



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΣΗΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ

Ρομποτική II: Ευφυή Ρομποτικά Συστήματα & Κύτταρα

Ροή Σ: Σήματα, Έλεγχος, Ρομποτική
8^ο Εξάμηνο

Εξαμηνιαία Εργασία 2

ΘΕΜΑ:

Αυτοκινούμενα Ρομπότ: Παρακολούθηση εμποδίου
(Mobile Robots: Wall Following)

Χρήστος Δημόπουλος – 03117037

Θέμα Εργασίας

Στόχος της εργασίας είναι ο προγραμματισμός ενός κινητού ρομπότ διαφορικής οδήγησης (differential drive) ώστε να εκτελεί έναν αλγόριθμο παρακολούθησης εμποδίου (wall following). Ειδικότερα, η ρομποτική διάταξη καλείται να εκτελέσει μια πλήρη περιφορά με παράλληλη κίνηση στα εμπόδια, διατηρώντας σταθερή απόσταση από αυτά. Αρχικά, περιγράφεται αναλυτικά ένας τρόπος εφαρμογής της θεωρητικής μεθοδολογίας για την παρακολούθηση εμποδίου από το αυτοκινούμενο ρομπότ με επενέργηση στη γραμμική και γωνιακή ταχύτητά του και χρήση των διαθέσιμων αισθητηριακών εισόδων. Στη συνέχεια, προσομοιώνουμε τον αλγόριθμο και καταγράφουμε στον χρόνο διάφορες μεταβλητές της κίνησης.

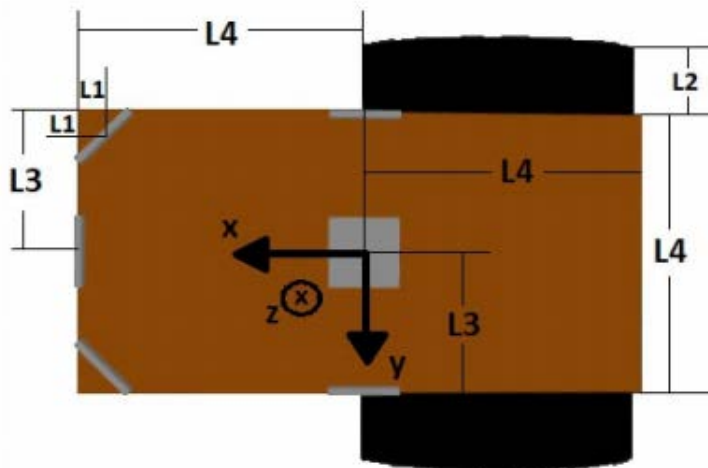
Περιεχόμενα

Θέμα Εργασίας	2
Θεωρητική Ανάλυση	4
Προσομοίωση Ρομποτικής Εργασίας	6
References	10

Θεωρητική Ανάλυση

Στην Εικόνα 1 φαίνεται το χρησιμοποιούμενο ρομπότ διαφορικής οδήγησης, το οποίο διαθέτει δύο τροχούς διαμέτρου 20 cm. Η συγκεκριμένη ρομποτική διάταξη είναι εφοδιασμένη με τους ακόλουθους αισθητήρες: (1) 5 αισθητήρες υπερήχων σόναρ, οι οποίοι μετρούν απόσταση από εμπόδια, καθώς και (2) ένα IMU (Inertial Measurement Unit) 9 βαθμών ελευθερίας, το οποίο μετράει στροφικές ταχύτητες, γραμμικές επιταχύνσεις, καθώς και περιστροφή γύρω από κάθε άξονα. Η διάταξη είναι συμμετρική ως προς το τοπικό επίπεδο xz ενώ οι αποστάσεις των αισθητήρων είναι οι εξής:

$$L1 = 0.018 \text{ m}, L2 = 0.05 \text{ m}, L3 = 0.1 \text{ m}, L4 = 0.2 \text{ m}$$



Εικόνα 1: Mobile Robot Scheme Design

Ο αρχικός προσανατολισμός του ρομπότ στον χώρο του προβλήματος καθορίζεται με βάση το τελευταίο ψηφίο του AM ($X = 7$) ως εξής:

$$angle = \text{mod}(X, \pi) = \text{mod}(7, \pi) = 0.7142 \text{ rads}$$

Επιπλέον, η παρακολούθηση εμποδίων από το αυτοκινούμενο ρομπότ γίνεται με **ανθρωρολογιακή φορά** (counter-clockwise), καθώς το ψηφίο $X = 7$ είναι περιττός αριθμός.

