

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Τομέας Συστημάτων Παραγωγής



Διπλωματική Εργασία

**“Πλοήγηση Επίγειων Οχημάτων Κινουμένων
με Ολίσθηση Τροχών και Πολλαπλούς Αισθητήρες:
Μία Θεώρηση Ασαφούς Λογικής”**

Κόντε Μαρία

Υπεβλήθη στο τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για την αποκτηση του Διπλώματος Μηχανικού Παραγωγής και Διοίκησης από το Πολυτεχνείο Κρήτης.

Εξεταστική Επιτροπή:

Καθηγητής Βαλαβάνης Κίμων (Επιβλέπων)
Επίκουρος Καθηγητής Τσουρβελούδης Νικόλαος
Λέκτορας Κοσματοπούλος Ηλίας

*Αφιερώνεται στην οικογένειά μου,
Βαγγέλη, Έφη και Νίκο.*

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς οχήματος που στρίβει με ολίσθηση των τροχών (skid steering), ελέγχεται από ελεγκτή ασαφούς λογικής και κινείται σε άγνωστο χώρο όπου βρίσκονται εμπόδια με στόχο την προσέγγιση σημείου μέσα στο χώρο όπου κινείται και ταυτόχρονα την αποφυγή των εμποδίων. Το προς επίλυση πρόβλημα ανήκει στην κατηγορία σχεδιασμού τροχιάς κινούμενου έντροχου οχήματος που κινείται σε άγνωστο εσωτερικό περιβάλλον δύο διαστάσεων με ταυτόχρονη αποφυγή στατικών και δυναμικών εμποδίων έτσι ώστε το όχημα να ικανοποιεί τους περιορισμούς του προβλήματος.

Υλοποιήθηκε ασαφής ελεγκτής δύο επιπέδων ο οποίος βασίζεται στην τροφοδότηση με ενδείξεις που προέρχονται από αισθητήρες υπερήχων και γίνεται σε πραγματικό χρόνο. Στο πρώτο επίπεδο, την είσοδο αποτελούν τα δεδομένα από τους αισθητήρες και την έξοδο οι δυνατότητες σύγκρουσης σε κάθε κατεύθυνση ενώ, στο δεύτερο επίπεδο ως είσοδος υπάρχουν οι δυνατότητες σύγκρουσης και το σφάλμα κατεύθυνσης και ως έξοδοι, η περιστροφική και η μεταφορική ταχύτητα που κινούν το όχημα προς την επιθυμητή θέση.

Η συγκεκριμένη εργασία πρωτυπεί σε σχέση με προηγούμενες που έχουν γίνει στο ίδιο αντικείμενο ως προς την αναβάθμιση του ασαφούς ελεγκτή. Αυτή επιτυγχάνεται διαμέσου του τρόπου σχεδίασης, της αύξησης των συναρτήσεων συμμετοχής της μεταβλητής εισόδου angle error στο δεύτερο επίπεδο του ασαφούς ελεγκτή, της αύξησης του αριθμού κανόνων στην βάση κανόνων. Οι τροποποιήσεις αυτές είχαν ως αποτέλεσμα ένα αναβαθμισμένο ελεγκτή αναφορικά με την ευελιξία του οχήματος να κινηθεί σε πολύπλοκα περιβάλλοντα, αλλά και αναφορικά με την αντιδραστικότητα σε περιβάλλοντα αποτελούμενα από δυναμικά εμπόδια. Βέβαια από τις αναβαθμίσεις αυτές προέκυψε μία αυξημένη υπολογιστική πολυπλοκότητα στο δεύτερο επίπεδο και μία μείωση αυτής στο πρώτο επίπεδο του ασαφούς ελεγκτή.

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε εφαρμόστηκε πάνω στα έντροχα οχήματα ATRV-Mini της εταιρίας iRobot. Δοκιμάστηκαν διάφορα σενάρια στα οποία το όχημα κλήθηκε να κινηθεί μέσα σε συγκεκριμένο χώρο και να επιτύχει να προσεγγίσει έναν συγκεκριμένο στόχο.

Ευχαριστίες

Επισκόπηση

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση του θέματος. Αναφέρονται εργασίες που έχουν γίνει στο θέμα της πλοήγησης αυτόνομων οχημάτων με χρήση ή όχι ασαφούς λογικής. Παράλληλα προσδιορίζονται οι διαφορές της συγκεκριμένης εργασίας σε σχέση με προηγούμενες που έχουν γίνει επάνω στο ίδιο αντικείμενο.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για τα έντροχα οχήματα και πιο συγκεκριμένα για το ATRV-Mini της iRobot. Εξετάζονται τα κινηματικά μοντέλα που συναντώνται περισσότερο συχνά και τα πλεονεκτήματα εκείνων που βρίσκουν εφαρμογή στην κίνηση με ολίσθηση των τροχών. Επίσης, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του οχήματος ATRV-Mini όσον αφορά τις τεχνικές προδιαγραφές, τα συστήματα ελέγχου και αξόνων αλλά και το λογισμικό που χρησιμοποιεί.

Στο κεφάλαιο 3 αναφέρονται γενικά στοιχεία για την ασαφή λογική. Προορίζεται για τους αναγνώστες που δεν είναι εξοικιωμένοι με το συγκεκριμένο αντικείμενο. Παρατίθενται στοιχεία για τους ασαφείς αλγορίθμους, τους ασαφείς ελεγκτές, την ασαφοποίηση μεταβλητών εισόδου και την ασαφοποίηση μεταβλητών εξόδου, στοιχεία σημαντικά για την κατανόηση της βάσης πάνω στην οποία στηρίχθηκε ο σχεδιασμός του ασαφούς ελεγκτή.

Στο κεφάλαιο 4 γίνεται περιγραφή της δομής του ασαφούς ελεγκτή που αναπτύχθηκε. Παρουσιάζεται η ομαδοποίηση των αισθητήρων υπερήχου καθώς και η δομή του πρώτου και του δεύτερου επιπέδου του ασαφούς ελεγκτή (μεταβλητές εισόδου/εξόδου, υπολογιστική πολυπλοκότητα, βάση κανόνων).. Ενώ στο τέλος εξετάζεται η διαφοροποίηση στον παραπάνω σχεδιασμό εξαιτίας της πλοήγησης του οχήματος σε διάδρομο.

Στο κεφάλαιο 5 περιγράφεται η εφαρμογή του ασαφούς ελεγκτή στο όχημα σε πραγματικό χρόνο. Εξετάζεται η δομή του κώδικα και παρουσιάζονται συγκεκριμένες εφαρμογές (σενάρια) που συνοδεύονται με ανάλυση των αποτελεσμάτων τους. Τέλος, προτείνονται θέματα για περαιτέρω έρευνα.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Βιβλιογραφική Επισκόπηση	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Έντροχα Οχήματα & ATRV-Mini	14
2.1 <i>Κινηματικά Μοντέλα</i>	14
2.1.1 Κίνηση με Περιστροφή Γύρω από Ένα Άξονα (Single Axis Steering)	14
2.1.2 Κίνηση με Περιστροφή Γύρω από Δύο Άξονες (Double Axis Steering)	15
2.1.3 Κίνηση με Ολίσθηση των Τροχών (Skid Steering)	16
2.2 <i>Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα των Οχημάτων που Στρίβουν με Ολίσθηση</i>	18
2.3 <i>Το Οχημα ATRV-Mini</i>	18
2.3.1 Τεχνικές Προδιαγραφές	19
2.3.2 Λογισμικό Mobility [15]	19
2.3.3 Σύστημα Ελέγχου [2]	20
2.3.4 Σύστημα Αξόνων	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ασαφής Λογική	22
3.1 <i>Εισαγωγή</i>	22
3.2 <i>Βασικοί Όροι</i>	22
3.3 <i>Ασαφείς Αλγόριθμοι</i>	24
3.4 <i>Τελεστές Ασαφούς Λογικής</i>	25
3.5 <i>Πράξεις με Ασαφή Σύνολα</i>	26
3.6 <i>Αλγεβρικές Ιδιότητες</i>	26
3.7 <i>Γλωσσικές Μεταβλητές</i>	27
3.8 <i>Συνδετικά</i>	27
3.9 <i>Ασαφείς Ελεγκτές</i>	28
3.10 <i>Σχεδιασμός Ασαφούς Αλγορίθμου</i>	29
3.11 <i>Ασαφοποίηση Μεταβλητών Εισόδου</i>	30
3.11 <i>Απο-Ασαφοποίηση της Εξόδου</i>	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Σχεδιασμός του Ασαφούς Ελεγκτή	34
4.1 <i>Ομαδοποίηση των Αισθητήρων</i>	34
4.2 <i>Πρώτο Επίπεδο Ασαφούς Ελεγκτή</i>	36
4.3 <i>Δεύτερο Επίπεδο Ασαφούς Ελεγκτή</i>	40
4.4 <i>Διαφοροποίηση Σχεδιασμού Ελεγκτή για Πλόηση σε Διάδρομο</i>	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Προγραμματισμός του Ασαφούς Ελεγκτή και Εφαρμογή σε Πραγματικό Χρόνο στα Οχήματα ATRV-Mini	54
5.1 <i>Γενικά</i>	54
5.2 <i>Δομή του Κώδικα</i>	54

5.2.1 Περιγραφή του Κώδικα	56
5.3 Πειραματικά Αποτελέσματα	58
5.3.1 Σενάριο 1	58
5.3.2 Σενάριο 2	61
5.3.3 Σενάριο 3	64
5.3.4 Σύγκριση των Σεναρίων 2 και 3	66
5.3.5 Σενάριο 4	69
5.4 Συμπεράσματα	72
5.5 Προτάσεις για Μελέτη	73
Βιβλιογραφία	75

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Όχημα με ένα άξονα περιστροφής [14].....	14
Σχήμα 2.2: Όχημα με περιστροφή γύρω από δύο άξονες [14]	15
Σχήμα 2.3: Όχημα που στρίβει με ολίσθηση των τροχών [14].....	16
Σχήμα 2.4: Το όχημα ATRV-Mini της RWI	18
Σχήμα 2.5: Το περιβάλλον Mobility	20
Σχήμα 2.6: Η κεντρική οθόνη λειτουργιών του rFlex	21
Σχήμα 2.7: Ορθοκανονικό σύστημα αξόνων του ATRV-Mini	21
Σχήμα 3.1: Χαρακτηριστική συνάρτηση κλασικού συνόλου Boole	22
Σχήμα 3.2 Παραδείγματα τριγωνικών και τραπεζοειδών συναρτήσεων.....	23
Σχήμα 3.3: Αποσύνθεση ασαφούς ελεγκτή πολλαπλών εισόδων-πολλαπλών εξόδων σε ένα σύνολο ασαφών ελεγκτών πολλαπλών εισόδων-μιας εξόδου	31
Σχήμα 4.1: Διάταξη των αισθητήρων υπερήχων	34
Σχήμα 4.2: Ομαδοποίηση των αισθητήρων	35
Σχήμα 4.3: Αρίθμηση των περιοχών γύρω από το όχημα ATRV-Mini	37
Σχήμα 4.4: Δομικό διάγραμμα ασαφούς ελεγκτή ανίχνευσης εμποδίων.....	38
Σχήμα 4.5: Μεταβλητή εισόδου - Distance_from_obstacle	38
Σχήμα 4.6: Μεταβλητή εξόδου - Δυνατότητα σύγκρουσης	39
Δυνατότητα Σύγκρουσης	40
Σχήμα 4.7: Δομικό διάγραμμα δευτέρου επιπέδου ασαφούς ελεγκτή.....	41
Σχήμα 4.8: Μεταβλητή εισόδου - Σφάλμα κατεύθυνσης	42
Σχήμα 4.9: Μεταβλητή εξόδου - Μεταφορική ταχύτητα	42
Σχήμα 4.10: Μεταβλητή εξόδου - Περιστροφική ταχύτητα.....	43
Σχήμα 4.11: Περιοχές που υπάρχει πιθανότητα σύγκρουσης για την περίπτωση πλοήγησης του οχήματος σε διάδρομο	50
Σχήμα 4.12: Ομαδοποίηση των αισθητήρων για πλοήγηση σε διάδρομο	51
Σχήμα 5.1: Δομικό διάγραμμα προγράμματος πλοήγησης οχήματος ATRV-Mini	55
Σχήμα 5.2. Ρουτίνες και κεντρικό πρόγραμμα	56
Σχήμα 5.3 Η πορεία του οχήματος (Σενάριο 1).....	58
Σχήμα 5.4 Σενάριο 1	59
Σχήμα 5.5 Δυνατότητες σύγκρουσης για κάθε μία από τις οκτώ περιοχές (Σενάριο 1)	60
Σχήμα 5.6 Μεταφορική και περιστροφική ταχύτητα (Σενάριο 1).....	60
Σχήμα 5.7 Η πορεία του οχήματος (Σενάριο 2).....	61
Σχήμα 5.8 Σενάριο 2	62
Σχήμα 5.9 Δυνατότητες σύγκρουσης για κάθε μία από τις οκτώ περιοχές (Σενάριο 2)	63
Σχήμα 5.10 Μεταφορική και περιστροφική ταχύτητα (Σενάριο 2).....	63
Σχήμα 5.11 Σενάριο 3	64
Σχήμα 5.12 Δυνατότητες σύγκρουσης για κάθε μία από τις οκτώ περιοχές (Σενάριο 3)	65
Σχήμα 5.14 Σενάρια 2 και 3.....	67
Σχήμα 5.15 Δυνατότητες σύγκρουσης για κάθε μία από τις οκτώ περιοχές (Σενάρια 2 και 3).....	68
Σχήμα 5.16 Μεταφορική και περιστροφική ταχύτητα (Σενάρια 2 και 3).....	69
Σχήμα 5.17 Η πορεία του οχήματος (Σενάριο 4).....	70
Σχήμα 5.18 Σενάριο 4	70

Σχήμα 5.19 Δυνατότητες σύγκρουσης για κάθε μία από τις οκτώ περιοχές (Σενάριο 4)	71
Σχήμα 5.20 Μεταφορική και περιστροφική ταχύτητα (Σενάριο 4)	72

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του οχήματος ATRV-Mini	19
Πίνακας 4.1: Εξαγωγή της δυνατότητας σύγκρουσης στην περιοχή 1	40
Πίνακας 4.2: Κανόνες εξαγωγής εντολών κίνησης σε περιβάλλον χωρίς εμπόδια	46
Πίνακας 4.3: Επιλεγόμενοι συνδιασμοί δυνατοτήτων σύγκρουσης για την περίπτωση πιθανών εμποδίων στις περιοχές 1,2,3,4	46
Πίνακας 4.4: Κανόνες εξαγωγής εντολών κίνησης για την περίπτωση πιθανών εμποδίων στις περιοχές 1,2,3,4	49
Πίνακας 4.5: Κανόνες εξαγωγής εντολών κίνησης για πλοήγηση σε διάδρομο	53

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Η περιοχή των αυτόνομων έντροχων οχημάτων (**Mobile Robots, MR**) αποτελεί ένα ερευνητικό πεδίο στο οποίο εμφανίζεται μεγάλη δραστηριότητα. Τα κύρια σημεία ενδιαφέροντος αναφορικά με την λειτουργία των MR σε εσωτερικούς χώρους είναι η αναγνώριση θέσης, η συγκρότηση τοπικού χάρτη του περιβάλλοντος ή του χώρου εργασίας από μετρήσεις, η χάραξη τροχιάς, η ανίχνευση και αποφυγή εμποδίων, η αβεβαιότητα μετρήσεων από αισθητήρες και οι στρατηγικές πολλαπλών παραγόντων (multi-agent strategies).

Στην συγκεκριμένη εργασία το πρόβλημα που μελετήθηκε, αφορά στην πλοήγηση και την αποφυγή εμποδίων έντροχου οχήματος που στρίβει με ολίσθηση των τροχών (skid steering). Για την αντιμετώπιση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές βασισμένες στην θεωρία των ασαφών συνόλων [11]. Το συγκεκριμένο πρόβλημα έχει αντιμετωπιστεί από άλλους ερευνητές με πολλές μεθοδολογίες. Συγκεκριμένα:

Οι J. Gomez-Ortega *et al* [5], έχουν προτείνει μια μεθοδολογία επίλυσης του προβλήματος της πλοήγησης βασιζόμενοι σε ένα σύστημα πρόβλεψης της πλοήγησης του οχήματος αποτελούμενο από ένα συνδυασμό μεθοδολογιών που κάνουν χρήση του φίλτρου Kalman καθώς και τεχνικών γενετικών αλγορίθμων.

Οι Kalyanmoy *et al* [7], πρότειναν μια μεθοδολογία βασισμένη στη χρήση ενός συνδυασμού γενετικών αλγορίθμων και της θεωρίας των ασαφών συνόλων (Genetic-Fuzzy). Η χρήση των γενετικών αλγορίθμων γίνεται για την ρύθμιση των παραμέτρων του ασαφούς ελεγκτή.

Μια άλλη προσέγγιση η οποία παρουσιάστηκε από τον A. Nearchou [10] κάνει χρήση της θεωρίας των εξελικτικών αλγορίθμων (Evolutionary Algorithms) για την πλοήγηση αυτόνομων οχημάτων. Η κεντρική ιδέα είναι ότι υπάρχει ένας πληθυσμός από υποψήφιος πράξεις τις οποίες μπορεί να κάνει το όχημα και επιλέγεται η καλύτερη.

Ένας άλλος τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος είναι με χρήση τεχνικών πεδίων δυναμικού σε συνδυασμό με ασαφή λογική. Μια τέτοια προσέγγιση έχουν κάνει οι Tsourveloudis *et al* [16]. Σε αυτή την εργασία προτείνεται σύστημα υπολογισμού που βασίζεται στη θεωρία πεδίων δυναμικού και ο οποίος συνδιάζεται με ελεγκτές ασαφούς λογικής προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Οι Alwan *et al* [1] στην εργασία τους πρότειναν ένα σύστημα αντιδραστικής συμπεριφοράς (reactive behaviour) για την πλοήγηση των αυτόνομων οχημάτων. Η κύρια λειτουργία του συστήματος είναι να αποφασίσει μεταξύ τριών διαφορετικών συμπεριφορών με βάση τις οποίες θα κινηθεί. Οι τρεις διαφορετικές συμπεριφορές είναι : συμπεριφορά η οποία οδηγείται από τον στόχο (goal directed), αντιδραστική (reactive) και αντανakλαστική (reflexive). Η αντιδραστική συμπεριφορά αφορά

αποφυγή εμποδίων σε δυναμικό περιβάλλον ή περιβάλλον με απρόβλεπτα εμπόδια στο μονοπάτι του οχήματος. Η αντανakλαστική συμπεριφορά είναι ιδανική για αποφυγή εμποδίων σε περίπτωση που αυτά βρεθούν στον δρόμο του οχήματος. Μόλις επιλεγθεί ο τύπος της συμπεριφοράς επιλέγονται οι κανόνες οι οποίοι αντιστοιχούν σε αυτή την συμπεριφορά και οι άλλοι απενεργοποιούνται.

Οι J. Zhang και Bohner [17] πρότειναν ένα σύστημα πλοήγησης βασισμένο σε ασαφή λογική που βρίσκει υποστόχους σε ένα μερικώς γνωστό περιβάλλον. Στην διαδικασία εύρεσης του μονοπατιού αντί για την εύρεση ενός λεπτομερειακού μονοπατιού, καθορίζεται ένα σύνολο κρίσιμων θέσεων οι οποίες λέγονται υποστόχοι και οι οποίες δημιουργούνται σε στατικό περιβάλλον. Οι στόχοι αυτοί καθορίζουν την συνολική συμπεριφορά του οχήματος. Σε κάθε βήμα η ανάδραση δεν τροφοδοτεί το σύστημα μόνο με πληροφορίες για τον έλεγχο της θέσης αλλά και για τις δυναμικές αλλαγές στο περιβάλλον. Υπάρχει ένας “εκτιμητής καταστάσεων” ο οποίος αποτελείται από ασαφείς κανόνες και χρησιμοποιεί τις εισόδους από τους αισθητήρες για να κάνει εκτίμηση της τρέχουσας κατάστασης. Στην συνέχεια ένας ασαφής ελεγκτής καθορίζει την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση καθώς και τον έλεγχο της κατεύθυνσης.

Ο Li [9] προτείνει έλεγχο του οχήματος βασισμένος σε ένα μοντέλο αντίληψης δράσης. Προτείνεται ένα σύνολο από κανόνες, που επιτρέπει στο όχημα να συμπεριφερθεί διαφορετικά σε διάφορες καταστάσεις όπως στην αποφυγή εμποδίων, στο να ακολουθεί γωνίες και να κατευθύνεται στον στόχο. Όλες οι συμπεριφορές δημιουργούνται και τοποθετούνται μαζί έτσι ώστε να λειτουργούν συμπληρωματικά. Σε αυτή την προτεινόμενη μεθοδολογία αλληλεπιδραστικές συμπεριφορές σχηματίζονται από ασαφείς κανόνες και οι έξοδοι του συστήματος ρυθμίζονται βάζοντας βάρη σε όλες τις εξαγόμενες συμπεριφορές.

Μια άλλη συμπεριφορά η οποία έχει προταθεί από τους Ramirez-Serrano και Boumedine [3] κατατάσσει τα δεδομένα των αισθητήρων σε δυο μεταβλητές οι οποίες περιγράφουν το εμπόδιο το οποίο ανιχνεύεται. Αυτές οι μεταβλητές είναι η γωνία του εμποδίου και η απόσταση του εμποδίου. Βασισμένο σε αυτές τις δυο εισόδους και στην γωνία στροφής, την ταχύτητα του οχήματος και την απόσταση από τον στόχο (robot distance to goal), το όχημα συμπεριφέρεται ανάλογα και κατευθύνεται προς τον στόχο του. Σε αυτή την προσέγγιση το σύστημα συγκεντρώνεται μόνο στο μπροστά σημείο του οχήματος, καθώς αδιαφορεί για το τι γίνεται πίσω του ή αριστερά και δεξιά. Μόνο εμπόδια τα οποία είναι μέσα στο μονοπάτι το οποίο ακολουθεί το όχημα επηρεάζουν την συμπεριφορά του.

Ο Alessandro Saffiotti [13] παρουσιάζει ένα αναλυτικό κατάλογο των εργασιών που έχουν γίνει στον τομέα της πλοήγησης των αυτόνομων οχημάτων με την βοήθεια της ασαφούς λογικής. Εξετάζει τα προβλήματα τα οποία παρουσιάζονται κατά την πλοήγηση καθώς και τους τρόπους επίλυσης τους. Γίνεται μια κατάταξη των συμπεριφορών σε προκαθορισμένες συμπεριφορές βασισμένες σε τροφοδότηση στοιχείων από αισθητήρες, σε πολύπλοκες συμπεριφορές καθώς και μια παρουσίαση συνδιασμών των διαφόρων συμπεριφορών. Τέλος γίνεται αναφορά στον τρόπο μοντελοποίησης των διαφόρων προβλημάτων.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσέγγιση της πλοήγησης ενός οχήματος με την βοήθεια της ασαφούς λογικής. Η μεθοδολογία που έχει ακολουθηθεί στηρίζεται στον τρόπο ανάπτυξης ενός ασαφούς ελεγκτή για ένα αυτόνομο όχημα που έχει προταθεί από τους Tsourveloudis *et al* [16]. Η πρωτοτυπία της συγκεκριμένης εργασίας έγκειται στα εξής:

- ✓ *Τύπο του οχήματος.* Δεν έχει γίνει εκτεταμένη έρευνα για τον συγκεκριμένο τύπο οχήματος.
- ✓ *Τρόπος σχεδίασης του ελεγκτή.* Ο χώρος γύρω από το όχημα διαιρείται σε 8 ίσους κυκλικούς τομείς, και όχι τέσσερις.
- ✓ *Αύξηση των συναρτήσεων συμμετοχής της μεταβλητής εισόδου *angle error* στο δεύτερο επίπεδο του ασαφούς ελεγκτή,* από επτά σε έντεκα, γεγονός που επιτρέπει τόσο τον σχεδιασμό της τροχιάς όσο και την προσέγγιση του στόχου με μεγαλύτερη ακρίβεια.
- ✓ *Βάση κανόνων στο δεύτερο επίπεδο.* Περιέχει αυξημένο αριθμό κανόνων που φτάνουν τους 2354. Αυτό έχει ως συνέπεια και αυξημένη υπολογιστική πολυπλοκότητα στο δεύτερο επίπεδο.
- ✓ *Βάση κανόνων στο πρώτο επίπεδο.* Περιέχει μειωμένο αριθμό κανόνων οι οποίοι φτάνουν τους 15 και οι οποίοι βρίσκουν εφαρμογή για την εύρεση της πιθανότητας σύγκρουσης και για τις οκτώ κατευθύνσεις. Αυτό έχει ως συνέπεια και μειωμένη υπολογιστική πολυπλοκότητα στο πρώτο επίπεδο.
- ✓ Το όχημα είναι *περισσότερο ευέλικτο*, καθώς επιτυγχάνεται πλοήγηση σε πιο πολύπλοκα περιβάλλοντα.
- ✓ Το όχημα είναι *αντιδρά καλύτερα* σε περιβάλλοντα αποτελούμενα από δυναμικά εμπόδια. Επιτυγχάνει την εύρεση του στόχου αποφεύγοντας τα εμπόδια που εμφανίζονται ξαφνικά και σε μικρή απόσταση από αυτό, καθώς και τα κινούμενα εμπόδια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Έντροχα Οχήματα & ATRV-Mini

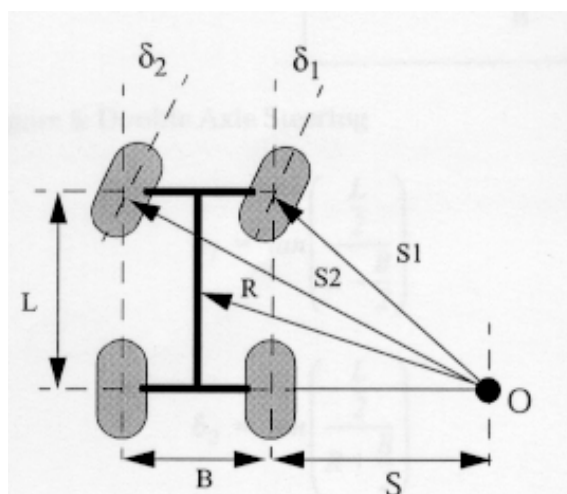
2.1 Κινηματικά Μοντέλα

Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται τα κινηματικά μοντέλα για τους εξής τρεις τύπους έντροχων οχημάτων:

- ✓ Οχήματα τα οποία στρίβουν γύρω από ένα άξονα (Single Axis Steering)
- ✓ Οχήματα τα οποία στρίβουν γύρω από δύο άξονες (Double Axis Steering)
- ✓ Οχήματα τα οποία στρίβουν με ολίσθηση των τροχών (Skid Steering)

2.1.1 Κίνηση με Περιστροφή Γύρω από Ένα Άξονα (Single Axis Steering)

Τα οχήματα αυτού του τύπου κινούνται με την βοήθεια των κατευθυντήριων τροχών οι οποίοι περιστρέφονται γύρω από ένα άξονα πάνω στον οποίο είναι προσαρμοσμένοι. Όλοι οι τροχοί είναι σε καθαρά περιστροφική κατάσταση, γεγονός που επιτυγχάνει την ελαχιστοποίηση πλευρικών δυνάμεων που εξασκούνται στους τροχούς κατά την στροφή. Επίσης, οι τροχοί κατά την κίνηση τους ακολουθούν καμπύλα μονοπάτια με διαφορετικές ακτίνες οι οποίες ξεκινούν από ένα κοινό κέντρο. Η σχέση μεταξύ της γωνίας στροφής του μέσα μπροστά τροχού και του έξω μπροστά τροχού, μπορούν να εξαχθούν από την γεωμετρία (σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Όχημα με ένα άξονα περιστροφής [14].

