



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ
ΓΡΗΓΟΡΟ ΚΑΙ ΕΥΕΛΙΚΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟ
ΣΥΝΕΡΓΑΤΙΚΩΝ ΡΟΜΠΟΤ ΣΕ ΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΟΥΜΕΝΑ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

ΔΗΜΟΣΘΕΝΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΟΣΘΕΝΗΣ

ΑΜ: 1054463

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:
ΣΤΑΥΡΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ – ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Διπλωματική εργασία υποβληθείσα στο Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών του
Πανεπιστημίου Πατρών

ΠΑΤΡΑ, 2/2022

Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών
ΔΗΜΟΣΘΕΝΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΟΣΘΕΝΗΣ

© 2022 – Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας δεν υποδηλοί την αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.
Κατά τη συγγραφή τηρήθηκαν οι αρχές της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΓΡΗΓΟΡΟ ΚΑΙ ΕΥΕΛΙΚΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟ ΣΥΝΕΡΓΑΤΙΚΩΝ ΡΟΜΠΟΤ ΣΕ ΑΝΑΔΙΑΜΟΡΦΟΥΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

ΔΗΜΟΣΘΕΝΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΟΣΘΕΝΗΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μετάβαση από τη μαζική παραγωγή στην παραγωγή εξατομικευμένων προϊόντων είναι ο βασικός καταλύτης πίσω από το Industry4.0 και οδηγεί στην ανάπτυξη σύγχρονων συστημάτων παραγωγής. Αυτό με τη σειρά του δημιουργεί την ανάγκη ανάπτυξης ευέλικτων και αναδιαμορφώσιμων συστημάτων συναρμολόγησης. Αυτή η διπλωματική διερευνά τη χρήση της τεχνολογίας Ψηφιακού Διδύμου σε τέτοια συστήματα παραγωγής για την αύξηση της ευελιξίας και της δυνατότητας αναδιαμόρφωσης του μέσω διαφόρων λειτουργιών. Η προτεινόμενη υλοποίηση Ψηφιακού Διδύμου (ΨΔ) περιλαμβάνει δύο κύρια συστατικά: α) Την ψηφιακή αναπαράσταση της εγκατάστασης παραγωγής, συνδυάζοντας πολλαπλά δεδομένα αισθητήρων και μοντέλα CAD. Η εικονική εγκατάσταση παραγωγής αποδίδεται στο τρισδιάστατο περιβάλλον αξιοποιώντας τις δυνατότητες που παρέχονται από το λειτουργικό σύστημα Robot Operating System (ROS) και β) Τον έλεγχο της συμπεριφοράς πολλαπλών ρομπότ σε πραγματικό χρόνο (χρησιμοποιώντας διάφορες λειτουργίες).

Η επικοινωνία μεταξύ των φυσικών και των ψηφιακών τμημάτων στο επίπεδο του Ψηφιακού Διδύμου πραγματοποιείται μέσω του ROS. Η ενσωμάτωση του ΨΔ σε ένα συνολικό σύστημα παραγωγής με διάφορα στοιχεία (όπως συστήματα προγραμματισμού διεργασιών) πραγματοποιείται μέσω του Asset Administration Shell (AAS) και ενός συστήματος επικοινωνίας μεταξύ ROS-AAS που είναι υπεύθυνο για τη μετάφραση των δεδομένων μεταξύ των δύο μορφών. Τέλος, αναπτύχθηκε ένα σύστημα ενορχήστρωσης διεργασιών (Διαχειριστής ροής εργασίας) που είναι υπεύθυνο για την αποστολή των προγραμματισμένων εργασιών στους επιλεγμένους πόρους.

Η ανεπτυγμένη υποδομή εφαρμόστηκε σε ένα σενάριο εμπνευσμένο από τη βιομηχανία ηλεκτρονικών ειδών ευρείας κατανάλωσης που επικεντρώνεται στη συναρμολόγηση δύο διαφορετικών προϊόντων, μιας κεφαλής κουρευτικής μηχανής και ενός καλύμματος οθόνης. Ωστόσο, η προτεινόμενη λύση έχει σχεδιαστεί για να εφαρμόζεται εύκολα σε πολλά παρόμοια σενάρια.

Λέξεις κλειδιά:

έλεγχος πολλαπλών ρομπότ, ψηφιακό δίδυμο, αναδιαμόρφωση, asset administration shell, ευελιξία

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

Acronym	Definition
AAS	Asset Administration Shell
CAD	Computer-aided Design
DT	Digital Twin
ERP	Enterprise resource planning
I4.0	Industry4.0
KPI	Key Performance Indicator
MES	Manufacturing execution system
ROS	Robot Operating System
RVIZ	ROS Visualisation
TF	Transform
URDF	Unified Robotic Description Format

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	IV
ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ.....	VI
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	VII
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	3
2.1. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΡΟΜΠΟΤ	
ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ	4
2.1.1. Αποφυγή σύγκρουσης.....	5
2.1.2. Συντονισμένη κίνηση πολλαπλών ρομπότ	6
2.1.3. Προσδιορισμός στόχων βάσει «αντίληψης».....	7
2.1.4. Κίνηση με έλεγχο δύναμης.....	7
2.2. ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ.....	ERROR!
BOOKMARK NOT DEFINED.	
2.3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΡΩΝ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΤΟ AAS.....	7
2.4. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	8
3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ	9
3.1. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ	
ΜΕ ΒΑΣΗ ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΑ ΠΡΟΤΥΠΑ	9
3.2. ΈΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ ΣΕ	
ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ.....	10

3.3.	ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΤΩΝ ΥΠΟ-ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΑΔΥΜΟΥ ΜΕΣΩ ROS	11
3.4.	ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ AAS ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΟΥΣ ΜΕ ΤΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΑΔΥΜΟ.....	12
4.	ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ & ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	13
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	15

