
Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος

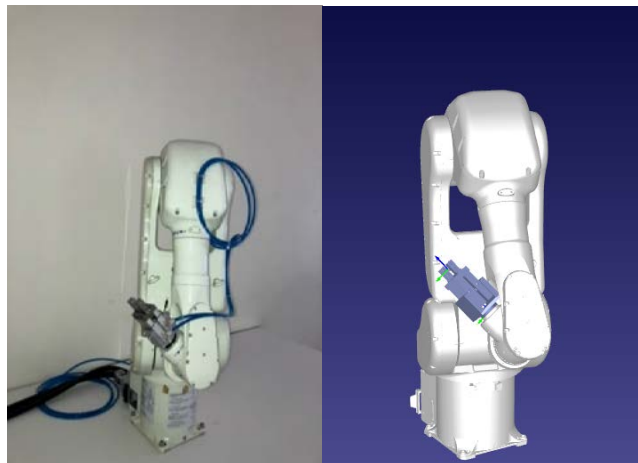
Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής, Υπολογιστών και Τηλεπικοινωνιών

Διπλωματική Εργασία

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στη Ρομποτική

ΘΕΜΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

«Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης του ρομποτικού βραχίονα Kawasaki RS005L σε περιβάλλον ROBODK»



Εργασία που υποβλήθηκε στο Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στη Ρομποτική, του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, για τη μερική εκπλήρωση υποχρεώσεων για το Δίπλωμα Ειδίκευσης στη Ρομποτική.

Εκπονητής: Παναγιώτης Σταματίου

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Δημήτριος Σαγρής

Σέρρες, 2024

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή:

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος φοιτητής, έχοντας επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής, δηλώνει υπεύθυνα ότι είναι συγγραφέας αυτής της Μεταπτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχοντας δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησε. Δηλώνει επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχει ενσωματώσει στην εργασία του προερχόμενο από βιβλία, άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο επακριβώς ή παραφρασμένο, το έχει πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχει αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο Φοιτητής:

Παναγιώτης Σταματίου



Ευχαριστίες...

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο ΔΙ.ΠΑ.Ε Σερρών, της Σχολής Μηχανικών, του τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής, Υπολογιστών και Τηλεπικοινωνιών και συγκεκριμένα στο Τμήμα Μεταπτυχιακών Σπουδών της Ρομποτικής κατά το έτος 2024 και σηματοδοτεί την ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου, Δρ. Δημήτριο Σαγρή, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε εξ' αρχής, αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα, την επιστημονική του καθοδήγηση, τις υποδείξεις του, τη συμπαράστασή του και το αμείωτο ενδιαφέρον που έδειξε από την αρχή μέχρι το τέλος, παρόλο το επιβαρυνόμενο πρόγραμμα του .

Ευχαριστώ τον Δρ Ιωάννη Καλόμοιρο και τον Διευθυντή του προγράμματος Ρομποτικών Σπουδών, Δρ Σταύρο Βολογιαννίδη, όπως και όλο το Διδακτικό ερευνητικό προσωπικό του τμήματος για τη συνεισφορά τους προκειμένου να διατηρήσουν το μεγάλο αγαθό της δημόσιας εκπαίδευσης στο επίπεδο που της αξίζει σε μια κοινωνία που δοκιμάζεται.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά την Κατερίνα Δούρα και την αδερφή μου Ματίνα Σταματίου για την υπομονή και συμπαράσταση τους σε αυτό το δύσκολο και πνευματικά επίπονο ταξίδι έως την ολοκλήρωση του.

Τέλος θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για τη στήριξη, αλλά και την καθοριστική τους συμβολή, στους φίλους και συναδέλφους και κυρίως την Μαρία Καλούδη και Χρήστο Μπόζο για την πολύτιμη βοήθειά τους πρακτικά και ηθικά στην σύνταξη της διπλωματικής εργασίας.

Σέρρες, Μάρτιος 2024

Παναγιώτης Σταματίου
Ηλεκτρονικός Μηχανικός

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη του ρομποτικού βραχίονα Kawasaki RS005L σε περιβάλλον του λογισμικού ROBODK.

Αρχικά αναφέρεται στο ρομποτικό βραχίονα σε θεωρητικό επίπεδο, εξετάζοντας τα γενικά και ειδικά χαρακτηριστικά του, αναλύοντας στη συνέχεια την κινηματική αλυσίδα του ρομπότ, με 6 βαθμούς ελευθερίας (6-DOF).

Στην πορεία της εργασίας εισάγεται το ρομπότ στο περιβάλλον του λογισμικού RoboDK προχωρώντας βήμα-βήμα, έως ότου είναι σε θέση να μπορεί ο χειριστής να κάνει χρήση του λογισμικού, έχοντας ένα πολύ καλό θεωρητικό και πρακτικό υπόβαθρο, μελετώντας κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα.

Η εργασία ολοκληρώνεται με την παρουσίαση του κώδικα που χρησιμοποιείται, σε γλώσσα του ρομπότ και γλώσσα Python για να γίνει κατανοητό το πρόγραμμά και σε επίπεδο προγραμματισμού. Οι χρήστες μπορούν να δημιουργήσουν προσαρμοσμένα προγράμματα ελέγχου για τα ρομπότ τους χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού της επιλογής τους, όπως Python ή AS Robot (Kawasaki).

Το RoboDK μπορεί να θεωρηθεί παραγωγικό πρόγραμμα καθώς προσφέρει ένα εύχρηστο και ισχυρό εργαλείο για τη σχεδίαση, τον έλεγχο και την εκτέλεση των ρομποτικών εργασιών. Επιπρόσθετα, οι χρήστες μπορούν να επωφεληθούν από τη γραφική διεπαφή του και την ευελιξία του στον προγραμματισμό για την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων.

ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ : Ρομποτικός βραχίονας Kawasaki RS005L, Περιβάλλον εργασίας RoboDK, Πλαίσια αναφοράς αξόνων

English Summary

Thesis Title:

Development of a simulation model of the robotic arm Kawasaki RS005L in ROBODK environment.

Abstract

The purpose of this thesis is the development of the Kawasaki RS005L robotic arm in the environment of the software ROBODK software.

At first we refer to the robotic arm at a theoretical level, examining its general and special characteristics by analyzing the kinematic chain of the robot with 6 degrees of freedom (6-DOF).

In the course of the paper we introduce the robot into the RoboDK software environment, proceeding step by step, until we are able to enable anyone to make use of the software, having a very good theoretical and practical background, by studying some typical examples.

Finally, we will also look at the code used, in robot language and python language, to make program understandable on a programming level too. Users can create custom control programs for their robots using their programming language of choice, such as Python or AS Robot (Kawasaki)

RoboDK can be considered a productive program as it offers an easy-to-use and powerful tool for designing, controlling and executing robotic tasks. In addition, users can benefit from its graphical interface and its flexibility in programming to achieve the desired results.

KEYWORDS: Kawasaki RS005L robotic arm, RoboDK working environment, Axis reference frames

Πίνακας περιεχομένων

ΘΕΜΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	i
Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή.....	ii
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	iii
Περίληψη.....	iv
English Summary.....	v
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	viii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xii
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	
1.1 Ο ρομποτικός βραχίονας Kawasaki.....	1
1.2 Το λογισμικό της RoboDK.....	4
1.3 Η ανάγκη της προσομοίωσης.....	4
1.4 Σκοπός και στόχοι της εργασίας	5
Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο	
2.1 Εισαγωγή στον τομέα της ρομποτικής και της προσομοίωσης.....	7
2.2 Βασικές έννοιες της ρομποτικής κινηματικής.....	10
2.3 Η εταιρεία και το λογισμικό RoboDK	11
2.4 Ανάλυση και περιγραφή του ρομποτικού βραχίονα Kawasaki RS005L ..	11
2.5 Ροπή στρέψης, αδράνειας και ειδικά χαρακτηριστικά του βραχίονα	13
2.6 Ταχύτητες βραχίονα σύμφωνα με τα εργοστασιακά δεδομένα	15
2.7 Denavit – Hartenberg Συντεταγμένες και Παράμετροι.....	16
2.7.1 Τα Όρια των Αρθρώσεων.....	18
2.7.2 Ευθεία Κινηματική Ανάλυση.....	20
2.7.3 Αντίστροφη Κινηματική Ανάλυση.....	22
Κεφάλαιο 3. Μεθοδολογία επίλυσης και μοντέλα προσομοίωσης	
3.1 Ανάλυση των απαιτήσεων για το μοντέλο προσομοίωσης.....	28
3.2 Εισαγωγή του μοντέλου Kawasaki RS005L	31
3.3 Ενσωμάτωση εργαλείου στον ρομποτικό βραχίονα.....	34
3.4 Πλοήγηση και βασικές λειτουργίες στο RoboDK	37
3.5 Πίνακας ελέγχου του ρομποτικού βραχίονα	42

Κεφάλαιο 4. Προσομοίωση και Στόχοι

4.1 Ρομποτικοί στόχοι	47
4.1.2 Ακρίβεια στόχου.....	49
4.2 Πρόγραμμα σύνδεσης στόχων στο RoboDK	50
4.3 Πλαίσιο αναφοράς αξόνων.....	54
4.4 Πίνακας διαμόρφωσης γωνιών του ρομποτικού βραχίονα Kawasaki RS005L	58
4.5 Εφαρμογή του πίνακα διαμόρφωσης στους στόχους εργασίας	64

Κεφάλαιο 5. Εκτέλεση προσομοιώσεων σε διάφορα σενάρια

5.1 Αναγνώριση πλαισίου αναφοράς και εποπτεία στόχων	69
5.2 Δημιουργία υποπρογραμμάτων πάνω στο κύριο πρόγραμμα	71
5.3 Σύνδεση κυρίως προγράμματος με υποπρογράμματα	74
5.4 Επιλογή και τοποθέτηση αντικειμένων.....	76
5.4.1 Συλλογή και επανατοποθέτηση αντικειμένου στο RoboDK.....	79
5.5 Εκτέλεση προγράμματος της εργαστηριακής αρπάγης με προσαρμοσμένο πλαίσιο αναφοράς αξόνων	93
5.6 Εξαγωγή προγράμματος σε γλώσσα Python και γλώσσα βραχίονα Kawasaki	94
5.7 Σύγκριση των αποτελεσμάτων με την πραγματική συμπεριφορά του ρομποτικού βραχίονα	95

Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα και προτάσεις

6.1 Τα δύσκολα σημεία της εργασίας και προτάσεις βελτίωσης του μεταπτυχιακού προγράμματος	96
6.2 Ο ρομποτικός βραχίονας με τεχνητή νοημοσύνη	97
6.3 Ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων	97
6.4 Προτάσεις για μελλοντική εργασία στους χειριστές του RoboDK.....	98
6.5 Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα και τις επισημάνσεις.....	99

Βιβλιογραφία.....	100
--------------------------	------------

Παράρτημα.....	102
-----------------------	------------

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Αρπάγη του βραχίονα Kawasaki	2
Εικόνα 2. Βραχίονας Kawasaki RS005L	2
Εικόνα 3. Χειριστήριο βραχίονα (Teach pendant)	3
Εικόνα 4. Ελεγκτής F50 (Kawasaki Controller)	3
Εικόνα 5. Στιγμιότυπο της επιφάνειας εργασίας του RoboDK.....	4
Εικόνα 6. Επιτεύγματα του Γάλλου εφευρέτη Vaucanson [2].....	8
Εικόνα 7. Διάφορες γωνίες λήψης του βραχίονα RS005L [10]	13
Εικόνα 8. Τερματικός μηχανικός διακόπτης του βραχίονα	16
Εικόνα 9. Συστήματα Συντεταγμένων κατά D-H [14]	17
Εικόνα 10. Δύο ζεύγη γωνιών με ίδιο τελικό σημείο [15]	25
Εικόνα 11. Περιβάλλον εργασίας του RoboDK.....	28
Εικόνα 12. Επιλογή από το μενού Tools/Options	29
Εικόνα 13. Εισαγωγή βιβλιοθήκης μέθοδος α'	32
Εικόνα 14. Εισαγωγή βιβλιοθήκης μέθοδος β'	32
Εικόνα 15. Λήψη του βραχίονα από το διαδίκτυο	33
Εικόνα 16. Φόρτωση του μοντέλου Kawasaki RS005L	33
Εικόνα 17. Ο ρομποτικός βραχίονας στο RoboDK.....	34
Εικόνα 18. Επιλογή εργαλείου για τον βραχίονα.....	35
Εικόνα 19. Tool Spindle.....	35
Εικόνα 20. Ο βραχίονας με το εργαλείο.....	36
Εικόνα 21. Ενσωμάτωση του εργαλείου στον ρομποτικό βραχίονα.....	36
Εικόνα 22. Αλλαγή ονόματος εργαλείου	37
Εικόνα 23. Ισομετρικές λήψεις θέασης.....	38
Εικόνα 24. Δέντρο εργασιών του ρομποτικού βραχίονα	39
Εικόνα 25. Parent - child links στο σταθμό εργασίας	39
Εικόνα 26. Πλαίσια αναφοράς αξόνων του βραχίονα.....	40
Εικόνα 27. Επιλογή Visible Robot Flange	41
Εικόνα 28. Βραχίονας χωρίς το πλαίσιο αναφοράς των αξόνων της φλάντζας.....	41
Εικόνα 29. Ρομποτικό πάνελ RS005L.....	42
Εικόνα 30. Απόσπασμα του πίνακα ελέγχου για τρεις βασικές λειτουργίες.....	44

Εικόνα 31. Χώρος εργασίας του εργαλείου του βραχίονα.....	44
Εικόνα 32. Κλιμάκωση αρθρώσεων των μελών του βραχίονα σε μοίρες.....	45
Εικόνα 33. Απόσπασμα α΄ θέσης βραχίονα	45
Εικόνα 34. Απόσπασμα β΄ θέσης βραχίονα	46
Εικόνα 35. Τιμές γωνιών α΄ θέσης βραχίονα	46
Εικόνα 36. Δημιουργία στόχου στο RoboDK.....	47
Εικόνα 37. Εμφάνιση στόχου	48
Εικόνα 38. Διαφορετικοί στόχοι στο πρόγραμμα	48
Εικόνα 39. Ταχύτητα προσομοίωσης κίνησης	49
Εικόνα 40. Καρτέλα κατάστασης "Θέσης 1"	49
Εικόνα 41. Μετακίνηση του ρομπότ από το στόχο.....	50
Εικόνα 42. Εκπαιδευτικό πρόγραμμα 1	51
Εικόνα 43. Σύνδεση στόχων.....	52
Εικόνα 44. Σύνδεση 4 στόχων.....	53
Εικόνα 45. Μη εφικτή επίτευξη προσέγγισης στόχου	53
Εικόνα 46. Αλλαγή τιμών στις καρτεσιανές συντεταγμένες.....	54
Εικόνα 47. Εισαγωγή νέου πλαισίου αναφοράς.....	55
Εικόνα 48. Επιλογή πλαισίου αναφοράς.....	56
Εικόνα 49. Ορισμός πλαισίου αναφοράς	56
Εικόνα 50. Ενεργοποίηση πλαισίου αναφοράς	57
Εικόνα 51. Θέσεις 2 και 3 απρόσιτες από τον βραχίονα.....	58
Εικόνα 52. Πίνακας διαμόρφωσης γωνιών των αρθρώσεων	58
Εικόνα 53. Άρθρωση JT3 (Αγκώνας βραχίονα).....	59
Εικόνα 54. Τιμές συντεταγμένων θέσης Α΄	59
Εικόνα 55. Τιμές των γωνιών των αρθρώσεων στη θέση Α΄	60
Εικόνα 56. Διαμόρφωση 1, θέσης Α΄	60
Εικόνα 57. Άρθρωση (JT3), στη θέση διαμόρφωσης Β΄	61
Εικόνα 58. Διαμόρφωση 2, Θέση Β΄	61
Εικόνα 59. Κατάλογος περισσότερων επιλογών στο πίνακα διαμόρφωσης	62
Εικόνα 60. Επιλογές διαμόρφωσης με (Elbow down)	62
Εικόνα 61. Πίνακας προορισμού "Target 5"	63
Εικόνα 62. Other configurations επιλογή 2.....	64

Εικόνα 63. Μονό κλικ στο στόχο	65
Εικόνα 64. Διπλό κλικ στο στόχο.....	65
Εικόνα 65. Σύγκριση τιμών διαμόρφωσης άρθρωσης	66
Εικόνα 66. Εκπαίδευση στόχου σε καινούργιο πλαίσιο αναφοράς.....	66
Εικόνα 67. Αλλαγή στις τιμές διαμόρφωσης της θέσης 3.....	67
Εικόνα 68. Τροχιά προγράμματος με γραμμική σύνδεση στόχων.....	67
Εικόνα 69. Αποτύπωμα τροχιάς με φυσική σύνδεση στόχων.....	68
Εικόνα 70. Αποτύπωμα τροχιάς μετά την εκπαίδευση στόχων	68
Εικόνα 71. Σταθμός εργασίας Kawasaki_αρπάγη_Basic.....	69
Εικόνα 72. Εκμάθηση στόχου σε μια επιφάνεια	70
Εικόνα 73. Δημιουργία στόχων στην επιφάνεια του αντικειμένου.....	71
Εικόνα 74. Δημιουργία προγράμματος	72
Εικόνα 75. Μετατόπιση του βραχίονα στον άξονα Z	72
Εικόνα 76. Δημιουργία δύο υποπρογραμμάτων.....	73
Εικόνα 77. Συνδετικός στόχος "Αρχική Θέση".....	74
Εικόνα 78. Ενσωμάτωση υποπρογραμμάτων στο κύριο πρόγραμμα	75
Εικόνα 79. Εκτέλεση προγράμματος με διάφανη πινακίδα	75
Εικόνα 80. Εκτέλεση προγράμματος με εμφανή πινακίδα	75
Εικόνα 81. Διαφορά καρτεσιανού στόχου με συνδετικό στόχο.....	76
Εικόνα 82. Ενσωμάτωση αρπάγης στο ρομπότ.....	77
Εικόνα 83. Εισαγωγή τραπεζιού και του πλαισίου αναφοράς του.....	77
Εικόνα 84. Συγχρονισμένα πλαίσια αναφοράς με τα αντικείμενα.....	78
Εικόνα 85. Χώρος εργασίας του βραχίονα.....	78
Εικόνα 86. Προετοιμασία του χώρου εργασίας	80
Εικόνα 87. Εντολή συλλογής αντικειμένου	80
Εικόνα 88. Εκτέλεση εντολής περισυλλογής αντικειμένου	81
Εικόνα 89. Ορθή τοποθέτηση αρπάγης στο αντικείμενο	82
Εικόνα 90. Δημιουργία στόχων αντικειμένου.....	82
Εικόνα 91. Πρόγραμμα Reset A'	83
Εικόνα 92. Προσθήκη προσομοίωσης στο πρόγραμμα.....	83
Εικόνα 93. Οδηγίες γεγονότος προγράμματος.....	84
Εικόνα 94. Επιλογή γεγονότων προγράμματος.....	84

Εικόνα 95. Εσωτερικό πρόγραμμα αλληλουχίας γεγονότων	85
Εικόνα 96. Δημιουργία προγράμματος "Παραλαβή Α' "	85
Εικόνα 97. Διαδραστικό πρόγραμμα αλληλουχίας γεγονότων	86
Εικόνα 98. Σύνδεση αντικειμένου με την αρπάγη	86
Εικόνα 99. Δημιουργία γεγονότος στο σύνδεσμο "Παραλαβή Α' "	87
Εικόνα 100. Αντικείμενο προσκολλημένο στην αρπάγη	87
Εικόνα 101. Νέος ορισμός πλαισίου αναφοράς " Κουτί Θέση Β' "	88
Εικόνα 102. Πίνακας ελέγχου και Θέση Β' του βραχίονα.....	88
Εικόνα 103. Δημιουργία νέων στόχων στη Θέση Β'	89
Εικόνα 104. Οδηγίες γεγονότος	90
Εικόνα 105. Σύνδεση προγραμμάτων στο κύριο πρόγραμμα	90
Εικόνα 106. Επιλογή προγράμματος.....	91
Εικόνα 107. Σειρά εκτέλεσης προγράμματος	91
Εικόνα 108. Απόσπασμα τροχιάς εκτελώντας το κύριο πρόγραμμα	91
Εικόνα 109. Οδηγία προσθήκης πλαισίου αναφοράς.....	92
Εικόνα 110. Ανάθεση τραπέζιού ως ενεργού πλαίσιο αναφοράς	92
Εικόνα 111. Απόσπασμα τροχιάς της αρπάγης στο κύριο πρόγραμμα.....	93
Εικόνα 112. Βασικό πρόγραμμα με τροποποιημένες καρτεσιανές της αρπάγης.....	94
Εικόνα 113. Εργαστηριακή λήψη 1.....	95
Εικόνα 114. Εργαστηριακή λήψη 2.....	95

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Τιμές ροπής στρέψης και αδράνειας από τον κατασκευαστή [10].....	13
Πίνακας 2. Ειδικά χαρακτηριστικά του βραχίονα Kawasaki.....	14
Πίνακας 3. Εύρος κίνησης και γωνιακές ταχύτητες[10].....	15
Πίνακας 4. Παράμετροι D-H.....	17
Πίνακας 5. Μεταβλητές D-H για τον βραχίονα Kawasaki RS005L.....	18
Πίνακας 6. Όρια γωνιών από τον κατασκευαστή [10].....	18
Πίνακας 7. Όρια γωνιών κατά D-H.....	19
Πίνακας 8. Κατάλογος εργαλείων του RoboDK [16].....	31

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1 Ο ρομποτικός βραχίονας Kawasaki

Ο ρομποτικός βραχίονας Kawasaki RS005L αναδεικνύεται ως μια ελαφριά μονάδα, η οποία σε συνδυασμό με κινητήρες υψηλής απόδοσης και υψηλής περιστροφής, παρέχει την βέλτιστη επιτάχυνση και λειτουργία σε γρήγορες ταχύτητες. Ο ρυθμός επιτάχυνσης προσαρμόζεται αυτόματα με βάση το φορτίο και την θέση του ρομπότ, εξασφαλίζοντας την βέλτιστη απόδοση με τη μέγιστη δυνατή αποτελεσματικότητα στο καλύτερο δυνατό χρόνο.

Σε σύγκριση με την προηγούμενη γενιά των βραχιόνων Kawasaki, ο RS005L παρουσιάζει επιπλέον την αύξηση της μέγιστης εμβέλειας και του εύρους περιστροφής κάθε άξονα. Η αυξημένη κίνηση μεταφράζεται σε μεγαλύτερο χώρο εργασίας με ελάχιστο "νεκρό χώρο" και αυξημένη ευελιξία.

Οι κινητήρες υψηλής απόδοσης, σε συνδυασμό με την άκαμπτη κατασκευή του βραχίονα, επιτρέπουν ανώτερη ροπή καρπού καθώς και χωρητικότητα φορτίου από τους προγενέστερους. Οι ενσωματωμένες πνευματικές γραμμές με σωληνάκια διαμέτρου 3/8" και η εσωτερική καλωδίωση παρέχονται στην αγορά του. Επιπλέον παρέχονται φλάντζες τοποθέτησης και βαλβίδες επιτρέποντας την εύκολη εγκατάσταση επιπλέον καλωδιώσεων, σωληνώσεων ή εξοπλισμού.

Ο λεπτός σχεδιασμός του βραχίονα επιτρέπει την εγκατάσταση του σε πολύ περιορισμένους χώρους όπως επιτραπέζια είτε στο δάπεδο ακόμα και σε οροφή. Πολλαπλά ρομπότ μπορούν να εγκατασταθούν σε εφαρμογές "υψηλής πυκνότητας ρομπότ" χωρίς να επηρεάζεται η απόδοση.

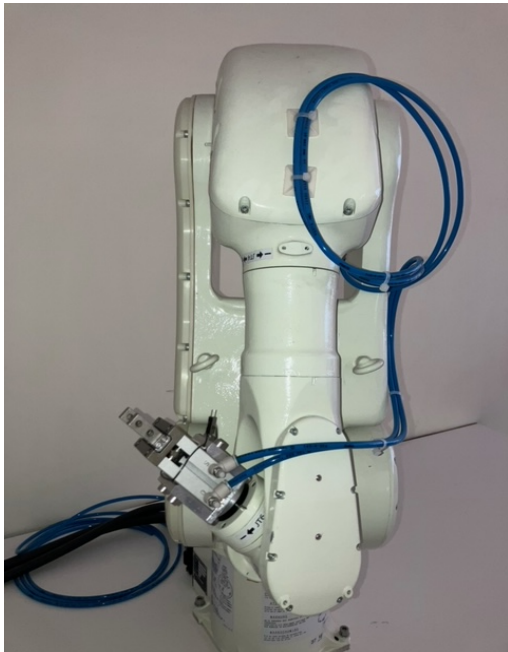
Το περιβάλλον RoboDK (Robotics Offline Programming and Simulation Software) είναι ένα λογισμικό προσομοίωσης για ρομποτικές εφαρμογές το οποίο επιτρέπει τη δημιουργία, προσομοίωση και εκπαίδευση ρομποτικών συστημάτων, χωρίς την ανάγκη πραγματικού υλικού. Ένα από τα κύρια του χαρακτηριστικά είναι η συμβατότητά του με πολλούς κατασκευαστές ρομποτικών συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων των βραχιόνων Kawasaki.

Η προσομοίωση κινήσεων είναι ένα εργαλείο που επιτρέπει στους χρήστες να προγραμματίσουν και να προσομοιώσουν τις κινήσεις του ρομπότ, δίνοντάς τους τη δυνατότητα να δοκιμάσουν πώς αντιδρά σε διάφορες συνθήκες. Είναι ένα δημοφιλές εργαλείο

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

εκπαίδευσης στον τομέα της ρομποτικής και επίσης παρέχει τη δυνατότητα σύνδεσης με εξωτερικά συστήματα, όπως το MATLAB(Matrix Laboratory) και το ROS (Robot Operating System), επιτρέποντας την ομαλή ενσωμάτωση με άλλα προγράμματα.

Ο ρομποτικός βραχίονας Kawasaki RS005L και το περιβάλλον του RoboDK αποτελούν ισχυρά εργαλεία για την ανάπτυξη και προσομοίωση ρομποτικών εφαρμογών. Βοηθούν τους χρήστες να σχεδιάσουν και να ελέγξουν ρομποτικά συστήματα με αποδοτικό και ασφαλή τρόπο, προσφέροντας εκτεταμένες δυνατότητες και λειτουργικότητα. Στις εικόνες 1, 2, 3 και 4 παρουσιάζονται, ο βραχίονας της Kawasaki, η αρπάγη, ο ελεγκτής και το χειριστήριο που λήφθηκαν στο εργαστήριο του M.Sc. Ρομποτικής, του Τμήματος Μηχανικών και Πληροφορικής Τ.Ε Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του ΔΙ.ΠΑ.Ε.στη πόλη των Σερρών.



Εικόνα 2. Βραχίονας Kawasaki RS005L



Εικόνα 1. Αρπάγη του βραχίονα Kawasaki

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή



Εικόνα 4. Ελεγκτής F50 (Kawasaki Controller)



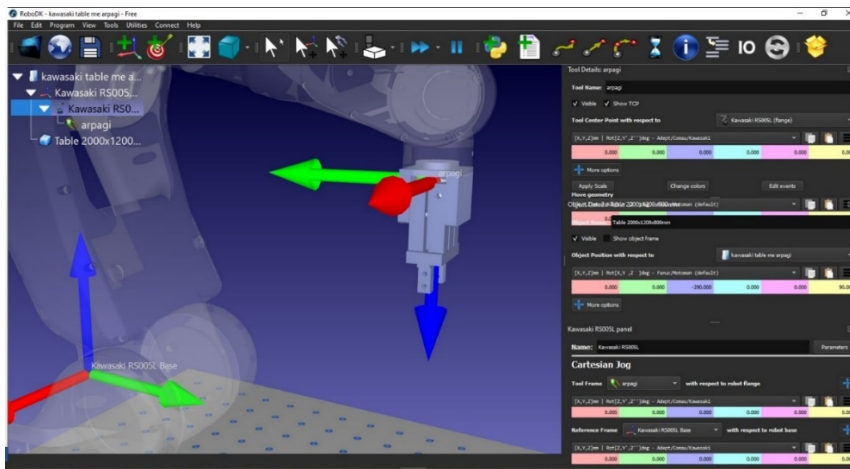
Εικόνα 3. Χειριστήριο βραχίονα (Teach pendant)

1.2 Το λογισμικό της RoboDK

Όπως και τα υπόλοιπα προγράμματα προσομοίωσης, το RoboDK απαιτεί μια αρχική εξοικείωση λόγω της πολυπλοκότητάς του ως επαγγελματικό λογισμικό. Καθώς ο χρήστης εξοικειώνεται με το RoboDK, παρατηρεί ότι το περιβάλλον του λογισμικού γίνεται ολοένα και πιο φιλικό και προσιτό. Η επαναλαμβανόμενη χρήση συμβάλλει στην αύξηση της άνεσης και της εξοικείωσης του χρήστη με τις λειτουργίες και τις δυνατότητες του λογισμικού.

Έγινε σημαντική προσπάθεια για την ακριβή τοποθέτηση των εξαρτημάτων κατά την εισαγωγή τους από τη βιβλιοθήκη του προγράμματος, το οποίο υποστηρίζει πάνω από 900 ρομπότ και 50 διαφορετικούς κατασκευαστές. Επίσης, δίνεται μεγάλη έμφαση στον ορισμό των πλαισίων αναφοράς των αξόνων, καθώς αποτελούν τα θεμέλια της εργασίας. Το πρόγραμμα διαθέτει πληθώρα δυνατοτήτων, κάτι που το καθιστά έναν από τους πλέον ισχυρούς προσομοιωτές ρομποτικών βραχιόνων στην αγορά.

Μια εικόνα της επιφάνειας εργασίας του λογισμικού φαίνεται στην εικόνα 5.



Εικόνα 5. Στιγμιότυπο της επιφάνειας εργασίας του RoboDK

1.3 Η ανάγκη της προσομοίωσης

Αναπτύσσοντας το μοντέλο του βραχίονα Kawasaki RS005L στον σταθμό εργασίας του λογισμικού RoboDK, αποκτήθηκαν γνώσεις λειτουργικότητας και παράλληλα δημιουργήθηκε ένας ενθουσιασμός για τα ρομποτικά προγράμματα προσομοίωσης. Η εμπειρία του χρήστη σε κάθε πρόγραμμα προσομοίωσης μπορεί να διαφέρει, καθώς η φαντασία και οι δυνατότητες του

λογισμικού επηρεάζουν την προσέγγισή του. Ωστόσο, είναι βέβαιο ότι αυτή η διαδικασία διεγείρει τη φαντασία του χρήστη και ανοίγει νέες προοπτικές για το τι μπορεί να επιτευχθεί με το πρόγραμμα προσομοίωσης.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, δημιουργήθηκαν συνολικά τέσσερα προγράμματα στο λογισμικό RoboDK. Κάθε πρόγραμμα αντιμετώπισε προβλήματα σε διαφορετικά σημεία που συχνά φαινόταν ανεπίλυτα. Ωστόσο, μέσα από την υπομονή και την επιμονή του χρήστη, κατανοείται ότι κανένα πρόβλημα δεν είναι ανέφικτο, αλλά μάλλον αποτελεί ευκαιρία για απόκτηση γνώσεων και εμπειριών.

Αρχικά, τέθηκαν ορισμένοι στόχοι (θέσεις) προσέγγισης του βραχίονα, οι οποίοι επιτεύχθηκαν με επιτυχία. Κατά τη διάρκεια της εργασίας, παρατηρήθηκε ότι τα πλαίσια αναφοράς αξόνων παίζουν σημαντικό ρόλο σε κάθε πρόγραμμα που καλείται να εκτελέσει ο χρήστης.

Για έναν σταθμό εργασίας με βραχίονες, τα πλαίσια αναφοράς είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξή τους. Μέσω εκτενών προσομοιώσεων και δοκιμών, ο χειριστής του RoboDK συνειδητοποιεί ότι όλα είναι εφικτά.

1.4 Σκοπός και στόχοι της εργασίας

Η κύρια επίδοση της εργασίας επικεντρώνεται στη δημιουργία ενός ρεαλιστικού μοντέλου προσομοίωσης του ρομποτικού βραχίονα Kawasaki RS005L, μέσα στο περιβάλλον του RoboDK. Αυτή η προσπάθεια εξυπηρετεί διάφορους στόχους και εφαρμογές, οι οποίοι επεξηγούνται παρακάτω:

Δημιουργία Ρεαλιστικού Μοντέλου. Ο κύριος στόχος είναι η δημιουργία ενός ρεαλιστικού μοντέλου του ρομποτικού βραχίονα RS005L, λαμβάνοντας υπόψη την ακρίβεια της κινηματικής του αλυσίδας, τα υλικά που χρησιμοποιούνται και τις δυνατότητές του.

Προσομοίωση Κινήσεων και Ελέγχου. Πραγματοποιείται προσομοίωση των κινήσεων του ρομποτικού βραχίονα RS005L και διεξάγονται διάφοροι έλεγχοι, με σκοπό να αξιολογηθεί η απόκρισή του σε διαφορετικές συνθήκες και καταστάσεις.

Ανάπτυξη Εφαρμογών. Η ανάπτυξη και δοκιμή εφαρμογών που εκμεταλλεύονται το ρομποτικό βραχίονα συντελεί στη βελτίωση διάφορων τομέων, όπως η επεξεργασία υλικού, η συγκόλληση, η μεταφορά αντικειμένων, καθώς και άλλες παραγωγικές διαδικασίες.

Εκπαίδευση και Εκπαιδευτικό Εργαλείο. Η εφαρμογή λειτουργεί ως εκπαιδευτικό εργαλείο για την εκμάθηση, τον χειρισμό και τον έλεγχο του ρομποτικού βραχίονα RS005L.

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Ανάπτυξη Καινοτόμων Λύσεων. Η χρήση της προσομοίωσης σε συνδυασμό με το ROBODK αποτελεί ισχυρό εργαλείο για την ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων στον τομέα της ρομποτικής.

Συμπερασματικά, οι στόχοι αυτοί αποσκοπούν στην επίτευξη ενός αξιόπιστου και αποτελεσματικού μοντέλου προσομοίωσης για τον ρομποτικό βραχίονα RS005L, προσφέροντας τη δυνατότητα ανάπτυξης και δοκιμής ρομποτικών εφαρμογών με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα. Ολοκληρώνοντας την εργασία, σκοπός ήταν η εισαγωγή, ορισμένων προγραμμάτων που δημιουργήθηκαν, στον πραγματικό βραχίονα Kawasaki RS005L που εδρεύει στο εργαστήριο του μεταπτυχιακού προγράμματος της ρομποτικής.

Να επισημανθεί ότι το λογισμικό RoboDK προσφέρει μια δωρεάν έκδοση που επιτρέπει στους χρήστες να χρησιμοποιήσουν τις βασικές λειτουργίες του για ανάπτυξη ρομποτικών προγραμμάτων προσομοίωσης. Ωστόσο, η δωρεάν έκδοση δεν επιτρέπει την εξαγωγή του προγράμματος προσομοίωσης που δημιουργείται, για να εκτελεστεί σε πραγματικό ρομπότ. Αντ' αυτού θα χρειαστεί η αγορά της πλήρους έκδοσης του λογισμικού, για να είναι δυνατή η εξαγωγή και η εκτέλεση του προγράμματος. Ωστόσο, υπάρχει η δυνατότητα δοκιμής της πλήρους έκδοσης για ένα μήνα, κατά την οποία ο χρήστης μπορεί να εκτελέσει ένα πλήθος σταθμών εργασίας, που έχει δημιουργήσει.

Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Εισαγωγή στον τομέα της ρομποτικής και της προσομοίωσης

Η Ρομποτική ανήκει στον Τομέα της Μηχανικής των Μηχανών & Αυτόματου Ελέγχου, της επιστήμης της Μηχανολογίας και επικεντρώνεται στον σχεδιασμό, την κατασκευή, τον έλεγχο και τη λειτουργία των ρομπότ. Ο όρος "ρομπότ" χρησιμοποιείται για να περιγράψει αυτόνομες μηχανές που είναι ικανές να εκτελούν εργασίες χωρίς την παρέμβαση ανθρώπων.

Η πρόιμη εμφάνιση των ρομπότ, παρουσιάζοντας τα ανθρωπόμορφα όντα, εντοπίζεται στους μύθους πολλών λαών. Πολλοί μύθοι από την αρχαιότητα αναφέρονται σε μηχανικούς ανθρώπους, αγάλματα που μιλούν και έχουν ψυχή, καθώς και τεχνητά όντα που δεν είναι ούτε θεοί ούτε ημίθεοι. Στην Ηλιάδα, υπάρχει αναφορά στην ύπαρξη "Χρυσών Σκλάβων" που βοηθούσαν τον Ήφαιστο, τον θεό της φωτιάς, ο οποίος ήταν κουτσός. Ο ίδιος είχε δημιουργήσει, μαζί με την Αθηνά, θεά της σοφίας και της υφαντουργίας, αυτόματα όντα προικισμένα με "ζωή". Κάποια από αυτά τα όντα, τα χρησιμοποιούσε στο εργαστήριό του.

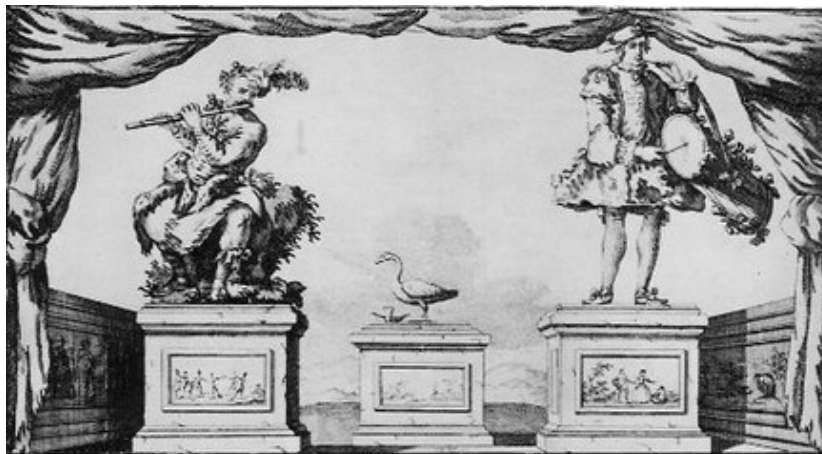
Ο Ήφαιστος, εργαζόταν στο εργαστήριό του εκτελώντας βαριές μηχανουργικές εργασίες, παράγοντας διάφορες κατασκευές όπως όπλα, μηχανικά εργαλεία, ομοιώματα και άλλα. Ένα από αυτά τα όντα που δημιούργησε ήταν ο Τάλως, ένας μεταλλικός γίγαντας από χαλκό, έμψυχος και άτρωτος. Ο Ήφαιστος χάρισε τον Τάλω στην Ευρώπη, και ο Δίας, άντρας της Ευρώπης, τον χάρισε στον ευνοούμενό του, τον Μίνωα, βασιλιά της Κρήτης. Ο Τάλως επέφερε προστασία στο νησί από τους εχθρούς, μετέφερε τις εντολές και τις διαταγές του βασιλιά Μίνωα στους υπηκόους του, και επίσης συνέβαλε στην επίλυση των διαφορών τους.

Ο μύθος αυτός αντιπροσωπεύει τις αντιλήψεις των αρχαίων για τις ανθρωπόμορφες μηχανές που ήταν υπό την υπηρεσία ανθρώπων ή θεών. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το φάσμα των υπηρεσιών/εργασιών που εκτελούσαν τα προϊστορικά "ρομπότ", όπως βαριές κατασκευές και μηχανουργικές εργασίες, παρέχοντας βοήθεια σε άτομα με κινητικές δυσκολίες, μεταφορά και διαχείριση αντικειμένων, μεταφορά εντολών και λήψη αποφάσεων με διασταύρωση πληροφορίας βάσει κανόνων. [1]

Κατά τον 15ο αιώνα, και συγκεκριμένα το 1495, ο Λεονάρντο ντα Βίντσι σχεδίασε ένα ρομπότ ιπότη το οποίο μπορούσε να κινεί τα χέρια, να κάνει μορφασμούς με το σαγόνι του, να σηκώνεται και να κάθεται. Παρόλα αυτά, το πρώτο λειτουργικό ρομπότ, κατασκευάστηκε το 1738 από έναν άλλον εφευρέτη ονόματι Ζακ ντε Βοκανσόν, ο οποίος δημιούργησε ένα

Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

ανδροειδές που μπορούσε να παίζει φλάουτο, την χωνευτική πάπια και τον άνθρωπο με το ταμπούρλο. [2] Μπορούμε να δούμε στην εικόνα 6 τις χαρακτηριστικές εφευρέσεις του Βοκανσόν.



Εικόνα 6. Επιτεύγματα του Γάλλου εφευρέτη Vaucanson [2]

Το 1922, στο Παρίσι, η λέξη "ρομπότ" ειπώθηκε και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά η λέξη ρομπότ (robot), από το Τσέχο σκηνοθέτη Karel Capek στο έργο του RUR (Rossum's Universal Robots). Σ' αυτό το έργο υπήρχαν υπάκουα μικρά τεχνητά, ανθρωπομορφικά πλάσματα, όπου δεχόταν εντολές από τον κύριο τους και τελικά επαναστάτησαν ενάντια του. Στα Τσέχικα αλλά και στα Ρωσικά, τα πλάσματα αυτά είχαν την ονομασία «robotnik», από τη λέξη robota, που σημαίνει «καταναγκαστική εργασία» και «αγγαρεία». Ο Capek και το έργο του ήταν πρωταρχικά υπεύθυνοι για τις αντιλήψεις των ανθρώπων, ακόμα και σήμερα, περί ανθρωπόμορφων μηχανών με την έννοια της ευφυίας και της μοναδικής προσωπικότητας που μπορούν να εκδηλώσουν.

Σήμερα η ρομποτική εφαρμόζεται σε πολλούς τομείς όπως:

- ♦ Της Κινηματικής και Δυναμικής των ρομπότ, που επικεντρώνεται στον σχεδιασμό κινήσεων και στην ανάλυση των δυναμικών χαρακτηριστικών τους, βάσει του συστήματος συντεταγμένων αναφοράς. Αυτό χρησιμοποιείται, για την περιγραφή της κίνησης των υπολοίπων συνδέσμων του ρομπότ. [3]
- ♦ Την επιστήμη προσαρμοστικού ελέγχου η οποία σχετίζεται με τον σχεδιασμό αλγορίθμων ελέγχου που αφορούν την κίνηση, τον αισθητηριακό έλεγχο και την ανταπόκριση των ρομπότ όσον αφορά χρονικά μεταβαλλόμενα συστήματα. Προσφέρουν πολλά σημαντικά πλεονεκτήματα και οφέλη όπως: Ανθεκτικότητα στις μεταβολές του συστήματος,

Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

βελτιωμένη απόδοση παρακολούθησης, ευελιξία και προσαρμοστικότητα, ενισχυμένη απόρριψη διαταραχών, ανοχή σε σφάλματα και ανίχνευση σφαλμάτων, αυξημένη αποδοτικότητα του συστήματος, προσαρμογή σε πραγματικό χρόνο. [4]

- ♦ Την Τεχνητή Νοημοσύνη και Μηχανική Μάθηση. Μέσα στην Α.Ι. (Artificial Intelligence), αναπτύχθηκε ένα νέο πεδίο που ονομάζεται μηχανική μάθηση. Αντί να γραφτεί ένα πρόγραμμα βήμα προς βήμα για την επίτευξη κάποιου σκοπού, κάτι που είναι μια παραδοσιακή προσέγγιση στην τεχνητή νοημοσύνη, συλλέγονται πολλά δεδομένα για κάτι που απαιτείται να κατανοηθεί. [5]
- ♦ Την Άρθρο-Ρομποτική Συνεργασία η οποία αναφέρεται στη μελέτη του τρόπου με τον οποίο άνθρωποι και ρομπότ μπορούν να συνεργάζονται αποτελεσματικά, είτε σε βιομηχανικά περιβάλλοντα εργασίας είτε σε άλλες εφαρμογές. Οι άνθρωποι χρησιμοποιούν ρομπότ στο σπίτι και στις δουλειές τους. Κατά τη διάρκεια της δημιουργίας ενός ρομπότ, γίνονται σχεδιαστικές επιλογές σχετικά με το πώς ένα ρομπότ περιγράφει και επιτυγχάνει τους στόχους του. Ενώ είναι γνωστό ότι η συμπεριφορά του ρομπότ επηρεάζει την ανθρώπινη αντίληψη. [6]
- ♦ Τις Εφαρμογές της Ρομποτικής, ένας τομέας που έχει εύρος από τη βιομηχανική παραγωγή και την χειρουργική ρομποτική, μέχρι την εξερεύνηση του διαστήματος και την αυτόνομη οδήγηση.
- ♦ Την Προσομοίωση, η οποία αναφέρεται στην αναπαράσταση του πραγματικού κόσμου ή ενός συγκεκριμένου συστήματος μέσω ενός ψηφιακού μοντέλου, με σκοπό την απόδοσή του με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, σε ένα εικονικό περιβάλλον. Ο τομέας της προσομοίωσης επίσης εφαρμόζεται σε πολλούς τομείς, συμπεριλαμβανομένης της προσομοίωσης μηχανισμών με τη χρήση ψηφιακών μοντέλων για την προσομοίωση της κίνησης και της συμπεριφοράς πριν από την πραγματική υλοποίηση. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των ρομπότ είναι η ευελιξία τους, η οποία τους επιτρέπει να προσαρμόζονται σε διαφορετικές απαιτήσεις και περιβάλλοντα. Ας δούμε πώς αυτή η ευελιξία εκφράζεται σε διάφορους τομείς:
 - ο **Ανθρωποειδή Ρομπότ**: Οι εξελίξεις σε αυτόν τον τομέα ανοίγουν νέες προοπτικές για την ενσωμάτωση ανθρωποειδών ρομπότ σε διαφορετικά περιβάλλοντα, όπως τα καθημερινά καθήκοντα στο σπίτι ή σε εργασιακά περιβάλλοντα.