Τα σύμβολα ορίζονται ως εξής:

δ_1 = Κατεύθυνση του εσωτερικού κατευθυντήριου τροχού (rad)

δ_2 = Κατεύθυνση του εξωτερικού κατευθυντήριου τροχού (rad)

R = Ακτίνα στροφής του οχήματος

L = Μήκος του οχήματος

B = Πλάτος του οχήματος

O = Κέντρο περιστροφής

S = Απόσταση του οχήματος από το κέντρο περιστροφής

Η απόσταση του οχήματος από το κέντρο της περιστροφής δίνεται ως:

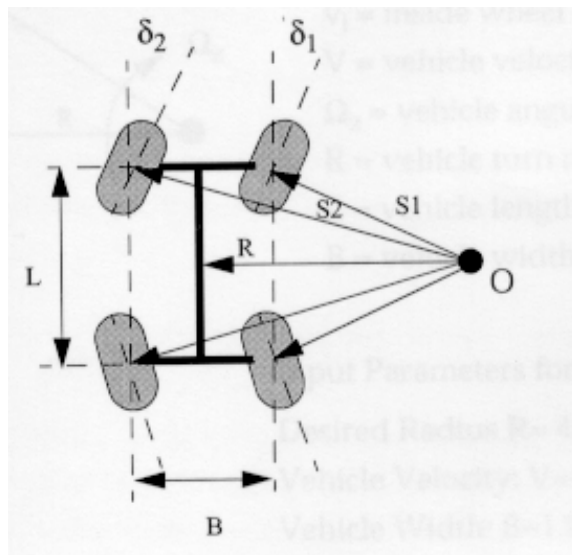
$$S = \sqrt{R^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} - \frac{B}{2} \quad (2.1)$$

Οι κατευθύνσεις των τροχών είναι:

$$\delta_1 = \tan\left(\frac{L}{S}\right) \quad (2.2) \quad \text{και} \quad \delta_2 = \tan\left(\frac{L}{B+S}\right) \quad (2.3)$$

2.1.2 Κίνηση με Περιστροφή Γύρω από Δύο Άξονες (Double Axis Steering)

Τα οχήματα των οποίων και οι τέσσερις τροχοί διαθέτουν δυνατότητα στροφής παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευελιξία στις περιστροφικές κινήσεις συγκριτικά με τα οχήματα των οποίων μόνο οι δύο τροχοί περιστρέφονται. Τα πρώτα επιτυγχάνουν μισή ακτίνα στροφής σε σχέση με τα δεύτερα. Αυτό συμβαίνει διότι το κέντρο στροφής μετακινείται πλησιέστερα στο κέντρο του οχήματος.



Σχήμα 2.2: Όχημα με περιστροφή γύρω από δύο άξονες [14]

Τα σύμβολα ορίζονται ως εξής:

δ_1 = Κατεύθυνση του εσωτερικού κατευθυντήριου τροχού (rad)

δ_2 = Κατεύθυνση του εξωτερικού κατευθυντήριου τροχού (rad)

L = Μήκος του οχήματος

B = Πλάτος του οχήματος

O = Κέντρο περιστροφής

R = Ακτίνα στροφής του οχήματος

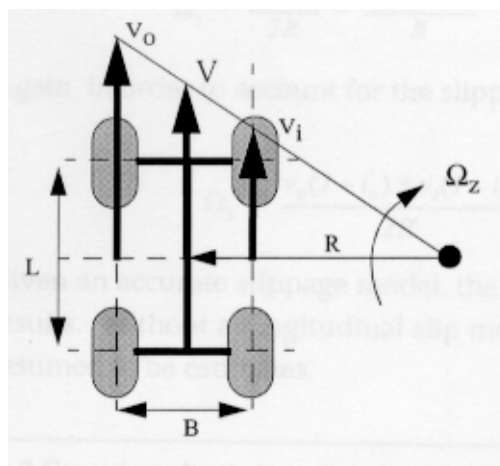
Οι κατευθύνσεις των τροχών είναι:

$$\delta_1 = \tan\left(\frac{\frac{L}{2}}{R - \frac{B}{2}}\right) \quad (2.4)$$

$$\delta_2 = \tan\left(\frac{\frac{L}{2}}{R + \frac{B}{2}}\right) \quad (2.5)$$

2.1.3 Κίνηση με Ολίσθηση των Τροχών (Skid Steering)

Η κινηματική ανάλυση ενός οχήματος που στρίβει με ολίσθηση των τροχών επιτρέπει μια προκαταρκτική εκτίμηση της ταχύτητας των τροχών δοθέντων των διαστάσεων του οχήματος, της επιθυμητής ακτίνας στροφής και του επιθυμητού ρυθμού στροφής. Παρόλα αυτά, όπως και στα προηγούμενα κινηματικά μοντέλα δεν μελετούνται οι δυνάμεις οι οποίες αναπτύσσονται. Έτσι η ολίσθηση (η οποία είναι πολύ σημαντικό στοιχείο στα skid steering οχήματα) δεν λαμβάνεται υπόψη γεγονός που έχει ως συνέπεια τα κινηματικά μοντέλα να είναι λιγότερο ακριβή.



Σχήμα 2.3: Όχημα που στρίβει με ολίσθηση των τροχών [14]

Από το σχήμα 2.3 προκύπτει:

v_o = Ταχύτητα του εξωτερικού τροχού (m/sec)

v_i = Ταχύτητα του εσωτερικού τροχού (m/sec)

V = Ταχύτητα του οχήματος

Ω_z = Γωνιακή ταχύτητα του οχήματος

Ω'_z = Γωνιακή ταχύτητα του οχήματος λαμβάνοντας υπόψη την ολίσθηση

R = Ακτίνα στροφής του οχήματος (m)

R' = Ακτίνα στροφής του οχήματος (m) λαμβάνοντας υπόψη την ολίσθηση

L = Μήκος του οχήματος (m)

B = Πλάτος του οχήματος (m)

Η ακτίνα στροφής μπορεί να υπολογιστεί από τα όμοια τρίγωνα.

Ο λόγος των ταχυτήτων των τροχών είναι:

$$\frac{v_0}{v_i} = \frac{R + \frac{B}{2}}{R - \frac{B}{2}} \quad (2.6)$$

Η ακτίνα στροφής δίνεται ως:

$$R = \frac{\frac{B}{2} \left(\frac{v_0}{v_i} + 1 \right)}{\left(\frac{v_0}{v_i} - 1 \right)} = \frac{B}{2} \left(\frac{v_0 + v_i}{v_0 - v_i} \right) \quad (2.7)$$

Η ακτίνα αυτή θα επιτευχθεί μόνο εάν δεν υπάρχει ολίσθηση των τροχών στο έδαφος. Εάν λάβουμε υπόψη την ολίσθηση των εξωτερικών τροχών i_0 και των εσωτερικών τροχών i_i τότε :

$$R' = \frac{B}{2} \left(\frac{v_0(1-i_0) + v_i(1-i_i)}{v_0(1-i_0) - v_i(1-i_i)} \right) \quad (2.8)$$

Ο ρυθμός περιστροφής μπορεί να βρεθεί από την παρακάτω σχέση:

$$\Omega_z = \frac{v_0 + v_i}{2R} = \frac{v_i \left(\frac{v_0}{v_i} - 1 \right)}{B} \quad (2.9)$$

Λαμβάνοντας υπόψη και την ολίσθηση έχουμε:

$$\Omega_z' = \frac{v_0(1-i_0) + v_i(1-i_i)}{2R'} = \frac{v_i \left(\frac{v_0(1-i_0)}{v_i} - (1-i_i) \right)}{B} \quad (2.10)$$

Έχοντας ένα ακριβές μοντέλο της ολίσθησης, οι κινηματικές εξισώσεις μπορούν να μας δώσουν ακριβή αποτελέσματα. Χωρίς ένα ακριβές μοντέλο της ολίσθησης, οι ταχύτητες των τροχών και ακτίνα στροφής μπορούν να εκτιμηθούν με χαμηλή ακρίβεια.

2.2 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα των Οχημάτων που Στρίβουν με Ολίσθηση

Τα κύρια πλεονεκτήματα των οχημάτων που στρίβουν με ολίσθηση είναι [14]:

- ✓ Είναι συμπαγή
- ✓ Απαιτούν λιγότερα εξαρτήματα για να κατασκευαστούν.
- ✓ Επιδεικνύουν εξαιρετική ευελιξία στην κίνηση με χρήση εξαρτημάτων τα οποία απαιτούνται για να κινηθεί το όχημα σε ευθεία γραμμή.
- ✓ Η μετάδοση της κίνησης στους τροχούς γίνεται μόνο σε ένα άξονα γύρω από τον οποίο περιστρέφονται οι τροχοί. Στα οχήματα που έχουν κατευθυντήριο τροχό, η κίνηση γίνεται σε δύο άξονες. Αυτό κάνει δυσκολότερη την μετάδοση της κίνησης στους τροχούς.

Το σημείο στο οποίο μειονεκτούν τα οχήματα αυτού του τύπου έναντι των οχημάτων που διαθέτουν κατευθυντήριο τροχό είναι οι δυνάμεις οι οποίες αναπτύσσονται σε ένα τέτοιο σύστημα είναι σαφώς μικρότερες, παρόλο ότι η μετάδοση της κίνησης με κατευθυντήριο τροχό είναι δυσκολότερη. Το γεγονός αυτό οφείλεται στον τρόπο μετάδοσης της κίνησης.

2.3 Το Όχημα ATRV-Mini

Το όχημα στο οποίο έγινε εφαρμογή του ασαφούς ελεγκτή που σχεδιασθηκε είναι το ATRV-Mini της εταιρίας Real World Interface (RWI) η οποία μετονομάστηκε σε iRobot. Ανήκει στην κατηγορία των οχημάτων που στρίβουν με ολίσθηση των τροχών. Ενώ έχει γίνει εκτεταμένη έρευνα στον τομέα των οχημάτων τα οποία έχουν κατευθυντήριο τροχό ή τροχούς, η ερευνητική εργασία δεν έχει προχωρήσει αντίστοιχα για τα οχήματα της κατηγορίας του ATRV-Mini. Αποτελεί ένα όχημα με πολλές δυνατότητες κυρίως σε ανοικτό χώρο, παρ'όλο που οι δυνατότητες αυτές δεν έχουν ακόμη δοκιμαστεί πειραματικά καθώς το όχημα δεν έχει εξοπλιστεί με ασύρματη επικοινωνία.



Σχήμα 2.4: Το όχημα ATRV-Mini της RWI

2.3.1 Τεχνικές Προδιαγραφές

Το όχημα ATRV-Mini του εργαστηρίου Ευφυών Συστημάτων και Ρομποτικής διαθέτει εκτός από τα προκαθορισμένα χαρακτηριστικά επιπλέον εξοπλισμό που εξυπηρετεί τις ερευνητικές δραστηριότητες. Συγκεκριμένα, κάμερα, επιπλέον αισθητήρες υπερήχων και GPS. Ο πίνακας που ακολουθεί παραθέτει τις τεχνικές προδιαγραφές του οχήματος.

Μήκος	62.2 cm
Πλάτος	53.3 cm
Υψος	45 cm
Βάρος	38.6 kg
Σώμα	Αλουμίνιο
Ταχύτητα	0-1.5 m/sec
Ωφέλιμο φορτίο	9 kg
Χρόνος λειτουργίας	3-6 hr (εξαρτάται από το έδαφος)
Κίνηση	4-wheel, PWM
Τρόπος Κατεύθυνσης	Skid steering
Γωνία στροφής	0 (στρίβει στο κέντρο)
Μπαταρίες	Δύο 12 V, 12 amp/hr
Κινητήρες	Δύο 0.1 HP, 24V DC servo motors
Υπολογιστής	Pentium III EBX
I/O Ports	Ethernet, RS-232, Joystick
Αισθητήρες	24 Sonar
Κάμερα	Sony EVI D30
GPS	

Πίνακας 2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του οχήματος ATRV-Mini

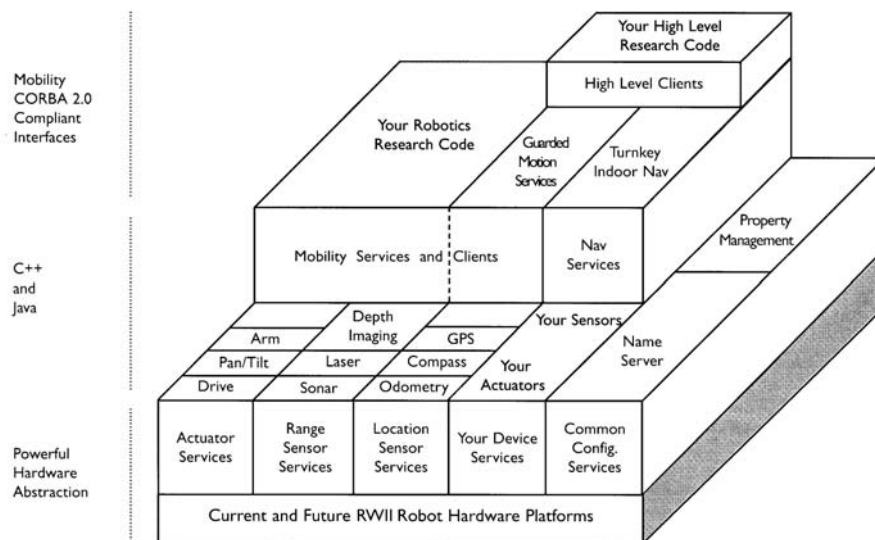
2.3.2 Λογισμικό Mobility [15]

Το MOBILITY είναι ένα αντικειμενοστραφές εργαλείο που παρέχεται από την iRobot για την δημιουργία προγραμμάτων ελέγχου για συστήματα ενός ή περισσότερων έντροχων οχημάτων. Αποτελείται από:

- ✓ Ένα σύνολο λογισμικών εργαλείων,
- ✓ Το αντικείμενο του μοντέλου του έντροχου οχήματος, το οποίο αποτελείται από μία σειρά άλλων αντικειμένων. Καθένα από αυτά αντιπροσωπεύει μέρη του οχήματος, όπως οι αισθητήρες και ο μηχανισμός κίνησης. Τα αντικείμενα αυτά μπορούν να τροποποιηθούν ή να χρησιμοποιηθούν ως συναρτήσεις σε νέους αλγορίθμους.

- ✓ Βασικές μονάδες (modules) ελέγχου του έντροχου ρομπότ (κίνηση, sonar, κάμερα, GPS).
- ✓ Αντικειμενοστραφές περιβάλλον εργασίας για την απλοποίηση της ανάπτυξης κώδικα.

Το Mobility προσδιορίζει το αντικείμενο του έντροχου ρομπότ χρησιμοποιώντας το CORBA standard, το οποίο του δίνει τη δυνατότητα να υποστηρίζει πολλές γλώσσες προγραμματισμού (όπως η Java και η C++) σε διάφορες πλατφόρμες. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να τροποποιήσει βασικά μέρη του συστήματος του ρομπότ και να προσθέσει νέα, ανάλογα με την εφαρμογή.



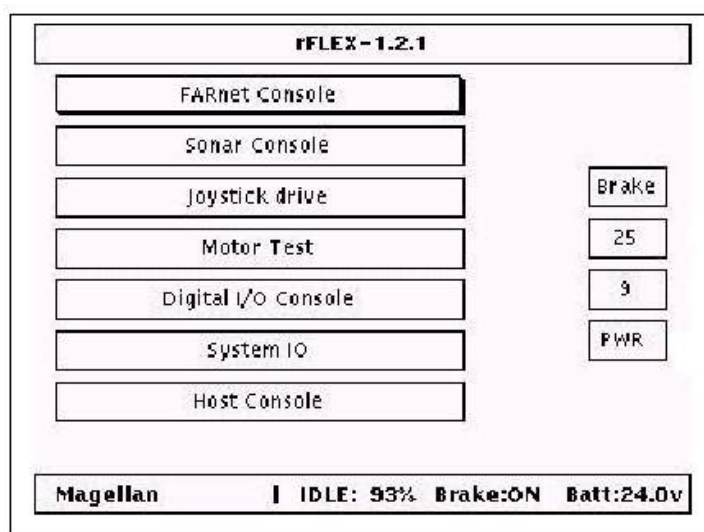
Σχήμα 2.5: Το περιβάλλον Mobility

2.3.3 Σύστημα Ελέγχου [2]

Το rFlex είναι το σύστημα ελέγχου του έντροχου ρομπότ και των περιφερειακών του. Λειτουργεί χωρίς την χρήση υπολογιστικής μονάδας και βρίσκεται πάνω στο όχημα. Αποτελείται από ένα αλληλεπιδραστικό περιβάλλον εργασίας με το οποίο πραγματοποιείται διαχείριση, διαμόρφωση και διάγνωση των περιφερειακών. Οι κύριες λειτουργίες του rFlex είναι:

- Εκκίνηση – Τερματισμός λειτουργίας του οχήματος
- Ορισμός του τύπου του δικτύου στο οποίο μετέχει το όχημα
- Ενεργοποίηση και έλεγχος των αισθητήρων υπερήχων
- Ενεργοποίηση της οδήγησης με χειριστήριο
- Έλεγχος των κινητήρων
- Ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση των φρένων
- Ένδειξη στάθμης μπαταρίας και θυρών επικοινωνίας
- Μεταφορά στην οθόνη του λειτουργικού συστήματος

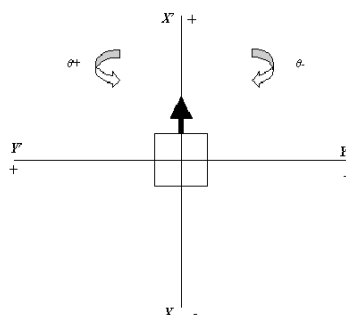
Οι πληροφορίες παρέχονται στον χρήστη μέσω μιας οθόνης υγρών κρυστάλλων που βρίσκεται στο πίσω μέρος της κορυφής του έντροχου ρομπότ. Η εναλλαγή μεταξύ των λειτουργιών γίνεται με τη βοήθεια ενός ποτενσιόμετρου.



Σχήμα 2.6: Η κεντρική οθόνη λειτουργιών του rFlex

2.3.4 Σύστημα Αξόνων

Το ATRV-Mini κινείται με βάση ένα ορθοκανονικό σύστημα αξόνων που έχει οριστεί από την κατασκευάστρια εταιρία, και είναι αυτό βάση του οποίου έγινε ο σχεδιασμός και υλοποιήθηκαν τα προγράμματα. Οι διαφορές του συστήματος αυτού σε σχέση με το καρτεσιανό σύστημα αξόνων είναι ο ορισμός των αξόνων X-Y, καθώς ο άξονας Y του καρτεσιανού συστήματος αντιστοιχεί στον άξονα X του συστήματος του οχήματος και αντίστροφα. Επίσης, τα θετικά και τα αρνητικά πρόσημα ορίζονται διαφορετικά, όπως και οι γωνίες στροφής καθώς ο ορισμός τους σαν αρνητικές ή θετικές.



Σχήμα 2.7: Ορθοκανονικό σύστημα αξόνων του ATRV-Mini

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Ασαφής Λογική

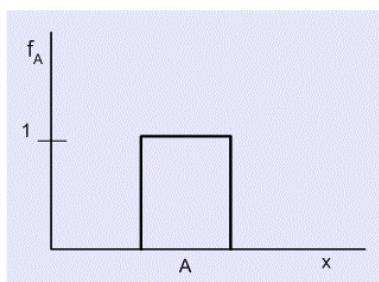
3.1 Εισαγωγή

Ο θεωρητικός φορέας για την υλοποίηση μιας μεγάλης κατηγορίας ευφών συστημάτων είναι η θεωρία ασαφών συνόλων, που εισήχθη από τον Lotfi A. Zadeh του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνιας στο Berkeley των ΗΠΑ στα μέσα της δεκαετίας του '60. Η θεωρία της ασαφούς λογικής βασίζεται στην προϋπόθεση ότι ο περιβάλλον χώρος απαρτίζεται από στοιχεία που ανήκουν σε διάφορα σύνολα με διαφορετικούς βαθμούς συμμετοχής. Η ασάφεια δημιουργεί μία πλειότιμη έννοια στο χώρο της αβεβαιότητας.

Η θεωρία της ασαφούς λογικής είναι κατάλληλη τόσο για την αναπαράσταση της γνώσης και της εμπειρίας, όσο και για την δημιουργία μηχανισμών συμπερασμού ή συμπερασμάτων που χρησιμοποιούν τη διαθέσιμη κωδικοποιημένη γνώση και τις τρέχουσες τιμές των μεταβλητών της διεργασίας υπό έλεγχο για να συμπεράνουν την πράξη ελεγχου που απαιτείται. [8]

3.2 Βασικοί Όροι

Στην κλασική θεωρία συνόλων, ένα σύνολο αποτελείται από ένα πεπερασμένο ή άπειρο αριθμό στοιχείων. Τα στοιχεία όλων των συνόλων υπό μελέτη ανήκουν σε ένα σταθερό *υπερσύνολο αναφοράς* (universe of discourse). Τα στοιχεία ενός υπερσυνόλου αναφοράς που περιέχει το σύνολο υπό μελέτη ανήκουν ή όχι στο υπό μελέτη σύνολο A .

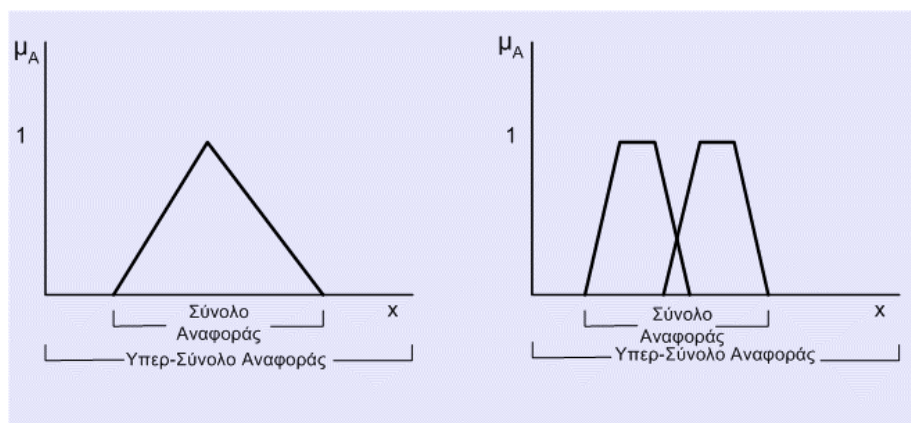


Σχήμα 3.1: Χαρακτηριστική σ συνάρτηση κλασικού συνόλου Boole

Αυτό μπορεί να εκφραστεί με τη χαρακτηριστική συνάρτηση του Boole (crisp ή Boolean characteristic function) $f_A(x)$ του σαφούς συνόλου A :

$$f_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{αν } x \in A \\ 0 & \text{αν } x \notin A \end{cases} \quad (3.1)$$

Η ασάφεια μπορεί να εισαχθεί στη θεωρία των συνόλων αν γενικευτεί η χαρακτηριστική συνάρτηση ώστε να λαμβάνει άπειρο αριθμό τιμών στο κλειστό διάστημα $[0,1]$.



Σχήμα 3.2 Παραδείγματα τριγωνικών και τραπεζοειδών συναρτήσεων

Εάν X είναι το υπερσύνολο αναφοράς με επί μέρους στοιχεία x , τότε $X = \{x\}$. Ένα ασαφές σύνολο (fuzzy set) A του υπερσυνόλου αναφοράς X μπορεί να εκφραστεί συμβολικά ως ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών (ordered pairs),

$$A = \int \{\mu_A(x)/x\} \quad \text{ή} \quad \sum \{\mu_A(x)/x\} \quad \text{για } x \in X \quad (3.2)$$

για τη συνεχή και τη διακριτή περίπτωση, αντιστοίχως¹. Η $\mu_A(x)$ καλείται *συνάρτηση συμμετοχής* (membership function) του x στο σύνολο A και είναι μια απεικόνιση από το υπερσύνολο αναφοράς X στο κλειστό διάστημα $[0,1]$. Η συνάρτηση συμμετοχής υποδεικνύει το βαθμό κατά τον οποίο το σύνολο x ανήκει στο σύνολο A , δηλαδή

$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0,1] \quad (3.3)$$

Το *σύνολο στήριξης* (support set) ενός ασαφούς συνόλου A είναι το σύνολο των στοιχείων του υπερσυνόλου αναφοράς X για το οποίο $\mu_A(x) > 0$. Ένα ασαφές σύνολο μπορεί να θεωρηθεί ως μια απεικόνιση του συνόλου στήριξης στο κλειστό διάστημα $[0,1]$.

¹ Τα σύμβολα \int και \sum εκφράζουν το “σύνολο” και δεν έχουν καμιά σχέση με το κλασικό άθροισμα ή ολοκλήρωμα.

Οι τιμές μιας *ασαφούς μεταβλητής* (fuzzy variable) μπορεί να θεωρηθούν ετικέτες (labels) ασαφών συνόλων. Γενικότερα, οι τιμές μιας ασαφούς μεταβλητής μπορεί να είναι προτάσεις σε κάποια προδιαγραμμένη γλώσσα με συνδυασμό ασαφών μεταβλητών, γλωσσικών περιγραφμάτων (linguistic descriptors) και *υπεκφυγών* (hedges). Η εξάρτηση μιας γλωσσικής μεταβλητής από μια άλλη (ανεξάρτητη) περιγράφεται από μια *ασαφή εξαρτημένη δήλωση* (fuzzy conditional statement) που έχει την μορφή:

$$R : \text{EAN } \Delta_1 \text{ TOTE } \Delta_2$$

ή συμβολικά

$$\Delta_1 \rightarrow \Delta_2$$

όπου Δ_1 και Δ_2 είναι *ασαφείς* δηλώσεις της μορφής

$$\Delta : x \text{ είναι } A$$

και A είναι ένα ασαφές υποσύνολο του υπερσυνόλου αναφοράς X .

Δύο ή περισσότερες ασαφείς εξαρτημένες δηλώσεις μπορούν να συνδυαστούν (η μια ενσωματώνεται στην άλλη) ώστε να σχηματίσουν μια ένθετη ασαφή εξαρτημένη δήλωση της μορφής:

$$R : \text{EAN } \Delta_1 \text{ TOTE } (\text{EAN } \Delta_2 \text{ TOTE } \Delta_3).$$

Είναι προφανές ότι αυτή η δήλωση μπορεί να εκφραστεί επίσης ως δύο συνδεδεμένες εξαρτημένες δηλώσεις:

$$R^1 : \text{EAN } \Delta_1 \text{ TOTE } R^2$$

και

$$R^2 : \text{EAN } \Delta_2 \text{ TOTE } \Delta_3$$

3.3 Ασαφείς Αλγόριθμοι

Δύο ή παραπάνω εξαρτημένες δηλώσεις μπορούν να συνδιαστούν με το συνδετικό ΕΙΤΕ ώστε να σχηματίσουν ένα *ασαφή αλγόριθμο* R'' της μορφής :

$$R'' : R^1 \text{ ΕΙΤΕ } R^2 \text{ ΕΙΤΕ } \dots \text{ ΕΙΤΕ } R''$$

Για παράδειγμα ένα υποσύνολο των κανόνων για τον έλεγχο μιας ατμομηχανής είναι:

ΕΑΝ ΣΤΑ είναι ΑΜΕ ΤΟΤΕ (ΕΑΝ ΜΣΤ είναι ΟΧΙ (ΑΜΕ Ή ΑΜΣ) ΤΟΤΕ ΜΠΚ είναι ΘΜΕ)

ΕΙΤΕ

ΕΑΝ ΣΤΑ είναι ΑΜΣ ΤΟΤΕ (ΕΑΝ ΜΣΤ είναι (ΘΜΕ Ή ΘΜΙ) ΤΟΤΕ ΜΠΚ είναι ΘΜΙ)

ΕΙΤΕ

ΕΑΝ ΣΤΑ είναι ΑΜΙ ΤΟΤΕ (ΕΑΝ ΜΣΤ είναι ΘΜΣ ΤΟΤΕ ΜΠΚ είναι ΘΜΙ)
όπου

ΣΤΑ = Σφάλμα Ταχύτητας

ΜΣΤ = Μεταβολή Σφάλματος ταχύτητας

ΜΠΚ = Μεταβολή στην Παροχή Καυσίμου

και

ΑΜΕ, ΑΜΣ, ΑΜΙ = Αρνητικά Μεγάλο, Μέσο, Μικρό

ΘΜΕ, ΘΜΣ, ΘΜΙ = Θετικά Μεγάλο, Μέσο, Μικρό

3.4 Τελεστές Ασαφούς Λογικής

Οι τελεστές (operators) *min* (για *minimum*) και *max* (για *maximum*) μπορεί να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τα συμφραζόμενα. Επίσης μπορούν να εφαρμοστούν σε ανεξάρτητα στοιχεία καθώς και σε σύνολα και πίνακες για κάθε στοιχείο τους ξεχωριστά.

