



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Σχεδιασμός και προγραμματισμός της ρομποτικής συγκόλλησης  
εξαρτήματος μηχανής βαφής υφασμάτων  
με χρήση κινηματικής προσομοίωσης**

Παντελεήμων Κατσαρός

*Επιβλέπων Καθηγητής: Βοσνιάκος Γεώργιος*

ΑΘΗΝΑ 2020

# Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία, αφορά τον σχεδιασμό και τον προγραμματισμό μέσω κινηματικής προσομοίωσης ενός ρομποτικού κελιού συγκόλλησης εξαρτήματος μηχανής βαφής υφασμάτων που παράγεται από Ελληνική εταιρεία. Το βασικό πρόβλημα της αυτοματοποίησης της κατεργασίας είναι ότι η γεωμετρία της ραφής αλλάζει συνεχώς, δεδομένου ότι αυτή βρίσκεται στην τομή δύο κυλίνδρων. Επιπλέον η πραγματική γεωμετρία του εξαρτήματος όπως αυτό προκύπτει από τις προηγούμενες κατεργασίες κοπής και καμπύλωσης διαφέρει από την ονομαστική, τυπικά κατά αρκετά δέκατα του χιλιοστού.

Πρωταρχικός σκοπός ήταν η μοντελοποίηση του ρομποτικού κελιού και η κινηματική προσομοίωση στο περιβάλλον του Solidworks. Ο έλεγχος της κίνησης του ρομπότ για την υλοποίηση των επί μέρους συγκολλήσεων πραγματοποιήθηκε ορίζοντας γεωμετρικούς και μηχανικούς περιορισμούς με εργαλεία που παρέχει το περιβάλλον CAD συμπεριλαμβανομένης της παρακολούθησης των τιμών των αρθρώσεων των κινηματικών μηχανισμών.

Με βάση την προσομοίωση σχεδιάστηκαν οι τροχιές συγκόλλησης για πέντε ραφές, ενώ διαπιστώθηκε η αδυναμία υλοποίησης μιας, τουλάχιστον όσο αφορά τη χρήση του διαθέσιμου εργαλείου συγκόλλησης που είχε προταθεί. Συνεπώς, αλλάζοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου και έπειτα από διαδοχικές δοκιμές εντός του περιβάλλοντος κινηματικής προσομοίωσης είναι δυνατή η επίτευξη της επιθυμητής συγκόλλησης αποφεύγοντας σύγκρουση του ρομπότ με την υπό συγκόλληση κατασκευή.

Στην συνέχεια με τη χρήση φωτογραμμετρίας μοντελοποιήθηκε η υπό κατεργασία κατασκευή με βάση τις πραγματικές διαστάσεις της. Παρατηρήθηκαν μεγάλα σφάλματα μεταξύ των πραγματικών και των ονομαστικών διαστάσεων της κατασκευής. Κρίθηκε αναγκαία λοιπόν η υλοποίηση της προσομοίωσης με βάση το μοντέλο της κατασκευής που προέκυψε από την φωτογραμμετρική μέτρηση.

Με το πέρας της νέας προσομοίωσης έγινε μελέτη των αποτελεσμάτων και αυτοματοποιήθηκε η μετατροπή τους σε πρόγραμμα ικανό να διαβαστεί από την μονάδα ελέγχου του ρομποτικού κελιού.

**Λέξεις Κλειδιά:** Ρομποτικό κελί, Ρομποτική συγκόλληση, Φωτογραμμετρία, CAD, κινηματική προσομοίωση, έλεγχος συγκρούσεων

# Abstract

The aim of this dissertation is the design, the simulation and the offline programming of a robotic welding cell for the construction of a dyeing machine. The main issue of automating the process is that the geometry of the seam is constantly changing, since it is at the intersection of two cylinders. In addition, the actual geometry of the component as it results from previous cutting and curving processes differs from the nominal, typically by several tenths.

The primary purpose was to design the robotic cell in Solidworks environment and simulate it through Solidworks Motion Analysis. Robot motion control for individual welds was performed by defining geometrical and mechanical constraints with tools provided by Solidworks while monitoring the joint values of the mechanisms using Plot Displacement.

Based on the simulation, it was observed that not all the welds could be implemented using the available tool. By modifying the geometrical characteristics of the above mechanism and after successive tests it is possible to achieve the desired welding paths avoiding collisions of the arm on the structure.

Then, using the photogrammetry, the model was designed based on its actual dimensions. Based on the photogrammetric measurement, dimension errors were observed between the actual and the nominal dimensions of the construction. Therefore, it was considered necessary to carry out the simulation based on the model of construction resulting from photogrammetric measurement.

After the new simulation results were studied, an algorithm was implemented in order to automate their conversion into a program in KRL Kuka robot programming language.

**Keywords:** robotic cell, robotic welding, photogrammetry, CAD, kinematic simulation, collision detection

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή Γ.Βοσνιάκο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, την άψογη συνεργασία και τις συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας και την εταιρεία Sclavos SA, και ειδικότερα τους κ. Α. Γεωργαντά, Γ. Γεωργίου, Δ. Κουβαλιά, για την υποστήριξη τους, την παροχή δεδομένων, την συζήτηση ενδιάμεσων αποτελεσμάτων και εν γένει για την ευκαιρία εκπόνησης της εργασίας σε ένα πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον και την αντιμετώπιση πραγματικών προβλημάτων της παραγωγής.

# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
Abstract.....	3
Περιεχόμενα.....	5
<b>1 Εισαγωγή.....</b>	<b>8</b>
1.1 Εισαγωγή στη ρομποτική συγκόλληση .....	8
1.2 Διατύπωση του προβλήματος και σημασία επίλυσης .....	11
1.4 Σχετική έρευνα .....	12
1.4 Ανασκόπηση κεφαλαίων .....	18
<b>2 Στοιχεία Θεωρίας Συγκολλήσεων .....</b>	<b>19</b>
2.1 Εισαγωγή στις συγκολλήσεις .....	19
2.2 Μέθοδος συγκόλλησης με προστατευτικό αέριο και σύρμα (GMAW) ....	19
2.3 Εξοπλισμός συγκολλήσεων MIG/MAG .....	22
2.3 Όπλα συγκόλλησης.....	23
2.4 Σύστημα τροφοδοσίας σύρματος.....	24
2.5 Τρόποι μεταφοράς τηγμένου υλικού πλήρωσης (transfer modes) .....	25
<b>3 Βιομηχανικοί ρομποτικοί βραχίονες .....</b>	<b>26</b>
3.1 Ιστορική αναδρομή.....	26
3.2 Περιγραφή.....	27
3.3 Είδη αρθρώσεων .....	29
3.4 Ταξινόμηση Βραχιόνων βάση της γεωμετρικής διαμόρφωσης.....	30
3.5 Σύστημα κίνησης.....	31
3.6 Χρήση .....	32
3.7 Προγραμματισμός Βιομηχανικών Ρομπότ.....	33
3.8 Ρομποτικό σύστημα KR 8 R2100-2 arc HW.....	38
3.9 Μηχανισμός συγκράτησης KUKA KP2 HV 2600.....	41
<b>4 Φωτογραμμετρία .....</b>	<b>42</b>
4.1 Εισαγωγή .....	42
<b>5 Παράμετροι της συγκόλλησης .....</b>	<b>45</b>
5.1 Εισαγωγή .....	45
5.2 Φασεολόγιο.....	45

5.3 Προσανατολισμός τσιμπίδας συγκόλλησης .....	46
<b>6 Σχεδιασμός κελιού συγκόλλησης .....</b>	<b>48</b>
6.1 Εισαγωγή.....	48
6.2 Συναρμολόγηση βραχίονα .....	48
6.3 Συναρμολόγηση μηχανισμού συγκράτησης KP2 HV 2600 .....	51
6.4 Σχεδιασμός εξαρτήματος 11829U.....	54
6.5 Τοποθέτηση του εξαρτήματος 11829U στον μηχανισμό συγκράτησης..	55
6.6 Μηχανισμός συγκόλλησης.....	56
6.7 Σχεδιασμός του κελιού συγκόλλησης.....	59
<b>7 Προσομοίωση ρομποτικής συγκόλλησης .....</b>	<b>65</b>
7.1 Εισαγωγή.....	65
7.2 Προσομοίωση 1 <sup>ης</sup> Συγκόλλησης .....	65
7.3 Προσομοίωση 2 <sup>ης</sup> Συγκόλλησης .....	71
7.4 Προσομοίωση 3 <sup>ης</sup> Συγκόλλησης .....	76
7.5 Προσομοίωση 4 <sup>ης</sup> Συγκόλλησης .....	83
7.6 Προσομοίωση 5 <sup>ης</sup> Συγκόλλησης .....	87
7.6 Προσομοίωση 6 <sup>ης</sup> Συγκόλλησης .....	91
<b>8 Παραμετροποίηση της συγκόλλησης .....</b>	<b>95</b>
8.1 Εισαγωγή.....	95
8.2 Φωτογραμμετρική μέτρηση της υποκατασκευής.....	95
8.3 Επεξεργασία αποτελεσμάτων .....	98
8.4 Μοντελοποίηση της υποκατασκευής.....	100
8.5 Έλεγχος αποτελεσμάτων .....	104
8.6 Μοντελοποίηση υποκατασκευής.....	105
8.7 Προσομοίωση της συγκόλλησης.....	106
8.9 Εξαγωγή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.....	109
8.10 Δημιουργία κώδικα προγραμματισμού (KRL) .....	111
<b>9. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία.....</b>	<b>112</b>
9.1 Σύνοψη .....	112
9.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	113
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>114</b>
<b>Παράρτημα.....</b>	<b>117</b>
Αποτελέσματα φωτογραμμετρικών μετρήσεων κυλίνδρου .....	117

Αποτελέσματα φωτογραμμετρικών μετρήσεων καπακιού.....	118
Κώδικας MATLAB εύρεσης Least Square Fit Plane.....	119
KRL Struct 1 <sup>ης</sup> Συγκόλλησης.....	120
Ενδεικτικά αποτελέσματα Προσομοίωσης 2 <sup>ης</sup> Συγκόλλησης.....	121
Διαγράμματα μεταβολής των τιμών των αρθρώσεων του ρομπότ .....	122
Σχέδιο τοποθέτησης του ρομποτικού βραχίονα .....	124

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Εισαγωγή στη ρομποτική συγκόλληση

Οι σύγχρονες κατασκευαστικές βιομηχανίες αντιμετωπίζουν δύο βασικές προκλήσεις, την επίτευξη μέγιστης ποιότητας σε χαμηλότερο δυνατό κόστος και την αύξηση της παραγωγικότητας ώστε να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις του ανταγωνισμού της παγκόσμιας αγοράς. Αυτό κατά συνέπεια απαιτεί τον εκσυγχρονισμό και την αυτοματοποίηση των διαδικασιών παραγωγής, με στόχο την επιτυχή εγκατάσταση ημιαυτόνομων συστημάτων παραγωγής που θα απαιτούν για την λειτουργία τους το ελάχιστο δυνατό προσωπικό.

Ένα αναπόσπαστο κομμάτι της παραγωγικής διαδικασίας απλούστερων αλλά και σύνθετων μεταλλικών κατασκευών είναι οι συγκολλήσεις. Οι συγκολλήσεις αποτελούν την οικονομικότερη και αποτελεσματικότερη μέθοδο μόνιμης σύνδεσης μεταλλικών τμημάτων ή και επιμέρους κατασκευών.

Η απαίτηση της αγοράς για βελτιστοποίηση της ποιότητας των κατασκευών αλλά και της αύξηση της παραγωγικότητας σε συνδυασμό με την ραγδαία εξέλιξη της ρομποτικής τα τελευταία χρόνια οδήγησαν στην υιοθέτηση νέων τεχνολογιών όπως η αξιοποίηση των ρομποτικών συστημάτων στις συγκολλήσεις. Έτσι, δημιουργήθηκε ο όρος ρομποτική συγκόλληση. Ρομποτικές χαρακτηρίζονται εκείνες οι συγκολλήσεις που εκτελούνται και ελέγχονται από μια ρομποτική διάταξη.

Οι αυξημένες δυνατότητες που διαθέτουν τα βιομηχανικά ρομπότ τα καθιστούν εν τέλει εξελιγμένα συστήματα αυτοματισμού, που μπορούν να εκτελούν ποικίλες εργασίες στα βιομηχανικά συστήματα δίνοντας στη βιομηχανία μεγαλύτερη ευελιξία στην αυτοματοποίηση μεγάλου μέρους των απαιτούμενων παραγωγικών διαδικασιών (π.χ. συναρμολογήσεις, συγκολλήσεις, πακετάρισμα κ.α.).

Τα βιομηχανικά ρομπότ αποτελούν ήδη ένα σημαντικό παράγοντα της σύγχρονης παραγωγής και αναμένεται να παίξουν καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξή της μελλοντικής. Η αυξημένη ζήτηση της χρήσης των ρομποτικών συστημάτων πηγάζει από την ανάγκη για ευέλικτες, έξυπνες μηχανές οι οποίες θα μπορέσουν να πραγματοποιήσουν τα καθήκοντα τους με επαναλαμβανόμενο τρόπο, οικονομικά και ποιοτικά. Ο πιο ενεργός κλάδος της βιομηχανίας στην εφαρμογή ρομπότ είναι η αυτοκινητοβιομηχανία ενώ αυξάνεται το ενδιαφέρον για την εφαρμογή ρομπότ και σε άλλους κλάδους όπως η ναυπηγική.

Η συγκόλληση αποτελεί μια εν δυνάμει επικίνδυνη διαδικασία (μεγάλη ακτινοβολία, έκλυση αερίων κλπ.) και που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα υγείας (προβλήματα όρασης, αναπνευστικά κλπ.). Επιπλέον ο χρόνος που απαιτείται για προετοιμασία, ο παράγοντας της κούρασης του συγκολλητή, οι προδιαγραφές ασφαλείας που πρέπει να



τηρηθούν και τέλος το κόστος, καθιστούν τις ρομποτικές συγκολλήσεις καθοριστικές για την σύγχρονες βιομηχανίες παραγωγής μεταλλικών κατασκευών. Υπολογίζεται ότι το 25% του συνόλου των βιομηχανικών ρομπότ προορίζεται για εργασίες συγκολλήσεων.

Η εισαγωγή των ρομπότ στις συγκολλήσεις έλαβε χώρα προκειμένου να ικανοποιηθεί η ανάγκη για υψηλή ποιότητα σε μικρότερα χρονικά διαστήματα. Η πρώτη γενιά ρομποτικών συστημάτων για συγκόλληση ήταν ένα σύστημα δυο περασμάτων, όπου το πρώτο πέρασμα γινόταν για να μάθει το ρομπότ την γεωμετρία της ραφής και στο δεύτερο πέρασμα λάμβανε χώρα η συγκόλληση. Η δεύτερη γενιά, ωστόσο, εκτελεί τη συγκόλληση με ένα πέρασμα, κατά το οποίο το ρομπότ αναγνωρίζει τη ραφή και τη διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσει ενώ ταυτόχρονα πραγματοποιεί τη συγκόλληση. Η τρίτη γενιά συστημάτων όχι μόνο πραγματοποιεί την αναγνώριση της ραφής και της διαδρομής που πρέπει να ακολουθήσει ταυτόχρονα με τη συγκόλληση, αλλά έχει τη δυνατότητα να εντοπίσει και να προσαρμοστεί σε απότομες αλλαγές στη γεωμετρία της ραφής. Με την τρίτη γενιά ρομποτικών συστημάτων επιτεύχθηκε μεγάλη ευελιξία ως προς το εύρος εφαρμογών των ρομπότ αλλά με οικονομικό κόστος. Απαιτείται υπολογίσιμος χρόνος προγραμματισμού για πολύ συγκεκριμένες εφαρμογές, από υψηλά εκπαιδευμένους και ικανούς προγραμματιστές. Ωστόσο, η διαθεσιμότητα και η ευελιξία των εφαρμογών είναι επιπρόσθετοι παράγοντες-κλειδιά για τη σύγχρονη βιομηχανία παραγωγής, η οποία απαιτεί από τα συστήματα συγκόλλησης να ικανοποιούν τις απαιτήσεις αυτές, επιτυγχάνοντας με αυτόν τον τρόπο ευελιξία κίνησης του συστήματος, χωρίς την απαίτηση για επιπλέον γνώσεις και ικανότητες από το χειριστή.

Η σύγχρονη βιομηχανία αντιμετωπίζει δυο βασικές προκλήσεις: υψηλότερη ποιότητα σε χαμηλότερες τιμές και την ανάγκη για αύξηση της παραγωγικότητας. Αυτές είναι οι απαιτήσεις προκειμένου να διατηρηθούν τα βιομηχανικά εργοστάσια παραγωγής στις ανεπτυγμένες χώρες, δεδομένου του ανταγωνισμού από χώρες όπου το κόστος εργασίας είναι χαμηλότερο. Ένα ακόμα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό των συστημάτων παραγωγής, είναι η ευελιξία της διαδικασίας παραγωγής, από τη στιγμή που οι εταιρείες πρέπει να προσαρμόζονται σε μια πολύ δυναμική αγορά όπου τα προϊόντα παρουσιάζουν πολύ σύντομους κύκλους ζωής λόγω των διεθνών τάσεων και ανταγωνισμού. Επομένως, οι εταιρείες παραγωγής πρέπει να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις της αγοράς αποδοτικά, διατηρώντας τα προϊόντα τους ανταγωνιστικά. Αυτό απαιτεί μια πολύ αποδοτική και ελεγχόμενη διαδικασία παραγωγής, στο επίκεντρο της οποίας βρίσκεται η αυτοματοποίηση μέσω υπολογιστών και κατάλληλων λογισμικών. Ο τελικός στόχος είναι η δημιουργία ημιαυτόνομων, υψηλά αυτοματοποιημένων συστημάτων, τα οποία θα λειτουργούν απαιτώντας την ελάχιστη παρέμβαση από τον χειριστή.

Οι ρομποτικές συγκολλήσεις συνιστούν μια από τις πιο επιτυχημένες εφαρμογές βιομηχανικών ρομποτικών βραχιόνων. Στην πράξη, ένας τεράστιος αριθμός προϊόντων απαιτεί διεργασίες συγκολλήσεων στην διαδικασία συναρμολόγησης τους. Παρά το αυξανόμενο ενδιαφέρον, οι βιομηχανικές ρομποτικές συγκολλήσεις δεν έχουν εξελιχθεί ιδιαίτερα και απέχουν αρκετά ακόμα από το να είναι μια τελειοποιημένη τεχνολογική διαδικασία, τουλάχιστον καθολικά. Η διαδικασία συγκόλλησης είναι πολύπλοκη, δύσκολη στην παραμετροποίηση και τον χειρισμό. Στην πραγματικότητα, οι περισσότερες από τις τεχνικές συγκόλλησης και οι επιδράσεις τους πάνω στις ραφές δεν είναι πλήρως κατανοητές και πραγματοποιούνται με βάση εμπειρικά μοντέλα τα οποία προκύπτουν μετά από πολλές επαναλήψεις και βελτιστοποίηση. Οι επιπτώσεις της διαδικασίας συγκόλλησης στις συγκολλημένες επιφάνειες δεν είναι πάντα πλήρως γνωστές και κατανοητές. Κατά την διαδικασία συγκόλλησης λαμβάνει χώρα η συγκέντρωση πολύ υψηλών θερμοκρασιών σε μικρές ζώνες, γεγονός που οδηγεί το υλικό στο να υποστεί εξαιρετικά υψηλές τοπικές θερμικές διαστολές και έντονους θερμικούς κύκλους, τουτέστιν πιθανές αλλαγές στις μηχανικές του ιδιότητες. Οι παραπάνω αλλαγές πρέπει να είναι πλήρως κατανοητές προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι αρνητικές επιπτώσεις της συγκόλλησης στο υλικό.

Η πλειονότητα των βιομηχανικών συγκολλήσεων ωφελείται από την εισαγωγή ρομποτικών συστημάτων, από τη στιγμή που τα σφάλματα τα οποία καταλογίζονται στον ανθρώπινο παράγοντα εξαλείφονται πλήρως. Αυτό οδηγεί σε οικονομικότερα προϊόντα από τη στιγμή που η παραγωγικότητα και η ποιότητα μπορούν να αυξηθούν ενώ ταυτόχρονα μειώνονται τα κόστη και το εργατικό δυναμικό.

Στη συγκόλληση με ρομπότ, όλη η διαδικασία ελέγχεται από τον controller του robot. Ο σχεδιασμός του εξοπλισμού για μια τέτοιου είδους συγκόλληση είναι τελείως διαφορετικός από αυτή της χειροκίνητης συγκόλλησης. Οι ταχύτητες συγκόλλησης είναι μεγαλύτερες, και η μηχανή συγκόλλησης θα πρέπει να μπορεί να ανταπεξέλθει σε αυτές τις απαιτήσεις. Προσθετικά όλος ο υπόλοιπος εξοπλισμός θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να δεχθεί μέσω σειριακής επικοινωνίας όλες τις παραμέτρους συγκόλλησης από τον controller του ρομπότ. Για να πραγματοποιηθεί μια εφαρμογή ρομποτικής συγκόλλησης απαιτείται πρόσθετος εξειδικευμένος εξοπλισμός. Η μηχανή συγκόλλησης η οποία είναι η πηγή της ισχύος που χρειάζεται, και το εργαλείο (τσιμπίδα) συγκόλλησης, το οποίο μεταφέρει το ρεύμα συγκόλλησης, το σύρμα, το αέριο προστασίας και το υγρό ψύξης. Το ακροφύσιο της τσιμπίδας, επειδή βρίσκεται πάντα κοντά στο σημείο συγκόλλησης, με τη συνεχή λειτουργία συσσωρεύει στην εσωτερική του πλευρά εκτινάξεις ρευστού μετάλλου, πιτσιλίσματα. Αυτό καθιστά αναγκαία την τοποθέτηση ειδικού συστήματος για τον αυτόματο καθαριστικό. Επίσης ο σωστός σχεδιασμός του τροφοδοτικού του σύρματος και η σωστή τοποθέτηση της τσιμπίδας εξασφαλίζει την

ομαλή τροφοδοσία του σύρματος και κατά συνέπεια την ομαλή λειτουργία του τόξου συγκόλλησης. Περιφερειακές συσκευές συγκράτησης του αντικειμένου που συγκολεύεται, εξασφαλίζουν την ακριβή του θέση επιβεβαιώνοντας την επαναληψιμότητα του συστήματος. Η παραγωγικότητα της εγκατάστασης μπορεί να αυξηθεί χρησιμοποιώντας περιφερειακές συσκευές που βοηθούν την εύκολη αντικατάσταση των εξαρτημάτων από τον χειριστή του συστήματος. [18] ,[32], [29]

## **1.2 Διατύπωση του προβλήματος και σημασία επίλυσης**

Παρά τη ραγδαία τεχνολογική εξέλιξη στον χώρο της ρομποτικής και τα οφέλη από τη χρήση ρομποτικών συστημάτων, η πολυπλοκότητα και η ακρίβεια που απαιτείται για την επίτευξη μίας συγκόλλησης υψηλής ποιότητας καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη την αυτοματοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας. Ένα από τα βασικότερα ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν κατά τον σχεδιασμό και τον προγραμματισμό ενός ρομποτικού κελιού συγκόλλησης είναι παρακολούθηση της τροχιάς συγκόλλησης με υψηλή ακρίβεια.

Στην παρούσα εργασία θα μελετηθεί ο σχεδιασμός και ο προγραμματισμός του ρομποτικού κελιού συγκόλλησης ενός μεταλλικού εξαρτήματος μηχανής βαφής υφασμάτων της εταιρείας Sclavos. Η εταιρεία σχεδιάζει και κατασκευάζει μηχανές βαφής υφασμάτων σε ένα εύρος μεγεθών. Η συγκόλληση αποτελεί την κατ' εξοχήν εφαρμοζόμενη κατεργασία της κατασκευής των προϊόντων της. Μέχρι σήμερα στις εγκαταστάσεις της εταιρείας λειτουργεί μόνο ένα ρομποτικό κύτταρο για μια σχετικά μικρή κατασκευή (εξάρτημα) αλλά σχεδιάζονται άλλα δύο για μεγαλύτερα εξαρτήματα. Ένα από τα εξαρτήματα που η συγκόλληση τους θεωρείται δύσκολη και γίνεται χειροκίνητα φαίνεται στην εικόνα 1-1.

Το βασικό πρόβλημα είναι ότι η γεωμετρία της ραφής αλλάζει συνεχώς, δεδομένου ότι αυτή βρίσκεται στην τομή δύο κυλίνδρων. Επιπλέον η πραγματική γεωμετρία του εξαρτήματος όπως αυτό προκύπτει από τις προηγούμενες κατεργασίες κοπής και καμπύλωσης διαφέρει από την ονομαστική, τυπικά κατά αρκετά δέκατα.

Πρώτο βασικό ζήτημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι η κατάλληλη επιλογή του ρομπότ, της τσιμπίδας συγκόλλησης και του μηχανισμού συγκράτησης του τεμαχίου ώστε να επιβεβαιωθεί κινηματικά η δυνατότητα κίνησης του βραχίονα εντός και εκτός του τεμαχίου τηρώντας της κατάλληλες αποστάσεις ασφαλείας για την αποφυγή πρόσκρουσης. Δεύτερο βασικό ζήτημα είναι η παραμετροποίηση της τροχιάς του ρομπότ χωρίς τη χρήση ανιχνευτή ακμής ώστε να ελαχιστοποιείται το σφάλμα που προκύπτει ανάμεσα στην πραγματική και την ονομαστική γεωμετρία ραφής.



**Σχήμα 1-1.** Εξάρτημα 11829U.

Στην παρούσα μελέτη δεν είναι δυνατή η χρήση ανιχνευτή ακμής (seam tracking) καθώς το μέγεθος της συσκευής θα καθιστούσε αδύνατη την κίνηση του βραχίονα εντός του τεμαχίου για την επίτευξη των εσωτερικών συγκολλήσεων. Επίσης το κόστος μιας τέτοιας συσκευής είναι πολύ υψηλό.

#### **1.4 Σχετική έρευνα**

Για την παρούσα διπλωματική εργασία αναζητήθηκαν και μελετήθηκαν πολλά ξενόγλωσσα και μη επιστημονικά άρθρα, βιβλία, επιστημονικές μελέτες και ιστοσελίδες με απώτερο σκοπό την μελέτη διαφορετικών μεθόδων προγραμματισμού ρομποτικών κελιών με την μέθοδο Offline Programming (OLP). Το περιεχόμενό τους συνοψίζεται σε αυτήν την ενότητα.

Οι Khelifa Baizid, Saša Čuković, Jamshed Iqbal, Ali Yousnadj, Ryad Chellali, Amal Meddahi, GoranDevedžić, Ionut Ghionea [1] παρουσιάζουν την κινηματική προσομοίωση ενός βραχίονα έξι βαθμών ελευθερίας με τη χρήση του IROSIM . Το IROSIM είναι μία πλατφόρμα προσομοίωσης ρομποτικών κελιών το οποίο έχει δημιουργηθεί χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα του Solidworks. Όπως περιγράφεται στην δημοσίευση το IROSIM δημιουργήθηκε με σκοπό την υλοποίηση μιας πλατφόρμας σχεδίασης και προσομοίωσης ρομποτικών κελιών φιλικής προς τους χρήστες. Πιο συγκεκριμένα η πλατφόρμα περιέχει έτοιμα τα συναρμολογήματα ρομποτικών μηχανισμών, ενώ παρέχει

εντολές ώστε ο χρήστης να μπορεί εύκολα να ορίσει την τροχιά της συγκόλλησης και τον προσανατολισμό του βραχίονα.

Οι Tuna Balkan, M. A. Sahir Arıkan και Murat Bulut [2] περιγράφουν την προσομοίωση ρομποτικού κελιού συγκόλλησης με τη χρήση ένος εκ των πρώτων προγραμμάτων που υλοποιήθηκαν γι' αυτό το σκοπό, το Proweld. Το ProWeld περιείχε βιβλιοθήκες με απλά γεωμετρικά σχήματα ώστε ο χρήστης να σχηματίσει την τροχιά της συγκόλλησης και βάσεις δεδομένων ώστε να υπολογίζονται αυτόματα οι παράμετροι αυτής η χρήση του ήταν αυτόνομη από οποιοδήποτε λογισμικό CAD.

Ο Pavoι Božek [3] μελετά την προσομοίωση της κίνησης ρομποτικού βραχίονα με τη χρήση του RobCAD. Όπως αναφέρει, ο offline προγραμματισμός δεν αποτελεί ακόμα την ιδανική μέθοδο προγραμματισμού καθώς τα λογισμικά προσομοίωσης δεν λαμβάνουν υπόψιν παραμέτρους όπως σφάλματα ακρίβειας της κίνησης των μηχανισμών του κελιού και σφάλματα της τοποθέτησης των μηχανισμών σε σχέση με την προσομοίωση. Στο τέλος του άρθρου προτείνονται μέθοδοι για το 'καλιμπράρισμα' του ρομποτικού κελιού όπως η μετατόπιση των αξόνων συντεταγμένων του αναλόγως με τα σφάλματα που έχουν προκύψει.

Ο Nikolay Bratovanov[4] αναλύει τα πλεονεκτήματα της προσομοίωσης μηχανισμών στο περιβάλλον του Solidworks. Όπως αναφέρει, το βασικό πλεονέκτημα του Solidworks είναι ότι τα χαρακτηριστικά του προσφέρουν ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ώστε οι χρήστες του να μπορούν να υλοποιήσουν τον σχεδιασμό και την προσομοίωση χωρίς τη παράλληλη χρήση κάποιου άλλου προγράμματος .

Οι G.C. Carvalho, M.L. Siqueira, S.C. Absi-Alfaro [5] παρουσιάζουν τα πλεονεκτήματα του offline προγραμματισμού ενός ρομποτικού κελιού συγκόλλησης όπως το ότι τα προγράμματα του κελιού μπορούν να υλοποιηθούν χωρίς την διακοπή της λειτουργίας του και ότι υπάρχει δυνατότητα παραμετροποίησης του προγράμματος αναλόγως με την εκάστοτε τροχιά. Όπως αναφέρεται και σε αυτό το άρθρο το σημαντικότερο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι τα σφάλματα που μπορεί να προκύψουν μεταξύ των πραγματικών διαστάσεων του κελιού και του μοντέλου προσομοίωσης τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε σφάλματα στην τροχιά του βραχίονα.

Οι A. F. Castro, M. F. Silva, and F. J. G. Silva [6] παρουσιάζουν την προσομοίωση της συγκόλλησης ενός μεταλλικού πλαισίου λεωφορείου. Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι να συγκριθεί ο χρόνος που απαιτείται για την χειροκίνητη συγκόλληση με τον συνολικό χρόνο που προέκυψε από την προσομοίωση, αναφέροντας τέλος ότι με την προσομοίωση της διαδικασίας μπορεί να βελτιστοποιηθεί μειώνοντας σημαντικά τον χρόνο υλοποίησης της.

Ο Y. Chen [7], στο επιστημονικό του άρθρο παρουσιάζει την μέθοδο σχεδιασμού ρομποτικής τροχιάς για την υλοποίηση 3d σάρωσης και βαφής ενός εξαρτήματος. Στόχος

της μελέτης ήταν η μετατροπή μέσω αλγορίθμου της επιφάνειας του τεμαχίου σε επιμέρους τριγωνικές γεωμετρίες ώστε να σχεδιαστεί η τροχιά που θα καλύψει ολόκληρη την επιφάνεια του τεμαχίου.

Ο M. Defaux [8], παρουσιάζει συνοπτικά τους νέους ρομποτικούς βραχίονες και τις μεθόδους προγραμματισμού τους για την αυτοματοποίηση βιομηχανικών κατεργασιών όπως laser κοπή και συγκολλήσεις.

Οι X. Fang and J. Zhang [9], παρουσιάζουν μία μέθοδο αλληλεπίδρασης μεταξύ των CAD και CAR (Computer Aided Robot) Software για τον προγραμματισμό ρομποτικών κελιών ώστε να εκμεταλλευθούν τις δυνατότητες και τα πλεονεκτήματα που παρέχουν. Με το πέρας της μελέτης υλοποίηση έναν αλγόριθμο ώστε το Robot Studio (CAR) να αντλεί γεωμετρικά δεδομένα απευθείας από το Solidworks (CAD) .

Οι L. A. Ferreira, Y. L. Figueira, I. F. Iglesias, και M. Á. Souto [10] παρουσιάζουν μία μέθοδο παραμετροποίησης της τροχιάς ρομποτικής συγκόλλησης. Το ρομποτικό κελί της μελέτης είναι εξοπλισμένο με δύο κάμερες οι οποίες με τη χρήση κατάλληλου αλγορίθμου επεξεργασίας εικόνων είναι ικανές να εξάγουν στον υπολογιστή ελέγχου του κελιού δεδομένα σχετικά με την θέση και τις διαστάσεις της μεταλλικής κατασκευής. Σκοπός της μελέτης ήταν η κατάλληλη επεξεργασία αυτών των δεδομένων ώστε ο χειριστής του κελιού να τα εισάγει στο παραμετροποιημένο CAD μοντέλο και με τη χρήση ενός λογισμικού σε γλώσσα python να επιτευχθεί η επικοινωνία του υπολογιστή με την μονάδα ελέγχου του κελιού ώστε αυτή να τροφοδοτείται αυτόματα με το παραμετροποιημένο πρόγραμμα.

Οι E. V. Garonenko και S. I. Anciferon [11], παρουσιάζουν την μοντελοποίηση ενός ρομποτικού μηχανισμού με τη χρήση του Solidworks. Το άρθρο εστιάζει μόνο στην διαδικασία σχεδίασης και συναρμολόγησης των επιμέρους μηχανισμών χωρίς περαιτέρω αναλύσεις όπως η αντίστροφη κινηματική.

Οι M. Hajduk, S. Ján, και V. Marek [12], παρουσιάζουν την μέθοδο προγραμματισμού ενός ρομποτικού βραχίονα KUKA για σημειακή συγκόλληση. Το άρθρο εστιάζει περισσότερο στα θετικά σημεία της χρήσης προγραμμάτων προσομοίωσης ρομποτικών κελιών όπως το RobCAD.

Οι N. Larkin, A. Short, Z. Pan, και S. Van Duin [13] παρουσιάζουν την μέθοδο Automatic Offline Robot Programming. Η μέθοδος αυτή είναι ικανή στην να δημιουργήσει αυτόματα το πρόγραμμα του ρομπότ αντλώντας δεδομένα από το αρχείο CAD. Για την υλοποίηση αυτή χρησιμοποιούν διάφορους αλγορίθμους υπολογισμού αντίστροφης κινηματικής και αποφυγής συγκρούσεων, ενώ η μετατροπή των αποτελεσμάτων γίνεται με Code translators που μετατρέπουν τα καρτεσιανά αποτελέσματα σε εντολές προγραμματισμού.

Οι O. Legoff and J. Y. Hascoët [14] παρουσιάζουν την μέθοδο υλοποίησης αλγορίθμου για τον αυτόματο υπολογισμό τροχιάς συγκόλλησης αντλώντας δεδομένα από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των CAD αρχείων. Το άρθρο παρουσιάστηκε το 1998 και αποτέλεσε ένα έναυσμα για την υλοποίηση προγραμμάτων που υπολογίζουν αυτόματα την τροχιά της συγκόλλησης.

Ο T. Luhmann [15], παρουσιάζει συνοπτικά νέες μεθόδους και τον απαιτούμενο εξοπλισμό για φωτογραμμετρικές μετρήσεις σε βιομηχανικές εφαρμογές συμπεραίνοντας ότι η φωτογραμμετρία αποτελεί πλέον μια αποτελεσματικότερη μέθοδο μέτρησης αντικειμένων με μεγάλη ακρίβεια.

Οι P. Neto και N. Mendes, [16] στο άρθρο τους παρουσιάζουν την διαδικασία προσομοίωσης ρομποτικού κελιού μόνο με τη χρήση λογισμικού CAD (Autodesk inventor). Για την προσομοίωση έχει υλοποιηθεί σε γλώσσα visual basic κατάλληλο interface ικανό προς επίλυση αντίστροφης κινηματικής ώστε να προσομοιωθεί η κίνηση του ρομποτικού βραχίονα στην τροχιά.

Οι P. Neto, J. N. Pires, και A. P. Moreira [17] υλοποιούν τρεις διαφορετικές προσομοιώσεις ρομποτικής τροχιάς σε περιβάλλον CAD. Όπως αναφέρουν, η μέθοδος αυτή είναι πολύ ταχύτερη και ευκολότερη από τις συμβατικές μεθόδους προγραμματισμού, όμως μπορούν να προκύψουν σφάλματα καθώς ο ρομποτικός βραχίονας αρκετές φορές δεν είναι ικανός να ακολουθήσει αυτή του προσομοιωμένου μοντέλου.

Οι Z. Pan, J. Polden, N. Larkin, S. Van Duin και J. Norrish [18] παρουσιάζουν τα βασικά χαρακτηριστικά των νέων μεθόδων προγραμματισμού ρομποτικών βραχιόνων. Οι μέθοδοι που αναλύονται είναι οι Online, Offline programming και η μέθοδος της επαυξημένης πραγματικότητας. Στο τέλος του άρθρου συνοψίζονται τα θετικά και τα αρνητικά στοιχεία της κάθε μεθόδου.

Οι Z. Pan, J. Polden, N. Larkin, S. Van Duin, και J. Norrish [19] αναλύουν την κινηματική προσομοίωση και τον προγραμματισμό ρομποτικής συγκόλλησης με βραχίονα έξι βαθμών ελευθερίας. Η υλοποίηση πραγματοποιείται με τη χρήση του προγράμματος συναρμολόγησης assembly Delmia ενώ η αντίστροφη κινηματική επίλυση με τη χρήση του MATLAB.

Οι S. Pellegrinelli, N. Pedrocchi, L. Molinari, και T. T. Tolio [20] έχοντας επιτύχει την αναπαράσταση ενός ρομποτικού κελιού στον τρισδιάστατο χώρο υλοποιούν την προσομοίωση του χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο ο οποίος παρουσιάζεται αναλυτικά στο άρθρο.

J. N. Pires, T. Godinho, και P. Ferreira, [21] σε μελέτη που υλοποιήθηκε το 2004 παρουσιάζουν την διαδικασία προγραμματισμού ρομποτικού βραχίονα με την χρήση του AutoCAD. Με τη χρήση κατάλληλου interface ορίζουν την τροχιά της συγκόλλησης πάνω

στο μοντέλο της μεταλλικής κατασκευής και στην συνέχεια λαμβάνουν από αυτό τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Το εν λόγω interface αποτελεί ένα απ' τα πρώτα που υλοποιήθηκαν.

Οι M. Rodrigues, M. Kormann, C. Schuhler, και P. Tomek [22] παρουσιάζουν μία μελέτη η οποία έχει στόχο την επίλυση ενός εκ των σημαντικότερων μειονεκτημάτων του offline προγραμματισμού ρομποτικών κελιών για βιομηχανικές κατεργασίες το οποίο είναι ότι οι πραγματικές διαστάσεις των υπό κατεργασία κατασκευών διαφέρουν από τις ονομαστικές διαστάσεις τους. Προς την επίλυση του ζητήματος περιγράφουν μία διαδικασία κατά την οποία η κατασκευή σαρώνεται με 3d Scanner GMPR και μοντελοποιείται αυτόματα με τη χρήση αλγορίθμου. Το 3d μοντέλο της σάρωσης συγκρίνεται με το ονομαστικό και με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων υπολογίζονται τα σημεία της παραμετροποιημένης τροχιάς της κατεργασία.

Οι E. Roos και A. Behrens [23] έχοντας υλοποιήσει τον offline προγραμματισμό ενός βραχίονα με τη μέθοδο της μαθηματικής του μοντελοποίησης και την επίλυση της αντίστροφης κινηματικής, μελέτησαν την κίνηση του ρομποτικού βραχίονα συμπεραίνοντας τα σφάλματα που μπορεί να προκύψουν μεταξύ του πραγματικού και του μοντελοποιημένου μοντέλου.

Ο L. G. Socacio [24] περιγράφει ένα εύρος προγραμμάτων που έχουν υλοποιηθεί για τον offline προγραμματισμό ρομποτικών κελιών παρουσιάζοντάς τα θετικά στοιχεία αυτής της μεθόδου όπως η μείωση του απαιτούμενου χρόνου και ότι ο χρήστης μπορεί την λειτουργία Virtual teach pendant, που προσφέρουν αρκετά από τα λογισμικά, να εξοικειωθεί με τη λειτουργία του κελιού χωρίς αυτό να έχει κατασκευαστεί.

Οι G. C. Vosniakos and A. Chronopoulos [25] υλοποίησαν την προσομοίωση και τον προγραμματισμό ενός ρομποτικού κελιού χρησιμοποιώντας λογισμικό CAD που υποστηρίζει περιορισμούς - constraints. Εκμεταλλευόμενοι τις δυνατότητες που τους παρείχε κατάφεραν να σχεδιάσουν το ρομποτικό κελί να επιλύσουν το πρόβλημα της αντίστροφης κινηματικής ώστε ο βραχίονας να ακολουθήσει την απαιτούμενη τροχιά και να μελετήσουν την προσομοίωση ώστε εντοπιστούν πιθανές συγκρούσεις κατά την λειτουργία του κελιού.

Οι D. Wan, L. Hui, και T. Xiaoting [26] παρουσιάζουν τον προγραμματισμό ενός ρομποτικού κελιού σημειακής συγκόλλησης για την κατασκευή πλαισίου αυτοκινήτου χρησιμοποιώντας το ROBCad. Περιγράφουν την διαδικασία που απαιτεί το συγκεκριμένο λογισμικό ώστε να προσομοιωθεί η κίνηση του βραχίονα και να ανιχνευθούν οι πιθανές συγκρούσεις των μηχανισμών του κελιού.

Οι X. F. Zha και H. Du [27] υλοποίησαν έναν νέο αλγόριθμο επίλυσης της αντίστροφης κινηματικής για την προσομοίωση της κίνησης ρομποτικών μηχανισμών σε περιβάλλον CAD, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος δοκιμάστηκε στο περιβάλλον του



Robosim. Σκοπός αυτής της προσπάθειας ήταν η επίλυση των ζητημάτων που αντιμετώπιζαν οι μέχρι τότε αλγόριθμοι οι οποίοι δεν ήταν ικανοί να επιλύσουν την προσομοίωση όταν το σύστημα περιείχε περιορισμούς του μηχανισμού όπως όρια των τιμών και των ταχυτήτων των αρθρώσεων του βραχίονα.

Ο Kim Cheol Soon, Kim Myeong Hoon, Lee Soo Jun, Se-Han Lee<sup>1</sup> και Jong-Keun Park [28] αναπτύσσουν το πρόγραμμα ενός ρομποτικού κελιού για την υπό γωνία κοπή ατσαλιού. χρησιμοποιώντας το Interactive Graphic Robotics Integrated Programming (IGRIP) και το Microsoft Visual C ++ προκειμένου να δημιουργηθούν αυτόματα τα σημεία κοπής. Το IGRIP μπορεί να χειριστεί διάφορους τύπους ρομπότ και μπορεί ευκολά να αναλύσει γραφικά ή αριθμητικά δεδομένα από άλλα λογισμικά CAD. Αναλύοντας τα στοιχεία των CAD models υλοποιήθηκε μακροεντολή ώστε να παραμετροποιείται η τροχιά του βραχίονα αναλόγως με τις διαστάσεις τους.

Ο Jobst Bickendorf [29] παρουσιάζει συνοπτικά διάφορες νέες μεθόδους OLP προγραμματισμού βιομηχανικών ρομπότ για κατεργασίες κοπής και συγκόλλησης. Το επιστημονικό άρθρο αναλύει τα βασικά πλεονεκτήματα του Offline programming έναντι του Teach in programming. Ως πρόγραμμα υλοποίησης της προσομοίωσης αναφέρεται το MOSES, το οποίο παρέχει δυνατότητες όπως αυτόματη ανίχνευση της τροχιάς συγκόλλησης στο αρχείο CAD και εξαγωγή του προγράμματος του ρομπότ λαμβάνοντας υπόψιν τις παραμέτρους της συγκόλλησης που έχουν εισαχθεί ως δεδομένα.

Ο Haiming Shen [30] υλοποιεί τον προγραμματισμό και την προσομοίωση της συγκόλλησης θύρας αυτοκινήτου με ρομποτικό βραχίονα έξι βαθμών ελευθερίας . Η υλοποίηση της μοντελοποίησης γίνεται με τη χρήση του 3d περιβάλλοντος Siemens NX Unigraphics (UG) ενώ η επίλυση του αντιστρόφου κινηματικού μοντέλου με τη χρήση αλγορίθμων της C++. Η προσομοίωση υλοποιείται επιτυχώς ανοίγοντας τον δρόμο για την ανάπτυξη OLP Softwares .

Όπως συμπεραίνουμε από τα παραπάνω επιστημονικά άρθρα ο προγραμματισμός των ρομποτικών κελιών μέχρι τις αρχές του 2000 πραγματοποιούνταν χρησιμοποιώντας γλώσσες προγραμματισμού (πχ Visual Basic, C++ κλπ). Με το πέρασμα των ετών υλοποιήθηκαν ολοκληρωμένα περιβάλλοντα για την υλοποίηση του προγραμματισμού, αλλά οι άδειες χρήσης τους αύξαναν κατά πολύ το κόστος της εγκατάστασης και προγραμματισμού του κελιού. Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια της υλοποίησης του προγραμματισμού μόνο με τα εργαλεία τα οποία συμπεριλαμβάνονται στην έκδοση Solidworks 2019. Επίσης σε όλα τα επιστημονικά άρθρα που μελετήθηκαν δεν αναφέρθηκε κάποια εναλλακτική μέθοδος παραμετροποίησης της τροχιάς του ρομπότ αναλόγως με τις πραγματικές διαστάσεις της υπό κατεργασίας κατασκευής. Στην παρούσα μελέτη θα γίνει μια προσπάθεια αντιμετώπισης του παραπάνω προβλήματος με την μέθοδο της φωτογραμμετρίας.

## 1.4 Ανασκόπηση κεφαλαίων

Όπως αναφέρθηκε, η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει την προσπάθεια του σχεδιασμού και του προγραμματισμού μέσω κινηματικής προσομοίωσης, ρομποτικής συγκόλλησης εξαρτήματος μηχανής βαφής υφασμάτων ενώ γίνεται μία προσπάθεια παραμετροποίησης της τροχιάς του ρομπότ με την μέθοδο της φωτογραμμετρίας. Στην παρούσα διπλωματική κάθε ένα από αυτά τα πεδία αποτελεί ένα ανεξάρτητο κεφάλαιο με πρώτο μέρος την απαιτούμενη εισαγωγική γνώση, η οποία στη συνέχεια εφαρμόζεται στο δεύτερο μέρος για το συγκεκριμένο ρομποτικό βραχίονα .

Αναλυτικότερα, τα επιμέρους κεφάλαια περιλαμβάνουν τα εξής:

**Κεφάλαιο 2** - Θεωρίας Συγκολλήσεων: Παρουσιάζεται συνοπτικά η μέθοδος συγκόλλησης MIG/MAG.

**Κεφάλαιο 3** - Βιομηχανικοί ρομποτικοί βραχίονες: Γίνεται μια εισαγωγή στα είδη των βιομηχανικών ρομποτικών συστημάτων και των μεθόδων προγραμματισμού τους.

**Κεφάλαιο 4** - Φωτογραμμετρία: Παρουσιάζεται η Φωτογραμμετρική μέθοδος μέτρησης αντικειμένων και ο απαιτούμενος εξοπλισμός.

**Κεφάλαιο 5** - Παράμετροι της συγκόλλησης: Γίνεται αναφορά στην χειροκίνητη κατεργασία της κατασκευής και στις παραμέτρους της.

**Κεφάλαιο 6** - Σχεδιασμός κελιού συγκόλλησης: Παρουσιάζεται αναλυτικά ο σχεδιασμός του ρομποτικού κελιού στο Solidworks.

**Κεφάλαιο 7** - Προσομοίωση ρομποτικής συγκόλλησης: Παρουσιάζεται αναλυτικά η μέθοδος υλοποίησης της προσομοίωσης με τη χρήση του Motion Analysis.

**Κεφάλαιο 8** - Παραμετροποίηση της συγκόλλησης: Παρουσιάζεται η μέθοδος παραμετροποίησης του προγραμματισμού του ρομποτικού κελιού. Αρχικά καταγράφεται η διαδικασία της φωτογραμμετρίας, στη συνέχεια ο σχεδιασμός του αντικειμένου με βάση τις πραγματικές του διαστάσεις και τέλος η μέθοδος μετατροπής των αποτελεσμάτων σε κώδικα προγραμματισμού του ρομποτικού κελιού.

## 2 Στοιχεία Θεωρίας Συγκολλήσεων

### 2.1 Εισαγωγή στις συγκολλήσεις

Με τον όρο συγκόλληση εννοούμε γενικά την τοπική σύμφυση μετάλλων υπό υψηλή θερμοκρασία. Η σύμφυση αυτή είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί μεταξύ όμοιων και ανόμοιων μετάλλων και με τη χρήση ή όχι πίεσης. Με τη μέθοδο συγκόλλησης συνθέτουμε τη μορφή του αντικειμένου που επιθυμούμε, συγκολλώντας κομμάτια ήδη προκατασκευασμένα. Αυτή η διεργασία έχει συνήθως σαν αποτέλεσμα την παραγωγή αντικειμένων με πολύ χαμηλότερο κόστος από τη χύτευση και με καλύτερη γενικά ποιότητα κατασκευής, ακρίβεια διαστάσεων, μηχανικές ιδιότητες, εμφάνιση κλπ. Με τον τρόπο αυτό τα προϊόντα της συγκόλλησης είναι πολλές φορές έτοιμα για χρήση χωρίς να χρειάζονται επιπλέον μηχανουργικές κατεργασίες.

Τα πλεονεκτήματα αυτά των συγκολλήσεων, έχουν προκαλέσει σε πολλές περιπτώσεις τον ανασχεδιασμό χυτών αντικειμένων και κατασκευή τους ως συγκολλητών, με χαμηλότερο κόστος. Μεγάλη ώθηση στη διάδοση των συγκολλήσεων, και ιδιαίτερα των ηλεκτροσυγκολλήσεων, έδωσε και η επιτυχής εφαρμογή τους για την σύνδεση ελασμάτων στη ναυπηγική και αργότερα στην αυτοκινητοβιομηχανία, αεροναυπηγική, λεβητοουργία κλπ. Στην περίπτωση αυτή η συγκόλληση αντικατέστησε με επιτυχία τη σύνδεση με καρφιά και βίδες, με σημαντικό κέρδος σε βάρος και εργατικά.

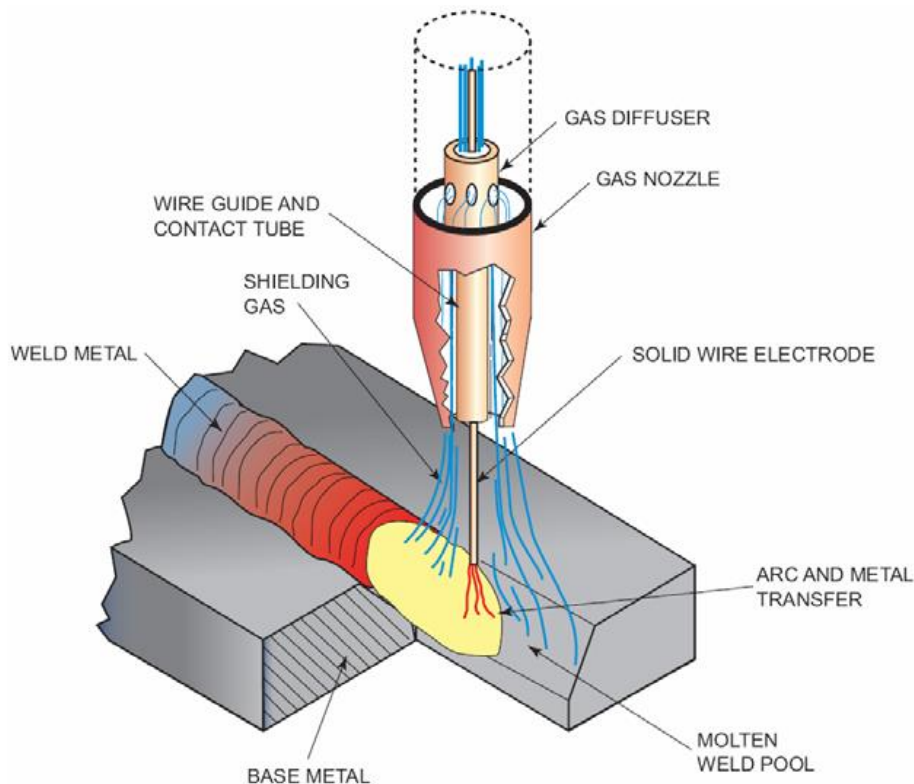
Τα βασικά προβλήματα που αντιμετωπίζει ο μηχανικός κατά την παραγωγή συγκολλητών προϊόντων, είναι κυρίως ο κατάλληλος σχεδιασμός του κομματιού, ώστε να διευκολύνεται η συγκόλληση και η “συγκολλησιμότητα” του υλικού σε συνδυασμό με τα μηχανήματα που υπάρχουν.

