



Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρονικής και Υπολογιστών

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ

Εργασία 2^η : Car Control

Εαρινό εξάμηνο 2023/24

Δεϊρμεντζόγλου Ιωάννης
Τομέας Ηλεκτρονικής και Υπολογιστών
Α.Ε.Μ.: 10015
Email: deirmentz@ece.auth.gr

Περιεχόμενα

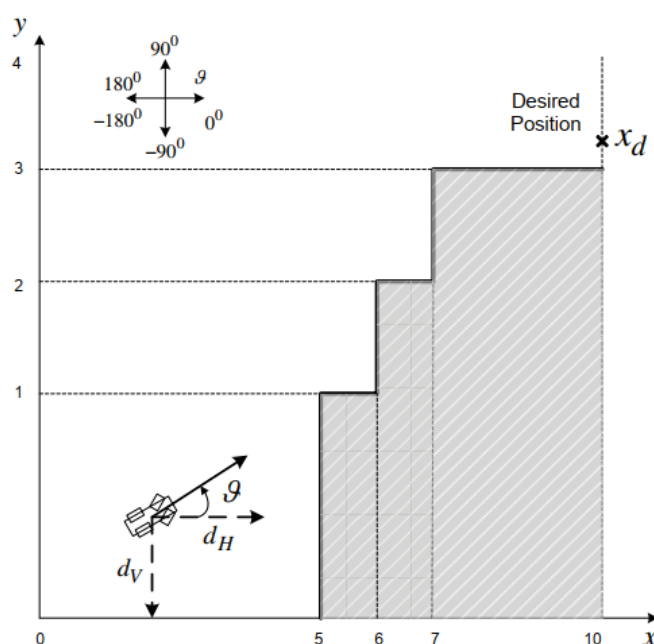
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	3
ΑΣΑΦΗΣ ΒΑΣΗ ΚΑΝΟΝΩΝ	4
ΑΣΑΦΗΣ ΕΛΕΓΚΤΗΣ	7
Μοντέλο Αυτοκίνητου στο Simulink	7
Tuning Λεκτικών Μεταβλητών	12

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του μαθήματος “Υπολογιστική Νοημοσύνη” και αποτελεί το δεύτερο μέρος του συνολικού project. Στόχος της είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος ασαφούς ελέγχου για τη ρύθμιση της γωνίας τιμονιού ενός αυτοκινήτου, προκειμένου να φτάσει σε μια καθορισμένη θέση αποφεύγοντας σταθερά εμπόδια. Το όχημα κινείται με σταθερή ταχύτητα και βασίζεται σε αισθητήρες για τη μέτρηση της απόστασής του από τα εμπόδια. Ο ασαφής ελεγκτής επεξεργάζεται αυτά τα δεδομένα και καθορίζει την επιθυμητή μεταβολή της γωνίας του τιμονιού, $\Delta\theta$, προκειμένου το όχημα να παραμείνει ασφαλές και να πετύχει τον στόχο του.

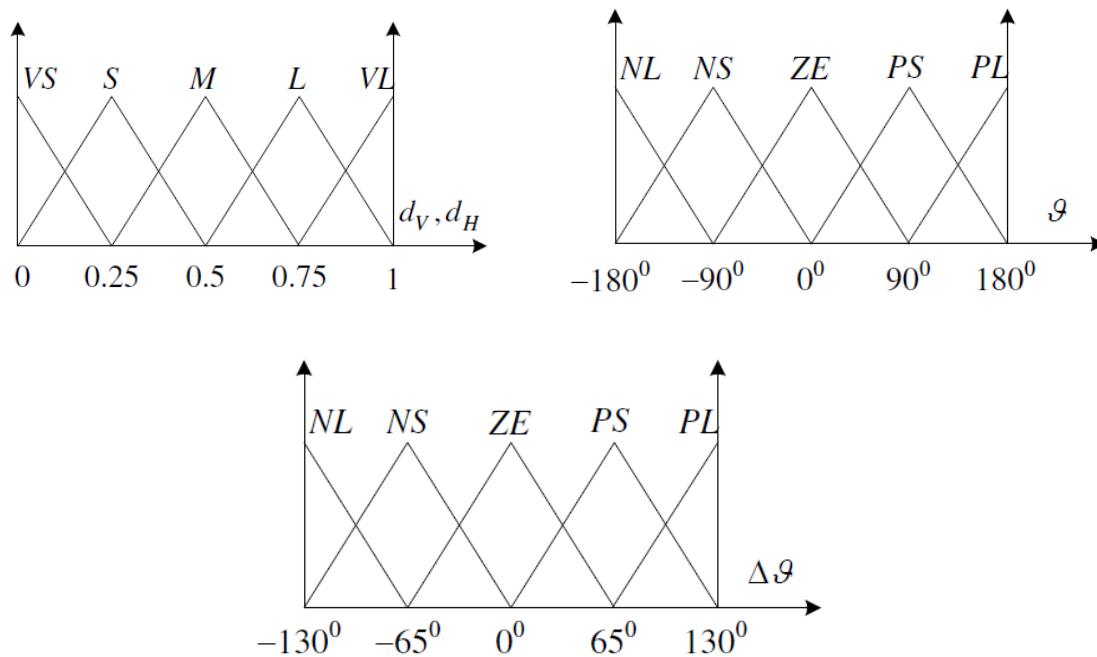
Περιγραφή του προβλήματος

Το αυτοκίνητο ξεκινά από τη θέση $(4, 0.4)$ με διαφορετικό κάθε φορά προσανατολισμό (γωνία θ) και σκοπός του είναι να φτάσει όσο το δυνατόν πιο κοντά στην τελική θέση $(x_d, y_d) = (10, 3.2)$, αποφεύγοντας τα σταθερά εμπόδια που αναπαρίστανται στο διάγραμμα της Εικόνας 1.



