ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ανάπτυξη μηχατρονικής αρπάγης και ρομποτικού συστήματος συγκομιδής καρπών ντομάτας

Φοιτητής: **Κουρουπάκης Φάνης** Α.Μ: **6441**

Επιβλέπων: **Δρ. Φασουλάς Ιωάννης**

Ηράκλειο Κρήτης, Δεκέμβριος 2024

Αυτή η σελίδα είναι σκόπιμα λευκή

Περίληψη

Στο πλαίσιο αυτής της πτυχιακής εργασίας το θέμα είναι η ανάπτυξη μηχατρονικής αρπάγης για γεωργικές εφαρμογές. Κύριες χρήσεις της αρπάγης αυτής είναι η συλλογής καρπών, η οποία κατασκευάστηκε πρόσφατα στο Εργαστήριο Ρομποτικής και Αυτομάτου Ελέγχου του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου. Η εργασία χωρίζεται σε δυο μέρη, το πρώτο αφορά την ανάπτυξη ενός αρχικού πρωτότυπου αρπάγης για γεωργικές εφαρμογές. Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζεται μία βελτιωμένη εκδοχή του πρωτότυπου της αρπάγης με βάση κάποια συμπεράσματα που προέκυψαν από το αρχικό και την ενσωμάτωση αυτού σε ένα ολοκληρωμένο ρομποτικό σύστημα.

Πιο συγκεκριμένα, αρχικά στην εργασία, παρουσιάζονται ορισμένα ρομποτικά συστήματα που εκτελούν αντίστοιχες γεωργικές εργασίες όπως η συλλογή καρπών και το κλάδεμα, αλλά και μηχανισμοί κοπής που χρησιμοποιούνται σήμερα στη γεωργία με σκοπό την αντίληψη του επιπέδου αυτοματοποίησης των γεωργικών εργασιών. Στη συνέχεια αναλύεται ο σχεδιασμός της αρπάγης και των υποστηρικτικών συστημάτων αυτής. Στο κομμάτι αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά τα μέρη του αρχικού πρωτότυπου της αρπάγης που σχεδιάστηκαν. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται κάποια αρχικά πειράματα που έγιναν πάνω σε πραγματικό ιστό με σκοπό τη εξαγωγή συμπερασμάτων για τη λειτουργία της αρπάγης, όπως είναι οι δυνατότητες και το πεδίο εφαρμογών που μπορεί να καλύψει αλλά και οι δυνατότητες για βελτίωση.

Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζεται το βελτιωμένο μοντέλο της αρπάγης, αναλύοντας τη λειτουργία της και το τρόπο με τον οποίο λειτουργεί η μηχανολογική διάταξη. Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία ενσωμάτωσης σε ένα ολοκληρωμένο ρομποτικό σύστημα το οποίο είναι σε θέση να εντοπίζει καρπούς ντομάτας και να τους προσεγγίζει εκτελώντας εργασίες συγκομιδής. Ο εντοπισμός των καρπών επιτυγχάνεται μέσα από μία κάμερα στην οποία ένα ήδη εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο αναγνωρίζει καρπούς ντομάτας. Η θέση της ντομάτας υπολογίζεται χάρη σε μία κάμερα βάθους που είναι αναρτημένη πάνω στην αρπάγη, ενώ τη προσέγγιση του καρπού στη κατάλληλη θέση αναλαμβάνει ένας ρομποτικός βραχίονας.

Τέλος, η εργασία κλείνει με την παρουσίαση ορισμένων πειραμάτων που έχουν να κάνουν με την ανίχνευση και προσέγγιση των καρπών τομάτας άλλα και πειράματα που περιλαμβάνουν τη διαδικασία συγκομιδής. Η αξιολόγηση του συστήματος γίνεται από τη βαθμολογία επιτυχίας των παραπάνω πειραμάτων, ενώ κλείνοντας δίνονται ορισμένα συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Abstract

In the limits of this thesis the theme is the development of a mechatronic end effector for agricultural applications. The main uses of this end effector are the application of crop collection. This prototype end effector that made in Control System and Robotics Laboratory of Hellenic Mediterranean University. The thesis is separated into two parts. The first deals with the development of the first end effector prototype for agricultural applications. In the second part deals with an improved end effector prototype, based on inferences from experiments of the first prototype and the integration of this new end effector in an integrated robotic system.

In detail robotic systems for agricultural applications like fruit harvesting and pruning and in use cutting mechanisms in agriculture, because it is important to understand the automation level for agricultural tasks. Consequently, the design of the end effector and its support systems are analyzed. In this point are presented all parts of the initial prototype designed. Following, carry out some experiments on real plants to draw conclusions about the end effector, such as the possibilities and the scope of application that can cover, as well as the possibilities for improvement.

In the second part is presented the improved end effector while analyzing the function of the mechanism. After that is described all the integration process in a robotic system. This system can detect, approach and harvest ripe tomato crops. The detection of ripe tomatoes is taking place through a pre-trained neural network, while the location of the detected tomato calculated through a depth camera is amounted on the end effector and finally the approach process is taken over by a robot arm.

Finally, the thesis is closing by the presentation of some experiments that have to do with the detection and approach of tomato crops and other experiments that include harvesting process. The evaluation of the system occurs by the success score of the above experiments, while closing some conclusions and suggestions for future research are given.

1. Περιεχόμενα

1. Περιεχόμενα 5
2. Περιεχόμενα Εικόνων 7
3. Εισαγωγή 11
   3.1. Σύντομη ανασκόπηση της εργασίας 11
   3.2. Κίνητρα 12
   3.3. Σκοπός 12
4. Τεχνολογίες ρομποτικών συστημάτων στη γεωργία 13
   4.1. Ρομπότ συλλογής καρπών τομάτας της MetoMotion. 13
   4.2. Ρομπότ συλλογής καρπών τομάτας από την Panasonic 13
   4.3. Ρομπότ συλλογής καρπών πιπεριάς 14
   4.4. Ρομπότ συλλογής καρπών φράουλας από την Agrobot 14
   4.5. Ρομπότ κλαδέματος αμπελιών 15
   4.6. Ρομπότ συλλογής καρπών από αγγούρι 15
   4.7. Αρπάγη συλλογής καρπών μελιτζάνας 16
   4.8. Μηχανισμοί κοπής για γεωργικές χρήσεις 17
      4.8.1. Κλαδευτικό ψαλίδι αέρος 18
      4.8.2. Κλαδευτικό ψαλίδι ηλεκτρικό 18
      4.8.3. Αλυσοπρίονο 18
      4.8.4. Κονταροψάλιδο τύπου παράκαμψης 19
5. Σχεδιασμός αρπάγης και μονάδας οδήγησης αρπάγης. 20
   5.1. Σύλληψη ιδέας 20
   5.2. Σχεδιασμός αρπάγης 21
   5.3. Σχεδιασμός μονάδας οδήγησης αρπάγης 30
6. Κατασκευή και συναρμολόγηση της μηχατρονικής αρπάγης 34
   6.1. Κατασκευή αρπάγης 34
   6.2. Κατασκευή μονάδας οδήγησης της αρπάγης. 39
   6.3. Επιμέρους εξαρτήματα αρπάγης και μονάδας οδήγησης της. 42
7. Έλεγχος αρπάγης 45
   7.1. Συνοπτική περιγραφή του συστήματος ελέγχου της αρπάγης 45
   7.2. Το λογισμικό Arduino IDE 45
   7.3. Κινητήρες Servo 46
   7.4. Ο μικρολεγκτής Arduino Uno 48
   7.5. Ηλεκτρικό κύκλωμα 50
8. Αρχικά πειράματα 52
   8.1. Πειράματα 52

8.2. Παρατηρήσεις και συμπεράσματα αρχικών πειραμάτων 54
8.2.1. Παρατηρήσεις πειραμάτων 54
8.2.2. Συμπεράσματα πειραμάτων 54
8.3. Βελτιωμένη αρπάγη 55
8.3.1. Τρισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο αρπάγης 55
8.3.2. Ανάλυση μηχανισμού και υπολογισμός δυνάμεων και της βέλτιστης περιοχής κοπής 56
8.3.3. Πρωτότυπο νέας αρπάγης 59
9. Υλοποίηση αυτόνομου ρομποτικού συστήματος συλλογής καρπών τομάτας 63
9.1. Εισαγωγή 63
9.2. Ορισμός του προβλήματος 63
9.3. Προαπαιτούμενες γνώσεις 64
9.4. Θεωρητική λύση 68
9.5. Ρομποτικό σύστημα συγκομιδής καρπών ντομάτας 71
9.5.1. Καθορισμός τεχνικών χαρακτηριστικών της αρπάγης στο ελεγκτή του ρομποτικού βραχίονα UR5e 72
9.5.2. Έλεγχος λειτουργιών ρομποτικού βραχίονα μέσω της Python 74
9.5.3. Το μοντέλο νευρωνικού δικτύου YOLO 82
9.5.4. Αισθητήρας Μηχανικής όρασης (RGBD) 85
9.5.5. Έλεγχος της αρπάγης με τη Python 91
9.5.6. Αλγόριθμος εντοπισμού και προσέγγισης καρπών ντομάτας 96
10. Πειραματική αποτίμηση του ρομποτικού συστήματος συγκομιδής 101
10.1. Πειραματική διάταξη 101
10.2. Πρωτόκολλο πειραμάτων 102
10.2.1. Παραδοχές 103
10.3. Πειράματα 104
10.3.1. Πειράματα προσέγγισης 105
10.3.2. Πειράματα συγκομιδής 108
10.4. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική ερεύνα 110
11. Βιβλιογραφία 111

2. Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 4-1 Ρομποτικό σύστημα συλλογής καρπών τομάτας της MetoMotion. 13
Εικόνα 4-2 Ρομποτικό σύστημα συλλογής καρπών τομάτας από τη Panasonic 14
Εικόνα 4-3 Ρομποτικό σύστημα συλλογής καρπών πιπεριάς 14
Εικόνα 4-4 Ρομποτικό σύστημα συλλογής καρπών φράουλας της Agrobot. 15
Εικόνα 4-5 Ρομπότ κλαδέματος αμπελιών 15
Εικόνα 4-6 Ρομποτικό σύστημα συλλογής καρπών αγγούρι. 16
Εικόνα 4-7 Ρομπότ συλλογής καρπών μελιτζάνας 16
Εικόνα 4-8 α) Κλαδευτικό ψαλίδι τύπου παράκαμψης (παράγραφος 3.8.1), β) Κλαδευτικό ψαλίδι τύπου αμόνι (παράγραφος 3.8.2), γ)Πριόνι χειρός (παράγραφος 3.8.3), δ)Κλαδευτικό ψαλίδι τύπου παράκαμψης με δυο κοπτικές λεπίδες (παράγραφος 3.8.4). 17
Εικόνα 4-9 Κλαδευτικό ψαλίδι αέρος τύπου παράκαμψης με μια λεπίδα κοπής. 18
Εικόνα 4-10 Κλαδευτικό ψαλίδι ηλεκτρικό τύπου παράκαμψης με μια λεπίδα κοπής. 18
Εικόνα 4-11 Αλυσοπρίονο ηλεκτρικό χειρός. 19
Εικόνα 4-12 Κοπτικός μηχανισμός τύπου κονταροψαλιδο απο την εταιρεία Ameco. 19
Εικόνα 5-1 Διαδικασία συγκομιδής καρπών σταφυλιού με ανάδειξη της μεθοδολογία κοπής και συγκράτησης του καρπού. 20
Εικόνα 5-2 Γωνία περιστροφής του μηχανισμού κοπής 22
Εικόνα 5-3 Ανάδειξη της κινηματικής αλυσίδας της αρπάγης μέσα από τη μονάδα οδήγησης. 23
Εικόνα 5-4 Τρισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο αρπάγης (δεξιά κάτω γωνία) και αναλυτική προβολή αρπάγης με σημάνσεις για την ανάδειξη επιμέρους κομματιών της. 23
Εικόνα 5-5 Μηχανισμός κοπής της αρπάγης, όπου διακρίνεται η λεπίδα (μαύρο χρώμα) και η λάμα στήριξης (μεταλλικό χρώμα). 24
Εικόνα 5-6 Τρισδιάστατο μοντέλο βάσης του μηχανισμού κοπής και συγκράτησης. 24
Εικόνα 5-7 Τρισδιάστατο μοντέλο καλύμματος βάσης του μηχανισμού κοπής και συγκράτησης (αριστερά με κίτρινο χρώμα), και σε συναρμολόγηση με τη βάση. 25
Εικόνα 5-8 Τρισδιάστατο μοντέλο των κομματιών του μηχανισμού συγκράτησης με τη λαβη (κόκκινο) και η αντιστήριξη (ώχρα). 25
Εικόνα 5-9 Τρισδιάστατο μοντέλο άξονα έδρασης μηχανισμών κοπής και συγκράτησης με δυνατότητα διάκρισης των διαβαθμίσεων και των σπειρωμάτων (αριστερά) και σε συναρμολόγηση με τη λάμα (δεξιά). 26
Εικόνα 5-10 Τρισδιάστατη αναπαράσταση σε τομή της βάσης, των δυο ράουλων εντός της βάσης αυτής. 26
Εικόνα 5-11 Τρισδιάστατη αναπαράσταση του πίρου στήριξης των δυο ραουλων και σε συναρμολόγηση του εντός της βάσης της αρπάγης που είναι σε τομή. 27
Εικόνα 5-12 Δακτυλίδι- αποστάτης για το ράουλο του μηχανισμού συγκράτησης. 27
Εικόνα 5-13 Άγκιστρο ελατήριου (γαλάζιο χρώμα) για την επαναφορά του μηχανισμού κοπής σε ανοικτή θέση και σε συναρμολόγηση αυτού με την υπόλοιπη αρπάγη. 27
Εικόνα 5-14 Ο ρομποτικός βραχίονας Mitsubishi RV2A. 28
Εικόνα 5-15 Οι διαστάσεις της φλάντζας του βραχίονα Mitsubishi RV2A όπως προέκυψαν από το εγχειρίδιο του κατασκευαστή. 28
Εικόνα 5-16 Επιπρόσθετη βάση για τη τοποθέτηση της αρπάγης πάνω στο ρομποτικό βραχίονα (αριστερά) και κομμάτι προσαρμογής με τη φλάντζα του βραχίονα (δεξιά). 28
Εικόνα 5-17 Ψηφιακό μοντέλο μονάδα οδήγησης της αρπάγης (αριστερή πάνω γωνιά) και αναλυτική προβολή του μοντέλου. 30
Εικόνα 5-18 Βάση μονάδας οδήγησης της αρπάγης. 31
Εικόνα 5-19 Καπάκι βάσης μονάδας οδήγησης αρπάγης με ανάδειξη της εσωτερικής και εξωτερικής του γεωμετρίας. 31
Εικόνα 5-20 Μηχανισμός τηλεχειρισμού της μονάδας οδήγησης της αρπάγης αποτελούμενος από ένα ζευγάρι οδοντωτών τροχών (γραναζιών). 31
Εικόνα 5-21 Κινητήριο γρανάζι όπου αναδεικνύεται η εμπρόσθια και οπίσθια μορφή του 32
Εικόνα 5-22 Κινούμενο γρανάζι όπου αναδεικνύεται η εμπρόσθια και οπίσθια μορφή του. 32

Εικόνα 5-23 Σχηματική αναπαράσταση των δυνάμεων που αναπτύσσονται στο τύμπανο (κινούμενο γρανάζι) κατά τη μετάδοση της ροπής στρέψης από το κινητήριο στο κινούμενο γρανάζι. 33
Εικόνα 6-1 Διάγραμμα διαδικασίας παραγωγής ενός αντικειμένου με τη μέθοδο της προσθετικής κατασκευής. 35
Εικόνα 6-2 Βασικά μέρη μηχανής παραγωγής αντικειμένων με εναπόθεση υλικού. 36
Εικόνα 6-3 Το σύνολο των κομματιών της αρπάγης που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο της προσθετικής κατασκευής. 37
Εικόνα 6-4 Τα κομμάτια της αρπάγης που κατασκευάστηκαν σε τόρνο του εργαστήριου. 37
Εικόνα 6-5 Σε συναρμολόγηση η κατασκευασμένη βάση της αρπάγης. 38
Εικόνα 6-6 Σε συναρμολόγηση με τη λάμα οι δυο μηχανισμοί, κοπής και συγκράτησης. 38
Εικόνα 6-7 Τελικό συναρμολόγημα της αρπάγης. 38
Εικόνα 6-8 Τα κομμάτια που κατασκευάστηκαν για τη μονάδας οδήγησης της αρπάγης. 39
Εικόνα 6-9 Κινητήριο γρανάζι- τύμπανο με τοποθετημένα και τα δυο ρουλεμάν του. 40
Εικόνα 6-10 Τοποθετημένο το κινητήριο γρανάζι μαζί με το κινητήρα Servo πάνω στο κάλυμμα της βάσης της μονάδας. 40
Εικόνα 6-11 Κινούμενο γρανάζι με συρματόσχοινο 40
Εικόνα 6-12 Τοποθετημένο κινούμενο γρανάζι- τύμπανο πάνω στη βάση της μονάδας, ενώ έχει προστεθεί και ο ταχύ- σύνδεσμος και βίδα συγκράτησης του τυμπάνου. 41
Εικόνα 6-13 Τελικό συναρμολόγημα μονάδας οδήγησης της αρπάγης. 41
Εικόνα 6-14 Ρουλεμάν για την έδραση των περιστρεφόμενων κομματιών όπως είναι ο gripper και το τύμπανο, στην εικόνα απεικονίζονται το 687zz (αριστερά) και το 6800zz (δεξιά). 42
Εικόνα 6-15 Ταχύ- σύνδεσμοι αέρος πνευματικών συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στη κατασκευή 43
Εικόνα 6-16 Συρματόσχοινο γαλβάνιζε διαμέτρου 1mm που χρησιμοποιήθηκε για να μεταδίδει τη κίνηση από τη μονάδα στην αρπάγης και δυο είδη σύνδεσης του συρματόσχοινου που χρησιμοποιήθηκαν για την σύνδεση μου τους μηχανισμούς, θηλιάς (πάνω) και με κόμπο (κάτω). 43
Εικόνα 6-17 Ελατήρια επαναφοράς μηχανισμών κοπής και συγκράτησης. 44
Εικόνα 7-1 Περιβάλλον προγραμματισμού του μικροελεγκτή Arduino. 46
Εικόνα 7-2 Ακροδέκτης για ένα τυπικό Servo κινητήρα. 47
Εικόνα 7-3 Αναλυτική παρουσίαση των βασικών μερών ενός κινητήρα τύπου Servo. 47
Εικόνα 7-4 Γραφική παράσταση ενός ψηφιακού σήματος PWM με ανάδειξη των κύριων χαρακτηριστικών του. 48
Εικόνα 7-5 Αναλυτική απεικόνιση των κυρίων μερών του μικροελεγκτή Arduino Uno. 49
Εικόνα 7-6 Ψηφιακή αναπαράσταση της συνδεσμολογίας των κινητήρων της αρπάγης. 50
Εικόνα 7-7 Τοποθέτηση ηλεκτρικού κυκλώματος μέσα σε κουτί με σκοπό την εκτέλεση πειραμάτων με την αρπάγη. 50
Εικόνα 7-8 Διάγραμμα ροής προγράμματος που τρέχει ο μικροελεγκτής Arduino Uno. 51
Εικόνα 8-1 Διαδικασία κοπής και συλλογής άγουρου σταφυλιού. 52
Εικόνα 8-2 Διαδικασία κοπής φύλλου συκιάς. 53
Εικόνα 8-3 Διαδικασία κοπής λουλουδιών κήπου. 53
Εικόνα 8-4 Διαδικασία κοπής και συγκράτησης από δέντρο μικρό ροδί (αριστερά). 53
Εικόνα 8-5 Διαδικασία κοπής φύλλων βλίτου. 54
Εικόνα 8-6 Τρισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο βελτιωμένης εκδοχής της αρπάγης. 55
Εικόνα 8-7 Αναλυτική προβολή συναρμολογήματος τρισδιάστατου γεωμετρικού μοντέλου αρπάγης. 55
Εικόνα 8-8 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος μηχανισμού κοπής. 56
Εικόνα 8-9 Σχηματική αναπαράσταση της μεταβολής της γωνίας ‘’θ’’ πάνω στη καμπύλη της λεπίδας και δυνάμεων κοπής(Fc) αλλά και της δύναμης (Fr) που είναι κάθετη πάνω στη νοητή ευθεία που περνάει από το κέντρο περιστροφής. 57
Εικόνα 8-10 Βέλτιστες περιοχές χρήσης της λεπίδας με βάση τις δυνατότητες σε δύναμη κοπής 58

Εικόνα 8-11 Βελτιωμένη εκδοχή αρπάγης με ανάδειξη του μηχανισμού κοπής (αριστερά) και του μηχανισμού συγκράτησης με το εύκαμπτο ποτενσιόμετρο (δεξιά) 59
Εικόνα 8-12 Ηλεκτρικό κύκλωμα ελέγχου αρπάγης με ανάδειξη της συνδεσμολογίας των επενεργητών και του που ποτενσιόμετρου με το μικροελεγκτή Arduino Nano. 59
Εικόνα 8-13 Μικροελεγκτής Arduino Nano με ανάδειξη των κυρίων σημείων και θυρών του. ... 60
Εικόνα 8-14 Τεχνικά χαρακτηριστικά γραμμικών επενεργητών. 61
Εικόνα 8-15 Γραμμικός επενεργητής της Actuonix με ενσωματωμένο μικροελεγκτή (πάνω αριστερά), με αναλυτική αναπαράσταση με σκοπό την ανάδειξη του μηχανισμών που αποτελείται, το μικροελεγκτή του DC κινητήρα (1) οποίος περιλαμβάνει αισθητήρες και συστήματα ανάδρασης για τη σωστή λειτουργία του ενεργοποιητή, την καλώδια τροφοδοσίας και ανταλλαγής δεδομένων (2), τον κινητήρα του γραμμικού ενεργοποιητή (3), ο ατέρμονας που κινεί μέσα και έξω το βάκτρο του ενεργοποιητή μετατρέποντας τη περιστροφική κίνηση σε γραμμική (4), το βάκτρο με το άκρο του για τη σύνδεση του ενεργοποιητή με άλλους μηχανισμούς (5), το κάλυμα του κινητήρα για τη προστασίας από το εξωτερικό περιβάλλον (6). 61
Εικόνα 8-16 Εύκαμπτο γραμμικό ποτενσιόμετρο. 62
Εικόνα 9-1 Συσχέτιση πλαισίων A και B μέσω του διανύσματος θέσης (pab) και του πίνακα στροφής (Rab) [17]. 65
Εικόνα 9-2 Σχηματική αναπαράσταση σύνθετης στροφής του πλαισίου B ως προς το A [17]. 65
Εικόνα 9-3 Σχηματική αναπαράσταση της συσχέτισης ενός σημείου q από το πλαίσιο B στο πλαίσιο A [17]. 66
Εικόνα 9-4 Αναλυτική απεικόνιση πίνακα ομογενή μετασχηματισμού και των ιδιότητας που αντιπροσωπεύει κάθε στοιχείο του. 67
Εικόνα 9-5 Αναλυτική απεικόνιση των ομογενών μετασχηματισμών που προκύπτουν στο πρόβλημα συσχέτισης της θέσης του καρπού ως προς το πλαίσιο TCP. 69
Εικόνα 9-6 Ψηφιακή αναπαράσταση της σύνθεσης των ομογενών μετασχηματισμών με αποτέλεσμα το χαρακτηρισμό της θέσης του καρπού της ντομάτας με τη βάση του ρομποτικού βραχίονα. 69
Εικόνα 9-7Συνοπτικό διάγραμμα ροής υπολογιστικής διαδικασίας για τον υπολογισμό της θέσης του καρπού ως προς τη βάση του βραχίονα. 70
Εικόνα 9-8 Στο σχήμα παρουσιάζεται ο τρόπος επικοινωνίας της Python με τα υποσυστήματα, την αρπάγη (αριστερά) μέσα από τη βιβλιοθήκη PySerial, το βραχίονα (δεξιά) μέσω της βιβλιοθήκης RTDE, με τη κάμερα (μέση) μέσω της PyRealsense2. 71
Εικόνα 9-9 Ανάδειξη της θέσης του κέντρου μάζας της αρπάγης (Center of mass), του πλαισίου {TCP}, του πλαισίου της φλάντζας {flange} και του {Cam} που σχετίζεται με τη κάμερα. 72
Εικόνα 9-10 Σχηματική αναπαράσταση της επικοινωνίας του ρομπότ με το χρήστη μέσα από τις διαφορετικές διεπαφές. 75
Εικόνα 9-11 Απεικόνιση του εντοπισμού της διεύθυνσης IP μέσα από το teach pendant το ρομποτικού βραχίονα UR. 77
Εικόνα 9-12 Ψηφιακή αναπαράσταση της τροχιάς κίνησης του ρομποτικού βραχίονα σε τρείς θέσεις στόχους στο χώρο του εργαλείου. 78
Εικόνα 9-13 Παράδειγμα κώδικα εκτέλεσης τη κίνηση σε μία σειρά από στόχους τον ένα μετά τον άλλο στο χώρο του εργαλείου. 79
Εικόνα 9-14 Ψηφιακή αναπαράσταση της τροχιάς κίνησης του ρομποτικού βραχίονα σε τρείς θέσεις στόχους στο χώρο των αρθρώσεων. 80
Εικόνα 9-15 Παράδειγμα κώδικα εκτέλεσης της κίνησης σε μία σειρά από στόχους τον ένα μετά τον άλλο στο χώρο των αρθρώσεων. 80
Εικόνα 9-16 Παράδειγμα σύνταξης εντολών και για τα τρία είδη Interface. 81
Εικόνα 9-17 Χρονοδιάγραμμα των εκδόσεων του YOLO[15]. 82
Εικόνα 9-18 Σύγκριση της απόδοσης του μοντέλου YOLO για την έκδοση v8 ως προς την v5 σε περιπτώσεις εντοπισμού αντικειμένων, ταξινόμησης και κατάτμησης [16]. 83
Εικόνα 9-19 Αρχιτεκτονική δικτύου YOLO-v8 Nano. [15] 83

Εικόνα 9-20 Κώδικας για τον εντοπισμό αντικειμένων από το μοντέλο Yolo μέσα από τη web camera [16]. 85
Εικόνα 9-21 Απεικόνιση της εφαρμογής του μοντέλου yolo στη web camera του υπολογιστή. 85
Εικόνα 9-22 Κάμερα βάθους από την εταιρία Intel με εμπορική ονομασία D435i με ανάδειξη των εικονοληπτών. 86
Εικόνα 9-23 Τεχνολογία της υπέρυθρης στερεοσκοπικής όρασης. 87
Εικόνα 9-24 Μηδενικό σημείο αναφοράς για το χάρτη βάθους πάνω στη κάμερα βάθους [18]. 88
Εικόνα 9-25 Θέση των πλαισίων αναφοράς για το Depth και RGB frame [18]. 88
Εικόνα 9-26 Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος της κάμερας βάθους [18]. 88
Εικόνα 9-27 Απεικόνιση σκηνικού μέσα από τη κάμερα Intel 435i για το Color frame (Αριστερά) και Depth frame (δεξιά). 89
Εικόνα 9-28 Παράδειγμα κώδικα στη python για την απεικόνιση του σκηνικού στο color και depth frame όπως αυτό φαίνεται στην Εικόνα 9-27. 90
Εικόνα 9-29 Διάγραμμα επικοινωνίας Python και Αρπάγης μέσα από τη σειριακή επικοινωνία (Serial Communication). 91
Εικόνα 9-30 Διάγραμμα ροής για το βασικό κώδικα του τρέχει στο μικροελεγκτή Arduino Nano για τον έλεγχο της αρπάγης. 93
Εικόνα 9-31 Διάγραμμα ροής προγράμματος που εκτελείται από τη python παράλληλα με το κώδικα στο μικροελεγκτή για τον έλεγχο της αρπάγης. 94
Εικόνα 9-32 Παράδειγμα κώδικα που εκτελείται από τη python για τον έλεγχο των λειτουργιών της αρπάγης. 95
Εικόνα 9-33 Απεικόνιση των μηχανισμών κοπής σε κλειστή θέση (Α), σε ανοιχτή θέση (Β) και μηχανισμού συγκράτησης σε ανοιχτή θέση (Γ), κλειστή θέση (Δ). 96
Εικόνα 9-34 Χαρακτηριστικά σημεία πάνω στο πλαίσιο εντοπισμού για τον υπολογισμό του κέντρου του. 97
Εικόνα 9-35 Διάγραμμα ροής για το κώδικα που εντοπίζει τη θέση των καρπών ντομάτας και υπολογίζει τη θέση του ως προς το {TCP.} 98
Εικόνα 9-36 Εντοπισμός και επισήμανση καρπού ντομάτας με της κάμερας βάθους. 99
Εικόνα 9-37 Διάγραμμα ροής κυρίως κώδικα για την εκτέλεση των πειραμάτων εντοπισμού, προσέγγισης και συλλογής καρπών ντομάτας. 100
Εικόνα 9-38 Υπολογισμός pre- grasp και peduncle point από το σημείο που υπολογίζεται από τη κάμερα βάθους. 100
Εικόνα 10-1 Αρχιτεκτονική πειραματικής διάταξης για την αποτίμηση των δυνατοτήτων της αρπάγης, με ανάδειξη της ανταλλαγής δεδομένων (πορτοκαλί βέλος) μεταξύ υποσυστημάτων, τη εξωτερική τροφοδοσία συσκευής (κόκκινο βέλος), και την σύνδεση με μηχανικό τρόπο μεταξύ υποσυστημάτων (πράσινο βέλος) 101
Εικόνα 10-2 Σύνοψη πειραματικής διαδικασίας προσέγγισης καρπών ντομάτας. 102
Εικόνα 10-3 Αρχική στάση του βραχίονα αναμένοντας το εντοπισμό καρπών ντομάτας. 102
Εικόνα 10-4 Σύνοψη πειραματικής διαδικασίας συλλογής καρπών. 103
Εικόνα 10-5 Χαρακτηριστικό μήκος για τον κοτσάνι των καρπών ντομάτας. 104
Εικόνα 10-6 Χαρακτηριστική ελάχιστη απόσταση της ντομάτας από τη κάμερα. 104
Εικόνα 10-7 Στιγμιότυπα από της ντομάτες που εντοπίστηκαν για τα πειράματα προσέγγισης. 105
Εικόνα 10-8 Στιγμιότυπα προσεγγίσεων των μίσχων της ντομάτας για τις εντοπισμένες ντομάτες. 106
Εικόνα 10-9 Ψηφιακή αναπαράσταση των θέσεων των καρπών ντομάτας στο χώρο σε σχέση με το βραχίονα. 106
Εικόνα 10-10 Στιγμιότυπα από τις ντομάτες που εντοπίστηκαν για τα πειράματα συγκομιδής. . 108
Εικόνα 10-11 Ψηφιακή αναπαράσταση των τυχαίων θέσεων των καρπών ως προς το βραχίονα. 108
Εικόνα 10-12 Στιγμιότυπα από τα πειράματα συγκομιδής κατά τη διαδικασία των πειραμάτων. 109

3. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα κίνητρα και οι στόχοι για την υλοποίηση της παρούσας πτυχιακής εργασίας ενώ στο τέλος γίνεται και μια σύντομη ανασκόπηση για αυτά που θα παρουσιαστούν.

3.1. Σύντομη ανασκόπηση της εργασίας

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα κίνητρα που οδήγησαν το σπουδαστή να πραγματοποιήσει αυτή την εργασία αλλά και το σκοπό που θέλει να πετύχει με την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται υπάρχουσες τεχνολογίες πάνω στο τομέα της γεωργίας στη ρομποτική για να γίνει κατανοητό το σημείο που έχει φτάσει η τεχνολογία. Έτσι αναδεικνύονται κάποια σύγχρονα ολοκληρωμένα συστήματα που εκτελούν κυρίως εργασίες συγκομιδής ενώ στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται αναφορά σε κοπτικούς μηχανισμούς.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη σχεδίαση της αρπάγης. Το κεφάλαιο ξεκινάει με τη σύλληψη της ιδέας μιας και αποτελεί μια ιδιαίτερη προσέγγιση του προβλήματος της συγκομιδής καρπών. Στη συνέχεια παρουσιάζεται βήμα προς βήμα η σχεδίαση των μηχανικών μερών της αρπάγης και της μονάδας οδήγησης αυτής.

Το έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η κατασκευή της αρπάγης, ξεκινώντας με την κατασκευή όλων των κομματιών που σχεδιάστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο και στη συνέχεια γίνεται η συναρμολόγηση των επιμέρους εξαρτημάτων με την τελική μορφή της αρπάγης και της μονάδας χειρισμού αυτής.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζεται το σύστημα ελέγχου για το πρωτότυπο της αρπάγης περιγράφοντας το μικροελεγκτή, του ενεργοποιητές αλλά και το ηλεκτρικό κύκλωμα της αρπάγης.

Στο όγδοο κεφάλαιο πραγματοποιούνται κάποια πειράματα για τη διαπίστωση της λειτουργικότητα του πρωτότυπου της αρπάγης που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε, ενώ μέσα από τα συμπεράσματα που προκύπτει για αυτήν αποτελούν γνώμονα για επανασχεδίαση του βελτιωμένου πρωτότυπου.

Στο ένατο κεφάλαιο επιδιώκεται η ενσωμάτωση της νέας αρπάγης σε ένα ολοκληρωμένο ρομποτικό σύστημα. Αρχικά ορίζεται το πρόβλημα που αφορά την αυτοματοποίηση της συγκομιδής ώριμων καρπών ντομάτας, παραθέτοντας στη συνέχεια τις απαιτούμενες γνώσεις για την επίλυση του. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η θεωρητική λύση του προβλήματος και τέλος τα βήματα προς την υλοποίηση του.

Στο δέκατο κεφάλαιο περιλαμβάνεται πειραματική αποτίμηση των δυνατοτήτων της αρπάγης περιγράφοντας αρχικά τη πειραματική διάταξη, το πρωτόκολλο που ακολουθείται για την εκτέλεση των πειραμάτων με τις παραδοχές και τέλος τα πειράματα που

πραγματοποιήθηκαν στο ΄χώρο του εργαστηρίου. Η εργασία κλείνει με το παράθεση κάποιων συμπερασμάτων για την αρπάγη και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

3.2. Κίνητρα

Στη μέρες μας γίνεται όλο και πιο έντονος ο αγώνας για καλύτερο και πιο αποδοτικότερο έλεγχο και χειρισμό των γεωργικών καλλιεργειών με σκοπό τη μείωση της μόλυνσης του περιβάλλοντος και καλύτερη αξιοποίηση των φυσικών πόρων. Ο αγώνας αυτός έχει προκαλέσει τη δραστηριοποίηση ειδικών να ασχοληθούν με τη κατασκευή αυτοματοποιημένων συστημάτων που να εκτελούν αγροτικές εργασίες όπως το κλάδεμα, η συλλογή καρπών, η αποψίλωση καλλιεργειών από ζιζάνια, το ψέκασμα με φυτοφάρμακα και άλλα πολλά.

Η Ελλάδα λόγο του κλίματος αλλά και της μορφολογίας του εδάφους, έχει δώσει τη δυνατότητα σε χιλιάδες ανθρώπους να ασχοληθούν με το πρωτογενή τομέα παράγοντας προϊόντα υψηλής ποιότητας.

Παρόλα αυτά παρατηρείται μια μειωμένη τάση στον εκσυγχρονισμού των καλλιεργητικών τεχνικών πράγμα που επηρεάζει αρνητικά την ανταγωνιστικότητα με τις υπόλοιπες χώρες αντίστοιχα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα πολύ άνθρωποι να καταφεύγουν σε άλλες μορφές εργασίας εγκαταλείποντας το πρωτογενή τομέα. Με βάση τα παραπάνω δημιουργήθηκε το ενδιαφέρον να κατασκευαστεί μια μηχατρονική αρπάγη για γεωργικές εφαρμογές ώστε να παρακινήσει με κάποιο τρόπο τους ανθρώπους που εργάζονται στο πρωτογενή τομέα να συνεχίσουν να ασκούν το επάγγελμα αυτό, εντάσσοντας στη καθημερινότητα τους νέες τεχνικές που θα αυξήσουν την αποδοτικότητα των εργασιών τους

3.3. Σκοπός

Κύριος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας αρπάγης η οποία θα προορίζεται για γεωργικές χρήσεις και συγκεκριμένα τη συλλογής καρπών. Για την επίτευξη του στόχου αυτού θα πρέπει να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί ο μηχανισμός ο οποίος θα εκτελεί αυτές τις εργασίες. Η διαδικασία της κατασκευής της αρπάγης όμως περιέχει τη τρισδιάστατη μοντελοποίηση της αρπάγης, τη ταχεία προτυποποίηση μέσα από τη τεχνολογία τις τρισδιάστατης εκτύπωσης, τον έλεγχο της λειτουργίας της αρπάγης, διαδικασίες που εντάσσονται σε πολλά διαφορετικά επιστημονικά πεδία με τα οποία είναι επιθυμητό να καταπιαστεί ο σπουδαστής εφαρμόζοντας τις γνώσεις που έχει αποκτήσει κατά τη διάρκεια των σπουδών του.

4. Τεχνολογίες ρομποτικών συστημάτων στη γεωργία

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τεχνολογίες ρομποτικών συστημάτων στη γεωργία αλλά και κοπτικών μηχανισμών που προέκυψαν από ερευνά στο διαδίκτυο ώστε να γίνει αντιληπτό το επίπεδο της τεχνολογίας.

4.1. Ρομπότ συλλογής καρπών τομάτας της MetoMotion.

Το ρομπότ GRoW από την MetoMotion [1] (Εικόνα 4-1) είναι ένα ολοκληρωμένο ρομποτικό σύστημα κατασκευασμένο για τη συλλογή καρπών τομάτας μέσα σε θερμοκήπιό. Το ρομπότ αυτό χρησιμοποιεί κάμερες για να εντοπίσει τις ώριμες ντομάτες αλλά και για να υπολογίσει τη θέση.

Η συλλογή των καρπών γίνεται με τη βοήθεια ενός ρομποτικού βραχίονα ο οποίος προσεγγίζει το φυτό και με τη βοήθεια μια κατάλληλα σχεδιασμένης αρπάγης γίνεται ταυτόχρονη κοπή και πιάσιμο των καρπών. Αξίζει βέβαια να σημειωθεί ότι η συλλογή των καρπών τομάτας γίνεται συλλέγοντας ολόκληρο το τσαμπί και όχι το κάθε καρπό μεμονωμένα.



Εικόνα 4-1 *Ρομποτικό σύστημα συλλογής καρπών τομάτας της MetoMotion.*

Επιπλέων το ρομποτικό σύστημα έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης των καρπών μέσω ενός ταινιόδρομου που φέρει πάνω στη κατασκευή του αλλά και να δίνει πληροφορίες σχετικά με τη κατάσταση της σοδειάς ώστε να βοηθήσει τον ιδιοκτήτη να προγραμματίσει καλύτερα τις εργασίες του.

4.2. Ρομπότ συλλογής καρπών τομάτας από την Panasonic

Το ρομπότ συλλογής καρπών τομάτας από την εταιρεία Panasonic [2] (Εικόνα 4-2) είναι φτιαγμένο για να κυκλοφορεί πάνω σε ειδικούς διάδρομους μέσα σε θερμοκήπια. Με

κάμερες εντοπίζει τις ώριμες ντομάτες χρησιμοποιώντας τη διαφορά χρώματος μεταξύ ώριμης και μη τομάτας. Η συλλογή των καρπών γίνεται μια προς μια χάρη στην ειδικά σχεδιασμένη αρπαγή που φέρει στο άκρο του ο βραχίονας.



Εικόνα 4-2 *Ρομποτικό σύστημα συλλογής καρπών τομάτας από τη Panasonic*

4.3. Ρομπότ συλλογής καρπών πιπεριάς

Το ρομπότ συλλογής καρπών πιπεριάς [3] (**Εικόνα 4-3**) αποτελεί ένα ακόμα εγχείρημα για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας συλλογής καρπών μέσα σε θερμοκήπιό. Σε αυτή τη περίπτωση η συλλογή των καρπών προορίζεται για πιπεριές. Η διαδικασία της συλλογής γίνεται μέσω ενός βραχίονα ο οποίος είναι τοποθετημένος σε ένα ψαλιδωτό ανυψωτικό μηχάνημα. Ο εντοπισμός των καρπών γίνεται με κάμερες και η απόσταση του καρπού από το φυτό γίνεται με τη βοήθεια μιας ειδικά σχεδιασμένης αρπάγης.



Εικόνα 4-3 *Ρομποτικό σύστημα συλλογής καρπών πιπεριάς*

4.4. Ρομπότ συλλογής καρπών φράουλας από την Agrobot

Το ρομπότ συλλογής καρπών φράουλας από την εταιρεία Agrobot [4] (**Εικόνα 4-4**) αυτό είναι κατάλληλα σχεδιασμένο για να καλλιεργείς θερμοκηπίου αλλά και υπαίθριες καλλιεργείς. Η συλλογή των καρπών φράουλας γίνεται με το αυτοκινούμενο όχημα να περνάει πάνω από τη καλλιέργεια. Με κάμερες εντοπίζει τους ώριμους καρπούς και τους συλλεγεί με κατάλληλα άκρα τα οποία προσεγγίζουν τους καρπούς κατακόρυφα τους αποκόπτουν και τους απομακρύνουν σε ειδικά δοχεία οπού αποθηκεύονται.



Εικόνα 4-4 *Ρομποτικό σύστημα συλλογής καρπών φράουλας της Agrobot.*

Η αρπάγη για την αποκοπή και συγκράτηση των καρπών φράουλας πρόκειται για ένα απλό μηχανισμό οποίος σφίγγει και συγκρατεί το καρπό από το κοτσάνι του. Η αποκοπή του καρπού γίνεται χάρι σε μικρές λεπίδες που είναι τοποθετημένες πάνω στις λαβές, έτσι καθώς σφίγγεται το κοτσάνι κόβεται ταυτόχρονα και το κοτσάνι.

4.5. Ρομπότ κλαδέματος αμπελιών

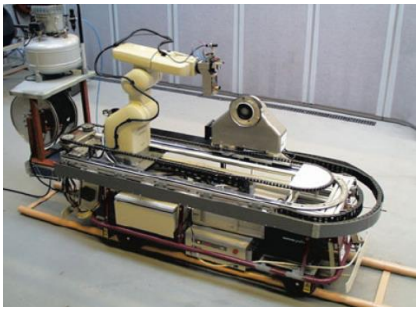
Το ρομπότ κλαδέματος αμπελιών [5] (**Εικόνα 4-5**)αυτό είναι κατασκευασμένο για να πραγματοποιεί διαδικασίες κλαδέματος σε αμπελώνες. Χρησιμοποιεί στερεοσκοπικές κάμερες οι οποίες σαρώνουν ολόκληρο το αμπέλι φυτό και με πολλαπλές αλληλεπικαλυπτόμενες φωτογραφίες δημιουργεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο της αμπέλου και στη συνέχεια εφαρμόζει κανόνες κλάδευσης. Η τεχνολογία έχει τη δυνατότητα να προσαρμοστεί σε άλλες πρακτικές όπως η αφαίρεση φύλλων και η αραίωση βλαστών.

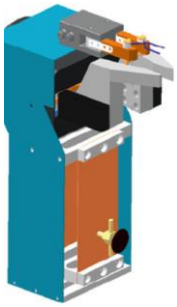


Εικόνα 4-5 *Ρομπότ κλαδέματος αμπελιών*

4.6. Ρομπότ συλλογής καρπών από αγγούρι

Το ρομπότ συλλογής καρπών από αγγούρι [12] (**Εικόνα 4-6**) δοκιμάστηκε σε ένα πειραματικό θερμοκήπιο, με μέση ταχύτητα 45 s ανά αγγούρι, και με ποσοστό επιτυχίας 80%. Στην ουσία, οι αποτυχίες οφείλονταν σε ανακρίβειες στην εκτίμηση θέσης Η αρπάγη περιέχει μια λαβή με δύο δάχτυλα και μια βεντούζα από όπου συγκρατεί τα φρούτα (αγγούρια) και μια θερμική συσκευή κοπής για να διαχωρίσετε τα φρούτα από το φυτό.



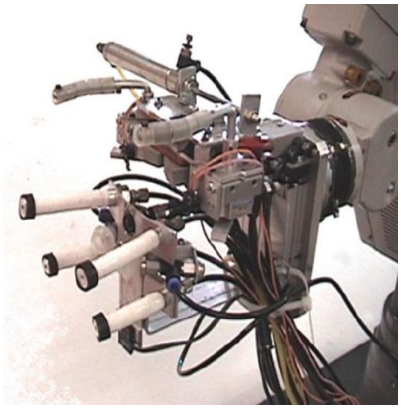


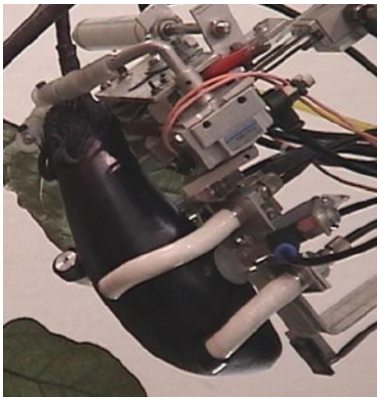
Εικόνα 4-6 *Ρομποτικό σύστημα συλλογής καρπών αγγούρι.*

Η λειτουργία έχει ως εξής: με ένα σύστημα τρισδιάστατης όρασης βρίσκει το αγγούρι. Μετά από αυτό χρησιμοποιώντας τα δάχτυλα της λαβής, το ρομπότ πιάνει το μίσχο του αγγουριού. μετά από αυτό κόβεται ο καρπός και με την βεντούζα το αγγούρι ακινητοποιείται κατά το στάδιο μεταφοράς. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι θερμική κοπή δημιουργεί μια σημαντική βελτίωση σε σχέση με παραδοσιακή κοπή με μαχαίρι. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όταν χρησιμοποιείται το ίδιο μαχαίρι για την κοπή του καρπού ξανά και ξανά, υπάρχει κίνδυνος μετάδοσης ιών, οπότε πρέπει να καθοριστεί ένας μηχανισμός καθαρισμού για να αφαιρούνται οποιαδήποτε οργανικά υπολείμματα μετά από μια εργασία κοπής.

4.7. Αρπάγη συλλογής καρπών μελιτζάνας

Η αρπάγη συλλογής καρπών μελιτζάνας [12] (**Εικόνα 4-7**) αποτελείται από μια λαβή με τέσσερις επενεργητές από καουτσούκ, δυο μηχανισμούς με αναρρόφησης και έναν μηχανισμό κοπής μίσχων (με ψαλίδι). Δύο πρόσθετα δάχτυλα χρησιμοποιούνται ως κατευθυντήρια γραμμή για την συγκομιδή φρούτων και ειδικά για να πιαστεί το μίσχος. Όλοι οι μηχανισμοί ενεργοποιούνται με 4 bar πεπιεσμένου αέρα. Ένα εργαστηριακό σε πείραμα έγινε με επιτυχία ποσοστό συγκομιδής 62,5% και με μέση ταχύτητα 64 s ανά μελιτζάνα.





Εικόνα 4-7 *Ρομπότ συλλογής καρπών μελιτζάνας*

4.8. Μηχανισμοί κοπής για γεωργικές χρήσεις

Οι μηχανισμοί που προέκυψαν από ερευνά στο διαδίκτυο, διαφοροποιούνται ανάλογα με τη μορφή και τη λειτουργία τους και παρουσιάζονται παρακάτω. Αρχικά παρουσιάζονται μηχανισμοί χειρός και στη συνέχεια μηχανισμοί αέρος και ηλεκτρικοί.



Εικόνα 4-8 *α) Κλαδευτικό ψαλίδι τύπου παράκαμψης (παράγραφος 3.8.1), β) Κλαδευτικό ψαλίδι τύπου αμόνι (παράγραφος 3.8.2), γ)Πριόνι χειρός (παράγραφος 3.8.3), δ)Κλαδευτικό ψαλίδι τύπου παράκαμψης με δυο κοπτικές λεπίδες (παράγραφος 3.8.4).*

Κλαδευτικό ψαλίδι τύπου παράκαμψης με μια κοπτική λεπίδα

Η λειτουργία σε αυτό το τύπο ψαλιδιού βασίζεται στη μεταξύ τους παράκαμψη δυο λεπίδων. Αυτό σημαίνει ότι δυο λεπίδες τοποθετημένες η μια δίπλα στην άλλη μετακινούνται μεταξύ τους και πραγματοποιούν το μηχανισμό κοπής. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει καλύτερη ποιότητα κοπής σε σχέση με μηχανισμούς τύπου αμόνι.