Με τον όρο συγκολλησιμότητα του υλικού εννοούμε την ευκολία με την οποία είναι δυνατή η συγκόλληση με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο και τη μηχανική και χημική συμπεριφορά της κόλλησης και του γειτονικού μετάλλου. Οι μέθοδοι συγκόλλησης που εφαρμόζονται σε ευρεία κλίμακα είναι η συγκόλληση με φλόγα αερίου η ηλεκτροσυγκόλληση τόξου και η ηλεκτροσυγκόλληση αντίστασης. Εκτός από αυτούς τους βασικούς τρόπους συγκόλλησης, υπάρχουν και πολλοί άλλοι με ειδικότερα πεδία εφαρμογής. [31]

### 2.2 Μέθοδος συγκόλλησης με προστατευτικό αέριο και σύρμα (GMAW)

Η μέθοδος συγκόλλησης GMAW, είναι η ημιαυτόματη μέθοδος συγκόλλησης με σύρμα, σε προστατευτική ατμόσφαιρα αδρανούς (MIG) ή ενεργού (MAG) αερίου. Κατά την εκτέλεση των συγκολλήσεων MIG/MAG, στις περισσότερες περιπτώσεις, η

τροφοδοσία του ηλεκτροδίου – σύρματος επιτελείται μηχανικά, ενώ η προώθηση της κεφαλής της συγκόλλησης (όπλο συγκόλλησης), επιτελείται χειρωνακτικά. Για το λόγο αυτό η μέθοδος χαρακτηρίζεται ως ημιαυτόματη. Ωστόσο, μπορεί η μέθοδος να εκτελεστεί και μηχανικά, δηλαδή η κεφαλή της συγκόλλησης να κινείται μηχανικά σε σχέση με το βασικό μέταλλο, οπότε χαρακτηρίζεται ως πλήρως μηχανοποιημένη, ή και αυτοματοποιημένα, οπότε και τα αντικείμενα προς συγκόλληση τροφοδοτούνται με μηχανικό τρόπο, και τότε χαρακτηρίζεται ως αυτόματη. Το βέβαιο είναι ότι ο ρυθμός τροφοδοσίας του σύρματος πρέπει να αντιστοιχεί στο ρυθμό τήξης του, κάτι το οποίο δεν μπορεί να εξασφαλιστεί χειρωνακτικά, κι έτσι η μέθοδος δε μπορεί να εκτελεστεί με τρόπο τέτοιο που να χαρακτηριστεί χειρωνακτική.



**Σχήμα 2-1.** Μέθοδος συγκόλλησης με προστατευτικό αέριο και σύρμα (GMAW)

Η μέθοδος είναι κατάλληλη για τη συγκόλληση όλων των ευρέως χρησιμοποιούμενων βιομηχανικών κραμάτων, όπως, αλουμινίου και των κραμάτων του, μαγνησίου και των κραμάτων του, κοινών και ελαφρά κραματωμένων χαλύβων, ανοξειδωτων και πυρίμαχων χαλύβων, χαλκού, μπρούντζου, κ.λπ., σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης, με τη σωστή, για κάθε εφαρμογή, επιλογή παραμέτρων συγκόλλησης, υλικού πλήρωσης και προστατευτικού αερίου.

Η διαρκής και απρόσκοπτη τροφοδοσία του αναλίσκόμενου ηλεκτροδίου, εξασφαλίζεται με μηχανικό τρόπο, που οδηγεί το σύρμα, από ειδικά ρολά, στο χειρωνακτικά ή μηχανικά ελεγχόμενο όπλο συγκόλλησης, μέσω εύκαμπτου αγωγού, με τη

βοήθεια μηχανοκίνητων ραούλων ρυθμιζόμενης ταχύτητας περιστροφής. Ο ρυθμός τήξης του ηλεκτροδίου – σύρματος, πρέπει να αντιστοιχεί στο ρυθμό τροφοδοσίας του σύρματος, ο οποίος καθορίζει και το απαιτούμενο ρεύμα συγκόλλησης. Επιπλέον, μέσω του όπλου, τροφοδοτείται το προστατευτικό αέριο ή μίγμα αερίων, η παροχή του ρεύματος συγκόλλησης, το υγρό ψύξης (στην περίπτωση όπου το όπλο είναι υδρόψυκτο), και το καλώδιο ελέγχου, που συνδέει το όπλο με τον πίνακα ελέγχου της μηχανής συγκόλλησης. [32]

Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ο υψηλός ρυθμός εναπόθεσης (deposition rate) του υλικού πλήρωσης, λόγω της αντίστοιχα μεγάλης ταχύτητας τήξης του σύρματος, σε σχέση με τη μέθοδο συγκόλλησης με επενδυμένα ηλεκτρόδια ή τη μέθοδο συγκόλλησης με ηλεκτρόδιο βολφραμίου σε ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου (TIG). Το ηλεκτρόδιο – σύρμα τροφοδοτείται αδιάκοπα, γεγονός που επίσης συμβάλει στην επίτευξη υψηλού ρυθμού εναπόθεσης. Στην αυξημένη παραγωγικότητα της μεθόδου συμβάλει και η απουσία σκουριάς που θα σχηματίζονταν σε κάθε κορδόνι και θα απαιτούσε καθαρισμό, όπως, για παράδειγμα, στη περίπτωση της συγκόλλησης βυθισμένου τόξου. Η απουσία σκουριάς απαλλάσσει τη μέθοδο και από τον κίνδυνο εμφάνισης ενός πολύ συχνού σε άλλες μεθόδους σφάλματος συγκόλλησης, των εγκλεισμάτων σκουριάς (slag inclusion).

Επιπλέον, ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η απλή και εύκολη ρύθμιση του τρόπου μεταφοράς του τηγμένου ηλεκτροδίου μέσω του τόξου στο λουτρό τήξης. Η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης, με τη σωστή ρύθμιση παραμέτρων, κάτι που δεν ισχύει για τη μέθοδο συγκόλλησης βυθισμένου τόξου, για παράδειγμα. Ακόμα, οι υψηλές τιμές πυκνότητας ρεύματος που επιτυγχάνονται, οδηγούν στην επίτευξη μεγαλύτερης διείσδυσης σε σχέση με τη συγκόλληση με επενδυμένα ηλεκτρόδια. Τέλος, η μέθοδος MIG/MAG παρουσιάζει μεγάλη ευελιξία, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύτατο πεδίο εφαρμογών. [12]

Στα μειονεκτήματα που αναφέρονται για τη μέθοδο, συγκαταλέγονται η ευαισθησία της στα εξωτερικά περιβάλλοντα και σε έκθεση σε ρεύματα αέρα, καθώς η προστατευτική ατμόσφαιρα αποτελείται μόνο από το παρεχόμενο αέριο. Επιπλέον, η έλλειψη σκουριάς οδηγεί σε υψηλότερους ρυθμούς απόψυξης της περιοχής της συγκόλλησης, μετά τη στερεοποίηση του λουτρού τήξης, ή/και σε υποβίβασμό των μεταλλουργικών και μηχανικών ιδιοτήτων της συγκόλλησης και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης. Ακόμα, η έλλειψη σκουριάς αφήνει το τόξο εκτεθειμένο, με αποτέλεσμα να χρειάζεται πλήρης εφαρμογή όλων των μέτρων ατομικής προστασίας ενάντια σε δερματικές βλάβες ή/και βλάβες της οράσεως.

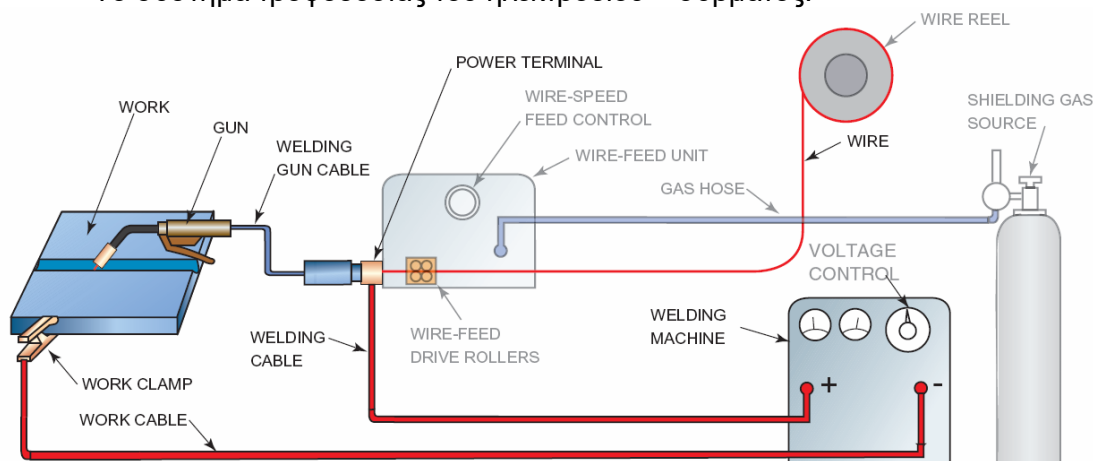
Επίσης, μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί και η ευαισθησία της στο κρίσιμο σφάλμα της ατελούς τήξης. Η συχνή εμφάνιση ατελούς τήξης (lack of fusion) στις συγκεκριμένες συγκολλήσεις οφείλεται στην αυξημένη ταχύτητα προώθησης της συγκόλλησης, στην κατανομή θερμότητας μεταξύ βασικού μετάλλου και ηλεκτροδίου (μεγαλύτερο ποσοστό της θερμικής ενέργειας καταλήγει στο ηλεκτρόδιο από ότι στο βασικό μέταλλο), και στη συχνά εμφανιζόμενη δυσκολία χειρισμού του όπλου συγκόλλησης (και κατά συνέπεια και του αντίστοιχου τόξου) σε δύσκολα προσβάσιμες περιοχές συγκόλλησης.

Γενικότερα, η προσβασιμότητα στη περιοχή συγκόλλησης, μπορεί να περιορίζεται, λόγω του σχήματος και του μεγέθους του όπλου, σε συνδυασμό με τα διάφορα καλώδια τροφοδοσίας που καταλήγουν σ' αυτό. Τέλος, σε σύγκριση με τη μέθοδο συγκόλλησης με επενδυμένα ηλεκτρόδια, η μέθοδος MIG/MAG, απαιτεί εξοπλισμό υψηλότερου κόστους, πιο πολύπλοκο, και λιγότερο ευέλικτο. [12]

### 2.3 Εξοπλισμός συγκολλήσεων MIG/MAG

Ο βασικός, απαραίτητος για τη λειτουργία της μεθόδου εξοπλισμός, εμφανίζεται σχηματικά στην Εικόνα 2.2. Τα κύρια μέρη που αποτελούν τον εξοπλισμό για την εφαρμογή της μεθόδου, είναι:

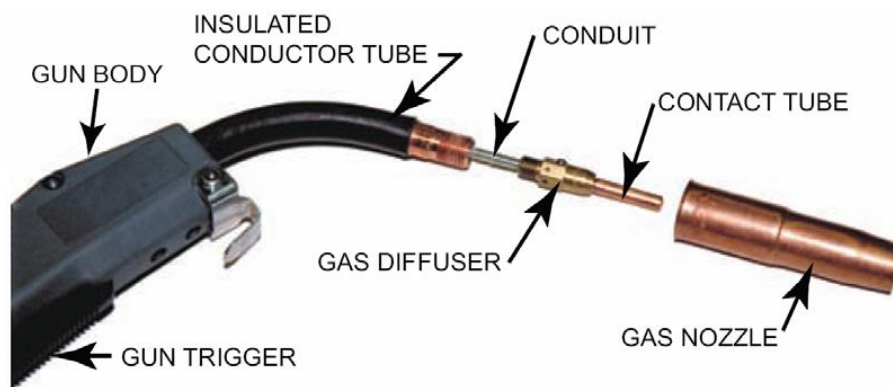
- Το όπλο της συγκόλλησης,
- Η πηγή ρεύματος,
- Το κύκλωμα παροχής προστατευτικού αερίου,
- Το κύκλωμα παροχής ψυκτικού υγρού (όταν χρησιμοποιείται) και
- Το σύστημα τροφοδοσίας του ηλεκτροδίου – σύρματος.



Σχήμα 2-2. Εξοπλισμός συγκολλήσεων MIG/MAG

## 2.3 Όπλα συγκόλλησης

Η μέθοδος συγκόλλησης MIG/MAG χρησιμοποιείται τόσο στη χειρωνακτική όσο και στην αυτοματοποιημένη εκδοχή της. Έτσι, αντίστοιχα, υπάρχουν και ειδικά όπλα συγκόλλησης για την κάθε περίπτωση (Εικόνα 2-3). Τα Αερόψυκτα όπλα συγκόλλησης Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που το θερμικό φορτίο το επιτρέπει, καθώς και σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει εύκολη διαθεσιμότητα νερού για να χρησιμοποιηθεί στο κύκλωμα ψύξης. Τα υδρόψυκτα όπλα συγκόλλησης είναι παρόμοια με τα αερόψυκτα η μόνη διαφορά τους είναι ότι περιέχουν αγωγούς για τη κυκλοφορία του υγρού ψύξης. Το υγρό ψύξης κυκλοφορεί μέσω των αγωγών και ψύχει κυρίως την ηλεκτρική επαφή και το ακροφύσιο του αερίου. Η υγρόψυξη επιτρέπει τη συνεχόμενη χρήση του όπλου συγκόλλησης, με αυξημένη ικανότητα χρήσης ρεύματος και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Οι αγωγοί κυκλοφορίας του υγρού ψύξης, προσθέτουν βάρος και υποβιβάζουν την ευκολία χρήσης του όπλου. [12]



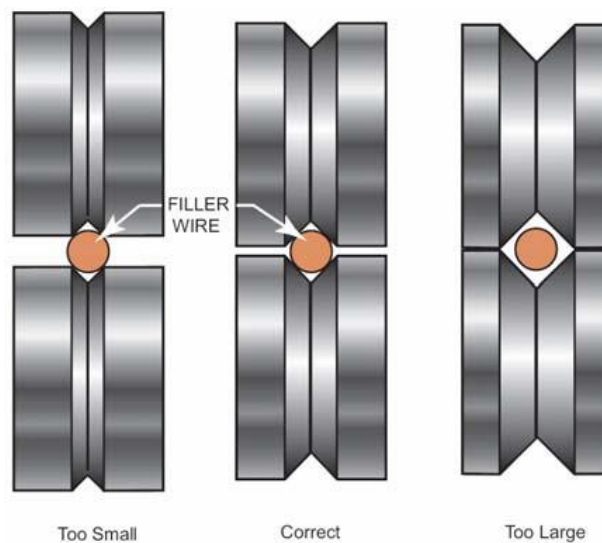
**Σχήμα 2-3.** Τσιμπίδα συγκόλλησης.

Η επιλογή του τύπου δαυλού συγκόλλησης που θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε εφαρμογή, και κυρίως αν θα είναι αερόψυκτος ή υδρόψυκτος, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες οι κυριότεροι από τους οποίους είναι:

- Ο τύπος του προστατευτικού αερίου,
- Το εύρος τιμών έντασης ρεύματος που θα χρησιμοποιηθεί στη συγκόλληση,
- Ο τύπος των βασικών υλικών,
- Η προετοιμασία ακμών της συγκολλητής σύνδεσης,
- Ο τύπος και η διάσταση του υλικού πλήρωσης,
- Η προσβασιμότητα της προς συγκόλληση περιοχής, και η διαθέσιμη τεχνογνωσία του συνεργείου που θα εκτελέσει τη συγκεκριμένη εργασία συγκόλλησης.
- Το βάρος και η ευχρηστία του κάθε υποψήφιου όπλου συγκόλλησης, προφανώς, πρέπει να συνυπολογίζονται

## 2.4 Σύστημα τροφοδοσίας σύρματος

Είναι, όπως αναφέρθηκε, το σύστημα που ευθύνεται για την ομαλή και απρόσκοπτη τροφοδοσία του ηλεκτροδίου – σύρματος στο όπλο συγκόλλησης. Αποτελείται από ράουλα που κινούνται μηχανικά, και σε συνεργασία με άλλα ράουλα που απλά περιστρέφονται και πιέζουν το σύρμα συγκόλλησης, τραβούν ή σπρώχνουν το σύρμα και εξασφαλίζουν την ευθύτητα του και τη σωστή τροφοδοσία του. Στην Εικόνα παρουσιάζει τυπικές διατάξεις τέτοιων μηχανισμών. Παρατηρούμε ότι τα ράουλα για το αλουμίνιο, για παράδειγμα, πρέπει να είναι διαφορετικά από αυτά του χάλυβα. Γενικά τα ράουλα και όλος ο μηχανισμός, πρέπει να είναι σωστά επιλεγμένα, ανάλογα με τον τύπο και τη διάμετρο του σύρματος συγκόλλησης, και σωστά συντηρημένα. [12]



**Σχήμα 2-4.** Σύστημα τροφοδοσίας σύρματος.

Στις περισσότερες κοινές εφαρμογές, τα αναλίσκόμενα ηλεκτρόδια επιλέγονται με τρόπο ώστε η χημική τους σύσταση να πλησιάζει, όσο το δυνατό, τη χημική σύσταση των βασικών μετάλλων. Πολλές όμως φορές, για να προκύψει επιτυχής συγκόλληση, και οι ιδιότητες της συγκολλητής σύνδεσης να είναι οι προδιαγραφόμενες, επιλέγονται υλικά πλήρωσης διαφορετικής χημικής σύστασης. Γενικά, οι διάμετροι των συρμάτων που χρησιμοποιούνται στις συγκολλήσεις MIG/MAG είναι μάλλον μικρές συγκρινόμενες με αυτές που χρησιμοποιούνται σε άλλες μεθόδους συγκόλλησης. Οι πιο συχνά εμφανιζόμενες είναι από 1.0 έως 1.6 mm, αν και σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθούν και διάμετροι ως 3.2 mm προς τα πάνω και ως 0.5 mm προς τα κάτω. Οι υψηλές τιμές ρεύματος που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο, σε συνδυασμό με τις μικρές διαμέτρους σύρματος, έχουν σαν αποτέλεσμα την επίτευξη πολύ υψηλών ρυθμών τήξης του υλικού πλήρωσης, οι οποίοι κυμαίνονται από 40 έως 340 mm/sec περίπου. Έτσι τα σύρματα συγκόλλησης πρέπει να παρέχονται σε ειδικά ρολά, που να εξασφαλίζουν την απρόσκοπτη προώθηση αρκετών μέτρων σύρματος, μέσα από τον εξοπλισμό της



συγκόλλησης, χωρίς προβλήματα. Τα χαλύβδινα υλικά πλήρωσης προμηθεύονται, συνήθως με χάλκινη επικάλυψη, που βοηθάει στην αντιδιαβρωτική συμπεριφορά του σύρματος, και βελτιώνει την ηλεκτρική επαφή και αγωγιμότητα του.

## **2.5 Τρόποι μεταφοράς τηγμένου υλικού πλήρωσης (transfer modes)**

Το υλικό πλήρωσης, το τηγμένο σύρμα – ηλεκτρόδιο δηλαδή μπορεί να μεταφέρεται από το ηλεκτρόδιο στο λουτρό τήξης με δύο, κυρίως τρόπους:

Όταν το ηλεκτρόδιο έρχεται σε επαφή με το λουτρό τήξης, προκαλώντας έτσι Βραχυκύκλωση του ρεύματος συγκόλλησης, επιτελείται μεταφορά που αποκαλείται μεταφορά με τόξο βραχυκύκλωσης.

Όταν η μεταφορά επιτελείται μέσω διακριτών σταγόνων, που κινούνται κατά μήκος του τόξου συγκόλλησης, κάτω από την επίδραση βαρυτικών ή ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων.

Τότε, διακρίνουμε δύο υποπεριπτώσεις μεταφοράς:

- με σταγόνες
- με τόξο ψεκασμού.

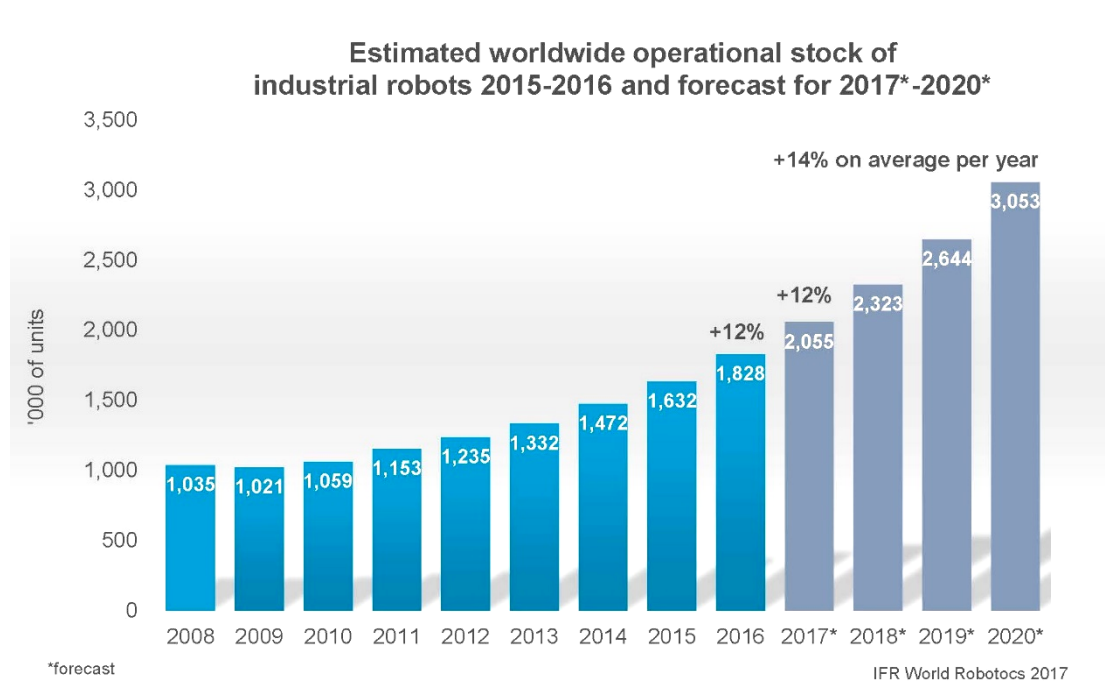
## 3 Βιομηχανικοί ρομποτικοί βραχίονες

### 3.1 Ιστορική αναδρομή

Η ιστορία των βιομηχανικών αυτοματισμών χαρακτηρίζεται από περιόδους ραγδαίας μεταβολής των κοινά χρησιμοποιούμενων μεθόδων. Είτε ως αίτιο είτε, ίσως, ως αποτέλεσμα, οι μεθοδολογικές αυτές μεταβολές, φαίνεται πως είναι στενά συνδεδεμένες με τον οικονομικό περίγυρο. Τα βιομηχανικά ρομπότ επισημάνθηκαν ως ξεχωριστές διατάξεις το 1960, μαζί με τα συστήματα σχεδίασης/σχεδιασμού μέσω Η/Υ (C.A.D.) και τα συστήματα κατασκευής μέσω Η/Υ (C.A.M.). Η χρήση τους σηματοδοτεί τις σύγχρονες τάσεις στον τομέα αυτοματοποίησης της παραγωγής. Αυτές οι τεχνολογικές περιοχές οδηγούν την βιομηχανική αυτοματοποίηση σε μια νέα μετεξέλιξη, η εμβέλεια της οποίας είναι ακόμα δυσδιάκριτη.

Στην Β. Αμερική η χρήση ρομποτικών διατάξεων υιοθετήθηκε σε μεγάλο βαθμό νωρίς τη δεκαετία του 1980, και σημείωσε μικρή κάμψη κατά το τέλος της δεκαετίας. Από τότε η συγκεκριμένη αγορά αναπτύσσεται, υπόκειται όμως και σε οικονομικές διακυμάνσεις, όπως συμβαίνει άλλωστε σε όλες τις αγορές.

Στο σχήμα παρουσιάζεται ο αριθμός των ετήσιων εγκαταστάσεων ρομποτικών διατάξεων παγκοσμίως.



**Σχήμα 3-1.** Αριθμός των ετήσιων εγκαταστάσεων ρομποτικών διατάξεων παγκοσμίως.

Η πτωτική πορεία του κόστους των βιομηχανικών ρομπότ αποτελεί ένα πολύ σημαντικό αίτιο της αυξανόμενης χρήσης τους. Επιπλέον, τα ρομπότ δεν γίνονται απλώς φθηνότερα αλλά και πιο αποτελεσματικά, δηλαδή, ταχύτερα, ακριβέστερα και πιο ευέλικτα. Προσαρμόζοντας αυτά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά σε μια αριθμητική κλίμακα, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το κόστος ακολουθεί ταχύτερη πτωτική πορεία από αυτήν που αποκαλύπτουν οι τυπικές τιμές της αγοράς. Τα ρομπότ, λοιπόν προσφέρουν μια συμφέρουσα, από οικονομική άποψη, λύση ενώ το κόστος της ανθρώπινης εργασίας αυξάνεται.

Έτσι όλο και περισσότερες βιομηχανικές εφαρμογές μπαίνουν στη λίστα των υποψήφιων ρομποτικών υλοποιήσεων. Αυτή η τάση, μοναδική και σημαντικότερη, προάγει την αγορά των βιομηχανικών ρομπότ. Ένας δευτερευούσης σημασίας λόγος αυτής της ανάπτυξης, υπαγορεύεται από τις διαρκώς αναπτυσσόμενες δεξιότητες των ρομποτικών μηχανισμών. Ολοένα και περισσότερο εισχωρούν σε ένα εργασιών, που είτε είναι αδύνατο να διεκπεραιωθούν από ανθρώπους είτε θεωρούνται επικίνδυνες για τη σωματική τους αρτιότητα.

Οι εφαρμογές που υλοποιούνται από τα βιομηχανικά ρομπότ βαθμιαία γίνονται περισσότερο σύνθετες. Ωστόσο είναι γεγονός ότι στις Η.Π.Α. το έτος 2000 περίπου το 78% των εγκατεστημένων ρομπότ εκτελούσαν εργασίες συγκόλλησης ή επεξεργασίας υλικών.

Μια πιο ενδιαφέρουσα περιοχή, η συναρμολόγηση με χρήση βιομηχανικών ρομπότ, κάλυπτε το 10% των εγκαταστάσεων. [33]

### **3.2 Περιγραφή**

Οι εργασίες που μπορεί να φέρει εις πέρας ένας βραχίονας εξαρτώνται από τις προδιαγραφές σχεδιασμού του και ποικίλουν, καλύπτοντας μια ευρεία περιοχή εφαρμογών. Η λειτουργία του οροθετείται από χειροπιαστούς παράγοντες όπως είναι το μέγιστο επιτρεπτό φορτίο, η ταχύτητα, το μέγεθός του χώρου εργασίας και η επαναληψιμότητα. Επίσης, για συγκεκριμένες εφαρμογές, σημαντικοί παράγοντες είναι το συνολικό μέγεθος και βάρος του βραχίονα, η καταναλισκόμενη ισχύ και το κόστος του.

Τα στοιχεία που απαρτίζουν ένα ρομποτικό σύστημα, μπορούν σε μια πρώτη προσέγγιση να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες:

- Στον βραχίονα
- Στον αποληκτήριο επενεργητή
- Στους διάφορους εξωτερικούς αισθητήρες και επενεργητές
- Στον επενεργητή

Η επιλογή και ο σχεδιασμός ενός βραχίονα διαφοροποιείται, ανάλογα με τον τύπο της εργασίας που πρόκειται να του ανατεθεί. Τα μεγάλα ρομπότ για παράδειγμα είναι ικανά στο χειρισμό μεγάλου ωφέλιμου φορτίου αλλά δεν είναι ικανά για εργασίες που απαιτούν μεγαλύτερη ακρίβεια κινήσεων όπως η τοποθέτηση ηλεκτρονικών συσκευών σε πλακέτες. Η διαφοροποίησή τους δεν αφορά μόνο το μέγεθος. Ο αριθμός των αρθρώσεων, ο τύπος των επενεργητών, καθώς και ο τύπος των αισθητήρων και συστημάτων ελέγχου, διαφέρει πολύ ανάλογα με το είδος της εφαρμογής, στην οποία προσανατολίζεται το ρομπότ [34].

Για την καλύτερη κατανόηση των δυνατοτήτων και του τρόπου λειτουργίας των ρομποτικών βραχιόνων χρειάζεται να παρουσιαστούν ορισμένες βασικές έννοιες.

**Βαθμοί ελευθερίας:** Για ένα βραχίονα το πλήθος των βαθμών ελευθερίας είναι σταθερό και ίσο με τον αριθμό των αρθρώσεων του. Κρίνεται σκόπιμο να επισημανθεί η διαφορά ανάμεσα στους βαθμούς κινητικότητας ενός βραχίονα και στους βαθμούς ελευθερίας που απαιτούνται για την εκτέλεση ενός έργου. Οι πρώτοι είναι σταθεροί ενώ οι δεύτεροι είναι συνδεδεμένοι με το συγκεκριμένο έργο που εκτελεί. Για την γενική περίπτωση που απαιτείται η τοποθέτηση και ο προσανατολισμός ενός αντικειμένου στο χώρο χρειάζονται έξι βαθμοί ελευθερίας, τρεις για την τοποθέτηση και τρεις για τον προσανατολισμό του αντικειμένου ως προς ένα σύστημα συντεταγμένων αναφοράς.

**Χώρος εργασίας:** Ορίζεται ως ο τρισδιάστατος χώρος τον οποίο μπορεί να σαρώσει η άκρη του ρομποτικού μηχανισμού. Οι διαστάσεις και η γεωμετρική του μορφή εξαρτάται από την δομή του ρομπότ.

**Ωφέλιμο φορτίο:** Ορίζεται το βάρος που μπορεί να μεταφέρει το άκρο του βραχίονα. Το φορτίο αυτό προδιαγράφεται από τον κατασκευαστή του ρομπότ και δεν είναι σταθερό αλλά εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία πρόκειται να κινηθεί ο καρπός.

**Επαναληψιμότητα:** Ορίζεται ως η δυνατότητα του βραχίονα να επιστρέψει στο ίδιο σημείο μετά από ένα αριθμό επαναλήψεων της ίδιας κίνησης. Δίνεται ως εύρος μέσα στο οποίο θα τερματίσει την κίνηση. Η απόκλιση που μπορεί να παρατηρηθεί οφείλεται στο ότι κατά την λειτουργία του ρομπότ ο αισθητήρας που δίνει την θέση, είναι πιθανό να χάσει την μέτρηση της θέσης με αποτέλεσμα να μην μπορεί να επιστρέψει στη ζητούμενη θέση μετά από ορισμένους κύκλους λειτουργίας.

**Ακρίβεια:** Ορίζεται ως η ικανότητα του ρομπότ να πηγαίνει ακριβώς στη θέση που του έχει δοθεί εντολή να πάει. Η ακρίβεια εξαρτάται από ένα αριθμό παραγόντων με κυριότερους την ανάλυση των εξαρτημάτων ελέγχου και την μηχανολογική σύνδεση των μελών του ενώ επηρεάζεται από το είδος και το μέγεθος του φορτίου.

**Ταχύτητα:** Ένα ακόμη κριτήριο επιλογής είναι η μέγιστη ταχύτητα κίνησης του επενεργητή ενός βραχίονα. Για παράδειγμα σε εφαρμογές όπως διαλογή προϊόντων απαιτείται μεγάλη ταχύτητα κίνησης ωστόσο σε μερικές περιπτώσεις είναι η εφαρμογή που οριοθετεί την ταχύτητα κίνησης όπως η διαδικασία της συγκόλλησης.

### 3.3 Είδη αρθρώσεων

Άρθρωση ονομάζεται η διάταξη που συνδέει που συνδέει δύο σώματα μεταξύ τους περιορίζοντας ένα ή , συχνότερα περισσότερους από τους μεταξύ τους βαθμούς ελευθερίας. Οι αρθρώσεις που εμφανίζονται με μεγαλύτερη συχνότητα σε μηχανισμούς είναι [35] :

**a) Περιστροφική άρθρωση.** Δίνει ένα βαθμό ελευθερίας παρέχοντας τη δυνατότητα στο σώμα να περιστραφεί σε ένα επίπεδο και απαγορεύει κάθε άλλη δυνατότητα κίνησης.

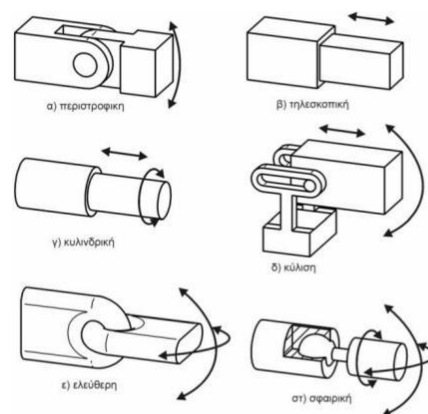
**b) Τηλεσκοπική άρθρωση.** Δίνει ένα βαθμό ελευθερίας αφήνοντας το σώμα να μετατοπίζεται στη διεύθυνση ενός από τους άξονες, αποκόπτοντας οποιαδήποτε άλλη δυνατότητα κίνησης.

**c) Κυλινδρική άρθρωση.** Δίνει δύο βαθμούς ελευθερίας αφήνοντας μία μεταφορική κίνηση στη διεύθυνση ενός άξονα και μία περιστροφική γύρω από τον άξονα αυτό.

**d) Άρθρωση κύλισης.** Δίνει δύο βαθμούς ελευθερίας , μία μεταφορική και μία περιστροφική κίνηση. Ο άξονας της περιστροφικής κίνησης είναι κάθετος στη διεύθυνση του άξονα της μεταφορικής κίνησης.

**e) Ελεύθερη άρθρωση.** Δίνει δύο βαθμούς ελευθερίας καθώς το σώμα έχει την δυνατότητα να κάνει δύο περιστροφικές κινήσεις.

**f) Σφαιρική άρθρωση.** Δίνει τρεις βαθμούς ελευθερίας αφήνοντας και τις τρεις περιστροφικές κινήσεις ελεύθερες και εμποδίζοντας όλες τις μεταφορικές.



Σχήμα 3-2. Είδη αρθρώσεων

Ο τύπος ενός ρομπότ μπορεί να περιγραφεί με βάση τις αρθρώσεις που διαθέτει με την αλληλουχία των συμβόλων S, P και R που αντιστοιχούν σε αρθρώσεις ολίσθησης, πρισματικές και περιστροφικές, όπως αναλύθηκε προηγουμένως. Ο χαρακτηρισμός αυτός ξεκινάει από την βάση και προχωράει προς τον καρπό. Για παράδειγμα ένα σφαιρικό ρομπότ μπορεί να είναι της μορφής RRP και ένα αρθρωτό ρομπότ της μορφής RRR.

### 3.4 Ταξινόμηση Βραχιόνων βάση της γεωμετρικής διαμόρφωσης

Ο τύποι και η διαδοχή των αρθρώσεων ενός ρομποτικού βραχίονα επιτρέπει την ταξινόμηση τους σε κατηγορίες. Στο διαχωρισμό αυτό λαμβάνονται υπόψη οι τρεις πρώτες αρθρώσεις του βραχίονα και κατά συνέπεια εξαιρούνται οι αρθρώσεις του καρπού. Διακρίνονται οι εξής κατηγορίες [35]:

**Καρτεσιανοί βραχίονες:** Η συγκεκριμένη κατηγορία υλοποιείται με τρεις διαδοχικές πρισματικές αρθρώσεις. Οι άξονες των αρθρώσεων είναι ανά δύο κάθετοι μεταξύ τους. Η καρτεσιανή δομή παρέχει μεγάλη δυσκαμψία και σταθερή ακρίβεια σε όλο τον χώρο εργασίας οποίος είναι ένα παραλληλεπίπεδο. Το κυριότερο μειονέκτημα του συγκεκριμένου τύπου βραχιόνων είναι η μειωμένη επιδεξιότητα κίνησης εξαιτίας των πρισματικών αρθρώσεων που διαθέτει.

**Βραχίονες Gantry:** οι βραχίονες Gantry είναι στην ουσία καρτεσιανοί, διαφέρουν όμως στον τρόπο προσέγγισης του αντικείμενου ενδιαφέροντος. Αναλυτικότερα, ο κλασικός καρτεσιανός βραχίονας προσεγγίζει το αντικείμενο από πάνω ενώ ο βραχίονας Gantry από το πλάι. Εξαιτίας αυτής της διαφοροποίησης παρατηρείται αύξηση του χώρου εργασίας, της δυσκαμψίας ενώ είναι δυνατός ο χειρισμός μεγάλων και βαριών αντικειμένων.

**Κυλινδρικοί βραχίονες:** Στην κατηγορία αυτή βραχιόνων έχει αντικατασταθεί η πρώτη πρισματική άρθρωση της καρτεσιανής δομής από μια περιστροφική άρθρωση. Οι βραχίονες αυτοί χαρακτηρίζονται από καλή δυσκαμψία και μείωση της ακρίβειας με την αύξηση της οριζόντιας μετατόπισης. Ο χώρος εργασίας για την κατηγορία αυτή είναι τμήμα κυλίνδρου. Σημαντικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης γεωμετρίας είναι ότι ο βραχίονας εισέρχεται στο χώρο εργασίας και τον περιορίζει.

**Σφαιρικοί βραχίονες:** Στη κατηγορία αυτή βραχιόνων έχει αντικατασταθεί και η δεύτερη πρισματική άρθρωση της καρτεσιανής δομής από μια περιστροφική. Συνέπεια της αλλαγής αυτής είναι η αύξηση της μηχανολογικής πολυπλοκότητας. Η δυσκαμψία της κατασκευής μειώνεται και η ακρίβεια του καρπού μειώνεται με την αύξηση της ακτινικής απόστασης. Ο χώρος εργασίας είναι τμήμα σφαίρας και περιέχει ένα μέρος της βάσης με συνέπεια να παρέχεται η δυνατότητα χειρισμού αντικειμένων που βρίσκονται στο έδαφος.

**Βραχίονες SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm):** η γεωμετρία SCARA είναι ειδική και περιλαμβάνει δύο περιστροφικές και μια πρισματική άρθρωση τοποθετημένες με τέτοιο τρόπο ώστε οι άξονες κίνησης να είναι παράλληλοι μεταξύ τους. Η συγκεκριμένη γεωμετρία παρουσιάζει μεγάλη δυσκαμψία σε κατακόρυφη φόρτιση και ελαστικότητα σε οριζόντια. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ακρίβεια τοποθέτησης του καρπού μειώνεται με την αύξηση της απόστασης του από τον άξονα της πρώτης άρθρωσης.

**Ανθρωπομορφικοί βραχίονες:** η ανθρωπομορφική γεωμετρία υλοποιείται με τρεις διαδοχικές περιστροφικές αρθρώσεις. Αναλυτικότερα, ο άξονας περιστροφής της πρώτης άρθρωσης είναι κατακόρυφος και κάθετος στους άξονες περιστροφής των επόμενων δύο αρθρώσεων που είναι παράλληλοι μεταξύ τους. Κύριο γνώρισμα της συγκεκριμένης γεωμετρίας είναι η μεγάλη επιδεξιότητα που προσφέρει. Ο χώρος εργασίας έχει τη μορφή σφαίρας.

### 3.5 Σύστημα κίνησης

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι επενεργητών για την κίνηση των αρθρώσεων. Οι τύποι των συστημάτων κίνησης είναι [35]:

**Υδραυλικά συστήματα κίνησης:** Τα συστήματα αυτά κάνουν χρήση υδραυλικών επενεργητών που μετατρέπουν την υδραυλική πίεση και ροή σε μηχανική κίνηση. Οι υδραυλικοί επενεργητές επιλέγονται όταν ζητούμενο είναι η μετακίνηση μέτριων και υψηλών φορτίων με λογικές ταχύτητες. Βασικά γνωρίσματα των συστημάτων αυτών είναι η μεγάλη ανυψωτική τους ικανότητα και η υψηλή ενεργειακή απόδοση ενώ τα κύρια μειονεκτήματά τους είναι το υψηλό κόστος και η μειωμένη ακρίβεια στις κινήσεις σε σχέση με τους σερβοκινητήρες.

**Πνευματικά συστήματα κίνησης:** Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν πνευματικούς κινητήρες για την κίνηση, οι οποίοι μετατρέπουν πεπιεσμένο αέρα σε μηχανική κίνηση. Τα συστήματα αυτά αποτελούν την πιο φθηνή λύση από αυτά που θα παρουσιαστούν. Συναντώνται κυρίως σε χαμηλού κόστους ρομποτικούς βραχίονες με μικρή ανυψωτική ικανότητα, ενώ χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία απλών stop-to-stop κινήσεων.

**Ηλεκτρικά συστήματα κίνησης:** Τα συστήματα αυτά έχουν επενεργητές ηλεκτρικούς κινητήρες. Συνήθως χρησιμοποιούνται βηματικοί κινητήρες ή εναλλακτικά σερβοκινητήρες για υψηλότερη απόδοση. Επειδή τα ηλεκτρικά οδηγούμενα ρομπότ δεν απαιτούν μια υδραυλική μονάδα ισχύος, εξοικονομούν χώρο στο δάπεδο και μειώνουν τα επίπεδα θορύβου

### 3.6 Χρήση

Τα ρομπότ είναι ιδανικά για εργασίες μη ευχάριστες ή επικίνδυνες για τον άνθρωπο όπως για παράδειγμα το βάψιμο με ψεκάσμο και ο χειρισμός ραδιενεργών στοιχείων. Επιπλέον τα ρομπότ έχουν την ικανότητα να εκτελούν επαναλαμβανόμενες εργασίες οι οποίες όμως δεν είναι ιδιαίτερα πολύπλοκες.

Σε γενικές γραμμές τα βιομηχανικά ρομπότ παρέχουν [33]:

- Ευελιξία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ίδια δουλειά μετά από μεταβολή του προϊόντος που χειρίζονται.
- Ευφυΐα, με την χρήση ειδικών αισθητήρων π.χ. κάμερες για μηχανική όραση.
- Ταχύτητα και ακρίβεια.
- Μεγαλύτερη δύναμη συγκριτικά με τον άνθρωπο.
- Γρήγορη ανάπτυξη.
- Σταθερή ποιότητα προϊόντος και παραγωγικότητα.

Οι κυριότερες εργασίες στις οποίες χρησιμοποιούνται ρομποτικοί βραχίονες στην βιομηχανία είναι:

- Φόρτωμα και ξεφόρτωμα μηχανών.
- Σημειακή συγκόλληση.
- Συγκόλληση τόξου.
- Βάψιμο ψεκάσμού.
- Συναρμολόγηση εξαρτημάτων.
- Έλεγχος ποιότητας.
- Κατεργασίες( λείανση, διάτρηση, κοπή κ.α.
- Έγχυση μετάλλων σε καλούπια χύτευσης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι για κάθε κατηγορία εφαρμογών απαιτούνται διαφορετικά χαρακτηριστικά όσον αφορά την ακρίβεια, την γεωμετρία κατασκευής και το σύστημα ελέγχου. Με βάση τα παραπάνω, ένα ρομπότ βαφής για παράδειγμα δεν μπορεί να αντικαταστήσει ένα ρομπότ συναρμολόγησης. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται σε ποιες βιομηχανικές εφαρμογές επιλέγονται τα καρτεσιανά, κυλινδρικά, σφαιρικά και αρθρωτά ρομπότ.





Σχήμα 3-3. Ταξινόμηση εργασιών ανά είδος βραχίονα.

### 3.7 Προγραμματισμός Βιομηχανικών Ρομπότ

Στην εποχή της παγκοσμιοποίησης, οι βιομηχανίες έχουν να αντιμετωπίσουν την αυξανόμενη δυναμική των καινοτομιών, τους μικρότερους κύκλους ζωής των προϊόντων, καθώς και μια συνεχόμενη διαφοροποίηση του εύρους των προϊόντων. Ταυτόχρονα, βρίσκονται υπό πίεση λόγω ελλείψεων και υψηλού κόστους ειδικευμένων εργατών. Τα βιομηχανικά ρομπότ, αποτελούν την καλύτερη λύση τόσο για την παραγωγικότητα, αλλά και για την ευελιξία που μπορούν να παρέχουν. Παρόλα αυτά, ο προγραμματισμός ενός βιομηχανικού ρομπωτικού συστήματος για μία συγκεκριμένη εφαρμογή είναι ακόμη μία δύσκολη, χρονοβόρα και δαπανηρή εργασία.

Για παράδειγμα, ο χειροκίνητος προγραμματισμός ενός ρομπωτικού συστήματος για τη συγκόλληση τόξου ενός μεγάλου κελύφους παίρνει παραπάνω από οχτώ μήνες, ενώ ο κύκλος εργασίας της συγκόλλησής του είναι μόνο 16 ώρες. Στην περίπτωση αυτή, ο χρόνος προγραμματισμού είναι περίπου 360 φορές ο χρόνος εκτέλεσης. Έχει ως αποτέλεσμα, οι μικρομεσαίες επιχειρήσεις (Small to Median Sized Enterprises – SMEs) να μην επωφελούνται από ρομπωτικούς αυτοματισμούς [33].

Σε πρακτικές βιομηχανικές εφαρμογές σήμερα, υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες προγραμματισμού των ρομπότ:

- Online Προγραμματισμός (συμπεριλαμβανομένων lead-through και walk-through)
- Offline Προγραμματισμός (OLP)

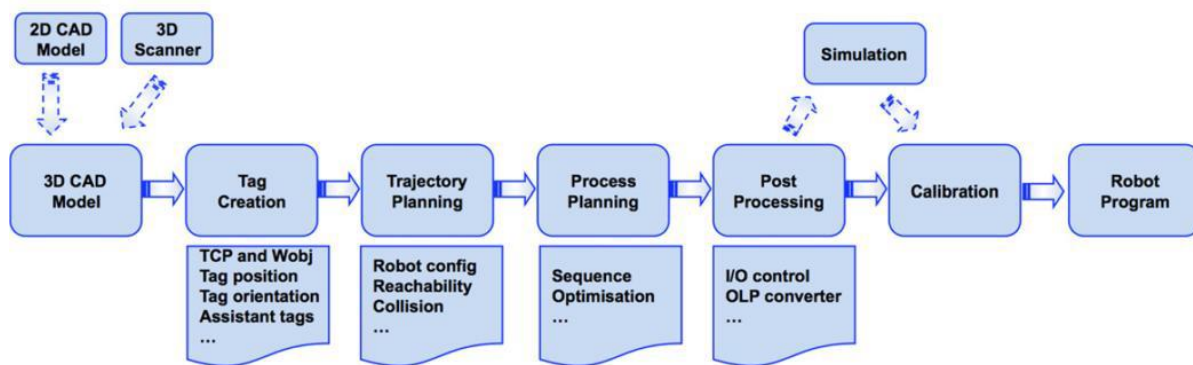
### **3.7.1 Online programming**

Ο Online Προγραμματισμός, πραγματοποιείτε συνήθως από έμπειρους χειριστές ρομπότ. Μέσω του χειριστηρίου (teach pendant) του καθοδηγούν το ρομπότ να ακολουθήσει μια επιθυμητή πορεία. Η παραπάνω μέθοδος ονομάζεται Lead-through. Περιλαμβάνει τη μετακίνηση του βραχίονα στο επιθυμητό σημείο, καθώς και την αποθήκευση αυτής της θέσης στη μνήμη, με σκοπό την ανάκλησή της κατά την επανεκτέλεση. Ο χειριστής είναι υπεύθυνος για την καθοδήγηση του ρομπότ και για τη διατήρηση της επιθυμητής θέσης και προσανατολισμού. Στη φάση της εκπαίδευσης, ο χρήστης καθοδηγεί το ρομπότ είτε χειρωνακτικά, είτε χρησιμοποιώντας το χειριστήριό του, γεγονός που επιτρέπει την αλληλεπίδραση βραχίονα – χειριστή. Τα εξαρτήματα εκπαίδευσης είναι χειριστήρια με πληκτρολόγιο, που επιτρέπουν τον έλεγχο των αρθρώσεων ή των Καρτεσιανών βαθμών ελευθερίας αντίστοιχα. Πολλοί από αυτούς τους ελεγκτές παρέχουν δυνατότητες διακλάδωσης και ελέγχου των προγραμμάτων. Έτσι είναι δυνατή η ενσωμάτωση απλών προγραμμάτων που περιέχουν λογικές μεταβλητές προτάσεις. Ο OnLine προγραμματισμός χωρίζεται σε δύο κατηγορίες [38] [28]:

- Υποβοηθούμενο από το Χειριστή
- Οδηγούμενο από Αισθητήρες

### **3.7.2 Offline Προγραμματισμός (OLP)**

Η εφαρμογή της ρομποτικής στην παραγωγή, έχει οδηγήσει στη μείωση του χρόνου παραγωγής και στη βελτίωση της ποιότητας των προς επεξεργασία τεμαχίων. Μικρομεσαίες επιχειρήσεις, που παράγουν μια ευρεία ποικιλία προϊόντων, απαιτούν μία μέθοδο που να παράγει αυτόματα ένα κώδικα NC. Ο Offline προγραμματισμός των ρομπότ, χρησιμοποιώντας CAD μοντέλα, έχει τη δυνατότητα να παρέχει μια οπτική παρουσίαση του ρομπότ κατά την εκτέλεση των εργασιών, καθώς και να εξαλείφει τα προβλήματα κατά τη φάση του σχεδιασμού, όπως αυτό της πρόσβασης, της σύγκρουσης, του χρόνου κλπ. [38] [28]



**Σχήμα 3-4.** Στάδια προγραμματισμού ρομποτικού βραχίονα με τη μέθοδο (OLP)[38]

Ως Μη Διασυνδεδεμένο Προγραμματισμό (OLP), ορίζουμε το είδος αυτό του προγραμματισμού που πραγματοποιείται χωρίς τη σύνδεση του υπολογιστή με το ρομπότ. Υλοποιείται μέσω γλωσσών που διαθέτουν ανάλογες επεκτάσεις και είναι εφοδιασμένες με περιβάλλον γραφικών. Το ρομποτικό κύτταρο μοντελοποιείται τρισδιάστατα. [33]

Στην offline διδασκαλία, ένας χειριστής χειρίζεται ένα εικονικό ρομπότ, όσον αφορά μια ακολουθία θέσεων του τελικού επενεργητή, μέσα σε ένα εικονικό περιβάλλον. Στη συνέχεια, ο εικονικός ελεγκτής, ο οποίος ταυτίζεται με τον πραγματικό, παρεμβάλλει αυτές τις θέσεις και οδηγεί το ρομπότ ώστε να κινηθεί κατά μήκος της διαδρομής. Ταυτόχρονα, οι συγκρούσεις μεταξύ του ρομπότ και του περιβάλλοντος ανιχνεύονται αυτόματα. Σύμφωνα με τις πληροφορίες σύγκρουσης, η διαδρομή μπορεί να τροποποιηθεί χειροκίνητα ή ημιαυτόματα, παράγοντας έτσι μιας διαδρομή χωρίς συγκρούσεις. Σε αυτό το σύστημα, βαθμονόμηση (calibration), πρέπει να γίνει πριν φορτωθεί το πρόγραμμα στο σύστημα ελέγχου του ρομπότ για εκτέλεση.

Ο Offline προγραμματισμός έχει αρκετά πλεονεκτήματα συγκριτικά με τον Online. Αρχικά η διαδικασία προγραμματισμού δεν απαιτεί την παρουσία του ρομπότ, κάτι το οποίο θα ελαχιστοποιούσε την παραγωγή του. Τα προγράμματα μπορούν να αναπτυχθούν κατά τη φάση σχεδιασμού/κύκλου παραγωγής και ο προγραμματισμός μπορεί να γίνει παράλληλα με την παραγωγή. Επίσης, τα προγράμματα είναι πιο ευέλικτα, με την έννοια ότι τυχόν τροποποιήσεις, μπορούν να ενσωματωθούν άμεσα.

Ένα ακόμη θετικό στοιχείο είναι η προσομοίωση. Μέσω της προσομοίωσης τα προγράμματα μπορούν να ελεγχθούν, επιβεβαιώνοντας τις κινήσεις των ρομπότ, με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιείτε η πιθανότητα σφάλματος και έτσι να βελτιώνεται η παραγωγικότητα και η ασφάλεια. [36]

### 3.7.3 Προσομοίωση μηχανικών συστημάτων (MSS) και επίλυση με ADAMS

Στη παρούσα εργασία Offline προγραμματισμός του κελιού υλοποιήθηκε προσομοιώνοντας τη λειτουργία του με τη χρήση του Motion Analysis του Solidworks. Το Motion analysis αποτελεί έναν προσομοιωτή μηχανικών συστημάτων (MSS). Η προσομοίωση μηχανικού συστήματος (MSS) είναι η μελέτη της κίνησης που προκαλείται από εξωτερικές δυνάμεις και διεγέρσεις που δρουν στο σύστημα. Το μηχανικό σύστημα αποτελείται από άκαμπτα και εύκαμπτα εξαρτήματα διασυνδεδεμένα με διάφορα είδη των αρθρώσεων και άλλων δυνάμεων περιορισμού.