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με την επιτάχυνση της ανάπτυξης της επιστήμης και της τεχνολογίας, η ανθρώπινη κοινωνία έχει όλο και υψηλότερες απαιτήσεις για τη λειτουργικότητα και την ποιότητα των προϊόντων, ο κύκλος ανανέωσης των προϊόντων γίνεται όλο και μικρότερος, ενώ η πολυπλοκότητα των προϊόντων αυξάνεται. Η τελευταία τάση στη σημερινή παγκοσμιοποιημένη αγορά εκφράζει μια προφανή επιθυμία για υψηλότερο επίπεδο εξατομίκευσης των προϊόντων. Θα μπορούσε κανείς να πει ότι η εξατομίκευση των προϊόντων είναι η παγκόσμια τάση που οδηγεί κυρίως τις μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις (SMEs) προς την ανάπτυξη σύγχρονων συστημάτων παραγωγής. Αυτό, με τη σειρά του, δημιουργεί την ανάγκη ανάπτυξης ευέλικτων και αναδιαμορφώσιμων συστημάτων συναρμολόγησης ικανών να παράγουν υψηλή ποικιλία προϊόντων σε μικρούς αριθμούς και με υψηλή απόδοση.

Τα σημερινά συστήματα παραγωγής, αν και πλήρως ρομποτικά για την επίτευξη ελάχιστου χρόνου κύκλου και μέγιστης παραγωγικότητας, στερούνται την ευελιξία που απαιτείται για να γίνει η μετάβαση στη μαζική εξατομίκευση, ένα βασικό συστατικό του Industry4.0. Ως εκ τούτου, πρέπει να αναπτυχθούν νέες εφαρμογές πέραν των σημερινών συστημάτων παραγωγής, για να αυξήσουν την ευελιξία και την προσαρμοστικότητα τους στις συνεχώς μεταβαλλόμενες ανάγκες της αγοράς.

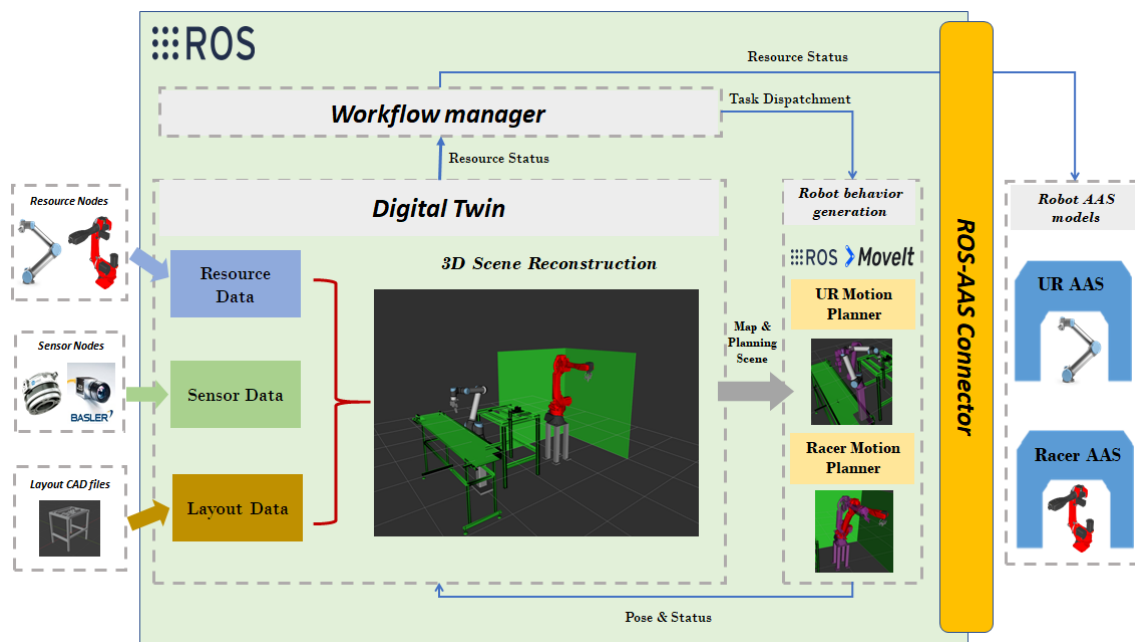
Για το σκοπό αυτό, η παρακάτω διατριβή επικεντρώνεται στην υλοποίηση τεχνολογίας ψηφιακού διδύμου (DT) με στόχο την ενίσχυση των δυνατοτήτων των υφιστάμενων συστημάτων συναρμολόγησης πολλαπλών ρομπότ. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη διευκόλυνση του συντονισμού μεταξύ των ρομπότ, ώστε να επιτευχθεί όχι μόνο ευελιξία και αναδιαμόρφωση μέσω του προγραμματισμού των ρομπότ σε πραγματικό χρόνο με βάση τις τρέχουσες ανάγκες παραγωγής, αλλά και της ασφαλούς λειτουργίας τους μηδενίζοντας την πιθανότητα σύγκρουσης μεταξύ τους.

Το προτεινόμενο σύστημα DT και η εφαρμοσθείσες στρατηγικές προγραμματισμού και ελέγχου των ρομπότ που βασίζονται σε αυτό, στοχεύουν στην:

1. Αύξηση της ευελιξίας του συστήματος με την ενίσχυση των δυνατοτήτων «αντίληψης» του περιβάλλοντος και αντίδρασης στις αλλαγές αυτού

2. Αύξηση της αναδιαμορφωσιμότητάς του συστήματος συναρμολόγησης ελαχιστοποιώντας τις απαιτούμενες αλλαγές για τον χειρισμό διαφορετικών προϊόντων.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ



Εικόνα 1: Αρχιτεκτονική Ψηφιακού Διδύμου

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα (Εικόνα 1), αυτή η διατριβή προτείνει την ανάπτυξη ενός εξαιρετικά ευέλικτου και αναδιαμορφώσιμου συστήματος βασισμένου σε ένα μοντέλο ψηφιακού δίδυμου που αντιπροσωπεύει σε πραγματικό χρόνο το κελί συναρμολόγησης. Συνολικά, η υλοποιημένη αρχιτεκτονική αποτελείται από τα ακόλουθα υποσυστήματα:

- Ψηφιακό Δίδυμο για την υλοποίηση διαφόρων λειτουργιών
- Καθορισμός και έλεγχος της συμπεριφοράς των ρομπότ σε πραγματικό χρόνο,
- Μοντελοποίηση των πόρων βασισμένη στο AAS για να καταστεί δυνατή η επικοινωνία μεταξύ διαφόρων συστημάτων,
- Διαχειριστής ροής εργασίας, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την ενορχήστρωση και παρακολούθηση της εκτέλεσης των εργασιών.