Εικόνα 1 : Χώρος κίνησης αυτοκινήτου

Το σύστημα διαθέτει αισθητήρες για τη μέτρηση αποστάσεων d_V (κάθετη απόσταση) και d_H (οριζόντια απόσταση) από τα εμπόδια, καθώς και έναν αισθητήρα για τη γωνία του οχήματος σε σχέση με τον οριζόντιο άξονα (θ). Αυτές οι μετρήσεις εισάγονται στον ασαφή ελεγκτή, ο οποίος, αφού περάσουν από το στάδιο του fuzzifier για να μετατραπούν σε λεκτικές μεταβλητές, αποφασίζει την κατάλληλη μεταβολή της γωνίας $\Delta\theta$, με βάση τη βάση ασαφών κανόνων που ορίζεται παρακάτω.



Εικόνα 2: Ασαφή σύνολα μεταβλητών εισόδου και μεταβλητής εξόδου

Οι τιμές των εισόδων για τις αποστάσεις χωρίζονται σε πέντε ασαφή σύνολα (VS: Πολύ Μικρή, S: Μικρή, M: Μέση, L: Μεγάλη, VL: Πολύ Μεγάλη), ενώ η γωνία προσανατολισμού διακρίνεται επίσης σε πέντε ασαφή σύνολα (NL: Μεγάλη Αρνητική, NS: Μικρή Αρνητική, Z: Μηδενική, PS: Μικρή Θετική, PL: Μεγάλη Θετική). Η έξοδος, δηλαδή η μεταβολή της γωνίας $\Delta\theta$, περιλαμβάνει τα ίδια ασαφή σύνολα, αλλά η γωνία κινείται στο εύρος $[-130^\circ, 130^\circ]$, κάτι που διαφοροποιεί τα όρια των συνόλων.

ΑΣΑΦΗΣ ΒΑΣΗ ΚΑΝΟΝΩΝ

Η ασαφής βάση κανόνων του ελεγκτή που αναπτύχθηκε ακολουθεί μια στρατηγική που κατευθύνει το αυτοκίνητο προς το εμπόδιο και, όταν πλησιάσει αρκετά, αλλάζει την κατεύθυνσή του ώστε να υπερπηδήσει το εμπόδιο. Έτσι, η λογική του ελεγκτή βασίζεται κυρίως στην οριζόντια απόσταση από το εμπόδιο (d_H).

Όταν η απόσταση από το εμπόδιο είναι πολύ μεγάλη, μεγάλη ή μεσαία (Very Large, Large, Medium), ο ελεγκτής στοχεύει να διατηρήσει τη γωνία προσανατολισμού του αυτοκινήτου όσο το δυνατόν πιο κοντά στις 0 μοίρες. Όταν η απόσταση γίνεται μικρή (Small), ο ελεγκτής εφαρμόζει 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 (Very Small), ο ελεγκτής επιβάλλει μια μεγαλύτερη αλλαγή στη γωνία (Positive Large), για να αποφύγει το εμπόδιο. Όταν το αυτοκίνητο ξεπεράσει το εμπόδιο, η οριζόντια απόσταση αυξάνεται ξανά σε πολύ μεγάλη, και ο ελεγκτής επιδιώκει να το επαναφέρει σε προσανατολισμό κοντά στις 0 μοίρες.

Ωστόσο, με την αποκλειστική χρήση της οριζόντιας απόστασης, το αυτοκίνητο μπορεί να βρεθεί κοντά σε έναν παράλληλο τοίχο μετά το πέρασμα του εμποδίου. Για να διασφαλιστεί ότι θα φτάσει στην επιθυμητή τελική θέση, χρησιμοποιείται επίσης το δεδομένο της κάθετης απόστασης (dV). Όταν το αυτοκίνητο πλησιάζει πολύ κοντά σε έναν παράλληλο τοίχο, ο ελεγκτής το απομακρύνει ελαφρώς (Small), προκειμένου να φτάσει με ασφάλεια στην τελική του θέση. Με βάση αυτή τη λογική, διαμορφώθηκε η παρακάτω ασαφής βάση κανόνων.

Οι κανόνες που λαμβάνουν υπόψη την είσοδο **dV** ενεργοποιούνται όταν το όχημα εισέρχεται ή βρίσκεται στις αρχικές φάσεις της κίνησής του πάνω από τις οριζόντιες επιφάνειες του εμποδίου. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι άλλες η μεταβλητή εισόδου **θ** (γωνία του οχήματος), παίζει επίσης ρόλο στο σύστημα. Δεν υπάρχει κανόνας για την περίπτωση **dV = L**, καθώς, λίγο μετά, οι άλλες δύο εισοδοί θα οδηγήσουν το όχημα πιο ψηλά πάνω από την οριζόντια επιφάνεια, κάνοντας την τιμή της **dV** να αυξηθεί σε **VL**. Αυτό αφορά τις εσωτερικές γωνίες του εμποδίου.

Πιο συγκεκριμένα αγνοώντας εντελώς τον αισθητήρα κάθετης απόστασης dV , ισοδυναμεί με “and dV is ANY”:

- $dH = VS$: Όταν dH πολύ μικρή, θέλω να στρίψει το όχημα προς τα επάνω – δεξιά απότομα (αποφυγή σύγκρουσης).
- $dH = S$: Όταν dH μικρή, θέλω να στρίψει το όχημα προς τα επάνω - δεξιά σχετικά γρήγορα (αλλά όχι «τέρμα» απότομα)
- $dH = M$: Όταν dH μέτρια, θέλω να αρχίσει το όχημα στροφή προς τα επάνω – δεξιά καθώς αρχίζει να πλησιάζει το εμπόδιο
- $dH = L$: Όταν dH μεγάλη, σημαίνει πως το αυτοκίνητο απέχει από εμπόδιο, άρα διατήρηση ευθείας πορείας προς τα δεξιά
- $dH = VL$: Όταν dH πολύ μεγάλη, σημαίνει ότι το όχημα βρίσκεται είτε διαγώνια πάνω στις εξωτερικές γωνίες του εμποδίου είτε στην τελική ευθεία είτε στην αρχή. Οπότε θέλουμε να διατηρήσει ευθεία δεξιά πορεία.