Το λογισμικό MSS αναπτύσσονται ραγδαία την τελευταία δεκαετία. Επιτρέπει στον χρήστη να αξιολογήσει τον μηχανολογικό σχεδιασμό τα χαρακτηριστικά και τις επιδόσεις μιας μηχανολογικής κατασκευής πριν από την κατασκευή του πρωτοτύπου. Με τη χρήση συστημάτων MSS μειώνεται το κόστος ανάπτυξης του προϊόντος, μπορούν να μελετηθούν εναλλακτικές λύσεις με μηδενικό κόστος και να μειωθεί ο χρόνος που απαιτείται για την ανάπτυξη ενός νέου προϊόντος στην αγορά.

Το Solidworks για την επίλυση των υπολογισμών που απαιτούνται για την προσομοίωση όπως η επίλυση αντίστροφης κινηματικής χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο ADAMS. Οι φυσικοί νόμοι της μηχανικής είναι η βάση για το πεδίο των MSS.

Τα εργαλεία προσομοίωσης MSS εφαρμόζουν νόμους φυσικής ή μηχανικούς περιορισμούς. Ο ADAMS / Solver χρησιμοποιεί το σύστημα εξισώσεων κίνησης των Euler Lagrange. Αυτό το αλγεβρικό σύστημα αποτελείται από δεύτερης τάξης διαφορικές εξισώσεις και απαιτεί εξελιγμένες αριθμητικές μεθόδους για τη επίλυση του.

Ο ADAMS / Solver ορίζει τα παρακάτω για να καθορίσει το μηχανικό μοντέλο για μια προσομοίωση:

- Τα αδρανειακά χαρακτηριστικά των εξαρτημάτων
- Οι σχέσεις μεταξύ των τμημάτων
- Οι κινήσεις και οι δυνάμεις του συστήματος

Τα δεδομένα εισόδου για μια προσομοίωση ADAMS / Solver περιλαμβάνουν :

- Τη μάζα και τις αδράνεις των άκαμπτων σωμάτων ή τμημάτων
- Τον ορισμό γεωμετρικών πτυχών του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των κέντρων μάζας των εξαρτημάτων, τις θέσεις στα μέρη των αρμών που συγκρατούν το σύστημα, και τις δυνάμεις που επιβάλλονται σε αυτά
- Τη συνδεσμολογία των εξαρτημάτων (μηχανισμοί σύνδεσης των εξαρτημάτων) που ορίζονται ως μηχανικές αρθρώσεις ή γεωμετρικοί περιορισμοί
- Τα δεδομένα γραφικής απεικόνισης των εξαρτημάτων.

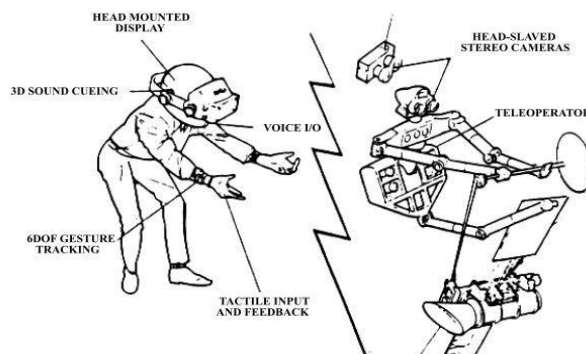
Για κάθε προσομοίωση δεν είναι απαραίτητο να οριστούν όλα τα παραπάνω δεδομένα. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η χρήση του αλγόριθμου για την υλοποίηση κινηματικής προσομοίωσης .

Μια κινηματική ανάλυση προσομοιώνει την κίνηση του συστήματος επιτρέποντας τον προσδιορισμό του εύρους των πιθανών τιμών των αρθρώσεων του συστήματος για την επίτευξη της επιθυμητής κίνησης και της ταχύτητας και επιτάχυνσης οποιοδήποτε σημείου ενδιαφέροντος του κελιού. Η κινηματική ανάλυση είναι αλγεβρική και αποτελεί μια πολύ γρήγορη και μεγάλης ακριβείας μέθοδο. [37]

### 3.7.4 Προγραμματισμός με Επαυξημένη Πραγματικότητα

Πλέον, η συνέργεια μεταξύ της Ρομποτικής και της Εικονικής Πραγματικότητας είναι δεδομένη. Η Επαυξημένη Πραγματικότητα (Augmented Reality – AR), είναι μια τεχνολογία η οποία προέρχεται από την Εικονική Πραγματικότητα. Η AR είναι ένα περιβάλλον, όπου αντικείμενα δημιουργημένα από υπολογιστή, μπλέκονται σε μια σκηνή του πραγματικού κόσμου, προκειμένου να ενισχύσουν τη διαδραστικότητα του χρήστη με τον πραγματικό κόσμο.

Η Επαυξημένη Πραγματικότητα, δηλαδή, επικαλύπτει διαδραστικά το πραγματικό περιβάλλον με εικονικές χωρικές πληροφορίες. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κάνει άμεσα διαθέσιμα στο πραγματικό περιβάλλον, τα πλεονεκτήματα της γραφικής διαδραστικής προσομοίωσης και να παρέχει ένα αποτελεσματικό και διαισθητικό κανάλι επικοινωνίας, για τις χωρικές πληροφορίες. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4, ένα εικονικό μοντέλο ενός ρομπότ πλυσίματος αεροπλάνου μπορεί να υπερτεθεί σε ένα μοντέλο αεροπλάνου σε κλίμακα. Το εικονικό μοντέλο του ρομπότ μπορεί να κινηθεί αναφορικά με το μοντέλο του αεροπλάνου, για να δημιουργήσει μια ακολουθία ρομπότ, η οποία μπορεί αργότερα να βαθμονομηθεί και να προγραμματιστεί για ένα πραγματικό ρομπότ πλυσίματος αεροπλάνων.[38]



**Σχήμα 3-5.** Προγραμματισμός με χρήση επαυξημένης πραγματικότητας.

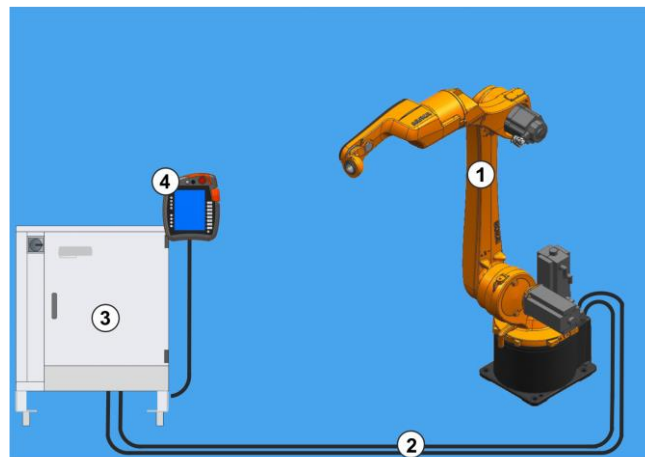
Ο προγραμματισμός ρομπότ χρησιμοποιώντας τεχνικές AR (Robot Programming using Augmented Reality - PRAR), επιτρέπει μια μορφή offline προγραμματισμού, χωρίς να χρειάζεται να μοντελοποιηθεί το τεμάχιο εργασίας στο εικονικό περιβάλλον. Η PRAR, είναι επίσης χρήσιμη όταν απαιτείται μια επί τόπου προσέγγιση, όπως το εικονικό ρομπότ μπορεί να επαυξηθεί στο κύτταρο εργασίας του πραγματικού κόσμου. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να εξαλείψει πολλές τεχνικές δυσκολίες, οι οποίες σχετίζονται με θέματα βαθμονόμησης ανάμεσα στον εικονικό και τον πραγματικό κόσμο.

### 3.8 Ρομποτικό σύστημα KR 8 R2100-2 arc HW

#### 3.8.1 Εισαγωγή

Η εταιρία Sclavos επέλεξε το ρομποτικό σύστημα KR 8 R2100-2 arc HW για την αυτοματοποίηση της κατεργασίας. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η προσομοίωση της λειτουργίας της εγκατάστασης ώστε να επιβεβαιωθεί ότι ο συγκεκριμένος βραχίονας είναι ικανός κινηματικά να εκτελέσει όλες τις απαιτούμενες κατεργασίες. Το ρομποτικό σύστημα KR 8 R2100-2 arc HW αποτελείται από [38]:

1. Τον ρομποτικό βραχίονα
2. Τα καλώδια σύνδεσης
3. Την μονάδα ελέγχου του συστήματος
4. Το teach pendant

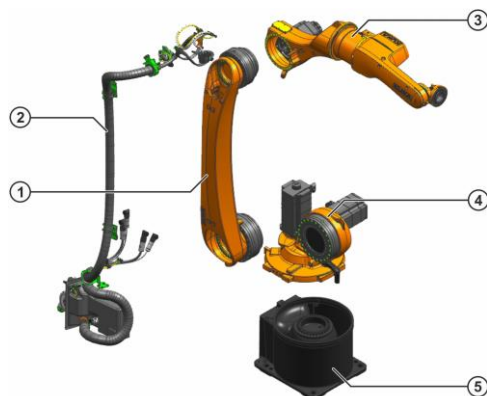


**Σχήμα 3-6.** Ρομποτικό σύστημα KR 8 R2100-2 arc HW

Ο βραχίονας αποτελείται από τμήματα ή μέλη διασυνδεδεμένα με 6 αρθρώσεις. Κάθε σύνδεσμος περιλαμβάνει έναν άξονα γύρω από τον οποίο περιστρέφονται δύο μέλη. Αυτή η εύρωστη και αξιόπιστη συναρμολόγηση, σε συνδυασμό με ένα σύστημα μέτρησης, του επιτρέπει τη γνώση της απόλυτης θέσης του ρομπότ οποιαδήποτε στιγμή.

Είναι αρκετά ευέλικτος και ικανός να εκτελέσει μια ποικιλία βιομηχανικών εφαρμογών, όπως χειρισμός φορτίων βάρους έως 8 kg, συγκολλήσεις και βαφή.

Τα κύρια μέλη του βραχίονα φαίνονται στο Σχήμα 3-7.



**Σχήμα 3-7.** Τμήματα Ρομποτικού βραχίονα KR 8 R2100-2 arc HW: Link Arm (1), Electrical Installations (2), Hollow wrist/arm (3), Rotating column (4), Base frame (5)

### 3.8.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος

Το συναρμολόγημα του βραχίονα περιέχει τη μηχανοκίνηση, τα φρένα, τους μηχανισμούς μετάδοσης κίνησης, δεσμίδες καλωδίων, το πνευματικό και ηλεκτρικό κύκλωμα για το χρήστη, καθώς και το σύστημα αντιστάθμισης.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ρομποτικού συστήματος.

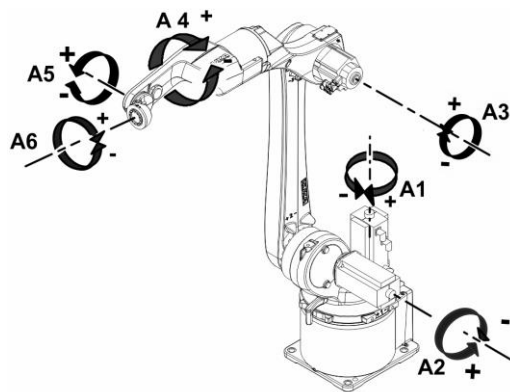
**Πίνακας 6-1.** Τεχνικά χαρακτηριστικά Kuka KR8 R2100HW [38]

Χαρακτηριστικό	Τιμή
Βαθμοί Ελευθερίας	6
Επιφάνεια χώρου εργασίας	36.58 m <sup>3</sup>
Σφάλμα επαναληψιμότητας	± 0.04 mm
Μάζα	260 kg
Μέγιστο ωφέλιμο φορτίο	9.3 kg
Μέγιστη εμβέλεια	2101 mm
Θόρυβος λειτουργίας	< 65 dB (A)
Χώρος εγκατάστασης	Πάτωμά/Οροφή υπό την επιθυμητή γωνία

**Πίνακας 6-2.** Όρια αρθρώσεων Kuka KR8 R2100HW [38]

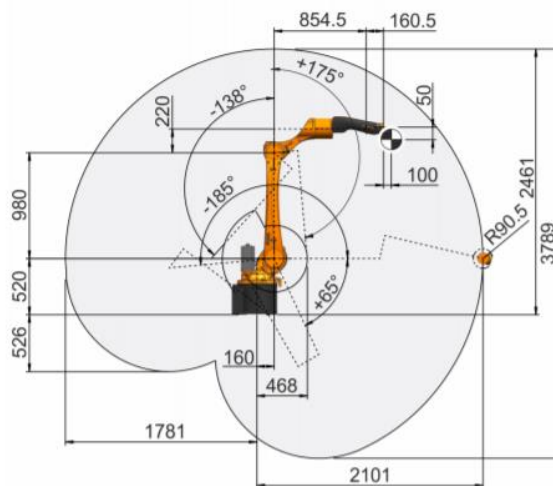
Άρθρωση	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Όρια	±185 °	-185 ° / 65 °	-138 ° / 180 °	±165 °	-115 ° / 140 °	±350 °
Εύρος	370°	250°	218°	330°	255°	700°
Ταχύτητα με ωφέλιμο βάρος 8 kg	200 °/s	175 °/s	190 °/s	430 °/s	430 °/s	630 °/s

Η φορά της κίνησης και η διάταξη των αρθρώσεων διακρίνεται στην παρακάτω εικόνα.

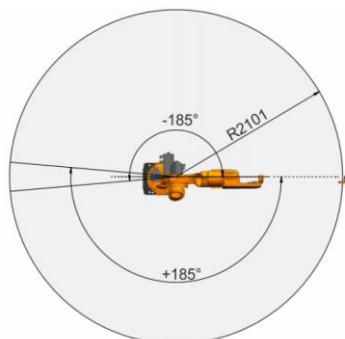


**Σχήμα 3-8.** Φορά κίνησης των αρθρώσεων

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται ο χώρος εργασίας του ρομποτικού βραχίονα



**Σχήμα 3-9.** Χώρος εργασίας του βραχίονα πρόοψη



**Σχήμα 3-10.** Χώρος εργασίας του βραχίονα κάτοψη



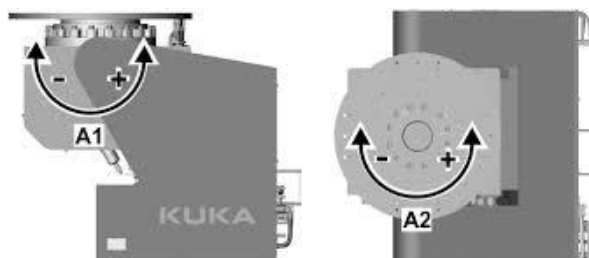
### 3.9 Μηχανισμός συγκράτησης KUKA KP2 HV 2600

Η συγκράτηση της υπό κατεργασία κατασκευής επιλέχθηκε να γίνει με τον μηχανισμό KUKA KP2 HV 2600. Ο μηχανισμός συγκράτησης είναι δύο βαθμών ελευθερίας αποτελούμενος από δύο περιστροφικές αρθρώσεις ικανός να συγκρατήσει ωφέλιμο φορτίο 2600 k g. [38]



Σχήμα 3-11. Μηχανισμός συγκράτησης KUKA KP2 HV 2600

Όπως διακρίνουμε στον πίνακα των χαρακτηριστικών του μηχανισμού, ένα από τα πλεονεκτήματα επιλογής του είναι η ακρίβεια κίνησης των αρθρώσεων ενώ η επιλογή ενός μηχανισμού από την ίδια κατασκευαστική εταιρεία καθιστά τον προγραμματισμό της συνεργασίας τους ευκολότερο. Στην παρακάτω εικόνα (3-12) διακρίνονται η πρώτη (A1) και η 2η (A2) αρθρώσεις του μηχανισμού.



Σχήμα 3-12. Αρθρώσεις Μηχανισμού συγκράτησης KUKA KP2 HV 2600

Πίνακας 3-3. Τεχνικά χαρακτηριστικά KUKA KP2 HV 2600[38]

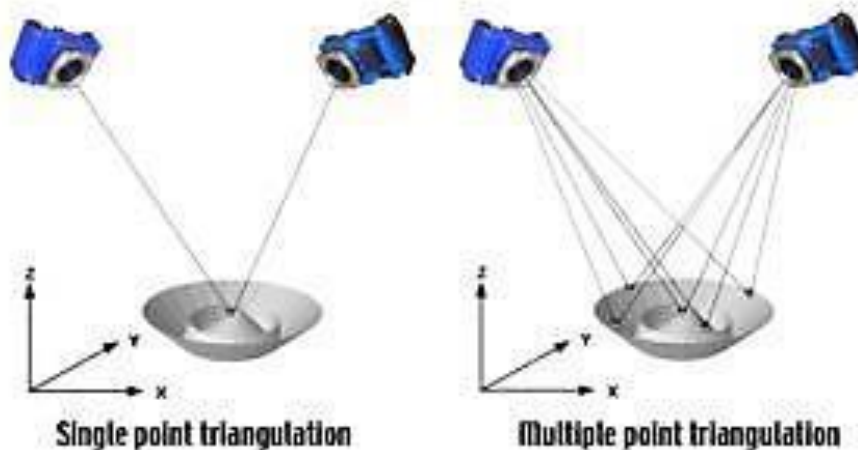
Χαρακτηριστικό	Τιμή
Ωφέλιμο βάρος (kg)	2600
Σφάλμα επαναληψιμότητας (mm)	+/- 0.35 (r=400 mm)
Μέγιστη ροπή 1ης άρθρωσης (Nm)	9,250 Nm
Μέγιστη ροπή 2ης άρθρωσης (Nm)	3,900 Nm
Εύρος 1ης άρθρωσης (ο)	120
Εύρος 2ης άρθρωσης (ο)	370
Μέγιστη ταχύτητα 1ης άρθρωσης (ο /s)	25ο
Μέγιστη ταχύτητα 2ης άρθρωσης (ο /s)	50
Μάζα μηχανισμού (kg)	2000
Θερμοκρασία λειτουργίας (ο C)	+5 to +40

# 4 Φωτογραμμετρία

## 4.1 Εισαγωγή

Η φωτογραμμετρία είναι μια τεχνική μέτρησης των διαστάσεων αντικειμένων φωτογραφίζοντάς τα από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Η λειτουργία της βασίζεται στον συσχετισμό αναγνωριστικών στόχων που έχουν τοποθετηθεί πάνω στο αντικείμενο και εμφανίζονται σε δύο ή περισσότερες φωτογραφίες με βάση μια κλίμακα αναφοράς. Ο προσδιορισμός της θέσης των στόχων βασίζεται στις βασικές αρχές της τριγωνομετρίας.

Για παράδειγμα ένα σημείο του αντικείμενου που έχει φωτογραφηθεί υπό δυο οπτικές γωνίες. Η γραμμή που συνδέει το σημείο με την κάμερα ονομάζεται "Line sight". Ο τριγωνομετρικός συσχετισμός των δύο γραμμών μας επιτρέπει τον προσδιορισμό της θέσης του σημείου στον τρισδιάστατο χώρο [39] .



Σχήμα 4-1. Οπτικές γωνίες φωτογραμμετρίας

Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης το υπό μελέτη αντικείμενο θα φωτογραφηθεί από πάρα πολλές διαφορετικές οπτικές γωνίες έχοντας τοποθετήσει πρώτα πάνω του τον απαιτούμενο αριθμό στόχων ώστε να επιτύχουμε μετρήσουμε την διάμετρό του με την απαιτούμενη ακρίβεια.

Για τον υπολογισμό της θέσης και της απόστασης των σημείων η κάθε φωτογραφία θα πρέπει να περιέχει τουλάχιστον δύο σημείο των οποίων η απόσταση είναι γνωστή και προκαθορισμένη. Τα σημεία αυτά είναι τοποθετημένα πάνω σε μια μπάρα (scale bar) .



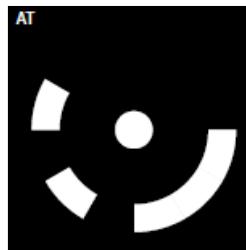
Σχήμα 4-2. Κλίμακα



**Σχήμα 4-3.** Βαθμονόμηση αντικειμένου με βάση κλίμακα αναφοράς

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν 4 μπάρες τοποθετημένες περιμετρικά του αντικειμένου ώστε να είναι δυνατή η συσχέτιση όλων των στόχων του αντικειμένου με του στόχους αναφοράς που είναι τοποθετημένοι πάνω στις μπάρες. Κωδικοποιημένοι και σημειακοί στόχοι

Οι κωδικοποιημένοι στόχοι είναι ένας ειδικός τύπος στόχου που το λογισμικό φωτογραμμετρίας που χρησιμοποιείται (ImetricS) μπορεί να αναγνωρίσει και να αποκωδικοποιήσει αυτόματα. Κάθε κώδικας αποτελείται από έναν μοναδικό ημιτελή κύκλο και μία κουκίδα τοποθετημένης στο κέντρο του.



**Σχήμα 4-4.** Κωδικοποιημένος στόχος φωτογραμμετρίας

Οι κωδικοποιημένοι στόχοι είναι απαραίτητοι για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας μέτρησης, το λογισμικό τους αναγνωρίζει αυτόματα και τους χρησιμοποιεί για τον προσδιορισμό του προσανατολισμού του αντικειμένου. Για τον προσανατολισμό μιας εικόνας απαιτούνται τουλάχιστον τέσσερις προσδιορισμένοι στόχοι.

Οι σημειακοί στόχοι χρησιμοποιούνται για την αύξηση της πυκνότητας των τοποθετημένων στόχων του αντικειμένου. Το software τους αναγνωρίζει και τους κωδικοποιεί αυτόματα.



**Σχήμα 4-5.** Σημειακός στόχος

Για την επίτευξη ικανοποιητικής ακρίβειας αποτελεσμάτων ο κάθε στόχος θα πρέπει να εμφανίζεται σε 5-10 φωτογραφίες. Στην παρούσα μελέτη ο κάθε στόχος εμφανίζεται σε περισσότερες από 15 φωτογραφίες.

Οι φωτογραφίες μετρήσεις θα πρέπει να είναι υψηλής ποιότητας και με κατάλληλη φωτεινότητα ώστε το software να είναι ικανό να αναγνωρίσει τους στόχους.

Για τη φωτογράφιση του αντικείμενου χρησιμοποιήθηκε μια κάμερα Nikon D90 και ένα φλας SIGMA EM-140 DG, . Η κάμερα μου επέτρεψε να βγάλω φωτογραφίες υψηλής ποιότητας στο σημείο μέτρησης στις εγκαταστάσεις της εταιρείας Sclanos.



**Σχήμα 4-6.** Φωτογραφική μηχανή Nikon D90

Οι φωτογραφίες πρέπει να λαμβάνονται από διαφορετικές οπτικές γωνίες περιμετρικά του αντικείμενου. Οι εικόνες θα πρέπει να καλύπτουν ολόκληρο το αντικείμενο μέτρησης, εξασφαλίζοντας την αλληλοεπικάλυψη των στόχων.

Το λογισμικό ImetricS υπολογίζει τις συντεταγμένες των στόχων στον τρισδιάστατο χώρο. Οι πιο σημαντικές λειτουργίες του ImetricS είναι οι εξής:

- Η "αυτόματη επεξεργασία" επιτρέπει την εύρεση και την ταυτοποίηση των κωδικοποιημένων στόχων, καθώς και των κλιμάκων.
- Χρησιμοποιεί όλες τις εικόνες των μετρημένων σημείων από διαφορετικές οπτικές γωνίες, ώστε να υπολογίσει τις συντεταγμένες τους και τον προσανατολισμό του αντικείμενου.
- Τα αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν σε μία βάση δεδομένων ώστε στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν από λογισμικό CAD για την μοντελοποίηση του αντικείμενου.

## 5 Παράμετροι της συγκόλλησης

### 5.1 Εισαγωγή

Για την υλοποίηση της προσομοίωσης ήταν αναγκαίο να καταγραφεί και να μελετηθεί η χειροκίνητη κατεργασία συγκόλλησης της κατασκευής. Κατόπιν συνεννοήσεως με την εταιρία πραγματοποιήθηκαν επισκέψεις στις εγκαταστάσεις της ώστε να καταγραφεί η κατεργασία. Η χειροκίνητη συγκόλληση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο MIG/MAG με τροφοδοσία σύρματος 316 LSI. Για σημειακές διορθώσεις της κατεργασίας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος TIG και τρόχισμα της επιφάνειας.

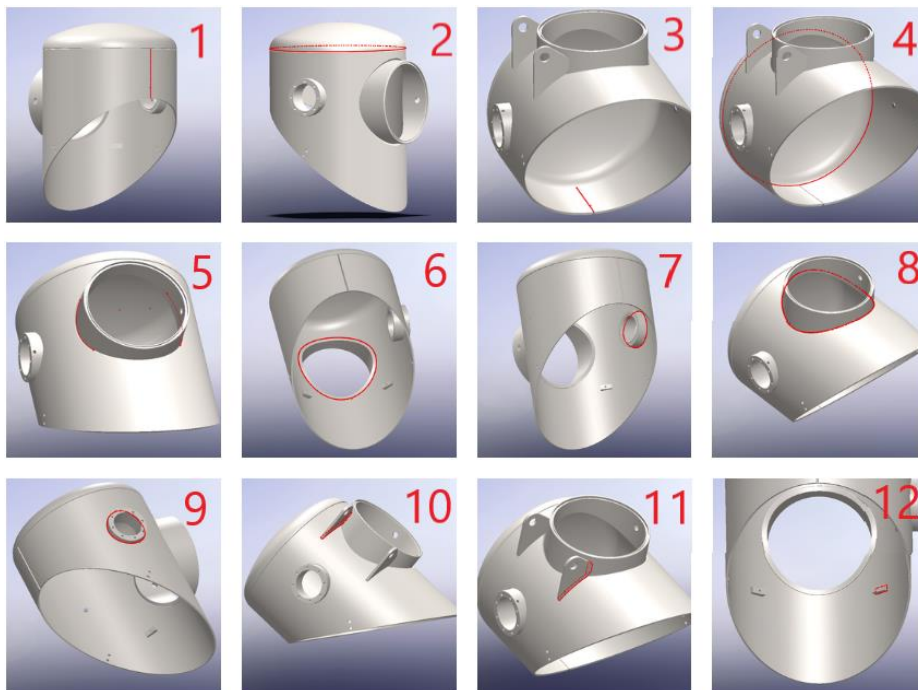


Σχήμα 5-1. Φωτογραφικό καρέ από την χειροκίνητη συγκόλληση

### 5.2 Φασεολόγιο

Κατά τη μελέτη της χειροκίνητης κατεργασίας καταγράφηκε η σειρά με την οποία πραγματοποιήθηκαν οι επιμέρους συγκολλήσεις και η ένταση και η τάση τροφοδοσίας της τσιμπίδας και ο προσανατολισμός της κατά την κίνησή της στις ραφές. Οι συνθήκες όπως καταγράφηκαν διακρίνονται στον πίνακα 5-1 και στην εικόνα 5-2. Όπως διακρίνουμε από τον πίνακα λείπουν τα στοιχεία της 1ης (φάσεις 1-2) και της 2ης (φάσεις 3-4) συγκόλλησης καθώς η 1η πραγματοποιείται με το πέρας της κατεργασίας

κυλινδρίσματος του ελάσματος ενώ η 2η κατεργασία έχει αυτοματοποιηθεί από ειδικό μηχάνημα.



**Σχήμα 5-2.** Φασεολόγιο της συγκόλλησης

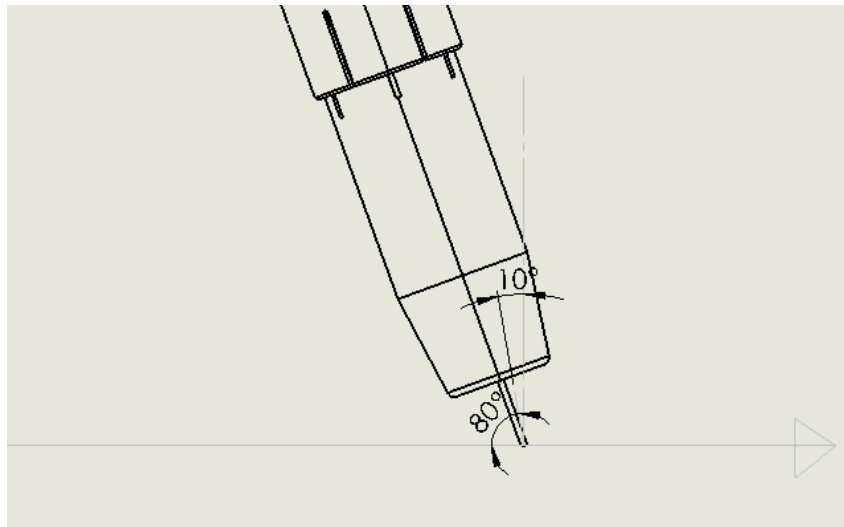
**Πίνακας 5-1.** Αριθμός των ετήσιων

	Ταχύτητα	Ένταση ρευματος I	Τάση ρευματος V
4	9	190	27
5	6.6	180	25
6	9	190	27
7	7.5	180	25
8	8	170	24
9	7.5	180	25
10	6.5	170	24
11	6.5	170	24
12	6.5	170	24

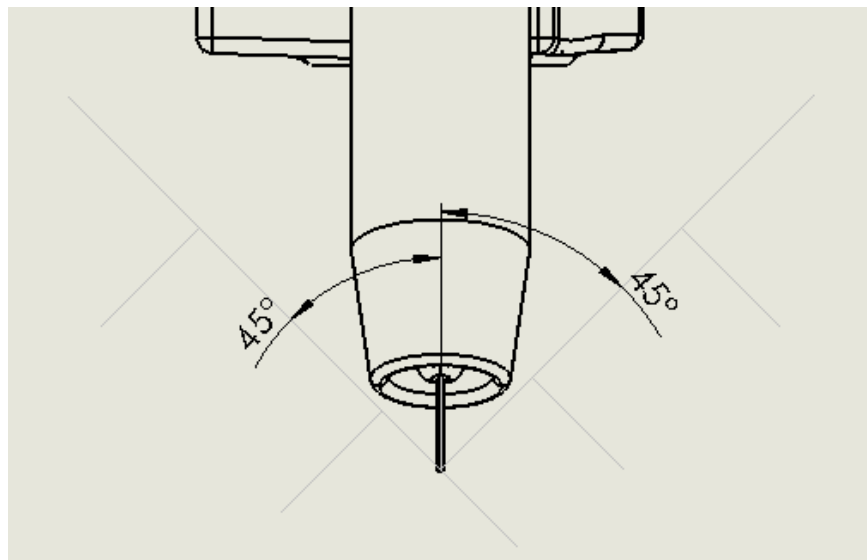
### 5.3 Προσανατολισμός τσιμπίδας συγκόλλησης

Η τσιμπίδα κατά την κίνηση της στην τροχιά της συγκόλλησης πρέπει να σχηματίζει γωνία  $10^\circ$  με αυτή ενώ στην περίπτωση που συγκολλούνται δύο επιφάνειες που

σχηματίζουν γωνία μεταξύ τους ο άξονας της τσιμπίδας πρέπει να διχοτομεί τη γωνία αυτή.



**Σχήμα 5-2.** Απαιτούμενος προσανατολισμός τσιμπίδας κατά τη φορά της συγκόλλησης



**Σχήμα 5-3.** Απαιτούμενος προσανατολισμός τσιμπίδας σε συγκόλληση επιφανειών που σχηματίζουν γωνία

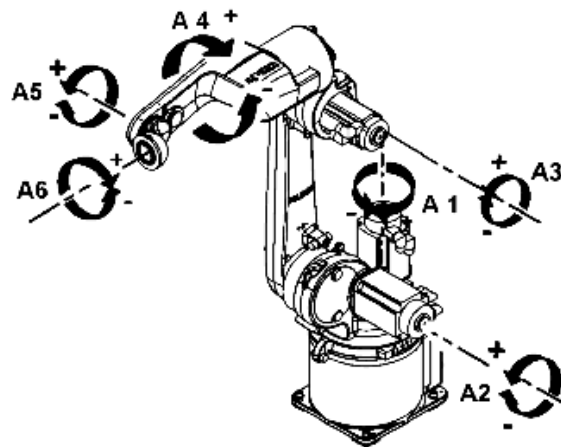
## 6 Σχεδιασμός κελιού συγκόλλησης

### 6.1 Εισαγωγή

Για τη μοντελοποίηση του κελιού συγκόλλησης σε περιβάλλον CAD χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SolidWorks της Dassault Systems. Το SolidWorks είναι ένα λογισμικό που υποστηρίζει τα στάδια ανάπτυξης ενός προϊόντος: το σχέδιο (CAD), την κατασκευή (CAM) και την εφαρμοσμένη μηχανική (CAE). Παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας τρισδιάστατων επιμέρους τεμαχίων και συναρμολογημάτων και παρουσίασής τους με διάφορους τρόπους, όπως προσομοίωση και αντίστροφη μηχανική.

### 6.2 Συναρμολόγηση βραχίονα

Το πρώτο στάδιο της κινηματικής προσομοίωσης του ρομποτικού βραχίονα Kuka KR8 R2100HW ήταν η συναρμολόγησή του σε CAD περιβάλλον λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς των αρθρώσεων που συνθέτουν το ρομπότ. Το μοντέλο CAD και οι προδιαγραφές του δίνονται από τον κατασκευαστή.



Σχήμα 6-1. Φορά κίνησης των αρθρώσεων

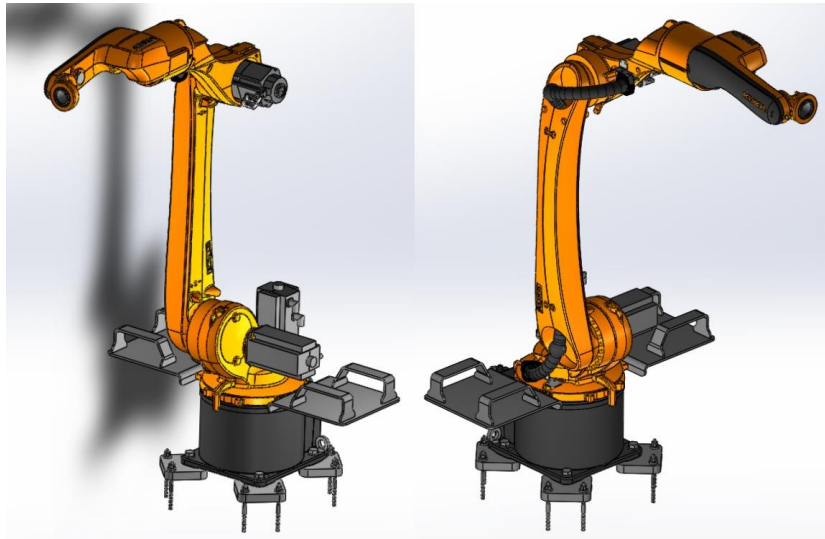
Πίνακας 6-1. Όρια αρθρώσεων Kuka KR8 R2100HW

Όρια αρθρώσεων Kuka KR8 R2100HW						
Άρθρωση	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Όρια (°)	±170	-185 ° / 65	-120 / 180	±165	-115 / 140	±350
Εύρος (°)	340	250	200	330	255	700



Τα όρια των αρθρώσεων καθορίζουν το χώρο εργασίας του βραχίονα. Ως χώρος εργασίας ορίζεται ο χώρος στον οποίο μπορεί να βρεθεί το τελικό σημείο δράσης με οποιονδήποτε προσανατολισμό.

Η Kuka παρέχει μέσω του site της το μοντέλο CAD του βραχίονα σε μορφή .step . Πρώτο βήμα λοιπόν της συναρμολόγησης ήταν ο διαχωρισμός των επιμέρους μελών του βραχίονα όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.

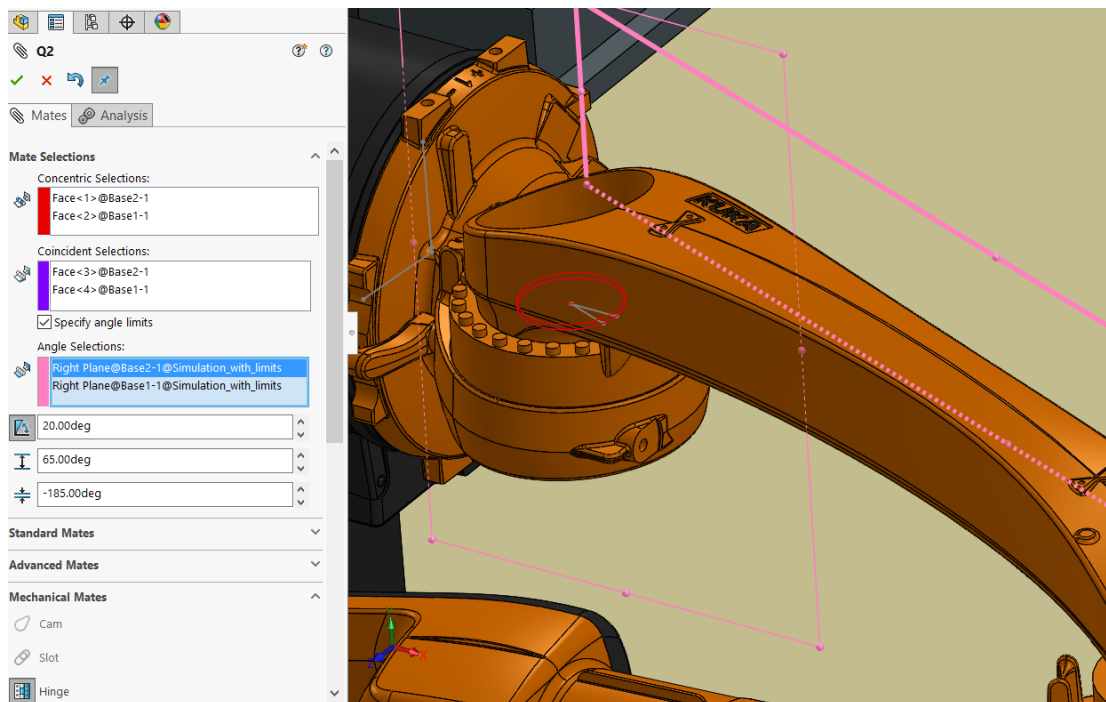


**Σχήμα 6-2.** Kuka KR8 R2100HW CAD part



**Σχήμα 6-3.** Μέλη του βραχίονα

Αφού διαχωρίστηκαν τα μέλη του βραχίονα συναρμολογήθηκαν με την «hinge mate». Η «hinge mate» μας επιτρέπει την συναρμολόγηση περιστροφικών αρθρώσεων ορίζοντας τις δύο επιφάνειες που δημιουργούν την άρθρωση ως ομόκεντρες. Αρχικά ορίζονται οι ομόκεντροι κύκλοι της άρθρωσης επιλέγοντάς τους στο “Coincident Selections” και οι εφαπτόμενες επιφάνειες επιλέγοντας τις στο πεδίο “Coincident Selections”. Η επιλογή “Angle Selections” μας επιτρέπει να ορίσουμε το εύρος της άρθρωσης συσχετίζοντας δύο επίπεδα αναφοράς των δύο κομματιών. Τα δυο αυτά επίπεδα επιλέχθηκαν έτσι ώστε να ταυτίζονται όταν η άρθρωση βρίσκεται στο σημείο ισορροπίας  $A2=0$ .

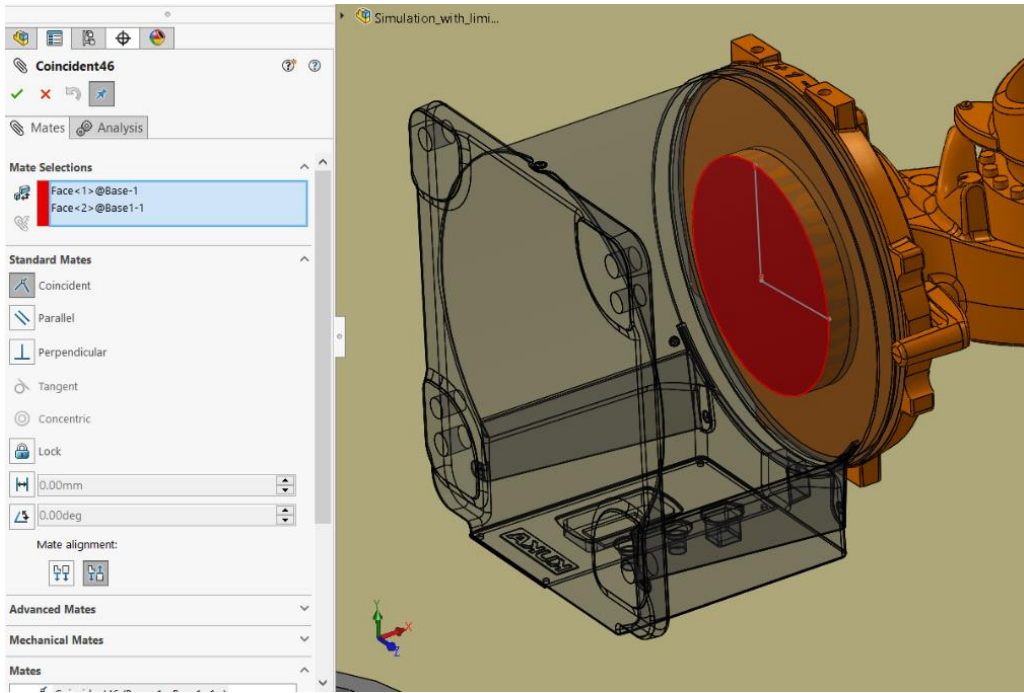


**Σχήμα 6-4.** Hinge mate της πρώτης άρθρωσης του βραχίονα

Λόγω σφαλμάτων που παρουσίαζε η πρώτη άρθρωση κατά την κινηματική προσομοίωση, πιο συγκεκριμένα αποσυναρμολόγησης της άρθρωσης κατά την κίνηση του βραχίονα, προστέθηκε μια “Coincident Mate”.

Η εντολή “Coincident Mate” μας επιτρέπει την εφαπτομένη συσχέτιση δυο επιφανειών. Με την πρόσθεση αυτής της επιπλέον συσχέτισης το πρόβλημα λύθηκε επιτυγχάνοντας την ορθή κινηματική λειτουργία του βραχίονα.

Με την ίδια μέθοδο συναρμολογήθηκαν οι υπόλοιπες αρθρώσεις του βραχίονα επιτυγχάνοντας την τήρηση προδιαγραφόμενου εύρους τους.



Σχήμα 6-5. Coincident Mate της πρώτης άρθρωσης του βραχίονα

### 6.3 Συναρμολόγηση μηχανισμού συγκράτησης KP2 HV 2600

Στη συνέχεια συναρμολογήθηκε ο μηχανισμός συγκράτησης της μεταλλικής υποκατασκευής. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός αποτελείται από τρία βασικά κομμάτια. Τα κομμάτια συνδέονται με δυο περιστροφικές αρθρώσεις. Το μοντέλο CAD και οι προδιαγραφές του δίνονται από τον κατασκευαστή.

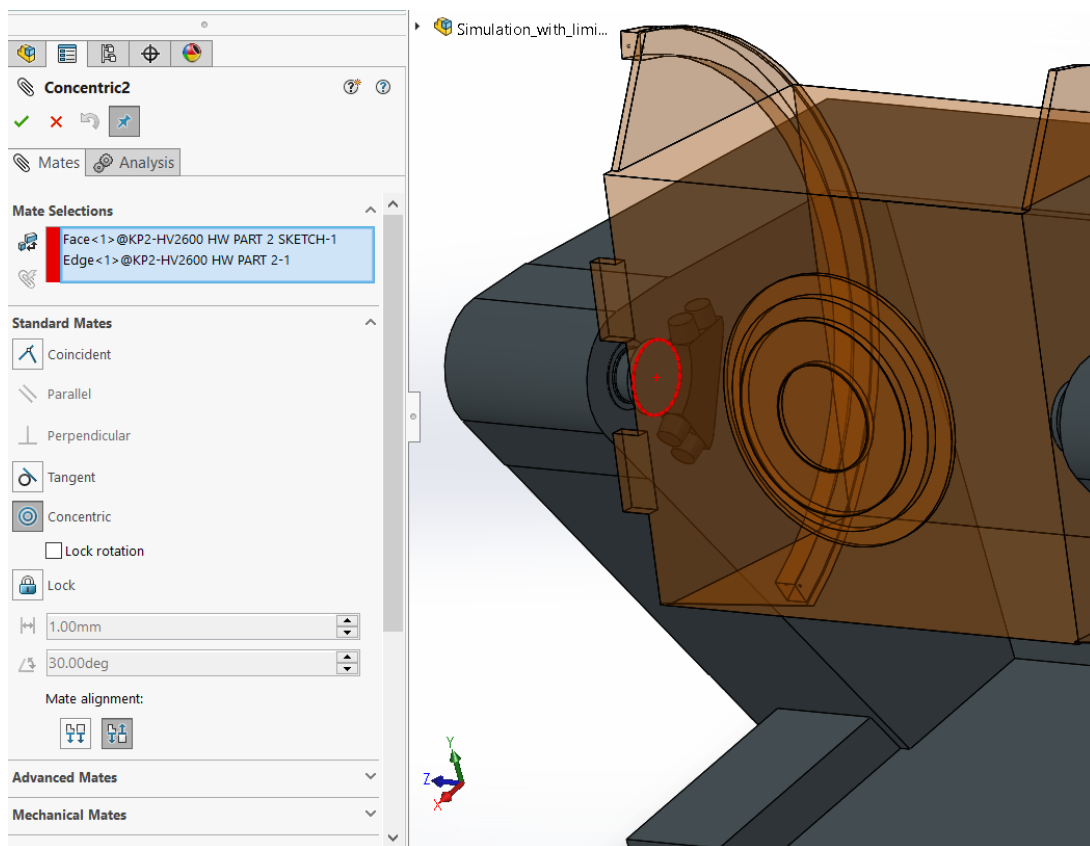


Σχήμα 6-6. Αρθρώσεις του μηχανισμού συγκράτησης KP2 HV 2600

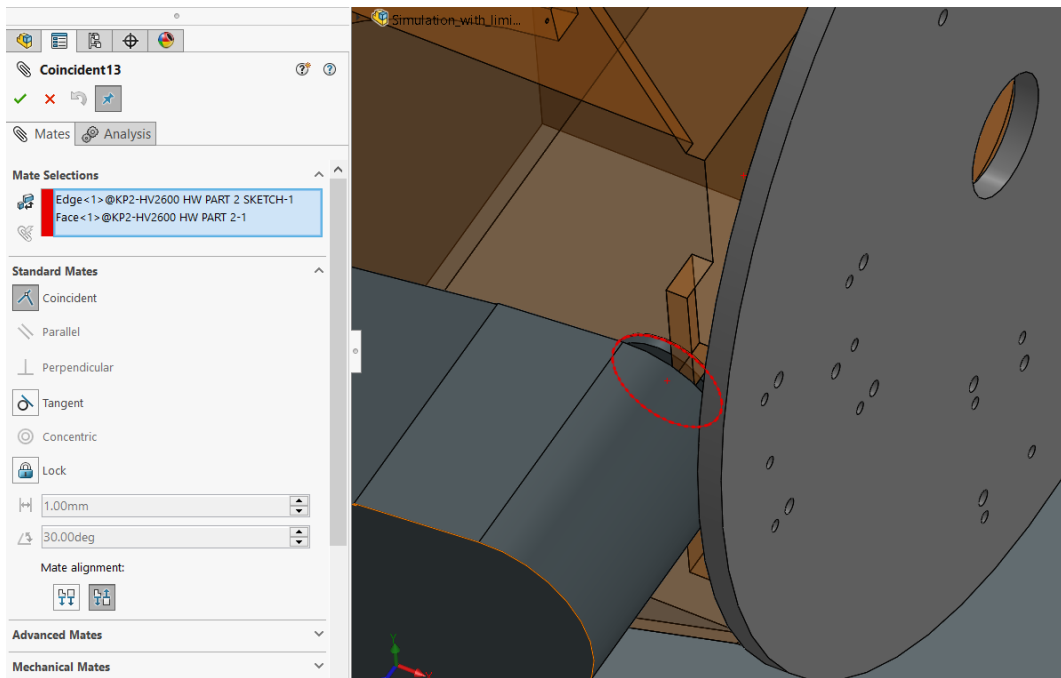
Πίνακας 6-2. Όρια αρθρώσεων Kuka KP2 HV 2600

Όρια αρθρώσεων Kuka KP2 HV 2600		
Άρθρωση	A1	A2
Όρια	+115 °	±185 °
Εύρος	115°	370°

Για την συναρμολόγηση του μηχανισμού συγκράτησης χρησιμοποιήθηκαν τα Coincentric mate , Coincident mate και Limit angle mate. Εκμεταλλευόμενος κυκλικές γεωμετρίες των κομματιών αρχικά με την Coincentric mate τέθηκε ομοκεντρική συσχέτιση στους δύο κύκλους που ήταν σχεδιασμένοι πάνω στα κομμάτια όπως φαίνεται στο σχήμα 6-7 και με την Coincident θέτοντας εφαπτομενική σχέση ανάμεσα στους δυο κύκλους επιτεύχθηκε η περιστροφική κίνηση του ενός κομματιού σε σχέση με την βάση του μηχανισμού συγκράτησης.

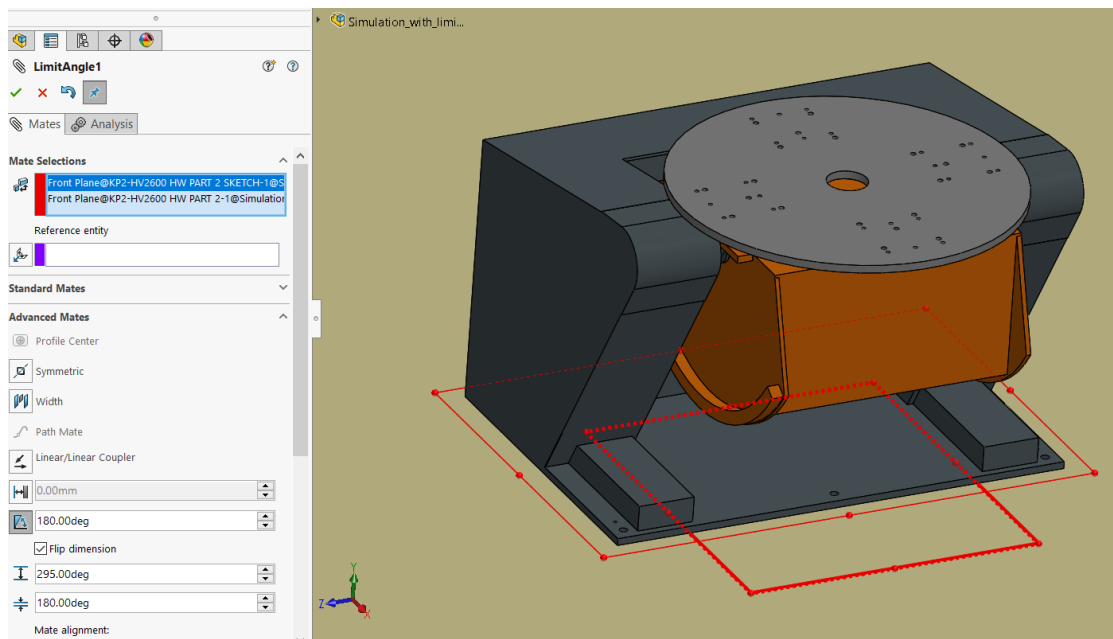


**Σχήμα 6-7.** Kuka KP2 HV 2600 Coincentric Mate



Σχήμα 6-8 . Kuka KP2 HV 2600 Coincident mate

Ενώ για την οριοθέτηση της περιστροφικής κίνησης με βάση τις προδιαγραφές του κατασκευαστή χρησιμοποιήθηκε η “limit Angle mate” η οποία μας επιτρέπει να ορίσουμε το εύρος της άρθρωσης συσχετίζοντας δύο επίπεδα αναφοράς των δύο κομματιών. Τα δυο αυτά επίπεδα επιλέχθηκαν έτσι ώστε να ταυτίζονται όταν η άρθρωση βρίσκεται στο σημείο ισορροπίας  $A1=180^\circ$  ( Ονομαστική τιμή:  $A1=0$ ) ενώ ή μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η άρθρωση είναι  $A1=295^\circ$  (Ονομαστική τιμή:  $A1=115^\circ$ ).

