

Προσομοίωση, μοντελοποίηση και μελέτη  
αυτοματοποιημένης διαδικασίας διαχείρισης υλικών  
μέσα σε γραμμή παραγωγής με χρήση ρομποτικών  
βραχιόνων.



Πολυτεχνείο Κρήτης  
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Καλογρίδης Μάριος

A.M 2018010039

Σεπτέμβριος 2024

# Εξεταστική Επιτροπή

Δρ. Ελευθέριος Δοϊτσίδης,  
*Επίκουρος Καθηγητής*

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης,  
Πολυτεχνείο Κρήτης

Δρ. Ευστράτιος Ιωαννίδης  
*Αναπληρωτής Καθηγητής*

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης,  
Πολυτεχνείο Κρήτης

Δρ. Ιψάκης Δημήτριος,  
*Επίκουρος Καθηγητής*

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης,  
Πολυτεχνείο Κρήτης

# Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας, κλείνει ένα σημαντικό κεφάλαιο της ζωής μου, διάρκειας πέντε ετών. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, τον Δρ. Δοϊτσίδα Ελευθέριο για την καθοδήγηση και τις συμβουλές που μου προσέφερε, καθώς και τον Δρ. Ιωαννίδη Ευστράτιο.

Θα ήθελα, επιπλέον, να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για τη στήριξη που μου προσέφεραν και τις θυσίες που έκαναν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στην πόλη των Χανίων.

# Περιεχόμενα

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Εισαγωγή</b>   | <b>2</b>  |
| <b>2</b> | <b>Θεωρητικό Υπόβαθρο</b>   | <b>4</b>  |
| 2.1      | Γραμμή παραγωγής . . . . .  | 4         |
| 2.2      | 4η Βιομηχανική Επανάσταση (Industry 4.0) . . . . .  | 5         |
| 2.2.1    | Τεχνητή Νοημοσύνη . . . . .   | 7         |
| 2.2.2    | Μηχανική Μάθηση . . . . .   | 7         |
| 2.2.3    | Πυλώνες 4ης Βιομηχανικής Επανάστασης (Industry 4.0) . . . . .   | 10        |
| 2.3      | Βιομηχανικά Ρομπότ (Industrial Robots) . . . . .  | 12        |
| 2.3.1    | Συνεργατικά ρομπότ (Cobots) . . . . .   | 13        |
| 2.4      | Ρομπότ στην παραγωγική διαδικασία . . . . .   | 15        |
| 2.5      | Ρομποτικοί βραχίονες . . . . .  | 17        |
| 2.5.1    | Άκρο εργασίας -End Of Arm Tooling (EOAT) . . . . .  | 19        |
| 2.6      | Κινηματική Ρομποτικού Βραχίονα . . . . .  | 20        |
| 2.6.1    | Ευθύ κινηματικό πρόβλημα . . . . .  | 20        |
| 2.6.2    | Αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα . . . . .  | 22        |
| 2.7      | Ρομποτικοί βραχίονες στην βιομηχανία για εργασίες διαλογής (picking) . . . .                                      | 23        |
| 2.8      | Διαλογή και τοποθέτηση (Pick and Place) . . . . .   | 26        |
| <b>3</b> | <b>Εργαλεία</b>   | <b>28</b> |
| 3.1      | Λογισμικό Webots . . . . .  | 28        |
| 3.1.1    | Αισθητήρας απόστασης . . . . .  | 30        |
| 3.1.2    | Κάμερα . . . . .  | 31        |
| 3.1.3    | Ταινιόδρομοι . . . . .  | 33        |
| 3.2      | Ρομποτικοί βραχίονες . . . . .  | 34        |
| 3.2.1    | UR5e . . . . .  | 34        |
| 3.3      | Ρομποτική αρπάγη . . . . .  | 35        |
| <b>4</b> | <b>Προσομοιωμένο μοντέλο διαδικασίας διαλογής και τοποθέτησης με τη βοήθεια βιομηχανικών ρομποτικών βραχιόνων</b> | <b>38</b> |
| 4.1      | Δομικά στοιχεία της προσομοίωσης . . . . .  | 38        |
| 4.2      | Περιγραφή λειτουργίας μοντέλου . . . . .  | 42        |
| 4.3      | Σενάρια προσομοίωσης . . . . .  | 44        |
| 4.3.1    | Πρώτο σενάριο λειτουργίας . . . . .   | 44        |
| 4.3.2    | Δεύτερο σενάριο λειτουργίας . . . . .   | 48        |
| 4.3.3    | Τρίτο σενάριο λειτουργίας . . . . .   | 48        |
| <b>5</b> | <b>Πειραματική διαδικασία</b>   | <b>56</b> |
| 5.1      | Δημιουργία σεναρίων ελέγχου . . . . .   | 56        |
| 5.2      | Μεθοδολογία και μετρήσεις . . . . .   | 59        |



|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 5.2.1     | Πρώτο μοντέλο . . . . .                       | 60        |
| 5.2.2     | Δεύτερο μοντέλο . . . . .                     | 61        |
| 5.2.3     | Τρίτο μοντέλο . . . . .                       | 62        |
| 5.2.4     | Κώδικας στοχαστικών αφίξεων . . . . .         | 63        |
| 5.3       | Παρατηρήσεις . . . . .                        | 64        |
| <b>6</b>  | <b>Συμπεράσματα - Μελλοντικές Επεκτάσεις</b>  | <b>65</b> |
| <b>A'</b> | <b>Κώδικες</b>                                | <b>69</b> |
| A'.1      | Κώδικας πρώτου και δεύτερου μοντέλο . . . . . | 69        |
| A'.2      | Κώδικας τρίτου μοντέλου . . . . .             | 72        |
| A'.3      | Κώδικας στοχαστικών αφίξεων . . . . .         | 77        |

# Περίληψη

Στη παρούσα διπλωματική εργασία θα αναλυθεί μία γραμμή παραγωγής, όπου γίνεται διαχείριση υλικών, με χρήση ρομποτικών βραχιόνων. Αρχικά θα μοντελοποιηθούν τρία διαφορετικά χωροταξικά μοντέλα, που εκτελούν αυτοματοποιημένη διαχείριση υλικών με χρήση εξειδικευμένου λογισμικού. Στα μοντέλα υπάρχουν ρομποτικοί βραχίονες, χωροθετημένοι με συγκεκριμένο τρόπο όπου δέχονται αντικείμενα από ζώνες μεταφοράς, τα διαχειρίζονται τοποθετώντας τα σε προκαθορισμένες θέσεις ανάλογα με το είδος τους. Στο ίδιο λογισμικό γίνεται ρεαλιστική προσομοίωση αληθινών συνθηκών των μοντέλων και μετρούνται οι χρόνοι παραγωγής για την δημιουργία ενός τελικού τεμαχίου σε έξι διαφορετικά σενάρια. Τέλος γίνεται ανάλυση των χρόνων κάθε μοντέλου με σκοπό την εύρεση των οριακών τιμών και σύγκριση των σεναρίων.

# Abstract

In this diploma thesis, a production line that utilizes robotic manipulators will be analyzed. Initially, three different models will be simulated, performing an automated 'picking' process in robotic simulation software. The models feature robotic arms in specific arrangements, receiving objects from conveyor belts. The robots 'pick up' these objects and place them in predetermined positions based on their type. Simulation of actual conditions and measurement of production times for creating a final piece are conducted in the same software under six different scenarios. Finally, an analysis of the times for each model is performed to find the threshold/limit values and compare the scenarios.

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Ο τομέας της ρομποτικής τα τελευταία χρόνια εξελίσσεται με ταχείς ρυθμούς, και με την πρόοδο της τεχνολογίας, γίνεται ολοένα και πιο προσβάσιμος σε καθολικό επίπεδο, επιτρέποντας έτσι την πραγματοποίηση περισσότερων εργασιών, που υπό άλλες συνθήκες τις πραγματοποιούσε ο άνθρωπος. Η είσοδος της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης, οι όλο και πιο αυξημένες ανάγκες για ταχύτερους χρόνους, ποιοτικότερο αποτέλεσμα και αυξημένη αποδοτικότητα σε κάθε επαγγελματικό τομέα, κάνει την χρήση ρομπότ επιτακτική για την διεκπεραίωση εργασιών. Οι ρομποτικοί βραχίονες έχουν εισαχθεί σε κάθε παραγωγή και σε κάθε εργοστάσιο, αυτοματοποιώντας έτσι κάθε γραμμής παραγωγής. Ο άνθρωπος περνάει σε ρόλο ελεγκτή και επιτρέπει στα συνεργατικά ρομπότ να αναλαμβάνουν τις επαναλαμβανόμενες και κουραστικές διεργασίες, αφήνοντας τον ελεύθερο να επικεντρώνεται σε πιο πολύπλοκες εφαρμογές που απαιτούν αναλυτική ικανότητα.

Οι γραμμές παραγωγής, πλέον αναζητούν ταχύτητα και αποτελεσματικότητα, με ρομποτικούς βραχίονες και συνεργατικά ρομπότ να βρίσκονται σε κάθε σταθμό και σε κάθε διεργασία. Η τεχνητή νοημοσύνη και η ενισχυμένη μηχανική μάθηση αναβαθμίζει κάθε πτυχή της βιομηχανίας, η οποία εξελίσσεται προς ένα μέλλον όπου η συνεργασία μεταξύ ανθρώπου και ρομπότ αποτελεί κλειδί για την ανάπτυξη και την καινοτομία σε κάθε τομέα παραγωγής. Οι ρομποτικοί βραχίονες εκτελούν επαναλαμβανόμενες και απαιτητικές εργασίες με ακρίβεια και αποτελεσματικότητα. Αυτό επιτρέπει στους εργαζόμενους να επικεντρώνονται σε πιο εξειδικευμένες και δημιουργικές εργασίες. Οι ρομποτικοί βραχίονες βρίσκονται σε προκαθορισμένες θέσεις, εκτελούν διεργασίες προγραμματισμένες από τον άνθρωπο ελεγκτή και επιστρέφουν δεδομένα μέσω των αισθητήρων που διαθέτουν.

Η διαδικασία της αυτοματοποιημένης επιλογής "picking" βρίσκεται συχνά ως σταθμός σε μια ολοκληρωμένη γραμμή παραγωγής κυρίως στα αρχικά ή στα τελικά στάδια, όπου χρειάζεται διαχωρισμός αντικειμένων και τοποθέτηση τεμαχίων σε συγκεκριμένες θέσεις εκτελώντας διαδικασίες επιλογής και τοποθέτησης "pick and place". Αντικείμενα έρχονται μέσω μεταφορικών διαδρόμων προς τις τοποθετημένες θέσεις των συνεργατικών ρομπότ, τα οποία "πιάνουν" τα αντικείμενα και τα τοποθετούν σε συγκεκριμένες θέσεις. Οι ρομποτικοί βραχίονες μπορούν να εκτελούν διεργασίες διαλογής με εξαιρετική ακρίβεια, αναγνωρίζοντας τη θέση, το σχήμα και το μέγεθος των προϊόντων. Με τη χρήση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, τα ρομπότ μπορούν να προσαρμόζονται σε ποικίλες συνθήκες και να βελτιώνουν σταδιακά την απόδοσή τους. Η αυτοματοποίηση μειώνει τον κίνδυνο λαθών και βελτιώνει την ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος. Έτσι, με την εφαρμογή της αυτοματοποιημένης επιλογής εξελίσσεται σημαντικά η γραμμή παραγωγής, προσφέροντας συγχρόνως οφέλη σε απόδοση, ακρίβεια και αξιοπιστία.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μοντελοποίηση και προσομοίωση ενός

ολοκληρωμένου συστήματος αυτοματοποιημένης επιλογής και τοποθέτησης με ρομποτικούς βραχίονες UR5e. Προκειμένου να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος στόχος, δημιουργήθηκαν 3 διαφορετικά, ως προς την χωροταξία μοντέλα, μέσω του λογισμικού ρεαλιστικής ρομποτικής προσομοίωσης Webots, τα οποία εκτελούν αντίστοιχες λειτουργίες και προσομοιώνουν μια διεργασία αυτοματοποιημένης επιλογής, όπως αυτή συναντάται σε διάφορες γραμμές παραγωγής στην βιομηχανία. Δημιουργήθηκαν οι κώδικες για τους ελεγκτές των ρομποτικών βραχιόνων σε κάθε μοντέλο, με σκοπό το ρομπότ, να κάνει τοποθέτηση με διαλογή του αντικειμένου που έρχεται από την ζώνη μεταφοράς και να το τοποθετεί σε συγκεκριμένη θέση. Μετρήθηκαν και αναλύθηκαν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των μοντέλων σε διαφορετικά θεωρητικά σενάρια που δημιουργήθηκαν, με σκοπό να βρεθούν οι χρόνοι της συγκεκριμένης διαδικασίας και οι οριακές τιμές κάθε συστήματος. Οι μετρήσεις, η δημιουργία των μοντέλων και οι προσομοιώσεις υλοποιήθηκαν αποκλειστικά σε περιβάλλον λογισμικού Webots.

Η εργασία αποτελείται από 6 κεφάλαια. Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια βιβλιογραφική επισκόπηση του θεωρητικού υποβάθρου, πάνω στο οποίο βασίζεται το αντικείμενο αυτής της εργασίας. Συγκεκριμένα, γίνονται αναφορές στην επίδραση της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης στις σύγχρονες γραμμές παραγωγής, στη μηχανική μάθηση και στην τεχνητή νοημοσύνη, που χρησιμοποιούνται ως εργαλεία στις περισσότερες εφαρμογές ρομποτικής. Επιπλέον, περιγράφεται το κινηματικό μοντέλο ρομποτικών βραχιόνων, αναφέρονται τα είδη ρομπότ που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία και αναλύονται οι εφαρμογές ρομποτικών βραχιόνων στην σύγχρονη παραγωγική διαδικασία. Τέλος, αναφέρονται κάποιες ανάλογες υλοποιήσεις παρόμοιων προβλημάτων και σεναρίων "αυτοματοποιημένης διαλογής" και "διαλογής και τοποθέτησης" τόσο στην παραγωγική διαδικασία όσο και στην ρομποτική γενικότερα.

Στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφονται τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν, και συγκεκριμένα η ρομποτική πλατφόρμα προσομοίωσης Webots, λογισμικό στο οποίο χρησιμοποιούνται δομικά στοιχεία ρεαλιστικής λειτουργίας, όπως ο ρομποτικός βραχίονας UR5e, η αρπάγη (3-F Robotiq Gripper), καθώς και ζώνη μεταφοράς, κάμερα και αισθητήρας απόστασης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, περιγράφεται η μοντελοποίηση των τριών διαφορετικών, ως προς την χωροταξία μοντέλων. Αναλύεται η διαδικασία με την οποία δημιουργήθηκε το κάθε μοντέλο και η μορφολογία. Επίσης, αναλύεται ο κώδικας που περιέχει ο ελεγκτής κάθε ρομποτικού βραχίονα σε κάθε ένα από τα αντίστοιχα μοντέλα. Εκεί εξηγείται όλη η λειτουργία της διαδικασίας διαλογής του κάθε μοντέλου στο περιβάλλον Webots. Τέλος, παρουσιάζονται τα διαγράμματα ροής του κάθε κώδικα, τα οποία εξηγούν τις διαδικασίες και τα βήματα της διεργασίας διαλογής που εξετάζεται.

Στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιούνται όλες οι δοκιμές και τα πειράματα της υλοποίησης. Δημιουργούνται 6 διαφορετικά σενάρια για κάθε ένα από τα 3 μοντέλα και δοκιμάζονται τα συστήματα μέσω προσομοίωσης. Χρονομετρούνται τα μοντέλα στα σενάρια, με σκοπό να βρεθούν οι οριακές τιμές κάθε συστήματος και οι αντίστοιχοι χρόνοι παραγωγής ενός τελικού τεμαχίου στα διάφορα σενάρια. Τα δεδομένα συγκεντρώνονται και πραγματοποιούνται συγκρίσεις μεταξύ αυτών.

Στο έκτο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια επισκόπηση των παραπάνω πληροφοριών, αξιολογείται η αποτελεσματικότητα της μεθόδου και εξάγονται συμπεράσματα.

## Κεφάλαιο 2

# Θεωρητικό Υπόβαθρο

Οι βιομηχανίες και τα εργοστάσια σήμερα, έχουν εκσυγχρονίσει τις πρακτικές τους στη παραγωγική διαδικασία και ο άνθρωπος έχει αντικατασταθεί σε αρκετές εργασίες από τα ρομπότ. Με την είσοδο της 4ης Βιομηχανικής επανάστασης στις τεχνικές των σύγχρονων εταιριών και εργοστασίων, η συζήτηση για το βέλτιστο μοντέλο λειτουργίας και συνεργασίας ρομποτικών βραχιόνων και ανθρώπου γίνεται πλέον επιτακτική. Στην παραγωγική διαδικασία χρησιμοποιείται πλέον η τεχνολογία και η μηχανική με σκοπό την μείωση των χρόνων, το ποιοτικότερο αποτέλεσμα και την οικονομία των πόρων. Άνθρωπος και ρομπότ λειτουργούν συμπληρωματικά στην σύγχρονη βιομηχανία, με τον άνθρωπο ως ελεγκτή και χειριστή, ενώ με τα ρομπότ να αναλαμβάνουν τις επαναλαμβανόμενες τεχνικές διαδικασίες μέσω της τεχνητής νοημοσύνης και του deep learning. Η συνεργασία ανθρώπου-ρομπότ αποτελεί αντικείμενο έρευνας που στοχεύει στον συμπληρωματικό συνδυασμό των δεξιοτήτων του ανθρώπου και των ιδιοτήτων ενός ρομπότ. Τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά ενός ρομποτικού βραχίονα είναι η ικανότητα κίνησης με υψηλή ακρίβεια, η επαναληψιμότητα και η ικανότητα να σηκώνει μεγάλα φορτία, καθιστώντας τον ιδανικό για χρήση σε βιομηχανικές εφαρμογές. Οι κύριες δεξιότητες του ανθρώπου που είτε απουσιάζουν από τα ρομπότ είτε ξεπερνούν τις ικανότητες αυτών, είναι η αντίληψη του περιβάλλοντος από πλήθος αισθητηρίων οργάνων, η λήψη αποφάσεων και εξαγωγή συμπερασμάτων, η ταχεία προσαρμογή σε αλλαγές του περιβάλλοντος και η βέλτιστη διαμόρφωση του μυοσκελετικού συστήματος για την εκτέλεση μιας εργασίας. Δεδομένης της δυσκολίας που παρουσιάζει η ανάπτυξη ρομπότ για να προσεγγίζουν τις δεξιότητες ενός ανθρώπου, η συνεργασία ανθρώπου-ρομπότ με κατάλληλο τρόπο μπορεί να γεφυρώσει το κενό που παρατηρείται μεταξύ χειρωνακτικών εργασιών και πλήρους αυτοματισμού, αλλά και να δημιουργήσει νέα πεδία εφαρμογών.

### 2.1 Γραμμή παραγωγής

Η γραμμή παραγωγής είναι η διαδρομή που ακολουθεί η δημιουργία ενός προϊόντος, δηλαδή μια σειρά παραγωγικών δραστηριοτήτων όπως η επεξεργασία, η μεταφορά, η συναρμολόγηση και η επιθεώρηση, ξεκινώντας από την είσοδο των πρώτων υλών στον χώρο παραγωγής. Συνήθως, μια γραμμή παραγωγής ακολουθεί έναν καθορισμένο σχεδιασμό και συγκεκριμένες διαδικασίες για να επεξεργαστεί τα είδη, τα υλικά ή τα συστατικά που απαιτούνται για την παραγωγή του τελικού προϊόντος. Οι γραμμές παραγωγής μπορούν να διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο του εργοστασίου και τη φύση των προϊόντων που παράγονται. Συνήθως, περιλαμβάνουν συστήματα μεταφοράς, μηχανές επεξεργασίας, σταθμούς ελέγχου ποιότητας και εργαζόμενους που εκτελούν συγκεκριμένες εργασίες σε κάθε στάδιο της παραγωγής. Η στόχευση της γραμμής παραγωγής είναι να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα, την ποιότητα και την παραγωγικότητα του εργοστασίου [1].

Μια γραμμή παραγωγής είναι ένα σύστημα που αποτελείται από διάφορα στάδια, μηχανήματα και εξοπλισμό, και χρησιμοποιείται για τη μαζική παραγωγή προϊόντων. Κατά τη διάρκεια της παραγωγής, συμβαίνουν διάφορες κατεργασίες και διαδικασίες. Μία από τις κύριες κατεργασίες που συμβαίνουν σε μια γραμμή παραγωγής είναι η συναρμολόγηση, όπου τα διάφορα εξαρτήματα και μέρη του προϊόντος συναρμολογούνται μαζί. Αυτή η διαδικασία μπορεί να είναι χειρωνακτική ή αυτοματοποιημένη, ανάλογα με τον τύπο του προϊόντος και την τεχνολογία παραγωγής. Μέσω της τεχνολογίας και των ρομποτικών βραχιόνων αυτές οι διαδικασίες γίνονται σχεδόν αποκλειστικά με την χρήση ρομπότ, με τον άνθρωπο πλέον να έχει τον ρόλο του χειριστή-ελεγκτή. Γεγονός που αποδεικνύει την είσοδο της αυτοματοποίησης και της εξέλιξης στον χώρο της βιομηχανίας. Μετά τη συναρμολόγηση, τα προϊόντα υποβάλλονται σε δοκιμές και ελέγχους ποιότητας για να διασφαλιστεί ότι πληρούν τις προδιαγραφές και ότι είναι επιθυμητής ποιότητας. Τα προϊόντα συσκευάζονται σε κατάλληλα αποθηκευτικά δοχεία για τη μεταφορά τους. Τέλος μεταφέρονται από τη γραμμή παραγωγής στον τόπο αποθήκευσης ή απευθείας στους πελάτες. Η αποθήκευση των αντικειμένων και η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας είναι σημαντικές λειτουργίες σε μια γραμμή παραγωγής.

Στις αρχές της βιομηχανικής επανάστασης, η παραγωγή βασιζόταν στο ανθρώπινο εργατικό δυναμικό. Οι εργάτες κατασκεύαζαν τα προϊόντα χειρωνακτικά, με μεγάλο χρόνο και ενέργεια να απαιτούνται για κάθε προϊόν. Αυτό οδήγησε σε υψηλά κόστη παραγωγής και περιορισμένη ποσότητα παραγωγής. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και την επιθυμία για αυξημένη παραγωγικότητα, οι επιχειρήσεις ξεκίνησαν να χρησιμοποιούν γραμμές παραγωγής. Κάθε στάδιο είχε μια συγκεκριμένη λειτουργία, και τα προϊόντα περνούσαν από διαδοχικές φάσεις συναρμολόγησης. Αυτό βελτίωσε την παραγωγικότητα και μείωσε τους χρόνους. Μέσω της αυτοματοποίησης και της εξέλιξης της τεχνολογίας ρομπότ και αυτοματοποιημένα συστήματα ανέλαβαν καθήκοντα παραγωγής, μειώνοντας την ανθρώπινη επέμβαση και αυξάνοντας την ακρίβεια και την ευελιξία. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν πλέον, να προσαρμοστούν γρήγορα σε διαφορετικές παρτίδες προϊόντων, σε αλλαγές στις προδιαγραφές και στις απαιτήσεις της αγοράς. Στη σύγχρονη παραγωγή, δίνεται μεγάλη προσοχή στον έλεγχο της ποιότητας. Υψηλής τεχνολογίας συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου εξασφαλίζουν ότι τα προϊόντα πληρούν τις προδιαγραφές ποιότητας καθ' όλη τη διάρκεια της παραγωγής. Μια σημαντική πτυχή σήμερα είναι η βιωσιμότητα, η οποία περιλαμβάνει τη χρήση ανακυκλώσιμων υλικών, τη μείωση των αποβλήτων, την εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση των επιπτώσεων στο περιβάλλον. Τέλος η ψηφιοποίηση των γραμμών παραγωγής και η διασύνδεση των μηχανημάτων έχουν επιτρέψει την παρακολούθηση και τον έλεγχο της παραγωγής από απομακρυσμένους τόπους και την αυτόματη διόρθωση προβλημάτων, βελτιώνοντας έτσι, την αποδοτικότητα και την ακρίβεια.

Η αυτόματη γραμμή παραγωγής αποτελεί έναν αποδοτικό τρόπο παραγωγής και επεξεργασίας. Αυτός ο τρόπος παραγωγής, χωρίς τη συμμετοχή ανθρώπου, μπορεί να αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό τον προηγούμενο χειρωνακτικό τρόπο παραγωγής με τη χρήση συγκεκριμένων υπολογιστικών προγραμμάτων. Διασφαλίζεται, έτσι η σχετικά σταθερή ποιότητα του τελικού προϊόντος και η εφαρμογή μιας τέτοιας αυτόματης γραμμής παραγωγής απελευθερώνει την παραγωγικότητα. Επιπλέον, παράγονται προϊόντα με μεγάλη συχνότητα, σε ομοιόμορφες προδιαγραφές και χαρακτηριστικά, που συμμορφώνονται στη σύγχρονη παραγωγή και ζήτηση. Η εξέλιξη της παγκόσμιας οικονομίας, οδήγησε σε περισσότερες αλλαγές στην σύγχρονη παραγωγή και η αυτοματοποίηση στον συγκεκριμένο τομέα βελτιώνει σημαντικά την παραγωγικότητα και εξοικονομεί τεράστιο κόστος.

## 2.2 4η Βιομηχανική Επανάσταση (Industry 4.0)

Τέταρτη βιομηχανική επανάσταση ονομάστηκε η τρέχουσα τάση της αυτοματοποίησης και της ανταλλαγής δεδομένων στις τεχνολογίες παραγωγής. Η 4η βιομηχανική επανάσταση ενισχύει

αυτό που ονομάστηκε "έξυπνο εργοστάσιο". Μέσα στα λεγόμενα "έξυπνα εργοστάσια", συστήματα παρακολουθούν και εποπτεύουν τις φυσικές διαδικασίες, δημιουργούν ένα οικονομικό αντίγραφο του φυσικού κόσμου και παίρνουν αποκεντρωμένες αποφάσεις. Μέσω του "Διαδικτύου των πραγμάτων", τα συστήματα επικοινωνούν και συνεργάζονται τόσο μεταξύ τους όσο και με τους ανθρώπους σε πραγματικό χρόνο. Στην ουσία, η Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση (Indusrtty 4.0) είναι η τάση προς την αυτοματοποίηση και την ανταλλαγή δεδομένων στις τεχνολογίες και στις διαδικασίες παραγωγής που περιλαμβάνουν κυβερνοφυσικά συστήματα (cyber-physical systems), υπολογιστικό νέφος (cloud computing) και τεχνητή νοημοσύνη. Οι μηχανές δεν μπορούν να αντικαταστήσουν τη βαθιά τεχνογνωσία, αλλά τείνουν να είναι πιο αποτελεσματικές από τους ανθρώπους στην εκτέλεση επαναλαμβανόμενων λειτουργιών και ο συνδυασμός μηχανικής μάθησης και υπολογιστικής ισχύος επιτρέπει στις μηχανές να εκτελούν εξαιρετικά περίπλοκες εργασίες.[2]

Η 4η βιομηχανική επανάσταση αναφέρεται σε μια επαναστατική προσέγγιση στον τομέα της βιομηχανίας και της παραγωγής, η οποία επικεντρώνεται στην εφαρμογή προηγμένων τεχνολογιών και διασυνδεδεμένων συστημάτων για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας, της ποιότητας και της αυτοματοποίησης στη βιομηχανία. Το "Indusrtty 4.0" αναπτύχθηκε ως απάντηση στην ταχεία εξέλιξη της τεχνολογίας και την ανάγκη για πιο έξυπνη και αποδοτική παραγωγή. Οι μηχανές, οι εξοπλισμοί και οι διάφορες συσκευές στη γραμμή παραγωγής συνδέονται μεταξύ τους μέσω δικτύου, που επιτρέπει την ανταλλαγή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο. Οι μηχανές, οι συσκευές και οι διάφορες πηγές δεδομένων είναι συνδεδεμένες στο διαδίκτυο και επικοινωνούν μεταξύ τους, το οποίο επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, πολύ πιο γρήγορα και αποδοτικά [2]. Η τεχνητή νοημοσύνη έχει πολύ σημαντική θέση στην παραγωγή, καθώς τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες και από τις περιφερειακές συσκευές αναλύονται εκτενώς και μέσω της τεχνητής νοημοσύνης γίνεται η λήψη των αποφάσεων και η πρόβλεψη των πιθανών προβλημάτων. Σημαντικό ρόλο στην τέταρτη βιομηχανική επανάσταση έχουν τα ρομπότ και η αυτοματοποίηση, τα οποία αναλαμβάνουν των κύριο όγκο εργασιών πλέον, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για ανθρώπινη επέμβαση. Οι διαδικασίες παραγωγής γίνονται ψηφιακές και οι επιχειρήσεις προσαρμόζονται γρήγορα σε αλλαγές στη ζήτηση της αγοράς και στις απαιτήσεις των πελατών. Ο στόχος της 4ης βιομηχανικής επανάστασης είναι να δημιουργήσει έξυπνες, αυτόνομες και ενσωματωμένες επιχειρήσεις που μπορούν να παράγουν υψηλής ποιότητας προϊόντα με αυξημένη αποτελεσματικότητα και λιγότερες απώλειες.

Οι βασικοί πυλώνες της 4ης βιομηχανικής επανάστασης αντιπροσωπεύουν τις βασικές αρχές και τις τεχνολογικές δυνατότητες της. Η πλήρης συνδεσιμότητα όλων των συσκευών και μηχανημάτων τους επιτρέπει να επεξεργάζονται δεδομένα και σε συνδυασμό με τη συνδεση στο διαδίκτυο να μπορούν να τα ανταλλάσσουν. Με αυτόν τον τρόπο συνεργάζονται μεταξύ τους και δεν λειτουργούν εξατομικευμένα, απαλλάσσοντας τον χειριστή από περιττές εργασίες. Έτσι, η συνδεσιμότητα επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων και την ανταλλαγή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο. Η ανάλυση αυτών των δεδομένων είναι κρίσιμη για την βελτιστοποίηση της παραγωγής. Η ικανότητα ανάλυσης τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων είναι σημαντική για την ανάκτηση πληροφοριών, την πρόβλεψη τάσεων και τη λήψη αποφάσεων. Όλα αυτά επιτυγχάνονται με το "Διαδίκτυο των πραγμάτων" (Internet of Things), δηλαδή με την σύνδεση όλων των συσκευών στο διαδίκτυο, γεγονός που άλλαξε και εκσυγχρόνισε όλη την παραγωγική διαδικασία και μαζί με την τεχνητή νοημοσύνη και την μηχανική μάθηση είναι οι βασικοί συνδετικοί κρίκοι της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης. Συνεπώς, οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης αναλύουν τα δεδομένα για να εξάγουν πληροφορίες και να προβλέπουν τάσεις, ενώ η χρήση της τεχνητής νοημοσύνης συμβάλλει στην αυτόνομη λήψη αποφάσεων και στην αυτόματη προσαρμογή σε αλλαγές, που βοηθά στην πρόβλεψη προβλημάτων και στην βελτίωση της απόδοσης [2].



### 2.2.1 Τεχνητή Νοημοσύνη

Η τεχνητή νοημοσύνη αναφέρεται στη δημιουργία ηλεκτρονικών συστημάτων που μπορούν να εκτελούν εργασίες, οι οποίες απαιτούν ανθρώπινη νοημοσύνη. Αυτά τα συστήματα είναι σε θέση να μαθαίνουν, να αναλύουν πληροφορίες, να λαμβάνουν αποφάσεις και να εκτελούν εργασίες με αυτοματοποιημένο τρόπο. Στην ουσία, αφορά τη δημιουργία υπολογιστικών συστημάτων που μπορούν να προσομοιώνουν την ανθρώπινη νοημοσύνη. Η τεχνητή νοημοσύνη είναι ένας γρήγορα εξελισσόμενος τομέας με εφαρμογές σε πολλούς κλάδους, όπως η υγεία, η αυτοκινητοβιομηχανία, η εκπαίδευση και πολλοί άλλοι [3]. Συγκεκριμένα, στην παραγωγική διαδικασία έχει επανασχεδιάσει και εξελίξει τις τεχνικές παραγωγής και εργασίας και παρόλο που, η εφαρμογή της είναι ακόμα σε εξέλιξη, έχει δείξει τεράστια δυναμική για τη βελτίωση της απόδοσης, τη μείωση του κόστους και την επίτευξη υψηλής ποιότητας παραγωγής.

Η τεχνητή νοημοσύνη απαιτεί μια βάση εξειδικευμένου υλικού και λογισμικού για τη συγγραφή και την εκπαίδευση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης. Δεν υπάρχει μια συγκεκριμένη γλώσσα προγραμματισμού που είναι συνώνυμη με την τεχνητή νοημοσύνη, αλλά οι γλώσσες όπως η Python, η Java και η C++ έχουν χαρακτηριστικά που είναι δημοφιλή μεταξύ των αναπτυσσόμενων τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης [3]. Κατά γενικό τρόπο, τα συστήματα τεχνητής νοημοσύνης λειτουργούν διατρέχοντας μεγάλες ποσότητες δεδομένων εκπαίδευσης, αναλύοντας αυτά τα δεδομένα για συσχετίσεις και μοτίβα και χρησιμοποιώντας αυτά τα μοτίβα για να κάνουν προβλέψεις σχετικά με μελλοντικές καταστάσεις. Έτσι, μέσω της τεχνητής νοημοσύνης μπορούν να δημιουργηθούν ρεαλιστικά κείμενα, εικόνες, μουσική και άλλα μέσα.

Η τεχνητή νοημοσύνη έχει επανασχεδιάσει και εξελίξει την παραγωγική διαδικασία με πολλούς τρόπους. Αν και η εφαρμογή της στην παραγωγή είναι ακόμα σε εξέλιξη, έχει δείξει τεράστιο δυναμικό για βελτίωση της απόδοσης, μείωση του κόστους και επίτευξη υψηλής ποιότητας παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται για την ανάλυση δεδομένων και την πρόβλεψη της ζήτησης, επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της παραγωγής και τη διαχείριση των αποθεμάτων. Επιτρέπει την παρακολούθηση της κατάστασης των μηχανών και των εξοπλισμών σε πραγματικό χρόνο, το οποίο βοηθά στην πρόληψη βλαβών και τη συντήρηση του εξοπλισμού [3]. Τα ρομπότ, που πλέον χρησιμοποιούν τεχνητή νοημοσύνη μπορούν να αναλαμβάνουν εργασίες στην παραγωγή, εξοικονομώντας χρόνο και ανθρώπινη εργασία και με αυτόν τον τρόπο επιτρέπεται η αυτόματη επιθεώρηση και ο έλεγχος της ποιότητας των προϊόντων, μειώνοντας τα ελαττώματα και τις απορρίψεις. Επίσης η τεχνητή νοημοσύνη επιτρέπει την παραμετροποίηση των προϊόντων σύμφωνα με τις ατομικές ανάγκες των πελατών, δημιουργώντας μια πιο εξατομικευμένη παραγωγή, το οποίο βοηθάει στη μείωση της κατανάλωσης πόρων, βελτιώνοντας τη βιωσιμότητα της παραγωγής.