- **Ρομποτική στην Ιατρική:** Σε αυτό τον τομέα, το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στη μοντελοποίηση οργάνων και την προσομοίωση ρομποτικών διαδικασιών, ώστε να διευκολύνεται η εκτέλεση ασφαλών και σε πραγματικό χρόνο επεμβάσεων.
- **Νανορομποτική:** Η αυτοματοποίηση, ο έλεγχος και η κατασκευή νανορομπότ αποτελούν έναν προκλητικό και νέο τομέα έρευνας.
- **Διαστημική Ρομποτική:** Στον χώρο αυτό, τα ρομπότ αντιμετωπίζουν την πρόκληση της συμπεριφοράς σε μη-σταθερά περιβάλλοντα, όπου η βαρύτητα είναι από ανύπαρκτη μέχρι αμελητέα, και πρέπει να διατηρούν την ισορροπία τους.
- **Κινητή Ρομποτική:** Η κινητή ρομποτική αντιπροσωπεύει μια σύνθετη περιοχή έρευνας, όπου συνδυάζονται πολλές προηγμένες τεχνολογίες και ανοικτά ερευνητικά ζητήματα. [7]

Ως συμπέρασμα θα μπορούσε ειπωθεί ότι η προσομοίωση είναι ένας σημαντικός τομέας που διευκολύνει την ασφαλή και αποτελεσματική ανάπτυξη και δοκιμή συστημάτων χωρίς την ανάγκη για πραγματικά πρωτότυπα. Είναι απαραίτητη, για την επίλυση προβλημάτων στη ρομποτική και σε πολλούς άλλους τομείς της τεχνολογίας και της επιστήμης.

2.2 Βασικές έννοιες της ρομποτικής κινηματικής

Η ρομποτική κινηματική αποτελεί έναν κρίσιμο τομέα της ρομποτικής καθώς περιλαμβάνει βασικές έννοιες που η κατανόησή τους είναι καθοριστική για την ανάπτυξη, τον έλεγχο και τον προγραμματισμό των ρομποτικών συστημάτων. Μερικές εκ των οποίων είναι: η *Θέση (Position)* ενός ρομπότ που περιγράφει την τοποθεσία του στο χώρο. Συνήθως, αναφέρεται σε συντεταγμένες (X, Y, Z) για την τρισδιάστατη κίνηση. Τον *Προσανατολισμό (Orientation)* ο οποίος αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο το ρομπότ είναι στραμμένο στο χώρο. Συνήθως, σε μορφή γωνιών Euler ή σε μητρώα στροφής πάνω σε πίνακες μητρώου. Την *Ευθεία Κινηματική Αλυσίδα (Kinematic Chain)*. Είναι το μοντέλο που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη δομή του ρομπότ και τις συνδέσεις (συνήθως αρθρώσεις) μεταξύ των μελών του. Την *Αντίστροφη Κινηματική Αλυσίδα (Inverse Kinematics)*. Πρόκειται για τη διαδικασία υπολογισμού των αρθρώσεων όσον αφορά τις γωνίες των αρθρώσεων του ρομπότ, θέλοντας να πετύχει μια συγκεκριμένη θέση και προσανατολισμό. Την *Διαφορική Κινηματική (Differential Kinematics)*. Ο υπολογισμός των ταχυτήτων κίνησης των διαφόρων αρθρώσεων του ρομπότ, σε σχέση με τις επιτρεπόμενες ταχύτητες του μηχανισμού κίνησης. Την *Ταχύτητα*

(*Velocity*) και *Επιτάχυνση (Acceleration)* οι οποίες αφορούν τις χρονικές παραγώγους της θέσης και του προσανατολισμού του ρομπότ. Τέλος τον *Χώρο Διαμόρφωσης (Configuration Space)* ο οποίος περιγράφει όλες τις δυνατές καταστάσεις των αρθρώσεων του ρομπότ. Είναι η προδιαγραφή της θέσης όλων των σημείων του ρομπότ και ο χώρος όλων των διαμορφώσεων του ρομπότ. Ονομάζεται χώρος διαμόρφωσης ή χώρος C. [8]

2.3 Η εταιρεία και το λογισμικό RoboDK

Η RoboDK ιδρύθηκε από τον Albert Nubiola τον Ιανουάριο του 2015. Είναι μια δευτερογενής εταιρεία που προέκυψε από τις έρευνες που διεξήχθησαν στο εργαστήριο CoRo του Πανεπιστημίου ETS στο Μόντρεαλ του Καναδά, ένα από τα κορυφαία εργαστήρια στο τομέα της ρομποτικής στον Καναδά. Η ιστορία της RoboDK ξεκίνησε με τον πρώτο της πελάτη, έναν κατασκευαστή από τη Νέα Ζηλανδία, ο οποίος επιθυμούσε να χρησιμοποιήσει το RoboDK για να προσαρμόσει ένα ρομπότ ABB για φρεζάρισμα.

Αρχικά, η βιβλιοθήκη του RoboDK υποστήριζε 200 διαφορετικά ρομπότ και περίπου 20 κατασκευαστές. Καθώς ο χρόνος προχώρησε, το RoboDK αναπτύχθηκε ταχέως και τώρα εξυπηρετεί εταιρείες κάθε μεγέθους, από μικρές επιχειρήσεις έως μεγαλύτερες διεθνείς εταιρείες. Σήμερα, το RoboDK διαθέτει μια εκτενή βιβλιοθήκη με πάνω από 900 μοντέλα ρομπότ, από 50 διαφορετικούς κατασκευαστές. Η εταιρεία έχει έδρα της τον Καναδά και την Ευρώπη, με περισσότερους από 50 συνεργάτες σε διάφορες περιοχές του πλανήτη. Ο αριθμός των ενεργών χρηστών του RoboDK ανέρχεται σε χιλιάδες. Το 2017, μια ομάδα από το ερευνητικό κέντρο Langley της NASA στη Βιρτζίνια των ΗΠΑ ανέλαβε την ανάπτυξη ενός αυτοματοποιημένου συστήματος επιθεώρησης για πολύπλοκες ατράκτους αεροσκαφών. Οι ερευνητές με χρήση cobot, εκμεταλλευόμενοι ένα UR10 της Universal Robots και το λογισμικό RoboDK για προσομοίωση και offline προγραμματισμό κατέληξαν σε μια αποτελεσματική λύση. [9]

2.4 Ανάλυση και περιγραφή του ρομποτικού βραχίονα Kawasaki RS005L

Ο ρομποτικός βραχίονας Kawasaki RS005L είναι ένα αξιόπιστο και ευέλικτο εργαλείο, σχεδιασμένο να εκτελεί μια ευρεία γκάμα εφαρμογών στον τομέα της αυτοματοποίησης

Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

βιομηχανικών διεργασιών. Μια περαιτέρω προσέγγιση των κύριων λειτουργιών και δυνατοτήτων του Βραχίονα Kawasaki RS005L περιγράφονται:

Ωφέλιμο φορτίο: Ο RS005L μπορεί να αντέξει φορτία έως 5 κιλά, καθιστώντας τον κατάλληλο για διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές, όπως η συγκόλληση, η διαχείριση υλικού και η τοποθέτηση αντικειμένων.

Ευελιξία: Ο βραχίονας διαθέτει 6 βαθμούς ελευθερίας (6-DOF), πράγμα που του επιτρέπει να εκτελεί ποικίλες κινήσεις και να προσαρμόζεται σε διάφορα περιβάλλοντα. Οι αρθρώσεις του μπορούν να κινηθούν σε ένα ευρύ φάσμα γωνιών και θέσεων.

Ακρίβεια: Διαθέτει αισθητήρες ακριβείας που τον καθιστούν κατάλληλο για εργασίες που απαιτούν υψηλή ακρίβεια, όπως η κατασκευή μικρών εξαρτημάτων.

Ασφάλεια: Είναι εξοπλισμένος με αισθητήρες ασφαλείας που ανιχνεύουν την παρουσία ανθρώπων και αντιδρούν αυτόματα για να αποφευχθούν ατυχήματα.

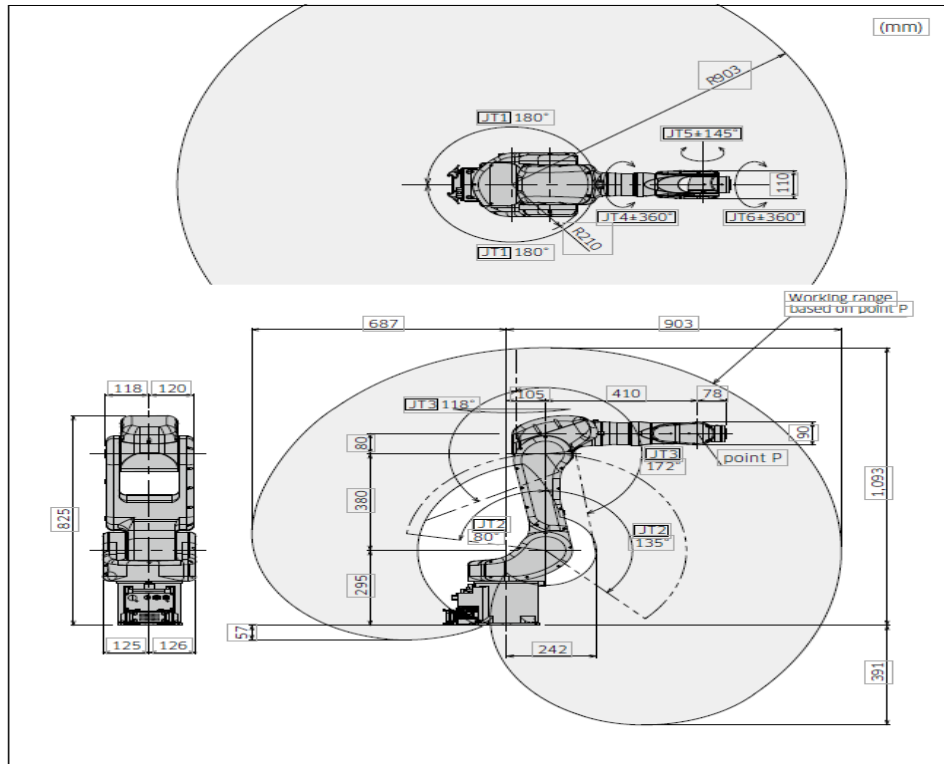
Εύκολος Έλεγχος: Ο ελεγκτής του RS005L είναι εύχρηστος και επιτρέπει στους χρήστες να προγραμματίσουν και να ελέγξουν τον ρομποτικό βραχίονα με ευκολία. Υποστηρίζει πολλές γλώσσες προγραμματισμού και διαθέτει γραφικό περιβάλλον ανάπτυξης.

Εφαρμογές: Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια ευρεία γκάμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων της συγκόλλησης, της διαχείρισης υλικού, της τοποθέτησης εξαρτημάτων, της αυτοματοποίησης διαδικασιών παραγωγής και πολλών άλλων.

Συνεργατικός Σχεδιασμός: Ανήκει στην κατηγορία των ρομπότ με συνεργατικό σχεδιασμό, που σημαίνει ότι μπορεί να εργάζεται δίπλα σε ανθρώπους χωρίς τον κίνδυνο ατυχημάτων. [10]

Στην εικόνα 7, απεικονίζεται η κάτοψη και το προφίλ του βραχίονα RS-005L, μαζί με τις αναλυτικές του διαστάσεις.

Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο



Εικόνα 7. Διάφορες γωνίες λήψης του βραχίονα RS005L [10]

2.5 Ροπή στρέψης, αδράνειας και ειδικά χαρακτηριστικά του βραχίονα

Στον πίνακα 1, παρέχονται οι τιμές ροπής στρέψης και αδράνειας του βραχίονα.

ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΗ ΡΟΠΗ ΣΤΡΕΨΗΣ (N*m)	ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ ΚΑΡΠΟΥ (JT4)	12.3
	ΚΑΜΨΗ ΚΑΡΠΟΥ (JT5)	12.3
	ΣΥΣΤΡΟΦΗ ΚΑΡΠΟΥ (JT6)	7
ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΗ ΡΟΠΗ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ (Kg*m²)	ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ ΚΑΡΠΟΥ (JT4)	0.4
	ΚΑΜΨΗ ΚΑΡΠΟΥ (JT5)	0.4
	ΣΥΣΤΡΟΦΗ ΚΑΡΠΟΥ (JT6)	0.12

Πίνακας 1. Τιμές ροπής στρέψης και αδράνειας από τον κατασκευαστή [10]

Με γνώμονα τις τιμές στρέψης και εφαρμόζοντας την μέγιστη τιμή στρέψης ανά μέλος αντίστοιχα υπολογίζονται οι τιμές αδράνειας, σε μονάδες κιλού επί τετραγωνικό μέτρο (Kg * m²) στα μέλη (JT4), (JT5) και (JT6) αντιστοίχως.

Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Στη Μηχανική, στρέψη προκαλείται σε ένα σώμα όταν ασκείται η ροπή στον άξονά του, που τείνει να τον στρίψει. Μονάδα μέτρησης της στρέψης, στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI), είναι το Νιούτον επί μέτρο ($N \cdot m$). Η στρέψη προκαλεί διατμητικές τάσεις στην επιφάνεια της διατομής του σώματος. Διάτμηση σε ένα σώμα συμβαίνει όταν επενεργούν 2 δυνάμεις ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς, ώστε να είναι κάθετες στον άξονα του.

Από τον ακόλουθο πίνακα 2 παρέχονται πληροφορίες σχετικά με τη μάζα του βραχίονα, η οποία ανέρχεται σε 37 κιλά, καθώς και τα σημεία τοποθέτησής του, τα οποία περιλαμβάνουν επιτραπέζια εγκατάσταση, τοποθέτηση στο δάπεδο και τοποθέτηση στην οροφή. [11]

ΜΑΖΑ (Kg)	37	
ΣΗΜΕΙΑ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ	ΕΠΙΤΡΑΠΕΖΙΟ, ΕΠΙΔΑΠΕΔΙΟ, ΟΡΟΦΗΣ	
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ (°C)	0 – 45
	ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ (%)	35 – 85 (άνευ υετού ή πάγου)
ΒΑΘΜΟΣ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ	ΚΑΡΠΟΣ(IP67 ή παρόμοιο), ΑΞΟΝΕΣ ΒΑΣΗΣ(IP65 ή παρόμοιο)	
ΕΛΕΓΚΤΗΣ / ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ(ΦΑΙΝΟΜΕΝΙΚΗΣ)	F60 / 2KVA	

Πίνακας 2. Ειδικά χαρακτηριστικά του βραχίονα Kawasaki

Το ιδανικό περιβάλλον τοποθέτησης για την εύρυθμη λειτουργία του, είναι σε θερμοκρασία από 0°C έως και 45°C. Όσον αφορά την υγρασία, θα πρέπει να κυμαίνεται από 35-85 %.

Ο βαθμός προστασίας βάσει προτύπου IP, για τους άξονες της βάσης είναι IP65. Αφορά την παροχή σταθερής άμυνας του βραχίονα έναντι στερεών και υγρών στοιχείων. Προστασία από σκόνη (πρώτο ψηφίο): Το "6" στο IP65 σημαίνει ότι η συσκευή είναι εξαιρετικά ανθεκτική στην εισροή σκόνης. Προστασία από το νερό (δεύτερο ψηφίο): Το "5" στο IP65 σημαίνει ότι η συσκευή προστατεύεται από πίδακες νερού από όλες τις κατευθύνσεις. Εάν τα μέλη της βάσης του βραχίονα χτυπηθούν από πιτσιλιές νερού ή ψεκαστούν με πίδακα νερού, θα πρέπει να είναι ασφαλείς και να συνεχίσουν να λειτουργούν. Ωστόσο, το IP65 δεν υπόσχεται προστασία από πλήρη βύθιση ή παρατεταμένη έκθεση στο νερό.

Όσον αφορά τον καρπό του βραχίονα, η προστασία βρίσκεται στο IP67, το οποίο με τη σειρά του σημαίνει ότι τα περιβλήματα με διαβάθμιση IP67 παρέχουν υψηλού επιπέδου προστασία λόγω της υψηλής ικανότητάς τους να προστατεύουν από την είσοδο νερού και σκόνης. Τα

Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

περιβλήματα με βαθμό IP67 είναι σε θέση να αντέχουν σε ψεκασμούς από λάστιχα και πίδακες νερού και μπορούν να αντέξουν στιγμιαία βύθιση σε νερό σε βάθος 150mm έως 1000mm έως και 30 λεπτά το πολύ. [12]

Η τελευταία σειρά του πίνακα, αναφέρεται στον ελεγκτή (controller). Για τον βραχίονα Kawasaki RS005L, χρησιμοποιείται ο F60 με φαινόμενη ισχύ S έως και 2KVA (KiloVoltAmber).

Ο ελεγκτής συναντάται σε δυο τύπους. Ο πρώτος ονομάζεται ανοιχτής κατασκευής (Open structure) με διαστάσεις W300 x D320 x H130 mm και ο δεύτερος ονομάζεται εσώκλειστης κατασκευής (Enclosed structure) με διαστάσεις W300 x D500 x H188 mm. Όπου W, D, H, Πλάτος, Μήκος και Ύψος αντίστοιχα. Έχει μνήμη 16Mbytes, μάζα 8,3 κιλά για τον ανοιχτού τύπου και 16 κιλά για τον κλειστού. Μπορεί κάποιος να ανατρέξει στην επίσημη ιστοσελίδα της Kawasaki για περαιτέρω ιδιότητες του ελεγκτή. [11]

2.6 Ταχύτητες βραχίονα σύμφωνα με τα εργοστασιακά δεδομένα

Στο πίνακα 3, αναγράφονται οι τιμές εύρους κίνησης και οι γωνιακές ταχύτητες κάθε μέλους του βραχίονα οι οποίες και αναλύονται παρακάτω.

ΑΞΟΝΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	Εύρος κίνησης	Μέγιστες ταχύτητες
Περιστροφή Βραχίονα (JT1)	$\pm 180^\circ$	300 ° / s
Κίνηση βραχίονα μέσα-έξω (JT2)	+135° έως -80°	300 ° / s
Κίνηση βραχίονα πάνω-κάτω (JT3)	+118° έως -172°	300 ° / s
Περιστροφή καρπού (JT4)	$\pm 360^\circ$	460 ° / s
Κάμψη καρπού (JT5)	$\pm 145^\circ$	460 ° / s
Συστροφή καρπού (JT6)	$\pm 360^\circ$	740 ° / s

Πίνακας 3. Εύρος κίνησης και γωνιακές ταχύτητες[10]

Αρχικά να σημειωθεί ότι ο ρομποτικός βραχίονας RS005L έχει έξι περιστροφικές αρθρώσεις μεταξύ των μελών του. Τα σύμβολα των αρθρώσεων JT_i του βραχίονα, περιγράφονται στον πίνακα 3 παραπάνω. Οι τιμές του εύρους κίνησης, θα χρησιμοποιηθούν για το ευθύ κινηματικό πρόβλημα και θα προσαρμοστούν στην επόμενη ενότητα, με τη μέθοδο επίλυσης του προβλήματος κατά Denavit-Hartenberg.

Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Ένα ενδιαφέρον σημείο που πρέπει να τονιστεί όσον αφορά την άρθρωση JT1 είναι ότι στη πρώτη άρθρωση του βραχίονα, υπάρχει και τερματικός διακόπτης εύρους, ο οποίος μπορεί να μειώσει κατά το δοκούν τη περιστροφή στον άξονα Z εικόνα 8.



Εικόνα 8. Τερματικός μηχανικός διακόπτης του βραχίονα

2.7 Denavit – Hartenberg Συντεταγμένες και Παράμετροι

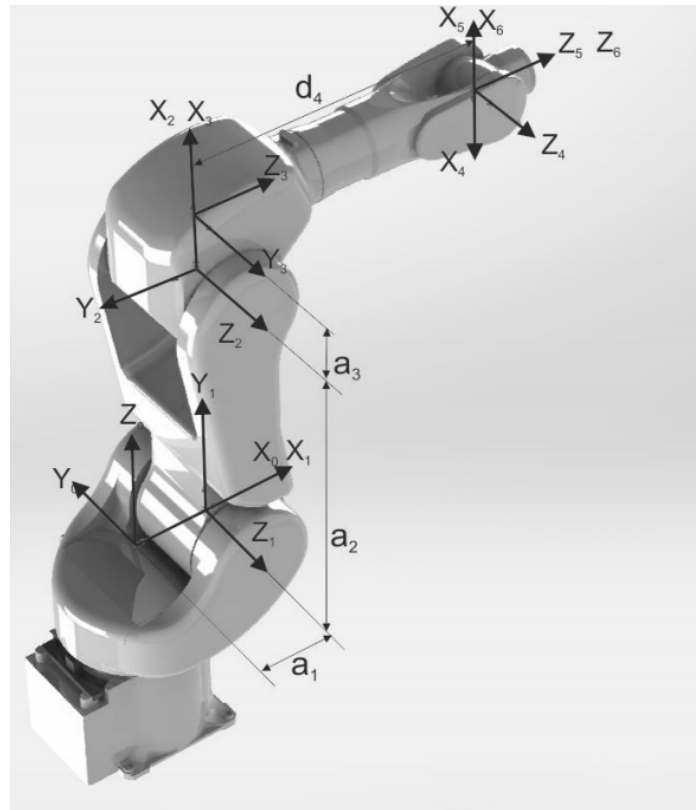
Παρουσιάζονται δύο προβλήματα σχετικά με την κινηματική ανάλυση γωνιών και θέσης των μελών σε ένα ρομποτικό βραχίονα.

Το πρώτο πρόβλημα αφορά το ευθύ κινηματικό, όπου με βάση τις μεταβλητές των αρθρώσεων ενός ρομποτικού βραχίονα, προσδιορίζεται η θέση και ο προσανατολισμός του τελικού εργαλείου.

Το δεύτερο πρόβλημα κινηματικής αφορά το αντίστροφο κινηματικό, όπου με βάση τη θέση του τελικού εργαλείου (TCP), σε σχέση με το αναφερόμενο σύστημα συντεταγμένων, όπου απαιτείται προσδιορισμός των γωνιών των αρθρώσεων.

Για το ευθύ κινηματικό πρόβλημα η πιο διαδεδομένη μέθοδος, είναι η μέθοδος Denavit-Hartenberg. Η επιτυχής χρήση του αλγορίθμου Denavit-Hartenberg απαιτεί την εκτέλεση ορισμένων βημάτων. Αρχικά, πρέπει να οριστεί η αρίθμηση και η κατεύθυνση των αρθρώσεων, και στη συνέχεια, να γίνει ανάθεση του Συστήματος Συντεταγμένων (Σ.Σ) σε κάθε έναν από τους συνδέσμους. [13]

Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο



Εικόνα 9. Συστήματα Συντεταγμένων κατά D-H [14]

Ακολουθεί ο καθορισμός των συντεταγμένων βάσει της παραπάνω εικόνας 9, που σε συνδυασμό με τον πίνακα 4 καθορίζονται και τα Σ.Σ. κατά Denavit-Hartenberg. Δεδομένου ότι ο βραχίονας αποτελείται αποκλειστικά από περιστροφικές αρθρώσεις, όλες οι μεταβλητές παραμένουν σταθερές, εκτός από τις γωνίες θ των αρθρώσεων.

Μέλος	θ_i (Rz)	d_i (Tz)	a_i (Tx)	a_i (Rx)
1	θ_1	0	a_1	a_1
2	θ_2	0	a_2	0
3	θ_3	0	a_3	a_3
4	θ_4	d_4	0	a_4
5	θ_5	0	0	a_5
6	θ_6	0	0	0

Πίνακας 4. Παράμετροι D-H

Στον πίνακα 5, γίνετε αντικατάσταση στις τιμές των γωνιών και των μετατοπίσεων, βάσει του παραπάνω πίνακα 4 και των τιμών από το τεχνικό εγχειρίδιο της εταιρείας Kawasaki.

Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Μέλος	θ_i (Rz)	d_i (Tz)	a_i (Tx)	a_i (Rx)
1	θ_1	0	105	90
2	θ_2	0	380	0
3	θ_3	0	80	90
4	θ_4	410	0	90
5	θ_5	0	0	90
6	θ_6	0	0	0

Πίνακας 5. Μεταβλητές D-H για τον βραχίονα Kawasaki RS005L

2.7.1 Τα Όρια των Αρθρώσεων

Τα όρια γωνιών θ καθορίζονται από τον κατασκευαστή του βραχίονα, όπως περιγράφεται στον πίνακα 6 στην επίσημη ιστοσελίδα της Kawasaki.

Αρθρωση	Min (\leq)	Max (\geq)
<i>JT1</i>	-180°	+180°
<i>JT2</i>	-80°	+135°
<i>JT3</i>	-172°	+118°
<i>JT4</i>	-360°	+360°
<i>JT5</i>	-145°	+145°
<i>JT6</i>	-360°	+360°

Πίνακας 6. Όρια γωνιών από τον κατασκευαστή [10]

Ο υπολογισμός των ορίων των γωνιών JT_i διαφέρει από αυτόν που προβλέπεται με τη μέθοδο Denavit-Hartenberg, λόγω της αναγωγής τους, στις τιμές εύρους. Από JT_i σε θ_i :

$$\theta_1 = -JT_1, \theta_2 = -JT_2 + 90^\circ = JT_2 + 35^\circ, \theta_3 = JT_3 + 90^\circ, \theta_4 = JT_4 + 180^\circ, \theta_5 = JT_5 + 180^\circ, \theta_6 = JT_6$$

Τα όρια των γωνιών κατά Denavit-Hartenberg καθορίζονται τελικά, σύμφωνα με τον πίνακα 7.

Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

<i>Γωνία</i>	<i>Min (\leq)</i>	<i>Max (\geq)</i>
θ_1	-180°	+180°
θ_2	-45°	+170°
θ_3	-82°	+208°
θ_4	-180°	+540°
θ_5	+35°	+325°
θ_6	-360°	+360°

Πίνακας 7. Όρια γωνιών κατά D-H

Ακολουθούν οι πίνακες μετασχηματισμού που προκύπτουν για κάθε μέλος του βραχίονα, χρησιμοποιώντας τις τιμές που περιέχονται στον πίνακα 8, σύμφωνα με τη μέθοδο Denavit–Hartenberg. [14]

$$A_0^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & \alpha_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & \alpha_1 \sin \theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_1^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & \alpha_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & \alpha_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3^4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & \sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & -\cos \theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4^5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & \sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & -\cos \theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_5^6 = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Το μητρώο A_4^5 αναπαριστά τη θέση και τον προσανατολισμό του πέμπτου μέλους έναντι του τέταρτου, ενώ το μητρώο A_5^6 αναπαριστά τον προσανατολισμό του έκτου μέλους έναντι

του πέμπτου. Τα υπομητρώα μεταφοράς αυτών των μητρώων είναι μηδενικά, υποδηλώνοντας την ταύτιση των συστημάτων συντεταγμένων τους. Αυτό είναι αναμενόμενο, δεδομένου ότι οι γωνίες θ_4, θ_5 και θ_6 καθορίζουν τον προσανατολισμό της άκρης του βραχίονα.

Για την αποτελεσματική επίλυση του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος, χρησιμοποιείται το μητρώο A_6^7 , το οποίο περιγράφει τη θέση και τον προσανατολισμό του εργαλείου του ρομπότ. Οι τιμές αυτού του μητρώου παραμένουν σταθερές, με τη μοναδική αλλαγή να αφορά την απόσταση d_7 , η οποία είναι η απόσταση μεταξύ του συστήματος συντεταγμένων του εργαλείου και του συστήματος συντεταγμένων του έκτου μέλους και έχει τιμή 110 mm.

$$A_6^7 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.7.2 Ευθεία Κινηματική Ανάλυση

Η εύρεση της θέσης και του προσανατολισμού του βραχίονα επιτυγχάνεται μέσω της επίλυσης του ευθύ κινηματικού προβλήματος. Αυτό επιτυγχάνεται με τη συνεχή σύνθεση των μητρώων μέσω της διαδοχικής εφαρμογής τους, όπως φαίνεται στον παρακάτω τύπο.

$$A_0^6 = A_0^1 * A_1^2 * A_2^3 * A_3^4 * A_4^5 * A_5^6$$

Για την κινηματική επίλυση χρησιμοποιήθηκαν κάποιες συντομογραφίες για να απλοποιηθούν οι τιμές στους πίνακες. Αυτές είναι οι: $c_i = \cos\theta_i$, $c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$, $s_i = \sin\theta_i$, $s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$ [14]

$$A_0^1 = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & s_1 & \alpha_1 * c_1 \\ s_1 & 0 & -c_1 & \alpha_1 * s_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_1^2 = \begin{bmatrix} c_1 * c_2 & -c_1 * s_2 & s_1 & \alpha_1 * c_1 + \alpha_2 * c_1 * c_2 \\ s_1 * c_2 & -s_1 * s_2 & -c_1 & \alpha_1 * s_1 + \alpha_2 * s_1 * c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & \alpha_2 * s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

$$A_0^3 = \begin{bmatrix} c_1 * c_{23} & s_1 & c_1 * s_{23} & \alpha_1 * c_1 + \alpha_2 * c_1 * c_2 + \alpha_3 * c_1 * c_{23} \\ s_1 * c_{23} & -c_1 & s_1 * s_{23} & \alpha_1 * s_1 + \alpha_2 * s_1 * c_2 + \alpha_3 * s_1 * c_{23} \\ s_{23} & 0 & -c_{23} & \alpha_2 * s_2 + \alpha_3 * s_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_0^4 = \begin{bmatrix} c_1 * c_{23} * c_4 + s_1 * s_4 & c_1 * s_{23} & c_1 * c_{23} * s_4 - s_1 * c_4 & \alpha_1 * c_1 + \alpha_2 * c_1 * c_2 + \alpha_3 * c_1 * c_{23} + d_4 * c_1 * s_{23} \\ s_1 * c_{23} * c_4 - c_1 * s_4 & s_1 * s_{23} & s_1 * c_{23} * s_4 + c_1 * c_4 & \alpha_1 * s_1 + \alpha_2 * s_1 * c_2 + \alpha_3 * s_1 * c_{23} + d_4 * s_1 * s_{23} \\ s_{23} * c_4 & -c_{23} & s_{23} * s_4 & \alpha_2 * s_2 + \alpha_3 * s_{23} - d_4 * c_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_0^5 = \begin{bmatrix} c_5 * (c_1 * c_{23} * c_4 + s_1 * s_4) + s_5 * c_1 * s_{23} & c_1 * s_{23} * s_4 - s_1 * c_4 & s_5 * (c_1 * c_{23} * c_4 + s_1 * s_4) - c_5 * c_1 * s_{23} & \alpha_1 * c_1 + \alpha_2 * c_1 * c_2 + \alpha_3 * c_1 * c_{23} + d_4 * c_1 * s_{23} \\ c_5 * (s_1 * c_{23} * c_4 - c_1 * s_4) + s_5 * s_1 * s_{23} & s_1 * c_{23} * s_4 + c_1 * c_4 & s_5 * (s_1 * c_{23} * c_4 - c_1 * s_4) - c_5 * s_1 * s_{23} & \alpha_1 * s_1 + \alpha_2 * s_1 * c_2 + \alpha_3 * s_1 * c_{23} + d_4 * s_1 * s_{23} \\ c_5 * s_{23} * c_4 - s_5 * c_{23} & s_{23} * s_4 & s_5 * s_{23} * c_4 + c_5 * c_{23} & \alpha_2 * s_2 + \alpha_3 * s_{23} - d_4 * c_{23} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Τελικά, πολλαπλασιάζοντας διαδοχικά πίνακα με πίνακα στο Matlab, προκύπτει ο πίνακας A_0^6 , με τα υπομητρώα στροφής n , o , a και τα υπομητρώα μεταφοράς p , για τον κάθε άξονα x , y και z όπως φαίνεται παρακάτω.

$$A_0^6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Υπομητρώο στροφής:

$$n_x = c_1 * c_{23} * (c_4 * c_5 * c_6 + s_4 * s_6) + s_1 * (s_4 * c_5 * c_6 - c_4 * s_6) + c_1 * s_{23} * s_5 * c_6$$

$$n_y = s_1 * c_{23} * (c_4 * c_5 * c_6 + s_4 * s_6) - c_1 * (s_4 * c_5 * c_6 - c_4 * s_6) + s_1 * s_{23} * s_5 * c_6$$

$$n_z = s_{23} * (c_4 * c_5 * c_6 + s_4 * s_6) - c_{23} * s_5 * c_6$$

$$o_x = c_1 * c_{23} * (-c_4 * c_5 * c_6 + s_4 * s_6) - s_1 * (s_4 * c_5 * c_6 - c_4 * s_6) - c_1 * s_{23} * s_5 * c_6$$

$$o_y = s_1 * c_{23} * (-c_4 * c_5 * c_6 + s_4 * s_6) + c_1 * (s_4 * c_5 * c_6 - c_4 * s_6) - s_1 * s_{23} * s_5 * c_6$$

$$o_z = s_{23} * (-c_4 * c_5 * c_6 + s_4 * s_6) + c_{23} * s_5 * c_6$$

$$a_x = c_1 * c_{23} * c_4 * s_5 + s_1 * s_4 * s_5 - c_1 * s_{23} * c_5$$

$$a_y = s_1 * c_{23} * c_4 * s_5 - c_1 * s_4 * s_5 - s_1 * s_{23} * c_5$$

$$a_z = s_{23} * c_4 * s_5 + c_{23} * c_5$$

Υπομητρώο Μεταφοράς:

$$p_x = \alpha_1 * c_1 + \alpha_2 * c_1 * c_2 + \alpha_3 * c_1 * c_{23} + d_4 * c_1 * s_{23} = c_1 * (\alpha_1 + \alpha_2 * c_2 + \alpha_3 * c_{23} + d_4 * s_{23})$$

$$p_y = \alpha_1 * s_1 + \alpha_2 * s_1 * c_2 + \alpha_3 * s_1 * c_{23} + d_4 * s_1 * s_{23} = s_1 * (\alpha_1 + \alpha_2 * c_2 + \alpha_3 * c_{23} + d_4 * s_{23})$$

$$p_z = \alpha_2 * s_2 + \alpha_3 * s_{23} - d_4 * c_{23}$$

2.7.3 Αντίστροφη Κινηματική Ανάλυση

Μέσω της επίλυσης του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος είναι δυνατό να προσδιοριστούν οι γωνίες των αρθρώσεων για την επίτευξη μιας επιθυμητής θέσης και προσανατολισμού του τερματικού εργαλείου TCP (Tool Center Point). Η επίλυση αυτού του προβλήματος είναι πιο πολύπλοκη, σε σχέση με του ευθύ κινηματικού. Αντί για απλές μεταβλητές θέσης (X, Y, Z), απαιτούνται επίσης μεταβλητές προσανατολισμού (O, A, T) του εργαλείου, προσθέτοντας έτσι πολυπλοκότητα στην επίλυση.

Για τον προσδιορισμό του προσανατολισμού του άκρου του βραχίονα, χρησιμοποιούνται τρεις γνωστοί μέθοδοι: Euler, BASE (ως προς το σύστημα της βάσης) και Roll-Pitch-Yaw όπως παρουσιάζονται σε αντίστοιχα μητρώα. Παρακάτω αναφέρονται οι πίνακες μετασχηματισμού για κάθε μία μέθοδο που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί. [14]

Μέθοδος Euler:

$$A_{euler} = \begin{bmatrix} \cos O \cos A \cos T - \sin O \sin T & -\cos T \sin O - \cos O \cos A \sin T & \cos O \sin A & X \\ \cos O \sin T + \cos A \cos T \sin O & \cos O \cos T - \cos A \sin O \sin T & \sin O \sin A & Y \\ -\cos T \sin A & \sin A \sin T & \cos A & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Μέθοδος Base:

$$A_{BASE} = \begin{bmatrix} \cos T \cos A & \cos T \sin A \sin O - \cos O \sin T & \sin O \sin T + \cos O \cos T \sin A & X \\ \cos A \sin T & \cos O \cos T + \sin O \sin A \sin T & \cos O \sin T \sin A - \cos T \sin O & Y \\ -\sin A & \cos A \sin O & \cos A \cos O & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκε η τελευταία μέθοδος που αναφέρεται στη χρήση του μητρώου Roll-Pitch-Yaw. [14]

Ο πίνακας προσανατολισμού που προκύπτει βρέθηκε ότι είναι ο εξής:

Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

$$A_{RPY} = \begin{bmatrix} \cos O \cos A & \cos O \sin A \sin T - \cos T \sin O & \sin O \sin T + \cos O \cos T \sin A & X \\ \cos A \sin O & \cos O \cos T + \sin O \sin A \sin T & \cos T \sin O \sin A - \cos O \sin T & Y \\ -\sin A & \cos A \sin T & \cos A \cos T & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Η μέθοδος RPY, ξεκινάει με τον υπολογισμό της θέσης και του προσανατολισμού του έκτου μέλους του ρομπότ. Για να γίνει αυτό, εφαρμόζεται ο τύπος: $A_0^6 = A_0^7 * A_6^7$

Όπου ως A_0^7 χρησιμοποιείται το μητρώο που δημιουργήθηκε παραπάνω και ως A_6^7 ο αντίστροφος πίνακας του A_6^7 και είναι:

$$A_6^7 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Γνωρίζοντας το μητρώο A_0^6 , ορίζεται μία θέση και έναν προσανατολισμό για το άκρο του βραχίονα και υπολογίζονται οι γωνίες των αρθρώσεων.

$$p_x = c_1 * (\alpha_1 + \alpha_2 * c_2 + \alpha_3 * c_{23} + d_4 * s_{23}) \quad (1)$$

$$p_y = s_1 * (\alpha_1 + \alpha_2 * c_2 + \alpha_3 * c_{23} + d_4 * s_{23}) \quad (2)$$

$$p_z = \alpha_2 * s_2 + \alpha_3 * s_{23} - d_4 * c_{23} \quad (3)$$

Διαιρώντας τη σχέση (2) με την σχέση (1) προκύπτει:

$$\frac{p_y}{p_x} = \frac{s_1 * (\alpha_1 + \alpha_2 * c_2 + \alpha_3 * c_{23} + d_4 * s_{23})}{c_1 * (\alpha_1 + \alpha_2 * c_2 + \alpha_3 * c_{23} + d_4 * s_{23})} = \frac{s_1}{c_1}$$

Η γωνία θ_1 υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{p_y}{p_x}$$

Γνωρίζοντας τη γωνία θ_1 , μπορεί να υπολογιστεί η γωνία θ_2 . Από τον πολλαπλασιασμό των εξισώσεων (1) με $\cos\theta_1$ και τη (2) με $\sin\theta_1$, προκύπτουν οι σχέσεις (4) και (5) αντίστοιχα.

$$p_x * c_1 = (c_1 * (\alpha_1 + \alpha_2 * c_2 + \alpha_3 * c_{23} + d_4 * s_{23})) * c_1 \quad (4)$$

$$p_y * s_1 = (s_1 * (\alpha_1 + \alpha_2 * c_2 + \alpha_3 * c_{23} + d_4 * s_{23})) * s_1 \quad (5)$$

Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Με πρόσθεση κατά μέλη των δύο εξισώσεων (4) και (5), προκύπτει η εξίσωση (6).

$$\begin{aligned} p_x * c_1 + p_y * s_1 &= s_1^2 * (\alpha_1 + \alpha_2 * c_2 + \alpha_3 * c_{23} + d_4 * s_{23}) + c_1^2 * (\alpha_1 + \alpha_2 * c_2 + \alpha_3 * c_{23} + d_4 * s_{23}) \\ \Rightarrow p_x * c_1 + p_y * s_1 &= \alpha_1 + \alpha_2 * c_2 + \alpha_3 * c_{23} + d_4 * s_{23} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow p_x * c_1 + p_y * s_1 - \alpha_1 - \alpha_2 * c_2 = \alpha_3 * c_{23} + d_4 * s_{23} \quad (6)$$

Χωρίζονται τα γνωστά με τα άγνωστα στην εξίσωση (3) και προκύπτει η εξίσωση (7).

$$(3) \Leftrightarrow p_z - \alpha_2 * s_2 = \alpha_3 * s_{23} - d_4 * c_{23} \quad (7)$$

Υψώνοντας στο τετράγωνο τις σχέσεις (6) και (7) και αθροίζοντας τες προκύπτει η σχέση (8).

$$(p_x * c_1 + p_y * s_1 - \alpha_1 - \alpha_2 * c_2)^2 + (p_z - \alpha_2 * s_2)^2 = \alpha_3^2 + d_4^2 \quad (8)$$

Η καινούρια σχέση είναι της μορφής:

$$A \sin \theta_2 - B \cos \theta_2 = C \quad (9)$$

Οι ισότητες των μελών είναι:

$$A = -2 * \alpha_2 * p_z$$

$$B = -2 * \alpha_2 * (p_x * c_1 + p_y * s_1 - \alpha_1)$$

$$C = \alpha_3^2 + d_4^2 - \alpha_2^2 - p_z^2 - (p_x * c_1 + p_y * s_1 - \alpha_1)^2$$

Επιλύοντας την εξίσωση (9) προκύπτει η γωνία θ_2 , η οποία έχει δύο (2) δυνατές λύσεις.

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left(\frac{C}{\pm \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}} \right) + \tan^{-1} \frac{B}{A}$$

Η παραπάνω εξίσωση ισχύει μόνο όταν ο παρονομαστής $A^2 + B^2 > C^2$, αφού η τετραγωνική ρίζα δεν μπορεί να πάρει αρνητικό αριθμό, δηλαδή:

$$(-2 * \alpha_2 * p_z)^2 + (2 * \alpha_2 * (p_x * c_1 + p_y * s_1 - \alpha_1))^2 > (\alpha_3^2 + d_4^2 - \alpha_2^2 - p_z^2 - (p_x * c_1 + p_y * s_1 - \alpha_1)^2)^2$$

Εφόσον υπολογίστηκε η γωνία θ_2 , υπολογίζεται ακολούθως και η γωνία θ_3 . Με βάση τη σχέση (7), λύνεται η εξίσωση ως προς $\cos \theta_{23}$ και, έπειτα, ως προς $\sin \theta_{23}$ και προκύπτουν οι σχέσεις (10) και (11) αντίστοιχα.

$$(7) \Rightarrow c_{23} = \frac{-p_z + \alpha_2 * s_2 + \alpha_3 * s_{23}}{d_4} \quad (10)$$

$$(7) \Rightarrow s_{23} = \frac{p_z - \alpha_2 * s_2 + d_4 * c_{23}}{\alpha_3} \quad (11)$$

Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Βάση της σχέσης (6) και αντικαθιστώντας μία φορά την εξίσωση (10) και μια φορά την εξίσωση (11), λύνεται η εξίσωση ως προς $\sin\theta_{23}$ και $\cos\theta_{23}$ αντίστοιχα, και προκύπτουν οι δύο παρακάτω εξισώσεις:

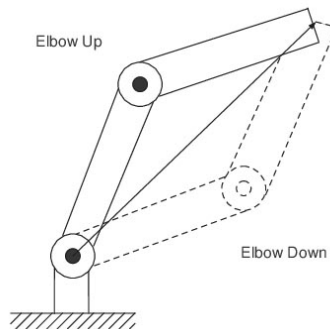
$$(6) \xrightarrow{(10)} s_{23} = \frac{p_x * c_1 + p_y * s_1 - \alpha_1 - \alpha_2 * c_2 - \frac{\alpha_3}{d_4} * (-p_z + \alpha_2 * s_2)}{\frac{\alpha_3^2 + d_4^2}{d_4}} \quad (12)$$

$$(6) \xrightarrow{(11)} c_{23} = \frac{p_x * c_1 + p_y * s_1 - \alpha_1 - \alpha_2 * c_2 - \frac{d_4}{\alpha_3} * (p_z - \alpha_2 * s_2)}{\frac{\alpha_3^2 + d_4^2}{\alpha_3}} \quad (13)$$

Διαιρώντας τη σχέση (12) με τη σχέση (13), προκύπτει η γωνία θ_3 όπως φαίνεται παρακάτω.

$$\theta_3 = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{p_x * c_1 + p_y * s_1 - \alpha_1 - \alpha_2 * c_2 - \frac{\alpha_3}{d_4} * (-p_z + \alpha_2 * s_2)}{\frac{\alpha_3^2 + d_4^2}{d_4}}}{\frac{p_x * c_1 + p_y * s_1 - \alpha_1 - \alpha_2 * c_2 - \frac{d_4}{\alpha_3} * (p_z - \alpha_2 * s_2)}{\frac{\alpha_3^2 + d_4^2}{\alpha_3}}} \right) - \theta_2$$

Ως αποτέλεσμα των ανωτέρω υπολογισμών, παρατηρείται ότι υπάρχουν δύο λύσεις για τη γωνία θ_2 και ως εκ τούτου, για τη γωνία θ_3 . Το πρώτο ζεύγος λύσεων σημαίνει ότι ο "αγκώνας" του βραχίονα είναι στραμμένος προς τα επάνω, ενώ το δεύτερο ζεύγος σημαίνει ότι ο "αγκώνας" είναι στραμμένος προς τα κάτω. Ανεξάρτητα από την επιλογή μεταξύ των δύο λύσεων, ο βραχίονας φτάνει στο ίδιο τελικό σημείο. Αυτό φαίνεται καθαρά στην αναπαράσταση της εικόνας 10.