Η βάση των ασαφών κανόνων που διαμορφώθηκε για τον έλεγχο της γωνίας του αυτοκινήτου είναι η εξής:

1. If **dH** is **VL** and **theta** is **ZE** then **dTheta** is **ZE**
2. If **dH** is **L** and **theta** is **ZE** then **dTheta** is **ZE**
3. If **dH** is **M** and **theta** is **ZE** then **dTheta** is **ZE**
4. If **dH** is **S** and **theta** is **ZE** then **dTheta** is **PS**
5. If **dH** is **VS** and **theta** is **ZE** then **dTheta** is **PL**
6. If **dH** is **VL** and **theta** is **PS** then **dTheta** is **NS**
7. If **dH** is **L** and **theta** is **PS** then **dTheta** is **NS**

8. If **dH** is **M** and **theta** is **PS** then **dTheta** is **NS**
9. If **dH** is **S** and **theta** is **PS** then **dTheta** is **ZE**
10. If **dH** is **VS** and **theta** is **PS** then **dTheta** is **PS**
11. If **dH** is **VL** and **theta** is **PL** then **dTheta** is **NL**
12. If **dH** is **L** and **theta** is **PL** then **dTheta** is **NL**
13. If **dH** is **M** and **theta** is **PL** then **dTheta** is **NL**
14. If **dH** is **S** and **theta** is **PL** then **dTheta** is **NS**
15. If **dH** is **VS** and **theta** is **PL** then **dTheta** is **ZE**
16. If **dH** is **VL** and **theta** is **NS** then **dTheta** is **PS**
17. If **dH** is **L** and **theta** is **NS** then **dTheta** is **PS**
18. If **dH** is **M** and **theta** is **NS** then **dTheta** is **PS**
19. If **dH** is **S** and **theta** is **NS** then **dTheta** is **PL**
20. If **dH** is **VS** and **theta** is **NS** then **dTheta** is **PL**
21. If **dH** is **VL** and **theta** is **NL** then **dTheta** is **PL**
22. If **dH** is **L** and **theta** is **NL** then **dTheta** is **PL**
23. If **dH** is **M** and **theta** is **NL** then **dTheta** is **PL**
24. If **dH** is **S** and **theta** is **NL** then **dTheta** is **PL**
25. If **dH** is **VS** and **theta** is **NL** then **dTheta** is **PL**

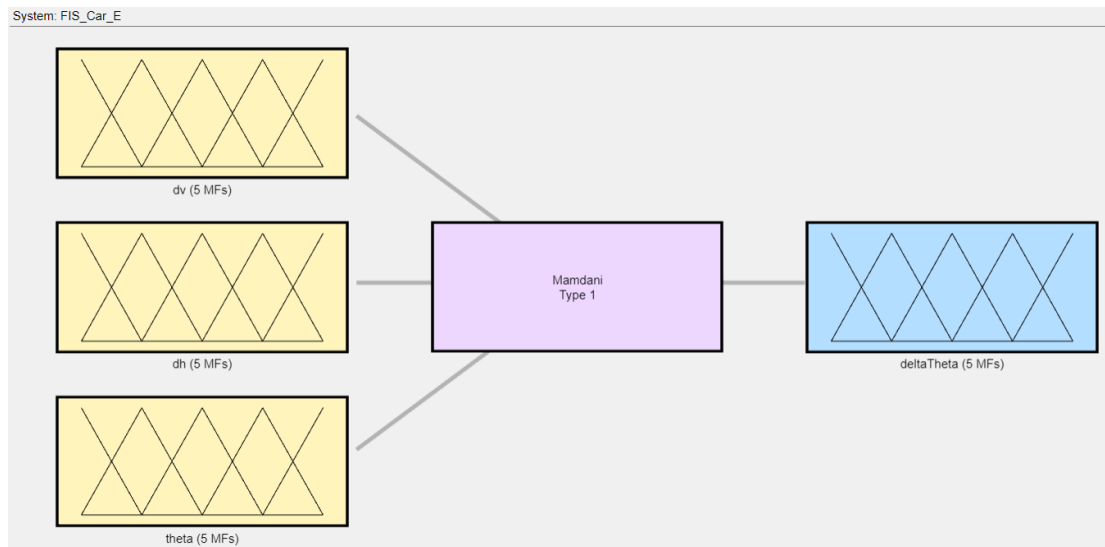
Επιπλέον κανόνες που λαμβάνουν υπόψη την κάθετη απόσταση (dV):

26. If **dV** is **VS** and **theta** is **NL** then **dTheta** is **PL**
27. If **dV** is **VS** and **theta** is **NS** then **dTheta** is **PL**
28. If **dV** is **VS** and **theta** is **ZE** then **dTheta** is **PS**
29. If **dV** is **VS** and **theta** is **PS** then **dTheta** is **PS**
30. If **dV** is **VS** and **theta** is **PL** then **dTheta** is **ZE**

Αυτοί οι κανόνες καθοδηγούν την απόφαση του ασαφούς ελεγκτή για τη μεταβολή της γωνίας του τιμονιού ($\Delta\theta$) με βάση την οριζόντια και κάθετη απόσταση από τα εμπόδια, καθώς και τη γωνία προσανατολισμού του αυτοκινήτου.