Οι πράξεις *min* και *max* δύο στοιχείων ορίζονται ως:

$$\alpha \wedge \beta = \min(\alpha, \beta) = \begin{cases} \alpha & \text{εάν } \alpha \leq \beta \\ \beta & \text{εάν } \alpha > \beta \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\alpha \vee \beta = \max(\alpha, \beta) = \begin{cases} \alpha & \text{εάν } \alpha \geq \beta \\ \beta & \text{εάν } \alpha < \beta \end{cases} \quad (3.5)$$

Όταν οι τελεστές χρησιμοποιούνται ενιαία υπονοούν το ελάχιστο (*inf* ή *infimum*) ή το μέγιστο (*sup* ή *supremum*) όλων των στοιχείων ενός συνόλου. Για παράδειγμα:

$$\alpha = \wedge A = \inf(A), \alpha \in A$$

$$\alpha = \vee A = \sup(A), \alpha \in A$$

Οι τελεστές επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν υπό τη μορφή συναρτήσεων με μεμονωμένα στοιχεία ή σύνολα. Για παράδειγμα:

$$\alpha = \wedge(a_1, a_2, \dots, a_m) = a_1 \wedge a_2 \wedge \dots \wedge a_m = \wedge_k(a_k)$$

$$A = \wedge(A_1, A_2, \dots, A_m) = A_1 \wedge A_2 \wedge \dots \wedge A_m = \wedge_k(A_k)$$

Όταν τα στοιχεία ενός συνόλου είναι συναρτήσεις μιας μεταβλητής, οι τελεστές εκφράζονται ως εξής:

$$\alpha = \wedge_k(a(x)), x \in X$$

3.5 Πράξεις με Ασαφή Σύνολα

Ένα ασαφές σύνολο A του X θεωρείται *κενό* εάν η συνάρτηση συμμετοχής του είναι μηδενική παντού, δηλαδή

$$A = 0 \text{ εάν } \mu_A(x) = 0 \quad \forall x \in X \quad (3.6)$$

Το *συμπλήρωμα* (complement) \bar{A} ενός ασαφούς συνόλου ορίζεται ως:

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in X \quad (3.7)$$

Δύο ασαφή σύνολα θεωρούνται *ισότιμα* όταν οι συναρτήσεις συμμετοχής τους είναι ίσες παντού, δηλαδή

$$A = B \text{ εάν } \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (3.8)$$

Ένα ασαφές σύνολο B είναι *υποσύνολο* ενός συνόλου A εάν η συνάρτηση συμμετοχής του B είναι μικρότερη ή ίση με αυτή του A παντού στο X , δηλαδή

$$B \subset A \text{ εάν } \mu_B(x) \leq \mu_A(x) \quad \forall x \in X \quad (3.9)$$

Η *ένωση* δύο ασαφών συνόλων A και B στο X ορίζεται ως:

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (3.10)$$

Η *τομή* δύο ασαφών συνόλων A και B στο X ορίζεται ως:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (3.11)$$

Το *γινόμενο* δύο ασαφών συνόλων A και B στο X ορίζεται ως:

$$\mu_{A \bullet B}(x) = \mu_A(x) \bullet \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (3.12)$$

3.6 Αλγεβρικές Ιδιότητες

Χρησιμοποιώντας τους ορισμούς της ένωσης, της τομής και του συμπληρώματος οι αλγεβρικές ιδιότητες της κλασικής λογικής ισχύουν και για τα ασαφή σύνολα.

$$\text{Νόμος διπλής άρνησης: } \overline{\bar{A}} = A \quad (3.13)$$

$$\text{Μεταθετική ιδιότητα: } A \cup B = B \cup A, A \cap B = B \cap A \quad (3.14)$$

$$\text{Αδύναμη πράξη: } A \cup A = A, A \cap A = A \quad (3.15)$$

$$\text{Προσεταιριστική ιδιότητα: } (A \cup B) \cup \Gamma = A \cup (B \cup \Gamma), (A \cap B) \cap \Gamma = A \cap (B \cap \Gamma) \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \text{Επιμεριστική ιδιότητα: } A \cap (B \cup \Gamma) &= (A \cap B) \cup (A \cap \Gamma), \\ A \cup (B \cap \Gamma) &= (A \cup B) \cap (A \cup \Gamma) \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\text{Νόμος απορρόφησης: } A \cap (A \cup B) = A, A \cup (A \cap B) = A \quad (3.18)$$

$$\text{Θεώρημα DeMorgan: } \overline{A \cap B} = \bar{A} \cup \bar{B}, \overline{A \cup B} = \bar{A} \cap \bar{B} \quad (3.19)$$

Εκτός από αυτές ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις μόνο για ασαφή σύνολα:

$$X \cap \bar{X} \neq \emptyset \quad (3.20)$$

$$X \cup \bar{X} \neq E \quad (3.21)$$

$$A \cap \emptyset = \emptyset \text{ ή } \mu_a \wedge 0 = 0 \quad (3.22)$$

$$A \cup \emptyset = \emptyset \text{ ή } \mu_a \vee 0 = \mu_a \quad (3.23)$$

$$A \cap E = \emptyset \text{ ή } \mu_a \wedge 1 = \mu_a \quad (3.24)$$

$$A \cup E = E \text{ ή } \mu_a \vee 1 = 1 \quad (3.25)$$

όπου το σύνολο E ορίζεται ως $\mu_E(x) = 1, x \in X$.

3.7 Γλωσσικές Μεταβλητές

Μια γλωσσική μεταβλητή παίρνει τιμές που είναι οι *προτάσεις* μιας φυσικής ή τεχνητής γλώσσας. Γενικά η τιμή μιας γλωσσικής μεταβλητής είναι ένας σύνθετος όρος αποτελούμενος από ατομικούς όρους. Οι όροι αυτοί έχουν τις εξής υπό-κατηγορίες:

- *Πρωτεύοντες όροι* (primary terms) που είναι *ετικέτες* ασαφών συνόλων του υπερσυνόλου αναφοράς.
- Την *άρνηση* (negation) ΟΧΙ (NOT) και τα *συνδετικά* (connectives) ΚΑΙ (AND) και Ή (OR).
- *Δείκτες* (markers) όπως οι παρενθέσεις

Οι πρωτεύοντες όροι μπορούν να έχουν συνεχείς ή διακριτές συναρτήσεις συμμετοχής. Οι συνεχείς συναρτήσεις ορίζονται με αναλυτικές συναρτήσεις.

3.8 Συνδετικά

Η άρνηση ΟΧΙ και τα συνδετικά ΚΑΙ και Ή μπορούν να οριστούν μέσω των πράξεων του συμπληρώματος, τομής και ένωσης αντίστοιχα. Συνήθως το συνδετικό ΚΑΙ χρησιμοποιείται με μεταβλητές που έχουν διαφορετικά υπερσύνολα αναφοράς. Εάν

$$A = \{\mu_A(x) / x\} \text{ για } x \in X \quad (3.26)$$

$$B = \{\mu_B(y) / y\} \text{ για } y \in Y \quad (3.27)$$

τότε

$$\begin{aligned} A \text{ KAI } B &= \mu_A(x) \wedge \mu_B(y) / (x, y) \text{ για } x \in X, y \in Y \\ &= \mu_{A \cap B}(x, y) / (x, y) \end{aligned} \quad (3.28)$$

Το συνδετικό Ή συνδέει γλωσσικές τιμές της ίδιας μεταβλητής. Οι δύο μεταβλητές αναφοράς πρέπει να ανήκουν στο ίδιο υπερσύνολο αναφοράς. Εάν

$$\begin{aligned} A &= \{\mu_A(x) / x\} \text{ για } x \in X \\ B &= \{\mu_B(x) / x\} \text{ για } x \in X \end{aligned}$$

τότε

$$\begin{aligned} A \text{ Η } B &= \mu_A(x) \vee \mu_B(x) / x \\ &= \mu_{A \cup B}(x) / x \text{ για } x \in X \end{aligned} \quad (3.29)$$

Το συνδετικό Ή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί με μεταβλητές σε διαφορετικά υπερσύνολα αναφοράς εάν οι μεταβλητές βρίσκονται στο μέρος της συνθήκης σε μια σχέση της μορφής ‘ΕΑΝ...ΤΟΤΕ’ (όμοια με τη γνωστή εντολή IF...THEN του συμβατικού προγραμματισμού σε υψηλή γλώσσα).

Η πράξη ΟΧΙ είναι συνώνυμη με την άρνηση στη φυσική γλώσσα. Έτσι εάν,

$$\begin{aligned} A &= \{\mu_A(x) / x\} \text{ για } x \in X \\ \text{ΟΧΙ } A &= \overline{A} = \{1 - \mu_A(x) / x\} \end{aligned} \quad (3.30)$$

Γλωσσικά περιγράμματα χρησιμεύουν στη δημιουργία ενός ευρύτερου συνόλου γλωσσικών τιμών μιας γλωσσικής μεταβλητής από μια μικρότερη συλλογή πρωτεύοντων όρων. Χρησιμοποιώντας το περίγραμμα πολύ σε συνδυασμό με τα συνδετικά ΟΧΙ, ΚΑΙ και τον πρωτεύοντα όρο μεγάλο, μπορούμε να δημιουργήσουμε τα επιπλέον ασαφή σύνολα πολύ μεγάλο, πάρα πολύ μεγάλο, ΟΧΙ πολύ μεγάλο κ.λ.π. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να υπολογίσουμε τη συνάρτηση συμμετοχής σύνθετων όρων, όπως π.χ

$$A = \text{ΟΧΙ μικρό ΚΑΙ ΟΧΙ μεγάλο}$$

Η συνάρτηση συμμετοχής της οποίας είναι

$$\mu_A(x) = [1 - \mu_{\text{ΜΙΚΡΟ}}(x)] \wedge [1 - \mu_{\text{ΜΕΓΑΛΟ}}(x)]. \quad (3.31)$$

3.9 Ασαφείς Ελεγκτές

Τα απαραίτητα δομικά συστατικά στοιχεία ενός ασαφούς ελεγκτή είναι τα εξής:

- Η βάση δεδομένων πραγματικού χρόνου όπου μετά από εξομάλυνση καταχωρούνται οι τιμές των μεταβλητών που συλλέγονται από τη φυσική διαδικασία από τις διάφορες τοπικές μονάδες ελέγχου (TME) καθώς και οι έξοδοι του ελεγκτή (δηλαδή οι δράσεις ελέγχου) που κατά τακτά χρονικά διαστήματα μεταφέρονται και πάλι στις TME. Η βάση δεδομένων πραγματικού χρόνου συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί σαν ο συνδετικός κρίκος μεταξύ της φυσικής διαδικασίας και του ελεγκτή.

- Η βάση γνώσης στην οποία είναι καταχωρημένη η κωδικοποιημένη γνώση (δηλαδή οι κανόνες ελέγχου) για τον έλεγχο της διαδικασίας.
- Τα ασαφή σύνολα που είναι καταχωρημένα είτε σε αναλυτική ή διακριτή μορφή σε ειδικό αρχείο. Ο μηχανισμός συμπερασμού χρησιμοποιεί τα σύνολα αυτά για να αποδώσει τις πράξεις ελέγχου στη διαδικασία.
- Τον ασαφοποιητή όπου οι φυσικές μεταβλητές της διαδικασίας μετατρέπονται στη γλώσσα των ασαφών συνόλων.
- Το μηχανισμό συμπερασμού ή μηχανισμό συμπερασμάτων όπου οι αποφάσεις ελέγχου βάσει των διαθέσιμων κανόνων σε μορφή ασαφών συνόλων.
- Τον από-ασαφοποιητή όπου τα ασαφή σύνολα των εξόδων του ελεγκτή μετατρέπονται σε σαφείς δράσεις ελέγχου προς μετάδοση στους ενεργοποιητές της διαδικασίας μέσω των ΤΜΕ.

Ο αλγόριθμος ενός ασαφούς ελεγκτή μπορεί να εκτελείται σε τακτά χρονικά διαστήματα (ο “χρόνος δειγματοληψίας”) που είναι προκαθορισμένα βάσει στοιχείων που έχουν σχέση με τη δυναμική συμπεριφορά της διαδικασίας υπό έλεγχο. Μια κοινή τακτική είναι να τίθεται ο χρόνος δειγματοληψίας ίσος ή μεγαλύτερος του χρόνου σταθεροποίησης μετά από κάποια σταθερή διέγερση της διαδικασίας. Εναλλακτικά ο ασαφής ελεγκτής μπορεί να εκτελείται με εντολές διακοπών σε χρονικές στιγμές που καθορίζονται από έναν εκτελεστή του πληροφοριακού συστήματος. Βάσει κάποιου κριτηρίου που σχετίζεται με τον ρυθμό εξέλιξης των σφαλμάτων του κλειστού συστήματος, ο εκτελεστής αποφασίζει πότε θα εκτελεστεί ο ελεγκτής. Με τον τρόπο αυτό ο ελεγκτής εκτελείται μόνο όταν απαιτείται.

3.10 Σχεδιασμός Ασαφούς Αλγορίθμου

Οι βασικές παράμετροι σχεδιασμού ενός ασαφούς ελεγκτή είναι:

- Οι στρατηγικές ασαφοποίησης:
 - (α) Προσδιορισμός του τελεστή ασαφοποίησης.
- Η βάση δεδομένων πραγματικού χρόνου:
 - (α) Διακριτοποίηση/κανονικοποίηση των υπερσυνόλων αναφοράς.
 - (β) Η διάσπαση των ασαφών χώρων εισόδων και εξόδων.
 - (γ) Επιλογή των ασαφών συνόλων.
- Η βάση γνώσης:
 - (α) Η επιλογή των σημάτων/καταστάσεων που αποτελούν τα αίτια.
 - (β) Επιλογή των μεταβλητών ελέγχου.
 - (γ) Εύρεση των κανόνων ελέγχου.
 - (δ) Λογισμικό και πληρότητα των ασαφών κανόνων.
- Η λογική του μηχανισμού συμπεράσματος:
 - (α) Ορισμός της ασαφούς συνεπαγωγής.

- (β) Ορισμός της συνδετικής σχέσης ‘ΚΑΙ’.
- (γ) Ορισμός του όρου ‘ΕΙΤΕ’.
- (δ) Ορισμός του τελεστή σύνθεσης.
- (ε) Λογισμικό του μηχανισμού συμπερασμού.
- Η από-ασαφοποίηση:
 - (α) Τεχνικές από-ασαφοποίησης.
 - (β) Υπολογισμός της σαφούς τιμής της εξόδου του ελεγκτή σε φυσικές τιμές.

3.11 Ασαφοποίηση Μεταβλητών Εισόδου

Στην πράξη τα δεδομένα μιας διαδικασίας είναι σαφείς (crisp) και συνεπώς απαιτείται ασαφοποίηση των τιμών των μετρήσεων στα πρώτα στάδια της διαδικασίας συνεπαγωγής. Οι γλωσσικοί κανόνες που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο μιας διαδικασίας έχουν την μορφή πολλαπλών αίτιων και ενός συμπεράσματος. Σε περίπτωση πολλαπλών εξόδων ο ασαφής γλωσσικός ελεγκτής αποσυνθέτεται σε ένα σύνολο ελεγκτών πολλαπλών εισόδων και μιας εξόδου (AE1, AE2...) όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4. Παρακάτω περιγράφεται ο ασαφής αλγόριθμος αλλά για να απλουστευτούν οι μαθηματικές πράξεις θα υποθεθεί ότι ο ελεγκτής έχει τρεις μόνο εισόδους και μια έξοδο. Είναι προφανές ότι η ανάλυση εύκολα επεκτείνεται για περισσότερες εισόδους.

Έστω ότι οι τρεις είσοδοι και η μοναδική έξοδος του ελεγκτή χαρακτηρίζονται από τις μεταβλητές x_1, x_2, x_3 και y αντίστοιχα. Εάν οι κανόνες έχουν τη συνήθη μορφή:

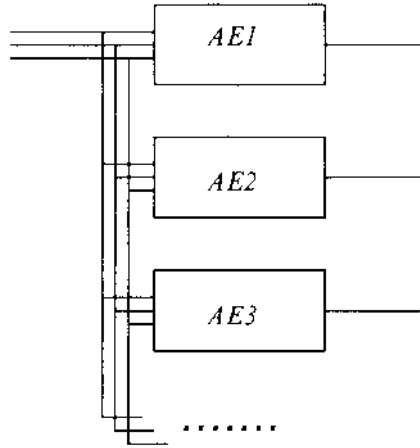
$$\text{ΕΑΝ } (A_1 \text{ ΚΑΙ } A_2 \text{ ΚΑΙ } A_3) \text{ ΤΟΤΕ } B$$

Η ασαφής εξαρτημένη σχέση καθορίζεται από:

$$\mu_R(x_1, x_2, x_3) = \phi(\mu_A^1(x_1) \wedge \mu_A^2(x_2) \wedge \mu_A^3(x_3), \mu_B(y)) \quad (3.32)$$

$$= \phi(\wedge (\mu_A^j(x_k) \mu_B(y)) \text{ για } j = 1, 2, 3 \quad (3.33)$$

όπου $\phi(.)$ είναι η σχέση γινομένου και είναι *max-min* ή *max-product*.



Σχήμα 3.3: Αποσύνθεση ασαφούς ελεγκτή πολλαπλών εισόδων-πολλαπλών εξόδων σε ένα σύνολο ασαφών ελεγκτών πολλαπλών εισόδων-μιας εξόδου

Η διατύπωση,

$$\sigma^j(k) = \mu_A^1(x_1) \wedge \mu_A^2(x_2) \dots \wedge \mu_A^N(x_N) \text{ όπου } \sigma^j(k) \in [0,1] \quad (3.34)$$

είναι ο βαθμός εκπλήρωσης (degree of fulfillment) του j -οστού κανόνα και υπολογίζεται σε κάθε χρονική στιγμή. Ο βαθμός εκπλήρωσης ουσιαστικά περιγράφει κατά πόσο οι εισοδοί του ελεγκτή ταιριάζουν τα αίτια του κάθε κανόνα και έχει την έννοια *βάρους* που αποδίδεται σε κάθε κανόνα. Στην πράξη, ένας πολύ μικρός αριθμός κανόνων έχει μη-μηδενικά βάρη.

Χρησιμοποιώντας τον κανόνα συνθετικού συμπεράσματος, ο ασαφής αλγόριθμος συμπεραίνει την κατάλληλη τιμή της εξόδου του ελεγκτή y από τις *τρέχουσες τιμές* των αντιστοίχων εισόδων x_1, x_2, x_3 . Εάν στη χρονική στιγμή k οι τιμές των εισόδων είναι $x_1(k), x_2(k), x_3(k)$ η τιμή της εξόδου με *max-min* σύνθεση είναι:

$$Y(k) = X_1(k) \wedge X_2(k) \wedge X_3(k) \circ R^N \quad (3.35)$$

Η παραπάνω διαδικασία απλοποιείται σημαντικά εάν θεωρηθεί ότι τα ασαφή σύνολα των μεταβλητών εισόδου είναι *μονοσύνολα*, δηλαδή:

$$\mu_{X_i(k)} = 1 \text{ εάν } x_i = x_i(k)$$

$$= 0 \text{ αλλιώς}$$

οπότε :

$$\begin{aligned} \mu_Y(y) &= \bigvee_{x_1} \bigvee_{x_2} \bigvee_{x_3} [1 \wedge 1 \wedge 1 \wedge \mu_{R^N}(x_1, x_2, x_3, y)] \\ &= \mu_{R^N}(x_1, x_2, x_3, y) \end{aligned} \quad (3.36)$$

3.11 Απο-Ασαφοποίηση της Εξόδου

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές απο-ασαφοποίησης, αλλά πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει θεωρητική βάση για καμιά από αυτές. Για τον έλεγχο διαδικασιών το βασικό κριτήριο επιλογής μιας κατάλληλης τεχνικής είναι η υπολογιστική απλότητα και η συμβατότητα με την εφαρμογή.

Σύμφωνα με το κριτήριο της υπολογιστικής απλότητας έχουν προταθεί οι ακόλουθες υποψήφιες τεχνικές:

1) *Απο-ασαφοποίηση μεγίστου* (Maximum defuzzifier): Στην τεχνική αυτή εξετάζεται η σύνθετη συνάρτηση συμμετοχής του συμπεράσματος, δηλαδή της εξόδου του ελεγκτή, και επιλέγεται ως έξοδος η τιμή της μεταβλητής y όπου $\mu_Y(y)$ είναι μέγιστο. Συνεπώς

$$\hat{y}_{MAX} = \max \mu_Y(y). \quad (3.37)$$

Η μέθοδος δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, ειδικά όταν υπάρχουν πολλαπλά μέγιστα.

2) *Από-ασαφοποίηση με μέσο όρο μεγίστων* (Mean of Maxima defuzzifier)- *MOM*: Στην τεχνική αυτή εξετάζεται η συνάρτηση συμμετοχής $\mu_Y(y)$ για να βρεθούν οι τιμές (εφόσον υπάρχουν) του y όπου $\mu_Y(y)$ είναι μέγιστη. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών της εξόδου που αντιστοιχούν στην συνθήκη αυτή, δηλαδή:

$$\hat{y}_{MOM} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \max \mu_Y(y_j). \quad (3.38)$$

Στην περίπτωση που μόνο ένα μέγιστο υπάρχει τότε η τεχνική αυτή είναι όμοια με την προηγούμενη. Στην περίπτωση που υπάρχει πλήθος τιμών με μέγιστη τιμή τότε υπολογίζεται ο μέσος όρος.

3) *Απο-ασαφοποίηση κέντρου* (Center of Area ή COA – defuzzifier): Στην τεχνική αυτή υπολογίζεται το κέντρο του εμβαδού της σύνθετης συνάρτησης συμμετοχής της εξόδου $\mu_Y(y)$, η οποία και θεωρείται ως το τελικό αποτέλεσμα, δηλαδή η σαφής τιμή της εξόδου.

Εδώ:

$$\hat{y}_{COA} = \frac{\int_S y \mu_Y(y) dy}{\int_S \mu_Y(y) dy}, \quad (3.39)$$

όπου S είναι το σύνολο στήριξης της συνάρτησης $\mu_Y(y)$. Στην περίπτωση που το σύνολο υποστήριξης είναι διακριτό, η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$\hat{y}_{COA} = \frac{\sum_{i=1}^I y_i \mu_Y(y_i)}{\sum_{i=1}^I \mu_Y(y_i)}. \quad (3.40)$$

Στην τεχνική αυτή τα σχήματα των συναρτήσεων συμμετοχής παίζουν μεγάλο ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα.

4) *Απο-ασαφοποίηση κέντρου βάρους* (Center of Gravity – COG): Στην τεχνική αυτή υπολογίζεται το κέντρο βάρους όλων των συναρτήσεων συμμετοχής των I κανόνων που έχουν ενεργοποιηθεί σταθμισμένοι με τον βαθμό εκπλήρωσης σ_i για κάθε κανόνα. Εδώ δεν υπολογίζεται το συνδυαστικό ΕΙΤΕ, έτσι το τελικό αποτέλεσμα στην περίπτωση που οι συναρτήσεις είναι συμμετρικές είναι:

$$\hat{y}_{COG} = \frac{\sum_{i=1}^I \sigma_i \mu_Y^i(y_i)}{\sum_{i=1}^I \mu_Y^i(y_i)}. \quad (3.41)$$

Όλες οι παραπάνω τεχνικές έχουν στόχο την εύρεση σαφούς τιμής της εξόδου του ελεγκτή (δηλαδή της μεταβλητής ελέγχου) από την σύνθετη συνάρτηση συμμετοχής εξόδου. Με την σαφή τιμή θα οδηγηθεί ο ενεργοποιητής της διαδικασίας υπό έλεγχο. Η διαδικασία της αποσαφοποίησης μπορεί να περιγραφεί συνοπτικά με έναν τελεστή $def(.)$, δηλαδή:

$$\hat{y}(k) = def(\mu_Y), \quad (3.42)$$

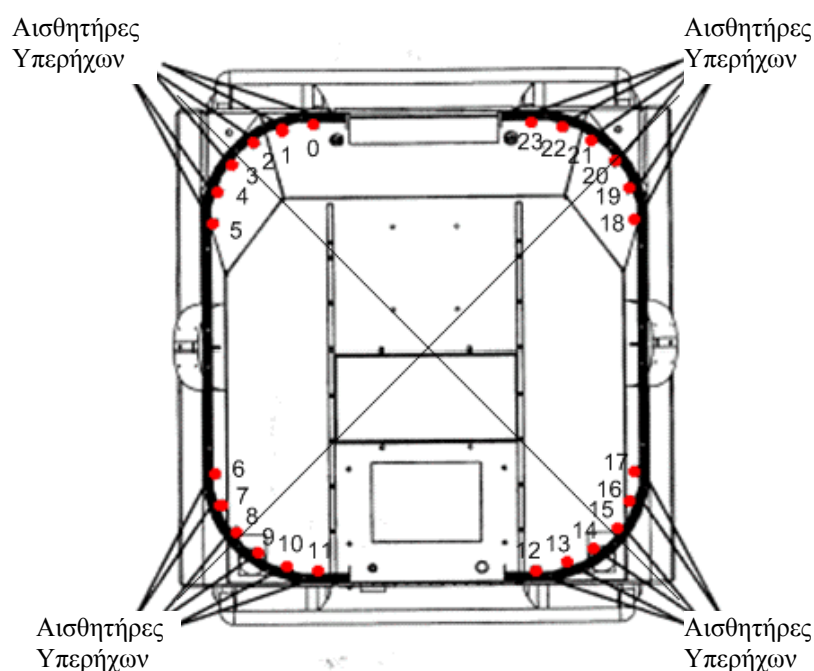
όπου $\hat{y}(k)$ είναι η αριθμητική τιμή της εξόδου του ελεγκτή την χρονική στιγμή k .

Με σύγκριση των παραπάνω τεχνικών συμπεραίνουμε ότι η τεχνική *MOM* παράγει καλύτερα αποτελέσματα στη μεταβατική συμπεριφορά ενός κλειστού συστήματος ελέγχου. Η τεχνική *COA* παράγει καλύτερη στατική συμπεριφορά, δηλαδή σφάλμα στην μόνιμη κατάσταση του συστήματος και έχει συμπεριφορά που παρομοιάζει με αυτή ενός ελεγκτή δύο όρων (PI).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Σχεδιασμός του Ασαφούς Ελεγκτή

4.1 Ομαδοποίηση των Αισθητήρων

Το όχημα ATRV-Mini είναι εφοδιασμένο με 24 αισθητήρες υπερήχων, η διάταξη των οποίων δίνεται στο σχήμα 4.1. Σε κάθε έναν αντιστοιχεί και ένας αριθμός που χρησιμοποιείται στην συνέχεια για την ομαδοποίηση τους.