Εικόνα 10. Δύο ζεύγη γωνιών με ίδιο τελικό σημείο [15]

Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Αφού έχουν υπολογιστεί οι γωνίες θ_1, θ_2 και θ_3 που καθορίζουν τη θέση του βραχίονα, είναι απαραίτητο να υπολογιστούν οι γωνίες θ_4, θ_5 και θ_6 που καθορίζουν τον προσανατολισμό του.

Για αυτόν τον υπολογισμό χρησιμοποιείται το υπομητρώο στροφής R_3^6 .

Για να βρεθεί αυτό το υπομητρώο χρειάζονται τα υπομητρώα R_0^3 και R_0^6 του A_0^6 .

$$R_3^6 = (R_0^3)^{-1} * R_0^6$$

Όπου το R_3^6 είναι της μορφής:

$$R_3^6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix}$$

Το υπομητρώο R_3^6 μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια της παρακάτω εξίσωσης:

$$R_3^6 = R_3^4 * R_4^5 * R_5^6$$

$$R_3^6 = \begin{bmatrix} c_4 * c_5 * c_6 + s_4 * s_6 & -c_4 * c_5 * s_6 + s_4 * c_6 & c_4 * s_5 \\ s_4 * c_5 * c_6 - c_4 * s_6 & -s_4 * c_5 * s_6 - c_4 * c_6 & s_4 * s_5 \\ s_5 * c_6 & -s_5 * s_6 & -c_5 \end{bmatrix}$$

Εάν η γωνία θ_5 είναι ίση με 0° ή 180° , τότε το μητρώο R_3^6 απλοποιείται πολύ. Λόγω, του πεδίου ορισμού της θ_5 ως προς Denavit-Hartenberg, όπου παίρνει τιμές $35^\circ \leq \theta_5 \leq 325^\circ$, η γωνιά θ_5 μπορεί να πάρει μόνο την τιμή 180. Έτσι αν $\theta_5=180$, τότε:

$$R_3^6 = \begin{bmatrix} -c_4 * c_6 + s_4 * s_6 & c_4 * s_6 + s_4 * c_6 & 0 \\ -s_4 * c_6 - c_4 * s_6 & s_4 * s_6 - c_4 * c_6 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_3^6(1,1) = -c_4 * c_6 + s_4 * s_6 = -\cos(\theta_4 + \theta_6)$$

(14)

$$R_3^6(2,1) = -s_4 * c_6 - c_4 * s_6 = -\sin(\theta_4 + \theta_6)$$

(15)

Διαιρώντας τη σχέση (15) με τη σχέση (14) υπολογίζονται οι γωνίες θ_4 και θ_6 .

$$\tan(\theta_4 + \theta_6) = \frac{R_3^6(2,1)}{R_3^6(1,1)} = \frac{-\sin(\theta_4 + \theta_6)}{-\cos(\theta_4 + \theta_6)} \Rightarrow \theta_4 + \theta_6 = \tan^{-1} \frac{R_3^6(2,1)}{R_3^6(1,1)}$$

Παρατηρώντας την παραπάνω σχέση, η θ_4 με τη θ_6 δεν μπορούν να υπολογιστούν ξεχωριστά. Έτσι χάνεται ένας βαθμός ελευθερίας. Για την επίλυση της εξίσωσης θεωρείτε η θ_4 ίση με το

Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

μηδέν ($\theta_4=0$). Διαφορετικά, κρατάει την προηγούμενη τιμή της. Έτσι, μπορεί να υπολογιστεί η γωνία θ_6 .

Αν η θ_5 δεν είναι 180° , τότε προκύπτει:

$$\begin{aligned}
 a_z &= R_3^6(3,3) = -\cos \theta_5 \\
 \cos \theta_5 &= -a_z \\
 \cos^2 \theta_5 + \sin^2 \theta_5 &= 1 \\
 \sin \theta_5 &= \pm \sqrt{1 - a_z^2} \\
 \tan \theta_5 &= \frac{\pm \sqrt{1 - a_z^2}}{-a_z} \Rightarrow \theta_5 = \tan^{-1} \frac{\pm \sqrt{1 - a_z^2}}{-a_z} = \tan^{-1} \frac{I_5 * \sqrt{1 - a_z^2}}{-a_z}
 \end{aligned}$$

Όπου $I_5 = \pm 1$. Όταν $I_5 = 1$, τότε η λύση που προκύπτει είναι ανεστραμμένου καρπού, ενώ για $I_5 = -1$ είναι μη ανεστραμμένου καρπού.

Πλέον, με γνωστή τη γωνία θ_5 , υπολογίζεται η γωνία θ_4 .

$$\begin{aligned}
 R_3^6(1,3) &= a_x = \cos \theta_4 * \sin \theta_5 \\
 R_3^6(2,3) &= a_y = \sin \theta_4 * \sin \theta_5 \\
 \theta_4 &= \tan^{-1} \frac{I_5 * a_y}{I_5 * a_x}
 \end{aligned}$$

Τέλος υπολογίζεται η γωνία θ_6 :

$$\begin{aligned}
 R_3^6(3,1) &= n_z = \cos \theta_6 * \sin \theta_5 \\
 R_3^6(3,2) &= o_z = \cos \theta_6 * \sin \theta_5 \\
 \theta_6 &= \tan^{-1} \frac{-I_5 * o_z}{I_5 * n_z}
 \end{aligned}$$

Κεφάλαιο 3. Μεθοδολογία επίλυσης και μοντέλα προσομοίωσης

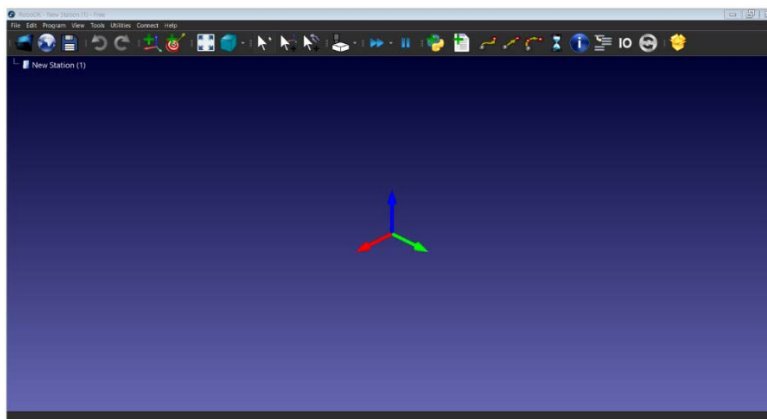
3.1 Ανάλυση των απαιτήσεων για το μοντέλο προσομοίωσης

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται η διαδικασία εγκατάστασης του λογισμικού RoboDK μαζί με το μοντέλο της Kawasaki RS005L. Αρχικά, ο χρήστης πρέπει να λάβει και να εγκαταστήσει το λογισμικό της εταιρείας από την επίσημη ιστοσελίδα της RoboDK, <https://robodk.com>. Δεν απαιτείται οικονομική επένδυση για εργασία με βασικά αρχεία εξομοίωσης, καθώς ο χρήστης μπορεί να εκτελέσει πολλές λειτουργίες με τη δωρεάν δοκιμαστική έκδοση. Σημειώνεται ότι η έκδοση που εγκαταστάθηκε είναι η **ver 5.6.8**.

Επιπλέον, το λογισμικό μπορεί να εγκατασταθεί στη μεγαλύτερη πλειονότητα λειτουργικών συστημάτων όπως στα windows 32 bit αλλά και 64 bit, στα Ubuntu, σε Macintosh, σε ένα raspberry pi, καθώς και σε κινητά τηλέφωνα android ή iPhone.

Στη παρούσα διπλωματική θα γίνει εγκατάσταση σε λειτουργικό Windows 64 bit.

Αφού εγκατασταθεί επιτυχώς το πρόγραμμα, «ανοίγεται» από το εικονίδιο συντόμευσης και θα εμφανιστεί στην οθόνη το περιβάλλον εργασίας όπως φαίνεται στην εικόνα 11.

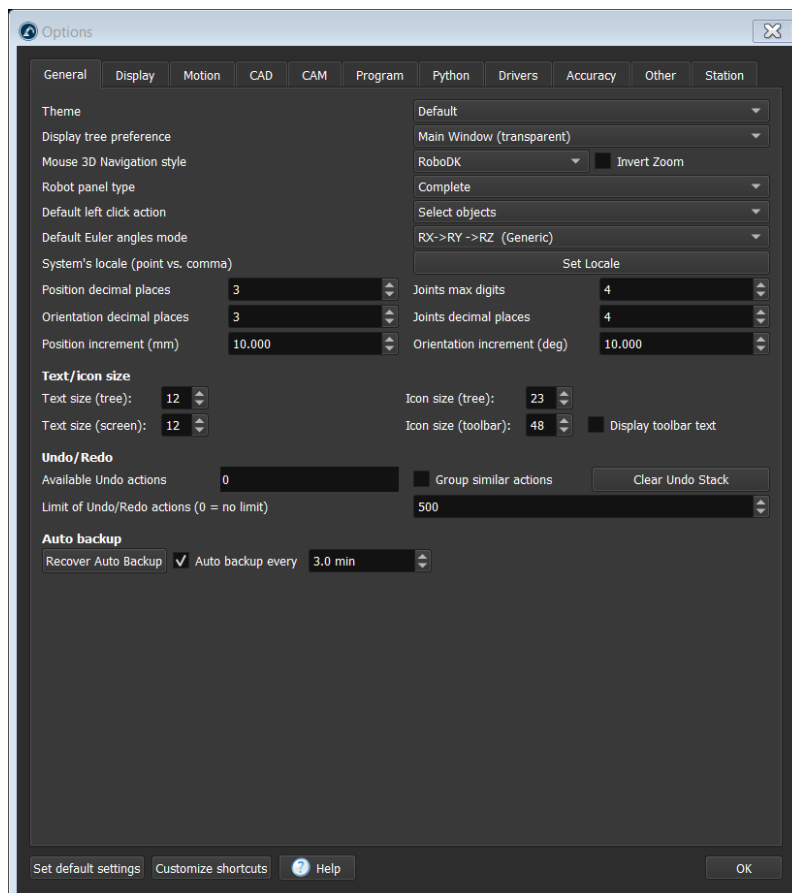


Εικόνα 11. Περιβάλλον εργασίας του RoboDK

Από το εργαλείο Tools το οποίο βρίσκεται στο κύριο μενού του προγράμματος, επιλέγεται η επιθυμητή γλώσσα στο περιβάλλον εργασίας του λογισμικού.



Από το κύριο μενού και πάλι, στην επιλογή Tools, επιλέγοντας την τελευταία γραμμή επιλογής «Options», οργανώνεται το περιβάλλον προγραμματισμού, σύμφωνα με τις προτιμήσεις του εκάστοτε χρήστη, όπως φαίνεται στην εικόνα 12.











Το πρόγραμμα, παρέχει αρκετές δυνατότητες όπως η προσαρμογή των γραμματοσειρών (φόντο, στυλ, μέγεθος), ο τρόπος αποθήκευσης της εργασίας, (με δυνατότητα αυτόματης αποθήκευσης), η αναπαράσταση των χρωμάτων στους καρτεσιανούς άξονες, η ακρίβεια στη θέση του βραχίονα, και άλλες επιλογές.










Εικόνα 12. Επιλογή από το μενού Tools/Options

Στον πίνακα 8, υπάρχει ο πλήρης κατάλογος εργαλείων, όπως εμφανίζεται στο πάνω οριζόντιο μενού του προγράμματος.

	<p>Open Load a new file (RoboDK RDK Station) or a supported file type (robot, tool, STEP, IGES, STL, ...)</p>	<p>Άνοιγμα ενός φακέλου ή αρχείου του υπολογιστή για το πρόγραμμα RoboDK ή ένας τύπος αρχείου με κατάληξη (IGES, STEP, STL, ...)</p>
	<p>Open online library Show the online library (robots, tools and sample objects)</p>	<p>Ανοίγει την βιβλιοθήκη του RoboDK στο διαδίκτυο για την εύρεση ρομπότ, εργαλείων και διαφόρων αντικειμένων</p>

	Save Station Save the RoboDK station (RDK file)	Αποθήκευση του σταθμού μας σαν (αρχείο RDK)
	Undo Undo the last command (Ctrl+Z)	Αναίρεση της τελευταίας εντολής
	Redo Redo the last command (Ctrl+Y)	Επανάληψη της τελευταίας εντολής
	Add a reference frame Reference frames allow placing objects with respect to each other	Προσθήκη πλαισίου αναφοράς αξόνων. Επιτρέπει την προσθήκη αντικειμένων με σεβασμό στα πλαίσια αναφοράς των αξόνων τους.
	Add a new target Robot targets record robot positions with respect to a reference frame or in joint coordinates	Προσθήκη νέου στόχου Οι ρομποτικοί στόχοι αποτυπώνουν τις θέσεις του ρομπότ σε σχέση με τα πλαίσια αναφοράς των αξόνων
	Fit All Update the 3D view to display all items	Προσαρμογή πλάνου στη οθόνη Ενημέρωση της τρισδιάστατης προβολής για να εμφανιστούν όλα τα στοιχεία
	Isometric View Display the default 3D isometric view	Ισομετρική λήψη Εμφάνιση της προεπιλεγμένης τρισδιάστατης ισομετρικής προβολής
	Move reference Frames Move a reference frame by dragging it on the screen (hold Alt)	Μετακίνηση των πλαισίων αναφοράς Μετακίνηση ενός πλαισίου αναφοράς σύροντάς το στην οθόνη (κρατήστε πατημένο το Alt)
	Move TCP (robot tool) Move a robot TCP by dragging it on the screen (hold Alt+Shift)	Μετακίνηση TCP (εργαλείο ρομπότ) Μετακινήστε ένα TCP ρομπότ σύροντάς το στην οθόνη (κρατήστε πατημένα τα πλήκτρα Alt+Shift).
	Check collisions Activate or deactivate collision checking.	Έλεγχος συγκρούσεων Ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση του ελέγχου συγκρούσεων.

	Fast simulation Accelerate the simulation speed (hold the space bar)	Γρήγορη προσομοίωση Επιταχύνετε η ταχύτητα προσομοίωσης (κρατήστε πατημένο το πλήκτρο διαστήματος)
	Pause simulation The simulation can be resumed by pressing the space bar	Παύση προσομοίωσης Η προσομοίωση μπορεί να συνεχιστεί πατώντας το πλήκτρο διαστήματος
	Add Program Add a new robot program for simulation and program generation	Προσθήκη προγράμματος Προσθήκη νέου προγράμματος ρομπότ για προσομοίωση και δημιουργία προγράμματος
	Add Python Program Add a new Python macro	Προσθήκη προγράμματος Python Προσθήκη νέας μακροεντολής Python
	Move Joint Instruction Add a new joint movement instruction	Εντολή προσθήκης φυσικής κίνησης Προσθήκη μια νέας εντολής φυσικής κίνησης άρθρωσης
	Move Linear Instruction Add a new linear movement instruction	Εντολή προσθήκης γραμμικής κίνησης Προσθήκη μια νέας εντολής γραμμικής κίνησης άρθρωσης
	Export Simulation Export a program or simulation as a 3D, PDF or 3D HTML file.	Εξαγωγή προσομοίωσης Εξαγωγή ενός προγράμματος ή μιας προσομοίωσης ως αρχείο 3D, PDF ή 3D HTML αρχείο.

Πίνακας 8. Κατάλογος εργαλείων του RoboDK [16]

3.2 Εισαγωγή του μοντέλου Kawasaki RS005L

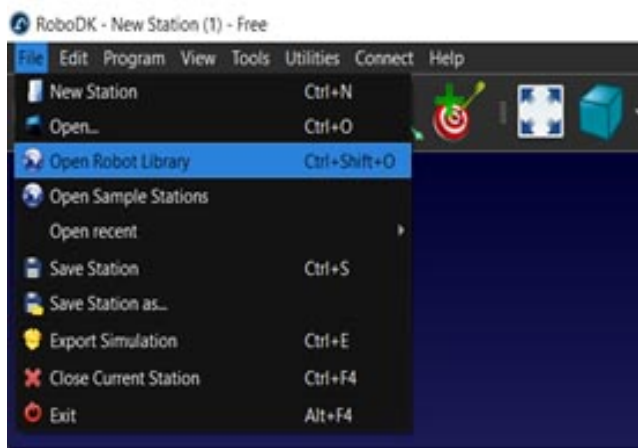
Κατά την εισαγωγή του μοντέλου στο πρόγραμμα RoboDK, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψιν ότι υπάρχουν ορισμένα αρχικά βήματα που πρέπει να ακολουθηθούν από τον χρήστη, για όλα τα μοντέλα προσομοίωσης, πριν ξεκινήσει ο σχεδιασμός τους στο λογισμικό.

Πρωτίστως πρέπει να εντοπιστεί και να εισαχθεί από τη βιβλιοθήκη, το ρομποτικό μοντέλο, το οποίο στην παρούσα περίπτωση είναι το Kawasaki RS005L. Αυτό μπορεί να

πραγματοποιηθεί, είτε κάνοντας κλικ στο εικονίδιο της παγκόσμιας σφαίρας στην επάνω αριστερή γωνία, είτε μέσω του μενού "File" επιλέγοντας την επιλογή "Open Robot Library", όπως φαίνεται στις εικόνες 13 και 14 αντίστοιχα.



Εικόνα 13. Εισαγωγή βιβλιοθήκης μέθοδος α΄

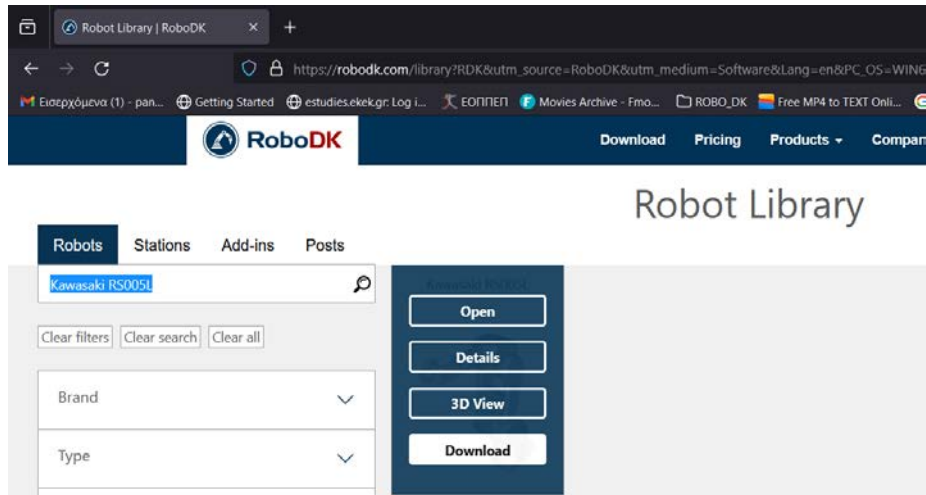


Εικόνα 14. Εισαγωγή βιβλιοθήκης μέθοδος β΄

Επιλέγεται ο ρομποτικός βραχίονας που απαιτείται, κάνοντας downloading το αρχείο, όπως φαίνεται στην εικόνα 15. [17]

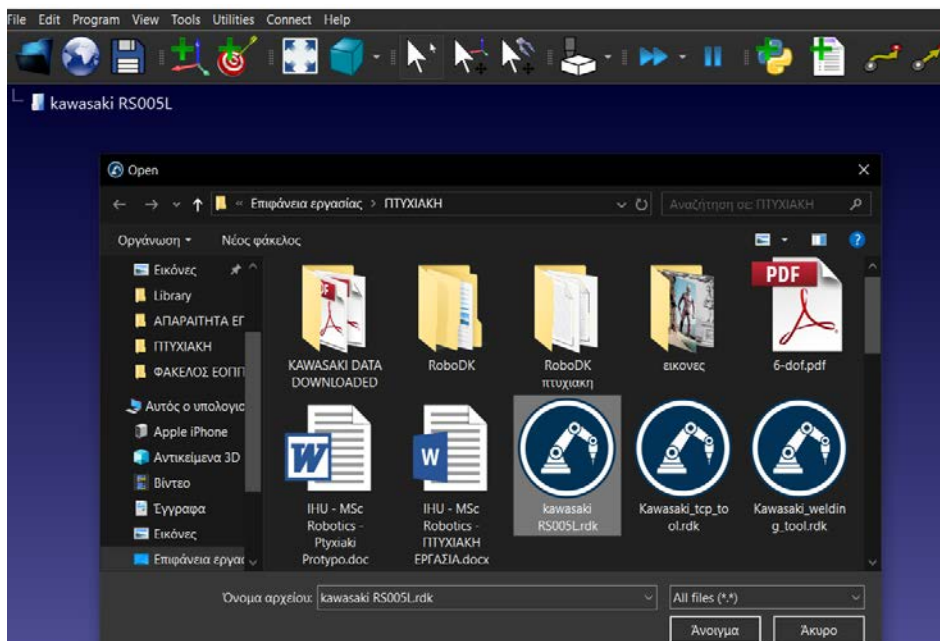
Ο ζητούμενος ρομποτικός βραχίονας, είναι ο Kawasaki RS005L οπότε και τον «κατεβάζουμε» πατώντας το πλήκτρο «download» στο παράθυρο της βιβλιοθήκης που ανοίγει.

Κεφάλαιο 3. Μεθοδολογία επίλυσης και μοντέλα προσομοίωσης



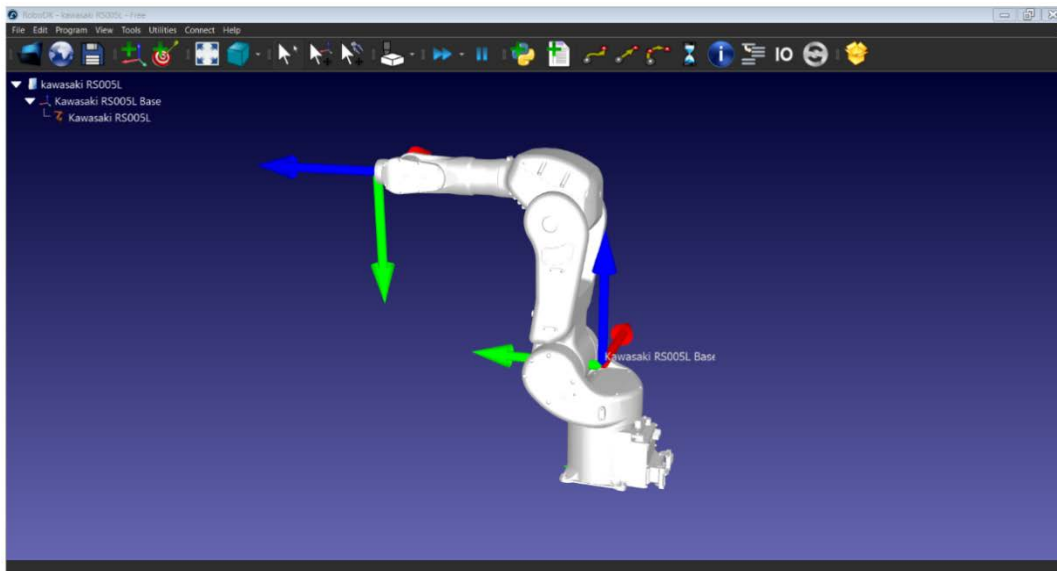
Εικόνα 15. Λήψη του βραχίονα από το διαδίκτυο

Στον φάκελο που έχει αποθηκευτεί το μοντέλο, επιλέγεται «Άνοιγμα» για να εμφανιστεί στην επιφάνεια εργασίας, βλ. εικόνα 16.



Εικόνα 16. Φόρτωση του μοντέλου Kawasaki RS005L

Εμφανίζεται ο βραχίονας μέσα στο περιβάλλον του λογισμικού μαζί με τους άξονες x, y, z, όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα 17.



Εικόνα 17. Ο ρομποτικός βραχίονας στο RoboDK

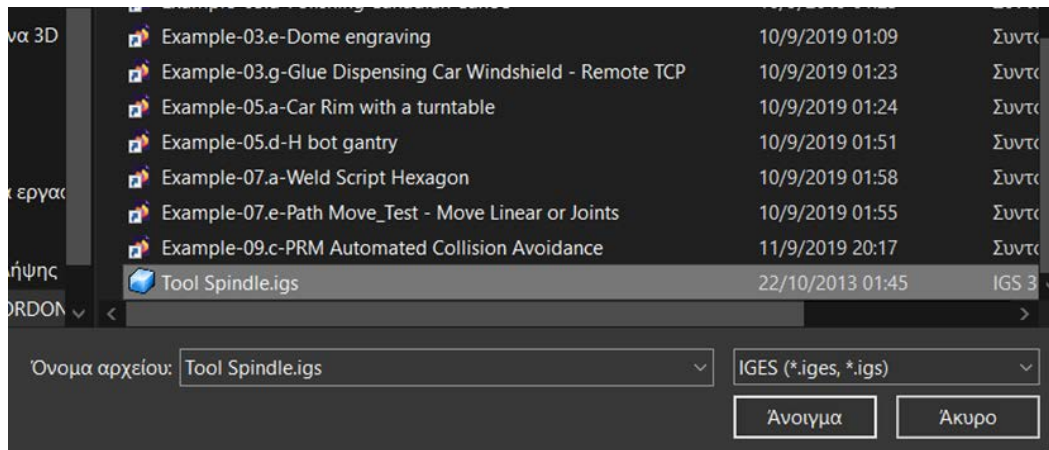
3.3 Ενσωμάτωση εργαλείου στον ρομποτικό βραχίονα

Στην προηγούμενη ενότητα έγινε αναφορά για το τρόπο εισαγωγής του μοντέλου της παρούσας πτυχιακής μέσα στο λογισμικό RoboDK και κατά κανόνα, οποιουδήποτε μοντέλου ρομποτικού βραχίονα που έχει στη διάθεσή του το πρόγραμμα.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει πλέον κατανοητός ο τρόπος πλοήγησης, μέσα στο περιβάλλον του RoboDK. Για την αποτελεσματικότερη αλλά και πιο πρακτική εξάσκηση του χρήστη, κρίνεται χρήσιμο να εισαχθεί ένα εργαλείο (Tool) στο τελευταίο μέλος του βραχίονα, ώστε να γίνει το πείραμα, ακόμα πιο ρεαλιστικό.

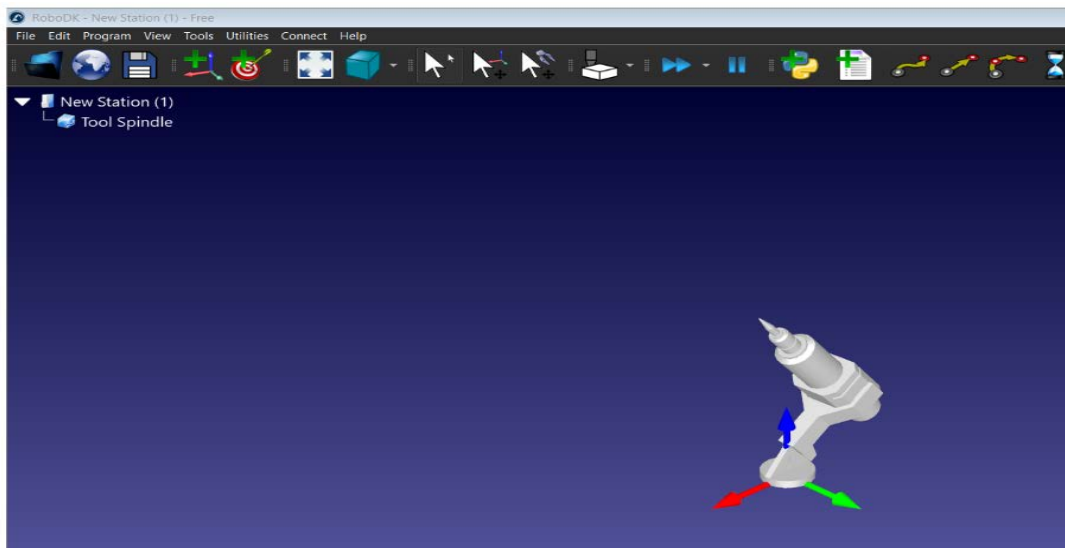
Αρχικά γίνεται εισαγωγή του εργαλείου, ανοίγοντας το μενού «Load file (local)», όπως ακριβώς είχε εισαχθεί το μοντέλο του βραχίονα. Θα πρέπει να «φορτωθεί» το αντικείμενο τριών διαστάσεων (3D) παραδείγματος χάριν, ένα αρχείο με κατάληξη IGES, όπως ακριβώς φαίνεται στην εικόνα 18.

Από το μενού της βιβλιοθήκης στο κάτω δεξιά άκρο του παραθύρου που άνοιξε, μετατρέπεται η επιλογή από «All file(*.*)», σε «IGES(*.iges, *.igs)». Με αυτό τον τρόπο το πρόγραμμα «ψάχνει» όλα τα αντικείμενα που έχουν κατάληξη «IGES».



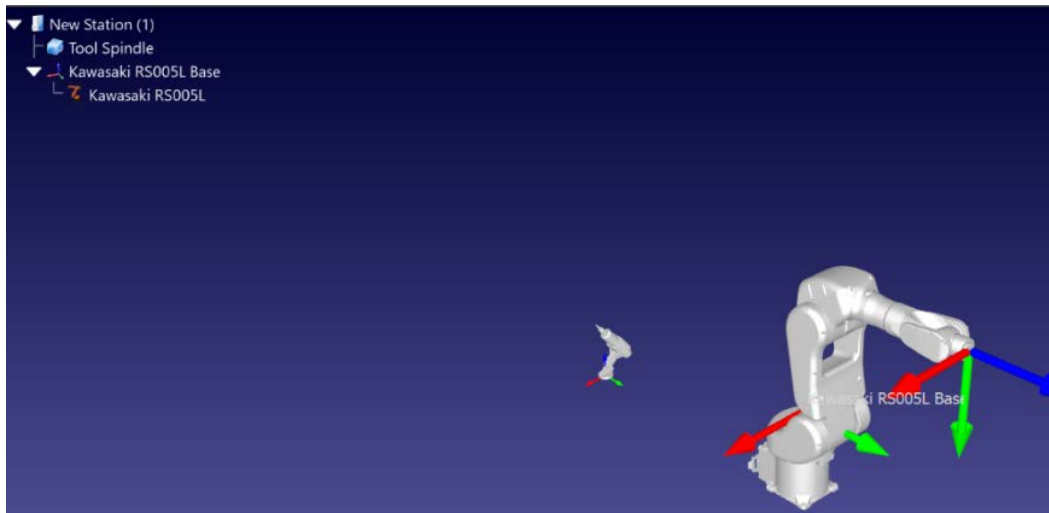
Εικόνα 18. Επιλογή εργαλείου για τον βραχίονα

Ανοίγοντας το «Tool Spindle» εμφανίζεται το εργαλείο που επιλέχθηκε βλ. εικόνα 19.



Εικόνα 19. Tool Spindle

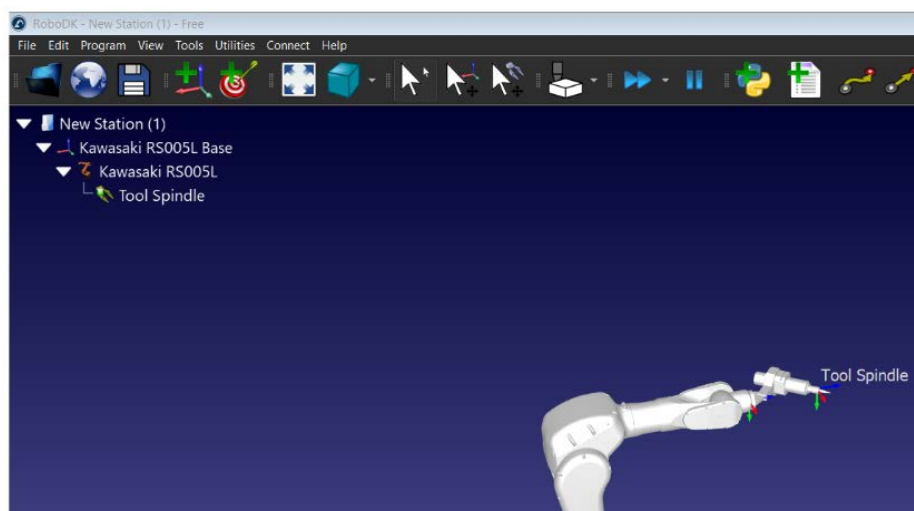
Στη συνέχεια φορτώνεται και ο ρομποτικός βραχίονας και εμφανίζονται μαζί, όπως στην εικόνα 20.



Εικόνα 20. Ο βραχίονας με το εργαλείο

Στο μενού αριστερά πάνω, όπου ονομάζεται αυτόματα από το πρόγραμμα «New Station (1)», παρατηρείται ότι υπάρχει μια δενδροειδής αλληλουχία. Παρατηρώντας καλύτερα το Tool Spindle, εμφανίζεται πάνω από τον ρομποτικό βραχίονά και φαίνεται να μεσολαβεί ένα κατακόρυφο βέλος αναμεσά τους.

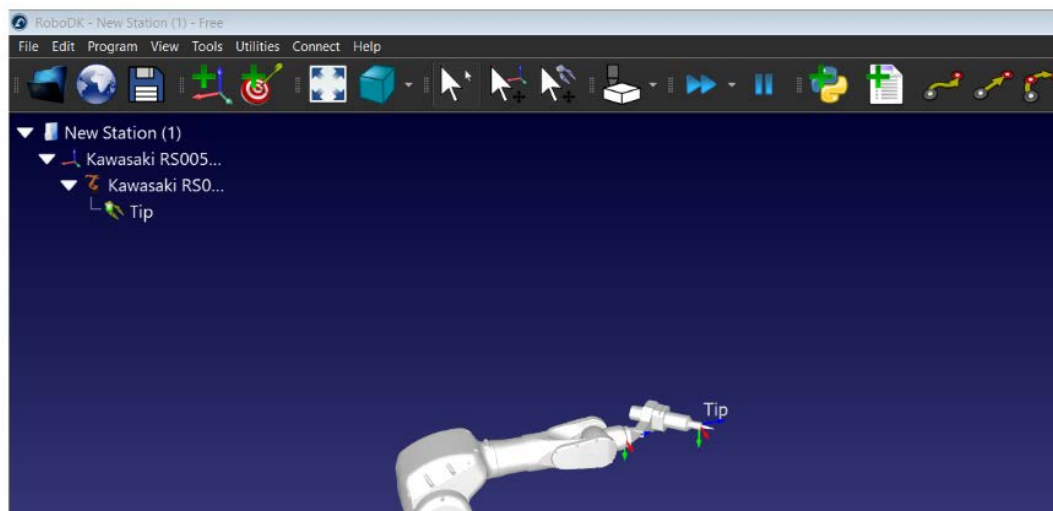
Όταν λοιπόν ένα αντικείμενο στο RoboDK είναι με αυτή τη διάταξη το επάνω μέλος από το βέλος ονομάζεται «parent» γονέας, ενώ το κάτω μέρος που εσωκλείει αυτό, ονομάζεται «child» παιδί. Σύρουμε το εργαλείο στη συνέχεια από το σταθμό εργασίας, πάνω στην επιλογή Kawasaki RS005L οπότε το Tool Spindle από «parent», γίνεται «child» με τον τρόπο που φαίνεται στην εικόνα 21 και ενσωματώνεται πλέον, πάνω στο ρομποτικό βραχίονα.



Εικόνα 21. Ενσωμάτωση του εργαλείου στον ρομποτικό βραχίονα

Μπορούμε κάνοντας διπλό κλικ στο «child», Tool Spindle και να αλλάξουμε το όνομα του, είτε στην ελληνική, είτε σε οποιαδήποτε άλλη γλώσσα, εικόνα 22.

Τα εργαλεία είναι φρονιμότερο να ονομάζονται με λατινικά γράμματα, για την αναγνώριση τους από το πρόγραμμα αργότερα. Στη παρούσα πτυχιακή, ονομάστηκε «Tip».



Εικόνα 22. Αλλαγή ονόματος εργαλείου

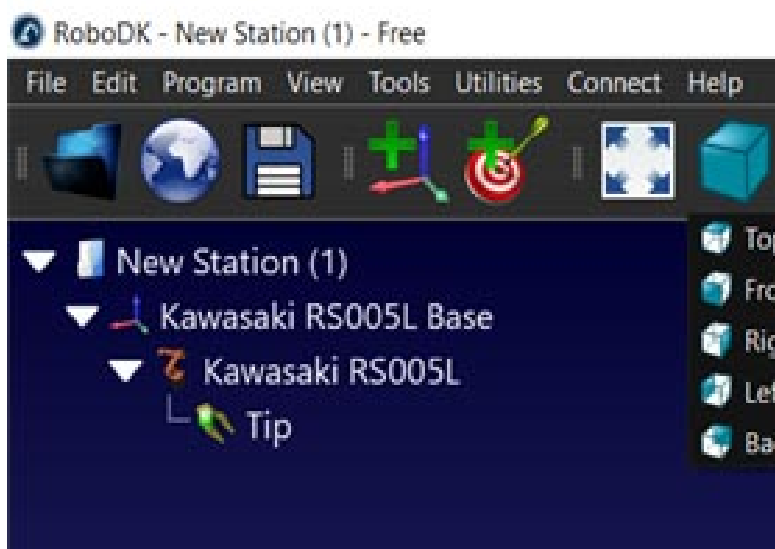
3.4 Πλοήγηση και βασικές λειτουργίες στο RoboDK

Μερικές πολύ βασικές λειτουργίες για την διαδραστικότητα με το περιβάλλον του RoboDK πραγματοποιούνται με δεξί κλικ του «ποντικιού», καθώς και με το «scroll wheel» (ροδάκι) στη μέση του ποντικιού.

Κρατώντας πατημένο το δεξί κλικ και με κίνηση του ποντικιού, περιστρέφεται ο βραχίονας σε οποιονδήποτε άξονα, ενώ περιστρέφοντας τη κεντρική ροδέλα, μπορούμε να μεγεθύνουμε ή να μικρύνουμε τον βραχίονα κατά το δοκούν.

Κρατώντας πατημένο το ροδάκι και περιστρέφοντάς το ποντίκι, μετακινείται στην επιφάνεια του προγράμματος.

Μπορεί να γίνει αλλαγή επίσης στην ισομετρική λήψη θέασης επιλέγοντας τον πράσινο κύβο στο μενού, οπότε και βλέπουμε τον σταθμό του βραχίονά από 5 διαφορετικές γωνίες λήψεις, εικόνα 23.

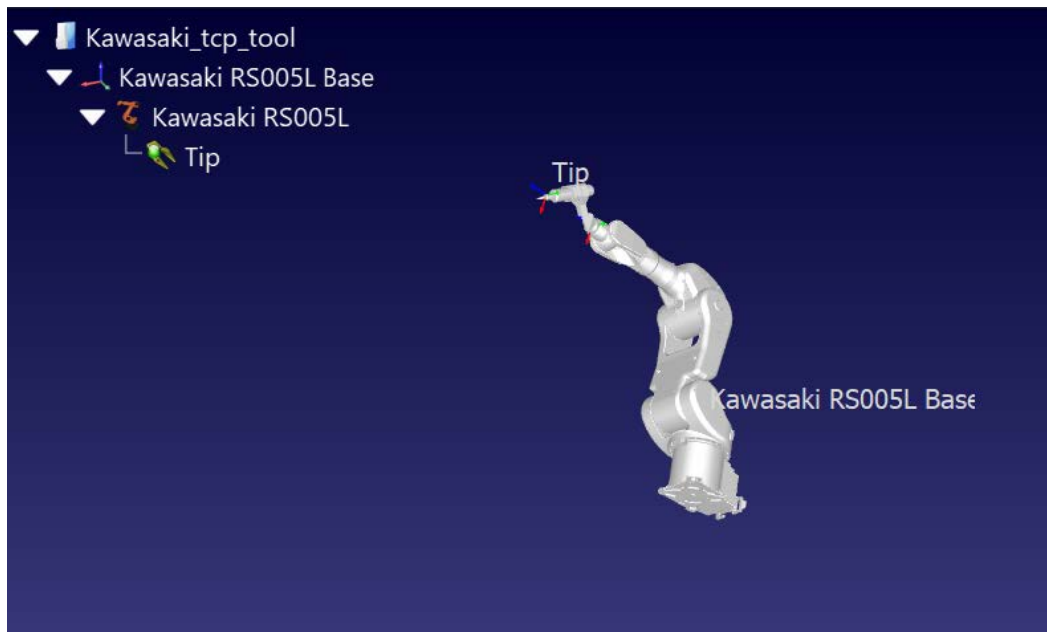


Εικόνα 23. Ισομετρικές λήψεις θέασης

Όπως προαναφέρθηκε στο αριστερό άκρο του περιβάλλοντος εργασίας, βρίσκεται το δέντρο του σταθμού εργασίας το οποίο αποτελεί και τον πυρήνα της εργασίας. Στο «δέντρο εργασιών» θα δημιουργηθεί το πρόγραμμά και θα γίνει διαχείριση των αντικειμένων που θα συμπεριληφθούν στους στόχους του ρομπότ. Ουσιαστικά, εδώ δημιουργούνται και διαχειρίζονται όλα τα απαραίτητα στοιχεία για την εκτέλεση της εργασίας. Ένα σημαντικό στοιχείο που πρέπει να τονιστεί αναφορικά με το «δέντρο εργασιών», αφορά τη δομή του ρομπότ και την αλληλεπίδραση μεταξύ των στοιχείων του και είναι η σχέση "γονέα-παιδιού" (Parent link – child link).

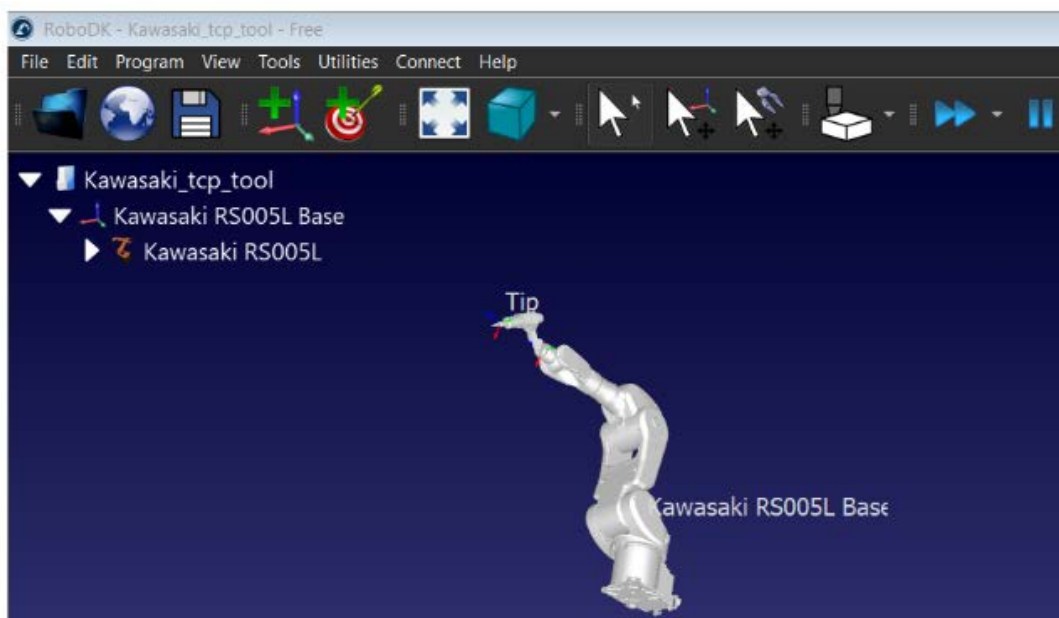
Η σχέση «γονέα – παιδιού» είναι ένας τρόπος για να συνδεθούν πολλά αντικείμενα μεταξύ τους. Παρατηρώντας το δέντρο εργασιών, είναι ορατή μια εσοχή μεταξύ των διαφορετικών αντικειμένων που είναι διαθέσιμα.

