

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

8^ο Εξάμηνο – Ροή Σ – Ρομποτική II

2^η Εξαμηνιαία Εργασία – Μέρος 1^ο – Αυτοκινούμενα Ρομπότ: Παρακολούθηση
Εμποδίου

Η παρακάτω εργασία έγινε με την επιμέλεια των φοιτητών Κριθαρούλα Αναστασίας
με αριθμό μητρώου 03117073 και Κριθαρούλα Διονύση με αριθμό μητρώου
03117875.

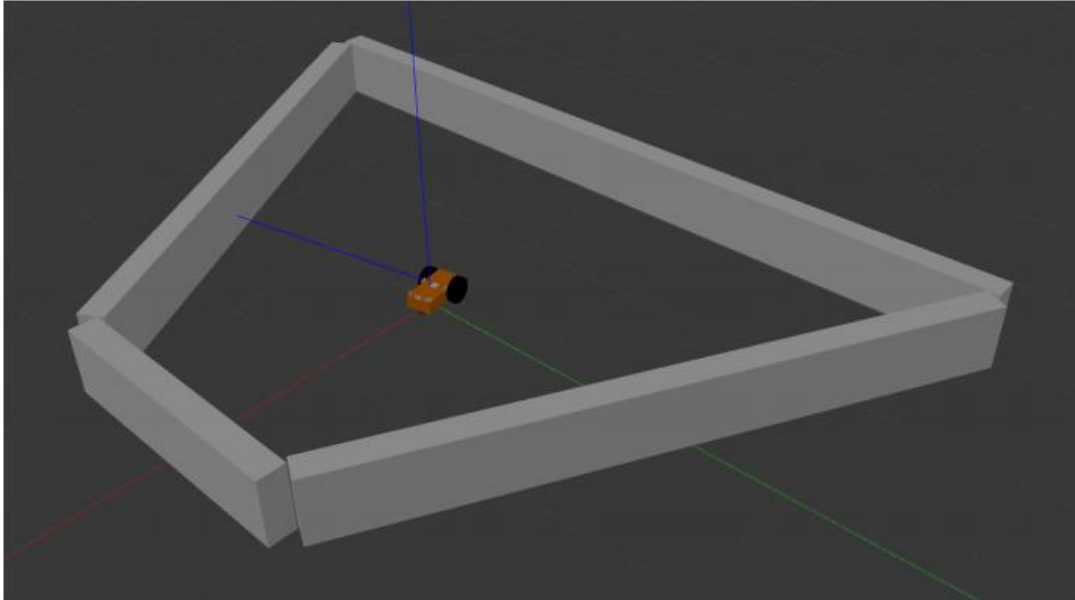
Αθήνα, Ιούνιος 2021

Πίνακας περιεχομένων

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	4
ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	5
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	10
Γραφικές παραστάσεις	11

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

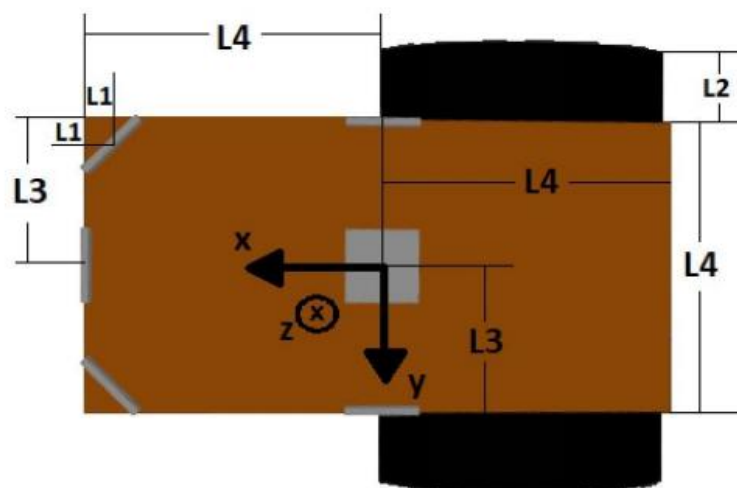
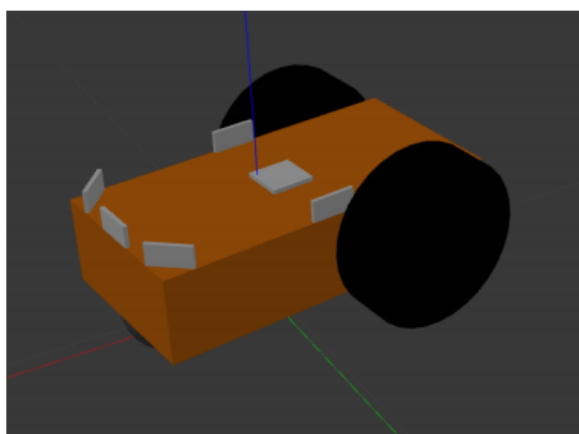
Στη συγκεκριμένη εργασία καλούμαστε να υλοποιήσουμε έναν αλγόριθμο για την παρακολούθηση ενός εμποδίου (wall following). Πιο συγκεκριμένα, το εμπόδιο που κληθήκαμε να ακολουθήσουμε απεικονίζεται παρακάτω:



Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε ένα ρομπότ διαφορικής διάταξης, με το οποίο κληθήκαμε να εκτελέσουμε τουλάχιστον μια πλήρη περιφορά με παράλληλη κίνηση στα εμπόδια, διατηρώντας παράλληλα σταθερή απόσταση από αυτά.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Το ρομπότ που χρησιμοποιήθηκε αποτελεί ένα ρομπότ διαφορικής οδήγησης (differential - drive) με δύο τροχούς διαμέτρου 20 cm, συμμετρικό ως προς το επίπεδο xz, το οποίο δημιουργήθηκε σε περιβάλλον προσομοίωσης και απεικονίζεται παρακάτω, μαζί με το τοπικό πλαίσιο αναφοράς του.



