



Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ

ΔΕΥΤΕΡΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΣΑΦΟΥΣ ΕΛΕΓΚΤΗ (FLC) ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΚΙΝΗΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Ημερομηνία: 11/10/2024

Οικονόμου Χρήστος

A.E.M.: 10268

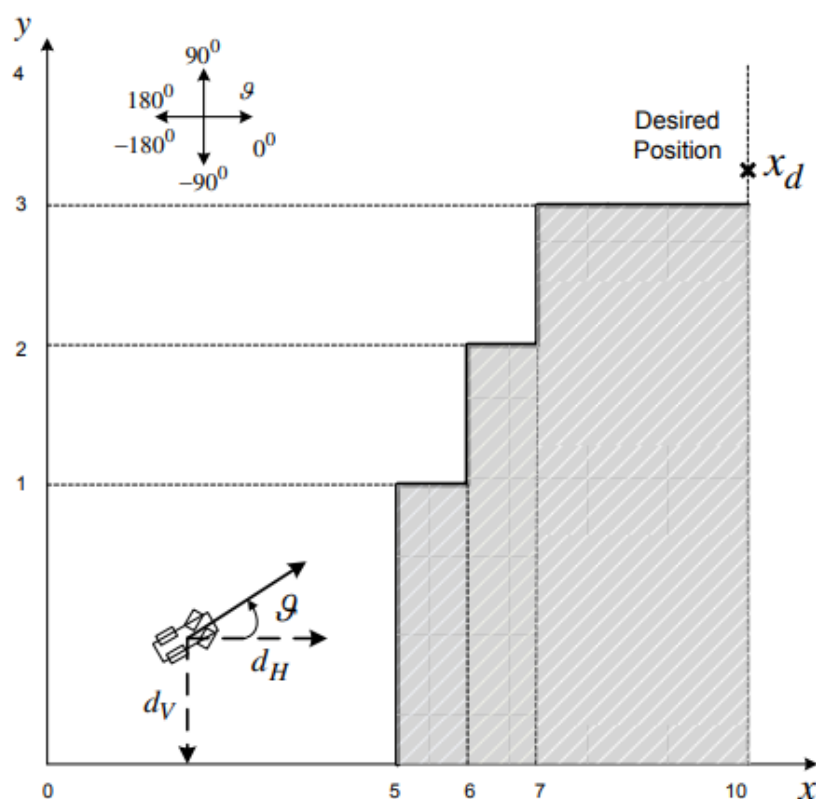
Email: cnoikonom@ece.auth.gr

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή.....	σελ.3
Σχεδίαση του Ασαφούς Ελεγκτή (FLC)	4
Μοντελοποίηση Συστήματος με Χρήση Simulink	9
Προσομοίωση - Αποτελέσματα	10
Δημιουργία Περιβάλλοντος	10
Αποτελέσματα Προσομοιώσεων	11
Διορθώσεις στις Λεκτικές Μεταβλητές (Tuning)	13
Συμπεράσματα	16
Βιβλιογραφικές Πηγές	17

Εισαγωγή

Η δεύτερη εργασία του μαθήματος πραγματεύεται τον σχεδιασμό ενός ασαφούς ελεγκτή (FLC), με σκοπό τον έλεγχο της κίνησης ενός οχήματος, προκειμένου αυτό να έχει τη δυνατότητα να αποφεύγει εμπόδια. Το περιβάλλον, στο οποίο καλείται να κινηθεί το εν λόγω όχημα αποτυπώνεται στην Εικόνα 1.

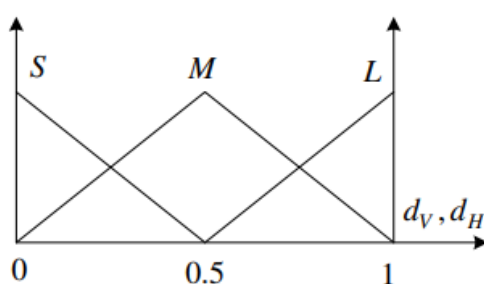


Εικόνα 1: Περιβάλλον Κίνησης Οχήματος

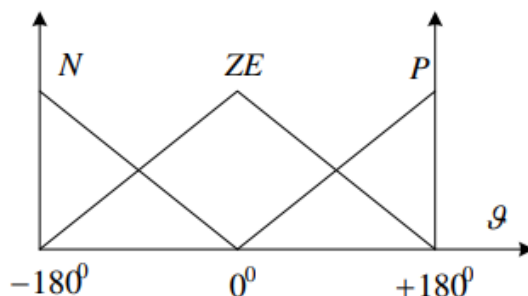
Το όχημα ξεκινάει από την θέση $(x_{init}, y_{init}) = (4.1, 0.3)$ και ο στόχος του είναι να φτάσει στο σημείο $(x_d, y_d) = (10, 3.2)$, χωρίς να ακουμπήσει σε κάποιο από τα σταθερά εμπόδια που φαίνονται στην Εικόνα 1.

Σχεδίαση του Ασαφούς Ελεγκτή (FLC)

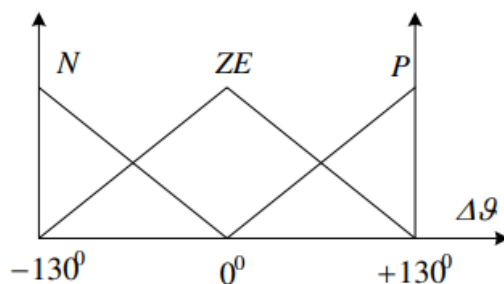
Ο ελεγκτής που ζητείται από την εκφώνηση, διαθέτει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και πρέπει να πληροί κάποιες προδιαγραφές. Συγκεκριμένα, ως **εισόδους** έχει την **κάθετη απόσταση** του οχήματος από τα εμπόδια (d_V), η οποία εκτείνεται σε τιμές που ανήκουν στο διάστημα $[0,1]$, την **οριζόντια απόσταση** του οχήματος από τα εμπόδια (d_H) με τιμές που ανήκουν στο ίδιο διάστημα, καθώς και τη **διεύθυνση της ταχύτητας** του οχήματος (θ), οι τιμές της οποίας κυμαίνονται στο διάστημα $[-180^\circ, 180^\circ]$. Ως μοναδική **έξοδος** του FLC καταλογίζεται η **μεταβολή της διεύθυνσης της ταχύτητας** του οχήματος ($\Delta\theta$), με εύρος τιμών $[-130^\circ, 130^\circ]$. Ο χώρος των μεταβλητών εισόδου και εξόδου, χωρίζεται σε **τρία ασαφή σύνολα**, σύμφωνα με τις Εικόνες 2, 3 και 4.



