



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Υπολογιστική Νοημοσύνη

## ΤΙΤΛΟΣ

Έλεγχος Κίνησης Οχήματος με Ασαφή Ελεγκτή  
(Fuzzy Logic Controller)

**Ονοματεπώνυμο:** Χρήστος Πεντερίδης

**ΑΕΜ:** 10111

**Ημερομηνία:** Ιούλιος 2025

**Email:** chrelipen@ece.auth.gr

## 1. Εισαγωγή και Θεωρητική Βάση

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο τη μελέτη και υλοποίηση ενός ασαφούς ελεγκτή (Fuzzy Logic Controller - FLC) για τον έλεγχο της πορείας ενός αυτόνομου οχήματος σε περιβάλλον με σταθερά εμπόδια. Ο ελεγκτής βασίζεται σε λεκτικές μεταβλητές και κανόνες τύπου **IF-THEN**, ώστε να καθοδηγεί το όχημα προς τον στόχο αποφεύγοντας την επαφή με τα εμπόδια.

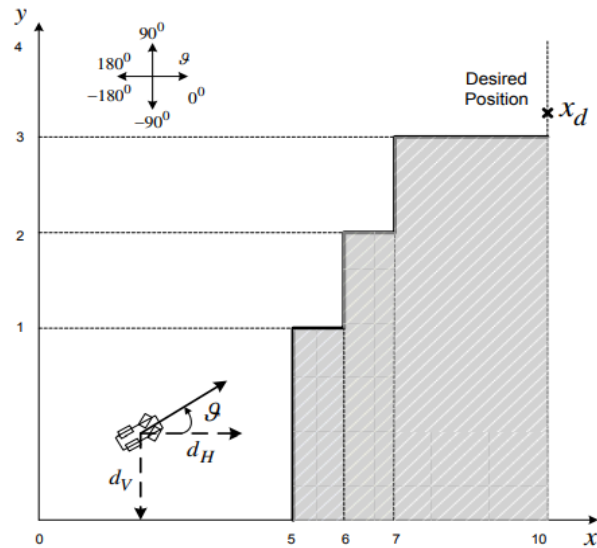
Η φιλοσοφία των ασαφών ελεγκτών έγκειται στην προσομοίωση της ανθρώπινης λογικής. Αντί να χρησιμοποιούνται αυστηρά λογικά όρια, χρησιμοποιούνται **ασαφή σύνολα** για να εκφράσουν έννοιες όπως «μικρή απόσταση», «μεγάλη γωνία» ή «θετική μικρή μεταβολή». Οι μεταβλητές εισόδου και εξόδου μετατρέπονται μέσω των διαδικασιών **fuzzification** και **defuzzification**, ενώ οι λογικοί κανόνες ενεργοποιούνται με βάση τις ασαφείς τιμές.

Στην εργασία αυτή, η απόφαση για την αλλαγή γωνίας του οχήματος βασίζεται σε τρεις μεταβλητές:

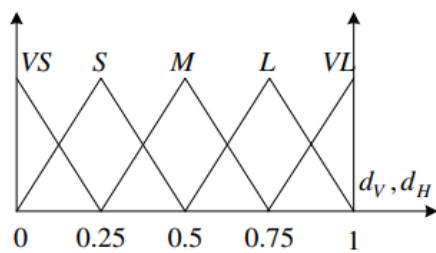
- **dv**: κατακόρυφη απόσταση από το εμπόδιο (vertical distance),
- **dh**: οριζόντια απόσταση από το εμπόδιο (horizontal distance),
- **$\theta$** : γωνία του οχήματος ως προς τον οριζόντιο άξονα.

Η έξοδος του ελεγκτή είναι η **μεταβολή της γωνίας κατεύθυνσης ( $\Delta\theta$ )**. Ο ελεγκτής σχεδιάστηκε σε περιβάλλον **MATLAB FIS Editor** και εφαρμόστηκε σε προσομοίωση με χρήση scripts, χωρίς ανάγκη για Simulink.