### 2.2.2 Μηχανική Μάθηση

Η Μηχανική μάθηση (Machine learning) είναι ένα υποπεδίο της τεχνητής νοημοσύνης που ασχολείται με τη σχεδίαση αυτόματων διαδικασιών, ικανών να μαθαίνουν από παραδείγματα. Η εκμάθηση από παραδείγματα είναι η διαδικασία με την οποία ένα σύστημα μαθαίνει να αναγνωρίζει και να περιγράφει ποια χαρακτηριστικά ορίζουν μια κατηγορία αντικειμένων, χρησιμοποιώντας συγκεκριμένους κανόνες και μια γλώσσα αναπαράστασης. Παράλληλα, είναι σημαντικό να βρεθεί η σωστή ισορροπία ανάμεσα στην πολυπλοκότητα αυτών των κανόνων και την ακρίβεια των δεδομένων, ώστε να αποφεύγεται η υπερβολική προσαρμογή και να είναι δυνατή η ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Έτσι η μηχανική μάθηση έχει ως σκοπό τη δημιουργία μηχανών ικανών να μαθαίνουν, δηλαδή ικανών να βελτιώνουν την απόδοση τους σε κάποιους τομείς μέσω της αξιοποίησης προηγούμενης γνώσης και εμπειρίας.[4]

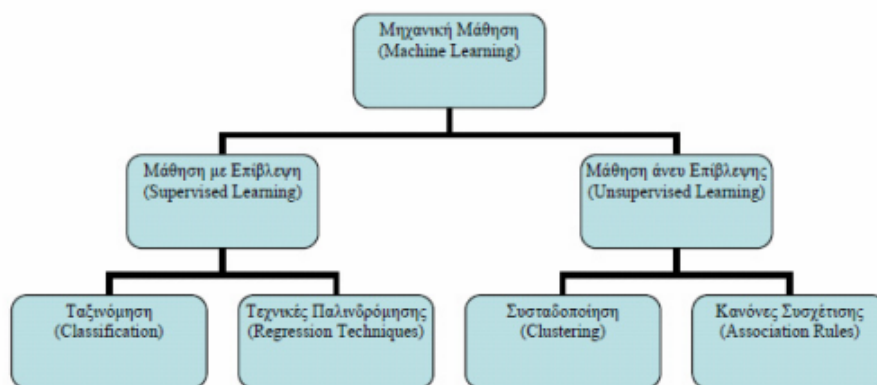
Πολλές φορές, το πρόβλημα της βελτίωσης της απόδοσης σε μια εργασία μπορεί να αναχθεί στο πρόβλημα της προσέγγισης μιας συνάρτησης-στόχου (target function) ή αντικειμενικής συνάρτησης (objective function), γεγονός που απλοποιεί τους περαιτέρω συλλογισμούς. Σε

κάποια προβλήματα η συνάρτηση-στόχος είναι προφανής, ενώ σε άλλα όχι. Πεδίο ορισμού αυτής της συνάρτησης είναι ένα σύνολο οντοτήτων σε κάποια δεδομένη αναπαράσταση, η οποία αποτελεί το χώρο στιγμιοτύπων (instance space) του προβλήματος. Η πιο κοινή αναπαράσταση είναι το μοντέλο του διανυσματικού χώρου, όπου τα αντικείμενα αναπαρίστανται ως διανύσματα σε έναν πολυδιάστατο χώρο (vector spacemodel, [Salton , McGill,1983]). Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, οι οντότητες αναπαρίστανται ως διανύσματα, τα στοιχεία των οποίων αναπαριστούν τα χαρακτηριστικά της οντότητας που έχουν επιλεγεί ως σχετικά για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Τα χαρακτηριστικά μπορούν να παίρνουν συμβολικές ή αριθμητικές τιμές. Οι τιμές της συνάρτησης-στόχου μπορεί να είναι πρακτικά οτιδήποτε: αριθμητικές ή συμβολικές, διακριτές ή συνεχείς, βαθμωτές ή διανυσματικές, κ.ο.κ. Ακόμα είναι δυνατόν να έχουν φυσική σημασία ή να μην έχουν [4].

Οι δύο στόχοι των προβλημάτων με τα οποία ασχολείται η μηχανική μάθηση είναι η πρόβλεψη και η ανακάλυψη γνώσης. Η πρόβλεψη εμπλέκει κάποιες μεταβλητές ή κάποια πεδία της βάσης δεδομένων έτσι ώστε να προβλεφθούν άγνωστες ή μελλοντικές τιμές ή και άλλες μεταβλητές ενδιαφέροντος. Πάνω στη πρόβλεψη στηρίζονται εφαρμογές διαφόρων πεδίων όπως αυτό της ιατρικής για πρόβλεψη καρκίνου, για χρηματοοικονομικές προβλέψεις, ακόμα και στην μετεωρολογία. Η ανακάλυψη γνώσης από δεδομένα είναι μία σύνθετη διαδικασία, που στοχεύει στον προσδιορισμό έγκυρων, νέων, χρήσιμων και κατανοητών σχέσεων-προτύπων. Αυτή η διαδικασία συνδυάζει τεχνικές από τη Στατιστική, τις Βάσεις δεδομένων και τη Μηχανική μάθηση, και έχει σημαντικές εφαρμογές σε πραγματικές συνθήκες και σε μεγάλη κλίμακα.

Οι τεχνικές της μηχανικής μάθησης διαίρονται σε δύο κατηγορίες: την εκμάθηση με επίβλεψη και την εκμάθηση χωρίς επίβλεψη. Στην πρώτη περίπτωση, σε κάθε παράδειγμα είναι γνωστή η τιμή ή η κατηγορία στην οποία ανήκει η παρατήρηση "y", και με βάση ένα σύνολο από ταξινομημένα στιγμιότυπα έχει ως σκοπό την εύρεση ενός προτύπου μοντέλου με το οποίο θα μπορούσαμε να ταξινομήσουμε ένα άλλο σετ στιγμιοτύπων, που είναι αταξινομήτα. Στην περίπτωση που τιμή ή η κατηγορία στην οποία ανήκει η παρατήρηση είναι άγνωστη, η μηχανική μάθηση επιχειρεί να την προσεγγίσει κατηγοριοποιώντας τα παραδείγματα σε ομάδες που θα έχουν ομοιότητα με βάση τα χαρακτηριστικά τους ή δημιουργεί κανόνες συσχέτισης. Το ζητούμενο στην περίπτωση της μάθησης με επίβλεψη είναι η κατασκευή ενός μοντέλου-προτύπου που αναπαριστά τη γνώση που παρέχεται μέσω της εμπειρίας και το οποίο στη συνέχεια χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση νέων αταξινομήτων στιγμιοτύπων. Κατά κανόνα, οι προβλέψεις του μοντέλου που προκύπτει θα επαληθεύονται για την πλειοψηφία των στοιχείων που περιλαμβάνονται, τα οποία λέγονται και στιγμιότυπα εκπαίδευσης. Η εκμάθηση με επίβλεψη έχει δύο περαιτέρω κατηγορίες προβλημάτων, την παλινδρόμηση και την ταξινόμηση. Στην πρώτη, η μεταβλητή "y" είναι μία συνεχής μεταβλητή, ενώ στη δεύτερη μία διακριτή κατηγορική μεταβλητή. Τέλος, τα προβλήματα χωρίς επίβλεψη χωρίζονται σε: ομαδοποίησης και ανακάλυψης κανόνων. Η μεθοδολογία της ομαδοποίησης επιχειρεί να ξεχωρίσει τα δεδομένα σε άτυπες ομάδες, ενώ η ανακάλυψη κανόνων εξετάζει τα δεδομένα για να εντοπίσει κανόνες που περιγράφουν τις ιδιότητες των παραδειγμάτων.

Τα στάδια τα οποία ακολουθούνται στην διαδικασία της μηχανικής μάθησης είναι η επιλογή δεδομένων, όπου δημιουργείται το σύνολο δεδομένων στο οποίο θα εφαρμοστεί η αναζήτηση (training data set selection) με επιλογή στοιχείων (πινάκων, πεδίων) από σχεσιακές βάσεις δεδομένων. Η προεπεξεργασία δεδομένων ασχολείται με την αντιμετώπιση περιπτώσεων ελλιπών δεδομένων, πεδίων με τιμές που τα καθιστούν κενά, και πεδίων με τιμές που υπονοούν κάτι διαφορετικό από την πραγματική τους σημασία. Ο μετασχηματισμός δεδομένων, όπου τα δεδομένα μετασχηματίζονται ώστε να διευκολύνουν την ανακάλυψη γνώσης. Οι μετασχηματισμοί αυτοί μπορεί να περιλαμβάνουν είτε τη μείωση του αριθμού των υπό-εξέταση χαρακτηριστικών με επιλογή ορισμένων από αυτά, είτε την ομοιόμορφη κωδικοποίηση της ίδιας πληροφορίας, είτε την μετατροπή συνεχόμενων αριθμητικών τιμών σε διακριτές. Στην συνέχεια είναι η επιλογή αλγορίθμου και η εφαρμογή του, όπου καθορίζεται τι είδους γνώση θα αναζητηθεί, κάτι που



Σχήμα 2.1: Κατηγορίες μηχανικής μάθησης. [5]

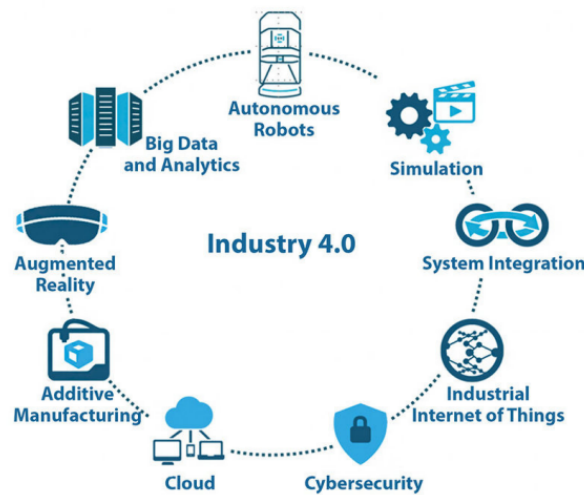
έμμεσα προσδιορίζει και την κατηγορία αλγορίθμου που θα χρησιμοποιηθεί. Είναι ένα καθαρά υπολογιστικό στάδιο, στο οποίο γίνεται η ουσιαστική αναζήτηση της γνώσης στα δεδομένα. Περιγράφεται με τον όρο εξόρυξη σε δεδομένα (Data Mining). Τέλος είναι η ερμηνεία και η αξιολόγηση των ευρεθέντων προτύπων, πιθανώς με υποβοήθηση γραφικών απεικονίσεων των προτύπων ή και των δεδομένων [4].

Εν ολίγοις, η Μηχανική Μάθηση αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα στη σύγχρονη παραγωγική διαδικασία. Με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας, οι επιχειρήσεις επιτυγχάνουν την αυτοματοποίηση και τη βελτιστοποίηση της παραγωγής τους, επιτρέποντας την εξοικονόμηση χρόνου, κόστους και πόρων, καθώς και τη βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων. Η μηχανική μάθηση χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της ζήτησης προϊόντων, επιτρέποντας τη ρύθμιση της παραγωγής ανάλογα με τις ανάγκες της αγοράς. Η είσοδος των ρομπότ και του αυτοματισμού στην παραγωγική διαδικασία, σε συνδυασμό με την χρήση της μηχανικής μάθησης, καθιστά τα ρομπότ υπεύθυνα να αναλαμβάνουν εργασίες όπως η συναρμολόγηση ή η συσκευασία προϊόντων. Πέρα από τη γραμμή συναρμολόγησης και τις μονάδες παραγωγής, η εφαρμογή λύσεων μηχανικής μάθησης για τη διαχείριση θεμάτων σχετικών με την εφοδιαστική αλυσίδα βελτιώνει την αποδοτικότητα και μειώνει δραστηρικά τα κόστη, στην συνολική παραγωγή. Η τεχνική μηχανικής μάθησης είναι αυτή τη στιγμή ο μόνος τρόπος που έχουν τα μηχανήματα για να προσαρμόζονται σε ένα μεταβαλλόμενο περιβάλλον και να δημιουργούν σύνθετες στρατηγικές προκειμένου να επιτύχουν τους στόχους τους, οι οποίοι δεν είναι δυνατό να επιτευχθούν με τη βοήθεια προγραμματισμένου κώδικα. Αναγνωρίζοντας τις πολλές ευκαιρίες για τη χρήση της μηχανικής μάθησης στη βιομηχανική παραγωγή, οι εγκαταστάσεις παραγωγής μπορούν να βελτιώσουν την ποιότητά των προϊόντων τους, να προβλέψουν τα скаμπανεβάσματα της ζήτησης στην αγορά, να μειώσουν τον αριθμό των σοβαρών συμβάντων, να βελτιώσουν τη φήμη τους όσον αφορά την ασφάλεια και τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο και να αυξήσουν την αποτελεσματικότητα και την παραγωγικότητά τους σε κάθε τομέα. Η εφαρμογή της μηχανικής μάθησης στη βιομηχανική παραγωγή αποτελεί εξελισσόμενη διαδικασία που προσθέτει διαρκώς αξία και οδηγεί σε αύξηση των εσόδων σε βάθος χρόνου.

Η μηχανική μάθηση αντιπροσωπεύει έναν από τους σημαντικότερους τομείς της τεχνητής νοημοσύνης και της ψηφιακής εποχής μας. Με τη δυνατότητά της να αναγνωρίζει πρότυπα σε δεδομένα και να εξάγει προβλέψεις, η μηχανική μάθηση έχει επαναπροσδιορίσει τον τρόπο που αντιμετωπίζονται τα προβλήματα. Σημαντική προϋπόθεση για την επιτυχία της μηχανικής μάθησης είναι η σωστή εκμετάλλευση των παρεχόμενων δεδομένων. Όλοι οι αλγόριθμοι απαιτούν τα δεδομένα να είναι ενοποιημένα σε ένα αρχείο εισόδου ακολουθώντας συγκεκριμένη τυποποίηση.

### 2.2.3 Πυλώνες 4ης Βιομηχανικής Επανάστασης (Industry 4.0)

Το "Industry 4.0" περιλαμβάνει την ενσωμάτωση ευφυών μηχανών, συστημάτων, ανθρώπων και την εισαγωγή αλλαγών στις παραγωγικές διαδικασίες. Οι αλλαγές αυτές αποσκοπούν στην αύξηση της αποδοτικότητας της εργασίας και στην εξατομικευμένη παραγωγή, εισάγοντας τη δυνατότητα για ευέλικτες αλλαγές. Η "Βιομηχανία 4.0" δεν εφαρμόζεται μόνο στην τεχνολογία αλλά και σε νέους τρόπους εργασίας και στον ρόλο των ανθρώπων στη βιομηχανία. Η αύξηση του επιπέδου της μηχανογράφησης, της επικοινωνίας και της ενσωμάτωσης της τεχνητής νοημοσύνης οδηγεί σε σημαντική βελτίωση της ασφάλειας και της αποδοτικότητας της εργασίας. Η έννοια της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης βασίζεται σε 9 κύριους πυλώνες: Αυτόνομα Ρομπότ (Autonomous Robots), Προσομοιώσεις (Simulations), Ενσωμάτωση Συστημάτων (Systems Integration), Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things), Κυβερνοασφάλεια (Cyber Security), Υπολογιστικό Νέφος (Cloud Computing), Προσθετική Κατασκευή (Additive Manufacturing), Επαυξημένη Πραγματικότητα (Augmented Reality), Μεγάλα Δεδομένα (Big Data) [2].



Σχήμα 2.2: Οι 9 πυλώνες της 4ης Βιομηχανικής επανάστασης [2].

- **Διαδίκτυο των Πραγμάτων:** Το "Internet of Things" (IoT) αναφέρεται στις εκατομμύρια φυσικές συσκευές σε όλο τον κόσμο που είναι πλέον συνδεδεμένες στο διαδίκτυο, συλλέγοντας και μοιράζοντας δεδομένα. Με τη βοήθεια των επεξεργαστών και των ασύρματων δικτύων είναι δυνατό να μετατραπεί οτιδήποτε σε μέρος του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Παραδείγματα, περιλαμβάνουν τον αυτοματισμό στο σπίτι, τα οχήματα χωρίς οδηγό, την επικοινωνία μεταξύ αυτοκινήτων, τα έργα έξυπνων πόλεων, τις έξυπνες συσκευές παρακολούθησης υγείας και άλλα [6].
- **Μεγάλα Δεδομένα:** Η εμφάνιση μεγάλων συνόλων δεδομένων στις βιομηχανίες άνοιξε τον δρόμο για την ανάλυση "μεγάλων δεδομένων". Σκοπός είναι η βελτιστοποίηση της ποιότητας παραγωγής, η εξοικονόμηση ενέργειας, η βελτίωση του εξοπλισμού και των υπηρεσιών, η συλλογή δεδομένων από τις περισσότερες πηγές που εμπλέκονται στην παραγωγή και η συσχέτιση των συλλεγμένων και επεξεργασμένων δεδομένων [6].
- **Προσθετική Κατασκευή:** Το "Additive Manufacturing", όπως η εκτύπωση 3-D χρησιμοποιείται ευρέως στο "Industry 4.0". Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή πρωτοτύπων και μικρότερων εξαρτημάτων μηχανών. Μπορούν να επιτευχθούν προσαρμοσμένα, περίπλοκα, αλλά και πιο ελαφριά σχέδια. Χρησιμοποιούνται ευρέως από τη βιομηχανία αεροδιαστημικής, για παράδειγμα, για την ελάφρυνση των αεροσκαφών τους και για τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου [6].

- **Επαυξημένη Πραγματικότητα:** Το "Augmented Reality" αναλύει το υπάρχον περιβάλλον και προσθέτει πληροφορίες σε αυτό, με σκοπό τη δημιουργία ενός νέου τεχνητού περιβάλλοντος. Αυτό το τεχνητό περιβάλλον χρησιμοποιείται σε βιομηχανίες με σκοπό την προσομοίωση στον πραγματικό κόσμο [6].
- **Αυτόνομα Ρομπότ:** Τα ρομπότ χρησιμοποιούνταν ευρέως για την αντιμετώπιση σύνθετων εργασιών, αλλά με το πέρασμα των χρόνων εξελίσσονται για μεγαλύτερη χρησιμότητα. Τα ρομπότ γίνονται πιο αυτόνομα, ευέλικτα και συνεργατικά. Σκοπός είναι να επικοινωνούν μεταξύ τους και να εργάζονται γνωστικά και με ασφάλεια με τον άνθρωπο.[6]
- **Υπολογιστικό Νέφος:** Στις έξυπνες εργοστασιακές μονάδες με αυξημένες λειτουργίες που σχετίζονται με την παραγωγή απαιτείται περισσότερη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ οργανισμών, υπαλλήλων και πελατών. Η πληροφορία του συστήματος και η λειτουργία του μόλις εφαρμοστεί στο υπολογιστικό νέφος θα επιτρέψει την αύξηση των λειτουργιών για τους σταθμούς παραγωγής που βασίζονται στα δεδομένα [6].
- **Κυβερνοασφάλεια:** Με την πρόοδο και την τυποποίηση των κυβερνοτεχνολογιών (cyber technologies), υπάρχει ανάγκη για προστασία της πληροφορίας και των δεδομένων. Αυτό διασφαλίζει την προστασία από κλοπή ή παρέχει καταφύγιο για την αντιμετώπιση ζημιών στο υλικό, το λογισμικό και τα ηλεκτρονικά δεδομένα. Η έξυπνη βιομηχανία που βασίζεται κυρίως σε πρωτόκολλα επικοινωνίας και δικτύωσης, θα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κυβερνοασφάλεια. Το σύστημα και ο εξοπλισμός μιας βιομηχανίας είναι συχνά υπό τον κίνδυνο εγκλημάτων και απειλών που σχετίζονται με υπολογιστές [6].
- **Ενσωμάτωση Συστημάτων:** "Systems Integration" είναι η διαδικασία συνένωσης των επιμέρους υποσυστημάτων σε ένα σύστημα και η διασφάλιση ότι τα υποσυστήματα λειτουργούν μαζί ως σύστημα. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την ενοποίηση υπαρχόντων, συχνά διαφορετικών συστημάτων, με στόχο την αύξηση της αξίας για τον πελάτη[6].
- **Προσομοιώσεις:** Κάθε φυσικό πρόβλημα σε ένα προϊόν, μπορεί να αναπαρασταθεί με τη μορφή ενός υπολογιστικού μοντέλου. Αυτό το υπολογιστικό μοντέλο προσομοιώνεται για να μειωθεί η αποτυχία στο τελικό προϊόν. Η ανάγκη για φυσικές δοκιμές έχει μειωθεί με την εισαγωγή της τεχνολογίας προσομοίωσης. Τεχνικές προσομοίωσης όπως η υπολογιστική ρευστοδυναμική, η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, η θερμική προσομοίωση, η ψηφιακή και αναλογική προσομοίωση έχουν εξοικονομήσει πόρους για τις βιομηχανίες [6].

Η έννοια της 4ης Βιομηχανικής επανάστασης, που χαρακτηρίζεται από την ενσωμάτωση ψηφιακών τεχνολογιών στις διαδικασίες παραγωγής, χρησιμεύει ως θεμέλιο για τις προόδους στα αυτοματοποιημένα συστήματα και τα έξυπνα εργοστάσια. Πλέον δίνεται έμφαση στην χρήση των πυλώνων που αναφέρθηκαν και παραπάνω, όπως cyber-physical systems, Internet of Things, advanced robotics, με σκοπό τη δημιουργία εξαιρετικά αποδοτικών, ευέλικτων και διασυνδεδεμένων περιβαλλόντων παραγωγής. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, η οποία περιλαμβάνει την προσομοίωση διαδικασίας διαχείρισης υλικών μέσα σε γραμμή παραγωγής με χρήση ρομποτικών βραχιόνων, ευθυγραμμίζεται και συνδέεται με κάποιες από τις αρχές του Industry 4.0. Πιο συγκεκριμένα, με την εφαρμογή και βελτιστοποίηση των ρομποτικών χειριστών, η προσομοίωση όχι μόνο δείχνει τη δυνατότητα αύξησης της παραγωγικότητας και της ακρίβειας, αλλά επίσης αναδεικνύει την απρόσκοπη ενσωμάτωση της αυτοματοποίησης και της ανάλυσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο στις παραγωγικές διαδικασίες. Αυτή η ευθυγράμμιση υπογραμμίζει τον μετασχηματιστικό αντίκτυπο των τεχνολογιών της 4ης Βιομηχανικής επανάστασης στην ενίσχυση της λειτουργικής αποδοτικότητας και ανοίγει τον δρόμο για μελλοντικές καινοτομίες στα έξυπνα συστήματα παραγωγής.

## 2.3 Βιομηχανικά Ρομπότ (Industrial Robots)

Η Ένωση Βιομηχανικών Ρομπότ (RIA) έχει ορίσει ένα "βιομηχανικό ρομπότ" (industrial robot) ως έναν επαναπρογραμματιζόμενο πολυλειτουργικό χειριστή σχεδιασμένο να μετακινεί υλικό, εξαρτήματα, εργαλεία ή εξειδικευμένες συσκευές, μέσω μεταβλητών προγραμματισμένων κινήσεων για την εκτέλεση μιας ποικιλίας εργασιών [7]. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι χειριστών μπορούν να μοντελοποιηθούν ως μια ανοιχτή κινηματική αλυσίδα άκαμπτων σωμάτων (rigid bodies) που ονομάζονται σύνδεσμοι, οι οποίοι διασυνδέονται με αρθρώσεις (joints). Το τυπικό βιομηχανικό ρομπότ είναι τοποθετημένο σε μια σταθερή βάση βάθρου που συνδέεται με τους υπόλοιπους συνδέσμους. Ο τελικός τελεστής (end-effector) συνδέεται στο ελεύθερο άκρο και επιτρέπει στο ρομπότ να χειρίζεται αντικείμενα και να εκτελεί τις απαιτούμενες εργασίες. Ένας γενικότερος ορισμός του ρομπότ είναι: μια γενικής χρήσης, επαναπρογραμματιζόμενη μηχανή ικανή να επεξεργάζεται ορισμένα ανθρώπινα χαρακτηριστικά όπως η κρίση, η λογική, η μάθηση και η πρόβλεψη. Αν και τα βιομηχανικά ρομπότ έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε μια ποικιλία κατασκευαστικών εφαρμογών, τα περισσότερα ρομπότ που χρησιμοποιούνται είναι "κωφά", "άλαλα", "τυφλά" και "ακίνητα" [7].

Οι σημερινοί ερευνητές προσπαθούν να αναπτύξουν και να σχεδιάσουν "ευφυή" ρομπότ. Ρομπότ, δηλαδή, που ανταποκρίνονται στις αλλαγές στο περιβάλλον τους, μέσω αισθητήρων που συνδέονται με τον ελεγκτή τους. Η ανάπτυξη του κλάδου της τεχνητής νοημοσύνης, της αυτοματοποίησης και της μηχανικής μάθησης βοηθάει στην λύση προβλημάτων που αντιμετωπίζονται στην βιομηχανία. Ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα στη χρήση ενός ρομπότ σε έναν χώρο εργασίας είναι η ανθρώπινη ασφάλεια. Ένα ρομπότ εξοπλισμένο με αισθητήρες που ανιχνεύουν την παρουσία ενός εμποδίου ή ενός ανθρώπινου εργαζομένου στον χώρο εργασίας του, θα μπορούσε να κλείνει αυτόματα για να αποτρέψει οποιαδήποτε βλάβη στον εαυτό του ή στον άνθρωπο εργαζόμενο. Τα ρομπότ παρουσιάζουν διαφορετικούς βαθμούς αυτονομίας. Ορισμένα ρομπότ είναι προγραμματισμένα να εκτελούν πιστά συγκεκριμένες ενέργειες ξανά και ξανά (επαναλαμβανόμενες ενέργειες) χωρίς διαφοροποιήσεις και με υψηλό βαθμό ακρίβειας. Αυτές οι ενέργειες καθορίζονται από προγραμματισμένες ρουτίνες που καθορίζουν την κατεύθυνση, την επιτάχυνση, την ταχύτητα, την επιβράδυνση και την απόσταση μιας σειράς συντονισμένων κινήσεων. Αντίθετα, άλλα ρομπότ είναι πολύ πιο ευέλικτα ως προς τον προσανατολισμό του αντικειμένου με το οποίο αλληλεπιδρούν ή ως προς την εργασία που πρέπει να εκτελέσουν. Για παράδειγμα, για πιο ακριβή καθοδήγηση, τα ρομπότ συχνά περιέχουν υποσυστήματα μηχανικής όρασης που λειτουργούν ως οπτικοί αισθητήρες τους, συνδεδεμένα με ισχυρούς υπολογιστές ή ελεγκτές.



Σχήμα 2.3: Βιομηχανικό Ρομπότ [7].

Ένα βιομηχανικό ρομπότ αποτελείται από διάφορα υποσυστήματα που συνεργάζονται μεταξύ τους. Τον ρομποτικό βραχίονα (manipulator), όπου είναι η μηχανική δομή που εκτελεί το πραγματικό έργο του ρομπότ, που αποτελείται από συνδέσμους και ενώσεις με ενεργοποιητές (actuators). Τις συσκευές που αντιλαμβάνονται τη θέση διαφόρων συνδέσμων ή/και αρθρώσεων και μεταδίδουν αυτές τις πληροφορίες στον ελεγκτή (feedback devices). Τον ελεγκτή (controller), ο οποίος χρησιμοποιείται για τη δημιουργία σημάτων προς το σύστημα μετάδοσης κίνησης, με στόχο να μειώνεται το σφάλμα απόκρισης κατά τη θέση και την εφαρμογή της δύναμης. Την πηγή ενέργειας, όπου ηλεκτρικά, πνευματικά και υδραυλικά συστήματα ισχύος χρησιμοποιούνται για την παροχή και τη ρύθμιση της ενέργειας που απαιτείται για τους ενεργοποιητές του χειριστή. Γενικότερα, η διαμόρφωση του χειριστή είναι ένα σημαντικό στοιχείο στην επιλογή ενός ρομπότ. Βασίζεται στην κινηματική δομή των διαφόρων αρθρώσεων και συνδέσμων και στις σχέσεις τους μεταξύ τους. Υπάρχουν έξι βασικές κινήσεις ή βαθμοί ελευθερίας για αυθαίρετη τοποθέτηση και προσανατολισμό ενός αντικειμένου σε έναν τρισδιάστατο χώρο, τρεις κινήσεις του χεριού και του σώματος και τρεις κινήσεις του καρπού. Οι τρεις πρώτοι σύνδεσμοι, που ονομάζονται κύριοι σύνδεσμοι, φέρουν τις ακαθάριστες εργασίες χειραγώγησης (τοποθέτηση). Παραδείγματα είναι οι εφαρμογές συγκόλλησης τόξου, βαφής με ψεκασμό και κοπής με πίδακα νερού, ενώ οι τρεις τελευταίοι σύνδεσμοι, οι δευτερεύοντες σύνδεσμοι, φέρουν τις λεπτές εργασίες χειρισμού. Ρομπότ με περισσότερους από έξι άξονες κίνησης ονομάζονται ρομπότ πλεονάζοντος βαθμού ελευθερίας. Οι περιττοί άξονες χρησιμοποιούνται για μεγαλύτερη ευελιξία, όπως η αποφυγή εμποδίων στο χώρο εργασίας.

Υπάρχουν πέντε κύριες μηχανικές διαμορφώσεις που χρησιμοποιούνται συνήθως για τα ρομπότ: Καρτεσιανό, κυλινδρικό, σφαιρικό, αρθρωτό και "SCARA", ανάλογα με τον διαθέσιμο χώρο εργασίας, την επιθυμητή εμβέλεια και την αποφυγή σύγκρουσης, γίνεται η επιλογή για την βέλτιστη μηχανική διαμόρφωση που ταιριάζει καλύτερα στο εκάστοτε εργοστάσιο.

Καθώς η ανάγκη για αυτοματισμό αυξάνεται, τα βιομηχανικά ρομπότ προσελκύουν περισσότερη προσοχή ως λύση για την αντιμετώπιση των ελλείψεων εργατικού δυναμικού και την επέκταση των επιχειρηματικών ευκαιριών. Με την ευελιξία τους, τα βιομηχανικά ρομπότ έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να αναπτυχθούν εύκολα σε χώρους όπου η εγκατάσταση ενός εξειδικευμένου μηχανήματος δεν είναι ιδανική. Επειδή είναι γρήγορα και ισχυρά, τα συμβατικά βιομηχανικά ρομπότ απαιτείται να τοποθετούνται μακριά από ανθρώπους και μέσα σε φράκτες ασφαλείας. Από την άλλη, τα συνεργατικά ρομπότ, ένας νέος τύπος ρομπότ που τραβάει την προσοχή τα τελευταία χρόνια, μπορούν να συνυπάρξουν με τον άνθρωπο.

### 2.3.1 Συνεργατικά ρομπότ (Cobots)

Τα Συνεργατικά ρομπότ είναι η πιο πρόσφατη τεχνολογία στη ρομποτική και έχουν αλλάξει σημαντικά τον κόσμο του αυτοματισμού. Το όνομα "Cobot" είναι συντομογραφία του "συνεργατικού ρομπότ" (Collaborative robot). Τα ρομπότ αυτά ονομάζονται συνεργατικά, καθώς μπορούν να συνεργαστούν με μεγάλη ασφάλεια με τους ανθρώπους. Αυτό επιτυγχάνεται, διότι είναι εξοπλισμένα με αισθητήρες που δίνουν στο ρομπότ "ρεαλιστική αίσθηση" σε σχέση με το περιβάλλον γύρω του. Εάν το συνεργατικό ρομπότ διακοπεί από την εργασία του θα τεθεί σε λειτουργία ασφαλείας, σε αντίθεση με τα παραδοσιακά ρομπότ, που απλώς θα συνέχιζαν την εργασία τους, τραυματίζοντας δυνητικά ανθρώπους. Για χρόνια οι μεγάλοι κατασκευαστές είχαν το πλεονέκτημα στον αυτοματισμό, χρησιμοποιώντας παραδοσιακά βιομηχανικά ρομπότ, αλλά αυτά τα μεγάλα, ακριβά και πολύπλοκα ρομπότ σχεδιάστηκαν για διαδικασίες παραγωγής μεγάλου όγκου σταθερού παραγωγικού χαρακτήρα. Σε αντίθεση με τα μικρών όγκων ρομπότ που έχουν γίνει πλέον πιο ευέλικτα, οικονομικά αποδοτικότερα, πιο εύκολα και εύχρηστα στον χειριστή. Επιτρέποντας σε εταιρείες οποιουδήποτε επιπέδου τεχνικής εξειδίκευσης να αυξάνουν την παραγωγικότητα, να βελτιώνουν την ποιότητα και να ανταποκρίνονται πιο γρήγορα στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις των πελατών [8].





(α') Cobot από τον κατασκευαστή ABB



(β') Cobot από τον κατασκευαστή KUKA



(γ') Cobot από τον κατασκευαστή YASKAWA

Σχήμα 2.4: Παραδείγματα Cobots που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία.

Τα "Cobots" προορίζονται να θέσουν το άτομο στο επίκεντρο της διαδικασίας και να απαλλάξουν τους εργαζόμενους από διάφορες εργασίες, που υπό άλλες συνθήκες μπορεί να ήταν επικίνδυνες. Οι άνθρωποι δεν εξαφανίζονται από την παραγωγή, τα συνεργατικά ρομπότ λειτουργούν παράλληλα με τους χειριστές αντί να τους αντικαθιστούν και έχουν σχεδιαστεί για να παραμένουν στο σημείο που εγκαταστάθηκε αρχικά. Τα ρομπότ αυτά έχουν αρκετούς αισθητήρες σύγκρουσης για να αναγνωρίζουν και να διευκολύνουν τη λειτουργία με έναν άνθρωπο εργάτη. Περιλαμβάνουν όρια στην δύναμη που ασκούν για να εγγυηθούν ότι τυχόν σύγκρουση δεν θα έχει ως αποτέλεσμα κάποια βλάβη. Είναι εξοπλισμένα με μια χειροκίνητη συσκευή που επιτρέπει στον χειριστή να ελέγχει απευθείας το ρομπότ και την κινητικότητα του ενώ βρίσκεται σε αυτοματοποιημένη λειτουργία. Τα συγκεκριμένα ρομπότ συνεργάζονται με ανθρώπους βοηθώντας σε μια εργασία ή λειτουργώντας ως οδηγός. Σε αντίθεση με τα αυτόνομα ρομπότ, τα οποία λειτουργούν κυρίως ανεξάρτητα και χωρίς επίβλεψη, τα συνεργατικά ρομπότ προγραμματίζονται και κατασκευάζονται για να ανταποκρίνονται σε ανθρώπινες εντολές και ενέργειες. Μπορούν να ρυθμιστούν και να προσαρμοστούν από τους χειριστές και μπορούν να αναλάβουν επαναλαμβανόμενες, κουραστικές εργασίες, απελευθερώνοντας χρόνο από τους ανθρώπους, που επικεντρώνονται σε εργασίες που χρειάζονται την τεχνογνωσία και τις ικανότητές τους. Αυτή είναι και η πραγματική ουσία και λειτουργία των "Cobots", να συνεργάζονται ευέλικτα και δυναμικά με το ανθρώπινο δυναμικό ενισχύοντας την αποδοτικότητα, παράγοντας προϊόντα υψηλότερης ποιότητας και αυξάνοντας την ασφάλεια των εργαζομένων σε καταστάσεις παραγωγής και αποθήκευσης, αλληλεπιδρώντας ομαλά με αυτοματοποιημένες εργασίες μιας εγκατάστασης.

Γενικά, έχουν παρατηρηθεί διάφορα χαρακτηριστικά και πτυχές των συνεργατικών ρομπότ που τους επιτρέπουν να προσφέρουν τα καλύτερα αποτελέσματα στις σύγχρονες βιομηχανίες. Κάποιες από τις πολύ σημαντικές και καίριες εργασίες τους είναι τα σενάρια διαλογής και τοποθέτησης, οι "συν-χειρισμοί" (co-manipulation) και εργασίες που σχετίζονται με ε-



πιθεώρηση. Επίσης, άλλοι πιθανοί τομείς εφαρμογών είναι εργασίες φινιρίσματος επιφανειών και εργασίες συγκόλλησης και συναρμολόγησης. Σε αντίθεση με τα βιομηχανικά ρομπότ πιο παλιάς τεχνολογίας, τα "Cobots" βελτιώνουν σημαντικά την ασφάλεια των εργαζομένων. Η τεχνολογία τους έχει προχωρήσει με τα χρόνια και είναι κατασκευασμένα με ελαφριά και ανθεκτικά μέταλλα και συνθετικά, μειώνοντας το ενεργειακό αποτύπωμα, βελτιώνοντας την κίνηση τους, την επαφή τους με τα αντικείμενα λόγω των αισθητήρων τους και την διεπαφή με τους ανθρώπους, χειριστές. Η ευελιξία του προγραμματισμού και της εγκατάστασης των συνεργατικών ρομπότ δεν μειώνει την ύπαρξη συγκεκριμένων προδιαγραφών και ισχύοντων οριών για την ασφάλεια του χειριστή. Τα εργαλεία προσομοίωσης μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό κινδύνων και στην σχεδίαση λύσεων και εναλλακτικών. Έτσι, τα περισσότερα "Cobots" διαθέτουν στρογγυλεμένα σχήματα και επιφάνειες, που μειώνουν τις δυνάμεις που ασκούνται σε περιπτώσεις σύγκρουσης ή επαφής. Αυτή η τεχνολογία βελτιώνεται και αναπτύσσεται στον συγκεκριμένο τομέα εδώ και πολλά χρόνια, μέσω των πληροφοριών που συγκεντρώνονται κατά την δοκιμή και την χρήση.



Σχήμα 2.5: Εφαρμογές των "Cobots" σε μια γραμμή παραγωγής [8].