όπου $L_1 = 0.018 \text{ m}$, $L_2 = 0.05 \text{ m}$, $L_3 = 0.1 \text{ m}$ και $L_4 = 0.2 \text{ m}$.

Η συγκεκριμένη ρομποτική διάταξη, όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, περιλαμβάνει:

- πέντε αισθητήρες υπερήχων σόναρ, οι οποίοι μετρούν απόσταση από εμπόδια
- ένα IMU (Inertial Measurement Unit) 9 βαθμών ελευθερίας, το οποίο μετράει στροφικές ταχύτητες, επιταχύνσεις καθώς και περιστροφή γύρω από κάθε άξονα.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Αρχικά, προτού εκτελέσουμε τον αλγόριθμο μεταβάλλουμε τον αρχικό προσανατολισμό του ρομπότ (περιστροφή κατά τον άξονα z) κατά γωνία:

$$\begin{aligned} angle &= \text{mod}(X_1 + X_2, \pi) \xrightarrow{X_1=3, X_2=5} \\ angle &= \text{mod}(8, \pi) \Rightarrow \\ \mathbf{angle} &\approx \mathbf{1.72 \text{ rad}} \end{aligned}$$

ενώ καθώς $X = X_1 + X_2 = 8$ είναι άρτιος αριθμός, θα υλοποιήσουμε την παρακολούθηση με ωρολογιακή φορά (CW) ως προς το παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων.

Προκειμένου, λοιπόν, να παρακολουθήσουμε το εμπόδιο και να προσομοιώσουμε μια παράλληλη κίνηση του ρομπότ σε αυτό υλοποιούμε έναν αλγόριθμο παρακολούθησης εμποδίου με επενέργεια στη γραμμική και γωνιακή ταχύτητά του ρομπότ, ο οποίος αποτελείται από τις ακόλουθες τρεις καταστάσεις:

Κατάσταση 0: Προσέγγιση του εμποδίου για πρώτη φορά

Το ρομπότ κινείται με σταθερή γραμμική ταχύτητα (ως προς τον άξονα x) και μηδενική γωνιακή ταχύτητα (ως προς τον άξονα z) σε ευθύγραμμη τροχιά που ακολουθεί προέκταση του αρχικού του προσανατολισμού έως ότου πλησιάσει το εμπόδιο – τοίχο. Το «πόσο» κοντά έχει πλησιάσει το ρομπότ στο εμπόδιο, το ελέγχουμε μέσω του εμπρόσθιου αισθητήρα του ρομπότ. Όταν η τιμή αυτού πέσει κάτω από ένα κατώφλι μεταβαίνουμε στην κατάσταση 1.