Κλαδευτικό ψαλίδι τύπου αμόνι

Στο μηχανισμό αυτό θα μπορούσε κανείς να πει κανείς ότι μοιάζει με το τρόπο που κόβονται τα λαχανικά πάνω σε μια πλακά κοπής, καθώς μια αιχμηρή λεπίδα πιέζει τα προς κοπή αντικείμενα πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια και λόγω της πίεσης αυτής πραγματοποιείται η κοπή. Γενικά η μέθοδος αυτή χαρακτηρίζεται από μικρότερη απαίτηση σε δύναμη ένα ευρύ σημείο στο οποίο γίνεται η κοπή. Αυτός ο μηχανισμός είναι ιδανικό για σκληρότερα κλαδιά, ξυλώδη στελέχη, νεκρό ξύλο και παρόμοια.

Πριόνι χειρός

Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια τελείως διαφορετική προσέγγιση κοπής που αφορούν γεωργικές εργασίες. Σε αυτή τη μέθοδο η λεπίδα φέρει κατάλληλη οδόντωση πάνω στη πλευρά κοπής. Η κοπή πραγματοποιείται κινώντας παλινδρομικά τη λεπίδα πάνω στο σημείο κοπής. Η παλινδρόμηση αυτή αφαιρεί σταδιακά υλικό από τον ιστό στο σημείο επαφής τους προκαλώντας τελικά την αποκοπή του. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε έντονα ογκώδης ιστούς ενώ η ποιότητα κοπής είναι χαμηλή.

Κλαδευτικό ψαλίδι τύπου παράκαμψης με δυο κοπτικές λεπίδες

Στη μέθοδο αυτή δυο όμοιες λεπίδες κινούνται η μια αντίθετα στην άλλη, πραγματοποιώντας κοπές από τη μεταξύ τους παράκαμψη. Οι κοπές και σε αυτή τη μέθοδο χαρακτηρίζονται από καλή ποιότητα κοπής. Θα μπορούσε να πει κανείς ότι η μηχανισμοί αυτοί χρησιμοποιούν κατά βάση την ίδια φιλοσοφία με τους τύπους Lopping με τη μόνη διαφορά εδώ ότι οι αιχμές κοπής εδώ είναι ευθείες και όχι καμπύλες. Η λειτουργία τους θυμίζει το μηχανισμό κοπής τύπου παράκαμψης με μια λεπίδα κοπής που παρουσιάζεται παραπάνω.

4.8.1. Κλαδευτικό ψαλίδι αέρος

Ο μηχανισμός αυτός αποτελεί εξέλιξη στο ψαλίδι κλαδέματος τύπου παράκαμψης που παρουσιάστηκε παραπάνω. Η ιδέα πίσω από τη λειτουργία του ψαλιδιού αυτού είναι η δύναμη που χρειάζεται να ασκηθεί στη λεπίδα για να πραγματοποιήσει τη κοπή προέρχεται από ένα κύκλωμα πεπιεσμένου αέρα.



Εικόνα 4-9 *Κλαδευτικό ψαλίδι αέρος τύπου παράκαμψης με μια λεπίδα κοπής.*

Η πίεση αυτή του αέρα ασκείται σε ένα πνευματικό έμβολο του οποίου το βάκτρο είναι συνδεμένο με τη λεπίδα. Έτσι καθώς πιέζεται το έμβολο από τον αέρα, κινείται σπρώχνοντας με τη σειρά του τη λεπίδα. Ο μηχανισμός αυτός εκτός από τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει σε χαμηλό κόστος και ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης, παρουσιάζει και ένα μεγάλο μειονέκτημα που είναι το η ανάγκη για κύκλωμα πεπιεσμένου αέρα στο χορό εργασίας.

4.8.2. Κλαδευτικό ψαλίδι ηλεκτρικό

Η χρήση ηλεκτρικών ψαλιδιών χειρός αποτελεί από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους κλαδέματος. Η λειτουργία του είναι όμοια με το κλαδευτικό ψαλίδι αέρος με τη διαφορά ότι σε αυτή τη περίπτωση η επενέργεια πάνω στη λεπίδα γίνεται από ηλεκτρικό κινητήρα.



Εικόνα 4-10 *Κλαδευτικό ψαλίδι ηλεκτρικό τύπου παράκαμψης με μια λεπίδα κοπής.*

Πιο συγκεκριμένα η επενέργεια γίνεται από ένα σέρβο-κινητήρα ο οποίος ελέγχεται από μια κεντρική μονάδα. Η κοπή μπορεί να είναι σταδιακή, δηλαδή όσο περισσότερο πιέζεται το κουμπί τόσο περισσότερο κλείνει η λεπίδα αλλά και απότομη με διπλό πάτημα του κουμπιού (η λειτουργία και η δυνατότητες κάθε ψαλιδιού μπορεί να διαφέρουν από κατασκευαστή σε κατασκευαστή). Τα πιο εξελιγμένα ηλεκτρικά ψαλίδια προσφέρουν στο χειριστή και προστασία από τραυματισμό κατά τη κοπή, όπου η κοπή αναστέλλεται. Η τροφοδοσία του ψαλιδιού και της μονάδας ελέγχου γίνεται από μπαταρίες οι οποίες μπορούν να προσφέρουν αυτονομία λειτουργίας μέχρι και οχτώ ώρες.

4.8.3. Αλυσοπρίονο

Η χρήση αλυσοπρίονων γίνεται κατά κύριο λόγο σε ξυλώδης ιστούς. Η κοπή των αλυσοπρίονων βασίζεται στη σταδιακή αφαίρεση υλικού, όπως και στα χειροκίνητα πριόνια, όπου πολλές κοπτικές ακμές κινούνται πάνω στο ξύλωμα.



Εικόνα 4-11 *Αλυσοπρίονο ηλεκτρικό χειρός.*

Οι κοπτικές ακμές είναι συνδεμένες μεταξύ τους σχηματίζοντας στο σύνολο μια αλυσίδα. Τη κίνηση της αλυσίδας αναλαμβάνει ένας ηλεκτρικός κινητήρας, καθώς η ταχύτητα περιστροφής του ελέγχεται από ένα διακόπτη ενώ τροφοδοσία του κινητήρα γίνεται από μια μπαταρία. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη λειτουργία της η αλυσίδας πρέπει να λιπαίνεται με ειδικό λιπαντικό φιλικό στο περιβάλλον.

4.8.4. Κονταροψάλιδο τύπου παράκαμψης

Η χρήση κοπτικών μηχανισμών τύπου κονταροψάλιδο αποτελεί μια ιδιαίτερη κατηγορία των εργαλείων χειρός καθώς η χρήση του προορίζεται μόνο για μεγάλα ύψη εκεί οπού οι απλοί (βλ. Εικόνα 4-12) δεν είναι καλύπτουν τις ανάγκες της εργασίας. Οι μηχανισμοί τύπου κονταροψάλιδο αποτελούνται κυρίως από το κοπτικό μηχανισμό, τη προέκταση του μηχανισμού (κοντάρι) και τη λαβή με την οποία χειρίζεται ο μηχανισμός



Εικόνα 4-12 *Κοπτικός μηχανισμός τύπου κονταροψαλιδο απο την εταιρεία Ameco.*

Επιπλέον ανάλογα με τη κατασκευή του μηχανισμού συνήθως φέρουν ειδικές λαβές για την συγκράτηση και απομάκρυνση του κομμένου ιστού μακριά από το φυτό.

5. Σχεδιασμός αρπάγης και μονάδας οδήγησης αρπάγης.

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται ο σχεδιασμός της αρπάγης και της μονάδας οδήγησης αυτής. Αρχικά, αναλύεται ο τρόπος με το οποίο έγινε η σύλληψη της ιδέας για τη μορφή και το μηχανισμό της αρπάγης και στη συνέχεια η λογική βάση της οποίας προέκυψε και η μονάδα οδήγησης της αρπάγης.

5.1. Σύλληψη ιδέας

Η διαδικασία της μοντελοποίησης και διαστασιολόγησης της αρπάγης ώστε στη συνέχεια να προχωρήσει στη κατασκευή της, ήταν προϊόν μιας αρχικής διαδικασίας που σκοπό είχε να γίνει η σύλληψη της ιδέας. Αυτό πραγματοποιήθηκε μέσα από μια διαδικασία έρευνας υπάρχων τεχνολογιών πάνω στο αντικείμενο των γεωργικών δραστηριοτήτων όπως αυτό παρουσιάστηκε παραπάνω.

Μέσα από την ερευνά αυτή παρατηρήθηκε ότι όλες οι αρπάγες έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι ότι είναι φτιαγμένες με τέτοιο τρόπο ώστε ένα μέρος τους να ασχολείται με την απόσπαση του ιστού από το φυτό, είτε αυτό είναι κάποιος καρπός, φύλλο ή κλαδί και κάποιο άλλο κομμάτι τους κατά περίπτωση με τη διαχείριση του ιστού που έχει αποκοπεί, δηλαδή την απομάκρυνση κάποιου καρπού, κλαδιού ή φύλλου.



Εικόνα 5-1 *Διαδικασία συγκομιδής καρπών σταφυλιού με ανάδειξη της μεθοδολογία κοπής και συγκράτησης του καρπού.*

Τα όσα προαναφέρθηκαν μπορούν να γίνουν καλύτερα κατανοητά μέσα απ' τη παραπάνω εικόνα (Εικόνα 5-1). Σε αυτή την εικόνα φαίνεται ότι για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία

της συγκομιδής του καρπού (είτε αυτό είναι σταφύλι, τομάτα, πιπεριά κτλ.) το ένα χέρι ασχολείται με την απόσπαση του καρπού χρησιμοποιώντας κάποιο κοπτικό μέσο και το άλλο με τη συγκράτηση του και τη μετακίνηση του μακριά από το φυτό με κάποιο ασφαλή τρόπο.

Αυτή τη μεθοδολογία αποτελεί τη βασική ιδέα στη σχεδίαση της αρπάγης. Τονίζεται ότι η χρήση του δεύτερου μηχανισμού ανάλογα με τη περίπτωση είναι προαιρετική (όπως διαδικασία κλαδέματος) όπου δεν είναι απαραίτητη η ασφαλής μετακίνηση του ιστού μακριά από το φυτό. Επίσης η ιδέα που παρουσιάζεται σε αυτήν την εργασία βασίζεται στην έμμεση συγκράτηση του καρπού μέσα από το κοτσάνι που διαθέτει και όχι απευθείας σε αυτό.

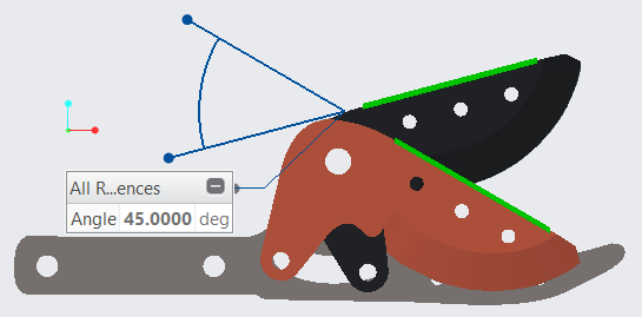
5.2. Σχεδιασμός αρπάγης

Ρομποτική αρπάγη είναι μια συσκευή που μπορεί να "πιάσει" και να επεξεργαστεί ένα αντικείμενο. Συνήθως είναι συνδεδεμένη στο άκρο ενός ρομποτικού βραχίονα, και προσομοιώνει την κίνηση του ανθρώπινου χεριού ή κάποιου εξειδικευμένου εργαλείου. Η μορφή και τα χαρακτηριστικά αυτής της συσκευής εξαρτώνται από τις ανάγκες της εφαρμογής που θα χρησιμοποιηθεί.

Η πρώτη έρευνα που έγινε πάνω στην τεχνολογία αυτή, πραγματοποιήθηκε το 1969 από το Πανεπιστήμιο του Στάνφορντ. Ήταν μια πρώιμη ρομποτική μηχανή, η οποία θα γινόταν γνωστή ως "η πρώτη εύκολα ελεγχόμενη αρπάγη". Πειράματα πάνω στην συγκεκριμένη τεχνολογία είχαν υπάρξει και από άλλα πανεπιστήμια, χωρίς όμως ουσιαστικά αποτελέσματα. Η αρπάγη του Victor Scheinman, είχε την δυνατότητα να κατευθύνεται μέσω υπολογιστή, σε έξι πλήρης βαθμούς ελευθερίας. Σε σχέση με παλιότερα πειράματα, η συγκεκριμένη αρπάγη ήταν πιο εύκολη στον χειρισμό της και πιο ασφαλής. Η πρώτη αυτή απόπειρα, βοήθησε ουσιαστικά στην ανάπτυξη της γνωστικής βάσης που έχει εφαρμοστεί σε όλα τα βιομηχανικά ρομπότ του σήμερα .

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολλές έρευνες και πειραματισμοί πάνω στην κατασκευή και εξέλιξη της ρομποτικής αρπάγης. Οι αναρίθμητες βιομηχανικές διεργασίες και οι διαφορετικές απαιτήσεις της εκάστοτε εργασίας επιβάλλουν την δημιουργία διαφορετικών αρπαγών. Ανάλογα τη μορφή της εργασία και το περιβάλλον στο οποίο υλοποιείται, χρειάζονται αντίστοιχα τα κατάλληλα μηχανολογικά χαρακτηριστικά της αρπάγης. Ένας μηχανικός λοιπόν, οφείλει να μελετήσει πολλές παραμέτρους προκειμένου να επιλέξει την σωστή αρπάγη με τα κατάλληλα χαρακτηριστικά ή να κατασκευάσει εκ νέου μία. Ορισμένες εργασίες πρέπει να γίνονται με συγκεκριμένες ταχύτητες, ή να περιορίζονται σε συγκεκριμένο χώρο. Επιπλέον σε κάποιες περιπτώσεις απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια και κάποια προϊόντα είναι πιο ευαίσθητα σε σχέση με κάποια άλλα. Σίγουρα το ζητούμενο του μηχανικού σε κάθε περίπτωση, είναι οι διεργασίες να γίνουν σωστά, στον ελάχιστο δυνατό χρόνο, με ασφάλεια και χωρίς να φθείρεται το τελικό προϊόν.

Κατά βάση η κατασκευή της αρπάγης είναι ένα ψαλίδι τύπου παράκαμψης με μια λεπίδα κοπής. Η εξέλιξη σε αυτό το τύπο ψαλιδιού έγινε αντικαθιστώντας την απλή λεπίδα που έχουν τα ψαλίδια αυτά με μια η οποία φέρει και ένα μοχλοβραχίονα με σκοπό να φτιαχτεί ένα κονταροψάλιδο.



Εικόνα 5-2 *Γωνία περιστροφής του μηχανισμού κοπής*

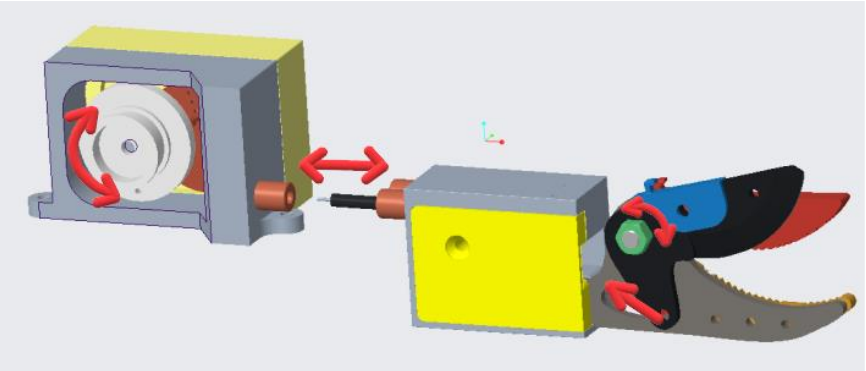
Η εξέλιξη αυτή βοήθησε καθώς ο έτοιμος αυτός μηχανισμός κοπής τροποποιήθηκε τοποθετώντας και το μηχανισμό συγκράτησης στο ίδιο σημείο στήριξης με αυτό της λεπίδας κοπής του κονταροψάλιδου.

Έτσι, αφού επιλέχθηκε η αρχική ιδέα της μορφής της αρπάγης στη συνέχεια αποφασίστηκε ότι η αίτια που θα προκαλεί περιστροφή των δυο μηχανισμών θα είναι τοποθετημένη απόσταση από την κατασκευή της αρπάγης για το λόγο αυτό προτάθηκε η ιδέα κατασκευής της μονάδας οδήγησης της αρπάγης των οποίων μέσο σύνδεσης είναι το συρματόσχοινο. Η ιδέα του απομακρυσμένου ελέγχου έχει σκοπό τη μείωση του όγκου της αρπάγης που είναι αναρτημένη στο άκρο.

Η λειτουργία της μονάδας οδήγησης της αρπάγης βασίζεται στην ιδέα της περιέλιξης ενός νήματος γύρω από ένα περιστρεφόμενο τύμπανο. Η περιέλιξη αυτή γύρω από το τύμπανο προκαλεί τη κίνηση του συρματόσχοινου και κατά συνέπεια τη μετακίνηση του αντικειμένου που είναι αγκιστρωμένο στην άκρη του συρματόσχοινου. Ο μηχανισμός αυτός είναι ευρέως διαδεδομένος καθώς δίνει τη δυνατότητα έλξης αντικειμένων που βρίσκονται σε μεγάλη με χαρακτηριστική εφαρμογή αυτή που έχουν τα αυτοκίνητα για ρυμούλκευση.

Έτσι και στη περίπτωση της αρπάγης, οπού δυο συρματόσχοινα τυλίγονται πάνω σε δυο τύμπανα, τα οποία περιστρέφουν ανεξάρτητα δυο κινητήρες RC Servo, ένας για το μηχανισμό κοπής και ένα για το μηχανισμό συγκράτησης. Πιο συγκεκριμένα η κίνηση προέρχεται από το κινητήρα RC Servo και μεταδίδεται μέσω των γραναζιών στο τύμπανο. Προφανώς ανάλογα με τη φορά που περιστρέφεται ο κινητήρας πραγματοποιείται το τύλιγμα ή το ξετύλιγμα του συρματόσχοινου πάνω στο τύμπανο. Έτσι με αυτό τρόπο η περιστροφική κίνηση του κινητήρα μετατρέπεται σε γραμμική.

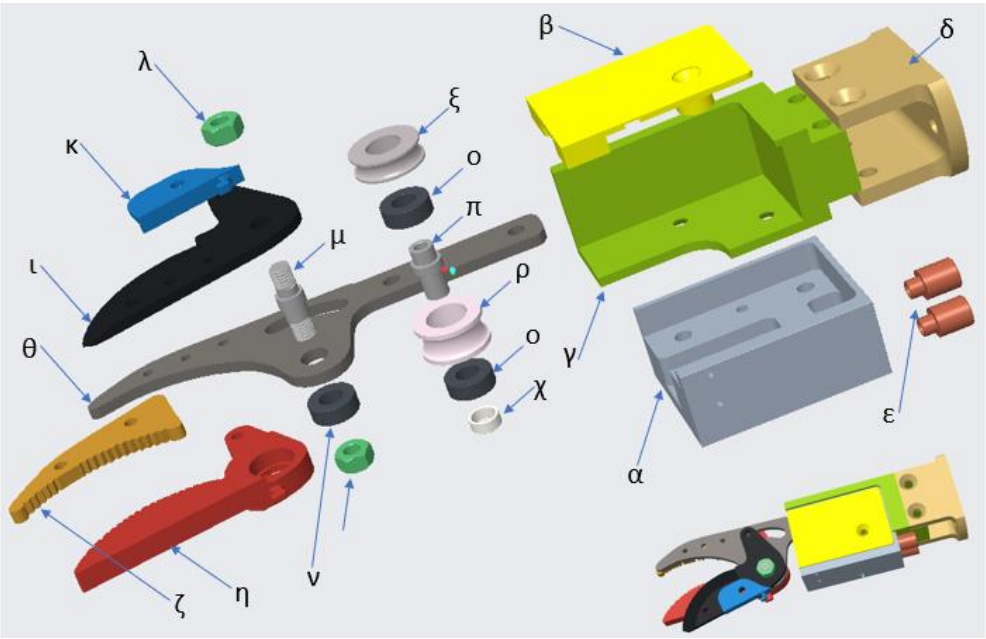
Σημειώνεται ότι η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται αφού πρώτα έχει γίνει η σύνδεση του συρματόσχοινου με το τύμπανο. Για την προκείμενη περίπτωση η σύνδεση γίνεται τη χρήση κόμπου.



Εικόνα 5-3 *Ανάδειξη της κινηματικής αλυσίδας της αρπάγης μέσα από τη μονάδα οδήγησης.*

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ανάλογα με τη γωνιά περιστροφής των κινητήρων (στη περίπτωση αυτή υπολογίζεται στις 180 μοίρες) και μέσω των συρματόσχοινων τα οποία είναι συνδεδεμένα στην άλλη άκρη τους το μεν με το ψαλίδι και το άλλο με το μηχανισμό συγκράτησης, να τους ανοιγοκλείνουν πραγματοποιούνταν διαδικασίες κοπής και συγκράτησης (Εικόνα 5-3).

Για την επίτευξη της καλύτερης μελέτη της αρπάγης πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός της σε σύγχρονη πλατφόρμα τρισδιάστατης σχεδίασης Creo Parametric της PTC οπού αναπτύχθηκαν όλα τα κομμάτια της και έγινε προεπισκόπηση ης τελικής γεωμετρίας αυτής.



Εικόνα 5-4 *Τρισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο αρπάγης (δεξιά κάτω γωνία) και αναλυτική προβολή αρπάγης με σημάνσεις για την ανάδειξη επιμέρους κομματιών της..*

Με βάση τη Εικόνα 5-4 σε αυτή παρουσιάζονται με αλφαβητική σειρά τα επιμέρους εξαρτήματα της αρπάγης και τα οποία είναι α)Βάση αρπάγης, β)Καπάκι βάσης αρπάγης, γ)Βάση για τοποθέτηση αρπάγης πάνω στο βραχίονα, δ)Βάση για τη προσαρμογή στη φλάντζα του βραχίονα, ε)Ταχύνδεσμοι, ζ)Αντιστήριξη λαβής, η)Λαβή συγκράτησης, θ)Λάμα στήριξης μηχανισμών κοπής και συγκράτησης, ι)Λεπίδα κοπής, κ)Άγκιστρο επαναφοράς λεπίδας, λ)Παξιμάδια Μ6, μ)Άξονας έδρασης μηχανισμών κοπής και συγκράτησης ν)Ρουλεμάν ξ)Ράουλο μηχανισμού κοπής, ο)Ρουλεμάν ράουλων, π)Άξονας έδρασης ράουλων, ρ)Ράουλο μηχανισμού συγκράτησης, χ)Αποστάτης

Η ανάπτυξη του μηχανισμού της αρπάγης έγινε πάνω σε ένα ήδη υπάρχουν μηχανισμό κοπής κονταροψαλιδου της εταιρείας Ameco (Εικόνα 4-12). Αυτό έγινε λόγο της σχετικά απαιτητικής κατασκευαστικής διαδικασίας που χρειάζεται ένα ψαλίδι για να παραχθεί και στο γεγονός ότι η κατασκευή ψαλιδιού δεν αποτελεί κυρίως σκοπός σε αυτή τη πτυχιακή εργασία.

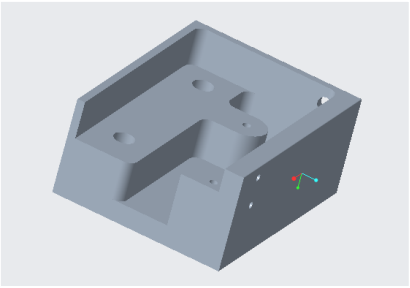
Πιο αναλυτικά **ο μηχανισμός κοπής** αποτελείται από μια ειδικά διαμορφωμένη λεπίδα κοπής τύπου Bypass-Lopping shear (Εικόνα 4-8) όπως αυτή παρουσιάζεται παραπάνω η οποία είναι διαμορφωμένη με ένα είδος μοχλοβραχίονα μέσω του οποίου ασκείται η δύναμη της κοπής, αλλά και μια ειδικά διαμορφωμένη λάμα πάνω στην οποία εδράζεται η λεπίδα κοπής και σε συνεργασία μεταξύ τους πραγματοποιούνται οι κοπές σε φυτά.



Εικόνα 5-5 *Μηχανισμός κοπής της αρπάγης, όπου διακρίνεται η λεπίδα (μαύρο χρώμα) και η λάμα στήριξης (μεταλλικό χρώμα).*

Με την παραπάνω αρχική παραδοχή της προμήθειας έτοιμου ψαλιδιού έγινε ο σχεδιασμός του μηχανισμού της αρπάγης γύρω από το μηχανισμό κοπής. Έτσι αρχικά σχεδιάστηκε η βάση πάνω στην οποία θα στηρίζεται ο ήδη υπάρχων μηχανισμός κοπής.

Η **βάση τη αρπάγης** (Εικόνα 5-6) αυτή είναι σχεδιασμένη με τέτοιο τρόπο ώστε αφενός να βιδώνεται και να παραμένει σταθερή η λάμα, αφετέρου όμως να επιτρέπει τη λειτουργία του μηχανισμού κοπής αλλά και του μηχανισμού συγκράτησης.

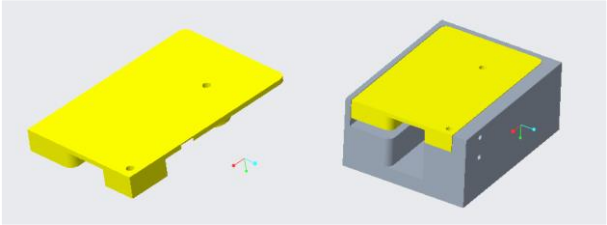


Εικόνα 5-6 *Τρισδιάστατο μοντέλο βάσης του μηχανισμού κοπής και συγκράτησης.*

Η παραπάνω ιδέα βάση της οποίας σχεδιάστηκε η βάση της αρπάγης εξηγεί τη περιπλοκή γεωμετρία της, διότι εκτός τους δυο μηχανισμούς οι οποίοι τοποθετούνται πάνω σε αυτή, υπάρχουν και άλλοι μηχανισμοί οι οποίοι λειτουργούν υποστηρικτικά όπως είναι τα ελατήρια, τα ράουλα, οι Ταχύ- σύνδεσμοι το καπάκι τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

Στη συνέχεια σχεδιάστηκε το **καπάκι της βάσης της αρπάγης** (Εικόνα 3.2.β σε αναλυτική προβολή) είναι ένα σχετικά απλό αντικείμενο. Σκοπός του καλύμματος αυτού είναι να προστατέψει ένα μέρος του μηχανισμού της αρπάγης από εξωτερικά αίτια που μπορούν να

προκαλέσουν δυσλειτουργία, φθορά ή καταστροφή του μηχανισμού αλλά και ο ίδιο ο μηχανισμός να προκαλέσει τραυματισμό σε κάποιον άνθρωπο.



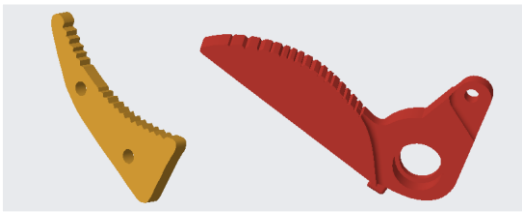
Εικόνα 5-7 *Τρισδιάστατο μοντέλο καλύμματος βάσης του μηχανισμού κοπής και συγκράτησης (αριστερά με κίτρινο χρώμα), και σε συναρμολόγηση με τη βάση.*

Έπειτα και αφού προηγήθηκε η δημιουργία του τρισδιάστατου γεωμετρικού μοντέλου του μηχανισμού κοπής έγινε η ψηφιακή συναρμολόγηση με τη βάση ώστε στη συνέχεια να βοηθηθεί ο σχεδιασμός του μηχανισμού συγκράτησης.

Η μορφή του μοντέλου του **μηχανισμού συγκράτησης** (Εικόνα 5-8) είναι παρόμοια με τη λεπίδα καθώς φέρει και αυτός μοχλοβραχίονα αντίστοιχο με αυτόν της λεπίδας. Στο κέντρο όπου εδράζεται έχει ειδική πατούρα για τη τοποθέτηση ρουλεμάν για καλύτερη κίνηση χωρίς τριβές. Κατά το σχεδιασμό του προστέθηκε ένα μικρό άγκιστρο από όπου πιάνεται το ελατήριο επαναφοράς. Η θέση του πάνω στο μηχανισμό συγκράτησης έγινε με τη κατά δύναμη πιο μικρή καθετή απόσταση από τον άξονα περιστροφής. Με αυτό το τρόπο επιτεύχθηκε ελάχιστη δυνατή αντίθετη ροπή από αυτήν που θα προκαλεί τη δύναμη συγκράτησης.

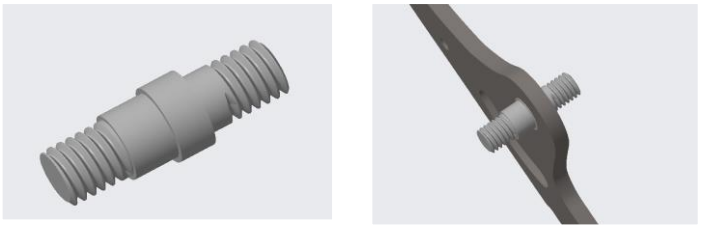
Επιπλέον για την επίτευξη της διαδικασίας συγκράτησης σχεδιάστηκε και ένα ειδικό κομμάτι το οποίο θα βοηθάει στη διαδικασία συγκράτησης. Το κομμάτι αυτό είναι η αντιστήριξη η οποία είναι σταθερά βιδωμένη πάνω στη λάμα.

Η μορφή της επιφάνειας που συγκρατεί σχεδιάστηκε ώστε να εφάπτεται ακριβώς με την αντιστήριξη με αποτέλεσμα να μπορεί ο μηχανισμός να συγκρατεί πολύ λεπτά κοτσάνια .



Εικόνα 5-8 *Τρισδιάστατο μοντέλο των κομματιών του μηχανισμού συγκράτησης με τη λαβη (κόκκινο) και η αντιστήριξη (ώχρα).*

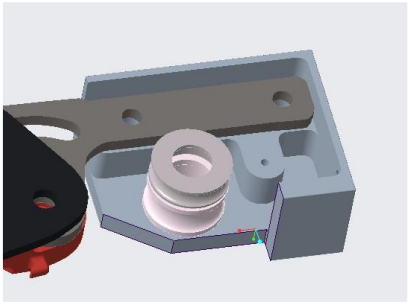
Για την ανεξάρτητη λειτουργία του μηχανισμού κοπής και του μηχανισμού συγκράτησης πάνω στον ίδιο άξονα σχεδιαστικέ ένας **άξονας έδρασης μηχανισμών** (Εικόνα 5-9). Ο άξονας φέρει τρεις διαβαθμίσεις και σπειρώματα στις άκριες του για τη σύσφιξη με περικοχλία. Ο σχεδιασμός του άξονα έδρασης των μηχανισμών έγινε με σκοπό να κατασκευαστεί σε συμβατικό μηχανουργικό τόρνο.



Εικόνα 5-9 *Τρισδιάστατο μοντέλο άξονα έδρασης μηχανισμών κοπής και συγκράτησης με δυνατότητα διάκρισης των διαβαθμίσεων και των σπειρωμάτων (αριστερά) και σε συναρμολόγηση με τη λάμα (δεξιά).*

Αυτό που κατορθώνει αυτός ο άξονας είναι να μένει πακτωμένο στη λάμα μέσω της σφικτής συναρμογής (δηλαδή είναι πρεσαριστό ο άξονας πάνω στη λάμα), και οι δυο μηχανισμοί αμφίπλευρα της λάμας να έχουν τη δυνατότητα ανεξάρτητης περιστροφής χωρίς να περιστρέφεται ο ίδιος ο άξονας έδρασης τους.

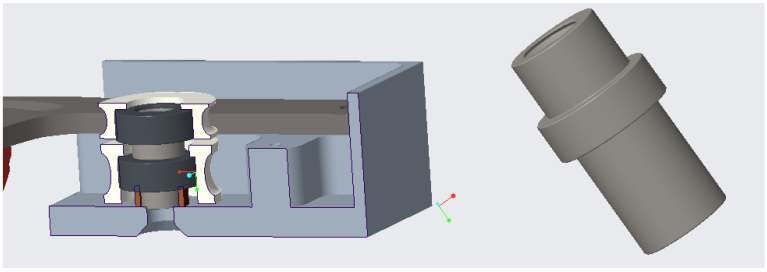
Εν συνεχεία για τη καλύτερη λειτουργία της αρπάγης σχεδιαστικά δυο **ράουλα** (Εικόνα 5-10)τα οποία τοποθετούνται στο εσωτερικό της βάσης της αρπάγης με σκοπό να κατευθύνουν τα συρματόσχοινα τα οποία κινούν τους μηχανισμούς.



Εικόνα 5-10 *Τρισδιάστατη αναπαράσταση σε τομή της βάσης, των δυο ράουλων εντός της βάσης αυτής.*

Τα ράουλα αυτά έχουν την δυνατότητα να περιστρέφονται ελευθέρα γύρω στο σημείο όπου έχουν τοποθετηθεί. Η λειτουργία σε κάθε ένα ράουλο δεν επηρεάζεται από το άλλο έτσι με αυτό το τρόπο επιτυγχάνεται και σε αυτό το σημείο η ανεξάρτητη λειτουργία των δυο μηχανισμών της αρπάγης.

Ο πίρος (Εικόνα 5-11) είναι αυτός επιτρέπει την ανεξάρτητη λειτουργία των δυο ράουλων. Ο πίρος είναι βιδωμένος σταθερά πάνω στη βάση ενώ ενδιάμεσα στα ράουλα και πίρο τοποθετούνται ρουλεμάν. Ο πίρος αυτός μέσω μιας διαβάθμισης σκοπό έχει να κρατάει σε απόσταση τα δυο ράουλα αλλά και να αφήνει τα δυο ράουλα να περιστρέφονται, έτσι η διαβάθμιση αυτή έχει ύψος τόσο όσο είναι και το πάχος του εσωτερικού δακτυλίου των ρουλεμάν Την ελεύθερη περιστροφή των ράουλων με ελάχιστες τριβές βοηθούν δυο μικρά ρουλεμάν.



Εικόνα 5-11 *Τρισδιάστατη αναπαράσταση του πίρου στήριξης των δυο ραουλων και σε συναρμολόγηση του εντός της βάσης της αρπάγης που είναι σε τομή.*

Ο πίρος αυτός φέρει εσωτερικά μια οπή με σκοπό μια περαστή βίδα με παξιμάδι να το κραταει σταθερο πάνω στη βάση καθώς υπάρχει συγκεκριμένη οπή σε αυτό το σημείο στη βάση για αυτό το σκοπό (βλ. Εικόνα 5-11 βάσης σε τομή). Σε αυτή τη περίπτωση επίσης ο σχεδιασμός έγινε με σκοπό το συγκεκριμένος πιρος να κατασκευαστεί σε συμβατικό τόρνο.

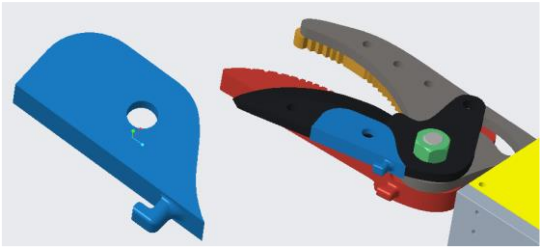
Την διασφάλιση ότι το κάτω ράουλο που αφορά τη λειτουργία του μηχανισμού συγκράτησης δεν θα έρθει σε επαφή με το πάτωμα της βάσης φροντίζει ένα δακτύλιδι, το οποίο λειτουργεί σαν **αποστάτης** (Εικόνα 5-4.χ).



Εικόνα 5-12 *Δακτυλίδι- αποστάτης για το ράουλο του μηχανισμού συγκράτησης*

Ο αποστάτης αυτός σχεδιάστηκε ώστε να έρχεται σε επαφή μόνο με τον εσωτερικό δακτύλιο του ρουλεμάν διαφορετικά θα αναπτυσσόταν τριβή μεταξύ τους κατά τη περιστροφή του ράουλου και θα έχει σαν αποτέλεσμα το φρενάρισμα του ρουλεμάν αλλά και τη καταστροφή του αποστάτη.

Ακόμα για την επαναφορά στην αρχική θέση του μηχανισμού κοπής σχεδιάστηκε το **άγκιστρο του μηχανισμού κοπής** (Εικόνα 5-4.κ) το οποίο λειτουργεί με την ίδια φιλοσοφία του αγκίστρου στο μηχανισμό συγκράτησης. Αντίστοιχα και σε αυτή τη περίπτωση σχεδιάστηκε το άγκιστρο τέτοιο ώστε να ασκεί τη λιγότερη δυνατή δύναμη που θα ανθίσταται στη κοπή.

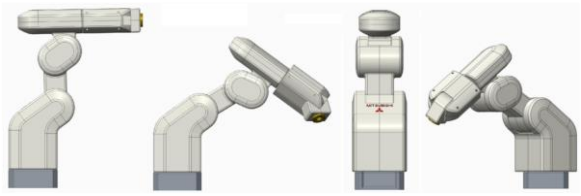


Εικόνα 5-13 *Άγκιστρο ελατήριου (γαλάζιο χρώμα) για την επαναφορά του μηχανισμού κοπής σε ανοικτή θέση και σε συναρμολόγηση αυτού με την υπόλοιπη αρπάγη.*

Το άγκιστρο βιδώνεται πάνω στη λεπίδα κοπής ώστε να μπορεί να ασκεί τη δύναμη επαναφοράς το ελατήριο. Κατά τη σχεδίαση του αγκίστρου τέθηκε ως στόχος η γεωμετρία το αντικειμένου να είναι τέτοια ώστε να μην επιβαρύνει τη λειτουργία του μηχανισμού

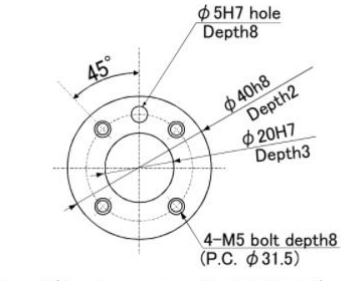
λειτουργώντας σαν εμπόδιο κατά τη διαδικασία της κοπής όπως να μπερδεύεται με τον ιστό του φυτού ή να αποτελεί ένας έντονα μεγάλος όγκος σε αυτό το σημείο.

Τέλος επειδή η αρπάγη προορίζεται και να λειτουργεί και με τη βοήθεια ρομπότ, σχεδιάστηκαν κάποια επιπλέον κομμάτια ώστε να μπορεί η αρπάγη να τοποθετηθεί στη φλάντζα ενός ρομποτικού βραχίονα. Ως ρομποτικός βραχίονας επιλέχθηκε ο RV2A της Mitsubishi ρομπότ που βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του εργαστήριου Ρομποτικής και Αυτομάτου ελέγχου του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου (ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ).



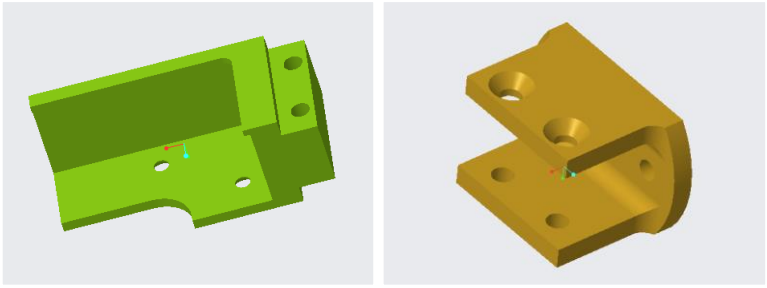
Εικόνα 5-14 *Ο ρομποτικός βραχίονας Mitsubishi RV2A.*

Στη συνέχεια η σχεδίαση της **βάσης ανάρτησης** (Εικόνα 5-4.γ…. δ….) της αρπαγή έγινε βάση των διαστάσεων της φλάντζας του βραχίονα που προέκυψαν από το εγχειρίδιο του κατασκευαστή για το συγκεκριμένο μοντέλο βραχίονα όπως αυτές φαίνονται στη συνέχεια (Εικόνα 5-15).



Εικόνα 5-15 *Οι διαστάσεις της φλάντζας του βραχίονα Mitsubishi RV2A όπως προέκυψαν από το εγχειρίδιο του κατασκευαστή.*

Τα κομμάτια που σχεδιάστηκαν είναι δυο, το ένα βιδώνεται πάνω στη βάση της αρπάγης και η γεωμετρία του είναι τέτοια ώστε να μπορεί να προσφέρει σταθερότητα τελική κατασκευή της αρπάγης.



Εικόνα 5-16 *Επιπρόσθετη βάση για τη τοποθέτηση της αρπάγης πάνω στο ρομποτικό βραχίονα (αριστερά) και κομμάτι προσαρμογής με τη φλάντζα του βραχίονα (δεξιά).*

Στη συνέχεια σχεδιάστηκε και το δεύτερο κομμάτι αποτελεί κρίκο σύνδεσης με τη φλάντζα του ρομποτικού βραχίονα. Στη σχεδίαση και των δυο κομματιών υπήρξε η ιδέα της δυνατότητας επέμβασης στο μηχανισμό της αρπάγης (σε περίπτωση που χρειαστούν κάποιες επιδιορθώσεις) χωρίς να είναι απαραίτητη η αποσυναρμολόγηση πάνω από το βραχίονα.

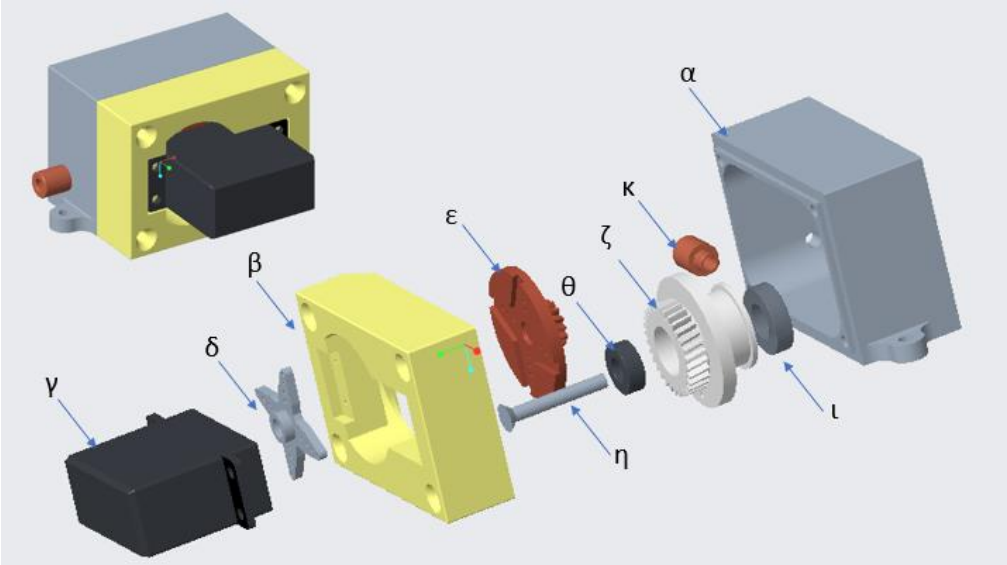
Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι στη σχεδίαση των κομματιών για τη τοποθέτηση της αρπάγης πάνω στο βραχίονα λήφθηκε σοβαρά υπόψη το ποσό έντονα θα κάμπτονται τα σωληνάκια που συνδέονται στο πίσω μέρος της βάσης της αρπάγης και μέσα σε αυτά κινείται το συρματόσχοινο καθώς αυτή η παράμετρος καθόρισέ το μήκος που θα προσδίδουν τα δυο αυτά κομμάτια στο σύνολο της αρπάγης.

5.3. Σχεδιασμός μονάδας οδήγησης αρπάγης

Ο σχεδιασμός της μονάδας οδήγησης βασίστηκε στην ιδέα ότι, μια αρπάγη που προορίζεται για λειτουργεί πάνω σε φυτά πολλές φορές υπόκειται σε εργασίες όπου ο χώρος τους είναι αρκετά περιορισμένος. Ο περιορισμός αυτός μπορεί να οφείλεται είτε στο πυκνό φύλλωμα που μπορεί να έχει το φυτό είτε μια έντονη και ακανόνιστη βλάστηση.

Για το λόγο αυτό θα έλεγε κανείς μια τέτοιου είδους αρπαγή πρέπει να χαρακτηρίζεται από μικρό όγκο. Η ιδιότητα αυτή δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα να μπορεί να εισχωρεί με ευκολία και ευελιξία ανάμεσα στο φυτό και να πραγματοποίει εργασίες που θέλει.Έτσι, για τους παραπάνω λογούς επιλέχθηκε η μονάδα οδήγησης της αρπάγης να μην είναι μαζί με την αρπάγη δηλαδή να μην είναι ενσωματωμένη σε αυτή σαν μια ενιαία οντότητα.

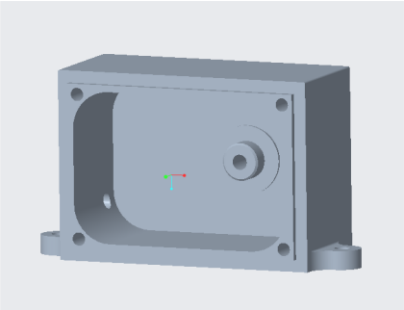
Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα στη μονάδα να χειρίζεται την αρπάγη από απόσταση. Αυτό σημαίνει ότι ο εκάστοτε επενεργητής θα επενεργεί σε απόσταση από την αρπάγης και τα αποτελέσματα αυτού θα γίνονται αντιληπτά μέσω της λειτουργίας της αρπάγης δηλαδή του μηχανισμού κοπής και συγκράτησης. Ο σχεδιασμός της μονάδας οδήγησης πραγματοποιήθηκε στη πλατφόρμα της PTC Creo Parametric.



Εικόνα 5-17 *Ψηφιακό μοντέλο μονάδα οδήγησης της αρπάγης (αριστερή πάνω γωνιά) και αναλυτική προβολή του μοντέλου.*

Στην Εικόνα 5-17 παρουσιάζονται με αλφαβητική σειρά τα μέρη της μονάδας οδήγησης της αρπάγης και τα οποία είναι α)Βάση μονάδας, β)Καπάκι βάσης μονάδας, γ)Κινητήρας RC Servo, δ)Φλάντζα κινητήρα, ε)Κινητήριο γρανάζι, ζ)Κινούμενο γρανάζι, η)Βίδα M4, θ)Ρουλεμάν 687, ι)Ρουλεμάν 6800 κ)Ταχυσύνσδεσμος.

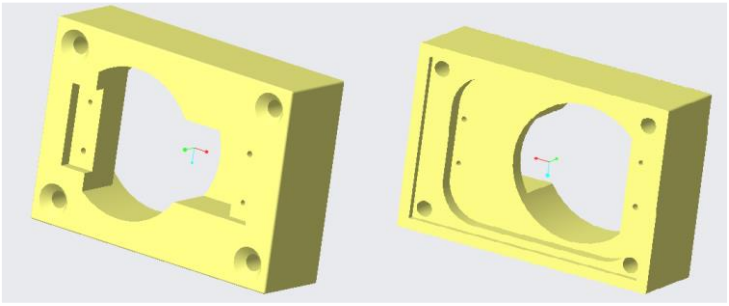
Ο σχεδιασμός της μονάδας οδήγησης της αρπάγης ξεκίνησε σχεδιάζοντας τη βάση. **Η βάση της μονάδας οδήγησης της αρπάγης** (**Εικόνα 5-18**) είναι το κυρίως μέρος της μονάδας χειρισμού καθώς πάνω σε αυτή τοποθετούνται και λειτουργούν τα επιμέρους εξαρτήματα της.



Εικόνα 5-18 *Βάση μονάδας οδήγησης της αρπάγης.*

Για το λόγο αυτό έχει κάποιες διαμορφώσεις στη γεωμετρία της αλλά και τρύπες για να τοποθετούνται και στερεώνονται τα υπόλοιπα κομμάτια, όπως το καπάκι και τα τύμπανα που παρουσιάζονται παρακάτω.