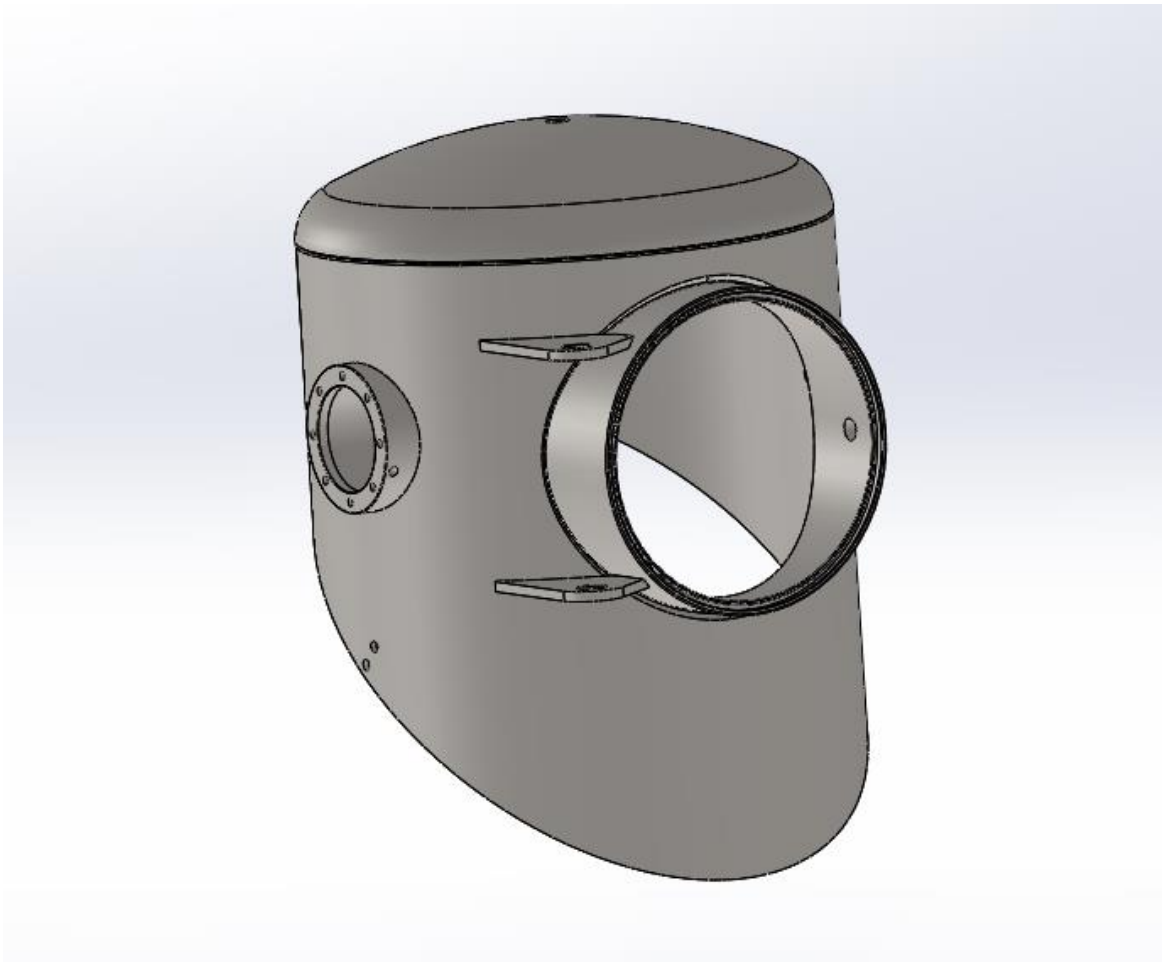


Σχήμα 6-9. Οριοθέτηση αρθρώσεων Kuka KP2 HV 2600

Συνδυάζοντας τα “mates” που χρησιμοποιήθηκαν για την προηγούμενη άρθρωση επιτεύχθηκε και η υλοποίηση της δεύτερης. Η Coincetric mate χρησιμοποιήθηκε ώστε η ή βάση στήριξης της κατασκευής να αποκτήσει επαπτομένη σχέση με τον μηχανισμό τοποθέτησής της και η Coincetric ώστε να τοποθετηθεί ομοκεντρικά με αυτή. Με την χρήση της Angle mate ορίστηκε το εύρος της άρθρωσης.

#### 6.4 Σχεδιασμός εξαρτήματος 11829U

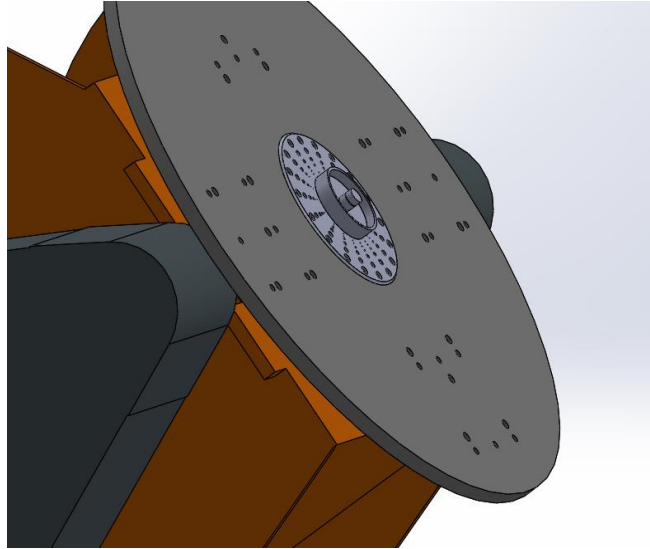
Στην συνέχεια έγινε προμήθεια από την εταιρία Sclavos του αρχείου CAD του υπό μελέτη εξαρτήματος μηχανής βαφής υφασμάτων. Το μηχανολογικό σχέδιο της κατασκευής δεν είναι δυνατό να παρουσιαστεί λεπτομερώς στην παρούσα μελέτη λόγω της πολιτικής απορρήτου της εταιρίας.



Σχήμα 6-10. Εξάρτημα 11829U

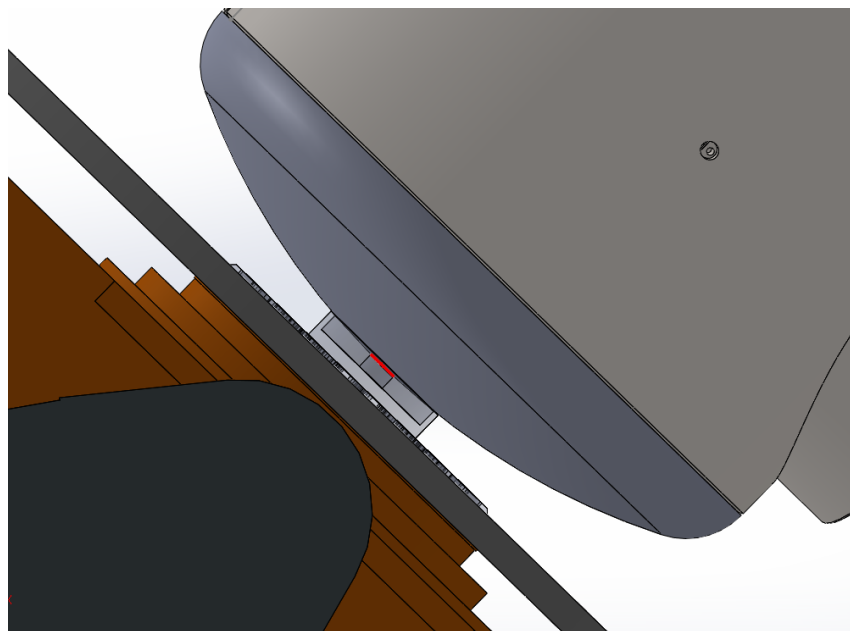
## 6.5 Τοποθέτηση του εξαρτήματος 11829U στον μηχανισμό συγκράτησης

Για την τοποθέτηση της μεταλλικής κατασκευής στον μηχανισμό συγκράτησης σχεδιάστηκε κατάλληλα εξάρτημα συγκράτησης ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί πάνω του η μεταλλική κατασκευή με “mechanical mates”.



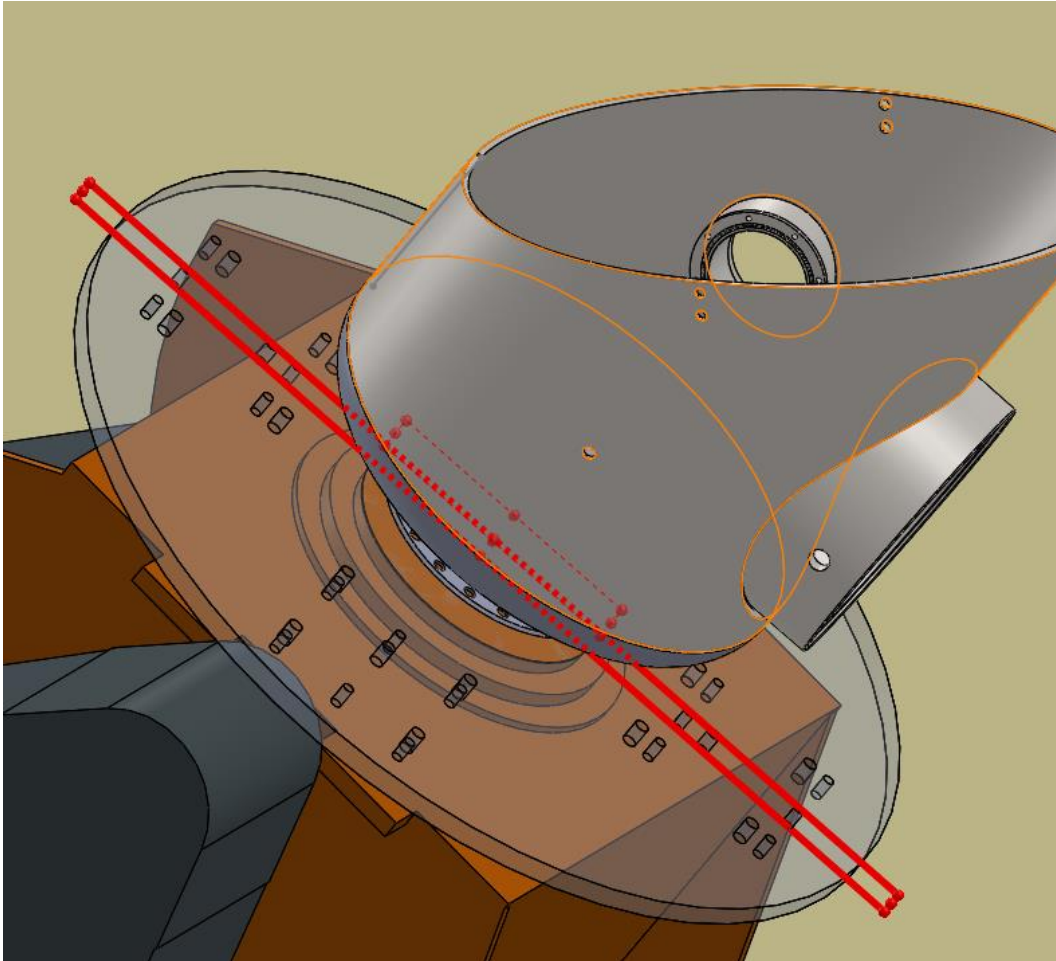
**Σχήμα 6-11.** Εξάρτημα συγκράτησης του εξαρτήματος 11829U

Η μεταλλική κατασκευή τοποθετήθηκε επιτυχώς με την Coincident mate συσχετίζοντας τον κύκλο της μεταλλικής κατασκευής που φαίνεται στην εικόνα 6-11 με κύκλο που σχεδιάστηκε στο εξάρτημα συγκράτησης (εικόνα 6-12).



**Σχήμα 6-12.** Τοποθέτηση του εξαρτήματος 11829U στη συσκευή συγκράτησης

Στη συνέχεια με την Coincident mate τέθηκε συσχέτιση σε δύο πλαίσια αναφοράς των δύο εξαρτημάτων όπως φαίνεται στην εικόνα 6-13 έτσι ώστε να συμπίπτουν επιτυγχάνοντας την ταυτόχρονη περιστροφή τους με την κίνηση του ενός.



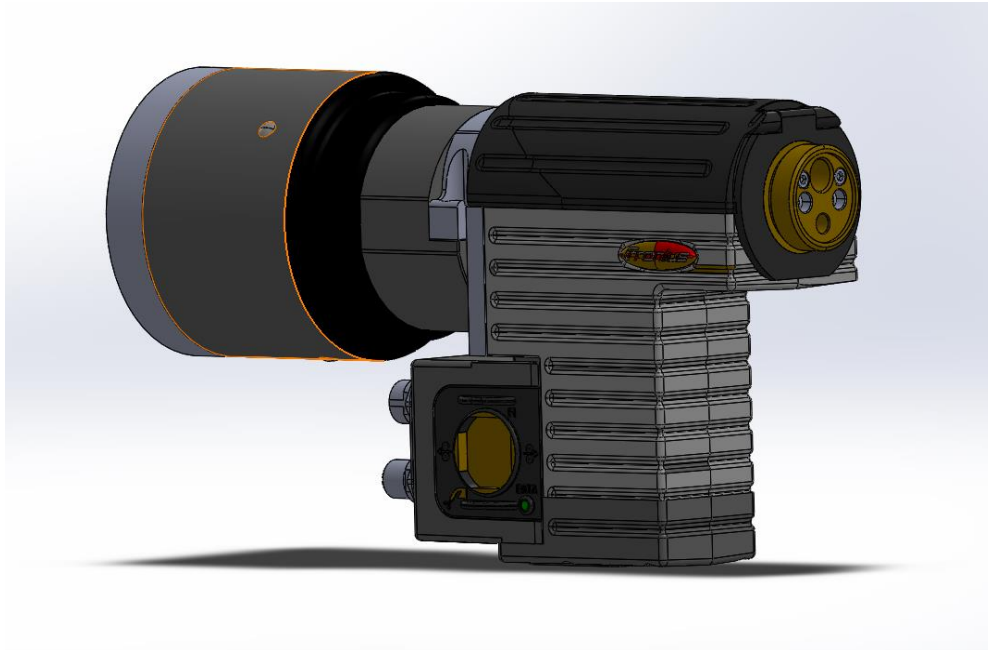
**Σχήμα 6-13.** Coincident Mate τοποθέτησης του 11829U

## 6.6 Μηχανισμός συγκόλλησης

Στην συνέχεια συναρμολογήθηκε και τοποθετήθηκε στο άκρο του βραχίονα ο μηχανισμός συγκόλλησης. Η παρούσα μελέτη αφορά την κινηματική μελέτη της συγκόλλησης, και για τον λόγω αυτό μοντελοποιήθηκαν τα κομμάτια του εξοπλισμού συγκόλλησης που επηρεάζουν την κινηματικά τον ρομποτικό βραχίονα . Οι μηχανισμοί όπως προαναφέρθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο έχουν επιλεγθεί από την εταιρία και σκοπός της μελέτης είναι να επιβεβαιώσει ότι καταλληλόλητα σου προς την επίτευξη της κίνησης του ρομπότ στις απαιτούμενες διαδρομές συγκόλλησης.

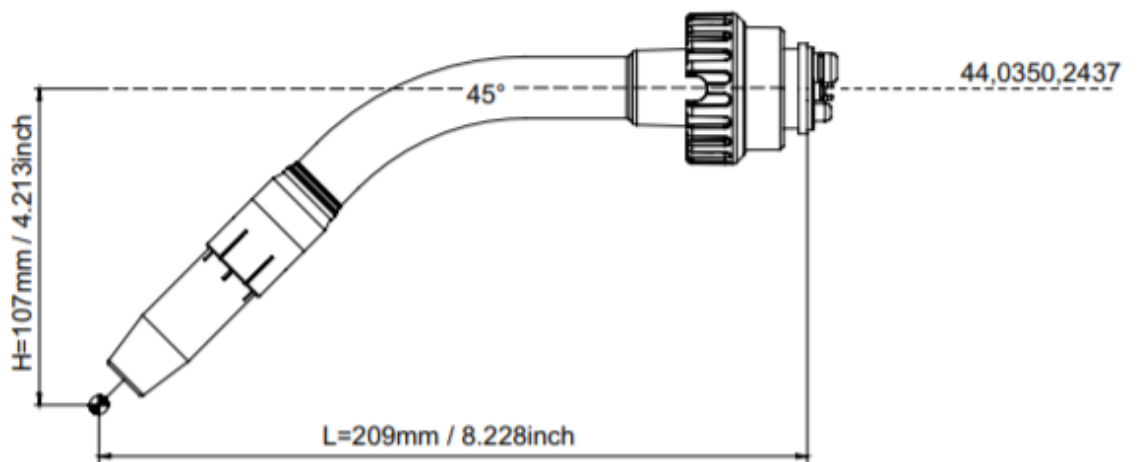


Ο πρώτος μηχανισμός είναι το τροφοδοτικό σύρματος συγκόλλησης Robacta Drive CMT της Fronius με την βάση τοποθέτησής του στον βραχίονα. Το αρχείο CAD του τροφοδοτικού προέρχεται από την κατασκευάστρια εταιρία.



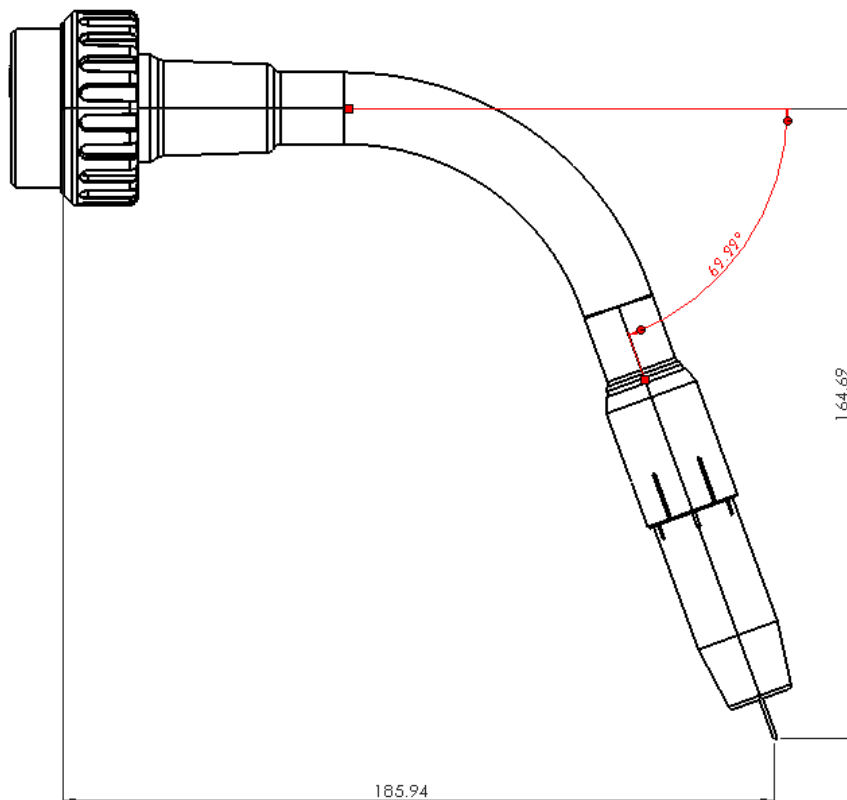
**Σχήμα 6-14.** Robacta Drive CMT

Ο δεύτερος μηχανισμός ο οποίο θα αποτελεί και τον επενεργητή του ρομποτικού βραχίονα είναι η τσιμπίδα συγκόλλησης Robacta 400 της Fronius.



**Σχήμα 6-15.** Robacta 400

Η Fronius παρέχει την δυνατότητα κατασκευής και προμήθειας μηχανισμών συγκόλλησης με τροποποιημένες διαστάσεις έτσι ώστε να ικανοποιούνται η απαιτήσεις της ρομποτικής συγκόλλησης του εκάστοτε πελάτη της. Αφού λοιπόν λήφθηκε το αρχείο CAD από την εταιρεία και κατόπιν συνεννόησης με τον επιβλέποντα μηχανικό του έργου έγιναν κάποιες τροποποιήσεις στις διαστάσεις του.



**Σχήμα 6-16.** Τροποποιημένη τσιμπίδα συγκόλλησης Robacta 400

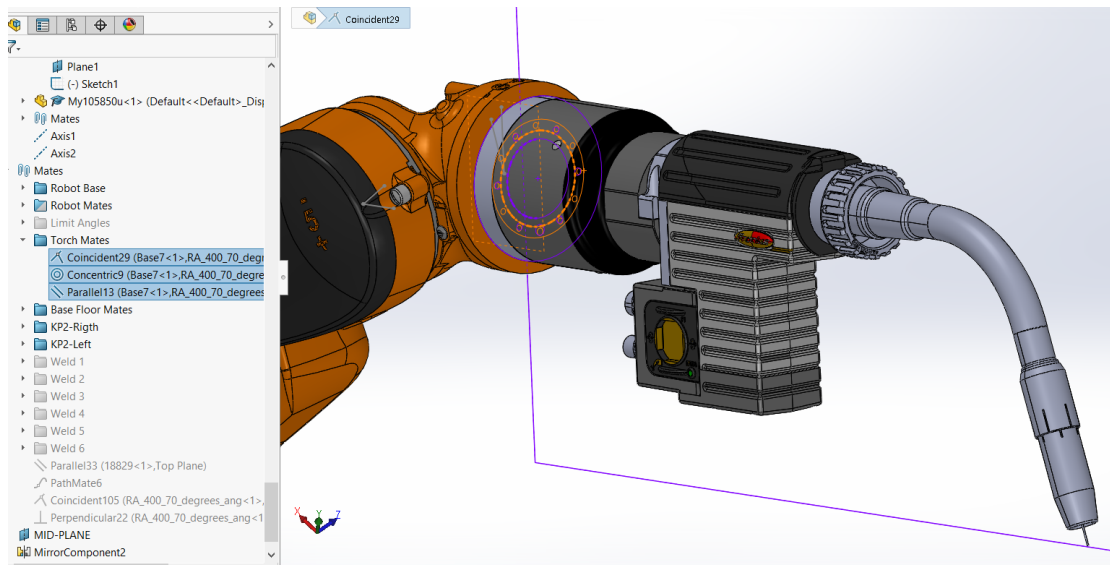
Οι αλλαγές αυτές έγιναν καθώς κατά την διαδικασία της κινηματικής προσομοίωσης που παρουσιάζεται σε επόμενο κεφάλαιο παρατηρήθηκαν προσκρούσεις του βραχίονα στην κατά την διαδικασία της κινηματικής με τη χρήση των συμβατικών μηχανισμών συγκόλλησης.

Στη συνέχεια οι δύο μηχανισμοί συναρμολογήθηκαν με χρήση της Coincident mate. Με το πέρας της συναρμολόγησης το αρχείο solidworks assembly αποθηκεύτηκε ως ένα ενιαίο solidpart cad αρχείο καθώς κατά την κινηματική προσομοίωση στο solidworks πρέπει να γίνεται χρήση όσο το δυνατόν λιγότερων mates ώστε να απλοποιείται ο αλγόριθμος επίλυσης του software.

Με το πέρας της συναρμολόγησης ο μηχανισμός συγκόλλησης τοποθετήθηκε στην κατάλληλα σχεδιασμένη βάση συγκράτησης του επενεργητή του βραχίονα.

Για την τοποθέτηση, όπως διακρίνεται στην παραπάνω εικόνα, χρησιμοποιήθηκαν μια coincident mate για την επαπτομενική συσχέτιση των δυο επιφανειών συγκράτησης , μια coincentric ώστε η βάση στήριξης του τροφοδοτικού να αποκτήσει ομοκεντρική σχέση με την απολληκτήρια περιστροφική άρθρωση του βραχίονα.

Επίσης, χρησιμοποιήθηκε και μια parallel mate ώστε τα δύο κατάλληλα πλαίσια αναφοράς του μηχανισμού συγκόλλησης και της περιστροφικής άρθρωσης του βραχίονα να ταυτίζονται. Έτσι επιτεύχθηκε η παράλληλη περιστροφή των δύο μηχανισμών.



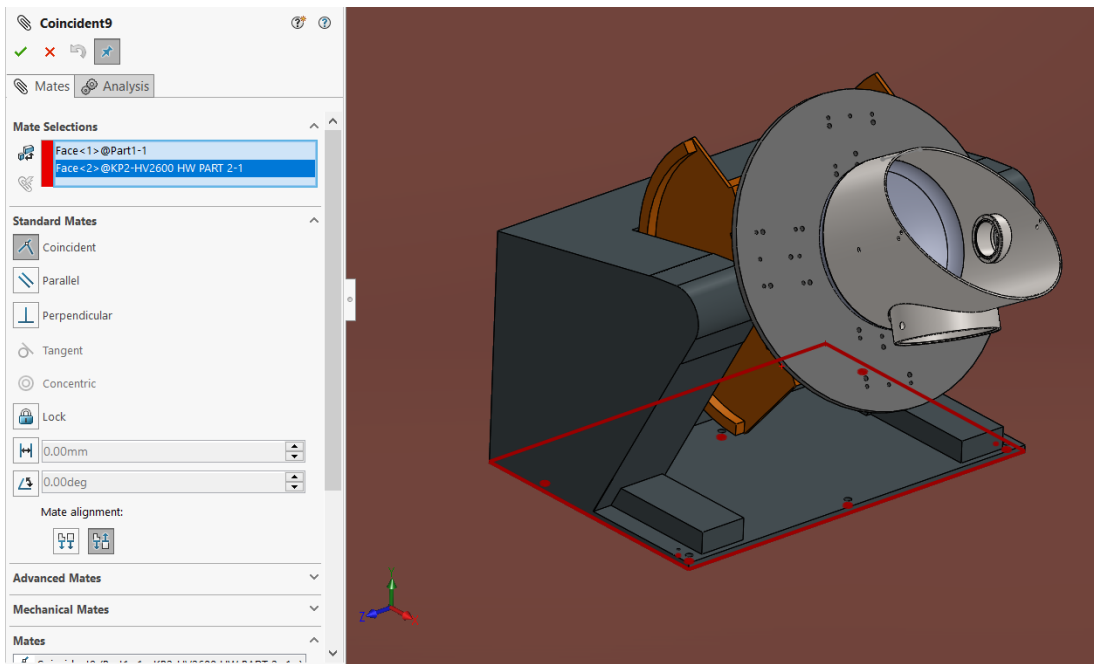
Σχήμα 6-17. Coincident mate τοποθέτησης Robacta Drive CMT

## 6.7 Σχεδιασμός του κελιού συγκόλλησης.

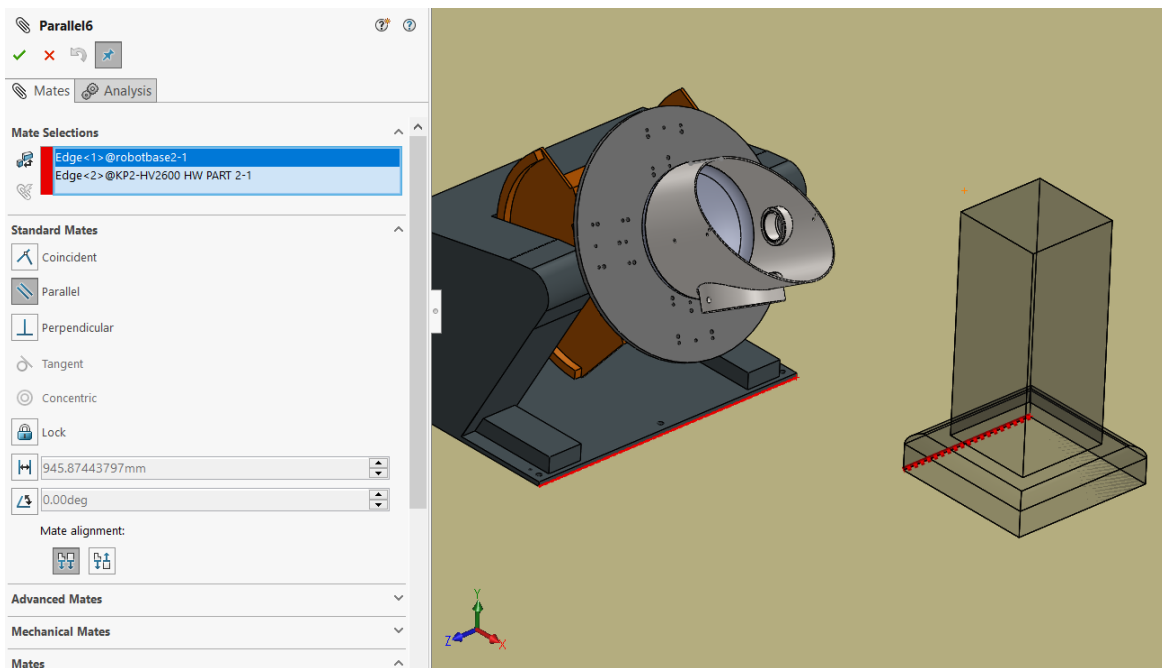
Αρχικά σχεδιάστηκε το δάπεδο του κελιού ώστε να τοποθετηθούν το προαναφερόμενα μέλη. Ο πρώτος μηχανισμός που τοποθετήθηκε στο δάπεδο ήταν το assembly αρχείο του μηχανισμού συγκράτησης.

Με την coincident mate εφαρμόστηκε επαπτομενική σχέση ανάμεσα στην επιφάνεια της βάσης του μηχανισμού και στην επιφάνεια του δαπέδου.

Για την τοποθέτηση του βραχίονα σχεδιάστηκε μία βάση στήριξης. Η βάση τοποθετήθηκε με τον ίδιο τρόπο στην επιφάνεια του δαπέδου. Ενώ με την parallel mate τοποθετήθηκε παράλληλα ως προς τον μηχανισμό συγκράτησης.



**Σχήμα 6-18.** Coincident mate τοποθέτησης μηχανισμού συγκράτησης

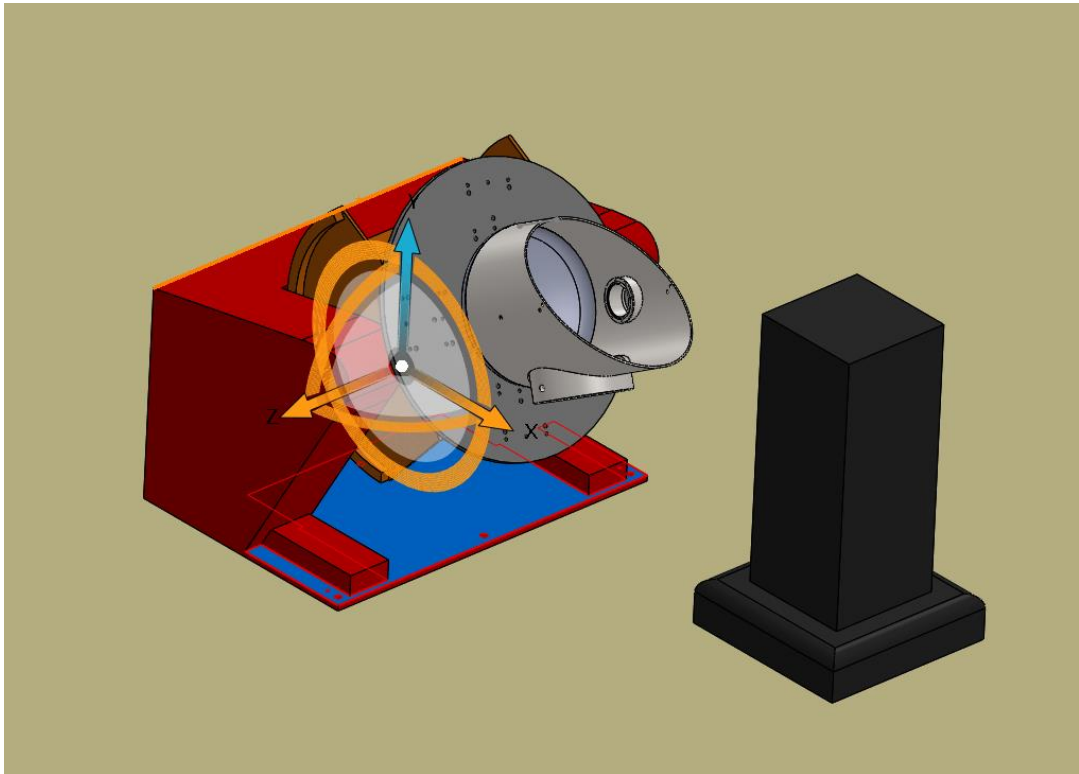


**Σχήμα 6-19.** Τοποθέτηση βάσης στήριξης του βραχίονα

Στη συνέχεια κάνοντας δεξί κλικ πάνω στην βάση στήριξης του ρομπότ και πατώντας την επιλογή “Fix” η βάση σταθεροποιήθηκε.

Θέτοντας τα παραπάνω mates και σταθεροποιώντας την βάση επιτεύχθηκε η κίνηση του μηχανισμού συγκράτησης επαπτομενικά στο δάπεδο του κελιού με σταθερό

προσανατολισμό. Η περιορισμός αυτό συνέβαλε σημαντικά ώστε στη συνέχεια της μελέτης η βάση να μετατοπίζεται συμμετρικά για τις ανάγκες των κινηματικών προσομοιώσεων.

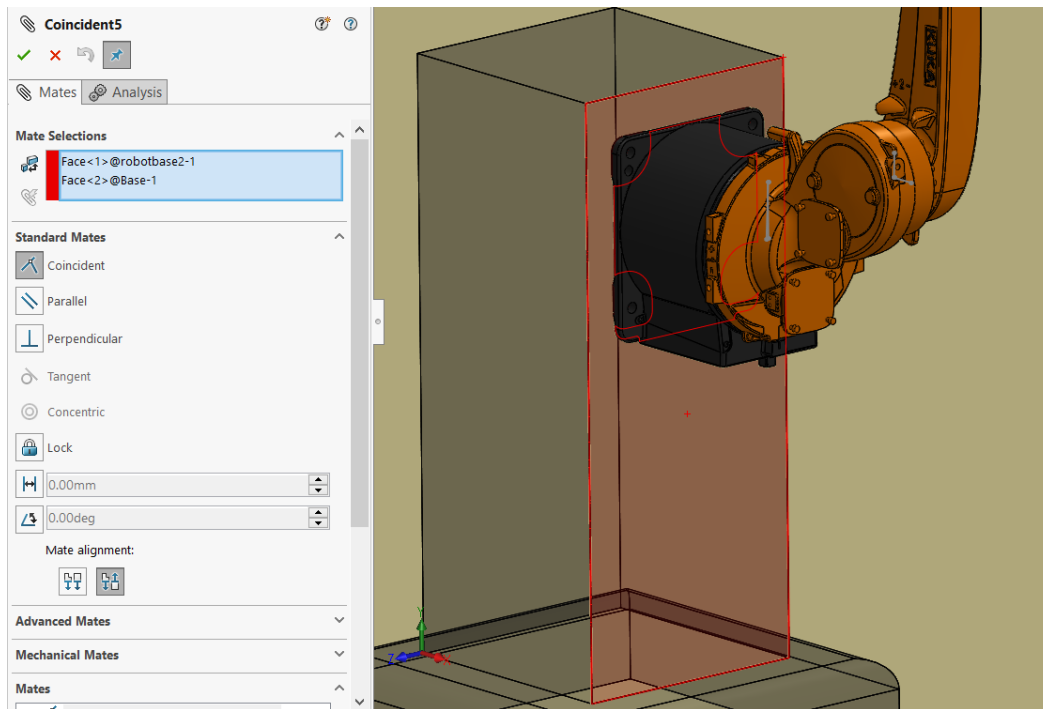


**Σχήμα 6-20.** Ελευθερία κίνησης του μηχανισμού συγκράτησης

Στη συνέχεια εισήχθη το assembly αρχείο του ρομποτικού βραχίονα. Στο σημείο αυτό προκύπτει το πρώτο πρόβλημα που είναι το σημείο και ο προσανατολισμός τοποθέτησης του ρομπότ στο κελί. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί είτε με αντιστροφή κινηματική και χρήση αλγόριθμων βελτιστοποίησης, είτε με δοκιμές πειραματισμού. Ένα από τα προτερήματα της χρήσης του Solidworks είναι ότι μας επιτρέπει κατόπιν κινηματικών δοκιμών να αλλάξουμε τις θέσεις και τον προσανατολισμό των μηχανισμών του κελιού μεταβάλλοντας τα mates που έχουν ήδη ορισθεί ή διαγράφοντας τα και δημιουργώντας νέα.

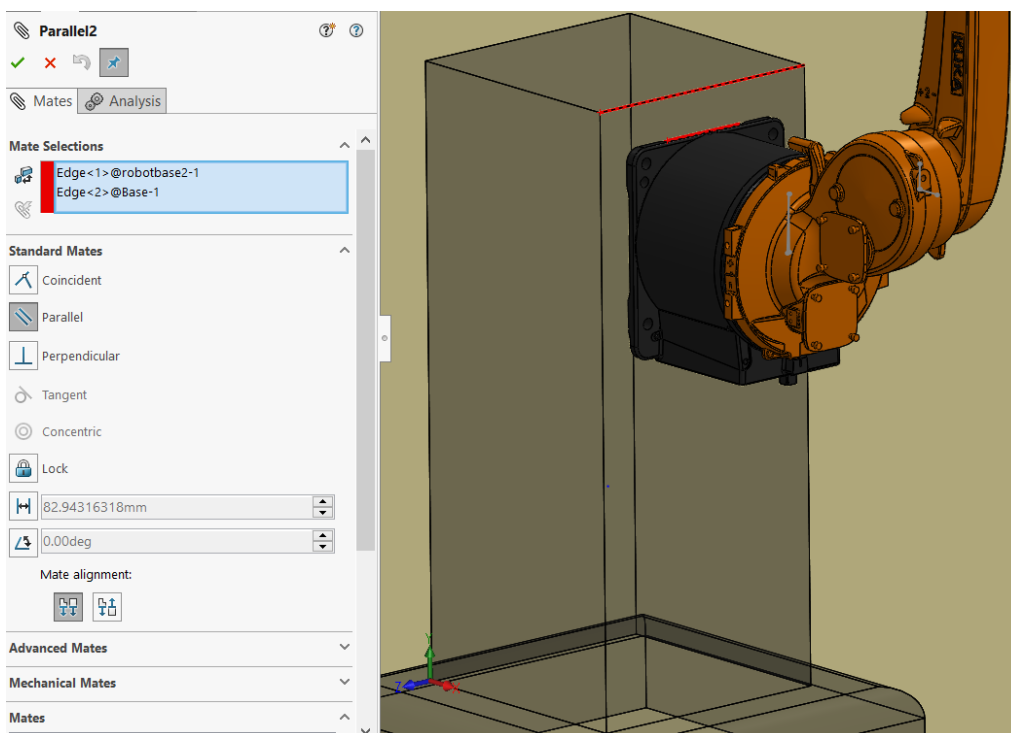
Για το αρχικά πειράματα ο βραχίονας τοποθετήθηκε στο κελί όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα 6-21.

Αρχικά με την Coincident mate ο η βάση του βραχίονα τοποθετήθηκε εφαπτομενικά στην βάση τοποθέτησης του ρομπότ.



**Σχήμα 6-21.** Coincident mate τοποθέτησης του βραχίονα στην βάση στήριξης

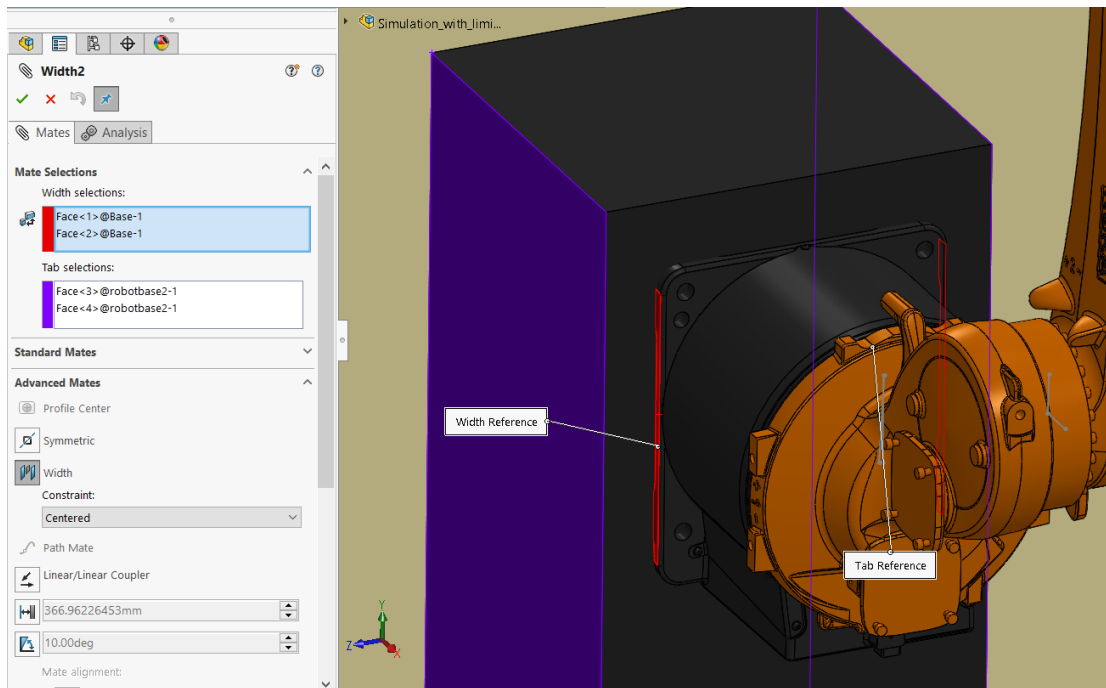
Στην συνέχεια με την parallel mate ορίστηκε ο προσανατολισμός της βάσης του βραχίονα.



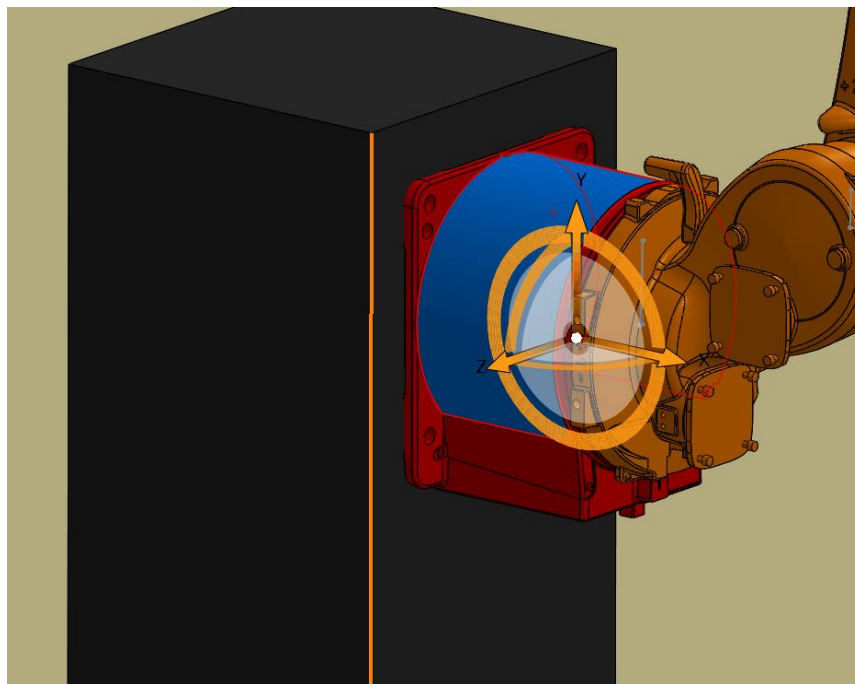
**Σχήμα 6-22.** Parallel τοποθέτησης του βραχίονα στην βάση στήριξης

Τέλος, χρησιμοποιήθηκε και η Width mate ώστε ο βραχίονας να τοποθετηθεί συμμετρικά στην βάση. Στο πεδίο Width Selections ορίστηκαν οι δυο παράλληλες

πλευρές της βάσης τοποθέτησης του ρομπότ ενώ στο tab Selections ορίστηκαν οι δυο παράλληλες πλευρές της βάσης του ρομποτικού βραχίονα. Εφαρμόζοντας την mate με επιλογή centered οι τέσσερις αυτές πλευρές τοποθετούνται συμμετρικά ώστε οι εσωτερικές πλευρές να ισαπέχουν από τις εξωτερικές .



**Σχήμα 6-23.** Width mate τοποθέτησης του βραχίονα στην βάση στήριξης.



**Σχήμα 6-24.** Ελευθερία κίνησης του βραχίονα στην βάση του.

Ορίζοντας τα παραπάνω mates επιτεύχθηκε ο περιορισμός της κίνησης του βραχίονα στην βάση στήριξης μόνο κατά τον άξονα συντεταγμένων του Y όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Αυτό λειτούργησε καθοριστικά στην κινηματική προσομοίωση ώστε να δοκιμαστούν αρκετά σημεία τοποθέτησης του ρομπότ.

Στο σημείο αυτό της μελέτης το κελί συγκόλλησης πήρε την αρχική μορφή του επιτρέποντας μας να συνεχίσουμε στην υλοποίηση της προσομοίωσης. Αξίζει να αναφερθεί ότι ένα κελί συγκόλλησης απαρτίζεται και από άλλα μέρη όπως προστατευτικά πλαίσια την μονάδα ελέγχου και τον εξοπλισμό συγκόλλησης και άλλα. Η παρούσα εργασία εστιάζεται στην κινηματική μελέτη της συγκόλλησης. Για τον λόγο αυτό κρίθηκε ότι δεν ήταν απαραίτητος ο σχεδιασμός και η τοποθέτηση στο κελί των ανωτέρω επιμέρους μερών καθώς δεν επηρεάζουν κινηματικά την προσομοίωση και θα επιβάρυναν το λογισμικό.



## 7 Προσομοίωση ρομποτικής συγκόλλησης

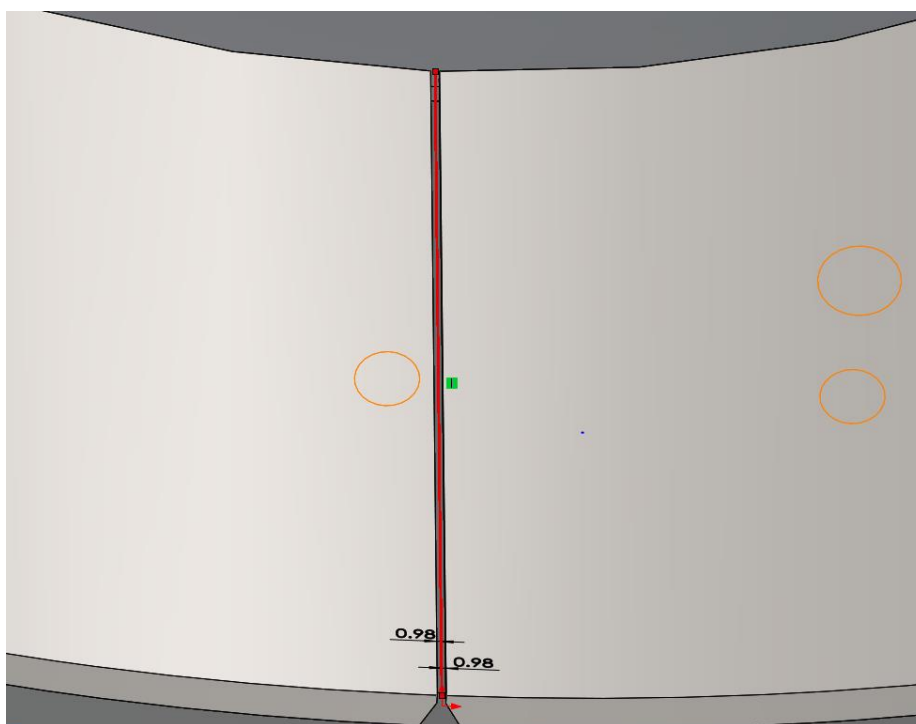
### 7.1 Εισαγωγή

Για την υλοποίηση της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο «Solidworks Motion» , το οποίο συμπεριλαμβάνεται στην έκδοση Solidworks Premium .

### 7.2 Προσομοίωση 1<sup>ης</sup> Συγκόλλησης

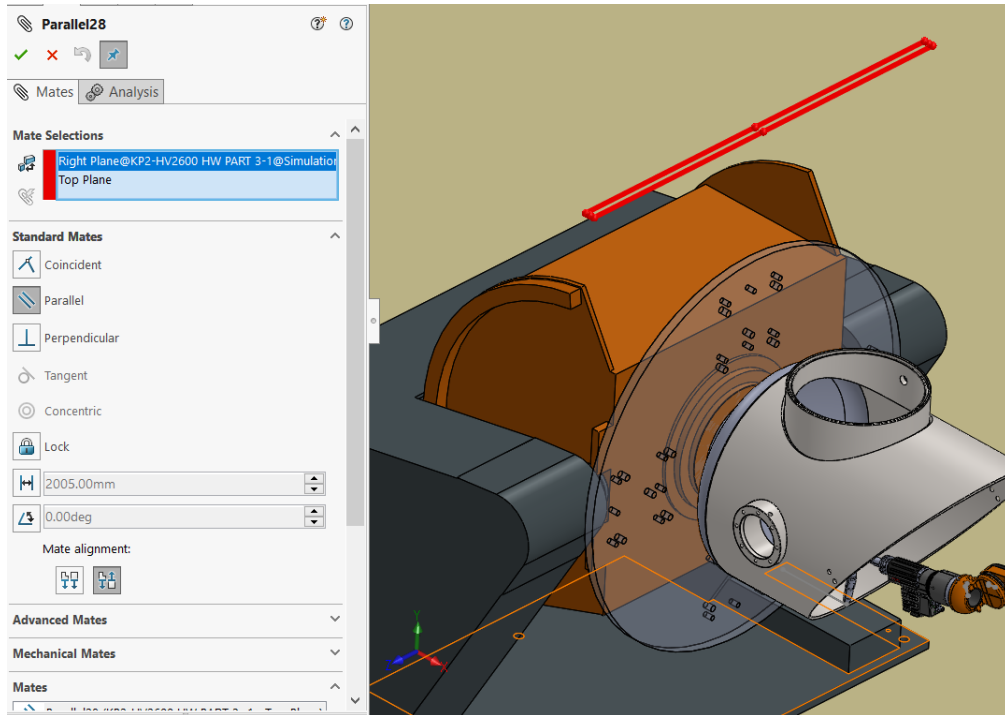
Όπως προαναφέρθηκε για την υλοποίηση της προσομοίωσης της τροχιάς της τσιμπίδας συγκόλλησης με τον επιθυμητό προσανατολισμό θα πρέπει πρώτα να οριστούν τα mates και στη συνέχεια η τροχιά της συγκόλλησης.

Αρχικά σχεδιάστηκε πάνω στο κομμάτι η τροχιά της συγκόλλησης. Η τροχιά σχεδιάστηκε πάνω στο κομμάτι με την εντολή Sketch .



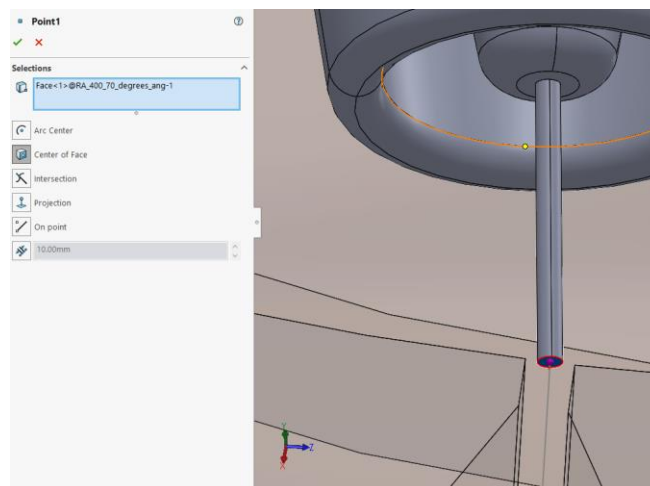
Σχήμα 7-1. Τροχιά 1<sup>ης</sup> συγκόλλησης

Αρχικά ορίστηκαν τα mates ώστε ο μηχανισμός συγκράτησης να τοποθετήσει την μεταλλική κατασκευή στην επιθυμητή θέση. Χρησιμοποιώντας την parallel mate ορίστηκε σχέση έτσι ώστε το επίπεδο αναφοράς της μεταλλικής κατασκευής να είναι παράλληλο με το έδαφος . Με τον ορισμό του mate το κομμάτι τοποθετήθηκε στον χώρο εργασίας έτσι ώστε η τροχιά συγκόλλησης να είναι παράλληλη προς το έδαφος.