Ο αλγόριθμος παρακολούθησης εμποδίων αξιοποιεί τις μετρήσεις των sonar αισθητήρων (και ιδίως αυτών που βρίσκονται δεξιά R και μπροστά – δεξιά FR του τοπικού πλαισίου αναφοράς), ώστε το ρομπότ να διατηρεί μια σταθερή απόσταση από τα εμπόδια. Πιο συγκεκριμένα, ορίζουμε:

- Η μετρούμενη απόσταση του **R-sensor** από κάποιο εμπόδιο να διατηρείται σταθερή και ίση με **0.2 m**.
- Η μετρούμενη απόσταση του **FR-sensor** από κάποιο εμπόδιο να διατηρείται σταθερή και ίση με **0.3 m**.

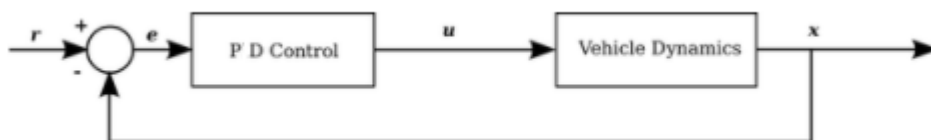
Για τον σκοπό αυτό, μπορούμε να αναλύσουμε τον αλγόριθμο σε τρεις διακριτές καταστάσεις:

1. **Κατάσταση 1:** Το ρομπότ βρίσκεται στη θέση αρχικοποίησης του και καλείται να κινηθεί προς τα εμπόδια. Για τον σκοπό αυτό, αναπτύσσει γραμμική ταχύτητα κατά τη x-διεύθυνση ίση με $V_x = 0.5 \text{ m/sec}$, ώσπου ο μπροστινός αισθητήρας (F-sensor) να μετρήσει απόσταση μικρότερη ή ίση των **0.5 m** (λαμβάνοντας υπόψη ότι $L_4 = 0.2\text{m}$). Μόλις συμβεί κάτι τέτοιο, το ρομπότ αντιλαμβάνεται ότι πρέπει να στρίψει ώστε να αποφύγει τη σύγκρουση με το εμπόδιο και μεταβαίνει στην κατάσταση 2.
2. **Κατάσταση 2:** Στην εν λόγω κατάσταση, το ρομπότ πρόκειται να συγκρουστεί με κάποιο εμπόδιο και καλείται να στρίψει. Για τον σκοπό αυτό, θέτουμε να αναπτύσσει γραμμική ταχύτητα κατά τη x-διεύθυνση $V_x = 0.1\text{m/sec}$ και γωνιακή ταχύτητα κατά τη z-διεύθυνση $\omega_z = -1.5 \text{ rad/sec}$. Μόλις ικανοποιηθεί η κάτωθι συνθήκη για τις μετρούμενες από τους αισθητήρες αποστάσεις:

$$dist_{sonar_R} + 0.3m < dist_{sonar_F} \ \&\& \ dist_{sonar_{FR}} + 0.25m < dist_{sonar_F} \{1\}$$

τότε, το ρομπότ έχει στρίψει αρκετά και μπορεί αν μεταβεί στην Κατάσταση 3, ώστε να ξεκινήσει την παρακολούθηση εμποδίων. Οι διορθωτικές τιμές των 0.3m και 0.25m, προκύπτουν πειραματικά λαμβάνοντας υπόψη τις διαστάσεις του ρομπότ και τις επιθυμητές αποστάσεις του ρομπότ από το εμπόδιο που παρακολουθεί.