ΑΣΑΦΗΣ ΕΛΕΓΚΤΗΣ

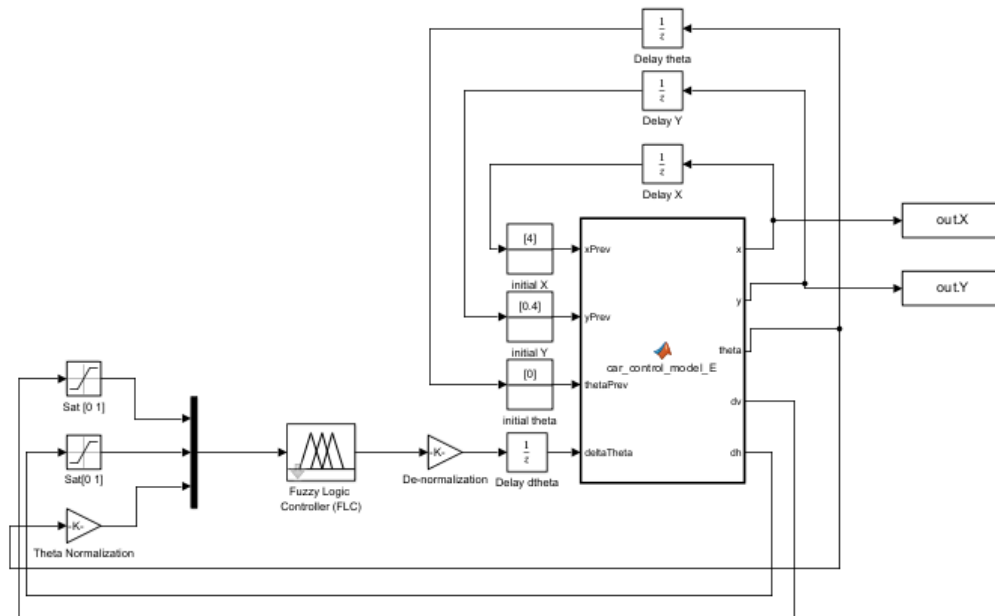
Όπως αναφέρεται και στην εκφώνηση για την δημιουργία της ασαφούς βάσης και του ασαφούς ελεγκτή χρησιμοποιήθηκε ο FIS editor για να δημιουργηθεί το δημιουργηθεί .fis αρχείο που περιγράφει τον ελεγκτή. Το αρχείο αυτό έπειτα χρησιμοποιήθηκε στο block διάγραμμα του ελεγκτή στο Simulink.



Εικόνα 3 : Ασαφής ελεγκτής στο fis editor

Μοντέλο Αυτοκίνητου στο Simulink

Στο Simulink αναπτύχθηκε ένα μοντέλο για την προσομοίωση του συνολικού συστήματος, το οποίο περιλαμβάνει το μοντέλο κίνησης του αυτοκινήτου και τον ασαφή ελεγκτή, συνδεδεμένα σε διάταξη κλειστού βρόχου. Αυτό το σύστημα διασφαλίζει ότι οι αποφάσεις του ελεγκτή βασίζονται διαρκώς στις τρέχουσες συντεταγμένες και στη γωνία προσανατολισμού του οχήματος, ρυθμίζοντας τη γωνία κατεύθυνσης για αποφυγή των εμποδίων και επίτευξη της επιθυμητής θέσης.



Εικόνα 4 : Car model in Simulink

Σύνθεση του Μοντέλου - Συνάρτηση car_control_model

Η συνάρτηση car_control_model αναλαμβάνει την προσομοίωση της δυναμικής του οχήματος. Δέχεται τις τιμές των συντεταγμένων x, y , τη γωνία του οχήματος θ (theta) από την προηγούμενη θέση, καθώς και τη μεταβολή της γωνίας $\Delta\theta$ (deltaTheta) από τον ελεγκτή. Η συνάρτηση επιστρέφει τις νέες συντεταγμένες του οχήματος, την ανανεωμένη γωνία του θ , καθώς και τις αποστάσεις από τα εμπόδια, την κάθετη dV και την οριζόντια dH .

Κανονικοποίηση και Περιορισμός Τιμών Αισθητήρων

Η γωνία του οχήματος θ κανονικοποιείται στο διάστημα $[-1,1]$ πριν εισαχθεί στον ελεγκτή, επιτρέποντας έτσι την ομαλή λειτουργία του ασαφούς συστήματος και εξασφαλίζοντας ότι όλες οι τιμές παραμένουν εντός των λειτουργικών ορίων. Οι τιμές από τους αισθητήρες απόστασης περιορίζονται επίσης στο διάστημα $[0,1]$, ώστε να διασφαλιστεί σταθερότητα στο σύστημα ελέγχου.

Η έξοδος του ασαφούς ελεγκτή, που αφορά τη μεταβολή της γωνίας κατεύθυνσης του οχήματος $\Delta\theta$, αρχικά ορίζεται επίσης στο διάστημα $[-1,1]$. Στη συνέχεια, κανονικοποιείται στο φυσικό διάστημα $[-130^\circ, 130^\circ]$, που αντιστοιχεί στην πλήρη δυνατότητα κίνησης της γωνίας διεύθυνσης.

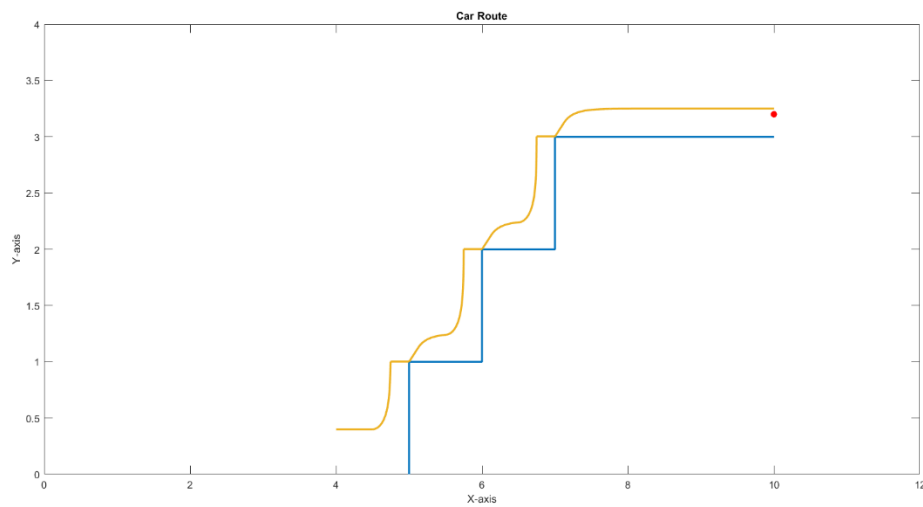
Χρονική Καθυστέρηση και Διάστημα Ολοκλήρωσης

Το διάστημα ολοκλήρωσης για τον υπολογισμό της απόστασης ορίζεται στα 0.1 δευτερόλεπτα, με την ίδια χρονική καθυστέρηση να εισάγεται και στο μοντέλο για να προσομοιωθεί η καθυστέρηση στην απόκριση του συστήματος. Αυτή η καθυστέρηση αντιπροσωπεύει την πραγματική χρονική υστέρηση κατά τη μετάβαση από μια θέση στην επόμενη.