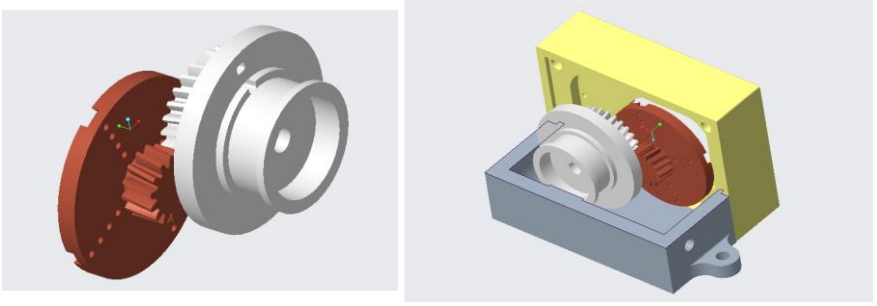
Εν συνέχεια σχεδιάστηκε το **καπάκι για τη βάση** (Εικόνα 5-19) της μονάδας οδήγησης της αρπάγης. Το καπάκι της βάσης επιτελεί πιο συνθέτη γεωμετρία σε σχέση με τη βάση. Ο λόγος αυτού οφείλεται στο γεγονός ότι το καπάκι εκτός από κάλυμμά λειτουργεί σαν βάση για το κινητήρα RC Servo.



Εικόνα 5-19 *Καπάκι βάσης μονάδας οδήγησης αρπάγης με ανάδειξη της εσωτερικής και εξωτερικής του γεωμετρίας.*

Η τοποθέτηση του κινητήρα RC Servo γίνεται μέσα σε μια ειδική διαμόρφωση πάνω στο καπάκι της βάσης. Έπειτα η συναρμολόγηση και σύσφιξη του με τη βάση της μονάδας γίνεται με τέσσερις βίδες.

Έπειτα σχεδιάστηκε **ο μηχανισμός χειρισμού της αρπάγης** (Εικόνα 5-20). Ο μηχανισμός αυτός είναι ένα ζεύγος οδοντωτών τροχών (γραναζιών).

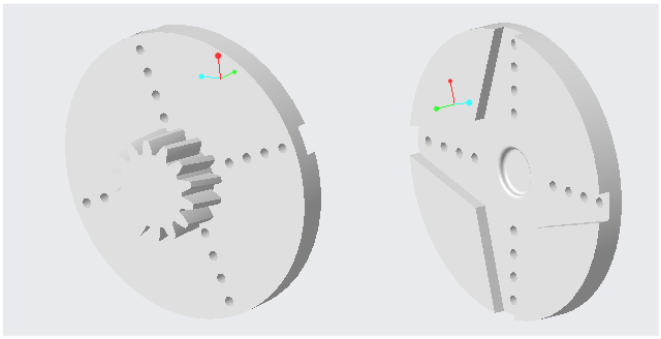


Εικόνα 5-20 *Μηχανισμός τηλεχειρισμού της μονάδας οδήγησης της αρπάγης αποτελούμενος από ένα ζευγάρι οδοντωτών τροχών (γραναζιών).*

Έτσι τα κομμάτια μπορούν να αναπαρασταθούν με ψηφιακή μορφή σε συναρμολόγηση μεταξύ τους δίνοντας μια πρώτη ιδέα για τη γεωμετρία της μονάδας χειρισμού της αρπάγης. Πιο συγκεκριμένα σκοπός του ζεύγους οδοντωτών τροχών είναι μέσω μια σχέσης μετάδοσης

περίπου 2/1 να αυξήσουν τη ροπή στρέψης που παρέχει ο κινητήρα, κατ' επέκταση τη δύναμη συγκράτησης και δύναμη κοπής.

Το **κινητήριο γρανάζι** (Εικόνα 5-17.ε) είναι σχεδιασμένο ώστε να βιδώνει πάνω του η φλάντζα του κινητήρα. Έτσι το γρανάζι αυτό αποτελεί ένα ενιαίο κομμάτι με μια φλάντζα η οποία φέρει διαμόρφωση ώστε να εφαρμόζει και να βιδώνεται πάνω στη φλάντζα του κινητήρα.

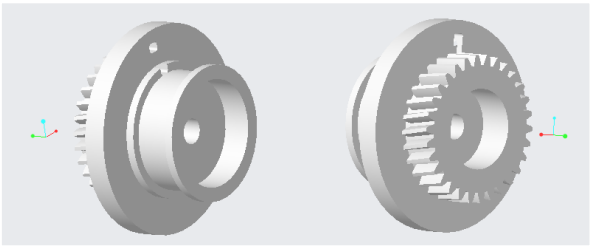


Εικόνα 5-21 *Κινητήριο γρανάζι όπου αναδεικνύεται η εμπρόσθια και οπίσθια μορφή του*

Κύρια χαρακτηρίστηκα του κινητήριου γραναζιού:

- Αριθμός δοντιών= 14
- Εξωτερική διάμετρος= 3mm
- Πλάτος δοντιού= 6mm

Το **κινούμενο γρανάζι** (Εικόνα 5-17.ζ) είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε είναι αποτελεί ένα ενιαίο σώμα με το τύμπανο πάνω στο οποίο γίνεται η περιέλιξη του συρματόσχοινου. Αυτό έγινε για την ελαχιστοποίηση των εξαρτημάτων- κομματιών μέσα στη μονάδα οδήγησης της αρπάγης.



Εικόνα 5-22 *Κινούμενο γρανάζι όπου αναδεικνύεται η εμπρόσθια και οπίσθια μορφή του.*

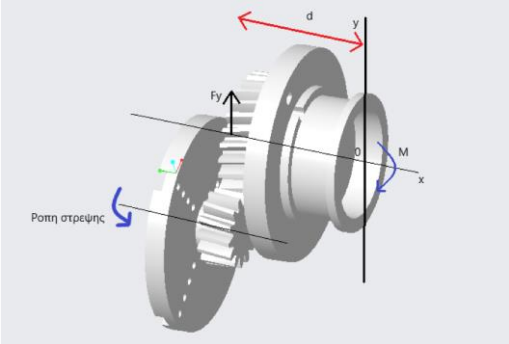
Κύρια χαρακτηρίστηκα του κινούμενου γραναζιού:

- Αριθμός δοντιών= 30
- Εξωτερική διάμετρος= 25mm
- Πλάτος δοντιού= 6mm

Το κινούμενο γρανάζι για να μπορέσει να περιστρέφεται ελευθέρα εδράζεται πάνω σε δυο ρουλεμάν. Τα ρουλεμάν τοποθετούνται με σφικτή συναρμογή σε ειδικές διαβαθμίσεις (πατούρες) χωνευτά μέσα στο γρανάζι. Τα δυο ρουλεμάν (Εικόνα 6-14, 6800zz και 687zz,) σφίγγονται με μια περαστή βίδα πάνω στη βάση κρατώντας τον εσωτερικό δακτύλιο και των δυο σταθερό.

Ο λόγος που πραγματοποιείται η σύσφιξη του κινουμένου γραναζιού πάνω στη βάση είναι διότι κατά τη λειτουργία των γραναζιών σε εμπλοκή, κατά τη μετάδοση της ροπής στρέψης

από το κινητήριο στο κινούμενο εμφανίζεται μια δύναμη (Εικόνα 5-23 δύναμη Fy) η οποία λόγω της απόστασης (Εικόνα 5-23 απόσταση d) της από το σημείο στήριξης δημιουργεί μια ροπή η οποία τείνει να βγάλει το κινούμενο γρανάζι από τη θέση του με αποτέλεσμα να χάνεται η εμπλοκή των δοντιών άρα παρουσιάζεται μεταξύ τους ολίσθηση.



Εικόνα 5-23 *Σχηματική αναπαράσταση των δυνάμεων που αναπτύσσονται στο τύμπανο (κινούμενο γρανάζι) κατά τη μετάδοση της ροπής στρέψης από το κινητήριο στο κινούμενο γρανάζι.*

Αυτό συμβαίνει διότι από κατασκευής του το κινούμενο γρανάζι είναι ένας πρόβολος του οποίου στο σημείο στήριξης (Εικόνα 5-23, σημείο 0) εμφανίζονται ροπές (Εικόνα 5-23, ροπή M) λόγο της στήριξης του αλλά και της λειτουργίας του.

6. Κατασκευή και συναρμολόγηση της μηχατρονικής αρπάγης

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη κατασκευή της αρπάγης και τη μονάδα χειρισμού της αρπάγης. Η παραγωγή των σχεδιασμένων κομματιών έγινε με τη μέθοδο της προσθετικής κατασκευής σε προσωπικό εκτυπωτή ενώ χρησιμοποιήθηκε και η μέθοδος αφαίρεσης υλικού σε συμβατικό τόρνο του εργαστηρίου.

6.1. Κατασκευή αρπάγης

Ο όρος προσθετική κατασκευή ή εναλλακτικά στρωματική κατασκευή (Layer Manufacturing) καθιερώθηκε σταδιακά για την περιγραφή αυτής της σχετικά νέας ομάδα κατασκευαστικών τεχνολογιών και μεθόδων παραγωγής, γιατί προσδιορίζει το ουσιαστικό κοινό γνώρισμα όλων αυτών των τεχνολογιών, το οποίο είναι η κατασκευή αντικειμένων-κομματιών μέσω διαδικασιών ελεγχόμενης πρόσθεσης υλικού.

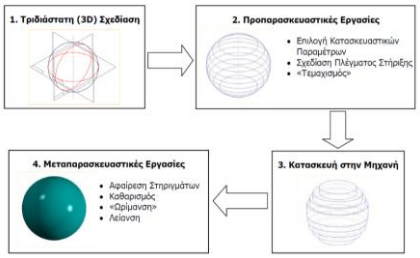
Αναλόγως της τεχνολογίας χρησιμοποιούνται διαφόρων ειδών υλικά (φωτοπολυμερή, μέταλλα, θερμοπλαστικά πολυμερή, κεραμικά ή χαρτί) σε διάφορες μορφές (υγρή, σε κόκκους, νήματα ή φύλλα), τα οποία διαμορφώνονται συνήθως σε λεπτά στρώματα που προστίθενται σταδιακά μέχρι να «χτιστεί» το αντικείμενο (εξού και ο όρος Στρωματική Κατασκευή). Στις πιο γνωστές τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής συγκαταλέγονται η Στερεολιθογραφία (Stereolithography-SL), η Κατασκευή με Εναπόθεση Υλικού (Fused Deposition Modelling -FDM), η Επιλεκτική Συσσωμάτωση με Λέιζερ (Selective Laser Sintering -SLS), η Συγκόλληση Κόκκων με Ψεκασμό (PowderBedInkjetPrinting), η Κατασκευή με Πολλαπλό Ψεκασμό (Multi-jet Modelling -MJM) και η Συγκόλληση Επάλληλων Φύλλων (Laminated Object Manufacturing -LOM). Ο όρος Τρισδιάστατη Εκτύπωση(3D printing) χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την περιγραφή της τεχνικής προσθετικής κατασκευής η οποία αναπτύχθηκε στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Μασαχουσέτης (MIT).

Η διαδικασία κατασκευής ενός αντικειμένου με τεχνολογίες προσθετικής κατασκευής μπορεί να διαχωριστεί σε τέσσερα βασικά στάδια. Το πρώτο στάδιο αποτελεί η σχεδίαση του τρισδιάστατου (3D) ψηφιακού μοντέλου του αντικειμένου μέσω ενός συστήματος μηχανολογικής ή βιομηχανικής σχεδίασης (CAD).

Στο δεύτερο στάδιο εκτελούνται προπαρασκευαστικές εργασίες με βάση το 3D μοντέλο και ο προγραμματισμός κατασκευής στη μηχανή προσθετικής κατασκευής. Για την αναπαράσταση του 3D μοντέλου και την μεταφορά των γεωμετρικών δεδομένων χρησιμοποιείται το πρότυπο STL (προέρχεται από το StereoLithography).

Στην τρίτη φάση της διαδικασίας, τα αρχεία τομών των αντικειμένων εισάγονται στη μηχανή προσθετικής κατασκευής και με τη ρύθμιση κάποιων δευτερευόντων παραμέτρων (π.χ. της ταχύτητας κίνησης της λεπίδας επικάλυψης/εναπόθεσης νέου υλικού) ξεκινά η κατασκευή του αντικειμένου. Η φάση αυτή είναι εντελώς αυτοματοποιημένη και δεν απαιτείται η εποπτεία του χειριστή.

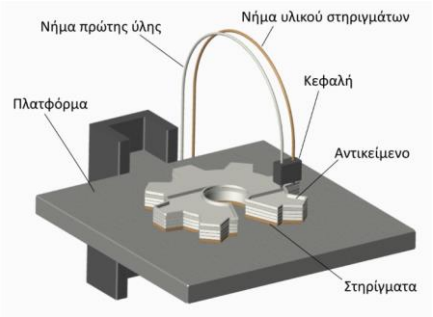
Με την ολοκλήρωση της κατασκευαστικής φάσης το αντικείμενο απομακρύνεται είτε με την βοήθεια ειδικών εργαλείων είτε με το χέρι, ώστε να καθαρισθεί από το τυχόν υπάρχοντα στηρίγματα ή/και υπολείμματα πρώτης ύλης. Επίσης, ανάλογα με την φύση της χρησιμοποιούμενης τεχνολογίας προσθετικής κατασκευής, ίσως απαιτηθούν επιπλέον μετα-παρασκευαστικές εργασίες όπως η τοποθέτηση του κομματιού εντός κατάλληλου θαλάμου «ωρίμανσης», όπου εκτίθεται σε κατάλληλες συνθήκες προκειμένου να αποκτήσει αντοχή τέτοια που θα επιτρέπει την εκτέλεση των τελικών εργασιών τελειοποίησής του, όπως την λείανση και το βάψιμο των επιφανειών του.



Εικόνα 6-1 *Διάγραμμα διαδικασίας παραγωγής ενός αντικειμένου με τη μέθοδο της προσθετικής κατασκευής.*

Η τεχνολογία της κατασκευής (μοντέλων)με εναπόθεση υλικού (Fused Deposition Modeling-FDM). Μέσω της συγκεκριμένης τεχνολογίας μπορούν να παραχθούν αντικείμενα που έχουν ως πρώτη ύλη το ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)ή άλλα θερμοπλαστικά πολυμερή, γνωστά για την ανθεκτικότητά τους. Έτσι, η μέθοδος αυτή συχνά επιλέγεται όταν η μηχανική αντοχή καθίσταται κρίσιμη για το κατασκευαζόμενο αντικείμενο. Όπως και οι υπόλοιπες μέθοδοι, η μέθοδος FDM λειτουργεί σύμφωνα με την αρχή της διαδοχικής στρωματικής κατασκευής. Κάθε στρώση παράγεται μέσω της εξώθησης θερμοπλαστικού υλικού σε υγρή κατάσταση.

Το υλικό τροφοδοτείται σε μορφή νήματος (filament) σε μια θερμαινόμενη κεφαλή, από όπου και εξωθείται σε θερμοκρασία λίγο μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία τήξης του. Η κεφαλή βρίσκεται τοποθετημένη σε κατάλληλη διάταξη η οποία της επιτρέπει να κινείται σε δύο άξονες (X και Y) έτσι ώστε να είναι δυνατή η ελεγχόμενη εναπόθεση του υλικού πάνω στη πλατφόρμα κατασκευής.



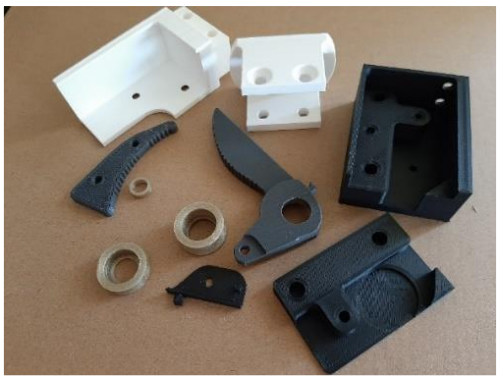
Εικόνα 6-2 *Βασικά μέρη μηχανής παραγωγής αντικειμένων με εναπόθεση υλικού.*

Η μηχανή εναπόθεση του υλικού που χρησιμοποιήθηκε για τη παραγωγή των μοντέλων που σχεδιάστηκαν στη προηγούμενη παράγραφο είναι ο εκτυπωτής της Creality με εμπορική ονομασία Ender3. Πρόκειται για ένα εκτυπωτή μικρού μεγέθους και απευθύνεται σε ένα ευρύ κοινό χρήσης λόγω της ευκολίας στη χρήση και της καλής ποιότητας παραγωγής τεμαχίων, ενώ το υλικό εναπόθεσης που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των τεμαχίων είναι το PLA (πολυγαλακτικό οξύ).

Πίνακας 6-1 *Στο παρακάτω πίνακα αναφέρονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εκτυπωτή Ender3 της Creality που χρησιμοποιήθηκε για τη παραγωγή των τεμαχίων στο πλαίσιο της εργασίας αυτής.*

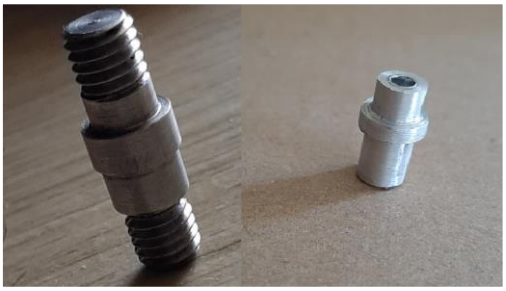
Τεχνικά χαρακτηριστηκά	
Μέσο κόστος μηχανής	200 Euro
Μέγιστη ταχύτητα εκτύπωσης	500 mm/s
Υποστηριζόμενα υλικά για νήματα	PLA, PETG, ABS, TPU
Ογκος Κατασκευής (μήκος*πλάτος*ύψος)	220*220*240 mm
Ύψος στρώματος (Layer height)	0,1-0,35 mm
Ακρίβεια εκτύπωσης	±0,1mm
Θερμοκρασία ακροφυσίου	≤300°C
Μέγιστη θερμοκρασία τράπεζας	≤100°C

Έτσι η κατασκευή ξεκίνησε με τη κατασκευή των κομματιών που αποτελούν το μηχανισμό της αρπάγης και που αυτά κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο προσθετικής κατασκευής που αναφέρθηκε νωρίτερα.



Εικόνα 6-3 *Το σύνολο των κομματιών της αρπάγης που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο της προσθετικής κατασκευής.*

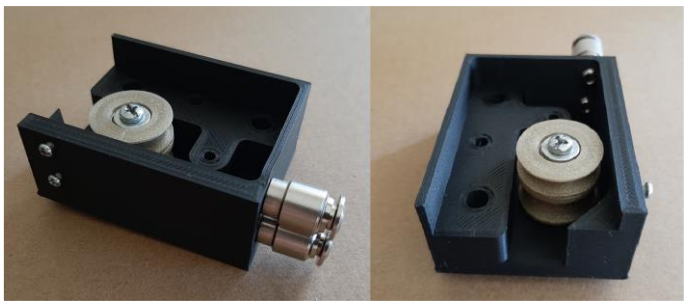
Στη συνέχεια αφού τέλειωσε η κατασκευή των εκτυπωμένων κομματιών ακολουθήσε η κατασκευή των κομματιών από μέταλλο. Τα κομμάτια αυτά κατασκευάστηκαν σε συμβατικό τόρνο του εργαστήριου Λεπτομηχανικής και Αντίστροφης Μηχανικής του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστήμιου . Το υλικό κατασκευής των κομματιών είναι από αλουμίνιο 1001 για το πίρο που χρησιμοποιείται για τη στήριξη στα ράουλα και για τον άξονα έδρασης των μηχανισμών κοπής και συγκράτησης από κοινό χάλυβα κατασκευών St37 (Εικόνα 6-4).



Εικόνα 6-4 *Τα κομμάτια της αρπάγης που κατασκευάστηκαν σε τόρνο του εργαστήριου.*

Για την επίτευξη της καλύτερης δυνατής ποιότητα κατασκευής των τεμαχίων στο συμβατικό τόρνο του εργαστηρίου, δημιουργήθηκαν για αυτή την εργασία τα κατασκευαστικά σχέδια των τεμαχίων μέσα στα οποία περιέχονται όλες οι διαστάσεις και οι ανοχές που επιλέχθηκαν για τα τεμάχια αυτά.

Στη συνέχεια της κατασκευή ακολουθήσε η συναρμολόγηση των επιμέρους κομματιών. Αρχικά συναρμολογήθηκαν τα ράουλα οι ταχύ- σύνδεσμοι και οι βίδες από όπου αγκιστρώνονται τα ελατήρια επαναφοράς των μηχανισμών κοπής και συγκράτησης πάνω στη βάση της αρπάγης.



Εικόνα 6-5 *Σε συναρμολόγηση η κατασκευασμένη βάση της αρπάγης.*

Στη συνέχεια έγινε συναρμολόγηση των μηχανισμών κοπής και συγκράτησης πάνω στη λάμα αλλά και του κομματιού που έχει σκοπό την αντιστήριξη.



Εικόνα 6-6 *Σε συναρμολόγηση με τη λάμα οι δυο μηχανισμοί, κοπής και συγκράτησης.*

Τέλος πραγματοποιήθηκε η συναρμολόγηση της λάμας που φέρει ήδη συναρμολογημένους τους μηχανισμούς κοπής και συγκράτησης, πάνω στη βάση αλλά και η τοποθέτηση των συρματόσχοινων.

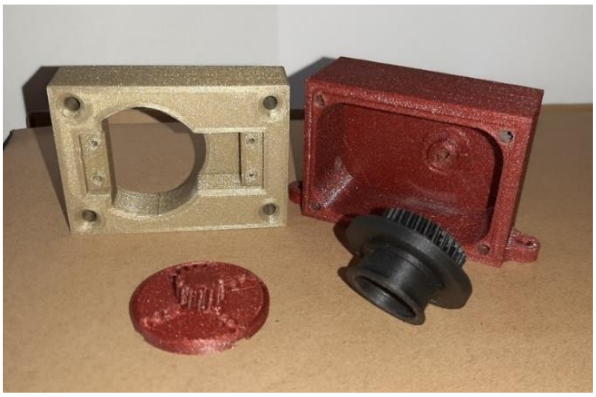


Εικόνα 6-7 *Τελικό συναρμολόγημα της αρπάγης.*

Τη τελική συναρμολόγηση της αρπάγης κλείνουν τα ελατήρια επαναφοράς των δυο μηχανισμών και η τοποθέτηση του καλύμματος της βάσης της αρπάγης, καθώς και οι βάσεις για την τοποθέτηση πάνω στο βραχίονα.

6.2. Κατασκευή μονάδας οδήγησης της αρπάγης.

Η κατασκευή της μονάδας ξεκίνησε με τη κατασκευή των κομματιών που έχουν σχεδιαστεί σε προηγούμενο στάδιο μέσω της πλατφόρμας Creo Parametric. Η κατασκευή των επιμέρους κομματιών πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε προσωπικό εκτυπωτή από υλικό με εμπορική ονομασία PLA (Πολυγαλακτικό οξύ).



Εικόνα 6-8 *Τα κομμάτια που κατασκευάστηκαν για τη μονάδας οδήγησης της αρπάγης.*

Τα κομμάτια που κατασκευάστηκα στον εκτυπωτή είναι:

- Η βάση της μονάδας οδήγησης.
- Το καπάκι της βάσης που αποτελεί και βάση για το σερβοκινητήρα.
- Το τύμπανο με το ενσωματωμένο γρανάζι.
- Το κινητήριο γρανάζι.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η συναρμολόγηση των επιμέρους κομματιών με αυτά που κατασκευάστηκαν. Κατά την υλοποίηση της μονάδας προέκυψαν τεχνικά θέματα τα οποία προκαλούν δυσλειτουργία στην μονάδα.

Τέτοιου είδους προβλήματα οφείλονται κυρίως στα μέσα σύνδεσης των κομματιών τα οποία είναι κυρίως βίδες μικρών διαστάσεων που είναι δύσκολο να προμηθευτούν από την αγορά, λόγο ανεπάρκειας και υψηλού κόστους. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν βίδες από μεταχειρισμένες ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές.

Ένα ακόμα πρόβλημα που πρόκυψε κατά τη κατασκευή- συναρμολόγηση της μονάδας ήταν η τοποθέτηση των ρουλεμάν στις πατούρες. Αν και αυτό λήφθηκε υπόψη κατά το σχεδιασμό, λόγω της σχετικά τραχιάς επιφάνειας που χαρακτηρίζει τα εκτυπωμένα κομμάτια δημιουργεί δυσκολίες στον υπολογισμό των ανοχών συναρμογής. Έτσι κατά τη τοποθέτηση των ρουλεμάν κρίθηκε αναγκαία η λείανση αυτών με ένα γυαλόχαρτο ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη διάσταση.

Έτσι με την επίλυση των δυσκολίων που προέκυψαν αρχικά έγινε η συναρμολόγηση των δυο ρουλεμάν. Η συναρμολόγηση τους θέλει να τα στοιχεία κύλισης να είναι εφαρμοστά στο τύμπανο χωρίς τη δυνατότητα της μεταξύ τους ολίσθησης. Τα ρουλεμάν που χρησιμοποιήθηκαν είναι ένσφαιρα με βαθιά αυλάκωση και εμπορική ονομασία 6800zz και 687zz.



Εικόνα 6-9 *Κινητήριο γρανάζι- τύμπανο με τοποθετημένα και τα δυο ρουλεμάν του.*

Έπειτα από τη συναρμολόγηση των ρουλεμάν ακολουθήσε η συναρμολόγηση του σερβοκινητήρα με το καπάκι της βάσης και το κινητήριο γρανάζι. Θεωρείται το πιο δύσκολο κομμάτι της συναρμολόγησης της μονάδας καθώς ο κινητήρας πρέπει να τοποθετηθεί σε συγκεκριμένη θέση και πάνω σε αυτόν να βιδωθεί η φλάντζα του και στη συνέχεια το κινητήριο γρανάζι.



Εικόνα 6-10 *Τοποθετημένο το κινητήριο γρανάζι μαζί με το κινητήρα Servo πάνω στο κάλυμμα της βάσης της μονάδας.*

Τη συνέχεια της συναρμολόγησης έχει κοπής του συρματόσχοινου στη κατάλληλη διάσταση και η τοποθέτηση του πάνω στο τύμπανο. Για να τοποθετηθεί το συρματόσχοινο στο τύμπανο πρέπει να περαστεί μέσα από δυο τρύπες και στη συνέχεια προστίθεται ο κόμπος ο οποίος λειτουργεί ως τέρμα για να μην είναι δυνατό να εμπλακεί το συρματόσχοινο πάνω από το τύμπανο.



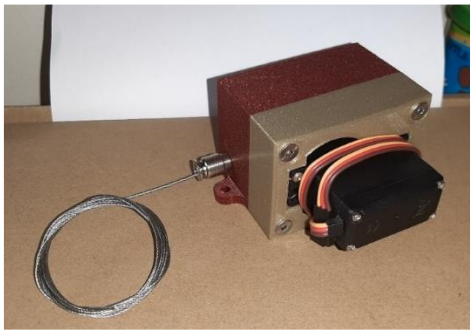
Εικόνα 6-11 *Κινούμενο γρανάζι με συρματόσχοινο*

Έτσι αφού τελειώσει και η συναρμολόγηση με το συρματόσχοινο στη συνέχεια τοποθετείται πάνω στη βάση το τύμπανο με το συρματόσχοινο. Για την υλοποίηση σε αυτό το κομμάτι της συναρμολόγησης πρέπει αρχικά να έχει τοποθετηθεί πάνω στη βάση ο ταχύ- σύνδεσμος . η τοποθέτηση του γίνεται βιδώνοντας τος στη κατάλληλη οπή της βάσης με ένα κατσαβίδι τύπου Allen διάστασης 2,5mm. Έτσι αφού έχει τοποθετηθεί ο ταχύ- σύνδεσμος περνιέται και το συρματόσχοινο μέσα από αυτόν με τελική μορφή αυτή της εικόνας παρακάτω.



Εικόνα 6-12 *Τοποθετημένο κινούμενο γρανάζι- τύμπανο πάνω στη βάση της μονάδας, ενώ έχει προστεθεί και ο ταχύ- σύνδεσμος και βίδα συγκράτησης του τυμπάνου.*

Το στάδιο αυτό τελειώνει προσθέτοντας και τη βίδα πάκτωσης του τυμπάνου πάνω στη βάση. Η βίδα αυτή είναι περαστή στη βάση και στο τύμπανο και σφίγγεται με ένα παξιμάδι εξωτερικά της βάσης. Ιδιαίτερη προσοχή σε αυτό το στάδιο πρέπει να δοθεί στη σύσφιξη της βίδας, διότι το υπερβολικό σφίξιμο αυτής προκαλεί φρενάρισμα στα ρουλεμάν. Άρα η σύσφιξη αυτής γίνεται μέσα από ποιοτικό έλεγχο της ικανότητας περιστροφής του τυμπάνου. Τέλος η συναρμολόγηση τελειώνει με τη τοποθέτηση και σύσφιξη του καλύμματος της βάσης με τη βάση. Η συναρμολόγηση των δυο κομματιών είναι σχετικά απλή, καθώς η θέση τους έχει καθοριστεί μονοσήμαντα από κατάλληλες διαμορφώσεις- πατούρες στη βάση και το κάλυμμά της μονάδας.



Εικόνα 6-13 *Τελικό συναρμολόγημα μονάδας οδήγησης της αρπάγης.*

Η συγκράτηση του καλύμματος πάνω στη βάση της μονάδας επιτυγχάνεται χάρη σε τέσσερις βίδες που τοποθετούνται στις τέσσερις άκριες της. Οι βίδες αυτές είναι χωνευτές τύπου Allen.

6.3. Επιμέρους εξαρτήματα αρπάγης και μονάδας οδήγησης της.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται κάποια εξαρτήματα που απαρτίζουν την μονάδα οδήγησης της αρπάγης αλλά και την αρπάγη και τα οποία δεν έγινε κατασκευή τους αλλά προμηθευτήκαν σε μια διαδικασία ερευνάς για την επίλυση προβλημάτων που προκύπταν και προσαρμοστήκαν πάνω στη κατασκευή. Η προμήθεια τους έγινε είτε από καταστήματα στο διαδίκτυο είτε από τη τοπική αγορά.

Ρουλεμάν

Τα ρουλεμάν που χρησιμοποιούνται για τη στήριξη και την ελεύθερη περιστροφή του τυμπάνου είναι της εταιρίας NSK με βαθιά αυλάκωση και μπίλιες για στοιχεία ολίσθησης με εμπορική ονομασία 6800zz και 687zz κλειστού τύπου.



Εικόνα 6-14 *Ρουλεμάν για την έδραση των περιστρεφόμενων κομματιών όπως είναι ο gripper και το τύμπανο, στην εικόνα απεικονίζονται το 687zz (αριστερά) και το 6800zz (δεξιά).*

Πίνακας 6-2 *Γεωμετρικά χαρακτηρίστηκα για το έδρανο κύλισης 6800zz*

Ρουλεμάν 6800zz	
Εξωτερική διάμετρος	19mm
Εσωτερική διάμετρος	14mm
Πλάτος	5mm

Πίνακας 6-3 *Γεωμετρικά χαρακτηρίστηκα για το έδρανο κύλισης 687zz*

Ρουλεμάν 687zz	
Εξωτερική διάμετρος	14mm
Εσωτερική διάμετρος	7mm
Πλάτος	5mm

Ταχύ- σύνδεσμοι

Ταχύ- σύνδεσμοι καλούνται τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν με σκοπό τη διασύνδεση της μονάδας οδήγησης με την αρπάγη. Τα στοιχεία αυτά αποτελούν εμπορικά εξαρτήματα για την υλοποίηση πνευματικών συστημάτων.



Εικόνα 6-15 *Ταχύ- σύνδεσμοι αέρος πνευματικών συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν στη κατασκευή*

Οι ταχύ- σύνδεσμοι είναι τοποθετημένα κατά ζεύγος πάνω στη μονάδα οδήγησης της αρπάγης. Η συναρμολόγηση τους γίνεται χάριν του φέρων σπειρώματος που έχουν ενώ κατά τη λειτουργία τους καταφέρνουν να συνδέονται με σωληνάκι αέρος ενώ εσωτερικά τους ολισθαίνει με μεγάλη ευκολία συρματόσχοινο το οποίο μεταδίδει τη κίνηση στην αρπάγη.

Συρματόσχοινο

Για τη μετάδοση της κίνησης από τη μονάδα οδήγησης στην αρπάγη χρησιμοποιείται συρματόσχοινο γαλβάνιζέ διαμέτρου 1mm. Έτσι για τη λειτουργία της αρπάγης υπάρχουν δυο συρματόσχοινα εκ των οποίων το ένα προορίζεται για τη μετάδοση της κίνησης από τη μονάδα οδήγησης στο μηχανισμό κοπής και το άλλο από τη δεύτερη μονάδα οδήγησης στο μηχανισμό συγκράτησης.



Εικόνα 6-16 *Συρματόσχοινο γαλβάνιζε διαμέτρου 1mm που χρησιμοποιήθηκε για να μεταδίδει τη κίνηση από τη μονάδα στην αρπάγης και δυο είδη σύνδεσης του συρματόσχοινου που χρησιμοποιήθηκαν για την σύνδεση μου τους μηχανισμούς, θηλιάς (πάνω) και με κόμπο (κάτω).*

Η σύνδεση στα άκρα του συρματόσχοινου με τη μονάδα οδήγησης αλλά και τους μηχανισμούς της αρπάγης έγινε με δυο τρόπους. Ο ένας τρόπος ο οποίος έχει να κάνει με τη μονάδα οδήγησης έγινε η χρήση κόμπου, δηλαδή ενός εξαρτήματος το οποίο βιδώνεται στην άκρια του συρματόσχοινου και λειτουργεί σαν τέρμα.

Στο δεύτερο τρόπο χρησιμοποιείται ο τύπος θηλιάς, δηλαδή στην άκρια του συρματόσχοινου πραγματοποιείται μια θηλιά με τη βοήθεια κατάλληλου εξαρτήματος (ταλουρίτ) το οποίο πρεσάρετε και σφίγγει το συρματόσχοινο. Να σημειωθεί ότι το εξάρτημα αυτό επιλέγεται βάση της διαμέτρου του συρματόσχοινου που επιθυμείτε να γίνει η θηλιά ή ο κόμπος αντίστοιχα. Το πρεσάρισμα για μικρές διαμέτρους μπορεί να γίνει και με το χέρι ενώ για μεγαλύτερες απαιτείται η χρήση κατάλληλης μηχανικής διάταξης.

Ελατήρια έλξεως

Για την επαναφορά των μηχανισμών κοπής και συγκράτησης στην ανοικτή θέση επιλέχθηκε η χρήση ελατηρίων έλξεως. Πιο συγκεκριμένα τα ελατήρια αυτά τείνουν να κρατάνε τους δυο μηχανισμούς στην ανοικτή θέση και κατ' επέκταση μέσω της κινηματικής αλυσίδας του καθενός μηχανισμού κρατάνε τεντωμένο το συρματόσχοινο.



Εικόνα 6-17 *Ελατήρια επαναφοράς μηχανισμών κοπής και συγκράτησης.*

Ακόμα τα ελατήρια τείνουν να απλουστεύσουν τη κατασκευή καθώς δεν απαιτείται επιπλέον μηχανισμός ο οποίος θα επαναφέρει το κάθε μηχανισμό χωριστά στην αρχική του θέση.

Πίνακας 6-4 *Τεχνικά χαρακτηριστικά ελατηρίων έλξεως*

Χαρακτηριστικά ελατηρίων	
Διάμετρος σύρματος	1mm
Εσωτερική διάμετρος ελατήριου	4mm
Υλικό	Χάλυβας ελατηρίων

7. Έλεγχος αρπάγης

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται το σύστημα ελέγχου της μονάδας οδήγησης και κατ' επέκτασή της αρπάγης. Αναφέρονται τα μέρη που το αποτελούν όπως οι κινητήρες και ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχό της. Στη συνέχεια περιγράφεται το ηλεκτρικό κύκλωμα και τέλος το διάγραμμμα ροής που περιγράφει το κώδικα που τρέχει ο μικροελεγκτής

7.1. Συνοπτική περιγραφή του συστήματος ελέγχου της αρπάγης

Το συνολικό σύστημα αποτελείται από τη μηχανολογική κατασκευή της αρπάγης, δυο κινητήρες τύπου R/C Servo για την κίνηση της μονάδας χειρισμού της αρπάγης, έναν μικρό-ελεγκτή (Arduino Uno) ο οποίος ελέγχει τους κινητήρες, και το λογισμικό από το οποίο πραγματοποιείται ο προγραμματισμός του μικρό- ελεγκτή για τη κίνηση των κινητήρων.

Για τον έλεγχο και την πραγματοποίηση των κινήσεων της αρπάγης, χρησιμοποιήθηκαν δυο Servo κινητήρες (R/C Servo). Ο έλεγχος της κίνησης των Servo κινητήρων γίνεται μέσω του μικροελεγκτή Arduino Uno. Το Arduino Ide παίζει το σημαντικότερο ρόλο αφού στο περιβάλλον του γράφεται ο κώδικάς για την κίνηση των Servo κινητήρων, ο οποίος με τη σειρά του αποστέλλεται στην πλακέτα του μικροελεγκτή Arduino Uno και πραγματοποιούνται οι κινήσει στους μηχανισμούς κοπής και συγκράτησης της αρπάγης.

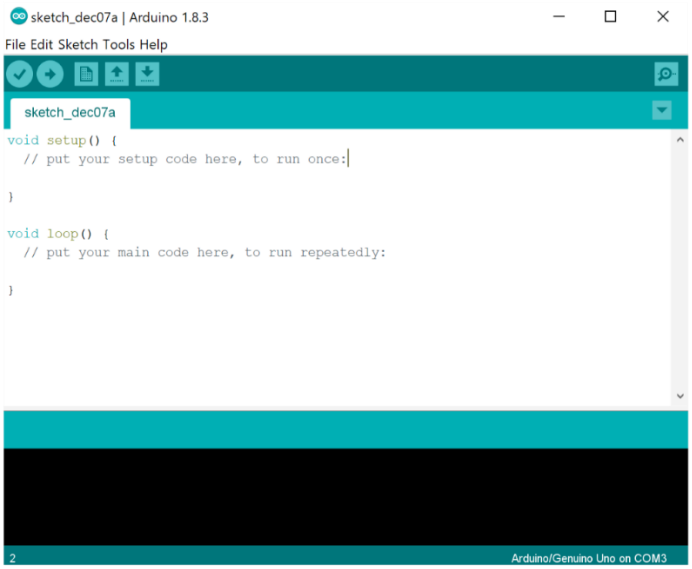
7.2. Το λογισμικό Arduino IDE

Το περιβάλλον προγραμματισμού (IDE) του Arduino είναι μία εφαρμογή γραμμένη σε Java που λειτουργεί σε πολλές πλατφόρμες. Έχει σχεδιαστεί για να εισαγάγει στον προγραμματισμό τους νέους που δεν είναι εξοικειωμένοι με την ανάπτυξη λογισμικού. Περιλαμβάνει ένα πρόγραμμα επεξεργασίας κώδικα με χαρακτηριστικά όπως είναι η επισήμανση σύνταξης και συνδυασμός αγκύλων και είναι επίσης σε θέση να μεταγλωττίζει και να φορτώνει προγράμματα στην πλακέτα με ένα μόνο κλικ.

Η γλώσσα προγραμματισμού του Arduino είναι μια υλοποίηση της Wiring, η οποία αποτελεί μια παραλλαγή-μίξη C και C++ που απευθύνεται σε μικροελεγκτές αρχιτεκτονικής AVR όπως ο ATmega η οποία βασίζεται στο περιβάλλον προγραμματισμού πολυμέσων Processing. Στο περιβάλλον του Arduino IDE το πρόγραμμα που δημιουργείται ονομάζεται sketch. Μέσα σε αυτό ο χρήστης πρέπει να ορίσει δυο λειτουργίες:

-void setup(): μία συνάρτηση που τρέχει μία φορά στην αρχή του προγράμματος και η οποία ορίζει κάποιες ρυθμίσεις που έχουν να κάνουν με το μικροελεγκτή, όπως ο χαρακτηρισμός κάποιων pins ως είσοδοι ή έξοδοι, αλλά και την εκκίνηση της σειριακής επικοινωνίας όταν χρειάζεται.

-void loop(): πρόκειται για μία συνάρτηση που εκτελείται συνέχεια μέχρι η πλακέτα να απενεργοποιηθεί. Στη πραγματικότητα είναι ένας ατέρμονας βρόγχος μέσα στον οποίο εκτελείται το κυρίως κομμάτι του κώδικα.



Εικόνα 7-1 *Περιβάλλον προγραμματισμού του μικροελεγκτή Arduino.*

Το περιβάλλον προγραμματισμού του Arduino δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να χρησιμοποιεί έτοιμα παραδείγματα από τη βιβλιοθήκη του, να οπτικοποιεί δεδομένα εισόδου στο μικροελεγτη σε πραγματικό χρόνο μέσω του Serial Monitor.

Το Arduino είναι ανοιχτού λογισμικού: τα σχέδια αναφοράς του λογισμικού του Arduino διανέμονται δωρεάν και είναι διαθέσιμα στην ιστοσελίδα του Arduino.

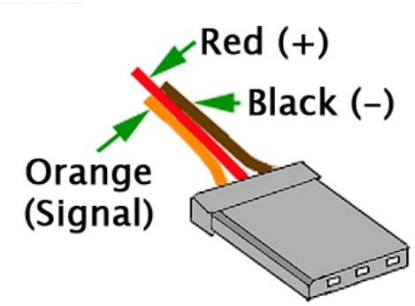
7.3. Κινητήρες Servo

Οι Servo κινητήρες είναι κινητήρες με βελτιωμένα λειτουργικά χαρακτηριστικά όπως πυκνότητα ισχύος, ροπή αδράνειας, και βαθμού απόδοσης. Είναι συνήθως κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ένα ενσωματωμένο σύστημα γραναζιών και ένα κύκλωμα ανάδρασης. Χρησιμοποιούνται σε κινητήρια συστήματα υψηλών απαιτήσεων, όπου υπάρχει ανάγκη για μεγάλη ακρίβεια και γρήγορη ταχύτητα απόκρισης του συστήματος σε έλεγχο ροπής, ταχύτητας και θέσης.

Με άλλα λόγια, ένα σύστημα κινούμενο με Servo κινητήρα προϋποθέτει το βέλτιστο συνδυασμό κινητήρα και τεχνικής ελέγχου. Έχουν γενικά μικρό μέγεθος για τη ροπή που μπορούν να μεταφέρουν και για την ταχύτητα περιστροφής (60 έως 160 rpm).

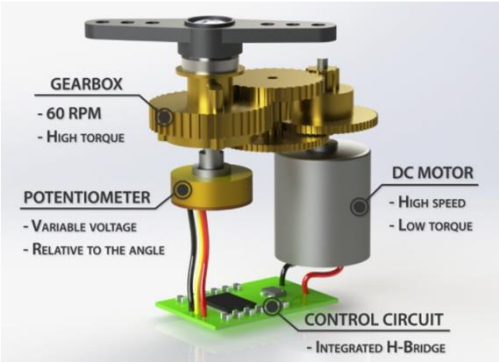
Οι Servo κινητήρες έχουν χαμηλό κόστος και εύκολη συνδεσμολογία. Χρησιμοποιούν μόνο τρία καλώδια σύνδεσης από τα οποία το πρώτο είναι η γείωση (–), το δεύτερο η τάση

τροφοδοσίας (+) και το τρίτο είναι το σήμα του ελέγχου θέσης αντιστοιχεί σε κατάλληλα διαμορφωμένο σήμα PWM.



Εικόνα 7-2 *Ακροδέκτης για ένα τυπικό Servo κινητήρα.*

Γενικά ένας Servo κινητήρας περιέχει στο εσωτερικό του το κύκλωμα ελέγχου, τον κινητήριο άξονα με τη φλάντζα, ένα ποτενσιόμετρο, έναν κινητήρα και ένα σύστημα γραναζιών.



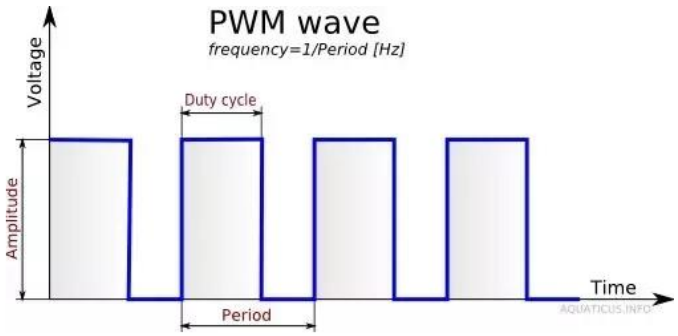
Εικόνα 7-3 *Αναλυτική παρουσίαση των βασικών μερών ενός κινητήρα τύπου Servo.*

Το κύκλωμα ελέγχου είναι ο “εγκέφαλος” του Servo κινητήρα ο οποίος διαβάζει το σήμα που του στέλνουμε (PWM) και ελέγχει τον κινητήρα προκειμένου να τον περιστρέψει στην επιθυμητή θέση. Το ποτενσιόμετρο, συνδέεται με τον κινητήριο άξονα και περιστρέφεται μ’ αυτόν έτσι ώστε να μεταβάλλει την αντίσταση του ποτενσιόμετρου για να το διαβάσει ο ελεγκτής. Έτσι μπορεί να ξέρει κάθε στιγμή την ακριβής γωνία στροφής του κινητήριου άξονα. Ο κινητήρας είναι συνεχούς ρεύματος (DC motor) και συνδέεται με το σύστημα γραναζιών έτσι ώστε να μεταφέρει την κίνηση στον κινητήριο άξονα.

Οι Servo κινητήρες είναι ευρέως διαδεδομένοι διότι έχουν πολύ εύκολο τρόπο ελέγχου. Ο έλεγχος τους γίνεται από ένα σήμα τετραγωνικών παλμών “PWM” (Pulse Width Modulation) με συχνότητα 50Hz , δηλαδή περίοδο 20ms .

Το σήμα “PWM” χαρακτηρίζεται από τρείς παραμέτρους, την περίοδο, τη συχνότητα και τον κύκλο λειτουργίας. Οι οποίοι εξηγούνται ως εξής:

1. Η περίοδος (period) είναι το πόσο χρόνο χρειάζεται για να πραγματοποιήσει τον πλήρη κύκλο του παλμού.
2. Η συχνότητα (frequency) είναι το πόσο συχνά δημιουργούνται οι παλμοί και καθορίζεται σε Hz.
3. Ο κύκλος λειτουργίας (duty cycle) είναι η πιο κρίσιμη παράμετρος και αναφέρεται στο χρονικό διάστημα το οποίο ο παλμός του “PWM” είναι ενεργός η σε κατάσταση HIGH και εκφράζεται ως επί τοις εκατό (%) ποσοστό της πλήρης περιόδου.



Εικόνα 7-4 *Γραφική παράσταση ενός ψηφιακού σήματος PWM με ανάδειξη των κύριων χαρακτηριστικών του.*

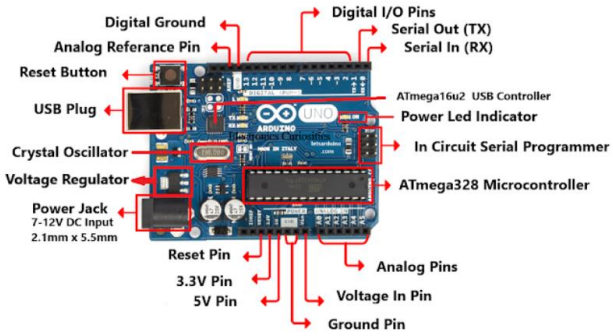
Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται σε αυτή την εφαρμογή είναι ο Servo Waveshare MG996R (Πίνακας 7-1) για το χειρισμό του μηχανισμού συγκράτησης και κοπής.

Πίνακας 7-1 *Τεχνικά χαρακτηριστικά κινητήρα Servo που χρησιμοποιήθηκε για τη κίνηση των μηχανισμών.*

	Τεχνικά χαρακτηρίστηκα κινητήρα
Λειτουργία Servo	Αναλογική
Περιστροφή	180°
Ροπή (6V)	11kg.cm
Ροπή (4,8V)	9kg.cm
Ταχύτητα (6V)	0.18sec/60°
Τύπος Γραναζιών	Μεταλλικά

7.4. Ο μικρολεγκτής Arduino Uno

Για τον έλεγχο των κινητήρων χρησιμοποιήθηκε ο μικροελεγκτής Arduino Uno. Ο μικροελεγκτής Arduino είναι ευρέως διαδεδομένος για εφαρμογές μηχατρονικών συστημάτων λόγω του μικρού όγκου του και της απλότητας που προσφέρει σε επίπεδο προγραμματισμού αλλά και συνδεσμολογία με ηλεκτρικά κυκλώματα.