3. **Κατάσταση 3:** Στην τρίτη κατάσταση το ρομπότ εκτελεί την παρακολούθηση εμποδίων με χρήση ενός PD controller, ώστε οι αισθητήρες R και FR να μετράνε αποστάσεις 0.2m και 0.3m αντίστοιχα. Ως κέρδη ελέγχου επιλέγονται $K_p = 25$ και $K_D = 5$. Κάθε φορά, λοιπόν, προσδιορίζεται το σφάλμα των μετρούμενων από τα sonars αποστάσεων σε σχέση με τις επιθυμητές αποστάσεις, καθώς και η χρονική του παράγωγος, και με βάση αυτά ελέγχεται η γωνιακή ταχύτητα του ρομπότ κατά τη z-διεύθυνση, φράζοντας την στο διάστημα $[-0.5\text{m/sec}, 0.5\text{m/sec}]$. Η δε γραμμική ταχύτητα του ρομπότ κατά τη διεύθυνση x διατηρείται σταθερή και ίση με 0.5 m/sec. Μόλις η συνθήκη {1} πάψει να ισχύει, το ρομπότ βρίσκεται κοντά σε γωνία των εμποδίων και καλείται να στρίψει, γι'αυτό και μεταβαίνει εκ νέου στην Κατάσταση 2.

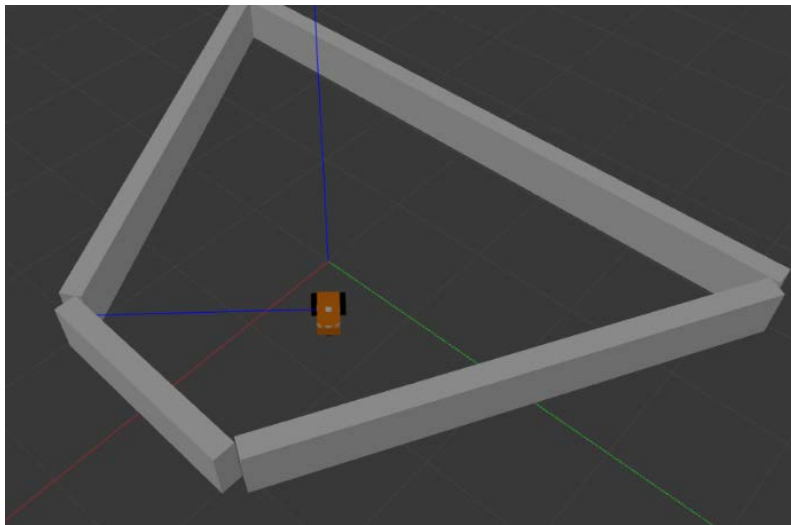


Εικόνα 2: PD ελεγκτής για παρακολούθηση εμποδίων. [3]

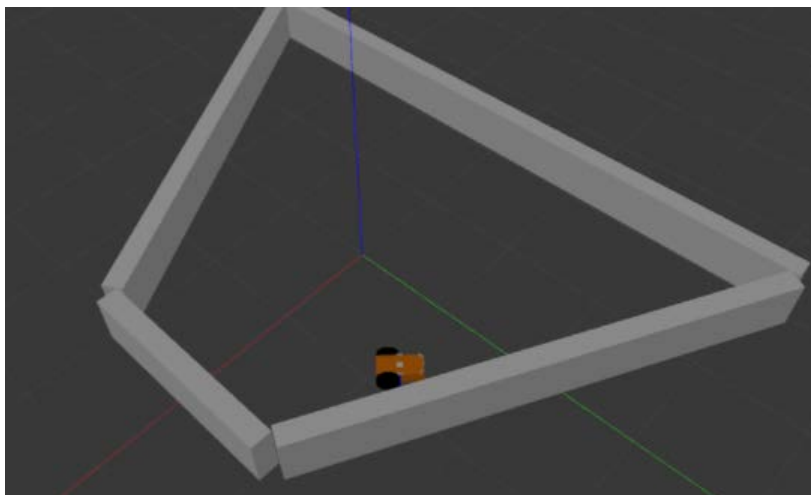
Προσομοίωση Ρομποτικής Εργασίας

Η προσομοίωση της κίνησης του αυτο-οδηγούμενου ρομπότ πραγματοποιείται με βάση την παραπάνω θεωρητική ανάλυση και με χρήση του λογισμικού ROS και του περιβάλλοντος προσομοίωσης Gazebo.