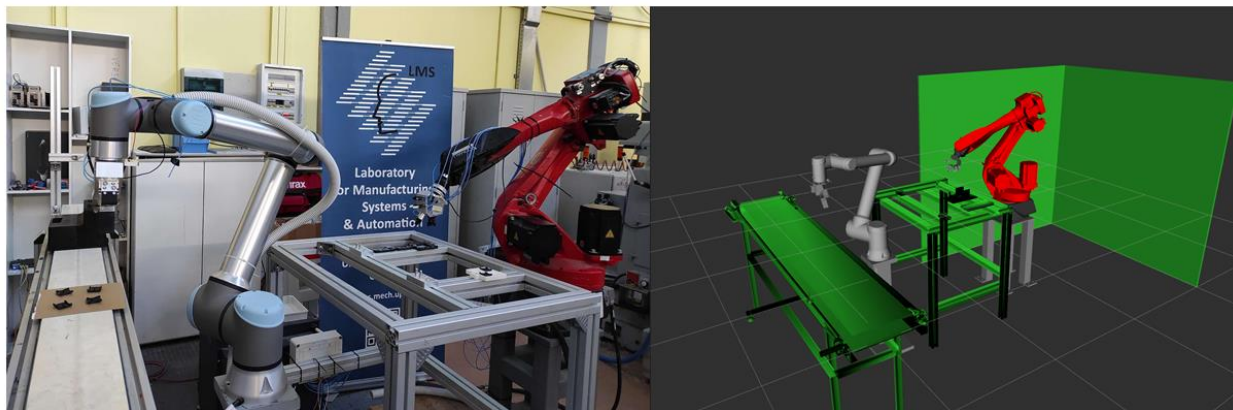
2.1. ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΔΙΔΥΜΟΥ

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, το υλοποιημένο μοντέλο Ψηφιακού Διδύμου αποτελείται από τα ακόλουθα συστατικά στοιχεία:

- a) Μονάδα δεδομένων πόρων
- b) Μονάδα δεδομένων αισθητήρων
- c) Μονάδα δεδομένων διάταξης
- d) Μονάδα ανακατασκευής τρισδιάστατου περιβάλλοντος

Η μονάδα δεδομένων πόρων είναι υπεύθυνη για τη μετάδοση των ψηφιακών μοντέλων των πόρων. Τα δεδομένα των εμπλεκόμενων αισθητήρων δημοσιεύονται μέσω ειδικών topics στο DT για να χρησιμοποιηθούν από τους σχεδιαστές κίνησης των ρομπότ. Η ενότητα δεδομένων διάταξης περιλαμβάνει όλα τα αρχεία CAD που σχετίζονται με στατικά εξαρτήματα και τα οποία χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τα αρχεία URDF για την κατασκευή του τρισδιάστατου κόσμου του σεναρίου συναρμολόγησης.

Για την ψηφιακή απεικόνιση του περιβάλλοντος, χρησιμοποιείται το εργαλείο απεικόνισης του ROS (RVIZ). Το RVIZ είναι ένα εργαλείο 3D απεικόνισης για εφαρμογές ROS που επιτρέπει την απεικόνιση διαφορετικών τύπων πληροφοριών, όπως μοντέλα ρομπότ και δεδομένα αισθητήρων (Εικόνα 2).



Εικόνα 2: Πραγματικό και ψηφιακό περιβάλλον

2.2. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΕΛΕΧΟΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΡΟΜΠΟΤ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ

Για το σχεδιασμό κίνησης ρομποτικών βραχιόνων, το ψηφιακό δίδυμο χρησιμοποιεί το πακέτο MoveIt!. Το MoveIt! είναι ένα βασικό εργαλείο για το χειρισμό και τον σχεδιασμό διαδρομής ρομπότ που βασίζεται στην αρχιτεκτονική ανταλλαγής ROS μηνυμάτων και παρέχει ενσωμάτωση με αλγορίθμους σχεδιασμού τροχιάς ρομποτικών βραχιόνων για τη δημιουργία ασφαλών και χωρίς συγκρούσεις διαδρομών κατά την εκτέλεση διαφόρων εργασιών από τα ρομπότ.