Η ζήτηση για τον συγκεκριμένο τύπο ρομπότ αυξάνεται εκθετικά και η αγορά μεγαλώνει. Όλα τα δεδομένα που συλλέγονται από τους αισθητήρες τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για υπολογισμούς αναλύσεις και ελέγχους. Οι πελάτες έχουν όλο και πιο συγκεκριμένες απαιτήσεις για εξατομικευμένα είδη, κάτι που δημιουργεί σημαντική αύξηση της προσφοράς στον συγκεκριμένο κλάδο. Το "Cobot", λοιπόν, είναι ένα νέο ρομπότ παραγωγής που προορίζεται να λειτουργεί μαζί με τους ανθρώπους και όχι αυτόνομα και μόνο του στο περιβάλλον του. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο, σε χώρους εργασίας με περιορισμένο χώρο και η λειτουργία διακοπής εργασίας επιτρέπει τη στιγμιαία διακοπή των λειτουργιών από τον άνθρωπο, χειριστή, που επιτρέπει στα ρομπότ να μαθαίνουν από τους ανθρώπους που ηγούνται μια διαδικασία/εργασία. Περιέργως, τα συνεργατικά ρομπότ κερδίζουν έδαφος ακόμη και σε βαριές βιομηχανικές συνθήκες και δεν περιορίζονται απλά σε μικρές εφαρμογής εργασίες, καθιστώντας τα θελκτικά σε κάθε εργοστάσιο και παραγωγή. Επομένως, είναι απαραίτητα στις μικρού βεληνεχούς έξυπνες εργοστασιακές διαδικασίες που κάνουν την παραγωγή πιο αποτελεσματική και ανταγωνιστική στην παγκόσμια οικονομία.

## 2.4 Ρομπότ στην παραγωγική διαδικασία

Η εμφάνιση των σύγχρονων ρομποτικών συστημάτων στη βιομηχανία είναι μία πραγματικότητα. Τα ρομπότ εισέρχονται σε διάφορους χώρους εργασίας, τα εργοστάσια αλλάζουν μορφή και ακολουθούν εδώ και χρόνια την εξέλιξη της τεχνολογίας, των νέων εργαλείων και δεδομένων. Η είσοδος και η εφαρμογή του "Industry 4.0" αλλάζει τις πρακτικές και την αποδοτικότητα των γραμμών παραγωγής. Η αυτοματοποίηση έχει γίνει συνώνυμη με τη χρήση ρομποτικής

για τη μείωση ή την αντικατάσταση των εργασιών, που παραδοσιακά πραγματοποιούνταν από εργαζόμενους. Η ρομποτική αποτελεί μόνο ένα μέρος του πώς λειτουργεί η αυτοματοποίηση στον τομέα της κατασκευής. Οι ρομποτικοί βραχίονες είτε τριών, είτε έξι αξόνων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το χειρισμό υλικού και την τοποθέτηση των αντικειμένων, ολοκληρώνοντας αυτές τις εργασίες πιο γρήγορα και αποδοτικά από ό,τι μόνο με την ανθρώπινη εργασία. Αυτές οι βιομηχανικές εφαρμογές της ρομποτικής μπορούν να βελτιώσουν τις επαναλαμβανόμενες διαδικασίες και εργασίες υψηλού όγκου, όπως η τοποθέτηση ενός εξαρτήματος σε μια μεταφορική ζώνη και η ανύψωση βαριών αντικειμένων. Οι μηχανικοί ελέγχου μπορούν να προγραμματίσουν τα ρομπότ να εκτελούν την ίδια εργασία με τον ίδιο τρόπο κάθε φορά ή, χρησιμοποιώντας πιο προηγμένη τεχνολογία, να τα προγραμματίσουν να είναι πιο ευέλικτα.

Συνήθως υπάρχουν δύο τύποι εφαρμογών για τις οποίες οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν ρομπότ: επαναλαμβανόμενες και προσαρμοστικές/ευέλικτες εφαρμογές [9]. Ορισμένοι κατασκευαστές χρησιμοποιούν τη ρομποτική για την αυτοματοποίηση επαναλαμβανόμενων και μονότονων εργασιών, όπως ο χειρισμός υλικού και η συναρμολόγηση. Τα ρομπότ μπορούν συνήθως να ολοκληρώσουν αυτές τις εργασίες ταχύτερα και να βελτιώσουν την ποιότητα. Συνηθισμένα παραδείγματα χρήσης επαναλαμβανόμενης αυτοματοποίησης περιλαμβάνουν:

- μεταφορά υλικού,
- διαλογή και τοποθέτηση (pick and place),
- διανομή υλικού,
- αφαίρεση υλικού,
- στοίβαξη παλετών,
- συγκόλληση,
- συναρμολόγηση.

Η δεύτερη κοινή περίπτωση χρήσης είναι η προσαρμοστική/ευέλικτη αυτοματοποίηση. Τα ρομπότ γίνονται πιο προηγμένα, επιτρέποντάς τους να εκτελούν πιο ευέλικτες και προσαρμοσμένες εργασίες. Αντί να προγραμματίζεται ένα ρομπότ να επαναλαμβάνει την ίδια κίνηση ξανά και ξανά, ορισμένα ρομπότ, σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες, μπορούν να προσαρμόζονται σε διαφορετικά εξαρτήματα και προϊόντα, επιτρέποντας γρήγορη αλλαγή εργασιών με ελάχιστο χρόνο απενεργοποίησης και επαναπρογραμματισμού. Οι κατασκευαστές μπορεί να συνδυάσουν την ευέλικτη αυτοματοποίηση με επιλογές απομακρυσμένης παρακολούθησης και απομακρυσμένου προγραμματισμού, ώστε να μπορούν να πραγματοποιούν αλλαγές από απόσταση.

Τα οφέλη της ρομποτικής και της αυτοματοποίησης στην κατασκευή είναι πολλαπλά. Τα εργοστάσια που εγκαθίστούν λύσεις ρομποτικής και αυτοματοποίησης στις γραμμές παραγωγής τους μπορούν να βελτιώσουν την παραγωγικότητα, την ακρίβεια, την επαναληψιμότητα και την ποιότητα. Τα εργοστάσια που έχουν συνδυάσει ρομποτική μαζί με άλλες τεχνολογίες παραγωγής σε μια συνολική λύση αυτοματοποίησης, έχουν δει υψηλή απόδοση στην επένδυση τους και χρησιμοποιούν τα δεδομένα από τις μηχανές για να λαμβάνουν καλύτερες, πιο στρατηγικές αποφάσεις σχετικά με τον σχεδιασμό.



Σχήμα 2.6: Εργοστάσιο που χρησιμοποιεί ρομπότ στην παραγωγική διαδικασία [9].

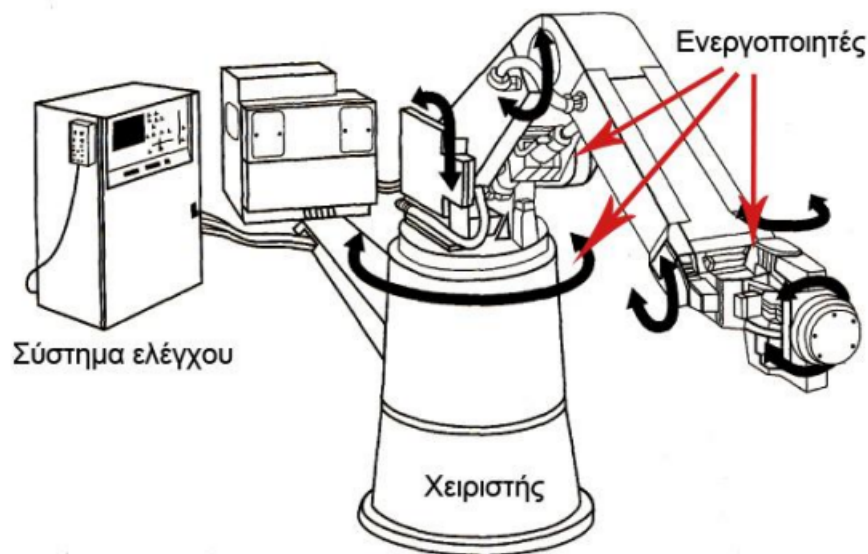
## 2.5 Ρομποτικοί βραχίονες

Ένας ρομποτικός βραχίονας αποτελεί ουσιαστικό στοιχείο της βιομηχανίας και των σύγχρονων διεργασιών κατασκευής. Πρόκειται για ένα πολύ ευέλικτο και προγραμματιζόμενο μηχανικό σύστημα που σχεδιάστηκε για να μιμείται τις κινήσεις και τις λειτουργίες ενός ανθρώπινου χεριού. Αποτελούνται από αρκετά βασικά εξαρτήματα, συμπεριλαμβανομένων των αντιστοίχων συνδέσμων, αρθρώσεων και τελικών εξαρτημάτων και έχουν ενσωματωθεί εκτενώς στις γραμμές παραγωγής για τη βελτιστοποίηση διαφόρων εργασιών. Στη βιβλιογραφία συναντάται συχνά με τη γενική ονομασία βιομηχανικό ρομπότ. Η βασική δομή ενός τέτοιου ρομπότ περιλαμβάνει τουλάχιστον τα παρακάτω τρία δομικά μέρη:

- Το κινούμενο μηχανικό τμήμα που ονομάζεται χειριστής [10].
- Τα στοιχεία που ενεργοποιούν το χειριστή και ονομάζονται στοιχεία δράσης ή ενεργοποιητές (actuators) [10].
- Το σύστημα ελέγχου, που αποθηκεύει και εκτελεί τα προγράμματα εργασίας και ελέγχει τις κινήσεις του ρομπότ [10].

Ένας βραχίονας αντίστοιχα, αποτελείται από τις αρθρώσεις (joints), τα τμήματα που συνδέουν τις αρθρώσεις και ονομάζονται σύνδεσμοι (links) και το τελικό σημείο δράσης (tool), το οποίο μπορεί να είναι μία αρπάγη, ένα εργαλείο συγκόλλησης, ένα εργαλείο βαφής ή οποιοδήποτε άλλο εργαλείο το οποίο είναι απαραίτητο στην εκάστοτε κατεργασία. Η μηχανική κίνηση του βραχίονα επιτυγχάνεται μέσω των ενεργοποιητών οι οποίοι μπορεί να είναι κινητήρες, υδραυλικά συστήματα κ.α. Στην περίπτωση ενός ηλεκτρικού βραχίονα οι ενεργοποιητές είναι ηλεκτρικοί κινητήρες, όπως παραδείγματος χάρη, οι σερβοκινητήρες. Το σύστημα ελέγχου είναι ο εγκέφαλος του ρομπότ. Είναι ένα υπολογιστικό σύστημα, όπως παραδείγματος χάρη το "Arduino", το οποίο έχει τη δυνατότητα να λαμβάνει δεδομένα από το χρήστη ή από αισθητήρες και να εκτελεί τα αντίστοιχα προγράμματα για την επιθυμητή κίνηση του ρομπότ. [10]

Οι βαθμοί ελευθερίας (Degrees of Freedom, "DOF") είναι συνδεδεμένοι με την εκάστοτε εργασία, την οποία καλείται να ολοκληρώσει ο βραχίονας. Συνεπώς, το σύνολο των ανεξαρτήτων μεταβλητών με βάση τις οποίες περιγράφεται πλήρως η θέση των υλικών σημείων του συστήματος, αποτελεί τους βαθμούς ελευθερίας του συστήματος [11]. Έστω ότι μια εργασία του βραχίονα απαιτεί την τοποθέτηση ενός υλικού στον τρισδιάστατο χώρο, τότε οι βαθμοί ε-

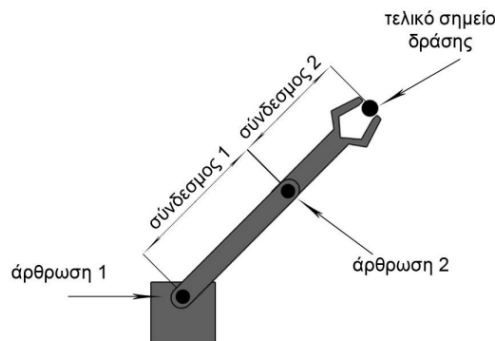


Σχήμα 2.7: Η βασική δομή ενός βιομηχανικού ρομποτικού βραχίονα [11]

λευθερίας που απαιτούνται είναι τρεις. Αν όμως, χρειαστεί να γίνει και ο προσανατολισμός του υλικού στο χώρο σύμφωνα με ένα σύστημα αναφοράς, τότε οι βαθμοί ελευθερίας που απαιτεί η εργασία, αυξάνονται σε έξι. Ένας ρομποτικός βραχίονας αποτελείται από συνδέσμους, οι οποίοι ενώνονται ανά δύο μεταξύ τους και η διαδοχική αυτή ένωση σχηματίζει μια κινηματική αλυσίδα. Οι μηχανισμοί που ενώνουν τους συνδέσμους και προσδίδουν κίνηση στην κινηματική αλυσίδα, ονομάζονται αρθρώσεις. Οι αρθρώσεις αυτές χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες, τις περιστροφικές αρθρώσεις, τις πρισματικές και τις σύνθετες αρθρώσεις.

- Η περιστροφική άρθρωση, είναι άρθρωση που επιτρέπει τη σχετική περιστροφική κίνηση δύο διαδοχικών συνδέσμων. Δίνει ένα βαθμό ελευθερίας στο βραχίονα, επιτρέποντας στο σώμα του να περιστραφεί σε ένα επίπεδο, ενώ ταυτόχρονα αποκόπτει κάθε άλλη δυνατότητα κίνησης.[11].
- Η πρισματική άρθρωση είναι άρθρωση που επιτρέπει σχετική μετατόπιση (σε ευθεία γραμμή) μεταξύ δύο διαδοχικών συνδέσμων. Δίνει ένα βαθμό ελευθερίας στο βραχίονα επιτρέποντας στο σώμα του να μετατοπίζεται στη διεύθυνση του άξονα στον οποίο είναι προσανατολισμένη, ενώ αποκόπτει κάθε άλλη δυνατότητα κίνησης [11].
- Σύνθετες αρθρώσεις είναι αυτές οι οποίες αναλύονται γεωμετρικά σε υπέρθεση δύο ή περισσότερων από τις βασικές αρθρώσεις (περιστροφική και πρισματική) [11].

Οι ρομποτικοί βραχίονες χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες βιομηχανίες και εφαρμογές, προσφέροντας αρκετά πλεονεκτήματα. Συγκεκριμένα, στην κατασκευή, εκτελούν εργασίες όπως ο χειρισμός υλικών, η συναρμολόγηση, η συγκόλληση, το βάψιμο και ο έλεγχος. Βελτιώνουν την αποτελεσματικότητα της παραγωγής, μειώνουν το ανθρώπινο σφάλμα και βελτιώνουν την ποιότητα των προϊόντων. Στον τομέα της συσκευασίας, οι ρομποτικοί βραχίονες χρησιμοποιούνται για εργασίες διαλογής και τοποθέτησης, συσκευάζοντας προϊόντα σε δοχεία. Η ταχύτητά τους και η ακρίβειά τους συντελούν στην γρηγορότερη και πιο συνεπή διαδικασία "packaging". Άλλες εφαρμογές βρίσκουν οι ρομποτικοί βραχίονες στην γεωργία και στην ιατρική. Όσον αφορά τις παραγωγικές διαδικασίες, οι ρομποτικοί βραχίονες διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της παραγωγικότητας. Μπορούν να



Σχήμα 2.8: Τυπικό σχέδιο βραχίονα με 2 περιστροφικές αρθρώσεις.[11]

εκτελούν επαναλαμβανόμενες εργασίες με ακρίβεια, ταχύτητα και συνέπεια, μειώνοντας τον κίνδυνο σφαλμάτων και βελτιώνοντας την ποιότητα των προϊόντων. Η δυνατότητα προγραμματισμού των ρομποτικών βραχιόνων για διάφορες εργασίες τα καθιστά προσαρμόσιμα και ευέλικτα, εξασφαλίζοντας την ολοκλήρωσή τους σε διάφορα στάδια της διαδικασίας παραγωγής. Οι ρομποτικοί βραχίονες έχουν γίνει ανατικατάστατα εργαλεία στη σύγχρονη κατασκευή, συνεισφέροντας στην αυξημένη ανταγωνιστικότητα και αποδοτικότητα σε διάφορους κλάδους βιομηχανίας.

### 2.5.1 Άκρο εργασίας -End Of Arm Tooling (EOAT)

Το άκρο εργασίας (συνχνά αναφέρεται και ως "end effector") αποτελεί ένα κρίσιμο εργαλείο στα ρομποτικά συστήματα. Πρόκειται για το τμήμα του ρομποτικού βραχίονα που αλληλεπιδρά με τα αντικείμενα ή τα υλικά στο περιβάλλον, επιτρέποντας στο ρομπότ να εκτελέσει συγκεκριμένες εργασίες. Το EOAT μπορεί να απαρτίζεται από διάφορα εργαλεία, διαφορετικά κάθε φορά, ανάλογα με την εφαρμογή, και παίζει έναν κρίσιμο ρόλο στον καθορισμό της λειτουργικότητας του ρομπότ.[12]

Ένα "end effector" είναι μια περιφερειακή συσκευή που συνδέεται στο άκρο ενός ρομποτικού βραχίονα, επιτρέποντας στο ρομπότ να αλληλεπιδρά με την εργασία του. Τα περισσότερα είναι μηχανικά ή ηλεκτρομηχανικά και χρησιμεύουν ως δαγκάνες, εργαλεία επεξεργασίας ή αισθητήρες [12]. Κυμαίνονται από απλές δαγκάνες με δύο δάκτυλα για εργασίες διαλογής και τοποθέτησης, έως και πολύπλοκα συστήματα αισθητήρων για ρομποτικό έλεγχο, με συστήματα λείανσης, τριβής ή και γυαλίσματος. Χωρίς αυτό τα περισσότερα ρομπότ είναι πρακτικά άχρηστα, καθώς, ακόμα και αν ένας ρομποτικός βραχίονας μπορεί να προγραμματιστεί να βρει μια συγκεκριμένη θέση εντός του χώρου εργασίας του, χωρίς την αρπάγη, όπως αναφέρεται συχνά στην ελληνική βιβλιογραφία, δεν έχει τρόπο να εκτελέσει καμία λειτουργία. Υπάρχουν πάρα πολλά διαφορετικά είδη άκρων εργασίας και εξαρτάται ποιο είναι καταλληλότερο ανάλογα με την εκάστοτε εργασία που πρέπει να πραγματοποιηθεί, αν δηλαδή πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα παθητικό σύστημα ή ένα ενεργό προσαρμόσιμο τεχνολογικό σύστημα. Ωστόσο, υπάρχουν 2 βασικοί τύποι:

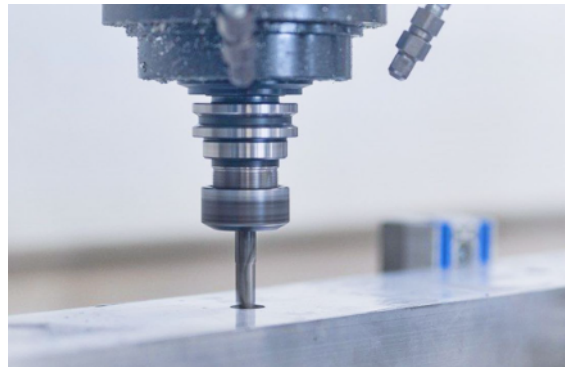
- Εργαλεία Διεργασίας, ένας απλός τρόπος σκέψης για τα εργαλεία διεργασίας είναι να συγκριθούν με έναν εργάτη που χρησιμοποιεί ένα εργαλείο. Υπάρχουν διάφορα εργαλεία διεργασίας ανάλογα με την λειτουργία τους στην βιομηχανία. Παραδείγματα περιλαμβάνουν εργαλεία ρομποτικής συγκόλλησης, εργαλεία επεξεργασίας, βαψίματος, 3D εκτύπωσης, αφαίρεσης υλικού, εργαλεία λείανσης κ.α [12].
- Ρομποτικές αρπάγες (Grippers), είναι οι συνηθέστερες διατάξεις, είναι ικανές να αρπάζουν και να χειρίζονται αντικείμενα, πράγμα που τις καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλες για εργασίες όπως η διαλογή και τοποθέτηση, η συναρμολόγηση και η τήρηση μηχανών. Τα



πιο γνωστά είναι τα "grippers" με "δάχτυλα", τα οποία μπορεί να έχουν από δύο έως και πιο σπάνια έξι.[12]

Όπως και ένας τεχνικός που χρησιμοποιεί το λάθος εργαλείο, ένα ρομποτικό χέρι με το λάθος εργαλείο δεν μπορεί να εκτελέσει μια εργασία αποτελεσματικά. Η επιλογή του σωστού εργαλείου προσφέρει αυξημένο εύρος εφαρμογών, βελτιωμένη αποδοτικότητα, μειώνει την φθορά και βελτιώνει την ποιότητα του προϊόντος. Το σωστό εργαλείο επιταχύνει και βελτιώνει την απόδοση του ρομποτικού βραχίονα ή της γραμμής παραγωγής.

Οι απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής είναι αυτές που καθορίζουν τον τύπο του άκρου εργασίας που θα χρειαστεί ο ρομποτικός βραχίονας. Για παράδειγμα, αν το ρομπότ χρησιμοποιείται κυρίως για εφαρμογές διαλογής και τοποθέτησης, θα ήταν ιδανικότερη η επιλογή αρπάγης. Σημαντικό ρόλο κατέχουν και οι τύποι υλικών και εξαρτημάτων που το ρομπότ θα εντοπίζει και θα μετακινεί, καθώς και το βάρος των υλικών. Επίσης, η επιλογή επηρεάζεται και από το αν θα λειτουργεί υδραυλικά, ηλεκτρικά ή με αεροκίνηση. Μια άλλη κατάσταση που υπάρχει σε πολλές σύγχρονες βιομηχανίες είναι η χρήση ενός συστήματος αλλαγής εργαλείου. Αυτά τα συστήματα επιτρέπουν στα ρομπότ να αλλάζουν εργαλεία με γρήγορο τρόπο. Είναι απαραίτητα για τους κατασκευαστές που έχουν ένα βιομηχανικό ρομπότ υπεύθυνο για την εκτέλεση διαφορετικών εργασιών. Ενώ, πολλές φορές είναι αναγκαίο να δημιουργηθεί ένα προσαρμοσμένο εργαλείο στο τέλος του βραχίονα. Σε αντίθεση με την τυπική εργαλειοποίηση, η προσαρμοσμένη εργαλειοποίηση σχεδιάζεται συγκεκριμένα και στις παραμέτρους της κάθε εγκατάστασης.



Σχήμα 2.9: Παράδειγμα "end effector" που χρησιμοποιείται για διάτρηση.[12]

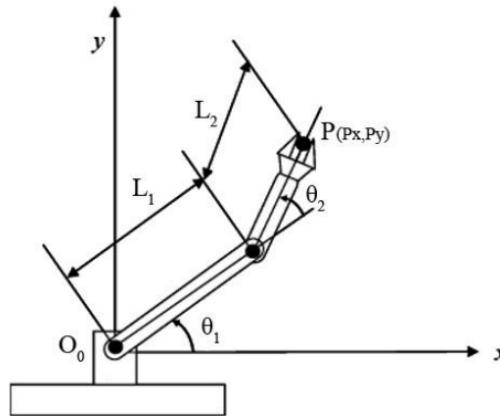
## 2.6 Κινηματική Ρομποτικού Βραχίονα

Η κινηματική ασχολείται με τη βασική γεωμετρία των μηχανισμών και μελετά την κίνηση του ρομπότ στον χώρο χωρίς να εξετάζει τις δυνάμεις οι οποίες την προκαλούν. Τα δύο προβλήματα της κινηματικής των βραχιόνων είναι το ευθύ και το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα. Ένας αρθρωτός βραχίονας μπορεί να θεωρηθεί ως ένας μηχανισμός που παράγει μία θέση και ένα προσανατολισμό. Συνεπώς οι σχέσεις μεταξύ αυτών των ποσοτήτων και των μετατοπίσεων των αρθρώσεων, δηλαδή των μετρήσιμων και ελέγξιμων μεταβλητών, πρέπει να προσδιορισθούν. Ως θέση θεωρείται η θέση του άκρου του βραχίονα στο χώρο, ενώ ως προσανατολισμός είναι η κατεύθυνση της προσέγγισης του τελευταίου συνδέσμου ή του τελικού στοιχείου δράσης.

### 2.6.1 Ευθύ κινηματικό πρόβλημα

Το ευθύ κινηματικό πρόβλημα ασχολείται με την εύρεση της θέσης και του προσανατολισμού του τελικού σημείου δράσης του βραχίονα, με δεδομένες τις μεταβλητές που ορίζουν τις κινήσεις των αρθρώσεών του, όπως για παράδειγμα τις γωνίες κίνησης των δύο περιστροφικών

αρθρώσεων του βραχίονα 2DOF που φαίνεται. Συνεπώς οι σχέσεις που προκύπτουν για την



Σχήμα 2.10: Επίπεδος βραχίονας 2DOF.[11]

ευθεία κινηματική ανάλυση του βραχίονα είναι οι εξής:

$$Px = L1 * \cos\theta_1 + L2 * \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.1)$$

$$Py = L1 * \sin\theta_1 + L2 * \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.2)$$

όπου  $\cos\theta_i$  και  $\sin\theta_i$  ,συμβολίζουν το συνημίτονο και το ημίτονο μίας γωνίας.

Γενικά, όπως έχει αναφερθεί, ένας βραχίονας αποτελείται από διαδοχικούς συνδέσμους, οι οποίοι συνδέονται με αρθρώσεις, από τη βάση μέχρι το τελικό εργαλείο δράσης. Ένα κινηματικό μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην επίλυση του ευθέως κινηματικού προβλήματος των βραχιόνων, είναι αυτό των Denavit και Hartenberg. Η σύμβαση Denavit Hartenberg, στην οποία χρησιμοποιούνται τέσσερις παράμετροι, είναι η πιο κοινή μέθοδος για την περιγραφή του κινηματικού προβλήματος ενός ρομπότ  $v$  ( $v = 1, 2, 3...$ ) αρθρώσεων. Ένα σύστημα συντεταγμένων επισυνάπτεται σε κάθε άρθρωση και καθορίζει τις DH παραμέτρους. Βάσει της μεθόδου αυτής, επιλέγονται με συγκεκριμένο τρόπο τα συστήματα συντεταγμένων που είναι προσαρμοσμένα σε κάθε άρθρωση του ρομποτικού βραχίονα, εκτελώντας τα βήματα του αλγορίθμου [11].

Ο αλγόριθμος DH, αποτελεί μια διαδικασία σύμφωνα με την οποία είναι δυνατή η τοποθέτηση ορθοκανονικών και δεξιόστροφων συστημάτων συντεταγμένων (Σ.Σ) στους συνδέσμους του βραχίονα, έχοντας ως στόχο την επίλυση του ευθέως αλλά και του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος. Τα βήματα του αλγορίθμου είναι τα ακόλουθα:

**Βήμα 1ο:** Αρχικά γίνεται αρίθμηση των αρθρώσεων και προσδιορισμός των σχετικών παραμέτρων τους.

**Βήμα 2ο:** Τοποθετούνται οι άξονες  $Z_i$  στις σχετικές αρθρώσεις. Ο άξονας  $Z_0$  τοποθετείται στη βάση στη διεύθυνση κίνησης της 1ης άρθρωσης. Ο άξονας  $Z_i$  τοποθετείται στη διεύθυνση κίνησης της άρθρωσης  $(i+1)$ . Αν η άρθρωση είναι περιστροφική, η διεύθυνση κίνησης είναι ο άξονας στροφής. Αν είναι πρισματική, η διεύθυνση κίνησης είναι η ευθεία της κίνησης.

**Βήμα 3ο:** Τοποθετούνται οι άξονες  $X_i$  στις σχετικές αρθρώσεις. Ο άξονας  $X_i$  τοποθετείται στη κοινή κάθετο μεταξύ  $Z_{i-1}$  , με φορά από τον  $Z_{i-1}$  στον  $Z_i$  [11].

Αφού ολοκληρωθούν τα βήματα 1 έως 3 δημιουργείται ο πίνακας των παραμέτρων DH σύμφωνα με τους ακόλουθους κανόνες.

- Σε κάθε μια γραμμή συμπληρώνουμε την παράμετρο  $\theta_i$ , που αντιστοιχεί στην γωνία στροφής του  $X_i - 1$  ως προς τον άξονα  $Z_i - 1$  ώστε να γίνει παράλληλος και με την ίδια φορά με τον  $X_i$ .
- Σε κάθε μια γραμμή συμπληρώνουμε την παράμετρο  $r_i$ , όπου είναι η ελάχιστη (κάθετη) που χρειάζεται να διανύσει ο  $X_i - 1$  κατά τον  $Z_i - 1$  ώστε να συναρτήσει τον  $X_i$ .
- Σε κάθε μια γραμμή συμπληρώνουμε την παράμετρο  $d_i$ , όπου είναι η ελάχιστη (κάθετη) που χρειάζεται να διανύσει ο  $Z_i - 1$  κατά τον  $X_i$  ώστε να συναντήσει τον  $Z_i$ .
- Σε κάθε μια γραμμή συμπληρώνουμε την παράμετρο  $a_i$ , που είναι η γωνία στροφής του  $Z_i - 1$  ως προς τον άξονα  $X_i$  ώστε να γίνει παράλληλος και με την ίδια φορά με τον  $Z_i$ . [11]

Στόχος είναι να βρεθεί ο συνολικός πίνακας μετασχηματισμού μέσω των στοιχείων του συμπληρωμένου πίνακα DH, ο οποίος δίνει τη σχετική θέση και τον προσανατολισμό και δίνεται από την σχέση [11]:

$$T = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta\cos\alpha & \sin\theta\sin\alpha & r\cos\theta \\ \sin\theta & \cos\theta\cos\alpha & -\cos\theta\sin\alpha & r\sin\theta \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

### 2.6.2 Αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα

Κατά την ευθεία κινηματική ανάλυση προσδιορίστηκε η θέση και ο προσανατολισμός του τελικού σημείου δράσης  $P = (Px, Py)$  με δεδομένες τις μεταβλητές των αρθρώσεων,  $\theta_1$  και  $\theta_2$ . Στην περίπτωση όμως, κατά την οποία είναι δεδομένο το σημείο τοποθέτησης του άκρου  $P = (Px, Py)$  του χειριστή, θα πρέπει να εφαρμοστεί η αντίστροφη κινηματική ανάλυση, συνεπώς να επιλυθεί το αντίστροφο κινηματικό πρόβλημα, προς εύρεση των μεταβλητών των αρθρώσεων,  $\theta_1$  και  $\theta_2$ . Οι κινηματικές εξισώσεις στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι κατά κανόνα μη γραμμικές και μία λύση δεν είναι πάντοτε εύκολα προσδιορίσιμη, ενώ σχεδόν ποτέ δεν είναι και μοναδική. Ισχύει ότι κάθε σημείο  $P = (Px, Py)$  στο χώρο εργασίας του, το οποίο απέχει από τη βάση  $O_0$  απόσταση  $r^2 = P_x^2 + P_y^2$ , ισχύουν οι παρακάτω τύποι: [11]

$$\theta_2 = ATAN2(\pm(\sqrt{1 - \sigma^2}), \sigma) \quad (2.4)$$

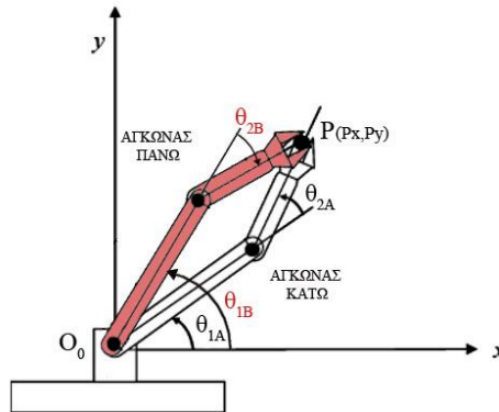
$$\theta_1 = ATAN2(-L_2\sin\theta_2 P_x, L_2\sin\theta_2 P_y + (L_1 + L_2\cos\theta_2)P_x) \quad (2.5)$$

Η συνάρτηση  $ATAN2$  εκφράζει την αντίστροφη εφαπτομένη με δύο ορίσματα, το πρώτο εκ των οποίων αντιστοιχεί στην τιμή του ημιτόνου της γωνίας, ενώ το δεύτερο στην τιμή του συνημιτόνου. Κατ' αυτόν τον τρόπο είναι δυνατός ο μονοσήμαντος υπολογισμός της ζητούμενης γωνίας, καθότι είναι γνωστό και το τεταρτημόριο στο οποίο βρίσκεται.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, στη γενική περίπτωση επίλυσης του αντίστροφου κινηματικού προβλήματος υπάρχουν δύο λύσεις για τις γωνίες  $\theta_1$  και  $\theta_2$ . Αυτές οι δύο λύσεις, δηλαδή τα δύο ζεύγη  $(\theta_1, \theta_2)$ , ονομάζονται "Αγκώνας πάνω" (Elbow up) και "Αγκώνας κάτω" (Elbow down).

Ωστόσο στις παραπάνω εξισώσεις υπάρχει ο περιορισμός  $|\sigma| \leq 1$ , αλλιώς δεν υπάρχει πραγματική λύση. Αυτό σημαίνει ότι το σημείο που έχει προγραμματιστεί να προσεγγίσει το άκρο του βραχίονα, βρίσκεται εκτός του χώρου εργασίας του [11].





Σχήμα 2.11: Οι θέσεις του "αγκώνα" σύμφωνα με τα ζεύγη λύσεων για τις  $\theta_1$  και  $\theta_2$  [11].

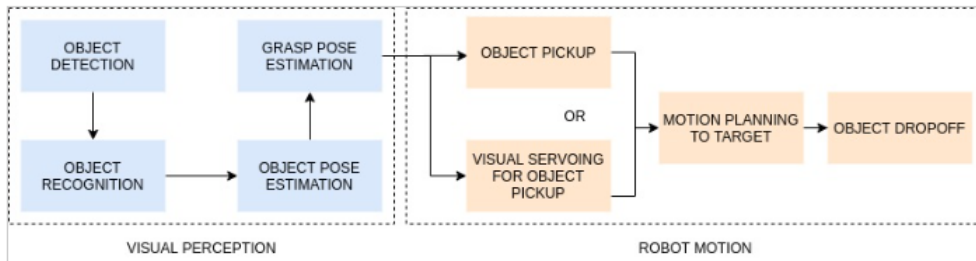
## 2.7 Ρομποτικοί βραχίονες στην βιομηχανία για εργασίες διαλογής (picking)

Παραδοσιακά, οι ρομποτικοί βραχίονες εκτελούν κωδικοποιημένες εντολές, αλλά η πλειονότητα των συνεργατικών ρομποτικών βραχιόνων σήμερα περιλαμβάνουν αυτόνομη κίνηση. Η αυτοματοποιημένη επιλογή αντικειμένων σε ημιδομημένα περιβάλλοντα χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση θεωρείται, πλέον από τις σημαντικότερες και πιο συνηθείς εφαρμογές που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία και στην παραγωγική διαδικασία, καθώς προσφέρει τη δυνατότητα να αξιοποιηθεί η ανθρώπινη εργασία σε πιο απαιτητικές εφαρμογές.

Η χρήση ρομποτικής και αυτοματοποίησης στην διαλογή/ανάκτηση αντικειμένων από προκαθορισμένες θέσεις από ζώνες μεταφοράς αποκαλείται αυτοματοποιημένη διαλογή (automated picking) και ανοίγει περισσότερες δυνατές περιπτώσεις χρήσης με μείωση των απαιτήσεων για εργατικό δυναμικό. Η ανάκτηση αντικειμένων, όπως εξαρτήματα για συναρμολόγηση ή η τοποθέτηση αντικειμένων σε ράφια και βάσεις, είναι παραδείγματα αυτόματων διαδικασιών που εκτελούνται με τη βοήθεια ρομποτικών συστημάτων. Αυτές οι διαδικασίες χρησιμοποιούν έξυπνες τεχνικές χειρισμού και συχνά ενσωματώνουν τρισδιάστατη ρομποτική όραση για μεγαλύτερη ακρίβεια. Η αυτοματοποιημένη διαλογή, βασίζεται στη μηχανική όραση για τον εντοπισμό των αντικειμένων και στην ρομποτική για την μηχανική κίνηση του ρομποτικού βραχίονα. Οι αισθητήρες παρατηρούν το περιβάλλον για να ανιχνεύσουν τα αντικείμενα που πρέπει να ανακτηθούν, στη συνέχεια καθορίζουν τη σωστή προσέγγιση για να το ανακτήσουν και να το τοποθετήσουν στην επιθυμητή θέση. Έπειτα το ρομπότ κάνει την πρακτική διαδικασία, ανακτώντας το αντικείμενο και μεταφέροντας το στην τοποθεσία απόθεσης χρησιμοποιώντας διάφορες στρατηγικές σχεδιασμού κίνησης [13].