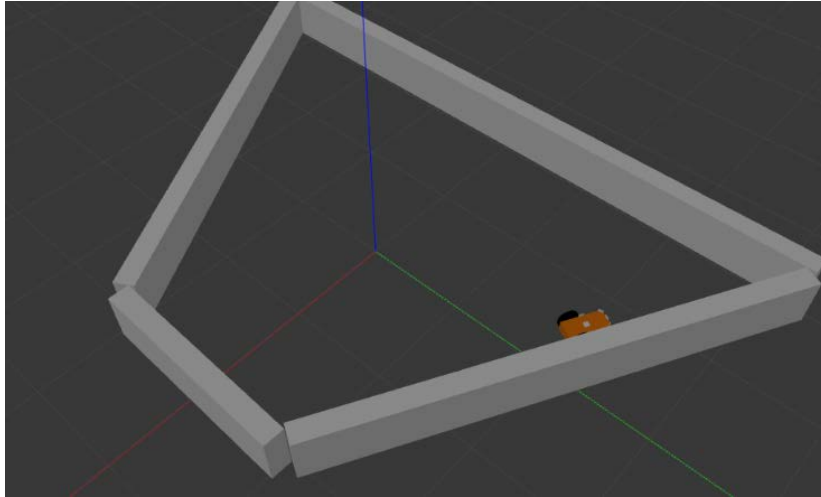
Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται στιγμιότυπα της κίνησης παρακολούθησης εμποδίων του ρομποτικού συστήματος, στο περιβάλλον προσομοίωσης του Gazebo.



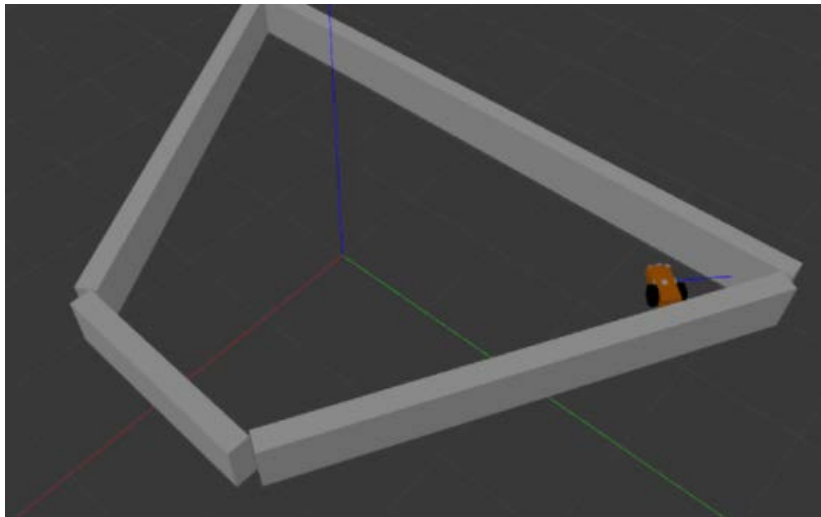
Στιγμιότυπο 1: Το ρομπότ σε πρώτο στάδιο κινείται από τη θέση αρχικοποίησης προς τα εμπόδια με σταθερή γραμμική ταχύτητα 0.5 m/sec.



Στιγμιότυπο 2: Το ρομπότ έχει πλησιάσει αρκετά τα εμπόδια και στρίβει ανθρωρολογικά..



Στιγμιότυπο 3: Το κινούμενο ρομπότ εκτελεί παρακολούθηση εμποδίων υποβοηθούμενη από έναν PD controller. Η απόσταση του από το εμπόδιο διατηρείται σταθερή.

