# Θεωρητικό Υπόβαθρο

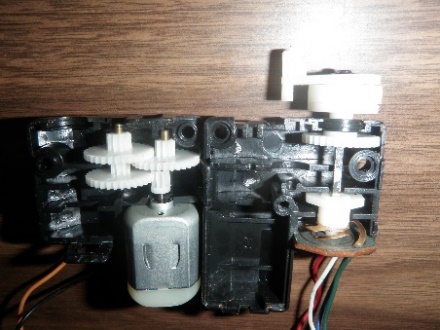
## Μοτέρ Servo

### Αρνητική Ανάδραση

Ένα servo, ή σερβο-μηχανισμός είναι ένα σύστημα το οποίο λειτουργεί με βάση την αρχή της αρνητικής ανάδρασης η οποία προσπαθεί, μέσω κάποιας ενέργειας, να αναγκάζει την έξοδο του συστήματος, να ακολουθεί την είσοδο [1].

### Δομή

To μοτέρ servo, είναι ένα ηλεκτρικό μοτέρ το οποίο στην πιο βασική του μορφή αποτελείται από τα εξής μέρη [2]:



Εικόνα 1‑1 Το εσωτερικό ενός servo motor.

* Γρανάζι κινητήρα
* Κινητήρας DTC
* Κύκλωμα ελέγχου
* Ποτενσιόμετρο
* Άξονας εξόδου

Μπορούμε να συνδέσουμε εξαρτήματα επάνω στον άξονα εξόδου προκειμένου να τα θέσουμε σε περιστροφική κίνηση.

### Λειτουργία

Το κύκλωμα ελέγχου είναι υπεύθυνο για την περιστροφή του κινητήρα DTC μέσω ενός σήματος ελέγχου. Έτσι κάθε σήμα αντιστοιχεί σε μία επιθυμητή γωνιακή μετατόπισητου κινητήρα. Ο κινητήρας με την σειρά του περιστρέφει τον άξονα εξόδου μέσω του γραναζιού με σκοπό να τον περιστρέψει. Όσο μεγαλύτερο είναι το γρανάζι τόσο αυξάνεται η ροπή του τελικού άξονα. Το ποτενσιόμετρο παράγει ένα σήμα ανατροφοδότησης το οποίο αντιπροσωπεύει την πραγματική γωνιακή μετατόπιση του άξονα. Τέλος, συγκρίνοντας την πραγματική με την επιθυμητή γωνιακή μετατόπιση, πραγματοποιείται αρνητική ανάδραση, η οποία αποσβένει το σφάλμα

### Μοντέλο PWM

Μία συχνή μέθοδος ελέγχου των μοτέρ servo είναι η χρήση του μοντέλου PWM (Pulse-Width-Modulation) όπου σύμφωνα με αυτό κάθε χρονικό διάστημα ένας παλμός πλάτους τροφοδοτείται στο μοτέρ [2]. Θα ξεκινήσουμε την πιο αναλυτική περιγραφή του μοντέλου ορίζοντας κάποιες ποσότητες.

Ορίζουμε τον Duty Cycle () από την σχέση:

Η γωνιακή συχνότητα ενός κύκλου PWM ορίζεται ως:

Το servo-μοτέρ είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να υποστηρίζει παλμούς με πλάτος μεταξύ μίας ελάχιστης και μέγιστης τιμής και αντίστοιχα. Αν τροφοδοτηθεί με ένα σήμα το οποίο έχει πλάτος εντός αυτών των ορίων, ο άξονας εξόδου θα αποκτήσει ανάλογη περιστροφή.

Η τιμή του είναι μεταβλητή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κατασκευαστεί ένας υποστηριζόμενο παλμός πλάτους ως ο οποίος θα δίνεται από την σχέση:

Το μοτέρ καταλήγει να αποκτά περιστροφή ίση με:

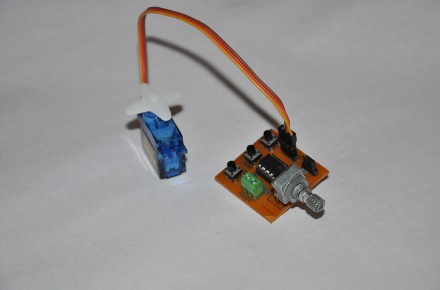
Όπου η ελάχιστη και μέγιστη περιστροφή που υποστηρίζει το servo. Αυτές καθορίζονται από τα και αντίστοιχα.

Συνοπτικά, εάν η επιθυμητή γωνία περιστροφής του servo είναι , τότε πρώτα βρίσκουμε τον D από την σχέση:

και ύστερα υπολογίζουμε το αντίστοιχο πλάτος από την σχέση **(2.1)**. Τέλος τροφοδοτούμε στο μοτέρ ένα σήμα με παλμό πλάτους μέσω ενός μικροελεγκτή PWM.

### Μικροελεγκτής PWM

Οι μικροελεγκτές PWM τροφοδοτούν τα μοτέρ servo με το επιθυμητό σήμα PWM μέσω των καναλιών που διαθέτουν. Κάθε κανάλι αποτελείται από τρεις ακροδέκτες (pins) που βρίσκονται σε σειρά. Οι ακροδέκτες είναι υπεύθυνοι για να παρέχουν στο servo ένα από τα τρία απαραίτητα σήματα:



Εικόνα 1‑2 Ένας μικρός μικροελεγκτής PWM συνδεδεμένος με ένα μοτέρ servo.

1. Τάση λειτουργίας
2. Γείωση
3. Σήμα PWM

Οι μικροελεγκτές συνήθως συνδέονται με έναν υπολογιστή, ο οποίος καθορίζει την μορφή του σήματος PWM και το κανάλι στο οποίο θα σταλεί. Θεωρητικά, ο έλεγχος των servo θα μπορούσε να γίνει απευθείας από τον υπολογιστή. Ωστόσο, οι μικροελεγκτές PWM εμπεριέχουν ρυθμιστικά κυκλώματα τα οποία εξασφαλίζουν πως όλα τα μοτέρ δέχονται την σωστή τάση λειτουργίας και ακόμα παράγουν σήματα με λιγότερο θόρυβο.

## Raspberry Pi

### Τι είναι το Raspberry Pi;

Το raspberry pi, στην πιο απλή του μορφή, είναι ένας υπολογιστής μικρών διαστάσεων [3]. Με την πάροδο του χρόνου, αναπτύσσονται νέα μοντέλα Raspberry Pi, έτσι ώστε να μένουν ενημερωμένα με τις τελευταίες εξελίξεις της τεχνολογίας και του Hardware.



Εικόνα 1‑3 Raspberry Pi 4

Οι κύριες διαφορές μεταξύ του Raspberry Pi και ενός τυπικού, προσωπικού υπολογιστή (PC) εμφανίζονται τόσο στην ισχύ, όσο και στο κόστος. Οι συσκευές Raspberry Pi είναι σημαντικά πιο οικονομικές από ένα PC επειδή βασίζονται σε τεχνολογίες hardware κόστους και έχουν μειωμένη κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, δεν μπορούν να ανταποκριθούν στις ίδιες απαιτήσεις με έναν κοινό υπολογιστή και έτσι χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου δεν απαιτούνται υψηλές επιδόσεις όπως σε μικροελεγκτές, servers, έξυπνες συσκευές, ερασιτεχνικές δραστηριότητες και άλλα.