Σχήμα 4.1: Διάταξη των αισθητήρων υπερήχων

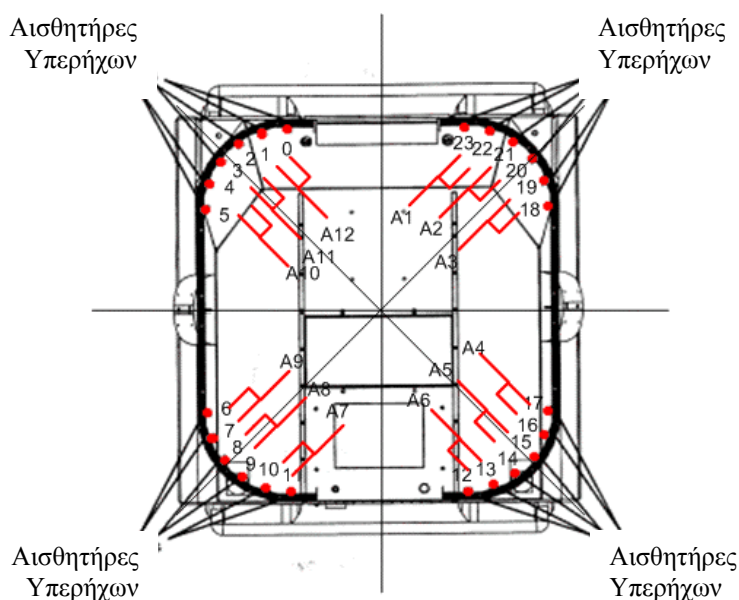
Διαμέσου αυτών γίνεται η ανατροφοδότηση του λογισμικού με τις πληροφορίες που αφορούν το περιβάλλον. Συγκεκριμένα, οι αισθητήρες ορίζοντας μία κυκλική περιοχή γύρω από το όχημα ανιχνεύουν τα πιθανά εμπόδια που υπάρχουν μέσα σε αυτή και συνεπώς το όχημα λαμβάνει τις απαραίτητες πληροφορίες για να κινηθεί ανάλογα. Όμως, προκειμένου να γίνει η βέλτιστη αξιοποίηση των δεδομένων που παρέχουν οι αισθητήρες είναι αναγκαίο να γίνει μια όσο το δυνατόν ορθολογικότερη χρήση τους. Μετά απο δοκιμές διαφόρων μεθόδων επιλέχθηκε η βέλτιστη με βάση τα κριτήρια της ελαχιστοποίησης της

πολυπλοκότητας του αλγορίθμου και της βελτιστοποίησης των εξαγόμενων αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε η ομαδοποίηση των αισθητήρων ανά δύο και η υλοποίηση συνάρτησης για την εύρεση του ελάχιστου των αποστάσεων από τα εμπόδια που αυτοί επιστρέφουν.

Πιο αναλυτικά, το υπολογιστικό κόστος καθώς και ο απαιτούμενος χρόνος για την διεξαγωγή των διαφόρων υπολογισμών σχετίζονται άμεσα με τη διαχείριση των αισθητήρων. Για παράδειγμα, για έναν απλό ασαφή ελεγκτή με 8 εισόδους και 2 εξόδους με 2 λεκτικές μεταβλητές στην κάθε είσοδο και 3 στην κάθε έξοδο θα έπρεπε να κατασκευαστεί μία βάση κανόνων με 2304 κανόνες (αν υποθεθεί ότι είναι επιθυμητό να κατασκευαστούν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί). Είναι φανερό ότι για να ελεγχθεί ένα όχημα με 24 αισθητήρες θα έπρεπε να υπήρχε ένα τεράστιο πλήθος κανόνων. Το πλήθος των κανόνων έχει σαν αποτέλεσμα η εκτέλεση του προγράμματος να καθυστερεί και άρα η συμπεριφορά του οχήματος να μην είναι τόσο καλή σε πραγματικό χρόνο. Αυτό οδήγησε στην ομαδοποίηση των αισθητήρων

Γενικά για την υλοποίηση της βάσης κανόνων ενός ελεγκτή ασαφούς λογικής απαιτούνται $O(K^n)$ κανόνες, όπου K είναι αριθμός των ασαφών γλωσσικών μεταβλητών και n είναι ο αριθμός των μεταβλητών εισόδου. Η υπολογιστική πολυπλοκότητα μπορεί να εξεταστεί αναφορικά με τον αριθμό των εισόδων του ελεγκτή ή αναφορικά με τις γλωσσικές μεταβλητές που σχετίζονται με τις εισόδους. Εάν υποθεθεί ότι οι εισόδοι είναι σταθερές, τότε η πολυπλοκότητα είναι πολυωνυμική και εξαρτάται από τον αριθμό των γλωσσικών μεταβλητών. Ενώ σε περίπτωση που οι εισόδοι είναι μεταβλητές, η αύξηση του αριθμού των αποτελεσμάτων τους αυξάνει εκθετικά την πολυπλοκότητα [17]

Η ομαδοποίηση η οποία επιλέχθηκε είναι αυτή που φαίνεται στο σχήμα 4.2.



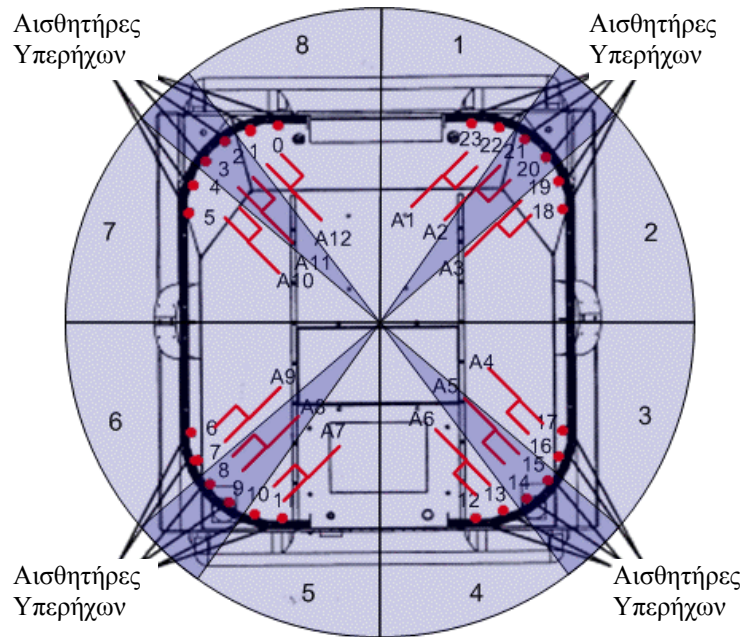
Σχήμα 4.2: Ομαδοποίηση των αισθητήρων

Αναφορικά με την συνάρτηση που βρίσκει το ελάχιστο των δυο ενδείξεων από κάθε ζευγάρι αισθητήρων, η επιλογή του συγκεκριμένου τρόπου εξαγωγής του αποτελέσματος έγινε διότι θεωρήθηκε ότι τουλάχιστον ένας αισθητήρας θα δίνει σωστή ένδειξη κάθε φορά. Πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι οι αισθητήρες που έχουν ομαδοποιηθεί ανά δύο βλέπουν γειτονικές περιοχές οι οποίες σε ένα βαθμό αλληλοκαλύπτονται. Έτσι χωρίς μεγάλο σφάλμα μπορούμε να θεωρήσουμε ότι με την μέθοδο αυτή έχουμε γνώση για το τι γίνεται στην περιοχή που καλύπτεται από τους ανάλογους αισθητήρες. Πρέπει να τονιστεί ότι στην περίπτωση που και οι δυο αισθητήρες δίνουν λανθασμένες ενδείξεις δεν υπάρχει τρόπος να πάρουμε σωστή πληροφορία για το συγκεκριμένο ζευγάρι.

Η αρχική μέθοδος εισαγωγής δεδομένων από τους ομαδοποιημένους αισθητήρες έγινε έτσι ώστε οι ενδείξεις των ανά δύο ομαδοποιημένων αισθητήρων να αθροίζονται και στην συνέχεια διαιρούνται δια 2 και να εξάγεται ο μέσος όρος της απόστασης του εμποδίου. Η μέθοδος αυτή μετά από πειράματα εγκαταλείφθηκε, διότι οι αισθητήρες αποδείχθηκαν αναξιόπιστοι. Η συμπεριφορά των αισθητήρων δεν ήταν η αναμενόμενη καθώς πολλές φορές είχαμε λανθασμένες ενδείξεις. Ενώ υπήρχε εμπόδιο μπροστά, οι αισθητήρες έδιναν καθαρό μονοπάτι και το ανάποδο. Αυτό είχε σαν συνέπεια, αν σε ένα ζευγάρι είχαμε έναν μόνο αισθητήρα ο οποίος έδινε λάθος ένδειξη, το αποτέλεσμα του μέσου όρου να είναι λάθος.

4.2 Πρώτο Επίπεδο Ασαφούς Ελεγκτή

Στο πρώτο επίπεδο υπολογίζεται η πιθανότητα σύγκρουσης σε κάθε μια από τις οκτώ διευθύνσεις οι οποίες προκύπτουν εάν χωριστεί η περιοχή γύρω από το όχημα σε οκτώ ίσους κυκλικούς τομείς. Οι κυκλικοί τομείς αριθμούνται ώστε να διευκολύνεται η μεταγενέστερη αναφορά σε αυτούς. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η αρίθμηση τους καθώς και τα ζεύγη των αισθητήρων που αντιστοιχούν σε κάθε περιοχή. Όπως διατυπώνεται αναλυτικά στην συνέχεια, ορισμένοι αισθητήρες παίρνουν μέρος για την ανίχνευση πιθανών εμποδίων δύο γειτονικών περιοχών, επομένως οι περιοχές για ορισμένα ζεύγη αισθητήρων αλληλοεπικαλύπτονται.όπως φαίνεται και στην σχηματική διάταξη που ακολουθεί.



Σχήμα 4.3: Αρίθμηση των περιοχών γύρω από το όχημα ATRV-Mini

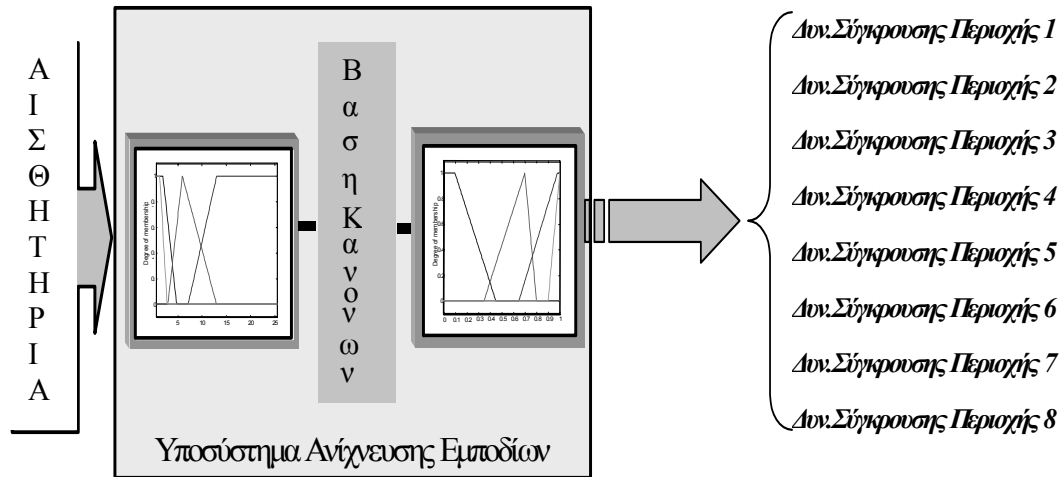
Για την εξαγωγή των πιθανοτήτων σχεδιασθηκαν οκτώ ασαφείς ελεγκτές, ένας για την κάθε μια κατεύθυνση. Η αρχιτεκτονική που ακολουθείται βασίζεται στην εργασία των *Tsourveloudis et al* [16]. Ως δεδομένα εισόδου, οι ελεγκτές έχουν τα δεδομένα από τους αισθητήρες. Η ομαδοποίηση των αισθητήρων αναφορικά με την εκάστοτε κατεύθυνση έγινε σύμφωνα με το Σχήμα 5.2 και είναι η εξής:

1. Δυνατότητα σύγκρουσης στην περιοχή 1: A_i με $i = 1, 2$,
[Αισθητήρες: 23, 22, 21, 20]
2. Δυνατότητα σύγκρουσης στην περιοχή 2: A_i με $i = 2, 3$,
[Αισθητήρες: 21, 20, 19, 18]
3. Δυνατότητα σύγκρουσης στην περιοχή 3: A_i με $i = 4, 5$,
[Αισθητήρες: 17, 16, 15, 14]
4. Δυνατότητα σύγκρουσης στην περιοχή 4: A_i με $i = 5, 6$,
[Αισθητήρες 15, 14, 13, 12]
5. Δυνατότητα σύγκρουσης στην περιοχή 5: A_i με $i = 7, 8$,
[Αισθητήρες 11, 10, 9, 8]
6. Δυνατότητα σύγκρουσης στην περιοχή 6: A_i με $i = 8, 9$, [Αισθητήρες 9, 8, 7, 6]
7. Δυνατότητα σύγκρουσης στην περιοχή 7: A_i με $i = 10, 11$,
[Αισθητήρες 5, 4, 3, 2]
8. Δυνατότητα σύγκρουσης στην περιοχή 8: A_i με $i = 11, 12$,
[Αισθητήρες 3, 2, 1, 0]

Όπου i το αντίστοιχο ζευγάρι αισθητήρων.

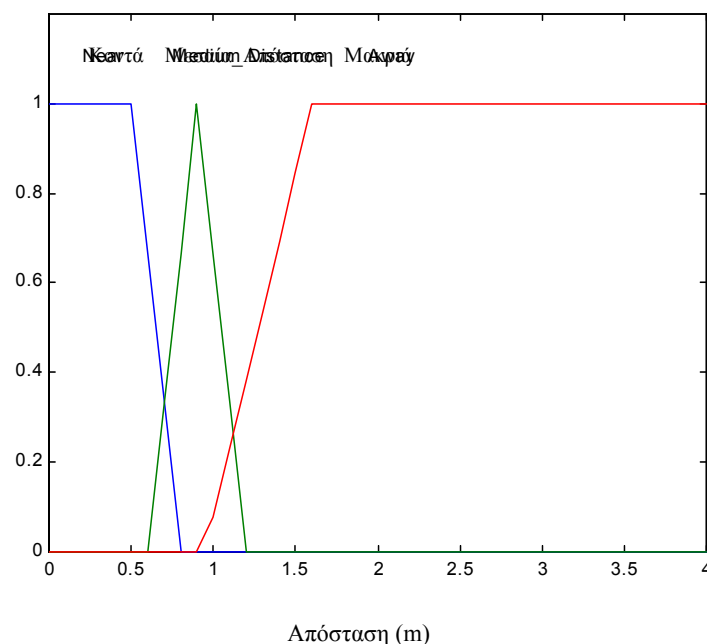
Οι ελεγκτές που έχουν χρησιμοποιηθεί έχουν κατασκευαστεί με την χρήση της ασαφούς λογικής και έχουν την γενική μορφή που φαίνεται στο σχήμα 4.3. Όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα η είσοδος στο υποσύστημα ανίχνευσης εμποδίων αποτελείται από τις ενδείξεις των αισθητήρων που προειδοποιούν για πιθανό εμπόδιο το οποίο βρίσκεται κοντά, σε μέτρια αποποσταση ή μακριά από το όχημα. Οι

ενδείξεις ενεργοποιούν ένα συγκεκριμένο κανόνα από την βάση κανόνων του οποίου ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις. Ως έξοδος του υποσυστήματος προκύπτουν οι πιθανότητες σύγκρουσης του οχήματος με το εμπόδιο σε κάθε μία από τις οκτώ διευθύνσεις.



Σχήμα 4.4: Δομικό διάγραμμα ασαφούς ελεγκτή ανίχνευσης εμποδίων

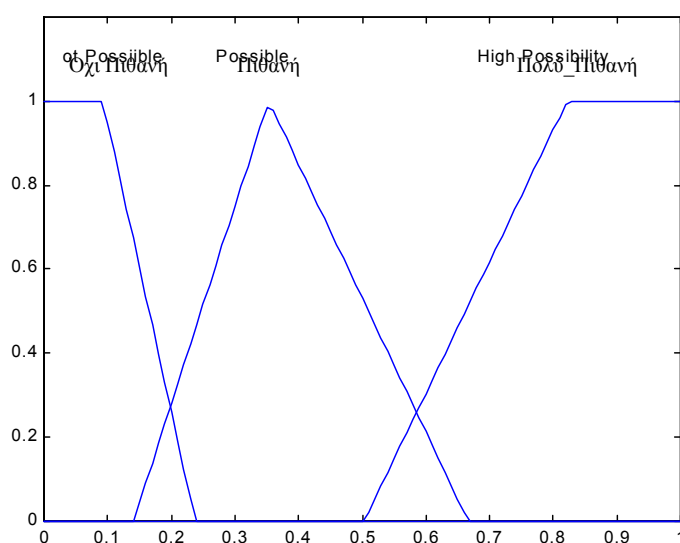
Για την ασαφοποίηση (fuzzification) της εισόδου γίνεται χρήση των γλωσσικών μεταβλητών που περιγράφουν την απόσταση του οχήματος από το εμπόδιο (*distance_from_obstacle*). Οι λεκτικές μεταβλητές έχουν ονομαστεί ως εξής: κοντά (*near*), μεσαία_απόσταση (*medium_distance*, Μακριά (*away*) και οι συναρτήσεις συμμετοχής που τις περιγράφουν φαίνονται στο σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5: Μεταβλητή εισόδου - *Distance_from_obstacle*

Ας σημειωθεί ότι η απόσταση που βλέπουν οι αισθητήρες δίνεται από τον κατασκευαστή ως 4,8 m. Οι πειραματικές μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο έδειξαν ότι στην πραγματικότητα η απόσταση αυτή περιορίζεται στα 4 m περίπου.

Όσον αφορά την έξοδο του ελεγκτή που περιγράφει την δυνατότητα σύγκρουσης του οχήματος (*collision_possibility*) στην ανάλογη κάθε φορά κατεύθυνση, ως πιθανότητα, αποτελείται από έναν αριθμό μεταξύ 0 και 1. Οι λεκτικές μεταβλητές που περιγράφουν την έξοδο είναι: *όχι πιθανή* (*not_possible*), *πιθανή* (*possible*), *πολύ πιθανή* (*high_possibility*) και οι αντίστοιχες συναρτήσεις συμμετοχής φαίνονται στο σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.6: Μεταβλητή εξόδου - Δυνατότητα σύγκρουσης

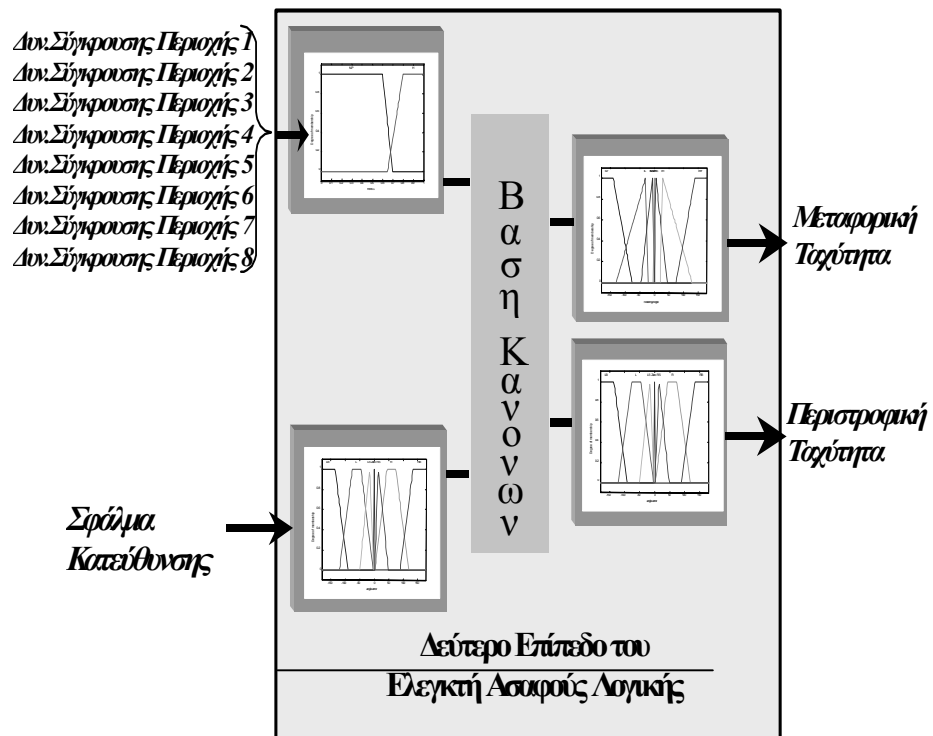
Το βασικό τμήμα του ελεγκτή του πρώτου επιπέδου είναι η βάση κανόνων. Εκεί περιέχονται κανόνες της μορφής: IF A_1 is *near* AND A_2 is *near* THEN *collision_possibility* is *high*. Λόγω του περιορισμένου αριθμού των εισόδων καθώς και των λεκτικών μεταβλητών που περιέχονται, η υπολογιστική πολυπλοκότητα της βάσης κανόνων είναι μικρή. Επομένως, για την καλύτερη απόδοση του ελεγκτή προστέθηκαν στην βάση όλοι οι δυνατοί συνδιασμοί των ενδείξεων σε κάθε ζεύγος αισθητήρων. Η βάση κανόνων για τον υπολογισμό της δυνατότητας της σύγκρουσης στην κατεύθυνση που αντιστοιχεί στην περιοχή 1 παρουσιάζεται στον πίνακα 4.1 και είναι όμοια για κάθε μία από τις υπόλοιπες επτά κατευθύνσεις. Η βάση κανόνων περιέχει 15 κανόνες σε αντίθεση με την τον αριθμό της βάσης κανόνων η οποία είχε σχεδιαστεί στα πλαίσια προηγούμενης εργασίας και η οποία περιείχε 57 κανόνες για την εύρεση πιθανότητας σύγκρουσης στις περιοχές μπροστά και πίσω και 60 κανόνες για τις περιοχές δεξιά και αριστερά του οχήματος.

ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΕΙΣΟΔΟΥ		ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΕΞΟΔΟΥ
A_1	A_2	Δυνατότητα Σύγκρουσης
Near	--	High Possibility
Med_Dist	--	Possible
Away	--	Not Possible
Near	Near	High Possibility
Med_Dist	Near	Possible
Away	Near	High Possibility
Near	Med_Dist	High Possibility
Med_Dist	Med_Dist	Possible
Away	Med_Dist	Possible
Near	Away	High Possibility
Med_Dist	Away	Possible
Away	Away	Not Possible
--	Near	High Possibility
--	Med_Dist	Possible
--	Away	Not Possible

Πίνακας 4.1: Εξαγωγή της δυνατότητας σύγκρουσης στην περιοχή 1

4.3 Δεύτερο Επίπεδο Ασαφούς Ελεγκτή

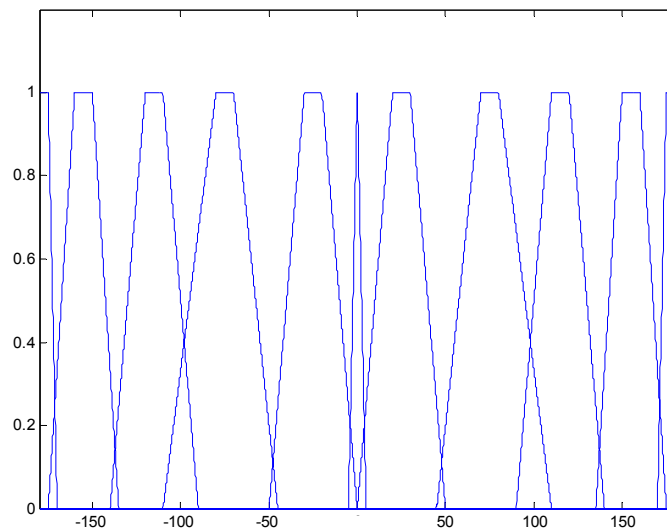
Το δεύτερο επίπεδο του ασαφούς ελεγκτή έχει αρχιτεκτονική παρόμοιου τύπου με τον ελεγκτή του πρώτου επιπέδου. Η είσοδος του αποτελείται τις οκτώ δυνατότητες σύγκρουσης που έχουν προκύψει ως έξοδοι από τον ελεγκτή του πρώτου επιπέδου, καθώς και από το σφάλμα της γωνίας κατεύθυνσης. Η έξοδος που προκύπτει μετά από ενεργοποίηση κάποιου συγκεκριμένου κανόνα της βάσης κανόνων αποτελείται δύο ταχύτητες, μια μεταφορική (translational) και μια περιστροφική (rotational). Το γενικό διάγραμμα που περιγράφει τη δομή καθώς και τον τρόπο λειτουργίας του ασαφούς ελεγκτή δευτέρου επιπέδου παρουσιάζεται στο σχήμα 4.7.



Σχήμα 4.7: Δομικό διάγραμμα δευτέρου επιπέδου ασαφούς ελεγκτή

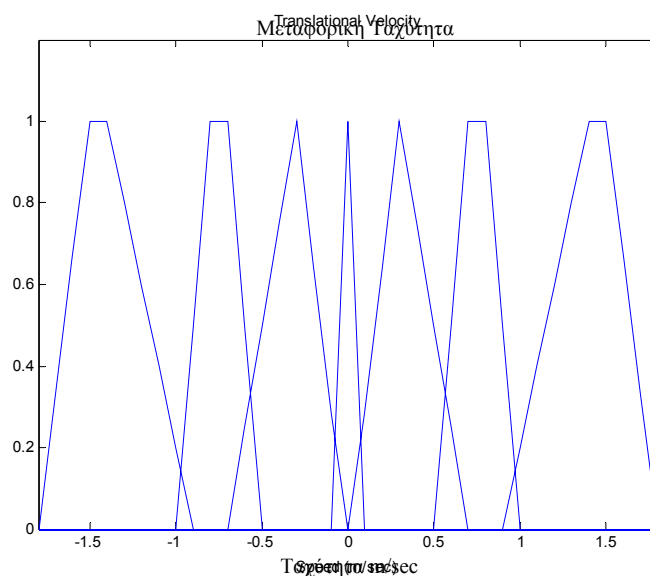
Η ένατη σε σειρά είσοδος στον ασαφή ελεγκτή δευτέρου επιπέδου είναι το σφάλμα κατεύθυνσης το οποίο ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της επιθυμητής γωνίας με την οποία πρέπει να στραφεί το όχημα προκειμένου να επιτύχει τον στόχο του και της πραγματικής γωνίας με την οποία είναι στραμμένο. Το εύρος τιμών του σφάλματος κατεύθυνσης είναι από -180^0 έως 180^0 . Με τον συμβολισμό θ δίνεται η πραγματική γωνία κατά την οποία έχει στραφεί το όχημα.. Οι λεκτικές μεταβλητές οι οποίες περιγράφουν το σφάλμα κατεύθυνσης είναι οι εξής: Πίσω1(Backwards_1), Πολύ_αριστερά(Hard_Left), Αριστερά(Left), Αριστερά2(Left2), Αριστερά1(Left1), Μπροστά(Ahead), Δεξιά1(Right1), Δεξιά2(Right2), Δεξιά(Right), Πολύ_δεξιά(Hard_Right), Πίσω2(Backwards_2). και οι συναρτήσεις συμμετοχής τους παρουσιάζονται στο σχήμα 4.8.

Αξίζει να σημειωθεί ότι επιλέχθηκε να διαμεριστεί το εύρος τιμών του σφάλματος κατεύθυνσης σε 11 τμήματα προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η ακρίβεια κίνησης του οχήματος στην πορεία προσέγγισης του στόχου, γεγονός που επιτεύχθηκε. Η αύξηση της διαμέρισης του εύρους τιμών είχε αναπόφευκτα ως συνέπεια την σημαντική αύξηση της πολυπλοκότητας της βάσης κανονών του ασαφούς ελεγκτή.