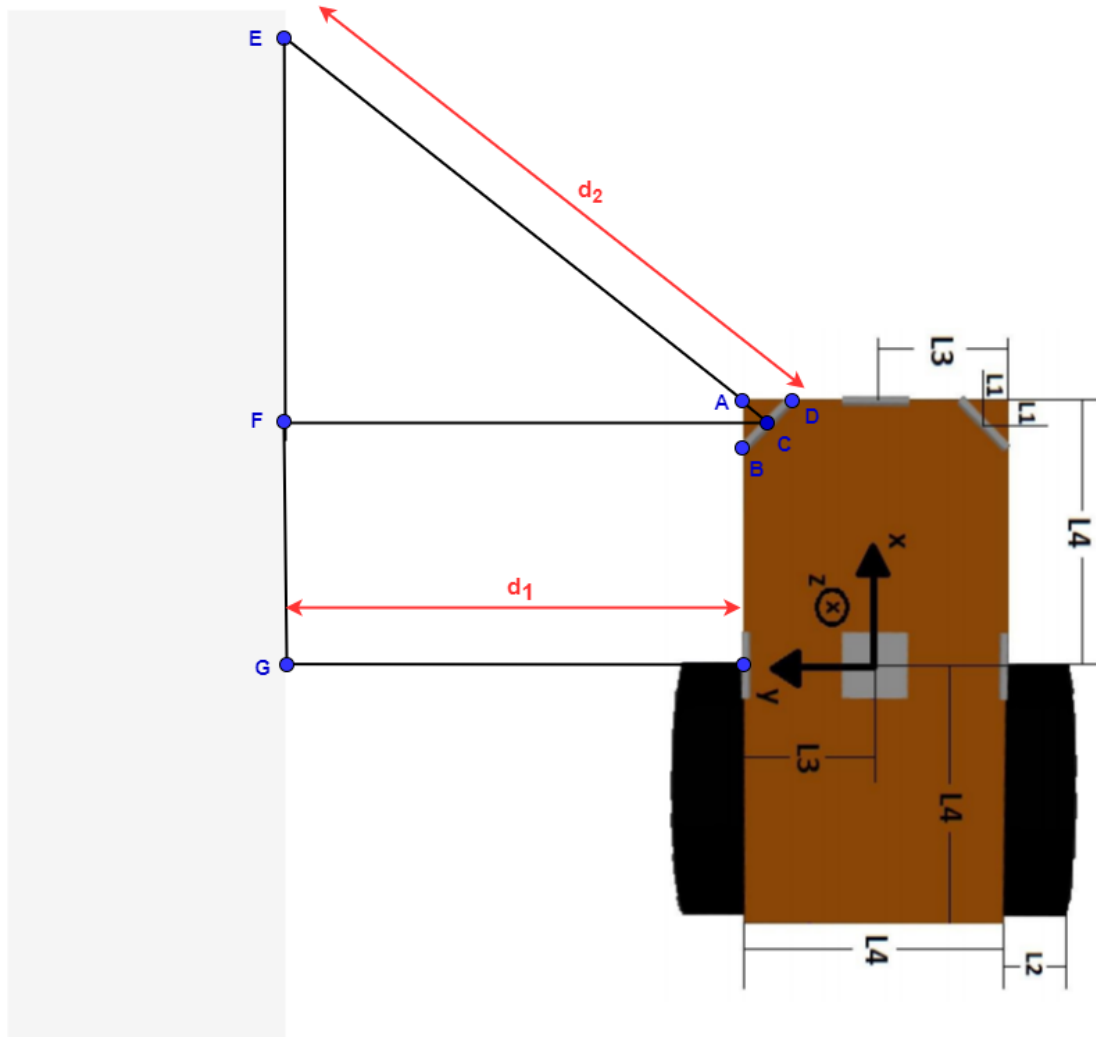
Κατάσταση 1: Στροφή

Το ρομπότ εισέρχεται στην κατάσταση αυτή όταν πλησιάζει αρκετά το εμπόδιο – τοίχο. Για τον έλεγχο αυτό χρησιμοποιούμε είτε τον εμπρόσθιο αισθητήρα του ρομπότ (όταν προέρχεται από την κατάσταση 0), είτε ένα συνδυασμό του αριστερού, του εμπρόσθιου αριστερού και του εμπρόσθιου αισθητήρα (όταν

προέρχεται από την κατάσταση 2). Όταν, λοιπόν, η τιμή του εμπρόσθιου αισθητήρα πέσει κάτω από ένα κατώφλι, ή αντίστοιχα οι τιμές του αριστερού και του εμπρόσθιου αριστερού κινητήρα με την προσθήκη κάποιων σταθερών ξεπεράσουν την τιμή του εμπρόσθιου κινητήρα, το ρομπότ καλείται να εκτελέσει μια δεξιά περιστροφή έως ότου ευθυγραμμιστεί παράλληλα με το εμπόδιο που αρχικά βρίσκεται μπροστά του. Για το σκοπό αυτό ελαττώνεται η γραμμική ταχύτητα του ρομπότ (ως προς τον άξονα x), ενώ αυξάνεται η γωνιακή του ταχύτητα (ως προς τον άξονα z) οπότε και αρχίζει να περιστρέφεται δεξιόστροφα έως ότου ευθυγραμμιστεί με τον τοίχο. Ο έλεγχος της ευθυγράμμισης γίνεται και πάλι με χρήση των τριών αισθητήρων που προαναφέρθηκαν.

Κατάσταση 2: Ευθύγραμμη κίνηση παράλληλη στον τοίχο

Το ρομπότ ευθυγραμμίζεται με το εμπόδιο – τοίχο αριστερά του και τον «ακολουθεί» διατηρώντας μια σταθερή απόσταση από αυτόν, οπότε και κινείται με μια σταθερή γραμμική ταχύτητα (ως προς τον άξονα x), ενώ η γωνιακή του ταχύτητα (ως προς τον άξονα z) ρυθμίζεται μέσω ενός PID ελεγκτή. Ο ελεγκτής αυτός χρησιμοποιεί τις τιμές του αριστερού αλλά και του εμπρόσθιου αριστερού αισθητήρα του ρομπότ και προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει τα σφάλματα αυτών από τις αναμενόμενες τιμές τους. Πιο αναλυτικά, έστω ότι θέλουμε το ρομπότ να κινείται παράλληλα στο εμπόδιο, σε μια απόσταση d_1 από αυτό. Τότε θέλουμε η τιμή του αριστερού αισθητήρα του ρομπότ να ισούται διαρκώς με d_1 , ενώ όσον αφορά την τιμή του εμπρόσθιου αριστερού αισθητήρα του ρομπότ έχουμε:



Παρατηρούμε ότι καθώς το τρίγωνο (ABD) είναι ισοσκελές, το ευθύγραμμο τμήμα AC θα είναι διάμεσος, ύψος και διχοτόμος της γωνίας \widehat{BCD} , οπότε και $\widehat{BAC} = \widehat{CAD} = 45^\circ$. Άρα και $\widehat{FEA} = 45^\circ$. Οπότε:

$$\sin(\widehat{FEA}) = \frac{d_1 + L_1}{d_2} \Rightarrow \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{d_1 + 0.018}{d_2} \Rightarrow$$

$$\sqrt{2} \cdot d_2 - 2 \cdot d_1 = 0.036$$

Έστω λοιπόν ότι θέλουμε το ρομπότ να κινείται παράλληλα στον τοίχο σε σταθερή απόσταση d_1 από αυτόν, τότε οι τιμές το αριστερού αισθητήρα d_1 , και του εμπρόσθιου αριστερού κινητήρα d_2 θα πρέπει να ικανοποιούν τη σχέση:

$$\sqrt{2} \cdot d_2 - 2 \cdot d_1 = 0.036$$

Επιλέγουμε $d_1 = 0.2 \text{ m}$, οπότε θα πρέπει και $d_2 = \frac{0.036+0.4}{\sqrt{2}} \Rightarrow d_2 = 0.3 \text{ m}$.

Θεωρώντας τις παραπάνω τιμές ως target distances για τους δύο αισθητήρες προκειμένου το ρομπότ να εκτελεί ευθύγραμμη κίνηση παράλληλα στον τοίχο, η εξίσωση ελέγχου του PID ελεγκτή για τη γωνιακή ταχύτητα (ως προς τον άξονα z) του ρομπότ θα δίνεται από τη σχέση:

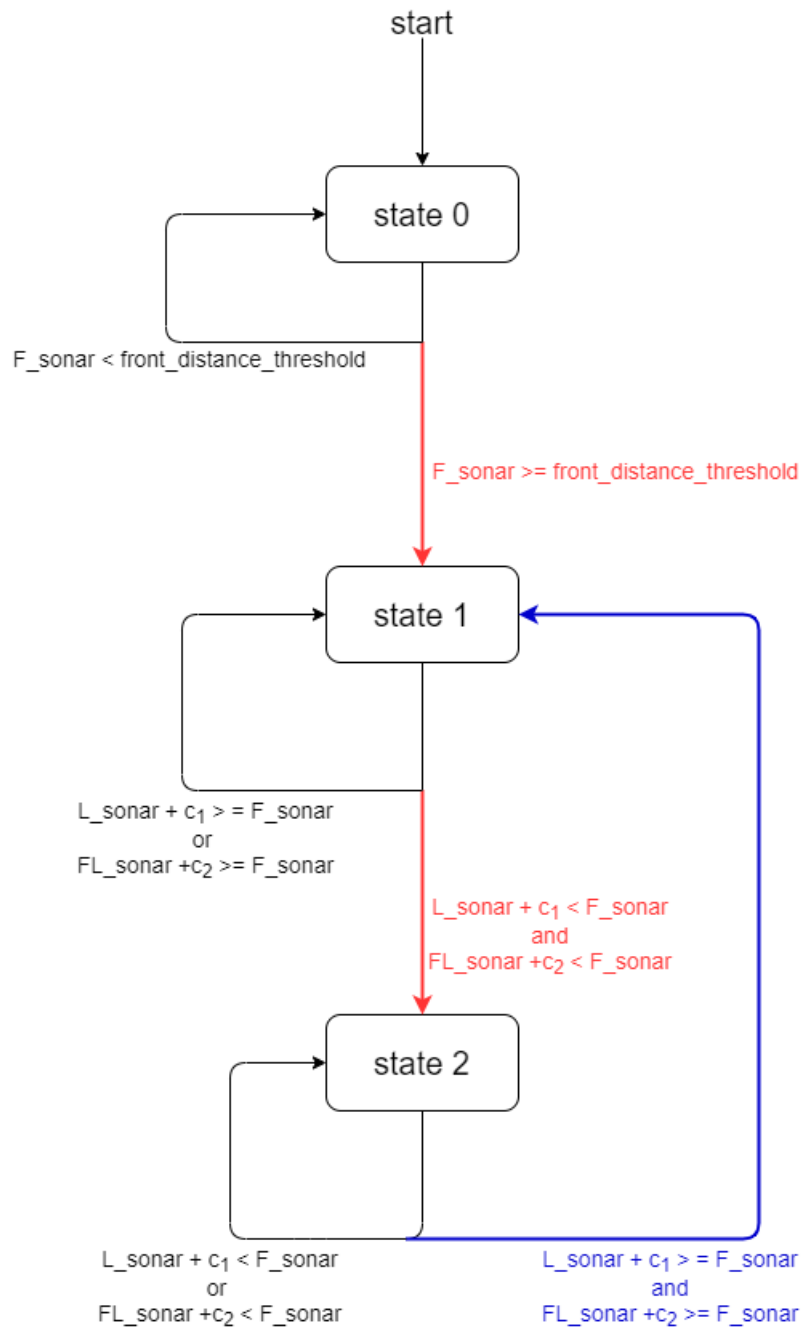
$$\omega_z = K_P \cdot e(t) + K_D \cdot \frac{\partial e}{\partial t}$$

όπου $e(t) = (F_sonar - d_1) + (FL_sonar - d_2)$ και F_sonar, FL_sonar οι τιμές του αριστερού και του εμπρόσθιου αριστερού αισθητήρα αντίστοιχα, κάθε χρονική στιγμή.

Σχόλιο:

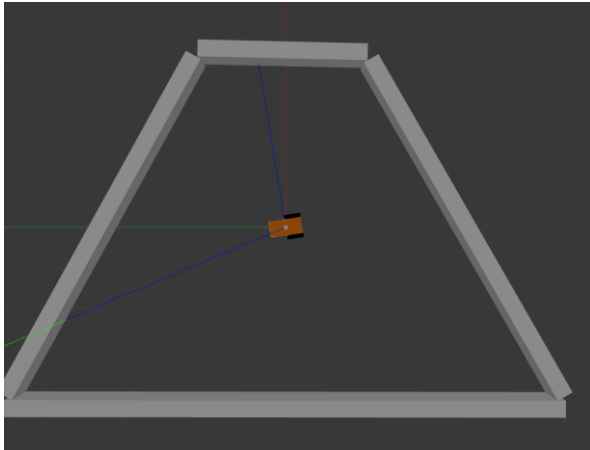
Όσον αφορά τις αυξομειώσεις της γραμμικής ταχύτητας του ρομπότ κατά τον άξονα x καθώς και της γωνιακής ταχύτητας κατά τον άξονα z κατά τη διάρκεια των μεταβάσεων μεταξύ των καταστάσεων, αυτές γίνονται ομαλά, καθώς θεωρούμε ομαλά επιταχυνόμενες κινήσεις με σταθερές επιταχύνσεις σε κάθε μια από τις δύο κατευθύνσεις. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό προκειμένου να αποφύγουμε απότομες μεταβολές στις ταχύτητες, οι οποίες είναι ιδιαίτερα επιβλαβείς για τους κινητήρες.

Η διαδοχή των παραπάνω καταστάσεων από το ρομπότ κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου παρακολούθησης του εμποδίου μπορεί να αναπαρασταθεί μέσω του ακόλουθου διαγράμματος:

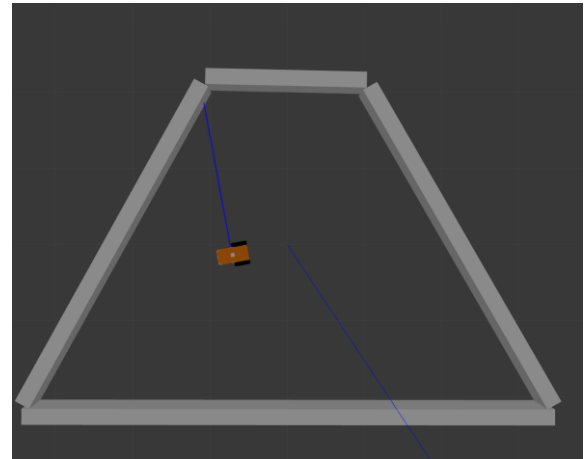


ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

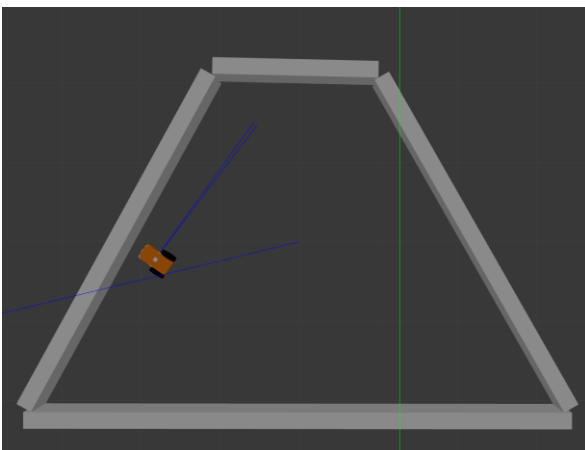
Παρουσιάζουμε αρχικά κάποια ενδεικτικά στιγμιότυπα (screenshots) της προσομοίωσης που υλοποιήσαμε προκειμένου να δούμε τον τρόπο με τον οποίο το ρομπότ εκτελεί τη ζητούμενη εργασία:



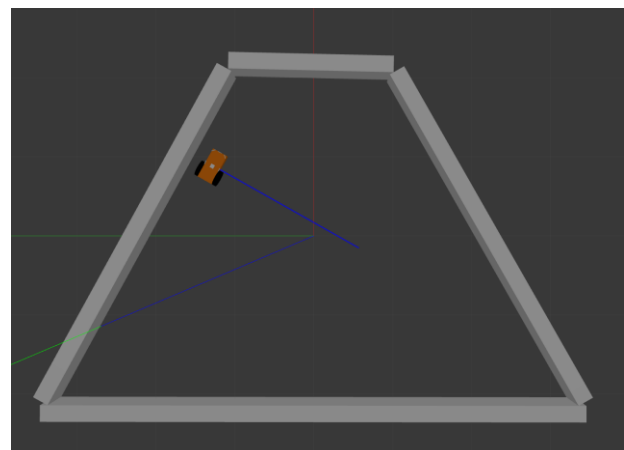
state 0



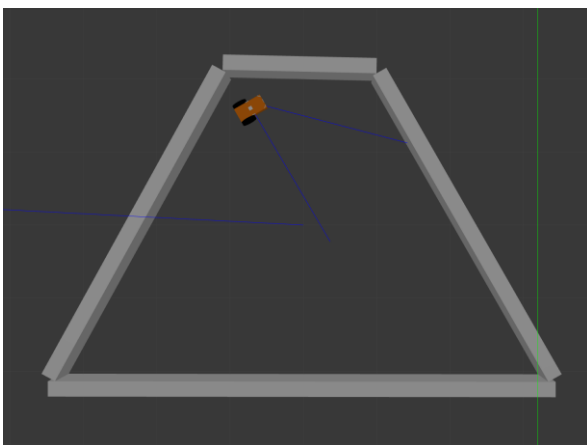
state 0



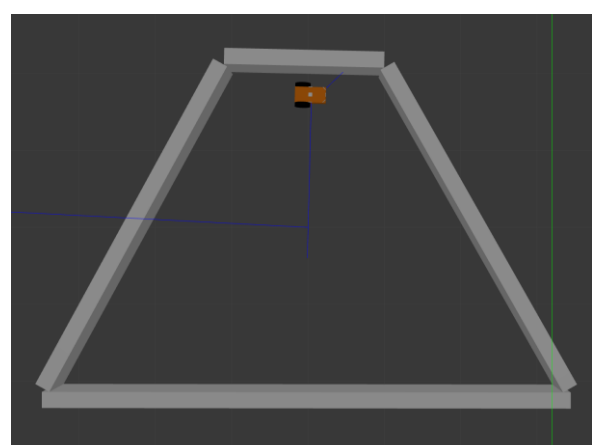
state 1



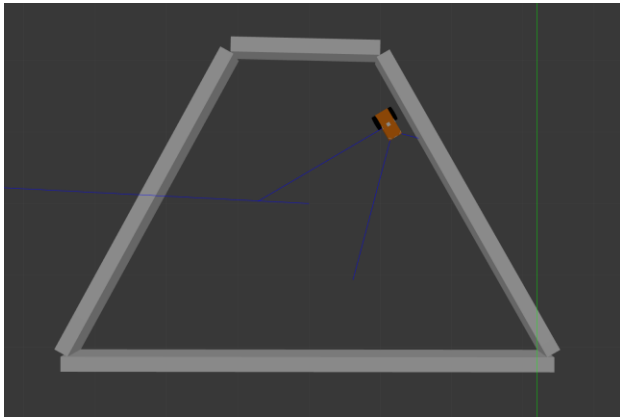
state 2



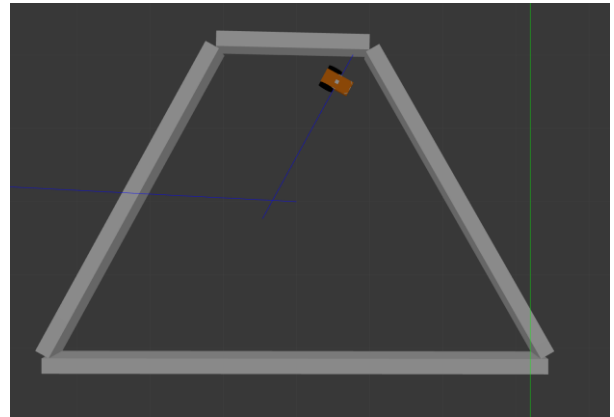
state 1



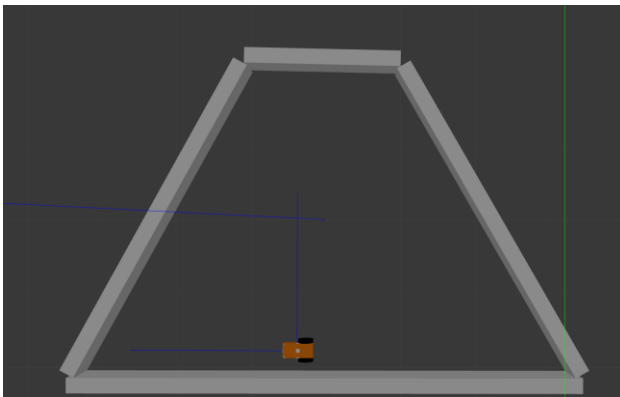
state 2



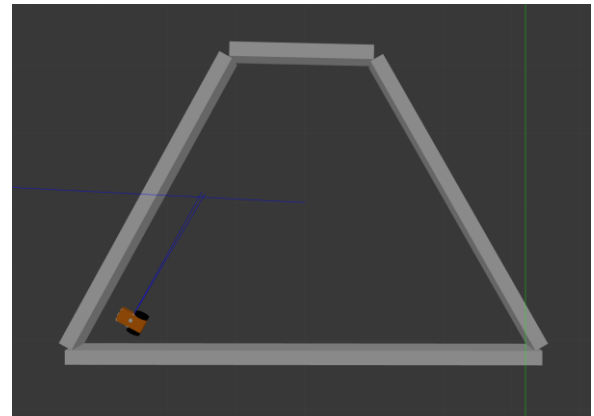
state 2



state 1



state 2

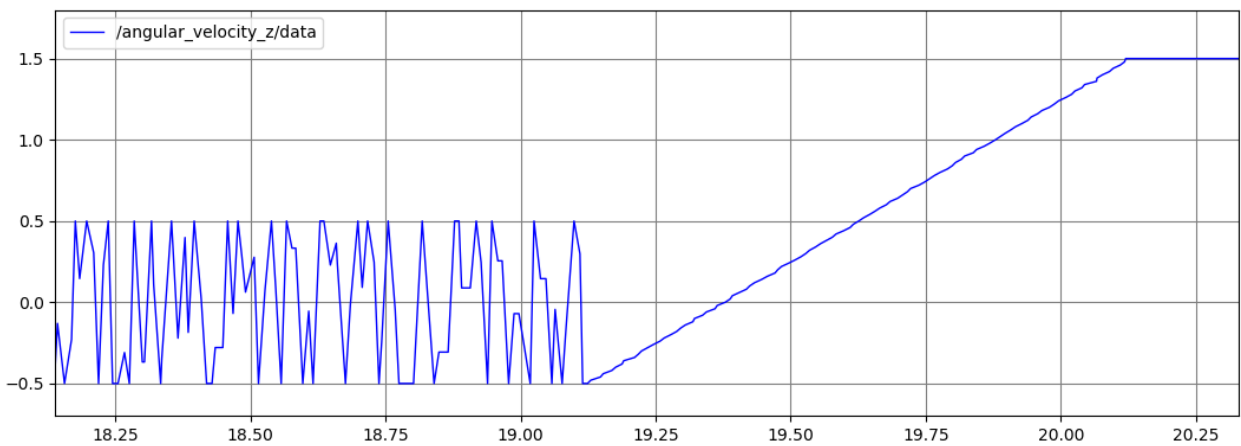
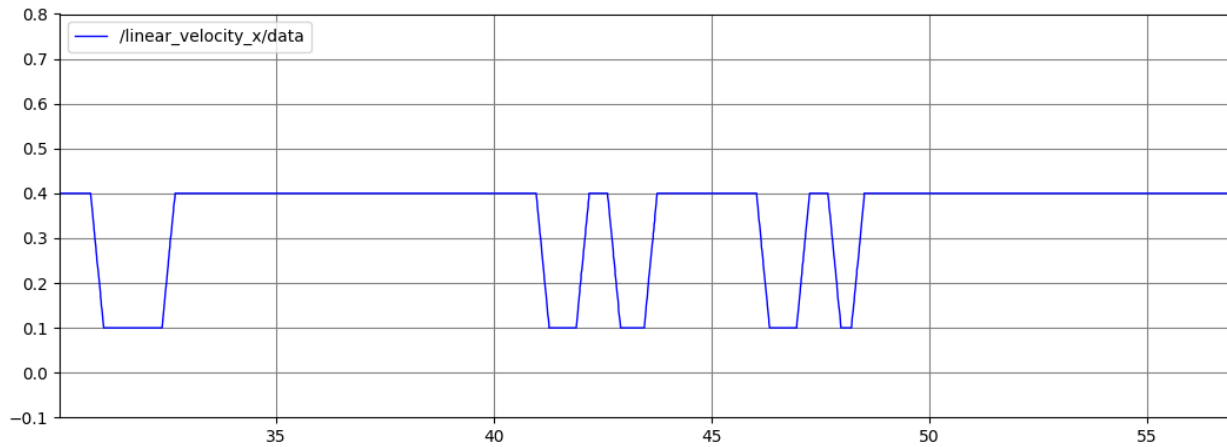


state 1

Γραφικές παραστάσεις

Στη συνέχεια παρατίθενται ορισμένες γραφικές παραστάσεις οι οποίες υπολογίστηκαν με χρήση του `rat_plot` και βοηθούν στην καλύτερη κατανόηση της προσομοίωσης καθώς και του τρόπου με τον οποίο το ρομπότ «παρακολουθεί» το εμπόδιο – τοίχο.

Απεικονίζουμε αρχικά τη **γραμμική ταχύτητα** του ρομπότ ως προς τον άξονα x , αλλά και τη **γωνιακή ταχύτητα** αυτού ως προς τον άξονα z .