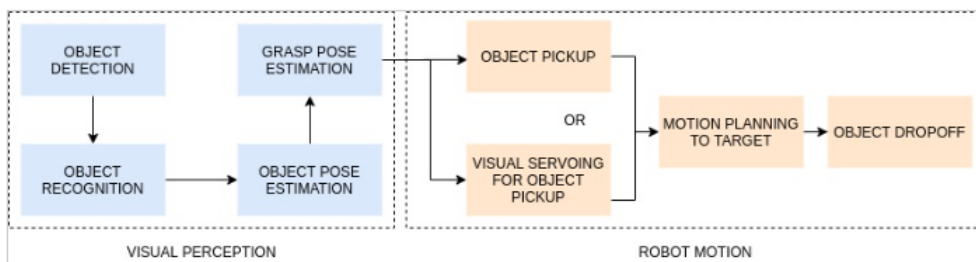
Η οπτική αντίληψη περιλαμβάνει υπο-τομείς που συμμετέχουν στον προσδιορισμό των αντικειμένων στο περιβάλλον και στον καθορισμό της θέσης της αρπαγής για το ρομπότ, ενώ οι αλγόριθμοι ελέγχου κίνησης του ρομπότ βοηθούν στην εκτέλεση της μεταφοράς και της τοποθέτησης.

Ο τύπος των αντικειμένων/χομματιών που ανακτώνται και ο τρόπος που βρίσκονται τοποθετημένα καθορίζει το κατά πόσο θα είναι επιτυχημένη η διαδικασία επιλογής. Τα αντικείμενα με συμμετρική δομή, εύκολα αναγνωρίσιμα χρώματα και άλλα ευδιάκριτα χαρακτηριστικά είναι πιο εύκολα να παρατηρηθούν στο περιβάλλον. Διάφοροι υψομετρικοί παράγοντες, ιδιότητες παραμόρφωσης και γεωμετρικά σχέδια αποτελούν προκλήσεις. Συγκεκριμένα, οι κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο που είναι τοποθετημένα τα αντικείμενα, χωρίζονται σε δομημένη, ημιδομημένη και μη δομημένη, όπου ή είναι πλήρως προβλέψιμη διάταξη των αντικειμένων, ή είναι



Σχήμα 2.12: Διάγραμμα ροής αυτοματοποιημένης διαλογής [13].

διάταξη με λεπτομερείς ανακρίβειες ή εντελώς τυχαία τοποθέτηση αντικειμένων, αντίστοιχα. Ενώ η δομημένη και η ημιδομημένη ανάκτηση δεν χρειάζονται οπτική ανίχνευση, αυτά είναι τα λιγότερο πιθανά σενάρια στον βιομηχανικό χώρο και απαιτούν υπερβολική προετοιμασία.



Σχήμα 2.13: Δομημένη, ημιδομημένη και μη δομημένη διάταξη [14].

Η οπτική αντίληψη-αναγνώριση είναι το πρώτο βήμα του ρομποτικού βραχίονα στην διαδικασία της επιλογής. Η μηχανική μάθηση και η μηχανική όραση, χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση αυτού του βήματος. Η σύγκριση των ανιχνευμένων αντικειμένων με το πραγματικό τους τρισδιάστατο μοντέλο και το αντίστοιχο μοντέλο CAD βοηθά στην ανίχνευση και αναγνώριση.

Αρχικά έχουμε την ανίχνευση αντικειμένων, όπου ο προσδιορισμός των μεμονωμένων αντικειμένων παρά τις επικαλύψεις, τα φωτοανακλαστικά και τα σημεία μικρής ευκρίνειας αποτελούν ένα πρώτο βήμα, που βοηθά το ρομπότ να κατανοήσει τα πιθανά αντικείμενα προς ανάκτηση. Συμβατικές τεχνικές μηχανικής όρασης, όπως η ανίχνευση ακμών και χρωματικών διαφορών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση αντικειμένων. Αυτές οι τεχνικές εφαρμόζονται κυρίως σε αντικείμενα που είναι πλήρως ορατά και έχουν διακριτά χαρακτηριστικά. Μόνο οι τεχνικές βαθιάς μάθησης είναι σε θέση να ανιχνεύουν σωστά τα αντικείμενα σε πιο πολύπλοκες καταστάσεις, καθώς έχουν προεκπαιδευθεί σε πολλά σύνολα δεδομένων. Έτσι, αντιμετωπίζουν με επιτυχία πολλά από τα προβλήματα που παρουσιάζουν οι παραδοσιακές τεχνικές μηχανικής όρασης.

Στη συνέχεια έχουμε, την αναγνώριση αντικειμένων, όπου αφού έχουν ανιχνευθεί, η αναγνώριση του τύπου του αντικειμένου και η απόφαση ποιο αντικείμενο να ανακτηθεί αποτελεί το επόμενο σημαντικό βήμα. Τα αντικείμενα που κρύβονται ή οι επικαλύψεις καθιστούν αρκετά δύσκολη την κατάταξη ακόμη και για τους καλύτερους αλγόριθμους μάθησης. Η εκτίμηση της θέσης του αντικειμένου είναι το επόμενο βήμα, όπου αφού αναγνωριστεί το αντικείμενο που πρέπει να ανακτηθεί, καθορίζεται η θέση του χρησιμοποιώντας το μοντέλο CAD του αντικειμένου και άλλους αλγόριθμους εντοπισμού. Τέλος, είναι η εκτίμηση της θέσης λαβής. Μόλις προσδιορισθεί το αντικείμενο που πρόκειται να ανακτηθεί, γίνεται ο προσδιορισμός της θέσης λαβής για το ρομπότ, προκειμένου να ανακτηθεί το αντικείμενο με επιτυχία. Αυτό αποτελεί ένα αρκετά δύσκολο βήμα, δεδομένων των περιορισμών της αποφυγής συγκρούσεων και της διασφάλισης μιας ασφαλούς λήψης του αντικειμένου. Αυτό το βήμα εξαρτάται από ένα καλό

γεωμετρικό μοντέλο (ακριβές και προσιτό σχεδιασμό). Με όλα αυτά τα βήματα η "οπτική αντίληψη" των κομματιών ολοκληρώνεται και έρχεται το επόμενο βήμα που είναι η κίνηση του ρομποτικού βραχίονα [13].

Αφού επιλεγεί το αντικείμενο που πρόκειται να ανακτηθεί και το ρομπότ γνωρίζει τη θέση λαβής, το ρομπότ πρέπει να πλοηγηθεί προς τον στόχο για να εκτελέσει τη διαλογή. Η προσέγγιση προς το σημείο λήψης μπορεί να περιλαμβάνει ένα συμβατικό σχεδιασμό κίνησης, ο οποίος εξαρτάται από τα δεδομένα που έχουν έρθει από το προηγούμενο βήμα της "εικονικής αντίληψης". Οι ρομποτικοί βραχίονες διαθέτουν αισθητήρες για την επιβεβαίωση της επιτυχούς διαλογής του αντικειμένου, προκειμένου να ξεκινήσει η διαδικασία τοποθέτησης. Για στατικά σημεία χρησιμοποιείται ένας σχεδιασμός κίνησης, ενώ η οπτική αναγνώριση χρησιμοποιείται μόνο για άγνωστες ή μεταβλητές θέσεις. Τέλος σημαντική είναι η επιλογή του άκρου εργασίας, δηλαδή του εργαλείου στο άκρο του βραχίονα και ο τρόπος ελέγχου του [14]. Οι συμβατικές αρπάγες δύο δαχτύλων είναι ιδανικές για σκληρά, μη παραμορφώσιμα αντικείμενα, αλλά δεν είναι αρκετές για μεγάλα και παραμορφώσιμα.



Σχήμα 2.14: Παράδειγμα αρπάγης δύο δαχτύλων

Η αυτοματοποιημένη διαλογή αντικειμένων προϋποθέτει ότι ο ρομποτικός χειριστής και το σύστημα ανίχνευσής του πρέπει να είναι προσαρμόσιμα και έξυπνα, για να επιλύσουν προβλήματα σε όλα τα πιθανά σενάρια. Παρόλα αυτά, δεν είναι πάντα εύκολο αυτό και πολλές φορές εμφανίζονται αντιξοότητες, που δυσκολεύουν την διαδικασία, όπως:

- το ρομποτικό άκρο του βραχίονα πρέπει να παίρνει σχεδόν άπειρες θέσεις με ακρίβεια και με σταθερότητα, χωρίς να παρεκκλίνει ή να συμπεριφέρεται λανθασμένα,
- η λήψη του αντικειμένου από δύσκολες θέσεις και η αναγκαιότητα να αποφευχθεί η σύγκρουση είναι εξαιρετικά δύσκολη για τους ρομποτικούς χειριστές,
- η διαλογή του σωστού αντικειμένου σε συνθήκες δύσκολου φωτισμού μπορεί να είναι δύσκολη, ειδικά όταν η θέση του αντικειμένου δεν είναι εμφανής και η ακρίβεια της κάμερας είναι περιορισμένη,
- η σωστή θέση της κάμερας ή η σωστή ανίχνευση του αντικειμένου με χρήση τρισδιάστατης όρασης είναι δύσκολη και επιρρεπής σε ανακρίβειες.

## 2.8 Διαλογή και τοποθέτηση (Pick and Place)

Τα σενάρια διαλογής και τοποθέτησης είναι θεμελιώδεις διαδικασίες που περιλαμβάνουν την αυτοματοποιημένη ανάκτηση αντικειμένων ή εξαρτημάτων από μια τοποθεσία. Αυτά τα σενάρια είναι αναπόσπαστα μέρη διάφορων βιομηχανιών, συμπεριλαμβανομένων της αυτοκινητοβιομηχανίας, της ηλεκτρονικής και της παραγωγής τροφίμων, τα οποία πραγματοποιούνται με τη βοήθεια εξειδικευμένων ρομπότ. Η συγκεκριμένη διαδικασία βελτιώνει την αποτελεσματικότητα της εργασίας, τους χρόνους και την αποδοτικότητα ολόκληρης της γραμμής παραγωγής συνολικά. Η αυτοματοποίηση της συγκεκριμένης διαδικασίας επιταχύνει τον ρυθμό της ανάκτησης κομματιών ή αντικειμένων και της τοποθέτησής τους σε άλλες θέσεις και βοηθά στην αύξηση του ρυθμού παραγωγής.

Υπάρχουν αρκετοί τύποι ρομπότ, που χρησιμοποιούνται σε διαδικασίες διαλογής και τοποθέτησης συμπεριλαμβανομένων:

- Συμβατικοί ρομποτικοί βραχίονες: Είναι ο πιο κοινός τύπος ρομπότ για αυτήν την διαδικασία. Ένα ρομποτικός βραχίονας με 5 άξονες χρησιμοποιείται για τυπικές εφαρμογές, όπου τα αντικείμενα ανακτώνται και μεταφέρονται σε άλλες θέσεις σε ένα μόνο επίπεδο. Ρομποτικοί βραχίονες με 6 άξονες χρησιμοποιούνται για πιο πολύπλοκες εφαρμογές, όπως όταν τα αντικείμενα πρέπει να περιστραφούν ή να αλλάξουν προσανατολισμό πριν τοποθετηθούν σε μια άλλη θέση.
- Καρτεσιανό Συστήματα: Συστήματα με έξι άξονες, που λειτουργεί σε πολλά επίπεδα. Αυτά τα ρομπότ κινούνται σε τρεις ορθογώνιους άξονες (X, Y και Z) και χρησιμοποιούν καρτεσιανές συντεταγμένες. Συνήθως έχουν καλύτερη ακρίβεια θέσης σε σύγκριση με τους ρομποτικούς βραχίονες έξι αξόνων.
- Ρομποτικά συστήματα τύπου Delta: Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, όπου τα ρομπότ ανακτούν αντικείμενα σε ομάδες και τα τοποθετούν σε σταθμούς συναρμολόγησης ή δοχεία. Τα ρομπότ Delta διαθέτουν συνήθως προηγμένες τεχνολογίες όρασης που τους επιτρέπουν να διακρίνουν διάφορα μεγέθη, σχήματα και χρώματα. Υπάρχουν αρκετές διαμορφώσεις ρομπότ Delta, αλλά τα περισσότερα διαθέτουν τρία κομμάτια σαν "μπράτσα" που λειτουργούν σε τέσσερις άξονες.
- Ρομπότ γρήγορης ανάκτησης: Ιδανικά για χρήση σε εφαρμογές που έχουν μεσαίο και υψηλό φόρτο εργασίας και απαιτείται υψηλή ταχύτητα. Τα ρομπότ γρήγορης ανάκτησης αυτοματοποιούν πλήρως τη διαδικασία διαλογής, ελευθερώνοντας την ανθρώπινη εργατική δύναμη να επικεντρωθεί σε δραστηριότητες με μεγαλύτερη επίδραση. Είναι ιδανικά για διαδικασίες που χρειάζονται υψηλή ταχύτητα. Μπορούν να ανακτήσουν, περίπου, έως και 300 αντικείμενα την ώρα.
- Συνεργατικά ρομπότ Cobots: Επεκτείνουν το έργο των ανθρώπων, οι οποίοι τους καθοδηγούν στις διαδικασίες επιλογής σε κάθε εργασία. Με τη βελτιστοποίηση των διαδρομών σε πραγματικό χρόνο και τη διατήρηση των εργαζομένων στο έργο, τα συνεργατικά ρομπότ βοηθούν τους εργαζόμενους να δουλεύουν πιο αποδοτικά.

Συνήθως τοποθετημένα σε σταθερά σημεία, τα ρομπότ διαλογής και τοποθέτησης βρίσκονται σε θέσεις που μπορούν να φτάσουν διάφορες περιοχές για να εκτελέσουν το έργο. Χρησιμοποιούν προηγμένα συστήματα όρασης για να αναγνωρίσουν, να αρπάξουν και να μετακινήσουν αντικείμενα από ένα σημείο σε ένα άλλο. Με μια ποικιλία επιλογών σχεδιασμού, τα ρομπότ που χρησιμοποιούνται για διαλογή και τοποθέτηση, μπορούν να εξοπλιστούν με διάφορες επιλογές και εξαρτήματα στο άκρο του βραχίονα για χρήση σε διάφορες εφαρμογές, όπως συναρμολόγηση, συσκευασία ή ανάκτηση αντικειμένων. Για παράδειγμα, αυτά τα ρομπότ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να ανακτήσουν αντικείμενα για μια παραγγελία και να τα τοποθετήσουν σε ένα κιβώτιο για συσκευασία, ή μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να ανακτήσουν τα

ανταλλακτικά που χρειάζονται για τη συναρμολόγηση και να τα μεταφέρουν [15].



Σχήμα 2.15: Παράδειγμα ρομπότ Pick and Place της εταιρείας KUKA.

Μονότονες και χρονοβόρες εργασίες, που προηγουμένως απαιτούσαν πολύ χρόνο, γίνονται τώρα γρήγορα με τη χρήση ειδικών ρομπότ. Αυτό έχει οδηγήσει στην ευρεία υιοθέτησή τους στα εργοστάσια. Οι ρομποτικές διατάξεις για διαλογή και τοποθέτηση, αντικαθιστούν τη χειρωνακτική εργασία, αυξάνοντας σημαντικά την παραγωγή, ενώ παράλληλα διασφαλίζουν υψηλή ποιότητα και μειώνουν τον κίνδυνο ανθρώπινων λαθών. Τα ρομπότ είναι εξοπλισμένα με προηγμένους αισθητήρες και λογισμικό, που τους επιτρέπουν να χειρίζονται εύθραυστα ή περίπλοκα αντικείμενα με εξαιρετική ακρίβεια. Αυτή η ακρίβεια είναι κρίσιμη σε βιομηχανίες, όπου η ποιότητα των προϊόντων και η ασφάλεια έχουν ύψιστη σημασία. Αφαιρώντας την ανάγκη για ανθρώπινη παρέμβαση στη διαχείριση συγκεκριμένων υλικών, τα σενάρια διαλογής και τοποθέτησης βελτιώνουν την ασφάλεια στον χώρο εργασίας. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε περιβάλλοντα όπου υπάρχουν επικίνδυνα ή βαριά αντικείμενα.

Ενδεικτικές εφαρμογές, που σχετίζονται με την διαλογή και τοποθέτηση είναι οι ακόλουθες:

- Συναρμολόγηση: Τα ρομπότ που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές συναρμολόγησης "αρπάζουν" εισερχόμενα εξαρτήματα από μια τοποθεσία, όπως ένας ταινιοδρόμος, και τοποθετούν ή συνδέουν το εξάρτημα σε ένα άλλο κομμάτι του αντικειμένου. Τα δύο ενωμένα κομμάτια μεταφέρονται στη συνέχεια στον επόμενο σταθμό συναρμολόγησης.
- Συσκευασία: Τα ρομπότ που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία συσκευασίας "αρπάζουν" αντικείμενα από μια εισερχόμενη πηγή ή μια ορισμένη περιοχή και τοποθετούν τα αντικείμενα σε έναν συσκευαστικό χώρο.
- Έλεγχος: Τα ρομπότ εδώ χρησιμοποιούνται για εφαρμογές ελέγχου και είναι εξοπλισμένα με προηγμένα συστήματα όρασης για να αναχτούν αντικείμενα, να ανιχνεύουν ανωμαλίες ή να αφαιρούν ελαττωματικά εξαρτήματα, τοποθετώντας τα σε μια καθορισμένη τοποθεσία.
- Διαδικασία διαλογής αντικειμένων από δοχεία: Τα ρομπότ αξιοποιούν εξειδικευμένα συστήματα όρασης που τους επιτρέπουν να διακρίνουν χρώμα, σχήμα και μέγεθος, προκειμένου να επιλέξουν τα κατάλληλα αντικείμενα ακόμη και μέσα από δοχεία, τα οποία περιέχουν τυχαία αναμειγμένα αντικείμενα. Αυτά τα αντικείμενα που αναχτώνται μεταφέρονται σε άλλο σημείο για να συναρμολογηθούν ή να συσκευαστούν.

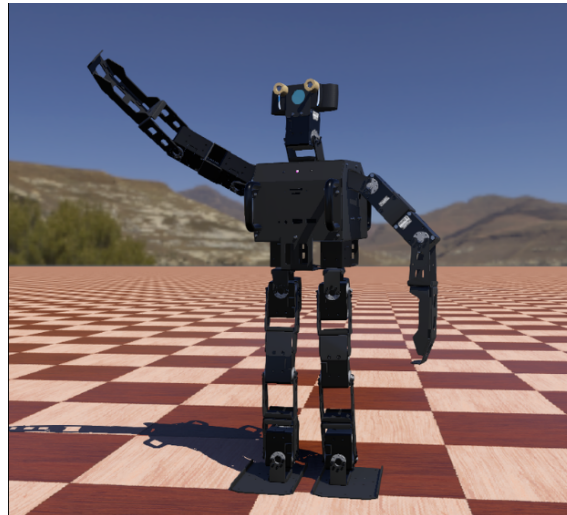
## Κεφάλαιο 3

# Εργαλεία

Προτού ένα μοντέλο μιας παραγωγικής διαδικασίας έλθει σε λειτουργία πρέπει πρώτα να δοκιμαστεί, να περάσει από απαραίτητους ελέγχους και να προσομοιωθεί η λειτουργία του, με σκοπό την ασφάλεια, την αποφυγή ατυχημάτων και την αποδοτικότητα. Το σύνολο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον προσομοίωσης. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το Webots, όπου προσομοιώθηκαν διαφορετικά σενάρια σε βιομηχανικό περιβάλλον, με χρήση των ρομποτικών βραχιόνων της εταιρείας Universal Robots.

### 3.1 Λογισμικό Webots

Το Webots είναι ένα λογισμικό ρομποτικής προσομοίωσης, ανοικτού κώδικα που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία, την εκπαίδευση και την έρευνα. Παρέχει ένα πλήρες περιβάλλον ανάπτυξης για τον σχεδιασμό, τον προγραμματισμό και την προσομοίωση ρομπότ. Η εταιρεία Cyberbotics Ltd. διατηρεί το Webots ως το κύριο προϊόν της συνεχώς από το 1998.

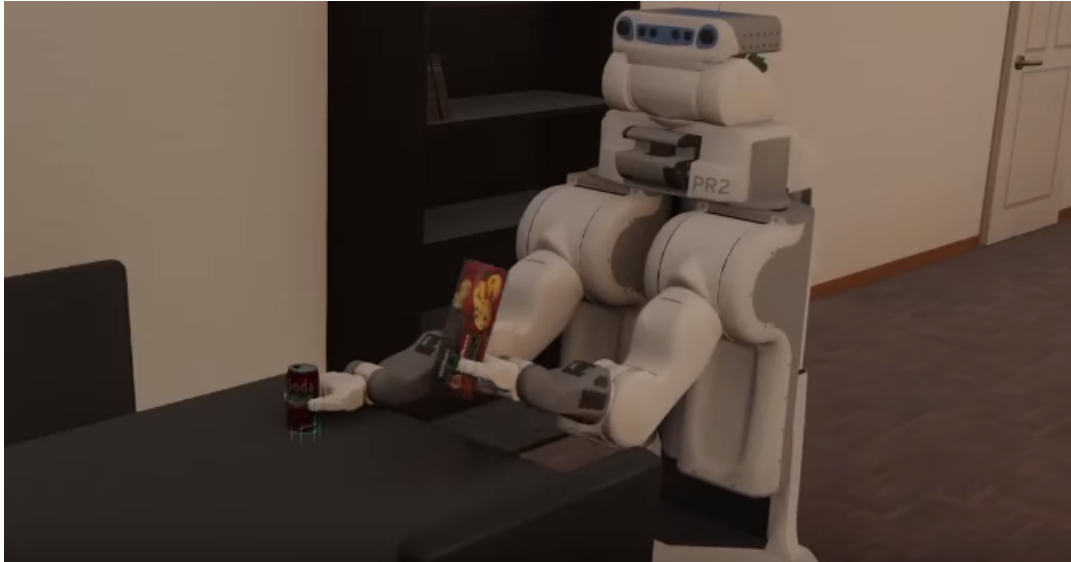


Σχήμα 3.1: Προσομοίωση ανθρωποειδούς ρομπότ σε περιβάλλον εξωτερικού χώρου.

Το Webots περιλαμβάνει μια μεγάλη συλλογή από ελεύθερα προσαρμόσιμα μοντέλα ρομπότ, αισθητήρων, επενεργητών και αντικειμένων. Επιπλέον, είναι δυνατόν να δημιουργηθούν νέα μοντέλα από το μηδέν ή να εισαχθούν από λογισμικό CAD. Κατά το σχεδιασμό ενός μοντέλου ρομπότ, ο χρήστης καθορίζει τόσο τις γραφικές όσο και τις φυσικές ιδιότητες των αντικειμένων. Οι γραφικές ιδιότητες περιλαμβάνουν το σχήμα, τις διαστάσεις, τη θέση και



τον προσανατολισμό, τα χρώματα και την υφή του αντικειμένου. Οι φυσικές ιδιότητες περιλαμβάνουν τη μάζα, το συντελεστή τριβής, καθώς και τις σταθερές ελατηρίου και απόσβεσης. Απλή υδροδυναμική είναι παρούσα στο λογισμικό. Το Webots χρησιμοποιεί μια παραλλαγή του ODE (Open Dynamics Engine) για τον εντοπισμό συγκρούσεων και την προσομοίωση της δυναμικής των άκαμπτων σωμάτων (rigid bodies). Η βιβλιοθήκη ODE επιτρέπει την ακριβή προσομοίωση των φυσικών ιδιοτήτων των αντικειμένων, όπως η ταχύτητα, η αδράνεια και η τριβή.



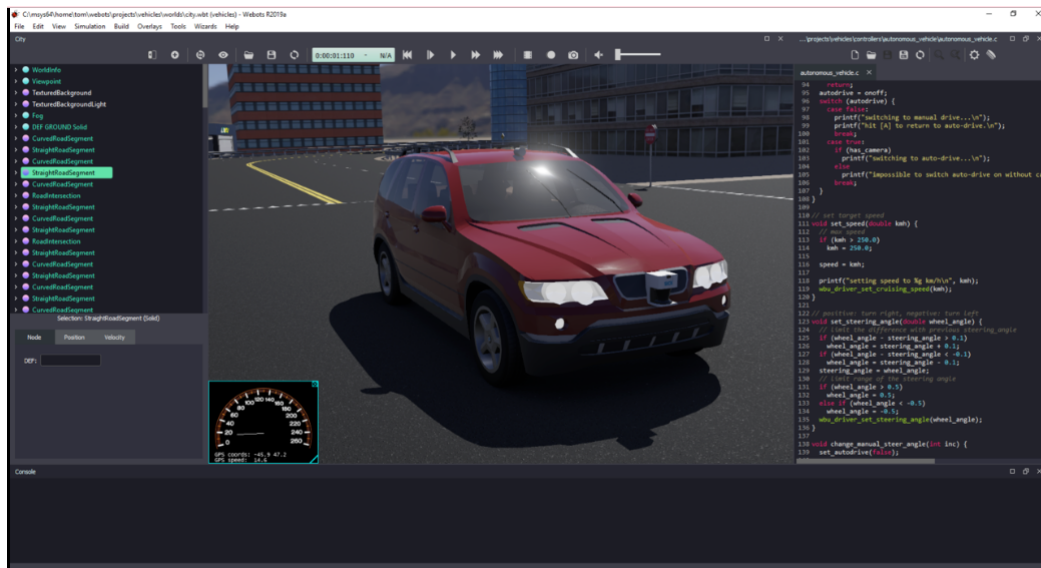
Σχήμα 3.2: Παράδειγμα μοντέλου που φαίνεται η προσομοίωση των φυσικών ιδιοτήτων στα αντικείμενα.

Το Webots περιλαμβάνει ένα σύνολο αισθητήρων και επενεργητών που χρησιμοποιούνται συχνά σε πειράματα ρομποτικής, όπως LIDAR, ραντάρ, αισθητήρες απόστασης, αισθητήρες φωτός, αισθητήρες αφής, GPS, επιταχυνσιόμετρα, κάμερες, πομποί και δέκτες, σερβοκινητήρες (περιστροφικοί και γραμμικοί), αισθητήρες θέσης και δύναμης, LEDs, αρπάγες, γυροσκόπια, πυξίδες, IMU κ.ά. Τα προγράμματα ελέγχου του ρομπότ μπορούν να γραφούν εκτός του Webots σε C, C++, Python, ROS, Java και MATLAB χρησιμοποιώντας ένα απλό API.

Το Webots προσφέρει τη δυνατότητα λήψης στιγμιotypών (screenshots) και εγγραφής των προσομοιώσεών του. Οι κόσμοι του Webots αποθηκεύονται σε αρχεία με κατάληξη \*.wbt που βασίζονται στη γλώσσα VRML. Είναι δυνατή επίσης η εισαγωγή και εξαγωγή κόσμων και αντικειμένων του Webots στη μορφή VRML. Οι χρήστες μπορούν να αλληλεπιδρούν με μια εκτελούμενη προσομοίωση με τη μετακίνηση ρομπότ και άλλων αντικειμένων με το ποντίκι.

Κύριοι τομείς εφαρμογής:

- Έρευνα για την κινητικότητα των ρομπότ.
- Γρήγορη δημιουργία πρωτότυπων ρομπότ με τροχούς και πόδια.
- Νοημοσύνη σμήνους (Swarm intelligence).
- Τεχνητή ζωή και εξελικτική ρομποτική.
- Προσομοίωση προσαρμοστικής συμπεριφοράς.
- Πειραματικό περιβάλλον για υπολογιστική όραση.
- Διαγωνισμοί διδασκαλίας και προγραμματισμού ρομπότ.

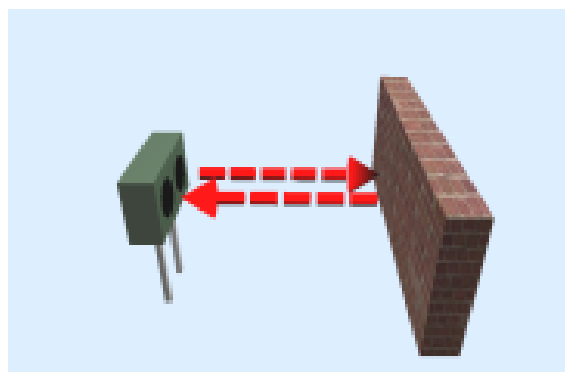


Σχήμα 3.3: Χρήση του λογισμικού για δημιουργία αυτόνομου αυτοκινήτου.

### 3.1.1 Αισθητήρας απόστασης

Γενικά ένας αισθητήρας απόστασης, γνωστός και ως αισθητήρας εγγύτητας, είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της απόστασης ανάμεσα σε αυτόν και σε ένα αντικείμενο ή επιφάνεια. Ο αισθητήρας λειτουργεί με ποικίλους τρόπους ανάλογα με τον τύπο του. Οι αισθητήρες απόστασης μπορούν να έχουν υψηλή αξιοπιστία και μακρά διάρκεια ζωής λόγω της απουσίας μηχανικών μερών και της έλλειψης φυσικής επαφής μεταξύ του αισθητήρα και του αντιληφθέντος αντικειμένου και είναι σε πολλές εφαρμογές, καθώς επιτρέπουν στα ρομπότ και σε άλλες μηχανές να ανιχνεύουν αντικείμενα και να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον τους.

Στο περιβάλλον του Webots, ο κόμβος του αισθητήρα απόστασης (Distance sensor node) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μοντελοποιήσει ένα γενικό αισθητήρα, έναν υπέρυθρο αισθητήρα ή έναν αισθητήρα απόστασης με λέιζερ. Η προσομοίωση της συγκεκριμένης συσκευής μέσα στο περιβάλλον πραγματοποιείται με την ανίχνευση των συγκρούσεων μεταξύ των αισθητήρων απόστασης και των αντικείμενων στον χώρο. Στην περίπτωση αισθητήρα τύπου λέιζερ, οι συγκρούσεις συμβαίνουν με τα "περιγράμματα αντικειμένων" (bounding objects) των "κόμβων" (nodes).



Σχήμα 3.4: Κόμβος αισθητήρα απόστασης, όπως εμφανίζεται στο λογισμικό Webots.

Κάποιες βασικές προγραμματιστικές εντολές, σε γλώσσα προγραμματισμού C που χρησιμοποιούνται στο Webots για την χρήση και ενεργοποίηση των αισθητήρων είναι οι παρακάτω:



---

```
#include <webots/distance_sensor.h>
void wb_distance_sensor_enable(WbDeviceTag tag, int sampling_period);
void wb_distance_sensor_disable(WbDeviceTag tag);
```

---

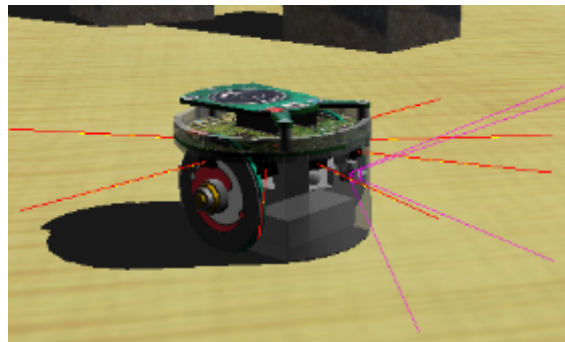
Οι δύο αυτές συναρτήσεις παραπάνω, είναι οι εντολές που χρησιμοποιούνται για ενεργοποίηση του αισθητήρα και για απενεργοποίηση του, αντίστοιχα. Χρησιμοποιούνται στην αρχή του κώδικα και ορίζουν τις συσκευές που θα χρησιμοποιηθούν από τον ελεγκτή (controller).

---

```
double wb_distance_sensor_get_value(WbDeviceTag tag);
```

---

Η παραπάνω συνάρτηση επιστρέφει την τελευταία τιμή που μετρήθηκε από τον καθορισμένο αισθητήρα απόστασης. Αυτή η τιμή υπολογίζεται από τον προσομοιωτή σύμφωνα με τον πίνακα αναζήτησης του "Distance sensor node", συνεπώς, το εύρος της τιμής που επιστρέφεται καθορίζεται από αυτόν τον πίνακα αναζήτησης.



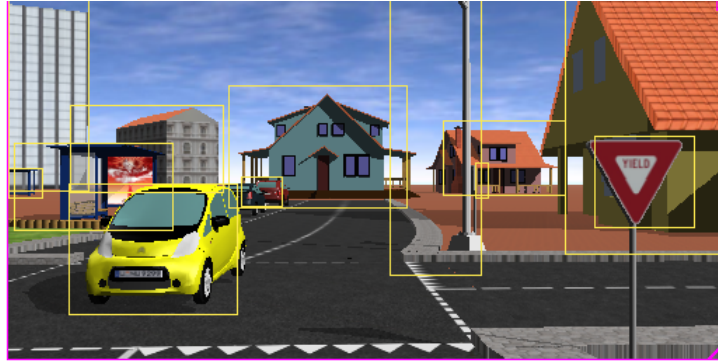
Σχήμα 3.5: Εικονική αποτύπωση των ακτινών του αισθητήρα πάνω σε ένα "E-puck" ρομπότ στο λογισμικό Webots.

### 3.1.2 Κάμερα

Η κάμερα στο λογισμικό Webots είναι ένας εικονικός αισθητήρας που μοντελοποιεί κάμερες πραγματικών ρομπότ. Χρησιμοποιείται για να λαμβάνει εικόνες από το εικονικό περιβάλλον και να τις χρησιμοποιεί για διάφορους σκοπούς στη ρομποτική προσομοίωση. Αυτή η κάμερα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση αντικειμένων, την παρακολούθηση του περιβάλλοντος, την πλοήγηση, και για διάφορες άλλες εργασίες. Οι εικόνες που λαμβάνει μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον ελεγκτή του ρομπότ για τη λήψη αποφάσεων και την εκτέλεση εργασιών στο περιβάλλον της προσομοίωσης. Συνολικά, η κάμερα στο Webots είναι ένα πολύτιμο εργαλείο για την ανάπτυξη, τη δοκιμή και την προσομοίωση ρομποτικών συστημάτων.

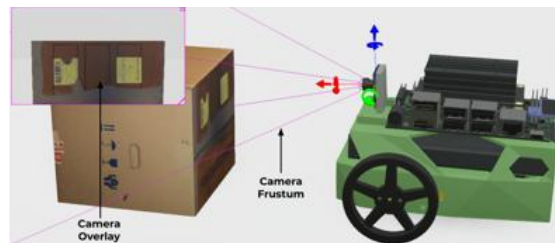
Η προσθήκη ενός κόμβου (node) κάμερας είναι χρήσιμη και χρησιμοποιείται στις περισσότερες εφαρμογές. Οι κάμερες είναι προσαρμόσιμες (ανάλυση, πεδίο θέασης, θόρυβος, κ.λπ.) και περιλαμβάνουν από προεπιλογή μηχανισμό ζουμ και εστίασης. Επιπλέον, διατίθενται ειδικά εφέ, όπως διάφορα μοντέλα θορύβου, παραμόρφωσης φακού και η χρήση σφαιρικής ή κυλινδρικής προβολής. Εάν προστεθεί "node" αναγνώρισης στην κάμερα, αυτή μπορεί να επιστρέφει όχι μόνο την εικόνα αλλά και όλα τα αντικείμενα που εντοπίστηκαν, καθώς και το μέγεθος και τη θέση τους. Είναι, ως εκ τούτου, πολύ εύκολο να προσομοιωθούν έξυπνες κάμερες μέσω του περιβάλλοντος του Webots.

Το "node" της κάμερας χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της κάμερας που βρίσκεται στο ρομπότ. Η τελική εικόνα μπορεί να εμφανιστεί σε 3D παράθυρο. Ανάλογα με την ρύθμισή της,



Σχήμα 3.6: Εικόνα από κάμερα σε περιβάλλον Webots.

μπορεί να προσομοιώσει μια γραμμική κάμερα, μια κλασική "RGB" κάμερα ή ακόμα και μια που παρουσιάζει σφαιρικές παραμορφώσεις. Το πεδίο φακού μπορεί να περιέχει έναν κόμβο φακού (Lens node) για να καθοριστεί η παραμόρφωση της εικόνας. Το πεδίο εστίασης μπορεί να περιέχει έναν κόμβο εστίασης (Focus node) για να παρέχει στη συσκευή της κάμερας ένα ελεγχόμενο σύστημα εστίασης. Εάν αυτό το πεδίο έχει οριστεί ως "NULL", τότε δεν υπάρχει δυνατότητα εστίασης στη συσκευή της κάμερας. Το πεδίο ζουμ μπορεί να περιέχει έναν κόμβο ζουμ (Zoom node) για να παρέχει στη συσκευή της κάμερας ένα ελεγχόμενο σύστημα ζουμ. Εάν αυτό το πεδίο έχει οριστεί ως "NULL", τότε δεν υπάρχει δυνατότητα ζουμ στη συσκευή της κάμερας. Το πεδίο αναγνώρισης μπορεί να περιέχει έναν κόμβο αναγνώρισης (Recognition node) για να παρέχει στη συσκευή της κάμερας τη δυνατότητα αναγνώρισης αντικειμένων. Η κάμερα μπορεί να αναγνωρίσει μόνο τους στερεούς κόμβους (solid nodes), των οποίων οι χρωματικοί κώδικες αναγνώρισης δεν είναι κενοί.