Επιπλέον, στο πλαίσιο αυτής της διατριβής, ο τυπικός σχεδιασμός κίνησης που βασίζεται στο MoveIt! και ο έλεγχος των ρομποτικών βραχιόνων ενισχύεται με επιπλέον λειτουργίες για την αύξηση της ευελιξίας και της σταθερότητας του προτεινόμενου Ψηφιακού Δίδυμου. Αυτές οι λειτουργίες είναι:

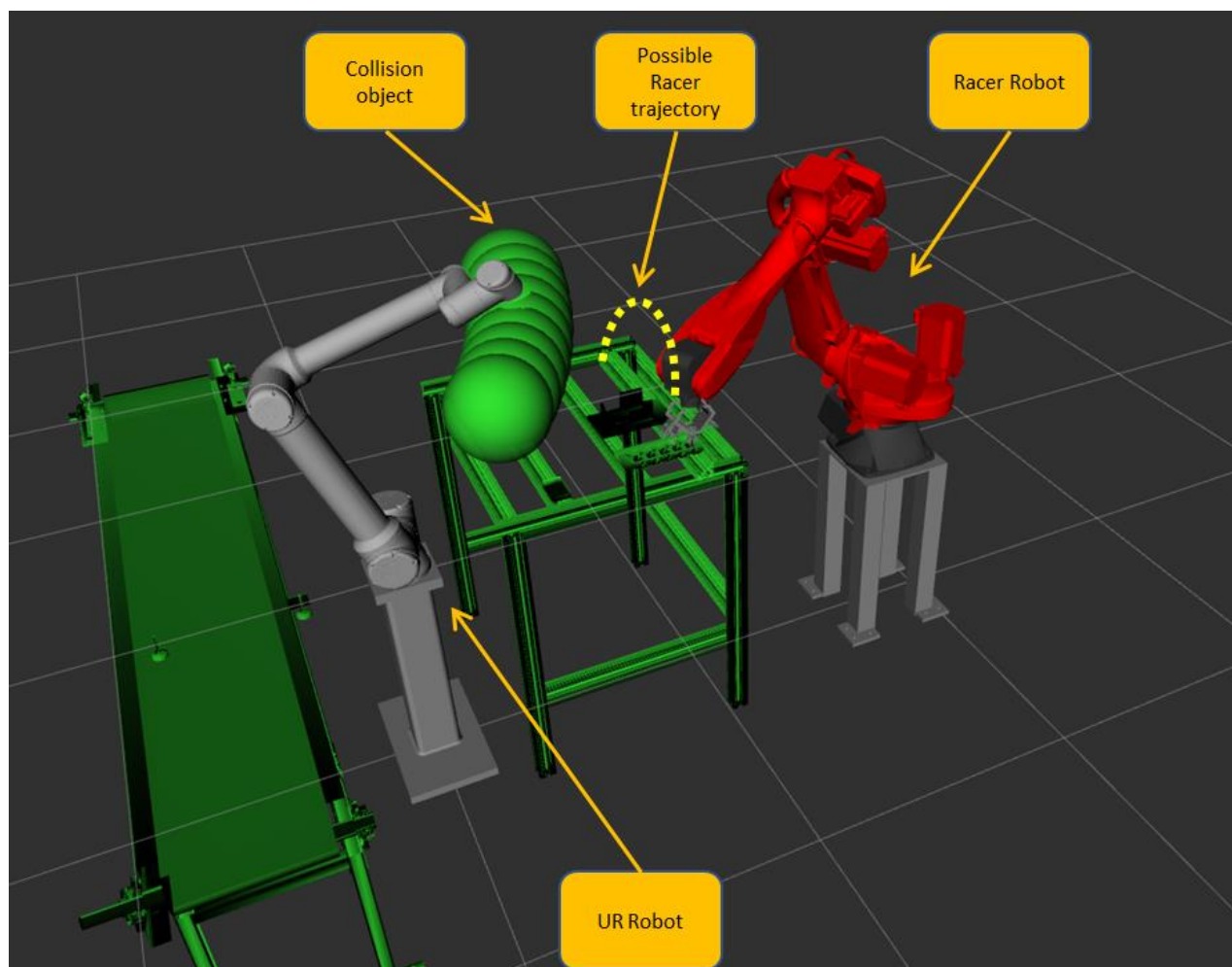
- Αποφυγή σύγκρουσης
- Συντονισμένη κίνηση πολλαπλών ρομπότ
- Προσδιορισμός στόχων βάσει «αντίληψης»
- Κίνηση με έλεγχο δύναμης

2.2.1. Αποφυγή σύγκρουσης

Για την εξασφάλιση μιας τροχιάς χωρίς συγκρούσεις, χρησιμοποιείται μια διεπαφή σχεδιασμού περιβάλλοντος κατά την ανάπτυξη του Ψηφιακού Δίδυμου. Αυτή η διεπαφή επιτρέπει την εισαγωγή πληροφοριών σχετικά με το περιβάλλον, όπως στατικά ή κινούμενα αντικείμενα, στο Ψηφιακό Δίδυμο με τη μορφή απλών γεωμετρικών αντικειμένων (όπως κύβους, σφαίρες κ.λπ.) ή οποιουδήποτε άλλου αντικειμένου χρησιμοποιώντας το αρχείο CAD του αντικειμένου.

2.2.2. Συντονισμένη κίνηση πολλαπλών ρομπότ

Για την επίτευξη συντονισμένης κίνησης μεταξύ δυο (ή και περισσότερων) ρομπότ που κινούνται στον ίδιο χώρο, η διεπαφή σχεδιασμού περιβάλλοντος χρησιμοποιείται συμπληρωματικά με πληροφορίες που προέρχονται από τους αλγόριθμους σχεδιασμού διαδρομής για να καταστεί δυνατή η κίνηση χωρίς συγκρούσεις μεταξύ των δύο ρομπότ. Πιο συγκεκριμένα, οι πληροφορίες σχετικά με τη παραγόμενη τροχιά στο ρομπότ Α χρησιμοποιούνται ως είσοδος για την αναπαραγωγή αντικειμένων σύγκρουσης κατά μήκος της προγραμματισμένης τροχιάς ως μέρος του περιβάλλοντος του ρομπότ Β (Εικόνα 3).



Εικόνα 3: Λογική υλοποίησης συντονισμένης κίνησης

2.2.3. Προσδιορισμός στόχων βάσει «αντίληψης»

Για αντικείμενα που πρέπει τα ρομπότ να χειριστούν αλλά η θέση τους δεν είναι γνωστή εξ αρχής, οι στόχοι για τους σχεδιαστές κίνησης παρέχονται από ένα σύστημα όρασης που είναι υπεύθυνο για την ανίχνευση της θέσης και του προσανατολισμού του αντικειμένου. Οι πληροφορίες αυτές δημοσιεύονται μέσω του ROS ως πλαίσια και είναι προσβάσιμες από τους σχεδιαστές κίνησης ρομπότ προκειμένου να υπολογιστεί η τροχιά για τον χειρισμό του αντικειμένου.