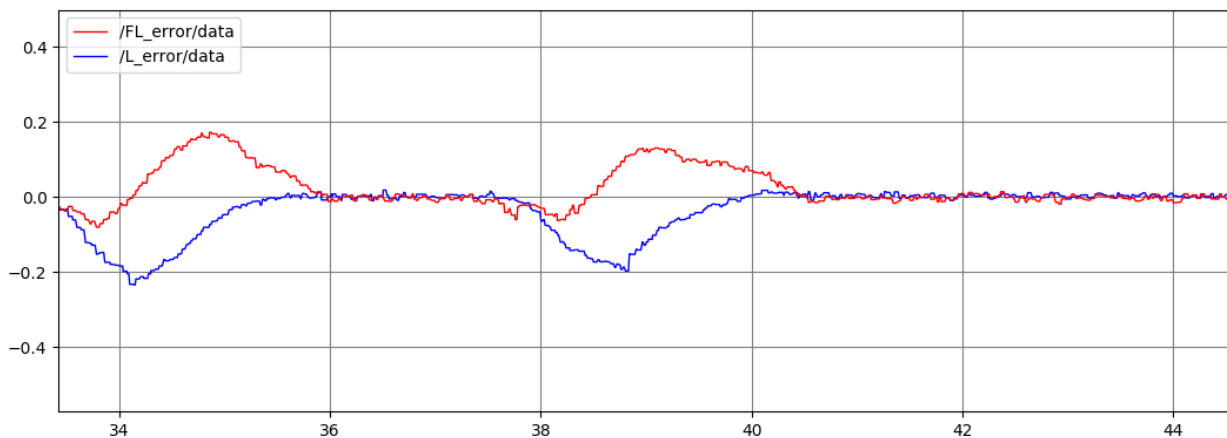
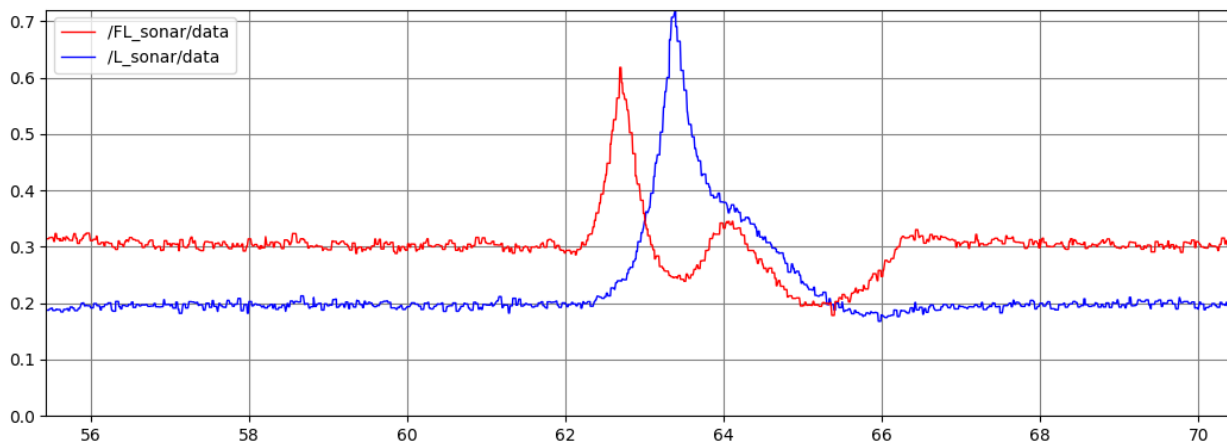


Παρατηρήσεις:

Παρατηρούμε, όπως και αναμέναμε, ότι όσον αφορά τη γραμμική ταχύτητα του ρομπότ ως προς τον άξονα x , αυτή εναλλάσσεται μεταξύ των τιμών 0.4 και 0.1, οι οποίες αντιστοιχούν στο state 2 και στο state 1 αντίστοιχα. Μάλιστα, οι μεταβάσεις μεταξύ των τιμών αυτών είναι ομαλές ευθύγραμμες, όπως και επιδιώξαμε. Ομοίως, όσον αφορά τη γωνιακή ταχύτητα του ρομπότ ως προς τον άξονα z , παρατηρούμε ότι αυτή κινείται είτε στο διάστημα -0.5 έως 0.5 , είτε αποκτά σταθερή τιμή ίση με 1.5. Οι αυξομειώσεις που παρατηρούνται μεταξύ -0.5 και 0.5 αντιστοιχούν στο state 2, όπου η γωνιακή ταχύτητα ελέγχεται μέσω του PID ελεγκτή, προκειμένου να διατηρηθεί σταθερός ο προσανατολισμός του ρομπότ παράλληλος προς το εμπόδιο. Το γεγονός ότι οι διακυμάνσεις της περιορίζονται στο συγκεκριμένο διάστημα, αποτελεί δικό μας περιορισμό, τον οποίο και επιβάλλαμε (πειραματικά) στη έξοδο

του PID ελεγκτή προκειμένου αποφύγουμε πολύ απότομες μεταβολές. Αντίστοιχα, το διάστημα στο οποίο η γωνιακή ταχύτητα αποκτά σταθερή τιμή ίση με 1.5, αντιστοιχεί στο state 1, όπου το ρομπότ εκτελεί μια ομαλή δεξιόστροφη περιστροφή. Μάλιστα, και πάλι οι μεταβάσεις μεταξύ των δύο αυτών καταστάσεων παρατηρούμε ότι είναι ομαλές και σχεδόν γραμμικές.

