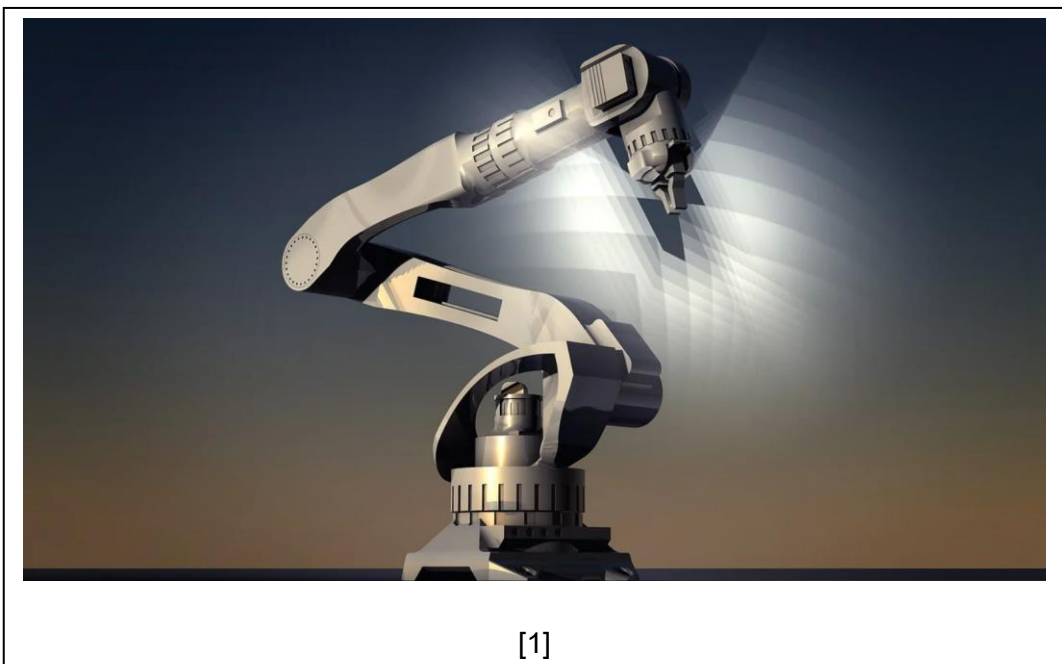




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Κινηματική ανάλυση ,σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για
ρομποτικό βραχίονα**



Φοιτητής: ΓΑΝΤΟΥΡ ΚΑΡΙΜ
ΑΜ: 272017074

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

Ζαχαρία Παρασκευή
Επίκουρη Καθηγήτρια
ΠΑΔΑ

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2022



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

Diploma Thesis

Kinematic analysis, design and applications of digital twin for a robotic manipulator



**Student: GHANDOUR KARIM
Registration Number: 272017074**

Supervisor

**Paraskevi Zacharia
Assistant Professor
UNIWA**

ATHENS-EGALEO, MARCH 2022

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

ΖΑΧΑΡΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ, ΕΠΙΚΟΥΡΗ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Πα.Δ.Α.	ΣΤΕΡΓΙΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Πα.Δ.Α. ΠΡΟΕΔΡΟΣ ΤΜΗΜΑΤΟΣ	ΠΑΝΑΓΙΩΤΑΤΟΣ ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Πα.Δ.Α.
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και ΓΑΝΤΟΥΡ ΚΑΡΙΜ,
Μάρτιος, 2022**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΓΑΝΤΟΥΡ ΚΑΡΙΜ Του ΙΣΜΑΗΛ , με αριθμό μητρώου 272017074 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέπουσας καθηγήτριας.»

Ο Δηλών
ΓΑΝΤΟΥΡ ΚΑΡΙΜ



(Υπογραφή φοιτητή/ήτριας)

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια της διπλωματικής μου Κ. Ζαχαρία Παρασκευή για την πολύτιμη καθοδήγησή της. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου που με υποστηρίζανε με κάθε συμβουλή, τους υπόλοιπους διδάσκοντες του τμήματος μου για όλες τις γνώσεις. Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου για την συνεχή συμπαράστασή τους .

Περίληψη

Με την εμφάνιση της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης η χρήση των ρομποτικών βραχιόνων αυξάνεται συνεχώς στο τομέα της παραγωγής για διάφορες εργασίες ,όπως συλλογή και τοποθέτηση , διαδικασία συγκόλλησης, βαφή και διαδικασίες χειρισμού. Με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους εργασίας και την βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας. Η μεγαλύτερη πρόκληση που υπάρχει κατά τη ρύθμιση του ρομποτικού βραχίονα είναι η σωστή τοποθέτηση του βραχίονα στο χώρο στην επιθυμητή θέση και προσανατολισμό, για να επιτευχθεί αυτό υπάρχουν δύο είδη κινηματικής ανάλυσης, η ευθεία και αντίστροφη. Η κινηματική ανάλυση αποτελεί έναν σημαντικό εργαλείο για το λειτουργικό σχεδιασμό μιας ρομποτικής εφαρμογής.

Έτσι, για να βελτιωθεί η απόδοση ενός ρομποτικού βραχίονα απαιτείται η κατάλληλη ανάλυση της κινηματικής συμπεριφοράς του και ο σωστός σχεδιασμός, μελετώντας το βραχίονα περί υλικό κατασκευής και αντοχής σε ψηφιακό περιβάλλον. Κατά συνέπεια η παρούσα έρευνα επικεντρώνεται στην έννοια του βέλτιστου σχεδιαστικού προφίλ λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους σχεδιασμού, που καθιστούν αποτελεσματικό και αξιόπιστο έναν ρομποτικό βραχίονα. Σήμερα, για να επιτύχουμε την επιθυμητή βελτίωση, αξιοποιούμε εργαλεία μοντελοποίησης και προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται ευρέως σε τέτοιες εφαρμογές, για τη διευκόλυνση και την επιτάχυνση των διαδικασιών σχεδιασμού. Όπως, η δομική ανάλυση, η δυναμική προσομοίωση, βελτιστοποίηση για τον κατάλληλο σχεδιασμό και συνολική βελτίωση της δομής του ρομπότ. Η σύγχρονη τεχνολογία του ψηφιακού διδύμου αποτελεί ισχυρό εργαλείο για την περιγραφή, την ψηφιακή απεικόνιση της συμπεριφοράς και τον έλεγχο ενός πραγματικού ρομποτικού συστήματος. Η συγκεκριμένη τεχνολογία βρίσκει μεγάλη εφαρμογή στην βιομηχανία 4.0, για την απαίτηση δημιουργίας ενός δυναμικού μοντέλου ενός συστήματος εντός ορισμένου προσομοιωτή. Επιπλέον, εφαρμογές που περιλαμβάνουν λειτουργίες από κατασκευή εξαρτημάτων, συναρμολόγηση μερών, παλετοποίηση και τον ρομποτικό χειρισμό. Στην περίπτωση ρομποτικής εφαρμογής θεωρείται σημαντικό εργαλείο για την συγκριτική ανάλυση του συστήματος μέσω της ψηφιακής απεικόνισης, διότι με το πέρασμα του χρόνου ένα ρομποτικό σύστημα τείνει να μειωθεί η επαναληψιμότητα του για διάφορους λόγους. Επίσης, από το λογισμικό προσομοίωσης του ψηφιακού διδύμου υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου του ρομποτικού συστήματος σε πραγματικό χρόνο, για εκτίμηση αποκλίσεων από τις προδιαγραφές του ψηφιακού μοντέλου.

Συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας σχεδιάστηκε ένας ρομποτικός βραχίονας με τη χρήση τρισδιάστατου σχεδιαστικού προγράμματος (SolidWorks), όπου και έγινε η μοντελοποίηση του βραχίονα. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται μια προσομοίωση στον ψηφιακό προσομοιωτή CoppeliaSim του σχεδιαζόμενου βραχίονα σε βιομηχανικό περιβάλλον εκτελώντας ορισμένη βιομηχανική εφαρμογή, ως ψηφιακό δίδυμο.

Λέξεις – κλειδιά

Ρομποτικός βραχίονας ,Κινηματική ανάλυση , Σχεδιασμός ρομπότ, προγραμματισμός ρομπότ ,Ψηφιακό δίδυμο ,Προσομοίωση ρομποτικού βραχίονα.

Abstract

With the advent of the fourth industrial revolution, the use of robotic manipulators is constantly raising in the production sector for various tasks, such as assembly and installation, welding, painting and handling. Aiming to minimize production costs and optimize the production process. The biggest challenge when it comes to adjust the robotic manipulator is to place correctly the arm in the space in the desired position and orientation, in order to achieve this there are two types of kinematic analysis, the straight and the reverse. The Kinematic analysis is an important tool for the functional design of a robotic application.

In order to improve the performance of a robotic manipulator requires proper analysis of the kinematic behavior and correct design, studying the arm for construction material and strength inside a digital environment. Therefore, the present research focuses on the concept of the optimal design profile taking into consideration design parameters, which make a robotic manipulator efficient and reliable. Today, to accomplish the desired improvement, we use modeling and simulation tools that are extensively used in such applications to simplify and speed up design processes. As, Structural analysis, dynamic simulation, optimization for proper design and overall improvement of the robot structure. The new digital twin technology is a powerful tool for description, digital behavior representation and controlling a real robotic system. This technology is suitable in the industry 4.0, for the reason it requires a dynamic model simulation. In addition, applications that include part manufacturing, part assembling, organize and robotic handling. In the case of robotic applications, it considered important tool for comparative analysis of the system through digital imaging, because over time the repeatability of a robotic system tends to be reduced for a variety of reasons. Also, using a digital simulation software it is possible to control the robotic system in real time to estimate divergences from the digital model specifications.

In detail, a robotic arm was designed in the context of this diploma thesis using SOLIDWORKS, where also the manipulator was modeled. Later, simulation is presented using the digital simulator CoppeliaSim of the designed manipulator performing a certain industrial application as a digital twin.

Keywords

Robotic manipulator, kinematic analysis, robotic design, programming a robot, digital twin, robotic manipulator simulation.

Περιεχόμενα

Κατάλογος σχημάτων	10
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	18
Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	19
Σκοπός και στόχοι	19
Μεθοδολογία	20
Καινοτομία	21
Δομή 22	
Γενική ανασκόπηση περί βιομηχανικά ρομπότ	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο : Χωρικές Αναπαραστάσεις και Μετασχηματισμοί	36
<i>1.1 Εισαγωγή</i>	36
<i>1.2 Αναπαραστάσεις για θέσεις, προσανατολισμοί και πλαίσια</i>	36
<i>1.3 Απεικονίσεις: Μεταβολή αναπαραστάσεων από πλαίσιο σε πλαίσιο</i>	40
<i>1.4 Τελεστές: Μεταφορές, περιστροφές και μετασχηματισμοί</i>	44
<i>1.5 Αριθμητική μετασχηματισμοί</i>	47
<i>1.6 Εξισώσεις μετασχηματισμών</i>	49
<i>1.7 Αναπαράσταση προσανατολισμού</i>	51
<i>1.8 Μετασχηματισμοί ελεύθερων διανυσμάτων</i>	57
Κεφάλαιο 2: Κινηματική ρομποτικών βραχιόνων	60
<i>2.1 Εισαγωγή</i>	60
<i>2.2 Ανάλυση μελών ρομποτικού βραχίονα</i>	61
<i>2.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη ενός βραχίονα</i>	67
<i>2.4 Ανάλυση συνδεσμολογίας μελών</i>	69
<i>2.5 Προσάρτηση πλαισίων</i>	71
<i>2.6 Κινηματική</i>	73
<i>2.7 Χώρος ενεργοποιητών, χώρος αρθρώσεων και Καρτεσιανός χώρος</i>	75
<i>2.8 Καθιερωμένα πλαίσια</i>	76
<i>2.9 Εντοπισμός εργαλείου</i>	78
<i>2.10 Εισαγωγή Ιακωβιανές</i>	78
<i>2.11 Περιγραφή για χρονικά μεταβαλλόμενη θέση και προσανατολισμό</i>	78
<i>2.12 Γραμμική και γωνιακή ταχύτητα</i>	80
<i>2.13 Κίνηση τμημάτων του ρομπότ</i>	86
<i>2.14 Μετάδοση ταχύτητας στα μέλη</i>	86
<i>2.15 Ιακωβιανές</i>	88
Κεφάλαιο 3 : Αντίστροφη κινηματική ρομποτικών βραχιόνων	90

3.1 Εισαγωγή	90
3.2 Επιλυσιμότητα	90
3.3 Υπόχωρος ενός ρομποτικού βραχίονα με $n < 6$	93
3.4 Σύγκριση αλγεβρικής και γεωμετρικής μεθόδου	94
3.5 Αλγεβρική επίλυση με αναγωγή σε πολώνυμο	98
3.6 Λύση Pieper	99
3.7 Επίλυση ρομποτικού βραχίονα μέσω της SOLVE	100
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : Μηχανολογικός σχεδιασμός ρομποτικών βραχιόνων	102
<i>Εισαγωγή</i>	102
4.1 Σχεδίαση βάσει απαιτήσεων	102
4.2 Κινηματική διαμόρφωση	105
4.3 Ποσοτικοί δείκτες των ιδιοτήτων του όγκου εργασίας	113
4.4 Πλεονασματικές δομές και δομές κλειστής αλυσίδας	115
4.5 Διατάξεις ενεργοποίησης	118
4.6 Μελέτη υλικού κατασκευής ρομποτικών βραχιόνων	121
4.7 Στιβαρότητα και παραμόρφωση	124
4.8 Αισθητήρες θέσης	128
4.9 Σύντομη ανάλυση οπτικών κωδικοποιητών	129
4.10 Αισθητήρες δύναμης	129
Κεφάλαιο 5: Προσομοίωση και ανάλυση ψηφιακού κλώνου ρομποτικού βραχίονα	130
5.1 Εισαγωγή	130
5.2 Ορισμός προσομοίωσης και πλεονεκτήματα	131
5.3 Περιβάλλον προσομοίωσης	131
5.4 Ανάλυση λειτουργίας προσομοιωτή CoppeliaSim	132
5.5 Προγραμματισμός του βραχίονα	142
5.6 Μελέτη και υλοποίηση ενός ψηφιακού κλώνου για ένα ρομποτικό βραχίονα	149
Κεφάλαιο 6: Μελέτη περίπτωσης	151
6.1 Γενική ανασκόπηση	151
6.2 Σχεδιασμός και μελέτη	152
6.3 Προσομοίωση του ρομποτικού βραχίονα	165
Προσομοίωση του ρομπότ σε λειτουργία κινηματικής του CoppeliaSim	165
Προσομοίωση 1/ Διεργασία βαφής 1	170
Προσομοίωση 2/ Διεργασία βαφής 2	177
6.4 Υλικό κατασκευής βραχίονα για την εφαρμογή βαφής	189
Συμπεράσματα και σχόλια	190
Βιβλιογραφία - Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές	192

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1: Πωλήσεις βιομηχανικών ρομπότ στην Βόρεια Αμερική (Πηγή : Robotic Industries Association).....	26
Σχήμα 2: Ετήσιες εγκαταστάσεις βιομηχανικών ρομπότ (Πηγή : Robotic Industries Association)...	26
Σχήμα 3: Εκτίμηση ποσοστού % εξοικονόμησης κόστους εργασίας με την εγκατάσταση ρομποτικών συστημάτων για το έτος 2015 .(Πηγή : The Boston Consulting Group).....	27
Σχήμα 4: Σχηματική απεικόνιση του ρομποτικού βραχίονα KR 700 PA (4 βαθμών ελευθερίας) ,για βιομηχανικές εφαρμογές . Πηγή : KUKA Industrial Robots (Kuka, n.d.).....	28
Σχήμα 5: Συστήματα συντεταγμένων τοποθετούνται τόσο στον ρομποτικό βραχίονα όσο και στα αντικείμενα που τον περιβάλλουν.....	29
Σχήμα 6: Οι κινηματικές εξισώσεις προσδιορίζουν το πλαίσιο του εργαλείου σε σχέση με το πλαίσιο βάσης ως συνάρτηση των μεταβλητών των αρθρώσεων (CRAIG, 2020) .	30
Σχήμα 7: Γνωρίζοντας την θέση και τον προσανατολισμό του αποληκτῆριου επενεργητή και αντίστοιχα όλες τις τιμές των μεταβλητών που περιγράφουν τις αρθρώσεις του ρομποτικού συστήματος ,επιλύουμε το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα (CRAIG, 2020) .	31
Σχήμα 8: Συσχέτιση ροπής που ασκούν οι ενεργοποιητές και της συντελούμενης κίνησης του βραχίονα που εμπεριέχονται στις δυναμικές εξισώσεις.....	32
Σχήμα 9: Οι επιθυμητή συμπεριφορά του βραχίονα ως, κινήσεις του ρομπότ και του αποληκτῆριου επενεργητή του , δυνάμεις επαφής καθώς και άλλη παράγοντες που περιγράφονται από γλώσσα ρομποτικού προγραμματισμού (Volz, 2018).....	34
Σχήμα 10: Τα συστήματα προγραμματισμού χωρίς σύνδεση συνήθως παρέχουν γραφικό περιβάλλον που επιτρέπει το προγραμματισμό του ρομπότ χωρίς την ανάγκη πρόσβασης σε αυτό (Castor, 2020).....	35
Σχήμα 11: Σχηματική αναπαράσταση διανύσματος P ως προς το σύστημα συντεταγμένων {A}(Παράδειγμα) (CRAIG, 2020).....	37
Σχήμα 12: Σχηματική περιγραφή ελεύθερων ανυσμάτων (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007).	37

Σχήμα 13: Εύρεση ενός σώματος υπολογίζοντας την θέση και τον προσανατολισμό (CRAIG, 2020).	38
Σχήμα 14: Παράδειγμα συνδυασμού πλαισίων (CRAIG, 2020).	40
Σχήμα 15: Παράδειγμα μεταβολής αναπαράστασης σημείου σε διαφορετικό πλαίσιο (CRAIG, 2020).	41
Σχήμα 16: Περιστροφή της απεικόνισης ενός διανύσματος (CRAIG, 2020).	42
Σχήμα 17: Γενικός μετασχηματισμός για ένα διάνυσμα (CRAIG, 2020).	43
Σχήμα 18: Τελεστής μεταφοράς (CRAIG, 2020).	45
Σχήμα 19: Περιστροφή του διανύσματος AP1 γύρω από τον Z κατά 30 μοίρες (CRAIG, 2020). ...	46
Σχήμα 20: Σύνθετα σύστημα συντεταγμένων που συσχετίζονται μεταξύ τους	47
Σχήμα 21: Κλειστός βρόχος μετασχηματισμών (CRAIG, 2020).....	49
Σχήμα 22: Παράδειγμα εξίσωσης μετασχηματισμών (Πιθανές απεικονίσεις του πλαισίου {C} οι σχέσεις 1.37 και 1.38) (CRAIG, 2020).....	50
Σχήμα 23: Γωνίες περιστροφής ως προς τους σταθερούς άξονες X-Y-Z. Υπάρχει μια σειρά περιστροφής R_X (γ) R_Y (β) R_Z (α) (CRAIG, 2020).	52
Σχήμα 24: Γωνίες περιστροφής Euler ως προς Z-Y-X (CRAIG, 2020).....	54
Σχήμα 25: Ίσα διανύσματα ταχυτήτων (CRAIG, 2020).	58
Σχήμα 26: Μετασχηματισμός διανυσμάτων ταχύτητας (CRAIG, 2020).	59
Σχήμα 27: Τύποι κατωτέρων ζευγών αρθρώσεων (CRAIG, 2020).....	61
Σχήμα 28 : Καρτεσιανή γεωμετρία και βραχίονας με τη μορφή γερανού οροφής (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007).	62
Σχήμα 29: Σχηματική αναπαράσταση κυλινδρικής και σφαιρικής γεωμετρίας (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007). 63	
Σχήμα 30: Τύπου SCARA γεωμετρία και ανθρωπομορφική γεωμετρία (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007).	63
Σχήμα 31: Σύγκριση ανθρώπινου χέρι με ρομποτικό βραχίονα (Fanny , et al., 2014).	64

Σχήμα 32: Ανθρωπομορφικός καρπός σε σύγκριση με ένα βραχίονα (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007).	64
Σχήμα 33: Σφαιρικός καρπός.	64
Σχήμα 34: Σχηματική απεικόνιση μιας απλής αρπάγης (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007).	65
Σχήμα 35: DEXHAND ρομποτικό χέρι με πολλαπλά δάχτυλα DLR	65
Σχήμα 36: Βάση της κινηματικής λειτουργίας ενός τμήματος εξασφαλίζεται μια σχέση μεταξύ των αξόνων των δύο γειτονικών αρθρώσεων που εμπεριέχονται. Η συγκεκριμένη σχέση χαρακτηρίζεται από δύο παραμέτρους, το μήκος a και την συστροφή α του μέλους (CRAIG, 2020).....	66
Σχήμα 37: Σύγκριση επαναληπτικότητας και ακρίβειας	68
Σχήμα 38: Ένα μέλος που περιλαμβάνει δύο άξονες περιστροφής (CRAIG, 2020).....	69
Σχήμα 39: Οι δύο παράμετροι που αξιοποιούνται για την περιγραφή του είδους της συνδεσμολογίας των γειτονικών μελών, η μετατόπιση του μέλους d και η γωνία άρθρωσης θ (CRAIG, 2020).	70
Σχήμα 40: Απεικόνιση πλαισίων $\{i-1\}$ και $\{i\}$ για ένα τυπικό βραχίονα. Τα επιπλεγμένα πλαίσια τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε το πλαίσιο i , να είναι στερεά προσαρτημένο στο μέλος i (CRAIG, 2020).....	71
Σχήμα 41: Ορισμός των ενδιάμεσων πλαισίων $\{P\}$, $\{Q\}$ και $\{R\}$ (CRAIG, 2020).	74
Σχήμα 42: Εναλλακτικοί τρόποι αναπαράστασης της θέσης και του προσανατολισμού για ένα ρομποτικό βραχίονα μεταξύ κινηματικών αναπαραστάσεων (CRAIG, 2020).	75
Σχήμα 43: Τα πλαίσια καθιερωμένης χρήσης (CRAIG, 2020).....	76
Σχήμα 44: Παράδειγμα προσάρτησης πλαισίων (CRAIG, 2020).	77
Σχήμα 45: Περιστροφή του πλαισίου $\{B\}$ με γωνιακή ταχύτητα ${}^A\Omega_B$ σε σχέση με το $\{A\}$ πλαίσιο (CRAIG, 2020).....	80
Σχήμα 46: Μετατόπιση του πλαισίου $\{B\}$ ως προς το $\{A\}$ με ορισμένη ταχύτητα ${}^A V_{BORG}$ (CRAIG, 2020).	81
Σχήμα 47: Διάνυσμα ${}^B Q$ σταθερό ως προς το $\{B\}$ πλαίσιο, ενώ περιστρέφεται ως προς το $\{A\}$ έχοντας γωνιακή ταχύτητα ${}^A\Omega_B$ (CRAIG, 2020).....	81

Σχήμα 48: Διανυσματική απεικόνιση της ταχύτητας ενός σημείου λόγω γωνιακής ταχύτητας (CRAIG, 2020).....	82
Σχήμα 49: Προσδιορισμός της ταχύτητας του τμήματος i μέσω της γραμμικής ταχύτητας u_i και της γωνιακής ταχύτητας ω_i . Αυτές οι ταχύτητες απεικονίζονται σε σχέση με οποιοδήποτε πλαίσιο αναφοράς ενός μέλους του μηχανισμού (CRAIG, 2020).....	86
Σχήμα 50: Απεικόνιση διανυσμάτων ταχύτητας γειτονικών μελών (CRAIG, 2020).....	87
Σχήμα 51: Βραχίονα με δύο τμήματα l_1 και l_2 (CRAIG, 2020).....	91
Σχήμα 52: Βραχίονας με 3 μέλη (CRAIG, 2020).....	92
Σχήμα 53: Δυο τροχιές, εκ των οποίων η μια οδηγεί σε σύγκρουση του ρομπότ (CRAIG, 2020)..	92
Σχήμα 54: Οι παράμετροι των μελών ενός επίπεδου ρομποτικού βραχίονα.	94
Σχήμα 55: Απεικόνιση γεωμετρίας για έναν επίπεδο βραχίονα τριών μελών (CRAIG, 2020).	97
Σχήμα 56: Ρομποτικός βραχίονας με έξι βαθμούς ελευθερίας εκ των οποίων το ένα αποτελεί πλεόνασμα (CRAIG, 2020)	103
Σχήμα 57: Ειδική πλατφόρμα κλίσης και περιστροφής που παρέχει δύο βαθμούς ελευθερίας στο ολικό σύστημα του ρομποτικού συστήμα	104
Σχήμα 58: Σχηματική απεικόνιση ενός σειριακού (a) και ενός παράλληλου (b) χειριστή [(Fang & Tsai, 2003) , (Bonev & Zlatanov, 2001)]	106
Σχήμα 59: Είδη ρομποτικών βραχιόνων (Yasar & Korkut, 2016).....	107
Σχήμα 60: Καρτεσιανός ρομποτικός βραχίονας (CRAIG, 2020).....	108
Σχήμα 61: Αρθρωτός ρομποτικός βραχίονας (CRAIG, 2020).	108
Σχήμα 62: Αρθρωτός ρομποτικός βραχίονας (Articulated Robot IRB 1300 της εταιρίας ABB), (ABB, 2022).	109
Σχήμα 63: Ρομπότ τύπου SCARA (CRAIG, 2020).	109
Σχήμα 64: Σφαιρικός ρομποτικός βραχίονας (CRAIG, 2020).....	110
Σχήμα 65: Κυλινδρικός ρομποτικός βραχίονας (CRAIG, 2020).	110

Σχήμα 66: Σχηματική αναπαράσταση ενός καρπού σε δύο διαφορετικές όψεις χωρίς κάθετους άξονες (Roshiem, 1988).....	112
Σχήμα 67: Σχηματική απεικόνιση μιας ειδικής περίπτωσης ενός ρομποτικού βραχίονα που διαθέτει καρπό μη τεμνόμενων αξόνων ,αλλά ως ρομπότ έχει λύση κλειστού τύπου στο κινηματικό πρόβλημα (CRAIG, 2020).....	112
Σχήμα 68: Αναπαράσταση ενός καρπού που διαθέτει ορθογώνιους άξονες που οδηγείται από εξωτερικούς ενεργοποιητές με τη βοήθεια ομοαξονικών συνδέσμων (CRAIG, 2020).....	112
Σχήμα 69: Αναπαράσταση ενός καρπού από ρομποτικό βραχίονα με πέντε βαθμούς ελευθερίας για εφαρμογές συγκόλλησης (CRAIG, 2020).	113
Σχήμα 70: Σχηματική αναπαράσταση χώρου εργασίας ενός επίπεδου ρομποτικού βραχίονα με 2-DOF και αδρανειακά ελλειψοειδή (Asada, 1984).....	115
Σχήμα 71: Δύο προτεινόμενες διαμορφώσεις για ρομποτικό βραχίονα με 7-DOF (Waldron, 1988).	116
Σχήμα 72: Μηχανισμός Stewart με διαμόρφωση παράλληλου ρομποτικού βραχίονα με 6-DOF (CRAIG, 2020).....	117
Σχήμα 73: Τύποι μειωτήρων. α. έως γ. με μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς, δ. με κωνικούς οδοντωτούς τροχούς, ε. με ατέρμονα κοχλία-τροχό, στ. με κοχλιωτούς οδοντωτούς τροχούς (ΣΤΕΡΓΙΟΥ & ΣΤΕΡΓΙΟΥ, 2002).....	119
Σχήμα 74: Ανάλυση δυνάμεων σε κινούμενο ιμάντα (ΣΤΕΡΓΙΟΥ & ΣΤΕΡΓΙΟΥ, 2002).	120
Σχήμα 75: Σύστημα με (α) απλούς ατέρμονες κοχλίες, (β) ένσφαιρους ατέρμονες κοχλίες που επιτρέπουν την μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε ευθύγραμμη με την ταυτόχρονη μείωση ταχύτητας (CRAIG, 2020).	121
Σχήμα 76: Διάγραμμα Αντοχής (Εκφρασμένη σε τάση) σε συνάρτηση με την πυκνότητα υλικών κατασκευής (Ashby, 2020).	123
Σχήμα 77: Διάγραμμα Αντοχής (Εκφρασμένη σε τάση) σε συνάρτηση με το σχετικό κόστος ανά μονάδα όγκου (Ashby, 2020).	123

Σχήμα 78: Μια προεξέχουσα δοκός που χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση της στιβαρότητας στο ελεύθερο ενός δοκιμίου-μέλους που βρίσκεται υπό την επίδραση ενός φορτίου (CRAIG, 2020).	126
Σχήμα 79: Ανάλυση ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ψήκτρα (Naeini, 1988).	127
Σχήμα 80: Μια τυπική προβολή του προσομοιωτή CoppeliaSim (CoppeliaSim User Manual).....	133
Σχήμα 81: Γραμμή εργαλείων 1 (CoppeliaSim User Manual).	134
Σχήμα 82: Γραμμή εργαλείων 2 (CoppeliaSim User Manual).	135
Σχήμα 83: Περιγηγητής του προσομοιωτή (CoppeliaSim User Manual).	136
Σχήμα 84: Παράθυρο δομής της σκηνής προσομοίωσης (CoppeliaSim User Manual).	137
Σχήμα 85: Σχηματική απεικόνιση συσχέτισης Scene and model(CoppeliaSim User Manual).	138
Σχήμα 86: Οντότητες: Αντικείμενα και συλλογή (CoppeliaSim User Manual).	139
Σχήμα 87: Προσομοίωση έναρξη/παύση/τερματισμός επιλογές γραμμής εργαλείων(CoppeliaSim User Manual).	140
Σχήμα 88: Διάγραμμα κατάσταση προσομοίωσης(CoppeliaSim User Manual).	141
Σχήμα 89: Ενεργοποίηση επιλογών αλληλεπίδρασης και δυναμικής για το ζητούμενο σώμα.	143
Σχήμα 90: Ενεργοποίηση λειτουργίας ροπής/δύναμης για την άρθρωση.	143
Σχήμα 91: Ενεργοποίηση λειτουργίας ενεργοποιημένου κινητήρα.	144
Σχήμα 92: Κινηματικό πρόβλημα κατά το οποίο είναι δεδομένες οι τιμές των αρθρώσεων που υποδεικνύονται με βάση τα βέλη και ζητείται ο προσδιορισμός της θέσης και του προσανατολισμού του τελικού άκρου(CoppeliaSim User Manual).	145
Σχήμα 93: Απεικόνιση ενός πλαισίου ψηφιακού διδύμου για ένα work-cell (human-robot) [Malik A. A., Bilberg A., 2018].	150
Σχήμα 94: Διάταξη σύνδεσης πραγματικού ρομπότ με ψηφιακό κλώνο μέσω client (Flávia Pires, A. Cachada, J. Barbosa, A. Moreira, P. Leitão, 2019).	150
Σχήμα 95: Τα στάδια σχεδιασμού του ρομποτικού βραχίονα.	152

Σχήμα 96: Μέλος 1 σε σχεδιαστική απεικόνιση με διαστάσεις.	153
Σχήμα 97: Μέλος 2 σε σχεδιαστική απεικόνιση με διαστάσεις.	154
Σχήμα 98: Μέλος 3 σε σχεδιαστική απεικόνιση με διαστάσεις.	155
Σχήμα 99: Μέλος 4 σε σχεδιαστική απεικόνιση με διαστάσεις.	156
Σχήμα 100: Μέλος 5 σε σχεδιαστική απεικόνιση με διαστάσεις.	157
Σχήμα 101: Μέλος 6 σε σχεδιαστική απεικόνιση με διαστάσεις.	158
Σχήμα 102: Μέλος 7 σε σχεδιαστική απεικόνιση με διαστάσεις.	159
Σχήμα 103: Μέλος 8 σε σχεδιαστική απεικόνιση με διαστάσεις.	159
Σχήμα 104: Η Βάση (Base) του ρομποτικού βραχίονα.	160
Σχήμα 105: Ο ώμος (Shoulder) του ρομποτικού βραχίονα.	161
Σχήμα 106: Ο βραχίονας (Arm) του ρομπότ.	161
Σχήμα 107: Το αντιβράχιο (Forearm) του ρομποτικού βραχίονα.	162
Σχήμα 108: Ο καρπός του ρομπότ.	162
Σχήμα 109: Ο σύνδεσμός 1 του ρομπότ.	162
Σχήμα 110: Ο σύνδεσμός 2 του ρομπότ.	163
Σχήμα 111: Ο σύνδεσμός της αρπάγης του ρομπότ.	163
Σχήμα 112: Η συναρμολόγηση του ρομποτικού βραχίονα.	164
Σχήμα 113: Τα στοιχεία που περιλαμβάνει η σκηνή της προσομοίωσης.	165
Σχήμα 114: Η δομή του βραχίονα ως hierarchy.	166
Σχήμα 115: Διάταξη του βραχίονα σε αρχικό στάδιο.	166
Σχήμα 116: Το αποτέλεσμα μετατόπισης του στόχου ως διάταξη των τμημάτων του βραχίονα στο χώρο.	167

Σχήμα 117: Το αποτέλεσμα μετατόπισης και της περιστροφής του στόχου ως διάταξη των τμημάτων του βραχίονα στο χώρο.	168
Σχήμα 118: Η δομή του βραχίονα ως hierarchy στο CoppeliaSim για τις εφαρμογές βαφής.	170
Σχήμα 119: Η ταξινόμηση των στοιχείων που απαρτίζουν την σκηνή 1.	171
Σχήμα 120: Απεικόνιση του ρομποτικού βραχίονα πριν την έναρξη της βαφής.	171
Σχήμα 121: Απεικόνιση του ρομποτικού βραχίονα σε ενδιάμεση θέση.	172
Σχήμα 122: Απεικόνιση του ρομποτικού βραχίονα στην τελική θέση, αφού έχει γίνει η βαφή.	172
Σχήμα 123: Η ταξινόμηση των στοιχείων που απαρτίζουν την σκηνή 2.	177
Σχήμα 124: Ο βραχίονας σε αρχική θέση πριν την έναρξη της διεργασίας	178
Σχήμα 125: Ο βραχίονας μετά από την βαφή της δεύτερης πλευράς του κύβου.	179
Σχήμα 126: Ο βραχίονας μετά από την βαφή της πρώτης πλευράς του κύβου και η γραφική απεικόνιση της ταχύτητας του ακροφυσίου και των αρθρώσεων συναρτήσεως του χρόνου.	179
Σχήμα 127: Η βαφή της τέταρτης πλευράς του κύβου.	180
Σχήμα 128: Ο ρομποτικός βραχίονας έπειτα από την βαφή της τρίτης πλευράς του κύβου.	180
Σχήμα 129: Η βαφή της τελευταίας πλευράς του κύβου.	181

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ως ρομπότ χαρακτηρίζεται ένα είδος μηχάνημα το οποίο συλλέγει πληροφορίες για το περιβάλλον χώρο αξιοποιώντας αισθητήρες και αυτόματα παίρνει αποφάσεις (Tarun, et al., 2017). Ο τομέας της ρομποτικής ως επιστήμη μηχανικής ασχολείται με το σχεδιασμό, την μοντελοποίηση, τον έλεγχο και τη χρήση των ρομπότ (Kazim, et al., 2018). Στις μέρες μας τα ρομπότ βρίσκουν εφαρμογή σε αρκετούς τομείς για παράδειγμα στην βιομηχανία, ιατρική, στον στρατιωτικό τομέα και σε επικίνδυνα μέρη όπως το διάστημα για εξερεύνηση (Tarun, et al., 2017). Η ρομποτική έχει μεγάλη σημασία στην αυτοματοποίηση πολλών διαδικασιών, με τους ρομποτικούς βραχίονες να βρίσκουν εφαρμογή σε αρκετές παραγωγικές διαδικασίες. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται σε εργασίες όπως μεταφορά, συναρμολόγηση, όλα τα είδη συγκολλήσεων, κοπή υλικών (με ιδιαίτερη ακρίβεια), βαφή και παλετοποίηση (Claudio, et al., 2016). Σε γενικές γραμμές, τα βιομηχανικά ρομπότ αξιοποιούνται για την εκτέλεση επαναλαμβανόμενων διαδικασιών στις οποίες χρειάζεται ακρίβεια και ταχύτητα, το οποίο καθίσταται δύσκολο να γίνει από άνθρωπο. Επιπλέον, τα βιομηχανικά ρομπότ έχουν τη δυνατότητα να εργάζονται χωρίς καμία διακοπή, που θα επηρεάσει την ακρίβεια ή την αποτελεσματικότητα της εκτελούμενης εργασίας, διότι ως εξαιρετικά αναπτυγμένες και στιβαρές συσκευές δεν αποτυγχάνουν (Claudio, et al., 2016). Με αυτό το τρόπο βελτιώνεται η ποιότητα των αποτελεσμάτων και η κατασκευή γίνεται πιο αποτελεσματική (Khaled M, et al., 2014). Υπάρχουν διαφορετικά είδη διαμορφώσεων χειριστών, όπως ορθογώνιο, κυλινδρικό, περιστροφικό, σφαιρικό και οριζόντιο αρθρωτό .

Ωστόσο, ο έλεγχος ενός ρομπότ με μεγάλο βαθμό ελευθερίας αποτελεί δύσκολη διαδικασία. Η τοποθέτηση και ο προσανατολισμός του ρομπότ αποτελεί ένα σημαντικό βήμα για το σχεδιασμό και το έλεγχο του (Tarun, et al., 2017). Στο τελικό στάδιο η ρομποτική έχει απώτερο στόχο τον έλεγχο σε πραγματικό χρόνο του ρομπότ, όμως είναι αρκετά σημαντικό να γίνουν ορισμένες προσομοιώσεις πριν την τελική εκτέλεση. Ο λόγος είναι πώς οι προσομοιώσεις καθιστούν την ρύθμιση ευκολότερη του ρομπότ, δεν κοστίζουν σε περίπτωση ζημίας και δεν είναι χρονοβόρες όσο αφορά τη ρύθμιση στο ψηφιακό περιβάλλον. Επιπρόσθετα, υλοποίηση νέων μοντέλων του ρομπότ και η δοκιμή τους σε ψηφιακό περιβάλλον απαιτεί σύντομο χρόνο και υπάρχει ευκολία στη ρύθμιση των παραμέτρων στο στάδιο. Η δυνατότητα εκτέλεσης προσομοιώσεων σε πραγματικό χρόνο είναι σημαντική για τα προχωρημένα στάδια σχεδίασης και μέσω αυτής ο τελικός σχεδιασμός μπορεί να επιβεβαιωθεί πριν ξεκινήσει η δαπανηρή και η χρονοβόρα διαδικασία κατασκευής του προτύπου (Kazim, et al., 2018).

Σε αυτή τη περίπτωση η εφαρμογή της τεχνολογίας του ψηφιακού διδύμου (Digital Twin) θεωρείται κατάλληλη για την σύγκριση και την επικύρωση των κινήσεων που κάνει ο ρομποτικός βραχίονας.

Ως ψηφιακό δίδυμο χαρακτηρίζεται μια εικονική αναπαράσταση της τηλεμετρίας που ανιχνεύεται από ένα απομακρυσμένο σύστημα και αποδίδεται σε πραγματικό χρόνο ή αναπαραγωγή εκτός σύνδεσης. Οι εφαρμογές για τα ψηφιακά δίδυμα είναι ευρείες, περιλαμβάνουν συναρμολόγηση ,κατασκευή εξαρτημάτων, δοκιμή, ρομποτικό χειρισμό, παλετοποίηση και αρκετά άλλα. Σε μηχανικές κατεργασίες εξαρτημάτων, η τεχνολογία του ψηφιακού διδύμου αξιοποιείται για την αύξηση της απόδοσης μέσω της ψηφιακής απεικόνισης της πραγματικής κίνησης κατά την κατεργασία της πρώτης ύλης στο τελικό εξάρτημα. Επίσης, όταν ένας ρομπότ χρησιμοποιείται για προσθετική ή αφαιρετική κατασκευή, τείνει η επαναληψιμότητα του ρομποτικού συστήματος μειώνεται με το χρόνο για ορισμένους λόγους φθοράς. Επομένως, ένα ψηφιακό δίδυμο είναι σημαντικό εργαλείο για οποιοδήποτε ζήτημα προσομοίωσης, ελέγχου και αποτελεί ένα υποπροϊόν ελέγχου εξωτερικών παραγόντων (Dockter, 2021).

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Το αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η κινηματική ανάλυση, ο μηχανολογικός σχεδιασμός και η προσομοίωση των βιομηχανικών ρομπότ. Πειραματικά, σχεδιάζεται ένας ρομποτικός βραχίονας σε τρισδιάστατο σχεδιαστικό πρόγραμμα. Έπειτα, ακολουθεί μια προσομοίωση σε ψηφιακό περιβάλλον (χρησιμοποιώντας το V-rep /CoppeliaSim Edu) του βραχίονα σε βιομηχανική εφαρμογή, που απαρτίζει το ψηφιακό δίδυμο του ρομπότ.

Η διπλωματική εργασία επικεντρώνεται κυρίως στην κινηματική συμπεριφορά, το σχεδιασμό ενός ρομποτικού βραχίονα και την προσομοίωσή του, που βελτιώνει την ακρίβεια ελέγχου του ρομπότ, ενισχύοντας το ρυθμό παραγωγής σε βιομηχανικές εφαρμογές. Επιπλέον, η υλοποίηση και ο προγραμματισμός του ψηφιακού διδύμου μειώνει την πιθανότητα εκδήλωσης ανεπιθύμητης συμπεριφοράς του βραχίονα, εξοικονομώντας χρόνο και πόρους για την επιχείρηση .

Σκοπός και στόχοι

Ακολουθως παρουσιάζονται οι βασικές ερευνητικές ερωτήσεις οι οποίες διέπουν το υπό εξέταση θέμα :

- Πώς γίνεται η εφαρμογή της κινηματικής σε ρομποτικό βραχίονα, εξετάζοντας τις γεωμετρίες που το απαρτίζουν και όλες τις χρονικά εξαρτώμενες ιδιότητες της κίνησής του.
- Πώς μπορούμε να αυξήσουμε την ακρίβεια των ρομποτικών χειριστών μέσω της κινηματικής ανάλυσης
- Πώς περιγράφονται τα μέλη που αποτελούν το βραχίονα
- Πώς επιτυγχάνεται η συνδεσμολογία των μελών
- Με ποιο τρόπο επιλύεται το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα για ένα βραχίονα
- Πώς σχεδιάζεται ένας ρομποτικός βραχίονας βάση συγκεκριμένων απαιτήσεων
- Ποια είναι τα βασικά είδη των ρομποτικών χειριστών
- Ποια είναι τα κατάλληλα υλικά κατασκευής των ρομπότ
- Ποια είναι η κατάλληλη μέθοδος προσομοίωσης του ρομπότ
- Με ποιο τρόπο προσομοίωσης γίνεται πρόβλεψη της συμπεριφοράς του χειριστή
- Πώς ελέγχεται ένας βραχίονας μέσω υλοποίησης ψηφιακού διδύμου
- Ποιος ο ρόλος του ψηφιακού διδύμου στην συμπεριφορά και το χρόνο ζωής του βραχίονα
- Πώς προγραμματίζεται ένας βραχίονας σε ψηφιακό περιβάλλον
- Ποια είναι τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της ψηφιακής υλοποίησης έναντι της συμβατικής
- Πώς λειτουργεί ο εξεταζόμενος προσομοιωτής

Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για την ολοκλήρωση του πειραματικού μέρους είναι η εξής :

- ✚ Αρχικά, έγινε βιβλιογραφική έρευνα σε βιβλία και στο διαδίκτυο για τα βιομηχανικά ρομπότ που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή με βάση κατάλληλες εφαρμογές.
- ✚ Πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση περί τα μέρη που απαρτίζουν το επιλεγμένο βραχίονα .
- ✚ Σε μηχανολογικά σχέδια του προτύπου ρομποτικού βραχίονα ABB IRB 120, βασίστηκαν οι διαστάσεις σχεδιασμού.
- ✚ Σχεδιασμός του ρομποτικού βραχίονα με χρήση του τρισδιάστατου σχεδιαστικού προγράμματος SolidWorks.
- ✚ Προγραμματισμός και τοποθέτηση του ρομπότ στο ψηφιακό περιβάλλον του προσομοιωτή CoppeliaSim.
- ✚ Έναρξη της προσομοίωσης με βάση την κατάλληλη ρύθμιση του ψηφιακού περιβάλλοντος και του βραχίονα.
- ✚ Σχολιασμός αποτελέσματος προσομοίωσης.

Καινοτομία

- ❖ Αναλυτική μελέτη μελών του βραχίονα και περιγραφή συνδεσμολογίας
- ❖ Σχεδιασμός του βραχίονα αναλυτικά για κάθε μέλος του
- ❖ Προσομοίωση σε ψηφιακό περιβάλλον εκτελώντας ορισμένη εφαρμογή
- ❖ Κατάλληλος προγραμματισμός χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού Lua και ανάλυση κώδικα.

Δομή

Γενική ανασκόπηση περί βιομηχανικά ρομπότ

- Ρομποτική – Ορισμός ,ιστορική εξέλιξη και χρήσεις
- Ανάλυση θέσης και προσανατολισμού
- Ευθύφορη κινηματική ρομποτικών βραχιόνων
- Αντίστροφη κινηματική ρομποτικών βραχιόνων
- Δυναμική ανάλυση των βιομηχανικών ρομπότ
- Σχεδιασμός βραχιόνων
- Προγραμματισμός των ρομπότ
- Προγραμματισμός εκτός σύνδεσης και Προσομοίωση

Κεφάλαιο 1: Χωρικές Αναπαραστάσεις και Μετασχηματισμοί

- 1.1 Εισαγωγή
- 1.2 Αναπαραστάσεις για θέσεις, προσανατολισμούς και πλαίσια
- 1.3 Απεικονίσεις: Μεταβολή αναπαραστάσεων από πλαίσιο σε πλαίσιο
- 1.4 Τελεστές: Μεταφορές, περιστροφές και μετασχηματισμοί
- 1.5 Αριθμητική μετασχηματισμοί
- 1.6 Εξισώσεις μετασχηματισμών
- 1.7 Αναπαράσταση προσανατολισμού
- 1.8 Μετασχηματισμοί ελεύθερων διανυσμάτων

Κεφάλαιο 2: Κινηματική ρομποτικών βραχιόνων

- 2.1 Εισαγωγή
- 2.2 Ανάλυση μελών ρομποτικού βραχίονα
- 2.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη ενός βραχίονα
- 2.4 Ανάλυση συνδεσμολογίας μελών
- 2.5 Προσάρτηση πλαισίων
- 2.6 Κινηματική
- 2.7 Χώρος ενεργοποιητών, χώρος αρθρώσεων και καρτεσιανός χώρος
- 2.8 Καθιερωμένα πλαίσια
- 2.9 Εντοπισμός εργαλείου
- 2.10 Εισαγωγή Ιακωβιανές
- 2.11 Περιγραφή για χρονικά μεταβαλλόμενη θέση και προσανατολισμό
- 2.12 Γραμμική και γωνιακή ταχύτητα
- 2.13 Κίνηση τμημάτων του ρομπότ
- 2.14 Μετάδοση ταχύτητας στα μέλη
- 2.15 Ιακωβιανές

Κεφάλαιο 3 : Αντίστροφη κινηματική ρομποτικών βραχιόνων

- 3.1 Εισαγωγή
- 3.2 Επιλυσιμότητα
- 3.3 Υπόχωρος ενός ρομποτικού βραχίονα με $n < 6$
- 3.4 Σύγκριση αλγεβρικής και γεωμετρικής μεθόδου
- 3.5 Αλγεβρική επίλυση με αναγωγή σε πολώνυμο
- 3.6 Λύση Pieper
- 3.7 Επίλυση ρομποτικού βραχίονα μέσω της Solve

Κεφάλαιο 4: Μηχανολογικός σχεδιασμός ρομποτικών βραχιόνων

- 4.1 Εισαγωγή
- 4.2 Σχεδίαση βάσει απαιτήσεων
- 4.3 Κινηματική διαμόρφωση
- 4.4 Ποσοτικοί δείκτες των ιδιοτήτων του όγκου εργασίας
- 4.5 Πλεονασματικές δομές και δομές κλειστής αλυσίδας
- 4.6 Διατάξεις ενεργοποίησης
- 4.7 Μελέτη υλικού κατασκευής ρομποτικών βραχιόνων
- 4.8 Στιβαρότητα και παραμόρφωση
- 4.9 Αισθητήρες θέσης
- 4.10 Σύντομη ανάλυση οπτικών κωδικοποιητών
- 4.11 Αισθητήρες δύναμης

Κεφάλαιο 5: Προσομοίωση και ανάλυση ψηφιακού κλώνου ρομποτικού βραχίονα

- 5.1 Εισαγωγή
- 5.2 Ορισμός προσομοίωσης και πλεονεκτήματα
- 5.3 Περιβάλλον προσομοίωσης
- 5.4 Ανάλυση λειτουργίας προσομοιωτή CoppeliaSim
- 5.5 Προγραμματισμός του βραχίονα
- 5.6 Μελέτη και υλοποίηση ενός ψηφιακού κλώνου για ένα ρομποτικό βραχίονα

Κεφάλαιο 6: Μελέτη περίπτωσης

- 6.1 Γενική ανασκόπηση
- 6.2 Σχεδιασμός και μελέτη
 - Μεθοδολογία σχεδιασμού
 - Μηχανολογικός σχεδιασμός και απεικόνιση διαστάσεων
 - Μοντελοποίηση CAD
- 6.3 Προσομοίωση του ρομποτικού βραχίονα
 - Λειτουργία κινηματικής/ Μοντέλο προσομοίωσης
 - Προσέγγιση στόχου μέσω αντίστροφης κινηματικής

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

Προγραμματισμός του ρομπότ

Προσομοίωση 1/Διεργασία βαφής 1

Προγραμματισμός Διεργασίας 1

Ανάλυση κώδικα 1

Προσομοίωση 2/Διεργασία βαφής 2

Προγραμματισμός Διεργασίας 2

Ανάλυση κώδικα 2

6.4 Υλικό κατασκευής βραχίονα για την εφαρμογή βαφής

Συμπεράσματα και σχόλια

Βιβλιογραφία - Αναφορές – Διαδικτυακές Πηγές

Γενική ανασκόπηση περί βιομηχανικά ρομπότ

Ρομποτική – Ορισμός ,ιστορική εξέλιξη και χρήσεις

Ως επιστήμη η ρομποτική ασχολείται με την υλοποίηση μηχανών-διατάξεων που έχουν την δυνατότητα να αντικαταστήσουν την ανθρώπινη εργασία, συνδυάζοντας τη φυσική δραστηριότητα με τη λήψη αποφάσεων μέσω της τεχνητής νοημοσύνης. Τα ρομπότ ως μηχανές ,ανεξάρτητα από την εφαρμογή τους, μπορούν να μεταβάλλουν το περιβάλλον στο οποίο λειτουργούν, εκτελώντας ενέργειες που πραγματοποιούνται βάση ορισμένων κανόνων και πληροφοριών που συλλέγονται από το περιβάλλον εργασίας τους μέσα από κατάλληλα αισθητήρια. Συνεπώς, ως σύγχρονο αντικείμενο της ρομποτικής θεωρείται η μελέτη της διασύνδεσης μεταξύ αντίληψης και δράσης .

Η δυνατότητα δράσης του ρομποτικού βραχίονα εξαρτάται από την μηχανική δομή του, η οποία εμπεριέχει έναν μηχανισμό κίνησης που επιτρέπει την κίνηση από σημείο σε σημείο στο χώρο και ένα αρθρωτό μηχανισμό για το χειρισμό διάφορων αντικειμένων. Η αντίληψη του ρομπότ βασίζεται στο σύστημα αισθητήρων που περιλαμβάνει για να συλλέγει πληροφορίες για το ίδιο το σύστημα και το περιβάλλον εργασίας στο οποίο εντοπίζεται. Η λογική διασύνδεση μεταξύ μηχανικής δομής και αισθητήρων ελέγχεται από το σύστημα ελέγχου του ρομποτικού συστήματος, μέσω του οποίου λαμβάνονται αποφάσεις και εκτελούνται ενέργειες έχοντας λάβει τους περιορισμούς που θέτει το μηχανικό σύστημα και το περιβάλλον εργασίας. Επομένως, το αντικείμενο της ρομποτικής αποτελεί συνδυασμός επιστημονικών πεδίων, όπως επιστήμη της μηχανικής, επιστήμη των υλικών, πεδίο επεξεργασίας σημάτων και πληροφορικής, τεχνητή νοημοσύνη, επιστήμη του προγραμματισμού, της ηλεκτρονικής και υπολογιστικών διατάξεων, θεωρίας αυτοματισμού (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007).

Για πρώτη φορά ο όρος ρομπότ αναφέρθηκε σε θεατρικό έργο επιστημονικής φαντασίας από τον Τσέχο συγγραφέα Karel Capek το 1921 και προέρχεται από τη σλάβικη λέξη robota που δηλώνει εργάτης. Με την εφαρμογή της αυτοματοποίησης σε μεγάλες βιομηχανίες παραγωγής γίνεται αντικατάσταση του ανθρώπινου δυναμικού με ειδικές μηχανές που εκτελούν μια σειρά εργασιών στην παραγωγική διαδικασία. Η αυτοματοποίηση αποσκοπεί στην αύξηση της παραγωγικότητας και του κέρδους με την βέλτιστη ποιότητα προϊόντων, αξιοποιώντας την ραγδαία ανάπτυξη της επιστήμης και της τεχνολογίας του 20ού αιώνα. Με την τάση της σύγχρονης αγοράς να κατευθύνεται σε προϊόντα με μικρή διάρκεια ζωής και την ανάπτυξη της επιστήμης των υπολογιστών, η αυτοματοποίηση της βιομηχανικής παραγωγής γίνεται πιο αποτελεσματική με τη βοήθεια των επαναπρογραμματιζόμενων μηχανών (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007).

Το 1961 δημιουργείται και δοκιμάζεται σε λειτουργία το πρώτο βιομηχανικό τύπου ρομπότ από την εταιρεία Unimation. Ως ορισμό ευρέως αποδεκτό που δόθηκε από το 1980 για ένα βιομηχανικό ρομπότ, είναι μια μηχανή που επιδέχεται επαναπρογραμματισμό με πολλές εφαρμογές, η οποία είναι σχεδιασμένη κατάλληλα για μεταφορά αντικειμένων, διατάξεων εκτελώντας σύνθετες προγραμματιζόμενες κινήσεις για την εκτέλεση διάφορων εφαρμογών. Παραδείγματα εφαρμογών της ρομποτικής στην βιομηχανία είναι φόρτωση, εκφόρτωση διατάξεων και αποθηκών, βαφή, παλετοποίηση, συσκευασία, λείανση, διεργασίες κοπής, συγκολλήσεις, συναρμολόγηση και έλεγχος ποιότητας των τελικών προϊόντων δίνοντας μετρήσεις.

Η ιστορία της αυτοματοποίησης της βιομηχανίας χαρακτηρίζεται από καιρούς σημαντικών μεταβολών των συμβατικών μεθόδων. Τα βιομηχανικά ρομπότ αναγνωρίστηκαν ως ξεχωριστές διατάξεις το 1960 (Roth, 1983), ταυτόχρονα με τα συστήματα σχεδίασης μέσω Η/Υ (Τα λεγόμενα Cad συστήματα) και τα συστήματα κατασκευής με Η/Υ (CAM συστήματα). Η εφαρμογή των οποίων οδήγησε σε αυτοματοποίηση της παραγωγής σε μεγάλο ποσοστό.

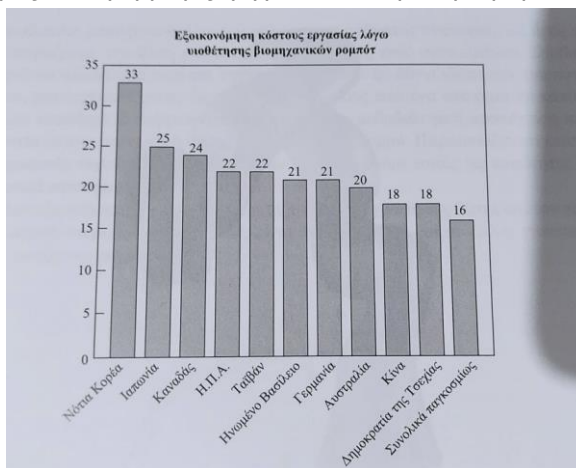
Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν διατάξεις με ρομπότ στην Βόρεια Αμερική την δεκαετία του 1980 και από τότε η συγκεκριμένη αγορά διευρύνεται με οικονομικές μεταβολές, επηρεάζοντας σημαντικά την αγορά (Brooks, 2002). Παρακάτω παρουσιάζεται διαγραμματικά το πλήθος των εγκαταστάσεων ρομποτικών συστημάτων ανά έτος σε σημαντικές βιομηχανικές περιοχές του κόσμου. Μελέτες προβλέπουν πως έως το 2025 ο μέσος όρος των βιομηχανιών θα εξοικονομεί το 16% του εργατικού κόστους αντικαθιστώντας το ανθρώπινο δυναμικό με βιομηχανικά ρομπότ. Επίσης, όπως φαίνεται παρακάτω σχηματικά ορισμένες χώρες τους συμφέρει η συγκεκριμένη λύση.



Σχήμα 1: Πωλήσεις βιομηχανικών ρομπότ στην Βόρεια Αμερική (Πηγή : Robotic Industries Association).



Σχήμα 2: Ετήσιες εγκαταστάσεις βιομηχανικών ρομπότ (Πηγή : Robotic Industries Association).



Σχήμα 3: Εκτίμηση ποσοστού % εξοικονόμησης κόστους εργασίας με την εγκατάσταση ρομποτικών συστημάτων για το έτος 2015. (Πηγή : The Boston Consulting Group).

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μείωση στο κόστος των βιομηχανικών ρομπότ, σε αντίθεση με την αύξηση του κόστους εργασίας του ανθρώπου καθιστώντας προτιμότερο την εγκατάσταση ρομποτικών συστημάτων. Όπου, η συγκεκριμένη τάση ενισχύει την αγορά των βιομηχανικών ρομπότ. Επιπλέον, άλλος λόγος που καθιστά τα βιομηχανικά ρομπότ αποτελεσματικά είναι οι δεξιότητες των ρομποτικών μηχανισμών που παρουσιάζουν συνεχώς μια βελτίωση όσο αφορά το χειρισμό. Ολοένα και παραπάνω τα ρομποτικά συστήματα χρησιμοποιούνται σε ένα φάσμα εργασιών, όπου είτε δεν είναι δυνατόν να γίνουν από ανθρώπους είτε όπου θεωρείτε επικίνδυνο το περιβάλλον για την ανθρώπινη υγεία (CRAIG, 2020).

Το περιβάλλον εργασίας των βιομηχανικών ρομπότ είναι αυστηρά δομημένο με προκαθορισμένα φυσικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά, επιδιώκοντας μικρό βαθμό αυτονομίας σε σχέση με εφαρμογές που πραγματοποιούνται σε μη δομημένο και άγνωστο χώρο, όπως στρατιωτικές, εξερευνητικές και γενικά για την υποστήριξη του ανθρώπου σε οικιακές και αγροτικές εργασίες, χειρουργική, προσθετική και άλλα. Ο τομέας της ρομποτικής σε τέτοια πεδία βρίσκεται πρωταρχικό σημείο. Αυτό οφείλετε στην μειωμένη κατανόηση των μηχανισμών ελέγχου που δίνουν τη δυνατότητα χειρισμού, η οποία συνεπάγεται σε γνώση των χαρακτηριστικών του αντικειμένου και περιβάλλον εργασίας (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007).

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε την διαφορά μεταξύ ενός βιομηχανικού ρομπότ (που θα είναι και το αντικείμενο μελέτης), το οποίο είναι μηχανικός βραχίονας ή μηχανικό ρομπότ χειρισμού και ενός κλασικού συστήματος αυτοματισμού. Διατάξεις όπως αυτή του Σχήματος 4 θεωρούνται βιομηχανικά ρομπότ ενώ οι αριθμητικά ελεγχόμενες μηχανές (NC), όπως φρέζα CNC δεν χαρακτηρίζεται ως ρομποτικό σύστημα. Ο διαχωρισμός καθορίζεται από την πολυπλοκότητα και την ποιότητα του αλγορίθμου που μπορεί να εκτελέσει ως προγραμματιζόμενο σύστημα. Σε περίπτωση που ένα μηχάνημα έχει τη δυνατότητα να προγραμματιστεί ώστε να εκτελέσει μεγάλο πλήθος εφαρμογών, τότε είναι πιθανόν να χαρακτηριστεί ως ρομποτικό σύστημα. Σε άλλη περίπτωση αν η διάταξη περιορίζεται στην πραγματοποίηση μιας κατηγορίας εργασιών, τότε εντάσσεται στα κλασικά αυτοματοποιημένα συστήματα (CRAIG, 2020).

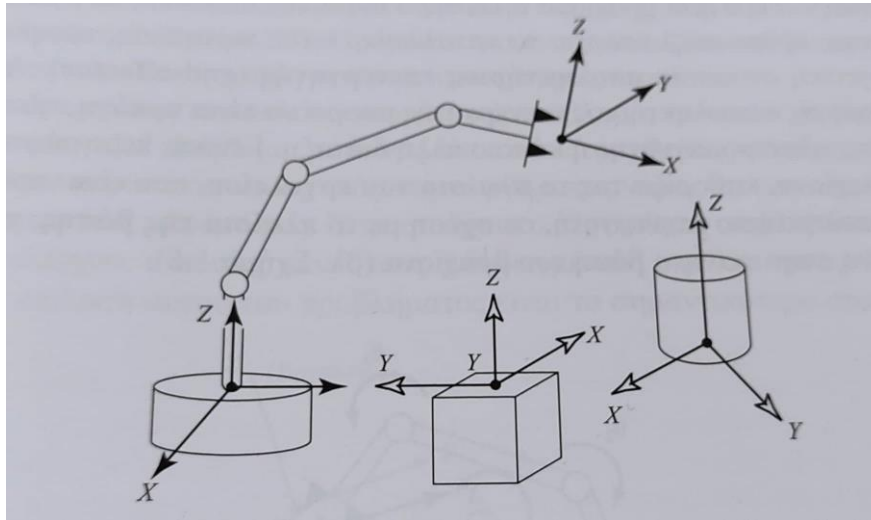


Σχήμα 4: Σχηματική απεικόνιση του ρομποτικού βραχίονα KR 700 PA (4 βαθμών ελευθερίας), για βιομηχανικές εφαρμογές. Πηγή: KUKA Industrial Robots (Kuka, n.d.).

❖ *Ανάλυση θέσης και προσανατολισμού*

Το ζητούμενο συνήθως της ρομποτικής είναι ο προσδιορισμός της θέσης ενός αντικειμένου στον τρισδιάστατο χώρο. Ως αντικείμενο χαρακτηρίζεται στην ρομποτική: ένα μέλος που δομεί το ρομποτικό βραχίονα, το εργαλείο εργασίας του βραχίονα, το εξάρτημα του ρομπότ και άλλα επιπρόσθετα στοιχεία που συνθέτουν το περιβάλλον εργασίας. Σε πρώτο στάδιο τα συγκεκριμένα αντικείμενα χαρακτηρίζονται μόνο από δύο ιδιότητες: την θέση και το προσανατολισμό τους. Επιπλέον, σημαντικό θέμα αποτελεί ο τρόπος αναπαράστασης και ελέγχου των συγκεκριμένων μεγεθών, αξιοποιώντας μαθηματικές σχέσεις.

Για να προσδιορίσουμε την θέση και το προσανατολισμό ενός αντικειμένου στον χώρο, πάντα αρχικά ορίζουμε ένα σύστημα συντεταγμένων, το οποίο χαρακτηρίζει το εξεταζόμενο αντικείμενο. Έπειτα, υπολογίζουμε την θέση και το προσανατολισμό του πλαισίου αυτού, ως προς ένα ορισμένο απόλυτο σύστημα αναφοράς (CRAIG, 2020).



Σχήμα 5: Συστήματα συντεταγμένων τοποθετούνται τόσο στον ρομποτικό βραχίονα όσο και στα αντικείμενα που τον περιβάλλουν.

- Οποιοδήποτε πλαίσιο συντεταγμένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σύστημα αναφοράς, ως προς το οποίο εκφράζουμε την θέση και τον προσανατολισμό ενός αντικειμένου. Συνήθως, επιθυμούμε να μεταβάλλουμε εκούσια την περιγραφή των ιδιοτήτων του εξεταζόμενου αντικειμένου, αλλάζοντας τις συντεταγμένες του από ένα σύστημα σε κάποιο άλλο (CRAIG, 2020).

❖ *Ευθύφορη κινηματική ρομποτικών βραχιόνων*

Ως κινηματική χαρακτηρίζεται η επιστήμη που μελετά την κίνηση ενός αντικειμένου χωρίς να υπολογίζει τις δυνάμεις που ευθύνονται για την κίνηση. Στην κινηματική εξετάζουμε την θέση, την ταχύτητα, την επιτάχυνση και κάθε άλλο παράγωγο των μεταβλητών που προσδιορίζουν την θέση (ως συνάρτηση χρόνου ή άλλων μεταβλητών). Συνεπώς, η εφαρμογή της κινηματικής σε ένα ρομποτικό βραχίονα, αφορά τις γεωμετρικές και όλες τις χρονικά εξαρτώμενες ιδιότητες της κίνησης του βραχίονα.

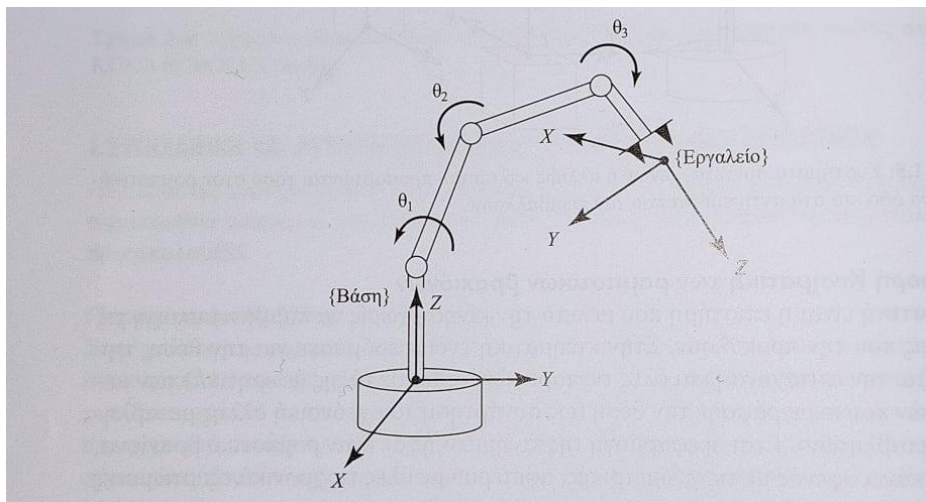
Ως συναρμογή ένας ρομποτικός βραχίονας δομείται από σχεδόν άκαμπτα στοιχεία, τα οποία λέγονται μέλη και συνδέονται μέσω αρθρώσεων. Με τη βοήθεια των αρθρώσεων τα γειτονικά μέλη μπορούν να κινούνται το ένα προς το άλλο. Επιπλέον, με τη χρήση κατάλληλων αισθητήρων καταγράφεται η σχετική θέση δύο γειτονικών μελών.

Οι αρθρώσεις που κινούνται περιστροφικά χαρακτηρίζονται ως περιστροφικές αρθρώσεις. Για τον υπολογισμό της κίνησης μιας περιστροφικής άρθρωσης μετρείται η σχηματιζόμενη γωνία των δύο κινούμενων μελών, όπου η συγκεκριμένη γωνία καλείται γωνία άρθρωσης. Κάποιοι βραχίονες διαθέτουν αρθρώσεις ολίσθησης που λέγονται πρισματικές. Όπου η διαφορά θέσης σε απόσταση των δύο μελών εδώ καλείται μετατόπιση.

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

Ως βαθμοί ελευθερίας ενός ρομποτικού βραχίονα ορίζουμε το πλήθος των ανεξάρτητων μεταβλητών θέσης που χρειάζεται να προσδιοριστούν, ώστε να είναι δυνατόν ο προσδιορισμός της θέσης όλων των μελών του βραχίονα. Τυπικά ένας ρομποτικός βραχίονας προσομοιάζεται με μια ανοιχτή κινηματική αλυσίδα και κάθε άρθρωση του βραχίονα αντιστοιχεί σε μία μεταβλητή. Επομένως, το πλήθος των αρθρώσεων του βραχίονα είναι ίσο με τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας του.

Στο τέλος του ελεύθερου άκρου του βραχίονα προσαρμόζεται κατάλληλα, ανάλογα με την εφαρμογή εργαλείο, το οποίο ονομάζεται αποληκτήριο επενεργητής (end-effector). Ανάλογα την ζητούμενη εργασία, ο αποληκτήριο επενεργητής μπορεί να είναι αρπαγή, ηλεκτρομαγνήτης, ηλεκτρόδιο συγκόλλησης ή άλλη διάταξη. Γενικά για να προσδιορίσουμε την θέση του βραχίονα, καθορίζουμε πρώτα το πλαίσιο του εργαλείου, το οποίο βρίσκεται στον αποληκτήριο επενεργητή, σε σχέση με το πλαίσιο βάσης, που προσαρμόζεται στην ακίνητη βάση του βραχίονα (Όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα).



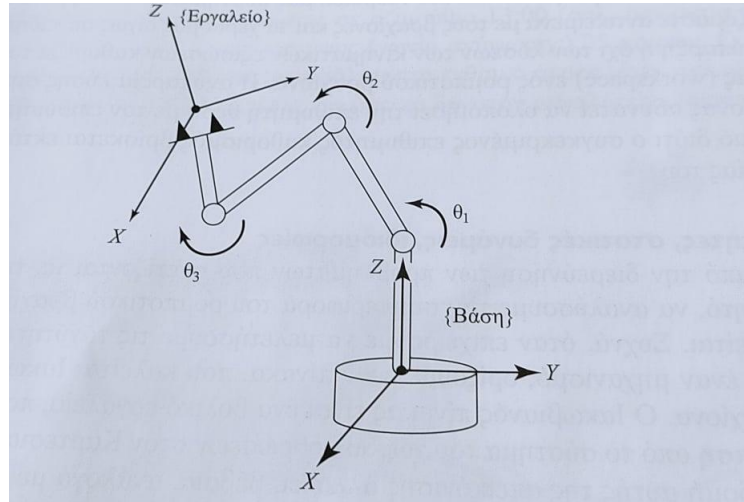
Σχήμα 6: Οι κινηματικές εξισώσεις προσδιορίζουν το πλαίσιο του εργαλείου σε σχέση με το πλαίσιο βάσης ως συνάρτηση των μεταβλητών των αρθρώσεων (CRAIG, 2020).

Ένα σημαντικό ζήτημα στην μελέτη των ρομποτικών βραχιόνων είναι το πρόβλημα της ευθύφορης κινηματικής (Forward Kinematics). Συγκεκριμένα, είναι ένα στατικό γεωμετρικό πρόβλημα με δεδομένο ένα σύνολο γωνιών αρθρώσεων, βάση του οποίου γίνεται ο υπολογισμός της θέσης και του προσανατολισμού του αποληκτήριου επενεργητή σε σχέση με το πλαίσιο βάσης του βραχίονα. Κατά το πρόβλημα αυτό πραγματοποιείται ένας μετασχηματισμός από τον χώρο των αρθρώσεων στον καρτεσιανό χώρο.

❖ Αντίστροφη κινηματική ρομποτικών βραχιόνων

Ως αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα καλούμε το ζήτημα κατά το οποίο γνωρίζουμε την θέση και το προσανατολισμό του αποληκτήριου επενεργητή και ζητείται ο υπολογισμός όλων των δυνατών γωνιών των αρθρώσεων, τα οποία οδηγούν σε συγκεκριμένη θέση και προσανατολισμό. Επιπλέον, το συγκεκριμένο πρόβλημα αποτελεί θεμελιώδη ζήτημα για το αντικείμενο της ρομποτικής.

Στα βιολογικά συστήματα αυτό το ζήτημα αποτελεί καθημερινό πρόβλημα, το οποίο λύνεται αρκετές φορές καθημερινά. Από την άλλη όμως σε τεχνολογικό επίπεδο του ρομπότ, απαιτείται σχεδιασμός ενός αλγορίθμου που θα ελέγχεται από ένα Η/Υ με στόχο να εκτελέσει ενδεδειγμένους υπολογισμούς, επιλύοντας το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα το οποίο επηρεάζει σημαντικά την λειτουργικότητα του ρομπότ.



Σχήμα 7: Γνωρίζοντας την θέση και τον προσανατολισμό του αποληκτῆριου επενεργητή και αντίστοιχα όλες τις τιμές των μεταβλητών που περιγράφουν τις αρθρώσεις του ρομποτικού συστήματος, επιλύουμε το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα (CRAIG, 2020).

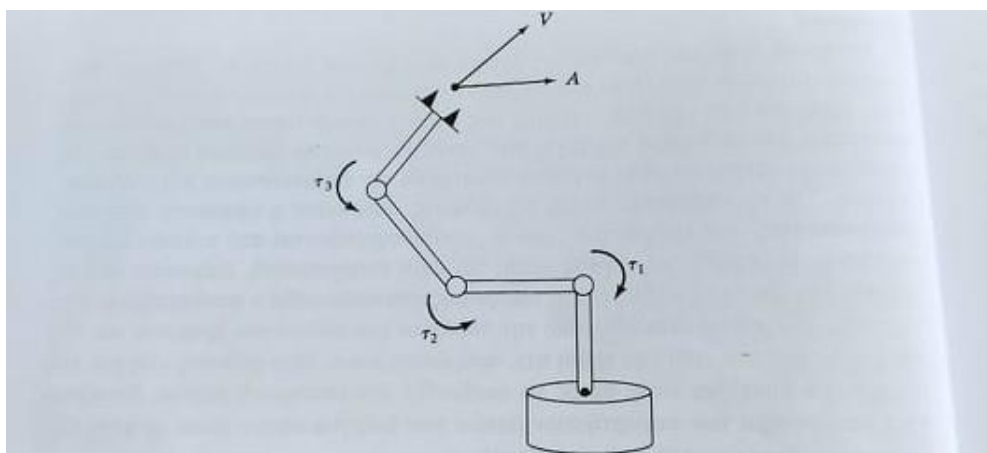
Το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα παρομοιάζεται με ένα ζήτημα απεικόνισης θέσεων ενός τρισδιάστατου καρτεσιανού επιπέδου, σε τοποθεσίες του εσωτερικού χώρου των αρθρώσεων του ρομπότ. Αυτό το ζήτημα απεικόνισης χρειάζεται κάθε φορά που τίθεται ένας στόχος που χαρακτηρίζεται από ένα εξωτερικό πλαίσιο αναφοράς. Για πρώιμα ρομποτικά συστήματα δεν υπάρχουν τέτοιου είδους αλγορίθμους και η μετακίνησή τους σε επιθυμητές θέσεις πραγματοποιείται κατευθείαν (ορισμένες φορές χειροκίνητα), αποθηκεύοντας τις συγκεκριμένες θέσεις ως ένα σύνολο αριθμητικών τιμών των αρθρώσεων. Κατά συνέπεια στην περίπτωση των πρώιμων συστημάτων που λειτουργούν με τον εξής τρόπο (εγγραφή – αποθήκευση όλων των θέσεων και κινήσεων για κάθε άρθρωση και έπειτα η αναπαραγωγή της εγγραφής) δεν απαιτείται κάποιο είδους αλγόριθμου που θα συνδέει τον χώρο των αρθρώσεων με το καρτεσιανό χώρο. Όμως στα σύγχρονα ρομποτικά συστήματα σχεδόν πάντα υπάρχει αλγόριθμος για την αντίστροφη κινηματική.

Ο λόγος που η αντίστροφη κινηματική είναι πιο σύνθετη σε σχέση με την ευθύφορη είναι η ύπαρξη μη γραμμικών εξισώσεων στο αντίστροφο πρόβλημα. Όπου οι μη γραμμικές εξισώσεις δύσκολα δίνουν λύση κλειστού τύπου και δημιουργούνται ερωτήματα για την ύπαρξη ή την πολλαπλότητα των λύσεων. Επίσης, το ερώτημα αν υπάρχουν λύσεις για τις κινηματικές εξισώσεις καθορίζει το χώρο εργασίας (Work Space) του ρομποτικού βραχίονα. Στην περίπτωση μηδενικών λύσεων για τις κινηματικές εξισώσεις, τότε προκύπτει το συμπέρασμα πως ο βραχίονας αδυνατεί να φθάσει το επιθυμητό σημείο με τον ορισμένο προσανατολισμό, καθώς το ζητούμενο σημείο βρίσκεται εκτός χώρου εργασίας του.

❖ Δυναμική ανάλυση των βιομηχανικών ρομπότ

Με τον όρο δυναμική χαρακτηρίζεται το επιστημονικό πεδίο που μελετά τις δυνάμεις που απαιτούνται για να δημιουργηθεί κίνηση. Ας υποθέσουμε πως επιθυμούμε να μεταβάλουμε την κινητική κατάσταση ενός βραχίονα από μια θέση ηρεμίας σε μία άλλη θέση όπου ο αποληκτήριο επενεργητής του να αποκτήσει μια συγκεκριμένη ταχύτητα, η οποία και θα διατηρήσει σταθερή και στη συνέχεια να επιβραδύνει έως ότου σταματήσει. Όστε να επιτύχουμε την συγκεκριμένη αλληλουχία κινήσεων, χρειάζεται κατάλληλη εφαρμογή από τους ενεργοποιητές των αρθρώσεων (δημιουργούν ροπές), που λειτουργούν βάση σύνθετων συναρτήσεων. Με τον όρο ενεργοποιητές αρθρώσεων καλούμε διατάξεις που παρέχουν κίνηση στον βραχίονα. Παράδειγμα διατάξεων αποτελούν ηλεκτρικοί κινητήρες, πνευματικά ή υδραυλικά στοιχεία και μύες. Η κάθε ροπή που προκαλούν οι ενεργοποιητές ξεχωριστά, εξαρτάται από τις χωρικές και χρονικές ιδιότητες της διαδρομής του αποληκτηρίου επενεργητή. Επίσης εξαρτάται, από την αδράνεια του κάθε μέλος του βραχίονα και του ωφέλιμου φορτίου, από την τριβή που αναπτύσσεται στις αρθρώσεις και άλλους παράγοντες. Τρόπος για να γίνει έλεγχος της πορείας που θα ακολουθήσει ο ρομποτικός βραχίονας είναι μέσω υπολογισμού των συναρτήσεων ροπών του κάθε ενεργοποιητή, με τη βοήθεια δυναμικών εξισώσεων του ρομποτικού βραχίονα. Έτσι, οι αλγόριθμοι ελέγχου του βραχίονα θα πρέπει να συμπεριλαμβάνουν τον έλεγχο της δυναμική συμπεριφοράς των συστημάτων που συμμετέχουν στην κίνηση.

Επιπλέον, η εφαρμογή των δυναμικών εξισώσεων της κίνησης δίνει την προσομοίωση. Μέσω επανασχεδιασμού των εξισώσεων, με τέτοιο τρόπο ώστε η επιτάχυνση να είναι συνάρτηση της ροπής των ενεργοποιητών, προκύπτει μια προσομοίωση της κίνησης του βραχίονα ως αποτέλεσμα ενός συνόλου ροπών που δημιουργούν οι ενεργοποιητές. Η μείωση του κόστους της υπολογιστικής ισχύος, καθιστά προσιτό τη χρήση μεθόδων προσομοίωσης για πολλές εφαρμογές, εκ των οποίων τα βιομηχανικά ρομπότ.



Σχήμα 8: Συσχέτιση ροπής που ασκούν οι ενεργοποιητές και της συντελούμενης κίνησης του βραχίονα που εμπεριέχονται στις δυναμικές εξισώσεις.

❖ Σχεδιασμός βραχιόνων

Ως διατάξεις τα βιομηχανικά ρομπότ έχουν ευρύ πεδίο εφαρμογών στην βιομηχανία. Όμως, λόγω οικονομικών κριτηρίων ο μηχανολογικός σχεδιασμός ενός βραχίονα θα πρέπει προσαρμόζεται άμεσα στην ρομποτική εφαρμογή που θα συντελεί τελικά. Ως κριτήριο σχεδιασμού εκτός από το μέγεθος, την ταχύτητα και την ικανότητα διαχείρισης φορτίου, αποτελεί ο αριθμός των αρθρώσεων που χρειάζονται και την γεωμετρική μορφή .

Η ανάλυση των παραπάνω παραμέτρων διαμορφώνει την ποιότητα και το μέγεθος του περιβάλλον εργασίας του ρομποτικού βραχίονα, την στιβαρότητα της διάταξης και άλλα χαρακτηριστικά.

Η αύξηση του αριθμού των αρθρώσεων του βραχίονα , αυξάνει την επιδεξιότητα του και την ικανότητα να εκτελέσει πιο πολύπλοκες διεργασίες. Από την άλλη, αυτό αυξάνει την δυσκολία κατασκευής και το κόστος δημιουργίας του. Για να κατασκευάσουμε λειτουργικό ρομπότ μπορούμε να ακολουθήσουμε δύο μεθόδους : η κατασκευή ενός εξειδικευμένου ρομπότ, το οποίο χρησιμοποιείται για μια ορισμένη εργασία ή την δημιουργία ενός ρομπότ γενικής χρήσης που θα έχει πολλές εφαρμογές. Η κατασκευή ενός εξειδικευμένου ρομπότ απαιτεί ειδική μελέτη για να βρεθεί ο κατάλληλος αριθμός αρθρώσεων που θα διαθέτει. Για παράδειγμα, αν επιθυμούμε ένα ρομπότ αποκλειστικά για να τοποθετεί αντικείμενα πάνω σε ένα τραπέζι εργασίας, τότε δεν απαιτείται μεγαλύτερο αριθμό αρθρώσεων από τέσσερις, επειδή έχοντας τρεις αρθρώσεις το ρομπότ θα έχει πρόσβαση σε κάθε σημείο του τρισδιάστατου χώρου εργασίας. Ενώ, με τις τέσσερις αρθρώσεις το εργαλείο που τοποθετείτε στο άκρο του βραχίονα έχει τη δυνατότητα να στρέφεται γύρο από τον κατακόρυφο άξονα. Για την περίπτωση του ρομπότ για πολλαπλές χρήσεις, ο κατάλληλος αριθμός αρθρώσεων εξαρτάται από τις βασικές ιδιότητες του κόσμου μας και πρέπει να είναι μικρότερο από έξι.

❖ Προγραμματισμός των ρομπότ

Η σύνδεση μεταξύ ανθρώπου και ρομπότ πραγματοποιείται μέσω μιας γλώσσας ρομποτικού προγραμματισμού.