Το λειτουργικό σύστημα ενός υπολογιστή Raspberry Pi ονομάζεται Raspberry Pi OS και βασίζεται επάνω στο Linux/Debian [3]. Τέλος, έχει προ-εγκατεστημένη την γλώσσα προγραμματισμού “python” την οποία μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για να εγκαταστήσουμε εφαρμογές ή βιβλιοθήκες και να επικοινωνήσουμε με το hardware του του υπολογιστή ή με εξαρτήματα/συσκευές που είναι συνδεδεμένες μαζί του.

### Κεφαλή GPIO

To Raspberry Pi έχει μία κεφαλή GPIO (general-purpose input/output) με 40 ακροδέκτες (pins) οι οποίοι χρησιμοποιούνται για την αποστολή και παραλαβή σημάτων με συσκευές όπως αισθητήρες, μοτέρ, LED και άλλα. Κάθε ακροδέκτης μπορεί να ανήκει σε μία από αυτές τις κατηγορίες:

* 3.3V
* 5V
* Ground
* ID EEPROM
* GPIO
  + General Purpose Input
  + General Purpose Output
  + Ειδικές Επιλογές (Ορίζονται από τον αριθμό του Pin)
    - PWM
    - SPI
    - I2C
    - Serial

Οι κατηγορίες 3.3V, 5V και Ground υπάρχουν απλά για να παρέχουν τροφοδοσία 3.3V, 5V και 0V αντίστοιχα. Ο τύπος ID EEPROM αντιστοιχεί σε δύο pins τα οποία είναι υπεύθυνα για την αναγνώριση εξαρτημάτων ΗAT, αν και δεν είναι πάντα αναγκαία η χρήση τους.

Τέλος οι ακροδέκτες που ανήκουν σε μια από ειδικές επιλογές (PWM, SPI, I2C, SERIAL) χρησιμοποιούνται για την λήψη και αποστολή δεδομένων από και σε συσκευές μέσω των πρωτοκόλλων που αυτές υποστηρίζουν. Τα HATs (hardware attached on top) είναι απλά εξαρτήματα το οποία συνδέονται επάνω στην κεφαλή GPIO, καλύπτοντας κάποιους ή όλους τους ακροδέκτες της.

Το πρωτόκολλο I2C για παράδειγμα χρησιμοποιείται σε αυτή την εργασία για την επικοινωνία μεταξύ του Raspberry Pi και ενός HAT το οποίο λειτουργεί σαν μικροελεγκτής PWM. Για την ανταλλαγή πληροφοριών, υπεύθυνοι είναι οι ακροδέκτες SDA (GPIO 2) και SCL (GPIO 3). Ο ακροδέκτης SDA (Serial Data) μεταφέρει δεδομένα μεταξύ των συσκευών, ενώ ο SCL (Serial Clock) καθορίζει τον χρόνο αποστολής και ανάγνωσης δεδομένων από το Raspberry Pi και τις συνδεδεμένες συσκευές.



Εικόνα 1‑4 Διάγραμμα GPIO header pins για το Raspberry Pi.

## Ρομποτικοί Βραχίονες

### Η εξέλιξη των ρομπότ στην βιομηχανία

Η πρώτη παρέμβαση των ρομπότ στην βιομηχανία έγινε το 1954, όταν δύο μηχανικοί, ο George Devol και ο Joseph Engelberger ίδρυσαν την εταιρία «Unimation» [4]. Το 1961, η Unimation κατασκεύασε αυτό που θεωρείται σήμερα το πρώτο βιομηχανικό ρομπότ με όνομα «Unimate»[5]. To Unimate ήταν ένα ρομπότ υδραυλικής πίεσης, κάτι που το καθιστούσε κατάλληλο για εργασίες με μεγάλο φορτίο. Η επιτυχία του στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας οδήγησε αργότερα στην ίδρυση και άλλων εταιριών κατασκευής ρομπότ. Γενικά, Τα ρομπότ που χαρακτήριζαν εκείνη την δεκαετία χρησιμοποιούνταν κυρίως στην επεξεργασία υλικών και τις γραμμές παραγωγής. Ωστόσο, επειδή ο επαναπρογραμματισμός τους ήταν μία αρκετά δύσκολη διαδικασία, η κίνησή τους ήταν συγκεκριμένη και διατελούσαν μία και μόνο εργασία.

Ένα ακόμα μεγάλο ορόσημο για την ρομποτική ήταν η κατασκευή το «Stanford Arm» από τον Victor Scheinman [6]. Το Stanford Arm ήταν το πρώτο ολοκληρωτικά ηλεκτρικά-ελεγχόμενο ρομπότ αφού χρησιμοποιούσε έναν μικροεπεξεργαστή (PDP-6) για την λειτουργία του. Επίσης, ήταν εξοπλισμένο με ταχύμετρα και τενσιόμετρα που καθιστούσαν δυνατή την μέτρηση θέσης και ταχύτητας του, παρέχοντας έτσι μια πιο λεπτομερής και ελεγχόμενη κίνηση. Τα μοντέλα που ακολούθησαν μπορούσαν να αναλάβουν εργασίες οι οποίες απαιτούσαν μια πιο ακριβής κίνηση όπως η ήταν για παράδειγμα η συναρμολόγηση στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Τα ρομπότ μεταξύ των χρονολογιών 1980 και 2000 ήταν εξοπλισμένα με servo μοτέρ και έτσι μπορούσαν να εκτελέσουν κινήσεις τόσο από σημείο σε σημείο, όσο και επάνω σε ένα συνεχές μονοπάτι [5]. Ο προγραμματισμός τους γινόταν με την χρήση teach box, PLC, ή υπολογιστή. Συνεπώς δεν περιορίζονταν σε μία συγκεκριμένη κίνηση αφού μπορούσαν να προγραμματιστούν εκ νέου για διαφορετικές λειτουργίες και να χρησιμοποιούν την επεξεργαστική ικανότητα ενός υπολογιστή ώστε να προσαρμόζονται σε περιβαλλοντικούς παράγοντες.

Σήμερα, οι ικανότητες ενός ρομπότ περιορίζονται κυρίως από το λογισμικό του υπολογιστή ο οποίος το ελέγχει. Γενικά, ένα ρομπότ της εποχής μας μπορεί να είναι συνδεδεμένο με διαφορετικούς αισθητήρες και έτσι να έχει επίγνωση του περιβάλλοντός του σε βαθύ επίπεδο. Τα δεδομένα που συλλέγει, με την κατάλληλη επεξεργασία, οδηγούν σε φιλοσοφημένες και εξατομικευμένες για κάθε εφαρμογή κινήσεις.