2.2.4. Κίνηση με έλεγχο δύναμης

Εκτός από τον έλεγχο της θέσης του ρομπότ, σε ορισμένες εφαρμογές συναρμολόγησης, είναι επίσης σημαντικό να ελέγχεται με ακρίβεια η δύναμη που εφαρμόζεται από τον τελικό αποτέλεσμα, προκειμένου, για παράδειγμα, να αποφεύγεται η καταστροφή των συναρμολογημένων εξαρτημάτων. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται εξωτερικός αισθητήρας δύναμης/ροπής έξι αξόνων για τη μέτρηση της δύναμης που εφαρμόζεται στην αρπάγη του ρομπότ. Οι πληροφορίες αυτές γίνονται προσβάσιμες, μέσω του ROS, στους σχεδιαστές κίνησης ρομπότ. Όταν η δύναμη που εφαρμόζεται στην αρπάγη του ρομπότ από το εξάρτημα φθάσει σε ένα όριο που έχει καθοριστεί εκ των προτέρων και είναι απαραίτητο για τη σωστή συναρμολόγηση του συγκεκριμένου τμήματος, η κίνηση του ρομπότ σταματάει.

2.3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΡΩΝ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΤΟ AAS

Η βασική τεχνολογία που επιτρέπει την ενσωμάτωση του Ψηφιακού Δίδυμου με τα συστήματα υψηλότερου επιπέδου, όπως τα συστήματα ERP και MES, είναι το AAS. Το AAS χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα αγαθό ψηφιακά με τυποποιημένο τρόπο με σκοπό την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ βιομηχανικών συστημάτων και μεταξύ συστημάτων ενορχήστρωσης των συστημάτων αυτών κ.α.

Το AAS περιλαμβάνει την έννοια των επιμέρους μοντέλων, καθένα από τα οποία μπορεί να χαρακτηρίσει το αγαθό περιγράφοντας τις πτυχές του σε διαφορετικούς τομείς και τις λειτουργίες του. Κάθε επιμέρους μοντέλο περιγράφεται από διάφορες ιδιότητες που ορίζονται από ένα μοναδικό καθολικό αναγνωριστικό και ένα σύνολο σαφώς καθορισμένων χαρακτηριστικών. Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορεί να είναι προτιμώμενο όνομα, σύμβολο, μονάδα μέτρησης, ορισμός κ.λπ. Για τη δημιουργία μοντέλων AAS, χρησιμοποιείται το λογισμικό AASX Package Explorer.

2.4. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗΣ ΡΟΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο Διαχειριστής ροής εργασίας αποτελεί το ενδιάμεσο στοιχείο που επικοινωνεί με το ψηφιακό δίδυμο και τους πραγματικούς πόρους. Ο Διαχειριστής ροής εργασίας είναι ένας μηχανισμός εκτέλεσης δεξιοτήτων, ο οποίος ενεργεί ως ελεγκτής της εκτέλεσης των προγραμματισμένων εργασιών μεταξύ των πόρων και του συστήματος προγραμματισμού των εργασιών αυτών. Επίσης το σύστημα αυτό είναι υπεύθυνο για την αποστολή των προγραμματισμένων λειτουργιών στους πόρους στους οποίους έχουν ανατεθεί από το σύστημα προγραμματισμού εργασιών, ενώ παρακολουθεί και την κατάσταση εκτέλεσης τους.

3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Η ανάπτυξη του προτεινόμενου πλαισίου μπορεί να χωριστεί στα ακόλουθα στοιχεία:

- Καθορισμός της συμπεριφοράς ρομποτικού βραχίονα με βάση καθορισμένα πρότυπα
- Έλεγχος της συμπεριφοράς ρομποτικού βραχίονα με χρήση δεδομένων που δημοσιεύονται σε πραγματικό χρόνο στο Ψηφιακό Δίδυμο
- Επικοινωνία των υπο-συστημάτων μέσω ROS
- Δημιουργία μοντέλων AAS και σύνδεση τους με το ψηφιακό δίδυμο

3.1. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΠΡΟΤΥΠΑ

Οι εργασίες που ανατίθενται στα ρομπότ είναι συνήθως υψηλότερης πολυπλοκότητας από αυτή που μπορεί να αντιληφθεί ο ελεγκτής του ρομπότ. Ως εκ τούτου, απαιτείται ένα στοιχείο που είναι υπεύθυνο για τη μετάφραση αυτών των εργασιών σε απλές ενέργειες που μπορούν να εκτελεστούν από τον ελεγκτή του ρομπότ.

Στο πλαίσιο αυτό, κάθε μία από τις εργασίες που θα μπορούν να ανατεθούν σε ένα ρομπότ έχει συνδεθεί με ένα συγκεκριμένο σύνολο απλών ενεργειών ακολουθώντας μια πρότυπη προσέγγιση, όπως φαίνεται στον πίνακα παρακάτω (Πίνακας 1).

Πίνακας 1: Πρότυπο μοντελοποίησης εργασιών

Εργασία	Ενέργειες	Παράμετροι
Εργασία 1	Ενέργεια 1	Παράμετροι για ενέργεια 1
	Ενέργεια 2	Παράμετροι για ενέργεια 2
	Ενέργεια ν	Παράμετροι για ενέργεια ν
Εργασία ν	Ενέργεια 1	Παράμετροι για ενέργεια 1
	Ενέργεια 2	Παράμετροι για ενέργεια 2
	Ενέργεια ν	Παράμετροι για ενέργεια ν

3.2. ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΙΟΝΑ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ

Όσον αφορά τον έλεγχο της συμπεριφοράς του ρομπότ, αναπτύχθηκαν τρεις λειτουργίες, όπως παρουσιάστηκε και στη μεθοδολογία.