Υπάρχει το εργαλείο που αναφέρεται ως «Tip». Υπάρχει ο ρομποτικός βραχίονας που έχει ένα κάθετο βέλος αριστερά. Τέλος υπάρχει το πλαίσιο αναφοράς που εν προκειμένω είναι η βάση του ρομπότ και μετά ένας φάκελος που περιλαμβάνει ολόκληρο τον σταθμό εργασίας «Kawasaki_tcp_tool», εικόνα 24.



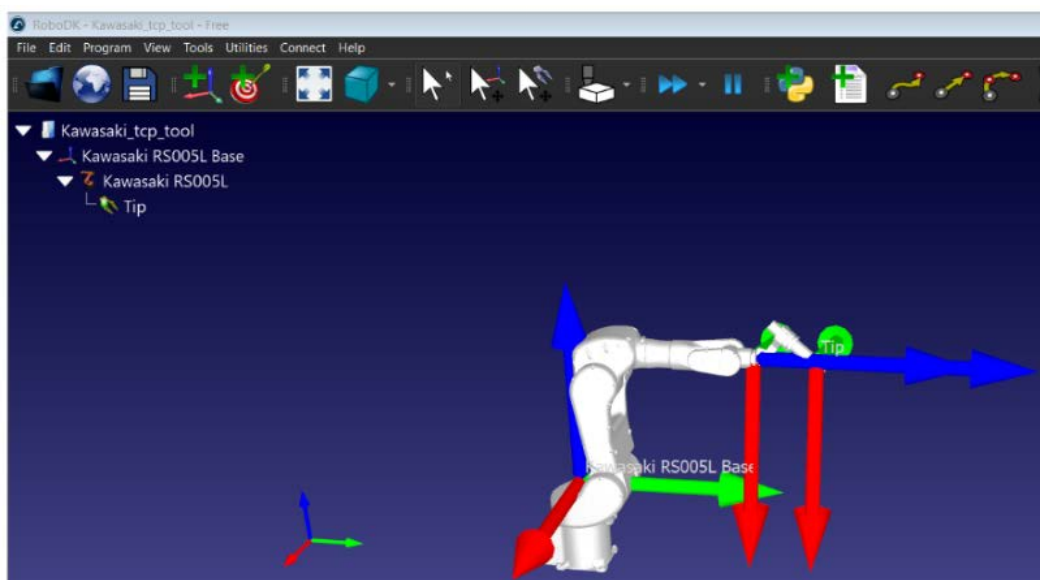
Εικόνα 24. Δέντρο εργασιών του ρομποτικού βραχίονα

Αυτό που φαίνεται στην εικόνα 24, είναι και η σχέση «γονέα – παιδιού» που αναφέρθηκε. Πατώντας το λευκό κατακόρυφο βέλος πάνω από το Tip, το εργαλείο εξαφανίζεται ή καλύτερα, εσωκλείεται μέσα στον γονέα που είναι ο Kawasaki RS005L όπως στην εικόνα 25. Σημειώνεται ότι διαγράφοντας έναν «γονέα», αυτόματα διαγράφεται και το «παιδί του».



Εικόνα 25. Parent - child links στο σταθμό εργασίας

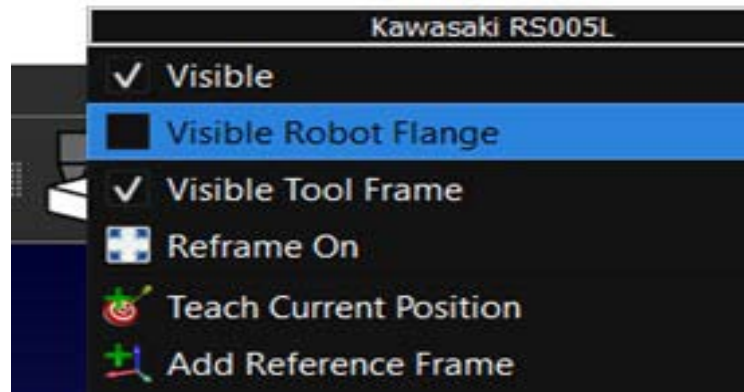
Θα πρέπει να αναφερθούν βεβαίως, τα διαφορετικά πλαίσια αναφοράς αξόνων. Ορατά στην επιφάνεια εργασίας είναι το πλαίσιο αναφοράς του TCP (Tool Center Point), το πλαίσιο του εργαλείου που ονομάστηκε Tip, το σημείο ένωσης του εργαλείου με το τελευταίο μέλος του ρομπότ (φλάντζα) και τελευταίο το πλαίσιο αναφοράς των αξόνων της βάσης του ρομπότ, εικόνα 26. Παρόλα αυτά, στο δέντρο εργασιών εμφανίζεται μόνο το πλαίσιο αναφοράς της βάσης του βραχίονα διότι εσωκλείει όλα τα υπόλοιπα.



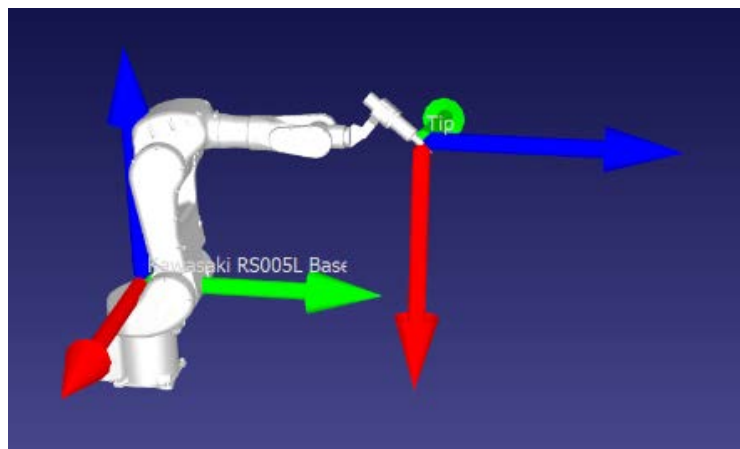
Εικόνα 26. Πλαίσια αναφοράς αξόνων του βραχίονα

Τα πλαίσια αναφοράς των αξόνων είναι πολύ σημαντικά για την τοποθέτηση αντικειμένων ή στόχων κατά την λειτουργία του ρομπότ.

Υπάρχει η δυνατότητα «εξαφάνισης» και «εμφάνισης» των βελών (αξόνων) που απεικονίζονται στην επιφάνεια εργασίας. Στη εικόνα 27 για παράδειγμα, υπάρχει ένα πλαίσιο αναφοράς TCP, αλλά και αυτό της φλάντζας τομής. Δεν είναι απαραίτητο να είναι ορατά και τα δύο πλαίσια, οπότε με δεξί κλικ στο ρομποτικό βραχίονα μπορεί να απενεργοποιηθεί η επιλογή «visible robot flange». Το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 28, χωρίς πλέον το πλαίσιο αναφοράς της φλάντζας του βραχίονα.



Εικόνα 27. Επιλογή Visible Robot Flange



Εικόνα 28. Βραχίονας χωρίς το πλαίσιο αναφοράς των αξόνων της φλάντζας

Μπορεί φυσικά να γίνει το ίδιο και με το πλαίσιο αναφοράς αξόνων του TCP καθώς και με αυτό της βάσης. Μπορεί επίσης να γίνει αλλαγή στο μέγεθος των βελών εάν δε «βολεύουν» τόσο οπτικά, σε μεγάλα ή μικρά, πιέζοντας το πλήκτρο του (-) ή (+), μικραίνοντάς ή μεγαλώνοντάς τα, αντιστοίχως.

Είναι απαραίτητο να σημειωθεί, ότι ο *άξονας X* κατά συνθήκη είναι με *κόκκινο* χρώμα, ο *άξονας Y* είναι με χρώμα *πράσινο* και ο *άξονας Z* είναι με χρώμα *μπλε*, κάτι που μπορεί να θυμάται κάποιος, με τον μνημονικό κανόνα RGB (Red Green Blue) ως XYZ.

3.5 Πίνακας ελέγχου του ρομποτικού βραχίονα

Ένα ακόμα πολύ σημαντικό εργαλείο του προγράμματος, είναι ο ρομποτικός πίνακας ή πίνακας ελέγχου του βραχίονά. Κάνοντας διπλό αριστερό «κλικ» πάνω στον βραχίονα της Kawasaki, ανοίγει δεξιά της οθόνης, ο πίνακας ελέγχου όπως φαίνεται και στην εικόνα 29.



Εικόνα 29. Ρομποτικό πάνελ RS005L

Ακολουθώς εξηγούνται οι κύριες λειτουργίες αυτού του πίνακα, καθώς είναι απαραίτητος τόσο για την παρούσα εργασία όσο και για οποιαδήποτε άλλη εργασία που ενδέχεται να ανατεθεί.

Αρχικά φαίνεται στην πάνω πλευρά, το όνομα του ρομπότ. Στη συνέχεια ποιο εργαλείο είναι ενεργοποιημένο και εδώ φαίνεται να είναι αυτό που ονομάστηκε «Tip». Από κάτω

ακριβώς υπάρχει ένας πίνακας με αριθμούς που αντιπροσωπεύουν τη θέση του εργαλείου σε σχέση με την θέση της φλάντζας στο τελευταίο μέλος του βραχίονα. Σε κάθε τέτοιου είδους πίνακα, στη πρώτη έως και τη τρίτη στήλη αναφέρονται οι άξονες X,Y,Z, σε χιλιοστά(mm), ενώ στις επόμενες τρεις στήλες διαδοχικά, αναφέρεται η περιστροφή του εκάστοτε μέλους του βραχίονα που εξετάζεται.

Το κατά συνθήκη μετρικό σύστημα όσον αφορά τη μεταφορά αξόνων είναι τα χιλιοστά, ενώ για τη περιστροφή τους, έχουμε τις μοίρες (deg). Το πρόγραμμα διαθέτει και άλλα μετρικά συστήματα, όπως για παράδειγμα αντί για μοίρες τη μετατροπή σε rad.

Στον πίνακα 10 παρατηρείται ότι η μεταφορά του πλαισίου αναφοράς των αξόνων του εργαλείου, σε σχέση με το πλαίσιο αξόνων της φλάντζας σε χιλιοστά είναι μηδενική όσον αφορά τους άξονες X και Y. Έχει όμως απόκλιση 20 εκατοστά στον άξονα Z. Φαίνεται επίσης ότι δεν υπάρχει περιστροφή σε κάποιον άξονα στο σύστημα αξόνων που προαναφέρθηκε.

Tool frame "Tip" with respect to robot flange					
(mm)			(deg)		
X	Y	Z	u	v	w
0.000	0.000	200.000	0.000	0.000	0.000

Πίνακας 10. Θέση του εργαλείου σε σχέση με τη θέση της φλάντζας

Στον πίνακα 11 αναφέρεται το βασικό πλαίσιο αναφοράς αξόνων, σε σχέση με το πλαίσιο αξόνων της βάσης. Στο συγκεκριμένο πίνακα έχει ενδιαφέρον να γίνει ιδιαίτερη αναφορά, καθώς σε αυτό το πίνακα αλλάζουν συνεχώς οι τιμές και μάλιστα βρίσκεται όλη η κινηματική αλυσίδα του βραχίονα. Εδώ λοιπόν φαίνεται μια τυχαία θέση του βραχίονα και οι τιμές της, στα πλαίσια αναφοράς των αξόνων.

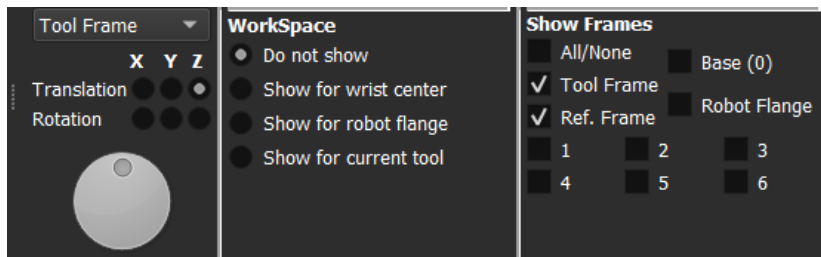
Tool frame with respect to Reference Frame					
Transportation(mm)			Rotation(deg)		
X	Y	Z	X	Y	Z
730.581	645.228	54.240	157.826	59.549	16.147

Πίνακας 11. Θέση του εργαλείου σε σχέση με το σύστημα αναφοράς

Με ακρίβεια σε χιλιοστά του χιλιοστού, φαίνονται οι θέσεις μεταφοράς και οι θέσεις στροφής των αρθρώσεων του βραχίονα, σε σχέση με το βασικό πλαίσιο αναφοράς. Όπως και παραπάνω φαίνεται η μεταφορά (σε χιλιοστά) στους άξονες X, Y, Z, όσον αφορά το πλαίσιο αναφοράς της βάσης, καθώς και η περιστροφή του εργαλείου στον εκάστοτε άξονα (σε μοίρες).

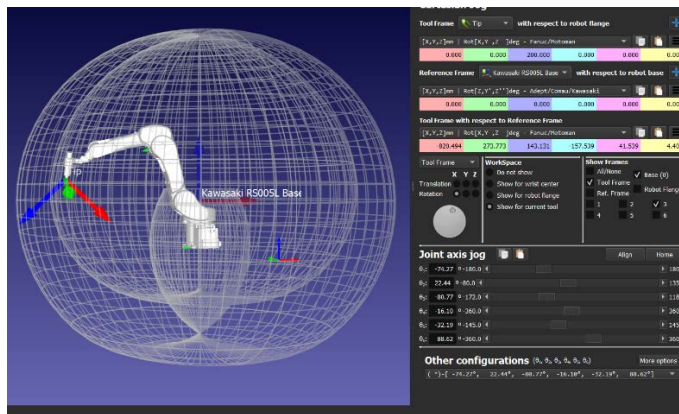
Αναλύοντας περισσότερο αυτούς τους αριθμούς, ο πρώτος αριθμός που αναφέρεται σημαίνει ότι ο κόκκινος άξονας, που είναι κατά κανόνα ο άξονας X, απέχει από τον κόκκινο άξονα αναφοράς της βάσης 730,581 χιλιοστά αλλά στη αντίθετη κατεύθυνση, γι' αυτό και το πλιν (-). Έτσι στις τρεις πρώτες στήλες υπάρχει το διάστημα μεταφοράς, ενώ έχει ήδη καταστεί σαφές ότι οι τελευταίες τρεις στήλες, αφορούν την περιστροφή του εργαλείου. Ενδεικτικά αναφέρεται, ότι στον άξονα Z στην έκτη στήλη, υπάρχει αρνητική περιστροφή κατά 16.147 μοίρες σε σχέση με το πλαίσιο αναφοράς των αξόνων της βάσης.

Στο στιγμιότυπο της εικόνας 30, παρατηρούνται τρεις ακόμα βασικές λειτουργίες στον πίνακα ελέγχου του βραχίονα. Ξεκινώντας από τη πρώτη στήλη αριστερά, φαίνεται ένα κουμπί περιστροφικού ελέγχου υψηλής ακρίβειας, χαμηλής ταχύτητας, κατά άξονα μεταφοράς και περιστροφής αντίστοιχα. Στη μεσαία στήλη εμφανίζεται ο χώρος εργασίας του βραχίονα για τέσσερις συνθήκες.



Εικόνα 30. Απόσπασμα του πίνακα ελέγχου για τρεις βασικές λειτουργίες

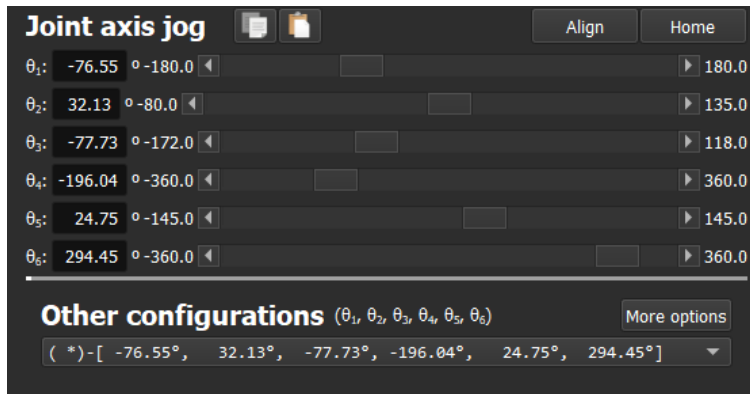
Αν για παράδειγμα χρειάζεται να είναι εμφανής ο χώρος εργασίας του εργαλείου, ενεργοποιώντας την τελευταία επιλογή «Show for current tool», θα εμφανιστεί ως αποτέλεσμα στην εικόνα 31. Στη τελευταία στήλη γίνεται επιλογή για το ποιο πλαίσιο αξόνων θέλουμε να είναι ορατό και επιπρόσθετα τις επιλογές 1, 2, 3, 4, 5 και 6, για να εμφανιστεί ή όχι, για κάθε μέλος του βραχίονα.



Εικόνα 31. Χώρος εργασίας του εργαλείου του βραχίονα

Ένας πολύ βασικός «υποπίνακας» που εσωκλείεται στον πίνακα ελέγχου, είναι αυτός που φαίνεται στην εικόνα 32. Στον πάνελ αυτό, είναι εμφανείς όλες οι γωνίες από όλες τις αρθρώσεις του βραχίονα καθώς και τα όρια γωνιών του κάθε μέλους.

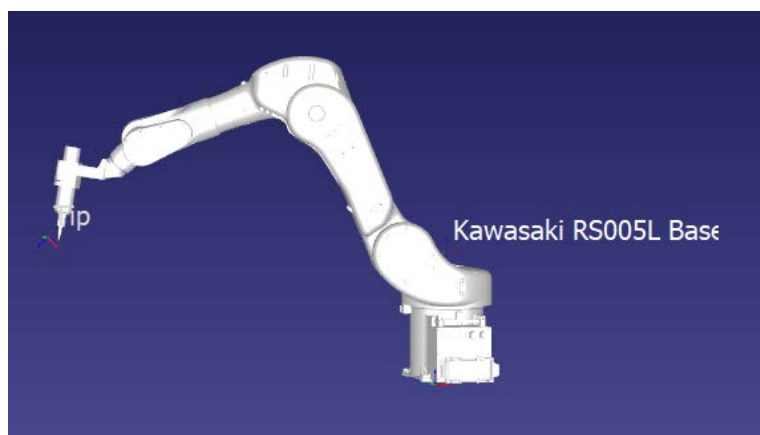
Κάτι επίσης πολύ σημαντικό, είναι ότι ο χειριστής μπορεί να επέμβει και να ορίσει αυτές τις γωνίες σύμφωνα με την εργασία που του έχει ανατεθεί.



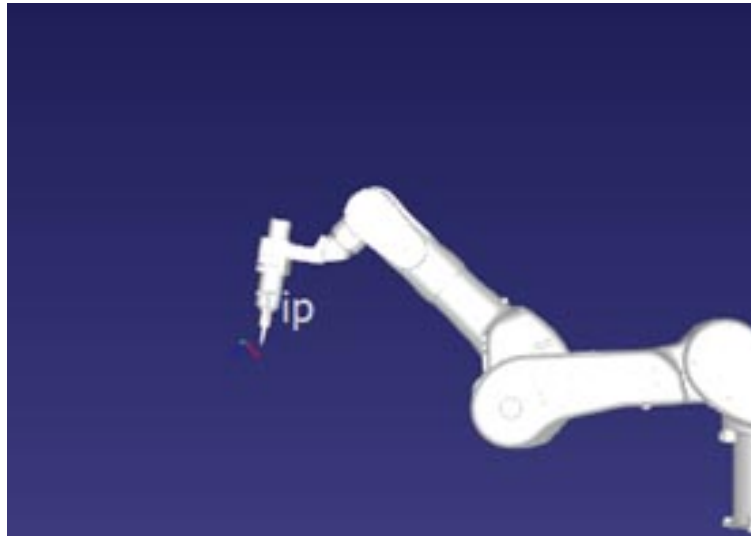
Εικόνα 32. Κλιμάκωση αρθρώσεων των μελών του βραχίονα σε μοίρες

Το τελευταίο κομμάτι του πίνακα, που αναφέρεται σαν «Other configurations», αφορά την κινηματική αλυσίδα του βραχίονα και έχει να κάνει με τα ζεύγη γωνιών στο ίδιο τελικό σημείο.

Αν για παράδειγμα παρέχονται οι τιμές γωνιών των αρθρώσεων της πρώτης διαμόρφωσης, το αποτέλεσμα θα είναι αυτό που φαίνεται στην εικόνα 33, ενώ επιλέγοντας την επόμενη διαμόρφωση, τότε ο βραχίονας θα έχει τη μορφή της εικόνας 34. Αυτό θα παίζει καθοριστικό ρόλο, όταν ο χρήστης περάσει πλέον σε πιο δημιουργικές εργασίες, όπου η διαδρομή των μελών του βραχίονα είναι πρακτική για το αποτέλεσμα που καλείται να φέρει εις πέρας.

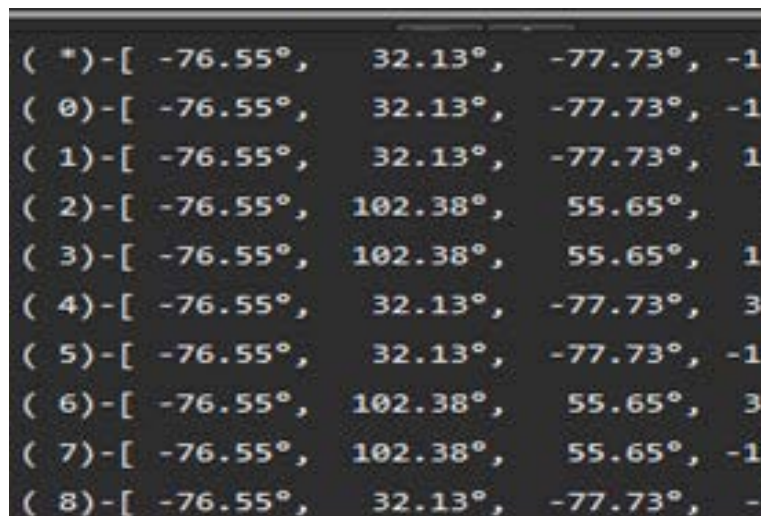


Εικόνα 33. Απόσπασμα α' θέσης βραχίονα



Εικόνα 34. Απόσπασμα β' θέσης βραχίονα

Από την επιλογή Other configuration εφόσον κλικάρουμε με το ποντίκι μας θα εξαχθεί τελικά η εικόνα 35 που φαίνεται παρακάτω.



( *)	-	[	-76.55°	,	32.13°	,	-77.73°	,	-19
(0)	-	[	-76.55°	,	32.13°	,	-77.73°	,	-19
(1)	-	[	-76.55°	,	32.13°	,	-77.73°	,	16
(2)	-	[	-76.55°	,	102.38°	,	55.65°	,	-
(3)	-	[	-76.55°	,	102.38°	,	55.65°	,	17
(4)	-	[	-76.55°	,	32.13°	,	-77.73°	,	34
(5)	-	[	-76.55°	,	32.13°	,	-77.73°	,	-19
(6)	-	[	-76.55°	,	102.38°	,	55.65°	,	35
(7)	-	[	-76.55°	,	102.38°	,	55.65°	,	-18
(8)	-	[	-76.55°	,	32.13°	,	-77.73°	,	-1


Εικόνα 35. Τιμές γωνιών α' θέσης βραχίονα

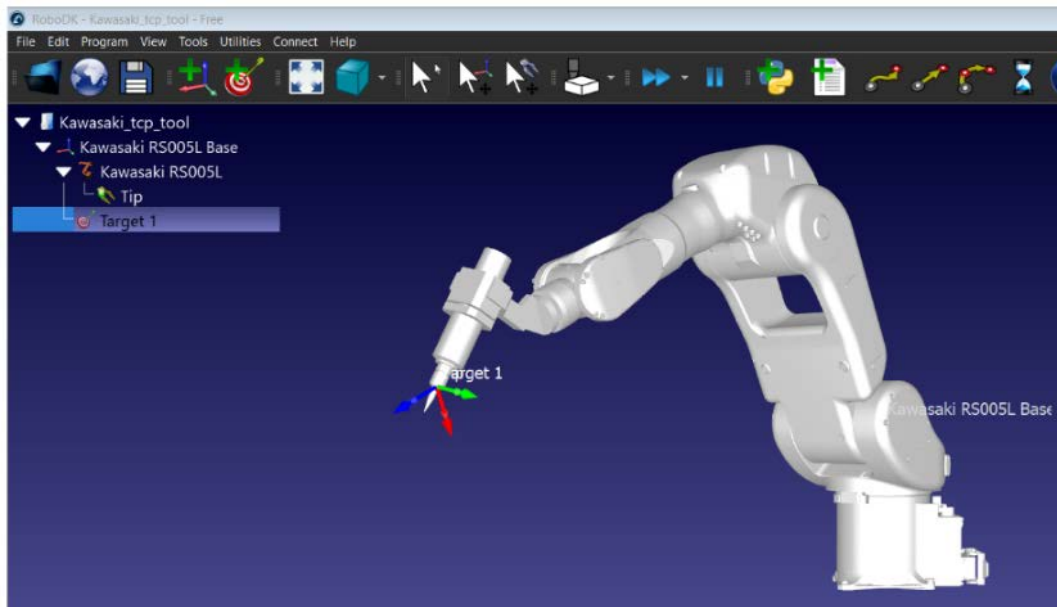
Το συγκεκριμένο πρόγραμμα παρέχει **δεκαπέντε επιλογές** για την θέση στο TCP (Tool Center Point) του εργαλείου, με άλλες ρυθμίσεις στις γωνίες των αρθρώσεων.

Κεφάλαιο 4. Προσομοίωση και Στόχοι

4.1 Ρομποτικοί στόχοι

Στη ρομποτική πριν πραγματοποιηθεί μια κίνηση, πρέπει να γίνει αρχικοποίηση της τρέχουσας θέσης του ρομπότ ως σημείο εκκίνησης, ενώ αυτό που ορίζεται ως στόχος είναι το τελικό σημείο στο χώρο. Κατά συνέπεια, το αρχικό σημείο εκκίνησης συνάδει με τη θέση του ρομπότ πριν από την έναρξη της κίνησης. Στο εν λόγω κεφάλαιο, ορίζονται στόχοι σε ένα τρισδιάστατο περιβάλλον, προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή κίνηση του ρομπότ.

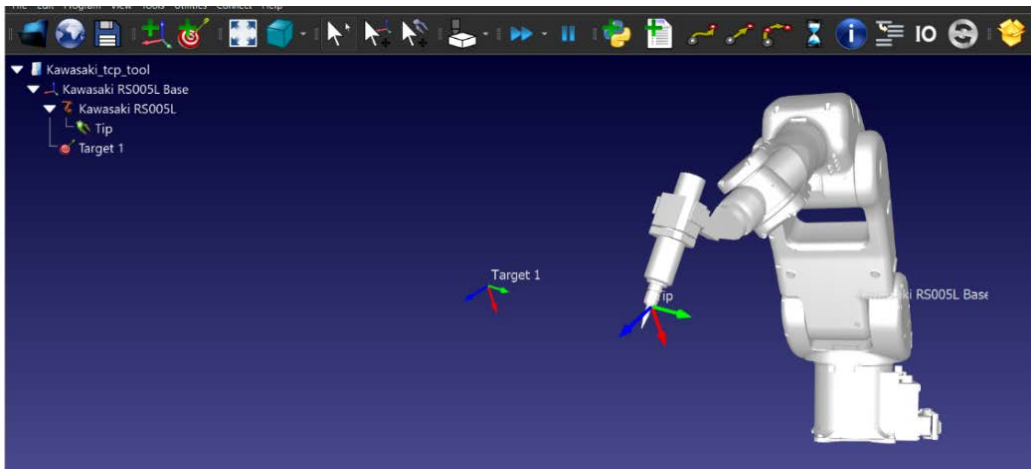
Οι στόχοι είναι ένας τρόπος για την καταγραφή μιας θέσης στο χώρο εργασίας του βραχιονά, η καταγραφή δηλαδή της θέσης XYZ και ο προσανατολισμός του εργαλείου. Όταν καταγράφεται μια θέση (στόχος) προκαλείται ουσιαστικά μετακίνηση του ρομπότ σε μια δεδομένη θέση. Εκεί δημιουργείται ο στόχος, πατώντας «προσθήκη νέου στόχου» από τη γραμμή εργαλείων  βλ. εικόνα 36.



Εικόνα 36. Δημιουργία στόχου στο RoboDK

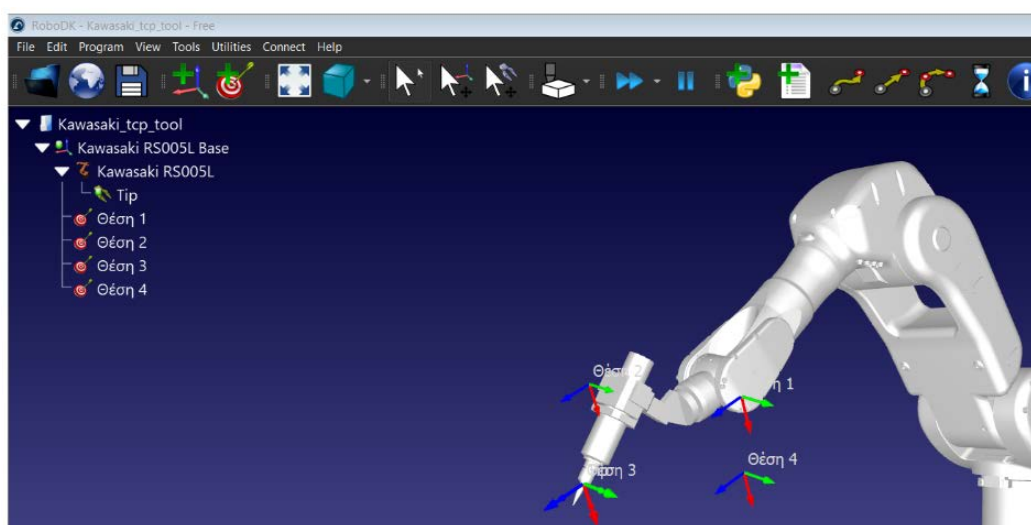
Εδώ λαμβάνουν μέρος δύο γεγονότα. Το πρώτο είναι ότι θα δημιουργηθεί ένας μικρότερος στόχος, στο σημείο που βρισκόταν το ρομπότ στην επιφάνεια εργασίας και ταυτόχρονα το πρόγραμμα, θα δημιουργήσει έναν νέο στόχο (Target1), στο δέντρο του σταθμού εργασίας.

Μετακινώντας το ρομπότ, κρατώντας δηλαδή το ALT και σύροντας με αριστερό κλικ του ποντικιού σε μια νέα θέση, θα δούμε τον στόχο που δημιουργήσαμε βλ. εικόνα 37.



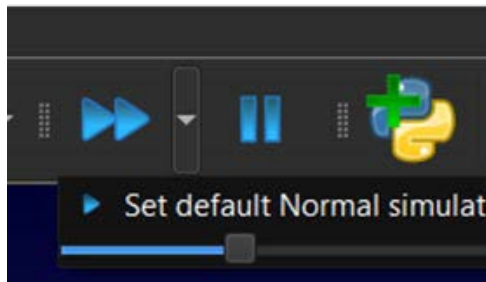
Εικόνα 37. Εμφάνιση στόχου

Πατώντας το στόχο 1 (Target 1) στο σταθμό εργασίας, παρατηρείται ότι το εργαλείο επιστρέφει στη θέση Target 1. Ξεκινώντας τη δημιουργία νέων στόχων, με τον τρόπο που περιγράφηκε παραπάνω, εμφανίζονται στο δέντρο εργασιών νέοι στόχοι. Θέτοντας στόχους, πραγματοποιείται μια εσωτερική διαδικασία για το που ακριβώς χρειάζεται να βρίσκεται το ρομπότ, κάνοντας ενδεχομένως μια εργασία που ανατέθηκε. Υπάρχει η δυνατότητα μετονομασίας των στόχων είτε με το πλήκτρο F2, είτε κάνοντας δεξί κλικ μετονομασία. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα μετονομάστηκαν οι στόχοι, από «Target i» σε «Θέση i» εικόνα 38.



Εικόνα 38. Διαφορετικοί στόχοι στο πρόγραμμα

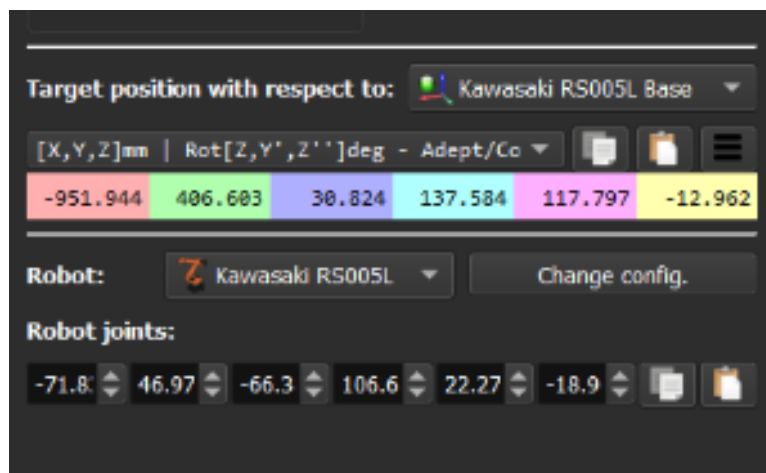
Μια πολύ σημαντική σημείωση σε αυτό το σημείο είναι ο χρόνος προσομοίωσης. Για να μην φαίνεται ο βραχίονας να τηλεμεταφέρεται από τον ένα στόχο στον άλλο, πατώντας την επιλογή «play» στη πάνω μπάρα του προγράμματος, ορίζεται και το χρονικό πλαίσιο της μετακίνησης του TCP από έναν στόχο στον επόμενο. Πατώντας το «play» εμφανίζεται το σύμβολο του «fast forward» κάτω από το πλήκτρο εντολής και στην κάτω πλευρά της επιφάνειας εργασίας, η μπάρα προσομοίωσης ταχύτητας βλ. εικόνα 39.



Εικόνα 39. Ταχύτητα προσομοίωσης κίνησης

4.1.2 Ακρίβεια στόχου

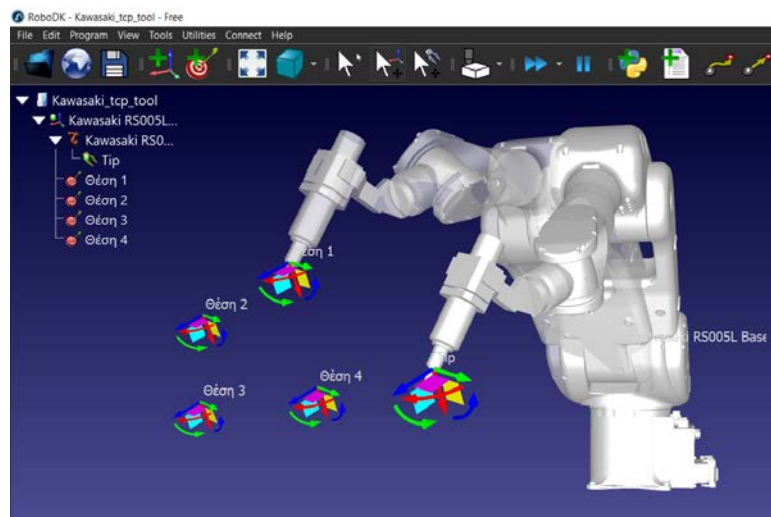
Έγινε λοιπόν κατανοητό πώς τίθενται τυχαίοι στόχοι στο περιβάλλον του προγράμματός. Σε πραγματικές συνθήκες όμως, πρέπει να τοποθετείται ο στόχος εκεί ακριβώς που ζητείται. Στο συγκεκριμένο πείραμα έχουν τεθεί τέσσερις στόχοι και ανοίγοντας τον πίνακα θέσης για τον κάθε στόχο, (πατώντας F3 πάνω στο στόχο του δέντρου εργασιών), ανοίγει μια καινούργια καρτέλα στο δεξί άκρο της οθόνης. Παράδειγμα για τη Θέση 1, βλ. εικόνα 40.



Εικόνα 40. Καρτέλα κατάστασης "Θέσης 1"

Πριν πάμε στο ζήτημα της ακρίβειας θέσης στόχου, ας δούμε πως μπορούμε να τροποποιήσουμε γενικά τη θέση ενός στόχου.

Έχοντας πατημένο το πλήκτρο ALT εμφανίζονται τετράγωνα και καμπύλα βέλη στους στόχους και στο εργαλείο του βραχίονα. Αν σε συνδυασμό με το ALT και τον δείκτη του ποντικιού, μετακινηθεί ένας από αυτούς τους στόχους, εμφανίζεται ένα ημιδιαφανές ρομπότ. Το ρομπότ αυτό δείχνει τον τρόπο που θα συμπεριφερθεί ο βραχίονας αν αφήσουμε το στόχο σε ένα οποιοδήποτε σημείο. Αν το παρακάνουμε και ξεφύγουμε από τα όρια του χώρου εργασίας, εμφανίζεται ένα τριγωνικό σύμβολο προειδοποίησης και γίνεται σαφές ότι ο βραχίονας έχει ξεφύγει από τα όρια του. Βλέπουμε χαρακτηριστικά του παραδείγματος στην εικόνα 41.




Εικόνα 41. Μετακίνηση του ρομπότ από το στόχο

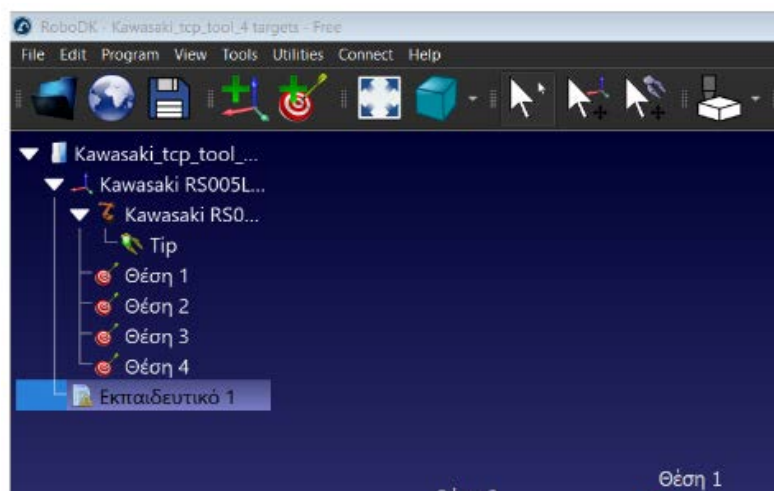
Εάν ο στόχος που τέθηκε είναι αυτός που ζητήθηκε, κάνοντας κλικ στην επιλογή «Teach current position», η καινούργια θέση που επιλέχθηκε παίρνει τη θέση της προηγούμενης. Αυτό εννοείται ότι μπορεί να γίνει για κάθε στόχο ξεχωριστά. Για να καταστεί η θέση ιδιαίτερα ακριβής, τοποθετούνται οι τιμές μετατόπισης για κάθε άξονα ξεχωριστά στο πεδίο της καρτέλας που άνοιξε.

4.2 Πρόγραμμα σύνδεσης στόχων στο RoboDK




Το πρόγραμμα σύνδεσης στόχων είναι κρίσιμο, διότι βάζει πλέον τα θεμέλια δημιουργίας μιας ολοκληρωμένης εργασίας που έχει ανατεθεί. Στην αντίστροφη κινηματική ανάλυση το

ζητούμενο από ένα ρομποτικό βραχίονα, αλλά και από οποιοδήποτε ρομπότ, είναι το τελικό σημείο προσέγγισης. Αυτό λοιπόν που λείπει και αναλύεται παρακάτω, είναι η σύνδεση αυτών των τελικών σημείων (στόχων), για την επίτευξη του προσδοκώμενου αποτελέσματος.

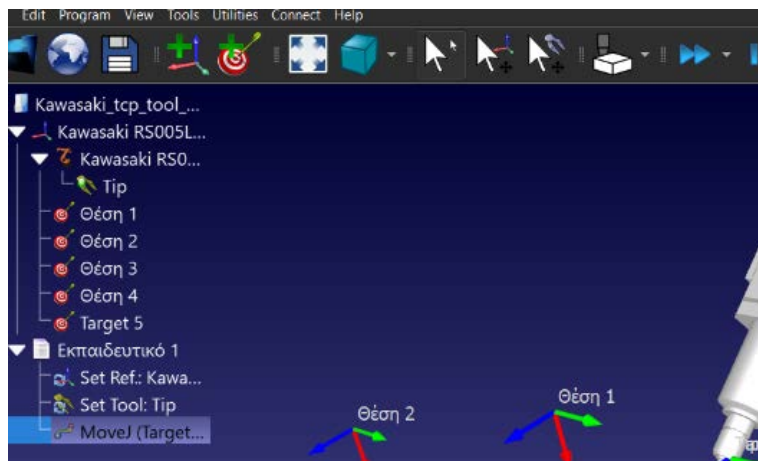
Θέλοντας να δημιουργηθεί ένα πρόγραμμα στο RoboDK, πρέπει καταρχάς να προστεθεί από το κατάλογο εργαλείων. Ενεργοποιώντας την επιλογή στην οριζόντια πάνω μπάρα «Adds a new program linked to the selected robot» (**Program** →  **Add Program**), θα δημιουργηθεί ένα καινούργιο πρόγραμμα στο δέντρο του σταθμού που το λογισμικό αυτόματα ονομάζει Prog1. Υπάρχει φυσικά η δυνατότητα αλλαγής στο όνομα του προγράμματος κατά βούληση. Το συγκεκριμένο θα ονομαστεί «Εκπαιδευτικό 1» όπως φαίνεται και στην εικόνα 42.



Εικόνα 42. Εκπαιδευτικό πρόγραμμα 1

Για να προστεθεί μια σύνδεση κίνησης μεταξύ των στόχων, ο χρήστης πατάει από τον κατάλογο εργαλείων «Adds a joint movement to a program» . Παρατηρείται ότι το πρόγραμμα έχει τοποθετήσει τρία child links κάτω από το parent link, «Εκπαιδευτικό 1». Οι στόχοι, αντί του joint movement (κοινής σύνδεσης άρθρωσης) θα μπορούσαν να συνδεθούν με γραμμική κίνηση (linear movement)  ή και καμπύλης (circular movement) . Αυτές είναι τρεις επιλογές σύνδεσης στόχων που παρέχει το πρόγραμμα. Στη πορεία του προγράμματος μπορεί ο χρήστης να κάνει αλλαγή σύνδεσης άρθρωσης, αν εξυπηρετεί περισσότερο την έκβαση της εργασίας.

Στην εικόνα 43 φαίνεται το αποτέλεσμα της εργασίας. Επίσης παρατηρείται ότι έχει προστεθεί ένας ακόμα στόχος «Target 5».



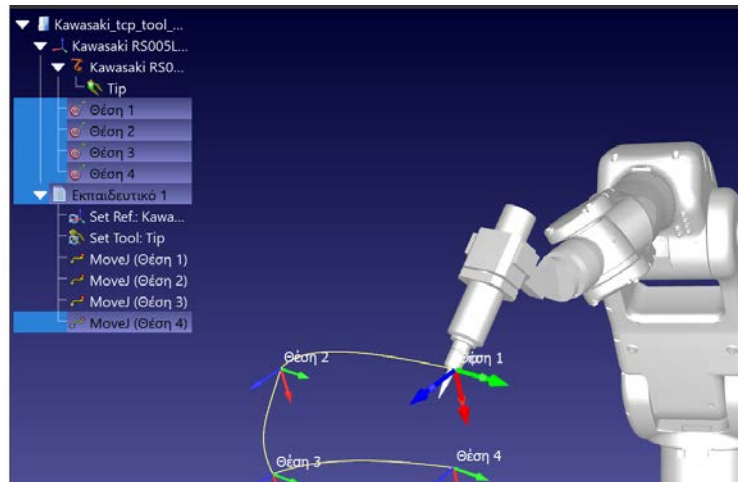
Εικόνα 43. Σύνδεση στόχων

Έχουν δημιουργηθεί όπως διακρίνεται από την εικόνα τρία child links, το Set Ref, το Set Tool και MoveJ (Target 5).