Σημαντικά ερωτήματα που γίνονται περί του ρομποτικού προγραμματισμού είναι τα εξής:

- Η ευκολία περιγραφής των κινήσεων του ρομπότ από το πρόγραμμα
- Ο τρόπος προγραμματισμού πολλαπλών ρομπότ για την παράλληλη λειτουργία τους
- Πως τα σήματα που προέρχονται από αισθητήρες μετατρέπονται σε μορφή κώδικα μέσω μιας γλώσσας προγραμματισμού .



Σχήμα 9: Οι επιθυμητή συμπεριφορά του βραχίονα ως, κινήσεις του ρομπότ και του αποληκτήριου επενεργητή του, δυνάμεις επαφής καθώς και άλλη παράγοντες που περιγράφονται από γλώσσα ρομποτικού προγραμματισμού (Volz, 2018).

Το σημείο που διαφοροποιεί τους ρομποτικούς μηχανισμούς σε σχέση με συμβατικούς αυτοματισμούς, είναι η ευελιξία τους να προγραμματιστούν για εκτέλεση πολύπλοκων εργασιών. Το οποίο δεν είναι το μοναδικό τους πλεονέκτημα, με τη βοήθεια των αισθητήρων οι ρομποτικοί βραχίονες μπορούν να ανταλλάξουν πληροφορίες με άλλους βιομηχανικούς αυτοματισμούς επιτρέποντας την προσαρμογή τους σε ένα περιβάλλον που αλλάζει και εξελίσσεται συνέχεια .

Συνήθως στα ρομποτικά συστήματα επιτρέπεται στον άνθρωπο να εκμάθει με απλό και γρήγορο τρόπο τις απαιτούμενες κινήσεις που χρειάζεται να κάνει. Επιπλέον, ο χρήστης ρυθμίζει το εκτελεστικό σημείο πάνω στο ρομποτικό βραχίονα, το οποίο καλείται και TCP Κεντρικό Σημείο Εργαλείου (Tool Center Point).

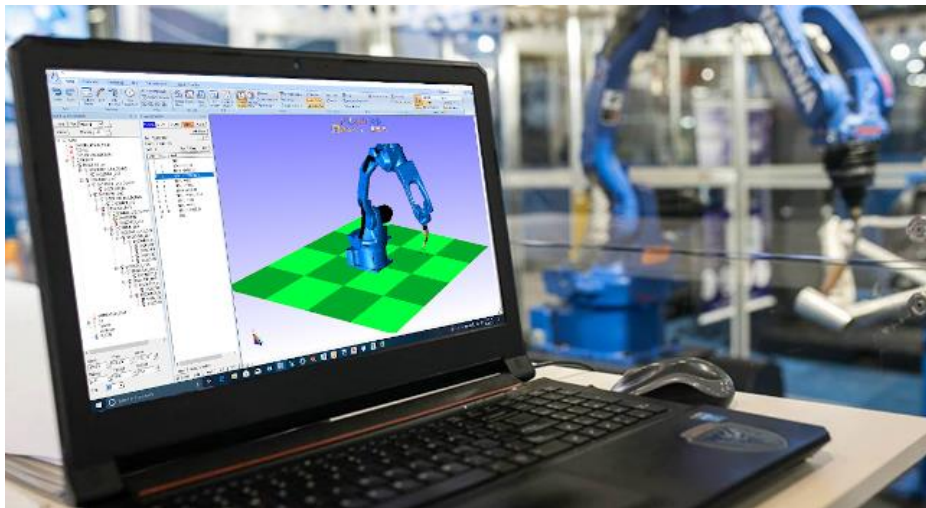
Όλες οι εκτελούμενες κινήσεις του ρομπότ προσδιορίζονται από τον χρήστη βάσει των ζητούμενων θέσεων του εκτελεστικού σημείου ως προς ένα σύστημα αναφοράς που το καθορίζει ο ίδιος. Όπου ο χρήστης καθορίζει το συγκεκριμένο σύστημα συντεταγμένων αναφοράς σε συσχέτιση με ένα βασικό πλαίσιο και παίρνει θέση ανάλογα με την εφαρμογή που θα εκτελέσει ο βραχίονας.

Η σχέση μεταξύ ανθρώπου και ρομπότ αποκτά μεγάλη σημασία καθώς πολλά ρομπότ και διάφοροι προγραμματιζόμενοι αυτοματισμοί χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε απαιτητικές βιομηχανικές εργασίες. Το ζήτημα του ρομποτικού προγραμματισμού εντάσσεται σε ένα ευρύ επιστημονικό πεδίο, καθώς εμπεριέχει όλα τα θέματα του συμβατικού προγραμματισμού .

❖ *Προγραμματισμός εκτός σύνδεσης και προσομοίωση*

Καλούμε ένα σύστημα προγραμματισμού χωρίς σύνδεση, ένα περιβάλλον προγραμματισμού με αρκετά γραφικά, με τη βοήθεια του οποίου μπορούμε να παράγουμε προγράμματα χωρίς απαίτηση για πρόσβαση στο ίδιο το ρομποτικό σύστημα. Το σημαντικό πλεονέκτημα του προγραμματισμού χωρίς σύνδεση είναι ότι δεν υπάρχει η προϋπόθεση σύνδεσης του ρομποτικού εξοπλισμού κατά το προγραμματισμό του με το ψηφιακό περιβάλλον προγραμματισμού. Επομένως, οι ρομποτικές διατάξεις σε γραμμές παραγωγής μπορούν να λειτουργούν χωρίς διακοπές για προγραμματισμό, μεγιστοποιώντας με αυτό το τρόπο το χρόνο λειτουργίας και παραγωγής.

Επιπλέον, η αξιοποίηση της ανερχόμενης τεχνολογίας της ευχερής σύνδεσης της βάσης σχεδιαστικών δεδομένων (C.A.D. database), η οποία χρησιμεύει στην φάση του σχεδιασμού ενός προϊόντος σε ταυτόχρονο χρόνο με την διαδικασία κατασκευής του, συντελεί σε σημαντική μείωση του χρόνου προγραμματισμού της παραγωγικής διαδικασίας.



Σχήμα 10: Τα συστήματα προγραμματισμού χωρίς σύνδεση συνήθως παρέχουν γραφικό περιβάλλον που επιτρέπει το προγραμματισμό του ρομπότ χωρίς την ανάγκη πρόσβασης σε αυτό (Castor, 2020).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο : Χωρικές Αναπαραστάσεις και Μετασχηματισμοί

1.1 Εισαγωγή

Στο πλαίσιο μελέτης ρομποτικών εφαρμογών απαιτείται η υποστήριξη κάποιου μηχανισμού για να προσδώσει κίνηση στα εξαρτήματα και εργαλεία της ρομποτικής διάταξης. Για αυτό είναι σημαντικό να υπάρχει η δυνατότητα να εκφράσουμε με μαθηματικές σχέσεις για την θέση και τον προσανατολισμό των τμημάτων, των εργαλείων και των εξαρτημάτων που συνοδεύουν το ρομπότ. Για να οριστούν τα μαθηματικά μεγέθη που περιγράφουν την θέση και τον προσανατολισμό, ορίζουμε σύστημα συντεταγμένων ως πλαίσιο αναφοράς και εξετάζουμε τις συνθήκες αναπαράστασης. Θέτοντας το σύστημα συντεταγμένων το θεωρούμε απόλυτο και οι αναπαραστάσεις των αντικειμένων γίνονται ως προς αυτό. Έτσι, κάθε θέση και προσανατολισμό περιγράφεται ως προς το συγκεκριμένο απόλυτο σύστημα αναφοράς ή προς κάποιο διαφορετικό καρτεσιανό σύστημα, το οποίο θα περιγράφεται σε σχέση με το απόλυτο σύστημα που ορίσαμε.

1.2 Αναπαραστάσεις για θέσεις, προσανατολισμοί και πλαίσια

Λέγοντας αναπαράσταση δηλώνουμε την αναλυτική εξέταση των ιδιοτήτων κάθε αντικειμένου που επηρεάζει την συμπεριφορά του ρομποτικού βραχίονα που εξετάζουμε. Με το χαρακτηρισμό αντικείμενα καλούμε τα εξαρτήματα, τα τμήματα του ρομπότ και τα εργαλεία.

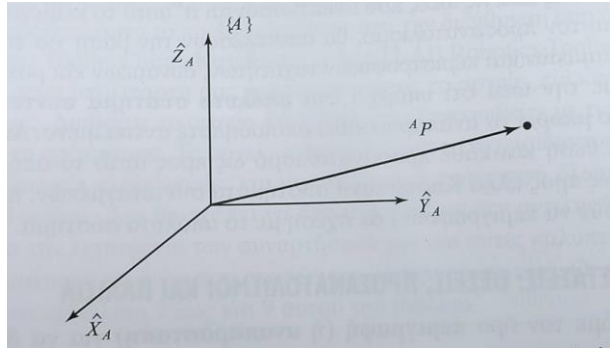
Ανάλυση θέσης

Για το προσδιορισμό της θέσης οποιουδήποτε σημείου στο χώρο ορίζουμε ένα σύστημα συντεταγμένων και υπολογίζουμε ένα διάνυσμα θέσης 3×1 . Επιπλέον, ορίζουμε εκτός από το απόλυτο σύστημα αναφοράς άλλα πολλαπλά συστήματα σε συσχέτιση με το απόλυτο σύστημα (CRAIG, 2020). Έτσι, η κίνηση του εξεταζόμενου σωματιδίου στον ευκλείδειο χώρο περιγράφεται από τη θέση του σημείου σε σχέση με το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων που ορίζουμε (Εστω $\{A\}$ με τρία μοναδιαία διανύσματα). Με αυτό το τρόπο η θέση του σημείου στους τρεις άξονες $p = (x, y, z) \in R^3$, δηλώνει την προβολή του σημείου στους τρεις άξονες του αδρανειακού συστήματος συντεταγμένων. Επιπλέον, η τροχιά του σημείου προσδιορίζεται μέσω της παραμετροποιημένης καμπύλης $p(t) = (x(t), y(t), z(t)) \in R^3$.

Το άνυσμα $p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \in R^3$ είτε το διανυσματικό άθροισμα $p = x\bar{x} + y\bar{y} + z\bar{z}$, Όπου τα μοναδιαία

διανύσματα του συστήματος αναφοράς είναι: $\bar{x} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, $\bar{y} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$, $\bar{z} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ μας δίνουν την μαθηματική περιγραφή της θέσης ενός σημείου του εξεταζόμενου σώματος (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007).

Στο σχήμα 11 που ακολουθεί, γίνεται αναπαράσταση του πλαισίου $\{A\}$ ως παράδειγμα, με τρία μοναδιαία διανύσματα, τα οποία είναι κάθετα μεταξύ τους. Επίσης, γίνεται αναπαράσταση ενός σημείου P_A ως διάνυσμα και ισοδύναμα αποτελεί την θέση A στο χώρο με συγκεκριμένη διατεταγμένη τριάδα αριθμών. Συνεπώς, για την περιγραφή της θέσης ενός σημείου στο χώρο χρησιμοποιείται ένα διάνυσμα θέσης (CRAIG, 2020).



Σχήμα 11: Σχηματική αναπαράσταση διανύσματος P ως προς το σύστημα συντεταγμένων {A}(Παράδειγμα) (CRAIG, 2020).

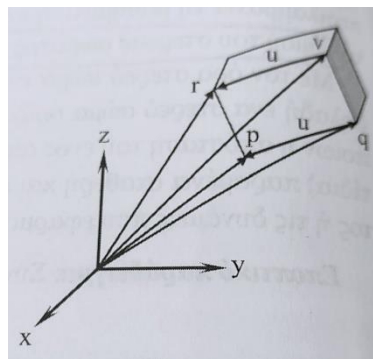
Η συνολική κίνηση ενός στερεού σώματος ισοδυναμεί με την κίνηση ενός συνόλου σωματιδίων ή σημείων που δομούν το συνολικό σώμα και ικανοποιεί την σχέση 1.1 .

$$\|P(t) - q(t)\| = \|P(0) - q(0)\| = constant \quad (1.1)$$

Θεωρούμε q και p δύο τυχαία σημεία του συνολικού σώματος και κατά την κίνηση του σώματος ικανοποιείται η σχέση (1.1). Επιπρόσθετα, ως $\| \cdot \|$ χαρακτηρίζεται το ευκλείδειο μέτρο ή νόρμα για ένα διάνυσμα. Η κίνηση του στερεού σώματος έχει ως αποτέλεσμα την μετατόπιση σε νέα θέση και έναν διαφορετικό προσανατολισμό (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007).

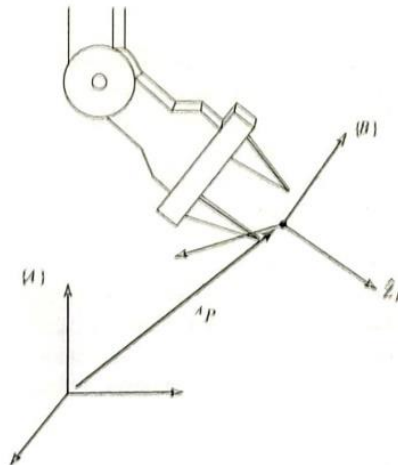
Θεωρώντας τα σημεία q και p δύο οποιαδήποτε σημεία του σώματος, τότε ορίζεται το άνυσμα $u \in R^3$ ως κατευθυνόμενο τμήμα γραμμής που συνδέει τα δύο αυτά σημεία και περιγράφεται από την σχέση $u = p - q \in R^3$. Η διαφορά της έννοιας μεταξύ του διανύσματος u και των δύο σημείων p και q είναι σημαντική (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007).

Το διάνυσμα u διαθέτει διεύθυνση και μέτρο, ωστόσο δεν ανήκει σταθερά στο στερεό σώμα, επειδή υπάρχουν και άλλα ζεύγη σημείων πάνω στο σώμα που μπορούν να ενωθούν από το ίδιο άνυσμα. Όπως φαίνεται στο παράδειγμα του σχήματος 12 οι θέσεις των σημείων r και v για τα οποία ισχύει η σχέση $r - v = u \in R^3$. Συνεπώς, τα ανύσματα για τα οποία ισχύει αυτή ιδιότητα χαρακτηρίζονται ως ελεύθερα, καθώς μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιοδήποτε σημείο στο χώρο χωρίς να μεταβληθούν. Αντίθετα, τα διανύσματα που χαρακτηρίζουν τις θέσεις ορισμένων σημείων μεταβάλλονται κατά την μετατόπιση του στερεού σώματος (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007).



Σχήμα 12: Σχηματική περιγραφή ελεύθερων ανυσμάτων (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007).

Για να προσδιοριστεί ένα σώμα στο χώρο δεν αρκεί μόνο η απλή αναπαράσταση του σημείου στο χώρο, αλλά απαιτείται η επιπρόσθετη περιγραφή του προσανατολισμού του στο χώρο. Έστω, το παράδειγμα του σχήματος 13 στο οποίο έχουμε το διάνυσμα P_A που περιγράφει ένα σημείο που εντοπίζεται ανάμεσα στα δύο ακροδάχτυλα του ρομποτικού χειριστή. Με αυτές τις πληροφορίες δεν μπορεί να γίνει ακριβής προσδιορισμός της θέσης του βραχίονα, χωρίς την εύρεση του προσανατολισμού. Αν ένας ρομποτικός βραχίονας διαθέτει επαρκής πλήθος αρθρώσεων, τότε έχει τη δυνατότητα να προσανατολιστεί σε οποιοδήποτε τυχαία κατεύθυνση στο χώρο ελεύθερα, χωρίς την αλλαγή της θέσης του διανύσματος P_A (CRAIG, 2020).



Σχήμα 13: Εύρεση ενός σώματος υπολογίζοντας την θέση και τον προσανατολισμό (CRAIG, 2020).

Για την εύρεση του προσανατολισμού ενός σώματος, αρχικά ορίζεται ένα σύστημα συντεταγμένων που τοποθετείται πάνω στο εξεταζόμενο σώμα. Έπειτα, ακολουθεί η συσχέτιση του ορισμένου πλαισίου με το σύστημα αναφοράς. Το σύστημα συντεταγμένων $\{B\}$ στο παράδειγμα του σχήματος 13 έχει τοποθετηθεί στο εξεταζόμενο αντικείμενο, με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δεδομένο. Έτσι, η συσχέτιση του πλαισίου $\{B\}$ ως προς το $\{A\}$ είναι αρκετή για να βρεθεί ο ζητούμενος προσανατολισμός (CRAIG, 2020).

Επομένως, ο χαρακτηρισμός των θέσεων για οποιοδήποτε σημείο πραγματοποιείται μέσω διανυσμάτων, από την άλλη ο προσανατολισμός των σωμάτων περιγράφεται με ένα ορισμένο σύστημα αναφοράς. Για να γίνει αναπαράσταση του προσαρτημένου συστήματος συντεταγμένων $\{B\}$, αρκεί να υπολογιστούν τα τρία μοναδιαία διανύσματα σε συνάρτηση με το πλαίσιο $\{A\}$.

Τα μοναδιαία διανύσματα των τριών αξόνων του πλαισίου $\{B\}$ συμβολίζονται ως $\widehat{X}_B, \widehat{Y}_B, \widehat{Z}_B$. Αντίστοιχα, τα μοναδιαία διανύσματα του συστήματος συντεταγμένων $\{B\}$ εκφρασμένα ως προς το πλαίσιο $\{A\}$ είναι ${}^A\widehat{X}_B, {}^A\widehat{Y}_B, {}^A\widehat{Z}_B$. Για διευκόλυνση θεωρούνται ότι τα μοναδιαία διανύσματα ισοδυναμούν με στήλες από πίνακα 3x3 που διαθέτει διάταξη ${}^A\widehat{X}_B, {}^A\widehat{Y}_B, {}^A\widehat{Z}_B$. Έτσι, λοιπόν ο συγκεκριμένος πίνακας καλείται πίνακας περιστροφής και του αποδίδεται το σύμβολο ${}^A_B R$, καθώς περιγράφει την αναπαράσταση του πλαισίου $\{B\}$ σε σχέση με το $\{A\}$.

$${}^A_B R = [\widehat{X}_B \quad \widehat{Y}_B \quad \widehat{Z}_B] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Από τα παραπάνω συμπερασματικά προκύπτει πως για την εύρεση του προσανατολισμού αξιοποιούνται τρία διανύσματα, τα οποία αποτελούν τις στήλες του πίνακα 3x3 που περιγράφει τον προσανατολισμό (CRAIG, 2020).

Οι συνιστώσες ενός διανύσματος αποτελούν τις προβολές του ανύσματος πάνω στους άξονες του πλαισίου αναφοράς. Για αυτό οι βαθμωτές ποσότητες r_{ij} που αναφέρονται στην σχέση (1.2) μπορούν να γραφτούν ως το αντίστοιχο ζεύγος μοναδιαίων διανυσμάτων, όπως γίνεται στην ακόλουθη σχέση:

$${}^A_B R = [\hat{X}_B \quad \hat{Y}_B \quad \hat{Z}_B] = \begin{bmatrix} \hat{X}_B * \hat{X}_A & \hat{Y}_B * \hat{X}_A & \hat{Z}_B * \hat{X}_A \\ \hat{X}_B * \hat{Y}_A & \hat{Y}_B * \hat{Y}_A & \hat{Z}_B * \hat{Y}_A \\ \hat{X}_B * \hat{Z}_A & \hat{Y}_B * \hat{Z}_A & \hat{Z}_B * \hat{Z}_A \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Επιπρόσθετα, το εσωτερικό γινόμενο δύο μοναδιαίων διανυσμάτων υπολογίζεται ως το συνημίτονο της γωνίας που εμπεριέχεται μεταξύ των δύο διανυσμάτων. Μέσω επιπλέον πράξεων η σχέση (1.3) μετασχηματίζεται στην ακόλουθη μαθηματική έκφραση :

$${}^A_B R = [\hat{X}_B \quad \hat{Y}_B \quad \hat{Z}_B] = \begin{bmatrix} \hat{X}_A^T \\ \hat{Y}_A^T \\ \hat{Z}_A^T \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

Από την σχέση (1.4) γίνεται αντιληπτό πως οι γραμμές του πίνακα περιστροφής αποτελούν τα μοναδιαία διανύσματα του {A} ως το πλαίσιο {B}. Έτσι, ο πίνακας που περιγράφει το πλαίσιο {A} σε σχέση με το {B}, ${}^B_A R$ προκύπτει με την αναστροφή του πίνακα της σχέσης (1.3):

$${}^B_A R = {}^A_B R^T \quad (1.5)$$

Αποδεικνύεται όπως ακολουθεί παρακάτω πώς ο αντίστροφος ενός πίνακα περιστροφής ισούται με τον ανάστροφο του.

$${}^A_B R^T * {}^A_B R = \begin{bmatrix} \hat{X}_B^T \\ \hat{Y}_B^T \\ \hat{Z}_B^T \end{bmatrix} [\hat{X}_B \quad \hat{Y}_B \quad \hat{Z}_B] = I_3 \quad (1.6)$$

Ως I_3 συμβολίζεται ο μοναδιαίος πίνακας 3x3 και έτσι ισχύει η εξής σχέση:

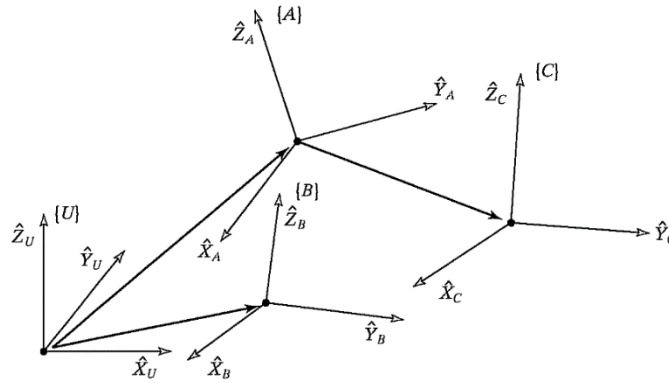
$${}^A_B R = {}^B_A R^{-1} = {}^B_A R^T \quad (1.7)$$

Ανάλυση πλαισίου

Η τοποθεσία του σώματος σχήμα 13 μπορεί να επιλεγεί αυθαίρετα και για διευκόλυνση επιλέγεται ως σημείο αναφοράς το σημείο μηδέν του πλαισίου που προσαρτάται στο βραχίονα. Με τον όρο πλαίσιο χαρακτηρίζεται μια ομάδα τεσσάρων διανυσμάτων που περιγράφουν την θέση και τον προσανατολισμό. Στο παράδειγμα που απεικονίζεται στο σχήμα 13, η θέση των δακτύλων χαρακτηρίζεται από ένα διάνυσμα, ενώ ο προσανατολισμός περιγράφεται μέσω τριών διανυσμάτων. Εναλλακτικά, η περιγραφή του πλαισίου μπορεί να γίνει από ένα διάνυσμα και έναν πίνακα στροφής. Συνεπώς, για την πλήρη περιγραφή ενός πλαισίου χρειάζεται η θέση της αφετηρίας του συστήματος και το διάνυσμα θέσης, που προσδιορίζει την θέση μηδέν των αξόνων σε συσχέτιση με ένα διαφορετικό σύστημα αναφοράς που περιέχει το εξεταζόμενο πλαίσιο. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα, το πλαίσιο {B} χαρακτηρίζεται από το πίνακα ${}^B_A R$ και το διάνυσμα P_{BORG} αναφορικά με

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα το πλαίσιο $\{A\}$. Με το διάνυσμα ${}^A P_{BORG}$ υπολογίζεται το σημείο (0,0) των αξόνων του πλαισίου $\{B\}$ (CRAIG, 2020).

$$\{B\} = \{ {}^A R, {}^A P_{BORG} \} \quad (1.8)$$



Σχήμα 14: Παράδειγμα συνδυασμού πλαισίων (CRAIG, 2020).

Στο παραπάνω σχήμα 14 απεικονίζονται τρία πλαίσια ($\{A\}$, $\{B\}$ και $\{C\}$) συμπεριλαμβανομένου το απόλυτο σύστημα συντεταγμένων $\{U\}$. Τα πλαίσια $\{A\}$, $\{B\}$ είναι δεδομένα ως προς το απόλυτο σύστημα συντεταγμένων και το πλαίσιο $\{C\}$ ως προς το $\{A\}$. Το διάνυσμα που απεικονίζεται με αρχή το σημείο μηδέν των αξόνων του πλαισίου $\{A\}$ και τελικό σημείο την αρχή των αξόνων του $\{C\}$ πλαισίου, με μια ορισμένη φορά δηλώνει ότι το $\{C\}$ πλαίσιο περιγράφεται σε σχέση με το $\{A\}$ πλαίσιο και όχι αντίστροφα.

Συμπερασματικά, προκύπτει ότι ένα πλαίσιο αξιοποιείται για την περιγραφή ενός πλαισίου ως προς ένα άλλο. Με τον όρο πλαίσιο χαρακτηρίζεται ταυτόχρονα η έννοια της θέσης και του προσανατολισμού ενός σώματος. Επιπρόσθετα, για να προσδιοριστεί η θέση ενός σημείου στο χώρο χρησιμοποιείται ένα πλαίσιο, με την προϋπόθεση να είναι μοναδιαίος πίνακας το μέρος του πλαισίου που αντιστοιχεί στον πίνακα στροφής και τα υπόλοιπα στοιχεία να αποτελούν ένα διάνυσμα θέσης που περιγράφουν το σημείο στο χώρο. Αντίστοιχα, ο προσανατολισμός ενός σημείου υπολογίζεται με την βοήθεια ενός πλαισίου που διαθέτει μηδενικό διάνυσμα στη θέση του διανύσματος θέσης (CRAIG, 2020).

1.3 Απεικονίσεις: Μεταβολή αναπαραστάσεων από πλαίσιο σε πλαίσιο

Απεικονίσεις για μεταφορές πλαισίων

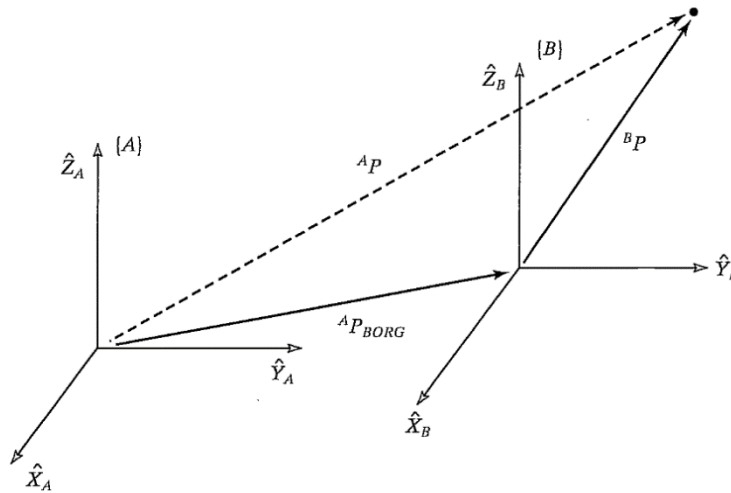
Το σχήμα 15 που φαίνεται παρακάτω παρουσιάζει ένα διάνυσμα ${}^B P$, το οποίο ορίζει ένα σημείο στο χώρο σε σχέση με το πλαίσιο $\{B\}$. Για να γίνει η περιγραφή του συγκεκριμένου σημείου ως προς το διαφορετικό πλαίσιο $\{A\}$ που διαθέτει ίδιο προσανατολισμό με το $\{B\}$, υπολογίζεται η απόσταση των δύο πλαισίων ως μοναδική διαφορά μεταξύ των δύο συστημάτων. Η συγκεκριμένη απόσταση χαρακτηρίζεται με τον όρο μεταφορά και ως μαθηματικό μέγεθος αποτελεί ένα διάνυσμα. Στην περίπτωση μεταφοράς από την αρχή των αξόνων του $\{B\}$ ως την αρχή των αξόνων του πλαισίου $\{A\}$, ως διάνυσμα συμβολίζεται με το ${}^A P_{BORG}$ (CRAIG, 2020).

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

Λόγω ίδιου προσανατολισμού και μόνο που έχουν τα δύο πλαίσια (ως ειδική περίπτωση), μπορούν τα επιμέρους διανύσματα ${}^A P_{BORG}$ και ${}^B P$ να αθροιστούν δίνοντας το διάνυσμα ${}^A P$.

$${}^A P = {}^B P + {}^A P_{BORG} \quad (1.9)$$

Το διάνυσμα ${}^A P_{BORG}$ ορίζει μια απεικόνιση καθώς εμπεριέχει την απαιτούμενη πληροφορία για την μεταβολή της αναπαράστασης.



Σχήμα 15: Παράδειγμα μεταβολής αναπαράστασης σημείου σε διαφορετικό πλαίσιο (CRAIG, 2020).

Απεικονίσεις για περιστροφές πλαισίων

Ως πίνακα περιστροφής ${}^A R_B$ ορίζεται ένας πίνακας 3x3 με στήλες τις συντεταγμένες των δύο διανυσμάτων (${}^B P$, ${}^A P_{BORG}$). Ο πίνακας ${}^A R_B$ δίνει την συσχέτιση μεταξύ συστήματος {B} ως προς το {A}. Επιπλέον, οι στήλες του πίνακα ${}^A R_B$ έχουν μοναδιαίο μέτρο και είναι ορθογώνιες μεταξύ τους (CRAIG, 2020).

Εφόσον οι στήλες του ${}^A R_B$ αποτελούν τα μοναδιαία διανύσματα του {B} σε συνάρτηση με το {A}, οι γραμμές του ${}^A R_B$ είναι τα μοναδιαία διανύσματα του {A} σε σχέση με το {B}. Κατά συνέπεια, ο πίνακας ${}^A R_B$ περιστροφής 3x3 μπορεί να απεικονιστεί ως πίνακας τριών στηλών ή σαν πίνακας τριών γραμμών, όπως φαίνεται παρακάτω :

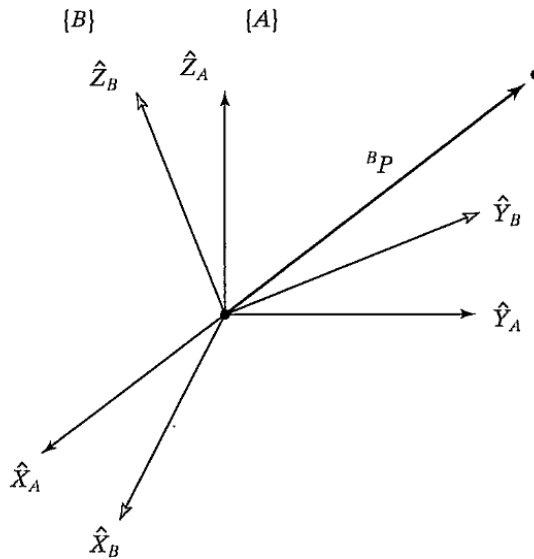
$${}^A R_B = [\hat{X}_B \quad \hat{Y}_B \quad \hat{Z}_B] = \begin{bmatrix} \hat{X}_A^T \\ \hat{Y}_A^T \\ \hat{Z}_A^T \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

Στο σχήμα 16 φαίνεται η αναπαράσταση του διανύσματος ${}^B P$ ως προς το πλαίσιο {B} και ζητείται η περιγραφή ως προς το πλαίσιο {A}. Σε αυτή τη περίπτωση εξετάζεται αν τα δύο πλαίσια έχουν κοινές αρχές αξόνων, με την βοήθεια του πίνακα περιστροφής ${}^A R_B$. Διότι, όταν ζητείται η περιγραφή του προσανατολισμού ενός πλαισίου {B} ως προς το διαφορετικό πλαίσιο {A}, τότε χρησιμοποιείται ο πίνακας περιστροφής ${}^A R_B$ που φέρει στήλες τα μοναδιαία διανύσματα του πλαισίου {B} εκφραζόμενα ως προς το {A}.

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

Για την εύρεση του διανύσματος ${}^A P$, υπολογίζονται οι προβολές του διανύσματος πάνω στις διευθύνσεις των μοναδιαίων διανυσμάτων. Οι συγκεκριμένες προβολές υπολογίζονται με την πράξη του εσωτερικού γινομένου διανυσμάτων, όπως ακολουθεί:

$$\begin{aligned} {}^A P_x &= {}^B \hat{X}_A * {}^B P \\ {}^A P_y &= {}^B \hat{Y}_A * {}^B P \\ {}^A P_z &= {}^B \hat{Z}_A * {}^B P \end{aligned} \quad (1.11)$$



Σχήμα 16: Περιστροφή της απεικόνισης ενός διανύσματος (CRAIG, 2020).

Για να εκφραστεί η σχέση 1.11 σε συμπαγή μορφή χρησιμοποιείται ένας πίνακας περιστροφής ${}^A R_B$ ως εξής :

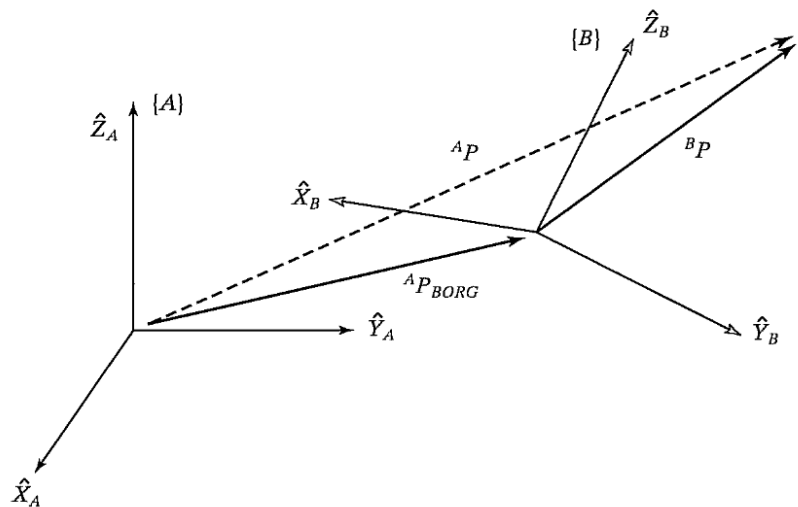
$${}^A P = {}^A R_B {}^B P \quad (1.12)$$

Η μαθηματική έκφραση (1.12) αποτελεί μια απεικόνιση, καθώς μεταβάλλει την αναπαράσταση ως προς το επιλεγμένο διάνυσμα. Δηλαδή, πραγματοποιείται αλλαγή του πλαισίου αναφοράς του διανύσματος P από {A} σε {B} (CRAIG, 2020).

Απεικονίσεις γενικευμένων πλαισίων

Η μεταφορά ενός πλαισίου {B} σε σχέση με το πλαίσιο {A} εκφράζεται μέσω ενός διανύσματος ${}^A P_{BORG}$. Επιπλέον, η περιστροφή του {B} πλαισίου σε σχέση με το {A} περιγράφεται από τον πίνακα ${}^A R_B$.

Στο σχήμα 17 φαίνονται δύο πλαίσια, όπου το πλαίσιο {B} έχει υποστεί μεταφορά και περιστροφή σε σχέση με το {A}. Ζητείται να υπολογιστεί το διάνυσμα ${}^A P$ γνωρίζοντας το διάνυσμα ${}^B P$.



Σχήμα 17: Γενικός μετασχηματισμός για ένα διάνυσμα (CRAIG, 2020).

Ο υπολογισμός της μεταφοράς για την περίπτωση του σχήματος 17, όπου έχουμε μεταφορά και περιστροφή μπορεί να πραγματοποιηθεί με την αναπαράσταση του διανύσματος ${}^B P$ ως προς ένα υποστηρικτικό ενδιάμεσο πλαίσιο που διαθέτει ίδιο προσανατολισμό με το πλαίσιο $\{A\}$ και έχει κοινή την αρχή των αξόνων με το πλαίσιο $\{B\}$. Συγκεκριμένα, για γίνει αυτό απαιτείται πολλαπλασιασμός του διανύσματος ${}^B P$ με ένα πίνακα περιστροφής ${}^A_B R$ και στη συνέχεια υπολογίζεται η μεταφορά του πλαισίου με μια διανυσματική πρόσθεση συνθέτοντας τελικά την ακόλουθη σχέση:

$${}^A P = {}^A_B R {}^B P + {}^A P_{BORG} \quad (1.13)$$

Η σχέση 1.13 χαρακτηρίζει την γενική περίπτωση του μετασχηματισμού ενός διανύσματος σε διαφορετικό πλαίσιο. Επιπρόσθετα, από την συγκεκριμένη σχέση προκύπτει πως τα διανύσματα που συμμετέχουν στην συγκεκριμένη πράξη εντάσσονται σε ένα όμοιο σύστημα συντεταγμένων, σε αυτή τη περίπτωση στο $\{A\}$ πλαίσιο και για αυτό υπάρχει η δυνατότητα πρόσθεσης τους.

Η μαθηματική σχέση 1.13 τροποποιείται σε πιο κατανοητή σχέση 1.14 την ακόλουθη:

$${}^A P = {}^A_B T {}^B P \quad (1.14)$$

Με αυτό το τρόπο μια απεικόνιση μεταξύ πλαισίων μπορεί να θεωρηθεί ως έναν τελεστή που εκφράζεται ως πίνακα. Επίσης, με την τροποποίηση της σχέσης 1.13 επιτυγχάνεται πιο συμπαγείς και πιο ευκρινή μαθηματική έκφραση σε αντίθεση με την σχέση 1.13 (CRAIG, 2020).

Για τον σχηματισμό της ισοδύναμης σχέσης 1.14 αξιοποιείται ένας τελεστής σε μορφή πίνακα, ο οποίος ορίζεται ως πίνακας 4x4 που δίνει το τελεστή και επιπρόσθετα ορισμένα διανύσματα θέσης που φέρουν διάσταση 4x1. Αναλυτικά η μαθηματική έκφραση δίνεται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} P_A \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A_B R & P_{BORG} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_B \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

Συγκεκριμένα, οι αλλαγές που πραγματοποιούνται είναι οι εξής :

- Ως τελευταίο στοιχείο των διανυσμάτων προστίθεται μονάδα.
- Στον πίνακα 4x4 προστίθεται ως τελευταία γραμμή, ο πίνακας $[0 \ 0 \ 0 \ 1]$.

Με τις παραπάνω υποθέσεις προκύπτει πως τα διανύσματα θέσης έχουν διαστάσεις 3x1 ή 4x1 και αντιστοίχως πολλαπλασιάζονται με πίνακες 3x3 ή 4x4 (CRAIG, 2020).

Από την προαναφερόμενη έκφραση αποδεικνύεται απλά :

$${}^A P = {}^A_B R {}^B P + {}^A P_{BORG}$$
$$1=1 \quad (1.16)$$

Ο πίνακας που αναφέρεται στην σχέση 1.15 ονομάζεται ομογενής μετασχηματισμός. Στην παρούσα περίπτωση ο συγκεκριμένος μετασχηματισμός ως δομή περιλαμβάνει την περιστροφή και την μεταφορά για ένα γενικό μετασχηματισμό στην απλή και συμπαγή μορφή για ορισμένο πίνακα. Επιπλέον, αυτός ο πίνακας σε άλλες εφαρμογές χρησιμοποιείται σε υπολογισμούς που σχετίζονται με προοπτική προβολή και κλιμάκωση. Επίσης, όταν η τελευταία γραμμή του πίνακα δεν έχει την μορφή $\ll[0 \ 0 \ 0 \ 1]\gg$ τότε ο πίνακας ομογενούς μετασχηματισμού δεν θεωρείται ορθοκανονικός πίνακας.

Η ομογενής σχέση μετασχηματισμού χρησιμοποιείται για διευκόλυνση πράξεων σε φυσική μορφή και αποφεύγεται σε εφαρμογές προγραμμάτων H/Y, καθώς αυξάνει το απαιτούμενο χρόνο ολοκλήρωσης του ζητούμενου υπολογισμού. Ο ρόλος των μετασχηματισμών σε ομογενή μορφή είναι ο προσδιορισμός πλαισίων. Επίσης, οι συγκεκριμένοι μετασχηματισμοί σε αυτή τη μορφή μπορούν να αξιοποιηθούν επιπρόσθετα για την περιγραφή πλαισίων, για παράδειγμα η απεικόνιση του $\{B\}$ πλαισίου σε σχέση με το $\{A\}$ έχοντας συμβολισμό ${}^A_B T$ (CRAIG, 2020).

1.4 Τελεστές: Μεταφορές, περιστροφές και μετασχηματισμοί

Τελεστές μεταφοράς

Ως μεταφορά χαρακτηρίζεται η μεταφορά ενός σημείου στον χώρο με την φορά και διεύθυνση ενός ορισμένου διανύσματος. Για την χωρική μετατόπιση χρησιμοποιείται μόνο ένα σύστημα συντεταγμένων και για αυτό η διαδικασία της μεταφοράς έχει παρόμοια λογική με την διαδικασία απεικόνισης ενός σημείου από ένα σύστημα συντεταγμένων σε ένα διαφορετικό. Το ζήτημα διάκρισης του είδους μαθηματικής τυποποίησης που εφαρμόζεται έχει ιδιαίτερη σημασία. Η ταξινόμηση αυτή διευκολύνεται σε περιπτώσεις που το διάνυσμα μετατοπίζεται προς τα <<εμπρός>> σχετικά με ένα σύστημα συντεταγμένων, λαμβάνοντας τις εξής εκδοχές :

- ✓ Το διάνυσμα μετατοπίζεται με φορά προς τα εμπρός, ή
- ✓ Το πλαίσιο μεταφέρεται προς τα πίσω.

Για τις δύο παραπάνω εκδοχές χρησιμοποιούνται παρόμοιες μαθηματικές εκφράσεις, καθώς παρακάτω αναλύονται δύο περιπτώσεις της ίδιας κατάστασης. Στο ακόλουθο σχήμα 18 φαίνεται ο τρόπος με το οποίο ένα διάνυσμα ${}^A P$ μετατοπίζεται κατά ${}^A Q$ που περιλαμβάνει την πληροφορία που χρειάζεται για να γίνει η συγκεκριμένη μεταφορά.

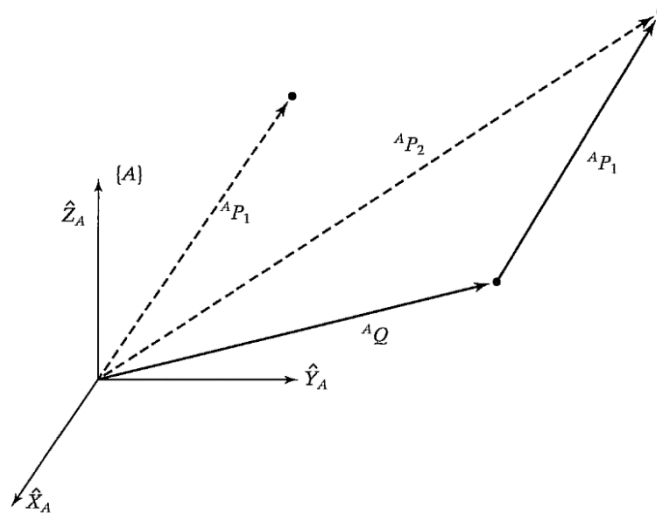
Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

Αφού πραγματοποιηθεί η διαδικασία της μεταφοράς προκύπτει ένα νέο άνυσμα ${}^A P_2$ που χαρακτηρίζεται από την ακολουθεί σχέση :

$${}^A P_2 = {}^A P_1 + {}^A Q \quad (1.17)$$

Η σχέση 1.17 σε μορφή τελεστή-πίνακα έχει την εξής έκφραση :

$${}^A P_2 = {}^A P_1 D_Q(q) \quad (1.18)$$



Σχήμα 18: Τελεστής μεταφοράς (CRAIG, 2020).

Με το q συμβολίζεται το προσημασμένο μέγεθος της μετατόπισης στην διεύθυνση Q . Θεωρητικά ο τελεστής D_Q μπορεί να θεωρηθεί ένα απλό ομογενή μετασχηματισμό ειδικής μορφής.

$$D_Q(q) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & q_x \\ 0 & 1 & 0 & q_y \\ 0 & 0 & 1 & q_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

Για τις συνιστώσες q_x , q_y , q_z του διανύσματος μεταφοράς Q , ικανοποιείται η σχέση $q = \sqrt{q_x^2 + q_y^2 + q_z^2}$. Οι σχέσεις (1.9) και (1.17) δίνουν το ίδιο μαθηματικό αποτέλεσμα. Αν στη σχέση 1.9 αντικατασταθεί το διάνυσμα ${}^A P_{BORG}$ με το ${}^B P_{BORG}$, τότε οι σχέσεις 1.9 και 1.17 θα πρόκυπταν με άλλο πρόσημο. Με την μεταβολή του πρόσημου φαίνεται η διαφορά μεταξύ των εκδοχών που προαναφέρθηκαν. Με την εφαρμογή του τελεστή D_Q περιγράφονται τα πλαίσια και οι απεικονίσεις.

Τελεστής περιστροφής

Μια επιπρόσθετη λειτουργία του πίνακα περιστροφής είναι ο τελεστής περιστροφής. Εφαρμόζεται στο υπολογισμένο διάνυσμα ${}^A P_1$ και προκαλεί την περιστροφή του κατά R , μεταβάλλοντας το σε ${}^A P_2$ που δίνεται από την σχέση (1.20).

$${}^A P_2 = R {}^A P_1 \quad (1.20)$$

Ο ρόλος του πίνακα περιστροφής είναι ίδιο στα πλαίσια και στα διανύσματα. Συγκεκριμένα, ένας πίνακας που περιστρέφει ένα διάνυσμα κατά R , το ίδιο περιγράφει και ένα πλαίσιο που επιδέχεται την περιστροφή R σε σχέση με ορισμένο πλαίσιο αναφοράς (CRAIG, 2020).

Είναι απλή η έκφραση ενός πίνακα περιστροφής ως τελεστή, όμως σε αυτή τη περίπτωση θα διατυπωθεί διαφορετικά ο τελεστής περιστροφής με στόχο την επίδειξη του άξονα ως προς το οποίο πραγματοποιείται η περιστροφή του αντικειμένου.

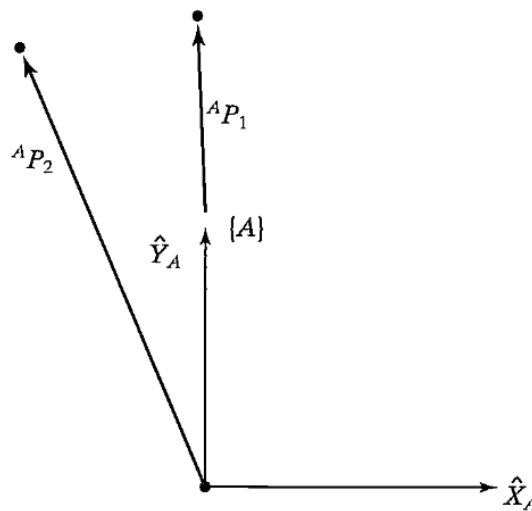
$${}^A P_2 = R_K(\theta) {}^A P_1 \quad (1.21)$$

Στην σχέση 1.21, το $R_K(\theta)$ αντιπροσωπεύει τον τελεστή περιστροφής, το οποίο ασκεί την περιστροφή γύρω από τον άξονα \hat{K} κατά θ μοίρες. Επίσης, υπάρχει δυνατότητα αναπαράστασης του τελεστή περιστροφής ως ομογενή μετασχηματισμό που περιλαμβάνει μηδενικό διάνυσμα θέσης.

Μέσω κατάλληλης διαμόρφωσης της σχέσης 1.10 προκύπτει ένας τελεστής που περιστρέφει κατά θ μοίρες το αντικείμενο ως προς έναν άξονα Z , όπως περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση.

$$R_k(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

Επειδή, ο πίνακας $R_K(\theta)$ προκύπτει από ομογενή μετασχηματισμό, μπορεί να θεωρηθεί πίνακας διαστάσεων 3×3 ή 4×4 .



Σχήμα 19: Περιστροφή του διανύσματος ${}^A P_1$ γύρω από τον Z κατά 30 μοίρες (CRAIG, 2020).

Τελεστές μετασχηματισμού

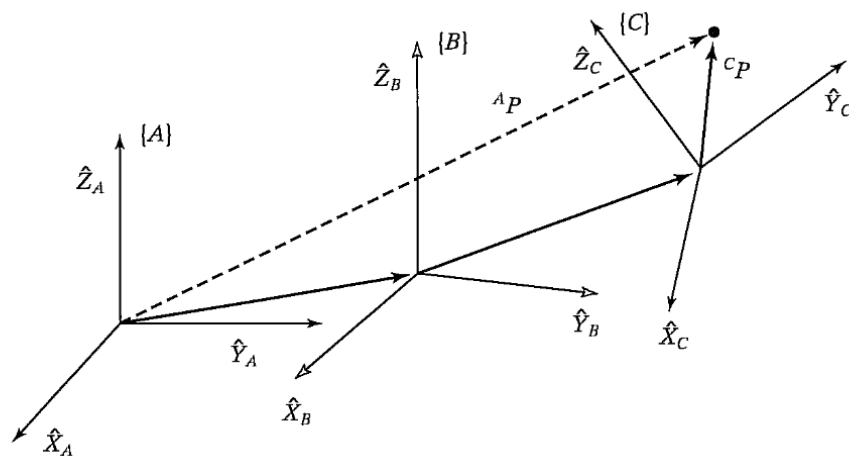
Τα πλαίσια έχουν δευτερεύων ερμηνεία που αφορά τον τελεστή μετασχηματισμό, όπως έχουν τα διανύσματα και οι πίνακες περιστροφής. Ο τελεστής T χαρακτηρίζει την ταυτόχρονη περιστροφή και μετάθεση ενός διανύσματος ${}^A P_1$, δημιουργώντας ένα νέο διάνυσμα.

$${}^A P_2 = T {}^A P_1 \quad (1.23)$$

Ο μετασχηματισμός για την περίπτωση περιστροφής R και μεταφοράς Q ενός πλαισίου, είναι όμοιο με ένα μετασχηματισμό περιστροφής κατά R και μεταφοράς κατά Q . Συνήθως, ένας μετασχηματισμός περιλαμβάνει ως ομογενής έναν υποπίνακα περιστροφής και ένα διάνυσμα θέσης (CRAIG, 2020).

- Ομογενής μετασχηματισμός : Ένας πίνακας 4x4 που περιλαμβάνει πληροφορίες για την θέση και τον προσανατολισμό.
- Ομογενής μετασχηματισμός ${}^A_B T$: Χρησιμοποιείται για την περιγραφή πλαισίων (πλαίσιο {B} σε αναφορά με το {A}). Οι στήλες του πίνακα ${}^A_B R$ είναι μοναδιαία διανύσματα των διευθύνσεων του κάθε άξονα του {B} και τα διανύσματα B_{BORG} που χαρακτηρίζουν την θέση της αρχής των αξόνων.
- Μετασχηματισμός απεικόνισης ${}^A_B T$: περιγράφει το διάνυσμα από πλαίσιο σε πλαίσιο (${}^A P$ σε ${}^B P$).
- Τελεστής μετασχηματισμού T: Εφαρμόζεται σε ένα διάνυσμα ${}^A P_1$ και δίνει ένα διαφορετικό ${}^A P_2$.

1.5 Αριθμητική μετασχηματισμοί



Σχήμα 20: Σύνθετα σύστημα συντεταγμένων που συσχετίζονται μεταξύ τους .

Σύνθετοι μετασχηματισμοί

Στο παραπάνω σχήμα 20 αποτελεί δεδομένο το διάνυσμα ${}^C P$ και ζητείται το διάνυσμα ${}^A P$. Το πλαίσιο {C} συσχετίζεται με το πλαίσιο {B}, ενώ το {B} είναι γνωστό ως προς το πλαίσιο {A}. Από την παρακάτω μαθηματική σχέση υπάρχει η δυνατότητα μετασχηματισμού του διανύσματος ${}^C P$ στο ${}^B P$, όπως ακολουθεί :

$${}^B P = {}^B_C T {}^C P \quad (1.24)$$

Αντίστοιχα γίνεται για τα διανύσματα ${}^B P$ στο ${}^A P$:

$${}^A P = {}^A_B T {}^B P \quad (1.25)$$

Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις προκύπτει η ακόλουθη σχέση :

$${}^A P = {}^A_B T {}^B_C T {}^C P \quad (1.26)$$

Μέσω παράξενων προκύπτει :

$${}^A_C T = {}^A_B T {}^B_C T \quad (1.27)$$

Με δεδομένο την αναπαράσταση του πλαισίου {B} και {C}, προκύπτει για τον μετασχηματισμό ${}^A_C T$:

$${}^A_C T = \begin{bmatrix} {}^A_B R & {}^B_C R & & \\ & & & \\ & & & \\ 0 & & & 1 \end{bmatrix} \quad (1.28)$$

Αντίστροφη μετασχηματισμοί

Υποθετικά έχουμε ένα πλαίσιο {B} δεδομένο σε σχέση με ένα διαφορετικό πλαίσιο {A}, δηλαδή είναι γνωστός ο μετασχηματισμός ${}^A_B T$. Σε ορισμένες περιπτώσεις ζητείται η περιγραφή του πλαισίου {A} ως προς το {B}, το οποίο συνεπάγεται σε υπολογισμό του μετασχηματισμού απεικόνισης ${}^B_A T$. Για να βρεθεί απευθείας ο πίνακας ${}^B_A T$ χρειάζεται η αντιστροφή του πίνακα 4x4. Όμως, έτσι δεν αξιοποιούνται οι εγγενείς ιδιότητες του ομογενούς μετασχηματισμού και για αυτό προτιμάται μια εναλλακτική μέθοδος που βασίζεται στη δομή του πίνακα.

Για να βρεθεί ο ${}^B_A T$, υπολογίζεται αρχικά ο πίνακας ${}^B_A R$ και το διάνυσμα ${}^B P_{AORG}$ μέσω των δεδομένων ${}^A_B R$ και ${}^A P_{BORG}$. Καθώς, χρησιμοποιείται η ιδιότητα των πινάκων περιστροφής :

$${}^B_A R = {}^A_B R^T \quad (1.29)$$

Ακολουθεί η περιγραφή του ${}^A P_{BORG}$ σε σχέση με το πλαίσιο {B}, με την υποστήριξη της σχέσης 1.12 προκύπτει :

$${}^B ({}^A P_{BORG}) = {}^B_A R {}^A P_{BORG} + {}^B P_{AORG} \quad (1.30)$$

Το αριστερό μέρος της ισότητας (1.30) θα πρέπει να ισούται με μηδέν.

$${}^B P_{AORG} = -{}^B_A R {}^A P_{BORG} = -{}^A_B R^T {}^A P_{BORG} \quad (1.31)$$

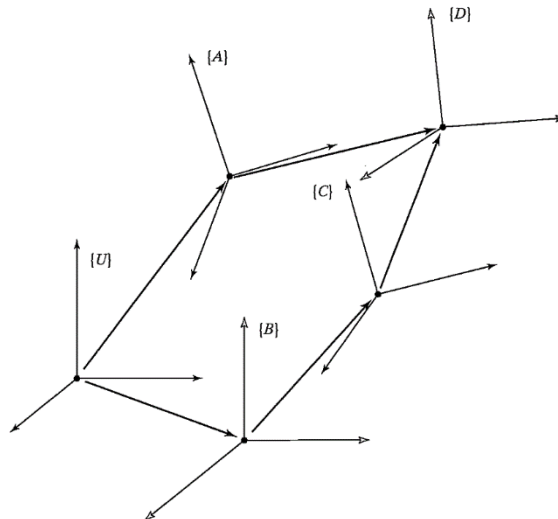
Συνδυάζοντας τις σχέσεις (1.29) και (1.31), μπορεί πίνακας ${}^B_A T$ να πάρει την παρακάτω έκφραση που είναι σημαντική για την αντιστροφή ενός ομογενούς μετασχηματισμού.

$${}^B_A T = \begin{bmatrix} {}^A_B R^T & & -{}^A_B R^T {}^A P_{BORG} & \\ & & & \\ & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.32)$$

Από τις προαναφερόμενες υποθέσεις έχουμε:

$${}^B_A T = {}^A_B T^{-1}$$

1.6 Εξισώσεις μετασχηματισμών



Σχήμα 21: Κλειστός βρόχος μετασχηματισμών (CRAIG, 2020).

Στο σχήμα 21 απεικονίζεται ένα πλαίσιο {D} που εκφράζεται ως γινόμενο μετασχηματισμών με δύο τρόπους.

Σε πρωταρχικό στάδιο ισχύει:

$${}^U_D T = {}^U_A T {}^A_D T \quad (1.33)$$

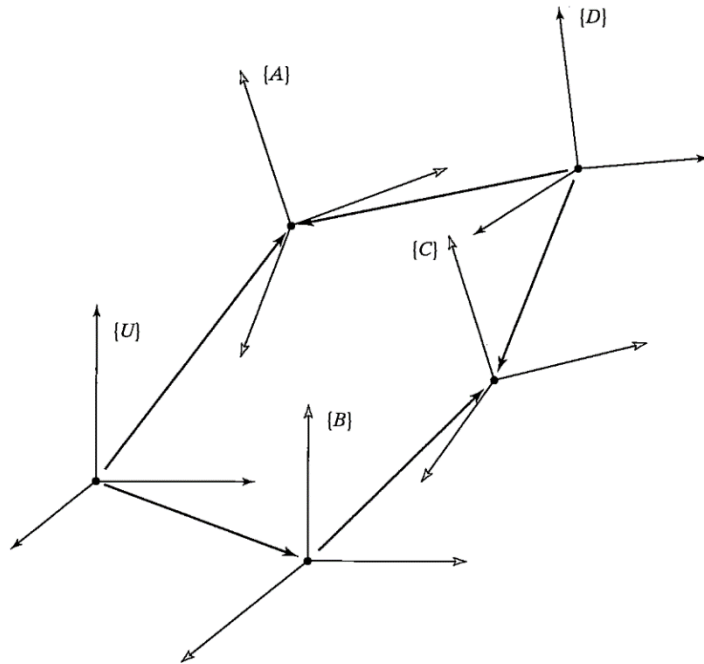
Στη συνέχεια :

$${}^U_D T = {}^U_B T {}^B_C T {}^C_D T \quad (1.34)$$

Λόγω ομοιότητας πρώτων μελών των σχέσεων (1.33) και (1.34), προκύπτει η ακόλουθη ισότητα που ονομάζεται εξίσωση μετασχηματισμών :

$${}^U_A T {}^A_D T = {}^U_B T {}^B_C T {}^C_D T \quad (1.35)$$

Στο σχήμα 22 παρουσιάζεται περίπτωση επίλυσης συστημάτων που εμπεριέχουν μετασχηματισμούς ως ζητούμενες ποσότητες. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα υποθετικά όλοι οι μετασχηματισμοί είναι γνωστοί πλην του ${}^B_C T$.



Σχήμα 22: Παράδειγμα εξίσωσης μετασχηματισμών (Γιθανές απεικονίσεις του πλαισίου {C} οι σχέσεις 1.37 και 1.38) (CRAIG, 2020).

Επιλύοντας την εξίσωση (1.35) ως προς το άγνωστο ${}^B_C T$, συνεπάγεται :

$${}^B_C T = {}^U_B T^{-1} {}^U_A T {}^A_D T {}^D_C T^{-1} \quad (1.36)$$

Στην σχηματική απεικόνιση η κατεύθυνση του βέλους δηλώνει τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται τα συστήματα συντεταγμένων. Στο παράδειγμα του σχήματος 22, το πλαίσιο {A} είναι ορισμένο σε σχέση με το {D}. Για να προσδιοριστούν πλαίσια τα οποία ενώνονται διαδοχικά με την βοήθεια βελών, υπολογίζονται ως γινόμενο μετασχηματισμών. Σε περιπτώσεις που το βέλος διαθέτει αντίθετη κατεύθυνση σε σύγκριση με τα υπόλοιπα βέλη που απαρτίζουν την αλυσίδα των μετασχηματισμών, τότε υπολογίζεται το αντίστροφο του ζητούμενου μετασχηματισμού και στη συνέχεια γίνεται ο πολλαπλασιασμός του.

Το πλαίσιο {C} περιγράφεται με δύο τρόπους :

$${}^U_C T = {}^U_A T {}^A_D T^{-1} {}^D_C T \quad (1.37)$$

Και

$${}^U_C T = {}^U_B T {}^B_C T \quad (1.38)$$

Εξισώνοντας τις δύο εξισώσεις προκύπτει :

$${}^U_A T = {}^U_B T {}^B_C T {}^D_C T^{-1} {}^D_A T \quad (1.39)$$

1.7 Αναπαράσταση προσανατολισμού

Σύμφωνα με την γραμμική άλγεβρα, συγκεκριμένα ο τύπος του Cayley που αναφέρετε στους ορθοκανονικούς πίνακες προκύπτει ότι για κάθε ομαλό πίνακα R υπάρχει ένας αντισυμμετρικός πίνακας S που ικανοποιεί την ακόλουθη εξίσωση:

$$R = (I_3 - S)^{-1}(I_3 + S) \quad (1.40)$$

Με το I_3 εκφράζεται ένας μοναδιαίος πίνακας 3×3 . Ως τρισδιάστατος αντισυμμετρικός πίνακας αποτελείται από τρεις παραμέτρους (S_x, S_y, S_z) (CRAIG, 2020).

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -S_z & S_y \\ S_z & 0 & -S_x \\ -S_y & S_x & 0 \end{bmatrix} \quad (1.41)$$

Βάση της σχέσης 1.41 συμπεραίνεται πως κάθε πίνακας περιστροφής μπορεί να προσδιοριστεί μέσω τριών μόνο παραμέτρων (CRAIG, 2020).

Ως ομαλός χαρακτηρίζεται ένας πίνακας του οποίου η ορίζουσα ισούται με +1. Σε αντίθεση, οι μη ομαλοί πίνακες είναι ορθοκανονικοί πίνακες με ορίζουσα ίση με -1. Κάθε πίνακας περιστροφής περιέχει έξι αλληλεξαρτήσεις σχετικά με τα στοιχεία του. Έτσι ο πίνακας της σχέσης 1.41 μπορεί να παρασταθεί ως τρεις στήλες .

$$R = [\hat{X} \quad \hat{Y} \quad \hat{Z}] \quad (1.42)$$

Τα συγκεκριμένα διανύσματα σχηματίζουν το ορθοκανονικό σύστημα συντεταγμένων του πλαισίου αναφοράς. Επιπλέον, είναι μοναδιαία και κάθετα το ένα προς το άλλο. Επομένως, τα εννέα στοιχεία του πίνακα παρουσιάζουν έξι περιορισμούς.

$$|\hat{X}| = 1$$

$$|\hat{Y}| = 1$$

$$|\hat{Z}| = 1$$

$$\hat{X} * \hat{Y} = 0$$

$$\hat{X} * \hat{Z} = 0$$

$$\hat{Y} * \hat{Z} = 0$$

$$(1.43)$$

Η λειτουργία ενός πίνακα περιστροφής σε ορισμένες περιπτώσεις να αποτελεί το ρόλο ενός τελεστή και σε διαφορετικές περιπτώσεις να είναι ο προσδιορισμός του προσανατολισμού. Έτσι, κάθε περίπτωση διαθέτει διαφορετική απεικόνιση. Συνήθως, οι πίνακες περιστροφής λειτουργούν ως τελεστές. Επιπλέον, δομούνται με τέτοιο τρόπο ώστε κατά τον πολλαπλασιασμό τους με ορισμένο διάνυσμα οδηγούν σε πράξη περιστροφή. Αντίθετα, η αξιοποίηση τους για προσδιορισμό του προσανατολισμού δεν αποτελεί αποτελεσματική λειτουργία. Η συμπλήρωση των δεδομένων του προσανατολισμού με το συμβατικό τρόπο θεωρείται επίπονη, καθώς απαιτεί την συμπλήρωση ενός

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα ολόκληρου πίνακα που φέρει εννέα στοιχεία. Συνεπώς, προτιμάται μια απλούστερη αναπαράσταση που χρειάζεται λιγότερα δεδομένα (CRAIG, 2020).

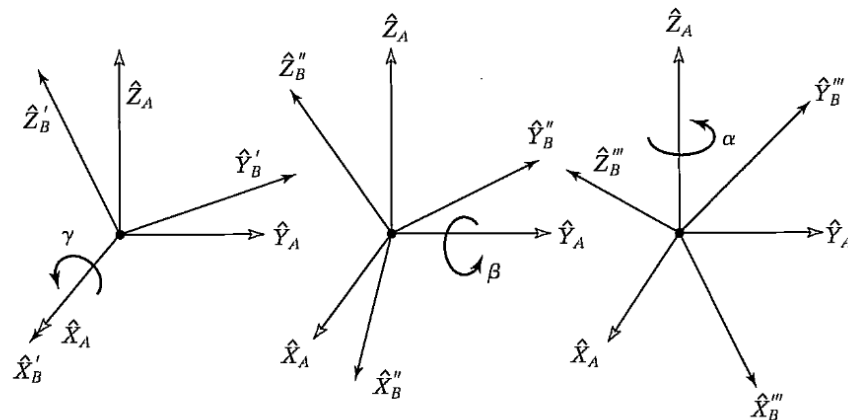
Γωνίες για τους σταθερούς άξονες X-Y-Z

Για παράδειγμα χρησιμοποιείται η απεικόνιση του πλαισίου {B}:

Υποθετικά ένα πλαίσιο {B} σε αρχική κατάσταση ταυτίζεται με το πλαίσιο {A}, έχοντας ίδιες συντεταγμένες. Στη συνέχεια το πλαίσιο {B} περιστρέφεται πρώτα σε σχέση με τον άξονα \hat{X}_A κατά μια γωνία γ , έπειτα ως προς τον άξονα \hat{Y}_A κατά γωνία β και τέλος περιστρέφεται ως προς τον \hat{Z}_A κατά γωνία α (CRAIG, 2020).

Η προαναφερόμενες περιστροφές πραγματοποιούνται σε σχέση με ένα από τους σταθερούς άξονες του πλαισίου αναφοράς {A}. Ο συγκεκριμένος κανόνας προσδιορισμού του προσανατολισμού ονομάζεται κανόνας γωνιών περιστροφής ως προς σταθερούς άξονες X-Y-Z. Σε ορισμένες περιπτώσεις αυτή η σύμβαση καλείται σύμβαση γωνιών παρακυλίσματος, πρόνευσης και ανάπαλσης (roll, pitch, yaw).

$$\begin{aligned}
 {}^A R_{XYZ}(\gamma, \beta, \alpha) &= R_Z(\alpha)R_Y(\beta)R_X(\gamma) \\
 &= \\
 & \begin{bmatrix} ca & -sa & 0 \\ sa & ca & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{bmatrix} \quad (1.44)
 \end{aligned}$$



Σχήμα 23: Γωνίες περιστροφής ως προς τους σταθερούς άξονες X-Y-Z. Υπάρχει μια σειρά περιστροφής $R_X(\gamma) R_Y(\beta) R_Z(\alpha)$ (CRAIG, 2020).

Με τον συμβολισμό ca αποτυπώνεται η συντομογραφία του $\cos\alpha$, όπως αντίστοιχα το sa για την συντομογραφία του $\sin\alpha$. Εκτελώντας τους πολλαπλασιασμούς της σχέσης 1.44 προκύπτει το ακόλουθο αποτέλεσμα (CRAIG, 2020).

$${}^A_B R_{XYZ}(\gamma, \beta, \alpha) = \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix} \quad (1.45)$$

Με τον συγκεκριμένο ορισμό καθορίζεται η σειρά με την οποία θα πραγματοποιηθούν οι περιστροφές. Επίσης, η σωστή σειρά περιστροφών θεωρείται η εξής: Αρχικά κατά γ ως προς το \widehat{X}_A , στη συνέχεια κατά β ως προς το \widehat{Y}_A και τελικά κατά α ως προς το \widehat{Z}_A (CRAIG, 2020).

Αν ο πίνακας από την σχέση 1.45 εξισωθεί με ένα πίνακα περιστροφής, τότε προκύπτει ένα σύστημα εννέα εξισώσεων που φέρουν τρεις αγνώστους. Γραμμικά εξαρτημένες είναι οι έξι εξισώσεις από τις εννέα συνολικά. Συνεπώς, δημιουργείτε το ζήτημα επίλυσης ενός συστήματος τριών εξισώσεων με τρεις αγνώστους (CRAIG, 2020).

$${}^A_B R_{XYZ}(\gamma, \beta, \alpha) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (1.46)$$

Υπολογίζοντας την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των r_{11} και r_{21} προκύπτει το $\cos\beta$. Ακολούθως, για την εύρεση της γωνίας β χρησιμοποιείται η συνάρτηση τόξου εφαπτομένης στη σχέση $-r_{31}/c\beta$, καθώς ισχύει $c\beta \neq 0$. Για τον υπολογισμό του α αξιοποιείται το τόξο εφαπτομένης του πηλίκου $r_{21}/c\beta$ μέσω $r_{11}/c\beta$. Και τέλος η γωνία γ προσδιορίζεται από το τόξο εφαπτομένης του πηλίκου των $r_{31}/c\beta$ και $r_{33}/c\beta$.

$$\beta = \text{Atan}^2(-r_{31}, \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2})$$

$$\alpha = \text{Atan}^2\left(\frac{r_{21}}{c\beta}, \frac{r_{11}}{c\beta}\right) \quad (1.47)$$

$$\gamma = \text{Atan}^2\left(\frac{r_{32}}{c\beta}, \frac{r_{33}}{c\beta}\right)$$

Η συνάρτηση τόξου εφαπτομένης (Atan^2), χρησιμοποιεί για δεδομένα τα δύο ορίσματα x και y . Το αποτέλεσμα της σχέσης για την γωνία β , είναι μια μοναδική λύση που ικανοποιεί τον εξής περιορισμό $-90^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$. Η συγκεκριμένη συνθήκη διευκολύνει τον ορισμό αμφιμονοσήμαντες απεικονίσεις για διάφορες αναπαραστάσεις προσανατολισμού, ωστόσο σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται η εύρεση όλων των λύσεων (CRAIG, 2020).

Σε περίπτωση που το β προκύψει $+$ ή -90° , που συνεπάγεται σε $c\beta=0$, τότε η λύση 1.48 που φαίνεται παρακάτω εκφυλίζεται. Έτσι, σε τέτοιες περιπτώσεις είναι δυνατόν να υπολογιστεί μόνο το άθροισμα ή διαφορά των μεγεθών α και γ . Μια καλή πρακτική συνήθως είναι η επιλογή του να είναι $\alpha = 0$ μοίρες, για την διευκόλυνση τέτοιων περιπτώσεων. Ακολούθως δίνονται τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης επιλογής (CRAIG, 2020).

Αν $\beta = 90^\circ$, τότε προκύπτει

$$\beta=90^\circ$$

$$\alpha=0^\circ$$

$$\gamma = \text{Atan}2(r_{12}, r_{22}) \quad (1.48)$$

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα
 Αν τώρα $\beta = -90^\circ$, προκύπτει η εξής λύση:

$$\beta = 90^\circ$$

$$\alpha = 0^\circ$$

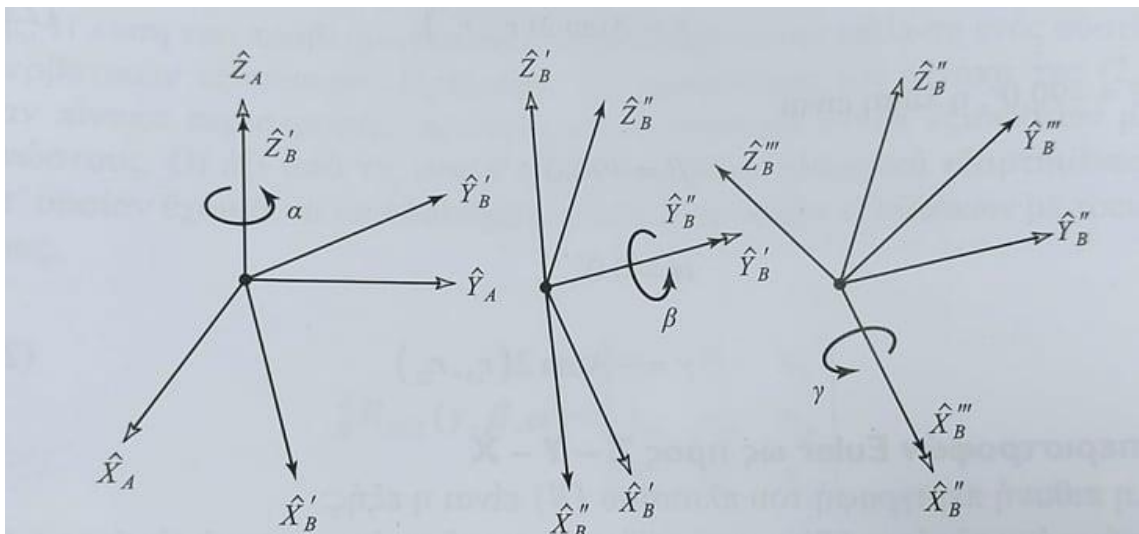
$$\gamma = -\text{Atan2}(r_{12}, r_{22}) \quad (1.49)$$

Γωνίες περιστροφής Euler για Z-Y-X :

Ένας Επιπρόσθετος τρόπος απεικόνισης του {B} πλαισίου είναι ο εξής:

Υποθετικά αναλύεται ένα πλαίσιο {B} το οποίο ταυτίζεται με ένα δεδομένο πλαίσιο {A}. Αρχικά ,επιδέχεται περιστροφή α ως προς τον άξονα \hat{Z}_B και στη συνέχεια κατά γωνία β ως προς το \hat{Y}_B , τέλος περιστρέφεται κατά γ σε σχέση με τον \hat{X}_B άξονα.

Οι συγκεκριμένες πολλαπλές περιστροφές πραγματοποιούνται κάθε φορά σε σχέση με ένα από τους άξονες του κινούμενου πλαισίου {B} και όχι ως προς τους άξονες του σταθερού πλαισίου {A}. Το σύνολο των περιστροφών που γίνονται κατά την συγκεκριμένη διαδικασία καλούνται γωνίες περιστροφής Euler. Κάθε περιστροφή γίνεται σε σχέση με έναν άξονα που έχει θέση που καθορίζεται από τις προηγούμενες περιστροφές. Οι γωνίες περιστροφής Euler Z-Y-X ονομάζονται έτσι, λόγω των τριών περιστροφών που γίνονται σε σχέση με τους άξονες \hat{X} , \hat{Y} και \hat{Z} (CRAIG, 2020).



Σχήμα 24: Γωνίες περιστροφής Euler ως προς Z-Y-X (CRAIG, 2020).

Στο σχήμα 24 απεικονίζεται η εφαρμογή του κανόνα γωνιών περιστροφής Euler Z-Y-X, για το πλαίσιο {B} που περιστρέφεται σε τρία στάδια. Λόγω της περιστροφής α σε σχέση με τον \hat{Z} άξονα μετατοπίζεται ο άξονας \hat{X} δημιουργώντας ένα νέο άξονα \hat{X}' , αντίστοιχα ο άξονας \hat{Y} σε \hat{Y}' . Ο πίνακας περιστροφής που συγκρατείται από τις γωνίες περιστροφής Euler σε σχέση με τους άξονες Z-Y-X, διαθέτει τον συμβολισμό ${}^A_B R_{XYZ}(\alpha, \beta, \gamma)$. Στο σχήμα 24 ο προσδιορισμός του ${}^A_B R_{XYZ}(\alpha, \beta, \gamma)$ μπορεί να πραγματοποιηθεί με την υποστήριξη των ενδιάμεσων πλαισίων {B'} και {B''}. Με την θεώρηση πως οι περιστροφές αντιστοιχούν σε απεικονίσεις των συγκεκριμένων πλαισίων, μπορεί να προκύψει η ακόλουθη σχέση:

$${}^A_B R = {}^A_{B'} R {}^{B'}_{B''} R {}^{B''}_B R \quad (1.50)$$

Το δεύτερο μέλος της ισότητας της σχέσης 1.50 ακολουθεί την σύμβαση των γωνιών Euler. Συγκεκριμένα, ο τελικός προσανατολισμός του {B} σε σχέση με το πλαίσιο {A} προσδιορίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} {}^A_B R_{X'Y'Z'} &= R_Z(a)R_Y(b)R_X(\gamma) \\ &= \begin{bmatrix} ca & -sa & 0 \\ sa & ca & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\gamma & -s\gamma \\ 0 & s\gamma & c\gamma \end{bmatrix} \quad (1.51) \end{aligned}$$

Μετά από την εκτέλεση των πράξεων προκύπτει:

$${}^A_B R_{X'Y'Z'}(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} cac\beta & cas\beta s\gamma - sac\gamma & cas\beta c\gamma + sas\gamma \\ sac\beta & sas\beta s\gamma + cac\gamma & sas\beta c\gamma - cas\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix} \quad (1.52)$$

Από το παραπάνω αποτέλεσμα παρατηρείται πως είναι όμοιο με το αντίστοιχο πίνακα της περιστροφής με την διαφορά στην σειρά εκτέλεσης σε σχέση με τους σταθερούς άξονες. Επειδή, υπάρχει ισοδυναμία μεταξύ των σχέσεων (1.52) και (1.45) δεν χρειάζεται ο υπολογισμός εκ νέου των γωνιών περιστροφής Euler Z-Y-X, μέσω του πίνακα περιστροφής. Δηλαδή η σχέση (1.47) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτή τη περίπτωση χωρίς καμία τροποποίηση (CRAIG, 2020).

Γωνίες περιστροφών Euler ως προς Z-Y-Z

Άλλη διαφορετική έκφραση του πλαισίου {B} είναι η ακόλουθη:

Υποθετικά έχουμε ένα πλαίσιο {B} που είναι όμοιο αρχικά με τον πλαίσιο {A}. Πρώτα επιδέχεται μια περιστροφή γωνίας α σε σχέση με τον άξονα \widehat{Z}_B και στη συνέχεια κατά γωνία β ως προς το \widehat{Y}_B και τέλος μια περιστροφή γ σε σχέση με τον άξονα \widehat{Z}_B .

Οι εκτελούμενες περιστροφές εκφράζονται σε σχέση με το κινούμενο πλαίσιο {B} και στην συγκεκριμένη περίπτωση οι γωνίες χαρακτηρίζονται ως γωνίες Euler και καλούνται απεικόνιση γωνιών Euler ως προς Z-Y-Z. Βάση των αναλύσεων που έχουν προαναφερθεί προκύπτει ένας ισοδύναμος πίνακας περιστροφής (CRAIG, 2020).

$${}^A_B R_{X'Y'Z'}(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} cac\beta c\gamma - sas\gamma & -cac\beta s\gamma - sac\gamma & cas\beta \\ sac\beta c\gamma + cas\gamma & -sas\beta s\gamma + cac\gamma & sas\beta \\ -s\beta c\gamma & s\beta s\gamma & c\beta \end{bmatrix} \quad (1.53)$$

Παρακάτω φαίνεται ο τρόπος υπολογισμού των γωνιών Euler με δεδομένο τον πίνακα περιστροφής.

$${}^A_B R_{X'Y'Z'}(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (1.54)$$

Αν $\sin \beta \neq 0$ τότε ισχύει :

$$\beta = \text{Atan2}(\sqrt{r_{31}^2 + r_{32}^2}, r_{33})$$

$$\alpha = \text{Atan2}(r_{23}/s\beta, r_{13}/s\beta)$$

$$\gamma = \text{Atan2}(r_{32}/s\beta, -r_{31}/s\beta) \quad (1.55)$$

Η μοναδική λύση ικανοποιεί την συνθήκη ικανοποιεί την συνθήκη $0 \leq \beta \leq 180^\circ$ για τον τύπο που περιλαμβάνει την θετική τετραγωνική ρίζα της γωνίας β . Σε περίπτωση που το $\beta=0$ ή $\beta=180^\circ$ τότε η λύση 1.55 εκφυλίζεται. Έτσι, μόνο η διαφορά ή το άθροισμα των α και γ μπορεί να υπολογιστεί. Για την διευκόλυνση περιπτώσεων όπως αυτές χρησιμοποιείται η επιλογή $\alpha=0$. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης επιλογής (CRAIG, 2020).

Αν $\beta=0$ τότε:

$$\beta=0$$

$$\alpha=0$$

$$\gamma = \text{Atan2}(-r_{12}, r_{11}) \quad (1.56)$$

Αν $\beta=180^\circ$, η λύση που προκύπτει είναι η εξής:

$$\beta=180^\circ$$

$$\alpha=0$$

$$\gamma = \text{Atan2}(r_{12}, -r_{11}) \quad (1.57)$$

Παράμετροι Euler

Άλλος επιπρόσθετος τρόπος απεικόνισης του προσανατολισμού πραγματοποιείται με την βοήθεια τεσσάρων αριθμών, που καλούνται παράμετροι Euler (CRAIG, 2020).

Έστω υποθετικά ένα δεδομένο διάνυσμα $\hat{K} = [k_1 \ k_2 \ k_3]^T$ που περιγράφει τον άξονα περιστροφής. Έχοντας την γωνία θ , τότε οι παράμετροι Euler χαρακτηρίζονται από τις ακόλουθες σχέσεις :

$$\epsilon_1 = k_x \sin \frac{\theta}{2}$$

$$\epsilon_2 = k_y \sin \frac{\theta}{2} \quad (1.58)$$

$$\epsilon_3 = k_z \sin \frac{\theta}{2} \quad \text{και}$$

$$\epsilon_4 = \cos \frac{\theta}{2}$$

Οι τέσσερις παράμετροι δεν είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους και χαρακτηρίζεται από την ακόλουθη σχέση.

$$\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2 + \epsilon_4^2 = 1 \quad (1.59)$$

Επειδή η σχέση 1.59 ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις, ο προσανατολισμός μπορεί να απεικονιστεί ως σημείο μιας υπερσφαίρας του τετραδιάστατου χώρου. Συχνά, για την αναπαράσταση των παραμέτρων του Euler αρκούν ένα διάνυσμα και ένας αριθμός. Ένα διάνυσμα 4×1 , με παράμετροι Euler είναι γνωστές ως μοναδιαία κουατέρνια.