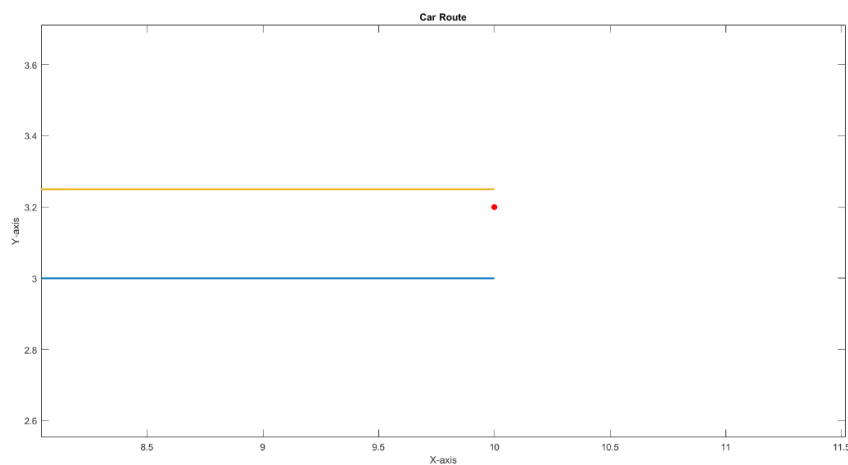
Οι νέες συντεταγμένες και οι γωνίες του αυτοκινήτου εξάγονται στο MATLAB workspace, επιτρέποντας την περαιτέρω ανάλυση και την απεικόνιση της πορείας του σε σχέση με τα σταθερά εμπόδια. Αυτό διευκολύνει τη γραφική προβολή των δεδομένων, προσφέροντας μία ολοκληρωμένη εικόνα της συμπεριφοράς του οχήματος και της αποτελεσματικότητας του ασαφούς ελεγκτή στην αποφυγή εμποδίων.

Ακολουθούν τα διαγράμματα προσομοίωσης του αυτοκινήτου για τις 3 γωνίες που ζητούνται από την εκφώνηση.