Ο στόχος 5 δημιουργήθηκε αυτόματα επειδή αρχικά δεν επιλέχθηκε κάποιος από τους υπάρχοντες στόχους στο σταθμό, πριν δημιουργηθούν οι συνδέσεις κίνησης. Το πρόγραμμα αποφάσισε μόνο του να δημιουργήσει ένα στόχο στη τελευταία θέση που ήταν τοποθετημένο το ρομπότ. Αυτό που ζητείται εν προκειμένω δεν περιέχει όμως τον στόχο 5. Επιλέγοντας το MoveJ(Target 5) και το «Target 5» μπορούν να διαγραφούν με το πλήκτρο DEL.

Για να πραγματοποιηθεί η σύνδεση τεσσάρων στόχων που δημιουργήθηκαν, επιλέγεται η «Θέση 1» (στόχος 1) και κρατώντας πατημένο το πλήκτρο ALT, επιλέγεται με το ποντίκι και το πρόγραμμά «Εκπαιδευτικό 1». Έχοντας επιλεγμένα αυτά τα δύο, επιλέγουμε από τον κατάλογο εργαλείων μια από τις τρεις συνδέσεις στόχων, στο συγκεκριμένο παράδειγμα, την πρώτη επιλογή «Adds a joint movement to a program». Εκτελείται η ίδια διαδικασία και για τους τέσσερις στόχους που τέθηκαν.

Υπάρχει μια ακόμα εναλλακτική με το πλήκτρο SHIFT να επιλεγούν απευθείας οι στόχοι 1 έως 4. Σε συνδυασμό του πλήκτρου CTRL επιλέγεται και το πρόγραμμα «Εκπαιδευτικό_1», θα επιτευχθεί το αποτέλεσμα που φαίνεται στην εικόνα 44.

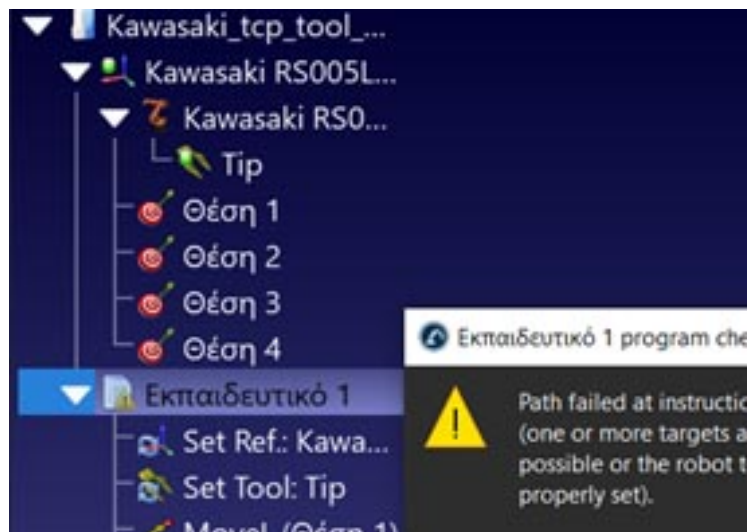


Εικόνα 44. Σύνδεση 4 στόχων

Για την εκτέλεση του προγράμματος, αρκεί να γίνει διπλό κλικ στο πρόγραμμα «Εκπαιδευτικό_1».

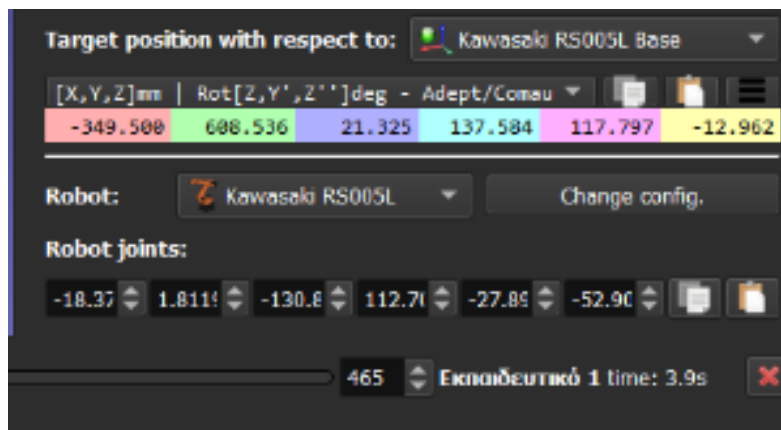
Πολύ σημαντικό εδώ είναι να αναφερθεί η επαναληψιμότητα. Θέλοντας να δημιουργηθεί μια ατέρμονη αλληλουχία εκτέλεσης του προγράμματος, με δεξί κλικ στο πρόγραμμα κλικάρουμε την επιλογή «Loop». Έτσι η διαδικασία εκτελείται μέχρι να πιεστεί το πλήκτρο ESC, ή σταματώντας το από τον κατάλογο εργαλείων με την επιλογή PAUSE.

Ένα πρόβλημα που ενδέχεται να εμφανιστεί κάνοντας τις συνδέσεις γραμμικές, είναι η αδυναμία εκτέλεσης του προγράμματος. Αυτό συμβαίνει γιατί κάποιοι από τους στόχους που έχουν τεθεί, δεν μπορούν να προσεγγιστούν λόγω της κλιμάκωσης στις αρθρώσεις του βραχίονα, ή ανικανότητας προσέγγισης του. Οπότε εμφανίζεται ένα προειδοποιητικό τρίγωνο στο δέντρο εργασιών και ένα μήνυμα που φαίνεται στην εικόνα 45.



Εικόνα 45. Μη εφικτή επίτευξη προσέγγισης στόχου

Ανοίγοντας τον πίνακα ελέγχου της προβληματικής θέσης (στόχου), φαίνεται ότι κάποιες από τις τιμές είναι εκτός εμβέλειας του βραχίονα. Ο πίνακας ελέγχου της θέσης ανοίγει με δεξί κλικ στη «Θέση 4» και επιλέγεται «Target options» ή γρηγορότερα έχοντας επιλεγμένο το στόχο, με το πλήκτρο F3. Έτσι ανοίγει δεξιά στην οθόνη ένας πίνακας που αφορά τη Θέση 4. Εκεί παρατηρείται ότι στους καρτεσιανούς άξονες έχει τεθεί ο στόχος σε σημείο που δε μπορεί να προσεγγίσει ο βραχίονας της Kawasaki. Το πρόβλημα διορθώνεται φέρνοντας το στόχο στο χώρο εργασίας του ρομπότ, αλλάζοντας τις τιμές των καρτεσιανών. Βλ. εικόνα 46.




Εικόνα 46. Αλλαγή τιμών στις καρτεσιανές συντεταγμένες

4.3 Πλαίσιο αναφοράς αξόνων

Το πλαίσιο αναφοράς αξόνων, δίνει πληροφορίες σχετικά με το που ακριβώς βρίσκονται οι στόχοι ή τα αντικείμενα του προγράμματος, σε σχέση με το ρομπότ σε ρεαλιστικό περιβάλλον.

Σε πραγματικές εφαρμογές, δίνονται πολλαπλά πλαίσια αναφοράς που σχετίζονται μεταξύ τους. Για παράδειγμα, ένα τραπέζι, ένα μπουκάλι και διάφορα άλλα αντικείμενα, που μπορεί να έχουν μια συγκεκριμένη θέση στο χώρο σε σχέση με ένα ρομπότ. Η μετακίνηση του πλαισίου αναφοράς του τραπεζιού δεν θα επηρεάσει τη σχέση μεταξύ των αντικειμένων και του τραπεζιού, αλλά θα επηρεάσει τη σχέση όλων των αντικειμένων σε σχέση με το ρομπότ αν το ρομπότ δε βρίσκεται στο δικό τους πλαίσιο αναφοράς αξόνων.

Στο παράδειγμα αυτό, όλοι οι στόχοι που δημιουργήθηκαν είναι μέρος του πλαισίου αναφοράς της βάσης του ρομπότ. Αν μετακινηθεί δηλαδή το ρομπότ προς οποιαδήποτε κατεύθυνση, μετακινούνται μαζί του και οι στόχοι που τέθηκαν. Κάνοντας αριστερό κλικ στον κατάλογο εργαλείων και την επιλογή πλαισίου αναφοράς , εμφανίζεται ένα καινούργιο

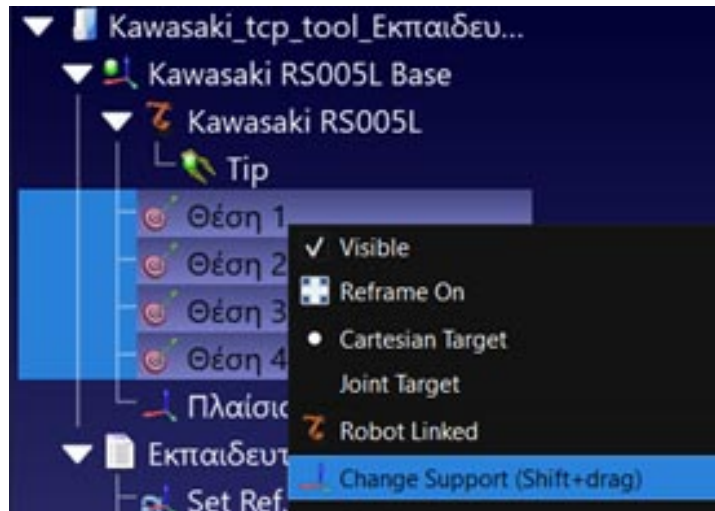
πλαίσιο αναφοράς, που το πρόγραμμα του δίνει αυτόματα το όνομα «Frame 2». Μετονομάστηκε σε «Πλαίσιο Εκπαίδευσης_1», όπως φαίνεται και στην εικόνα 47.



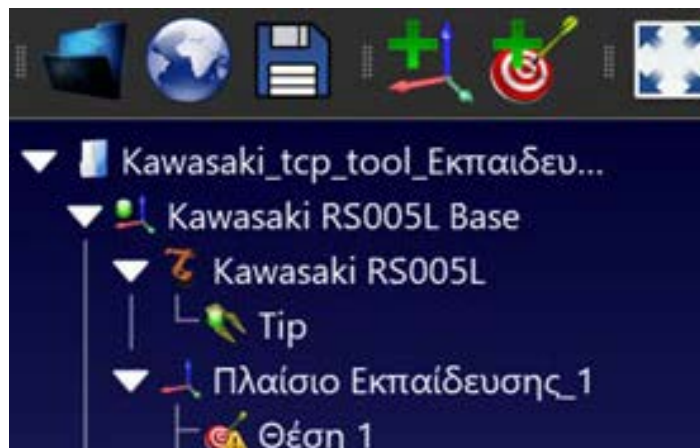
Εικόνα 47. Εισαγωγή νέου πλαισίου αναφοράς

Το καινούργιο αυτό πλαίσιο τοποθετείται αυτόματα από το πρόγραμμα, κάτω από το parent link «Kawasaki RS005L». Αυτό του δίνει τη δυνατότητα να μετακινείται ανεξάρτητα, όπως δηλαδή μετακινούνται οι στόχοι και ανήκει πλέον, στο πλαίσιο αναφοράς του ρομποτικού βραχίονα Kawasaki RS005L.

Κάτι που ισχύει για τον βραχίονα Kawasaki RS005L αλλά και για όλους τους βραχίονες του προγράμματός, είναι το σημείο που τοποθετείται το πλαίσιο αναφοράς στο δέντρο εργασιών. Όπως προαναφέρθηκε το προηγούμενο πλαίσιο αναφοράς τοποθετήθηκε κάτω από τους τέσσερις στόχους αυτόματα από το πρόγραμμα. Αν όμως στο καινούργιο πλαίσιο αναφοράς θέλουμε να συμπεριλάβουμε σαν child links τις θέσεις (στόχους) που έχουν οριστεί, πρέπει να επιλεχθούν και οι τέσσερις στόχοι. Οι ζητούμενοι στόχοι είναι από 1 έως 4, οπότε κάνοντας δεξί κλικ «Change support», ορίζεται σαν επιλογή πλαισίου αναφοράς το «Πλαίσιο Εκπαίδευσης_1». Το αποτέλεσμα είναι να γίνει «γονέας» στους στόχους που έχουμε ορίσει, το πλαίσιο αναφοράς «Εκπαιδευτικό 1» όπως φαίνεται στις εικόνες 48 και 49. Αυτό είναι κάτι που θα φανεί χρήσιμο σε ποιο πολύπλοκες συνθήκες εργασίας, δουλεύοντας για παράδειγμα με περισσότερους από έναν βραχίονες στον ίδιο χώρο.

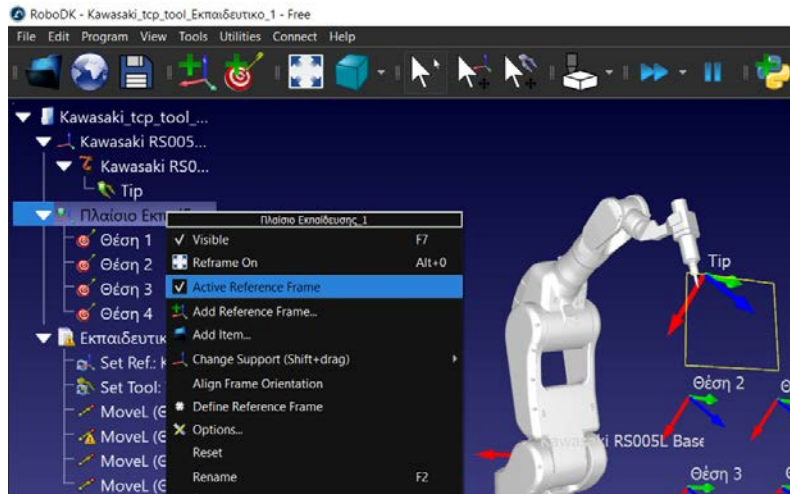


Εικόνα 48. Επιλογή πλαισίου αναφοράς



Εικόνα 49. Ορισμός πλαισίου αναφοράς

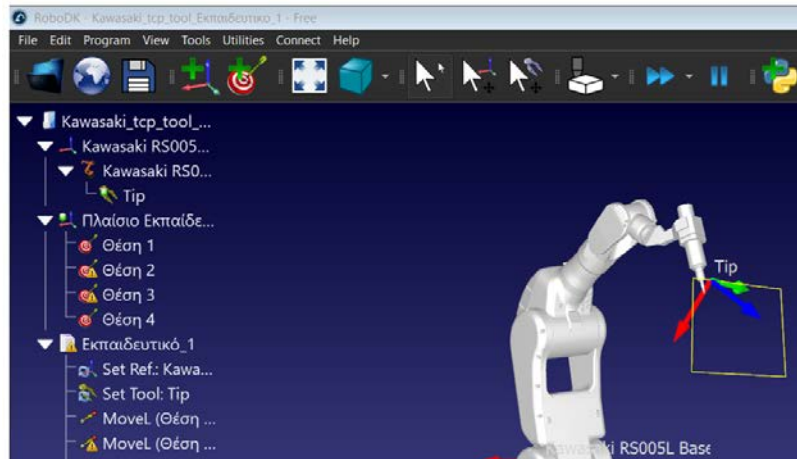
Με αυτό τον τρόπο διατηρείται η απόλυτη θέση του στόχου και αλλάζει ο γονέας (parent link), που σχετίζεται με αυτόν. Το πλαίσιο αναφοράς που έχει οριστεί δεν είναι ακόμα ενεργό. Πιέζοντας δεξί κλικ πάνω στο «Πλαίσιο Εκπαίδευσης 1» του σταθμού εργασίας, ενεργοποιείται το καινούργιο πλαίσιο αναφοράς όπως στην εικόνα 50.



Εικόνα 50. Ενεργοποίηση πλαισίου αναφοράς

Τί σημαίνει όμως η ενεργοποίηση του πλαισίου αναφοράς; Ενεργοποιώντας το πλαίσιο αναφοράς, υιοθετούνται οι στόχοι που έχει πλέον ως «παιδιά». Εν προκειμένω, όλες οι θέσεις από 1 έως 4. Σημαντικό ρόλο παίζει και το γεγονός να γνωρίζει ο χρήστης ποιο πλαίσιο αναφοράς είναι ενεργό, γι' αυτό και το RoboDK τοποθετεί μια πράσινη τελεία αριστερά από τα «parent links» που είναι ενεργοποιημένα. Αν παρατηρήσουμε προσεκτικά τη παραπάνω εικόνα, φαίνεται μια πράσινη τελεία δίπλα από το εργαλείο και μια πράσινη τελεία δίπλα στο Πλαίσιο Εκπαίδευσης_1.

Κάτι επίσης που πρέπει να επισημανθεί, είναι ότι μετακινώντας το πλαίσιο αναφοράς και τους στόχους, ενδέχεται να εμφανιστούν προειδοποιητικά τρίγωνα δίπλα από τους στόχους του δέντρου εργασιών εικόνα 51. Όταν συμβεί αυτό, το πρόγραμμα «προειδοποιεί» ότι έχουμε ξεφύγει των ορίων όσον αφορά την ικανότητα του βραχίονα να προσεγγίσει τις καινούργιες θέσεις όπως επισημάνθηκε και παραπάνω.

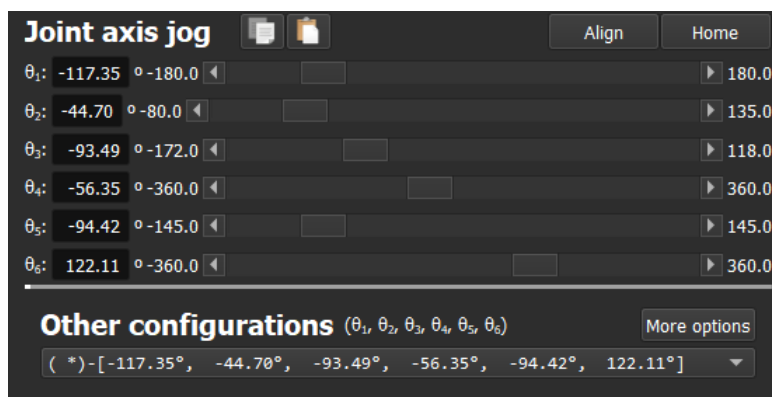


Εικόνα 51. Θέσεις 2 και 3 απρόσιτες από τον βραχίονα

4.4 Πίνακας διαμόρφωσης γωνιών του ρομποτικού βραχίονα Kawasaki RS005L

Ο πίνακας διαμόρφωσης γωνιών του ρομποτικού βραχίονα, είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα το οποίο θα πρέπει κάθε προγραμματιστής να καταλάβει σωστά, ειδικά η συμπεριφορά του ρομπότ μπορεί να παρουσιάσει σημαντικά σφάλματα. Ως αποτέλεσμα θα υπάρξει «σπατάλη» χρόνου όσον αφορά μια εργασία που έχει ανατεθεί να έρθει εις πέρας.

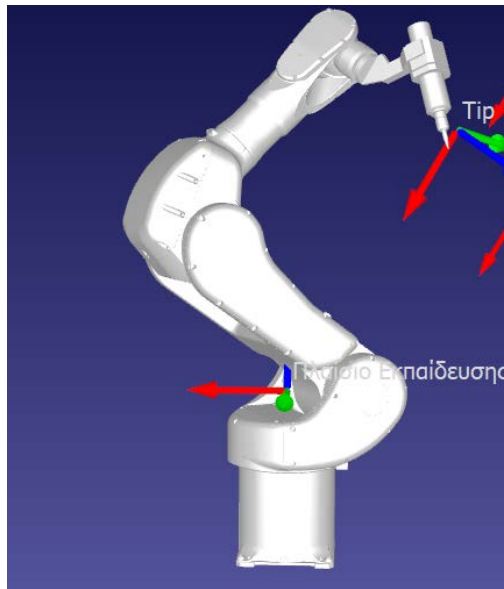
Κάνοντας διπλό κλικ επάνω στο βραχίονα, ανοίγει δεξιά στην οθόνη ο πίνακας ρυθμίσεων του Kawasaki RS005L. Το προτελευταίο μέρος αυτού του πίνακα αφορά τις συνδέσεις αξόνων των αρθρώσεων (joint axis jog) και το τελευταίο, τον πίνακα διαμόρφωσης γωνιών των αρθρώσεων (Other configurations), όπως φαίνεται και στην εικόνα 52.



Εικόνα 52. Πίνακας διαμόρφωσης γωνιών των αρθρώσεων

Η διαμόρφωση στην οποία αναφερόμαστε στον παραπάνω πίνακα είναι ένα σύνολο διαφορετικών τιμών άρθρωσης που θα ισοδυναμούσε ή θα κατέληγε να φέρει το εργαλείο του ρομπότ, στην ίδια ακριβώς καρτεσιανή θέση XYZ.

Για να γίνει περισσότερο κατανοητό, μπορούμε να φέρουμε ένα παράδειγμα από τον σταθμό εργασίας όπου έχουμε τοποθετημένο το βραχίονα, σε μια τυχαία θέση διαμόρφωσης άρθρωσης στον αγκώνα του βραχίονα (άρθρωση JT3), στραμμένος προς τα έξω όπως φαίνεται στην εικόνα 53.



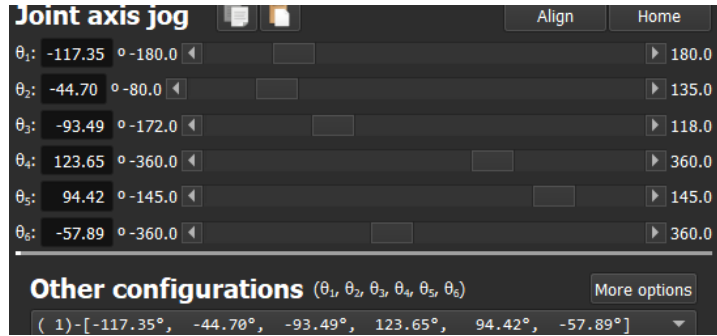
Εικόνα 53. Άρθρωση JT3 (Αγκώνας βραχίονα)

Παρατηρούμε από τον πίνακα διαμόρφωσης των καρτεσιανών συντεταγμένων, τις τιμές να είναι κατά XYZ -283.466, 117.062, 461.028 αντίστοιχα όπως στην εικόνα 54 και ας οριστεί ως θέση A'. Οι τιμές γωνιών των αρθρώσεων αυτής της θέσης φαίνονται στην εικόνα 55.

Tool Frame with respect to Reference Frame						
[X,Y,Z]mm | Rot[Z,Y',Z'']deg - Adept/Comau/Kawasaki						
-283.466	117.062	461.028	137.584	117.797	-12.962	

Εικόνα 54. Τιμές συντεταγμένων θέσης A'

Κεφάλαιο 4. Προσομοίωση και Στόχοι



Εικόνα 55. Τιμές των γωνιών των αρθρώσεων στη θέση Α'

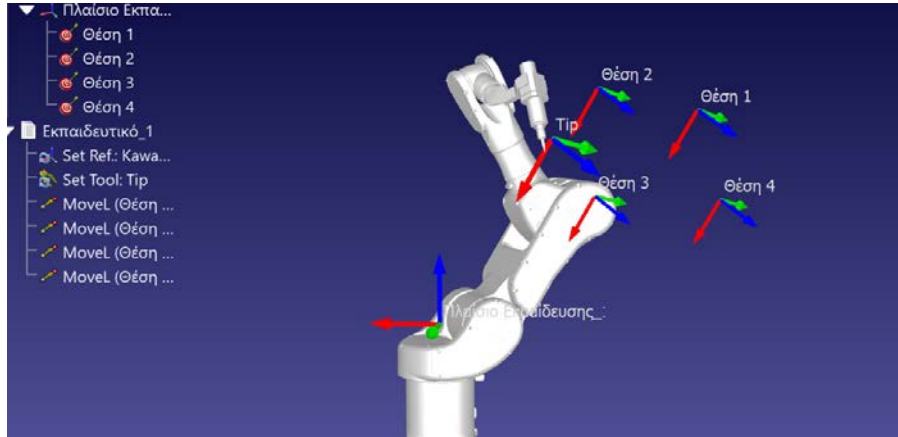
Ξεδιπλώνοντας το αναπτυσσόμενο μενού (Other configurations), εικόνα 56 στον υποκατάλογο που άνοιξε, είναι εφικτές 32 διαφορετικές τιμές διαμόρφωσης για τις γωνίες των αρθρώσεων μεταξύ των μελών του βραχίονα, έτσι ώστε να φτάσει στην ίδια ακριβώς θέση το εργαλείο του.

R _i	(*)	-[-117.35°, -44.70°, -93.49°, -56.35°, -94.42°, 122.11°]
	(0)	-[-117.35°, -44.70°, -93.49°, -56.35°, -94.42°, 122.11°]
	(1)	-[-117.35°, -44.70°, -93.49°, 123.65°, 94.42°, -57.89°]
	(2)	-[-117.35°, 42.49°, 71.41°, -87.08°, -123.79°, 43.95°]
T _r	(3)	-[-117.35°, 42.49°, 71.41°, 92.92°, 123.79°, -136.05°]
	(4)	-[62.65°, -57.99°, -86.27°, 93.35°, -123.76°, 44.72°]
	(5)	-[62.65°, -57.99°, -86.27°, -86.65°, 123.76°, -135.28°]
	(6)	-[62.65°, 21.41°, 64.19°, 123.11°, -97.73°, 117.06°]
	(7)	-[62.65°, 21.41°, 64.19°, -56.89°, 97.73°, -62.94°]
T _r	(8)	-[-117.35°, -44.70°, -93.49°, 303.65°, -94.42°, 122.11°]
T _r	(9)	-[-117.35°, -44.70°, -93.49°, -236.35°, 94.42°, -57.89°]
R	(10)	-[-117.35°, 42.49°, 71.41°, 272.92°, -123.79°, 43.95°]
	(11)	-[-117.35°, 42.49°, 71.41°, -267.08°, 123.79°, -136.05°]
	(12)	-[62.65°, -57.99°, -86.27°, -266.65°, -123.76°, 44.72°]
	(13)	-[62.65°, -57.99°, -86.27°, 273.35°, 123.76°, -135.28°]
J	(14)	-[62.65°, 21.41°, 64.19°, -236.89°, -97.73°, 117.06°]
	(15)	-[62.65°, 21.41°, 64.19°, 303.11°, 97.73°, -62.94°]
θ_1	(16)	-[-117.35°, -44.70°, -93.49°, -56.35°, -94.42°, -237.89°]
θ_2	(17)	-[-117.35°, -44.70°, -93.49°, 123.65°, 94.42°, 302.11°]
θ_3	(18)	-[-117.35°, 42.49°, 71.41°, -87.08°, -123.79°, -316.05°]
θ_4	(19)	-[-117.35°, 42.49°, 71.41°, 92.92°, 123.79°, 223.95°]
θ_5	(20)	-[62.65°, -57.99°, -86.27°, 93.35°, -123.76°, -315.28°]
θ_6	(21)	-[62.65°, -57.99°, -86.27°, -86.65°, 123.76°, 224.72°]
	(22)	-[62.65°, 21.41°, 64.19°, 123.11°, -97.73°, -242.94°]
	(23)	-[62.65°, 21.41°, 64.19°, -56.89°, 97.73°, 297.06°]
	(24)	-[-117.35°, -44.70°, -93.49°, 303.65°, -94.42°, -237.89°]
	(25)	-[-117.35°, -44.70°, -93.49°, -236.35°, 94.42°, 302.11°]
	(26)	-[-117.35°, 42.49°, 71.41°, 272.92°, -123.79°, -316.05°]
	(27)	-[-117.35°, 42.49°, 71.41°, -267.08°, 123.79°, 223.95°]
	(28)	-[62.65°, -57.99°, -86.27°, -266.65°, -123.76°, -315.28°]
	(29)	-[62.65°, -57.99°, -86.27°, 273.35°, 123.76°, 224.72°]
	(30)	-[62.65°, 21.41°, 64.19°, -236.89°, -97.73°, -242.94°]
	(31)	-[62.65°, 21.41°, 64.19°, 303.11°, 97.73°, 297.06°]

Εικόνα 56. Διαμόρφωση 1, θέσης Α'

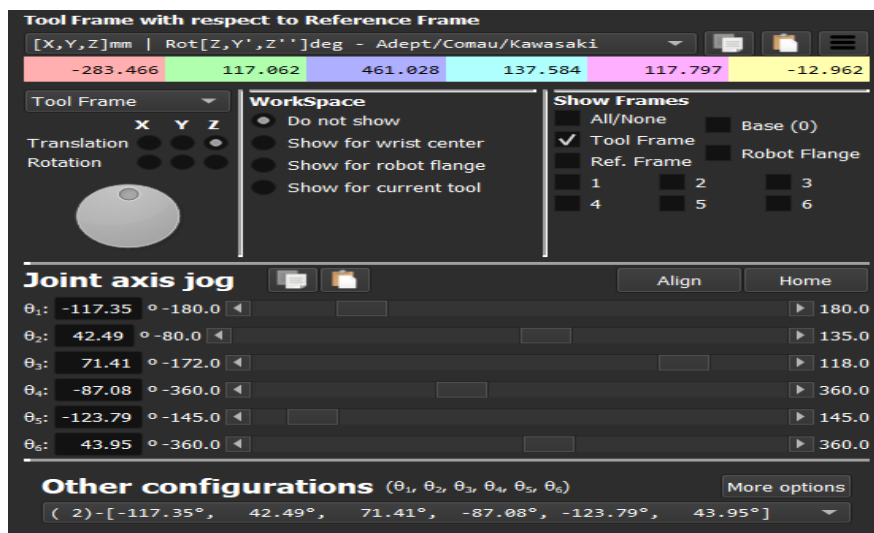
Κεφάλαιο 4. Προσομοίωση και Στόχοι

Επιλέγοντας τη διαμόρφωση 2 αντί της 1, στον υποκατάλογο (Cartesian jog), θα δούμε το TCP στην ίδια ακριβώς θέση και προσανατολισμό, αλλά το ρομπότ δεν βρίσκεται στην ίδια διαμόρφωση σύνδεσης αρθρώσεων. Παρατηρούμε δυο διαφορετικές διαμορφώσεις του ρομποτικού βραχίονα όπως φαίνεται στην εικόνα 57.



Εικόνα 57. Άρθρωση (JT3), στη θέση διαμόρφωσης Β΄

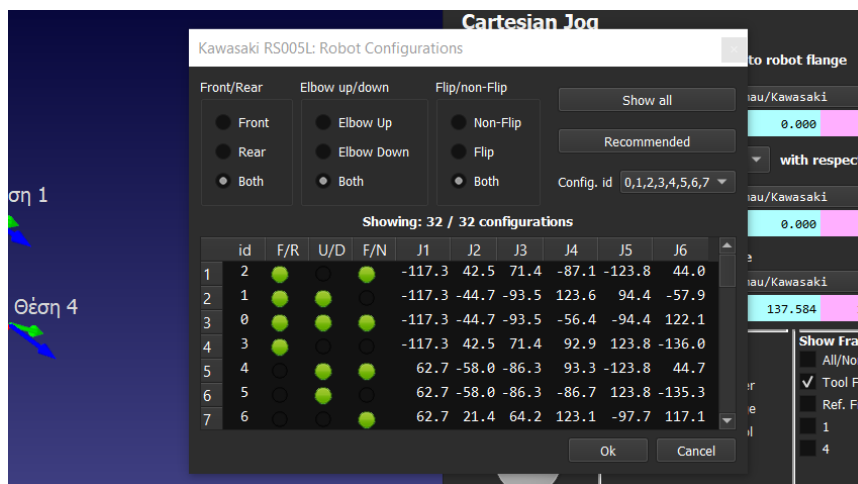
Βλέποντας προσεκτικά τον πίνακα διαμόρφωσης, έχει παραμείνει σταθερή μόνο η γωνία της πρώτης άρθρωσης θ_1 εικόνα 58. Από την εικόνα αυτή επίσης που αντιπροσωπεύει τον δεύτερο πίνακα διαμόρφωσης, εξάγεται και ένα ακόμα συμπέρασμα. Οι καρτεσιανοί άξονες του εργαλείου, παρέμειναν ακριβώς όπως ήταν και ο ρομποτικός βραχίονας της Kawasaki είναι σε μια άλλη διαμόρφωση άρθρωσης που ονομάζεται, θέση Β΄.



Εικόνα 58. Διαμόρφωση 2, Θέση Β΄

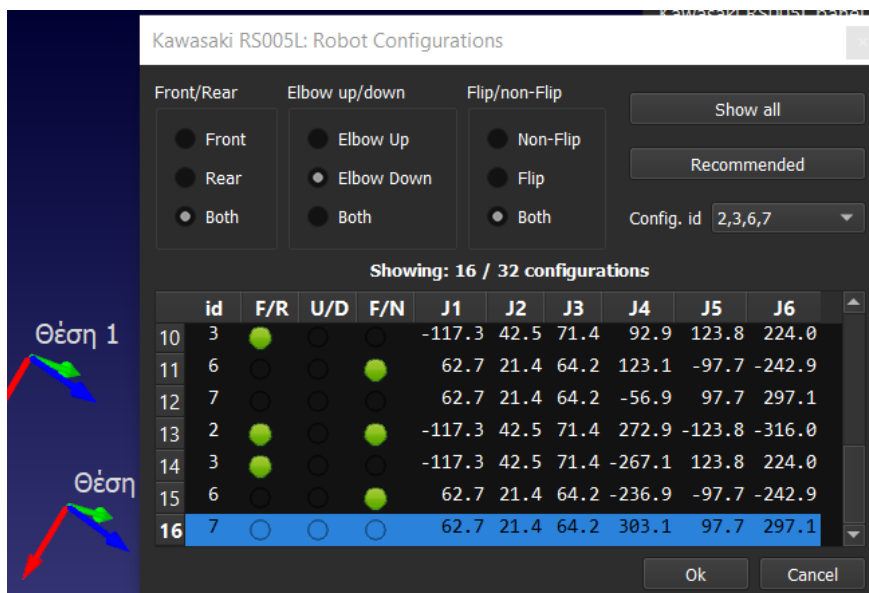
Κεφάλαιο 4. Προσομοίωση και Στόχοι

Επιλέγοντας «More options», ανοίγει ο κατάλογος περισσότερων επιλογών που φαίνεται στην εικόνα 59.



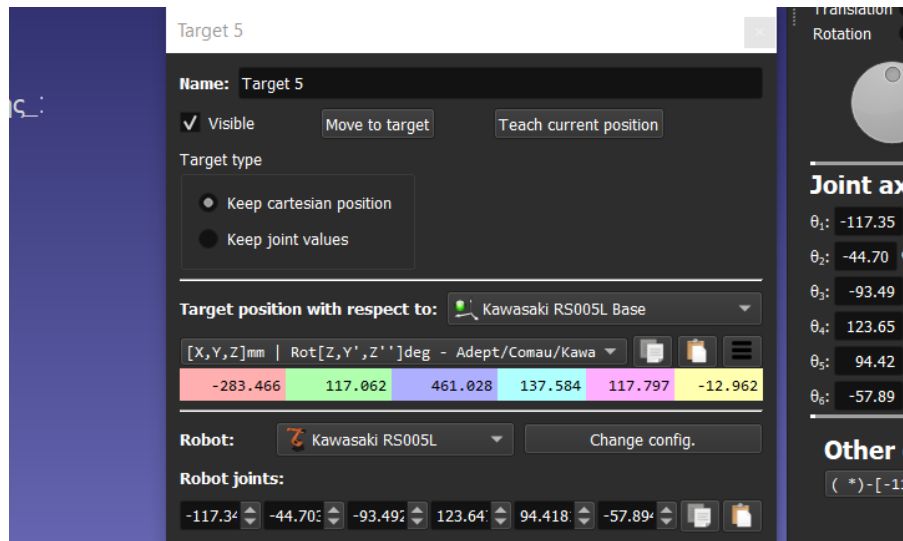
Εικόνα 59. Κατάλογος περισσότερων επιλογών στο πίνακα διαμόρφωσης

Επεμβαίνοντας στις ρυθμίσεις του παραπάνω καταλόγου, για παράδειγμα σε αυτές του «Elbow up/down», υπάρχει επιλογή ανάμεσα σε 16 διαφορετικές γωνίες αρθρώσεων μόνο για την επιλογή «Elbow down» όπως φαίνεται και στην εικόνα 60.



Εικόνα 60. Επιλογές διαμόρφωσης με (Elbow down)

Συνολικά υπάρχει δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε 32 διαμορφώσεις όπως έχει αναφερθεί. Δημιουργώντας έναν καινούργιο στόχο (Target 5) και πατώντας F3 για τον πίνακα διαμόρφωσης του καινούργιου στόχου, φαίνονται και η καρτεσιανή θέση και οι τιμές άρθρωσης του ρομπότ (Robot joints), βλ. εικόνα 61.



Εικόνα 61. Πίνακας προορισμού "Target 5"

Στη θέση αυτή, αποτυπώνονται οι τιμές:

$\theta_1 = -117.34$, $\theta_2 = -44.70$, $\theta_3 = -93.49$, $\theta_4 = 123.65$, $\theta_5 = 94.418$, $\theta_6 = -57.89$ σε μοίρες.

Μετακινώντας το ρομποτικό βραχίονα θα μεταβεί σε μια άλλη διαμόρφωση. Θα μετακινηθεί στο στόχο 5 (Target 5), αλλά δε θα χρησιμοποιήσει τη σωστή διαμόρφωση. Αυτό συμβαίνει γιατί όταν το ρομπότ διδάσκεται το σημείο προορισμού, δεν μπορεί να αντιληφθεί ότι η διαμόρφωση του δεν είναι σωστή αλλάζοντας θέση.

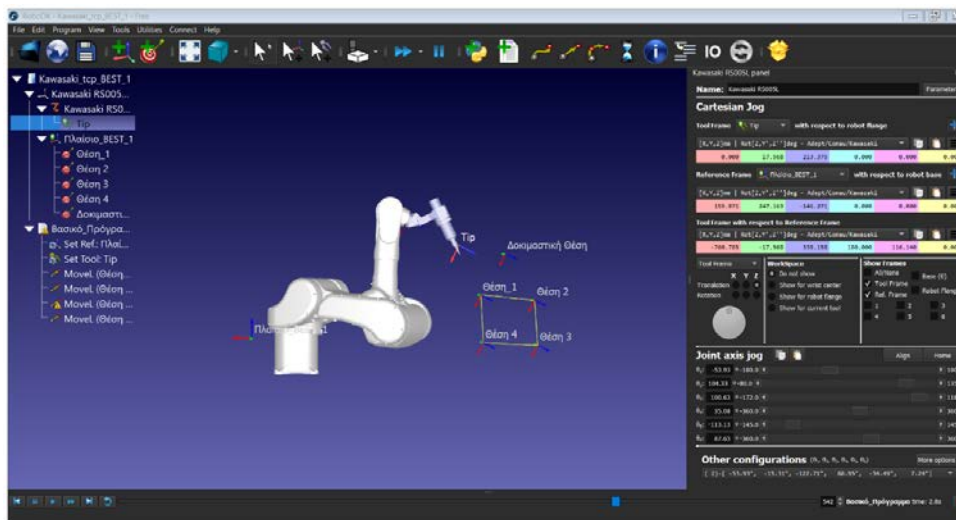
Στη ρομποτική γενικά, η γραμμική κίνηση δεν σέβεται τη διαμόρφωση και τις κινήσεις των αρθρώσεων. Για παράδειγμα σε μια ορισμένη διαμόρφωση, δίνοντας στο ρομπότ εντολή μετακίνησης από ένα σημείο Λ σε ένα σημείο Μ του χώρο εργασίας, το RoboDK δεν θα αναζητήσει τις τιμές της άρθρωσης, παρά θα προσπαθήσει να φτάσει στην καρτεσιανή τιμή που του δόθηκε με τον ταχύτερο δυνατό τρόπο. Για αυτό λοιπόν η διαμόρφωση του σημείου εκκίνησης είναι πολύ σημαντική.

Επιπρόσθετα θα πρέπει οπωσδήποτε να αναφερθεί η χρησιμότητα του μονού και του διπλού αριστερού κλικ στο ποντίκι, προσπαθώντας το εργαλείο του ρομπότ να φτάσει στην επιθυμητή θέση. Με μονό κλικ πάνω στο στόχο θα προσπαθήσει να κάνει μια γραμμική κίνηση, χωρίς «σεβασμό» στη διαμόρφωση αρθρώσεων. Ενώ με διπλό κλικ φαίνεται να τηλεμεταφέρεται στο στόχο και θα φροντίσει να εφαρμόσει τις τιμές των αρθρώσεων που έχει δεχθεί σαν δεδομένα.

4.5 Εφαρμογή του πίνακα διαμόρφωσης στους στόχους εργασίας

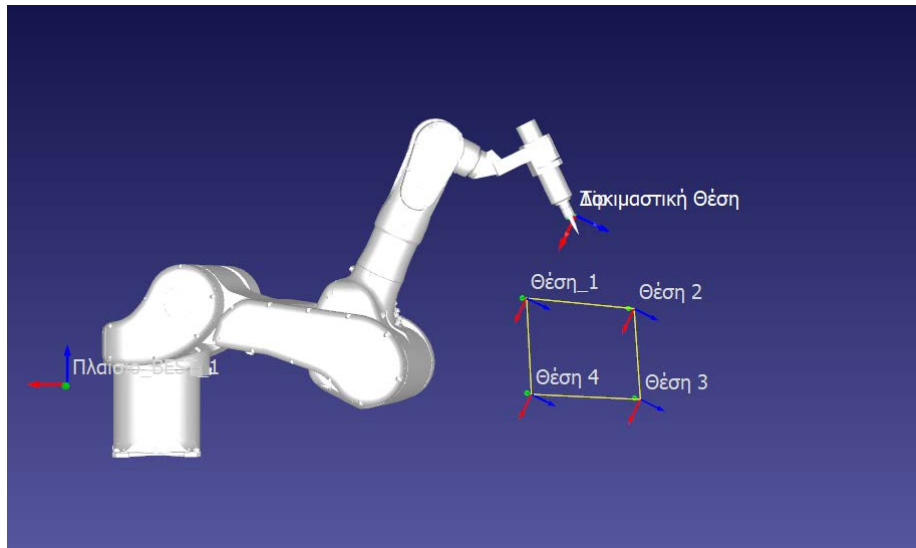
Δημιουργήθηκε ένας καινούργιος σταθμός εργασίας (Kawasaki_tcp_BEST_1), με τον τρόπο που παρουσιάστηκε παραπάνω. Στη παρούσα ενότητα θα γίνει αναφορά στο τρόπο που συμπεριφέρεται η γραμμική και η φυσική σύνδεση των στόχων, αλλάζοντας τις προεπιλεγμένες τιμές των αρθρώσεων στον πίνακα διαμόρφωσής τους.

Έστω ότι στον σταθμό εργασίας δημιουργείται ένας ακόμα στόχος, όπως φαίνεται στην εικόνα 62 και ονομάζεται «Δοκιμαστική θέση». Έχοντας αλλάξει στο πίνακα διαμόρφωσης την προεπιλογή στο Other configurations σε επιλογή 2, ο βραχίονας της Kawasaki έχει πλέον τον αγκώνα στραμμένο προς τα κάτω.

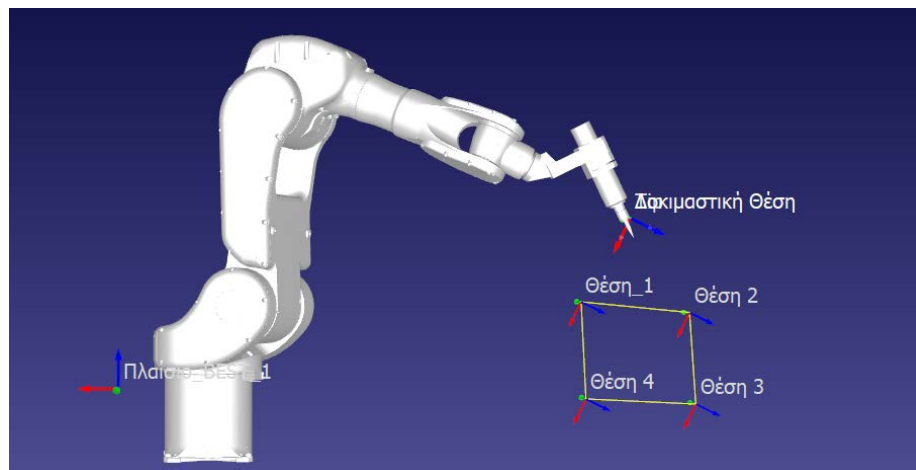


Εικόνα 62. Other configurations επιλογή 2

Επιλέγοντας τον στόχο με μονό κλικ του ποντικιού, «Δοκιμαστική θέση», ο βραχίονας θα μετακινηθεί σε αυτή τη θέση, αλλά δε θα χρησιμοποιήσει τη σωστή διαμόρφωση. Αν δώσουμε εντολή στο βραχίονα να πάει στην καινούργια θέση με τη συγκεκριμένη διαμόρφωση άρθρωσης που έχουμε ορίσει, τότε με μονό κλικ δεν θα σεβαστεί τις καινούργιες τιμές. Με διπλό κλικ όμως, φαίνεται να πηγαίνει απευθείας στη καινούργια του θέση με τις αρχικές τιμές διαμόρφωσης που είχε προγραμματιστεί. Στις εικόνες 63 και 64, φαίνονται οι διαφορές που προαναφέρθηκαν με μονό και διπλό κλικ πάνω στο στόχο.