Για την συντονισμένη κίνηση μεταξύ των δύο ρομπότ, συγκεκριμένα δεδομένα σχετικά με την προγραμματισμένη τροχιά του ρομπότ A αξιοποιούνται από τους αλγορίθμους σχεδιασμού τροχιάς του ρομπότ B, προκειμένου να μην επέλθει σύγκρουση μεταξύ των ρομπότ κατά την κίνησή τους. Πιο συγκεκριμένα, δεδομένα για τη θέση της κάθε άρθρωσης του ρομπότ σε πολλές ενδιάμεσες θέσεις κατά μήκος της παραγόμενης τροχιάς χρησιμοποιούνται από έναν αλγόριθμο ο οποίος λύνοντας το ευθύ κινηματικό πρόβλημα, υπολογίζει τη θέση του άκρου εργασίας του ρομπότ σε κάθε μια από τις ενδιάμεσες θέσεις. Στη συνέχεια, σε κάθε σημείο από τις υπολογισμένες θέσεις του άκρου εργασίας, προστίθεται ένα εικονικό αντικείμενο σύγκρουσης στο περιβάλλον του ρομπότ B, όπως παρουσιάστηκε και στην εικόνα 2. Με αυτόν τον τρόπο, η τροχιά που σχεδιάζεται να ακολουθήσει το ρομπότ A για την εκτέλεση μιας εργασίας, ερμηνεύεται ως εμπόδιο από τον σχεδιαστή κίνησης του ρομπότ B και αποφεύγεται κατά τον σχεδιασμό της τροχιάς.

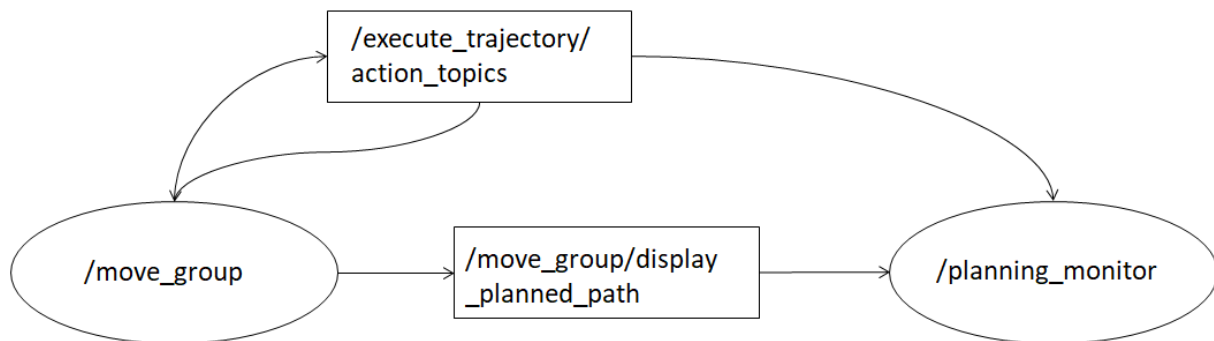
Για τον προσδιορισμό στόχων βάση «αντίληψης», χρησιμοποιούνται δεδομένα όρασης σε 2 διαστάσεις. Για το σκοπό αυτό, μια κάμερα χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της θέσης και του προσανατολισμού των εξαρτημάτων που θα πρέπει να χειριστεί το ρομπότ. Η στάση και ο προσανατολισμός του εντοπισμένου εξαρτήματος δίνονται σαν παράμετροι, μέσω του ROS στους σχεδιαστές κίνησης του ρομπότ που χρησιμοποιούν την πληροφορία αυτή για να δημιουργήσουν τη σωστή τροχιά για να πιάσει το ρομπότ το εξάρτημα.

Για την κίνηση με έλεγχο δύναμης, χρησιμοποιούνται δεδομένα δύναμης/ροπής σε πραγματικό χρόνο από έναν αισθητήρα δύναμης/ροπής. Καθώς το ρομπότ εκτελεί τις εργασίες συναρμολόγησης που του έχουν ανατεθεί, οι τιμές δύναμης/ροπής σε πραγματικό χρόνο που διαβάζει ο αισθητήρας δύναμης δίνονται σαν παράμετροι, μέσω του ROS σε έναν αλγόριθμο ο οποίος είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο της κίνησης του ρομπότ με βάση την αντίδραση που διαβάζεται από τον αισθητήρα. Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος δίνει εντολή στους σχεδιαστές

κίνησης του ρομπότ να μετακινήσουν το ρομπότ προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση, ενώ διαβάζει επίσης την αντίδραση που δέχεται το άκρο εργασίας σε πραγματικό χρόνο. Όταν η δύναμη που εφαρμόζεται στον αισθητήρα ξεπεράσει ένα προκαθορισμένο όριο, ο αλγόριθμος δίνει εντολή στους σχεδιαστές κίνησης να σταματήσουν την κίνηση του ρομπότ και η ενέργεια θεωρείται ολοκληρωμένη.