Εικόνα 7-5 *Αναλυτική απεικόνιση των κυρίων μερών του μικροελεγκτή Arduino Uno.*

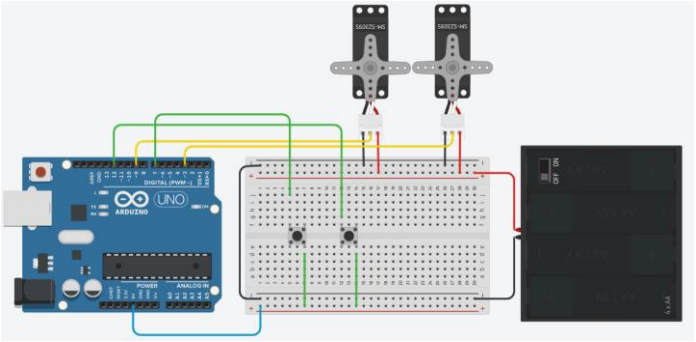
Ο μικροελεγκτής Arduino είναι φτιαγμένος να λειτουργεί με τάση 5Volt. Ακόμα 6 από αυτά τα pin έχουν τη δυνατότητα εξαγωγής σήματος τύπου PWM (pin3,5,6,9,10,11). Η είσοδος αναλογικών σημάτων στον μικροελεγκτή γίνεται από μια σειρά pin αναλογικής εισόδου (A0-A5). Ο μικροελεγκτής Arduino Uno έχει την δυνατότητα να τροφοδοτήσει με τάση κάποιο εξωτερικό κύκλωμα με τάση 5Volt και 3,3Volt, είτε με τη χρήση μπαταρίας της οποίας η τάση κυμαίνεται από 7-12Volt.

Πίνακας 7-2 *Πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών του μικροελεγκτή Arduino Uno.*

Τεχνικά χαρακτηρίστηκα μικροελεγκτή Arduino Uno	
Μικροελεγκτής	ATmega328
Τάση λειτουργίας	5V
Προτεινόμενη τάση εισόδου	7-12V
Όρια τάσης εισόδου	6-20V
Ψηφιακοί ακροδέκτες I/O	14, (6 PWM εξοδοι)
Αναλογικοί ακροδέκτες εισόδου	6
Συνεχές ρεύμα ανά ακροδέκτη	40mA
Συνεχές ρεύμα για τον ακροδέκτη τάσης 3.3V	50mA
Μνήμη Flash	32KB (ATMEGA328)
Μνήμη SRAM	2KB (ATMEGA328)
Ταχύτητα ρολογιού	16MHz
Μήκος	68.6mm
Πλάτος	53.4 mm
Βάρος	25gr

7.5. Ηλεκτρικό κύκλωμα

Το ηλεκτρικό κύκλωμα είναι το μέρος το συστήματος πού σκοπό έχει τη τροφοδοσία των κινητήρων με την προτεινόμενη τάση λειτουργίας αλλά και την οδήγηση τους ώστε να επιτευχθεί η σωστή λειτουργία της μονάδας χειρισμού και κατ' επέκταση της αρπάγης.

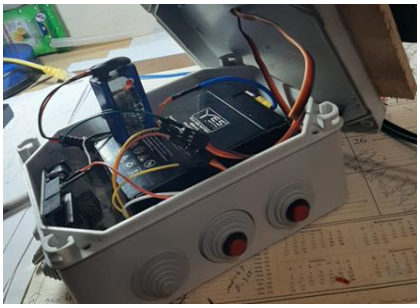


Εικόνα 7-6 *Ψηφιακή αναπαράσταση της συνδεσμολογίας των κινητήρων της αρπάγης*

Η τάση λειτουργίας που χρησιμοποιείται είναι σε δυο επίπεδα, μια τάση στα 6Volt για τη λειτουργία των κινητήρων όπως προτείνει ο κατασκευαστής τους και μια τάση λειτουργία στα 5Volt για τη λειτουργία του μικροελεγκτή. Η τάση λειτουργίας για τους δυο κινητήρες δίδεται μέσω μια μπαταρίας 6Volt, ενώ η τάση για τη λειτουργία του μικροελεγκτή προέρχεται από μια μπαταρία 9Volt που συνδέεται στη υποδοχή Power Jack για τροφοδοσία 7- 12Volt.

Η ιδέα βάση της οποίας υλοποιήθηκε το ηλεκτρικό κύκλωμα είναι ότι με το πάτημα ενός Button ένας κινητήρας θα περιστρέφεται σε συγκεκριμένη γωνιά που του έχει καθοριστεί, στη συνέχεια αφήνοντας το button ο κινητήρας θα επιστρέφει στην αρχική του θέση. Η ίδια λογική χειρισμού ισχύει για το μηχανισμό κοπής αλλά και το μηχανισμό συγκράτησης.

Άρα το ηλεκτρικό κύκλωμα περιλαμβάνει τις μπαταρίες τροφοδοσίας, δυο Push Button (τύπου Normally Open), το μικροελεγκτή Arduino Uno και τους δυο κινητήρες RC Servo. Για την καλύτερη οργάνωση και προστασία του ηλεκτρικού κυκλώματος τοποθετήθηκαν όλα τα κομμάτια που το απαρτίζουν μέσα σε ένα ηλεκτρολογικό κουτί.

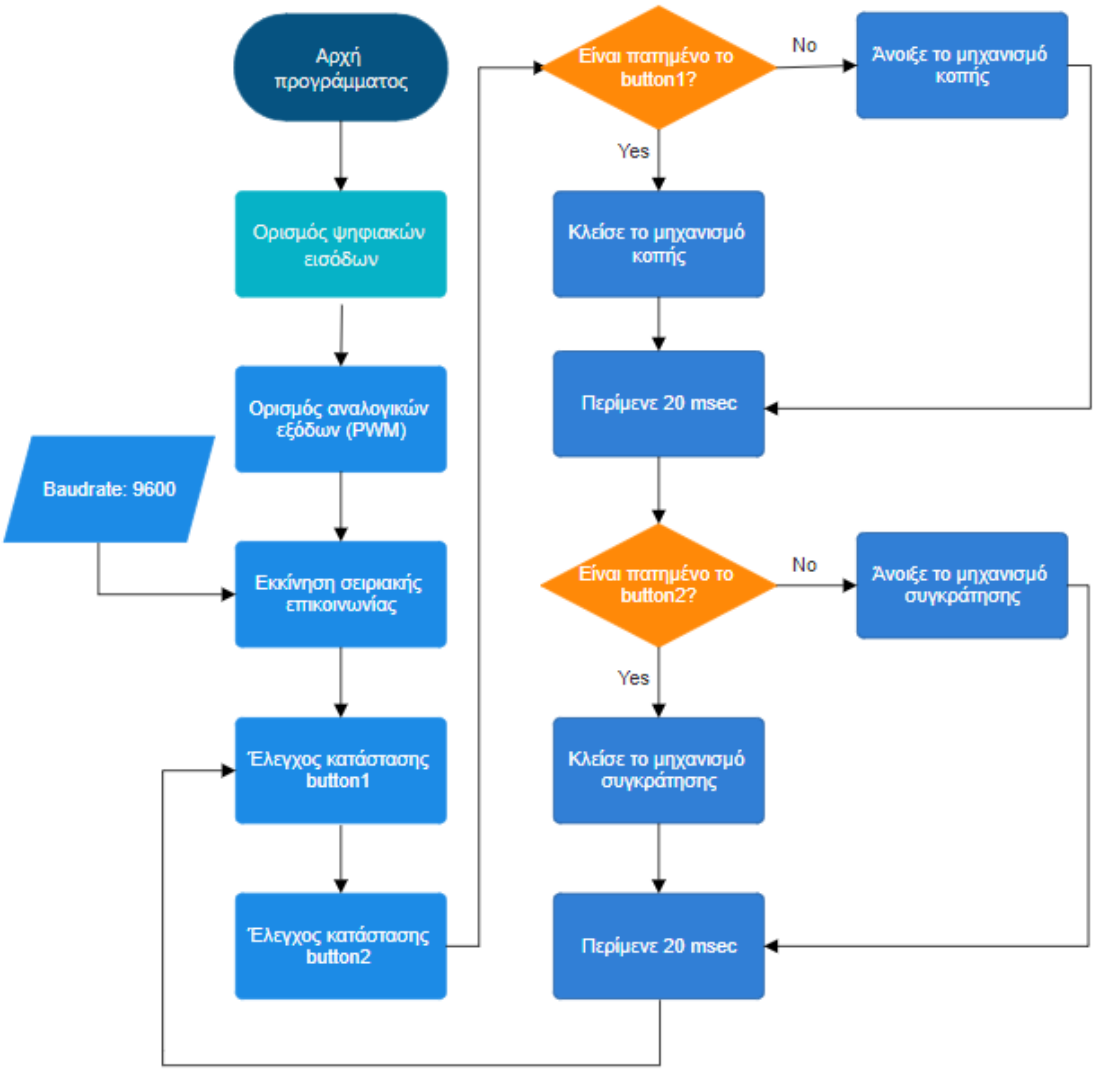


Εικόνα 7-7 *Τοποθέτηση ηλεκτρικού κυκλώματος μέσα σε κουτί με σκοπό την εκτέλεση πειραμάτων με την αρπάγη.*

Έτσι οι δυο κινητήρες συνδέθηκαν παράλληλα στη μπαταρία που βρίσκεται μέσα στο κουτί, το σήμα για τον έλεγχο της γωνίας περιστροφής δίδεται από το μικροελεγκτή Arduino Uno ο οποίος βρίσκεται και αυτό προστατευμένος μέσα στο κουτί. Για την δημιουργία ενός κοινού σημείου αναφοράς των τάσεων συνδέεται το ''-'' της μπαταρίας και σε μια από τις υποδοχές GND του μικροελεγκτή. Η τάση τροφοδοσίας των δυο Push Button γίνεται από τον ίδιο τον μικροελεγκτή και όχι από τη μπαταρία τροφοδοσίας των κινητήρων για την αποφυγή τυχών προβλημάτων στην είσοδο του μικροελεγκτή από μεγαλύτερη τάση.

Πίνακας 7-3 *Αντιστοίχιση κινητήρων και buttons με τα pin του μικροελεγκτή.*

Pins Αρπάγης	
Συσκευή	Arduino pins
Κινητήρας Servo μηχανισμού κοπής	D3 (PWM)
Κινητήρας Servo μηχανισμού συγκράτησης	D9 (PWM)
Button μηχανισμού κοπής	D12
Button μηχανισμού συγκράτησης	D7



Εικόνα 7-8 *Διάγραμμα ροής προγράμματος που τρέχει ο μικροελεγκτής Arduino Uno.*

8. Αρχικά πειράματα

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί γίνεται παρουσίαση κάποιων πειραμάτων που έγιναν με σκοπό την εξακρίβωση των δυνατοτήτων της αρπάγης. Τα πειράματα αυτό αφορούσαν την επιχείρηση κοπής και συγκράτησης μαλακών ιστών από φυτά. Μέσα από τα πειράματα προκύπτουν κάποια συμπεράσματα για την αρπάγη ενώ στο τέλος παρουσιάζεται μία νέα βελτιωμένη εκδοχή της αρπάγης.

8.1. Πειράματα

Γεωργικές εργασίες που πραγματοποιούνται στην ύπαιθρο πολλές φορές έχουν την ανάγκη από κοπή και συλλογή ιστών, είτε αυτό είναι κάποιο κλαδί, κάποιο φύλλο ή κάποιος καρπός. Οι εργασίες αυτές πολλές φορές γίνονται χρονοβόρες, επιβαρύνοντας ένα γεωργό οικονομικά όταν απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα για την περάτωση των εργασιών, αλλά και των εργάτη σωματικά όταν οι εργασίες αυτές σε ψηλά σημεία (μεγάλα δέντρα) σε χαμηλά σημεία (συνήθως για κηπευτικά). Έτσι το πρόβλημα αυτό καλούνται να λύσουν τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου.

Έτσι αρπαγή που κατασκευάστηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής προορίζεται για τη χρήση σε γεωργικές εργασίες. Στόχος της είναι να πραγματοποιεί εργασίες κοπης και συλλογής σε κυρίως μαλακούς ιστούς. Αυτό γίνεται αντιληπτό μέσα από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν και παρουσιάζονται παρακάτω.

Η **κοπή και συλλογή από καρπό σταφυλιού** (Εικόνα 8-1)στα πρώτα στάδια της ωρίμασης του αποτελεί ένα σημαντικό πείραμα καθώς σε αυτή τη περίπτωση εξετάζεται η ακρίβεια επαφής του μηχανισμού συγκράτησης καθώς το κοτσάνι του σταφυλιού είναι μικρής διατομής.



Εικόνα 8-1 *Διαδικασία κοπής και συλλογής άγουρου σταφυλιού.*

Μέσα από τη **κοπή φύλλων συκιάς** (Εικόνα 8-2)διαπιστώθηκε η ποιότητα κοπής του μηχανισμού αλλά και η ικανότητα να διεισδύει και να πραγματοποιεί κοπές σε σημεία με έντονο φύλλωμα εκεί δηλαδή όπου η πρόσβαση είναι δύσκολη.



Εικόνα 8-2 *Διαδικασία κοπής φύλλου συκιάς.*

Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η αποδοτικότητα του μηχανισμού σε πολλή λεπτούς ιστούς διεξαχθεί πείραμα για κοπή ανθού από **λουλούδι κήπου** (**Εικόνα 8-3**).



Εικόνα 8-3 *Διαδικασία κοπής λουλουδιών κήπου.*

Ιδιαίτερη πρόκληση αποτέλεσε η προσπάθεια κοπής ενός μερικώς σκληρού ιστού από **κλαδί ροδιάς** (Εικόνα 8-4). Σε αυτή τη περίπτωση εξετάσθηκε η δυνατότατά κοπής σκληρών ιστών έως πολύ ελάχιστα ξυλώδης αλλά και η ικανότητα συγκράτησης βάρους του μηχανισμού συγκράτησης που στη περίπτωση αυτή είναι το ρόδι.



Εικόνα 8-4 *Διαδικασία κοπής και συγκράτησης από δέντρο μικρό ροδί (αριστερά).*

Η κοπή ιστού από **βλίτο** (**Εικόνα 8-5**)αποτέλεσε ένα ακόμα πείραμα για την εξακρίβωση της διεισδυτικότητας της αρπάγης σε δυσπρόσιτα μέρη όπου καθίσταται δύσκολο λόγο έντονης βλάστησης του φυτού.



Εικόνα 8-5 *Διαδικασία κοπής φύλλων βλίτου.*

8.2. Παρατηρήσεις και συμπεράσματα αρχικών πειραμάτων

8.2.1. Παρατηρήσεις πειραμάτων

- Η λειτουργία του μηχανισμού κοπής εμφάνισε θετικά αποτελέσματα με καθαρές κοπές πάνω στους ιστούς που έγιναν τα πειράματα.
- Ο μηχανισμός συγκράτησης εμφάνισε καλά αποτελέσματα με την επίτευξη συγκράτησης καρπό από ρόδι βάρους της τάξης των 100 γραμμαρίων. Ένα επίσης θετικό αποτέλεσμα είναι η ικανότητα συγκράτησης ιστών πολύ μικρών διαστάσεων στο κοτσάνι της τάξης του χιλιοστού αναφερόμενος στη περίπτωση του μη ώριμου σταφυλιού.
- Μη επαρκή ικανότητα κοπής σε περιπτώσεις ιστών με μεγαλύτερη ωριμότητα, η οποία εκτιμάται ότι οφείλεται στην μειωμένη ικανότητα των κινητήρων για άσκηση δύναμης, τις απώλειες δύναμης λόγο τριβής των συρματόσχοινων στους σωλήνες και την αντίσταση που προκαλούν τα ελατήρια επαναφοράς.
- Η έντονη κάμψη των σωλήνων και του μήκους αυτών είχε ως αποτέλεσμα την μεγάλη αύξηση των τριβών και την απώλεια δύναμης έλξης.
- Ικανοποιητικά αποτελέσματα εισχώρησης της αρπάγης σε σημεία δυσπρόσιτα περίπτωση βλίτου και συκιάς, αλλά και σε περιπτώσεις όπως η απόσπαση καρπών σταφυλιού.

8.2.2. Συμπεράσματα πειραμάτων

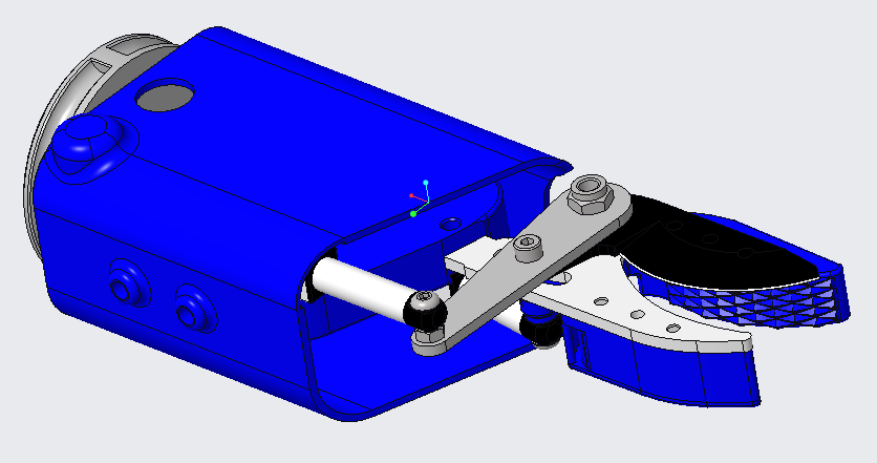
Με βάση τα παραπάνω εκτιμάται αναγκαίος ο επανασχεδιασμός του συστήματος ελέγχου των μηχανισμών της αρπάγης με σκοπό την επίτευξη ενός λιγότερο περίπλοκου συστήματος και μεγαλύτερη ικανότητα άσκησης δύναμης. Επίσης κρίνεται απαραίτητη η αφαίρεση των ελατηρίων επαναφορά καθώς προσθέτουν αντίσταση στο σύστημα οδήγησης των μηχανισμών με αποτέλεσμα τη μειωμένη αποτελεσματικότητα της αρπάγης. Επίσης συμπεραίνεται ως καλύτερη πρακτική η τοποθέτηση του μικροελεγκτή κοντά στους μηχανισμούς κοπής με αποτέλεσμα τη συνολική μείωση του όγκου της αρπάγης. Στα επιπλέον χαρακτηριστικά θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν ένας τρόπος με τον οποίο η αρπάγη θα διορθώνει τη κίνηση σε περιπτώσεις που χρειάζεται συγκράτησης μεγάλων όγκων.

8.3. Βελτιωμένη αρπάγη

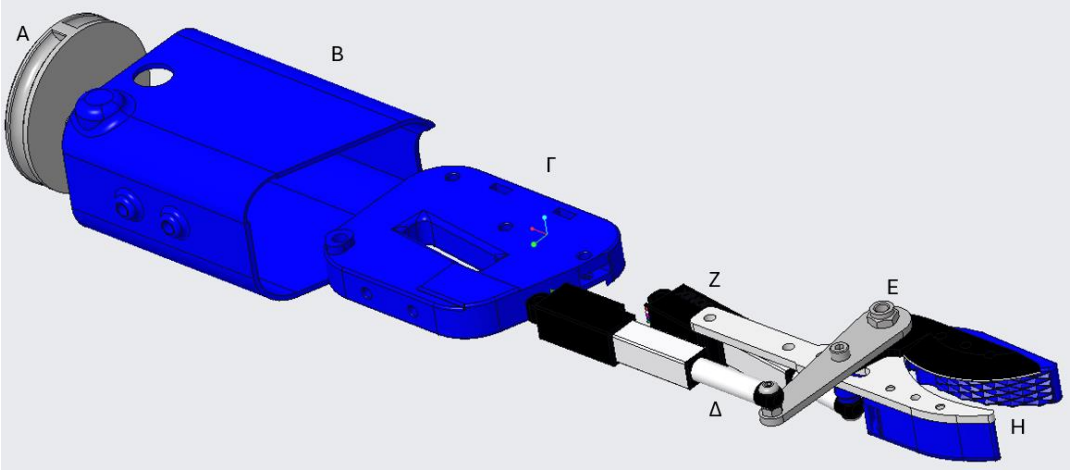
Στη παράγραφο αυτή θα γίνει παρουσίαση της νέας αρπάγης η οποία αποτελεί βελτιωμένη εκδοχή της προηγούμενης που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια με βάση τα συμπεράσματα που προέκυψαν στο τέλος του Κεφαλαίου 8. Η νέα αρπάγη χρησιμοποιεί τους ήδη υπάρχων μηχανισμούς κοπής και συγκράτησης, με τις διαφορές να εντοπίζονται στους κινητήρες- επενεργητές των μηχανισμών κοπής και συγκράτησης, στη τροποποίηση του μηχανισμού συγκράτησης με την εισαγωγή αισθητήρα ανίχνευσης του μίσχου του καρπού αλλά και την ενσωμάτωση του μικροελεγκτή πάνω στη κατασκευή της αρπάγης σε αντίθεση με το προηγούμενο μοντέλο που βρισκόταν μακριά από αυτή.

8.3.1. Τρισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο αρπάγης

Μετά την εκτέλεση των αρχικών πειραμάτων και με βάση κάποια συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτά ως προς τις ικανότητες κοπής και συγκράτησης, ο μηχανισμός και η κατασκευή της αρπάγης τροποποιήθηκε με αποτέλεσμα μια βελτιωμένη εκδοχή αυτής, όπως αυτή φαίνεται στη παρακάτω εικόνα. Σε αυτή την εκδοχή της αρπάγης ο έλεγχος των μηχανισμών κοπής και συγκράτησης γίνεται με τη χρήση δύο γραμμικών επενεργητών.



Εικόνα 8-6 *Τρισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο βελτιωμένης εκδοχής της αρπάγης.*



Εικόνα 8-7 *Αναλυτική προβολή συναρμολογήματος τρισδιάστατου γεωμετρικού μοντέλου αρπάγης.*

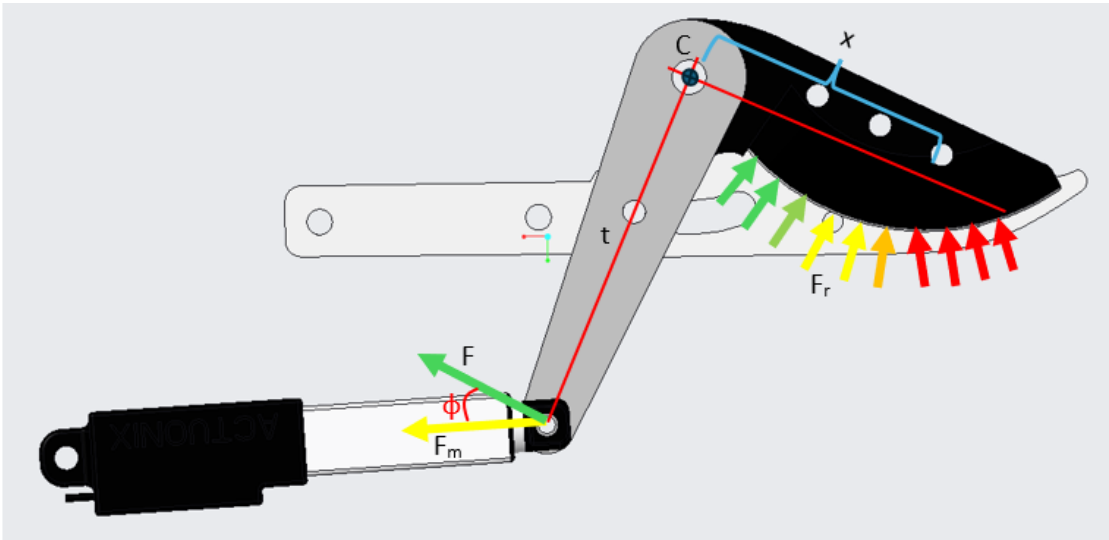
Η χρήση γραμμικών επενεργητών που επιλέχθηκε αποτελεί μία διαδεδομένη λύση σε περιπτώσεις κοπτικών μηχανισμών με μεγάλες απαιτήσεις σε δύναμη όπως τα ηλεκτρικά κλαδευτικά ψαλίδια βλ. Εικόνα 4-10. Στην Εικόνα 8-7 παρουσιάζεται η αναλυτική προβολή

του συναρμολογήματος της νέας αρπάγης με σκοπό την ανάδειξη των βασικών κομματιών αυτής, (Α) στρογγυλή βάση προσαρμογής στη φλάντζα του βραχίονα UR, (Β) κάλυμμα αρπάγης, (Γ) βάση στήριξης μηχανισμών και κινητήρων, (Δ) επενεργητής μηχανισμού κοπής, (Ζ) επενεργητής μηχανισμού συγκράτησης, (Ε) μηχανισμός κοπής, (Η) μηχανισμός συγκράτησης.

Συγκεκριμένα ο επενεργητής (βλ. Εικόνα 8-7, Δ) για το μηχανισμό κοπής με τη γραμμική κίνηση του βάκτρου ανοίγει και κλείνει το ψαλίδι και αντίστοιχα ο δεύτερος επενεργητής (βλ. Εικόνα 8-7 ,Ζ) με τη γραμμική κίνηση του βάκτρου ανοίγει και κλείνει το μηχανισμό συγκράτησης. Στα επιπλέον χαρακτηριστικά της αρπάγης στη νέα εκδοχή περιλαμβάνεται μια νέα βάση η οποία επιτρέπει την εύκολη προσαρμογή της αρπάγης στη φλάντζα του βραχίονα UR του εργαστηρίου για την εκτέλεση των πειραμάτων.

8.3.2. Ανάλυση μηχανισμού και υπολογισμός δυνάμεων και της βέλτιστης περιοχής κοπής

Στη παρακάτω παράγραφο επιχειρείται η ανάλυση δυνάμεων για το μηχανισμό κοπής για τον υπολογισμό των δύναμης που μπορεί να εφαρμόσει ο μηχανισμός κοπή κατά τη λειτουργία του με τη χρήση του γραμμικού επενεργητή που παρουσιάζεται στην Εικόνα 8-15. Σκοπός της παρούσας ανάλυσης είναι να διαπιστωθεί εάν ο επενεργητής που προτάθηκε ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις λειτουργίας του μηχανισμού κοπής. Ο κινητήρας που χρησιμοποιείται για την κίνηση του μηχανισμού κοπής με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά του (βλ. **Εικόνα 8-14**) είναι σε θέση να εφαρμόσει δύναμη 42 Newton κατά το κλείσιμο του βάκτρου.



Εικόνα 8-8 *Διάγραμμα ελευθέρου σώματος μηχανισμού κοπής.*

Σύμφωνα με τη παραπάνω εικόνα οι συμβολισμοί που αναφέρονται είναι οι εξής:

- **C**: Κέντρο περιστροφής της λεπίδας
- **F_m:** Η δύναμη έλξεως που ασκείται από το γραμμικό ενεργοποιητή και η οποία είναι του μεγέθους των **42N.**
- **F:** Η συνιστώσα της δύναμης που δημιουργεί τη ροπή ως προς το κέντρο περιστροφής της λεπίδας.

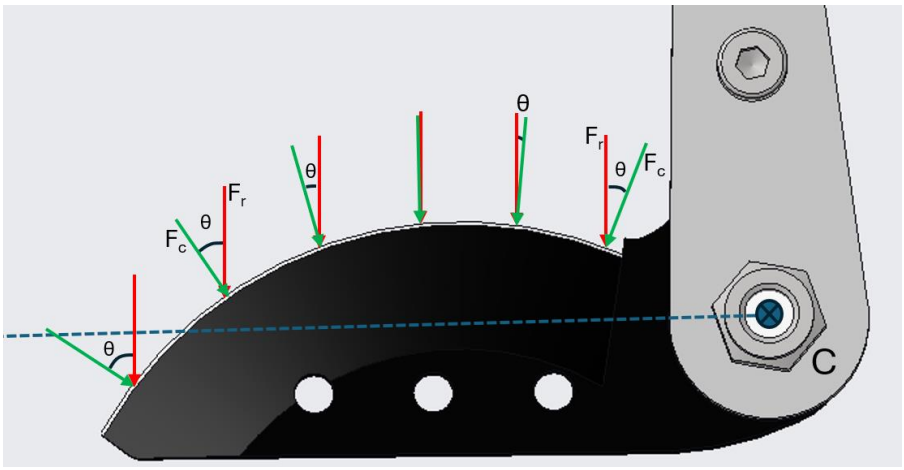
- **φ:** Γωνία μεταξύ της δύναμης που ασκεί ο κινητήρας και της συνιστώσας που δημιουργεί τη ροπή στρέψης της λεπίδας και η οποία λαμβάνει τιμές από την ανοιχτή κατάσταση του μηχανισμού κοπή στη κλειστή **0-30** περίπου μοίρες.
- **t:** Η απόσταση της κάθετης δύναμης ως προς το κέντρο περιστροφής η οποία είναι ίση με **65,3mm**.
- **F_r:** Δύναμη αντίδρασης κατά τη διαδικασία κοπής.
- **x:** Τυχαία θέση της δύναμης κοπής πάνω στη λεπίδα.

Εφαρμόζοντας της εξίσωση ισορροπίας ως προς το κέντρο περιστροφής (βλ. Εικόνα 8-8, C) της λεπίδας προκύπτει η παρακάτω έκφραση για τη δύναμη κοπής.

$$F_c = \frac{F_m \cos(\varphi)\, t}{x \cos(\theta)} \qquad [1]$$

Όπου ''θ'' η γωνία κλίσης της δύναμης κοπής σε μοίρες. Με βάση μετρήσεις που έγιναν πάνω στη λεπίδα μέσα από τη πλατφόρμα CAD προέκυψε η παρακάτω έκφραση η οποία περιγράφει τη κλίση της δύναμης κοπής σε μοίρες πάνω στη καμπύλη της λεπίδας ως προς την απόσταση ''x'' από τον άξονα περιστροφής ''C''.

$$\theta(x) = 1{,}332x + 49{,}875 \qquad [2]$$

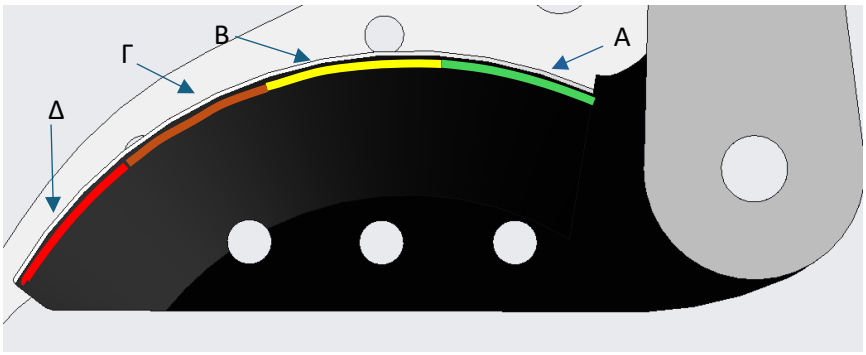


Εικόνα 8-9 *Σχηματική αναπαράσταση της μεταβολής της γωνίας ''θ'' πάνω στη καμπύλη της λεπίδας και δυνάμεων κοπής(Fc) αλλά και της δύναμης (Fr) που είναι κάθετη πάνω στη νοητή ευθεία που περνάει από το κέντρο περιστροφής.*

Λύνοντας τη εξίσωση (2) για επιθυμητή κλίση της δύναμης ίση με μηδέν μοίρες πάνω στη καμπύλη, προκύπτει ότι η απόσταση ''x'' από τον άξονα περιστροφής της λεπίδας το σημείο που εκμεταλλεύεται πλήρως η δύναμη κοπής και όχι κάποια συνιστώσα της. Η απόσταση αυτή βρίσκεται περίπου **30mm** από το σημείο C πάνω στον άξονα x το οποίο αντιστοιχεί στη πραγματικότητα κάπου στο μέσον της. Το αποτέλεσμα αυτό έχει λογική, καθώς παρατηρώντας την Εικόνα 8-9, είναι εύκολο να διακρίνει κανείς τη θέση της δύναμης με μηδενική κλίση. Η εξίσωση (1) όμως υπενθυμίζει ότι όσο το σημείο κοπής απομακρύνεται από το κέντρο περιστροφής της λεπίδας τόσο μειώνεται η δύναμη αυτή που εκμεταλλεύεται ο μηχανισμός.

Με βάση λοιπόν τη παρούσα ανάλυση προκύπτει το συμπέρασμα ότι η βέλτιστη περιοχή της λεπίδας που πρέπει να χρησιμοποιείται κατά τις εργασίες κοπής θα πρέπει να είναι από τη

μέση και προς τα μέσα όπως αυτή φαίνεται στη παρακάτω εικόνα (Εικόνα 8-10, περιοχές Α και Β.)



Εικόνα 8-10 *Βέλτιστες περιοχές χρήσης της λεπίδας με βάση τις δυνατότητες σε δύναμη κοπής*

Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης είναι σημαντικά όχι μόνο από την οπτική της μηχανικής που διέπει το μηχανισμό και στο γεγονός ότι επιβεβαιώνει αυτό που κάθε άνθρωπος αισθάνεται ως βέλτιστη περιοχή κοπής, αλλά και στη τοποθέτηση ενός νοητού πλαισίου συντεταγμένων που απαιτείται για την χρήση της αρπάγης σε συνεργασία με το ρομποτικό βραχίονα UR, το οποίο ονομάζεται TCP ή Tool Center Point ή σε ελεύθερη μετάφραση Κεντρικό Σημείο του Εργαλείου, ενώ αναφορά σε αυτό γίνεται στο Κεφάλαιο 9.

Τέλος για να υπάρχει μία συνέπεια για όσα περιγράφονται μέχρι τώρα στο παρακάτω πίνακα παρατίθεται κάποιες ενδεικτικές υπολογισμένες τιμές της δύναμης κοπής για κοτσάνι διαμέτρου 4mm στις αντίστοιχες περιοχές που φαίνονται στην Εικόνα 8-10.

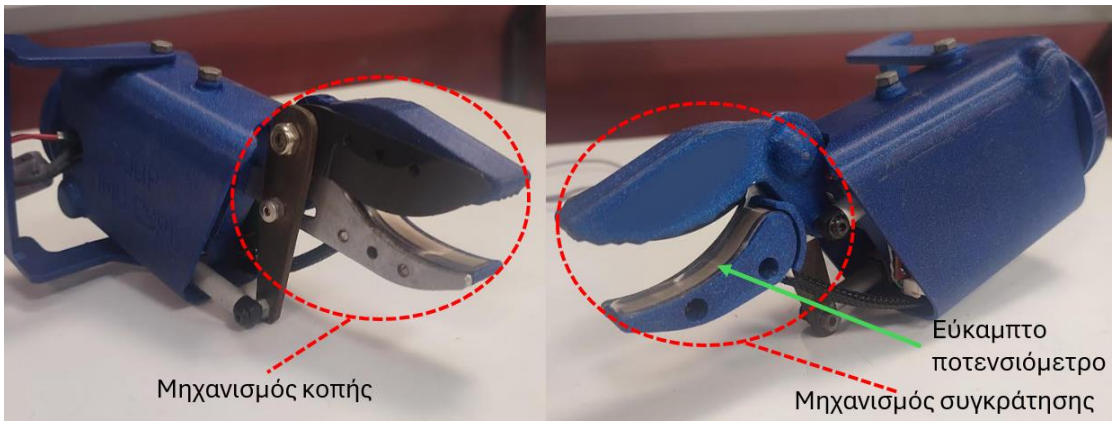
Πίνακας 8-1 *Ενδεικτική δύναμη κοπής σε συνάρτηση με τη θέση πάνω στην ακμή της λεπίδας.*

	Περιοχή Α	Περιοχή Β	Περιοχή Γ	Περιοχή Δ
X (mm)	28	43,3	52	64
θ (deg)	2,8	17,55	29,1	45,1
ϕ (deg)	0,1	6,5	9,8	10,7
Fc (N)	98,4	66	59,5	59,6

Τα αποτελέσματα των παραπάνω των υπολογισμών (Πίνακας 8-1) σε σύγκριση με τα ευρήματα από σχετική μελέτη πάνω στη δύναμη κοπής [13] ντομάτας σε σχέση με το μέγεθος της στην οποία προκύπτει ότι η δύναμη κοπής είναι της τάξης των **17N**, καθιστούν την αρπάγη ικανή να ανταποκριθεί στη απαιτήσεις κοπής καρπών ντομάτας.

8.3.3. Πρωτότυπο νέας αρπάγης

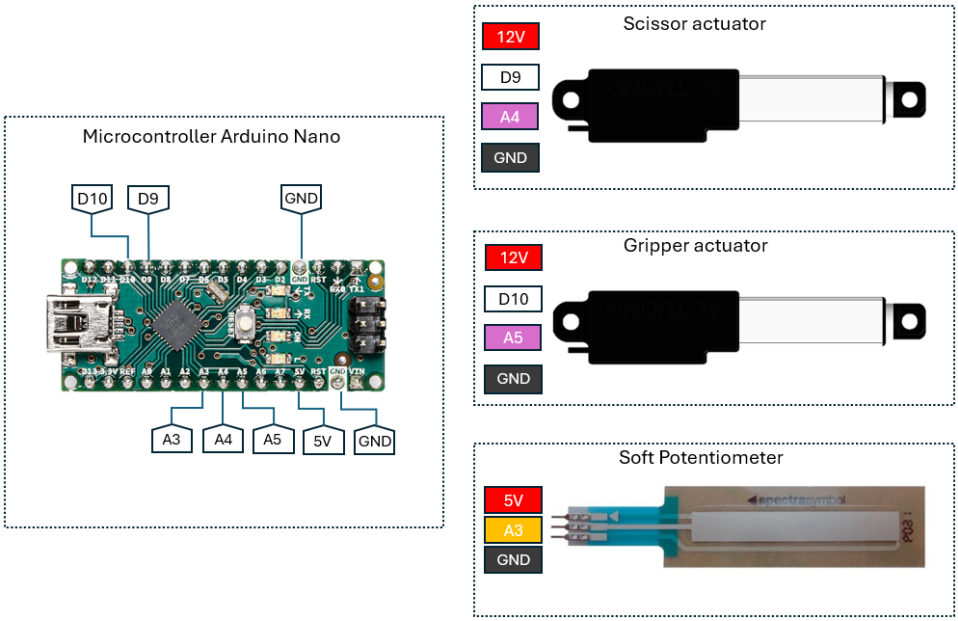
Να σημειωθεί ότι η τροποποίηση και η αναβάθμιση και η κατασκευή της νέας αρπάγης έγινε από τα μέλη του εργαστηρίου Ρομποτική και Αυτομάτου Ελέγχου του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου.



Εικόνα 8-11 *Βελτιωμένη εκδοχή αρπάγης με ανάδειξη του μηχανισμού κοπής (αριστερά) και του μηχανισμού συγκράτησης με το εύκαμπτο ποτενσιόμετρο (δεξιά) .*

Ηλεκτρικό κύκλωμα

Στη Εικόνα 8-12 απεικονίζεται η συνδεσμολογία των επενεργητών και του εύκαμπτου ποτενσιόμετρου πάνω στο μικροελεγκτή Arduino Nano. Χαρακτηριστικό αποτελεί το χρώμα που δόθηκε στις ετικέτες των επενεργητών καθώς αντικατοπτρίζουν το πραγματικό χρώμα των καλωδίων τους για να υπάρχει συσχέτιση αυτών με τη πραγματικότητα.



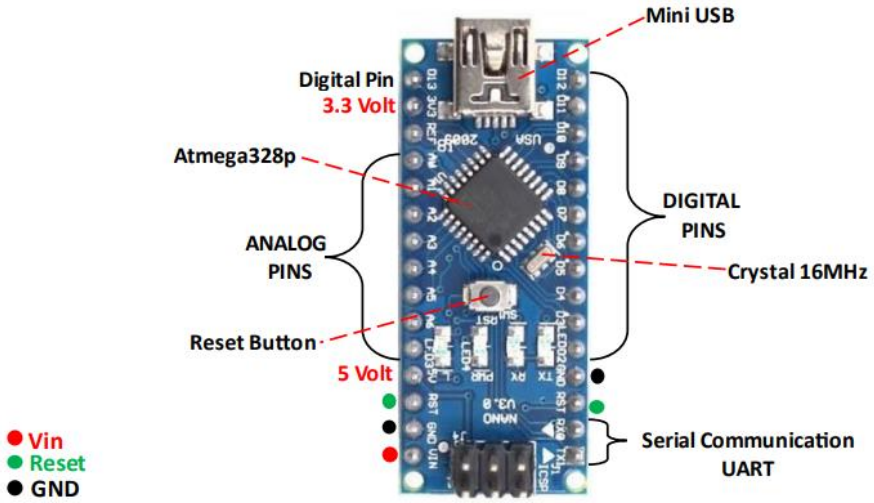
Εικόνα 8-12 *Ηλεκτρικό κύκλωμα ελέγχου αρπάγης με ανάδειξη της συνδεσμολογίας των επενεργητών και του που ποτενσιόμετρου με το μικροελεγκτή Arduino Nano.*

Με κόκκινο χρώμα για το ποτενσιόμετρο και τους επενεργητές συμβολίζεται η τροφοδοσία τους, ενώ μέσα σε αυτές αναφέρεται η στάθμη της τάσης λειτουργίας. Αντίστοιχα με μαύρο η γείωση (0 Volt) που αποτελεί αναφορά για όλες τις τάσεις και για αυτό το λόγο υπάρχει σύνδεση μεταξύ των επιμέρους αυτών γειώσεων. Για τους επενεργητές με άσπρη ταμπέλα συμβολίζεται το ψηφιακό σήμα ελέγχου της κίνησης των κινητήρων (PWM), ενώ με μπορντό το αναλογικό σήμα που επιστρέφουν οι επενεργητές ως ανάδραση της πραγματικής τους

θέσης. Για τη περίπτωση του ποτενσιόμετρου με πορτοκαλί συμβολίζεται το μεταβαλλόμενο αναλογικό σήμα που σχετίζεται με τη μεσαία λήψη και το οποίο μεταβάλλεται ανάλογα με τη θέση που ασκείται η δύναμη.

Arduino Nano

Τον έλεγχο της νέας αρπάγης αναλαμβάνει ο μικροελεγκτής Arduino Nano (βλ. Εικόνα 8-13) ο οποίος αποτελεί μια πιο συμπιεσμένη εκδοχή του Arduino Uno που χρησιμοποιήθηκε στο προηγούμενο πρωτότυπο της αρπάγης. Ο συγκεκριμένος μικροελεγκτής έχει μεγάλο φάσμα ευρείας χρήσης λόγο του μικρού του μεγέθους και της ευελιξίας του



Εικόνα 8-13 *Μικροελεγκτής Arduino Nano με ανάδειξη των κυρίων σημείων και θυρών του.*

Το Arduino Nano είναι ένας τύπος μικροελεγκτή και έχει σχεδιαστεί από την Arduino.cc.. Είναι μια πλακέτα μικρού μεγέθους και ευέλικτη με μεγάλη ποικιλία εφαρμογών. Η διαφορά με τις άλλες πλακέτες μικροελεγκτών της Arduino όπως ο UNO στη μικρότερη μνήμη με αποτέλεσμα ο Uno να μπορεί να δεχτεί μεγαλύτερα sketches, δηλαδή μεγαλύτερους κώδικες. Επιπλέον ο Arduino Nano (USB Mini) διαθέτει διαφορετική υποδοχή σε σχέση με αυτή του Uno (USB regular).

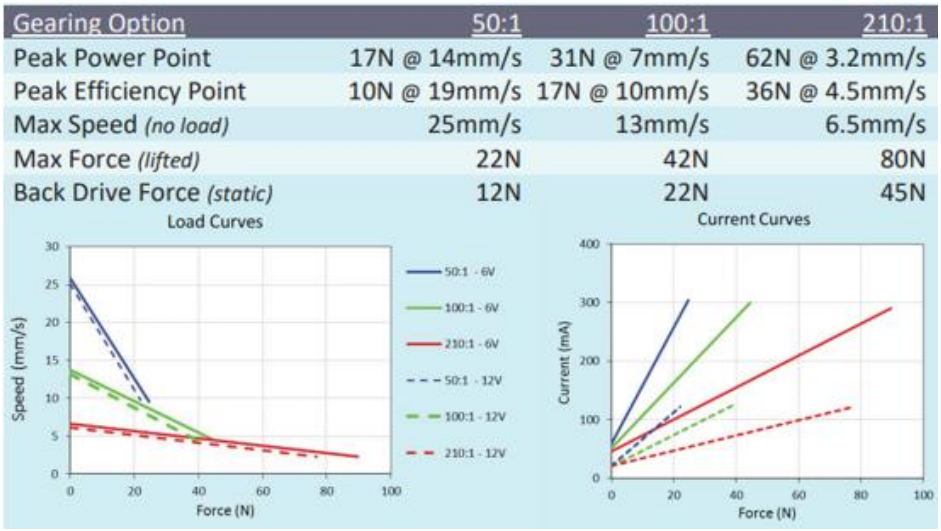
Πίνακας 8-2 *Τεχνικά χαρακτηριστικά μικροελεγκτή Arduino Nano.*

Τεχνικά χαρακτηριστικά Arduino Nano	
Microcontroller	Microchip ATmega328P
Τάση λειτουργίας	5 Volt
Τάση εισόδου	5-20 V
Ψηφιακές I/O	14 (6 PWM)
Αναλογικές είσοδοι	8
Flashmemory	32 KB
Μήκος	45 mm
Πλάτος	18 mm
Βάρος	7 gr
USB	Mini-USB Type-B

Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε ο Arduino Nano οφείλεται στο μικρότερο μέγεθος του ώστε να προσαρμοστεί στη κατασκευή της αρπάγης, με ταυτόχρονη κάλυψη των αναγκών που απαιτούνται για τον έλεγχο αυτής.

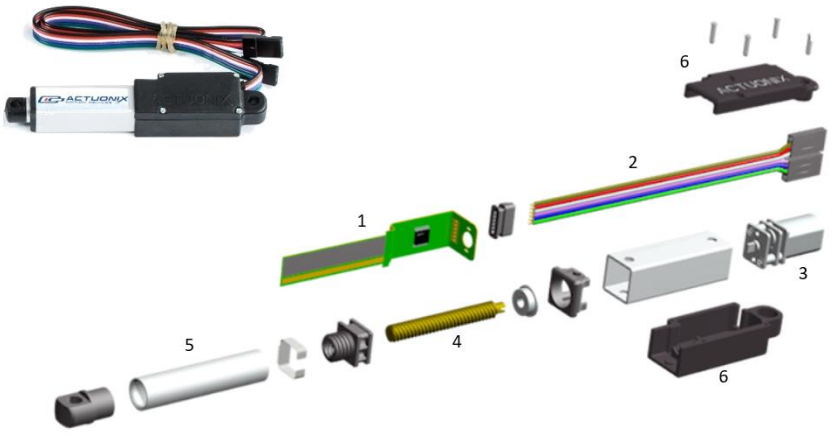
Γραμμικός επενεργητής

Για τον έλεγχο των μηχανισμός κοπής και συγκράτησης χρησιμοποιήθηκε ο γραμμικός επενεργητής της Actuonix (βλ. Εικόνα 8-15**,** πάνω αριστερά), ο οποίος είναι ένας Servo κινητήρας γραμμικής κίνησης από τη σειρά κινητήρων L12, ενώ στην αγορά διατίθενται διάφορα ειδή ανάλογα με τη διαδρομή του βάκτρου, τη σχέση μετάδοσης των γραναζιών που έχει εσωτερικά, αλλά και τη τάση λειτουργία του.



Εικόνα 8-14 *Τεχνικά χαρακτηριστικά γραμμικών επενεργητών.*

Ο κινητήρας που χρησιμοποιείται διαθέτει εσωτερικό ελεγκτή θέσης, ενώ η τάση λειτουργίας του κυμαίνεται από 6-12V. Η σχέση μετάδοσης στα γρανάζια του είναι 100/1, ενώ το μήκος της διαδρομής του είναι τα 50mm. Στη επίσημη σελίδα της Actuonix υπάρχουν κινητήρες της ίδιας σειρά με μικρότερη σχέση μετάδοσης πράγμα που σημαίνει ότι υπερτερούν σε ταχύτητα κίνησης του βάκτρου αλλά υστερούν σε δύναμη σε σχέση με το κινητήρα της εργασίας αυτής. Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά αποτελεί η μέγιστη δύναμη που μπορεί να ασκήσει **Max Force 42N** και η οποία χρησιμοποιείται στον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής (βλ. Πίνακας 8-1).