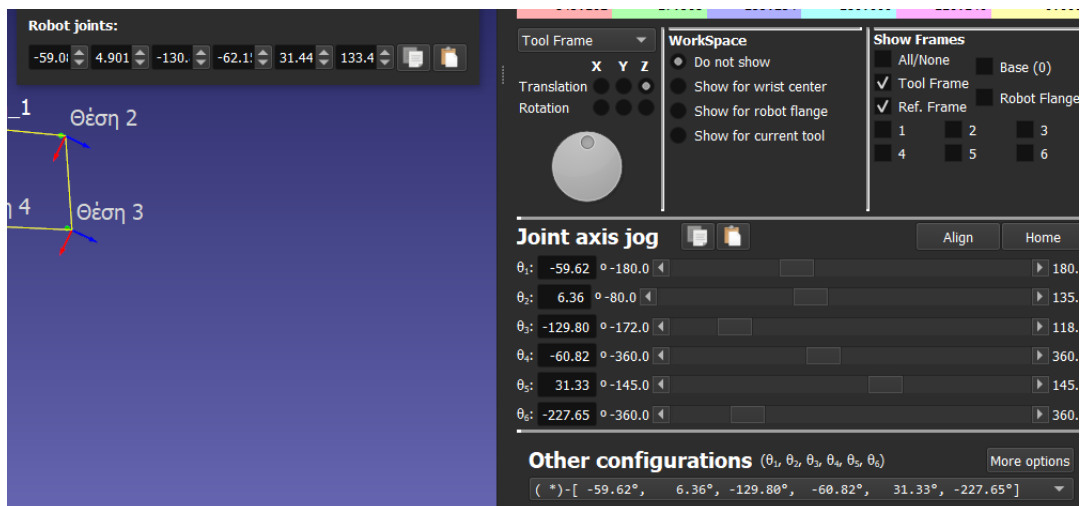


Εικόνα 63. Μονό κλικ στο στόχο



Εικόνα 64. Διπλό κλικ στο στόχο

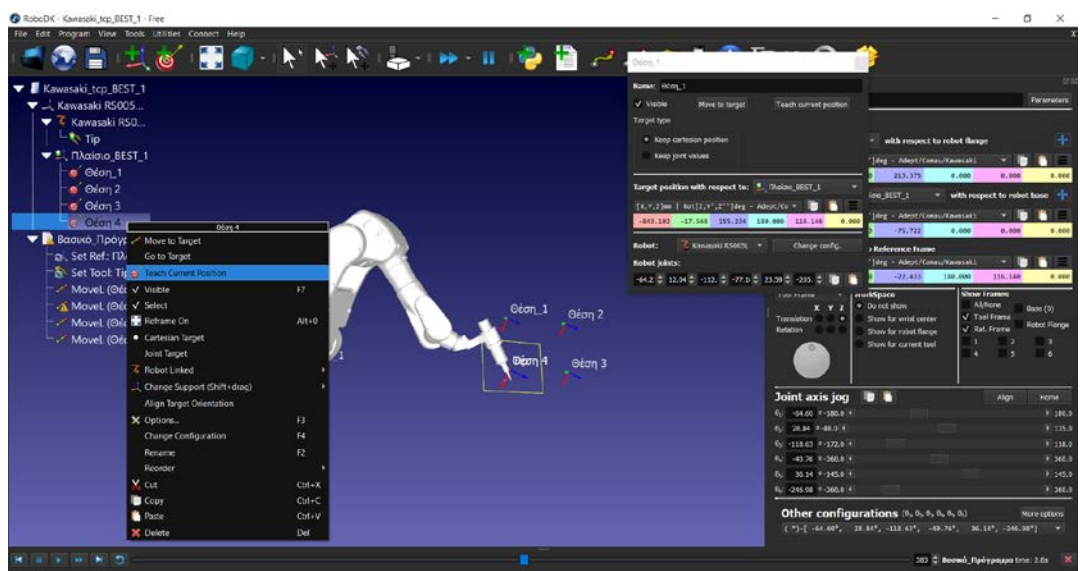
Διαγράφουμε τη «Δοκιμαστική θέση 1» και ορίζεται σαν σημείο εκκίνησης ο στόχος «Θέση 1». Εκτελώντας F3 από το πληκτρολόγιο, ανοίγει ο κατάλογος διαμόρφωσης άρθρωσης για τον συγκεκριμένο στόχο. Θα γίνει αντιληπτό ότι οι τιμές, που αφορούν τη θέση 1, δεν ταιριάζουν με τις τιμές του καταλόγου επιλογών του βραχίονα όπως φαίνεται στην εικόνα 65. Αυτό συμβαίνει γιατί όταν μετακινείται ένα πλαίσιο αναφοράς στο RoboDK, δεν ενημερώνεται η διαμόρφωση του ρομπότ αυτόματα.



Εικόνα 65. Σύγκριση τιμών διαμόρφωσης άρθρωσης

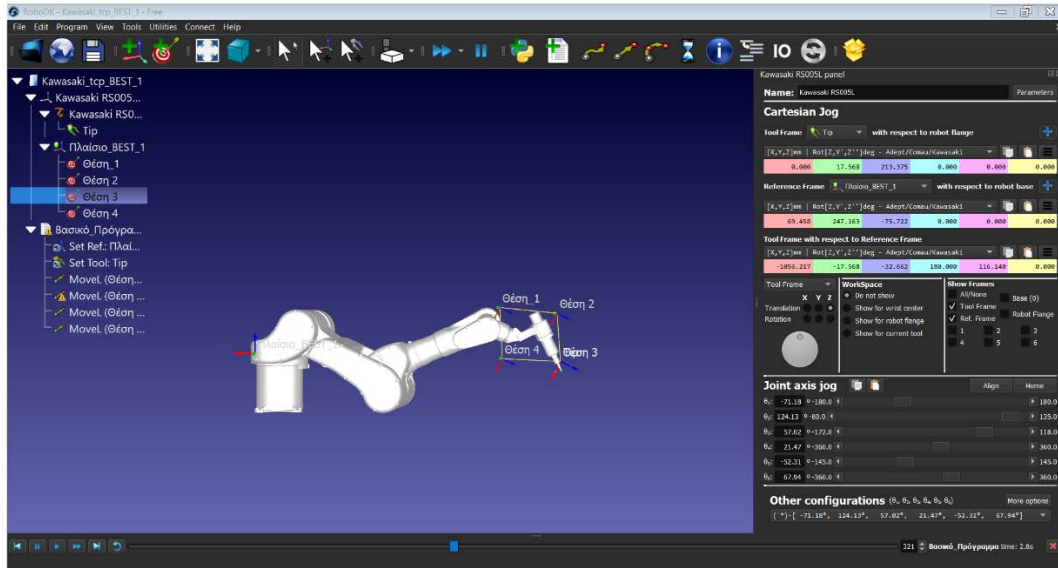
Η καινούργια διαμόρφωση θα ενημερωθεί μόνο αν ο στόχος μετακινηθεί ή «διδασχθεί» την καινούργια θέση. Αυτό γίνεται από το πρόγραμμα για πρακτικούς λόγους, θέλοντας να αποφύγει τεράστιους υπολογισμούς αντίστροφης κινηματικής ανάλυσης, όταν ο χρήστης θα ασχοληθεί πλέον με πληθώρα στόχων.

Αυτό λοιπόν που χρειάζεται να γίνει όταν ένα σύνολο στόχων αλλάζει θέση, είναι να ενημερωθεί ξεχωριστά κάθε θέση. Αυτό γίνεται από τον χρήστη διδάσκοντάς τον στόχο στο ρομπότ με την εντολή (Teach current position), βλ. εικόνα 66.



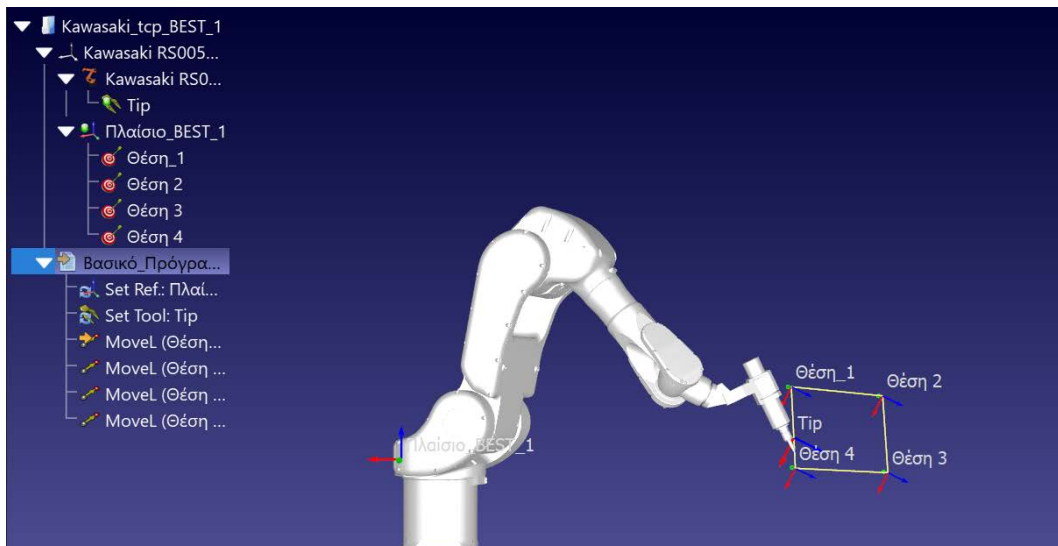
Εικόνα 66. Εκπαίδευση στόχου σε καινούργιο πλαίσιο αναφοράς

Τι συμβαίνει εάν παρουσιαστούν «περίεργες» τιμές διαμόρφωσης. Έστω ότι μετακινείται ο στόχος στη θέση 3 και δεν ενημερώνεται με την καινούργια τιμή διαμόρφωσης της συγκεκριμένης άρθρωσης, όπως φαίνεται στην εικόνα 67.



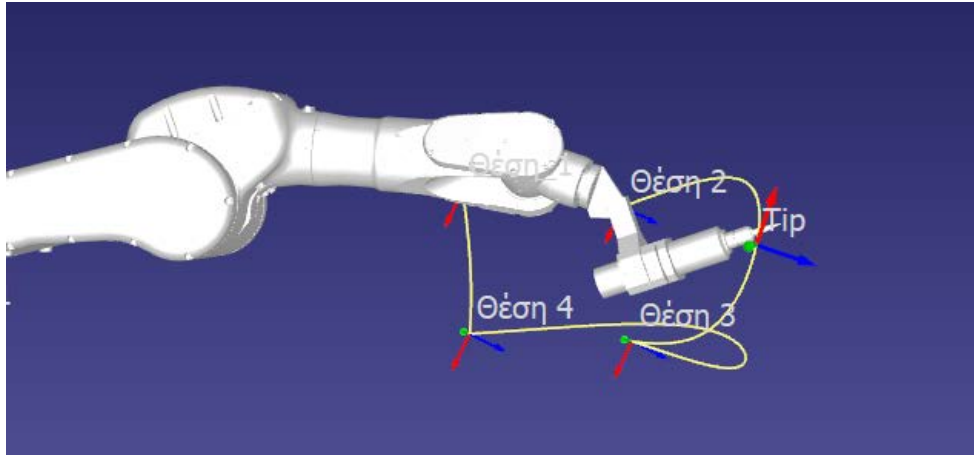
Εικόνα 67. Αλλαγή στις τιμές διαμόρφωσης της θέσης 3

Επιστρέφοντας ο βραχίονας στη «Θέση 1» με διπλό κλικ, φαίνεται να συμπεριφέρεται όπως ακριβώς του είχε «διδασχθεί» στη συγκεκριμένη θέση. Εκτελώντας το πρόγραμμα θα δούμε ότι δεν έχει αλλάξει κάτι στη τροχιά στόχων που είχαμε θέσει, όπως φαίνεται και στην εικόνα 4-33.



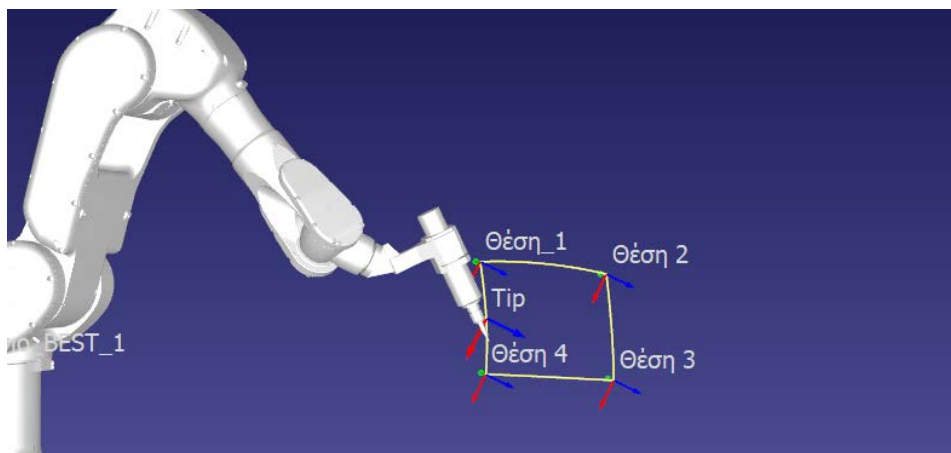
Εικόνα 68. Τροχιά προγράμματος με γραμμική σύνδεση στόχων

Αλλάζοντας όμως τη σύνδεση στόχων από γραμμική σε φυσική, η οποία σέβεται τις διαμορφώσεις των αρθρώσεων, ο βραχίονας διαγράφει μια περίεργη τροχιά, όπως κάποιος μπορεί να παρατηρήσει το αποτύπωμά της στην εικόνα 69.



Εικόνα 69. Αποτύπωμα τροχιάς με φυσική σύνδεση στόχων


Αυτό που μπορεί να γίνει για να μην υπάρχει αυτή η «περίεργη» τροχιά, είναι να πάμε σε κάθε στόχο ξεχωριστά ή σε αυτόν που έχει περίεργη διαμόρφωση αρθρώσεων. Κάνοντας δεξί κλικ και εκτελώντας την εντολή «Teach current position», το ρομπότ μπορεί να διδαχθεί τη συγκεκριμένη θέση. Με αυτό τον τρόπο υπάρχει μια ομαλή έκβαση της τροχιάς στο πρόγραμμα, αφού έγιναν οι παραπάνω ενέργειες βλ. εικόνα 70.



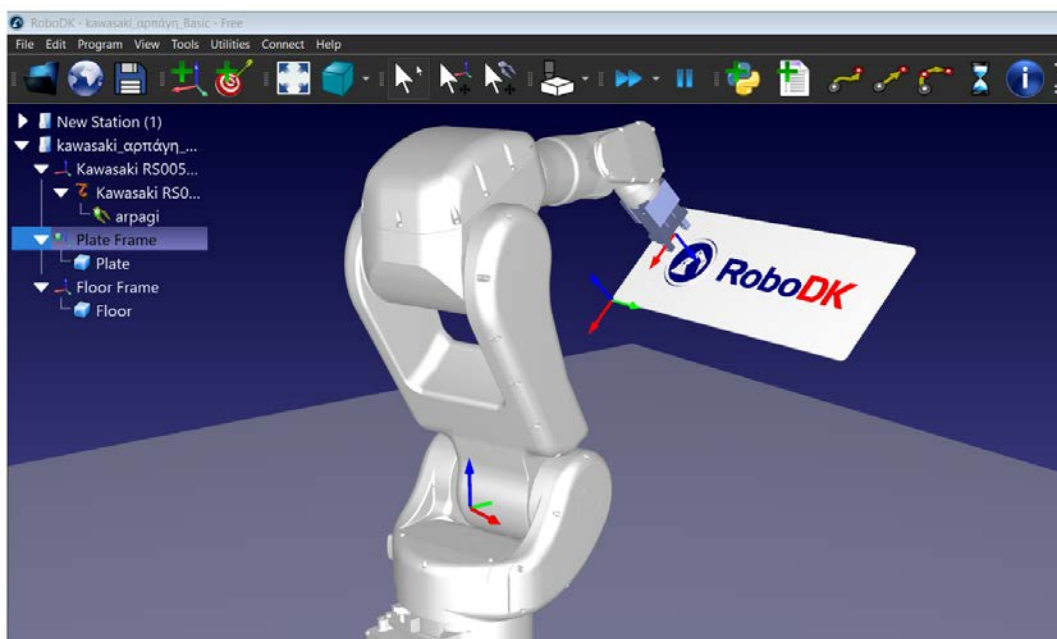
Εικόνα 70. Αποτύπωμα τροχιάς μετά την εκπαίδευση στόχων

Κεφάλαιο 5. Εκτέλεση προσομοιώσεων σε διάφορα σενάρια

5.1 Αναγνώριση πλαισίου αναφοράς και εποπτεία στόχων

Κάτι που θα πρέπει να θυμάται ο χρήστης όταν δημιουργεί έναν στόχο στο RoboDK, είναι ότι ο στόχος δημιουργείται στο ενεργό πλαίσιο αναφοράς αξόνων με την επιλογή  από τον κατάλογο εργαλείων.

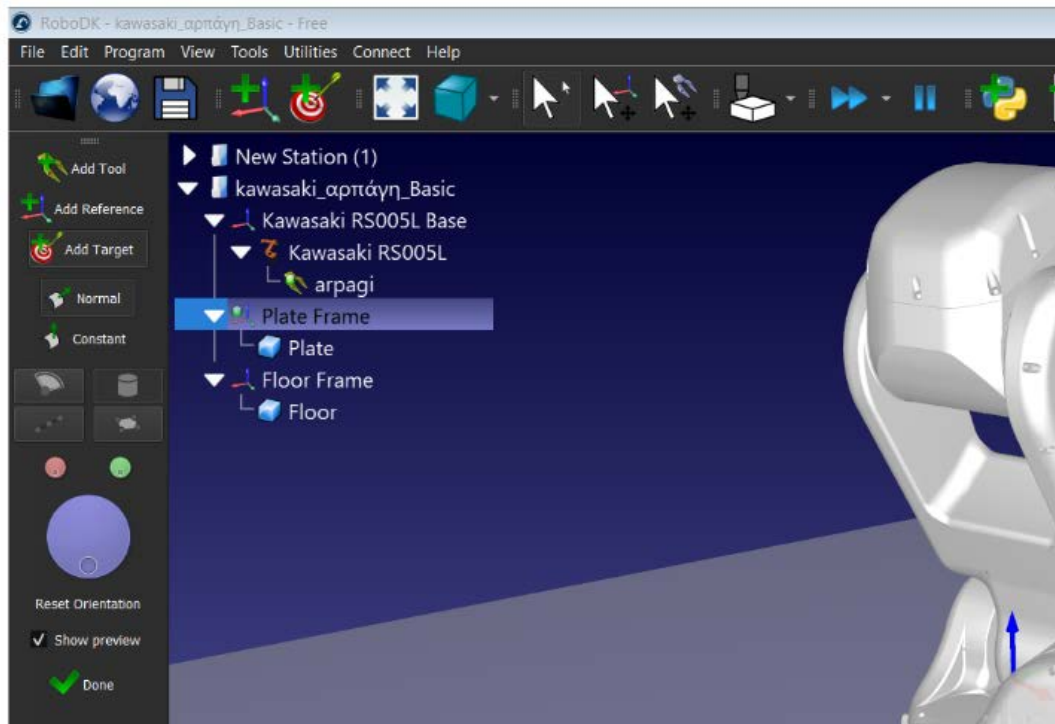
Στη παρακάτω εικόνα, δημιουργήθηκε ένας καινούργιος σταθμός εργασίας τοποθετώντας ένα τραπέζι, με το βραχίονα, την αρπάγη (gripper), μια πινακίδα με το λογότυπο της RoboDK και για λόγους καλαισθησίας προστέθηκε δάπεδο. Όλα αυτά τα αντικείμενα που εισήχθησαν, είναι από τη βιβλιοθήκη του RoboDK, εκτός από την αρπάγη στο σύνδεσμο JT6 του ρομποτικού βραχίονα Kawasaki, η οποία είναι η αρπάγη που χρησιμοποιείται στο εργαστήριο.



Εικόνα 71. Σταθμός εργασίας Kawasaki_αρπάγη_Basic

Το πλαίσιο αναφοράς αξόνων της πινακίδας τοποθετήθηκε κάθετα με το TCP (Tool Center Point) του βραχίονα, κάτι που φαίνεται και από την τοποθέτηση των αξόνων. Επίσης τοποθετήθηκε σε σημείο προσβάσιμο για τον βραχίονα. Ο καινούριος αυτός σταθμός ο οποίος ονομάστηκε «Kawasaki_αρπάγη_Basic», δημιουργήθηκε για να διδάξει στο χρήστη κάτι πολύ σημαντικό για τη παρούσα πτυχιακή. Την αναγνώριση και την εκμάθηση προορισμού του εργαλείου, σε μια επιφάνεια.

Στον κατάλογο εργαλείων του προγράμματος κλικάροντας την επιλογή «Program» ανοίγει μια καινούργια καρτέλα. Στην καρτέλα που ανοίγει κλικάροντας το «Teach Target(s) on Surface», ανοίγει ένας καινούργιος κατάλογος αριστερά στην επιφάνεια εργασίας του προγράμματος όπως φαίνεται και στην εικόνα 72.



Εικόνα 72. Εκμάθηση στόχου σε μια επιφάνεια

Το πρώτο πράγμα που πρέπει να γίνει, είναι η απενεργοποίηση της επιλογής «Snap on arc center». Είναι κάτι που δε χρειάζεται στη παρούσα φάση και αφήνονται ως έχουν οι υπόλοιπες προεπιλογές του καταλόγου.

Η περιήγηση με το ποντίκι πάνω από την επιφάνεια της πινακίδας που εισήχθη, εμφανίζει ένα ολόγραμμα του ρομποτικού βραχίονα να κινείται πάνω από αυτή. Κλικάροντας στο εκάστοτε σημείο που χρειάζεται ο χρήστης, έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία στόχων, κάτι που φαίνεται στην εικόνα 73. Δημιουργήθηκαν οκτώ στόχοι στη παρούσα φάση.

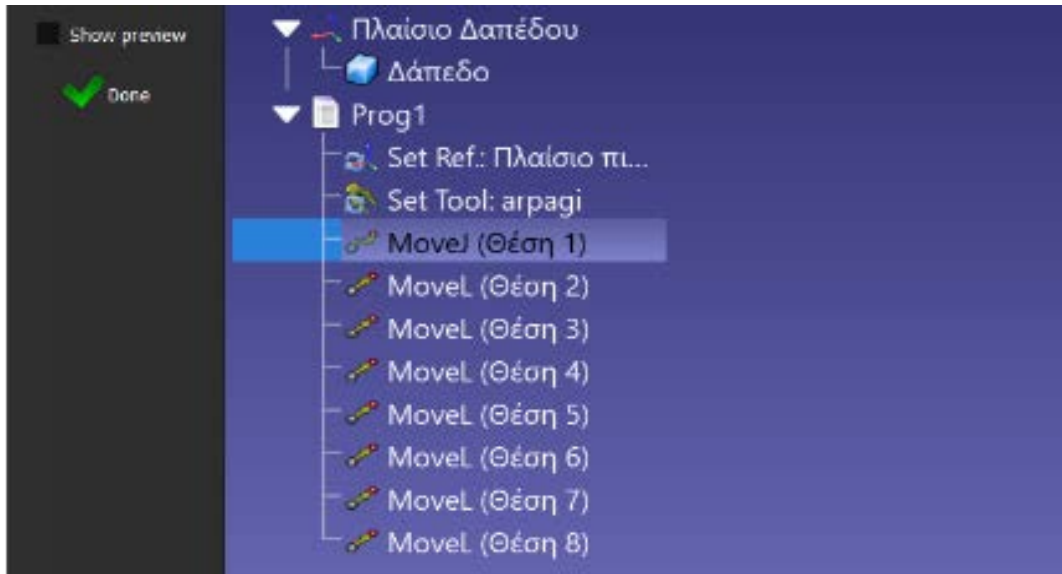


Εικόνα 73. Δημιουργία στόχων στην επιφάνεια του αντικειμένου

Φαίνεται ότι το κεντρικό σημείο του εργαλείου (TCP), να παραμένει κάθετα στην επιφάνεια της πινακίδας, όπως και αν μετακινηθεί, που αυτό είναι και το ζητούμενο. Υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης όλων των σημείων της εκάστης εργασίας με την επιλογή Preview Targets. Όπως επίσης η επιλογή να αλλάξει θέση ξεχωριστά ο κάθε στόχος, τοποθετώντας το εργαλείο πάνω του και μετακινώντας το πλαίσιο αναφοράς τους. Επιλέγοντας όλους τους στόχους και δεξί κλικ, μπορεί να γίνει μετονομασία μιας ομάδα στόχων και να αλλάξει μόνο η αρίθμηση.

5.2 Δημιουργία υποπρογραμμάτων πάνω στο κύριο πρόγραμμα

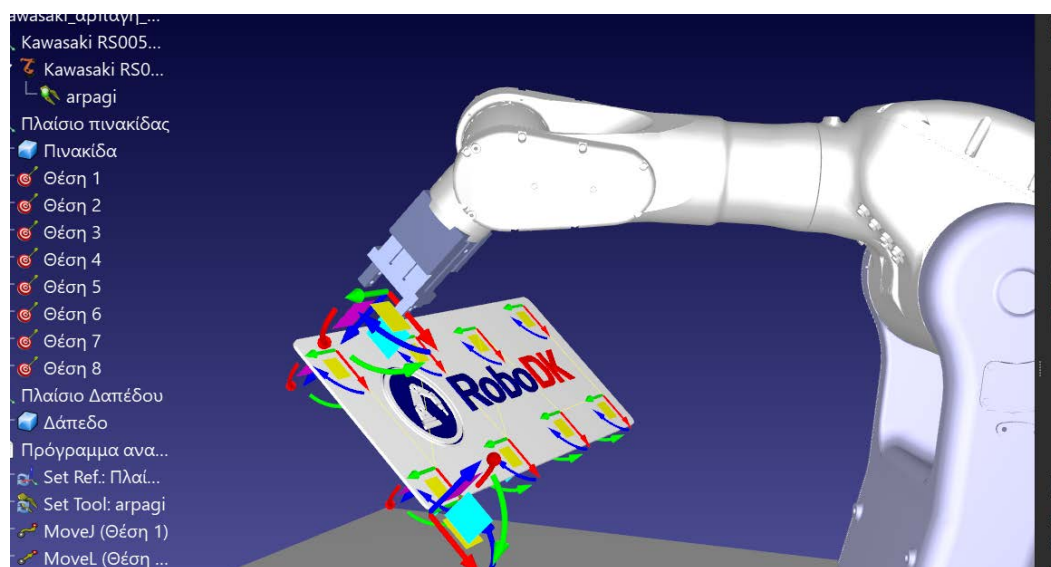
Υπάρχει μια επιλογή στο RoboDK για δημιουργία προγράμματος διαφορετική από αυτή που επιδείχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και μάλιστα πιο γρήγορη. Επιλέγοντας τις θέσεις από 1 έως και 8 με το πλήκτρο SHIFT και με δεξί κλικ «Create a program», δημιουργείται ένα πρόγραμμα αποτελούμενο από τους στόχους που επιλέχθηκαν. Παρατηρώντας πιο προσεκτικά αναγράφεται (MoveJ) φυσική η πρώτη σύνδεση, ενώ οι υπόλοιπες γραμμικές βλ. εικόνα 74.



Εικόνα 74. Δημιουργία προγράμματος

Υποθέτοντας ότι πρέπει στο πρόγραμμα να γίνει προσθήκη ενός σημείου εκκίνησης του βραχίονα(Προσέγγιση), ένα σημείο τερματισμού πέρα από τον τελευταίο στόχο (Απομάκρυνση) και ένα σημείο ανάκλησης του βραχίονα σε μια ορισμένη θέση(Αρχική Θέση).

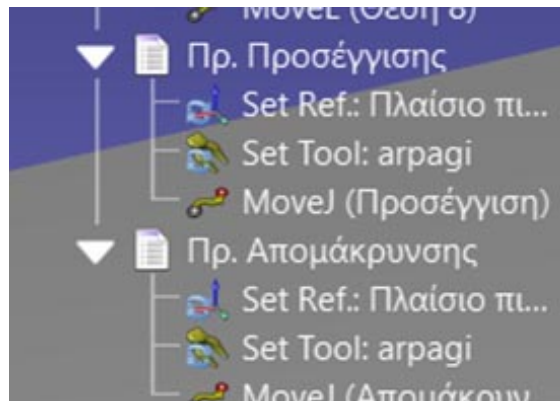
Για να υπηρετήσουμε τον πρώτο σκοπό, την προσθήκη ενός σημείου προσέγγισης, τοποθετείται το εργαλείο στη «Θέση 1» και απλά διαφοροποιούνται οι συντεταγμένες του σημείου Z. Από τον πίνακα διαμόρφωσης του συγκεκριμένου σημείου (διπλό αριστερό κλικ πάνω στο ρομπότ), μετακινώντας τη ροδέλα όσον αφορά τις συντεταγμένες μετατόπισης στον Z, θα μεταφερθεί το εργαλείο λίγο «μακρύτερα» από τον πρώτο στόχο, εικόνα 75.



Εικόνα 75. Μετατόπιση του βραχίονα στον άξονα Z

Δημιουργείται ένας καινούργιος στόχος στο επιθυμητό σημείο και ονομάζεται «Προσέγγιση». Πηγαίνοντας στο τελευταίο στόχο «Θέση 8» επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία με πριν και ο καινούργιος στόχος ονομάζεται «Απομάκρυνση». Από τον κατάλογο εργαλείων δημιουργήθηκαν από το χρήστη δύο ακόμα προγράμματα, τα οποία ονομάστηκαν «Πρ. Απομάκρυνσης» και «Πρ. Προσέγγισης», αντίστοιχα.

Με συγκράτηση του πλήκτρου CTRL, επιλογή του εκάστοτε στόχου και επιλογή του προγράμματος που στοχεύουμε, εισάγεται ένας φυσικός σύνδεσμος για να γίνουν μέρος του υποπρογράμματος πλέον, αυτοί οι νέοι στόχοι, βλ. εικόνα 76.



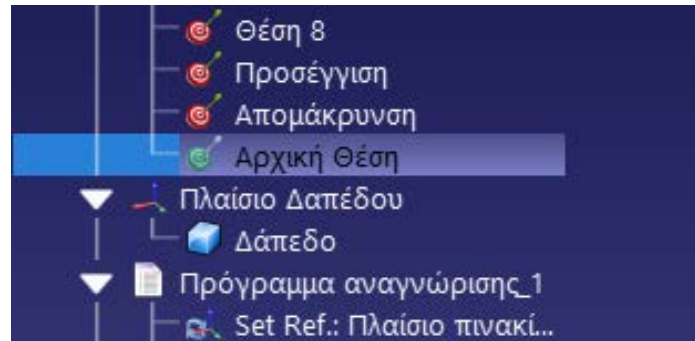
Εικόνα 76. Δημιουργία δύο υποπρογραμμάτων

Τοποθετούμε τον βραχίονα σε ένα σημείο στη μέση περίπου της πινακίδας και πιο απομακρυσμένα από τους στόχους Προσέγγισης και Απομάκρυνσης, για να δημιουργήσουμε έναν τελευταίο στόχο (Αρχική Θέση).

Ο τελευταίος στόχος που θα δημιουργηθεί, δεν θα είναι καρτεσιανός αλλά συνδετικός. Αυτό γίνεται κάνοντας δεξί κλικ και επιλέγοντας «joint target» πάνω στο στόχο. Ουσιαστικά το επιθυμητό είναι να δημιουργηθεί μια σύνδεση μεταξύ των στόχων «Προσέγγιση» και «Απομάκρυνση».

Δημιουργείται λοιπόν ένα νέο πρόγραμμα που ονομάζεται αυθαίρετα, «Πρόγραμμα εκκίνησης» και θα συνδεθεί «φυσικά» (Add a joint movement to a program), με τους δύο παραπάνω στόχους. Ο νέος αυτός συνδετικός στόχος περιλαμβάνει στην ουσία τους δύο προηγούμενους καρτεσιανούς στόχους, «Προσέγγιση» και «Απομάκρυνση».


Μια παρατήρηση που έχει να κάνει με τον καρτεσιανό στόχο και τον στόχο συνδέσμου είναι, ότι το RoboDK κατά βούληση δημιουργεί καρτεσιανούς στόχους και έχουν χρώμα κόκκινο. Παρατηρώντας την εικόνα 77, βλέπουμε τον συνδετικό στόχο να έχει χρώμα πράσινο.



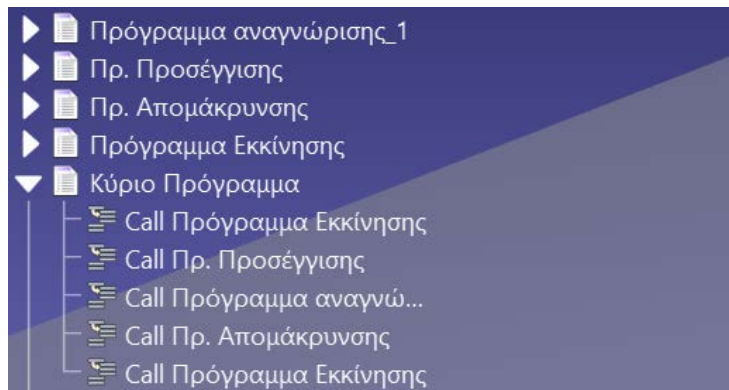
Εικόνα 77. Συνδεδεμένος στόχος "Αρχική Θέση"

Θα πρέπει να δημιουργηθεί ένα κύριο πρόγραμμα που θα περιλαμβάνει αυτά τα υποπρογράμματα και να έχει νόημα. Σαφώς και με όλα τα υποπρογράμματα που δημιουργήθηκαν, υπήρχε κατά νου, ότι εξυπηρετούν μια υποτιθέμενη εργασία ανάθεσης. Συγκεκριμένα το ρομπότ ξεκινά από τη *Αρχική θέση*, πηγαίνει στην *Θέση Προσέγγισης*, εκτελεί τις βασικές λειτουργίες από το στόχο 1 έως τον 8, παρίσταται στη *Θέση Απομάκρυνσης* και καταλήγει στην *Αρχική του Θέση*.

5.3 Σύνδεση κυρίως προγράμματος με υποπρογράμματα

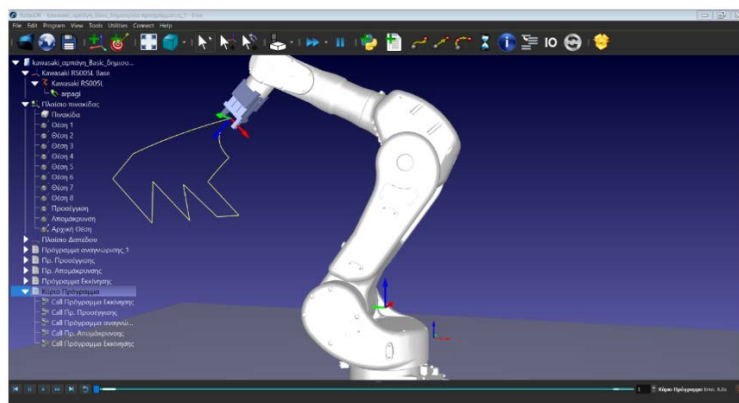
Το ζητούμενο είναι να δημιουργηθεί ένα κύριο πρόγραμμα το οποίο θα περιλαμβάνει όλα τα υπόλοιπα. Κατά αρχάς πιέζεται το πλήκτρο για τη δημιουργία προγράμματος και ονομάζεται «Κύριο Πρόγραμμα». Για να εισαχθούν προγράμματα στο κύριο πρόγραμμα επιλέγεται από το κατάλογο εργαλείων, το «Program call or insert code instruction»  και εμφανίζεται ένας δεύτερος πίνακας επίλογων, όπως φαίνεται στην εικόνα 78. Επιλέγουμε «Select program» και εισάγεται το πρόγραμμα. Επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία, εισάγονται όλα τα προγράμματα, με την επιθυμητή σειρά.

Κεφάλαιο 5. Εκτέλεση προσομοιώσεων σε διάφορα σενάρια



Εικόνα 78. Ενσωμάτωση υποπρογραμμάτων στο κύριο πρόγραμμα

Για να γίνει η πινακίδα διάφανη πρέπει να ενεργοποιηθεί η επιλογή «visible» με δεξί κλικ στην πινακίδα εικόνα 79. Με αυτό τον τρόπο είναι ορατό το μονοπάτι της τροχιάς. Αντίθετα, ενεργοποιώντας την επιλογή «visible», η πινακίδα εμφανίζεται βλ. εικόνα 80.

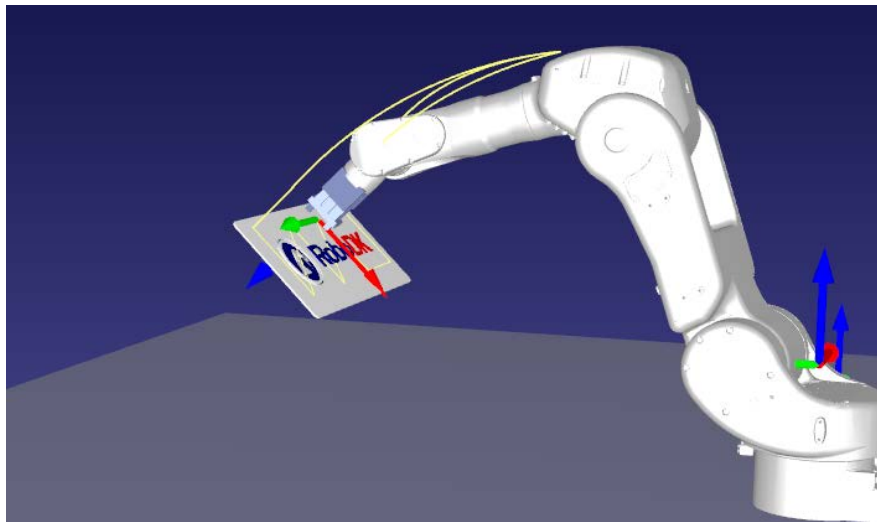


Εικόνα 79. Εκτέλεση προγράμματος με διάφανη πινακίδα



Εικόνα 80. Εκτέλεση προγράμματος με εμφανή πινακίδα

Μια βασική σημείωση στην εκτέλεση τέτοιων προγραμμάτων είναι η εξής: Μετακινώντας το πλαίσιο αναφοράς της πινακίδας σε κάποιο άλλο σημείο, παρατηρείται ότι ο βραχίονας RS005L ακολουθεί την προηγούμενη τροχιά του και βρίσκει τα σημεία που είχαν τεθεί ως στόχοι εκτός από έναν. Η αρχική θέση όπως ορίστηκε, είναι στόχος συνδεδετικός και όχι καρτεσιανός. Ο στόχος «Αρχική Θέση» κρατάει τις καρτεσιανές του συντεταγμένες στο χώρο εργασίας του βραχίονα, οπότε έχουμε το αποτέλεσμα που φαίνεται στην εικόνα 81.



Εικόνα 81. Διαφορά καρτεσιανού στόχου με συνδεδετικό στόχο

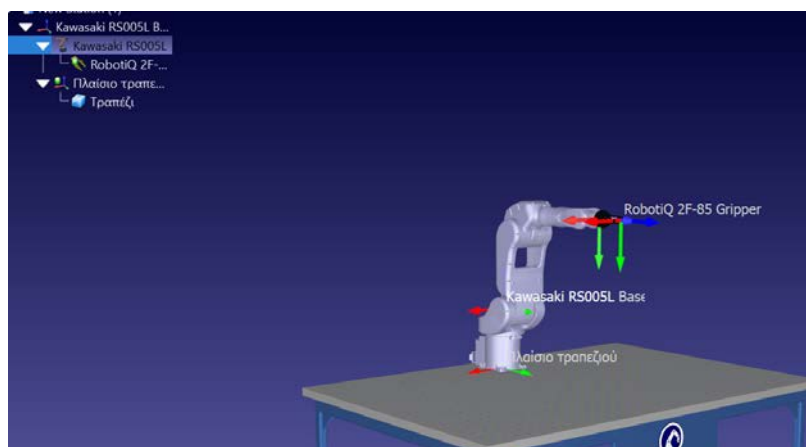
5.4 Επιλογή και τοποθέτηση αντικειμένων

Για την εκμάθηση του λογισμικού RoboDK σε ένα μεγάλο βαθμό, σε συνεργασία με το βραχίονα Kawasaki RS005L, κρίθηκε σκόπιμη η δημιουργία ενός ακόμα χαρακτηριστικού προγράμματος. Θα δημιουργηθεί ένας καινούργιος σταθμός εργασίας όπως ο παρακάτω στην εικόνα 82 και θα ενσωματωθεί η αρπάγη «**RobotiQ-2F-85-Gripper-Closed.tool**» από τη βιβλιοθήκη του RoboDK.



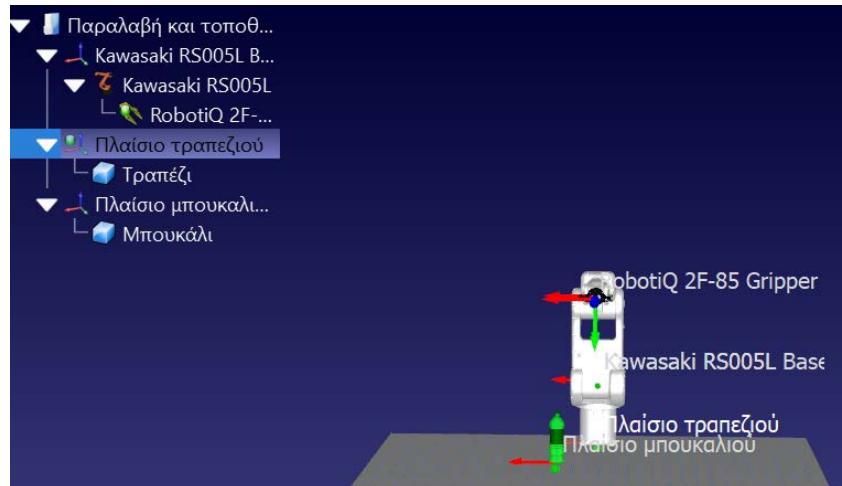
Εικόνα 82. Ενσωμάτωση αρπάγης στο ρομπότ

Αρχικά εισάγεται ένα μοντέλο τραπεζιού με διαστάσεις 2000x1200x800 από τη βιβλιοθήκη και ένα πλαίσιο αναφοράς για την τοποθέτηση αυτού, βλ. εικόνα 83.



Εικόνα 83. Εισαγωγή τραπεζιού και του πλαισίου αναφοράς του

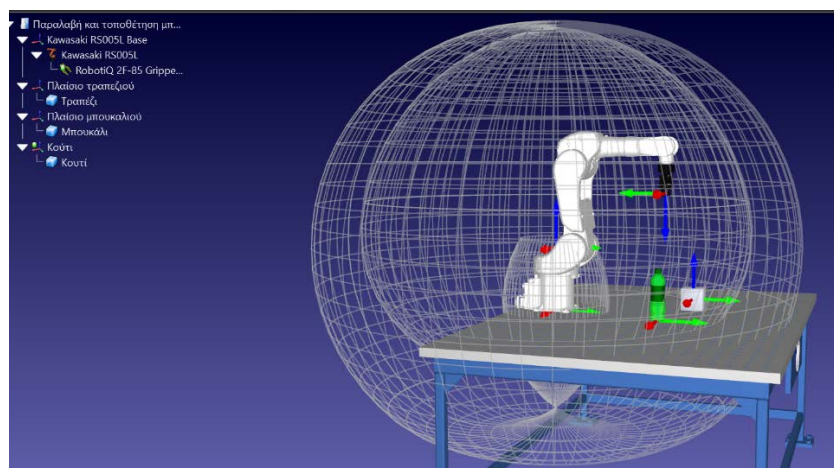
Θα πρέπει να τονιστεί κάτι πολύ σημαντικό σε αυτό το σημείο. **Τα πλαίσια αναφοράς του κάθε αντικειμένου ενός σταθμού εργασίας σε μια ρομποτική διάταξη καλό θα ήταν να δημιουργηθούν πριν τη δημιουργία του προγράμματος.** Αυτό θα βοηθήσει σε μεγάλο βαθμό στην έκβαση δημιουργίας του σταθμού. Στην εικόνα 84 παρακάτω, φαίνονται ο ρομποτικός βραχίονας μαζί με την αρπάγη κι ένα μπουκάλι πάνω στο τραπέζι. Το σημαντικό εδώ είναι οι άξονες αναφοράς, οι οποίοι τροποποιήθηκαν ώστε να καλύψουν τις ανάγκες της εργασίας. Έτσι, στο σημείο που είναι τοποθετημένα τα αντικείμενα παρατηρούνται και τα αντίστοιχα πλαίσια αναφοράς τους.