- Αρχική Γωνία $\theta_1=0^\circ$

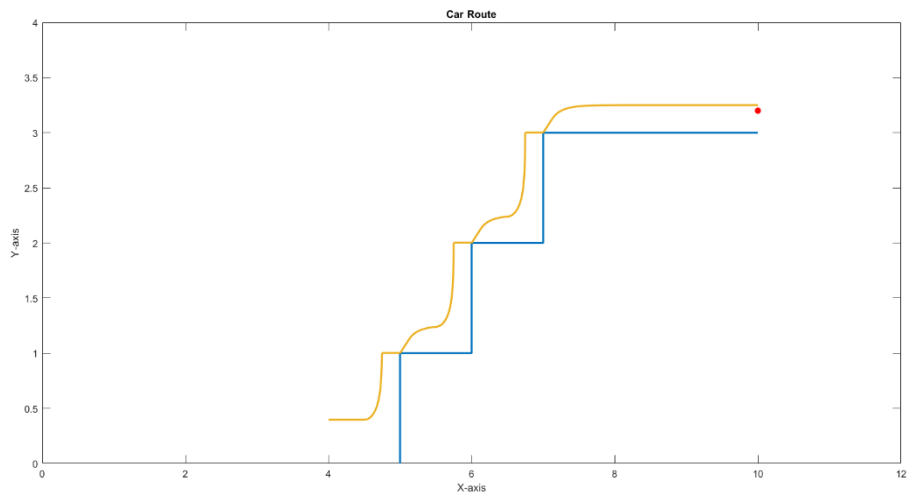


Εικόνα 5: Διάγραμμα πορείας αυτοκινήτου για $\theta_1=0$

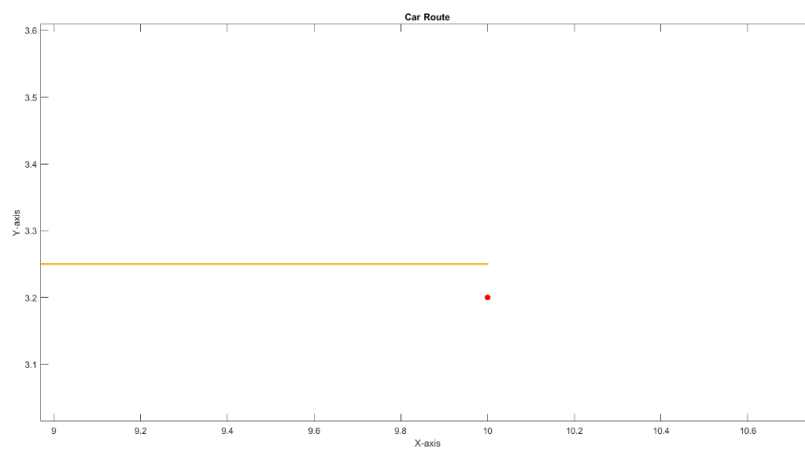


Εικόνα 6: Απόσταση τελικού σημείου αυτοκινήτου και σημείου στόχου

- Αρχική Γωνία $\theta_2=-45^\circ$

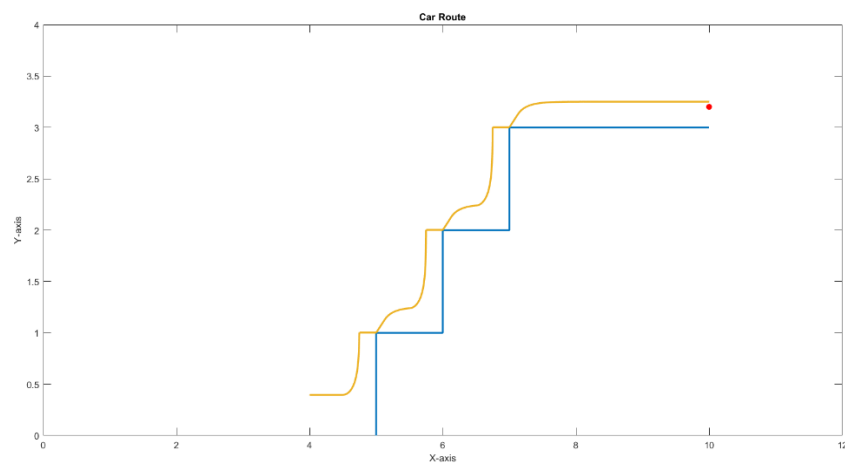


Εικόνα 7: Διάγραμμα πορείας αυτοκίνητου για $\theta = -45$

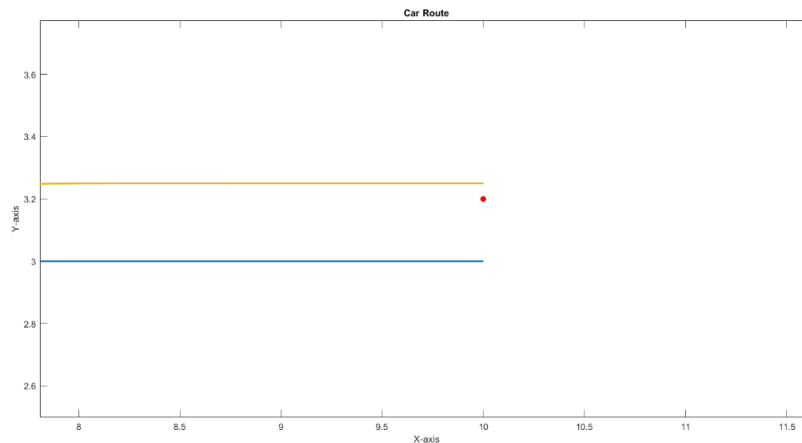


Εικόνα 8: Απόσταση τελικού σημείου αυτοκίνητου και σημείου στοχου

- Αρχική Γωνία $\theta_3 = -90^\circ$



Εικόνα 9: Διάγραμμα πορείας αυτοκίνητου για $\theta = -90$



Εικόνα 10 : Απόσταση τελικού σημείου αυτοκινήτου και σημείου στόχου

Παρατηρήσεις

Ο τελικός σκοπός του αυτοκινήτου επιτυγχάνεται με σχετικά ικανοποιητική προσέγγιση, καθώς ο ελεγκτής προσπαθεί να διατηρήσει μια ασφαλή και μικρή απόσταση από κάθε παράλληλο τοίχο. Παρότι το σφάλμα από την τελική επιθυμητή θέση είναι μεγαλύτερο από τον αρχικό στόχο (5 cm), η απόκλιση παραμένει μικρή και διατηρεί το αυτοκίνητο κοντά στην προκαθορισμένη πορεία.

Σε κάθε σημείο όπου το όχημα χρειάζεται να υπερπηδήσει ένα σκαλοπάτι, πλησιάζει αρκετά το εμπόδιο. Αυτό συμβαίνει επειδή, σε αυτές τις θέσεις, ο ελεγκτής "αντιλαμβάνεται" μεγάλες αποστάσεις (Very Large) και προς τις δύο κατευθύνσεις. Η συμπεριφορά αυτή δεν μπορεί να εξαλειφθεί απόλυτα, καθώς το σύστημα λαμβάνει υπόψη μόνο τις αποστάσεις στις οριζόντιες και κάθετες κατευθύνσεις και δεν διαθέτει πρόσθετες εισόδους, όπως η διαγώνια απόσταση από το εμπόδιο, που θα προσέφερε καλύτερη πληροφόρηση για πιο ομαλή αποφυγή.

Μόλις το σύστημα ανιχνεύσει ότι η απόσταση από τον παράλληλο τοίχο έχει μειωθεί στην περιοχή **Very Small**, ο ελεγκτής αρχίζει να προσαρμόζει την πορεία του οχήματος, αποκλίνοντας από το εμπόδιο και επαναφέροντάς το σε ασφαλή απόσταση. Αν και η έλλειψη διαγώνιας πληροφόρησης επηρεάζει τη συνολική ακρίβεια, το όχημα καταφέρνει να προσεγγίσει τον τελικό στόχο, με μια όμως αισθητή απόκλιση.

Παρατηρείται επίσης ότι, ανεξαρτήτως της αρχικής γωνίας προσανατολισμού του οχήματος, το σύστημα παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά σε όλες τις περιπτώσεις. Ειδικότερα, είτε η αρχική γωνία είναι θετική (έγιναν κάποιες επιπλέον δοκιμές που δεν παρουσιάζονται στην αναφορά καθώς δεν ζητείται από την εκφώνηση), αρνητική ή μηδενική, ο ελεγκτής καταφέρνει να προσαρμόσει την πορεία του οχήματος, οδηγώντας το σε μια κατεύθυνση που το βοηθά να αποφεύγει τα εμπόδια και να πλησιάζει τον στόχο.