### Ο ρομποτικός βραχίονας

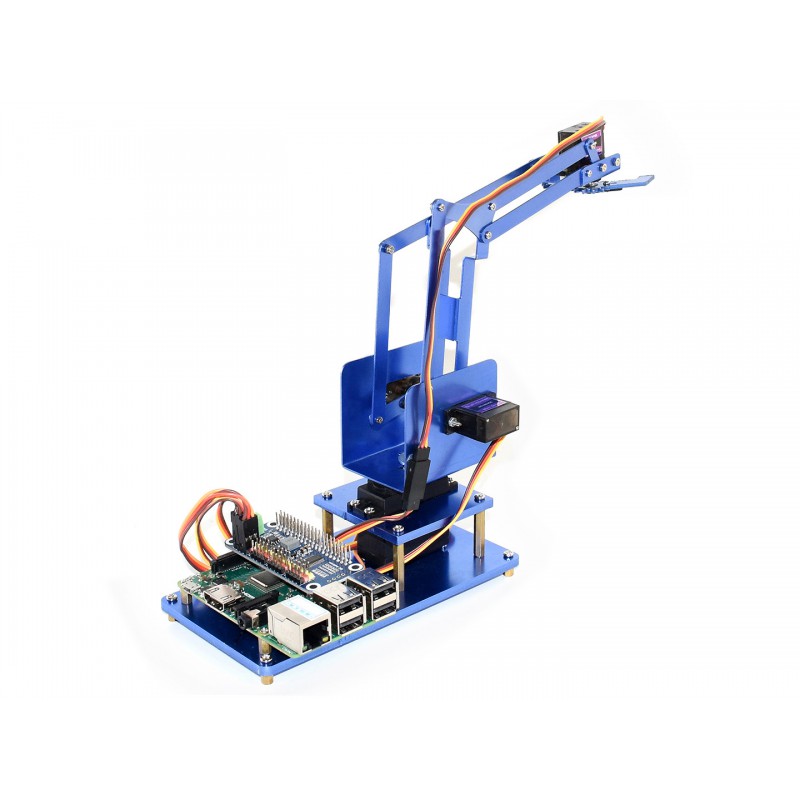
Πλέον υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη ρομπότ, το κάθε ένα με ικανότητες σχεδιασμένες για να ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Παραδείγματα περιλαμβάνουν τα ανθρωποειδή ρομπότ, τα drones, τους 3D εκτυπωτές και τους ρομποτικούς βραχίονες.

Οι ρομποτικοί βραχίονες έχουν παρόμοια φυσική δομή και κινησιολογία με το ανθρώπινο χέρι, καθιστώντας τους κατάλληλους σε εφαρμογές οι οποίες απαιτούν ακρίβεια και ευελιξία. Όπως και το ανθρώπινο χέρι αποτελούνται από:

* Συνδέσμους (links): Αντιστοιχούν στα οστά του ανθρώπινου χεριού και αποτελούν την φυσική δομή του βραχίονα.
* Αρθρώσεις (joints): Όπως υποδεικνύει το όνομά τους, έχουν ρόλο παρόμοιο με αυτόν των ανθρώπινων αρθρώσεων, δηλαδή να περιστρέφουν τους συνδέσμους.

Ένας ρομποτικός βραχίονας κατηγοριοποιείται με βάση των βαθμών ελευθερίας του (degrees of freedom, DOF). Κάθε ανεξάρτητη άρθρωση η οποία επηρεάζει είτε την περιστροφική ή την γραμμική θέση του [7]. Όσο περισσότεροι είναι οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος, τόσο πιο ευέλικτος είναι ο βραχίονας.

Στην εικόνα 2-5 παρουσιάζεται ένας ρομποτικός βραχίονας τεσσάρων βαθμών ελευθερίας, στον οποίο κάθε άρθρωση περιστρέφεται μέσω σερβοκινητήρα. Οι τρεις πρώτες αρθρώσεις είναι υπεύθυνες για την μετακίνηση της δαγκάνας στο επιθυμητό σημείο στον τρισδιάστατο χώρο, ενώ η τέταρτη άρθρωση ρυθμίζει το άνοιγμα και το κλείσιμο της, απαρτίζοντας συνολικά τέσσερεις βαθμούς ελευθερίας.

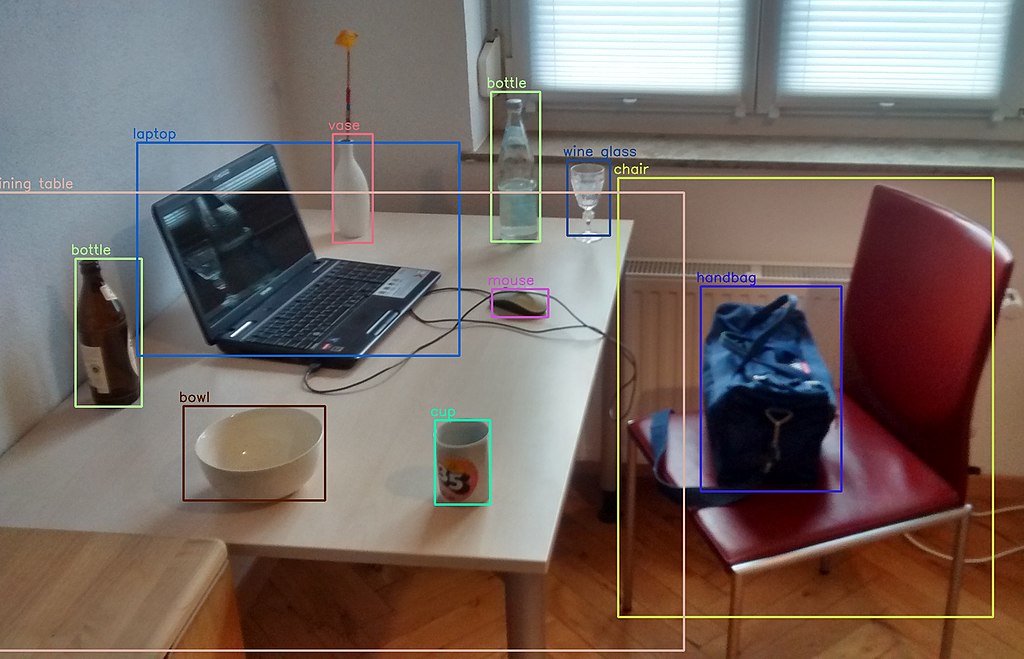


Εικόνα 1‑5 Ρομποτικός βραχίονας "Waveshare Robot Arm for Pi" με 4 βαθμούς ελευθερίας.

## Αναγνώριση αντικειμένων με το μοντέλο Yolo

### Ανίχνευση αντικειμένων σε μία εικόνα

Η ανίχνευση της θέσης και του τύπου ενός αντικειμένου σε μία ψηφιακή εικόνα ή βίντεο γίνεται μέσω ενός μοντέλου μηχανικής μάθησης. Το μοντέλο δέχεται ως είσοδο μία εικόνα και παράγει ως έξοδο το είδος (κλάση), ένα πλαίσιο οριοθέτησης (bounding box) και ένα βαθμό βεβαιότητας (confidence score) για κάθε αντικείμενο που ανιχνεύει. Ο βαθμός βεβαιότητας εκφράζει το πόσο σίγουρο είναι το μοντέλο για τον τύπο του αντικειμένου όσο και για το πόσο σωστά είναι τα όρια του πλαισίου οριοθέτησης. Ένα παράδειγμα πλαισίων οριοθέτησης φαίνεται στην Εικόνα 1‑6.



Εικόνα 1‑6 Ανιχνευμένα αντικείμενα που προέκυψαν από το μοντέλο «Yolo». Μπορούμε να διακρίνουμε το πλαίσιο οριοθέτησης που αντιστοιχεί σε κάθε αντικείμενο.