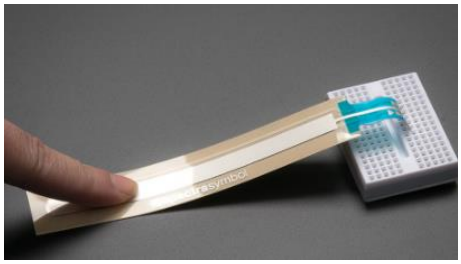


Εικόνα 8-15 *Γραμμικός επενεργητής της Actuonix με ενσωματωμένο μικροελεγκτή (πάνω αριστερά), με αναλυτική αναπαράσταση με σκοπό την ανάδειξη του μηχανισμών που αποτελείται, το μικροελεγκτή του DC κινητήρα (1) οποίος περιλαμβάνει αισθητήρες και συστήματα ανάδρασης για τη σωστή λειτουργία του ενεργοποιητή, την καλώδια τροφοδοσίας και ανταλλαγής δεδομένων (2), τον κινητήρα του γραμμικού ενεργοποιητή (3), ο ατέρμονας που κινεί μέσα και έξω το βάκτρο του ενεργοποιητή μετατρέποντας τη*

περιστροφική κίνηση σε γραμμική (4), το βάκτρο με το άκρο του για τη σύνδεση του ενεργοποιητή με άλλους μηχανισμούς (5), το κάλυμα του κινητήρα για τη προστασίας από το εξωτερικό περιβάλλον (6).

Εύκαμπτο γραμμικό ποτενσιόμετρο

Ως προς τους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στη νέα αρπάγη έχει προσαρμοστεί στην επιφάνεια συγκράτησης ένα εύκαμπτο ποτενσιόμετρο (βλ. Εικόνα 8-11) με το οποίο εντοπίζεται αν ο μηχανισμός συγκράτησης της αρπάγης πιάσει κάποιο αντικείμενο όπως το κοτσάνι από κάποιο καρπό.



Εικόνα 8-16 *Εύκαμπτο γραμμικό ποτενσιόμετρο.*

Στη περίπτωση που κάποιο αντικείμενο πιέσει την επιφάνεια του εύκαμπτου ποτενσιόμετρου τότε αυτό μεταβάλει την αντίσταση του ανάλογα με τη θέση που πιέζεται, πράγμα και το οποίο διαβάζει ο μικροελεγκτής Arduino Nano και σταματάει τη κίνηση του μηχανισμού συγκράτησης.

Η αρχή λειτουργίας του είναι ίδια με αυτή του κλασικού περιστροφικού ποτενσιόμετρου με τη διαφορά ότι είναι φτιαγμένα από εύκαμπτα υλικά. Στο εσωτερικό του ο αισθητήρας έχει δύο στρώματα, ένα αγώγιμο και ένα αντιστασιακό στρώμα. Όταν εφαρμόζεται πίεση πάνω στον αισθητήρα τα δύο στρώματα έρχονται σε επαφή δημιουργώντας μια αντίσταση που αλλάζει κατά μήκος της συσκευής. Το σημείο πίεσης πάνω στον αισθητήρα καθορίζει το ποσοστό των αντιστάσεων μεταξύ του πάνω και του κάτω στρώματος. Έτσι μετρώντας τη τάση κατά μήκος του αισθητήρα μπορεί με ακρίβεια να υπολογιστεί η θέση της πίεσης.

9. Υλοποίηση αυτόνομου ρομποτικού συστήματος συλλογής καρπών τομάτας

9.1. Εισαγωγή

Σκοπός του κεφαλαίου είναι η ενσωμάτωση της μηχατρονικής αρπάγης που προέκυψε από την βελτίωση του αρχικού πρωτότυπου σε ένα ολοκληρωμένο αυτόνομο ρομποτικό σύστημα συλλογής καρπών ντομάτας που θα περιλαμβάνει τον εντοπισμό, τη προσέγγιση και τη συγκομιδή των καρπών.

9.2. Ορισμός του προβλήματος

Στη περίπτωση των πειραμάτων που πρόκειται να πραγματοποιηθούν αλλά και σε πραγματικές ρομποτικές εφαρμογές η θέση στόχος στην οποία πρέπει να κινηθεί ο βραχίονας δίνεται ως προς κάποιο αντικείμενο που εντοπίζει τη θέση αυτή (στη περίπτωση της εργασίας αυτής ο αισθητήρας που εντοπίζει τη θέση στόχο είναι μια κάμερα) η οποία είναι αναρτημένη πάνω στη αρπάγη.

Από τη άλλη πλευρά ο ρομποτικός βραχίονα UR που διαθέτει το εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου και Ρομποτική του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου, όλες οι εντολές κίνησης που χρησιμοποιούν χωρικές συντεταγμένες για τη κίνηση του βραχίονα σε κάποια θέση στόχο, δίνονται ως προς τη βάση του βραχίονα καθώς αποτελεί σημείο αναφορά για αυτόν.

Με βάση τα παραπάνω τίθεται αναγκαία η συσχέτιση της θέσης στόχου με τη βάσης του ρομποτικού βραχίονα Για τη πραγματοποίηση της διαδικασίας υπολογισμού της θέσης του καρπού της ντομάτας ως προς τη βάση του ρομποτικού βραχίονα. Στο Πίνακας 9-1 συνοψίζονται οι γνωστές και άγνωστες παράμετροι στο πρόβλημα. Γνωστοί παράμετροι για το πρόβλημα θεωρούνται αυτοί που μπορούν να προκύψουν άμεσα, είτε ορίζονται αυθαίρετα από το χρήστη. Άγνωστες θεωρούνται οι παράμετροι οι οποίοι υπολογίζονται έμμεσα από τις γνωστές παράμετρούς.

Στο παρακάτω πίνακα γίνεται αναφορά στον όρο TCP (Tool Center Point), το οποίο αποτελεί σημαντική παράμετρο για ένα ρομποτικό σύστημα καθώς ορίζεται σύμφωνα με τη γεωμετρία της αρπάγης, ενώ λεπτομερή αναφορά για αυτή γίνεται στη παράγραφο 9.5.1.

Πίνακας 9-1 *Συνοπτικός πίνακας γνωστών και άγνωστων παραμέτρων για το πρόβλημα προσέγγισης καρπών ντομάτας.*

Παράμετροι προβλήματος	Γνωστοί	Άγνωστοι
Θέση του στόχου ως προς τη κάμερα.	✓	
Θέση του στόχου ως προς το TCP.		✓
Θέση του TCP ως προς τη βάση του βραχίονα.	✓	
Θέση του στόχου ως προς τη βάση του βραχίονα.		✓

Τέλος σημειώνεται ότι για την υλοποίηση του ρομποτικού συστήματος αυτό θα πρέπει να είναι σε θέση:

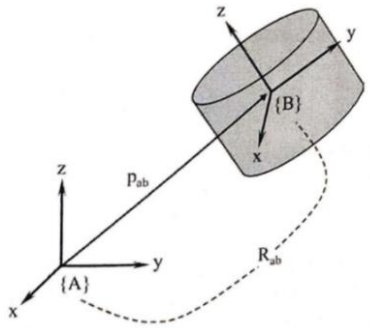
- Να αναγνωρίζει το καρπό στο χώρο μέσα από αισθητήρια όργανα.
- Να υπολογίζει την ακριβή θέση του καρπού στο χώρο.
- Να προσεγγίζει τη θέση των καρπών.
- Να συλλέγει το καρπό.

9.3. Προαπαιτούμενες γνώσεις

Σύμφωνα με το πρόβλημα που ορίστηκε στη προηγούμενη παράγραφο είναι αναγκαία η εισαγωγή κάποιων εννοιών από την επιστήμη της ρομποτικής οι οποίες επιτρέπουν στη συσχέτιση πλαισίων συντεταγμένων μεταξύ τους, όπου στη περίπτωση του καρπού της ντομάτας είναι αναγκαία η συσχέτιση ως προς τη βάση του ρομποτικού βραχίονα.

Πιο συγκεκριμένα ο ελεγκτής του ρομποτικού βραχίονα είναι σε θέση να περιγράψει τη θέση του Tool Center Point ως προς τη βάση του βραχίονα. Επίσης η θέση στόχος, πρακτικά περιγράφεται ως προς τη κάμερα αφού αυτή η συσκευή την εντοπίζει. Για να μπορέσει να μετακινήσει ο βραχίονας το πλαίσιο TCP στη θέση που βρίσκεται η ντομάτα, η θέση της ντομάτας πρέπει να περιγράφεται ως προς τη βάση.

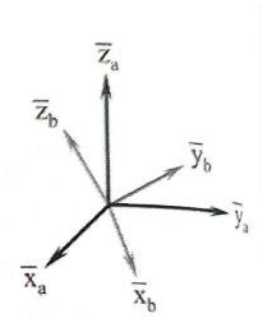
Για τη συσχέτιση του προσανατολισμού και της θέσης στόχου στη βάσης θα χρησιμοποιηθούν η θεωρία για το πίνακα στροφής και του Ο.Μ (Ομογενής Μετασχηματισμός). Πιο συγκεκριμένα η θέση και ο προσανατολισμός ενός στερεού σώματος αναφορικά με ένα αδρανειακό καρτεσιανό πλαίσιο συντεταγμένων {A}, γίνεται με τη περιγραφή της θέσης και του προσανατολισμού ενός δεύτερου καρτεσιανού πλαισίου συντεταγμένων {B}, το οποίο στερεώνεται σε ένα αυθαίρετο σημείο του σώματος π.χ. το κέντρο μάζας του σώματος όπως αυτό φαίνεται στην Εικόνα 9-1.



Εικόνα 9-1 *Συσχέτιση πλαισίων A και B μέσω του διανύσματος θέσης (pab) και του πίνακα στροφής (Rab) [17].*

Το διάνυσμα της θέσης της αρχής του πλαισίου {B},στο αδρανειακό πλαίσιο {A} p_{ab} περιγράφει τη θέση του στερεού σώματος ενώ ο πίνακας στροφής R_{ab} του πλαισίου {B} σε σχέση με το πλαίσιο {A} περιγράφει τον προσανατολισμό του. Ο πίνακας στροφής R_{ab} είναι ένας πίνακας 3x3 ενώ το διάνυσμα θέσης p_{ab} είναι ένας πίνακας διαστάσεων 3x1. Επομένως, μία μορφή περιγραφής της θέσης και του προσανατολισμού του στερεού σώματος του σχήματος στο χώρο αποτελείται από το ζεύγος (p_{ab},R_{ab}).

Ο πίνακας στροφής R_{ab} κατασκευάζεται από τα μοναδιαία διανύσματα του {B} x_b, y_b, z_b, εκφρασμένα στο {A}. Οι συντεταγμένες αυτώ των διανυσμάτων στο {A} προκύπτουν από τις προβολές του κάθε μοναδιαίου διανύσματος του πλαισίου {B} πάνω στους τρείς άξονες του {A}. Η προβολή αυτή εκφράζεται με εσωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων αυτών.



Εικόνα 9-2 *Σχηματική αναπαράσταση σύνθετης στροφής του πλαισίου B ως προς το A [17].*

$$\boldsymbol{x_{ab}} = \begin{bmatrix} \overline{x}_a \cdot \overline{x}_b \\ \overline{y}_a \cdot \overline{x}_b \\ \overline{z}_a \cdot \overline{x}_b \end{bmatrix},\ \boldsymbol{y_{ab}} = \begin{bmatrix} \overline{x}_a \cdot \overline{y}_b \\ \overline{y}_a \cdot \overline{y}_b \\ \overline{z}_a \cdot \overline{y}_b \end{bmatrix},\ \boldsymbol{z_{ab}} = \begin{bmatrix} \overline{x}_a \cdot \overline{z}_b \\ \overline{y}_a \cdot \overline{z}_b \\ \overline{z}_a \cdot \overline{z}_b \end{bmatrix}$$

Όπου $\overline{x}_a \cdot \overline{x}_b$ αντιστοιχεί στο εσωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων $\overline{x}_a$ και $\overline{x}_b$.

Τέλος ο πίνακας στροφής κατασκευάζεται από τις παραπάνω τρείς στήλες:

$$\boldsymbol{R_{ab}} = [\boldsymbol{x_{ab}} \quad \boldsymbol{y_{ab}} \quad \boldsymbol{z_{ab}}]$$

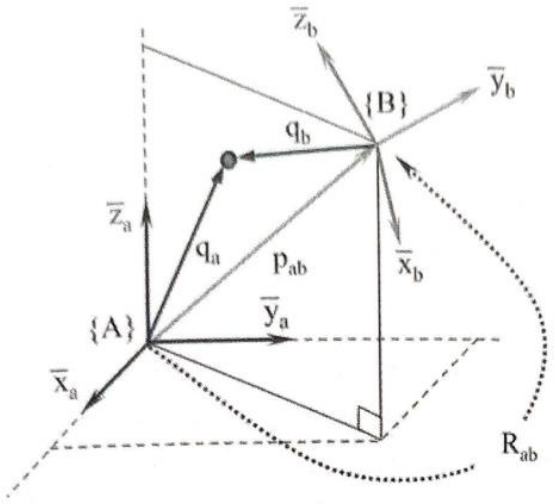
Κάθε στοιχείο του πίνακα στροφής είναι επομένως το συνημίτονο της γωνία μεταξύ των μοναδιαίων διανυσμάτων του {A} και {B}, δηλαδή τα στοιχεία του πίνακα στροφής είναι τα $\cos\theta_{ij}$,i= x_a, y_a, z_a και j = x_b, y_b, z_b

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα η περιγραφή της θέσης και του προσανατολισμού ενός στερεού σώματος στο χώρο αποτελείται από το ζεύγος (p_{ab}, R_{ab}), όπου p_{ab} η θέση του σημείου της αρχής του {B} σε σχέση με το πλαίσιο {A}.

Έστω τώρα $\mathbf{q_b = [x_b \ y_b \ z_b]^T}$ η θέση ενός σημείου q στο πλαίσιο {B} (βλέπε Εικόνα 9-5)η οποία χρειάζεται να εκφραστεί στο {A} γνωρίζοντας ότι τα δύο πλαίσια σχετίζονται από το ζεύγος θέσης προσανατολισμού (p_{ab}, R_{ab}). Εύκολα διαπιστώνεται ότι το ζητούμενο $\mathbf{q_a = [x_a \ y_a \ z_a]^T}$ δίνεται από την πρόσθεση του p_{ab} και του q_b σύμφωνα με τη σύμβαση που ισχύει για την εκτέλεση αλγεβρικών πράξεων μεταξύ διανυσμάτων.

Όμως η σύμβαση αυτή απαιτεί όλα τα διανύσματα να περιγράφονται στο ίδιο καρτεσιανό πλαίσιο αναφοράς. Στη περίπτωση των αλγεβρικών διανυσμάτων για τα οποία ορίζονται μόνο το μέτρο και η κατεύθυνση τους και όχι η απόλυτη θέση στο χώρο, η σύμβαση αυτή απαιτεί τη περιγραφή σε παράλληλα συστήματα συντεταγμένων, δηλαδή σε πλαίσια με άξονες παράλληλους με το πλαίσιο αναφοράς. Επομένως η ζητούμενη θέση του q_a δίνεται από την ακόλουθη σχέση Ο.Μ.:

$$q_a = R_{ab}\, q_b + p_{ab} \qquad [3]$$



Εικόνα 9-3 *Σχηματική αναπαράσταση της συσχέτισης ενός σημείου q από το πλαίσιο B στο πλαίσιο A [17].*

Η παραπάνω σχέση περιγράφεται συνοπτικά από την ομογενή έκφραση της:

$$q_a = g_{ab}\, q_b \qquad [4]$$

όπου q_a, q_b η ομογενή έκφραση της θέσης των σημείων, η οποία έχει ως τέταρτο στοιχείο τη μονάδα $q_a = \begin{bmatrix} q_a \\ 1 \end{bmatrix}$, $q_b = \begin{bmatrix} q_b \\ 1 \end{bmatrix}$, ενώ ο $\mathbf{g_{ab}}$ είναι ένας τετραγωνικός πίνακας διάστασης 4x4 και ονομάζεται *πίνακας ομογενούς μετασχηματισμού* και έχει τη παρακάτω μορφή.

$$g_{ab} = \begin{bmatrix} R_{ab} & p_{ab} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

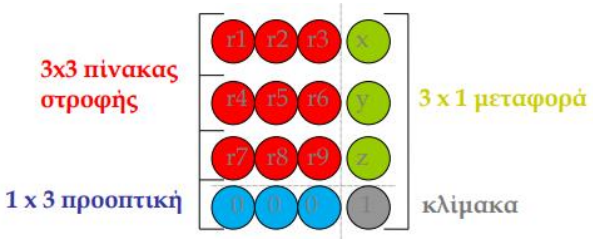
Στη πραγματικότητα το πρόβλημα που καλείται να αντιμετωπίσει κάποιος περιέχει περισσότερα από δύο πλαίσια. Άρα στη γενικευμένη περίπτωση όπου η θέση ενός πλαισίου {C} ως προς το {B} περιγράφεται από τον Ο.Μ. g_{bc} και η γενικευμένη θέση του {B} ως προς το

{A} περιγράφεται από τον ομογενή μετασχηματισμό g_{ab}, τότε η γενικευμένη θέση του {C} ως προς το {A} βρίσκεται με τη χρήση της παρακάτω σχέσης που ονομάζεται σύνθεση Ο.Μ:

$$g_{ac} = g_{ab}\, g_{bc} = \begin{bmatrix} R_{ab}R_{bc} & R_{ab}p_{bc} + p_{ab} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [5]$$

Όπου g_{ac} είναι ένας πίνακας διαστάσεων 4x4.

Μία πολύ σημαντική ιδιότητα στη περίπτωση των πινάκων στροφής αλλά και των Ο.Μ. είναι ότι, η αντιμεταθετή ιδιότητα δεν ισχύει στις πράξεις των πινάκων.



Εικόνα 9-4 *Αναλυτική απεικόνιση πίνακα ομογενή μετασχηματισμού και των ιδιότητας που αντιπροσωπεύει κάθε στοιχείο του.*

Στο περιβάλλον της python η ανάκτηση των γνωστών θέσεων επιστρέφονται σε arrays της μορφής **[X, Y, Z, Rx, Ry, Rz]** (σύμβαση που ακολουθεί η UR για την περιγραφή και τον προσανατολισμό), όπου τα στοιχεία X, Y, Z αναφέρονται στη μετατόπιση στους τρείς άξονες κίνησης, ενώ Rx, Ry, Rz στα διανύσματα στροφής γύρω από κάθε άξονα. Για την πραγματοποίηση των υπολογισμών με Ο.Μ. θα πρέπει αυτοί να είναι της μορφής όπως αυτή φαίνεται στην Εικόνα 9-4. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να γίνεται μετατροπή από τη μορφή array σε πίνακα.

Γενικά έχει παρατηρηθεί ότι υπολογιστικά οι πράξεις για τον υπολογισμό πινάκων στροφής όπως αυτοί αναφέρονται στη θεωρητική λύση του προβλήματος δημιουργούν πολλές πράξεις μειώνοντας την αποδοτικότητα ενός προγράμματος. Για το λόγο αυτό, για τον υπολογισμό των πινάκων στροφής χρησιμοποιήθηκε ο φορμαλισμός Rodriguez με σκοπό την απλούστευση της διαδικασίας υπολογισμού των πινάκων στροφής για τον πιο αποδοτικό προγραμματισμό.

Φορμαλισμός Rodriguez

Πιο συγκεκριμένα ο φορμαλισμός Rodriguez δίνει ένα τρόπο υπολογισμού του πίνακα στροφής για ένα διάνυσμα στο χώρο γνωρίζοντας τον άξονα και τη γωνία στροφής. Αυτός ο φορμαλισμός είναι ιδιαίτερα χρήσιμος στα γραφικά υπολογιστών, στη ρομποτική, και την αεροδιαστημική όπου ο αποδοτικός και ακριβής υπολογισμός των περιστροφών είναι απαραίτητος. Ο φορμαλισμός αυτός απλοποιεί τις πράξεις υπολογισμού του πίνακα στροφής χωρίς τη χρήση σύνθετων τριγωνομετρικών συναρτήσεων, πράγμα που των καθιστά υπολογιστικά πιο αποδοτικό.

Για τον υπολογισμό του πίνακα στροφής αρχικά θα πρέπει να οριστούν κάποιες παράμετροι όπως αυτοί που αναφέρονται στη συνέχεια:

- $\boldsymbol{v}$: Το διάνυσμα που πρόκειται να στραφεί
- $\boldsymbol{k}$: Το μοναδιαίο διάνυσμα που αναπαριστά τον άξονα περιστροφής
- $\boldsymbol{\theta}$: Η γωνία περιστροφής σε ακτίνια (radians)

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βήματα που πραγματοποιήθηκαν στα προγραμματιστικό επίπεδο μέσω της γλώσσας προγραμματισμού Python για τον υπολογισμό του πίνακα στροφής ενός διανύσματος. Έτσι αφού ορίστηκαν οι παράμετροι v, k, θ, ακολούθησε:

1. Από το array της μορφής [Rx, Ry, Rz], λαμβάνεται η γωνία στροφής του διανύσματος $\boldsymbol{v}$.
2. Στη συνέχεια η υπολογίζεται η κανονικοποιημένη μορφή του πίνακα που αναφέρεται στον άξονα γύρω από τον οποίο περιστρέφεται το διάνυσμα $\boldsymbol{v}$:

$$k = \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \text{(περίπτωση περιστροφής μόνο στο Z-αξονα)}$$

Όπου : $\boldsymbol{k_x}^2 + \boldsymbol{k_y}^2 + \boldsymbol{k_z}^2 = \mathbf{1}$

3. Κατασκευή του αντισυμμετρικού πίνακα (K):

$$K = \begin{bmatrix} 0 & -k_z & k_y \\ k_z & 0 & -k_x \\ -k_y & k_x & 0 \end{bmatrix}$$

4. Υπολογισμός του K^2:

$$K^2 = K \cdot K = \begin{bmatrix} 0 & -k_z & k_y \\ k_z & 0 & -k_x \\ -k_y & k_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -k_z & k_y \\ k_z & 0 & -k_x \\ -k_y & k_x & 0 \end{bmatrix}$$

5. Κατασκευή του πίνακα στροφής (R) σύμφωνα με τη επόμενη εξίσωση:

$$R = I + Ksin(\theta) + K^2(1 - \cos(\theta)) \qquad [6]$$

Όπου με I είναι ο μοναδιαίος πίνακας διάστασης 3x3.

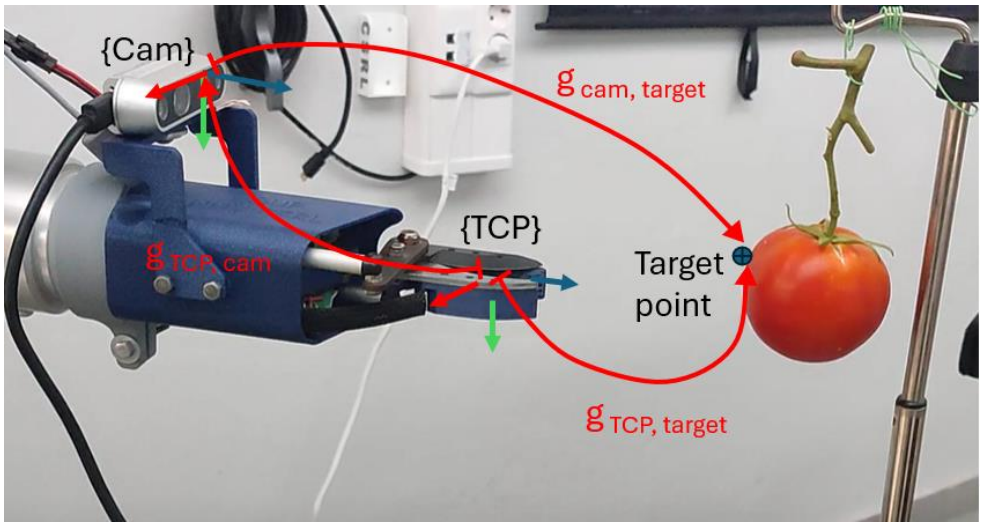
9.4. Θεωρητική λύση

Για τη λύση του προβλήματος όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι αναγκαία η συσχέτισης της θέσης στόχου, δηλαδή της θέσης του καρπού της ντομάτας στο χώρο με κάποιο γνωστό σημείο πάνω στον ρομποτικό βραχίονα, όπως το κεντρικό σημείο πάνω στην αρπάγη (TCP Point) και κατ' επέκταση τη βάση του ρομποτικού βραχίονα. Η πραγματοποίηση της συσχέτισης αυτής γίνεται με βάση τη θεωρία της σύνθεσης των ομογενών μετασχηματισμών από τη προηγούμενη παράγραφο (βλ. Εξίσωση 5) όπως αυτή περιγράφεται στη συνέχεια:

1. Υπολογισμός του Ο.Μ. της κάμερας που είναι τοποθετημένη πάνω στην αρπάγη ως προς το πλαίσιο TCP αυτής (Εικόνα 9-5, $g_{TCP,cam}$).
2. Υπολογισμός του Ο.Μ. της ντομάτας ως προς τη κάμερα με βάση τις συντεταγμένες που δίνει η κάμερα (Εικόνα 9-5, $g_{cam,\ target}$).
3. Υπολογισμός του ομογενή μετασχηματισμού του καρπού της ντομάτας ως προς το πλαίσιο TCP (Εικόνα 9-5, $g_{TCP,target}$) της αρπάγης μέσω της σύνθεσης των δύο προηγούμενων Ο.Μ. σύμφωνα με την εξίσωση (7).

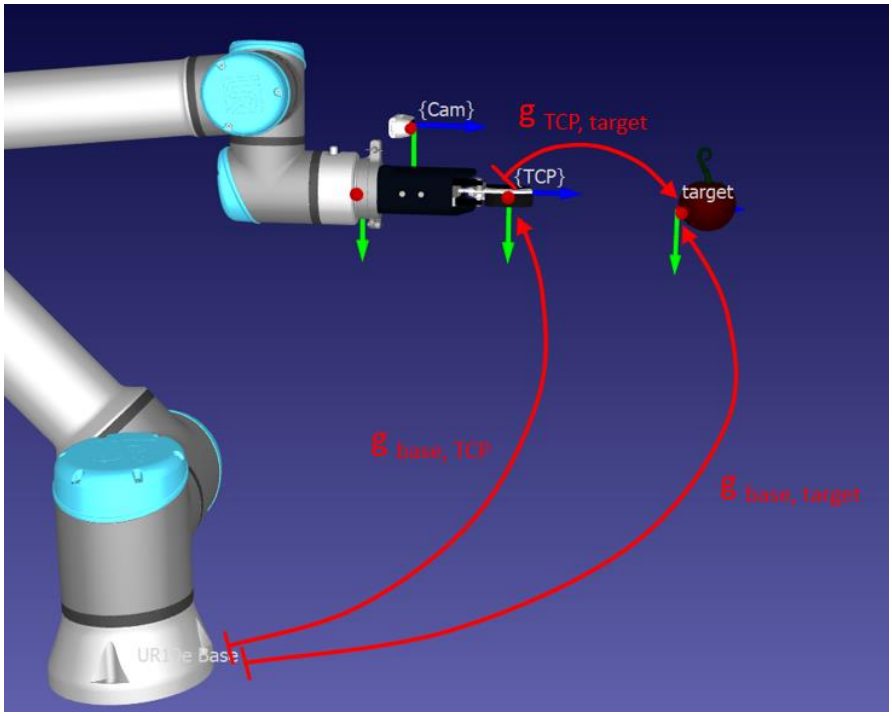
Η εξίσωση που περιγράφει την παραπάνω σύνθεση των ομογενών μετασχηματισμών δίνεται στη συνέχεια:

$$g_{TCP,cam} = g_{TCP,cam}\, g_{cam,target} \quad [7]$$



Εικόνα 9-5 *Αναλυτική απεικόνιση των ομογενών μετασχηματισμών που προκύπτουν στο πρόβλημα συσχέτισης της θέσης του καρπού ως προς το πλαίσιο TCP.*

4. Στη συνέχεια αφού έχει υπολογιστεί η θέση του καρπού της ντομάτας ως προς το TCP και με βάση το βήμα 3, στη συνέχεια υπολογίζεται η θέση του καρπού της ντομάτας ως προς τη βάση του ρομποτικού βραχίονα UR και πάλι χρησιμοποιώντας την εξίσωση (7) για τη σύνθεση των Ο.Μ. Σε αυτή τη περίπτωση η σύνθεση των Ο.Μ., της θέσης του καρπού της ντομάτας ως προς το πλαίσιο TCP (Εικόνα 9-5, $g_{TCP,\,target}$) και τον Ο.Μ. του πλαισίου TCP ως προς τη βάση του βραχίονα (Εικόνα 9-6, $g_{base,\,TCP}$), έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό του Ο.Μ. της της ντομάτας ως προς τη βάση (Εικόνα 9-6, $g_{base,\,target}$).



Εικόνα 9-6 *Ψηφιακή αναπαράσταση της σύνθεσης των ομογενών μετασχηματισμών με αποτέλεσμα το χαρακτηρισμό της θέσης του καρπού της ντομάτας με τη βάση του ρομποτικού βραχίονα.*

Η εξίσωση που περιγράφει την παραπάνω σύνθεση των Ο.Μ. δίνεται στη συνέχεια:

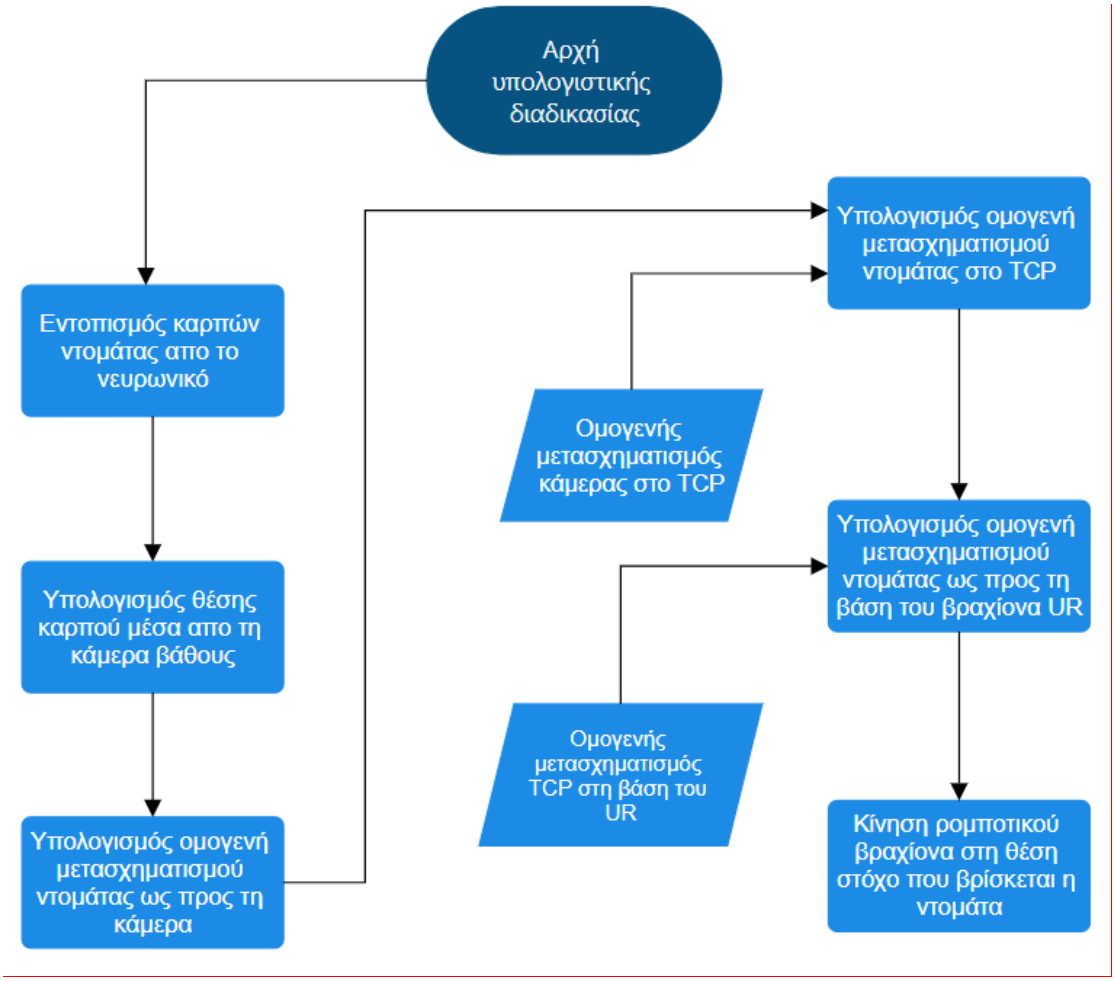
$$g_{base,target} = g_{base,TCP}\ g_{TCP,target} \quad [8]$$

Ο συνδυασμός των Ο.Μ. των εξισώσεων (7) και (8), δίνει μία γενική έκφραση (Εξίσωση (9)) για την επίλυση του προβλήματος, σχετικά με το προσδιορισμό της θέσης της ντομάτας ως προς τη βάση του ρομποτικού βραχίονα.

$$g_{base,target} = g_{base,TCP}\left(g_{TCP,cam}\ g_{cam,target}\right) \quad [9]$$

Διάγραμμα ροής υπολογιστικής διαδικασίας

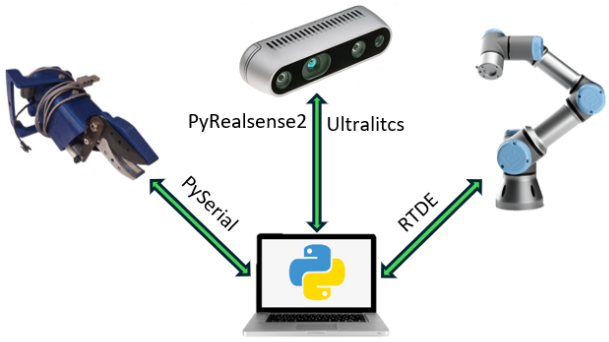
Η υπολογιστική διαδικασία της θεωρητικής λύσης του προβλήματος που περιγράφεται σε αυτή τη παράγραφο συνοψίζεται στο παρακάτω λογικό διάγραμμα.



Εικόνα 9-7*Συνοπτικό διάγραμμα ροής υπολογιστικής διαδικασίας για τον υπολογισμό της θέσης του καρπού ως προς τη βάση του βραχίονα.*

9.5. Ρομποτικό σύστημα συγκομιδής καρπών ντομάτας

Σε αυτή τη παράγραφο θα παρουσιαστεί βήμα προς βήμα όλη η διαδικασία που πραγματοποιήθηκε με σκοπό την υλοποίηση του ρομποτικού συστήματος Η βασική ιδέα για την υλοποίηση του ρομποτικού συστήματος βασίζεται στο γεγονός ότι η αρπάγη, ο ρομποτικός βραχίονας και η κάμερα με το νευρωνικό δίκτυο αποτελούν τρία ξεχωριστά συστήματα, την ενοποίηση όλων σε ένα ενιαίο ρομποτικό σύστημα επιτυγχάνεται μέσω της γλώσσας προγραμματισμού Python (βλ. Εικόνα 9-8) με τη χρήση κατάλληλων βιβλιοθηκών που αναφέρονται στο Πίνακας 9-2.



Εικόνα 9-8 *Στο σχήμα παρουσιάζεται ο τρόπος επικοινωνίας της Python με τα υποσυστήματα, την αρπάγη (αριστερά) μέσα από τη βιβλιοθήκη PySerial, το βραχίονα (δεξιά) μέσω της βιβλιοθήκης RTDE, με τη κάμερα (μέση) μέσω της PyRealsense2.*

Πίνακας 9-2 *Συνοπτική αναφορά βιβλιοθηκών που χρησιμοποιούνται από τη Python.*

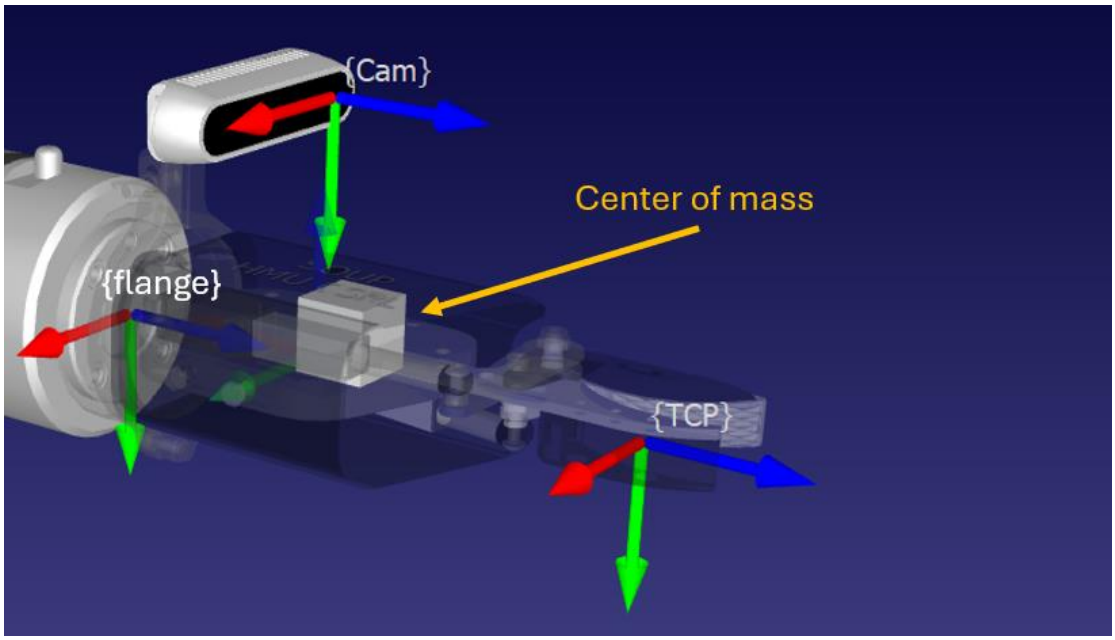
Βιβλιοθήκη	Περιγραφή
Ultralitics	Βιβλιοθήκη διαχείρισης μοντέλου του YOLO και την υποστήριξη λειτουργιών του όπως ο εντοπισμός αντικειμένων, ταξινόμηση και η κατάτμηση.
PyRealsense2	Βιβλιοθήκη διαχείρισης κάμερας βάθους της Intel η οποία επιτρέπει πρόσβαση σε δεδομένα όπως βάθους και υπέρυθρου μέσω της Python.
RTDE	Βιβλιοθήκη διαχείρισης λειτουργιών ρομποτικού βραχίονα UR, μέσω διεπαφής για την ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.
PySerial	Βιβλιοθήκη διαχείρισης σειριακή επικοινωνία για τη Python, επιτρέπει τη διεπαφή της Python με εξωτερικά στοιχεία hardware.

Η υλοποίηση του ρομποτικού συστήματος επιτυγχάνεται μέσα από τα παρακάτω βήματα:

1. Τοποθέτηση αρπάγης στο ρομποτικό βραχίονα UR και ορισμός του TCP και του κέντρου μάζας της αρπάγης.
2. Έλεγχος ρομποτικού βραχίονα UR μέσα από τη γλώσσα προγραμματισμού Python χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη RTDE.
3. Εξοικείωση με το μοντέλο YOLO μέσα από τη βιβλιοθήκη Ultralitcs για τον εντοπισμό καρπών ντομάτας με τη χρήση κάμερας.
4. Εξοικείωση με τη βιβλιοθήκη PyRealsense2 για τη διαχείριση της κάμερας βάθους Intel 435i.
5. Έλεγχος λειτουργίας μηχατρονικής αρπάγης μέσα από τη βιβλιοθήκη PySerial.
6. Παρουσίαση αλγόριθμου εντοπισμού και προσέγγισης των καρπών ντομάτας.

9.5.1. Καθορισμός τεχνικών χαρακτηριστικών της αρπάγης στο ελεγκτή του ρομποτικού βραχίονα UR5e

Η διαδικασία ελέγχου του ρομποτικού βραχίονα αρχικά περιλαμβάνει την αρχικοποίηση κάποιων παραμέτρων που σχετίζονται με την αρπάγη Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη, καθώς μέσα από αυτή γνωστοποιούνται στο βραχίονα χαρακτηρίστηκα της αρπάγης όπως είναι η μάζα της και το κέντρο βάρους της, ώστε να τα λαμβάνει υπόψιν του ο βραχίονας κατά τη κίνηση του για καλύτερο έλεγχο. Επιπλέον ο προσδιορισμός της θέσης και του προσανατολισμού του πλαισίου TCP, είναι χρήσιμος καθώς μέσα από αυτό το πλαίσιο η αρπάγη μπορεί και αλληλοεπιδρά με το φυσικό περιβάλλον, πραγματοποιώντας κάποια εργασία. Για να προσδιοριστεί αυτό το χαρακτηριστικό σημείο δημιουργείται το πλαίσιο TCP με τα χαρακτηριστικά του όπως η θέση του και ο προσανατολισμός του σε σχέση με τη φλάντζα του βραχίονα. Στη συνέχεια αφού καταχωρηθούν αυτά τα χαρακτηριστικά της αρπάγης στο βραχίονα ακολουθεί η διαδικασία της επικοινωνίας του ελεγκτή του ρομπότ με τη Python μέσα από τη βιβλιοθήκη RTDE.



Εικόνα 9-9 *Ανάδειξη της θέσης του κέντρου μάζας της αρπάγης (Center of mass), του πλαισίου {TCP}, του πλαισίου της φλάντζας {flange} και του {Cam} που σχετίζεται με τη κάμερα.*

Τοποθέτηση αρπάγης στο ρομποτικό βραχίονα

Έτσι αφού τοποθετήθηκε η αρπάγη πάνω στη φλάντζα του βραχίονα στη συνέχεια ακολούθησε μια διαδικασία προσδιορισμού κάποιων χαρακτηριστικών της αρπάγης στο ελεγκτή του ρομποτικού βραχίονα UR.

Ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της αρπάγης πάνω στο βραχίονα περιλαμβάνει το προσδιορισμό της θέσης του σημείου Tool Center Point (Βλ. Εικόνα 9-9, {TCP}), το οποίο επιλέχθηκε να είναι εντός του χώρου εργασίας των δύο μηχανισμών, αλλά και τον προσδιορισμό του προσανατολισμού του σημείου αυτού σε σχέση με τη φλάντζα του βραχίονα. Τέλος έγινε ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών μάζας και κέντρου βάρους της αρπάγης. Να σημειωθεί ότι όλη αυτή η διαδικασία αυτή γίνεται ευκολά μέσα περιβάλλον ελέγχου του ρομποτικού βραχίονα UR.

Ορισμός Tool Center Point

Η εκτέλεση της διαδικασίας χαρακτηρισμού της θέσης του πλαισίου TCP γίνεται μέσα από το teach pendant. Πιο συγκεκριμένα η διαδικασία περιλαμβάνει την επιλογή ενός σταθερού σημείο στο χώρο εργασίας σε σχέση με τη βάση του βραχίονα και στη συνέχεια καταχωρούνται τέσσερις διαφορετικές πόζες του βραχίονα τέτοιες ώστε το σημείο της αρπάγης που θα του ανατεθεί το πλαίσιο TCP το σημείο αλλάζοντας το προσανατολισμό κάθε φορά. Η διαδικασία μετακίνησης του βραχίονα για τη προσέγγιση του σημείου αυτού επαναλαμβάνεται τέσσερις φόρες κάθε φορά με διαφορετικό προσανατολισμό.

Με το πέρας της διαδικασίας υπολογισμού των συντεταγμένων ο ελεγκτής του βραχίονα εμφανίζει τις υπολογισμένες τιμές. Για την αρπάγη της εργασίας οι συντεταγμένες X, Y, Z που προέκυψαν παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα (Πίνακας 9-3).

Πίνακας 9-3 *Συντεταγμένες του πλαισίου {TCP} ως προς το πλαίσιο της φλάντζας {flange}.*

Συνιστώσες	Απόσταση από τη φλάντζα
X (mm)	-35
Y (mm)	0
Z (mm)	180.0

Ορισμός προσανατολισμού για το Tool Center Point

Η διαδικασία του χαρακτηρισμού του προσανατολισμού για το TCP σε σχέση με τη φλάντζα του βραχίονα, γίνεται με την μετακίνηση του βραχίονα ώστε ο Z άξονας του συστήματος συντεταγμένων του TCP γίνει παράλληλος και με την ίδια φορά ως προς το σύστημα συντεταγμένων της βάσης του βραχίονα. Με αυτό το τρόπο ο βραχίονας υπολογίζει το προσανατολισμό του TCP ως προς τη φλάντζα, ενώ η τιμές που προέκυψαν από αυτή τη διαδικασία παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα (Πίνακας 9-4).

Πίνακας 9-4 *Συνιστώσες προσανατολισμού του πλαισίου {TCP} ως προς το πλαίσιο {flange}.*

Συνιστώσες	Κλίση ως προς τη φλάντζα
Rx (deg)	0.00
Ry (deg)	0.00
Rz (deg)	0.00

Είναι σημαντικό να γνωρίζει ο βραχίονας το προσανατολισμό του TCP ως προς το πλαίσιο της φλάντζας. Αρχικά με το καθορισμό ενός πλαισίου TCP ο χρήστης είναι σε θέση να κινεί το άκρο του βραχίονα μέσα από το Teach pendant με βάση το πλαίσιο TCP και όχι το πλαίσιο της βάσης το οποίο είναι αισθητικά πιο δύσκολο. Επιπλέον όπως θα προκύψει στη συνέχεια

ο προσανατολισμός του πλαισίου TCP είναι σημαντικός για τον υπολογισμό του πίνακα στροφής ως προς τη φλάντζα του βραχίονα και κατ' επέκταση και ως προς τη βάση.

Ορισμός κέντρου βάρους και μάζα αρπάγης

Η διαδικασία υπολογισμού του κέντρου βάρους και της μάζας της αρπάγης είναι σχετικά πιο απλή σε σχέση με τις άλλες δύο. Σε αυτή τη διαδικασία ο βραχίονας τοποθετείται σε τέσσερις τυχαίες θέσεις στο χώρο εργασίας του. Στη συνέχεια ο βραχίονας χάρη σε μία ενσωματωμένη δυναμοκυψέλη που διαθέτει στη φλάντζα του υπολογίζει αυτόματα του κέντρο βάρους και τη μάζα της αρπάγης τιμές των οποίων φαίνονται στο παρακάτω πίνακα (Πίνακας 9-5).

Πίνακας 9-5 *Μάζα της αρπάγης και συνιστώσες θέσης του κέντρου βάρους της ως προς το πλαίσιο {flange}.*

Συνιστώσες	Θέση κέντρου βάρους
Mass (kg)	0.61
Cx (mm)	-2.00
Cy (mm)	9.00
Cz (mm)	63.00

Όπως έχει ήδη αναφερθεί για τον υπολογισμό της θέσης που εντοπίζεται η ντομάτα ως προς το Tool Center Point αυτή πρέπει να μετασχηματιστεί από το πλαίσιο της κάμερας στο πλαίσιο TCP της αρπάγης και τέλος στη βάση (βλ. Εικόνα 9-5 και Εικόνα 9-6). Για της επίτευξη αυτού του υπολογισμού απαιτείται ο προσδιορισμός της θέσης της κάμερας ως προς το Tool Center Point, διαδικασία η οποία υλοποιήθηκε χειροκίνητα ενώ τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα.

Ο λόγος που η θέση του καρπού της ντομάτας υπολογίζεται αρχικά ως προς το TCP και στη συνέχεια ως προς τη βάση του βραχίονα οφείλεται στο γεγονός ότι αφ' ενός η κάμερα είναι αναρτημένη πάνω στη αρπάγη, επομένως τεχνικά είναι πιο εύκολο αφ' ετέρου οποιαδήποτε στιγμή μπορώ να πάρω τη θέση του TCP ως προς τη βάση με την εκτέλεση μιας εντολής μέσα από τη βιβλιοθήκη RTDE, αναφορά στην οποία γίνεται σε επόμενη παράγραφο.