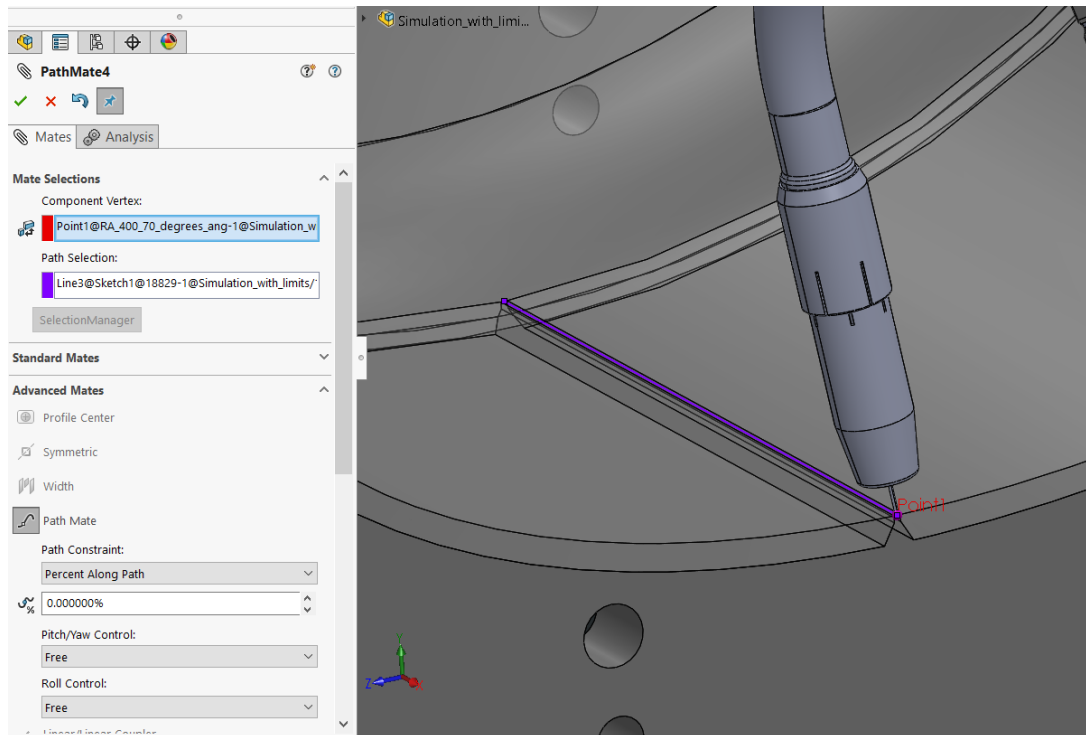
**Σχήμα 7-2.** Parallel mate 1<sup>ης</sup> συγκόλλησης

Επόμενο στάδιο, ήταν να οριστούν τα mates ώστε το άκρο της τσιμπίδας συγκόλλησης να κινείται πάνω στη τροχιά συγκόλλησης. Ο ορισμός αυτής της σχέσης επιτυγχάνεται με την Path mate. Κατά την χρήση αυτής επιβάλλεται να οριστεί ένα σημείο και η τροχιά πάνω στην οποία θα επιτρέπεται να κινηθεί κατά την ενεργοποίηση της. Ως τροχιά «path selection» ορίστηκε η τροχιά συγκόλλησης ενώ ως σημείο ορίστηκε το κέντρο της άκρης της τσιμπίδας συγκόλλησης. Το σημείο αναφοράς της τσιμπίδας ορίστηκε όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα με την χρήση της Reference Point.



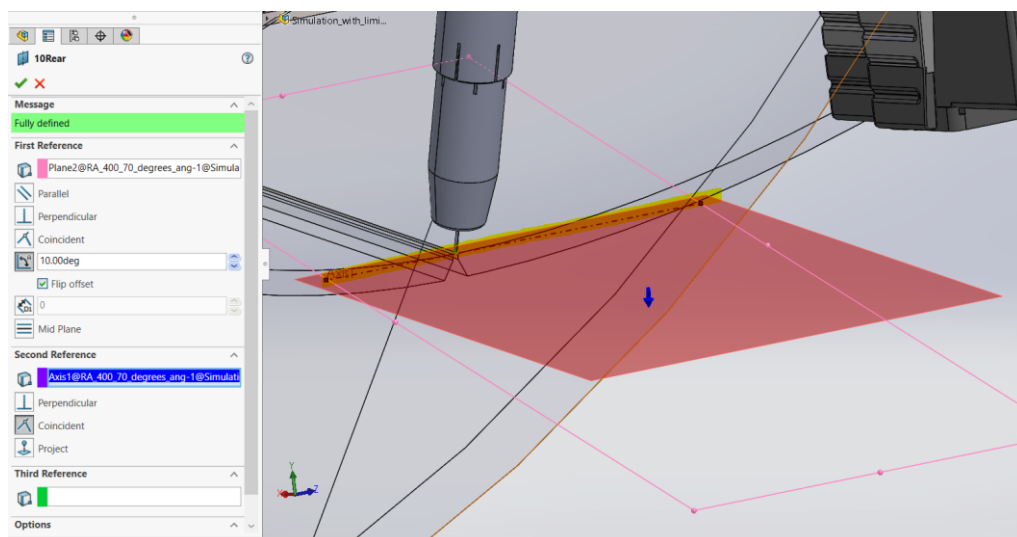
**Σχήμα 7-3.** Σημείο δράσης του βραχίονα

Έπειτα στην επιλογή Path constraint ορίστηκε η επιλογή percent along path με τιμή 0% έτσι ώστε όποτε ενεργοποιείται η path mate η άκρη της τσιμπίδας να τοποθετείται στην αρχή της τροχιάς συγκόλλησης.



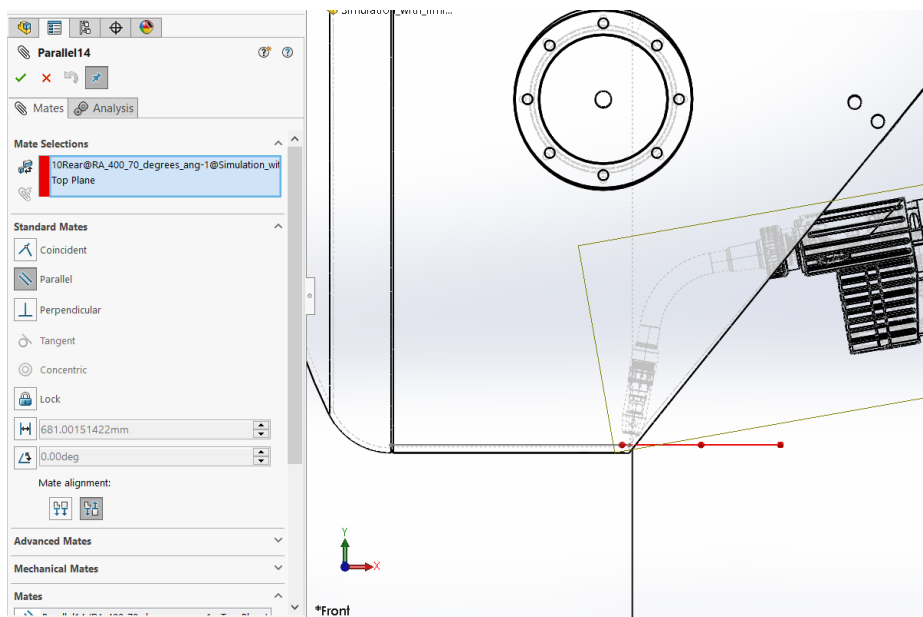
Σχήμα 7-4. Path mate 1<sup>ης</sup> συγκόλλησης

Στη συνέχεια με τη χρήση της Reference plane ορίστηκε νέο πλαίσιο αναφοράς της τσιμπίδας συγκόλλησης. Το πλαίσιο αυτό ορίστηκε όπως φαίνεται στην εικόνα (7-5) ώστε να σχηματίζει γωνία 10ο με τη επιφάνεια του άκρου της τσιμπίδας .



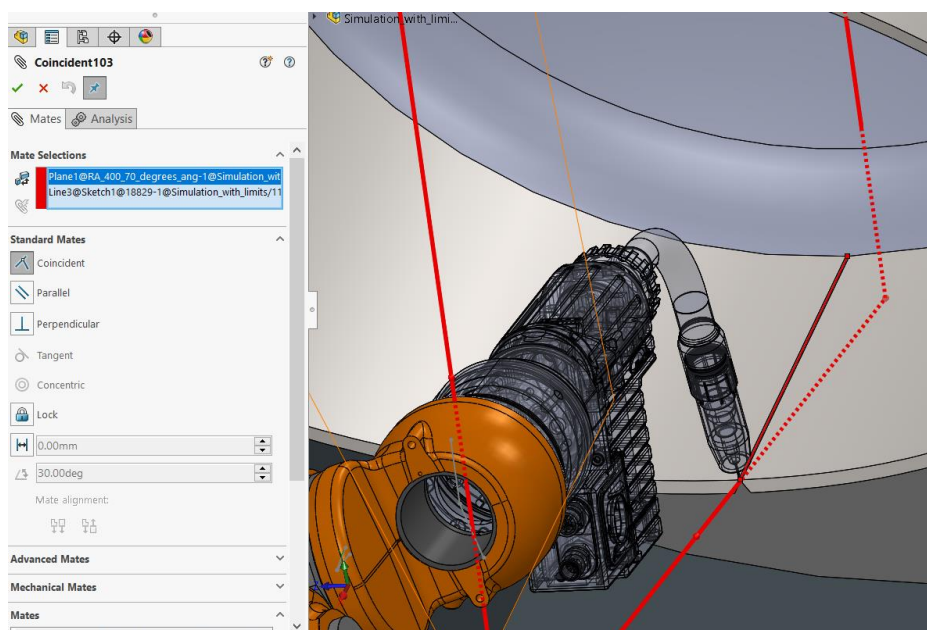
Σχήμα 7-5. Reference Plane 10° 1<sup>ης</sup> συγκόλλησης

Συσχετίζοντας λοιπόν το προηγούμενο πλαίσιο αναφοράς με το επίπεδο του δαπέδου του κελιού συγκόλλησης επιτεύχθηκε η τοποθέτηση της τσιμπίδας ως προς την τροχιά συγκόλλησης με γωνία 10°.



Σχήμα 7-6. 2<sup>nd</sup> Parallel mate 1<sup>ης</sup> συγκόλλησης

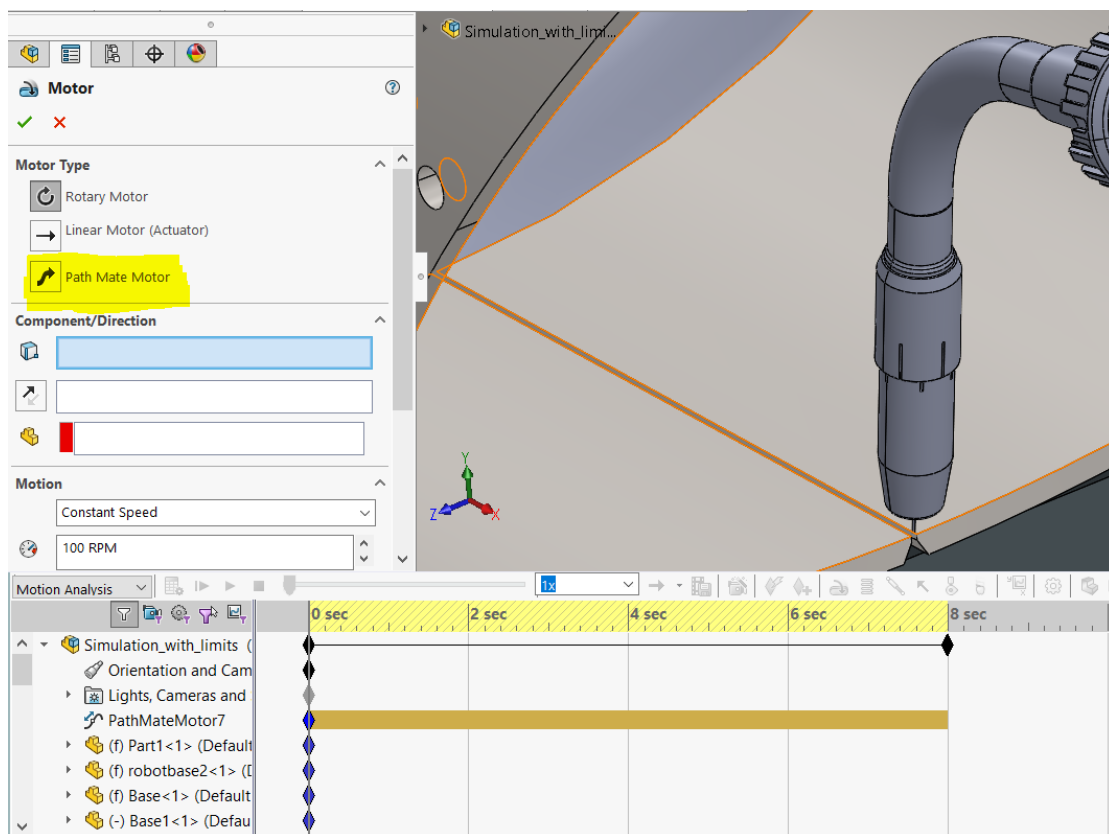
Με την Coincident Mate επιβλήθηκε στο πλαίσιο αναφοράς της τσιμπίδας που διακρίνεται στην εικόνα να συμπίπτει με την τροχιά συγκόλλησης. Αρχικό πλάνο ήταν το πλαίσιο αναφοράς της τσιμπίδας να είναι κάθετο στο δάπεδο του κελιού αλλά, ενώ το συγκεκριμένο mate έσπεκε γεωμετρικά, εμφάνιζε σφάλματα κατά τον ορισμό του.



Σχήμα 7-7. Coincident mate 1<sup>ης</sup> συγκόλλησης

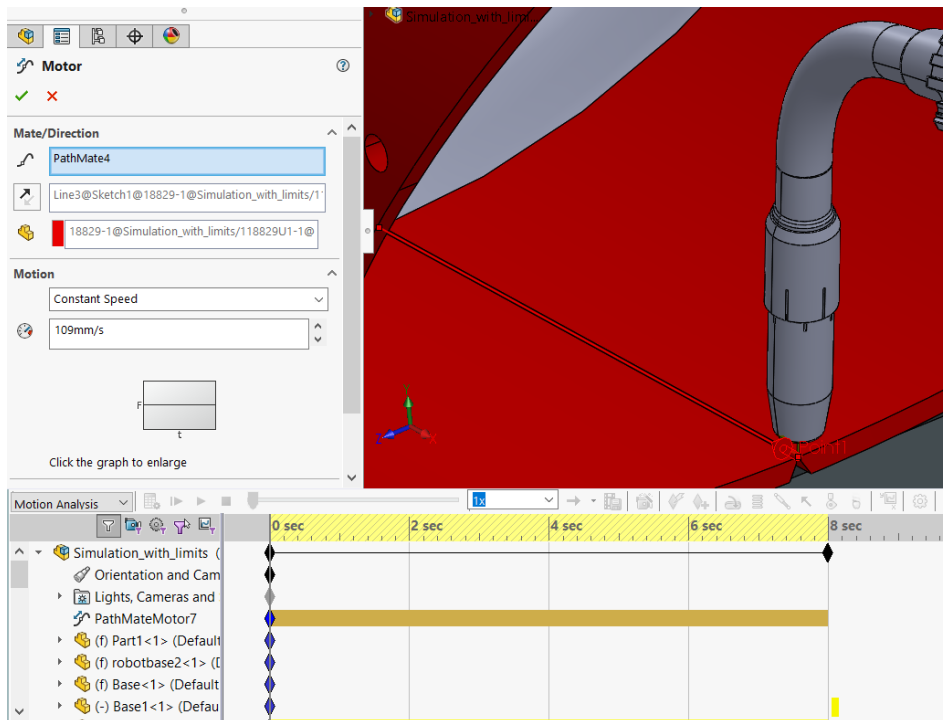
Με τον ορισμό του παραπάνω mate λοιπόν επιβλήθηκαν οι κατάλληλοι περιορισμοί στην τσιμπίδα ώστε η να κινείται πάνω στην τροχιά συγκόλλησης με τον επιθυμητό προσανατολισμό.

Επιλέγοντας την New motion study δημιουργήθηκε η πρώτη προσομοίωση της μελέτης. Σε κάθε motion study ορίζονται τα mates τα οποία θα είναι ενεργά κατά την προσομοίωση ενώ η κίνηση στους μηχανισμούς ορίζεται με την χρήση της Motor. Εφόσον τα επιθυμητά mates ήταν ενεργά κατά την επιλογή New motion study ορίζονται ενεργά και στην προσομοίωση.



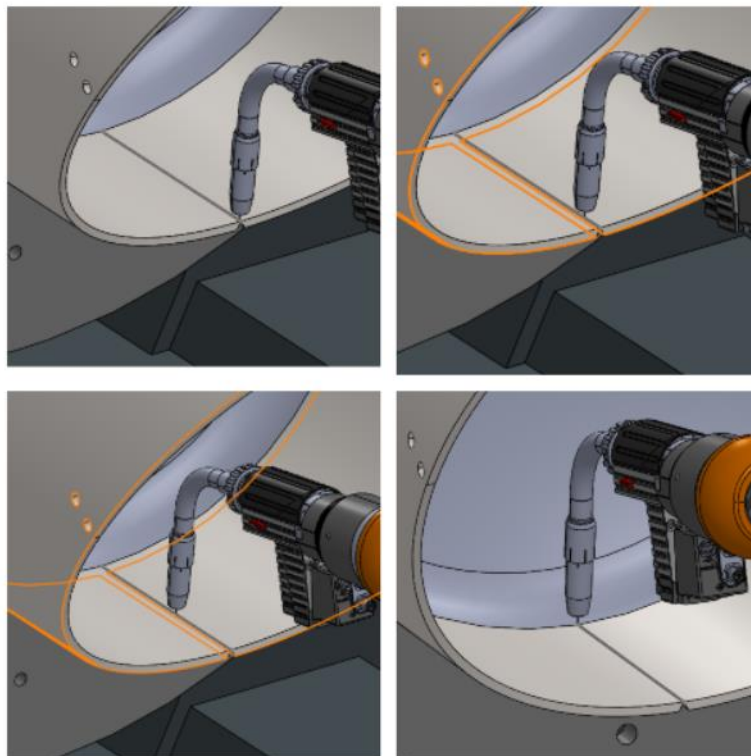
**Σχήμα 7-8.** Path mate motor 1<sup>ης</sup> συγκόλλησης

Επόμενο στάδιο λοιπόν ήταν η εφαρμογή κίνησης στην τσιμπίδα με την χρήση της Motor . Όπως διακρίνεται στην εικόνα 7-8 για τον ορισμό του path mate Motor αρχικά επιλέχθηκε η path mate της συγκόλλησης ενώ στην επόμενη επιλογή επιλέχθηκε η κατεύθυνση κίνησης της τσιμπίδας. Τέλος επιλέχθηκε σταθερά ταχύτητα 109 mm/s σύμφωνα με τις παραμέτρους της συγκόλλησης.



**Σχήμα 7-9.** Ταχύτητα 1<sup>ης</sup> συγκόλλησης

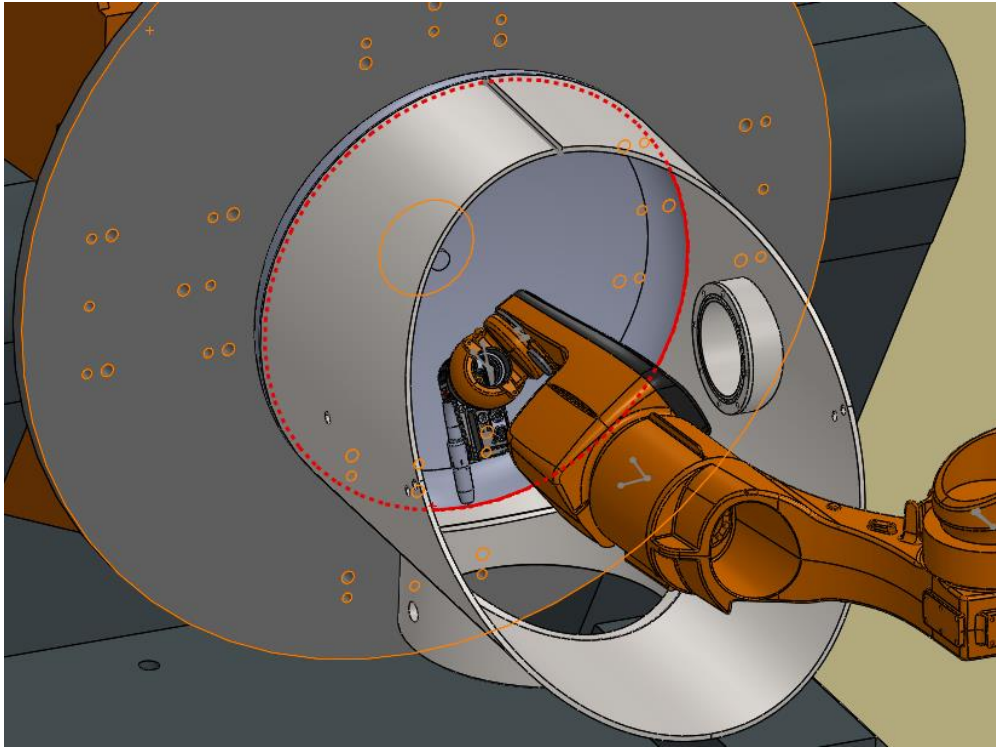
Έχοντας ορίσει τα mates και την κίνηση της σιμπίδας, πατώντας calculation καλούμε το software να εκτελέσει τους υπολογισμούς της κινηματικής προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης διακρίνονται στην παρακάτω εικόνα.



**Σχήμα 7-10.** Προσομοίωση 1<sup>ης</sup> συγκόλλησης

### 7.3 Προσομοίωση 2<sup>ης</sup> Συγκόλλησης

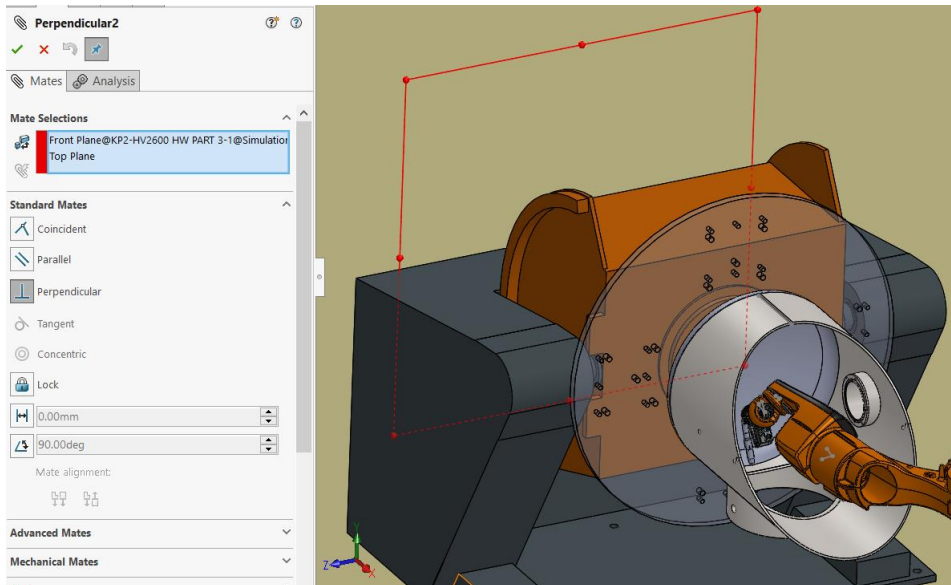
Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο «Παράμετροι συγκόλλησης» η κατεργασία που ακολουθεί είναι δημιουργία της εσωτερικής ραφής που ενώνει το καπάκι με τον κύριο κύλινδρο όπως διακρίνεται στην εικόνα 7-11.



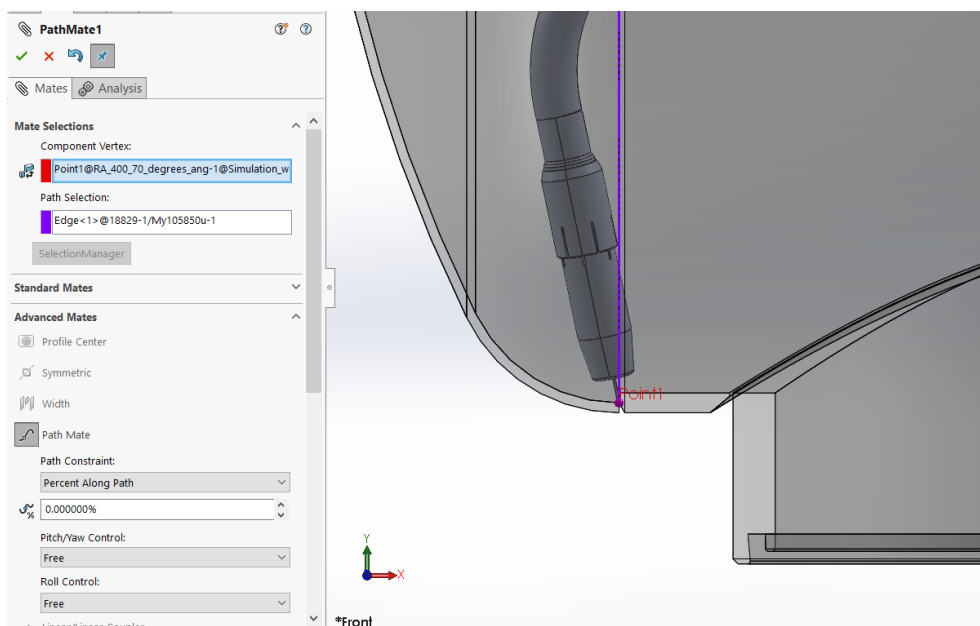
**Σχήμα 7-11.** Τροχιά 2<sup>ης</sup> συγκόλλησης

Αρχικά ορίστηκαν τα mates ώστε ο μηχανισμός συγκράτησης να τοποθετήσει την μεταλλική κατασκευή στην επιθυμητή θέση. Χρησιμοποιώντας την perpendicular mate ορίστηκε σχέση έτσι ώστε το επίπεδο αναφοράς της μεταλλικής κατασκευής που διακρίνεται στην εικόνα να είναι κάθετο προς το έδαφος. Με τον ορισμό του mate το κομμάτι τοποθετήθηκε στον χώρο εργασίας έτσι ώστε η κίνηση του μηχανισμού συγκράτησης να περιοριστεί σε έναν βαθμό ελευθερίας επιτρέποντας μόνο την περιστροφή της κατεργαζόμενης μεταλλικής κατασκευής.

Στη συνέχεια όπως και στην προηγούμενη προσομοίωση ορίστηκε η τροχιά της συγκόλλησης με την χρήση της path mate. Ως τροχιά «path selection» ορίστηκε η κυκλική τροχιά που ορίζεται από την εσωτερική ακμή του καπακιού όπως διακρίνεται με μπλε χρώμα στην εικόνα 7-13, ως σημείο δράσης ορίστηκε το κέντρο της άκρης της τσιμπίδας συγκόλλησης. Έπειτα στην επιλογή Path constraint ορίστηκε η επιλογή percent along path με τιμή 0% έτσι ώστε όποτε ενεργοποιείται η path mate η άκρη της τσιμπίδας να τοποθετείται στην αρχή της τροχιάς συγκόλλησης.



Σχήμα 7-12. Perpendicular mate 2<sup>ης</sup> συγκόλλησης

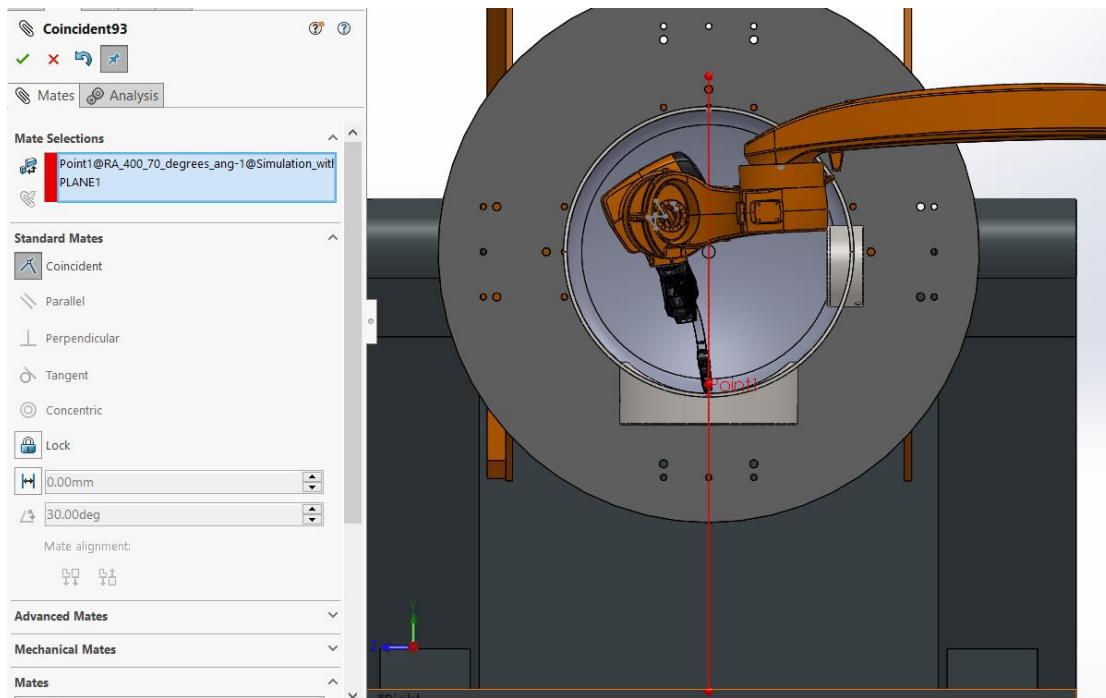


Σχήμα 7-13. Path mate 2<sup>ης</sup> συγκόλλησης

Στη συγκεκριμένη κατεργασία ήταν επιθυμητό και βέλτιστο η μεταλλική κατασκευή να περιστρέφεται από τον μηχανισμό συγκράτησης ενώ ο βραχίονας να παραμένει σε σχετικά σταθερή θέση κάνοντας μόνο μικρές κινήσεις ώστε το σημείο δράσης να ακολουθεί την τροχιά συγκόλλησης. Με την χρήση της Coincident mate ορίστηκε σχέση έτσι ώστε να συμπίπτουν το σημείο δράσης του βραχίονα με το πλαίσιο αναφοράς που διακρίνεται με κόκκινο χρώμα στην εικόνα 7-14 . Το πλαίσιο αναφοράς ορίστηκε έτσι ώστε να διχοτομεί σε δύο γεωμετρικά όμοια κομμάτια τον κύλινδρο στήριξης του μηχανισμού

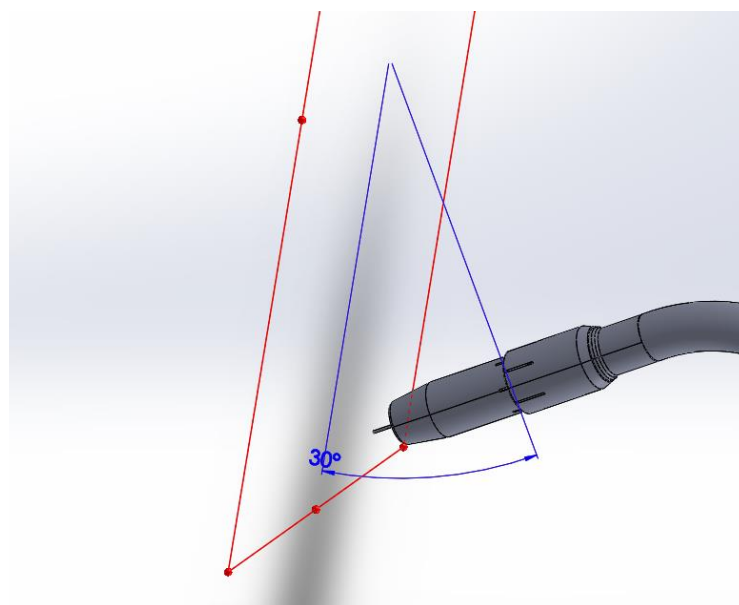


στήριξης και να είναι κάθετο προς το δάπεδο. Με το ορισμό αυτό περιορίστηκε η κίνηση του σημείου δράσης του βραχίονα στο δισδιάστατο πλαίσιο αναφοράς.

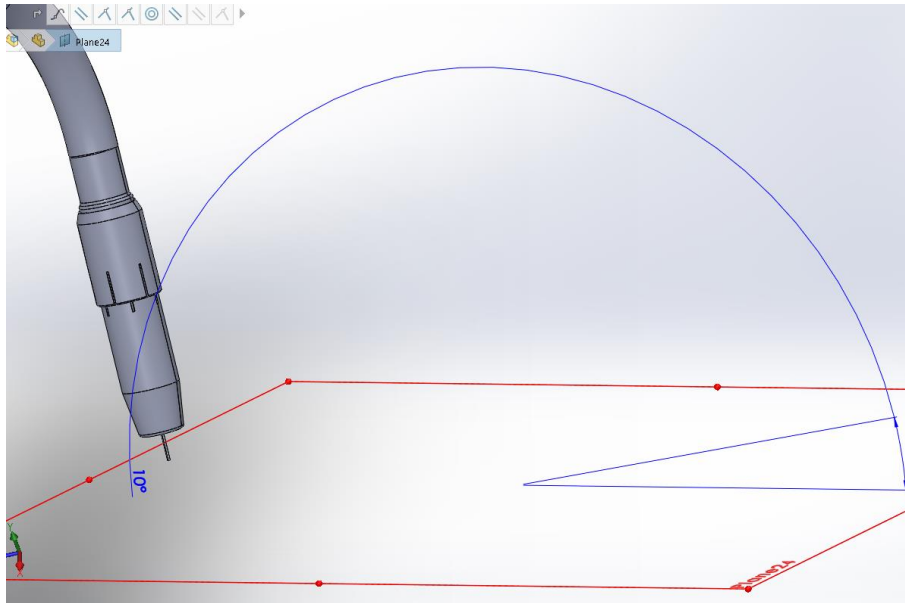


**Σχήμα 7-14.** Coincident mate 2<sup>ης</sup> συγκόλλησης

Στη συνέχεια ορίστηκε πλαίσιο αναφοράς της τσιμπίδας συγκόλλησης έτσι ώστε να σχηματίζει γωνία 30° με την ακίδα όπως διακρίνεται στην εικόνα 7-15 και γωνία 10° όπως διακρίνεται στην εικόνα 7-16.

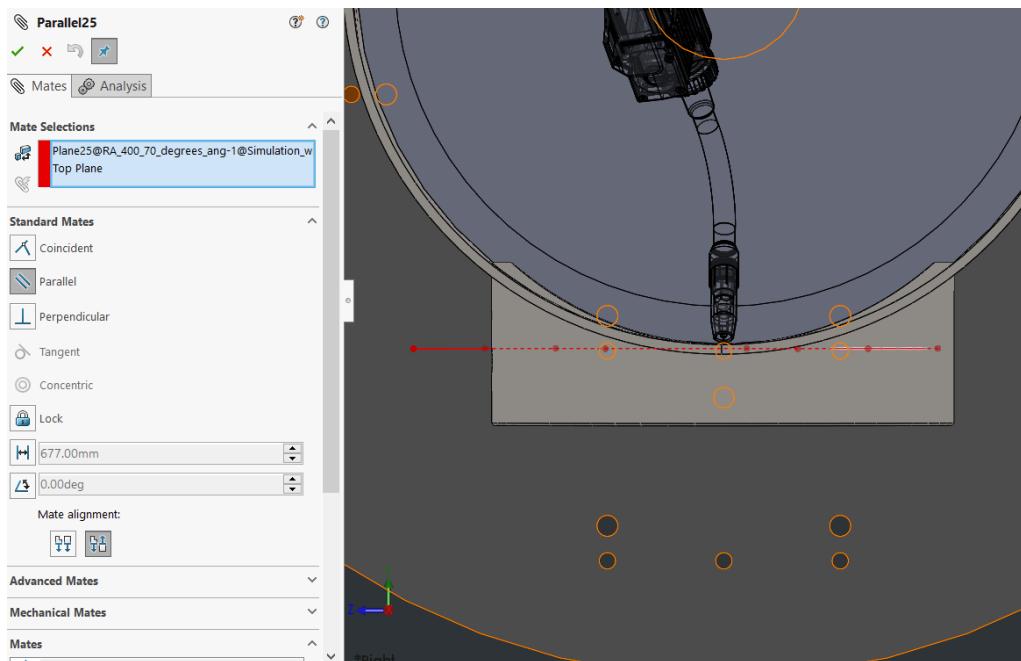


**Σχήμα 7-15.** Reference plane 30° 2<sup>ης</sup> συγκόλλησης



**Σχήμα 7-16.** Reference plane 10° 2<sup>ης</sup> συγκόλλησης

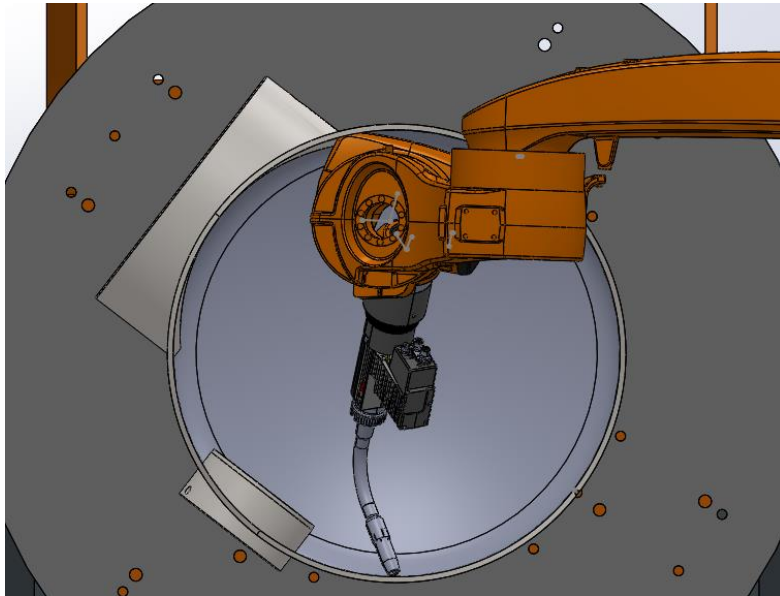
Ορίζοντας με την Parallel mate λοιπόν το παραπάνω πλαίσιο αναφοράς να είναι παράλληλο με το πλαίσιο αναφοράς του δαπέδου του κελιού συγκόλλησης επιτεύχθηκε οι απαιτούμενος προσανατολισμός της τσιμπίδας συγκόλλησης ως προς την τροχιά . Συγκεκριμένα γωνία 10° ως προς την κίνηση της τσιμπίδας στην τροχιά και 30° ως προς τη γωνία που σχηματίζουν οι υπό κατεργασία επιφάνειες.



**Σχήμα 7-17.** Parallel mate 2<sup>ης</sup> συγκόλλησης

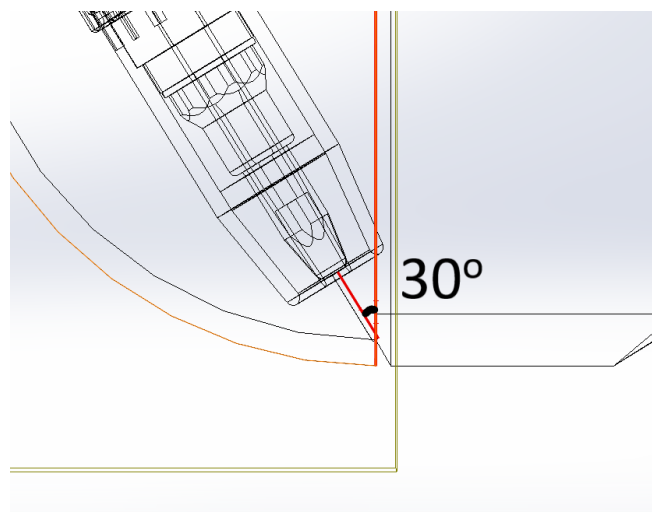
Το Solidworks επιτρέπει μέσω του κέρσορα την επιβολή κίνησης στους υπό μελέτη μηχανισμούς. Πριν την υλοποίηση της τελικής προσομοίωσης λοιπόν η υπό κατεργασία κατασκευή περιστράφηκε ώστε να παρατηρηθεί αν η κινηματική προσομοίωση βραχίονα πληροί τις απαιτούμενες προδιαγραφές.

Κατά την περιστροφή του κομματιού λοιπόν παρατηρήθηκε πρόσκρουση του ρομποτικού βραχίονα στο κομμάτι όπως διακρίνεται στην παρακάτω εικόνα.



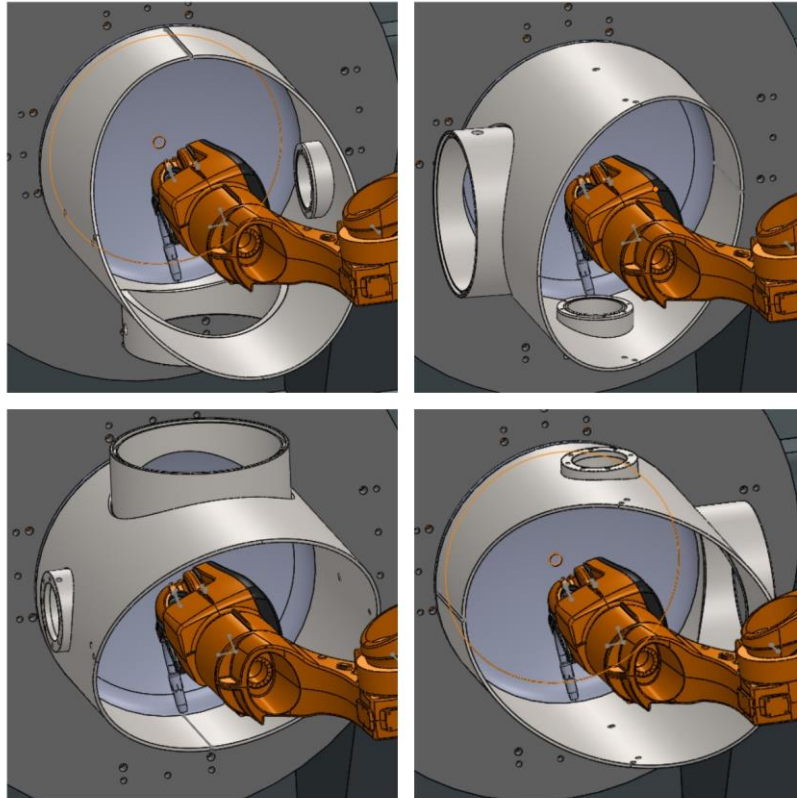
**Σχήμα 7-18.** Πρόοψη 2<sup>ης</sup> συγκόλλησης

Η λύση που επιλέχθηκε μετά από διαδοχικές δοκιμές για την επίλυση του παραπάνω ζητήματος ήταν η μείωση της γωνίας που σχηματίζει με τις υπό κατεργασία επιφάνειες η τσιμπίδα συγκόλλησης στις 10°.



**Σχήμα 7-19.** Προσανατολισμός τσιμπίδας με γωνία 30°.

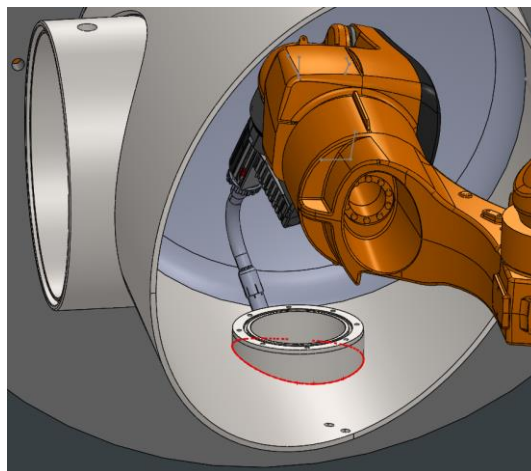
Για την τελική προσομοίωση της 2ης συγκόλλησης ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιεγράφηκε αναλυτικά στην 1η προσομοίωση. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης διακρίνονται στην παρακάτω εικόνα.



**Σχήμα 7-20.** Προσομοίωση 2<sup>ης</sup> συγκόλλησης

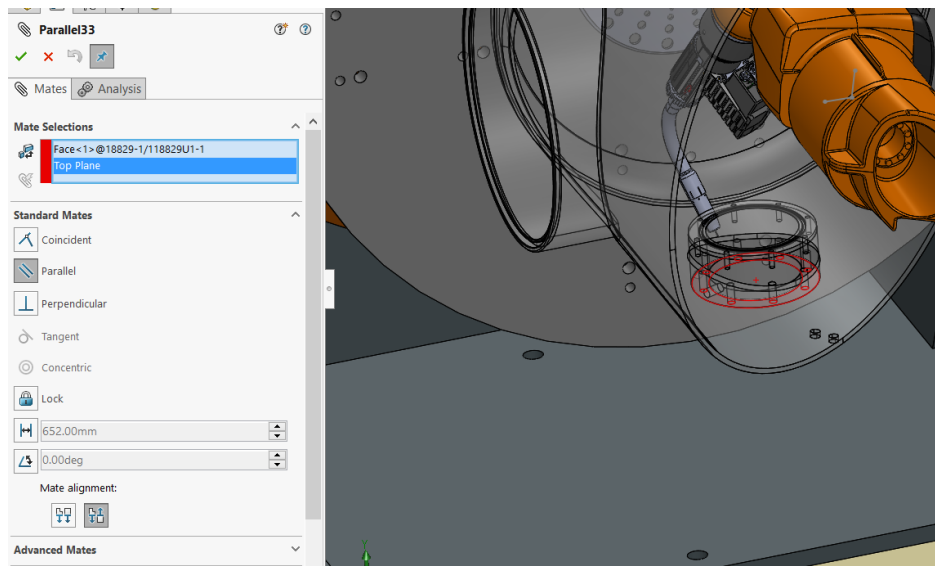
#### 7.4 Προσομοίωση 3<sup>ης</sup> Συγκόλλησης

Επόμενη κατά σειρά κατεργασία είναι η εσωτερική συγκόλληση του μικρότερου κυλίνδρου, η τροχιά της οποίας διακρίνεται με κόκκινο χρώμα στην παρακάτω εικόνα.



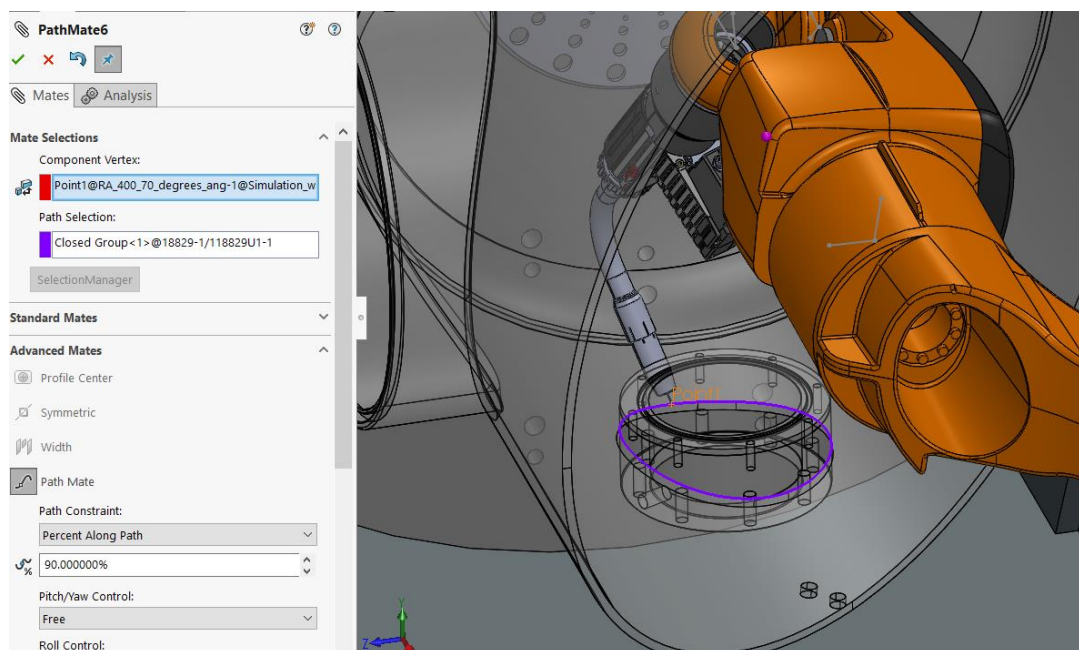
**Σχήμα 7-21.** Τροχιά 3<sup>ης</sup> συγκόλλησης

Πρώτο στάδιο υλοποίησης της προσομοίωσης είναι η τοποθέτηση του εξαρτήματος 11829U στον χώρο. Το κομμάτι τοποθετήθηκε έτσι ώστε ο άξονας συμμετρίας του μικρού κυλίνδρου να είναι κάθετος με το δάπεδο του κελιού. Αυτό επιτεύχθηκε ορίζοντας μία parallel mate μεταξύ μίας εκ των δύο επίπεδων επιφανειών του κυλίνδρου και του δαπέδου.



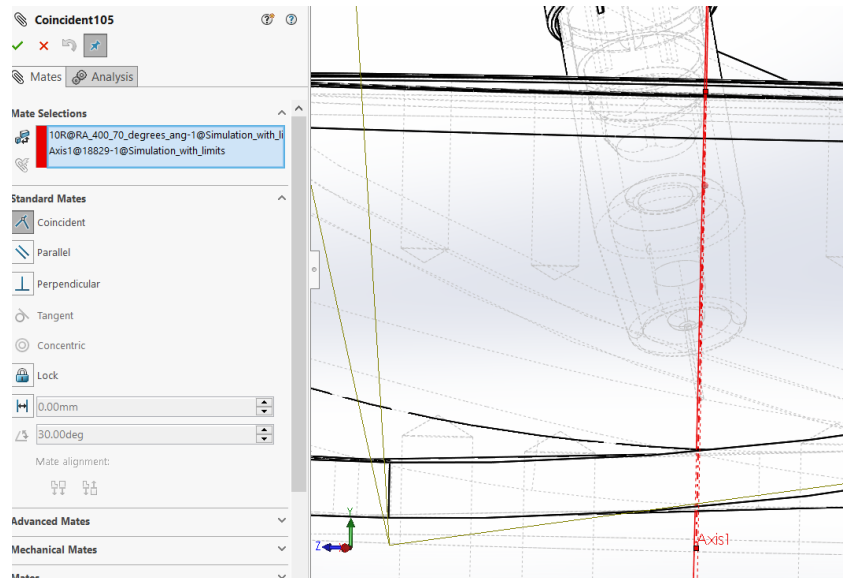
Σχήμα 7-22. Parallel mate τοποθέτησης 3<sup>ης</sup> συγκόλλησης

Στη συνέχεια ορίστηκε με την Path mate η τροχιά της συγκόλλησης όπως και στην προηγούμενες κατεργασίες. Η τροχιά διακρίνεται με μωβ χρώμα στην παρακάτω εικόνα.



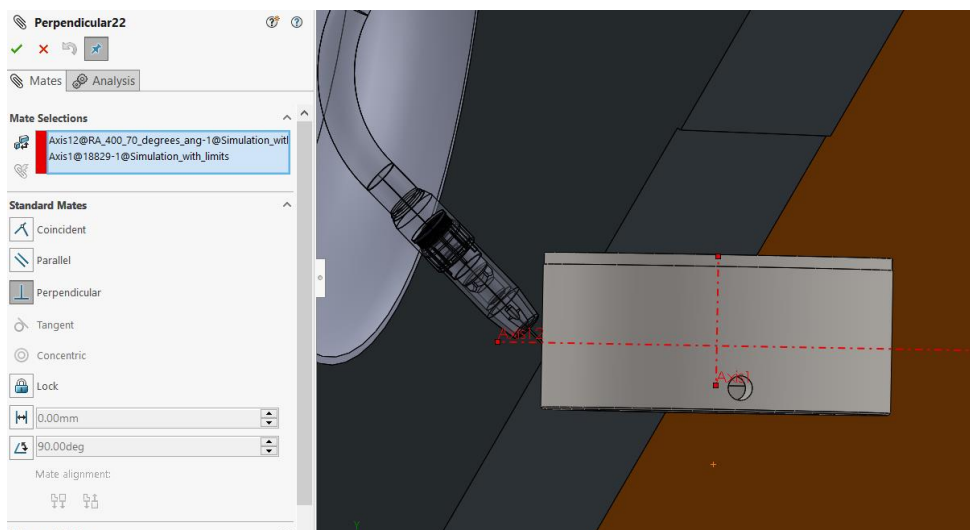
Σχήμα 7-23. Path mate 3<sup>ης</sup> συγκόλλησης

Στην συνέχεια με την Coincident Mate ορίστηκε σχέση μεταξύ της τσιμπίδας και του κυλίνδρου ώστε να συμπίπτουν ο άξονας συμμετρίας του κυλίνδρου με κατάλληλα ορισμένο πλαίσιο αναφοράς . Το πλαίσιο αναφοράς ορίστηκε έτσι ώστε όταν υλοποιηθεί η παραπάνω σχέση η τσιμπίδα να στραφεί σχηματίζοντας γωνία  $10^\circ$  με το εφαπτωμενικό διάνυσμα που ορίζεται από τη ραφή της συγκόλλησης με το σημείο επαφής.