Σχήμα 3.7: Κάμερα τοποθετημένη πάνω σε ρομπότ, προβάλλοντας το αντικείμενο που έχει απέναντι.

Κάποιες βασικές προγραμματιστικές εντολές, σε γλώσσα προγραμματισμού C που χρησιμοποιούνται στο Webots για την χρήση και ενεργοποίηση των καμερών είναι οι παρακάτω:

---

```
void wb_camera_enable(WbDeviceTag tag, int sampling_period);
void wb_camera_disable(WbDeviceTag tag);
```

---

Οι δύο αυτές συναρτήσεις παραπάνω, είναι οι εντολές που χρησιμοποιούνται για την ενεργοποίηση της κάμερας και για την απενεργοποίηση της αντίστοιχα. Χρησιμοποιούνται στην αρχή του κώδικα και ορίζουν τις συσκευές που θα χρησιμοποιηθούν από τον ελεγκτή (controller).

---

```
const unsigned char *wb_camera_get_image(WbDeviceTag tag);
```

---

Η συνάρτηση αυτή διαβάζει την τελευταία εικόνα που ανακτήθηκε από την κάμερα. Η εικόνα κωδικοποιείται ως μια ακολουθία από τέσσερα "bytes" που αντιπροσωπεύουν το μπλε, το

πράσινο και το κόκκινο. Τα "pixels" αποθηκεύονται σε οριζόντιες γραμμές που καλύπτουν από την πάνω αριστερή γωνία της εικόνας προς την κάτω δεξιά γωνία. Το τμήμα μνήμης που επιστρέφεται από αυτή τη συνάρτηση δεν πρέπει να απελευθερώνεται, καθώς διαχειρίζεται από την ίδια την κάμερα.

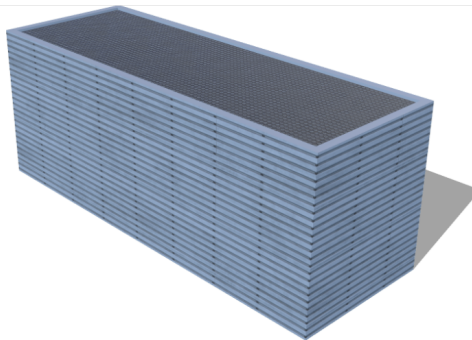
### 3.1.3 Ταινιόδρομοι

Οι ταινιόδρομοι (conveyor belts) είναι μηχανικές συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά αντικειμένων ή υλικών από ένα σημείο σε ένα άλλο. Συχνά χρησιμοποιούνται σε βιομηχανικές εφαρμογές και αποτελούν βασικό στοιχείο στις γραμμές παραγωγής, στις αποθηκεύσεις και στις διανομές εμπορευμάτων. Οι ταινιόδρομοι λειτουργούν με έναν συνεχόμενο κινούμενο ιμάντα που μεταφέρει τα αντικείμενα πάνω από μία σταθερή επιφάνεια ή μέσα από ένα σύστημα κυλίνδρων. Αυτό το μηχανικό σύστημα επιτρέπει την αυτόματη και συνεχή μεταφορά αντικειμένων με υψηλή ακρίβεια και ταχύτητα. Επιπλέον, οι ταινιόδρομοι μπορούν να εξοπλιστούν με αισθητήρες και συστήματα ελέγχου για να διαχειρίζονται το ρυθμό και την κατεύθυνση της μεταφοράς.



Σχήμα 3.8: Ταινιόδρομος που χρησιμοποιείται σε εργοστασιακές εγκαταστάσεις.

Στο λογισμικό Webots, το "conveyor belt" είναι μια προσομοιωμένη συσκευή που μοντελοποιεί τη λειτουργία μιας μεταφορικής ταινίας, όπως αυτές που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία. Έτσι είναι διαθέσιμη η προσομοίωση της μεταφοράς αντικειμένων πάνω σε αυτήν, καθώς και η αλληλεπίδραση διάφορων ρομπότ με αυτήν.



Σχήμα 3.9: Κόμβος Ταινιόδρομου (Conveyor belt node) από το περιβάλλον Webots.

Υπάρχουν παράγοντες που μπορούν να αλλάξουν στον συγκεκριμένο κόμβο από τον χρήστη και αυτοί είναι:

- "BorderThickness", ορίζει το πάχος του μεταλλικού μέρους γύρω από τον μεταφορικό ιμάντα.

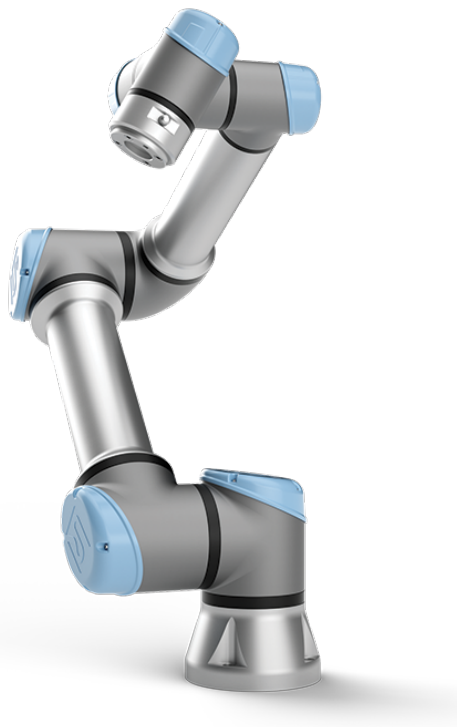
- "BorderHeight", ορίζει το ύψος του περιγράμματος γύρω από τον μεταφορικό ιμάντα.
- "Speed", ορίζει την ταχύτητα του ιμάντα σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο.

## 3.2 Ρομποτικοί βραχίονες

Στο λογισμικό Webots, υπάρχει διαθέσιμη μια μεγάλη ποικιλία από ρομποτικούς βραχίονες. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν τα μοντέλα των ρομποτικών βραχιόνων της εταιρείας *Universal Robots*. Η *Universal Robots* ήταν η πρώτη εταιρεία που κυκλοφόρησε ένα συνεργατικό ρομπότ που μπορούσε να λειτουργεί με ασφάλεια δίπλα σε εργαζόμενους, εξαλείφοντας την ανάγκη για κλουβιά ασφαλείας ή περίφραξη. Το 2008, κυκλοφόρησε το πρώτο UR5, το οποίο στη συνέχεια αναβαθμίστηκε στο UR5e. Στην παρούσα εργασία θα προσομοιωθεί το εν λόγω μοντέλο, παρόλα αυτά στο Webots υπάρχουν διαθέσιμοι ως κόμβοι και οι ρομποτικοί βραχίονες UR3e και UR10e. Πρόκειται για μοντέλα με 6 βαθμούς ελευθερίας, πλήρως συμβατά με το ROS (Robot Operating System), ένα εικονικό λειτουργικό σύστημα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται σύντομα τα χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων ρομποτικών βραχιόνων.

### 3.2.1 UR5e

Το UR5e είναι ένα συνεργατικό ρομπότ που κυκλοφόρησε για πρώτη φορά το 2008 και είναι το πρώτο συνεργατικό ρομπότ που δημιούργησε η εταιρεία UR. Μπορεί να υποστηρίξει έως 5 κιλά ωφέλιμου φορτίου και εξελίσσεται με τη σειρά e-Series με βελτιώσεις στην τεχνολογία του.



Σχήμα 3.10: Ρομποτικός βραχίονας UR5e

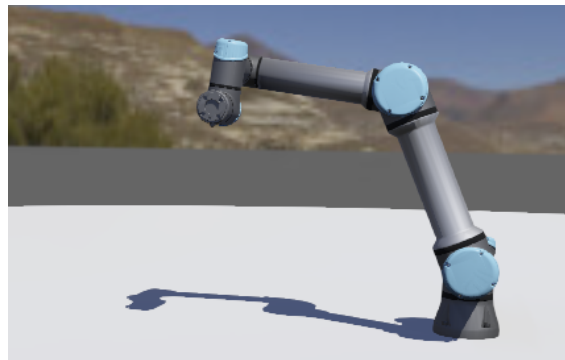
Το UR5e είναι ιδανικό ως ένα συνεργατικό ρομπότ, αρκετά ελαφρύ ώστε να τοποθετηθεί στην υπάρχουσα γραμμή παραγωγής (π.χ. σε ένα τραπέζι ή μέσα σε μια μηχανή). Προσαρμόζεται στην κάθε ανάγκη, ιδανικό για αντικείμενα μικρού έως μεσαίου μεγέθους. Μειώνει τον χρόνο

παραγωγής και αυξάνει την παραγωγικότητα, εξαλείφοντας λάθη με την εφαρμογή αυτοματοποιημένων, τυποποιημένων διαδικασιών. Δημιουργεί νέες λύσεις, καθώς επαναχρησιμοποιεί προγράμματα για επαναλαμβανόμενες εργασίες και μπορεί να μετακινηθεί για νέες διαδικασίες, αν απαιτηθεί. Καθιστά τους υπαλλήλους ικανούς να επικεντρωθούν σε πιο πολύπλοκες εργασίες, εφόσον το ρομπότ είναι υπεύθυνο για τις χρονοβόρες εργασίες.

Το UR5e μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές, όπως:

- Χειρισμός μηχανών (Machine tending).
- Συναρμολόγηση.
- Διανομή (Dispensing).
- Χειρισμός υλικών.
- Επιθεώρηση ποιότητας.
- Διαλογή και τοποθέτηση.

Η αυτοματοποίηση επιτρέπει την αυτόνομη εκτέλεση εργασιών, χωρίς συνεχή παρακολούθηση από τους υπαλλήλους. Τα ρομπότ της UR χρησιμοποιούν λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια σε σχέση με τα παραδοσιακά βιομηχανικά ρομπότ, καθώς το UR5e μπορεί να ανασηκώσει 5 κιλά, καταναλώνοντας μόλις 200 Watt, όσο περίπου και μία gaming κονσόλα. Έτσι μπορεί να παρέχει πολύ υψηλή απόδοση, διατηρώντας παράλληλα χαμηλή την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 3.11: Ο ρομποτικός βραχίονας UR5e στο λογισμικό Webots.

Στο Webots, το UR5e μπορεί να προσομοιωθεί και να ενσωματωθεί σε εικονικά περιβάλλοντα για δοκιμές και πειραματισμό. Είναι, έτσι, εύκολο να μοντελοποιηθούν, να προσομοιωθούν και να αναλυθούν ρομποτικά συστήματα προτού εφαρμοστούν στον πραγματικό κόσμο. Ο ρομποτικός βραχίονας UR5e, με 6 βαθμούς ελευθερίας, τον καθιστά κατάλληλο για μια ευρεία γκάμα εργασιών και μπορεί να επεκταθεί για να περιλάβει άλλα ρομποτικά εξαρτήματα, όπως αισθητήρες και αντικείμενα, δημιουργώντας πολύπλοκα και διαδραστικά σενάρια.

### 3.3 Ρομποτική αρπάγη

Η ρομποτική αρπάγη (Robotic gripper) είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται από το ρομπότ, για το κράτημα και τη μεταφορά αντικειμένων. Λειτουργεί παρόμοια με το χέρι ενός ανθρώπου, κρατώντας αντικείμενα με συγκεκριμένο τρόπο για να τα μετακινήσει από ένα μέρος σε ένα άλλο. Ο "Robotic gripper 3-Finger Adaptive" της Robotiq είναι περιφερειακή συσκευή, που σχεδιάστηκε για βιομηχανικές εφαρμογές και ο σχεδιασμός του τον καθιστά ένα εργαλείο στην άκρη του βραχίονα κατάλληλο για τη διαλογή, την τοποθέτηση και τον χειρισμό ενός μεγάλου εύρους και όγκου αντικειμένων με διάφορα μεγέθη και σχήματα. Διαθέτει τρία αρθρωτά δάχτυλα και το καθένα από αυτά έχει τρεις αρθρώσεις. Η ρομποτική αρπάγη, μπορεί να έρθει

σε επαφή με έως και δέκα σημεία ενός αντικειμένου, ενώ έχουν λιγότερους κινητήρες από το συνολικό αριθμό αρθρώσεων, το οποίο επιτρέπει στα δάχτυλα να προσαρμόζονται αυτόματα στο σχήμα του αντικειμένου που κρατούν.



Σχήμα 3.12: 3-Finger Adaptive Robot Gripper της εταιρείας Robotiq.

Η ρομποτική αρπάγη τριών δακτύλων είναι ιδανική για παραγωγική διαδικασία και για ρομποτική έρευνα. Προσαρμόζεται στο σχήμα του αντικειμένου για μια σταθερή λαβή. Είναι συμβατή με τους περισσότερους κατασκευαστές βιομηχανικών ρομπότ, ενώ είναι ιδανική για σύνδεση με τα Universal Robots, καθώς εγκαθίσταται σε λίγα λεπτά στον βραχίονα, διευκολύνοντας τη ρύθμιση και τον προγραμματισμό του με γρήγορο και εύκολο τρόπο. Με έλεγχο δύναμης, θέσης και ταχύτητας σε κάθε δάκτυλο και με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους λαβής, η συγκεκριμένη αρπάγη διαθέτει μεγάλη ευελιξία στα αντικείμενα που μπορεί να πιάσει.

Η προσομοίωση της συγκεκριμένης ρομποτικής αρπάγης στο Webots επιτρέπει στους χρήστες να δοκιμάσουν και να αξιολογήσουν τη λειτουργία του "Gripper" σε ένα εικονικό περιβάλλον, προτού το ενσωματώσουν σε πραγματικό ρομπότ. Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζεται αυτόματα στο σχήμα των αντικειμένων που κρατά και πρόκειται για μία λύση ιδανική για λειτουργία με μεγάλη ποικιλία σχημάτων και μεγεθών.



Σχήμα 3.13: 3-Finger Robotiq Adaptive Robot Gripper "node" στο λογισμικό Webots

| Motor Name            | Position Sensor Name         |
|-----------------------|------------------------------|
| palm_finger_1_joint   | palm_finger_1_joint_sensor   |
| finger_1_joint_1      | finger_1_joint_1_sensor      |
| finger_1_joint_2      | finger_1_joint_2_sensor      |
| finger_1_joint_3      | finger_1_joint_3_sensor      |
| palm_finger_2_joint   | palm_finger_2_joint_sensor   |
| finger_2_joint_1      | finger_2_joint_1_sensor      |
| finger_2_joint_2      | finger_2_joint_2_sensor      |
| finger_2_joint_3      | finger_2_joint_3_sensor      |
| finger_middle_joint_1 | finger_middle_joint_1_sensor |
| finger_middle_joint_2 | finger_middle_joint_2_sensor |
| finger_middle_joint_3 | finger_middle_joint_3_sensor |

Σχήμα 3.14: Πίνακας με τα Motor, Position sensor names, όπως χρησιμοποιούνται στο Webots.



## Κεφάλαιο 4

# Προσομοιωμένο μοντέλο διαδικασίας διαλογής και τοποθέτησης με τη βοήθεια βιομηχανικών ρομποτικών βραχιόνων

Στην παρούσα εργασία μοντελοποιήθηκε και προσομοιώθηκε ένα στάδιο μίας γραμμής παραγωγής στο περιβάλλον του λογισμικού Webots. Το στάδιο της διαλογής συναντάται σε κάθε γραμμή παραγωγής και είναι αναγκαίο, για να διαχωριστούν αντικείμενα ή για να τοποθετηθούν σε συγκεκριμένα μέρη. Μπορεί να βρίσκεται πριν από κάποιον σταθμό συναρμολόγησης ή στην αρχή της διαδικασίας για την ταξινόμηση και τον διαχωρισμό συγκεκριμένων αντικειμένων. Συχνά, η διαδικασία της διαλογής επαναλαμβάνεται πολλές φορές κατά μήκος μιας γραμμής παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν τρία μοντέλα ίδιας λειτουργίας αλλά με διαφορετική χωροταξία και μορφολογία. Τα μοντέλα προσομοιώνουν ένα σταθμό διαλογής ενός ρομποτικού βραχίονα σε ένα εργοστάσιο, ο οποίος δέχεται αντικείμενα από ζώνη μεταφοράς και τα τοποθετεί ανάλογα με το χρώμα τους σε διαφορετικές καθορισμένες θέσεις.

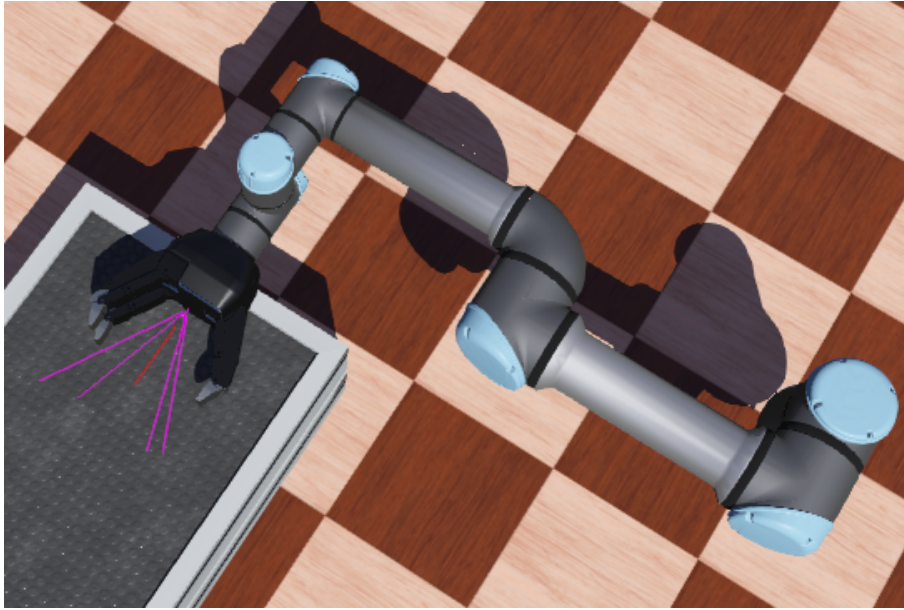
### 4.1 Δομικά στοιχεία της προσομοίωσης

Για την δημιουργία των τριών μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν ποικίλα αντικείμενα και συσκευές στο περιβάλλον του Webots. Συγκεκριμένα:

- Ρομποτικός βραχίονας UR5e (Σχήμα 4.1): Βρίσκεται σε προκαθορισμένη θέση, και όταν αναγνωριστεί αντικείμενο από εξωτερικό αισθητήρα, γίνεται κίνηση των κινητήρων σε συγκεκριμένες θέσεις, ώστε να γίνει διαλογή του αντικειμένου και στην συνέχεια τοποθέτηση σε προκαθορισμένη θέση στόχο.
- Ρομποτική αρπάγη (3-F Robotiq Gripper): Η αρπάγη που βρίσκεται στο τελικό άκρο του ρομποτικού βραχίονα είναι υπεύθυνη για να κάνει τη διαλογή και για να τοποθετήσει τα αντικείμενα στις προκαθορισμένες θέσεις. Για τη διαλογή των αντικειμένων, όταν αναγνωρίζεται ένα αντικείμενο από το σύστημα και είναι σε θέση να το πιάσει, ορίζονται στους κινητήρες συγκεκριμένες τιμές για να κλείσει τα δάχτυλα. Οι τιμές αυτές διατηρούνται έως να τοποθετηθεί στην αντίστοιχη θέση στόχο, όπου πάλι με συγκεκριμένες τιμές των κινητήρων τα δάχτυλα ανοίγουν.



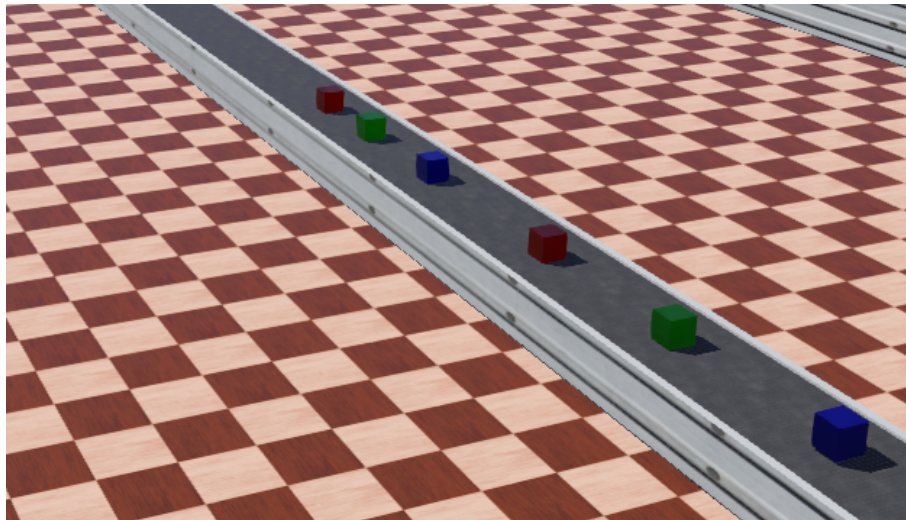
- Αισθητήρας απόστασης: Είναι συνδεδεμένος με το τελικό άκρο του ρομποτικού βραχίονα και μετράει την απόσταση από όποιο αντικείμενο αναγνωρίζεται ως κοντινό. Μέγιστη απόσταση που αναγνωρίζει είναι το 1 μέτρο. Είναι η συσκευή που ορίζει πότε θα ξεκινήσει να γίνεται η διαλογή του αντικειμένου.
- Οπτικός αισθητήρας (Camera): Είναι συνδεδεμένος με το τελικό άκρο του ρομποτικού βραχίονα και δίνει εικόνα στον χρήστη, καθώς και αναγνωρίζει αντικείμενα που έρχονται κοντά στον ρομποτικό βραχίονα. Έτσι βλέπει ο χειριστής τι αντικρίζει το άκρο του ρομπότ. Η κάμερα είναι υπεύθυνη για την αναγνώριση του χρώματος του αντικειμένου.



Σχήμα 4.1: Εικόνα του μοντέλου στο Webots

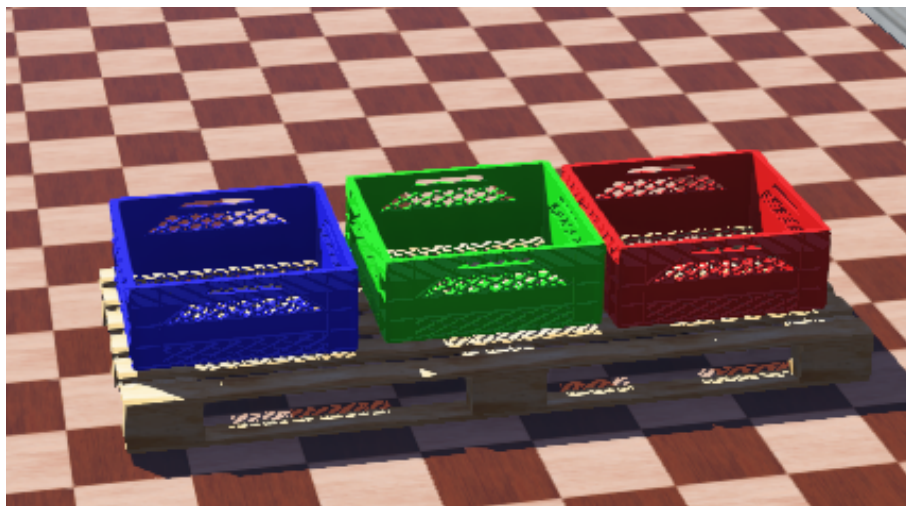
Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται ο ρομποτικός βραχίονας και πάνω του είναι προσαρμοσμένη η αρπάγη, όπου διακρίνονται τα τρία δάχτυλα. Το οπτικό πεδίο της κάμερας, όπου παρουσιάζεται με μοβ χρώμα και ο αισθητήρας απόστασης με την ακτίνα laser που χρησιμοποιείται για την μέτρηση με κόκκινο χρώμα.

- Ταινιόδρομος (Conveyor belt): Παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2 και έχει, ζώνη μεταφοράς μεγέθους 9 μέτρα στον οριζόντιο άξονα (μήκος), 0.4 μέτρα σε πλάτος και 0.21 μέτρα στον κατακόρυφο άξονα (ύψος). Η ζώνη αυτή μεταφέρει από την αρχή της μέχρι το τέλος τα αντικείμενα προς τον τελικό αποδέκτη, το ρομπότ, το οποίο βρίσκεται στην άκρη της ζώνης μεταφοράς. Η ταχύτητα της ζώνης μεταφοράς είναι 0.1 μέτρα/δευτερόλεπτα.
- Στερεοί κόμβοι (Solid nodes): Αντιπροσωπεύουν τα αντικείμενα που εμφανίζονται ως κυβικά σχήματα συγκεκριμένων και ίδιων διαστάσεων 0.1 μέτρα ύψους, πλάτους και μήκους και μάζας. Τα αντικείμενα αυτά έρχονται θεωρητικά από κάποιο άλλο σταθμό της γραμμής παραγωγής, εφοδιαστικής αλυσίδας και μέσω της ζώνης μεταφοράς φτάνουν στο σημείο όπου το ρομπότ κάνει τη διαλογή και τα μεταφέρει για να τα αφήσει στα αποθηκευτικά δοχεία, όπου είναι έτοιμα για να συνεχίσουν μέσα στη διαδικασία παραγωγής. Ενδεικτικά μπορεί να υπάρχει ένας επόμενος σταθμός συναρμολόγησης, όπου δημιουργείται ένα τελικό προϊόν. Τα αντικείμενα αυτά, στη συγκεκριμένη μελέτη, είναι τριών διαφορετικών χρωμάτων (πράσινο, μπλε, κόκκινο) και η διαφοροποίηση αυτή αντικατοπτρίζει την διαφορά των αντικειμένων. Κάθε ένα από αυτά αναγνωρίζεται από την συνδεδεμένη στο ρομπότ κάμερα ως ξεχωριστό αντικείμενο. Έτσι ανάλογα με το χρώμα του "solid node" τοποθετούνται από το ρομπότ στο αντίστοιχο αποθηκευτικό δοχείο.



Σχήμα 4.2: Εικόνα του μοντέλου στο Webots με την ζώνη μεταφοράς και των διαφορετικών χρωμάτων "solid nodes".

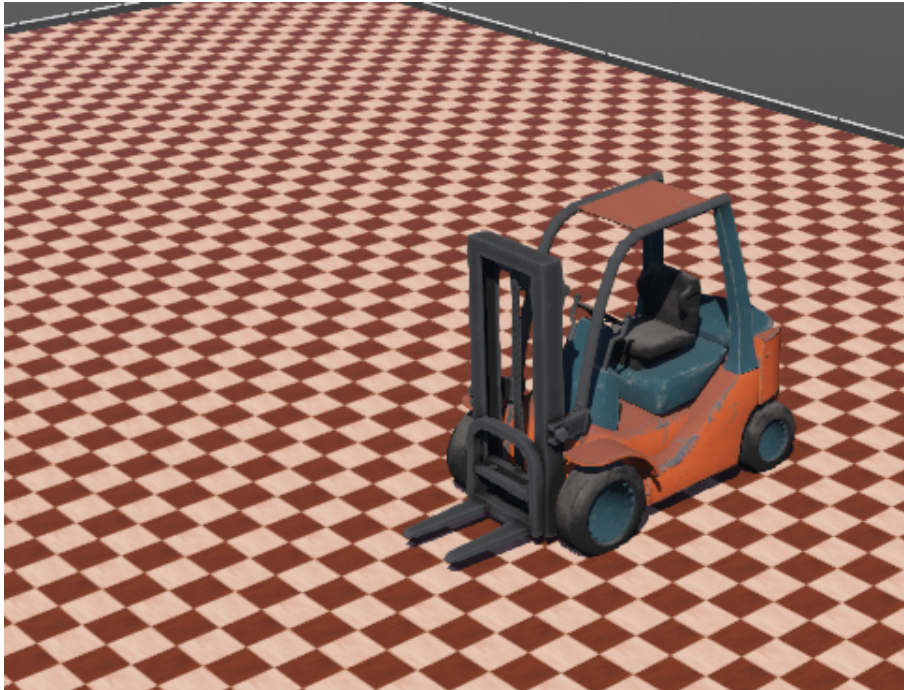
- Μικρά αποθηκευτικά δοχεία διαφορετικού χρώματος (Σχήμα 4.3): συγκεκριμένου μεγέθους και προκαθορισμένης θέσης. Είναι τρία διαφορετικά χρώματα (πράσινο, μπλε, κόκκινο) και στο καθένα από αυτά "αφήνει" ο ρομποτικός βραχίονας αντικείμενα του αντίστοιχου χρώματος. Το μέγεθος τους είναι 0.5 μέτρα σε μήκος, 0.5 σε πλάτος και 0.2 μέτρα σε ύψος.
- Ξύλινες Παλέτες: Τοποθετούνται σε συγκεκριμένες θέσεις και η λειτουργικότητά τους είναι να βρίσκονται κάτω από τα αποθηκευτικά δοχεία και να τα στηρίζουν και τα τρία μαζί στον ίδιο κοντινό χώρο. Το μέγεθος τους είναι 1.7 μέτρα σε μήκος, 0.7 μέτρα πλάτος και 0.12 μέτρα ύψους.



Σχήμα 4.3: Εικόνα του μοντέλου στο Webots με την παλέτα και τα αποθηκευτικά δοχεία.

- Ανυψωτικό όχημα (Σχήμα 4.4): το οποίο χειρίζεται τις παλέτες. Στο συγκεκριμένο μοντέλο δεν έχει κάποια λειτουργικότητα, αλλά προσομοιώνει ένα αληθινό εργοστάσιο, με το θεωρητικό σενάριο, μεταφοράς των παλετών σε επόμενο σταθμό.
- Rectangle Arena: Είναι ο χώρος και το επίπεδο που συγκρατεί όλα τα δομικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην συγκεκριμένη προσομοίωση και είναι ένα τετραγωνικό επίπεδο σαν "σκακίερα". Οι διαστάσεις του για αυτά τα μοντέλα είναι 20x20 μέτρα

(μήκος, πλάτος), το οποίο ορίζει και το μέγεθος του θεωρητικού χώρου που χρειάζεται σε ένα εργοστάσιο ή πραγματοποίηση της συγκεκριμένης διαδικασίας.



Σχήμα 4.4: Εικόνα του μοντέλου στο Webots με το ανυψωτικό και την Rectangle arena.

## 4.2 Περιγραφή λειτουργίας μοντέλου

Με σκοπό να προσομοιωθεί μία διαδικασία διαλογής δημιουργήθηκαν τρία μοντέλα σε περιβάλλον Webots. Τα τρία μοντέλα δεν διαφέρουν ως προς την λειτουργία και τον στόχο αλλά διαφοροποιούνται στους χρόνους παραγωγής και στην χωροταξία. Τα μοντέλα περιγράφουν ένα συγκεκριμένο κομμάτι της παραγωγικής διαδικασίας, με στόχο να προσομοιωθεί σε ρεαλιστικά δεδομένα και συνθήκες με την χρήση ενός ρομποτικού βραχίονα UR. Η συγκεκριμένη προσέγγιση και τα σχετικά αποτελέσματα, δύναται να χρησιμοποιηθούν σε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον.

Για τη δημιουργία της προσομοίωσης, αρχικά τοποθετήθηκαν οι κόμβοι (nodes) στον κόσμο του Webots και ρυθμίστηκαν οι απαραίτητες θέσεις, έτσι ώστε να είναι ρεαλιστικές και να μπορούν να είναι όλα λειτουργικά στην μετέπειτα προσομοίωση. Για κάθε αντικείμενο ή συσκευή που προσθέτουμε στον "κόσμο" της προσομοίωσης, είναι αναγκαίο να γίνεται η σχετική παραμετροποίηση που αφορά τις διαστάσεις, τον προσανατολισμό, τα χρώματα τους και τη μορφολογία τους, καθώς και να είναι ενεργή η επιλογή που αφορά τις φυσικές ιδιότητες. Χρησιμοποιώντας τις φυσικές ιδιότητες του, το αντικείμενο αντιδρά και δέχεται όλες τις δυνάμεις, όπως την βαρύτητα και την τριβή.

Συγκεκριμένα, εισήχθη ο ρομποτικός βραχίονας που θεωρήθηκε καταλληλότερος για την συγκεκριμένη διαδικασία. Το cobot UR5e, ως συνεργατικός ρομποτικός βραχίονας μπορούσε να εκτελέσει λόγω αρθρώσεων και μορφολογίας άριστα σενάρια διαλογής και τοποθέτησης. Εισήχθη, ως έτοιμος κόμβος (node). Δόθηκε ο κατάλληλος προσανατολισμός και οι συντεταγμένες στις τρεις διαστάσεις, με σκοπό να δέχεται από την ζώνη μεταφοράς τα αντικείμενα σε σωστή θέση και ύψος. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε ο ταινιόδρομος που ξεκινούσε από την αρχή του χώρου προσομοίωσης και έφτανε στο τελικό άκρο του ρομπότ για μπορεί να κάνει διαλογή στα αντικείμενα ενδιαφέροντος. Δόθηκαν διαστάσεις και προσανατολισμός με ανάλογο τρόπο.

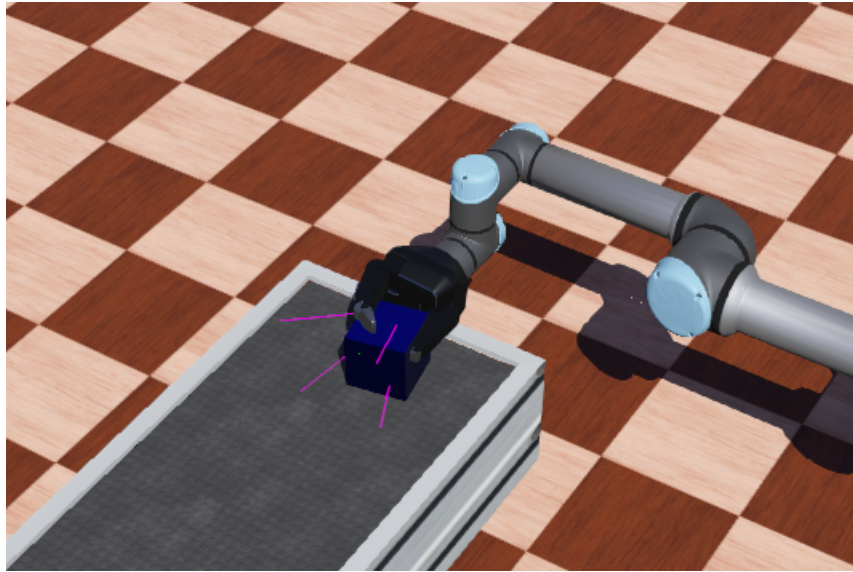
Πάνω σε αυτόν τοποθετήθηκαν τα αντικείμενα που δημιουργήθηκαν από τον ίδιο τον χρήστη, λαμβάνοντας υπόψιν το υπό μελέτη σενάριο. Εισήχθησαν ως στερεοί κόμβοι (solid nodes) και στην συνέχεια προστέθηκαν τα σχήματα (στερεά-solid) μαζί με τα μεγέθη, τα χρώματα, τη μάζα, τη μορφολογία και τις διαστάσεις των κύβων που δημιουργήθηκαν. Τέλος μπήκαν τα αποθηκευτικά δοχεία και οι παλέτες, με έτοιμες διαστάσεις και χρώματα.

Για το δεδομένο σενάριο και τον τρόπο λειτουργίας, τοποθετήθηκαν οι σχετικές συσκευές στο άκρο του ρομποτικού βραχίονα. Αρχικά η αρπάγη, που ως έτοιμος κόμβος ήταν ο 3-F Robotiq Gripper. Αυτή είναι υπεύθυνη για την διαδικασία συλλογής αντικειμένων και την τοποθέτηση τους στις σχετικές θέσεις, όπως αυτές ορίζονται από τον χρήστη. Μαζί με την αρπάγη προστέθηκε στο τελικό άκρο ο αισθητήρας απόστασης. Επιπλέον τοποθετήθηκε και προσαρμόστηκε στο τελικό άκρο η κάμερα, που έδινε εικόνα στον ρομποτικού βραχίονα και ήταν υπεύθυνη για την αναγνώριση των αντικειμένων και των χρωμάτων.