Αυτή η παρατηρούμενη ομοιότητα στις τρεις περιπτώσεις αρχικών γωνιών δείχνει ότι ο ελεγκτής είναι αποτελεσματικός και προσαρμόσιμος, ανεξάρτητα από το αρχικό προσανατολισμό του αυτοκινήτου. Αρχικά, το όχημα στρέφεται είτε προς τα εμπρός είτε διορθώνει την πορεία του όταν απαιτείται, με στόχο να αποφύγει τα εμπόδια που εντοπίζει μέσω των αισθητήρων του. Καθώς το αυτοκίνητο πλησιάζει τα παράλληλα εμπόδια, το σύστημα αντιδρά στα σήματα των αποστάσεων και διορθώνει με τον ίδιο τρόπο την πορεία του ώστε να διατηρήσει μια σταθερή απόσταση από τα εμπόδια.

Αυτή η συνέπεια υποδεικνύει ότι το μοντέλο ασαφούς ελέγχου είναι ικανό να διαχειριστεί διαφορετικές αρχικές συνθήκες χωρίς να απαιτείται προσαρμογή ή επιπλέον ρύθμιση των παραμέτρων του ελεγκτή, επιβεβαιώνοντας την ευελιξία και την αξιοπιστία του συστήματος ελέγχου.

Tuning Λεκτικών Μεταβλητών

Η ρύθμιση των λεκτικών μεταβλητών παίζει καθοριστικό ρόλο στη βελτίωση της απόδοσης του ελεγκτή, προκειμένου το όχημα να φτάσει με ακρίβεια στην επιθυμητή τελική θέση. Αρχικά, ο ελεγκτής είχε σχεδιαστεί για να διατηρεί μια μικρή απόσταση (**Small**) από τα παράλληλα εμπόδια, σταματώντας να επηρεάζει την οριζόντια διεύθυνση του οχήματος όταν η απόσταση ήταν περίπου 0.25 μέτρα. Ωστόσο, για να επιτευχθεί η ακριβής τοποθέτηση του οχήματος στην τελική θέση, απαιτείται η μείωση αυτής της απόστασης. Έτσι, η ιδανική ρύθμιση προβλέπει ότι ο ελεγκτής θα πρέπει να διατηρεί σταθερά μια απόσταση **Small** της τάξης των 0.2 μέτρων από τα εμπόδια, αντί για τα 0.25 μέτρα που χρησιμοποιούνταν αρχικά.

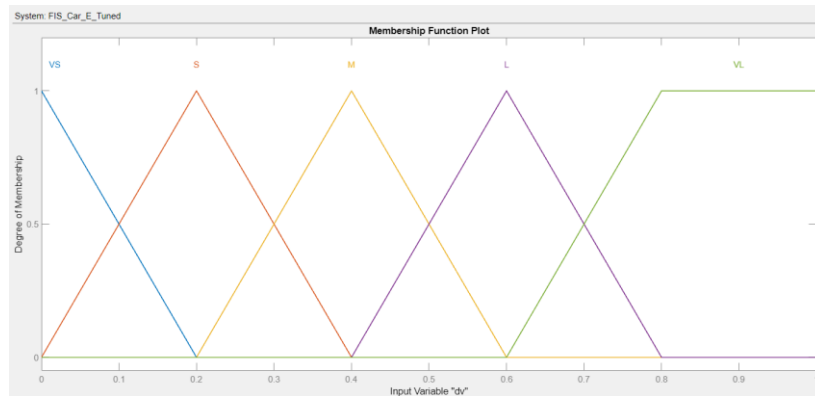
Αυτή η αλλαγή διασφαλίζει ότι η λεκτική μεταβλητή **Small** είναι πλήρως ενεργή για την απόσταση των 0.2 μέτρων, με αποτέλεσμα το όχημα να διορθώνει την πορεία του με μεγαλύτερη ακρίβεια κοντά στα εμπόδια.

Μείωση Διαστημάτων των Λεκτικών Μεταβλητών

Παρατηρήθηκε ότι η συμπεριφορά του ελεγκτή για μεγαλύτερες αποστάσεις, από την **Medium** και πάνω, παραμένει αμετάβλητη, καθώς ο στόχος του είναι να επαναφέρει το όχημα σε οριζόντια πορεία. Με αυτή τη γνώση, τα διαστήματα για κάθε λεκτική μεταβλητή της κάθετης απόστασης (**dV**) μειώθηκαν σε εύρος στα 0.4 μέτρα. Αυτή η προσαρμογή περιλαμβάνει την αναμόρφωση της λεκτικής μεταβλητής **Very Large**, η οποία τροποποιήθηκε σε τραπεζοειδές σχήμα ώστε να καλύπτει την απόσταση έως το 1 μέτρο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτές οι αλλαγές δεν επηρεάζουν την απόδοση του ελεγκτή στην αποφυγή εμποδίων, καθώς τα όρια των μεταβλητών εξακολουθούν να καλύπτουν επαρκώς το εύρος αποστάσεων που απαιτούνται για την ασφαλή πορεία του οχήματος. Ωστόσο, αυτές οι ρυθμίσεις βελτιώνουν την ακρίβεια στη διατήρηση της επιθυμητής τελικής θέσης, εξασφαλίζοντας μικρότερο περιθώριο σφάλματος.