### Ανίχνευση με YOLO

Το YOLO είναι ένα μοντέλο μηχανικής μάθησης το οποίο αναπτύχθηκε το 2015 από τον Joseph Redmon [8]. Σε αντίθεση με προηγούμενες μεθόδους οι οποίες ελέγχουν μεμονωμένες περιοχές της εικόνας και σε διάφορες διαστάσεις, το YOLO (You Only Look Once) εφαρμόζει ένα νευρωνικό δίκτυο σε όλη την εικόνα, μία φορά και παράγει bounding boxes με ξεχωριστά confidence scores.

Το σύστημα χωρίζει την εικόνα σε ένα πλέγμα διαστάσεων . Για κάθε κελί αυτού του πλέγματος, ένα νευρωνικό δίκτυο παράγει bounding boxes με συγκεκριμένο βαθμό βεβαιότητας. Κάθε bounding box εκφράζεται από ένα διάνυσμα 5 μεταβλητών και μία ακόμα μεταβλητή η οποία αντιστοιχεί στην κλάση του αντικειμένου που ανιχνεύθηκε. Τα αναπαριστούν το κέντρο του αντικειμένου σε σχέση με το κελί, ενώ τα εκφράζουν το πλάτος και το ύψος του σε σχέση με ολόκληρη την εικόνα αντίστοιχα. Τέλος, το εκφράζει τον βαθμό βεβαιότητας της ανίχνευσης.

### Εκπαίδευση του μοντέλου YOLO

Πριν μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε το YOLO και να ανιχνεύσουμε τα αντικείμενα που μας ενδιαφέρουν σε μία εικόνα, θα πρέπει να το εκπαιδεύσουμε κατάλληλα.

Σε ένα υψηλό επίπεδο, η εκπαίδευση του μοντέλου γίνεται με τα παρακάτω βήματα:

1. Συγκεντρώνουμε φωτογραφικό υλικό από εικόνες οι οποίες εμπεριέχουν αντικείμενα τις ίδιας κατηγορίας (κλάσης) με αυτά που θέλουμε να ανιχνεύσουμε.
2. Σε ένα κατάλληλο λογισμικό σήμανσης δεδομένων (labeling data software), σημειώνουμε τις περιοχές στις οποίες εντοπίζουμε κάθε αντικείμενο επάνω σε όλες τις φωτογραφίες και παράλληλα ορίζουμε την κλάση στην οποία ανήκουν. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται labeling process.
3. Από το ίδιο λογισμικό, εξάγουμε τα τις πληροφορίες σχετικά με την σήμανση των φωτογραφιών σε μία μορφή την οποία το μοντέλο μπορεί να αναγνωρίσει (για παράδειγμα .txt για το YOLO). Τα δεδομένα αυτά ονομάζονται label data.
4. Χρησιμοποιούμε έναν αλγόριθμο ο οποίος τροφοδοτεί το μοντέλο με την τοποθεσία (path) των label data και των φωτογραφιών και τελικά ξεκινάει την εκπαίδευσή του μοντέλου.

Μόλις ολοκληρωθεί η εκπαίδευση, παράγεται ένα αρχείο τύπου το οποίο περιέχει όλες τις πληροφορίες που χρειάζεται το μοντέλο για να λειτουργήσει. Η ακρίβεια του μοντέλου καθορίζεται από την ποιότητα της εκπαίδευσης του, έτσι, για να πετύχουμε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα, φροντίζουμε οι εικόνες που θα χρησιμοποιήσουμε κατά την εκπαίδευση να βρίσκονται υπό πολλές διαφορετικές συνθήκες φωτισμού και τα αντικείμενα να απεικονίζονται με πληθώρα περιστροφών και θέσεων στο χώρο.

# Hardware

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η γενική διάταξη και λειτουργία του συστήματος. Θα αναφέρουμε ονομαστικά τον εξοπλισμό από τον οποίο αποτελείται και ύστερα θα γίνει μία λεπτομερείς περιγραφή κάθε στοιχείου αυτού. Τελικά, θα αναφερθούμε στα προγράμματα και τις βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και οποιοδήποτε κομμάτι κώδικα το οποίο προέρχεται από εξωτερικές πηγές (third party).

## Φυσική Διάταξη

Για την λειτουργία αυτής της εφαρμογής χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω εξοπλισμός:

* Ρομποτικός Βραχίονας “Waveshare Robot Arm for Pi”
* Κάμερα “Logitech C505e HD 720p Webcam”
* Βάση κάμερας σε σχήμα “Π”.
* Βάση τρίλιζας
* Πιόνια τρίλιζας

Στην Εικόνα 2‑1 φαίνεται ο τρόπος που τοποθετούνται τα παραπάνω στοιχεία στον χώρο.

A robot holding a robot arm over a chess board

AI-generated content may be incorrect.

Εικόνα 2‑1 Φυσική διάταξη του συστήματος

Σε μια βάση πάχους τοποθετούνται τα πιόνια και ένα χαρτί Α4 με εκτυπωμένη την τρίλιζα. Ο ρομποτικός βραχίονας τοποθετείται πίσω από τη βάση σε μια σταθερή απόσταση, η οποία είναι ίδια σε κάθε παιχνίδι. Για να εξασφαλίσουμε πως η θέση του βραχίονα σε σχέση με την βάση είναι πάντα η ίδια, ένα σχέδιο σε χαρτί Α4 έχει τοποθετηθεί πίσω από την βάση.

Επάνω από την τρίλιζα τοποθετείται η βάση «Π» της κάμερας, έτσι ώστε να διασφαλίζει ένα καθαρό οπτικό πεδίο του πλέγματος. To Raspberry Pi, λειτουργεί ως ελεγκτής του ρομποτικού βραχίονα και είναι προσαρμοσμένο επάνω του, επομένως, όλο το σύστημα θα πρέπει να βρίσκεται κοντά σε μία οθόνη υπολογιστή και κάποια παροχή ρεύματος.

## Λειτουργία

Σε πρώτη φάση, το σύστημα περνάει από μία διαδικασία αρχικοποίησης, κατά την οποία ανιχνεύεται το πλέγμα της τρίλιζας. Αφού σιγουρευτούμε πως κανένα πιόνι δεν βρίσκεται επάνω σε κελί, εκτελούμε τον κύριο αλγόριθμο (main loop) και το παιχνίδι ξεκινά. Η κάμερα καταγράφει την τρίλιζα και μετά από επεξεργασία προκύπτουν τα όρια του πλέγματος.



Εικόνα 2‑2 Παράδειγμα του πλαισίου ορίων-πλέγματος που δημιουργείται κατά την αρχικοποίηση

Ο ανθρώπινος παίκτης (χρήστης) κάνει την πρώτη κίνηση τοποθετώντας ένα πιόνι με το σύμβολο «X» στο επιθυμητό κελί. Η σειρά του ολοκληρώνεται όταν αυτός πατήσει το κουμπί «Enter» στο πληκτρολόγιο.