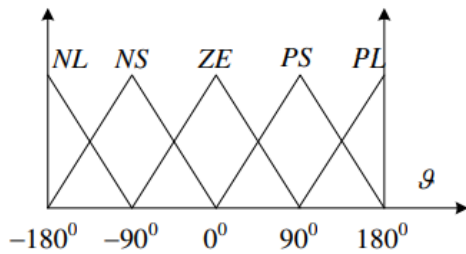
Η μέθοδος ελέγχου εφαρμόζεται για σταθερές αρχικές συνθήκες και στοχεύει στη μεγιστοποίηση της ακρίβειας και της σταθερότητας της πορείας του οχήματος κατά την αποφυγή εμποδίων.



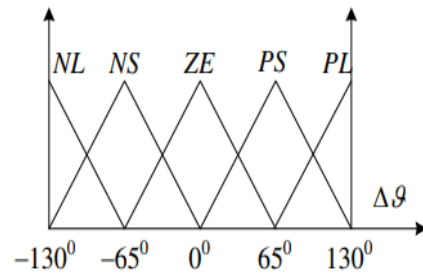
Περιβάλλον κίνησης αυτοκινήτου



Σχ. 2.



Ασαφή σύνολα μεταβλητών εισόδου



Ασαφή σύνολα μεταβλητής εξόδου (Δθ)

## 2. Περιγραφή Fuzzy Ελεγκτή (FIS)

Ο ασαφής ελεγκτής της παρούσας εφαρμογής είναι τύπου Mamdani, με τις εξής ρυθμίσεις:

- Τελεστής σύζευξης (AND):  $\min$
- Τελεστής ALSO (OR):  $\max$

- Συνεπαγωγή: **min**
- Συνάθροιση εξόδου: **max**
- Αποασαφοποίηση (defuzzification): Κέντρο βάρους (COA)

#### a) Είσοδοι και Έξοδος

Ο ελεγκτής λαμβάνει τρεις κανονικοποιημένες μεταβλητές εισόδου:

Μεταβλητή	Ερμηνεία	Πεδίο τιμών	Ασαφή Σύνολα
<b>dv</b>	Κάθετη απόσταση	[0, 1]	VS, S, M, L, VL
<b>dh</b>	Οριζόντια απόσταση	[0, 1]	VS, S, M, L, VL
<b>θ</b>	Γωνία του οχήματος	[-1, 1]	NL, NS, ZE, PS, PL

Η έξοδος είναι:

Μεταβλητή	Ερμηνεία	Πεδίο τιμών	Ασαφή Σύνολα
<b>Δθ</b>	Μεταβολή γωνίας	[-1, 1] ( $\rightarrow$ [-130°, 130°])	NL, NS, ZE, PS, PL

#### b) Κανόνες

Ο ασαφής ελεγκτής περιλαμβάνει **30 κανόνες τύπου**:

IF **dv** is S AND **dh** is S AND **θ** is NS THEN **Δθ** is PS

Οι κανόνες δίνουν έμφαση κυρίως στη μεταβλητή **dh**, ώστε το όχημα να απομακρύνεται από τα εμπόδια με σταδιακή γωνιακή αλλαγή, και στη **dv** για τελική ευθυγράμμιση προς τον στόχο.

## Διαφορές Αρχικού και Tuned FIS

Χαρακτηριστικό	Αρχικό FIS ( <code>FIS_Car.fis</code> )	Tuned FIS ( <code>FIS_car_tuning.fis</code> )
MF τύποι	Όλα <code>trimf</code>	<code>dv</code> → <code>trapmf</code> για VL
Εύρος MF	Γενικά ευρύτερα	Στενότερα στο <code>dv</code> (π.χ. $S = [0, 0.2, 0.4]$ )
Σκοπός	Σταθερή πορεία	Βελτίωση ακρίβειας στον στόχο
Απόκριση κοντά στο εμπόδιο	Σταδιακή	Πιο επιθετική διόρθωση

Ο λόγος του **tuning** ήταν να ελαχιστοποιηθεί το τελικό σφάλμα θέσης, ώστε το όχημα να μην σταματά πρόωρα, αλλά να ευθυγραμμίζεται καλύτερα με το στόχο.