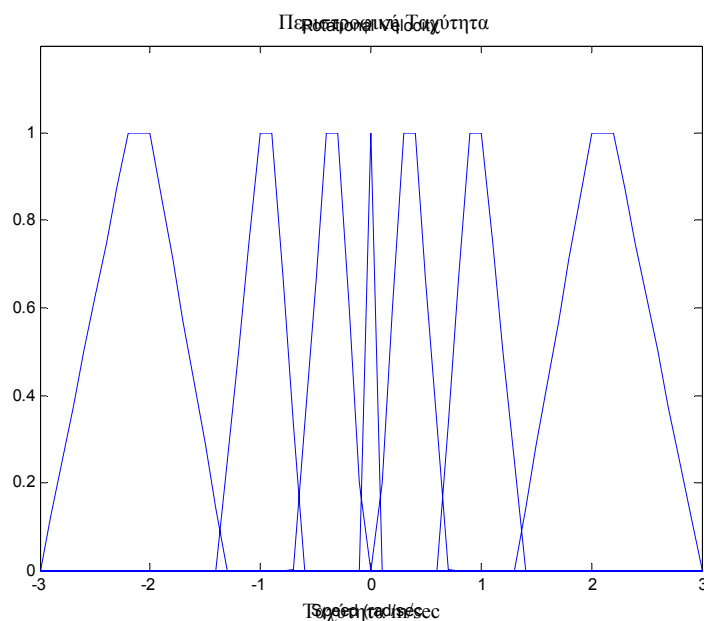
Σχήμα 4.8: Μεταβλητή εισόδου - Σφάλμα κατεύθυνσης

Όσον αφορά τις εξόδους του ελεγκτή, την μεταφορική και την περιστροφική ταχύτητα, περιγράφονται και αυτές από αντίστοιχες λεκτικές μεταβλητές ενώ παρουσιάζουν επίσης ένα περιορισμένο εύρος τιμών. Συγκεκριμένα, η μεταφορική ταχύτητα παίρνει τιμές από $-1,5$ έως $1,5$ m/sec. Οι τιμές αυτές ορίζονται από τις προδιαγραφές του κατασκευαστή και αποτελούν την μέγιστη ταχύτητα κίνησης του οχήματος προς τα εμπρός ή προς τα πίσω. Περιγράφεται από τις εξής λεκτικές μεταβλητές: *μεγάλη_ταχ._πίσω(back_full)*, *ταχ._πίσω(back)*, *μικρή_ταχ._πίσω(back_slow)*, *καθόλου_ταχ.(stop)*, *μικρή_ταχ._μπροστά(front_slow)*, *ταχ._μπροστά(front)*, *μεγάλη_ταχ._μπροστά(front_full)*, και τις συναρτήσεις συμμετοχής που φαίνονται στο Σχήμα 5.8.



Σχήμα 4.9: Μεταβλητή εξόδου - Μεταφορική ταχύτητα

Η περιστροφική ταχύτητα του οχήματος, έχει ένα εύρος τιμών $-2,5$ έως $2,5$ rad/sec το οποίο έχει προκύψει από πειραματικές μετρήσεις. Οι λεκτικές μεταβλητές που περιγράφουν τις μεταβλητές εισόδου είναι οι εξής: *πολύ_δεξιά(right_full)*, *δεξιά(right)*, *δεξιά1(right1)*, *όχι_περιστροφή(no_rotation)*, *αριστερά1(left1)*, *αριστερά(left)*, *πολύ_αριστερά(left_full)*. Οι αντίστοιχες συναρτήσεις συμμετοχής φαίνονται στο Σχήμα 5.9.



Σχήμα 4.10: Μεταβλητή εξόδου - Περιστροφική ταχύτητα

Το πλέον σημαντικό τμήμα του ασασφούς ελεγκτή του δευτέρου επιπέδου είναι η βάση κανόνων. Περιέχει κανόνες της μορφής: IF CP1 is High_Possibility AND CP2 is High_Possibility AND CP3 is High_Possibility AND CP4 is High_Possibility AND CP5 is High_Possibility AND CP6 is High_Possibility AND CP7 is High_Possibility AND CP8 is High_Possibility AND Angle_Error is Ahead THEN Translational Velocity is Front_Full and Rotational Velocity is No_Rotation. Λόγω του αυξημένου αριθμού των μεταβλητών εισόδου και εξόδου καθώς και των αντίστοιχων λεκτικών μεταβλητών μέσω των οποίων περιγράφονται, η υπολογιστική πολυπλοκότητα της βάσης κανόνων είναι πολύ μεγάλη.

Η υπολογιστική πολυπλοκότητα είναι:

$$2 [8O(k_1^{n_1}) + O(k_2^{n_2}) + O(k_3^{n_3})],$$

όπου:

k_1 =πλήθος συναρτήσεων συμμετοχής της μεταβλητής εισόδου στο πρώτο επίπεδο του ασασφούς ελεγκτή.

k_2 =συναρτήσεις συμμετοχής της μεταβλητής εισόδου –πιθανότητα σύγκρουσης– στο δεύτερο επίπεδο του ασασφούς ελεγκτή.

k_3 =συναρτήσεις συμμετοχής της μεταβλητής εισόδου –σφάλμα κατεύθυνσης– στο δεύτερο επίπεδο του ασασφούς ελεγκτή.

n_1 =πλήθος μεταβλητών εισόδου στο πρώτο επίπεδο

n2=πλήθος μεταβλητών εισόδου στο δεύτερο επίπεδο (για τις πιθανότητες σύγκρουσης)

n3=πλήθος μεταβλητών εισόδου στο πρώτο επίπεδο (για το σφάλμα κατεύθυνσης)

Το αποτέλεσμα πολλαπλασιάζεται επί δύο διότι αυτό είναι το πλήθος των εξόδων του ελεγκτή.

Επομένως, λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας δεν είναι εφικτή η υλοποίηση βάσης κανόνων η οποία να περιέχει όλες τις δυνατές περιπτώσεις εισόδων στον ελεγκτή και τις αντίστοιχες εξόδους που θα προέκυπταν. Η υλοποίηση έγινε με προσθήκη ομάδων κανόνων οι οποίοι καλύπτουν σχεδόν όλο το φάσμα των περιπτώσεων που αντιστοιχούν σε αναμενόμενα και εφικτά περιβάλλοντα αποτελούμενα από στατικά και δυναμικά εμπόδια. Η ομαδοποίηση των κανόνων που επιλέχθηκαν για εισαγωγή στην βάση κανόνων έγινε με στόχο την βέλτιστη απόδοση του ασαφούς ελεγκτή αλλά και την ελάττωση της πολυπλοκότητας. Η βάση κανόνων περιέχει 2354 έναντι 238 που είχε όταν σχεδιάστηκε στα πλαίσια προηγούμενης εργασίας.

Οι ομαδοποιήσεις των κανόνων είναι οι εξής:

1. Δεν υπάρχει πιθανότητα σύγκρουσης σε καμία από τις οκτώ κατευθύνσεις.
2. Πιθανότητα σύγκρουσης στην περιοχή 1.
3. Πιθανότητα σύγκρουσης στην περιοχή 2.
4. Πιθανότητα σύγκρουσης στην περιοχή 3.
5. Πιθανότητα σύγκρουσης στην περιοχή 4.
6. Πιθανότητα σύγκρουσης στην περιοχή 5.
7. Πιθανότητα σύγκρουσης στην περιοχή 6.
8. Πιθανότητα σύγκρουσης στην περιοχή 7.
9. Πιθανότητα σύγκρουσης στην περιοχή 8.
10. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 1,2.
11. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 2,3.
12. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 3,4.
13. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 4,5.
14. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 5,6.
15. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 6,7.
16. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 7,8.
17. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 8,1.
18. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 1,2,3.
19. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 2,3,4.
20. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 3,4,5.
21. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 4,5,6.
22. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 5,6,7.
23. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 6,7,8.
24. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 7,8,1.
25. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 8,1,2.
26. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 1,2,3,4.

27. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 2,3,4,5.
28. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 3,4,5,6.
29. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 4,5,6,7.
30. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 5,6,7,8.
31. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 6,7,8,1.
32. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 7,8,1,2.
33. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 8,1,2,3.
34. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 5,6,7,8,1, δηλαδή μπροστά και αριστερά του οχήματος.
35. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 8,1,2,3,4, δηλαδή μπροστά και δεξιά του οχήματος.
36. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 4,5,6,7,8, δηλαδή πίσω και αριστερά του οχήματος.
37. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 1,2,3,4,5, δηλαδή πίσω και δεξιά του οχήματος.
38. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 6,7,8,1,2,3, δηλαδή το όχημα βρίσκεται διέξοδο μόνο πίσω.
39. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 2,3,4,5,6,7, δηλαδή το όχημα βρίσκεται διέξοδο μόνο μπροστά.
40. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 4,5,6,7,8,1, δηλαδή το όχημα βρίσκεται διέξοδο μόνο δεξιά.
41. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 8,1,2,3,4,5, δηλαδή το όχημα βρίσκεται διέξοδο μόνο αριστερά
42. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 6,7,2,3, δηλαδή το όχημα βρίσκεται σε διάδρομο. (Αυτή είναι ειδική περίπτωση στην οποία χρειάστηκε να γίνουν διαφοροποιήσεις στην ομαδοποίηση των αισθητήρων με διαφορές όμως στην απόδοση κυρίως στα δυναμικά εμπόδια. Η περίπτωση εξηγείται αναλυτικά παρακάτω.)
43. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 8,1,4,5, δηλαδή το όχημα βρίσκεται διέξοδο αριστερά ή δεξιά.
44. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 7,8,3,4.
45. Πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 1,2,5,6.

Για κάθε ομάδα κανόνων έχει κατασκευαστεί ένας πίνακας που δείχνει σχηματικά ποιες περιοχές γύρω από το όχημα παρουσιάζουν πιθανότητα σύγκρουσης με εμπόδια καθώς και παραδείγματα των κανόνων.

Παρατηρείται στον πίνακα 4.2 ότι όταν το σφάλμα κατεύθυνσης είναι αριστερά, η στροφή γίνεται προς τα δεξιά και αντίστροφα. Αυτό οφείλεται στον ορισμό που έχει δοθεί σχετικά με το αριστερά και το δεξιά, όσον αφορά το όχημα. Το αριστερά που αντιστοιχεί στο σφάλμα κατεύθυνσης είναι το πραγματικό αριστερά.

ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΕΙΣΟΔΟΥ								ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΕΞΟΔΟΥ		
Δυνατότητες σύγκρουσης σε κάθε περιοχή								Σφάλμα Κατεύθυνσης	Μεταφορική Ταχύτητα	Περιστροφική Ταχύτητα
1	2	3	4	5	6	7	8			
NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	Hard_Right	Front_slow	Right_full
NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	Right	Front_slow	Right
NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	Right2	Front_slow	Right
NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	Right1	Front_slow	Right1
NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	Ahead	Front_slow	No_rotation
NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	Left1	Front_slow	Left1
NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	Left2	Front_slow	Left
NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	Left	Front_slow	Left
NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	Hard_Left	Front_slow	Left_full
NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	Backwards1/2	Back_Normal	No_rotation

Πίνακας 4.2: Κανόνες εξαγωγής εντολών κίνησης σε περιβάλλον χωρίς εμπόδια

Οι υπόλοιποι κανόνες της βάσης κανόνων εξαγώνται με παρόμοιο τρόπο. Για κάθε ομάδα κανόνων μπορεί να υπάρχει μεγάλος αριθμός δυνατών συνδυασμών αναφορικά με τις πιθανότητες σύγκρουσης, από αυτούς επιλέγονται και προστίθενται στην βάση οι συνδυασμοί που είναι πιο αναμενόμενοι. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που υπάρχει πιθανότητα σύγκρουσης στις περιοχές 1,2,3,4,5, δηλαδή πίσω και δεξιά του οχήματος, επιλέγονται οι εξής συνδυασμοί των πιθανοτήτων:

ΕΠΙΛΕΓΟΜΕΝΟΙ ΣΥΝΔΙΑΣΜΟΙ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΣΥΓΚΡΟΥΣΗΣ							
1	2	3	4	5	6	7	8
P	P	P	P	NP	NP	NP	NP
P	P	HP	HP	NP	NP	NP	NP
HP	HP	P	P	NP	NP	NP	NP
HP	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP
P	P	P	HP	NP	NP	NP	NP
HP	P	P	P	NP	NP	NP	NP
HP	HP	HP	P	NP	NP	NP	NP
P	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP

Πίνακας 4.3: Επιλεγόμενοι συνδυασμοί δυνατοτήτων σύγκρουσης για την περίπτωση πιθανών εμποδίων στις περιοχές 1,2,3,4

Στον επόμενο πίνακα παρατίθενται οι κανόνες οι οποίοι προέκυψαν με βάση την παραπάνω επιλογή των συγκεκριμένων συνδιασμών των πιθανοτήτων. Με παρόμοια διαδικασία εξάγονται οι κανόνες και για άλλους συνδιασμούς περιοχών στις οποίες παρουσιάζεται πιθανότητα σύγκρουσης του οχήματος με εμποδια.

ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΕΙΣΟΔΟΥ								ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΕΞΟΔΟΥ		
Δυνατότητες σύγκρουσης σε κάθε περιοχή								Σφάλμα Κατεύθυνσης	Μεταφορική Ταχύτητα	Περιστροφική Ταχύτητα
1	2	3	4	5	6	7	8			
P	P	P	P	NP	NP	NP	NP	Hard_Right	Front_slow	Left1
P	P	P	P	NP	NP	NP	NP	Right	Front_slow	Left1
P	P	P	P	NP	NP	NP	NP	Right2	Front_slow	Left1
P	P	P	P	NP	NP	NP	NP	Right1	Front_slow	Left1
P	P	P	P	NP	NP	NP	NP	Ahead	Front_slow	Left1
P	P	P	P	NP	NP	NP	NP	Left1	Front_slow	Left1
P	P	P	P	NP	NP	NP	NP	Left2	Front_slow	Left
P	P	P	P	NP	NP	NP	NP	Left	Front_slow	Left
P	P	P	P	NP	NP	NP	NP	Hard_Left	Front_slow	Left_full
P	P	P	P	NP	NP	NP	NP	Backwards1	Front_slow	Left_full
P	P	P	P	NP	NP	NP	NP	Backwards2	Front_slow	Left_full
P	P	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Hard_Right	Front_slow	Left1
P	P	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Right	Front_slow	Left1
P	P	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Right2	Front_slow	Left1
P	P	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Right1	Front_slow	Left1
P	P	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Ahead	Front_slow	Left1
P	P	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Left1	Front_slow	Left1
P	P	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Left2	Front_slow	Left
P	P	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Left	Front_slow	Left
P	P	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Hard_Left	Front_slow	Left_full
P	P	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Backwards1	Front_slow	Left_full
P	P	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Backwards2	Front_slow	Left_full
HP	HP	P	P	NP	NP	NP	NP	Hard_Right	Front_slow	Left1
HP	HP	P	P	NP	NP	NP	NP	Right	Front_slow	Left1
HP	HP	P	P	NP	NP	NP	NP	Right2	Front_slow	Left1
HP	HP	P	P	NP	NP	NP	NP	Right1	Front_slow	Left1
HP	HP	P	P	NP	NP	NP	NP	Ahead	Front_slow	Left1
HP	HP	P	P	NP	NP	NP	NP	Left1	Front_slow	Left1

HP	HP	P	P	NP	NP	NP	NP	Left2	Front_slow	Left
HP	HP	P	P	NP	NP	NP	NP	Left	Front_slow	Left
HP	HP	P	P	NP	NP	NP	NP	Hard_Left	Front_slow	Left_full
HP	HP	P	P	NP	NP	NP	NP	Backwards1	Front_slow	Left_full
HP	HP	P	P	NP	NP	NP	NP	Backwards2	Front_slow	Left_full
HP	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Hard_Right	Front_slow	Left1
HP	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Right	Front_slow	Left1
HP	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Right2	Front_slow	Left1
HP	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Right1	Front_slow	Left1
HP	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Ahead	Front_slow	Left1
HP	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Left1	Front_slow	Left1
HP	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Left2	Front_slow	Left
HP	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Left	Front_slow	Left
HP	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Hard_Left	Front_slow	Left_full
HP	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Backwards1	Front_slow	Left_full
HP	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Backwards2	Front_slow	Left_full
P	P	P	HP	NP	NP	NP	NP	Hard_Right	Front_slow	Left1
P	P	P	HP	NP	NP	NP	NP	Right	Front_slow	Left1
P	P	P	HP	NP	NP	NP	NP	Right2	Front_slow	Left1
P	P	P	HP	NP	NP	NP	NP	Right1	Front_slow	Left1
P	P	P	HP	NP	NP	NP	NP	Ahead	Front_slow	Left1
P	P	P	HP	NP	NP	NP	NP	Left1	Front_slow	Left1
P	P	P	HP	NP	NP	NP	NP	Left2	Front_slow	Left
P	P	P	HP	NP	NP	NP	NP	Left	Front_slow	Left
P	P	P	HP	NP	NP	NP	NP	Hard_Left	Front_slow	Left_full
P	P	P	HP	NP	NP	NP	NP	Backwards1	Front_slow	Left_full
P	P	P	HP	NP	NP	NP	NP	Backwards2	Front_slow	Left_full
HP	P	P	P	NP	NP	NP	NP	Hard_Right	Front_slow	Left1
HP	P	P	P	NP	NP	NP	NP	Right	Front_slow	Left1
HP	P	P	P	NP	NP	NP	NP	Right2	Front_slow	Left1
HP	P	P	P	NP	NP	NP	NP	Right1	Front_slow	Left1
HP	P	P	P	NP	NP	NP	NP	Ahead	Front_slow	Left1
HP	P	P	P	NP	NP	NP	NP	Left1	Front_slow	Left1
HP	P	P	P	NP	NP	NP	NP	Left2	Front_slow	Left
HP	P	P	P	NP	NP	NP	NP	Left	Front_slow	Left
HP	P	P	P	NP	NP	NP	NP	Hard_Left	Front_slow	Left_full
HP	P	P	P	NP	NP	NP	NP	Backwards1	Front_slow	Left_full
HP	P	P	P	NP	NP	NP	NP	Backwards2	Front_slow	Left_full

HP	HP	HP	P	NP	NP	NP	NP	Hard_Right	Front_slow	Left1
HP	HP	HP	P	NP	NP	NP	NP	Right	Front_slow	Left1
HP	HP	HP	P	NP	NP	NP	NP	Right2	Front_slow	Left1
HP	HP	HP	P	NP	NP	NP	NP	Right1	Front_slow	Left1
HP	HP	HP	P	NP	NP	NP	NP	Ahead	Front_slow	Left1
HP	HP	HP	P	NP	NP	NP	NP	Left1	Front_slow	Left1
HP	HP	HP	P	NP	NP	NP	NP	Left2	Front_slow	Left
HP	HP	HP	P	NP	NP	NP	NP	Left	Front_slow	Left
HP	HP	HP	P	NP	NP	NP	NP	Hard_Left	Front_slow	Left_full
HP	HP	HP	P	NP	NP	NP	NP	Backwards1	Front_slow	Left_full
HP	HP	HP	P	NP	NP	NP	NP	Backwards2	Front_slow	Left_full
P	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Hard_Right	Front_slow	Left1
P	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Right	Front_slow	Left1
P	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Right2	Front_slow	Left1
P	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Right1	Front_slow	Left1
P	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Ahead	Front_slow	Left1
P	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Left1	Front_slow	Left1
P	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Left2	Front_slow	Left
P	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Left	Front_slow	Left
P	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Hard_Left	Front_slow	Left_full
P	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Backwards1	Front_slow	Left_full
P	HP	HP	HP	NP	NP	NP	NP	Backwards2	Front_slow	Left_full

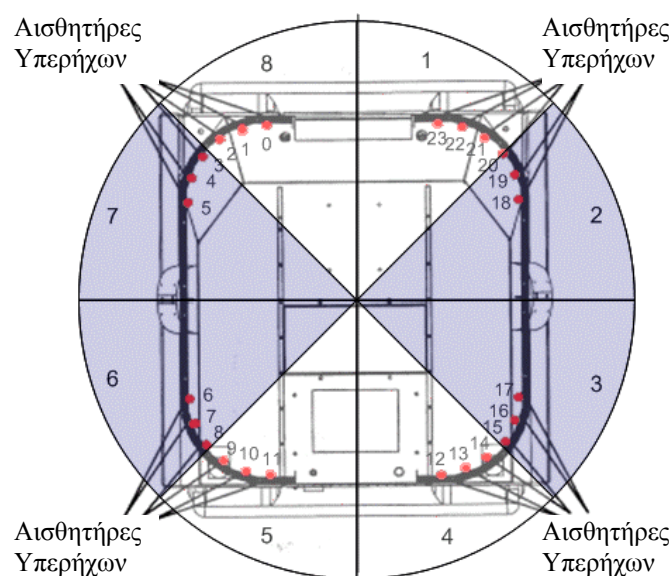
Πίνακας 4.4: Κανόνες εξαγωγής εντολών κίνησης για την περίπτωση πιθανών εμποδίων στις περιοχές 1,2,3,4

4.4 Διαφοροποίηση Σχεδιασμού Ελεγκτή για Πλόηση σε Διάδρομο

Προκειμένου να επιτευχθεί αυτόματη πλοήγηση του έντροχου ρομπότ ATRV-Mini σε περιβάλλον όπου τα εμπόδια όριζαν έναν διάδρομο και τον οποίο το ρομπότ θα έπρεπε να διασχίσει προκειμένου να φτάσει τον στόχο, έπρεπε να διαφοροποιηθεί η ομαδοποίηση των αισθητήρων. Ο τρόπος που ομαδοποιούνται οι αισθητήρες επηρεάζει τον τρόπο που το όχημα αντιλαμβάνεται το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται.

Για να διασχίσει το ρομπότ τον διάδρομο έπρεπε να γίνει εισαγωγή κανόνων οι οποίοι θα έπρεπε να έχουν ως προϋποθέσεις την πιθανότητα σύγκρουσης του

οχήματος με εμπόδια μόνο στις πλάγιες περιοχές του ρομπότ. Όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί οι περιοχές που θα έπρεπε να παρουσιάζουν πιθανότητα σύγκρουσης είναι μόνο οι περιοχές 2,3 και 6,7.



Σχήμα 4.11: Περιοχές που υπάρχει πιθανότητα σύγκρουσης για την περίπτωση πλοήγησης του οχήματος σε διάδρομο

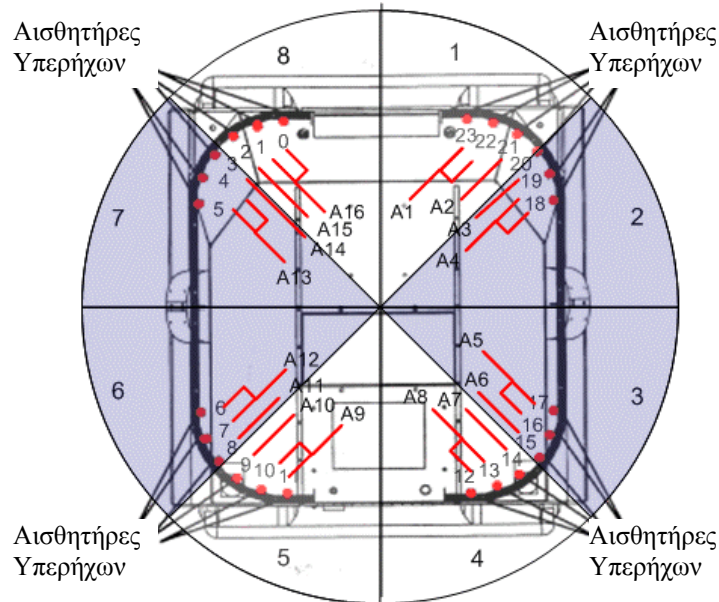
Όσον αφορά την περιοχή 1, για παράδειγμα, με την υπάρχουσα ομαδοποίηση των αισθητήρων, από από κάθε ζεύγος 23,22 και 21,20 ο αλγόριθμος κρατάει την μικρότερη ένδειξη. Στην συνέχεια η ένδειξη αυτή επιστρέφει την απόσταση (near, medium distance ή away) του οχήματος από το εμπόδιο. Από αυτές τις αποστάσεις επιλέγεται εκείνη που παρουσιάζει το εμπόδιο πιο κοντά στο όχημα προκειμένου να χαρακτηριστεί η αντίστοιχη περιοχή ως πιθανή ή όχι για σύγκρουση με το εμπόδιο (Possible, Not Possible ή High_Possibility). Επομένως, από τους τέσσερις αισθητήρες που αντιστοιχούν στην περιοχή 1, ο αισθητήρας που θα παρουσιάσει ένδειξη της πιο κοντινής απόστασης από πιθανό εμπόδιο θα έχει ως αποτέλεσμα να χαρακτηριστεί ανάλογα και η αντίστοιχη περιοχή.

Στην περίπτωση του διαδρόμου ο αισθητήρας 20 δείχνει αναπόφευκτα την ύπαρξη εμποδίου και επομένως με τον τρόπο που αναλύθηκε η περιοχή 1 αποτελεί πλέον πιθανή περιοχή σύγκρουσης (Possible ή High_Possibility). Παρόμοια ορίζονται ως τέτοιες και οι υπόλοιπες επτά περιοχές. Με αυτόν τον τρόπο το όχημα αντιλαμβάνεται ένα περιβάλλον στο οποίο είναι περικυκλωμένο από εμπόδια χωρίς δυνατότητα διαφυγής. Επομένως δεν είναι σε θέση να διασχίσει τον διαδρομο και να φτάσει τον στόχο.

Για την αποφυγή αυτού του προβλήματος, επιλέχθηκε μία διαφορετική ομαδοποίηση των αισθητήρων.

1. Δυνατότητα σύγκρουσης στην περιοχή 1: A_i με $i = 1,2$, Αισθητήρες: 23,22,21
2. Δυνατότητα σύγκρουσης στην περιοχή 2: A_i με $i = 3,4$, Αισθητήρες: 20,19,18
3. Δυνατότητα σύγκρουσης στην περιοχή 3: A_i με $i = 5,6$, Αισθητήρες: 17,16,15
4. Δυνατότητα σύγκρουσης στην περιοχή 4: A_i με $i = 7,8$, Αισθητήρες: 14,13,12
5. Δυνατότητα σύγκρουσης στην περιοχή 5: A_i με $i = 9,10$, Αισθητήρες: 11,10,9

6. Δυνατότητα σύγκρουσης στην περιοχή 6: A_i με $i = 11, 12$, Αισθητήρες 8, 7, 6
 7. Δυνατότητα σύγκρουσης στην περιοχή 7: A_i με $i = 13, 14$, Αισθητήρες 5, 4, 3
 8. Δυνατότητα σύγκρουσης στην περιοχή 8: A_i με $i = 15, 16$, Αισθητήρες 2, 1, 0
- Όπου i το αντίστοιχο ζευγάρι αισθητήρων.