3.3. ΕΠΙΚΟΝΩΝΙΑ ΤΩΝ ΥΠΟ-ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΣΩ ROS

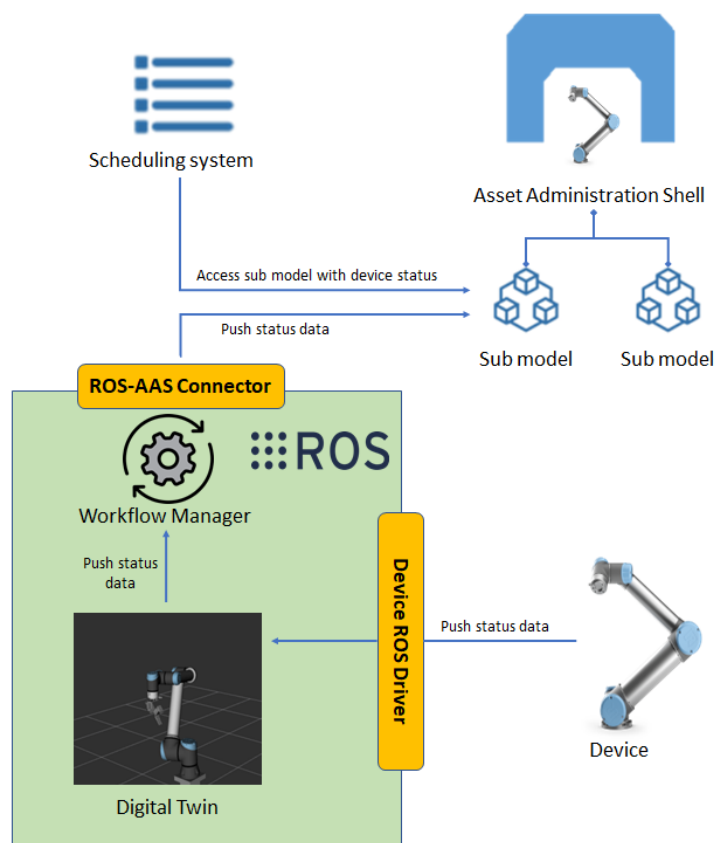
Η στρατηγική ελέγχου των ρομποτικών βραχιόνων που παρουσιάστηκε παραπάνω έχει βασιστεί στην επικοινωνία και την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των διαφόρων στοιχείων του Ψηφιακού Δίδυμου μέσω του Λειτουργικού Συστήματος Ρομπότ (ROS). Πιο συγκεκριμένα, ο τύπος επικοινωνίας «δημοσίευσης-εγγραφής» του ROS, αποτελεί βασικό στοιχείο για την υλοποίηση των λειτουργιών αυτών. Όλες οι λειτουργίες που έχουν υλοποιηθεί χρησιμοποιούν δεδομένα που εκτίθενται με τη μορφή μηνυμάτων ROS και δημοσιεύονται σε συγκεκριμένα topics. Με την εγγραφή σε αυτά τα topics, τα απαιτούμενα δεδομένα μπορούν να είναι διαθέσιμα για οποιοδήποτε στοιχείο χρειάζεται αυτά τα δεδομένα. Ένα παράδειγμα αυτής της λογικής, όπως υλοποιήθηκε για την συντονισμένη κίνηση πολλαπλών ρομπότ παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 4).



Εικόνα 4: ROS Επικοινωνία για την συντονισμένη κίνηση πολλαπλών ρομπότ

3.4. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΩΝ AAS ΚΑΙ ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΟΥΣ ΜΕ ΤΟ ΨΗΦΙΑΚΟ ΔΙΔΥΜΟ

Προκειμένου να καταστεί δυνατή η ενσωμάτωση και η επικοινωνία του ανεπτυγμένου Ψηφιακού Δίδυμου και των πραγματικών ρομπότ με συστήματα υψηλότερου επιπέδου (όπως συστήματα ERP ή άλλα συστήματα προγραμματισμού παραγωγής), πρέπει να δημιουργηθεί ένα μοντέλο AAS για κάθε ρομπότ και να συνδεθεί με το πραγματικά ρομπότ, προκειμένου να μπορεί το μοντέλο να ενημερώνεται δυναμικά σχετικά με την κατάσταση του ρομπότ. Η δυναμική ενημέρωση των πεδίων του μοντέλου AAS επιτυγχάνεται μέσω ενός ROS-AAS συνδέσμου που επιτρέπει την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ τους. Η συνολική αρχιτεκτονική αυτής της επικοινωνίας παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 5).

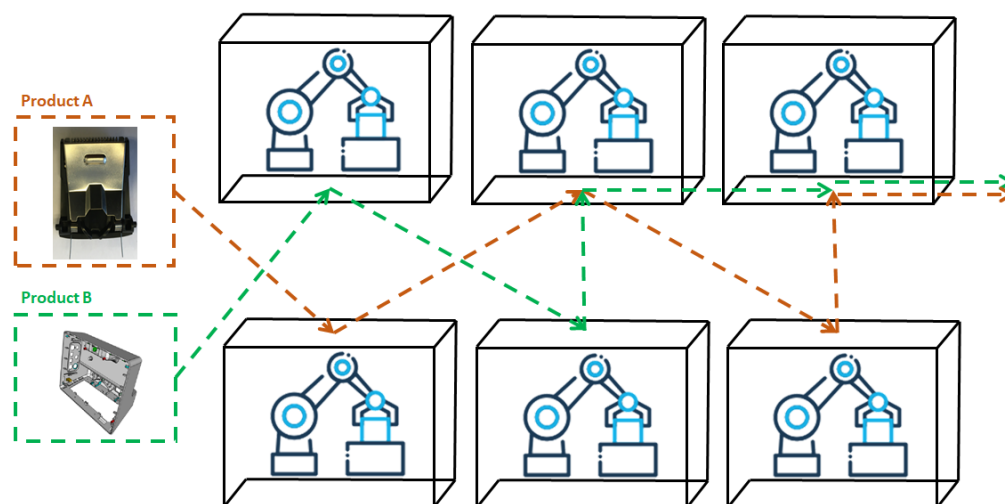


Εικόνα 5: Επικοινωνία μεταξύ ROS-AAS

4. ΜΕΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ & ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην παρακάτω ενότητα παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο το προτεινόμενο σύστημα παραγωγής που βασίζεται σε DT έχει αναπτυχθεί, δοκιμαστεί και επικυρωθεί σε μια πραγματική μελέτη περίπτωσης εμπνευσμένη από τη βιομηχανία. Συγκεκριμένα, το σύστημα έχει δοκιμαστεί σε μια γραμμή συναρμολόγησης μιας εταιρείας ηλεκτρονικών ειδών ευρείας κατανάλωσης που παράγει την κεφαλή μιας ξυριστικής μηχανής και ένα κάλυμμα οθόνης.