Εικόνα 84. Συγχρονισμένα πλαίσια αναφοράς με τα αντικείμενα

Πολύ μεγάλο ρόλο παίζει επίσης η επίβλεψη του χώρου εργασίας πριν ξεκινήσει να δημιουργείται ένα πρόγραμμα. Τοποθετώντας οποιοδήποτε αντικείμενο στο χώρο εργασίας θα ήταν συνετό αν όχι αναγκαίο, να ελεγχθεί το βεληνεκές του βραχίονα.

Επιλέγοντας λοιπόν να γίνει ορατός ο χώρος εργασίας όπως φαίνεται στην εικόνα 85, μπορούν να τοποθετηθούν τα αντικείμενα σε ένα σημείο προσέγγισης του βραχίονα. Επίσης χρήσιμο θα ήταν, εφόσον υπάρχουν επιτραπέζια αντικείμενα, να στρέψουμε την αρπάγη με διεύθυνση παράλληλη στον άξονα Z και κατεύθυνση προς το τραπέζι. Αυτό θα βοηθήσει στην πορεία για την ομαλότερη έκβαση της συγκεκριμένης εργασίας, που είναι η συλλογή και η επανατοποθέτηση αντικείμενων από ένα σημείο του τραπεζιού σε κάποιο άλλο.



Εικόνα 85. Χώρος εργασίας του βραχίονα

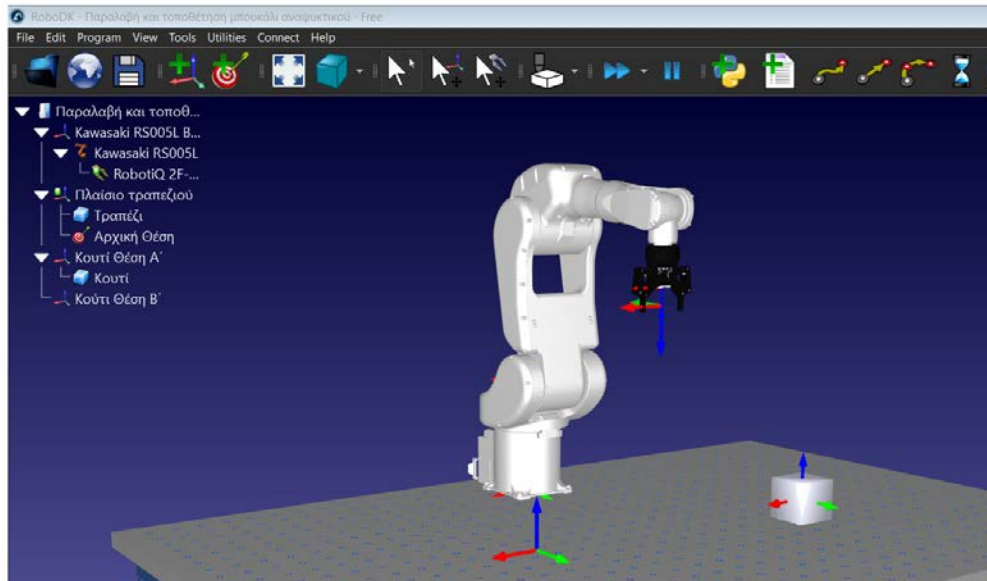
5.4.1 Συλλογή και επανατοποθέτηση αντικειμένου στο RoboDK

Σκοπός αυτού του προγράμματος είναι η συλλογή ενός αντικειμένου από ένα σημείο του τραπέζιού και τοποθέτησής του σε ένα άλλο, με τον ρομποτικό βραχίονα της Kawasaki.

Σε συνέχεια του προηγούμενου προγράμματος, μένει το κουτί στο τραπέζι και αφαιρείται το μπουκάλι. Αυτό που θα δημιουργηθεί είναι ένα πρόγραμμα με το οποίο θα συλλέγεται το κουτί από μια θέση Α' και θα τοποθετείται σε μια διπλανή θέση Β' πάνω στο τραπέζι εργασίας.

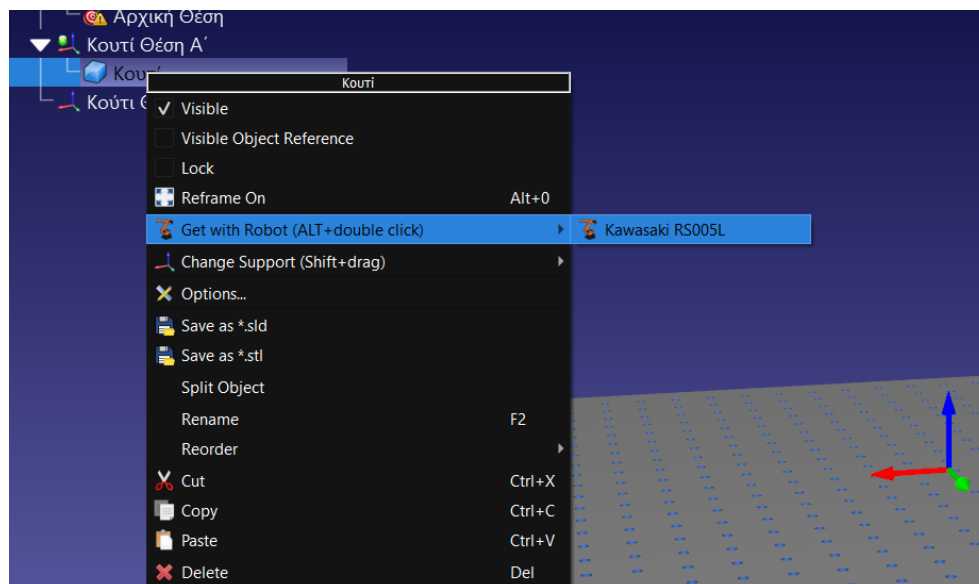
Ουσιαστικά θα δημιουργηθεί ένα πρόγραμμα πέντε διαφορετικών κινήσεων. Ξεκινώντας από την αρχική θέση η αρπάγη, τοποθετείται σε μια θέση αναμονής πάνω από το κουτί. Στη συνέχεια ο βραχίονας τοποθετείται έτσι ώστε η αρπάγη να «αγκαλιάσει» το κουτί και να το κρατήσει. Σαν τρίτο βήμα του προγράμματος θα φέρουμε την αρπαγή και πάλι στη θέση αναμονής της θέσης Α'. Κρατώντας πλέον το κουτί στον αέρα ο βραχίονας της Kawasaki, θα διαγράψει μια τροχιά για να φτάσει σε μια θέση αναμονής Β', στο χώρο εργασίας του βραχίονα. Στην επόμενη φάση του προγράμματος η αρπάγη αφήνει το κουτί στο δεύτερο σημείο που έχει οριστεί σαν στόχος και απομπλέκεται. Στο τελικό στάδιο του προγράμματος και αφού έχει απεμπλακεί η αρπάγη, προγραμματίζεται να ανέβει στη θέση αναμονής Β' και τελικά να επιστρέψει στην αρχική της θέση. Με μερικά τεχνάσματα στο πρόγραμμα δημιουργείται ένας ατέρμων βρόχος, έτσι ώστε κάθε φορά που ο βραχίονας αφήνει το κουτί στη θέση Β' και επιστρέφει στην αρχική του θέση, να εμφανίζεται ένα καινούργιο κουτί στην θέση Α' αναπαριστώντας τελικά μια γραμμή παραγωγής.

Έτσι όπως φαίνεται στην εικόνα 86, θα είναι και ο χώρος εργασίας που έχει διαμορφωθεί με τον βραχίονα και την αρπάγη κάθετα προς τον πάγκο εργασίας και τις δύο προκαθορισμένες θέσεις Α' και Β', οριζόμενες σαφώς από τα πλαίσια αναφοράς τους. Στο δέντρο εργασιών φαίνονται το ρομπότ με την αρπάγη που δίνει το λογισμικό και τέσσερα πλαίσια αναφοράς. Το πλαίσιο αναφοράς αξόνων της βάσης του ρομπότ, του τραπέζιού, της θέσης Α' και της θέσης Β'. Το πρόγραμμα ξεκινάει με τον ορισμό του πρώτου στόχου που ονομάστηκε «Αρχική θέση» και φροντίζουμε να βρίσκεται κάπου μεταξύ των δύο θέσεων, όπως είχαν οριστεί και τα πλαίσια αναφοράς Α', Β'.



Εικόνα 86. Προετοιμασία του χώρου εργασίας

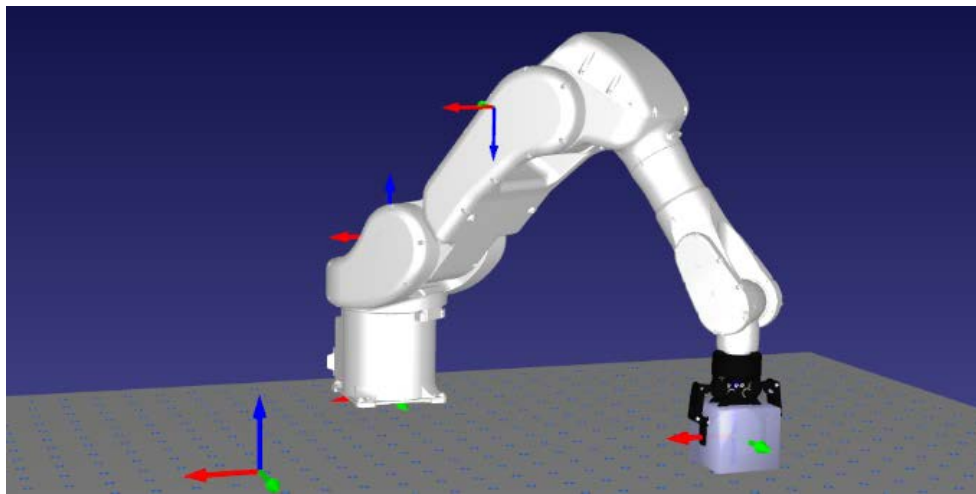
Υπάρχει μια χρήσιμη εντολή μέσα στα εργαλεία του RoboDK, όπου κάνοντας δεξί κλικ πάνω στο αντικείμενο στη θέση Α', ανοίγει ένα μενού και επιλέγεται η εντολή «Get with Robot». Επιλέγοντας το εκάστοτε ρομπότ της Kawasaki, θα σταλεί η αρπάγη να «αγκαλιάσει» το κουτί βλ. εικόνα 87.



Εικόνα 87. Εντολή συλλογής αντικειμένου

Να σημειωθεί ότι αυτό συμβαίνει λόγω της τοποθέτησης του πλαισίου αναφοράς του κουτιού ακριβώς στο πλαίσιο αναφοράς των αξόνων του. Γι' αυτό και η διαδικασία αρχικοποίησης των πλαισίων αναφοράς, είναι πολύ σημαντική στους σταθμούς εργασίας.

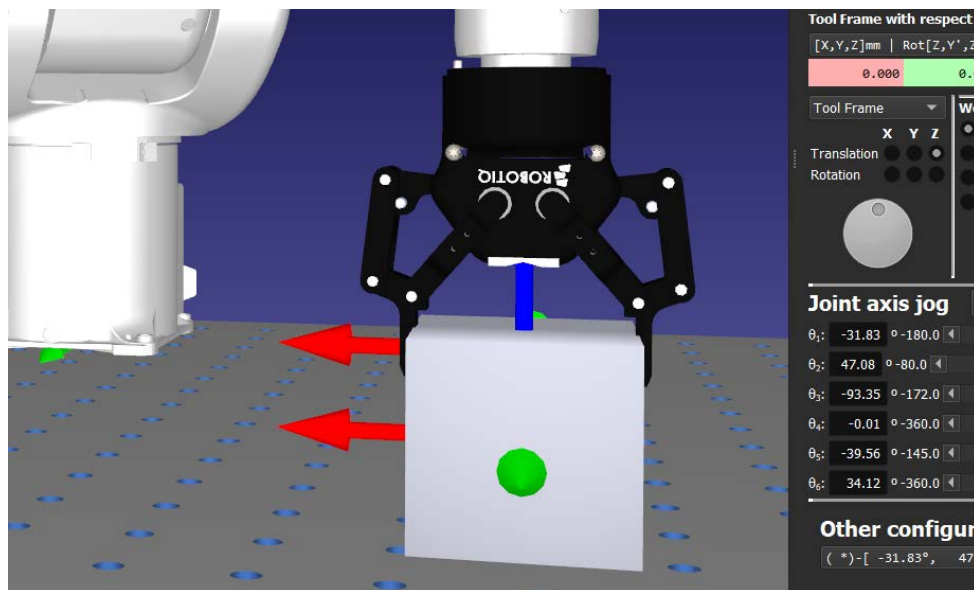
Αμέσως μετά την εκτέλεση της εντολής ο βραχίονας διαμορφώνεται έτσι ώστε να «γραπώσει» το αντικείμενο βλ. εικόνα 88



Εικόνα 88. Εκτέλεση εντολής περισυλλογής αντικειμένου

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να δοθεί λίγη έμφαση και να γίνουν κάποιες διορθώσεις, εάν χρειάζονται, για την ακριβή τοποθέτηση της αρπάγης πάνω στο αντικείμενο. Κάνοντας διπλό κλικ ή ανοίγοντας τις ρυθμίσεις του ρομπότ, επιλέγουμε από τις παραμέτρους του και εστιάζουμε στη Z καρτεσιανή της αρπάγης, κάνοντας τη καλύτερη δυνατή τοποθέτηση της πάνω στο αντικείμενο.

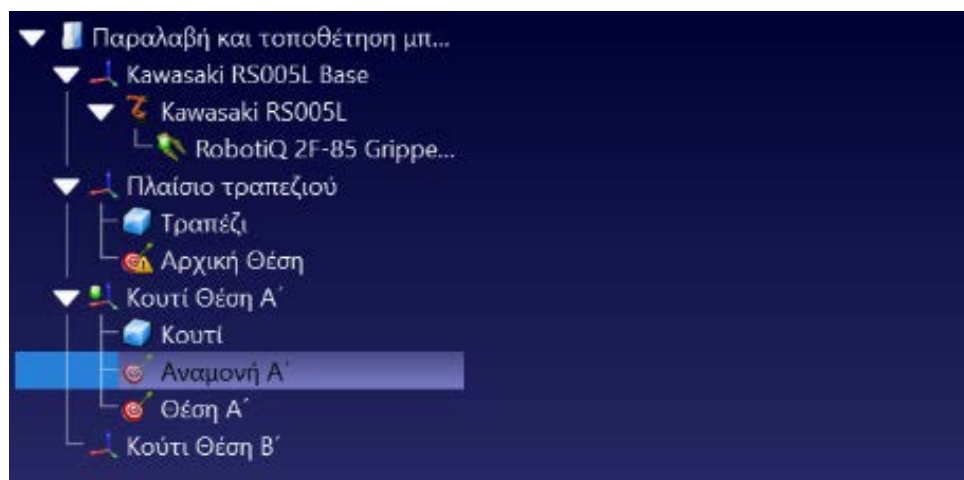
Στην εικόνα 89, παρατηρείται η αρπάγη με τις κατάλληλες διορθώσεις στον άξονα Z, να είναι τοποθετημένη ορθά.



Εικόνα 89. Ορθή τοποθέτηση αρπάγης στο αντικείμενο

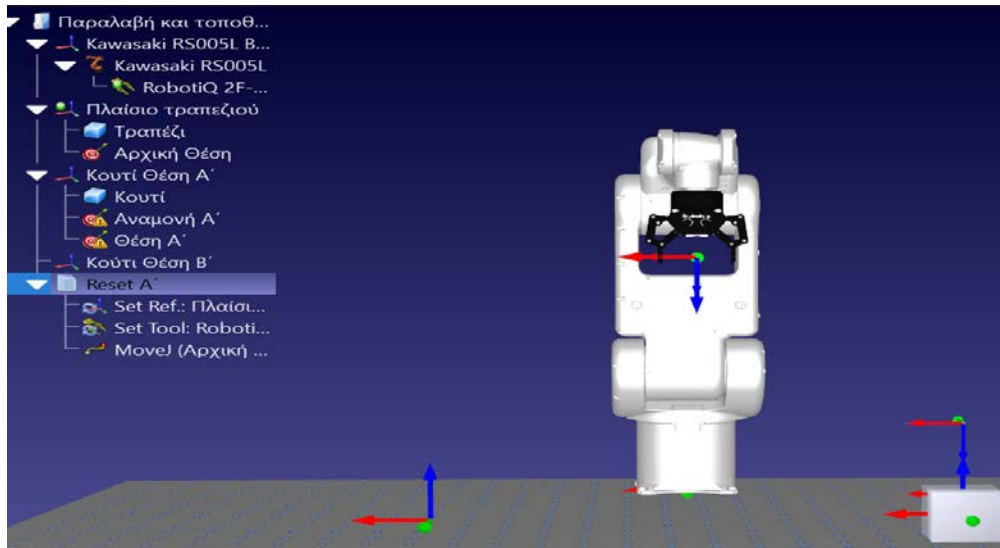
Μετά τις απαιτούμενες διορθώσεις των καρτεσιανών της αρπάγης και αφού ορίζεται ο πρώτος στόχος «Θέση Α'», δημιουργείται ένας ακόμα στόχος «Αναμονή Α'» λίγο πιο πάνω από τη θέση συλλογής του αντικειμένου, όπως φαίνεται στην εικόνα 90.

Συνοψίζοντας, έχουν δημιουργηθεί μέχρι τώρα τρεις στόχοι. Αρχική θέση, Αναμονή Α' και Θέση Α'.



Εικόνα 90. Δημιουργία στόχων αντικειμένου

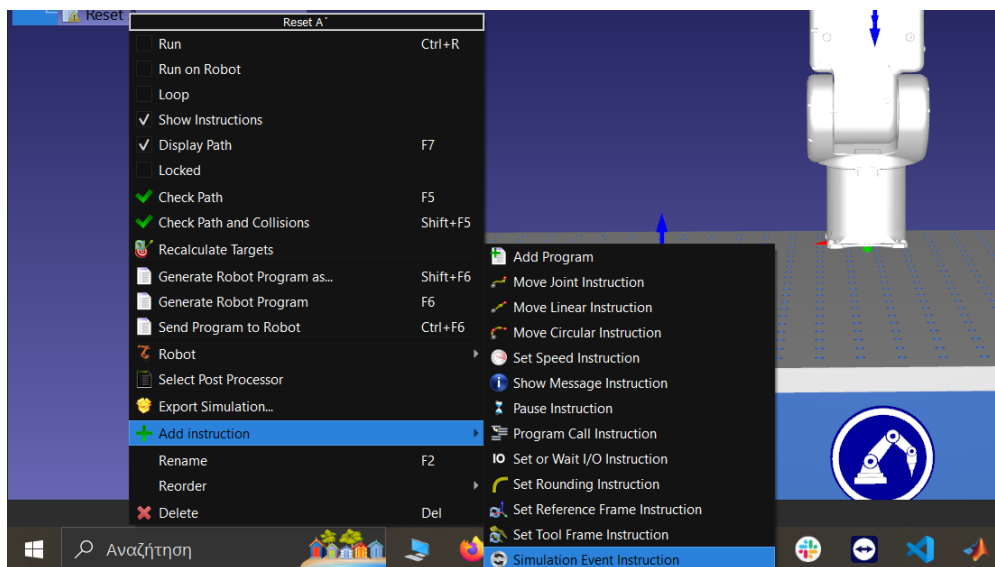
Επαναφέρεται και πάλι ο βραχίονας στην Αρχική Θέση. Κάνοντας διπλό αριστερό κλικ στο στόχο «Αρχική Θέση» και έχοντας σαν προεπιλεγμένο πλαίσιο αναφοράς αυτό του τραπεζιού, επιλέγεται το εργαλείο δημιουργίας προγράμματος. Το πρόγραμμα θα ονομαστεί Reset Α' και το αποτέλεσμα είναι αυτο που φαίνεται στην εικόνα 91.



Εικόνα 91. Πρόγραμμα Reset A´

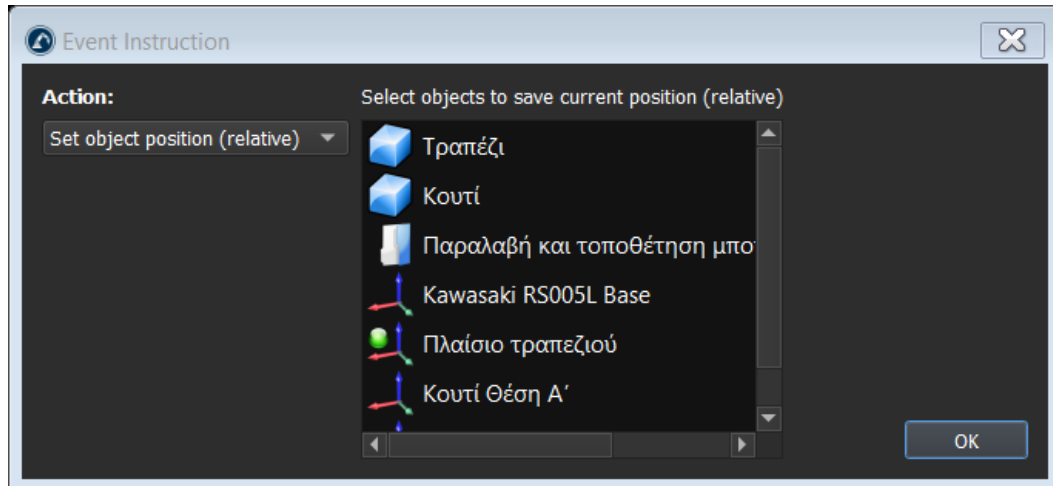
Σκοπός σε αυτό το πρόγραμμα είναι να δημιουργηθεί μια προσομοίωση κίνησης. Το επόμενο βήμα είναι να αφαιρεθούν τα «child» του Reset A´(Set Ref, Set Tool, MoveJ) που δημιουργήθηκαν αυτόματα.

Κάνοντας δεξί κλικ στο πρόγραμμά, επιλέγεται το «Add instruction» και έπειτα κλικάρεται η επιλογή «Simulation event instruction» βλ. εικόνα 92.

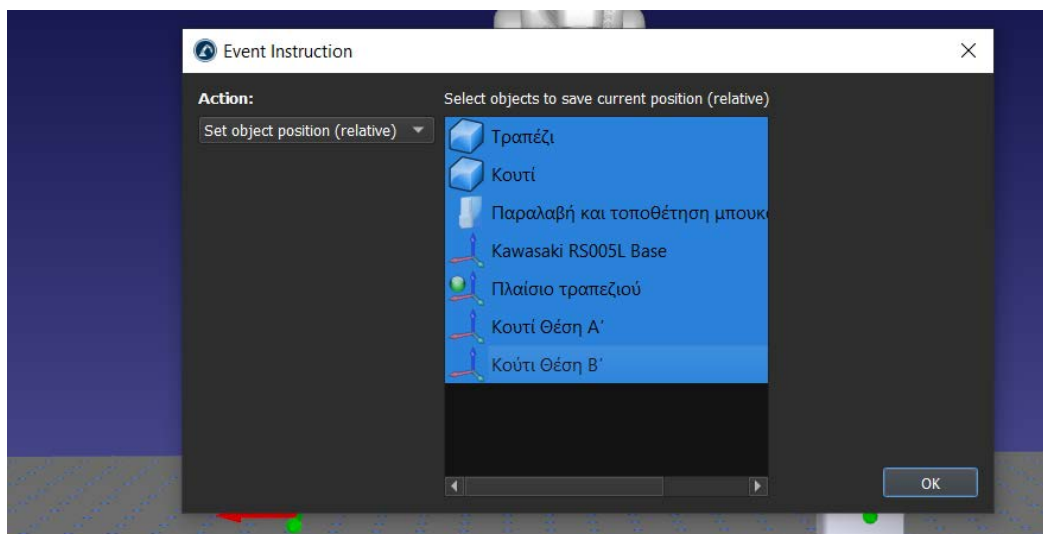


Εικόνα 92. Προσθήκη προσομοίωσης στο πρόγραμμα


Ανοίγει αμέσως ένα παράθυρο το οποίο αποτυπώνεται στην εικόνα 93 και 94 διαδοχικά, στο οποίο φαίνεται να υπάρχουν κάποιες δράσεις για το πρόγραμμα. Επιλέγονται με shift όλα τα αντικείμενα που εμφανίζονται στο «παράθυρο» και πατάμε OK.

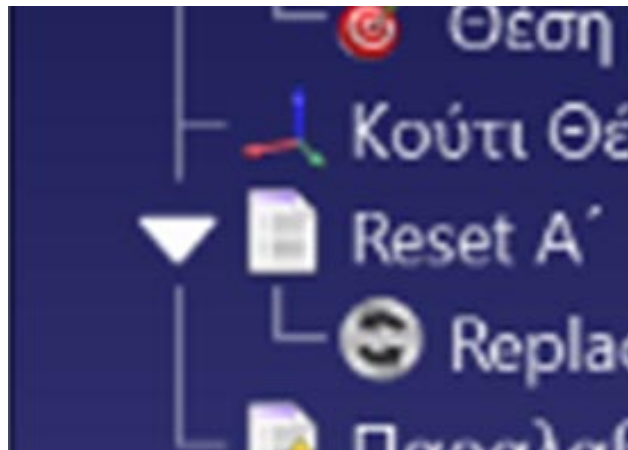


Εικόνα 93. Οδηγίες γεγονότος προγράμματος



Εικόνα 94. Επιλογή γεγονότων προγράμματος

Αυτό που κάνει το πρόγραμμα είναι να δημιουργήσει μια αλληλουχία με όλα τα αντικείμενα του σταθμού εργασίας, η οποία παρουσιάζεται με ένα σύμβολο που φαίνεται στην εικόνα 95 και ονομάζεται «Replace objects» .



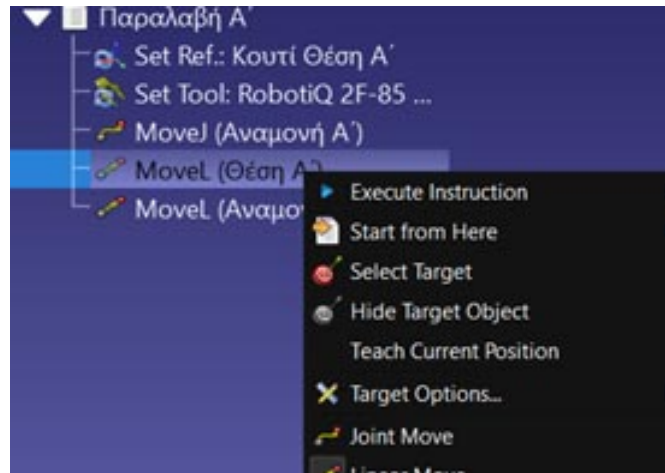
Εικόνα 95. Εσωτερικό πρόγραμμα αλληλουχίας γεγονότων

Στη συνέχεια δημιουργείται ένα ακόμα πρόγραμμα που ονομάζεται «Παραλαβή Α'», βλ. εικόνα 96.



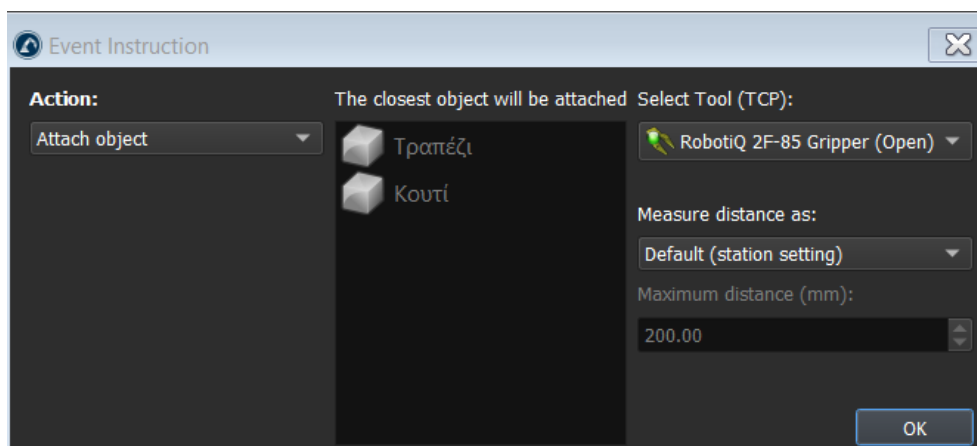
Εικόνα 96. Δημιουργία προγράμματος "Παραλαβή Α' "

Δημιουργούνται τρεις διαφορετικές δράσεις σύνδεσης στόχων (child links), όπως φαίνεται στην εικόνα 97 και η πρώτη συνδέεται με φυσική συμπεριφορά, ενώ οι άλλες δύο με γραμμική. Η αλληλουχία προσέγγισης είναι πλέον (Αναμονή Α' - Θέση Α' - Αναμονή Α').



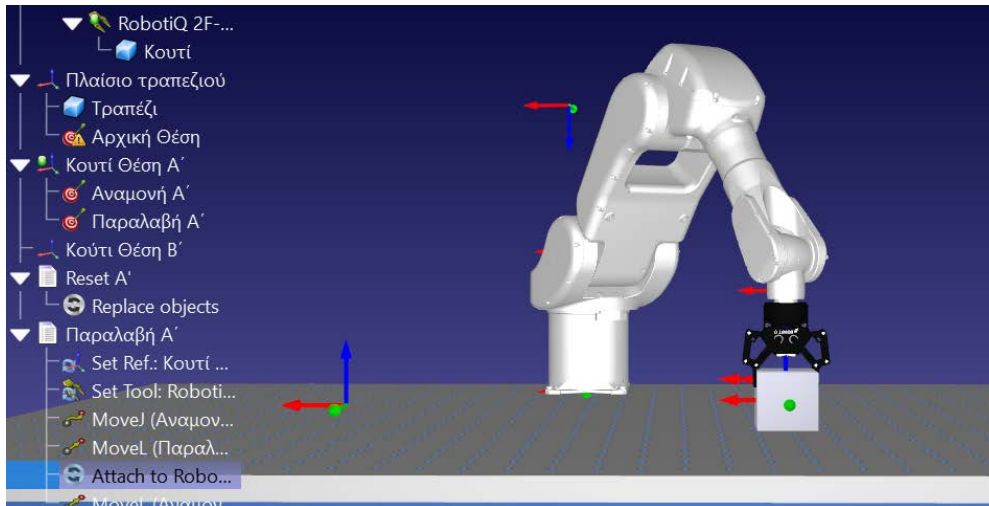
Εικόνα 97. Διαδραστικό πρόγραμμα αλληλουχίας γεγονότων

Με δεξί κλικ στη μεσαία θέση (Θέση Α'), επιλέγεται και πάλι από το «Add instruction», η εντολή «Simulation event instruction». Αυτή τη φορά εμφανίζεται ένα νέο μενού, όπου η δράση αφορά τη σύνδεση της αρπάγης με το αντικείμενο. Στο μενού αυτό αφήνονται οι επιλογές ως έχουν, δηλαδή ενεργοποιημένη την εντολή Attach object βλ. εικόνα 98.



Εικόνα 98. Σύνδεση αντικειμένου με την αρπάγη

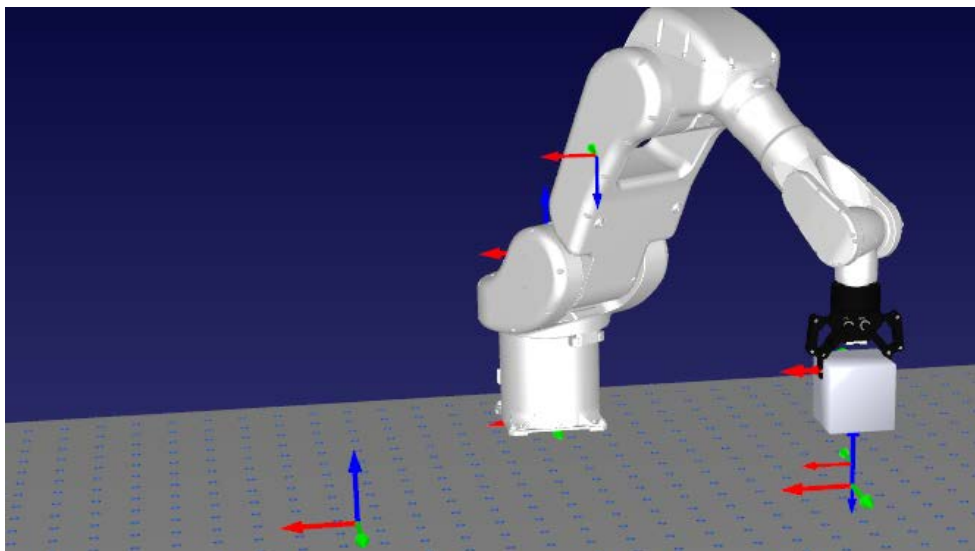
Στην εικόνα 99 παρατηρείται το αποτέλεσμα της πράξης καθώς και η δημιουργία του συμβόλου αλληλουχίας γεγονότων ακριβώς μετά τον σύνδεσμο «Παραλαβή Α'».



Εικόνα 99. Δημιουργία γεγονότος στο σύνδεσμο "Παραλαβή Α' "

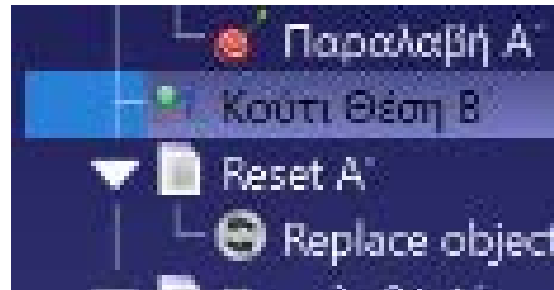
Κάτι που αξίζει να σημειωθεί σ' αυτό το σημείο, είναι η σημασία της θέσης του αντικείμενου στο δέντρο εργασιών. Πατώντας το σύμβολο αλληλουχίας γεγονότων «Attach to RobotiQ», παρατηρείται ότι το αντικείμενο «Κουτί» γίνεται το child της αρπάγης!

Πατώντας τον τελευταίο γραμμικό σύνδεσμο που δημιουργήθηκε μπορεί κάποιος να δει το αποτέλεσμα που φαίνεται στην εικόνα 100. Η αρπάγη έχει «γραπώσει» το αντικείμενο και μετακινείται μαζί με αυτό σε οποιαδήποτε θέση.



Εικόνα 100. Αντικείμενο προσκολλημένο στην αρπάγη

Καθώς το πρόγραμμα «χτίζεται», θα πρέπει να δίνεται μεγάλη σημασία στα πλαίσια αναφοράς αξόνων των αντικειμένων που εσωκλείονται. Στο επόμενο βήμα ορίζεται ως πλαίσιο αναφοράς αξόνων το «Κουτί Θέση Β'» βλ. εικόνα 101.



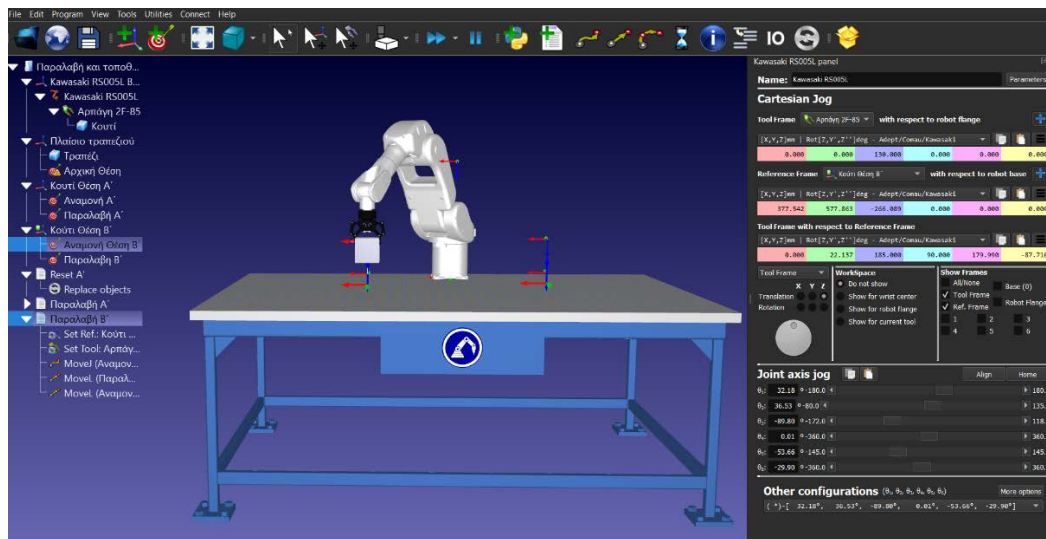
Εικόνα 101. Νέος ορισμός πλαισίου αναφοράς " Κουτί Θέση Β' "

Στο σημείο αυτό ακολουθούνται τα ίδια βήματα με το πλαίσιο αναφοράς στη Θέση Α' αφού όμως γίνει μια πολύ σημαντική ενέργεια. Ανοίγοντας τον πίνακα ελεγχου του βραχίονα εικόνα 102, θα πρέπει να μηδενιστούν όλες οι τιμές, εκτός του άξονα Z που αφορούν την αρπάγη. Προσοχή, θα πρέπει να είναι ενεργό το πλαίσιο αναφοράς «Κουτί Θέση Β'», πριν τις παραπάνω ενέργειες. Το λογισμικό της RoboDk έχει έναν εσωτερικό αλγόριθμο που ουσιαστικά βοηθάει να φτάσει ο χειριστής συμμετρικά στην επόμενη θέση χωρίς περαιτέρω διορθώσεις.

Name: Kawasaki RS005L		Parameters	
Cartesian Jog			
Tool Frame	Αρπάγη 2F-85	with respect to robot flange	
[X,Y,Z]mm	Rot[Z,Y',Z'']deg	Adept/Comau/Kawasaki	
0.000	0.000	130.000	0.000 0.000 0.000
Reference Frame	Κουτί Θέση Β'	with respect to robot base	
[X,Y,Z]mm	Rot[Z,Y',Z'']deg	Adept/Comau/Kawasaki	
377.542	577.863	-266.089	0.000 0.000 0.000
Tool Frame with respect to Reference Frame			
[X,Y,Z]mm	Rot[Z,Y',Z'']deg	Adept/Comau/Kawasaki	
0.000	22.137	196.772	90.000 179.998 -87.718

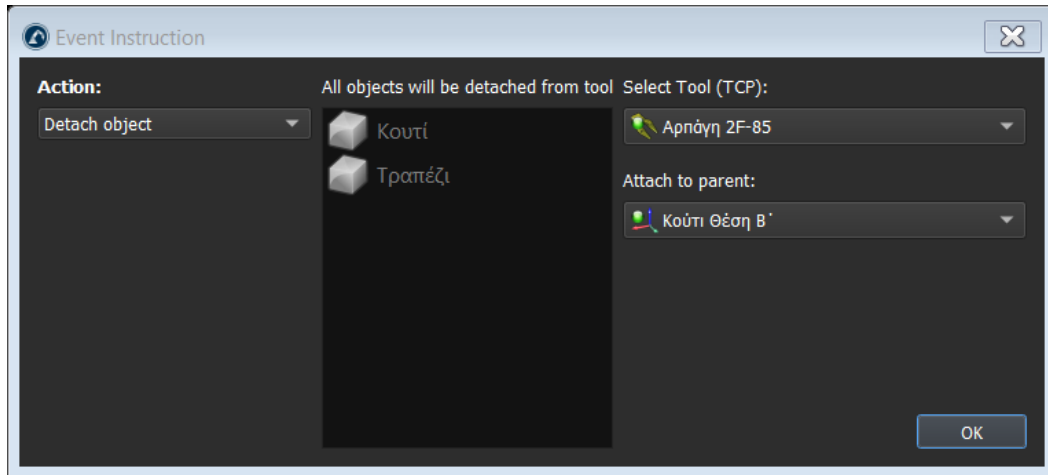
Εικόνα 102. Πίνακας ελέγχου και Θέση Β' του βραχίονα

Επόμενο βήμα είναι να οριστούν καινούργιοι στόχοι στη Θέση Β'. Με τον ίδιο τρόπο που δημιουργήθηκαν αυτοί στη Θέση Α', γίνεται το ίδιο και για τη καινούργια θέση στόχο. Στην εικόνα 103, φαίνονται πλέον ολοκληρωμένοι οι στόχοι που δημιουργήθηκαν καθώς και τα πλαίσια αναφοράς της προηγούμενης θέσης. Δημιουργείται ένα καινούριο πρόγραμμα παραλαβής που ονομάζεται «Παραλαβή Β'» και συνδέεται όπως και το πρώτο. Δηλαδή με έναν φυσικό και δύο γραμμικούς συνδέσμους.




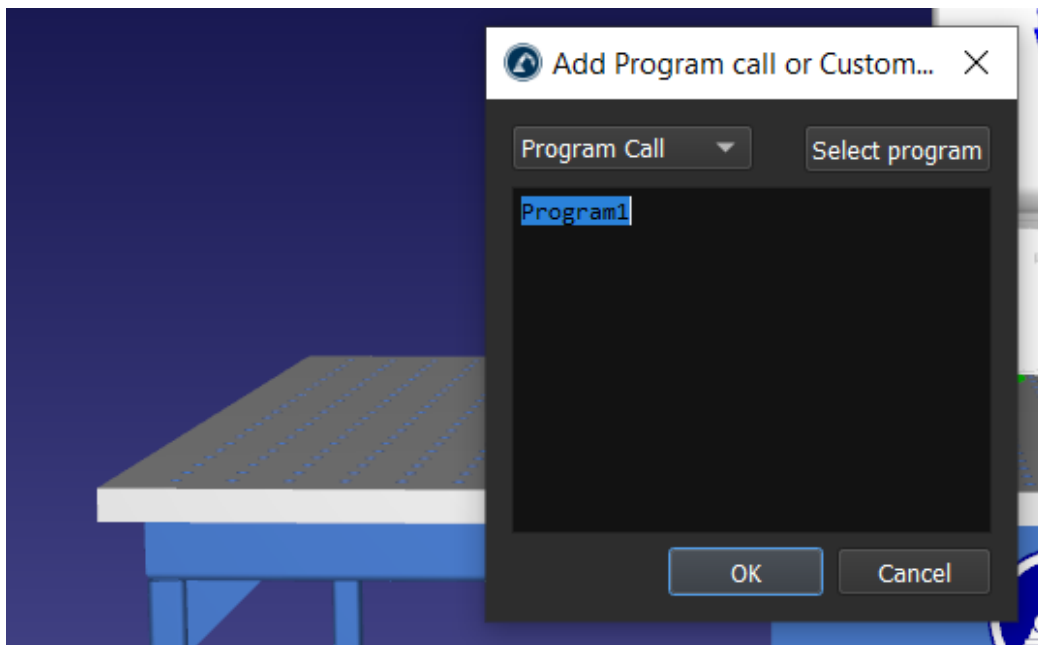
Εικόνα 103. Δημιουργία νέων στόχων στη Θέση Β'

Είναι ορατό ότι καθ' όλη τη διάρκεια που αλλάζουν οι θέσεις στο χώρο εργασίας, το αντικείμενο είναι προσκολλημένο στην αρπάγη. Για να αλλάξει αυτό θα πρέπει με κάποιο τρόπο να δοθεί η εντολή για να αποκολληθεί από αυτή. Αυτό θα συμβεί εκτελώντας και πάλι το πρόγραμμα εμπλοκής-απεμπλοκής αρπάγης στο σημείο που χρειάζεται. Δηλαδή στο σύνδεσμο «Παραλαβή Β'», να δοθεί η εντολή «Add Event instruction» όπως και προηγουμένως. Θα ανοίξει η καρτέλα που φαίνεται στην εικόνα 104 (οδηγίας γεγονότων) που φαίνεται παρακάτω. Επιλέγοντας το «Detach object», δηλαδή αποκόλληση αντικειμένου και κάνοντας ενεργό το πλαίσιο αναφοράς αξόνων «Κουτί Θέση Β'» δεξιά, πατάμε ΟΚ.