Στην σχέση που φαίνεται παρακάτω δίνεται ο πίνακας περιστροφής που ισοδυναμεί με τις παραμέτρους Euler.

$$R_{\epsilon} = \begin{bmatrix} 1 - 2\epsilon_2^2 - 2\epsilon_3^2 & 2(\epsilon_1\epsilon_2 - \epsilon_3\epsilon_4) & 2(\epsilon_1\epsilon_3 - \epsilon_2\epsilon_4) \\ 2(\epsilon_1\epsilon_2 - \epsilon_3\epsilon_4) & 1 - 2\epsilon_1^2 - 2\epsilon_3^2 & 2(\epsilon_2\epsilon_3 - \epsilon_1\epsilon_4) \\ 2(\epsilon_1\epsilon_3 - \epsilon_2\epsilon_4) & 2(\epsilon_2\epsilon_3 - \epsilon_1\epsilon_4) & 1 - 2\epsilon_1^2 - 2\epsilon_2^2 \end{bmatrix} \quad (1.60)$$

Σε περίπτωση που είναι δεδομένος ο πίνακας περιστροφής, δηλαδή το αντίστροφο τότε οι παράμετροι Euler, δίνονται ως εξής:

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{r_{32} - r_{23}}{4\epsilon_4} \\ \epsilon_2 &= \frac{r_{13} - r_{31}}{4\epsilon_4} \\ \epsilon_3 &= \frac{r_{21} - r_{12}}{4\epsilon_4} \\ \epsilon_4 &= \frac{1}{2} \sqrt{1 + r_{11} + r_{22} + r_{33}} \end{aligned} \quad (1.61)$$

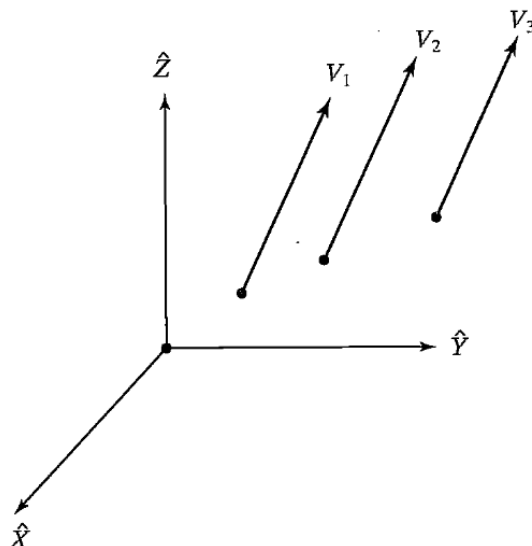
Η σχέση (1.61) δεν είναι αποτελεσματική στην περίπτωση που ο πίνακας περιστροφής αναπαριστά περιστροφή 180° ως προς ορισμένο άξονα, διότι η παράμετρο ϵ_4 παίρνει την τιμή μηδέν. Επιπλέον, αποδεικνύεται πως όλοι οι παράμετροι ϵ_i έχουν εύρος τιμών $[-1,1]$ (CRAIG, 2020).

Διδασκόμενοι και προκαθορισμένοι προσανατολισμοί

Σε αρκετά ρομποτικά συστήματα υποστηρίζεται η δυνατότητα να εκπαιδευτούν και να μάθουν προκαθορισμένες θέσεις και προσανατολισμούς. Αυτό πραγματοποιείται με την μετακίνηση του βραχίονα στην ζητούμενη θέση που αποθηκεύεται. Δεν αποτελεί προϋπόθεση η επιστροφή του ρομπότ στις καθαρισμένες θέσεις. Επίσης, οι συγκεκριμένες τοποθεσίες μπορεί να χαρακτηρίζουν θέσεις τεμαχίων και εξαρτημάτων. Με την εκπαίδευση του ρομπότ στους διαφορετικούς προσανατολισμούς, ο προγραμματισμός δεν επηρεάζεται κατά μεγάλο βαθμό από τα προβλήματα της αναπαράστασης του προσανατολισμού. Καθώς, τα σημεία που συλλογίζονται κατά την εκπαίδευση του ρομπότ αποθηκεύονται σε μορφή πινάκων περιστροφής (CRAIG, 2020).

1.8 Μετασηματισμοί ελεύθερων διανυσμάτων

Δύο διανύσματα καλούνται ίσα όταν έχουν ίσες διαστάσεις, ίσα μέτρα και ίδια φορά. Επιπλέον, δύο διανύσματα που είναι ίσα μεταξύ τους έχουν την δυνατότητα να ενεργούν σε διαφορετικές θέσεις και στο ακόλουθο σχήμα 25 απεικονίζεται μια παρόμοια περίπτωση με διανύσματα ταχύτητας, τα οποία είναι ίσα σύμφωνα με τον προαναφερόμενο ορισμό (CRAIG, 2020).



Σχήμα 25: Ίσα διανύσματα ταχυτήτων (CRAIG, 2020).

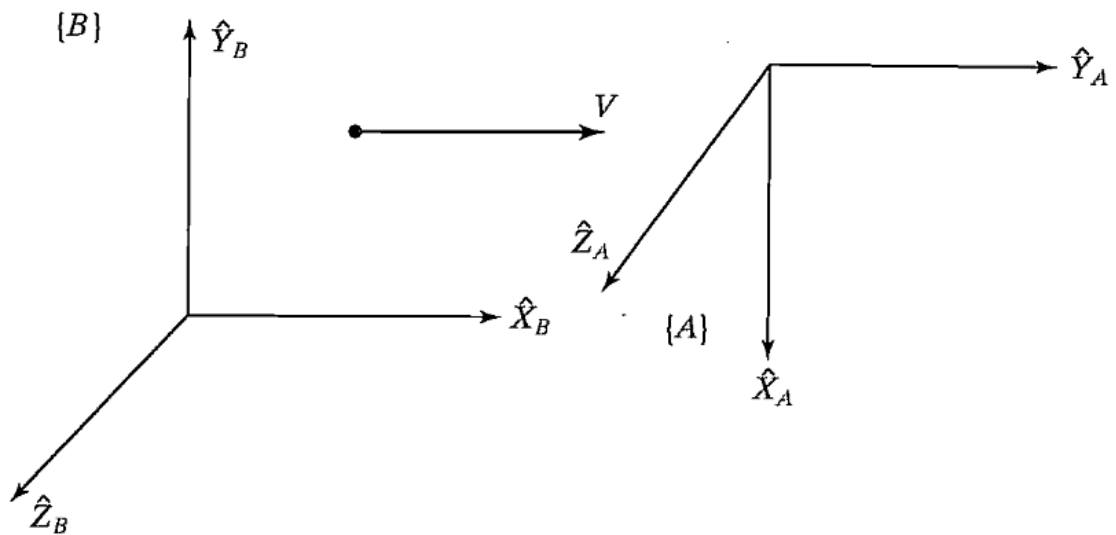
Ο όρος της ισοδυναμίας απαιτεί την αναφορά σε ένα ορισμένο περιβάλλον που θεωρείται κοινό και για τα εξεταζόμενα διανύσματα και ένα κριτήριο ισοδυναμίας. Δύο διανύσματα λέγονται ισοδύναμα για κάποια ιδιότητα όταν δημιουργούν τα ίδια αποτελέσματα σε σχέση με την συγκεκριμένη ιδιότητα (CRAIG, 2020).

Ως ολισθαίνον διάνυσμα χαρακτηρίζεται ένα διάνυσμα που εξαρτάται άμεσα από την ευθεία πάνω στην οποία κείται. Η συγκεκριμένη ευθεία περιλαμβάνοντάς την φορά και το μέτρο εκφράζουν τον φορέα δράσης του. Για παράδειγμα το αποτέλεσμα μιας δύναμης εξαρτάται από τον φορέα δράσης της και για αυτό η δύναμη μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα ολισθαίνον διάνυσμα (CRAIG, 2020).

Για την περιγραφή ενός ελεύθερου διανύσματος χρειάζεται μόνο το μέτρο και η φορά. Συνεπώς, για τον μετασχηματισμό του αρκεί ο πίνακας περιστροφής που ενώνει τα δύο πλαίσια. Επιπλέον, η σχετική θέση των κέντρων των πλαισίων δεν παίρνει μέρος στους υπολογισμούς (CRAIG, 2020).

Επειδή, η ταχύτητα ενός σημείου αποτελεί ένα ελεύθερο διάνυσμα, μόνο η φορά και το μέτρο έχουν ιδιαίτερη σημασία. Ένα διάνυσμα ταχύτητας ${}^B V$, το οποίο είναι δεδομένο σε σχέση με ένα πλαίσιο $\{B\}$ και εκφράζονται οι συντεταγμένες του ως προς το πλαίσιο $\{A\}$, εκφράζεται μέσω της ακόλουθης εξίσωσης (CRAIG, 2020).

$${}^A V = {}^A_R {}^B V \quad (1.62)$$



Σχήμα 26: Μετασχηματισμός διανυσμάτων ταχύτητας (CRAIG, 2020).

Βάση της σχέσης (1.62), η λειτουργία της περιστροφής δεν έχει επίδραση στο μέτρο του διανύσματος, ωστόσο προσδιορίζει τον μετασχηματισμό που μεταβάλλει την περιγραφή του διανύσματος, χαρακτηρίζοντας το σε σχέση με το πλαίσιο {A}. Επίσης, το διάνυσμα μετασχηματισμού APBORG δεν παίρνει μέρος στον μετασχηματισμό των ταχυτήτων (CRAIG, 2020).

Κεφάλαιο 2: Κινηματική ρομποτικών βραχιόνων

2.1 Εισαγωγή

Για να γίνει ο χειρισμός αντικειμένων από έναν ρομποτικό βραχίονα απαιτείται να μετακινηθεί κατάλληλα και να προσανατολιστεί στο χώρο, ώστε το άκρο εργασίας να φτάσει στο επιθυμητό σημείο, για παράδειγμα να ανασηκώσει ένα αντικείμενο. Συνεπώς, για εφαρμογές τις ρομποτικής είναι αναγκαίο να προσδιορίσουμε τη θέση και το προσανατολισμό ενός αντικειμένου αλλά και του ρομποτικού άκρου στον καρτεσιανό επίπεδο ή το λεγόμενο τρισδιάστατο χώρο.

Ένας ρομποτικός βραχίονας αποτελείται από μια σειρά στερεών σωμάτων, τα οποία ονομάζονται σύνδεσμοι και συνδέονται μέσω αρθρώσεις. Όπου, κάθε σύνδεσμος/ άρθρωση έχει ένα βαθμό ελευθερίας. Οι αρθρώσεις διακρίνονται σε δύο είδη, ορισμένες που έχουν τη δυνατότητα να στραφούν γύρω από έναν άξονα που ονομάζονται περιστροφικές αρθρώσεις και άλλες που επιτρέπουν την ολίσθηση κατά μήκος ενός άξονα και ονομάζονται πρισματικές αρθρώσεις.

Η ανάλυση της κινηματικής συμπεριφοράς ενός ρομπότ βασίζεται στην μελέτη κίνησης ενός στερεού σώματος (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007). Ως κινηματική ορίζουμε ένα κλάδο της επιστήμης που μελετάει την κίνηση χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις δυνάμεις που την προκαλούν. Τα ζητούμενα στην κινηματική είναι η θέση, η ταχύτητα, η επιτάχυνση και κάθε άλλο παράγωγο που χαρακτηρίζει την θέση (ως συνάρτηση του χρόνου ή άλλων μεταβλητών). Επομένως, ο ρόλος της κινηματικής σε ένα ρομποτικό βραχίονα αφορά τις γεωμετρικές που το απαρτίζουν και όλες τις χρονικά εξαρτώμενες ιδιότητες της κίνησης του. Όσο αφορά τη σχέση κίνησης με δυνάμεις και ροπές που την δημιουργούν είναι αντικείμενο της μελέτης δυναμικής κατάστασης του βραχίονα (CRAIG, 2020).

Η περιγραφή της θέσης και του προσανατολισμού ενός στερεού σώματος κάθε χρονική στιγμή στο χώρο γίνεται μέσω μαθηματικών σχέσεων. Ως στερεό σώμα ορίζεται ένα μη παραμορφώσιμο σώμα, δηλαδή συνολικά απαρτίζεται από μια ομάδα σωματιδίων, των οποίων η απόσταση του ενός σε σχέση με το άλλο (για δυο οποιαδήποτε σωματίδια του συνόλου) διατηρείται σταθερή και δεν εξαρτάται από τις δυνάμεις που ενεργούν στο συνολικό σώμα ή τις κινήσεις του σώματος (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007). Το κεντρικό ζήτημα που θα αναλυθεί παρακάτω είναι μια μέθοδος εύρεσης της θέσης και του προσανατολισμού του άκρου εργασίας του ρομποτικού βραχίονα σε συσχέτιση με την βάση του, ως συνάρτηση των χαρακτηριστικών μεταβλητών των αρθρώσεων (CRAIG, 2020).

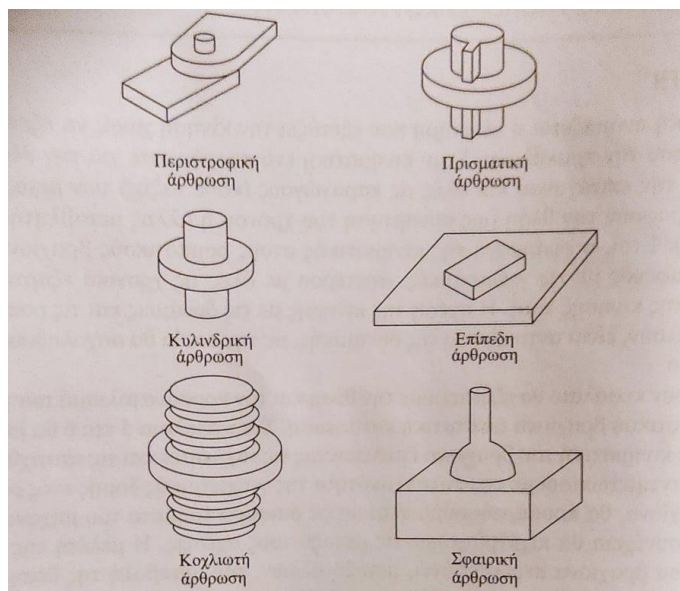
2.2 Ανάλυση μελών ρομποτικού βραχίονα

Ένας ρομποτικός βραχίονας δομείται από ένα μηχανικό μέρος και από ένα σύστημα ελέγχου. Το μηχανικό μέρος αποτελείται από μια αλληλουχία στερεών σωμάτων που συνδέονται μεταξύ τους μέσω αρθρώσεων (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007). Τα συγκεκριμένα στερεά σώματα ονομάζονται μέλη του ρομποτικού βραχίονα. Επιπλέον, με τη βοήθεια των αρθρώσεων συνδέονται γειτονικά ζεύγη μελών. Ο όρος κατώτερο ζεύγος περιγράφει την σύνδεση δύο επιφανειών που εφάπτονται και ολισθαίνουν μεταξύ τους.

Οι αρθρώσεις γενικά ομαδοποιούνται σε δύο κατηγορίες :

- Η πρώτη κατηγορία που δίνει τη δυνατότητα της σχετικής περιστροφής των γειτονικών συνδέσμων γύρω από ορισμένο άξονα της άρθρωσης και καλούνται περιστροφικές αρθρώσεις (revolute joints) .
- Αυτές που επιτρέπουν την μεταφορική κίνηση πάνω στον άξονα της άρθρωσης και λέγονται πρισματικές αρθρώσεις ή αρθρώσεις ολίσθησης .

Οι δυο προαναφερόμενοι τύποι αρθρώσεων με κατάλληλο συνδυασμό μεταξύ τους δημιουργούν μια δομή ενός βραχίονα. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο συνδυασμός των πρώτων τριών αρθρώσεων του βραχίονα προσδίδει κίνηση στο ρομπότ και ο τρόπος σύνδεσης τους χαρακτηρίζει τη γεωμετρία του. Στο σχήμα 28 που ακολουθεί φαίνονται οι έξι δυνατοί συνδυασμοί από κατώτερα ζεύγη αρθρώσεων.



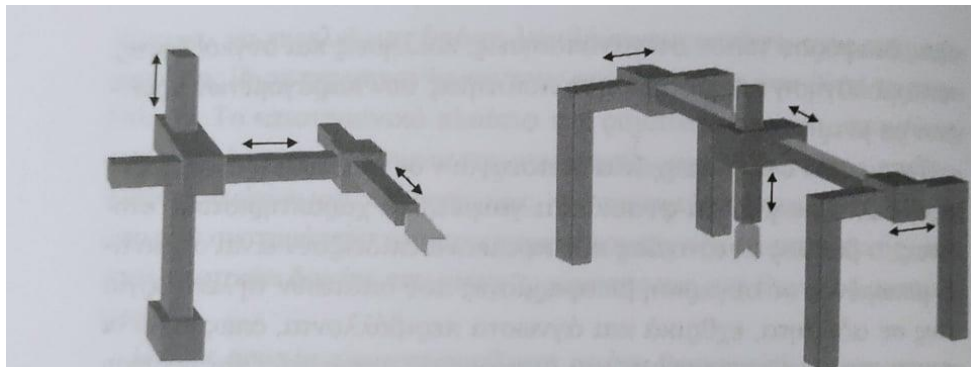
Σχήμα 27: Τύποι κατωτέρων ζευγών αρθρώσεων (CRAIG, 2020).

Λόγω του μηχανολογικού σχεδίου είναι ευκολότερη η κατασκευή αρθρώσεων που διαθέτουν μόνο έναν βαθμό ελευθερίας. Στην πλειονότητα των ρομποτικών βραχιόνων συναντάμε περιστροφικές αρθρώσεις (revolute joints) ή πρισματικές αρθρώσεις. Για ειδική περίπτωση σε μηχανισμό που φέρει μια άρθρωση n βαθμών ελευθερίας, η συγκεκριμένη άρθρωση μπορεί να μοντελοποιηθεί ως n αρθρώσεις με ένα βαθμό ελευθερίας. Όπου, οι αρθρώσεις αυτές συνδέονται με $n-1$ μέλη μηδενικού μήκους, συμπεραίνοντας θεωρητικά πως οι βραχίονες διαθέτουν αρθρώσεις ενός βαθμού ελευθερίας (CRAIG, 2020).

Για την αρίθμηση των μελών του βραχίονα ξεκινάμε από την ακίνητη βάση, η οποία αντιστοιχεί στον αριθμό 0. Ακολουθεί το πρώτο κινούμενο μέλος ως αριθμό 1. Με αυτό το τρόπο η αρίθμηση συνεχίζεται έως το ελεύθερο άκρο του ρομπότ, που θεωρείται το μέλος με αρίθμηση n . Στην γενική περίπτωση για να συνδέσουμε ένα αποληκτήριο επενεργητή σε ένα βραχίονα στον τρισδιάστατο χώρο, χρειάζονται να υπάρχουν έξι αρθρώσεις. Ορισμένα ρομπότ έχουν υψηλό βαθμό πολυπλοκότητας και δεν είναι τόσο απλά όσο μια κινηματική αλυσίδα, περιλαμβάνουν μέλη με σχήμα παραλληλογράμμου ή άλλες κλειστές κινηματικές δομές (CRAIG, 2020).

Οι τύποι γεωμετρίας αρθρώσεων διαχωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

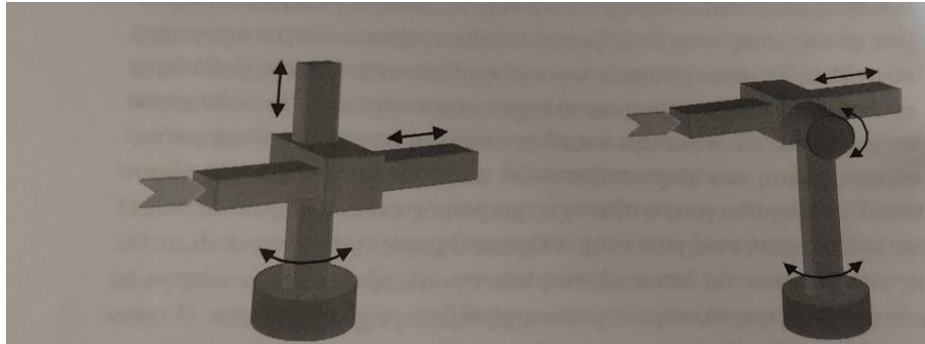
- Καρτεσιανή γεωμετρία με τρεις πρισματικές αρθρώσεις, με άξονες ορθογώνιοι το ένα προς το άλλο. Όπως, παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα 29. Επίσης, παρακάτω παρουσιάζεται βραχίονας τύπου γερανού οροφής που έχουν την ίδια γεωμετρία και έχουν εφαρμογές σε αποθήκες.



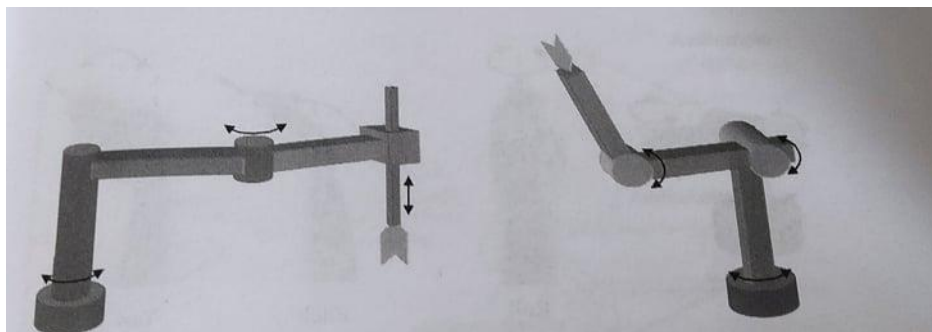
Σχήμα 28 : Καρτεσιανή γεωμετρία και βραχίονας με τη μορφή γερανού οροφής (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007).

- Κυλινδρική γεωμετρία, όμοια με την καρτεσιανή γεωμετρία με τη διαφορά η πρώτη άρθρωση αντικαθίσταται με μία περιστροφική άρθρωση .
- Σφαιρική γεωμετρία, στην οποία οι πρώτες δύο αρθρώσεις είναι περιστροφικές αρθρώσεις, ακολουθεί στο σχήμα 30 αναπαράσταση.
- Γεωμετρία τύπου SCARA, περιλαμβάνει δύο περιστροφικές και μια πρισματική άρθρωση που έχουν παράλληλους άξονες, όπως φαίνεται στο σχήμα 31.

- Ανθρωπομορφική γεωμετρία, αποτελείται από τρεις περιστροφικές αρθρώσεις με τη βάση ή μέση, τον ώμο και αγκώνα. Επίσης, ως τύπος γεωμετρίας έχει την μεγαλύτερη επιδεξιότητα.

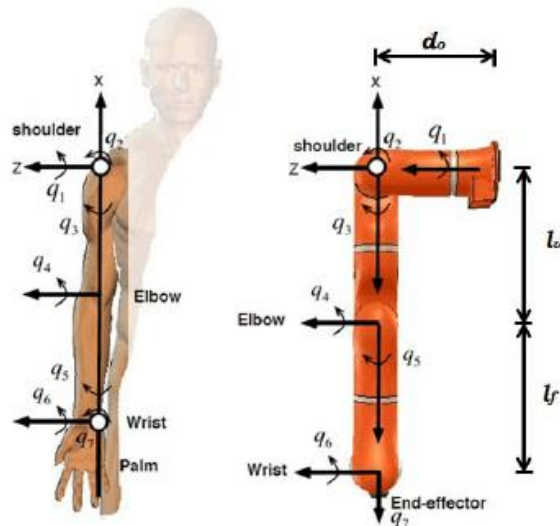


Σχήμα 29: Σχηματική αναπαράσταση κυλινδρικής και σφαιρικής γεωμετρίας (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007).

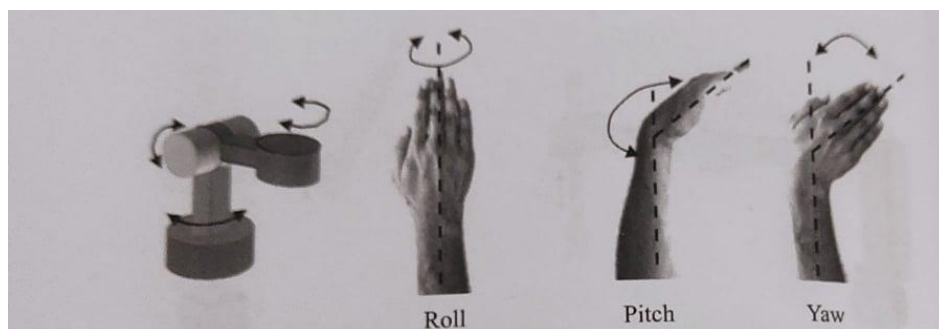


Σχήμα 30: Τύπου SCARA γεωμετρία και ανθρωπομορφική γεωμετρία (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007).

Ο σκοπός των αρθρώσεων που βρίσκονται μετά τις πρώτες τρεις αρθρώσεις του βραχίονα συνήθως είναι να προσφέρουν επιδεξιότητα στο ρομπότ και συνολικά δημιουργούν το καρπό του βραχίονα. Η σύνδεση του άκρου του βραχίονα γίνεται στον καρπό, για να γίνει η ζητούμενη εφαρμογή. Επιπλέον, ο προσανατολισμός του άκρου του ρομπότ ελέγχεται μέσω του συμπαγής καρπού. Η δομή του ανθρωπόμορφου καρπού απαρτίζεται από τρεις αρθρώσεις περιστροφικής γεωμετρίας που επιτρέπουν την κλίση (pitch), τη στροφή (roll) και την εκτροπή (yaw) όπως στον ανθρώπινο χέρι (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007).

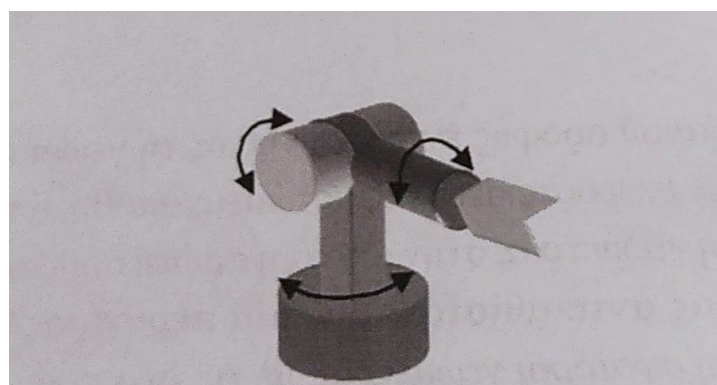


Σχήμα 31: Σύγκριση ανθρώπινου χέρι με ρομποτικό βραχίονα (Fanny , et al., 2014).



Σχήμα 32: Ανθρωπομορφικός καρπός σε σύγκριση με ένα βραχίονα (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007).

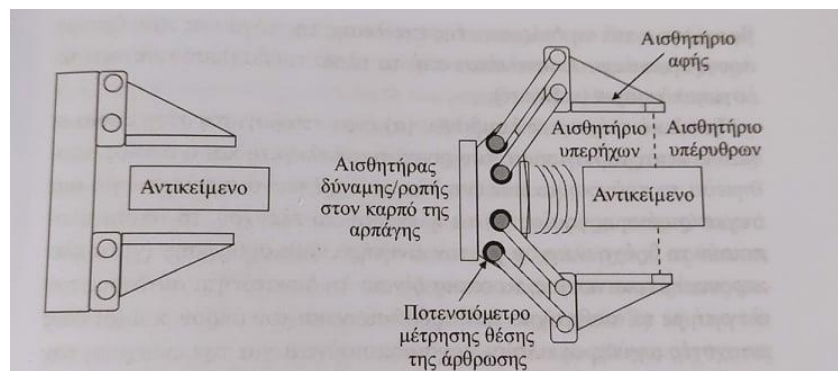
Για την επίτευξη της μεγαλύτερης επιδεξιότητας θα πρέπει οι τρεις άξονες των περιστροφικών αρθρώσεων να τέμνονται σε ένα σημείο στο χώρο, σχηματίζοντας σφαιρικό καρπό .



Σχήμα 33: Σφαιρικός καρπός.

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

Όλες οι αρθρώσεις σε ένα ρομποτικό βραχίονα ενισχύονται με ενεργοποιητές που προκαλούν την κίνηση της άρθρωσης και κατά συνέπεια την κίνηση της διάταξης. Τα είδη των ενεργοποιητών ως κινητήρες είναι ηλεκτρικός, πνευματικός και υδραυλικός. Για να γίνει έλεγχος των κινητήρων απαιτείτε να γίνουν κάποιες μετρήσεις όσο αφορά τη θέση και την ταχύτητα των αρθρώσεων. Με τον όρο θέση προσδιορίζουμε την απόσταση από ένα προκαθορισμένο σημείο μηδέν. Για την περίπτωση της περιστροφής η θέση χαρακτηρίζεται ως γωνιακή θέση και μετρείται σε ακτίνια (rad). Υπάρχουν διάφοροι τύποι αισθητήρων που υπολογίζουν τη θέση και την ταχύτητα της άρθρωσης, για παράδειγμα ποτενσιόμετρο και ταχύμετρο. Η διαμόρφωση του άκρου του βραχίονα διαφέρει ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιείται και συνήθως είναι κάποιο εργαλείο ή μία αρπάγη. Οι διαθέσιμες αρπάγες για ειδικές εργασίες είναι μαγνητική αρπάγη, αρπάγη κενού και αρπάγες που χρησιμοποιούνται σε γενικές εφαρμογές που σχεδιάζονται με μηχανικά δάχτυλα για το χειρισμό αντικειμένων. Σχεδιαστικά η πιο απλή αρπάγη διαθέτει δύο δάχτυλα και δύο καταστάσεις λειτουργίας, την ανοιχτή και την κλειστή, από την άλλη οι πιο σύγχρονες αρπάγες που φέρουν μηχανικά δάχτυλα διαθέτουν αισθητήρες. Γενικά , όσο πιο ευέλικτη είναι μια αρπάγη και διαθέτει πολλές εφαρμογές τόσο υψηλότερο κόστος έχει (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007).



Σχήμα 34: Σχηματική απεικόνιση μιας απλής αρπάγης (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007).

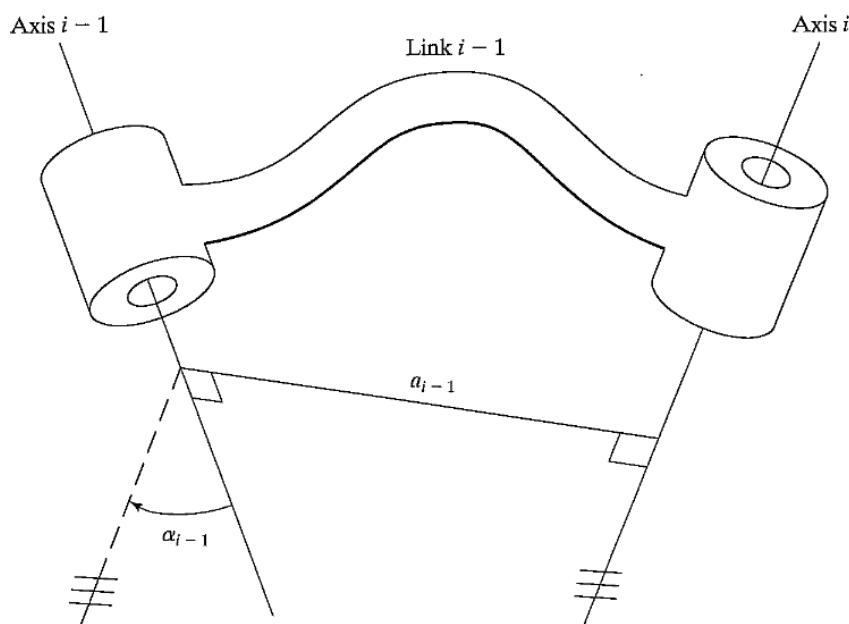


Σχήμα 35: DEXHAND ρομποτικό χέρι με πολλαπλά δάχτυλα DLR

(Πηγή : <https://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-11669/#gallery/28612>)

Ο σχεδιασμός ενός τμήματος για ένα ρομποτικό σύστημα, απαιτεί την εξέταση ορισμένων παραμέτρων όπως: το είδος του υλικού που θα εφαρμοστεί, η αντοχή και η στιβαρότητα του τμήματος του ρομπότ, η θέση και ο είδος των εδράσεων στις αρθρώσεις, το εξωτερικό σχήμα, το συνολικό βάρος, η αδράνεια και άλλοι επιπλέον παράμετροι. Για την εφαρμογή των κινηματικών εξισώσεων για τον εξεταζόμενο μηχανισμό, το κάθε μέλος θεωρείται ένα στερεό σώμα βάση του οποίου καθορίζεται η συσχέτιση μεταξύ των δύο γειτονικών αξόνων των αρθρώσεων του βραχίονα. Με τον άξονα i χαρακτηρίζεται μια ευθεία του χώρου ή διεύθυνση του διανύσματος γύρω από την οποία πραγματοποιείται η περιστροφή του μέλους i σε αντιστοίχιση με το μέλος $i-1$. Έτσι, με βάση την κινηματική του μέλους, μπορεί να χαρακτηριστεί μέσω δύο αριθμών που δηλώνουν την σχετική απόσταση μεταξύ των δύο αξόνων (CRAIG, 2020).

Για τον υπολογισμό της απόστασης ενός ζεύγους αξόνων εφαρμόζεται μια συγκεκριμένη διαδικασία. Ο υπολογισμός της μεταξύ τους απόστασης γίνεται πάνω στην ευθεία που είναι κάθετη ως προς τους δύο άξονες. Η συγκεκριμένη κάθετη είναι πάντα μοναδική, με εξαίρεση την ειδική περίπτωση των παράλληλων αξόνων. Η περίπτωση των παράλληλων αξόνων περιλαμβάνει άπειρες κοινές κάθετες, πάνω στις οποίες υπολογίζεται το ίδιο μήκος της απόστασης των δύο αξόνων.



Σχήμα 36: Βάση της κινηματικής λειτουργίας ενός τμήματος εξασφαλίζεται μια σχέση μεταξύ των αξόνων των δύο γειτονικών αρθρώσεων που εμπεριέχονται. Η συγκεκριμένη σχέση χαρακτηρίζεται από δύο παραμέτρους, το μήκος a και την συστροφή α του μέλους (CRAIG, 2020).

Όπως φαίνεται στο σχήμα 37 έχουμε το τμήμα $i-1$ και την κοινή κάθετη πάνω στην οποία υπολογίζεται το μήκος του μέλους a_{i-1} (CRAIG, 2020).

Η δεύτερη ζητούμενη παράμετρος καλείται συστροφή του μέλους. Έστω υποθετικά ένα επίπεδο που είναι κάθετο στην κοινή κάθετη των δύο αξόνων. Αφού γίνει η προβολή των δύο αξόνων στο συγκεκριμένο επίπεδο, μετρίεται η μεταξύ τους γωνία. Ο υπολογισμός της συγκεκριμένης γωνίας πραγματοποιείται με φορά από τον άξονα $i-1$ προς τον άξονα i , με βάση τον κανόνα του δεξιού χεριού γύρω από τον άξονα a_{i-1} . Ως γωνία α_{i-1} καλείται η συστροφή του μέλους $i-1$ (CRAIG, 2020).

Συνεπώς, από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει πως οι δύο συγκεκριμένη παράμετροι, το μήκος και η συστροφή, χαρακτηρίζουν την σχέση ανάμεσα σε δύο ευθείες, για την συγκεκριμένη μελέτη οι ευθείες αποτελούν άξονες στο χώρο.

Στο προαναφερόμενο σχήμα 37, ο συμβολισμός a_{i-1} χαρακτηρίζει την γωνία που εμπεριέχεται μεταξύ των αξόνων $i-1$ και i . Οι ευθείες που φαίνονται στο σχήμα 37 με τρεις παράλληλες γραμμές είναι παράλληλες ευθείες. Αν οι άξονες τέμνονται μεταξύ τους, τότε η συστροφή υπολογίζεται στο επίπεδο που περιλαμβάνει τους άξονες. Επίσης η έννοια της φοράς γωνίας a_{i-1} δεν υπάρχει σε στην συγκεκριμένη περίπτωση (CRAIG, 2020).

Με την βοήθεια του συστήματος ελέγχου του ρομπότ δίνετε η δυνατότητα προγραμματισμού της εκτελούμενης εφαρμογής του βραχίονα και ελέγχου της διαδρομής που ακολουθεί καθώς λειτουργεί . Συνολικά το σύστημα ελέγχου ενός ρομπότ αποτελείται από το υλικό τμήμα (Hardware) και το λογισμικό τμήμα (software) .

- ❖ Το υλικό τμήμα αποτελείται από: α) Έναν υπολογιστή που αποθηκεύει το λογισμικό του ρομποτικού ελεγκτή και το πρόγραμμα εντολών σε μορφή κώδικα που πρέπει να πραγματοποιήσει για μια ορισμένη εργασία. β) Τα ηλεκτρονικά ελέγχου, τα οποία δομούν το βρόχο ελέγχου για τον κινητήρα της κάθε άρθρωσης αντίστοιχα. γ) Τα ηλεκτρονικά επικοινωνίας, τα οποία επιτρέπουν τη σύνδεση του ελεγκτή με τα αισθητήρια της κάθε άρθρωσης και του άκρου εργασίας. δ) Και τέλος τους ενισχυτές ισχύος, τα οποία ενισχύουν το σήμα ελέγχου σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο που χρειάζεται για τους κινητήρες των αρθρώσεων.
- ❖ Το λογισμικό τμήμα εμπεριέχει: α) Ένα προγραμματιστικό περιβάλλον το οποίο αξιοποιεί κάποια γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου. β) Το κινηματικό λογισμικό, μέσω του οποίου υπολογίζετε η θέση του άκρου του βραχίονα, έχοντας δεδομένο τη θέση των αρθρώσεων και το αντίστροφο. γ) Το λογισμικό ελέγχου, το οποίο εκτελεί τον αλγόριθμο ελέγχου για το σύνολο των αρθρώσεων. Το οποίο γνωρίζοντας τη την θέση και την ταχύτητα του κινητήρα, υπολογίζει το σήμα ελέγχου που χρειάζεται για να μετατοπιστεί ο κινητήρας στην ζητούμενη τοποθεσία. δ) Έναν λογισμικό δυναμικών όρων, που λαμβάνει ως είσοδο τις δυναμικές παραμέτρους του ρομπότ σε συνδυασμό με την κατάσταση του για την βελτίωση της λειτουργίας του βραχίονα προσαρμόζοντας το σήμα ελέγχου. ε) Υποστηρικτικό λογισμικό που παρακολουθεί τη συμπεριφορά του βραχίονα, καθώς δίνει ανάδραση στον χρήστη για πιθανά σφάλματα (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007).

2.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη ενός βραχίονα

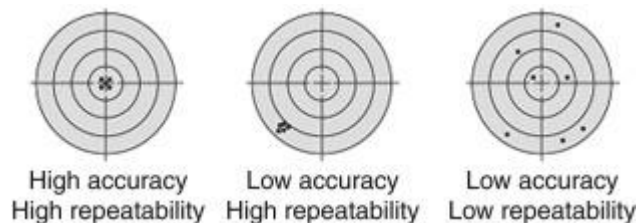
Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή το πλήθος των ανεξάρτητων κινήσεων που πραγματοποιεί ένα σώμα στο χώρο καλείται βαθμός ελευθερίας της κίνησης του. Όταν ένα αντικείμενο έχει τη δυνατότητα να κινείται ελεύθερα στο τρισδιάστατο χώρο τότε χαρακτηρίζεται από έξι βαθμούς ελευθερίας, εκ των οποίων οι τρεις αφορούν τη θέση και οι υπόλοιπες τρεις τον προσανατολισμό. Ορίζοντας ένα σύστημα συντεταγμένων ως πλαίσιο αναφοράς για τη θέση και το προσανατολισμό του εξεταζόμενου σώματος, τότε οι τρεις κινήσεις για τη θέση και το προσανατολισμό μπορούν να περιγράψουν ως τρεις μεταφορικές κινήσεις στη κλίμακα των αξόνων αναφοράς και ως τρεις περιστροφές γύρω από τους άξονες του πλαισίου αναφοράς. Σε έναν βραχίονα οι τρεις αρχικές

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

αρθρώσεις σε βασικές γεωμετρίες σχηματίζουν τους τρεις βαθμούς ελευθερίας για το χειρισμό ενός αντικειμένου στο χώρο ενώ οι υπόλοιπες τρεις περιστροφικές αρθρώσεις του σφαιρικού καρπού δίνουν τους τρεις βαθμούς ελευθερίας που περιγράφουν το προσανατολισμό του στερεού σώματος στο χώρο. Συνεπώς, για να υπάρχει ελεύθερη κίνηση στο χώρο απαιτείται βραχίονα που έχει έξι βαθμούς ελευθερίας, οι οποίοι προκύπτουν με έξι αρθρώσεις κατά ελάχιστο. Σε πραγματικές εφαρμογές τα ρομπότ φέρουν πλήθος αρθρώσεων είτε παραπάνω είτε λιγότερο από έξι. Στη περίπτωση των ρομπότ με αριθμό αρθρώσεων λιγότερο από έξι παρουσιάζουν μικρότερη ευελιξία ως προς τις κινήσεις που μπορούν να πραγματοποιήσουν, καθιστώντας τους κατάλληλους για συγκεκριμένες εργασίες. Ένα ρομπότ με γεωμετρία τύπου SCARA τεσσάρων βαθμών ελευθερίας με τις τρεις πρώτες αρθρώσεις να σχηματίζουν την γεωμετρία και την τέταρτη περιστροφική άρθρωση με άξονα περιστροφής τον άξονα της προηγούμενης (Τρίτη πρισματική άρθρωση) χρησιμοποιείται σε εφαρμογές κάθετης συναρμολόγησης (Όπως χειρισμός και συναρμολόγηση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε τυποποιημένες πλακέτες) και παρουσιάζει θετικά αποτελέσματα. Οι ρομποτικοί βραχίονες που διαθέτουν παραπάνω από έξι αρθρώσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερη κινητική ευελιξία , ωστόσο έχουν σύνθετο κινηματικό λογισμικό .

Επιπρόσθετα, δύο βασικά χαρακτηριστικά των ρομποτικών βραχιόνων είναι η επαναληπτικότητα και η ακρίβεια. Η επαναληπτικότητα σε χιλιοστά προσδιορίζει τις προδιαγραφές των ρομποτικών βραχιόνων και αποτελεί χαρακτηριστικό όγκο όπου κινείτε το ρομποτικό άκρο κάθε φορά επαναληπτικά προς μια ζητούμενη τοποθεσία από μια ορισμένη αρχική θέση.

Σε διαφορετικές θέσεις στο χώρο εργασίας το άκρο του ρομποτικού βραχίονα έχει διαφορετική ακρίβεια και διαφορετική επαναληπτικότητα. Οι διαφορές εξαρτώνται από την ορισμένη θέση και την κατεύθυνση κίνησης του ρομποτικού άκρου. Έτσι, η ακρίβεια είναι για παράδειγμα μικρότερη σε μεγάλη απόσταση από το χώρο εργασίας του ρομπότ, όπου ο βραχίονας βρίσκεται σε μέγιστη επέκταση.



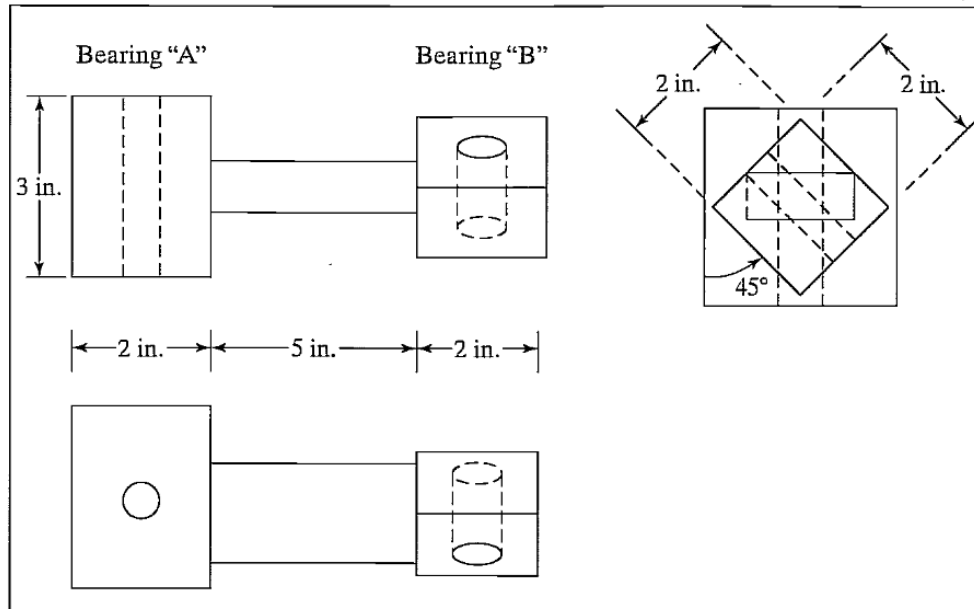
Σχήμα 37: Σύγκριση επαναληπτικότητας και ακρίβειας

(Πηγή : <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/repeatability>).

Επιπλέον, σημαντικό μέγεθος για τους ρομποτικούς βραχίονες αποτελεί το φορτίο. Με τον όρο φορτίο χαρακτηρίζουμε το μέγιστο βάρος ενός αντικειμένου που έχει δυνατότητα να χειριστεί το ρομπότ με βάση τις προδιαγραφές που ορίζει ο κατασκευαστής. Συνήθως, το φορτίο για τα ηλεκτρικά βιομηχανικά ρομπότ κυμαίνεται μεταξύ 10gr και 80kg. Αντιθέτως, τα υδραυλικά ρομπότ μπορούν να χειριστούν φορτία που φτάνουν έως και τα 300kg με ταχύτητες έως τα 3 m/s (ΔΟΥΛΓΕΡΗ, 2007).

2.4 Ανάλυση συνδεσμολογίας μελών

Βάση του μηχανολογικού σχεδιασμού το ζήτημα της συνδεσμολογίας των τμημάτων ενός βιομηχανικού ρομπότ δημιουργεί αρκετά θέματα προς μελέτη. Τα συγκεκριμένα θέματα αφορούν αφενός την αντοχή των αρθρώσεων και την λίπανση τους, αφετέρου την συναρμολόγηση των οδοντωτών τροχών και των εδράνων. Ωστόσο, στο πεδίο της κινηματικής συμπεριφοράς τα μεγέθη που εξετάζονται είναι μόνο δύο, τα οποία προσδιορίζουν πως συνδέονται τα μέλη (CRAIG, 2020).



Σχήμα 38: Ένα μέλος που περιλαμβάνει δύο άξονες περιστροφής (CRAIG, 2020).

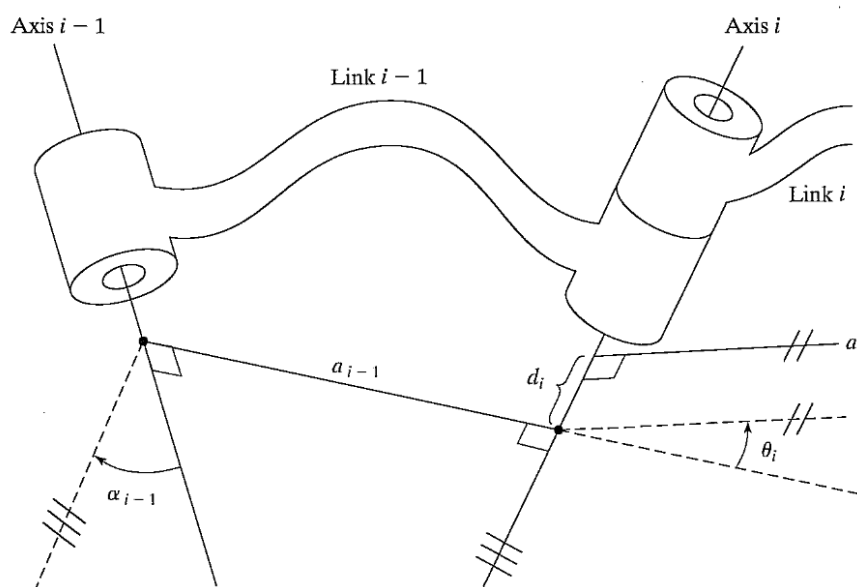
Τα ενδιάμεσα τμήματα της κινηματικής αλυσίδας

Ένας άξονας που αντιστοιχεί σε μια άρθρωση αποτελεί κοινό άξονα για τα γειτονικά μέλη, καθώς τα συνδέει μεταξύ τους. Η παράμετρος που ονομάζεται μετατόπιση του μέλους προσδιορίζει την συνδεσμολογία των μελών, δίνοντας την μεταξύ τους απόσταση μετρούμενη πάνω στον κοινό τους άξονα. Η μετατόπιση μετρούμενη πάνω στον άξονα i συμβολίζεται με d_i . Άλλη παράμετρος είναι η σχετική περιστροφή των δύο γειτονικών μελών σε σχέση με τον ορισμένο άξονα. Η συγκεκριμένη παράμετρος ονομάζεται γωνία άρθρωσης και έχει συμβολισμό θ_i (CRAIG, 2020).

Στο ακόλουθο σχήμα 40 φαίνεται η σύνδεση μεταξύ των μελών $i-1$ και i . Αντίστοιχα, όπως προαναφέρθηκε το a_i αντιστοιχεί στο μήκος του μέλους i , υπολογιζόμενο πάνω στην κοινή κάθετο των δύο μελών. Η πρώτη παράμετρος συνδεσμολογίας είναι η μετατόπιση d_i και αποτελεί την προσημασμένη απόσταση που υπολογίζεται πάνω στον άξονα i , ξεκινώντας από το σημείο της τομής του με το a_{i-1} , έως το σημείο τομής του με το a_i . Όπως φαίνεται στο σχήμα 40 η μετατόπιση d_i θα ήταν μη σταθερή σε περίπτωση που η άρθρωση ήταν πρισματική. Η δεύτερη παράμετρος είναι η γωνία που βρίσκεται μεταξύ της προέκτασης της απόστασης a_{i-1} και της απόστασης a_i , υπολογιζόμενη γύρω από τον άξονα της άρθρωσης i , η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 40. Η συγκεκριμένη παράμετρος διαθέτει συμβολισμό θ_i και είναι μεταβλητή στην περίπτωση των περιστροφικών αρθρώσεων (CRAIG, 2020).

Η θέση των αξόνων i και $i+1$ επηρεάζουν το μήκος του μέλους, a_i και την συστροφή α_i . Στα άκρα της κινηματικής αλυσίδας οι παράμετροι διαθέτουν τιμή μηδέν, δηλαδή $a_0=a_n=0$ και $\alpha_0=\alpha_n=0$. Με τις προαναφερόμενες συμβάσεις, η μετατόπιση d_i και η γωνία της άρθρωσης θ_i είναι καλώς ορισμένα για τις αρθρώσεις 2 έως $n-1$. Σε περίπτωση που η πρώτη άρθρωση είναι περιστροφική, τότε η θέση μηδέν για την θ_i επιλέγεται αυθαίρετα. Με δεδομένο την σύμβαση $d_i=0$ και η περίπτωση της άρθρωσης 1 επιλέγεται πρισματική, τότε η θέση μηδέν της μετατόπισης d_i ορίζεται αυθαίρετα. Σε αυτή τη περίπτωση επιπρόσθετα γίνεται η επιλογή της σύμβασης $\theta_i=0$. Με αντίστοιχο τρόπο γίνεται και για την άρθρωση n (CRAIG, 2020).

Επιλέγοντας αυτές τις συμβάσεις ορισμένα μεγέθη μπορούν να πάρουν αυθαίρετες τιμές και απλοποιούνται κάποιοι υπολογισμοί λόγω των μηδενικών τιμών που λαμβάνουν τα μεγέθη σε ορισμένες περιπτώσεις με τις συγκεκριμένες συμβάσεις.



Σχήμα 39: Οι δύο παράμετροι που αξιοποιούνται για την περιγραφή του είδους της συνδεσμολογίας των γειτονικών μελών, η μετατόπιση του μέλους d και η γωνία άρθρωσης θ (CRAIG, 2020).

Οι παράμετροι των μελών

Με βάση της προαναφερόμενης ανάλυσης, για την κινηματική περιγραφή ενός ρομπότ απαιτείται ο προσδιορισμός τιμών σε τέσσερα μεγέθη για κάθε μέλος ξεχωριστά. Εκ των οποίων τα δύο χαρακτηρίζουν το μέλος καθαυτό και τα υπόλοιπα δύο περιγράφουν την συνδεσμολογία του με κάποιο γειτονικό μέλος. Σε μια συμβατή περίπτωση μιας περιστροφικής άρθρωσης, η γωνία θ_i λέγεται μεταβλητή της άρθρωσης, ενώ τα υπόλοιπα τρία μεγέθη είναι σταθερές παράμετροι του μέλους. Αντιθέτως, στην περίπτωση των πρισματικών αρθρώσεων, η μετατόπιση d_i θεωρείται η μεταβλητή της άρθρωσης ενώ τα υπόλοιπα μεγέθη είναι οι σταθερές παράμετροι του μέλους. Με την συγκεκριμένη συμφωνία καθορίζεται το πλαίσιο γεωμετρικής και συμβολικής περιγραφής για ένα μηχανισμό και ως σύμβαση καλείται Denavit-Hartenberg (CRAIG, 2020).

Για ένα ρομπότ με έξι αρθρώσεις, χρειάζονται 18 αριθμοί για να περιγράψουν το μη μεταβλητό τμήμα της κινηματικής του. Στην περίπτωση που όλες οι αρθρώσεις είναι περιστροφικές, αυτοί οι αριθμοί είναι έξι διατεταγμένες τριάδες της μορφής $(\alpha_i, \alpha_i, d_i)$ (CRAIG, 2020).

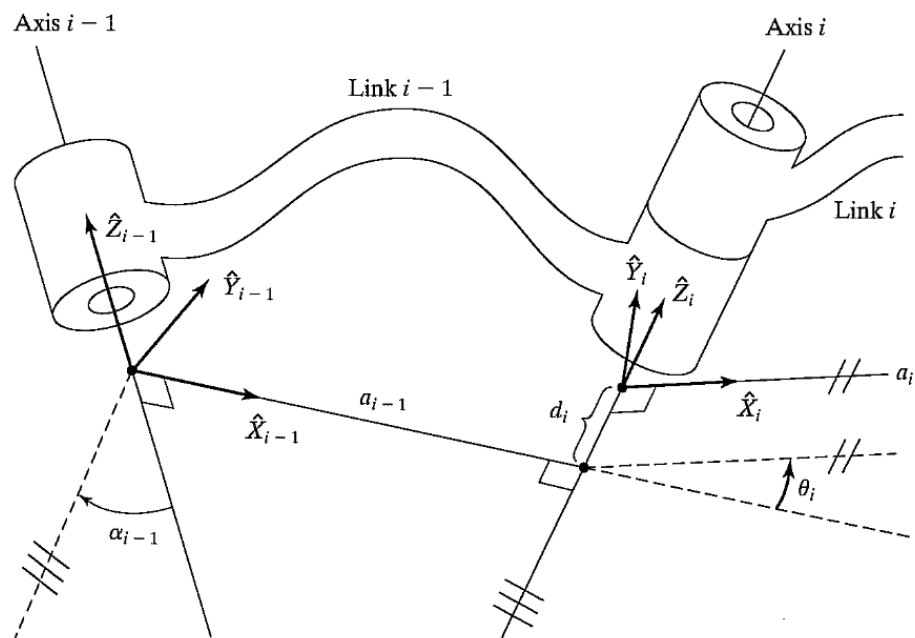
2.5 Προσάρτηση πλαισίων

Για να γίνει η περιγραφή της θέσης ενός μέλους σε σχέση με ορισμένα γειτονικά μέλη του, ορίζεται ένα πλαίσιο, που τοποθετείται στο ζητούμενο μέλος. Στα προσαρτημένα πλαίσια δίνεται ένας αριθμός, που αντιστοιχεί στον αριθμό του μέλους στο οποίο προσαρτώνται. Συγκεκριμένα, το πλαίσιο i είναι στερεά προσαρτημένο στο μέλος i (CRAIG, 2020).

Ενδιάμεσα μέλη της κινηματικής αλυσίδας

Η σύμβαση που χρησιμοποιείται για την προσάρτηση πλαισίων στα μέλη είναι εξής: Ο άξονας \hat{Z} του πλαισίου i , καλείται \hat{Z}_i και ταυτίζεται με τον άξονα της άρθρωσης i . Η αρχή των αξόνων για το πλαίσιο τοποθετείται στο σημείο που τέμνονται η κοινή κάθετο a_i με τον άξονα i . Επιπρόσθετα, ο άξονας \hat{X}_i προσαρτάται πάνω στην κοινή κάθετο μήκους a_i , έχοντας κατεύθυνση από την άρθρωση i προς την άρθρωση $i+1$ (CRAIG, 2020).

Αν $a_i=0$, τότε ο άξονας X_i είναι κάθετος στο επίπεδο που δημιουργούν οι άξονες Z_i και Z_{i+1} . Η γωνία συστροφής α_i ορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να υπολογίζεται με την βοήθεια του κανόνα του δεξιού χεριού γύρω από τον άξονα X_i . Η ελεύθερη επιλογή του προσήμου της γωνίας α_i , στην συγκεκριμένη περίπτωση, αντιστοιχεί στις δύο επιλογές της κατεύθυνσης του άξονα \hat{X}_i . Τέλος, το πλαίσιο i ολοκληρώνεται με τον άξονα \hat{Y}_i , το οποίο επίσης ορίζεται με βάση τον δεξιόχειρο κανόνα (CRAIG, 2020).



Σχήμα 40: Απεικόνιση πλαισίων $\{i-1\}$ και $\{i\}$ για ένα τυπικό βραχίονα. Τα επιπληγμένα πλαίσια τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε το πλαίσιο i , να είναι στερεά προσαρτημένο στο μέλος i (CRAIG, 2020).

Η βάση του ρομπότ αποτελεί το μέλος μηδέν και σε αυτή προσαρτάται ένα πλαίσιο με αριθμό 0. Το συγκεκριμένο πλαίσιο είναι ακίνητα προσαρτημένο. Επιπρόσθετα, για το ζήτημα της κινηματικής του βραχίονα μπορεί να αποτελέσει πλαίσιο αναφοράς. Έτσι, υπάρχει η δυνατότητα περιγραφής της θέσης όλων των άλλων προσαρτημένων πλαισίων στα αντίστοιχα μέλη, σε σχέση με το συγκεκριμένο πλαίσιο βάσης (CRAIG, 2020).

Επειδή το πλαίσιο $\{0\}$ μπορεί να προσαρμοστεί αυθαίρετα, για την διευκόλυνση της κατάστασης επιλέγεται ο άξονας \hat{Z}_0 με στόχο να ταυτίζεται με τον άξονα 1 και επίσης το πλαίσιο $\{0\}$ προσαρτάται με τέτοιο τρόπο ώστε να συμπίπτει με τον πλαίσιο $\{1\}$ όταν η μεταβλητή που αντιστοιχεί στην άρθρωση 1 πάρει μηδενική τιμή. Με αυτή την σύμβαση πάντα θα προκύψουν μηδενικές τιμές για τις παραμέτρους a_0 και α_0 . Επιπλέον, με αυτό το τρόπο επιτυγχάνεται $d_1=0$ στην περίπτωση που η άρθρωση νούμερο 1 είναι περιστροφική, ή αντίστοιχα $\theta_1=0$ όταν η άρθρωση 1 είναι πρισματική (CRAIG, 2020).

Όσο αφορά την άρθρωση n , ο άξονας \hat{X}_N (Το πλαίσιο $\{N\}$ αποτελεί το τελευταίο πλαίσιο) ορίζεται με στόχο να ευθυγραμμίζεται με τον άξονα \hat{X}_{N-1} στην περίπτωση που ισχύει $\theta_n=0$. Επιπλέον, η επιλογή του κέντρου του πλαισίου $\{N\}$ γίνεται ώστε να ισχύει $d_n=0$. Για την περίπτωση της πρισματικής άρθρωσης n , ο άξονας \hat{X}_N τοποθετείται ώστε να προκύπτει γωνία θ μηδέν. Η αρχή των συντεταγμένων του πλαισίου $\{N\}$ ορίζεται ώστε να συμπίπτει με το κοινό σημείο τομής των αξόνων \hat{X}_{N-1} και του άξονα που αντιστοιχεί στην άρθρωση n για $d_n=0$ (CRAIG, 2020).

Συνοπτική ανασκόπηση των παραμέτρων και των πλαισίων των μελών

Όταν τα πλαίσια των μελών προσαρτώνται με βάση την προαναφερόμενη σύμβαση, τότε ισχύουν οι ακόλουθοι ορισμοί για τις παραμέτρους των μελών.

a_i = η απόσταση των αξόνων \hat{Z}_i και \hat{Z}_{i+1} μετρούμενη κατά μήκος του \hat{X}_i άξονα

α_i = η γωνία μεταξύ των αξόνων \hat{Z}_i και \hat{Z}_{i+1} μετρούμενη ως προς τον \hat{X}_i άξονα

d_i = η απόσταση μεταξύ των \hat{X}_{i-1} και \hat{X}_i υπολογιζόμενη κατά μήκος του άξονα \hat{Z}_i

θ_i = η γωνία από τον άξονα \hat{X}_{i-1} προς τον \hat{X}_i μετρούμενη γύρω από τον άξονα \hat{Z}_i

Συνήθως, η παράμετρος a_i επιλέγεται για θετικές τιμές μόνο, επειδή εκφράζει απόσταση. Αντιθέτως, τα υπόλοιπα μεγέθη (α, d, θ) εκφράζονται προσημασμένα (CRAIG, 2020).

Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας προσάρτησης πλαισίων για ένα νέο μηχανισμό. Για δύο άξονες i και $i+1$:

1. Προσδιορισμός των αξόνων που αντιστοιχούν σε αρθρώσεις, που υποθετικά αποτελούν ευθείες άπειρου μήκους.
2. Προσδιορισμός της κοινής κάθετου μεταξύ των αξόνων i και $i+1$ ή το σημείο τομής τους. Το σημείο τομής ή στο σημείο που η κοινή κάθετο τέμνει τον άξονα i , γίνεται ο ορισμός του κέντρου του πλαισίου.
3. Ευθυγράμμιση του Z_i με τον άξονα i .
4. Ευθυγράμμιση του \hat{X}_i με την κοινή κάθετο των αξόνων i και $i+1$. Σε περίπτωση που τέμνονται, τότε ορίζεται ο άξονας \hat{X}_i ως προς την κοινή κάθετο ευθεία στο επίπεδο των αξόνων i και $i+1$.
5. Ο άξονας \hat{Y}_i ορίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε το σύστημα συντεταγμένων που προκύπτει να υποστηρίζει την σύμβαση του δεξιού χεριού.
6. Ορίζεται ένα πλαίσιο $\{0\}$ που ταυτίζεται με το πλαίσιο $\{1\}$ όταν η μεταβλητή της άρθρωσης 1 πάρει την τιμή μηδέν. Για το πλαίσιο $\{N\}$, επιλέγεται αυθαίρετα το κέντρο του και η διεύθυνση του \hat{X}_N (CRAIG, 2020).

2.6 Κινηματική

Κατασκευή ενός πίνακα μετασχηματισμού μέλους

Ο μετασχηματισμός που περιγράφει το πλαίσιο $\{i\}$ σε σχέση με το πλαίσιο $\{i-1\}$, στην γενική του έκφραση εξαρτάται από τέσσερις παραμέτρους του μέλους. Ωστόσο, για την περίπτωση ενός δεδομένου ρομπότ, είναι συνάρτηση μιας μόνο μεταβλητής που αντιστοιχεί σε μια παράμετρο. Οι άλλες τρεις παράμετροι διαθέτουν ορισμένες τιμές που βασίζονται στο μηχανολογικό σχεδιασμό. Με την προσάρτηση ενός πλαισίου για κάθε μέλος, διαιρείτε το κινηματικό πρόβλημα σε n επιμέρους υπό προβλήματα. Το κάθε επιμέρους πρόβλημα που προκύπτει, το οποίο είναι της μορφής ${}^{i-1}T$, πραγματοποιείται η ανάλυση του σε άλλα τέσσερα νέα επιμέρους προβλήματα μετασχηματισμών. Επιπλέον, κάθε μετασχηματισμός από τους τέσσερις εξαρτάται αποκλειστικά από μια παράμετρο και για αυτό δεν είναι σύνθετο (CRAIG, 2020).

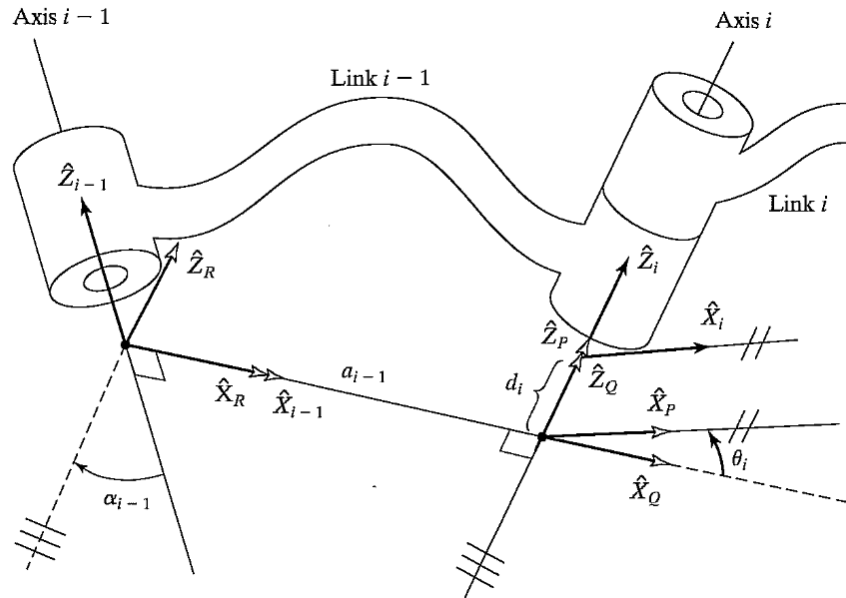
Στο σχήμα 42 φαίνεται η αναπαράσταση των πλαισίων $\{P\}$, $\{Q\}$ και $\{R\}$, επιπρόσθετα γίνεται η απεικόνιση των αξόνων \hat{X} και \hat{Z} για κάθε πλαίσιο μόνο για την απλοποίηση της αναπαράστασης. Η διαφορά του πλαισίου $\{R\}$ σε σχέση με το $\{i-1\}$ είναι μόνο μια περιστροφή α_{i-1} . Επίσης, το πλαίσιο $\{P\}$ διαφοροποιείται από το πλαίσιο $\{Q\}$ κατά μια περιστροφή θ_i . Και τέλος το πλαίσιο $\{i\}$ διαφέρει από το $\{P\}$ κατά μια μεταφορά d_i . Η ακόλουθη σχέση εκφράζει τον μετασχηματισμό που μετασχηματίζει διανύσματα που ορίζονται στο πλαίσιο $\{i\}$ στην αντίστοιχη αναπαράσταση τους στο πλαίσιο $\{i-1\}$ (CRAIG, 2020).

$${}^{i-1}P = {}^{i-1}T {}^R T {}^Q T {}^P T {}^i P \quad (2.1)$$

ή

$${}^{i-1}P = {}^{i-1}T {}^i P \quad (2.2)$$

Όπου
$${}^{i-1}T = {}^{i-1}T {}^R T {}^Q T {}^P T {}^i T \quad (2.3)$$



Σχήμα 41: Ορισμός των ενδιάμεσων πλαισίων {P}, {Q} και {R} (CRAIG, 2020).

Εναλλακτικά η σχέση 2.3 διατυπώνεται από τις ακόλουθες σχέσεις 2.4 και 2.5:

$${}^{i-1}_i T = R_X(\alpha_{i-1}) D_X(\alpha_{i-1}) R_Z(\theta_i) D_Z(d_i) \quad (2.4)$$

ή

$${}^{i-1}_i T = \text{Screw}_X(\alpha_{i-1}, \alpha_{i-1}) \text{Screw}_Z(d_i, \theta_i) \quad (2.5)$$

Με τον συμβολισμό $\text{Screw}_Q(r, \varphi)$ συνδυάζεται περιεκτικά η μεταφορά πάνω σε έναν άξονα Q κατά r, και την περιστροφή σε σχέση με τον ίδιο άξονα κατά φ . Κάνοντας τους πολλαπλασιασμούς της σχέσης 2.4 προκύπτει μια γενική μορφή του μετασχηματισμού ${}^{i-1}_i T$:

$${}^{i-1}_i T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Σειρά μετασχηματισμών μελών

Αφού γίνει ο ορισμός των πλαισίων στα αντίστοιχα μέλη και υπολογιστούν οι παράμετροι, τότε εύκολα προσδιορίζονται οι κινηματικές εξισώσεις. Βάση των τιμών των παραμέτρων βρίσκονται οι πίνακες μετασχηματισμού για όλα τα μέλη. Έπειτα, οι επιμέρους πίνακες που προκύπτουν πολλαπλασιάζονται για την εύρεση ενός τελικού μετασχηματισμού που συνδέει τα πλαίσια {N} και {0}.

$${}^0_N T = {}^0_1 T {}^1_2 T {}^2_3 T \dots {}^{N-1}_N T \quad (2.7)$$

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

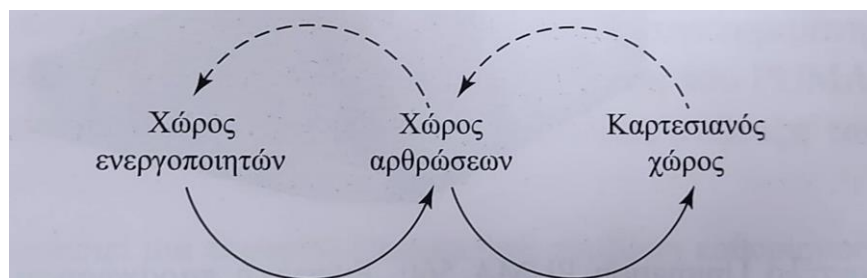
Ο μετασχηματισμός 0T_N περιλαμβάνει όλες τις μεταβλητές των αρθρώσεων, δηλαδή όλες οι n μεταβλητές. Οι αισθητήρες θέσης των αρθρώσεων μπορούν να παραληφθούν για να υπολογιστεί ο μετασχηματισμός 0T_N , το οποίο περιλαμβάνει την Καρτεσιανή θέση και τον προσανατολισμό του n μέλους.

2.7 Χώρος ενεργοποιητών, χώρος αρθρώσεων και Καρτεσιανός χώρος

Όλες οι θέσεις των τμημάτων ενός ρομποτικού βραχίονα που φέρει n βαθμοί ελευθερίας, μπορούν να εκφραστούν ως συνάρτηση των n μεταβλητών των αρθρώσεων. Συνολικά οι συγκεκριμένες μεταβλητές αναφέρονται ως διάνυσμα των αρθρώσεων $n \times 1$. Επιπλέον, ο χώρος που περιλαμβάνει όλα τα διανύσματα αυτά καλείται χώρος των αρθρώσεων. Με τον όρο Καρτεσιανός χώρος, υποδηλώνεται πως ο υπολογισμός της θέσης πραγματοποιείται με την βοήθεια ενός συστήματος ορθογωνίων αξόνων και του προσανατολισμού με βάση τις συμβάσεις που προαναφέρθηκαν παραπάνω. Σε ορισμένες περιπτώσεις εναλλακτικά ο όρος Καρτεσιανός χώρος καλείται και χρηστικός χώρος ή χώρος δράσης (CRAIG, 2020).

Στην πλειονότητα των βιομηχανικών ρομπότ δεν ισχύει η υπόθεση πως κάθε κινούμενη άρθρωση κινείται μέσω ενός ενεργοποιητή. Αυτό φαίνεται στο παράδειγμα όπου δύο ενεργοποιητές λειτουργούν ταυτόχρονα σε ένα διαφορικό ζεύγος για να μεταδώσουν κίνηση σε μια μόνο άρθρωση. Μια ακόμη περίπτωση κατά την οποία ισχύει αυτό είναι όταν ένας γραμμικός ενεργοποιητής χρησιμοποιείται για την περιστροφή μιας περιστροφικής άρθρωσης που ανήκει σε ένα μηχανισμό που φέρει τέσσερα τμήματα. Συνεπώς, έχει σημασία σε τέτοιο είδους περιπτώσεις να αναφερθεί η έννοια των θέσεων των ενεργοποιητών. Οι αισθητήρες που έχουν ρόλο την ανίχνευση της θέσης του ρομποτικού βραχίονα, συχνά προσαρτώνται πάνω στους ενεργοποιητές. Για αυτό χρειάζεται να γίνουν κάποιοι υπολογισμοί με στόχο την εύρεση του διανύσματος των αρθρώσεων που συσχετίζεται με το σύνολο των τιμών των ενεργοποιητών ή του διανύσματος των ενεργοποιητών (CRAIG, 2020).

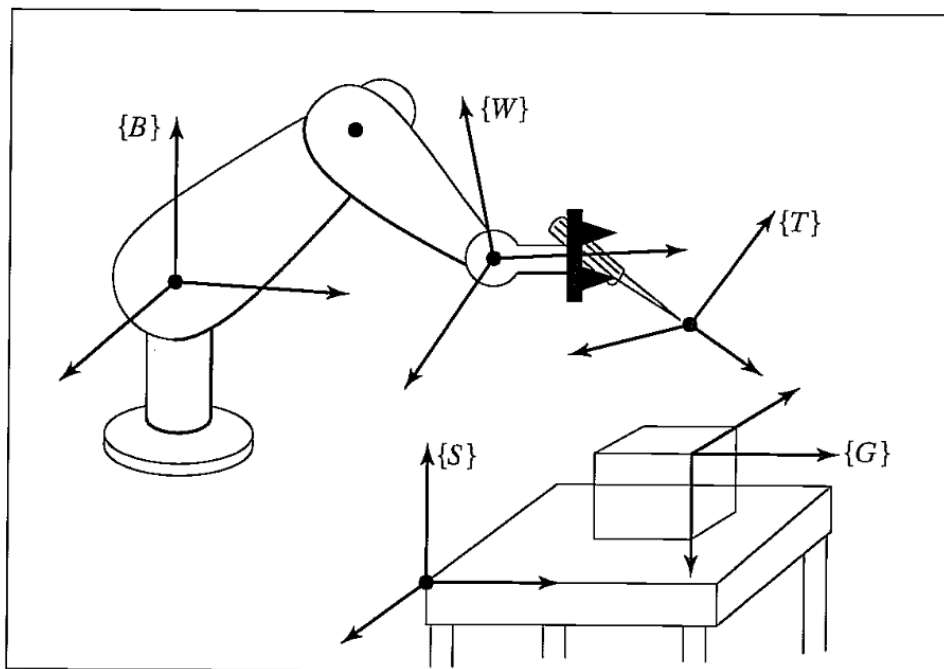
Βάση του σχήματος που ακολουθεί παρακάτω, φαίνεται πως υπάρχουν τρεις τρόποι για την αναπαράσταση της θέσης και του προσανατολισμού για ένα ορισμένο βραχίονα: απεικόνιση στον χώρο των ενεργοποιητών, στον χώρο των αρθρώσεων και στον χρηστικό χώρο. Στο σχήμα 43 τα διακεκομμένα βέλη που απεικονίζονται δηλώνουν το πρόβλημα της αντίστροφης απεικόνισης (CRAIG, 2020).



Σχήμα 42: Εναλλακτικοί τρόποι αναπαράστασης της θέσης και του προσανατολισμού για ένα ρομποτικό βραχίονα μεταξύ κινηματικών αναπαραστάσεων (CRAIG, 2020).

2.8 Καθιερωμένα πλαίσια

Για την διευκόλυνση της κατανόησης της αναπαράστασης ενός ρομπότ και του χώρου εργασίας του δίνονται ειδικές ονομασίες και θέσεις σε ορισμένα <<καθιερωμένα>> πλαίσια (CRAIG, 2020).



Σχήμα 43: Τα πλαίσια καθιερωμένης χρήσης (CRAIG, 2020).

Στο σχήμα 44 παρουσιάζεται μια περίπτωση κατά την οποία ένα ρομπότ που συγκρατεί ένα εργαλείο και προετοιμάζεται να το τοποθετήσει σε μια ορισμένη τοποθεσία με τέτοιο τρόπο ώστε η άκρη του να έρθει σε επαφή με την προεπιλεγμένη θέση. Τα πλαίσια που εμφανίζονται στο σχήμα 44 αξιοποιούνται για την περιγραφή της κίνησης του ρομπότ (CRAIG, 2020).

Πλαίσιο Βάσης {B}

Το πλαίσιο {B} τοποθετείται στην βάση του βραχίονα και αποτελεί το πλαίσιο {0}. Το συγκεκριμένο πλαίσιο προσαρτάται στο σταθερό μέρος του βραχίονα και που ονομάζεται μέλος μηδέν (CRAIG, 2020).

Πλαίσιο σταθμού {S}

Το πλαίσιο {S} βρίσκεται σε θέση που είναι άμεσα συνδεδεμένη με την εκτελούμενη εργασία. Για ένα χρήστη, το {S} πλαίσιο αποτελεί ένα απόλυτο σύστημα συντεταγμένων και κάθε κίνηση που πραγματοποιείται περιγράφεται σε σχέση με αυτό. Συνήθως, το συγκεκριμένο πλαίσιο καλείται <<πλαίσιο εργασίας>> ή <<παγκόσμιο πλαίσιο>> και πάντα προσδιορίζεται σε σχέση με το πλαίσιο βάσης μέσω του μετασχηματισμού ${}^B_S T$ (CRAIG, 2020).

Πλαίσιο καρπού {W}

Προσαρτάται στο τελευταίο μέλος του ρομποτικού βραχίονα και αποτελεί εναλλακτική ονομασία για το πλαίσιο {N} που είναι το πλαίσιο του τελευταίου μέλους του ρομπότ. Το κέντρο του πλαισίου {W} εντοπίζεται στο σημείο που καλείται καρπός του βραχίονα και μετατοπίζεται μαζί με το τελευταίο τμήμα του ρομπότ. Επιπλέον, συνδέεται με το πλαίσιο βάσης σύμφωνα με την σχέση : $\{W\} = {}_W^B T = {}_N^0 T$ (CRAIG, 2020).

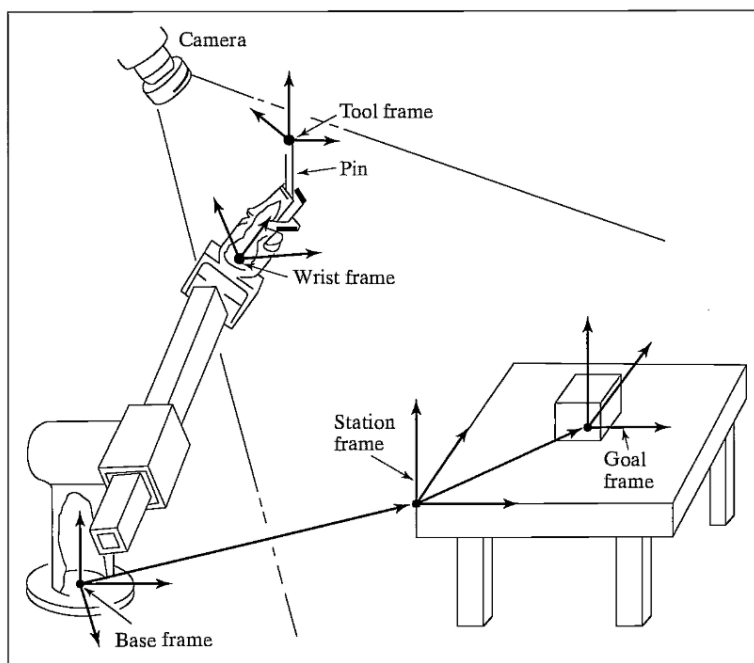
Πλαίσιο εργαλείου {T}

Το πλαίσιο {T} προσαρτάται στο άκρο του εργαλείου που χρησιμοποιεί ο ρομποτικός βραχίονας. Σε περίπτωση που το χέρι του βραχίονα είναι άδειο, τότε το πλαίσιο {T} προσαρτάται στο κέντρο του χεριού ανάμεσα στα ακροδάχτυλα. Επιπλέον, το πλαίσιο του εργαλείου προσδιορίζεται σε σχέση με το πλαίσιο του καρπού (CRAIG, 2020).

Πλαίσιο στόχευσης {G}

Ως πλαίσιο αποτελεί την θέση προς την οποία το ρομπότ κατευθύνει το εργαλείο. Συγκεκριμένα, συνεπάγεται ότι αφού ολοκληρωθεί η κίνηση του βραχίονα θα πρέπει τα κέντρα των πλαισίων {T} και {G} να ταυτίζονται. Το πλαίσιο προορισμού ορίζεται σε όλες τις περιπτώσεις σε σχέση με το πλαίσιο σταθμού.

Κάθε κίνηση του βραχίονα μπορεί να αναλυθεί με βάση των προαναφερόμενων πλαισίων χωρίς να υπάρξει απώλεια της γενικότητας. Επίσης, η εφαρμογή των οποίων βοηθά στην υλοποίηση μιας ολοκληρωμένης γλώσσας που περιγράφει τις κινήσεις ενός ρομποτικού βραχίονα στο χώρο (CRAIG, 2020).



Σχήμα 44: Παράδειγμα προσάρτησης πλαισίων (CRAIG, 2020).

2.9 Εντοπισμός εργαλείου

Είναι σημαντικό ένα ρομπότ να μπορεί να υπολογίσει την θέση και τον προσανατολισμό του άκρου εργασίας του κάθε στιγμή κατά την εκτέλεση μιας διεργασίας. Για να πραγματοποιηθεί ο συγκεκριμένος υπολογισμός, γίνεται μια αναφορά σε ένα σύστημα συντεταγμένων που διευκολύνει τον συνολικό υπολογισμό. Με άλλα λόγια η διαδικασία που εκτελείται είναι ο υπολογισμός της τιμής του πλαισίου του εργαλείου $\{T\}$ σε σχέση με το πλαίσιο σταθμού $\{S\}$. Με την βοήθεια του υπολογισμένου πίνακα ${}^B_W T$ και των κινηματικών εξισώσεων υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού του πλαισίου $\{T\}$ σε σχέση με το πλαίσιο $\{S\}$. Έτσι, η επίλυση εξίσωσης μετασχηματισμών δίνει το παρακάτω αποτέλεσμα:

$${}^S_T = {}^B_T^{-1} {}^B_W T {}^W_T T \quad (2.8)$$

Η σχέση 2.8 σε ένα ρομποτικό σύστημα ονομάζεται συνάρτηση εντοπισμού και μέσω της οποίας υπολογίζεται η θέση του βραχίονα. Επιπρόσθετα, η συγκεκριμένη σχέση αποτελεί μια γενίκευση της κινηματικής. Δηλαδή, ο πίνακας S_T υπολογίζει την κινηματική με βάση την γεωμετρία του βραχίονα ${}^B_W T$ και έναν γενικό μετασχηματισμό του σταθμού σε σχέση με την βάση (${}^B_S T$) και ένα τελευταίο μετασχηματισμό που εμπεριέχει τον αποληκτήριο επενεργητή (${}^W_T T$). Με αυτούς τους μετασχηματισμούς παρέχεται η δυνατότητα προσθήκης εργαλείων με μετατοπίσεις και συστροφές, και επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα πραγματοποίησης εργασιών με ένα οποιοδήποτε τυχαίο ορισμένο πλαίσιο σταθμού (CRAIG, 2020).