Σχήμα 7-24. Coincident mate 3<sup>ης</sup> συγκόλλησης

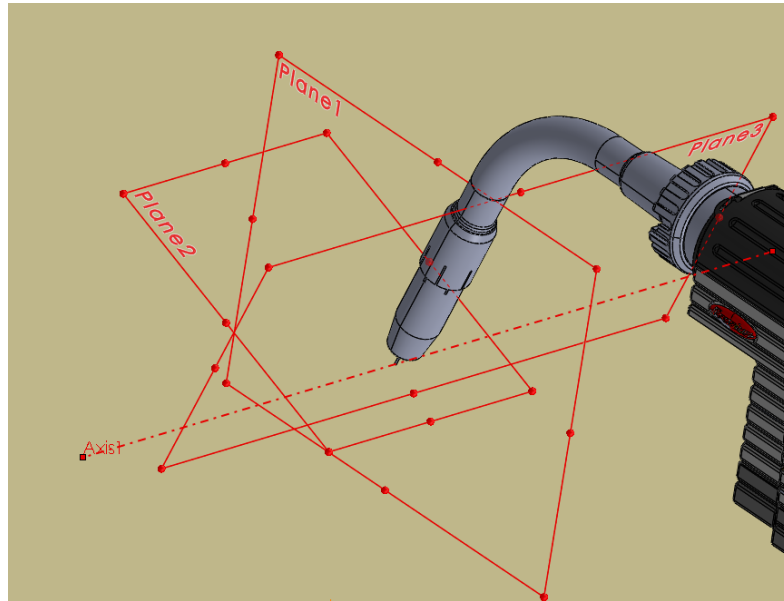
Στη συνέχεια με τη χρήση της Perpendicular Mate ορίστηκε ώστε ο κατάλληλα ορισμένος άξονας (Axis 12) που διακρίνεται στην παρακάτω εικόνα να είναι κάθετος με τον άξονα συμμετρίας του κυλίνδρου. Με αυτόν τον περιορισμό επιτεύχθηκε η τοποθέτηση της τσιμπίδας με γωνία  $45^\circ$  σε σχέση με την επιφάνεια του κυλίνδρου.



Σχήμα 7-25. Coincident mate 3<sup>ης</sup> συγκόλλησης

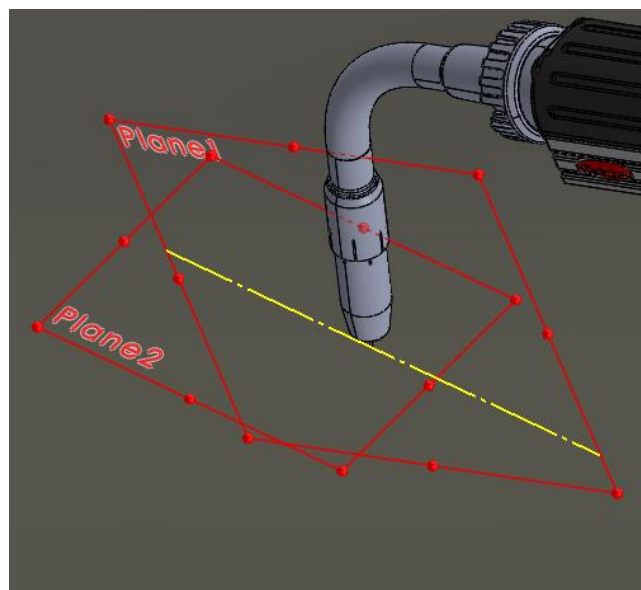
Ο ορισμός του προσανατολισμού του βραχίονα για την επίτευξη των προσομοιώσεων επιτεύχθηκε ορίζοντας σχέσεις μεταξύ κατάλληλα ορισμένων πλαισίων αναφοράς των μηχανισμών. Είναι λοιπόν αναγκαίο να αναλυθεί λεπτομερώς ορισμός των πλαισίων αναφοράς που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Πρώτο στάδιο είναι ο ορισμός των βασικών Reference Plane ώστε πάνω στα οποία θα οριστούν και τα υπόλοιπα.



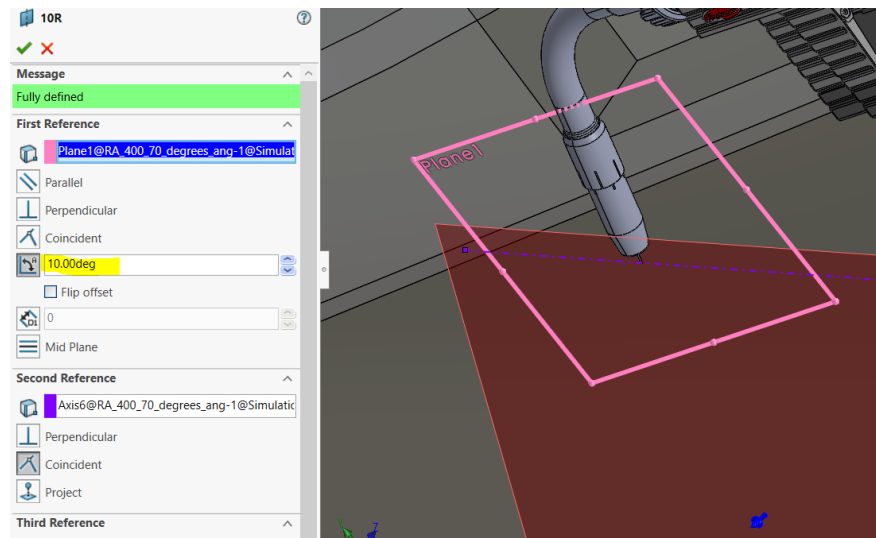
**Σχήμα 7-26.** Βασικά Plane Τιμπίδας συγκόλλησης

Με την εντολή Reference mate δημιουργήθηκε άξονας αναφοράς ο οποίος ορίζεται από τα σημεία που συμπίπτουν τα Plane 1 και 2



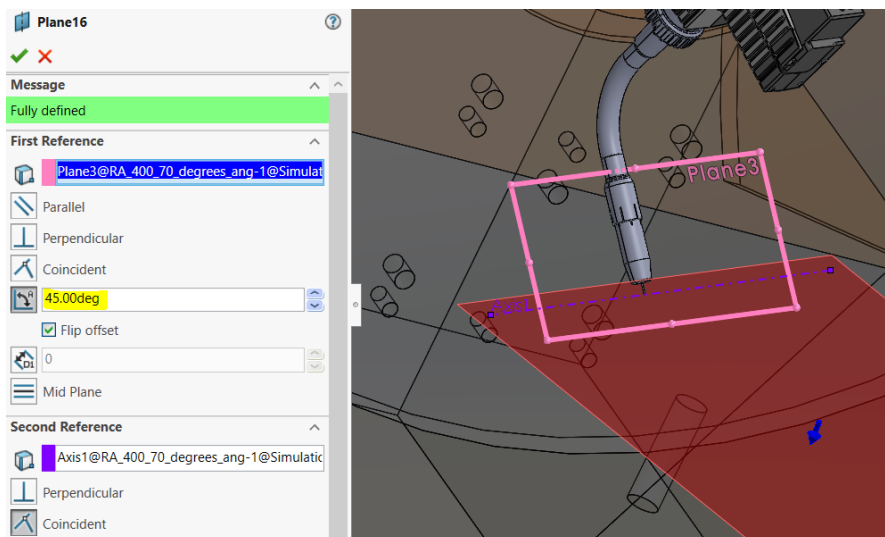
**Σχήμα 7-27.** Axis 6

Στη συνέχεια ορίστηκε νέο πλαίσιο αναφοράς (10R) ώστε να σχηματίζει γωνία 10ο με το Plane 1 της τσιμπίδας σε σχέση με τον άξονα αναφοράς που δημιουργήθηκε προηγουμένως. Το πλαίσιο αυτό χρησιμοποιήθηκε στην Coincident mate ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη κλίση της τσιμπίδας κατά 10ο σε σχέση με τη φορά κίνησης της.



**Σχήμα 7-28.** Νέο πλαίσιο αναφοράς 10R

Στη συνέχεια ορίστηκε νέο Plane έτσι το οποίο σχηματίζει γωνία 45ο με το Plane 3 σε σχέση με τον άξονα αναφοράς της τσιμπίδας Axis 1.

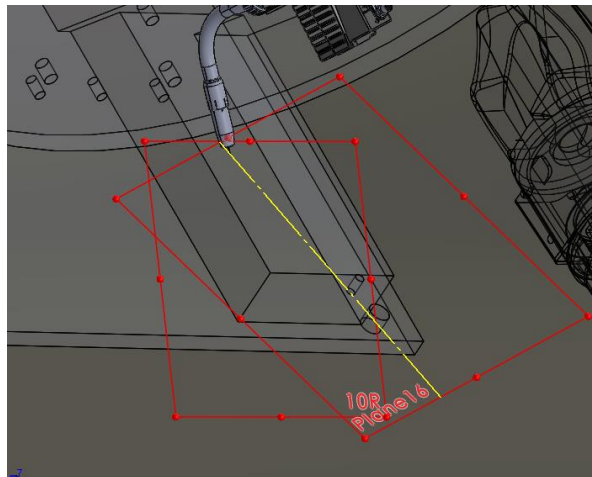


**Σχήμα 7-29.** Plane 16 45deg

Ο νέος άξονας αναφοράς που δημιουργήθηκε από τα σημεία στα οποία συμπίπτουν τα planes 10R και Plane16 ορίστηκε έτσι ώστε όταν του επιβάλλεται



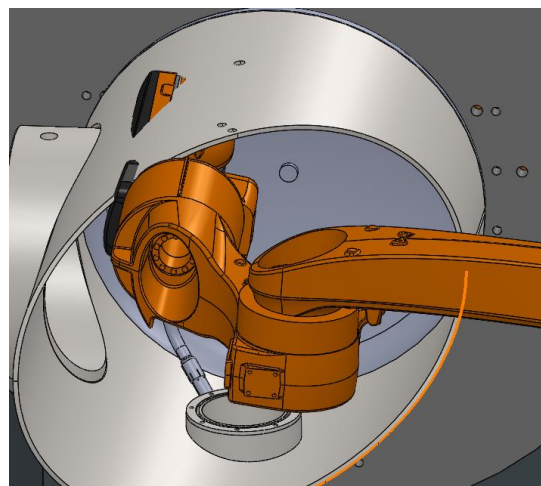
καθετότητα με τον άξονα συμμετρίας ενός κυλίνδρου η τσιμπίδα να σχηματίζει γωνία 45° με αυτό.



**Σχήμα 7-30.** Ορισμός άξονα αναφοράς

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα του παραπάνω ορισμού των mates είναι το ο χρήστης μπορεί να παρέμβει στα ορίσματα των planes αλλάζοντας τις τιμές τους σε περίπτωση που θέλει να δοκιμάσει την κίνηση του μηχανισμού υπό διαφορετικές γωνίες.

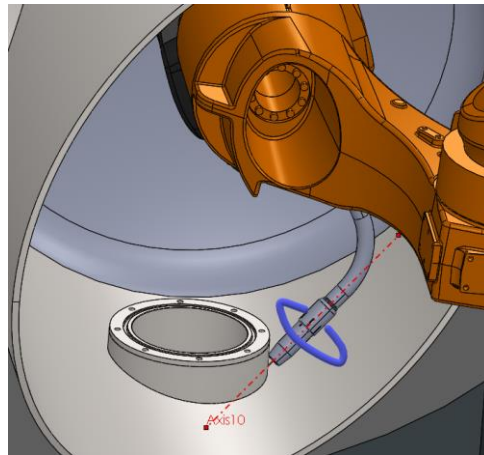
Για την τελική προσομοίωση της 2ης συγκόλλησης ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφηκε αναλυτικά στην 1η προσομοίωση. Κατά την προσομοίωση της κατεργασίας παρατηρήθηκε κρούση του βραχίονα στην κατασκευή. Κρίθηκε αναγκαία λοιπόν η αλλαγή του προσανατολισμού του βραχίονα.



**Σχήμα 7-31.** Τροχιά 3<sup>ης</sup> συγκόλλησης

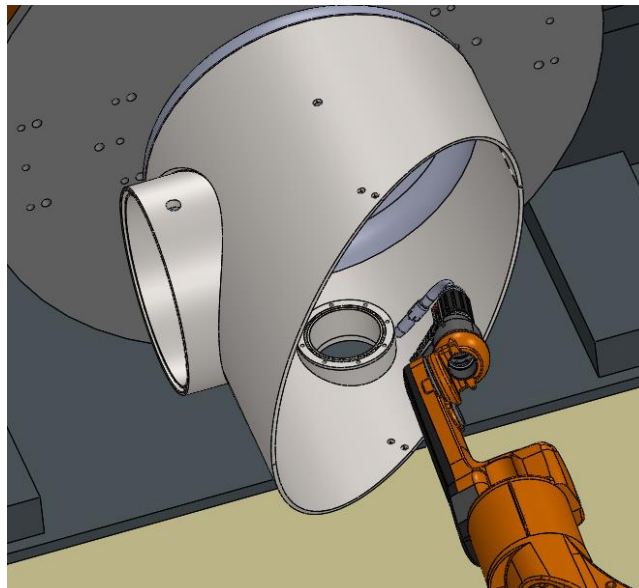
Για την επίλυση του προβλήματος υλοποιήθηκαν δοκιμές για διαφορετικές τιμές της γωνίας που σχηματίζει η τσιμπίδα συγκόλλησης με το κύλινδρο. Οι δοκιμές υλοποιήθηκαν

στο εύρος μεταξύ 40° και 50° χωρίς όμως να επιτευχθεί η επίλυση του προβλήματος καθώς παρατηρήθηκε πρόσκρουση του βραχίονα στην κατασκευή σε ανεξαρτήτως της γωνίας δοκιμής. Όπως παρατηρούμε στην παρακάτω εικόνα το μόνο περιθώριο δοκιμών που μας επέτρεπαν οι απαιτήσεις της συγκόλλησης ήταν η στρέψη της τσιμπίδας κατά τον άξονα της (Axis 10).



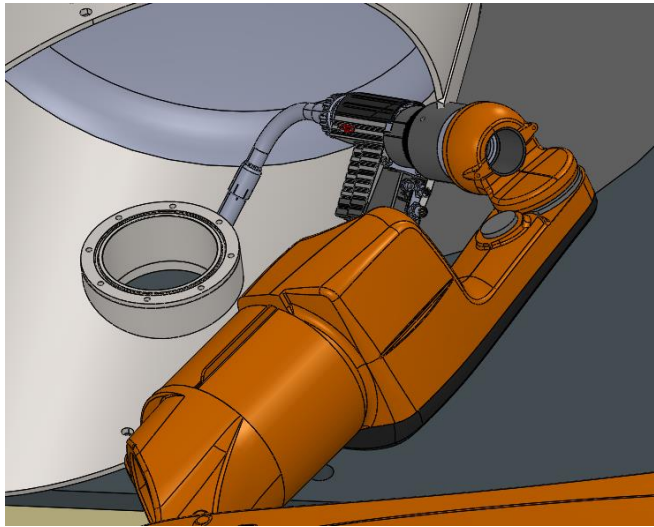
**Σχήμα 7-32.** Τροχιά 3<sup>ης</sup> συγκόλλησης με στρέψη της τσιμπίδας

Όπως βλέπουμε η στρέψη του μηχανισμού της τσιμπίδας κατά τον προαναφερθέντα άξονα έφερε σε τέτοια θέση τον βραχίονα ώστε να μην έχει επαφή με την κατασκευή.



**Σχήμα 7-33.** Τροχιά 3<sup>ης</sup> συγκόλλησης με στρέψη της τσιμπίδας

Όπως βλέπουμε κατά την κίνηση του βραχίονα με τον νέο προσανατολισμό στην τροχιά της συγκόλλησης παρατηρήθηκε νέα κρούση του στην κατασκευή.

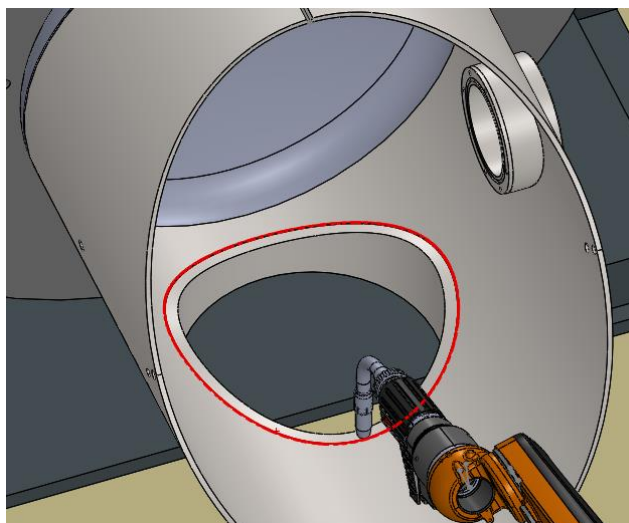


**Σχήμα 7-34.** Τροχιά 3<sup>ης</sup> συγκόλλησης

Αφού υλοποιήθηκαν πολλές δοκιμές θετοντας στην τσιμπίδα διαφορετικούς προσανατολισμούς ως προς την κατασκευή και την τροχια συμπεράναμε ότι η συγκεκριμένη κατεργασία δεν είναι δυνατόν να υλοποιηθεί με την τσιμπίδα συγκόλλησης που διατίθεται.

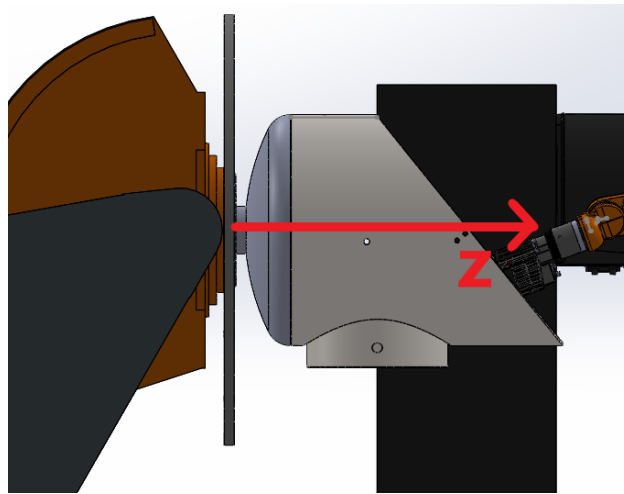
### **7.5 Προσομοίωση 4<sup>ης</sup> Συγκόλλησης**

Επόμενη κατά σειρά κατεργασία είναι η εσωτερική συγκόλληση των δύο κυλίνδρων όπως διακρίνεται στην εικόνα 7-21.



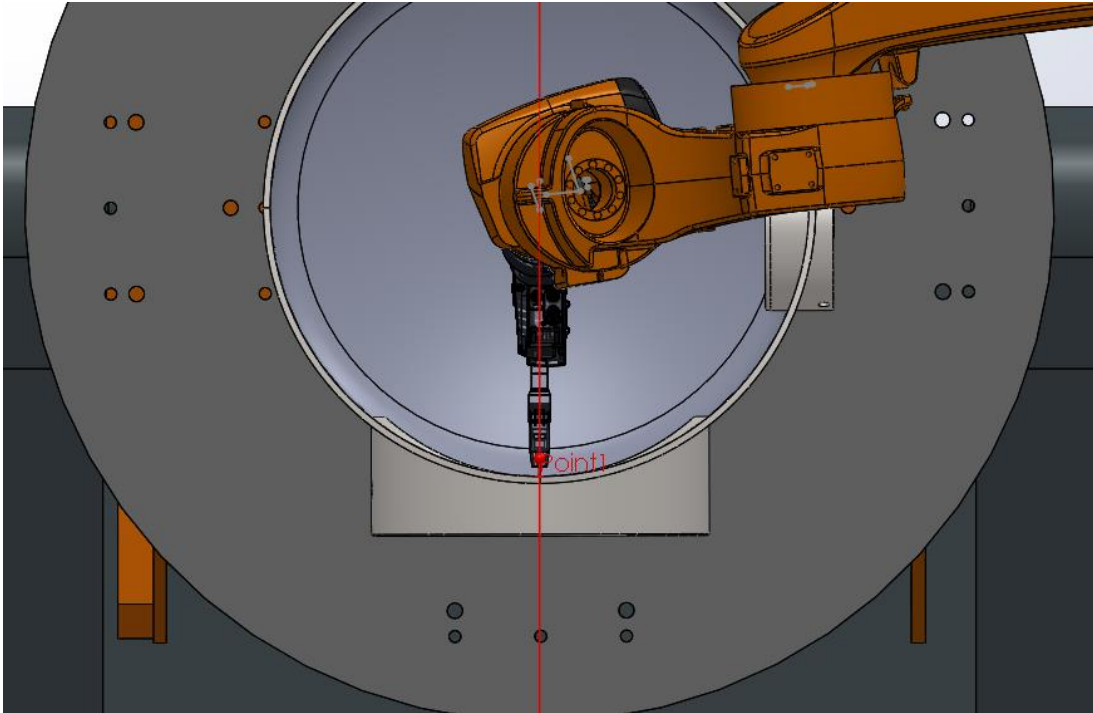
**Σχήμα 7-35.** Τροχιά 4<sup>ης</sup> συγκόλλησης

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, η διαδικασία της προσομοίωσης ξεκίνησε με την εφαρμογή περιορισμών στις δύο αρθρώσεις του μηχανισμού συγκράτησης έτσι ώστε το κομμάτι να τοποθετηθεί με τον επιθυμητό προσανατολισμό. Η τοποθέτηση του κομματιού έγινε με όπως στην 2η συγκόλληση καθώς στην συγκεκριμένη κατεργασία επιθυμούμε η υπό κατεργασία κατασκευή έχει ένα βαθμό ελευθερίας ώστε να στραφεί ως προς τον άξονα Z που διακρίνεται στο σχήμα 7-22. Όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια του κεφαλαίου ο περιορισμός αυτό θα μας επιτρέψει την βέλτιστη κίνηση για την συνεργασία του βραχίονα με τον μηχανισμό συγκράτησης.



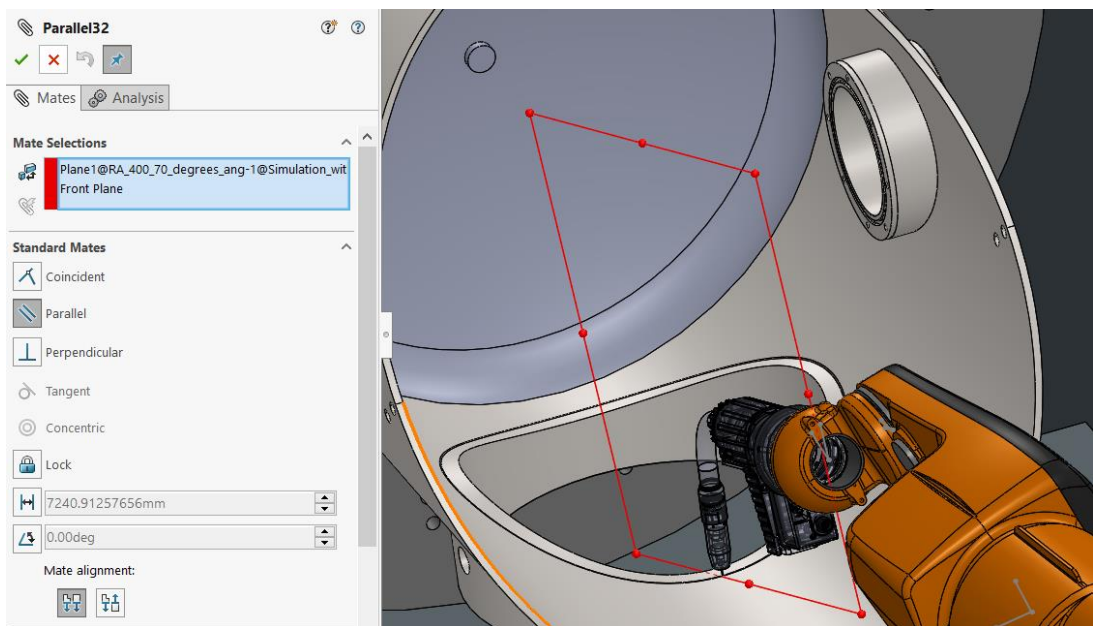
**Σχήμα 7-36.** Ελευθερία κίνησης εξαρτήματος 11829U κατά την 4<sup>η</sup> συγκόλληση

Στη συγκεκριμένη κατεργασία ήταν επιθυμητό και βέλτιστο η μεταλλική κατασκευή να περιστρέφεται από τον μηχανισμό συγκράτησης ενώ ο βραχίονας να παραμένει σε σχετικά σταθερή θέση κάνοντας μόνο μικρές κινήσεις ώστε το σημείο δράσης να ακολουθεί την τροχιά συγκόλλησης. Με την χρήση της Coincident mate ορίστηκε σχέση έτσι ώστε να συμπίπτουν το σημείο δράσης του βραχίονα με το πλαίσιο αναφοράς που διακρίνεται με κόκκινο χρώμα στην εικόνα 7-23. Το πλαίσιο αναφοράς ορίστηκε έτσι ώστε να διχοτομεί σε δύο γεωμετρικά όμοια κομμάτια τον κύλινδρο στήριξης του μηχανισμού στήριξης και να είναι κάθετο προς το δάπεδο. Με το ορισμό αυτό περιορίστηκε η κίνηση του σημείου δράσης του βραχίονα στο δισδιάστατο πλαίσιο αναφοράς.



**Σχήμα 7-37.** Coincident mate 4<sup>ης</sup> συγκόλλησης

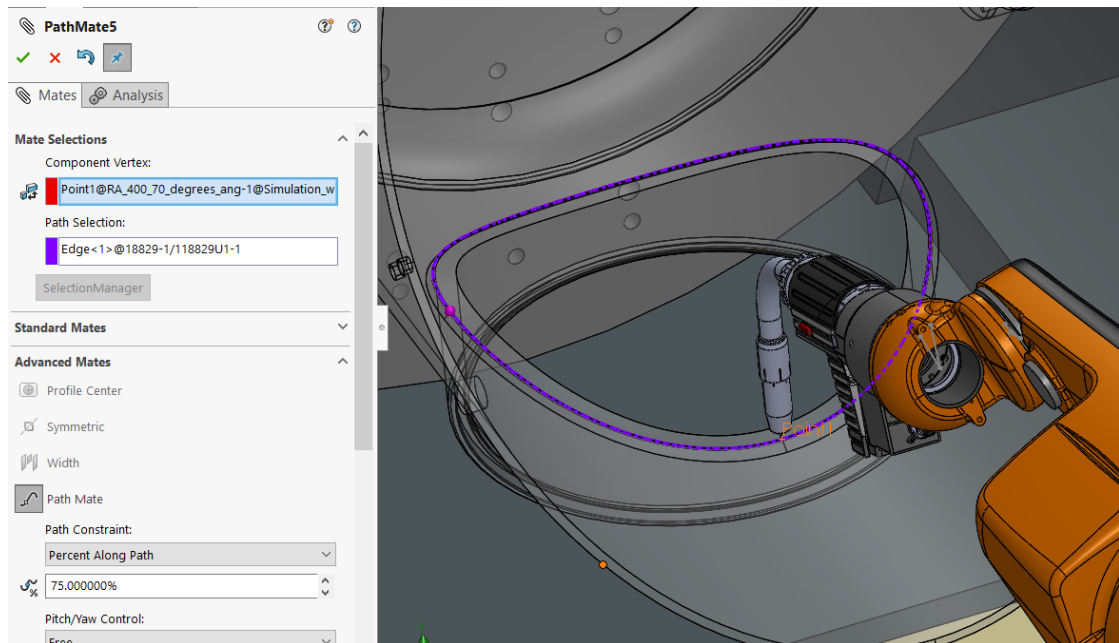
Στην συνέχεια ορίστηκε parallel mate μεταξύ κατάλληλα ορισμένου πλαισίου αναφοράς της τσιμπίδας συγκόλλησης και του δαπέδου έτσι ώστε να καθοριστεί η κίνηση της πάνω στην ραφή με τον κατάλληλο προσανατολισμό. Η parallel mate που ορίστηκε παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα .



**Σχήμα 7-38.** Parallel mate 4<sup>ης</sup> συγκόλλησης

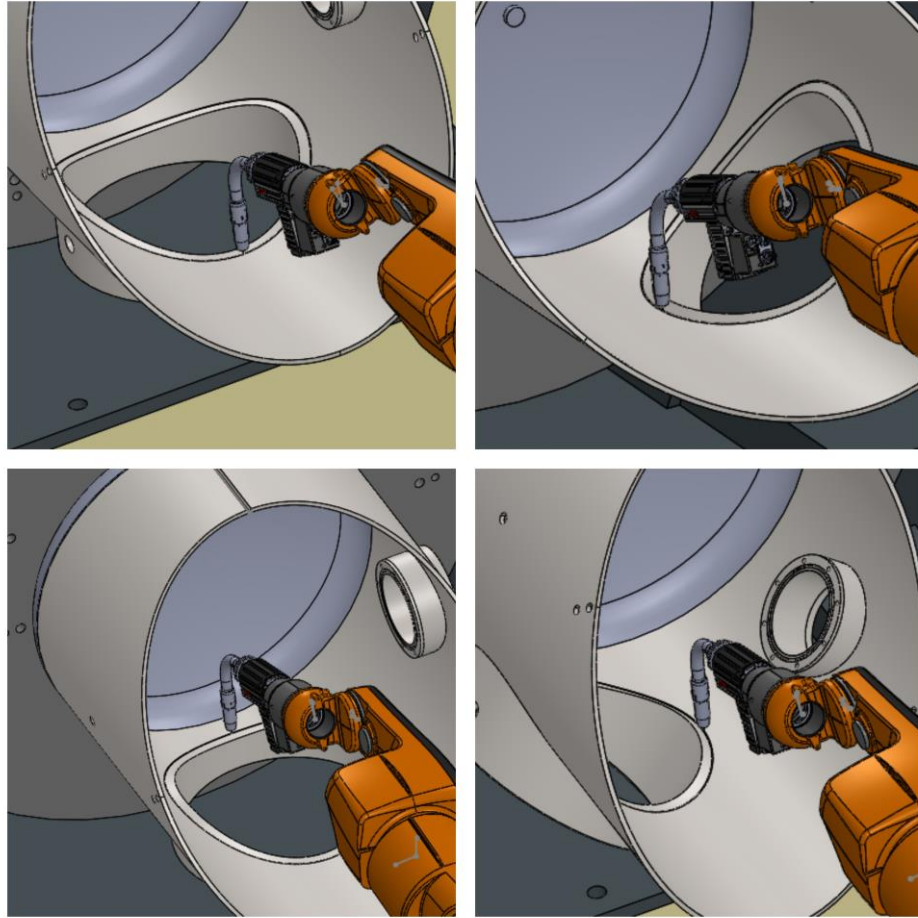
Στη συνέχεια όπως και στην προηγούμενη προσομοίωση ορίστηκε η τροχιά της συγκόλλησης με την χρήση της path mate. Ως τροχιά «path selection» ορίστηκε η ραφή της συγκόλλησης και ως σημείο δράσης ορίστηκε το κέντρο της άκρης της τσιμπίδας συγκόλλησης.

Έπειτα στην επιλογή Path constraint ορίστηκε η επιλογή percent along path με τιμή 75% έτσι ώστε, όποτε ενεργοποιείται η path mate, η άκρη της τσιμπίδας να τοποθετείται στην επιθυμητή αρχή της τροχιάς συγκόλλησης.



**Σχήμα 7-39.** Path mate 4<sup>ης</sup> συγκόλλησης

Για την τελική προσομοίωση της 2ης συγκόλλησης ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφηκε αναλυτικά στην 1η προσομοίωση. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης διακρίνονται στην παρακάτω εικόνα.



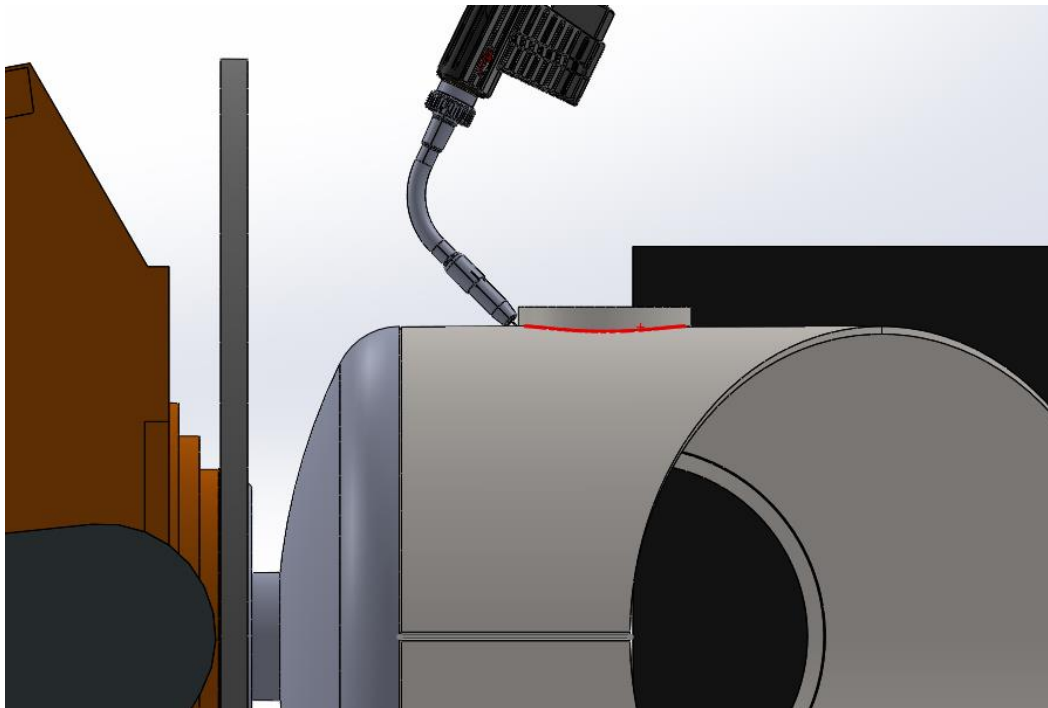
**Σχήμα 7-40.** Προσομοίωση 4<sup>ης</sup> συγκόλλησης

Όπως παρατηρούμε στην παραπάνω εικόνα το εργαλείο δράσης του βραχίονα πραγματοποιεί ευθύγραμμη κίνηση, ενώ παράλληλα ο μηχανισμός συγκράτησης περιστρέφει το κομμάτι. Έτσι επιτεύχθηκε η προσομοίωση της βέλτιστης συνεργασίας των δύο μηχανισμών. Σε αυτό το σημείο μπορούμε να συμπεράνουμε ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της κινηματικής προσομοίωσης με εργαλεία offline programming όπως το Solidworks, καθώς η επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος με εξισώσεις αντίστροφης κινηματικής και χρήση εργαλείων όπως το MATLAB[19] θα ήταν ιδιαίτερα χρονοβόρα έως και ανέφικτη.

### **7.6 Προσομοίωση 5<sup>ης</sup> Συγκόλλησης**

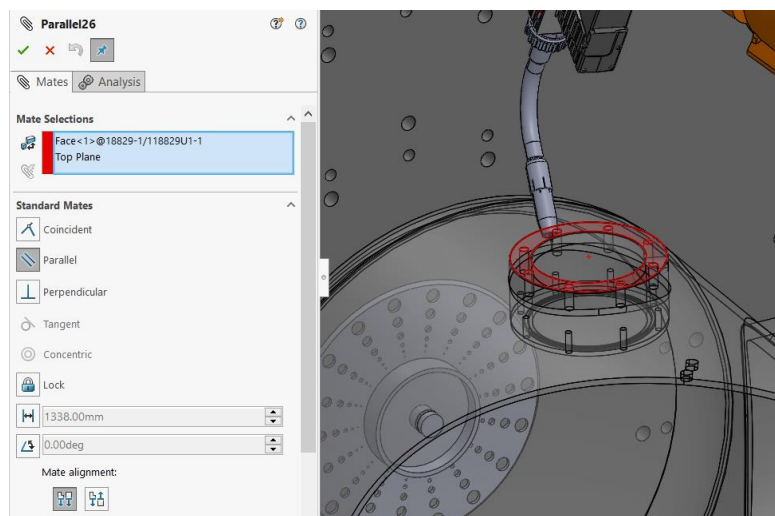
Στη συνέχεια έγινε η προσπάθεια προσομοίωσης της 4ης συγκόλλησης. Η κατεργασία αυτή αναφέρεται στην εξωτερική συγκόλληση του μικρού κυλίνδρου όπως διακρίνεται στην παρακάτω εικόνα. Για την συγκόλληση αυτήν ισχύουν παρόμοιες απαιτήσεις με τις προηγούμενες. Πιο συγκεκριμένα η άκρη της τσιμπίδας πρέπει να

διχοτομεί την γωνία που σχηματίζουν τα υπό καταργασία υλικά και να σχηματίζει γωνία 10° με το διάνυσμα της διεύθυνσης κίνησης.



**Σχήμα 7-41.** Τροχιά 5<sup>ης</sup> συγκόλλησης

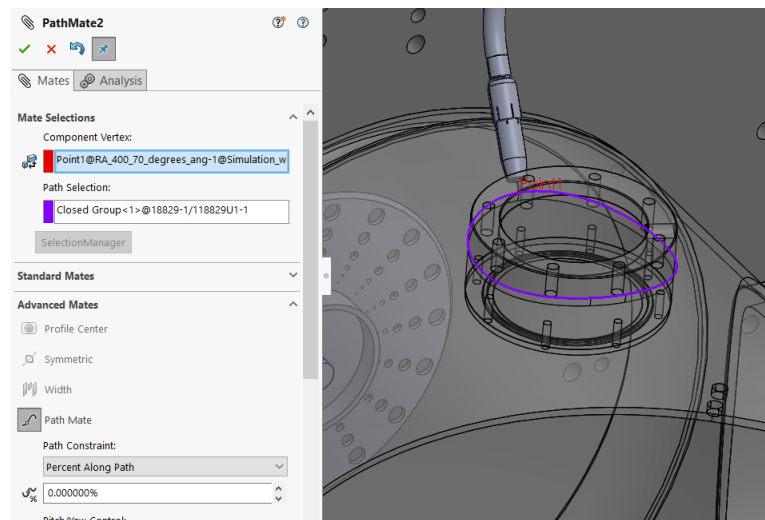
Η μεταλλική κατασκευή απαιτείται να τοποθετηθεί στον χώρο έτσι ώστε ο υπό καταργασία μικρός κύλινδρος να είναι κάθετος με την επιφάνεια του δαπέδου και σταθερός ώστε να κινηθεί η τσιμπίδα περιμετρικά του. Η τοποθέτηση αυτή επιτεύχθηκε ορίζοντας μια parallel mate μεταξύ της άνω επιφάνειας του κυλίνδρου και του εδάφους όπως διακρίνεται στην παρακάτω εικόνα 7-28.



**Σχήμα 7-42.** Parallel mate για την τοποθέτηση του 11829U κατά την 4<sup>η</sup> συγκόλληση

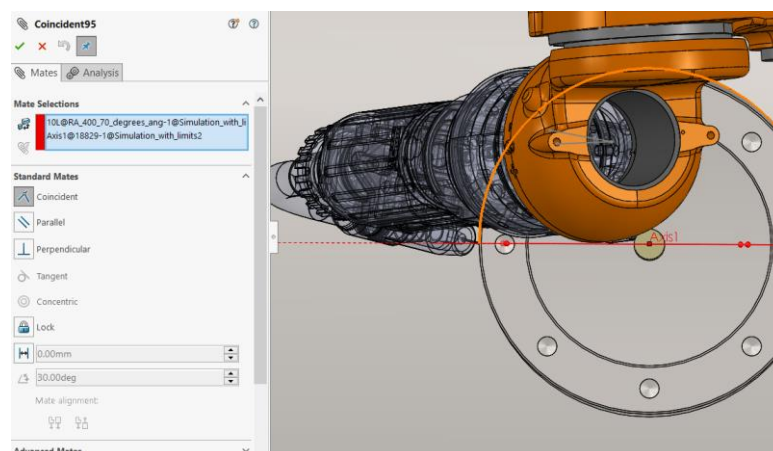


Στη συνέχεια όπως και στην προηγούμενη προσομοίωση ορίστηκε η τροχιά της συγκόλλησης με την χρήση της path mate. Ως τροχιά «path selection» ορίστηκε η ραφή της συγκόλλησης και ως σημείο δράσης ορίστηκε το κέντρο της άκρης της τσιμπίδας συγκόλλησης. Έπειτα στην επιλογή Path constraint ορίστηκε η επιλογή percent along path με τιμή 0% έτσι ώστε όποτε ενεργοποιείται η path mate η άκρη της τσιμπίδας να τοποθετείται στην επιθυμητή αρχή της τροχιάς συγκόλλησης.



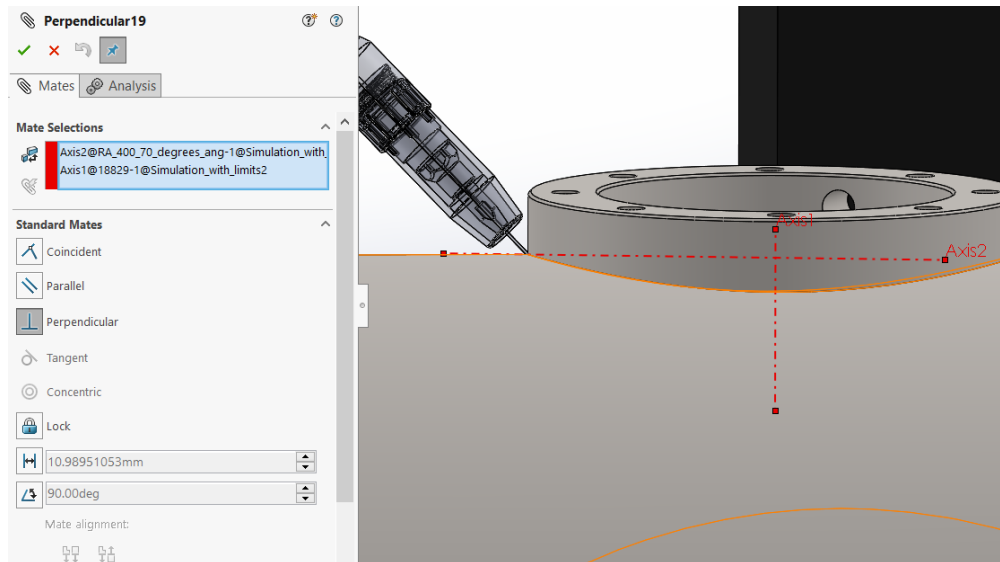
**Σχήμα 7-43.** Path mate 5<sup>ης</sup> συγκόλλησης

Στην συνέχεια με την coincident mate ορίστηκε σχέση μεταξύ της τσιμπίδας και του κυλίνδρου ώστε να συμπίπτουν ο άξονας συμμετρίας του κυλίνδρου με κατάλληλα ορισμένο πλαίσιο αναφοράς. Το πλαίσιο αναφοράς ορίστηκε έτσι ώστε όταν υλοποιηθεί η παραπάνω σχέση η τσιμπίδα να στραφεί σχηματίζοντας γωνία 10° με το εφαπτωμενικό διάνυσμα που ορίζεται από τη ραφή της συγκόλλησης με το σημείο επαφής.



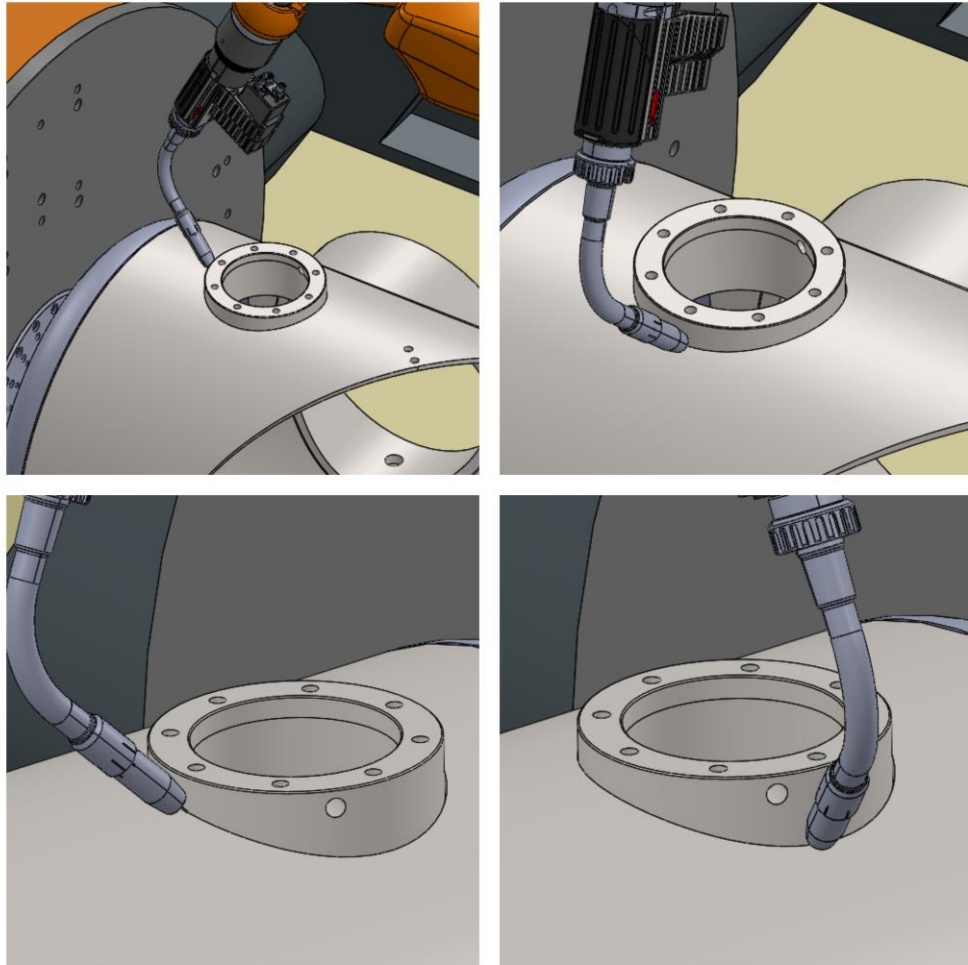
**Σχήμα 7-44.** Coincident mate 5<sup>ης</sup> συγκόλλησης

Με τη χρήση της perpendicular mate ορίστηκε σχέση μεταξύ του άξονα συμμετρίας του κυλίνδρου και κατάλληλα ορισμένα άξονα της τσιμπίδας. Οι δύο αυτοί συμπίπτουν λόγω της coincident mate ενώ με την perpendicular mate ορίστηκε να είναι κάθετοι μεταξύ τους. Όπως διακρίνεται στην εικόνα 7-31 με την υλοποίηση αυτών των σχέσεων η τσιμπίδα σχηματίζει γωνία 45ο με την επιφάνειά του μικρού κυλίνδρου.



**Σχήμα 7-45.** Perpendicular mate 5<sup>ης</sup> συγκόλλησης

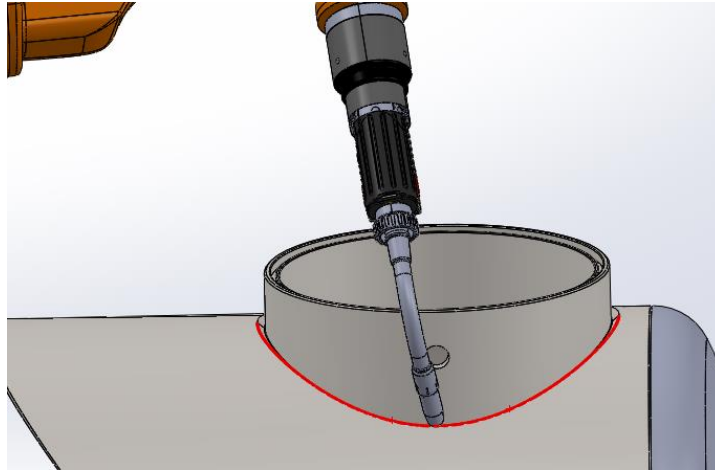
Για την τελική προσομοίωση της 4ης συγκόλλησης ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιεγράφηκε αναλυτικά στην 1η προσομοίωση. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης διακρίνονται στην παρακάτω εικόνα.



**Σχήμα 7-46.** Προσομοίωση 5<sup>ης</sup> συγκόλλησης

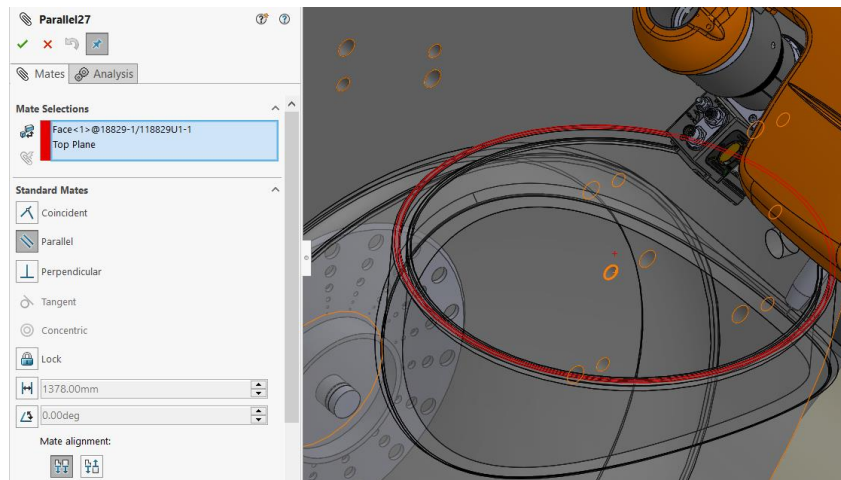
### **7.6 Προσομοίωση 6<sup>ης</sup> Συγκόλλησης**

Στη συνέχεια έγινε η προσπάθεια προσομοίωσης της 6ης συγκόλλησης. Η κατεργασία αυτή αναφέρεται στην εξωτερική συγκόλληση της ραφής που διακρίνεται στην παρακάτω εικόνα. Για την συγκόλληση αυτήν ισχύουν παρόμοιες απαιτήσεις με τις προηγούμενες. Πιο συγκεκριμένα η άκρη της τσιμπίδας πρέπει να διχοτομεί την γωνία που σχηματίζουν τα υπό κατεργασία υλικά και να σχηματίζει γωνία 10° με το διάνυσμα της διεύθυνσης κίνησης.



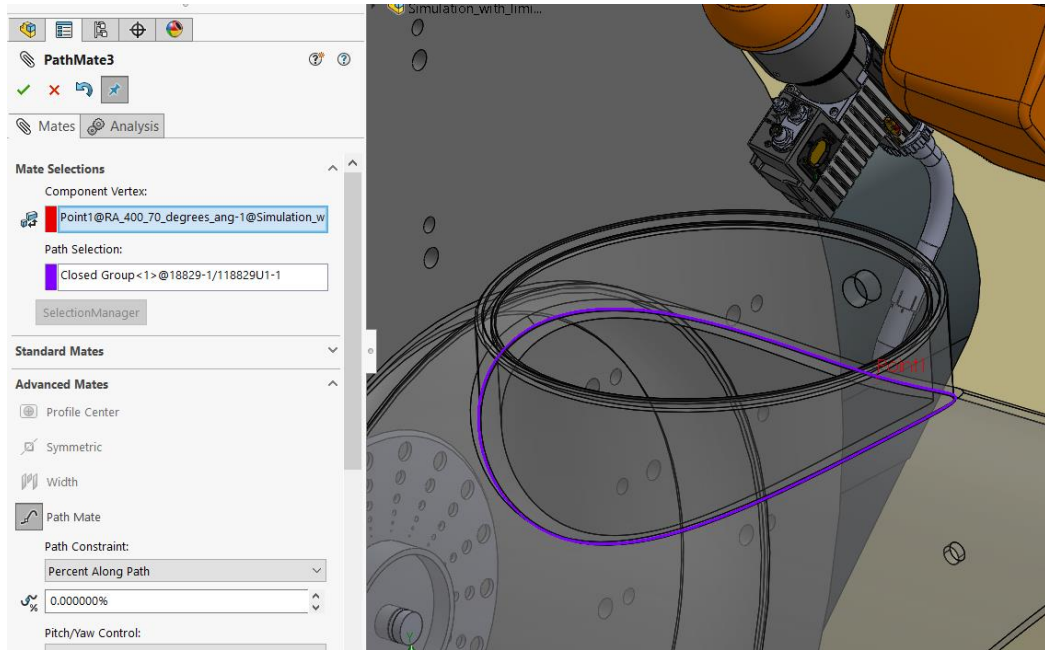
**Σχήμα 7-47** Τροχιά 6<sup>ης</sup> συγκόλλησης

Η μεταλλική κατασκευή απαιτείται να τοποθετηθεί στον χώρο έτσι ώστε ο υπό καταργασία μικρός κύλινδρος να είναι κάθετος με την επιφάνεια του δαπέδου και σταθερός ώστε να κινηθεί η τσιμπίδα περιμετρικά του. Η τοποθέτηση αυτή επιτεύχθηκε ορίζοντας μια parallel mate με όπως και στην περίπτωση της 4<sup>ης</sup> συγκόλλησης.