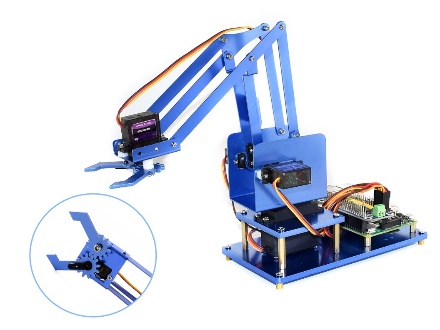
Κάθε φορά που ολοκληρώνεται η σειρά οποιοδήποτε παίκτη (ρομπότ ή άνθρωπος), η κάμερα καταγράφει την τρίλιζα, επεξεργάζεται την εικόνα και μετατρέπει την πληροφορία σε ψηφιακή μορφή, συγκεκριμένα σε μία λίστα python.

Όταν έρθει η σειρά του ρομπότ, αυτό υπολογίζει την καλύτερη κίνηση που μπορεί να κάνει και ο βραχίονας μεταφέρει ένα από τα πιόνια «Ο» στο κατάλληλο κελί. Το παιχνίδι ολοκληρώνεται όταν προκύψει ισοπαλία ή εάν ένας από τους δύο παίκτες κερδίσει.

## Περιγραφή του Hardware

### Ρομποτικός βραχίονας «Waveshare Robot Arm for Pi»

Το μοντέλο του βραχίονα που χρησιμοποιήθηκε ονομάζεται «Waveshare Robot Arm for Pi». Έχει τέσσερις βαθμούς ελευθερίας και τέσσερα μοτέρ σέρβο αντίστοιχα. Τα τρία πρώτα μοτέρ είναι υπεύθυνα για την περιστροφική κίνηση των αρθρώσεων, ενώ το τελευταίο χρησιμοποιείται για τον έλεγχο μίας δαγκάνας που είναι ενσωματωμένη στο άκρο του.



Εικόνα 2‑3 Waveshare Robot Arm for Pi

Το προϊόν διατίθεται ως πακέτο συναρμολόγησης και περιέχει:

* Τη μεταλλική δομή του βραχίονα
* 4 μοτέρ servo
* Έναν μικροελεγκτή PWM σε μορφή HAT (Servo Driver HAT)

Για την λειτουργία του βραχίονα, απαιτείται αρχικά η συναρμολόγηση όλων των εξαρτημάτων. Η σχεδίαση του συστήματος επιτρέπει την εύκολη τοποθέτηση ενός «Raspberry Pi 4 model B» στην ειδική βάση σχηματίζεται. Τρία μοτέρ MG90S χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της δαγκάνας: το ένα ελέγχει την σύσφιξη ενώ τα άλλα δύο ρυθμίζουν το ύψος και το βάθος της θέσης της. Ένα επιπλέον μοτέρ MG996R τοποθετήθηκε στην βάση για τον καθορισμό της αζιμουθιακής γωνίας του βραχίονα.

Ο μικροελεγκτής είναι ενσωματωμένος με 16 κανάλια και έτσι μπορεί να ελέγξει μέχρι και 16 μοτέρ ταυτόχρονα, ενώ παρέχει ανάλυση 4096 βημάτων. Αυτό σημαίνει πως η διαφορά του μικροελεγκτή μπορεί να χωριστεί σε 4096 διακριτά επίπεδα τα οποία αναγνωρίζει ως είσοδο. Τέλος, ο ελεγκτής βασίζεται στο ολοκληρωμένο κύκλωμα PCA9896 για το οποίο υπάρχει σχετική βιβλιοθήκη python.

### Βάση «Π» και Κάμερα

Η κάμερα που χρησιμοποιήθηκε μία απλή webcam υπολογιστή «Logitech C505e HD 720p». Είναι συνδεδεμένη με το Raspberry Pi και στηρίζεται επάνω στην βάση «Π» με τον τρόπο που φαίνεται στην ΧΧ.

H βάση της κάμερας είναι μία διάταξη μεταλλικών ράβδων που σχηματίζει ένα «Π». Είναι σχεδιασμένη ώστε να παραμένει σταθερή, ενώ το ύψος της εξασφαλίζει ένα μεγαλύτερο πεδίο όρασης. Η κάμερα συγκρατείται σε αυτή μέσω του κλίπ που διαθέτει.

### Βάση Τρίλιζας και Πιόνια

Η βάση της τρίλιζας αποτελείται από μία επιφάνεια διογκωμένης πολυστερίνης (φελιζόλ) πάχους τριών εκατοστών, και μία ξύλινη επιφάνεια, πάχους 1.5 εκατοστών, που έχει τοποθετηθεί επάνω της. Τα δύο στοιχεία είναι ενωμένα με ανθεκτική κολλητική ταινία. Το φελιζόλ επιλέχθηκε λόγω της οικονομικής του τιμής και του χαμηλού βάρους του, ενώ η ξύλινη επιφάνεια χρησιμοποιήθηκε κυρίως για αισθητικούς λόγους.

Ένα φύλλο Α4 στο οποίο είναι εκτυπωμένη η διάταξη της τρίλιζας έχει στερεωθεί στην ξύλινη επιφάνεια με την χρήση κόλλας PVA. Το ξύλο συνεργάζεται άριστα με την κόλλα PVA και το χαρτί, γεγονός που αποτέλεσε ακόμα έναν λόγο να επιλεγεί.

Πίσω από την βάση, είναι τοποθετημένο ένα εκτυπωμένο διάγραμμα το οποίο καθορίζει την θέση του ρομποτικού βραχίονα σε σχέση με την βάση της τρίλιζας. Αυτό λειτουργεί σαν οδηγός είναι σημαντικό να τοποθετείται σωστά πριν ξεκινήσει το παιχνίδι.

Τέλος, τα πιόνια είναι κυλινδρικά κομμάτια πλαστικού, ύψους περίπου 2 εκατοστών, στα οποία έχουν προσκολληθεί εκτυπωμένα σύμβολα τρίλιζας, με

κόλλα σιλικόνης. Συνολικά, υπάρχουν πέντε πιόνια με το σύμβολο «Χ» και τέσσερα με το σύμβολο «0».

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Sforza Castle Milan in autumn | Skyscrapers shown from view looking up | Hairdresser using comb and hair-cutting shears to trim ends of man's hair |
| (a) | (b) | (c) |

Εικόνα 2‑4 (a) … (b) … (c) …

## Κατασκευή Hardware

### Συναρμολόγηση Ρομποτικού Βραχίονα

Η συναρμολόγηση του ρομποτικού βραχίονα έγινε σύμφωνα με τις οδηγίες που αναφέρονται στην ιστοσελίδα του προϊόντος[9]. Τα μοτέρ servo εγκαταστάθηκαν ταυτόχρονα με την συναρμολόγηση του σκελετού ενώ το Raspberry Pi με το Servo Driver HAT τοποθετήθηκε στο τέλος.

Κατά την διαδικασία της χειροκίνητου ελέγχου, ο οποίος εξετάζεται σε επόμενο κεφάλαιο, παρατηρήθηκε συνεχής αποτυχία του μοτέρ της δαγκάνας. Η κίνηση του άξονα εξόδου του σερβοκινητήρα εμποδιζόταν από το να κλείσει εντελώς κατά το γράπωμα ενός πιονιού λόγω της μη παραμορφώσιμης δομής του. Αυτό οδηγούσε σε υπερθέρμανση και τελικά στην καταστροφή του μοτέρ.