2.10 Εισαγωγή Ιακωβιανές

Η μελέτη των ταχυτήτων και των δυνάμεων δίνει μια μαθηματική οντότητα που ονομάζεται Ιακωβιανή (CRAIG, 2020). Μέσω της ταχύτητας του σώματος ή την υβριδική ταχύτητα περιγράφεται η ταχύτητα του άκρου του βραχίονα. Οι Ιακωβιανές ενός ρομποτικού βραχίονα είναι πίνακες που δημιουργούν το διάνυσμα που αντιστοιχεί στις ταχύτητες των αρθρώσεων σε συνάρτηση με την ταχύτητα σώματος του άκρου (Ιακωβιανή άκρου) ή με την υβριδική ταχύτητα του άκρου (Ιακωβιανή βραχίονα) (CRAIG, 2020).

2.11 Περιγραφή για χρονικά μεταβαλλόμενη θέση και προσανατολισμό

Παραγωγή διανυσμάτων θέσης

Η ακόλουθη σχέση αποτελεί βάση για την μελέτη των ταχυτήτων που δίνει τον συμβολισμό για την παράγωγο ενός διανύσματος:

$${}^B V_Q = \frac{d}{dt} {}^B Q = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{{}^B Q(t+\Delta t) - {}^B Q(t)}{\Delta t} \quad (2.9)$$

Η ταχύτητα για ένα διάνυσμα θέσης ισοδυναμεί με την γραμμική ταχύτητα ενός σημείου του χώρου που απεικονίζεται με το διάνυσμα θέσης. Με την σχέση 2.9 υπολογίζεται η παράγωγο του Q ως προς το πλαίσιο $\{B\}$. Έτσι, σε περίπτωση που το Q είναι αμετάβλητο σε σχέση με το πλαίσιο $\{B\}$, τότε προκύπτει τιμή ταχύτητας μηδέν, ακόμα και αν το πλαίσιο $\{Q\}$ μεταβάλλεται σε σχέση με κάποιο άλλο πλαίσιο. Συνεπώς, έχει μεγάλη σημασία να φαίνεται το πλαίσιο ως προς το οποίο πραγματοποιείται η παραγωγή (CRAIG, 2020).

Εκφρασμένο ως προς το πλαίσιο $\{A\}$, το διάνυσμα της ταχύτητας από την σχέση 2.9 παίρνει την ακόλουθη έκφραση :

$${}^A({}^B V_Q) = \frac{d}{dt} {}^B Q \quad (2.10)$$

Από την σχέση 2.10 προκύπτει το εξής συμπέρασμα, το διάνυσμα της ταχύτητας συνδέεται με ένα σημείο του χώρου. Αντίθετα, οι αριθμητικές τιμές που απεικονίζουν την ταχύτητα του συγκεκριμένου σημείου εκφράζεται από δύο πλαίσια. Το ένα πλαίσιο ως προς το οποίο πραγματοποιήθηκε η παραγωγή και το δεύτερο ως προς το οποίο αναλύθηκε το διάνυσμα της ταχύτητας, το οποίο προκύπτει από την παραγωγή (CRAIG, 2020).

Για την διευκόλυνση του συμβολισμού αξιοποιείται η ακόλουθη σχέση :

$${}^B({}^B V_Q) = {}^B V_Q \quad (2.11)$$

Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα απαλοιφής του εξωτερικού προπορευόμενου εκθέτη με την προσθήκη στον συμβολισμό τον πίνακα περιστροφής που μεταβάλλει το πλαίσιο αναφοράς. Στην ακόλουθη σχέση φαίνεται η συγκεκριμένη διαδικασία:

$${}^A({}^B V_Q) = {}^A_B R {}^B V_Q \quad (2.12)$$

Για την ταχύτητα ορίζονται σχέσεις όπως η σχέση (2.12), με σκοπό ο συμβολισμός που εκφράζει την ταχύτητα θα αντιπροσωπεύουν την ταχύτητα στο πλαίσιο παραγωγής, χωρίς την ύπαρξη εξωτερικών πορευμένων εκθέτων (CRAIG, 2020).

Συνήθως, μελετάται η ταχύτητα της αρχής του συστήματος συντεταγμένων ενός πλαισίου ως προς ένα καθολικό σύστημα αναφοράς, αντί της ταχύτητας που αντιστοιχεί σε ένα τυχαίο σημείο ως προς αυθαίρετο πλαίσιο. Για τέτοια περίπτωση αξιοποιείται η ακόλουθη σχέση :

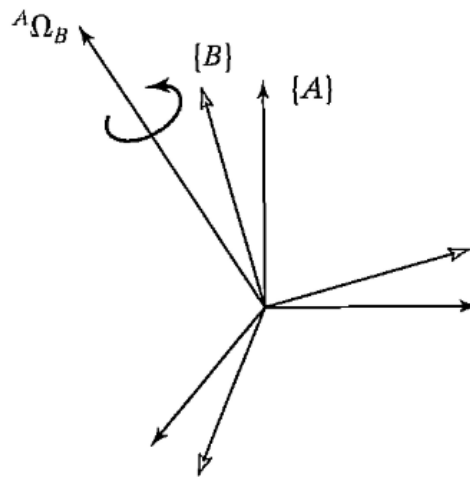
$$U_C = {}^U V_{CORG} \quad (2.13)$$

Καθώς μελετάται το σημείο που αποτελεί το κέντρο του πλαισίου $\{C\}$ και το δεδομένο πλαίσιο $\{U\}$ (CRAIG, 2020).

Διάνυσμα γωνιακής ταχύτητας

Το διάνυσμα της γωνιακής ταχύτητας συμβολίζεται ως Ω , σε αντίθεση με την γραμμική ταχύτητα που εκφράζει την ιδιότητα ενός μόνο σημείου, η γωνιακή ταχύτητα χαρακτηρίζει την ιδιότητα ενός ολόκληρου σώματος. Λόγω, της τοποθέτησης των πλαισίων στα σώματα που αναλύονται, προκύπτει πως η γωνιακή κίνηση ενός πλαισίου χαρακτηρίζεται από την γωνιακή ταχύτητα (CRAIG, 2020).

Όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα 46, η γωνιακή ταχύτητα ${}^A \Omega_B$ εκφράζει την περιστροφή του πλαισίου $\{B\}$ σε σχέση με το πλαίσιο $\{A\}$. Φυσικά η γωνιακή ταχύτητα δηλώνει το εξής: Κάθε χρονική στιγμή, μέσω της διεύθυνσης της ${}^A \Omega_B$ απεικονίζεται ο στιγμιαίος άξονας περιστροφής του πλαισίου $\{B\}$ σε σχέση με το πλαίσιο $\{A\}$, ενώ το μέτρο της ${}^A \Omega_B$ περιγράφει την ταχύτητα περιστροφής. Για παράδειγμα, η γωνιακή ταχύτητα ${}^C ({}^A \Omega_B)$ αναφέρεται στο πλαίσιο $\{B\}$ σε σχέση με το πλαίσιο $\{A\}$, εκφρασμένη στο $\{C\}$ πλαίσιο.



Σχήμα 45: Περιστροφή του πλαισίου {B} με γωνιακή ταχύτητα ${}^A\Omega_B$ σε σχέση με το {A} πλαίσιο (CRAIG, 2020).

Ένας συμβολισμός για την συγκεκριμένη περίπτωση που διευκολύνει είναι ο εξής:

$$\omega_C = {}^U\Omega_C \quad (2.14)$$

Στην σχέση 2.14 η γωνιακή ταχύτητα του πλαισίου {C} είναι αναφορικά με το καθιερωμένο πλαίσιο αναφοράς {U} (CRAIG, 2020).

2.12 Γραμμική και γωνιακή ταχύτητα

Γραμμική ταχύτητα

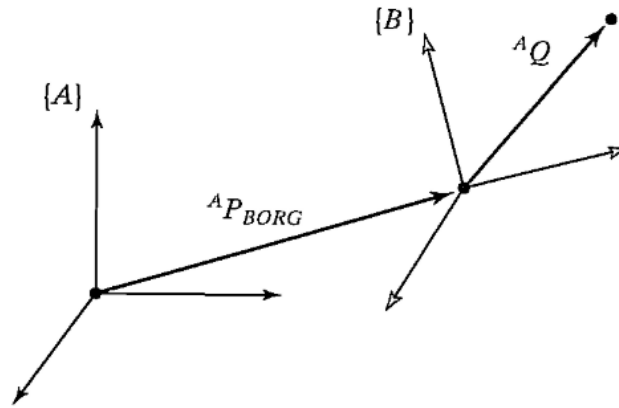
Έστω ένα πλαίσιο {B} που είναι κατάλληλα προσαρτημένο σε ένα στερεό σώμα και ζητείται η περιγραφή της κίνησης του BQ αναφορικά με το πλαίσιο {A}, όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα 47 που ακολουθεί παρακάτω (CRAIG, 2020).

Για την περιγραφή της θέσης του πλαισίου {B} ως προς το πλαίσιο {A} χρησιμοποιείται το διάνυσμα θέσης ${}^A P_{BORG}$ και ο πίνακας περιστροφής ${}^A R_B$. Υποθετικά λαμβάνεται σταθερός ο προσανατολισμός ${}^A R_B$ σε σχέση με το χρόνο. Επομένως, η κίνηση του Q σε σχέση με το πλαίσιο {A} προκαλείται λόγω της μεταβολής του διανύσματος ${}^A P_{BORG}$ ή του BQ ως προς το χρόνο.

Εύκολα προσδιορίζεται η γραμμική ταχύτητα του σημείου Q σε σχέση με το πλαίσιο {A}, εκφράζοντας τις συνιστώσες της ταχύτητας ως προς το {A} και αθροίζοντας τα, όπως φαίνεται παρακάτω:

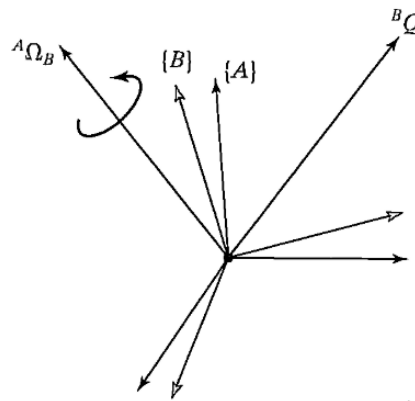
$${}^A V_Q = {}^A V_{BORG} + {}^A R_B {}^B V_Q \quad (2.15)$$

Η συγκεκριμένη σχέση 2.15 ισχύει για σχετικούς σταθερούς προσανατολισμούς {B} και {A} (CRAIG, 2020).



Σχήμα 46: Μετατόπιση του πλαισίου {B} ως προς το {A} με ορισμένη ταχύτητα ${}^A V_{BORG}$ (CRAIG, 2020).

Ταχύτητα περιστροφής



Σχήμα 47: Διάνυσμα ${}^B Q$ σταθερό ως προς το {B} πλαίσιο, ενώ περιστρέφεται ως προς το {A} έχοντας γωνιακή ταχύτητα ${}^A \Omega_B$ (CRAIG, 2020).

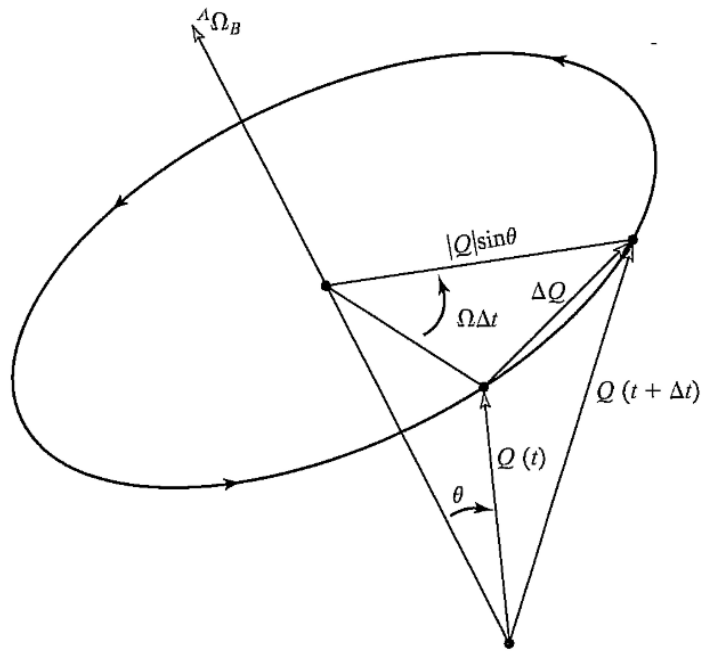
Στο σχήμα 48 παρουσιάζονται δύο πλαίσια με κοινό κέντρο συντεταγμένων και μηδενική γραμμική ταχύτητα, για αυτό και τα κέντρα τους θα ταυτίζονται κάθε χρονική στιγμή. Τα δύο πλαίσια μπορούν να προσαρτηθούν ξεχωριστά ή μαζί σε στερεά σώματα, ωστόσο για διευκόλυνση της αναπαράστασης αυτό παραλείπεται σχηματικά.

Κάθε χρονική στιγμή ο προσανατολισμός του {B} ως προς το {A} αλλάζει. Επιπλέον, το διάνυσμα ${}^A \Omega_B$ περιγράφει την ταχύτητα περιστροφής του {B} σε σχέση με το πλαίσιο {A}. Στο σχήμα 48 παρουσιάζεται επιπρόσθετα ένα σταθερό σημείο ${}^B Q$, που ανήκει στο πλαίσιο {B} (CRAIG, 2020).

Ένα σημαντικό ζήτημα αποτελεί η χρονική μεταβολή ενός διανύσματος που είναι σταθερό ως προς ένα ορισμένο πλαίσιο {B}, περιγράφοντας το σε σχέση με ένα διαφορετικό πλαίσιο {A}, καθώς τα συγκεκριμένα πλαίσια περιστρέφονται το ένα προς το άλλο.

Δηλαδή υποθετικά, καθώς μελετάται το διάνυσμα Q σε σχέση με το πλαίσιο {B} παραμένει σταθερό. Συνεπώς, ισχύει η σχέση 2.16:

$${}^B V_Q = 0 \quad (2.16)$$



Σχήμα 48: Διανυσματική απεικόνιση της ταχύτητας ενός σημείου λόγω γωνιακής ταχύτητας (CRAIG, 2020).

Εύκολα παρατηρείται πως το σημείο Q εφόσον είναι σταθερό σε σχέση με το πλαίσιο {B}, θα έχει ορισμένη ταχύτητα στην περίπτωση που η παρατήρηση γίνεται από το πλαίσιο {A}, αποτέλεσμα της σχετικής ταχύτητας περιστροφής ${}^A\Omega_B$. Για να γίνει υπολογισμός της συγκεκριμένης ταχύτητας χρησιμοποιείται μια διαισθητική συλλογιστική. Στο παραπάνω σχήμα 49 φαίνονται δύο στιγμιότυπα για το Q κατά την περιστροφή του γύρω από το διάνυσμα ${}^A\Omega_B$.

Βάση το σχήμα 49 είναι φανερό ότι η μεταβολή του ${}^A Q$ χρειάζεται να είναι κάθετη ταυτόχρονα στο ${}^A\Omega_B$ και ${}^A Q$. Επιπλέον, προκύπτει πως το μέτρο της διαφορικής μεταβολής δίνεται από :

$$|\Delta Q| = (|{}^A Q| \sin \theta)(|{}^A\Omega_B| \Delta t) \quad (2.17)$$

Από τις συνθήκες για το μέτρο και την διεύθυνση ισχύει η παρακάτω σχέση:

$${}^A V_Q = {}^A\Omega_B \times {}^A Q \quad (2.18)$$

Σε μια γενική περίπτωση, το διάνυσμα Q θα μεταβαλλόταν επίσης ως προς το πλαίσιο {B}, συμπεριλαμβάνοντας το συγκεκριμένο στοιχείο.

$${}^A V_Q = {}^A ({}^B V_Q) + {}^A\Omega_B \times {}^A Q \quad (2.19)$$

Για την αποφυγή χρήσης διπλού προπορευόμενου εκθέτη αξιοποιείται ένας πίνακας περιστροφής και αντικαθίσταται το ${}^A Q$ μέσω του γινομένου ${}^B Q {}^A_B R$, δίνοντας την σχέση :

$${}^A V_Q = {}^A_B R {}^B V_Q + {}^A\Omega_B \times {}^B Q {}^A_B R \quad (2.20)$$

*Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα
Συνδυασμός γραμμικής και περιστροφικής ταχύτητας*

Η σχέση 2.20 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περιπτώσεις που τα κέντρα των πλαισίων δεν ταυτίζονται, με την προσθήκη της γραμμικής ταχύτητας της αρχής των αξόνων του {B} πλαισίου με στόχο την δημιουργία της γενικής εξίσωσης για την ταχύτητα ενός διανύσματος σταθερού πλαισίου {B}, όπως αυτό προκύπτει βάση πλαισίου {A}:

$${}^A V_Q = {}^A V_{BORG} + {}^A_R {}^B V_Q + {}^A \Omega_B \times {}^B Q {}^A_R \quad (2.21)$$

Από την σχέση 2.21 περιγράφεται η παράγωγός ενός διανύσματος που εντάσσεται σε ένα μη σταθερό πλαίσιο, έτσι όπως φαίνεται από ένα σταθερό πλαίσιο (CRAIG, 2020).

Ανάλυση γωνιακής ταχύτητας /ιδιότητα της παραγώγου των ορθοκανονικών πινάκων

Μεταξύ μιας παραγώγου ενός ορθοκανονικού πίνακα και ενός αντισυμμετρικού πίνακα προκύπτει μια σημαντική συσχέτιση, με τα εξής βήματα: Για κάθε ορθοκανονικό πίνακα R ισχύει η σχέση

$$RR^T = I_n \quad (2.22)$$

Με I_n συμβολίζεται ένας μοναδιαίος $n \times n$ πίνακας. Για την συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται $n=3$ και με το R δίνεται ένας ομαλός ορθοκανονικός πίνακας ή πίνακας περιστροφής. Η παραγωγή της σχέσης 2.22 δίνει

$$\dot{R}R^T + R\dot{R}^T = 0_n \quad (2.23)$$

Με το 0_n δίνεται ο μηδενικός πίνακας $n \times n$. Επιπλέον, ορίζεται η παρακάτω σχέση:

$$S = \dot{R}R^T \quad (2.24)$$

Έτσι, προκύπτει :

$$S + S^T = 0_n \quad (2.25)$$

Επομένως, το S αντιστοιχεί σε αντισυμμετρικό πίνακα και επιπλέον υπάρχει μια ιδιότητα που συνδέει τους αντισυμμετρικούς πίνακες με την παράγωγο των ορθοκανονικών πινάκων, που διατυπώνεται ως :

$$S = \dot{R}R^{-1} \quad (2.26)$$

Ταχύτητα σημείου λόγω περιστροφής του πλαισίου αναφοράς

Με την υπόθεση ενός σταθερού διανύσματος ${}^B P$, το οποίο είναι σταθερό ως προς το πλαίσιο {B}, προκύπτει η αναπαράσταση του σε σχέση με ένα διαφορετικό πλαίσιο {A} από την εξής σχέση :

$${}^A P = {}^A_R {}^B P \quad (2.27)$$

Αν το πλαίσιο {B} περιστρέφεται τότε το διάνυσμα ${}^A P$ θα μεταβάλλεται ακόμη και στη περίπτωση που το διάνυσμα ${}^B P$ είναι σταθερό. Έτσι προκύπτει η σχέση :

$$\dot{{}^A P} = {}^A_R \dot{{}^B P} \quad (2.28)$$

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα
Αξιοποιώντας τις προαναφερόμενες σχέσεις για την ταχύτητα :

$${}^A V_P = {}^A_B R {}^B P \quad (2.29)$$

Από την σχέση 2.29 αντικαθίσταται το ${}^B P$, δίνοντας:

$${}^A V_P = {}^A_B R {}^A_B R^{-1} {}^A P \quad (2.30)$$

Συνδυάζοντας την σχέση για τους ορθοκανονικούς πίνακες 2.26 :

$${}^A V_P = {}^A S {}^A P \quad (2.31)$$

Αντισυμμετρικοί πίνακες και εξωτερικό γινόμενο διανυσμάτων

Αναλυτική μορφή ενός αντισυμμετρικού πίνακα S φαίνεται παρακάτω:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ -\Omega_y & \Omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Ο ορισμός ενός πίνακα στήλης 3×1 :

$$\Omega = \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Ως Ω χαρακτηρίζεται το διάνυσμα γωνιακής ταχύτητας και φέρει πίνακα γωνιακής ταχύτητας 3×1 .

Με το συνδυασμό των δύο προαναφερόμενους πίνακες προκύπτει :

$$S P = \Omega \times P \quad (2.34)$$

Με P συμβολίζεται ένα τυχαίο διάνυσμα και η πράξη που εκτελείται είναι εξωτερικό γινόμενο διανυσμάτων.

Συνεπώς, η σχέση 2.31 συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις τροποποιείται ως εξής:

$${}^A V_P = {}^A \Omega_B \times {}^A P \quad (2.31)$$

Φυσική διατύπωση του διανύσματος της γωνιακής ταχύτητας

Πιο αναλυτικά η φυσική ερμηνεία της γωνιακής ταχύτητας, προκύπτει με την απευθείας παραγωγήση ενός πίνακα περιστροφής, όπως φαίνεται ακολούθως:

$$\dot{R} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t+\Delta t) - R(t)}{\Delta t} \quad (2.32)$$

Με την αναδιατύπωση του $R(t+\Delta t)$, λαμβάνοντας το ως σύνθεση δύο πινάκων :

$$R(t+\Delta t) = R_K(\Delta\theta) R(t) \quad (2.33)$$

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

Όπου κατά το χρονικό διάστημα Δt έχει πραγματοποιηθεί μια μικρή περιστροφή $\Delta\theta$, γύρω από τον άξονα \hat{K} . Μέσω της σχέσης 2.33 αναδιατυπώνεται η σχέση 2.32ως εξής:

$$\dot{R} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{R_K(\Delta\theta) - I_3}{\Delta t} R(t) \right) \quad (2.34)$$

Λαμβάνοντας υποθετικά πολύ μικρές γωνίες και συνδυάζοντας προαναφερόμενη σχέση προκύπτει :

$$R_K(\Delta\theta) = \begin{bmatrix} 1 & -k_z\Delta\theta & k_y\Delta\theta \\ k_z\Delta\theta & 1 & -k_x\Delta\theta \\ -k_y\Delta\theta & k_x\Delta\theta & 1 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Επομένως, αναδιατυπώνεται σε τελική μορφή με την σχέση 2.34 στο εξής:

$$\dot{R} = \left(\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\begin{bmatrix} 0 & -k_z\Delta\theta & k_y\Delta\theta \\ k_z\Delta\theta & 0 & -k_x\Delta\theta \\ -k_y\Delta\theta & k_x\Delta\theta & 0 \end{bmatrix}}{\Delta t} \right) R(t) \quad (2.36)$$

Τελικά, διατηρώντας το Δt και υπολογίζοντας το όριο συνεπάγεται :

$$\dot{R} = \begin{bmatrix} 0 & -k_z\dot{\theta} & k_y\dot{\theta} \\ k_z\dot{\theta} & 0 & -k_x\dot{\theta} \\ -k_y\dot{\theta} & k_x\dot{\theta} & 0 \end{bmatrix} R(t) \quad (2.37)$$

Επιπλέον, προκύπτει η παρακάτω παρατήρηση :

$$\dot{R}R^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ -\Omega_y & \Omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

Όπου

$$\Omega = \begin{bmatrix} \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x\dot{\theta} \\ k_y\dot{\theta} \\ k_z\dot{\theta} \end{bmatrix} = \dot{\theta}\hat{K} \quad (2.39)$$

Τέλος, η φυσική σημασία του διανύσματος της γωνιακής ταχύτητας Ω είναι ότι κάθε χρονική στιγμή, η μεταβολή του προσανατολισμού ενός περιστρεφόμενου πλαισίου ισοδυναμεί με μια περιστροφή ως προς έναν άξονα \hat{K} . Ο συγκεκριμένος στιγμιαίος άξονας περιστροφής, θεωρούμενος αρχικά ως μοναδιαίο διάνυσμα και στη συνέχεια κλιμακούμενος με συντελεστή την ταχύτητα περιστροφής $\dot{\theta}$ γύρω από αυτόν, δίνει ως αποτέλεσμα το διάνυσμα της γωνιακής ταχύτητας (CRAIG, 2020).

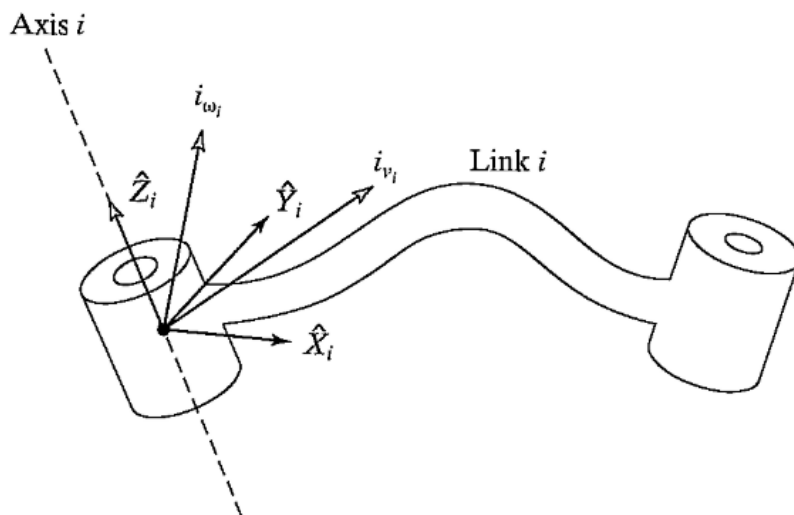
2.13 Κίνηση τμημάτων του ρομπότ

Κατά την εξέταση της κίνησης των τμημάτων ενός ρομπότ, λαμβάνεται το πλαίσιο $\{0\}$ ως πλαίσιο αναφοράς. Συνεπώς, η γραμμική ταχύτητα του κέντρου του πλαισίου $\{i\}$ λαμβάνεται ως u_i και αντίστοιχα ως ω_i η γωνιακή ταχύτητα του κέντρου του πλαισίου $\{i\}$. Κατά την κίνηση ενός ρομποτικού βραχίονα κάθε χρονική στιγμή διαθέτει μια γραμμική και μια γωνιακή ταχύτητα (CRAIG, 2020).

2.14 Μετάδοση ταχύτητας στα μέλη

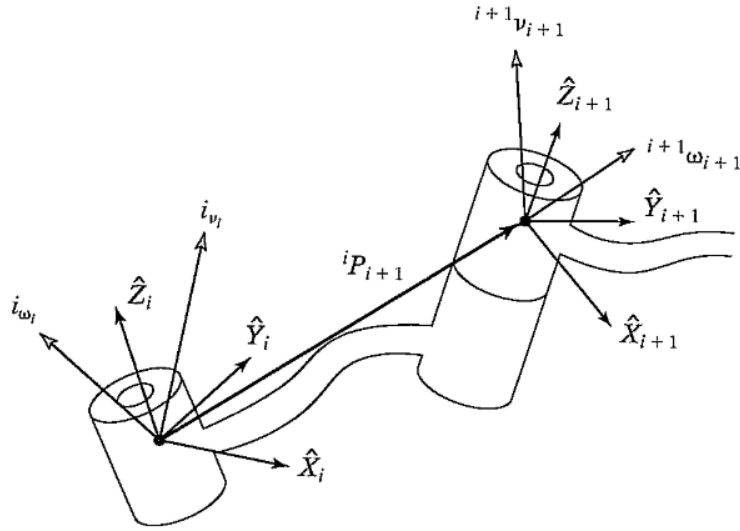
Ένας ρομποτικός βραχίονας δομείται από μια αλυσίδα στερεών σωμάτων και το κάθε ένα από τα οποία έχει τη δυνατότητα να κινείται ελεύθερα σε σχέση με τα γειτονικά του μέλη. Επομένως, ο υπολογισμός της ταχύτητας του κάθε μέλος ξεχωριστά πραγματοποιείται με μια ορισμένη σειρά, ξεκινώντας από την βάση του βραχίονα. Η ταχύτητα που ανήκει στο μέλος $i+1$ θα δίνεται ως ταχύτητα του μέλους i προσαυξημένη κατά την νέα συνιστώσα της ταχύτητας από την κίνηση της άρθρωσης $i+1$.

Όπως είναι φανερό από το ακόλουθο σχήμα 50, θεωρητικά κάθε μέλος του μηχανισμού αποτελεί ένα στερεό σώμα του οποίου η κίνηση εκφράζεται μέσω από ένα διάνυσμα γραμμικής ταχύτητας και ένα διάνυσμα γωνιακής ταχύτητας. Επίσης, οι συγκεκριμένες ταχύτητες θα εκφράζονται σε σχέση με το πλαίσιο του μέλους και όχι του πλαισίου βάσης.



Σχήμα 49: Προσδιορισμός της ταχύτητας του τμήματος i μέσω της γραμμικής ταχύτητας u_i και της γωνιακής ταχύτητας ω_i . Αυτές οι ταχύτητες απεικονίζονται σε σχέση με οποιοδήποτε πλαίσιο αναφοράς ενός μέλους του μηχανισμού (CRAIG, 2020).

Στο σχήμα 50 γίνεται φανερό πως τα μέλη i και $i+1$ και τα διανύσματα των ταχυτήτων είναι ορισμένα ως προς τα αντίστοιχα μέλη.



Σχήμα 50: Απεικόνιση διανυσμάτων ταχύτητας γειτονικών μελών (CRAIG, 2020).

Για να γίνει η πρόσθεση ταχυτήτων περιστροφής απαιτείται και τα διανύσματα ω να είναι εκφρασμένα σε σχέση με το ίδιο πλαίσιο αναφοράς. Έτσι, η γωνιακή ταχύτητα που ανήκει στο μέλος $i+1$ είναι η ταχύτητα του μέλους i αυξημένη κατά μια συνιστώσα που δημιουργείται μέσω της ταχύτητας περιστροφής της άρθρωσης $i+1$. Η μαθηματική διατύπωση της συγκεκριμένης διαδικασίας αναλύεται ως προς το πλαίσιο $\{i\}$ με τον εξής τρόπο:

$${}^i\omega_{i+1} = {}^i\omega_i + {}_{i+1}{}^iR \theta_{i+1} \dot{} \quad {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (2.40)$$

Συμπληρωματικά έχουμε:

$$\theta_{i+1} \dot{} \quad {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} = {}^{i+1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \theta_{i+1} \dot{} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

Με τον πολλαπλασιασμό των δύο μελών της εξίσωσης 2.40 με τον όρο ${}^{i+1}{}^iR$, εκφράζεται η γωνιακή ταχύτητα του μέλους $i+1$ σε σχέση με το πλαίσιο $\{i+1\}$.

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}{}^iR \quad {}^i\omega_i + \theta_{i+1} \dot{} \quad {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (2.42)$$

Η γραμμική ταχύτητα του κέντρου του πλαισίου $i+1$, είναι η ταχύτητα του κέντρου του πλαισίου i συν την συνιστώσα που προέρχεται από την ταχύτητα περιστροφής του μέλους i . Έτσι συνεπάγεται η ακόλουθη εξίσωση:

$${}^i v_{i+1} = {}^i v_i + {}^i\omega_i \times {}^i P_{i+1} \quad (2.43)$$

Με τον πολλαπλασιασμό των δύο μελών της σχέσης 2.43 με τον όρο ${}^{i+1}{}^iR$, έχουμε:

$${}^{i+1} v_{i+1} = {}^{i+1}{}^iR ({}^i v_i + {}^i\omega_i \times {}^i P_{i+1}) \quad (2.44)$$

Αντίστοιχα, στην περίπτωση της πρισματικής άρθρωσης $i+1$, δίνεται :

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}{}^iR \quad {}^i\omega_i \quad (2.45)$$

$${}^{i+1} v_{i+1} = {}^{i+1}{}^iR ({}^i v_i + {}^i\omega_i \times {}^i P_{i+1}) + d_{i+1} \dot{} \quad {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \quad (2.46)$$

Με αυτό το τρόπο χρησιμοποιώντας τις παραπάνω εξισώσεις με αυτή τη σειρά, από μέλος σε μέλος, υπολογίζεται η γωνιακή ταχύτητα $\dot{\theta}_N$ και η γραμμική ταχύτητα \dot{x}_N του τελευταίου μέλους της αλυσίδας. Επίσης, οι συγκεκριμένες ταχύτητες περιγράφονται σε σχέση με το πλαίσιο $\{N\}$ (CRAIG, 2020).

2.15 Ιακωβιανές

Ο όρος Ιακωβιανή περιγράφει μια πολυδιάστατη μορφή της παραγώγου. Ως παράδειγμα λαμβάνεται ένα σύνολο έξι συναρτήσεων όπου κάθε μια εμπεριέχει έξι ανεξάρτητες μεταβλητές:

$$\begin{aligned}y_1 &= f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) \\y_2 &= f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) \\&\vdots \\y_6 &= f_6(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)\end{aligned}\quad (2.47)$$

Με τον διανυσματικό συμβολισμό προκύπτει η διατύπωση :

$$Y = F(X) \quad (2.48)$$

Για τον υπολογισμό των παραγώγων των y_i ως συναρτήσεις των x_j , εφαρμόζεται ο κανόνας της αλυσιδωτής παραγωγισής και προκύπτει:

$$\begin{aligned}\delta y_1 &= \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \delta x_1 + \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial x_6} \delta x_6 \\ \delta y_2 &= \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \delta x_1 + \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_2}{\partial x_6} \delta x_6 \\ &\vdots \\ \delta y_6 &= \frac{\partial f_6}{\partial x_1} \delta x_1 + \frac{\partial f_6}{\partial x_2} \delta x_2 + \dots + \frac{\partial f_6}{\partial x_6} \delta x_6\end{aligned}\quad (2.49)$$

Με αντίστοιχο τρόπο η σχέση 2.49, διατυπώνεται με διανυσματική έκφραση ως :

$$\delta Y = \frac{\partial F}{\partial X} \delta X \quad (2.50)$$

Ως Ιακωβιανή J , ορίζεται ο πίνακας των μερικών παραγώγων της σχέσης 2.50 (Πίνακας 6×6). Αν οι συναρτήσεις $f_i(X)$ δεν είναι γραμμικές συναρτήσεις, τότε οι μερικές παράγωγοι είναι συναρτήσεις των x_i και για αυτό υποστηρίζεται η εξής διατύπωση:

$$\delta Y = J(X) \delta X \quad (2.51)$$

Διαιρώντας με το Δt η σχέση 2.51 μετατρέπεται στην σχέση (2.52). Συνεπώς, η Ιακωβιανή μπορεί να δοθεί ως ένα τελεστής απεικόνισης των ταχυτήτων από τον χώρο X στον χώρο Y .

$$\dot{Y} = J(X) \dot{X} \quad (2.52)$$

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

Κάθε χρονική στιγμή, το X διαθέτει μια τιμή και ο πίνακας $J(X)$ αντιστοιχεί σε έναν γραμμικό μετασχηματισμό. Με το πέρασμα του χρόνου το X μεταβάλλεται, με αποτέλεσμα να αλλάξει και ο πίνακας $J(X)$. Έτσι, η Ιακωβιανή είναι ένας χρονομεταβλητός γραμμικός μετασχηματισμός.

Ο ρόλος των Ιακωβιανών στην ρομποτική είναι η συσχέτιση των ταχυτήτων των αρθρώσεων με τις Καρτεσιανές ταχύτητες του άκρου ενός βραχίονα (CRAIG, 2020).

Λαμβάνοντας το παρακάτω παράδειγμα έχουμε :

$${}^0v = {}^0J(\Theta)\dot{\Theta} \quad (2.53)$$

Ως Θ συμβολίζεται το διάνυσμα των γωνιών των αρθρώσεων του βραχίονα και v είναι το διάνυσμα των Καρτεσιανών ταχυτήτων. Επιπρόσθετα, για κάθε μορφοθέτηση του ρομποτικού βραχίονα οι ταχύτητες των αρθρώσεων έχουν γραμμική συσχέτιση με την ταχύτητα του άκρου του. Ωστόσο, αυτή η συσχέτιση ισχύει για μια ορισμένη στιγμή, καθώς την επόμενη χρονική στιγμή η Ιακωβιανή μεταβάλλεται κατά ένα μικρό ποσοστό (CRAIG, 2020).

Γενικά, στην περίπτωση ενός ρομπότ που φέρει έξι αρθρώσεις, η Ιακωβιανή αποτελεί έναν πίνακα 6×6 , η $\dot{\Theta}$ είναι στήλη 6×1 και η 0v επίσης αποτελεί μια στήλη 6×1 . Το διάνυσμα Καρτεσιανής ταχύτητας 0v με διάσταση 6×1 αποτελείται από ένα διάνυσμα γραμμικής ταχύτητας με διάσταση 3×1 και από ένα διάνυσμα περιστροφικής ταχύτητας που έχει επίσης διάσταση 3×1 . Σε μια δομημένη μορφή φαίνονται παρακάτω:

$${}^0v = \begin{bmatrix} {}^0u \\ {}^0\omega \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

Υπάρχει η δυνατότητα ορισμού Ιακωβιανές με οποιοδήποτε διαστάσεις. Ο αριθμός που αντιστοιχεί στις γραμμές, εκφράζει τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας στον Καρτεσιανό χώρο. Ενώ, ο αριθμός των στηλών ισοδυναμεί με τον αριθμό των αρθρώσεων του ρομποτικού βραχίονα (CRAIG, 2020).

Στην περίπτωση ενός επίπεδου βραχίονα με δύο μέλη για παράδειγμα, σχηματίζεται μια Ιακωβιανή 2×2 , που συσχετίζει τις ταχύτητες στις αρθρώσεις με την ταχύτητα του αποληκτήριου επενεργητή (CRAIG, 2020).

Κεφάλαιο 3 : Αντίστροφη κινηματική ρομποτικών βραχιόνων

3.1 Εισαγωγή

Το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα μπορεί να διατυπωθεί σαν παράδειγμα ως εξής : δίνονται ως δεδομένα η ζητούμενη θέση και ο προσανατολισμός του εργαλείου σε σχέση με τον σταθμό εργασίας και ζητείται ο προσδιορισμός των γωνιών των αρθρώσεων που θα εξασφαλίσουν το συγκεκριμένο αποτέλεσμα.

Το πρόβλημα εύρεσης των γωνιών των αρθρώσεων με σκοπό την τοποθέτηση του πλαισίου {T} σε μια ορισμένη θέση ως προς το πλαίσιο σταθμού {S}, υπολογίζεται σε δύο στάδια. Πρωταρχικά, προσδιορίζονται οι μετασχηματισμοί που χαρακτηρίζουν το πλαίσιο του καρπού {W} σε συνάρτηση με το πλαίσιο βάσης {B}. Έπειτα, εφαρμόζεται η αντίστροφη κινηματική για την εύρεση των γωνιών των αρθρώσεων (CRAIG, 2020).

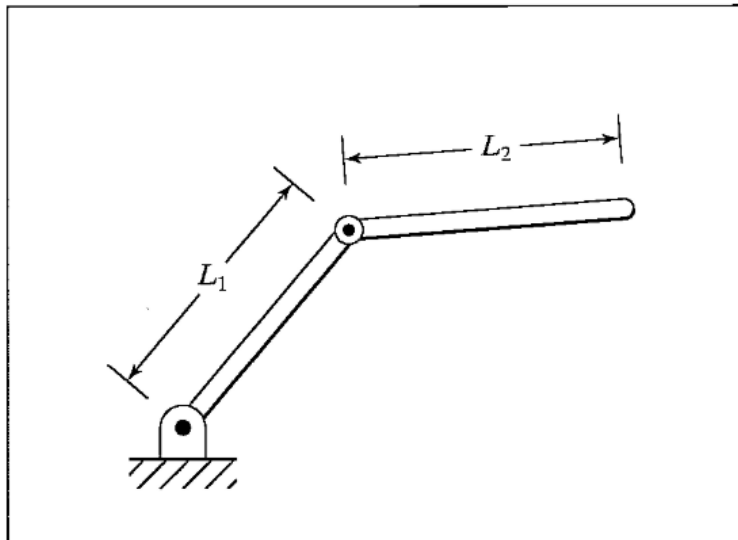
3.2 Επιλυσιμότητα

Η επίλυση των κινηματικών εξισώσεων για ρομποτικό βραχίονα δεν γίνεται γραμμικά. Με τα στοιχεία του πίνακα 0T υπολογίζονται οι τιμές των γωνιών $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$. Για παράδειγμα, ένας ρομποτικός βραχίονας που έχει έξι βαθμούς ελευθερίας δίνει ένα σύστημα 12 εξισώσεων με 6 αγνώστους. Όμως, οι εννέα εξισώσεις που προκύπτουν από το μέλος του 0T που δημιουργούν τον πίνακα περιστροφής, μόνο οι τρεις είναι γραμμικά ανεξάρτητες. Οι συγκεκριμένες σε προσθήκη με άλλες τρεις που βρίσκονται στο διάνυσμα θέσης (τμήμα του 0T), αποτελούν ένα σύστημα 6 εξισώσεων με 6 αγνώστους. Έτσι, πρόκειται για μη υπερβατικές εξισώσεις που υπολογίζονται δύσκολα. Κάθε σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων παρουσιάζει τα εξής ζητήματα: το πρόβλημα ύπαρξης λύσεων, το πρόβλημα ύπαρξης πολλαπλών λύσεων, το πρόβλημα εύρεσης κατάλληλης μεθόδου υπολογισμού των εξισώσεων (CRAIG, 2020).

Υπαρξη λύσεων

Το συγκεκριμένο ερώτημα αφορά τον χώρο εργασίας του ρομποτικού βραχίονα όπου γίνεται η εφαρμογή. Ως χώρος εργασίας χαρακτηρίζεται η περιοχή που μπορεί να φτάσει το άκρο εργασίας του ρομπότ. Για την ύπαρξη λύσεων χρειάζεται το σημείο στόχευσης του αποληκτηρίου επενεργητή να εντάσσεται στο χώρο εργασίας. Για τον χώρο αυτό υπάρχουν δύο εναλλακτικοί ορισμοί: Χώρος επιδεξιότητας που αποτελεί περιοχή που κάθε της σημείο είναι προσβάσιμο από τον αποληκτήριο επενεργητή με κάθε δυνατό προσανατολισμό. Προσβάσιμος χώρος εργασίας καλείται η περιοχή των σημείων που είναι προσβάσιμα από τον αποληκτήριο επενεργητή με ένα τουλάχιστον προσανατολισμό.

Το σχήμα 52 απεικονίζει έναν επίπεδο βραχίονα που φέρει δύο τμήματα εντός του χώρου επιδεξιότητας του. Στην περίπτωση που $I_1=I_2$, τότε ο προσβάσιμος χώρος εργασίας έχει σχήμα ενός κυκλικού δίσκου με 2I ακτίνα. Ο χώρος πρόσβασης συγκρατείται αποκλειστικά από ένα μόνο σημείο που είναι το κέντρο των συντεταγμένων του πλαισίου βάσης. Αν $I_1 \neq I_2$, τότε δεν υπάρχει χώρος επιδεξιότητας και ο χώρος διαθέτει σχήμα ενός κυκλικού δακτυλίου εξωτερικής ακτίνας I_1+I_2 και εσωτερικής ακτίνας $|I_1-I_2|$. Στο εσωτερικό του χώρου υπάρχουν δύο δυνατοί προσανατολισμοί, ενώ στα όρια μόνο ένας.



Σχήμα 51: Βραχίονα με δύο τμήματα l_1 και l_2 (CRAIG, 2020).

Για τον παραπάνω χώρο επιδεξιότητας του ρομπότ του σχήματος 52 απαιτείται ο βραχίονας να έχει ικανότητα περιστροφής των αρθρώσεων σε 360° (CRAIG, 2020).

Ένας ρομποτικός βραχίονας που διαθέτει λιγότερο από έξι βαθμούς ελευθερίας δεν μπορεί να λάβει όλες τις τυχαίες επιθυμητές θέσεις και προσανατολισμοί στον τρισδιάστατο χώρο. Επομένως, ο επίπεδος ρομποτικός βραχίονας του σχήματος 52 για οποιοδήποτε σημείο με μη μηδενική συντεταγμένη στον άξονα Z θα αποτελέσει μη προσβάσιμο σημείο (CRAIG, 2020).

Επιπρόσθετα, ο χώρος εργασίας ενός ρομπότ επηρεάζεται από τον μετασχηματισμό του πλαισίου του άκρου εργασίας του ρομπότ, διότι ως προς αυτό συνήθως γίνεται η αναφορά προσέγγισης σημείου στο χώρο. Ο μετασχηματισμός εργαλείου είναι ανεξάρτητο από την ευθεία και την αντίστροφη κινηματική του βραχίονα. Για αυτό γίνεται η θεώρηση του πλαισίου του καρπού του ρομπότ $\{W\}$. Για ορισμένο αποληκτήριο επενεργητή αντιστοιχεί ένα πλαίσιο εργαλείου $\{T\}$. Έχοντας δεδομένο το πλαίσιο στόχευσης $\{G\}$, γίνεται ο υπολογισμός του πλαισίου $\{W\}$ και στη συνέχεια εξετάζεται αν το αποτέλεσμα του συνδυασμού θέσης και προσανατολισμού εμπεριέχεται στο χώρο εργασίας του ρομπότ. Αν επιλεγθεί θέση και προσανατολισμός για το πλαίσιο του καρπού του βραχίονα που βρίσκεται εντός του χώρου εργασίας, τότε προκύπτει μια τουλάχιστον λύση (CRAIG, 2020).

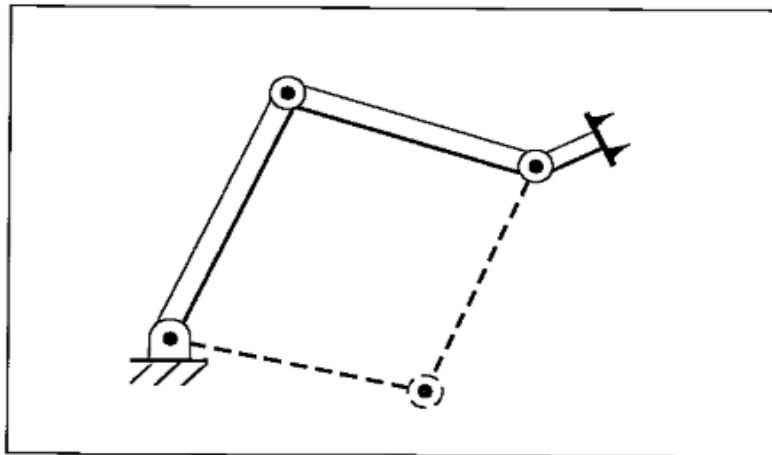
Πολλαπλές λύσεις

Άλλο διαφορετικό πρόβλημα που προκύπτει κατά την διαδικασία των κινηματικών εξισώσεων είναι το ζήτημα των πολλαπλών λύσεων. Για παράδειγμα ένας ρομποτικός βραχίονας επίπεδης διάταξης που φέρει τρεις περιστροφικές αρθρώσεις διαθέτει μεγάλο χώρο εργασίας στο επίπεδο (έχοντας επαρκή μήκη τμημάτων και μεγάλα εύρη περιστροφής αρθρώσεων), επειδή όλες οι θέσεις στο εσωτερικό χώρο επιδεξιότητας του προσεγγίζονται με πολλούς τυχαίους προσανατολισμούς. Στο σχήμα 52 φαίνεται ένας ρομποτικός βραχίονας με τρία τμήματα και έχει το αποληκτήριο επενεργητή σε μια ορισμένη τοποθεσία και προσανατολισμό. Το σχήμα με την μη συνεχή γραμμή δηλώνει την δεύτερη πιθανή τοποθέτηση του βραχίονα που δίνει την ίδια θέση και προσανατολισμό του αποληκτηρίου επενεργητή (CRAIG, 2020).

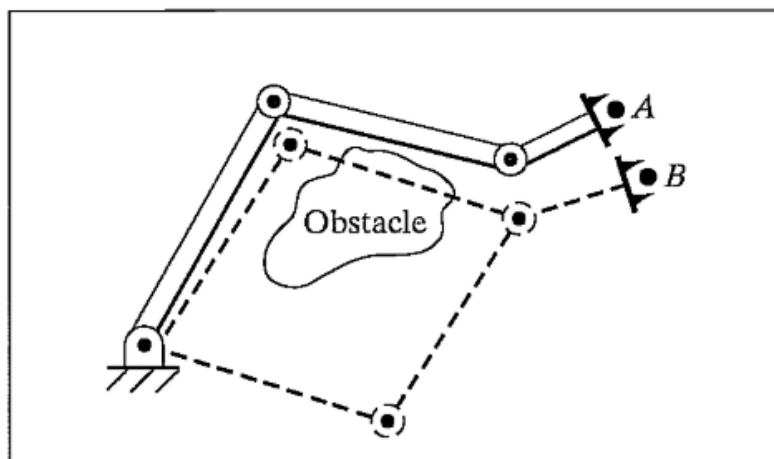
Η ύπαρξη εναλλακτικών λύσεων καθιστά δύσκολο για το σύστημα την επιλογή μιας λύσης. Υπάρχουν αρκετά κριτήρια επιλογής, εκ των οποίων μια αρκετά λογική είναι η πλησιέστερη λύση.

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

Στο σχήμα 53 παρουσιάζεται τέτοια περίπτωση κατά την οποία ο βραχίονας εντοπίζεται στην θέση A και ζητείται η μετακίνησή του στο σημείο B, καθώς μια καλή λύση αποτελεί η ελάχιστη μετακίνηση των αρθρώσεων. Συνεπώς, αν δεν παρουσιαζόταν εμπόδιο τότε θα ήταν κατάλληλη η πάνω τροχιά που φαίνεται στο σχήμα 53. Για αυτό η περίπτωση κατά την οποία υπάρχει εμπόδιο πρέπει χρησιμοποιηθεί η κάτω μορφοθέτηση για την προσέγγιση του σημείου B. Επομένως, χρειάζεται να γίνει ο υπολογισμός όλων των δυνατών λύσεων (CRAIG, 2020).



Σχήμα 52: Βραχίονας με 3 μέλη (CRAIG, 2020).



Σχήμα 53: Διο τροχίες, εκ των οποίων η μια οδηγεί σε σύγκρουση του ρομπότ (CRAIG, 2020).

Το πλήθος των λύσεων είναι συναρτήσεως του αριθμού των αρθρώσεων του βραχίονα και των παραμέτρων των μελών (α_i , a_i και d_i για ρομπότ με περιστροφικές αρθρώσεις) και επιπρόσθετα του δυνατού εύρους κίνησης των αρθρώσεων.

Μέθοδος επίλυσης

Για την λύση των συστημάτων μη γραμμικών εξισώσεων δεν υπάρχουν γενικοί αλγόριθμοι, σε αντίθεση με τις γραμμικές εξισώσεις.

Επιλύσιμος χαρακτηρίζεται ένας βραχίονας, όταν οι τιμές των μεταβλητών που αντιστοιχούν στις αρθρώσεις προσδιορίζονται μέσω αλγορίθμου που υπολογίζει όλο το σύνολο των μεταβλητών των

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα αρθρώσεων που βρίσκονται σε μια ορισμένη θέση και έναν αντίστοιχο προσανατολισμό (CRAIG, 2020).

Από το προαναφερόμενο ορισμό είναι σημαντικό ο προσδιορισμός όλων των πιθανών λύσεων, εφόσον υπάρχουν πολλαπλές λύσεις. Οι τρόποι επίλυσης ενός βραχίονα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, οι λύσεις κλειστού τύπου και οι αριθμητικές λύσεις. Η δεύτερη κατηγορία επειδή είναι επαναληπτική, απαιτεί αρκετό χρόνο έναντι των λύσεων κλειστού τύπου. Η μέθοδος χαρακτηρίζεται ως κλειστού τύπου, διότι η επίλυση βασίζεται σε επαναληπτικές εκφράσεις ή πολυώνυμα τετάρτου ή λιγότερου βαθμού. Μεταξύ των μεθόδων που δίνουν λύσεις κλειστού τύπου, γίνεται διάκριση σε δύο κατηγορίες, την αλγεβρική και την γεωμετρική. Ωστόσο, ο διαχωρισμός των δύο δεν είναι ευδιάκριτος. Επειδή, αν χρησιμοποιηθεί η γεωμετρική μέθοδος στο τέλος καταλήγει σε χρήση αλγεβρικών σχέσεων, για αυτό οι δύο μέθοδοι δεν έχουν μεγάλη διαφορά μεταξύ τους (CRAIG, 2020).

Βάση πρόσφατων ερευνών στο τομέα της κινηματικής, διατυπώνεται πως, κάθε σύστημα που έχει έως και έξι βαθμούς ελευθερίας και συναρμολογούνται από τμήματα που συνδέονται σε απλή σειρά, με την βοήθεια περιστροφικών και πρισματικών αρθρώσεων, έχουν λύση. Για αυτό είναι σημαντικό να σχεδιάζονται οι βραχίονες με ορισμένο τρόπο ώστε εξασφαλίζεται η ύπαρξη μιας λύσης κλειστού τύπου. Σχεδιαστικά αυτό επιτυγχάνεται με την απλότητα που εξασφαλίζει μια λύση κλειστού τύπου.

Η συνθήκη μέσω της οποίας θα εγγυηθεί η ύπαρξη λύσεων κλειστού τύπου για έναν ρομποτικό βραχίονα που διαθέτει έξι περιστροφικές αρθρώσεις είναι να υπάρχει κοινό σημείο τομής για τρεις άξονες (CRAIG, 2020).

3.3 Υπόχωρος ενός ρομποτικού βραχίονα με $n < 6$

Ο προσβάσιμος χώρος εργασίας για έναν ρομποτικό βραχίονα απαρτίζεται από το σύνολο των πλαισίων προορισμού στους οποίους μπορεί να έχει πρόσβαση. Στην περίπτωση ενός ρομποτικού βραχίονα που έχει n βαθμούς ελευθερίας ($n < 6$), ο χώρος πρόσβασης αποτελεί ένα τμήμα ενός υποχώρου n βαθμών ελευθερίας. Αντίστοιχα, ο χώρος για έναν βραχίονα με έξι βαθμούς ελευθερίας είναι υποχώρος του τρισδιάστατου χώρου και επομένως ο χώρος εργασίας για έναν απλούστερο βραχίονα είναι υποσύνολο του υποχώρου του.

Ένας τρόπος για να γίνει προσδιορισμός του υποχώρου για έναν βραχίονα n βαθμών ελευθερίας, γίνεται μέσω αναπαράστασης του πλαισίου του καρπού ή του εργαλείου σαν συνάρτηση των n μεταβλητών που τον χαρακτηρίζουν, λαμβάνοντας την συνθήκη πως οι μεταβλητές του είναι ανεξάρτητες, καθώς όλες οι μεταβλητές παίρνουν κάθε δυνατή τιμή, δίνοντας το υποχώρο εργασίας (CRAIG, 2020).

Ορίζοντας ένα σημείο προορισμού στον χώρο εργασίας για ένα ρομπότ που έχει n βαθμούς ελευθερίας, χρησιμοποιούνται n παραμέτρους για τον υπολογισμό του προορισμού. Στην περίπτωση των 6 βαθμών ελευθερίας, εν γένει δεν θα υπάρχει πρόσβαση στον προορισμό με ρομπότ με $n < 6$ και για αυτό γίνεται προσέγγιση ενός άλλου προορισμού που εντάσσεται στο υποχώρο του ρομπότ, έχοντας την μικρότερη απόσταση από το αρχικό ζητούμενο προορισμό (CRAIG, 2020).

Παρακάτω αναφέρονται βήματα για τον καθορισμό αυθαίρετων προορισμών για έναν ρομποτικό βραχίονα με $n < 6$ (n :βαθμοί ελευθερίας).

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

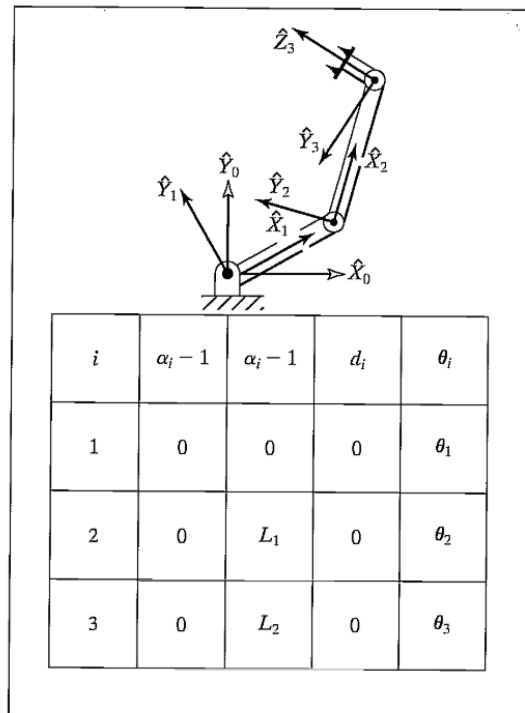
1. Βάση ενός δεδομένου αυθαίρετου πλαισίου προορισμού ${}^S T$, γίνεται ο υπολογισμός ενός τροποποιημένου πλαισίου ${}^S_c T$, με τέτοιο τρόπο ώστε να εμπεριέχεται στον υποχώρο του βραχίονα και να είναι πλησίον (όσο το δυνατό) στο πλαίσιο ${}^S T$.
2. Γίνεται η επίλυση του προβλήματος της αντίστροφης κινηματικής με στόχο τον προσδιορισμό των γωνιών των αρθρώσεων, λαμβάνοντας το ${}^S_c T$ ως ζητούμενο πλαίσιο προορισμού.

Είναι φυσικό αρχικά να τοποθετείτε το κέντρο του πλαισίου του εργαλείου στην ζητούμενη θέση και στη συνέχεια να επιλέγεται ένας εφικτός προσανατολισμός κοντά στον ζητούμενο προσανατολισμό.

3.4 Σύγκριση αλγεβρικής και γεωμετρικής μεθόδου

Θεωρείται ένας ρομποτικός βραχίονας με τρία μέλη που φαίνεται στο σχήμα 55 συμπεριλαμβάνοντας τις παραμέτρους των μελών του. Λαμβάνοντας την μεθοδολογία της κινηματικής για ένα ρομποτικό βραχίονα (Κεφάλαιο 2), διαμορφώνονται οι κινηματικές εξισώσεις μέσω των παραμέτρων των μελών του.

$${}^B W T = {}^0_3 T = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & l_1 c_1 + l_2 c_{12} \\ s_{123} & c_{123} & 0 & l_1 s_1 + l_2 s_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$



Σχήμα 54: Οι παράμετροι των μελών ενός επίπεδου ρομποτικού βραχίονα.

Με σκοπό την καλύτερη μελέτη της αντίστροφης κινηματικής, λαμβάνεται υποθετικά πως οι αναγκαίοι μετασχηματισμοί πλαισίων έγιναν με τέτοιο τρόπο ώστε το σημείο προορισμού να

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα χαρακτηρίζεται μέσω του πλαισίου καρπού σε σχέση με το πλαίσιο ${}^B_W T$ βάσης. Επειδή, ο ρομποτικός βραχίονας είναι επίπεδος εύκολα γίνεται η περιγραφή των σημείων προορισμού με χρήση των αριθμών x , y και ϕ . Καθώς, η γωνία ϕ περιγράφει τον προσανατολισμό στο επίπεδο του τρίτου μέλους. Επομένως, αντικαθίσταται η περιγραφή του γενικού μετασχηματισμού καθορισμού του προορισμού ${}^B_W T$, με την ακόλουθη δομή μετασχηματισμού :

$${}^B_W T = \begin{bmatrix} c_\phi & -s_\phi & 0 & x \\ s_\phi & c_\phi & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Κάθε προσβάσιμο σημείο ανήκει στο υποχώρο που δίνει την δομή των εξισώσεων (3.2). Με την εξίσωση των σχέσεων 3.1 και 3.2 προκύπτει ένα σύστημα τεσσάρων μη γραμμικών εξισώσεων που πρέπει να λυθούν ως προς τις γωνίες θ_1 , θ_2 και θ_3 .

$$c_\phi = c_{123} \quad (3.3)$$

$$s_\phi = s_{123} \quad (3.4)$$

$$x = l_1 c_1 + l_2 c_{12} \quad (3.5)$$

και

$$y = l_1 s_1 + l_2 s_{12} \quad (3.6)$$

Επιλύοντας το σύστημα των παραπάνω εξισώσεων με την άθροιση των τετραγώνων (3.5) και (3.6), προκύπτει :

$$x^2 + y^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 c_2 \quad (3.7)$$

Αξιοποιώντας τους εξής τύπους:

$$\begin{aligned} c_{12} &= c_1 c_2 - s_1 s_2 \\ s_{12} &= c_1 s_2 - s_1 c_2 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Λύνοντας ως προς το c_2 :

$$c_2 = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \quad (3.9)$$

Για την ύπαρξη λύσης θα πρέπει το δεξιό μέλος της ισότητας (3.9) να δίνει τιμές που ανήκουν στο διάστημα $[-1, 1]$. Όμοια διαδικασία διενεργεί ο αλγόριθμος επίλυσης, ελέγχοντας τους παραπάνω περιορισμούς και γνωμοδοτεί για την ύπαρξη ή όχι λύσης. Αν ο συγκεκριμένος περιορισμός δεν καλύπτεται φυσικά, τότε το ζητούμενο σημείο προορισμού εντοπίζεται αρκετά μακριά και δεν μπορεί να προσεγγιστεί από τον βραχίονα (CRAIG, 2020).

Με την προϋπόθεση πως ο προορισμός εντάσσεται στο χώρο εργασίας, υπολογίζεται το s_2 βάση της παρακάτω τριγωνομετρικής ταυτότητας:

$$s_2 = \pm \sqrt{1 - c_2^2} \quad (3.10)$$

Τέλος, για τον προσδιορισμό της γωνίας θ_2 χρησιμοποιείται η συνάρτηση δύο ορισμάτων τόξο εφαπτομένης.

$$\theta_2 = \text{Atan2}(s_2, c_2) \quad (3.11)$$

Το πρόσημο της σχέσης 3.10 καθορίζεται βάση της πολλαπλής λύσης κατά την οποία επιλέγεται ως την πάνω ή κάτω λύση τροχιάς του σχήματος 54 (CRAIG, 2020).

Αφού γίνει ο υπολογισμός της γωνίας θ_2 , μπορεί να προσδιοριστεί η γωνία θ_1 υπολογίζοντας τις σχέσεις (3.5), (3.6).

$$x = k_1 c_1 - k_2 s_1 \quad (3.12)$$

$$y = k_1 s_1 + k_2 c_1 \quad (3.13)$$

Όπου

$$k_1 = l_1 + l_2 c_2$$

$$k_2 = l_2 s_2 \quad (3.14)$$

Κατά την επίλυση της εξίσωσης γίνεται τροποποίηση των μεταβλητών και συγκεκριμένα αλλάζει ο τρόπος αναπαράστασης των k_1 και k_2 .

Έστω
$$r = +\sqrt{k_1^2 + k_2^2} \quad (3.15)$$

Και

$$\gamma = \text{Atan2}(k_2, k_1)$$

Τότε

$$k_1 = r \cos \gamma \text{ και } k_2 = r \sin \gamma \quad (3.16)$$

Οι σχέσεις (3.14) και (3.15) μπορούν εναλλακτικά να διατυπωθούν ως εξής:

$$\frac{x}{r} = \cos \gamma \cos \theta_1 - \sin \gamma \sin \theta_1 \quad (3.17)$$

$$\frac{y}{r} = \cos \gamma \sin \theta_1 - \sin \gamma \cos \theta_1 \quad (3.18)$$

Συνεπώς, προκύπτει

$$\cos(\gamma + \theta_1) = \frac{x}{r} \quad (3.19)$$

$$\sin(\gamma + \theta_1) = \frac{y}{r} \quad (3.20)$$

Με την εφαρμογή της συνάρτησης δύο ορισμάτων τόξο εφαπτομένης, έχουμε:

$$\gamma + \theta_1 = \text{Atan2}\left(\frac{y}{r}, \frac{x}{r}\right) = \text{Atan2}(y, x) \quad (3.21)$$

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα
 Κατά συνέπεια:

$$\theta_1 = \text{Atan 2}(y, x) - \text{Atan 2}(k_2, k_1) \quad (3.22)$$

Το πρόσημο της γωνίας θ_2 , επηρεάζει το πρόσημο της ποσότητας k_2 και συνεπώς επηρεάζεται τελικά η τιμή της γωνίας θ_1 .

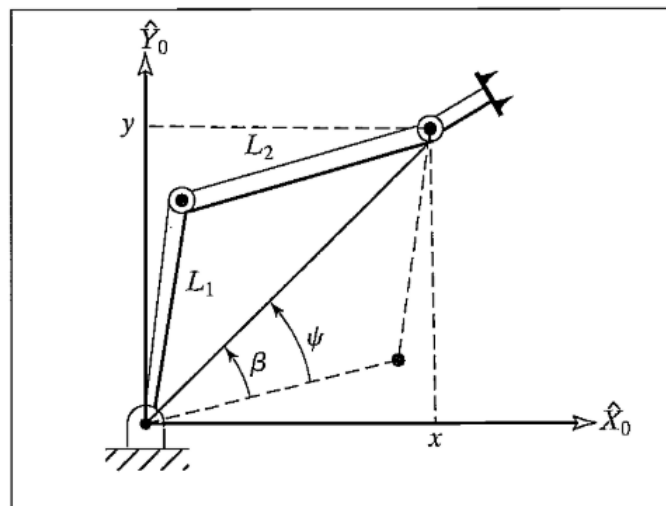
Τέλος, με την βοήθεια των προαναφερόμενων εξισώσεων, υπολογίζεται το άθροισμα των τριών γωνιών ($\theta_1+\theta_2+\theta_3$) ως εξής:

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = \text{Atan 2}(s_\Phi, c_\Phi) = \Phi \quad (3.23)$$

Από την σχέση (3.23), γνωρίζοντας την τις γωνίες θ_2 και θ_3 προσδιορίζεται η γωνία θ_1 .

Γεωμετρική λύση

Κατά την γεωμετρική επίλυση γίνεται αποσυναρμολόγηση της γεωμετρίας του χώρου εργασίας του βραχίονα σε επιμέρους γεωμετρικά προβλήματα. Για αρκετούς βραχίονες (ειδικά αν $\alpha_i=0$ ή $\alpha_i=\pm 90$), η γεωμετρική επίλυση γίνεται εύκολα και ο υπολογισμός των γωνιών των αρθρώσεων γίνεται βάση θεωρήματα της Επιπεδομετρίας και της Τριγωνομετρίας (CRAIG, 2020).



Σχήμα 55: Απεικόνιση γεωμετρίας για έναν επίπεδο βραχίονα τριών μελών (CRAIG, 2020).

Το σχήμα 56, δείχνει τα μήκη l_1, l_2 και την ευθεία που ενώνει τα κέντρα των πλαισίων $\{0\}$ και $\{3\}$, που σχηματίζουν ένα τρίγωνο. Οι διακεκομμένες γραμμές δηλώνουν δεύτερη εκδοχή του τριγώνου που δίνει επίσης την ίδια θέση του πλαισίου $\{3\}$. Με την εφαρμογή του νόμου των συνημιτόνων στο τρίγωνο με τις συνεχείς γραμμές, υπολογίζεται η γωνία θ_2 :

$$x^2 + y^2 = l_1^2 + l_2^2 - 2l_1l_2 \cos(180^\circ + \theta_2) \quad (3.24)$$

Λόγω της σχέσης $\cos(180^\circ + \theta_2) = -\cos(\theta_2)$, έχουμε:

$$c_2 = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \quad (3.25)$$

Για τον σχηματισμό τέτοιου τριγώνου πρέπει η απόσταση του σημείου προορισμού να εκφράζεται από την σχέση $\sqrt{x^2 + y^2}$ που είναι μικρότερη ή το πολύ ίση με το άθροισμα των μηκών l_1+l_2 . Αφού

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα
ελεγχθεί η συνθήκη πως ικανοποιείται, γίνεται ο υπολογισμός της τιμής του θ_2 στο διάστημα $[-180,0]$ μοιρών, καθώς μόνο για αυτές τις τιμές σχηματίζεται το τρίγωνο του σχήματος 56. Η άλλη λύση που σχηματίζεται με τις διακεκομμένες γραμμές, είναι συμμετρική, δηλαδή $\theta_2 = -\theta_2$ (CRAIG, 2020).

Για να γίνει ο υπολογισμός ως προς την γωνία θ_1 , ελέγχονται οι γωνίες ψ και β του σχήματος 56. Επειδή, η γωνία β μπορεί να βρίσκεται σε οποιοδήποτε τεταρτημόριο, ανάλογα με τα πρόσημα των x και y , χρησιμοποιείται πάλι η συνάρτηση δύο ορισμάτων τόξο εφαπτομένης.

$$\beta = \text{Atan2}(y,x) \quad (3.26)$$

Σε συνδυασμό με τον νόμο των συνημιτόνων προκύπτει το ψ :

$$\cos\psi = \frac{x^2+y^2+l_1^2-l_2^2}{2l_1\sqrt{x^2+y^2}} \quad (3.27)$$

Θα πρέπει η συνάρτηση τόξου ημιτόνου να υπολογιστεί ώστε $0 \leq \psi \leq 180^\circ$, με σκοπό να διατηρούνται αναλλοίωτα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της λύσης.

Έπειτα, προκύπτει

$$\theta_1 = \beta \pm \psi \quad (3.28)$$

Το θετικό πρόσημο δηλώνει την περίπτωση $\theta_2 < 0$, αντίθετα το αρνητικό πρόσημο στην περίπτωση $\theta_2 > 0$.

Με το άθροισμα των γωνιών υπολογίζεται η γωνία ϕ που δηλώνει την περιστροφή του τελευταίου μέλους :

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = \Phi \quad (3.29)$$

Λύνοντας την σχέση 3.29 ως προς το θ_3 τελειώνει η διαδικασία υπολογισμού.

3.5 Αλγεβρική επίλυση με αναγωγή σε πολυώνυμο

Η επίλυση των υπερβατικών εξισώσεων συνήθως παρουσιάζει μια δυσκολία και όταν υπάρχει μόνο μια μεταβλητή για παράδειγμα η γωνία θ , τότε εμφανίζεται στις εξισώσεις $\sin\theta$ και $\cos\theta$. Με την βοήθεια των παρακάτω αντικαταστάσεις προκύπτουν σχέσεις που επηρεάζονται μόνο από μια μεταβλητή την u .

$$u = \tan \frac{\theta}{2}$$

$$\cos \theta = \frac{1-u^2}{1+u^2} \quad (3.30)$$

$$\sin \theta = \frac{2u}{1+u^2}$$

Οι εκφράσεις της σχέσης 3.30 αντιστοιχούν τις υπερβατικές εξισώσεις σε πολυωνυμικές εξισώσεις ως προς το u .

Οι πολυωνυμικές εξισώσεις με βαθμό μικρότερο ή ίσο του 4, διαθέτουν λύσεις κλειστού τύπου.

3.6 Λύση Pieper

Ο Pieper μελέτησε τους ρομποτικούς βραχίονες με έξι βαθμούς ελευθερίας, των οποίων οι τρεις διαδοχικοί άξονες τέμνονται σε κοινό σημείο (CRAIG, 2020).

Η μέθοδος Pieper χρησιμοποιείται στα περισσότερα εμπορικά διαθέσιμα βιομηχανικά ρομπότ.

Στην περίπτωση που οι τρεις τελευταίοι άξονες τέμνονται, τα κέντρα των αντίστοιχων πλαισίων {4}, {5} και {6} μετακινούνται πάνω στο σημείο τομής τους. Το συγκεκριμένο σημείο τομής εκφράζεται ως προς το πλαίσιο βάσης από την ακόλουθη σχέση:

$${}^0P_{4ORG} = {}^0T_1{}^1T_2{}^2T_3P_{4ORG} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Εναλλακτικά με την τέταρτη στήλη της σχέσης (2.6), για $i=4$:

$${}^0P_{4ORG} = {}^0T_1{}^1T_2{}^2T_3 \begin{bmatrix} a_3 \\ -d_4sa_3 \\ d_4ca_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Επίσης, μπορεί να διατυπωθεί ως :

$${}^0P_{4ORG} = {}^0T_1{}^1T_2 \begin{bmatrix} f_1(\theta_3) \\ f_2(\theta_3) \\ f_3(\theta_3) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Καθώς:

$$\begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ 1 \end{bmatrix} = {}^2T_3 \begin{bmatrix} a_3 \\ -d_4sa_3 \\ d_4ca_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Ο πίνακας 2T_3 σε συνδυασμό με την σχέση 2.6 μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} f_1 &= a_3c_3 + d_4sa_3s_3 + a_2 \\ f_2 &= a_3c_2a_3s_3 - d_4sa_3c_2a_3c_3 - d_4sa_2c_2a_3 - d_3sa_2 \\ f_3 &= a_3s_2a_3s_3 - d_4sa_3s_2a_3c_3 + d_4ca_2c_2a_3 + d_3ca_2 \end{aligned} \quad (3.35)$$

Από την σχέση 2.6 για τους μετασχηματισμούς 0T_1 και 1T_2 προκύπτει:

$${}^0P_{4ORG} = \begin{bmatrix} c_1g_1 - s_1g_1 \\ c_1g_1 + c_1g_2 \\ g_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Με :

$$g_1 = c_2f_1 - s_2f_2 + a_1$$

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

$$g_2 = s_2ca_1f_1 + c_2ca_1f_2 - s_2a_1f_3 - d_2sa_1$$

$$g_3 = s_2sa_1f_1 + c_2sa_1f_2 + c_2a_1f_3 + d_2ca_1 \quad (3.37)$$

Αναλύοντας τη σχέση για το τετράγωνο του μέτρου του μέτρου του ${}^0P_{4ORG}$ που συμβολίζεται με r:

$$r = g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 \quad (3.38)$$

Με την αντικατάσταση των g από την σχέση 3.37:

$$r = (c_2f_1 - s_2f_2 + a_1)^2 + (s_2ca_1f_1 + c_2ca_1f_2 - s_2a_1f_3 - d_2sa_1)^2 + (s_2sa_1f_1 + c_2sa_1f_2 + c_2a_1f_3 + d_2ca_1)^2$$

=

$$f_1^2 + f_2^2 + f_3^2 + a_1^2 + d_2^2 + 2d_2f_3 + 2a_1(c_2f_1 - s_2f_2) \quad (3.39)$$

Βάση συνιστώσας ως προς Z από την 3.36, η παραπάνω εξίσωση γράφεται :

$$r = (k_1c_2 + k_2s_2)2a_1 + k_3$$

$$z = (k_1s_2 - k_2c_2)sa_1 + k_4 \quad (3.40)$$

Όπου

$$k_1 = f_1$$

$$k_2 = -f_2$$

$$k_3 = f_1^2 + f_2^2 + f_3^2 + a_1^2 + d_2^2 + 2d_2f_3$$

Και

$$k_4 = f_3ca_1 + d_2ca_1 \quad (3.41)$$

3.7 Επίλυση ρομποτικού βραχίονα μέσω της SOLVE

Μέσω της συνάρτησης SOLVE πραγματοποιούνται καρτεσιανοί μετασχηματισμοί και επικαλείται η συνάρτηση αντίστροφης κινηματικής. Έτσι, γενικεύεται η διαδικασία επίλυσης του προβλήματος της αντίστροφης κινηματικής με σκοπό την εφαρμογή αυθαίρετων πλαισίων εργαλείου και σταθμού στην διαδικασία υπολογισμού του πλαισίου καρπού ως προς το βασικό πλαίσιο.

Με δεδομένο το πλαίσιο προορισμού {G}, που καθορίζεται σε σχέση με το {S} με την βοήθεια του μετασχηματισμού S_T , η συνάρτηση SOLVE αξιοποιεί τις αναπαραστάσεις του εργαλείου {T} και του σταθμού {S}, έτσι ώστε να υπολογιστεί η θέση του {W} ως προς το {B} (πίνακας ${}^B_W T$).

$${}^B_W T = {}^B_S T {}^S_T {}^T_W T^{-1} \quad (3.42)$$

Στη συνέχεια, η αντίστροφη κινηματική με είσοδο τον μετασχηματισμό ${}^B_W T$, προσδιορίζονται οι γωνίες $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$.

Παρακάτω φαίνονται οι περιπτώσεις από την σχέση 3.40 για την γωνία θ_3 :

- i. Για $\alpha_1=0$, τότε $r = k_3$. Η τιμή της σχέσης r δίνεται. Το δεξί μέλος της σχέσης k_3 είναι συνάρτηση της γωνίας θ_3 μόνο. Από την σχέση 3.30 για αλλαγή μεταβλητών, προκύπτει μια δευτεροβάθμια εξίσωση προς $\tan(\theta_3/2)$ που μπορεί να λυθεί ως προς θ_3 .
- ii. Αν $s\alpha_1=0$, τότε $z = k_4$. Η τιμή z είναι δεδομένη. Αντίστοιχα, η συγκεκριμένη περίπτωση, από την σχέση 3.30 προκύπτει δευτεροβάθμια εξίσωση.
- iii. Εναλλακτικά, απαλείφονται τα s_2 και c_2 από την σχέση 3.40 δίνοντας την ακόλουθη εξίσωση :

$$\frac{(r-k_3)^2}{4a_1^2} + \frac{(z-k_4)^2}{s^2a_1} = k_1^2 + k_2^2 \quad (3.43)$$

Η συγκεκριμένη εξίσωση έπειτα από την αλλαγή μεταβλητών (3.30), καταλήγει σε μια τεταρτοβάθμια εξίσωση που λύνεται ως προς θ_3 .

Ξέροντας την γωνία θ_3 , εύκολα υπολογίζεται η θ_2 επιλύοντας την σχέση (3.40) και την θ_1 επιλύοντας την σχέση (3.36) (CRAIG, 2020).

Για ολοκληρωθεί η διαδικασία επίλυσης πρέπει να υπολογιστούν οι γωνίες θ_4, θ_5 και θ_6 . Οι άξονες που αντιστοιχούν στις αρθρώσεις 4,5 και 6 έχουν ίδιο σημείο τομής και για αυτό οι συγκεκριμένες γωνίες επηρεάζουν μόνο τον προσανατολισμό του τελευταίου μέλους. Για να γίνει αυτό αρκεί να βρεθεί ο πίνακας περιστροφής 0R του καθορισμένου πλαισίου. Με γνωστές τις γωνίες θ_1, θ_2 και θ_3 προσδιορίζεται ο πίνακας ${}^0R|_{\theta_4=0}$, αυτός ο συμβολισμός δηλώνει τον προσανατολισμό του πλαισίου {4} ως προς το πλαίσιο βάσης καθώς $\theta_4=0$. Συνεπώς, με δεδομένο τον πίνακα 0R , προσδιορίζεται ο πίνακας ${}^0R|_{\theta_4=0}$ μέσω της παρακάτω σχέσης (CRAIG, 2020):

$${}^4R|_{\theta_4=0} = {}^0R^{-1}|_{\theta_4=0} {}^0R \quad (3.44)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : Μηχανολογικός σχεδιασμός ρομποτικών βραχιόνων

Εισαγωγή

Οι εφαρμογές που μπορεί να υλοποιήσει ένας ρομποτικός βραχίονας επηρεάζονται άμεσα από τον σχεδιασμό του και την σύνθεση του ως διάταξη. Επιπλέον, η λειτουργία του περιορίζεται από πραγματικούς παράγοντες όπως το μέγιστο φορτίο που μπορεί να χειριστεί, τη ταχύτητα, το εύρος του πεδίου εργασίας και την επαναληψιμότητα. Επιπρόσθετα, σε ορισμένες εφαρμογές απαιτείται η εξέταση παραγόντων όπως είναι το ολικό βάρος του ρομποτικού βραχίονα, η ισχύς που καταναλώνει και το κόστος αγοράς του.

Η δομή ενός ρομποτικού συστήματος μπορεί σε μια πρώτη προσέγγιση να χωριστεί σε τέσσερις κατατάξεις :

- i. Ο ρομποτικός χειριστής ,μαζί με κάθε αισθητήρα που συμπεριλαμβάνει εσωτερικά ως διάταξη.
- ii. Το άκρο εργασίας του βραχίονα ή ο αποληκτήριο επενεργητής
- iii. Υποστηρικτικά αισθητήρια που βρίσκονται στο εξωτερικό του ρομπότ και συσκευές όπως τεχνητή όραση και διατάξεις μεταφοράς τεμαχίων
- iv. Ο ελεγκτής

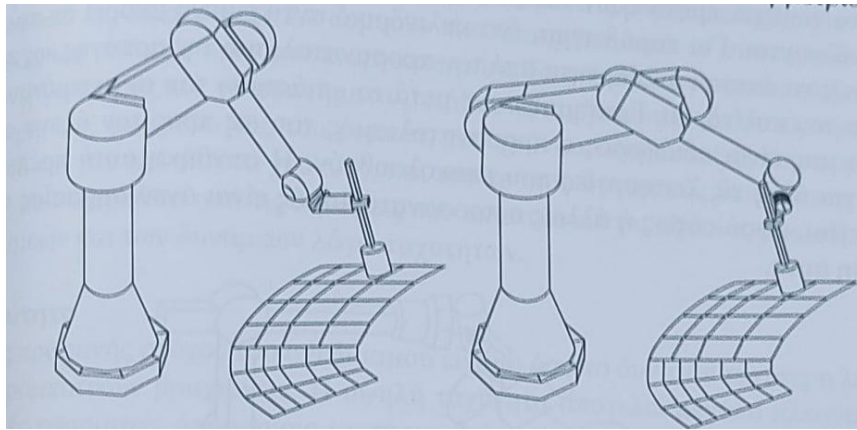
4.1 Σχεδίαση βάσει απαιτήσεων

Τα ρομπότ ως διατάξεις είναι ευέλικτα ως προς το προγραμματισμό τους, καθιστώντας τους κατάλληλους για την υλοποίηση πολλών εργασιών. Ωστόσο, οικονομικοί και πρακτικοί παράγοντες θέτουν την ανάγκη αναδιαμόρφωσης του σχεδιασμού τους βάσει του πεδίου εφαρμογής τους. Για παράδειγμα ρομπότ μεγάλου μεγέθους έχουν τη δυνατότητα χειρισμού μεγάλων φορτίων αλλά δεν είναι κατάλληλη για εργασίες που απαιτούν λεπτομερής κίνηση όπως η τοποθέτηση εξαρτημάτων σε πλακέτες. Η διαφοροποίηση δεν αφορά αποκλειστικά το μέγεθος, εφόσον το πλήθος και η διάταξη των αρθρώσεων, το είδος των ενεργοποιητών καθώς και ο τύπος των αισθητήρων και των συστημάτων αυτοματισμού μεταβάλλονται ανάλογα με την τελική εφαρμογή που προορίζεται ο ρομποτικός βραχίονας .

Πλήθος βαθμών ελευθερίας

Κάθε ρομποτικός βραχίονας σχεδιάζεται με ένα συγκεκριμένο αριθμό βαθμών ελευθερίας, το οποίο χαρακτηρίζει την ορισμένη εργασία στην οποία ειδικεύεται το ρομπότ. Ρεαλιστικά οι πλεονότητες των εργασιών για να πραγματοποιηθεί δεν χρειάζονται μέγιστο αριθμό βαθμών ελευθερίας .

