



# ΑΣΑΦΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

CAR CONTROL

Κιλάρογλου Ελευθέριος (8501)

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Θεσσαλονίκη 2021

## Περιγραφή:

Η εργασία αυτή έχει σκοπό την δημιουργία ενός ασαφούς ελεγκτή για τον έλεγχο της κίνησης ενός οχήματος με σκοπό την αποφυγή εμποδίων.

### Ασαφής Ελεγκτής

Ο ασαφής ελεγκτής σχεδιάστηκε με χαρακτηριστικά σύμφωνα με τα ζητούμενα της εκφώνησης:

- Οι κανόνες υλοποιούνται με τον τελεστή συμπερασμού Larsen  $R_p$ .
- Το συνδετικό ALSO υλοποιείται με τον τελεστή max.
- Σαν τελεστή σύνθεσης χρησιμοποιούμε τον max-min
- Ο από-σαφοποιητής υλοποιείται με την τεχνική COA.

Η ασαφής βάση κανόνων απαρτίζεται από 27 κανόνες, όπως ακριβώς ορίζεται από την πολυπλοκότητα του προβλήματος. Συγκεκριμένα, για τρεις εισόδους με τρία ασαφή σύνολα έχουμε  $3 \times 3 \times 3 = 27$  κανόνες για κάθε ενδεχόμενο. Οι κανόνες αυτοί ακολουθούν τη μορφή:

$$IF d_v \text{ is } S \text{ AND } d_H \text{ is } S \text{ AND } \theta \text{ is } N \text{ THEN } \Delta\theta \text{ is } P$$

Τα βάρη (weights) των κανόνων έχουν οριστεί κατάλληλα σε τρεις κατηγορίες:

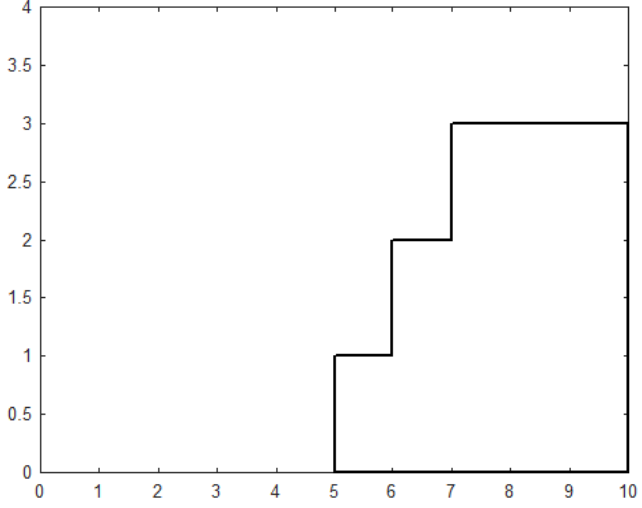
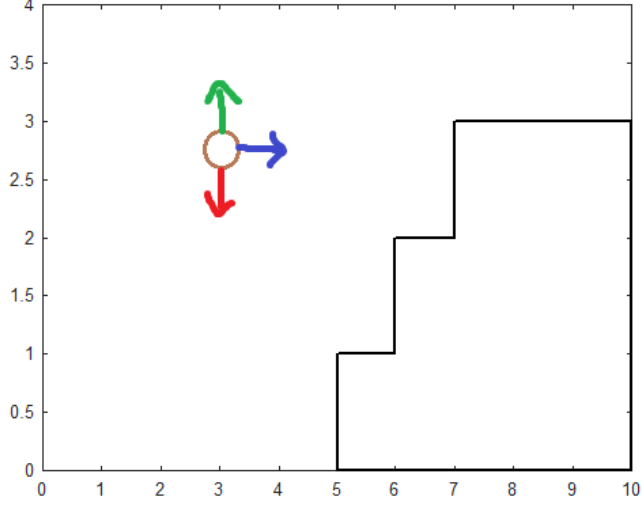
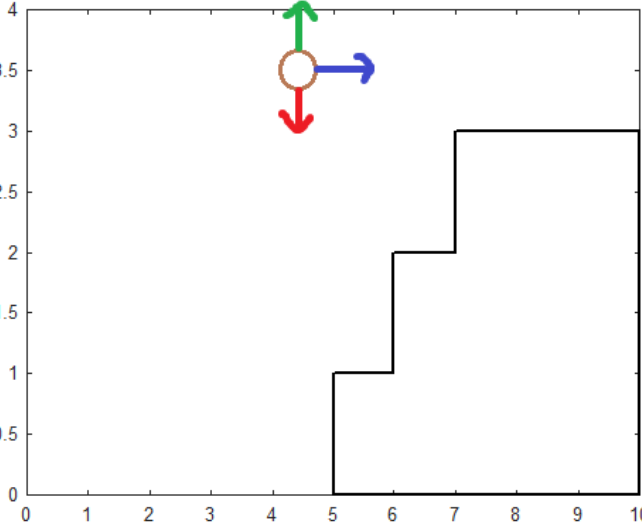
- 1 – Χαμηλής σημασίας ( $w=0.333$ )
- 2 – Μέσης σημασίας ( $w = 0.667$ )
- 3 - Υψηλής σημασίας ( $w = 1$ )

και με βάση αυτά τα βάρη ποσοτικοποιείται η συνεισφορά του αντίστοιχου κανόνα στο τελικό συμπέρασμα.

Ακολουθούν οι κανόνες σε μορφή πίνακα και τα αντίστοιχα βάρη τους. Η στήλη «Σχήμα» αποτελεί μια εκτίμηση των θέσεων του οχήματος στο χώρο. Το βελάκι που φαίνεται δείχνει την κατεύθυνση του οχήματος (κατά προσέγγιση). Με πράσινο χρώμα το  $\Delta\theta$  είναι Positive, με μπλε είναι Zero και με κόκκινο είναι Negative:

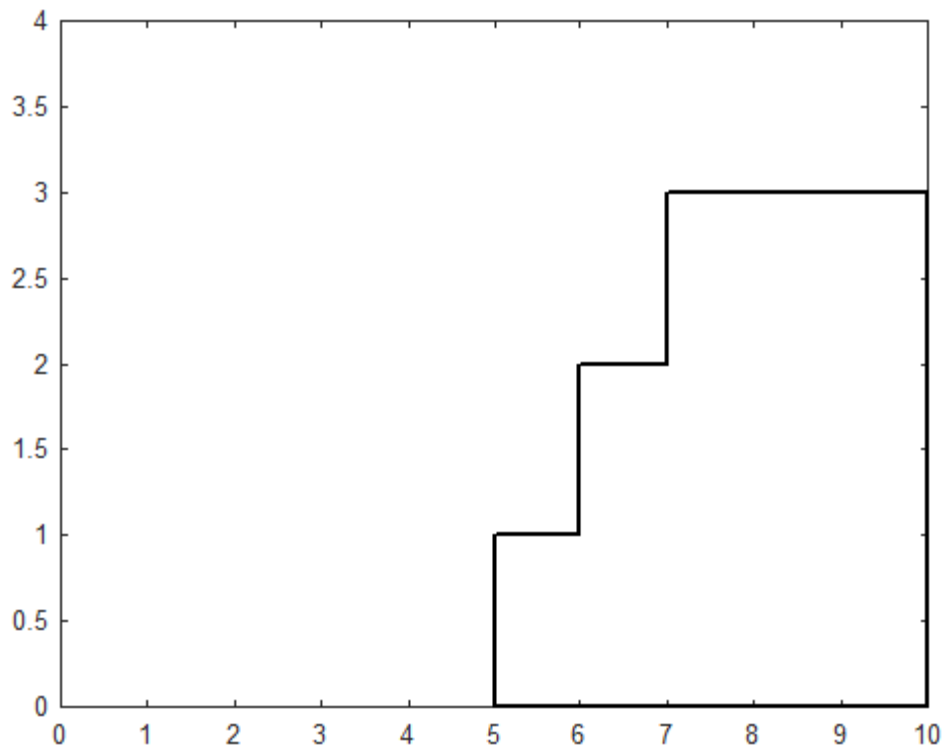
$d_V$	$d_H$	$\theta$	$\Delta\theta$	$W$	Σχήμα
S	S	N	P	3	
		Z	P	3	
		P	Z	2	
	M	N	P	3	
		Z	Z	2	
		P	N	1	
	L	N	P	1	
		Z	Z	1	
		P	N	1	

$d_V$	$d_H$	$\theta$	$\Delta\theta$	$W$	Σχήμα
M	S	N	P	3	
		Z	P	3	
		P	Z	2	
	M	N	P	2	
		Z	Z	1	
		P	N	1	
	L	N	P	2	
		Z	Z	1	
		P	N	1	

$d_V$	$d_H$	$\theta$	$\Delta\theta$	$W$	Σχήμα
L	S	N	P	1	
		Z	P	1	
		P	Z	1	
	M	N	P	2	
		Z	Z	2	
		P	N	2	
	L	N	P	2	
		Z	Z	2	
		P	N	3	

## Επεξήγηση:

Στο πείραμα θεωρήθηκε πως ο χώρος περιορίζεται στα όρια  $[0, 10]$  για τον άξονα των  $x$  και  $[0, 4]$  για τον άξονα τον  $y$ , όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αν το αυτοκίνητο μεταβεί σε θέση εκτός των ορίων η διαδικασία τερματίζεται και το πείραμα θεωρείται αποτυχημένο.



Επίσης να σημειωθεί ότι οι αποστάσεις από τα εμπόδια κανονικοποιήθηκαν στο διάστημα  $[0, 1]$  με συντελεστές κλιμακοποίησης  $1/4$  για το  $d_V$  και  $1/10$  για το  $d_H$ .

Τώρα, ας γίνει ανάλυση του πρώτου κανόνα:

***IF  $d_V$  is  $S$  AND  $d_H$  is  $S$  AND  $\theta$  is  $N$  THEN  $\Delta\theta$  is  $P$***

Όπως βλέπουμε στο σχήμα του αντίστοιχου κανόνα, σε αυτήν τη περίπτωση το όχημα βρίσκεται πολύ κοντά στο εμπόδιο και κατευθύνεται προς τα τοιχώματά του προς τα κάτω. Επομένως είναι απαραίτητο να αλλάξει κατεύθυνση όσο πιο γρήγορα γίνεται και γι' αυτό το  $\Delta\theta$  παίρνει την τιμή  $P$  με μέγιστο βάρος  $weight = 1$  (στο σχήμα συμβολίζεται όπως αναφέρθηκε και παραπάνω με  $W = 3$ ).

Ένας άλλος όμως κανόνας είναι αυτό που ακολουθεί τη σχέση:

***IF  $d_V$  is M AND  $d_H$  is L AND  $\theta$  is Z THEN  $\Delta\theta$  is Z***

Σε αυτήν την περίπτωση όπως φαίνεται στο σχήμα το όχημα βρίσκεται αρκετά μακριά από το σημείο προορισμού και ταυτόχρονα αρκετά μακριά από το εμπόδιο ενώ κατευθύνεται προς αυτό. Επειδή, όμως το  $\theta$  είναι Zero βγαίνει το πόρισμα ότι η γωνία πρέπει να διατηρηθεί σταθερή (έτσι ώστε να πλησιάσει και στο σημείο προορισμού πριν κάνει κάποιον ελιγμό για στροφή) στις περισσότερες από αυτές τις περιπτώσεις ενώ εάν κάποιος άλλος κανόνας επιβάλλει την αλλαγή της κατεύθυνσης του οχήματος τότε προφανώς ο άλλος κανόνας θα έχει αρκετά μεγαλύτερη σημασία ώστε να μπορέσει να προβλέψει την κίνηση του αυτοκινήτου και να ξεκινήσει τη στροφή πριν το όχημα φτάσει πολύ κοντά στο εμπόδιο. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο ο κανόνας αυτός είναι χαμηλής σημασίας και παίρνει την τιμή  $weight = 0.333$  ( $W = 1$ ).

Με παρόμοια λογική εξάγονται και οι υπόλοιποι κανόνες, αναλογίζοντας το επιθυμητό αποτέλεσμα και τη σημασία ύπαρξής του στο σύστημα.

## Ανάλυση διαδικασίας:

Η θέση του οχήματος κάθε χρονική στιγμή καθορίζεται από τη σχέση

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = v \text{ ή } x_{i+1} = x_i + v\Delta t$$

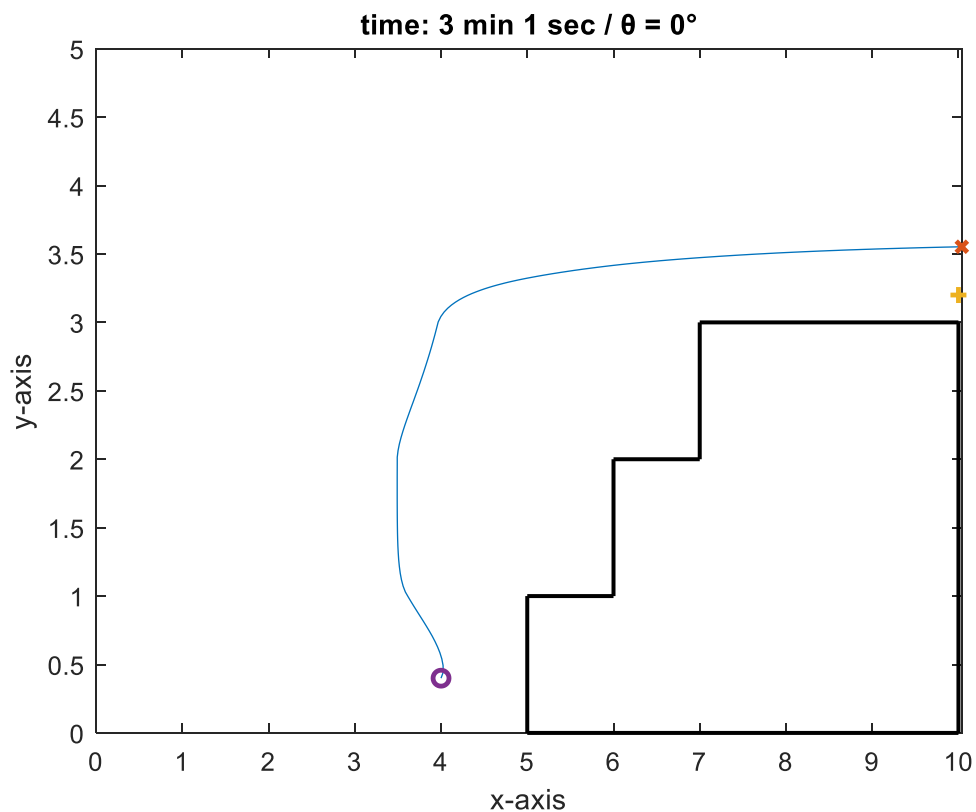
$x$  η αντίστοιχη συνεταγμένη και  $v$  η προβολή της ταχύτητας στον άξονα αυτόν. Δηλαδή για τον άξονα  $x$ ,  $v = v_0 * \cos\theta$  ενώ για τον άξονα  $y$ ,  $v = v_0 * \sin\theta$ . Επίσης  $\Delta t$  είναι ο χρόνος μεταξύ δύο δειγμάτων ο οποίος στο πείραμά μας θεωρείται 1 second.

Αντίστοιχα για την γωνία  $\theta$  έχουμε  $\Delta\theta = \theta_{i+1} - \theta_i$  ή  $\theta_{i+1} = \Delta\theta + \theta_i$  όπου το  $\Delta\theta$  υπολογίζεται από το ασαφή σύστημα με δεδομένη την αρχική γωνία  $\theta_i$  και τις αποστάσεις του οχήματος από τα άκρα  $d_V$  και  $d_H$ . Επίσης να τονιστεί ότι η γωνία  $\theta$  περιορίζεται στο διάστημα  $[-180, 180]$  ώστε να αποτελεί δεκτή είσοδο στο ασαφή σύστημα ενώ ταυτόχρονα αυτό δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα μιας που το ημίτονο και το συνημίτονο στην παραπάνω σχέση είναι περιοδικά κατά  $2\pi$ .



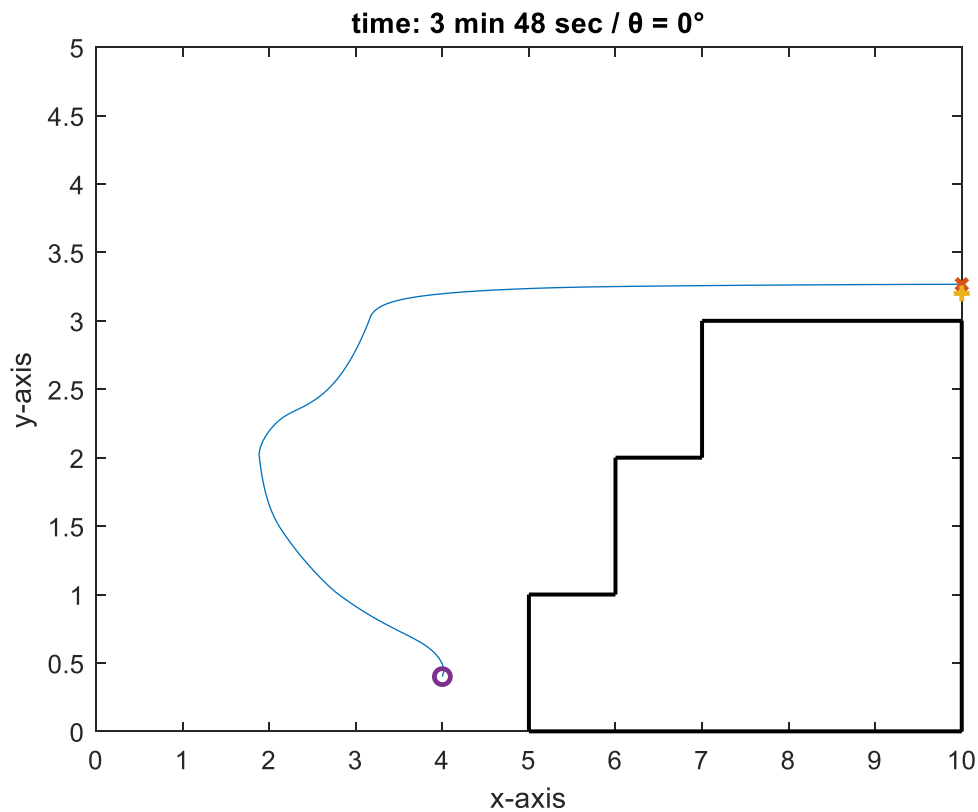
## Πορεία οχήματος:

Αρχικά το πρόβλημα εξετάστηκε για την αρχική γωνία  $\theta_0 = 0$ . Επίσης αρχικά η βάση κανόνων χρησιμοποιήθηκε όπως παραπάνω αλλά χωρίς τα βάρη που προσθέσαμε αργότερα. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν τα membership functions της εκφώνησης. Με κύκλο (o) συμβολίζεται η αρχική θέση του αυτοκινήτου, με X η τελική και με + η επιθυμητή θέση-στόχος  $(x_d, y_d) = (10, 3.2)$ . Η πορεία του οχήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (να τονιστεί ότι το αρχείο που χρησιμοποιήθηκε είναι το fis.fis):



Όπως παρατηρούμε όχημα εκτελεί μια αρκετά ομαλή πορεία αποφεύγοντας τα εμπόδια αλλά καταλήγει πιο πάνω από το σημείο που θέλουμε.

Έτσι αποφασίστηκε να ακολουθηθεί η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω για την εξαγωγή μιας περισσότερο κατάλληλης βάσης κανόνων χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα βάρη. Το αποτέλεσμα της αλλαγής αυτής φαίνεται παρακάτω (το αρχείο που χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την περίπτωση είναι το fis different weight → fisdw.fis):

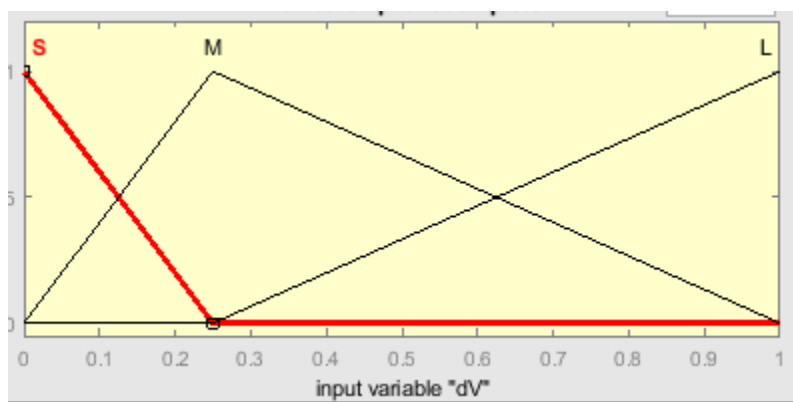


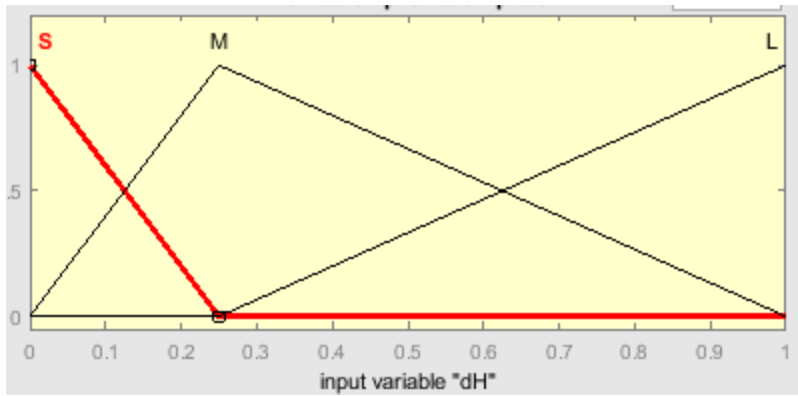
Παρατηρούμε ότι πράγματι η αλλαγή αυτή της βάσης κανόνων βελτίωσε το αποτέλεσμα. Βλέπουμε όμως ότι όπως και πριν το όχημα διατηρεί μεγάλη απόσταση από τα εμπόδια. Αυτό συμβαίνει επειδή η ασαφής βάση κανόνων βγάζει το συμπέρασμα ότι το όχημα βρίσκεται πολύ κοντά στα εμπόδια παρόλο που στην πραγματικότητα δεν είναι και έτσι προσπαθεί να το απομακρύνει. Δηλαδή ουσιαστικά οι αποστάσεις  $d_V$  και  $d_H$  παίρνουν την τιμή Small σε σημεία που το

ανθρώπινο μάτι θεωρεί ότι είναι περισσότερο μακριά από το εμπόδιο (πχ Medium). Πιο συγκεκριμένα αυτό εμφανίζεται κυρίως στην οριζόντια απόσταση  $d_H$ . Θα μπορούσε κανείς να πει ότι αυτό είναι λάθος της κανονικοποίησης καθώς θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι το όχημα δεν μπορεί να πάρει τιμές στον άξονα  $x$  μικρότερες του 3, δεδομένου ότι η αρχική θέση είναι στο σημείο  $x_0 = 4$  ενώ το όχημα θέλει να φτάσει στο σημείο  $x_d = 10$  που είναι αρκετά δεξιότερα από αυτό. Επιπλέον όπως φαίνεται και στα παραπάνω σχήματα τα εμπόδια στη συγκεκριμένη περίπτωση μπορούν να βγάλουν το  $d_H$  μέγιστο όταν το  $x$  πάρει την τιμή 7 και όχι περισσότερο. Επομένως ακόμη και το  $x_{max} = 10$  για την κανονικοποίηση (συντελεστής κλιμακοποίησης  $k = x_{max} - x_{min}$ ) θα μπορούσε να θεωρηθεί υπερβολή. Για να φανεί καλύτερα όλο αυτό το λάθος μπορεί να σκεφτεί κανείς ότι με βάση τις συναρτήσεις συμμετοχής της εκφώνησης και το συντελεστή κλιμακοποίησης που χρησιμοποιήσαμε, απόσταση Small από το εμπόδιο μπορεί να είναι έως και  $d_H^{max} = 5$  κάτι που στην πραγματικότητα για το ανθρώπινο μάτι θα μπορούσε να θεωρηθεί ακόμη και Large.

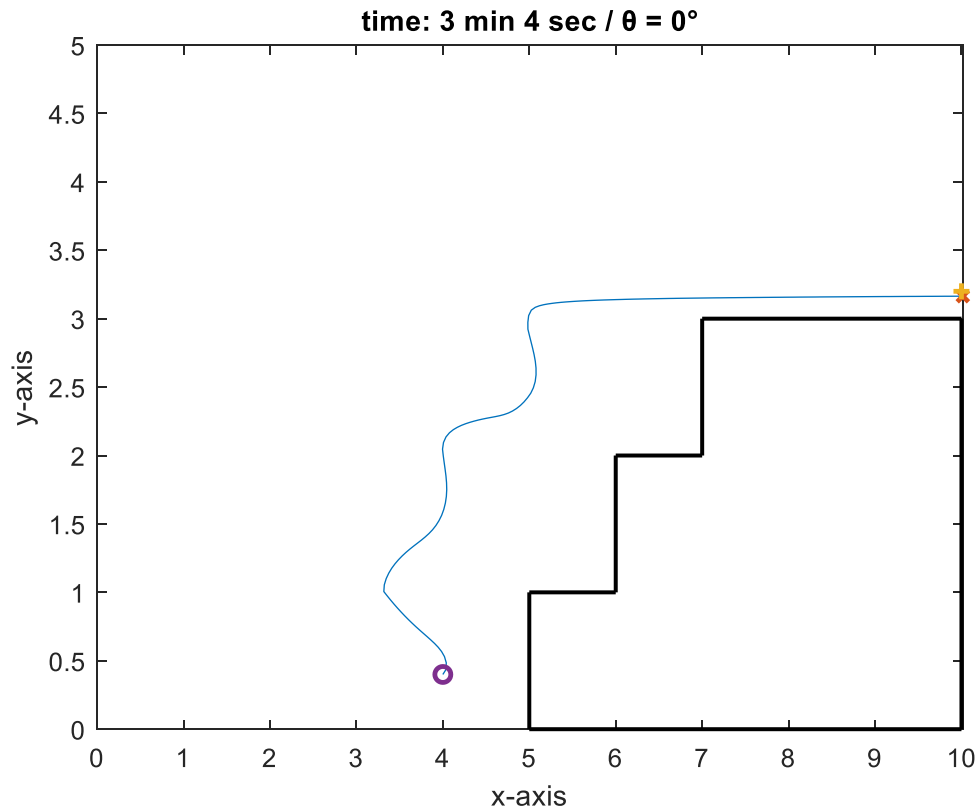
Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται κυρίως για την απόσταση  $d_H$  καθώς για την κάθετη απόσταση  $d_V$  στο πείραμα αυτό θεωρήθηκε εμπόδιο και ο άξονας  $x$  και έτσι με βάση τις συναρτήσεις συμμετοχής και το συντελεστή κλιμακοποίησης  $1/4$  που χρησιμοποιήθηκε, η λεκτική μεταβλητή  $d_V$  δίνει μια καλύτερη εικόνα της Small/Medium/Large κάθετης απόστασης από το εμπόδιο στον χώρο.

Για να το διορθώσουμε λοιπόν όλο αυτό επαναπροσδιορίσαμε τα όρια των λεκτικών μεταβλητών των αποστάσεων  $d_V$  και  $d_H$ . Πιο συγκεκριμένα θεωρούμε ότι το Small παίρνει μικρότερες τιμές (πχ  $d_H^{max} = 2.5$ ) ενώ οι άλλες λεκτικές μεταβλητές διαμορφώνονται κατάλληλα με βάση την αλλαγή αυτή. Οι νέοι διαμερισμοί των χώρων των μεταβλητών αυτών φαίνεται παρακάτω:





Το αποτέλεσμα της δεύτερης αλλαγής αυτής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το αρχείο fis different weight, different membership με όνομα fisdwdm.fis):



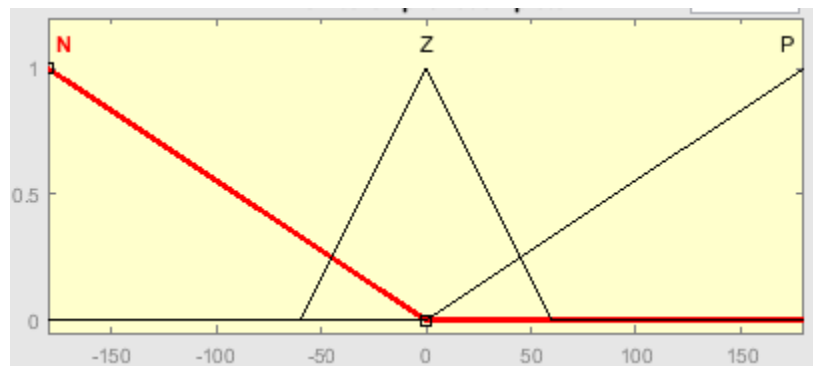
Παρατηρούμε λοιπόν ότι παρόλο το όχημα δεν έχει τόσο ομαλή διαδρομή φτάνει ικανοποιητικά κοντά στο σημείο προορισμού αποφεύγοντας να κάνει την επιπλέον απόσταση που έκανε με μόνο ρύθμιση των βαρών. Η απόσταση αυτή φαίνεται από το χρόνο που χρειάστηκε για να φτάσει το όχημα στο σημείο προορισμού δεδομένου ότι έχουμε σταθερή ταχύτητα. Ο χρόνος αυτός φαίνεται πάνω σε κάθε σχήμα.

Για να διορθώσουμε λοιπόν και το πρόβλημα της μη ομαλής διαδρομής σκεφτόμαστε τι μπορεί να επηρεάζει τη συνεχή αλλαγή της κατεύθυνσης. Παρατηρώντας τη διαδρομή του οχήματος βλέπουμε ότι το όχημα προσπαθεί ουσιαστικά να εξασφαλίσει μια «σταθερή» απόσταση από το δεξιά εμπόδιο και να μην το πλησιάσει πολύ. Έτσι όταν το εμπόδιο βρίσκεται στην σταθερή αυτή απόσταση αυτό πάει λίγο να απομακρυνθεί ενώ όταν ξαφνικά το εμπόδιο «απομακρύνεται» το όχημα πάει να πλησιάσει το εμπόδιο στην ίδια σταθερή απόσταση.

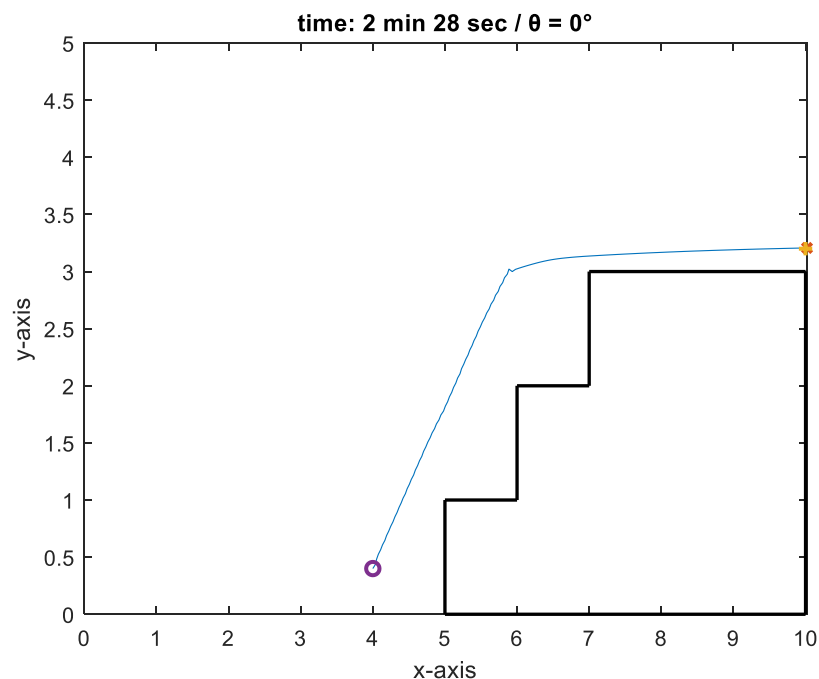
Παρατηρώντας τους κανόνες που παρουσιάσαμε πιο πάνω, αυτό συμβαίνει επειδή όταν το όχημα βρίσκεται κοντά στο εμπόδιο και η γωνία είναι μηδέν τότε ασαφές σύστημα αποφασίζει ότι το  $\Delta\theta$  θα είναι θετικό ενώ όταν η γωνία είναι θετική τότε το  $\Delta\theta$  θα είναι 0 (όταν η γωνία είναι αρνητική τότε προφανώς  $\Delta\theta$  είναι θετικό αλλά δε μας ενδιαφέρει στην περίπτωση που εξετάζουμε). Έτσι όταν το όχημα κινείται κατακόρυφα προς τα πάνω ενώ η γωνία είναι θετική και θέλουμε να μην αλλάζει κατεύθυνση, το ασαφές σύστημα θεωρεί τη γωνία και μηδενική και έτσι έχουμε ένα μικρό θετικό  $\Delta\theta$  που έχει ως αποτέλεσμα την μικρή απομάκρυνση του οχήματος. Το σημείο αυτό όπου το όχημα κινείται κατακόρυφα προς τα πάνω είναι το σημείο των 90 μοιρών και αποτελεί το σημείο τομής των συναρτήσεων συμμετοχής P και Z της γωνίας  $\theta$ . Δηλαδή είναι ουσιαστικά το σημείο μετά από το οποίο η γωνία θεωρείται κυρίως θετική και όχι τόσο μηδενική και γι' αυτό το  $\Delta\theta$  παίρνει μικρές μόνο θετικές τιμές. Πριν το σημείο αυτό, όπου η γωνία θεωρείται κυρίως μηδενική, το  $\Delta\theta$  παίρνει μεγαλύτερες τιμές με αποτέλεσμα η γωνία να φτάνει γρήγορα τις 90 μοίρες και έτσι το όχημα να μην προλαβαίνει να πλησιάσει άλλο το εμπόδιο. Δηλαδή ουσιαστικά το πρόβλημα είναι ότι μέχρι τις 90 μοίρες της γωνίας  $\theta$  η γωνία λαμβάνεται κυρίως μηδενική. Για να διορθώσουμε λοιπόν αυτά τα «δύο» προβλήματα αρκεί να μεταβάλουμε το σημείο αυτό από τις 90 μοίρες σε μια μικρότερη γωνία. Έτσι όσο το όχημα βρίσκεται κοντά στο δεξιά

εμπόδιο θα κινείται κυρίως σε αυτή την καινούρια γωνία (αντί κατακόρυφα) με αποτέλεσμα να λυθεί το πρόβλημα της μη ομαλής διαδρομής.

Μειώνοντας λοιπόν την επιρροή της  $\theta$  is  $Z$  (ώστε το σημείο τομής με την  $\theta$  is  $P$  να είναι μικρότερο από 90 μοίρες όπως αναφέρθηκε παραπάνω) και κάνοντας τις κατάλληλες δοκιμές, καταλήγουμε τον παρακάτω διαμερισμό του χώρου της γωνίας  $\theta$ :

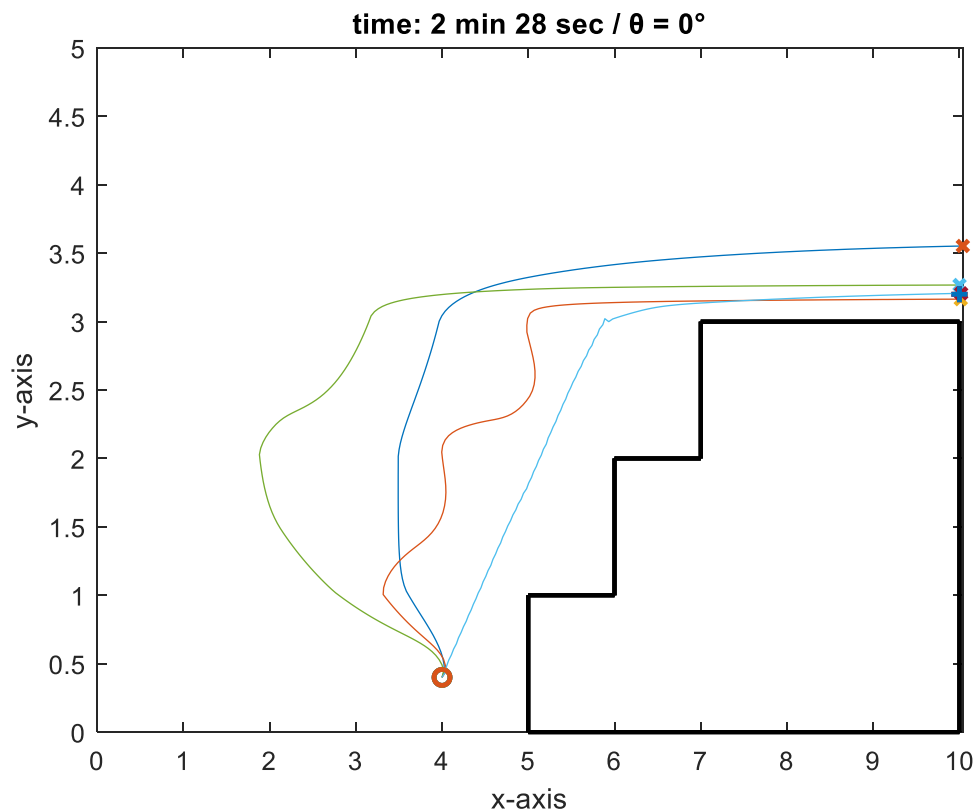


Το αποτέλεσμα της τρίτης αλλαγής αυτής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το αρχείο `fis different weight, different membership, different theta` με όνομα `fisdwdmdth.fis`):

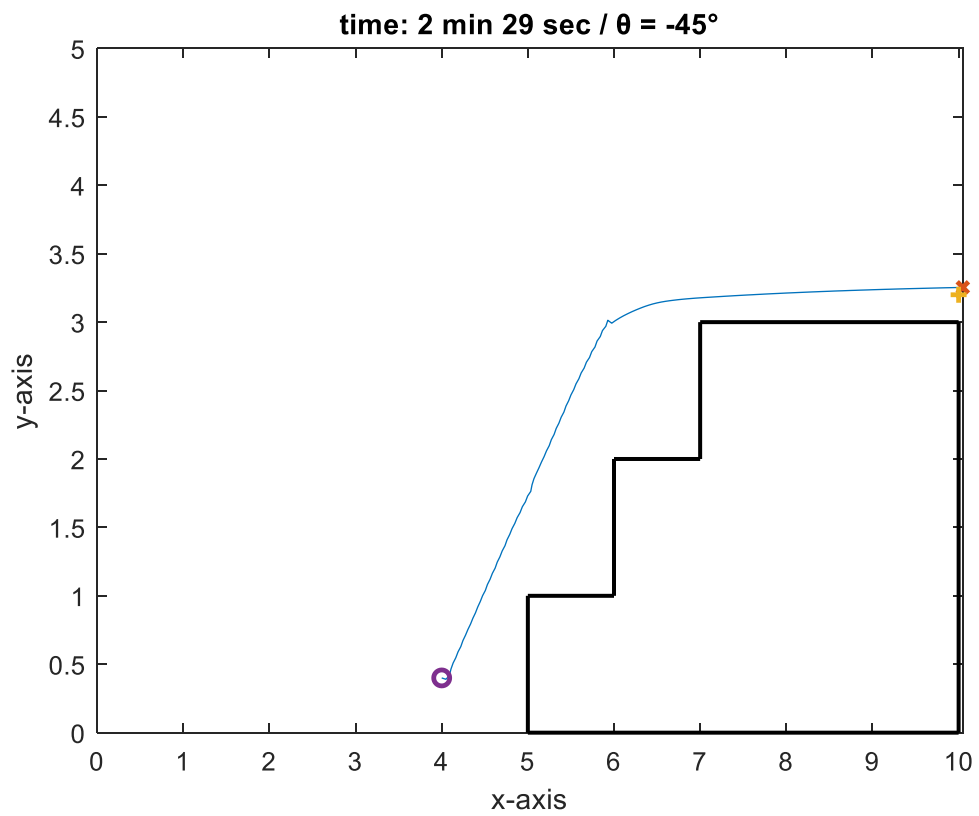
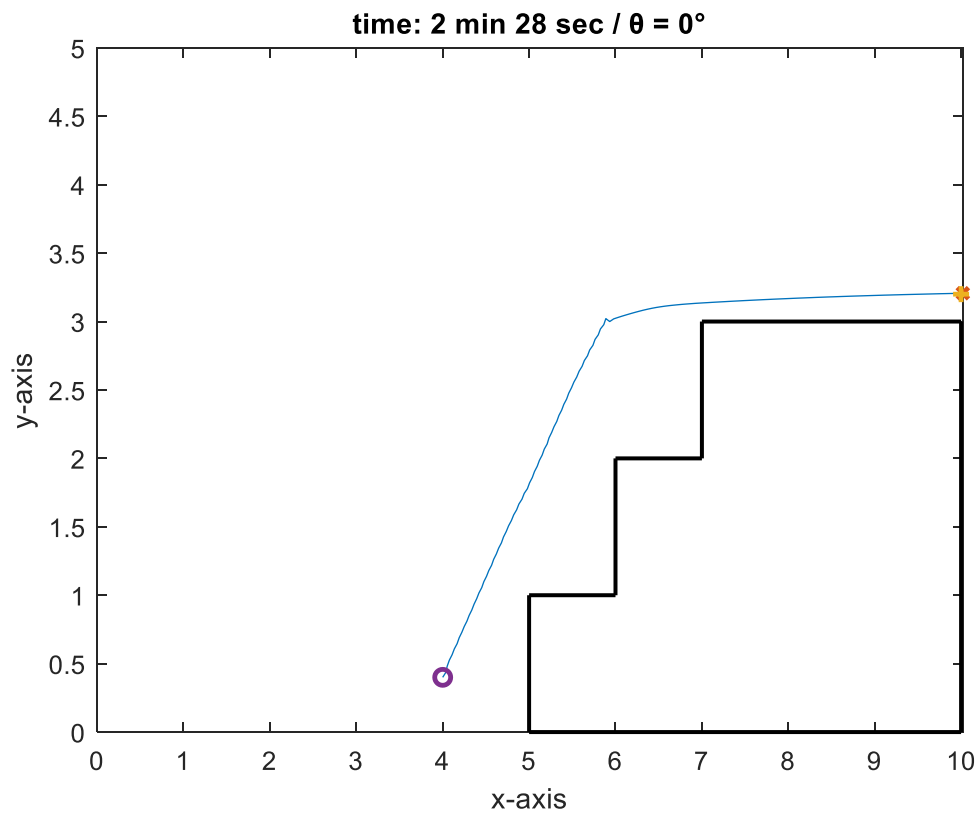


Παρατηρούμε λοιπόν πως πράγματι διορθώθηκε το πρόβλημα της μη ομαλής διαδρομής ενώ ταυτόχρονα πετυχαίνουμε και καλύτερη ακρίβεια στο επιθυμητό σημείο. Τέλος να αναφερθεί ότι το όχημα φτάνει επίσης πιο γρήγορα στον προορισμό του.

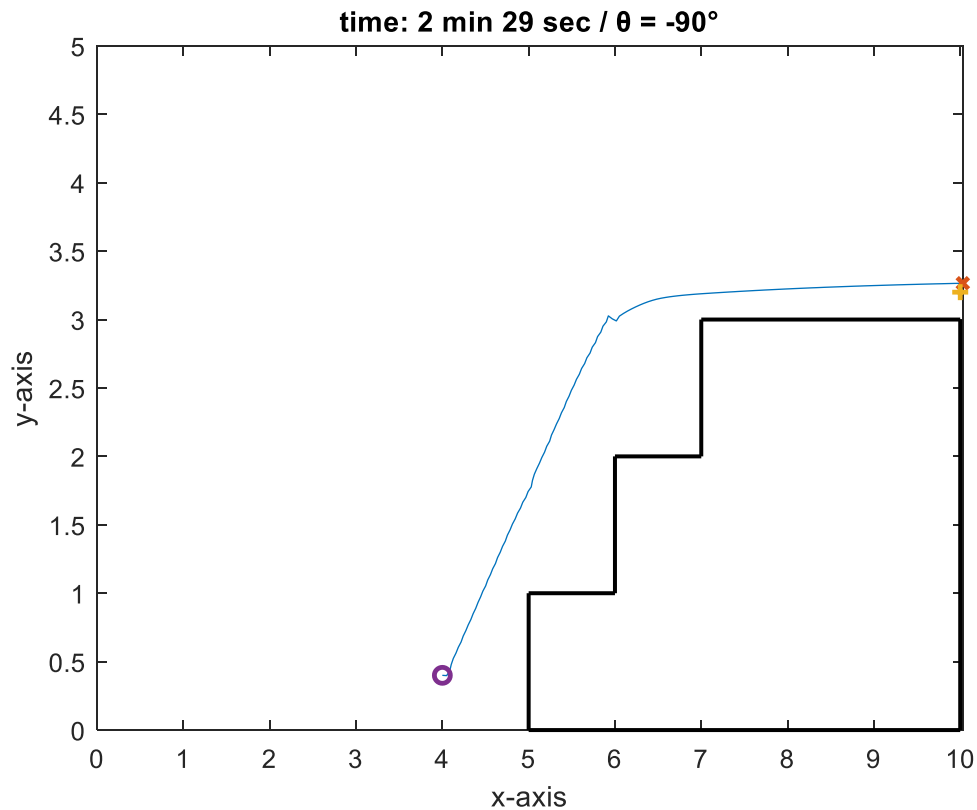
Για να συνοψίσουμε και να φανεί καλύτερα η παραπάνω διαδικασία στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η πορεία του οχήματος και στις 4 περιπτώσεις. Με μπλε χρώμα φαίνεται πορεία που έκανε το όχημα πριν τη ρύθμιση των βαρών. Με πράσινο χρώμα η πορεία που έκανε το όχημα μετά τη ρύθμιση των βαρών. Με κόκκινο χρώμα η πορεία που έκανε το όχημα μετά τη ρύθμιση των συναρτήσεων συμμετοχής των αποστάσεων  $d_V$  και  $d_H$ . Ενώ με γαλάζιο χρώμα η πορεία που έκανε το όχημα μετά τη ρύθμιση και της συνάρτησης συμμετοχής της γωνίας  $\theta$ .



Τέλος παρακάτω συνοψίζονται τα αποτελέσματα για τις 3 αρχικές γωνίες  $\theta = 0$ ,  $\theta = -45^\circ$  και  $\theta = -90^\circ$  :







Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα είναι σχεδόν πανομοιότυπα και στις 3 περιπτώσεις καθώς η αρχική διαφορά τις γωνίας διορθώνεται αμέσως και το όχημα παίρνει συγκεκριμένη πορεία με σκοπό την αποφυγή του εμποδίου στα δεξιά του. Τέλος να σημειωθεί ότι αυτός ο χρόνος «διόρθωσης» της γωνίας δεν είναι αμελητέος και είναι υπεύθυνος για τη μικρή διαφορά στο σημείο-στόχο που παρατηρείται στα παραπάνω σχήματα σε σχέση με την περίπτωση  $\theta = 0$ .