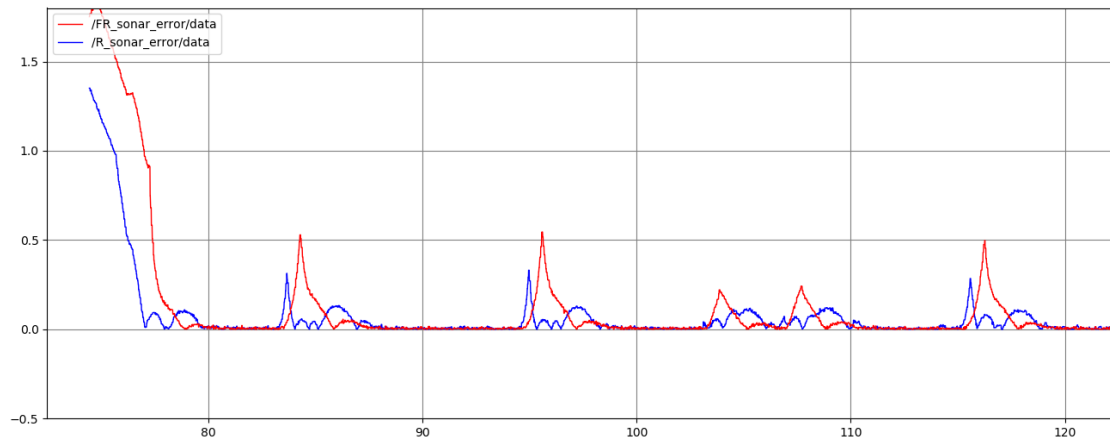


Στιγμιότυπο 4: Το ρομπότ καταφθάνει σε γωνία των εμποδίων και καλείται να στρίψει εκ νέου με ανθρωπολογιακή φορά.

Για την καλύτερη αποτύπωση, επεξήγηση και αξιολόγηση της λειτουργίας του αλγορίθμου wall following, καταγράφονται στον χρόνο ορισμένα μεταβλητά μεγέθη που συνοψίζουν την κίνηση του ρομπότ. Στην Εικόνα 4 απεικονίζονται κατά απόλυτη τιμή τα σφάλματα μετρούμενων αποστάσεων από τις επιθυμητές αποστάσεις για τους αισθητήρες R-sonar (δεξιά) και FR-sonar (μπροστά δεξιά) του ρομπότ. Αν, δηλαδή, θεωρήσουμε $dist_R$ και $dist_{FR}$ τις μετρούμενες από τους αισθητήρες αποστάσεις κάθε χρονική στιγμή, τότε τα απεικονιζόμενα σφάλματα είναι:

$$e_R = |dist_R - 0.2 \text{ m}|, \text{ για τον αισθητήρα R-sonar}$$

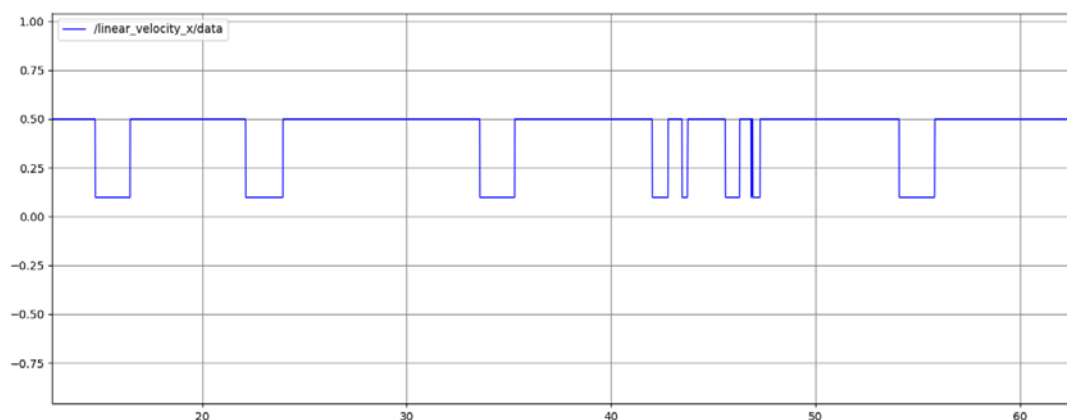
$$e_{FR} = |dist_{FR} - 0.3 \text{ m}|, \text{ για τον αισθητήρα FR-sonar}$$



Εικόνα 4: Σφάλματα μετρούμενων αποστάσεων από επιθυμητές τιμές για τους δύο αισθητήρες.