Τελικός στόχος είναι η γραμμή συναρμολόγησης να αποτελείται από ανεξάρτητες, ευέλικτες μονάδες συναρμολόγησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συναρμολόγηση πολυάριθμων προϊόντων, αντί για ένα μόνο προϊόν (Εικόνα 6). Συνεπώς, η μονάδα συναρμολόγησης, με τη βοήθεια του ψηφιακού διδύμου, θα πρέπει να είναι σε θέση να χειριστεί τη συναρμολόγηση περισσότερων του ενός προϊόντων με την ελάχιστη δυνατή αναδιαμόρφωση.



Εικόνα 6: Παράδειγμα μελλοντικής γραμμής παραγωγής

Η εφαρμογή του συστήματος Ψηφιακού Διδύμου στην παραπάνω μελέτη περίπτωσης έδειξε ότι οι λειτουργίες, που παρέχονται από το Ψηφιακό Δίδυμο, επιτρέπουν την προσαρμογή του συστήματος παραγωγής σε περιβαλλοντικές αλλαγές αυξάνοντας την ευελιξία του. Εκτός αυτού, εμπνευσμένοι από τις πραγματικές βιομηχανικές απαιτήσεις που προέρχονται από τη

μελέτη περίπτωσης, ορισμένοι βασικοί δείκτες επιδόσεων (KPIs) καθορίστηκαν με επίκεντρο την επικύρωση της προτεινόμενης λύσης για την παραγωγή των δύο διαφορετικών προϊόντων που αναφέρθηκαν παραπάνω (Πίνακας 2). Αυτές οι δείκτες είναι:

- **Χρόνος αναδιαμόρφωσης:** Ο χρόνος που απαιτείται για την αναδιαμόρφωση του κελιού συγκρότησης για την παραγωγή διαφορετικής παραλλαγής προϊόντος.
- **Αριθμός διαφορετικών προϊόντων:** Ο συνολικός αριθμός διαφορετικών προϊόντων που μπορούν να παραχθούν από το κελί συγκρότησης χωρίς αναδιαμόρφωση

Πίνακας 2: Σύγκριση μεταξύ των δυο συστημάτων

KPI	Υπάρχον Σύστημα	Προτεινόμενο Σενάριο
Χρόνος αναδιαμόρφωσης	2-3 μήνες	1-2 μέρες
Αριθμός διαφορετικών προϊόντων	1	2

Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παραπάνω, είναι προφανές ότι τα υπάρχοντα συστήματα ρομποτικής συναρμολόγησης μπορούν να έχουν σημαντική προστιθέμενη αξία με την ενσωμάτωση του προτεινόμενου Ψηφιακού Διδύμου. Όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, οι λειτουργίες που προσφέρει το Ψηφιακό Δίδυμο μπορούν να οδηγήσουν σε αύξηση της ευελιξίας τους και σημαντική μείωση της ανάγκης αναδιαμόρφωσης τους σε περίπτωση εισαγωγής νέων προϊόντων στη γραμμή παραγωγής.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παραπάνω διατριβή είχε ως θέμα την ανάπτυξη και χρήση Ψηφιακού Διδύμου για λειτουργίες πολλαπλών ρομπότ σε ευέλικτα συστήματα παραγωγής. Η λύση που παρουσιάστηκε επιτρέπει τον ασφαλή και σε πραγματικό χρόνο προγραμματισμό και έλεγχο των ρομποτικών βραχιόνων, ώστε να εξασφαλίζεται η κίνησή τους χωρίς συγκρούσεις σε μη δομημένο περιβάλλον και η βέλτιστη εκτέλεση των διαδικασιών συναρμολόγησης. Αυτά επιτυγχάνονται μέσω διαφόρων λειτουργιών που χρησιμοποιούν δεδομένα αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο και το ROS για την ψηφιακή αναπαράσταση του πραγματικού περιβάλλοντος και την προσαρμογή της συμπεριφοράς των ρομπότ.

Επιπλέον, στο πλαίσιο του προτεινόμενου συστήματος, το AAS αξιοποιείται για την επικοινωνία του Ψηφιακού Δίδυμου με συστήματα υψηλότερου επιπέδου, όπως συστήματα ERP. Για το σκοπό αυτό, υλοποιήθηκε ένας συγκεκριμένος σύνδεσμος ROS-AAS που επιτρέπει την επικοινωνία και την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των δύο.

Το σύστημα Ψηφιακού Διδύμου δοκιμάστηκε σε μια μελέτη περίπτωσης από τον κλάδο των ηλεκτρονικών ειδών ευρείας κατανάλωσης, όπου ελέγχθηκε η ευελιξία του συστήματος και η ικανότητά του να χειρίζεται διαφορετικές παραλλαγές προϊόντων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι με την εισαγωγή του προτεινόμενου Ψηφιακού Δίδυμου στο σύστημα παραγωγής, η ευελιξία του συστήματος αυξάνεται, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται και ταχύτερη αναδιαμόρφωση του συστήματος όταν εισάγονται νέα προϊόντα.

Τα επόμενα βήματα για την περαιτέρω βελτίωση το συστήματος Ψηφιακού Διδύμου θα πρέπει να επικεντρωθούν στην ενίσχυση του με περισσότερες λειτουργίες και επέκταση του ώστε να είναι βιώσιμο για μεγαλύτερες και πιο ρεαλιστικές βιομηχανικές εφαρμογές. Για το σκοπό αυτό, η ενσωμάτωση του συστήματος σε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον πρέπει να πραγματοποιηθεί.