Για να αποφευχθεί αυτό, κρίθηκε αναγκαία η τροποποίηση της δαγκάνας. Στην περιοχή όπου το τμήμα της δαγκάνας έρχεται σε επαφή με το πιόνι, τοποθετήθηκε μία λεπτή επένδυση συνθετικού σπόγγου όπως φαίνεται στην ΧΧ. Έτσι, το μοτέρ απαιτεί πλέον σημαντικά λιγότερη ροπή για να παραμορφώσει τον σπόγγο, ο οποίος με την σειρά του ασκεί δύναμη κάθετης αντίδρασης και τριβής στο πιόνι, συγκρατώντας το. Τελικά διαπιστώσαμε πως μία τέτοια αλλαγή ήταν αρκετή ώστε να αποτρέψει την υπερθέρμανση του μοτέρ.



Εικόνα 3‑1 Επένδυση συνθετικού σπόγγου επάνω στην δαγκάνα.

### Κατασκευή Βάσης Κάμερας

Για κατασκευή της βάσης χρησιμοποιήθηκε ηλεκτροσυγκόλληση τόξου. Αρχικά κόψαμε δύο μεταλλικές ράβδους ίδιου ύψους (ΧΧ εκατοστών) και τις τοποθετήσαμε παράλληλα, σε κατακόρυφη θέση. Αυτές λειτούργησαν σαν «πόδια» της βάσης. Τα επάνω άκρα τους ενώθηκαν με μία οριζόντια μεταλλική ράβδο μήκους ΧΧ εκατοστών έτσι ώστε τελικά να προκύψει μία διάταξη με σχήμα «Π».

Για να ισορροπήσει το σύστημα, στο κάτω άκρο των κατακόρυφων ράβδων, συγκολλήσαμε ακόμα μία ράβδο μικρών διαστάσεων, τοποθετημένη κάθετα με το επίπεδο που ορίζουν τα υπόλοιπα στοιχεία. Μία τέτοια προσθήκη αντισταθμίζει τυχόν ροπές οι οποίες θα μπορούσαν να ανατρέψουν την βάση.

A black camera on a white surface

AI-generated content may be incorrect.

Εικόνα 3‑2 Η κάμερα στηρίζεται επάνω στην βάση «Π»

# Software

## Αρχιτεκτονική Προγράμματος και Βιβλιοθήκες

### Βιβλιοθήκες

Οι βιβλιοθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στον κώδικα της εφαρμογής από εξωτερικές πηγές είναι οι εξής:

* opencv-python
* pynput
* ultralytics

To opencv-python είναι μία βιβλιοθήκη η οποία χρησιμοποιείται στην επεξεργασία εικόνων. Σε αυτή την εργασία αξιοποιήθηκε με σκοπό την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου Yolo, προβάλλοντας τις περιοχές στις οποίες εντοπίζεται κάθε αντικείμενο με ένα ορθογώνιο πλαίσιο και αναγράφοντας το confidence score στην κορυφή του. Το πακέτο ultralytics από την άλλη είναι υπεύθυνο για την χρήση του YOLO, τόσο κατά την εκπαίδευση όσο και την εφαρμογή του. Τέλος, έγινε χρήση του pynput έτσι ώστε να ανιχνεύονται οι είσοδοι του πληκτρολογίου από τον αλγόριθμο.

### Αρχιτεκτονική Προγράμματος

Σε αυτή την υποενότητα θα προσπαθήσουμε να περιγράψουμε την γενική δομή του προγράμματος και το πως συνεργάζονται όλα τα αρχεία και κλάσεις του κώδικα μεταξύ τους σε υψηλό επίπεδο.

Διάγραμμα 2‑1 Αρχιτεκτονική προγράμματος

Το πρόγραμμα έχει στηριχτεί στον αντικειμενοστραφή προγραμματισμό και έτσι τα περισσότερα αρχεία περιλαμβάνουν μία κλάση. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2‑1, το λογισμικό χωρίζεται σε πέντε πακέτα (modules), τα οποία λειτουργούν σαν ξεχωριστές κατηγορίες οργανώνοντας τον κώδικα με βάση την λειτουργία του.

Το module «computer\_vision» περιέχει τον κώδικα που σχετίζεται με την επεξεργασία εικόνας. Είναι υπεύθυνο τόσο για την καταγραφή φωτογραφιών όσο και για την εξαγωγή δεδομένων από αυτές (π.χ. ανίχνευση αντικειμένων).

Το module «input», όπως υποδηλώνει το όνομά του, διαχειρίζεται τις εισόδους του χρήστη (π.χ. πληκτρολόγιο) και ορίζει ένα σύστημα διαχείρισης γεγονότων (event system) το οποίο θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Ο έλεγχος του ρομποτικού βραχίονα γίνεται μέσω του module «robot\_arm» το οποίο περιέχει τα απαραίτητα scripts για την αποστολή σημάτων PWM στα σερβο-μοτέρ μέσω του μικροελεγκτή PWM.

Στο module «tic\_tac\_toe» περιλαμβάνεται κώδικας ο οποίος σχετίζεται με το παιχνίδι της τρίλιζας. Ένα script-διαχειριστής (game\_manager) έχει πλήρη επίγνωση των μεταβλητών του παιχνιδιού και έτσι καθορίζει την πορεία του, ενώ τα υπόλοιπα scripts διαχειρίζονται τις κινήσεις των παικτών – δηλαδή του ανθρώπου και του ρομπότ.

Τέλος, εκτός όσων αναφέραμε, υπάρχουν δύο αρχεία εκτός module: το και . Το ελέγχει την ροή του προγράμματος και έτσι επιλέγει πότε το παιχνίδι ξεκινά και πότε τελειώνει. Το , χρησιμοποιείται για την μετατροπή δεδομένων από την μία μορφή σε κάποια άλλη όπως η μετατροπή της επιθυμητής γωνίας περιστροφής σε πλάτος παλμού PWM.

## Έλεγχος των Μοτέρ Servo

### Τροφοδοσία παλμού σε κανάλι με το PCA9685.py

Αφού πραγματοποιήθηκε η συναρμολόγηση του ρομποτικού βραχίονα, το επόμενο φυσικό βήμα είναι η ανάπτυξη ενός αλγόριθμου χειροκίνητου ελέγχου.

Ωστόσο, πριν φτάσουμε στον έλεγχο του βραχίονα, θα πρέπει να έχει αναπτυχθεί ένα πρόγραμμα για τον έλεγχο των μοτέρ servo. Για να γίνει αυτό θα εξετάσουμε τον έτοιμο κώδικα ελέγχου του ολοκληρωμένου κυκλώματος PCA9685 ο οποίος παρέχεται στο site του ρομποτικού βραχίονα [9]:

PCA9685.py

1. #!/usr/bin/python

2. import sys

3. import time

4. import math

5. if not 'win' in sys.platform:

6.     import smbus

7.

8. # ============================================================================

9. # Raspi PCA9685 16-Channel PWM Servo Driver

10. # ============================================================================

11.

12. class PCA9685:

13.

14.     # I2C register addresses

15.     \_\_SUBADR1            = 0x02

16.     \_\_SUBADR2            = 0x03

17.     \_\_SUBADR3            = 0x04

18.     \_\_MODE1              = 0x00

19.     \_\_PRESCALE           = 0xFE

20.     \_\_LED0\_ON\_L          = 0x06

21.     \_\_LED0\_ON\_H          = 0x07

22.     \_\_LED0\_OFF\_L         = 0x08

23.     \_\_LED0\_OFF\_H         = 0x09

24.     \_\_ALLLED\_ON\_L        = 0xFA

25.     \_\_ALLLED\_ON\_H        = 0xFB

26.     \_\_ALLLED\_OFF\_L       = 0xFC

27.     \_\_ALLLED\_OFF\_H       = 0xFD

28.