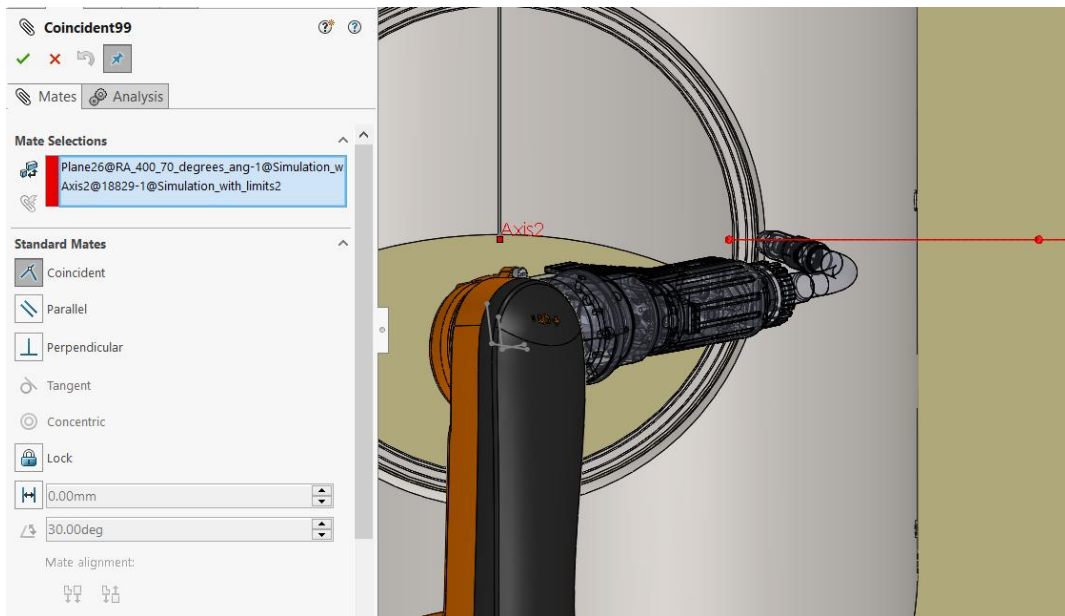


**Σχήμα 7-48.** Parallel mate τοποθέτησης κομματιού κατά την 5<sup>η</sup> συγκόλληση

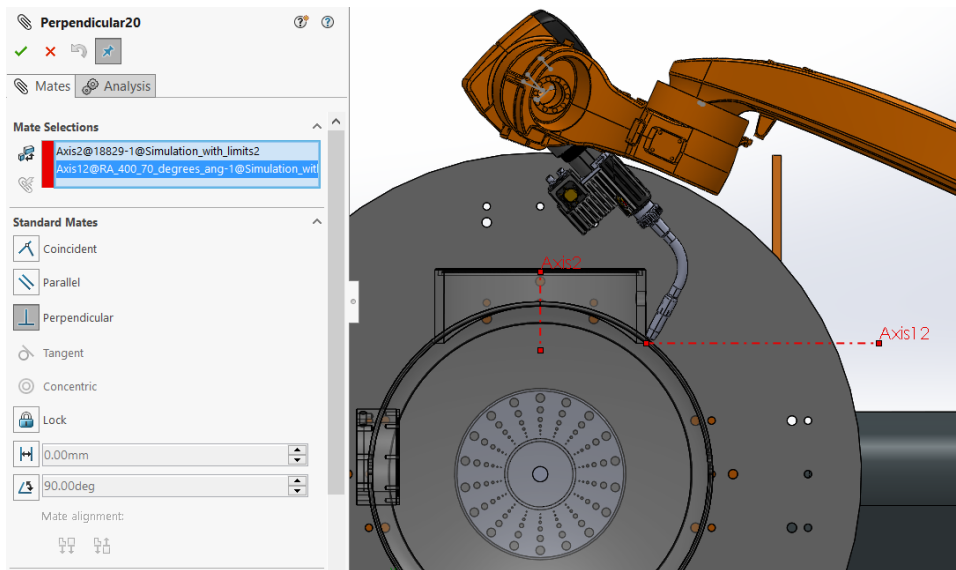
Η διαδικασία προσομοίωσης σε αυτήν την περίπτωση ήταν όμοια με αυτήν της 4ης καταργασίας ορίζοντας μια path mate, μια coincident και μία perpendicular. Η διαδικασία φαίνεται στις εικόνες 7-35, 7-36, 7-37.



Σχήμα 7-49. Path mate 6<sup>ης</sup> συγκόλλησης

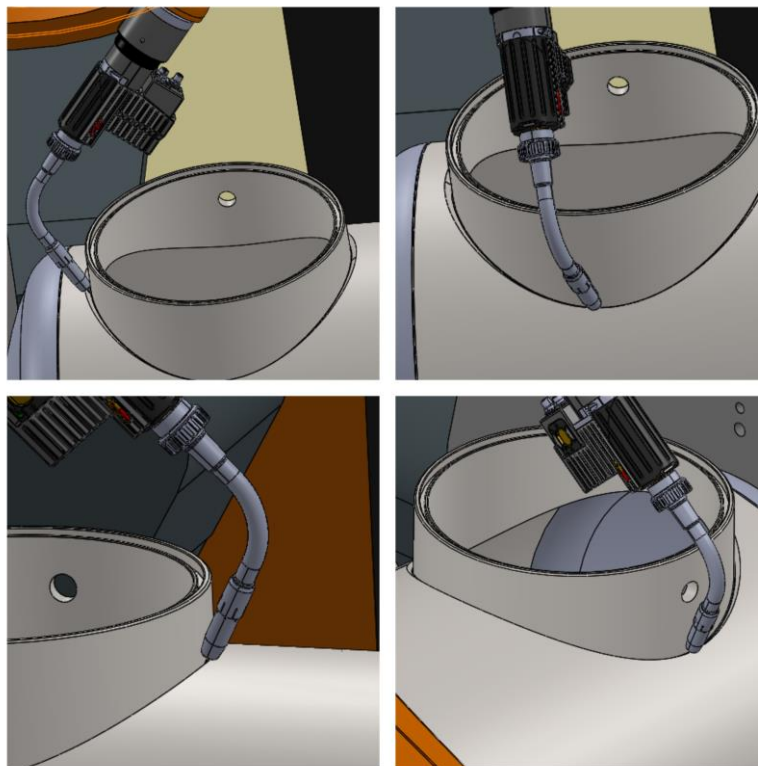


Σχήμα 7-50. Coincident mate 6<sup>ης</sup> συγκόλλησης



**Σχήμα 7-51.** Perpendicular mate 6<sup>ης</sup> συγκόλλησης

Για την τελική προσομοίωση της 6ης συγκόλλησης ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιεγράφηκε αναλυτικά στην 1η προσομοίωση. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης διακρίνονται στην παρακάτω εικόνα.



**Σχήμα 7-52.** Προσομοίωση 6<sup>ης</sup> συγκόλλησης

## 8 Παραμετροποίηση της συγκόλλησης

### 8.1 Εισαγωγή

Όπως προαναφέρθηκε, το βασικό πρόβλημα της αυτοματοποίησης της συγκόλλησης είναι ότι η γεωμετρία της ραφής αλλάζει συνεχώς, δεδομένου ότι αυτή βρίσκεται στην τομή δύο κυλίνδρων. Επιπλέον η πραγματική γεωμετρία του εξαρτήματος όπως αυτό προκύπτει από τις προηγούμενες κατεργασίες κοπής και καμπύλωσης διαφέρει από την ονομαστική, τυπικά κατά αρκετά δέκατα.

Στην παρούσα εργασία έγινε μια προσπάθεια να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα παραμετροποιώντας την τροχιά του βραχίονα με βάση της πραγματικές διαστάσεις της υπό κατεργασίας μεταλλικής υποκατασκευής. Για την υλοποίηση της παραμετροποίησης της τροχιάς ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

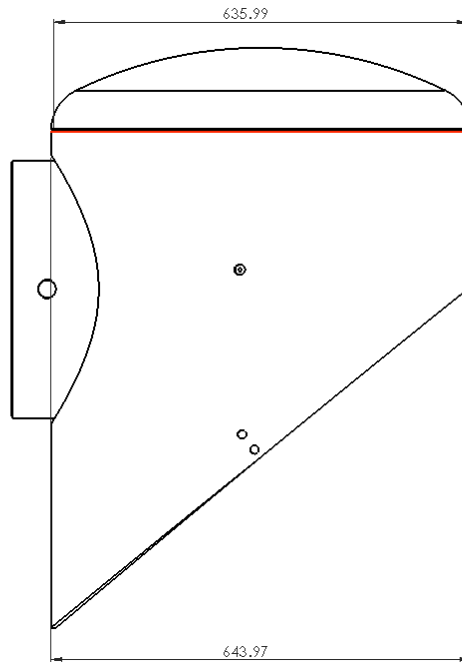
- Φωτογραμμετρική μέτρηση της υποκατασκευής
- Επεξεργασία αποτελεσμάτων
- Μοντελοποίηση της υποκατασκευής με βάση τις πραγματικές διαστάσεις
- Προσομοίωση της συγκόλλησης
- Εξαγωγή αποτελεσμάτων

### 8.2 Φωτογραμμετρική μέτρηση της υποκατασκευής

Η Φωτογραμμετρική μέτρηση έλαβε χώρα στις εγκαταστάσεις της εταιρείας Sclavos. Κατόπιν συνεννοήσεως με τους μηχανικούς της εταιρείας μου παραχωρήσαν η υπό μελέτη μεταλλική κατασκευή ή οποία ήταν στο στάδιο πριν υποβληθεί σε κατεργασία συγκόλλησης . Σύμφωνα με προηγούμενες μετρήσεις της εταιρείας οι μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ πραγματικών και ονομαστικών διαστάσεων συναντιούνται στις μεγάλες διαμέτρους του καπακιού και του μεγάλου κυλίνδρου της κατασκευής . Για τον λόγο αυτό η μέτρηση επικεντρώθηκε στην μέτρηση των δύο αυτών διαστάσεων.

Πρώτο βήμα της μέτρησης ήταν η τοποθέτηση της κατασκευής με κατάλληλο προσανατολισμό ώστε να είναι δυνατή η περιμετρική φωτογράφισή του. Η τοποθέτηση έγινε από μηχανικούς της εταιρίας καθώς το βάρος της κατασκευής καθιστούσε αδύνατη τη μεταφορά της με τα χέρια, ενώ τοποθετήθηκε πάνω σε μια παλέτα για την προστασία του από πιθανές φθορές .

Η τοποθέτηση της κατασκευής διακρίνεται στην παρακάτω εικόνα. Όπως διακρίνουμε περιμετρικά του τοποθετήθηκαν και τα scale bars τα όποια είναι απαραίτητα ώστε το πρόγραμμα επεξεργασίας των φωτογραφιών να διαστασιολογήσει τις θέσεις των στόχων στον χώρο. Για την μέτρηση της εσωτερικής ραφής συγκόλλησης του καπακιού οι στόχοι τοποθετήθηκαν πάνω από την ραφή.



**Σχήμα 8-1.** Διαστάσεις διαμέτρων εξαρτήματος 11829U



**Σχήμα 8-2.** Τοποθέτηση στόχων στο καπάκι του 11829U

Για την μέτρηση λήφθηκαν 56 φωτογραφίες περιμετρικά του τεμαχίου ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η δυσκολία της συγκεκριμένης μέτρησης ήταν ότι λόγω του χαμηλού φωτισμού του χώρου όπου τοποθετήθηκε το δείγμα ήταν απαραίτητη η χρήση φλάς. Η αντανάκλαση του φωτός του φλάς όμως στο αλουμίνιο έκανε δυσδιάκριτους τους στόχους με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η αναγνώριση τους από το πρόγραμμα επεξεργασίας (ImetricS). Τελικά ύστερα από διαδοχικές φωτογραφίσεις με διαφορετικές ρυθμίσεις του κλείστρου και της έντασης του φλάς της



φωτογραφικής μηχανής επιτεύχθηκε η φωτογράφιση του τεμαχίου όπως διακρίνεται στην παρακάτω εικόνα.



**Σχήμα 8-3.** 1<sup>η</sup> Φωτογραμμετρική λήψη

Στην συνέχεια αφαιρέθηκαν οι στόχοι από το καπάκι και τοποθετήθηκαν στον μεγάλο κύλινδρο, κάτω από τη ραφή της εξωτερικής συγκόλλησης. Με την τοποθέτηση των στόχων λήφθηκαν και οι απαραίτητες φωτογραφίες όπως και διακρίνεται στην παρακάτω εικόνα.

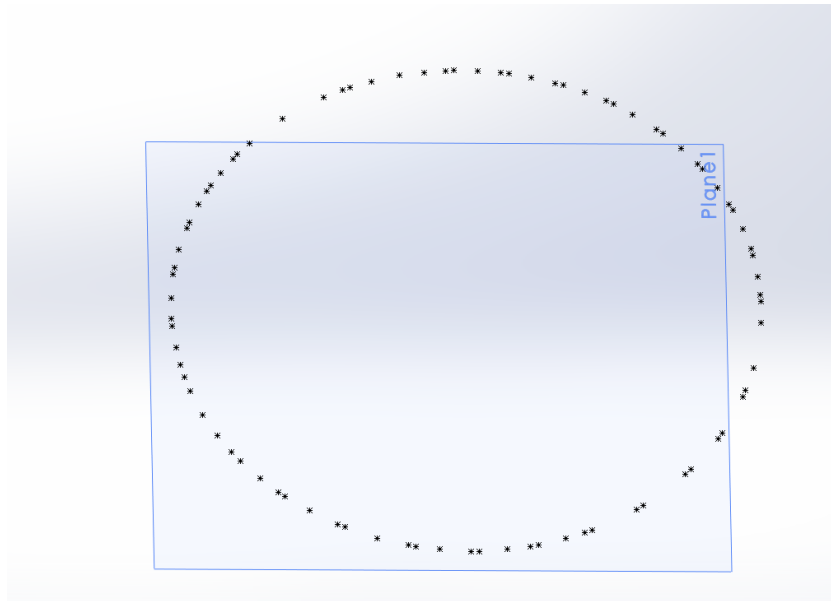


Σχήμα 8-4. 2<sup>η</sup> Φωτογραμμετρική λήψη

### 8.3 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

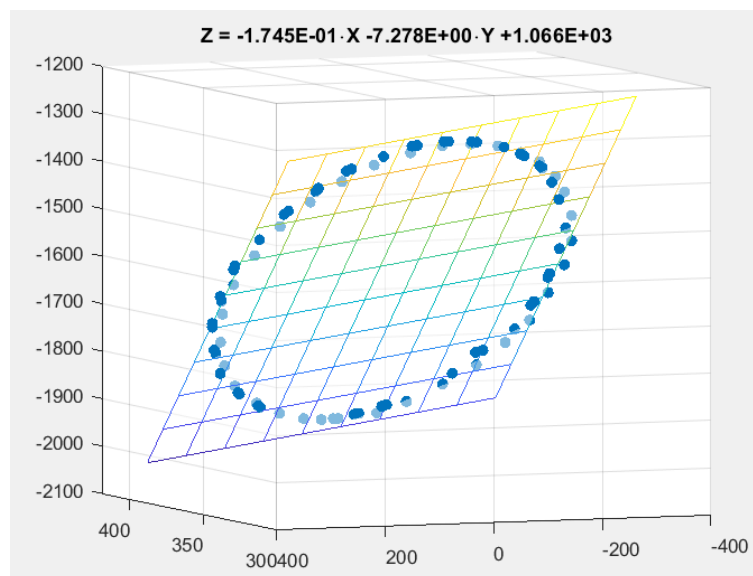
Στη συνέχεια οι φωτογραφίες επεξεργάστηκαν στο πρόγραμμα ImetricS. Το πρόγραμμα είναι ικανό να αναγνωρίσει τις θέσεις των στόχων στο χώρο με ακρίβεια και στην συνέχεια να εξάγει τα αποτελέσματα σε μορφή .xls . Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι τυποποιημένη και δεν υπάρχει νόημα στην λεπτομερή περιγραφή της. Τα αποτελέσματα με τις ακριβείς συντεταγμένες των στόχων βρίσκονται στο Παράρτημα.

Για την εξέτασή των αποτελεσμάτων τα σημεία περάστηκαν στο SolidWorks με την χρήση μακροεντολής . Η κώδικας της μακροεντολής βρίσκεται στο παράρτημα της διπλωματικής εργασίας. Στην παρακάτω εικόνα διακρίνονται τα σημεία της μέτρησης του καπακιού αφού εισήχθησαν στο SolidWorks.

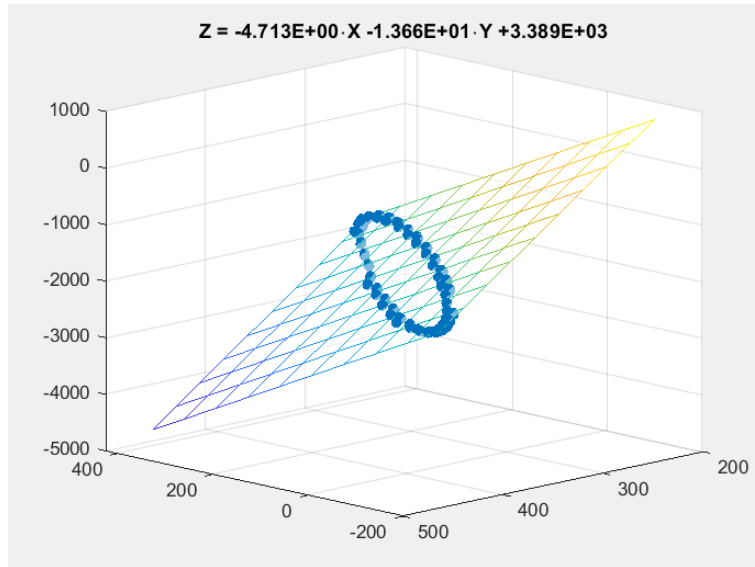


**Σχήμα 8-5.** Αποτελέσματα φωτογραμμετρίας στον 3d χώρο

Όπως διακρίνεται τα σημεία βρίσκονται σε διαφορετικά ύψη μέσα στον χώρο (x,y,z), ήταν αναγκαίο για την επίτευξη της μελέτης να αναχθούν σε ένα ενιαίο πλαίσιο αναφοράς με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα της μέτρησης. Επιλέχθηκε η αναγωγή αυτή να γίνει με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (Regression Analysis) με τη χρήση του MATLAB. Δημιουργήθηκε κώδικας ο οποίος λαμβάνει από το αρχείο .txt των αποτελεσμάτων της φωτογραμμετρίας τις τιμές των συντεταγμένων των σημείων υπολογίζοντας την εξίσωση least square fitting plane.



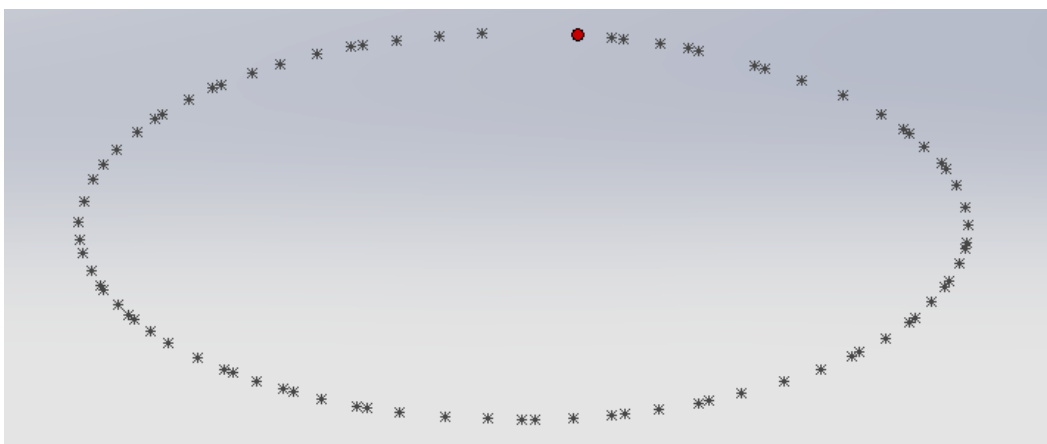
**Σχήμα 8-6.** Πλαίσιο αναφοράς κυλίνδρου



**Σχήμα 8-7.** Πλαίσιο αναφοράς μετρήσεων του καπακιού

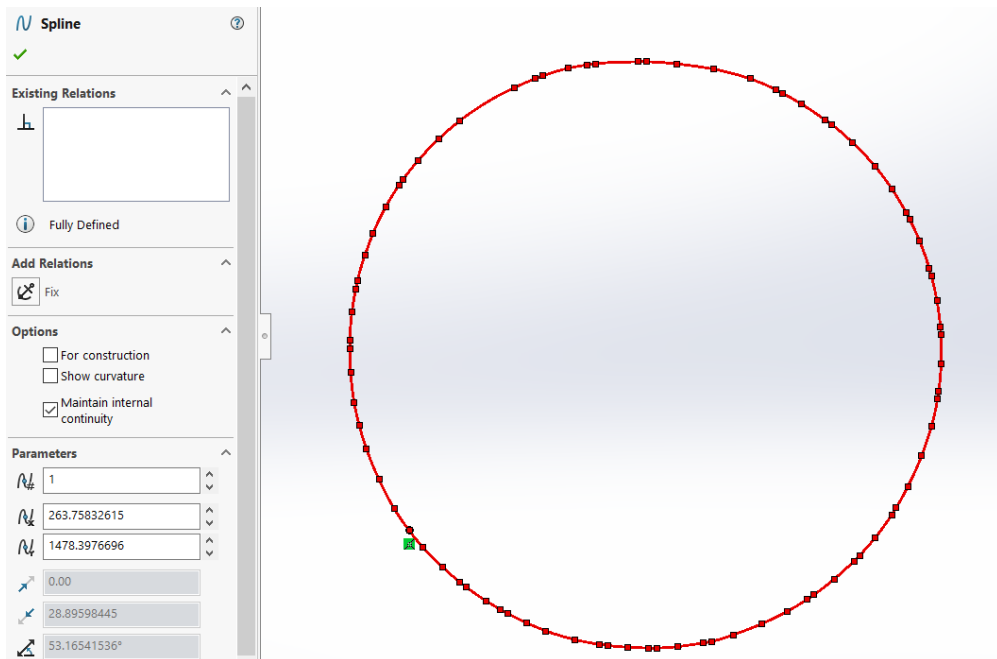
#### 8.4 Μοντελοποίηση της υποκατασκευής

Μετά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων σχεδιάστηκε το επίπεδο που υπολογίστηκε προηγουμένως στο Solidworks. Στην συνέχεια τα αποτελέσματα της μέτρησης του μεγάλου κυλίνδρου προβλήθηκαν πάνω στο επίπεδο με την χρήση της εντολής “Convert Entities” ώστε να γίνει η προσπάθεια μοντελοποίησης του . Στην παρακάτω εικόνα διακρίνονται τα σημεία τα οποία βρίσκονται επάνω σε ένα ενιαίο πλαίσιο αναφοράς. Με κόκκινο διακρίνεται το σημείο αναφοράς το οποίο αντιστοιχεί στο στόχο που τοποθετήθηκε πάνω στην ραφή της συγκόλλησης του κυλίνδρου. Πάνω ακριβώς από αυτό το σημείο τοποθετήθηκε και στόχος στο καπάκι έτσι ώστε να αναγνωριστούν τα σημεία σε σχέση με την γεωμετρία της υποκατασκευής.



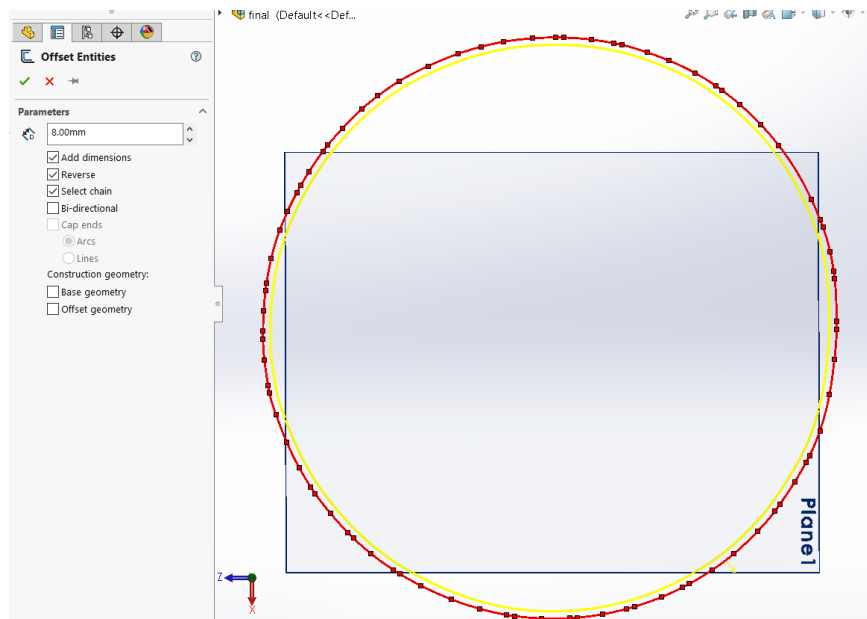
**Σχήμα 8-8.** Αποτελέσματα φωτογραμμετρίας του κυλίνδρου έπειτα από επεξεργασία με τη μέθοδο Regression analysis

Στην συνέχεια τα σχηματίστηκε η τροχιά των σημείων με την εντολή Spline, όπως και διακρίνεται στην παρακάτω εικόνα.



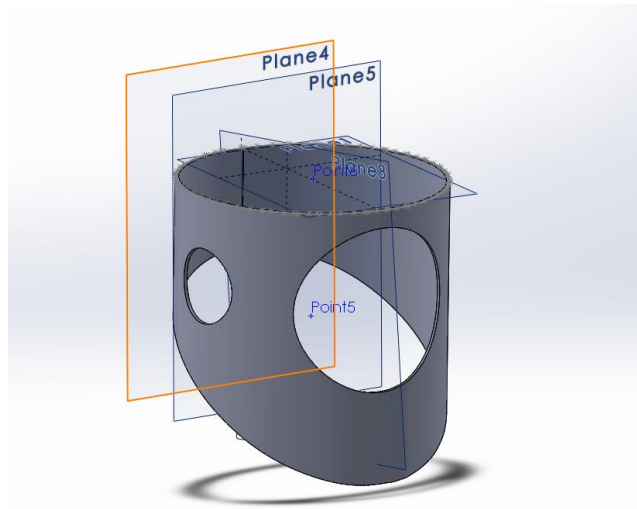
Σχήμα 8-9. Ένωση σημείων με την εντολή Spline

Το πάχος της λαμαρίνας του κυλίνδρου είναι 8mm, έτσι με την εντολή offset entities ορίστηκε νέα τροχιά που απέχει από την προαναφερθείσα κατά 8mm.



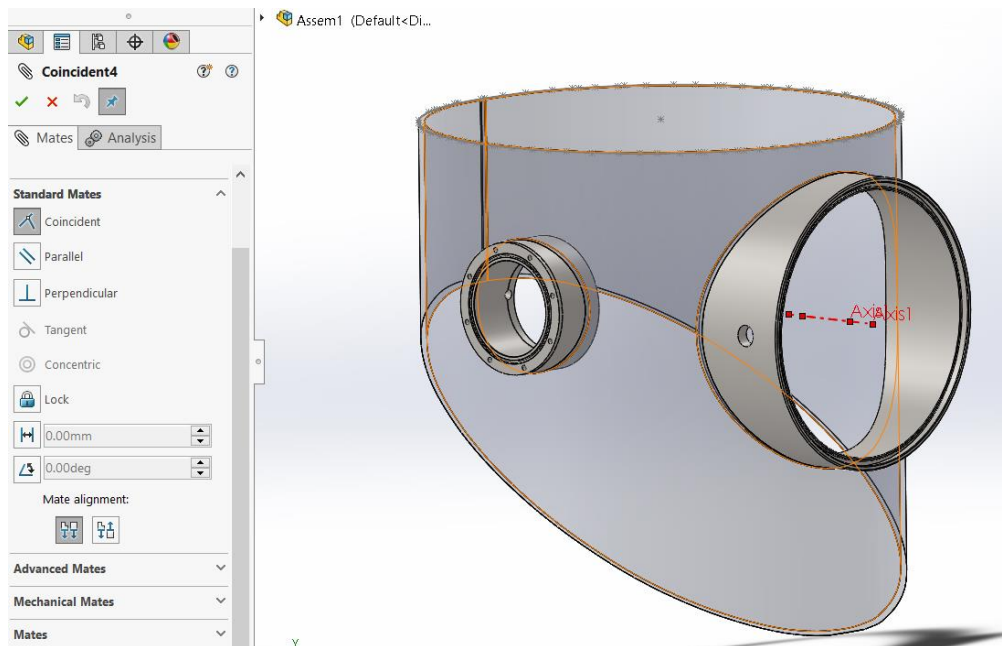
Σχήμα 8-10. Μετατόπιση της τροχιάς κατά 8mm

Με την χρήση της extrude μοντελοποιήθηκε ο κύλινδρος, ενώ ορίστηκαν κατάλληλα πλαίσια αναφοράς ώστε να γίνου με την extrude cut οι διατομές των μικρών κυλίνδρων. Το αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα .



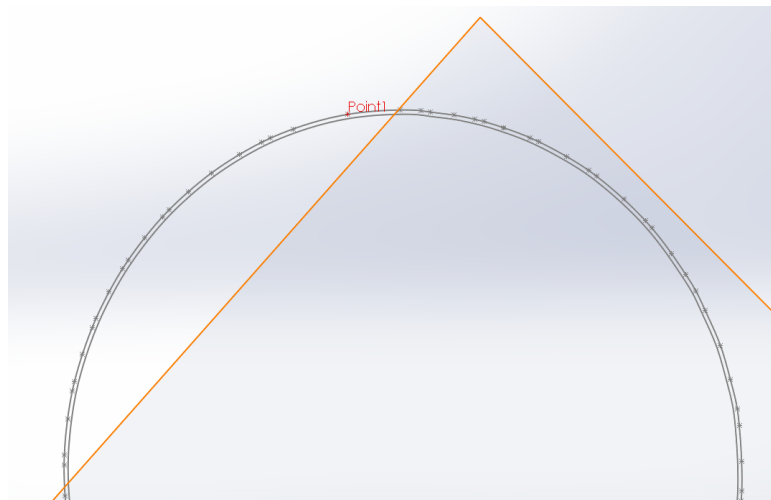
**Σχήμα 8-11** Μοντελοποίηση κυλίνδρου

Με την χρήση της Coincident mate και της Distance mate τοποθετήθηκαν οι δυο μικροί κύλινδροι της υποκατασκευής σύμφωνα με τις ονομαστικές διαστάσεις του μηχανολογικού σχεδίου της.



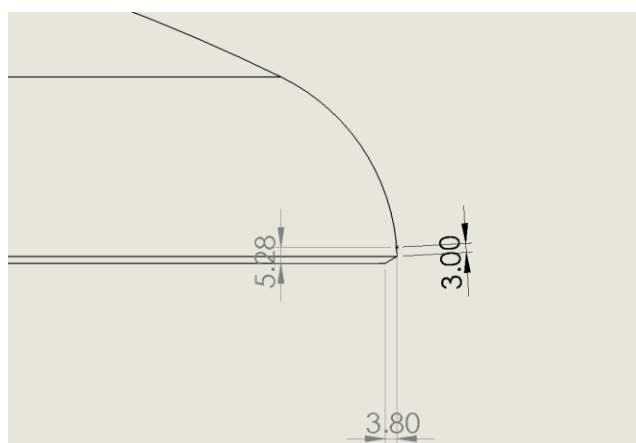
**Σχήμα 8-12.** Τοποθέτηση των μικρότερων κυλίνδρων

Στη συνέχεια με τον ίδιο τρόπο επεξεργάστηκαν τα αποτελέσματα της μέτρησης του καπακιού. Στην παρακάτω εικόνα διακρίνονται τα σημεία τα οποία βρίσκονται επάνω σε ένα ενιαίο πλαίσιο αναφοράς. Με κόκκινο διακρίνεται το σημείο αναφοράς το οποίο αντιστοιχεί στο στόχο που τοποθετήθηκε πάνω στην ραφή της συγκόλλησης του κυλίνδρου. Όπως και στην μοντελοποίηση του κυλίνδρου τα σημεία ενώθηκαν με την εντολή offset entities ορίστηκε νέα τροχιά που απέιχε από την προαναφερθείσα κατά 3.8mm.



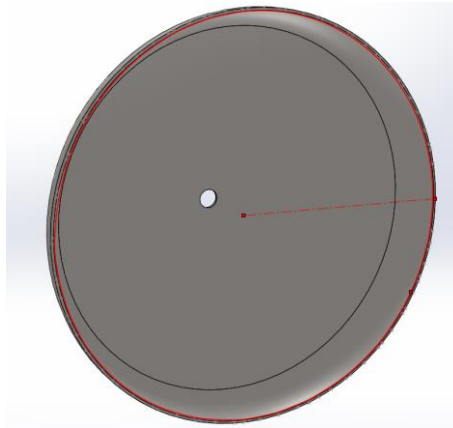
**Σχήμα 8-13.** Σχηματισμός τροχιάς καπακιού

Τα 3.8mm προκύπτουν από υπολογισμό, καθώς οι στόχοι του καπακιού είχαν τοποθετηθεί πάνω σε σημείο καμπύλωσης της κατασκευής. Παρόλα αυτά η μελέτη έγινε με γνώμονα την επίτευξη της μέγιστης δυνατής ακρίβειας. Στην παρακάτω εικόνα διακρίνεται ο προαναφερθείς υπολογισμός. Εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι κάποιο μικρό σφάλμα της τάξεως του 0.3 mm δεν είναι ικανό να δημιουργήσει πρόβλημα στην υλοποίηση της συγκόλλησης σε πραγματικές συνθήκες .



**Σχήμα 8-14.** Υπολογισμός απαιτούμενης μετατόπισης της τροχιάς

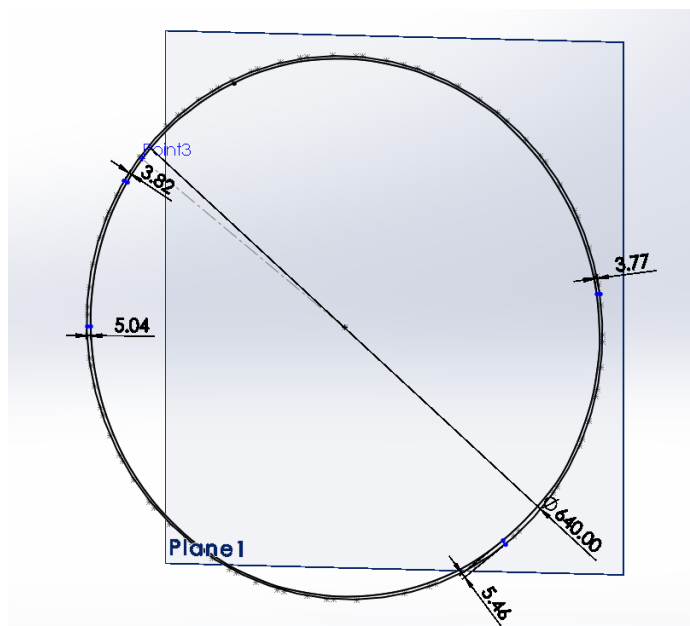
Για την εξοικονόμηση χρόνου και τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας, το καπάκι δεν μοντελοποιήθηκε εκ νέου αλλά τοποθετήθηκε πάνω του η νέα τροχιά την οποία θα ακολουθήσει ο βραχίονας στην διαδικασία της προσομοίωσης. Στην παρακάτω εικόνα διακρίνεται το assembly που δημιουργήθηκε με το καπάκι και η παραμετροποιημένη τροχιά τοποθετημένη πάνω του.



Σχήμα 8-15. Τοποθέτηση τροχιάς στο καπάκι

### 8.5 Έλεγχος αποτελεσμάτων

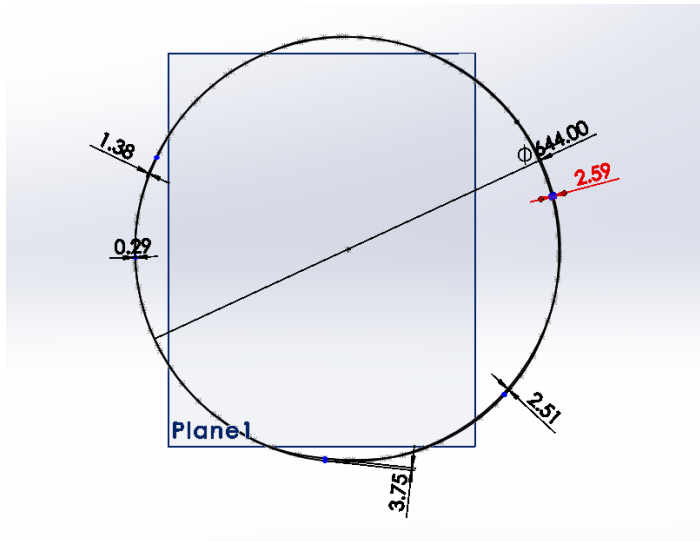
Πριν την υλοποίηση της προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε ένας δειγματοληπτικός έλεγχος στα σημεία της τροχιάς όπου οπτικά φαινόταν να υπάρχουν οι μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ της ονομαστικής και της πραγματικής τροχιάς. Όπως διακρίνουμε στην παρακάτω εικόνα ο έλεγχος για το καπάκι έδειξε σφάλματα έως και 5.5mm.



Σχήμα 8-16. Αποκλίσεις μεταξύ της ονομαστικής και της πραγματικής τροχιάς κατακτιού



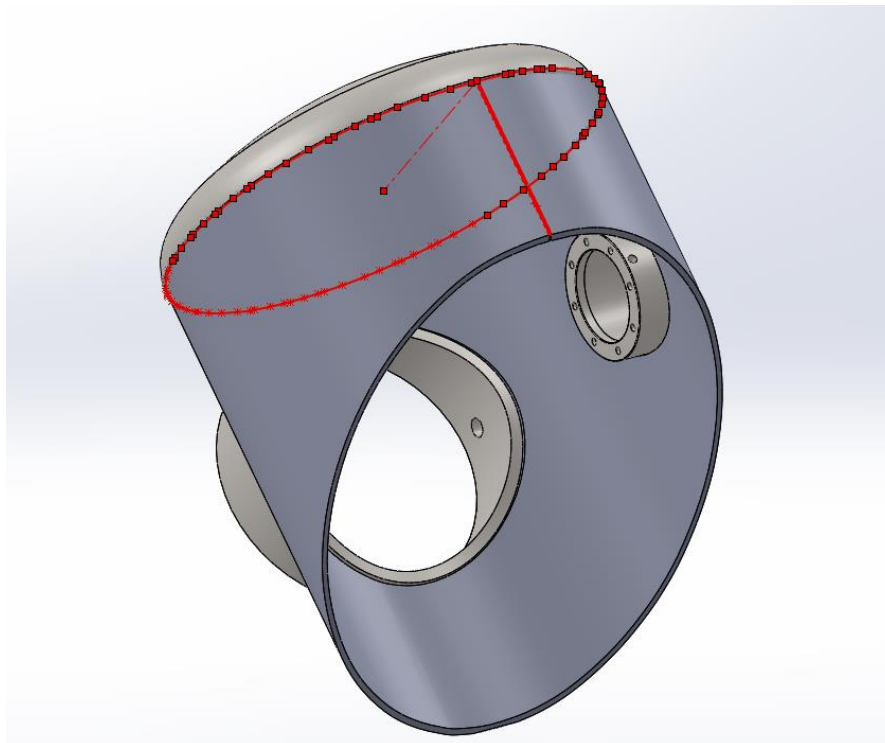
Ο έλεγχος του κυλίνδρου έδειξε σφάλματα έως και 3.75mm.



Σχήμα 8-17. Αποκλίσεις μεταξύ της ονομαστικής και της πραγματικής τροχιάς κυλίνδρου

### 8.6 Μοντελοποίηση υποκατασκευής

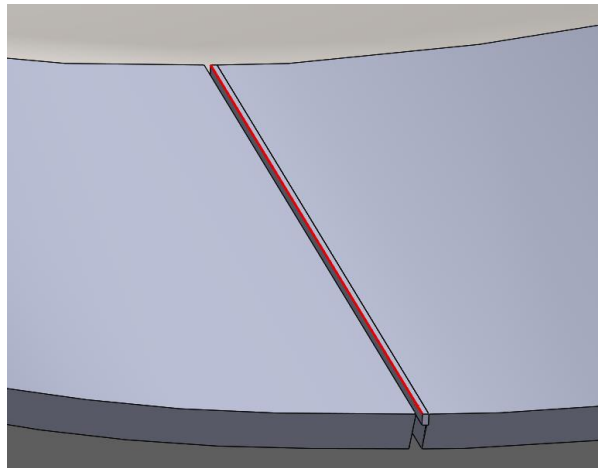
Τέλος με τις Coincident και Coincentric mates έγινε το assembly της υποκατασκευής. Όπως βλέπουμε λήφθηκε υπόψη και το σημείο αναφοράς της τροχιάς του καπακιού ώστε να τοποθετηθεί πάνω στον κύλινδρο.



Σχήμα 8-18. Συναρμολόγηση παραμετροποιημένου εξαρτήματος 11829U

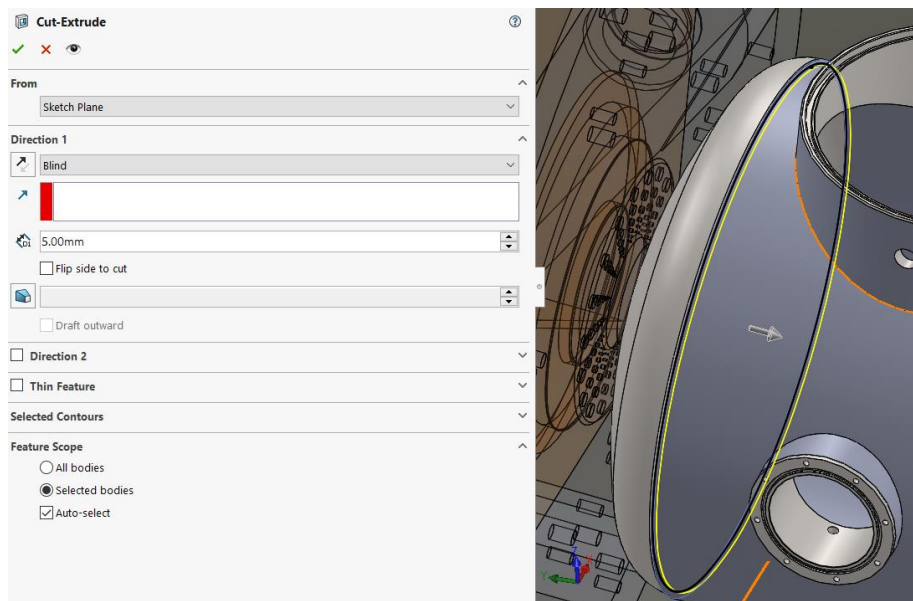
## 8.7 Προσομοίωση της συγκόλλησης

Για την υλοποίηση της συγκόλλησης και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων ακολουθήθηκε η μέθοδος του προηγούμενου κεφαλαίου. Κατά τον σχεδιασμό της τροχιάς της πρώτης και της δεύτερης συγκόλλησης το Solidworks δεν ήταν δυνατόν να αναγνωρίσει τροχιές σχεδιασμένες με Sketch πάνω στο τεμάχιο. Για τον λόγο αυτό για την συγκόλληση 1 δημιουργήθηκε με extrude μια επιφάνεια ώστε η ακμή της να αποτελέσει την τροχιά της συγκόλλησης.



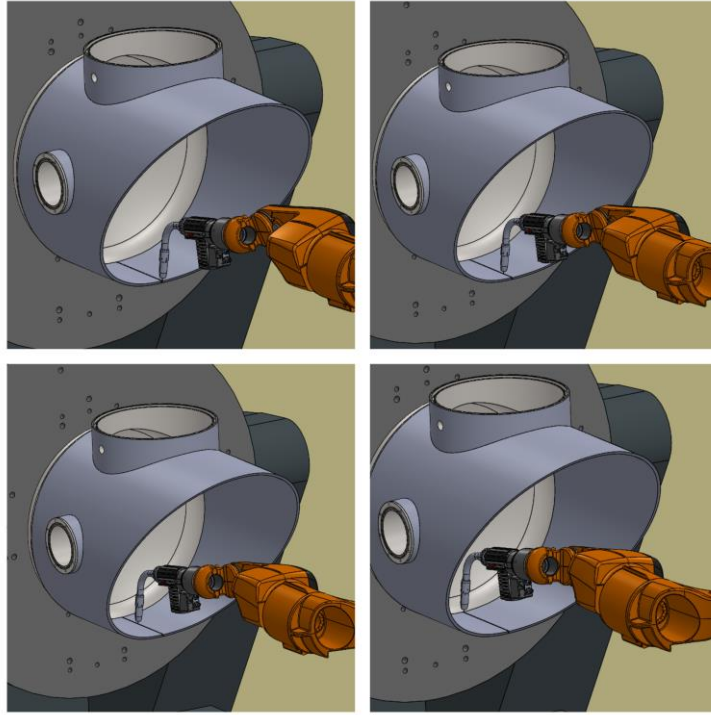
Σχήμα 8-19. Σχεδιασμός τροχιάς 1<sup>ης</sup> συγκόλλησης με extrude

Για την συγκόλληση 2 δημιουργήθηκε με extrude cut ένα αυλάκωμα στον κύλινδρο ώστε η ακμή του να αποτελέσει την τροχιά της συγκόλλησης.

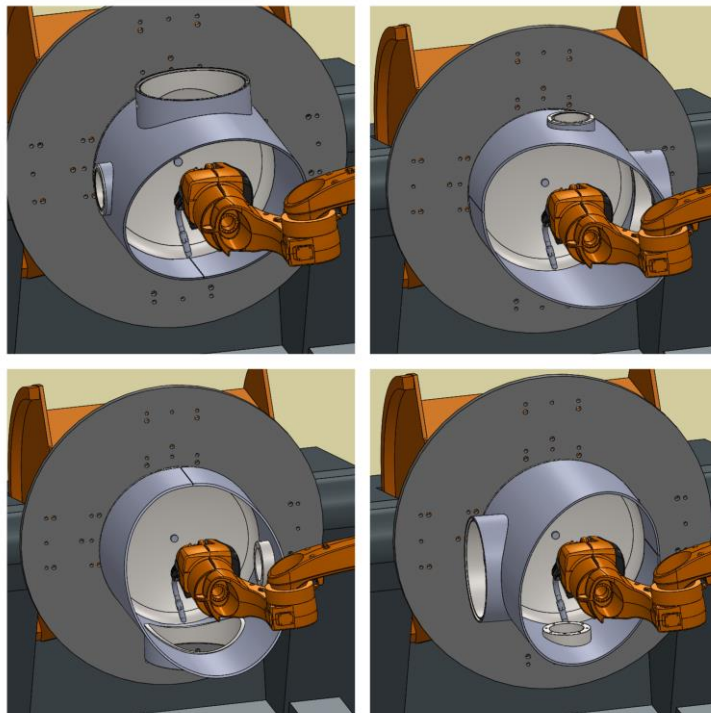


Σχήμα 8-20. Σχεδιασμός τροχιάς 2<sup>ης</sup> συγκόλλησης με extruded cut

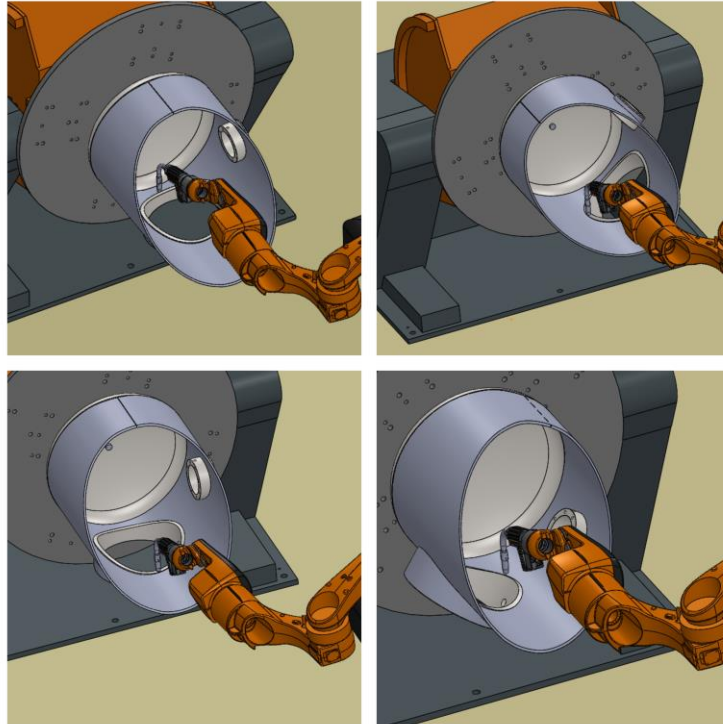
Επίσης κατά το calculation της προσομοίωσης της 2ης συγκόλλησης το Solidworks εμφάνιζε αρκετά σφάλματα λόγω της πολυπλοκότητας της τροχιάς. Τα σφάλματα λύθηκαν κάνοντας αρκετές φορές rebuilding το assembly και τρέχοντας το calculation μέχρι να επιτευχθεί. Οι προσομοιώσεις των συγκολλήσεων διακρίνονται παρακάτω.



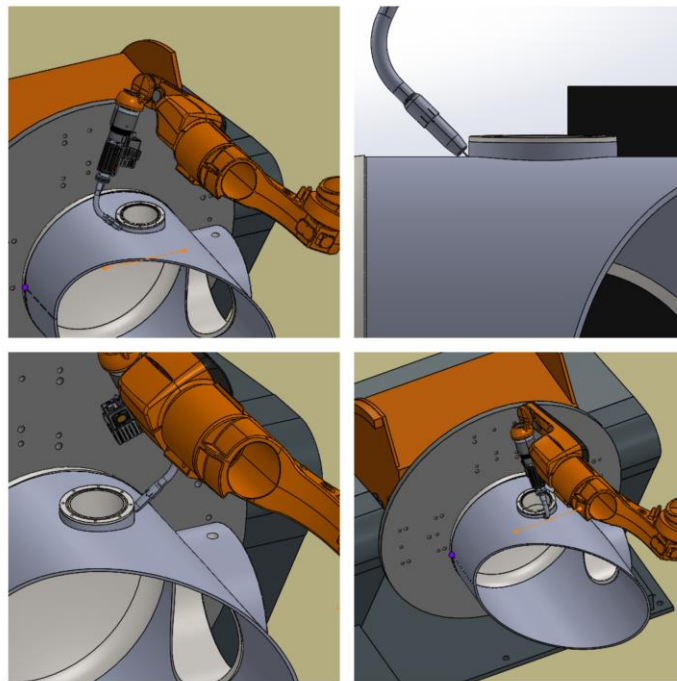
**Σχήμα 8-21.** Προσομοίωση 1<sup>ης</sup> συγκόλλησης



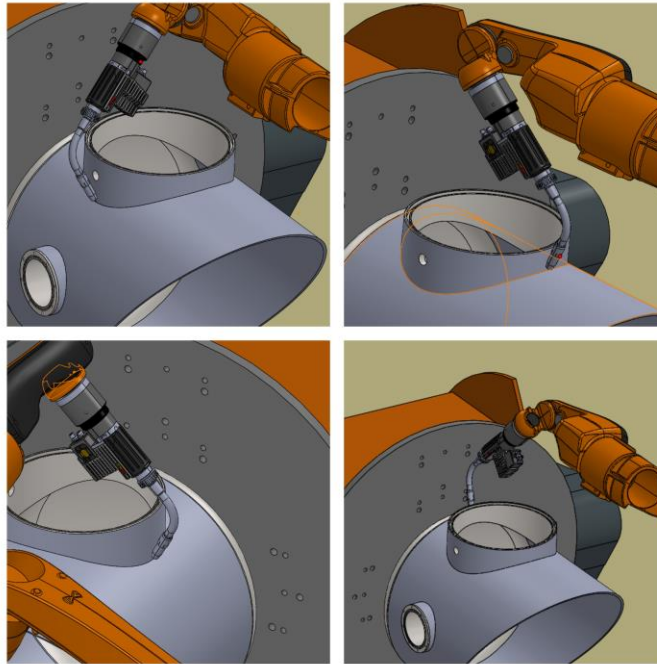
**Σχήμα 8-22.** Προσομοίωση 2<sup>ης</sup> συγκόλλησης



**Σχήμα 8-23.** Προσομοίωση 4<sup>ης</sup> συγκόλλησης



**Σχήμα 8-24.** Προσομοίωση 5<sup>ης</sup> συγκόλλησης

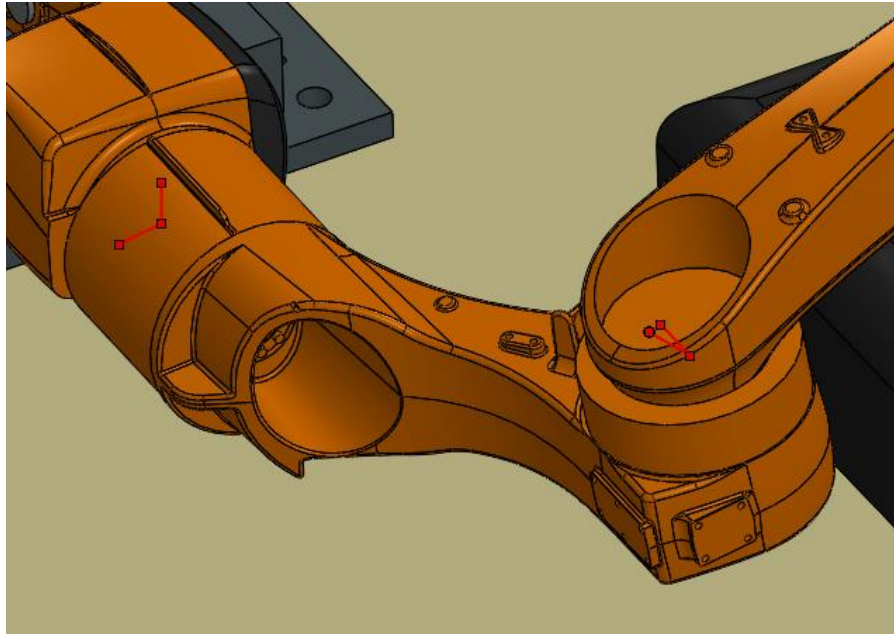


Σχήμα 8-25. Προσομοίωση 6<sup>ης</sup> συγκόλλησης

### 8.9 Εξαγωγή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης

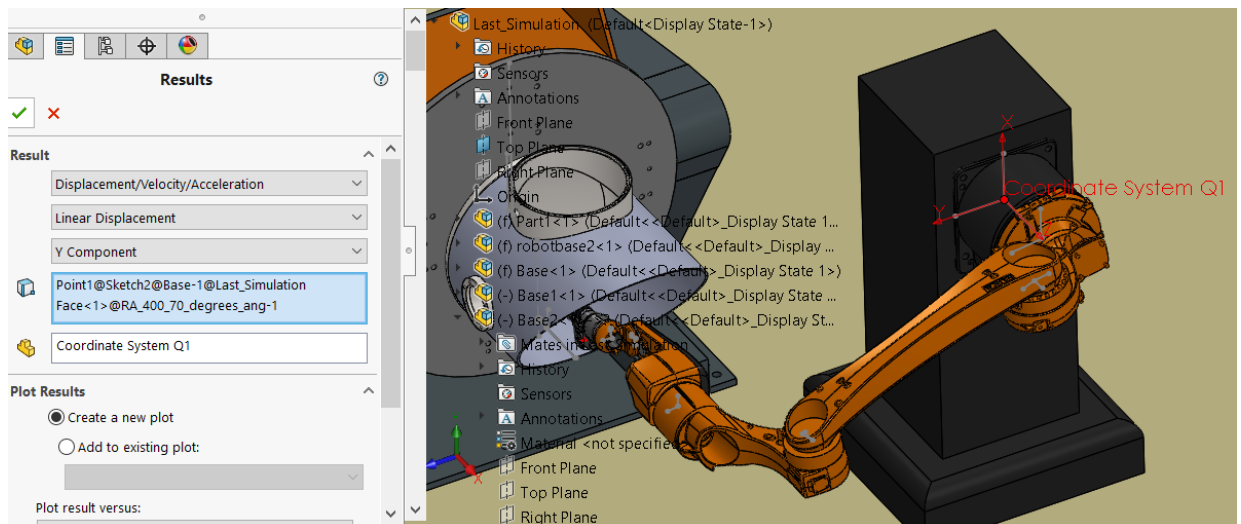
Με το πέρας της προσομοίωσης ήταν απαραίτητο να αντληθούν τα απαραίτητα αποτελέσματα όπως τιμές των αρθρώσεων και η θέση του επενεργητή σύμφωνα με το επιθυμητό σύστημα συντεταγμένων. Η δημιουργία των αποτελεσμάτων επιτυγχάνεται με την εντολή Results and Plots.