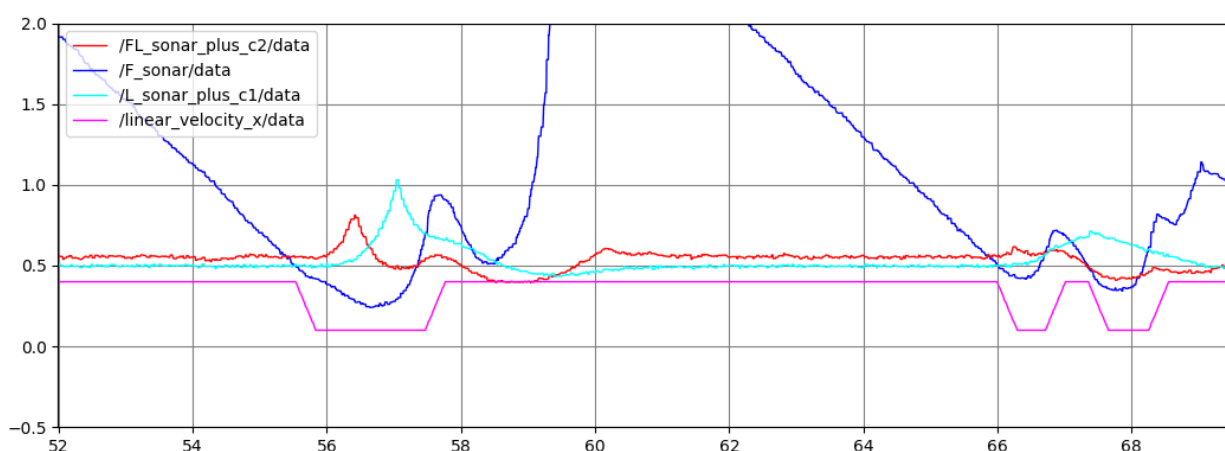
Στη συνέχεια απεικονίζουμε τις τιμές του αριστερού **L_sonar**, αλλά και του εμπρόσθιου αριστερού αισθητήρα **FL_sonar** του ρομπότ, καθώς και τις αποκλίσεις (σφάλματα) **L_error**, **FL_error**, αυτών από τις προσδοκώμενες τιμές τους 0.2 και 0.3 αντίστοιχα, δηλαδή $L_error = 0.2 - L_sonar$ και $FL_error = 0.3 - FL_sonar$.



Παρατηρήσεις:

Παρατηρούμε ότι σε διαστήματα όπου το ρομπότ βρίσκεται στο state 2, δηλαδή ακολουθεί «παράλληλα» το εμπόδιο, οι τιμές των δύο αισθητήρων προσεγγίζουν αρκετά καλά τις προσδοκώμενες τιμές τους, με τα αντίστοιχα σφάλματα να είναι αρκετά χαμηλά και να κυμαίνονται μεταξύ -0.01 και 0.01 , οπότε και το ρομπότ επιτυγχάνει, όπως παρατηρούμε και από την προσομοίωση, να διατηρήσει σε μεγάλο βαθμό μια σταθερή απόσταση (ίση με 0.2) από το εμπόδιο κατά τη διάρκεια της παράλληλης κίνησής του σε αυτό. Αντίθετα, όταν το ρομπότ βρίσκεται σε state 1, οπότε και εκτελεί δεξιόστροφη περιστροφή, είναι πρακτικά αδύνατο να διατηρήσει σταθερή απόσταση από τα εμπόδια, και για αυτό παρατηρούμε τις έντονες μεταβολές στις τιμές των αισθητήρων, αλλά και των αντίστοιχων σφαλμάτων κατά τη διάρκεια του διαστήματος αυτού.

Τέλος, θα προσπαθήσουμε να παρατηρήσουμε το πώς αλλά και το πόσο γρήγορα προσαρμόζεται το ρομπότ στο κατάλληλο state του αλγορίθμου, και για το σκοπό αυτό απεικονίζουμε στο ακόλουθο διάγραμμα, την τιμή του εμπρόσθιου αισθητήρα F_sonar , του ρομπότ, αλλά και των παραστάσεων $L_sonar + c_1$, $FL_sonar + c_2$, οι οποίες καθορίζουν τις συνθήκες μεταβάσεων μεταξύ των states. Παράλληλα, θα απεικονίσουμε και τη γραμμική ταχύτητα του ρομπότ, ως προς τον άξονα x , η οποία και βοηθάει να αντιληφθούμε κάθε φορά σε ποιο state βρίσκεται το ρομπότ.



Παρατηρήσεις:

Παρατηρούμε, λοιπόν, όπως και αναμέναμε, ότι στο σημείο που η τιμή του εμπρόσθιου αισθητήρα F_{sonar} (μπλε καμπύλη), «πέσει» κάτω από τις τιμές των παραστάσεων $L_{\text{sonar}} + c_1$ (γαλάζια καμπύλη) και $FL_{\text{sonar}} + c_2$ (κόκκινη καμπύλη), τότε η γραμμική ταχύτητα του ρομπότ αρχίζει και μειώνεται ομαλά από την τιμή 0.4 στην τιμή 0.1, οπότε και το ρομπότ μεταβαίνει από το state 2 στο state 1, όπου και παραμένει καθ' όλη τη διάρκεια που η τιμή του F_{sonar} είναι μικρότερη από κάποια εκ των δύο παραστάσεων. Στη συνέχεια όταν η τιμή του εμπρόσθιου αισθητήρα ξεπεράσει και πάλι τις τιμές του αριστερού και του εμπρόσθιου αριστερού αισθητήρα του ρομπότ συν τις σταθερές, το ρομπότ θεωρείται ότι έχει περιστραφεί αρκετά και έχει ευθυγραμμιστεί ικανοποιητικά με το επόμενο εμπόδιο, οπότε και μεταβαίνει εκ νέου στο state 2, με τη γραμμική του ταχύτητα να αρχίζει να αυξάνεται ομαλά έως την τιμή 0.4. Οι τιμές των σταθερών c_1 , c_2 επιλέχθηκαν πειραματικά ίσες με $c_1 = 0.3$ και $c_2 = 0.25$.