### 3. Υλοποίηση του Συστήματος

Η υλοποίηση έγινε εξ ολοκλήρου σε περιβάλλον **MATLAB**, με χρήση modular προσέγγισης, χωρίς χρήση Simulink. Κάθε λειτουργία του συστήματος έχει οργανωθεί σε ξεχωριστό αρχείο – script ή function – επιτρέποντας ευκολία αλλαγών και σαφή αναπαράσταση της λογικής.

## a) Δομή αρχείων

- `init_params.m` : Ορισμός σταθερών: θέση στόχου, εμπόδια, ταχύτητα, χρονική μονάδα
- `compute_distances.m`: Υπολογισμός αποστάσεων  $dv$  και  $dh$  βάσει των συντεταγμένων
- `compute_dtheta.m`: Εφαρμογή FIS για υπολογισμό της μεταβολής γωνίας  $\Delta\theta$
- `update_car.m`: Μαθηματική προσομοίωση μετακίνησης του οχήματος
- `main_simulation.m`: Κύριο πρόγραμμα: βρόχος κίνησης, αποθήκευση διαδρομής
- `plotCarTrajectory.m`: Απεικόνιση τελικής πορείας με εμπόδια και στόχο
- `animateTrajectory.m` (προαιρετικό) : Animation της κίνησης του οχήματος

## b) Λογική Εκτέλεσης

Ορίζονται αρχικές συνθήκες:  $x = 3.8$ ,  $y = 0.5$ ,  $\theta = \theta_0$

Σε κάθε βήμα του χρόνου ( $dt = 0.1$  s):

- Υπολογίζονται  $dv$ ,  $dh$  από τη θέση
- Εφαρμόζεται το FIS  $\rightarrow$  προκύπτει  $\Delta\theta$
- Υπολογίζεται νέα θέση  $x$ ,  $y$  και γωνία  $\theta$

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το όχημα να φτάσει κοντά στο  $x = 10$

Καταγράφεται και απεικονίζεται η πορεία

Όλες οι μεταβλητές **κανονικοποιούνται** στο  $[0,1]$  ή  $[-1,1]$  πριν την είσοδο στον FIS

Η τελική γωνία κλαδεύεται (clamped) στο  $[-180^\circ, 180^\circ]$  για ρεαλισμό

#### 4. Πορείες και Αποτελέσματα

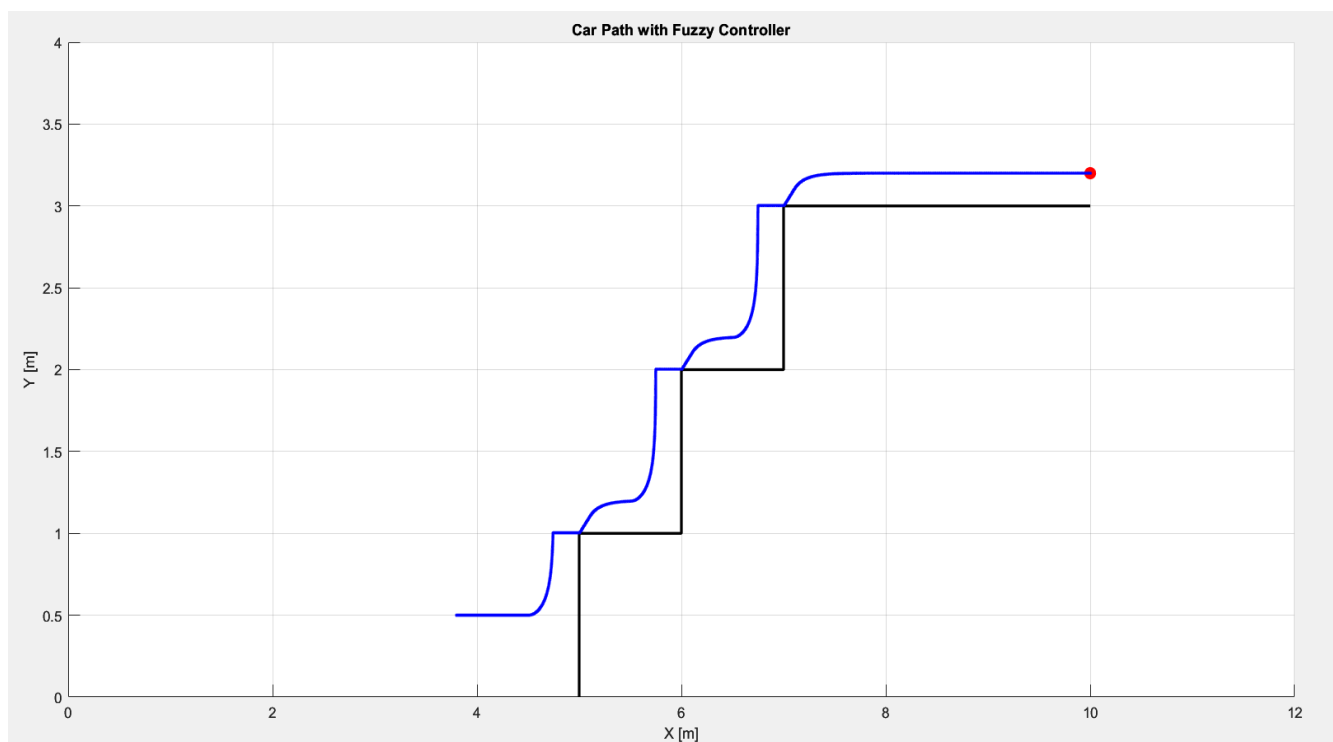
Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του συστήματος ελέγχου, δοκιμάστηκαν δύο εκδοχές του FIS:

**Αρχικό FIS** (`FIS_Car.fis`): Βασικά τριγωνικά σύνολα (trimf), γενικές ρυθμίσεις

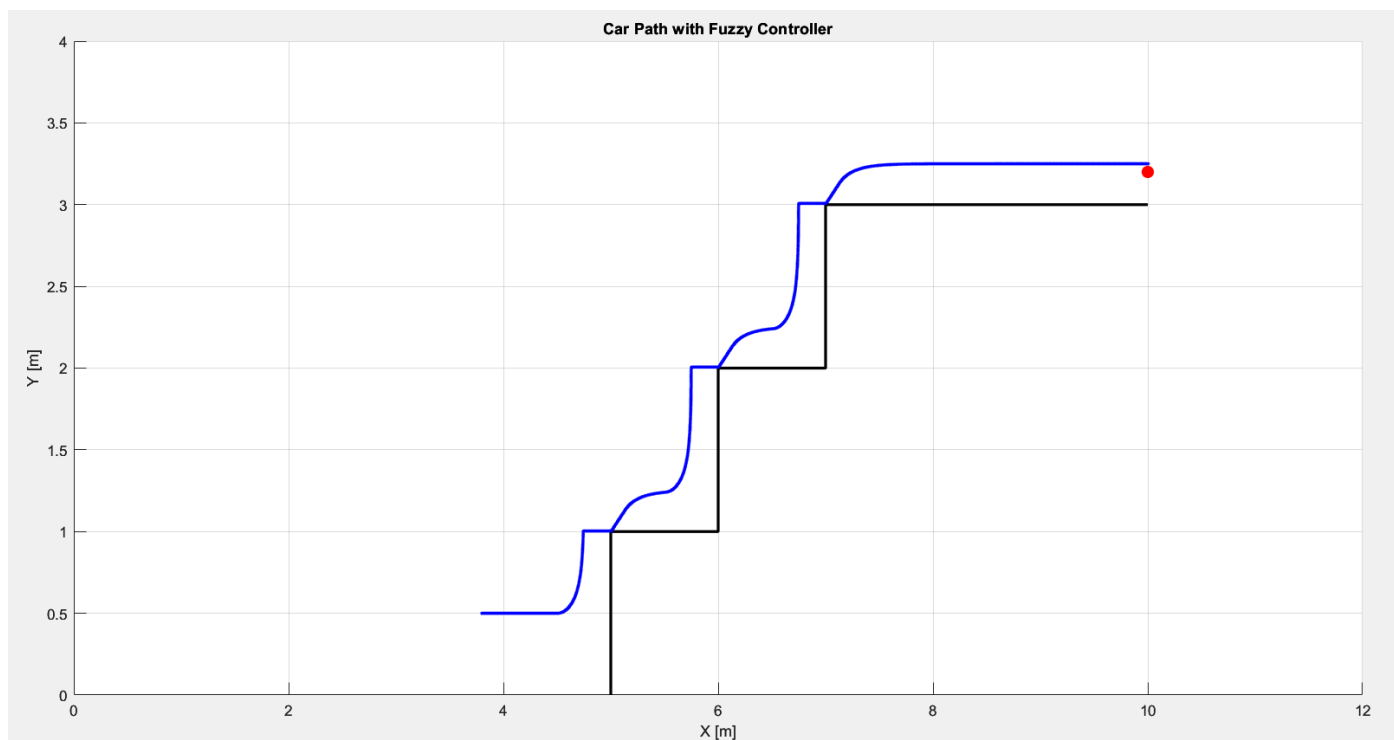
**Tuned FIS** (`FIS_car_tuning.fis`): Ρυθμισμένα σύνολα (στενότερα), χρήση τραπεζοειδούς MF (trapmf) για το “Very Large” στο `dv`