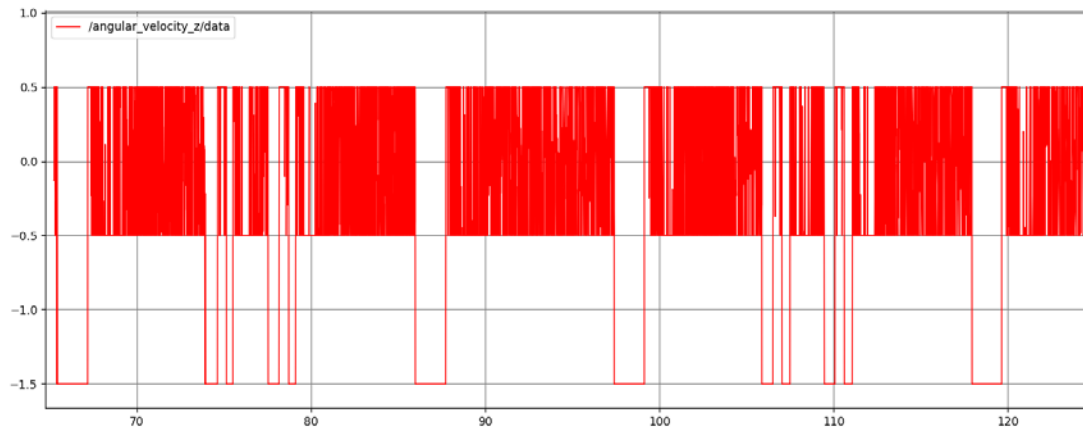
Παρατηρούμε ότι, αρχικά, οι τιμές σφαλμάτων και για τους δύο αισθητήρες είναι **μεγάλες και σταδιακά φθίνουν**, κάτι το οποίο είναι λογικό, καθώς το ρομπότ ως πρώτη κίνηση καλείται να μεταβεί από τη θέση αρικοποίησης κοντά στα εμπόδια. Τα διαστήματα κατά τα οποία, τα σφάλματα λαμβάνουν **σχεδόν μηδενική τιμή**, το ρομπότ εκτελεί επιτυχώς τον αλγόριθμο παρακολούθησης εμποδίων υπό την επίδραση του PD ελεγκτή, διατηρώντας σταθερή την επιθυμητή απόσταση από αυτά. Τα **τοπικά peaks**, δε, στις τιμές των σφαλμάτων που φαίνονται στην Εικόνα 4 αντιστοιχούν στις περιπτώσεις για τις οποίες το ρομπότ πλησιάζει κάποια γωνία εμποδίων και καλείται να στρίψει με ανθρωπολογική φορά, προκειμένου να μην συγκρουστεί. Το στρίψιμο αυτό, όπως είναι φυσικό, μεταφράζεται σε αύξηση των τιμών σφάλματος απόστασης μέχρι το ρομπότ να επανέλθει στην κατάσταση 3, δηλαδή στην παρακολούθηση των εμποδίων.

Όσον αφορά τη γραμμική ταχύτητα του κινούμενου ρομπότ κατά τη διεύθυνση x και τη γωνιακή του ταχύτητα κατά τη z -διεύθυνση, αυτές διαφαίνονται στις Εικόνες 5 και 6 αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι το ρομπότ αναπτύσσει καθόλη τη διάρκεια κίνησης του σταθερή γραμμική ταχύτητα κατά τη διεύθυνση x και ίση με 0.5m/sec . Μοναδική εξαίρεση αποτελούν οι στιγμές κατά τις οποίες το ρομπότ καλείται να στρίψει, οπότεν και η προαναφερθείσα ταχύτητα λαμβάνει την τιμή 0.1m/sec .



Εικόνα 5: Γραμμική Ταχύτητα του κινούμενου Ρομπότ κατά τη x -διεύθυνση.

Η γωνιακή ταχύτητα του κινούμενου ρομπότ κατά τη z-διεύθυνση, από την άλλη, επηρεάζεται άμεσα από τον PD ελεγκτή. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6, τα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία το ρομπότ κινείται παράλληλα με κάποιο εμπόδιο, άρα και υπό την επίδραση του ελεγκτή, η γωνιακή ταχύτητα του υφίσταται απότομες αυξομειώσεις, πάντοτε ωστόσο φραγμένες στο διάστημα $[-0.5, 0.5]$, προκειμένου να μην βγεί εκτός τροχιάς. Στις περιπτώσεις, όμως, που το ρομπότ καλείται να στρίψει η γωνιακή του ταχύτητα λαμβάνει την τιμή -1.5 rad/sec , όπως ορίστηκε στην Θεωρητική Ανάλυση, με το αρνητικό της πρόσημο να υποδηλώνει την ανθρωρολογιακή φορά κίνησης.



Εικόνα 6: Γωνιακή Ταχύτητα κινούμενου ρομπότ κατά τη z-διεύθυνση.

References

- [1] Εισαγωγή στη Ρομποτική, 4η Έκδοση, Craig John
- [2] Ρομποτική, Siciliano, Sciavicco, Villani, Oriolo
- [3] <https://www.autonomousrobotslab.com/pid-control.html>