Εικόνα 2: Διαμερισμός του Χώρου των Μεταβλητών Εισόδου d_V και d_H σε Τρία Ασαφή Σύνολα

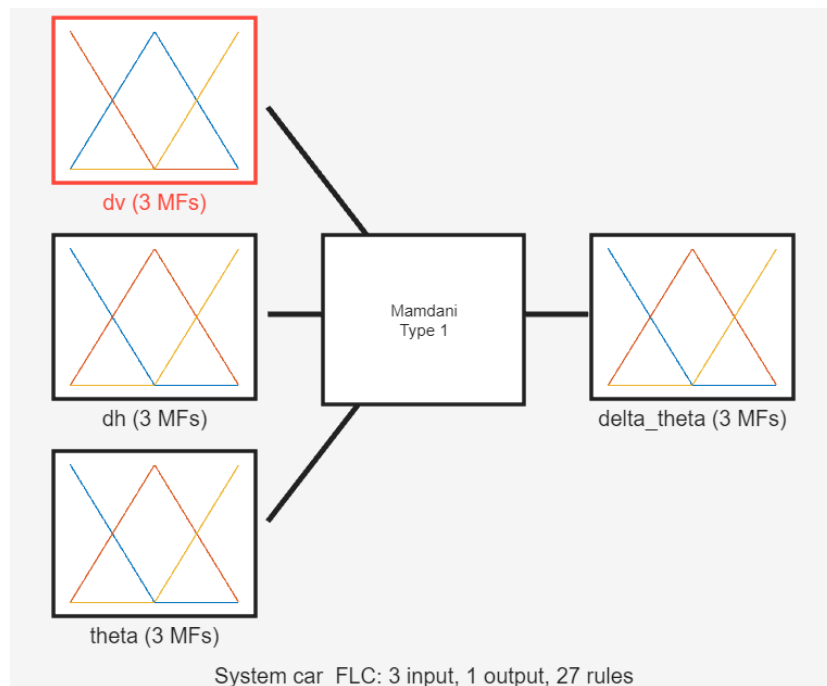


Εικόνα 3: Διαμερισμός του Χώρου της Μεταβλητής Εισόδου θ σε Τρία Ασαφή Σύνολα

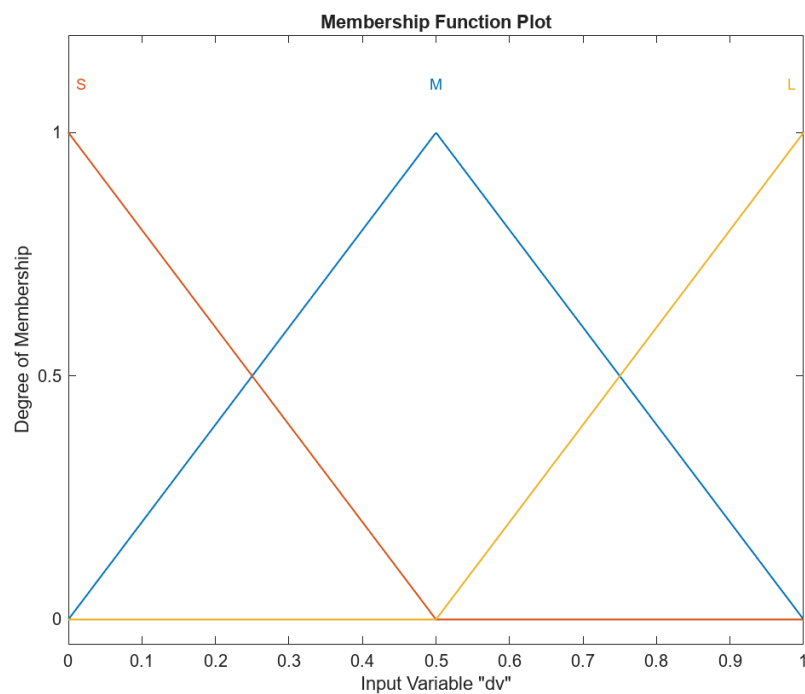


Εικόνα 4: Διαμερισμός του Χώρου της Μεταβλητής Εξόδου $\Delta\theta$ σε Τρία Ασαφή Σύνολα

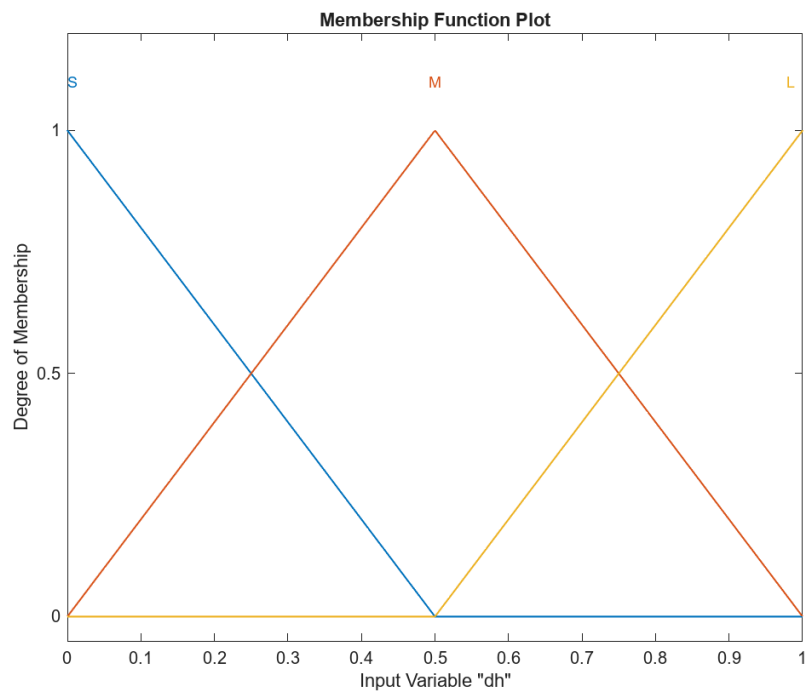
Με βάση τα διαγράμματα που απεικονίζονται παραπάνω και τα υπόλοιπα δεδομένα της εκφώνησης, γίνεται η πρώτη μοντελοποίηση του FLC μέσω του εργαλείου **Fuzzy Logic Designer** της MATLAB, η οποία αποτυπώνεται στις παρακάτω εικόνες:



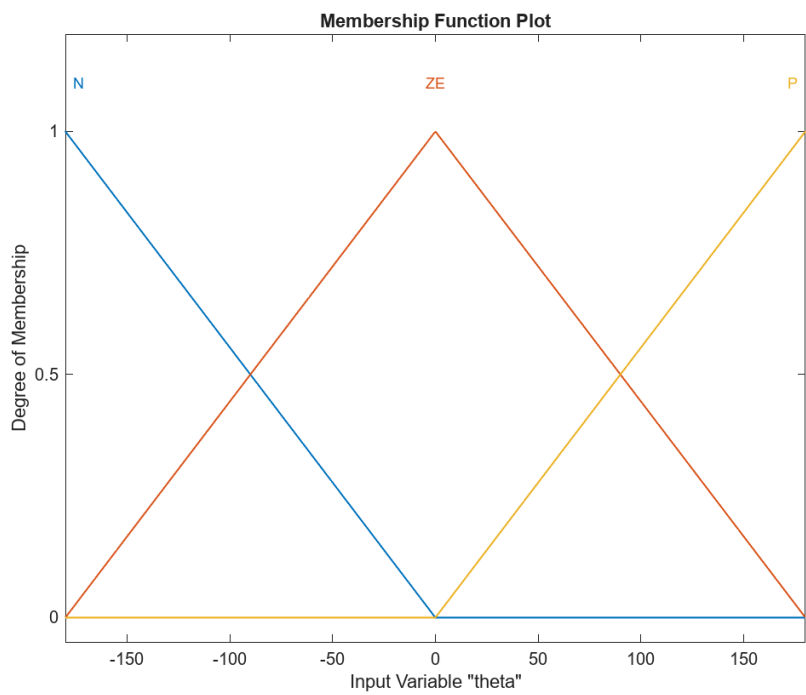
Εικόνα 5: Μπλοκ Διάγραμμα του Ασαφούς Ελεγκτή



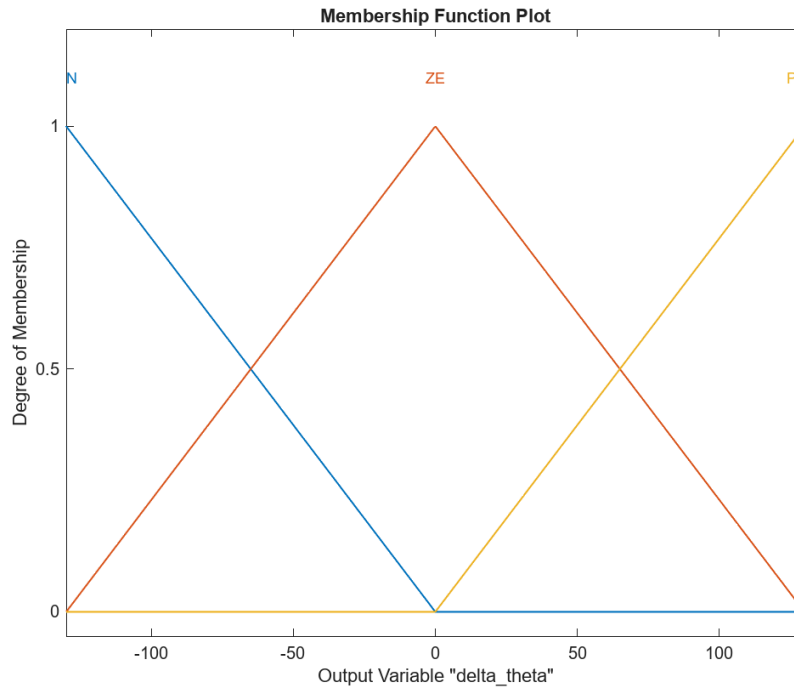
Εικόνα 6: Membership Functions της Μεταβλητής Εισόδου dv



Εικόνα 7: *Membership Functions της Μεταβλητής Εισόδου dh*



Εικόνα 8: *Membership Functions της Μεταβλητής Εισόδου θ*



Εικόνα 9: Membership Functions της Μεταβλητής Εξόδου $\Delta\theta$

Λεπτομέρειες σχετικά με τις τιμές των παραμέτρων των Membership Functions των μεταβλητών εισόδου και εξόδου, όπως και όλες οι πληροφορίες και τα δεδομένα που σχετίζονται με τον σχεδιασμό του ελεγκτή, αναγράφονται στο αρχείο “Car_Control_FIS.fis”.

Από τα ασαφή σύνολα των μεταβλητών εισόδου και εξόδου, προκύπτει το **σύνολο των κανόνων**, με βάση τους οποίους θα σχεδιαστεί ο ασαφής ελεγκτής. Το σύνολο αυτό αποτελείται από τους εξής **27 κανόνες**:

1. If (dv is S) and (dh is S) and (theta is P) then (delta_theta is ZE) (1)
2. If (dv is M) and (dh is S) and (theta is P) then (delta_theta is ZE) (1)
3. If (dv is L) and (dh is S) and (theta is P) then (delta_theta is ZE) (1)
4. If (dv is S) and (dh is M) and (theta is P) then (delta_theta is N) (1)
5. If (dv is M) and (dh is M) and (theta is P) then (delta_theta is ZE) (1)
6. If (dv is L) and (dh is M) and (theta is P) then (delta_theta is ZE) (1)
7. If (dv is S) and (dh is L) and (theta is P) then (delta_theta is N) (1)
8. If (dv is M) and (dh is L) and (theta is P) then (delta_theta is N) (1)
9. If (dv is L) and (dh is L) and (theta is P) then (delta_theta is N) (1)
10. If (dv is S) and (dh is S) and (theta is ZE) then (delta_theta is P) (1)
11. If (dv is M) and (dh is S) and (theta is ZE) then (delta_theta is P) (1)
12. If (dv is L) and (dh is S) and (theta is ZE) then (delta_theta is ZE) (1)
13. If (dv is S) and (dh is M) and (theta is ZE) then (delta_theta is ZE) (1)
14. If (dv is M) and (dh is M) and (theta is ZE) then (delta_theta is ZE) (1)
15. If (dv is L) and (dh is M) and (theta is ZE) then (delta_theta is ZE) (1)
16.If (dv is S) and (dh is L) and (theta is ZE) then (delta_theta is ZE) (1)
17. If (dv is M) and (dh is L) and (theta is ZE) then (delta_theta is ZE) (1)
18. If (dv is L) and (dh is L) and (theta is ZE) then (delta_theta is ZE) (1)
19. If (dv is S) and (dh is S) and (theta is N) then (delta_theta is P) (1)

20. If (dv is M) and (dh is S) and (theta is N) then (delta_theta is P) (1)
21. If (dv is L) and (dh is S) and (theta is N) then (delta_theta is P) (1)
22. If (dv is S) and (dh is M) and (theta is N) then (delta_theta is P) (1)
23. If (dv is M) and (dh is M) and (theta is N) then (delta_theta is P) (1)
24. If (dv is L) and (dh is M) and (theta is N) then (delta_theta is P) (1)
25. If (dv is S) and (dh is L) and (theta is N) then (delta_theta is P) (1)
26. If (dv is M) and (dh is L) and (theta is N) then (delta_theta is P) (1)
27. If (dv is L) and (dh is L) and (theta is N) then (delta_theta is ZE) (1)