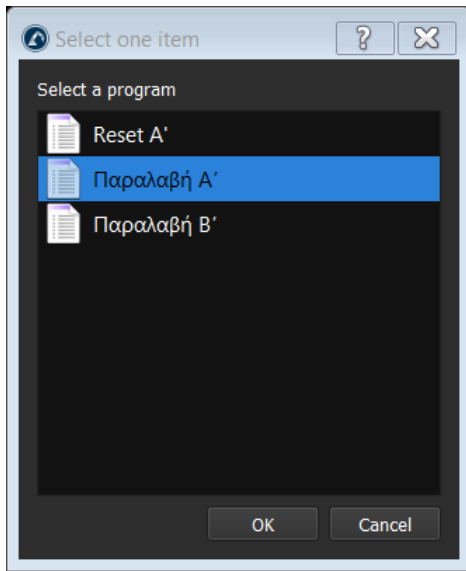
Εικόνα 104. Οδηγίες γεγονότος

Στη πορεία της εξομοίωσης δημιουργείται ένα ακόμα πρόγραμμα που θα είναι και το κύριο πρόγραμμα. Στο κύριο αυτό πρόγραμμα θα γίνει χρήση της εντολής «Add Program call», κάτι που γίνεται κάνοντας δεξί κλικ στο Κύριο Πρόγραμμα ή πατώντας το σύμβολο , από το μενού εργαλείων του λογισμικού. Εμφανίζεται ένας πίνακας που έχει τον τίτλο «Add Program call or Custom» βλ. εικόνα 105. Αυτό που διακρίνεται ουσιαστικά, είναι ένα εργαλείο το οποίο συνδέει πολλά προγράμματα μαζί.

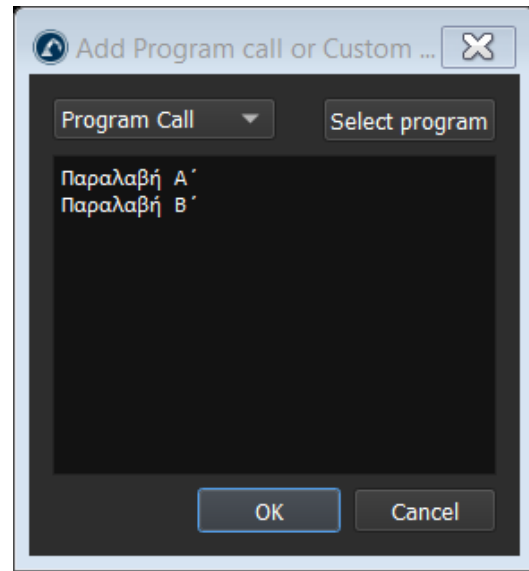


Εικόνα 105. Σύνδεση προγραμμάτων στο κύριο πρόγραμμα

Στην καρτέλα που ανοίγει, έχοντας εκτελέσει το OK του προηγούμενου παραθύρου, δίνεται η επιλογή για τη σειρά εκτέλεσης των προγραμμάτων που έχουν δημιουργηθεί. Επιλέγοντας τα προγράμματα που θα χρησιμοποιήσει ο χρήστης, πατά OK και ανοίγει μια καινούργια καρτέλα. Εκτελώντας «Enter» από το πληκτρολόγιο, τα προγράμματα τοποθετούνται το ένα κάτω από το άλλο, για να εκτελεστούν κατά βούληση όταν θελήσει ο χειριστής του προγράμματος. Στις εικόνες 106 και 107 αντίστοιχα φαίνονται αυτά τα οποία προαναφέρθηκαν.

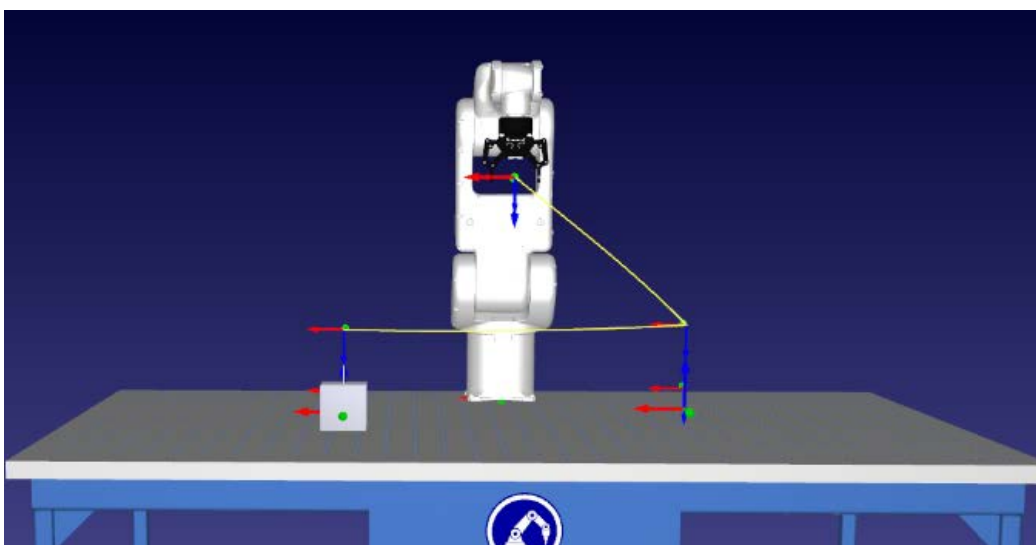


Εικόνα 106. Επιλογή προγράμματος



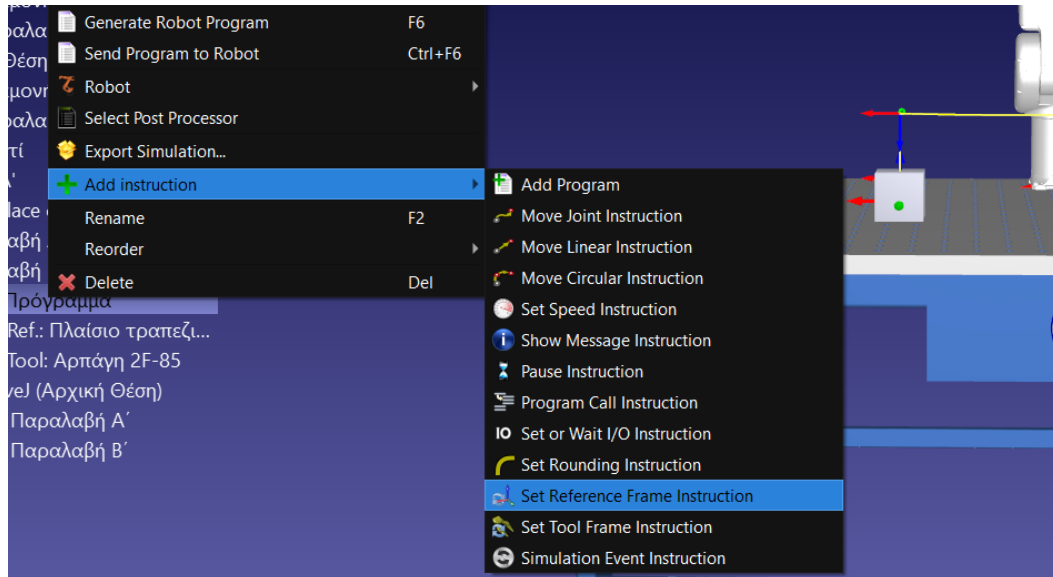
Εικόνα 107. Σειρά εκτέλεσης προγράμματος

Εκτελώντας το «Κύριο Πρόγραμμα» θα έχουμε πλέον το αποτέλεσμα τροχιάς, όπου ένα χαρακτηριστικό απόσπασμα της φαίνεται στην εικόνα 108.

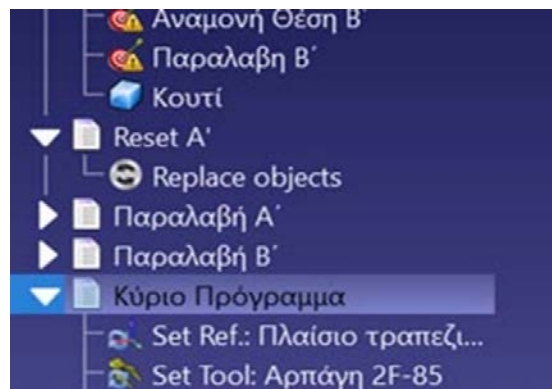


Εικόνα 108. Απόσπασμα τροχιάς εκτελώντας το κύριο πρόγραμμα

Στο πρόγραμμα θα πρέπει να προστεθεί μια ακόμα οδηγία. Κάνοντας δεξί κλικ στο «Κύριο Πρόγραμμα», θα τεθεί μια οδηγία όσον αφορά το πλαίσιο αναφοράς των αξόνων. Η οδηγία έχει να κάνει με την προσθήκη ενός πλαισίου αναφοράς αξόνων, αυτή τη φορά όμως, μέσα στο ενεργό πρόγραμμα βλ. εικόνα 109 και 110 αντιστοίχως.



Εικόνα 109. Οδηγία προσθήκης πλαισίου αναφοράς



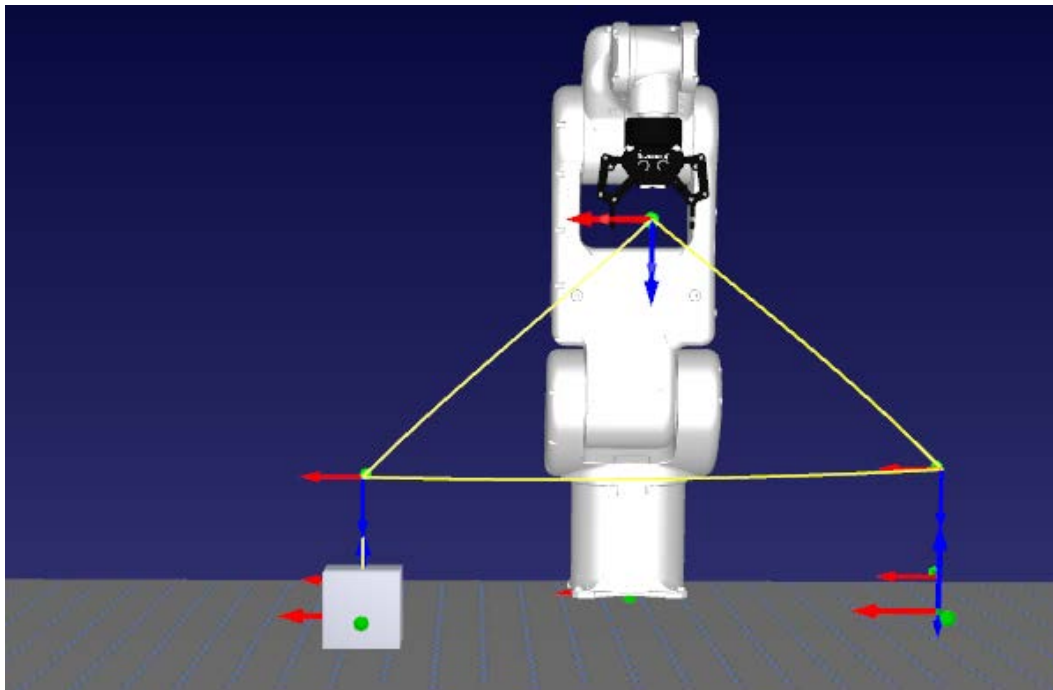
Εικόνα 110. Ανάθεση τραπεζιού ως ενεργού πλαισίου αναφοράς

Αντικαταστάθηκε πλέον το ενεργό πλαίσιο αναφοράς του ρομπότ που ορίστηκε σαν προεπιλογή, με το πλαίσιο αναφοράς αξόνων του τραπεζιού. Μόλις γίνει και αυτή η αλλαγή, προστίθεται μια ακόμα φυσική σύνδεση για να επιστρέψει ο βραχίονας στην «Αρχική Θέση».

Εκτελώντας το «Κύριο Πρόγραμμα», φαίνεται ο βραχίονας να εκτελεί μια τροχιά ξεκινώντας από την «Αρχική του Θέση», να πηγαίνει στο σημείο Αναμονή Α', να κατεβαίνει γραμμικά πλέον για να παραλάβει το κιβώτιο και να επιστρέψει στην θέση Αναμονή Α'. Στη συνέχεια να μεταβαίνει επίσης γραμμικά στη θέση Αναμονή Β', κατεβαίνει στη Θέση

Παραλαβή Β' να αφήσει το κιβώτιο, για να ανέβει ξανά στη θέση Αναμονή Β' και τελικά να επιστρέφει με φυσική κίνηση στην αρχική του Θέση.

Κάνοντας δεξί κλικ στο κύριο πρόγραμμα και ενεργοποιώντας την επιλογή «Loop», το πρόγραμμα εκτελείται ασταμάτητα μέχρι να δώσει ο χειριστής εντολή να σταματήσει. Στην εικόνα 111, αποτυπώνεται ένα χαρακτηριστικό απόσπασμα της τροχιάς του εργαλείου στον βραχίονα.

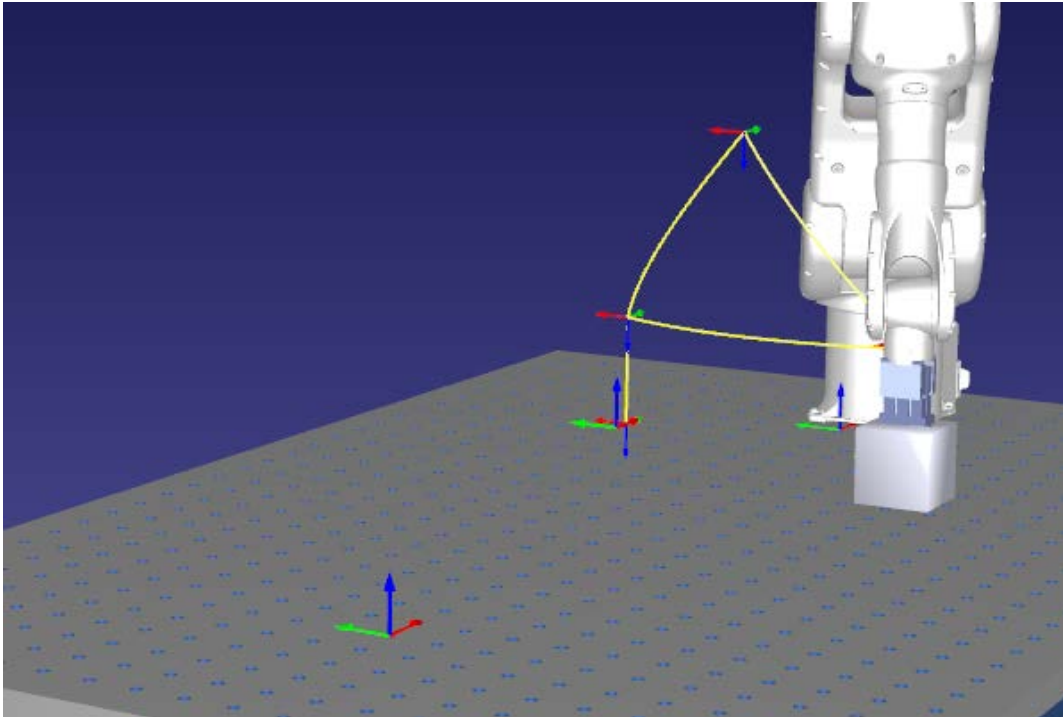


Εικόνα 111. Απόσπασμα τροχιάς της αρπάγης στο κύριο πρόγραμμα

5.5 Εκτέλεση προγράμματος της εργαστηριακής αρπάγης με προσαρμοσμένο πλαίσιο αναφοράς αξόνων

Με την αρπάγη του εργαστηρίου πάνω στο ρομποτικό βραχίονα, προσαρμόζεται το πρόγραμμα λόγω αλλαγής των καρτεσιανών στο TCP(Tool Center Point).

Κάνοντας την ίδια διαδικασία που περιεγράφηκε παραπάνω και αντικαθιστώντας την αρπάγη με αυτή του εργαστηρίου θα έχουμε το αποτέλεσμα που φαίνεται στη παρακάτω εικόνα 112.



Εικόνα 112. Βασικό πρόγραμμα με τροποποιημένες καρτεσιανές της αρπάγης

5.6 Εξαγωγή προγράμματος σε γλώσσα Python και γλώσσα βραχίονα Kawasaki

Ολοκληρώνοντας την εργασία, το ζητούμενο είναι να δημιουργήσουμε ένα πρόγραμμα σε γλώσσα Python ή AS Robot (Kawasaki), το οποίο θα αποστείλουμε μέσω υπολογιστή ή αποθηκευτικών μέσων, στον ελεγκτή του βραχίονα. Ουσιαστικά είναι το αποτέλεσμα της εργασίας μας σε πραγματικό περιβάλλον.

Κάνοντας δεξί κλικ πάνω στο κύριο πρόγραμμα, ανοίγει ένας κατάλογος επιλογών και επιλέγοντας «Generate Robot Program ή απλά πατώντας F6», το RoboDK μετατρέπει το πρόγραμμα σε γλώσσα Python ή AS Robot (Kawasaki). Για να γίνει αυτό χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα ο Post Processor της Kawasaki.

Δυστυχώς σε αυτή την έκδοση η οποία είναι ελεύθερη, δεν δίνεται η δυνατότητα για τη συγκεκριμένη ενέργεια παρά μόνο για ένα μήνα. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα μόνο το πρώτο μήνα από την εγκατάσταση του, να εξάγουμε το πρόγραμμα που δημιουργούμε σε εξομοίωση και αυτό κάναμε στη παρούσα διπλωματική. Τα προγράμματα που δημιουργήθηκαν αναρτώνται στο παράρτημα της παρούσας εργασίας. Για να εκτελέσουμε ένα πρόγραμμα που έχουμε ήδη εξάγει σε γλώσσα Python, από το εργαλείο Tools στον κατάλογο εργαλείων επιλέγουμε Run Script και το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε.

5.7 Σύγκριση των αποτελεσμάτων με την πραγματική συμπεριφορά του ρομποτικού βραχίονα

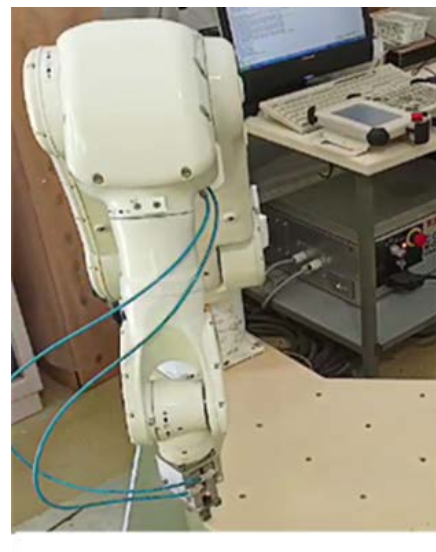
Στην ενότητα αυτή παρατίθενται κάποιες λήψεις από το παραπάνω πείραμα στο εργαστήριο των μηχανικών του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Το πρόγραμμα που εξάχθηκε, μεταφέρθηκε στον ελεγκτή του βραχίονα της Kawasaki και τελικά επετεύχθη το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ένα σημείο που είναι διαφορετικό είναι το τραπέζι καθώς δεν έχει τις ίδιες διαστάσεις με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στο RoboDK, κι αυτό γιατί δεν βρέθηκε στην βιβλιοθήκη του RoboDK.

Κάτι ακόμα που αξίζει να αναφερθεί, είναι ότι η αρπάγη δεν ανοιγοκλείνει και αυτό γιατί το πρόγραμμα δεν αντιλαμβάνεται την εντολή (;Attach και :Detach). Όπως φαίνεται και από τη δομή της εντολής, εμφανίζεται στο κώδικα σαν σχόλιο. Η εντολή για εμπλοκή και απεμπλοκή της αρπάγης είναι (CLOSEI και OPENI) αντίστοιχα. Παρακάτω παρατίθενται κάποιες λήψεις φωτογραφιών εκτέλεσης του προγράμματος εικόνες 113 και 114.



Εικόνα 113. Εργαστηριακή λήψη 1



Εικόνα 114. Εργαστηριακή λήψη 2

Κεφάλαιο 6. Συμπεράσματα και προτάσεις

6.1 Τα δύσκολα σημεία της εργασίας και προτάσεις βελτίωσης του μεταπτυχιακού προγράμματος

Ένα γενικό συμπέρασμα που μπορεί να διαπιστώσει με μια πρώτη επαφή ο χειριστής του βραχίονα της Kawasaki RS005L, είναι ότι πρόκειται για έναν ανθεκτικό και εργονομικό βραχίονα. Κάνει εφικτές εργασίες όπως αυτές που αναλύθηκαν, είτε σε εκπαιδευτικό, είτε σε επαγγελματικό επίπεδο. Προφανώς και έχει πάρα πολλές ακόμα δυνατότητες και σε συνδυασμό με το πανίσχυρο λογισμικό της RoboDK, μπορεί κάποιος να εργαστεί σε πολλά ακόμα προγράμματα με πολλαπλούς βραχίονες σε σταθμούς εργασίας.

Όσον αφορά το λογισμικό, υπάρχει η δυνατότητα να αξιοποιηθεί σε πολυάριθμες εφαρμογές με περιορισμένες όμως δυνατότητες εκτέλεσης. Θα ήταν πολύ χρήσιμο εάν η σχολή μπορούσε να παρέχει την ακαδημαϊκή άδεια του λογισμικού για να γίνει ανάλυση και εκτέλεση όλων των λειτουργιών που παρέχει το πρόγραμμα, όπως επίσης και η επιδιόρθωση του εργαστηριακού βραχίονα. Αν και η εργασία προσέγγισε ένα υψηλό επίπεδο προσομοίωσης, δεν υπήρχε δυνατότητα εκτέλεσης των προγραμμάτων που αναπτύχθηκαν πάνω στο βραχίονα του εργαστηρίου λόγω βλάβης του.

Ένα ακόμα δύσκολο σημείο όπου αντιμετωπίστηκαν προβλήματα, είναι η ενημέρωση του λογισμικού όσον αφορά τον βασικό οδηγό καθοδήγησης και λειτουργίας του προγράμματος καθώς η εταιρεία συνεχώς βελτιώνει με αναβαθμίσεις το λογισμικό της.

Βεβαίως, «ουδέν κακόν αμιγές καλού» γιατί με συνεχή χειρισμό του προγράμματος και την πολύωρη χρήση στο περιβάλλον προσομοίωσης του, δίνεται η δυνατότητα εξοικείωσης σε πρόσθετες λειτουργίες και εφαρμογές, όσον αφορά μελλοντικές εργασίες που θα μπορούσαν να ανατεθούν.

Το λογισμικό της RoboDK θα μπορούσε με ευκολία να είναι μέρος του μεταπτυχιακού προγράμματος καθώς ακόμα και στην ελεύθερη έκδοση του, δίνει τη δυνατότητα στους φοιτητές για εκμάθηση και προσομοίωση σε ένα πολύ προχωρημένο επίπεδο.

6.2 Ο ρομποτικός βραχίονας με τεχνητή νοημοσύνη

Ο βραχίονας της Kawasaki, θα μπορούσε να προσαρμοστεί με τις απαιτήσεις της εποχής και την εξέλιξη της τεχνητής νοημοσύνης. Ο συνδυασμός ρομποτικών βραχιόνων και τεχνητής νοημοσύνης αντιπροσωπεύει έναν σημαντικό τομέα της τεχνολογίας που έχει επιφέρει επαναστατικές αλλαγές σε πολλούς τομείς, συμπεριλαμβανομένης της βιομηχανίας, της υγείας, της έρευνας και πολλών άλλων.

Η τεχνητή νοημοσύνη προσφέρει τη δυνατότητα στο σύστημα να μάθει και να προσαρμόζεται με τον χρόνο, καθιστώντας τους ρομποτικούς βραχίονες πιο ευέλικτους και αυτόνομους. Ο συνδυασμός αυτών των δύο τεχνολογιών επιτρέπει τη δημιουργία ρομποτικών συστημάτων που μπορούν να λειτουργούν αυτόνομα ή σε συνεργασία με ανθρώπους, εκτελώντας δύσκολες, επαναλαμβανόμενες ή και επικίνδυνες εργασίες. Αυτά τα συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη αυτοματοποιημένων γραμμών παραγωγής σε εργοστάσια, για ιατρικές εφαρμογές όπως η χειρουργική, για αναζήτηση και διάσωση σε επικίνδυνα περιβάλλοντα, και πολλά άλλα. Επιπλέον, η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης στους ρομποτικούς βραχίονες επιτρέπει την ανάπτυξη προηγμένων λειτουργιών όπως η αναγνώριση αντικειμένων, η αυτόματη προσαρμογή σε νέες καταστάσεις και η αυτόνομη λήψη αποφάσεων.

Συνολικά, ο συνδυασμός των ρομποτικών βραχιόνων και της τεχνητής νοημοσύνης ανοίγει νέους ορίζοντες στην αυτοματοποίηση και την εξέλιξη της τεχνολογίας, με δυνητικές εφαρμογές που επηρεάζουν θετικά την κοινωνία και την οικονομία.

6.3 Ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων

Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα της προσομοίωσης με το ROBODK είναι η δυνατότητα προβλέψεων και αναλύσεων που παρέχει. Οι χρήστες μπορούν να δοκιμάσουν διαφορετικές προσεγγίσεις, αλγόριθμους και σενάρια λειτουργίας σε εικονικό περιβάλλον πριν τις εφαρμόσουν στη πραγματικότητα. Αυτή η προσέγγιση βοηθά στην ανάπτυξη πιο αποτελεσματικών, ασφαλών και εξελιγμένων ρομποτικών συστημάτων.

Επιπλέον, η συνδυασμένη χρήση προσομοίωσης και ROBODK μπορεί να επιταχύνει τη διαδικασία εκπαίδευσης και επαναπρογραμματισμού των ρομπότ. Με τη δυνατότητα εξομοίωσης του πραγματικού περιβάλλοντος και των συνθηκών λειτουργίας, οι τεχνικοί

μπορούν να εκπαιδεύσουν τα ρομπότ να λειτουργούν με ακρίβεια και αποτελεσματικότητα, μειώνοντας τον χρόνο που απαιτείται για την προσαρμογή τους σε νέες εργασιακές απαιτήσεις.

Τέλος, η συνεχής εξέλιξη της τεχνολογίας της προσομοίωσης και του ROBODK δημιουργεί ένα περιβάλλον που ενθαρρύνει την καινοτομία και τη δημιουργία νέων ιδεών στη ρομποτική. Με τη δυνατότητα να δοκιμάζουν και να πειραματίζονται χωρίς τους περιορισμούς του φυσικού κόσμου, οι μηχανικοί μπορούν να φέρουν εισαγωγικές ιδέες στη πραγματικότητα πιο γρήγορα και αποτελεσματικά, προωθώντας έτσι την πρόοδο και την καινοτομία στον τομέα της ρομποτικής.

6.4 Προτάσεις για μελλοντική εργασία στους χειριστές του RoboDK

Αναδεικνύοντας τη σημασία της παρούσας εργασίας στο γενικότερο πλαίσιο της ρομποτικής, κατέστη κατανοητό το γεγονός ότι το λογισμικό RoboDK είναι ένα πανίσχυρο λογισμικό, για την προσομοίωση ρομποτικών βραχιόνων. Συνοπτικά παρουσιάζονται πιθανές εφαρμογές του λογισμικού RoboDK, σε πρακτικά προβλήματα ή επιχειρηματικές ευκαιρίες. Όπως:

1. **Ανάπτυξη Προσομοιωτών Ρομπότ:** εφαρμογή στη δημιουργία προσομοιωτών ρομπότ με το RoboDK για να βοηθήσει στην ανάπτυξη και εκτίμηση νέων ρομποτικών συστημάτων ή για εκπαιδευτικούς σκοπούς.
2. **Προγραμματισμός Ρομπότ:** Εφαρμογή στον προγραμματισμό ρομπότ με τη χρήση του RoboDK για την εκτέλεση διαφόρων εργασιών όπως συγκόλληση, τοποθέτηση εξαρτημάτων και πακετάρισμα.
3. **Αυτοματοποίηση Εργασιών:** Λειτουργία σε επιχειρήσεις, με εξειδίκευση στην αυτοματοποίηση εργασιών σε βιομηχανικό περιβάλλον, εκμεταλλευόμενοι το RoboDK για τον σχεδιασμό και την εφαρμογή ρομποτικών συστημάτων.
4. **Εκπαίδευση:** Εφαρμογή σε προγράμματα εκπαίδευσης για τους χρήστες του RoboDK ή εκπαίδευση εργαζομένων σε επιχειρήσεις που χρησιμοποιούν το λογισμικό για τον έλεγχο των ρομποτικών τους συστημάτων.
5. **Έρευνα και Ανάπτυξη:** Συμμετοχή σε προγράμματα έρευνας και ανάπτυξης, σχετικά με την εφαρμογή του RoboDK σε νέες εφαρμογές και τεχνολογίες, όπως η συνεργατική ρομποτική, τα αυτόνομα ρομπότ και η επέκταση των δυνατοτήτων του λογισμικού. Είναι σημαντικό να λάβει υπόψη ο ενδιαφερόμενος τις προσωπικές του προτιμήσεις, τα

ενδιαφέροντά του και τις δεξιότητές του, σχετικά με τον τομέα ενασχόλησής του στη Ρομποτική

6.5 Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα και τις επισημάνσεις

Αναμφισβήτητα έγινε μια μεγάλη προσπάθεια, για τη βελτίωση και εκπαίδευση του υποψήφιου χρήστη, στο λογισμικό RoboDK σε συνδυασμό με έναν από τους καλύτερους ρομποτικούς βραχίονες της αγοράς, για επαγγελματική και μη χρήση.

Φυσικά, δεν είναι εφικτό να αναλυθεί και να κατανοηθεί πλήρως το λογισμικό σε μια ερευνητική εργασία, ωστόσο δίνει το έναυσμα σε ανθρώπους που αγαπούν τη ρομποτική, να ξεκινήσουν και να εντρυφήσουν στο λογισμικό, παράγοντας και εκτελώντας δημιουργικά προγράμματα.

Βιβλιογραφία

- [1] Δημήτριος Μ. Εμίρης, Δημήτριος Ε. Κουλουριώτης, ΡΟΜΠΟΤΙΚΗ], 4η επιμ., Αθήνα: ΤΖΙΟΛΑ, 2021.
- [2] «WIKIPEDIA,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Jacques_de_Vaucanson.
- [3] S. M.,. a. Z. L. Guang Jin, «Dynamic Simulation Modeling of Industrial Robot Kinematics in,» Gengxin Sun, Henan 451460, China, 5 January 2022.
- [4] G. Olaoye, «Adaptive control techniques for uncertain payload in robot manipulators,» ResearchGate, 18/march/2024.
- [5] A. Chen, «A pioneering scientist explains ‘deep learning’,» 16 October 2018. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.theverge.com/2018/10/16/17985168/deep-learning-revolution-terrence-sejnowski-artificial-intelligence-technology>.
- [6] A. P. K. P. G. S. C. K. T. D. M. Millicent Schlafly, «Collaborative Robots Can Augment Human Cognition,» PNAS Nexus,, Evanston, 60208, IL, USA, 2021.
- [7] S. N. Yeole, «Simulation in Robotics,» σε *Proceedings of the National Conference on “RECENT ADVANCES IN MANUFACTURING ENGINEERING & TECHNOLOGY”*, Andhra Pradesh, India, January 10-11, 2011.
- [8] Δ. Μ. Μ. Δημήτριος Σαγρής, «Εισαγωγή στη Ρομποτική και τα Αυτόματα Συστήματα,» σε *P 102-MSc in Robotics, Σημειώσεις του μαθήματος*, Σερρες, Ελλάδα, 2021.
- [9] «Robotics and Automation News,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://roboticsandautomationnews.com/2015/07/14/offline-programming-software-robotd-offers-hundreds-of-virtual-industrial-robots-from-top-robotics-companies/540/>. [Πρόσβαση 25 2 2024].

- [10] «Kawasakirobotics,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://kawasakirobotics.com/uploads/sites/2/2022/01/specifications_robots_small-medium-payload-robots_rs_rs005l_en_01_2021.pdf. [Πρόσβαση 28 10 2023].
- [11] «Kawasakirobotics,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://kawasakirobotics.com/uploads/sites/2/2022/01/F60-E.pdf>. [Πρόσβαση 3 11 2023].
- [12] Maxon, «drive tech,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://drive.tech/en/stream-content/ip65-ip67-ip68what-do-protection-ratings-mean>. [Πρόσβαση 5 11 2023].
- [13] Β. Γ. Μ. Φώτης Ν. Κουμπούλης, Εισαγωγή στη Ρομποτική, Αθήνα: Παπασωτηρίου, 2002.
- [14] Β. Πλιάκος, *Off-line Προγραμματισμός Βιομηχανικού Βραχίονα Με έξι Αρθρώσεις*, Διπλωματική Εργασία, 2015.
- [15] Binyameen Farooq, Osman Hasan, Sohail Iqbal, Conference: International Conference on Formal Engineering Methods, «Formal Kinematic Analysis of the Two-Link Planar Manipulator,» Sohail Iqba, Islamabad, Pakistan, 2013.
- [16] «RoboDK,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://robodk.com/doc/en/Basic-Guide.html#Nav3D>. [Πρόσβαση 3 12 2023].
- [17] «RoboDK.com,» RoboDK, [Ηλεκτρονικό]. Available: https://robodk.com/library?RDK&utm_source=RoboDK&utm_medium=Software&Lang=en&PC_OS=WIN64&ProgName=RoboDK&ProgVer=5.6.8&ProgDate=2023-12-13&PCID=07f3a3d536c78a6610dea84e7e7e08ee&LNH=46726565&id_login=7772003#.

Παράρτημα

Κώδικας των προσομοιώσεων σε γλώσσα του Post processor Kawasaki

Για την πρώτη εφαρμογή αναγνώρισης στόχου σε μια επιφάνεια και προσπέλασή της, το πρόγραμμα που εξήγαμε είναι το παρακάτω:

```
.PROGRAM _Anagnorisi epifaneias ()
  BASE TRANS (0.000, 0.000, 0.000, 0.0000, 0.0000, 0.0000)
  TOOL TRANS (0.000, 17.568, 213.375, 0.0000, 0.0000, 0.0000)
  LMOVE TRANS (-433.482, 133.641, 219.336, 137.5840, 117.7970,-12.9620)
  LMOVE TRANS (-604.427, 259.704, 217.188, 137.5840, 117.7970,-12.9620)
  LMOVE TRANS (-631.625, 175.068, 120.509, 137.5840, 117.7970,-12.9620)
  LMOVE TRANS (-429.734, 153.562, 129.065, 137.5840, 117.7970,-12.9620)
.END
```

Στο πρόγραμμα παραλαβής και τοποθέτησης με την αρπάγη του RoboDK «RobotiQ-2F-85-Gripper-Closed.tool», πήραμε τον παρακάτω κώδικα:

```
.PROGRAM RobotiQ-2F-85-Gripper-Closed ()
  BASE TRANS (33.382, 79.648,-306.091, 0.0000, 0.0000,-89.8182)
  TOOL TRANS (0.000, 0.000, 0.000, 0.0000, 0.0000, 0.0000)
  JMOVE # [-0.61998, 2.18989, -117.62400, -179.74800, 60.18350, 180.49600]
  CALL _
  CALL _
  CALL P
  JMOVE # [0.61998, 2.18989, -117.62400, -179.74800, 60.18350, 180.49600]
.END
```

Οι κάτω παύλες που καλεί το πρόγραμμα είναι οι υπορουτίνες που τρέχουν πίσω από το κυρίως πρόγραμμα. Κάτι που πρέπει να σημειωθεί εδώ είναι ότι το πρόγραμμα εμφανίζει κάτω παύλα λόγω του ότι τα ονόματα των υπορουτίνων είναι γραμμένα στα Ελληνικά.

Θα δούμε παρακάτω πως εμφανίζονται με την αρπάγη του εργαστηρίου.

Στο βασικό πρόγραμμα προσομοίωσης με την αρπάγη του εργαστηρίου και με προσαρμοσμένες συντεταγμένες στην αρπάγη πήραμε τον παρακάτω κώδικα:

```
.PROGRAM KurioProgramma ()  
  BASE TRANS (-660.000, 430.000,-300.000, 0.0000, 0.0000, 0.0000)  
  TOOL TRANS (0.000, 0.000, 0.000, 0.0000, 0.0000, 0.0000)  
  JMOVE # [0.00000, -1.09415, -104.87000, 0.00000, -76.22430, -0.00000]  
  CALL Paralavi_1  
  CALL Apothesis2  
  CALL Reset  
  JMOVE # [0.00000, -1.09415, -104.87000, 0.00000, -76.22430, -0.00000]  
.END
```

Στο σημείο που έχουμε τις υπορουτίνες Paralavi_1, Apothesis2 και Reset το πρόγραμμα καλεί τα συγκεκριμένα προγράμματα μέσα στο πρόγραμμα τα οποία εξήγαμε και παρατίθενται παρακάτω με τα ονόματα τους ξεχωριστά.

Reset

```
.PROGRAM Reset ()  
.END
```

Paralavi_1

```
.PROGRAM Paralavi_1 ()  
  BASE TRANS (280.000, 430.000,-250.000, 0.0000, 0.0000, 0.0000)  
  TOOL TRANS (0.000, 0.000, 0.000, 0.0000, 0.0000, 0.0000)  
  JMOVE # [33.07070, 10.63490, -126.39500, 0.00000, -42.96990, -33.07070]  
  LMOVE TRANS (0.000, 0.000, 150.000, 0.0000, 180.0000, 180.0000)  
  ; Attach to arpagi  
  LMOVE TRANS (0.000, 0.000, 300.000, 0.0000, 180.0000, 180.0000)  
.END
```

Apothesis2

```
.PROGRAM Apothesis2 ()  
  BASE TRANS (-260.000, 430.000,-250.000, 0.0000, 0.0000, 0.0000)  
  TOOL TRANS (0.000, 0.000, 0.000, 0.0000, 0.0000, 0.0000)  
  JMOVE # [-31.15930, 9.19135, -128.11900, 0.00000, -42.69000, 31.15930]
```

Παράρτημα

```
LMOVE TRANS (0.000, 0.000, 150.000, 0.0000, 180.0000, 180.0000)
; Detach from arpagi
LMOVE TRANS (0.000, 0.000, 300.000, 0.0000, 180.0000, 180.0000)
.END
```

Τελευταία αναφέρεται το πρόγραμμα Παραλαβής Απόθεσης, χωρίς υπορουτίνες μέσα στο πρόγραμμα, παρά μόνο προσέγγιση συντεταγμένων.

MainProgram

```
.PROGRAM MainProgram ()
; Replace objects
BASE TRANS (280.000, 430.000,-250.000, 0.0000, 0.0000, 0.0000)
TOOL TRANS (0.000, 0.000, 0.000, 0.0000, 0.0000, 0.0000)
JMOVE # [33.07070, 10.63490, -126.39500, 0.00000, -42.96990, -33.07070]
LMOVE TRANS (0.000, 0.000, 150.000, 0.0000, 180.0000, 180.0000)
; Attach to arpagi
LMOVE TRANS (0.000, 0.000, 300.000, 0.0000, 180.0000, 180.0000)
BASE TRANS (-260.000, 430.000,-250.000, 0.0000, 0.0000, 0.0000)
LMOVE TRANS (0.000, 0.000, 300.000, 0.0000, 180.0000, 180.0000)
LMOVE TRANS (0.000, 0.000, 150.000, 0.0000, 180.0000, 180.0000)
; Detach from arpagi
LMOVE TRANS (0.000, 0.000, 300.000, 0.0000, 180.0000, 180.0000)
BASE TRANS(-660.000,430.000,-300.000,0.0000,0.0000,0.0000)
JMOVE #[0.00000, -1.09415, -104.87000, 0.00000, -76.22430, -0.00000]
.END
```

Σε γλώσσα Python έχουμε τον παρακάτω κώδικα στο Κύριο πρόγραμμα με την αρπάγη του εργαστηρίου:

```
# This file is used by your post processor (Kawasaki)
# to generate the appropriate file for your robot.
# You will find your robot program in the same folder where this file is located.
```

Παράρτημα

```
# To avoid showing this file after program generation you can select:
# Tools->Options->tab Other, then, uncheck "Show programs in Notepad"

import sys
import os
import math

sys.path.append(os.path.abspath(r"C:/RoboDK/Posts/")) # temporarily add path to POSTS
folder

from Kawasaki import *
def p(x,y,z,r,p,w):
    a = r*math.pi/180.0
    b = p*math.pi/180.0
    c = w*math.pi/180.0
    ca = math.cos(a)
    sa = math.sin(a)
    cb = math.cos(b)
    sb = math.sin(b)
    cc = math.cos(c)
    sc = math.sin(c)
    return Mat([[cb*ca,ca*sc*sb-cc*sa,sc*sa+cc*ca*sb,x],[cb*sa,cc*ca+sc*sb*sa,cc*sb*sa-
ca*sc,y],[-sb,cb*sc,cc*cb,z],[0.0,0.0,0.0,1.0]])
print('Total instructions: 12')
r = RobotPost(r"Kawasaki",r"Kawasaki RS005L",6, axes_type=['R','R','R','R','R','R'],
ip_com=r"127.0.0.1", api_port=20500, prog_ptr=2488156024528,
robot_ptr=2488021999824)
r.ProgStart(r"Original")
r.RunMessage(r"Program generated by RoboDK v5.2.5 for Kawasaki RS005L on 26/02/2024
13:49:33",True)
r.RunMessage(r"Using nominal kinematics.",True)
r.setFrame(p(33.3822,79.6478,-306.091,-89.8182,0,0),-1,r"Πλαίσιο τραπεζιού")
r.setTool(p(0,0,0,0,0),-1,r"arpagi _original")
r.MoveJ(p(-435.474,-37.872,473.379,89.817,0.219,-180),[-0.619983,2.18989,-117.624,-
179.748,60.1835,180.496],[0,0,1])
r.RunCode(r"Παραλαβη_A", True)
```

Παράρτημα

```
r.RunCode(r""Απόθεση_Β'"" , True)
r.RunCode(r""Επανεκκίνηση"" , True)
r.MoveJ(p(-435.474,-37.872,473.379,89.817,0.219,-180),[-0.619983,2.18989,-117.624,-
179.748,60.1835,180.496],[0,0,1])
r.ProgFinish(r""Original'")
r.ProgStart(r""Παραλαβη_Α'")
r.setFrame(p(202.144,470.185,-251.091,-89.8182,0,0),-1,r""Πλαίσιο Κουτι1'")
r.MoveJ(p(3.26926e-05,-1.41784e-05,180,89.817,0.219,-180),[23.2947,25.0148,-129.908,-
179.527,25.1638,156.278],[0,0,1])
r.MoveL(p(5.9849e-05,-2.60159e-05,0,89.817,0.219,-180),[23.2947,52.5341,-123.906,-
176.838,3.65166,153.551],[0,0,1])
r.RunMessage(r""Attach to arpagi _original'"" , True)
r.MoveL(p(3.26926e-05,-1.41784e-05,180,89.817,0.219,-180),[23.2947,25.0148,-129.908,-
179.527,25.1638,156.278],[0,0,1])
r.ProgFinish(r""Παραλαβη_Α'")
r.ProgStart(r""Απόθεση_Β'")
r.setFrame(p(-217.854,468.853,-251.091,-89.8182,0,0),-1,r""Πλαίσιο Κουτι_2'")
r.MoveJ(p(6.53852e-05,8.8642e-07,180,89.817,0.219,-180),[-24.8921,25.5175,-129.076,-
179.536,25.3149,204.474],[0,0,1])
r.MoveL(p(3.2693e-05,1.50649e-05,0,89.809,0.219,-180),[-24.8921,52.7418,-123.114,-
177.193,4.05659,202.101],[0,0,1])
r.RunMessage(r""Detach from arpagi _original'"" , True)
r.MoveL(p(6.53852e-05,8.8642e-07,180,89.817,0.219,-180),[-24.8921,25.5175,-129.076,-
179.536,25.3149,204.474],[0,0,1])
r.ProgFinish(r""Απόθεση_Β'")
r.ProgStart(r""Επανεκκίνηση'")
r.setFrame(p(33.3822,79.6478,-306.091,-89.8182,0,0),-1,r""Πλαίσιο τραπεζιού'")
r.MoveJ(p(-435.474,-37.872,473.379,89.817,0.219,-180),[-0.619983,2.18989,-117.624,-
179.748,60.1835,180.496],[0,0,1])
r.RunMessage(r""Replace objects'"" , True)
r.ProgFinish(r""Επανεκκίνηση'")
r.ProgSave(r""C:/Users/panos/Documents/RoboDK/'"" , r""Original'"" , False, r""C:/RoboDK/Other/VSCodium/VSCodium.exe'")
```