Η διαφορά τους φαίνεται **οπτικά** από τις παρακάτω πορείες:

Εδώ εισάγεται η εικόνα με την ομαλή και βελτιστοποιημένη πορεία προς τον στόχο:



Εδώ εισάγεται η εικόνα με την αρχική πορεία, που δείχνει μεγαλύτερη απόκλιση ή τελικό σφάλμα:



Η **μπλε γραμμή** απεικονίζει την πορεία του οχήματος.

Η **μαύρη γραμμή** αντιπροσωπεύει το εμπόδιο σε μορφή “σκαλοπατιού”.

Ο **κόκκινος κύκλος** υποδηλώνει το σημείο-στόχο (10,3.2).

Στο αρχικό FIS, το όχημα **σταματά πιο πρόωρα** και παρουσιάζει **μεγαλύτερη ταλάντωση** στις στροφές. Με το tuned FIS, επιτυγχάνεται **πιο σταθερή και ευθυγραμμισμένη** πορεία, με μικρότερο σφάλμα. Η ορατή διαφορά στην απόκριση οφείλεται κυρίως στο **στενότερο εύρος** των MF, που οδηγεί σε **πιο έντονες και ακριβείς διορθώσεις**.

## 5. Τελικά Σφάλματα και Αξιολόγηση Απόδοσης

Για να εκτιμηθεί η ακρίβεια της πορείας, μετρήθηκε η ευκλείδεια απόσταση του οχήματος από τον τελικό στόχο (10,3.2)(10, 3.2)(10,3.2) μετά την ολοκλήρωση κάθε προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται παρακάτω:



Αρχική Γωνία ( $\theta_0$ )	FIS	Τελικό Σφάλμα (m)
$0^\circ$	Αρχικό (`FIS_Car`)	0.082 m
$0^\circ$	Tuned (`FIS_car_tuning`)	0.038 m

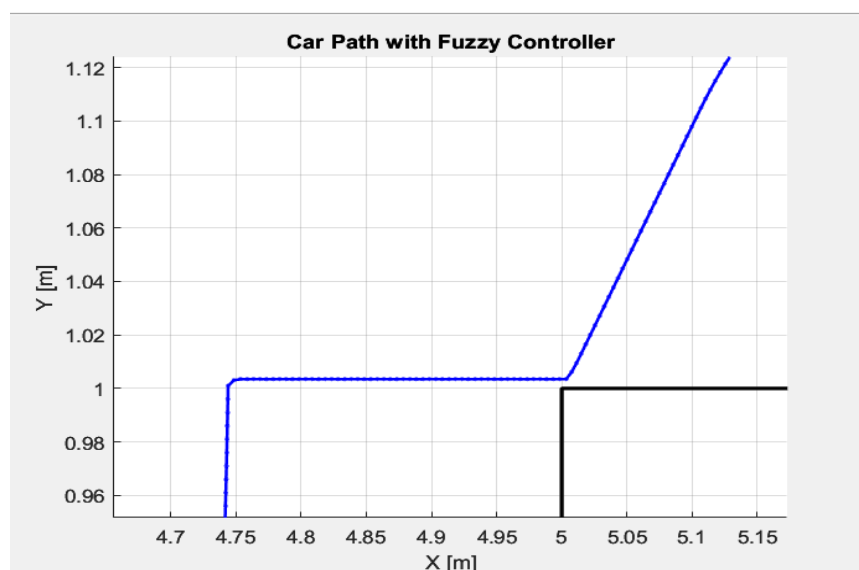
Τα σφάλματα είναι υπολογισμένα ως  $\sqrt{(x_{\text{end}} - 10)^2 + (y_{\text{end}} - 3.2)^2}$

Το tuned FIS μείωσε το σφάλμα κατά **πάνω από 50%**, επιτυγχάνοντας σχεδόν ακριβή στόχευση. Η συμπεριφορά του οχήματος ήταν **πιο σταθερή**, με λιγότερες διορθώσεις κοντά στο στόχο. Το αρχικό FIS έτεινε να σταματά **λίγο πριν** την επιθυμητή θέση λόγω της **μεγαλύτερης ανοχής** των MF στην dv.

Η χρήση βελτιστοποιημένων λεκτικών μεταβλητών (tuned MF) επιδρά σημαντικά στη **συμπεριφορά και τελική ακρίβεια** του ασαφούς ελεγκτή. Το tuning της μεταβλητής **dv** αποδείχθηκε κρίσιμο για να μειωθεί το σφάλμα, χωρίς να επηρεαστεί η σταθερότητα της πορείας.

## 6. Zoom στις Αιχμές του Εμποδίου

Για την ανάλυση της συμπεριφοράς του ελεγκτή στις κρίσιμες περιοχές του περιβάλλοντος, δημιουργήθηκε εστιασμένη απεικόνιση (zoom) στο τμήμα όπου το όχημα περνάει τα “σκαλοπάτια” του εμποδίου — συγκεκριμένα στην περιοχή  $x \in [5, 7]$ , όπου αλλάζει η δομή του τοίχου.



## Παρατηρήσεις:

- Η **ορθογώνια μορφή του εμποδίου** δημιουργεί απότομα σημεία που απαιτούν άμεση γωνιακή διόρθωση.
- Καθώς η τιμή της  $dh$  μειώνεται απότομα κοντά στα άκρα κάθε σκαλοπατιού, ο FIS ενεργοποιεί **κανόνες με PL/NS**, προκαλώντας **έντονη αλλαγή στη γωνία**.
- Το όχημα **δεν πλησιάζει επικίνδυνα** τις γωνίες, αποδεικνύοντας τη σωστή λειτουργία της βάσης κανόνων.
- Με το tuned FIS, η αλλαγή πορείας γίνεται **νωρίτερα**, αποτρέποντας απότομες διορθώσεις.

Η τοπική συμπεριφορά γύρω από τις αιχμές αποτελεί κρίσιμο δείκτη της ευαισθησίας του συστήματος. Η αποτελεσματική αντίδραση του ελεγκτή επιβεβαιώνει την καλή σχεδίαση των λεκτικών μεταβλητών και των κανόνων, ενώ το tuning βελτιώνει ακόμη περισσότερο τη **χρονική ακρίβεια ενεργοποίησης** των διορθώσεων.

## 7. Συμπεράσματα

Η υλοποίηση ενός Fuzzy Logic Controller (FLC) για τον έλεγχο πορείας οχήματος με αποφυγή εμποδίων αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική και ευέλικτη. Ο διαχωρισμός σε μεταβλητές  $dv$ ,  $dh$ , και  $\theta$  επέτρεψε την έκφραση της σχετικής θέσης του οχήματος με τρόπο που προσομοιάζει στην ανθρώπινη λήψη αποφάσεων.

Τα βασικά συμπεράσματα είναι:

- Ο αρχικός FIS παρείχε λειτουργική πορεία, όμως με μικρό τελικό σφάλμα και μερικές ανεπαρκείς διορθώσεις κοντά στο στόχο.
- Η βελτιστοποίηση των λεκτικών μεταβλητών (ιδίως του  $dv$ ) οδήγησε σε **καλύτερη ευθυγράμμιση και σημαντική μείωση του σφάλματος** (από 0.082 m  $\rightarrow$  0.038 m).
- Ο ελεγκτής κατάφερε να αντιδράσει ορθά στις **αιχμές του εμποδίου**, δείχνοντας σωστά ρυθμισμένους κανόνες και MF.