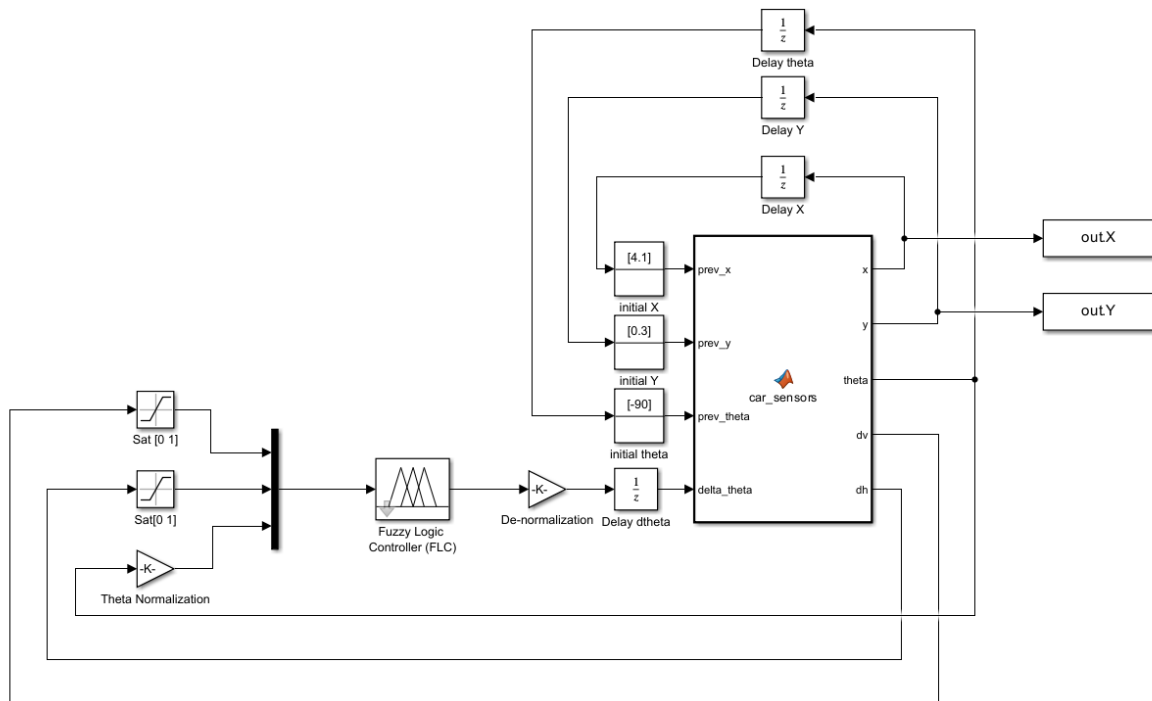
***Πίνακας 1:** Βάση Κανόνων του Ασαφούς Ελεγκτή*

Η λογική που υιοθετήθηκε για τη βάση κανόνων του ελεγκτή είναι να καθοδηγεί το όχημα προς το εμπόδιο και όταν πλησιάσει αρκετά κοντά, να αλλάζει κατεύθυνση, ώστε να αποφύγει κάθε εμπόδιο που, ενδεχομένως, θα συναντήσει. Η ασαφής βάση κανόνων στηρίζεται κυρίως στην οριζόντια απόσταση από το εμπόδιο (d_H). Αν η απόσταση είναι πολύ μεγάλη, μεγάλη ή μεσαία (σύμφωνα με τις λεκτικές μεταβλητές Very Large, Large και Medium), ο σκοπός του ελεγκτή είναι να ρυθμίσει την κατεύθυνση, ώστε η τελική γωνία του οχήματος να πλησιάζει τις 0 μοίρες. Όταν η απόσταση είναι μικρή (Small), πραγματοποιεί μια μικρή θετική αλλαγή στη γωνία (Positive Small) για να προετοιμάσει το όχημα να περάσει το εμπόδιο. Στην περίπτωση που η απόσταση είναι πολύ μικρή, επιβάλλεται μεγαλύτερη αλλαγή γωνίας. Μόλις το όχημα περάσει το κάθε σκαλοπάτι, η οριζόντια απόσταση αυξάνεται και ο ελεγκτής το επαναφέρει κοντά στις 0 μοίρες.

Η χρήση μόνο της οριζόντιας απόστασης θα είχε ως αποτέλεσμα το όχημα να βρίσκεται πολύ κοντά στον παράλληλο τοίχο μετά από κάθε σκαλοπάτι, ενώ η επιθυμητή τελική θέση έχει κάποια απόσταση από αυτόν. Για αυτόν τον λόγο, χρησιμοποιείται και η μέτρηση της κάθετης απόστασης. Όταν το όχημα πλησιάζει πολύ έναν παράλληλο τοίχο, ο ελεγκτής το απομακρύνει ελαφρώς (Small), ώστε να φτάσει στην επιθυμητή θέση.

Μοντελοποίηση Συστήματος με Χρήση Simulink

Ολόκληρο το σύστημα που εξετάζεται στην παρούσα εργασία μοντελοποιήθηκε μέσω του εργαλείου **Simulink** της MATLAB. Το μοντέλο που δημιουργήθηκε αποτελείται από τον **ασαφή ελεγκτή (FLC)** που σχεδιάστηκε προηγουμένως, ένα **μοντέλο - συνάρτηση** που προσομοιάζει τους **αισθητήρες του αυτοκινήτου (σύστημα καθοδήγησης)**, καθώς και ένα σύστημα **κλειστού βρόχου (ανάδραση)**. Το σύστημα, στην ολότητά του, αποτυπώνεται στην Εικόνα 9.



Εικόνα 10: Μοντέλο Συστήματος (Simulink)

Η συνάρτηση **car_sensors** δέχεται ως εισόδους τις προηγούμενες συντεταγμένες και τη γωνία του αυτοκινήτου, καθώς και την έξοδο του ελεγκτή. Ως έξοδο, επιστρέφει τις νέες συντεταγμένες X και Y , τη νέα γωνία, καθώς και την οριζόντια και κάθετη απόσταση από τα εμπόδια. Σύμφωνα με την εκφώνηση, τα εμπόδια είναι προκαθορισμένα, άρα και γνωστά στο σύστημα, οπότε με βάση τις συντεταγμένες υπολογίζονται οι αποστάσεις, προσομοιώνοντας έτσι τους αισθητήρες του αυτοκινήτου.