Σχήμα 4.12: Ομαδοποίηση των αισθητήρων για πλοήγηση σε διάδρομο

Η συγκεκριμένη ομαδοποίηση απομωνώνει περισσότερο τις περιοχές μεταξύ τους. Επομένως, στην περίπτωση του διαδρόμου, ο αισθητήρας 20 ανιχνεύει τα εμπόδια που βρίσκονται στα πλάγια του οχήματος αλλά δεν επηρεάζει πλέον την εξαγωγή πιθανότητας σύγκρουσης στην περιοχή 1. Η συγκεκριμένη πιθανότητα ορίζεται με βάση τις ενδείξεις που επιστρέφουν οι αισθητήρες 23, 22 και 21 οι οποίοι ανιχνεύουν εμπόδια στην περιοχή μπροστά από το όχημα και όχι πλάγια. Ισχύουν αντίστοιχα συμπεράσματα και για τις υπόλοιπες περιοχές. Οι κανόνες βάσει των οποίων πραγματοποιείται η πλοήγηση του οχήματος διαμέσου διαδρόμου παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΕΙΣΟΔΟΥ								ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΕΞΟΔΟΥ		
Δυνατότητες σύγκρουσης σε κάθε περιοχή								Σφάλμα Κατεύθυνσης	Μεταφορική Ταχύτητα	Περιστροφική Ταχύτητα
1	2	3	4	5	6	7	8			
P	HP	HP	P	P	HP	HP	P	Hard_Right	Back_slow	No_Rotation
P	HP	HP	P	P	HP	HP	P	Right	Back_slow	No_Rotation
P	HP	HP	P	P	HP	HP	P	Right2	Front_slow	No_Rotation
P	HP	HP	P	P	HP	HP	P	Right1	Front_slow	No_Rotation
P	HP	HP	P	P	HP	HP	P	Ahead	Front_slow	No_Rotation

P	HP	HP	P	P	HP	HP	P	Left1	Front_slow	No_Rotation
P	HP	HP	P	P	HP	HP	P	Left2	Front_slow	No_Rotation
P	HP	HP	P	P	HP	HP	P	Left	Back_slow	No_Rotation
P	HP	HP	P	P	HP	HP	P	Hard_Left	Back_slow	No_Rotation
P	HP	HP	P	P	HP	HP	P	Backwards1	Back_slow	No_Rotation
P	HP	HP	P	P	HP	HP	P	Backwards2	Back_slow	No_Rotation
NP	HP	HP	NP	NP	HP	HP	NP	Hard_Right	Back_slow	No_Rotation
NP	HP	HP	NP	NP	HP	HP	NP	Right	Back_slow	No_Rotation
NP	HP	HP	NP	NP	HP	HP	NP	Right2	Front_slow	No_Rotation
NP	HP	HP	NP	NP	HP	HP	NP	Right1	Front_slow	No_Rotation
NP	HP	HP	NP	NP	HP	HP	NP	Ahead	Front_slow	No_Rotation
NP	HP	HP	NP	NP	HP	HP	NP	Left1	Front_slow	No_Rotation
NP	HP	HP	NP	NP	HP	HP	NP	Left2	Front_slow	No_Rotation
NP	HP	HP	NP	NP	HP	HP	NP	Left	Back_slow	No_Rotation
NP	HP	HP	NP	NP	HP	HP	NP	Hard_Left	Back_slow	No_Rotation
NP	HP	HP	NP	NP	HP	HP	NP	Backwards1	Back_slow	No_Rotation
NP	HP	HP	NP	NP	HP	HP	NP	Backwards2	Back_slow	No_Rotation
NP	P	P	NP	NP	HP	HP	NP	Hard_Right	Back_slow	No_Rotation
NP	P	P	NP	NP	HP	HP	NP	Right	Back_slow	No_Rotation
NP	P	P	NP	NP	HP	HP	NP	Right2	Front_slow	No_Rotation
NP	P	P	NP	NP	HP	HP	NP	Right1	Front_slow	No_Rotation
NP	P	P	NP	NP	HP	HP	NP	Ahead	Front_slow	No_Rotation
NP	P	P	NP	NP	HP	HP	NP	Left1	Front_slow	No_Rotation
NP	P	P	NP	NP	HP	HP	NP	Left2	Front_slow	No_Rotation
NP	P	P	NP	NP	HP	HP	NP	Left	Back_slow	No_Rotation
NP	P	P	NP	NP	HP	HP	NP	Hard_Left	Back_slow	No_Rotation
NP	P	P	NP	NP	HP	HP	NP	Backwards1	Back_slow	No_Rotation
NP	P	P	NP	NP	HP	HP	NP	Backwards2	Back_slow	No_Rotation
NP	HP	HP	NP	NP	P	P	NP	Hard_Right	Back_slow	No_Rotation
NP	HP	HP	NP	NP	P	P	NP	Right	Back_slow	No_Rotation
NP	HP	HP	NP	NP	P	P	NP	Right2	Front_slow	No_Rotation
NP	HP	HP	NP	NP	P	P	NP	Right1	Front_slow	No_Rotation
NP	HP	HP	NP	NP	P	P	NP	Ahead	Front_slow	No_Rotation
NP	HP	HP	NP	NP	P	P	NP	Left1	Front_slow	No_Rotation
NP	HP	HP	NP	NP	P	P	NP	Left2	Front_slow	No_Rotation
NP	HP	HP	NP	NP	P	P	NP	Left	Back_slow	No_Rotation
NP	HP	HP	NP	NP	P	P	NP	Hard_Left	Back_slow	No_Rotation
NP	HP	HP	NP	NP	P	P	NP	Backwards1	Back_slow	No_Rotation

NP	HP	HP	NP	NP	P	P	NP	Backwards2	Back_slow	No_Rotation
NP	P	P	NP	NP	P	P	NP	Hard_Right	Back_slow	No_Rotation
NP	P	P	NP	NP	P	P	NP	Right	Back_slow	No_Rotation
NP	P	P	NP	NP	P	P	NP	Right2	Front_slow	No_Rotation
NP	P	P	NP	NP	P	P	NP	Right1	Front_slow	No_Rotation
NP	P	P	NP	NP	P	P	NP	Ahead	Front_slow	No_Rotation
NP	P	P	NP	NP	P	P	NP	Left1	Front_slow	No_Rotation
NP	P	P	NP	NP	P	P	NP	Left2	Front_slow	No_Rotation
NP	P	P	NP	NP	P	P	NP	Left	Back_slow	No_Rotation
NP	P	P	NP	NP	P	P	NP	Hard_Left	Back_slow	No_Rotation
NP	P	P	NP	NP	P	P	NP	Backwards1	Back_slow	No_Rotation
NP	P	P	NP	NP	P	P	NP	Backwards2	Back_slow	No_Rotation

Πίνακας 4.5: Κανόνες εξαγωγής εντολών κίνησης για πλοήγηση σε διάδρομο

Ο νέος σχεδιασμός του ασαφούς ελεγκτή που υλοποιήθηκε για την επίτευξη της πλοήγησης του οχήματος διαμέσου διαδρόμου δεν είχε επιτυχή αποτελέσματα κατά την εφαρμογή του σε περιβάλλον αποτελούμενο από δυναμικά εμπόδια, συγκρινόμενος με την απόδοση του αρχικού ασαφούς ελεγκτή. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στο γεγονός ότι η εξαγωγή της πιθανότητας σύγκρουσης για κάθε περιοχή βασίζεται στις ενδείξεις ενός ζεύγους αισθητήρων και ενός αισθητήρα. Όπως προαναφέρθηκε έχει υλοποιηθεί αλγόριθμος ο οποίος επιστρέφει την μικρότερη ένδειξη από τις δύο που δίνουν οι σενσορες σε κάθε ζεύγος, καλύπτοντας έτσι την αναξιοπιστία τους. Όμως αυτό δεν συμβαίνει και με τον τρίτο σένσορα που λαμβάνει μέρος στην εξαγωγή της πιθανότητας σύγκρουσης για κάθε περιοχή. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας δεν βρίσκεται σε ζεύγος, επομένως η πιθανή αναξιοπιστία της ένδειξης του έχει επιπτώσεις στην πλοήγηση του οχήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Προγραμματισμός του Ασαφούς Ελεγκτή και Εφαρμογή σε Πραγματικό Χρόνο στα Οχήματα ATRV-Mini

5.1 Γενικά

Ο προγραμματισμός του ασαφούς ελεγκτή υλοποιήθηκε στη γλώσσα C ενώ η εφαρμογή του έγινε στα οχήματα ATRV-MINI του εργαστηρίου Ευφών Τεχνολογικών Συστημάτων και Ρομποτικής. Κατά την ολοκλήρωση του συστήματος αντιμετωπίστηκαν προβλήματα σχετικά με την αναξιοπιστία του λογισμικού καθώς και του λειτουργικού συστήματος των συγκεκριμένων οχημάτων. Συγκεκριμένα:

- *Αναξιοπιστία αισθητηρίων.* Κατά την εκτέλεση του προγράμματος οι ενδείξεις άλλες φορές ήταν σωστές και άλλες φορές λανθασμένες. Το συγκεκριμένο πρόβλημα αντιμετωπίστηκε όπως έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 5.
- *Αναξιοπιστία οδομέτρου.* Το οδόμετρο στην πρώτη εκτέλεση του προγράμματος δίνει σωστές ενδείξεις, αλλά σε περίπτωση επανάληψης δίνει λανθασμένες ενδείξεις. Το όχημα για διαδοχικές εκτελέσεις των προγραμμάτων δεν κατάφερε να κρατήσει την σωστή θέση του, στο σύστημα των συντεταγμένων του. Αυτό είχε σαν συνέπεια σε περίπτωση που ήταν επιθυμητό να εκτελεστεί δεύτερο συνεχόμενο πείραμα, πριν από κάθε εκτέλεση του προγράμματος να γίνεται αρχικοποίηση του συστήματος συντεταγμένων εξωτερικά.
- *Λογισμικό κατασκευάστριας εταιρείας.* Πολλά από τα έτοιμα προγράμματα που προμηθεύτηκε το εργαστήριο από την κατασκευάστρια εταιρία δεν δούλευαν. Κάποια από τα προβλήματα λύθηκαν σε διπλωματικές εργασίες οι οποίες εκπονήθηκαν στο εργαστήριο [15].

5.2 Δομή του Κώδικα

Τα κύρια τμήματα του κώδικα είναι:

- *Αρχικοποίηση.* Το όχημα θέτει ως κέντρο του χώρου το κέντρο του οχήματος και κατά την εκτέλεση του προγράμματος αυτό το σημείο λαμβάνεται ως κέντρο καθώς και ως σημείο αναφοράς για τον υπολογισμό των διαφόρων σημείων.

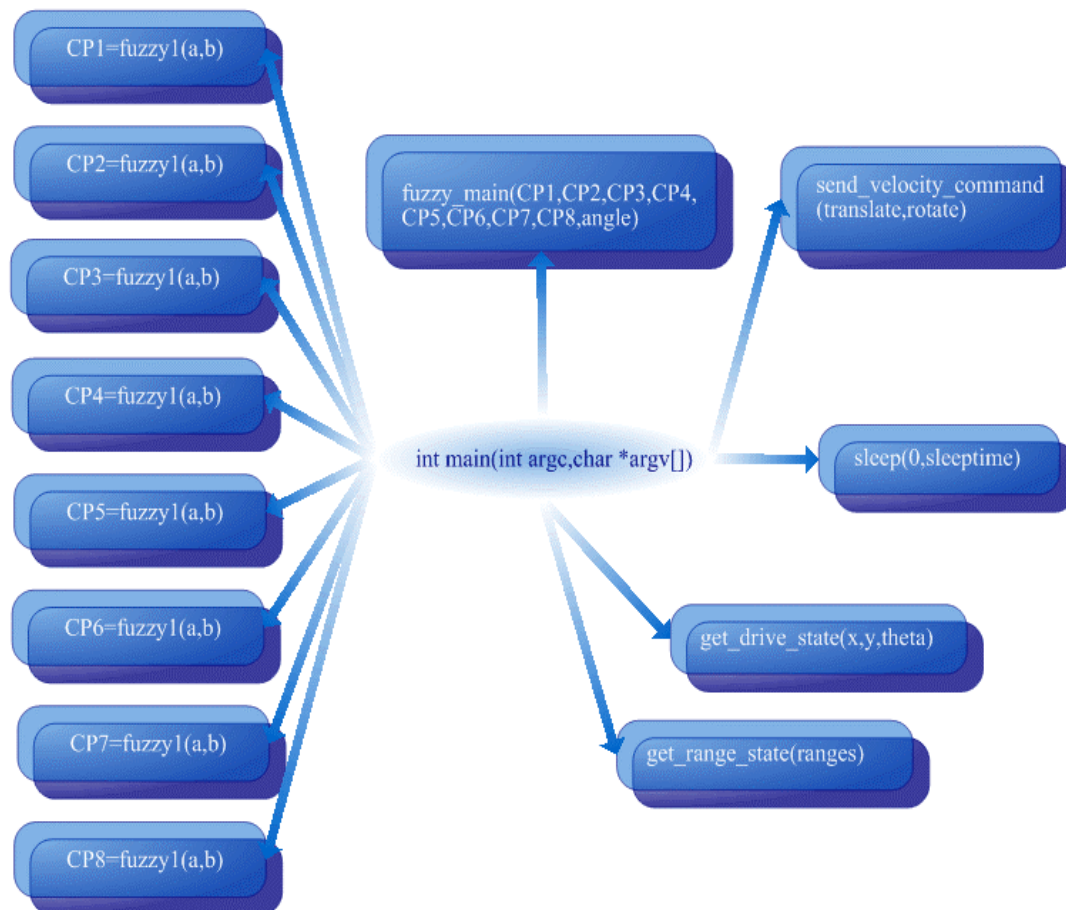
- *Τερματική συνθήκη.* Ο έλεγχος για τερματισμό του προγράμματος γίνεται με την ακόλουθη συνθήκη: Το όχημα πρέπει να βρίσκεται σε σημείο εντός κύκλου διαμέτρου 30 cm από τον στόχο που καλείται να προσεγγίσει. Δεδομένων των διαστάσεων του οχήματος θεωρείται ότι το όχημα έχει προσεγγίσει ικανοποιητικά τον στόχο εφ'όσον βρίσκεται εντός του κύκλου των 30 cm.
- *Ανίχνευση αισθητήρων.* Πριν την κίνηση του οχήματος ο χώρος ανιχνεύεται με την βοήθεια των αισθητήρων. Οι ενδείξεις τους εισάγονται στον ασαφή ελεγκτή και προκύπτει η απόφαση κίνησης του οχήματος. Εάν το όχημα έχει πετύχει τον στόχο του, τερματίζεται η λειτουργία του προγράμματος. Το λογικό διάγραμμα του βασικού προγράμματος φαίνεται στο σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Δομικό διάγραμμα προγράμματος πλοήγησης οχήματος ATRV-Mini

5.2.1 Περιγραφή του Κώδικα

Για την υλοποίηση του κώδικα έγινε χρήση έτοιμων συναρτήσεων τις οποίες είχε το όχημα καθώς και συναρτήσεων σχεδιασμένων στο εργαστήριο. Η σχέση μεταξύ των συναρτήσεων και του κεντρικού προγράμματος φαίνεται στο παρακάτω δομικό διάγραμμα ενώ ακολουθεί η περιγραφή της λειτουργίας τους.



Σχήμα 5.2. Ρουτίνες και κεντρικό πρόγραμμα

Πρώτα γίνονται οι απαραίτητες αρχικοποιήσεις στο όχημα και δηλώνονται οι παράμετροι που απαιτούνται ώστε να προσδιοριστεί το όχημα από τις οι συναρτήσεις του mobility (λογισμικό του ATRV-Mini με έτοιμες συναρτήσεις). Για τον σκοπό αυτό καλείται η συνάρτηση *int main(int argc, char *argv[])*. Επίσης, καλείται η *get_drive_state(x,y,theta)*, η ρουτίνα που επιστρέφει την θέση του οχήματος καθώς και τον προσανατολισμό του.

Στην συνέχεια ο χρήστης έχει την επιλογή να κινήσει το όχημα (καθορίζοντας την μεταφορική ταχύτητα, την περιστροφική ταχύτητα και τον χρόνο κίνησης) ή να προσδιορίσει τον επιθυμητό στόχο στον οποίο θα κατευθυνθεί το όχημα (με χρήση του ασαφούς ελεγκτή και αποφυγή εμποδίων):

- ✓ Για την πρώτη επιλογή, καλείται η συνάρτηση *send_velocity_command(translate,rotate)* για να δώσει τιμές στις παραμέτρους της μεταφορικής, περιστροφικής ταχύτητας καθώς και η ρουτίνα *sleep(0,sleeptime)* η οποία καθορίζει τον χρόνο δειγματοληψίας.
- ✓ Για την δεύτερη επιλογή, ενεργοποιείται μια ανακύκλωση στην οποία αρχικά καλείται η ρουτίνα *get_drive_state(x,y,theta)*, με την βοήθεια της οποίας και των συντεταγμένων του στόχου βρίσκεται στην συνέχεια η απόσταση του οχήματος από τον στόχο.

Οι ενδείξεις των αισθητήρων επιστρέφονται από την συνάρτηση *get_range_state(ranges)*, τα αποτελέσματα τις οποίας αποθηκεύονται στο διάνυσμα *dist_v[i]* μεγέθους ίσο με τον αριθμό των αισθητήρων. Σε κάθε ανακύκλωση αποθηκεύεται η απόσταση πιθανού εμποδίου από τον αισθητήρα *i*. Επίσης, υπολογίζεται το σφάλμα κατεύθυνσης το οποίο αποτελεί και είσοδο στο δεύτερο επίπεδο του ασαφούς ελεγκτή. .

Στην συνέχεια εξάγεται η πιθανότητα σύγκρουσης του οχήματος με εμπόδιο για κάθε μία από τις οκτώ κατευθύνσεις, με την συνάρτηση *fuzzy1*. Τα ορίσματα της είναι οι ενδείξεις των αισθητήρων επομένως εξαρτώνται από την περιοχή στην οποία γίνεται αναφορά. Για παράδειγμα για την περιοχή 1 η συνάρτηση γίνεται είναι , *cp1 = fuzzy1 (min(dist_v[22],dist_v[23]),min(dist_v[21],dist_v[20]))*. Τα *dist_v[i]* είναι οι αποστάσεις του εμποδίου οι οποίες αντιστοιχούν σε κάθε αισθητήρα. Η εντολή *min* βρίσκει την ελάχιστη απόσταση από το αντίστοιχο ζεύγος αισθητήρων. Όμοια καλούνται και οι συναρτήσεις για τις υπόλοιπες επτά περιοχές.

Τέλος, καλείται η βασική συνάρτηση του ασαφούς ελεγκτή και η οποία βρίσκεται στο δεύτερο επίπεδο. Είναι η πλέον σημαντική καθώς οι τιμές που επιστρέφει (μεταφορική και μια περιστροφική ταχύτητα) καθορίζουν τόσο την πλοήγηση όσο και την αποφυγή εμποδίων. Η μορφή της συνάρτησης είναι *fuzzy_main(cp1,cp2,cp3,cp4,cp5,cp6,cp7,cp8,angle)*. Στην συνέχεια η συνάρτηση *send_velocity_command(s[0],s[1])* παίρνει ως εισόδους τις ταχύτητες και δίνει εντολή κίνησης στο όχημα. Ελέγχεται η συνθήκη τερματισμού η οποία περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, δηλαδή αν το όχημα έφτασε μέσα στην περίμετρο ενός κύκλου ο οποίος έχει σαν κέντρο το στόχο και ακτίνα ίση με 30 cm. Σε περίπτωση που ισχύουν οι προϋπόθεσης της συνθήκης ο αλγόριθμος δίνει την εντολή *send_velocity_command(0,0)* οπότε και γίνεται η ακινητοποίηση του οχήματος

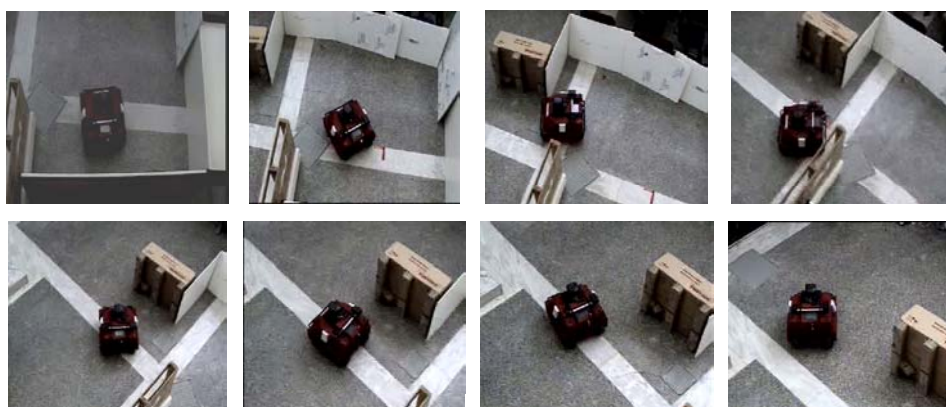
5.3 Πειραματικά Αποτελέσματα

Εκτελέστηκαν μία σειρά από πειράματα μετά την εφαρμογή του ασαφούς ελεγκτή στο όχημα ATV-Mini προκειμένου να δειχτούν οι δυνατότητες και αποτελεσματικότητά του αλγορίθμου. Αναπτύχθηκαν διαφορετικά σενάρια, σε κάθε ένα από τα οποία είχε διαμορφωθεί ένα περιβάλλον αποτελούμενο από στατικά ή και δυναμικά εμπόδια, το οποίο το ρομπότ καλούνταν να διασχίσει για να φτάσει το στόχο. Στην συνέχεια παρουσιάζονται με διαγράμματα τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών.

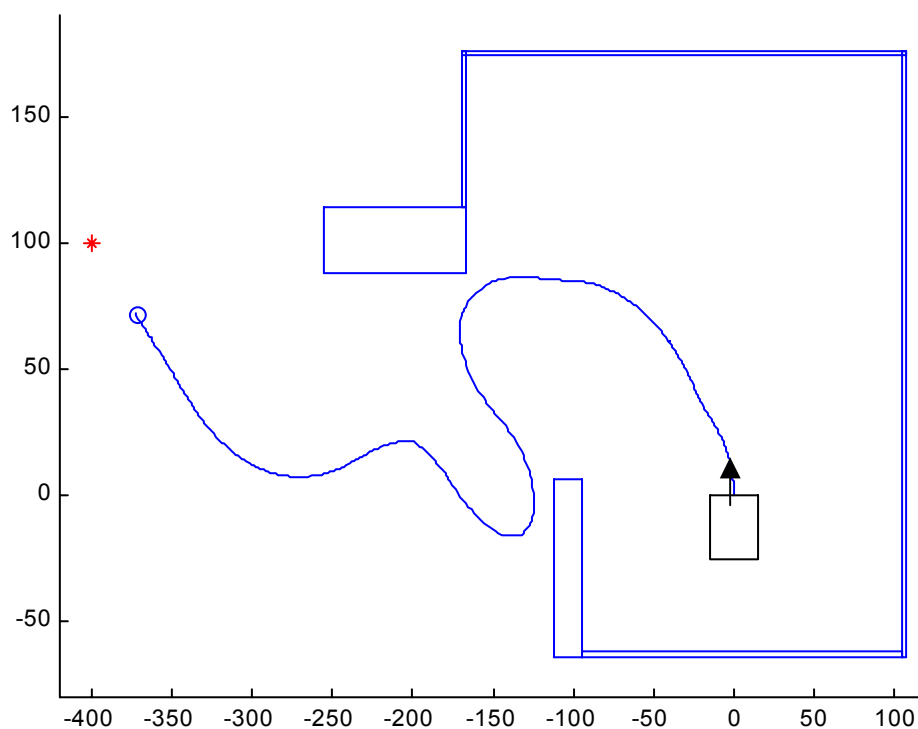
Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η αρχική θέση, ο αρχικός προσανατολισμός του, η τελική θέση, ο στόχος που του δόθηκε καθώς και η πορεία που ακολούθησε. Σε γραφήματα φαίνονται πως εξελισσόταν η περιστροφική και η μεταφορική ταχύτητα καθώς και οι δυνατότητες σύγκρουσης σε κάθε μία από τις οκτώ περιοχές. Οι διαστάσεις του χώρου είναι σε μέτρα (m) και ο χρόνος δειγματοληψίας σε msec (πρακτικά θεωρείται συνεχής). Με τον όρο βήματα, ορίζονται τα βήματα εκτέλεσης του προγράμματος, σε κάθε βήμα ο ελεγκτής παίρνει ενδείξεις από το περιβάλλον και δίνει εντολές κίνησης.

5.3.1 Σενάριο 1

Στο πρώτο σενάριο το οποίο εξετάζεται παρουσιάζεται ένας περιορισμένος χώρος στον οποίο έχει τοποθετηθεί το όχημα και στον οποίο υπάρχει μία μόνο διέξοδος. Στόχος του οχήματος είναι ένα σημείο που βρίσκεται έξω από αυτόν τον χώρο. Η πορεία του οχήματος παρουσιάζεται στο σχήμα 5.3. Με το έντονο σημάδι παριστάνεται ο στόχος και με κύκλο το σημείο το οποίο τελικά σταμάτησε το όχημα (κέντρο του οχήματος). Το βέλος δείχνει τον αρχικό προσανατολισμό του οχήματος.

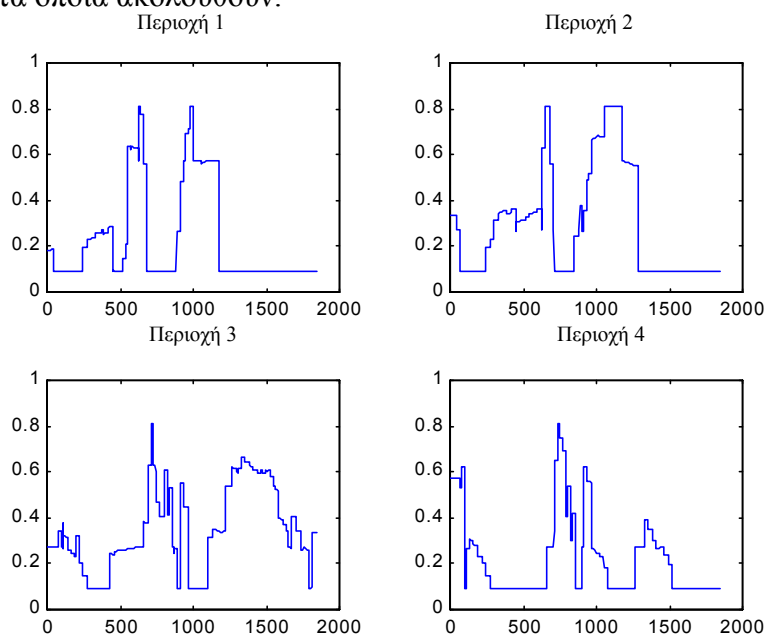


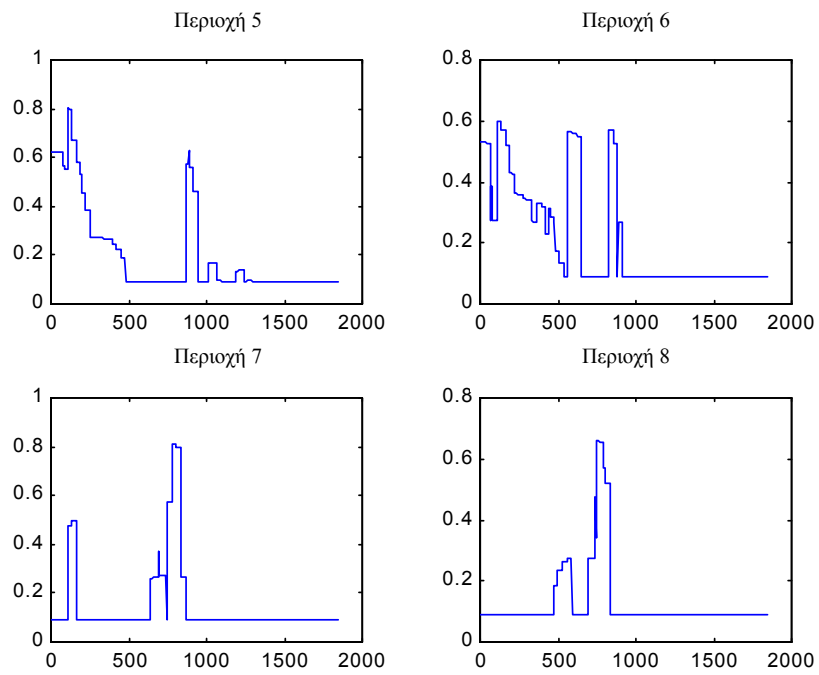
Σχήμα 5.3 Η πορεία του οχήματος (Σενάριο 1)



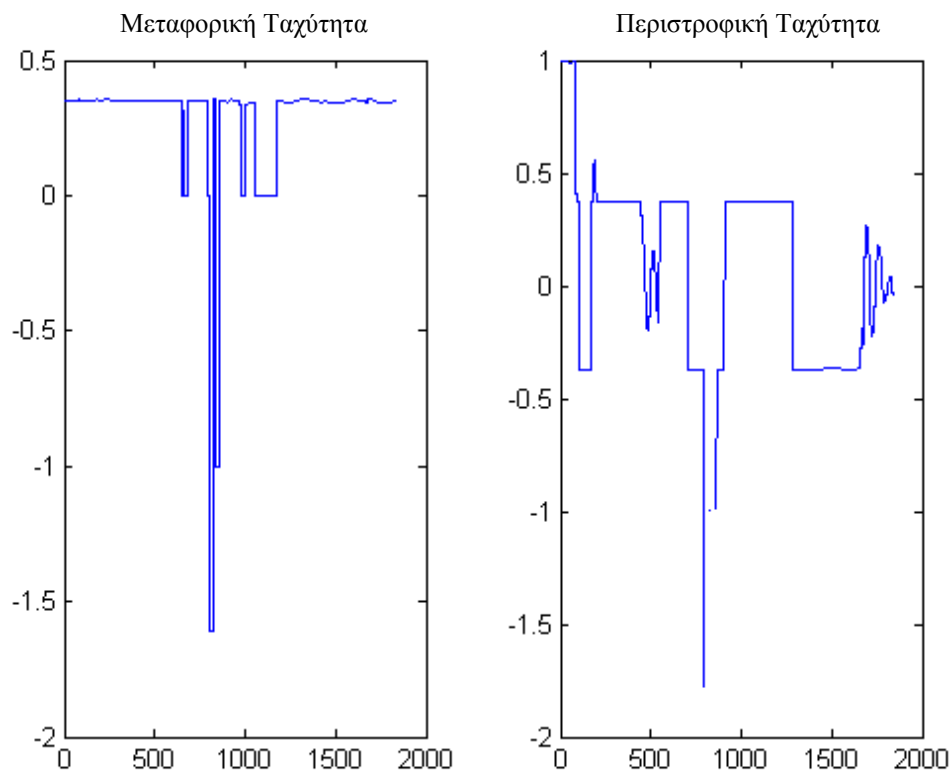
Σχήμα 5.4 Σενάριο 1

Η συμπεριφορά του οχήματος καθορίστηκε από τον περιβάλλοντα χώρο. Με βάση αυτόν ο ασαφής ελεγκτής υπολόγισε τις δυνατότητες σύγκρουσης και με βάση αυτές εξάχθηκαν η μεταφορική και η περιστροφική ταχύτητα του οχήματος. Οι δυνατότητες σύγκρουσης καθώς και οι εξαγόμενες ταχύτητες παρουσιάζονται στα διαγράμματα τα οποία ακολουθούν.