Πίνακας 9-6 *Συντεταγμένες του πλαισίου της κάμερας {Cam} ως προς το {TCP}.*

Θέση πλαισίου {Cam} ως προς {TCP}	
X (m)	-0.01
Y (m)	-0.09
Z (m)	-0.134

Πίνακας 9-7 *Προσανατολισμός πλαισίου {Cam} ως προς το πλαίσιο {TCP} σε UR coordinates.*

Προσανατολισμός πλαισίου{Cam} ως προς {TCP}	
RX (rad)	0
RY (rad)	0
RZ (rad)	0

9.5.2. Έλεγχος λειτουργιών ρομποτικού βραχίονα μέσω της Python

Στη συνέχεια θα γίνει αναφορά της βιβλιοθήκης RTDE που χρησιμοποιήθηκε μέσα από το περιβάλλον της Python για να ελέγχεται η λειτουργία του ρομποτικού βραχίονα. Αρχικά παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική της βιβλιοθήκης και η δυνατότητες της με αναφορά κάποιων από τις βασικές εντολές που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας. Στη συνέχεια

γίνεται αναφορά στο τρόπο με τον οποίο έγινε προσπάθεια συσχέτισης πλαισίων συντεταγμένων για τον έλεγχο της κίνησης του βραχίονα σε σχέση με κάποιο αντικείμενο από το περιβάλλον εργασίας του εισάγοντας την έννοια του ομογενή μετασχηματισμού

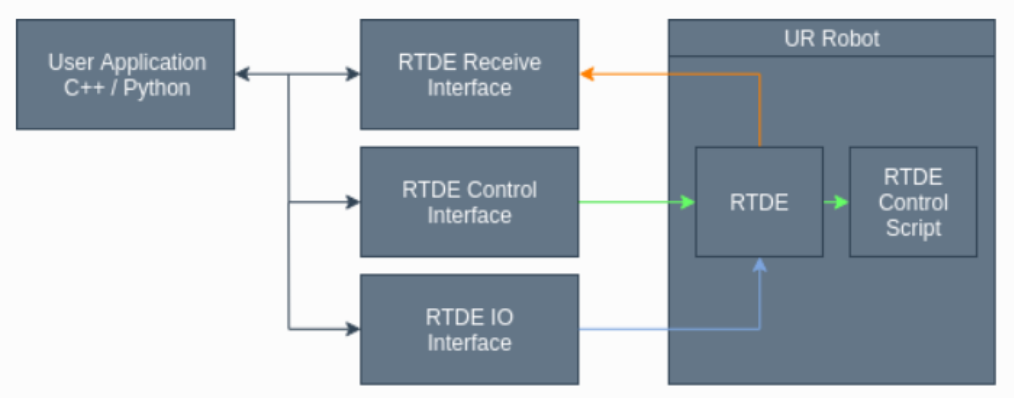
Βιβλιοθήκη RTDE

Ο έλεγχος του ρομποτικού βραχίονα UR μέσα από τη γλώσσα προγραμματισμού Python γίνεται με τη χρήση της βιβλιοθήκης RTDE το οποίο αποτελεί ακρωνύμιο της έκφρασης Real Time Data Exchange.

Η βιβλιοθήκη RTDE δημιουργεί μια επικοινωνία μεταξύ του Controller του ρομποτικού βραχίονα UR και μιας εξωτερικής εφαρμογής (στη περίπτωση αυτή της Python), μέσα από μία τυπική σύνδεση με την IP. Αυτή η λειτουργία είναι χρήσιμη καθώς επιτρέπει στη εξωτερική εφαρμογή την άντληση δεδομένων από τον Controller του βραχίονα, την αποστολή δεδομένων προς τον Controller του βραχίονα, αλλά και τον έλεγχο των Input/Output που διαθέτει ο Controller οι οποίες χρησιμοποιούνται για να στέλνει και δέχεται σήματα από εξωτερικές πηγές, όπως είναι οι αισθητήρες και επενεργητές.

Πιο συγκεκριμένα η επικοινωνία της βιβλιοθήκης και του Controller του ρομποτικού βραχίονα είναι χωρισμένη στις τρεις διαφορετικές διεπαφές οι οποίες αναφέρονται παρακάτω:

- **RTDE Control Interface**
- **RTDE Receive Interface**
- **RTDE IO Interface**



Εικόνα 9-10 *Σχηματική αναπαράσταση της επικοινωνίας του ρομπότ με το χρήστη μέσα από τις διαφορετικές διεπαφές.*

Η **RTDE Control Interface** χρησιμοποιείται κυρίως σε περιπτώσεις που ο χρήστης θέλει να κινήσει το βραχίονα, αλλά και σε εντολές που εμφανίζουν κάποια λειτουργικότητα. Πιο συγκεκριμένα η διεπαφή RTDE Control επιτρέπει στους χρήστες να ελέγχουν τις κινήσεις και τις λειτουργίες του ρομπότ. Περιλαμβάνει εντολές για τη ρύθμιση του TCP. Οι χρήστες μπορούν να εκτελέσουν έλεγχο θέσης (τόσο στον χώρο άρθρωσης όσο και στο χώρο του εργαλείου) και ανίχνευση επαφής με το περιβάλλον. Αυτές οι εντολές διευκολύνουν τον ακριβή έλεγχο και τον χειρισμό της συμπεριφοράς του ρομπότ, επιτρέποντας διάφορες ρομποτικές εφαρμογές.

Η **RTDE Receive Interface** χρησιμοποιείται για τη λήψη δεδομένων από το ρομπότ. Πιο συγκεκριμένα με τη διεπαφή RTDE Receive δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να λαμβάνει δεδομένα από το ρομπότ. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να αναφέρονται στη πραγματική γωνία των αρθρώσεων, των ταχυτήτων των αρθρώσεων, στη θέση και τη ταχύτητα αλλά και

τη δύναμη που ασκείται στο TCP, το βάρος που μπορεί να έχει κάποια αρπάγη αλλά και το κέντρο βάρους της, ενώ η **RTDE IO Interface** για τον έλεγχο των αναλογικών και ψηφιακών εισόδων και εξόδων.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι ο λόγος που το IO και Control έχουν χωριστεί σε δύο διαφορετικές διεπαφές είναι για να μπορεί ο χρήστης να ελέγχει τις ψηφιακές και αναλογικές εισόδους και εξόδους, ενώ το ρομπότ κινείται ή κάνει κάποια άλλη εργασία, καθώς οι εντολές που περιέχονται στο Control Interface παρουσιάζουν συνήθως **blocking χαρακτήρα**, δηλαδή όσο εκτελείται η συνάρτηση δεν μπορεί να κάνει ταυτόχρονα κάτι άλλο έως ότου τελειώσει η εργασία που εκτελεί η συνάρτηση (αν και αυτό το χαρακτηριστικό μπορεί να αλλάξει όπως περιγράφεται παρακάτω στη ανάλυση βασικών συναρτήσεων).

Μερικές τεχνικές λεπτομέρειες που πρέπει να γνωρίζει όποιος θέλει να χρησιμοποιήσει αυτή τη βιβλιοθήκη είναι ότι παρουσιάζει συμβατότητα με τα παρακάτω λειτουργικά συστήματα:

- Ubuntu 16.04 (Xenial Xerus)
- Ubuntu 18.04 (Bionic Beaver)
- Ubuntu 20.04 (Focal Fossa)
- macOS 10.14 (Mojave)
- Windows 10 x64

Ενώ ως προς τα συμβατά ρομπότ της Universal Robot, σε αυτά περιλαμβάνονται:

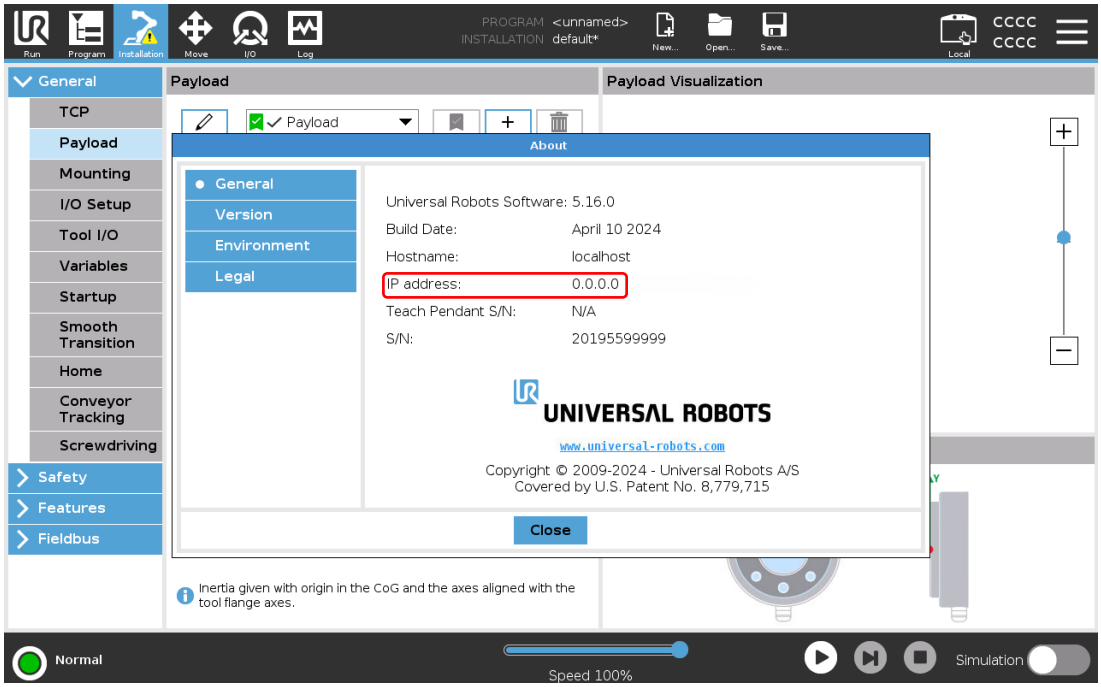
- Όλα τα e-Series
- Όλα τα CB-Series από το CB3/CB3.1

Αρχικά απαιτείται η εγκατάσταση της βιβλιοθήκης RTDE. Για να εγκατασταθεί η βιβλιοθήκη, η διαδικασία γίνεται με τη βοήθεια του PIP, το οποίο είναι ένα σύστημα διαχείρισης πακέτων της Python το οποίο έρχεται μαζί με την εγκατάσταση της Python στον υπολογιστή. Έτσι πληκτρολογώντας απλά την εντολή

>pip install ur_rtde

στο παράθυρο του command prompt το pip αναλαμβάνει την εγκατάσταση της βιβλιοθήκης στον υπολογιστή.

Αφού ολοκληρωθεί η εγκατάσταση της βιβλιοθήκης το επόμενο βήμα είναι η **δημιουργία της σύνδεσης μεταξύ ρομπότ και υπολογιστή μέσω της IP**. Η διεύθυνση της IP του ρομπότ μπορεί να βρεθεί από το Teach pendant, όπου επιλέγεται το εικονίδιο που βρίσκεται τέρμα πάνω δεξιά στην οθόνη (βλ. Εικόνα 9-11, εικονίδιο ☰ πάνω δεξιά) στη συνέχεια το κουμπί '**About**', ενώ στο παράθυρο που εμφανίζεται εντοπίζεται η διεύθυνση της IP σύμφωνα με την Εικόνα 9-11, όπου στη περίπτωση του ρομποτικού βραχίονα του εργαστηρίου UR3e δίνεται ως: **IP address: 192.168.1.60**.



Εικόνα 9-11 *Απεικόνιση του εντοπισμού της διεύθυνσης IP μέσα από το teach pendant το ρομποτικού βραχίονα UR.*

Αφού πλέον έχουν γίνει όλα όσα περιγράφονται στις προηγούμενες παραγράφους και ο χρήστης είναι έτοιμος να εκτελέσει το κώδικα του, μένει ακόμα να τεθεί **ο βραχίονας σε Remote control mode**. Με τον όρο remote control mode εννοείται η ικανότητα ελέγχου και προγραμματισμού του ρομπότ απομακρυσμένα μέσω εξωτερικών συσκευών και λογισμικό (δηλαδή να μην ελέγχεται ακριβώς μέσα από το περιβάλλον του teach pendant). Αυτή η κατάσταση ελέγχου του ρομπότ δίνει μία επιπλέον ευελιξία στη λειτουργία του ρομπότ και ιδιαίτερα σε βιομηχανικές εφαρμογές όπου ο αυτοματισμός και η απομακρυσμένη διαχείριση είναι μεγάλης σημασίας.

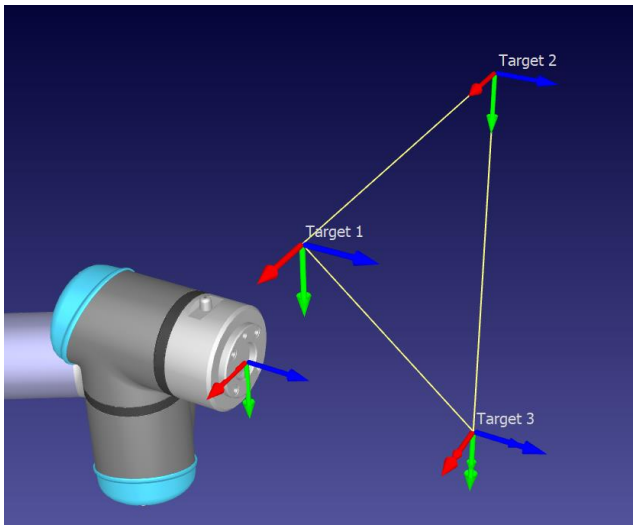
Παρακάτω δίνεται εν συντομία μία περίληψη για κάποιες από τις δυνατότητες που περιέχονται στη κατάσταση απομακρυσμένου ελέγχου (remote control).

- **Πρωτόκολλα επικοινωνίας** όπως το TCP/IP το οποίο μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας συμβατικά πρωτόκολλα δικτύων για την ενσωμάτωση με άλλα συστήματα και λογισμικά, το Modbus TCP το οποίο επιτρέπει την επικοινωνία με PLCs για την ενσωμάτωση σε μεγάλα βιομηχανικά συστήματα, το Ethernet/ IP και το Profinet για την επικοινωνία με διάφορα είδη βιομηχανικών εξοπλισμών.
- Η **συντήρηση και η αποσφαλμάτωση** όπου ο τεχνικός μπορεί να διαγνώσει και να αποκαταστήσει κάποια προβλήματα χωρίς να απαιτείται φυσική παρουσία, μειώνοντας το χρόνο που είναι εκτός λειτουργίας το ρομπότ.
- Ο **προγραμματισμός** που περιλαμβάνει το URCap μία πλατφόρμα που επιτρέπει στους developers να δημιουργούν κατά παραγγελία εφαρμογές για τα UR, αλλά και την απομακρυσμένη πρόσβαση στο teach pendant του βραχίονα για έλεγχο του βραχίονα από απόσταση μέσα από το γραφικό περιβάλλον του PolyScope GUI.

Στη συνέχεια για λόγους πληρότητας και σαφήνειας του κειμένου παρατίθενται μερικές βασικές εντολές που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας για τον έλεγχο του ρομποτικού βραχίονα UR.

RTDE Control Interface

- **rtde_c.moveL(target, speed, acceleration, asynchronous):** Αυτή η συνάρτηση κινεί το βραχίονα από τη θέση που βρίσκετε σε μια νέα θέση που ονομάζεται στόχος πάνω σε μία ευθεία γραμμή. Τα ορίσματα που λαμβάνει η συνάρτηση είναι:



Εικόνα 9-12 *Ψηφιακή αναπαράσταση της τροχιάς κίνησης του ρομποτικού βραχίονα σε τρείς θέσεις στόχους στο χώρο του εργαλείου.*

1. Ο στόχος (target) που είναι ένας πίνακας έξι στοιχείων [x, y, z, rx, ry, rz] και αφορά τη θέση (σε m) και το προσανατολισμό (σε rad) ως προς τη βάση του βραχίονα .
2. Τη ταχύτητα κίνησης κατά τη μετάβαση στο στόχο (σε m/s).
3. Η επιτάχυνση έως της επίτευξη της επιθυμητής ταχύτητας (σε m/s^2).
4. Το asynchronous στο τρόπο με τον οποίο θα εκτελεστεί η συνάρτηση (**TRUE για blocking και FALSE για unblocking**). Το όρισμα αυτό της συνάρτησης είναι προαιρετικό καθώς από προεπιλογή η συνάρτηση το λαμβάνει ως True ακόμα και αν δεν ορίσει κάτι ο χρήστης. **Η σημασία του ορίσματος αυτού είναι καθοριστική** στο τρόπο εκτέλεσης του κώδικα και αυτό γιατί στη περίπτωση που οριστεί με τη τιμή TRUE , η εκτέλεση του κώδικα σταματάει σε αυτή τη γραμμή μέχρι να ολοκληρωθεί η εντολή (δηλαδή μέχρι να φτάσει ο βραχίονας στην επιθυμητή θέση στόχο) και μετά συνεχίζει την εκτέλεση της εντολής που βρίσκεται στην επόμενη γραμμή. Στη περίπτωση τώρα που το όρισμα πάρει τη τιμή FALSE τότε η εκτέλεση των επόμενων γραμμών κώδικα συνεχίζει κανονικά. Αυτή η λειτουργικότητα δίνει τη δυνατότητα πραγματοποίησης και άλλων διαδικασιών κατά τη κίνηση του βραχίονα, όπως ο έλεγχος των I/O του ελεγκτή του βραχίονα.

- **rtde_c.moveL(path, asynchronous)** : Αυτή η συνάρτηση αποτελεί παραλλαγή της προηγούμενης με τη διαφορά ότι **στο όρισμα path περιέχονται πολλές θέσεις στόχοι** οι οποίοι εκτελούνται με τη σειρά η μία μετά την άλλη, δηλαδή το path μπορεί να είναι της μορφής **path = [path1, path2, path3, …]** ενώ το αποτέλεσμα της εκτέλεσης είναι όμοιο με την Εικόνα 9-12.

```python
import rtde_control
import rtde_receive
import rtde_io

# Robot IP adress
ip_adress = "192.168.1.60"

# Create interface obejects with reference to the robot ip adress
rtde_c = rtde_control.RTDEControlInterface(ip_adress)
rtde_r = rtde_receive.RTDEReceiveInterface(ip_adress)
rtde_io = rtde_io.RTDEIOInterface(ip_adress)

# Define movement parameters
speed = 0.015 # Speed in m/s
accel = 0.01 # Acceleration in m/s^2
blend = 0.005 # Blending radius for smooth transition between targets

# Define targets in tool space for moving the robot
target1 = [-0.143, -0.435, 0.20, 0.00, 3.14, 0.00, speed, accel,blend]
target2 = [-0.143, -0.51, 0.21, 0.00, 3.14, 0.00, speed, accel,blend]
target3 = [-0.32, -0.61, 0.31, 0.00, 3.14, 0.00, speed, accel,blend]

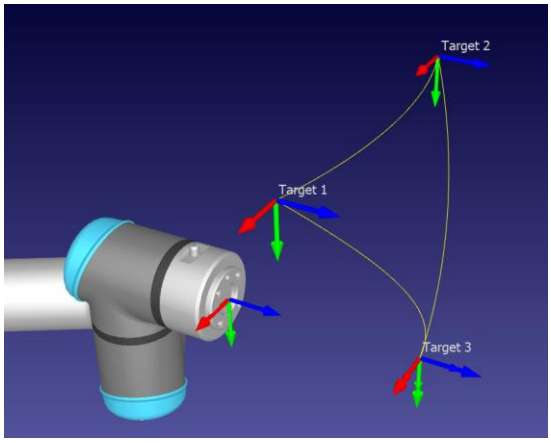
# Define path for moving the robot
path = [target1, target2, target3]

# Move the robot in tool space according to the path
rtde_c.moveL(path)
```

Εικόνα 9-13 *Παράδειγμα κώδικα εκτέλεσης τη κίνηση σε μία σειρά από στόχους τον ένα μετά τον άλλο στο χώρο του εργαλείου.*

Το ενδιαφέρον στο παραπάνω κώδικα που εμφανίζεται στην Εικόνα 9-13 αποτελεί η δυνατότητα παράκαμψη τον στόχων με τη δημιουργία τροχιάς η οποία περνάει κοντά από το σημείο στόχο το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την ομαλότερη μετάβαση από τα σημεία αποφεύγοντας απότομες επιταχύνσεις κατά τη προσέγγιση των σημείων. Αυτός ο τύπος κίνησης ορίζεται εισάγοντας τη παράμετρο blend στο τόξο καμπυλότητας κατά τη μετάβαση κοντά από το σημείο στόχο.

- **rtde_c.moveJ(q, speed, acceleration, asynchronous)** : Αυτή η συνάρτηση κινεί το βραχίονα από τη θέση που βρίσκετε σε μια νέα θέση (στο χώρο των αρθρώσεων), χωρίς όμως το άκρο να κινείται πάνω σε ευθεία γραμμή. Τα ορίσματα που λαμβάνει η συνάρτηση είναι:



Εικόνα 9-14 *Ψηφιακή αναπαράσταση της τροχιάς κίνησης του ρομποτικού βραχίονα σε τρείς θέσεις στόχους στο χώρο των αρθρώσεων.*

1. Ο στόχος (q) που είναι ένας πίνακας έξι στοιχείων [q1, q2, q3, q4, q5, q6] και αφορά τη τελική θέση των αρθρώσεων (σε rad) .
2. Τη μέγιστη ταχύτητα κίνησης κατά τη μετάβαση στις επιθυμητές γωνίες των αρθρώσεων (σε rad/s).
3. Η επιτάχυνση έως της επίτευξη της επιθυμητής ταχύτητας (σε rad/s^2).
4. Το asynchronous στο τρόπο με τον οποίο θα εκτελεστεί η συνάρτηση (TRUE για blocking και FALSE για unblocking) Η χρησιμότητα του ορίσματος είναι όμοια με αυτή που περιεγράφηκε για την εντολή **moveL**.

- **rtde_c.moveJ(path, asynchronous) :** Αυτή η συνάρτηση αποτελεί παραλλαγή της προηγούμενης με τη διαφορά ότι στο όρισμα path περιέχονται πολλές επιθυμητές πόζες του βραχίονα με βάση τις γωνίες των αρθρώσεων και οι οποίοι εκτελούνται με τη σειρά η μία μετά την άλλη βλ. Εικόνα 9-15), δηλαδή το path αυτή τη φορά μπορεί να είναι της μορφής **path = [Q1, Q2, Q3, Q4], όπου Qi = [q1, q2, q3, q4, q5, q6] με i =1,2,3,….**

```python
import rtde_control
import rtde_receive
import rtde_io

# Robot ip address
ip_address = '192.168.1.100'

# Create interface objects with reference to the robot ip address
rtde_c = rtde_control.RTDEControlInterface(ip_address)
rtde_r = rtde_receive.RTDEReceiveInterface(ip_address)
rtde_io = rtde_io.RTDEIOInterface(ip_address)

# Define movement parameters
speedR = 0.2  # Speed in rad/sec
accelR = 0.15  # acceleration in rad/sec^2
blend = 0.05  # Blending radius for smooth transitions between movements

# Define joint space poses for moving the robot
target1 = [-2.3047, -2.3028, 2.2333, 0.1028, 1.6044, -0.001, speedR, accelR, blend]
target2 = [-2.006, -1.665, 1.891, -0.1923, 1.5819, -0.001, speedR, accelR, blend]
target3 = [-2.059, -1.1868, 2.319, -1.099, 1.532, -0.001, speedR, accelR, blend]

# Define path for moving the robot
pose = [target1, target2, target3]

# Move the robot in joint space according to the path
rtde_c.moveJ(pose)
```

Εικόνα 9-15 *Παράδειγμα κώδικα εκτέλεσης της κίνησης σε μία σειρά από στόχους τον ένα μετά τον άλλο στο χώρο των αρθρώσεων.*

RTDE Receive Interface

- **rtde_r.getActualQ()** : Η συγκεκριμένη συνάρτηση επιστρέφει ένα πίνακα έξι στοιχείων που αντιστοιχεί στις γωνίες των αρθρώσεων σε ακτίνια (rad).
- **rtde_r.getActualTCPPose()** : Η συγκεκριμένη συνάρτηση επιστρέφει ένα πίνακα έξι στοιχείων όπου καθένα από αυτά αντιστοιχούν στις αποστάσεις για καθένα από τους άξονες κίνησης αλλά και τις περιστροφές γύρο από το κάθε άξονα κίνησης. Οπότε ο πίνακας αυτός είναι της μορφής [X, Y, Z, Rx, Ry, Rz]. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο πίνακας της πόζας που επιστρέφει είναι **ως προς το πλαίσιο συντεταγμένων της βάσης**, ενώ οι μονάδες για τις μετατοπίσεις είναι σε μέτρα και των προσανατολισμών σε rad.
- **rtde_r.getPayload()** : Η συγκεκριμένη συνάρτηση επιστρέφει μια τιμή που αντιστοιχεί στο βάρος της αρπάγης που έχει τοποθετηθεί με μονάδα μέτρησης τα κιλά (kg).

Τέλος για την αποφυγή οποιαδήποτε σύγχυσης που μπορεί να προκύψει, πρέπει να γίνει ξεκάθαρος ο τρόπος με τον οποίο συντάσσεται η κάθε εντολή, ενώ για αυτό το λόγο παρατίθεται η Εικόνα 9-16.

```
1   import rtde_control
2   import rtde_receive
3   import rtde_io
4
5   # Robot IP address
6   ip_address = "192.168.1.100"
7
8   rtde_c = rtde_control.RTDEControlInterface(ip_address)
9   rtde_r = rtde_receive.RTDEReceiveInterface(ip_address)
10  rtde_io = rtde_io.RTDEIOInterface(ip_address)
11
12  # set parameters for linear motion
13  target = [0.3, -0.2, 0.4, 0, 3.14, 0]
14  speed = 0.25
15  acceleration = 0.5
16  asynchronous = False
17
18  # Move the robot to the target position in the tool space
19  rtde_c.moveL( *args: target, speed, acceleration, asynchronous)
20
21  # Set the digital output pin '7', HIGH
22  rtde_io.setStandardDigitalOut( arg0: 7,  arg1: True)
23
24  # Get the actual joint angles (rad) of robot
25  rtde_r.getActualQ()
```

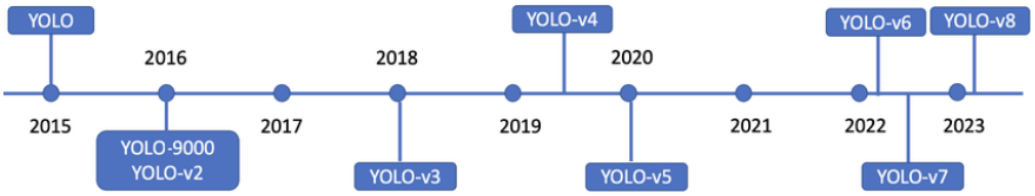
Εικόνα 9-16 *Παράδειγμα σύνταξης εντολών και για τα τρία είδη Interface.*

Με τη Εικόνα 9-16 γίνεται σαφές ο τρόπος με τον οποίο συντάσσεται κάθε εντολή στη βιβλιοθήκη RTDE. Το πρώτο σκέλος της αναφέρεται σε τρία αντικείμενα που έχουν να κάνουν με τα Interface (γραμμές 8-10). Το κάθε interface περιέχει ως παράμετρο τη διεύθυνση της IP του διαθέτει ο ρομποτικός βραχίονας UR. Λέγοντας αυτό προκύπτει τελικά ότι κάθε εντολή στην ουσία είναι και μία μέθοδος πάνω στο αντικείμενο ‘’Interface’’ που αναφέρεται (γραμμές 19, 22, 25). Στη γραμμή 19 η εντολή κινεί το βραχίονα στο χώρο του εργαλείου λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους ταχύτητα, επιτάχυνσης και του ασύγχρονου τρόπου εκτέλεσης της εντολής. Στη γραμμή 22 η εντολή αλλάζει την κατάσταση της ψηφιακής εξόδου ‘’7’’ που βρίσκεται πάνω στον ελεγκτή του βραχίονα σε HIGH (arg1: True). Η γραμμή 25 διαβάζει τις πραγματικές τιμές των γωνιών των αρθρώσεων του βραχίονα και τις αποθηκεύει σε μία μεταβλητή που αντιπροσωπεύει την πόζα του βραχίονα.

Μία πολύ σημαντική λεπτομέρεια ως προς την εκτέλεση των εντολών, είναι ότι οι εντολές που έχουν να κάνουν με τη λήψη η αποστολή δεδομένων που σχετίζονται με το άκρο του ρομποτικού βραχίονα αυτές αναφέρονται πάντα ως προς το πλαίσιο της βάση του. Στη πραγματικότητα όμως όλες οι πληροφορίες συνήθως δίνονται ως προς τη φλάντζα για πρακτικούς λόγους, και για χάριν ευκολία στο χρήστη. Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η συσχέτιση του πραγματικού κόσμου με το πλαίσιο της βάσης του βραχίονα.

9.5.3. Το μοντέλο νευρωνικού δικτύου YOLO

Το μοντέλο YOLO_v8 (You Only Look Once – version8) ανήκει στην ευρύτερη οικογένεια των μοντέλων YOLO, η οποία μέσω συνελικτικών νευρωνικών δικτύων (CNNs), ανιχνεύει αντικείμενα σε πραγματικό χρόνο. Όπως υποδηλώνει το όνομα, στο εν λόγω μοντέλο απαιτείται, μόνο μία προς τα εμπρός διάδοση της πληροφορίας (single forward propagation), μέσω ενός νευρωνικού δικτύου για την ανίχνευση αντικειμένων. Αυτό σημαίνει ότι η πρόβλεψη σε ολόκληρη την εικόνα γίνεται σε μία μόνο εκτέλεση του YOLO. Στο τέλος, στην εικόνα που του έχει δοθεί, εξάγει την ανίχνευση πολλαπλών αντικειμένων, **εντός οριοθετημένων πλαισίων (bounding boxes)**, μαζί με τις αντίστοιχες πιθανότητες των κλάσεων των αντικειμένων που ανίχνευσε. Η συγκεκριμένη έκδοση διατηρεί τα δυνατά χαρακτηριστικά του YOLO όπως η ταχύτητα και η ακρίβεια, ενώ παρουσιάζει μειωμένη υπολογιστική πολυπλοκότητα και κατανάλωση μνήμης.



Εικόνα 9-17 *Χρονοδιάγραμμα των εκδόσεων του YOLO[15].*

Ο πρωταρχικός στόχος του Yolo είναι να χρησιμοποιήσει ένα ενιαίο συνελικτικό νευρωνικό δίκτυο (CNN) για να κάνει προβλέψεις τόσο για τα οριοθετημένα πλαίσια όσο και για τις πιθανότητες κλάσης**. Η θεμελιώδης ιδέας είναι η έννοια της χρήσης ενός ενιαίου δικτύου για την εκτέλεση και των δύο αυτών εργασιών.** Έτσι το δίκτυο εκπαιδεύεται με ένα μεγάλο σύνολο δεδομένων φωτογραφιών που έχουν επισημανθεί προκειμένου να μάθει τα μοτίβα και τα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με μια ποικιλία διαφορετικών πραγμάτων. Κατά τη φάση των συμπερασμάτων της διαδικασίας της επισήμανσης, το νευρωνικό δίκτυο θα δημιουργήσει προβλέψεις σχετικά με το πλαίσιο οριοθέτησης και τις πιθανότητες να ανήκει το περιεχόμενο κάθε πλαισίου σε μία κλάση μέσα στην εικόνας που δίνεται. Στο τέλος της διαδικασίας εμφανίζει την αρχική εικόνα με τα αποτελέσματα που βρήκε.

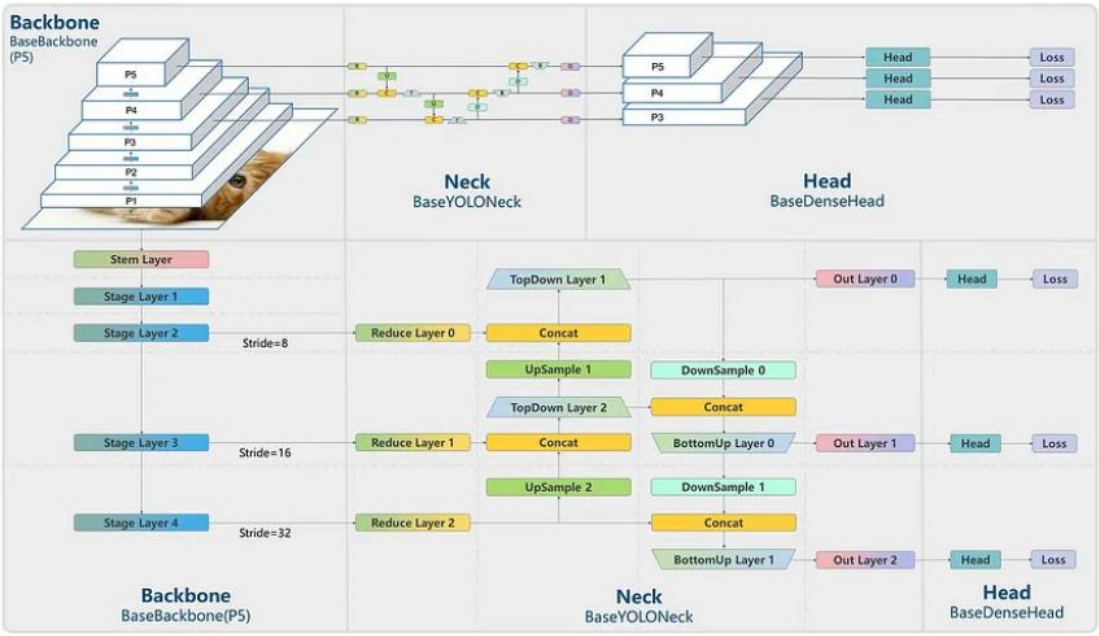
Το Yolo V8 έχει βρει εφαρμογές σε ένα ευρύ φάσμα πεδίων που σχετίζονται με την όραση υπολογιστών και την τεχνητή νοημοσύνη. Επειδή μπορεί να αναλύσει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές όπως η αυτόνομη οδήγηση, όπου η γρήγορη και ακριβής αναγνώριση αντικειμένων είναι ζωτικής σημασίας για την ασφάλεια των επιβατών.



Εικόνα 9-18 *Σύγκριση της απόδοσης του μοντέλου YOLO για την έκδοση v8 ως προς την v5 σε περιπτώσεις εντοπισμού αντικειμένων, ταξινόμησης και κατάτμησης [16].*

Το Yolo V8 έχει επίσης ιατρικές εφαρμογές, ιδίως στους τομείς της επεξεργασίας ιατρικών εικόνων και των διαγνωστικών, όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βοηθήσει σε αυτές τις διαδικασίες. Το Yolo V8 μπορεί να εντοπίσει αποτελεσματικά τις ανωμαλίες στις ιατρικές εικόνες, επιτρέποντας στους γιατρούς να λαμβάνουν καλύτερες αποφάσεις.

Η αρχιτεκτονική και οι μέθοδοι εκπαίδευσης του Yolo V8 μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο από ερευνητές όσο και από επαγγελματίες για να δημιουργήσουν τα δικά τους μοντέλα αναγνώρισης αντικειμένων. Το Yolo V8 πλέον είναι πολύ πιο εύκολο να χτιστεί, λόγω της διαθεσιμότητας ήδη εκπαιδευμένων μοντέλων και βιβλιοθηκών υλοποίησης όπως η **Ultralytics**.



Εικόνα 9-19 *Αρχιτεκτονική δικτύου YOLO-v8 Nano. [14]*

Μία σημαντική εξέλιξη σε σύγκριση με προηγούμενες γενιές οφείλεται στην αρχιτεκτονική Yolo V8. Τη δουλειά της ανάκτησης πληροφοριών από φωτογραφίες είναι στην αρμοδιότητα του δικτύου κορμού (Backbone network). Το Yolo V8 χρησιμοποιεί μια βελτιωμένη έκδοση της αρχιτεκτονικής CSPDarknet53, η οποία έχει αποδειχθεί αποτελεσματική στην καταγραφή ακριβής τοποθεσίας των δεδομένων.

Η ένωση αναλλοίωτων σε κλίμακα χαρακτηριστικών είναι ευθύνη του βασικού δικτύου λαιμού (Neck network). Το Δίκτυο Συνάθροισης Διαδρομών (Path aggregation network), που συνήθως αναφέρεται ως PANet, χρησιμεύει ως το κύριο δίκτυο κορμού για το Yolo V8. Το PANet παρέχει μια πιο ακριβή αναπαράσταση των χαρακτηριστικών συνδυάζοντας τα δεδομένα που συλλέγονται από πολλαπλά επίπεδα του υποκείμενου δικτύου.

Αφού συγχωνευτούν τα χαρακτηριστικά, αποστέλλονται στο κεντρικό δίκτυο (Head Network), το οποίο στη συνέχεια κάνει προβλέψεις με βάση τις πληροφορίες. Προβλέψεις σχετικά με τα οριοθετημένα πλαίσια και τις πιθανότητες κλάσης κάθε κελιού πλέγματος παρέχονται από το Yolo V8, όπως ακριβώς ήταν και από τους προκατόχους του. Παρόλα αυτά, οι εξελίξεις στον σχεδιασμό και τις συναρτήσεις απώλειας έχουν οδηγήσει σε αύξηση της ακρίβειας και της ευρωστίας του συστήματος ως αποτέλεσμα αυτών των καινοτομιών.

Γενικά τα μοντέλα YOLO παρέχονται εκπαιδευμένα στο κοινό μέσα από τεράστια σύνολα δεδομένων όπως το COCO, ενώ μπορούν να εκπαιδευτούν και πάνω σε νέα σύνολα δεδομένων. Τα μοντέλα του YOLO είναι δωρεάν προς το κοινό ενώ τη κατασκευή και συντήρηση τους έχει αναλάβει η Ultralitics. Παρακάτω αναφέρονται ενδεικτικά μερικές από τις κλάσεις που περιλαμβάνει το μοντέλο YOLOv8 Nano καθώς στη πραγματικότητα φτάνουν περίπου τις ογδόντα :

1. Άνθρωπο
2. Γάτα
3. Σκυλί
4. Αυτοκίνητο
5. Μπουκάλι
6. Μπανάνα
7. Μήλο
8. Πορτοκάλι
9. Laptop
10. Τηλεόραση

Στη περίπτωση της εργασίας σκοπός του μοντέλου είναι να εντοπίζει ώριμους καρπούς ντομάτας, το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε εκπαιδευτικέ από τα μέλη του εργαστηρίου Ρομποτικής και Αυτομάτου Ελέγχου, καθώς δεν προσφέρεται ήδη εκπαιδευμένο για τον εντοπισμό καρπών ντομάτας. Για να γίνει δυνατή η χρήση του μοντέλου με τη γλώσσα προγραμματισμού Python εγκαταστάθηκε η βιβλιοθήκη **Ultralitcs** και από αυτήν έγινε η εισαγωγή του μοντέλου YOLO πληκτρολογώντας τη παρακάτω εντολή στο παράθυρο του terminal:

>pip install ultralitics

Επιπλέον **οι βιβλιοθήκες ultralitics και pyrealsense2 χρειάζονται την εγκατάσταση κάποιων επιπλέων βιβλιοικών για την λειτουργία τους**. Στη γλώσσα προγραμματισμού python είναι σύνηθες το φαινόμενο μία βιβλιοθήκη να χρείαζεται την εγκατάσταση μια τρίτης βιβλιοθήκης για να μπορέσει να λειτουργήσει. Βέβαια σε πολύ ιδιαίτερες περιπτώσεις απαιτείται και μία συγκεκριμένη έκδοση της βιβλιοθήκης ή ακόμα και να παρουσιάζεται προβλήμα μεταξύ βιβλιοθηκών. **Για την αποφυγή τέτοιου είδους προβλημάτων είναι καλό να εφαρμόζεται από την αρχή ενός project η τακτική της δημιουργίας εικονικού περιβάλλοντος.** Ετσι και στα πλαίσια της εργασίας αυτής ο κώδικας βρίσκεται μέσα σε ένα εικονικό περιβάλλον για την αποφυγή αυτού του είδους των συγκρούσεων.

Οι βιβλιοθήκες που εγκαταστήθηκαν στο εικονικό περιβάλλον για την υποστήριξη της λειτουργίας των κυρίως βιβλιοθηκών είναι:

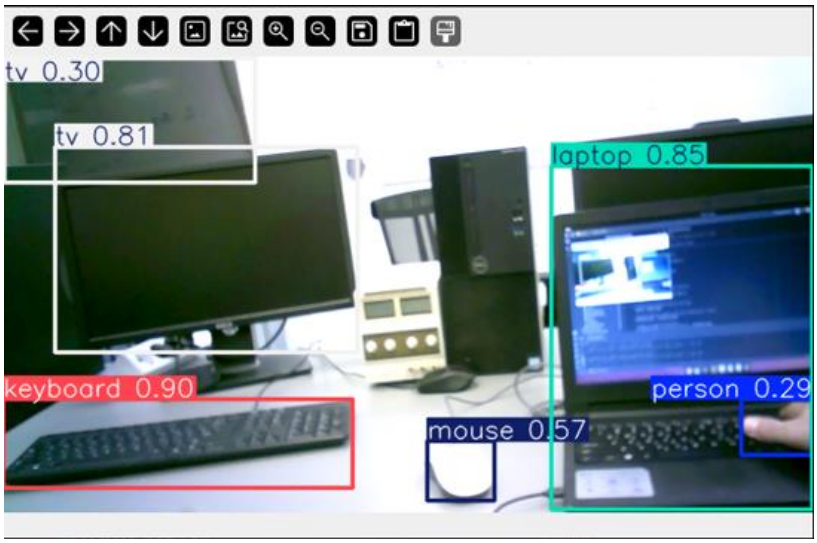
1. **Numpy** (Numerical Python, περιλαμβάνει αριθμητικές λειτουργίες για χειρισμό πινάκων)

2. **CV2** (OpenCV για την επεξεργασία εικόνας)
3. **Math** (βιβλιοθήκη περιεχομένου μαθηματικών λειτουργιών)
4. **Time** (βιβλιοθήκη λειτουργιών που σχετίζονται με το χρόνο)

```
1   from ultralytics import YOLO
2
3   # Load the YOLOv8 Nano pre-trained model
4   model = YOLO('yolo-Weights/yolov8n.pt')
5
6   # Run inference on the source and generate of results objects
7   results = model(source=0, show=True, conf=0.4, save=True)
```

Εικόνα 9-20 *Κώδικας για τον εντοπισμό αντικειμένων από το μοντέλο Yolo μέσα από τη web camera [16].*

Ο κώδικας που παρουσιάζεται στην Εικόνα 9-20, δίνει τη δυνατότητα μίας γρήγορης επισκόπησης των δυνατοτήτων του μοντέλου στον εντοπισμό αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο μέσα από τη web camera του υπολογιστή. Αφού φορτωθεί το ήδη εκπαιδευμένο μοντέλο yolov8n γραμμή 4 στη συνέχεια εφαρμόζεται πάνω στην κάμερα του υπολογιστή γραμμή 7 θέτοντας τη παράμετρο source ίση με 0 ή 1 ανάλογα τον υπολογιστή. Η συγκεκριμένη εντολή μπορεί να εφαρμόσει το μοντέλο και σε ήδη υπάρχων βίντεο. Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ο εντοπισμός αντικειμένων μέσα από τη web camera του υπολογιστή σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 9-21 *Απεικόνιση της εφαρμογής του μοντέλου yolo στη web camera του υπολογιστή.*

Η εφαρμογή του μοντέλου yolo στη web camera του υπολογιστή για τον εντοπισμό αντικειμένων (Εικόνα 9-21) επιστρέφει το σκηνικό στο οποίο εμφανίζει τα αντικείμενα επισημασμένα εντός πλαισίου (Bounding box), αναφέροντας τη κλάσης στην οποία ανήκουν και με μορφή ποσοστού τη πιθανότητα να ανήκουν σε αυτή τη κλάση (Confidence).

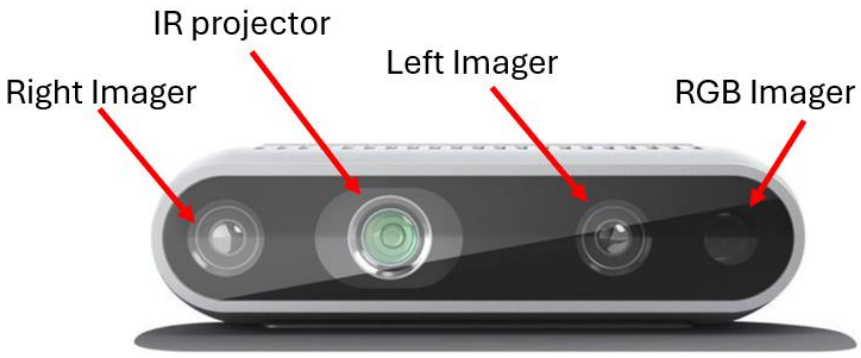
9.5.4. Αισθητήρας Μηχανικής όρασης (RGBD)

Ο αισθητήρας που χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό των καρπών της ντομάτας είναι μία κάμερα στερεοσκοπικής όρασης και ένα ήδη εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο για να εντοπίζει ώριμους καρπούς ντομάτας.

Η στερεοσκοπική όραση αναφέρεται σε μια μέθοδο που βασίζεται στο ανθρώπινο οπτικό σύστημα, αξιοποιώντας δύο RGB κάμερες που καταγράφουν σκηνές από τον πραγματικό κόσμο και αποθηκεύουν τις πληροφορίες σε ψηφιακά μέσα. Η λειτουργία των καμερών εξαρτάται από το φως που λαμβάνουν από το ορατό φάσμα (380-700 nm), το οποίο περνά μέσω ενός συγκλίνων φακού. Κάθε καταγραφή αντιστοιχεί σε μια εικόνα, γνωστή ως "frame", και η ταχύτητα καταγραφής αυτών των frames μετριέται σε frames ανά δευτερόλεπτο (FPS).

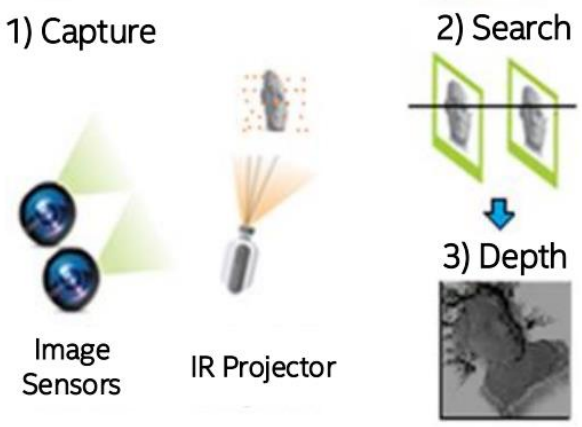
Βασιζόμενοι στη δισδιάστατη πληροφορία που παρέχουν οι δύο κάμερες, οι οποίες είναι ελαφρώς μετατοπισμένες μεταξύ τους, και χρησιμοποιώντας αρχές στερεοσκοπικής γεωμετρίας, είναι δυνατή η εκτίμηση του βάθους και της απόστασης των αντικειμένων από το επίπεδο των καμερών. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την απόκτηση τρισδιάστατης πληροφορίας από δισδιάστατες εικόνες. Η ίδια αρχή μπορεί να εφαρμοστεί, με κατάλληλη προσαρμογή, και με τη χρήση καμερών που καταγράφουν υπέρυθρη ακτινοβολία, η οποία εκπέμπεται από έναν ειδικού τύπου προβολέα.

Στο πλαίσιο του εντοπισμού των καρπών ντομάτας, χρησιμοποιήθηκε η κάμερα D435i της εταιρείας Intel όπως φαίνεται στην Εικόνα 9-22, η οποία αξιοποιεί την παραπάνω τεχνολογία για τον υπολογισμό του βάθους. Ο υπέρυθρος προβολέας (IR projector) προβάλλει ένα μοτίβο πάνω στο σκηνικό για μεγαλύτερη ακρίβεια του υπολογισμού, ιδίως σε εικόνες με χαμηλή υφή.