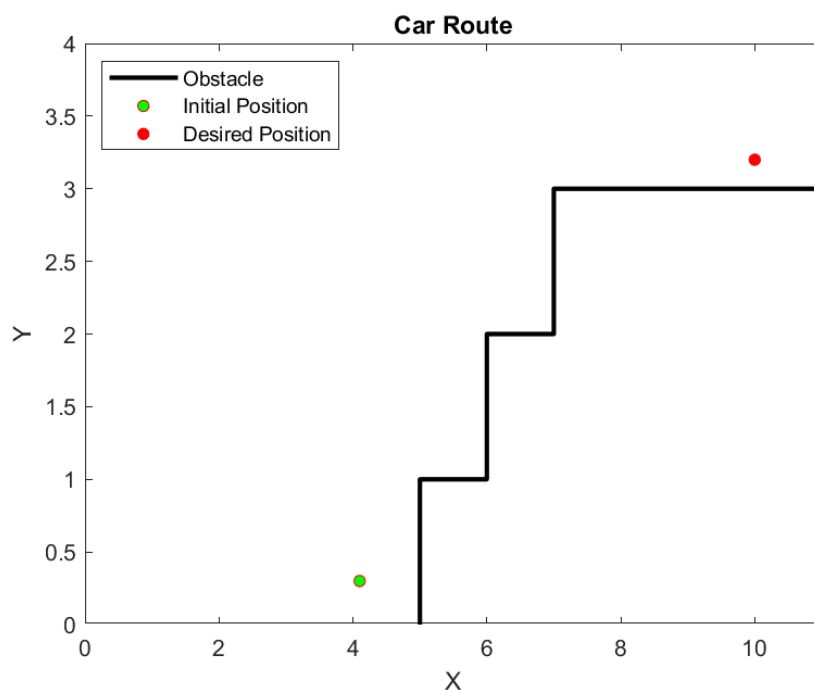
Πριν την είσοδο στον ελεγκτή, η γωνία κανονικοποιείται στο εύρος $[-1, 1]$, ενώ οι τιμές του αισθητήρα υπόκεινται σε **κορεσμό** (saturation) στο εύρος $[0, 1]$. Η έξοδος του ελεγκτή, που είναι η μεταβολή της γωνίας, βρίσκεται επίσης στο διάστημα $[-1, 1]$ και στη συνέχεια αποκανονικοποιείται στις πραγματικές τιμές της μεταβολής της γωνίας, δηλαδή στο εύρος $[-130^\circ, 130^\circ]$.

Ολόκληρο το μοντέλο που δημιουργήθηκε στο Simulink υπάρχει στο αρχείο “Car_Control_A.slx”.

Προσομοίωση - Αποτελέσματα

Δημιουργία Περιβάλλοντος

Με βάση το σχήμα που απεικονίζεται στην εκφώνηση (βλ. Εικόνα 1), δημιουργήθηκε το περιβάλλον, στο οποίο διαδραματίζεται η πορεία του αυτοκινήτου και λαμβάνει μέρος το πείραμα που μελετάται. Το περιβάλλον αυτό φαίνεται στην Εικόνα 10, ενώ ο κώδικας MATLAB, με βάση τον οποίο δημιουργήθηκε, βρίσκεται στο αρχείο “route_plot.m”. Στο αρχείο αυτό, περιλαμβάνεται και ο κώδικας που υλοποιεί την αποτύπωση της διαδρομής που εκτελεί το αυτοκίνητο στο περιβάλλον που εξετάζεται.

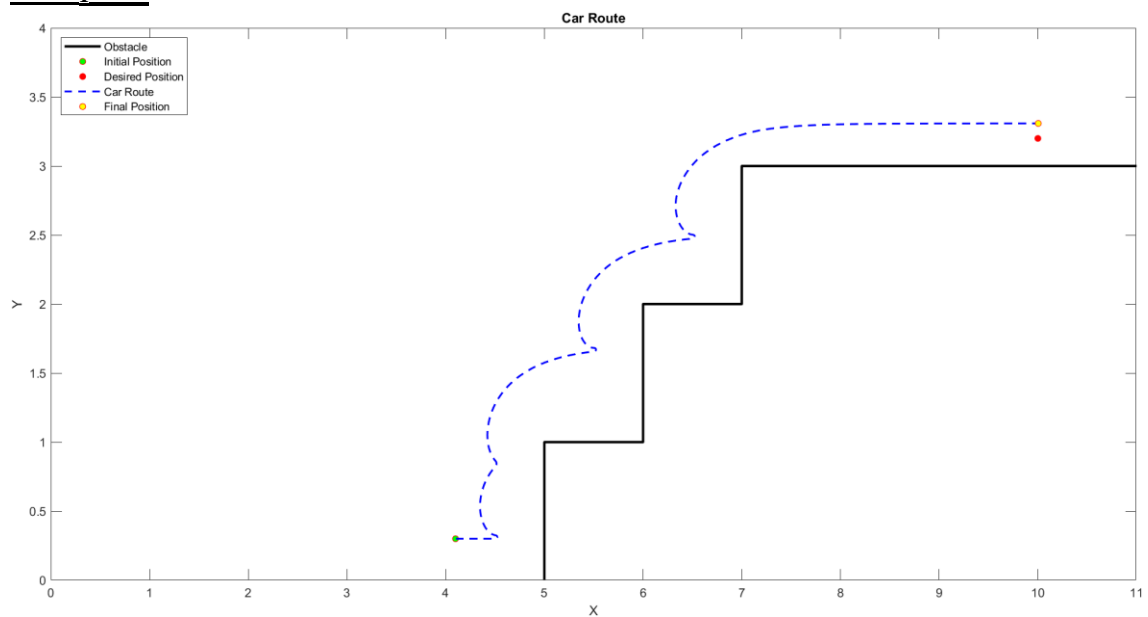


Εικόνα 11: Περιβάλλον του Πειράματος

Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Με βάση τα ζητούμενα της εκφώνησης, εκτελούνται προσομοιώσεις για τρεις αρχικές τιμές της διεύθυνσης της ταχύτητας του οχήματος, δηλαδή της μεταβλητής εισόδου θ . Αναλυτικότερα:

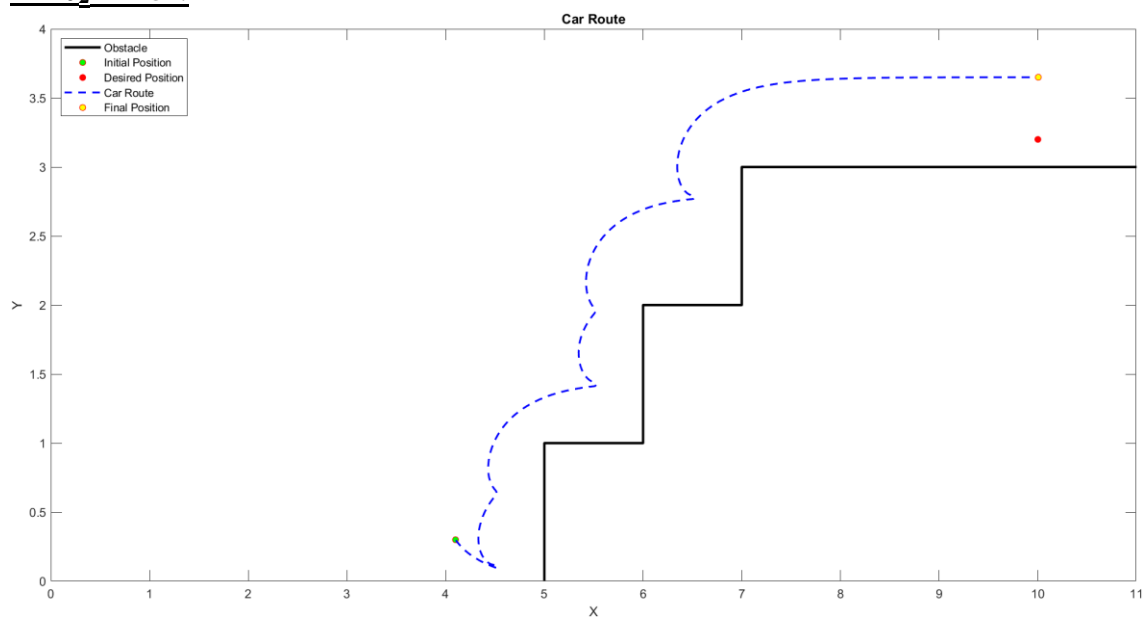
- Για $\theta_1 = 0$:



Εικόνα 12: Πορεία Οχήματος για Αρχική $\theta_1 = 0$

Συντεταγμένες Τελικού Σημείου: $(x, y) = (10.0038, 3.3084)$

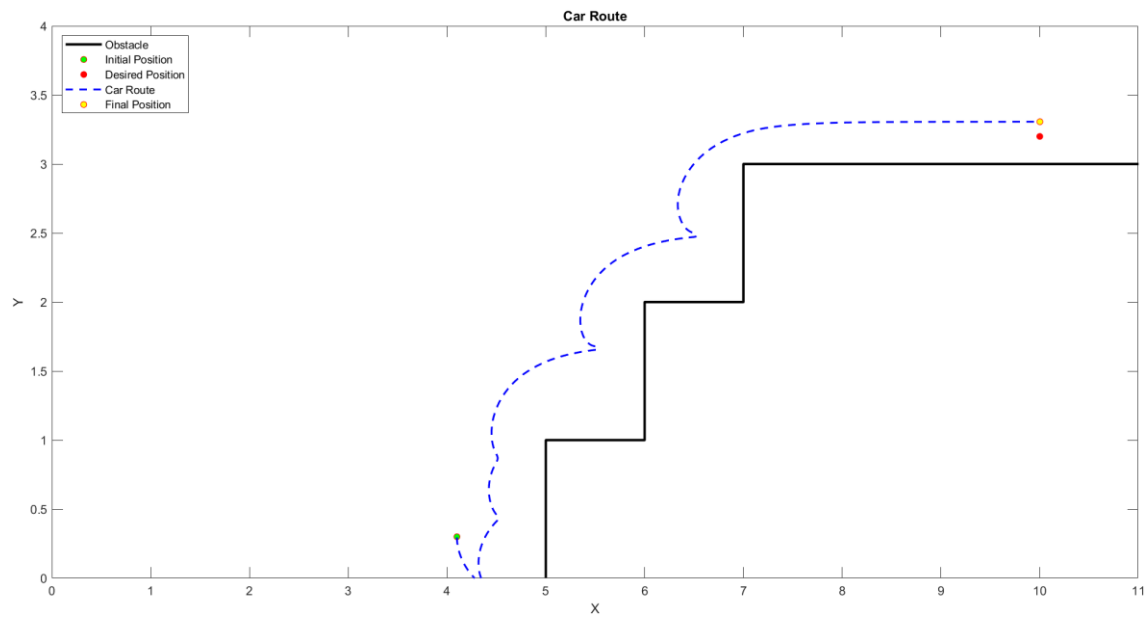
- Για $\theta_2 = -45^\circ$:



Εικόνα 13: Πορεία Οχήματος για Αρχική $\theta_2 = -45^\circ$

Συντεταγμένες Τελικού Σημείου: $(x, y) = (10.0044, 3.6503)$

- Για $\theta_3 = -90^\circ$:



Εικόνα 14: Πορεία Οχήματος για Αρχική $\theta_3 = -90^\circ$

Συντεταγμένες Τελικού Σημείου: $(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = (10.0012, 3.3062)$

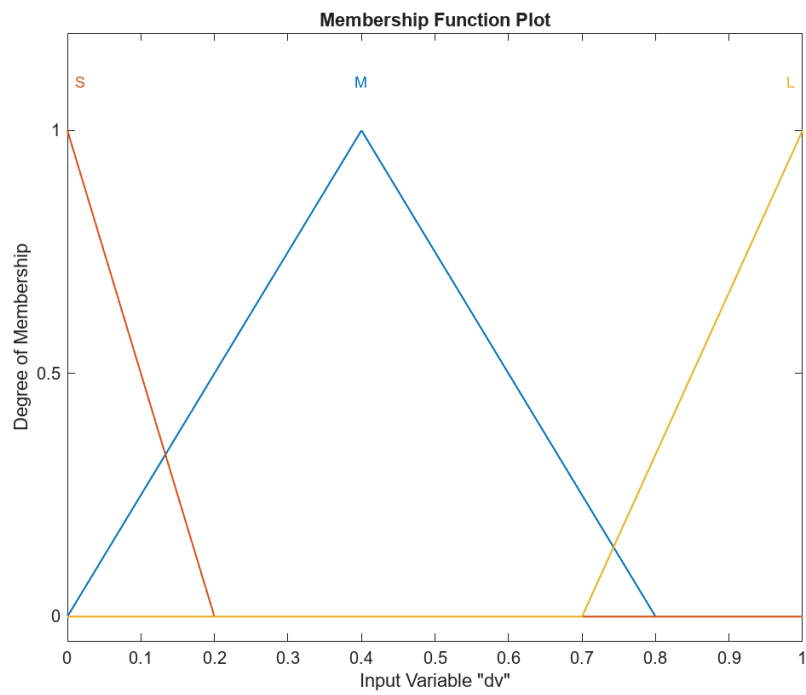
Διορθώσεις στις Λεκτικές Μεταβλητές (Tuning)

Παρατηρώντας τις συντεταγμένες των τελικών σημείων που προέκυψαν για τις τρεις προσομοιώσεις, είναι εμφανές πως το όχημα πλησιάζει το επιθυμητό σημείο, όμως δεν φτάνει ποτέ ακριβώς σε αυτό. Για τον λόγο αυτό, πρέπει να γίνουν κάποιες **τροποποιήσεις - διορθώσεις** στις παραμέτρους των λεκτικών μεταβλητών, ούτως ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στην προσέγγιση του επιθυμητού στόχου. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **Tuning**.