Για την εκτέλεση του συγκεκριμένου σεναρίου δημιουργήθηκε ο σχετικός κώδικας. Ο ρομποτικός βραχίονας αναγνωρίζει την απόσταση του τελικού άκρου από το πιο κοντινό αντικείμενο μέσω του αισθητήρα απόστασης και έχοντας την αναγνώριση του αντικειμένου και του χρώματος από την κάμερα, ενεργοποιεί την αρπάγη και τους κινητήρες του ρομπότ για να πιάνουν το αντικείμενο και να το τοποθετήσουν. Όταν εκτελείται η προσομοίωση, η ζώνη μεταφοράς αρχίζει να λειτουργεί με ταχύτητα 0.1 m/s. Τα αντικείμενα που είναι τοποθετημένα πάνω στον ταινιόδρομο, αρχίζουν να κινούνται προς την κατεύθυνση που έχει προσανατολισμό ο διάδρομος προς τα εκεί δηλαδή, που βρίσκεται ο ρομποτικός βραχίονας. Η κάμερα και ο αισθητήρας απόστασης δίνουν δεδομένα για την απόσταση του αντικειμένου και για το αν αναγνωρίζεται κάποιο αντικείμενο και το χρώμα του. Όταν η απόσταση του αισθητήρα από το αντικείμενο είναι μικρότερη από 0.1 μέτρα τότε ενεργοποιούνται οι κινητήρες της αρπάγης. Τα

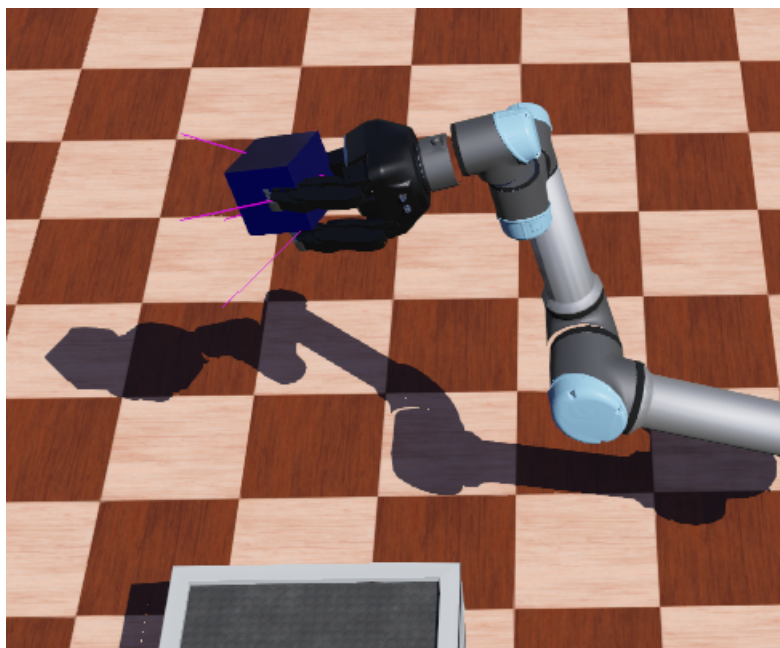


τρία δάχτυλα κινούνται και κλείνουν μέχρι ένα σημείο και κλειδώνουν το αντικείμενο (Σχήμα 4.5).



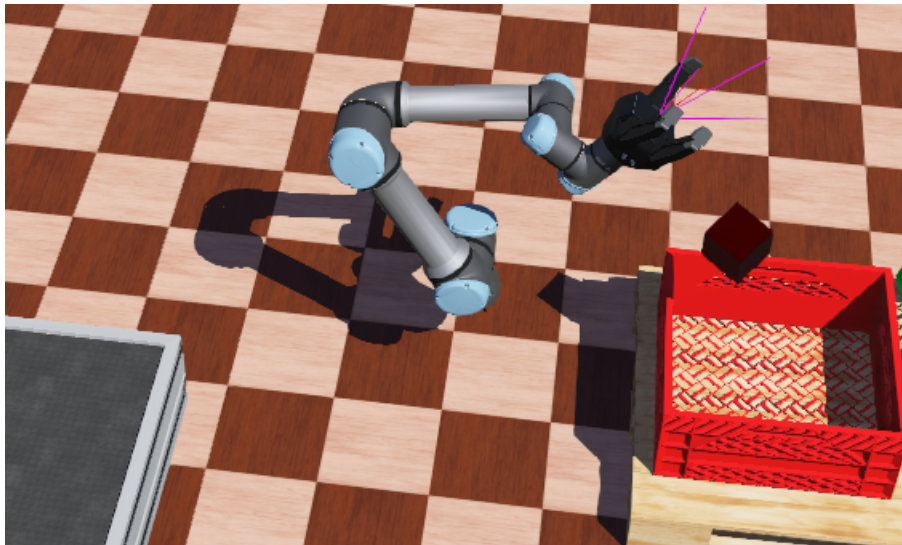
Σχήμα 4.5: Εικόνα του μοντέλου στο Webots την στιγμή που ο βραχίονας αναγνωρίζει και "γραπώνει" το αντικείμενο.

Τότε ενεργοποιούνται οι κινητήρες του ρομποτικού βραχίονα και κινούν τις αρθρώσεις τους μέχρι το προκαθορισμένο "σημείο στόχο" (target position) που έχει ορισθεί. Εκεί, αφήνουν τα αντικείμενα στο αντίστοιχο δοχείο. Υπάρχουν τρία διαφορετικά σημεία στόχοι και εξαρτάται σε ποιο θα καταλήξει ο ρομποτικός βραχίονας ανάλογα με το αντικείμενο και το χρώμα του αντικειμένου. Υπεύθυνη για αυτή την διαδικασία είναι η κάμερα, η οποία αναγνωρίζει το χρώμα του αντικειμένου. Ανάλογα με το χρώμα (μπλε, πράσινο ή κόκκινο), ο ρομποτικός βραχίονας καθοδηγείται στο αντίστοιχο σημείο στόχο, που είναι προκαθορισμένο για το κάθε χρώμα (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.6: Εικόνα του μοντέλου στο Webots την στιγμή που ενεργοποιούνται οι κινητήρες του βραχίονα, με σκοπό να φτάσει στο "σημείο στόχο".

Όταν, λοιπόν, βρεθεί ο ρομποτικός βραχίονας στο σωστό σημείο στόχο, τότε ξαναενεργοποιούνται οι κινητήρες της αρπάγης και επανέρχονται στις αρχικές θέσεις τα δάχτυλα, με αποτέλεσμα να αφήνουν το αντικείμενο να "πέσει" στο αποθηκευτικό δοχείο του αντίστοιχου χρώματος (Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7: Εικόνα του μοντέλου στο Webots την στιγμή που ο βραχίονας έχει φτάσει στο "σημείο στόχο" και "αφήνει" το αντικείμενο στην αντίστοιχη θέση.

Αφού γίνει η συγκεκριμένη διαδικασία, το ρομπότ θα επιστρέψει στην αρχική του θέση και θα επαναληφθεί η αντίστοιχη διαδικασία μέχρι να σταματήσει η προσομοίωση ή μέχρι να μην υπάρχουν άλλα αντικείμενα. Η ζώνη μεταφοράς θα συνεχίσει να λειτουργεί, αλλά χωρίς καμία ενεργή λειτουργία του μοντέλου, μέχρι να παρουσιαστεί νέο αντικείμενο.

### 4.3 Σενάρια προσομοίωσης

Δημιουργήθηκαν τρία διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης, με την ίδια λειτουργικότητα αλλά διαφορετική χωροταξία. Το πρώτο σενάριο λειτουργίας αποτελείται από έναν ρομποτικό βραχίονα και μία ζώνη μεταφοράς, με σκοπό τα αντικείμενα από τον διάδρομο να αναγνωριστούν και να τοποθετηθούν σωστά στο κατάλληλο αποθηκευτικό δοχείο.

Η ίδια διαδικασία συμβαίνει και στο δεύτερο σενάριο λειτουργίας, στο οποίο υπάρχουν δύο ζώνες μεταφοράς και δύο ρομποτικοί βραχίονες, οι οποίοι λειτουργούν αυτόνομα. Ένας διάδρομος, ο οποίος καταλήγει σε έναν ρομποτικό βραχίονα και άλλος ένας ξεχωριστός διάδρομος, που καταλήγει σε έναν άλλον ρομποτικό βραχίονα που λειτουργεί ξεχωριστά.

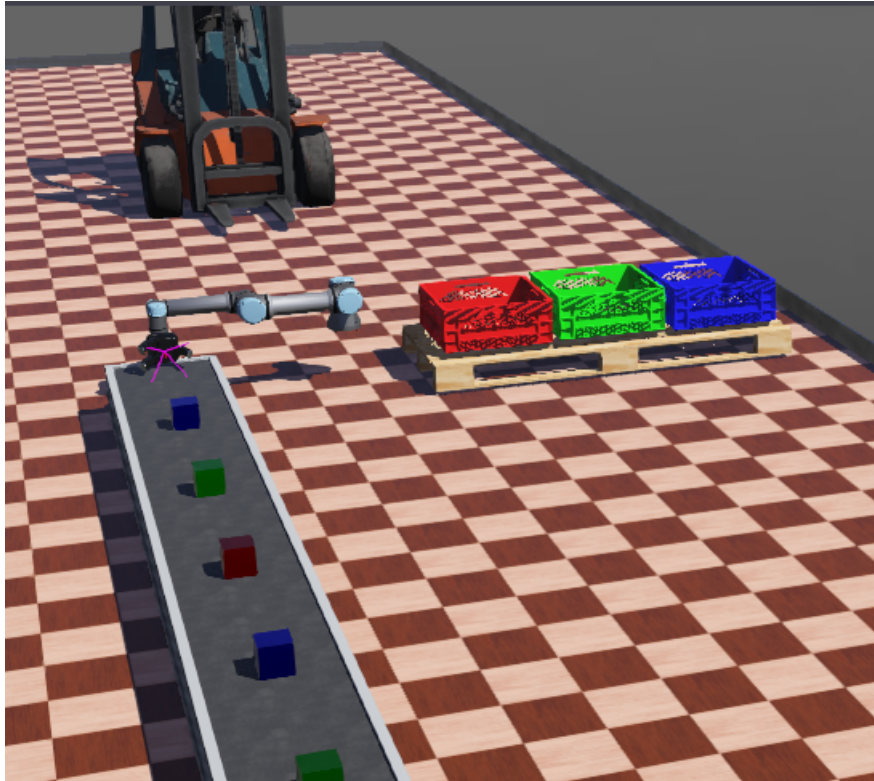
Το τρίτο σενάριο λειτουργίας έχει έναν ρομποτικό βραχίονα και δυο διαδρόμους, στους οποίους λειτουργεί ταυτόχρονα. Το ρομπότ πηγαίνει στην ζώνη μεταφοράς που αναγνωρίζει ότι υπάρχει κοντινότερο αντικείμενο.

Αναλυτικά οι κώδικες που αναπτύχθηκαν για την προσομοίωση των διαφορετικών σεναρίων θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.

#### 4.3.1 Πρώτο σενάριο λειτουργίας

Το πρώτο σενάριο, αποτελείται από έναν ρομποτικό βραχίονα και μία ζώνη μεταφοράς. Τα αντικείμενα έρχονται από την ζώνη μεταφοράς το ένα μετά το άλλο, ο αισθητήρας απόστασης ελέγχει την απόσταση και όταν φτάσει σε απόσταση μικρότερη των 0.1 μέτρων ειδοποιείται ο ρομποτικός βραχίονας UR5e. Μέσω συγκεκριμένων τιμών που παίρνουν οι κινητήρες, τόσο

του βραχίονα όσο και της αρπάγης γίνεται διαλογή του αντικειμένου και τοποθετείται στο κατάλληλο αποθηκευτικό δοχείο ανάλογα με το χρώμα του όταν φτάσει στην κατάλληλη θέση. Για την διαδικασία αναγνώρισης του χρώματος υπεύθυνη είναι η συνδεδεμένη κάμερα στην άκρη του ρομποτικού βραχίονα. Η διαμόρφωση του σεναρίου λειτουργίας αλλά και ο κώδικας που χρησιμοποιείται από τον ελεγκτή του ρομποτικού βραχίονα φαίνονται στο Σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8: Πρώτο σενάριο λειτουργίας στο Webots.

### Κώδικας πρώτου σεναρίου

Ο κώδικας είναι γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού C μέσα στο λογισμικό του Webots. Ο συγκεκριμένος κώδικας είναι αυτός που εκτελεί ο ελεγκτής του ρομποτικού βραχίονα. Αναλυτικά ο κώδικας παρουσιάζεται στο Α΄.1.

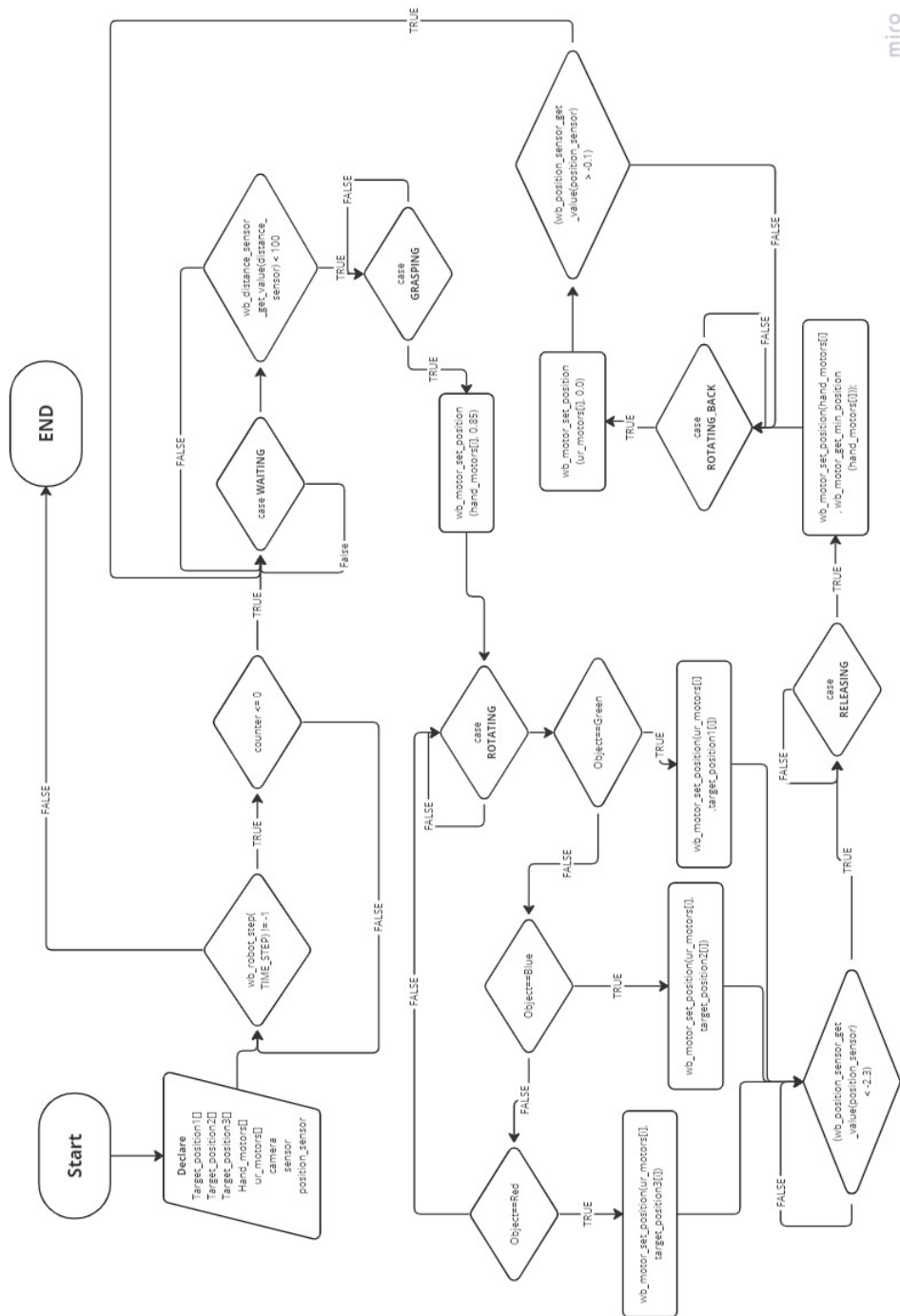
Αρχικά, δηλώνονται οι βιβλιοθήκες που χρειάζονται για την σωστή λειτουργία και στη συνέχεια αρχικοποιούνται και δηλώνονται όλες οι μεταβλητές και οι συσκευές που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση. Με την εντολή `wb_robot_init()`; αρχικοποιείται το ρομπότ που χρησιμοποιείται. Οι εντολές `WbDeviceTag hand_motors[3]`; και `WbDeviceTag ur_motors[5]`; αρχικοποιούν τους κινητήρες, που θα χρησιμοποιηθούν τόσο για τον ρομποτικό βραχίονα όσο και για την αρπάγη. Επίσης δηλώνονται με αντίστοιχο τρόπο οι συσκευές που είναι προσαρτημένες στο τελικό άκρο του ρομπότ, συγκεκριμένα ο αισθητήρας και η κάμερα. Στην κάμερα χρησιμοποιείται η εντολή `wb_camera_recognition_enable(camera, 2*TIME_STEP)`; , με σκοπό να ενεργοποιηθεί η αναγνώριση των αντικειμένων που θα είναι υπεύθυνη για τον διαχωρισμό των χρωμάτων. Ο σχετικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται είναι διαθέσιμος από της βιβλιοθήκες του λογισμικού.

Προτού εισέλθει ο κώδικας στην κύρια επανάληψη, δηλώνονται και τα τρία σημεία στόχοι, για τα αντίστοιχα χρώματα, τα οποία δείχνουν πόσο πρέπει να μετακινηθεί ο κάθε κινητήρας του ρομποτικού βραχίονα, για να φτάσει στην θέση όπου θα "αφήσει" το αντικείμενο στο αποθηκευτικό δοχείο. Στη συνέχεια ενεργοποιείται η κύρια επανάληψη, η οποία επαναλαμβάνει

ται μέχρι να τερματιστεί η προσομοίωση. Εκεί υπολογίζεται διαρκώς η τιμή του αισθητήρα απόστασης και τα αντικείμενα που αναγνωρίζονται από την κάμερα. Προτού ο κώδικας εισέλθει στις κύριες καταστάσεις (States) του ρομπότ, οι οποίες έχουν δηλωθεί αρχικά, γίνεται η διαδικασία της αναγνώρισης των χρωμάτων των αντικειμένων μέσω της κάμερας με την εντολή επανάληψης `for`.

Στη συνέχεια, ο κώδικας εκτελεί την κύρια λειτουργία του, στις διαφορετικές καταστάσεις (States) που βρίσκεται ο ρομποτικός βραχίονας. Αρχικά, ξεκινάει και περιμένει στο **WAITING state**, όπου είναι η αρχική θέση του ρομποτικού βραχίονα όταν δεν έχει πλησιάσει αρκετά κάποιο αντικείμενο. Αν ισχύει η συνθήκη (`wb_distance_sensor_get_value(distance_sensor) < 100`), τότε ο κώδικας προχωράει στο επόμενο State, **GRASPING** και ορίζονται οι τιμές που πρέπει να πάρουν οι κινητήρες της αρπάγης, για να πιάσουν το αντικείμενο. Στο επόμενο state αναγνωρίζεται το αντικείμενο και το χρώμα του και καθορίζεται σε ποιο σημείο στόχο, θα κινηθούν οι κινητήρες του ρομποτικού βραχίονα. Αφού εκτελεστούν τα παραπάνω, προχωράει στο **ROTATING**. Εδώ αν ισχύει η συνθήκη (`wb_position_sensor_get_value(position_sensor) < -2.3`), τότε σημαίνει ότι ο ρομποτικός βραχίονας έχει φτάσει στην θέση που πρέπει για να "αφήσει" το αντικείμενο και δίνει τις κατάλληλες τιμές στους κινητήρες της αρπάγης για να ανοίξουν τα δάχτυλα. Έπειτα, προχωράει στο επόμενο state το **RELEASING**. Ο ρομποτικός βραχίονας επιστρέφει στην αρχική του θέση, επειδή οι κινητήρες παίρνουν τις αντίστοιχες τιμές μέσω της εντολής `for (i = 0; i < 5; ++iwb_motor_set_position(ur_motors[i], 0.0)`; και προχωράει στο State **ROTATING\_BACK**. Εκεί, μόλις φτάσει στην κατάλληλη θέση και επιστρέφει στην αρχική του θέση το ρομπότ εισέρχεται ξανά στο **WAITING State**. Από εκεί και πέρα γίνεται αυτή η διαδικασία και η εναλλαγή των καταστάσεων, όσο υπάρχουν αντικείμενα και όσο διαρκεί η προσομοίωση, μέχρι δηλαδή να τερματιστεί. Το συνολικό διάγραμμα ροής της παραπάνω διαδικασίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.9.





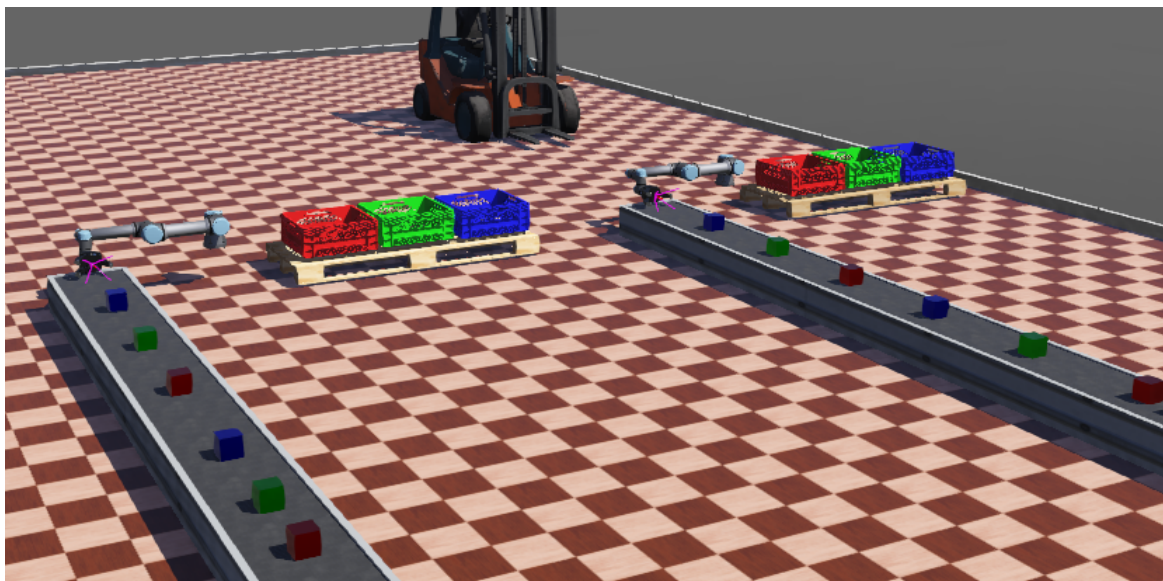
miro

Σχήμα 4.9: Διάγραμμα ροής του πρώτου σεναρίου.

### 4.3.2 Δεύτερο σενάριο λειτουργίας

Το δεύτερο σενάριο λειτουργίας δεν διαφέρει σημαντικά σε λειτουργικότητα από το πρώτο σενάριο λειτουργίας, διαφέρει όμως σε ποσοτικό επίπεδο. Το δεύτερο σενάριο λειτουργίας αποτελείται από δύο ρομποτικούς βραχίονες και δύο ζώνες μεταφοράς που λειτουργούν ξεχωριστά. Το ένα ρομπότ είναι υπεύθυνο και εξυπηρετεί τον έναν διάδρομο, ενώ το άλλο ρομπότ εξυπηρετεί τον άλλον. Τα δύο συστήματα λειτουργούν ταυτόχρονα το ένα δίπλα στο άλλο λειτουργώντας, όμως, ανεξάρτητα. Αντίστοιχα με το παραπάνω μοντέλο, οι βραχίονες δέχονται αντικείμενα που βρίσκονται πάνω στις ζώνες μεταφοράς και τα τοποθετούν ανάλογα με το χρώμα τους στα αντίστοιχα αποθηκευτικά δοχεία, που είναι διαφορετικά για κάθε ρομπότ, δηλαδή τα 3 αποθηκευτικά δοχεία του πρώτου συστήματος βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις από τα αποθηκευτικά δοχεία του δεύτερου συστήματος.

Τα δύο συστήματα προσεγγίζονται ως ένα και πραγματοποιούν την συγκεκριμένη διαδικασία διαλογής ως σύνολο, ενώ οι ελεγκτές, των δύο ρομπότ είναι προγραμματισμένοι να δουλεύουν με τον αντίστοιχο τρόπο. Γίνεται χρήση του ιδίου κώδικα και για τα δύο. Όταν ξεκινάει η προσομοίωση λειτουργούν και οι δύο ζώνες μεταφοράς και φέρνουν αντικείμενα στους δύο ρομποτικούς βραχίονες. Αφού φτάσουν αρκετά κοντά ενεργοποιούνται τα ρομπότ και τοποθετούν τα αντικείμενα στα ξεχωριστά, για τον κάθε διάδρομο, αποθηκευτικά δοχεία. Σκοπός είναι μετά να δημιουργηθεί το θεωρητικό προϊόν από τα συνολικά αντικείμενα και των δύο διαδρόμων, ως ένα σύστημα. Μια απεικόνιση του δεύτερου σεναρίου προσομοίωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10: Διαμόρφωση του δεύτερου σεναρίου λειτουργίας στο Webots.

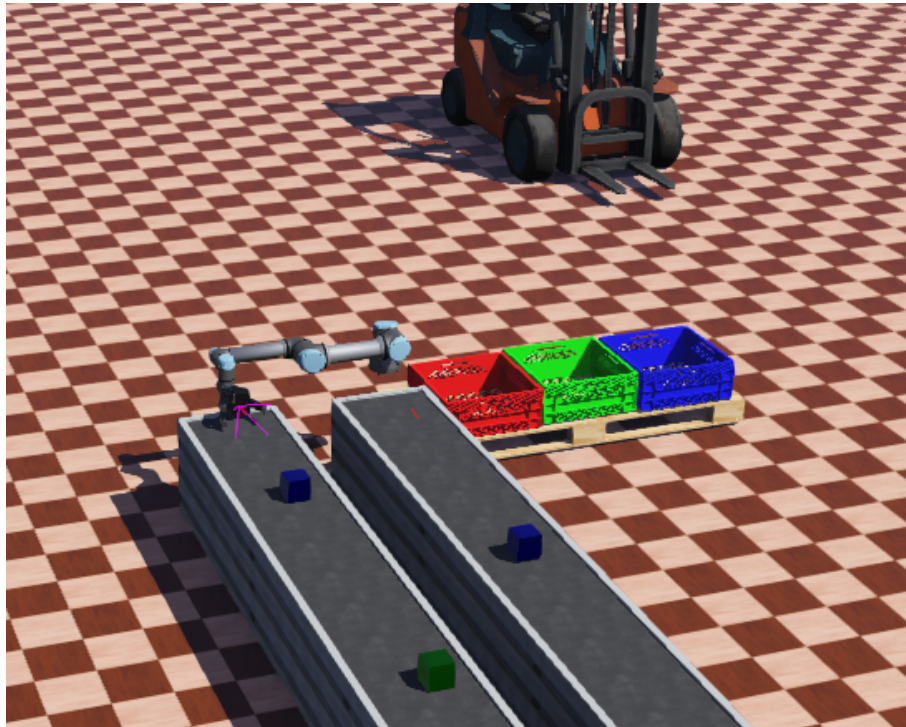
### Κώδικας δεύτερου σεναρίου

Ο κώδικας που χρησιμοποιείται στους δύο ρομποτικούς βραχίονες είναι ο ίδιος, καθώς και οι δύο κάνουν την ίδια διαδικασία και λειτουργούν κατά τον ίδιο τρόπο. Έχει γίνει η σχετική παραμετροποίηση προκειμένου να μπορούν οι δύο ρομποτικοί βραχίονες να δουλεύουν ταυτόχρονα. Επομένως ο κώδικας του ελεγκτή είναι αντίστοιχος του πρώτου σεναρίου και υπάρχει αναλυτικά στο Παράρτημα Α'.1

### 4.3.3 Τρίτο σενάριο λειτουργίας

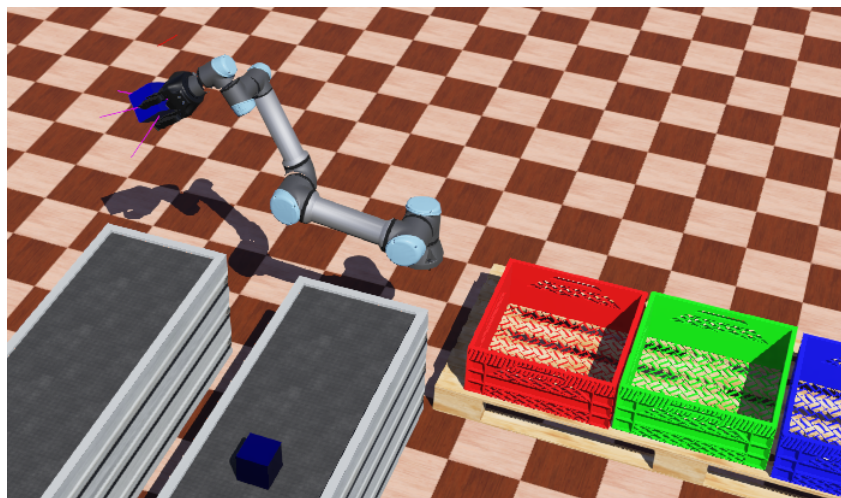
Το τρίτο σενάριο λειτουργίας διαφοροποιείται σε σχέση με τα δύο προηγούμενα σενάρια στην μορφοποίηση του. Εδώ υπάρχει ένας ρομποτικός βραχίονας UR και ένα τελικό σημείο τριών

αποθηκευτικών δοχείων, όμως υπάρχουν δύο ζώνες μεταφοράς αντικειμένων. Ο ρομποτικός βραχίονας, σε αυτήν την περίπτωση εξυπηρετεί και τους δύο διαδρόμους αντικειμένων. Ανάλογα με το ποιος διάδρομος έχει αντικείμενα πιο κοντά στο ρομπότ, εξυπηρετείται και πρώτος. Μια ενδεικτική διαμόρφωση του τρίτου σεναρίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.11.



Σχήμα 4.11: Διαμόρφωση του τρίτου σεναρίου στο λογισμικό Webots.

Το ρομπότ βρίσκεται σε μία αρχική θέση, όπου υποδέχεται αντικείμενα σε έναν συγκεκριμένο ίδιο διάδρομο και στο τέλος κάθε διαδρόμου υπάρχουν δύο αισθητήρες απόστασης. Αν το κοντινότερο αντικείμενο που γίνεται αντιληπτό από τους αισθητήρες βρίσκεται στην ζώνη μεταφοράς που ήδη είναι το ρομπότ, τότε παραμένει στην αρχική του θέση και ακολουθεί την διαδικασία που έχει αναλυθεί παραπάνω, δηλαδή "αρπάζει" το αντικείμενο, το μεταφέρει και το τοποθετεί στο τελικό σημείο στόχο (Σχήμα 4.12).

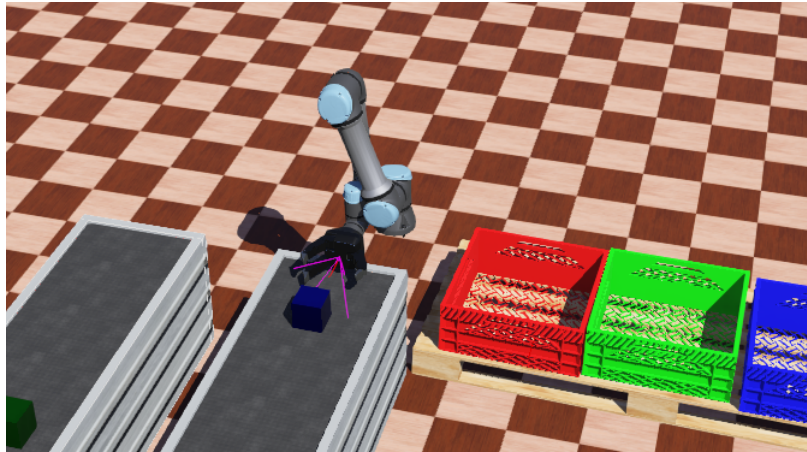


Σχήμα 4.12: Διαλογή αντικειμένου από τον πρώτο διάδρομο.

Αν τώρα το κοντινότερο αντικείμενο βρίσκεται στον δεύτερο, διπλανό διάδρομο και ανιχνευθεί

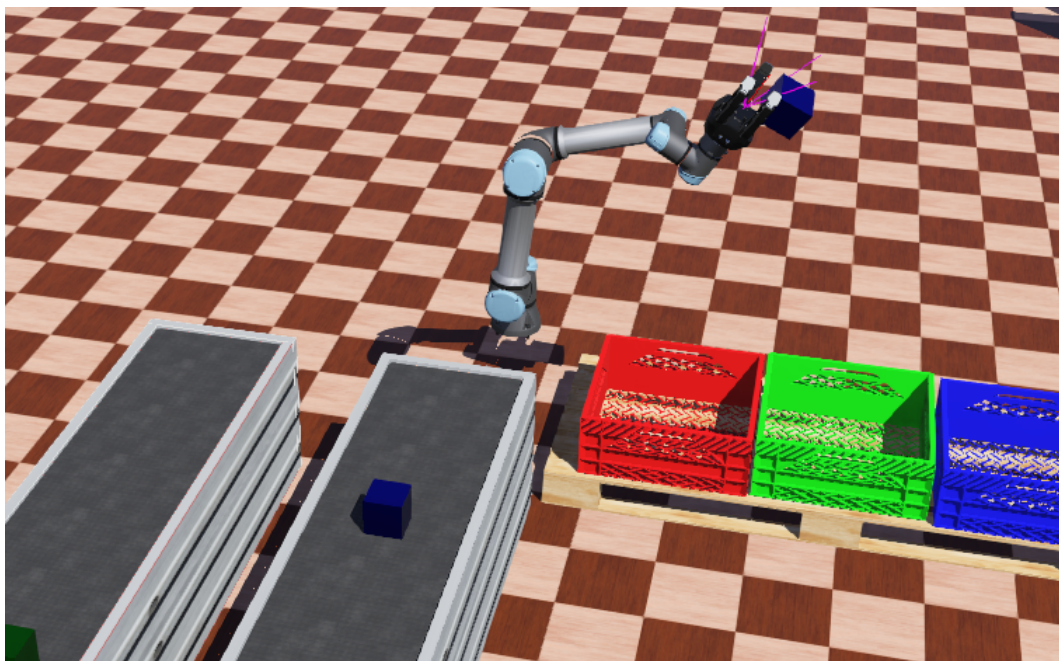


από τον δεύτερο αισθητήρα, τότε το ρομπότ μετακινείται και παίρνει νέα αρχική θέση με σκοπό να υποδεχθεί το αντικείμενο του δεύτερου διαδρόμου (Σχήμα 4.13).



Σχήμα 4.13: Διαλογή αντικειμένου από τον δεύτερο διάδρομο.

Στη συνέχεια, ακολουθείτε πάλι η ίδια διαδικασία όπου "αρπάζει" το αντικείμενο μεταφέρεται στα ίδια σημεία στόχους, ανάλογα με το χρώμα του και επιστρέφει στον πρώτο διάδρομο, στην αρχική θέση, δηλαδή, που είχε στην αρχή. Έτσι, αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της διαλογής ο ρομποτικός βραχίονα βρίσκεται στην πρώτη ζώνη μεταφοράς και περιμένει από τους δύο αισθητήρες απόστασης σήμα για να αποφανθεί αν θα αλλάξει αρχική θέση ή όχι. Τα τελικά σημεία εναπόθεσης είναι ίδια για κάθε ζώνης μεταφοράς και ο ρομποτικός βραχίονας αφήνει τα αντικείμενα στα ίδια τελικά σημεία είτε λάβει αντικείμενο από τον πρώτο διάδρομο είτε από τον δεύτερο. Γεγονός που σημαίνει, ότι το συγκεκριμένο μοντέλο έχει τα ίδια τρία σημεία στόχους, ανεξαρτήτως από που πήρε τα αντικείμενα το ρομπότ (Σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.14: Διαλογή και τοποθέτηση αντικειμένου ανεξαρτήτως διαδρόμου διαλογής.