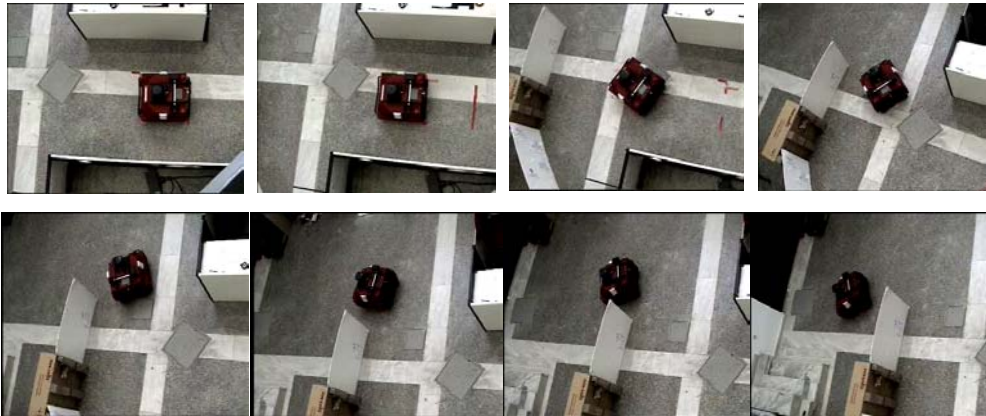
Σχήμα 5.5 Δυνατότητες σύγκρουσης για κάθε μία από τις οκτώ περιοχές (Σενάριο 1)



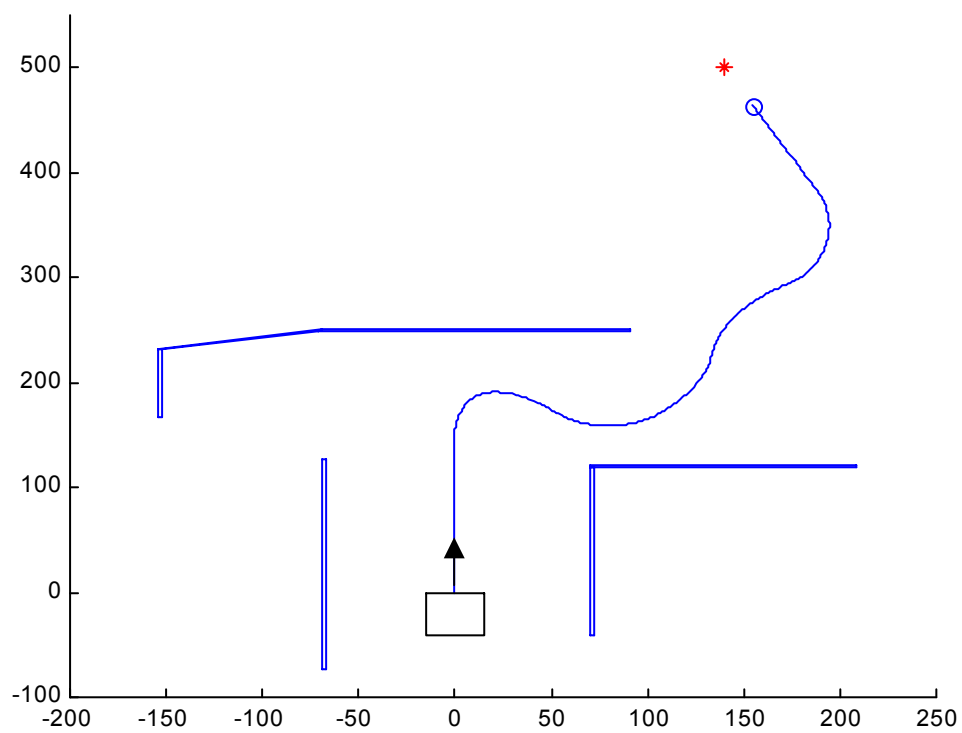
Σχήμα 5.6 Μεταφορική και περιστροφική ταχύτητα (Σενάριο 1)

5.3.2 Σενάριο 2

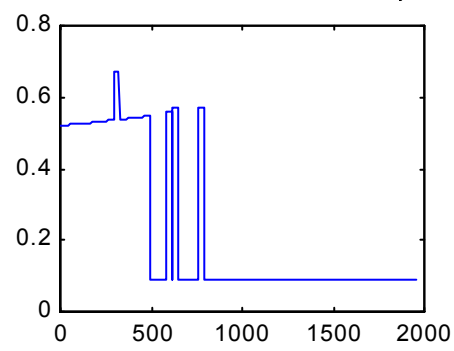
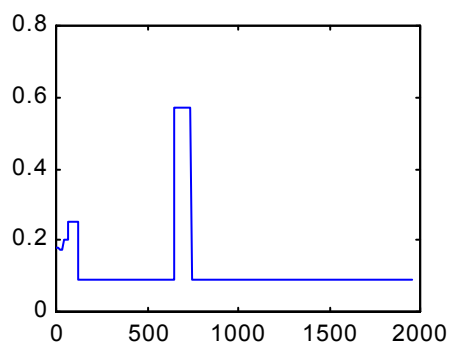
Στο δεύτερο σενάριο το όχημα αρχικά βρίσκεται σε ένα διάδρομο στο τέλος του οποίου υπάρχει ένα εμπόδιο σε σχήμα καμπύλης και το οποίο φράσσει το δρόμο προς την μπροστινή διεύθυνση αλλά και ένα ακόμα που εμποδίζει το όχημα να στρίψει προς τα δεξιά (πάλι κατά την έξοδο από τον διάδρομο). Ο στόχος του οχήματος βρίσκεται πίσω από το εμπόδιο που φράσσει τον δρόμο μπροστά από τον διάδρομο. Όπως φαίνεται και από την πορεία του οχήματος, αφού διασχίσει το διάδρομο, εκτελεί κατάλληλη περιστροφή ώστε να αποφύγει τα μπροστινά και τα εμπόδια στα δεξιά του, ενώ στην συνέχεια κατευθύνεται προς τον στόχο πίσω από τα εμπόδια. Η μορφή του χώρου κίνησης, καθώς και η πορεία του οχήματος φαίνονται στα σχήματα 5.7 και 5.8. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα γραφήματα που δείχνουν τις μεταβολές των δυνατοτήτων σύγκρουσης καθώς και των ταχυτήτων.



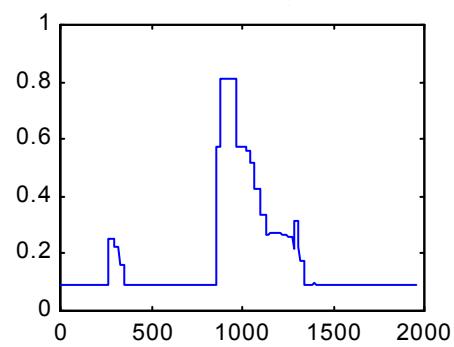
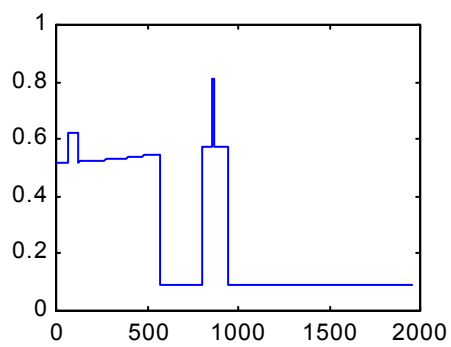
Σχήμα 5.7 Η πορεία του οχήματος (Σενάριο 2)

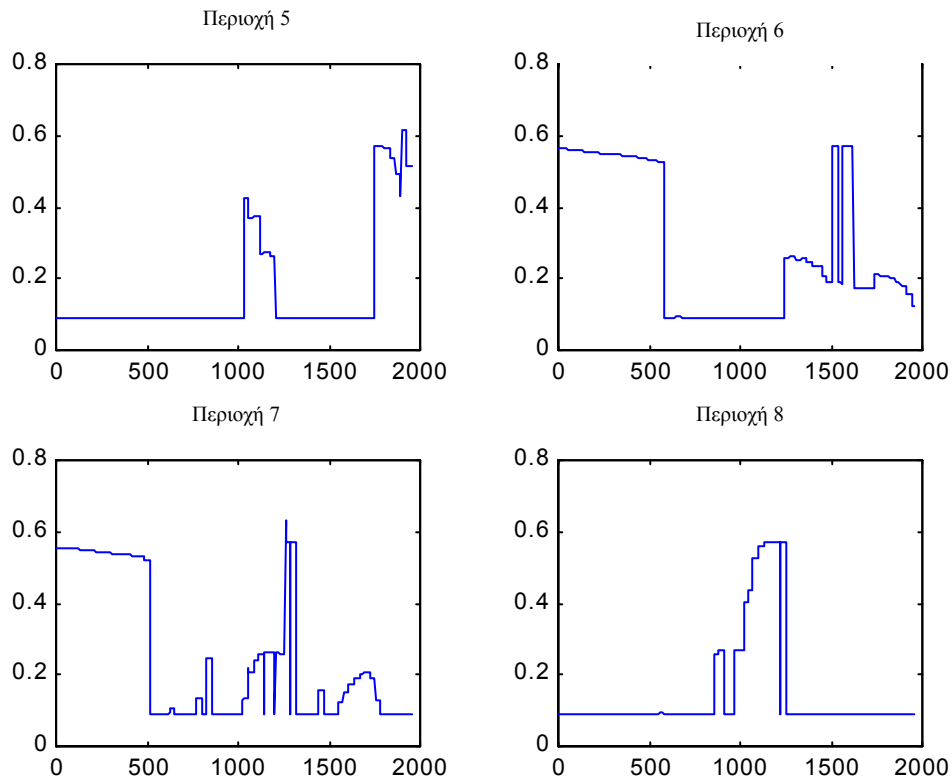


Σχήμα 5.8 Σενάριο 2

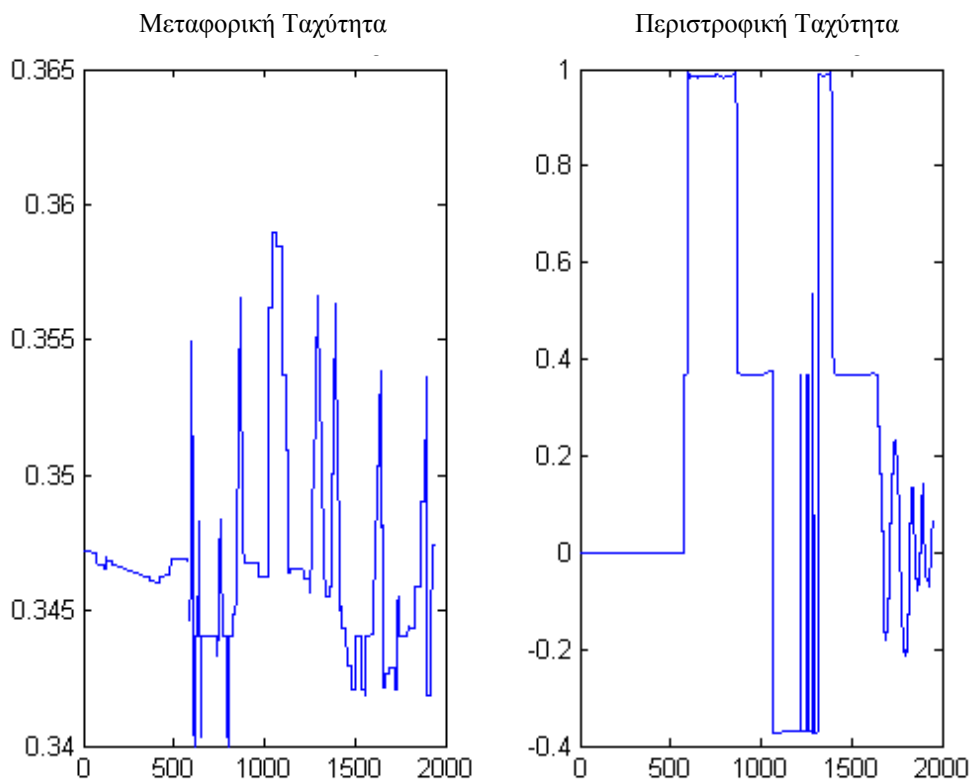


Περιοχή 4





Σχήμα 5.9 Δυνατότητες σύγκρουσης για κάθε μία από τις οκτώ περιοχές (Σενάριο 2)

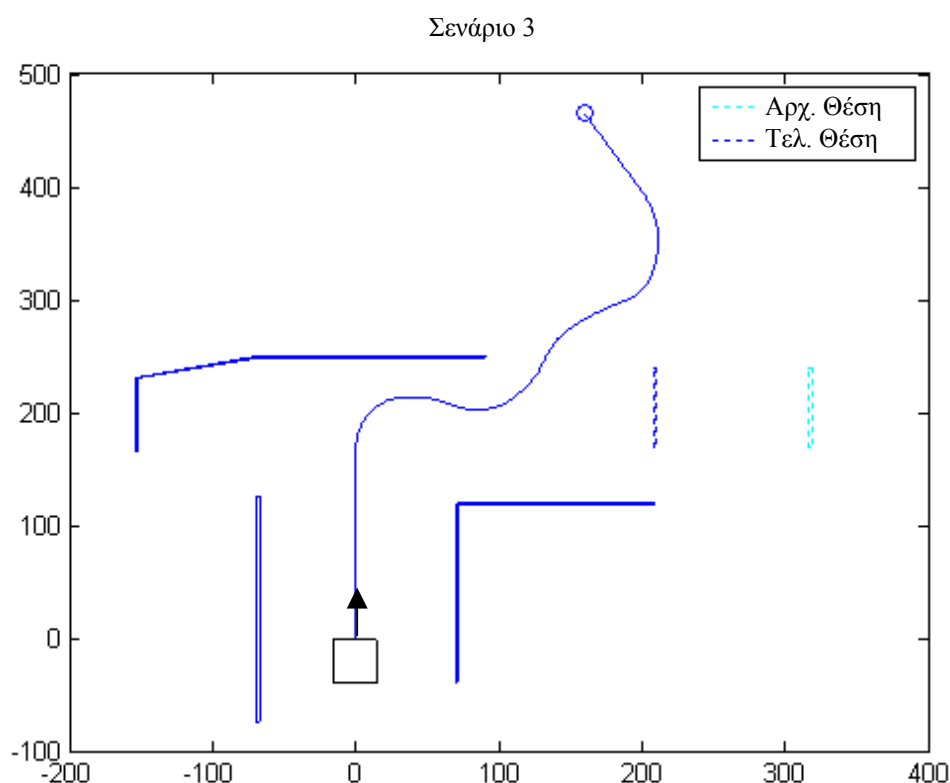


Σχήμα 5.10 Μεταφορική και περιστροφική ταχύτητα (Σενάριο 2)

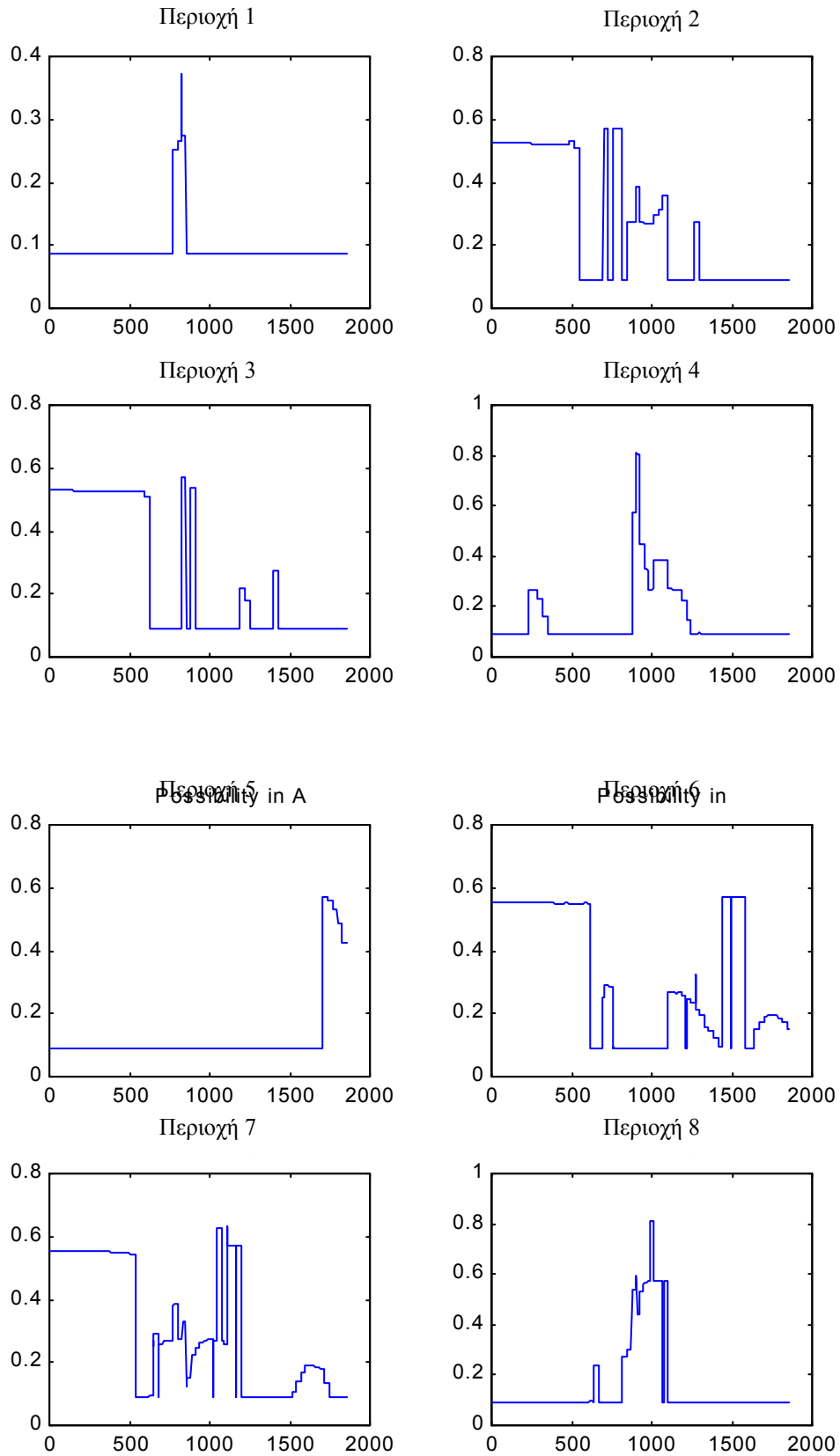
5.3.3 Σενάριο 3

Στο τρίτο σενάριο το όχημα αρχικά βρίσκεται στο ίδιο περιβάλλον όπως και στο δεύτερο σενάριο και έχει τον ίδιο στόχο. Καθώς έχει διασχίσει τον διάδρομο και περιστρέφεται για να αποφύγει το τελευταίο εμπόδιο και να κατευθυνθεί προς τον στόχο, ένα δυναμικό εμπόδιο φράσσει τον δρόμο μπροστά του οπότε είναι αναγκάζεται να διαμορφώσει ανάλογα την πορεία του προκειμένου να αποφύγει τα εμπόδια αλλά και περάσει από το άνοιγμα που έχει απομείνει για να προσεγγίσει τον στόχο του. Το περιβάλλον κίνησης, καθώς και η πορεία του οχήματος φαίνονται στο σχήμα 5.9. Το δυναμικό εμπόδιο έχει σχεδιαστεί με διακεκομμένη γραμμή, η αρχική θέση του με γαλάζιο χρώμα και η τελική με μπλε. Τα γραφήματα που δείχνουν τις μεταβολές των δυνατοτήτων σύγκρουσης καθώς και των ταχυτήτων φαίνονται στα σχήματα σχήμα 5.10 και 5.11 αντίστοιχα.

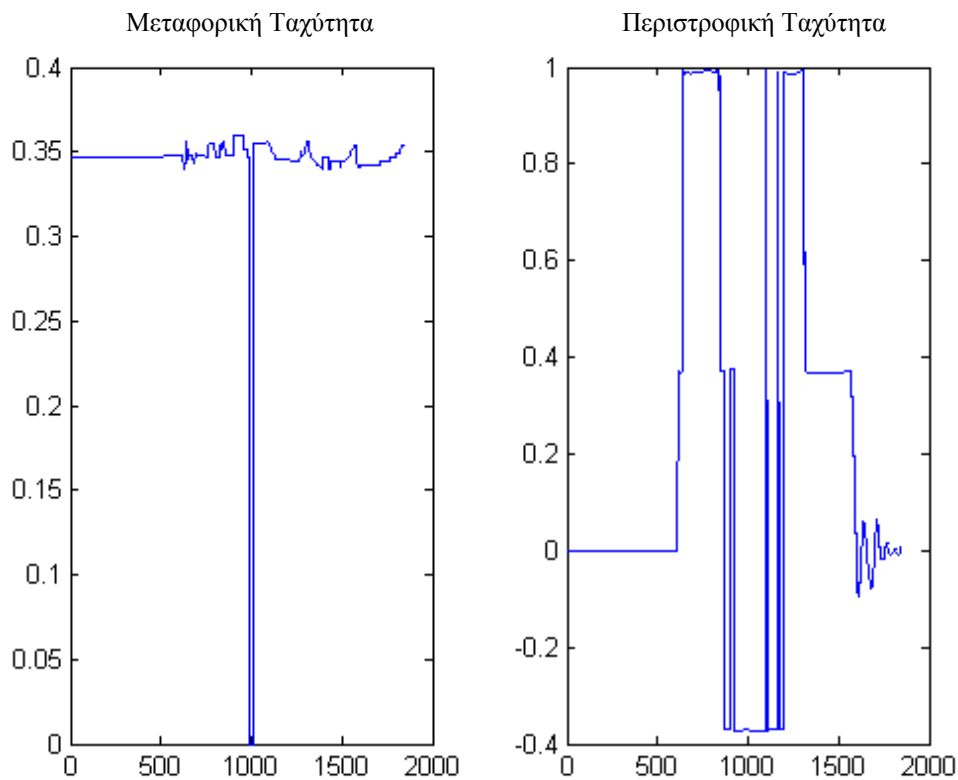
Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα γραφήματα (περιβάλλον κίνησης, δυνατότητες σύγκρουσης, μεταφορική και περιστροφική ταχύτητα) για τα σενάρια 2 και 3 μαζί, ώστε να γίνουν συγκρίσεις των αποτελεσμάτων μετά την είσοδο του δυναμικού εμποδίου.