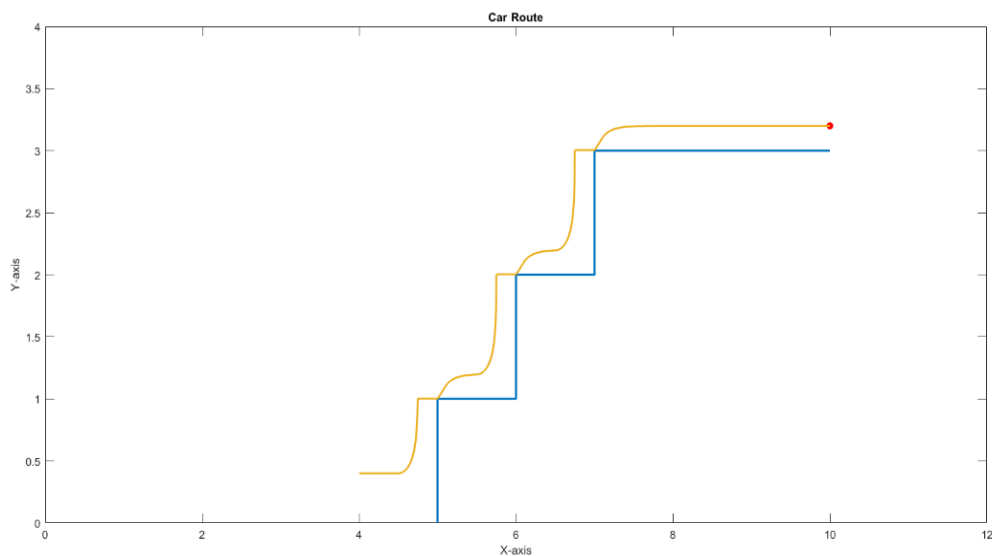
Ο νέος χώρος ορισμού της εισόδου **dv** έχει πλέον βελτιστοποιηθεί, παρέχοντας ένα πιο ακριβές μοντέλο ελέγχου για τις τελικές φάσεις της κίνησης του οχήματος, ιδιαίτερα κοντά στα εμπόδια. Παρακατω παρατίθεται ο νέος χώρος ορισμού της μεταβλητής dv όπως απεικονίζεται από το FIS Editor :



Εικόνα 11: Νέος χώρος ορισμού της μεταβλητής dv

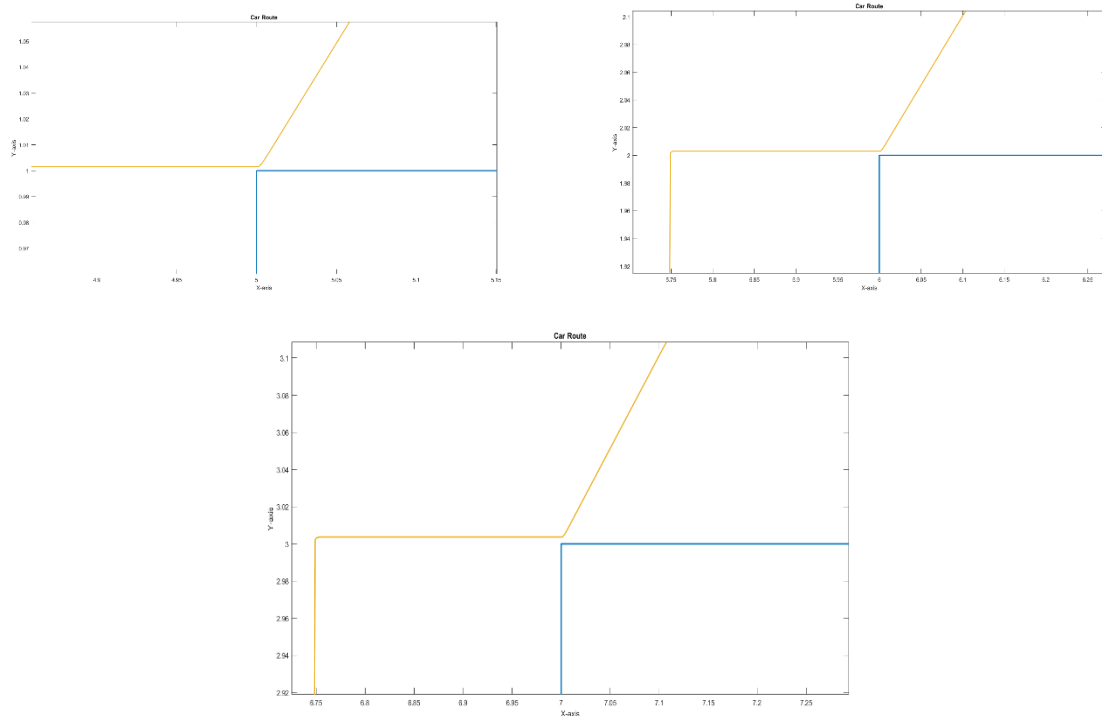
Το fis αρχείο για την ανανεωμένη ασαφή βάση είναι το FIS_Car_E_Tuned.fis

Ακολουθεί το διάγραμμα της πορείας του αυτοκίνητου (παρατίθεται μόνο αυτό για $\theta=0$ καθώς και στις 3 περιπτώσεις αρχικών γωνιών είχε πανομοιότυπη συμπεριφορά)



Εικόνα 12: Διάγραμμα πορείας αυτοκίνητου

Στην συνέχεια παρατίθενται εικόνες της πορείας με zoom στις γωνίες του τοίχου ώστε να φανεί ξεκάθαρα ότι το αυτοκίνητο δεν “χτυπάει” σε τοίχο και διατηρείται εντός πορείας.



Εικόνα 13: Zoomed Car Route (Angles)

Τελικά, μετά τις διαδικασίες tuning των λεκτικών μεταβλητών, το αυτοκίνητο κατάφερε να ακολουθήσει την επιθυμητή πορεία που περιγράφηκε θεωρητικά, επιτυγχάνοντας την ακριβή προσέγγιση του στόχου. Η λεπτομερής ρύθμιση των μεταβλητών, όπως η μείωση του ορίου της απόστασης **Small** και η προσαρμογή των συναρτήσεων συμμετοχής, επέτρεψαν στον ασαφή ελεγκτή να διατηρεί την πορεία του αυτοκινήτου με μεγαλύτερη ακρίβεια και να το οδηγεί στην τελική θέση με μηδενικό σφάλμα.

Το όχημα, μετά τις προσαρμογές, όχι μόνο κατάφερε να αποφύγει τα εμπόδια σύμφωνα με τους καθορισμένους κανόνες, αλλά και να σταθεροποιηθεί στην ακριβή θέση που ορίστηκε ως στόχος, εξαλείφοντας πλήρως την απόκλιση από την επιθυμητή τελική θέση.