Μια συνηθισμένη περίπτωση που αποτελεί και παράδειγμα είναι σε ρομποτικό βραχίονα να διαθέτει αποληκτήριο επενεργητή το οποίο να έχει άξονα συμμετρίας. Στο σχήμα 57 που ακολουθεί φαίνεται ένας ρομποτικός βραχίονας που χειρίζεται εργαλείο τρόχισης με δύο τρόπους. Στην συγκεκριμένη περίπτωση εφαρμογής αποτελεί πλεόνασμα ο προσανατολισμός του εργαλείου σε σχέση με τον άξονα \widehat{Zr} του εργαλείου, εφόσον ο τροχός λείανσης περιστρέφεται με υψηλή συχνότητα RPM. Διότι, ο συγκεκριμένος βραχίονας έχει τη δυνατότητα να υλοποιήσει αυτή την εργασία σε θεωρητικά με άπειρους συνδυασμούς (Για την στροφή γύρω από τον άξονα \widehat{Zr} που είναι ελεύθερη μεταβλητή). Συνεπώς, ο συγκεκριμένος βραχίονας χαρακτηρίζεται πλεονασματικός σε αυτή τη περίπτωση. Εργασίες όπως η συγκόλληση τόξου, η εξομάλυνση επιφανειών, η κόλληση, η στίλβωση και η σημειακή συγκόλληση όλες απαιτούν αποληκτήριο επενεργητή με ένα άξονα συμμετρίας κατά ελάχιστων (CRAIG, 2020).

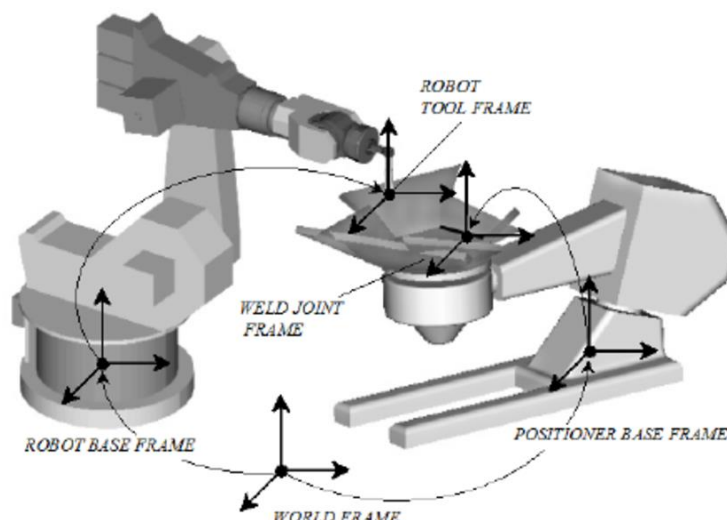


Σχήμα 56: Ρομποτικός βραχίονας με έξι βαθμούς ελευθερίας εκ των οποίων το ένα αποτελεί πλεόνασμα (CRAIG, 2020) .

Θεωρητικά για το χειρισμό του αποληκτηρίου επενεργητή στο χώρο απαιτείται έξι βαθμούς ελευθερίας, διότι η μια άρθρωση θεωρούμε ως πλασματική με άξονα τον άξονα συμμετρίας του εργαλείου. Αν αντικατασταθεί ο ρομποτικός βραχίονα του σχήματος 57 με ρομπότ που διαθέτει πέντε βαθμούς ελευθερίας, τότε θα προκύψει ένας πεπερασμένος αριθμός διακριτών λύσεων για το χειρισμό του του εργαλείου. Αρκετές βιομηχανικές εφαρμογές που χρειάζονται τη χρήση συμμετρικών εργαλείων αξιοποιούν ρομπότ με πέντε βαθμούς ελευθερίας (degree of freedom DOF).

Σε άλλες περιπτώσεις η παραγωγική διαδικασία προαπαιτεί τη χρήση ρομπότ με DOF(degree of freedom) λιγότερο από έξι. Αυτό συμβαίνει σε εργασίες που γίνονται με λεπτομερή χειρισμό, όπως η συναρμολόγηση ηλεκτρονικών διατάξεων σε πλακέτες που είναι επίπεδες και διαθέτουν ηλεκτρονικά εξαρτήματα με διάφορα ύψη. Για να γίνει η τοποθέτηση των εξαρτημάτων κατάλληλα πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια απαιτείτε το ρομπότ να διαθέτει τρεις βαθμούς ελευθερίας (κίνηση στους άξονες x , y και περιστροφή θ). Επιπλέον, για να γίνει η εισαγωγή και η ανάληψη των εξαρτημάτων σε κατακόρυφη διεύθυνση δημιουργείται τέταρτη μετατόπιση στον άξονα Z το οποίο είναι κάθετο στην οριζόντια διεύθυνση της πλακέτας .

Οι εργασίες που χρησιμοποιούν βραχίονες με DOF λιγότερο από έξι συνδυάζουν για την στήριξη του αντικειμένου προς επεξεργασία μια κατάλληλη διάταξη. Παράδειγμα αποτελεί η διεργασία συγκόλλησης σωληνώσεων στην οποία έχουμε μια ειδική πλατφόρμα ρυθμιζόμενη ως προς τη κλίση και τη περιστροφή, που συγκρατεί τους σωλήνες για να γίνει η συγκόλληση τους. Η συγκεκριμένη πλατφόρμα προσμετράτε για δύο βαθμούς ελευθερίας και επειδή η συγκόλληση τόξου ως διαδικασία είναι συμμετρική ως προς το εργαλείο, συνεπάγεται θεωρητικά πως η συγκεκριμένη εργασία είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με χρήση ενός ρομπότ με τρεις βαθμούς ελευθερίας. Ωστόσο, για να μην συμβεί σύγκρουση με το κατεργαζόμενο τεμάχιο κατά την λειτουργία υποχρεωτικά απαιτείται ρομπότ με παραπάνω DOF.



Σχήμα 57: Ειδική πλατφόρμα κλίσης και περιστροφής που παρέχει δύο βαθμούς ελευθερίας στο ολικό σύστημα του ρομποτικού συστήματος

(Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Welding-robotic-station_fig1_223506535).

Οι περιπτώσεις χειρισμού αντικειμένων που εμφανίζουν συμμετρία ως προς ορισμένο άξονα μειώνουν τον αριθμό DOF του συνολικού συστήματος. Αυτό φαίνεται στη περίπτωση ενός κυλινδρικού αντικειμένου που μπορεί να συγκρατηθεί ανεξάρτητα από τον προσανατολισμό του άκρου εργασίας του βραχίονα, σε σχέση με το άξονα του κυλίνδρου (CRAIG, 2020).

Χώρος εργασίας

Ένας ρομποτικός βραχίονας για να εκτελέσει ορισμένες εργασίες χρειάζεται να προσεγγίσει διάφορα αντικείμενα που βρίσκονται εντός του χώρου εργασίας του. Το περιβάλλον εργασίας που καλείται και όγκος εργασίας ή φάκελος εργασίας για ένα σταθερά εγκαταστημένο ρομπότ θεωρείται προκαθορισμένο. Τα εξεταζόμενα μεγέθη οροθετούνται ως προς τη κλίμακα στο όγκο εργασίας του ρομπότ. Σημαντικούς παράγοντες για το ρομποτικό σύστημα είναι το σχήμα του χώρου εργασίας και οι τοποθεσίες των εξεταζόμενων αντικειμένων εντός αυτού (CRAIG, 2020).

Ένα σημαντικό θέμα που συνήθως απαιτεί εξέταση είναι η είσοδος του ρομπότ στο χώρο εργασίας. Ενδεχομένως να πρέπει να γίνει αναδιαμόρφωση του χώρου εργασίας του ρομπότ ανάλογα με το κινηματικό σχεδιασμό του ρομπότ και την εκτελούμενη εργασία, ώστε να αποτραπούν συγκρούσεις του βραχίονα με αντικείμενα του χώρου εργασίας. Επιπλέον, η οριοθέτηση του όγκου εργασίας επηρεάζει σημαντικά την τελική κινηματική μορφολογία (CRAIG, 2020).

Το μέγιστο φορτίο που μπορεί να διαχειριστεί ένας ρομποτικός βραχίονας, επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από το σύστημα ισχύος, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δομικών του στοιχείων και το είδος των ενεργοποιητών που χρησιμοποιεί. Το φορτίο αποτελεί συνάρτηση της γεωμετρικού σχήματος, του χρόνου υποβάσταξης του διαχειριζόμενου φορτίου και του τρόπου διαχείρισης του φορτίου (CRAIG, 2020).

[Ταχύτητα](#)

Η ταχύτητα του του ρομποτικού βραχίονα αποτελεί σημαντικό μέγεθος, καθώς ορισμένες βιομηχανικές εφαρμογές αυτοματοποιούνται για να γίνουν πιο γρήγορα σε σχέση με το συμβατικό τρόπο. Επιπλέον, η υψηλή ταχύτητα ολοκλήρωσης διεργασιών συνεπάγεται οικονομικό όφελος και το οποίο αποτελεί πλεονέκτημα χρήσης των βιομηχανικών ρομπότ. Σε άλλες εφαρμογές, όμως η ταχύτητα του βραχίονα θα πρέπει να περιορίζεται λόγω εκτελούμενης εργασίας. Αυτό συμβαίνει σε διαδικασίες βαφής με ψεκασμό και σε αρκετές εφαρμογές συγκολλήσεων .

Σε μια εφαρμογή είναι σημαντικό να γνωρίζουμε τη διαφοροποίηση της έννοιας <<Μέγιστη ταχύτητα κίνησης του αποληκτήριου επενεργητή>> με τον χρόνο κύκλου εργασίας. Όταν ένας βραχίονα καλείται να μετακινήσει ένα αντικείμενο από μια ορισμένη θέση σε μια διαφορετική εντός του προδιαγραμμένου όγκου εργασίας του, τότε ο βραχίονας ελαττώνει και αυξάνει την ταχύτητα του κατά την ανάληψη και την απόθεση του αντικειμένου. Όπου και σε αυτές τις δύο κινήσεις επιτάχυνση και επιβράδυνση καταναλώνεται το μεγαλύτερο χρόνο του κύκλου εργασίας (CRAIG, 2020).

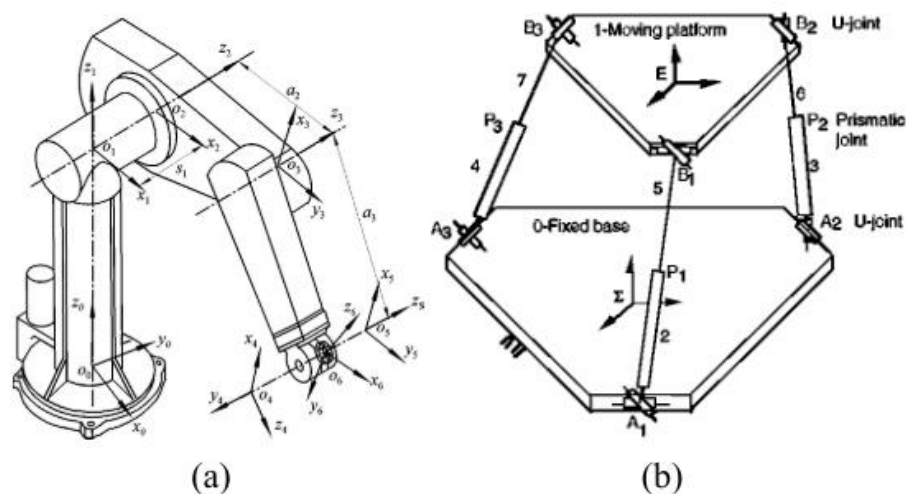
[Ακρίβεια και επαναληψιμότητα](#)

Η επαναληπτικότητα και η ακρίβεια ως χαρακτηριστικά θεωρούνται σημαντικά για ένα ρομποτικό βραχίονα, ωστόσο αυξάνουν το κόστος του συστήματος. Έτσι σε εφαρμογές όπως η βαφή με ψεκασμό δεν συμφέρει να υπάρχει μεγάλη ακρίβεια, εφόσον η ακρίβεια του ψεκασμού ως διαδικασία περιορίζεται από μια διάμετρο 8 ιντσών με ανοχή 2 ίντσες. Η ακρίβεια ενός ρομποτικού βραχίονα επηρεάζεται κατά μεγάλο ποσοστό από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του παρά από σχεδιασμό του. Επομένως, για να βελτιώσουμε την ακρίβεια ενός ρομπότ χρειάζεται να γίνει ανάλυση όλων των παραμέτρων που το απαρτίζουν. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ακριβής μέτρησης του κάθε μέλος μετά από την κατασκευή και εξέταση των μηχανολογικών ανοχών των μελών κατά την κατασκευή (CRAIG, 2020).

4.2 Κινηματική διαμόρφωση

Η ταξινόμηση των βιομηχανικών ρομπότ μπορεί να γίνει με πολλά κριτήρια όπως βαθμοί ελευθερίας, Κινηματική δομή, Τεχνολογία κίνησης, γεωμετρία του χώρου εργασίας, χαρακτηριστικά κίνησης και τρόπος ελέγχου (Pandilov & Dukovski , 2014). Το πλήθος των ανεξάρτητων μεταβλητών της θέσης με τα οποία καθορίζεται η θέση κάθε τμήματος του ρομπότ στο χώρο, καλείται αριθμός βαθμών ελευθερίας και ως γενικό όρο χρησιμοποιείται ευρέως για τους μηχανισμούς (J., 2005). Επιπλέον, τα ρομπότ μπορεί να ταξινομούνται με βάση τη δομική τους τοπολογία. Χαρακτηρίζουμε ένα ρομπότ ως σειριακός (ανοικτού βρόχου), όταν η κινηματική του δομή έχει τη μορφή μιας αλυσίδας ανοικτού βρόχου, χαρακτηρίζεται παράλληλος βραχίονας, όταν η κινηματική του δομή παίρνει τη μορφή μιας ανοικτού βρόχου αλυσίδας και τέλος καλείται υβριδικός χειριστής αν αποτελείται από αλυσίδες

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα ανοικτού και κλειστού βρόγχου ταυτόχρονα. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται ένας σειριακός και ένας παράλληλος χειριστής (Yasar & Korkut, 2016).



Σχήμα 58: Σχηματική απεικόνιση ενός σειριακού (a) και ενός παράλληλου (b) χειριστή [(Fang & Tsai, 2003) , (Bonev & Zlatanov, 2001)] .

Άλλο κριτήριο με βάση το οποίο ταξινομούνται οι ρομποτικοί βραχίονες είναι βάση της τεχνολογίας κίνησης που χρησιμοποιούν. Οι πλειονότητα των βραχιόνων έχουν ηλεκτρικούς κινητήρες DC είτε (stepper) κινητήρες, επειδή παρουσιάζουν ευκολία στον έλεγχο. Ωστόσο, σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ταχύτητα και διαχείριση μεγάλων φορτίων προτιμάται η πνευματική ή υδραυλική τεχνολογία κίνησης (Tsai, 1999) .


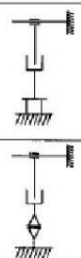







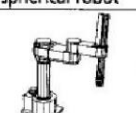
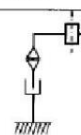




Τα βιομηχανικά ρομπότ ποικίλουν ως προς το μέγεθος και το σχήμα και χρησιμοποιούν διαφορετικό τύπο συστήματος συντεταγμένων το κάθε ένα. Η διάταξη των αρθρώσεων, το μήκος των τμημάτων του βραχίονα και το είδος του συστήματος συντεταγμένων όλα επηρεάζουν την διαμόρφωση του χώρου εργασίας του ρομπότ. Για να προσδιοριστεί η μέγιστη επιφάνεια του χώρου εργασίας αντικαταστατέ η αρπάγη ή το ελεύθερο άκρο του ρομπότ με ένα ιδεατό σημείο στην άκρη του βραχίονα. Έτσι, πειραματικά ο προσδιορισμός του χώρου εργασίας συμπεριλαμβάνοντας το εργαλείο εργασίας, προκύπτει λίγο μεγαλύτερο (Yasar & Korkut, 2016).

Αρχικά για να γίνει ο σχεδιασμός του βραχίονα επιλέγετε ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας που θα διαθέτει, έπειτα προσδιορίζεται η διάταξη των αρθρώσεων του βραχίονα που θα υλοποιήσουν τους βαθμούς ελευθερίας. Το πλήθος των αρθρώσεων για ρομπότ τύπου σειριακή κινηματική αλυσίδα ισούται με το ζητούμενο αριθμό βαθμών ελευθερίας. Η πλειονότητα των βραχιόνων σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε οι $n - 3$ τελευταίες αρθρώσεις να ελέγχουν το προσανατολισμό του αποληκτικού επενεργητή και διαθέτουν άξονες που τέμνονται στο σημείο καρπού, αντίθετα ο καθορισμός της θέσης του σημείου καρπού ελέγχεται από τις πρώτες τρεις αρθρώσεις. Συνεπώς, τέτοιου τύπου βραχίονες απαρτίζονται από μια δομή τοποθέτησης και από μια δομή προσανατολισμού που εναλλακτικά καλείται και καρπός. Ο πλέον διαδομένος τρόπος σχεδιασμού βιομηχανικών ρομπότ το οποίο χρησιμοποιείται και για διάφοροι μηχανισμοί είναι με βάση το προαναφερόμενο πηγεοκαρπικό πρότυπο. Επιπρόσθετα, στις περισσότερες περιπτώσεις η δομή καθορισμού θέσης σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε η κινηματική συμπεριφορά να είναι απλή έχοντας τιμές γωνιών συστροφής με

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα εύρος από 0 έως ± 90 μοίρες και μηδενικές τιμές για αρκετά μήκη και μετατοπίσεις των τμημάτων (CRAIG, 2020).

Ανάλογα με το σχεδιασμό του ρομποτικού βραχίονα διαφοροποιείται και ο χώρος εργασίας. Έτσι, ένας κατάλληλος συνδυασμός διαφορετικών διαμορφώσεων μπορεί να οδηγήσει σε ένα άλλο σύνολο πιθανών χώρων εργασίας για ένα ρομπότ. Για αυτό πριν την υλοποίηση μιας ορισμένης ρομποτικής διαμόρφωσης, χρειάζεται να μελετηθεί η εκτελούμενη εφαρμογή για να προσδιοριστούν οι απαιτήσεις του χώρου εργασίας. Μια επιπλέον ταξινόμηση που γίνεται για τα ρομπότ είναι ως προς τη διαμόρφωση του χώρου εργασίας, όπου ορισμένοι χώροι εργασίας διαθέτουν γεωμετρικό σχήμα ενώ άλλοι είναι ακανόνιστοι (Ross, et al., 2011).

Η ταξινόμηση των απλών ρομποτικών βραχιόνων πηχεοκαρπικού τύπου πλέον γίνεται με βάση τον σχεδιασμό των τριών πρώτων αρθρώσεων (δομής προσδιορισμού θέσης). Στο παρακάτω σχήμα 60 φαίνεται η ταξινόμηση των ρομποτικών βραχιόνων βάση διαμόρφωσης σε καρτεσιανοί, σφαιρικοί, κυλινδρικοί και περιστροφικοί (Revolute).

Robot	Axes		Wrist (DOF)		
	Kinematic Chain	Workspace			
 cartesian robot			1	1	2
			2	3	3
 cylindrical robot			1	1	2
			2	3	
 spherical robot			1	2	3
			3	3	3
 SCARA robot			1	2	2
			2		
 articulated robot			2	3	3
			3	3	3

Σχήμα 59: Είδη ρομποτικών βραχιόνων (Yasar & Korkut, 2016).

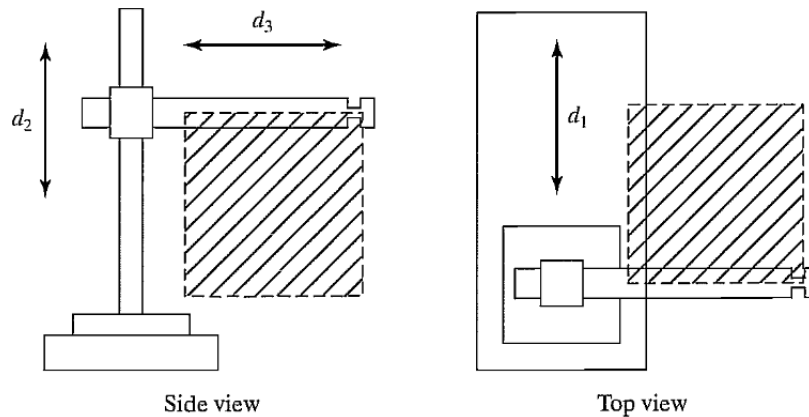
Οι πιθανές διαμορφώσεις για ένα ρομποτικό βραχίονα είναι οι εξής:

Καρτεσιανοί ρομποτικοί βραχίονες:

Ως διαμόρφωση αποτελεί την πιο κατανοητή μορφολογία και όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 61 οι πρώτες τρεις αρθρώσεις είναι πρισματικές με κάθετους άξονες που αντιστοιχούν σε καρτεσιανές διευθύνσεις \hat{X} , \hat{Y} , \hat{Z} .

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

Με βάση τη συγκεκριμένη διαμόρφωση κατασκευάζονται συνήθως ρομπότ με στιβαρή δομή. Έτσι, τα ρομπότ πολύ μεγάλου μεγέθους, τα οποία ονομάζονται ρομπότ τύπου γερανογέφυρας χαρακτηρίζονται από καρτεσιανή διαμόρφωση. Τα συγκεκριμένα ρομπότ χρησιμοποιούνται για το χειρισμό ολόκληρων οχημάτων ή για το χειρισμό τμημάτων από μεγάλα αεροσκάφη κατά την επισκευή (CRAIG, 2020).



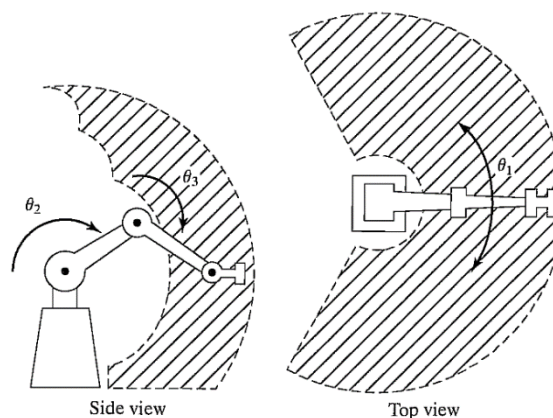
Σχήμα 60: Καρτεσιανός ρομποτικός βραχίονας (CRAIG, 2020).

Επιπλέον, πλεονεκτήματα των καρτεσιανών ρομποτικών βραχιόνων βασίζονται στο χαρακτηριστικό ότι οι τρεις πρώτες αρθρώσεις είναι αποσυζευγμένες, το οποίο τα καθιστά πιο απλά σχεδιαστικά και αποκλείει κινηματικές ιδιομορφίες λόγω των πρώτων τριών αρθρώσεων (CRAIG, 2020).

Ένα από τα βασικά μειονεκτήματα της καρτεσιανής διαμόρφωσης αποτελεί το γεγονός πως όλες οι διατάξεις τροφοδοσίας τεμαχίων που συνδέονται με την εκτελούμενη εφαρμογή χρειάζεται να οδηγούνται εντός του εσωτερικού χώρου του ρομπότ. Για αυτό το λόγο τα κύτταρα εργασίας που συνδέονται με ένα καρτεσιανό ρομπότ παρουσιάζουν εξάρτηση από την μορφολογία του ρομπότ. Επιπρόσθετα, υπάρχει περιορισμός του μεγέθους και στην χωροθέτηση των ιδιοσκευών και συνοδευτικών αισθητήρων του ρομπότ. Έτσι, καθίσταται δύσκολη η εγκατάσταση καρτεσιανών ρομπότ σε προσχεδιασμένα κύτταρα εργασίας (CRAIG, 2020).

Αρθρωτοί ρομποτικοί βραχίονες :

Στο σχήμα 62 παρουσιάζεται σχηματικά ένας αρθρωτός ρομποτικός βραχίονας.



Σχήμα 61: Αρθρωτός ρομποτικός βραχίονας (CRAIG, 2020).

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

Οι αρθρωτοί βραχίονες ονομάζονται εναλλακτικά βραχίονες με αγκώνα ή ανθρωπομορφικοί βραχίονες. Οι συγκεκριμένοι βραχίονες αποτελούνται από δύο αρθρώσεις που θυμίζουν ανθρώπινο ώμο (όπου η μία άρθρωση περιστρέφεται γύρω από έναν κατακόρυφο άξονα και η άλλη άρθρωση χρησιμεύει για την ανύψωση έξω από το οριζόντιο επίπεδο), μια άρθρωση αγκώνα (με άξονα που είναι παράλληλος με τον άξονα της άρθρωσης του ώμου ανύψωσης) και άλλες δύο ή τρεις αρθρώσεις καρπού που βρίσκονται στο τελικό μέρος του βραχίονα.

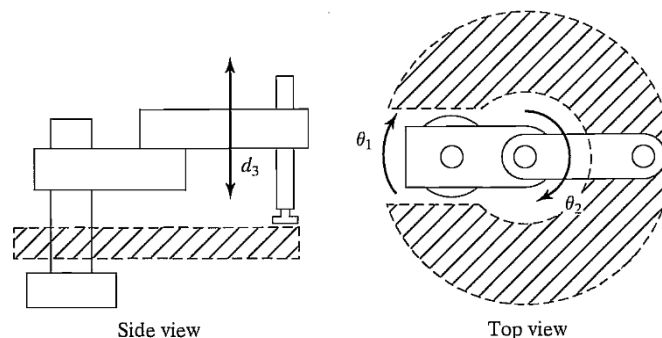
Μερικά παραδείγματα αρθρωτού ρομποτικού βραχίονα είναι το PUMA 560, το Motoman L-3 και το Articulated Robot IRB 1300 που φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα 63.



Σχήμα 62: Αρθρωτός ρομποτικός βραχίονας (Articulated Robot IRB 1300 της εταιρίας ABB), (ABB, 2022).

Η διαμόρφωση του αρθρωτού βραχίονα περιορίζει την παρείσδυση των μερών του ρομποτικού βραχίονα στον όγκο εργασίας και για αυτό ο βραχίονας παραβλέπει δυσπρόσιτες περιοχές. Η διαμόρφωση του αρθρωτού βραχίονα είναι πιο περιορισμένη σε σχέση με αυτή του καρτεσιανού βραχίονα. Για αυτό προτείνονται ως οικονομική πρόταση για εφαρμογές που πραγματοποιούνται σε μικρό όγκο εργασίας (CRAIG, 2020).

Ρομποτικοί βραχίονες τύπου SCARA (Selective compliance Assembly Robot Arm):



Σχήμα 63: Ρομπότ τύπου SCARA (CRAIG, 2020).

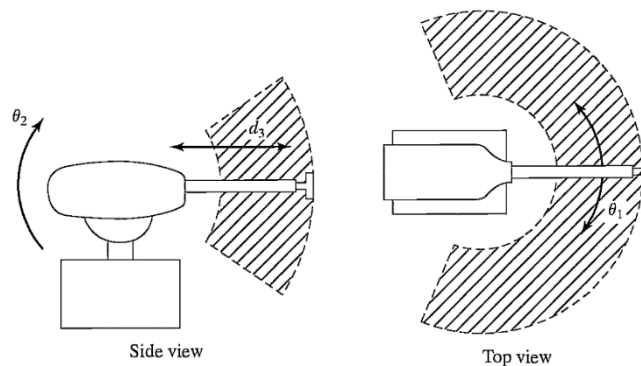
Όπως φαίνεται στο σχήμα 64, η διαμόρφωση τύπου SCARA περιλαμβάνει τρεις παράλληλες περιστροφικές αρθρώσεις για την μετακίνηση του ρομπότ πάνω στο επίπεδο εργασίας. Ενώ, η τέταρτη πρισματική άρθρωση μετακινεί τον αποληκτήριο επενεργητή κάθετα προς το οριζόντιο

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα επίπεδο κίνησης. Για αυτό η μορφολογία SCARA κατάλληλη λύση για εφαρμογές που πραγματοποιούνται σε επίπεδους χώρους εργασίας (CRAIG, 2020).

Οι τρεις πρώτες αρθρώσεις στην συγκεκριμένη διαμόρφωση δεν στηρίζουν το βάρος του ρομπότ ούτε το διαχωριζόμενο φορτίο, το οποίο αποτελεί πλεονέκτημα για τα ρομπότ SCARA. Επιπρόσθετα, σε αυτή τη διαμόρφωση υπάρχει η δυνατότητα εγκατάστασης των δύο ενεργοποιητών των δύο πρώτων αρθρώσεων στο τμήμα βάσης (μέλος 0) του ρομπότ. Με αυτό το τρόπο υπάρχει περιθώριο για επιλογή ενεργοποιητών μεγάλων διαστάσεων και αυξημένης ισχύος. Συνεπώς, το ρομπότ μπορεί να μετακινείται στο χώρο εργασίας με αυξημένη ταχύτητα (CRAIG, 2020).

Παράδειγμα σύγκρισης αποτελεί ο ρομποτικός βραχίονας τύπου SCARA, Adept 1 που διαθέτει μέγιστη ταχύτητα ~ 9.14 m/s, η οποία είναι δεκαπλάσια της ταχύτητας ενός αρθρωτού βραχίονα (Rowe, 1986).

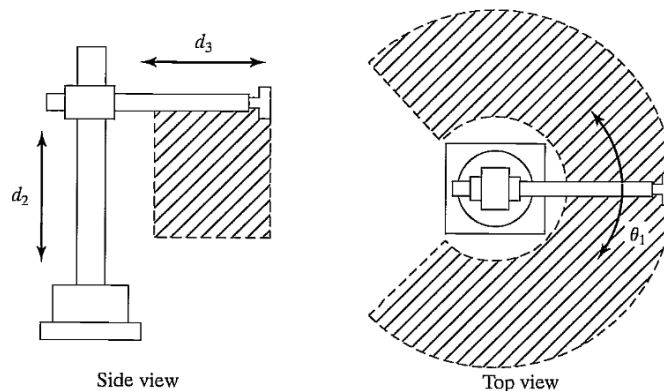
Σφαιρική ρομποτικοί βραχίονες :



Σχήμα 64: Σφαιρικός ρομποτικός βραχίονας (CRAIG, 2020).

Όπως γίνεται αντιληπτό και από το σχήμα 65 η σφαιρική διαμόρφωση είναι όμοια με τον αρθρωτό βραχίονα, με την διαφορά πως αντικαταστατεί η άρθρωση του αγκώνα με μια πρισματική άρθρωση. Ο σφαιρικός ρομποτικός βραχίονας πλεονεκτεί ως προς την ευελιξία κίνησης που διαθέτει λόγω του μέλους 3 που μπορεί να μετακινείται πρισματικά. Έτσι, η σφαιρική μορφολογία θεωρείται πιο κατάλληλη σε κάποιες εφαρμογές έναντι της μορφολογίας με αγκώνα (CRAIG, 2020).

Κυλινδρικοί ρομποτικοί βραχίονες :



Σχήμα 65: Κυλινδρικός ρομποτικός βραχίονας (CRAIG, 2020).

Ένας κυλινδρικός ρομποτικός βραχίονας απαρτίζεται από μια περιστροφική άρθρωση με κατακόρυφο άξονα, μια πρισματική άρθρωση που επιτρέπει την κατακόρυφη κίνηση του ρομπότ και μια ακόμη πρισματική που είναι κάθετη στον άξονα της περιστροφικής άρθρωσης, τέλος συμπεριλαμβάνεται ορισμένο είδους καρπού (CRAIG, 2020).

Ανάλογα με το τρόπο κίνησης των ρομποτικών βραχιόνων διαχωρίζεται σε χωρική, επίπεδη και σφαιρική (Pandilon & Dukovski , 2014).

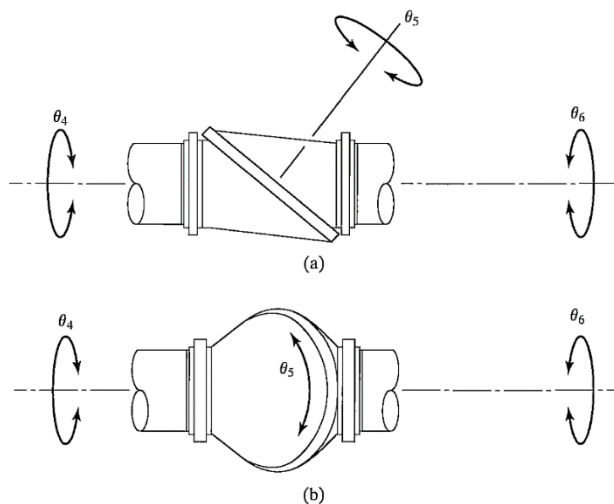
Επιπρόσθετα, υπάρχει διαχωρισμός των ρομπότ ανάλογα με το τρόπο ελέγχου, σε σέρβο (servo closed loop control) και σε μη σέρβο (ανοιχτού βρόγχου) ρομπότ. Τα ρομπότ ανοιχτού βρόγχου περιορίζονται κινητικά σε προκαθορισμένες μηχανικές στάσεις και χρησιμοποιούνται κατά κυρίως σε εφαρμογές μεταφοράς υλικών (Jazar, 2010).

Άρθρωση καρπού

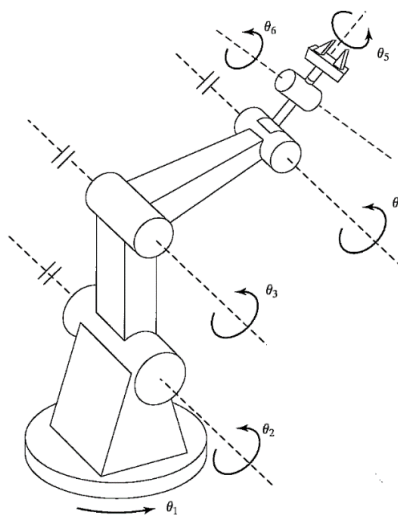
Η δομή ενός καρπού περιέχει δύο ή τρεις περιστροφικές αρθρώσεις με άξονες που είναι κάθετοι μεταξύ τους και ενώνονται στο ίδιο σημείο. Ο συνδυασμός των τριών κάθετων αξόνων επιτρέπει την επίτευξη κάθε επιθυμούμενο προσανατολισμό (για αρθρώσεις χωρίς περιοριστικά όρια). Επιπλέον, υπάρχει μια κλειστού τύπου κινηματική λύση για κάθε ρομποτικό βραχίονα με τρεις τέμνουσες άξονες (Waldron, 1986).

Πρακτικά είναι δύσκολο να δημιουργηθεί η διαμόρφωση των τριών κάθετων αξόνων χωρίς να υπάρξουν περιορισμούς στην περιστροφική κίνηση των αρθρώσεων. Η διαμόρφωση <<three roll wrist>> που συνήθως υλοποιείτε σε αρκετούς ρομποτικούς βραχίονες και κατασκευάζεται από την Cincinnati Milacron, απαρτίζεται από έναν καρπό με τεμνόμενους άξονες, οι οποίοι όμως δεν είναι κάθετοι. Έτσι, οι τρεις αρθρώσεις έχουν την ικανότητα εκτέλεσης συνεχής περιστροφικής κίνησης, χωρίς την ύπαρξη περιορισμών αλλά λόγω της έλλειψης καθετότητας παρουσιάζονται τιμές προσανατολισμού που δεν μπορούν να επιτευχθούν με τις επιλεγμένες αρθρώσεις. Σχηματικά το σύνολο των τιμών των μη δυνατών προσανατολισμών δημιουργεί έναν κώνο που είναι εκτός εμβέλειας του τρίτου άξονα του καρπού. Για να ενταχθεί ο κώνος εντός του χώρου εργασίας του βραχίονα, χρειάζεται να πραγματοποιηθεί κατάλληλη συναρμογή του καρπού με το τμήμα 3 του ρομπότ. Όπως , ακολουθεί στο σχήμα 67 (Roshiem, 1988).

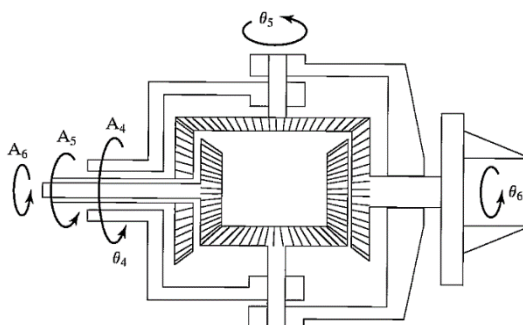
Ορισμένα ρομπότ που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία συμπεριλαμβάνουν καρπούς με άξονες χωρίς κοινό σημείο τομής και για αυτό πιθανώς να μην προκύπτει λύση κλειστού τύπου για το κινηματικό πρόβλημα. Για να διορθωθεί αυτό χρειάζεται κατάλληλη διαμόρφωση του καρπού ώστε ο άξονας της τέταρτης άρθρωσης να γίνει παράλληλος με τους άξονες των αρθρώσεων δύο και τρία. Με παρόμοιο τρόπο προκύπτει λύση κλειστού τύπου σε περιπτώσεις μη τεμνόμενων αξόνων, το οποίο ισχύει και για ρομποτικούς βραχίονες καρτεσιανού τύπου (CRAIG, 2020).



Σχήμα 66: Σχηματική αναπαράσταση ενός καρπού σε δύο διαφορετικές όψεις χωρίς κάθετους άξονες (Roshiem, 1988).



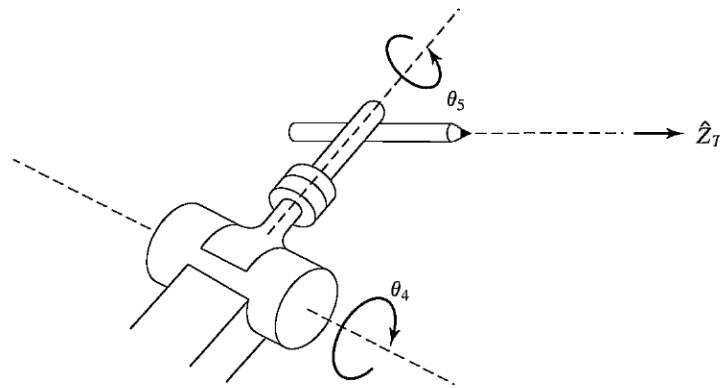
Σχήμα 67: Σχηματική απεικόνιση μιας ειδικής περίπτωσης ενός ρομποτικού βραχίονα που διαθέτει καρπό μη τεμνόμενων αξόνων, αλλά ως ρομπότ έχει λύση κλειστού τύπου στο κινηματικό πρόβλημα (CRAIG, 2020).



Σχήμα 68: Αναπαράσταση ενός καρπού που διαθέτει ορθογώνιους άξονες που οδηγείται από εξωτερικούς ενεργοποιητές με τη βοήθεια ομοαξονικών συνδέσμων (CRAIG, 2020).

Σε εφαρμογές συγκολλήσεων χρησιμοποιούνται ρομπότ που διαθέτουν πέντε βαθμούς ελευθερίας και έχουν δύο άξονες με μια διάταξη όπως αυτή που φαίνεται στο σχήμα 70. Έτσι, για την επίτευξη

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα όλων των προσανατολισμών, προϋποθέτει την συνθήκη καθετότητας μεταξύ άξονα συμμετρίας του άκρου εργασίας και του άξονα της πέμπτης άρθρωσης (CRAIG, 2020).



Σχήμα 69: Αναπαράσταση ενός καρπού από ρομποτικό βραχίονα με πέντε βαθμούς ελευθερίας για εφαρμογές συγκόλλησης (CRAIG, 2020).

4.3 Ποσοτικοί δείκτες των ιδιοτήτων του όγκου εργασίας

Κατά το σχεδιασμό ρομποτικών βραχιόνων απαιτείται η επιπρόσθετη εξέταση του χώρου εργασίας μέσω των ποσοτικών δεικτών που χαρακτηρίζουν κάθε ιδιότητα του χώρου (CRAIG, 2020).

Υλοποίηση του χώρου εργασίας με αποδοτικό σχεδιασμό

Έχει παρατηρηθεί πως η υλοποίηση ενός Καρτεσιανού ρομποτικού βραχίονα χρειάζεται περισσότερη πρώτη ύλη σε αντίθεση με την κατασκευή ενός αρθρωτού ρομποτικού βραχίονα για το ίδιο χώρο εργασίας. Αυτό αποδεικνύεται ποσοτικά παρακάτω μέσω μαθηματικών σχέσεων .

Το συμβατικό μήκος ή άθροισμα μήκους ενός ρομποτικού βραχίονα εκφράζεται ως εξής:

$$L = \sum_{i=1}^N (a_{i-1} - d_i) \quad (3.1)$$

Όπου ως a_{i-1} ορίζονται τα μήκη των τμημάτων του ρομπότ και d_i δίνει τις μετατοπίσεις των αρθρώσεων αντίστοιχα. Επομένως, το μέγεθος L που αντιστοιχεί στο άθροισμα μήκους για ένα ρομποτικό βραχίονα και δίνει το μέτρο του «μήκους» της συνολικής ρομποτικής διάταξης. Ειδικά για την περίπτωση των πρισματικών αρθρώσεων το d_i περιγράφει την απόσταση των ορίων μετακίνησης της συγκεκριμένης άρθρωσης (CRAIG, 2020).

Ως δείκτης δομικού μήκους Q_L , ορίζεται το πηλίκο του αθροίσματος μήκους L του ρομποτικού βραχίονα την κυβική ρίζα του όγκου που δημιουργεί ο χώρος εργασίας.

$$Q_L = \frac{L}{\sqrt[3]{W}} \quad (3.2)$$

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

Ο δείκτης δομικού μήκους Q_L , δίνει την ποσότητα από μήκος του μηχανισμού που χρειάζεται για την δημιουργία κάποιας μορφολογίας, ώστε τελικά να υλοποιηθεί ο όγκος του χώρου εργασίας που ζητείτε. Συνεπώς, για χαρακτηριστεί ένας σχεδιασμός αποτελεσματικός για έναν ρομποτικό βραχίονα, θα πρέπει να δίνει μικρό δείκτη δομικού μήκους αλλά ταυτόχρονα να καλύπτεται ένα μεγάλο ποσοστό όγκου του χώρου εργασίας (Waldron, 1988).

Σχεδιασμός χωρών εργασίας με καλές συνθήκες

Σε ορισμένες περιπτώσεις οι ρομποτικοί βραχίονες αδυνατούν να εκτελέσουν συγκεκριμένες εργασίες που βρίσκονται σε ιδιάζοντα σημεία, διότι μειώνεται η κινητική τους ευελιξία και κατά συνέπεια το πλήθος των βαθμών ελευθερίας τους. Σε περιοχές με σύνθετη γεωμετρία και χαρακτηριστικά ,συμπεριλαμβάνοντας και τα ιδιάζοντα σημεία που βρίσκονται στα όρια του χώρου εργασίας, παρουσιάζονται δύσκολες συνθήκες λειτουργίας για το ρομποτικό βραχίονα. Η εξασφάλιση ενός χώρου εργασίας χωρίς την παρουσία ιδιομορφιών, επιτρέπει την ομαλή λειτουργία του ρομποτικού βραχίονα.

Η ποσοτική περιγραφή των ιδιοτήτων που εξασφαλίζουν έναν χώρο εργασίας με καλές συνθήκες , πραγματοποιείται με τη βοήθεια ειδικών δεικτών. Επίσης, η εφαρμογή των συγκεκριμένων δεικτών κατά το σχεδιαστικό στάδιο εξασφαλίζει την δημιουργία ενός χώρου εργασίας με τις κατάλληλες προϋποθέσεις για την σωστή λειτουργία του ρομπότ (CRAIG, 2020).

Η μαθηματική σχέση που περιγράφει τις ιδιόμορφες μορφοθετήσεις είναι η ακόλουθη (CRAIG, 2020):

$$\text{Det}(J(\theta)) = 0 \quad (3.3)$$

Για την περιγραφή της επιδεξιότητας του ρομποτικού βραχίονα ως μέτρο χρησιμοποιείται η ορίζουσα της Ιακωβιανής. Το μέτρο της χειρισμικότητας, w , ενός ρομποτικού βραχίονα (manipulability measure) υπολογίζεται ως εξής (Yoshikawa, 1985):

$$w = \sqrt{\det(J(\theta)J^T(\theta))} \quad (3.4)$$

Για την περίπτωση μη πλεονασματικού ρομποτικού βραχίονα η παραπάνω σχέση απλουστεύεται στην εξής σχέση :

$$w = |\det(J(\theta))| \quad (3.5)$$

Η σχέση 3.5 υπολογίζεται από την ανάλυση ταχυτήτων.

Το αποτέλεσμα ενός σωστού σχεδιασμού είναι μεγάλες περιοχές χώρου εργασίας που διαθέτουν υψηλές τιμές δείκτη w (CRAIG, 2020).

Εναλλακτικά η σχέση 3.5 υπολογίζεται βάση ανάλυσης επιταχύνσεων ή ικανότητα άσκησης δύναμης. Η παρακάτω σχέση 3.6 στηρίζεται στην ανάλυση των ιδιοτιμών του Καρτεσιανού πίνακα μάζας

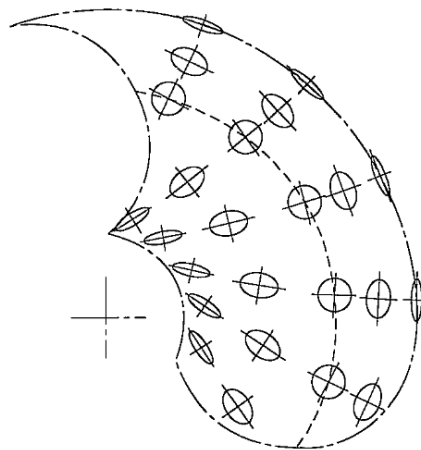
$$M_x(\theta) = J^{-T}(\theta)M(\theta)J^{-1}(\theta) \quad (3.6)$$

Η σχέση 3.6 περιγράφει το μέτρο της αποτελεσματικότητας της επιτάχυνσης ενός ρομποτικού βραχίονα για διαφορετικές Καρτεσιανές κατευθύνσεις. Η σχηματική αναπαράσταση για το συγκεκριμένο μέτρο δίνεται σύμφωνα με την σχέση 3.7 και σχηματικά αποτελεί ένα αδρανειακό ελλειψοειδές .

$$X^T M_{\chi}(\theta) X = 1 \quad (3.7)$$

Η σχέση 3.7 αναπαριστά μια έλλειψη n διαστάσεων και το n αντιστοιχεί στην διάσταση του όρου X . Οι διευθύνσεις που ορίζουν τα ιδιοδιανύσματα του $M_{\chi}(\theta)$ ταυτίζονται με τις διευθύνσεις που αντιστοιχούν στους άξονες του ελλειψοειδούς της σχέσης (3.7). Ο υπολογισμός των μηκών των αντίστοιχων αξόνων προκύπτει από τις αντίστροφες τετραγωνικές ρίζες για τις συγκεκριμένες ιδιοτιμές του πίνακα (Asada, 1984).

Χώροι εργασίας με κατάλληλες συνθήκες εργασίας για ρομποτικούς βραχίονες, παρουσιάζουν αδρανειακά ελλειψοειδή με σφαιρικό σχήμα.



Σχήμα 70: Σχηματική αναπαράσταση χώρου εργασίας ενός επίπεδου ρομποτικού βραχίονα με 2-DOF και αδρανειακά ελλειψοειδή (Asada, 1984).

Στο σχήμα 71 φαίνονται οι ιδιότητες για ένα επίπεδο ρομποτικό βραχίονα με δύο τμήματα. Επιπλέον, η κεντρική περιοχή του χώρου εργασίας του ρομποτικού βραχίονα χαρακτηρίζεται από καλές συνθήκες εργασίας ,καθώς δημιουργούνται σχεδόν κυκλικά ελλειψοειδή. Ενώ, στα όρια του χώρου εργασίας οι ελλείψεις <<χάνουν>> την σφαιρικότητα τους, το οποίο αποδεικνύει την δυσκολία επίτευξης ορισμένων κατευθύνσεων από το βραχίονα (Asada, 1984).

4.4 Πλεονασματικές δομές και δομές κλειστής αλυσίδας

Μικροβραχίονες και άλλες πλεονασματικότητες

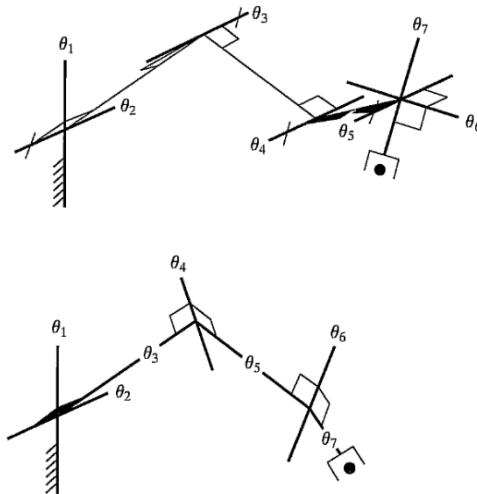
Για να μπορεί να κινείται ελεύθερα ένας ρομποτικός βραχίονας στο χώρο αρκεί να φέρει μόνο έξι βαθμούς ελευθερίας. Από την άλλη, η προσθήκη παραπάνω αρθρώσεων για την αύξηση του πλήθους των βαθμών ελευθερίας δίνει επιπλέον πλεονεκτήματα στο ρομπότ (CRAIG, 2020).

Η χρήση επιπλέον βαθμών ελευθερίας αξιοποιείται σε ρομποτικούς βραχίονες, όπως είναι οι μικροβραχίονες, οι οποίοι αποτελούν ενδιαφέρον αντικείμενο έρευνας για τους επιστήμονες. Δομικά ένας μικροβραχίονας διαθέτει ευκίνητους και λεπτομερείς βαθμούς ελευθερίας που συνδέονται με τον ελεύθερο άκρο ενός κανονικού ρομποτικού βραχίονα. Επιπλέον, η κύρια διαφορά μεταξύ

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

μικροβραχίονα και συμβατικού βραχίονα είναι το εύρος κίνησης. Καθώς, ένας συμβατικός ρομποτικός βραχίονας παρέχει μεγάλο εύρος κινήσεων, σε αντίθεση με ένα μικροβραχίονα που διαθέτει περιορισμένο εύρος κινήσεων, αλλά παρέχει κίνηση με ακρίβεια και αυτόματο έλεγχο της ασκούμενης δύναμης (J. Trevelyan, 1984), (P. Marchal, 1981).

Επιπρόσθετο πλεονέκτημα χρήσης πρόσθετων αρθρώσεων είναι η ευέλικτη κίνηση που προσφέρεται, ώστε να αποφεύγονται συγκρούσεις με ιδιόμορφες μορφοθετήσεις στο χώρο εργασίας του ρομπότ. Στο σχήμα 72 που ακολουθεί φαίνονται δύο διαμορφώσεις για βραχίονες που φέρουν επτά βαθμοί ελευθερίας (Hollerbach, 1984), (Waldron, 1986).



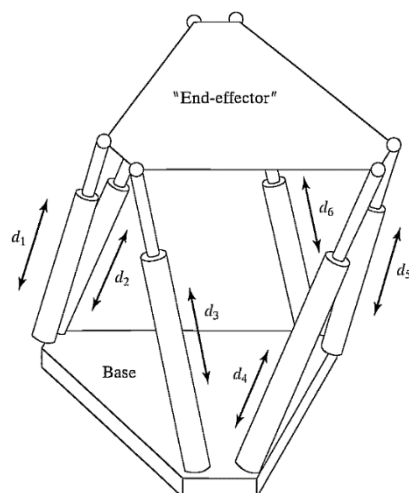
Σχήμα 71: Δύο προτεινόμενες διαμορφώσεις για ρομποτικό βραχίονα με 7-DOF (Waldron, 1988).

Επομένως, τα πλεονασματικά ρομπότ πλεονεκτούν με την ικανότητα τους να αποφύγουν εμπόδια σε συνωστισμένα περιβάλλοντα εργασίας. Αυτό παρατηρείται στην περίπτωση ενός ρομποτικού βραχίονα με 6-DOF που μπορεί να προσεγγίσει ορισμένο σημείο του χώρου έχοντας δεδομένο προσανατολισμό με πεπερασμένο αριθμό τρόπων. Αντιθέτως, με την αύξηση των αρθρώσεων σε επτά σε σύνολο, το ρομπότ αποκτά άπειρους συνδυασμούς προσέγγισης του ορισμένου σημείου στο χώρο για να διαμορφωθεί η κατάλληλη επιλογή συνδυασμού με στόχο την αποφυγή συγκρούσεων (CRAIG, 2020).

Δομές με κλειστό βρόχο

Ένα παράδειγμα ρομποτικού βραχίονα κλειστού βρόχου αποτελεί ο βραχίονας Motoman L-3 που διαθέτει μηχανισμούς με κλειστό βρόχο στις διατάξεις οδήγησης για τις αρθρώσεις νούμερο 2 και 3. Το πλεονέκτημα των διατάξεων με κλειστό βρόχο είναι η στιβαρότητα που προσφέρουν στο ολικό συναρμολόγημα. Ωστόσο, οι δομές που φέρουν βρόχο ελαττώνουν το πεδίο κίνησης των αρθρώσεων και ως συνέπεια περιορίζεται το εύρος του χώρου εργασίας (M. Leu, 1985).

Ο μηχανισμός που παρουσιάζεται στο σχήμα 72 καλείται Stewart και αποτελεί διαμόρφωση κλειστού βρόχου που συνιστάται ως εναλλακτική επιλογή στον συμβατικό ρομποτικό βραχίονα με έξι βαθμούς ελευθερίας και τύπου σειριακής αλυσίδας (M. Leu, 1985).



Σχήμα 72: Μηχανισμός Stewart με διαμόρφωση παράλληλου ρομποτικού βραχίονα με 6-DOF (CRAIG, 2020).

Ο έλεγχος της θέσης και του προσανατολισμού του αποληκτήριου επενεργητή πραγματοποιείται από τους έξι γραμμικούς ενεργοποιητές που αποτελούν το σύνδεσμο με την βάση. Η σύνδεση μεταξύ βάσης και κάθε ενεργοποιητή γίνεται μέσω μιας άρθρωσης μορφής σταυρού που διαθέτει δύο βαθμούς ελευθερίας, ενώ η συνδεσμολογία με τον αποληκτήριο επενεργητή γίνεται μέσω μιας σφαιρικής άρθρωσης ολίσθησης που φέρει τρεις βαθμούς ελευθερίας. Ο μηχανισμός Stewart ως διάταξη κλειστού βρόχου χαρακτηρίζεται από υψηλή στιβαρότητα αλλά έχει περιορισμένο χώρο εργασίας. Επιπρόσθετα, ως μηχανισμό παρουσιάζει μια ιδιοτροπία ως προς τη λύση του κινηματικού προβλήματος, καθώς επιλύεται απλουστερά ως προς αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα έναντι του ευθύ κινηματικού προβλήματος που είναι πιο σύνθετο και δεν δίνει απαραίτητα λύσεις κλειστού τύπου (CRAIG, 2020).

Για την ευκολότερη εύρεση του πλήθους βαθμών ελευθερίας σε ένα μηχανισμό κλειστού βρόχου χρησιμοποιείται η μαθηματική σχέση 3.8 του Grübler .

$$F = 6(l - n - 1) + \sum_{i=1}^n f_i \quad (3.8)$$

Όπου: - F χαρακτηρίζει το συνολικό αριθμό των βαθμών ελευθερίας

- l το σύνολο των μελών, συμπεριλαμβανομένου της βάσης
- n το πλήθος των αρθρώσεων
- f_i ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας που αφορούν την άρθρωση i

Για την περίπτωση επίπεδου βραχίονα η σχέση 3.8 μετασχηματίζεται σε:

$$F = 3(l - n - 1) + \sum_{i=1}^n f_i \quad (3.9)$$

Θεωρώντας πως τα αντικείμενα που δεν παρουσιάζουν περιορισμούς διαθέτουν τρεις βαθμούς ελευθερίας.

4.5 Διατάξεις ενεργοποίησης

Έπειτα από την επιλογή ορισμένης κινηματικής διαμόρφωσης για ένα ρομποτικό βραχίονα, ακολουθεί το ζήτημα ενεργοποίησης των αρθρώσεων. Δομικά ένας ενεργοποιητής απαρτίζεται από το σύστημα μετάδοσης κίνησης και από ένα μειωτήρα, που είναι αλληλοεξαρτώμενες διατάξεις και απαιτούν ταυτόχρονο σχεδιασμό (CRAIG, 2020).

Καθορισμός θέσης ενεργοποιητών

Η πρώτη κατηγοριοποίηση ενεργοποιητών αρθρώσεων καλείται διάταξη άμεσης καθοδήγησης, καθώς ο ενεργοποιητής προκαλεί μια επαρκής μεγάλη ροπή ή δύναμη που οδηγείται άμεσα για αξιοποίηση στην άρθρωση. Στην συγκεκριμένη περίπτωση ο ενεργοποιητής τοποθετείται σε κοντινή απόσταση από την άρθρωση που τροφοδοτεί. Οι διατάξεις άμεσης καθοδήγησης πλεονεκτούν με τον απλούστερο σχεδιασμό και της επιλογής αυτόματης ρύθμισης της υψηλής στάθμης. Έτσι, η κίνηση των αρθρώσεων μπορεί να ρυθμιστεί έχοντας την ίδια ακρίβεια με την οποία ελέγχεται ο ενεργοποιητής χωρίς τη χρήση μειωτήρων ή συστημάτων μετάδοσης κίνησης (Yousef-Toumi, 1987).

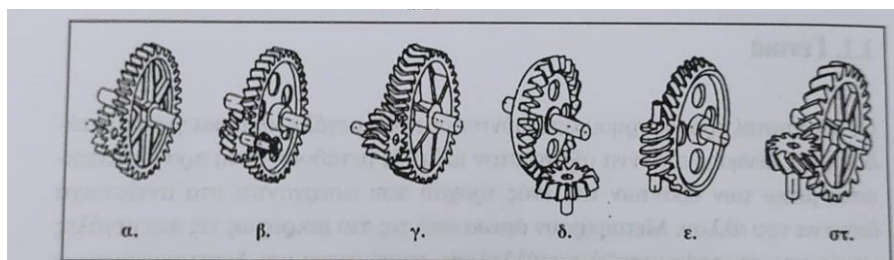
Ένα μεγάλο ποσοστό ενεργοποιητών, ωστόσο σχεδιάζεται για την λειτουργία με μεγάλες ταχύτητες και μικρές ροπές. Έτσι, σε τέτοιες περιπτώσεις απαιτείται η εφαρμογή συστημάτων μείωσης ταχύτητας. Επίσης, οι ενεργοποιητές σε αυτή τη περίπτωση παρουσιάζουν αυξημένο βάρος και για αυτό συνήθως τοποθετούνται στην βάση του ρομπότ ή σε μικρή απόσταση από αυτήν, με σκοπό την ελαττώσει της ολικής αδράνειας του ρομποτικού βραχίονα. Επομένως, για την επίτευξη της ορθής λειτουργίας του βραχίονα χρειάζεται να παρεμβεί ένα σύστημα μετάδοσης κίνησης μεταξύ ενεργοποιητών και αρθρώσεων (CRAIG, 2020).

Στους μηχανισμούς ρύθμισης των αρθρώσεων που συνδέονται με ενεργοποιητές που βρίσκονται σε κάποια απομακρυσμένη απόσταση, υπάρχουν μειωτήρες που συνδέονται με την άρθρωση είτε βρίσκονται στον ενεργοποιητή. Ορισμένες διατάξεις έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν κίνηση και ταυτόχρονα να μειώσουν την ταχύτητα. Το κύριο μειονέκτημα αυτών των σύνθετων διατάξεων είναι η πρόσθεση επιπλέον φαινομένων προς εξέταση της τριβής και της ελαστικότητας στον μηχανισμό. Η σύνδεση του μειωτήρα σε μια άρθρωση προκαλεί μεταβίβαση κίνησης με μικρότερες ροπές και μεγαλύτερες ταχύτητες. Όπου, η ελαστικότητα του μηχανισμού δεν αποτελεί σημαντικό ζήτημα στην περίπτωση των μικρών τιμών ροπής. Όμως, αυτό δεν ισχύει σε περιπτώσεις εφαρμογών που συμπεριλαμβάνουν μειωτήρες με αυξημένο βάρος, καθώς μειώνεται η απόδοση εγκατάστασης απομακρυσμένων ενεργοποιητών (CRAIG, 2020).

Ως σύνολο παράγοντες όπως ελαστικότητα του μηχανισμού μετάδοσης, το βάρος του μειωτήρα, η επιπρόσθετη τριβή που προκαλεί ο μειωτήρας και η ευκολία ένταξης όλων αυτών των μηχανισμών στο σχέδιο του ρομποτικού βραχίονα παρουσιάζουν σημαντική επιρροή στην βέλτιστη κατανομή βαθμίδων ενός μειωτήρα που εντάσσεται σε ορισμένο σύστημα μετάδοσης κίνησης (CRAIG, 2020).

Σύστημα μετάδοσης κίνησης και μειωτήρες

Τα γρανάζια ή οδοντωτοί τροχοί τα πιο διαδομένα εξαρτήματα ενός μειωτήρα ενταγμένα σε συμπαγείς δομές, προκαλούν μεγάλη ελάττωση της ταχύτητας. Υπάρχουν αρκετοί μέθοδοι σύνδεσης ζευγάρια γραναζιών, για παράδειγμα η μετωπική σύζευξη κατά την οποία οι άξονες των τροχών έχουν παράλληλη τοποθέτηση, τα κωνικά γρανάζια σε ορθογώνια τεμνόμενους, ασύμβατοι με ατέρμονες κοχλίες και διασταυρούμενα ελικοειδή γρανάζια και αρκετοί άλλη συνδυασμοί. Τα γρανάζια ανάλογα με της κατηγορία τους διαφοροποιούνται σε χαρακτηριστικά ως προς το μέγιστο ονομαστικό φορτίο και την αντοχή σε φθορά (CRAIG, 2020).



Σχήμα 73: Τύποι μειωτήρων. α. έως γ. με μετωπικούς οδοντωτούς τροχούς, δ. με κωνικούς οδοντωτούς τροχούς, ε. με ατέρμονα κοχλία-τροχό, στ. με κοχλιωτούς οδοντωτούς τροχούς (ΣΤΕΡΓΙΟΥ & ΣΤΕΡΓΙΟΥ, 2002).

Τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των γραναζιών σε εφαρμογές είναι η ανάκρουση και η επιπλέον τριβή που δημιουργούν κατά την μετάδοση κίνησης. Ως ανάκρουση χαρακτηρίζεται το αποτέλεσμα της ατελούς συναρμογής των γραναζιών και ως ορισμό αποτελεί την μέγιστη γωνιακή μετακίνηση του γραναζιού εξόδου, καθώς το γρανάζι της εισόδου μένει σταθερό. Αντίθετα, όταν υπάρχει σφιχτή συναρμογή μεταξύ των γραναζιών με στόχο την εξάλειψη της ανάκρουσης δημιουργείται υπερβολική τριβή κατά την μετάδοση κίνησης. Επομένως, για να αποφευχθούν τα προαναφερόμενα ζητήματα τα γρανάζια κατασκευάζονται και τοποθετούνται με υψηλή ακρίβεια, ωστόσο υπάρχει αύξηση του κόστους παραγωγής τους (CRAIG, 2020).

Με τον λόγο σχέσης μετάδοσης η για ένα ζεύγος γραναζιών υπολογίζεται η ελάττωση της ταχύτητας και η συνακόλουθη αύξηση της ροπής. Ο λόγος η ορίζεται για τιμές μεγαλύτερες του ένα για μειωτήρες. Στις ακόλουθες σχέσεις δίνονται οι ταχύτητες ως συνάρτηση των ροπών στην είσοδο και στην έξοδο του συνολικού συστήματος γραναζιών.

$$\dot{\theta}_o = \frac{1}{\eta} \dot{\theta}_i \quad (3.10)$$

$$\tau_o = \eta \tau_i \quad (3.11)$$

Όπου : $\dot{\theta}_o$ συμβολίζεται η ταχύτητα εξόδου

$\dot{\theta}_i$ η ταχύτητα εισόδου

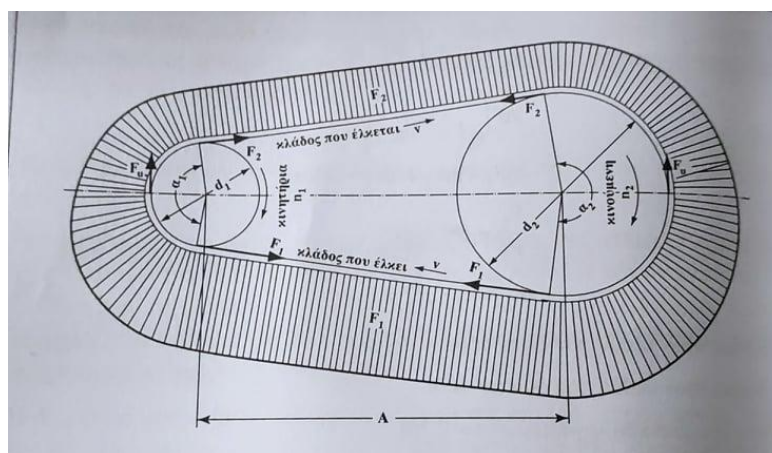
τ_o και τ_i είναι οι ροπή στην έξοδο και στην είσοδο αντίστοιχα.

Άλλη διαφορετική κατηγορία μειωτήρων εμπεριέχει τα εξής στοιχεία συρματόσχοινα, μιάντες, εύκαμπτες ταινίες και μηχανικά καλώδια. Τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν αυτά τα στοιχεία είναι ευκαμψία που επιτρέπει να τυλίγονται πάνω στις τροχαλίες και ελαστικότητα που εξαρτάται από το μήκος τους. Επειδή, οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί έχουν μεγάλη ευκαμψία χρειάζεται να εξασφαλίζεται η διατήρηση σύνδεσης του μιάντα ή του συρματόσχοινου με τις τροχαλίες αναπτύσσοντας κατάλληλη προένταση στον βρόχο. Όμως, η δημιουργία μεγάλης προέντασης προκαλεί μόνιμη παραμόρφωση στα ελαστικά εξαρτήματα και αυξάνει την τριβή των μηχανισμών (CRAIG, 2020).

Οι εύκαμπτες ταινίες, τα συρματόσχοινα και τα μηχανικά καλώδια λειτουργούν είτε ως μέρη μονοτερματικών απολήξεων είτε σε εφαρμογές με κλειστούς βρόχους, καθώς κατά τη διάρκεια όλης της λειτουργίας τους βρίσκονται σε μια ορισμένη διάσταση υπό την ασκούμενη προένταση. Για την υπερνίκηση της ασκούμενης δύναμης μετακίνησης της άρθρωσης που κατευθύνεται προς κάποιο προσανατολισμό με την υποστήριξη ενός ελατηρίου, αξιοποιείται ένα συρματόσχοινο για την εναλλαγή της κατεύθυνσης. Επιπλέον, τρόπος αποτελεί η χρήση δύο ανταγωνιστικών συστημάτων μονοτερματικών απολήξεων τα οποία ενεργούν σε αντίθετες κατευθύνσεις. Με την εφαρμογή των συγκεκριμένων μεθόδων και την αύξηση των ενεργοποιητών (Μειονέκτημα λόγω αύξησης του επιπρόσθετου κόστους) αντιμετωπίζονται τα ζητήματα που δημιουργούν μεγάλα φορτία προέντασης (CRAIG, 2020).

Οι αλυσίδες με κυλίστρα που παρουσιάζουν ίδια χαρακτηριστικά λειτουργίας με τις ελαστικές ταινίες, έχουν την δυνατότητα σύνδεσης με τροχαλίες μικρής διαμέτρου διατηρώντας την υψηλή στιβαρότητα κατά την λειτουργία. Όμως, τα συγκεκριμένα συστήματα σε εφαρμογές διαχείρισης μεγάλων φορτίων παρουσιάζουν σημαντική φθορά, συγκεκριμένα οι πείροι στα σημεία σύνδεσης των τμημάτων και για αυτό προτιμώνται τα συστήματα οδοντωτών μιάντων που είναι πιο συμπαγή (CRAIG, 2020).

Τα μηχανικά καλώδια, οι ελαστικές ταινίες, οι αλυσίδες, οι μιάντες και τα συρματόσχοινα ως στοιχεία μεταδίδουν την κίνηση με την ταυτόχρονη μείωση της ταχύτητας (CRAIG, 2020). Αυτό απεικονίζεται σχηματικό παράδειγμα ενός μιάντα στο σχήμα με την τροχαλία στην είσοδο να διαθέτει διάμετρο d_1 και αντίστοιχα η τροχαλία στην έξοδο διάμετρο d_2 .



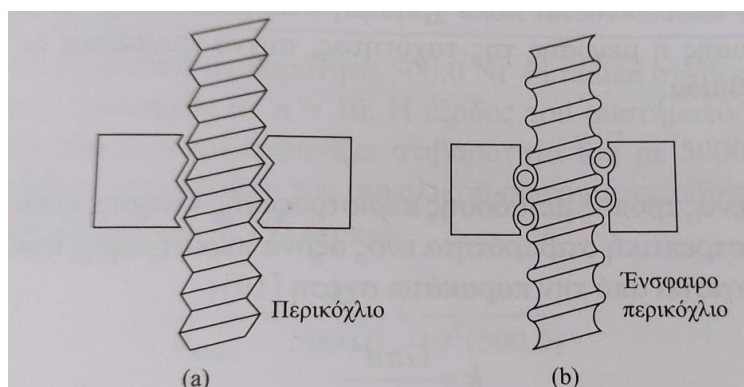
Σχήμα 74: Ανάλυση δυνάμεων σε κινούμενο μιάντα (ΣΤΕΡΓΙΟΥ & ΣΤΕΡΓΙΟΥ, 2002).

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα
Ο λόγος μετάδοσης κίνησης εκφράζεται με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$i = \frac{d_2}{d_1} \quad (3.12)$$

(ΣΤΕΡΓΙΟΥ & ΣΤΕΡΓΙΟΥ, 2002)

Μια επιπλέον γνωστή μέθοδος μείωσης ταχύτητας με την εφαρμογή συμπαγούς δομής αποτελούν τα συστήματα με απλούς ατέρμονες κοχλίες ή με ένσφαιρους ατέρμονες. Οι εφαρμογές των ατέρμονων κοχλιών είναι σημαντικές καθώς μπορούν να στηρίξουν μεγάλα φορτία και έχουν την ικανότητα να αλλάξουν την περιστροφική κίνηση σε ευθύγραμμη. Η διαφορά των συστημάτων ένσφαιρων ατέρμονων κοχλιών σε σχέση με τους απλούς ατέρμονες κοχλίες αφορά το σχήμα του περικοχλίου, το οποίο στους ένσφαιρους κοχλίες δεν εφαρμόζεται στο σπείρωμα κατευθείαν αλλά έμμεσα με τη βοήθεια μικρών μεταλλικών σφαιρών που ανακυκλώνονται στις αυλακώσεις κοχλίωσης. Η χρήση των ένσφαιρων ατέρμονων κοχλιών μειώνει την αναπτυσσόμενη τριβή και επιτρέπει την ανάδρομη οδήγηση τους, κίνηση από την έξοδο προς την είσοδο της κοχλίωσης (CRAIG, 2020).



Σχήμα 75: Σύστημα με (α) απλούς ατέρμονες κοχλίες, (β) ένσφαιρους ατέρμονες κοχλίες που επιτρέπουν την μετατροπή της περιστροφικής κίνησης σε ευθύγραμμη με την ταυτόχρονη μείωση ταχύτητας (CRAIG, 2020).

4.6 Μελέτη υλικού κατασκευής ρομποτικών βραχιόνων

Οι πλειονότητα των ρομποτικών διατάξεων κατασκευάζονται από κοινά υλικά. Ωστόσο, τα ρομπότ που χρησιμοποιούνται σε εξειδικευμένες εφαρμογές όπως, για διαστημική εξερεύνηση ή άλλες διαφορετικές εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας κατασκευάζονται από μέταλλο τιτανίου και δομικά στοιχεία ινών άνθρακα. Η επιλογή του υλικού κατασκευής του ρομπότ εξαρτάται σε μεγάλο ποσοστό από το περιβάλλον εργασίας του ρομπότ και την ζητούμενη αντοχή βάση εφαρμογής (Gurudu Rishank Reddy, 2016).

Επιπλέον, το επιπλεγμένο υλικό επηρεάζεται από παραμέτρους, όπως ο σχεδιασμός, η ταχύτητα λειτουργίας της διάταξης, τα επικίνδυνα υλικά που πιθανόν να βρίσκονται εντός χώρου εργασίας, την ανθρώπινη παρουσία, η απόσταση της μετακίνησης του ρομπότ (Nairutya Patel, 2020).

Συνηθισμένα υλικά κατασκευής συνδέσμων και βάσεις ρομποτικών βραχιόνων αποτελούν ο χάλυβας, ο χυτοσίδηρος και το αλουμίνιο. Στη περίπτωση των κινουμένων ρομπότ προστίθεται ελαστικό υλικό για την μείωση του θορύβου και της ολίσθησης με το έδαφος για την καλύτερη

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

ισορροπία του ρομπότ. Τα ρομπότ περιέχουν αρκετά ηλεκτρονικά στοιχεία και καλώδια που ελέγχονται μέσω συχνοτήτων ή λέιζερ. Επιπρόσθετα, διαθέτουν κυλίνδρους και άλλους μηχανισμούς δημιουργίας κίνησης που περιέχουν υδραυλικό έλαιο ή πεπιεσμένο αέρα. Οι συγκεκριμένοι μηχανισμοί συνδέονται με τις βαλβίδες ελέγχου μέσω εύκαμπτων σωλήνων σιλικόνης, καουτσούκ και με επικάλυψη ανοξειδώτου χάλυβα. Σε ειδικές εφαρμογές ορισμένα τμήματα του ρομπότ απαιτούν προστασία από το περιβάλλον εργασίας με ευέλικτες ασπίδες νεοπρενίου. Οι ελεγκτές του ρομπότ αποθηκεύονται σε χαλύβδινα ηλεκτρικά ντουλάπια που τοποθετούνται σε κοντινή θέση από το χώρο εργασίας της ρομποτικής διάταξης ή μεταφέρονται στο ίδιο το ρομπότ (Nairutya Patel, 2020).

Το αλουμίνιο αποτελεί μαλακό υλικό και για αυτό είναι πιο ευέλικτο κατά την εκτελούμενη εργασία, από την άλλη ο χάλυβας διαθέτει μεγαλύτερη αντοχή. Δομικά ένας ρομποτικός βραχίονας απαρτίζεται από πολλαπλά τμήματα και το καθένα χαρακτηρίζεται από διαφορετική αντοχή και βάρος. Για παράδειγμα ο ώμος σε ένα βραχίονα φέρει μεγαλύτερο βάρος σε σύγκριση με τα υπόλοιπα τμήματα. Τα υπόλοιπα τμήματα εκτός της βάσης και του άκρου εργασίας δεν έρχονται σε επαφή με το έδαφος και δεν στηρίζουν επιπρόσθετο βάρος άλλων τμημάτων, όπως συμβαίνει με την βάση του βραχίονα που στηρίζει το συνολικό συναρμολόγημα και έχει το μεγαλύτερο βάρος ως τμήμα του ρομποτικού βραχίονα (Gurudu Rishank Reddy, 2016).

Το υλικό που χρησιμοποιείται κατά μεγάλο ποσοστό για την κατασκευή των περισσότερων τμημάτων ενός ρομποτικού βραχίονα είναι το κράμα αλουμινίου 6061. Ως κράμα το αλουμίνιο 6061 με θερμική προεπεξεργασία σκλήρυνσης εμπεριέχει μαγνήσιο και πυρίτιο ως κύρια στοιχεία. Επιπλέον, χαρακτηρίζεται από ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες και δίνει καλά αποτελέσματα σε διεργασίες συγκόλλησης. Θεωρείται από τα πιο συνηθισμένα κράματα αλουμινίου για απλές εφαρμογές. Επιπλέον, οι μηχανικές ιδιότητες του εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από την θερμοκρασία του ή την θερμική επεξεργασία που έχει υποστεί ως υλικό (Gurudu Rishank Reddy, 2016).

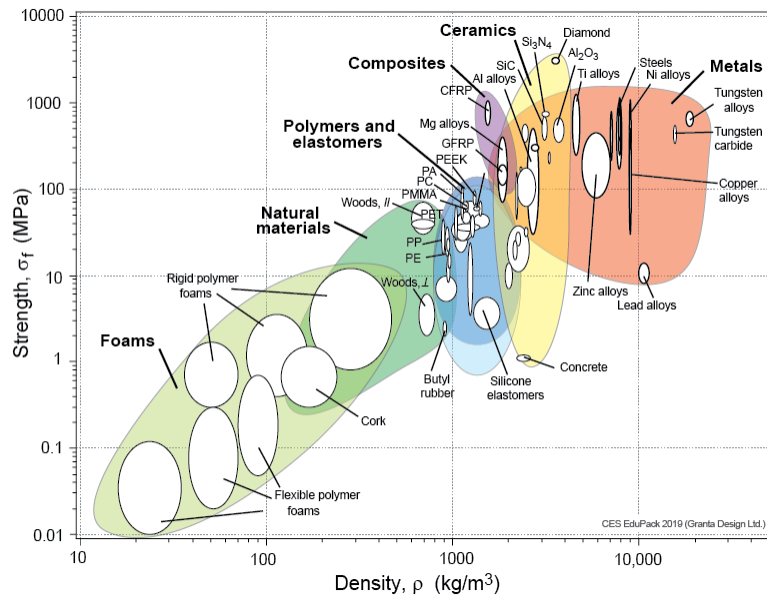
Οι μηχανικές ιδιότητες του αλουμινίου 6061 είναι οι εξής : Μέτρο ελαστικότητας του Young ίσο με 69 GPa (10,000Ksi), Η ανόπτηση του δίνει μέγιστη τιμή αντοχής εφελκυσμού 120MPa (18,000Psi) και μέγιστο όριο διαρροής 55MPa (8,000 Psi) και επιμήκυνση (Συνολική επιμήκυνση πριν την τελική θραύση) 20-30% (Gurudu Rishank Reddy, 2016).

Σήμερα, υπάρχει διαθέσιμη μεγάλη συλλογή από μεταλλικά και συνθετικά υλικά προς αγορά και η εκλογή του υλικού υλοποίησης του ρομπότ θεωρείται σύνθετη διαδικασία. Για την διευκόλυνση της μελέτης υλικών κατασκευής των βραχιόνων χρησιμοποιούνται τα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 77 και το Σχήμα 78) που απεικονίζουν τα χαρακτηριστικά υλικά κατασκευής σε διαχωρισμένα πεδία βάση χαρακτηριστικών ιδιοτήτων και ποιότητας (Gurudu Rishank Reddy, 2016).

Λόγω των πολλών υλικών που υπάρχουν προς αξιοποίηση και των πολλαπλών ιδιοτήτων τους χρειάζεται να γίνει κατάλληλη απεικόνιση των υλικών σε ομάδες για να γίνει σύγκριση τους. Αυτό πραγματοποιείται με τη βοήθεια των διαγραμμάτων 'Ashby' (Διαγράμματα <<φούσκα>>) που φέρουν άξονες που αντιστοιχούν σε προκαθορισμένα μεγέθη το καθένα αντίστοιχα. Έτσι, κάθε υλικό διαθέτει ένα εύρος τιμών για μια ορισμένη ιδιότητα, που εξαρτάται από την δομική σύνθεση, την θερμική επεξεργασία, το βαθμό επεξεργασίας και άλλους παράγοντες. Τα υλικά απεικονίζονται στα διαγράμματα ως ελλείψεις ή <<φουσαλίδες>>, των οποίων το πλάτος και το ύψος καθορίζεται από το εύρος τιμών της εξεταζόμενης ιδιότητας (GRANTA, 2020).

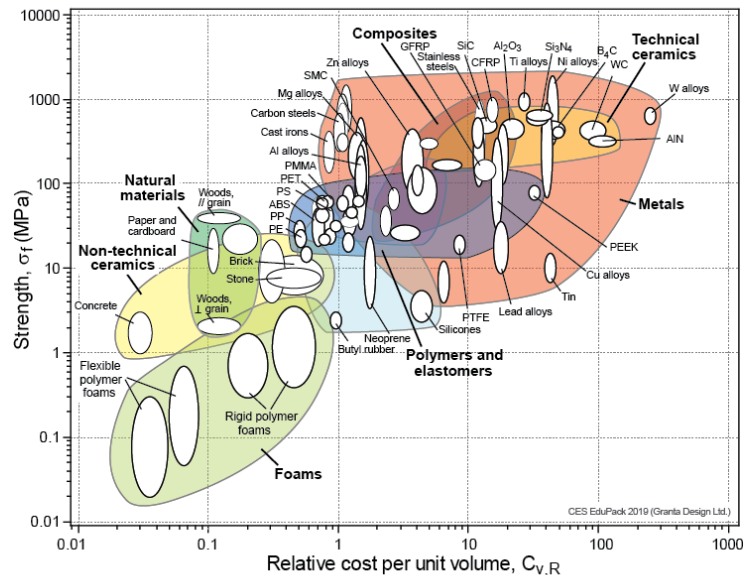
Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

Το εύρος των αξόνων στους πίνακες επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτει όλα τα υλικά, από πυκνά, σκληρά και ισχυρά μέταλλα όπως είναι το βολφράμιο έως και ελαφρύ και εύκαμπτοι πολυμερείς αφροί. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση λογαριθμικής κλίμακας, όπου κάθε βήμα στους άξονες αντιστοιχεί σε ένα συντελεστή 10 (GRANTA, 2020).



Σχήμα 76: Διάγραμμα Αντοχής (Εκφρασμένη σε τάση) σε συνάρτηση με την πυκνότητα υλικών κατασκευής (Ashby, 2020).

(Chart created using CES EduPack 2019, ANSYS Granta © 2020 Granta Design)



Σχήμα 77: Διάγραμμα Αντοχής (Εκφρασμένη σε τάση) σε συνάρτηση με το σχετικό κόστος ανά μονάδα όγκου (Ashby, 2020).

(Chart created using CES EduPack 2019, ANSYS Granta © 2020 Granta Design)

4.7 Στιβαρότητα και παραμόρφωση

Απώτερος σκοπός του σχεδιασμού των περισσότερων ρομποτικών βραχιόνων είναι η στιβαρότητα της συνολικής διάταξης που κατασκευάζεται και του συστήματος οδήγησης. Η στιβαρότητα σε ένα ρομποτικό σύστημα προσφέρει κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα. Όπως, η διατήρηση της στιβαρότητας των τμημάτων του ρομποτικού βραχίονα κατά την επίδραση εξωτερικών φορτίων και της βαρύτητας. Το συγκεκριμένο πλεονέκτημα είναι σημαντικό, διότι ένας τυπικός ρομποτικός βραχίονας δεν έχει αισθητήρες, ώστε να εντοπίζεται η θέση του πλαισίου αναφοράς του άκρου εργασίας άμεσα. Ο υπολογισμός της θέσης γίνεται με την εφαρμογή της ευθείας κινηματικής με δεδομένο τις θέσεις των αρθρώσεων που υπολογίζονται μέσω των συνδεδεμένων αισθητήρων και αυτό απαιτεί ακριβή υπολογισμό, δηλαδή πρέπει η διαμόρφωση Denavit-Hartenberg να διατηρείται αμετάβλητη υπό κάθε συνθήκη φόρτισης. Επιπλέον, ο χαρακτηρισμός της δομής του συστήματος ή των μηχανισμών μετάδοσης κίνησης από ελαστικότητα προκαλεί φαινόμενα συντονισμού που αποτελούν κίνδυνο για την ασφαλής λειτουργία του βραχίονα (CRAIG, 2020).

Ελαστικά στοιχεία σε σειρά και παράλληλα

Η σύνδεση δύο ελαστικών στοιχείων με στιβαρότητα k_1 και k_2 αντίστοιχα, τα οποία έχουν παράλληλη συνδεσμολογία παρέχουν συνολική στιβαρότητα :

$$k_{parallel} = k_1 + k_2 \quad (3.13)$$

Αντίστοιχα, για συνδεσμολογία σε σειρά η σχέση 3.13 διαφοροποιείται ως εξής:

$$\frac{1}{k_{series}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \quad (3.14)$$

Η σχέση 3.14 εφαρμόζεται σε πολλές περιπτώσεις μετάδοσης κίνησης, επειδή μια βαθμίδα μετάδοσης κίνησης ή μείωσης ταχύτητας, συνήθως συνδέεται σε σειρά με τις υπόλοιπες βαθμίδες (CRAIG, 2020).

Άξονες

Για την μετάδοση της περιστροφικής κίνησης συχνά αξιοποιούνται άτρακτοι. Για τον υπολογισμό της στρεπτικής στιβαρότητας για έναν περιστροφικό άξονα με κυκλική διατομή χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση 3.15 (J., 1977) :

$$k = \frac{G\pi d^4}{32 l} \quad (3.15)$$

Όπου : - d είναι η διάμετρος του άξονα

- l το μήκος του άξονα

- G το μέτρο της διατμητικής ελαστικότητας (Για τον χάλυβα $G = 7.5 \times 10^{10} \text{ Nt/m}^2$) .

(CRAIG, 2020)

Οδοντωτοί τροχοί

Τα γρανάζια ή οδοντωτοί τροχοί παρουσιάζουν μεγάλη σκληρότητα, ωστόσο εισάγουν ορισμένη ελαστικότητα στο σύστημα οδήγησης. Προσεγγιστικά για τον υπολογισμό της στιβαρότητας ενός γραναζιού εξόδου, με την υπόθεση πως το γρανάζι στην είσοδο είναι σταθερό, γίνεται με βάση :

$$k = C_g b r^2 \quad (3.16)$$

- Ως b συμβολίζεται το εύρος του γραναζιού
- r η ακτίνα του γραναζιού στην θέση εξόδου
- $C = 1.34 \times 10^{10} \text{ Nt/m}^2$ η τιμή για τον χάλυβα.

Τα συστήματα που χρησιμοποιούν γρανάζια, παρουσιάζουν μια μεταβολή στην συνισταμένη στιβαρότητα του συστήματος οδήγησης κατά έναν παράγοντα n^2 . Αν το σύστημα μετάδοσης κίνησης έχει στιβαρότητα πριν την ελάττωση της ταχύτητας ίση με k_1 (Για παράδειγμα στη θέση εισόδου) για την οποία ισχύει :

$$\tau_i = k_i \delta \theta_i \quad (3.17)$$

Και αντίστοιχα k_o η στιβαρότητα στην θέση εξόδου έπειτα από την μείωση της ταχύτητας, που ικανοποιεί την σχέση 3.18

$$\tau_o = k_o \delta \theta_o \quad (3.18)$$

Τότε, η συσχέτιση μεταξύ k_o και k_1 για ένα ιδανικό στερεό και μη παραμορφώσιμο ζεύγος γραναζιών υπολογίζεται ως εξής:

$$k_o = \frac{\tau_o}{\delta \theta_o} = \frac{n k_i \delta \theta_i}{\frac{1}{\eta} \delta \theta_i} = \eta^2 k_i = i^2 k_i \quad (3.19)$$

Συνεπώς, το τετράγωνο του λόγου της σχέσης μετάδοσης κίνησης είναι ανάλογο της στιβαρότητας σε ένα μηχανισμό μείωσης ταχύτητας που χρησιμοποιεί γρανάζια (D., 1979).

Ιμάντες

Για τον υπολογισμό της στιβαρότητας ενός ιμάντα χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση 3.20:

$$k = \frac{AE}{l} \quad (3.20)$$

Όπου A συμβολίζει το εμβαδόν της διατομής του ιμάντα,

E το μέτρο ελαστικότητας,

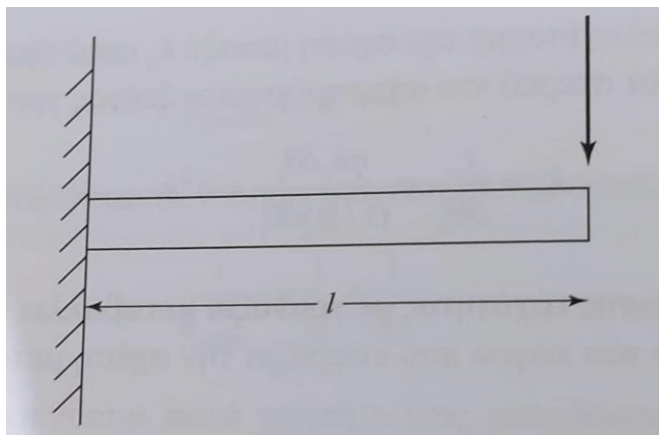
l το άθροισμα του ελεύθερου μήκους του ιμάντα της απόστασης που περικλείεται μεταξύ τροχαλιών και του ενός τρίτου του μήκους του ιμάντα που εφάπτεται με τις τροχαλίες (J., 1977).

Μέλη – τμήματα διάταξης

Θεωρητικά ένα μέλος που ανήκει σε ένα ρομποτικό βραχίονα μπορεί να μοντελοποιηθεί σαν έναν πρόβολο, του οποίου η στιβαρότητα στο ελεύθερο σημείο του (Σχήμα 79) δίνεται από την σχέση 3.21 (J., 1977).

$$k = \frac{3\pi E(d_o^4 - d_i^4)}{64 l^3} \quad (3.21)$$

Ως d_i και d_o συμβολίζεται η εσωτερική και η εξωτερική διάμετρος της δοκού αντίστοιχα, με l δίνεται το μήκος και E είναι το μέτρο ελαστικότητας (CRAIG, 2020).



Σχήμα 78: Μια προεξέχουσα δοκός που χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση της στιβαρότητας στο ελεύθερο ενός δοκιμίου-μέλους που βρίσκεται υπό την επίδραση ενός φορτίου (CRAIG, 2020).

Η στιβαρότητα για την περίπτωση μιας κοιλοδοκού τετραγωνικής διατομής υπολογίζεται ως :

$$k = \frac{E (w_o^4 - w_i^4)}{4 l^3} \quad (3.22)$$

Όπου w_o και w_i είναι η εξωτερική και η εσωτερική διάμετρος αντίστοιχα της δοκού και η διαφορά $w_o - w_i$ μας δίνει το πάχος του τοιχώματος (CRAIG, 2020).

Ενεργοποιητές

Οι πιο διαδομένοι ενεργοποιητές που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των ρομποτικών βραχιόνων είναι οι υδραυλικοί εμβολοφόροι κύλινδροι και οι ενεργοποιητές με βάνες. Διαθέτουν συμπαγής δομή και έχουν την δυνατότητα να δημιουργήσουν δυνάμεις για τον έλεγχο των αρθρώσεων χωρίς τη βοήθεια μειωτήρων. Επιπλέον, η αντλία και ο συσσωρευτής που βρίσκονται σε απομακρυσμένη θέση από το ρομποτικό βραχίονα επηρεάζουν τη ταχύτητα λειτουργίας του. Τα υδραυλικά συστήματα ελέγχου θέσης αποτελούν αποτελεσματικό τρόπο ελέγχου και διαθέτουν απλή σύνθεση. Για αυτό οι υδραυλικοί ενεργοποιητές προτιμώνται σε αρκετά πρώιμα και σύγχρονα μοντέλα βιομηχανικών ρομπότ (CRAIG, 2020).

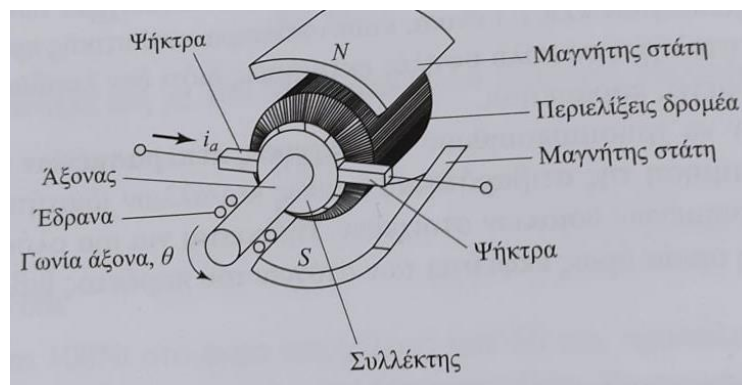
Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα για την εφαρμογή υδραυλικών συστημάτων, όπως η ανάγκη για εγκατάσταση μεγάλου πλήθους από εξαρτήματα (αντλίες, σωληνώσεις, συσσωρευτές,

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα σέρβο-βαλβίδες). Επιπρόσθετα, η διευθέτηση των συγκεκριμένων εξαρτημάτων στο χώρο αποτελεί δύσκολο ζήτημα και κατά συνέπεια δεν είναι κατάλληλα για όλες τις εφαρμογές. Σε σύγκριση με πιο σύγχρονες τεχνολογίες ρομποτικού ελέγχου, τα υδραυλικά συστήματα μειονεκτούν σε διεργασίες που απαιτούν δυνάμεις από ενεργοποιητές με μεγάλη ακρίβεια και αυτό οφείλεται στην αναπτυσσόμενη τριβή μεταξύ των στοιχείων στεγανοποίησης (CRAIG, 2020).

Οι πνευματική κύλινδροι διαθέτουν τις ίδιες ιδιότητες που παρέχουν τα υδραυλικά συστήματα και διαφοροποιούνται ως προς το μέσο εργασίας. Έτσι, στα υδραυλικά υπάρχει κυκλοφορία υδραυλικών υγρών, ενώ στα πνευματικά κυκλοφορεί αέρας που αποτελεί πιο καθαρό μέσο σε αντίθεση με το υδραυλικό υγρό σε περίπτωση διαρροών. Σε σύγκριση με τα υδραυλικά συστήματα τα πνευματικά έχουν μικρή ακρίβεια ελέγχου, το οποίο οφείλεται στην συμπιεστότητα του αέρα και της τριβής στεγανοποίησης (CRAIG, 2020).

Οι πιο πολύ χρησιμοποιούμενοι ενεργοποιητές για ρομποτικούς βραχίονες είναι οι ηλεκτρικοί κινητήρες. Πλεονεκτούν ενάντια των άλλων τύπων ενεργοποιητών, διότι μπορούν να ελέγχονται με σχετικά μεγάλη ακρίβεια και αποτελούν κατάλληλη λύση για ρομπότ μικρού ή μεσαίου μεγέθους (CRAIG, 2020).

Οι ευκολότερη κινητήρες για την διεπαφή και τον αυτόματο έλεγχο είναι οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος που διαθέτουν ψήκτρες (όπως απεικονίζεται στο σχήμα 80). Η αγωγή του ρεύματος γίνεται στις περιελίξεις ενός δρομέα μέσω ψηκτρών που συνδέονται με τον περιστρεφόμενο συλλέκτη. Η φθορά των ψηκτρών και η υψηλή αναπτυσσόμενη τριβή μειώνουν σημαντικά την απόδοση του κινητήρα. Στους πιο σύγχρονους κινητήρες χρησιμοποιείται νέος τύπος από μαγνητικά υλικά που δίνουν μεγαλύτερες τιμές ροπής με το μοναδικό περιορισμό την θερμοκρασία περιέλιξης. Κατά συνέπεια, μπορούν αναπτύξουν υψηλές τιμές ροπής για μικρούς χρόνους λειτουργίας και χαμηλότερες τιμές ροπής για μεγαλύτερους κύκλους εργασίας (CRAIG, 2020).



Σχήμα 79: Ανάλυση ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος με ψήκτρα (Naeini, 1988).

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της φθοράς των ψηκτρών και της τριβής χρησιμοποιούνται οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες. Διότι, οι περιελίξεις που διαθέτουν είναι ακίνητες, ενώ το μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται. Η περιστροφή του άξονα υπολογίζεται με την βοήθεια ενός ενσωματωμένου στον δρομέα αισθητήρα και η μετρούμενη γωνία ως πληροφορία μεταβιβάζεται σε εξωτερικά ηλεκτρονικά κυκλώματα για την πραγματοποίηση της μεταγωγής. Επιπρόσθετο πλεονέκτημα που έχουν οι κινητήρες χωρίς ψήκτρες είναι η καλή ψύξη, λόγω της θέσης περιέλιξης που βρίσκεται σε κοντινή απόσταση από την εξωτερική επιφάνεια, προσαρτημένη στο κέλυφος. Επίσης, η ροπή κατά

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα
την συνεχή λειτουργία είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την ροπή κινητήρων με ψήκτρες ίδιου μεγέθους (CRAIG, 2020).

Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος και οι βηματικοί κινητήρες έχουν λιγότερες εφαρμογές στους ρομποτικούς βραχίονες. Εφόσον, οι κινητήρες τύπου εναλλασσόμενου ρεύματος παρουσιάζουν δυσκολία κατά τον αυτόματο έλεγχο και οι βηματικοί δίνουν αρκετά μικρές τιμές ροπών καθιστώντας τους μη κατάλληλους (CRAIG, 2020).

4.8 Αισθητήρες θέσης

Θεωρητικά, ο έλεγχος των περισσότερων ρομποτικών βραχιόνων γίνεται με τη βοήθεια των σερβομηχανισμών και κατά συνέπεια κάθε διέγερση στους ενεργοποιητές, η οποία είναι είτε δύναμη είτε ροπή στηρίζεται σε μια διαφορά μεταξύ πραγματικής θέσης και ζητούμενης θέσης της άρθρωσης. Με το κριτήριο της σύνδεσης αισθητήρων θέσης σε κάθε άρθρωση (CRAIG, 2020).

Ο συχνότερος τρόπος σύνδεσης των αισθητήρων είναι κατευθείαν πάνω στον άξονα του αντίστοιχου ενεργοποιητή. Σε περίπτωση ανελαστικότητας του συστήματος οδήγησης και έλλειψη ανάκρουσης, τότε ο υπολογισμός των γωνιών της κάθε άρθρωσης προκύπτει από την μετατόπιση του άξονα του ενεργοποιητή. Η συγκεκριμένη ταύτιση αισθητήρα και ενεργοποιητή διευκολύνει τον αυτόματο έλεγχο του συστήματος (CRAIG, 2020).

Ο περιστρεφόμενος οπτικός κωδικοποιητής αποτελεί τον πιο γνωστό μηχανισμό ανάδρασης θέσης για ρομποτικές εφαρμογές. Συγκεκριμένα, λειτουργεί με την υποστήριξη ενός δίσκου που φέρει μια τυπωμένη μορφή κωδικοποίησης. Με την περιστροφή του δίσκου ανακόπτεται μια δέσμη φωτός, με αποτέλεσμα την δημιουργία φωτεινών παλμών. Στη συνέχεια, με την υποστήριξη ενός φωτοανιχνευτή γίνεται μετατροπή των παλμών φωτός σε ψηφιακή κυματομορφή. Συχνά, σχηματίζονται δύο κυματομορφές που παρουσιάζουν διαφορά φάσης 90 μοιρών. Έτσι, η σχηματιζόμενη γωνία του άξονα προκύπτει με βάση του πλήθους των παλμών, από την άλλη η φορά περιστροφής υπολογίζεται βάση διαφοράς φάσης των δύο τετραγωνικής μορφής παλμοσειρών. Επίσης, ο καθορισμός της θέσης αναφοράς με στόχο την εύρεση της απόλυτης γωνιακής θέσης πραγματοποιείται με κωδικοποιητές που παράγουν ορισμένο παλμό δεικτοδότησης σε ένα συγκεκριμένο σημείο (CRAIG, 2020).

Οι γωνιακοί αναλυτές είναι μηχανισμοί που δημιουργούν 2 αναλογικά σήματα, το συνημίτονο και το ημίτονο της σχηματιζόμενης γωνίας ενός άξονα. Μέσω του σχετικού μεγέθους των 2 σημάτων προκύπτει η γωνία του άξονα. Η ανάλυση που κάνουν οι συγκεκριμένες διατάξεις εξαρτάται από την ποιότητα του γωνιακού αναλυτή και από το θόρυβο που δημιουργούν οι καλωδιώσεις και τα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Οι γωνιακοί αναλυτές θεωρούνται πιο αξιόπιστοι σε σχέση με τους οπτικούς κωδικοποιητές, ωστόσο κατά την λειτουργία τους έχουν μικρότερη ανάλυση. Η σύνδεση των γωνιακών αναλυτών δεν γίνεται άμεσα πάνω σε μία άρθρωση, αλλά είναι έμμεση με την βοήθεια επιπλέον διατάξεων (γρاناζιών), ώστε να αυξηθεί η συνολική ανάλυση (CRAIG, 2020).

Τα ποτενσιόμετρα ως διατάξεις αποτελούν αισθητήρες θέσης με την πιο άμεση μορφή. Σε ένα σύστημα έχουν μορφή συνδεσμολογίας γέφυρας και δίνουν ως έξοδο μια τάση ανάλογη της θέσης του άξονα. Παρουσιάζουν μειονεκτήματα που μειώνουν την χρήση τους, όπως η περιορισμένη ανάλυση, έλλειψη γραμμικής συμπεριφοράς και ευαισθησία σε εξωτερικές διαταραχές.

Τα ταχύμετρα χρησιμοποιούνται σε ορισμένες εφαρμογές για την παραγωγή αναλογικών σημάτων, τα οποία είναι ανάλογα της ταχύτητας του άξονα. Σε περίπτωση έλλειψης αισθητήρων ταχύτητας, η ανάδραση ταχύτητας που προκύπτει συμπεριλαμβάνει τις αποκλίσεις της μετρούμενης θέσης στον χρόνο. Με αυτό το τρόπο η αριθμητική παραγωγή εισάγει στις μετρήσεις χρονική καθυστέρηση και θόρυβο. Συνεπώς, για αυτούς τους λόγους οι πλεονότητες των ρομποτικών βραχιόνων δεν συμπεριλαμβάνουν αισθητήρες ταχύτητας (CRAIG, 2020).

4.9 Σύντομη ανάλυση οπτικών κωδικοποιητών

Οι οπτικοί κωδικοποιητές γενικά στηρίζονται στην οπτική και ακολουθούν μια ορισμένη διαδικασία. Αρχικά, όταν μια σχισμή ενός δίσκου συναντά με μια φωτεινή πηγή, τότε παράγεται από έναν αισθητήρα φωτός μια ηλεκτρική τάση σε ημιτονοειδή μορφή. Στη συνέχεια, παράγεται από ένα δεύτερο αισθητήρα που βρίσκεται σε μια μετατοπισμένη θέση μια συνημιτονοειδής τάση, η οποία ως ημιτονοειδή τάση βρίσκεται 90 μοίρες εκτός φάσης σε σύγκριση με την πρώτη κυματομορφή. Η συγκεκριμένη ορθογωνική διεύθυνση έχει σημασία, επειδή η διεύθυνση και η φορά περιστροφής του άξονα καθορίζει ποιο σήμα έχει το <<οδηγό>> ρόλο ως προς το άλλο, με αυτό το τρόπο προκύπτει η κατεύθυνση περιστροφής του άξονα. Επιπρόσθετα, κάθε περιστροφή του δίσκου κατά μια σχισμή, αντιστοιχεί στην παραγωγή ενός πλήρους ημιτονοειδούς κύκλου μέσω των αισθητήρων. Έτσι, ένας κωδικοποιητής που διαθέτει δίσκο με 500 γραμμές φράγματος παράγει 500 ημιτονοειδείς κύκλους για κάθε για μια ολόκληρη περιστροφή του άξονα (CRAIG, 2020).

4.10 Αισθητήρες δύναμης

Υπάρχουν αρκετές διατάξεις που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της δύναμης επαφής μεταξύ άκρου εργασίας του ρομποτικού βραχίονα και του περιβάλλοντος με το οποίο έρχεται σε επαφή. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες περιλαμβάνουν στοιχεία που ονομάζονται επιμηκυνσιόμετρα που κατασκευάζονται από υλικά ημιαγωγών ή από κατάλληλα μεταλλικά φύλλα. Συνδεδεμένοι με μια μεταλλική δομή, τα επιμηκυνσιόμετρα δίνουν μια έξοδο ανάλογη της επιμήκυνσης του μετάλλου (CRAIG, 2020).

Τα προβλήματα που δημιουργούνται κατά τη σχεδίαση τέτοιων αισθητήρων συνοπτικά είναι :

- Ποιο είναι το κατάλληλο πλήθος αισθητήρων που απαιτείται να εγκατασταθεί με στόχο την συλλογή ορισμένων πληροφοριών ;
- Ποια είναι η κατάλληλη θέση των αισθητήρων για την σωστή τοποθέτηση και λειτουργία τους;
- Ποια είναι η διάταξη που συνδυάζει στιβαρότητα με καλή ευαισθησία;
- Με ποιο τρόπο εξασφαλίζεται προστασία της διάταξης από τυχόν υπερφόρτωση;

Οι παρακάτω θέσεις θεωρούνται κατάλληλες για την εγκατάσταση αισθητήρων σε ρομποτικούς βραχίονες:

- Στις θέσεις των ενεργοποιητών των αντίστοιχων αρθρώσεων. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες υπολογίζουν την ροπή ή την παραγόμενη δύναμη στην έξοδο του αντίστοιχου ενεργοποιητή

(ή σε ορισμένες περιπτώσεις του μειωτήρα). Αποτελούν ένα σημαντικό παράγοντα για ορισμένες εφαρμογές αυτομάτου ελέγχου, ωστόσο δεν παρέχουν πλήρης πληροφορίες για την αλληλεπίδραση του αποληκτηρίου επενεργητή με το περιβάλλον.

- Στην θέση που βρίσκεται μεταξύ του αποληκτηρίου επενεργητή και της τελευταίας άρθρωσης του βραχίονα. Οι αισθητήρες αυτοί ονομάζονται αισθητήρες καρπού. Ως μηχανικές δομές διαθέτουν επιμηκυνσιόμετρα για την μέτρηση των δυνάμεων και των ροπών που ασκούνται στο αποληκτήριο επενεργητή. Τέτοιου είδους αισθητήρες μπορούν να μετρήσουν από τρεις έως έξι συνιστώσες διανύσματος δύναμης ή ροπής.
- Στα ελεύθερα άκρα του αποληκτηρίου επενεργητή και καλούνται δυναμομετρικά δάχτυλα. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες ενσωματώνουν επιμηκυνσιόμετρα και έχουν τη δυνατότητα να μετρήσουν έως τέσσερις συνιστώσες δύναμης που ασκούνται στο κάθε ακροδάχτυλο του αποληκτηρίου επενεργητή (CRAIG, 2020).

Κεφάλαιο 5: Προσομοίωση και ανάλυση ψηφιακού κλώνου ρομποτικού βραχίονα

5.1 Εισαγωγή

Ο ρόλος της προσομοίωσης στο πεδίο της ρομποτικής έχει γίνει σημαντικός ως ερευνητικό εργαλείο από τις αρχές του 20ου αιώνα. Σε πρωταρχικό στάδιο, η προσομοίωση αποτελούσε εργαλείο ακαδημαϊκής έρευνας. Η εφαρμογές των προσομοιώσεων παρουσίασαν μια ιδιαίτερη αύξηση μετά από την ανάπτυξη των Υ/Η. Έτσι, η προσομοίωση αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο που επιτρέπει τον προγραμματισμό, τον σχεδιασμό, την ανάλυση σε πολλά πεδία της έρευνας και της ανάπτυξης. Η προσομοίωση όμως, αποτελεί απαραίτητη μέθοδος ελέγχου και ανάλυσης στις ρομποτικές εφαρμογές έναντι άλλων εφαρμογών διαφορετικών πεδίων (Zlajpah L. , 2008).

Η ικανότητα προσομοίωσης προσδίδει πολλαπλές επιλογές για την αντιμετώπιση πολλών προβλημάτων με δημιουργικούς τρόπους. Κατά την πειραματική διαδικασία παρέχεται η δυνατότητα διερεύνησης, σχεδιασμού, απεικόνισης και δοκιμής ενός δοκιμίου ή ενός μη υπαρκτό αντικειμένου. Μια μεγάλη ποσότητα ειδικού λογισμικού για προσομοίωση είναι διαθέσιμη προς αξιοποίηση για γενικού τύπου ρομπότ ακόμη και για βιομηχανικά ρομπότ (Zlajpah L., 2008). Όπως, είναι ο προσομοιωτής V-ger ή CoppeliaSim που χρησιμοποιείται για προσομοίωση ρομποτικών εφαρμογών και άλλοι αυτόματοι μηχανισμοί. Παρακάτω θα αναλυθεί ο προσομοιωτής V-ger, για τον τρόπο λειτουργίας του και τις δυνατότητες που παρέχει.

Ένας προσομοιωτής δίνει τη δυνατότητα ανάλυσης μιας ορισμένης δομής, χαρακτηριστικών και την λειτουργία ενός ρομποτικού συστήματος σε διαφορετικά επίπεδα λεπτομέρειας με το καθένα να ορίζει διαφορετικές απαιτήσεις για το εργαλείο προσομοίωσης. Επιπλέον, όσο πιο σύνθετο είναι το εξεταζόμενο σύστημα, τόσο αυξάνεται η σημασία του ρόλου της προσομοίωσης. Τα συμβατικά ρομποτικά συστήματα παρουσιάζουν μια πολυπλοκότητα όσο αφορά την σύνθεση, έτσι η αξιοποίηση της προσομοίωσης μπορεί να βελτιώσει τον σχεδιασμό, την ανάπτυξη, ακόμη και την λειτουργία των συγκεκριμένων ρομποτικών συστημάτων (Zlajpah L. , 2008).

Ο συνδυασμός της προσομοίωσης με εργαλεία οπτικοποίησης και διεπαφής αυξάνει την ακρίβεια του αποτελέσματος της προσομοίωσης με αρκετά ρεαλιστικό τρόπο (Zlajpah L. , 2008).

5.2 Ορισμός προσομοίωσής και πλεονεκτήματα

Ως προσομοίωση χαρακτηρίζεται μια διαδικασία σχεδιασμού για ένα μοντέλο ενός πραγματικού ή θεωρητικού φυσικού συστήματος. Επιπλέον περιλαμβάνεται μια δοκιμή εκτέλεσης του μοντέλου και μια ανάλυση της παραγόμενης εκτέλεσης (Zlajrah L. , 2008).

Η δυνατότητα υλοποίησης προσομοίωσης δίνει ένα ευρύ πεδίο επιλογών για την αντιμετώπιση πιθανών ζητημάτων με αποτελεσματικό τρόπο. Επίσης, παρέχεται το αποτέλεσμα ενός συστήματος που πρόκειται να κατασκευαστεί, με στόχο την πρόβλεψή του αποτελέσματος. Σε περίπτωση που οι προτεινόμενες λύσεις αποτύχουν, αυτό συμβαίνει εντός της προσομοίωσης, αποφεύγοντας τραυματισμούς ή υλική ζημία και εξοικονομώντας χρόνο και πόρους. Επιπλέον, δίνεται η ικανότητα πρόβλεψης αστοχίας μηχανισμών, αποφεύγοντας περιττές αλλαγές στο σχεδιασμό έπειτα από την παραγωγή εξαρτημάτων που θα λειτουργήσουν για μεγάλους χρονικούς κύκλους.

Τέλος, με την τεχνολογία της προσομοίωσης δίνεται η δυνατότητα εργασίας σε τέσσερις διαστάσεις. Έτσι, για παράδειγμα μπορεί κάποιος να δει εντός σύντομου χρόνου πως θα εκτελεστεί μια προγραμματισμένη εργασία που θα πραγματοποιηθεί τον επόμενο μήνα, καθώς η συγκεκριμένη εργασία μπορεί να επιβραδυνθεί με στόχο την παρατήρηση λεπτομερειών. Με την βοήθεια όλων των προαναφερόμενων πλεονεκτημάτων διευκολύνεται η εργασία και μειώνεται το κόστος υλοποίησης (Zlajrah L. , 2008).

Σημαντικό ζήτημα που δημιουργείται στο πεδίο του σχεδιασμού είναι, ποιο θα είναι το αποτέλεσμα αν μεταβληθεί ορισμένο σημείο ή τμήμα. Αυτά τα ζητήματα προκύπτουν λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος και συχνά είτε επιλύονται μερικώς είτε παραμένουν άλυτα ζητήματα. Η αξιοποίηση της εικονικής πραγματικότητας, μέσω προσαρμογής της προσομοίωσης βάση έρευνας επιτυγχάνεται η δημιουργία ψηφιακού πειραματικού περιβάλλον με τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Συνεπώς, για τους προηγούμενους λόγους έχει δημιουργηθεί μια ποικιλία εργαλείων προσομοίωσης για τα ρομποτικά συστήματα που έχουν στόχο τον μηχανολογικό σχεδιασμό ρομποτικών βραχιόνων και συστημάτων αυτόματου ελέγχου, τον προγραμματισμό εκτός σύνδεσης, τον σχεδιασμό και την δοκιμή ρομποτικών κυψελών και για αρκετές άλλες εφαρμογές (Zlajrah L. , 2008).

Τα περισσότερα εργαλεία προσομοίωσης των ρομπότ επικεντρώνονται στην κίνηση του ρομποτικού βραχίονα σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Επειδή, η αναπαράσταση της κίνησης σε ένα προσομοιωτή έχει σημαντικό ρόλο σε όλα τα συγκεκριμένα συστήματα συμπεριλαμβάνονται κινηματικά ή δυναμικά μοντέλα για τα ρομπότ. Επίσης, το είδος των μοντέλων που χρησιμοποιείται εξαρτάται από το σκοπό του συστήματος προσομοίωσης. Αποτελούν παράδειγμα οι αλγόριθμοι σχεδιασμού τροχιάς που βασίζονται πάνω σε κινηματικά πρότυπα. Έτσι, με παρόμοιο τρόπο, η κατασκευή μιας κυψέλης που απαρτίζεται από επιμέρους ρομπότ μπορεί να προσομοιωθεί αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας αποκλειστικά κινηματικά μοντέλα χειριστών των ρομπότ και χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η δυναμική συμπεριφορά. Ωστόσο, για να γίνει ο σχεδιασμός των ενεργοποιητών απαιτούνται δυναμικά μοντέλα. Για αυτό τα σύγχρονα συστήματα ελέγχου των ρομποτικών βραχιόνων διαθέτουν εσωτερικά διαφορετικά κινηματικά και δυναμικά πρότυπα ρομπότ για την βελτίωση της απόδοσης (Zlajrah L. , 2008).

5.3 Περιβάλλον προσομοίωσης

Το γραφικό περιβάλλον που θα αναλυθεί παρακάτω καλείται CoppeliaSim, παλιότερα ήταν γνωστό ως V-REP, αποτελεί έναν προσομοιωτή ρομπότ που έχει εφαρμογές στη βιομηχανία, στην εκπαίδευση και στην έρευνα. Δημιουργήθηκε αρχικά στο πλαίσιο της Toshiba R&D και τώρα

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα
αναπτύσσεται και συντηρείται ενεργά εκ μέρους της Coppelia Robotics AG, που είναι μια μικρή εταιρεία που εντοπίζεται στην Ελβετία [CoppeliaSim-Wikiwand/Wikipedia].

Είναι βασισμένο πάνω σε μια αρχιτεκτονική κατανεμημένου ελέγχου που επιδέχεται τις εξής γλώσσες προγραμματισμού: Python και Lua scripts, ή C/C++ πρόσθετα που λειτουργούν μεμονωμένοι, σύγχρονοι ελεγκτές. Επιπρόσθετοι ασύγχρονοι ελεγκτές μπορούν να εκτελεστούν σε διαφορετική διεργασία, (thread) ή μηχανή με την βοήθεια διαφόρων λύσεων ενδιάμεσου λογισμικού (ROS, απομακρυσμένο API, ZeroMQ) αξιοποιώντας γλώσσες όπως C/C++, Python, Java και MATLAB ή Octave [CoppeliaSim-Wikiwand/Wikipedia].

Το CoppeliaSim χρησιμοποιεί μια μηχανή κινηματικής για υπολογισμούς ευθείας και αντίστροφης κινηματικής, και άλλες αρκετές βιβλιοθήκες προσομοίωσης φυσικής (Buller, ODE, Vortex, Newton Game Dynamics) για πραγματοποίηση προσομοίωσης στερεό σώματος.

Τα μοντέλα και οι σκηνές (Scenes) υλοποιούνται συναρμολογώντας διάφορα αντικείμενα (Πλέγματα, αρθρώσεις, διάφοροι αισθητήρια, Point Clouds, OC δέντρα και άλλα) εντός μιας ιεραρχικής δομής (ταξινόμηση) (Hierarchical Structure) [CoppeliaSim-Wikiwand/Wikipedia].

Οι επιπλέον λειτουργίες που παρέχονται από plug-ins ,περιλαμβάνουν: Σχεδιασμός κίνησης (μέσω OMPL), συνθετική επεξεργασία όρασης και απεικόνιση (μέσω OpenCV), ανίχνευση σύγκρουσης, προσαρμοσμένες γραφικές αναπαραστάσεις και οπτικοποίηση δεδομένων (για παράδειγμα γραφήματα), υπολογισμός ελάχιστης απόστασης.

Μερικές εφαρμογές του CoppeliaSim:

- Προσομοίωση αυτόματων εργοστασιακών συστημάτων
- Εξ αποστάσεως παρακολούθηση
- Έλεγχος υλικού (Hardware)
- Γρήγορη δημιουργία προτύπων και επαλήθευση
- Παρακολούθηση ασφάλειας
- Ταχεία ανάπτυξη αλγορίθμων
- Παρουσίαση προϊόντος
- Εκπαίδευση σχετική με τη ρομποτική

Το CoppeliaSim χρησιμοποιείται κυρίως στην ρομποτική, έρευνα και στην εκπαίδευση [CoppeliaSim-Wikiwand/Wikipedia].

5.4 Ανάλυση λειτουργίας προσομοιωτή CoppeliaSim

Περιβάλλον διεπαφής χρήστη (User interface) CoppeliaSim

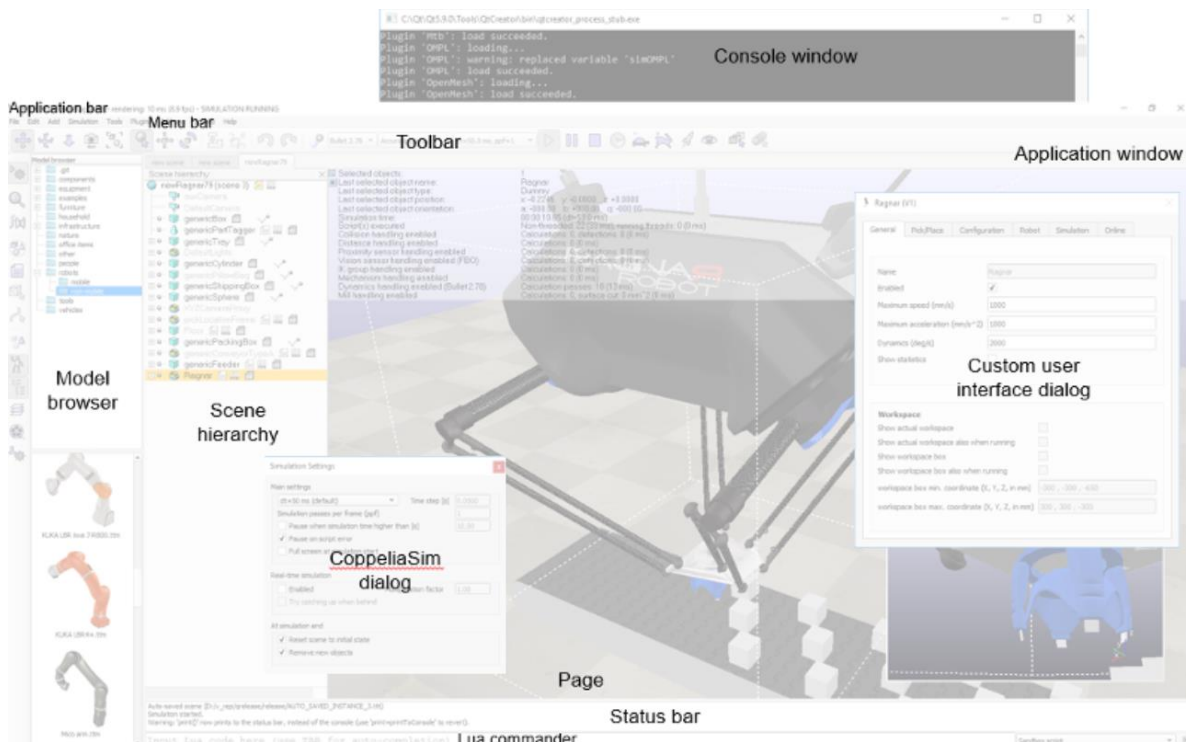
Ο προσομοιωτής CoppeliaSim ως εφαρμογή απαρτίζεται από αρκετά στοιχεία:

Τα κύρια στοιχεία που φέρει είναι τα εξής:

- ❖ Ένα παράθυρο εφαρμογής (a console window): Στα Windows OS (Operating system-λειτουργικό σύστημα) η εφαρμογή ξεκινά δημιουργώντας ένα console window που όμως,

αποκρύπτεται γρήγορα. Η συγκεκριμένη συμπεριφορά απόκρυψης του παραθύρου μπορεί να μεταβληθεί στις ρυθμίσεις του User settings dialog. Στα Linux OS, το CoppeliaSim για να ξεκινήσει χρησιμοποιείται η κονσόλα (console), που παραμένει σε απόκρυψη κατά την διάρκεια λειτουργίας του CoppeliaSim. Στα λειτουργικά Mac OSX, ο βέλτιστος τρόπος για να ξεκινήσει ο προσομοιωτής είναι μέσω του terminal, για την παράλληλη προβολή των μηνυμάτων. Εντός του Console ή του παραθύρου του terminal στο οποίο φαίνεται ποιες προσθήκες φορτώθηκαν και αν η διαδικασία προετοιμασίας ήταν επιτυχής. Γενικά, το παράθυρο του Console δεν είναι διαδραστικό και προβάλλει μόνο πληροφορίες ως έξοδο. Υπάρχει η δυνατότητα εξαγωγής πληροφοριών απευθείας στο παράθυρο Console με την εντολή εκτύπωσης (έχοντας ένα ενσωματωμένο script), ή μέσω της εντολής C printf ή std::cout από ένα πρόσθετο (plugin). Επίσης, παρέχεται η ικανότητα δημιουργίας προγραμματισμένων παραθύρων ως υποστηρικτικά για το console για την προβολή ειδικών πληροφοριών που αφορούν την προσομοίωση.

- ❖ Παράθυρο εφαρμογής: Αποτελεί το κύριο παράθυρο του προσομοιωτή. Σε αυτό γίνεται η εμφάνιση, η επεξεργασία, η προσομοίωση και η αλληλεπίδραση με την σκηνή (Scene) που υπάρχει. Οι συσκευές εισόδου (για παράδειγμα πληκτρολόγιο) παρουσιάζουν συγκεκριμένες λειτουργίες, καθώς ενεργοποιούνται στο παράθυρο της εφαρμογής, αυτές οι λειτουργίες ενδεχομένως να μεταβάλλονται ανάλογα με το περιβάλλον ή τη θέση ενεργοποίησης.
- ❖ Πολλαπλά παράθυρα διαλόγου: κοντά στο παράθυρο της εφαρμογής, ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί και να αλληλοεπιδράσει με ένα Scene αλλάζοντας τις ρυθμίσεις διαλόγου ή παραμέτρους. Κάθε διάλογο ομαδοποιεί ένα σύνολο σχετικών συναρτήσεων που εφαρμόζονται στο αντικείμενο προς μελέτη.



Σχήμα 80: Μια τυπική προβολή του προσομοιωτή CoppeliaSim (CoppeliaSim User Manual).

Στοιχεία (interface)

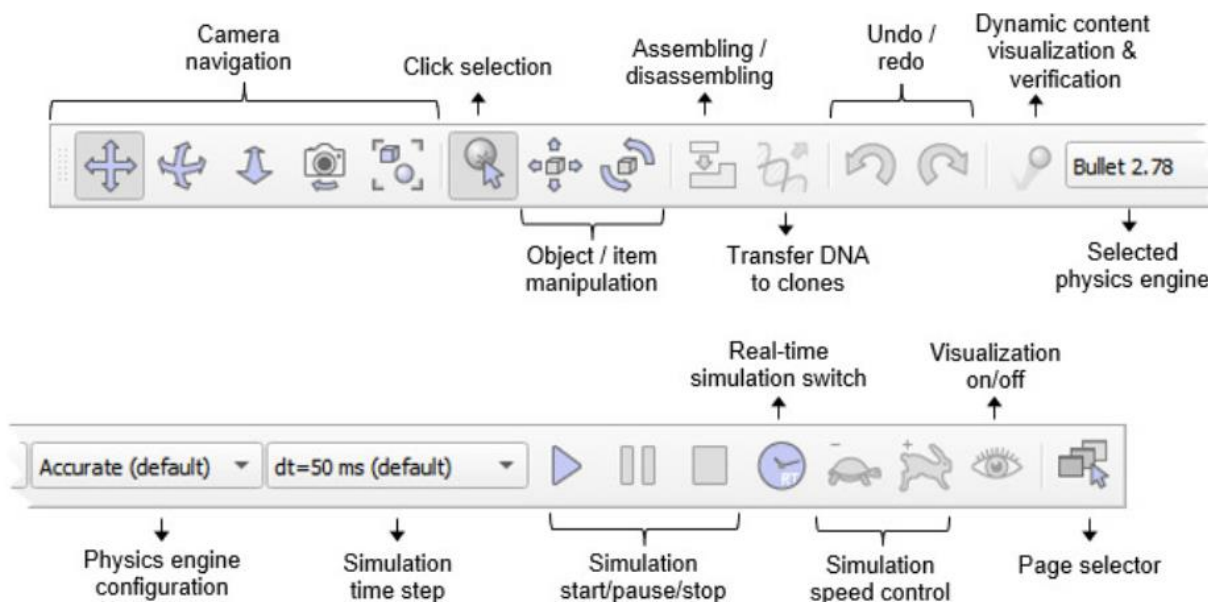
Κατά την έναρξη του CoppeliaSim, αρχικά ξεκινάει μια προεπιλεγμένη σκηνή (Scene). Στον χρήστη δίνεται η ικανότητα να ανοίξει πολλαπλές σκηνές ταυτόχρονα. Η κάθε σκηνή μοιράζεται το παράθυρο της εφαρμογής και τις ρυθμίσεις με τις υπόλοιπες σκηνές, ωστόσο μόνο το ενεργό περιεχόμενο της σκηνής είναι ορατό στο παράθυρο της εφαρμογής (CoppeliaSim User Manual).

Γραμμή εφαρμογής: Υποδεικνύει τον τύπο της άδειας του CoppeliaSim αντιγράφου, περιέχει το όνομα αρχείου της σκηνής που εμφανίζεται, ο χρόνος που πέρασε και η τρέχουσα κατάσταση του προσομοιωτή. Επιπλέον, η γραμμή εφαρμογής καθώς και κάθε άλλη επιφάνεια εντός του παραθύρου εφαρμογής μπορεί να αξιοποιηθεί για την σύναψη αρχείων που είναι συμβατά με τον προσομοιωτή (CoppeliaSim User Manual).

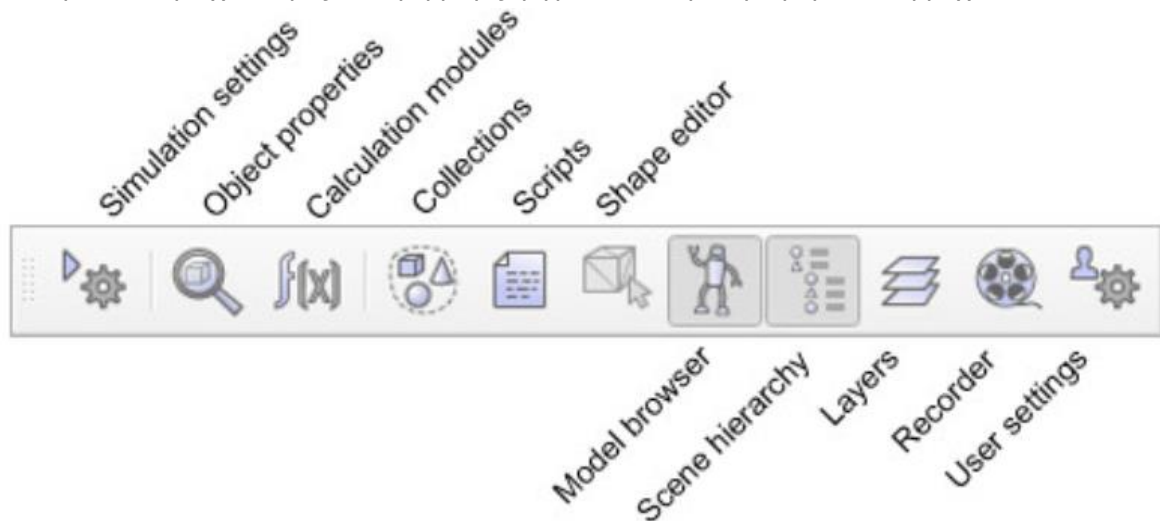
Γραμμή μενού: Μέσω της γραμμής μενού δίνεται η πρόσβαση σε όλες τις λειτουργίες του προσομοιωτή. Συνήθως, τα στοιχεία που βρίσκονται στην γραμμή μενού ενεργοποιούν ένα παράθυρο διαλόγου. Οι περισσότερες λειτουργίες στη γραμμή μενού μπορούν να γίνουν εναλλακτικά από ένα αναδυόμενο μενού (CoppeliaSim User Manual).

Γραμμή εργαλείων: Εδώ παρουσιάζονται λειτουργίες που είναι προσβάσιμες (για παράδειγμα αλλαγή της λειτουργίας πλοήγησης). Επιπλέον, ορισμένες λειτουργίες της γραμμής εργαλείων 1 και όλες οι λειτουργίες της γραμμής 2 μπορούν να εκτελεστούν από την γραμμή μενού ή του αναδυόμενου μενού (CoppeliaSim User Manual).

Παρακάτω φαίνεται σχηματικά η λειτουργία των επιλογών της γραμμής εργαλείων:



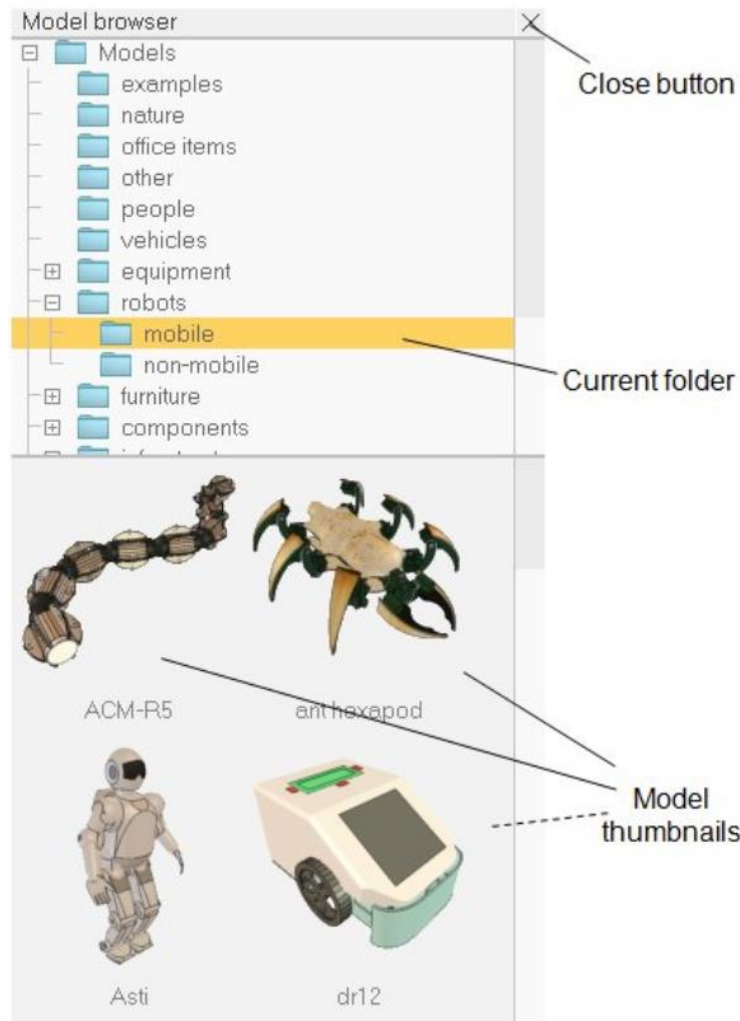
Σχήμα 81: Γραμμή εργαλείων 1 (CoppeliaSim User Manual).



Σχήμα 82: Γραμμή εργαλείων 2 (CoppeliaSim User Manual).

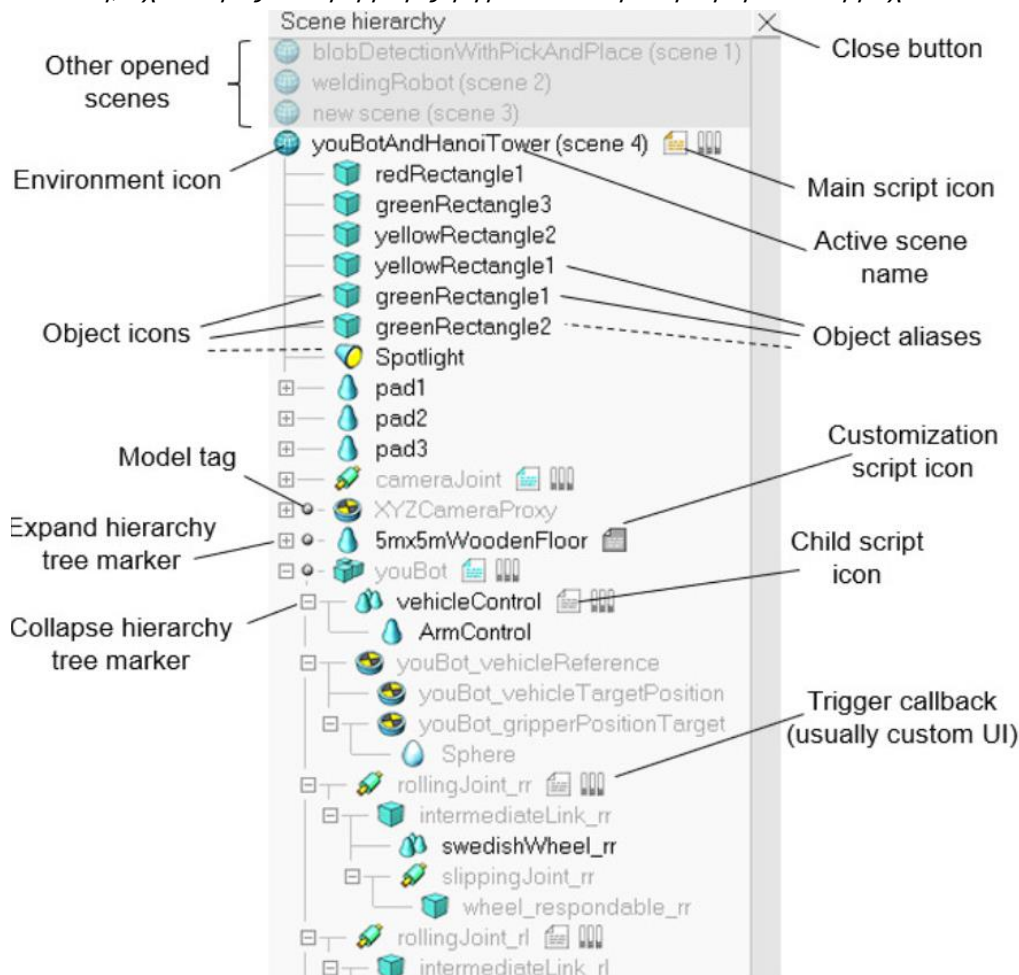
Πρότυπο προγράμματος περιήγησης (model browser): Το συγκεκριμένο παράθυρο είναι ορατό από προεπιλογή, αλλά μπορεί να αποκρυφθεί με τον αντίστοιχο κουμπί της γραμμής εργαλείων που βρίσκεται στο αριστερό μέρος της εφαρμογής (CoppeliaSim User Manual).

Στο πάνω μέρος φαίνεται η δομή φακέλου Model και στο κάτω τμήμα εμφανίζονται μικρογραφίες μοντέλων (models) που περιλαμβάνονται στον επιλεγμένο φάκελο. Δίνεται η δυνατότητα μεταφοράς των μικρογραφιών στην σκηνή προσομοίωσης και αυτόματα το σχετικό μοντέλο (CoppeliaSim User Manual).



Σχήμα 83: Περιγητής του προσομοιωτή (CoppeliaSim User Manual).

Scene hierarchy (Ιεραρχία σκηνής): Είναι ορατή από προεπιλογή, αλλά μπορεί να αποκρυφθεί με το αντίστοιχο κουμπί της γραμμής εργαλείων. Εδώ προβάλλεται το περιεχόμενο μιας σκηνής, δηλαδή όλα τα αντικείμενα που συνθέτουν μια σκηνή (Scene). Λόγω της δομής των αντικειμένων, κάθε δομή μοιάζει με μια δομή ταξινόμησης σε μορφή ταξινόμησης δέντρου. Στην συγκεκριμένη ταξινόμηση, τα στοιχεία μπορούν να επεκταθούν ή να συγκεντρωθούν όσο αφορά τα δομικά τους στοιχεία. Πατώντας διπλό κλικ σε ένα εικονίδιο μιας μικρογραφίας ανοίγει και κλείνει ένα διάλογο-παράθυρο ρυθμίσεων που ανήκει στο συγκεκριμένο στοιχείο.



Σχήμα 84: Παράθυρο δομής της σκηνής προσομοίωσης (CoppeliaSim User Manual).

Σελίδα: Κάθε σκηνή μπορεί να περιλαμβάνει έως και 8 σελίδες, κάθε μια από αυτές μπορεί να έχει απεριόριστο αριθμό προβολών.

Όψεις (Views): Μπορεί να υπάρξουν απεριόριστες σε μια σελίδα. Έχει ως ρόλο την εμφάνιση της σκηνής που εμπεριέχει ένα περιβάλλον και ορισμένα αντικείμενα, τα οποία παρατηρούνται με την βοήθεια ορατών αντικειμένων (για παράδειγμα κάμερες, γραφήματα ή αισθητήρια όρασης).

Κείμενο πληροφοριών: Εδώ προβάλλονται πληροφορίες που αφορούν την τρέχουσα επιλογή αντικειμένου/στοιχείου και την κατάσταση της εκτελούμενης προσομοίωσης ή των παραμέτρων.

Γραμμή κατάστασης: Προβάλλει πληροφορίες για τις εκτελούμενες λειτουργίες, εντολές και εμφανίζει μηνύματα σφάλματος περί μεταφραστές κώδικα.

Γραμμή εκτέλεσης εντολών σε Lua: Ένας βρόχος ανάγνωσης-επεξεργασίας-εκτύπωσης, το οποίο προσθέτει μια είσοδο κειμένου στον προσομοιωτή, δίνοντας την δυνατότητα εκτέλεσης κώδικα Lua ταυτόχρονα όπως σε ένα terminal.

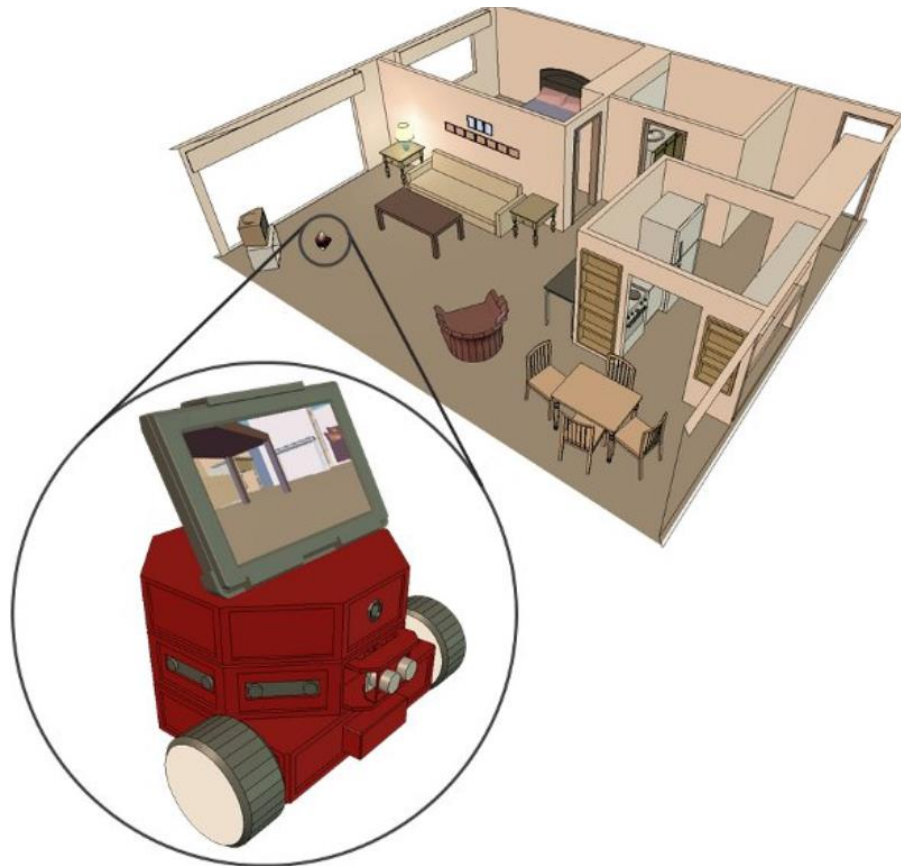
Προσαρμοσμένα interface: Είναι προκαθορισμένα από τον χρήστη ως επιφάνειες UI που χρησιμοποιούνται για την προβολή πληροφοριών (Όπως κείμενο, εικόνες και άλλα) ή κάποιο προσαρμοσμένο διάλογο για την αλληλεπίδραση με τον χρήστη μέσω προσαρμοσμένο τρόπο.

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

Αναδυόμενο μενού: Εμφανίζονται με ένα δεξί κλικ έχοντας σταθερό το ποντίκι. Κάθε επιφάνεια εντός του παραθύρου εφαρμογής δίνει διαφορετικό αναδυόμενο μενού.

Σκηνές και μοντέλα (Scenes and Models)

Οι σκηνές και τα μοντέλα (Αντικείμενα προς εξέταση) στον προσομοιωτή CoppeliaSim αποτελούν τα κύρια στοιχεία. Ένα μοντέλο αποτελεί υπό στοιχείο μιας σκηνής, που χαρακτηρίζεται ως model. Μια σκηνή μπορεί να περιλαμβάνει ένα οποιοδήποτε αριθμό μοντέλων. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται μια σχέση σκηνής-μοντέλου:



Σχήμα 85: Σχηματική απεικόνιση συσχέτισης Scene and model (CoppeliaSim User Manual).

Ένα τουλάχιστον ή και τα δύο από τα παρακάτω στοιχεία περιλαμβάνονται στις σκηνές και τα μοντέλα της προσομοίωσης:

- Αντικείμενα του Scene
- Ενσωματωμένα scripts

Επιπλέον, σε μια σκηνή μπορεί να υπάρχει επιπρόσθετα:

- Το περιβάλλον της προσομοίωσης
- Το κύριο κώδικα/script
- Σελίδες και όψεις

Περιβάλλον του προσομοιωτή

Στον προσομοιωτή CoppeliaSim το περιβάλλον ορίζει τις ιδιότητες και τις παραμέτρους που δημιουργούν ένα μέρος μιας σκηνής, χωρίς να αποτελούν αντικείμενα. Με την αποθήκευση ενός μοντέλου δεν αποθηκεύονται οι ιδιότητες και οι παράμετροι, για να πραγματοποιηθεί αυτό απαιτείται αποθήκευση της σκηνής (scene).

Ένα περιβάλλον ορίζει τις εξής ιδιότητες και παράμετροι:

- Το Χρώμα του φόντου
- Παράμετροι FOG. Οι παράμετροι FOG δεν αλληλοεπιδρούν άμεσα με τα αντικείμενα που βρίσκονται στην σκηνή, εκτός από κάμερες ή αισθητήρες όρασης εάν ενεργοποιηθεί η κατάλληλη επιλογή.
- Φωτισμός περιβάλλοντος
- Πληροφορίες δομής σκηνής
- Επιπρόσθετες ρυθμίσεις

Οντότητες (Entities)

Ως οντότητα χαρακτηρίζεται ένα αντικείμενο σε μια σκηνή ή σε μια συλλογή. Παρακάτω παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ αντικειμένων σε μια σκηνή, συλλογές και οντότητες :



Σχήμα 86: Οντότητες: Αντικείμενα και συλλογή (CoppeliaSim User Manual).

Επισκόπηση λειτουργικότητας

Το CoppeliaSim προσφέρει ισχυρές λειτουργίες που είναι ενεργοποιημένα από τον προσομοιωτή και συγκεκριμένα μέσω plugins, add-ons, πρόσθετων routines ή με μονάδες επέκτασης.

Ακολούθως φαίνονται οι κύριες λειτουργίες του CoppeliaSim:

- ❖ Υπολογισμοί γεωμετρίας
- ❖ Κινηματική
- ❖ Δυναμική
- ❖ Δεδομένα οπτικοποίησης/ έξοδοι
- ❖ Χειρισμός δεδομένων/ μετασχηματισμός
- ❖ Μνήματα/ interfaces/συνδεσιμότητα
- ❖ Εντολές/ρυθμίσεις
- ❖ Προγραμματισμός τροχιάς
- ❖ Μονοπάτια/Τροχιές
- ❖ Προσαρμοσμένα interfaces για τον χρήστη

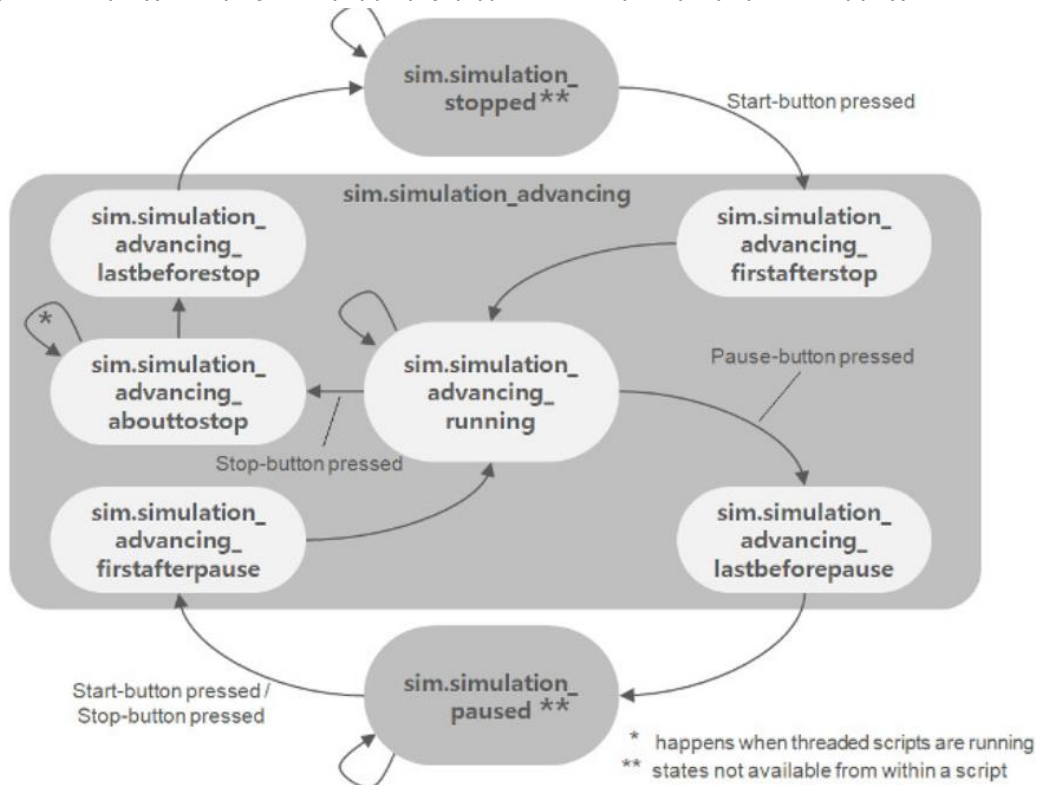
Προσομοίωση

Μια προσομοίωση στο CoppeliaSim μπορεί να ρυθμιστεί μέσω των σχετικών επιλογών που βρίσκονται στην γραμμή εργαλείων που φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 87: Προσομοίωση έναρξη/παύση/τερματισμός επιλογές γραμμής εργαλείων(CoppeliaSim User Manual).

Ο προσομοιωτής εσωτερικά χρησιμοποιεί πρόσθετες ενδιάμεσες καταστάσεις για να ενημερώσει σωστά τα scripts ή τα προγράμματα για το επόμενο βήμα. Παρακάτω απεικονίζεται το διάγραμμα κατάστασης του προσομοιωτή με τις εσωτερικές εκτελούμενες καταστάσεις :



Σχήμα 88: Διάγραμμα κατάσταση προσομοίωσης(CoppeliaSim User Manual).

5.5 Προγραμματισμός του βραχίονα

Παρακάτω θα αναλυθεί ο τρόπος που προγραμματίζεται ένας ρομποτικός βραχίονας στον προσομοιωτή CoppeliaSim χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού Lua ενσωματωμένα εντός child script.

Μια τυπική μορφή ενός διασυνδεδεμένου script (Non-threaded) σε Lua είναι η εξής:

```
Function sysCall_init ()
```

```
end
```

```
function sysCall_actuation ()
```

```
end
```

```
function sysCall_sensing ()
```

```
end
```

```
function sysCall_cleanup ()
```

```
end
```

Όπως φαίνεται στον παραπάνω κώδικα έχουμε τέσσερις συναρτήσεις που θα ανακαλέσει ο προσομοιωτής από την προκαθορισμένη βιβλιοθήκη (βάση) συναρτήσεων, με σκοπό την εκτέλεση της ζητούμενης λειτουργίας.

Αρχικά ,η συνάρτηση sysCall_init () χρησιμοποιείται για την αρχικοποίηση του κώδικα και εκτελείται μόνο μια φορά κατά την έναρξη της προσομοίωσης.

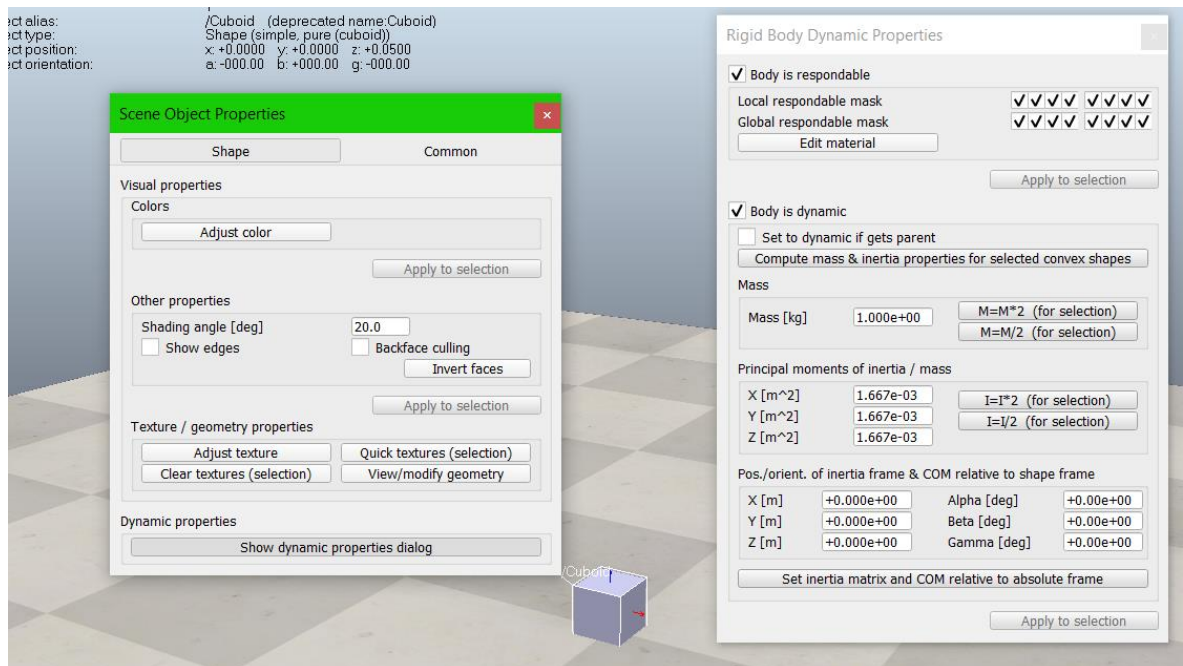
Στη συνέχεια, αξιοποιείται η συνάρτηση sysCall_actuation () που εμπεριέχει το τμήμα του κώδικα που ελέγχει την κίνηση των αρθρώσεων. Συνήθως, σε αυτό το τμήμα κώδικά ορίζεται η ζητούμενη θέση ή ταχύτητα.

Έπειτα, ακολουθεί η συνάρτηση sysCall_sensing () που αφορά τον κώδικα για τα αισθητήρια όργανα ή όργανα ανίχνευσης. Έτσι, σε αυτή την συνάρτηση γίνεται ενημέρωση, καταχώριση και προβολή δεδομένων για τους αισθητήρες που συνδέονται με το σύστημα.

Τέλος, η συνάρτηση sysCall_cleanup (), έχει ρόλο τον καθαρισμό (διαγραφής και επαναδημιουργία) του περιβάλλοντος της προσομοίωσης κατά το τέλος της εκτέλεσης (CoppeliaSim User Manual).

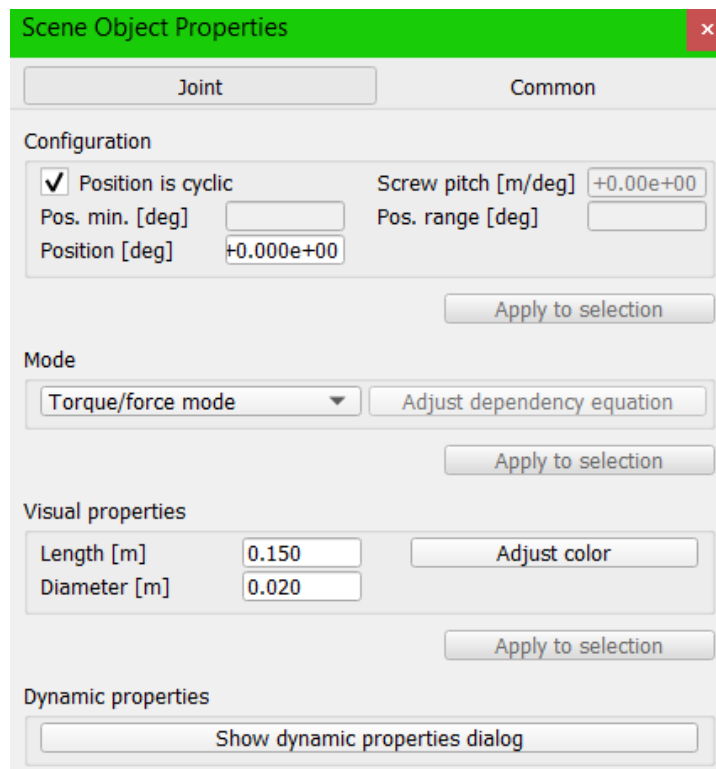
Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

Για την σωστή λειτουργία της προσομοίωσης, δηλαδή της μετάδοσης της κίνησης από την άρθρωση στο ζητούμενο στερεό σώμα απαιτείται το συγκεκριμένο σώμα να έχει ενεργοποιημένες τις επιλογές , σώμα που ανταποκρίνεται και δυναμικό σώμα. Όπως, φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:

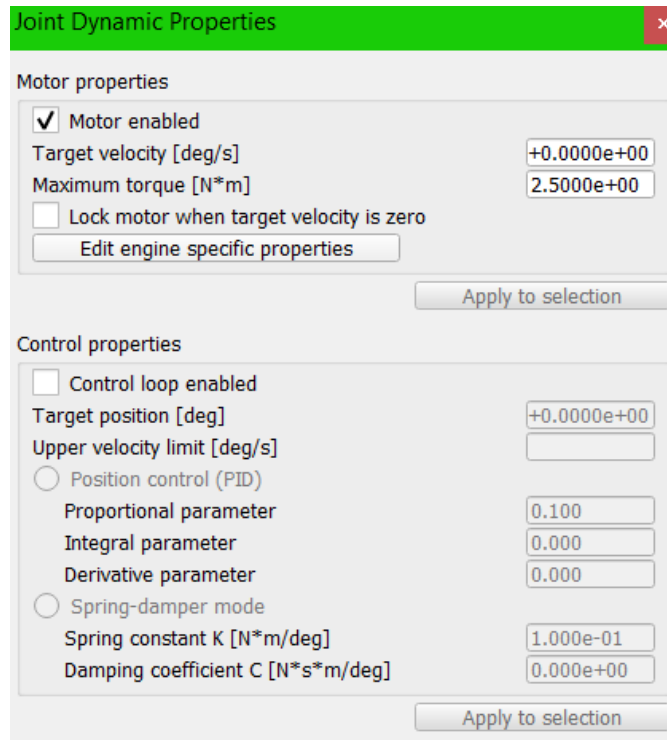


Σχήμα 89: Ενεργοποίηση επιλογών αλληλεπίδρασης και δυναμικής για το ζητούμενο σώμα.

Επίσης, για την άρθρωση χρειάζεται να γίνει μια αντίστοιχη ρύθμιση. Απαιτείται η ενεργοποίηση της επιλογής για την λειτουργία ροπής ή δύναμης και στις ρυθμίσεις δυναμικής της άρθρωσης να ενεργοποιηθεί η επιλογή ενεργοποιημένος κινητήρας, όπως ακολουθεί στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 90: Ενεργοποίηση λειτουργίας ροπής/δύναμης για την άρθρωση.



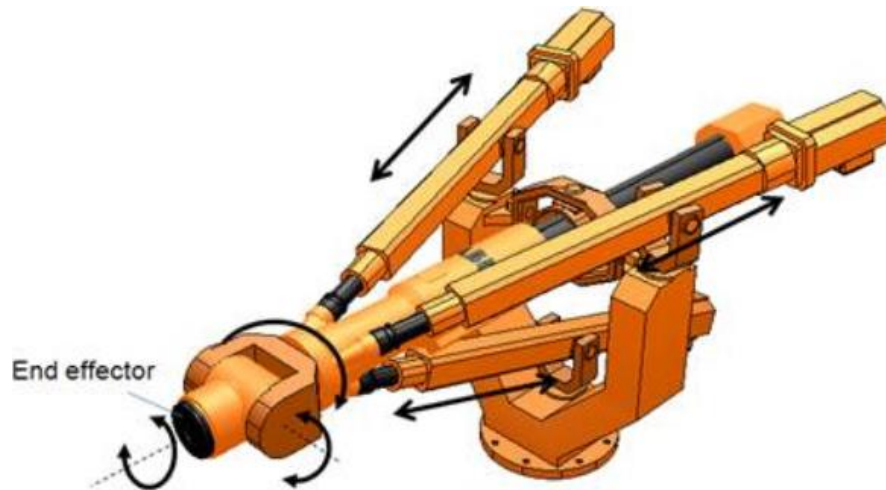
Σχήμα 91: Ενεργοποίηση λειτουργίας ενεργοποιημένου κινητήρα.

Κινηματική

Η λειτουργία της κινηματικής του CoppeliaSim είναι αρκετά αποτελεσματική, ευέλικτη και δίνει την δυνατότητα χειρισμού οποιουδήποτε τύπου μηχανισμού σε λειτουργία αντίστροφης κινηματικής (IK mode) ή σε ευθεία κινηματική (FK mode). Ο χειρισμός της συγκεκριμένης λειτουργίας πραγματοποιείται μέσω της Coppelia Kinematics Routines (που αποτελούν μια συλλογή από C++ συναρτήσεις που μπορούν να ενσωματωθούν σε αυτόνομες εφαρμογές), ενταγμένες στο kinematics plugin (CoppeliaSim User Manual).

Το πρόβλημα της αντίστροφης κινηματικής αποτελεί ζήτημα εύρεσης τιμών των αρθρώσεων που αντιστοιχούν σε μια ορισμένη θέση και/ή προσανατολισμό ενός στοιχείου του σώματος (γενικά του τελικού άκρου). Γενικότερα, το συγκεκριμένο πρόβλημα αποτελεί μετασχηματισμός από τις συντεταγμένες του τρισδιάστατου χώρου εργασίας στις συντεταγμένες του χώρου των αρθρώσεων. Έτσι, για παράδειγμα το πρόβλημα για έναν σειριακό βραχίονα θα ήταν η εύρεση των τιμών όλων των αρθρώσεων του βραχίονα γνωρίζοντας την θέση (και/ή τον προσανατολισμό) του τελικού άκρου του ρομπότ (CoppeliaSim User Manual).

Το αντίστροφο ζήτημα εύρεσης της θέσης και/ή του προσανατολισμού του τελικού άκρου του βραχίονα με δεδομένο τις τιμές των αρθρώσεων, καλείται ως ευθύφορο κινηματικό πρόβλημα. Επίσης, το πρόβλημα της ευθείας κινηματικής συνήθως επιλύεται ευκολότερα σε σχέση με το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα. Ωστόσο, αυτό ισχύει στις περιπτώσεις που αφορούν ανοιχτές κινηματικές αλυσίδες και όχι για γενικού τύπου μηχανικές διαμορφώσεις, όπως αυτό που ακολουθεί:



Σχήμα 92: Κινηματικό πρόβλημα κατά το οποίο είναι δεδομένες οι τιμές των αρθρώσεων που υποδεικνύονται με βάση τα βέλη και ζητείται ο προσδιορισμός της θέσης και του προσανατολισμού του τελικού άκρου(CoppeliaSim User Manual).

Η λειτουργία της κινηματικής είναι διαθέσιμη μέσω του πρόσθετου της κινηματικής (kinematics plugin), που επιτρέπει την οργάνωση σύνθετων κινηματικών προβλημάτων εντός ένα ξεχωριστού περιβάλλον IK. Αυτή η απομόνωση γίνεται για την απομάκρυνση της συγκεκριμένης διαδικασίας από τις άλλες πτυχές που συνδέονται με κάποιο μοντέλο της προσομοίωσης.

Το πρόσθετο της κινηματικής του CoppeliaSim περιλαμβάνει αρκετές API συναρτήσεις που έχουν το πρόθεμα simIK. Τα οποία επιτρέπουν την δημιουργία, τον χειρισμό και την επίλυση κινηματικών εργασιών είτε ευθύφορα είτε αντίστροφα για κάθε τύπο μηχανισμό πλήρως προγραμματιστικά.

Εύκολα μια κινηματική εργασία μπορεί να προετοιμαστεί (set up) βάση του περιεχομένου της σκηνης, όπως φαίνεται στο ακόλουθο κώδικα για ένα παράδειγμα:

-- set-up:

```
function sysCall_init()

    simBase=sim.getObject('/base')

    simTip=sim.getObject('/tip')

    simTarget=sim.getObject('/target')

    ikEnv=simIK.createEnvironment()

    ikGroup=simIK.createIkGroup(ikEnv)

    local
    ikElement=simIK.addIkElementFromScene(ikEnv,ikGroup,simBase,simTip,simTarget,desiredConstraints)

end
```

-- IK calculation, and application to the scene:

```
function sysCall_actuation()
    simIK.applyIkEnvironmentToScene(ikEnv,ikGroup)
end
```

Η συνάρτηση `simIK.addIkElementFromScene` θα αναλύσει την δεδομένη σκηνή, δίνοντας ως έξοδο μια βάση, έναν άκρο εργασίας (tip) και ένα αντικείμενο στόχο και τελικά θα δημιουργήσει κατάλληλα ένα IK στοιχείο βάση τους δεδομένους περιορισμούς.

Αντίθετα, η συνάρτηση `simIK.applyIkEnvironmentToScene` θα υπολογίσει το IK ζήτημα και έπειτα θα εφαρμόσει τα αποτελέσματα που βρέθηκαν στις αντίστοιχες αρθρώσεις της σκηνής.

Εναλλακτικά, μπορεί κάποιος να δημιουργήσει το κινηματικό περιβάλλον χειροκίνητα για πλήρη έλεγχο, όπως φαίνεται στο παρακάτω παράδειγμα:

-- set-up:

```
function sysCall_init()
    simJoints={sim.getObject('/j1'),sim.getObject('/j2')}
    ikJoints={ }
    ikBase=simIK.createDummy(ikEnv) -- create a dummy in the IK environemnt
    -- set that dummy into the same pose as its CoppeliaSim counterpart:
    simIK.setObjectMatrix(ikEnv,ikBase,-1,sim.getObjectMatrix(simBase,-1))
    local parent=ikBase
    for i=1,#simJoints,1 do -- loop through all joints
        -- create a joint in the IK environment:
        ikJoints[i]=simIK.createJoint(ikEnv,simIK.jointtype_revolute)
        -- set it into IK mode:
        simIK.setJointMode(ikEnv,ikJoints[i],simIK.jointmode_ik)
        -- set the same joint limits as its CoppeliaSim counterpart joint:
        local cyclic,interv=sim.getJointInterval(simJoints[i])
        simIK.setJointInterval(ikEnv,ikJoints[i],cyclic,interv)
        -- set the same joint position as its CoppeliaSim counterpart joint:
        simIK.setJointPosition(ikEnv,ikJoints[i],sim.getJointPosition(simJoints[i]))
        -- set the same object pose as its CoppeliaSim counterpart joint:
```

```

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα
    simIK.setObjectMatrix(ikEnv,ikJoints[i],-1,sim.getObjectMatrix(simJoints[i],-1))

    simIK.setObjectParent(ikEnv,ikJoints[i],parent) -- set its corresponding parent

    parent=ikJoints[i]

end

ikTip=simIK.createDummy(ikEnv) -- create the tip dummy in the IK environment
-- set that dummy into the same pose as its CoppeliaSim counterpart:
simIK.setObjectMatrix(ikEnv,ikTip,-1,sim.getObjectMatrix(simTip,-1))
simIK.setObjectParent(ikEnv,ikTip,parent) -- attach it to the kinematic chain
ikTarget=simIK.createDummy(ikEnv) -- create the target dummy in the IK environment
-- set that dummy into the same pose as its CoppeliaSim counterpart:
simIK.setObjectMatrix(ikEnv,ikTarget,-1,sim.getObjectMatrix(simTip,-1))
simIK.setLinkedDummy(ikEnv,ikTip,ikTarget) -- link the two dummies
ikGroup=simIK.createIkGroup(ikEnv) -- create an IK group
-- set its resolution method to undamped:
simIK.setIkGroupCalculation(ikEnv,ikGroup,simIK.method_pseudo_inverse,0,3)
-- add an IK element to that IK group:
local ikElement=simIK.addIkElement(ikEnv,ikGroup,ikTip)
-- specify the base of that IK element:
simIK.setIkElementBase(ikEnv,ikGroup,ikElement,ikBase)
-- specify the constraints of that IK element:

simIK.setIkElementConstraints(ikEnv,ikGroup,ikElement,simIK.constraint_x+simIK.constraint_y)
end

-- IK calculation, and application to the scene:
function sysCall_actuation()
    -- reflect the pose of the target dummy in the IK environment:
    simIK.setObjectMatrix(ikEnv,ikTarget,ikBase,sim.getObjectMatrix(simTarget,simBase))
    simIK.handleIkGroup(ikEnv,ikGroup) -- solve

```

-- apply the calculated joint values:

```
sim.setJointPosition(simJoints[1],simIK.getJointPosition(ikEnv,ikJoints[1]))
```

```
sim.setJointPosition(simJoints[2],simIK.getJointPosition(ikEnv,ikJoints[2]))
```

end

Ανάλυση ΙΚ ομάδων και ΙΚ στοιχεία

Το CoppeliaSim χρησιμοποιεί ΙΚ ομάδες και ΙΚ στοιχεία για την επίλυση εργασιών αντίστροφης και ευθείας κινηματικής. Μια ΙΚ εργασία ορίζεται από μια ΙΚ ομάδα που περιλαμβάνει ένα ή παραπάνω ΙΚ στοιχεία:

ΙΚ ομάδα: Μια τέτοια ομάδα περιλαμβάνει ένα ή παραπάνω ΙΚ στοιχεία. Έτσι, για την επίλυση του κινηματικού προβλήματος μιας απλής κινηματικής αλυσίδας, απαιτείται μια ΙΚ ομάδα που περιλαμβάνει ένα ΙΚ στοιχείο. Η ΙΚ ομάδα ορίζει τις συνολικές ιδιότητες της επίλυσης (για παράδειγμα το solver, τον αριθμό των επαναλήψεων που χρειάζονται και άλλα).

ΙΚ στοιχείο: Ένα τέτοιο στοιχείο αντιστοιχεί σε μια απλή κινηματική αλυσίδα που είναι ένας σύνδεσμος που διαθέτει τουλάχιστον μια άρθρωση σε ΙΚ λειτουργία. Η αλυσίδα καθορίζεται από το ένα άκρο που ισοδυναμεί με το αποληκτήριο επενεργητή (συνήθως είναι το τελικό άκρο της αλυσίδας) και μια βάση, η οποία αντιπροσωπεύει το αντικείμενο βάσης (ή το αρχικό αντικείμενο) της κινηματικής αλυσίδας και επιπρόσθετα έναν στόχο για το ακολουθήσει το τελικό άκρο του βραχίονα.

Συνοπτικά, ένα ΙΚ στοιχείο δομείται από: μια βάση που ορίζει την αρχή της κινηματικής αλυσίδας. Πολλαπλούς συνδέσμους (οποιοδήποτε είδος αντικείμενο εκτός από αρθρώσεις σε ΙΚ λειτουργία). Οι αρθρώσεις που δεν είναι ΙΚ λειτουργία θεωρούνται και αυτοί σύνδεσμοί (σε αυτή τη περίπτωση συμπεριφέρονται ως άκαμπτοι σύνδεσμοί, δηλαδή αρθρώσεις που έχουν σταθερή γραμμική/γωνιακή τοποθεσία).

Έναν άκρο, συνήθως αποτελεί το τελευταίο αντικείμενο της θεωρούμενης κινηματικής αλυσίδας (όταν η αλυσίδα επεκτείνεται από την βάση έως το τελικό άκρο) και συνήθως αυτό αποτελεί το αποληκτήριο επενεργητή. Επομένως, το τελικό άκρο της αλυσίδας θα πρέπει να συνδέεται με ένα αντικείμενο στόχο. Το συγκεκριμένο στόχο ορίζει την θέση και/ή τον προσανατολισμό που πρέπει να ακολουθήσει το τελικό άκρο κατά την επίλυση του κινηματικού προβλήματος (CoppeliaSim User Manual).

5.6 Μελέτη και υλοποίηση ενός ψηφιακού κλώνου για ένα ρομποτικό βραχίονα

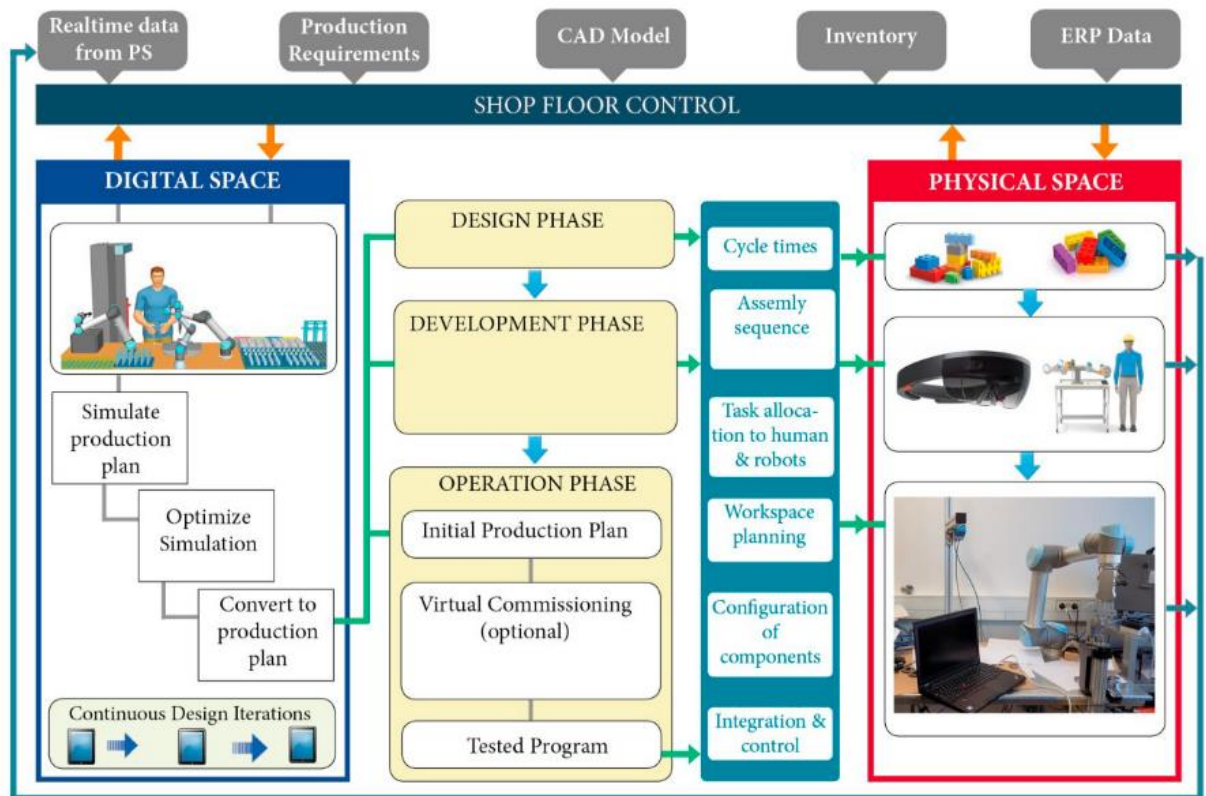
Με τον όρο ψηφιακό κλώνο χαρακτηρίζεται ένα μέρος ευρύτερου πλαισίου και διαχωρίζεται σε τρεις τομείς εικονικής ανάπτυξης προϊόντων, κυβερνοφυσικών συστημάτων (cyber-physical systems) και διαχείριση κύκλου ζωής ενός προϊόντος (Grieves, M. and Vickers, J. 2017). Γενικά, μπορεί επίσης να θεωρηθεί ως σημαντικό παράγοντα της ανάπτυξης της βιομηχανίας 4.0 (S. Schweigert-Recksiek , , J. Trauer , C. Engel , K. Spreitzer and M. Zimmermann, 2020).

Η εξέλιξη της ιδέας του ψηφιακού διδύμου έγινε από ένα (hardware twin) που αναπτύχθηκε στο πρόγραμμα Apollo από την NASA που περιλάμβανε δύο όμοια διαστημικά οχήματα. Κατά την εφαρμογή της διαστημικής εφαρμογής, το ένα όχημα διατηρούταν στο πειραματικό περιβάλλον του εργαστηρίου, ενώ το άλλο όχημα εξερευνούσε το διάστημα σε πραγματικό χρόνο. Το όχημα που ήταν στο εργαστήριο αντικατόπτριζε συνεχώς τις συνθήκες του άλλου οχήματος που ήταν σε εφαρμογή, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των ειδικών για τις εξωτερικές συνθήκες. Μια διαφορετική προσέγγιση της έννοιας του ψηφιακού είχε παρουσιαστεί στο Πανεπιστήμιο του Μίσιγκαν που αφορούσε την διαχείριση του κύκλου ζωής ενός προϊόντος (Product lifecycle management /PLM). Η συγκεκριμένη προσέγγιση βασίζεται στην ιδέα πως κάθε σύστημα μπορεί να διαχωρίζεται σε δύο υποσύνολα συστημάτων, ένα φυσικό σύστημα που βρίσκεται πραγματικά και ένα εικονικό σύστημα που υλοποιείται ψηφιακά, ωστόσο παρέχει όλες τις πληροφορίες του φυσικού συστήματος (Malik A. A., Bilberg A., 2018).

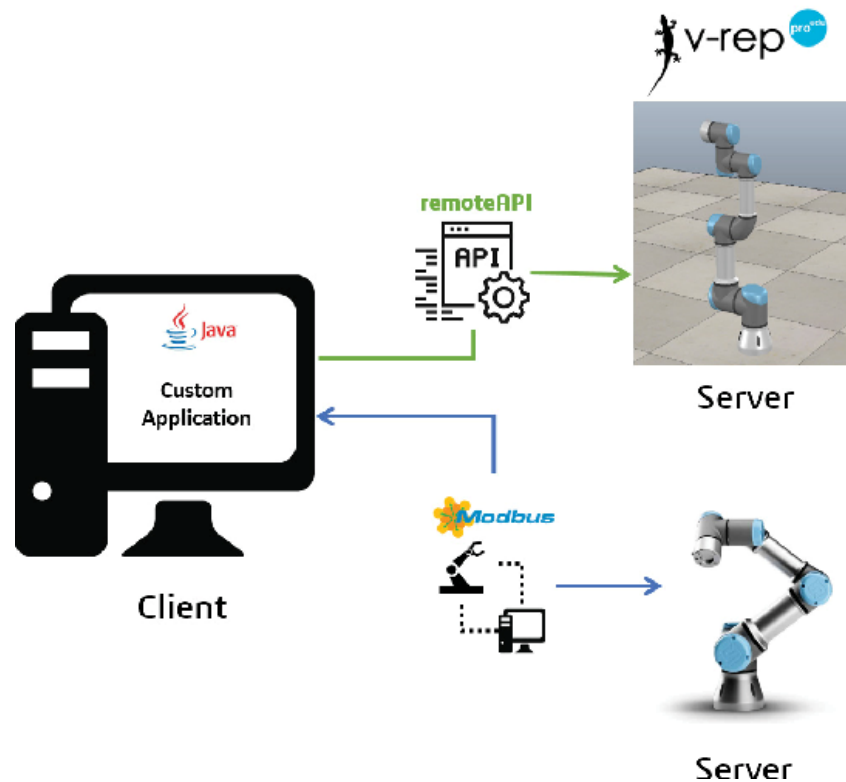
Το πλαίσιο ενός ψηφιακού διδύμου δομείται από δύο διασυνδεδεμένα περιβάλλοντα, το φυσικό και το ψηφιακό. Το πραγματικό περιβάλλον, συνήθως σε βιομηχανικές εφαρμογές αποτελείται από ανθρώπους, ρομπότ και σχετικό εξοπλισμό παραγωγής. Από την άλλη, το εικονικό περιβάλλον απαρτίζεται από μια προσομοίωση σε ένα Η/Υ. Κάθε στοιχείο του φυσικού συστήματος συγχρονίζεται κατάλληλα με τις αντίστοιχες ψηφιακές αναπλάσεις τους στο ψηφιακό σύστημα. Δηλαδή, όλες οι εικονικές προσομοιώσεις χαρακτηρίζονται από τις συνθήκες λειτουργίας των διασυνδεδεμένων φυσικών αντικειμένων στο σύστημα παραγωγής. Είναι προτεινόμενο η δημιουργία του ψηφιακού διδύμου ενός human-robot-collaborative (HRC) να πραγματοποιηθεί παράλληλα κατά το στάδιο εύρεσης ιδεών για την καλύτερη σχεδίαση (Malik A. A., Bilberg A., 2018).

Η διαδικασία αρχικά έχει την μορφή ενός απλού κινούμενου σχεδίου που εξελίσσεται σε μια προσομοίωση για την ανάλυση της απόδοσης σε επίπεδο ενός συστήματος. Έτσι, χρειάζεται το ψηφιακό ομοίωμα να είναι σε συνεχής ενημέρωση με κάθε εξελικτικές τροποποιήσεις που συμβαίνουν στο πραγματικό σύστημα. Επίσης, η προσομοίωση από το στάδιο υλοποίησης εξελίσσεται ως προς τις πληροφορίες που δέχεται και ως προς την σύνδεση που παρουσιάζει με το φυσικό σύστημα. Σε στάδιο λειτουργίας, για κάθε μεταβολή που γίνεται στην παραγωγή, ο εικονικός χώρος σε σύντομο χρόνο θα περάσει από τον πλήρη κύκλο του χρόνου εκτέλεσης και θα πάρει τις βέλτιστες αποφάσεις με στόχο τον έλεγχο της παραγωγής (Malik A. A., Bilberg A., 2018).

Ο προσομοιωτής CoppeliaSim μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ενός ψηφιακού κλώνου, καθώς παρέχει την λειτουργία Remote API. Η συγκεκριμένη λειτουργία επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ του προσομοιωτή και μιας εξωτερικής εφαρμογής που θα συνδέει το πραγματικό ρομπότ με τον Η/Υ (δηλαδή χρησιμοποιείται σε διαφορετική διαδικασία ή σε άλλη εξωτερική συσκευή). Επιπλέον, είναι cross-platform και διαθέτει τις ίδιες κλήσεις συναρτήσεων API που υποστηρίζονται στην λειτουργία του CoppeliaSim. Επομένως, ένα παράδειγμα εφαρμογής ενός ψηφιακού κλώνου με την λειτουργία Remote API θα είχε την διάταξη που φαίνεται στο σχήμα 94 .



Σχήμα 93: Απεικόνιση ενός πλαισίου ψηφιακού διδύμου για ένα work-cell (human-robot) [Malik A. A., Bilberg A., 2018].



Σχήμα 94: Διάταξη σύνδεσης πραγματικού ρομπότ με ψηφιακό κλώνο μέσω client (Flávia Pires, A. Cachada, J. Barbosa, A. Moreira, P. Leitão, 2019).

Κεφάλαιο 6: Μελέτη περίπτωσης

6.1 Γενική ανασκόπηση

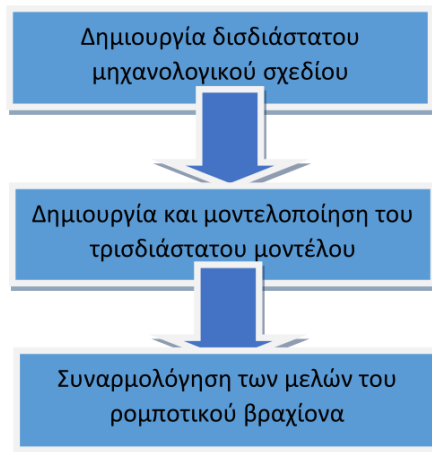
Ενώ, ο τελικός στόχος στην ρομποτική είναι η ανάλυση και η ρύθμιση ενός πραγματικού ρομπότ, σε κάποιες περιπτώσεις είναι σημαντικό να πραγματοποιηθεί προσομοίωση της ζητούμενης διεργασίας πριν την πραγματική εκτέλεση από το ρομπότ. Οι προσομοιώσεις είναι πιο απλή ως προς τη ρύθμιση, δεν επιβαρύνουν οικονομικά, σύντομες ως προς την εκτέλεση και εύχρηστες στην υλοποίηση. Η σχεδίαση νέων ρομπότ και η εκτέλεση πειραματικών προσομοιώσεων δεν απαιτεί πολύ χρόνο σε σχέση με μια πραγματική δοκιμή. Επιπρόσθετα, η προσομοίωση λειτουργεί πιο γρήγορα σε σχέση με τα πραγματικά ρομπότ και επιτρέπεται εύκολα την ρύθμιση των παραμέτρων της προσομοίωσης που εμφανίζονται στην οθόνη για διευκόλυνση (Szabo, 2004).

Σε σύνθετα στάδια σχεδιασμού, η ικανότητα εκτέλεσης προσομοιώσεων σε πραγματικό χρόνο αποτελεί σημαντική διαδικασία. Επειδή, με αυτό τον τρόπο το τελικό αποτέλεσμα του σχεδιασμού μπορεί να ελεγχθεί πριν την έναρξη κατασκευής του τελικού προτύπου εξοικονομώντας χρόνο και πόρους. Έτσι, για την υλοποίηση τέτοιων προσομοιώσεων χρειάζεται υπολογιστική ισχύ και ακρίβεια, τα οποία αναπτύσσονται κατά μεγάλη κλίμακα τα τελευταία χρόνια με την τεχνολογική εξέλιξη. Με το κατάλληλο συνδυασμό διαφορετικών λογισμικών προγραμμάτων για την μοντελοποίηση και την προσομοίωση ρομποτικών διατάξεων απλοποιείται η διαδικασία σχεδιασμού, κατασκευής και επιθεώρησης του πραγματικού μοντέλου. Η διαδικασία προσομοίωσης υποστηρίζει το προγραμματισμό του ρομπότ, παρέχοντας δυνατότητα αξιολόγησης και πρόβλεψης της συντελούμενης συμπεριφοράς του ρομποτικού συστήματος, με στόχο την επαλήθευση και βελτιστοποίηση της σχεδιασμένης διαδρομής και διαδικασίας για την ζητούμενη διεργασία (Kazim, et al., 2018).

Η παρούσα μελέτη περιλαμβάνει το σχεδιασμό, την ανάλυση ενός ρομποτικού βραχίονα που βασίζεται ως διαμόρφωση στο βιομηχανικό ρομπότ IRB 120 κατασκευής της εταιρίας ABB και την προσομοίωση του σε μια εργασία βαφής σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις, επιπλέον γίνεται προσομοίωση του βραχίονα, καθώς προσεγγίζει τυχαίο σημείο χρησιμοποιώντας αντίστροφη κινηματική.

6.2 Σχεδιασμός και μελέτη

Μεθοδολογία σχεδιασμού

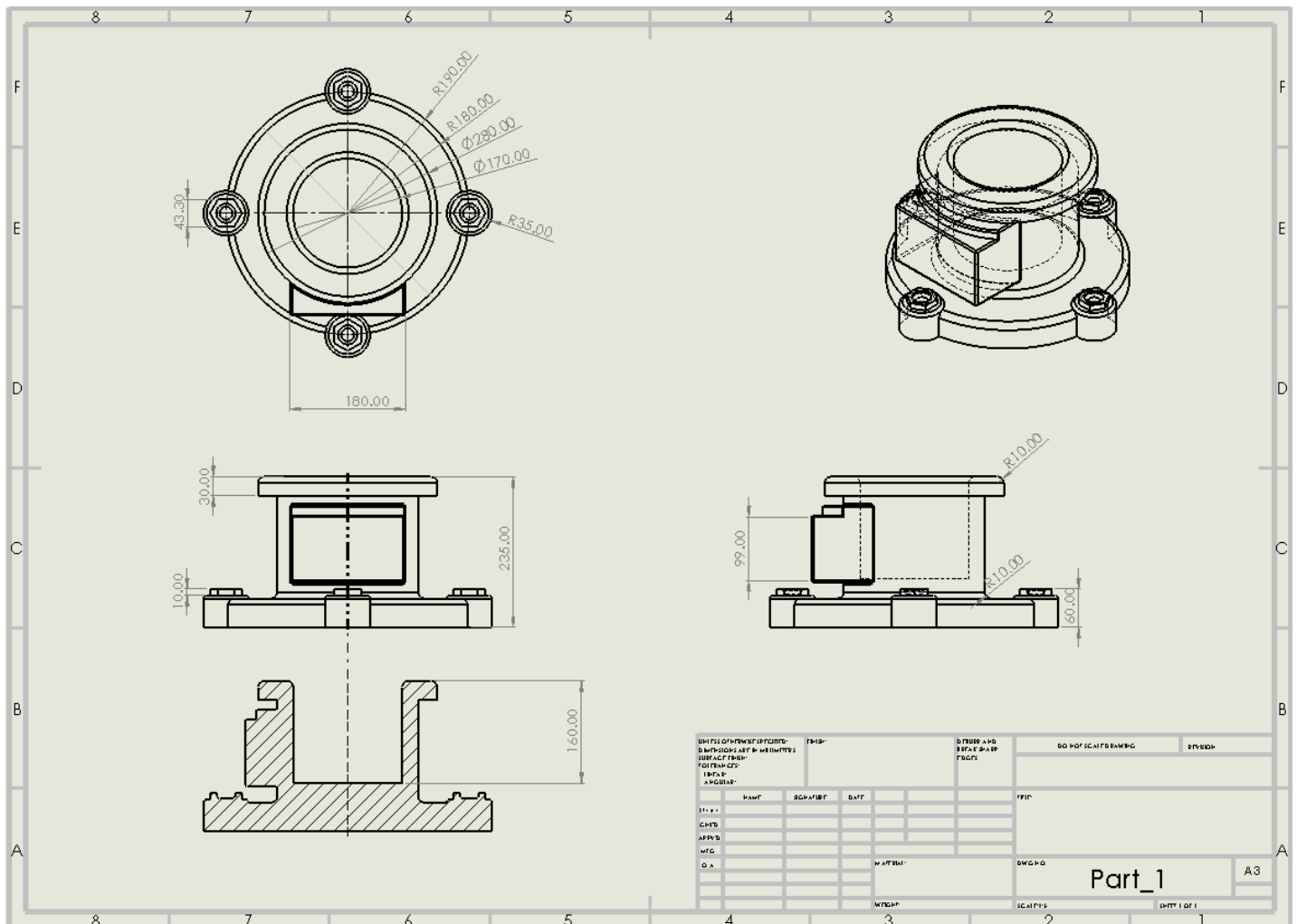


Σχήμα 95: Τα στάδια σχεδιασμού του ρομποτικού βραχίονα.

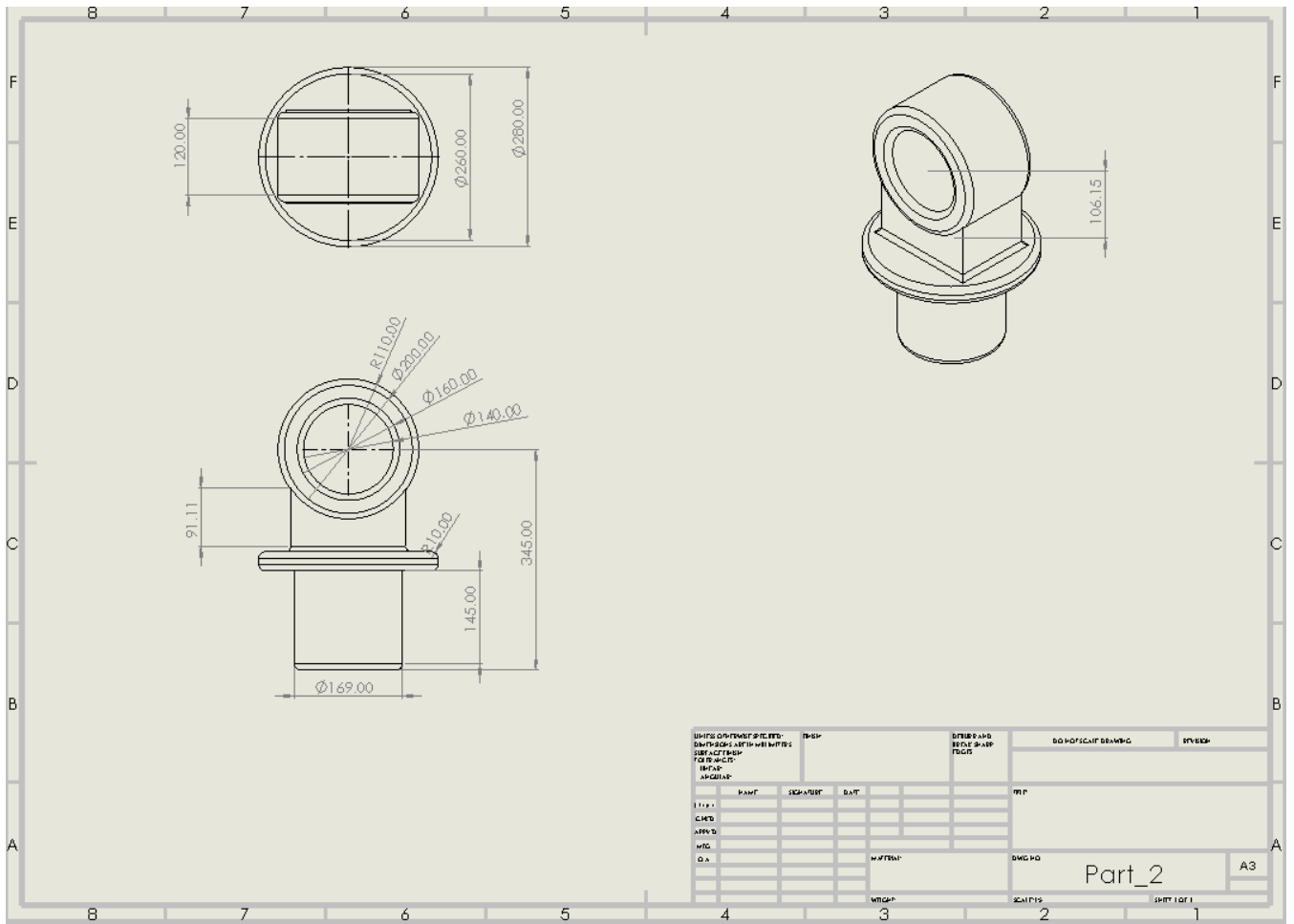
Για την ολοκλήρωση της σχεδίασης και της ανάλυσης του ρομπότ έχουν ολοκληρωθεί τα βήματα που αναφέρονται στο σχήμα (95). Επιπλέον, ολόκληρη η σχεδίαση έχει πραγματοποιηθεί στο SOLIDWORKS.

Η σχεδίαση του συγκεκριμένου ρομποτικού βραχίονα βασίστηκε στο ρομπότ μοντέλου ABB IRB 120. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα μέλη του ρομπότ, σε αναλυτική απεικόνιση με τις αντίστοιχες διαστάσεις.

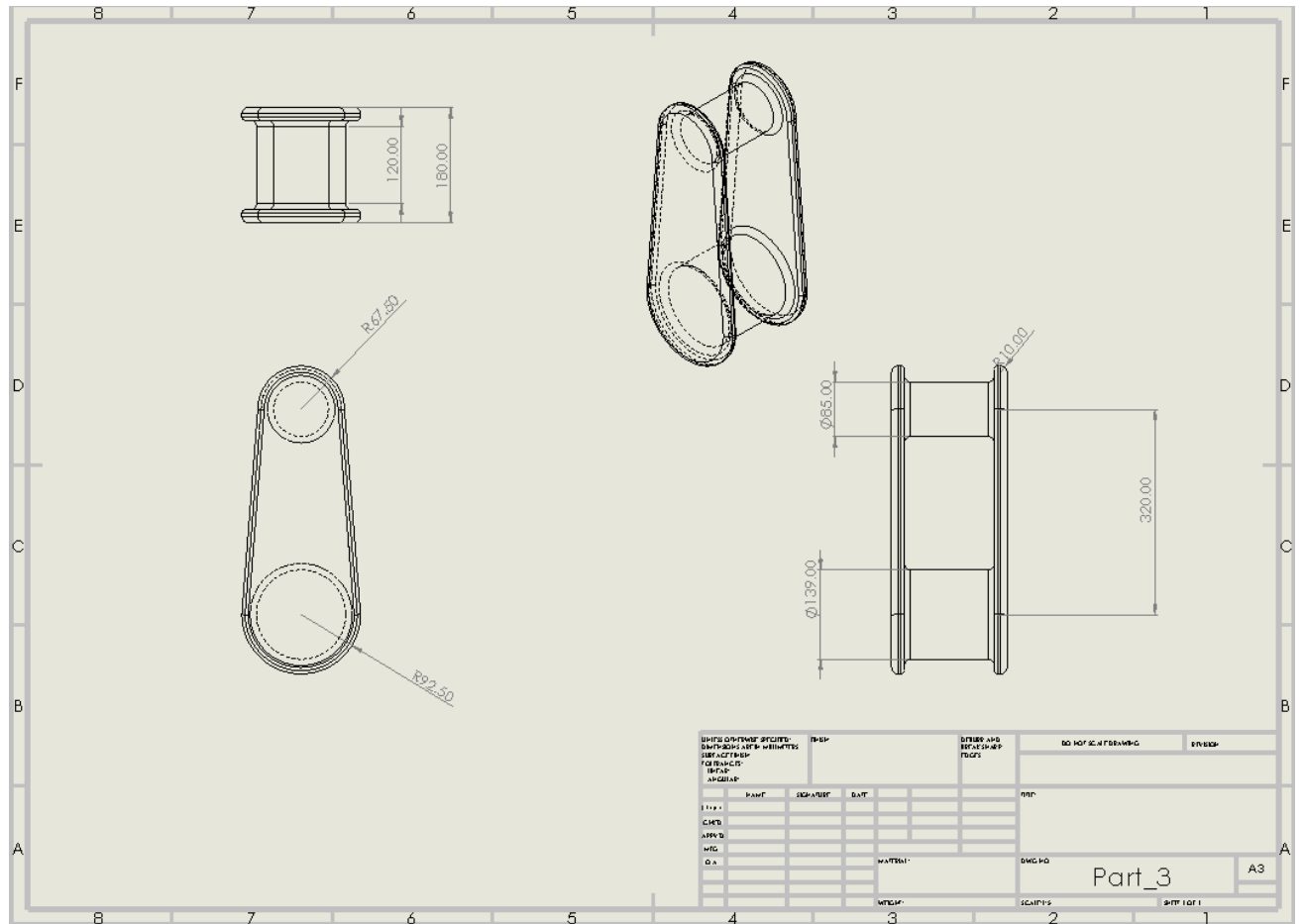
Ο δισδιάστατος σχεδιασμός συμπεριλαμβάνοντας τις διαστάσεις των μελών του ρομπότ που φαίνεται παρακάτω έχουν σκοπό την καλύτερη κατανόηση των αναπαραστάσεων των μελών. Αντίθετα, τα τρισδιάστατα μέλη που ακολουθούν στη συνέχεια έχουν σχεδιαστεί για την συναρμολόγηση τους. Επιπλέον, το συναρμολόγημα των μελών, δηλαδή ο βραχίονας εφαρμόζεται αργότερα για την εκτελούμενη εργασία στην προσομοίωση.



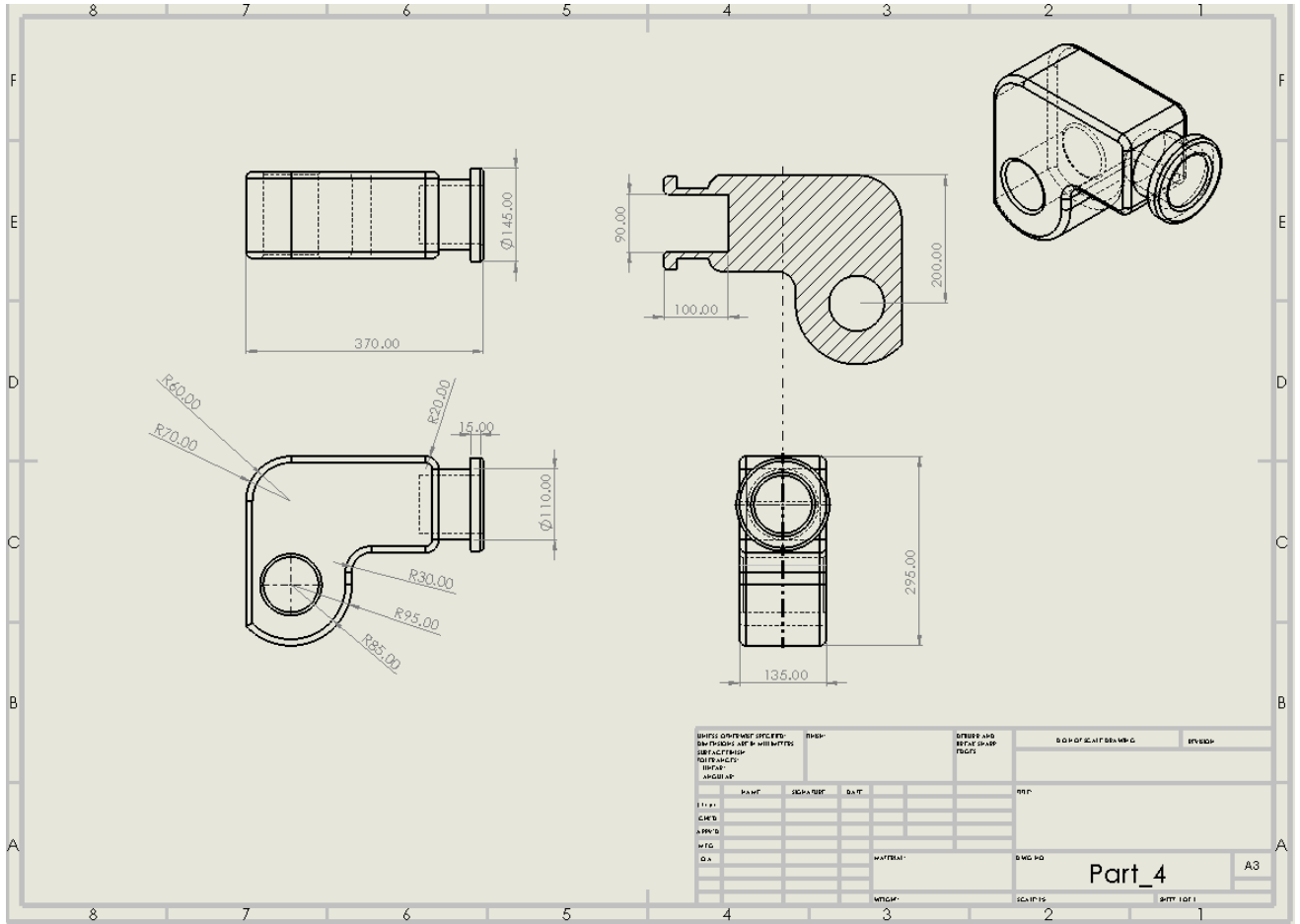
Σχήμα 96: Μέλος 1 σε σχεδιαστική απεικόνιση με διαστάσεις.



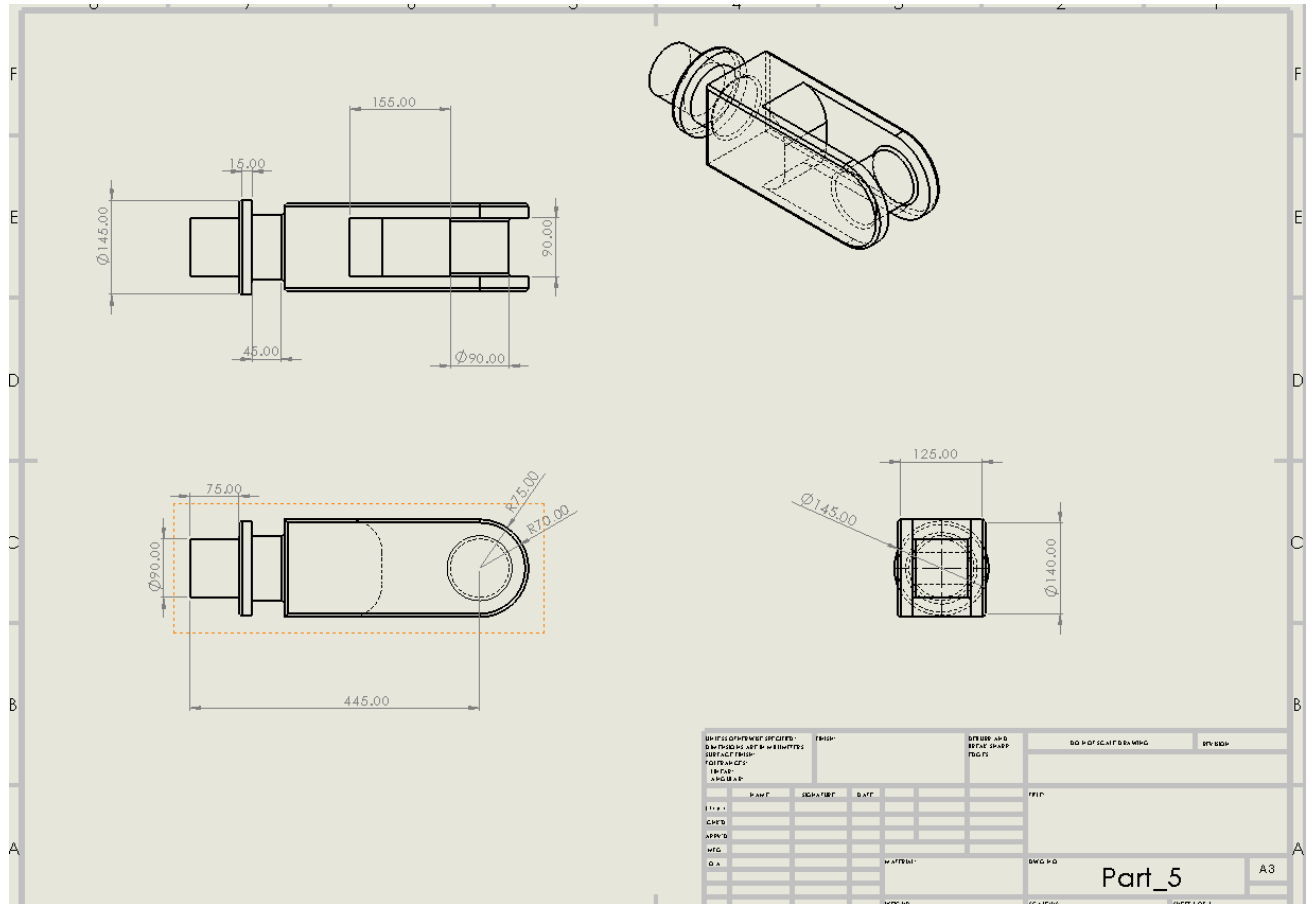
Σχήμα 97: Μέλος 2 σε σχεδιαστική απεικόνιση με διαστάσεις.



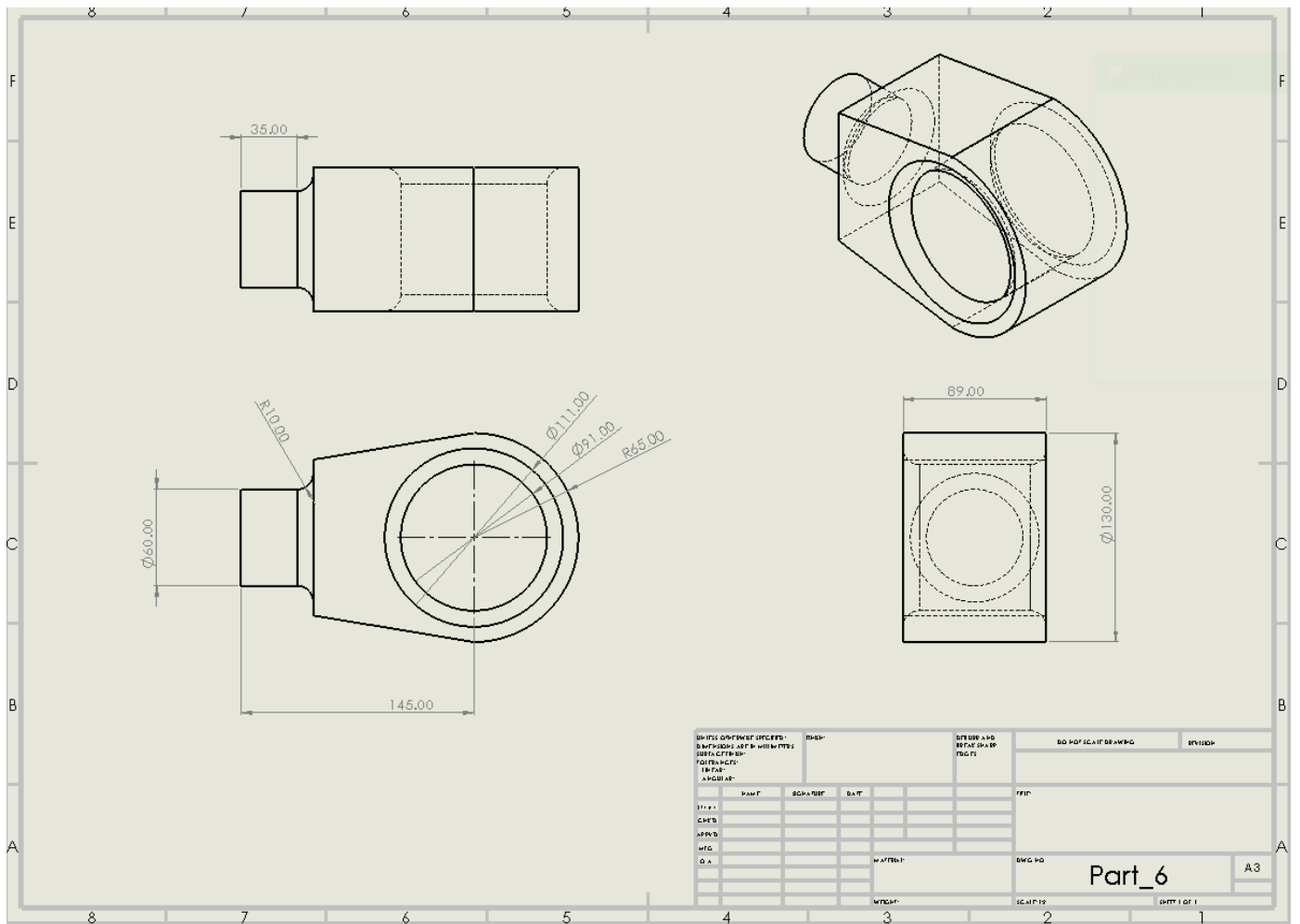
Σχήμα 98: Μέλος 3 σε σχεδιαστική απεικόνιση με διαστάσεις.



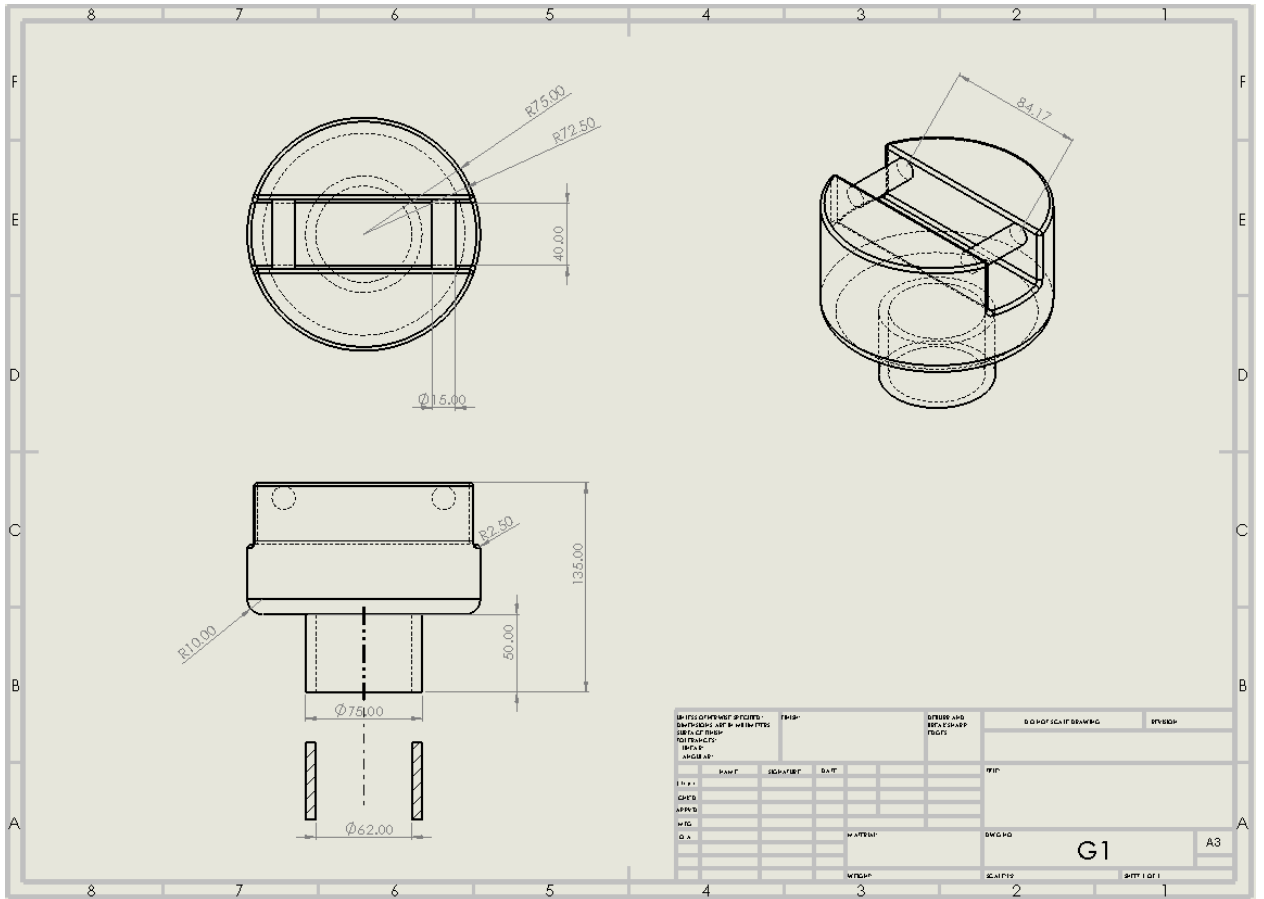
Σχήμα 99: Μέλος 4 σε σχεδιαστική απεικόνιση με διαστάσεις.



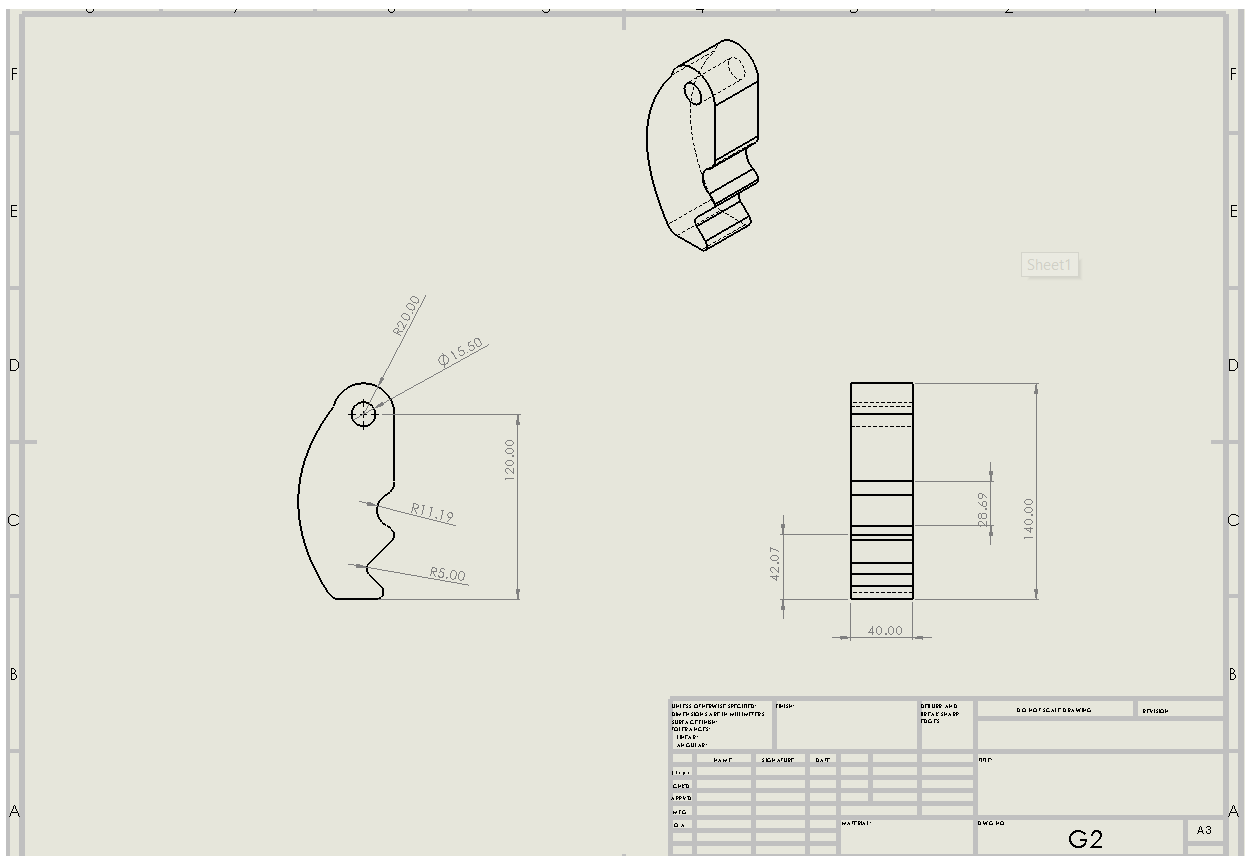
Σχήμα 100: Μέλος 5 σε σχεδιαστική απεικόνιση με διαστάσεις.



Σχήμα 101: Μέλος 6 σε σχεδιαστική απεικόνιση με διαστάσεις.



Σχήμα 102: Μέλος 7 σε σχεδιαστική απεικόνιση με διαστάσεις.



Σχήμα 103: Μέλος 8 σε σχεδιαστική απεικόνιση με διαστάσεις.

Μοντελοποίηση CAD

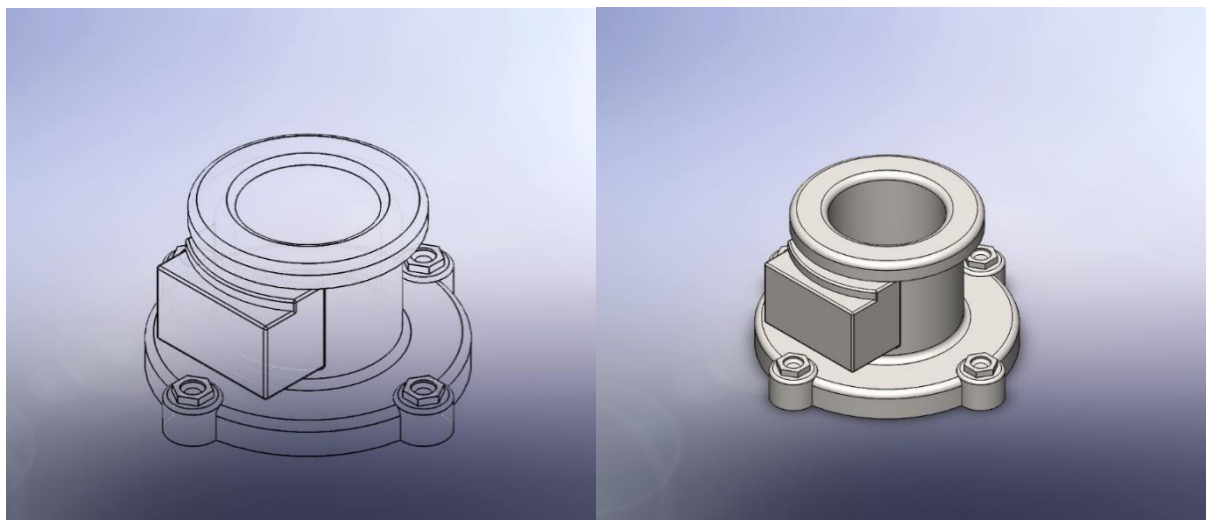
Με τον όρο Computer-aided design (CAD) ή σχεδιασμός με την χρήση Η/Υ ορίζεται κάθε ενέργεια που περιλαμβάνει την αποτελεσματική χρήση του Η/Υ με σκοπό την δημιουργία, την τροποποίηση ή την μελέτη του μηχανολογικού σχεδιασμού (Rishabh Jain, Mohd. Nayab Zafar, J.C. Mohanta, 2019).

Ο σκοπός εφαρμογής των λογισμικών CAD είναι η αύξηση της παραγωγικότητας του σχεδιασμού, την βελτίωση της ποιότητας του σχεδίου, βελτίωση της επικοινωνίας μέσω της λειτουργίας τεκμηρίωσης και της δημιουργίας βάσης δεδομένων για την κατασκευή. Ένα σύστημα CAD συνδέεται κατά κυρίως με ένα διαδραστικό γραφικό σύστημα υπολογιστών, που αναφέρεται ως σύστημα CAD (Swathi K, Student MT).

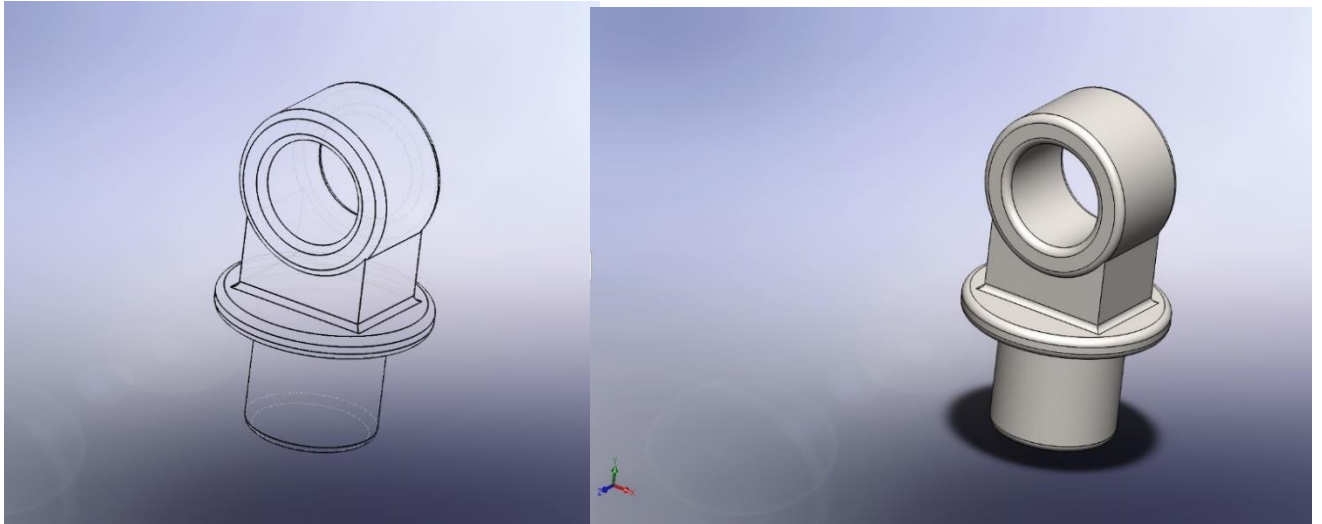
Όλα τα μέλη του ρομποτικού βραχίονα που σχεδιάζονται στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας γίνονται στο σχεδιαστικό λογισμικό SOLIDWORKS το κάθε ένα ξεχωριστά. Στη συνέχεια τα επιμέρους μέλη συναρμολογούνται με την εφαρμογή κατάλληλων συνθηκών και περιορισμούς.

Το λογισμικό του SOLIDWORKS επιλέγεται διότι, χρησιμοποιείται πρόσφατα αρκετά στον τομέα της έρευνας και διευκολύνει τον σχεδιασμό του ρομπότ, καθώς και μειώνει το απαιτούμενο χρόνο ολοκλήρωσης του σχεδιασμού. Έτσι, αυξάνεται η παραγωγικότητα του σχεδιαστή και βελτιώνεται η ταχύτητα και η φύση της μοντελοποίησης του ρομπότ (Rishabh Jain, Mohd. Nayab Zafar, J.C. Mohanta, 2019).

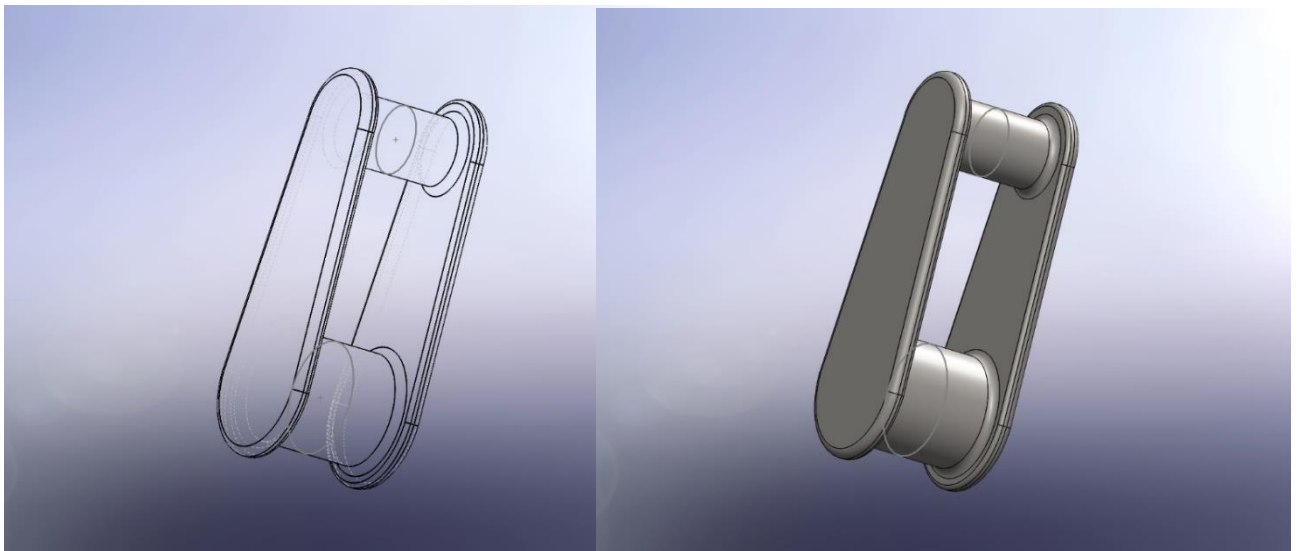
Στα σχήματα που φαίνονται παρακάτω απεικονίζονται τα μέλη που απαρτίζουν το ρομποτικό βραχίονα. Στο σχήμα 112 παρουσιάζεται η συναρμολόγηση του ρομποτικού βραχίονα σε τελικό στάδιο.



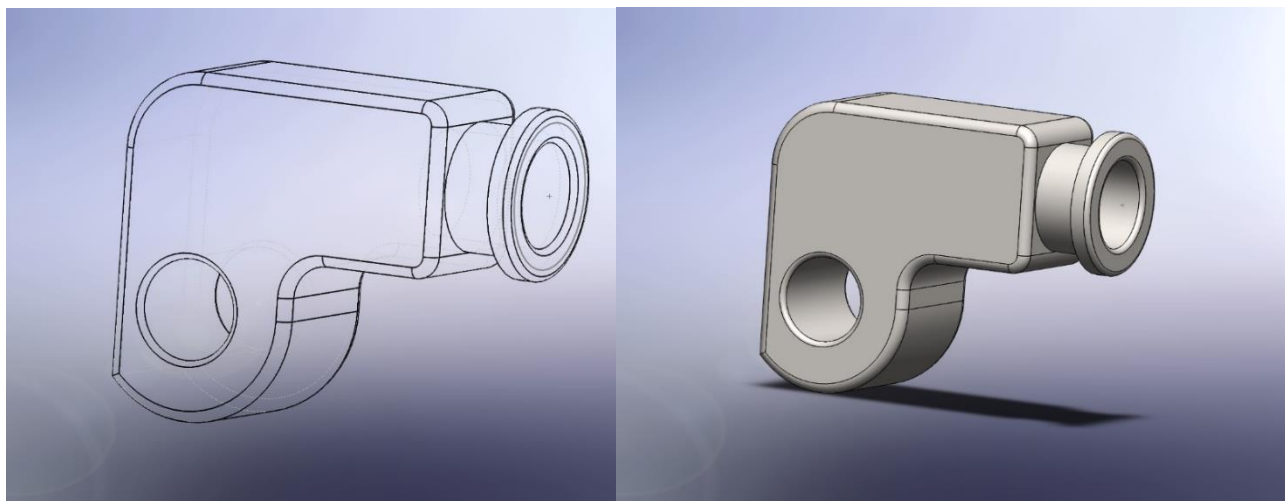
Σχήμα 104: Η Βάση (Base) του ρομποτικού βραχίονα.



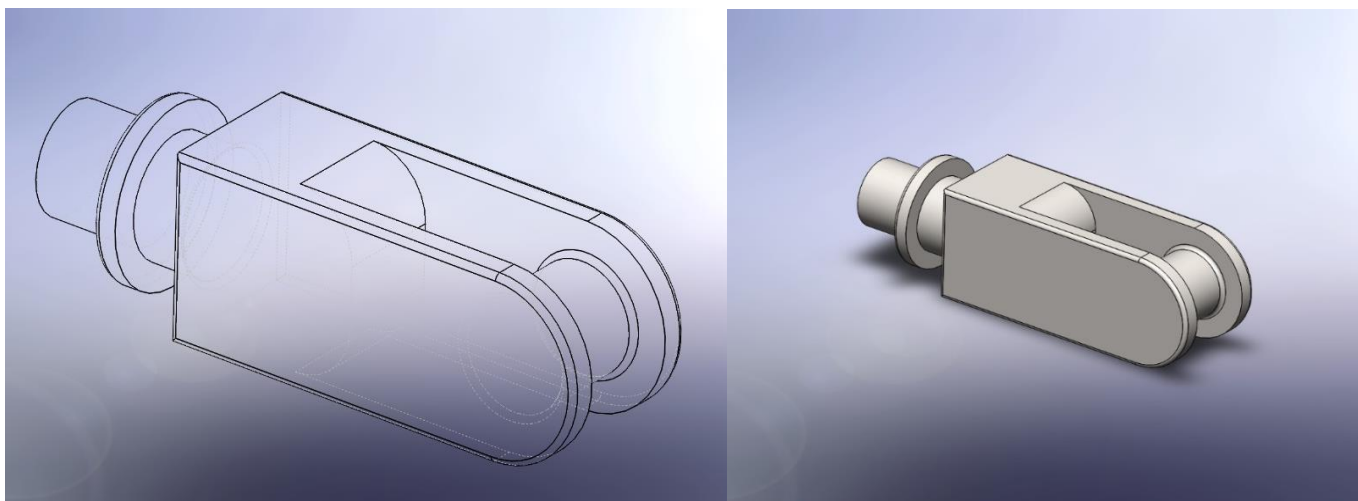
Σχήμα 105: Ο ώμος (Shoulder) του ρομποτικού βραχίονα.



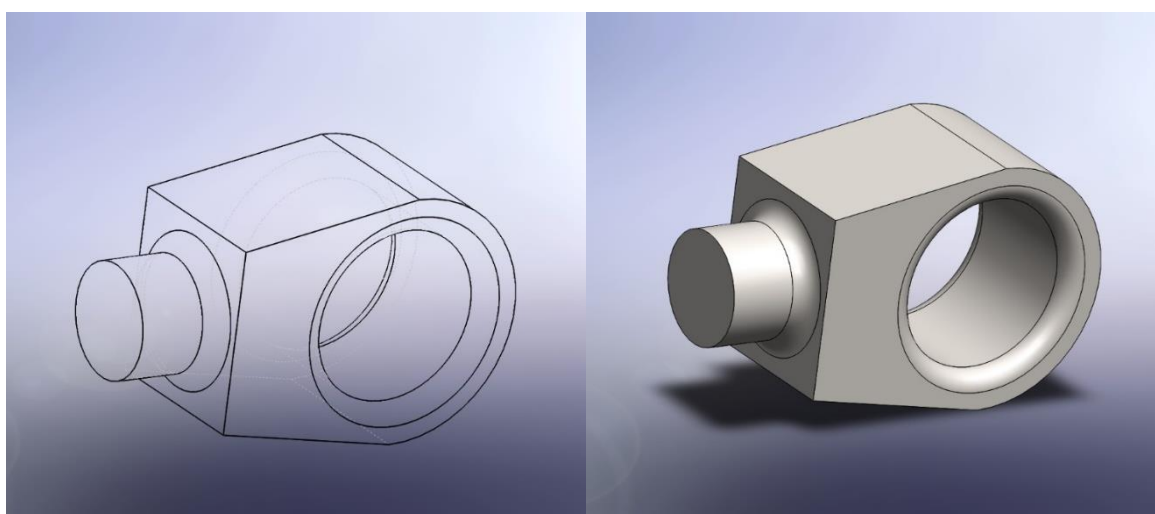
Σχήμα 106: Ο βραχίονας (Arm) του ρομπότ.



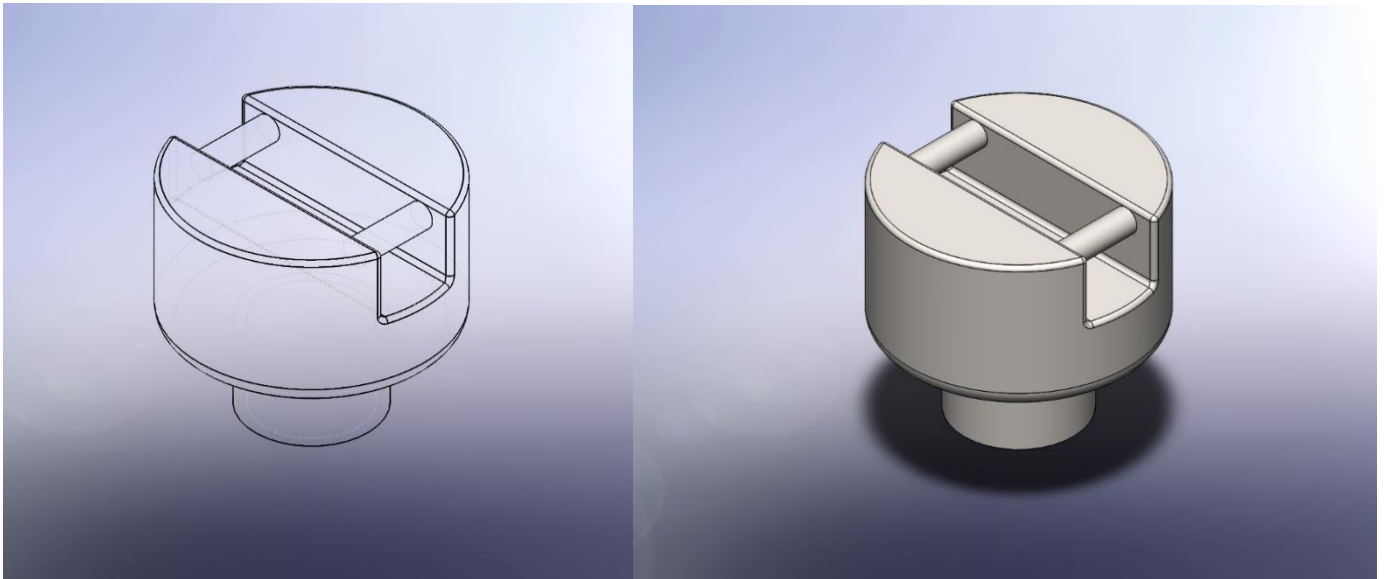
Σχήμα 107: Το αντιβράχιο (Forearm) του ρομποτικού βραχίονα.



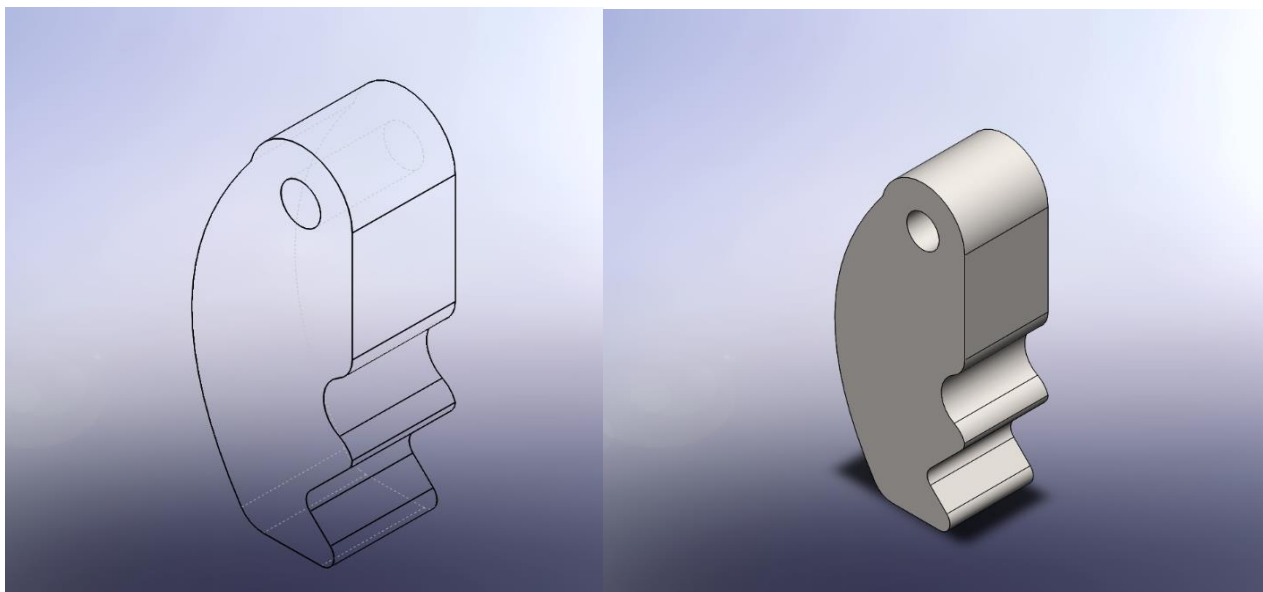
Σχήμα 108: Ο καρπός του ρομπότ.



Σχήμα 109: Ο σύνδεσμος 1 του ρομπότ.

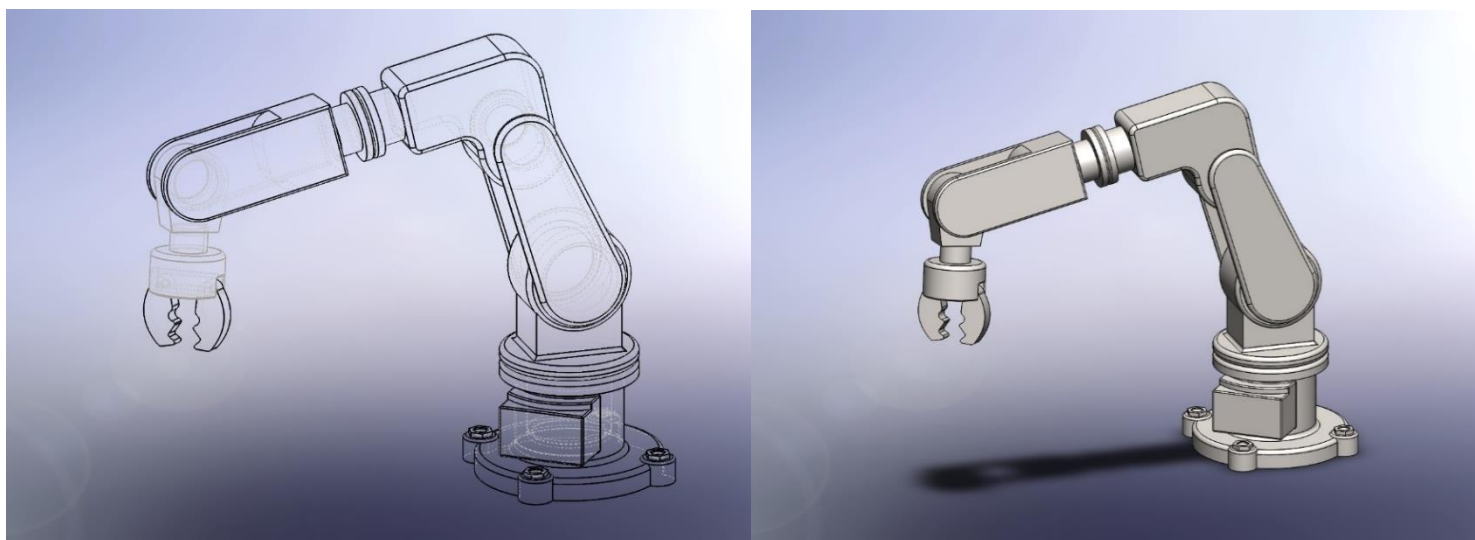


Σχήμα 110: Ο σύνδεσμός 2 του ρομπότ.



Σχήμα 111: Ο σύνδεσμός της αρπάγης του ρομπότ.

Στο ακόλουθο σχήμα που φαίνεται το τελικό συναρμολόγημα. Επίσης, στο συναρμολόγημα η βάση αποτελείται το σταθερό σώμα, καθώς στηρίζει τα υπόλοιπα τμήματα που κινούνται βάση των ορισμένων συνθήκων.



Σχήμα 112: Η συναρμολόγηση του ρομποτικού βραχίονα.

6.3 Προσομοίωση του ρομποτικού βραχίονα

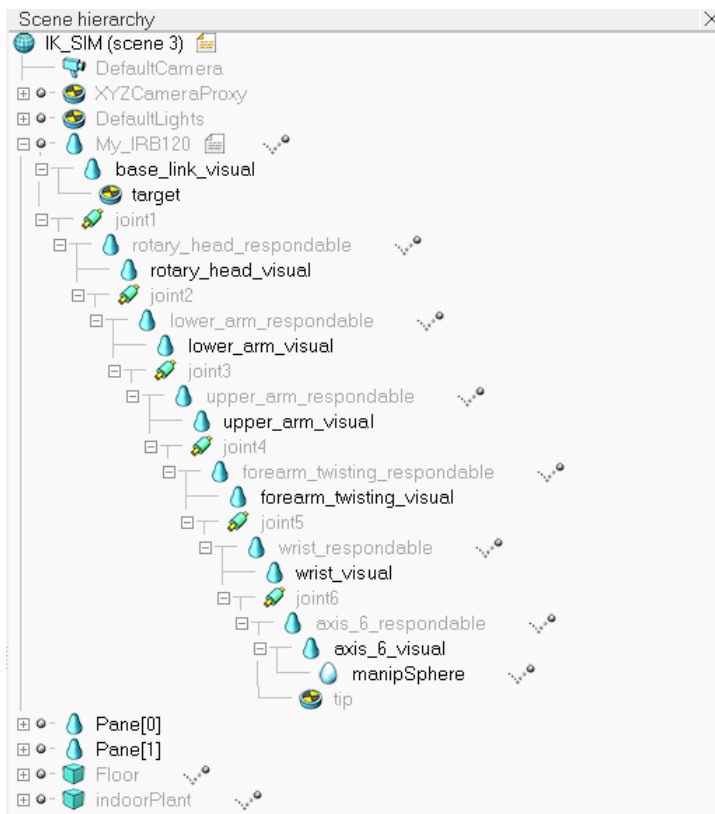
Για την προσομοίωση του ρομποτικού βραχίονα χρησιμοποιήθηκε το CoppeliaSim. Όπως παρουσιάζεται από τα σχήματα που ακολουθούν, ο βραχίονας προσομοιώνεται σε δύο εφαρμογές βαφής με διαφορετικές τροχιές κίνησης. Επιπλέον, γίνεται μια προσομοίωση του βραχίονα σε ένα πρόβλημα προσέγγισης σημείου βάση αντίστροφης κινηματικής.

Για την εισαγωγή του βραχίονα ως σχεδιασμένο πρότυπο στο περιβάλλον προσομοίωσης γίνεται μετατροπή του αρχείου από .SLDASM που υποστηρίζεται από το λογισμικό του SOLIDWORKS σε .URDF που μπορεί να εισαχθεί στο περιβάλλον του CoppeliaSim, με την βοήθεια του πρόσθετου (Add-in) SW2URDF που εγκαθίσταται από την συλλογή Adds-in του SOLIDWORKS. Στη συνέχεια, με την χρήση της μεθόδου εισαγωγής αρχείων τύπου URDF (Modules-Importers-URDF importer) που βρίσκεται στο CoppeliaSim εισάγεται το πρότυπο στο περιβάλλον προσομοίωσης.

Προσομοίωση του ρομπότ σε λειτουργία κινηματικής του CoppeliaSim

Το μοντέλο προσομοίωσης

Για την συγκεκριμένη προσομοίωση χρησιμοποιείται ο ρομποτικός βραχίονας με μη δυναμικές ιδιότητες και απλά με την χρήση της αντίστροφης κινηματικής, καθώς ακολουθεί το σημείο στόχο που ορίζουμε, μετακινώντας και περιστρέφοντας το στο χώρο.



Σχήμα 113: Τα στοιχεία που περιλαμβάνει η σκηνή της προσομοίωσης.

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα
Το hierarchy του ρομπότ σε αυτή τη περίπτωση:

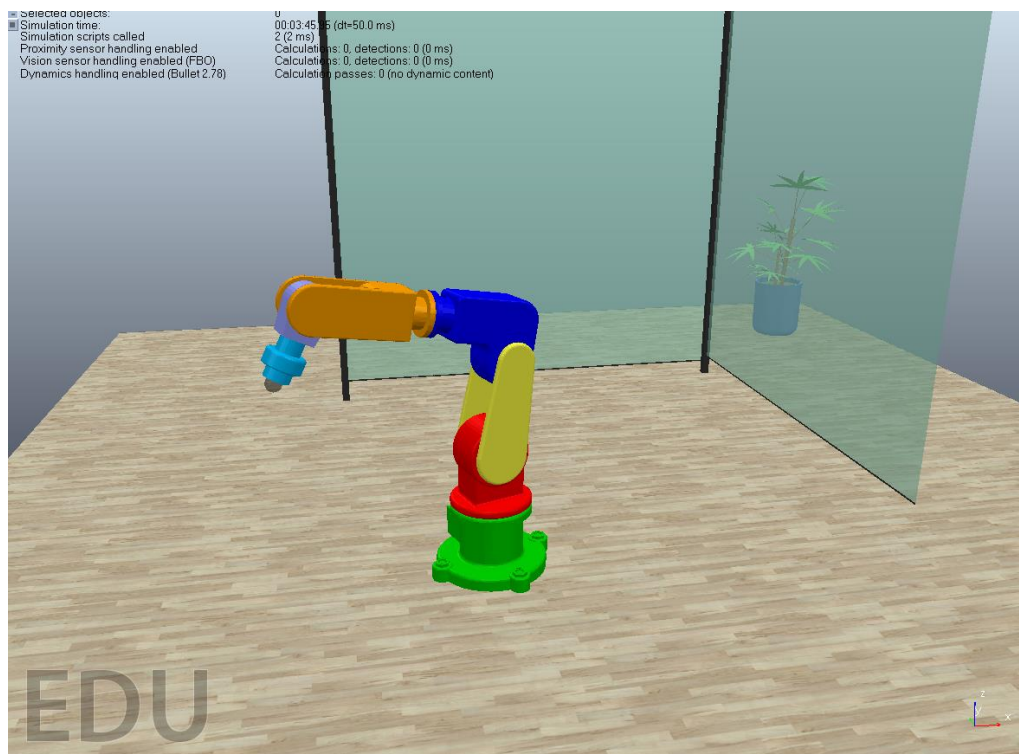


Σχήμα 114: Η δομή του βραχίονα ως hierarchy.

Το στοιχείο target είναι το σημείο στόχο που του μεταβάλλουμε τη θέση και τον προσανατολισμό ώστε να το ακολουθήσει το άκρο του ρομπότ tip με την επίλυση της αντίστροφης κινηματικής που περιλαμβάνεται στο ορισμένο κώδικα προγραμματισμού.

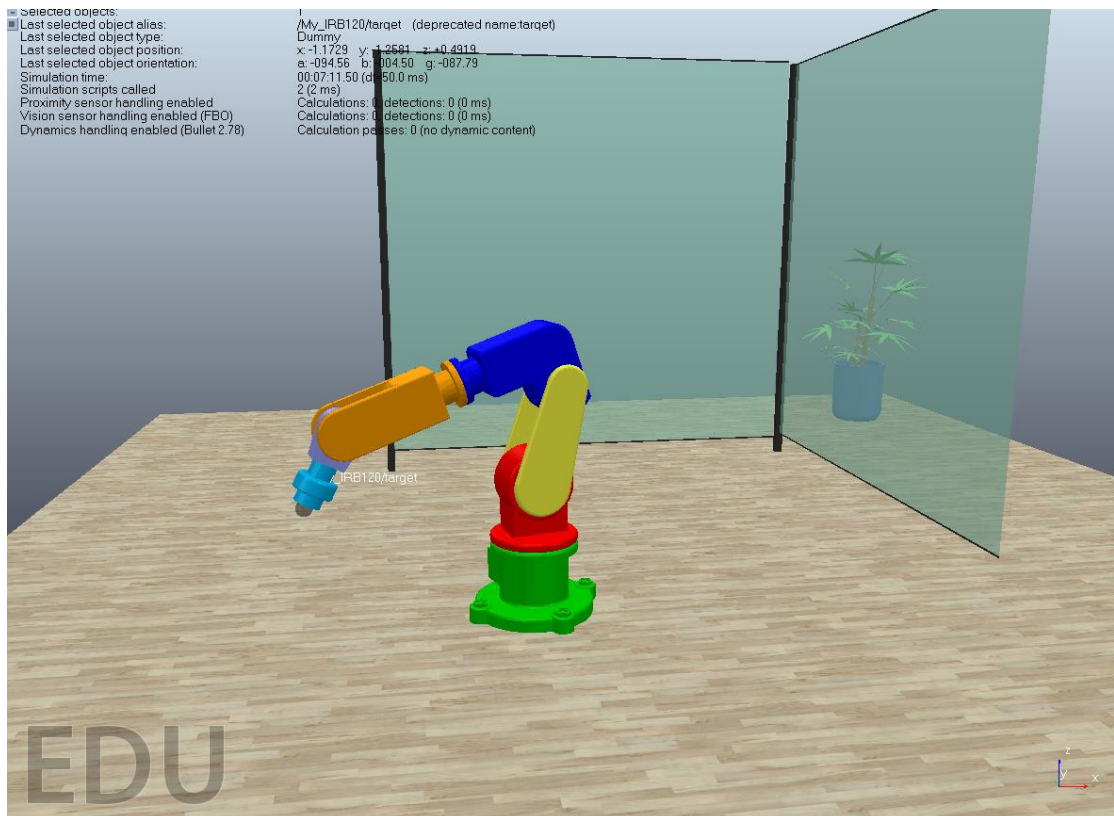
Προσέγγιση στόχου μέσω αντίστροφης κινηματικής

Αρχικά, ξεκινάει η προσομοίωση με τον βραχίονα να βρίσκεται στην αρχική θέση του, όπου το target και το tip ταυτίζονται, όπως φαίνεται παρακάτω:



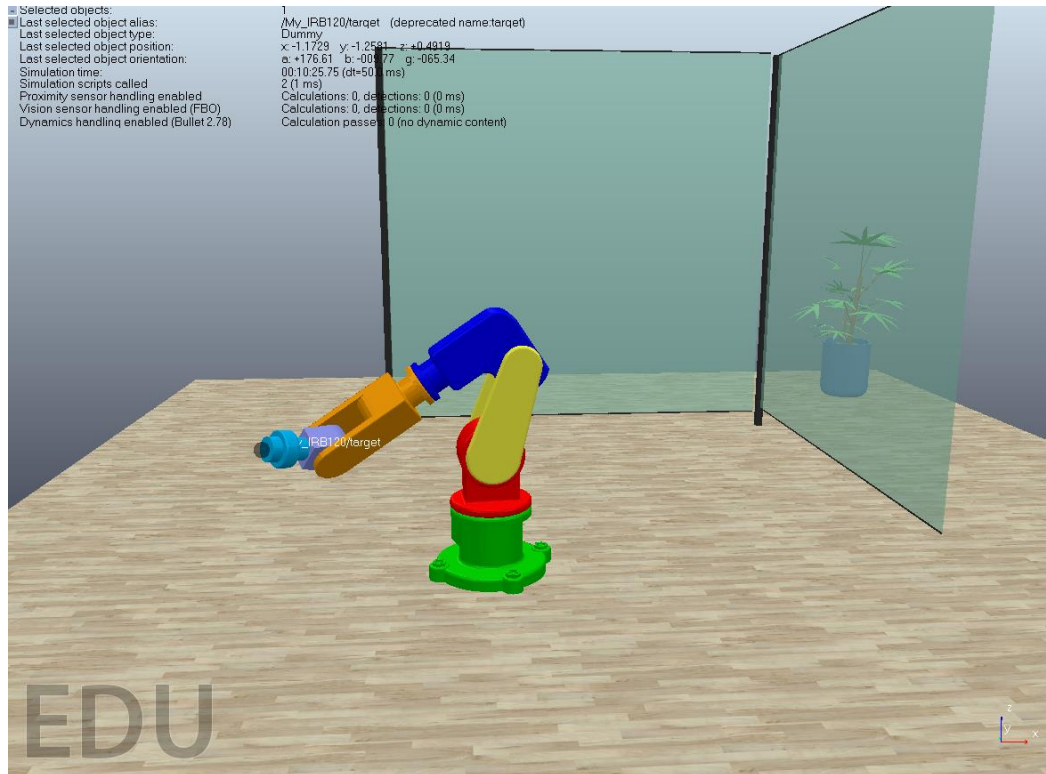
Σχήμα 115: Διάταξη του βραχίονα σε αρχικό στάδιο.

Μετατοπίζεται ο στόχος και ως αποτέλεσμα να το ακολουθήσει το tip μεταβάλλοντας την διάταξη του βραχίονα στο χώρο, ώστε να το προσεγγίσει.



Σχήμα 116: Το αποτέλεσμα μετατόπισης του στόχου ως διάταξη των τμημάτων του βραχίονα στο χώρο.

Στη συνέχεια ταυτόχρονα μετατοπίζεται και περιστρέφεται ο στόχος δίνοντας νέα θέση και προσανατολισμός που αποτελούν το δεδομένο και ζητείται η κατάλληλη γεωμετρική διάταξη του ρομπότ.



Σχήμα 117: Το αποτέλεσμα μετατόπισης και της περιστροφής του στόχου ως διάταξη των τμημάτων του βραχίονα στο χώρο.

Προγραμματισμός του βραχίονα

```
function sysCall_init()
```

```
-- Take a few handles from the scene:
```

```
simBase=sim.getObject('.')
```

```
simTip=sim.getObject('./tip')
```

```
simTarget=sim.getObject('./target')
```

```
ikEnv=simIK.createEnvironment()
```

```
-- Prepare the 2 ik groups, using the convenience function 'simIK.addIkElementFromScene':
```

```
ikGroup_undamped=simIK.createIkGroup(ikEnv)
```

```
simIK.setIkGroupCalculation(ikEnv,ikGroup_undamped,simIK.method_pseudo_inverse,0,10)
```



```
simIK.addIkElementFromScene(ikEnv,ikGroup_undamped,simBase,simTip,simTarget,simIK.constraint_pose)
```

```
    ikGroup_damped=simIK.createIkGroup(ikEnv)
```

```
simIK.setIkGroupCalculation(ikEnv,ikGroup_damped,simIK.method_damped_least_squares,0.3,99)
```

```
simIK.addIkElementFromScene(ikEnv,ikGroup_damped,simBase,simTip,simTarget,simIK.constraint_pose)
```

```
end
```

```
function sysCall_actuation()
```

```
    if simIK.applyIkEnvironmentToScene(ikEnv,ikGroup_undamped,true)~=simIK.result_success then
```

```
        simIK.applyIkEnvironmentToScene(ikEnv,ikGroup_damped)
```

```
    end
```

```
end
```

```
function sysCall_cleanup()
```

```
    simIK.eraseEnvironment(ikEnv)
```

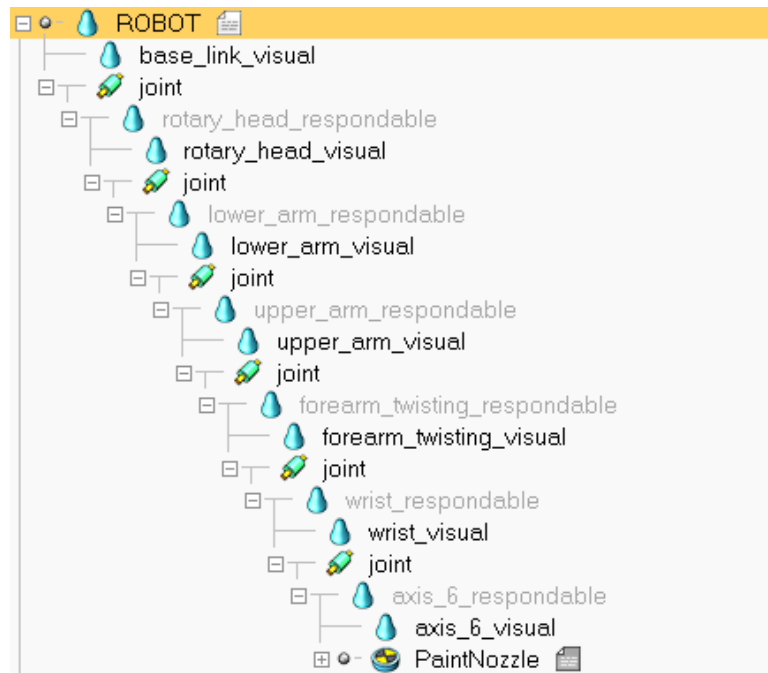
```
end
```

Για τον έλεγχο του ρομπότ χρησιμοποιήθηκε κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού Lua, που ενσωματώθηκε ως child script στο στοιχείο που αντιστοιχεί στον βραχίονα εντός του παραθύρου των στοιχείων (Scene hierarchy) της σκηνής.

Μέσα στην συνάρτηση function sysCall_init() υπολογίζεται η θέση για base, target, tip μέσω της sim.getObject("") και στη συνέχεια δημιουργούνται 2 ik ομάδες. Τέλος, υλοποιείται μια φορά το ik περιβάλλον.

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

Έπειτα, οργανώνεται η ιεραρχία (hierarchy) της διάταξης του βραχίονα για τις εφαρμογές βαφής όπως φαίνεται στο σχήμα (118). Στον βραχίονα προστέθηκε ένα ακροφύσιο ψεκασμού για την διεργασία βαφής από την συλλογή διατάξεων για το άκρο εργασίας που παρέχει ο προσομοιωτής (Components-Modifiers-Paint gun.ttm).

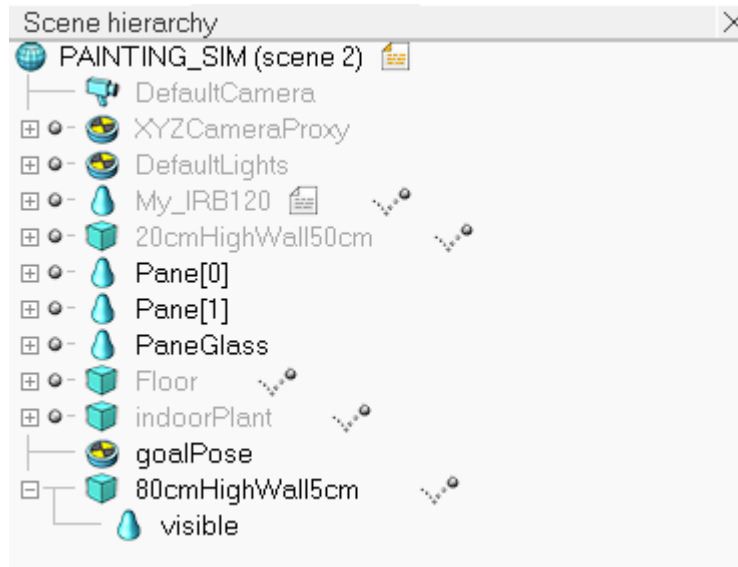


Σχήμα 118: Η δομή του βραχίονα ως hierarchy στο CoppeliaSim για τις εφαρμογές βαφής.

Προσομοίωση 1/ Διεργασία βαφής 1

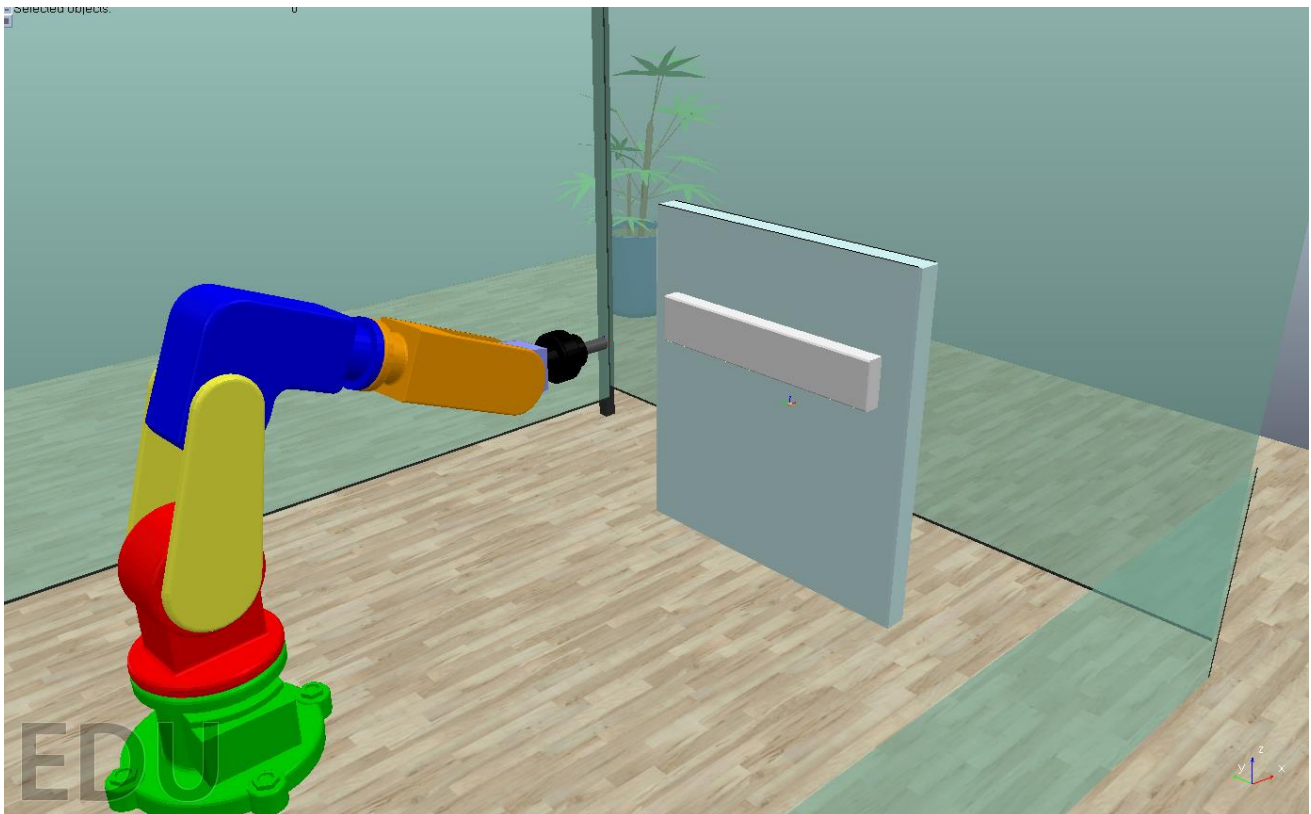
Κατά την πρώτη προσομοίωση ο ρομποτικός βραχίονας χρησιμοποιείται σε μια διαδικασία βαφής με ευθύγραμμη τροχιά κίνησης. Κατά την μετατόπιση του βραχίονα από την θέση έναρξης έως την τελική θέση το ακροφύσιο ψεκάζει την ζητούμενη επιφάνεια με χρώμα με συνεχής και επαναληπτικό τρόπο.

Η σκηνή 1 σε αυτή την προσομοίωση απαρτίζεται από τα στοιχεία του χώρου εργασίας, τον βραχίονα και τον τοίχο που περιλαμβάνει την ζητούμενη επιφάνεια. Η ιεραρχία των συγκεκριμένων στοιχείων φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα 119.

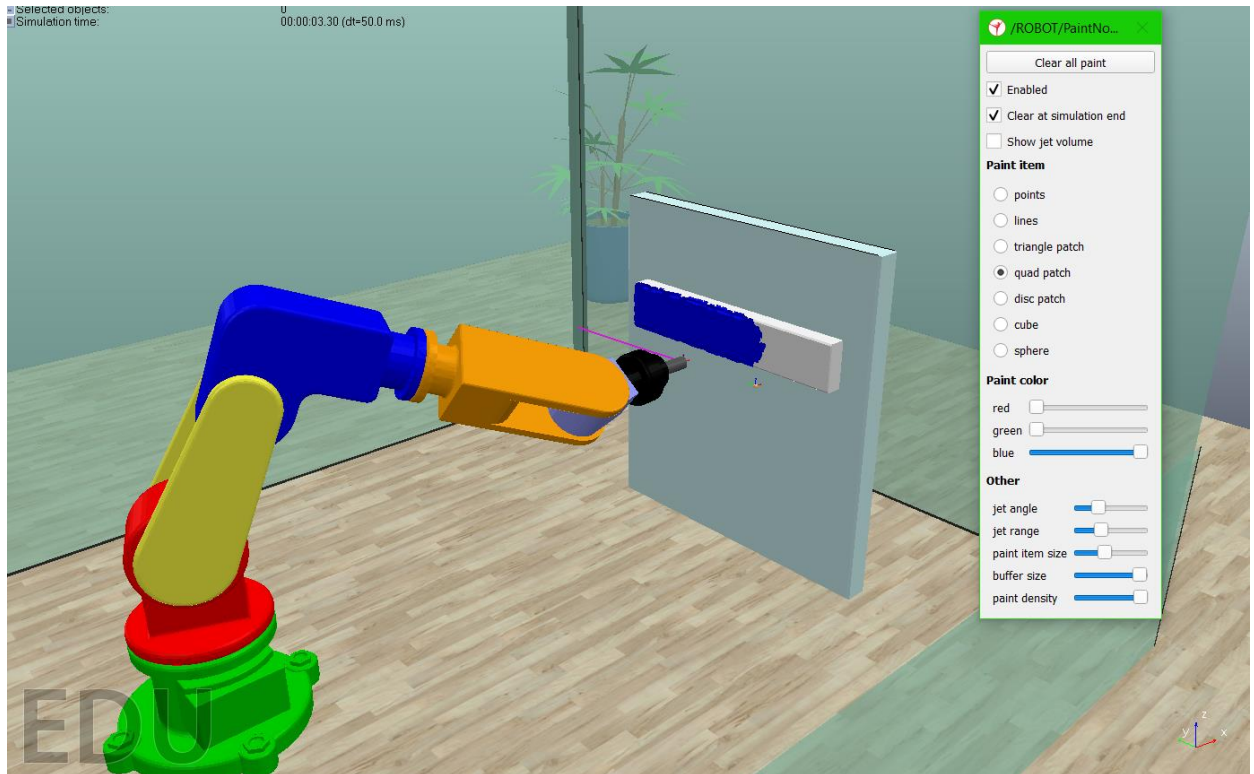


Σχήμα 119: Η ταξινόμηση των στοιχείων που απαρτίζουν την σκηνή 1.

Στο παρακάτω σχήμα 120 παρουσιάζεται ο βραχίονας στην αρχική θέση πριν την έναρξη της βαφής.

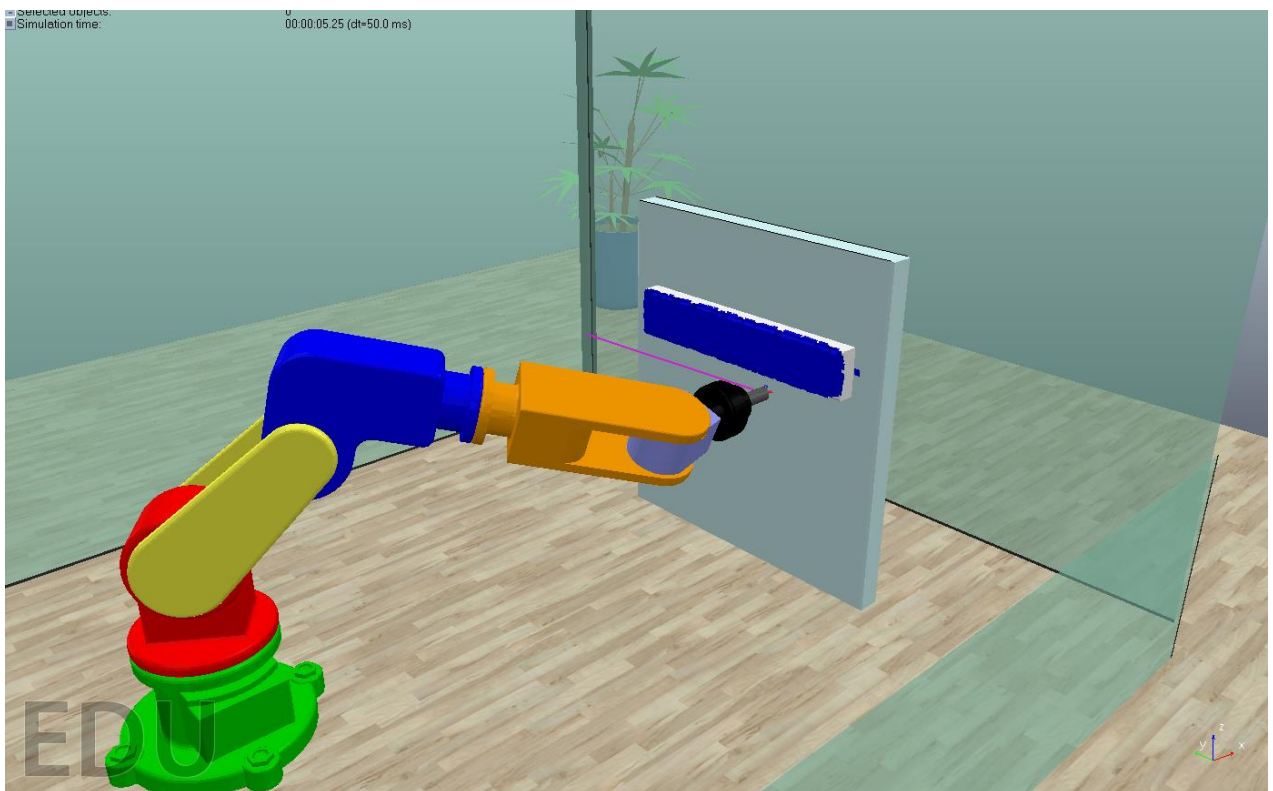


Σχήμα 120: Απεικόνιση του ρομποτικού βραχίονα πριν την έναρξη της βαφής.



Σχήμα 121: Απεικόνιση του ρομποτικού βραχίονα σε ενδιάμεση θέση.

Στο σχήμα 122 παρουσιάζεται ο βραχίονας στην τελική θέση, αφού έχει γίνει η βαφή της ζητούμενης επιφάνειας. Επίσης, στο σχήμα 121 φαίνονται οι ρυθμίσεις του ακροφυσίου ψεκασμού που μπορούν να μεταβληθούν από τον χρήστη μέσω του ειδικού παραθύρου (User Interface) που εμφανίζεται.



Σχήμα 122: Απεικόνιση του ρομποτικού βραχίονα στην τελική θέση, αφού έχει γίνει η βαφή.

Προγραμματισμός διεργασίας 1

Για τον έλεγχο του ρομπότ χρησιμοποιήθηκε κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού Lua, που ενσωματώθηκε ως child script στο στοιχείο που αντιστοιχεί στον βραχίονα εντός του παραθύρου των στοιχείων (Scene hierarchy) της σκηνής 1.

Ο κώδικας 1 σε αναλυτική μορφή:

```
function sysCall_init()

    corout=coroutine.create(coroutineMain)

end

function sysCall_actuation()

    if coroutine.status(corout)~='dead' then

        local ok,errorMsg=coroutine.resume(corout)

        if errorMsg then

            error(debug.traceback(corout,errorMsg),2)

        end

    end

end

end

function hopThroughConfigs(path,joints,reverse,dynModel)

    local lb=sim.setThreadAutomaticSwitch(false)

    local s=1

    local g=#path/6

    local incr=1

    if reverse then

        s=#path/6

        g=1

        incr=-1

    end

    for i=s,g,incr do
```

```
if dynModel then
    for j=1,#joints,1 do
        sim.setJointTargetPosition(joints[j],path[(i-1)*6+j])
    end
else
    for j=1,#joints,1 do
        sim.setJointPosition(joints[j],path[(i-1)*6+j])
    end
end
end
sim.switchThread()
end
sim.setThreadAutomaticSwitch(1b)
end

function coroutineMain()
    local simBase=sim.getObject('.')
    local simTip=sim.getObject('./tip')
    local simGoal=sim.getObject('/goalPose')
    local simJoints={ }
    for i=1,6,1 do
        simJoints[i]=sim.getObject('./joint',{index=i-1})
    end
    sim.switchThread() -- make sure we have skipped the first simulation step,
        -- otherwise following cmd won't reflect reality
    local dynModel=sim.isDynamicallyEnabled(simJoints[1])

    -- Prepare an ik group, using the convenience function 'simIK.addIkElementFromScene':
```

```
local ikEnv=simIK.createEnvironment()

local ikGroup=simIK.createIkGroup(ikEnv)

local
ikElement,simToIkMap=simIK.addIkElementFromScene(ikEnv,ikGroup,simBase,simTip,simGoal,
simIK.constraint_pose)

-- Retrieve some handles of objects created in the IK environment:

local ikTip=simToIkMap[simTip]

local ikJoints={ }

for i=1,#simJoints,1 do

    ikJoints[i]=simToIkMap[simJoints[i]]

end

-- Generate a path:

local path=simIK.generatePath(ikEnv,ikGroup,ikJoints,ikTip,100)

simIK.eraseEnvironment(ikEnv)

-- Hop through the path configurations:

while true do

    hopThroughConfigs(path,simJoints,false,dynModel)

    hopThroughConfigs(path,simJoints,true,dynModel)

end

end
```

Ανάλυση κώδικα 1

Όπως φαίνεται και παραπάνω ο κώδικας 1 έχει την τυπική δομή ενός τυπικού διασυνδεδεμένου script. Καθώς, περιλαμβάνει τις δομικές συναρτήσεις `Function sysCall_init ()`, `function sysCall_actuation ()`. Επιπλέον, στο εσωτερικό της συνάρτησης `Function sysCall_init ()` εμπεριέχεται ο ορισμός της μεταβλητής `corout` που σχηματίζει μια (Coroutine) που εκτελεστεί για μια φορά στην αρχή της προσομοίωσης.

Με τον όρο `Coroutines` στην γλώσσα `Lua`, χαρακτηρίζεται μια συλλογικότητα που δίνει την δυνατότητα εκτέλεσης σε δύο ή παραπάνω μεθόδους με ελεγχόμενο τρόπο. Μέσω εφαρμογής των `Coroutines`, κάθε χρονική στιγμή εκτελείται μόνο μια τέτοια ρουτίνα (Coroutine) και παύει η εκτέλεση της μόνο όταν ζητηθεί η αναστολή της. Για παράδειγμα, σε περίπτωση που υπάρχουν δύο μέθοδοι, η μια μέθοδο αφορά τον κύριο πρόγραμμα και η δεύτερη την μέθοδο `coroutine`. Καλώντας την `coroutine` χρησιμοποιώντας την συνάρτηση συνέχειας, αρχίζει την εκτέλεση της και όταν καλείται η συνάρτηση παύσης, αναστέλλεται η εκτέλεση της. Αντίστοιχα, η ίδια ρουτίνα (coroutine) μπορεί να συνεχιστεί με την κλήση διαφορετικής συνάρτησης για να συνεχίσει την λειτουργία από το σημείο αναστολής της και η συγκεκριμένη διαδικασία μπορεί να λειτουργεί ως την ολοκλήρωση της ρουτίνας (coroutine)[`Coroutine Basics`].

Στην συνάρτηση `function sysCall_actuation()` περιλαμβάνεται η διαχείριση της ρουτίνας (coroutine) της διαδικασίας προσομοίωσης. Έπειτα, ακολουθεί η συνάρτηση (function) `hopThroughConfigs(path,joints,reverse,dynModel)` που περιλαμβάνει την συνάρτηση `sim.setThreadAutomaticSwitch()` που έχει ρόλο την προσωρινή απαγόρευση διακοπής της τροχιάς του νήματος που ακολουθεί το ρομπότ κατά την διαδικασία βαφής. Με εξαίρεση την εναλλαγή τροχιάς. Έτσι, δημιουργείται μια συνεχής κίνηση του ρομπότ χωρίς διακοπές.

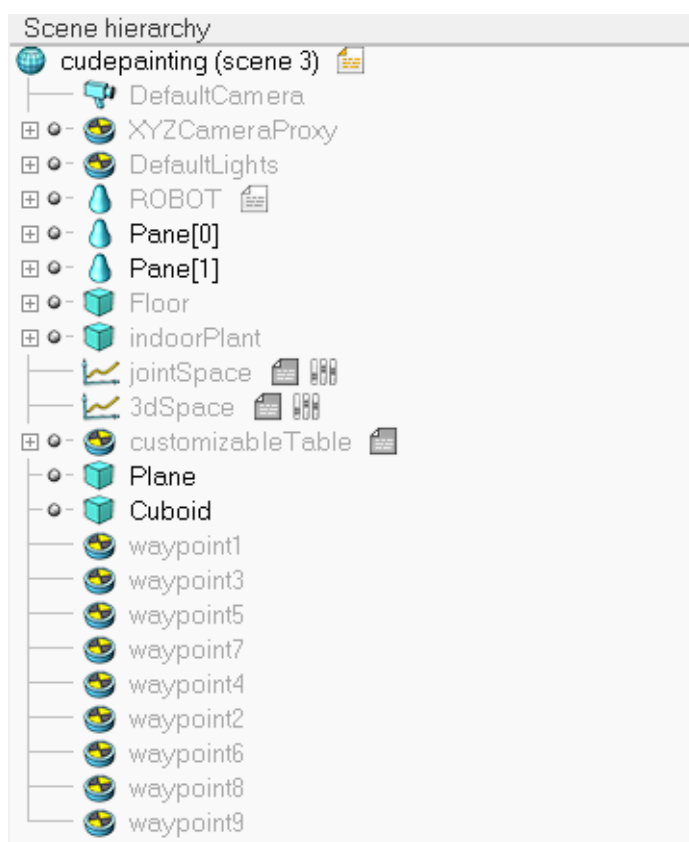
Στην περίπτωση του δυναμικού μοντέλου μέσω της `sim.setJointTargetPosition` και της διάταξης του βραχίονα στο χώρο, ορίζεται η γραμμική/γωνιακή θέση στόχου της κάθε άρθρωσης αντίστοιχα. Αντίθετα, στην κινηματική λειτουργία, η κάθε άρθρωση κινείται με ένα ορισμένο προφίλ που είναι κατάλληλο για τις μέγιστες τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών που επιλέγονται με την βοήθεια της συνάρτησης `sim.setJointPosition`, ορίζοντας την γραμμική/γωνιακή θέση κάποιας άρθρωσης, όπως φαίνεται στο αναλυτικό κώδικα που προαναφέρθηκε.

Η συνάρτηση `sim.switchThread` επιτρέπει την ρητή διακοπή της εκτέλεσης και εναλλάσσει τον έλεγχο πίσω στον προσομοιωτή για την αντιστροφή της τροχιάς. Στην συνέχεια χρησιμοποιείται πάλι η συνάρτηση `sim.setThreadAutomaticSwitch()` για την συνεχή κίνηση.

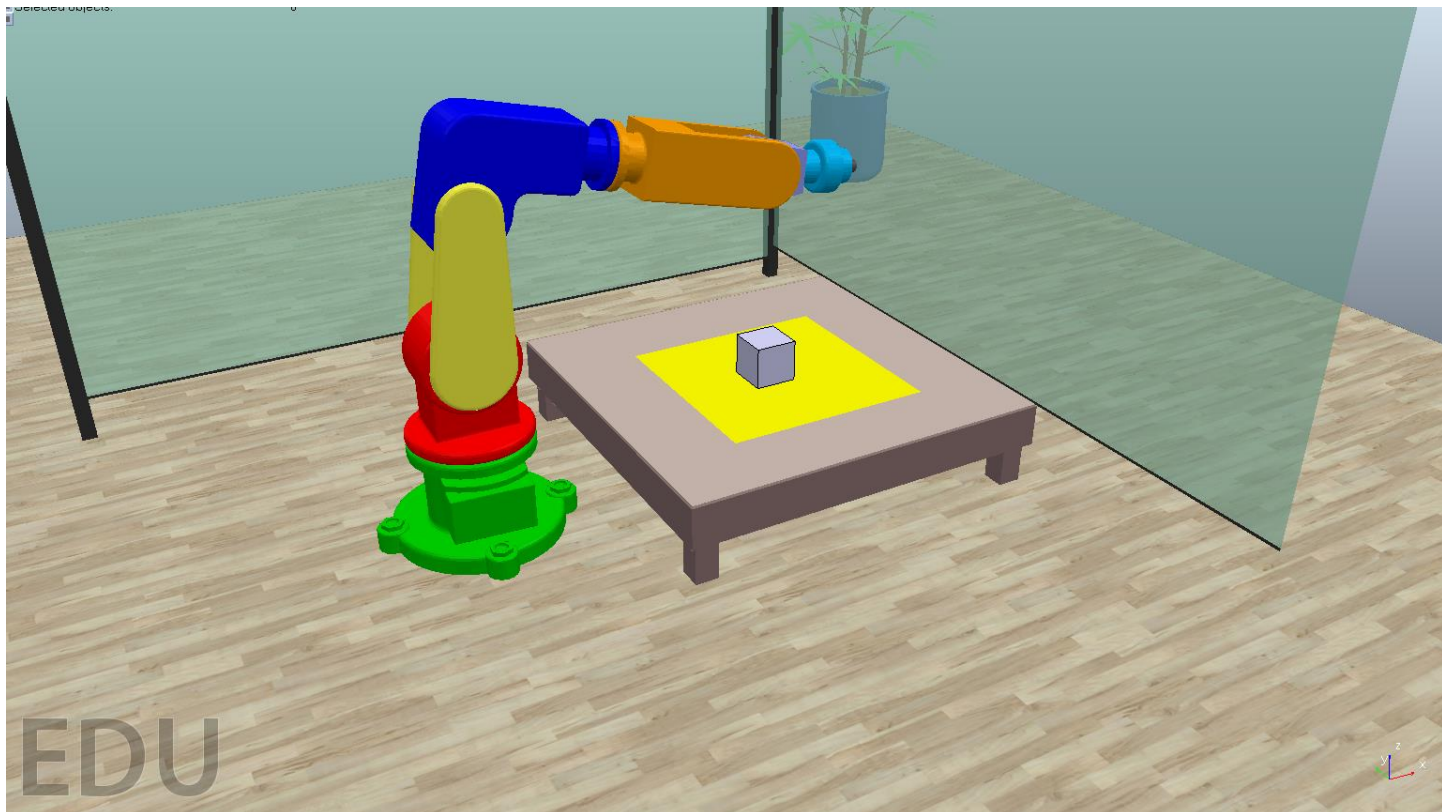
Στην συνάρτηση `coroutineMain()`, με την υποστήριξη της συνάρτησης `sim.getObject` γίνεται η ανάκτηση χειρισμού (όσο αφορά την τοποθεσία και τον προσανατολισμό), με βάση την διαδρομή που ακολουθεί και το ψευδώνυμο του αντίστοιχου στοιχείου (Βάση, άκρο εργασίας, θέση στόχου και των αρθρώσεων). Έπειτα, υλοποιείται το `ik` περιβάλλον με τις αντίστοιχες `ik` ομάδες.

Προσομοίωση 2/ Διεργασία βαφής 2

Στην δεύτερη προσομοίωση εξίσου γίνεται μια διεργασία βαφής, ωστόσο η τροχιά που ακολουθεί ο βραχίονας σε αυτή τη περίπτωση είναι διαφορετική και σε αντίθεση με την προηγούμενη είναι σύνθετη. Στην προσομοίωση ο βραχίονας μετατοπίζεται σε διαφορετικές θέσεις με διαφορετικούς προσανατολισμούς στο χώρο με στόχο την βαφή ενός αντικειμένου σε σχήμα κύβου, ψεκάζοντας τις πέντε ελεύθερες επιφάνειες του. Επίσης, κατά την κίνηση του βραχίονα γίνεται γραφική απεικόνιση της ταχύτητας των αρθρώσεων και του αποληκτήριο επενεργητή (άκρου εργασίας) στους τρεις άξονες XYZ συναρτήσει του χρόνου.

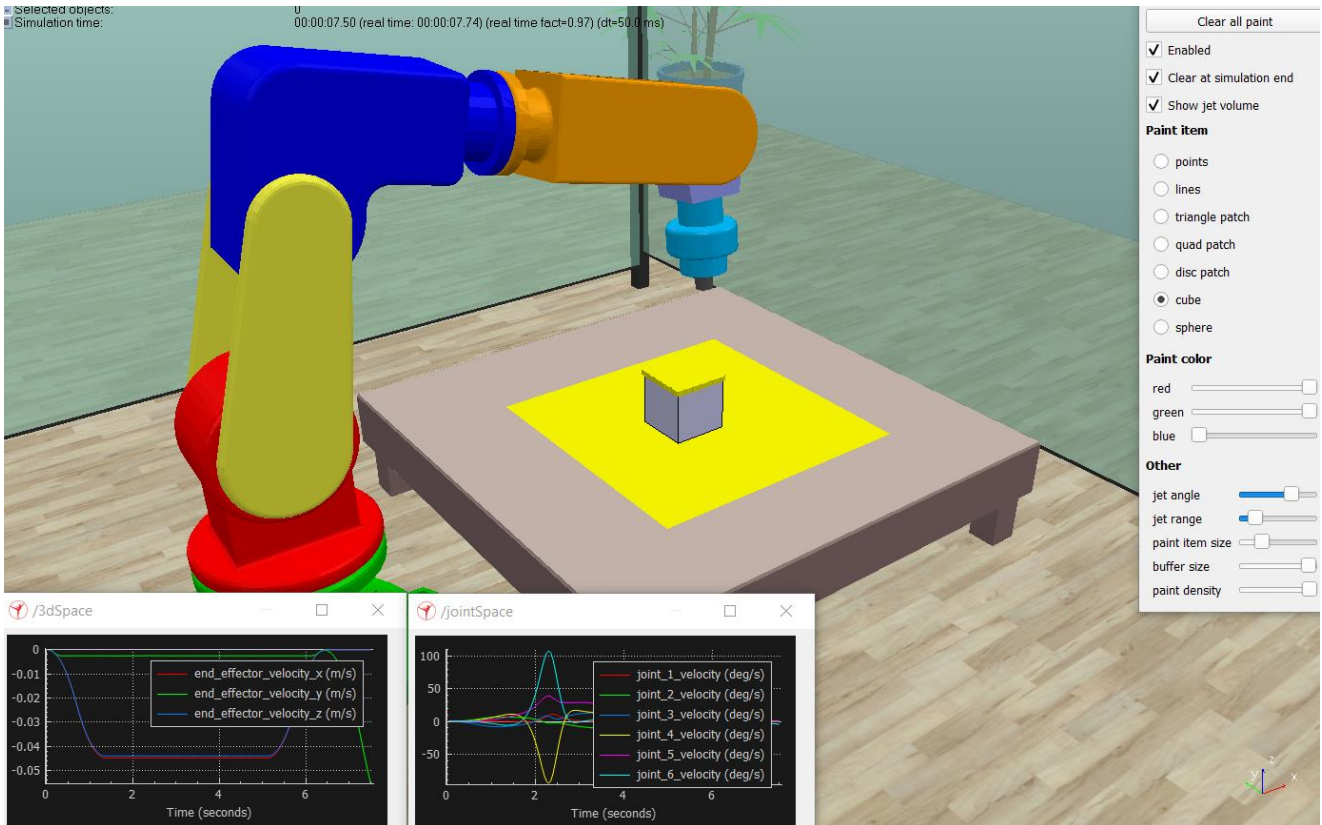


Σχήμα 123: Η ταξινόμηση των στοιχείων που απαρτίζουν την σκηνή 2.

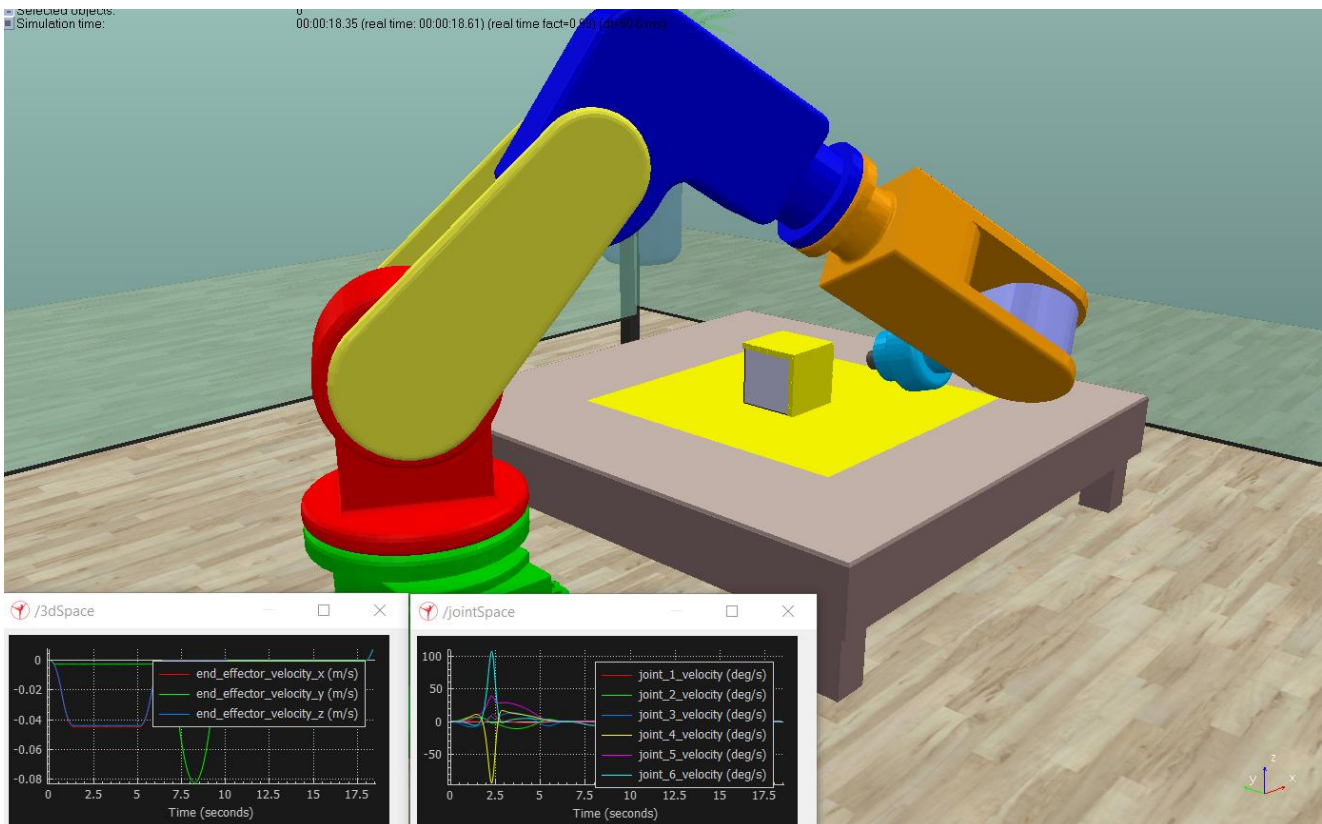


Σχήμα 124: Ο βραχίονας σε αρχική θέση πριν την έναρξη της διεργασίας .

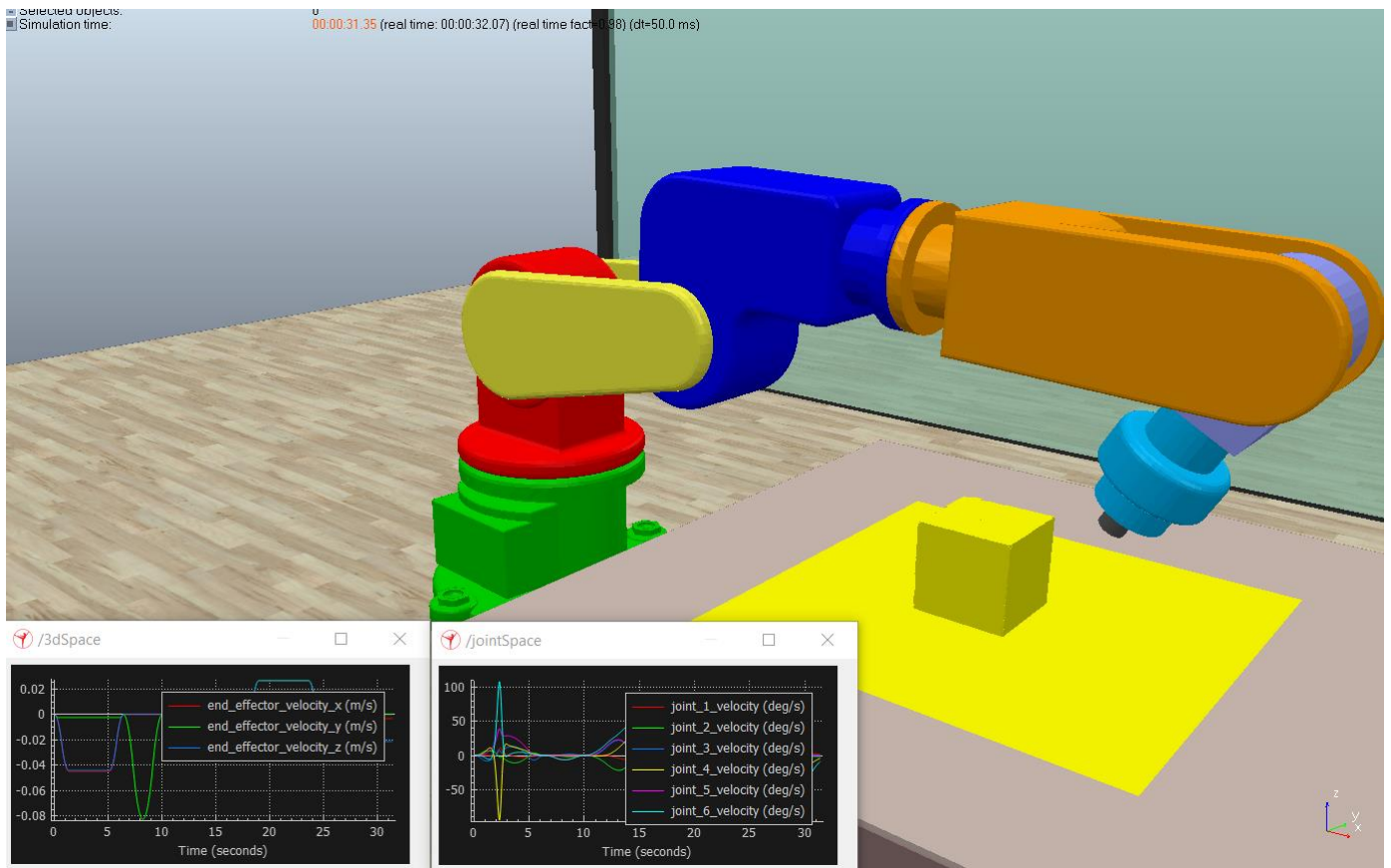
Ο βραχίονας αρχικά για προ ρύθμιση προσανατολίζεται σε ένα πλαίσιο αναφοράς με το κατάλληλο προσανατολισμό για να προσεγγίσει στη συνέχεια σε ύψος την πρώτη πλευρά του κύβου. Στη συνέχεια ακολουθεί την προσέγγιση των πολλαπλών πλαισίων (waypoint x) που ορίζονται στο χώρο, με σκοπό τον προσανατολισμό του ακροφυσίου ψεκασμού για την βαφή.



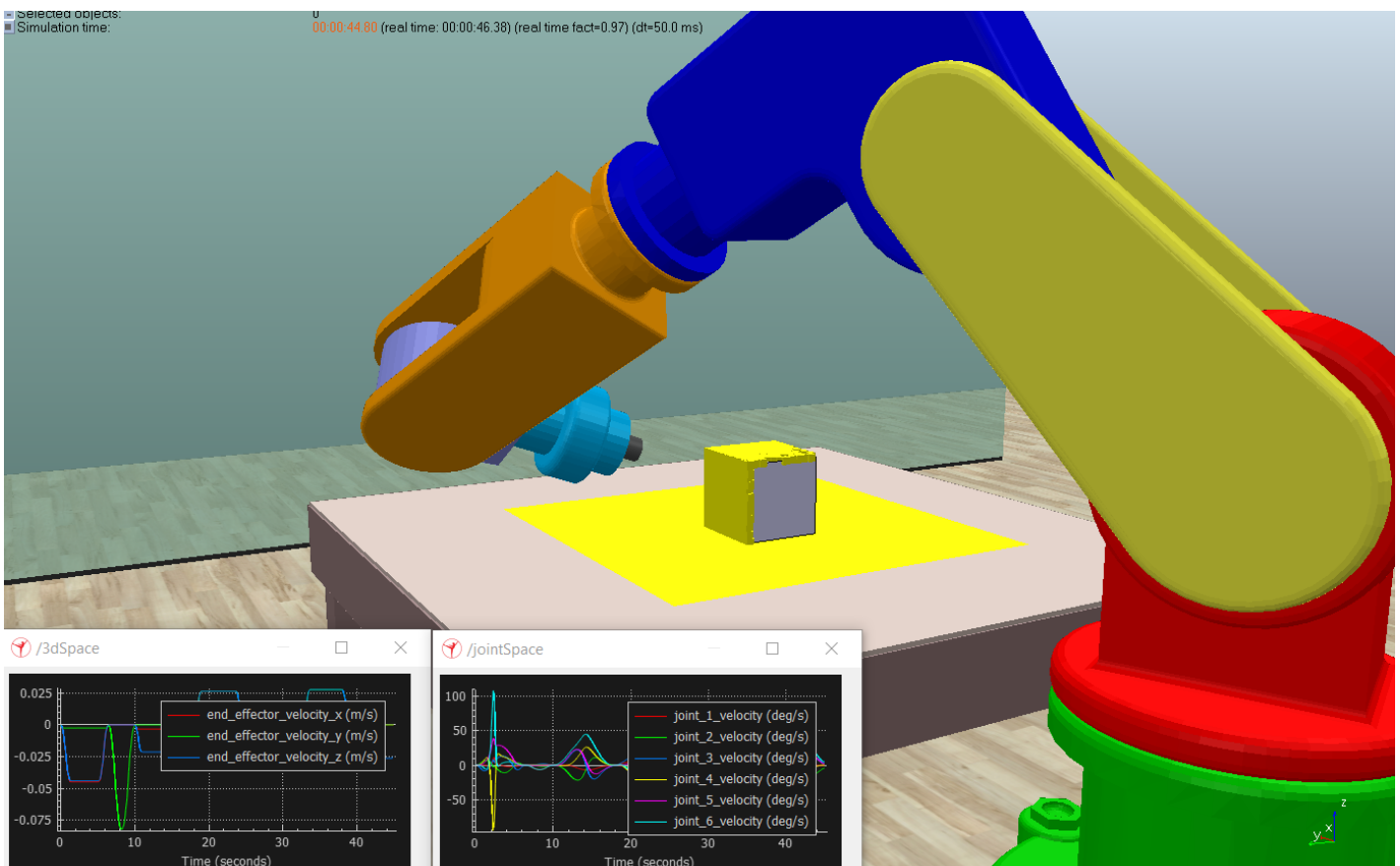
Σχήμα 126: Ο βραχίονας μετά από την βαφή της πρώτης πλευράς του κύβου και η γραφική απεικόνιση της ταχύτητας του ακροφυσίου και των αρθρώσεων συναρτήσει του χρόνου.



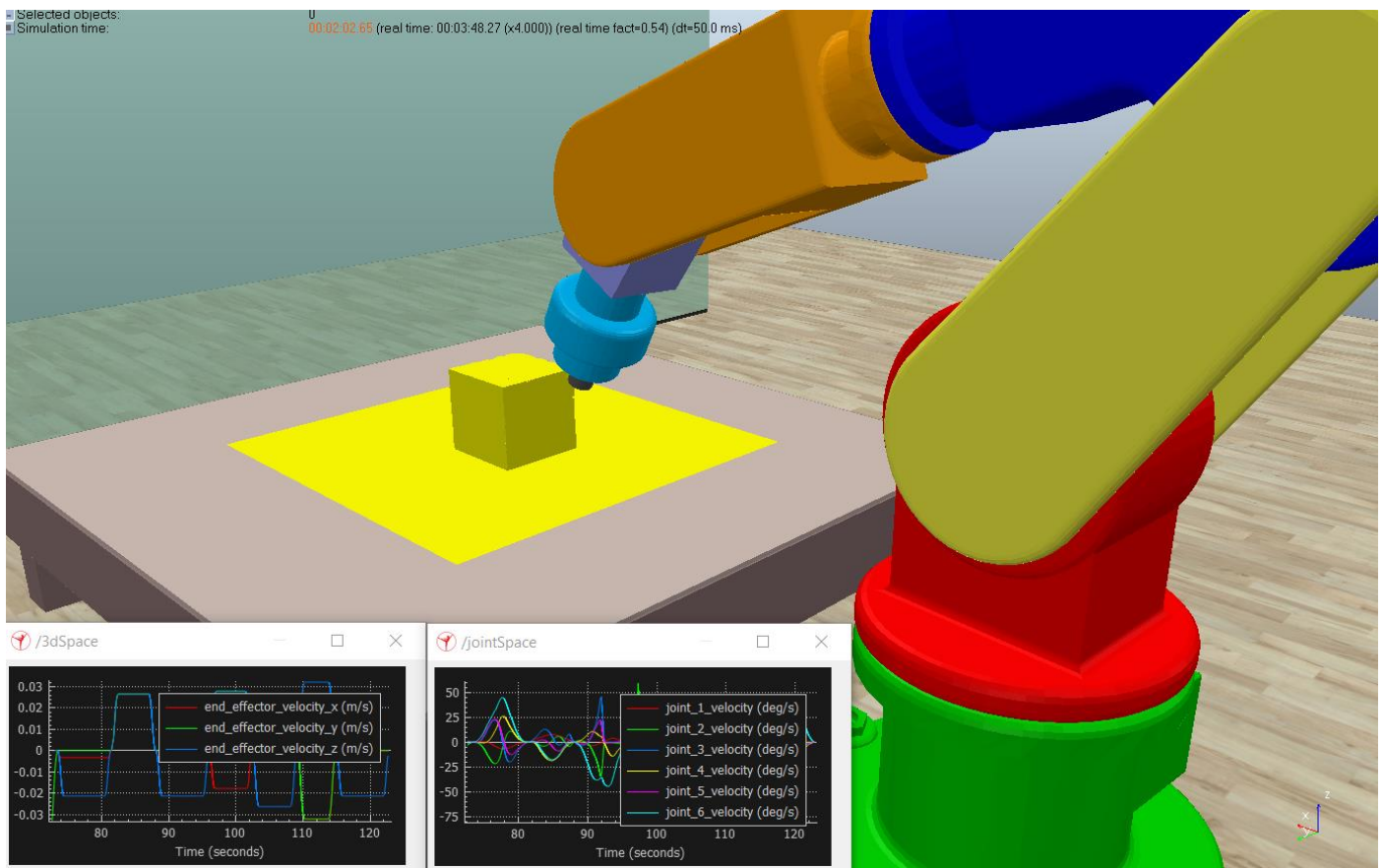
Σχήμα 125: Ο βραχίονας μετά από την βαφή της δεύτερης πλευράς του κύβου



Σχήμα 128: Ο ρομποτικός βραχίονας έπειτα από την βαφή της τρίτης πλευράς του κύβου.



Σχήμα 127: Η βαφή της τέταρτης πλευράς του κύβου.



Σχήμα 129: Η βαφή της τελευταίας πλευράς του κύβου.

Προγραμματισμός διεργασίας 2

Ο κώδικας 2 σε αναλυτική μορφή:

```
function sysCall_init()

    corout=coroutine.create(coroutineMain)

    -- Take a few handles from the dynamic robot:

    simBase=sim.getObject('.')

    simTip=sim.getObject('./tip')
```

```
simTarget=sim.getObject('./target')

simJoints={}

for i=1,6,1 do

    simJoints[i]=sim.getObject('./joint',{index=i-1})

end

-- Prepare an ik group, using the convenience function 'simIK.addIkElementFromScene':

ikEnv=simIK.createEnvironment()

ikGroup=simIK.createIkGroup(ikEnv)

simIK.setIkGroupCalculation(ikEnv,ikGroup,simIK.method_damped_least_squares,0.01,10)

local
ikElement=simIK.addIkElementFromScene(ikEnv,ikGroup,simBase,simTip,simTarget,simIK.constraint_pose)

simIK.setIkElementPrecision(ikEnv,ikGroup,ikElement,{0.0005,0.005*math.pi/180})

-- Graphs:

graph3dSpace=sim.getObject('/3dSpace')

graphJointSpace=sim.getObject('/jointSpace')

endEffectorVelX=sim.addGraphStream(graph3dSpace,'end effector velocity x','m/s',0,{1,0,0})

endEffectorVelY=sim.addGraphStream(graph3dSpace,'end effector velocity y','m/s',0,{0,1,0})

endEffectorVelZ=sim.addGraphStream(graph3dSpace,'end effector velocity z','m/s',0,{0,0.5,1})

jointVels={}

jointVels[1]=sim.addGraphStream(graphJointSpace,'joint 1 velocity','deg/s',0,{1,0,0})
```

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

```
jointVels[2]=sim.addGraphStream(graphJointSpace,'joint 2 velocity','deg/s',0,{0,1,0})

jointVels[3]=sim.addGraphStream(graphJointSpace,'joint 3 velocity','deg/s',0,{0,0.5,1})

jointVels[4]=sim.addGraphStream(graphJointSpace,'joint 4 velocity','deg/s',0,{1,1,0})

jointVels[5]=sim.addGraphStream(graphJointSpace,'joint 5 velocity','deg/s',0,{1,0,1})

jointVels[6]=sim.addGraphStream(graphJointSpace,'joint 6 velocity','deg/s',0,{0,1,1})

end

function sysCall_sensing()

    local vel=sim.getObjectVelocity(simTip)

    sim.setGraphStreamValue(graph3dSpace,endEffectorVelX,vel[1])

    sim.setGraphStreamValue(graph3dSpace,endEffectorVelY,vel[2])

    sim.setGraphStreamValue(graph3dSpace,endEffectorVelZ,vel[3])

    for i=1,#simJoints,1 do

sim.setGraphStreamValue(graphJointSpace,jointVels[i],180*sim.getJointVelocity(simJoints[i])/math
.pi)

        end

    end

end

function sysCall_actuation()

    if coroutine.status(corout)~='dead' then

        local ok,errorMsg=coroutine.resume(corout)

        if errorMsg then

end
```

```
error(debug.traceback(corout,errorMsg),2)

end

end

end

function moveToPoseCallback(pose,velocity,accel,auxData)

sim.setObjectPose(auxData.target,-1,pose)

simIK.applyIkEnvironmentToScene(auxData.ikEnv,auxData.ikGroup)

end

function moveToPose_vialK(maxVelocity,maxAcceleration,maxJerk,targetPose,auxData)

local currentPose=sim.getObjectPose(auxData.tip,-1)

return sim.moveToPose(-
1,currentPose,maxVelocity,maxAcceleration,maxJerk,targetPose,moveToPoseCallback,auxData,ni
l)

end

function moveToConfigCallback(config,velocity,accel,auxData)

for i=1,#auxData.joints,1 do

local jh=auxData.joints[i]

if sim.getJointMode(jh)==sim.jointmode_force and sim.isDynamicallyEnabled(jh) then

sim.setJointTargetPosition(jh,config[i])

else
```



```
sim.setJointPosition(jh,config[i])

    end

end

end

function moveToConfig_viaFK(maxVelocity,maxAcceleration,maxJerk,goalConfig,auxData)

    local startConfig={}

    for i=1,#auxData.joints,1 do

        startConfig[i]=sim.getJointPosition(auxData.joints[i])

    end

    sim.moveToConfig(-
1,startConfig,nil,nil,maxVelocity,maxAcceleration,maxJerk,goalConfig,nil,moveToConfigCallback,a
uxData,nil)

end

function coroutineMain()

    -- IK movement data:

    local maxIkVel={0.45,0.45,0.45,4.5} -- vx,vy,vz in m/s, Vtheta is rad/s

    local maxIkAccel={0.13,0.13,0.13,1.24} -- ax,ay,az in m/s^2, Atheta is rad/s^2

    local maxIkJerk={0.1,0.1,0.1,0.2} -- is ignored (i.e. infinite) with RML type 2

    local w1=sim.getObjectPose(sim.getObject('/waypoint1'),-1)

    local w2=sim.getObjectPose(sim.getObject('/waypoint2'),-1)

    local w3=sim.getObjectPose(sim.getObject('/waypoint3'),-1)
```

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

```
local w4=sim.getObjectPose(sim.getObject('/waypoint4'),-1)
```

```
local w5=sim.getObjectPose(sim.getObject('/waypoint5'),-1)
```

```
local w6=sim.getObjectPose(sim.getObject('/waypoint6'),-1)
```

```
local w7=sim.getObjectPose(sim.getObject('/waypoint7'),-1)
```

```
local w8=sim.getObjectPose(sim.getObject('/waypoint8'),-1)
```

```
local w9=sim.getObjectPose(sim.getObject('/waypoint9'),-1)
```

```
-- FK movement data:
```

```
local initConf={}
```

```
local maxConfVel={}
```

```
local maxConfAccel={}
```

```
local maxConfJerk={}
```

```
for i=1,#simJoints,1 do
```

```
    initConf[i]=sim.getJointPosition(simJoints[i])
```

```
    maxConfVel[i]=45*math.pi/180
```

```
    maxConfAccel[i]=1.15
```

```
    maxConfJerk[i]=0.4
```

```
end
```

```
-- Execute the movement here:
```

```
local data={}
```

```
data.ikEnv=ikEnv
```

```
data.ikGroup=ikGroup
```

```
data.tip=simTip

data.target=simTarget

data.joints=simJoints

while true do

    moveToConfig_viaFK(maxConfVel,maxConfAccel,maxConfJerk,initConf,data)

    moveToPose_vialK(maxIkVel,maxIkAccel,maxIkJerk,w1,data)

    moveToPose_vialK(maxIkVel,maxIkAccel,maxIkJerk,w2,data)

    moveToPose_vialK(maxIkVel,maxIkAccel,maxIkJerk,w3,data)

    moveToPose_vialK(maxIkVel,maxIkAccel,maxIkJerk,w4,data)

    moveToPose_vialK(maxIkVel,maxIkAccel,maxIkJerk,w5,data)

    moveToPose_vialK(maxIkVel,maxIkAccel,maxIkJerk,w6,data)

    moveToPose_vialK(maxIkVel,maxIkAccel,maxIkJerk,w7,data)

    moveToPose_vialK(maxIkVel,maxIkAccel,maxIkJerk,w8,data)

    moveToPose_vialK(maxIkVel,maxIkAccel,maxIkJerk,w9,data)

end

end
```

Ανάλυση κώδικα 2

Πρώτα, εντός της συνάρτησης `sysCall_init()` προκαθορίζονται ορισμένα τμήματα του δυναμικού μοντέλου του βραχίονα. Δημιουργούνται τις `ik` ομάδες με την υποστήριξη της συνάρτησης `simIK.addIkElementFromScene`. Έπειτα, υλοποιούνται τα γραφήματα στο γραφικό περιβάλλον της προσομοίωσης.

Στην συνάρτηση `sysCall_sensing()`, πραγματοποιείται ο υπολογισμός της ταχύτητας και η γραφική της απεικόνιση σε συνάρτηση με το χρόνο. Στην συνάρτηση `moveToPoseCallback(pose,velocity,accel,auxData)` ορίζεται η στάση του αντικειμένου με την `sim.setObjectPose` και υπολογίζεται - εφαρμόζεται η αντίστροφη κινηματική με τις αντίστοιχες τιμές της σκηνής μέσω της `simIK.applyIkEnvironmentToScene()`.

Η μετακίνηση γίνεται βάση της συνάρτησης :

```
function moveToPose_viaIK(maxVelocity,maxAcceleration,maxJerk,targetPose,auxData)
```

Και με την βοήθεια της ευθείας κινηματικής με :

```
function moveToConfig_viaFK(maxVelocity,maxAcceleration,maxJerk,goalConfig,auxData)
```

Μέσα στην συνάρτηση `coroutineMain()` περιλαμβάνονται τα δεδομένα για την αντίστροφη και ευθεία κινηματική αντίστοιχα.

Τέλος, με την επίλυση της αντίστροφης κινηματικής γίνεται η μετακίνηση στις ζητούμενες θέσεις των αντίστοιχων πλαισίων w_n , έχοντας τα απαιτούμενες πληροφορίες για τα ζητούμενα πλαίσια.

6.4 Υλικό κατασκευής βραχίονα για την εφαρμογή βαφής

Η επιλογή του υλικού κατασκευής του ρομπότ εξαρτάται από πολλαπλές παραμέτρους, όπως σχεδιασμός, η εργασία που εκτελείται, η ταχύτητα υλοποίησης, το περιβάλλον της εφαρμογής, τα επιβλαβή υλικά που εμπλέκονται, μήκος προσέγγισης σημείου εργασίας, η τροχιά της διαδρομής προσέγγισης, ποσοστό συμμετοχής ανθρώπων στη διαδικασία, ικανότητα ελέγχου και αποτελέσματα αστοχιών (Nairutya Patel, 2020).

Η πλειονότητα των ρομπότ κατασκευάζονται από κοινά υλικά. Άλλα ρομπότ με ειδικές εφαρμογές, όπως διαστημική εξερεύνηση ή εφαρμογές που απαιτούν υψηλή τεχνολογία ενδέχεται να χρησιμοποιούν μέταλλο τιτανίου και δομικά συνθετικά ινών άνθρακα. Το περιβάλλον εργασίας και η ζητούμενη αντοχή έχουν σημαντική επιρροή στην επιλογή του υλικού κατασκευής του ρομπότ (Nairutya Patel, 2020).

Ειδικότερα, για τους βραχίονες και τις βάσεις των ρομπότ χρησιμοποιούνται υλικά, όπως χάλυβας, χυτοσίδηρος και αλουμίνιο.

Κατάλληλα υλικά για ρομπότ εφαρμογής βαφής

Τα ρομπότ βαφής έχουν συνήθως διαφορετική δομή υλικών για κάθε μέλος. Επίσης, ο βραχίονας του ρομπότ θα πρέπει να έχει μικρότερο βάρος σε σχέση με τα υπόλοιπα τμήματα. Επομένως, το συνολικό βάρος του ρομπότ μπορεί να μειωθεί και κατά συνέπεια η μετακίνηση του βραχίονα να είναι ευκολότερη. Ομοίως, η βάση του βραχίονα χρειάζεται να διαθέτει υψηλή αντοχή ώστε να στηρίξει το συνολικό βάρος του βραχίονα και να απορροφά τους κραδασμούς (Nairutya Patel, 2020).

Το πάνω μέρος του βραχίονα (upper arm) μπορεί να κατασκευαστεί από aluminum alloy, ώστε να μειωθεί το βάρος και η ροπή αδράνειας κάθε εξαρτήματος, βελτιώνοντας την σταθερότητα και την δυναμική του βραχίονα κατά την μετακίνηση, με την βάση να συγκρατεί όλο το βάρος του ρομπότ απαιτώντας υψηλή ακαμψία και αντοχή. Έτσι, ο δομικός χάλυβας αποτελεί κατάλληλο υλικό (Nairutya Patel, 2020).

Συμπεράσματα και σχόλια

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διπλωματικής σχεδιάστηκε ένας ρομποτικός βραχίονας με την βοήθεια του σχεδιαστικού προγράμματος SOLIDWORKS, όπου έγινε και η μοντελοποίηση του ως συναρμολόγημα. Έπειτα, ακολούθησε μια προσομοίωση της κινηματικής συμπεριφοράς του μέσω της λειτουργίας αντίστροφης κινηματικής του προσομοιωτή CoppeliaSim, ορίζοντας το σημείο στόχο που πρέπει να προσεγγιστεί στο χώρο. Επιπλέον, υλοποιήθηκαν δύο προσομοιώσεις για διαδικασίες βαφής με την υποστήριξη του ρομποτικού βραχίονα. Οι προσομοιώσεις έγιναν στον προσομοιωτή CoppeliaSim και ο προγραμματισμός έγινε σε γλώσσα Lua σε μορφή script που ενσωματώθηκε στον βραχίονα εντός του περιβάλλον προσομοίωσης.

Ο σκοπός της διπλωματικής είναι ο σχεδιασμός και η μοντελοποίηση ενός ρομποτικού βραχίονα βιομηχανικού τύπου με έξι βαθμούς ελευθερίας βασισμένο σε πραγματικό μοντέλο (IRB ABB 120) και η προσομοίωση του στην κινηματική λειτουργία που διαθέτει ο προσομοιωτής CoppeliaSim για μελέτη προσέγγισης τυχαίου σημείου και τον προγραμματισμό της αντίστροφης κινηματικής. Στη συνέχεια ο βραχίονας προσομοιάζεται σε δύο διαδικασίες βαφής με διαφορετικές τροχιές.

Ο κώδικας της κάθε προσομοίωσης του ρομπότ αναλύεται με την υποστήριξη του API που διαθέτει αναφορικά τις λειτουργίες της κάθε συνάρτησης που χρησιμοποιείται στο CoppeliaSim. Έτσι, αναλύονται οι λειτουργίες και οι είσοδοι των χρησιμοποιούμενων συναρτήσεων. Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται σχηματικά η συσχέτιση μεταξύ των στοιχείων της σκηνης προσομοίωσης και αναφέρεται η ρύθμιση των στοιχείων που παίρνουν μέρος στην διαδικασία. Για παράδειγμα, το ακροφύσιο ψεκασμού βάση δομής ιεραρχίας είναι υπό στοιχείο του τελευταίου άκρου του βραχίονα και στο σχήμα 121 φαίνονται οι ρυθμίσεις λειτουργίας του.

Για τις δύο προσομοιώσεις βαφής χρησιμοποιήθηκε το ακροφύσιο βαφής χωρίς κάποια μεταβολή στο προκαθορισμένο script που ενσωματώνεται για την λειτουργία του ψεκασμού. Για αυτό η διαδικασία ψεκασμού γίνεται με συνεχή τρόπο, το οποίο για βελτίωση μπορεί να τροποποιηθεί κατάλληλα στον κώδικα ώστε ο ψεκασμός να γίνει μόνο κατά την προσέγγιση της ζητούμενης επιφάνειας αναφορικά με την δεύτερη προσομοίωση. Άλλη επιπρόσθετη βελτίωση που μπορεί να γίνει αφορά την τροχιά κίνησης του βραχίονα κατά την δεύτερη προσομοίωση, καθώς με την αύξηση των πλαισίων αναφοράς σε πλήθος η κίνηση του βραχίονα μπορεί να γίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια ελέγχου. Επίσης, στις προσομοιώσεις για να αντιπροσωπεύουν καλύτερα την πραγματικότητα μπορούν να χρησιμοποιούνται αντικείμενα με βιομηχανικές εφαρμογές για την βαφή τους.

Λόγω της φυσικής που διαθέτει ο προσομοιωτής CoppeliaSim παρουσιάζεται μια αδυναμία κατά την διαδικασία βαφής αντικειμένων, καθώς τα σώματα αδυνατούν να διατηρήσουν την βαφή. Ωστόσο, αυτό το ζήτημα δεν επηρεάζει την εκτελούμενη προσομοίωση και ο μοναδικός τρόπος για να διορθωθεί είναι να μεταβληθεί το χρώμα του αντικειμένου ως ιδιότητα. Στις προσομοιώσεις δεν επιλέγεται αυτή η λύση επειδή δεν είναι ρεαλιστική.

Με την ολοκλήρωση του πειραματικού μέρους φαίνεται ο τρόπος σχεδιασμού ενός ρομπότ βιομηχανικού τύπου για ορισμένες απαιτήσεις και ο τρόπος συνδεσμολογίας του ως συναρμολόγημα, περιγράφοντας το κάθε μέλος ξεχωριστά. Επίσης, παρουσιάζεται ο τρόπος επίλυσης του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος μέσω της λειτουργίας ik του CoppeliaSim στην εκτελούμενη προσομοίωση και γίνεται αναφορά στον τρόπο αύξησης της ακρίβειας χειρισμού του βραχίονα αξιοποιώντας την κινηματική ανάλυση. Επιπρόσθετα, γίνεται κατανοητός ο τρόπος προγραμματισμού του βραχίονα στο ψηφιακό περιβάλλον του προσομοιωτή.

Η ανάλυση του προσομοιωτή CoppeliaSim που πραγματοποιήθηκε αναφέρει τον τρόπο λειτουργίας και την κατάλληλη μέθοδο προσομοίωσης του ρομπότ. Αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα
μειονεκτήματα της ψηφιακής υλοποίησης σε σύγκριση με την συμβατική μέθοδο για ένα ρομπότ. Τέλος, παρουσιάζεται περιληπτικά ο τρόπος δημιουργίας και ελέγχου ενός ψηφιακού κλώνου με το CoppeliaSim.

Ως συνολική πορεία, η συγκεκριμένη μελέτη παρουσίασε μια αναλυτική επισκόπηση για το σχεδιασμό και την προσομοίωση ενός ρομποτικού βραχίονα εξετάζοντας το CoppeliaSim, δίνοντας περιθώριο για μελλοντικές επεκτάσεις για πιο σύνθετες προσομοιώσεις και περαιτέρω δομική ανάλυση για το χρησιμοποιημένο ρομπότ. Τέλος, η αυτή η μελέτη μπορεί να αποτελέσει βάση για την υλοποίηση και έλεγχο ενός ψηφιακού κλώνου με ένα πραγματικό ρομπότ.

Βιβλιογραφία - Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

[1] <https://pixabay.com/illustrations/cybernetics-robot-robotic-arm-4216899/>

B. Roth ,”Principle of Automation,” Future Directions in Manufacturing Technology, Based on the Unilever Research and Engineering Division Symposium held at port Sunlight ,April 1983 ,Published by Unilever Research ,UK.

R. Brooks, *Flesh and Machines* ,Pantheon Books, UK.

International Federation of Robotics, “Executive summary World Robotics 2016 Industrial Robots ” ,available at <http://www.ifr.org/industrial-robots/statistics/>

ABB, 2022. *ABB robots*. [Online]

Available at: <https://webshop.robotics.abb.com/us/catalog/product/view/id/165/s/articulated-robot-irb-1300-loading-and-unloading-p-11-r-0-9/category/3/>

[Accessed 14 April 2022].

Asada, H., 1984. Dynamic Analysis and Design of Robot Manipulators Using Inertia Ellipsoids. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics*, March.

Ashby, M., 2020. *GrantaDesign*. [Online]

Available at: <https://www.grantadesign.com/education/students/charts/>

[Accessed 23 April 2022].

Bonev, I. A. & Zlatanov, D., 2001. The mystery of the singular SNU translational parallel robot. *ParalleMIC Reviews*, Volume 4.

Brooks, R., 2002. *Flesh and Machines*. *Pantheon Books*.

Castor, M., 2020. *Control Engineering*. [Online]

Available at: <https://www.controleng.com/articles/the-need-for-robotic-offline-programming-in-a-covid-19-world/>

[Accessed 2 April 2022].

Claudio , U., Juan, C. & José , P., 2016. Design, construction and control of a SCARA manipulator with 6 degrees of freedom. *Journal of Applied Research and Technology. JART*, 14(6), p. 9.

CRAIG, J. J., 2020. *ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ ,Μηχανική & Αυτόματος Έλεγχος*. 4th ed. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ : ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ.

- Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα*
D., W., 1979. Fundamental Knowledge of Gear Noise - A Survey. *Proceedings of the Conference on Noise and Vibrations of Engines and Transmissions*.
- Dockter, D., 2021. *energid*. [Online]
Available at: <https://www.energid.com/blog/the-digital-twin-and-real-time-adaptive-robot-control>
[Accessed 22 March 2022].
- Fang, Y. & Tsai, L. W., 2003. Feasible motion solutions for serial manipulators at singular configurations. *Journal of Mechanical Design*, Volume 1, pp. 61-69.
- Fanny, F., Amedeo, R., Vincenzo, L. & Villani, L., 2014. Human Motion Mapping to a Robot Arm with Redundancy Resolution. *ResearchGate*, p. July.
- GRANTA, A. I., 2020. *GrantaDesign*. [Online]
Available at: <https://www.grantadesign.com/education/students/charts/>
[Accessed 25 April 2022].
- Gurudu Rishank Reddy, V. K. P. E., 2016. *SlideShare*. [Online]
Available at: <https://www.slideshare.net/KrishnaPrashanthEran/guruduerankimaster-thesis-2016>
[Accessed 23 April 2022].
- Hollerbach, J., 1984. Optimum Kinematic Design for a Seven Degree of Freedom Manipulator. *Proceedings of the 2nd International Symposium of Robotics Research*, August.
- Hunt, K., 1978. *Kinematic Geometry of Mechanisms*. Cambridge: Cambridge University Press.
- J. Trevelyan, P. K. a. M. O., 1984. Motion Control for a Sheep Shearing Robot. *The 1st International Symposium of Robotics Research*.
- J., C. J., 2005. *Introduction to Robotics Mechanics and Control*. 3rd ed. New Jersey: Horton, M.J..
- J., S., 1977. *Mechanical Engineering Design*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill.
- Jazar, R. N., 2010. Theory of applied robotics: kinematics, dynamics, and control. *Springer Science & Business Media*.
- Kazim, R., Tauseef, A. K. & Naseem, A., 2018. Kinematic analysis and geometrical improvement of an industrial. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, p. 6.

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

Khaled M, B.-G., Anthony A, M. & Rodney G., R., 2014. A Kinematic Analysis and Evaluation of Planar Robots Designed From Optimally Fault-Tolerant Jacobians. *IEEE Transactions on Robotics*, 30(2), p. 8.

Kuka, n.d. *Kuka*. [Online]

Available at: <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/industrial-robots/kr-700-pa>
[Accessed 2 April 2022].

M. Leu, V. D. a. K. W., 1985. An Analytical and Experimental Study of the Stiffness of Robot Manipulators with Parallel Mechanisms. *Robotics and Manufacturing Automation*.

Naeini, F. P. -, 1988. *Feedback Control Dynamic Systems*. s.l.:Addison-Wesley.

Nairutya Patel, R. S., 2020. STUDY OF MATERIAL CHARACTERISTICS FOR EFFICIENT DESIGN OF SPRAY PAINTING ROBOT. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 07(03).

P. Marchal, J. C. a. J. D., 1981. *SelfAdaptive ArcWelding Operation by Means of an Automatic Joint Following System, Proceedings of the 4th Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators*. Zaburów: s.n.

Pandilov, Z. & Dukovski , V., 2014. Comparison of the characteristics between serial and parallel robots.. *Acta Technica Corviniensis-Bulletin of Engineering* , 1(143).

Reidy, K. W. a. J., 1986. A Study of Kinematically Redundant Manipulator Structure. *Proceedings of the IEEE Robotics and Automation Conference*, April.

Roshiem, M., 1988. Wrists. *The International Encyclopedia of Robotics*.

Ross, L., Masterson, J. & Towers, R., 2011. Robotics: Theory and Industrial Application. *GoodheartWillcox*.

KUTS, V., CHEREZOVA, N., SARKANS, M., OTTO, T., 2020. DIGITAL TWIN: INDUSTRIAL ROBOT KINEMATIC MODEL INTEGRATION TO THE VIRTUAL REALITY ENVIRONMENT. *Journal of Machine Engineering*. (20) 53-64.

Roth, B., 1983. Principle of Automation. *Future Directions in Manufacturing Technology*.

Rowe, W., 1986. Robotics Technical Directory. *Instrument Society of America*.

Κινηματική ανάλυση, σχεδιασμός και εφαρμογές ψηφιακού διδύμου για ρομποτικό βραχίονα

Szabo, R., 2004. Topological navigation of simulated robots using occupancy grid. *Rev. Int. J. Adv. Rob. Syst*, 1(4).

Tarun, P. S., Dr., P. S. & Dr. , . S. C., 2017. Forward and Inverse Kinematic Analysis of Robotic Manipulators. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 04(02), p. 11.

Tsai, L., 1999. Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators. *John Wiley & Sons*.

Volz, K., 2018. *Design Robotics Robotic Vision for Mass Customisation Manufacturing*. [Online] Available at: <https://designrobotics.net/2018/03/14/robotic-arms-in-manufacturing/> [Accessed 2 April 2022].

Waldron, K., 1988. Design of Arms. *The International Encyclopedia of Robotics*.

Waldron, R. V. & K., 1986. Geometric Optimization of Manipulator Structures for Working Volume and Dexterity. *International Journal of Robotics Research*, 5(2).

Yasar, S. A. & Korkut, I., 2016. DESIGN AND KINEMATIC ANALYSIS OF A RRRP ROBOT ARM. *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management*, 3(6), p. 4.

Yoshikawa, T., 1985. Manipulability of Robotic Mechanisms. *The International journal of Robotics Research*, 4(2).

Youcef-Toumi, H. A. a. K., 1987. *Design of Direct Drive Manipulators*. Cambridge: MIT Press.

ΔΟΥΛΓΕΡΗ, Ζ., 2007. *ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΗ, ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΘΡΩΤΩΝ ΒΡΑΧΙΟΝΩΝ*. ΑΘΗΝΑ: s.n.

ΣΤΕΡΓΙΟΥ, Ι. Κ. & ΣΤΕΡΓΙΟΥ, Κ. Ι., 2002. *ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΗΧΑΝΩΝ ΙΙ ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΚΙΝΗΣΗΣ*. ΑΘΗΝΑ: ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΕΚΔΟΤΙΚΗ.

Zlajpah L., 2008. Simulation in robotics. *ScienceDirect, Mathematics and Computers in Simulation* 79 (2008) 879–897.

CoppeliaSim-Wikiwand/Wikipedia

Available at: <https://www.wikiwand.com/en/CoppeliaSim>

[Accessed 3 June 2022].

CoppeliaSim User Manual

Available at: <https://www.coppeliarobotics.com/helpFiles/>

[Accessed 3 June 2022].

Rishabh Jain, Mohd. Nayab Zafar, J.C. Mohanta, 2019. Modeling and Analysis of Articulated Robotic Arm for Material Handling Applications. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 691.

Swathi K, Student MT. Design and Analysis of an Articulated Robot Arm.2017:2(11):36-43.

Singh A., Arora R., Chouhan Y.S., 2020. Design and Static Analysis of Robotic Arm using Ansys. International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE):9(1).

Coroutine Basics

Available at: <https://www.lua.org/pil/9.1.html>

[Accessed 7 June 2022].

Grieves, M. and Vickers, J. (2017), "Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems", In: Kahlen, F.-J., Flumerfelt, S. and Alves, A. (Eds.), Transdisciplinary perspectives on complex systems, Springer International, Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4

S. Schweigert-Recksiek , , J. Trauer , C. Engel , K. Spreitzer and M. Zimmermann, 2020. CONCEPTION OF A DIGITAL TWIN IN MECHANICAL ENGINEERING – A CASE STUDY IN TECHNICAL PRODUCT DEVELOPMENT. INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE – DESIGN 2020.

Malik A. A., Bilberg A., 2018. Digital twins of human robot collaboration in a production setting. Procedia MANUFACTURING. ScienceDirect.

Flávia Pires, A. Cachada, J. Barbosa, A. Moreira, P. Leitão, 2019. Digital Twin in Industry 4.0: Technologies, Applications and Challenges. Semantic Scholar.