Επίσης, κάθε ζώνη μεταφοράς έχει τοποθετημένο τον δικό της αισθητήρα απόστασης, έτσι ώστε το ρομπότ να ξέρει πόσο κοντά βρίσκεται το κάθε αντικείμενο που πλησιάζει στο τέλος της κάθε ζώνης. Προτεραιότητα δίνεται στον διάδρομο που ο αισθητήρας έχει μικρότερη τιμή,

δηλαδή εκεί που το αντικείμενο είναι πιο κοντά. Έτσι, αντιλαμβάνεται και ξέρει ο ρομποτικός βραχίονας, αν θα παραμείνει στην αρχική του θέση και στην πρώτη ζώνη μεταφοράς ή αν θα εξυπηρετήσει την δεύτερη ζώνη και θα αλλάξει η αρχική του θέση.

Σε περίπτωση που δύο αντικείμενα είναι κοντά τότε ο ρομποτικός βραχίονας επιλέγει να πάει στο πλησιέστερο αντικείμενο για να κάνει τη διαλογή. Τέλος ο ρομποτικός βραχίονας μετά από κάθε διαδικασία επιστρέφει στην πρώτη του και αρχική του θέση για να επαναλάβει την λειτουργία.

Εν ολίγοις έρχονται αντικείμενα και από τις δύο ζώνες μεταφοράς και το ρομπότ κάνει διαλογή το αντικείμενο που βρίσκεται πιο κοντά σε απόσταση ανάλογα με τις τιμές που δίνουν οι αισθητήρες. Όπως φαίνεται και παρακάτω ο ρομποτικός βραχίονας έχει την ίδια αρχική θέση και αλλάζει όταν έρχεται αντικείμενο από τον δεύτερο διάδρομο, μετά την διαδικασία επιστρέφει πάντα στην ίδια αρχική θέση όπως φαίνεται και στην παραπάνω φωτογραφία. Η τοποθέτηση γίνεται στα ίδια σημεία στόχους, ανεξαρτήτως από ποιόν διάδρομο προέρχεται το αντικείμενο.

### Κώδικας τρίτου σεναρίου

Ο κώδικας που χρησιμοποιείται στο τρίτο σενάριο έχει ανάλογη δομή με τον κώδικα των προηγούμενων σεναρίων. Η κύρια διαφορά έγκειται στις επιπλέον καταστάσεις (states) που υπάρχουν λόγω του επιπλέον διαδρόμου. Οι αρχικοποιήσεις και πολλά σημεία της κύριας συνάρτησης είναι ίδια, όμως, όπως φαίνεται και παρακάτω υπάρχει μια νέα ακολουθία καταστάσεων στον ελεγκτή για να μπορεί ο ρομποτικός βραχίονας να εξυπηρετεί και τις δύο ζώνες μεταφοράς. Αναλυτικά ο κώδικας υπάρχει στο Παράρτημα Α΄.2.

Αντίστοιχα, όπως και στον κώδικα του πρώτου μοντέλου, στην αρχή εισάγονται οι βιβλιοθήκες που χρειάζονται για να μπορούν να δηλωθούν και να λειτουργήσουν οι συναρτήσεις και οι συσκευές που χρησιμοποιούνται. Με την εντολή `wb_robot_init()`; αρχικοποιείται ο ρομποτικός βραχίονας. Οι εντολές `WbDeviceTag hand_motors[3]`; και `WbDeviceTag ur_motors[5]`; αρχικοποιούν τους κινητήρες που θα χρησιμοποιηθούν τόσο για τον ρομποτικό βραχίονα όσο και για την αρπάγη. Επίσης, δηλώνονται με αντίστοιχο τρόπο οι συσκευές που είναι προσαρτημένες στο τελικό άκρο του ρομπότ, και συγκεκριμένα ο αισθητήρας απόστασης και η κάμερα.

Σε αυτό το μοντέλο υπάρχουν δύο αισθητήρες συνδεδεμένοι με τον ρομποτικό βραχίονα, καθένας είναι υπεύθυνος για τον αντίστοιχο διάδρομο. `WbDeviceTag distance_sensor = wb_robot_get_device("sensor"); wb_distance_sensor_enable(distance_sensor, TIME_STEP);`, η δήλωση για τον πρώτο αισθητήρα του πρώτου διαδρόμου, `WbDeviceTag distance_sensor1 = wb_robot_get_device("sensor1"); wb_distance_sensor_enable(distance_sensor1, TIME_STEP);`, η δήλωση του δεύτερου αισθητήρα υπεύθυνου για τον δεύτερο διάδρομο.

Για την κάμερα χρησιμοποιείται και η εντολή `wb_camera_recognition_enable(camera, 2*TIME_STEP);`, με σκοπό να ενεργοποιηθεί η αναγνώριση των αντικειμένων, που θα είναι υπεύθυνη για τον διαχωρισμό των χρωμάτων. Προτού εισέλθει ο κώδικας στην κύρια επανάληψη, δηλώνονται και τα έξι σημεία στόχοι, για τα αντίστοιχα χρώματα, τα οποία δείχνουν πόσο πρέπει να μετακινηθεί κάθε κινητήρας του ρομποτικού βραχίονα, για να φτάσει στην θέση όπου θα "αφήσει" το αντικείμενο στο αποθηκευτικό δοχείο.

Τα τρία πρώτα είναι οι κινήσεις των κινητήρων όταν γίνεται διαλογή του αντικειμένου από την πρώτη ζώνη μεταφοράς, ενώ τα υπόλοιπα τρία είναι οι κινήσεις των κινητήρων όταν το γίνεται διαλογή του αντικειμένου από την δεύτερη ζώνη μεταφοράς. Να σημειωθεί ότι, τα σημεία στόχοι είναι τα ίδια και για την περίπτωση διαφορετικών διαδρόμων (καταλήγουν στην ίδια θέση). Δηλαδή το `target position1` και `target position4` "αφήνουν" το αντικείμενο στην ίδια θέση, παρά την διαφορετική κίνηση των κινητήρων. Αντίστοιχα και για τα `target`

**position** 2 και 5, όπως και 3 και 6. Αυτό συμβαίνει, γιατί οι αρχικές θέσεις των αριθρώσεων του ρομποτικού βραχίονα αλλάζουν ανάλογα με την ζώνη μεταφοράς που εξυπηρετεί.

Αφού πραγματοποιηθούν τα παραπάνω, ο κώδικας εισέρχεται στην κύρια επανάληψη, η οποία επαναλαμβάνεται μέχρι να τερματιστεί η προσομοίωση. Εκεί εκτυπώνονται διαρκώς οι τιμές των αισθητήρων απόστασης και τα αντικείμενα που αναγνωρίζονται από την κάμερα. Στη συνέχεια μπαίνει ο κώδικας, σε μία από τις δύο ακολουθίες καταστάσεων (*states*) που έχουν δηλωθεί στην αρχή του προγράμματος, μία σειρά από καταστάσεις που λειτουργούν όταν ο ρομποτικός βραχίονας δουλεύει από την πρώτη ζώνη μεταφοράς και άλλη μία σειρά από καταστάσεις για την δεύτερη ζώνη μεταφοράς.

Με την εντολή `if(distance_sensor_value1 < 1000)`, το ρομπότ αναγνωρίζει ότι ο αισθητήρας του δεύτερου διαδρόμου έχει τιμή μικρότερη του πρώτου, άρα έρχεται αντικείμενο από τον δεύτερο διάδρομο. Έτσι, μπαίνει στην ακολουθία των καταστάσεων του δεύτερου διαδρόμου για να κάνει την διαλογή και τοποθέτησης. Αν η παραπάνω συνθήκη είναι ψευδής τότε το ρομπότ παραμένει στην αρχική θέση και περιμένει αντικείμενα από τον πρώτο διάδρομο μέχρι η συνθήκη να γίνει αληθής. Πιο συγκεκριμένα, αν ισχύει η λογική συνθήκη `EAN (if)`, που είδαμε παραπάνω και η συνθήκη είναι αληθής ο κώδικας μπαίνει στο **state** `STARTING_POS`, όπου οι κινητήρες του βραχίονα παίρνουν τις κατάλληλες τιμές για να μεταφερθεί σε θέση από όπου θα κάνει την διαλογή στη δεύτερη ζώνη μεταφοράς και θα προχωρήσει στο επόμενο **state** `WAITING`.

Το ρομπότ θα περιμένει στην θέση που έχει μεταφερθεί, μέχρι να αναγνωριστεί αντικείμενο από τον αισθητήρα και να ισχύει η συνθήκη (`if (wb_distance_sensor_get_value(distance_sensor) < -2.3)`), που ειδοποιεί τους κινητήρες της αρπάγης να κάνουν την διαδικασία διαλογής (στον δεύτερο διάδρομο). Στο επόμενο **GRASPING state** ο ρομποτικός βραχίονας κινείται μέχρι να φτάσει το σημείο στόχο, που αντιστοιχεί στο χρώμα που αναγνωρίζει η κάμερα. Μετά, στο **ROTATING state**, ο ρομποτικός βραχίονας φτάνει στην κατάλληλη θέση και ορίζονται οι κινητήρες της αρπάγης, με σκοπό να τοποθετηθεί το αντικείμενο στο αντίστοιχο αποθηκευτικό δοχείο.

Έπειτα, ο ρομποτικός βραχίονας κινείται προς την αρχική του θέση στον πρώτο διάδρομο, εκεί όπου μπαίνει στο τελευταίο **state** `ROTATING_BACK`, το οποίο είναι το τελευταίο και πλέον οι κινητήρες του ρομποτικού βραχίονα επιστρέφουν στις αρχικές τους τιμές. Αφού γίνει όλη αυτή η διαδικασία ο κώδικας επιστρέφει πίσω για να εξετάσει ξανά αν η αρχική συνθήκη `if(distance_sensor_value1 < 1000)` είναι αληθής ή ψευδής. Όταν η συνθήκη είναι ψευδής σημαίνει ότι η τιμή του αισθητήρα στην πρώτη ζώνη μεταφοράς είναι μικρότερη και το ρομπότ θα μείνει να εκτελέσει τις καταστάσεις από την αρχική του θέση.

Αρχικά ξεκινάει και περιμένει στο **WAITING1 state**, όπου είναι η αρχική θέση του ρομποτικού βραχίονα όταν δεν έχει πλησιάσει αρκετά κάποιο αντικείμενο. Αν ισχύει η συνθήκη (`wb_distance_sensor_get_value(distance_sensor) < 100`), τότε ο κώδικας προχωράει στο επόμενο **State**, **GRASPING1** και ορίζονται οι τιμές που πρέπει να πάρουν οι κινητήρες της αρπάγης για να πιάσουν το αντικείμενο. Στην επόμενη κατάσταση αναγνωρίζεται το αντικείμενο και το χρώμα του και καθορίζεται σε ποιο σημείο στόχο θα κινηθούν οι κινητήρες του ρομποτικού βραχίονα. Αφού γίνουν αυτά προχωράει στο **ROTATING1**.

Εδώ αν ισχύει η συνθήκη (`wb_position_sensor_get_value(position_sensor) < -2.3`), τότε σημαίνει ότι ο ρομποτικός βραχίονας έχει φτάσει στην θέση που πρέπει για να "αφήσει" το αντικείμενο. Δίνει τις κατάλληλες τιμές στους κινητήρες της αρπάγης για να ανοίξουν τα δάχτυλα και προχωράει στην επόμενη κατάσταση **RELEASING1**. Ο ρομποτικός βραχίονας επιστρέφει στην αρχική του θέση, με την εντολή `for (i = 0; i < 5; ++iwb_motor_set_position(ur_motors[i] 0.0);` και προχωράει στο **State** `ROTATING_BACK1`.

Εκεί, μόλις ολοκληρωθούν όλες οι εντολές επιστρέφει στην αρχική του θέση. Αφού τελειώσει

η ακολουθία των καταστάσεων γίνεται έλεγχος της αρχικής συνθήκης της τιμής των αισθητήρων. Αυτό θα γίνεται όσο υπάρχουν αντικείμενα σε κάποια από τις δύο ζώνες μεταφοράς και όσο διαρκεί η προσομοίωση, μέχρι δηλαδή να τερματιστεί. Το διάγραμμα ροής του τρίτου σεναρίου παρουσιάζεται στα Σχήματα 4.15 και 4.16.

54





Σχήμα 4.16: Διάγραμμα Ροής του Σεναρίου 3 (Μέρος β).

## Κεφάλαιο 5

# Πειραματική διαδικασία

Προκειμένου να μελετηθούν διαφορετικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας των τριών διαφορετικών σεναρίων λειτουργίας, που δημιουργήθηκαν και περιγράφηκαν αναλυτικά στο κεφάλαιο 4, καθώς και να γίνει μια συγκριτική αξιολόγηση, έγιναν διάφορες παραδοχές σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας τους, αλλά και με το κόστος ανάπτυξης. Εκτιμήθηκαν τρία διαφορετικά κόσθη εγκατάστασης και διαφορετικές χρονικές τιμές στις οποίες λειτουργούν βέλτιστα, άρα έχουν δυνητικά και διαφορετικούς χρόνους παραγωγής.

Στη συνέχεια θα δημιουργηθούν σενάρια ελέγχου, στα οποία θα αναλυθούν τα τρία μοντέλα/συστήματα και θα βρεθούν οι οριακοί τους χρόνοι.

Σκοπός της πειραματικής αυτής διαδικασίας είναι να βρεθούν οι οριακές τιμές, στις οποίες μπορεί το κάθε μοντέλο να λειτουργεί βέλτιστα και σε σωστούς χρόνους παραγωγής, συναρτήσει του μέσου υποθετικού κόστους της εγκατάστασης και παραγωγής του κάθε μοντέλου. Έτσι, θα πραγματοποιηθεί μια οικονομοτεχνική σύγκριση των τριών σεναρίων λειτουργίας, έχοντας ως βασικό στοιχείο διαφοροποίησης την διαμόρφωση τους.

Θα εξεταστούν στο κάθε μοντέλο υποθετικά σενάρια ελέγχου λαμβάνοντας υπόψιν δυο κύριους παράγοντες, τους ρυθμούς άφιξης των αντικειμένων στον ρομποτικό βραχίονα και την σειρά άφιξης των αντικειμένων. Θα δοκιμαστούν αιτιοκρατικές αφίξεις και στοχαστικές αφίξεις αντικειμένων σε τρεις διαφορετικούς χρόνους άφιξης και θα βρεθούν οι χρόνοι παραγωγής υποθετικών τεμαχίων. Με αυτόν τον τρόπο θα βρεθούν και οι οριακές τιμές άφιξης των αντικειμένων στις οποίες μπορεί να ανταποκριθεί το κάθε μοντέλο/σύστημα.

Για την δημιουργία ενός θεωρητικού τεμαχίου, χρειάζονται 2 αντικείμενα από το κάθε χρώμα. Δηλαδή, μετά από την διεργασία διαλογής και τοποθέτησης που εκτελεί ο ρομποτικός βραχίονας θα πρέπει να βρίσκονται στα αποθηκευτικά δοχεία 2 μπλε, 2 πράσινα, 2 κόκκινα αντικείμενα για να δημιουργηθεί ένα τεμάχιο. Ο χρόνος που χρειάζεται το κάθε μοντέλο για να ολοκληρώσει αυτήν την διαδικασία είναι ο χρόνος παραγωγής ενός τεμαχίου. Για το κάθε μοντέλο θα έχει υπολογιστεί ένα μέσο κόστος εγκατάστασης, το οποίο σε συνδυασμό με τους χρόνους των 3 συστημάτων και κυρίως των οριακών τους τιμών θα καταλήγουν στον τέλος στην σύγκριση των τριών χωροταξικών μοντέλων.

### 5.1 Δημιουργία σεναρίων ελέγχου

Τα σενάρια ελέγχου θα δημιουργηθούν με βάση δύο παράγοντες όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Οι δύο παράγοντες θα είναι:

- Σειρά άφιξης αντικειμένων: Θα εξεταστούν δύο διαφορετικές σειρές άφιξης. Μία προκαθορισμένη σειρά, δηλαδή ένας αιτιοκρατικός ρυθμός άφιξης. Τα τρία χρώματα θα

διαδέχονται το ένα το άλλο με μια συγκεκριμένη σειρά που δεν θα αλλάζει στην διάρκεια της προσομοίωσης. Η σειρά αυτή θα είναι 1-μπλε, 2-πράσινο, 3-κόκκινο. Σε όλη την διάρκεια αυτής της διαδικασίας η σειρά με την οποία θα έρχονται τα αντικείμενα, δεν θα αλλάξει. Η άλλη σειρά άφιξης θα είναι με βάση στοχαστικές αφίξεις, στην οποία τα αντικείμενα έρχονται τυχαία, με βάση μία συγκεκριμένη πιθανότητα για το κάθε χρώμα. Συγκεκριμένα η πιθανότητα να εμφανιστεί μπλε αντικείμενο είναι  $3/10$ , πράσινο  $3/10$  και κόκκινο  $4/10$ . Επομένως η σειρά που θα εμφανίζονται και θα προχωρούν τα αντικείμενα στον ταινιόδρομο θα είναι τυχαία μεν, αλλά τα αντικείμενα ακολουθούν μια συγκεκριμένη κατανομή όσον αφορά την πιθανότητα να βρίσκονται στην σειρά. Επειδή αυτή η σειρά μπορεί να έρχεται επ'άπειρον, για διευκόλυνση της διαδικασίας, θα υπάρχει μια στοχαστική σειρά μεγέθους 30 αντικειμένων. Η παραγωγή της κάθε σειράς θα γίνεται εκ νέου κάθε φορά που γίνεται χρονομέτρηση και προσομοίωση. Ο χρόνος παραγωγής ενός τεμαχίου θα είναι και σε αυτήν την περίπτωση ο χρόνος που χρειάζεται για να βρεθούν τουλάχιστον 2-μπλε, 2-πράσινα και 2-κόκκινα στα αποθηκευτικά δοχεία.

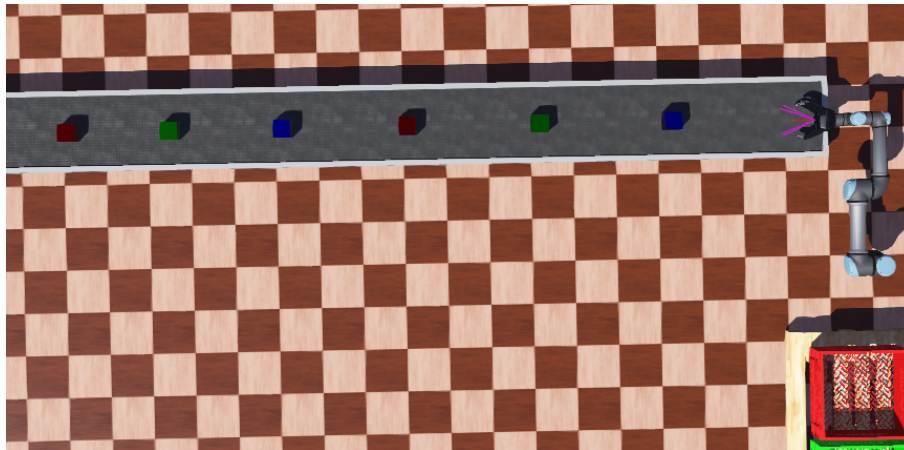
- Ρυθμοί άφιξης των αντικειμένων: Θα εξεταστούν τρεις διαφορετικοί ρυθμοί άφιξης αντικειμένων. Ο χρόνος δηλαδή που περνάει από την στιγμή που γίνεται διαλογή ενός αντικειμένου μέχρι την στιγμή που θα γίνει διαλογή του επόμενου ή αλλιώς η χρονική απόσταση που έχει το ένα αντικείμενο από το άλλο. Οι ρυθμοί άφιξης θα είναι 1-αντικείμενο/5-δευτερόλεπτα, 1-αντικείμενο/10-δευτερόλεπτα και 1-αντικείμενο/18-δευτερόλεπτα. Οι ρυθμοί άφιξης αναφέρονται στον συνολικό ρυθμό άφιξης του συστήματος και όχι στον ρυθμό άφιξης του κάθε ταινιόδρομου. Επομένως, στα μοντέλα με δύο ταινιόδρομους ο συνολικός ρυθμός άφιξης θα ισχύει για τα αντικείμενα του συστήματος συνολικά, δηλαδή και των δύο διαδρόμων.

Μετά το πέρας των μετρήσεων των σεναρίων ελέγχου και της χρονομέτρησης των ρυθμών παραγωγής, θα βρεθεί και η οριακή τιμή μέσης συνολικής άφιξης για το κάθε μοντέλο. Από εκείνη την τιμή και κάτω το μοντέλο υπολειτουργεί και δεν μπορεί ο ρομποτικός βράχιονας του συγκεκριμένου μοντέλου να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της προσομοίωσης. Επομένως, αν χρειαστεί το συγκεκριμένο μοντέλο να λειτουργήσει σε μικρότερες χρονικές συνθήκες από την οριακή τιμή, τότε δεν συστήνεται για μία τέτοια γραμμή παραγωγής.

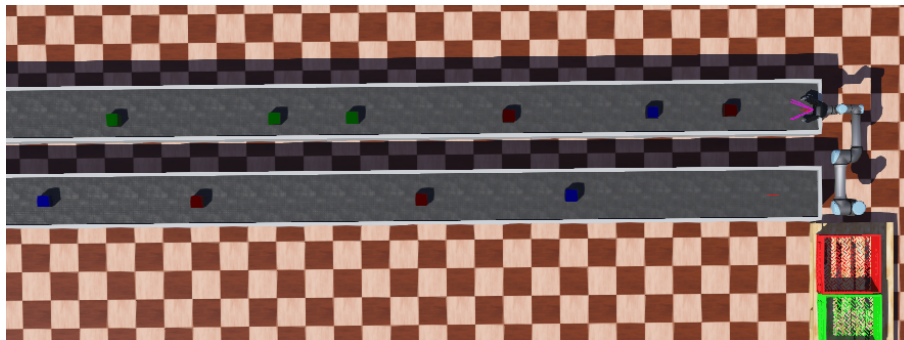
Τα σενάρια που θα μελετηθούν για το κάθε μοντέλο ξεχωριστά είναι τα εξής:

- Πρώτο σενάριο: αιτιοκρατική άφιξη 1-μπλε, 2-πράσινο, 3-κόκκινο και με μέσο ρυθμό συνολικής άφιξης περίπου 1 αντικείμενο/12 sec για την παραγωγή ενός τεμαχίου (2 μπλε, 2 πράσινα, 2 κόκκινα).
- Δεύτερο σενάριο: αιτιοκρατική άφιξη 1-μπλε, 2-πράσινο, 3-κόκκινο και με μέσο ρυθμό συνολικής άφιξης περίπου 1 αντικείμενο/5 sec , για την παραγωγή ενός τεμαχίου (2 μπλε, 2 πράσινα, 2 κόκκινα).
- Τρίτο σενάριο: αιτιοκρατική άφιξη 1-μπλε, 2-πράσινο, 3-κόκκινο και με μέσο ρυθμό συνολικής άφιξης περίπου 1 αντικείμενο/18 sec , για την παραγωγή ενός τεμαχίου (2 μπλε, 2 πράσινα, 2 κόκκινα).
- Τέταρτο σενάριο: στοχαστική άφιξη με πιθανότητες  $K(4/10)$ ,  $M(3/10)$ ,  $\Pi(3/10)$  και με μέσο ρυθμό συνολικής άφιξης περίπου 1 αντικείμενο/12 sec , για την παραγωγή ενός τεμαχίου (2 μπλε, 2 πράσινα, 2 κόκκινα).
- Πέμπτο σενάριο: στοχαστική άφιξη με πιθανότητες  $K(4/10)$ ,  $M(3/10)$ ,  $\Pi(3/10)$  και με μέσο ρυθμό συνολικής άφιξης περίπου 1 αντικείμενο/5 sec , για την παραγωγή ενός τεμαχίου (2 μπλε, 2 πράσινα, 2 κόκκινα).
- Έκτο σενάριο: στοχαστική άφιξη με πιθανότητες  $K(4/10)$ ,  $M(3/10)$ ,  $\Pi(3/10)$  και με μέσο ρυθμό συνολικής άφιξης περίπου 1 αντικείμενο/18 sec , για την παραγωγή ενός

τεμαχίου (2 μπλε, 2 πράσινα, 2 κόκκινα).



Σχήμα 5.1: Αιτιοκρατικές αφίξεις σε ένα από τα σενάρια στην προσομοίωση στο λογισμικό Webots.



Σχήμα 5.2: Στοχαστικές αφίξεις σε ένα από τα σενάρια στην προσομοίωση στο λογισμικό Webots.

## 5.2 Μεθοδολογία και μετρήσεις

Αρχικά βρέθηκαν τα προσεγγιστικά κόστη για την εγκατάσταση μίας θεωρητικής μονάδας / σταθμού παραγωγής, σαν αυτόν που περιγράφουν και προσομοιώνουν τα μοντέλα. Δηλαδή τις τιμές που έχουν τα δομικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη προσομοίωση, σε ένα πραγματικό εργοστάσιο που εκτελεί την αντίστοιχη λειτουργία διαλογής. Οι τιμές που ακολουθούν για τα εργαλεία και τις συσκευές είναι προσεγγιστικές και αντιστοιχούν σε μέση τιμή των κοστολογήσεων που μπορεί να υπάρχουν.

- Ρομποτικός βραχίονας UR5e  $\approx$  \$30.000
- Αρπάγη 3-F Robotiq Gripper  $\approx$  \$20.000
- Ταινιόδρομος (Conveyor belt)  $\approx$  \$3.000/meter
- Δοχείο αποθήκευσης (Plastic crate)  $\approx$  \$7
- Ξύλινη Παλέτα  $\approx$  \$5

Στη συνέχεια, όπως φαίνεται και παρακάτω θα διαμορφωθούν τα τρία σενάρια λειτουργίας στις συνθήκες των έξι σεναρίων ελέγχου και θα χρονομετρηθούν για να βρεθούν οι παραγωγικοί χρόνοι των μοντέλων σε κάθε σενάριο. Μαζί με τους χρόνους που θα καταγραφούν στις αντίστοιχες συνθήκες των σεναρίων ελέγχου, θα υπολογιστεί και ένα προσεγγιστικό κόστος για την εγκατάσταση του κάθε μοντέλου, έτσι ώστε να μπορούν να συγκριθούν τα μοντέλα εκτός από χωροταξικά αλλά και οικονομοτεχνικά.

Τέλος για το κάθε μοντέλο αφού γίνουν οι μετρήσεις θα βρεθούν πειραματικά και προσεγγιστικά οι οριακοί χρόνοι των τριών διαμορφώσεων, δηλαδή οι χρόνοι κάτω από τους οποίους τα μοντέλα δεν είναι λειτουργικά, δηλαδή δεν μπορούν να ανταποκριθούν στα δεδομένα του συγκεκριμένου περιβάλλοντος προσομοίωσης.

Η χρονομέτρηση κατά την διάρκεια της προσομοίωσης του κάθε σεναρίου γίνεται μέσα από το περιβάλλον του Webots, όπου υπάρχει μετρητής εγκατεστημένος για την χρονομέτρηση της προσομοίωσης. Για την ακολουθία εμφάνισης των αντικειμένων με στοχαστική άφιξη θα χρησιμοποιηθεί "γεννήτρια", που για κάθε προσομοίωση θα δημιουργεί μία καινούρια ακολουθία στοχαστικής άφιξης, σύμφωνα με τις πιθανότητες εμφάνισης του κάθε χρώματος που έχουν δοθεί στον κώδικα ως δεδομένα. Ο αριθμός της ακολουθίας κάθε φορά θα είναι τα 30 αντικείμενα, έτσι ώστε το δείγμα να είναι αρκετό για να υπάρχει νόημα και στην στοχαστική ακολουθία αλλά και στην προσομοίωση. Αφού η χρονομέτρηση γίνεται για δημιουργία ενός τεμαχίου 6 αντικειμένων, τα 30 αντικείμενα της ακολουθίας είναι αρκετά. Ο κώδικας που είναι υπεύθυνος για την δημιουργία των ακολουθιών παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Η χρονομέτρηση των μοντέλων στο κάθε σενάριο ελέγχου γίνεται για να βρεθεί ο χρόνος, που χρειάζεται ο ρομποτικός βραχίονας να εκτελέσει τις διεργασίες, ώστε να δημιουργηθεί ένα τελικό τεμάχιο. Για την δημιουργία ενός τελικού τεμαχίου χρειάζονται να βρίσκονται στα αποθηκευτικά δοχεία 2 κόκκινα αντικείμενα, 2 μπλε αντικείμενα και 2 πράσινα. Επομένως, ο χρόνος παραγωγής ενός τεμαχίου είναι το χρονικό διάστημα από την έναρξη της προσομοίωσης μέχρι τη στιγμή που ο ρομποτικός βραχίονας, "τοποθετήσει" το τελευταίο αντικείμενο στο αποθηκευτικό δοχείο του αντίστοιχου χρώματος, το οποίο είναι απαραίτητο για τη δημιουργία του τεμαχίου.

Η ακολουθία στοχαστικής άφιξης του κάθε σεναρίου θα δηλώνεται με την σειρά που βγαίνει από τη "γεννήτρια", αλλά για διευκόλυνση θα δηλώνονται τα χρώματα των αντικειμένων μόνο με το αρχικό γράμμα. Δηλαδή "Π" για το πράσινο, "Κ" για το κόκκινο και "Μ" για το μπλε. Παράδειγμα δήλωσης ακολουθίας, όπως θα γίνει και παρακάτω είναι: "ΠΚΜΠΠΜΜΚΠΜ..." κ.ο.κ.

### 5.2.1 Πρώτο μοντέλο

Το συνολικό κόστος εγκατάστασης του συγκεκριμένου μοντέλου, που αποτελείται από έναν ρομποτικό βραχίονα, μία αρπάγη, έναν ταινιόδρομο μήκους 9 μέτρων, 3 αποθηκευτικά δοχεία και μία παλέτα, ανέρχεται προσεγγιστικά στα: \$77.026.

#### Πρώτο σενάριο ελέγχου

Στο πρώτο σενάριο επικρατεί αιτιοκρατική άφιξη σειράς 1-μπλε, 2-πράσινο, 3-κόκκινο, με μέσο συνολικό ρυθμό άφιξης αντικειμένων του συστήματος περίπου 1 αντικείμενο/12 sec. Για να παράγει το σύστημα ένα τελικό τεμάχιο, που χρειάζεται 2 κόκκινα, 2 μπλε και 2 πράσινα αντικείμενα τοποθετημένα στις τελικές θέσεις, απαιτείται "χρόνος παραγωγής" 1min και 23sec.

#### Δεύτερο σενάριο ελέγχου

Στο δεύτερο σενάριο επικρατεί αιτιοκρατική άφιξη σειράς 1-μπλε, 2-πράσινο, 3-κόκκινο, με μέσο συνολικό ρυθμό άφιξης αντικειμένων του συστήματος περίπου 1 αντικείμενο/5 sec. Για να παράγει το σύστημα ένα τελικό τεμάχιο χρειάζεται 2 κόκκινα, 2 μπλε και 2 πράσινα αντικείμενα τοποθετημένα στις τελικές θέσεις. Στον συγκεκριμένο ρυθμό άφιξης το συγκεκριμένο μοντέλο αδυνατεί να παράγει τελικό τεμάχιο, καθώς δεν είναι λειτουργικό σε αυτούς τους χρόνους.

#### Τρίτο σενάριο ελέγχου

Στο τρίτο σενάριο επικρατεί αιτιοκρατική άφιξη σειράς 1-μπλε, 2-πράσινο, 3-κόκκινο, με μέσο συνολικό ρυθμό άφιξης αντικειμένων του συστήματος περίπου 1 αντικείμενο/18 sec. Για να παράγει το σύστημα ένα τελικό τεμάχιο, που χρειάζεται 2 κόκκινα, 2 μπλε και 2 πράσινα αντικείμενα τοποθετημένα στις τελικές θέσεις, απαιτείται "χρόνος παραγωγής" 1min και 48sec.

#### Τέταρτο σενάριο ελέγχου

Στο τέταρτο σενάριο επικρατεί στοχαστική άφιξη με πιθανότητες  $K(4/10)$ ,  $M(3/10)$ ,  $\Pi(3/10)$  σειράς "ΠΚΠΠΠΜΜΠΠΜΠΚΜΜΚΠΜΜΜΚΠΚΚΚΚΚΚΜΠ" και μέσο συνολικό ρυθμό άφιξης αντικειμένων του συστήματος περίπου 1 αντικείμενο/12 sec. Για να παράγει το σύστημα ένα τελικό τεμάχιο, που χρειάζεται 2 κόκκινα, 2 μπλε και 2 πράσινα αντικείμενα τοποθετημένα στις τελικές θέσεις, απαιτείται "χρόνος παραγωγής" 2min και 29sec.

#### Πέμπτο σενάριο ελέγχου

Στο πέμπτο σενάριο επικρατεί στοχαστική άφιξη με πιθανότητες  $K(4/10)$ ,  $M(3/10)$ ,  $\Pi(3/10)$  σειράς "ΠΠΚΚΠΜΠΜΚΜΚΚΜΠΚΠΠΚΜΜΚΜΠΚΠΠΠΚΠ" και μέσο συνολικό ρυθμό άφιξης αντικειμένων του συστήματος περίπου 1 αντικείμενο/5 sec. Για να παράγει το σύστημα ένα τελικό τεμάχιο χρειάζεται 2 κόκκινα, 2 μπλε και 2 πράσινα αντικείμενα τοποθετημένα στις τελικές θέσεις. Στον συγκεκριμένο ρυθμό άφιξης το συγκεκριμένο μοντέλο αδυνατεί να παράγει τελικό τεμάχιο, καθώς δεν είναι λειτουργικό σε αυτούς τους χρόνους.

#### Έκτο σενάριο ελέγχου

Στο έκτο σενάριο επικρατεί στοχαστική άφιξη με πιθανότητες  $K(4/10)$ ,  $M(3/10)$ ,  $\Pi(3/10)$  σειράς "ΚΚΚΠΚΠΚΜΠΜΠΚΚΜΚΚΜΠΚΜΚΚΚΚΚΜΜΠΠΠ" και μέσο συνολικό ρυθμό άφιξης αντικειμένων του συστήματος περίπου 1 αντικείμενο/18 sec. Για να παράγει το σύστημα

ένα τελικό τεμάχιο, που χρειάζεται 2 κόκκινα, 2 μπλε και 2 πράσινα αντικείμενα τοποθετημένα στις τελικές θέσεις, απαιτείται "χρόνος παραγωγής" 3min και 3sec.

### **Οριακό σημείο**

Αφού δοκιμαστούν όλα τα σενάρια και βρεθεί σε ποιες τιμές χρονικής άφιξης το μοντέλο είναι λειτουργικό και σε ποιες όχι, μπορεί να βρεθεί η τιμή μέσης χρονικής άφιξης πάνω από την οποία το σύστημα είναι λειτουργικό. Έπειτα από δοκιμές βρέθηκε προσεγγιστικά ότι το οριακό σημείο του πρώτου μοντέλου είναι για μέση τιμή άφιξης του συστήματος: 1 αντικείμενο/6.5 sec.

### **5.2.2 Δεύτερο μοντέλο**

Το συνολικό κόστος εγκατάστασης του συγκεκριμένου μοντέλου, που αποτελείται από δύο ρομποτικούς βραχίονες, δύο αρπάγες, δύο ταινιόδρομους μήκους 9 μέτρων ο καθένας, 6 αποθηρευτικά δοχεία και δύο παλέτες, ανέρχεται προσεγγιστικά στα: \$154.052.

#### **Πρώτο σενάριο ελέγχου**

Στο πρώτο σενάριο επικρατεί αιτιοκρατική άφιξη σειράς 1-μπλε, 2-πράσινο, 3-κόκκινο, με μέσο συνολικό ρυθμό άφιξης αντικειμένων του συστήματος περίπου 1 αντικείμενο/12 sec. Για να παράγει το σύστημα ένα τελικό τεμάχιο, που χρειάζεται 2 κόκκινα, 2 μπλε και 2 πράσινα αντικείμενα τοποθετημένα στις τελικές θέσεις, απαιτείται "χρόνος παραγωγής" 1min και 22sec.

#### **Δεύτερο σενάριο ελέγχου**

Στο δεύτερο σενάριο επικρατεί αιτιοκρατική άφιξη σειράς 1-μπλε, 2-πράσινο, 3-κόκκινο, με μέσο συνολικό ρυθμό άφιξης αντικειμένων του συστήματος περίπου 1 αντικείμενο/5 sec. Για να παράγει το σύστημα ένα τελικό τεμάχιο, που χρειάζεται 2 κόκκινα, 2 μπλε και 2 πράσινα αντικείμενα τοποθετημένα στις τελικές θέσεις, απαιτείται "χρόνος παραγωγής" 31sec.