Σχήμα 5.11 Σενάριο 3



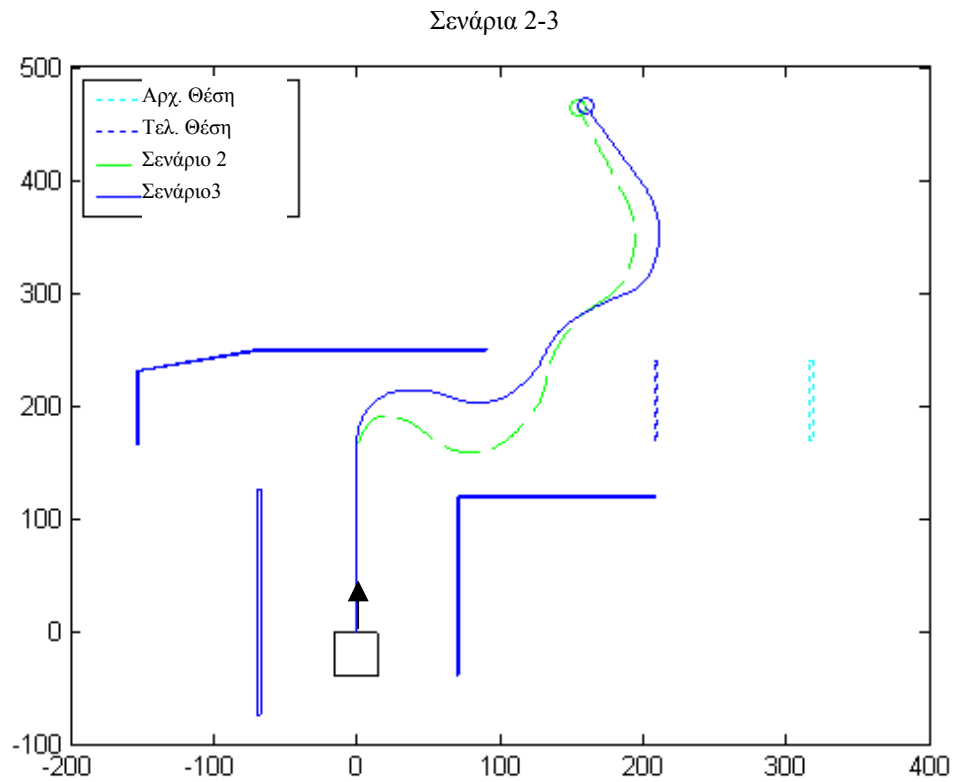
Σχήμα 5.12 Δυνατότητες σύγκρουσης για κάθε μία από τις οκτώ περιοχές (Σενάριο 3)



Σχήμα 5.13 Μεταφορική και περιστροφική ταχύτητα (Σενάριο 3)

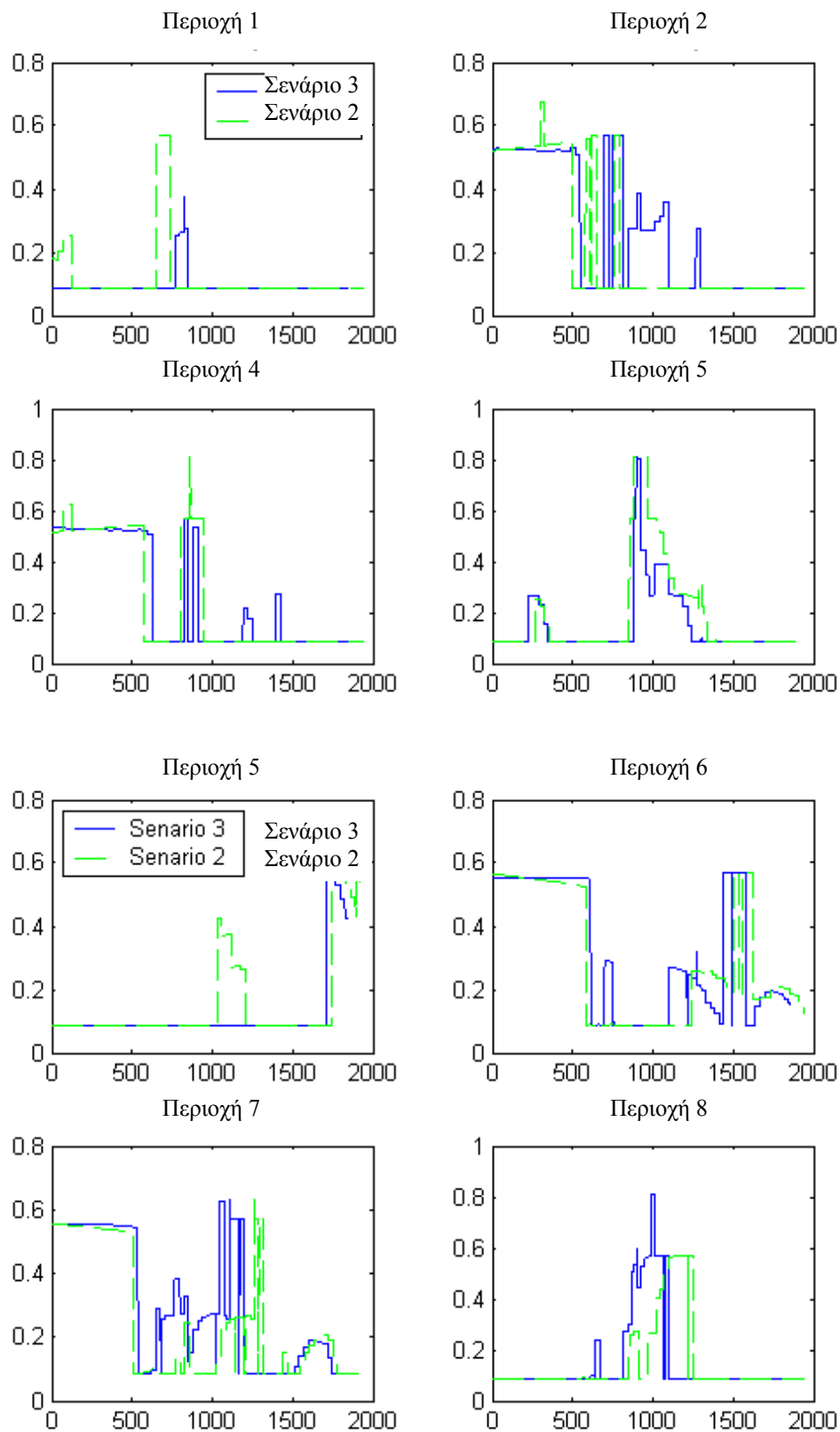
5.3.4 Σύγκριση των Σεναρίων 2 και 3

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται και οι δύο τροχιές που ακολούθησε το όχημα. Με μπλε χρώμα παριστάνεται η τροχιά του σεναρίου 3 και με πράσινη διακεκομμένη γραμμή η τροχιά του σεναρίου 2. Ο στόχος και το δυναμικό εμπόδιο παριστάνονται όπως και πριν με κόκκινο και μπλε χρώμα αντίστοιχα. Παρατηρώντας το γράφημα φαίνεται με την εισαγωγή του δυναμικού εμποδίου πώς το όχημα αλλάζει πορεία του, για να περάσει τελικά από το άνοιγμα που σχηματίζεται ανάμεσα στο δυναμικό και στο στατικό εμπόδιο προκειμένου να προσεγγίσει τον στόχο.

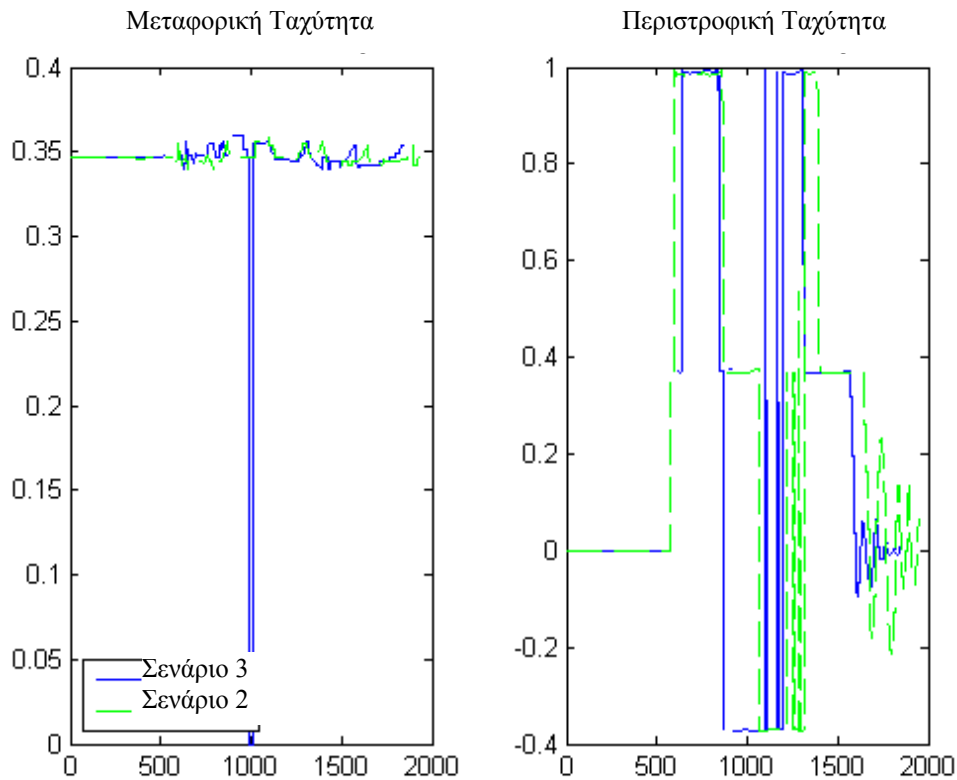


Σχήμα 5.14 Σενάρια 2 και 3

Στα γραφήματα που ακολουθούν για τις ταχύτητες και τις πιθανότητες σύγκρουσης σε κάθε κατεύθυνση, με πράσινο χρώμα παριστάνονται πάντα τα αποτελέσματα του σεναρίου 2 και με μπλε του σεναρίου 3.



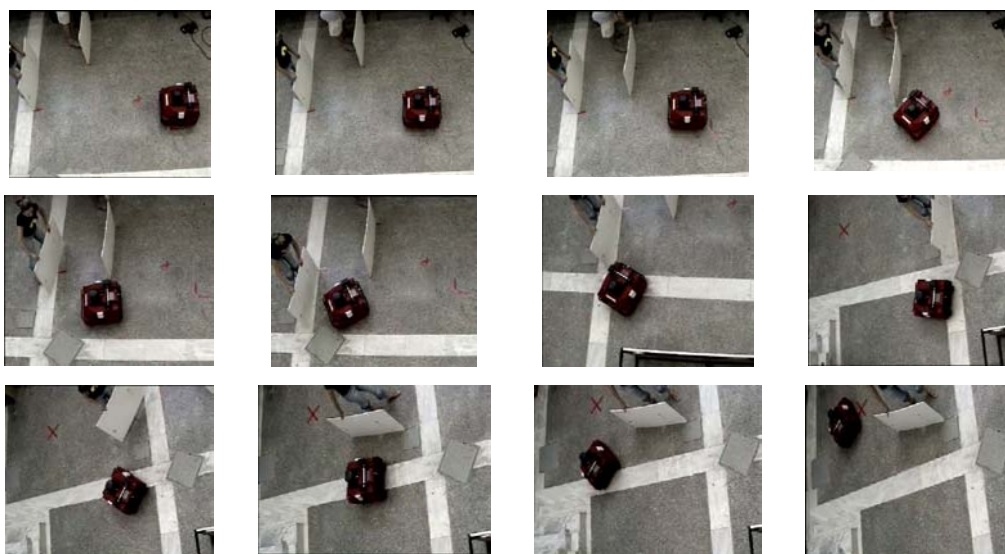
Σχήμα 5.15 Δυνατότητες σύγκρουσης για κάθε μία από τις οκτώ περιοχές (Σενάρια 2 και 3)



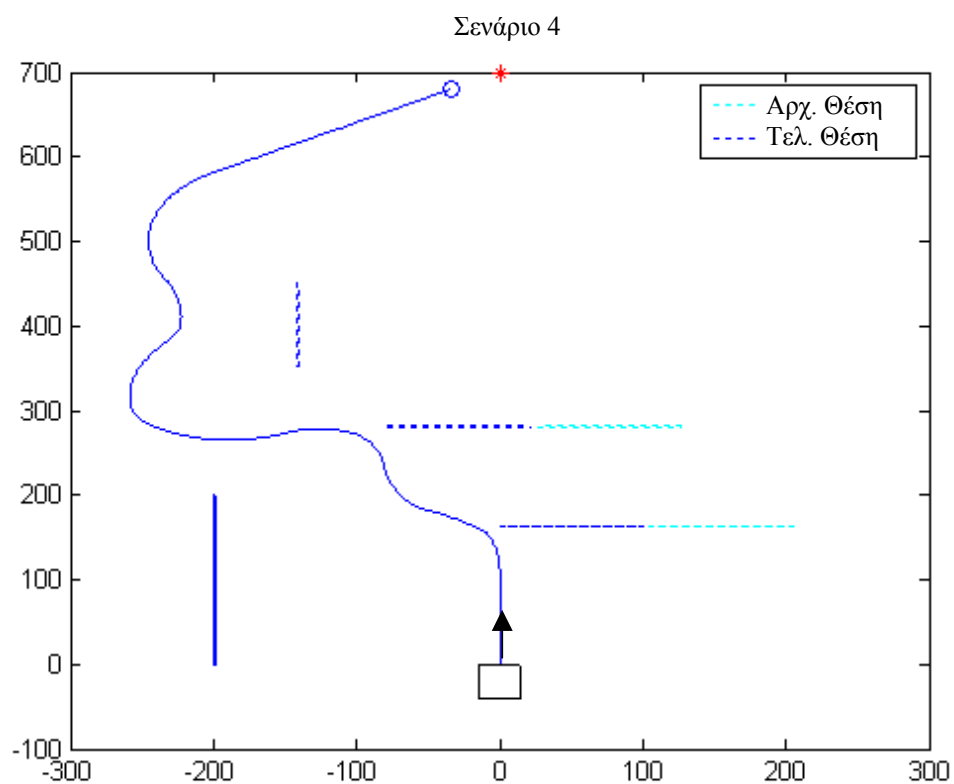
Σχήμα 5.16 Μεταφορική και περιστροφική ταχύτητα (Σενάρια 2 και 3)

5.3.5 Σενάριο 4

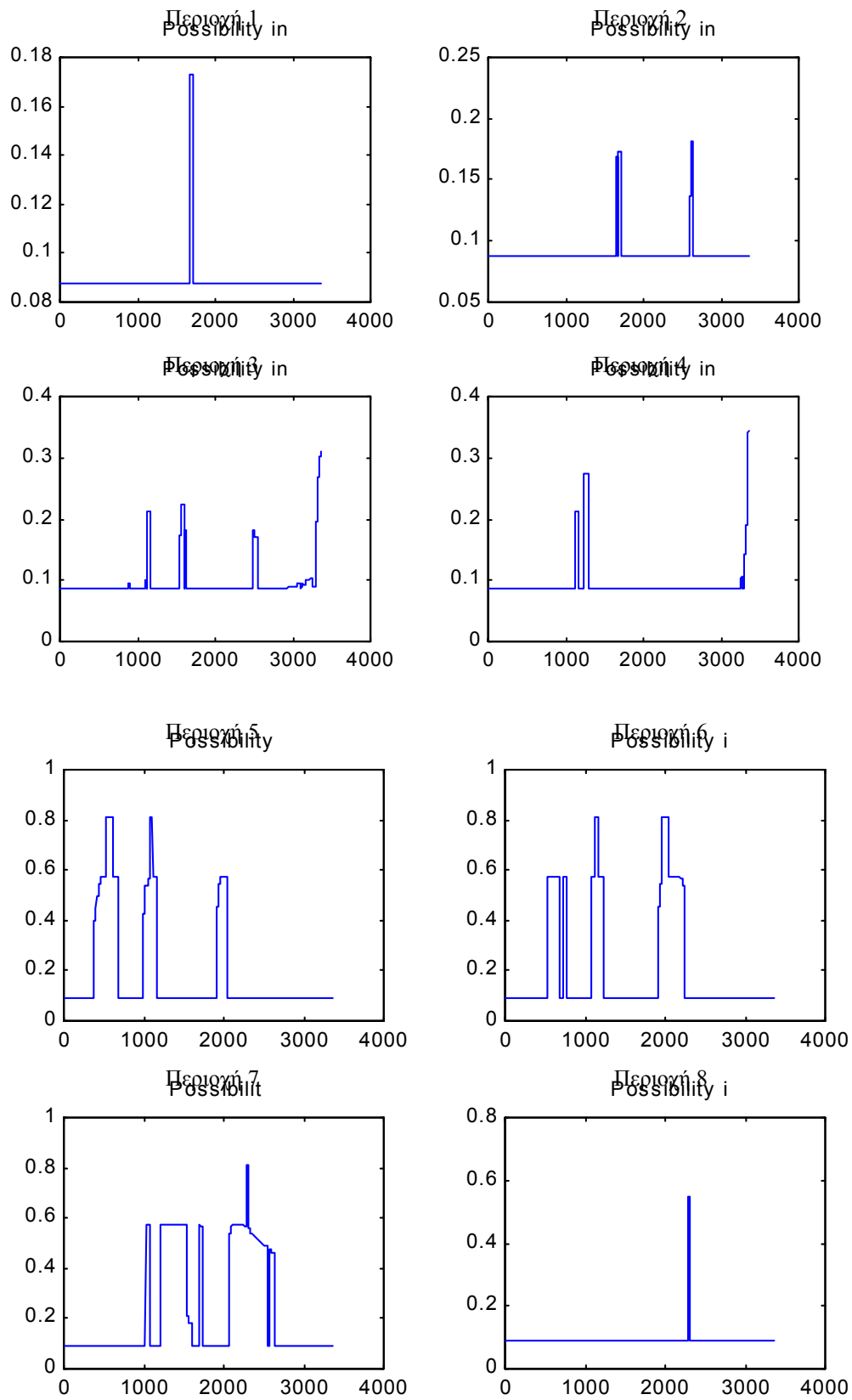
Σε αυτό το σενάριο, το όχημα έχει τοποθετηθεί σε ένα περιβάλλον όπου υπάρχει μόνο ένα στατικό εμπόδιο, στα αριστερά του οχήματος. Εμφανίζεται ένα δυναμικό εμπόδιο φράσσοντας την πορεία του οχήματος προς τον στόχο ο οποίος βρίσκεται 7 μέτρα μπροστά από την αρχική του θέση (παριστάνεται με κόκκινο χρώμα). Τα δυναμικά εμπόδια σχεδιάζονται με διακεκομμένες γραμμές, η αρχική θέση τους είναι με γαλάζιο και η τελική με κόκκινο χρώμα. Φαίνεται χαρακτηριστικά η πορεία του οχήματος καθώς προσπαθεί να αποφύγει τα τρία εμπόδια αλλά και να προσεγγίσει τον στόχο.



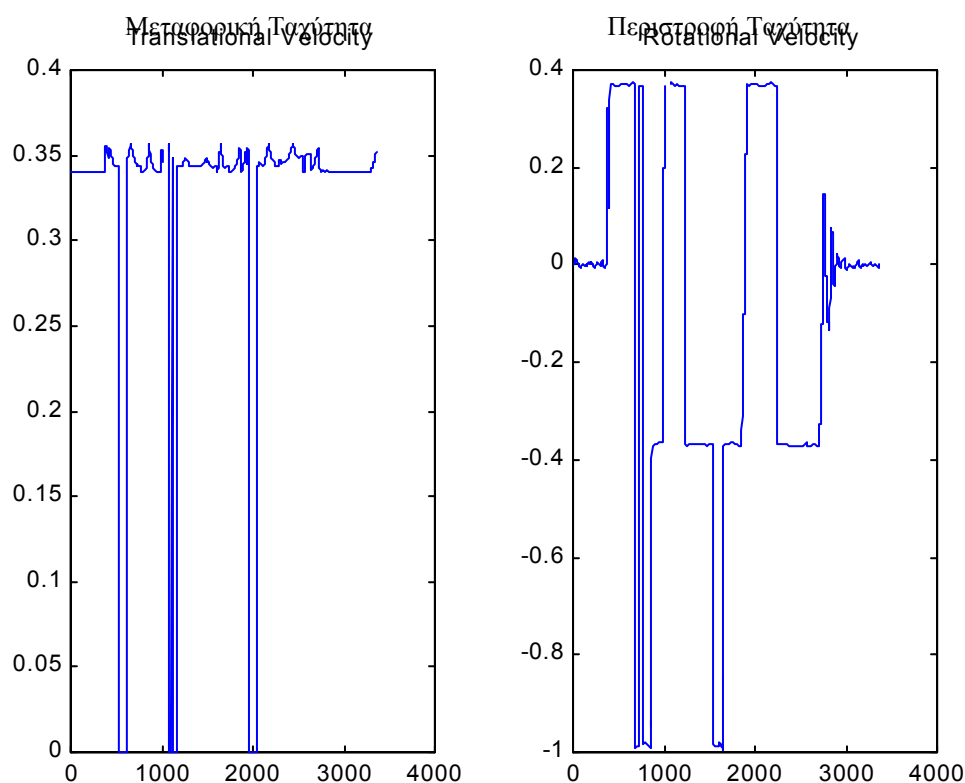
Σχήμα 5.17 Η πορεία του οχήματος (Σενάριο 4)



Σχήμα 5.18 Σενάριο 4



Σχήμα 5.19 Δυνατότητες σύγκρουσης για κάθε μία από τις οκτώ περιοχές (Σενάριο 4)



Σχήμα 5.20 Μεταφορική και περιστροφική ταχύτητα (Σενάριο 4)

5.4 Συμπεράσματα

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη αλγορίθμων ελέγχου πραγματικού χρόνου βάσει μετρήσεων από αισθητήρες και η εφαρμογή τους για την πλοήγηση επίγειων αυτόνομων οχημάτων. Η μέθοδος επίλυσης του προβλήματος βασίστηκε στην ανάπτυξη ασαφούς ελεγκτή δύο επιπέδων. Διαφοροποιήθηκε και πρωτοτύπησε ως προς τον τρόπο σχεδίασης του ελεγκτή (ο χώρος γύρω από το όχημα διαιρείται σε 8 ίσους κυκλικούς τομείς), την αύξηση των συναρτήσεων συμμετοχής της μεταβλητής εισόδου *angle error* στο δεύτερο επίπεδο του ασαφούς ελεγκτή καθώς και την αύξηση του αριθμού των κανόνων στην βάση κανόνων.

Τα οχήματα στα οποία έγινε εφαρμογή ανήκουν στην κατηγορία των οχημάτων που στρίβουν με ολίσθηση των τροχών. Σημειώνεται ότι δεν έχει γίνει εκτεταμένη έρευνα για τον συγκεκριμένο τύπο οχήματος στο παρελθόν.

Κατά την εφαρμογή αντιμετωπίστηκαν προβλήματα όπως η αναξιοπιστία του οδομέτρου (λόγω ολίσθησης των τροχών σε λείο έδαφος) και των αισθητήρων. Επηρεάστηκε η σωστή λειτουργία του ελεγκτή πλοήγησης του οχήματος.

Προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά του οχήματος και το σφάλμα που παρατηρείται στην κίνηση κάτω από τις ίδιες συνθήκες, έγιναν πειράματα και βρέθηκε το σφάλμα αυτό σημαντικό. Παρά τα προβλήματα η κίνηση του οχήματος είναι σύμφωνη με τις ενδείξεις των αισθητήρων, και το όχημα κατόρθωνε να επιτυγχάνει τον στόχο του, πάντα με κάποια ανεκτή απόκλιση. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων στο μέλλον προτείνεται η τροφοδοσία του ελεγκτή με πληροφορία προερχόμενη και από άλλους αισθητήρες όπως είναι η κάμερα ή και για την περίπτωση του ανοικτού χώρου, από GPS.

Το όχημα κατόρθωσε να κινηθεί με επιτυχία τόσο σε χώρο αποτελούμενο από στατικά εμπόδια, αλλά και δυναμικά εμπόδια. Μετά από ανάλυση των αποτελεσμάτων αποδεικνύεται ότι το όχημα είναι περισσότερο ευέλικτο, καθώς επιτυγχάνεται πλοήγηση σε πιο πολύπλοκα περιβάλλοντα, καθώς και πιο αντιδραστικό σε περιβάλλοντα με δυναμικά εμπόδια. Η αναβάθμιση του ελεγκτή έδειξε ότι ο σχεδιασμός της τροχιάς με αποφυγή των εμποδίων αλλά και η προσέγγιση του στόχου επιτυγχάνονται με μεγαλύτερη ακρίβεια. Εκτός αυτών μειώθηκε η υπολογιστική πολυπλοκότητα του πρώτου επιπέδου του ασαφούς ελεγκτή αλλά αυξήθηκε η υπολογιστική πολυπλοκότητα του δευτέρου επιπέδου, γεγονός που αποτελεί και το μειονέκτημα της εφαρμογής.

5.5 Προτάσεις για Μελέτη

Μελλοντικές επεκτάσεις του θέματος περιλαμβάνουν τα εξής:

Ανίχνευση εμποδίων με την βοήθεια αισθητήρων όρασης (vision system). Το όχημα είναι εφοδιασμένο με κάμερα η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδότηση του ελεγκτή και με οπτικά ερεθίσματα. Τα ερεθίσματα αυτά θα μπορούσαν να συμβάλλουν σε καλύτερη κατανόηση του χώρου και δημιουργία καλύτερων στρατηγικών πλοήγησης και αποφυγής εμποδίων,

Συνεργασία οχημάτων. Το όχημα κινείται σε ένα χώρο αυτόνομα και αποφεύγει τα εμπόδια πετυχαίνοντας κάποιο προκαθορισμένο στόχο. Σκόπιμα θα ήταν να διερευνηθεί η κίνηση του οχήματος και ο συνδυασμός της με την κίνηση ενός δεύτερου η και περισσότερων οχημάτων προκειμένου να επιτύχει κάποιο στόχο.

Σύγκριση των αποτελεσμάτων του ασαφούς ελεγκτή με τα αποτελέσματα άλλων μεθόδων στο ίδιο το όχημα. Είναι δυνατή η χρήση άλλων μεθόδων ελέγχου, όπως κλασσικές μέθοδοι ελέγχου, γενετικοί αλγόριθμοι κ.λ.π. Τα αποτελέσματά τους θα μπορούσαν να συγκριθούν με τα αποτελέσματα του ασαφούς ελεγκτή.

Κίνηση του οχήματος στον εξωτερικό χώρο. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της συμπεριφοράς του συγκεκριμένου οχήματος σε εξωτερικούς χώρους. Αυτό διότι λόγω της κατασκευής του συγκεκριμένου οχήματος ενδείκνυται η κίνηση του σε ανοικτούς χώρους. Το συγκεκριμένο όχημα με την βοήθεια της ειδικής κατασκευής των τροχών του και σε συνδυασμό με το GPS (Global Positioning System) με το οποίο είναι εφοδιασμένο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σαν μια ιδανική πλατφόρμα για πειράματα ανοικτού χώρου. Για την σωστή χρήση του όμως κρίνεται αναγκαία η χρήση ασύρματου Ethernet.

Χρήση τεχνικών βελτιστοποίησης. Το μονοπάτι το οποίο εξάγεται από τον ασαφή ελεγκτή δεν είναι βέλτιστο. Με χρήση κατάλληλων τεχνικών βελτιστοποίησης θα ήταν δυνατόν να γίνει βελτιστοποίηση του.

Βιβλιογραφία

- [1] Alwan, M., Cheung, P., Saleh, A., Obeid, N. “Combining Goal-directed, Reactive and Reflexive Navigation in Autonomous Mobile Robots”, *Proc. IEEE Australia and New Zealand Conf. On Intelligent Information Systems*, pp 346-349, 1996.
- [2] *ATRV-Mini All-Terrain Mobile Robot User’s Guide*, IS Robotics, Inc., Real World Interface Division, 2000.
- [3] Boumedine, M., Ramirez-Serano, A., “Fuzzy knowledge-based controller design for autonomous robot navigation”, *Experts Systems with Applications*, vol. 14, pp. 179-186, 1998.
- [4] Doitsidis, L., K. P. Valavanis, N. C. Tsourveloudis, “Fuzzy Logic Based Autonomous Skid Steering Vehicle Navigation”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington D.C, 2002.
- [5] Gomez-Ortega, J., Ramirez, D., Limon, D., Camacho, E. “Nonlinear MBPC for mobile robot navigation using genetic algorithms”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Detroit, MI, USA, 1999.
- [6] Godjevac, J., *Neuro-Fuzzy Controllers, Design and Application*, Lausanne, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1997.
- [7] Kalyanmoy Dep., Dilip Kumar Pratihari, & Amitabha Ghosh, “Learning to avoid moving obstacles optimally for mobile robots using a genetic – fuzzy approach”, *Lectures Notes in Computer Science*, pp. 583-592, 1988.
- [8] Κινγκ, Ρ. “Υπολογιστική Νοημοσύνη στον Έλεγχο Συστημάτων”. Εκδοτικός Οίκος Π. Τραυλός-Ε. Κωσταράκη, 1998.
- [9] Li, W. “Perception-action behavior control of a mobile robot in uncertain environments using fuzzy logic”, *Proceedings of the IEEE/RJS Int. Conf. On Intelligent Robots and Systems*, pp.439-445, 1994.
- [10] Nearhou, A. “Adaptive navigation of autonomous vehicles using evolutionary algorithms”, *Artificial Intelligence in Engineering*, vol. 13, pp. 159-173, 1999.
- [11] Passino, K., Yurckovich, S. “Fuzzy Control”, Addison–Wesley, 1997.
- [12] Pratihari, D., Deb, K., Ghosh, A., “A genetic-fuzzy approach for mobile robot navigation among moving obstacles”, *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 20, pp. 145-172, 1999.
- [13] Saffiotti, A., “The Uses of Fuzzy Logic in Autonomous Robot Navigation: a catalogue raisonne”, Technical Report TR/iridia/97-6, 1997.
- [14] Shamah, B., “Experimental comparison of skid steering vs. explicit steering for wheeled mobile robot”. M.Sc. Thesis, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh Pennsylvania, 1999.
- [15] Τσαλατσάνης, Α., “ Οπτικό σύστημα του ATRV-MINI, λειτουργικότητα και εφαρμογές”, Διπλωματική εργασία , Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2001.

- [16] Tsourveloudis, N., Valavanis, K., Hebert, T., "Autonomous Vehicle Navigation Utilizing Electrostatic Potential Fields and Fuzzy Logic", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 17, no 4, pp. 490-497, 2001.
- [17] Zhang, J. Bohner, P., "A Fuzzy Control Approach for Executing Subgoal-Guided Motion of a Mobile Robot in a Partly-Known Environment.", *Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automatio*