29.     def \_\_init\_\_(self, address=0x40, debug=False):

30.         # Initialize PCA9685 object

31.         self.bus = smbus.SMBus(1)

32.         self.address = address

33.         self.debug = debug

34.

35.         # Reset PCA9685 to initialize

36.         if (self.debug):

37.             print("Reseting PCA9685")

38.         self.write(self.\_\_MODE1, 0x00)

39.

40.     def write(self, reg, value):

41.         # Writes an 8-bit value to the specified register/address

42.         self.bus.write\_byte\_data(self.address, reg, value)

43.         if (self.debug):

44.             print("I2C: Write 0x%02X to register 0x%02X" % (value, reg))

45.

46.     def read(self, reg):

47.         # Read an unsigned byte from the I2C device

48.         result = self.bus.read\_byte\_data(self.address, reg)

49.         if (self.debug):

50.             print("I2C: Device 0x%02X returned 0x%02X from reg 0x%02X" % (self.address, result & 0xFF, reg))

51.         return result

52.

53.     def setPWMFreq(self, freq):

54.         # Sets the PWM frequency

55.         # Calculate prescale value based on desired frequency

56.         prescaleval = 25000000.0    # 25MHz

57.         prescaleval /= 4096.0       # 12-bit

58.         prescaleval /= float(freq)

59.         prescaleval -= 1.0

60.         if (self.debug):

61.             print("Setting PWM frequency to %d Hz" % freq)

62.             print("Estimated pre-scale: %d" % prescaleval)

63.

64.         # Set prescale for the PCA9685

65.         prescale = math.floor(prescaleval + 0.5)

66.         if (self.debug):

67.             print("Final pre-scale: %d" % prescale)

68.

69.         # Save old mode, sleep, set prescale, restore old mode

70.         oldmode = self.read(self.\_\_MODE1)

71.         newmode = (oldmode & 0x7F) | 0x10        # sleep

72.         self.write(self.\_\_MODE1, newmode)        # go to sleep

73.         self.write(self.\_\_PRESCALE, int(math.floor(prescale)))

74.         self.write(self.\_\_MODE1, oldmode)

75.         time.sleep(0.005)

76.         self.write(self.\_\_MODE1, oldmode | 0x80)

77.

78.     def setPWM(self, channel, on, off):

79.         # Sets a single PWM channel

80.         # Directly controls the speed of the servo motor

81.         # Set PWM values for the specified channel

82.         self.write(self.\_\_LED0\_ON\_L + 4 \* channel, on & 0xFF)

83.         self.write(self.\_\_LED0\_ON\_H + 4 \* channel, on >> 8)

84.         self.write(self.\_\_LED0\_OFF\_L + 4 \* channel, off & 0xFF)

85.         self.write(self.\_\_LED0\_OFF\_H + 4 \* channel, off >> 8)

86.         if (self.debug):

87.             print("channel: %d  LED\_ON: %d LED\_OFF: %d" % (channel, on, off))

88.

89.     def setServoPulse(self, channel, pulse):

90.         # Sets the Servo Pulse, assuming a PWM frequency of 50Hz

91.         # Determines the specific position or angle to which the servo motor should move

92.         # Convert pulse duration to PWM value

93.         pulse = pulse \* 4096 / 20000        # PWM frequency is 50Hz, the period is 20000us

94.         self.setPWM(channel, 0, int(pulse))

95.

96. if \_\_name\_\_=='\_\_main\_\_':

97.

98.     # Create PCA9685 object

99.     pwm = PCA9685(0x40, debug=False)

100.

101.     # Set PWM frequency to 50 Hz

102.     # Primarily influences how often the servo controller updates the position

103.     pwm.setPWMFreq(50)

104.

105.     # Continuously sweep the servo back and forth

106.     channel = 15

107.     while True:

108.         for i in range(500, 2500, 10):

109.             pwm.setServoPulse(channel, i)

110.             time.sleep(0.02)

111.

112.         for i in range(2500, 500, -10):

113.             pwm.setServoPulse(channel, i)

114.             time.sleep(0.02)

115.

116.

117. # PULSE TO DEGREES IN "setServoPulse()"

118. # 500  -------   0 °

119. # 1000 -------  45 °

120. # 1500 -------  90 °

121. # 2000 ------- 135 °

122. # 2500 ------- 180 °

123.

124.

Οι μέθοδοι setServoPulse και setPWMFreq είναι αυτές οι οποίες θα φανούν χρήσιμες στον έλεγχο των servo. Ο υπόλοιπος κώδικας έχει να κάνει με την επικοινωνία μεταξύ του Raspberry Pi και του κυκλώματος PCA9685 μέσω της βιβλιοθήκης smbus.

Η μέθοδος setPWMFreq, καθορίζει την συχνότητα PWM έτσι ώστε να είναι ίση την τιμή της παραμέτρου freq. Σε αυτή την εφαρμογή, η συχνότητα που επιλέγουμε είναι αυτή των , η οποία αντιστοιχεί σε συχνότητα ή και θα την θεωρούμε δεδομένη από εδώ και πέρα.

Η μέθοδος setServoPulse τροφοδοτεί το servo στο κανάλι channel με έναν παλμό PWM με πλάτος pulse . To servo driver HAT έχει ανάλυση 4096 (12-bit) και επομένως μπορεί να αναγνωρίζει τιμές από 0 έως 4095. Για την τροφοδοσία του servo, ο κώδικας μετατρέπει πρώτα το πλάτος του παλμού από μs σε επίπεδα PWM. Η αναλογία είναι:

Συνεπώς, εάν τροφοδοτήσουμε ένα servo με παλμό πλάτους pulse , το αντίστοχο επίπεδο PWM δίνεται από την σχέση:

Για παράδειγμα, αν επιθυμούμε να τροφοδοτήσουμε ένα servo με παλμό πλάτους 500μs, η αντίστοιχη τιμή PWM που θα σταλεί στο servo είναι:

Η διαδικασία της μετατροπής γίνεται στην γραμμή του παραπάνω κώδικα.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί, ότι ενώ ο μικροελεγκτής μπορεί να υποστηρίξει επίπεδα PWM από 0 έως 4095, τα servo που χρησιμοποιούνται σε αυτή την εφαρμογή λειτουργούν σε ένα πιο περιορισμένο εύρος παλμών. Συγκεκριμένα υποστηρίζουν παλμούς από έως , που αντιστοιχούν σε επίπεδα PWM από έως . Ένας παλμός περιστρέφει τον άξονα του μοτέρ στους , ενώ ένας παλμός το περιστρέφει στους . Στις γραμμές 117-122 του κώδικα φαίνονται οι αναλογίες μεταξύ μήκους παλμού pulse και της αντίστοιχης γωνίας περιστροφής που θα αποκτήσει το servo για δεδομένη συχνότητα PWM .

### Χειριστής servo motor.py

Για τον εύκολο έλεγχο των servo σε υψηλό επίπεδο και έτσι ώστε να μην χρειάζεται να υπολογίζουμε, ορίζουμε μία νέα κλάση :

motor.py

1. from robot\_arm.PCA9685 import PCA9685

2. import conversions

3. import time

4.