#### **Τρίτο σενάριο ελέγχου**

Στο τρίτο σενάριο επικρατεί αιτιοκρατική άφιξη σειράς 1-μπλε, 2-πράσινο, 3-κόκκινο, με μέσο συνολικό ρυθμό άφιξης αντικειμένων του συστήματος περίπου 1 αντικείμενο/18 sec. Για να παράγει το σύστημα ένα τελικό τεμάχιο, που χρειάζεται 2 κόκκινα, 2 μπλε και 2 πράσινα αντικείμενα τοποθετημένα στις τελικές θέσεις, απαιτείται "χρόνος παραγωγής" 1min και 46sec.

#### **Τέταρτο σενάριο ελέγχου**

Στο τέταρτο σενάριο επικρατεί στοχαστική άφιξη με πιθανότητες  $K(4/10)$ ,  $M(3/10)$ ,  $\Pi(3/10)$  σειράς "ΜΜΚΚΠΠΜΚΚΚΚΠΚΜΚΚΜΜΚΚΚΠΚΜΜΠΚΚΚΠ" και μέσο συνολικό ρυθμό άφιξης αντικειμένων του συστήματος περίπου 1 αντικείμενο/12 sec. Για να παράγει το σύστημα ένα τελικό τεμάχιο, που χρειάζεται 2 κόκκινα, 2 μπλε και 2 πράσινα αντικείμενα τοποθετημένα στις τελικές θέσεις, απαιτείται "χρόνος παραγωγής" 1min και 46sec.

#### **Πέμπτο σενάριο ελέγχου**

Στο πέμπτο σενάριο επικρατεί στοχαστική άφιξη με πιθανότητες  $K(4/10)$ ,  $M(3/10)$ ,  $\Pi(3/10)$  σειράς "ΚΠΜΚΜΜΚΠΜΚΚΠΜΜΜΜΠΜΜΚΠΜΠΚΚΠΜΠΠΚ" και μέσο συνολικό ρυθμό άφιξης αντικειμένων του συστήματος περίπου 1 αντικείμενο/5 sec. Για να παράγει το σύστημα

ένα τελικό τεμάχιο, που χρειάζεται 2 κόκκινα, 2 μπλε και 2 πράσινα αντικείμενα τοποθετημένα στις τελικές θέσεις, απαιτείται "χρόνος παραγωγής" 42sec.

### **Έκτο σενάριο ελέγχου**

Στο έκτο σενάριο επικρατεί στοχαστική άφιξη με πιθανότητες K(4/10), M(3/10), Π(3/10) σειράς "ΠΚΠΚΠΜΚΚΚΚΜΠΜΠΜΜΠΚΚΚΠΚΚΜΜΚΚΚΚΜ" και μέσο συνολικό ρυθμό άφιξης αντικειμένων του συστήματος περίπου 1 αντικείμενο/18 sec. Για να παράγει το σύστημα ένα τελικό τεμάχιο, που χρειάζεται 2 κόκκινα, 2 μπλε και 2 πράσινα αντικείμενα τοποθετημένα στις τελικές θέσεις, απαιτείται "χρόνος παραγωγής" 3min και 28sec.

### **Οριακό σημείο**

Αφού δοκιμαστούν όλα τα σενάρια και βρεθεί σε ποιες τιμές χρονικής άφιξης το μοντέλο είναι λειτουργικό και σε ποιες όχι, μπορεί να βρεθεί η τιμή μέσης χρονικής άφιξης πάνω από την οποία το σύστημα είναι λειτουργικό. Έπειτα από δοκιμές βρέθηκε προσεγγιστικά ότι το οριακό σημείο του δεύτερου μοντέλου είναι για μέση τιμή άφιξης του συστήματος: 1 αντικείμενο/2 sec.

### **5.2.3 Τρίτο μοντέλο**

Το συνολικό κόστος εγκατάστασης του συγκεκριμένου μοντέλου, που αποτελείται από έναν ρομποτικό βραχίονα, μία αρπάγη, δύο ταινιόδρομους μήκους 9 μέτρων ο καθένας, 3 αποθηκευτικά δοχεία και μία παλέτα, ανέρχεται προσεγγιστικά στα: \$104.026.

### **Πρώτο σενάριο ελέγχου**

Στο πρώτο σενάριο επικρατεί αιτιοκρατική άφιξη σειράς 1-μπλε, 2-πράσινο, 3-κόκκινο, με μέσο συνολικό ρυθμό άφιξης αντικειμένων του συστήματος περίπου 1 αντικείμενο/12 sec. Για να παράγει το σύστημα ένα τελικό τεμάχιο χρειάζεται 2 κόκκινα, 2 μπλε και 2 πράσινα αντικείμενα τοποθετημένα στις τελικές θέσεις. Στον συγκεκριμένο ρυθμό άφιξης το συγκεκριμένο μοντέλο αδυνατεί να παράγει τελικό τεμάχιο, καθώς δεν είναι λειτουργικό σε αυτούς τους χρόνους.

### **Δεύτερο σενάριο ελέγχου**

Στο δεύτερο σενάριο επικρατεί αιτιοκρατική άφιξη σειράς 1-μπλε, 2-πράσινο, 3-κόκκινο, με μέσο συνολικό ρυθμό άφιξης αντικειμένων του συστήματος περίπου 1 αντικείμενο/5 sec. Για να παράγει το σύστημα ένα τελικό τεμάχιο χρειάζεται 2 κόκκινα, 2 μπλε και 2 πράσινα αντικείμενα τοποθετημένα στις τελικές θέσεις. Στον συγκεκριμένο ρυθμό άφιξης το συγκεκριμένο μοντέλο αδυνατεί να παράγει τελικό τεμάχιο, καθώς δεν είναι λειτουργικό σε αυτούς τους χρόνους.

### **Τρίτο σενάριο ελέγχου**

Στο τρίτο σενάριο επικρατεί αιτιοκρατική άφιξη σειράς 1-μπλε, 2-πράσινο, 3-κόκκινο, με μέσο συνολικό ρυθμό άφιξης αντικειμένων του συστήματος περίπου 1 αντικείμενο/18 sec. Για να παράγει το σύστημα ένα τελικό τεμάχιο, που χρειάζεται 2 κόκκινα, 2 μπλε και 2 πράσινα αντικείμενα τοποθετημένα στις τελικές θέσεις, απαιτείται "χρόνος παραγωγής" 1min και 45sec.



#### **Τέταρτο σενάριο ελέγχου**

Στο τέταρτο σενάριο επικρατεί στοχαστική άφιξη με πιθανότητες  $K(4/10)$ ,  $M(3/10)$ ,  $\Pi(3/10)$  σειράς "ΠΜΠΜΚΠΚΚΚΜΚΜΚΚΚΠΜΜΜΚΠΚΠΚΠΚΠΜΚ" και μέσο συνολικό ρυθμό άφιξης αντικειμένων του συστήματος περίπου 1 αντικείμενο/12 sec. Για να παράγει το σύστημα ένα τελικό τεμάχιο χρειάζεται 2 κόκκινα, 2 μπλε και 2 πράσινα αντικείμενα τοποθετημένα στις τελικές θέσεις. Στον συγκεκριμένο ρυθμό άφιξης το συγκεκριμένο μοντέλο αδυνατεί να παράγει τελικό τεμάχιο, καθώς δεν είναι λειτουργικό σε αυτούς τους χρόνους.

#### **Πέμπτο σενάριο ελέγχου**

Στο πέμπτο σενάριο επικρατεί στοχαστική άφιξη με πιθανότητες  $K(4/10)$ ,  $M(3/10)$ ,  $\Pi(3/10)$  σειράς "ΚΚΠΠΜΠΠΚΜΚΠΠΚΚΠΜΠΚΠΚΚΜΠΚΠΚΜΚΚΠ" και μέσο συνολικό ρυθμό άφιξης αντικειμένων του συστήματος περίπου 1 αντικείμενο/5 sec. Για να παράγει το σύστημα ένα τελικό τεμάχιο χρειάζεται 2 κόκκινα, 2 μπλε και 2 πράσινα αντικείμενα τοποθετημένα στις τελικές θέσεις. Στον συγκεκριμένο ρυθμό άφιξης το συγκεκριμένο μοντέλο αδυνατεί να παράγει τελικό τεμάχιο, καθώς δεν είναι λειτουργικό σε αυτούς τους χρόνους.

#### **Έκτο σενάριο ελέγχου**

Στο έκτο σενάριο επικρατεί στοχαστική άφιξη με πιθανότητες  $K(4/10)$ ,  $M(3/10)$ ,  $\Pi(3/10)$  σειράς "ΠΜΜΚΠΠΠΚΜΜΜΠΜΜΜΚΚΚΠΠΠΠΜΜΚΠΚΚΚ" και μέσο συνολικό ρυθμό άφιξης αντικειμένων του συστήματος περίπου 1 αντικείμενο/18 sec. Για να παράγει το σύστημα ένα τελικό τεμάχιο, που χρειάζεται 2 κόκκινα, 2 μπλε και 2 πράσινα αντικείμενα τοποθετημένα στις τελικές θέσεις, απαιτείται "χρόνος παραγωγής" 2min και 28sec.

#### **Οριακό σημείο**

Αφού δοκιμαστούν όλα τα σενάρια και βρεθεί σε ποιες τιμές χρονικής άφιξης το μοντέλο είναι λειτουργικό και σε ποιες όχι, μπορεί να βρεθεί η τιμή μέσης χρονικής άφιξης πάνω από την οποία το σύστημα είναι λειτουργικό. Έπειτα από δοκιμές βρέθηκε προσεγγιστικά ότι το οριακό σημείο του τρίτου μοντέλου είναι για μέση τιμή άφιξης του συστήματος: 1 αντικείμενο/14 sec.

#### **5.2.4 Κώδικας στοχαστικών αφίξεων**

Ο συγκεκριμένος κώδικας δημιουργήθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού C και δημιουργεί μία ακολουθία στοχαστικών αφίξεων για σύνολο 30 αντικειμένων, με βάση συγκεκριμένες πιθανότητες για κάθε είδος αντικειμένου (χρώμα). Κάθε φορά που εξεταζόταν ένα καινούριο σενάριο, ο κώδικας παρήγαγε καινούρια στοχαστική ακολουθία 30 αντικειμένων. Αναλυτικά ο κώδικας υπάρχει στο Παράρτημα Α'3.

## 5.3 Παρατηρήσεις

Αφού έγιναν όλες οι απαραίτητες μετρήσεις μπορούν να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα για την λειτουργία και την δυναμική του κάθε μοντέλου/συστήματος. Οι συγκρίσεις γίνονται τόσο σε επίπεδα αποδοτικότητας, όσο και σε επίπεδα λειτουργικότητας, ενώ θα ληφθούν υπόψη τα οικονομικά δεδομένα των συστημάτων. Να σημειωθεί ότι τα δεδομένα, μέσω των οποίων έγιναν οι μετρήσεις είναι ενδεικτικά και μπορεί να μεταβληθούν.

Όσον αφορά το πρώτο μοντέλο, πρόκειται για το οικονομικότερο κόστος εγκατάστασης σε σχέση με τα υπόλοιπα μοντέλα, ενώ ταυτόχρονα οι χρόνοι παραγωγής μπορούν να ανταποκριθούν στο μεγαλύτερο ποσοστό των σεναρίων. Στις μετρήσεις που διεξήχθησαν το συγκεκριμένο μοντέλο δεν μπορούσε να ανταποκριθεί σε 2 από τα 6 σενάρια. Το οριακό του σημείο προσεγγίστηκε στο 1 αντικείμενο/6.5sec.

Το δεύτερο μοντέλο είναι το πιο αποδοτικό και αυτό που μπορεί να ανταποκριθεί και στα 6 σενάρια. Ικανό να διαχειριστεί πολύ γρήγορους χρόνους παραγωγής, λόγω της οριακής του τιμής, 1 αντικείμενο/2sec. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι το καλύτερο από άποψη χρόνων, λειτουργικότητας και αποδοτικότητας. Παρόλα αυτά, είναι η πιο ακριβή δομή, καθώς έχει το μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης.

Το τρίτο μοντέλο είναι το λιγότερα λειτουργικό σε σχέση με τα άλλα δύο, καθώς δεν ανταποκρίθηκε επαρκώς στα 4 από τα 6 σενάρια, λόγω της οριακής τιμής, 1 αντικείμενο/14sec. Είναι εμφανές, λοιπόν, ότι δεν μπορεί να ανταποκριθεί σε πολύ γρήγορους χρόνους παραγωγής, ενώ το κόστος εγκατάστασης του συγκεκριμένου μοντέλου είναι το δεύτερο φθηνότερο εκ των τριών.

Η σειρά άφιξης επηρεάζει τους χρόνους παραγωγής σε κάθε σενάριο και σε κάθε μοντέλο, φαίνεται ότι η αιτιοκρατική άφιξη παρέχει τους πιο γρήγορους χρόνους. Παρόλα αυτά, δεν είναι η πιο συνηθισμένη σειρά σε ένα εργοστάσιο, καθώς για να έρχονται σε προκαθορισμένη σειρά πρέπει να έχει υπάρξει προεργασία σε προηγούμενο στάδιο. Οι στοχαστικές αφίξεις παρουσιάζουν την τυχαιότητα, που συναντάται τις περισσότερες φορές στην βιομηχανία. Στα περισσότερα σενάρια παρατηρείται αύξηση στους χρόνους παραγωγής συνολικά σε σχέση με τις αιτιοκρατικές αφίξεις.

Σε κάθε περίπτωση τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ενδεικτικά αυτών που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία. Τα αποτελέσματα μπορεί να μεταβάλλονται αισθητά με χρήση διαφορετικών δομικών στοιχείων ή με διαφορετικές στρατηγικές ελέγχου. Τα αποτελέσματα ανταποκρίνονται σε ρεαλιστικές καταστάσεις, αλλά δεν γίνεται να θεωρούνται αρκετά για να μπορούν να υποδείξουν ποιο σύστημα είναι το καλύτερο. Δύναται όμως, να δώσουν μια σαφή εικόνα των διαδικασιών διαλογής και τοποθέτησης στην βιομηχανία.

## Κεφάλαιο 6

# Συμπεράσματα - Μελλοντικές Επεκτάσεις

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, προσομοιώθηκε, μοντελοποιήθηκε και μελετήθηκε μια αυτοματοποιημένη διαδικασία διαχείρισης υλικών (picking) μέσα σε γραμμή παραγωγής, με χρήση ρομποτικών βραχιόνων. Δημιουργήθηκαν 3 διαφορετικά χωροταξικά μοντέλα/σενάρια λειτουργίας και μελετήθηκαν οι χρόνοι παραγωγής των συστημάτων σε συγκεκριμένες παραμέτρους για διαφορετικά σενάρια.

Στα μοντέλα/σενάρια λειτουργίας υπάρχουν ρομποτικοί βραχίονες, οι οποίοι έχουν τοποθετηθεί με συγκεκριμένο τρόπο, για να δέχονται αντικείμενα από ζώνες μεταφοράς και να τα διαχειρίζονται, τοποθετώντας τα σε προκαθορισμένες θέσεις ανάλογα με το είδος τους. Στο ίδιο λογισμικό γίνεται προσομοίωση ρεαλιστικών συνθηκών, όπου εξάγονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και συγκρίνονται τα μοντέλα μεταξύ τους, ως προς την αποδοτικότητα, την λειτουργικότητα και το κόστος εγκατάστασης.

Αρχικά, δημιουργήθηκαν τα τρία μοντέλα/σενάρια λειτουργίας με δομικά στοιχεία που είτε ήταν έτοιμα στο λογισμικό, είτε δημιουργήθηκαν από την αρχή. Δημιουργήθηκε ο κώδικας που εγκαταστάθηκε στους ρομποτικούς βραχίονες των συστημάτων. Ελέγχθηκε η λειτουργικότητα των μοντέλων και ξεκίνησε η προσομοίωση της διαδικασίας διαχείρισης των υλικών σε κάθε μοντέλο ξεχωριστά.

Σε επόμενη φάση, αφού επιβεβαιώθηκε η λειτουργία των μοντέλων έγιναν οι δοκιμές και οι μετρήσεις των συστημάτων. Εξετάστηκαν 6 διαφορετικά σενάρια ελέγχου για να μετρηθούν οι χρόνοι παραγωγής σε διαφορετικές συνθήκες, έτσι ώστε να γίνουν οι απαραίτητες συγκρίσεις και να βρεθούν τα όρια των μοντέλων. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ανάλογα με τους ρυθμούς άφιξης και ανάλογα με την σειρά άφιξης. Επιπρόσθετα, βρέθηκε προσεγγιστικά το κόστος εγκατάστασης του κάθε μοντέλου και συμπεριλήφθηκε ως παράγοντας στην σύγκριση.

Σε όλες τις δοκιμές παρατηρήθηκε ότι το 2ο μοντέλο αποδείχθηκε το πιο λειτουργικό και ικανότερο να ανταποκριθεί στις μεγαλύτερες ταχύτητες, παρόλο που οικονομικά ήταν η πιο ακριβή επιλογή. Το 1ο μοντέλο από την άλλη, μπορούσε να ανταποκριθεί στα περισσότερα σενάρια ικανοποιητικά, παρόλο που η οριακή τιμή του ήταν μεγαλύτερη από του πρώτου, ενώ αποδείχθηκε το οικονομικότερο μοντέλο ως προς την εγκατάστασή του. Τέλος το 3ο μοντέλο δεν μπορούσε να ανταποκριθεί λειτουργικά και αποδοτικά σε αρκετά σενάρια λόγω της πολυπλοκότητας στην διαμόρφωσή του, ενώ οικονομικά βρίσκεται ανάμεσα του 1ου και 2ου μοντέλου. Όλα τα μοντέλα, όμως μπορούσαν να εκτελέσουν την συγκεκριμένη διαδικασία διαλογής και τοποθέτησης και μπορούν να χρησιμοποιηθούν δυνητικά με επιτυχία στην βιομηχανία.

Τα συγκεκριμένα μοντέλα είναι πλήρως λειτουργικά και προσομοιωμένα σε ρεαλιστικό περιβάλλον. Παρέχουν πληροφορίες για την υλοποίηση μιας τέτοιας διαδικασίας στην βιομηχανία, αλλά και για την πραγματική τους εγκατάσταση σε ένα εργοστάσιο. Μαζί με επιπλέον μελέτη και ανάπτυξη περισσότερων σεναρίων μπορεί να αποτελέσει την βάση για την εγκατάσταση της εφαρμογής ως σταθμό σε μια γραμμή παραγωγής στην εξελεγμένη πλέον βιομηχανία.

Στα πλαίσια μελλοντικής επέκτασης της παρούσας εργασίας προτείνεται, η ενσωμάτωση ρεαλιστικότερων βιομηχανικών διατάξεων και η ρεαλιστική χρήση κομματιών από πραγματικές εφαρμογές. Η απλουστευμένη προσέγγιση με τη χρήση κομματιών με σταθερό σχήμα και μέγεθος, που διαφοροποιούνταν ως προς το χρώμα, αποτελεί μια καλή περίπτωση για την επίδειξη της ορθής λειτουργίας της προτεινόμενης προσέγγισης, αλλά υστερεί σε ρεαλιστικότητα. Για την επίτευξη της λειτουργίας με κομμάτια της πολυπλοκότητας που αναφέρθηκε θα πρέπει να μελετηθεί και η ενσωμάτωση εξελεγμένων τεχνικών αναγνώρισης βασισμένη σε μεθοδολογίες π.χ. από την περιοχή της μηχανικής μάθησης.

# Bibliography

- [1] Brahim Rekiek et al. «ASSEMBLY LINE DESIGN: A SURVEY». In: *IFAC Proceedings Volumes* 35 (2002), pp. 155–166. ISSN: 1474-6670. DOI: <https://doi.org/10.3182/20020721-6-ES-1901.01647>.
- [2] Dorota Palka and Jolanta Ciukaj. «Prospects for development movement in the industry concept 4.0». In: *sciendo* 2 (2019), pp. 315–326. DOI: 10.2478/mape-2019-0031.
- [3] S. A. Oke. «A Literature Review on Artificial Intelligence». In: *International Journal of Information and Management Sciences* 19 (2008), pp. 535–570.
- [4] Ayushi Chahal and Preeti Gulia. «Machine Learning and Deep Learning». In: *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering* 8 (2019), pp. 4910–4914.
- [5] ΠΑΛΑΙΟΛΟΓΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ. «Ταξινόμηση με Χρήση αλγορίθμων Εξορυξης Δεδομένων και Ασαφούς Λογικής: Μια Εφαρμογή στο Μετρό του Παρισιού». ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ, 2009.
- [6] Suhaib Ur Rehman and Shamoil Ejaz. «AN IMPLEMENTATION OF 9 PILLARS OF INDUSTRY 4.0 IN CONVENTIONAL FOOTWEAR INDUSTRY MODEL». In: *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology* 4 (2020), pp. 283–286. ISSN: 2455-2143.
- [7] Wanek Golnazarian and Ernest Hall. «Intelligent Industrial Robots». In: (2002). DOI: 10.1201/9780203908587.ch6.5.
- [8] Mohd Javaid et al. «Significant applications of Cobots in the field of manufacturing». In: *Cognitive Robotics* 2 (2022), pp. 222–233. ISSN: 2667-2413. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2022.10.001>.
- [9] Raul D. S. G. Campilho and Francisco J. G. Silva. «Industrial Process Improvement by Automation and Robotics». In: *Machines* 11 (2023). ISSN: 2075-1702.
- [10] George Konidaris Oliver Kroemer Scott Niekum. «A Review of Robot Learning for Manipulation: Challenges, Representations, and Algorithms». In: *Journal of Machine Learning Research* (2021), pp. 1–82.
- [11] ΔΕΛΗΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ. «Σχεδιασμός, κατασκευή και προγραμματισμός ρομποτικού βραχίονα». ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ, 2016.
- [12] Daniel U Jing, Declan Devine, and John Lyons. «3D Printed End of Arm Tooling (EOAT) for robotic automation». In: *Robotics* 7 (2018), p. 49. DOI: 10.3390/robotics7030049.
- [13] Richard Bormann et al. «Towards Automated Order Picking Robots for Warehouses and Retail». In: Nov. 2019, pp. 185–198.

- [14] Carlos Martinez et al. «Automated bin picking system for randomly located industrial parts». In: *2015 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA)*. 2015, pp. 1–6.
- [15] Nazib Sobhan and Abu Salman Shaikat. «Implementation of Pick Place Robotic Arm for Warehouse Products Management». In: *2021 IEEE 7th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA)*. 2021, pp. 156–161.

# Παράρτημα Α΄

## Κώδικες

### Α΄.1 Κώδικας πρώτου και δεύτερου μοντέλο

---

```
#include <webots/robot.h>
#include <webots/distance_sensor.h>
#include <webots/motor.h>
#include <webots/camera.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <webots/camera_recognition_object.h>
#include <webots/position_sensor.h>
#include <webots/supervisor.h>

#define TIME_STEP 64

enum State { WAITING, GRASPING, ROTATING, RELEASING, ROTATING_BACK };

int main(int argc, char **argv) {

    wb_robot_init();
    int counter = 0, i = 0;
    int state = WAITING ;
    const double target_position1[] = {-1.55, -1.65, -2.38, -1.51 };//green
    const double target_position2[] = { -1.00, -2.00, -2.38, -1.51 };//red
    const double target_position3[] = {-1.88, -1.15, -2.38, -1.51 };//blue
    double speed = 1.0;
    double a,b,c;

    if (argc == 2)
        sscanf(argv[1], "%lf", &speed);

    WbDeviceTag hand_motors[3];
    hand_motors[0] = wb_robot_get_device("finger_1_joint_1");
    hand_motors[1] = wb_robot_get_device("finger_2_joint_1");
    hand_motors[2] = wb_robot_get_device("finger_middle_joint_1");
    WbDeviceTag ur_motors[5];
    ur_motors[0] = wb_robot_get_device("shoulder_lift_joint");
    ur_motors[1] = wb_robot_get_device("elbow_joint");
    ur_motors[2] = wb_robot_get_device("wrist_1_joint");
    ur_motors[3] = wb_robot_get_device("wrist_2_joint");
    //ur_motors[4] = wb_robot_get_device("shoulder_pan_joint");
```



```

WbDeviceTag camera = wb_robot_get_device("camera");
wb_camera_enable(camera, 2*TIME_STEP);
wb_camera_recognition_enable(camera, 2*TIME_STEP);

WbDeviceTag distance_sensor = wb_robot_get_device("sensor");
wb_distance_sensor_enable(distance_sensor, TIME_STEP);

WbDeviceTag position_sensor = wb_robot_get_device("wrist_1_joint_sensor");
wb_position_sensor_enable(position_sensor, TIME_STEP);

while (wb_robot_step(TIME_STEP) != -1) {
    int number_of_objects = wb_camera_recognition_get_number_of_objects(camera);
    printf("\nRecognized %d objects. \n", number_of_objects);
    int distance_sensor_value = wb_distance_sensor_get_value(distance_sensor);
    printf("\nDistance sensor value %d \n", distance_sensor_value);
    int ps = wb_position_sensor_get_value(position_sensor);
    printf(" \n ps = %d", ps);
    const WbCameraRecognitionObject *objects = wb_camera_recognition_get_objects
        (camera);
    for (i=0; i<number_of_objects; i++){
        for(int j=0; j<objects[i].number_of_colors; ++j){
            a = objects[i].colors[3*j];
            b = objects[i].colors[3*j+1];
            c = objects[i].colors[3*j+2];
            printf("%lf %lf %lf", a, b, c);
            printf("Color: %lf %lf %lf \n", objects[i].colors[3*j], objects[i].
                colors[3*j+1], objects[i].colors[3*j+2]);
        }
    }

    printf("Current state: ");
    switch (state) {
        case WAITING:
            printf("WAITING\n");
            break;
        case GRASPING:
            printf("GRASPING\n");
            break;
        case ROTATING:
            printf("ROTATING\n");
            break;
        case RELEASING:
            printf("RELEASING\n");
            break;
        case ROTATING_BACK:
            printf("ROTATING_BACK\n");
            break;
    }

    if (counter <= 0) {
        switch (state) {
            case WAITING:
                if (wb_distance_sensor_get_value(distance_sensor) < 100) {

```

```

        state = GRASPING;
        counter = 8;
        printf("Grasping can\n");
        for (i = 0; i < 3; ++i)
            wb_motor_set_position(hand_motors[i], 0.85);
    }
    break;
case GRASPING:
    if(a == 0.000000 && b == 1.000000 && c == 0.000000){
        for (i = 0; i < 5; ++i)
            wb_motor_set_position(ur_motors[i], target_position1[i]);}
    else if (a == 1.000000 && b == 0.000000 && c == 0.000000){
        for (i = 0; i < 5; ++i)
            wb_motor_set_position(ur_motors[i], target_position2[i]);}
    else {
        for (i = 0; i < 5; ++i)
            wb_motor_set_position(ur_motors[i], target_position3[i]);}
    printf("Rotating arm\n");
    state = ROTATING;
    break;

case ROTATING:
    if (wb_position_sensor_get_value(position_sensor) < -2.3) {
        counter = 8;
        printf("Releasing can\n");
        state = RELEASING;
        for (i = 0; i < 3; ++i)
            wb_motor_set_position(hand_motors[i], wb_motor_get_min_position
                (hand_motors[i]));
    }
    break;
case RELEASING:
    for (i = 0; i < 5; ++i)
        wb_motor_set_position(ur_motors[i], 0.0);
    printf("Rotating arm back\n");
    state = ROTATING_BACK;
    break;
case ROTATING_BACK:
    if (wb_position_sensor_get_value(position_sensor) > -0.1) {
        state = WAITING;
        printf("Waiting can\n");
    }
    break;
}
}
counter--;

};

wb_robot_cleanup();
return 0;
}

```

---

## A'.2 Κώδικας τρίτου μοντέλου

---

```
#include <webots/robot.h>
#include <webots/distance_sensor.h>
#include <webots/motor.h>
#include <webots/camera.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <webots/camera_recognition_object.h>
#include <webots/position_sensor.h>
#include <webots/supervisor.h>

#define TIME_STEP 64

enum State { STARTING_POS , WAITING, GRASPING, ROTATING, RELEASING,
             ROTATING_BACK };
enum State1 { WAITING1, GRASPING1, ROTATING1, RELEASING1,
             ROTATING_BACK1 };

int main(int argc, char **argv) {
    wb_robot_init();
    int counter = 0, i = 0;
    int state = STARTING_POS;
    const double target_position1[] = {-1.55, -1.65, -2.38, -1.51 };//green
    const double target_position2[] = { -1.00, -2.00, -2.38, -1.51};//red
    const double target_position3[] = {-1.88, -1.20, -2.38, -1.51 };//blue
    const double target_position4[] = {-3.00, -5.00, -2.38, -1.51 };//green
    const double target_position5[] = {-3.00, -5.00, -2.38, -1.51 };//red
    const double target_position6[] = {-1.88, -1.2, -2.38, -1.51};//blue
    const double starting_position[]={ -1.2, 2.90, -1.65 ,0 };
    double speed = 1.0;
    double a,b,c;

    if (argc == 2)
        sscanf(argv[1], "%lf", &speed);

    WbDeviceTag hand_motors[3];
    hand_motors[0] = wb_robot_get_device("finger_1_joint_1");
    hand_motors[1] = wb_robot_get_device("finger_2_joint_1");
    hand_motors[2] = wb_robot_get_device("finger_middle_joint_1");
    WbDeviceTag ur_motors[5];
    ur_motors[0] = wb_robot_get_device("shoulder_lift_joint");
    ur_motors[1] = wb_robot_get_device("elbow_joint");
    ur_motors[2] = wb_robot_get_device("wrist_1_joint");
    ur_motors[3] = wb_robot_get_device("wrist_2_joint");
    //ur_motors[4] = wb_robot_get_device("shoulder_pan_joint");

    WbDeviceTag camera = wb_robot_get_device("camera");
    wb_camera_enable(camera, 2*TIME_STEP);
    wb_camera_recognition_enable(camera, 2*TIME_STEP);
```

```

WbDeviceTag distance_sensor = wb_robot_get_device("sensor");
wb_distance_sensor_enable(distance_sensor, TIME_STEP);

WbDeviceTag distance_sensor1 = wb_robot_get_device("sensor1");
wb_distance_sensor_enable(distance_sensor1, TIME_STEP);

WbDeviceTag position_sensor = wb_robot_get_device("wrist_1_joint_sensor");
wb_position_sensor_enable(position_sensor, TIME_STEP);

while (wb_robot_step(TIME_STEP) != -1) {

    int number_of_objects = wb_camera_recognition_get_number_of_objects(camera);
    printf("\nRecognized %d objects. \n", number_of_objects);
    int distance_sensor_value =
wb_distance_sensor_get_value(distance_sensor);
    printf("\nDistance sensor value %d . \n", distance_sensor_value);
    int distance_sensor_value1 = wb_distance_sensor_get_value
(distance_sensor1);
    printf("\nDISTANCE SENSOR VALUE %d . \n", distance_sensor_value1);
    double aaa = wb_position_sensor_get_value(position_sensor);
    printf("\n AAAAA= %f\n", aaa);
    double bbb= aaa + 1.6;
    printf("\n BBBB= %f\n", bbb);

    const WbCameraRecognitionObject *objects= wb_camera_recognition_get_
objects(camera);
    for (i=0; i<number_of_objects; i++){
        for(int j=0; j<objects[i].number_of_colors; ++j){
            a = objects[i].colors[3*j];
            b = objects[i].colors[3*j+1];
            c = objects[i].colors[3*j+2];
            printf("%lf %lf %lf", a,b,c);
            printf("Color: %lf %lf %lf \n", objects[i].colors[3*j],
objects[i].colors[3*j+1], objects[i].colors[3*j+2]);
        }
    }

    if(distance_sensor_value1<1000)
    {

        printf("Current state: ");
        switch (state) {
            case STARTING_POS:
                printf("STARTING_POS\n");
                break;
            case WAITING:
                printf("WAITING\n");
                break;
            case GRASPING:
                printf("GRASPING\n");
                break;
            case ROTATING:

```

```

        printf("ROTATING\n");
        break;
    case RELEASING:
        printf("RELEASING\n");
        break;
    case ROTATING_BACK:
        printf("ROTATING_BACK\n");
        break;
}

if (counter <= 0) {
    switch (state) {
        case STARTING_POS :
            for (i = 0; i < 4; ++i)
                {wb_motor_set_position(ur_motors[i], starting_position[i]);
                // counter = 15;
            }
            if (wb_distance_sensor_get_value(distance_sensor) < 1000)
                state = WAITING;
            printf("WAITING");

            break;
        case WAITING:
            if (wb_distance_sensor_get_value(distance_sensor) < 100) {
                state = GRASPING;
                counter = 8;
                printf("Grasping can\n");
                for (i = 0; i < 3; ++i)
                    wb_motor_set_position(hand_motors[i], 0.85);
            }
            break;
        case GRASPING:
            if(a == 0.000000 && b == 1.000000 && c == 0.000000){
                for (i = 0; i < 4; ++i)
                    wb_motor_set_position(ur_motors[i], target_position4[i]);}
            else if (a == 1.000000 && b == 0.000000 && c == 0.000000){
                for (i = 0; i < 4; ++i)
                    wb_motor_set_position(ur_motors[i], target_position5[i]);}
            else {
                for (i = 0; i < 4; ++i)
                    wb_motor_set_position(ur_motors[i], target_position6[i]);}
            printf("Rotating arm\n");
            state = ROTATING;
            break;
        case ROTATING:
            if ( /*wb_position_sensor_get_value(position_sensor)*/bbb< -2.3) {
                counter = 8;
                printf("Releasing can\n");
                state = RELEASING;
                for (i = 0; i < 3; ++i)
                    wb_motor_set_position(hand_motors[i],
                    wb_motor_get_min_position(hand_motors[i]));
            }
            break;
        case RELEASING:
            for (i = 0; i < 4; ++i)

```

```

        wb_motor_set_position(ur_motors[i], 0.0);
    printf("Rotating arm back\n");
    state = ROTATING_BACK;
    break;
case ROTATING_BACK:
    if (wb_position_sensor_get_value(position_sensor) > -0.1) {
        state = WAITING;
        printf("Waiting can\n");
    }
    break;
}
}
}

else{
    printf("Current state: ");
    switch (state) {
        case WAITING:
            printf("WAITING\n");
            break;
        case GRASPING:
            printf("GRASPING\n");
            break;
        case ROTATING:
            printf("ROTATING\n");
            break;
        case RELEASING:
            printf("RELEASING\n");
            break;
        case ROTATING_BACK:
            printf("ROTATING_BACK\n");
            break;}
    if (counter <= 0) {
        switch (state) {

            case WAITING1:
                if (wb_distance_sensor_get_value(distance_sensor) < 100) {
                    state = GRASPING1;
                    counter = 8;
                    printf("Grasping can1\n");
                    for (i = 0; i < 3; ++i)
                        wb_motor_set_position(hand_motors[i], 0.85);
                }
                break;

            case GRASPING1:
                if(a == 0.000000 && b == 1.000000 &&c == 0.000000){
                    for (i = 0; i < 4; ++i)
                        wb_motor_set_position(ur_motors[i], target_position1[i]);}
                else if (a == 1.000000 && b == 0.000000 &&c == 0.000000){
                    for (i = 0; i < 4; ++i)
                        wb_motor_set_position(ur_motors[i], target_position2[i]);}
                else {
                    for (i = 0; i < 4; ++i)

```

```

        wb_motor_set_position(ur_motors[i], target_position3[i]);}
        printf("Rotating arm1\n");
        state = ROTATING1;
        break;

    case ROTATING1:
        if (wb_position_sensor_get_value(position_sensor) < -2.3) {
            counter = 8;
            printf("Releasing can1\n");
            state = RELEASING1;
            for (i = 0; i < 3; ++i)
                wb_motor_set_position(hand_motors[i],
                    wb_motor_get_min_position(hand_motors[i]));
            }
            break;
    case RELEASING1:
        for (i = 0; i < 4; ++i)
            wb_motor_set_position(ur_motors[i], 0.0);
        printf("Rotating arm back1\n");
        state = ROTATING_BACK1;
        break;
    case ROTATING_BACK1:
        if (wb_position_sensor_get_value(position_sensor) > -0.1) {
            state = WAITING1;
            printf("Waiting can1\n");

        }
        break;
    }
}

}

}

counter--;

};

wb_robot_cleanup();

return 0;
}

```

---



## A'.3 Κώδικας στοχαστικών αφίξεων

---

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <time.h>

int main() {
    srand(time(NULL));
    double probabilities[] = {0.4, 0.3, 0.3}; // Red, Blue, Green
    int num_products = 30;
    char* products[] = {"red", "blue", "green"};
    printf("Generated sequence of products:\n");
    for (int i = 0; i < num_products; i++) {
        double rand_num = (double)rand() / RAND_MAX;
        int product_index = 0;
        double cumulative_prob = probabilities[0];
        while (rand_num > cumulative_prob) {
            product_index++;
            cumulative_prob += probabilities[product_index];
        }

        printf("%s\n", products[product_index]);
    }

    return 0;}
```

---