Εικόνα 9-22 *Κάμερα βάθους από την εταιρία Intel με εμπορική ονομασία D435i με ανάδειξη των εικονοληπτών.*

Η δεξιά και η αριστερή κάμερα αποτυπώνουν τη σκηνή και στέλνουν τα δεδομένα της εικόνας στο επεξεργαστή, ο οποίος υπολογίζει τις τιμές βάθους για κάθε pixel στην εικόνα, συσχετίζοντας τα σημεία από τη δεξιά στην αριστερή εικόνα μέσω της μετακίνησης στην αριστερή και δεξιά εικόνα. Οι τιμές για τις τιμές βάθους επεξεργάζονται με σκοπό τη δημιουργία του depth frame.



Εικόνα 9-23 *Τεχνολογία της υπέρυθρης στερεοσκοπικής όρασης.*

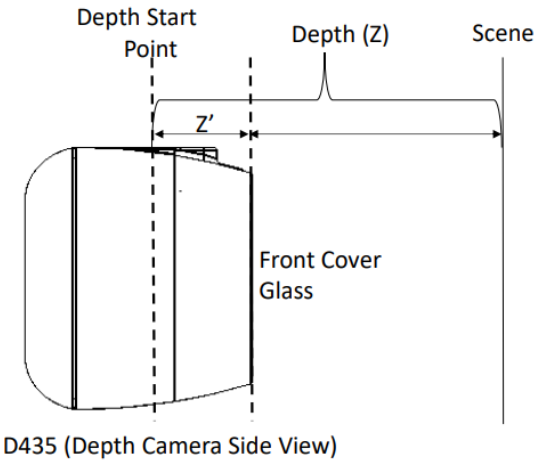
Στην Εικόνα 9-23 παρουσιάζεται η τεχνολογία της υπέρυθρης στερεοσκοπικής όρασης όπου στο πρώτο στάδια γίνεται η λήψη φωτογραφιών από τους δύο αισθητήρες με τη ταυτόχρονη προβολή του υπέρυθρου σχεδίου, στη συνέχεια γίνεται συσχέτιση των σημείων των εικόνων και τέλος με την επεξεργασία των δεδομένων αυτών προκύπτει ο χάρτης βάθους της εικόνας.

Στο παρακάτω πίνακα αναφέρονται μερικές τιμές για τη ελάχιστη δυνατή απόσταση εντοπισμού αντικειμένων σε συνάρτηση με την ευκρίνεια της κάμερα βάθους όπως αυτές προέκυψαν από τη εγχειρίδιο της κάμερας, ενώ με πράσινο χρώμα επισημαίνεται η ευκρίνεια που χρησιμοποιείται στα πλαίσια της εργασίας αυτής.

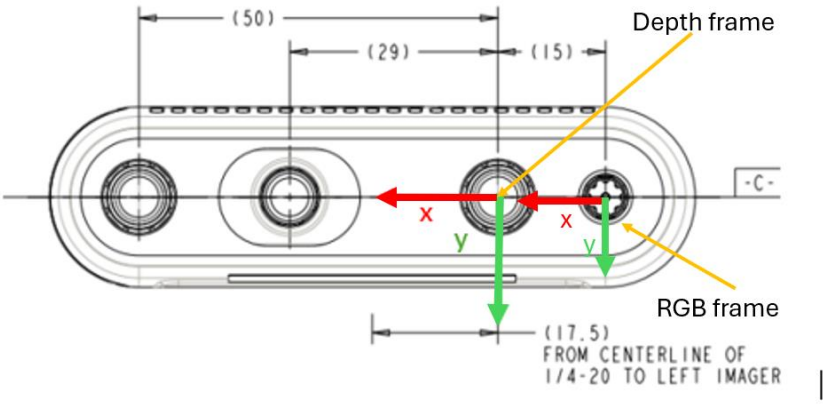
Πίνακας 9-8 *Πίνακας ελάχιστης απόστασης της σκηνής από τη κάμερα ανάλογα με της ευκρίνεια, με επισήμανση (πράσινο) της χρησιμοποιούμενης [18].*

Ευκρίνεια	Μοντέλο D435i
	Min- Z (mm)
1280x720	280
848x480	195
640x480	175
640x360	150
480x270	120
424x240	105

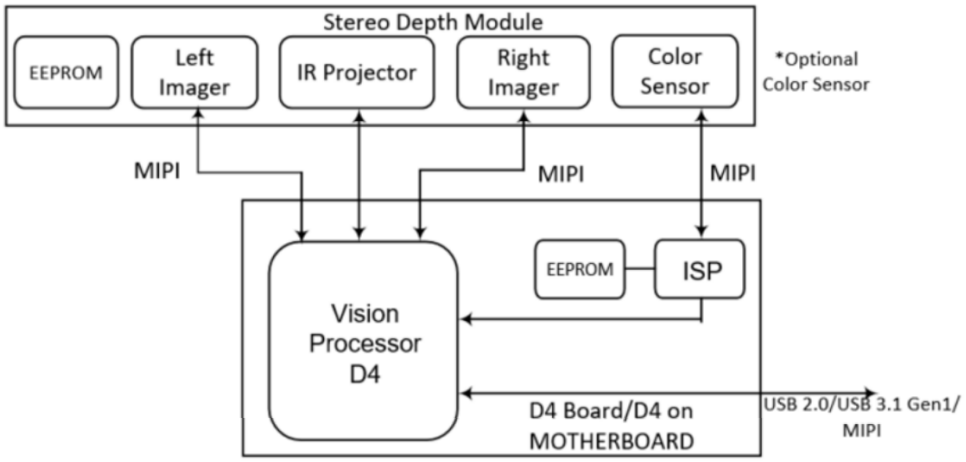
Για το μοντέλο της κάμερα D435i το μηδενικό σημείο (Depth start point) με βάση το οποίο φτιάχνεται ο χάρτης βάθους είναι ο αριστερός εικονολήπτης. Σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές τις κάμερα το σημείο αυτό βρίσκεται **-4,2mm** από τον εμπρόσθιο κάλυμμα του φακού. (βλ. Εικόνα 9-24, Front Cover Glass).



Εικόνα 9-24 *Μηδενικό σημείο αναφοράς για το χάρτη βάθους πάνω στη κάμερα βάθους [18].*



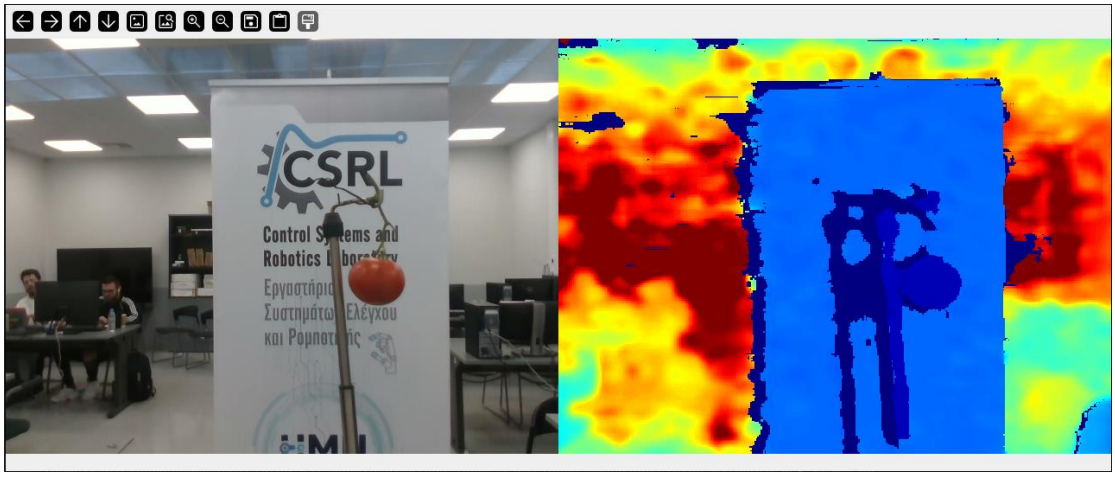
Εικόνα 9-25 *Θέση των πλαισίων αναφοράς για το Depth και RGB frame [18].*



Εικόνα 9-26 *Σχηματικό διάγραμμα του συστήματος της κάμερας βάθους [18].*

Από το διάγραμμα λειτουργίας της κάμερας (Εικόνα 9-26) προκύπτει ότι η κάμερα μετά την επεξεργασία των δεδομένων που λαμβάνει από τους εικονολήπτες και τον αισθητήρα

χρώματος έχει δημιουργήσει δύο ειδών frames (Depth frame και Color frame). Το ένας αφορά το βάθος και ο άλλος το χρώμα για το συγκεκριμένο σκηνικό. Για να προσδιοριστεί η απόσταση ενός σημείου από τη κάμερα θα πρέπει στη συνέχεια αυτά τα δύο frames να ευθυγραμμιστούν το ένα πάνω στο άλλο.



Εικόνα 9-27 *Απεικόνιση σκηνικού μέσα από τη κάμερα Intel 435i για το Color frame (Αριστερά) και Depth frame (δεξιά).*

Στη Εικόνα 9-27 παρουσιάζεται για το ίδιο σκηνικό το Depth frame και το Color ή RGB frame με σκοπό την ανάδειξη της μορφής για κάθε frame χωριστά. **Στη κάμερα βάθους η διαδικασία της ευθυγράμμισης του depth και RGB frame έχει σαν αποτέλεσμα τη μετατόπιση του πλαισίου αναφορά από τον αριστερό εικονολήπτη που αντιστοιχεί στο depth frame στον αισθητήρα χρώματος της κάμερας που αντιστοιχεί στο RGB frame** (βλ. Εικόνα 9-25)**.** Επομένως όλα τα δεδομένα απόσταση λαμβάνονται πλέον ως προς τον αισθητήρα χρώματος.

Για το χειρισμό και την ενσωμάτωση της κάμερας στο κώδικα χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη **pyrealsense2.** Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο κώδικας στη γλώσσα προγραμματισμού python χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη pyrealsense2 για την απεικόνιση του depth και color frame χωριστά, όπως αυτό φαίνεται στην Εικόνα 9-27.

```python
import pyrealsense2 as rs
import numpy as np
import cv2

# Initialize Intel RealSense pipeline
pipeline = rs.pipeline()
# Create a config object and enable depth and color streams
config = rs.config()
config.enable_stream( *args: rs.stream.depth, 640, 480, rs.format.z16, 30)
config.enable_stream( *args: rs.stream.color, 640, 480, rs.format.bgr8, 30)
# Start streaming
pipeline.start(config)
# Create an align object to align depth frames to color frames
align_to = rs.stream.color
align = rs.align(align_to)
try:
    while True:
        # Wait for a coherent pair of frames: depth and color
        frames = pipeline.wait_for_frames()
        # Align the depth frame to color frame
        aligned_frames = align.process(frames)
        # Get aligned frames
        aligned_depth_frame = aligned_frames.get_depth_frame()  # Aligned depth frame
        color_frame = aligned_frames.get_color_frame()
        # Validate that both frames are valid
        if not aligned_depth_frame or not color_frame:
            continue
        # Convert images to numpy arrays
        depth_image = np.asanyarray(aligned_depth_frame.get_data())
        color_image = np.asanyarray(color_frame.get_data())
        # Apply colormap to the depth image (for better visualization)
        depth_colormap = cv2.applyColorMap(cv2.convertScaleAbs(depth_image, alpha=0.03), cv2.COLORMAP_JET)
        # Stack both images horizontally for display
        images = np.hstack((color_image, depth_colormap))
        # Show the images in a window
        cv2.imshow( winname: 'RealSense - Color and Depth (Aligned)', images)

        # Exit on pressing 'q'
        if cv2.waitKey(1) & 0xFF == ord('q'):
            break
finally:
    # Stop streaming
    pipeline.stop()
    cv2.destroyAllWindows()
```

Εικόνα 9-28 *Παράδειγμα κώδικα στη python για την απεικόνιση του σκηνικού στο color και depth frame όπως αυτό φαίνεται στην Εικόνα 9-27.*

Η pyrealsense είναι στη πραγματικότητα ένα *wrapper της python για την Intel RealSense SDK (η οποία είναι γραμμένη σε C++),* η οποία παρέχει εργαλεία και βιβλιοθήκες για να αλληλοεπιδρά με τη κάμερα βάθους Intel RealSense. Με αυτό το τρόπο οι developers της python αποκτούν πρόσβαση σε δεδομένα της κάμερας RealSense, όπως είναι το βάθος και υπέρυθρο και η ροή χρωμάτων RGB για την επίτευξη πληθώρας εργασιών μηχανικής όρασης. Σημαντικές δυνατότητες που δίνει η pyrealsense2:

1) **Έλεγχος της κάμερας:**
   Έλεχγος κάμερας με σκοπό την απόδοση διαφορετικών ροών δεδομένων όπως το βάθος, το χρώμα, το υπέρυθρο σε πραγματικό χρόνο.
2) **Δεδομένα βάθους:**
   Πρόσβαση σε πληροφορίες βάθους που αντιπροσωπεύουν την απόσταση μεταξύ κάμερας και αντικειμένου στο σκηνικό το οποίο είναι χρήσιμο σε περιπτώσεις 3D scanning και ρομποτικές εφαρμογές.
3) **Νέφος σημείων:**

Δημιουργία τρισδιάστατου νέφους σημείων από τα δεδομένα βάθους τα οποία είναι χρήσιμα στη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων και την αναγνώριση του περιβάλλοντος.

4) **Συγχρονισμός και ευθυγράμμιση:**
Δυνατότητα συγχρονισμού διαφορετικών ροών δεδομένων (π.χ. βάθους και RBG χρώματος) με σκοπό των συνδυασμό τους για πιο ακριβείς αναλύσεις.

5) **Εύκολη ενσωμάτωση:**
Όντας βιβλιοθήκη της python είναι εύκολη η ενσωμάτωση της με άλλες βιβλιοθήκες της python όπως η NumPy, OpenCV και η TensorFlow, για την επεξεργασία εικόνας, τη μηχανική μάθηση, και ρομποτικές εφαρμογές.

Οι κύριες εφαρμογές που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι στη ρομποτική, στη τρισδιάστατη σάρωση (3D Scanning), στην αναγνώριση αντικειμένων, και σε εφαρμογές επαυξημένης πραγματικότητας.

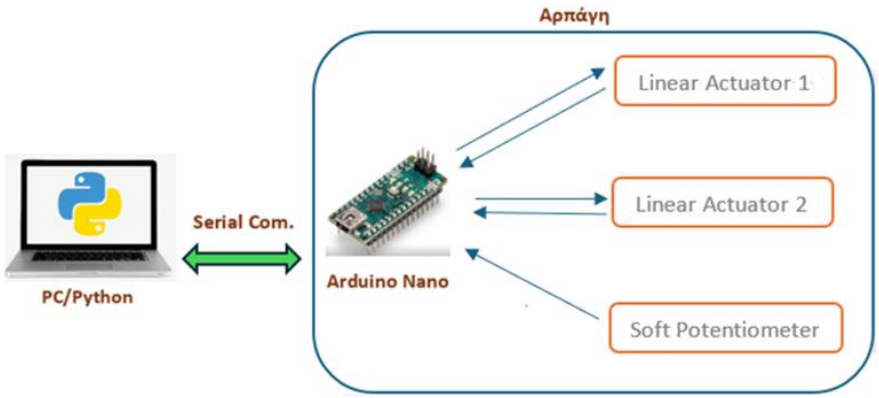
Η εγκατάσταση της βιβλιοθήκης σε προσωπικό υπολογιστή γίνεται με τη βοήθεια του PIP συντάσσοντας στο terminal την παρακάτω εντολή:

>pip install pyrealsense2

Αξίζει να σημειωθεί ότι χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στην έκδοση της python που χρησιμοποιείται καθώς υπάρχει το ενδεχόμενο σε νέες εκδόσεις αυτής να δημιουργείται πρόβλημα κατά την εγκατάσταση του πακέτου της βιβλιοθήκης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι στα πλαίσια της εργασίας αυτή κρίθηκε απαραίτητη η μετάβαση σε παλαιότερη έκδοση της **python (από τη python 12 στη python 8) για την εγκατάσταση του πακέτου pyrealsense2.**

9.5.5. Έλεγχος της αρπάγης με τη Python

Ο έλεγχος της αρπάγης όπως ειπώθηκε και στην αρχή αυτής της παραγράφου γίνεται χωριστά από αυτή του βραχίονα. Πιο συγκεκριμένα με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python ο μικροελεγκτής Arduino λαμβάνει εντολές όπως το άνοιγμα και το κλείσιμο του ψαλιδιού και της αρπάγης μέσα από τη σειριακή επικοινωνία. Επίσης ο μικροελεγκτής Arduino είναι σε θέση να κοινοποιεί τη κατάσταση που βρίσκεται εκείνη τη στιγμή στη σειριακή επικοινωνία με μορφή μηνύματος, όταν του ζητηθεί, δηλαδή, αν η αρπάγη ή το ψαλίδι είναι ανοιχτό ή κλειστό.



Εικόνα 9-29 *Διάγραμμα επικοινωνίας Python και Αρπάγης μέσα από τη σειριακή επικοινωνία (Serial Communication).*

Στην Εικόνα 9-29 παρουσιάζεται σε διάγραμμα η επικοινωνία της python με το μικροελεγκτή Arduino της αρπάγης μέσα από τη σειριακή επικοινωνία. Επιπλέον στο διάγραμμα εντός του

πλαισίου (αναφερόμενο ως Αρπάγη) φαίνεται η επικοινωνία του μικροελεγκτή με τους γραμμικούς επενεργητές (αμφίδρομα βέλη) αλλά και το εύκαμπτο ποτενσιόμετρο. Η επικοινωνία με τους κινητήρες περιλαμβάνει την αποστολή σήματος (PWM) για την οδήγηση των κινητήρων και τη λήψη αναλογικού σήματος που αντιστοιχεί στη πραγματική θέση που βρίσκεται ο κινητήρας. Για το εύκαμπτο ποτενσιόμετρο η επικοινωνία περιλαμβάνει μόνο τη λήψη αναλογικού σήματος που αντιστοιχεί στη θέση που του ασκείται πίεση στην επιφάνεια του.

Σειριακή επικοινωνία Η/Υ με τον μικροελεγκτή

Όπως αναφέραμε παραπάνω, η δυνατότητα χειρισμού της αρπάγης με τη χρήση των παραπάνω εντολών μέσα από τη γλώσσα προγραμματισμού Python οφείλεται στη βιβλιοθήκη PySerial. Η βιβλιοθήκη pyserial είναι μια λειτουργική βιβλιοθήκη της Python που ενσωματώνει την πρόσβαση σε σειριακές θύρες, παρέχοντας μια διεπαφή για σειριακή επικοινωνία σε διάφορα λειτουργικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένων των Windows, Linux και macOS. Χρησιμοποιείται ευρέως σε έργα που περιλαμβάνουν επικοινωνία με συσκευές υλικού όπως μικροελεγκτές, αισθητήρες και άλλα ενσωματωμένα συστήματα. Επίσης επιτρέπει τη διαμόρφωση των παραμέτρων της σειριακής θύρας, όπως το Baud rate και ο έλεγχος ροής δεδομένων διαμέσου της θύρας. Ως προς τη μετάδοση δεδομένων υποστηρίζει και αποστολή και λήψη στη σειριακή θύρα, ενώ μπορεί να χειριστεί δεδομένα δυαδικής μορφής και κειμένου.

Παράμετροι της σειριακής επικοινωνίας

- **Baud rate:** είναι η ταχύτητα της σειριακής επικοινωνίας, που όπως και οι επόμενες παράμετροι, παίρνει τιμές που ορίζονται στο τεχνικό εγχειρίδιο του σειριακού οργάνου. Στη παρούσα εργασία η τιμή για τη παράμετρο αυτή έχει ρυθμιστεί στα **115200**.
- **Port:** με την ορισμό αυτής της παραμέτρου καθορίζεται η θύρα μέσα από την οποία γίνεται η αποστολή και λήψη δεδομένων από και προς το μικροελεγκτή.

Τέλος η εγκατάσταση της γίνεται πολύ εύκολα μέσω του PIP και μέσα από το παράθυρο του Command prompt πληκτρολογώντας την εντολή:

>**pip install pyserial**

Για πιο προηγμένες εφαρμογές, το pyserial υποστηρίζει ασύγχρονη επικοινωνία χρησιμοποιώντας threads ή το **module serial.threaded**. Αυτό επιτρέπει τη μη φραγή ανάγνωσης και εγγραφής, επιτρέποντας στο κύριο πρόγραμμα να εκτελεί άλλες εργασίες ενώ χειρίζεται σειριακή επικοινωνία στο παρασκήνιο.

Firmware μικροελεγκτή για την διαχείριση της αρπάγης

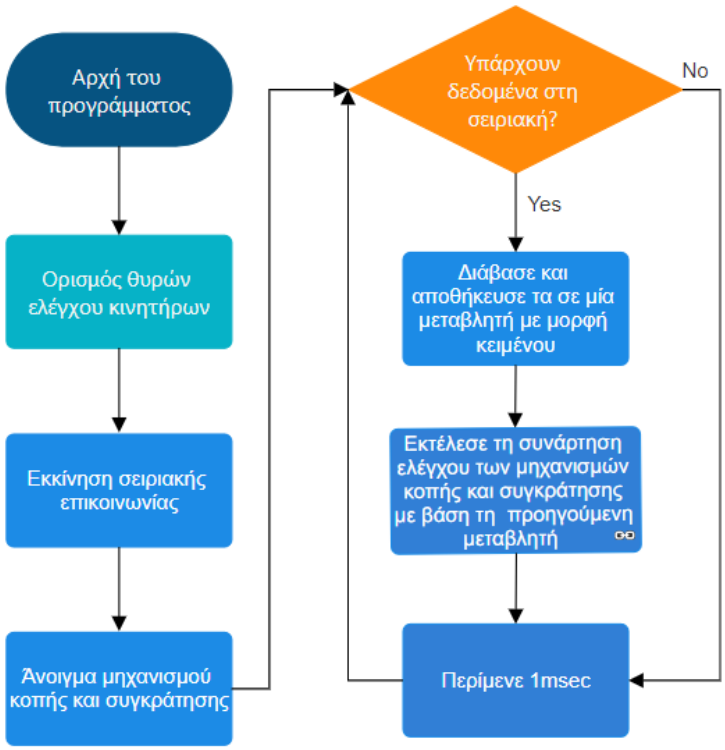
Για να επιτευχθεί ο έλεγχος της αρπάγης μέσα από τη python θα πρέπει εκτός από το κώδικα της Python να τρέχει παράλληλα κώδικας στο μικροελεγκτή Arduino Nano (Firmware). Ο κώδικας αυτός, ανάλογα με τα μηνύματα που εμφανίζονται στη σειριακή του μικροελεγκτή οδηγεί τους κινητήρες στις κατάλληλες θέσεις. Τα μηνύματα αυτά αποτελούνται από συγκεκριμένες φράσεις οι οποίες παρουσιάζονται στο Πίνακας 9-9 μαζί με τη περιγραφή της διαδικασίας την οποία ενεργοποιούν. Επίσης ο κώδικας αυτός είναι σε θέση να επιστρέφει δεδομένα σε περίπτωση που του ζητηθεί προς τη python. Τα δεδομένα αυτά έχουν να κάνουν με τη πραγματική κατάσταση των μηχανισμών κοπής και συγκράτησης (δηλαδή αν είναι ανοικτοί ή κλειστοί).

Στην Εικόνα 9-30 παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα που περιγράφει τη λειτουργία του κώδικα που εκτελείται στο μικροελεγκτή Arduino Nano. Ξεκινώντας την εκτέλεση του κώδικα που έχει αποθηκευτεί στον Arduino Nano, αρχικά ορίζονται τα pins στα οποία αντιστοιχούν στις εξόδους αναλογικού σήματος για την οδήγηση των κινητήρων και οι αναλογικές είσοδοι μέσα από τα οποία ο μικροελεγκτής λαμβάνει σήματα από τους κινητήρες και το εύκαμπτο ποτενσιόμετρο.

Έπειτα ξεκινάει η επικοινωνία του μικροελεγκτή μέσω της σειριακής όπου δηλώνεται η ταχύτητα ανταλλαγής δεδομένων και η θύρα μέσω της οποίας γίνεται η ανταλλαγή των δεδομένων. Επιπλέον οι μηχανισμοί κοπής και συγκράτησης οδηγούνται στην ανοικτή κατάσταση τους.

Μετά τις πρώτες αρχικές ρυθμίσεις ο κώδικας ξεκινάει ένα ατέρμονα βρόγχο μέσα στον οποίο εκτελείται ο κυρίως κώδικας του μικροελεγκτή. Στη αρχή αυτού του βρόγχου ο μικροελεγκτής ελέγχει τη σειριακή για τυχών δεδομένα, στη περίπτωση που δεν υπάρχουν δεδομένα σε αναμονή για να διαβαστούν, δίνεται ένα χρονικό περιθώριο 1 msec και στη συνέχεια ελέγχεται ξανά τη θύρα για τυχών δεδομένα, προφανώς η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να προκύψουν δεδομένα.

Αφού προκύψουν δεδομένα τότε αυτά αποθηκεύονται σε μία μεταβλητή τύπου δεδομένων string και στη συνέχεια με βάση το περιεχόμενο της μεταβλητής εκτελείται η συνάρτηση ελέγχου των κινητήρων και κατ' επέκταση του μηχανισμού κοπής και συγκράτησης



Εικόνα 9-30 *Διάγραμμα ροής για το βασικό κώδικα του τρέχει στο μικροελεγκτή Arduino Nano για τον έλεγχο της αρπάγης.*

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι η διαδικασία εκτέλεσης της συνάρτησης ελέγχου των μηχανισμών κοπής και συγκράτησης όπως αυτή φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα (βλ. Εικόνα 9-30,), οδηγεί στην εκτέλεση συνάρτησης της οποίας η λογική ακολουθεί το

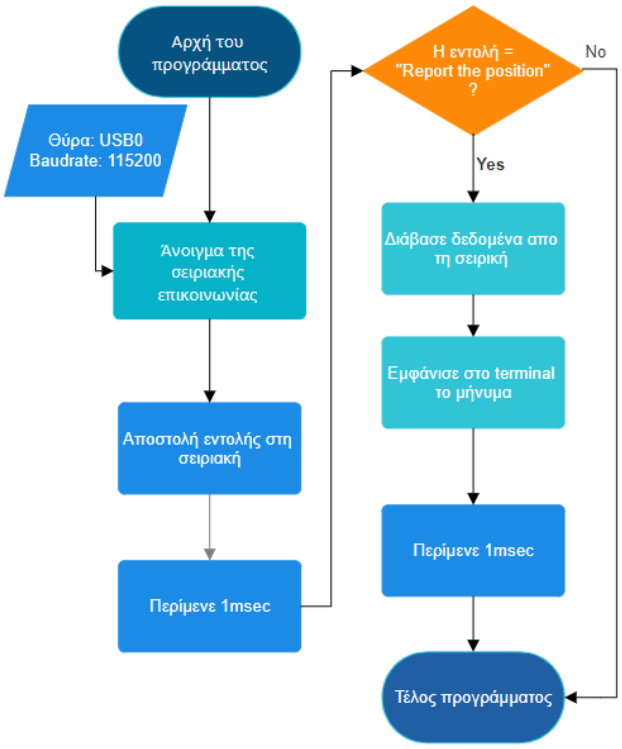
Πίνακας 9-9 όπου αναφέρονται οι εντολές και οι διαδικασίες που ενεργοποιούν στην αρπάγη.

Πίνακας 9-9 *Ανάλυση εντολών που μεταδίδονται με μορφή μηνύματος από τη Python μέσα από τη σειριακή επικοινωνία και το αποτέλεσμα της εκτέλεσης τους από τον μικροελεγκτή Arduino Nano.*

Εντολή	Περιγραφή εντολής
“Close all”	Κλείσιμο ψαλιδιού και αρπάγης- Κοπή και συγκράτηση
“Open all”	Άνοιγμα ψαλιδιού και αρπάγης
“Close scissor”	Κλείσιμο ψαλιδιού- Κοπή
“Close gripper”	Κλείσιμο αρπάγης- Συγκράτηση
“Open scissor”	Άνοιγμα ψαλιδιού
“Open gripper”	Άνοιγμα αρπάγης
“Report the position”	Αναφορά της πραγματική κατάστασης του ψαλιδιού και της αρπάγης

Στην άλλη άκρη της σειριακής επικοινωνίας όπως έχει γίνει ήδη σαφές από την Εικόνα 9-29, βρίσκεται ο υπολογιστής ελέγχου. Επομένως για να μπορούν να επικοινωνούν ο μικροελεγκτής και η python ρυθμίζεται και στη περίπτωση αυτή η θύρα και η ταχύτητα ανταλλαγής δεδομένων όμοια με αυτή που έχει δηλωθεί στο Arduino Nano.

Ο κώδικας που τρέχει στη python είναι ο κυρίως κώδικας ελέγχου του συστήματος που έχει να κάνει με το ρομποτικό βραχίονα και τη κάμερα με το νευρωνικό δίκτυο. Στο αυτό το σημείο θα γίνει περιγραφή μόνο για το κομμάτι που αφορά την επικοινωνία με την αρπάγη σαν να ήταν ένα αυτοτελές πρόγραμμα.



Εικόνα 9-31 *Διάγραμμα ροής προγράμματος που εκτελείται από τη python παράλληλα με το κώδικα στο μικροελεγκτή για τον έλεγχο της αρπάγης.*

Έτσι ξεκινώντας ο κώδικας σύμφωνα με το διάγραμμα στην Εικόνα 9-31 ορίζονται οι παράμετροι της σειριακής επικοινωνίας και στη συνέχεια ζητείται από το χρήστη να πληκτρολογήσει μία εντολή. Αν η εντολή αυτή είναι ‘’exit’’ τότε τερματίζεται η λειτουργία του προγράμματος διαφορετικά καλείται η συνάρτηση που στέλνει την εντολή αυτή στη σειριακή. Στη συνέχεια ελέγχεται αν αυτή η εντολή έχει να κάνει με αναφορά κατάστασης ‘’report position’’ της αρπάγης. Στη περίπτωση που έχει να κάνει με αναφορά κατάστασης της αρπάγης ο κώδικας διαβάζει από τη σειριακή τα δεδομένα που έχει στείλει η αρπάγη και τα εμφανίζει στο terminal.

```python
import serial
import time

# Following valid commands
# ["open all", "open scissor", "open gripper", "close all", "close scissor", "close gripper", "report the position"]

# Initialize serial communication defining the port and baud rate
SRL = serial.Serial('USB0', 115200)



# Create function to write and read data from serial port
def serial_write_read(command):
    SRL.write(str(command).encode())
    time.sleep(1)
    if command == "report the position":
        data = SRL.readline().decode('utf').strip('\r\n')
        print(data, '\n')
        time.sleep(1)


while True:
    msg = input("Order the end_effector:")
    serial_write_read(msg)

    if msg == "exit":
        exit()

```

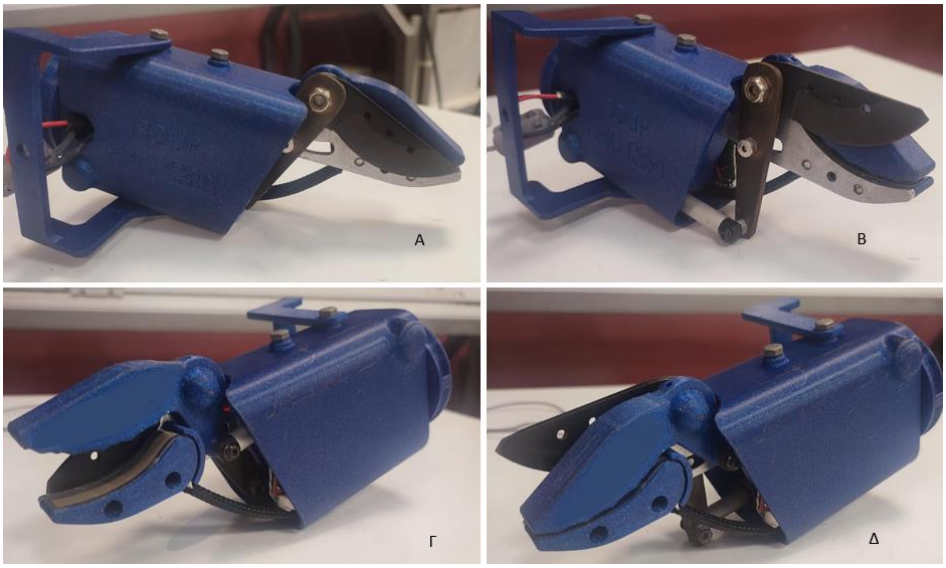
Εικόνα 9-32 *Παράδειγμα κώδικα που εκτελείται από τη python για τον έλεγχο των λειτουργιών της αρπάγης.*

Ο έλεγχος της κίνησης των γραμμικών επενεργητών των μηχανισμών της αρπάγης έγινε χρησιμοποιώντας κάποιες σταθερές τιμές για το σήμα PWM, μιας και όπως έχει ήδη αναφερθεί οι επενεργητές είναι τύπου servo. Οι τιμές των σήματος PWM που αντιστοιχούν στη θέση του βάκτρου για κάθε ενεργοποιητή προέκυψαν μέσα από δοκιμές με τους κινητήρες.

Επίσης για την αναγνώριση της πραγματικής κατάστασης των μηχανισμών κοπής και συγκράτησης όταν αυτή ζητηθεί από τη python επιλέχθηκαν κάποιες τιμές μέσα από δοκιμές οι οποίες αντιστοιχούν στη κατάσταση του κάθε μηχανισμού. Το σήμα που επιστρέφει ο κινητήρας για την πραγματική θέση του αντιστοιχεί σε ένα εύρος 0-5V, παρ’ όλα αυτά λόγο της ψηφιακού μετατροπέα (analog to digital converter) που υπάρχει στις αναλογικές εισόδους του μικροελεγκτή Arduino Nano, στη πραγματικότητα το σήμα αυτό έχει ένα εύρος ψηφιακών τιμών από 0-1024. Στο νέο εύρος η τιμή 0 αντιστοιχεί σε 0 Volt και η τιμή 1024 στη τάση 5Volt.

Πίνακας 9-10 Αντιστοίχιση σημάτων PWM και αναλογικού σήματος στις εισόδους του μικροελεγκτή με τις καταστάσεις των κινητήρων των μηχανισμών κοπής και συγκράτησης.

Μηχανισμός	Τιμή σήματος (PWM)		Τιμή σήματος αναλογική θύρας	
	Ανοικτός	Κλειστός	Ανοικτός	Κλειστός
Έλεγχος Κινητήρα κοπής (Pin D9)	130	40	210	300
Έλεγχος κινητήρα συγκράτησης (Pin D10)	110	80	90	400



Εικόνα 9-33 Απεικόνιση των μηχανισμών κοπής σε κλειστή θέση (Α), σε ανοιχτή θέση (Β) και μηχανισμού συγκράτησης σε ανοιχτή θέση (Γ), κλειστή θέση (Δ).

9.5.6. Αλγόριθμος εντοπισμού και προσέγγισης καρπών ντομάτας

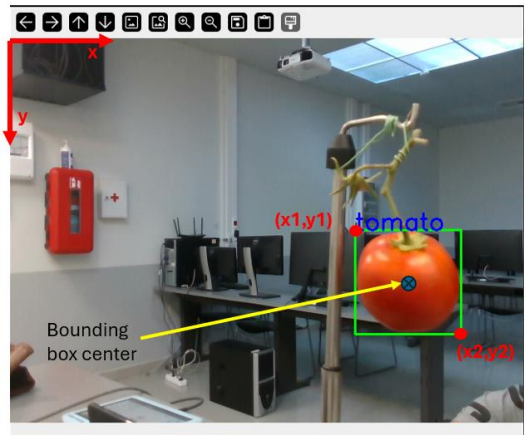
Αλγόριθμος εντοπισμού καρπών ντομάτας

Ο κώδικας που εκτελείται για τον εντοπισμό των καρπών της ντομάτας στα πλαίσια της εργασίας λειτουργεί με βάση το διάγραμμα της Εικόνα 9-35.Στην αρχή του κώδικα γίνεται η εισαγωγή όλων των απαραίτητων βιβλιοθηκών. Στις βιβλιοθήκες αυτές περιλαμβάνεται η pyrealsense2 για την διαχείριση της κάμερας, η Ultralitics για την εισαγωγή του μοντέλου YOLO, η Numpy και η math για την εκτέλεση αριθμητικών πράξεων, η βιβλιοθήκη CV2 ως υποστηρικτική βιβλιοθήκη για τη λειτουργία της κάμερας και τέλος η time για την εισαγωγή χρονικών καθυστερήσεων όπου είναι απαραίτητο. Στη συνέχεια ορίζεται η θέση της κάμερας βάθους ως προς το πλαίσιο {TCP} και ενεργοποιείται η κάμερα για τη λήψη στιγμιότηπων. Με τη χρήση της βιβλιοθήκης Ultraltics εισάγεται το ήδη εκπαιδευμένο μοντέλο YOLO και αμέσως μετά ξεκινάει η λήψη και η ευθυγράμμιση των στιγμιότυπων βάθους και χρώματος (depth και color frames).

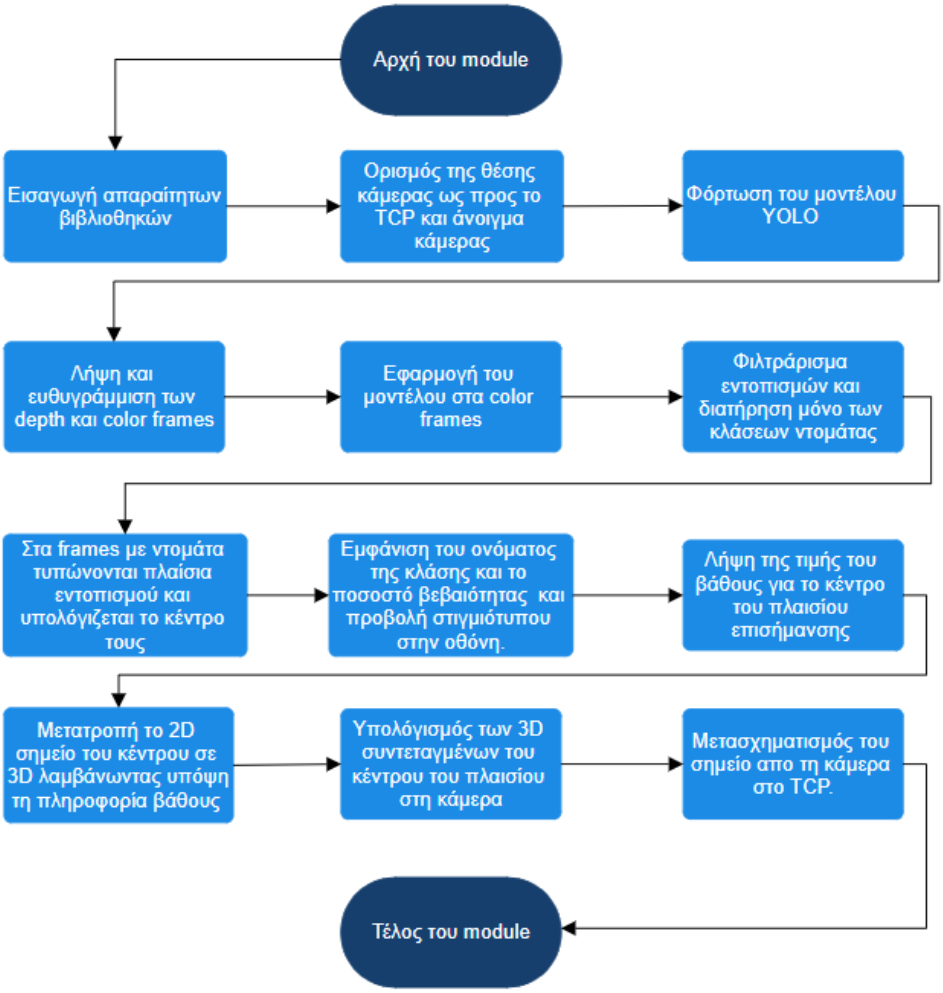
Έπειτα στα color frames εφαρμόζεται το μοντέλο YOLO για τον εντοπισμό αντικειμένων σύμφωνα με τις κλάσεις που έχει εκπαιδευτεί ενώ σε επόμενο βήμα φιλτράρονται οι εντοπισμοί διατηρώντας μόνο αυτούς που αφορούν την κλάση για τους καρπούς ντομάτας. Για τα frames που περιλαμβάνουν εντοπισμό ντομάτας προστίθεται πλαίσιο επισήμανσης για κάθε καρπό, ενώ σε κάθε πλαίσιο υπολογίζεται το κεντρο του. Το κέντρο του πλαισίου υπολογίζεται από το τύπο:

$$Bounding\ box\ center\ coordinates = \left(\frac{x1 + x2}{2}, \frac{y1 + y2}{2}\right)$$

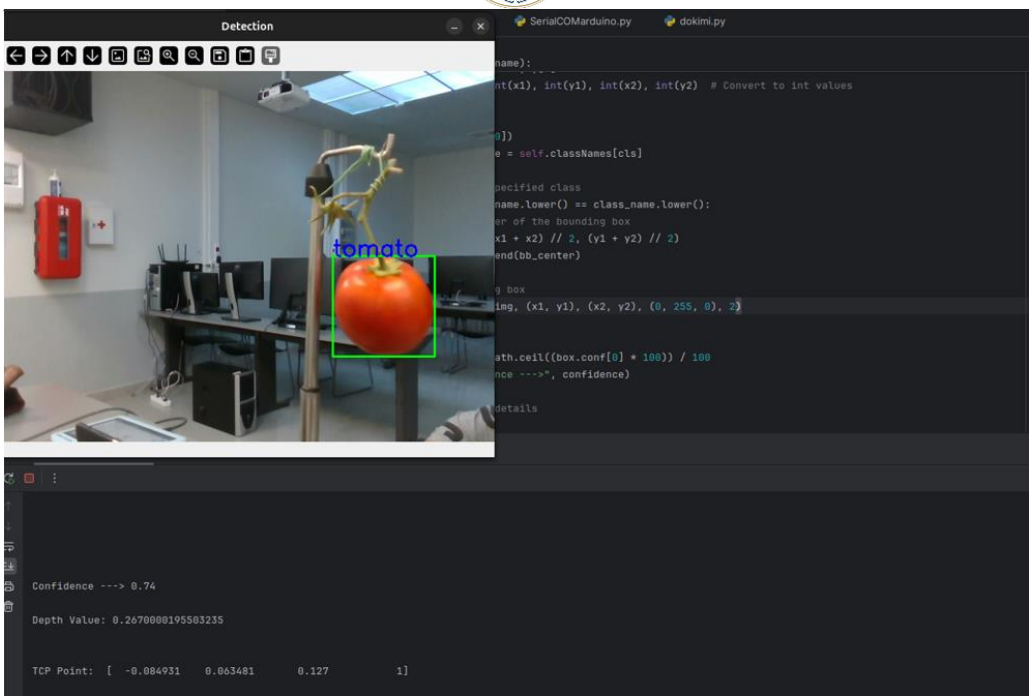
Όπου τα x1, x2, y1, y2 οι συντεταγμένες του πάνω αριστερά και κάτω δεξιά σημείου του πλαισίου επισήμανσης όπως αυτά φαίνονται στην Εικόνα 9-34 με βάση το σύστημα συντεταγμένων. Στη συνέχεια στο στιγμιότυπο που πρόκειται να εμφανιστεί τυπώνεται το όνομα της κλάσης, ενώ στο terminal τυπώνεται το ποσοστό βεβαιότητας για την αναγνώριση του καρπού (βλ. Εικόνα 9-36). ‘Επειτα μετατρέπετε το 2D σημείο (X, Y) σε 3D (X, Y, Z) λαμβάνοντας υποψή τη πληροφορία βάθους, στη συνέχεια υπολογίζονται οι χωρικές συντεταγμένες του σημείου στο πλαίσιο {Cam} και τέλος μετασχηματίζονται στο πλαίσιο {TCP}.



Εικόνα 9-34 *Χαρακτηριστικά σημεία πάνω στο πλαίσιο εντοπισμού για τον υπολογισμό του κέντρου του.*



Εικόνα 9-35 *Διάγραμμα ροής για το κώδικα που εντοπίζει τη θέση των καρπών ντομάτας και υπολογίζει τη θέση του ως προς το {TCP.}*



Εικόνα 9-36 *Εντοπισμός και επισήμανση καρπού ντομάτας με της κάμερας βάθους.*

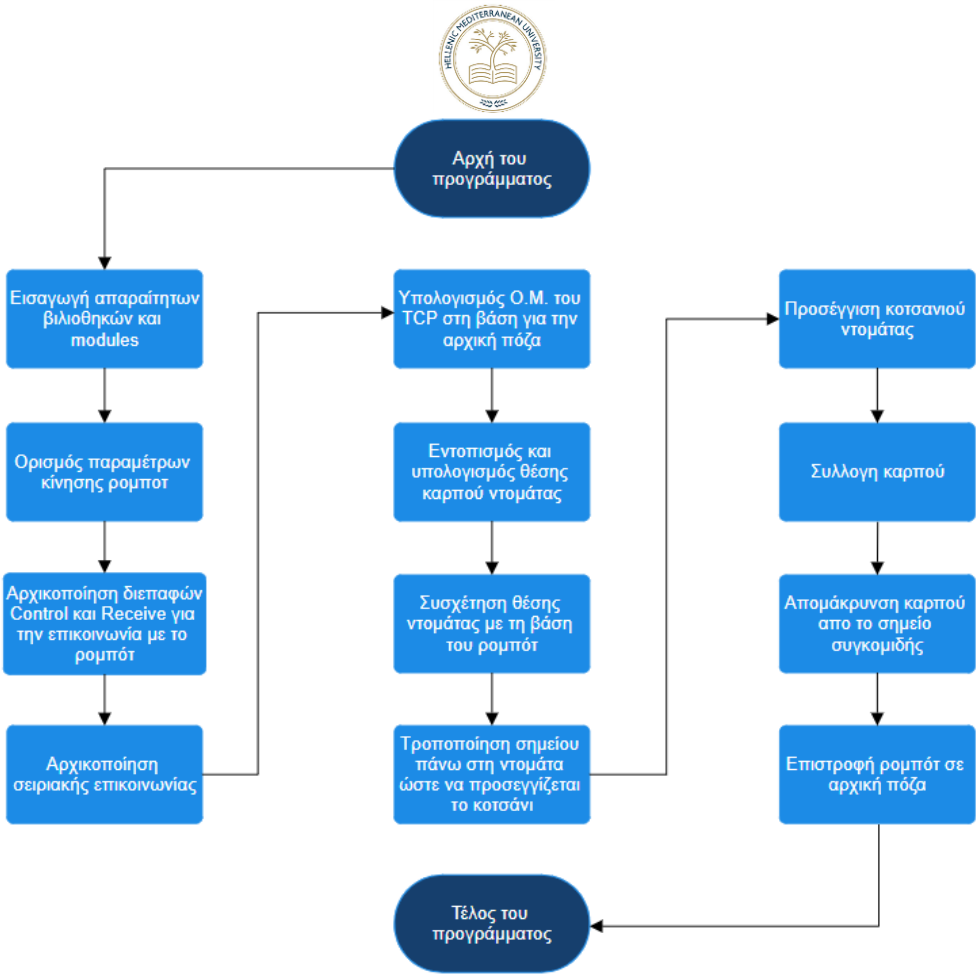
Όπως μπορεί κανείς να διακρίνει στην Εικόνα 9-36 εκτός από το παράθυρο στο οποίο εμφανίζεται επισημασμένος ο καρπός της ντομάτας, στη περιοχή του terminal (κάτω από την παράθυρο της κάμερας), εμφανίζεται το ποσοστό βεβαιότητας (Confidence) για την εντοπισμένη ντομάτα, η απόσταση αυτής από τη κάμερα (Depth Value) και ο υπολογισμός της θέσης του καρπού ντομάτας στο χώρο ως προς το πλαίσιο του εργαλείου (TCP Point).

Αλγόριθμος προσέγγισης καρπών ντομάτας

Ο αλγόριθμος για τη προσέγγιση των καρπών ντομάτας περιγράφει το κυρίως κώδικα μέσω του οποίου εκτελέστηκαν όλα τα πειράματα. Ο κώδικας αυτός λειτουργεί σύμφωνα με το διάγραμμα ροής στην Εικόνα 9-37.