5. class Motor:

6.     def \_\_init\_\_(self, channel, pca):

7.         self.channel = channel

8.         self.pwm = pca

9.         self.rotation = 90

10.         self.angular\_speed = 50

11.         self.set\_rotation(90)

Οι τέσσερις μεταβλητές που ορίζονται παραπάνω είναι:

* : Το κανάλι στο οποίο ανήκει το μοτέρ
* : Ένα στιγμιότυπο της κλάσης
* : Η τελευταία περιστροφή στην οποία βρισκόταν το μοτέρ
* : Η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του μοτέρ

Για να περιστρέψουμε το μοτέρ σε μία γωνία target\_rotation ορίζουμε την μέθοδο:

motor.py

1. def set\_rotation(self, target\_rotation):

2.         if(target\_rotation >= 180): target\_rotation = 180

3.         if(target\_rotation <= 0): target\_rotation = 0

4.

5.         pulse = conversions.angle\_to\_pulse(target\_rotation)

6.         self.pwm.setServoPulse(self.channel, pulse)

7.         self.rotation = target\_rotation

H οποία ελέγχει εάν η επιθυμητή γωνία είναι μεταξύ των ορίων , την μετατρέπει στο αντίστοιχο πλάτος παλμού PWM. Η τιμή της μεταβλητής ανανεώνεται αναλόγως.

Ο παλμός ο οποίος θα σταλεί στο μοτέρ μέσω του υπολογίζεται μέσω του κώδικα όπως φαίνεται παραπάνω, στην γραμμή 5. Όλο το αρχείο αποτελείται από 2 συναρτήσεις: μία για την αντιστοίχιση της επιθυμητής γωνίας περιστροφής σε πλάτος σήματος PWM, και μία για την αντιστοίχιση του πλάτους σε γωνία:

conversions.py

1. def angle\_to\_pulse(angle):

2.     if (angle <= 0): return 500

3.     elif (angle >= 180): return 2500

4.

5.     pulse\_per\_angle = (2500 - 500) / 180

6.     return (500 + pulse\_per\_angle \* angle)

7.

8. def pulse\_to\_angle(pulse):

9.     if(pulse <= 500): return 0

10.     elif (pulse >= 2500): return 180

11.

12.     angle\_per\_pulse = 180 / 2500

13.     return angle\_per\_pulse \* (pulse - 500)

14.

Τέλος, ορίζονται δύο ακόμα συναρτήσεις.

1. Η εκτελείται κατά την δημιουργία ενός αντικειμένου της κλάσης και το περιστρέφει σε γωνία .
2. H μας επιτρέπει να εκτελούμε ομαλή περιστροφή του μοτέρ, εφαρμόζοντάς όλες τις ενδιάμεσες περιστροφές μεταξύ της τελικής και χρονικές σε διακριτά χρονικά διαστήματα:

1. def initialize\_rotation(self, initial\_rotation):

2.         self.rotation = initial\_rotation

3.         pulse = conversions.angle\_to\_pulse(self.rotation)

4.         self.pwm.setServoPulse(self.channel, pulse) # degrees per second

5.

6.     def set\_rotation\_smooth(self, target\_rotation):

7.         if(target\_rotation >= 180): target\_rotation = 180

8.         if(target\_rotation <= 0): target\_rotation = 0

9.

10.         delta\_time = 0.02

11.         delta\_step = self.angular\_speed \* delta\_time

12.         if(target\_rotation < self.rotation): delta\_step  \*= -1

13.         number\_of\_steps = abs(int((target\_rotation - self.rotation) / delta\_step))

14.         print(f"Number of steps: {number\_of\_steps}, Target rotation: {target\_rotation}")

15.

16.         for i in range(number\_of\_steps):

17.             self.set\_rotation(self.rotation + delta\_step )

18.             time.sleep(delta\_time)

19.

20.         self.set\_rotation(target\_rotation)

## Έλεγχος του Ρομποτικού Βραχίονα

### Αντίστροφη Κινηματική Βραχίονα

Αντίστροφη κινηματική ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία υπολογίζεται η γωνία περιστροφής που θα πρέπει να έχει κάθε μοτέρ του βραχίονα έτσι ώστε το άκρο του (η δαγκάνα στην περίπτωσή μας) να βρίσκεται σε μία συγκεκριμένη θέση στο χώρο. Ονομάζεται αντίστροφη επειδή ο στόχος της είναι αντίστροφος με αυτόν της ευθείας κινηματικής, δηλαδή ο υπολογισμός του τελικού σημείο για δεδομένες περιστροφές των μοτέρ.

Ακόμα μία διαφορά μεταξύ των δύο είναι ότι για η αντίστροφη κινηματική μπορεί να έχει πολλαπλές ή και καμία λύση για κάποια θέση του άκρου, ενώ στην ευθεία κινηματική, οι διάφορες περιστροφές των μοτέρ θα καταλήγουν πάντα σε μία τελική θέση του άκρου.

Ας ξεκινήσουμε την αντίστροφη κινηματική για τον βραχίονα που χρησιμοποιείται στην παρούσα εφαρμογή. Αρχικά θα ορίσουμε τις γενικευμένες συντεταγμένες με τις οποίες θα ορίζεται η θέση του βραχίονα. Επίσης από εδώ και πέρα, για ευκολία, θα θεωρούμε «θέση του βραχίονα», την θέση του άκρου του, δηλαδή της δαγκάνας.

Παρακάτω παρουσιάζεται η μέθοδος με την οποία υπολογίζουμε την περιστροφή των αρθρώσεων (μοτέρ) των τριών μοτέρ θεωρώντας πως η επιθυμητή τελική θέση είναι αυτή με καρτεσιανές συντεταγμένες .

Στα διαγράμματα που παρουσιάζονται παραπάνω, ο άξονας x έχει φορά προς τα δεξιά της σελίδας, ο άξονας y έχει φορά προς το επάνω όριο της σελίδας, ενώ ο άξονας z έχει φορά η οποία βγαίνει από την σελίδα προς τον αναγνω΄στη.

Θεωρούμε έναν βραχίονα ο οποίος έχει περιστροφή και στον άξονα y και z αντίστοιχα.

*A diagram of a graph

AI-generated content may be incorrect.*

We assume a robot arm that can rotate horizontally and also vertically. The arm is considered a single straight line segment.

Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings


* + 
  + In the right diagram we found the vertical rotation of the arm. But we are not done yet.

The arm is actually not a single straight line segment, it's actually two equal-length line segments connected to each other. We need to redraw the upper right graph as follows:

Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings


Let's now find the separate vertical rotation of both segments.

Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings




Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings
Ink Drawings


Εκφράζουμε την θέση του βραχίονα με τρείς συντεταγμένες:

* **Depth (βάθος)**: Η προβολή της απόστασης του βραχίονα από την βάση στο οριζόντιο επίπεδο XZ
* **Height (ύψος):** Η κατακόρυφη απόσταση του βραχίονα από την βάση
* **Rotation (περιστροφή):** Η αζιμούθια περιστροφή του βραχίονα γύρω από τον κατακόρυφο άξονα περιστροφής που περνά από το κέντρο της βάσης.