Για την καταγραφή των τιμών των αρθρώσεων χρησιμοποιήθηκε η angular displacement. Η εντολή αυτή δέχεται ως όρισμα mates η γεωμετρικά στοιχεία που σχηματίζουν γωνία στον χώρο. Στον συγκεκριμένο μηχανισμό έπρεπε να δημιουργηθούν γεωμετρικά στοιχεία (Σχήμα 8-26) πάνω στις αρθρώσεις του βραχίονα ώστε να λειτουργήσουν σαν αισθητήρια γωνιακής θέσης σχεδιασμένα έτσι ώστε η έξοδος τους να συμβαδίζει τις πραγματικές τιμές του βραχίονα έτσι όπως τις ορίζει η κατασκευάστρια εταιρεία. [38] Το αρνητικό αυτής της μεθόδου ήταν ότι η εντολή αυτή δεν είναι δυνατόν να δεχθεί ως όρισμα το απαραίτητο σύστημα συντεταγμένων ώστε οι τιμές της γωνίας να αποκτούν και αρνητικές τιμές. Ως αποτέλεσμα, η έξοδος του αισθητήρα έχει μόνο θετικές τιμές θέτοντας αναγκαία την περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων μετά την δημιουργία τους.



**Σχήμα 8-26.** Αισθητήρες μέτρησης των αρθρώσεων

Οι συντεταγμένες του επενεργητή του βραχίονα δημιουργήθηκαν με την εντολή `linear displacement`. Η εντολή αυτή δέχεται ως είσοδο το μετρούμενο σημείο και το σχετικό σύστημα συντεταγμένων ενώ ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ως προς ποιο διάνυσμα εκ των X,Y,Z θα γίνει η μέτρηση.



**Σχήμα 8-27.** Linear Displacement

## 8.10 Δημιουργία κώδικα προγραμματισμού (KRL)

Για την μετατροπή δεδομένων που προέκυψαν από την προσομοίωση των κατεργασιών χρησιμοποιήθηκε το MATLAB. Συγκεκριμένα υλοποιήθηκε Script ικανό να αντλεί τα δεδομένα της προσομοίωσης από το αντίστοιχο .xls file και να εξάγει την δομή (Struct) του ορισμού των θέσεων του βραχίονα ώστε να κινηθεί με τον επιθυμητό προσανατολισμό την τροχιά της συγκόλλησης.

Η KRL (Kinetic Rule Language or KUKA Robot Language) αποτελεί μια frame-based language η οποία αναπτύχθηκε από τους Daniel G. Bobrow και Terry Winograd. Η δημιουργία της προήλθε από την προσπάθεια να παραχθεί μια γλώσσα προγραμματισμού μηχανολογικού εξοπλισμού η οποία θα ήταν εύχρηστη και ευανάγνωστη από μηχανικούς. Για την εκμάθηση της υπάρχει ελεύθερο διαθέσιμο υλικό στο διαδίκτυο. Στην παρούσα μελέτη θα περιγράφουν μόνο οι εντολές του κώδικα που δημιουργήθηκε.

Η KRL μας επιτρέπει την δημιουργία δομών από objects για τον ορισμό της κίνησης του βραχίονα. Οι εντολές κίνησης υποστηρίζουν διάφορους τύπους δομών ως μορφές δεδομένων:

```
FRAME {X 10, Y 0, Z 500, A 0, B 0, C 0}
```

```
POS {X 10, Y 0, Z 500, A 0, B 0, C 0, S 6, T 21}
```

```
E3POS {X 10, Y 0, Z 500, A 0, B 0, C 0, S 6, T 21, E1 0, E2 0, E3 0}
```

```
E6POS {X 10, Y 0, Z 500, A 0, B 0, C 0, S 6, T 21, E1 0, E2 0, E3 0, E4 0, E5 0, E6 0}
```

```
AXIS {A1 0, A2 -90, A3 90, A4 0, A5 0, A6 0}
```

Με την εντολή AXIS ορίζεται object το οποίο περιλαμβάνει τις τιμές των αρθρώσεων του βραχίονα ώστε να οριστεί η θέση και ο προσανατολισμός. Δομήθηκε στο περιβάλλον της MATLAB λοιπόν Script ώστε να διαβάζει τα αποτελέσματα από τους πίνακες του παραρτήματος και να τα μετατρέπει σε ένα Struct το οποίο θα περιλαμβάνει όλα τα AXIS objects για τον ορισμό της κίνησης του βραχίονα στην τροχιά της συγκόλλησης. Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας βρίσκονται στην ενότητα «KRL Struct 1ης Συγκόλλησης» του παραρτήματος.

```
A=xlsread('C:\Users\Pantelis\Desktop\Simulation  
teliko\SimulationResults\SimulationResultsBackup.xlsx',2,'A4:N69');  
B=A(:,[1,5,6,7,8,9,10,3,4]).';  
formatSpec = 'DECL AXIS%d {A1 %.2f, A2 %.2f, A3 %.2f, A4 %.2f, A5 %.2f, A6 %.2f,A7  
%.2f, A8 %.2f}\n';  
fprintf(formatSpec,B);
```

## 9. Συμπεράσματα και μελλοντική εργασία

### 9.1 Σύνοψη

Στην παρούσα εργασία περιγράφηκε η μέθοδος σχεδιασμού και OLP προγραμματισμού ρομποτικού κελιού συγκόλλησης. Η διαδικασία περιλάμβανε τόσο την εισαγωγή των 3D μοντέλων για την αναπαράσταση του φυσικού χώρου, όσο και τον προγραμματισμό τους ώστε η κίνηση των μοντέλων να προσομοιώνει την λειτουργία των μηχανισμών του ρομποτικού κελιού. Η σχεδιασμός και η προσομοίωση υλοποιήθηκαν με το λογισμικό Solidworks. Η προσομοίωση υλοποιήθηκε με βάση τις ονομαστικές διαστάσεις της υπό κατεργασία μεταλλικής κατασκευής ενώ οι μηχανισμοί επιλέχθηκαν από την εταιρία Sclavos για χάρη της οποίας πραγματοποιήθηκε η συγκεκριμένη μελέτη.

Το βασικό πρόβλημα της κατεργασίας που μελετήθηκε είναι ότι γεωμετρία της ραφής αλλάζει συνεχώς, δεδομένου ότι αυτή βρίσκεται στην τομή δύο κυλίνδρων. Επιπλέον η πραγματική γεωμετρία του εξαρτήματος όπως αυτό προκύπτει από τις προηγούμενες κατεργασίες κοπής και καμπύλωσης διαφέρει από την ονομαστική, τυπικά κατά αρκετά δέκατα.

Για την επίλυση του προβλήματος, με τη χρήση της φωτογραμμετρίας μοντελοποιήθηκε η υπό κατεργασία κατασκευή με βάση τις πραγματικές διαστάσεις της. Με βάση τη φωτογραμμετρική μέτρηση παρατηρήθηκαν μεγάλα σφάλματα μεταξύ των πραγματικών και των ονομαστικών διαστάσεων της κατασκευής. Εισάγοντας το νέο 3D μοντέλο της κατασκευής πραγματοποιήθηκε νέα προσομοίωση του ρομποτικού κελιού και υλοποιήθηκε μέθοδος μετατροπής των αποτελεσμάτων του Solidworks σε κώδικα προγραμματισμού του ρομποτικού κελιού (Kuka KRL programming language).

#### 9.1.1 OLP με χρήση του Solidworks

Ο συμβατικός προγραμματισμός εργασιών ενός βιομηχανικού ρομπότ, στηριζόταν ανέκαθεν στην εμπειρία του χειριστή, ο οποίος προγραμμάτιζε την τροχιά του με συμβατικές μεθόδους όπως η teach pendant. Ο τρόπος αυτός εκτός από το ότι ήταν χρονοβόρος, εγκυμονούσε τον κίνδυνο του λάθους, θέτοντας σε κίνδυνο την ακεραιότητα του βιομηχανικού εξοπλισμού καθώς και της εργασίας καθώς η αυτοματοποίηση κατεργασιών όπως η συγκόλληση απαιτούν την κίνηση του ρομποτικού βραχίονα με μεγάλη ακρίβεια.

Με την χρήση του Solidworks επιτεύχθηκε η ο ακριβείς σχεδιασμός των απαιτούμενων μηχανισμών ενώ με το πέρας της προσομοίωσης εξήχθησαν οι τιμές των αρθρώσεων με ακρίβεια χιλιοστών της μοίρας ενώ το αντίστροφο κινηματικό μοντέλο του



βραχίονα επιλύθηκε αυτόματα από το λογισμικό με τη χρήση του αλγόριθμου Adams απαλλάσσοντας τον χρήστη από μια χρονοβόρα διαδικασία.

Η προσομοίωση μας έδειξε ότι με την χρήση των υπό μελέτη μηχανισμών δεν ήταν δυνατή η υλοποίηση της μίας κατεργασίας. Αυτό αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου καθώς μπορεί αναδείξει την ακαταλληλότητα κάποιων μηχανισμών από το στάδιο της μελέτης.

Η χρήση του Solidworks για τον Offline προγραμματισμό έχει και αρκετά μειονεκτήματα. Ένα βασικό μειονέκτημα είναι ότι το λογισμικό δεν περιέχει πιο εξειδικευμένες εντολές για τον ορισμό της τροχιάς και του προσανατολισμού του βραχίονα. Έτσι για την υλοποίηση της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν οι υπάρχουσες εντολές, η μέθοδο αυτή όμως οδηγούσε σε αδυναμία υπολογισμού του αντίστροφου κινηματικού μοντέλου του βραχίονα.

### **9.1.2 Παραμετροποίηση του προγραμματισμού με χρήση φωτογραμμετρίας**

Με τη χρήση της φωτογραμμετρίας η κατασκευή μοντελοποιήθηκε με μεγάλη ακρίβεια. Η μέτρηση μας κατέδειξε σφάλματα της κατασκευής που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ποιότητα της κατεργασίας εφόσον αυτή είχε προγραμματιστεί με βάση τις ονομαστικές διαστάσεις. Η διαδικασία όμως είναι χρονοβόρα και δεν είναι δυνατόν να πραγματοποιείται για κάθε υπό κατεργασία κατασκευή.

## **9.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα**

Στην συγκεκριμένη εργασία, η έρευνα επικεντρώθηκε στην κινηματική ανάλυση του βραχίονα, και την διαδικασία παραμετροποίησης του προγράμματος με βάση τα αποτελέσματα φωτογραμμετρίας χωρίς να επικεντρωθεί στην αυτοματοποίηση της διαδικασίας.

Η αυτοματοποίηση της μεθόδου θα μείωνε σημαντικά τον χρόνο υλοποίησης της καθιστώντας την ελκυστικότερη. Αυτή θα μπορούσε να υλοποιηθεί με δημιουργία λογισμικού το οποίο θα ήταν ικανό να λαμβάνει τα αποτελέσματα της μέτρησης να αλλάζει τις διαστάσεις του τεμαχίου, να προσομοιώνει τις κατεργασίες και να εξάγει το πρόγραμμα του ρομποτικού κελιού.

Επίσης θα μπορούσε να αυτοματοποιηθεί και η μέτρηση της κατασκευής σε κελί όπου ρομποτικός βραχίονας εξοπλισμένος με οπτικούς αισθητήρες θα πραγματοποιεί την μέτρηση της κατασκευής χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.

## Βιβλιογραφία

- [1] K. Baizid *et al.*, “IRoSim: Industrial Robotics Simulation Design Planning and Optimization platform based on CAD and knowledge technologies,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 42, pp. 121–134, 2016.
- [2] T. Balkan, M. A. Sahir Arikan, and M. Bulut, “PROWELD: An off-line welding robot programming package with an interactive graphical interface,” *Int. J. Mater. Prod. Technol.*, vol. 12, no. 4–6, pp. 364–372, 1997.
- [3] P. Božek, “Robot path optimization for spot welding applications in automotive industry,” *Teh. Vjesn.*, vol. 20, no. 5, pp. 913–917, 2013.
- [4] N. Bratovanov, “Robot Modeling, Motion Simulation and Off-Line Programming Based on SolidWorks API,” *Proc. - 3rd IEEE Int. Conf. Robot. Comput. IRC 2019*, pp. 574–579, 2019.
- [5] G. C. Carvalho, M. L. Siqueira, and S. C. Absi-Alfaro, “Off-line programming of flexible welding manufacturing cells,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 78, no. 1–3, pp. 24–28, 1998.
- [6] A. F. Castro, M. F. Silva, and F. J. G. Silva, “Designing a Robotic Welding Cell for Bus Body Frame Using a Sustainable Way,” *Procedia Manuf.*, vol. 11, no. June, pp. 207–214, 2017.
- [7] Y. Chen, “CAD-guided robot motion planning,” 2002.
- [8] M. Defaux, “Welding and cutting: Robots take the lead in 3D,” *Ind. Rob.*, vol. 31, no. 1, pp. 39–43, 2004.
- [9] X. Fang and J. Zhang, “A collaborative method between CAD and CAR software for robotic cells design,” *Proc. 2nd Int. Conf. Inf. Technol. Electron. Commer. ICITEC 2014*, pp. 127–131, 2014.
- [10] L. A. Ferreira, Y. L. Figueira, I. F. Iglesias, and M. Á. Souto, “Offline CAD-based Robot Programming and Welding Parametrization of a Flexible and Adaptive Robotic Cell Using Enriched CAD/CAM System for Shipbuilding,” *Procedia Manuf.*, vol. 11, no. June, pp. 215–223, 2017.
- [11] E. V. Gaponenko and S. I. Anciferov, “Design of robotic cells based on relative handling modules with use of SolidWorks system,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1015, no. 3, 2018.
- [12] M. Hajduk, S. Ján, and V. Marek, “Robotic cell with robot Kuka for spot welding,” *SAMI 2008 6th Int. Symp. Appl. Mach. Intell. Informatics - Proc.*, pp. 115–116, 2008.
- [13] N. Larkin, A. Short, Z. Pan, and S. Van Duin, “Automatic program generation for welding robots from CAD,” *IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics, AIM*, vol. 2016-September, pp. 560–565, 2016.
- [14] O. Legoff and J. Y. Hascoët, “From CAD to computer aided welding,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 36, no. 2, pp. 417–436, 1998.

- [15] T. Luhmann, "Close range photogrammetry for industrial applications," *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 65, no. 6, pp. 558–569, 2010.
- [16] P. Neto and N. Mendes, "Direct off-line robot programming via a common CAD package," *Rob. Auton. Syst.*, vol. 61, no. 8, pp. 896–910, 2013.
- [17] P. Neto, J. N. Pires, and A. P. Moreira, "Robot path simulation: A low cost solution based on CAD," *2010 IEEE Conf. Robot. Autom. Mechatronics, RAM 2010*, pp. 333–338, 2010.
- [18] Z. Pan, J. Polden, N. Larkin, S. Van Duin, and J. Norrish, "Recent progress on programming methods for industrial robots," *Jt. 41st Int. Symp. Robot. 6th Ger. Conf. Robot. 2010, ISR/ROBOTIK 2010*, vol. 1, no. 2, pp. 619–626, 2010.
- [19] Z. Pan, J. Polden, N. Larkin, S. Van Duin, and J. Norrish, "Automated offline programming for robotic welding system with high degree of freedoms," *Lect. Notes Electr. Eng.*, vol. 121 LNEE, pp. 685–692, 2011.
- [20] S. Pellegrinelli, N. Pedrocchi, L. Molinari, and T. T. Tolio, "Integrated approach for multi-robot spot-welding cell design and welding-point allocation," *Key Eng. Mater.*, vol. 572, no. 1, pp. 648–651, 2014.
- [21] J. N. Pires, T. Godinho, and P. Ferreira, "CAD interface for automatic robot welding programming," *Ind. Rob.*, vol. 31, no. 1, pp. 71–76, 2004.
- [22] M. Rodrigues, M. Kormann, C. Schuhler, and P. Tomek, "Robot trajectory planning using OLP and structured light 3D machine vision," *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 8034 LNCS, no. PART 2, pp. 244–253, 2013.
- [23] E. Roos and A. Behrens, "Off-line programming of industrial robots - Adaptation of simulated user programs to the real environment," *Comput. Ind.*, vol. 33, no. 1, pp. 139–150, 1997.
- [24] L. G. Socacio, "Off-programming of robotic arc welding systems" *Acta Tech. Napocensis*, vol. 55, no. I, pp. 207–210, 2012.
- [25] G. C. Vosniakos and A. Chronopoulos, "Industrial robot path planning in a constraint-based computer-aided design and kinematic analysis environment," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 223, no. 5, pp. 523–533, 2009.
- [26] D. Wan, L. Hui, and T. Xiaoting, "Off-line programming of spot-weld robot for car-body in white based on robcad," *Proc. 2007 IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom. ICMA 2007*, pp. 763–768, 2007.
- [27] X. F. Zha and H. Du, "Generation and simulation of robot trajectories in a virtual CAD-based off-line programming environment," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 17, no. 8, pp. 610–624, 2001.
- [28] K. C. Soon, K. M. Hoon, L. S. Jun, S. H. Lee, and J. K. Park, "Development of OLP based automation program for cutting process improve of shape steel cutting robot," *2008 Int. Conf. Control. Autom. Syst. ICCAS 2008*, pp. 2374–2378, 2008.

- [29] Jobst Bickendorf, “New Applications of Cutting and Welding Robots with Automatic Offline-Programming” 2016, Proceedings of ISR 2016: 47st International Symposium on Robotics, pp. 632–637, 2016.
- [30] H. Shen, “Research on the off-line programming system of six degree of freedom robot in vehicle door welding based on UG,” M2VIP 2016 - Proc. 23rd Int. Conf. Mechatronics Mach. Vis. Pract., pp. 1–5, 2017.
- [31] Π.Ν. Μπότσαρης «Στοιχεία τεχνολογίας παραγωγής», Ξάνθη 2012
- [32] Τεχνολογία συγκολλήσεων, ΤΕΙ Πειραιά 2015  
[http://triblab.teipir.gr/files/Welding/Lab/Ch4\\_4\\_GMAW\\_doc.pdf](http://triblab.teipir.gr/files/Welding/Lab/Ch4_4_GMAW_doc.pdf)
- [33] John J. Craig, Introduction to Robotics: Mechanics and Control ,3rd Edition
- [34] Α. Χρονόπουλος, “Προγραμματισμός Ρομπότ για Κύτταρα Κατεργασιών σε Περιβάλλον CAD με Χρήση Περιορισμών,” Διπλωματική Εργασία, 2007.
- [35] Παππιγγιώτης Θεόδωρος Έλεγχος και προγραμματισμός ρομποτικής διάταξης τύλιξης νήματος για κατασκευή απλών τεμαχίων από σύνθετα υλικά, Ε.Μ.Π. 2017
- [36] Σεραφείμ Μίχας Προγραμματισμός Τροχιάς και Τηλεπαρακολούθηση Λειτουργίας Ρομποτικού Βραχίονα σε Περιβάλλον Εικονικής Πραγματικότητας με χρήση Αισθητήρων Ηλεκτρονικών Συσκευών Ευρείας Κατανάλωσης, Ε.Μ.Π. 2015
- [37] An Overview of How to Use ADAMS/Solver  
[http://www2.me.rochester.edu/courses/ME204/nx\\_help/en\\_US/graphics/fileLibrary/nx/tdoc\\_motion/mss.pdf](http://www2.me.rochester.edu/courses/ME204/nx_help/en_US/graphics/fileLibrary/nx/tdoc_motion/mss.pdf)
- [38] Kuka Robotics Official website: <https://www.kuka.com>
- [39] Lassime Charlotte, “Optical metrology applications in manufacturing”, Internship Report, Ε.Μ.Π. 2015

# Παράρτημα

## Αποτελέσματα φωτογραμμετρικών μετρήσεων κυλίνδρου

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
P1	-23.671	324.377	-1.318.329
P2	316.404	360.282	-1.625.448
P3	-322.653	382.349	-1.681.249
P4	-308.428	389.750	-1.743.305
P5	-286.018	397.975	-1.795.107
P6	-251.094	404.695	-1.844.927
P7	-205.765	410.953	-1.887.922
P8	-146.076	413.689	-1.924.272
P9	-88.512	412.523	-1.945.334
P10	121.784	330.079	-1.342.973
P11	69.103	403.980	-1.945.243
P12	-80.753	327.031	-1.326.546
P13	-133.285	330.554	-1.344.777
P14	-177.154	334.507	-1.368.672
P15	-224.406	341.046	-1.405.131
P16	-260.542	348.236	-1.444.530
P17	-293.385	355.596	-1.500.050
P18	31.149	323.478	-1.319.065
P19	-314.848	363.368	-1.559.167
P20	-324.091	371.806	-1.615.947
P21	190.799	402.759	-1.888.832
P22	-276.624	358.050	-1.467.290
P23	245.035	395.762	-1.838.159
P24	-245.696	351.451	-1.425.716
P25	90.983	323.129	-1.331.903
P26	144.670	407.176	-1.917.875
P27	149.716	326.193	-1.357.383
P28	200.353	329.434	-1.392.217
P29	245.029	334.527	-1.437.278
P30	280.069	342.066	-1.491.992
P31	305.785	349.968	-1.557.644
P32	-112.086	334.583	-1.335.219
P33	29.921	406.434	-1.950.634
P34	109.142	405.625	-1.934.114
P35	165.313	400.483	-1.906.524
P36	220.270	394.948	-1.864.968
P37	262.843	386.223	-1.814.947
P38	292.874	377.755	-1.758.738
P39	311.815	369.516	-1.693.548
P40	-53.992	331.654	-1.320.632
P41	-45.130	331.675	-1.319.388
P42	-0.573	331.130	-1.316.549

P43	8.408	330.788	-1.316.538
P44	58.983	330.319	-1.322.157
P45	67.814	330.723	-1.323.667
P46	171.355	333.515	-1.369.383
P47	178.718	334.372	-1.374.313
P48	221.835	337.517	-1.410.763
P49	228.032	336.890	-1.417.208
P50	262.773	342.901	-1.460.948
P51	267.558	343.993	-1.468.458
P52	295.305	350.397	-1.525.046
P53	312.622	360.796	-1.586.118
P54	313.920	361.308	-1.595.003
P55	316.223	369.527	-1.656.249
P56	315.566	368.903	-1.665.178
P57	305.941	378.630	-1.719.402
P58	303.530	379.486	-1.728.000
P59	282.398	386.155	-1.781.083
P60	278.289	386.531	-1.788.985
P61	136.811	408.690	-1.921.905
P62	-3.021	410.475	-1.952.653
P63	-12.017	410.585	-1.952.622
P64	-115.231	419.025	-1.936.449
P65	-123.618	418.750	-1.933.248
P66	-58.390	416.860	-1.949.727
P67	-67.274	416.942	-1.948.544
P68	-266.667	411.235	-1.823.890
P69	-271.692	407.921	-1.817.257
P70	-299.569	396.658	-1.766.277
P71	-316.718	392.098	-1.714.032
P72	-318.534	390.466	-1.705.394
P73	-324.864	383.354	-1.649.795
P74	-324.985	382.212	-1.640.904
P75	-320.133	373.690	-1.582.617
P76	-307.016	364.669	-1.533.045
P77	-206.080	343.221	-1.388.608
P78	-199.058	342.456	-1.383.074
P79	-161.421	339.028	-1.358.427
P80	-153.597	338.745	-1.354.011
P81	-228.617	412.889	-1.867.547
P82	198.015	401.160	-1.883.760

## Αποτελέσματα φωτογραμμετρικών μετρήσεων κατακτιού

	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
P1	-8.608	372.872	-1.613.169
P2	79.527	387.219	-2.218.928
P3	-47.599	388.667	-1.636.184
P4	-85.803	402.806	-1.667.166
P5	-116.948	416.358	-1.703.124
P6	-144.200	428.545	-1.747.708
P7	-164.182	439.327	-1.798.565
P8	48.394	351.601	-1.592.241
P9	-5.194	410.335	-2.191.737
P10	109.861	329.225	-1.584.175
P11	172.461	309.315	-1.589.761
P12	226.278	291.883	-1.605.899
P13	282.241	274.432	-1.635.785
P14	336.803	261.356	-1.682.491
P15	377.076	251.201	-1.735.755
P16	410.556	243.743	-1.809.644
P17	424.548	244.008	-1.877.516
P18	423.408	247.606	-1.950.754
P19	409.672	258.202	-2.013.556
P20	194.011	347.432	-2.215.551
P21	137.247	365.848	-2.223.156
P22	-175.755	448.021	-1.855.756
P23	-177.648	452.921	-1.913.497
P24	-170.021	453.556	-1.972.041
P25	-151.734	451.350	-2.030.002
P26	-124.312	445.565	-2.082.396
P27	-81.649	435.988	-2.134.670
P28	-30.731	425.578	-2.174.550
P29	20.215	407.138	-2.202.046
P30	-73.418	392.079	-1.654.620
P31	-66.758	389.921	-1.649.756
P32	-33.852	376.412	-1.626.293
P33	-26.638	373.460	-1.621.959
P34	12.124	358.948	-1.603.448
P35	20.290	356.937	-1.600.520
P36	69.536	339.055	-1.587.680
P37	77.727	335.714	-1.586.591
P38	134.567	316.235	-1.584.991
P39	142.977	313.562	-1.585.694
P40	191.823	298.439	-1.594.816
P41	207.328	292.062	-1.599.313
P42	254.875	277.819	-1.619.931
P43	301.783	264.432	-1.650.851
P44	312.785	261.437	-1.660.766

P45	391.748	241.488	-1.766.637
P46	395.414	240.497	-1.774.728
P47	418.004	239.017	-1.843.541
P48	419.521	238.594	-1.852.308
P49	424.497	239.914	-1.912.087
P50	424.677	240.557	-1.920.993
P51	351.614	250.375	-1.702.500
P52	357.128	249.314	-1.709.482
P53	417.873	246.113	-1.976.364
P54	415.974	247.067	-1.985.069
P55	400.586	258.142	-2.034.760
P56	397.253	259.890	-2.042.902
P57	370.909	269.918	-2.090.916
P58	365.854	272.596	-2.097.749
P59	325.725	288.177	-2.143.304
P60	319.512	290.914	-2.149.148
P61	280.395	305.448	-2.178.091
P62	273.339	308.363	-2.182.652
P63	228.203	328.081	-2.204.812
P64	220.758	332.126	-2.207.588
P65	169.042	350.025	-2.220.623
P66	160.972	353.677	-2.221.645
P67	108.590	370.444	-2.223.284
P68	100.639	374.443	-2.222.479
P69	50.786	389.832	-2.213.977
P70	42.651	392.691	-2.211.844
P71	-12.908	412.505	-2.187.733
P72	-57.195	424.484	-2.158.494
P73	-63.741	426.832	-2.152.902
P74	-100.788	438.088	-2.115.232
P75	-106.304	439.684	-2.108.376
P76	-138.681	444.243	-2.061.246
P77	-142.848	444.904	-2.053.381
P78	-162.417	447.482	-2.006.727
P79	-165.193	447.672	-1.998.223
P80	-176.018	449.243	-1.948.340
P81	-177.266	448.820	-1.939.479
P82	-180.025	445.795	-1.888.635
P83	-179.466	445.733	-1.879.705
P84	-173.337	439.572	-1.829.138
P85	-158.621	429.595	-1.776.541
P86	-155.457	427.785	-1.768.438

## Κώδικας MATLAB εύρεσης Least Square Fit Plane

```
lidarFile = 'C:\Users\Pantelis\Desktop\Simulation teliko\MATLAB files\Photogrammetry
Results\CylinderResults.txt';
fp = fopen(lidarFile, 'r');
ALS = fscanf(fp, '%f %f %f', [3 inf]);
fclose(fp);
ALS = ALS';
x=ALS(:,1);
y=ALS(:,2);
z =ALS(:,3);
B = [x(:) y(:) ones(size(x(:)))] \ z(:);
xv = linspace(min(x), max(x), 10)';
yv = linspace(min(y), max(y), 10)';
[X,Y] = meshgrid(xv, yv);
Z = reshape([X(:), Y(:), ones(size(X(:)))] * B, numel(xv), []);
scatter3(x,y,z, 'filled')
hold on
mesh(X, Y, Z, 'FaceAlpha', 0.5)
hold off
view(-120, 35)
title(sprintf('Z = %+.3E\cdotX %+.3E\cdotY %+.3E', B))
```

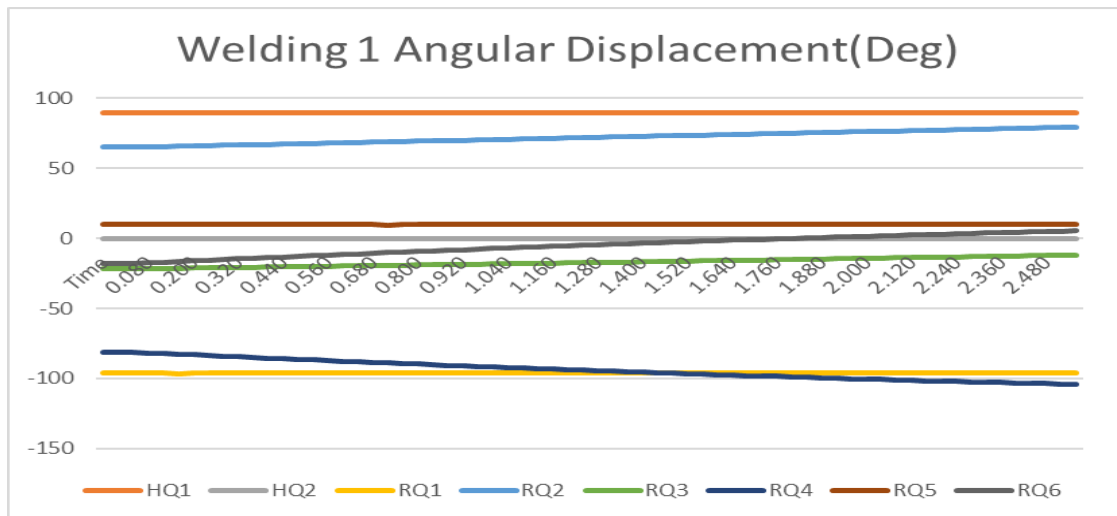
## KRL Struct 1<sup>ης</sup> Συγκόλλησης

DECL AXIS1 {A1 -96.278, A2 65.598, A3 -21.343, A4 -81.052, A5 10.027, A6 -18.206, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS2 {A1 -96.278, A2 65.576, A3 -21.368, A4 -81.187, A5 10.020, A6 -18.070, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS3 {A1 -96.281, A2 65.536, A3 -21.418, A4 -81.531, A5 10.002, A6 -17.722, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS4 {A1 -96.285, A2 65.414, A3 -21.526, A4 -81.867, A5 9.982, A6 -17.386, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS5 {A1 -96.284, A2 65.656, A3 -21.377, A4 -82.260, A5 9.976, A6 -16.985, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS6 {A1 -96.286, A2 65.757, A3 -21.334, A4 -82.728, A5 9.961, A6 -16.512, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS7 {A1 -96.285, A2 65.985, A3 -21.199, A4 -83.197, A5 9.952, A6 -16.034, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS8 {A1 -96.284, A2 66.214, A3 -21.064, A4 -83.663, A5 9.945, A6 -15.561, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS9 {A1 -96.284, A2 66.442, A3 -20.927, A4 -84.126, A5 9.938, A6 -15.091, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS10 {A1 -96.283, A2 66.671, A3 -20.789, A4 -84.585, A5 9.931, A6 -14.624, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS11 {A1 -96.283, A2 66.899, A3 -20.651, A4 -85.040, A5 9.926, A6 -14.161, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS12 {A1 -96.282, A2 67.127, A3 -20.512, A4 -85.492, A5 9.921, A6 -13.702, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS13 {A1 -96.281, A2 67.356, A3 -20.372, A4 -85.941, A5 9.917, A6 -13.246, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS14 {A1 -96.281, A2 67.584, A3 -20.231, A4 -86.385, A5 9.913, A6 -12.794, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS15 {A1 -96.280, A2 67.813, A3 -20.089, A4 -86.826, A5 9.910, A6 -12.346, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS16 {A1 -96.280, A2 68.041, A3 -19.946, A4 -87.264, A5 9.907, A6 -11.901, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS17 {A1 -96.279, A2 68.269, A3 -19.803, A4 -87.697, A5 9.906, A6 -11.461, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS18 {A1 -96.279, A2 68.498, A3 -19.659, A4 -88.127, A5 9.904, A6 -11.023, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS19 {A1 -96.278, A2 68.726, A3 -19.514, A4 -88.554, A5 9.904, A6 -10.590, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS20 {A1 -96.278, A2 68.955, A3 -19.368, A4 -88.976, A5 9.903, A6 -10.161, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS21 {A1 -96.277, A2 69.183, A3 -19.221, A4 -89.395, A5 9.904, A6 -9.735, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS22 {A1 -96.277, A2 69.411, A3 -19.073, A4 -89.810, A5 9.904, A6 -9.313, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS23 {A1 -96.276, A2 69.640, A3 -18.925, A4 -90.222, A5 9.906, A6 -8.895, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS24 {A1 -96.276, A2 69.868, A3 -18.776, A4 -90.629, A5 9.908, A6 -8.481, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS25 {A1 -96.276, A2 70.096, A3 -18.625, A4 -91.033, A5 9.910, A6 -8.071, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS26 {A1 -96.275, A2 70.325, A3 -18.475, A4 -91.433, A5 9.913, A6 -7.664, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS27 {A1 -96.275, A2 70.553, A3 -18.323, A4 -91.829, A5 9.916, A6 -7.262, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS28 {A1 -96.274, A2 70.781, A3 -18.170, A4 -92.222, A5 9.919, A6 -6.863, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS29 {A1 -96.274, A2 71.010, A3 -18.017, A4 -92.610, A5 9.923, A6 -6.468, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS30 {A1 -96.274, A2 71.238, A3 -17.863, A4 -92.995, A5 9.928, A6 -6.077, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS31 {A1 -96.273, A2 71.466, A3 -17.708, A4 -93.376, A5 9.932, A6 -5.690, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS32 {A1 -96.273, A2 71.695, A3 -17.552, A4 -93.753, A5 9.937, A6 -5.307, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS33 {A1 -96.272, A2 71.923, A3 -17.395, A4 -94.126, A5 9.943, A6 -4.928, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS34 {A1 -96.272, A2 72.151, A3 -17.238, A4 -94.495, A5 9.949, A6 -4.552, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS35 {A1 -96.272, A2 72.380, A3 -17.080, A4 -94.861, A5 9.955, A6 -4.181, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS36 {A1 -96.272, A2 72.608, A3 -16.921, A4 -95.222, A5 9.961, A6 -3.814, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS37 {A1 -96.271, A2 72.836, A3 -16.761, A4 -95.580, A5 9.968, A6 -3.450, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS38 {A1 -96.271, A2 73.064, A3 -16.600, A4 -95.934, A5 9.975, A6 -3.091, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS39 {A1 -96.271, A2 73.293, A3 -16.439, A4 -96.284, A5 9.983, A6 -2.735, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS40 {A1 -96.270, A2 73.521, A3 -16.276, A4 -96.630, A5 9.990, A6 -2.383, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS41 {A1 -96.270, A2 73.749, A3 -16.113, A4 -96.972, A5 9.998, A6 -2.036, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS42 {A1 -96.270, A2 73.978, A3 -15.949, A4 -97.310, A5 10.006, A6 -1.692, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS43 {A1 -96.270, A2 74.206, A3 -15.784, A4 -97.645, A5 10.015, A6 -1.352, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS44 {A1 -96.269, A2 74.434, A3 -15.619, A4 -97.975, A5 10.023, A6 -1.016, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS45 {A1 -96.269, A2 74.662, A3 -15.452, A4 -98.302, A5 10.032, A6 -0.685, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS46 {A1 -96.269, A2 74.891, A3 -15.285, A4 -98.624, A5 10.041, A6 -0.357, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS47 {A1 -96.269, A2 75.119, A3 -15.117, A4 -98.943, A5 10.050, A6 -0.033, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS48 {A1 -96.269, A2 75.347, A3 -14.948, A4 -99.258, A5 10.060, A6 0.287, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS49 {A1 -96.269, A2 75.576, A3 -14.779, A4 -99.569, A5 10.069, A6 0.603, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS50 {A1 -96.269, A2 75.804, A3 -14.608, A4 -99.876, A5 10.079, A6 0.915, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS51 {A1 -96.268, A2 76.032, A3 -14.437, A4 -100.179, A5 10.089, A6 1.223, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS52 {A1 -96.268, A2 76.261, A3 -14.264, A4 -100.479, A5 10.099, A6 1.528, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS53 {A1 -96.268, A2 76.489, A3 -14.091, A4 -100.774, A5 10.109, A6 1.828, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS54 {A1 -96.268, A2 76.717, A3 -13.918, A4 -101.066, A5 10.119, A6 2.124, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS55 {A1 -96.268, A2 76.946, A3 -13.743, A4 -101.353, A5 10.130, A6 2.416, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS56 {A1 -96.268, A2 77.174, A3 -13.567, A4 -101.637, A5 10.140, A6 2.704, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS57 {A1 -96.268, A2 77.403, A3 -13.391, A4 -101.917, A5 10.151, A6 2.989, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS58 {A1 -96.268, A2 77.631, A3 -13.214, A4 -102.193, A5 10.162, A6 3.269, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS59 {A1 -96.268, A2 77.859, A3 -13.036, A4 -102.465, A5 10.172, A6 3.546, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS60 {A1 -96.268, A2 78.088, A3 -12.857, A4 -102.733, A5 10.183, A6 3.818, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS61 {A1 -96.268, A2 78.316, A3 -12.677, A4 -102.997, A5 10.194, A6 4.087, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS62 {A1 -96.268, A2 78.545, A3 -12.496, A4 -103.258, A5 10.205, A6 4.351, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS63 {A1 -96.268, A2 78.774, A3 -12.315, A4 -103.514, A5 10.216, A6 4.612, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS64 {A1 -96.268, A2 79.002, A3 -12.133, A4 -103.767, A5 10.227, A6 4.869, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS65 {A1 -96.268, A2 79.231, A3 -11.949, A4 -104.016, A5 10.238, A6 5.122, A7 90.000, A8 0.000}  
DECL AXIS66 {A1 -96.268, A2 79.459, A3 -11.765, A4 -104.261, A5 10.249, A6 5.370, A7 90.000, A8 0.000}

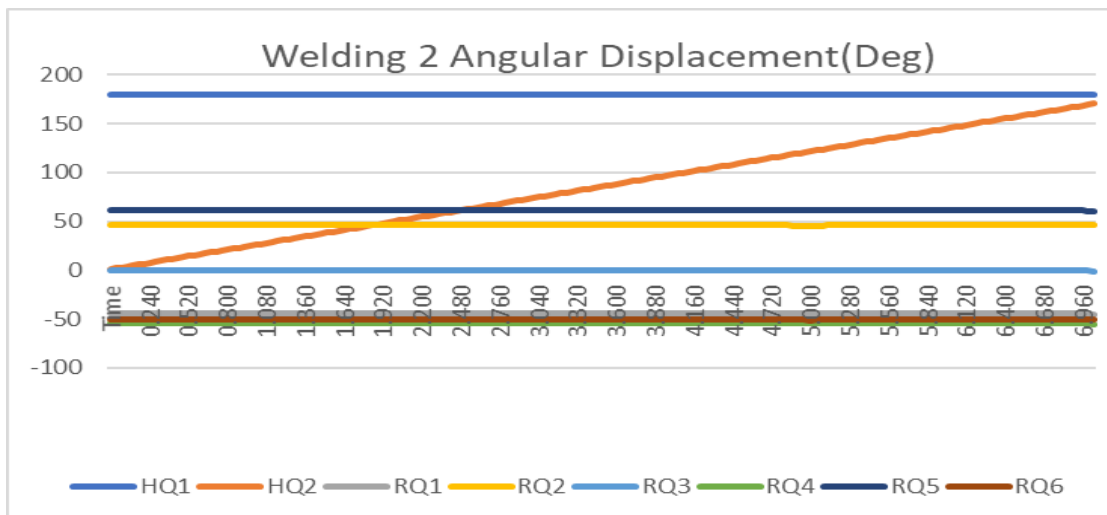




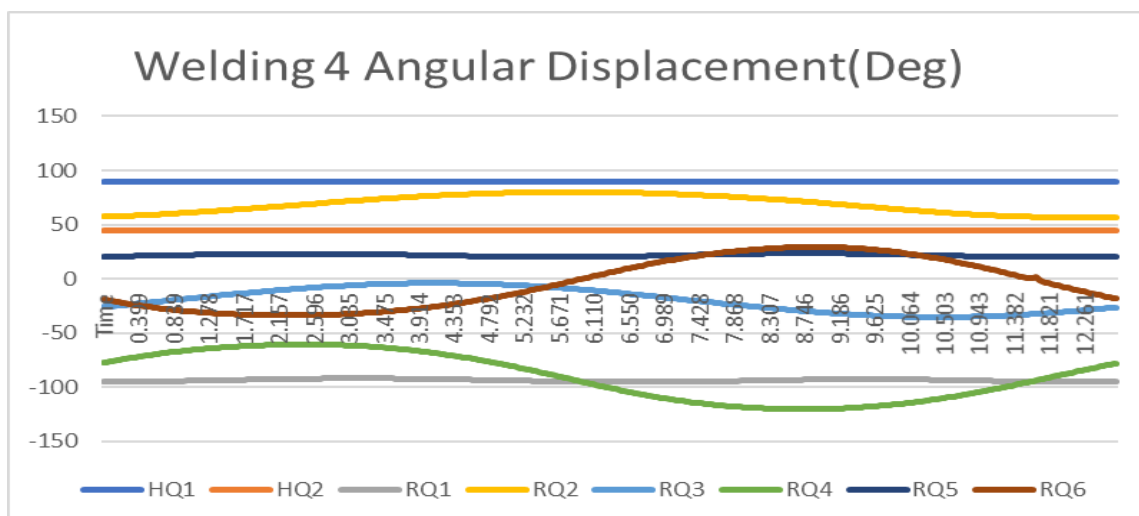
### Διαγράμματα μεταβολής των τιμών των αρθρώσεων του ρομπότ



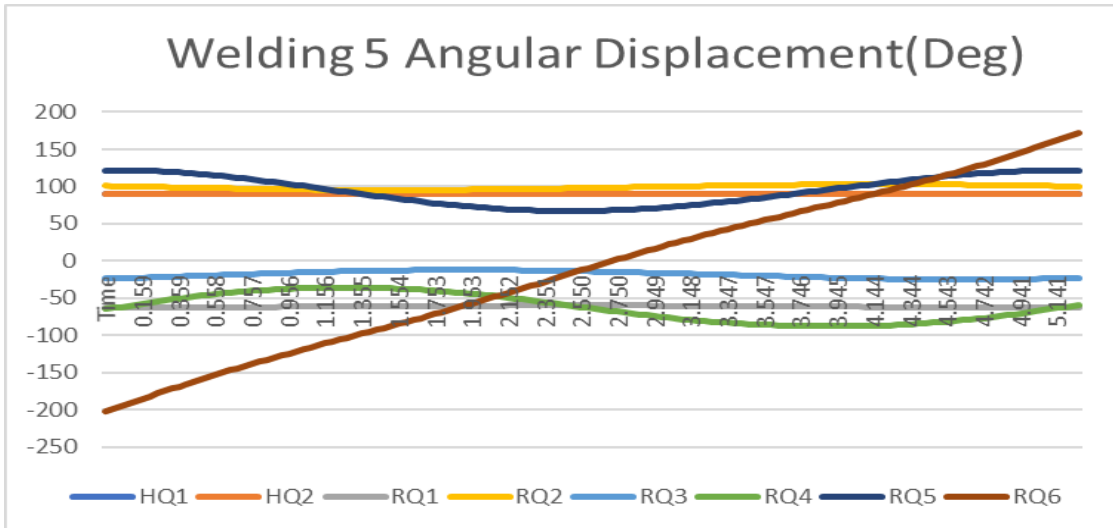
Σχήμα 11-1. 1<sup>st</sup> Welding Simulation Angular displacement



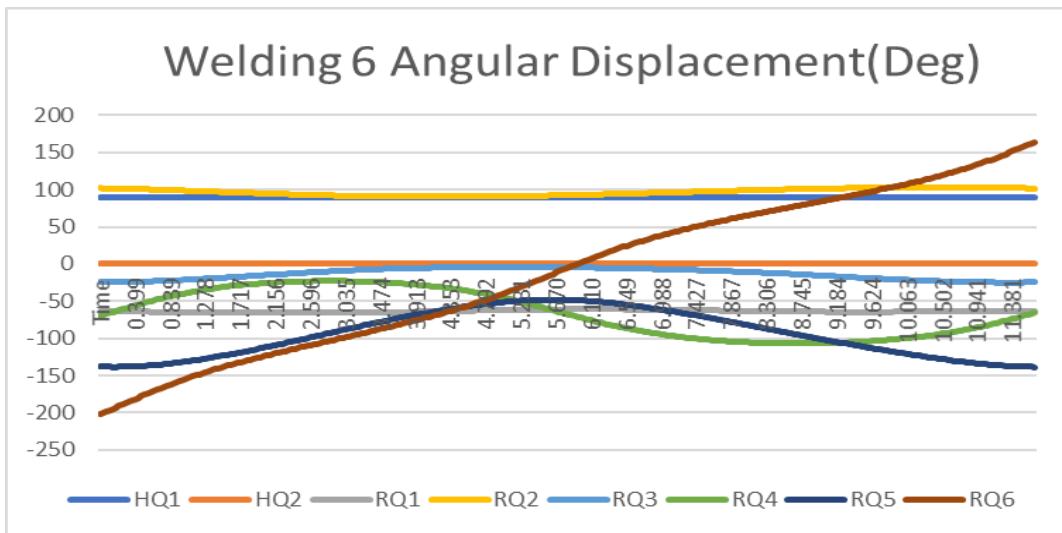
Σχήμα 11-2. 2<sup>nd</sup> Welding Simulation Angular displacement



Σχήμα 11-3. 4<sup>th</sup> Welding Simulation Angular displacement

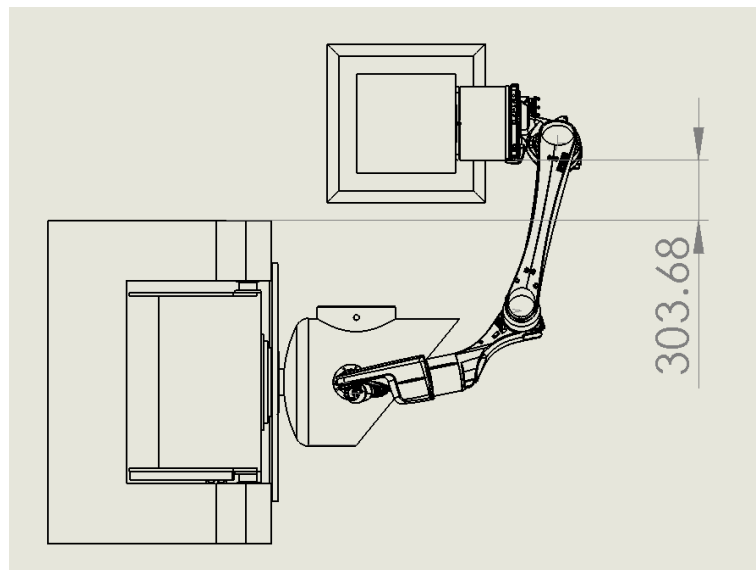


Σχήμα 11-4. 5<sup>th</sup> Welding Simulation Angular displacement

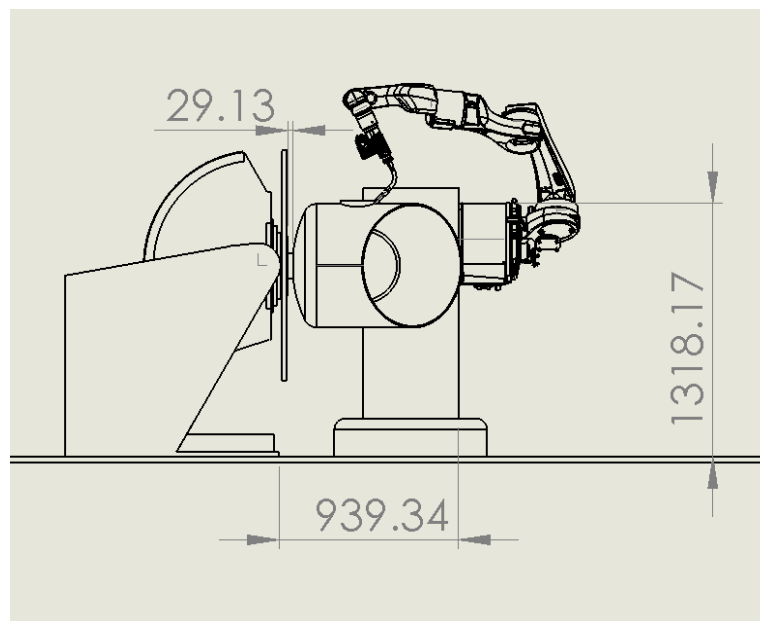


Σχήμα 11-5. 6<sup>th</sup> Welding Simulation Angular displacement

## Σχέδιο τοποθέτησης του ρομποτικού βραχίονα



Σχήμα 11-6. Κάτοψη κελιού



Σχήμα 11-7. Αριστερή πλάγια όψη κελιού