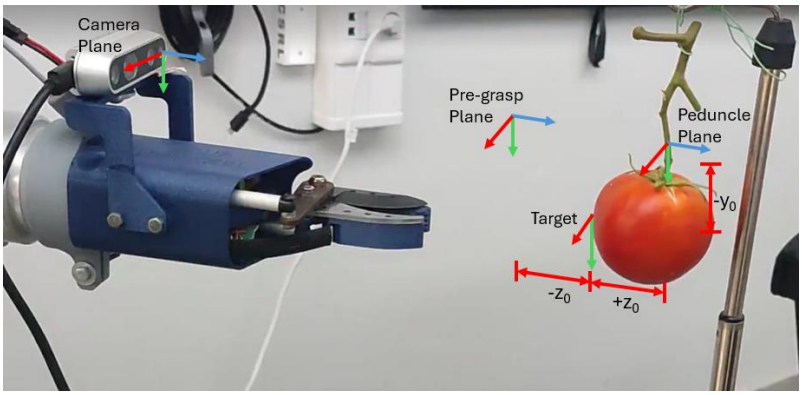
Αρχικά στο κώδικα εισάγονται όλες οι απαραίτητες βιβλιοθήκες και modules για την εκτέλεση του προγράμματος η οποία περιλαμβάνει, το module για τον εντοπισμό των καρπών ντομάτας που περιγράφεται στην αρχή αυτή της παραγράφου, τη βιβλιοθήκη Numpy για την εκτέλεση αριθμητικών πράξεων, τη pyserial για τη σειριακή επικοινωνία της python με την αρπάγη, τη time για την εισαγωγή χρονικών καθυστερήσεων όπου αυτό χρειάζεται και τη βιβλιοθήκη ur_rtde για τον έλεγχο του ρομποτικού βραχίονα UR.

Έπειτα ορίζονται οι παράμετροι κίνησης του ρομπότ και δημιουργούνται και οι διεπαφές επικοινωνίας με το ρομπότ και η αρχικοποίηση της σειριακής επικοινωνίας. Μετά υπολογίζεται ο Ο.Μ. του πλαισίου {TCP} στο πλαίσιο της βάσης του ρομπότ για την αρχική πόζα. Αμέσως μετά εντοπίζεται και υπολογίζεται η θέση του καρπού ως προς πλαίσιο {TCP}, μέσα από module για τον εντοπισμό και τον υπολογισμό της θέσης του καρπού της ντομάτας που περιγράφεται στην αρχή αυτής της παραγράφου. Στη συνέχεια συσχετίζεται η θέση του καρπού της ντομάτας με τη βάση του ρομποτικού βραχίονα με τη χρήση Ο.Μ. Ακολουθεί η προσέγγιση του καρπού και η συλλογή του από το κοτσάνι ενώ μετά απομακρύνεται μακριά από το σημείο συγκομιδής. Τέλος ο βραχίονας επιστρέφει στην αρχική του πόζα.



Εικόνα 9-37 *Διάγραμμα ροής κυρίως κώδικα για την εκτέλεση των πειραμάτων εντοπισμού, προσέγγισης και συλλογής καρπών ντομάτας.*

Στην Εικόνα 9-38, παρουσιάζεται η τροποποίηση του σημείου που εντοπίζεται πάνω στη ντομάτα {Target} από τη κάμερα, ώστε αυτό να περιγράφει τη θέση πάνω στο κοτσάνι {peduncle plane}. Για καλύτερη προσέγγιση του κοτσανιού δημιουργείται ένα επιπλέον πλαίσιο κατά τη κίνηση προσέγγισης του κοτσανιού {pre-grasp plane}



Εικόνα 9-38 *Υπολογισμός pre- grasp και peduncle point από το σημείο που υπολογίζεται από τη κάμερα βάθους.*

Αφού υπολογιστούν τα σημεία **pre-grasp plane** και **peduncle plane** ο βραχίονας προσεγγίζει διαδοχικά τα δύο σημεία. Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι για τα πειράματα προσέγγισης του καρπού αυτά εκτελούνται πάνω στον ίδιο κώδικα με παράληψη των βημάτων που αφορούν το άνοιγμα και κλείσιμο των μηχανισμών κοπής και συγκράτησης αλλά και το μέρος του κώδικα που εκτελείται η διαδικασία απομάκρυνσης του καρπού από το σημείο συγκομιδής.

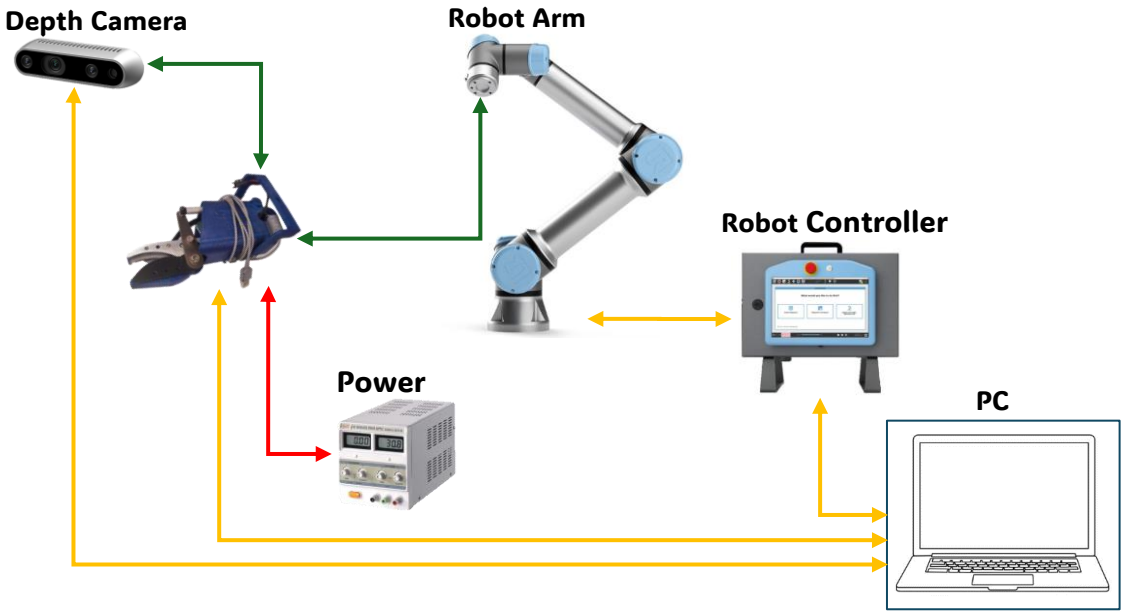
10. Πειραματική αποτίμηση του ρομποτικού συστήματος συγκομιδής

Για να αξιολογηθούν οι δυνατότητες της νέας μηχατρονικής αρπάγης, είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθεί η πειραματική αποτίμηση της. Δηλαδή να δημιουργηθεί το πειραματικό πλαίσιο, για την ανάλυση των δυνατοτήτων της αρπάγης. Αυτό θα πραγματοποιηθεί μέσα από πειράματα σε πραγματικό φυτό και συγκεκριμένα καρπών ντομάτας όπως έχει ήδη αναφερθεί στο χώρο του εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου και Ρομποτικής του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου.

10.1. Πειραματική διάταξη

Για τη πραγματοποίηση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε μία κατάλληλη πειραματική διάταξη τα μέρη της οποίας παρουσιάζονται στην Εικόνα 10-1**.** Η διάταξη περιλαμβάνει ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή, το ρομποτικό βραχίονα UR με τον ελεγκτή του, τη νέα αρπάγη και την κάμερα βάθους της Intel που παρουσιάστηκε στην αρχή της Παραγράφου 9.5.1.

Η αρπάγη τοποθετήθηκε στο ρομποτικό βραχίονα UR5e με κατάλληλη βάση προσαρμογής στη φλάντζα του ρομποτικού βραχίονα. Τη κίνηση του ρομποτικού βραχίονα αναλαμβάνει ο ελεγκτής του με βάση τα δεδομένα που δέχεται από τον υπολογιστή. Η σύνδεση του ηλεκτρονικού υπολογιστή και του ελεγκτή του ρομποτικού βραχίονα για την ανταλλαγή δεδομένων γίνεται ενσύρματα μέσω καλωδίου UTP.



Εικόνα 10-1 *Αρχιτεκτονική πειραματικής διάταξης για την αποτίμηση των δυνατοτήτων της αρπάγης, με ανάδειξη της ανταλλαγής δεδομένων (πορτοκαλί βέλος) μεταξύ υποσυστημάτων, τη εξωτερική τροφοδοσία συσκευής (κόκκινο βέλος), και την σύνδεση με μηχανικό τρόπο μεταξύ υποσυστημάτων (πράσινο βέλος)*

Οι πληροφορίες θέσης που πρόκειται να κινηθεί ο βραχίονας προκύπτουν από τη κάμερα που είναι τοποθετημένη πάνω στη αρπάγη, ενώ η σύνδεση της κάμερας βάθους με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή γίνεται ενσύρματα μέσω καλωδίου USB3.

Τέλος η σύνδεση της αρπάγης με τον υπολογιστή με σκοπό τον έλεγχο των μηχανισμών κοπής και συγκράτησης γίνεται ενσύρματα μέσω καλωδίου USB2, ενώ η παροχή ενέργειας σε αυτή γίνεται με εξωτερική τροφοδοσία από τροφοδοτικό συνεχής τάσης του εργαστηρίου.

10.2. Πρωτόκολλο πειραμάτων

Με σκοπό την αξιολόγηση των δυνατοτήτων της αρπάγης και του ρομποτικού συστήματος στο οποίο εντάχθηκε θα ακολουθήσουν στη συνέχεια κάποια πειράματα. Τα πειράματα αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Πειράματα προσέγγισης
- Πειράματα συγκομιδής

Για τις δύο περιπτώσεις των πειραμάτων πρόκειται να τοποθετηθούν τυχαία στο χώρο ώριμοι καρποί ντομάτας. Για τα πειράματα προσέγγισης η διαδικασία περιλαμβάνει:

1. Εντοπισμό της θέσης του καρπού στο χώρο (Εικόνα 10-2, αριστερά).
2. Προσέγγιση της θέση που βρίσκεται το κοτσάνι με την αρπάγη μέσω του βραχίονα (Εικόνα 10-2, δεξιά).
3. Επιστροφή του ρομποτικού βραχίονα στην αρχική θέση (Εικόνα 10-2, αριστερά).

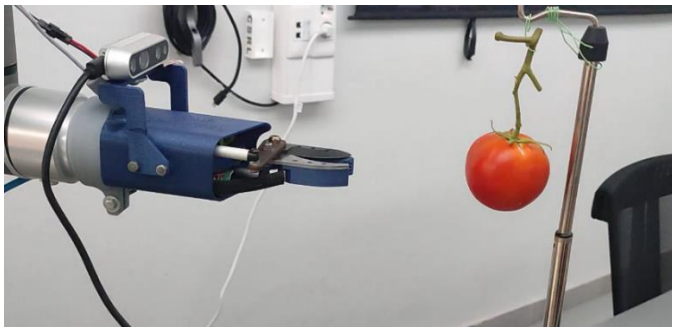


Εικόνα 10-2 *Σύνοψη πειραματικής διαδικασίας προσέγγισης καρπών ντομάτας.*

Σκοπός των πειραμάτων προσέγγισης είναι να αξιολογηθούν οι δυνατότητες της μηχανικής όρασης στον εντοπισμό καρπών ντομάτας στο χώρο και τον υπολογισμό της ακριβής θέσης τους.

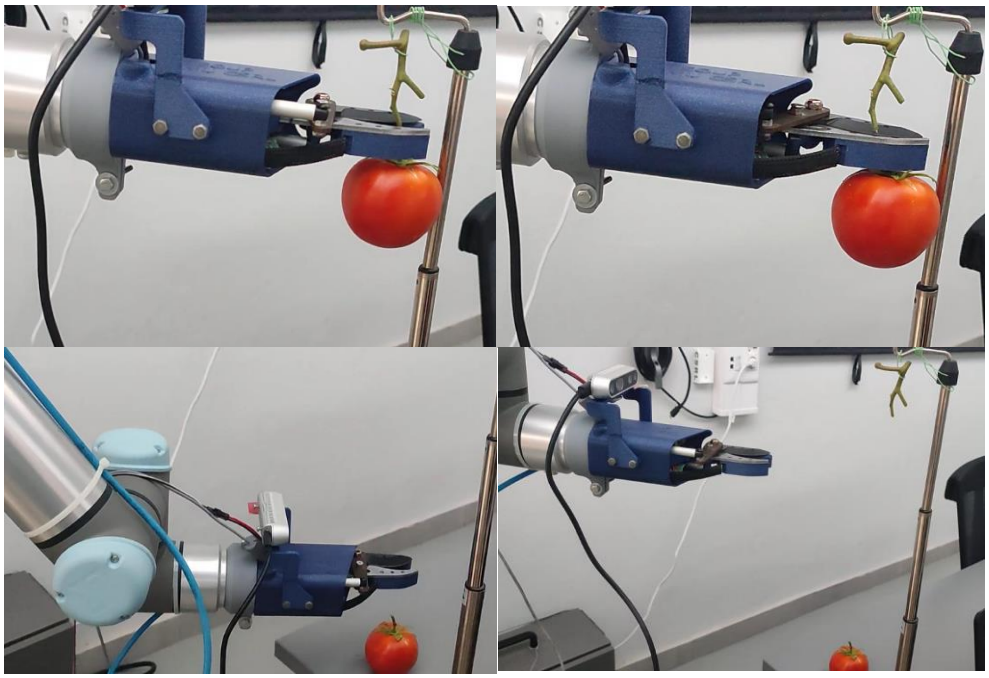
Έπειτα για τα πειράματα συγκομιδής η διαδικασία περιλαμβάνει:

1. Εντοπισμό της θέσης του καρπού στο χώρο δηλαδή ο βραχίονας βρίσκεται σε στάση αναμονής περιμένοντας να εντοπιστεί κάποια ντομάτα μέσα από τη μηχανική όραση (Εικόνα 10-3).



Εικόνα 10-3 *Αρχική στάση του βραχίονα αναμένοντας το εντοπισμό καρπών ντομάτας.*

2. Προσέγγιση της θέση που βρίσκεται το κοτσάνι με την αρπάγη μέσω του βραχίονα (Εικόνα 10-4, πάνω αριστερά).
3. Συγκράτηση του καρπού και κοπή του κοτσανιού από το οποίο είναι αναρτημένο (Εικόνα 10-4, πάνω δεξιά).
4. Απομάκρυνση του καρπού από το σημείο που έχει συλλεχθεί και εναπόθεση σε κάποιο ασφαλές σημείο (Εικόνα 10-4, κάτω αριστερά).
5. Επιστροφή του ρομποτικού βραχίονα στην αρχική θέση (Εικόνα 10-4, κάτω δεξιά).



Εικόνα 10-4 Σύνοψη πειραματικής διαδικασίας συλλογής καρπών.

Σκοπός των πειραμάτων συγκομιδής είναι η συνολική αξιολόγηση του ρομποτικού συστήματος και της αρπάγης σε διαδικασίες εντοπισμού, προσέγγισης και συλλογής καρπών ντομάτας.

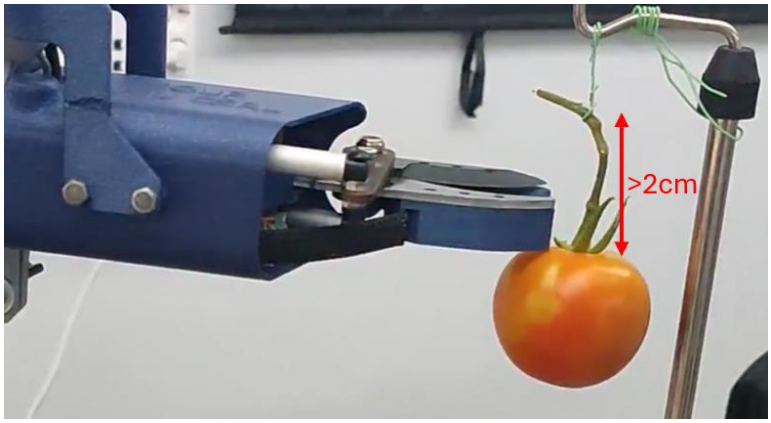
10.2.1. Παραδοχές

Για την υλοποίηση των πειραμάτων χρειάστηκε να γίνουν κάποιες παραδοχές με σκοπό την απλοποίηση του πραγματικού προβλήματος που είναι η συλλογής καρπών ντομάτας. Γενικά σκοπός των παραδοχών σε ένα πρόβλημα είναι η αντιμετώπιση αρχικά ενός εξιδανικευμένου προβλήματος με σκοπό την αξιολόγηση των τεχνικών που χρησιμοποιούνται αλλά και των αποτελεσμάτων αυτών. Στη συνέχεια αφού αξιολογηθούν θετικά οι τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν, το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση ώστε να αντικατοπτρίζει καλύτερα το πραγματικό πρόβλημα. Έτσι με αυτό το τρόπο μπορεί να πολύπλοκο πρόβλημα να αντιμετωπιστεί σταδιακά μέχρι τη τελική λύση του.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής οι παραδοχές που χρησιμοποιήθηκαν αναλύονται στη συνέχεια:

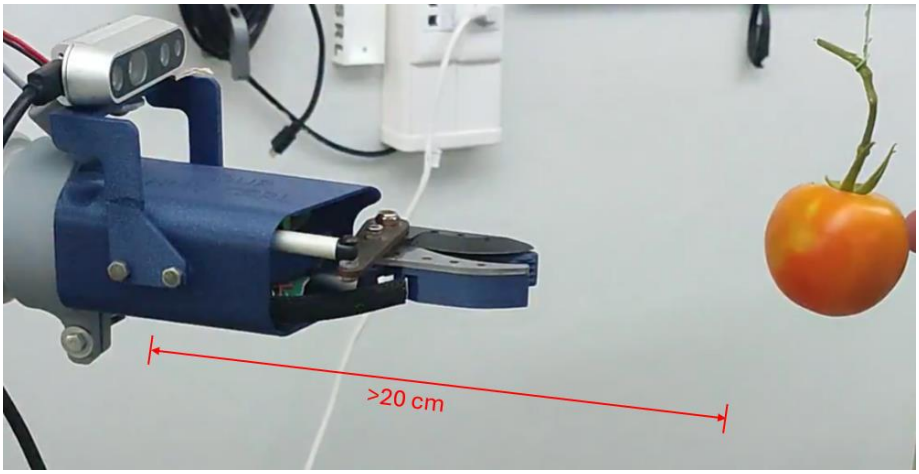
- Ως προς τον εντοπισμό καρπών με τη κάμερα βάθους επιλέχθηκε το σκηνικό να περιλαμβάνει ένα μόνο καρπό ντομάτας. Η παραδοχή αυτή απλοποιεί την υπολογιστική διαδικασία του προβλήματος καθώς δεν απαιτείται υπολογισμός θέσης για τους επιπλέον καρπούς ντομάτας και δεν απαιτείται επιπλέον διαδικασία επιλογής του καρπού για προσέγγιση.

- Οι καρποί που εμφανίζονται στο σκηνικό χαρακτηρίζονται από κοτσάνι μήκους μεγαλύτερο των 2cm και κάθετο προσανατολισμό (Εικόνα 10-2) με αποτέλεσμα να είναι σε θέση η αρπάγη να εισχωρεί σε αυτό και να τους συλλέγει με ευκολία.



Εικόνα 10-5 Χαρακτηριστικό μήκος για τον κοτσάνι των καρπών ντομάτας.

- Ως προς την ωριμότητα των καρπών οι ντομάτες που εμφανίζονται χαρακτηρίζονται από σχεδόν ώριμες και ώριμες για να διευκολύνεται η διαδικασία του εντοπισμού από το νευρωνικό δύκτιο.
- Λόγο της ευκρίνειας της κάμερας όλες οι ντομάτες στο σκηνικό πρέπει να βρίσκονται τουλάχιστον 20 cm από τη κάμερα. Αυτός ο περιορισμός οφείλεται καθαρά στη κάμερα καθώς οι ντομάτες που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από 17cm είναι αδύνατο λόγω ευκρίνεια να υπολογιστεί η θέση τους (βλ. Πίνακα 9-3).



***Εικόνα 10-6** Χαρακτηριστική ελάχιστη απόσταση της ντομάτας από τη κάμερα.*

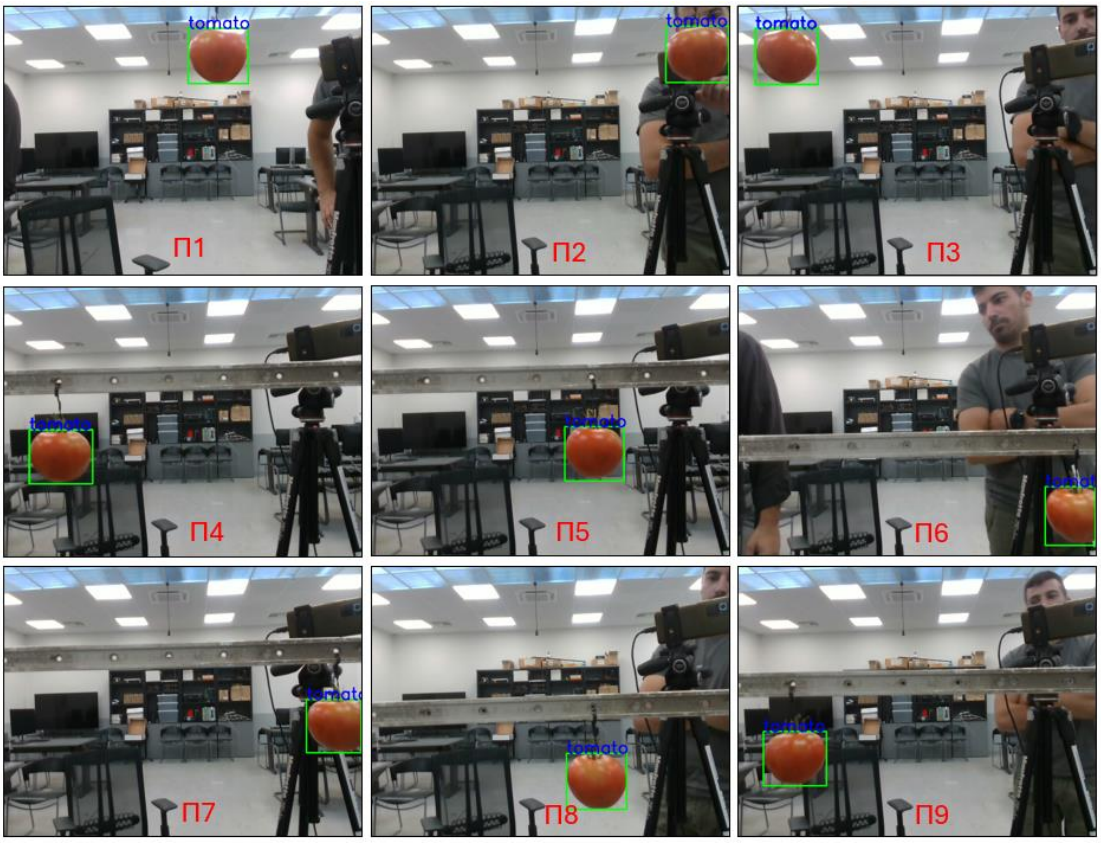
- Μία πολύ σημαντική παραδοχή είναι ότι η θέση της ντομάτας είναι πάντα τοποθετημένη τυχαία μέσα στο σκηνικό. Αυτό σημαίνει ότι η διαδικασία εντοπισμού του καρπού εξελίσσεται ενώ ο βραχίονας είναι ακίνητος άρα και το σκηνικό σταθερό.

10.3. Πειράματα

Για τα πειράματα συγκομιδής και προσέγγισης αυτά περιλαμβάνουν τη τοποθέτηση καρπών ντομάτας τυχαία στο χώρο και την εκτέλεση τους με βάση το πρωτόκολλο που αναφέρθηκε στην παράγραφο 10-2. Για κάθε πείραμα συλλέχθηκαν δεδομένα που έχουν να κάνουν με την υπολογιζόμενη θέση της ντομάτας στο χώρο ως προς το εργαλείο και εικόνες από τη κάμερα βάθους για τις ντομάτες που εντοπίζονται.

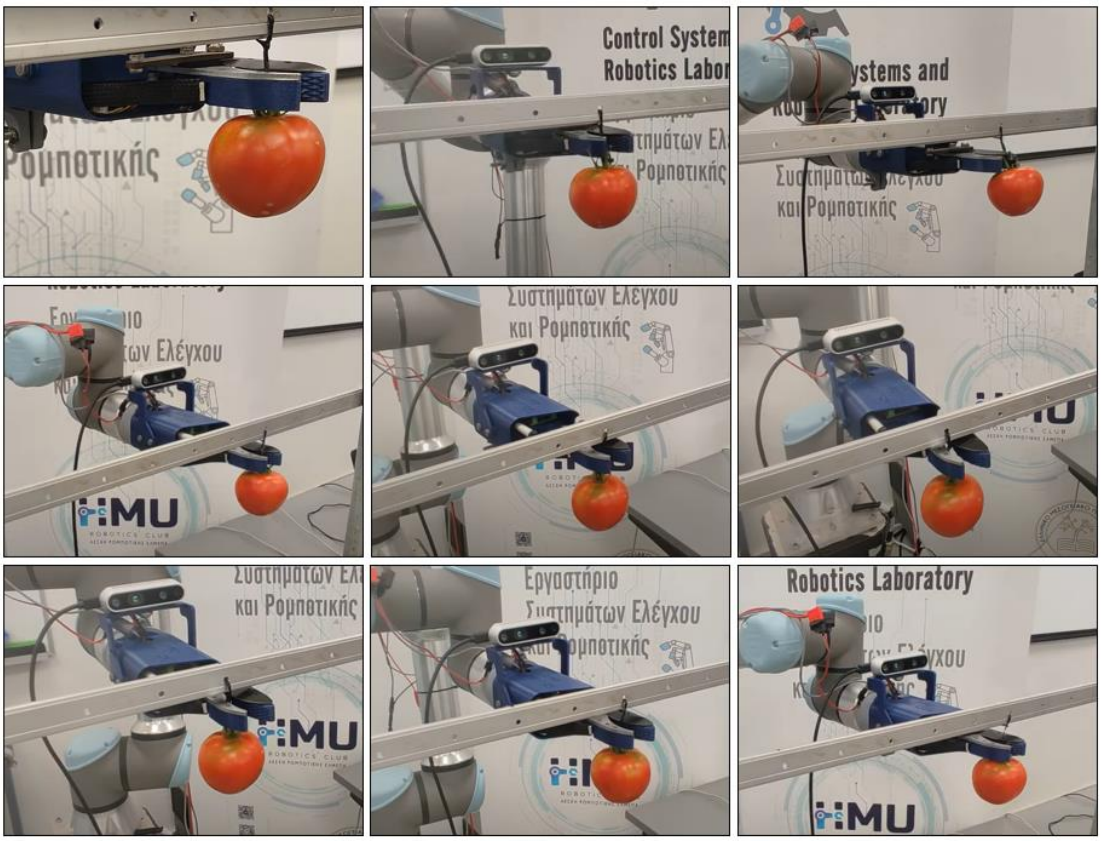
10.3.1. Πειράματα προσέγγισης

Για τα πειράματα προσέγγισης τοποθετήθηκαν τυχαία στο χώρο εννέα καρποί ντομάτας εξετάζοντας τις ικανότητες προσέγγισης των καρπών από το ρομποτικό βραχίονα. Οι ντομάτες που εξετάστηκαν παρουσιάζονται στην Εικόνα 10-7 με τη σειρά που έγιναν τα πειράματα.



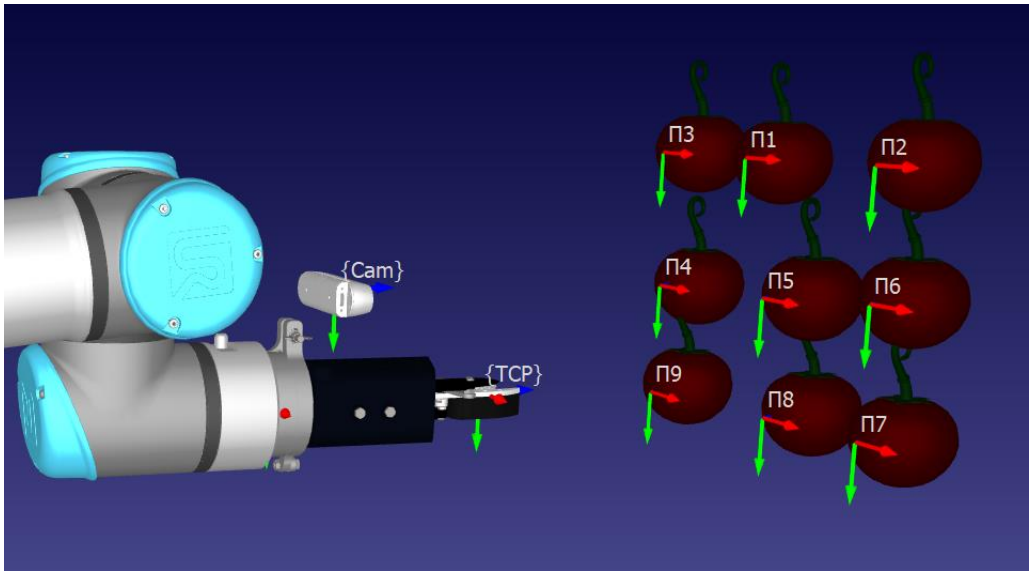
Εικόνα 10-7 *Στιγμιότυπα από της ντομάτες που εντοπίστηκαν για τα πειράματα προσέγγισης.*

Για τις εντοπισμένες ντομάτες της Εικόνα 10-7 στη συνέχεια παρουσιάζονται εικόνες από τις προσεγγίσεις της αρπάγης πάνω στους μίσχους των καρπών. Οι εικόνες για τις προσεγγίσεις που παρουσιάζονται στην Εικόνα 10-7 εμφανίζονται με την ίδια ακολουθία που εμφανίζονται και στην Εικόνα 10-8 για κάθε ντομάτα που εντοπίζεται.



Εικόνα 10-8 *Στιγμιότυπα προσεγγίσεων των μίσχων της ντομάτας για τις εντοπισμένες ντομάτες.*

Για να γίνει καλύτερα κατανοητή της τυχαίας τοποθέτησης των καρπών της ντομάτας στο χώρο στη συνέχεια παρουσιάζεται μία ψηφιακή αναπαράσταση του βραχίονα με την αρπάγη σε σχέση με τις θέσης των καρπών της ντομάτας.



Εικόνα 10-9 *Ψηφιακή αναπαράσταση των θέσεων των καρπών ντομάτας στο χώρο σε σχέση με το βραχίονα.*

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα από τα πειράματα για τη προσέγγιση καρπών ντομάτας, αυτά παρουσιάζονται στο Πίνακας 10-1.

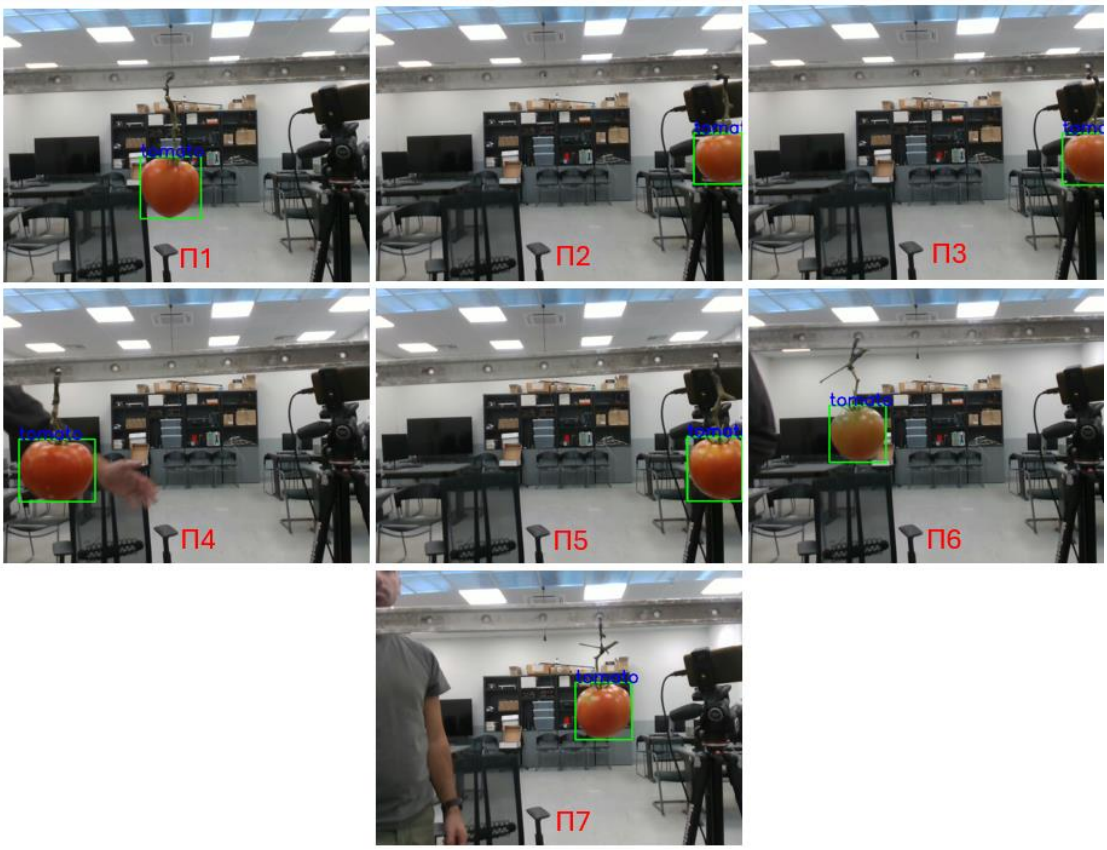
Πίνακας 10-1 *Αποτελέσματα πειραμάτων για τις διαδικασίες εντοπισμού και προσέγγισης καρπών ντομάτας.*

Πειράματα προσέγγισης		
	Εντοπισμός	Προσέγγιση
Πείραμα 1	✓	✓
Πείραμα 2	✓	✓
Πείραμα 3	✓	✗
Πείραμα 4	✓	✓
Πείραμα 5	✓	✓
Πείραμα 6	✓	✓
Πείραμα 7	✓	✓
Πείραμα 8	✓	✓
Πείραμα 9	✓	✓
Ποσοστό επιτυχίας	100%	88,8%

Όπως φαίνεται και από το Πίνακα 10-1 για τα πειράματα προσέγγισης οι διαδικασίες εντοπισμού των καρπών της ντομάτας στο σκηνικό σημείωσαν ποσοστό επιτυχίας 100%, γεγονός που οφείλεται στην επαρκή εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου. Για τη διαδικασία προσέγγισης αυτή παρουσίασε ποσοστό επιτυχίας 88,8% χάρη σε μία αποτυχία στο Πείραμα 3 όπου η αρπάγη συγκρούστηκε με το καρπό, με αποτέλεσμα τη μη επιτυχή προσέγγιση του μίσχου. Το γεγονός αυτό εκτιμάται ότι πιθανόν να οφείλεται στη μη επαρκή διαχείριση των δεδομένων που προκύπτουν από τη κάμερα, ή στη μη ικανοποιητική αποτελεσματικότητα της μεθόδου τροποποίησης του σημείου που εντοπίζει η κάμερα σε σημείο πάνω στο μίσχο του καρπού.

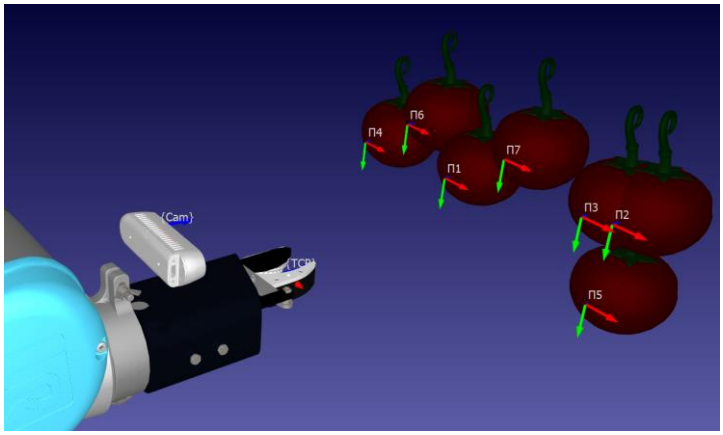
10.3.2. Πειράματα συγκομιδής

Για τα πειράματα προσέγγισης τοποθετήθηκαν τυχαία στο χώρο εφτά ντομάτες για να εξετασθεί η ικανότητα εντοπισμού προσέγγισης και συλλογής των καρπών. Έτσι για τα πειράματα σε καρπούς ντομάτας που πραγματοποιήθηκαν για το σκοπό αυτό αρχικά έγινε ο εντοπισμός τους μέσα από τη κάμερα βάθους όπως αυτά φαίνονται στην Εικόνα 10-10.

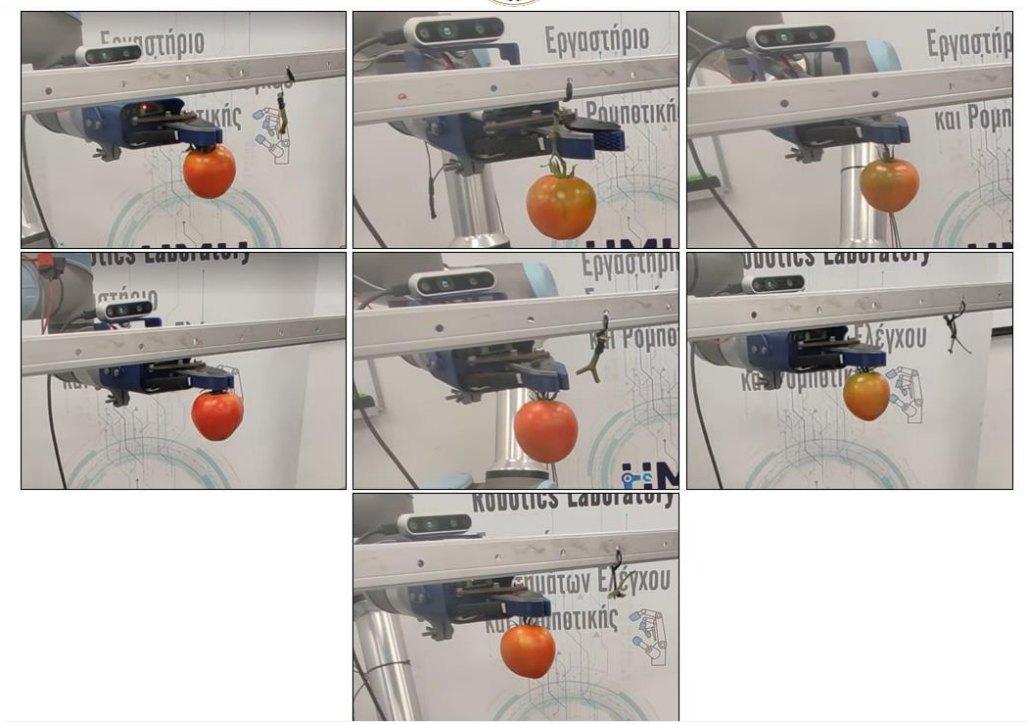


Εικόνα 10-10 *Στιγμιότυπα από τις ντομάτες που εντοπίστηκαν για τα πειράματα συγκομιδής.*

Όπως στα πειράματα προσέγγισης έτσι και στα πειράματα συγκομιδής για την καλύτερη κατανόηση της τυχαίας θέσης των καρπών στο χώρο σε σχέση με το ρομποτικό βραχίονα παρουσιάζεται στη συνέχεια μία ψηφιακή αναπαράσταση αυτών στην Εικόνα 10-11.



Εικόνα 10-11 *Ψηφιακή αναπαράσταση των τυχαίων θέσεων των καρπών ως προς το βραχίονα.*



Εικόνα 10-12 *Στιγμιότυπα από τα πειράματα συγκομιδής κατά τη διαδικασία των πειραμάτων.*

Στα πειράματα συγκομιδής το δεύτερο πείραμα χαρακτηρίστηκε από αποτυχία καθώς το ρομπότ απέτυχε να προσεγγίσει την ντομάτα, παρά τον επιτυχή εντοπισμό της. Το αποτέλεσμα της αποτυχίας οφείλεται στο γεγονός ότι το κοτσάνι παρουσίαζε καμπυλότητα με αποτέλεσμα το θεωρητικό σημείο που υπολογίστηκε με βάση την Εικόνα 9-38 να αποκλίνει από τη πραγματικότητα. Στη συνέχεια τροποποιήθηκε ο προσανατολισμός της ντομάτας στο Πείραμα 3 με αποτέλεσμα την επιτυχή συγκομιδή του καρπού. Τα αποτελέσματα από τα πειράματα συγκομιδής συνοψίζονται στο Πίνακας 10-2 που παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Πίνακας 10-2 *Αποτελέσματα πειραμάτων για τις διαδικασίες εντοπισμού και προσέγγισης καρπών ντομάτας και συγκομιδής.*

Πειράματα συγκομιδής		
	Εντοπισμός	Συγκομιδή
Πείραμα 1	✓	✓
Πείραμα 2	✓	
Πείραμα 3	✓	✓
Πείραμα 4	✓	✓
Πείραμα 5	✓	✓
Πείραμα 6	✓	✓
Πείραμα 7	✓	✓
Ποσοστό επιτυχίας	100%	85,7%

Για τα πειράματα συγκομιδής υπολογίστηκαν δύο είδη ποσοστών επιτυχίας, το πρώτο αφορά των εντοπισμό των καρπών ντομάτας και το δεύτερο τη συγκομιδή. Το ποσοστό καρπών ντομάτας που εντοπίστηκαν αντιπροσωπεύει τις ντομάτες που εντοπίστηκαν με επιτυχίας στο σύνολο των πειραμάτων, ενώ το ποσοστό συγκομιδής αντιπροσωπεύει τους καρπούς ντομάτας που συλλέχθηκαν με επιτυχία.

10.4. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική ερεύνα

Με την πειραματική αποτίμηση της αρπάγης που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα.

- Η αρπάγη παρουσίασε βελτιωμένες ικανότητες για τους μηχανισμούς κοπής και συγκράτησης σε σύγκριση με το αρχικό πρωτότυπο, με έντονη διαφορά να παρατηρείται στις περιπτώσεις κοπής στο μέσων και εσωτερικό τμήμα της λεπίδας.
- Η ικανότητα αναγνώρισης καρπών στο σκηνικό μέσω του νευρωνικού δυκτίου δεν ήταν η καλύτερη δυνατή και για αυτό το λόγο το η προσπάθεια εντοπισμού του καρπού απαίτησε τη χρήση βρόγχου για την επανάληψη της διαδικασίας έως τον επιτυχή εντοπισμό του.
- Ο μηχανισμός κοπής σε κάποιες περιπτώσεις δεν εμφάνιζε καθαρή κοπή στο κοτσάνι με αποτέλεσμα η απόσπαση του καρπού να επιτυγχάνεται με τράβηγμα κατά την απομάκρυνση του από τη θέση συγκομιδής, πράγμα που επιβάλει επιπλέον βελτίωση στην επαφή της λεπίδα κοπής με τη λάμα στήριξης των μηχανισμών κοπής και συγκράτησης.

Προτάσεις για μελλοντική έρευνα:

- Με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων για τους μηχανισμούς κοπής και συγκράτησης προτείνεται η χρήση πνευματικών επενεργητών οι οποίοι θα μπορούσαν να βελτιώσουν επιπλέον τις δυνατότητες των μηχανισμών κοπής και συγκράτησης για πιο σκληρούς ιστούς και καρπούς μεγαλύτερου βάρους καθώς επίσης και να απλοποιήσουν το ρομποτικό σύστημα καθώς ο έλεγχος μίας πνευματικής αρπάγης μπορεί να γίνει μέσα από τον ελεγκτή του ρομποτικού βραχίονα και τη βιβλιθήκη RTDE.
- Εξέλιξη της υπολογιστικής διαδικασίας ώστε στο σκηνικό να είναι δυνατή η εμφάνιση περισσότερων καρπών ντομάτας αλλά και η κατάλληλη τοποθέτηση της αρπάγης με σκοπό τη προσέγγιση αυτών από το ρομπότ.
- Εκπαίδευση του νευρωνικού δυκτίου στον εντοπισμό του κοτσανιού της ντομάτας με σκοπό την αποφυγή των τροποποιήσεων του σημείου πάνω στη ντομάτα όπως αυτοί περιγράφονται στη Εικόνα 9-38.
- Επίσης προτείνεται η εκπόνηση πειραμάτων σε πιο ρεαλιστικές συνθήκες όπως μεταβαλλόμενο φωτισμό, η ύπαρξη επισκιάσεων πάνω στους καρπού, τη τοποθέτηση των καρπών με διαφορετικό προσανατολισμό και απόσταση από τη κάμερα, την επικάλυψη τους με σκόνη, ακόμα και περιπτώσεις με χαμηλή αντίθεση του καρπού σε σχέση με το φόντο του ώστε να μελετηθεί η ακρίβεια του της μηχανικής όρασης του συστήματος.

Βιβλιογραφία

[1] Ρομπότ συλλογής καρπών τομάτας της MetoMotion,
[2] Ρομπότ συλλογής καρπών τομάτας από την Panasonic.
[3] Ρομπότ συλλογής καρπών πιπεριάς Sweeper.
[4] Ρομπότ συλλογής καρπών φράουλας από την Agrobot.
[5] Ρομπότ κλαδέματος αμπελιών.
[6] Σημειώσεις εργαστήριου, Μηχατρονικών συστημάτων, ΤΕΙ Κρήτης, Τμήμα Μηχανολόγων μηχανικών, Δρ. Φασουλάς Γιάννης.
[7] Πτυχιακή εργασία Εμμανουήλ Παπαδάκη, Σχεδιασμός και κατασκευή εξωσκελετικού νάρθηκα για την υποβοήθηση ατόμων με μερική αναπηρία στα χέρια,
[8] Πτυχιακή εργασία Καλαντζής Σ. Σπυρίδων, Σχεδιασμός, κατασκευή και έλεγχος μικρής ρομποτικής πλατφόρμας “Stewart”.
[9] Πτυχιακή εργασίας Καουκάκης Γεωργιος, Βελτίωση σχεδιασμού και κατασκευής μηχανικών μερών για ρομποτικό σκάφος.
[10] Grasping in agriculture: State of the art- Main characteristics, F. Rodriguez, J. C. Moreno, J. A. Sanchez and M. Berenguel.
[11] Διπλωματική εργασία, Ευσταθόπουλος Νικος, Ανάπτυξη Συστήματος Ανάλυσης Εικόνας Βασιζόμενο σε Μηχανική Μάθηση για Εφαρμογές σε Θερμοκηπιακές Καλλιέργειες Τομάτας
[12] Πτυχιακή εργασία, Καλαιτζάκης Σωτήρης Βενιζέλος, Ανακατασκευή, Πειραματική αποτίμηση και κινηματική ανάλυση ανθρωπόμορφου ρομποτικού χεριού.
[13] Xinsheng B., Weijiang M., Jin Z., Study on the relationship between fruit- stem separation force and fruit shape of processing tomato, 2014.
[14] YOLO. A deep dive into its advanced functions and new features, Medium.com, 2023,
[15] Object detection with a pre- trained Ultralitics YOLOv8 model, Ultralitics.com, 2024.
[16] RealPython: Arduino with python how to get started.
[17] Ανάπτυξη εφαρμογών με το Arduino: Ένας πλήρης οδηγός για τον Arduino, Παναγιώτης Παπάζογλου, 2021.
[18] Ρομποτική, Κινηματική, Δυναμική και έλεγχος αρθρωτών βραχιόνων, Ζωή Δουλγέρη, Έκδοση 1η, 2007.
[19] Εισαγωγή στη ρομποτική: Μηχανική και αυτόματος έλεγχος, John J. Graig, Έκδοση 4η, 2020.
[20] Intel RealSense D400 Series Datasheet
[21] Feng, Q.; Wang, X.; Wang, G.; Li, Z, “Design and test of tomatoes harvesting robot”, 2015.
[22] Universal Robots, Real Time Data Exchange (RTDE) guide.
[23] GitLab, Universal Robots RTDE C++ Interface.
[24] Nikolaos Kounalakis, Emmanouil Kalykakis, Manos Pettas, Alexandros Makris, Manolis M. Kavoussanos, Michael Sfakiotakis and John Fasoulas “Development of a Tomato Harvesting Robot: Peduncle Recognition and Approaching”
[25] Nikolaos Kounalakis, Emmanouil Kalykakis, Dimitrios Kosmopoulos, John Fasoulas, Michael Sfakiotakis “A Framework Leveraging Robotics and Machine Learning Technologies for Early Disease and Pest Detection in Greenhouse Tomato Crops”, 2023.