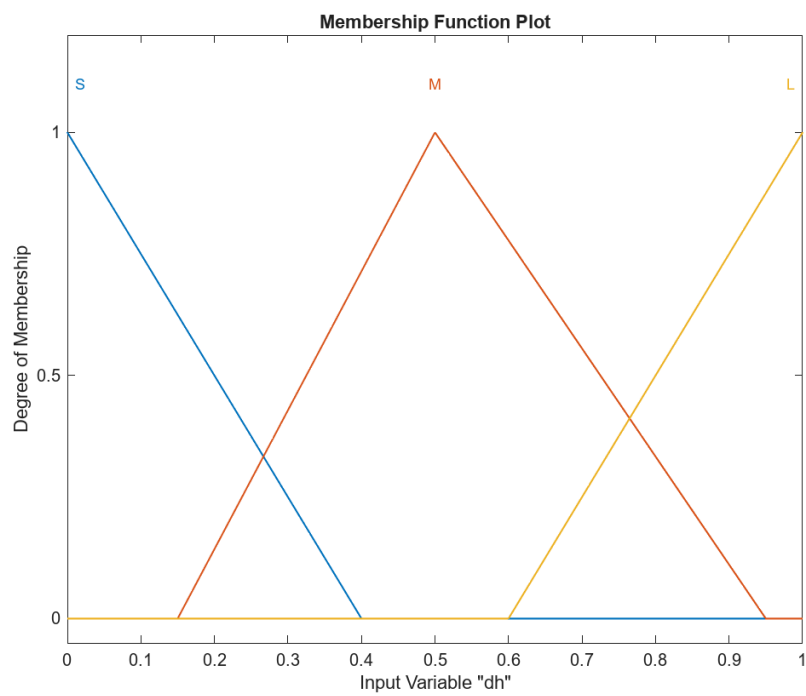
Συγκεκριμένα, έγιναν μετατροπές στις τιμές των Membership Functions των μεταβλητών εισόδου d_V και d_H . Οι μετατροπές αυτές φαίνονται στον Πίνακα 2, ενώ παρακάτω αποτυπώνονται και οι Membership Functions των μεταβλητών, μετά τη διαδικασία του tuning. Οι μετατροπές των τιμών έγιναν μέσω της λογικής “**trial and error**”, έχοντας ως γνώμονα την πορεία του οχήματος για αρχική $\theta = 0$ και παρατηρώντας τα σημεία στα οποία κατέληγε το όχημα μετά από κάθε δοκιμή. Με τον τρόπο αυτόν, έγινε η τροποποίηση των ασαφών συνόλων και, κατ’έπекταση, η προσέγγιση του επιθυμητού σημείου. Το τροποποιημένο μοντέλο είναι καταγεγραμμένο στο αρχείο “Car_Control_FIS_Tuned.fis”.

Variable	MF	Before Tuning			After Tuning		
d_V	S	-0.5	0	0.5	-0.2	0	0.2
	M	0	0.5	1	0	0.4	0.8
	L	0.5	1	1.5	0.7	1	1.2
d_H	S	-0.5	0	0.5	-0.6	0	0.4
	M	0	0.5	1	0.15	0.5	0.95
	L	0.5	1	1.5	0.6	1	1.8

Πίνακας 2: Μετατροπές στις Τιμές των MFs κατά τη Διαδικασία Tuning



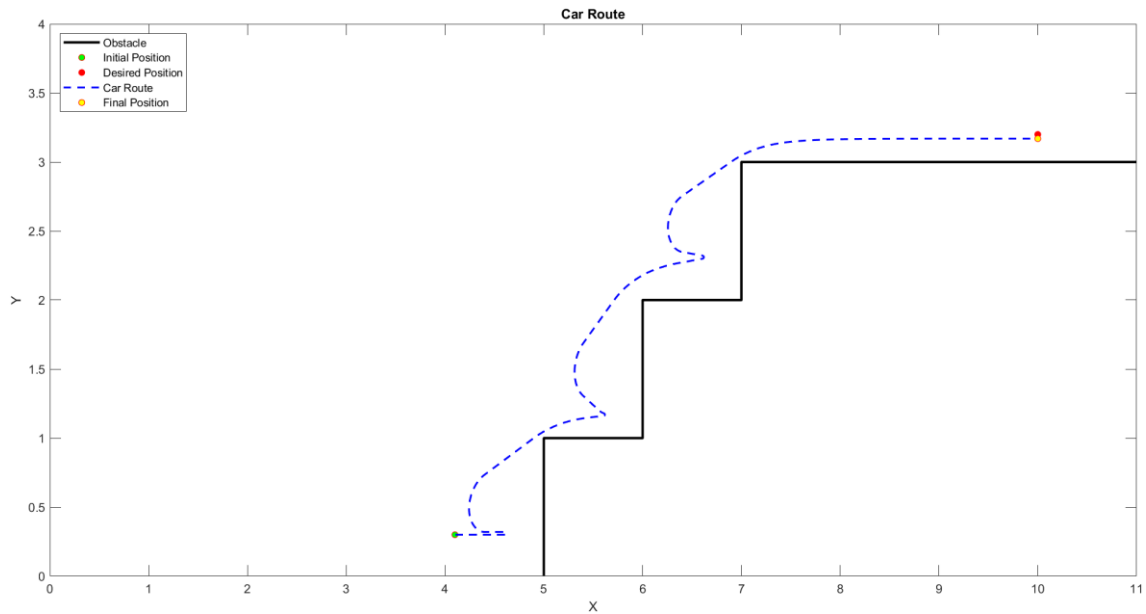
Εικόνα 15: Membership Functions της Μεταβλητής Εισόδου dv (Μετά τη Διαδικασία Tuning)



Εικόνα 16: Membership Functions της Μεταβλητής Εισόδου dh (Μετά τη Διαδικασία Tuning)

Εξετάζονται για μία ακόμη φορά οι πορείες που θα ακολουθήσει το όχημα για τις τρεις αρχικές τιμές της διεύθυνσης της ταχύτητας του οχήματος (θ) που εξετάστηκαν και παραπάνω:

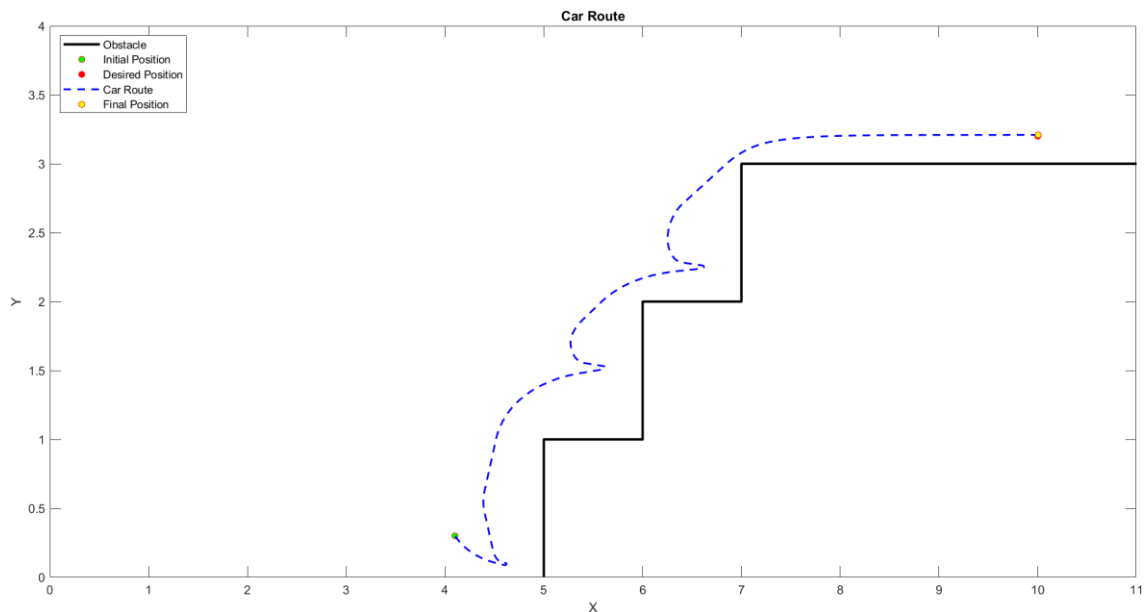
- Για $\theta_1 = 0$:



Εικόνα 17: Πορεία Οχήματος για Αρχική $\theta_1 = 0$ (Μετά τη Διαδικασία Tuning)

Συντεταγμένες Τελικού Σημείου: $(x, y) = (10.0002, 3.1693)$

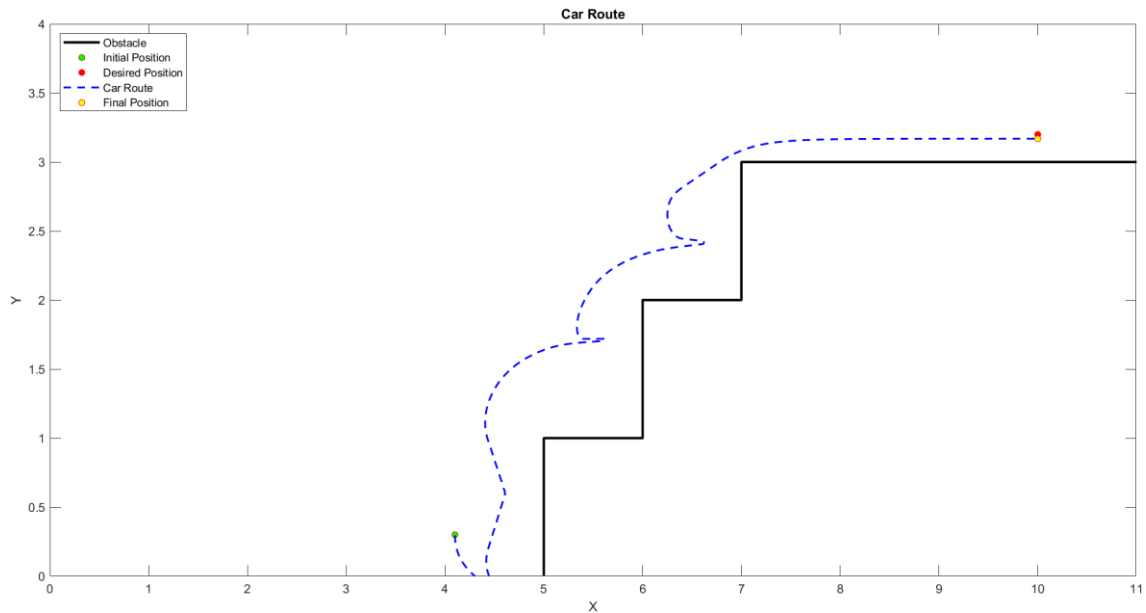
- Για $\theta_2 = -45^\circ$:



Εικόνα 18: Πορεία Οχήματος για Αρχική $\theta_2 = -45^\circ$ (Μετά τη Διαδικασία Tuning)

Συντεταγμένες Τελικού Σημείου: $(x, y) = (10.0037, 3.2093)$

- Για $\theta_3 = -90^\circ$:



Εικόνα 18: Πορεία Οχήματος για Αρχική $\theta_2 = -90^\circ$ (Μετά τη Διαδικασία Tuning)

Συντεταγμένες Τελικού Σημείου: $(x, y) = (10.0030, 3.1687)$

Συμπεράσματα

Με βάση τα διαγράμματα που παρατίθενται παραπάνω, είναι φανερό πως η διαδικασία του Tuning συμβάλλει σημαντικά στην ακρίβεια της προσέγγισης του επιθυμητού σημείου. Συγκεκριμένα, στις περιπτώσεις της πορείας για αρχική θ ίση με 0 ή -90° , παρατηρήθηκε ελάττωση του σφάλματος από περίπου 0.1 σε 0.03 μονάδες μήκους, ενώ, στην περίπτωση όπου η αρχική θ ήταν ίση με -45° , το σφάλμα προσέγγισης εκμηδενίζεται, καθώς το όχημα καταλήγει στο ακριβές επιθυμητό σημείο. Επομένως, προκύπτει το συμπέρασμα πως, μέσω κατάλληλης ρύθμισης των ορίων των ασαφών συνόλων των μεταβλητών εισόδου, είναι δυνατόν να προσεγγιστεί η επιθυμητή λύση ενός προβλήματος σε αρκετά ικανοποιητικό βαθμό.

Βιβλιογραφικές Πηγές

1. Γιάννης Μπουτάλης, Γεώργιος Συρακούσης, “Υπολογιστική Νοημοσύνη & Εφαρμογές”, Ξάνθη 2019
2. Richard C. Dorf, Robert H. Bishop, “Σύγχρονα Συστήματα Αυτόματου Ελέγχου”, 13η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα