

Πολυτεχνείο Κρήτης

**Ανάπτυξη Υβριδικής Αρχιτεκτονικής
Πλοήγησης Αυτόνομων Υποβρυχίων
Οχημάτων με Ασαφή Λογική και
Γενετικούς Αλγόριθμους**

Διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των
απαιτήσεων για την απόκτηση Διδακτορικού Διπλώματος

υπό

ΕΥΑΓΓΕΛΟΥ ΚΑΝΑΚΑΚΗ

Έτος: 2007

© Copyright υπό Ευάγγελου Κανακάκη

Έτος: 2007

Η διατριβή του Ευάγγελου Κανακάκη εγκρίνεται:

Τσουρβελούδης Νικόλαος _____
Αναπληρωτής Καθηγητής, Επιβλέπων

Κουϊκόγλου Βασίλειος _____
Καθηγητής, Μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής

Νικολός Ιωάννης _____
Λέκτορας, Μέλος της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής

Πουλιέζος Αναστάσιος _____
Καθηγητής

Σταυρακάκης Γεώργιος _____
Καθηγητής

Βλάσσης Νικόλαος _____
Επίκουρος Καθηγητής

Κοσματούπουλος Ηλίας _____
Επίκουρος Καθηγητής

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση αυτής της προσπάθειας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου, Κο. Νικόλαο Τσουρβελούδη, οι συμβουλές και η συμπαράσταση του οποίου, στον επιστημονικό και στον ανθρώπινο τομέα, υπήρξαν καθοριστικές στην πορεία ολοκλήρωσης της παρούσας δουλειάς.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου, Κο. Κίμωνα Βαλαβάνη, με την παρότρυνση του οποίου ξεκίνησε αυτή η ερευνητική προσπάθεια.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της συμβουλευτικής και της εξεταστικής επιτροπής, οι παρατηρήσεις των οποίων συνέβαλαν στην βελτίωση της παρούσας διατριβής. Επίσης ευχαριστώ όλους όσους μου συμπαράσθηκαν σε όλη την διάρκεια της έρευνας και της συγγραφής της παρούσας διατριβής.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου, και την σύζυγό μου Κέλλυ. Επίσης, ευχαριστώ τους γονείς μου Γιώργο και Αναστασία, στους οποίους αφιερώνω αυτήν την εργασία.

Σύντομο Βιογραφικό

Ο Ευάγγελος Κανακάκης γεννήθηκε στην Αθήνα το 1966. Το 1984 αποφοίτησε από το 30^ο γενικό Λύκειο Αθηνών και εισήχθη με πανελλήνιες εξετάσεις στο τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ολοκλήρωσε τις προπτυχιακές σπουδές του το 1989 και έλαβε το δίπλωμα του με γενικό βαθμό 7.2 (Λίαν Καλώς). Από το 1998 είναι Επίκουρος Καθηγητής Γενικών και Τεχνικών Μαθημάτων της Ακαδημίας Εμπορικού Ναυτικού Χανίων.

Το 1998 έγινε δεκτός στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Ειδίκευσης του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης στην κατεύθυνση των Συστημάτων Παραγωγής. Το 1999 ολοκλήρωσε τις υποχρεώσεις του λαμβάνοντας το Μεταπτυχιακό Δίπλωμα Ειδίκευσης με γενικό βαθμό 9.06, επίδοση η οποία ήταν η καλύτερη στο έτος του και για την οποία έλαβε υποτροφία του ΙΚΥ.

Από το 2000 μέχρι σήμερα είναι υποψήφιος διδάκτορας του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Περίληψη Διατριβής

Στην παρούσα διατριβή παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία για τον έλεγχο και την πλοήγηση αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων. Η προτεινόμενη μεθοδολογία ελέγχου είναι γενική και μπορεί να εφαρμοστεί σε όλους τους τύπους αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων, δεδομένου ότι δεν απαιτείται η ύπαρξη μαθηματικού μοντέλου κίνησης. Ο έλεγχος κίνησης του οχήματος γίνεται από ένα ελεγκτή που αποτελείται από πέντε διαφορετικά τμήματα που ενσωματώνουν ασαφείς ελεγκτές. Επιπλέον στην σχεδίαση του ελεγκτή λαμβάνεται υπόψη η ύπαρξη θαλάσσιου ρεύματος.

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική ελέγχου είναι ολοκληρωμένη γιατί αντιμετωπίζει τα προβλήματα του σχεδιασμού πορείας και της πλοήγησης πάνω στην προσχεδιασμένη πορεία με ταυτόχρονη αποφυγή εμποδίων και αποτελείται από τρία επίπεδα: το επίπεδο σχεδιασμού πορείας, το επίπεδο βελτιστοποίησης των ελεγκτών κίνησης και το επίπεδο ελέγχου κίνησης και αποφυγής εμποδίων.

Ειδικά για τις αποστολές κοντά στον πυθμένα, η βέλτιστη πορεία αναπαρίσταται με μια καμπύλη B-Spline η οποία βελτιστοποιείται με γενετικό αλγόριθμο στο πρώτο επίπεδο της αρχιτεκτονικής ελέγχου. Ο προσδιορισμός της βέλτιστης πορείας γίνεται με χρήση βαθυμετρικών δεδομένων του πυθμένα στην περιοχή πλοήγησης. Στο δεύτερο επίπεδο εξασφαλίζεται η πλοήγηση πάνω στην επιθυμητή πορεία με μικρό σφάλμα θέσης. Αυτό γίνεται με την γενετική βελτιστοποίηση των ελεγκτών κίνησης με κριτήριο την ελάχιστη απόκλιση από την πορεία που έχει υπολογισθεί. Το τρίτο επίπεδο της αρχιτεκτονικής ελέγχου είναι υπεύθυνο για την πλοήγηση του οχήματος και ενσωματώνει ικανότητα εντοπισμού και αποφυγής στατικών και δυναμικών εμποδίων, σε περίπτωση που εντοπιστούν τέτοια κατά την κίνηση του οχήματος πάνω στην προσχεδιασμένη πορεία.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία ελέγχου ελέγχθηκε αφενός με προσομοιώσεις πραγματικού υποβρυχίου οχήματος και αφετέρου με πειράματα πραγματικού χρόνου. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και των πειραμάτων φάνηκε ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία εξασφαλίζει ακρίβεια ελέγχου θέσης ακόμα και σε περιβάλλον με θαλάσσιο ρεύμα απρόβλεπτης κατεύθυνσης, χωρίς την ύπαρξη μαθηματικού μοντέλου κίνησης του οχήματος.

Πίνακας περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Κίνητρα	1
1.2	Αντικείμενο της διατριβής και μέθοδος επίλυσης.....	3
1.3	Συνεισφορά και πρωτοτυπία της διατριβής	8
1.4	Δομή της διατριβής	8
1.5	Δημοσιεύσεις	10
2	Αυτόνομα υποβρύχια οχήματα και προηγούμενη έρευνα	11
2.1	Μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα	11
2.2	Τηλεχειριζόμενα υποβρύχια οχήματα.....	13
2.3	Αυτόνομα υποβρύχια οχήματα	14
2.4	Προηγούμενη έρευνα και βιβλιογραφία	18
2.4.1	Σχεδιασμός πορείας αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων	18
2.4.2	Αποφυγή εμποδίων	21
2.4.3	Πλοήγηση και έλεγχος αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων	22
2.4.4	Προσδιορισμός θέσης υποβρυχίων οχημάτων	26
3	Κινηματική και δυναμική υποβρυχίων οχημάτων	29
3.1	Εισαγωγή.....	29
3.2	Κινηματική υποβρυχίων οχημάτων	29
3.2.1	Ορισμοί συστημάτων συντεταγμένων	29
3.2.2	Μετασχηματισμοί ταχύτητας.....	34
3.3	Δυναμική υποβρυχίων οχημάτων.....	36
3.3.1	Εξισώσεις κίνησης στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων	37
3.3.2	Δυνάμεις και ροπές που ασκούνται στα υποβρύχια οχήματα	41
3.3.3	Εξισώσεις κίνησης στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων	44
3.3.4	Εξισώσεις κίνησης στο αδρανειακό σύστημα αξόνων	44
3.4	Προσομοίωση κίνησης υποβρυχίων οχημάτων	46
4	Ασαφής έλεγχος και γενετικοί αλγόριθμοι.....	52
4.1	Εισαγωγή.....	52
4.2	Ασαφής λογική και ασαφής έλεγχος	52
4.3	Γενετικοί αλγόριθμοι	58
5	Αρχιτεκτονικές πλοήγησης αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων ¹	62
5.1	Εισαγωγή.....	62
5.2	Αρχιτεκτονικές ελέγχου αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων	63
5.3	Υβριδικά συστήματα ελέγχου	65
5.4	Προτεινόμενη αρχιτεκτονική ελέγχου.....	67
6	Ασαφής έλεγχος κίνησης και αποφυγή εμποδίων ¹	73
6.1	Εισαγωγή.....	73
6.2	Πολυεπίπεδος έλεγχος κίνησης και αποφυγή εμποδίων	74
6.3	Επίπεδο ανάγνωσης ενδείξεων αισθητήρων.....	76
6.4	Επίπεδο αποφυγής σύγκρουσης.....	80
6.5	Επίπεδο ελέγχου κίνησης.....	84
6.5.1	Υποσύστημα ελέγχου ταχύτητας	87
6.5.2	Υποσύστημα ελέγχου κατεύθυνσης	88
6.5.3	Υποσύστημα ελέγχου βάθους	90
6.5.4	Υποσύστημα ελέγχου διατοχισμού	91

6.5.5	Υποσύστημα ελέγχου θαλασσίου ρεύματος.....	92
7	Γενετικός σχεδιασμός πορείας υποβρυχίων οχημάτων	95
7.1	Εισαγωγή.....	95
7.2	Αναπαράσταση πορείας με πολυπαραμετρικές καμπύλες.....	96
7.3	Γενετικός προσδιορισμός βέλτιστης πορείας.....	99
7.4	Αντικειμενική συνάρτηση	102
7.5	Γενετικός προσδιορισμός πορείας.....	105
8	Γενετική βελτιστοποίηση ασαφών ελεγκτών κίνησης ¹	107
8.1	Εισαγωγή.....	107
8.2	Σχεδίαση επιπέδου ελέγχου για γενετική βελτιστοποίηση.....	108
8.3	Γενετική βελτιστοποίηση ασαφών ελεγκτών κίνησης	114
8.4	Αντικειμενική συνάρτηση – προσομοίωση κίνησης και μέτρηση σφάλματος θέσης.....	115
8.4.1	Έλεγχοι και διορθώσεις συναρτήσεων συμμετοχής	116
8.4.2	Προσομοίωση κίνησης και μέτρηση σφάλματος θέσης	119
9	Αποτελέσματα προσομοιώσεων	125
9.1	Εισαγωγή.....	125
9.2	Το αυτόνομο υποβρύχιο όχημα NPS-Phoenix	126
9.3	Προσομοιώσεις επιπέδου ελέγχου κίνησης.....	129
9.3.1	Έλεγχος επιπέδου ελέγχου κίνησης –Δοκιμή σε μεταβαλλόμενη πορεία.....	130
9.3.2	Έλεγχος επιπέδου ελέγχου κίνησης -Δοκιμή σε μεταβαλλόμενη πορεία με ρεύμα.....	131
9.3.3	Έλεγχος επιπέδου ελέγχου κίνησης -Δοκιμή σε οφιοειδή πορεία	133
9.4	Προσομοιώσεις επιπέδων ανάγνωσης ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγής σύγκρουσης.....	135
9.4.1	Έλεγχος επιπέδων ενδείξεων ανάγνωσης αισθητήρων και αποφυγής σύγκρουσης - Δοκιμές πλοήγησης σε σημείο στόχου	137
9.4.2	Έλεγχος επιπέδων ανάγνωσης ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγής σύγκρουσης - Δοκιμή πλοήγησης σε σημείο στόχου με ρεύμα	140
9.5	Προσομοιώσεις επιπέδου σχεδιασμού πορείας	142
9.6	Προσομοιώσεις επιπέδου γενετικής βελτιστοποίησης ασαφών ελεγκτών κίνησης	144
9.6.1	Έλεγχος επιπέδου βελτιστοποίησης ασαφών ελεγκτών κίνησης - βέλτιστοι ελεγκτές κίνησης.....	145
9.6.2	Έλεγχος επιπέδου βελτιστοποίησης ασαφών ελεγκτών κίνησης – προσομοιώσεις κίνησης	146
9.6.2.1	Έλεγχος επιπέδου βελτιστοποίησης ασαφών ελεγκτών κίνησης - πλοήγηση στην βέλτιστη πορεία.....	147
9.6.2.1	Έλεγχος επιπέδου βελτιστοποίησης ασαφών ελεγκτών κίνησης - πλοήγηση στην βέλτιστη πορεία με ρεύμα	149
9.6.2.2	Έλεγχος επιπέδου βελτιστοποίησης ασαφών ελεγκτών κίνησης - πλοήγηση σε τροποποιημένη πορεία.....	152
10	Πειραματικά αποτελέσματα	155
10.1	Υποβρύχιο όχημα και πειραματική διάταξη.....	156
10.1.1	Τηλεχειριζόμενο υποβρύχιο όχημα	157
10.1.2	Πισίνα δοκιμών	158
10.1.3	Κάμερα και κάρτα δέσμευσης εικόνας.....	158
10.1.4	Μονάδα ελέγχου οχήματος.....	158
10.2	Οπτικός υπολογισμός θέσης	159

10.3	Ασαφείς ελεγκτές κίνησης.....	163
10.3.1	Ασαφής ελεγκτής βάθους	165
10.3.2	Ασαφής ελεγκτής κατεύθυνσης	166
10.3.3	Ασαφής ελεγκτής απόστασης.....	167
10.4	Πειράματα ελέγχου κίνησης με το υποβρύχιο όχημα Videoray	167
10.4.1	Πλοήγηση προς στόχο	168
10.4.1.1	Πλοήγηση προς στόχο - Δοκιμή 1	169
10.4.2	Πλοήγηση προς στόχο με ρεύμα	171
10.4.3	Πλοήγηση σε διαδοχικά σημεία στόχου.....	173
10.4.3.1	Πείραμα πλοήγησης σε διαδοχικά σημεία στόχου-Δοκιμή 1	174
10.4.4	Παρακολούθηση κινούμενου στόχου.....	175
10.4.4.1	Πείραμα παρακολούθησης κινούμενου στόχου Δοκιμή 1	177
10.5	Αξιολόγηση πειραματικών αποτελεσμάτων.....	178
10.6	Συγκρίσεις	179
10.6.1	Μη γραμμικός ελεγκτής κίνησης υποβρυχίου οχήματος Videoray	180
10.6.2	Πειράματα με μη-γραμμικό-PD ελεγκτή κίνησης.....	182
10.6.3	Συγκρίσεις ασαφούς και μη-γραμμικού-PD ελεγκτή κίνησης.....	184
10.6.4	Συγκρίσεις ασαφούς ελεγκτή κίνησης με άλλες μεθοδολογίες.....	187
10.7	Φωτογραφίες πειραμάτων	188
11	Ανακεφαλαίωση και συμπεράσματα.....	190
12	Παραρτήματα.....	194
12.1	Παράρτημα Α: Αισθητήρες υποβρυχίων οχημάτων.....	194
12.1.1	Ενεργητικοί ακουστικοί αισθητήρες	195
12.1.2	Παθητικοί ακουστικοί αισθητήρες	198
12.1.3	Μαγνητικοί αισθητήρες	198
12.1.4	Αισθητήρες επιτάχυνσης	198
12.1.5	Γυροσκοπικοί αισθητήρες.....	198
12.1.6	Αισθητήρες πίεσης	199
12.1.7	Αισθητήρες διαρροής.....	199
12.1.8	Δορυφορικοί αισθητήρες θέσης.....	199
12.2	Παράρτημα Β: Δυναμικό μοντέλο και κώδικες προσομοίωσης οχήματος NPS-Phoenix	200
12.2.1	Εξισώσεις κίνησης	200
12.2.2	Μοντέλο Simulink	202
12.2.3	Αντικειμενική συνάρτηση γενετικού προσδιορισμού πορείας	207
12.2.4	Αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης ελεγκτών κίνησης	210
12.3	Προσάρτημα Γ: Κώδικας και διαγράμματα πειραμάτων με το υποβρύχιο όχημα Videoray	214
12.3.1	Κώδικας C ασαφών ελεγκτών	214
12.3.2	Διαγράμματα πειραμάτων με το υποβρύχιο όχημα Videoray	221
12.3.2.1	Πείραμα πλοήγησης προς στόχο - Δοκιμή 2	221
12.3.2.2	Πείραμα πλοήγησης προς στόχο - Δοκιμή 3	223
12.3.2.3	Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 4.....	226
12.3.2.4	Πείραμα πλοήγησης σε διαδοχικά σημεία στόχου -Δοκιμή 2	228
12.3.2.5	Πείραμα πλοήγησης σε διαδοχικά σημεία στόχου -Δοκιμή 3	229
12.3.2.6	Πείραμα πλοήγησης σε διαδοχικά σημεία στόχου -Δοκιμή 4	230
12.3.2.7	Πείραμα παρακολούθησης κινούμενου στόχου -Δοκιμή 2	231
12.3.2.8	Πείραμα παρακολούθησης κινούμενου στόχου -Δοκιμή 3	232
	Βιβλιογραφία	234

Πίνακας σχημάτων

Σχήμα 1-1:	Προτεινόμενη υβριδική αρχιτεκτονική πλοήγησης.....	7
Σχήμα 3-1:	Ορισμός συστημάτων συντεταγμένων.....	31
Σχήμα 3-2:	Ορισμός θέσης οχήματος με μεταφορά αδρανειακού συστήματος συντεταγμένων και στροφές Euler, (α): παράλληλη μεταφορά κατά το διάνυσμα θέσης, (β): περιστροφή κατεύθυνσης, (γ): περιστροφή πρόνευσης, (δ): περιστροφή διατοιχισμού.....	32
Σχήμα 3-3:	Επίδραση μεταβολής σειράς διαδοχικών περιστροφών, (α): περιστροφή τρισδιάστατου σώματος στις τρεις κύριες κατευθύνσεις σε γωνία $\pi/2$ με σειρά περιστροφής ψ , θ , ϕ (β): περιστροφή τρισδιάστατου σώματος στις τρεις κύριες κατευθύνσεις σε γωνία $\pi/2$ με σειρά περιστροφής ϕ , θ , ψ	33
Σχήμα 3-4:	Ορισμός διανυσμάτων θέσης στον χώρο.....	37
Σχήμα 3-5:	Επαλληλία ταχύτητας ωκεάνιου ρεύματος και οχήματος.....	48
Σχήμα 3-6:	Διάγραμμα ροής προσομοίωσης κίνησης υποβρυχίου οχήματος.....	51
Σχήμα 4-1:	Δομικό διάγραμμα ασαφούς ελεγκτή.....	54
Σχήμα 4-2:	Ενεργοποίηση κανόνων.....	56
Σχήμα 4-3:	Σύνθεση ασαφούς συμπεράσματος.....	57
Σχήμα 4-4:	Αποασαφοποίηση με την μέθοδο κέντρου βάρους.....	57
Σχήμα 4-5:	Ενεργοποίηση κανόνα με τρεις εισόδους.....	58
Σχήμα 4-6:	Δομικό διάγραμμα τυπικού γενετικού αλγόριθμου.....	59
Σχήμα 4-7:	Τελεστής διαστάυρωσης.....	61
Σχήμα 4-8:	Τελεστής μετάλλαξης.....	61
Σχήμα 5-1:	Υβριδικό σύστημα ελέγχου.....	66
Σχήμα 5-2:	Πλοήγηση αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος κοντά στον πυθμένα.....	67
Σχήμα 5-3:	Λογικό διάγραμμα προτεινόμενης μεθοδολογίας πλοήγησης αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος.....	69
Σχήμα 5-4:	Διάγραμμα πολυμηματικού ασαφή ελεγκτή κίνησης.....	69
Σχήμα 5-5:	Διάγραμμα προτεινόμενης υβριδικής αρχιτεκτονικής ελέγχου.....	71
Σχήμα 6-1:	Το επίπεδο ελέγχου κίνησης και αποφυγής εμποδίων.....	76
Σχήμα 6-2:	Δομή ασαφούς μηχανής συμπεράσματος ανάγνωσης ενδείξεων αισθητήρων.....	78
Σχήμα 6-3:	Περιμετρική διάταξη και σχετική σημασία αισθητήρων[30].....	79
Σχήμα 6-4:	Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου “Αισθητήρας 1” και εξόδου “Σύγκρουση εμπρός” ασαφούς μηχανής συμπεράσματος ανάγνωσης ενδείξεων αισθητήρων.....	80
Σχήμα 6-5:	Μετάβαση από συμπεριφορά στόχου σε συμπεριφορά αντίδρασης. (α): το εμπόδιο δεν έχει ανιχνευτεί -συμπεριφορά στόχου (β): το εμπόδιο έχει ανιχνευτεί- συμπεριφορά αντίδρασης.....	81
Σχήμα 6-6:	Υπολογισμός σφάλματος κατεύθυνσης: (α) στο οριζόντιο επίπεδο και (β) στο κατακόρυφο επίπεδο.....	82
Σχήμα 6-7:	Διάταξη ασαφούς μηχανής απόφασης αποφυγής εμποδίων.....	83
Σχήμα 6-8:	Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδων ασαφούς ελεγκτή αποφυγής συγκρούσεων.....	83
Σχήμα 6-9:	Συναρτήσεις συμμετοχής εξόδων ασαφούς μηχανής απόφασης αποφυγής εμποδίων.....	84
Σχήμα 6-10:	Σύστημα ελέγχου υποβρυχίου οχήματος.....	85
Σχήμα 6-11:	Δομή επιπέδου ελέγχου κίνησης.....	86
Σχήμα 6-12:	Δομή υποσυστήματος ελέγχου ταχύτητας.....	87
Σχήμα 6-13:	Δομή υποσυστήματος ελέγχου κατεύθυνσης.....	88
Σχήμα 6-14:	Υπολογισμός σφάλματος κατεύθυνσης με παρουσία θαλασσίου ρεύματος.....	89

Σχήμα 6-15: Δομή υποσυστήματος ελέγχου βάθους	90
Σχήμα 6-16: Δομή υποσυστήματος ελέγχου διατοιχισμού	92
Σχήμα 6-17: Διάγραμμα υποσυστήματος ελέγχου θαλασσίου ρεύματος	93
Σχήμα 6-18: Υπολογισμός συνιστωσών ρεύματος στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων	93
Σχήμα 7-1: Σύγκριση πολυπαραμετρικών καμπυλών B-Splines διαφορετικών βαθμών	98
Σχήμα 7-2: Αναπαράσταση καμπύλης πορείας B-Spline για γενετική βελτιστοποίηση	99
Σχήμα 7-3: Αναπαράσταση πορείας από δύο καμπύλες B-Spline	100
Σχήμα 7-4: Όροι αντικειμενικής συνάρτησης	104
Σχήμα 7-5: Το διάγραμμα ροής του γενετικού προσδιορισμού βέλτιστης πορείας	106
Σχήμα 8-1: Επίπεδο ελέγχου κίνησης με γενετική βελτιστοποίηση ασαφών ελεγκτών κίνησης....	109
Σχήμα 8-2: Ενοποιημένη δομή ασαφών ελεγκτών βάθους, πρόνευσης και κατεύθυνσης.	109
Σχήμα 8-3: Μορφή συναρτήσεων συμμετοχής για γενετική βελτιστοποίηση.....	111
Σχήμα 8-4: Καθορισμός χρωμοσωμάτων για τον ελεγκτή γωνίας πρόνευσης	112
Σχήμα 8-5: Καθορισμός χρωμοσωμάτων για τον ελεγκτή βάθους	113
Σχήμα 8-6: Καθορισμός χρωμοσωμάτων για τον ελεγκτή γωνίας κατεύθυνσης	113
Σχήμα 8-7: Διάγραμμα ροής γενετικού προσδιορισμού βέλτιστων ελεγκτών κίνησης.....	115
Σχήμα 8-8: Αντιστοίχιση τιμών <αριστερά>, <κέντρο> και <δεξιά> για τις συναρτήσεις συμμετοχής των ελεγκτών κίνησης.....	116
Σχήμα 8-9: Έλεγχος και διορθώσεις για τον παράγοντα λάθους PENALTYFLAG1	118
Σχήμα 8-10: Έλεγχος για τον παράγοντα λάθους PENALTYFLAG2	119
Σχήμα 8-11: Έλεγχος για τον παράγοντα λάθους PENALTYFLAG3	119
Σχήμα 8-12: Διακριτοποίηση βέλτιστης πορείας	120
Σχήμα 8-13: Υπολογισμός σφάλματος θέσης	121
Σχήμα 8-14: Έλεγχος για μεγάλο σφάλμα θέσης.....	121
Σχήμα 8-15: Λειτουργικό διάγραμμα αντικειμενικής συνάρτησης	124
Σχήμα 9-1: Το αυτόνομο υποβρύχιο όχημα NPS-Phoenix	126
Σχήμα 9-2: Επιφάνειες και κινητήρες ελέγχου του NPS-Phoenix	127
Σχήμα 9-3: Επίπεδο ελέγχου κίνησης-μεταβαλλόμενη πορεία, πορεία προσομοίωσης και επιθυμητή.....	130
Σχήμα 9-4: Επίπεδο ελέγχου κίνησης- μεταβαλλόμενη πορεία, πορεία προσομοίωσης και επιθυμητή στα επίπεδα X-Y και X-Z	131
Σχήμα 9-5: Επίπεδο ελέγχου κίνησης-μεταβαλλόμενη πορεία με ρεύμα, πορεία προσομοίωσης και επιθυμητή.....	132
Σχήμα 9-6: Επίπεδο ελέγχου κίνησης- μεταβαλλόμενη πορεία με ρεύμα, πορεία προσομοίωσης και επιθυμητή στα επίπεδα X-Y και X-Z.....	132
Σχήμα 9-7: Επίπεδο ελέγχου κίνησης-μεταβαλλόμενη πορεία με ρεύμα, μέγιστη απόκλιση σε συνάρτηση με την ταχύτητα του πλευρικού ρεύματος.....	133
Σχήμα 9-8: Επίπεδο ελέγχου κίνησης- οφιοειδής πορεία, πορεία προσομοίωσης και επιθυμητή.....	133
Σχήμα 9-9: Επίπεδο ελέγχου κίνησης- οφιοειδής πορεία, πορεία προσομοίωσης και επιθυμητή στο οριζόντιο επίπεδο x-y.....	134
Σχήμα 9-10: Ανάγνωση ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγή εμποδίων, λογικό διάγραμμα ανίχνευσης στόχων	136
Σχήμα 9-11: Ανάγνωση ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγή εμποδίων, πρώτη δοκιμή πλοήγησης προς σημείο στόχου, πορεία προσομοίωσης.....	138
Σχήμα 9-12: Ανάγνωση ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγή εμποδίων, πρώτη δοκιμή πλοήγησης προς σημείο στόχο, (α) θέση στον άξονα Z και ανύψωση πυθμένα, (β) πιθανότητα εμπρός σύγκρουσης.....	138
Σχήμα 9-13: Ανάγνωση ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγή εμποδίων, δεύτερη δοκιμή πλοήγησης προς σημείο στόχου, προσομοιωθείσα πορεία.....	139

Σχήμα 9-14:	Ανάγνωση ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγή εμποδίων, δεύτερη δοκιμή πλοήγησης προς σημείο στόχου, (α) θέση στον άξονα Z και ανύψωση πυθμένα, (β) πιθανότητα εμπρός σύγκρουσης	140
Σχήμα 9-15:	Ανάγνωση ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγή εμποδίων, δοκιμή πλοήγησης σε σημείο στόχου με ρεύμα, πορεία προσομοίωσης σε τρισδιάστατη απεικόνιση. Πορεία με μπλε κουκίδες: πλευρικό θαλάσσιο ρεύμα 0.5 ft/sec. Πορεία με κόκκινες κουκίδες: χωρίς θαλάσσιο ρεύμα.....	141
Σχήμα 9-16:	Ανάγνωση ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγή εμποδίων, δοκιμή πλοήγησης σε σημείο στόχου με ρεύμα, (α) θέση στον άξονα z και ανύψωση πυθμένα, (β) πιθανότητα εμπρός σύγκρουσης.....	142
Σχήμα 9-17:	Σχεδιασμός πορείας, σύγκλιση γενετικού αλγορίθμου	144
Σχήμα 9-18:	Σχεδιασμός πορείας, βέλτιστη πορεία και πολύγωνο ελέγχου.....	144
Σχήμα 9-19:	Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, σύγκλιση γενετικού αλγορίθμου	145
Σχήμα 9-20:	Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, βέλτιστες συναρτήσεις συμμετοχής ελεγκτή γωνίας πρόνευσης, Πλήρης γραμμή: βελτιστοποιημένες συναρτήσεις συμμετοχής, Διακεκομμένη γραμμή: αρχικές συναρτήσεις συμμετοχής.....	146
Σχήμα 9-21:	Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, σύγκριση πορειών πλοήγησης στην βέλτιστη πορεία	148
Σχήμα 9-22:	Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, σύγκριση αποτελεσμάτων πλοήγησης στην βέλτιστη πορεία.....	149
Σχήμα 9-23:	Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, καθορισμός διεύθυνσης ρεύματος για πλοήγηση στην βέλτιστη πορεία με ρεύμα	149
Σχήμα 9-24:	Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, πλοήγηση στην βέλτιστη πορεία με ρεύμα, γενετικά βέλτιστη πορεία και θαλάσσιος πυθμένας, θαλάσσιο ρεύμα 0.3 ft/sec.	150
Σχήμα 9-25:	Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, σύγκριση αποτελεσμάτων πλοήγησης στην βέλτιστη πορεία με ρεύμα	151
Σχήμα 9-26:	Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, πλοήγηση σε τροποποιημένη πορεία, αρχική και τροποποιημένη πολυπαραμετρική καμπύλη.	152
Σχήμα 9-27:	Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, πλοήγηση σε τροποποιημένη πορεία, πορεία προσομοίωσης.....	153
Σχήμα 9-28:	Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, σύγκριση αποτελεσμάτων πλοήγησης σε τροποποιημένη πορεία	154
Σχήμα 10-1:	(α) Τηλεχειριζόμενο υποβρύχιο όχημα Videoray, (β) Πισίνα δοκιμών.....	157
Σχήμα 10-2:	Μονάδα ελέγχου τηλεχειριζόμενου υποβρύχιου οχήματος.	159
Σχήμα 10-3:	Ορισμοί συστημάτων συντεταγμένων.....	160
Σχήμα 10-4:	Υπολογισμός γωνίας κατεύθυνσης.....	161
Σχήμα 10-5:	Οπτικός υπολογισμός θέσης υποβρυχίου οχήματος.....	162
Σχήμα 10-6:	Ελεγκτής κίνησης ρομπωτικού οχήματος Videoray.....	164
Σχήμα 10-7:	Υπολογισμός τάσεων αριστερού και δεξιού κινητήρα.....	165
Σχήμα 10-8:	Συναρτήσεις συμμετοχής ασαφή ελεγκτή βάθους	166
Σχήμα 10-9:	Επιφάνεια ελέγχου ελεγκτή βάθους.....	166
Σχήμα 10-10:	Πειραματική διάταξη.....	168
Σχήμα 10-11:	Πλοήγηση προς στόχο - Δοκιμή 1, θέση οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο	170
Σχήμα 10-12:	Πλοήγηση προς στόχο -Δοκιμή 1, θέση οχήματος στους άξονες X, Y, Z σε συνάρτηση με τον χρόνο	170
Σχήμα 10-13:	Πλοήγηση προς στόχο -Δοκιμή 1, γωνία κατεύθυνσης ανά κύκλο	170
Σχήμα 10-14:	Πλοήγηση προς στόχο –Δοκιμή1 , (α) φάση πλοήγησης προς τον στόχο - κάθετη απόσταση ανά κύκλο, (β) φάση αιώρησης πάνω από στόχο- απόσταση από στόχο.	171
Σχήμα 10-15:	Πλοήγηση προς στόχο -Δοκιμή 1, εντολές στους κινητήρες ανά κύκλο, (α) φάση πλοήγησης προς τον στόχο, (β) φάση αιώρησης πάνω από στόχο	171
Σχήμα 10-16:	Πλοήγηση προς στόχο με ρεύμα, θέση οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο	172

Σχήμα 10-17: Πλοήγηση προς στόχο με ρεύμα, θέση οχήματος στους άξονες X, Y, Z σε συνάρτηση με τον χρόνο	172
Σχήμα 10-18: Πλοήγηση προς στόχο με ρεύμα, γωνία κατεύθυνσης ανά κύκλο.....	172
Σχήμα 10-19: Πλοήγηση προς στόχο με ρεύμα, (α) φάση πλοήγησης προς στόχο - κάθετη απόσταση ανά κύκλο, (β) φάση αιώρησης πάνω από στόχο- απόσταση από στόχο	173
Σχήμα 10-20: Πλοήγηση προς στόχο με ρεύμα, εντολές στους κινητήρες ανά κύκλο, (α) φάση πλοήγησης προς στόχο, (β) φάση αιώρησης πάνω από στόχο.....	173
Σχήμα 10-21: Πλοήγηση σε διαδοχικά σημεία στόχου, πειραματική διάταξη	174
Σχήμα 10-22: Πλοήγηση σε διαδοχικά σημεία στόχου - Δοκιμή 1, θέση οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο.....	175
Σχήμα 10-23: Πλοήγηση σε διαδοχικά σημεία στόχου -Δοκιμή , κάθετη απόσταση από ευθεία στόχου.....	175
Σχήμα 10-24: Διάταξη πειράματος παρακολούθησης κινούμενου στόχου	176
Σχήμα 10-25: Παρακολούθηση κινούμενου στόχου-Δοκιμή 1: θέση οχήματος στους άξονες X, Y και Z σε συνάρτηση με τον χρόνο.....	177
Σχήμα 10-26: Παρακολούθηση κινούμενου στόχου -Δοκιμή 1: σφάλμα θέσης οχήματος για κάθε κύκλο.....	177
Σχήμα 10-27: Δομικό διάγραμμα μη-γραμμικού ελεγκτή κίνησης στο οριζόντιο και το κατακόρυφο επίπεδο	180
Σχήμα 10-28: Πολικές συντεταγμένες θέσης υποβρυχίου οχήματος	180
Σχήμα 10-29: Δομικό διάγραμμα αναλογικού-διαφορικού ελεγκτή στο κατακόρυφο επίπεδο	182
Σχήμα 10-30: Πείραμα πλοήγησης προς σημείο στόχου-Σύγκριση ελεγκτών κίνησης.....	184
Σχήμα 10-31: Πείραμα πλοήγησης προς σημείο στόχου με ρεύμα -Σύγκριση ελεγκτών κίνησης.....	185
Σχήμα Π- 1: Κατασκευή αισθητήρα υπερήχων	196
Σχήμα Π- 2: Εύρος δέσμης υπερήχων	196
Σχήμα Π- 3: Μέτρηση ταχύτητας με Doppler Sonar.....	198
Σχήμα Π-4: Μοντέλο προσομοίωση του NPS-Phoenix σε Simulink.....	202
Σχήμα Π-5: Αποφυγή εμποδίων	202
Σχήμα Π-6: Ανίχνευση εμποδίων	203
Σχήμα Π-7: Απόφαση αποφυγής σύγκρουσης	203
Σχήμα Π-8: Έλεγχος κίνησης.....	204
Σχήμα Π-9: Έλεγχος βάθους και γωνίας πρόνευσης.....	204
Σχήμα Π-10: Έλεγχος γωνίας κατεύθυνσης.....	205
Σχήμα Π-11: Έλεγχος ταχύτητας	205
Σχήμα Π-12: Ελεγκτής θαλασσίου ρεύματος	206
Σχήμα Π-13: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 2, θέση οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο	221
Σχήμα Π-14: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 2, θέση οχήματος στους άξονες x, y, z σε συνάρτηση με τον χρόνο	221
Σχήμα Π-15: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 2, γωνία κατεύθυνσης ανά κύκλο.....	222
Σχήμα Π-16: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 2, Α) φάση στόχευσης πάνω από στόχο- απόσταση από στόχο, Β) φάση πλοήγησης προς στόχο - κάθετη απόσταση ανά κύκλο.....	222
Σχήμα Π-17: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 2, εντολές στους κινητήρες ανά κύκλο	223
Σχήμα Π-18: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 3, θέση οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο	223
Σχήμα Π-19: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 3, θέση οχήματος στους άξονες x, y, z σε συνάρτηση με τον χρόνο	224
Σχήμα Π-20: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 3, γωνία κατεύθυνσης (yaw) ανά κύκλο	224
Σχήμα Π-21: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 3, Α) φάση στόχευσης πάνω από στόχο- απόσταση από στόχο, Β) φάση πλοήγησης προς στόχο - κάθετη απόσταση ανά κύκλο.....	225
Σχήμα Π-22: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 3, εντολές στους κινητήρες ανά κύκλο	225

Σχήμα Π-23:	Πείραμα πλοήγησης προς στόχο - Δοκιμή 4, θέση οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο	226
Σχήμα Π-24:	Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 4, θέση οχήματος στους άξονες x, y, z σε συνάρτηση με τον χρόνο	226
Σχήμα Π-25:	Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 4, γωνία κατεύθυνσης (yaw) ανά κύκλο	227
Σχήμα Π-26:	Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 4, Α) φάση στόχευσης πάνω από στόχο- απόσταση από στόχο Β) φάση πλοήγησης προς στόχο - κάθετη απόσταση ανά κύκλο	227
Σχήμα Π-27:	Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 4, εντολές στους κινητήρες ανά κύκλο	228
Σχήμα Π-28:	Πείραμα πλοήγησης σε διαδοχικά σημεία στόχου -Δοκιμή 2: θέση οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο	228
Σχήμα Π-29:	Πείραμα πλοήγησης σε διαδοχικά σημεία στόχου -Δοκιμή 2 : κάθετη απόσταση από ευθεία στόχου	229
Σχήμα Π-30:	Πείραμα πλοήγησης σε διαδοχικά σημεία στόχου -Δοκιμή 3: θέση οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο	229
Σχήμα Π-31:	Πείραμα πλοήγησης σε διαδοχικά σημεία στόχου -Δοκιμή 3: κάθετη απόσταση από ευθεία στόχου	230
Σχήμα Π-32:	Πείραμα πλοήγησης σε διαδοχικά σημεία στόχου -Δοκιμή 4: θέση οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο	230
Σχήμα Π-33:	Πείραμα πλοήγησης σε διαδοχικά σημεία στόχου -Δοκιμή 4: κάθετη απόσταση από ευθεία στόχου	231
Σχήμα Π-34:	Πείραμα παρακολούθησης κινούμενου στόχου -Δοκιμή 2: θέση οχήματος στους άξονες x, y, z σε συνάρτηση με τον χρόνο	231
Σχήμα Π-35:	Πείραμα παρακολούθησης κινούμενου στόχου -Δοκιμή 2: σφάλμα θέσης οχήματος για κάθε κύκλο	232
Σχήμα Π-36:	Πείραμα παρακολούθησης κινούμενου στόχου -Δοκιμή 3: θέση οχήματος στους άξονες x, y, z σε συνάρτηση με τον χρόνο	232
Σχήμα Π-37:	Πείραμα παρακολούθησης κινούμενου στόχου -Δοκιμή 3: σφάλμα θέσης οχήματος για κάθε κύκλο	233

Πίνακες

Πίνακας 3-1:	Επεξήγηση συμβόλων	30
Πίνακας 6-1:	Γωνίες εμβέλειας αισθητήρων υπερήχων στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο	77
Πίνακας 6-2:	Σχετική σημασία αισθητήρων [30]	79
Πίνακας 8-1:	Ενοποιημένη βάση κανόνων ελεγκτών κίνησης.	110
Πίνακας 9-1:	Τιμές μεταβλητών υποβρυχίου οχήματος NPS-Phoenix	128
Πίνακας 9-2:	Μεταβλητές ελέγχου υποβρυχίου οχήματος NPS-Phoenix	129
Πίνακας 9-3:	Ανάγνωση ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγή εμποδίων, δοκιμή πλοήγησης προς σημείο στόχου, αρχικό και τελικό σημείο στόχου	137
Πίνακας 9-4:	Ανάγνωση ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγή εμποδίων, δοκιμή πλοήγησης σε σημείο στόχου με ρεύμα, αρχικό και τελικό σημείο στόχου	140
Πίνακας 9-5:	Σχεδιασμός πορείας, συντεταγμένες σταθερών σημείων	143
Πίνακας 9-6:	Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, σύγκριση σφαλμάτων πλοήγησης στην βέλτιστη πορεία	147

Πίνακας 9-7: Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, καθορισμός διεύθυνσης ρεύματος για πλοήγηση στην βέλτιστη πορεία με ρεύμα	150
Πίνακας 9-8: Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, σύγκριση αποτελεσμάτων πλοήγησης στην βέλτιστη πορεία με ρεύμα	151
Πίνακας 9-9: Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, σύγκριση αποτελεσμάτων πλοήγησης σε τροποποιημένη πορεία	153
Πίνακας 10-1: Βάση κανόνων ελεγκτή βάθους.....	165
Πίνακας 10-2: Πλοήγηση προς στόχο, μέσος όρος σφάλματος θέσης	169
Πίνακας 10-3: Πείραμα πλοήγησης σε διαδοχικά σημεία στόχου, μέσο σφάλμα θέσης.....	174
Πίνακας 10- 4: Πείραμα παρακολούθησης κινούμενου στόχου, μέσο σφάλμα θέσης	176
Πίνακας 10- 5: Αποτελέσματα πειραμάτων με μη-γραμμικό-PD ελεγκτή.....	183
Πίνακας 10- 6: Σύγκριση ακρίβειας θέσης ασαφούς και μη-γραμμικού-PD ελεγκτή	185
Πίνακας 10- 7: Σύγκριση διανυθείσας απόστασης και απαιτήσεων ενέργειας ασαφούς και μη-γραμμικού-PD ελεγκτή	186

1° Κεφάλαιο

Εισαγωγή

1.1 Κίνητρα

Στον σύγχρονο κόσμο οι άνθρωποι έχουν στραφεί προς τους ωκεανούς για την κάλυψη μέρους των αναγκών τους σε ενέργεια και φυσικούς πόρους. Το ωκεάνιο περιβάλλον αν και βρίσκεται κοντά μας, λόγω των μεγάλων βαθών είναι ακόμα ανεξερεύνητο, γεγονός που έχει αρχίσει να αντιστρέφεται τις τελευταίες δεκαετίες. Τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα (Autonomous Underwater Vehicles, AUVs) είναι σημαντικά εργαλεία στην προσπάθεια εξερεύνησης των ωκεανών και μπορούν να μας βοηθήσουν στην κατανόηση και στην προστασία των υποθαλάσσιων υποσυστημάτων. Τέτοια οχήματα πρέπει να αντιμετωπίσουν προβλήματα που παρουσιάζονται λόγω των μεγάλων πιέσεων, λόγω της αδυναμίας επικοινωνίας με ηλεκτρομαγνητικά σήματα και τέλος λόγω της λειτουργίας τους σε αχαρτογράφητες περιοχές, με απρόβλεπτες καιρικές συνθήκες και επιδράσεις από το περιβάλλον (θαλάσσια ρεύματα και κύματα) [1].

Το ενδιαφέρον για τα μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα ξεκίνησε όταν υπήρξε ανάγκη για εργασία και παρατήρηση σε βάθη που είναι απρόσιτα από το άνθρωπο, κυρίως σε εφαρμογές της βιομηχανίας άντλησης πετρελαίου [2]. Έτσι αναπτύχθηκαν τα τηλεκατευθυνόμενα υποβρύχια οχήματα, των οποίων η τεχνολογία έχει εξελιχθεί τόσο ώστε σήμερα να χρησιμοποιούνται σε βάθος έως 11.000 μέτρα.

Τα τηλεκατευθυνόμενα υποβρύχια οχήματα, σε πολλές περιπτώσεις δεν αποτελούν τη βέλτιστη λύση γιατί έχουν εγγενείς αδυναμίες η κυριότερη των οποίων είναι η ύπαρξη καλωδίου παροχής ενέργειας και ανταλλαγής πληροφοριών, που επάγει υδροδυναμικές δυνάμεις και πρόσθετη αδράνεια την οποία πρέπει να υπερνικήσει το όχημα [3]. Επίσης η χρήση των τηλεκατευθυνόμενων οχημάτων περιορίζεται από το γεγονός ότι πρέπει να απασχολείται ένας χειριστής πράγμα που αυξάνει το κόστος και θέτει όρια στην χρήση του οχήματος λόγω των συνθηκών που επικρατούν στην επιφάνεια. Επιπλέον, τα τηλεκατευθυνόμενα υποβρύχια οχήματα λόγω της εξάρτησής τους από το μητρικό σκάφος, δεν μπορούν να εκτελέσουν αποστολές συνεχούς ωκεανογραφικής έρευνας και παρατηρήσεις σε εκτεταμένες περιοχές [4], [5].

Για να αντιμετωπιστούν τα μειονεκτήματα των τηλεκατευθυνόμενων υποβρυχίων οχημάτων, έχουν αναπτυχθεί τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα (Autonomous Underwater vehicles, AUVs), που βασίζονται στην ενέργεια των συσσωρευτών τους, στους αισθητήρες τους και σε έναν ή περισσότερους ενσωματωμένους υπολογιστές, για την εκπλήρωση των σκοπών της κάθε αποστολής. Η πλοήγηση αυτών των οχημάτων πραγματοποιείται αυτόνομα, χωρίς την παρέμβαση ανθρώπινου χειριστή παρά μόνο σε επίπεδο σχεδιασμού της αποστολής, ο οποίος γίνεται πριν την έναρξη της. Αν και έχουν γίνει πολλές σχεδιάσεις τέτοιων οχημάτων, ήδη από την δεκαετία του '60, η τεχνολογία των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων δεν έχει φτάσει ακόμα σε επίπεδο ωριμότητας [6]. Ο λόγος είναι ότι κατά την σχεδίαση και την χρήση τους εμφανίζονται σημαντικά προβλήματα, τα κυριότερα από τα οποία είναι:

1. **Οι συνθήκες λειτουργίας:** Η λειτουργία ενός αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος σε μεγάλο βάθος προϋποθέτει στιβαρή μεταλλική κατασκευή που συνεπάγεται αυξημένη μάζα και απαιτήσεις ενέργειας [7].
2. **Δύσκολες επικοινωνίες:** Η εξασθένηση των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων στο αγώγιμο περιβάλλον του θαλασσινού νερού, καθιστά αδύνατη την επικοινωνία με ηλεκτρομαγνητικά σήματα. Επίσης είναι αδύνατη η χρήση αισθητήρων εύρεσης θέσης που χρησιμοποιούν τέτοια σήματα [8].
3. **Περιορισμένοι ενεργειακοί πόροι:** Η ενέργεια που περιέχουν οι συσσωρευτές του οχήματος είναι περιορισμένη και απαιτείται να υπάρχει διαχείρισή της κατά την διάρκεια της αποστολής [9].
4. **Άγνωστο περιβάλλον:** Το περιβάλλον στο οποίο κινούνται τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα δεν είναι ελεύθερο από σταθερά και κινητά εμπόδια, ενώ πιθανή σύγκρουση μπορεί να έχει σοβαρές συνέπειες στην εξέλιξη της αποστολής και στην ασφαλή ανάκτηση του οχήματος [10].
5. **Μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες:** Το όχημα δέχεται την επίδραση απρόβλεπτων καιρικών συνθηκών που δημιουργούν κύματα και ρεύματα.

6. **Εύρεση θέσης:** Η ακριβής εύρεση θέσης είναι πρόβλημα για τα AUVs λόγω της χρήσης ηχητικών και οπτικών αισθητήρων [8].
7. **Ανάκτηση του οχήματος:** απαιτείται να υπάρχει αξιόπιστη και οικονομική μέθοδος για την ασφαλή ανάκτηση του οχήματος [11].
8. **Μη ολονομικότητα:** Λόγω της απαίτησης για εξοικονόμηση πόρων τα οχήματα που έχουν αποστολές μεγάλης διάρκειας σχεδιάζονται με κριτήριο την ελάχιστη υδροδυναμική αντίσταση. Τα σχήματα που προκύπτουν οδηγούν σε μη ολονομικά οχήματα, για τα οποία υπάρχει απαίτηση κίνησης σε όλα τα σημεία του τρισδιάστατου χώρου, γεγονός που αυξάνει τις δυσκολίες ελέγχου κίνησης.
9. **Δυσκολία ανάπτυξης αλγορίθμων αυτόνομης λειτουργίας.** Με δεδομένους τους παραπάνω περιορισμούς, απαιτείται η ανάπτυξη αλγορίθμων που επιτρέπουν την ασφαλή και πλήρως αυτόνομη λειτουργία. Οι αλγόριθμοι αυτοί πρέπει να ενσωματώνουν πολλαπλές λειτουργίες και συμπεριφορές με χαρακτηριστικά ευφυούς ελέγχου, κατεύθυνση στην οποία κινείται η παρούσα διατριβή.

Για τους παραπάνω λόγους, τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα δεν έχουν εκτοπίσει τα τηλεχειριζόμενα υποβρύχια οχήματα στις διάφορες εφαρμογές, καθώς τα τελευταία παραμένουν ακόμα πιο αξιόπιστα και ελέγχιμα. Αν και υπάρχουν αυτόνομα υποβρύχια οχήματα στο εμπόριο, στις περισσότερες των περιπτώσεων αυτά, λόγω κόστους και δυσκολίας χρήσης, χρησιμοποιούνται σε επίπεδο εξειδικευμένων λύσεων, για αποστολές εκτεταμένης ωκεανογραφικής παρατήρησης, για στρατιωτικές εφαρμογές ανίχνευσης ναρκών και για ερευνητικούς σκοπούς.

Για την ολοκλήρωση της τεχνολογίας και την ευρεία αξιοποίηση των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων, πρέπει ακόμα να γίνει αρκετή έρευνα [12]. Για τον λόγο αυτό, η οργάνωση και η σχεδίαση της αποστολής και ο έλεγχος κίνησης με αποφυγή εμποδίων, αποτελούν ιδιαίτερα δημοφιλή αντικείμενα έρευνας στην επιστημονική κοινότητα. Ο στόχος και η συνεισφορά της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη λύσεων σε προβλήματα ελέγχου και πλοήγησης των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων. Ειδικότερα εξετάζονται τα προβλήματα του σχεδιασμού πορείας, της αποφυγής εμποδίων και του ελέγχου κινήσεων για πλοήγηση σε άγνωστες συνθήκες λειτουργίας.

1.2 Αντικείμενο της διατριβής και μέθοδος επίλυσης

Οι αποστολές των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων μπορούν να χωριστούν στις εξής τρεις κατηγορίες [13]:

1. Αποστολές κοντά στην επιφάνεια.

2. Αποστολές κοντά στον πυθμένα.

3. Αποστολές στην μέση ζώνη βάθους μακριά από την επιφάνεια και μακριά από τον πυθμένα.

Για κάθε κατηγορία αποστολής μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί αισθητήρες για να δώσουν πληροφορία θέσης [14], ενώ οι αποστολές κοντά στον πυθμένα είναι οι πιο δύσκολες από την πλευρά του σχεδιασμού πορείας και της αποφυγής εμποδίων [15].

Στην παρούσα διατριβή, αναπτύσσεται μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία σχεδιασμού αποστολής και πλοήγησης αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων με έμφαση στις αποστολές κοντά στον πυθμένα, η οποία συμπυκνώνεται σε μια υβριδική αρχιτεκτονική ελέγχου. Με τις υβριδικές αρχιτεκτονικές ελέγχου μπορούν να ελέγχονται πολύπλοκα φυσικά συστήματα συνεχούς χρόνου με διαδικασίες λήψης αποφάσεων από συστήματα διακριτού χρόνου [16]. Στην περίπτωση των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων, το ελεγχόμενο φυσικό σύστημα είναι σε μεγάλο βαθμό μη γραμμικό, οπότε τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η υβριδική σχεδίαση είναι η δυνατότητα αξιόπιστου ελέγχου χωρίς γραμμικοποίηση των εξισώσεων, σε περιοχές λειτουργίας που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από την επιθυμητή συμπεριφορά του οχήματος. Η ανάγκη ανάπτυξης μιας αρχιτεκτονικής ελέγχου προκύπτει από την ανάγκη για δυνατότητα λήψης αυτόνομων αποφάσεων προκειμένου να επιτευχθούν πολύπλοκοι στόχοι, πράγμα που δεν μπορεί να γίνει από ένα μεμονωμένο ελεγκτή με συγκεκριμένα καθήκοντα ελέγχου. Αν και η αυτονομία μπορεί να επιτευχθεί χωρίς την χρήση ευφυούς ελέγχου, για την επίτευξη του μέγιστου βαθμού αυτονομίας είναι απαραίτητος ο ευφυής έλεγχος [17]. Έτσι στην παρούσα εργασία για λόγους αύξησης της αυτονομίας του οχήματος χρησιμοποιήθηκαν τεχνικές ευφυούς ελέγχου και συγκεκριμένα ο έλεγχος με ασαφή λογική και οι γενετικοί αλγόριθμοι. Με την προτεινόμενη υβριδική αρχιτεκτονική ελέγχου μπορεί να υπερσκελιστεί το συγκριτικό πλεονέκτημα των τηλεκατευθυνόμενων έναντι των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων, που υπάρχουν σε συγκεκριμένες λειτουργίες και όχι σε σχέση με την συνολική τους συμπεριφορά, που είναι η λογική του ανθρώπινου χειριστή. Η προτεινόμενη υβριδική αρχιτεκτονική ελέγχου καλύπτει τις απαιτήσεις σχεδιασμού πορείας, δυνατότητας αποφυγής εμποδίων και ακριβούς ελέγχου κινήσεων ενός αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος. Οι τομείς οι οποίοι εξασφαλίζονται με την προτεινόμενη αρχιτεκτονική ελέγχου είναι:

1. Ο σχεδιασμός πορείας. Σε όλες τις αποστολές των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων και ειδικά σε αυτές κοντά στον πυθμένα [18], είναι ουσιαστικής σημασίας ο σχεδιασμός της πορείας. Στον σχεδιασμό πορείας με δεδομένους τους στόχους της αποστολής, το ζητούμενο είναι η σύνθεση της πορείας, η οποία θα πρέπει να βρίσκεται μακριά από σταθερά εμπόδια και να έχει μορφή που μπορεί να ακολουθήσει το όχημα. Επιπλέον η πορεία πρέπει να πληροί περιορισμούς όπως μέγιστο βάθος και απαγορευμένες περιοχές πλοήγησης. Η πορεία υπολογίζεται ή σχεδιάζεται πριν την έναρξη της αποστολής και στην συνέχεια αφού προγραμματιστεί το όχημα, ξεκινάει η φάση εκτέλεσης της αποστολής. Κατά την φάση του

σχεδιασμού πορείας γίνεται μια πρωτογενής αποφυγή εμποδίων λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο του χώρου κίνησης, ώστε το όχημα να κινείται σε περιοχές ελεύθερες από εμπόδια και να αποφευχθεί ο εγκλωβισμός του οχήματος [19]. Στις περισσότερες αποστολές αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων ο σχεδιασμός της πορείας γίνεται από ένα χειριστή ο οποίος ορίζει σημεία στόχου τα οποία πρέπει να επιτύχει διαδοχικά το όχημα [20]. Για τις πολύπλοκες αποστολές, όπου η βέλτιστη πορεία δεν είναι προφανής, έχουν αναπτυχθεί μεθοδολογίες υπολογισμού τροχιάς που προσδιορίζουν τα διαδοχικά σημεία στόχου [21]. Μερικές από τις μεθόδους που έχουν χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό πορείας αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων είναι τα ηλεκτροστατικά πεδία [22], οι λεγόμενοι αλγόριθμοι A^* [23], τεχνικές στηριζόμενες σε ανάλυση της πορείας σε τμήματα που αποτελούνται από εφικτές πορείες για διάφορες περιπτώσεις πλοήγησης (case-based reasoning) [21], [24], αλγόριθμοι ταχείας προόδου (fast marching, FM) [25] και γενετικοί αλγόριθμοι [26]. Κοινό χαρακτηριστικό των παραπάνω προσεγγίσεων σχεδιασμού πορείας είναι ότι ο προσδιορισμός της πορείας γίνεται με διαδοχικά σημεία στόχου. Ο προσδιορισμός της πορείας με αυτόν τον τρόπο ενέχει το μειονέκτημα λαθών θέσης και ασταθειών που προκύπτουν καθώς το όχημα δέχεται διαδοχικές εντολές αλλαγής κατεύθυνσης [27].

Στην παρούσα διατριβή προτείνεται ο σχεδιασμός πορείας με χρήση πολυπαραμετρικών καμπυλών και γενετικών αλγορίθμων. Η αναπαράσταση της πορείας γίνεται με καμπύλες B-Splines και προτείνεται ένα σύστημα σχεδιασμού βέλτιστης πορείας το οποίο ενσωματώνει ένα γενετικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης των σημείων ελέγχου της πολυπαραμετρικής καμπύλης που δίνει πορείες μακριά από εμπόδια με ελάχιστο μήκος. Το συγκριτικό πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθόδου είναι ότι προσδιορίζεται μια συνεχής μαθηματική καμπύλη που μπορεί κάθε υποβρύχιο όχημα να ακολουθήσει, χωρίς απότομες αλλαγές κατεύθυνσης και χωρίς τμήματα με μικρή ακτίνα καμπυλότητας. Η πλοήγηση του οχήματος πάνω στην βέλτιστη πορεία ισοδυναμεί με την επίτευξη των στόχων της αποστολής και έτσι το όχημα αποκτά χαρακτηριστικά *συμπεριφοράς στόχου*. Το σύστημα σχεδιασμού πορείας καλείται πριν την έναρξη της αποστολής και υπολογίζεται η πορεία. Στην συνέχεια, κατά την διάρκεια της αποστολής, σε περίπτωση που το όχημα βρεθεί εγκλωβισμένο σε εμπόδια που ήταν άγνωστα στην πρώτη φάση σχεδιασμού πορείας, οπότε υπάρχει ανάγκη για ανασχεδιασμό πορείας, ο αλγόριθμος σχεδιασμού πορείας ανακαλείται και προσδιορίζεται νέα βέλτιστη πορεία.

2. **Η δυναμική αποφυγή εμποδίων.** Με τον όρο *δυναμική* αποφυγή εμποδίων εννοείται η ικανότητα αποφυγής εμποδίων, που βρίσκονται στην πορεία του οχήματος, η οποία είναι βασισμένη σε αναγνώριση του περιβάλλοντος χώρου σε πραγματικό χρόνο κατά την διάρκεια της κίνησης. Για την αναγνώριση του περιβάλλοντος και τον εντοπισμό εμποδίων, το όχημα βασίζεται στις ενδείξεις των αισθητήρων του [28]. Κατά την διάρκεια της κίνησης ενός αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος, ακόμη και πάνω σε μια προσχεδιασμένη πορεία που

βρίσκεται μακριά από εμπόδια, δεν είναι εξασφαλισμένη η κίνηση χωρίς συγκρούσεις [29]. Εμπόδια στην κίνηση ενός αυτόνομου υποβρυχίου μπορεί να προκύψουν από ανακρίβειες στις πληροφορίες χαρτογράφησης του πυθμένα. Επίσης μπορεί να υπάρχουν δυναμικά εμπόδια τα οποία κινούνται στον υποβρύχιο χώρο που κινείται το όχημα, (π.χ. άλλα υποβρύχια οχήματα). Έτσι η ικανότητα ανίχνευσης και αποφυγής εμποδίων είναι βασικό χαρακτηριστικό της αξιόπιστης αυτόνομης πλοήγησης και προϋποθέτει ενέργειες σε δύο φάσεις: α) αναγνώριση εμποδίων και β) λήψη απόφασης αποφυγής [30]. Η συμπεριφορά της αποφυγής εμποδίων χαρακτηρίζεται ως *συμπεριφορά αντίδρασης* βασιζόμενη στις ενδείξεις των αισθητήρων του οχήματος. Το όχημα για να αποφεύγει τα εμπόδια, θα πρέπει να μπορεί να εναλλάσσει την συμπεριφορά στόχου σε συμπεριφορά αντίδρασης, κάθε φορά που ανιχνεύεται κάποιο εμπόδιο και μέχρι την αποφυγή του. Για την σύζευξη των συμπεριφορών πλοήγησης χρησιμοποιήθηκε η ασαφής λογική [31]. Έτσι, για την αναγνώριση και την αποφυγή εμποδίων σχεδιάστηκαν ασαφείς μηχανές συμπεράσματος σε δύο τμήματα τα οποία ενσωματώθηκαν στο σύστημα ελέγχου κίνησης.

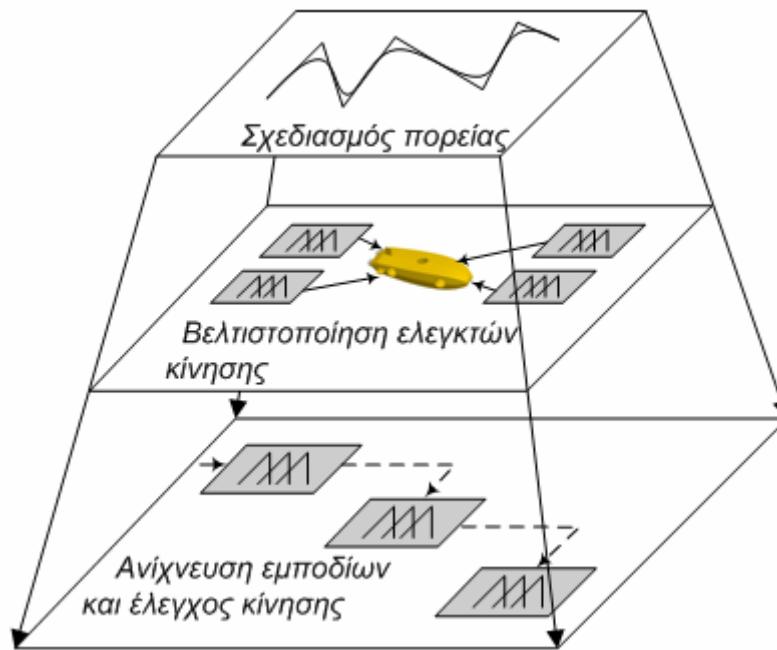
- 3. Ο έλεγχος κίνησης:** Η πλοήγηση ενός αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος σε ένα άγνωστο περιβάλλον με επίδραση κυμάτων και ρευμάτων και κοντά σε πιθανά εμπόδια, προϋποθέτει την ύπαρξη ενός σταθερού και αξιόπιστου συστήματος ελέγχου κινήσεων. Το σύστημα αυτό θα πρέπει να μπορεί να προσδιορίζει την θέση του οχήματος με βάση τις ενδείξεις των διάφορων αισθητήρων και ακολούθως να ρυθμίζει τις εντολές προς τους κινητήρες και τα πτερύγια ώστε το όχημα να βρεθεί στην επιθυμητή θέση με την επιθυμητή κατεύθυνση και ταχύτητα. Ένα αξιόπιστο σύστημα ελέγχου κίνησης εξασφαλίζει αφενός την ικανότητα του οχήματος να ακολουθεί μια επιθυμητή πορεία και αφετέρου να ακολουθεί εντολές αποφυγής εμποδίων. Για τον έλεγχο κινήσεων των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων έχουν σχεδιαστεί ελεγκτές PID [32], μη γραμμικοί ελεγκτές [33], ελεγκτές σθεναρού ελέγχου sliding mode [34], προσαρμοστικοί [35], ασαφείς [36] και νευρωνικοί ελεγκτές [37]. Στην παρούσα διατριβή παρουσιάζεται ένας πολυμηματικός ασαφής ελεγκτής για τον έλεγχο κίνησης των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων. Κατά την σχεδίαση του ελεγκτή κίνησης λήφθηκε υπόψη η μη ολονομικότητα των περισσότερων υποβρυχίων οχημάτων που δεν διαθέτουν έλεγχο των κινήσεων σε όλους τους βαθμούς ελευθερίας τους. Ο ελεγκτής κίνησης αξιοποιεί το πλεονέκτημα των ασαφών ελεγκτών, που είναι η ικανότητα ελέγχου μη-γραμμικών συστημάτων χωρίς προηγούμενη μαθηματική μοντελοποίηση. Για καλύτερη απόδοση ο ελεγκτής κίνησης βελτιστοποιείται με γενετικούς αλγορίθμους πριν την έναρξη της αποστολής, ώστε το όχημα να έχει το μικρότερο σφάλμα θέσης από την επιθυμητή πορεία. Λόγω της σχεδίασης χωρίς μαθηματική μοντελοποίηση του οχήματος, ο ελεγκτής κίνησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα με μικρές μόνο τροποποιήσεις.

Η προτεινόμενη υβριδική αρχιτεκτονική ελέγχου για την λύση του προβλήματος της αυτόνομης πλοήγησης των υποβρυχίων οχημάτων, που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή, περιλαμβάνει τρία επίπεδα σε ιεραρχική δομή:

1. Επίπεδο σχεδιασμού βέλτιστης πορείας
2. Επίπεδο βελτιστοποίησης ασαφών ελεγκτών κίνησης
3. Επίπεδο ανίχνευσης - αποφυγής εμποδίων και ελέγχου κίνησης

Το επίπεδο ελέγχου κίνησης έχει και αυτό ιεραρχική δομή και περιλαμβάνει:

1. Τμήμα ανάγνωσης αισθητήρων
2. Τμήμα λήψης απόφασης αποφυγής εμποδίων
3. Τμήμα ελέγχου κίνησης



Σχήμα 1-1: Προτεινόμενη υβριδική αρχιτεκτονική πλοήγησης

Στο πρώτο επίπεδο γίνεται ο σχεδιασμός της πορείας του οχήματος, μακριά από τα φυσικά εμπόδια του πυθμένα και με κατάλληλη μορφή ώστε να μπορεί να την ακολουθήσει το όχημα. Στην συνέχεια βελτιστοποιούνται οι ελεγκτές κίνησης του οχήματος, ώστε να εξασφαλίζεται η ακριβής πλοήγηση του οχήματος με τα μικρότερα σφάλματα θέσης πάνω στην πορεία που έχει αποφασιστεί. Τέλος παράγονται οι εντολές κίνησης του οχήματος από έναν ιεραρχικό ελεγκτή, που αποτελείται από τρία τμήματα και ενσωματώνει αξιολόγηση ενδείξεων αισθητήρων, λήψη απόφασης αποφυγής σύγκρουσης και έλεγχο κίνησης. Λόγω της γενικότητας της σχεδίασης και

της απουσίας μαθηματικού μοντέλου του οχήματος η προτεινόμενη αρχιτεκτονική πλοήγησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλους τους τύπους αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων.

Για να ελεγχθεί η προτεινόμενη υβριδική αρχιτεκτονική δημιουργήθηκε ένας προσομοιωτής κίνησης στον οποίο προγραμματίστηκε το δυναμικό μοντέλο ενός πραγματικού αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος. Επίσης πραγματοποιήθηκαν πειράματα ελέγχου σε δεξαμενή δοκιμών με αυτόνομο υποβρύχιο όχημα σε πραγματικό χρόνο.

1.3 Συνεισφορά και πρωτοτυπία της διατριβής

Στην παρούσα εργασία προτείνεται για πρώτη φορά μια ολοκληρωμένη μέθοδος αυτόνομης πλοήγησης υποβρυχίων οχημάτων. Η μέθοδος χαρακτηρίζεται ως *ολοκληρωμένη* διότι περιλαμβάνει σύστημα σχεδιασμού πορείας και σύστημα ελέγχου κίνησης. Ο σχεδιασμός πορείας που προτείνεται είναι επέκταση της μεθόδου που παρουσιάζεται στο [38] για υποβρύχια περιβάλλοντα και βασίζεται στην βελτιστοποίηση πολυπαραμετρικών καμπυλών B-Splines. Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι προκύπτουν ομαλές πορείες με μαθηματική αναπαράσταση και σχήμα που μπορεί να ακολουθήσει ένα υποβρύχιο όχημα, δεδομένου ότι κατά τον σχεδιασμό λαμβάνεται υπόψη η ικανότητα ελιγμών του οχήματος.

Ο έλεγχος κίνησης που προτείνεται περιλαμβάνει : α) αποφυγή εμποδίων, που δεν είναι γνωστά στο σύστημα σχεδιασμού πορείας και β) συστηματική αντιμετώπιση της επίδρασης υποθαλασσίων ρευμάτων μεταβαλλόμενης έντασης και διεύθυνσης. Η αποτελεσματικότητα του συστήματος ελέγχου κίνησης ελέγχεται διεξοδικά με προσομοίωση της κίνησης πραγματικού μη ολονομικού οχήματος, για το οποίο είναι γνωστές ακριβείς εξισώσεις κίνησης [39], αλλά και σε μη ολονομικό όχημα χωρίς γνώση του μαθηματικού μοντέλου κίνησης του.

Τα συστήματα σχεδιασμού πορείας και ελέγχου κίνησης ενσωματώνονται για πρώτη φορά σε κοινή αρχιτεκτονική ελέγχου που λόγω της γενικότητας της και της απουσίας μαθηματικής μοντελοποίησης του οχήματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα υποβρύχια οχήματα.

Τα αποτελέσματα τόσο των προσομοιώσεων όσο και των πειραμάτων πραγματικού χρόνου είναι ενθαρρυντικά δεδομένου ότι εξασφαλίζουν μικρή απόκλιση από την επιθυμητή πορεία για όλους τους τύπους ελεγκτών κίνησης (ευρετικούς και βελτιστοποιημένους), που χρησιμοποιούνται.

1.4 Δομή της διατριβής

Το Κεφάλαιο 2 αναφέρεται στα μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα και ειδικότερα στα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα. Γίνεται αναδρομή στην σχετική βιβλιογραφία με παρουσίαση των κυριότερων μεθόδων πλοήγησης των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων. Επίσης αναφέρονται οι κυριότερες μέθοδοι προσδιορισμού θέσης των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων, που γίνεται

αξιοποιώντας τις ενδείξεις από αισθητήρες του οχήματος και είναι ουσιώδους σημασίας για την πλοήγηση.

Στα Κεφάλαια 3 και 4 παρατίθεται το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για την κατανόηση των θεμάτων που θα συζητηθούν στην συνέχεια. Συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 3 αναλύονται η κινηματική και η δυναμική των υποβρυχίων οχημάτων, εξάγονται οι εξισώσεις κίνησης και περιγράφεται η μέθοδος προσομοίωσης που θα χρησιμοποιηθεί. Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται παρουσίαση του ευφυούς ελέγχου με ασαφή λογική, των γενετικών αλγορίθμων και των πολυπαραμετρικών καμπυλών.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται μια αναφορά στις προτεινόμενες στην βιβλιογραφία αρχιτεκτονικές ελέγχου αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων και παρουσιάζεται η προτεινόμενη υβριδική αρχιτεκτονική ελέγχου.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η ο έλεγχος κίνησης με τους ασαφείς ελεγκτές που εφαρμόζονται.

Στο Κεφάλαιο 7 παρουσιάζεται ο προτεινόμενος σχεδιασμός πορείας με γενετική βελτιστοποίηση πολυπαραμετρικών καμπυλών.

Στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζεται η βελτιστοποίηση με γενετικούς αλγόριθμους των ασαφών ελεγκτών κίνησης, ώστε κατά την κίνηση του οχήματος πάνω στην βέλτιστη πορεία να ελαχιστοποιείται το σφάλμα θέσης.

Στο Κεφάλαιο 9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων, που πραγματοποιήθηκαν για τον έλεγχο των τριών επιπέδων του προτεινόμενου πολυεπίπεδου ελεγκτή πλοήγησης αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων. Τα αποτελέσματα δίνονται ομαδοποιημένα σε πίνακες.

Στο Κεφάλαιο 10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων σε πραγματικό όχημα, που πραγματοποιήθηκαν για τον έλεγχο του επίπεδου ελέγχου κίνησης. Παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη, το όχημα και τα πειράματα που έγιναν, με τα αποτελέσματα τους ομαδοποιημένα σε πίνακες.

Το Κεφάλαιο 11 ολοκληρώνει την διατριβή με συζήτηση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών προσομοιώσεων και των πειραμάτων με την προτεινόμενη αρχιτεκτονική ελέγχου. Επίσης προτείνονται μελλοντικές επεκτάσεις και περαιτέρω έρευνα.

Ακολουθούν τα παραρτήματα με υλικό που θεωρούμε απαραίτητο για την αυτοτέλεια της διατριβής. Στο Παράρτημα Α γίνεται μια σύντομη αναφορά στους αισθητήρες των υποβρυχίων οχημάτων. Στο Παράρτημα Β παρουσιάζεται το αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε και οι κώδικες Matlab για την προσομοίωση της κίνησης και την βελτιστοποίηση των ελεγκτών κίνησης. Στο Παράρτημα Γ δίνεται το επίπεδο ελέγχου κίνησης σε κώδικα C, που

γράφτηκε για να γίνουν τα πειράματα με το πραγματικό υποβρύχιο όχημα και τα αποτελέσματα αυτών.

1.5 Δημοσιεύσεις

Μέρος των αποτελεσμάτων της έρευνας, που περιέχεται στην παρούσα διατριβή, έχει δημοσιευτεί μέχρι σήμερα στα:

- Kanakakis V., Tsourveloudis N., “Evolutionary Path Planning and Navigation of Autonomous Underwater Vehicles”, *Proceedings of the 15th IEEE Mediteranean Conferenve on Control and Automation, Athens, June 27-29, 2007*.
- Kanakakis V., Valavanis K. P, Tsourveloudis N. C., “Fuzzy Logic Based Navigation of Underwater Vehicles”, *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 40, pp. 45–88, 2004.
- Kanakakis V., Tsourveloudis N. C., Valavanis K. P., “Design and Testing of a Fuzzy Logic Controller for an Autonomous Underwater Vehicle”, *Proceedings of the IARP Workshop on Underwater Robotics for Sea Exploration and Environmental Monitoring, Rio de Janeiro, Brazil, October 2001*.

2° ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Αυτόνομα υποβρύχια οχήματα και προηγούμενη έρευνα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων. Επίσης γίνεται βιβλιογραφική επισκόπηση στα θέματα που αφορούν στο σχεδιασμό τροχιάς, στην αποφυγή εμποδίων, στην πλοήγηση, τον έλεγχο και τις μεθόδους προσδιορισμού θέσης των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων, ενώ παρουσιάζονται οι σημαντικότερες δημοσιευμένες εργασίες.

2.1 Μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα

Η ραγδαία ανάπτυξη στον τομέα της ρομποτικής, που σημειώθηκε τα τελευταία χρόνια, είχε ως άμεσο αποτέλεσμα και την επέκταση των ρομποτικών εφαρμογών στις υποθαλάσσιες εγκαταστάσεις [12], [40]. Η χρήση τηλεχειριζόμενων (Remotely Operated Vehicles, ROV) αλλά και αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων (Autonomous Underwater Vehicles, AUV) γίνεται ολοένα και ευρύτερη, με την διεθνή αγορά να διαθέτει πλέον ιδιαίτερα αξιόπιστα οχήματα που χαρακτηρίζονται από ευελιξία, ταχύτητα, αντοχή και ευκολία στην πλοήγηση. Οι διαστάσεις και οι

προδιαγραφές σχεδίασής τους κυμαίνονται ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής, γεγονός που δικαιολογεί την ταχύτατη διάδοση και χρήση τους.

Το πρώτο μη επανδρωμένο υποβρύχιο όχημα αποδίδεται στον Robert Whitehead που κατασκεύασε το όχημα *Torpedo fish* στην Αυστρία το 1866, το οποίο αυτό κινείτο με πεπιεσμένο αέρα, είχε μέγιστη ταχύτητα 3 m/s και εμβέλεια 700 m.

Περίπου 1000 μη επανδρωμένα υποβρύχια ρομποτικά οχήματα (Uninhabited Undersea Vehicles, UUV's) βρίσκονται σε λειτουργία στις μέρες μας [41]. Τα περισσότερα είναι τηλεχειριζόμενα οχήματα (ROV's), σχεδιασμένα να εκτελούν υποβρύχιες εργασίες, όπως επιθεωρήσεις, κατασκευές και επιδιορθώσεις αγωγών και καλωδίων σε βάθη πάνω από 1000 μέτρα. Οι δυνατότητες των υποβρυχίων οχημάτων συνεχώς αυξάνονται και μπορούν πλέον να εκτελούν υψηλής ανάλυσης ακουστικές και οπτικές περιηγήσεις σε μεγάλα βάθη, κάτι που παλαιότερα θεωρείτο αδύνατο. Για παράδειγμα τα οχήματα *Jason* και *Argo II* χρησιμοποιήθηκαν το 1997 για την χαρτογράφηση και επιθεώρηση μιας περιοχής ναυαγίου με έκταση 2 Km² στον Ειρηνικό ωκεανό σε βάθος 4100 μέτρα [42].

Ένα ROV περιγράφεται ως ένα τηλεχειριζόμενο όχημα που χαρακτηρίζεται από σχετική ευελιξία κίνησης ανάλογα με την τεχνολογία και τους βαθμούς ελευθερίας που διαθέτει και συνήθως φέρει κάμερα με δυναμικά χαρακτηριστικά (κίνηση, περιστροφή, εστίαση). Ένα τέτοιο τηλεχειριζόμενο υποβρύχιο ρομποτικό όχημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επιθεωρήσεις στα ύφαλα πλοίων ή να εισχωρεί σε ναυάγια, αναζητώντας στοιχεία και καταγράφοντας βίντεο με την κάμερά του. Ακόμη έχει την δυνατότητα να εισέρχεται σε μεγάλες δεξαμενές καυσίμων και σε εγκαταστάσεις ιχθυοτροφείων. Γίνεται αντιληπτό ότι ένα υποβρύχιο ρομποτικό όχημα αντικαθιστά την άμεση ανθρώπινη επέμβαση, ειδικά στις περιπτώσεις υψηλού κινδύνου, εξαλείφοντας με τον τρόπο αυτό την πιθανότητα απώλειας ανθρώπινης ζωής ή τραυματισμού [243].

Το γεγονός ότι ένα υποβρύχιο ρομποτικό όχημα δέχεται συνεχώς δυνάμεις από υποθαλάσσια ρεύματα και κύματα, σε συνδυασμό με την δυσκολία προσδιορισμού της θέσης του ως προς ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς, κάνουν ιδιαίτερα ελκυστικό το πρόβλημα ελέγχου του. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η ύπαρξη οπτικών, ηχητικών και μαγνητικών αισθητήρων, με την βοήθεια των οποίων προσδιορίζεται η θέση του οχήματος και υλοποιείται ο έλεγχος με διαδικασίες κλειστού βρόχου.

Τα τεχνικά εμπόδια στην εργασία των υποβρυχίων οχημάτων διαφέρουν σε πολλές απόψεις από αυτά των εναερίων, επίγειων και των οχημάτων των διαστημικών αποστολών. Η γρήγορη εξασθένιση των ακουστικών και των ηλεκτρομαγνητικών σημάτων στο νερό, περιορίζει την ακτίνα και το εύρος των ακουστικών και των οπτικών αισθητήρων υψηλής ανάλυσης [43]. Επιπλέον οι τεχνικές ράδιο καθοδήγησης που χρησιμοποιούνται σε εναέρια και διαστημικές αποστολές δεν λειτουργούν υποβρυχίως [44].

Οι μεγάλες πιέσεις που ασκούνται σε ένα υποβρύχιο περιβάλλον καθιστούν δύσκολο τον σχεδιασμό και την κατασκευή των υποβρυχίων οχημάτων. Λίγα μόνο επανδρωμένα υποβρύχια μπορούν να ξεπεράσουν τα 1000 μέτρα βάθος, ενώ ένα μόνο μπορεί να φτάσει τα 6500 μέτρα. Αντίθετα, ένας μεγάλος αριθμός μη επανδρωμένων υποβρυχίων ρομπότ λειτουργούν στα 6000 μέτρα βάθος και ένα από αυτά μπορεί να φτάσει τα 11000 μέτρα [45]. Γενικά τα μη επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα μπορούν να καταταχθούν ανάλογα με τις αποστολές για τις οποίες προορίζονται ως εξής [46]:

1. **Εμπορικές Αποστολές:** Οχήματα που δημιουργούνται με σκοπό την κάλυψη πληθώρας αναγκών, όπως περιηγήσεις, επιθεωρήσεις, έρευνα, ανάκτηση αντικειμένων, υποβρύχιες εργασίες, επισκευές και συντηρήσεις εξοπλισμού.
2. **Αποστολές Ωκεανογραφικής Έρευνας:** Οχήματα χρησιμοποιούμενα από ερευνητικά ιδρύματα για εξερεύνηση ή χαρτογράφηση υποθαλάσσιων περιοχών.
3. **Στρατιωτικές αποστολές:** Οχήματα για αμυντική χρήση όπως συντήρηση, επιθεώρηση, έρευνα, περιπολία για εύρεση και περισυλλογή ναρκών. Πάνω από 7000 στρατιωτικά AUV MK39EMATT έχουν κατασκευαστεί μέχρι σήμερα από την εταιρεία Sippican Inc [12].
4. **Ερευνητικές εφαρμογές:** Πρωτότυπα οχήματα που κατασκευάζονται για επιστημονική έρευνα και ανάπτυξη, όπως το Phoenix AUV του Naval Postgraduate School, Monterey, ΗΠΑ. [47]. Το μαθηματικό μοντέλο κίνησης τους NPS Phoenix θεωρείται πλήρως γνωστό [39] και είναι αυτό που χρησιμοποιείται στην συνέχεια για τις προσομοιώσεις.

Για τις παραπάνω εφαρμογές έχουν κατασκευαστεί τόσο τηλεκατευθυνόμενα υποβρύχια οχήματα όσο και αυτόνομα υποβρύχια οχήματα.

2.2 Τηλεχειριζόμενα υποβρύχια οχήματα

Τα πιο διαδεδομένα οχήματα είναι τα τηλεχειριζόμενα οχήματα τα οποία συνδέονται με το μητρικό σκάφος με καλώδιο το οποίο μεταφέρει ισχύ και δεδομένα. Τα ROV's θεωρούνται πλέον ως τα επικρατέστερα εργαλεία για τις υποθαλάσσιες επιχειρήσεις και μπορούν να καλύψουν ένα αρκετά μεγάλο σύνολο εφαρμογών. Το ευρύ φάσμα των εφαρμογών τους οφείλεται στους αισθητήρες και στους ρομποτικούς βραχίονες που διαθέτουν.

Το κυριότερο πεδίο εφαρμογής των τηλεχειριζόμενων υποβρυχίων οχημάτων είναι η βιομηχανία εξόρυξης πετρελαίου, οι ανάγκες της οποίας για τέτοια οχήματα αυξάνονται όσο αυξάνεται το βάθος εξόρυξης [6]. Η βιομηχανία εξόρυξης πετρελαίου προσπαθεί να κάνει γεωτρήσεις και να εκμεταλλευτεί εμπορικά κοιτάσματα σε βάθη που τα προηγούμενα χρόνια θα ήταν απρόσιτα ή οικονομικά ασύμφορα. Σύμφωνα με δημοσιευμένα στοιχεία [48], οι εξορύξεις πετρελαίου θα γίνονται σε βάθος μεγαλύτερο από 2500 μέτρα σε διάστημα λίγων ετών. Το όριο βάθους

κατάδυσης για τον άνθρωπο είναι 100 μέτρα ή περίπου 300 μέτρα για πλήρως κορεσμένη κατάδυση μεικτών αερίων. Κάτω από αυτά τα βάθη όλες οι εργασίες επιθεώρησης, συντήρησης και επισκευών θα πρέπει να γίνονται με υποβρύχια οχήματα, αυτόνομα ή τηλεκατευθυνόμενα. Προς το παρόν τα υποβρύχια οχήματα αξιοποιούνται από την βιομηχανία εξόρυξης πετρελαίου σε εργασίες επιθεώρησης, συντήρησης και επισκευών, όπως επίσης και σε εργασίες επιθεώρησης και εξερεύνησης του πυθμένα.

Για τις ανάγκες εξόρυξης πετρελαίου έχουν δημιουργηθεί τα ROV εργασίας που είναι εφοδιασμένα με κάμερες υψηλής ευκρίνειας και ισχυρούς ρομποτικούς βραχίονες [49]. Ενδεικτικά της κατηγορίας αυτής είναι το ROV Quest της εταιρείας Almstrom-Schilling Robotics το οποίο έχει μέγιστο βάθος εργασίας 3500 μέτρα και το ROV Magellan της εταιρείας Oceaneering International Inc. με μέγιστο βάθος εργασίας 8000 μέτρα. Για εργασίες παρατήρησης, επιθεώρησης και ανεύρεσης αντικειμένων σε περιοχές όπου τα ROV εργασίας είναι πολύ μεγάλα ή πολύ ακριβά, έχουν δημιουργηθεί τα ROV παρατήρησης. Τέλος υπάρχει η κατηγορία των μικρών ROV που είναι οχήματα μικρού βάρους, κόστους και διαστάσεων. Τα μικρά ROV χρησιμοποιούνται για οπτικό και ακουστικό έλεγχο σε μικρά και μεσαία βάθη με σημαντικά μικρότερο κόστος. Μια πλήρης ομαδοποίηση των τηλεχειριζόμενων υποβρυχίων οχημάτων εργασίας δίνεται στο [41] και στο [50]. Πλήρεις πίνακες όλων των τηλεχειριζόμενων υποβρυχίων οχημάτων ανά τον κόσμο με τις προδιαγραφές τους υπάρχουν στο [51].

Οι δυνατότητες των τηλεχειριζόμενων υποβρυχίων οχημάτων περιορίζονται από το καλώδιο σύνδεσης με το μητρικό σκάφος. Τα ROVs εργασίας έχουν μια κατανάλωση ενέργειας από 35 έως 150 kW. Η ενέργεια που μεταφέρεται στο όχημα περιορίζεται σε σχέση με τις απώλειες λόγω μήκους του αγωγού, από την απαίτηση για μικρή διάμετρο καλωδίου με στόχο την μείωση των υδροδυναμικών δυνάμεων που επάγονται στο όχημα. Τυπικές διάμετροι καλωδίων των τηλεχειριζόμενων υποβρυχίων οχημάτων είναι από 17mm έως 35 mm. Η αύξηση της τάσης, που παρέχει μερική λύση στο πρόβλημα μεταφοράς ισχύος, σταματάει όταν καταπονείται επικίνδυνα η μόνωση. Έτσι τα οχήματα βαθιάς κατάδυσης πρέπει να λειτουργούν σε σημαντικά μικρότερη κατανάλωση από τους προγόνους τους. Για παράδειγμα το ROV Magellan 825, με βάθος κατάδυσης 8000 m, έχει κατανάλωση 18 kW, ενώ το όχημα Magnum με βάθος κατάδυσης 3000 m, έχει κατανάλωση 75 kW. Ο περιορισμός της διαθέσιμης ισχύος είχε ως συνέπεια την αντικατάσταση των υδραυλικών επενεργητών των πρώτων οχημάτων με ηλεκτρικούς, για επίτευξη μεγαλύτερου βαθμού απόδοσης.

2.3 Αυτόνομα υποβρύχια οχήματα

Μια συνεχώς αναπτυσσόμενη κατηγορία οχημάτων είναι αυτή των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων (Autonomous Underwater Vehicles, AUVs). Ένα AUV είναι ένα μη επανδρωμένο, μη

συνδεδεμένο υποβρύχιο όχημα, το οποίο μεταφέρει την δική του πηγή ισχύος και στηρίζεται σε ένα ενσωματωμένο υπολογιστή για την εκπλήρωση της αποστολής του. Τα AUV εκτελούν σειρά οδηγιών που μπορούν να αλλάξουν κατά την λειτουργία, από δεδομένα που συλλέγουν οι αισθητήρες τους [52].

Τα αυτόνομα υποβρύχια ρομποτικά οχήματα προέκυψαν από την ανάγκη συλλογής ωκεανογραφικών δεδομένων κατά μήκος σταθερών τροχιών.

Ενώ τα τηλεχειριζόμενα ROVs έχουν το πλεονέκτημα της λογικής του ανθρώπινου χειριστή και της απεριόριστης παροχής ισχύος μέχρι την δεκαετία του '80, τα AUVs έπρεπε να περιμένουν τις εξελίξεις της τεχνολογίας στους συσσωρευτές και στους υπολογιστές για να εξελιχθούν, πράγμα που έγινε τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Με την εξέλιξη των συσσωρευτών τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα μπορούν να εκτελέσουν αποστολές με μεγαλύτερη διάρκεια, ενώ η εξέλιξη των υπολογιστών συνέβαλε στην ενσωμάτωση υπολογιστικής νοημοσύνης για λύση προβλημάτων πλοήγησης. Άλλοι τεχνολογικοί τομείς που συνέβαλαν στην εξέλιξη της τεχνολογίας των AUV είναι οι ακουστικοί αισθητήρες και οι ακουστικές επικοινωνίες.

Με την εξέλιξη των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων έχει γίνει ευκολότερη η παρατήρηση και η ανάλυση του περιεχομένου των θαλασσών και των παράκτιων περιοχών. Τα δεδομένα με την χρήση των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων συλλέγονται με κόστος 40% έως 60% μικρότερο από αυτό των συμβατικών μεθόδων, γεγονός που δεν μένει απαρατήρητο από την επιστημονική κοινότητα.

Επιπλέον τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα βρίσκουν όλο και περισσότερες εφαρμογές στην βιομηχανία εξόρυξης πετρελαίου [6] σε αρχαιολογικές αποστολές [53] και σε στρατιωτικές εφαρμογές [54]. Στο μέλλον καθήκοντα όπως περισυλλογή ναρκών και επιτήρηση υποβρυχίων περιοχών αναμένεται να γίνονται αποκλειστικά από τέτοια οχήματα.

Τα παραπάνω εξηγούν τους λόγους για τους οποίους τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα είναι τομέας όπου συγκεντρώνεται διεθνώς αρκετή ερευνητική προσπάθεια.

Τα αυτόνομα υποβρύχια ρομποτικά οχήματα άρχισαν να αναπτύσσονται στις αρχές του 1960 με το SEA SPOOK του Rebikoff και το SPURV (Self-Propelled Underwater Research Vehicle) του εργαστηρίου εφαρμοσμένης φυσικής του University of Washington [3]. Το SPURV ολοκληρώθηκε στις αρχές της δεκαετίας του '60 και παρέμεινε σε χρήση για ερευνητικούς σκοπούς μέχρι το τέλος της δεκαετίας του '70. Είχε εκτόπισμα 480 Kg και μπορούσε να αναπτύσσει ταχύτητα 2.2 m/s για 5.5 ώρες σε βάθος μέχρι 3 Km. Το όχημα επικοινωνούσε ακουστικά με την επιφάνεια και μπορούσε να πλοηγηθεί σε σταθερό βάθος, ανάμεσα σε δύο βάθη και με σταθερή κλίση ανάδυσης ή κατάδυσης έως 50°.

Τα οχήματα αυτά ακολούθησαν άλλα όπως το SKAT του ινστιτούτου Shirshov της Ρωσίας, το OSR-V (Ιαπωνία), τα EAVE West, RUMIC, UFSS (Πολεμικό Ναυτικό Η.Π.Α.), τα EAVE και EAST

(University of New Hampshire, Η.Π.Α.). Τα πρώτα αυτά οχήματα ήταν πολύ μεγάλα, ακριβά και μη αποτελεσματικά [9].

Το όχημα AUSS (Advanced Unmanned Search System) αναπτύχθηκε από το κέντρο ερευνών του Πολεμικού Ναυτικού των ΗΠΑ SPAWAR, το 1973 για έρευνα και εντοπισμό αντικειμένων με αφορμή την βύθιση των USS Thresher και USS Scorpion, καθώς και την απώλεια της βόμβας υδρογόνου στο Palomares της Ισπανίας. Το όχημα ολοκληρώθηκε το 1983 και βρισκόταν σε ενέργεια μέχρι την αρχή της δεκαετίας του '90.

Το όχημα EPULARD της Γαλλικής IFREMER σχεδιάστηκε το 1976, κατασκευάστηκε το 1978 και ολοκληρώθηκε το 1980. Ήταν το πρώτο όχημα που καθοδηγείτο αυτόνομα με ακουστικούς αισθητήρες και ήταν ικανό να διατηρεί μια σταθερή απόσταση από τον πυθμένα ενώ τραβούσε ένα καλώδιο.

Στο τέλος της δεκαετίας του '80 ξεκίνησε η εξέλιξη του αυτόνομου υποβρύχιου οχήματος HUGIN της Νορβηγικής εταιρείας Kongsberg-Simrad [55]. Έχει μήκος από 4 έως 5 μέτρα ανάλογα με το μήκος του μεσαίου τμήματος, διάμετρο γάστρας 0,75 μέτρα, εκτόπισμα 650 κιλά, μέγιστη ταχύτητα 2.57 m/s (5 Knots) και αυτονομία έως 24 ώρες σε βάθος έως 1000 μέτρα. Το όχημα αυτό μπορεί να εκτελεί αποστολές αναγνώρισης χαρτογράφησης και συλλογής ωκεανογραφικών δεδομένων με τις κάμερες υψηλής ευκρίνειας που διαθέτει.

Στην δεκαετία του '90 υπήρξε μεγάλο ενδιαφέρον από Ακαδημαϊκά Ιδρύματα, που κατασκεύασαν αυτόνομα υποβρύχια οχήματα για ερευνητικούς σκοπούς. Το Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (MIT), ΗΠΑ, εξέλιξε το όχημα Odyssey για ερευνητικούς σκοπούς στην αρχή της δεκαετίας του '90 [56]. Το όχημα εκτός των άλλων, χρησιμοποιήθηκε για συλλογή ωκεανογραφικών δεδομένων σε δίκτυο με άλλα οχήματα [57].

Το αυτόνομο υποβρύχιο όχημα ABE (Autonomous Benthic Explorer), που αναπτύχθηκε για ωκεανογραφική έρευνα [58] από το Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) στις αρχές της δεκαετίας του '90, έχει εκτόπισμα 680 Kg και αυτονομία μέχρι 34 ώρες με ταχύτητα 0.75 m/s, σε βάθη έως 5 Km. Έχει έξι ωθητήρες που το καθιστούν ευέλικτο και ικανό να ακολουθεί την γεωμετρία του πυθμένα. Η βαθύτερη του κατάδυση έγινε σε βάθος 4 Km. Το WHOI εξέλιξε επίσης το REMUS (Remote Environmental Monitoring Units) για ακαδημαϊκή έρευνα [59]. Το όχημα αυτό έχει αυτονομία έως 20 ώρες, εκτόπισμα 36 Kg, μέγιστο βάθος 100 m και ταχύτητα 1.5 m/s. Υπάρχουν περίπου εννέα τέτοια οχήματα σε πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα ανά τον κόσμο [46].

Εκτός από τα παραπάνω οχήματα, υπάρχει πληθώρα οχημάτων για ερευνητικούς και στρατιωτικούς σκοπούς σε τουλάχιστον 12 χώρες που ασχολούνται με την έρευνα και την εξέλιξή τους [60]. Στο [61] υπάρχει πίνακας με 75 οχήματα, ενώ στο [62] υπάρχει πίνακας με τα οχήματα

που είναι κατάλληλα για ακουστική παρατήρηση ψαριών. Στην βιβλιογραφία υπάρχει εκτεταμένη αναφορά στους τύπους των υποβρυχίων οχημάτων στα [9], [41], [46], [63], [64].

Ως προς τις αποστολές που εκτελούν, τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

1. Τα οχήματα ωκεανογραφικής παρατήρησης, τα οποία είναι σχεδιασμένα ώστε να είναι ενεργειακά βέλτιστα και να μπορούν να συλλέγουν ωκεανογραφικά δεδομένα ενώ πλοηγούνται σε βαθιά νερά, (π.χ. Odyssey [65], Ocean Voyager [66], Remus [67]) και τα μεγαλύτερα οχήματα Draper UUV [68] και LDUUV [69]). Τα οχήματα αυτά συνήθως κινούνται από έλικες και ελέγχονται από πτερύγια.
2. Τα οχήματα, στα οποία ο έλεγχος της θέσης γίνεται από ωθητήρες, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να έχουν χαμηλή ταχύτητα ή να είναι ακίνητα πάνω από ένα αντικείμενο. Τέτοια οχήματα είναι τα OTTER [70], Phoenix [71], Marius [72] και Vortex [73].

Η διαχείριση της διαθέσιμης ενέργειας είναι τομέας βασικού ενδιαφέροντος για τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα. Με δεδομένη χωρητικότητα συσσωρευτών η αυτονομία επηρεάζεται κυρίως από την ταχύτητα και από την κατανάλωση των αισθητήρων του οχήματος. Η διαθέσιμη θεωρητική ενέργεια ανά μονάδα βάρους συσσωρευτή διαφέρει ανά τύπο συσσωρευτή και είναι 160 Wh/Kg για τους συσσωρευτές οξειδίου μολύβδου, 230 Wh/Kg για του συσσωρευτές οξειδίου του μολύβδου, 800 Wh/Kg για τους συσσωρευτές πυριτίου – νατρίου και 3400 Wh/Kg για τις κυψέλες υδρογόνου [74]. Στην πράξη οι πραγματικές τιμές διαθέσιμης ενέργειας φτάνουν στο 10 έως 25% των θεωρητικών. Σήμερα, η πλειονότητα των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων είναι εφοδιασμένα με συσσωρευτές οξειδίου μολύβδου ή νικελίου-καδμίου για λόγους κόστους, ύπαρξης τέτοιων συσσωρευτών στο εμπόριο σε μεγάλη ποικιλία και δυνατότητα ασφαλούς φόρτισης χωρίς κίνδυνο έκρηξης, παράγοντες που δεν έχουν εξασφαλισθεί στους συσσωρευτές νέας γενιάς.

Η απουσία ανθρώπινου ελεγκτή υποδεικνύει ότι οι αποστολές των AUV περιορίζονται από το σύστημα ελέγχου, την επεξεργασία των δεδομένων και τις δυνατότητες των αισθητήρων. Η απουσία καλωδίου, που συνδέει το όχημα με κάποιο μητρικό σκάφος, περιορίζει την ποσότητα διαθέσιμης ενέργειας σε αυτήν που διαθέτουν οι συσσωρευτές του οχήματος. Έτσι περιορίζεται η διάρκεια της αποστολής. Ως αποτέλεσμα αυτών των περιορισμών, η ισχύς, η πλοήγηση και η οργάνωση της αποστολής αποτελούν κρίσιμους τεχνολογικούς τομείς για την μελλοντική ανάπτυξη των AUVs. Η ανάπτυξη των τομέων αυτών θα βοηθήσει τους σχεδιαστές να προσεγγίσουν τους παρακάτω στόχους: ευέλικτη επικοινωνία, αξιοπιστος έλεγχος και προγραμματισμός αξιοποίησης αποθεμάτων, ενσωμάτωση των πληροφοριών στην επεξεργασία πολύ-αισθητήριων λειτουργιών, σχεδιασμός αποστολής και προσαρμογή σε μεταβολές του συστήματος και του περιβάλλοντος [244]. Τα ζητήματα που πρέπει να επιλυθούν ώστε η

τεχνολογία των αυτόνομων υποβρύχιων οχημάτων να φτάσει στην ωριμότητα και να μπορεί πλήρως να ανταπεξέλθει στις απαιτήσεις των αποστολών που χρησιμοποιούνται είναι:

1. Η ευκολία χρήσης και η αξιοπιστία. Τα οχήματα θα πρέπει να γίνουν προσιτά μέσω φιλικού περιβάλλοντος προγραμματισμού και ελέγχου και να εκτελούν αξιόπιστα τις προγραμματισμένες αποστολές.
2. Ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός και εκτέλεση μιας αποστολής σε τομείς που περιλαμβάνουν σχεδιασμό πορείας, έλεγχο πλοήγησης, ανάλυση δεδομένων και δημιουργία αναφορών.
3. Η δυνατότητα αξιοποίησης διαφορετικών τύπων αισθητήρων.
4. Η αξιόπιστη καθέλκυση και περισυλλογή του οχήματος, από σκάφος στο οποίο δεν απαιτείται η ύπαρξη ειδικού εξοπλισμού για αυτόν τον σκοπό.

2.4 Προηγούμενη έρευνα και βιβλιογραφία

Κατά την πλοήγηση των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων παρουσιάζονται προβλήματα που προκύπτουν από τους εξής παράγοντες [75]:

1. Το άγνωστο υποβρύχιο περιβάλλον. Φτωχές πληροφορίες χαρτογράφησης και αντίληψης σε συνδυασμό με απρόβλεπτες συμπεριφορές.
2. Πολύ περιορισμένες επιλογές επικοινωνίας με το όχημα.
3. Πρακτικά άγνωστες δυναμικές εξισώσεις του οχήματος.
4. Η σύνθεση των δεδομένων των αισθητήρων. Δεδομένα από διαφορετικούς αισθητήρες πρέπει να συνεκτιμηθούν και να χρησιμοποιηθούν.
5. Ο συγχρονισμός πιθανά αντικρουόμενων συμπεριφορών, όπως αποφυγή συγκρούσεων και επίτευξη στόχων αποστολής.

Για την λύση των προβλημάτων αυτών έχουν ασχοληθεί διάφοροι ερευνητές, οι εργασίες των οποίων παρουσιάζονται στην συνέχεια ομαδοποιημένες ανά τομέα.

2.4.1 Σχεδιασμός πορείας αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων

Ο σχεδιασμός πορείας είναι ένα κλασικό πρόβλημα στην ρομποτική και στα αυτόνομα οχήματα. Με δεδομένο περιβάλλον κίνησης που περιέχει εμπόδια, το πρόβλημα του σχεδιασμού πορείας είναι να βρεθεί μια πορεία ελεύθερη από εμπόδια, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς που θέτει το όχημα και οι παράμετροι πλοήγησής του [85]. Το πρόβλημα του σχεδιασμού πορείας διαφέρει από αυτό της αποφυγής εμποδίων, δεδομένου ότι το πρώτο αναφέρεται σε υπολογισμό πορείας πριν την έναρξη της αποστολής σε γνωστό περιβάλλον κίνησης, ενώ το δεύτερο

αναφέρεται σε πλοήγηση με συμπεριφορά αντίδρασης σε περιβάλλον με άγνωστα εμπόδια. Η σχεδιαζόμενη πορεία πρέπει : 1) να έχει μορφή που μπορεί να ακολουθήσει το όχημα και 2) να εξασφαλίζει μικρή πιθανότητα σύγκρουσης με εμπόδια καθώς το όχημα την ακολουθεί.

Τα πρόβλημα του σχεδιασμού πορείας έχει αντιμετωπισθεί στα οχήματα εδάφους, στα εναέρια οχήματα καθώς και στα υποβρύχια. Εκτενής αναφορά στις μεθόδους σχεδιασμού πορείας για οχήματα εδάφους γίνεται στο [76]. Οι περισσότερες προσεγγίσεις βασίζονται σε αλγορίθμους που έχουν στόχο την ελαχιστοποίηση του μήκους της πορείας, του χρόνου που χρειάζεται για την πραγματοποίηση ή και των δύο, ενώ απαιτούν λεπτομερή μοντελοποίηση του περιβάλλοντος και της δυναμικής του οχήματος. Στις περισσότερες αποστολές αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων η πορεία του οχήματος καθορίζεται πριν την έναρξη της αποστολής από τον χρήστη ο οποίος καθορίζει μια σειρά σημείων στόχου. Στην συνέχεια το όχημα χρησιμοποιεί στρατηγικές αποφυγής εμποδίων για να τροποποιήσει τοπικά την πορεία, σε περίπτωση που ανιχνευτεί κάποιο εμπόδιο. Η παραπάνω προσέγγιση είναι ικανοποιητική σε περιπτώσεις αποστολών σε ανοικτή θάλασσα, μακριά από τον πυθμένα με προβλέψιμα ρεύματα και κύματα. Σε πιο περίπλοκες αποστολές είναι απαραίτητη η χρήση σχεδιαστών πορείας για να προσδιοριστεί η βέλτιστη πορεία, που συνήθως δεν είναι προφανής στον άνθρωπο. Για σχεδιασμό πορείας αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές, αντίστοιχες με αυτές που έχουν χρησιμοποιηθεί στα επίγεια και στα εναέρια οχήματα.

Η μέθοδος των ηλεκτροστατικών πεδίων προτάθηκε στο [77] για τοπική πλοήγηση και αποφυγή εμποδίων στην κίνηση ρομποτικών βραχιόνων και έχει εφαρμοστεί και στα οχήματα εδάφους ([78], [79]) και για τον σχεδιασμό της βέλτιστης πορείας αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων [22]. Στην προσέγγιση των τεχνητών ηλεκτροστατικών πεδίων τα εμπόδια θεωρούνται ότι φέρουν ηλεκτρικά φορτία τα οποία δημιουργούν στον χώρο κίνησης ένα πεδίο δυναμικού και απωθούν το όχημα, ενώ το σημείο στόχου έχει φορτίο με αντίθετο πρόσημο που έλκει το όχημα. Η πορεία του οχήματος προκύπτει από την κατεύθυνση της συνισταμένης των δυνάμεων. Η βέλτιστη πορεία υπολογίζεται από δύο σχεδιαστές πορείας έναν γενικό και ένα τοπικό. Πρώτα επιλέγεται από τον γενικό σχεδιαστή η πορεία κατά μήκος των περιοχών με ελάχιστο δυναμικό και ακολούθως η πορεία διορθώνεται τοπικά, όπου απαιτείται, από τον τοπικό σχεδιαστή. Εάν ο τοπικός σχεδιαστής πορείας αποτύχει στην δημιουργία εφικτής πορείας, ξανακαλείται ο γενικός σχεδιαστής. Ο χώρος κίνησης αναπαρίσταται από ένα δίκτυο κόμβων όπου ο κάθε κόμβος παίρνει μια τιμή κόστους ανάλογη με την απόσταση ανάμεσα σε αυτόν και στο γειτονικό του. Η βέλτιστη πορεία είναι αυτή που ελαχιστοποιεί το συνολικό μήκος και βρίσκεται μακριά από τα εμπόδια. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι η πιθανότητα εγκλωβισμού σε τοπικό ελάχιστο όταν το δυναμικό έχει άθροισμα μηδέν σε διακριτά σημεία του χώρου.

Για τον σχεδιασμό πορείας αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων έχει προταθεί η χρήση διαφορετικών τεχνικών, όπως η αναπαράσταση του χώρου κίνησης με ένα γράφο συνδεδεμένων

κορυφών, οι οποίες περιλαμβάνουν τις ακμές των εμποδίων τα οποία μοντελοποιούνται ως κύβοι [80], [81], [82]. Στην συνέχεια συναρτήσεις κόστους χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστεί η πορεία που τις ελαχιστοποιεί. Σε παρόμοιες προσεγγίσεις η βέλτιστη πορεία προκύπτει με συνδυασμό κινήσεων ανάμεσα σε κόμβους [83], [84].

Στο [23] παρουσιάζεται ένας σχεδιαστής πορείας που αξιοποιεί πληροφορίες βαθυμετρίας, θέσης εμποδίων, απαγορευμένων περιοχών κίνησης και θαλασσίων ρευμάτων. Αυτές οργανώνονται σε δενδρική μορφή και οι είσοδοι είναι το αρχικό σημείο, το τελικό σημείο και διάφοροι περιορισμοί της αποστολής όπως ελάχιστο και μέγιστο βάθος, επιθυμητές ταχύτητες και διαθέσιμη ενέργεια. Ο σχεδιαστής τροχιάς δημιουργεί μια πορεία που ελαχιστοποιεί μια συνάρτηση κόστους με χρήση του αλγορίθμου A^* [85], [86], η οποία θεωρείται ελεύθερη από εμπόδια όταν δεν τέμνει εμπόδια ή δεν υπερβαίνει τους περιορισμούς της αποστολής.

Στο [21] προτείνεται ένας σχεδιαστής πορείας αυτονόμων υποβρύχιων οχημάτων με προσέγγιση εξέτασης περιπτώσεων, όπου η πορεία υπολογίζεται επιλέγοντας παλαιότερες πορείες που έχουν αποθηκευτεί σε μια βάση δεδομένων. Επίσης η πορεία μπορεί να υπολογιστεί με σύνθεση ή με τροποποίηση αποθηκευμένων πορειών.

Στο [87] εξετάζεται ο σχεδιασμός πορείας ενεργειακά βέλτιστης με χρήση γενετικών αλγορίθμων σε θαλάσσιο περιβάλλον με ρεύμα. Στο [26] προτείνεται η χρήση γενετικών αλγορίθμων για τον προσδιορισμό της βέλτιστης ακολουθίας των σημείων στόχου. Στο [88] προτείνεται γενετικός σχεδιασμός πορείας για αυτόνομα υποβρύχια οχήματα σε περιβάλλοντα με ισχυρά ρεύματα όπως νερά ποταμών. Η πορεία οχήματος δίνεται με διαδοχικά σημεία στόχου τα οποία χαρακτηρίζονται από τις καρτεσιανές τους συντεταγμένες και από τον χρόνο προσέγγισης. Με προσομοίωση υπολογίζεται η ενέργεια που καταναλώνεται από το όχημα για την ολοκλήρωση της διαδρομής. Η βέλτιστη πορεία βρίσκεται με γενετική ελαχιστοποίηση μια συνάρτησης κόστους που περιλαμβάνει όρους χρόνου, απόστασης και απαιτούμενης ενέργειας. Στην αρχή της ελαχιστοποίησης υποτίθεται μια πορεία που αποτελείται από τρία σημεία στόχου, τα οποία αυξάνονται όταν υπάρχει περαιτέρω μείωση της συνάρτησης κόστους.

Στο [89] παρουσιάζεται ευρετική μέθοδος για τρισδιάστο σχεδιασμό πορείας στερεών σωμάτων με διαγράμματα Voronoi [90], [91], τα οποία αναπαριστούν τη συνδεσιμότητα των σημείων του χώρου. Ο υπολογισμός της βέλτιστης πορείας με την μέθοδο αυτή έχει το μειονέκτημα του αυξημένου υπολογιστικού φόρτου. Σύγκριση μεθόδων προσδιορισμού πορείας υποβρυχίων οχημάτων υπάρχει στο [86].

Το κοινό χαρακτηριστικό που έχουν όλες οι παραπάνω προσεγγίσεις είναι ότι οι πορείες παράγονται με την μορφή μιας ακολουθίας διαδοχικών σημείων στόχου. Στην παρούσα διατριβή για τον σχεδιασμό πορείας χρησιμοποιήθηκαν γενετικοί αλγόριθμοι σε συνδυασμό με πολυπαραμετρικές καμπύλες B-Splines. Η μέθοδος αυτή που έχει προταθεί για την σχεδίαση πορείας εναέριων οχημάτων στο [38], τροποποιήθηκε ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στον

σχεδιασμό πορείας αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων. Με αυτόν τον τρόπο η βέλτιστη πορεία σχηματίζεται από μια μαθηματική καμπύλη που είναι πιο εύκολο να ακολουθήσει το όχημα, καθώς δεν προκύπτουν λάθη από διαδοχικές απότομες αλλαγές κατεύθυνσης. Πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθόδου έναντι της μεθόδου των διαγραμμάτων Voronoi είναι ο μικρότερος απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος.

2.4.2 Αποφυγή εμποδίων

Πιθανοί κίνδυνοι στην κίνηση των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων μπορεί να είναι μια απότομη ανύψωση του πυθμένα, αντικείμενα στον πυθμένα, ναυάγια και άλλα υποβρύχια οχήματα ή πλοία επιφανείας που κινούνται στην ίδια περιοχή. Τα εμπόδια στην κίνηση των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων μπορούν να χωριστούν στις εξής κατηγορίες:

1. Βαθιά εμπόδια: διαμορφώσεις πυθμένα, βράχοι, ανθρώπινες κατασκευές, ναυάγια, αλυσίδες, σχοινιά.
2. Παρασυρόμενα εμπόδια στην μάζα του νερού: Ξύλα, δίχτυα, κοπάδια ψαριών, φύκια, δύτες, άλλα υποβρύχια οχήματα.
3. Εμπόδια στην επιφάνεια: σημαδούρες, πλοία επιφανείας, παγόβουνα.

Η ικανότητα ανίχνευσης και αποφυγής τέτοιων εμποδίων εξασφαλίζει την ασφάλεια του οχήματος και της αποστολής. Η βασική ιδέα στην ανίχνευση εμποδίων είναι η χρήση ενός ή περισσότερων αισθητήρων υπέρηχων, που είναι τοποθετημένοι στην κατεύθυνση κίνησης. Κατά την διάρκεια της περασμένης δεκαετίας αναπτύχθηκαν διάφοροι αισθητήρες, που ποικίλουν από τους απλούς αισθητήρες υπερήχων μέχρι τους τρισδιάστατους αισθητήρες υψηλής ευκρίνειας [92]. Πάντως ο τομέας της ανίχνευσης και αποφυγής εμποδίων συγκεντρώνει μέχρι σήμερα αρκετή ερευνητική δραστηριότητα.

Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία των αισθητήρων υπερήχων έχουν βοηθήσει στην εξέλιξη αισθητήρων χαμηλού κόστους και χαμηλής κατανάλωσης που παρέχουν την απαιτούμενη αίσθηση του χώρου κίνησης, για την αποφυγή εμποδίων [25], [93], [94], [95].

Στο [96] προτείνεται η αποφυγή εμποδίων με το όχημα να ακολουθεί έναν κάθετο τοίχο. Στην προσέγγιση αυτή τα όρια του εμποδίου χρησιμοποιούνται για να ορίσουν μια πορεία γύρω από το εμπόδιο. Το όχημα ακολουθεί αυτή την πορεία μέχρι να φτάσει σε ένα επιθυμητό σημείο στα όρια του εμποδίου, όπου παίρνει την εντολή να επιστρέψει στην αρχική του πορεία.

Στο [29] προτείνεται ένα σύστημα αποφυγής εμποδίων που αποτελείται από τέσσερα υποσυστήματα: έναν διαχειριστή υψομέτρων, που προσδιορίζει τα υψόμετρα του πυθμένα, έναν καθολικό διαχειριστή που δημιουργεί σημεία στόχου, ένα σχεδιαστή ανάδρασης που ελέγχει την πορεία που δίνει ο καθολικός διαχειριστής και αισθητήρες υπερήχων που απεικονίζουν το

περιβάλλον του οχήματος. Τα τέσσερα αυτά υποσυστήματα καθορίζουν αν υπάρχει ασφαλής πλοήγηση του οχήματος, οπότε σε αντίθετη περίπτωση σχεδιάζεται μια τροχιά αποφυγής εμποδίου. Παρόμοια προσέγγιση ακολουθείται στο [28].

Στο [97] προτείνεται μέθοδος αποφυγής εμποδίων για το υποβρύχιο όχημα Remus. Το όχημα πλοηγείται από έναν ελεγκτή που μηδενίζει την γωνία κατεύθυνσης ως προς το σημείο στόχου. Οι ενδείξεις κατεύθυνσης και απόστασης του εμποδίου ενός αισθητήρα υπερήχων ασαφοποιούνται και ενεργοποιούν σταθμισμένα την στρατηγική αποφυγής, σύμφωνα με την οποία ένα σημείο στόχου παρεμβάλλεται ανάμεσα στο όχημα και στο τελικό σημείο στόχου.

Στο [98] παρατίθεται μια μέθοδος αποφυγής εμποδίων για το υποβρύχιο όχημα Remus, όπου το όχημα ακολουθεί τον πυθμένα ενώ οι πληροφορίες από τον αισθητήρα υπερήχων ελέγχονται μέσω μιας συνάρτησης απειλής για τον βαθμό κινδύνου και διορθώνονται κατάλληλα οι μεταβλητές κίνησης στο κατακόρυφο επίπεδο.

Στο [99] προτείνεται η μέθοδος ιστογράμματος πεδίου, στην οποία τα δεδομένα από τους αισθητήρες αρχικά ανάγονται σε ένα διδιάστατο καρτεσιανό ιστόγραμμα του χώρου. Ακολουθώντας το διδιάστατο ιστόγραμμα ανάγεται σε ένα πολικό διάγραμμα πυκνότητας εμποδίων ή ισοδύναμα επικινδυνότητας. Στην συνέχεια επιλέγεται ο τομέας με την μικρότερη πυκνότητα εμποδίων, στον οποίο κατευθύνεται το όχημα.

Στο [15] περιγράφεται το πρόβλημα της αποφυγής εμποδίων με πειραματικά αποτελέσματα με το αυτόνομο υποβρύχιο όχημα Redermor, όπου η αναγνώριση των εμποδίων γίνεται με αξιολόγηση των εικόνων που παρέχουν αισθητήρες υπερήχων με οπτική απεικόνιση του περιβάλλοντος.

Στην παρούσα διατριβή η αποφυγή δυναμικών εμποδίων και η μαθηματική αντίληψη του περιβάλλοντος πραγματοποιείται με αποφάσεις που λαμβάνονται με μηχανές ασαφούς συμπεράσματος, βασισμένες στις ενδείξεις των αισθητήρων του οχήματος.

2.4.3 Πλοήγηση και έλεγχος αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων

Το πρόβλημα του ελέγχου κίνησης των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων προσεγγίστηκε από πολλούς ερευνητές την τελευταία δεκαετία [34], [100], [101], [102]. Στα υποβρύχια οχήματα οι υδροδυναμικές δυνάμεις είναι ο κύριος παράγοντας που καθιστά τον έλεγχο υποβρυχίων οχημάτων πρόβλημα μη- γραμμικό και δύσκολο, δεδομένου ότι μη γραμμική είναι η δυναμική του οχήματος και των ωθητήρων-ελίκων του.

Για την χρήση των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων προϋπόθεση είναι η λύση του προβλήματος ελέγχου κίνησης. Συγκεντρωτική αναφορά των τεχνικών ελέγχου, που έχουν χρησιμοποιηθεί για το πρόβλημα αυτό, υπάρχει στο [103].

Για τον έλεγχο των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων έχει χρησιμοποιηθεί ο PID έλεγχος με αποσύζευξη των κινήσεων σε οριζόντιο και κάθετο επίπεδο στα [32], [104], [105].

Επίσης έχουν χρησιμοποιηθεί τεχνικές βέλτιστου ελέγχου, όπου ελαχιστοποιείται μια συνάρτηση κόστους. Συγκεκριμένα έχει προταθεί προβλεπτικός (model predictive) έλεγχος, όπου το δυναμικό μοντέλο του οχήματος χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί η απόκριση του οχήματος, ενώ γίνεται υπολογισμός της θέσης σε ένα ορίζοντα χρόνου με ζητούμενο την ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης σφάλματος θέσης, που είναι το άθροισμα των τετραγώνων των διαφορών θέσης [106], [107], [108]. Επιπλέον έχει προταθεί έλεγχος με H_2/H_∞ στα [109], [110], [111], όπου εμφανίζεται καλή απόδοση των ελεγκτών. Υπάρχει το μειονέκτημα της πλήρους μαθηματικής αναπαράστασης που απαιτείται, κάτι που είναι ιδιαίτερα δύσκολο στα υποβρύχια. Επιπλέον οι ελεγκτές που προκύπτουν είναι αργοί και δεν είναι σίγουρο ότι οι βέλτιστοι ελεγκτές, όσον αφορά την ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους, αποτελούν την βέλτιστη λύση στην πλοήγηση του οχήματος. Ο έλεγχος του γραμμικοποιημένου συστήματος ενός υποβρυχίου οχήματος με τετραγωνική συνάρτηση κόστους (LQ) έχει προταθεί στο [112].

Επίσης έχει εφαρμοστεί ο μη-γραμμικός έλεγχος, όπου οι ενέργειες ελέγχου προσδιορίζονται ώστε να υπάρχει ευστάθεια του συστήματος, σύμφωνα με τα κριτήρια Lyapunov [33], [113], [114].

Ο έλεγχος ολίσθησης (sliding mode control) προτάθηκε από τους Yoerger και Slotine [34] ως μέθοδος που προσφέρει ευστάθεια ελέγχου στα μη γραμμικά συστήματα των υποβρυχίων οχημάτων [115]. Ακολούθως έχει εφαρμοστεί στα [116], [117], με ενθαρρυντικά αποτελέσματα.

Άλλη μεθοδολογία, που έχει χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων, είναι ο προσαρμοστικός έλεγχος (adaptive control), όπου τα κέρδη των ελεγκτών προσδιορίζονται στην διάρκεια του ελέγχου, ώστε να εξασφαλίζεται μέγιστη ευστάθεια [35], [101], [118], [119], [120], [121], [122], [123], [124], [125], [126], [127]. Είναι η τεχνική ελέγχου με την ευρύτερη αποδοχή και τα καλύτερα αποτελέσματα. Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του ελεγκτή και την ρύθμιση των κερδών ελέγχου απαιτείται ένα μοντέλο κίνησης, γεγονός που αποτελεί και το μειονέκτημα της μεθόδου [128].

Επίσης έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία ο νευρωνικός έλεγχος στα [35], [37], [129], [130], [131], [132], [133] ώστε να αντιμετωπισθεί η αοριστία του φυσικού συστήματος των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων.

Η εφαρμογή της ασαφούς λογικής και του ασαφούς ελέγχου παρουσιάζονται στα [36], [134], [135], [136], [137], [138], [139], [140], [141], ενώ οι εφαρμογές νευρο-ασαφών ελεγκτών βρίσκονται στα [142], [143]. Αναλυτικές μελέτες σχετικά με την μοντελοποίηση, την πλοήγηση και των έλεγχο των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων δίνονται στα [39], [47], [144], [145], [146], [147]. Επιπρόσθετα στοιχεία και πληροφορίες σχετικές με την πλοήγηση αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων δίνονται στα [148], [149].

Η χρήση του ευφυούς ελέγχου και της ασαφούς λογικής προσφέρει χαρακτηριστικά που βοηθούν στην αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων και ειδικά προβλημάτων αβεβαιότητας, που συναντώνται σε φυσικά περιβάλλοντα [138], [150]. Στο [142] προτείνεται η χρήση ασαφών ελεγκτών, που χρησιμοποιούν γενετικούς αλγόριθμους για τη βελτιστοποίηση της βάσης κανόνων.

Παρακάτω περιγράφονται οι κυριότερες εργασίες που έχουν δημοσιευτεί στον τομέα του ελέγχου και της πλοήγησης των αυτόνομων υποβρύχιων οχημάτων με ασαφή λογική.

Στο [141] περιγράφεται ένα σύστημα πλοήγησης που περιλαμβάνει έναν ασαφή ελεγκτή για την ανάκτηση ενός υποβρυχίου οχήματος. Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει δύο λειτουργίες: την λειτουργία ασφάλειας του οχήματος και την λειτουργία καταγραφής δεδομένων. Η πρώτη λειτουργία περιλαμβάνει συμπεριφορές αποφυγής εμποδίων, ενώ στη δεύτερη το όχημα μπορεί να κρατάει σταθερή απόσταση από τον βυθό για να καταγράψει δεδομένα με την κάμερα. Για την ανάκτηση του οχήματος ο ασαφής ελεγκτής αποφασίζει εάν είναι δυνατή η ανάκτηση, διαφορετικά το όχημα προχωράει σε επόμενη θέση πλησιέστερα στο σημείο ανάκτησης.

Στο [151] περιγράφονται διαδικασίες που αφορούν την προσέγγιση ενός σημείου στο επίπεδο X , Y και την αποφυγή εμποδίων κατά την κίνηση του οχήματος. Για τον σκοπό αυτό ενεργοποιούνται δύο ασαφείς ελεγκτές. Ο πρώτος ασαφής ελεγκτής ρυθμίζει την κατεύθυνση του οχήματος, ώστε να μειωθεί το σφάλμα κατεύθυνσης. Ο δεύτερος ελεγκτής, με εισόδους τη γωνία πρόσκρουσης και την απόσταση του εμποδίου, ενεργοποιείται όταν υπάρχει κοντά κάποιο εμπόδιο και διορθώνει κατάλληλα την κατεύθυνση του οχήματος.

Στο [152] περιγράφεται ένα σύστημα πλοήγησης που βασίζεται στην συμπεριφορά για τον έλεγχο ενός αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος σε πλοήγηση σε κοραλλιογενείς υφάλους. Η μοντελοποίηση και εφαρμογή διαφορετικών συμπεριφορών δίνει στο όχημα τη δυνατότητα να αποφεύγει συγκρούσεις, να διατηρεί σταθερή πορεία, καθώς και σταθερή απόσταση από τον βυθό. Τα παραπάνω επιτυγχάνονται είτε ακολουθώντας ένα σχοινί που αναγνωρίζεται οπτικά, είτε θέτοντας στόχους στον αισθητήρα υπερήχων. Οι εντολές προκύπτουν με την βοήθεια ενός ασαφούς ελεγκτή στο επίπεδο επιλογής συμπεριφοράς, που επιλέγει την κατάλληλη συμπεριφορά.

Στο [149] περιγράφεται μια αρχιτεκτονική ελέγχου για αυτόνομα υποβρύχια οχήματα. Σκοπός είναι να αυτοματοποιηθούν διαδικασίες που αφορούν τη χρήση προσαρμοσμένης ή ιεραρχικής αρχιτεκτονικής ή και των δύο. Για την λήψη των αποφάσεων χρησιμοποιείται η ασαφής λογική, όπου οι στόχοι και οι περιορισμοί αναπαρίστανται ως ασαφή σύνολα. Η επιρροή των στόχων και των περιορισμών λαμβάνεται υπόψη στην σύνθεση των ασαφών συνόλων και στην λήψη απόφασης.

Στο [153] παρουσιάζεται μια τεχνική ασαφούς ιεραρχικού προσδιορισμού θέσης για ένα αυτόνομο υποβρύχιο όχημα. Με την ιεραρχική προσέγγιση διεξάγεται ασύγχρονη σύνθεση όλων των

μετρήσεων των αισθητήρων, βασιζόμενη σε επίπεδα εμπιστοσύνης, οι οποίες στην συνέχεια συνδυάζονται με ενδείξεις αδρανειακών αισθητήρων. Με την ιεραχική σύνθεση ταξινομούνται διαφορετικά και ανεξάρτητα σήματα διάφορων αισθητήρων. Η μέθοδος αξιολογείται με πειραματικά αποτελέσματα πλοήγησης του AUV Ocean Explorer.

Στην εργασία [138] περιγράφεται έλεγχος κίνησης ενός αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος σε τρία τμήματα με ασαφείς ελεγκτές που εκτελούν αναγνώριση εμποδίων, αποφυγή εμποδίων και έλεγχο τάσης στους κινητήρες. Το σύστημα ελέγχου κίνησης που προτείνεται μπορεί να εκτελεί ακριβή πλοήγηση με δυνατότητα αποφυγής εμποδίων και δοκιμάζεται με προσομοιώσεις του υποβρυχίου οχήματος Phantom. Το σύστημα πλοήγησης, που περιγράφεται στην εργασία αυτή, επεκτάθηκε και συμπληρώθηκε ώστε να έχει γενική μορφή και αποτελεί την βάση της αρχιτεκτονικής ελέγχου που περιγράφεται στην παρούσα διατριβή.

Στο [143] προτείνεται ένα νευρωνικό δίκτυο έξι επιπέδων για τον έλεγχο ενός AUV. Το δίκτυο έχει την ικανότητα να αυτοπρογραμματίζεται και να επανασυνθέτει τους εσωτερικούς συνδετικούς κόμβους, βασιζόμενο σε πληροφορίες εκμάθησης. Περαιτέρω έρευνα στο τομέα των νευρο-ασαφών ελεγκτών δίνεται στο [154], όπου προτείνονται διαφορετικοί νευροασαφείς ελεγκτές, ανάλογα με την αποστολή που πρέπει να εκτελέσει ένα AUV.

Από την επισκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας για τις μεθοδολογίες ελέγχου των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής:

1. Η μη γραμμικότητα των υδροδυναμικών δυνάμεων καθιστούν ανακριβή τον έλεγχο με ελεγκτές PID. Η κατάστρωση τέτοιων ελεγκτών απαιτεί αποσύζευξη των εξισώσεων σε κάθε βαθμό ελευθερίας και γραμμικοποιήσεις, με αποτέλεσμα να αφαιρείται ουσιαστική πληροφορία από τις κυρίαρχες εξισώσεις. Επίσης γίνεται η υπόθεση ότι οι ελεγκτές λειτουργούν με μικρό εύρος, πράγμα που στα υποβρύχια οχήματα δεν ισχύει και μπορεί να δημιουργήσει σημαντικές ανακρίβειες και αστάθεια.
2. Οι μέθοδοι βέλτιστου ελέγχου απαιτούν την ύπαρξη αναλυτικού και ακριβούς μαθηματικού δυναμικού μοντέλου. Τέτοια μοντέλα έχουν καταστρωθεί για τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα, αλλά έχουν τα εξής μειονεκτήματα: 1) Είναι πολύπλοκα και ο προσδιορισμός των υδροδυναμικών συντελεστών απαιτεί δοκιμές σε δεξαμενές και 2) δεν λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή των υδροδυναμικών συντελεστών με την ταχύτητα, που είναι μεγάλη στα οχήματα ωκεανογραφικής παρατήρησης που λειτουργούν σε μεγάλες ταχύτητες [155].
3. Η μέθοδος προσαρμοστικού ελέγχου έχει παρουσιάσει ενθαρρυντικά αποτελέσματα και χρησιμοποιείται από τους περισσότερους ερευνητές, γιατί δεν απαιτεί ακριβές υδροδυναμικό μοντέλο του οχήματος, αλλά μοντελοποίηση της επιθυμητής απόκρισης.

4. Η μέθοδος σθεναρού ελέγχου sliding mode έχει επίσης δώσει ενθαρρυντικά αποτελέσματα, αν και απαιτείται μοντελοποίηση του οχήματος.
5. Τέλος οι μέθοδοι ευφυούς ελέγχου με νευρωνικά δίκτυα και ασαφή λογική υπόσχονται έλεγχο με ευστάθεια, χωρίς ανάγκη μοντελοποίησης του οχήματος. Στην παρούσα προσέγγιση ο έλεγχος του οχήματος γίνεται με ασαφείς ελεγκτές, που βελτιστοποιούνται από γενετική μεθοδολογία, ώστε αφενός να μην απαιτείται μαθηματική μοντελοποίηση του οχήματος και αφετέρου να υπάρχει μέγιστη ευστάθεια. Τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου, που προέκυψαν με πειράματα με πραγματικό υποβρύχιο σε πραγματικό χρόνο και περιγράφονται στο κεφάλαιο 10 της παρούσας διατριβής, είναι συγκρίσιμα με αυτά του sliding mode ελέγχου, η οποία αποτελεί μέθοδο ελέγχου με ευρεία αποδοχή και προτείνεται στο [156] για τον έλεγχο υποβρυχίου οχήματος ίδιου τύπου.

2.4.4 Προσδιορισμός θέσης υποβρυχίων οχημάτων

Για την αυτόνομη πλοήγηση των υποβρυχίων οχημάτων βασικό πρόβλημα αποτελεί ο προσδιορισμός θέσης στο αδρανειακό σύστημα αξόνων [157], [158]. Ο προσδιορισμός θέσης είναι σημαντικής σημασίας για την πλοήγηση των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων διότι παρέχει την ανάδραση στους ελεγκτές του οχήματος. Δεδομένου ότι στο νερό δεν υπάρχουν σήματα δορυφορικού προσδιορισμού, ο προσδιορισμός θέσης βασίζεται στις ενδείξεις των αισθητήρων. Το πρόβλημα προσδιορισμού θέσης λύνεται για τα υποβρύχια οχήματα με τις εξής τεχνικές [159]:

1. Προσδιορισμός θέσης με πρόσθεση μεταβολών.
2. Προσδιορισμός θέσης με ακουστικό τριγωνισμό.
3. Προσδιορισμός θέσης με σύστημα τεχνητής όρασης
4. Προσδιορισμός θέσης από γεωφυσικά χαρακτηριστικά.

2.4.4.1 Προσδιορισμός θέσης με πρόσθεση μεταβολών θέσης

Αποτελεί τη κυριότερη μέθοδο πλοήγησης σε περιοχές μακριά από την επιφάνεια και τον πυθμένα, κατά την οποία η μεταβολή της θέσης του οχήματος υπολογίζεται με ολοκλήρωση της ταχύτητας του οχήματος που δίνουν οι αισθητήρες [160], [161]. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται είναι :

1. Μονάδα μέτρησης αδράνειας (IMU), η οποία δίνει ταχύτητες και γωνίες θέσης.
2. Ηχητικός αισθητήρας μέτρησης ταχύτητας (Doppler Sonar) που δίνει την σχετική ταχύτητα του πυθμένα στο σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων.

3. Μαγνητική πυξίδα, που δίνει μεταβολές της γωνίας κατεύθυνσης.
4. Κλισίμετρο, που δίνει μεταβολές των γωνιών πρόνευσης και διατοιχισμού.

Η μέθοδος υπολογισμού θέσης με πρόσθεση μεταβολών θέσης περιγράφεται στα [162], [163], [164]. Τα λάθη προέρχονται από ανακρίβειες των αισθητήρων και είναι σωρευτικά. Επίσης λάθη προκύπτουν όταν χρησιμοποιούνται αισθητήρες που δεν ανιχνεύουν την επίδραση ρευμάτων. Έτσι η ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται από την ακρίβεια των αισθητήρων και από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για να απομονώσουν εσφαλμένες και ακραίες ενδείξεις. Ενδεικτικά, με την μέθοδο προσδιορισμού θέσης με χρήση ηχητικού αισθητήρα μέτρησης ταχύτητας έχει επιτευχθεί ακρίβεια της τάξης του 0.01% του διανυόμενου μήκους[165].

2.4.4.2 Προσδιορισμός θέσης με ακουστικό τριγωνισμό

Ο ακουστικός τριγωνισμός [166], [164], [167], [168], είναι προσδιορισμός με τριγωνομετρικές μεθόδους της θέσης του οχήματος σε σχέση με σταθερά σημεία του περιβάλλοντος. Στο υποβρύχιο περιβάλλον χρησιμοποιούνται ηχητικοί πομποί και δέκτες, δεδομένου ότι είναι δύσκολο να υπάρξουν σταθερά σημεία αναφοράς. Για αυτό τον σκοπό χρησιμοποιούνται ποντισμένοι ακουστικοί φάροι. Υπάρχουν δύο μέθοδοι ακουστικού τριγωνισμού:

1. Με παλμούς μεγάλου μήκους κύματος (Long baseline, LBL), όπου το όχημα εκπέμπει έναν ακουστικό παλμό μικρής συχνότητας. Η μέθοδος αναπτύχθηκε το 1974 στο WHOI για το επανδρωμένο υποβρύχιο όχημα Alvin [169] και επεκτάθηκε σε τηλεκατευθυνόμενα [170] και σε αυτόνομα υποβρύχια οχήματα [58], [171]. Για την εφαρμογή της μεθόδου, υπάρχει εγκατεστημένη μια συστοιχία ακουστικών φάρων σε γνωστές θέσεις. Ο παλμός που εκπέμπεται από το όχημα αναγνωρίζεται από τους ακουστικούς φάρους, οι οποίοι επιστρέφουν ένα παλμό γνωστής συχνότητας. Από τον χρόνο που απαιτείται για να επιστρέψει ο παλμός στο όχημα υπολογίζεται η απόσταση από τους φάρους και η θέση του οχήματος στο χώρο. Οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται είναι περίπου 10 kHz, η εμβέλεια της τάξης των 10 χιλιομέτρων και η ακρίβεια της τάξης των 5 μέτρων [172].
2. Με παλμούς μικρού μήκους κύματος, όπου το όχημα είναι εφοδιασμένο με τουλάχιστον τρεις δέκτες, που ακούν ένα παλμό που εκπέμπεται από ένα ακουστικό φάρο. Από την διαφορά φάσματος των ήχων που ακούν οι διαφορετικοί αισθητήρες μπορεί να υπολογιστεί το διάνυσμα θέσης του οχήματος σε σχέση με τον ακουστικό φάρο. Το σύστημα έχει μικρή εμβέλεια και ακρίβεια της τάξης του 1 cm και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που απαιτείται ακριβής ναυσιπλοΐα όπως προσέγγιση σταθμών πρόσδεσης.

Αναλυτικές σχέσεις για ακουστικό τριγωνισμό δίνονται στο [173], όπου η θέση του οχήματος υπολογίζεται γεωμετρικά στην τομή των κύκλων με ακτίνες τις αποστάσεις από τους ακουστικούς φάρους.

2.4.4.3 Προσδιορισμός θέσης με σύστημα τεχνητής όρασης

Σε υποβρύχια οχήματα που είναι εφοδιασμένα με κάμερα μπορεί να γίνει προσδιορισμός θέσης με αξιοποίηση της εικόνας που επιστρέφει η κάμερα. Η εικόνα επεξεργάζεται και η θέση του οχήματος προκύπτει ως προς έναν οπτικό στόχο. Τέτοιες μεθοδολογίες είναι εφαρμόσιμες σε περιβάλλοντα όπου είναι εξασφαλισμένη η διαύγεια του νερού, κυρίως σε πειράματα ή σε διαυγές θαλασσινό νερό [174], [175].

Στο [176] η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε στο υποβρύχιο όχημα GARBI. Στο [177] ο οπτικός προσδιορισμός θέσης χρησιμοποιείται για την επιθεώρηση υποβρύχιων αγωγών, όπου το ορατό στην κάμερα περίγραμμα του αγωγού χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί ο διαμήκης άξονας κίνησης. Η μέθοδος οπτικού προσδιορισμού θέσης προτείνεται επίσης στα [178], [179], [180]. Η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή πειραμάτων που περιγράφονται στο κεφάλαιο 10.

2.4.4.4 Προσδιορισμός θέσης από γεωφυσικά χαρακτηριστικά

Στη βιβλιογραφία προτείνεται η μέθοδος προσδιορισμού θέσης του οχήματος σε σχέση με γνωστά γεωφυσικά χαρακτηριστικά του πυθμένα. Ενδεικτικά, στο [181] ο προσδιορισμός θέσης γίνεται με σύγκριση των δεδομένων βαθυμετρίας του πυθμένα. Στα [182], [183] γίνεται εύρεση θέσης σε σχέση με μαγνητικά χαρακτηριστικά του πυθμένα.

3° Κεφάλαιο

Κινηματική και δυναμική υποβρυχίων οχημάτων

3.1 Εισαγωγή

Ο σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η παρουσίαση της κινηματικής και της δυναμικής των υποβρυχίων οχημάτων, Για τον σκοπό αυτό εξάγονται οι εξισώσεις κίνησης και αναλύεται η μέθοδος προσομοίωσης της κίνησης. Η παρουσίαση της μαθηματικής μοντελοποίησης της κίνησης γίνεται ώστε να γίνει κατανοητή η προσομοίωση της κίνησης των υποβρυχίων οχημάτων. Στο πρώτο μέρος παρουσιάζεται η κινηματική ανάλυση με τους ορισμούς συστημάτων αναφοράς και των μετασχηματισμών ταχύτητας. Στην συνέχεια, αναλύονται οι δυνάμεις και οι ροπές που ασκούνται στα υποβρύχια οχήματα και εξάγονται οι εξισώσεις κίνησης. Τέλος αναπτύσσεται η μεθοδολογία προσομοίωσης της κίνησης των υποβρυχίων οχημάτων, η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής πλοήγησης.

Η κινηματική και η δυναμική των υποβρυχίων οχημάτων περιγράφεται στα [103], [184]. Τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται στο παρόν κεφάλαιο και έχουν οριστεί στο [185] και συνοψίζονται στον Πίνακα 3-1.

3.2 Κινηματική υποβρυχίων οχημάτων

3.2.1 Ορισμοί συστημάτων συντεταγμένων

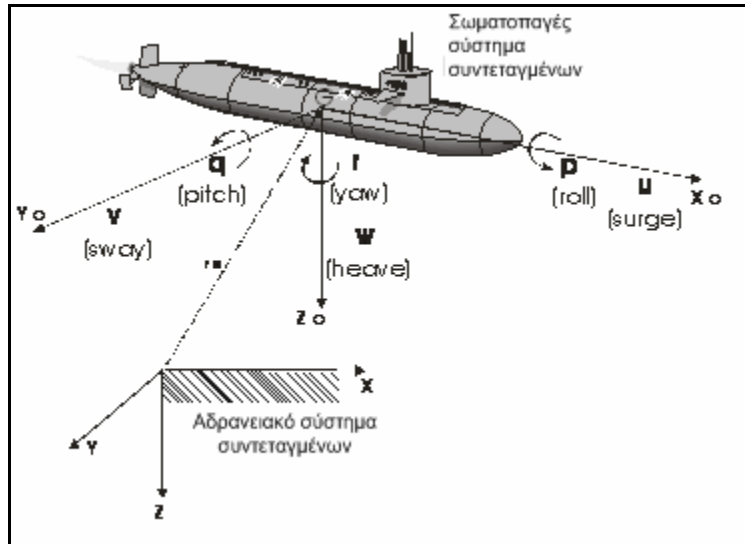
Για την περιγραφή της θέσης και της κίνησης ενός υποβρυχίου οχήματος χρησιμοποιούνται δύο συστήματα συντεταγμένων: το *αδρανειακό* και το *σωματοπαγές*.

Σύμβολο	Περιγραφή
t	χρόνος
x	θέση στον άξονα X του αδρανειακού συστήματος συντεταγμένων
y	θέση στον άξονα Y του αδρανειακού συστήματος συντεταγμένων
z	θέση στον άξονα Z του αδρανειακού συστήματος συντεταγμένων
φ	γωνία στροφής Euler περί τον άξονα X
θ	γωνία στροφής Euler περί τον άξονα Y
ψ	γωνία στροφής Euler περί τον άξονα Z
u	γραμμική ταχύτητα στον διαμήκη άξονα του σωματοπαγούς συστήματος συντεταγμένων
v	γραμμική ταχύτητα στον εγκάρσιο άξονα του σωματοπαγούς συστήματος συντεταγμένων
w	γραμμική ταχύτητα στον κάθετο άξονα του σωματοπαγούς συστήματος συντεταγμένων
p	γωνιακή ταχύτητα περί τον διαμήκη άξονα του σωματοπαγούς συστήματος συντεταγμένων
q	γωνιακή ταχύτητα περί τον εγκάρσιο άξονα του σωματοπαγούς συστήματος συντεταγμένων
r	γωνιακή ταχύτητα περί τον κάθετο άξονα του σωματοπαγούς συστήματος συντεταγμένων
η	διάνυσμα θέσης στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων
τ	διάνυσμα δυνάμεων στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων
I_x	ροπή αδρανείας του οχήματος περί τον διαμήκη άξονα του
I_y	ροπή αδρανείας του οχήματος περί τον εγκάρσιο άξονα του
I_z	ροπή αδρανείας του οχήματος περί τον κάθετο άξονα του
I_{xy}	φυγόκεντρη ροπή αδρανείας οχήματος περί τον διαμήκη και εγκάρσιο άξονα
I_{xz}	φυγόκεντρη ροπή αδρανείας οχήματος περί τον διαμήκη και εγκάρσιο άξονα
I_{yz}	φυγόκεντρη ροπή αδρανείας οχήματος περί τον εγκάρσιο και κάθετο άξονα
h	στροφορμή
m	μάζα
x_G	θέση του κέντρου βάρους στον διαμήκη άξονα του σωματοπαγούς συστήματος συντεταγμένων
y_G	θέση του κέντρου βάρους στον εγκάρσιο άξονα του σωματοπαγούς συστήματος συντεταγμένων
z_G	θέση του κέντρου βάρους στον κάθετο άξονα του σωματοπαγούς συστήματος συντεταγμένων
X_u	συντελεστές δυνάμεων αδρανείας και απόσβεσης στον διαμήκη άξονα του σωματοπαγούς συστήματος συντεταγμένων
$X_u u $	
$Y_v v $	συντελεστές δυνάμεων αδρανείας και απόσβεσης στον εγκάρσιο άξονα του σωματοπαγούς συστήματος συντεταγμένων
$Y_v v $	
Z_u	συντελεστές δυνάμεων αδρανείας και απόσβεσης στον κάθετο άξονα του σωματοπαγούς συστήματος συντεταγμένων
$Z_w w $	
K_p	συντελεστές ροπών αδρανείας και απόσβεσης στον διαμήκη άξονα του σωματοπαγούς συστήματος συντεταγμένων
$K_p p $	
M_q	συντελεστές ροπών αδρανείας και απόσβεσης στον εγκάρσιο άξονα του σωματοπαγούς συστήματος συντεταγμένων
$M_q q $	
N_r	συντελεστές ροπών αδρανείας και απόσβεσης στον κάθετο άξονα του σωματοπαγούς συστήματος συντεταγμένων
$N_r r $	
W	βάρος οχήματος
B	άντωση

Πίνακας 3-1: Επεξήγηση συμβόλων

Η θέση στο τρισδιάστατο χώρο ενός υποβρύχιου οχήματος ορίζεται μέσω του σταθερού στον χώρο ή γεωδαιτικού ή αδρανειακού (earth-fixed) συστήματος συντεταγμένων (X, Y, Z), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-1. Η αρχή του αδρανειακού συστήματος βρίσκεται σε κάποιο αυθαίρετα

ορισμένο σημείο της επιφάνειας του νερού και οι άξονες X, Y, Z βρίσκονται ο X και ο Y πάνω στην επιφάνεια και ο Z κατευθύνεται προς το αυξανόμενο βάθος με τηρουμένη την τρισορθογώνια διάταξη. Έτσι η θέση ορίζεται κάθε στιγμή από το διάνυσμα θέσης r_o το οποίο έχει αρχή το κέντρο του σταθερού συστήματος συντεταγμένων και τέλος το κέντρο βάρους του υποβρυχίου οχήματος.



Σχήμα 3-1: Ορισμός συστημάτων συντεταγμένων

Το αδρανειακό σύστημα αξόνων θεωρείται ακίνητο και έτσι αμελείται η συνεισφορά της κίνησης της γης στην κίνηση του οχήματος. Αυτή η υπόθεση είναι επαρκής όταν μελετώνται υποβρύχια οχήματα, ενώ για εφαρμογές πλοήγησης και ελέγχου στο διάστημα ως αρχή του αδρανειακού συστήματος αξόνων λαμβάνεται κάποιο άστρο το οποίο θεωρείται σταθερό.

Για να περιγραφεί ο προσανατολισμός στον χώρο ορίζεται το σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων (body-fixed) με αρχή κάποιο σταθερό σημείο του υποβρυχίου οχήματος πάνω στο κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας και άξονες X_o, Y_o, Z_o . Οι άξονες του σωματοπαγούς συστήματος συντεταγμένων ορίζονται ως εξής:

Ο άξονας X_o έχει διεύθυνση κατά το διάμηκες και φορά από το πίσω προς το εμπρός άκρο.

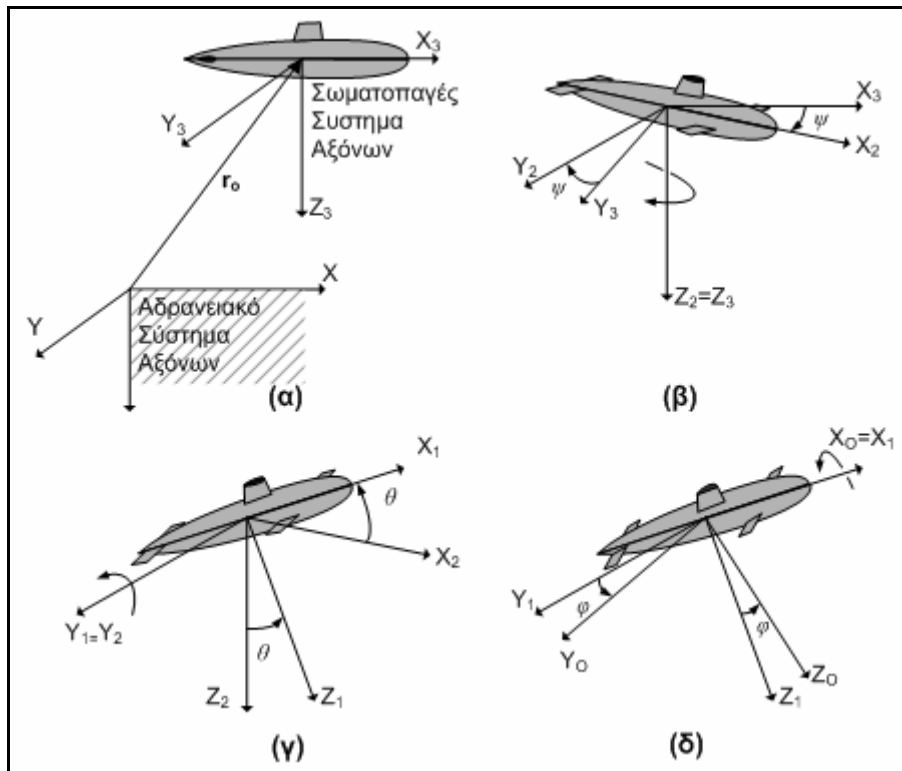
Ο άξονας Y_o έχει διεύθυνση κατά το εγκάρσιο και φορά προς το δεξιό τμήμα του οχήματος.

Ο άξονας Z_o έχει διεύθυνση κατά το κατακόρυφο και φορά από τα πάνω προς τα κάτω.

Οι άξονες του σωματοπαγούς συστήματος (X_o, Y_o, Z_o) για συνηθισμένα υποβρύχια οχήματα με συμμετρία κατά το κεντρικό επίπεδο μηδενίζουν τις φυγόκεντρες ροπές αδρανείας και ταυτίζονται με τους κύριους άξονες αδρανείας.

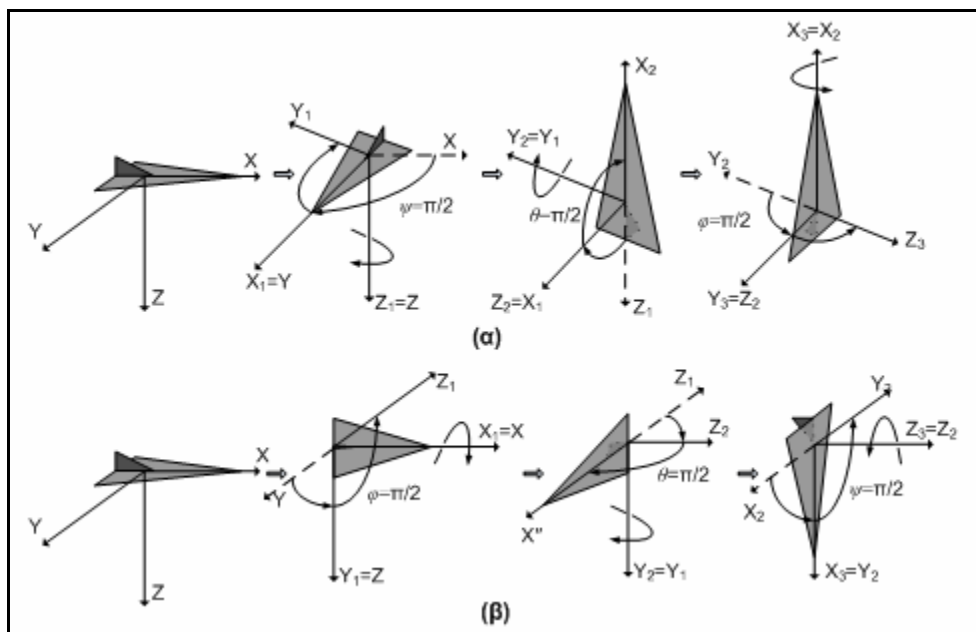
Η θέση του οχήματος στον χώρο και ο προσανατολισμός του σωματοπαγούς συστήματος συντεταγμένων προκύπτει από το αδρανειακό σύστημα όταν αυτό μεταφερθεί παράλληλα κατά το διάνυσμα θέσης r_o και ακολούθως υποστεί τρεις συνεχόμενες περιστροφές με την ακολουθία

των γωνιών Euler. Έτσι αν θεωρήσουμε ότι το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων μεταφέρεται παράλληλα κατά r_o προκύπτει το σύστημα συντεταγμένων (X_3, Y_3, Z_3) . Πρώτα γίνεται περιστροφή περί τον άξονα Z_3 κατά γωνία κατεύθυνσης ψ (yaw) οπότε προκύπτει το σύστημα (X_2, Y_2, Z_2) . Ακολουθεί στροφή περί τον άξονα Y_2 κατά γωνία πρόνευσης θ (pitch) οπότε προκύπτει το σύστημα (X_1, Y_1, Z_1) . Τέλος γίνεται στροφή κατά γωνία διατοιχισμού φ (roll) περί τον άξονα X_1 για να προκύψει το σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων (X_o, Y_o, Z_o) . Οι τρεις διαδοχικές περιστροφές που περιγράφονται παραπάνω είναι μη αντιστρέψιμες και κατά σύμβαση εκτελούνται πάντα με την ίδια σειρά όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-2.



Σχήμα 3-2: Ορισμός θέσης οχήματος με μεταφορά αδρανειακού συστήματος συντεταγμένων και στροφές Euler, (α): παράλληλη μεταφορά κατά το διάνυσμα θέσης, (β): περιστροφή κατεύθυνσης, (γ): περιστροφή πρόνευσης, (δ): περιστροφή διατοιχισμού

Όπως μπορεί να αποδειχτεί [184] η αλλαγή της σειράς εκτέλεσης των διαδοχικών περιστροφών οδηγεί σε λανθασμένη τελική θέση του οχήματος και για αυτόν τον λόγο οι περιστροφές δεν μπορούν να περιγραφούν ως άθροισμα διανυσμάτων, αλλά πρέπει να εκτελούνται με την σειρά που κατά σύμβαση θεωρείται σωστή. Στο Σχήμα 3-3 φαίνεται ένα τριδιάστατο αντικείμενο το οποίο περιστρέφεται σε γωνία $\pi/2$ και εξετάζεται η επίδραση της αλλαγής της σειράς εκτέλεσης των περιστροφών. Από το Σχήμα 3-3 προκύπτει ότι ο προσανατολισμός του αντικειμένου μεταβάλλεται, όταν αλλάζει η σειρά εκτέλεσης των περιστροφών.



Σχήμα 3-3: Επίδραση μεταβολής σειράς διαδοχικών περιστροφών, (α): περιστροφή τρισδιάστατου σώματος στις τρεις κύριες κατευθύνσεις σε γωνία $\pi/2$ με σειρά περιστροφής ψ, θ, φ (β): περιστροφή τρισδιάστατου σώματος στις τρεις κύριες κατευθύνσεις σε γωνία $\pi/2$ με σειρά περιστροφής φ, θ, ψ

Με βάση τα παραπάνω η θέση και ο προσανατολισμός του οχήματος ορίζονται στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων με τις συντεταγμένες θέσης του οχήματος και τις γωνίες στροφής Euler φ, θ, ψ . Το διάνυσμα θέσης και οι γωνίες Euler ομαδοποιούνται στο γενικευμένο διάνυσμα θέσης διαστάσεων 6×1 :

$$\eta = [\eta_1^T \quad \eta_2^T]^T, \quad (3.1)$$

όπου $\eta_1 = [x, y, z]^T$ το διάνυσμα συντεταγμένων και $\eta_2 = [\varphi, \theta, \psi]^T$ το διάνυσμα γωνιών Euler.

Στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων μπορούν να περιγραφούν οι κινήσεις και οι αλληλεπιδράσεις με το υδάτινο περιβάλλον από την πλευρά του οχήματος. Οι κινήσεις και αλληλεπιδράσεις αυτές λόγω της ομοιομορφίας του ρευστού που περιβάλλει το όχημα, εξαρτώνται μόνο από την θέση και την ταχύτητα του οχήματος εκτός από την περίπτωση που μελετάται η επίδραση της βαρύτητας, των κυμάτων και του θαλάσσιου ρεύματος. Έτσι η δυναμική του οχήματος μελετάται στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων ενώ η επίδραση της βαρύτητας, των κυμάτων και του θαλάσσιου ρεύματος λαμβάνεται υπόψιν αφού η διεύθυνση τους μετασχηματιστεί από το αδρανειακό σύστημα αξόνων στο σωματοπαγές. Ο μετασχηματισμός συντεταγμένων από το αδρανειακό στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων γίνεται με μεταφορά του συστήματος αξόνων και κατάλληλες περιστροφές ώστε να ταυτιστούν οι διευθύνσεις των αξόνων.

Έτσι η ταχύτητα του οχήματος μπορεί να εκφραστεί στο σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων π.χ. για την εξέταση της κίνησης διατοιχισμού ή της κατακόρυφης επιτάχυνσης πρόνευσης. Η ταχύτητα του οχήματος περιγράφεται από ένα διάνυσμα ως εξής:

$$\mathbf{v} = [\mathbf{v}_1^T \quad \mathbf{v}_2^T]^T, \quad (3.2)$$

όπου $\mathbf{v}_1 = [u \quad v \quad w]^T$ είναι το διάνυσμα γραμμικών ταχυτήτων και $\mathbf{v}_2 = [p \quad q \quad r]^T$ το διάνυσμα γωνιακών ταχυτήτων.

Το διάνυσμα της ταχύτητας στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων και οι γωνίες στροφής $\boldsymbol{\eta}_2 = [\varphi \quad \theta \quad \psi]^T$ αποτελούν τις μεταβλητές κατάστασης του οχήματος.

Στο σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων (X_o, Y_o, Z_o) μπορούν να περιγραφούν οι δυνάμεις X, Y, Z και οι ροπές K, M, N περί τους άξονες X_o, Y_o, Z_o αντίστοιχα που ασκούνται στο σώμα, με το διάνυσμα δυνάμεων ως εξής:

$$\boldsymbol{\tau} = [\boldsymbol{\tau}_1^T \quad \boldsymbol{\tau}_2^T]^T, \quad (3.3)$$

όπου $\boldsymbol{\tau}_1 = [X \quad Y \quad Z]^T$ είναι το διάνυσμα των δυνάμεων και $\boldsymbol{\tau}_2 = [K \quad M \quad N]^T$ είναι το διάνυσμα των ροπών.

3.2.2 Μετασχηματισμοί ταχύτητας

Με τους μετασχηματισμούς ταχύτητας μπορούν να μετασχηματιστούν οι συνιστώσες της γραμμικής ταχύτητας από το σωματοπαγές στο αδρανειακό σύστημα και αντίστροφα. Επίσης μπορούν να συσχετιστούν ο ρυθμός μεταβολής γωνιών θέσης στο αδρανειακό σύστημα (γωνιών Euler) με τις γωνιακές ταχύτητες στο σωματοπαγές σύστημα και αντίστροφα.

3.2.2.1 Μετασχηματισμός γραμμικής ταχύτητας

Για να μετασχηματιστούν οι συνιστώσες του διανύσματος ταχύτητας από το σωματοπαγές στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων γίνεται χρήση του θεωρήματος περιστροφής Euler όπου υπολογίζονται οι τρεις διαδοχικές περιστροφές γύρω από τους άξονες Z_3, Y_2, X_1 σε γωνίες ψ, θ, φ αντίστοιχα, όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Έτσι ο ρυθμός μεταβολής θέσης και η ταχύτητα του οχήματος συνδέονται με τον μετασχηματισμό ταχύτητας:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_1 = \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) \cdot \mathbf{v}_1, \quad (3.4)$$

όπου ο πίνακας περιστροφής $\mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2)$ εξαρτάται από τις γωνίες στροφής και μετασχηματίζει το διάνυσμα της γραμμικής ταχύτητας \mathbf{v}_1 από το σωματοπαγές στο αδρανειακό σύστημα. Υπολογίζεται ως γινόμενο των τριών μητρώων περιστροφής για τις διαδοχικές περιστροφές Euler:

$$\mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) = \mathbf{C}_{z,\psi}^T \cdot \mathbf{C}_{y,\theta}^T \cdot \mathbf{C}_{x,\varphi}^T, \quad (3.5)$$

όπου $\mathbf{C}_{x,\varphi}, \mathbf{C}_{y,\theta}, \mathbf{C}_{z,\psi}$ οι πίνακες περιστροφής για τις τρεις περιστροφές Euler είναι:

$$\mathbf{C}_{x,\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & \sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix}, \mathbf{C}_{y,\theta} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}, \mathbf{C}_{z,\psi} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Ο πίνακας μετασχηματισμού γραμμικής ταχύτητας είναι:

$$\mathbf{J}_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) \cdot \cos(\theta) & -\sin(\psi) \cdot \cos(\phi) + \cos(\psi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) & \sin(\psi) \cdot \sin(\phi) + \cos(\psi) \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\theta) \\ \sin(\psi) \cdot \cos(\theta) & \cos(\psi) \cdot \cos(\phi) + \sin(\psi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\phi) & -\cos(\psi) \cdot \sin(\phi) + \sin(\theta) \cdot \sin(\psi) \cdot \cos(\phi) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \cdot \sin(\phi) & \cos(\theta) \cdot \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

3.2.2.2 Αντίστροφος μετασχηματισμός ταχύτητας

Για να υπολογιστούν οι ταχύτητες στο σωματοπαγές σύστημα με δεδομένο τον ρυθμό μεταβολής θέσης, χρησιμοποιείται ο αντίστροφος μετασχηματισμός ταχύτητας:

$$\mathbf{v}_1 = \mathbf{J}_1^{-1}(\eta_2) \cdot \dot{\eta}_1. \quad (3.8)$$

Επειδή το μητρώο μετασχηματισμού $\mathbf{J}_1(\eta_2)$ είναι ορθογώνιο, ο αντίστροφος του ισούται με τον ανάστροφο:

$$\mathbf{J}_1(\eta_2)^{-1} = \mathbf{C}_{z,\psi} \cdot \mathbf{C}_{y,\theta} \cdot \mathbf{C}_{x,\phi} = \mathbf{J}_1(\eta_2)^T. \quad (3.9)$$

Οπότε ο αντίστροφος μετασχηματισμός γραμμικής ταχύτητας δίνεται από την σχέση:

$$\mathbf{v}_1 = \mathbf{J}_1^T(\eta_2) \cdot \dot{\eta}_1. \quad (3.10)$$

3.2.2.3 Μετασχηματισμός γωνιακής ταχύτητας

Οι ρυθμοί μεταβολής των γωνιών Euler στο αδρανειακό σύστημα $\dot{\eta}_2 = [\dot{\phi} \dot{\theta} \dot{\psi}]^T$ σχετίζονται με το διάνυσμα των γωνιακών ταχυτήτων στο σωματοπαγές σύστημα, $\mathbf{v}_2 = [p \ q \ r]^T$ με τον ακόλουθο μη ορθογώνιο γραμμικό μετασχηματισμό:

$$\dot{\eta}_2 = \mathbf{J}_2(\eta_2) \cdot \mathbf{v}_2, \quad (3.11)$$

όπου :

$$\mathbf{J}_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi) \cdot \tan(\theta) & \cos(\phi) \cdot \tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) / \cos(\theta) & \cos(\phi) / \cos(\theta) \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

Από την σχέση (3.12) βλέπουμε ότι ο πίνακας μετασχηματισμού γωνιακής ταχύτητας δεν ορίζεται για $\cos(\theta)=0$ ή για $\theta=\pm 90^\circ$. Αυτό είναι σημαντικό σε περιπτώσεις που τα υποβρύχια αναμένεται να λειτουργούν σε κατακόρυφη θέση πράγμα που είναι σπάνιο. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να θεωρείται διαφορετική σειρά των περιστροφών όποτε να προκύπτει ανωμαλία σε διαφορετική

θέση του οχήματος ή χρησιμοποιείται η τετραδική αναπαράσταση [186]. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε η αναπαράσταση με γωνίες Euler.

3.2.2.4 Αντίστροφος μετασχηματισμός γωνιακής ταχύτητας

Για να υπολογιστούν οι γωνιακές ταχύτητες στο σωματοπαγές σύστημα εφαρμόζεται ο αντίστροφος μετασχηματισμός γωνιακής ταχύτητας:

$$\mathbf{v}_2 = \mathbf{J}_2^{-1}(\boldsymbol{\eta}_2) \cdot \dot{\boldsymbol{\eta}}_2. \quad (3.13)$$

Δεδομένου ότι ο πίνακας μετασχηματισμού $\mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2)$ δεν είναι ορθογώνιος ο αντίστροφός του διαφέρει από τον ανάστροφο:

$$\mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2)^{-1} \neq \mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2)^T, \quad (3.14)$$

οπότε ο αντίστροφος μετασχηματισμός γωνιακής ταχύτητας δίνεται από τον αντίστροφο του πίνακα $\mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2)$:

$$\mathbf{J}_2^{-1}(\boldsymbol{\eta}_2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & \cos(\theta) \cdot \sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) \cdot \cos(\theta) \end{bmatrix}. \quad (3.15)$$

Συνολικά ο μετασχηματισμός ταχύτητας εκφράζεται από την σχέση:

$$\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\eta}}_1 \\ \dot{\boldsymbol{\eta}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_2(\boldsymbol{\eta}_2) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) \cdot \mathbf{v}, \quad (3.16)$$

και ο αντίστροφος μετασχηματισμός ταχύτητας εκφράζεται από την σχέση:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1^T(\boldsymbol{\eta}_2) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_2^{-1}(\boldsymbol{\eta}_2) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\eta}}_1 \\ \dot{\boldsymbol{\eta}}_2 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \mathbf{v} = \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta}) \cdot \dot{\boldsymbol{\eta}} \quad (3.17)$$

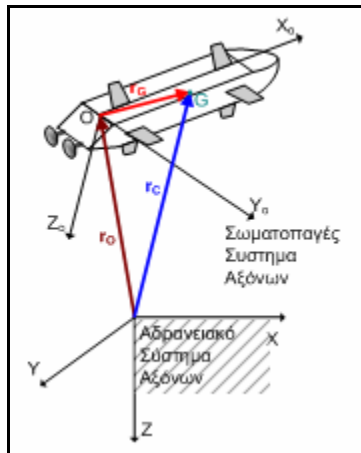
3.3 Δυναμική υποβρυχίων οχημάτων

Με την μελέτη της δυναμικής των υποβρυχίων οχημάτων εξετάζονται οι δυνάμεις που ασκούνται από το περιβάλλον και η επίδραση τους στην κίνηση του οχήματος. Οι εξισώσεις που σχετίζουν τις δυνάμεις και τις επιταχύνσεις ονομάζονται εξισώσεις κίνησης και μπορούν να γραφτούν στα δύο συστήματα συντεταγμένων: στο αδρανειακό και στο σωματοπαγές. Η εξαγωγή των εξισώσεων κίνησης γίνεται πρώτα στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων λόγω του αναλλοίωτου των πινάκων που περιγράφουν την επίδραση του περιέοντος ρευστού στο όχημα. Κατόπιν γίνεται εξαγωγή των εξισώσεων κίνησης στο αδρανειακό σύστημα αξόνων. Οι εξισώσεις κίνησης

στα δύο συστήματα αξόνων εξετάζονται ταυτόχρονα και μετασχηματίζονται πληροφορίες για την κινητική κατάσταση του οχήματος από το ένα σύστημα στο άλλο.

3.3.1 Εξισώσεις κίνησης στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων

Με βάση τα συστήματα συντεταγμένων που ορίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, μπορεί να οριστεί η κίνηση ενός υποβρυχίου οχήματος στον χώρο. Το όχημα θεωρείται ότι δεν παραμορφώνεται και διατηρεί το σχήμα του κάτω από τα φορτία που δέχεται. Η σχετική θέση του οχήματος στον τρισδιάστατο χώρο φαίνεται στο Σχήμα 3-4. Η αρχή του σωματοπαγούς συστήματος αξόνων (σημείο O) λαμβάνεται σε τυχαίο σημείο του οχήματος διαφορετικό από το κέντρο βάρους G που στην γενική περίπτωση διαφέρει από το κέντρο βάρους του οχήματος. Το διάνυσμα r_G δίνει την θέση του κέντρου βάρους του οχήματος στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων και τα διανύσματα r_O , r_C , είναι οι θέσεις των O και G αντίστοιχα στο αδρανειακό σύστημα αξόνων.



Σχήμα 3-4: Ορισμός διανυσμάτων θέσης στον χώρο

Σε σχέση με το σωματοπαγές σύστημα αξόνων μπορεί να οριστεί ο τελεστής αδρανείας του οχήματος I_o ως ακολούθως:

$$I_o = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix}, \quad (3.18)$$

όπου I_i , I_{ij} είναι οι κύριες και οι φυγόκεντρες ροπές αδρανείας περί τους άξονες X_o, Y_o, Z_o που ορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned}
I_x &= \int_{\nabla} (y^2 + z^2) \cdot dm \\
I_y &= \int_{\nabla} (x^2 + z^2) \cdot dm \\
I_z &= \int_{\nabla} (x^2 + y^2) \cdot dm \\
I_{xy} &= \int_{\nabla} (x \cdot y) \cdot dm = I_{yx} \\
I_{xz} &= \int_{\nabla} (x \cdot z) \cdot dm = I_{zx} \\
I_{yz} &= \int_{\nabla} (y \cdot z) \cdot dm = I_{zy} \quad .
\end{aligned} \tag{3.19}$$

Λόγω των ορισμών των ροπών αδρανείας το μητρώο \mathbf{I}_o είναι αντισυμμετρικό, δηλαδή : $\mathbf{I}_o = \mathbf{I}_o^T$.
Ισοδύναμα ο τελεστής αδρανείας μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\mathbf{I}_o \cdot \boldsymbol{\omega} = \int_{\nabla} \mathbf{r} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot dm , \tag{3.20}$$

όπου:

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{J}_1(\boldsymbol{\eta}_2) \cdot \mathbf{v}_2 = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad \omega_3] , \tag{3.21}$$

είναι το διάνυσμα των γωνιακών ταχυτήτων περιστροφής του σώματος στο αδρανειακό σύστημα αξόνων (διαφορετικό από το $\mathbf{v}_2 = [p \quad q \quad r]$).

Για ένα σώμα που κινείται στον χώρο με γωνιακή ταχύτητα $\boldsymbol{\omega}$, οι χρονικές παράγωγοι ενός διανύσματος που στο αδρανειακό σύστημα έχει συντεταγμένες $\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]$, ενώ στο σωματοπαγές σύστημα έχει συντεταγμένες $\mathbf{x}_o = [x_{o1} \quad x_{o2} \quad x_{o3}]$ συνδέονται με την σχέση:

$$\dot{\mathbf{x}} = \dot{\mathbf{x}}_o + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{x} . \tag{3.22}$$

3.3.1.1 Εξισώσεις ευθύγραμμης κίνησης

Η επιτάχυνση του κέντρου βάρους προκύπτει παραγωγίζοντας δύο φορές την σχέση:

$$\mathbf{r}_c = \mathbf{r}_o + \mathbf{r}_G , \tag{3.23}$$

που προκύπτει από τον ορισμό των διανυσμάτων θέσης. Αντικαθιστώντας την (3.22) προκύπτει:

$$\dot{\mathbf{v}}_c = \dot{\mathbf{v}}_o + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_o + \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{r}_G + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_G) . \tag{3.24}$$

Οι εξισώσεις κίνησης εξαγονται όταν αντικαταστήσουμε την (3.24) στην εξίσωση που εκφράζει τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα για ευθύγραμμη κίνηση:

$$m \cdot \dot{\mathbf{v}}_C = \mathbf{f}_C, \quad (3.25)$$

όπου \mathbf{f}_C είναι το 3x1 διάνυσμα της συνισταμένης δύναμης που διέρχεται από το κέντρο βάρους του οχήματος. Αντικαθιστώντας την (3.24) στην (3.25) προκύπτει η εξίσωση ευθύγραμμής κίνησης:

$$m \cdot (\dot{\mathbf{v}}_O + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_O + \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{r}_G + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_G)) = \mathbf{f}_O. \quad (3.26)$$

Στην περίπτωση που η αρχή του σωματοπαγούς συστήματος αξόνων συμπίπτει με το κέντρο βάρους ($\mathbf{r}_G = \mathbf{0}$), οπότε η (3.26) απλοποιείται ως εξής:

$$m \cdot (\dot{\mathbf{v}}_C + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_C) = \mathbf{f}_C. \quad (3.27)$$

3.3.1.2 Εξισώσεις περιστροφικής κίνησης

Η στροφορμή του οχήματος ορίζεται ως:

$$\mathbf{h}_O = \int_{\nabla} \mathbf{r} \times \mathbf{v} \cdot dm. \quad (3.28)$$

Παραγωγίζοντας την (3.28) προκύπτει:

$$\dot{\mathbf{h}}_O = \mathbf{m}_O - m \cdot \mathbf{v}_O \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_G), \quad (3.29)$$

όπου,

$$\mathbf{m}_O = \int_{\nabla} \mathbf{r} \times \dot{\mathbf{v}} \cdot dm, \quad (3.30)$$

είναι η ροπή της ορμής.

Η εξίσωση περιστροφικής κίνησης προκύπτει από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα για περιστροφική κίνηση:

$$\dot{\mathbf{h}}_C = \mathbf{m}_C, \quad (3.31)$$

όπου \mathbf{m}_C είναι το διάνυσμα της συνισταμένης των ροπών που ασκούνται στο όχημα.

Παραγωγίζοντας την (3.29) και αντικαθιστώντας στην (3.31) προκύπτει η εξίσωση περιστροφικής κίνησης:

$$\mathbf{I}_O \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{I}_O \cdot \boldsymbol{\omega}) + m \cdot \mathbf{r}_G \times (\dot{\mathbf{v}}_O + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_O) = \mathbf{m}_O. \quad (3.32)$$

Στην περίπτωση που η αρχή του σωματοπαγούς συστήματος αξόνων συμπίπτει με το κέντρο βάρους η (3.32) απλοποιείται ως εξής:

$$I_C \cdot \dot{\omega}_0 + \omega \times (I_C \cdot \omega) = m_C \quad (3.33)$$

3.3.1.3 Γενική μορφή εξισώσεων κίνησης

Οι εξισώσεις κίνησης (3.26) και (3.32) μπορούν να εκφραστούν σε πιο συμπαγή μορφή ως εξής [103]:

$$M_{veh} \cdot \dot{v} + C_{veh}(v) \cdot v = \tau_{veh}, \quad (3.34)$$

όπου M_{veh} είναι ο πίνακας μάζας του οχήματος, ο πίνακας C_{veh} εκφράζει τους αδρανειακούς όρους, v είναι η ταχύτητα του οχήματος στο σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων και τ_{veh} είναι το 6x1 διάνυσμα δυνάμεων που ασκούνται στο όχημα στη αρχή του σωματοπαγούς συστήματος συντεταγμένων.

Η ταχύτητα στο σωματοπαγές σύστημα είναι δίνεται από την εξίσωση (3.2). Ο πίνακας μάζας είναι :

$$M_{veh} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & m \cdot z_G & -m \cdot y_G \\ 0 & m & 0 & -m \cdot z_G & 0 & m \cdot x_G \\ 0 & 0 & m & m \cdot y_G & -m \cdot x_G & 0 \\ 0 & -m \cdot z_G & m \cdot y_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ m \cdot z_G & 0 & -m \cdot x_G & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -m \cdot y_G & m \cdot x_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix}. \quad (3.35)$$

Ο πίνακας 6x6 των όρων που εκφράζουν τις αδρανειακές και φυγόκεντρες δυνάμεις είναι:

$$C_{veh} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -m \cdot (y_G \cdot q + z_G \cdot r) & m \cdot (y_G \cdot p + w) & m \cdot (z_G \cdot p - v) \\ m \cdot (x_G \cdot q - w) & -m \cdot (z_G \cdot r + x_G \cdot p) & m \cdot (z_G \cdot q + u) \\ m \cdot (x_G \cdot r + v) & m \cdot (y_G \cdot r - u) & -m \cdot (x_G \cdot p + y_G \cdot q) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} m \cdot (y_G \cdot q + z_G \cdot r) & -m \cdot (x_G \cdot q - w) & -m \cdot (x_G \cdot r + v) \\ -m \cdot (y_G \cdot p + w) & m \cdot (z_G \cdot r + x_G \cdot p) & -m \cdot (y_G \cdot r - u) \\ -m \cdot (z_G \cdot p - v) & -m \cdot (z_G \cdot q + u) & m \cdot (x_G \cdot p + y_G \cdot q) \\ 0 & -I_{yz} \cdot q - I_{xz} \cdot p + I_z r & -I_{yz} \cdot r - I_{xy} \cdot p + I_y q \\ I_{yz} \cdot q + I_{xz} \cdot p - I_z r & 0 & I_{xz} \cdot r + I_{xy} \cdot q - I_x p \\ I_{yz} \cdot r + I_{xy} \cdot p - I_y q & I_{xz} \cdot r + I_{xy} \cdot q - I_x p & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.36)$$

Το διάνυσμα των εξωτερικά εφαρμοζόμενων δυνάμεων και ροπών δίνεται από την σχέση (3.3). Στις εξωτερικά εφαρμοζόμενες δυνάμεις συμπεριλαμβάνεται η επίδραση του περιβάλλοντος ρευστού στην κινηματική κατάσταση του οχήματος, η οποία εξετάζεται παρακάτω.

3.3.2 Δυνάμεις και ροπές που ασκούνται στα υποβρύχια οχήματα

Οι δυνάμεις που επάγονται σε ένα υποβρύχιο όχημα από το ρευστό που το περιβάλλει εξαρτώνται από την μορφή της ροής, ο καθορισμός της οποίας είναι στην γενική περίπτωση πολύπλοκος. Για αυτόν τον λόγο οι υδροδυναμικές δυνάμεις υπολογίζονται ως σύνθεση δυνάμεων που προκύπτουν από δύο διαφορετικά προβλήματα:

1. Δυνάμεις που ασκούνται από το ρευστό στο όχημα όταν αυτό εκτελεί μια εξαναγκασμένη κίνηση μέσα στο ρευστό.
2. Δυνάμεις που ασκούνται από το ρευστό στο όχημα όταν αυτό είναι ακίνητο και βρίσκεται μέσα σε πεδίο προσπίπτοντων κυματισμών.

Επιπλέον στο όχημα ασκούνται οι υδροστατικές δυνάμεις άντωσης, η δύναμη βαρύτητας οι δυνάμεις πρόωσης, οι δυνάμεις από έλικες και από τις επιφάνειες ελέγχου (πτερύγια ή πηδάλια) [187].

Η εξέταση του καθενός από τα δύο υδροδυναμικά προβλήματα χωριστά δίνει δυνάμεις και ροπές που εφαρμόζονται στο σώμα και μπορούν να ομαδοποιηθούν όπως παρουσιάζεται στην συνέχεια.

3.3.2.1 Δυνάμεις και ροπές όταν το όχημα εκτελεί εξαναγκασμένη κίνηση

Όταν το όχημα εκτελεί εξαναγκασμένη κίνηση ως επαγόμενες υδροδυναμικές δυνάμεις μπορούν να αναγνωριστούν οι δυνάμεις αδρανείας και οι δυνάμεις απόσβεσης.

3.3.2.1.1 Δυνάμεις αδρανείας και τριβής λόγω πρόσθετης μάζας.

Εξαιτίας της συνεκτικότητας του ρευστού, το όχημα συμπαρασύρει στην κίνηση του ένα μέρος του περιέοντος ρευστού. Η αδράνεια του τμήματος του ρευστού που συμπαρασύρεται, έχει ως αποτέλεσμα την φαινόμενη αύξηση της μάζας του οχήματος και ονομάζεται πρόσθετη μάζα. Το συμπαρασυρόμενο ρευστό επιδρά επίσης στην αντίσταση κίνησης του οχήματος μέσω της αντίστασης τριβής.

Οι δυνάμεις λόγω πρόσθετης μάζας περιγράφονται από την εξίσωση:

$$\tau_A = -M_A \cdot \dot{v} - C_A(v) \cdot v, \quad (3.37)$$

όπου M_A είναι ο πίνακας πρόσθετης μάζας και $C_A(v)$ είναι ο πίνακας δυνάμεων τριβής.

Ο πίνακας πρόσθετης μάζας ορίζεται ως το μητρώο των παραγώγων των δυνάμεων-ροπών στις κύριες διευθύνσεις ως προς τις επιταχύνσεις στις κατευθύνσεις κίνησης ως ακολούθως:

$$\mathbf{M}_A = \begin{bmatrix} X_{\ddot{u}} & X_{\ddot{v}} & X_{\ddot{w}} & X_{\ddot{p}} & X_{\ddot{q}} & X_{\ddot{r}} \\ Y_{\ddot{u}} & Y_{\ddot{v}} & Y_{\ddot{w}} & Y_{\ddot{p}} & Y_{\ddot{q}} & Y_{\ddot{r}} \\ Z_{\ddot{u}} & Z_{\ddot{v}} & Z_{\ddot{w}} & Z_{\ddot{p}} & Z_{\ddot{q}} & Z_{\ddot{r}} \\ K_{\ddot{u}} & K_{\ddot{v}} & K_{\ddot{w}} & K_{\ddot{p}} & K_{\ddot{q}} & K_{\ddot{r}} \\ M_{\ddot{u}} & M_{\ddot{v}} & M_{\ddot{w}} & M_{\ddot{p}} & M_{\ddot{q}} & M_{\ddot{r}} \\ N_{\ddot{u}} & N_{\ddot{v}} & N_{\ddot{w}} & N_{\ddot{p}} & N_{\ddot{q}} & N_{\ddot{r}} \end{bmatrix}. \quad (3.38)$$

Στο [188], παρατίθεται η μέθοδος υπολογισμού των προσθέτων μαζών για διαφορετικά γεωμετρικά σχήματα, ενώ στο [155] υπολογίζονται οι πρόσθετες μάζες για το υποβρύχιο όχημα Remus.

Ο πίνακας $\mathbf{C}_A(\mathbf{v})$ των δυνάμεων τριβής, που είναι ανάλογες με το τετράγωνο της ταχύτητας, για υποβρύχια που κινούνται με σχετικά μικρή ταχύτητα είναι:

$$\mathbf{C}_A(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}} \cdot w & Y_{\dot{v}} \cdot v \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\dot{w}} \cdot w & 0 & -X_{\dot{u}} \cdot u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}} \cdot v & X_{\dot{u}} \cdot u & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{w}} \cdot w & Y_{\dot{v}} \cdot v & 0 & -N_{\dot{r}} \cdot r & M_{\dot{q}} \cdot q \\ Z_{\dot{w}} \cdot w & 0 & -X_{\dot{u}} \cdot u & N_{\dot{r}} \cdot r & 0 & -K_{\dot{p}} \cdot p \\ -Y_{\dot{v}} \cdot v & X_{\dot{u}} \cdot u & 0 & -M_{\dot{q}} \cdot q & K_{\dot{p}} \cdot p & 0 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

3.3.2.1.2 Δυνάμεις απόσβεσης. Λόγω της κίνησης του οχήματος, διαφοροποιείται η κατανομή των πιέσεων του νερού και δημιουργούνται κύματα στην επιφάνεια. Οι δυνάμεις που επάγονται από την μεταβολή της πίεσης του νερού απάγουν ενέργεια από το όχημα. Επίσης ενέργεια απάγεται λόγω των δυνάμεων από την τριβή του υγρού στην επιφάνεια του οχήματος. Οι δυνάμεις από την μεταβολή της πίεσης και από την τριβή είναι δυνάμεις απόσβεσης και εκφράζονται με την σχέση:

$$\boldsymbol{\tau}_D = -\mathbf{D}(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{v}, \quad (3.40)$$

όπου $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ ο πίνακας απόσβεσης. Για υποβρύχια οχήματα που κινούνται με σχετικά μικρή ταχύτητα ο πίνακας απόσβεσης είναι:

$$D(v) = - \begin{bmatrix} X_u + X_{u|q}|u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_v + Y_{v|q}|v| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_w + Z_{w|q}|w| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_p + K_{p|q}|p| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_q + M_{q|q}|q| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_r + N_{r|q}|r| \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Για μεγαλύτερες ταχύτητες πρέπει να ληφθεί υπόψη η μη γραμμικότητα οπότε δεν μηδενίζονται οι όροι εκτός της διαγωνίου. Επίσης οι συντελεστές απόσβεσης δεν είναι σταθεροί και μεταβάλλονται σε συνάρτηση με την ταχύτητα [103].

3.3.2.2 Δυνάμεις και ροπές όταν το όχημα είναι ακίνητο σε πεδίο προσπιπόντων κυματισμών

Στην περίπτωση αυτή οι επαγόμενες υδροδυναμικές δυνάμεις είναι οι δυνάμεις που επάγονται από την πίεση του νερού λόγω κυμάτων επιφανείας, οι δυνάμεις λόγω ανέμου και οι δυνάμεις λόγω ωκεάνιων ρευμάτων. Για υποβρύχια οχήματα που λειτουργούν σε βάθος μακριά από την επιφάνεια του νερού, η επίδραση του ανέμου και των κυμάτων μπορεί να αγνοηθεί. Η επίδραση του θαλάσσιου ρεύματος στην παρούσα προσέγγιση λαμβάνεται υπόψιν στην προσομοίωση του οχήματος κινηματικά. Έτσι ως πραγματική ταχύτητα του οχήματος στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων, θεωρείται η επαλληλία της ταχύτητας του ρεύματος και της ταχύτητας του οχήματος.

3.3.2.3 Υδροστατικές δυνάμεις και βαρύτητα.

Το όχημα δέχεται την επίδραση των υδροστατικών δυνάμεων ως μια δύναμη που είναι το ολοκλήρωμα της πίεσης του ρευστού πάνω στην επιφάνεια του. Η συνισταμένη των πιέσεων είναι η άντωση, έχει διεύθυνση την διεύθυνση του βάρους και φορά αντίθετη. Το σημείο εφαρμογής της άντωσης είναι στο κέντρο όγκου του του βυθισμένου τμήματος του οχήματος, το οποίο συμβολίζεται με $B[x_B, y_B, z_B]$, ενώ το σημείο εφαρμογής του βάρους είναι στο κέντρο βάρους του οχήματος $G[x_G, y_G, z_G]$. Για υποβρύχια οχήματα πλήρως βυθισμένα η εγκάρσια ευστάθεια επιτυγχάνεται μέσω της τοποθέτησης του κέντρου βάρους G χαμηλότερα από το κέντρο όγκου B.

Με βάση τα παραπάνω οι υδροστατικές δυνάμεις και η βαρύτητα εκφράζονται ως εξής:

$$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \begin{bmatrix} (W - B) \cdot \sin(\theta) \\ -(W - B) \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\phi) \\ -(W - B) \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\phi) \\ -(y_G \cdot W - y_B \cdot B) \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\phi) + (z_G \cdot W - z_B \cdot B) \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\phi) \\ (z_G \cdot W - z_B \cdot B) \cdot \sin(\theta) + (x_G \cdot W - x_B \cdot B) \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\phi) \\ (x_G \cdot W - x_B \cdot B) \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\phi) - (y_G \cdot W - y_B \cdot B) \cdot \sin(\theta) \end{bmatrix}. \quad (3.42)$$

3.3.3 Εξισώσεις κίνησης στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων

Ανακεφαλαιώνοντας, οι εξισώσεις κίνησης ενός υποβρυχίου οχήματος (3.34) μπορούν να γραφτούν:

$$\mathbf{M}_{veh} \cdot \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}_{veh}(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{v} = \boldsymbol{\tau}_{veh}, \quad (3.43)$$

όπου:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_{veh} = & \underbrace{-\mathbf{M}_A \cdot \dot{\mathbf{v}}}_{\substack{\text{δυνάμεις αδρανείας} \\ \text{λόγω πρόσθετης μάζας}}} - \underbrace{\mathbf{C}_A(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{v}}_{\substack{\text{δυνάμεις τριβής} \\ \text{λόγω πρόσθετης μάζας}}} - \underbrace{\mathbf{D}(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{v}}_{\substack{\text{δυνάμεις απόσβεσης}}} - \underbrace{\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})}_{\substack{\text{υδροστατική άντωση} \\ \text{και βάρος}}} + \\ & + \underbrace{\boldsymbol{\tau}_{prop}}_{\substack{\text{δυνάμεις από έλικες} \\ \text{πρώωσης}}} + \underbrace{\boldsymbol{\tau}_{thrusters}}_{\substack{\text{δυνάμεις από προωθητήρες}}} + \underbrace{\boldsymbol{\tau}_{fins}}_{\substack{\text{δυνάμεις από πτερύγια /} \\ \text{πηδάλια}}}. \end{aligned} \quad (3.44)$$

Στην (3.43) έχουν παραληφθεί οι όροι που δεν έχουν σημασία για υποβρύχια οχήματα μακριά από την επιφάνεια του νερού. Από αντικατάσταση της (3.43) στην (3.34) προκύπτει η γενική μορφή της εξίσωσης κίνησης ενός υποβρυχίου οχήματος:

$$(\mathbf{M}_{veh} + \mathbf{M}_A) \cdot \dot{\mathbf{v}} + (\mathbf{C}_{veh}(\mathbf{v}) + \mathbf{C}_A(\mathbf{v})) \cdot \mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau}_{prop} + \boldsymbol{\tau}_{thrusters} + \boldsymbol{\tau}_{fins}, \quad (3.45)$$

Ή απλούστερα:

$$\mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} \quad (3.46)$$

3.3.4 Εξισώσεις κίνησης στο αδρανειακό σύστημα αξόνων

Στο αδρανειακό σύστημα αξόνων ορίζονται το διάνυσμα θέσης και οι γωνίες στροφής Euler δίνονται από την εξίσωση (3.1). Η ταχύτητα στο αδρανειακό σύστημα αξόνων εκφράζεται ως εξής:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \begin{bmatrix} \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} & \dot{\phi} & \dot{\theta} & \dot{\psi} \end{bmatrix}^T, \quad (3.47)$$

όπου τα $\dot{\phi}$, $\dot{\theta}$, $\dot{\psi}$ εκφράζουν τον ρυθμό μεταβολής των γωνιών Euler. Η χρονική παράγωγος του διανύσματος ταχύτητας στο αδρανειακό σύστημα, εκφράζει το διάνυσμα γραμμικών επιταχύνσεων και ρυθμού μεταβολής γωνιών θέσης:

$$\ddot{\mathbf{q}} = \frac{d}{dt}(\dot{\mathbf{q}}) = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} & \dot{\phi} & \dot{\theta} & \dot{\psi} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \ddot{x} & \ddot{y} & \ddot{z} & \ddot{\phi} & \ddot{\theta} & \ddot{\psi} \end{bmatrix}^T, \quad (3.48)$$

Οι εξισώσεις κίνησης στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων προκύπτουν από τον γενικευμένο δεύτερο νόμο του Νεύτωνα:

$$\boldsymbol{\tau} = d/dt [\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{q}}], \quad (3.49)$$

όπου \mathbf{M} είναι ο πίνακας μάζας του οχήματος συμπεριλαμβανόμενης και της πρόσθετης μάζας από το περιβάλλον υγρό. Από τον μετασχηματισμό ταχύτητας έχουμε:

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1(\eta_2) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_2(\eta_2) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \dot{\boldsymbol{\eta}} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) \cdot \mathbf{v}, \quad (3.50)$$

και αντίστροφα:

$$\mathbf{v} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})^{-1} \cdot \dot{\boldsymbol{\eta}}. \quad (3.51)$$

Αν παραγωγίσουμε την εξίσωση του μετασχηματισμού ταχύτητας με τον χρόνο έχουμε:

$$\frac{d}{dt}(\dot{\boldsymbol{\eta}}) = \frac{d}{dt}(\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) \cdot \mathbf{v}) = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1(\eta_2) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_2(\eta_2) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{v} + \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1(\eta_2) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_2(\eta_2) \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt}(\mathbf{v}). \quad (3.52)$$

Αντικαθιστώντας την έκφραση $\frac{d}{dt}(\dot{\boldsymbol{\eta}})$ με τον ορισμό του διανύσματος επιταχύνσεων στο αδρανειακό σύστημα, προκύπτει:

$$\ddot{\boldsymbol{\eta}} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1(\eta_2) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_2(\eta_2) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{v} + \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1(\eta_2) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_2(\eta_2) \end{bmatrix} \cdot \dot{\mathbf{v}} \Leftrightarrow \ddot{\boldsymbol{\eta}} = \dot{\mathbf{J}}(\boldsymbol{\eta}) \cdot \mathbf{v} + \mathbf{J}(\boldsymbol{\eta}) \cdot \dot{\mathbf{v}}. \quad (3.53)$$

Η παραπάνω εξίσωση συνδέει τις επιταχύνσεις στο αδρανειακό σύστημα με τις επιταχύνσεις στο σωματοπαγές σύστημα. Παρατηρούμε ότι αυτές ταυτίζονται μόνο όταν το μητρώο μετασχηματισμού $\mathbf{J}(\boldsymbol{\eta})$ παραμένει αμετάβλητο στον χρόνο. Αντιστρέφοντας την παραπάνω εξίσωση παίρνουμε:

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta}) \cdot [\ddot{\boldsymbol{\eta}} - \dot{\mathbf{J}}(\boldsymbol{\eta}) \cdot \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\eta}) \cdot \dot{\boldsymbol{\eta}}]. \quad (3.54)$$

Η εξίσωση κίνησης ενός υποβρυχίου οχήματος στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων μπορεί να γραφτεί με την μορφή:

$$\mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v}) \cdot \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{D}(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau}, \quad (3.55)$$

όπου: \mathbf{M} : το μητρώο μάζας του οχήματος, $\mathbf{C}(\mathbf{v})$: το μητρώο αδρανειακών όρων και πρόσθετων μαζών, $\mathbf{D}(\mathbf{v})$: το μητρώο αποσβέσεων και $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$: το διάνυσμα των δυνάμεων βαρύτητας.

Για να γραφτεί η (3.55) στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων πρέπει να απαλειφτούν οι όροι που εκφράζουν της ταχύτητα και την επιτάχυνση στο σωματοπαγές σύστημα.

Τα διανύσματα μάζας, αδρανειακών δυνάμεων, δυνάμεων απόσβεσης, δυνάμεων βαρύτητας και εξωτερικών δυνάμεων στο αδρανειακό σύστημα γράφονται ως εξής:

$$\begin{aligned} M_{\eta}(\eta) &= J^{-T}(\eta) \cdot M \cdot J^{-1}(\eta) \\ C_{\eta}(v, \eta) &= J^{-T}(\eta) \cdot [C(v) - M \cdot J^{-1}(\eta) \cdot \dot{J}(\eta)] \cdot J^{-1}(\eta) \\ D_{\eta}(v, \eta) &= J^{-T}(\eta) \cdot D(v) \cdot J^{-1}(\eta) \\ g_{\eta}(\eta) &= J^{-T}(\eta) \cdot g(\eta) \\ \tau_{\eta}(\eta) &= J^{-T}(\eta) \cdot \tau \end{aligned} \quad (3.56)$$

Οπότε η (3.55) μετασχηματίζεται στην εξίσωση κίνησης με όρους στο αδρανειακό σύστημα αξόνων:

$$M_{\eta} \cdot \ddot{\eta} + C_{\eta}(v, \eta) \cdot \dot{\eta} + D_{\eta}(v, \eta) \cdot \dot{\eta} + g_{\eta}(\eta) = \tau_{\eta} \quad (3.57)$$

Παρατηρούμε ότι αν και η ταχύτητα και η επιτάχυνση στην (3.57) είναι γραμμένη στο αδρανειακό σύστημα, οι συντελεστές τους εξαρτώνται από την ταχύτητα στο σωματοπαγές σύστημα. Έτσι οι εξισώσεις κίνησης θα πρέπει να εξετάζονται από κοινού και ταυτόχρονα και στα δύο συστήματα αξόνων όπως θα αναλυθεί παρακάτω στη διαδικασία προσομοίωσης υποβρυχίων οχημάτων.

3.4 Προσομοίωση κίνησης υποβρυχίων οχημάτων

Με βάση το δυναμικό μοντέλο και τις εξισώσεις κίνησης των υποβρυχίων οχημάτων που αναπτύχθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, αναπτύχθηκε η παρακάτω μέθοδος προσομοίωσης της κίνησης υποβρυχίων οχημάτων. Η προσομοίωση της κίνησης γίνεται με την βοήθεια των εξισώσεων κίνησης, οι οποίες καταστρώνονται για κάθε πραγματικό όχημα με τα υδροδυναμικά του δεδομένα. Τα προγράμματα προσομοίωσης κίνησης χρησιμοποιούνται αντί για πειράματα πραγματικού χρόνου, δεδομένου ότι έτσι μπορούν να ξεπεραστούν περιορισμοί κόστους, χρόνου και απαραίτητων εγκαταστάσεων. Επιπλέον δεν υπάρχει πιθανότητα βλάβης ή απώλειας οχήματος, όπως στα πειράματα σε πραγματικό θαλάσσιο περιβάλλον. Έτσι τα προγράμματα προσομοίωσης χρησιμοποιούνται για εξέλιξη τεχνικών πλοήγησης και ελέγχου χωρίς τους παραπάνω περιορισμούς. Βέβαια τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων θα πρέπει να συγκρίνονται με πραγματικά πειράματα για να ελέγχεται η επίδραση παραγόντων όπως επίδραση τυχαιότητας διαταραχών, ακρίβεια κινηματικού μοντέλου και υδροδυναμικών παραμέτρων, σφάλματα αισθητήρων και δυναμική κινητήρων-ελίκων. Στην παρούσα εργασία έγιναν προσομοιώσεις με βάση το δυναμικό μοντέλο του αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος NPS-

Phoenix που έχει δημοσιευτεί στο [144] και τροποποιήθηκε όπως περιγράφεται στο [189], ώστε οι πίνακες μάζας και απόσβεσης να είναι συμμετρικοί.

Για την προσομοίωση της κίνησης των υποβρυχίων οχημάτων, κατ' αρχήν αναγνωρίζονται οι μεταβλητές ελέγχου του οχήματος. Οι μεταβλητές ελέγχου είναι αυτές που δίνονται ως εντολή μεταβολής της κατάστασης κίνησης του οχήματος και περιλαμβάνουν μονοσήμαντα όλες τις ανεξάρτητες εντολές κίνησης. Για παράδειγμα, τέτοιες μεταβλητές ελέγχου είναι η τάση σε έναν κινητήρα πρόωσης, η γωνία στροφής ενός πτερυγίου ή οι στροφές μιας πλευρικής έλικας πρόωσης. Οι μεταβλητές ελέγχου ομαδοποιούνται και σχηματίζουν ένα διάνυσμα το οποίο καλείται *διάνυσμα ελέγχου* και η διάσταση του οποίου εξαρτάται από τον αριθμό των ανεξάρτητων ελίκων, πτερυγίων και πλευρικών ωθητήρων που έχει το όχημα:

$$\mathbf{b}_{\text{ελέγχου}} = [\text{εντολές ελέγχου ελίκων, πτερυγίων}]^T. \quad (3.58)$$

Με χρήση των εξισώσεων δυνάμεων ελίκων και πτερυγίων μπορούμε να σχηματίσουμε κατάλληλα την εξίσωση

$$\boldsymbol{\tau}_{\text{ελέγχου}} = \mathbf{B}(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{b}_{\text{ελέγχου}}, \quad (3.59)$$

όπου $\boldsymbol{\tau}_{\text{ελέγχου}}$ είναι το διάνυσμα των δυνάμεων ελέγχου που παράγονται από τους κινητήρες και τα πτερύγια του οχήματος το οποίο αναλύεται ως εξής:

$$\boldsymbol{\tau}_{\text{ελέγχου}} = \boldsymbol{\tau}_{\text{ελίκωνπρόωσης}} + \boldsymbol{\tau}_{\text{πλευρικώνωθητήρων}} + \boldsymbol{\tau}_{\text{πτερυγίων}}, \quad (3.60)$$

και $\mathbf{B}(\mathbf{v})$ είναι ο πίνακας μετασχηματισμού του διανύσματος ελέγχου στο διάνυσμα $\boldsymbol{\tau}_{\text{ελέγχου}}$.

Αντικαθιστώντας την (3.59) στην εξίσωση κίνησης στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων (3.46) έχουμε:

$$\begin{aligned} \mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) &= \mathbf{B}(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{b}_{\text{ελέγχου}} \quad \Leftrightarrow \\ \mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{v}} &= \mathbf{B}(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{b}_{\text{ελέγχου}} - \mathbf{C}(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{v} - \mathbf{D}(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{v} - \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}). \end{aligned} \quad (3.61)$$

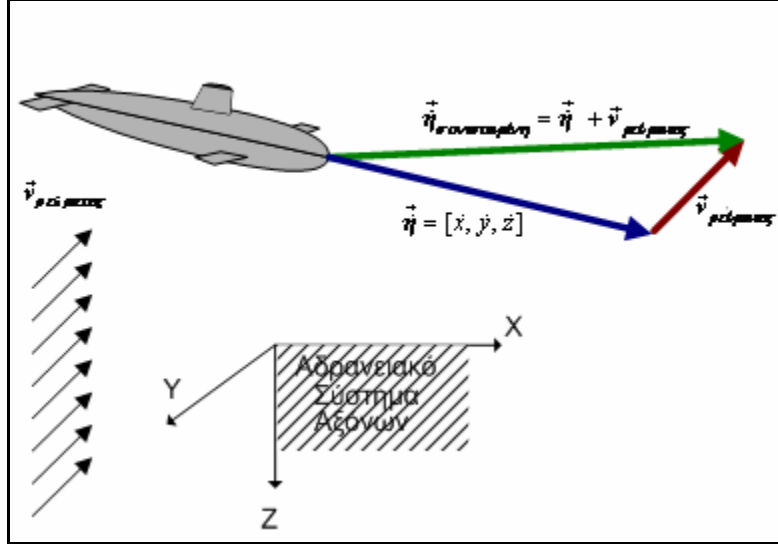
Πολλαπλασιάζοντας τα δύο μέλη της (3.61) με \mathbf{M}^{-1} έχουμε:

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{M}^{-1} \cdot [\mathbf{B}(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{b}_{\text{ελέγχου}} - \mathbf{C}(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{v} - \mathbf{D}(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{v} - \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})]. \quad (3.62)$$

Η εξίσωση (3.62) δίνει την επιτάχυνση στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων ως συνάρτηση της θέσης στο αδρανειακό σύστημα αξόνων, της ταχύτητας στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων και του διανύσματος ελέγχου.

Η ταχύτητα του οχήματος που προκύπτει ως ολοκλήρωμα σε κάποιο χρόνο της επιτάχυνσης που δίνει η (3.62) μπορεί να μετασχηματιστεί σε ταχύτητα στο αδρανειακό σύστημα αξόνων. Η

επίδραση της τυχόν ύπαρξης ωκεάνιου ρεύματος λαμβάνεται υπόψιν με την διανυσματική πρόσθεση της ταχύτητας του ρεύματος στην ταχύτητα του οχήματος. Η υπόθεση αυτή είναι επαρκής εφόσον το όχημα βρίσκεται ολόκληρο μέσα στην κινούμενη μάζα του ρευστού και μετακινείται με αυτό (Σχήμα 3-5).



Σχήμα 3-5: Επαλληλία ταχύτητας ωκεάνιου ρεύματος και οχήματος

Η προσομοίωση ενός υποβρυχίου οχήματος γίνεται με υπολογισμό της θέσης και της ταχύτητας του οχήματος σε σταθερά χρονικά διαστήματα ΔT . Ο αλγόριθμος προσομοίωσης με χρήση της (3.62) έχει ως εξής [39]:

Βήμα 1. Στην αρχή της προσομοίωσης της κίνησης του υποβρυχίου οχήματος λαμβάνει τιμές το διάνυσμα θέσης στο αδρανειακό σύστημα αξόνων :

$$\eta = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T. \quad (3.63)$$

Επίσης λαμβάνει αρχικές τιμές το διάνυσμα ταχύτητας του οχήματος στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων:

$$v = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T. \quad (3.64)$$

Τέλος λαμβάνουν τιμές οι μεταβλητές στερεού σώματος (μάζα, ροπές αδρανείας) και οι υδροδυναμικές μεταβλητές του οχήματος και υπολογίζεται με τις εξισώσεις (3.35) και (3.38) ο πίνακας μάζας και ο αντίστροφός του:

$$M = M_{veh} + M_A. \quad (3.65)$$

Βήμα 2. Υπολογίζονται οι πίνακες μετασχηματισμού ταχύτητας και αντίστροφου μετασχηματισμού ταχύτητας:

$$\dot{\eta} = J(\eta)^{(i)} \cdot v, \quad v = J^{-1}(\eta)^{(i)} \cdot \dot{\eta}.$$

Οι πίνακες αυτοί εξαρτώνται από τις γωνίες στροφής του οχήματος και είναι σταθεροί για κάθε κύκλο προσομοίωσης. Ο δείκτης (i) αναφέρεται στον $i - \sigma\tau\omicron$ κύκλο προσομοίωσης.

Βήμα 3. Υπολογίζεται το διάνυσμα εξωτερικών δυνάμεων ελέγχου στο όχημα:

$$\tau_{\text{ελέγχου}}^{(i)} = B(v) \cdot b_{\text{ελέγχου}}^{(i)}.$$

Το διάνυσμα ελέγχου στην περίπτωση αυτόνομης πλοήγησης του οχήματος δίνεται από τον ελεγκτή κίνησης, ο οποίος με δεδομένα τα στοιχεία θέσης και τα κινηματικά στοιχεία του οχήματος καθώς και την επιθυμητή πορεία και την ύπαρξη εμποδίων καθορίζει κατάλληλα τις μεταβλητές ελέγχου του οχήματος.

Βήμα 4. Υπολογίζεται το διάνυσμα επιταχύνσεων στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων με την σχέση:

$$\dot{v}^{(i)} = M^{-1} \cdot [\tau_{\text{ελέγχου}}(v) - C(v) \cdot v - D(v) \cdot v - g(\eta)]^{(i)}.$$

Βήμα 5. Υπολογίζεται το νέο διάνυσμα ταχυτήτων στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων με αριθμητική ολοκλήρωση κατά Runge-Kutta του διανύσματος της επιτάχυνσης:

$$v^{(i+1)} = \left[\frac{\dot{v}^{(i)} + \dot{v}^{(i-1)}}{2} \right] \cdot \Delta T + v^{(i)}. \quad (3.66)$$

Η ολοκλήρωση κατά Runge-Kutta επιλέχθηκε για λόγους εξοικονόμησης υπολογιστικού χρόνου γιατί αποδείχθηκε στην πράξη ότι δίνει καλύτερα αποτελέσματα όταν τα βήματα προσομοίωσης απέχουν περισσότερο χρόνο [189].

Βήμα 6. Το νέο διάνυσμα ταχυτήτων στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων με τον μετασχηματισμό ταχύτητας, μετασχηματίζεται στο αδρανειακό σύστημα αξόνων:

$$\dot{\eta}^{(i+1)} = J(\eta)^{(i)} \cdot v^{(i+1)}. \quad (3.67)$$

Βήμα 7. Η ύπαρξη ωκεάνιου ρεύματος λαμβάνεται υπόψιν με την επαλληλία της ταχύτητας του με την ταχύτητα του οχήματος. Στο διάνυσμα ταχύτητας και ρυθμών αλλαγής γωνιών θέσης $\dot{\eta}_I^{(i+1)}$ προστίθεται η ταχύτητα του ωκεάνιου ρεύματος για να προκύψει η τελική ταχύτητα του οχήματος στο αδρανειακό σύστημα αξόνων:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}^{(i+1)} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix}^{(i+1)} + \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}^{(\rho\epsilon\upsilon\mu\alpha\tau\omicron\varsigma)} \Leftrightarrow \dot{\eta}_I^{(i+1)} = \dot{\eta}_I^{(i+1)} + v_{\rho\epsilon\upsilon\mu\alpha\tau\omicron\varsigma} . \quad (3.68)$$

Βήμα 8. Η ταχύτητα του οχήματος ολοκληρώνεται αριθμητικά κατά Runge-Kutta στο χρονικό διάστημα ΔT για να υπολογιστεί η διανυθείσα απόσταση και η μεταβολή των γωνιών στροφής:

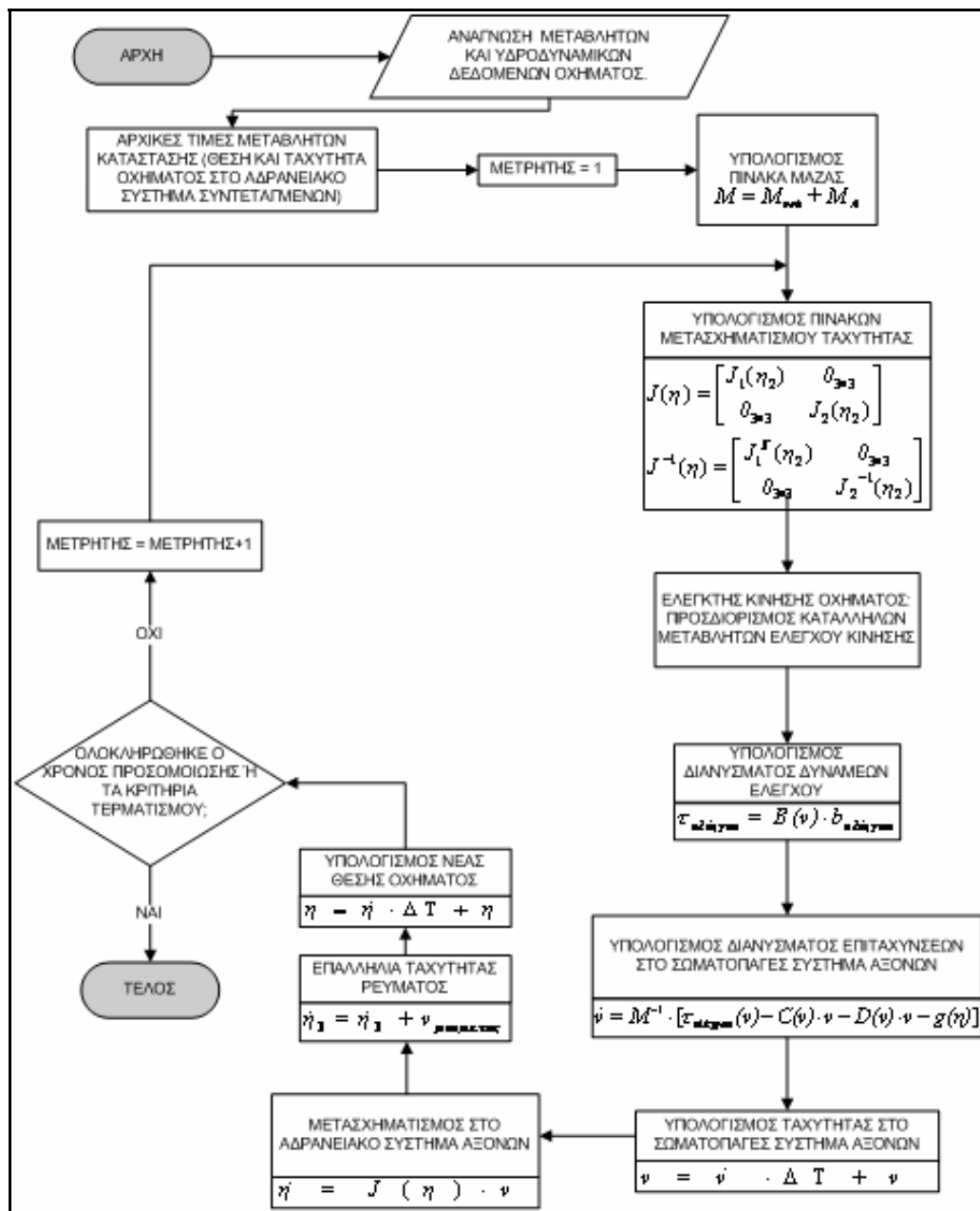
$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \phi \\ \Delta \theta \\ \Delta \psi \end{bmatrix}^{(i+1)} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}^{(i+1)} + \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}^{(i)} \right\} \cdot \Delta T \Leftrightarrow \Delta \eta^{(i+1)} = \frac{\{\Delta \dot{\eta}^{(i+1)} + \Delta \dot{\eta}^{(i)}\}}{2} \cdot \Delta T, \quad (3.69)$$

οπότε η θέση του οχήματος στο τέλος του βήματος προσομοίωσης προκύπτει με πρόσθεση της μεταβολής της θέσης στο αδρανειακό σύστημα αξόνων κατά την διάρκεια του βήματος προσομοίωσης, με την θέση του οχήματος στην αρχή του βήματος προσομοίωσης:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}^{(i+1)} = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \phi \\ \Delta \theta \\ \Delta \psi \end{bmatrix}^{(i+1)} + \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix}^{(i)} \Leftrightarrow \eta^{(i+1)} = \Delta \eta^{(i+1)} + \eta^{(i)}. \quad (3.70)$$

Βήμα 9. Επιστροφή στο βήμα 2 όπου γίνεται εκ νέου υπολογισμός μητρώων μετασχηματισμού και ακολουθούνται τα βήματα έως και το πέρας της προσομοίωσης που είναι γίνεται είτε με την συμπλήρωση του προκαθορισμένου χρόνου ή με την επίτευξη ενός προκαθορισμένου σημείου στόχου ή με την επίτευξη των στόχων της αποστολής.

Ο αλγόριθμος προσομοίωσης περιγράφεται στο Σχήμα 3-6 και μπορεί να εφαρμοστεί για να προσομοιωθεί η κίνηση ενός υποβρυχίου οχήματος σε περιπτώσεις όπου οι εντολές ελέγχου του οχήματος δεν επιφέρουν αλλαγή της μάζας του οχήματος ή της κατανομής της (π.χ. ερματισμός ή αφερματισμός δεξαμενών, μετακίνηση βαρών). Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να επαναυπολογίζεται ο πίνακας μάζας \mathbf{M} , οπότε από το Βήμα 9 γίνεται επιστροφή στο Βήμα 1.



Σχήμα 3-6: Διάγραμμα ροής προσομοίωσης κίνησης υποβρυχίου οχήματος.

4° Κεφάλαιο

Ασαφής έλεγχος και γενετικοί αλγόριθμοι

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναφορά στις μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για την προτεινόμενη αρχιτεκτονική ελέγχου και πλοήγησης αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων. Αυτές είναι ο έλεγχος με ασαφή λογική και οι γενετικοί αλγόριθμοι. Στις επόμενες παραγράφους γίνεται μια σύντομη αναφορά στις μεθόδους αυτές. Στην παράγραφο 4.2 δίνονται οι βασικές αρχές της ασαφούς λογικής και του ασαφούς ελέγχου. Στην παράγραφο 4.3 περιγράφεται η μεθοδολογία των γενετικών αλγορίθμων.

4.2 Ασαφής λογική και ασαφής έλεγχος

Η ασαφής λογική προτάθηκε το 1965 από τον L. Zadeh [190], για να αντιμετωπισθούν προβλήματα που περιέχουν αβεβαιότητα, ανακρίβειες, ή διαδικασίες λήψης αποφάσεων στηριγμένες σε ποιοτικά κριτήρια.

Η ασαφής λογική στηρίζεται στα *ασαφή σύνολα* τα οποία ορίζονται από μια *συνάρτηση συμμετοχής* [191]. Η τιμή της συνάρτησης συμμετοχής είναι ένας αριθμός στο διάστημα $[0,1]$ και

εκφράζει τον βαθμό στον οποίο ένα μέλος ενός συνόλου έχει την ιδιότητα που αναπαριστά το ασαφές σύνολο. Έτσι αν U είναι ένα σύνολο αναφοράς, τα στοιχεία του οποίου συμβολίζονται με u , η συνάρτηση συμμετοχής απεικονίζει το σύνολο U στο διάστημα $[0,1]$:

$$\mu_F : U \rightarrow [0, 1]. \quad (4.1)$$

Η συνάρτηση μ_F αντιστοιχεί σε κάθε στοιχείο $u \in U$ μία τιμή στο διάστημα $[0,1]$. Με αυτόν τον τρόπο ορίζεται το ασαφές σύνολο F ως το σύνολο των ζευγών:

$$\tilde{F} = \sum_{u \in U} \mu_F(u) / u, \quad (4.2)$$

όπου το σύμβολο \sum χρησιμοποιείται για την ομαδοποίηση όλων των ζευγών $\{\mu_F(u) / u\}$ για όλα τα διακριτά στοιχεία u του συνόλου U .

Με την ασαφή λογική μπορεί να μοντελοποιηθεί η διαδικασία εξαγωγής λογικών συμπερασμάτων που είναι βασισμένα σε *λογικούς κανόνες* της μορφής:

$$\text{Εάν } \{x \text{ είναι } A\} \text{ τότε } \{y \text{ είναι } B\}, \quad (4.3)$$

όπου x είναι το στοιχείο του συνόλου X με ιδιότητα που εκφράζεται από μια *λεκτική μεταβλητή* A και y είναι το στοιχείο του συνόλου Y με ιδιότητα που εκφράζεται από μια *λεκτική μεταβλητή* B . Το αριστερό μέρος του κανόνα $\{x \text{ είναι } A\}$ της (4.3), αποτελεί την είσοδο του κανόνα (rule antecedent), ενώ το δεξιό μέρος $\{y \text{ είναι } B\}$ αποτελεί τη έξοδο του κανόνα (rule consequent).

Ο βαθμός στον οποίο η είσοδος x και η έξοδος y έχουν την ιδιότητα που εκφράζουν οι λεκτικές μεταβλητές A και B αντίστοιχα, εκφράζονται από τα ασαφή σύνολα:

$$\tilde{A} = \int_x \mu_A(x) / x \quad (4.4)$$

$$\text{και } \tilde{B} = \int_y \mu_B(y) / y. \quad (4.5)$$

Το σύμβολο ολοκλήρωσης \int χρησιμοποιείται αντί του συμβόλου της άθροισης \sum της σχέσης (4.2) όταν το σύνολο αναφοράς είναι συνεχές και μη αριθμήσιμο.

Ο κανόνας (4.3) αποτελεί μια *ασαφή σχέση* μ_R τέτοια ώστε:

$$R(x, y) = \int_{(x, y)} \mu_{R(x, y)}(x, y) / (x, y), \quad (4.6)$$

$$\text{όπου } \forall x \in X, \forall y \in Y : \mu_R(x, y) = \mu_A(x) \otimes \mu_B(y), \quad (4.7)$$

Το σύμβολο \otimes αναπαριστά έναν τελεστή ασαφούς συνεπαγωγής. Στην παρούσα εργασία ως τελεστής συνεπαγωγής στην εργαλειοθήκη Fuzzy Matlab Toolbox, αλλά και στους κώδικες σε γλώσσα C που γράφτηκαν για να προγραμματιστούν ασαφείς ελεγκτές, ως τελεστής ασαφούς συνεπαγωγής χρησιμοποιήθηκε ο τελεστής Mamdani:

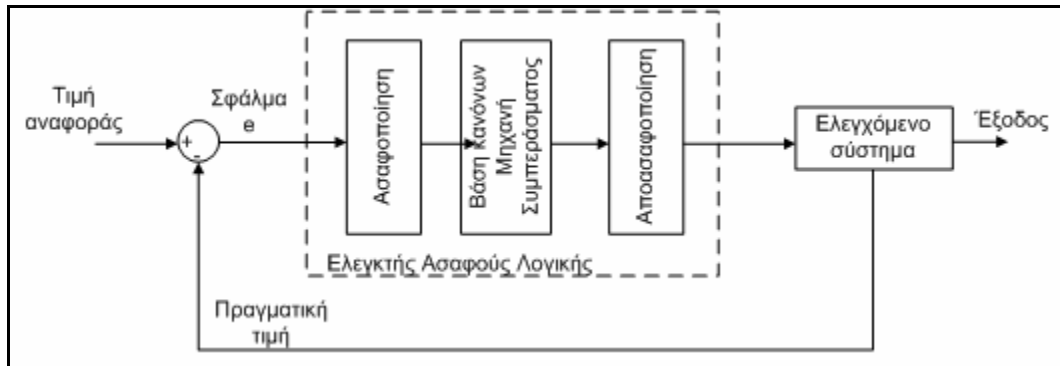
$$\mu_A(x) \otimes \mu_B(y) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(y)\} \quad (4.8)$$

Στην γενική του μορφή ένας κανόνας έχει την μορφή:

$$\text{Εάν } \{a_1 \text{ είναι } LA_1\} \text{ και } \dots \text{ και } \{a_i \text{ είναι } LA_i\} \text{ τότε } \{c_1 \text{ είναι } LC_1\} \text{ και } \dots \text{ και } \{c_j \text{ είναι } LC_j\}, \quad (4.9)$$

Όπου a_1, \dots, a_i είναι οι εισόδοι του κανόνα με λεκτικές μεταβλητές LA_1, \dots, LA_i και c_1, \dots, c_j είναι οι έξοδοι με λεκτικές μεταβλητές LC_1, \dots, LC_j αντίστοιχα. Τα και (AND) που συνδέουν τις εισόδους μπορεί να είναι ή (OR).

Το βασικό δομικό διάγραμμα ενός ασαφούς ελεγκτή φαίνεται στο Σχήμα 4-1.



Σχήμα 4-1: Δομικό διάγραμμα ασαφούς ελεγκτή

Ο ασαφής ελεγκτής αποτελείται από τρία τμήματα: το *τμήμα ασαφοποίησης*, όπου οι τιμές εισόδου ασαφοποιούνται και μετασχηματίζονται από αριθμητικές τιμές σε ασαφή σύνολα, την *μηχανή συμπεράσματος*, όπου υπάρχουν οι λογικοί κανόνες εξαγωγής συμπεράσματος και το *τμήμα αποασαφοποίησης*, όπου το συμπέρασμα που προκύπτει ως ασαφές σύνολο από την μηχανή εξαγωγής συμπεράσματος μετασχηματίζεται σε αριθμητική τιμή, που αποτελεί την έξοδο του ελεγκτή και την εντολή που επιδρά στο ελεγχόμενο φυσικό σύστημα.

Ο κάθε κανόνας της βάσης κανόνων αναπαριστά την γνώση ενός έμπειρου χειριστή του συστήματος. Με σύγκριση της παρατήρησης από την ασαφοποίηση των αριθμητικών τιμών εισόδου και της γνώσης που αναπαριστά ο κανόνας μπορεί να προσδιοριστεί ο βαθμός ενεργοποίησης της εξόδου του κάθε κανόνα. Ο κάθε κανόνας ενεργοποιείται στον βαθμό που πληρείται το “Εάν” μέρος του. Ακολούθως συντίθενται οι έξοδοι όλων των κανόνων για να υπολογιστεί η συνάρτηση συμμετοχής της εξόδου της βάσης των κανόνων, η οποία αποασαφοποιείται, για να υπολογιστεί η έξοδος του ελεγκτή.

Για τον απλό ασαφή ελεγκτή με μία είσοδο και μία έξοδο του σχήματος 4-1, η βάση κανόνων αποτελείται από n κανόνες της μορφής:

$$\text{Εάν } \{e \text{ είναι } LE^{(k)}\} \text{ τότε } \{u \text{ είναι } LU^{(k)}\}, \quad k=1, \dots, n, \quad (4.10)$$

όπου :

$LE^{(k)}$ είναι η λεκτική μεταβλητή της εισόδου E στον k -οστό κανόνα και η πρόταση $\{e \text{ είναι } LE^{(k)}\}$ είναι ισοδύναμη με το ασαφές σύνολο: $LE^{(k)} = \int_e \mu_{LE^{(k)}}(e) / e$.

$LU^{(k)}$ είναι η λεκτική μεταβλητή της εξόδου U στον k -οστό κανόνα και η πρόταση $\{u \text{ είναι } LU^{(k)}\}$ είναι ισοδύναμη με το ασαφές σύνολο: $LU^{(k)} = \int_u \mu_{LU^{(k)}}(u) / u$.

Σύμφωνα με την (4.8), η ασαφής σχέση που εκφράζει τον k -οστό κανόνα κατά Mamdani είναι:

$$\forall k : R_m^{(k)} = \int_{e \times u} \min(\mu_{LE^{(k)}}(e), \mu_{LU^{(k)}}(u)) / (e, u). \quad (4.11)$$

Η ασαφοποίηση της εισόδου e^* γίνεται με την συνάρτηση συμμετοχής:

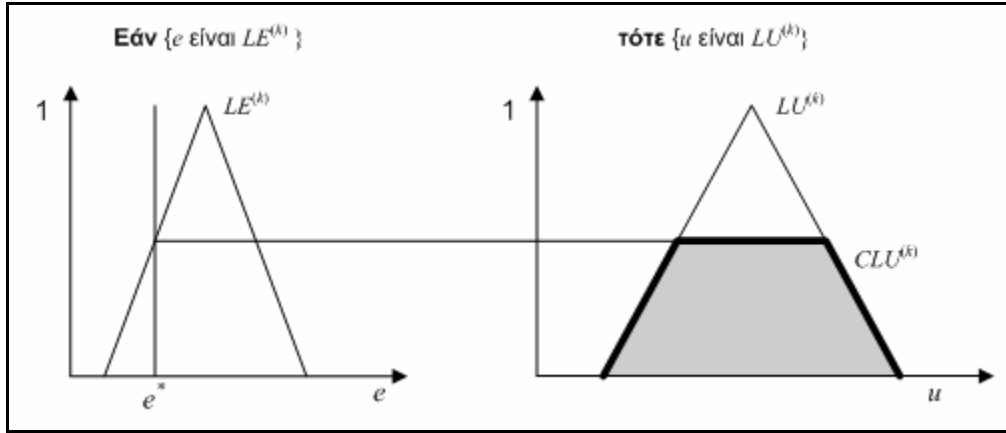
$$\forall e : \mu^*(e) = \begin{cases} 1, & \text{εάν } e = e^* \\ 0, & \text{διαφορετικά.} \end{cases} \quad (4.12)$$

Για την εξαγωγή συμπεράσματος υπάρχουν δύο μέθοδοι: η μέθοδος σύνθεσης κανόνων, όπου όλοι οι κανόνες συνθέτονται σε μια ασαφή σχέση και η μέθοδος ενεργοποίησης κανόνων, όπου ο κάθε κανόνας ενεργοποιείται ξεχωριστά, προκύπτουν ασαφή σύνολα με αριθμό ίσο με τον αριθμό των κανόνων και το συμπέρασμα προκύπτει από την ένωσή τους. Στην παρούσα εργασία εφαρμόστηκε η μέθοδος ενεργοποίησης κανόνων, η οποία είναι απλούστερη στην υπολογιστική υλοποίηση και δίνει ίδια αποτελέσματα με την μέθοδο σύνθεσης κανόνων, όταν χρησιμοποιείται ο τελεστής ασαφούς συνεπαγωγής Mamdani (σχέση (4.8)) [191].

Με την μέθοδο ενεργοποίησης κανόνων προκύπτουν n ασαφή σύνολα, ένα για κάθε κανόνα, $CLU^{(1)}, \dots, CLU^{(n)}$, όπου:

$$\forall u, \forall k : \mu_{CLU^{(k)}}(u) = \min\{\mu_{LE^{(k)}}(e^*), \mu_{LU^{(k)}}(u)\}. \quad (4.13)$$

Στο Σχήμα 4-2 δίνεται η γραφική αναπαράσταση της ενεργοποίησης του k -οστού κανόνα, από την οποία, σύμφωνα με την σχέση (4.13), σχηματίζεται στην έξοδο ένα ασαφές σύνολο $CLU^{(k)}$.



Σχήμα 4-2: Ενεργοποίηση κανόνων

Ως ασαφές συμπέρασμα από την μηχανή συμπεράσματος προκύπτει το ασαφές σύνολο $\int_u \mu_U(u)/u$, με συνάρτηση συμμετοχής $\mu_U(u)$ την ένωση των συναρτήσεων συμμετοχής των ασαφών συνόλων $CLU^{(1)}, \dots, CLU^{(n)}$:

$$\forall u : \mu_U(u) = \max_k \mu_{CLU^{(k)}}(u) = \max_k \min \{ \mu_{LE^{(k)}}(e^*), \mu_{LU^{(k)}}(u) \}. \quad (4.14)$$

Στο Σχήμα 4-3 έχει παρασταθεί γραφικά η διαδικασία σύνθεσης των εξόδων από δύο κανόνες.

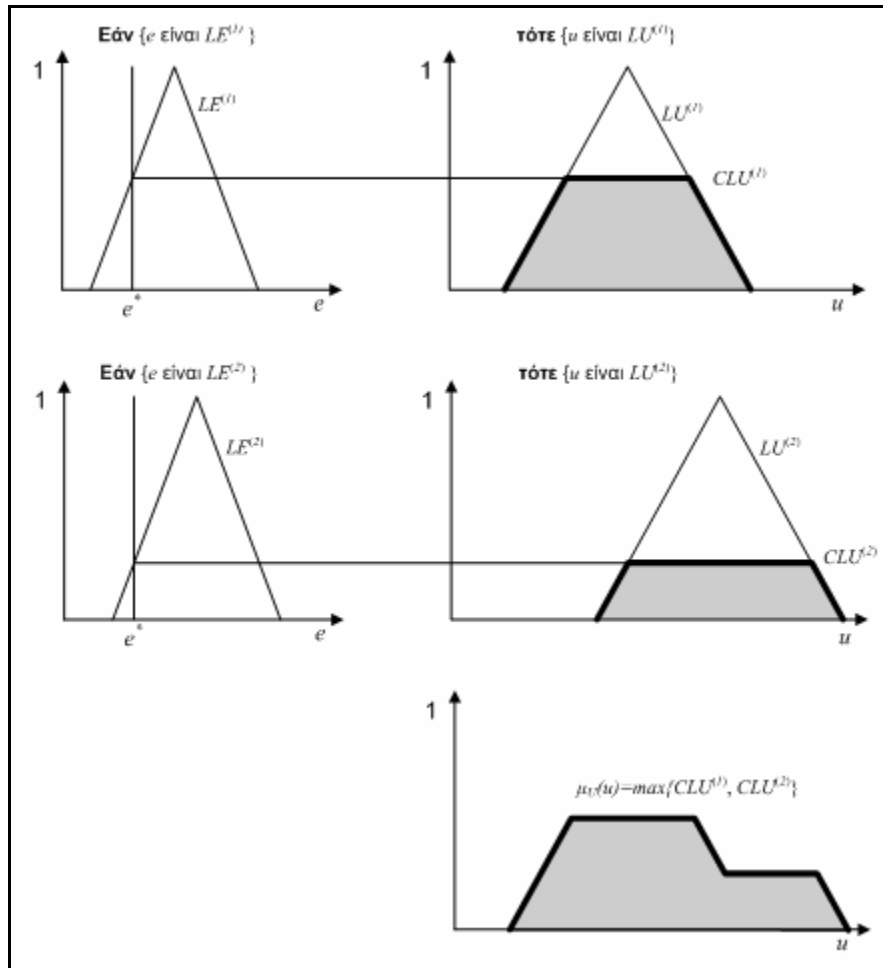
Η συνάρτηση συμμετοχής της εξόδου $\mu_U(u)$ φαίνεται κάτω δεξιά στο Σχήμα 4-3.

Για τον υπολογισμό της εξόδου του ασαφούς ελεγκτή ακολουθεί η αποασαφοποίηση του ασαφούς συνόλου $\int_u \mu_U(u)/u$. Για την αποασαφοποίηση έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι, όπως η μέθοδος κέντρου βάρους, η μέθοδος κέντρου αθροισμάτων και η μέθοδος του ύψους [256].

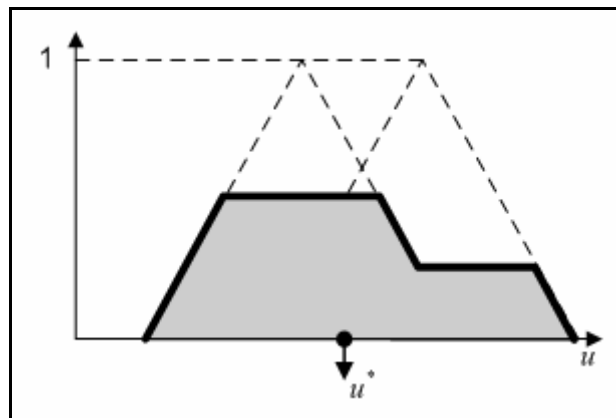
Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος κέντρου βάρους, σύμφωνα με την οποία η έξοδος ισούται με την θέση του κέντρου βάρους της επιφάνειας της συνάρτησης συμμετοχής:

$$u^* = \frac{\int_u u \mu_U(u) du}{\int_u \mu_U(u) du}, \quad (4.15)$$

όπου u^* είναι η έξοδος του ελεγκτή και το σύμβολο \int αναφέρεται σε ολοκλήρωση. Η αποασαφοποίηση με την μέθοδο του κέντρου βάρους παριστάνεται γραφικά στο Σχήμα 4-4.



Σχήμα 4-3: Σύνθεση ασαφούς συμπεράσματος



Σχήμα 4-4: Αποασαφοποίηση με την μέθοδο κέντρου βάρους

Η μέθοδος εξαγωγής συμπεράσματος στην περίπτωση που οι είσοδοι στους ασαφείς κανόνες είναι περισσότερες από μια, γίνεται με ενεργοποίηση του κάθε κανόνα με το ελάχιστο των τιμών

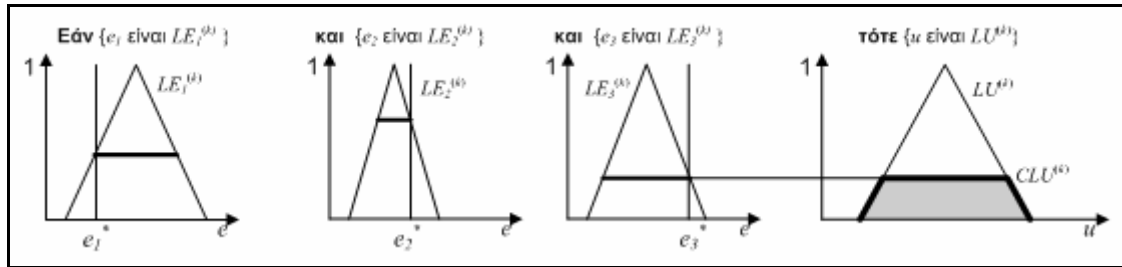
των συναρτήσεων συμμετοχής για τις τιμές των εισόδων, από όπου προκύπτει ένα ασαφές σύνολο:

$$\forall u, \forall k : \mu_{LCU^{(k)}}(u) = \min \left\{ \mu_{LE_1^{(k)}}(e_1^*), \dots, \mu_{LE_i^{(k)}}(e_i^*), \mu_{LU^{(k)}}(u) \right\}, \quad (4.16)$$

όπου i είναι ο αριθμός των εισόδων e_1, \dots, e_i του κανόνα k που έχει μορφή:

$$\text{Εάν } \{e_1 \text{ είναι } LE_1^{(k)}\} \text{ και } \dots \text{ και } \{e_i \text{ είναι } LE_i^{(k)}\} \text{ τότε } \{u \text{ είναι } LU^{(k)}\} \quad (4.17)$$

Η ενεργοποίηση ενός κανόνα με τρεις εισόδους, παριστάνεται γραφικά στο Σχήμα 4-5.



Σχήμα 4-5: Ενεργοποίηση κανόνα με τρεις εισόδους

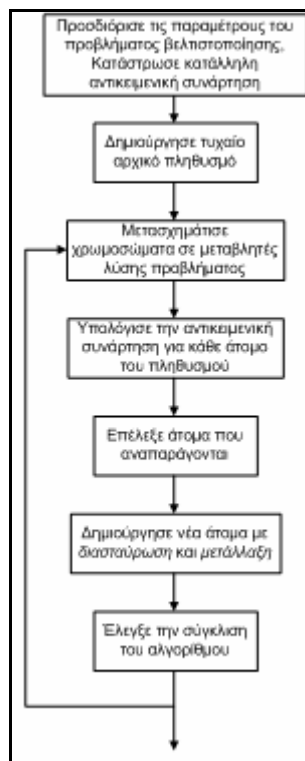
4.3 Γενετικοί αλγόριθμοι

Οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν ευρετική μέθοδο βελτιστοποίησης κατά την οποία προσομοιώνεται στον υπολογιστή η διαδικασία εξέλιξης βέλτιστων βιολογικών πληθυσμών. Προτάθηκαν από τον Holland την δεκαετία του '70 [192], [193] και είναι μέθοδος που συνδυάζει την ικανότητα προσδιορισμού της βέλτιστης λύσης ενός προβλήματος με αναζήτηση σε όλο τον χώρο των πιθανών λύσεων [194]. Στην φύση τα ικανά άτομα χαρακτηρίζονται από τον βαθμό ανταπόκρισής τους στις συνθήκες του περιβάλλοντος. Τα χαρακτηριστικά των έμβιων οργανισμών είναι αποτυπωμένα στον γενετικό τους κώδικα που είναι η ακολουθία των χρωμοσωμάτων τους. Τα ικανότερα άτομα ενός είδους έχουν περισσότερες πιθανότητες να αναπαραχθούν και να περάσουν τα γονίδια τους στις επόμενες γενιές. Η εξέλιξη των βιολογικών πληθυσμών γίνεται αφενός με την *διασταύρωση* και αφετέρου με την *μετάλλαξη* των γονιδίων, σε μια διαδικασία επιλογής των βέλτιστων γονιδίων, η οποία γίνεται με την βελτίωση από γενιά σε γενιά, βασισμένη στην επιβίωση των ικανότερων ατόμων [246].

Για τον προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης σε ένα πρόβλημα με γενετικό αλγόριθμο, οι μεταβλητές από τις οποίες αποτελείται μια πιθανή λύση του προβλήματος ονομάζονται *χρωμοσώματα*. Το σύνολο των χρωμοσωμάτων που αναπαριστούν μια πιθανή λύση ονομάζεται *άτομο*, ενώ το σύνολο των ατόμων που αποτελούν πιθανές λύσεις ονομάζεται *πληθυσμός*.

Τα χρωμοσώματα μπορεί να αναπαρίστανται *δυαδικά* ως μια ακολουθία ψηφίων 0 και 1, που ονομάζονται *γονίδια*, ή με *δεκαδικό* τρόπο ως ακέραιοι αριθμοί ή ως αριθμοί κινητής υποδιαστολής. Η δυαδική αναπαράσταση προτάθηκε από τον Holland και έχει το πλεονέκτημα της ευκολότερης αναπαραγωγής νέων ατόμων με διασταύρωση και μετάλλαξη, μειονεκτεί όμως στην εύκολη κατανόηση των αποτελεσμάτων. Στην παρούσα εργασία ακολουθήθηκε η δεκαδική αναπαράσταση των χρωμοσωμάτων. Η ποιότητα της λύσης που αναπαριστά το κάθε άτομο μετριέται από μια αντικειμενική συνάρτηση, που περιγράφει το πρόβλημα βελτιστοποίησης που εξετάζεται.

Η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης γίνεται με την εξέλιξη ενός αρχικού πληθυσμού, που δημιουργείται στην αρχή του γενετικού αλγόριθμου. Τα άτομα του αρχικού πληθυσμού έχουν τιμές χρωμοσωμάτων, που επιλέγονται τυχαία μέσα σε ένα προκαθορισμένο διάστημα. Μετά τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε άτομο ακολουθεί η δημιουργία νέου πληθυσμού με τους τελεστές αντιμετάθεσης (crossover) και μετάλλαξης (mutation). Η επιλογή των ατόμων που θα σχηματίσουν τον νέο πληθυσμό γίνεται ανάλογα με την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε άτομο, ώστε να εξασφαλίζεται ότι τα ικανότερα άτομα θα επιβιώσουν. Η διαδικασία βαθμολόγησης των ατόμων με την αντικειμενική συνάρτηση και δημιουργίας νέων πληθυσμών επαναλαμβάνεται, έτσι ώστε να δημιουργούνται πληθυσμοί τα άτομα των οποίων δίνουν μεγάλες (ή μικρές) τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-6.



Σχήμα 4-6: Δομικό διάγραμμα τυπικού γενετικού αλγόριθμου

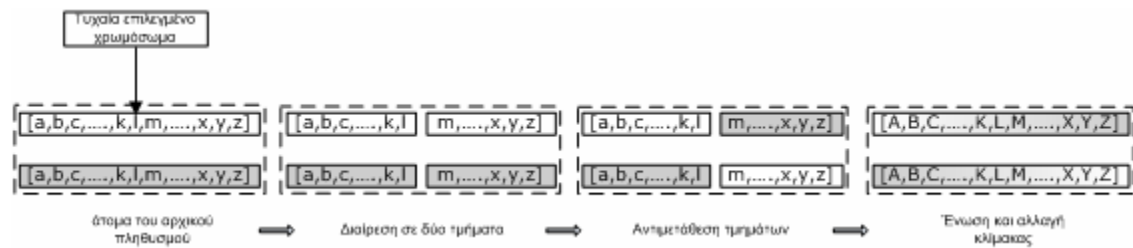
Η επιλογή των ατόμων κάθε γενιάς που αναπαράγονται, στην παρούσα εργασία γίνεται με ομοιόμορφη στοχαστική μέθοδο, σύμφωνα με την οποία σχηματίζεται μια ευθεία στην οποία το κάθε άτομο αντιστοιχεί σε μήκος όσο η πιθανότητα αναπαραγωγής του που είναι ανάλογη με την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Ο αλγόριθμος επιλέγει τα άτομα που θα αναπαραχθούν με επιλογή σημείων με ομοιόμορφη πιθανότητα πάνω στην ευθεία που έχει σχηματιστεί. Επιπλέον το άτομο με την καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης περνάει αυτούσιο στην επόμενη γενιά χωρίς διασταύρωση και μετάλλαξη.

Ο αριθμός των ατόμων, που καθορίζει το μέγεθος του πληθυσμού καθορίζεται αυθαίρετα από τον χρήστη. Γενικά μεγαλύτεροι πληθυσμοί επιταχύνουν την σύγκλιση, λόγω ταχύτερης εξερεύνησης της βέλτιστης λύσης στον n -διάστατο χώρο των πιθανών λύσεων. Ταυτόχρονα όμως, αύξηση του μεγέθους του πληθυσμού συνεπάγεται ανάλογη αύξηση του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου.

Η αντικειμενική συνάρτηση υπολογίζεται για κάθε άτομο του αρχικού πληθυσμού, οπότε όλα τα άτομα αξιολογούνται με την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που τους δίνεται. Στην συνέχεια ελέγχεται εάν εκπληρώνεται κάποιο κριτήριο τερματισμού. Κριτήρια τερματισμού είναι: α. ο έλεγχος εάν η αντικειμενική συνάρτηση κάποιου ατόμου του πληθυσμού είναι καλύτερη από την βέλτιστη που αναμένεται, οπότε η μέθοδος τερματίζεται για εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου και β. Ο έλεγχος για το εάν ο αριθμός της τρέχουσας γενιάς είναι ίσος με τον μέγιστο αριθμό των γενεών που εξετάζονται. Εάν πληρείται κάποιο κριτήριο τερματισμού τότε η βέλτιστη λύση είναι αυτή με την βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

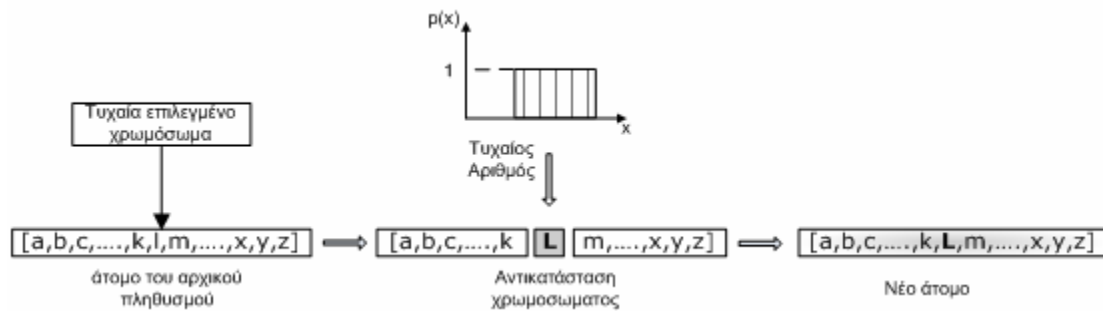
Εάν δεν πληρείται η κάποιο κριτήριο τερματισμού, τότε ξεκινά η διαδικασία δημιουργίας του επόμενου πληθυσμού. Τα άτομα του επόμενου πληθυσμού στην παρούσα εργασία προκύπτουν από τα άτομα του προηγούμενου πληθυσμού με τους τελεστές διασταύρωσης (ή επιχiasμού) και μετάλλαξης.

Τελεστής διασταύρωσης. Με τον τελεστή αυτόν προκύπτουν δύο νέα άτομα από δύο άτομα της υπάρχουσας γενιάς. Τα άτομα χωρίζονται σε κάποιο χρωμόσωμα, που επιλέγεται τυχαία ενώ στην συνέχεια το πρώτο μέρος του ενός ατόμου ενώνεται με το δεύτερο μέρος του άλλου και αντιστρόφως, για να σχηματίσουν δύο νέα άτομα που περιέχουν τα γονίδια των παλαιών ατόμων. Στην αναπαράσταση των χρωμοσωμάτων με πραγματικούς αριθμούς οι τελικές τιμές των γονιδίων του κάθε ατόμου προκύπτουν μετά από διόρθωση με αλλαγή κλίμακας. Έτσι ανταλλάσσονται πληροφορίες μεταξύ δύο πιθανών λύσεων και προκύπτουν νέα άτομα. Ο τελεστής διασταύρωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-7.



Σχήμα 4-7: Τελεστής διασταύρωσης

Τελεστής Μετάλλαξης (mutation operator). Με τον τελεστή αυτόν τροποποιείται ένα τυχαία επιλεγμένο χρωμόσωμα ενός ατόμου. Η τιμή που έχει διαγράφεται και αντικαθίσταται από μια τιμή που προκύπτει τυχαία μέσα σε ένα προδιαγεγραμμένο διάστημα. Έτσι με τον τελεστή αυτόν προκύπτουν άτομα με νέα χαρακτηριστικά που ενδεχομένως θα οδηγήσουν προς την βέλτιστη λύση. Ο τελεστής μετάλλαξης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-8.



Σχήμα 4-8: Τελεστής μετάλλαξης

Ο τελεστής μετάλλαξης εισάγει ποικιλότητα στις λύσεις που εξετάζονται, εξερευνώντας έτσι τον χώρο των πιθανών λύσεων. Επιπλέον τελειοποιεί μια υπάρχουσα λύση. Εφαρμόζεται με πιθανότητα που ορίζεται από τον χρήστη, η οποία συνήθως είναι πολύ μικρότερη από την πιθανότητα εφαρμογής του τελεστή αντιμετάθεσης. Αυτό μιμείται την φυσική διαδικασία όπου οι μεταλλάξεις είναι ένα μικρό ποσοστό των περιπτώσεων σχηματισμού νέων ατόμων.

Στην παρούσα εργασία η εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων έγινε με την εργαλειοθήκη Genetic Algorithm Toolbox της Matlab.

5^ο Κεφάλαιο

Αρχιτεκτονικές πλοήγησης αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων ¹

5.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται συνοπτικά οι αρχιτεκτονικές ελέγχου που έχουν αναπτυχθεί για τον έλεγχο των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων καθώς και η προτεινόμενη υβριδική αρχιτεκτονική ελέγχου. Ενώ υποβρύχια οχήματα έχουν αναπτυχθεί σε διαφορετικούς τύπους και για διάφορες αποστολές, υπάρχουν συγκεκριμένοι περιορισμοί, τους οποίους καλείται να αντιμετωπίσει ένα σύστημα ελέγχου ενός αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος. Οι κυριότεροι περιορισμοί είναι οι ακόλουθοι:

1. Η απουσία χειριστή, που καθιστά αναγκαία την ύπαρξη αξιόπιστου συστήματος ελέγχου.
2. Η περιορισμένη ενεργειακή αυτονομία ενός υποβρυχίου οχήματος, λόγω της συγκεκριμένης χωρητικότητας των συσσωρευτών και της ανυπαρξίας καλωδίου, που να το συνδέει με μητρικό σκάφος.
3. Η αξιολόγηση των ενδείξεων πολλαπλών αισθητήρων, οι οποίες περιέχουν σφάλματα. Ταυτόχρονα η αντιμετώπιση βλαβών των αισθητήρων [195].

¹ Τμήματα αυτού του κεφαλαίου είναι δημοσιευμένα στα:

1. Kanakakis, V., Valavanis, K. P., Tsourveloudis, N. C., "Fuzzy-Logic Based Navigation of Underwater Vehicles", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 40, pp. 45-88, 2004.
2. Tsourveloudis N. C., Doitsidis L., Valavanis K. P., "Autonomous Navigation of Unmanned Vehicles: A Fuzzy Logic Perspective", *Cutting Edge Robotics*, pp:291-310, ISBN:3-86611-038-3.

4. Οι άγνωστες ή ανακριβείς εξισώσεις κίνησης του οχήματος, που περιορίζει την αξιοπιστία πολλών συστημάτων ελέγχου σε ρεαλιστικές συνθήκες.
5. Οι διαφορετικοί τύποι των υποβρύχιων αποστολών, που μπορεί να ποικίλουν από πλοήγηση σε ανοικτή θάλασσα έως πλοήγηση κοντά στον πυθμένα και κοντά σε άλλα εμπόδια. Έτσι ένα σύστημα ελέγχου θα πρέπει να λειτουργεί ικανοποιητικά σε διαφορετικές αποστολές με διαφορετικές απαιτήσεις.
6. Η λειτουργία των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων σε άγνωστο τρισδιάστατο υποβρύχιο περιβάλλον, στο οποίο μπορεί να υπάρχουν εμπόδια πάνω στην πορεία του οχήματος. Επιπλέον στο θαλάσσιο υποβρύχιο περιβάλλον μπορεί να υπάρχουν επιδράσεις από ρεύματα και κύματα που είναι στοχαστικές.
7. Το μεγάλο κόστος έως την οριστική απώλεια ενός ακριβού οχήματος που μπορεί να έχει η κακή λειτουργία του συστήματος ελέγχου [196].
8. Η δυσκολία επικοινωνίας του οχήματος με άλλα οχήματα και με μητρικά σκάφη, λόγω της μη διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο νερό.
9. Η δυσκολία προσδιορισμού της θέσης του οχήματος λόγω της κίνησης σε ομοιογενές μέσο.
10. Η μη ολονομικότητα των οχημάτων, με την έννοια ότι οι βαθμοί ελευθερίας του οχήματος είναι περισσότεροι από τις δυνατότητες μεταβολής θέσης με τους κινητήρες του οχήματος. Έτσι η μεταβολή θέσης σε κάποιο βαθμό ελευθερίας θα πρέπει να γίνεται με συνδυασμένη ακολουθία κινήσεων σε περισσότερους βαθμούς ελευθερίας [197].

Οι παραπάνω παράγοντες καθιστούν την ύπαρξη αξιόπιστου συστήματος ελέγχου πρωταρχικής σημασίας για την ανάπτυξη των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων. Κύριοι στόχοι για ένα σύστημα διαχείρισης-ελέγχου ενός αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος στο ανώτερο επίπεδο είναι η επικοινωνία, η διαχείριση της ενέργειας και η επεξεργασία των πληροφοριών από τους αισθητήρες. Σε κατώτερο επίπεδο βρίσκονται η αποφυγή εμποδίων και ο έλεγχος κίνησης του οχήματος [247].

5.2 Αρχιτεκτονικές ελέγχου αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων

Για τον έλεγχο των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων έχει προταθεί διαφορετικές αρχιτεκτονικές ελέγχου [75], [198]. Οι περισσότερες από αυτές μπορούν να ομαδοποιηθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

1. Ιεραρχική αρχιτεκτονική ελέγχου. Η ιεραρχική αρχιτεκτονική χρησιμοποιεί μια από πάνω προς τα κάτω προσέγγιση, που διαιρεί το σύστημα σε επίπεδα. Τα υψηλότερα στρώματα

είναι υπεύθυνα για την επίτευξη των στόχων της αποστολής, ενώ τα χαμηλότερα επιλύουν ειδικότερα προβλήματα [149]. Το κάθε επίπεδο ελέγχου παίρνει εντολές από το αμέσως παραπάνω και πληροφορίες από το αμέσως παρακάτω, ενώ η ροή των πληροφοριών μειώνεται από τα παρακάτω προς τα κορυφαία επίπεδα. Επίπεδα που δεν είναι γειτονικά δεν μπορούν να επικοινωνήσουν άμεσα μεταξύ τους, πράγμα που έχει ως αποτέλεσμα μεγάλους υπολογιστικούς χρόνους, μη αξιόπιστες πληροφορίες από τους αισθητήρες και απρόβλεπτες αντιδράσεις σε γεγονότα που δεν έχουν προβλεφθεί στον σχεδιασμό [63]. Παράδειγμα ιεραρχικής αρχιτεκτονικής είναι η αρχιτεκτονική τριών επιπέδων του αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος NPS-Phoenix [47], [146].

2. Ετερογενής αρχιτεκτονική ελέγχου. Η ετερογενής αρχιτεκτονική επιλύει τα προβλήματα της πλοήγησης σε μια παράλληλη δομή, όπου το κάθε τμήμα του συστήματος μπορεί να επικοινωνεί κατευθείαν με το άλλο χωρίς ενδιάμεσο στάδιο. Η δομή αυτή προσπαθεί να επιλύσει τα προβλήματα επικοινωνίας της ιεραρχικής αρχιτεκτονικής. Τα τμήματα ελέγχου θεωρούνται ισότιμα και έχουν δυνατότητα άμεσης επικοινωνίας, χωρίς επίβλεψη. Το πλεονέκτημα της ετερογενούς αρχιτεκτονικής είναι ότι μπορεί να τροποποιείται εύκολα ώστε να προστίθενται ενδείξεις από επιπλέον αισθητήρες. Τα μειονεκτήματα είναι ότι ο έλεγχος είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί και ότι έχει παρατηρηθεί χαοτική συμπεριφορά [199] όταν το όχημα αντιμετωπίζει απρόβλεπτες καταστάσεις.
3. Ταξινομημένη αρχιτεκτονική ελέγχου. Αποτελείται από επίπεδα ελέγχου που είναι ταξινομημένα ως προς την σημασία τους και δουλεύουν παράλληλα χωρίς κάποια εποπτεία από κάποιο υψηλότερο επίπεδο [200], έστω και αν οι λειτουργίες τους, που ενεργοποιούνται από ενδείξεις αισθητήρων, επικαλύπτονται. Τα δεδομένα πλοήγησης διανέμονται σε όλα τα επίπεδα και το κάθε επίπεδο επεξεργάζεται τις πληροφορίες που το ενδιαφέρουν (αισθητήρες και εντολές πλοήγησης). Τα ανώτερα επίπεδα υπερνικούν τα κατώτερα, καθώς οι έξοδοι τους υπερνικούν τις εξόδους των κατώτερων επιπέδων. Το κάθε επίπεδο αντιστοιχεί σε μια συμπεριφορά, ενώ με την οργάνωση και την κατάταξη όλων των συμπεριφορών σχηματίζεται ένα σύστημα ελέγχου του υποβρυχίου οχήματος [201]. Το μειονέκτημα της ταξινομημένης αρχιτεκτονικής ελέγχου είναι η δυσκολία συγχρονισμού των διαφόρων επιπέδων, που προκύπτει από την έλλειψη ελέγχου σε ανώτερη βαθμίδα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δυσκολία προσδιορισμού λαθών στην σχεδίαση και ευστάθειας του συστήματος. Μειονέκτημα αποτελεί επίσης η πολυπλοκότητα της σχεδίασης, που αυξάνεται όσο αυξάνονται οι επιθυμητές συμπεριφορές του οχήματος. Πλεονέκτημα της ταξινομημένης αρχιτεκτονικής ελέγχου είναι η επεκτασιμότητα και η σταθερότητα του συστήματος ελέγχου που προκύπτει. Επίσης πλεονέκτημα αποτελεί ο μικρός υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για να υλοποιηθεί η ταξινομημένη αρχιτεκτονική ελέγχου [75].

4. Υβριδική αρχιτεκτονική ελέγχου. Η υβριδική αρχιτεκτονική είναι συνδυασμός ιεραρχικής, ετερογενούς και στρωματοποιημένης αρχιτεκτονικής [202], όπου χρησιμοποιούνται διαφορετικές δομές για την μοντελοποίηση και τον έλεγχο του οχήματος [203]. Το σύστημα ενσωματώνει έλεγχο υψηλού και χαμηλού επιπέδου σε μια σαφή δομή [63]. Το χαμηλό επίπεδο ελέγχου έχει ομοιότητες με την ταξινομημένη αρχιτεκτονική, ενώ το υψηλό επίπεδο (που απουσιάζει από την ταξινομημένη αρχιτεκτονική) έχει ιεραρχική δομή και σκοπό την σχεδίαση την εκπλήρωση των στόχων της αποστολής. Το χαμηλό επίπεδο χρησιμοποιεί είτε υβριδική είτε στρωματοποιημένη αρχιτεκτονική για τον έλεγχο των υποσυστημάτων του οχήματος. Παράδειγμα υβριδικής αρχιτεκτονικής είναι το σύστημα ελέγχου του αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος Ocean Voyager II [204]. Τα υβριδικά συστήματα ελέγχου και οι βασικές αρχές τους παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο.

Σύγκριση των αρχιτεκτονικών ελέγχου, με εφαρμογή τους σε προσομοίωση πλοήγησης πραγματικού αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος, δίνεται στο [31]. Οι αρχιτεκτονικές ελέγχου καλούνται να επιλύσουν τα προβλήματα της αυτόνομης πλοήγησης που κατά κύριο λόγο είναι ο κατάλληλος σχεδιασμός πορείας, η σύνθεση των ενδείξεων των αισθητήρων και ο έλεγχος της κίνησης του οχήματος μέσω του συγχρονισμού αντικρουόμενων ενεργειών για αποφυγή σύγκρουσης και επίτευξης στόχων της αποστολής.

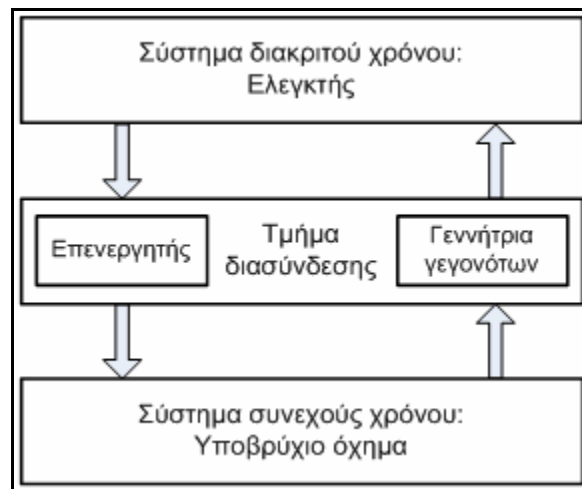
Η επίλυση των προβλημάτων αυτών στην παρούσα εργασία γίνεται με χρήση της ασαφούς λογικής, η οποία έχει χαρακτηριστικά που βοηθούν στην επίλυση μη-γραμμικών προβλημάτων σε φυσικά περιβάλλοντα. Μη γραμμικά προβλήματα ελέγχου μπορούν με την ασαφή λογική να επιλυθούν χωρίς απλοποιήσεις γραμμικοποίησης και με μεταφορά τεχνικών που χρησιμοποιούν ανθρωπίνοι ελεγκτές.

5.3 Υβριδικά συστήματα ελέγχου

Τα υβριδικά συστήματα ελέγχου είναι συστήματα που ενσωματώνουν διαδικασίες συνεχούς ή διακριτού χρόνου και διαδικασίες διακριτών γεγονότων που συμβαίνουν σε όχι τακτές χρονικές στιγμές. Οι διαδικασίες συνεχούς χρόνου περιγράφονται από διαφορικές εξισώσεις, ενώ οι διαδικασίες διακριτών γεγονότων εκτελούνται από υπολογιστές με χρήση αλγορίθμων που ενσωματώνουν μηχανές εξαγωγής συμπεράσματος. Τα υβριδικά συστήματα ελέγχου συνδυάζουν αποτελεσματικά αλγορίθμους ελέγχου συνεχούς χρόνου και μηχανές εξαγωγής συμπεράσματος. Έχουν χρησιμοποιηθεί σε προβλήματα ελέγχου πολύπλοκων δυναμικών συστημάτων όπως για την μοντελοποίηση αυτοματισμών σε αυτοκινητόδρομους [205], [206], σε συστήματα ρύθμισης εναέριας κυκλοφορίας [207], σε συστήματα παραγωγής [208] και στην ρομποτική [209]. Επίσης έχουν χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση και τον έλεγχο αυτόνομων οχημάτων εδάφους [210], εναέριων [211], [212] και υποβρυχίων οχημάτων [213] [214]. Ένα αυτόνομο υποβρύχιο όχημα

είναι ένα υβριδικό σύστημα γιατί περιλαμβάνει διαδικασίες συνεχούς και διακριτού χρόνου [215]. Για την επίτευξη μεγάλου βαθμού αυτονομίας είναι απαραίτητη η δυνατότητα μάθησης από προηγούμενες καταστάσεις, η δυνατότητα ανίχνευσης βλαβών και η ταχύτητα αντίδρασης σε όχι σαφώς καθορισμένες καταστάσεις. Αυτό σημαίνει ότι για την επίτευξη μεγάλου βαθμού αυτονομίας χωρίς την παρουσία χειριστή απαιτείται η ενσωμάτωση στο σύστημα ελέγχου τεχνικών λήψης απόφασης και ευφυούς ελέγχου [17], [216]. Στα υποβρύχια οχήματα η αυτονομία εξασφαλίζεται από τον έλεγχο του συστήματος συνεχούς χρόνου από έναν ελεγκτή διακριτού χρόνου [217].

Ένα υβριδικό σύστημα ελέγχου ενός αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος μπορεί στην γενική του μορφή να αναπαρασταθεί όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-1 [217]. Αποτελείται από τρία τμήματα, τον ψηφιακό *ελεγκτή*, το *ελεγχόμενο σύστημα* συνεχούς χρόνου και το *τμήμα διασύνδεσης* που τα ενώνει. Ο ελεγκτής είναι σύστημα διακριτού χρόνου που λαμβάνει, επεξεργάζεται σήματα και παράγει εντολές κίνησης. Το φυσικό σύστημα συνεχούς χρόνου που ελέγχεται, είναι το όχημα που λαμβάνει και εκτελεί τις εντολές κίνησης και επιστέφει μεταβλητές που είναι συνεχείς. Το τμήμα διασύνδεσης ενώνει τα τμήματα συνεχούς και διακριτού χρόνου και αποτελείται από την γεννήτρια γεγονότων που μεταφράζει τα συνεχή σήματα που παράγει το όχημα σε σύμβολα που αναπαριστούν γεγονότα και τον επενεργητή, που μεταφράζει τις εντολές του ελεγκτή σε τμηματικά σταθερές εντολές κίνησης.



Σχήμα 5-1: Υβριδικό σύστημα ελέγχου

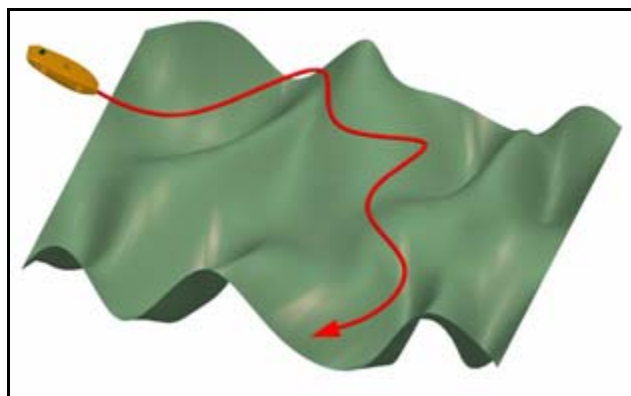
Με χρήση της παραπάνω διάταξης τα υβριδικά συστήματα μπορούν να ενσωματώσουν συμπεριφορές, οι οποίες προγραμματίζονται στον ελεγκτή. Το λογισμικό μπορεί να ακολουθεί κανόνες εξαγωγής συμπεράσματος για την υλοποίηση συμπεριφορών, που στην περίπτωση των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων είναι η συμπεριφορά στόχου και η συμπεριφορά αντίδρασης [218].

Η μεθοδολογία πλοήγησης αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων, που αναπτύσσεται στην παρούσα διατριβή, ανήκει στις υβριδικές αρχιτεκτονικές ελέγχου, διότι χρησιμοποιεί υπολογιστικές μεθόδους εξαγωγής συμπεράσματος για τον έλεγχο ενός συστήματος συνεχούς χρόνου. Ταυτόχρονα η υβριδική σχεδίαση του προτεινόμενου συστήματος ελέγχου περιλαμβάνει τις συμπεριφορές στόχου και αντίδρασης και εξασφαλίζει την κατάλληλη επιλογή της κυρίαρχης συμπεριφοράς. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική ελέγχου περιλαμβάνει τρία επίπεδα, σε ιεραρχική οργάνωση τα οποία είναι υπεύθυνα για τον σχεδιασμό της πορείας και την ακριβή πλοήγηση με ταυτόχρονη αποφυγή εμποδίων και παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

5.4 Προτεινόμενη αρχιτεκτονική ελέγχου

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε μια αρχιτεκτονική ελέγχου αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων η οποία είναι εφαρμόσιμη σε προβλήματα πλοήγησης κοντά στον πυθμένα. Τέτοιες αποστολές μπορεί να είναι η συλλογή δειγμάτων και η παρακολούθηση της ωκεάνιας ζωής, ο προσδιορισμός της θέσης ναυαγίων, η χαρτογράφηση του βυθού, κ.λ.π.

Στην πλοήγηση κοντά στον πυθμένα σε μεγάλο βάθος (Σχήμα 5-2), δεν υπάρχουν εξωτερικές πληροφορίες προσδιορισμού θέσης και το όχημα πρέπει να βασίζεται σε πληροφορίες από τους αισθητήρες του για την ακριβή του πλοήγηση. Συνήθως για τον πυθμένα υπάρχει πληροφορία η οποία προσδιορίζει τη γενική μορφολογία του βυθού (βουνά, κοιλάδες), αλλά όχι τα ακριβή υψόμετρα, ενώ τοπικά μπορεί τα βαθυμετρικά δεδομένα να απέχουν πολύ από την πραγματικότητα [181]. Επιπλέον πολλές φορές η μορφή του πυθμένα δεν είναι στατική αλλά μεταβάλλεται με τον χρόνο. Έτσι η πλοήγηση θεωρείται ότι γίνεται σε περιβάλλον όχι τελείως άγνωστο, αλλά ούτε πλήρως δεδομένο και γνωστό.



Σχήμα 5-2: Πλοήγηση αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος κοντά στον πυθμένα

Με βάση τα παραπάνω η πλοήγηση αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων κοντά στον πυθμένα πρέπει αφενός να στηρίζεται σε ένα ακριβές σύστημα σχεδιασμού πορείας και αφετέρου σε ένα αξιόπιστο και ακριβές σύστημα πλοήγησης, που ακολουθεί την βέλτιστη πορεία, ενώ έχει την

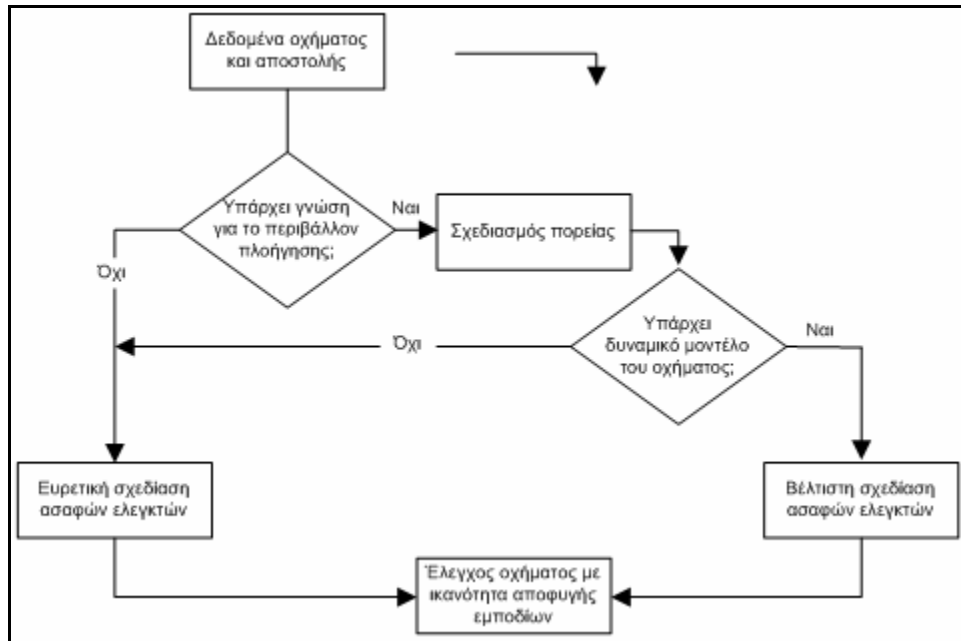
δυνατότητα να εντοπίζει και να αποφεύγει εμπόδια που βρίσκονται στην πορεία αυτή. Ο σχεδιαστής πορείας του οχήματος πρέπει να λαμβάνει υπόψιν περιορισμούς, που εφαρμόζονται σε κάθε αποστολή, όπως μέγιστο και ελάχιστο βάθος και απαγορευμένες περιοχές πλοήγησης. Για τον σχεδιασμό της βέλτιστης τροχιάς στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιούνται παραμετρικές καμπύλες B-splines. Οι καμπύλες αυτές έχουν το πλεονέκτημα ότι αναπαριστούν την τροχιά ομαλά χωρίς απότομες αλλαγές καμπυλότητας. Επιπλέον η τροχιά που προκύπτει προσομοιάζει καλύτερα μια τροχιά που μπορεί να ακολουθήσει το όχημα, γιατί δεν αποτελείται από ευθύγραμμα τμήματα [38]. Οι καμπύλες B-splines για δεδομένη τάξη, μπορούν να οριστούν από το πολύγωνο ελέγχου που τις περιβάλλει [219], ενώ οι κορυφές του πολυγώνου βελτιστοποιούνται με χρήση γενετικών αλγορίθμων.

Για τον έλεγχο της κίνησης του υποβρυχίου οχήματος απαιτείται, με δεδομένη την κινηματική κατάσταση και την θέση του οχήματος, ο προσδιορισμός κατάλληλου διανύσματος ελέγχου :

$$\mathbf{b}_{\text{ελέγχου}} = [\text{εντολές ελέγχου πτερυγίων, εντολές ελέγχου ελίκων}]^T,$$

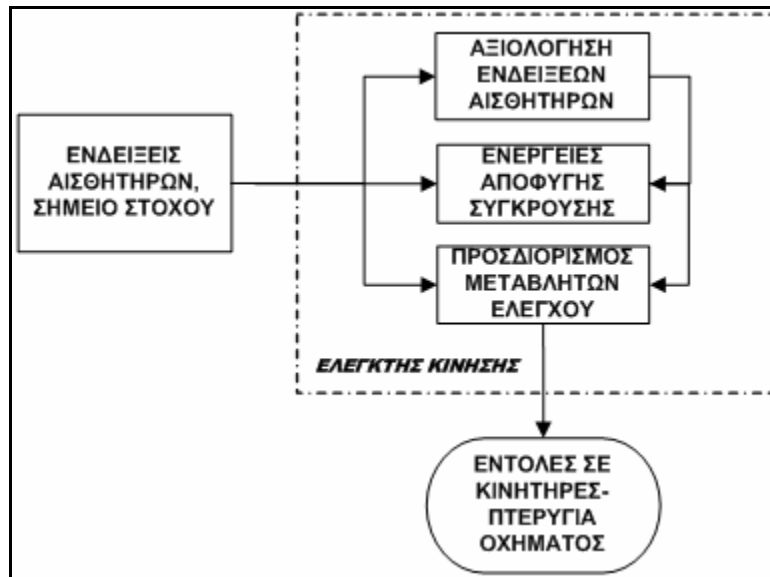
ώστε το όχημα να κινηθεί προς την επιθυμητή κατεύθυνση με κατάλληλη ταχύτητα. Η ρύθμιση της ταχύτητας επιτρέπει στο όχημα να ακολουθήσει την επιθυμητή πορεία, δεδομένου ότι δημιουργείται μεγάλη απόκλιση σε περιπτώσεις αλλαγής κατεύθυνσης, εάν η ταχύτητα του οχήματος σε κάποιο σημείο της πορείας είναι μεγαλύτερη από αυτήν που επιτρέπουν οι ελκτικές ικανότητες του.

Στην παρούσα εργασία ο έλεγχος της κίνησης των υποβρυχίων οχημάτων γίνεται από ένα σύστημα ελέγχου, που περιλαμβάνει παράλληλους ασαφείς ελεγκτές. Το πλεονέκτημα των ασαφών ελεγκτών είναι ότι μπορούν να σχεδιαστούν ευρετικά, ενσωματώνοντας την εμπειρία ενός χειριστή, ενώ δεν απαιτείται γραμμικοποίηση των εξισώσεων κίνησης του οχήματος, οπότε ο ίδιος ελεγκτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περισσότερα από ένα οχήματα. Επιπλέον, οι ασαφείς ελεγκτές, εφόσον υπάρχει υδροδυναμικό μοντέλο του οχήματος, μπορούν να βελτιστοποιηθούν, ώστε να υπάρχει μικρό σφάλμα θέσης για κάθε αποστολή που σχεδιάζεται. Η βελτιστοποίηση των ασαφών ελεγκτών στην παρούσα εργασία γίνεται με γενετικό αλγόριθμο και προϋποθέτει εκτός από την γνώση της πορείας, την ύπαρξη μαθηματικού μοντέλου κίνησης του οχήματος. Με βάση τα παραπάνω, το λογικό διάγραμμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας πλοήγησης αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων φαίνεται στο Σχήμα 5-3. Σύμφωνα με το Σχήμα 5-3, εάν υπάρχουν βαθυμετρικά δεδομένα της περιοχής πλοήγησης και υδροδυναμικό μοντέλο του οχήματος, τότε μπορεί να σχεδιαστεί η βέλτιστη πορεία και να βρεθούν οι ελεγκτές κίνησης που εξασφαλίζουν μικρό σφάλμα θέσης. Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν δεδομένα της περιοχής πλοήγησης και υδροδυναμικό μοντέλο του οχήματος, για την πλοήγηση χρησιμοποιούνται ευρετικά σχεδιασμένοι ασαφείς ελεγκτές.



Σχήμα 5-3: Λογικό διάγραμμα προτεινόμενης μεθοδολογίας πλοήγησης αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος

Ο έλεγχος των κινήσεων του οχήματος γίνεται από έναν ελεγκτή κίνησης, που αποτελείται από τρία τμήματα, τα οποία αναλαμβάνουν την αναγνώριση των ενδείξεων των αισθητήρων, τη λήψη απόφασης για αποφυγή σύγκρουσης και τέλος τον προσδιορισμό των μεταβλητών ελέγχου μέσω ασαφών μηχανών συμπεράσματος. Το δομικό διάγραμμα του ελεγκτή κίνησης φαίνεται στο Σχήμα 5-4.

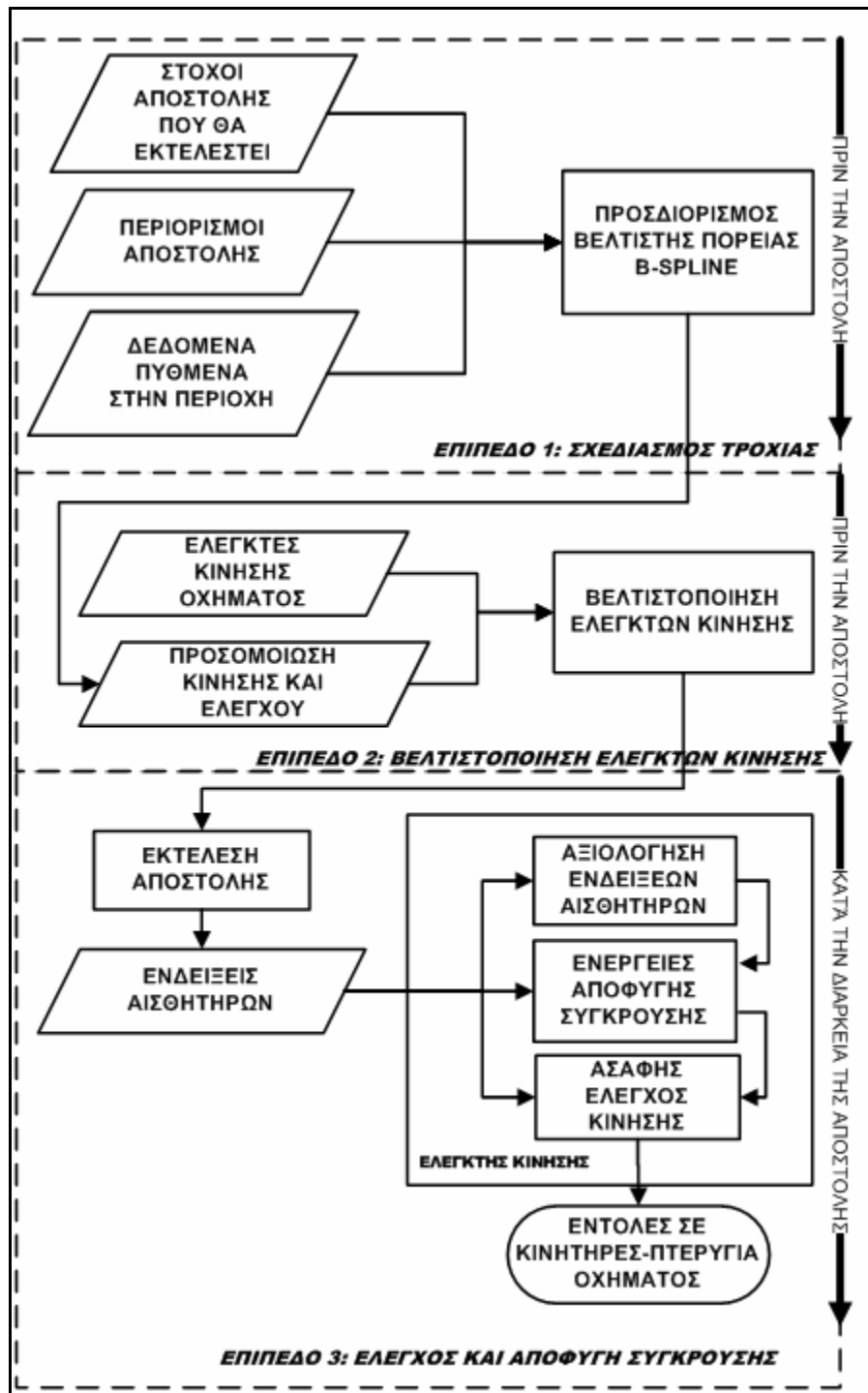


Σχήμα 5-4: Διάγραμμα πολυτμηματικού ασαφή ελεγκτή κίνησης.

Η βελτιστοποίηση του ελεγκτή κίνησης γίνεται πριν από την έναρξη της αποστολής με δεδομένη την επιθυμητή πορεία, χρησιμοποιώντας το δυναμικό μοντέλο κίνησης του οχήματος. Για την γενετική βελτιστοποίηση το σύνολο των τιμών των μεταβλητών, που καθορίζουν έναν ελεγκτή κίνησης, ορίζεται ως ένα άτομο και δημιουργείται ένας τυχαίος αρχικός πληθυσμός, τα άτομα του οποίου αναπαριστούν διαφορετικές δυνατότητες ελέγχου. Ακολουθώντας προσομοιώνεται η κίνηση του οχήματος για κάθε άτομο του πληθυσμού και κατά την διάρκεια της προσομοίωσης ελέγχεται το σφάλμα θέσης του οχήματος από την επιθυμητή πορεία. Στο τέλος κάθε προσομοίωσης εκτιμάται, με την τιμή που παίρνει μια αντικειμενική συνάρτηση, ο βαθμός με τον οποίο ο πολυμηματικός ελεγκτής κίνησης που εκφράζει το κάθε άτομο ικανοποιεί τις απαιτήσεις του ελέγχου και δίνει μικρό σφάλμα θέσης. Στην συνέχεια τα άτομα με τους τελεστές της αντιμετάθεσης και της μετάλλαξης παράγουν απογόνους με πιθανότητα ανάλογη με την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όσες γενιές χρειαστεί, μέχρι να προκύψει ο βέλτιστος ελεγκτής κίνησης, με τον οποίον θα εφοδιαστεί το όχημα για να εκπληρώσει την αποστολή του. Με την προτεινόμενη αρχιτεκτονική ελέγχου το πρόβλημα της σχεδίασης της βέλτιστης πορείας του οχήματος, επιλύεται σε χρόνο πριν την έναρξη της αποστολής ενώ ο προσδιορισμός της βέλτιστης πορείας βασίζεται σε δεδομένα του θαλάσσιου περιβάλλοντος, που είναι γνωστά εκ των προτέρων.

Ανακεφαλαιώνοντας, ο έλεγχος ενός αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος και ειδικά για αποστολές κοντά στον πυθμένα, όπου αναμένεται το όχημα να βρίσκεται κοντά σε εμπόδια, προτείνεται να γίνεται σε τρία επίπεδα τα οποία διατάσσονται όπως φαίνεται στο Σχήμα 5-5, με ιεραρχικό τρόπο:

- Επίπεδο 1: *Επίπεδο σχεδιασμού τροχιάς*. Στο επίπεδο αυτό σχεδιάζεται η βέλτιστη πορεία που μπορεί να ακολουθήσει το όχημα ώστε αφενός να εκπληρώσει τις απαιτήσεις της αποστολής και αφετέρου να ακολουθεί την διαμόρφωση του πυθμένα χωρίς η τροχιά του να βρίσκεται πάνω σε εμπόδια.
- Επίπεδο 2: *Επίπεδο βελτιστοποίησης ασαφών ελεγκτών*. Στο επίπεδο αυτό βελτιστοποιούνται οι ελεγκτές κίνησης του οχήματος. Η βελτιστοποίηση βασίζεται στο δυναμικό μοντέλο κίνησης του οχήματος για την πορεία που έχει υπολογιστεί στο επίπεδο 1. Έτσι εξασφαλίζεται ότι το όχημα κατά την εκτέλεση της αποστολής δεν θα παρεκκλίνει από την βέλτιστη πορεία.
- Επίπεδο 3: *Επίπεδο ελέγχου αποστολής*. Στο επίπεδο αυτό, που πραγματοποιείται κατά την διάρκεια εκτέλεσης της αποστολής, οι εντολές κίνησης δίνονται από τον βελτιστοποιημένο ελεγκτή κίνησης. Ταυτόχρονα αξιολογούνται οι ενδείξεις των αισθητήρων, ώστε να λαμβάνονται αποφάσεις για αποφυγή σύγκρουσης σε περίπτωση που υπάρχει κάποιο εμπόδιο στην πορεία του οχήματος.



Σχήμα 5-5: Διάγραμμα προτεινόμενης υβριδικής αρχιτεκτονικής ελέγχου

Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται τα τμήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας πλοήγησης αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων. Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται ο ελεγκτής κίνησης μέσω ασαφών ελεγκτών, που ενσωματώνει ικανότητα αναγνώρισης και αποφυγής εμποδίων. Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζεται το τμήμα σχεδιασμού πορείας, το οποίο αξιοποιεί την γνώση του

περιβάλλοντος πλοήγησης για την εύρεση της βέλτιστης πορείας, η οποία προσδιορίζεται ως καμπύλη B-Spline. Στο κεφάλαιο 8 παρουσιάζεται το τμήμα της γενετικής βελτιστοποίησης των ελεγκτών κίνησης του οχήματος, που προϋποθέτει την ύπαρξη υδροδυναμικού μοντέλου του οχήματος. Ο σκοπός της βελτιστοποίησης είναι ο προσδιορισμός των κατάλληλων συναρτήσεων συμμετοχής των ασαφών ελεγκτών κίνησης, έτσι ώστε το όχημα να έχει το ελάχιστο σφάλμα κατά την πραγματοποίηση της πορείας.

6ο Κεφάλαιο

Ασαφής έλεγχος κίνησης και αποφυγή εμποδίων ¹

6.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ο προτεινόμενος ελεγκτής κίνησης για την πλοήγηση ενός αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος. Ο ελεγκτής είναι σχεδιασμένος ώστε το όχημα να εκτελεί αυτόνομη πλοήγηση με δυνατότητα αποφυγής εμποδίων με έλεγχο των κινητήρων και πτερυγίων ελέγχου του οχήματος. Αποτελείται από τρία τμήματα ελέγχου και αναλυτικότερα το *τμήμα ανάγνωσης αισθητήρων*, το *τμήμα αποφυγής σύγκρουσης* και το *τμήμα* κατώτερου *ελέγχου κίνησης*. Για την ανάπτυξη του ελεγκτή δεν γίνεται καμία παραδοχή για το είδος ή το σχήμα του υποβρυχίου οχήματος. Επίσης δεν γίνεται καμία παραδοχή για το υποβρύχιο περιβάλλον και για τον τύπο, το μέγεθος και την κινητική κατάσταση των εμποδίων που το όχημα μπορεί να συναντήσει. Τα παραπάνω θεωρούνται άγνωστα και έτσι ο ελεγκτής μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα υποβρύχια οχήματα.

¹ Τμήματα αυτού του κεφαλαίου είναι δημοσιευμένα στα:

1. Kanakakis V., Tsourveloudis N. C., Valavanis K. P., “ Design and testing of a fuzzy logic controller for underwater vehicles, in *Proc. of the IARP International Workshop on Underwater Robotics for Sea Exploration and Environmental Monitoring*, Rio de Janeiro, Brazil, 2001.
2. Kanakakis V., Valavanis K. P., Tsourveloudis N. C., “Fuzzy Logic Based Navigation of Underwater Vehicles”, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 40, pp. 45–88, 2004.

Με βάση τα παραπάνω πλεονέκτημα της σχεδίασης του προτεινόμενου ελεγκτή κίνησης αποτελεί η απλότητα και η επεκτασιμότητα.

Η σχεδίαση αποτελεί επέκταση και γενίκευση προσφάτων ερευνητικών εργασιών που έχουν δημοσιευτεί στον τομέα αυτόνομης αποφυγής σύγκρουσης ρομποτικών οχημάτων εδάφους και αέρος [78], [220], [221], [222] και στον τομέα ελέγχου κίνησης υποβρυχίων οχημάτων [189]. Στην παρούσα εργασία οι τεχνικές που προτείνονται στις παραπάνω εργασίες τροποποιούνται και εφαρμόζονται στα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα. Ο έλεγχος και η πλοήγηση του οχήματος είναι βασισμένα στις ενδείξεις των αισθητήρων για αποφυγή σύγκρουσης, ενώ το υποβρύχιο περιβάλλον θεωρείται άγνωστο.

Όταν δεν έχει ανιχνευτεί κάποιο εμπόδιο το όχημα έχει *συμπεριφορά στόχου*, ενώ όταν ανιχνευτεί εμπόδιο το όχημα αποκτά *συμπεριφορά αντίδρασης*. Κατά την σχεδίαση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής δεν έγινε παραδοχή για τον τύπο του υποβρυχίου οχήματος και για την φύση, το μέγεθος και την ταχύτητα των εμποδίων που υπάρχουν στον χώρο κίνησης του υποβρυχίου οχήματος, τα οποία θεωρούνται άγνωστα. Οι ελεγκτές κίνησης που προκύπτουν είναι υπεύθυνοι για την ρύθμιση των μεταβλητών ελέγχου του οχήματος, έτσι ώστε αυτό να βρίσκεται στην επιθυμητή θέση με την επιθυμητή ταχύτητα. Επίσης, αν και τα περισσότερα οχήματα έχουν θετική αρχική ευστάθεια και είναι μελετημένα ώστε το κέντρο βάρους τους να είναι χαμηλότερα από το κέντρο άντωσης, ελέγχεται η κίνηση διατοιχισμού, ώστε η γωνία διατοιχισμού να μην παίρνει μεγάλες τιμές κατά την πλοήγηση του οχήματος. Μεγάλες τιμές της γωνίας διατοιχισμού έχουν αποτέλεσμα την δυσκολία χρήσης του οχήματος καθώς επηρεάζουν τα δεδομένα, που αυτό ανακτά με τους αισθητήρες του. Επίσης δεν επιτρέπουν την χρήση ρομποτικών βραχιόνων και δυσκολεύουν την ασφαλή ανάκτηση του οχήματος [12].

Το υπόλοιπο κεφάλαιο είναι οργανωμένο ως εξής: στην παράγραφο 6-2 περιγράφεται αναλυτικά η σχεδίαση του ελέγχου κίνησης και αποφυγής εμποδίων υποβρυχίων οχημάτων η οποία περιλαμβάνει τρία υποεπίπεδα ελέγχου: το *επίπεδο ανάγνωσης αισθητήρων*, το *επίπεδο αποφυγής σύγκρουσης* και το *επίπεδο ελέγχου κίνησης*. Στην παράγραφο 6-3 περιγράφεται το *επίπεδο ανάγνωσης ενδείξεων αισθητήρων*. Στην παράγραφο 6-4 περιγράφεται το *επίπεδο αποφυγής σύγκρουσης*, όπου λαμβάνεται η απόφαση για παράκαμψη και αποφυγή των εντοπιζόμενων εμποδίων. Στην παράγραφο 6-5 περιγράφεται το *επίπεδο ελέγχου κίνησης* και τα *υποσυστήματα ελέγχου κίνησης*.

6.2 Πολυεπίπεδος έλεγχος κίνησης και αποφυγή εμποδίων

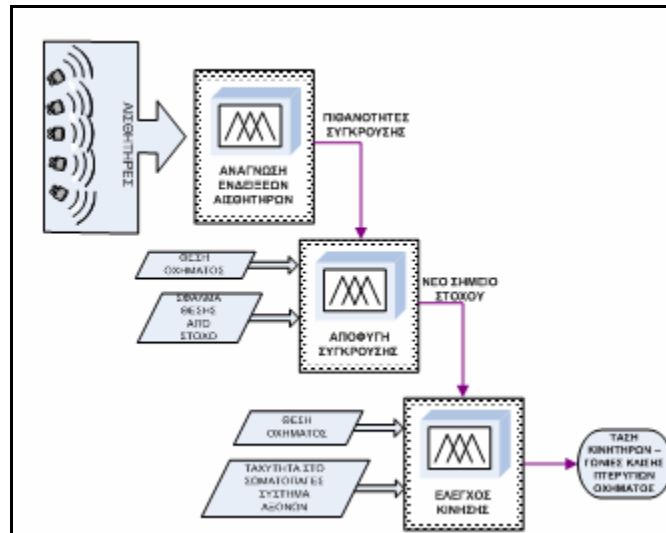
Ο λόγος που χρησιμοποιείται η ασαφής λογική είναι ότι τέτοιοι ελεγκτές έχουν αποδειχθεί αξιόπιστοι και ευέλικτοι σε περιπτώσεις ελέγχου όπου υπάρχει αβεβαιότητα [121], [191], [223],

[224]. Σε τέτοιες περιπτώσεις οι κινήσεις και οι ενδείξεις των αισθητήρων του οχήματος εξαρτώνται από τυχαίους παράγοντες του περιβάλλοντος και δεν είναι δυνατόν να μοντελοποιηθούν και να προβλεφθούν. Κατά συνέπεια δεν μπορεί να γίνει καμία ρεαλιστική παραδοχή όσον αφορά τη σχεδίαση της πορείας και την αποφυγή σύγκρουσης και το όχημα πρέπει να είναι κανό να εκτελεί τα παραπάνω κατά την διάρκεια της πορείας του. Έτσι η αρχιτεκτονική ελέγχου του οχήματος πρέπει να έχει δυνατότητες αντίδρασης, ώστε να δημιουργεί εντολές ελέγχου βασισμένες στις ενδείξεις των αισθητήρων [225]. Τέτοιοι ελεγκτές συμπεριφέρονται ως *ελεγκτές στόχου* όταν δεν αναγνωρίζεται κάποιο εμπόδιο και ως *ελεγκτές αντίδρασης* όταν είναι αναγκαία η συμπεριφορά αποφυγής εμποδίων.

Το *τμήμα ανάγνωσης αισθητήρων* είναι υπεύθυνο για την ανίχνευση των εμποδίων στην πορεία του οχήματος. Δέχεται δεδομένα από τους αισθητήρες υπερήχων του οχήματος, που στοχεύουν περιμετρικά και, μέσω της λεκτικής μεταβλητής “*σύγκρουση*”, δίνουν πληροφορίες σχετικά με την πιθανότητα σύγκρουσης στις τέσσερις κύριες κατευθύνσεις κίνησης: *μπροστά, πίσω, αριστερά, δεξιά*. Στην παρούσα διατριβή ο όρος *πιθανότητα σύγκρουσης* αποτελεί λεκτική μεταβλητή, που περιγράφει τον βαθμό κατά τον οποίο μια σύγκρουση είναι αναμενόμενη ανάλογα με την κατεύθυνση και την απόσταση ενός εμποδίου και δεν αποτελεί πιθανότητα με τη μαθηματική έννοια. Οι πιθανότητες σύγκρουσης στις τέσσερις κύριες κατευθύνσεις κίνησης, αποτελούν είσοδο στο *τμήμα αποφυγής σύγκρουσης*, όπου λαμβάνονται οι αποφάσεις για ενέργειες αποφυγής σύγκρουσης των εμποδίων που ανιχνεύονται από το επίπεδο ανάγνωσης αισθητήρων. Στο *τμήμα αποφυγής σύγκρουσης* επίσης δίνονται η θέση του οχήματος, η ταχύτητά του και το σφάλμα κατεύθυνσης από το *σημείο στόχου*. Με αυτά τα δεδομένα υπολογίζεται ένα νέο σημείο στόχου, το οποίο βρίσκεται μακριά από το εμπόδιο και αν είναι δυνατόν προς την επιθυμητή κατεύθυνση κίνησης του οχήματος. Οι μεταβλητές κίνησης του οχήματος ελέγχονται από το επίπεδο ελέγχου κίνησης. Έτσι προσδιορίζονται οι κατάλληλες τιμές της τάσης στους κινητήρες και των γωνιών στροφής στα πτερύγια του οχήματος, ώστε το όχημα να φτάσει το σημείο στόχου με την καθορισμένη ταχύτητα. Το *τμήμα ελέγχου κίνησης* αποτελείται από πέντε υποσυστήματα ελέγχου και συγκεκριμένα το *υποσύστημα ελέγχου ταχύτητας*, το *υποσύστημα ελέγχου διεύθυνσης*, το *υποσύστημα ελέγχου βάθους*, το *υποσύστημα ελέγχου διατοιχισμού* και το *υποσύστημα ελέγχου ρεύματος*.

Το *τμήμα ανάγνωσης αισθητήρων* είναι σχεδιασμένο ώστε να μπορεί λαμβάνει ενδείξεις από μεταβλητό αριθμό αισθητήρων, που μπορεί να βρίσκονται τοποθετημένοι σε διαφορετικές διατάξεις. Έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλους τους τύπους των υποβρυχίων οχημάτων. Παρόμοια και το *επίπεδο αποφυγής σύγκρουσης* είναι ανεξάρτητο από τον τύπο του οχήματος. Το *τμήμα ελέγχου κίνησης* περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τον τύπο του οχήματος όσον αφορά τους κινητήρες και τις επιφάνειες ελέγχου που περιλαμβάνονται στο όχημα, αν και για την ανάπτυξη του *τμήματος ελέγχου κίνησης* δεν απαιτείται αναλυτικό μοντέλο κίνησης του οχήματος. Έτσι οι έξοδοι των υποσυστημάτων του τμήματος ελέγχου κίνησης αθροίζονται για να δώσουν

εντολές κίνησης, που δημιουργούν δυνάμεις και ροπές ελέγχου, με τρόπο που λαμβάνει υπόψη τον αριθμό και τη θέση των επιφανειών ελέγχου και των κινητήρων, δεδομένα που διαφέρουν για κάθε υποβρύχιο όχημα.



Σχήμα 6-1: Το επίπεδο ελέγχου κίνησης και αποφυγής εμποδίων.

Όπως έχει αναφερθεί, πλεονέκτημα της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής αποτελεί η απλότητα, δεδομένου ότι υπάρχουν λίγες εισόδους σε κάθε τμήμα, σε σχέση με ένα γενικό ελεγκτή ο οποίος θα είχε πολύ περισσότερες εισόδους. Η αποδόμηση του ελεγκτή σε τρία τμήματα δικαιολογείται από τον περιορισμό του αριθμού των εμπλεκόμενων ασαφών κανόνων. Η επεκτασιμότητα της αρχιτεκτονικής ελέγχου προκύπτει από το γεγονός ότι το τμήμα ανάγνωσης αισθητήρων μπορεί να αποδομηθεί σε μια σειρά μικρότερων επιπέδων ανάγνωσης αισθητήρων ανάλογα με την ομαδοποίηση των αισθητήρων του οχήματος.

Ανακεφαλαιώνοντας, το επίπεδο ελέγχου και αποφυγής εμποδίων είναι οργανωμένο σε τρία τμήματα, που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-1 [138]. Το τμήμα ανάγνωσης ενδείξεων αισθητήρων υπολογίζει τις πιθανότητες σύγκρουσης στις κύριες κατευθύνσεις κίνησης, οι οποίες μαζί με θέση και το σφάλμα θέσης από τον στόχο δίνονται στο επίπεδο αποφυγής σύγκρουσης. Το τμήμα αποφυγής σύγκρουσης με την σειρά του υπολογίζει ένα νέο σημείο στόχου και το εισάγει στο επόμενο τμήμα ελέγχου κίνησης. Αυτό υπολογίζει ανάλογα με τις μεταβλητές κίνησης του οχήματος τα κατάλληλα μεγέθη εντολών στους κινητήρες του οχήματος, ώστε αυτό να κινηθεί προς το σημείο στόχου με τη σωστή ταχύτητα.

6.3 Επίπεδο ανάγνωσης ενδείξεων αισθητήρων

Το επίπεδο ανάγνωσης των ενδείξεων των αισθητήρων είναι υπεύθυνο για την αναγνώριση των εμποδίων που υπάρχουν στην περιοχή κίνησης του οχήματος. Αν και για τον εντοπισμό των

εμποδίων μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι τύποι αισθητήρων, εδώ θεωρείται ότι ο εντοπισμός γίνεται με χρήση ακουστικών αισθητήρων υπερήχων, οι οποίοι βρίσκονται τοποθετημένοι στο όχημα και στοχεύουν στην περίμετρό του. Η υπόθεση της χρήσης αισθητήρων υπερήχων δικαιολογείται από το γεγονός ότι στο υποβρύχιο περιβάλλον δεν είναι εγγυημένη η καλή ορατότητα και η χρήση τέτοιων αισθητήρων είναι η πλέον διαδεδομένη (Παράρτημα Α).

Χωρίς βλάβη της γενικότητας θεωρείται ότι το όχημα είναι εφοδιασμένο με 14 αισθητήρες υπερήχων τοποθετημένους περιμετρικά, οι οποίοι καλύπτουν 360° στο οριζόντιο επίπεδο και έναν τομέα με γωνία 15° στο κατακόρυφο επίπεδο [98]. Ο αριθμός των 14 αισθητήρων δεν είναι δεσμευτικός και αναφέρεται γιατί χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις του αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος NPS-Phoenix, που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 9 [30]. Η διάταξη των αισθητήρων υπερήχων στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο παρουσιάζονται στα Σχήματα 6-2 και 6-3 αντίστοιχα, ενώ οι γωνίες που παρακολουθεί κάθε αισθητήρας και το εύρος του στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο καταγράφονται στον Πίνακα 6-1.

Αισθητήρας	Οριζόντιο επίπεδο			Κατακόρυφο επίπεδο		
	Γωνία (deg)			Γωνία (deg)		
	Από	Έως	Εύρος	Από	Έως	Εύρος
1	-7.5	7.5	15	-5	10	15
2	-22.5	-7.5	15	-5	10	15
3	-45	-22.5	22.5	-5	10	15
4	-75	-45	30	-5	10	15
5	-105	-75	30	-5	10	15
6	-135	-105	30	-5	10	15
7	-165	-135	30	-5	10	15
8	-180	-165	30	-5	10	15
	165	180				
9	135	165	30	-5	10	15
10	105	135	30	-5	10	15
11	75	105	30	-5	10	15
12	45	75	30	-5	10	15
13	22.5	45	22.5	-5	10	15
14	7.5	22.5	15	-5	10	15

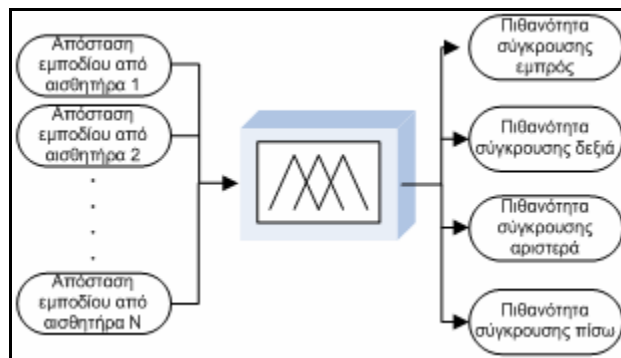
Πίνακας 6-1: Γωνίες εμβέλειας αισθητήρων υπερήχων στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο

Οι αισθητήρες θεωρείται ότι βρίσκονται στην αρχή του σωματοπαγούς συστήματος συντεταγμένων, το οποίο στις περισσότερες περιπτώσεις λαμβάνεται κοντά στο κέντρο βάρους του οχήματος. Αυτό γίνεται για να υπάρχει συμβατότητα της αρχιτεκτονικής πλοήγησης σε όλα τα είδη υποβρυχίων οχημάτων για συνήθεις περιπτώσεις πλοήγησης, όπου δεν απαιτείται εξαιρετική ακρίβεια (όπως χειρισμοί προσέγγισης εξέδρας πρόσδεσης). Δεδομένου ότι η ακτίνα δράσης των αισθητήρων υπερήχων είναι μεγαλύτερης τάξης μεγέθους από την μεγαλύτερη διάσταση του οχήματος, με την παραδοχή αυτή δεν δημιουργούνται σημαντικά λάθη.

Επίσης για λόγους απλότητας λαμβάνεται η ακτίνα δράσης όλων των αισθητήρων να είναι η ίδια και ίση με το ελάχιστο της ακτίνας δράσης όλων των τύπων αισθητήρων που φέρει το όχημα.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στον Πίνακα 6-1, οι αισθητήρες είναι πυκνότεροι στην κατεύθυνση εμπρόσθιας κίνησης, όπου αναμένεται να εντοπιστούν τα εμπόδια. Αισθητήρες επίσης υπάρχουν και στις κατευθύνσεις: *αριστερά, δεξιά, πίσω*, για να γίνει κατανοητή στο όχημα η περιοχή που γίνονται οι ελιγμοί αποφυγής των εμποδίων. Τέλος, στο κατακόρυφο επίπεδο, οι αισθητήρες είναι κεκλιμένοι προς τα κάτω. Αυτό γίνεται διότι για τα υποβρύχια οχήματα εξ ορισμού τα εμπόδια βρίσκονται στον πυθμένα και ελεύθερη περιοχή από εμπόδια θεωρείται η περιοχή προς την επιφάνεια. Έτσι η περιοχή που ανιχνεύουν οι αισθητήρες ορίζεται στο διάστημα $[-5^\circ +10^\circ]$. Αυτή η παραδοχή λαμβάνεται υπόψιν και στην κατάστρωση των κανόνων. Η γωνία ανίχνευσης των αισθητήρων προέκυψε μετά από εξέταση των προδιαγραφών των αισθητήρων που υπάρχουν στο εμπόριο και είναι κοινότεροι σε χρήση [98].

Οι αισθητήρες επιστρέφουν την απόσταση του πλησιέστερου εμποδίου που εντοπίζουν. Οι ενδείξεις των αισθητήρων εισάγονται σε μια ασαφή μηχανή συμπεράσματος όπου ασαφοποιούνται στην λεκτική μεταβλητή “*απόσταση*” με λεκτικές τιμές: “πολύ κοντά”, “κοντά” και “μακριά”. Η μηχανή συμπεράσματος επεξεργάζεται τις αποστάσεις των εμποδίων περιμετρικά του οχήματος και με χρήση ασαφών κανόνων υπολογίζει τις πιθανότητες σύγκρουσης στις τέσσερις κύριες κατευθύνσεις κίνησης : “*εμπρός σύγκρουση*”, “*πίσω σύγκρουση*”, “*αριστερά σύγκρουση*”, “*δεξιά σύγκρουση*” με λεκτικές μεταβλητές : “*απίθανη*”, “*πιθανή*” και “*πολύ πιθανή*”. Με τον όρο *πιθανότητα σύγκρουσης* στην παρούσα διατριβή εννοείται ο βαθμός στον οποίο επίκειται μια σύγκρουση, εξαρτάται από την ύπαρξη εμποδίων στον χώρο κίνησης του οχήματος και δεν αποτελεί πιθανότητα με μαθηματική τη έννοια. Η δομή της ασαφούς μηχανής εξαγωγής συμπεράσματος για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων σύγκρουσης στις κύριες κατευθύνσεις φαίνεται στο Σχήμα 6-2, όπου N ο αριθμός των αισθητήρων.



Σχήμα 6-2: Δομή ασαφούς μηχανής συμπεράσματος ανάγνωσης ενδείξεων αισθητήρων

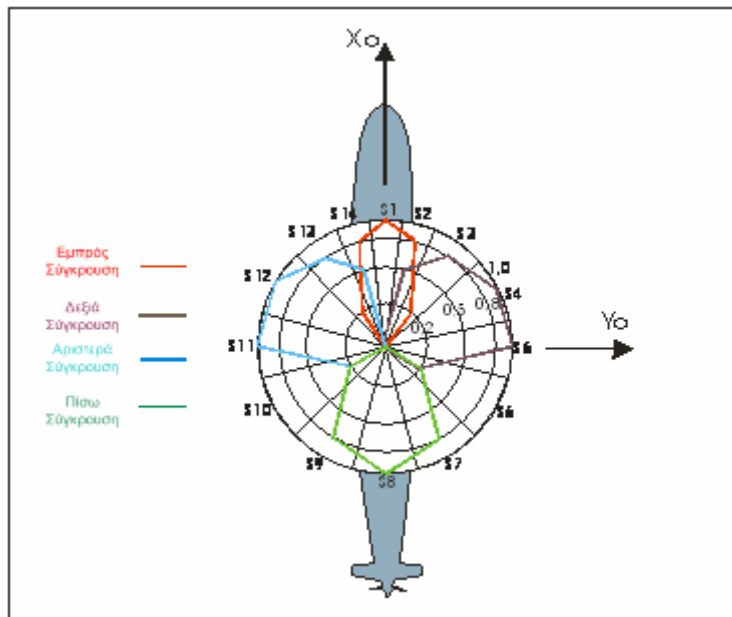
Σε κάθε περιοχή σύγκρουσης, λόγω της πυκνότητας των αισθητήρων, αντιστοιχούν περισσότεροι από έναν αισθητήρες και ο κάθε αισθητήρας έχει ένα σχετικό βάρος στον υπολογισμό της πιθανότητας σύγκρουσης σε κάθε κατεύθυνση. Η σχετική σημασία των αισθητήρων δίνεται στον

Πίνακα 6-2 και απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 6-3. Η σχετική σημασία των αισθητήρων λαμβάνεται υπόψη ως βάρος του κανόνα που ενεργοποιεί ο κάθε αισθητήρας στην μηχανή συμπεράσματος.

		Εμπρός σύγκρουση	Πίσω σύγκρουση	αριστερά σύγκρουση	δεξιά σύγκρουση
Αισθητήρας	1	1	0	0	0
	2	0.8	0	0	0.5
	3	0.2	0	0	0.8
	4	0	0	0	1
	5	0	0	0	1
	6	0	0.2	0	0.2
	7	0	0.8	0	0
	8	0	1	0	0
	9	0	0.8	0	0
	10	0	0.2	0.2	0
	11	0	0	1	0
	12	0	0	1	0
	13	0.2	0	0.8	0
	14	0.8	0	0.5	0

Πίνακας 6-2: Σχετική σημασία αισθητήρων [30]

Οι ενδείξεις των αισθητήρων συνεισφέρουν στον υπολογισμό σε περισσότερες από μια πιθανότητες σύγκρουσης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6-2 και στο Σχήμα 6-3. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται σύνθεση των ενδείξεων των αισθητήρων, για να υπάρξει πληρέστερη αντίληψη του περιβάλλοντος πλοήγησης μέσω των λεκτικών μεταβλητών που εκφράζουν οι πιθανότητες σύγκρουσης. Η τεχνική αυτή προτείνεται στην βιβλιογραφία για τα οχήματα εδάφους [78], [220], [222].

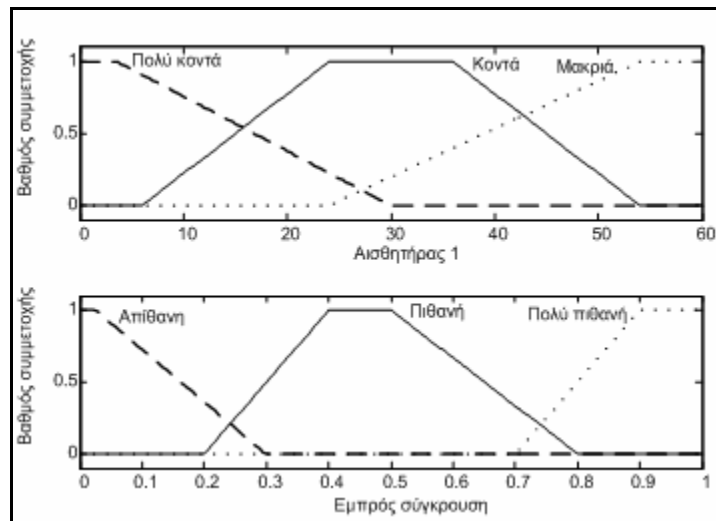


Σχήμα 6-3: Περιμετρική διάταξη και σχετική σημασία αισθητήρων[30]

Οι πιθανότητες σύγκρουσης υπολογίζονται με 57 ασαφείς κανόνες της μορφής:

ΕΑΝ: (απόσταση αισθητήρα 1 ΕΙΝΑΙ κοντά), ΤΟΤΕ (πιθανότητα εμπρός σύγκρουσης ΕΙΝΑΙ πολύ πιθανή).

Για λόγους απλότητας και εξοικονόμησης υπολογιστικού χρόνου, χρησιμοποιήθηκε τραπεζοειδής μορφή συναρτήσεων συμμετοχής. Οι τραπεζοειδείς συναρτήσεις συμμετοχής επιλέχθηκαν καθώς μετά από δοκιμές, διαπιστώθηκε ότι δεν προέκυψε αισθητή διαφορά στα αποτελέσματα έναντι άλλων τύπων συναρτήσεων συμμετοχής. Στο Σχήμα 6-4 φαίνονται οι μορφές των συναρτήσεων συμμετοχής για την είσοδο (αισθητήρας 1) και για την έξοδο (σύγκρουση εμπρός) της μηχανής συμπεράσματος που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του οχήματος NPS-Phoenix [30].

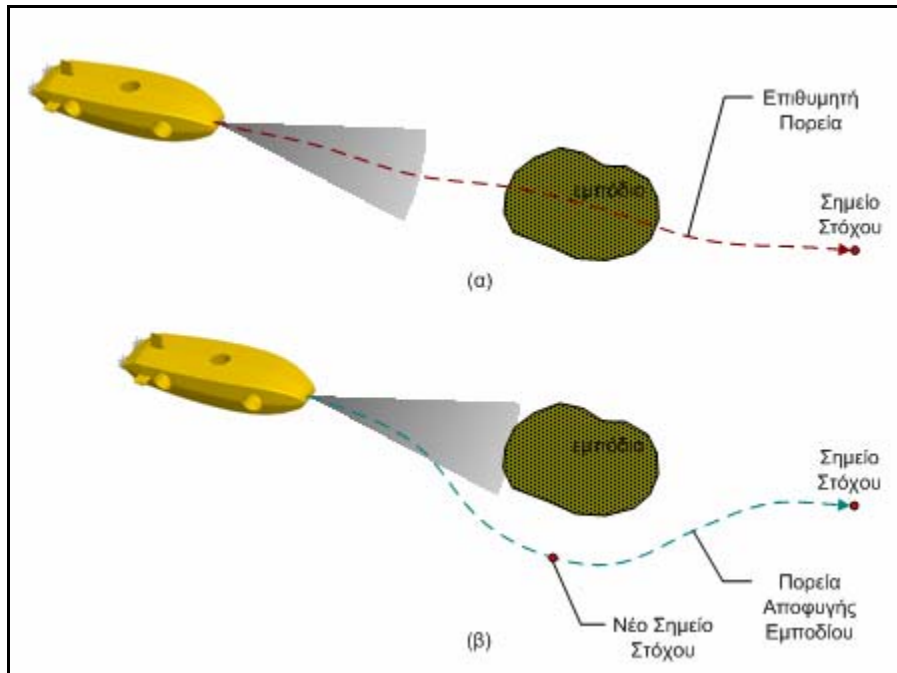


Σχήμα 6-4: Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδου “Αισθητήρας 1” και εξόδου “Σύγκρουση εμπρός” ασαφούς μηχανής συμπεράσματος ανάγνωσης ενδείξεων αισθητήρων

6.4 Επίπεδο αποφυγής σύγκρουσης

Το επίπεδο αποφυγής σύγκρουσης είναι υπεύθυνο για την αλλαγή πορείας όταν ανιχνεύεται κάποιο εμπόδιο στην πορεία κίνησης του οχήματος. Περιλαμβάνει έναν ασαφή ελεγκτή που υπολογίζει την μεταβολή των γωνιών κατεύθυνσης και προνευστασμού (πρόνευσης), ώστε το όχημα να αποφύγει τα εμπόδια. Η συμπεριφορά αποφυγής εμποδίων ξεκινά όταν κάποιο εμπόδιο ανιχνεύεται στην ακτίνα ενέργειας των αισθητήρων και συνεχίζεται όταν δεν υπάρχει ορατό εμπόδιο κατά την διάρκεια του ελιγμού αποφυγής. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει συμπεριφορά αποφυγής εμποδίου ο ελεγκτής αποφυγής συγκρούσεων δίνει μηδενική μεταβολή των γωνιών κατεύθυνσης και προνευστασμού, οπότε δεν μεταβάλλεται το σημείο στόχου και το όχημα έχει *συμπεριφορά στόχου*. Όταν ανιχνεύεται κάποιο εμπόδιο, ο ελεγκτής αποφυγής συγκρούσεων υπολογίζει μια μεταβολή γωνίας κατεύθυνσης στο οριζόντιο επίπεδο και μια μεταβολή γωνίας στο κατακόρυφο επίπεδο. Έτσι προσδιορίζεται μία νέα κατεύθυνση, που πρέπει

να ακολουθηθεί ώστε να αποφευχθεί το εμπόδιο και κατά αυτόν τον τρόπο το όχημα αποκτά συμπεριφορά αντίδρασης. Η μετάβαση από την συμπεριφορά στόχου στην συμπεριφορά αντίδρασης φαίνεται στο Σχήμα 6-5.



Σχήμα 6-5: Μετάβαση από συμπεριφορά στόχου σε συμπεριφορά αντίδρασης. (α): το εμπόδιο δεν έχει ανιχνευτεί-συμπεριφορά στόχου (β): το εμπόδιο έχει ανιχνευτεί- συμπεριφορά αντίδρασης

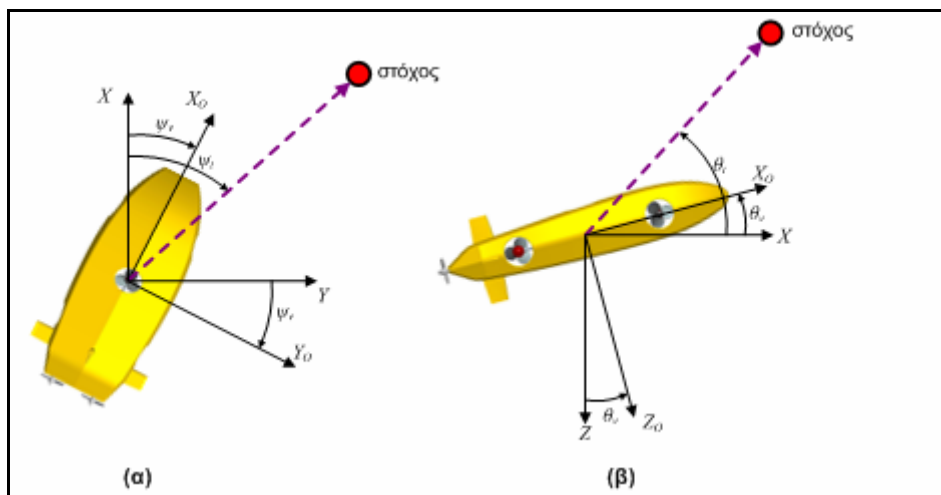
Οι εισοδοί στον ελεγκτή αποφυγής συγκρούσεων είναι οι πιθανότητες σύγκρουσης στις τέσσερις κύριες κατευθύνσεις κίνησης, που υπολογίζονται από το επίπεδο ανάγνωσης των ενδείξεων αισθητήρων και τα σφάλματα κατεύθυνσης του οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο ως προς το επιθυμητό σημείο στόχου.

Το σφάλμα κατεύθυνσης στο οριζόντιο επίπεδο υπολογίζεται ως η διαφορά της γωνίας κατεύθυνσης του στόχου ψ_t (ως προς σύστημα αξόνων παράλληλο με το αδρανειακό που έχει αρχή την αρχή του σωματοπαγούς συστήματος αξόνων και της γωνίας στροφής ψ_v) του οχήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-6(α).

$$\Delta\psi = \psi_t - \psi_v. \quad (6.1)$$

Παρόμοια το σφάλμα κατεύθυνσης στο κατακόρυφο επίπεδο υπολογίζεται ως διαφορά της γωνίας προνευστασμού του στόχου θ_t (ως προς σύστημα αξόνων παράλληλο με το αδρανειακό που έχει αρχή την αρχή του σωματοπαγούς συστήματος αξόνων) και της γωνίας προνευστασμού θ_v του οχήματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-6(β).

$$\Delta\theta = \theta_t - \theta_v. \quad (6.2)$$



Σχήμα 6-6: Υπολογισμός σφάλματος κατεύθυνσης: (α) στο οριζόντιο επίπεδο και (β) στο κατακόρυφο επίπεδο

Οι μεταβλητές εισόδου του ασαφή ελεγκτή αποφυγής συγκρούσεων είναι:

1. Οι “εμπρός σύγκρουση”, “πίσω σύγκρουση”, “αριστερά σύγκρουση” και “δεξιά σύγκρουση” με λεκτικές μεταβλητές : [“απίθανη”, “πολύ πιθανή”].
2. Το “οριζόντιο σφάλμα κατεύθυνσης” με λεκτικές μεταβλητές : [“μεγάλο αριστερά”, “αριστερά”, “μικρό αριστερά”, “μηδέν”, “μικρό δεξιά”, “δεξιά”, “μεγάλο δεξιά”].
3. Το “κατακόρυφο σφάλμα κατεύθυνσης” με λεκτικές μεταβλητές : [“μεγάλο κάτω”, “κάτω”, “μικρό κάτω”, “μηδέν”, “μικρό πάνω”, “πάνω”, “μεγάλο πάνω”].

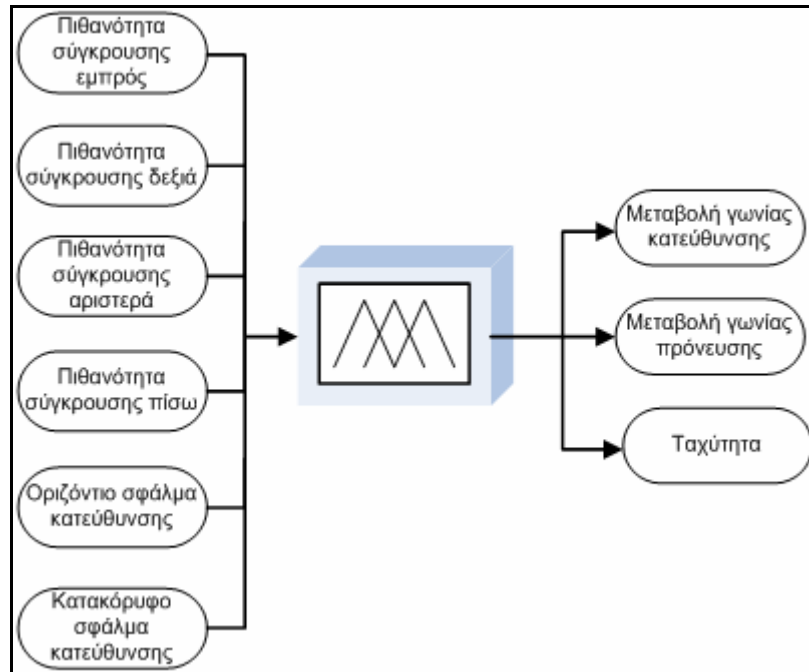
Οι μεταβλητές εξόδου είναι:

1. Η “μεταβολή γωνίας κατεύθυνσης” με λεκτικές μεταβλητές: [“αριστερά γρήγορα”, “αριστερά”, “αριστερά αργά”, “μηδέν”, “δεξιά αργά”, “δεξιά”, “δεξιά γρήγορα”].
2. Η “μεταβολή γωνίας πρόνευσης” με λεκτικές μεταβλητές: [“κάτω γρήγορα”, “κάτω”, “κάτω αργά”, “μηδέν”, “πάνω αργά”, “πάνω”, “πάνω γρήγορα”].
3. Η “ταχύτητα” με λεκτικές μεταβλητές:[“αργά”, “κανονικά”, “γρήγορα”].

Η βάση κανόνων της ασαφούς μηχανής συμπεράσματος αποτελείται από 56 κανόνες της μορφής:

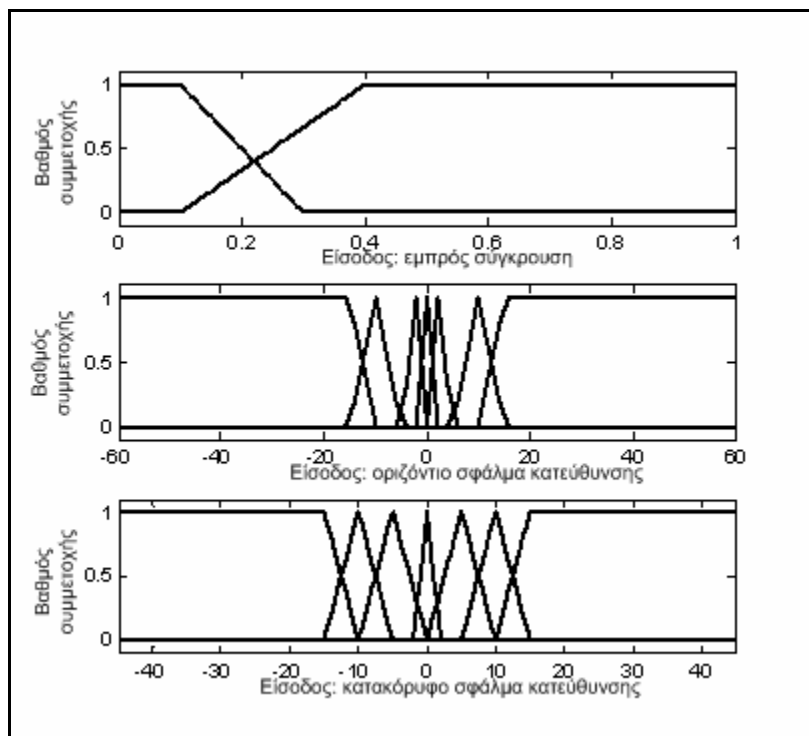
ΕΑΝ (εμπρός σύγκρουση ΕΙΝΑΙ απίθανη) ΚΑΙ (πίσω σύγκρουση ΕΙΝΑΙ απίθανη) ΚΑΙ (αριστερά σύγκρουση ΕΙΝΑΙ απίθανη) ΚΑΙ (δεξιά σύγκρουση ΕΙΝΑΙ απίθανη) ΚΑΙ (οριζόντιο σφάλμα κατεύθυνσης ΕΙΝΑΙ μηδέν) ΚΑΙ (κατακόρυφο σφάλμα κατεύθυνσης ΕΙΝΑΙ μηδέν) ΤΟΤΕ (μεταβολή γωνίας κατεύθυνσης ΕΙΝΑΙ μηδέν) ΚΑΙ (μεταβολή γωνίας πρόνευσης ΕΙΝΑΙ μηδέν).

Η διάταξη της ασαφούς μηχανής συμπεράσματος φαίνεται στο Σχήμα 6-7.

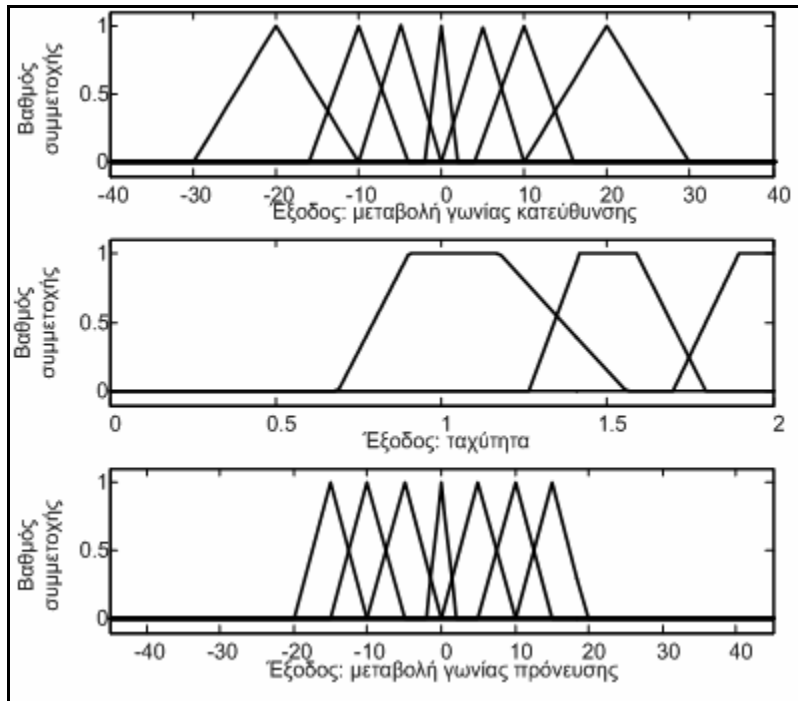


Σχήμα 6-7: Διάταξη ασαφούς μηχανής απόφασης αποφυγής εμποδίων

Οι συναρτήσεις συμμετοχής των εισόδων των εξόδων της ασαφούς μηχανής συμπεράσματος που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος NPS-Phoenix, φαίνονται στα Σχήματα 6-8 και 6-9 αντίστοιχα.



Σχήμα 6-8: Συναρτήσεις συμμετοχής εισόδων ασαφούς ελεγκτή αποφυγής συγκρούσεων



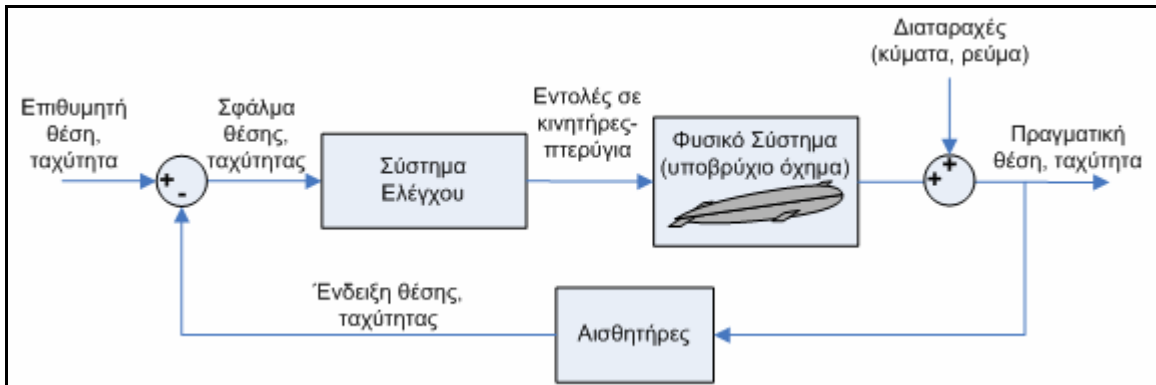
Σχήμα 6-9 : Συναρτήσεις συμμετοχής εξόδων ασαφούς μηχανής απόφασης αποφυγής εμποδίων

6.5 Επίπεδο ελέγχου κίνησης

Το επίπεδο ελέγχου κίνησης είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο των κινητήρων, των στροφών των ελίκων και των γωνιών των πτερυγίων του οχήματος, ώστε αυτό να κατευθυνθεί και να φτάσει ένα σημείο στόχου με την επιθυμητή ταχύτητα. Ο έλεγχος κίνησης γίνεται με ρύθμιση της τάσης των κινητήρων και της γωνίας των επιφανειών ελέγχου του οχήματος. Το προτεινόμενο επίπεδο ελέγχου κίνησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλους τους τύπους των υποβρυχίων οχημάτων, αφού γίνουν τροποποιήσεις κλίμακας στις εξόδους της τάσης των κινητήρων και των γωνιών των πτερυγίων. Όπως αναφέρεται στην βιβλιογραφία [71], αν και οι εξισώσεις κίνησης είναι πεπλεγμένες, οι εξισώσεις κατάστασης της πηδαλιουχίας, του βάθους και της ταχύτητας αλληλεπιδρούν με μικρούς όρους και μπορούν να εξεταστούν ανεξάρτητα, γεγονός που οδηγεί σε απλούστερη δομή του ελέγχου.

Στο σχήμα 6-10 φαίνεται το διάγραμμα του συστήματος ελέγχου ενός υποβρυχίου οχήματος. Το διάνυσμα κατάστασης αποτελείται από τις μεταβλητές θέσης στο αδρανειακό σύστημα αξόνων και τις συνιστώσες της ταχύτητας στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων και η τιμή του περιγράφει την θέση και την κινηματική κατάσταση του οχήματος. Ο έλεγχος του διανύσματος κατάστασης του οχήματος γίνεται με μεταβολή μιας ή περισσότερων μεταβλητών ελέγχου του οχήματος (π.χ. της γωνία πηδαλίου ή της τάσης στους πλευρικούς ωθητήρες). Το σύστημα ελέγχου παρέχει τις

κατάλληλες τιμές των μεταβλητών ελέγχου ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή του διανύσματος κατάστασης.



Σχήμα 6- 10: Σύστημα ελέγχου υποβρυχίου οχήματος

Η είσοδος στο σύστημα ελέγχου είναι το σφάλμα θέσης και ταχύτητας, ενώ η έξοδος του συστήματος ελέγχου, είναι οι εντολές στους κινητήρες και στα πτερύγια. Στο όχημα δέχεται επιπλέον την επίδραση των εξωτερικών διαταραχών από το περιβάλλον. Η απόκριση είναι η θέση και η ταχύτητα του οχήματος και μετράται από τους αισθητήρες στον κλάδο ανάδρασης, οι οποίοι ενημερώνουν το σύστημα ελέγχου για το αποτέλεσμα του ελέγχου πάνω στο όχημα.

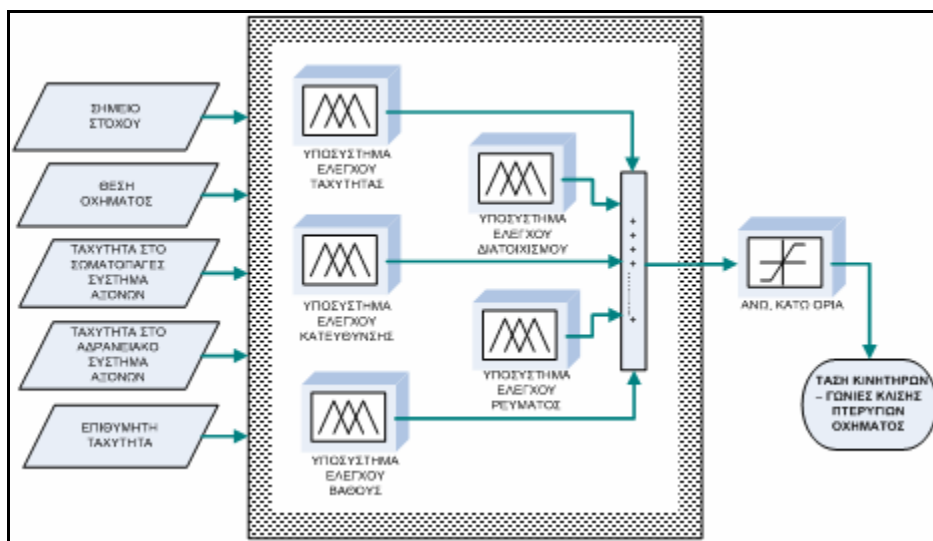
Οι είσοδοι του προτεινόμενου επιπέδου ελέγχου κίνησης είναι οι συντεταγμένες του σημείου στόχου, η θέση και ο προσανατολισμός του οχήματος στο αδρανειακό σύστημα αξόνων, η επιθυμητή ταχύτητα προσέγγισης του σημείου στόχου, η ταχύτητα του οχήματος στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων και η ταχύτητα του θαλάσσιου ρεύματος.

Το επίπεδο ελέγχου κίνησης αποτελείται από πέντε ασαφή υποσυστήματα ελέγχου:

1. Το *υποσύστημα ελέγχου ταχύτητας*, το οποίο παρακολουθεί και ελέγχει την ταχύτητα του οχήματος ρυθμίζοντας τις στροφές των κινητήριων ελίκων του.
2. Το *υποσύστημα ελέγχου κατεύθυνσης*, το οποίο είναι υπεύθυνο για την πηδαλιουχία στο οριζόντιο επίπεδο,
3. Το *υποσύστημα ελέγχου βάθους*, το οποίο ελέγχει το βάθος που βρίσκεται το όχημα ρυθμίζοντας την γωνία πρόνευσης και το βάθος,
4. Το *υποσύστημα ελέγχου διατοιχισμού*, το οποίο ρυθμίζει τις παραμέτρους ελέγχου της διατοιχιστικής κίνησης του οχήματος.
5. Το *υποσύστημα ελέγχου θαλασσίου ρεύματος*, το οποίο τροποποιεί τις μεταβλητές ελέγχου οχήματος ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει στην διαμήκη και παράλληλη μετατόπιση λόγω της ύπαρξης θαλάσσιου ρεύματος. Αν και οι μετατοπίσεις λόγω ρευμάτων μπορούν να αντιμετωπίζονται από τα υποσυστήματα ελέγχου ταχύτητας και κατεύθυνσης, μέσω της

ρύθμισης της γωνίας κατεύθυνσης και της ταχύτητας, η ύπαρξη του υποσυστήματος ελέγχου θαλασσίου ρεύματος αποδείχθηκε στις προσομοιώσεις ότι παρέχει πρόσθετη ακρίβεια κατεύθυνσης.

Μια μεταβλητή ελέγχου του οχήματος (π.χ. η τάση ενός κινητήρα, η γωνία ενός πτερυγίου), ενδεχομένως ελέγχεται από παραπάνω από ένα υποσύστημα ελέγχου. Έτσι οι έξοδοι από όλα τα υποσυστήματα προστίθενται αλγεβρικά και σχηματίζουν ένα διάνυσμα ελέγχου, στο οποίο εφαρμόζονται τα άνω και κάτω όρια από τους φυσικούς περιορισμούς των κινητήρων του οχήματος. Στον σχηματισμό του διανύσματος ελέγχου λαμβάνεται υπόψη ο αριθμός και η θέση των κινητήρων και των επιφανειών ελέγχου του οχήματος, ώστε οι έξοδοι από τα υποσυστήματα να επιδρούν στις κατάλληλες μεταβλητές ελέγχου. Η οργάνωση του επιπέδου ελέγχου κίνησης φαίνεται διαγραμματικά στο Σχήμα 6-11.



Σχήμα 6-11: Δομή επιπέδου ελέγχου κίνησης

Από το επίπεδο ελέγχου κίνησης προκύπτουν ως εντολές κίνησης οι τάσεις των κινητήρων και οι γωνίες των πτερυγίων του οχήματος. Οι πραγματικές μεταβλητές κίνησης (στροφές κινητήρων, γωνίες πτερυγίων) εξαρτώνται από αυτές τις εντολές, από την δυναμική του κάθε υποσυστήματος κίνησης και από την προηγούμενη κινηματική του κατάσταση και διαφέρουν από τις εντολές του ελεγκτή.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται αναλυτικά τα πέντε ασαφή υποσυστήματα ελέγχου που αποτελούν το επίπεδο ελέγχου κίνησης. Οι συναρτήσεις συμμετοχής των ασαφών ελεγκτών του υποσυστήματος ελέγχου κίνησης επιλέγονται αρχικά ευρετικά με δοκιμή και σφάλμα και στην συνέχεια βελτιστοποιούνται γενετικά. Η διαδικασία βελτιστοποίησης των συναρτήσεων συμμετοχής περιγράφεται στο κεφάλαιο 8.

Για την προσομοίωση του αυτόνομου υποβρύχιου οχήματος NPS-Phoenix αρχικά προσδιορίστηκαν ευρετικά οι συναρτήσεις συμμετοχής του επιπέδου ελέγχου κίνησης. Στο Κεφάλαιο 9 οι γενετικά βελτιστοποιημένες συναρτήσεις συμμετοχής συγκρίνονται με τις αρχικές ευρετικά προσδιορισθείσες.

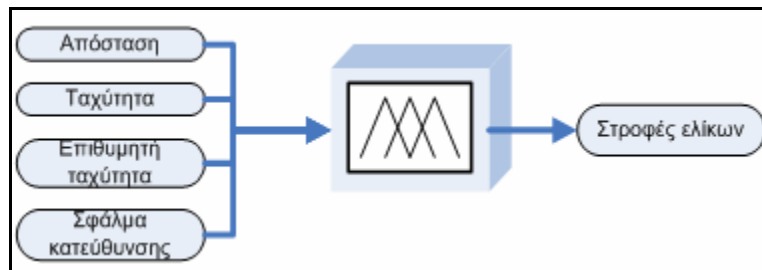
6.5.1 Υποσύστημα ελέγχου ταχύτητας

Αποτελείται από ένα ασαφή ελεγκτή που υπολογίζει την συχνότητα περιστροφής των ελίκων πρόωσης του οχήματος. Η δομή του ελεγκτή ταχύτητας παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-12.

Οι είσοδοι στον ελεγκτή είναι η ταχύτητα στον άξονα X_o , η απόσταση από το σημείο στόχου, η επιθυμητή ταχύτητα προσέγγισης και το σφάλμα κατεύθυνσης στο οριζόντιο επίπεδο με λεκτικές μεταβλητές:

1. Ταχύτητα: [αργή, κανονική, γρήγορη].
2. Απόσταση: [πολύ κοντά, κοντά, μακριά, πολύ μακριά].
3. Επιθυμητή ταχύτητα: [αργή, κανονική, γρήγορη],
4. Σφάλμα κατεύθυνσης: [αρνητικό, μηδέν, θετικό]

Οι λεκτικές μεταβλητές της εξόδου *στροφές ελίκων* είναι: [γρήγορα ανάποδα, ανάποδα, αργά ανάποδα, μηδέν, αργά πρόσω, πρόσω, γρήγορα πρόσω]



Σχήμα 6-12: Δομή υποσυστήματος ελέγχου ταχύτητας

Οι στροφές των ελίκων πρόωσης του οχήματος υπολογίζονται από την 22 κανόνες της μορφής:

ΕΑΝ (Ταχύτητα ΕΙΝΑΙ κανονική) ΚΑΙ (Απόσταση ΕΙΝΑΙ μακριά) ΚΑΙ (Επιθυμητή ταχύτητα ΕΙΝΑΙ κανονική) ΚΑΙ (σφάλμα κατεύθυνσης ΕΙΝΑΙ κανονικό) ΤΟΤΕ (στροφές ελίκων ΕΙΝΑΙ γρήγορα πρόσω).

Στην βάση κανόνων έχουν συμπεριληφθεί κανόνες, σύμφωνα με τους οποίους η τιμή της εξόδου είναι μηδέν όταν το σφάλμα κατεύθυνσης δεν είναι μηδέν. Κατ' αυτόν τον τρόπο το όχημα διορθώνει πρώτα την κατεύθυνση του και μετά κινείται προς τον στόχο.

6.5.2 Υποσύστημα ελέγχου κατεύθυνσης

Το υποσύστημα ελέγχου κατεύθυνσης περιλαμβάνει έναν ασαφή ελεγκτή, το δομικό διάγραμμα του οποίου φαίνεται στο Σχήμα 6-13. Ο ελεγκτής υπολογίζει την διαφορά μεταξύ της επιθυμητής κατεύθυνσης και της κατεύθυνσης του οχήματος (βλ. Σχήμα 6-15):

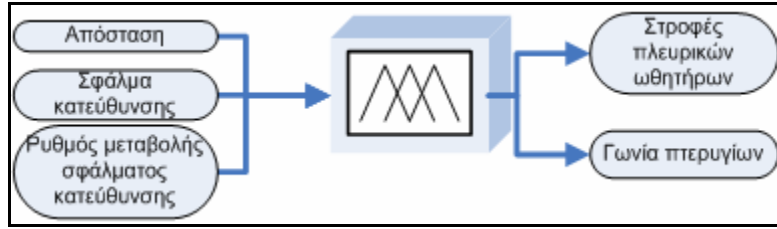
$$\Delta\psi = \psi_t - \psi_v, \quad (6.3)$$

όπου: ψ_v η γωνία κατεύθυνσης του οχήματος και ψ_t η γωνία κατεύθυνσης του στόχου.

Η γωνία σφάλματος κατεύθυνσης $\Delta\psi$ παίρνει τιμές στο διάστημα $[-180^\circ, 180^\circ]$ και διορθώνεται για να ληφθεί υπόψιν η επίδραση θαλασσίου ρεύματος. Η επίδραση του θαλάσσιου ρεύματος λαμβάνεται υπόψη με την πρόσθεση στην γωνία $\Delta\psi$ της γωνίας ψ_{cur} , με την οποία το όχημα στρέφεται προς την κατεύθυνση του ρεύματος αντισταθμίζοντας την μεταφορά του από το ρεύμα.

Έτσι αναφερόμενοι στο Σχήμα 6-13, ας υποθέσουμε ότι το όχημα βρίσκεται σε περιβάλλον όπου υπάρχει θαλάσσιο ρεύμα με ταχύτητα v_{cur} η οποία σχηματίζει γωνία ψ_{cur} με τον άξονα X του αδρανειακού συστήματος συντεταγμένων. Η σχετική γωνία με τον άξονα Y_o του σωματοπαγούς συστήματος συντεταγμένων είναι:

$$\Delta\psi = \psi_{cur} - \psi_v - \pi/2 \quad (6.4)$$



Σχήμα 6-13: Δομή υποσυστήματος ελέγχου κατεύθυνσης

Σε πρώτο στάδιο, (Σχήμα 6-14(α)), υπολογίζεται η προβολή της ταχύτητας του ρεύματος στον Y_o άξονα του σωματοπαγούς συστήματος:

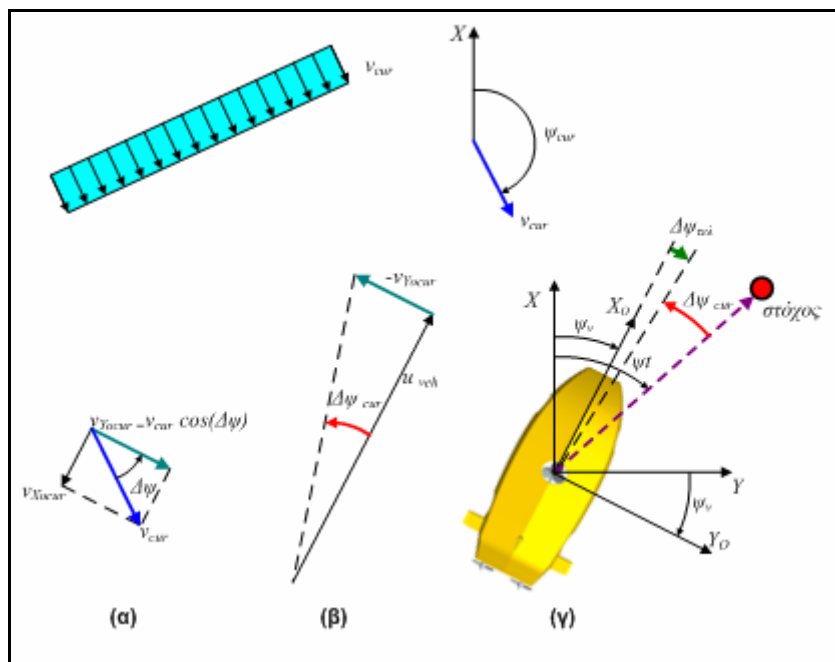
$$v_{Yocur} = v_{cur} \cos(\Delta\psi). \quad (6.5)$$

Κατόπιν, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-14(β), υπολογίζεται η γωνία που σχηματίζουν η ταχύτητα v_{Yocur} και η ταχύτητα του οχήματος u_{veh} στον X_o άξονα:

$$\Delta\psi_{cur} = \arctan(-v_{Yocur} / u_{veh}). \quad (6.6)$$

Για να αντιμετωπιστεί η επίδραση της μετακίνησης του οχήματος από το θαλάσσιο ρεύμα, η γωνία $\Delta\psi_{cur}$ προστίθεται στην διαφορά κατεύθυνσης του οχήματος και το όχημα στρίβει κατά την γωνία αυτή στην κατεύθυνση του ρεύματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-14(γ). Η διορθωμένη γωνία σφάλματος κατεύθυνσης μετά την διόρθωση λόγω ρεύματος είναι:

$$\Delta\psi_{τελ} = (\psi_t - \psi_v) + \Delta\psi_{cur}. \quad (6.7)$$



Σχήμα 6-14: Υπολογισμός σφάλματος κατεύθυνσης με παρουσία θαλασσίου ρεύματος

Η τροποποιημένη για την ύπαρξη θαλασσίου ρεύματος, γωνία σφάλματος κατεύθυνσης, ο ρυθμός μεταβολής της διαφοράς της γωνίας κατεύθυνσης και η απόσταση από το σημείο στόχου είναι οι είσοδοι στον ασαφή ελεγκτή, με εξόδους την τάση των πλευρικών ωθητήρων του οχήματος και τη γωνία των πτερυγίων που μεταβάλλουν την κατεύθυνση.

Οι λεκτικές μεταβλητές των εισόδων και των εξόδων είναι:

Είσοδοι ελεγκτή:

1. Διαφορά γωνίας κατεύθυνσης: [μεγάλη αρνητική, αρνητική, μηδέν, θετική, μεγάλη θετική].
2. Ρυθμός μεταβολής γωνίας διαφοράς κατεύθυνσης: [αρνητικός, μηδέν, θετικός].
3. Απόσταση από σημείο στόχου: [μηδέν, κοντά, μακριά].

Έξοδοι ελεγκτή:

1. Τάση πλευρικών ωθητήρων: [μεγάλη αρνητική, αρνητική, μηδέν, θετική, μεγάλη θετική].
2. Γωνία πτερυγίων: [μεγάλη αρνητική, αρνητική, μηδέν, θετική, μεγάλη θετική].

Η βάση κανόνων αποτελείται από 17 κανόνες της μορφής:

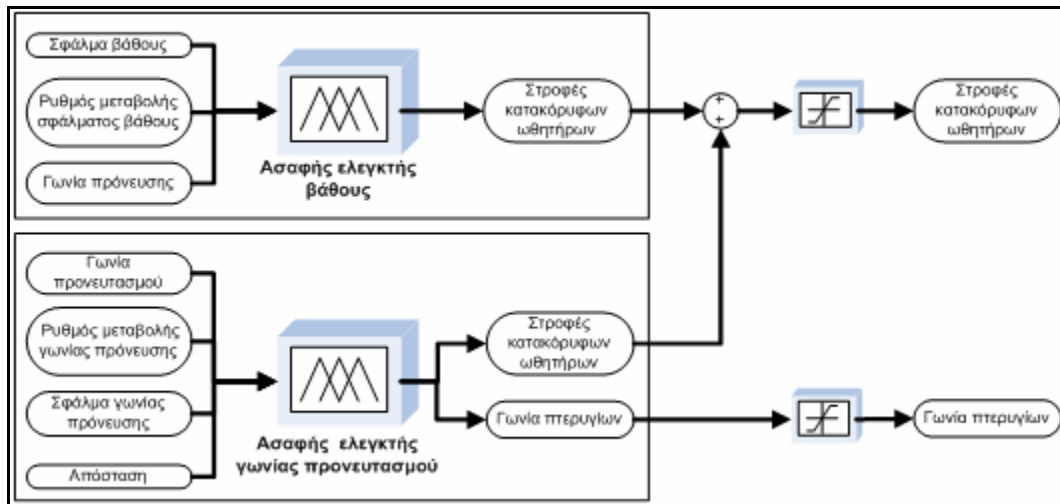
EAN (διαφορά γωνίας κατεύθυνσης ΕΙΝΑΙ θετική) ΚΑΙ (ρυθμός μεταβολής γωνίας διαφοράς κατεύθυνσης ΕΙΝΑΙ μηδέν) ΚΑΙ (απόσταση από σημείο στόχου ΕΙΝΑΙ μακριά) ΤΟΤΕ (τάση πλευρικών ωθητήρων ΕΙΝΑΙ θετική) ΚΑΙ (γωνία πτερυγίων ΕΙΝΑΙ θετική).

Σε περίπτωση ο έλεγχος της κατεύθυνσης του οχήματος γίνεται από ζεύγη πτερύγιων ή πλευρικών ωθητήρων, τοποθετημένων στο εμπρός και στο πίσω άκρο του οχήματος, η γωνία και η τάση που δίνεται ως έξοδος από τον ελεγκτή κατεύθυνσης σχηματίζει εντολή κίνησης με αντίθετο πρόσημο, ώστε να δημιουργείται ροπή μεταβολής κατεύθυνσης.

6.5.3 Υποσύστημα ελέγχου βάθους

Το υποσύστημα ελέγχου βάθους αποτελείται από δύο ασαφείς ελεγκτές που ελέγχουν την γωνία πρόνευσης και το βάθος. Η ύπαρξη των δύο ελεγκτών επιβάλλεται από το γεγονός ότι στην γωνία $\theta = \pm\pi/2$ υπάρχει ανωμαλία στην αναπαράσταση των γωνιών Euler και δεν ορίζεται ο μετασχηματισμός γωνιακής ταχύτητας, όπως φαίνεται από τους όρους $\sin(\phi)/\cos(\theta)$ και $\cos(\phi)/\cos(\theta)$ της σχέσης (3-12). Έτσι με την χρήση του ελεγκτή γωνίας πρόνευσης, εκτός από την επιτυχία του σημείου στόχου στο κατακόρυφο επίπεδο, παρακολουθείται η γωνία πρόνευσης του οχήματος ώστε να αποφεύγεται η λειτουργία σε κατακόρυφη θέση. Το δομικό διάγραμμα του υποσυστήματος ελέγχου βάθους φαίνεται στο Σχήμα 6-15.

Η έξοδος του ελεγκτή βάθους είναι η τάση στους κατακόρυφους ωθητήρες, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί εφόσον το όχημα διαθέτει τέτοιους ωθητήρες.



Σχήμα 6-15: Δομή υποσυστήματος ελέγχου βάθους

6.5.3.1 Ασαφής ελεγκτής γωνίας πρόνευσης

Οι λεκτικές μεταβλητές εισόδου του ελεγκτή γωνίας πρόνευσης είναι:

1. Διαφορά γωνίας πρόνευσης: [μεγάλη αρνητική, αρνητική, μηδέν, θετική, μεγάλη θετική].
2. Ρυθμός μεταβολής γωνίας πρόνευσης: [αρνητικός, κανονικός, θετικός].
3. Απόσταση από στόχο: [μηδέν, κοντά, μακριά].

4. Γωνία πρόνευσης: [εκτός ορίου αρνητική, κανονική, εκτός ορίου θετική].

Οι έξοδοι του ελεγκτή είναι:

1. Τάση κατακόρυφων ωθητήρων: [μεγάλη αρνητική, αρνητική, μηδέν, θετική, μεγάλη θετική].

2. Γωνία πτερυγίων: [μεγάλη αρνητική, αρνητική, μηδέν, θετική, μεγάλη θετική].

Η είσοδος γωνία πρόνευσης υπάρχει για να εξασφαλιστεί ότι αυτή δεν θα πλησιάσει τις τιμές όπου υπάρχει η ανωμαλία. Η τάση και η γωνία των πτερυγίων που δίνονται ως έξοδοι δίνονται ως εντολές στους κινητήρες με αντίθετο πρόσημο πλώρα και πρύμα, ώστε να εξασφαλίζεται η δημιουργία ροπής μεταβολής γωνίας πρόνευσης.

Η βάση κανόνων αποτελείται από 31 κανόνες της μορφής:

EAN (Διαφορά γωνίας πρόνευσης ΕΙΝΑΙ θετική) ΚΑΙ (Ρυθμός μεταβολής γωνίας πρόνευσης ΕΙΝΑΙ θετικός) ΚΑΙ (Απόσταση στόχο ΕΙΝΑΙ μακριά) ΤΟΤΕ (Τάση κατακόρυφων ωθητήρων ΕΙΝΑΙ μεγάλη θετική) ΚΑΙ (Γωνία πτερυγίων ΕΙΝΑΙ μεγάλη θετική).

6.5.3.2 Ασαφής ελεγκτής βάθους

Ο ασαφής ελεγκτής ελέγχου βάθους έχει τρεις εισόδους και μία έξοδο. Οι λεκτικές μεταβλητές των εισόδων είναι:

1. Διαφορά βάθους: [αρνητική, μηδέν, θετική].

2. Ρυθμός μεταβολής σφάλματος βάθους: [αρνητικός, κανονικός, θετικός].

3. Γωνία πρόνευσης: [αρνητική, κανονική, θετική].

Η έξοδος του ελεγκτή είναι:

1. Τάση κατακόρυφων ωθητήρων: [αρνητική, μηδέν, θετική].

Η βάση κανόνων αποτελείται από 11 κανόνες της μορφής:

EAN (Διαφορά βάθους ΕΙΝΑΙ αρνητική) ΚΑΙ (Ρυθμός μεταβολής σφάλματος βάθους ΕΙΝΑΙ κανονικός) ΚΑΙ (Γωνία πρόνευσης ΕΙΝΑΙ κανονική) ΤΟΤΕ (Τάση κατακόρυφων ωθητήρων ΕΙΝΑΙ αρνητική).

6.5.4 Υποσύστημα ελέγχου διατοιχισμού

Το υποσύστημα ελέγχου διατοιχισμού ελέγχει την διατοιχιστική κίνηση του οχήματος γύρω από τον άξονα X_o . Αυτό είναι απαραίτητο στην περίπτωση που το όχημα δεν έχει το κέντρο βάρους του αρκετά χαμηλότερα από το κέντρο άντωσης, οπότε δεν διαθέτει επαρκή ευστάθεια στην κίνηση αυτή. Το δομικό διάγραμμα του ελεγκτή διατοιχισμού παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-16.



Σχήμα 6-16: Δομή υποσυστήματος ελέγχου διατοιχισμού

Ο ελεγκτής διατοιχισμού έχει δύο εισόδους με λεκτικές μεταβλητές:

1. Γωνία διατοιχισμού: [μεγάλη αρνητική, αρνητική, μηδέν, θετική, μεγάλη θετική].
2. Ρυθμός μεταβολής γωνίας διατοιχισμού: [αρνητικός, κανονικός, θετικός].

Οι λεκτικές μεταβλητές της εξόδου είναι:

1. Γωνία πτερυγίων: [μεγάλη αρνητική, αρνητική, μηδέν, θετική, μεγάλη θετική].

Ο έλεγχος της διατοιχιστικής κίνησης του οχήματος γίνεται με δημιουργία ροπής. Η γωνία των πτερυγίων προστίθεται στα δεξιά και αφαιρείται στα αριστερά πτερύγια του οχήματος, ώστε να δημιουργείται ροπή που ελέγχει την περιστροφική κίνηση στον άξονα X .

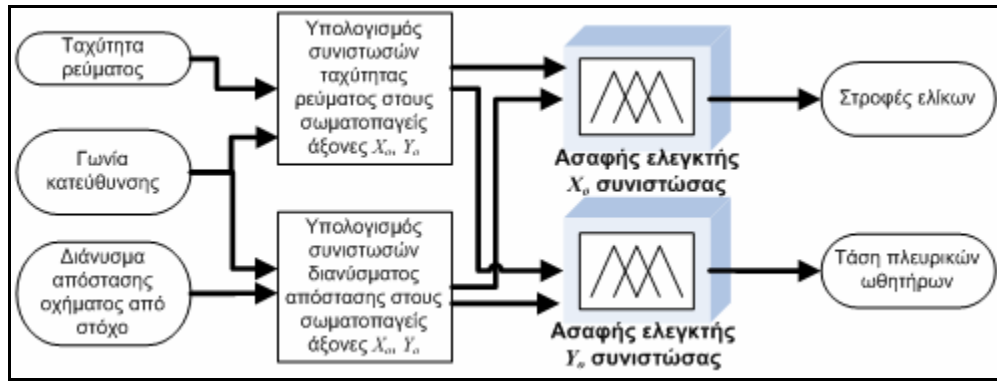
Η βάση κανόνων του ελεγκτή αποτελείται από 8 κανόνες της μορφής:

EAN (Γωνία διατοιχισμού ΕΙΝΑΙ αρνητική) ΚΑΙ (Ρυθμός μεταβολή γωνίας διατοιχισμού ΕΙΝΑΙ αρνητικός) ΤΟΤΕ (Γωνία πτερυγίων ΕΙΝΑΙ μεγάλη αρνητική).

6.5.5 Υποσύστημα ελέγχου θαλασσίου ρεύματος

Το υποσύστημα αυτό έχει σχεδιαστεί ώστε να βοηθάει το όχημα να ξεπεράσει την μετατόπιση του στον χώρο από ένα θαλάσσιο ρεύμα με συνιστώσες στο οριζόντιο επίπεδο $X-Y$. Αν και στο θαλάσσιο περιβάλλον μπορεί τοπικά λόγω της διαμόρφωσης του πυθμένα να υπάρχει και κατακόρυφη συνιστώσα θαλασσίου ρεύματος, τα θαλάσσια ρεύματα έχουν κυρίως κατεύθυνση στο επίπεδο. Το υποσύστημα αποτελείται από δύο ασαφείς ελεγκτές, που ελέγχουν την επίδραση του ρεύματος στις κατευθύνσεις κατά τον διαμήκη και κατά τον εγκάρσιο άξονα του οχήματος όπως στο Σχήμα 6-17.

Οι είσοδοι είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας του ρεύματος στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων, η γωνία στροφής κατεύθυνσης και η απόσταση του οχήματος από το σημείο στόχου.



Σχήμα 6-17: Διάγραμμα υποσυστήματος ελέγχου θαλασσίον ρεύματος

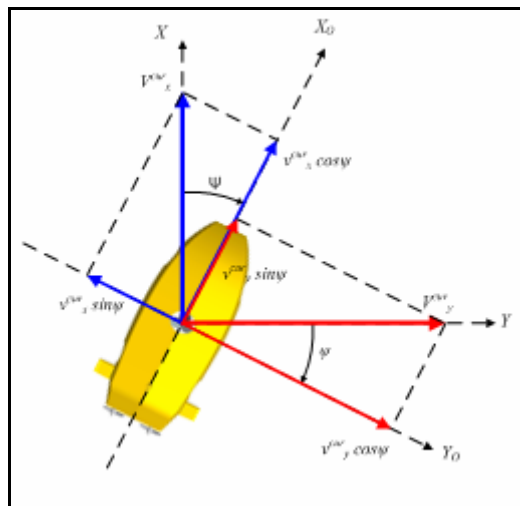
Στην αρχή υπολογίζονται οι συνιστώσες της ταχύτητας του ρεύματος στους σωματοπαγείς άξονες X_o και Y_o . Επίσης υπολογίζονται οι συνιστώσες του διανύσματος απόστασης στους άξονες X_o και Y_o . Η X_o συνιστώσα της ταχύτητας του ρεύματος επηρεάζει την κίνηση του προς τα εμπρός και προσδίδει ή αφαιρεί από το όχημα φαινόμενη ταχύτητα προχώρησης surge, η οποία αντιμετωπίζεται με αύξηση ή μείωση των στροφών της(ων) έλικας(ων) πρόωσης του οχήματος. Η συνιστώσα Y_o της ταχύτητας του ρεύματος δίνει μια πλάγια μετατόπιση, που αντιμετωπίζεται με αύξηση ή μείωση των στροφών του(ων) πλευρικού(ών) ωθητήρα(ων) ή / και με αύξηση ή μείωση της γωνίας κλίσης των κατακόρυφων πτερυγίων, εφόσον υπάρχει ζεύγος.

Οι συνιστώσες της ταχύτητας του ρεύματος στους σωματοπαγείς άξονες X_o και Y_o υπολογίζονται σύμφωνα με το Σχήμα 6-18 με τις σχέσεις:

$$V^{cur}_{xo} = v^{cur}_x \cos\psi + v^{cur}_y \sin\psi, \quad (6.8)$$

$$V^{cur}_{yo} = -v^{cur}_x \sin\psi + v^{cur}_y \cos\psi, \quad (6.9)$$

όπου ψ η γωνία κατεύθυνσης οχήματος, V^{cur}_x η συνιστώσα ρεύματος κατά τον αδρανειακό άξονα X , V^{cur}_y η συνιστώσα ρεύματος κατά τον αδρανειακό άξονα Y .



Σχήμα 6-18: Υπολογισμός συνιστωσών ρεύματος στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων

Οι δυο ασαφείς ελεγκτές έχουν εισόδους και εξόδους με λεκτικές μεταβλητές:

Ελεγκτής X_o συνιστώσας

Είσοδοι:

1. Συνιστώσα X_o : [αρνητική, μηδέν, θετική].
2. Δx : [αρνητική, μηδέν, θετική].

Έξοδος:

1. Στροφές ελίκων: [γρήγορα ανάποδα, ανάποδα, αργά ανάποδα, μηδέν, αργά πρόσω, πρόσω, γρήγορα πρόσω].

Ελεγκτής Y_o συνιστώσας

Είσοδοι:

1. Συνιστώσα Y_o : [αρνητική, μηδέν, θετική].
2. Δy : [αρνητικό, μηδέν, θετικό].

Έξοδος:

1. τάση πλευρικών ωθητήρων: [μεγάλη αρνητική, αρνητική, μηδέν, θετική, μεγάλη θετική].

Η βάση κανόνων των δύο ελεγκτών αποτελείται από 9 κανόνες της μορφής:

EAN (συνιστώσα Y_o ΕΙΝΑΙ αρνητική) ΚΑΙ (Δy ΕΙΝΑΙ αρνητικό) ΤΟΤΕ (τάση πλευρικών ωθητήρων ΕΙΝΑΙ μεγάλη θετική).

Με το υποσύστημα ελέγχου θαλασσίου ρεύματος γίνεται αντιστάθμιση της μεταφοράς του οχήματος μέσα στην μάζα του κινούμενου νερού. Στον διαμήκη άξονα της κίνησης η μεταφορά του οχήματος από το ρεύμα επιδρά στις στροφές των ελίκων πρόωσης, ενώ στον εγκάρσιο άξονα κίνησης η μεταφορά του οχήματος αντισταθμίζεται με τάση στους πλευρικούς ωθητήρες.

Έτσι η λειτουργία του υποσυστήματος ελέγχου θαλασσίου ρεύματος διορθώνει την θέση του οχήματος όταν υπάρχουν θαλάσσια ρεύματα και συμπληρώνει την διόρθωση στόχευσης του οχήματος λόγω ρευμάτων που περιγράφηκε στο υποσύστημα ελέγχου κατεύθυνσης.

Η ταχύτητα του ρεύματος V_c σε πραγματικές συνθήκες μπορεί να μετρηθεί με χρήση 2 οργάνων:

1. Acoustic Doppler Velocimeter, το οποίο μετράει την σχετική ταχύτητα του ρεύματος V_r ως προς το όχημα και

2. Doppler sonar, το οποίο μετράει την σχετική ταχύτητα του οχήματος ως προς τον πυθμένα V_{veh} ,

οπότε :

$$V_r = V_{veh} - V_c \Rightarrow V_c = V_{veh} - V_r. \quad (6.10)$$

7° Κεφάλαιο

Γενετικός σχεδιασμός πορείας υποβρυχίων οχημάτων

7.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το *επίπεδο σχεδιασμού τροχιάς* ενός αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος. Η βέλτιστη πορεία που μπορεί να ακολουθήσει το όχημα σχεδιάζεται με γενετικούς αλγόριθμους και πολυπαραμετρικές καμπύλες B-Splines, ώστε αφενός να εκπληρωθούν οι απαιτήσεις της αποστολής και αφετέρου το όχημα να ακολουθεί την διαμόρφωση του πυθμένα χωρίς η τροχιά του να βρίσκεται πάνω σε εμπόδια.

Η τροχιά που προκύπτει είναι μια ομαλή καμπύλη με δεδομένη ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας. Αντιθέτως, παλαιότερες προσεγγίσεις σχεδίαζαν την πορεία του οχήματος ως μια ακολουθία σημείων στόχου, που ορίζουν διαδοχικά ευθύγραμμα τμήματα. Το πρόβλημα με τις προσεγγίσεις αυτές είναι ότι το όχημα παρουσιάζει σφάλμα θέσης στα σημεία αλλαγής κατεύθυνσης.

Επιπλέον, με την παρούσα μεθοδολογία μπορεί να διασφαλιστεί ότι η σχεδιαζόμενη πορεία του οχήματος θα τηρεί περιορισμούς που μπορεί να υφίστανται για κάθε αποστολή, όπως: 1. *Μέγιστο βάθος*, που καθορίζεται από τις προδιαγραφές του οχήματος, 2. *Ελάχιστο βάθος*, που καθορίζεται από τις απαιτήσεις της αποστολής, 3. *Ελάχιστη απόσταση από τον πυθμένα*, που καθορίζεται από τον βαθμό ικανοποιητικού ελέγχου του οχήματος και από απαιτήσεις ασφαλείας και 4. *Ελάχιστη καμπυλότητα της τροχιάς*, που καθορίζεται από τις δυνατότητες ελιγμών του οχήματος.

Για τον προσδιορισμό της βέλτιστης πορείας δεδομένα είναι τα υψομετρικά στοιχεία του πυθμένα στην περιοχή της αποστολής. Η αποτύπωση του πυθμένα μπορεί να γίνει με βαθυμετρικά δεδομένα που συλλέγουν πλοία επιφανείας [226], [227], τα οποία ανακαλούνται με την βοήθεια γεωδαιτικών πληροφοριακών συστημάτων (Geospatial Information Systems, GIS) [228]. Για την εφαρμογή του προτεινόμενου γενετικού σχεδιασμού πορείας δεν απαιτείται εξαιρετική ακρίβεια των δεδομένων, παρά μόνο αποτύπωση των κύριων χαρακτηριστικών του πυθμένα. Αυτό γιατί το όχημα δεν βασίζεται στον σχεδιασμό της βέλτιστης πορείας για να πλοηγηθεί χωρίς συγκρούσεις με εμπόδια, αλλά η αποφυγή εμποδίων υπάρχει ως χαρακτηριστικό στο επίπεδο ελέγχου κίνησης, όπου το όχημα αξιοποιεί τις ενδείξεις των αισθητήρων του για να εντοπίσει εμπόδια. Στην περίπτωση που εντοπίζεται κάποιο εμπόδιο η πλοήγηση του οχήματος έχει συμπεριφορά αντίδρασης, μέχρι την αποφυγή του, οπότε η πλοήγηση γίνεται με συμπεριφορά στόχου.

Σε προηγούμενες προσεγγίσεις σχεδιασμού τροχιάς [229], [230], [231], [82], η πορεία του οχήματος αναπαρίσταται με ευθύγραμμα τμήματα τα οποία καθορίζουν σημεία στόχου. Σε αυτές τις προσεγγίσεις το μειονέκτημα είναι ότι το όχημα δεν μπορεί να ακολουθήσει με ακρίβεια την σχεδιασμένη τροχιά και υπάρχει σφάλμα κατά τις διαδοχικές απότομες αλλαγές κατεύθυνσης. Επιπλέον μπορεί να προκύψει αστάθεια και απώλεια ελέγχου στα σημεία που δίνονται οι εντολές αλλαγής κατεύθυνσης.

Για τον προσδιορισμό της βέλτιστης πορείας του οχήματος χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διατριβή η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο [38] για εναέρια οχήματα, η οποία επεκτάθηκε και τροποποιήθηκε για χρήση σε υποβρύχια οχήματα. Ο προσδιορισμός των κορυφών του πολυγώνου ελέγχου της πολυπαραμετρικής καμπύλης που αναπαριστά την πορεία του οχήματος γίνεται με χρήση γενετικού αλγόριθμου. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε αναπτύσσεται στις επόμενες παραγράφους.

7.2 Αναπαράσταση πορείας με πολυπαραμετρικές καμπύλες

Στην παρούσα προσέγγιση για την αναπαράσταση της πορείας του οχήματος χρησιμοποιούνται πολυπαραμετρικές καμπύλες B-Splines [219]. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον σχεδιασμό ομαλών καμπύλων χωρίς απότομες αλλαγές κατεύθυνσης που μπορεί να ακολουθήσει ευκολότερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια το όχημα. Μία πολυπαραμετρική καμπύλη B-Spline ορίζεται από τις συντεταγμένες των σημείων ελέγχου. Για $(n+1)$ σημεία ελέγχου με συντεταγμένες $(x_0, y_0, z_0), \dots, (x_n, y_n, z_n)$, οι συντεταγμένες των σημείων της καμπύλης B-Spline είναι:

$$\begin{aligned}
x(t) &= \sum_{i=0}^n x_i \cdot B_{i,K(t)} \\
y(t) &= \sum_{i=0}^n y_i \cdot B_{i,K(t)} \\
z(t) &= \sum_{i=0}^n z_i \cdot B_{i,K(t)} ,
\end{aligned} \tag{7.1}$$

όπου $B_{i,K(t)}$ είναι οι συναρτήσεις βάσης και K ο βαθμός της καμπύλης. Το άθροισμα των συναρτήσεων βάσης για οποιαδήποτε τιμή της παραμέτρου t είναι πάντοτε 1. Ο βαθμός της καμπύλης σχετίζεται με την ομαλότητα της καμπύλης, η οποία μεγαλώνει όσο μεγαλώνει ο βαθμός της καμπύλης. Η παράμετρος t παίρνει τιμές από 0 έως $(n-K+2)$ με ένα σταθερό βήμα το οποίο δίνει τα διακριτά σημεία της καμπύλης.

Η καμπύλη για $K=2$ είναι εφαπτόμενη στο πολύγωνο που ορίζεται από τα σημεία ελέγχου $(x_0, y_0, z_0), \dots, (x_n, y_n, z_n)$. Οι συναρτήσεις βάσης ορίζονται στα διαστήματα που ορίζονται από τους κόμβους (knots) που με την σειρά τους ορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned}
Knot(i) &= 0, & \text{εάν } i < K \\
Knot(i) &= i-K+1, & \text{εάν } K \leq i \leq n \\
Knot(i) &= n-K+2, & \text{εάν } n < i.
\end{aligned} \tag{7.2}$$

Οι συναρτήσεις βάσης ορίζονται με επαναληπτική διαδικασία ως εξής:

$$\begin{aligned}
B_{i,l(t)} &= \begin{cases} 1, & \text{εάν } Knot(i) \leq t < Knot(i+1) \\ 1, & \text{εάν } \begin{cases} Knot(i) \leq t < Knot(i+1) \\ \text{and} \\ t = n-K+2 \end{cases} \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \\
B_{i,K(t)} &= \frac{(t-Knot(i)) \cdot B_{i,K-1(t)}}{Knot(i+K-1)-Knot(i)} + \frac{(Knot(i+K)-t) \cdot B_{i+1,K-1(t)}}{Knot(i+K)-Knot(i+1)} ,
\end{aligned} \tag{7.3}$$

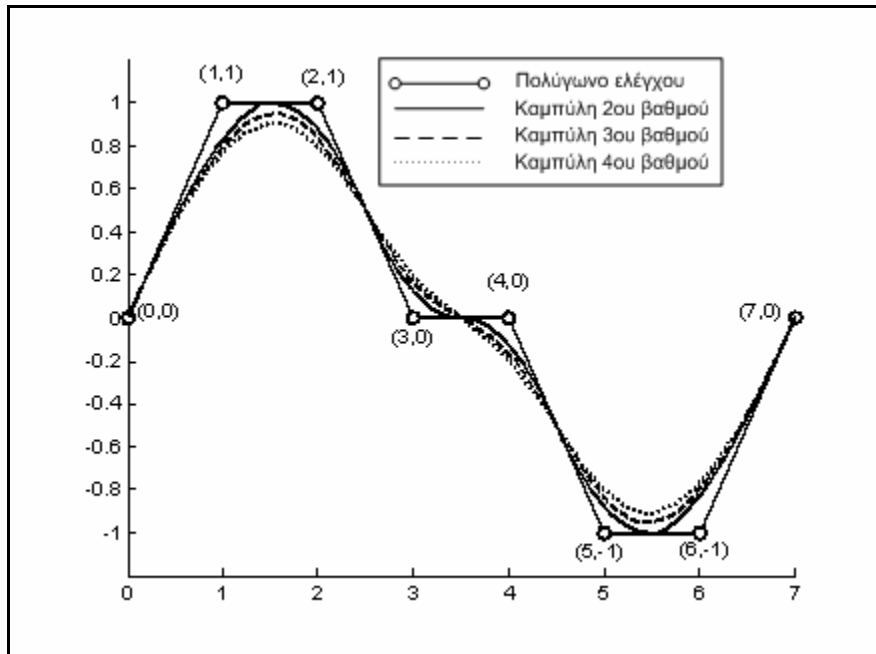
όπου η τιμή του κλάσματος είναι εξ' ορισμού 0 εάν ο παρανομαστής είναι 0.

Η καμπύλη είναι εφαπτόμενη στο αρχικό και στο τελικό σημείο του πολυγώνου που ορίζεται από τα σημεία ελέγχου $(x_0, y_0, z_0), \dots, (x_n, y_n, z_n)$. Η ιδιότητα αυτή χρησιμοποιείται για να οριστεί η αρχική κατεύθυνση της πορείας με κατάλληλη τοποθέτηση του πρώτου και του δεύτερου σημείου ελέγχου συνευθειακά πάνω στην διεύθυνση της επιθυμητής πορείας.

Η μεταβολή της ομαλότητας με τον βαθμό της καμπύλης φαίνεται στο Σχήμα 7-1, όπου έχουν σχεδιαστεί διδιάστατες καμπύλες δευτέρου, τρίτου και τέταρτου βαθμού. Το πολύγωνο ελέγχου

έχει οκτώ κορυφές από τις οποίες η πρώτη και η τελευταία έχουν πολλαπλότητα 3 και έχουν συντεταγμένες:

[συντεταγμένες πολυγώνου ελέγχου] = { [0,0], [1,1], [2,1], [3,0], [4,0], [5,-1], [6,-1], [7,0] }



Σχήμα 7-1: Σύγκριση πολυπαραμετρικών καμπυλών B-Splines διαφορετικών βαθμών

Η ακολουθία κόμβων των καμπυλών των Σχήματος 7-1 είναι:

Κόμβοι

καμπύλης

2^{ου} βαθμού: [0 0 0 0 0 0.17 0.33 0.5 0.67 0.83 1 1 1 1 1]

Κόμβοι

καμπύλης

3^{ου} βαθμού: [0 0 0 0 0 0.14 0.29 0.43 0.57 0.71 0.86 1 1 1 1 1]

Κόμβοι

καμπύλης

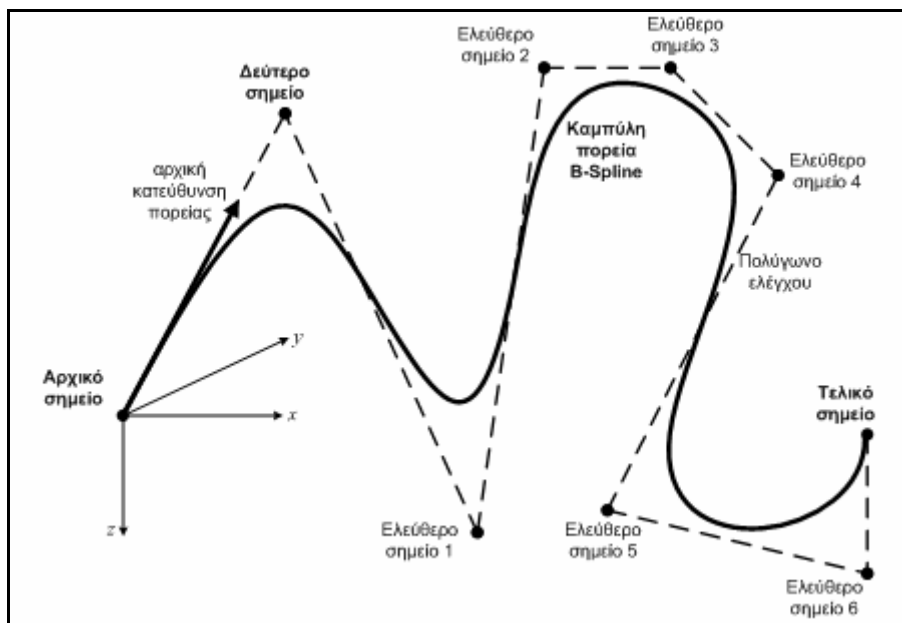
4^{ου} βαθμού: [0 0 0 0 0 0.12 0.25 0.38 0.5 0.62 0.75 0.87 1 1 1 1 1].

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 7-1, με αύξηση του βαθμού της καμπύλης επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ομαλότητα της καμπύλης, με ταυτόχρονη απομάκρυνση της από το πολύγωνο ελέγχου. Για αυτό τον λόγο στην παρούσα προσέγγιση για την αναπαράσταση πορειών υποβρυχίων οχημάτων χρησιμοποιήθηκαν καμπύλες τρίτου βαθμού.

7.3 Γενετικός προσδιορισμός βέλτιστης πορείας

Το επίπεδο σχεδιασμού βέλτιστης πορείας έχει ως στόχο του τον προσδιορισμό της πορείας που θα πρέπει να ακολουθήσει το όχημα για να πλοηγηθεί αφενός κοντά στον πυθμένα και αφετέρου μακριά από τα εμπόδια που αποτελούν τα χαρακτηριστικά του πυθμένα.

Για τον προσδιορισμό της βέλτιστης πορείας, εφαρμόζεται η γενετική βελτιστοποίηση της πολυπαραμετρικής καμπύλης B-Spline που την αναπαριστά. Η καμπύλη όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-2, ορίζεται από το πολύγωνο ελέγχου [38]. Το πολύγωνο ελέγχου αποτελείται από το αρχικό σημείο της πορείας, το δεύτερο σημείο - κορυφή του πολυγώνου ελέγχου, από έξι ελεύθερα σημεία χωρίς προσδιορισμό συντεταγμένων, οι οποίες αποτελούν το αντικείμενο της γενετικής βελτιστοποίησης και το τελευταίο σημείο του πολυγώνου ελέγχου που είναι το τελικό σημείο της πορείας και ταυτίζεται με το σημείο στόχου.

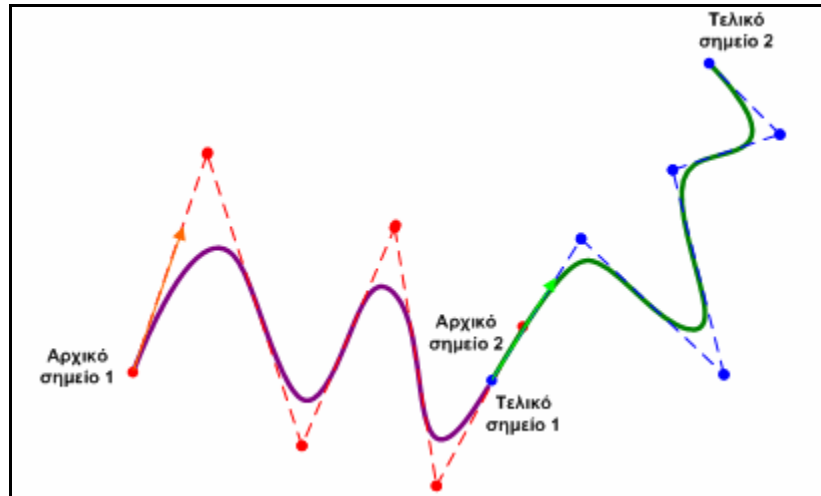


Σχήμα 7-2: Αναπαράσταση καμπύλης πορείας B-Spline για γενετική βελτιστοποίηση

Το δεύτερο σημείο ελέγχου, ή ισοδύναμα η δεύτερη κορυφή του πολυγώνου ελέγχου, θεωρείται σταθερό, έτσι ώστε να μπορεί να καθοριστεί η επιθυμητή αρχική κατεύθυνση πορείας. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί αφενός να σχεδιαστεί πορεία με αρχική διεύθυνση την κατεύθυνση του οχήματος την συγκεκριμένη χρονική στιγμή της έναρξης της αποστολής και αφετέρου για να μπορεί να προστεθεί δεύτερη καμπύλη B-Spline, σε περιπτώσεις πολύπλοκης γεωμετρίας της βέλτιστης πορείας (Σχήμα 7-3).

Η σύζευξη των δύο καμπυλών επιτυγχάνεται με την εξίσωση των συντεταγμένων του αρχικού σημείου ελέγχου της δεύτερης καμπύλης με τις συντεταγμένες του τελευταίου σημείου ελέγχου της πρώτης καμπύλης. Επίσης με τοποθέτηση των δύο τελευταίων σημείων ελέγχου του

πολυγώνου ελέγχου της πρώτης καμπύλης καθώς και των δύο πρώτων σημείων ελέγχου της δεύτερης καμπύλης συννευθιακά στον χώρο, ώστε κατά την μετάβαση από την μια καμπύλη στην άλλη να μην υπάρχει ασυνέχεια της καμπυλότητας. Για ευκολία ανάγνωσης του Σχήματος 7-3 χρησιμοποιήθηκαν 3 ελεύθερα σημεία ελέγχου για κάθε καμπύλη, αντί των 6 που χρησιμοποιούνται στην γενετική βελτιστοποίηση.



Σχήμα 7-3: Αναπαράσταση πορείας από δύο καμπύλες B-Spline

Ανακεφαλαιώνοντας, η πορεία του οχήματος μπορεί να αναπαρασταθεί από μια πολυπαραμετρική καμπύλη B-Spline, η οποία ορίζεται από τις συντεταγμένες των κορυφών του πολυγώνου ελέγχου στον χώρο και την ακολουθία των κόμβων που καθορίζει τον βαθμό της. Αναλυτικότερα η καμπύλη ορίζεται από:

1. Τις συντεταγμένες του πρώτου σημείου της πορείας, του δεύτερου σημείου του πολυγώνου ελέγχου και του τελευταίου σημείου της πορείας. Το πρώτο σημείο είναι η θέση του οχήματος πριν την έναρξη της αποστολής, το δεύτερο σημείο καθορίζει την αρχική κατεύθυνση της πορείας και το τελευταίο σημείο είναι το σημείο στόχου του οχήματος. Τα σημεία αυτά λόγω της σημασίας τους είναι σταθερά για κάθε αποστολή και δεν αποτελούν αντικείμενο βελτιστοποίησης.
2. Τα ενδιάμεσα ελεύθερα σημεία που είναι οι ενδιάμεσες κορυφές του πολυγώνου ελέγχου. Τα σημεία αυτά στην παρούσα προσέγγιση είναι 6 και με την αλλαγή τους τροποποιείται η πορεία του οχήματος ώστε να προσεγγίσει την βέλτιστη. Οι συντεταγμένες των σημείων αυτών στον τρισδιάστατο χώρο αποτελούν το αντικείμενο βελτιστοποίησης του γενετικού αλγορίθμου.
3. Την ακολουθία των κόμβων η οποία καθορίζει τον βαθμό και την μορφή της καμπύλης. Χωρίς βλάβη της γενικότητας οι κόμβοι ορίζονται σε ίσα διαστήματα μέσα στο διάστημα από 0 έως 1 του ορισμού των κόμβων. Λόγω της βελτιστοποίησης της καμπύλης μέσω της γενετικής

διαδικασίας η επίδραση της ακολουθίας των κόμβων δεν επηρεάζει την μορφή της βέλτιστης καμπύλης, η οποία αξιολογείται ως προς την τελική της μορφή.

Η ακολουθία των κόμβων που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα προσέγγιση είναι:

$$\text{Κόμβοι} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1/8 \ 2/8 \ 3/8 \ 4/8 \ 5/8 \ 6/8 \ 7/8 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]; \quad (7.4)$$

Τα σημεία ελέγχου είναι :

$$\text{σημεία ελέγχου} = \begin{bmatrix} \text{αρχικό σημείο} \\ \text{αρχικό σημείο} \\ \text{αρχικό σημείο} \\ \text{δεύτερο σημείο} \\ \text{ελευθερο σημείο 1} \\ \text{ελευθερο σημείο 2} \\ \text{ελευθερο σημείο 3} \\ \text{ελευθερο σημείο 4} \\ \text{ελευθερο σημείο 5} \\ \text{ελευθερο σημείο 6} \\ \text{τελικό σημείο} \\ \text{τελικό σημείο} \\ \text{τελικό σημείο} \end{bmatrix}. \quad (7.5)$$

Η πολλαπλότητα του αρχικού και του τελικού σημείου είναι 3. Αυτό γίνεται έτσι ώστε η καμπύλη να έχει βαθμό 3 και να επιβληθούν οι οριακές συνθήκες, που είναι η διέλευση της καμπύλης από τα σημεία αυτά [219].

Ο αριθμός των χρωμοσωμάτων για το κάθε άτομο του πληθυσμού καθορίζεται από τις συντεταγμένες των ελεύθερων σημείων – κορυφών του πολυγώνου ελέγχου, οι οποίες είναι:

$$n = 3 \times \{\text{αριθμός ελεύθερων σημείων ελέγχου}\}, \quad (7.6)$$

οπότε για 6 ελεύθερα σημεία ελέγχου ο αριθμός των χρωμοσωμάτων κάθε ατόμου του πληθυσμού είναι 18.

Ο προσδιορισμός της βέλτιστης πορείας γίνεται με γενετική βελτιστοποίηση ενός τυχαίου αρχικού πληθυσμού, ο οποίος αποτελείται από άτομα που αποτελούνται από 18 χρωμοσώματα. Το κάθε άτομο αναπαριστά μια πολυπαραμετρική καμπύλη τροχιά και αξιολογείται με μια αντικειμενική συνάρτηση. Στην συνέχεια τα άτομα του αρχικού πληθυσμού διασταυρώνονται και μεταλλάσσονται για να παράγουν τους απογόνους που αποτελούν την επόμενη γενιά με πιθανότητα ανάλογη του βαθμού ικανοποίησης των απαιτήσεων της αντικειμενικής συνάρτησης. Όσο ο πληθυσμός εξελίσσεται, τόσο τα άτομα που τον αποτελούν ικανοποιούν σε μεγαλύτερο βαθμό τις απαιτήσεις της αντικειμενικής συνάρτησης. Η όλη διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την εκπλήρωση κάποιου κριτηρίου τερματισμού, οπότε βέλτιστη πορεία αναπαρίσταται από το βέλτιστο άτομο.

Από τα παραπάνω γίνεται προφανής η σημασία της αντικειμενικής συνάρτησης, που αξιολογεί τον βαθμό ικανοποίησης των κριτηρίων που χαρακτηρίζουν την βέλτιστη λύση. Η αντικειμενική συνάρτηση, που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της βέλτιστης πορείας, παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο.

7.4 Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιείται για να βαθμολογήσει τα άτομα του πληθυσμού, σε σχέση με την ποιότητα της λύσης που αναπαριστούν. Το κάθε άτομο του πληθυσμού αποτελείται από χρωμοσώματα που αναπαριστούν μια πιθανή πορεία του οχήματος, σε μορφή μιας πολυπαραμετρικής καμπύλης B-Spline. Η πιθανή αυτή λύση πρέπει να βαθμολογηθεί ως προς την ποιότητά της και ο βαθμός αυτός δίνεται στο άτομο και συνδέεται με την πιθανότητα αναπαραγωγής του.

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι ένα σταθμισμένο άθροισμα έξι όρων, ο κάθε ένας εκ των οποίων αντιπροσωπεύει περιορισμούς της πιθανής λύσης. Οι όροι αυτοί εκφράζουν την εφικτότητα της λύσης, ή ταυτόσημα τον βαθμό που μπορεί το όχημα να ακολουθήσει την πορεία που περιγράφει το κάθε άτομο. Η αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται ως εξής:

$$f = \sum_{i=1}^6 a_i \cdot f_i, \quad (7.7)$$

όπου f_i οι όροι του αθροίσματος που εκφράζουν περιορισμούς και a_i είναι οι συντελεστές βαρύτητας των όρων.

Ο όρος f_1 θέτει ποινή στην περίπτωση της ύπαρξης ενός μη εφικτού τμήματος της πορείας. Σε περίπτωση που ένα μέρος της πορείας βρίσκεται κάτω από τον πυθμένα, αυτό το τμήμα δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί από το όχημα. Επιπλέον σε αυτή την περίπτωση υπάρχει αυξημένη πιθανότητα σύγκρουσης με τον πυθμένα. Για να βρεθούν τα σημεία της καμπύλης που βρίσκονται κάτω από τον πυθμένα, αυτή διακριτοποιείται σε ίσα τμήματα. Ο όρος f_1 είναι το ποσοστό των διακριτών σημείων της καμπύλης (διαφορετικά από τα σημεία ελέγχου) που έχουν z συντεταγμένες μεγαλύτερες από τις z συντεταγμένες του πυθμένα. Παίρνει τιμές από 0 έως 1. Έτσι οι όροι f_1 των καμπυλών με μεγαλύτερα τμήματα κάτω από τον πυθμένα έχουν μεγαλύτερη συνεισφορά στο άθροισμα της αντικειμενικής συνάρτησης και μικρότερη πιθανότητα να περάσουν τα γονίδια τους στις επόμενες γενιές.

Ο όρος f_2 αντιπροσωπεύει τον λόγο του μήκους της καμπύλης B-Spline και του μήκους του ευθύγραμμου τμήματος με άκρα την αρχή και το τέλος της πορείας:

$$f_2 = \frac{\text{μήκος καμπύλης}}{\text{μήκος ευθύγραμμου τμήματος}} - 1 . \quad (7.8)$$

Ο f_2 θέτει ποινή σε καμπύλες με μεγάλο μήκος, παίρνει τιμές από 0 έως 1 και προστίθεται στο άθροισμα ώστε οι συντομότερες πορείες να έχουν περισσότερες πιθανότητες να δώσουν απογόνους.

Ο όρος f_3 είναι ο λόγος των διακριτών σημείων της καμπύλης που βρίσκονται έξω από μια αποδεκτή περιοχή στο X - Y επίπεδο. Ο χώρος που μπορεί να βρίσκεται η πορεία του οχήματος καθορίζεται από τον χρήστη και αποτελεί ένα περιορισμό της αποστολής. Έτσι ο όρος f_3 θέτει ποινή σε καμπύλες εκτός της περιοχής της αποστολής και παίρνει τιμές από 0 έως 1. Προστίθεται στο άθροισμα ώστε οι πορείες μέσα στην αποδεκτή περιοχή της αποστολής να έχουν περισσότερες πιθανότητες να δώσουν απογόνους.

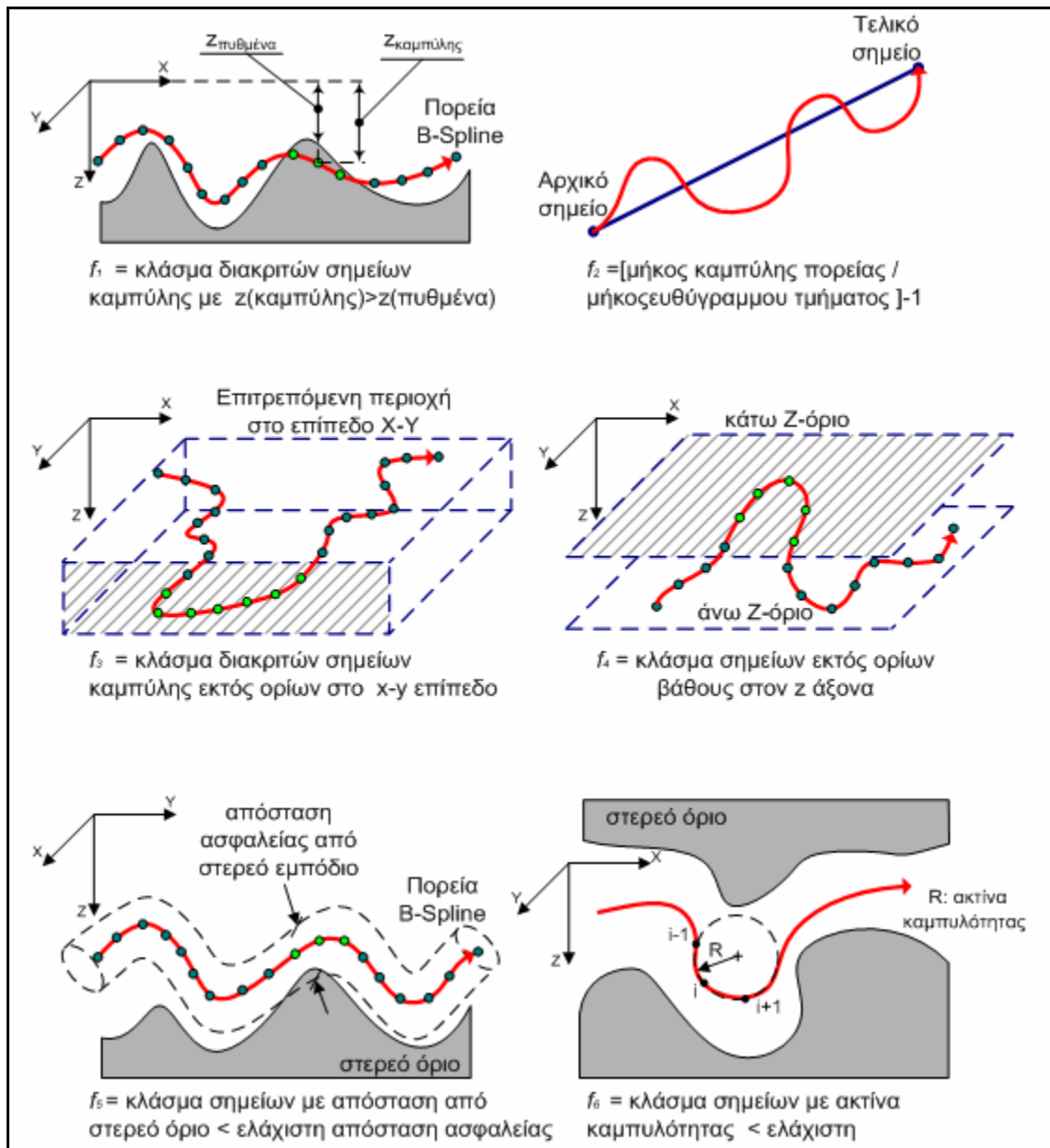
Ο όρος f_4 είναι ο λόγος των διακριτών σημείων της καμπύλης που βρίσκονται έξω από το ελάχιστο και το μέγιστο βάθος στο Z επίπεδο. Το βάθος της πορείας είναι σημαντικός περιορισμός της αποστολής και καθορίζεται από τον χρήστη. Ο όρος f_4 θέτει ποινή σε καμπύλες εκτός της περιοχής της αποστολής και παίρνει τιμές από 0 έως 1. Προστίθεται στο άθροισμα ώστε οι πορείες μέσα στα αποδεκτά όρια βάθους της αποστολής να έχουν περισσότερες πιθανότητες να δώσουν απογόνους.

Ο όρος f_5 είναι ο λόγος των διακριτών σημείων της καμπύλης που έχουν απόσταση από τον πυθμένα μικρότερη από μια ελάχιστη απόσταση ασφαλείας. Έτσι δημιουργείται ένας φαινομενικός αγωγός κατά την πορεία κίνησης του οχήματος μέσα στον οποίο δεν πρέπει να βρίσκονται στερεά εμπόδια. Η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας προδιαγράφεται από τον χρήστη και θέτει ένα όρο που μειώνει την πιθανότητα σύγκρουσης. Ο όρος f_5 θέτει ποινή σε καμπύλες που βρίσκονται πολύ κοντά στον πυθμένα και παίρνει τιμές από 0 έως 1. Προστίθεται στο άθροισμα ώστε οι πορείες κοντά στον πυθμένα να έχουν μικρότερες πιθανότητες να δώσουν απογόνους.

Ο όρος f_6 είναι ο λόγος των διακριτών σημείων της καμπύλης που έχουν ακτίνα καμπυλότητας μικρότερη από μια ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας. Αυτός ο έλεγχος γίνεται για να τεθεί ποινή στις πορείες που περιέχουν απότομες αλλαγές κατεύθυνσης που είναι δύσκολο να ακολουθήσει το όχημα. Για τον προσδιορισμό της ακτίνας καμπυλότητας σε ένα διακριτό σημείο της καμπύλης, προσδιορίζεται η ακτίνα του κύκλου που ορίζεται από το σημείο και τα 2 γειτονικά του. Η ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας έχει σχέση με την ελκτική ικανότητα του οχήματος, προδιαγράφεται από τον χρήστη σε σχέση με τις προδιαγραφές του οχήματος όπως ο ελάχιστος κύκλος στροφής.

Επιπλέον θέτει έναν όρο που μειώνει την πιθανότητα σύγκρουσης με τον πυθμένα. Ο όρος f_6 θέτει ποινή σε καμπύλες με απότομους ελιγμούς και παίρνει τιμές από 0 έως 1. Προστίθεται στο άθροισμα ώστε οι πορείες με απότομες μεταβολές κατεύθυνσης να έχουν μικρότερες πιθανότητες να δώσουν απογόνους.

Η γραφική αναπαράσταση των όρων f_i , $i = 1, \dots, 6$ της αντικειμενικής συνάρτησης φαίνεται στο Σχήμα 7-4. Οι όροι πολλαπλασιάζονται με συντελεστές βαρύτητας και το άθροισμα τους σχηματίζει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία αξιολογεί την εφικτότητα και την ποιότητα της λύσης που αντιπροσωπεύει το κάθε άτομο του πληθυσμού.



Σχήμα 7-4: Όροι αντικειμενικής συνάρτησης

7.5 Γενετικός προσδιορισμός πορείας

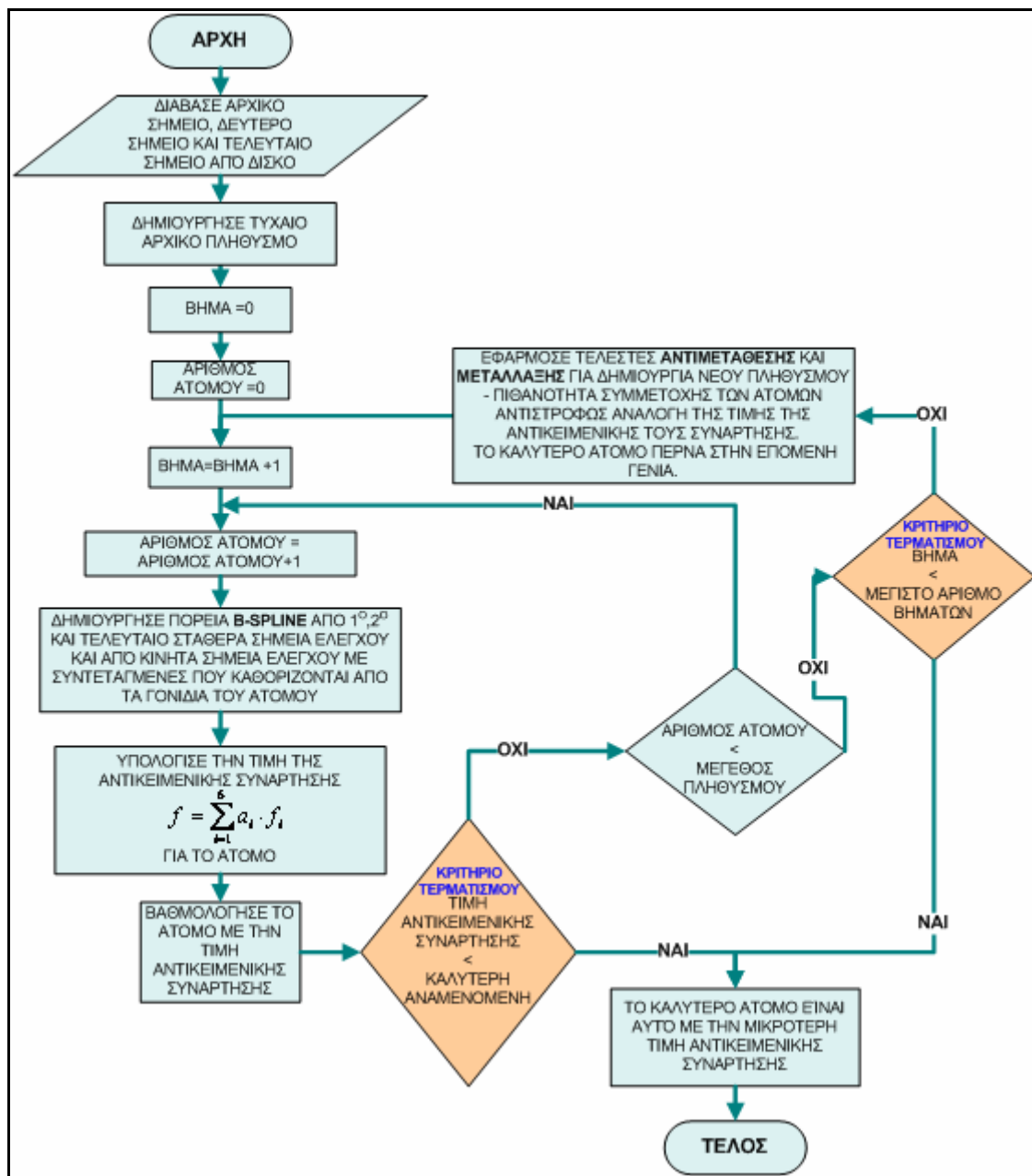
Στην αρχή του γενετικού προσδιορισμού της βέλτιστης πορείας δημιουργείται τυχαίος πληθυσμός που αποτελείται από N αριθμό ατόμων. Τα άτομα του αρχικού πληθυσμού βαθμολογούνται με την αντικειμενική συνάρτηση και αυτά με την καλύτερη απόδοση που έχουν μικρότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης, είναι πιθανότερο να επιλεγούν για να συμμετέχουν στην δημιουργία νέων ατόμων με τους τελεστές αντιμετάθεσης και μετάλλαξης με πιθανότητα ανάλογη της βαθμολογίας τους.

Η πιθανότητα επιλογής του ατόμου i του πληθυσμού για να συμμετέχει στην αναπαραγωγή νέων ατόμων είναι:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum f_i}, \quad (7.9)$$

όπου f_i είναι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του i -οστού ατόμου του πληθυσμού. Μετά την δημιουργία του νέου πληθυσμού ξεκινά νέος κύκλος με την αξιολόγηση των ατόμων του μέχρι την ολοκλήρωση ενός από τα κριτήρια τερματισμού. Το συνολικό διάγραμμα ροής του γενετικού προσδιορισμού της βέλτιστης πορείας φαίνεται στο Σχήμα 7-5.

Τα αποτελέσματα της παραπάνω διαδικασίας παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 9.



Σχήμα 7-5: Το διάγραμμα ροής του γενετικού προσδιορισμού βέλτιστης πορείας

8° Κεφάλαιο

Γενετική βελτιστοποίηση ασαφών ελεγκτών κίνησης ¹

8.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογία της γενετικής βελτιστοποίησης των ασαφών ελεγκτών κίνησης που βρίσκονται στο δεύτερο επίπεδο της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής ελέγχου, όπως αυτή περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5. Το επίπεδο ελέγχου κίνησης αποτελείται από το υποσύστημα ελέγχου ταχύτητας, το υποσύστημα ελέγχου κατεύθυνσης, το υποσύστημα ελέγχου βάθους, το υποσύστημα ελέγχου διατοχισμού και το υποσύστημα ελέγχου ρεύματος.

Ο σκοπός της γενετικής βελτιστοποίησης των ασαφών ελεγκτών κίνησης είναι να εξασφαλίσει ότι το όχημα κατά την διάρκεια της εκτέλεσης της αποστολής θα έχει ελάχιστο σφάλμα θέσης και ελάχιστη απόκλιση από τη σχεδιασμένη πορεία. Στην παρούσα προσέγγιση βελτιστοποιούνται οι συναρτήσεις συμμετοχής των εισόδων και της εξόδου των ελεγκτών κίνησης. Η γενετική βελτιστοποίηση των ασαφών ελεγκτών βασίζεται στο δυναμικό μοντέλο κίνησης συγκεκριμένου υποβρυχίου οχήματος. Όπως έχει αναλυθεί στο Κεφάλαιο 3, η ακρίβεια του δυναμικού μοντέλου κίνησης εξαρτάται από τα δεδομένα και τις υδροδυναμικές παραμέτρους του οχήματος.

¹ Τμήματα αυτού του κεφαλαίου είναι δημοσιευμένα στο:

Kanakakis V., Tsourveloudis N., “Evolutionary Path Planning and Navigation of Autonomous Underwater Vehicles”, *Proceedings of the 15th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, Athens, June 27-29, 2007.*

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται οι τροποποιήσεις που γίνονται στο επίπεδο ελέγχου κίνησης ώστε να είναι δυνατή η βελτιστοποίηση των ασαφών ελεγκτών. Επίσης περιγράφεται η μεθοδολογία της ασαφούς βελτιστοποίησης και η αντικειμενική συνάρτηση που αναπτύχθηκε.

8.2 Σχεδίαση επιπέδου ελέγχου για γενετική βελτιστοποίηση

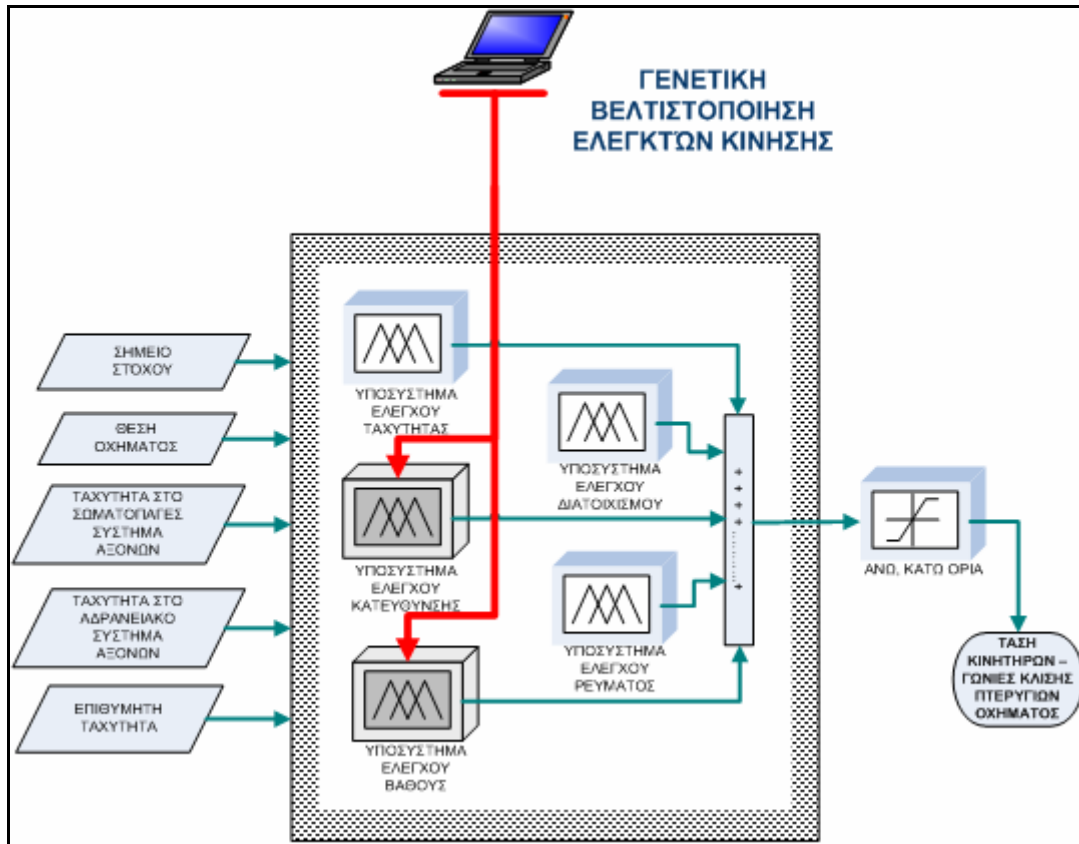
Το επίπεδο του ελέγχου κίνησης, όπως έχει αναλυθεί στο Κεφάλαιο 6 αποτελείται από πέντε υποσυστήματα ελέγχου:

1. Το *υποσύστημα ελέγχου ταχύτητας*, που παρακολουθεί και ελέγχει την ταχύτητα του οχήματος με έλεγχο των στροφών των κινητήριων ελίκων του.
2. Το *υποσύστημα ελέγχου κατεύθυνσης*, που ελέγχει την πηδαλιουχία στο οριζόντιο επίπεδο,
3. Το *υποσύστημα ελέγχου βάθους*, που ελέγχει το βάθος που βρίσκεται το όχημα με ρύθμιση της γωνίας πρόνευσης και του βάθους.
4. Το *υποσύστημα ελέγχου διατοιχισμού*, που ελέγχει τις δυναμικές παραμέτρους διατοιχιστικής κίνησης του οχήματος.
5. Το *υποσύστημα ελέγχου θαλασσίου ρεύματος*, που τροποποιεί την θέση του οχήματος ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει την ύπαρξη θαλασσίου ρεύματος.

Για την γενετική βελτιστοποίηση γίνεται τροποποίηση της σχεδίασης του επιπέδου ελέγχου κίνησης, όπως έχει παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 6, ώστε αυτό να γίνει απλούστερο χωρίς να υπάρχει σημαντική απώλεια ικανότητας ελέγχου. Για την γενετική βελτιστοποίηση επιλέγονται οι ελεγκτές γωνίας πρόνευσης και βάθους του υποσυστήματος ελέγχου βάθους και ο ελεγκτής κατεύθυνσης του επιπέδου ελέγχου κατεύθυνσης (Σχήμα 8-1). Οι ελεγκτές αυτοί είναι οι σημαντικότεροι στον έλεγχο και στην πλοήγηση του οχήματος, γιατί ελέγχουν την κατεύθυνση και το βάθος του οχήματος στον τρισδιάστατο χώρο. Τα υποσυστήματα ελέγχου βάθους και κατεύθυνσης επιλέχθηκαν για γενετική βελτιστοποίηση μετά από δοκιμές με προσομοιώσεις, όπου παρατηρήθηκε ότι η τροποποίηση των παραμέτρων των ελεγκτών ταχύτητας, διατοιχισμού και ρεύματος δεν έχει μεγάλη επίδραση στο σφάλμα θέσης που προκύπτει. Επιπλέον, με τον περιορισμό των παραμέτρων που βελτιστοποιούνται, μειώνεται δραστικά ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος. Για να επιτευχθεί η γενετική βελτιστοποίηση των υποσυστημάτων βάθους και κατεύθυνσης, η σχεδίαση των ασαφών ελεγκτών που περιλαμβάνουν απλουστεύεται και ενοποιείται όπως περιγράφεται παρακάτω.

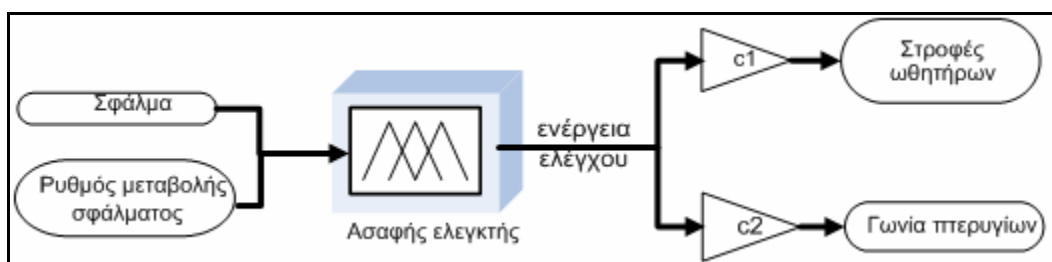
Οι ελεγκτές βάθους και γωνίας πρόνευσης του *υποσυστήματος ελέγχου βάθους*, ελέγχουν τις γωνίες των πτερυγίων κλίσης και τις τάσεις των κινητήρων των ωθητήρων, που καθορίζουν την κατακόρυφη θέση του οχήματος και την γωνία πρόνευσης στο επίπεδο $X-Z$. Το υποσύστημα

ελέγχου κατεύθυνσης περιλαμβάνει τον ασαφή ελεγκτή κατεύθυνσης που ελέγχει τις γωνίες των πτερυγίων κλίσης και τις τάσεις των κινητήρων των ωθητήρων που καθορίζουν την γωνία κατεύθυνσης του οχήματος στο επίπεδο $X-Y$.



Σχήμα 8-1: Επίπεδο ελέγχου κίνησης με γενετική βελτιστοποίηση ασαφών ελεγκτών κίνησης.

Οι τρεις συγκεκριμένοι ασαφείς ελεγκτές έχουν παρόμοια δομή, (Σχήμα 8-2) με εισόδους το σφάλμα (κατακόρυφης θέσης, γωνίας πρόνευσης ή γωνίας κατεύθυνσης) και τον ρυθμό μεταβολής σφάλματος και έξοδο μια μεταβλητή ενέργειας ελέγχου, η οποία ανάλογα με το όχημα και τους επενεργητές που διαθέτει, μπορεί να πολλαπλασιαστεί με κατάλληλους συντελεστές c_1 και c_2 και να μετασχηματιστεί σε εντολές τάσης κινητήρων ή σε εντολές γωνίας πτερυγίων κατά περίπτωση.



Σχήμα 8-2: Ενοποιημένη δομή ασαφών ελεγκτών βάθους, πρόνευσης και κατεύθυνσης.

Στους ελεγκτές πρόνευσης και βάθους, όπως φαίνονται στο Κεφάλαιο 6 στην πιο αναπτυγμένη τους μορφή, υπάρχει και μια τρίτη είσοδος που είναι η πραγματική γωνία πρόνευσης του οχήματος. Επίσης στον ελεγκτή γωνίας πρόνευσης υπάρχει και τέταρτη είσοδος που είναι η απόσταση από τον στόχο. Οι επιπλέον αυτές εισοδοί υπάρχουν για να αποφεύγεται η λειτουργία του οχήματος σε περιοχές κοντά στην ανωμαλία αναπαράστασης με γωνίες Euler που είναι για $\theta = \pm\pi/2$ [103].

Οι εισοδοί των ελεγκτών έχουν λεκτικές μεταβλητές:

1. Σφάλμα [μεγάλο αρνητικό, αρνητικό, μηδέν, θετικό, μεγάλο θετικό]
2. Ρυθμός μεταβολής σφάλματος [αρνητικός, κανονικός, θετικός]

Οι λεκτικές μεταβλητές της εξόδου των ελεγκτών είναι:

1. Ενέργεια ελέγχου [μεγάλη αρνητική, αρνητική, μηδέν, θετική, μεγάλη θετική]

Με βάση την ομοιόμορφη δομή των ασαφών ελεγκτών βάθους, πρόνευσης και κατεύθυνσης σχεδιάστηκε μια βάση κανόνων που εφαρμόζεται και στους τρεις ελεγκτές. Η ομοιόμορφη βάση κανόνων δίνεται στον Πίνακα 8-1.

		Σφάλμα		
		αρνητικό	μηδέν	θετικό
Ρυθμός μεταβολής σφάλματος	αρνητικό	αρνητική	αρνητική	μηδέν
	μηδέν	αρνητική	μηδέν	θετική
	θετικός	μηδέν	θετική	θετική

Πίνακας 8-1: Ενοποιημένη βάση κανόνων ελεγκτών κίνησης.

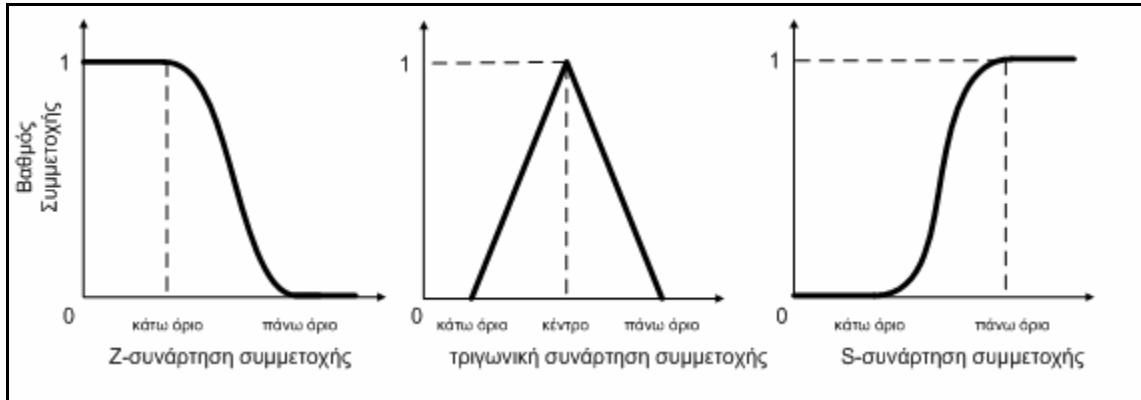
Η επίδραση της επιπλέον εισόδου Γωνία πρόνευσης με λεκτικές μεταβλητές

Γωνία πρόνευσης [εκτός ορίου αρνητική, κανονική, εκτός ορίου θετική],

των ελεγκτών πρόνευσης και βάθους γίνεται με την προσθήκη της εισόδου αυτής στους ελεγκτές πρόνευσης και βάθους, που ενεργοποιεί κανόνες διόρθωσης της γωνίας στην περίπτωση που αυτή είναι εκτός ορίου αρνητική ή εκτός ορίου θετική, μη λαμβανομένων υπόψη των υπολοίπων εισόδων. Οι συναρτήσεις συμμετοχής των λεκτικών μεταβλητών της εισόδου Γωνία πρόνευσης βελτιστοποιούνται γενετικά. Έτσι η γωνία πρόνευσης διορθώνεται έως να αποκτήσει τιμή που χαρακτηρίζεται κανονική. Όταν η γωνία πρόνευσης του οχήματος είναι κανονική τότε η είσοδος Γωνία πρόνευσης δεν λαμβάνεται υπόψη και το συμπέρασμα προκύπτει με χρήση της ενοποιημένης βάσης κανόνων.

Οι συναρτήσεις συμμετοχής των λεκτικών μεταβλητών των εισόδων και της εξόδου τροποποιούνται ώστε να είναι τύπου S, τριγωνικές και τύπου Z, όπως περιγράφονται στην εργαλειοθήκη ασαφούς λογικής της Matlab [232].

Οι παραπάνω συναρτήσεις συμμετοχής επιλέγονται για την απλότητα τους και η μορφή τους φαίνεται στο Σχήμα 8-3.



Σχήμα 8-3: Μορφή συναρτήσεων συμμετοχής για γενετική βελτιστοποίηση.

Για τον ορισμό μιας Z-συνάρτησης συμμετοχής απαιτούνται δύο τιμές για το κάτω και το πάνω όριο αντίστοιχα, για τον ορισμό μιας τριγωνικής συνάρτησης συμμετοχής απαιτούνται τρεις τιμές για το κάτω όριο, το κέντρο και το πάνω όριο, ενώ για τον ορισμό μιας S-συνάρτησης συμμετοχής απαιτούνται δύο τιμές για το κάτω όριο και το πάνω όριο αντίστοιχα. Οι τιμές που ορίζουν τις συναρτήσεις συμμετοχής βελτιστοποιούνται με την γενετική διαδικασία.

Ο πληθυσμός των ατόμων που βελτιστοποιούνται αποτελείται από χρωμοσώματα τα οποία αναπαριστούν τις τιμές που ορίζουν τις συναρτήσεις συμμετοχής. Ο συνολικός αριθμός των συναρτήσεων συμμετοχής για τους ελεγκτές γωνίας πρόνευσης, βάθους και κατεύθυνσης που βελτιστοποιούνται είναι 5 Z-συναρτήσεις συμμετοχής, 5 S-συναρτήσεις συμμετοχής και 11 τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής. Για τον ορισμό των παραπάνω συναρτήσεων συμμετοχής χωρίς κανένα περιορισμό, απαιτούνται $5 \cdot 2 + 5 \cdot 2 + 11 \cdot 3 = 53$ αριθμητικές τιμές ή αριθμός χρωμοσωμάτων, όπου 2, 2, 3, ο αριθμός των σημείων που απαιτούνται για τον πλήρη ορισμό 5 Z-μορφής, 5 S-μορφής και 11 τριγωνικών συναρτήσεων συμμετοχής αντίστοιχα. Ο αριθμός αυτός οδηγεί σε μεγάλους πληθυσμούς και κατά συνέπεια αυξάνεται ο υπολογιστικός χρόνος. Για να μειωθεί ο αριθμός των χρωμοσωμάτων λαμβάνεται υπόψη η συμμετρία του ελεγκτή, όπως εξηγείται στην συνέχεια.

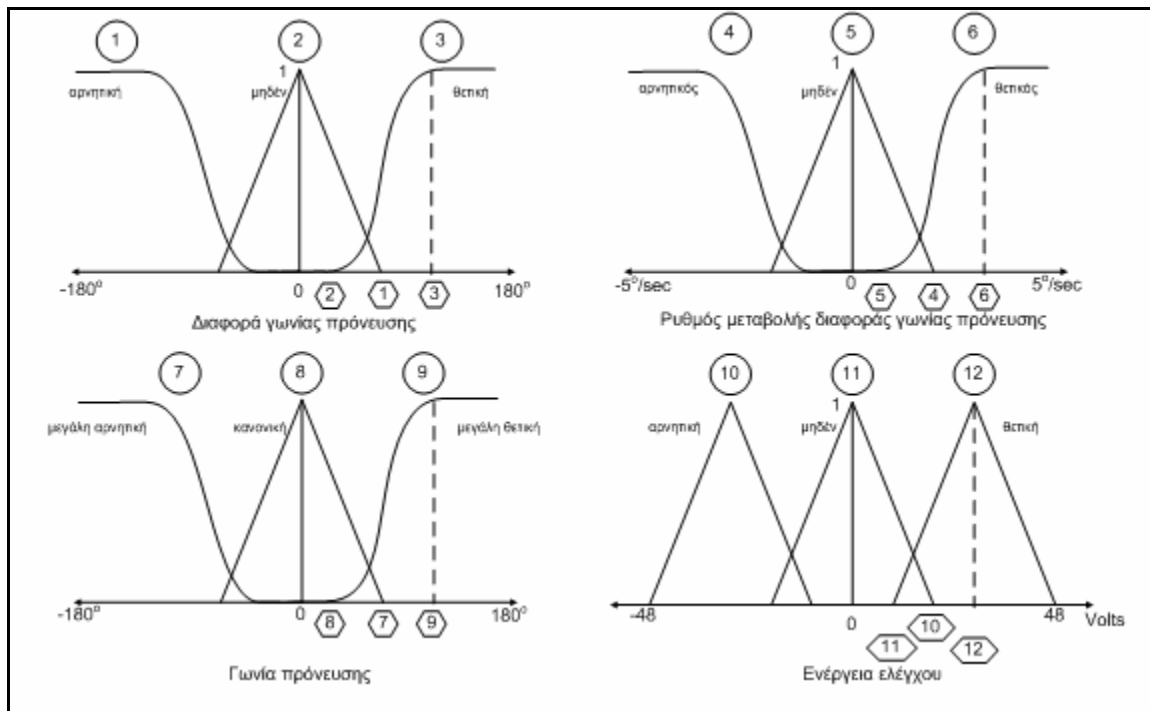
Για να πλοηγηθεί ένα αυτόνομο υποβρύχιο όχημα σε ένα ομοιόμορφο μέσο όπως είναι το νερό, με τυχαίες διαταραχές, απαιτούνται συμμετρικοί ελεγκτές με συμμετρικές συναρτήσεις συμμετοχής. Έτσι οι στροφές δεξιά / αριστερά και πάνω/κάτω αντιμετωπίζονται με τον ίδιο τρόπο από τους ελεγκτές και δεδομένης της συμμετρίας του οχήματος στο $X-Z$ επίπεδο θα

επιτυγχάνονται με τον ίδιο τρόπο. Επίσης οι εντολές κίνησης σε διαφορετικές κατευθύνσεις έχουν συνεισφορά στην εξέλιξη του ελεγκτή ανεξάρτητα της κατεύθυνσης κίνησης. Οι τιμές των χρωμοσωμάτων που εξελίσσονται από την γενετική διαδικασία κινούνται εντός εύρους που καθορίζεται από τον χρήστη και χωρίς να βλάπτεται η γενικότητα της προσέγγισης.

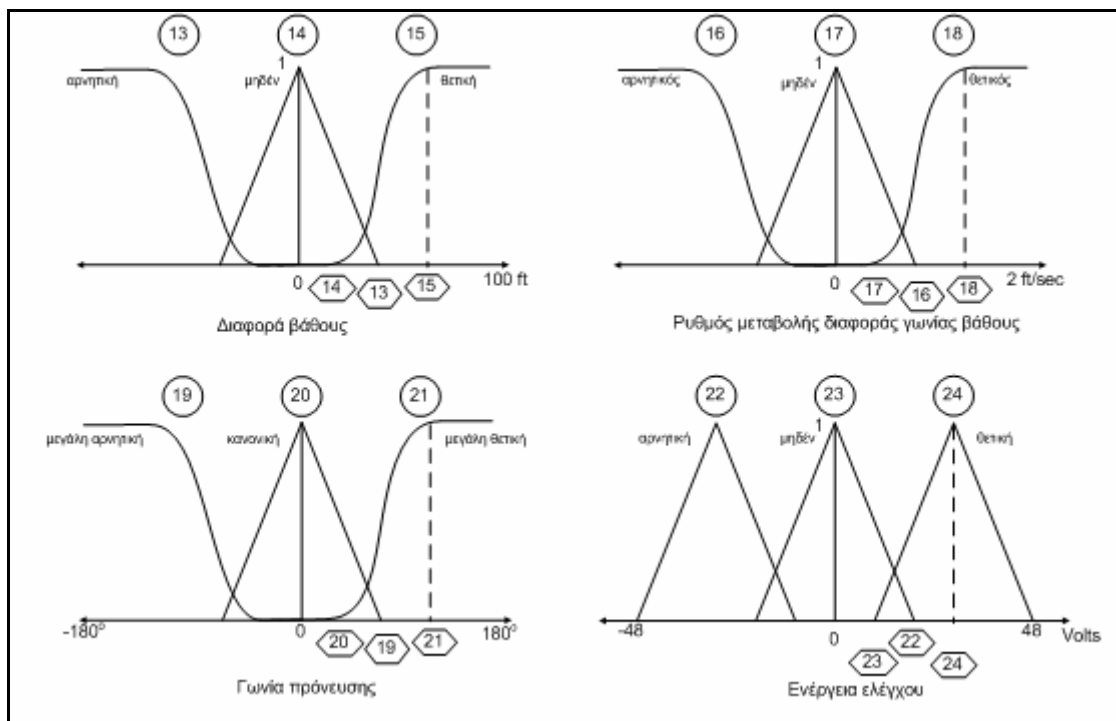
Ο καθορισμός των χρωμοσωμάτων για τον ελεγκτή γωνίας πρόνευσης φαίνεται στο Σχήμα 8-4. Στα Σχήματα 8-5 και 8-6 φαίνεται ο καθορισμός χρωμοσωμάτων για τους ελεγκτές βάθους και γωνίας κατεύθυνσης αντίστοιχα, όπου σε κύκλο σημειώνεται ο αριθμός της συναρτήσεως συμμετοχής, ενώ σε εξάγωνο σημειώνεται ο αριθμός του χρωμοσώματος που περιγράφει τα σημεία των συναρτήσεων συμμετοχής.

Από τα Σχήματα 8-5 έως 8-6 μπορεί να παρατηρηθεί ότι με την χρήση της υπόθεσης των συμμετρικών συναρτήσεων συμμετοχής για τις εισόδους και τις εξόδους των ασαφών ελεγκτών κίνησης, ο απαιτούμενος αριθμός χρωμοσωμάτων μειώνεται από 53 σε 33. Αυτό έχει επίδραση στην μείωση του μεγέθους του πληθυσμού και στον χρόνο που απαιτείται για σύγκλιση.

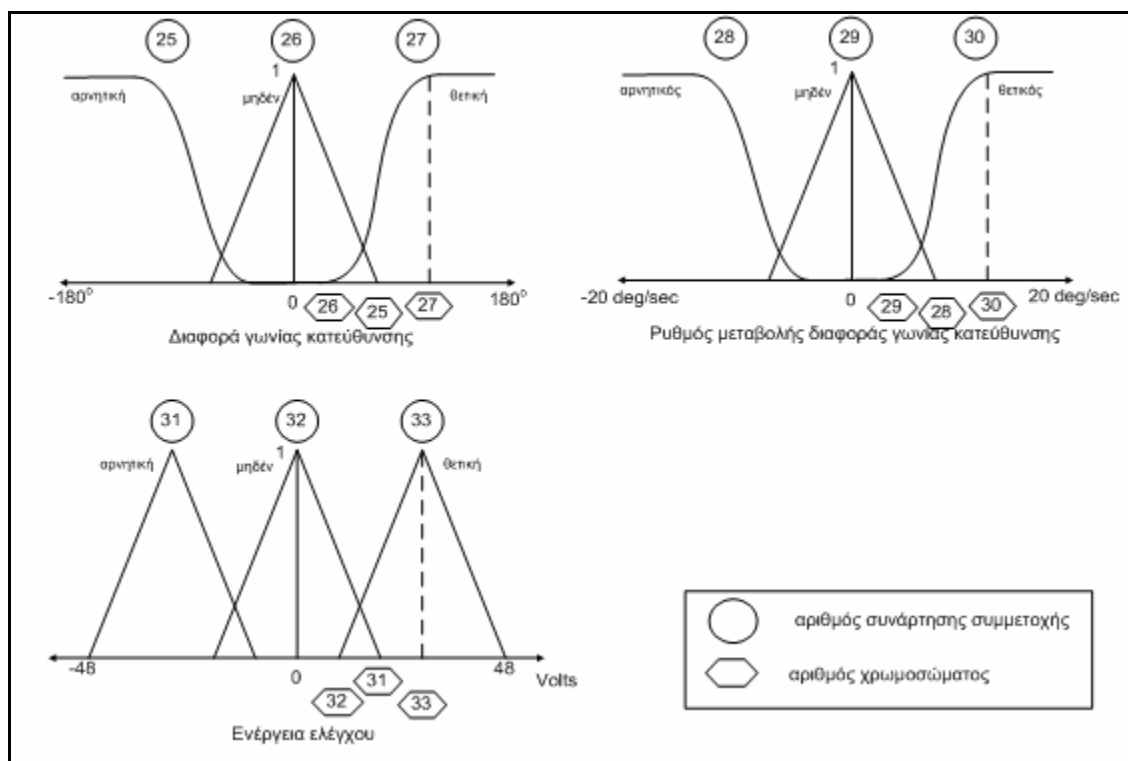
Στην επόμενη παράγραφο αναλύεται η μεθοδολογία της γενετικής βελτιστοποίησης των συναρτήσεων συμμετοχής των ελεγκτών κίνησης.



Σχήμα 8-4: Καθορισμός χρωμοσωμάτων για τον ελεγκτή γωνίας πρόνευσης



Σχήμα 8-5: Καθορισμός χρωμοσωμάτων για τον ελεγκτή βάθους



Σχήμα 8-6: Καθορισμός χρωμοσωμάτων για τον ελεγκτή γωνίας κατεύθυνσης

8.3 Γενετική βελτιστοποίηση ασαφών ελεγκτών κίνησης

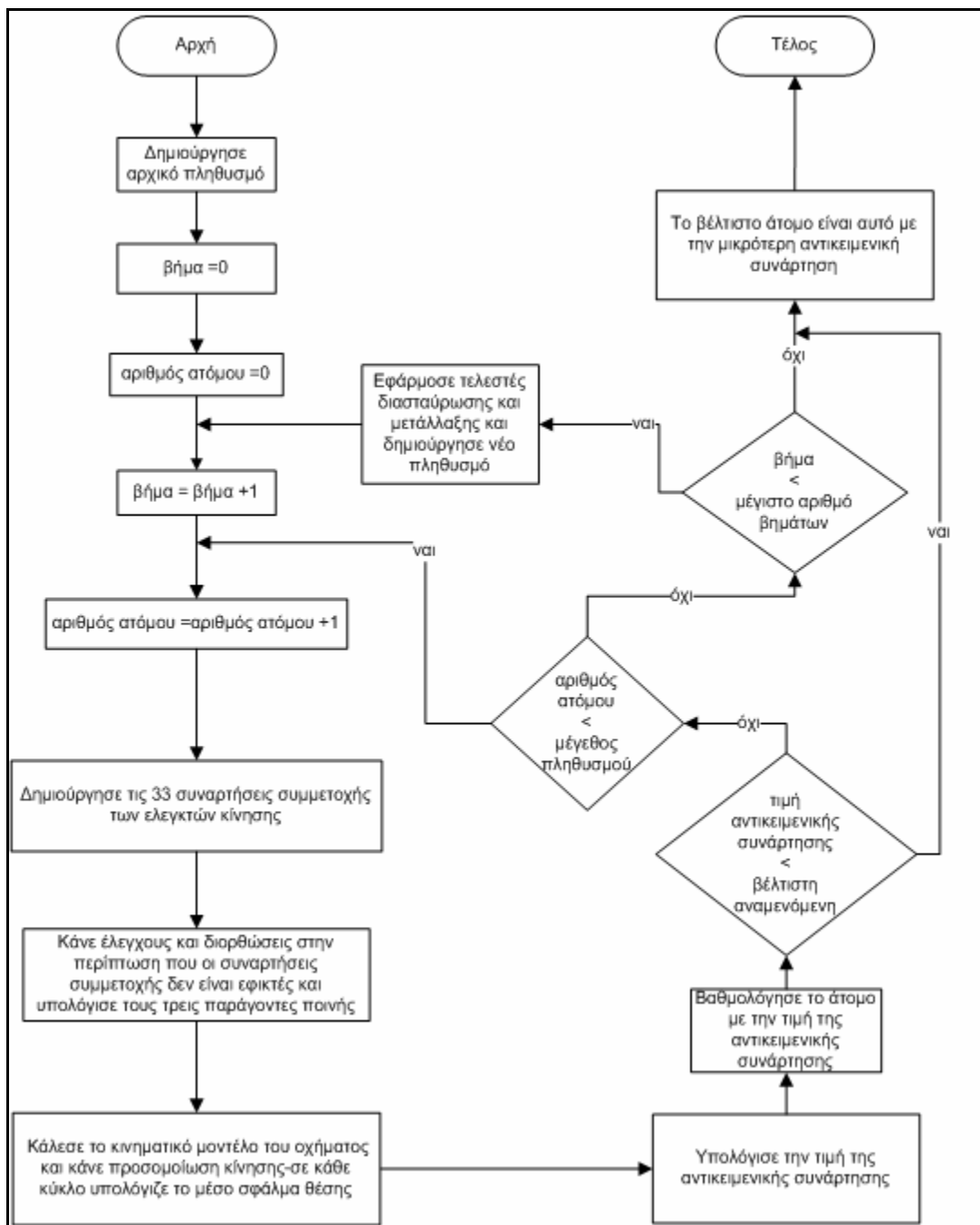
Τα άτομα που βελτιστοποιούνται αποτελούνται από 33 χρωμοσώματα. Με τις τιμές των 33 χρωμοσωμάτων ενός ατόμου και την υπόθεση της συμμετρίας των συναρτήσεων συμμετοχής μπορούν να αναπαραχθούν οι Z, S και οι τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής των ελεγκτών κίνησης ενός υποβρυχίου οχήματος. Οι ελεγκτές κίνησης που προκύπτουν για κάθε άτομο βαθμολογούνται ως προς την επίτευξη ικανοποιητικού ελέγχου από μια αντικειμενική συνάρτηση. Έτσι ο αλγόριθμος γενετικής βελτιστοποίησης όπως έχει ήδη παρουσιαστεί στο κεφάλαιο σχεδιασμού πορείας, μπορεί να προσδιορίσει το άτομο με την ελάχιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, που αναπαριστά τους ελεγκτές κίνησης με τον βέλτιστο έλεγχο του οχήματος.

Το διάγραμμα ροής του γενετικού προσδιορισμού των βέλτιστων ελεγκτών κίνησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 8-7. Στην αρχή δημιουργείται τυχαίος πληθυσμός με τιμές μέσα σε προεπιλεγμένα όρια. Οι τιμές των χρωμοσωμάτων του πληθυσμού ελέγχονται για το αν μπορούν να αναπαραστήσουν συναρτήσεις συμμετοχής και εάν απαιτείται διορθώνονται κατάλληλα. Για να τιμωρηθούν τα άτομα τα οποία για να αναπαραστήσουν εφικτές συναρτήσεις συμμετοχής, απαιτείται να διορθωθούν, υπάρχουν τρεις μεταβλητές – δείκτες, που αυξάνονται κάθε φορά που γίνεται μια διόρθωση. Η ύπαρξη τριών διαφορετικών δεικτών δικαιολογείται από το γεγονός ότι κάθε ασυμβατότητα που εντοπίζεται και διορθώνεται, όπως περιγράφεται παρακάτω, διαφέρει ως προς την σπουδαιότητα όσον αφορά τον βαθμό στον οποίο τα χρωμοσώματα ενός ατόμου δεν παριστάνουν εφικτές συναρτήσεις συμμετοχής.

Μετά τις διορθώσεις οι τιμές των χρωμοσωμάτων αναπαριστούν συμβατές συναρτήσεις συμμετοχής των ελεγκτών κίνησης. Ακολούθως προσομοιώνεται η κίνηση του οχήματος στην προκαθορισμένη βέλτιστη πορεία και προσδιορίζεται το σφάλμα ελέγχου, όπως περιγράφεται σε επόμενη παράγραφο. Η τιμή του σφάλματος ελέγχου αυξάνεται με τους δείκτες διόρθωσης και έτσι προκύπτει μια τελική αντικειμενική τιμή για το κάθε άτομο, που εκφράζει τον βαθμό επίτευξης ικανοποιητικού ελέγχου.

Αφού βαθμολογηθούν όλα τα άτομα δημιουργείται ο νέος πληθυσμός με τους τελεστές αντιμετάθεσης και μετάλλαξης. Η πιθανότητα εφαρμογής των δύο τελεστών ορίζεται από τον χρήστη με σκοπό την ταχύτερη σύγκλιση. Τα άτομα συμμετέχουν στον σχηματισμό των ατόμων του νέου πληθυσμού με πιθανότητα αντιστρόφως ανάλογη της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης.

Ο αλγόριθμος επαναλαμβάνεται μέχρι την επίτευξη μιας προκαθορισμένης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης ή μέχρι την ολοκλήρωση προκαθορισμένου αριθμού επαναλήψεων.



Σχήμα 8-7: Διάγραμμα ροής γενετικού προσδιορισμού βέλτιστων ελεγκτών κίνησης

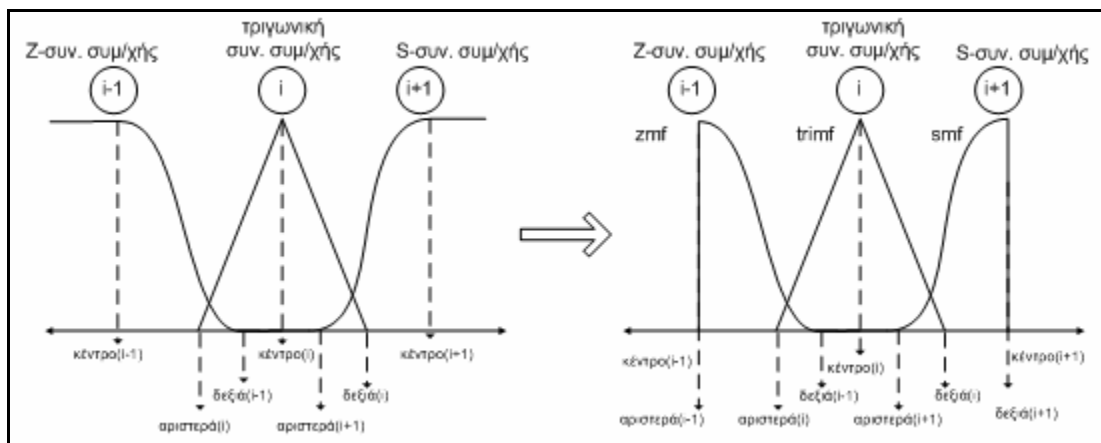
8.4 Αντικειμενική συνάρτηση – προσομοίωση κίνησης και μέτρηση σφάλματος θέσης

Ένα σημαντικό μέρος της γενετικής βελτιστοποίησης είναι η αντικειμενική συνάρτηση που αξιολογεί το κάθε άτομο με ένα βαθμό. Ο βαθμός αυτός πρέπει να ελαχιστοποιείται καθώς ο

πληθυσμός εξελίσσεται σε νεότερες γενιές. Για να βελτιστοποιηθούν οι συναρτήσεις συμμετοχής των ελεγκτών κίνησης έχει σχεδιαστεί και προγραμματιστεί μια αντικειμενική συνάρτηση. Στο Παράρτημα Β παρουσιάζεται ο κώδικας MATLAB για την αντικειμενική συνάρτηση.

8.4.1 Έλεγχοι και διορθώσεις συναρτήσεων συμμετοχής

Η είσοδος της αντικειμενικής συνάρτησης είναι τα χρωμοσώματα του κάθε ατόμου που αντιστοιχούν στις 33 συναρτήσεις συμμετοχής των ελεγκτών πρόνευσης, βάθους και κατεύθυνσης. Στην αρχή δημιουργούνται <αριστερά>, <κέντρο> και <δεξιά> διανύσματα διαστάσεων 33x1. Για την αναπαράσταση των Z και S συναρτήσεων συμμετοχής η τιμή <αριστερά> και <δεξιά> αντίστοιχα εξισώνεται με την τιμή <κέντρο>, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8-8.



Σχήμα 8-8: Αντιστοίχιση τιμών <αριστερά>, <κέντρο> και <δεξιά> για τις συναρτήσεις συμμετοχής των ελεγκτών κίνησης

Στην συνέχεια γίνονται έλεγχοι για να διασφαλιστεί ότι οι τιμές των διανυσμάτων <αριστερά>, <κέντρο> και <δεξιά> αναπαριστούν εφικτές συναρτήσεις συμμετοχής. Αυτό είναι απαραίτητο δεδομένου ότι οι τιμές των χρωμοσωμάτων δημιουργούνται από τους τελεστές αντιμετάθεσης και μετάλλαξης και μπορούν να περιέχουν ασυμβατότητες που δεν έχουν νόημα σε συναρτήσεις συμμετοχής. Όταν εντοπίζεται μια ασυμβατότητα διορθώνεται και προστίθεται μια μονάδα σε έναν από τους παράγοντες λάθους: *PENALTYFLAG1*, *PENALTYFLAG2* και *PENALTYFLAG3*. Ο πρώτος παράγοντας λάθους ο *PENALTYFLAG1* αυξάνεται όταν τα χρωμοσώματα περιέχουν ασυμβατότητες που δεν καθιστούν εφικτό τον σχηματισμό συναρτήσεων συμμετοχής. Στην περίπτωση αυτή δεν μπορεί να προσομοιωθεί η κίνηση του οχήματος αν δεν διορθωθούν αυτές οι ασυμβατότητες. Στο Σχήμα 8-9 φαίνονται οι έλεγχοι για ασυμβατότητες που δεν επιτρέπουν την αναπαράσταση εφικτών συναρτήσεων συμμετοχής και οι διορθώσεις που γίνονται μετά την αύξηση του παράγοντα λάθους *PENALTYFLAG1*.

Οι έλεγχοι που γίνονται για τον παράγοντα λάθους *PENALTYFLAG1* είναι τέσσερις και εκτελούνται με την εξής σειρά για όλα τα i από 1 έως 33 τρίγωνα που έχουν σχηματιστεί:

Έλεγχος 1: Αν $\text{κέντρο}(i) > \text{κέντρο}(i+1)$, τότε

$$\text{κέντρο}(i+1) = \text{κέντρο}(i+1) + [\text{κέντρο}(i) - \text{κέντρο}(i+1)]$$

$$\text{κέντρο}(i) = \text{κέντρο}(i) - [\text{κέντρο}(i) - \text{κέντρο}(i+1)] .$$

Έλεγχος 2: Αν $\text{αριστερά}(i) > \text{κέντρο}(i)$, τότε $\text{αριστερά}(i) = \text{κέντρο}(i)$.

Έλεγχος 3: Αν $\text{κέντρο}(i) > \text{δεξιά}(i)$, τότε $\text{κέντρο}(i) = \text{δεξιά}(i)$.

Έλεγχος 4: Αν $\text{αριστερά}(i) > \text{δεξιά}(i)$, τότε $\text{δεξιά}(i) = \text{αριστερά}(i)$,

Ο παράγοντας λάθους *PENALTYFLAG1* αυξάνεται κατά μια μονάδα κάθε φορά που επαληθεύεται μια σύγκριση. Οι διορθώσεις που γίνονται μπορούν να εξασφαλίσουν ότι για κάθε διάταξη των χρωμοσωμάτων θα δημιουργηθούν εφικτές συναρτήσεις συμμετοχής και θα γίνει υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης με προσομοίωση της κίνησης του οχήματος.

Οι άλλοι δύο παράγοντες *PLENALTFLAG2* και *PENALTYFLAG3* αυξάνονται όταν οι συναρτήσεις συμμετοχής μπορούν μεν να σχηματιστούν αλλά περιέχουν αδύναμα σημεία (όπως μεγάλη επικάλυψη και κενά διαστήματα). Στην περίπτωση αυτή δεν γίνονται διορθώσεις αλλά το άτομο τιμωρείται με αύξηση των παραγόντων *PLENALTFLAG2* και *PENALTYFLAG3* που προστίθενται σταθμισμένοι στο σφάλμα θέσης που υπολογίζεται με την προσομοίωση κίνησης.

Οι έλεγχοι για τον παράγοντα λάθους *PENALTYFLAG2* είναι:

Έλεγχος 1: $\text{αριστερά}(i) < \text{αριστερά}(i-1)$,

Έλεγχος 2: $\text{δεξιά}(i) > \text{δεξιά}(i+1)$,

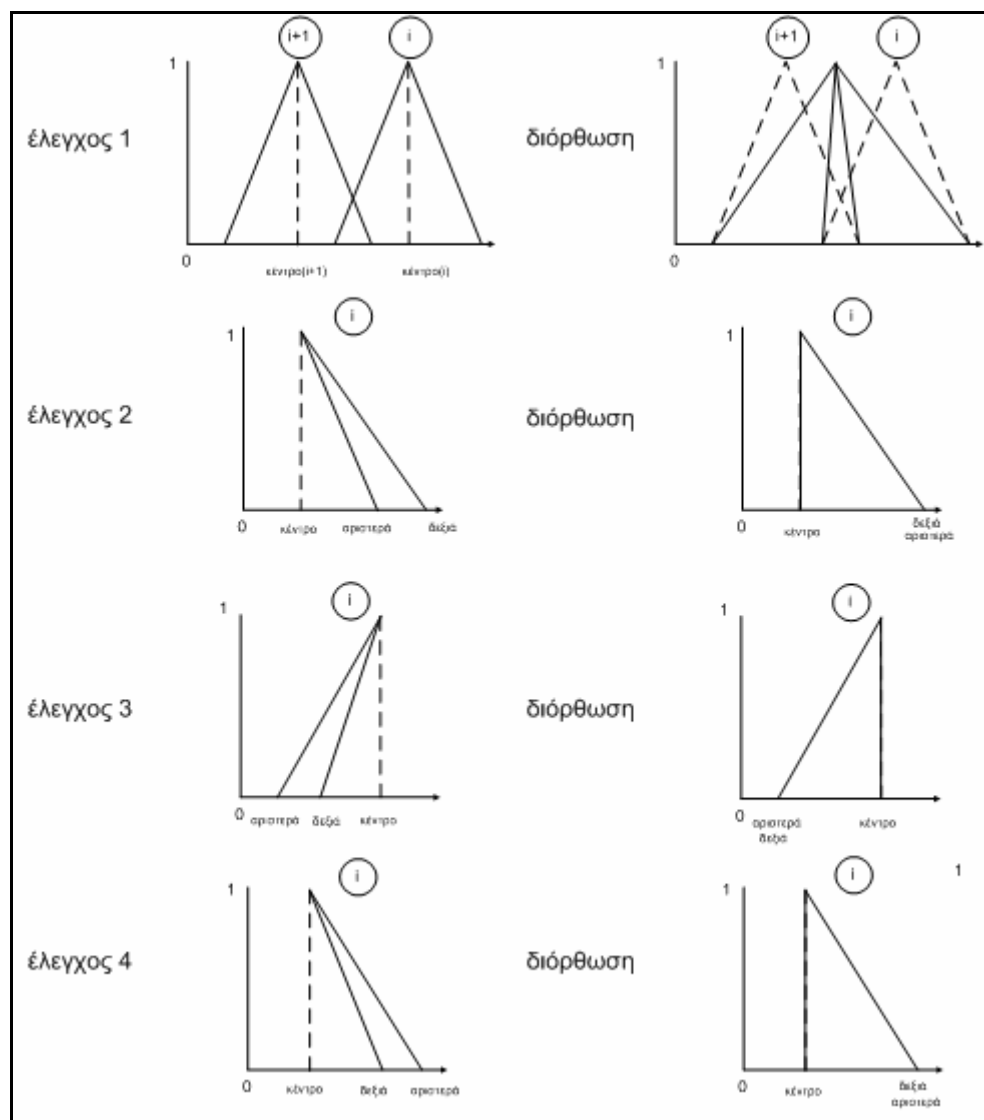
Έλεγχος 3: $\text{αριστερά}(i+1) \leq \text{δεξιά}(i-1)$.

Οι έλεγχοι για τον παράγοντα λάθους *PENALTYFLAG3* είναι:

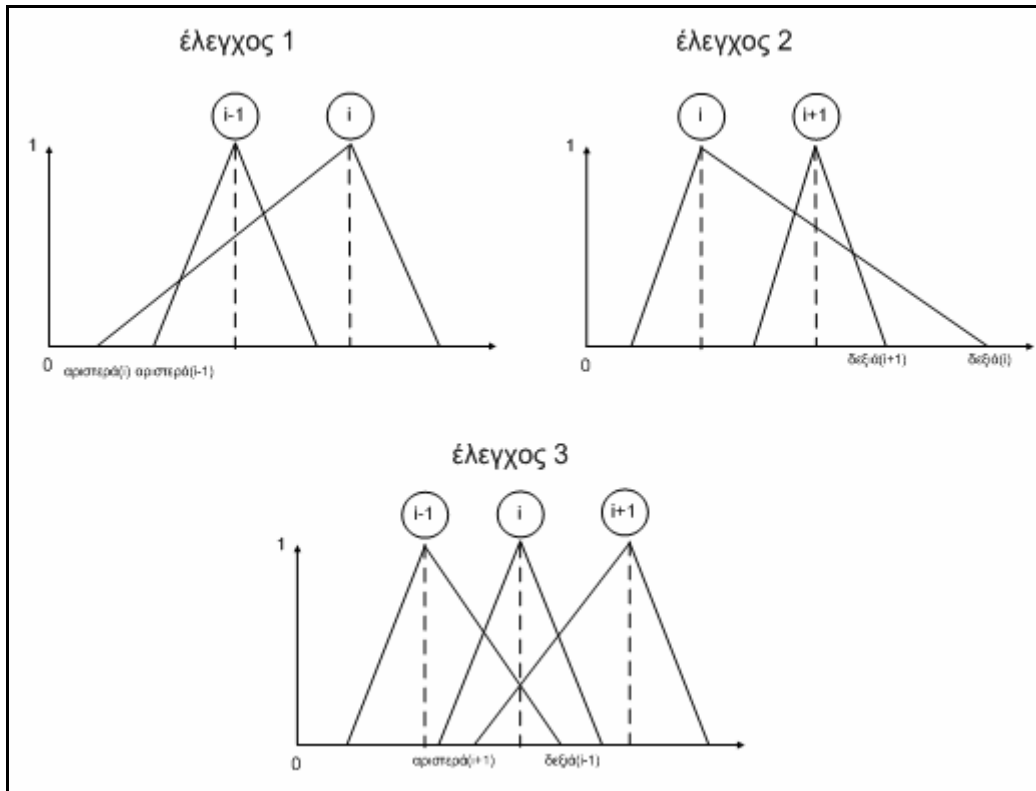
Έλεγχος 1: $\text{αριστερά}(i) > \text{δεξιά}(i-1)$,

Έλεγχος 2: $\text{δεξιά}(i) < \text{αριστερά}(i+1)$.

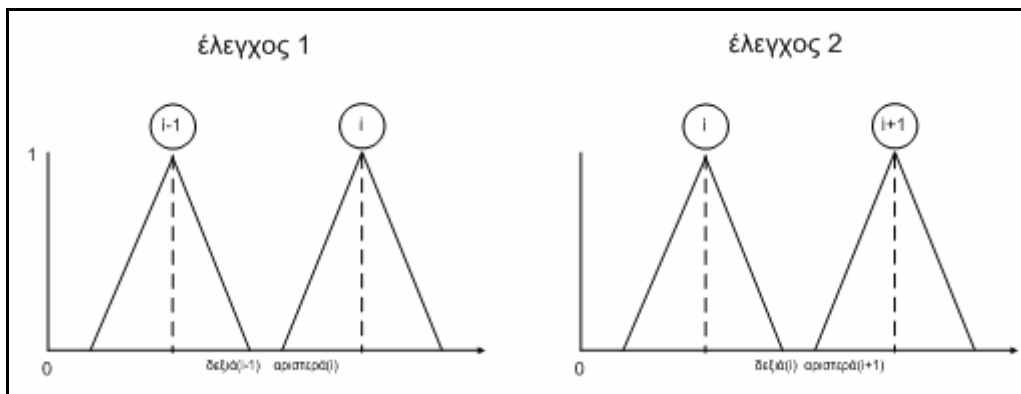
Οι παράγοντες *PENALTYFLAG2* και *PENALTYFLAG3* αυξάνονται κατά μια μονάδα κάθε φορά που επαληθεύεται μια σύγκριση ενός ελέγχου. Οι έλεγχοι για τους παράγοντες λάθους *PLENALTFLAG2* και *PENALTYFLAG3* φαίνονται στα σχήματα 8-10 και 8-11 αντίστοιχα.



Σχήμα 8-9: Έλεγχοι και διορθώσεις για τον παράγοντα λάθους *PENALTYFLAG1*



Σχήμα 8-10: Έλεγχοι για τον παράγοντα λάθους PENALTYFLAG2



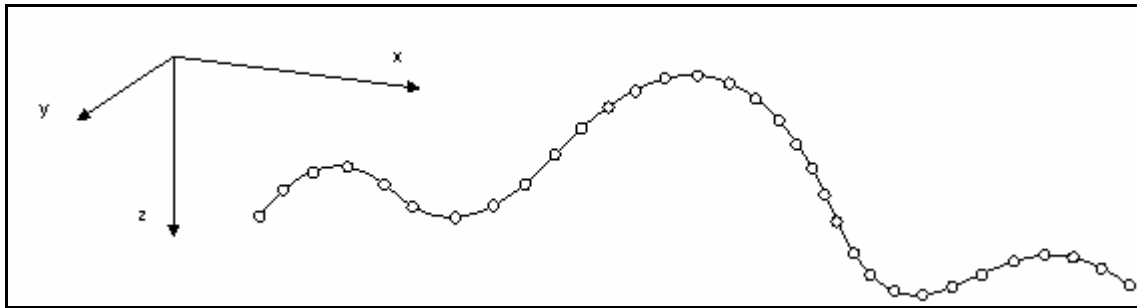
Σχήμα 8-11: Έλεγχοι για τον παράγοντα λάθους PENALTYFLAG3

8.4.2 Προσομοίωση κίνησης και μέτρηση σφάλματος θέσης

Μετά την αντιστοίχιση των τιμών των χρωμοσωμάτων του κάθε ατόμου σε εφικτές συναρτήσεις συμμετοχής που σχηματίζουν τους ελεγκτές κίνησης, ακολουθεί η αξιολόγηση του ατόμου μέσω της προσομοίωσης της κίνησης του οχήματος στη βέλτιστη πορεία και μέτρηση του σφάλματος θέσης. Το σφάλμα θέσης υπολογίζεται ως η διαφορά θέσης του οχήματος σε κάθε χρονική στιγμή

από την βέλτιστη πορεία, ενώ η κίνηση του οχήματος προσομοιώνεται με βάση το δυναμικό μοντέλο κίνησης.

Η βέλτιστη πορεία που έχει υπολογισθεί και εκφράζεται μαθηματικά ως μια πολυπαραμετρική καμπύλη B-Spline, διακριτοποιείται όπως φαίνεται στο Σχήμα 8-12 και το όχημα προσομοιώνεται σε πλοήγηση ώστε να επιτύχει τα διαδοχικά σημεία στόχου. Το κάθε σημείο στόχου θεωρείται ότι έχει επιτευχθεί όταν το όχημα βρίσκεται μέσα σε ένα κύκλο με ακτίνα που ονομάζεται *ακτίνα αποδοχής*. Όταν επιτευχθεί ένα σημείο στόχου τότε το όχημα στοχεύει το επόμενο διακριτό σημείο της πορείας. Το πλήθος των διακριτών σημείων που τροφοδοτούνται στο όχημα ως σημεία στόχου προσδιορίζεται ώστε αυτά να είναι αρκετά πυκνά και να σχηματίζουν με ακρίβεια την βέλτιστη πορεία. Στην περίπτωση που τα σημεία στόχου είναι πολύ πυκνά και σε απόσταση συγκρίσιμη με την ακτίνα αποδοχής, το όχημα τα επιτυγχάνει χωρίς να έχει αλλάξει την κατεύθυνση πλοήγησής του, οπότε παρουσιάζεται αυξημένο σφάλμα θέσης.



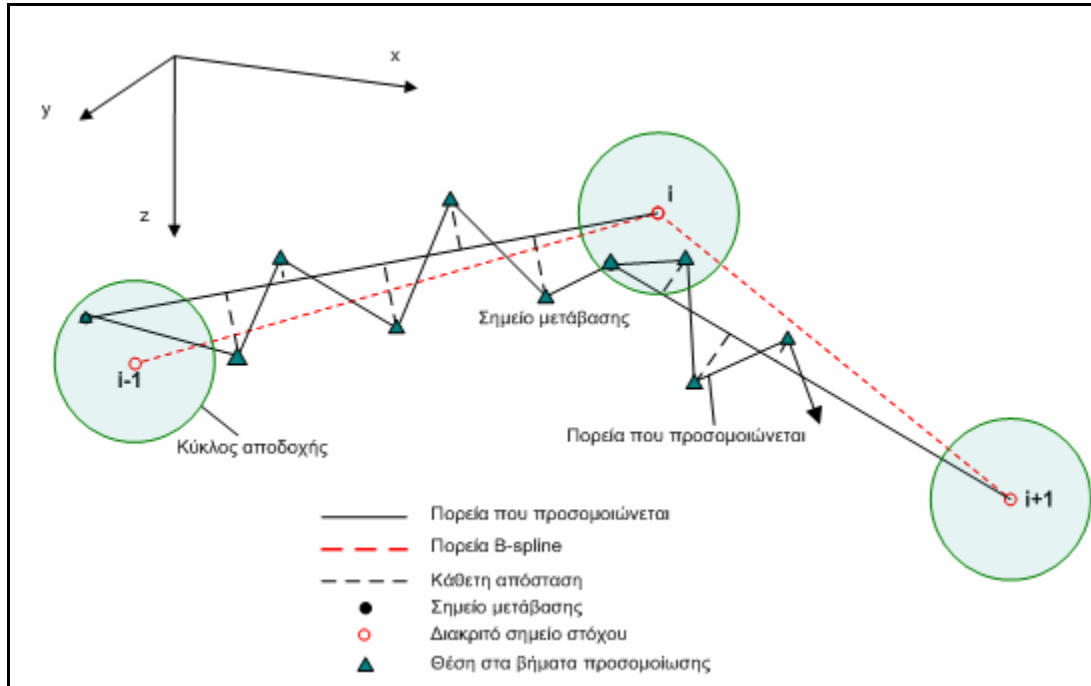
Σχήμα 8-12: Διακριτοποίηση βέλτιστης πορείας

Κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, σε κάθε κύκλο επιστρέφεται η θέση του οχήματος σε καρτεσιανές συντεταγμένες και υπολογίζεται η απόσταση του οχήματος από το σημείο στόχο. Εάν αυτή είναι μικρότερη από την ακτίνα του κύκλου αποδοχής, οπότε το σημείο στόχος θεωρείται ότι έχει επιτευχθεί, η θέση του οχήματος χαρακτηρίζεται ως σημείο μετάβασης. Δεδομένου ότι το όχημα τώρα έχει ως σημείο στόχου το επόμενο διακριτό σημείο της καμπύλης B-Spline, μπορεί να υπολογισθεί σε κάθε κύκλο προσομοίωσης, η κάθετη απόσταση της θέσης του οχήματος από την ευθεία που ενώνει το σημείο μετάβασης και το σημείο στόχου. Το άθροισμα των καθέτων αποστάσεων σε όλη την διάρκεια της προσομοίωσης μέχρι να επιτευχθεί το τελικό σημείο στόχου και να ολοκληρωθεί η πορεία του οχήματος στην προσχεδιασμένη τροχιά διαιρείται με τον αριθμό των κύκλων προσομοίωσης και έτσι υπολογίζεται το μέσο σφάλμα θέσης του οχήματος:

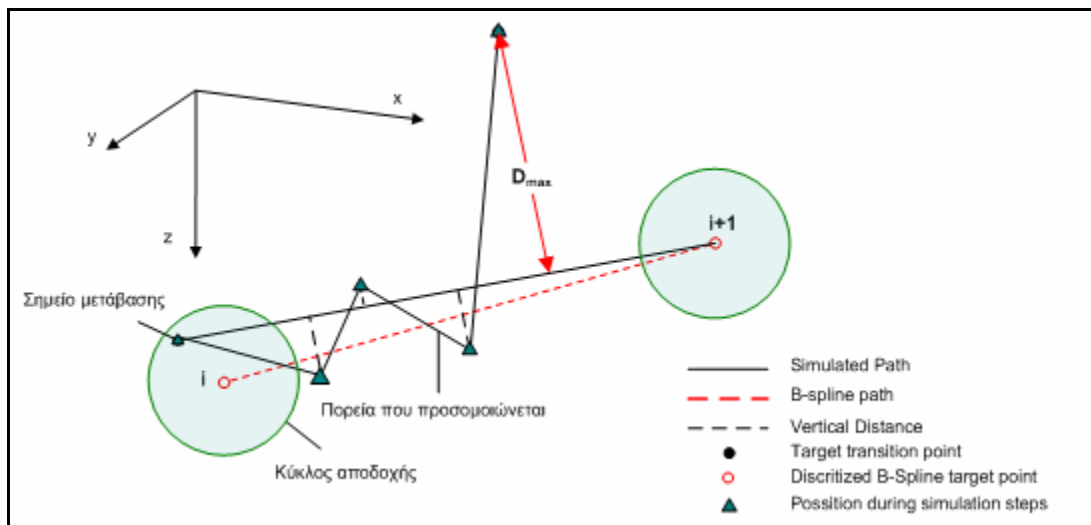
$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n}, \quad (8.1)$$

όπου D είναι η κάθετη απόσταση από την ευθεία σημείο μετάβασης – σημείο στόχου και n ο αριθμός των κύκλων προσομοίωσης.

Η μεθοδολογία της μέτρησης σφάλματος θέσης παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 8-13.



Σχήμα 8-13: Υπολογισμός σφάλματος θέσης



Σχήμα 8-14: Έλεγχος για μεγάλο σφάλμα θέσης

Εάν κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, η κάθετη απόσταση ξεπεράσει μία προκαθορισμένη μέγιστη τιμή, (Σχήμα 8-14), τότε το όχημα έχει βρεθεί σε υπερβολικά μεγάλη κάθετη απόσταση από την γραμμή σημείο μετάβασης – σημείο στόχου. Αυτό σημαίνει ότι ο έλεγχος δεν είναι

ακριβής και ότι το όχημα δεν μπορεί να ακολουθήσει με ακρίβεια την προκαθορισμένη βέλτιστη πορεία. Σε αυτή την περίπτωση για εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου οι υποψήφιες συναρτήσεις συμμετοχής τιμωρούνται με πρόσθεση της τιμής του κατωφλίου που ξεπεράστηκε στη μέση απόσταση από την βέλτιστη πορεία και η προσομοίωση διακόπτεται:

$$AN : D > D_{\max} \text{ TOTE : } \bar{D} = \bar{D} + D_{\max}, \text{ τέλος προσομοίωσης.} \quad (8.2)$$

Για να τιμωρηθούν άτομα τα οποία παριστάνουν συναρτήσεις συμμετοχής που δίνουν ικανοποιητικό έλεγχο του οχήματος αλλά παρουσιάζουν τοπικά μεγάλη απόκλιση σε κάποιο σημείο της πορείας, κρατιέται στην μνήμη το μέγιστο της κάθετης απόκλισης και προστίθεται ως βαθμός ποινής $P(i_k)$ για το k -οστό άτομο i_k η μέγιστη κάθετη απόκλιση στην μέση κάθετη απόκλιση :

$$P(i_k) = \bar{D} + D_{\max}. \quad (8.3)$$

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό ενός ατόμου που ανταμείβει η αντικειμενική συνάρτηση είναι ο αριθμός των διακριτών σημείων της καμπύλης πορείας που έχουν επιτύχει οι ελεγκτές κίνησης. Το όχημα όταν διαθέτει ακριβείς ελεγκτές θα μπορεί να επιτύχει όλα τα σημεία της πορείας. Στο τέλος της προσομοίωσης αν έχουν επιτευχθεί k από τα n διακριτά σημεία της πορείας, στο μέσο υπολογισθέν κάθετο σφάλμα θέσης προστίθεται ο όρος:

$$P_1 = C_1 \cdot \frac{n-k}{n}, \quad (8.4)$$

όπου C_1 είναι μια σταθερά ποινής. Έτσι αν έχουν επιτευχθεί όλα τα σημεία το άτομο δεν τιμωρείται ενώ στην περίπτωση που δεν επιτυγχάνεται κανένα σημείο το άτομο τιμωρείται με C_1 .

Τέλος τιμωρούνται τα άτομα που αναπαριστούν ελεγκτές που απαιτούν μεγάλο χρόνο μέχρι να επιτευχθεί το τελικό σημείο στόχου του οχήματος. Αν η μέγιστη ταχύτητα του οχήματος είναι v_{\max} , ο χρόνος t_1 που απαιτείται ώστε το όχημα να διανύσει την γνωστή πορεία με την μέγιστη ταχύτητα είναι:

$$t_1 = \frac{L}{v_{\max}}, \quad (8.5)$$

όπου L είναι το συνολικό μήκος της βέλτιστης πορείας.

Εάν μέχρι το τέλος της προσομοίωσης έχει περάσει χρόνος t προστίθεται βαθμός ποινής P_2 που ορίζεται ως εξής:

$$P_2 = \begin{cases} 0, & t < t_1 \\ C_2 \cdot \frac{t-t_1}{t_2-t_1}, & t_1 \leq t < t_2, \\ C_2, & t \geq t_2 \end{cases} \quad (8.6)$$

όπου C_2 είναι μια σταθερά ποινής και $t_2 = 2 \cdot t_1$.

Σύμφωνα με τα παραπάνω η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης αποτελείται από το μέσο κάθετο σφάλμα θέσης του οχήματος κατά την διάρκεια της προσομοίωσης κίνησης του, η ελαχιστοποίηση του οποίου είναι το ζητούμενο της γενετικής διαδικασίας βελτιστοποίησης των συναρτήσεων συμμετοχής των ελεγκτών κίνησης. Το μέσο κάθετο σφάλμα θέσης προσυζάνεται όταν το όχημα βρεθεί σε μεγάλη απόσταση από την βέλτιστη πορεία, όταν απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα για την ολοκλήρωση της αποστολής, ή όταν δεν μπορεί να επιτευχθεί όλη η πορεία αλλά μόνο ένα τμήμα της.

Συνολικά η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

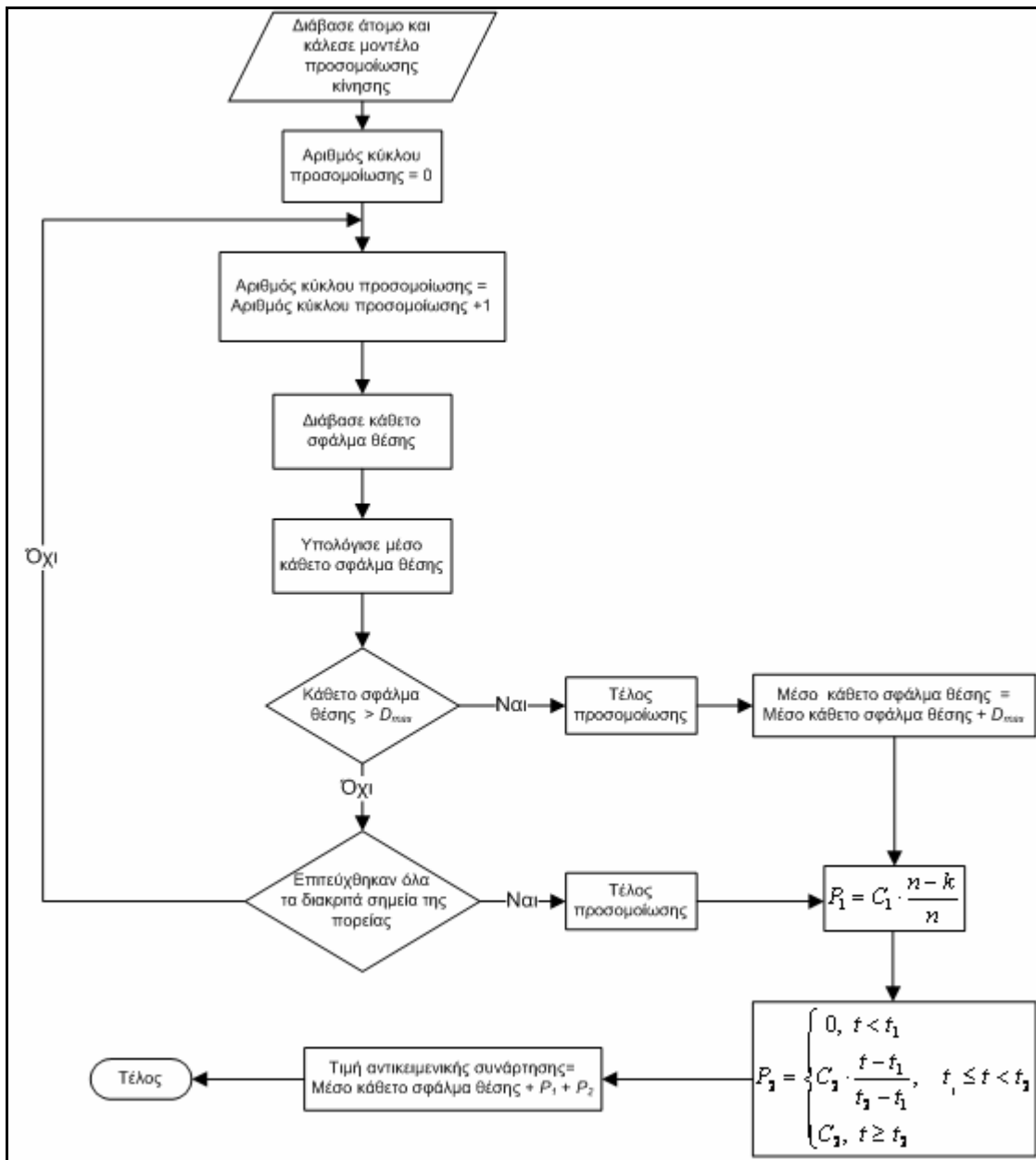
$$\text{Εάν } : D \leq D_{\max} \rightarrow P(i_k) = \bar{D} + P_1 + P_2,$$

$$\text{Εάν } : D > D_{\max} \rightarrow P(i_k) = \bar{D} + P_1 + P_2, \bar{D} = \bar{D} + D_{\max}, \text{ και τέλος προσομοίωσης,} \\ \text{όπου:}$$

$$P_1 = C_1 \cdot \frac{n-k}{n} \quad (8.7)$$

$$P_2 = \begin{cases} 0, & t < t_1 \\ C_2 \cdot \frac{t-t_1}{t_2-t_1}, & t_1 \leq t < t_2 \\ C_2, & t \geq t_2 \end{cases}$$

Σε μορφή διαγράμματος ροής η λειτουργία της αντικειμενικής συνάρτησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 8-15.



Σχήμα 8-15: Λειτουργικό διάγραμμα αντικειμενικής συνάρτησης

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται αποτελέσματα με προσομοιώσεις της κίνησης συγκεκριμένου υποβρυχίου οχήματος για το οποίο υπάρχει ακριβές μαθηματικό μοντέλο. Δημιουργούνται βέλτιστοι ελεγκτές για συγκεκριμένες πορείες οι οποίοι αξιολογούνται και συγκρίνονται με ευρετικούς ελεγκτές που δημιουργήθηκαν για το ίδιο όχημα [30].

9° Κεφάλαιο

Αποτελέσματα προσομοιώσεων

9.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν για τον έλεγχο της προτεινόμενης υβριδικής αρχιτεκτονικής ελέγχου και πλοήγησης αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων που παρουσιάζεται στα Κεφάλαια 6, 7 και 8 και περιλαμβάνει τα επίπεδα ελέγχου κίνησης, αποφυγής εμποδίων, σχεδιασμού τροχιάς και γενετικής βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης. Οι προσομοιώσεις έγιναν με το δυναμικό μοντέλο του αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος Phoenix του Naval Postgraduate School (NPS), Monterey, Καλιφόρνια, ΗΠΑ [39]. Έγιναν προσομοιώσεις για έλεγχο του επιπέδου ελέγχου κίνησης, για έλεγχο των επιπέδων ανάγνωσης ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγής σύγκρουσης και για έλεγχο του επιπέδου σχεδιασμού πορείας. Στις παραγράφους αυτού του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα κυριότερα διαγράμματα για μία από κάθε κατηγορία δοκιμής προσομοίωσης. Επίσης παρουσιάζονται πίνακες σύγκρισης των αποτελεσμάτων που προέκυψαν. Το υπόλοιπο κεφάλαιο είναι οργανωμένο ως εξής:

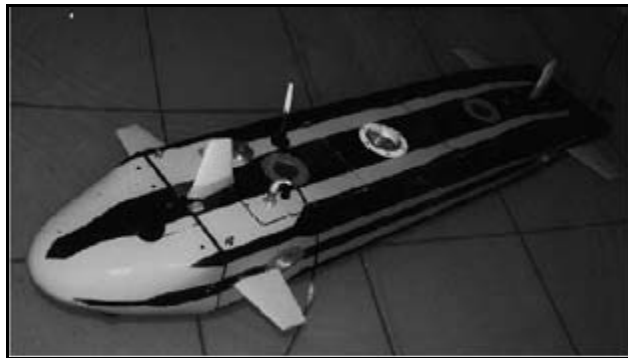
Στην παράγραφο 9.2 παρουσιάζεται το όχημα NPS-Phoenix που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις του παρόντος κεφαλαίου. Στην παράγραφο 9.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν για να ελεγχθεί η απόδοση του επιπέδου ελέγχου κίνησης του

πολυεπιπέδου ελεγκτή κίνησης της παραγράφου 6.5. Στην παράγραφο 9.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν για να ελεγχθούν τα επίπεδα ανάγνωσης αισθητήρων και αποφυγής σύγκρουσης. Στην παράγραφο 9.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που έγιναν για να ελεγχθεί το επίπεδο γενετικού σχεδιασμού πορείας. Στην παράγραφο 9.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και οι προσομοιώσεις που έγιναν για τον έλεγχο του επιπέδου βελτιστοποίησης των ασαφών ελεγκτών κίνησης.

9.2 Το αυτόνομο υποβρύχιο όχημα NPS-Phoenix

Για τις προσομοιώσεις επιλέχθηκε το υποβρύχιο όχημα Phoenix του Naval Postgraduate School (NPS). Το όχημα NPS-Phoenix (Σχήμα 9-1) επιλέχθηκε διότι οι προδιαγραφές, οι διαστάσεις και το ακριβές υδροδυναμικό του μοντέλο έχουν περιγραφεί και έχουν δημοσιευτεί. Το Phoenix είναι το μοναδικό όχημα που περιγράφεται με μεγάλη ακρίβεια στη βιβλιογραφία [39].

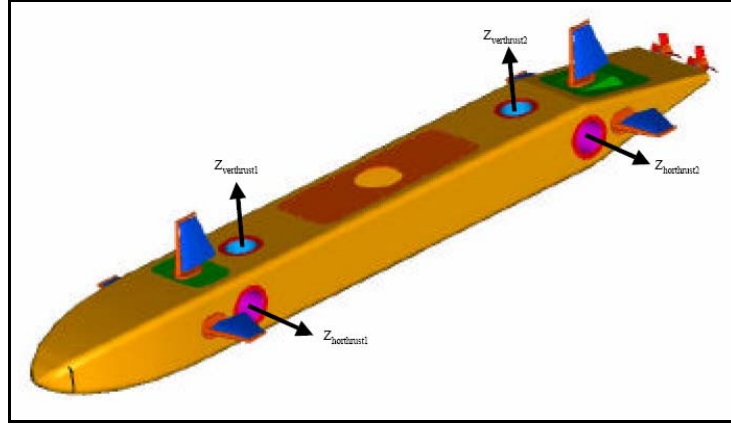
Για την προσομοίωση της κίνησης ενός αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος είναι ουσιώδης η ύπαρξη ενός ακριβούς δυναμικού και υδροδυναμικού μοντέλου, δεδομένου ότι στην περίπτωση που οι υδροδυναμικοί συντελεστές δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, συνήθως συμβαίνουν αριθμητικά λάθη κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Για αυτόν τον λόγο η κατάστρωση ακριβών υδροδυναμικών μοντέλων για τα υπάρχοντα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα αποτελεί ξεχωριστό πεδίο έρευνας [223].



Σχήμα 9-1: Το αυτόνομο υποβρύχιο όχημα NPS-Phoenix

Το αυτόνομο υποβρύχιο όχημα NPS-Phoenix είναι κατάλληλο για έρευνα σε ανοικτή θάλασσα σε μικρά βάθη. Έχει μήκος 7,3 ft και ουδέτερη άντωση. Για τον έλεγχο της γωνίας κατεύθυνσης και της πλευρικής μετατόπισης στον άξονα Y , είναι εφοδιασμένο με δύο ζεύγη επιφανειών ελέγχου, κάθετα τοποθετημένων, (τέσσερα πτερύγια) και δύο οριζόντιους κινητήρες ώσης σε οχετούς μέσα στο πρωραίο και στο πρυμναίο τμήμα της γάστρας. Για τον έλεγχο της γωνίας πρόνευσης και της κατακόρυφης μετατόπισης στον άξονα Z , είναι εφοδιασμένο με δύο ζεύγη επιφανειών ελέγχου, οριζόντια τοποθετημένων, (τέσσερα πτερύγια) και δύο κατακόρυφους κινητήρες ώσης σε οχετούς μέσα στο πρωραίο και στο πρυμναίο τμήμα της γάστρας. Ο έλεγχος της ταχύτητας στον άξονα X

γίνεται με δύο έλικες τοποθετημένες στο πρυμναίο τμήμα, οι οποίες μπορούν επίσης να δημιουργούν έτσι και ροπή αλλαγής γωνίας κατεύθυνσης. Οι επιφάνειες και οι κινητήρες ελέγχου φαίνονται στο Σχήμα 9-2 και περιγράφονται στο [234].



Σχήμα 9-2: Επιφάνειες και κινητήρες ελέγχου του NPS-Phoenix

Το κέλυφος του NPS-Phoenix είναι κατασκευασμένο από αλουμίνιο και το μέγιστο βάθος είναι 20 ft (6,1 m). Η μέγιστη ταχύτητα είναι 2 ft/sec. Το όχημα χρησιμοποιεί ένα ζεύγος συσσωρευτών μολύβδου που του δίνουν ενεργειακή αυτονομία για 90-120 min.

Η προσομοίωση της κίνησης του υποβρύχιου οχήματος γίνεται σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο 3.4. Αρχικά οι εξισώσεις κίνησης γράφονται στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων:

$$\mathbf{M} \cdot \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \mathbf{B}(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{b}_{\text{ελέγχου}}, \quad (9.1)$$

Όπου $\mathbf{v} = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T$ το διάνυσμα ταχυτήτων στο σωματοπαγές σύστημα αξόνων,

$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{veh} + \mathbf{M}_A$, ο πίνακας μάζας του οχήματος,

$\mathbf{C} = \mathbf{C}_{veh} + \mathbf{C}_A(\mathbf{v})$, ο πίνακας αδρανειακών όρων και δυνάμεων τριβής

$\mathbf{D}(\mathbf{v})$, ο πίνακας των δυνάμεων απόσβεσης,

$\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$, το διάνυσμα δυνάμεων βαρύτητας και η άνωση και

$\mathbf{B}(\mathbf{v})$, είναι ο πίνακας μετασχηματισμού του διανύσματος ελέγχου $\mathbf{b}_{\text{ελέγχου}}$ στο διάνυσμα $\boldsymbol{\tau}_{\text{ελέγχου}}$.

Με βάση την εξίσωση (9.1) και την επίδραση των επιφανειών και των κινητήρων ελέγχου $\mathbf{B}(\mathbf{v}) \cdot \mathbf{b}_{\text{ελέγχου}}$ υπολογίζεται η επιτάχυνση, η οποία ολοκληρώνεται για να υπολογισθεί η ταχύτητα και η διαφορά θέσης (μετατόπιση).

Για την προσομοίωση είναι απαραίτητο να είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά του οχήματος που είναι οι πίνακες M , $C(v)$, $D(v)$ και $g(\eta)$.

Οι συντελεστές των πινάκων M , $C(v)$, $D(v)$ και $g(\eta)$ για το υποβρύχιο όχημα NPS-Phoenix δίνονται στην βιβλιογραφία στο [39]. Στους συντελεστές που δίνονται στο [39] έγιναν μικρές αλλαγές για να διασφαλιστεί ότι ο πίνακας πρόσθετης μάζας είναι συμμετρικός και ότι τα στοιχεία εκτός της διαγωνίου είναι μικρότερα από τα στοιχεία που βρίσκονται πάνω στην διαγώνιο. Οι τιμές των χαρακτηριστικών του NPS-Phoenix δίνονται στον πίνακα 9-1.

$mass = 13.52$	Μάζα οχήματος (lbs)
$density = 1.99$	Πυκνότητα νερού (slugs/ft ³)
$length = 7.302$	Μήκος οχήματος (ft)
$i_x=2.7$	Ροπή αδρανείας περί τον διαμήκη άξονα (ft lb sec ²)
$i_y=42$	Ροπή αδρανείας περί τον εγκάρσιο άξονα (ft lb sec ²)
$i_z=45$	Ροπή αδρανείας περί τον κάθετο άξονα (ft lb sec ²)
$x_g = 0.01$	Διαμήκης θέση κέντρου βάρους (ft)
$y_g = 0.0$	Εγκάρσια θέση κέντρου βάρους (ft)
$z_g = 0.089$	Κατακόρυφη θέση κέντρου βάρους (ft)
$x_b = 0.01$	Διαμήκης θέση κέντρου άντωσης (ft)
$y_b = 0.0$	Εγκάρσια θέση κέντρου άντωσης (ft)
$z_b = 0.0$	Κατακόρυφη θέση κέντρου άντωσης (ft)

Πίνακας 9-1: Τιμές μεταβλητών υποβρυχίου οχήματος NPS-Phoenix

Αλλάζοντας τις τιμές των όρων πρόσθετης μάζας: $Y_f = 0.00$ και $N_f = 0.00$ (προτεινόμενες τιμές στο [39]: $Y_f = -1,78E - 1$ και $N_f = -1.78E - 3$) και κρατώντας όλες τις άλλες τιμές των σταθερών και των υδροδυναμικών παραγώγων προκύπτει ο πίνακας μάζας και πρόσθετης μάζας:

$$[M] = \begin{bmatrix} 14.6124 & 0 & 0 & 0 & 2.4066 & 0 \\ 0 & 26.8075 & 0 & -2.4066 & 0 & 0.2704 \\ 0 & 0 & 50.0509 & 0 & 6.8863 & 0 \\ 0 & -1.2033 & 0 & 7.6573 & 0 & 0 \\ 1.2033 & 0 & 7.0215 & 0 & 171.0958 & 0 \\ 0 & 0.1352 & 0 & 0 & 0 & 54.7080 \end{bmatrix}. \quad (9.2)$$

Οι υδροδυναμικές παράγωγοι και οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται είναι σταθεροί και δεν μεταβάλλονται με τον αριθμό Reynolds, οπότε δεν λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της μεταβολής της ταχύτητας. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι ο πίνακας μάζας μεταβάλλεται όταν η κατανομή μάζας του οχήματος αλλάζει σε περιπτώσεις ερματισμού δεξαμενών ή μετακίνησης βαρών (πχ. σε μετακίνηση βάρους για έλεγχο της γωνίας πρόνευσης [234], [235]).

Επίσης στις προσομοιώσεις και στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο δεν λήφθηκε υπόψη η δυναμική των επενεργητών και των κινητήρων του οχήματος. Οι στροφές των ελίκων και οι γωνίες των πτερυγίων που παράγουν οι ασαφείς ελεγκτές κίνησης τροφοδοτούνται

στο δυναμικό μοντέλο χωρίς μοντελοποίηση της δυναμικής απόκρισης του πραγματικού συστήματος κινητήρας-άξονας-έλικα ή επενεργητής-πτερύγιο. Αυτό έγινε για λόγους υπολογιστικής απλούστευσης και αποφυγής εισόδου εσφαλμένων υπολογισμών δεδομένου ότι δεν ήταν γνωστά λεπτομερή κατασκευαστικά δεδομένα και στοιχεία του οχήματος.

Το διάνυσμα ελέγχου που προκύπτει για ανεξάρτητες εντολές κίνησης των πτερυγίων – ελίκων του NPS-Phoenix έχει 14 στοιχεία και δίνεται στον πίνακα 9-2.

Οι εξισώσεις κίνησης του υποβρυχίου οχήματος NPS-Phoenix για τους έξι βαθμούς ελευθερίας, με βάση το υδροδυναμικό και κινηματικό του μοντέλο, δίνονται στο Παράρτημα Β.

δ_{rbt}	Γωνία πρωραίου κατακόρυφου πάνω πτερυγίου
δ_{rbb}	Γωνία πρωραίου κατακόρυφου κάτω πτερυγίου
δ_{rst}	Γωνία πρυμναίου κατακόρυφου πάνω πτερυγίου
δ_{rsb}	Γωνία πρυμναίου κατακόρυφου κάτω πτερυγίου
δ_{pbr}	Γωνία πρωραίου οριζόντιου δεξιού πτερυγίου
δ_{pbl}	Γωνία πρωραίου οριζόντιου αριστερού πτερυγίου
δ_{psr}	Γωνία πρυμναίου οριζόντιου δεξιού πτερυγίου
δ_{psl}	Γωνία πρυμναίου οριζόντιου αριστερού πτερυγίου
n_{port}	Στροφές δεξιάς έλικας
n_{stbd}	Στροφές αριστερής έλικας
$V_{bow-vertical}$	Τάση πρωραίου κάθετου ωθητήρα
$V_{stern-vertical}$	Τάση πρυμναίου κάθετου ωθητήρα
$V_{bow-lateral}$	Τάση πρωραίου οριζόντιου ωθητήρα
$V_{stern-lateral}$	Τάση πρυμναίου οριζόντιου ωθητήρα

Πίνακας 9-2: Μεταβλητές ελέγχου υποβρυχίου οχήματος NPS-Phoenix

9.3 Προσομοιώσεις επιπέδου ελέγχου κίνησης

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται οι αριθμητικές προσομοιώσεις που έγιναν για την διαπίστωση της απόδοσης του επιπέδου ελέγχου κίνησης του πολυεπίπεδου ελεγκτή κίνησης και αποφυγής εμποδίων. Η δομή του ελεγκτή κίνησης παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 6 και αποτελείται από πέντε επιμέρους υποσυστήματα ελέγχου: το υποσύστημα ταχύτητας, το υποσύστημα κατεύθυνσης, το υποσύστημα βάθους, που περιλαμβάνει τα συστήματα ελέγχου γωνίας πρόνευσης και ελέγχου βάθους, το υποσύστημα διατοιχισμού και το υποσύστημα θαλασσίου ρεύματος. Οι προσομοιώσεις έγιναν σε Simulink, αφού το δυναμικό μοντέλο του οχήματος και οι αναγκαίες συναρτήσεις προγραμματίστηκαν στην Matlab.

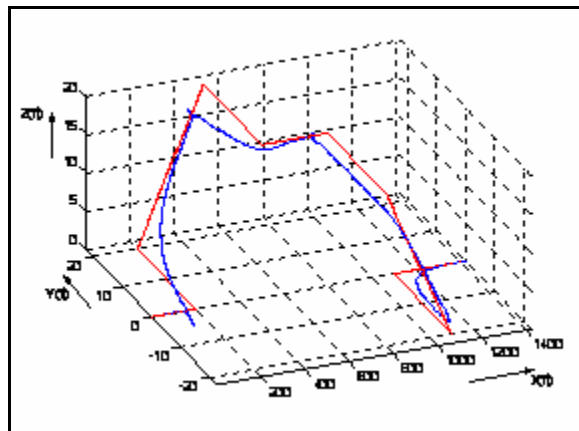
Τα βήματα της προσομοίωσης ήταν σταθερά με χρονική απόσταση 0.5 sec. Το όχημα ακολουθεί διαδοχικά σημεία στόχου, ώστε να σχηματίζεται μια επιθυμητή διαδρομή. Κατά την διάρκεια της πορείας δεν γίνεται αποφυγή εμποδίων ή βελτιστοποίηση συναρτήσεων συμμετοχής. Οι συναρτήσεις συμμετοχής των ελεγκτών κίνησης ρυθμίστηκαν με δοκιμές πριν από τις

προσομοιώσεις, ώστε να επιτυγχάνουν κατά τον δυνατό ακριβή έλεγχο του οχήματος. Για να ελεγχθεί η απόδοση της μεθοδολογίας ελέγχου κίνησης σε ορισμένες περιπτώσεις θεωρήθηκε η ύπαρξη θαλάσσιου ρεύματος με σταθερή ταχύτητα και κατεύθυνση.

Έγιναν προσομοιώσεις για τρεις δοκιμές. Στην πρώτη δοκιμή το όχημα ακολουθεί μια πορεία με τετραγωνική πριονωτή διατομή στο οριζόντιο επίπεδο ενώ σταδιακά καταδύεται και αναδύεται στο κατακόρυφο επίπεδο. Στην δεύτερη δοκιμή το όχημα ακολουθεί την ίδια πορεία όπως στην δοκιμή 1, με την διαφορά ότι θεωρείται η ύπαρξη πλευρικού θαλασσίου ρεύματος με κατεύθυνση κατά τον άξονα Y . Στην τρίτη δοκιμή δεν υπάρχει θαλάσσιο ρεύμα και το όχημα ακολουθεί στο επίπεδο $X-Y$ οφιοειδή πορεία σχήματος S που αποτελείται από εναλλασσόμενα ημικύκλια, ενώ στο επίπεδο $X-Z$ καταδύεται με σταθερό ρυθμό.

9.3.1 Έλεγχος επιπέδου ελέγχου κίνησης –Δοκιμή σε μεταβαλλόμενη πορεία

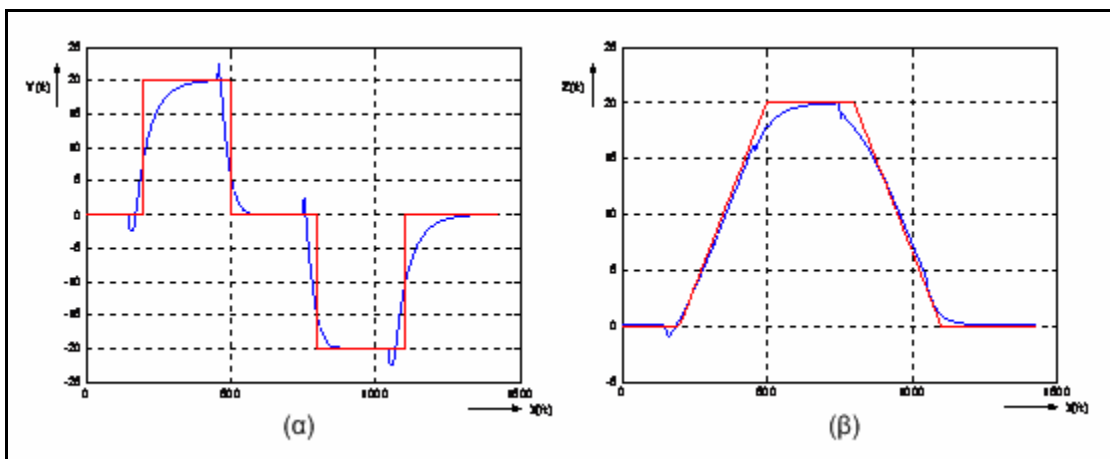
Στην δοκιμή αυτή το όχημα ακολουθεί πορεία με τετραγωνική πριονωτή διατομή στο οριζόντιο επίπεδο ενώ σταδιακά καταδύεται και αναδύεται στο κατακόρυφο επίπεδο. Δεν υπάρχει θαλάσσιο ρεύμα.



Σχήμα 9-3: Επίπεδο ελέγχου κίνησης-μεταβαλλόμενη πορεία, πορεία προσομοίωσης και επιθυμητή

Στο Σχήμα 9-3 φαίνεται στον τρισδιάστατο χώρο η επιθυμητή και η προσομοιωθείσα πορεία του οχήματος σε τρισδιάστατη απεικόνιση.

Στα Σχήματα 9-4(α) και (β) φαίνεται η επιθυμητή και η πορεία προσομοίωσης του οχήματος στο οριζόντιο επίπεδο $X-Y$ και στο κατακόρυφο επίπεδο $X-Z$ αντίστοιχα.



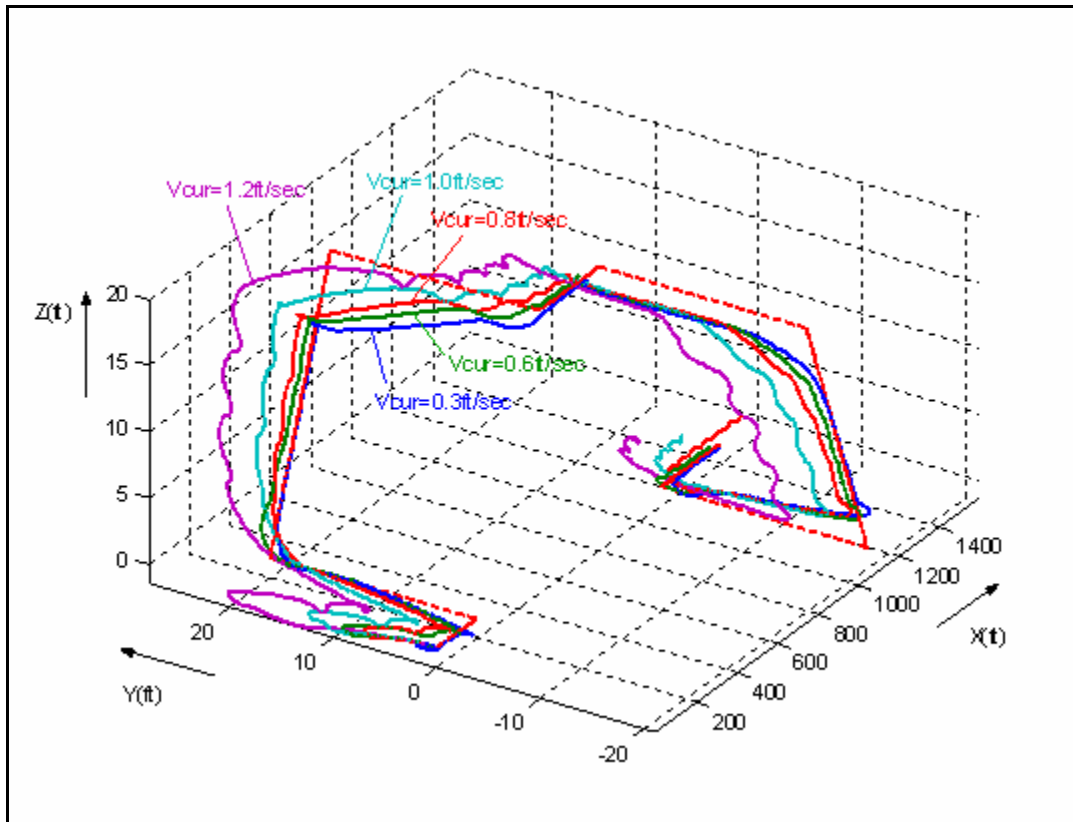
Σχήμα 9-4: Επίπεδο ελέγχου κίνησης- μεταβαλλόμενη πορεία, πορεία προσομοίωσης και επιθυμητή στα επίπεδα $X-Y$ και $X-Z$

Από τα Σχήματα 9-3 και 9-4 μπορεί να διαπιστωθεί ότι η δυναμική του οχήματος στο οριζόντιο και στο κάθετο επίπεδο δεν είναι αποσυνζευγμένες και έτσι μια εντολή αλλαγής κατεύθυνσης έχει επίδραση στην κίνηση στο κατακόρυφο επίπεδο και αντίστροφα. Ο ελεγκτής κίνησης μπορεί να κατευθύνει το όχημα στην προδιαγεγραμμένη πορεία με σφάλματα που γίνονται εντονότερα όταν δίνονται οι εντολές αλλαγής κατεύθυνσης και βάθους. Τα σφάλματα τείνουν να μειωθούν με την πάροδο του χρόνου και καθώς το όχημα κινείται προς το σημείο στόχου.

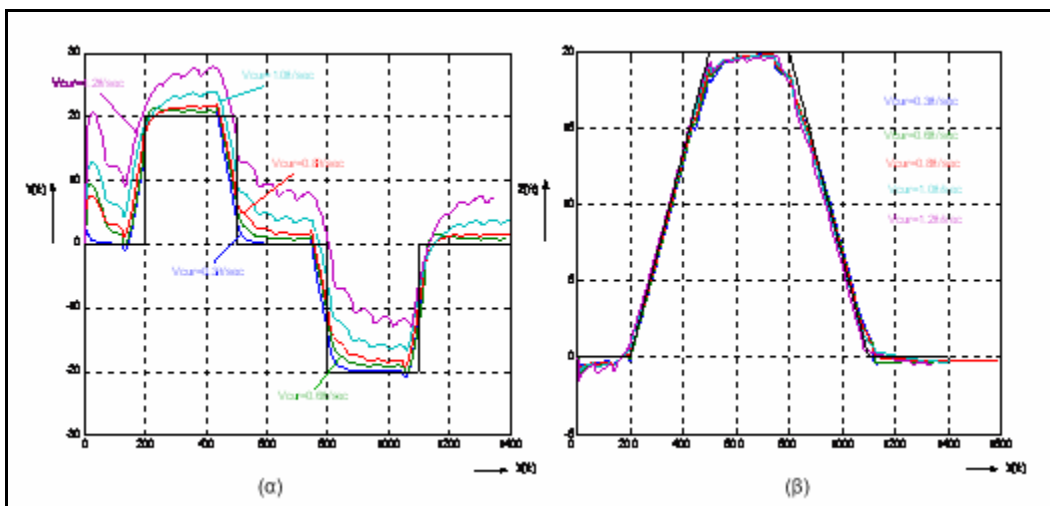
9.3.2 Έλεγχος επιπέδου ελέγχου κίνησης -Δοκιμή σε μεταβαλλόμενη πορεία με ρεύμα

Στην δοκιμή αυτή το όχημα ακολουθεί την ίδια πορεία με την δοκιμή 1, με την διαφορά ότι θεωρείται η ύπαρξη πλευρικού θαλασσίου ρεύματος με κατεύθυνση κατά τον άξονα Y . Έγιναν προσομοιώσεις με ταχύτητες ρεύματος 0.3, 0.6, 0.8 1.0 και 1.2 ft/sec.

Στο Σχήμα 9-5 φαίνεται η επιθυμητή και η πορεία προσομοίωσης του οχήματος σε τρισδιάστατη απεικόνιση για διάφορες ταχύτητες ρεύματος. Στο Σχήμα 9-6 φαίνεται η επιθυμητή και η πορεία προσομοίωσης του οχήματος στο οριζόντιο επίπεδο $X-Y$ και στο κατακόρυφο επίπεδο $X-Z$ για διάφορες ταχύτητες ρεύματος.

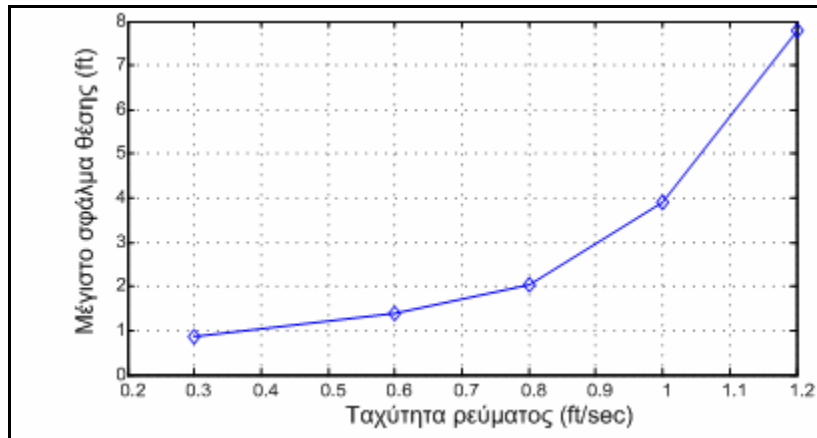


Σχήμα 9-5: Επίπεδο ελέγχου κίνησης-μεταβαλλόμενη πορεία με ρεύμα, πορεία προσομοίωσης και επιθυμητή



Σχήμα 9-6: Επίπεδο ελέγχου κίνησης- μεταβαλλόμενη πορεία με ρεύμα, πορεία προσομοίωσης και επιθυμητή στα επίπεδα X-Y και X-Z

Στο Σχήμα 9-7 παρουσιάζεται η μέγιστη απόκλιση από την επιθυμητή πορεία σε συνάρτηση με την ταχύτητα του πλευρικού ρεύματος. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 9-7, η μέγιστη απόκλιση αυξάνεται όταν αυξάνεται η ταχύτητα του ρεύματος.



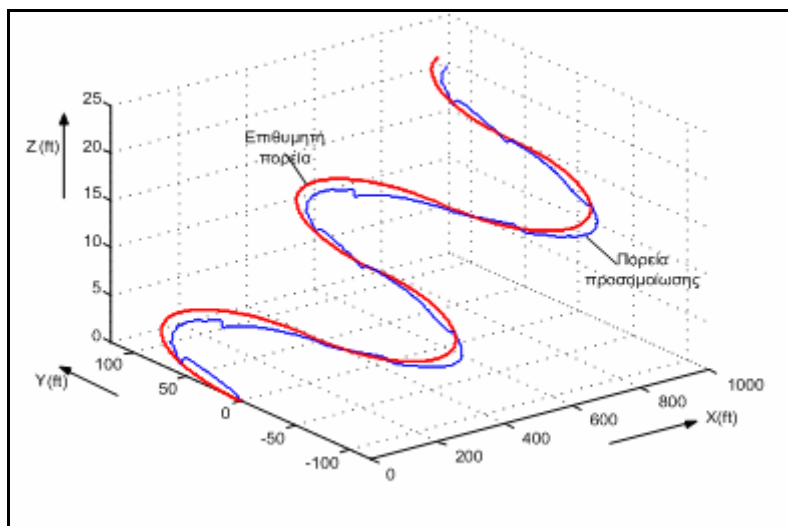
Σχήμα 9-7: Επίπεδο ελέγχου κίνησης-μεταβαλλόμενη πορεία με ρεύμα, μέγιστη απόκλιση σε συνάρτηση με την ταχύτητα του πλευρικού ρεύματος

9.3.3 Έλεγχος επιπέδου ελέγχου κίνησης -Δοκιμή σε οφιοειδή πορεία

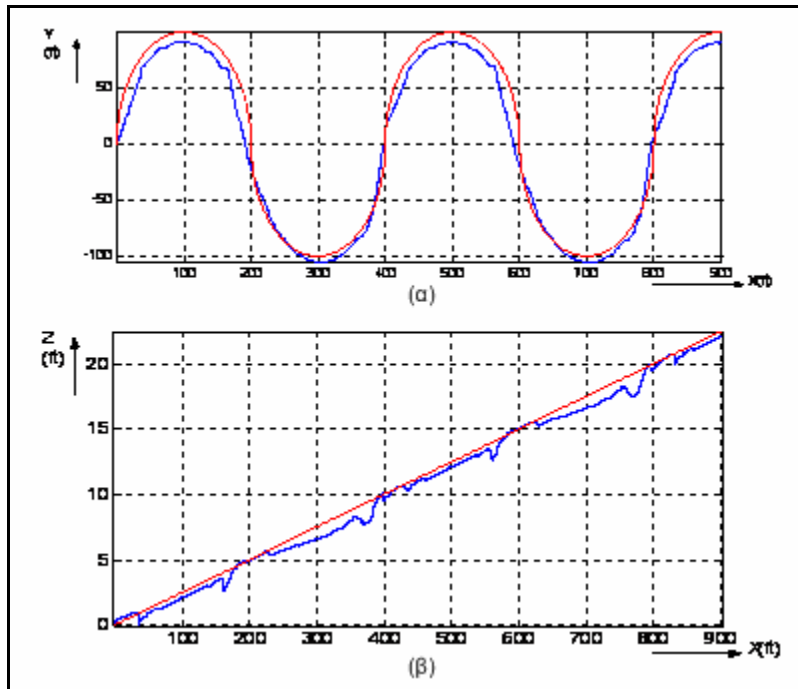
Στην δοκιμή αυτή το όχημα ακολουθεί στο επίπεδο $X-Y$ οφιοειδή πορεία σχήματος S που αποτελείται από εναλλασσόμενα ημικύκλια με διάμετρο 100 ft. Στο επίπεδο $X-Z$ καταδύεται με σταθερό ρυθμό. Δεν υπάρχει θαλάσσιο ρεύμα.

Στο Σχήμα 9-8 παρουσιάζονται η επιθυμητή και η πορεία προσομοίωσης του οχήματος σε τρισδιάστατη απεικόνιση.

Στο Σχήμα 9-9 φαίνεται η επιθυμητή και η πορεία προσομοίωσης του οχήματος στο οριζόντιο επίπεδο $X-Y$ και στο κατακόρυφο επίπεδο $X-Z$.



Σχήμα 9-8: Επίπεδο ελέγχου κίνησης- οφιοειδής πορεία, πορεία προσομοίωσης και επιθυμητή



Σχήμα 9-9: Επίπεδο ελέγχου κίνησης- οφιοειδής πορεία, πορεία προσομοίωσης και επιθυμητή στο οριζόντιο επίπεδο $x-y$

Από τις δοκιμές απόδοσης του ελεγκτή κίνησης μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

1. Ο ελεγκτής κίνησης πετυχαίνει τον σκοπό της πλοήγησης του οχήματος από σημείο σε σημείο στόχου, πράγμα που σημαίνει ότι η λογική της σχεδίασης είναι σωστή χωρίς λογικά σφάλματα.
2. Η απόδοση του ελεγκτή κίνησης ελέγχθηκε κάτω από διάφορες συνθήκες και αλλαγές προσανατολισμών καθώς και με την ύπαρξη θαλάσσιου ρεύματος και κρίνεται ικανοποιητική.
3. Υπάρχει αστάθεια στα σημεία αλλαγής κατεύθυνσης. Αυτό μπορεί να διορθωθεί με περαιτέρω ρύθμιση των συναρτήσεων συμμετοχής, διαδικασία που είναι χρονοβόρα λόγω του μεγάλου αριθμού των ανεξάρτητων παραμέτρων που πρέπει να καθοριστούν. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού προτείνεται η γενετική βελτιστοποίηση συναρτήσεων συμμετοχής.

9.4 Προσομοιώσεις επιπέδων ανάγνωσης ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγής σύγκρουσης

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται οι αριθμητικές προσομοιώσεις που έγιναν για τον έλεγχο των επιπέδων ανάγνωσης αισθητήρων και αποφυγής σύγκρουσης της πολυεπίπεδης αρχιτεκτονικής ελέγχου. Τα επίπεδα αυτά έχουν στόχο την αξιολόγηση των ενδείξεων των αισθητήρων του οχήματος, για να ανιχνευθούν εμπόδια στην περιοχή κίνησης του και για να γίνουν οι κατάλληλες διορθώσεις στην πορεία του, ώστε να αποφευχθεί μια πιθανή σύγκρουση.

Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε το δυναμικό-υδροδυναμικό μοντέλο κίνησης του υποβρυχίου οχήματος NPS-Phoenix και το επίπεδο ελέγχου κίνησης όπως δοκιμάστηκε στην παράγραφο 9.3, με συναρτήσεις συμμετοχής των ασαφών ελεγκτών εξελιγμένες με δοκιμές. Το όχημα πλοηγείται κοντά στον πυθμένα, ο οποίος έχει διαμορφώσεις που αποτελούν εμπόδια στην κίνηση του. Οι προσομοιώσεις έγιναν με σταθερά χρονικά βήματα των 0.25 sec.

Για την ανίχνευση των εμποδίων έχει προσομοιωθεί η ύπαρξη αισθητήρων υπερήχων που επιστρέφουν στο όχημα την απόσταση στην οποία ανιχνεύουν εμπόδιο, εφόσον αυτό βρίσκεται εντός του ωφέλιμου εύρους τους και εντός της γωνίας που ανιχνεύουν. Το όχημα έχει προσομοιωθεί με 14 αισθητήρες υπερήχων τοποθετημένους περιμετρικά, οι οποίοι καλύπτουν 360° στο οριζόντιο επίπεδο και 15° στο κατακόρυφο επίπεδο. Το εύρος των αισθητήρων τέθηκε 120 ft ενώ οι γωνίες εμβέλειας των αισθητήρων δίνονται στον πίνακα 6-1.

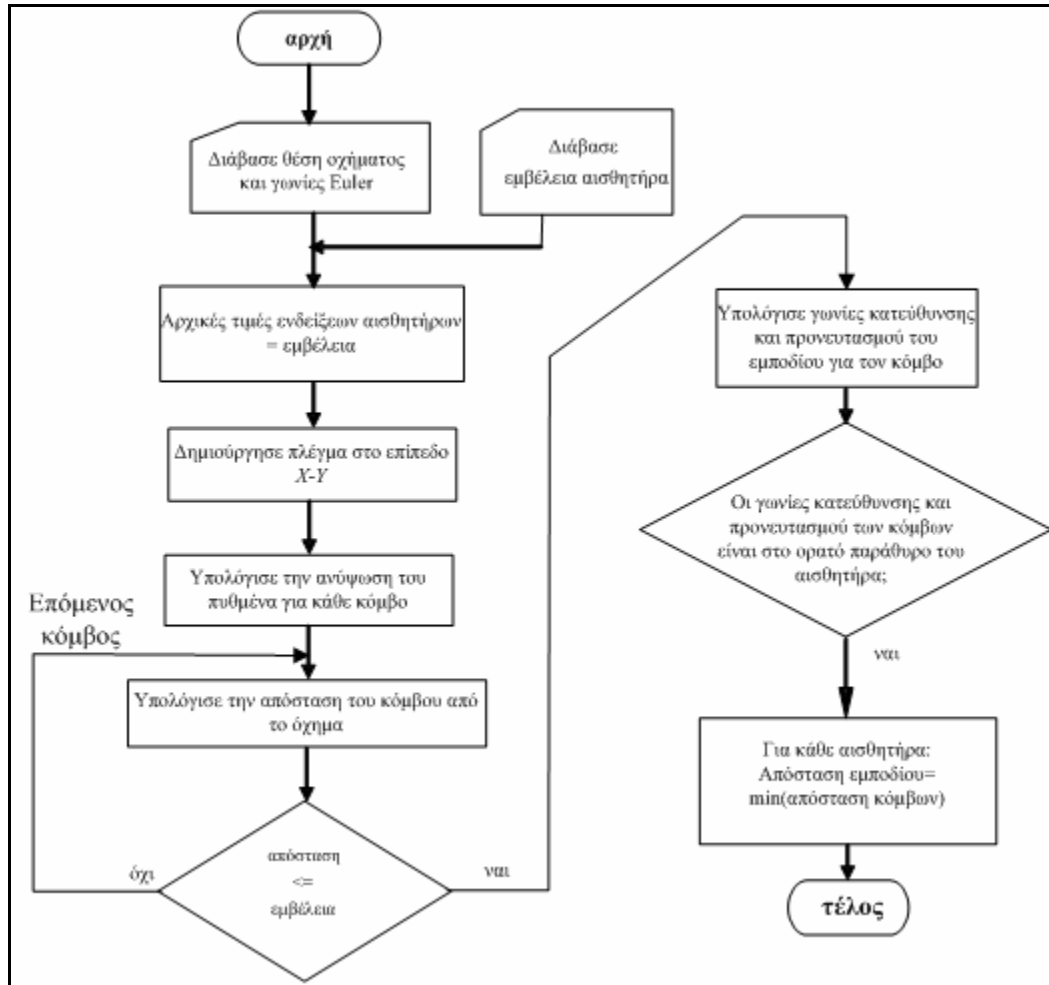
Ο πυθμένας αναπαρίστανται με μαθηματικές εκφράσεις της μορφής:

$$\begin{aligned} z(x, y) = & \sin(y+a) + b \sin(x) + c \cos\left(d \cdot \sqrt{y^2 + x^2}\right) + \\ & e \cos(y) + f \sin\left(f \sqrt{y^2 + x^2}\right) + g \cos(y) \end{aligned} \quad (9.3)$$

όπου a, b, c, d, e, f, g είναι σταθερές κατάλληλα επιλεγμένες. Οι μαθηματικές αυτές εκφράσεις έχουν προταθεί στο [38] για εναέρια οχήματα και στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται να αναπαραστήσουν φυσικές διαμορφώσεις ενός τεχνητού μη επίπεδου πυθμένα. Σε εφαρμογές όπου απαιτείται η αναπαράσταση μιας περιοχής του φυσικού πυθμένα, αντί για μαθηματικές εκφράσεις όπως αυτές της εξίσωσης (9.3), χρησιμοποιούνται επιφάνειες παρεμβολής, που δημιουργούνται από τα βαθυμετρικά δεδομένα της περιοχής [236].

Για την προσομοίωση των ενδείξεων των αισθητήρων δημιουργείται ένα τετράγωνο επίπεδο πλέγμα με πλάτος διπλάσιο του εύρους των αισθητήρων και κέντρο την θέση του οχήματος. Για κάθε κόμβο του πλέγματος υπολογίζεται από την παραπάνω σχέση η ανύψωση του πυθμένα, οπότε οι τριάδες (x, y, z) που σχηματίζονται αναπαριστούν την διακριτοποιημένη γεωμετρία του πυθμένα στην περιοχή κίνησης του οχήματος. Στην συνέχεια για κάθε τριάδα-κόμβο υπολογίζονται οι γωνίες ως προς το σωματοπαγές σύστημα αξόνων και ελέγχεται αν βρίσκονται

στην περιοχή εμβέλειας κάποιου αισθητήρα στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο. Στο τέλος ο αισθητήρας επιστρέφει ως ένδειξη το ελάχιστο της απόστασης όλων των σημείων που βρίσκονται μέσα στο εύρος που ανιχνεύει. Το λογικό διάγραμμα της ανίχνευσης στόχων και δημιουργίας ενδείξεων αισθητήρων δίνεται στο Σχήμα 9-10.



Σχήμα 9-10: Ανάγνωση ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγή εμποδίων, λογικό διάγραμμα ανίχνευσης στόχων

Οι ενδείξεις των αισθητήρων τροφοδοτούνται στο επίπεδο ανάγνωσης ενδείξεων αισθητήρων, που παράγει τις *πιθανότητες σύγκρουσης* στις κύριες κατευθύνσεις κίνησης του οχήματος. Οι *πιθανότητες σύγκρουσης* αξιολογούνται από το επίπεδο αποφυγής σύγκρουσης, που λαμβάνει την απόφαση για την αποφυγή της σύγκρουσης. Η απόφαση αυτή είναι η αλλαγή του σημείου – στόχου του οχήματος και η αλλαγή της επιθυμητής ταχύτητας κίνησης. Το τροποποιημένο σημείο στόχου και η νέα ταχύτητα κίνησης τροφοδοτούνται στο επίπεδο ελέγχου κίνησης, το οποίο όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο μπορεί να κατευθύνει το όχημα με κατάλληλη ρύθμιση των εντολών στους κινητήρες και στους επενεργητές.

Εξετάστηκε η απόδοση των επιπέδων ανάγνωσης ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγής σύγκρουσης σε τρεις δοκιμές προσομοίωσης, όπου για λόγους σύγκρισης η μαθηματική έκφραση του πυθμένα κρατήθηκε σταθερή ενώ στην δοκιμή 3 εξετάστηκε και η επίδραση της παρουσίας θαλάσσιου ρεύματος.

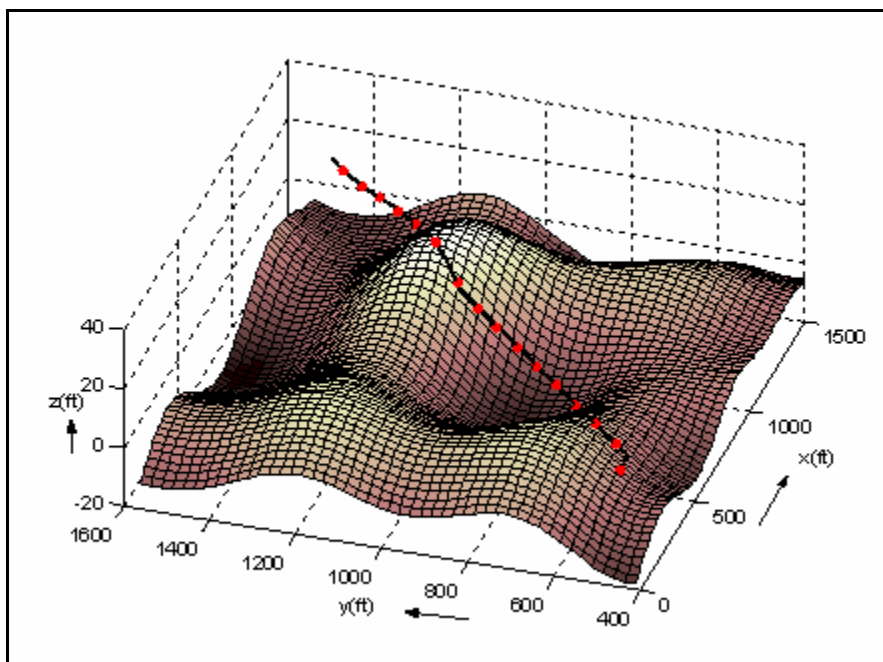
9.4.1 Έλεγχος επιπέδων ενδείξεων ανάγνωσης αισθητήρων και αποφυγής σύγκρουσης - Δοκιμές πλοήγησης σε σημείο στόχου

Στις δοκιμές αυτές το όχημα ξεκινάει από το αρχικό σημείο και κατευθύνεται προς ένα σημείο στόχου. Παρουσιάζονται δύο δοκιμές με σημεία στόχου που δίνονται στον Πίνακα 9-3:

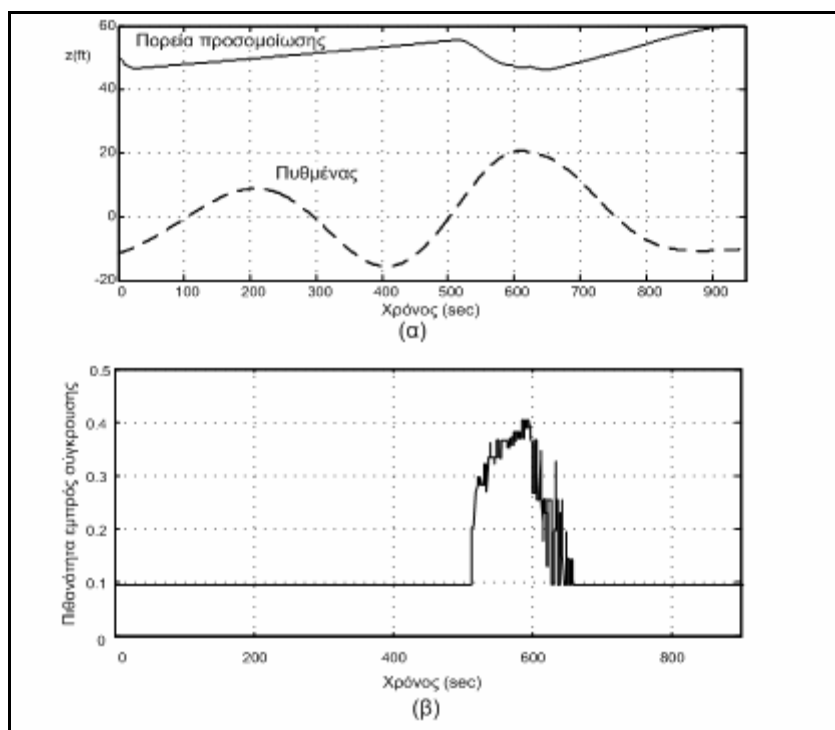
	Αρχικό σημείο	Τελικό σημείο	Ταχύτητα ρεύματος
Δοκιμή1	X= 0 ft Y= 450 ft Z= 50 ft	X= 1500 ft Y= 1500 ft Z= 60 ft	$V_x = 0.0 \text{ ft/sec}$ $V_y = 0.0 \text{ ft/sec}$
Δοκιμή2	X= -250 ft Y= -250 ft Z= 80 ft	X= 1400 ft Y= 1100 ft Z= 80 ft	$V_x = 0.0 \text{ ft/sec}$ $V_y = 0.0 \text{ ft/sec}$

Πίνακας 9-3: Ανάγνωση ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγή εμποδίων, δοκιμή πλοήγησης προς σημείο στόχου, αρχικό και τελικό σημείο στόχου

Κατά την διάρκεια της κίνησης ανιχνεύονται τα εμπόδια πυθμένα, που αποφεύγει το όχημα. Στο Σχήμα 9-11 φαίνεται για την πρώτη δοκιμή η πορεία προσομοίωσης σε τρισδιάστατη απεικόνιση. Οι τελείες στην συνεχή γραμμή του Σχήματος 9-11 δείχνουν την θέση του οχήματος σε σταθερά χρονικά διαστήματα των 50 sec. Στο Σχήμα 9-12 (α) φαίνεται η θέση του οχήματος στον άξονα Z και η ανύψωση του πυθμένα κάτω από το όχημα και στο Σχήμα 9-12 (β) φαίνεται η πιθανότητα εμπρός σύγκρουσης που υπολογίζει το επίπεδο ανάγνωσης ενδείξεων αισθητήρων σε συνάρτηση με τον χρόνο.

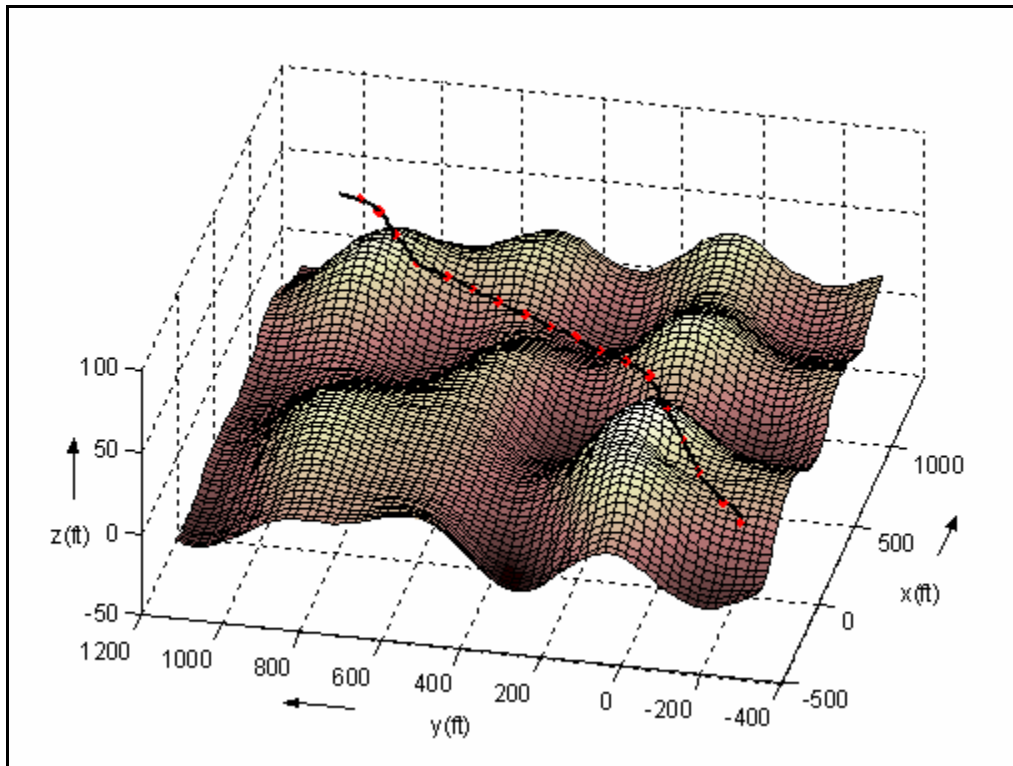


Σχήμα 9-11: Ανάγνωση ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγή εμποδίων, πρώτη δοκιμή πλοήγησης προς σημείο στόχο, πορεία προσομοίωσης



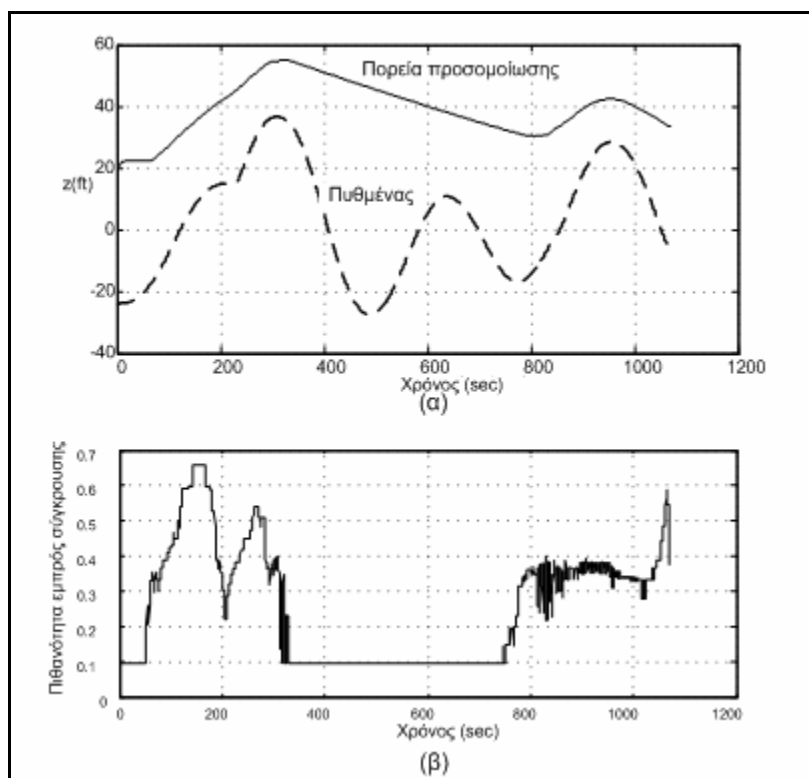
Σχήμα 9-12: Ανάγνωση ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγή εμποδίων, πρώτη δοκιμή πλοήγησης προς σημείο στόχο, (α) θέση στον άξονα Z και ανύψωση πυθμένα, (β) πιθανότητα εμπρός σύγκρουσης

Στο Σχήμα 9-13 παρουσιάζεται για την δοκιμή 2, η πορεία προσομοίωσης σε τρισδιάστατη απεικόνιση. Οι τελείες στην συνεχή γραμμή του Σχήματος 9-13 δείχνουν την θέση του οχήματος σε σταθερά χρονικά διαστήματα των 50 sec.



Σχήμα 9-13: Ανάγνωση ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγή εμποδίων, δεύτερη δοκιμή πλοήγησης προς σημείο στόχου, προσομοιωθείσα πορεία

Στο Σχήμα 9-14 (α) παρουσιάζεται η θέση του οχήματος στον άξονα Z και η ανύψωση του πυθμένα κάτω από το όχημα και στο Σχήμα 9-14 (β) έχει σχεδιαστεί η πιθανότητα εμπρός σύγκρουσης που υπολογίζει το επίπεδο ανάγνωσης ενδείξεων αισθητήρων σε συνάρτηση με τον χρόνο.



Σχήμα 9-14: Ανάγνωση ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγή εμποδίων, δεύτερη δοκιμή πλοήγησης προς σημείο στόχου, (α) θέση στον άξονα Z και ανύψωση πυθμένα, (β) πιθανότητα εμπρός σύγκρουσης

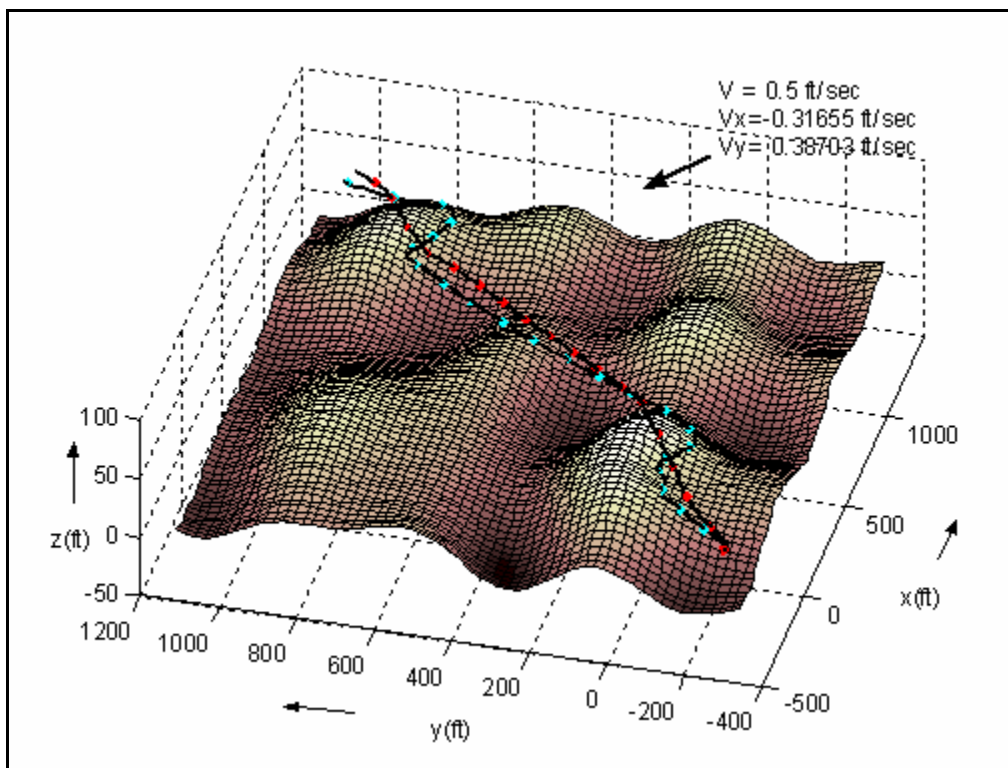
9.4.2 Έλεγχος επιπέδων ανάγνωσης ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγής σύγκρουσης - Δοκιμή πλοήγησης σε σημείο στόχου με ρεύμα

Στην δοκιμή αυτή το όχημα ξεκινάει από το αρχικό σημείο και κατευθύνεται προς το σημείο στόχου. Η δοκιμή αυτή είναι όμοια με την προηγούμενη με την προσθήκη θαλάσσιου ρεύματος με ταχύτητα 0.5 ft/sec. Η διεύθυνση του ρεύματος είναι κάθετη στην ευθεία που ενώνει τα σημεία αρχής και στόχου, οπότε οι συνιστώσες στους άξονες X και Y δίνονται στον Πίνακα 9-4. Στον Πίνακα 9-4 δίνονται επίσης τα σημεία αρχής και στόχου.

	Αρχικό σημείο	Τελικό σημείο	Ταχύτητα ρεύματος
Δοκιμή2	X= -250 ft Y= -250 ft Z= 80 ft	X= 1400 ft Y= 1100 ft Z= 80 ft	$V_x = -0.31655 \text{ ft/sec}$ $V_y = 0.38703 \text{ ft/sec}$

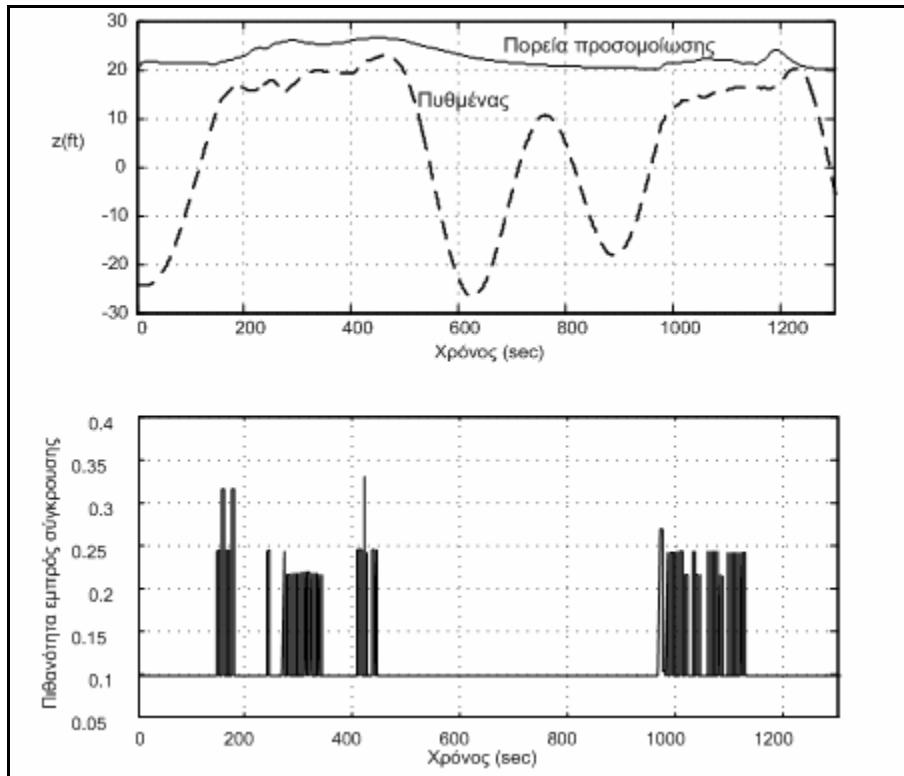
Πίνακας 9-4: Ανάγνωση ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγή εμποδίων, δοκιμή πλοήγησης σε σημείο στόχου με ρεύμα, αρχικό και τελικό σημείο στόχου

Στο Σχήμα 9-15 παρουσιάζεται με μπλε τελείες η πορεία προσομοίωσης της δοκιμής σε τρισδιάστατη απεικόνιση. Στο ίδιο σχήμα για λόγους σύγκρισης έχει σχεδιαστεί με κόκκινες τελείες η πορεία του οχήματος όταν δεν υπάρχει πλευρικό θαλάσσιο ρεύμα. Και στις δύο πορείες, οι τελείες δείχνουν της θέση του οχήματος σε σταθερά χρονικά διαστήματα των 50 sec.



Σχήμα 9-15: Ανάγνωση ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγή εμποδίων, δοκιμή πλοήγησης σε σημείο στόχου με ρεύμα, πορεία προσομοίωσης σε τρισδιάστατη απεικόνιση. Πορεία με μπλε κουκίδες: πλευρικό θαλάσσιο ρεύμα 0.5 ft/sec. Πορεία με κόκκινες κουκίδες: χωρίς θαλάσσιο ρεύμα.

Στο Σχήμα 9-16 (α) παρουσιάζεται η θέση του οχήματος στον άξονα Z και η ανύψωση του πυθμένα κάτω από το όχημα και στο Σχήμα 9-16 (β) έχει σχεδιαστεί η πιθανότητα εμπρόσθιας σύγκρουσης που υπολογίζει το επίπεδο ανάγνωσης ενδείξεων αισθητήρων σε συνάρτηση με τον χρόνο.



Σχήμα 9-16: Ανάγνωση ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγή εμποδίων, δοκιμή πλοήγησης σε σημείο στόχου με ρεύμα, (α) θέση στον άξονα z και ανύψωση πυθμένας, (β) πιθανότητα εμπρός σύγκρουσης

Από τις δοκιμές απόδοσης των επιπέδων ανάγνωσης ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγής σύγκρουσης μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

1. Τα επίπεδα ανάγνωσης ενδείξεων αισθητήρων και αποφυγής σύγκρουσης μπορούν να πλοήγουν το όχημα αυτόνομα στο θαλάσσιο περιβάλλον, ακόμα και με την παρουσία ρεύματος.
2. Το όχημα μπορεί να αποφεύγει εμπόδια που εντοπίζονται στην πορεία του χωρίς καμία εκ των προτέρων γνώση του θαλάσσιου περιβάλλοντος.
3. Το όχημα κατά την πλοήγηση του διατηρεί απόσταση ασφαλείας από τα εμπόδια και κινείται σε περιοχές που δεν είναι πιθανή η πρόσκρουσή του με εμπόδια.

9.5 Προσομοιώσεις επιπέδου σχεδιασμού πορείας

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται οι προσομοιώσεις που έγιναν για έλεγχο του επιπέδου σχεδιασμού της βέλτιστης πορείας που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 7.

Σκοπός του επιπέδου σχεδιασμού πορείας είναι ο προσδιορισμός της βέλτιστης πορείας του οχήματος σε μορφή πολυπαραμετρικής καμπύλης B-Spline, για την πλοήγηση του οχήματος

κοντά στον πυθμένα. Η βέλτιστη πορεία, που προκύπτει από τις δοκιμές, βασίζεται σε εκ των προτέρων γνωστά δεδομένα του πυθμένα και τηρεί τους περιορισμούς της πλοήγησης μακριά από εμπόδια και του ελαχίστου μήκους. Επίσης τηρούνται οι περιορισμοί μέγιστου και ελάχιστου βάθους, χώρου πλοήγησης και ελάχιστης καμπυλότητας.

Η βέλτιστη πορεία αποτελείται από μια πολυπαραμετρική καμπύλη B-Spline. Για τον ορισμό της καμπύλης απαιτείται ο καθορισμός των συντεταγμένων των κορυφών του πολυγώνου ελέγχου, το οποίο αποτελείται από τρία σταθερά και έξι ελεύθερα σημεία. Ως σταθερά σημεία ορίζονται η αρχή και το τέλος της πορείας. Σταθερό σημείο είναι επίσης το δεύτερο σημείο, που ορίζει την αρχική κατεύθυνση της πορείας. Έτσι, για τον ορισμό του πολυγώνου ελέγχου απαιτούνται έξι ελεύθερα σημεία, οι συντεταγμένες των οποίων βελτιστοποιούνται με γενετικό τρόπο.

Για τον έλεγχο της μεθοδολογίας η γεωμετρία του πυθμένα λήφθηκε από την ακόλουθη εξίσωση με συντελεστές που επιλέχθηκαν αυθαίρετα ώστε να αναπαραστήσουν φυσικές διαμορφώσεις του πυθμένα, όπως αυτές που περιγράφονται στο [237]:

$$\begin{aligned} z = & 100 - 6 \cdot \sin((y \cdot 4.5 \cdot \pi / 1000) + 0.6) - 7 \cdot \sin(x \cdot 2.5 \cdot \pi / 1200) - 8 \cdot \cos(3 \cdot \pi \cdot y / 1100) \\ & - 5 \cdot \sin(4 \cdot \pi \cdot (((x - 120)^2 + y^2)^{0.5}) / 1300) - 3 \cdot \cos(4 \cdot \pi \cdot (y + 550) / 1600) \\ & - 8 \cdot \sin(4 \cdot \pi \cdot (((x - 120)^2 + y^2)^{0.5}) / 1200) - 4 \cdot \cos(4 \cdot \pi \cdot (y + 300) / 800) \end{aligned} \quad (9.4)$$

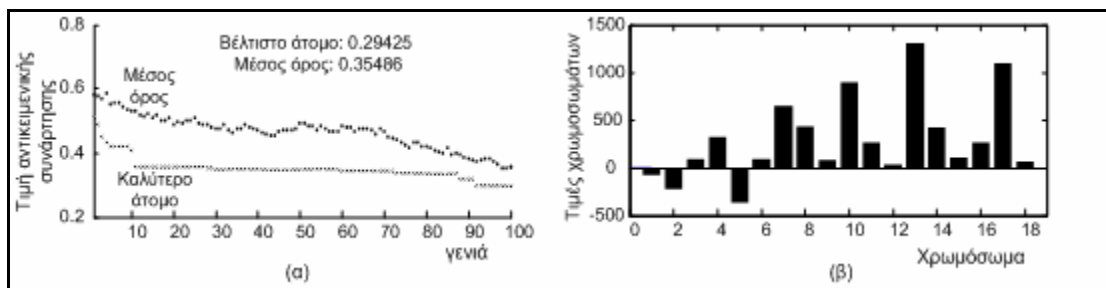
Οι συντεταγμένες των σταθερών σημείων της πορείας φαίνονται στο Πίνακα 9-5:

	x	y	z
Αρχικό σημείο	-400	-350	90
Δεύτερο σημείο	-210	-190	90
Τελικό σημείο	1550	1150	90

Πίνακας 9-5: Σχεδιασμός πορείας, συντεταγμένες σταθερών σημείων

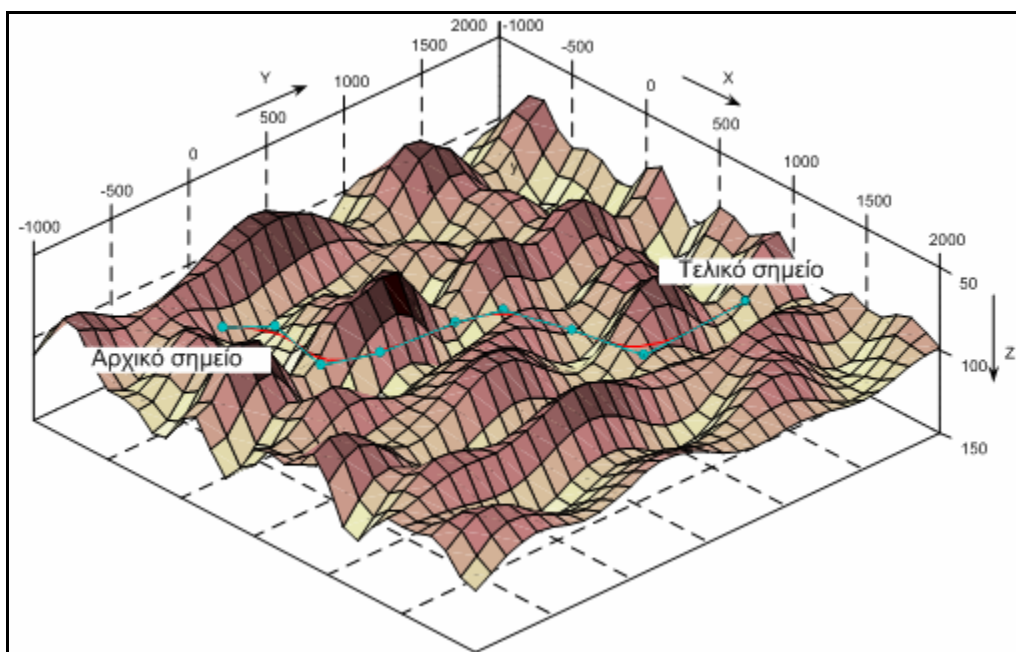
Το ελάχιστο βάθος της πορείας ορίζεται σε 85 ft και το μέγιστο βάθος ορίζεται σε 100 ft. Η ελάχιστη απόσταση ασφαλείας που απαιτείται να έχει το όχημα από τον πυθμένα είναι 10 ft. Η ελάχιστη καμπυλότητα της πορείας τέθηκε σε 20 ft ώστε να προκύψει ομαλή πορεία, που να μπορεί να ακολουθήσει το όχημα.

Ο γενετικός προσδιορισμός των συντεταγμένων των 6 κινητών σημείων γίνεται με την εργαλειοθήκη γενετικών αλγορίθμων της Matlab. Ο κώδικας σε Matlab της αντικειμενικής συνάρτησης που χρησιμοποιήθηκε δίνεται στο Παράρτημα Β. Κάθε άτομο έχει 18 χρωμοσώματα και ο πληθυσμός αποτελείται από 30 άτομα, η πιθανότητα αντιμετάθεσης τέθηκε 0.9 και η πιθανότητα μετάλλαξης τέθηκε ίση με 0.1. Ο μέγιστος αριθμός γενεών τέθηκε ίσος με 100. Η σύγκλιση του γενετικού προσδιορισμού της βέλτιστης πορείας φαίνεται στο Σχήμα 9-17(α), ενώ στο Σχήμα 9-17(β) φαίνεται το βέλτιστο άτομο που δημιουργήθηκε.



Σχήμα 9-17: Σχεδιασμός πορείας, σύγκλιση γενετικού αλγορίθμου

Η υπολογισθείσα βέλτιστη πορεία και το πολύγωνο ελέγχου φαίνεται στο Σχήμα 9-18.



Σχήμα 9-18: Σχεδιασμός πορείας, βέλτιστη πορεία και πολύγωνο ελέγχου

Από το Σχήμα 9-18 φαίνεται ότι ο αλγόριθμος μπορεί να υπολογίσει ομαλή πορεία που μπορεί να ακολουθήσει ένα υποβρύχιο όχημα. Επίσης η βέλτιστη πορεία δεν τέμνεται με τον πυθμένα ενώ διατηρεί απόσταση ασφαλείας. Επιπλέον η πορεία δεν φεύγει εκτός της προδιαγεγραμμένης περιοχής που πρέπει να κινηθεί το όχημα.

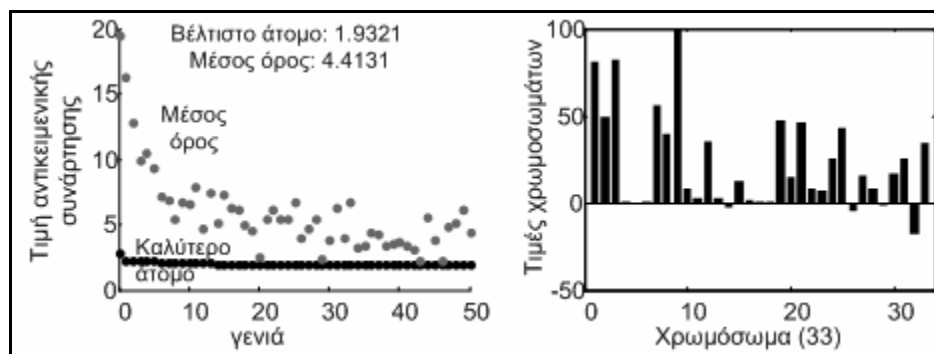
9.6 Προσομοιώσεις επιπέδου γενετικής βελτιστοποίησης ασαφών ελεγκτών κίνησης

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται οι αριθμητικές προσομοιώσεις που έγιναν για έλεγχο του επιπέδου βελτιστοποίησης των ασαφών ελεγκτών κίνησης. Σκοπός του επιπέδου βελτιστοποίησης των ασαφών ελεγκτών κίνησης είναι ο προσδιορισμός των βέλτιστων

συναρτήσεων συμμετοχής των ασαφών ελεγκτών γωνίας πρόνευσης, βάθους και γωνίας κατεύθυνσης, ώστε το όχημα να ακολουθήσει μια πορεία εκ των προτέρων γνωστή με ελάχιστο σφάλμα. Η μεθοδολογία της γενετικής βελτιστοποίησης αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 8.

Το κάθε άτομο αποτελείται από 33 χρωμοσώματα, που αναπαριστούν τις συναρτήσεις συμμετοχής των ασαφών ελεγκτών κίνησης. Για το κάθε άτομο γίνονται οι διορθώσεις που απαιτούνται ώστε να αναπαρασταθούν οι συναρτήσεις συμμετοχής των ελεγκτών κίνησης. Ακολουθώς γίνεται προσομοίωση της πορείας του οχήματος και μέτρηση σφάλματος θέσης. Επίσης υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, που λαμβάνει υπόψη, εκτός από τις διορθώσεις, το μέσο και το μέγιστο σφάλμα θέσης.

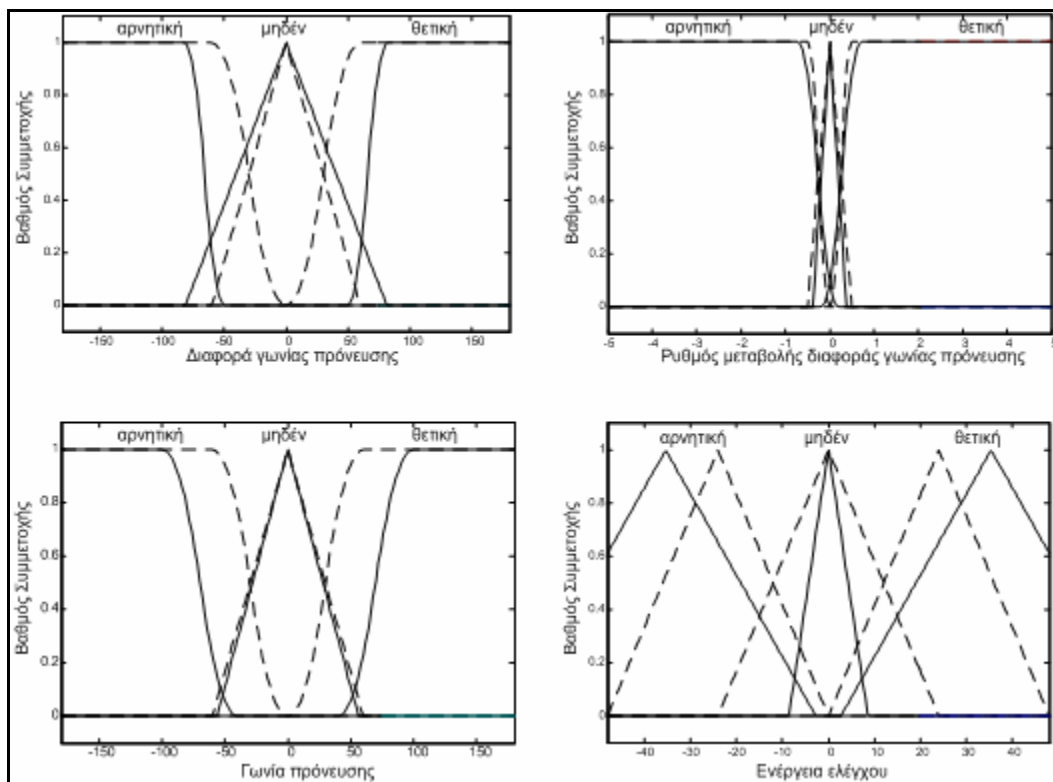
Το ζητούμενο των προσομοιώσεων είναι ο προσδιορισμός των βέλτιστων ελεγκτών κίνησης ώστε το όχημα να πλοηγηθεί στην βέλτιστη πορεία της προηγούμενης παραγράφου που δίνεται στο Σχήμα 9-18. Ο πληθυσμός αποτελείται από 10 άτομα, η πιθανότητα αντιμετάθεσης τέθηκε 0.8 και η πιθανότητα μετάλλαξης τέθηκε ίση με 0.2. Ο μέγιστος αριθμός γενεών τέθηκε ίσος με 50. Η σύγκλιση του γενετικού προσδιορισμού των βέλτιστων συναρτήσεων συμμετοχής των ασαφών ελεγκτών κίνησης δίνεται στο Σχήμα 9-19.



Σχήμα 9-19: Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, σύγκλιση γενετικού αλγορίθμου

9.6.1 Έλεγχος επιπέδου βελτιστοποίησης ασαφών ελεγκτών κίνησης - βέλτιστοι ελεγκτές κίνησης

Οι προσδιορισθείσες βέλτιστες συναρτήσεις συμμετοχής για τον ελεγκτή γωνίας πρόνευσης που έχει τρεις εισόδους (<διαφορά γωνίας πρόνευσης>, <ρυθμός μεταβολής διαφοράς γωνίας πρόνευσης> και <γωνία πρόνευσης>) και μία έξοδο(<ενέργεια ελέγχου γωνίας πρόνευσης>), δίνονται στο Σχήμα 9-20. Στο Σχήμα 9-20 με πλήρη γραμμή φαίνονται οι γενετικά βελτιστοποιημένες συναρτήσεις συμμετοχής του ελεγκτή γωνίας πρόνευσης, για τις εισόδους 1-3 και για την έξοδο του ελεγκτή. Με διακεκομμένη γραμμή φαίνονται οι αρχικές συναρτήσεις συμμετοχής.



Σχήμα 9-20: Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, βέλτιστες συναρτήσεις συμμετοχής ελεγκτή γωνίας πρόνευσης, Πλήρης γραμμή: βελτιστοποιημένες συναρτήσεις συμμετοχής, Διακεκομμένη γραμμή: αρχικές συναρτήσεις συμμετοχής

9.6.2 Έλεγχος επιπέδου βελτιστοποίησης ασαφών ελεγκτών κίνησης – προσομοιώσεις κίνησης

Για να ελεγχθεί η απόδοση των βελτιστοποιημένων ασαφών ελεγκτών κίνησης οι συναρτήσεις συμμετοχής, που έχουν προσδιοριστεί γενετικά, συγκρίνονται με τις συναρτήσεις συμμετοχής που έχουν εξελιχθεί και έχουν ρυθμιστεί εμπειρικά και χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις ελέγχου του επιπέδου ελέγχου κίνησης και ελέγχου των επιπέδων ανάγνωσης αισθητήρων και αποφυγής σύγκρουσης, που δίνονται στις παραγράφους 9.3 και 9.4. Επίσης οι γενετικά βελτιστοποιημένες συναρτήσεις συμμετοχής συγκρίνονται με τις απλοποιημένες συναρτήσεις συμμετοχής που δεν έχουν με κανένα τρόπο βελτιωθεί ή ρυθμιστεί και χρησιμοποιήθηκαν στην έναρξη της γενετικής βελτιστοποίησης των ασαφών ελεγκτών της παραγράφου 9.6.1. Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε το δυναμικό – υδροδυναμικό μοντέλο κίνησης του αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος NPS-Phoenix. Η επιθυμητή πορεία διακριτοποιείται σε μια ακολουθία πεπερασμένων σημείων στόχου και κατά την διάρκεια της προσομοίωσης μετράται η κάθετη απόκλιση από τα σημεία στόχου με την μεθοδολογία που έχει περιγραφεί στην παράγραφο 8.4.2. Όταν το όχημα ολοκληρώσει την επιθυμητή πορεία υπολογίζονται η μέση κάθετη απόκλιση από τα σημεία στόχου, η μέγιστη κάθετη απόκλιση, ο χρόνος που απαιτήθηκε και το συνολικό μήκος

της πορείας που διάνυσε το όχημα. Τα αποτελέσματα αυτά χρησιμεύουν για σύγκριση των ελεγκτών κίνησης.

Παρακάτω δίνονται τα αποτελέσματα από τρεις δοκιμές προσομοίωσης. Στην πρώτη δοκιμή προσομοίωσης, το όχημα πλοηγείται στην γενετικά βελτιστοποιημένη πορεία, που υπολογίσθηκε στην παράγραφο 9-5, με τις τρεις ομάδες των ελεγκτών κίνησης: τους γενετικά βελτιστοποιημένους ελεγκτές κίνησης, τους απλοποιημένους μη βελτιστοποιημένους ελεγκτές κίνησης και τους εμπειρικά ρυθμισμένους ελεγκτές κίνησης της παραγράφου 8.4.2.

Στην δεύτερη δοκιμή προσομοίωσης γίνονται παρόμοιες συγκρίσεις με την παρουσία πλευρικού θαλασσίου ρεύματος. Οι συγκρίσεις γίνονται για διάφορες ταχύτητες πλευρικού ρεύματος.

Στην τρίτη δοκιμή προσομοίωσης ελέγχονται οι τρεις ομάδες ελεγκτών κίνησης στην πλοήγηση του οχήματος σε πορεία διαφορετική από αυτήν που χρησιμοποιήθηκε για την γενετική βελτιστοποίηση των ελεγκτών κίνησης.

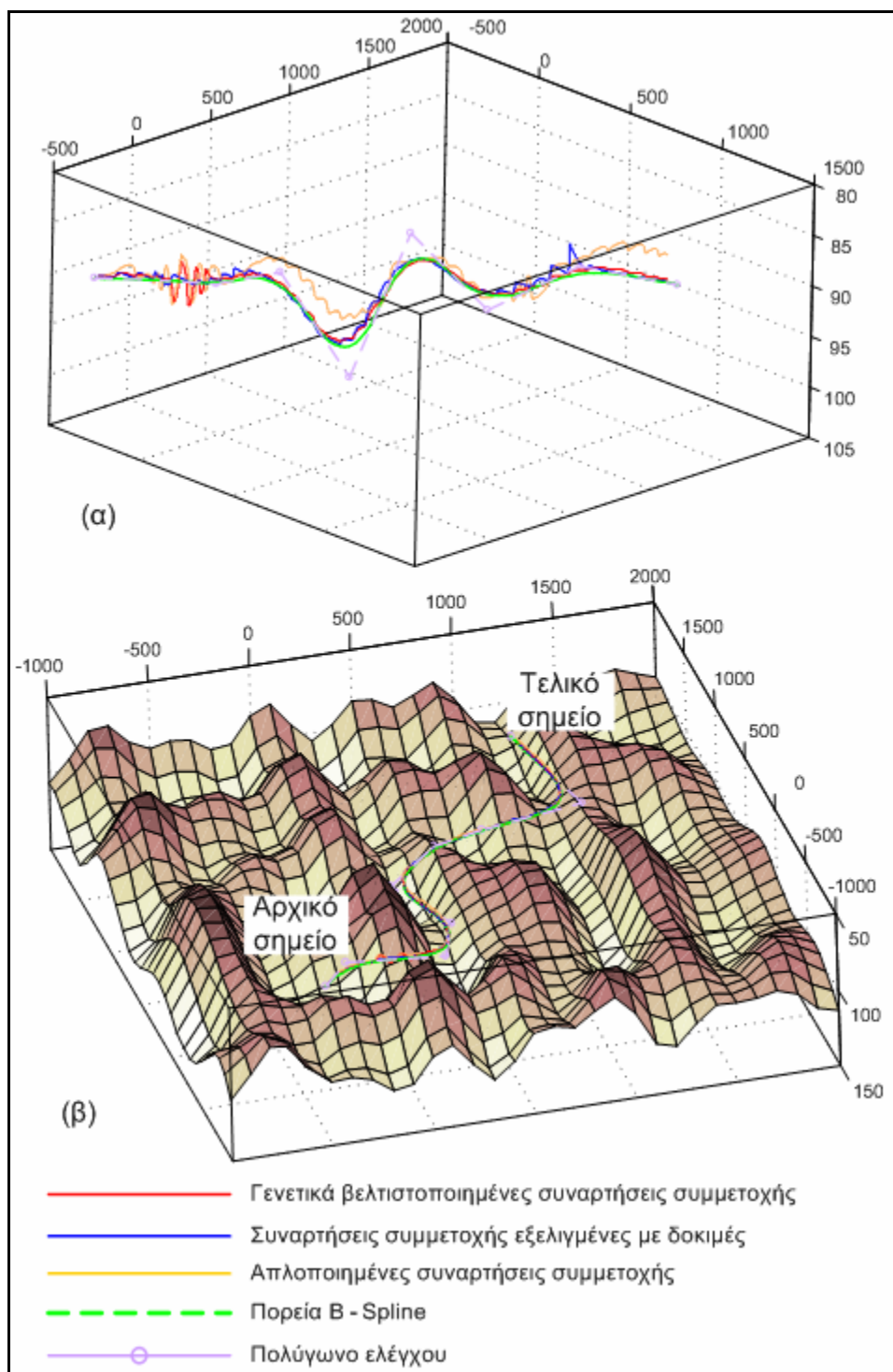
9.6.2.1 Έλεγχος επιπέδου βελτιστοποίησης ασαφών ελεγκτών κίνησης - πλοήγηση στην βέλτιστη πορεία

Στην δοκιμή αυτή το όχημα πλοηγείται στην βέλτιστη πορεία που προσδιορίστηκε στην παράγραφο 9.5 ενώ παρουσιάζεται στο Σχήμα 9-18. Η πορεία αυτή χρησιμοποιήθηκε για την εξέλιξη των γενετικά βελτιστοποιημένων ελεγκτών κίνησης. Οι προσομοιωθείσες πορείες του οχήματος για τα τρία σύνολα των ασαφών ελεγκτών κίνησης φαίνονται στο Σχήμα 9-21α με την βέλτιστη πορεία και το πολύγωνο ελέγχου. Στο Σχήμα 9-21β φαίνονται οι προσομοιωθείσες πορείες με τον πυθμένα. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ομαδοποιούνται στον Πίνακα 9-6 και μπορούν να συγκριθούν στο Σχήμα 9-22, όπου έχουν αναχθεί ως προς την απόδοση των γενετικά βελτιστοποιημένων ελεγκτών.

Από τον Πίνακα 9-6 μπορεί να διαπιστωθεί ότι οι απλοποιημένες συναρτήσεις συμμετοχής που δεν έχουν εξελιχθεί και βελτιστοποιηθεί έχουν την χειρότερη απόδοση.

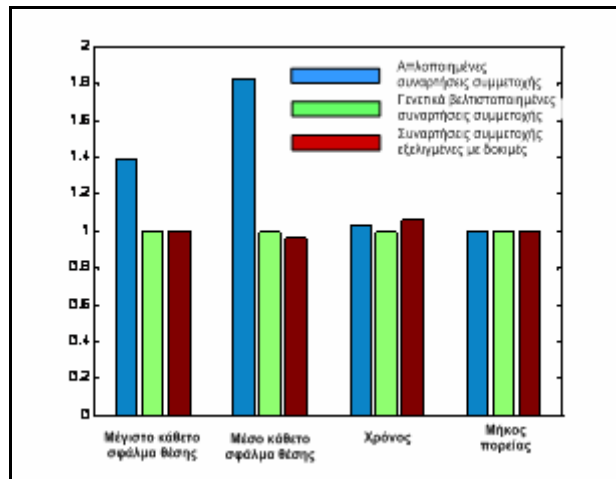
	Απλοποιημένες συναρτήσεις συμμετοχής	Γενετικά βελτιστοποιημένες συναρτήσεις συμμετοχής	Συναρτήσεις συμμετοχής εξελιγμένες με δοκιμές
Μέγιστο κάθετο σφάλμα θέσης (ft)	11.2498	8.1033	8.1408
Μέσο κάθετο σφάλμα θέσης (ft)	2.4335	1.3298	1.2812
Χρόνος (sec)	1768.4	1710.2	1815.4
Μήκος πορείας (ft)	3083.5663	3078.9227	3085.3702

Πίνακας 9-6: Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, σύγκριση σφαλμάτων πλοήγησης στην βέλτιστη πορεία



Σχήμα 9-21: Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, σύγκριση πορειών πλοήγησης στην βέλτιστη πορεία

Οι αποδόσεις των ελεγκτών που εξελίχθηκαν με δοκιμές, είναι συγκρίσιμες με τους γενετικά βελτιστοποιημένους ελεγκτές. Οι γενετικά βελτιστοποιημένοι ελεγκτές έχουν καλύτερη απόδοση σε όλα τα κριτήρια εκτός από τον απαιτούμενο χρόνο, είναι χειρότεροι κατά 3.65% από τους ελεγκτές που εξελίχθηκαν με δοκιμές.



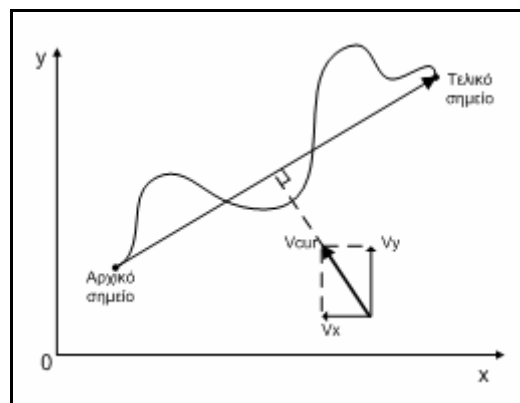
Σχήμα 9-22: Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, σύγκριση αποτελεσμάτων πλοήγησης στην βέλτιστη πορεία

9.6.2.1 Έλεγχος επιπέδου βελτιστοποίησης ασαφών ελεγκτών κίνησης - πλοήγηση στην βέλτιστη πορεία με ρεύμα

Στην δεύτερη δοκιμή προσομοίωσης για τον έλεγχο του επιπέδου βελτιστοποίησης ασαφών ελεγκτών κίνησης, λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της ύπαρξης θαλασσίου ρεύματος. Το όχημα πλοηγείται στην γενετικά υπολογισμένη βέλτιστη πορεία με τα τρία σύνολα των ασαφών ελεγκτών σε θαλάσσιο περιβάλλον όπου υπάρχει πλευρικό ρεύμα κάθετο στην πορεία κίνησης.

Η διεύθυνση του ρεύματος είναι πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και κάθετη στην διεύθυνση της κίνησης του οχήματος όπως φαίνεται στο Σχήμα 9-23.

Το μέτρο της ταχύτητας του ρεύματος είναι 0.1, 0.2 και 0.3 ft/sec. Για συντεταγμένες αρχικού σημείου [-400, -350] και τελικού σημείου [1550,1150] οι συνιστώσες της ταχύτητας ρεύματος φαίνονται στον Πίνακα 9-7.



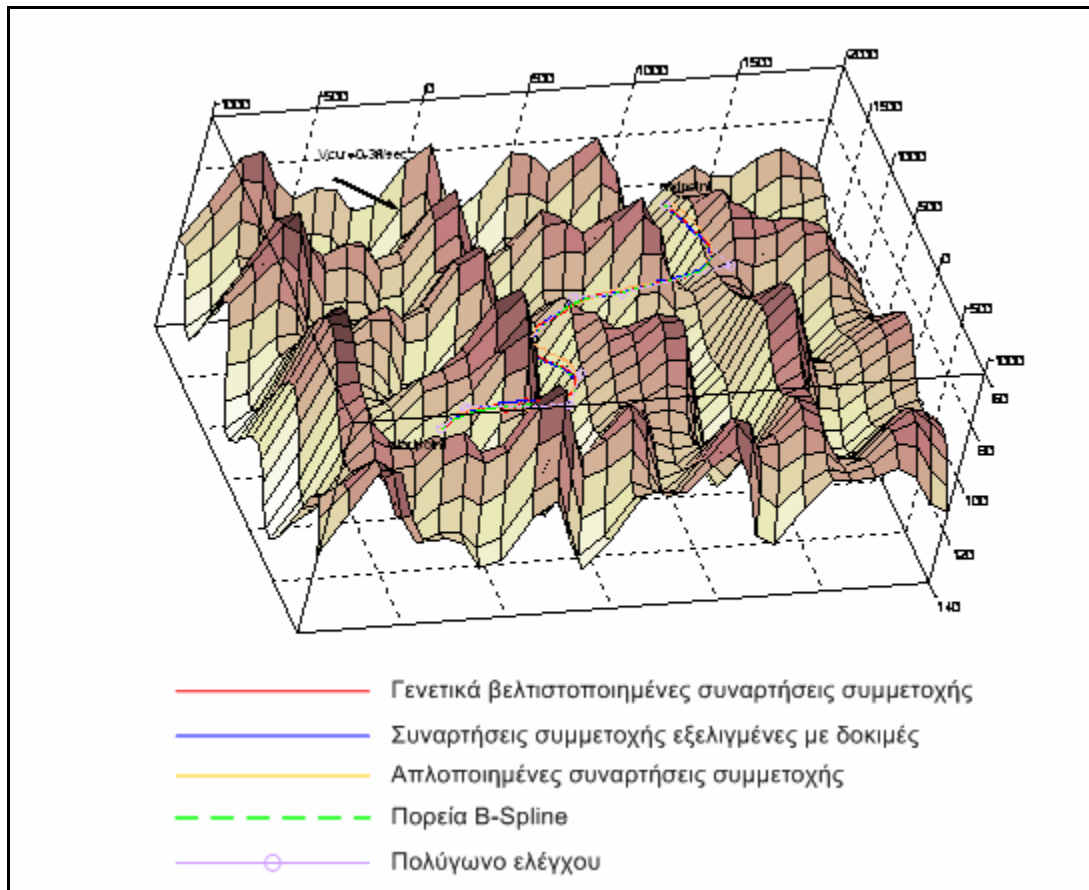
Σχήμα 9-23: Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, καθορισμός διεύθυνσης ρεύματος για πλοήγηση στην βέλτιστη πορεία με ρεύμα

Vcur (ft/sec)	Vx (ft/sec)	Vy (ft/sec)
0.1	-0.06097	0.07926
0.2	-0.1219	0.15852
0.3	-0.1829	0.2377

Πίνακας 9-7: Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, καθορισμός διεύθυνσης ρεύματος για πλοήγηση στην βέλτιστη πορεία με ρεύμα

Οι συνιστώσες αυτές τροφοδοτούνται στο μοντέλο προσομοίωσης της Simulink και προσομοιώνεται η κίνηση του οχήματος με τα τρία σύνολα των ασαφών ελεγκτών κίνησης (απλοποιημένοι, εξελιγμένοι με δοκιμές και γενετικά βελτιστοποιημένοι).

Στο Σχήμα 9-24 φαίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για ταχύτητα ρεύματος 0.3 ft/sec.



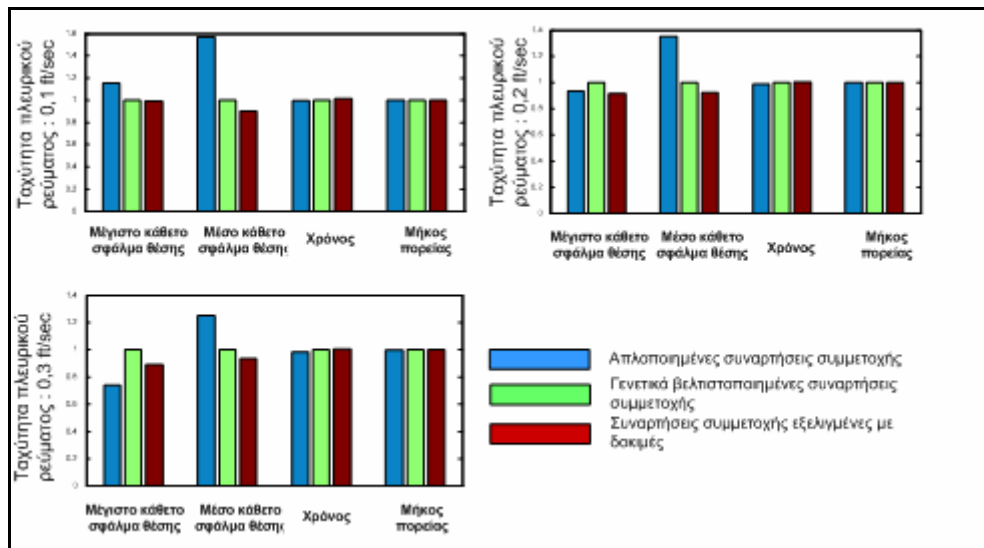
Σχήμα 9-24: Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, πλοήγηση στην βέλτιστη πορεία με ρεύμα, γενετικά βέλτιστη πορεία και θαλάσσιος πυθμένας, θαλάσσιο ρεύμα 0.3 ft/sec.

Τα αποτελέσματα για σύγκριση που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις ομαδοποιούνται στον Πίνακα 9-8 και στα ιστογράμματα του Σχήματος 9-25.

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 9-8 προκύπτει ότι όπως στην περίπτωση που δεν υπάρχει θαλάσσιο ρεύμα οι γενετικά εξελιγμένοι ασαφής ελεγκτές έχουν ελαφρά χειρότερη απόδοση από τους εξελιγμένους με δοκιμές. Επιπλέον, οι απλοποιημένοι ελεγκτές έχουν την χειρότερη απόδοση από όλους.

			Απλοποιημένες συναρτήσεις συμμετοχής	Γενετικά βελτιστοποιημένες συναρτήσεις συμμετοχής	Συναρτήσεις συμμετοχής εξελιγμένες με δοκιμές
Μέγιστο κάθετο σφάλμα θέσης (ft)	Ταχύτητα ρεύματος (ft/sec)	0.1	9.6775	8.4075	8.3006
		0.2	8.9036	9.5211	8.7098
		0.3	8.3877	11.3468	10.1037
Μέσο κάθετο σφάλμα θέσης (ft)	Ταχύτητα ρεύματος (ft/sec)	0.1	2.3000	1.4645	1.3184
		0.2	2.2722	1.6798	1.5496
		0.3	2.4068	1.9257	1.8010
Χρόνος (sec)	Ταχύτητα ρεύματος (ft/sec)	0.1	1760.6	1769.6	1794
		0.2	1766.4	1783.6	1795
		0.3	1782.4	1812.6	1818
Μήκος πορείας (ft)	Ταχύτητα ρεύματος (ft/sec)	0.1	3083.4309	3081.5763	3083.365
		0.2	3084.5759	3085.6443	3085.7056
		0.3	3086.5711	3091.6779	3090.9629

Πίνακας 9-8: Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, σύγκριση αποτελεσμάτων πλοήγησης στην βέλτιστη πορεία με ρεύμα



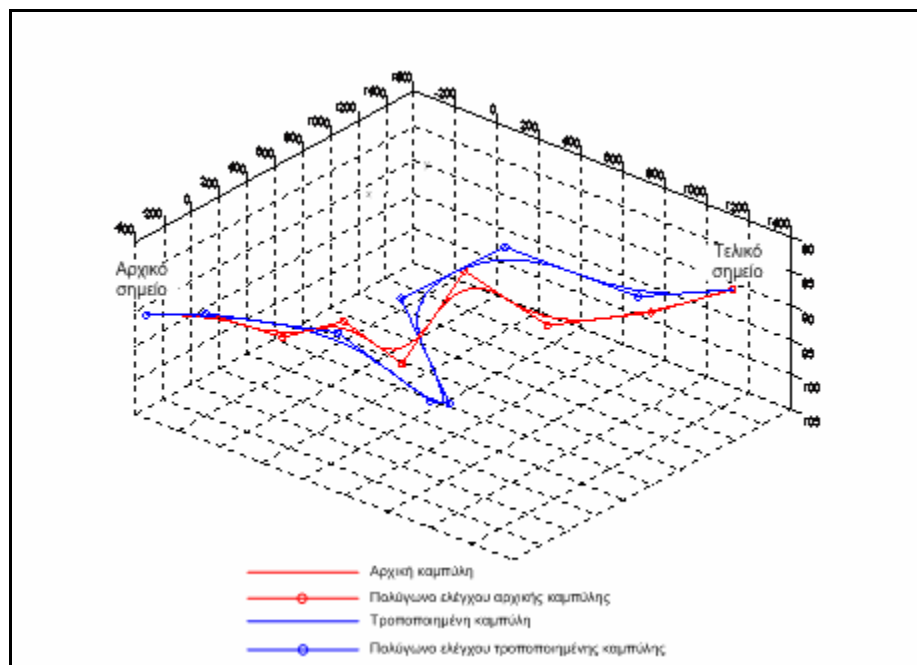
Σχήμα 9-25: Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, σύγκριση αποτελεσμάτων πλοήγησης στην βέλτιστη πορεία με ρεύμα

9.6.2.2 Έλεγχος επιπέδου βελτιστοποίησης ασαφών ελεγκτών κίνησης - πλοήγηση σε τροποποιημένη πορεία

Στην τρίτη δοκιμή προσομοίωσης συγκρίνεται η απόδοση των γενετικά εξελιγμένων ελεγκτών κίνησης όταν το όχημα κινείται σε πορεία διαφορετική από αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την εξέλιξη τους. Η σύγκριση γίνεται με τους ελεγκτές κίνησης που εξελίχθηκαν με δοκιμές και με τους απλοποιημένους και μη βελτιστοποιημένους ελεγκτές κίνησης.

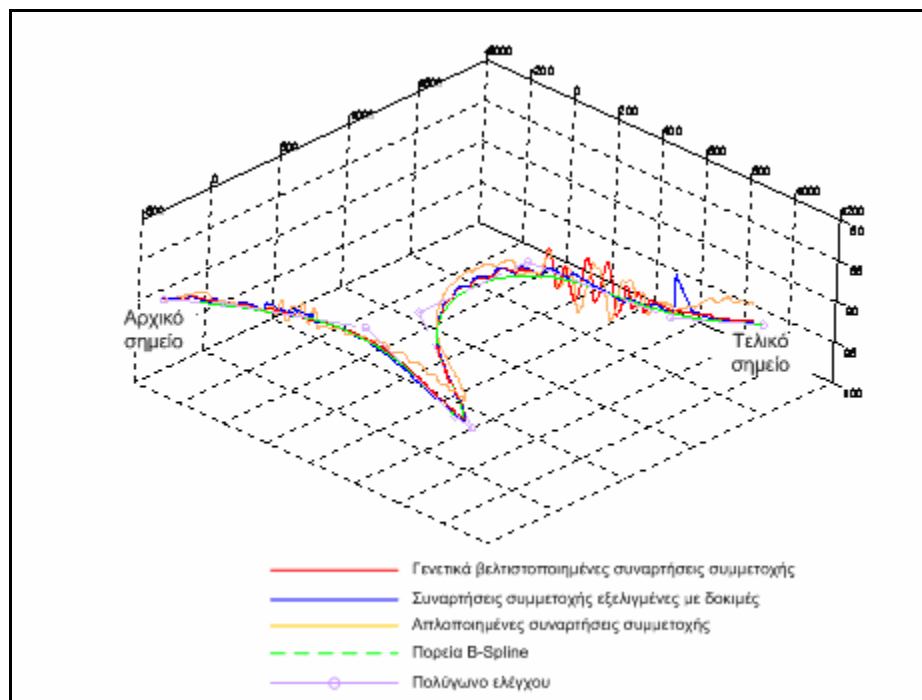
Για να γίνει η αξιολόγηση των γενετικά βελτιστοποιημένων ελεγκτών κίνησης, η βέλτιστη πορεία τροποποιείται με μετακίνηση των κινητών κορυφών του πολυγώνου ελέγχου. Το αρχικό και το τελικό σημείο καθώς και το δεύτερο σημείο του πολυγώνου παραμένουν σταθερά. Η πολυπαραμετρική καμπύλη που προκύπτει δεν αποτελεί εφικτή πορεία για το όχημα και χρησιμοποιείται μόνο για σύγκριση.

Στο Σχήμα 9-26 έχει σχεδιαστεί η τροποποιημένη πολυπαραμετρική καμπύλη B-Spline και το πολύγωνο ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση των ελεγκτών κίνησης, σε παράθεση με την αρχική καμπύλη.



Σχήμα 9-26: Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, πλοήγηση σε τροποποιημένη πορεία, αρχική και τροποποιημένη πολυπαραμετρική καμπύλη.

Στο Σχήμα 9-27 φαίνεται η πορεία προσομοίωσης του οχήματος με τους γενετικά εξελιγμένους ελεγκτές κίνησης, με τους απλοποιημένους ελεγκτές και με τους εξελιγμένους με δοκιμές ελεγκτές.

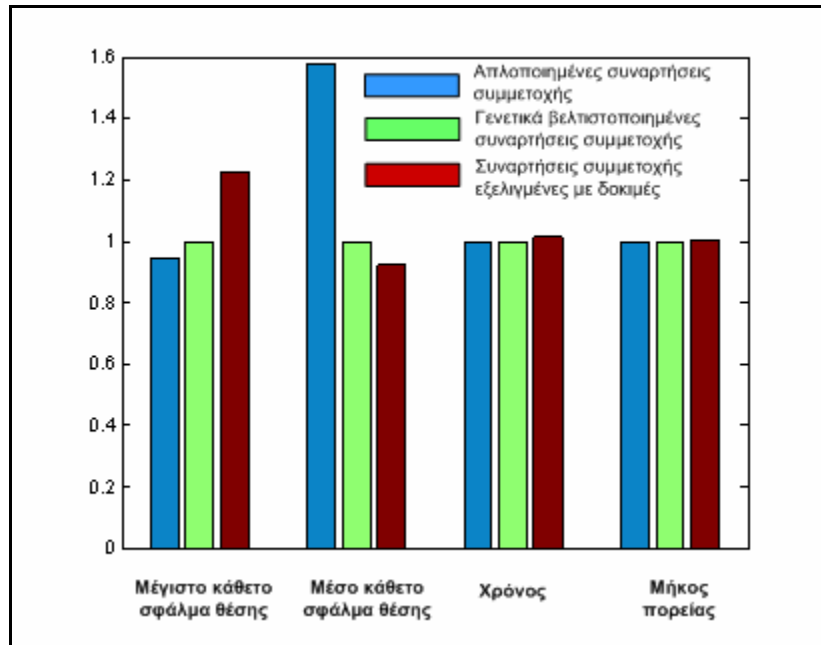


Σχήμα 9-27: Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, πλοήγηση σε τροποποιημένη πορεία, πορεία προσομοίωσης

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται στον Πίνακα 9-9 και στο Σχήμα 9-28.

	Απλοποιημένες συναρτήσεις συμμετοχής	Γενετικά βελτιστοποιημένες συναρτήσεις συμμετοχής	Συναρτήσεις συμμετοχής εξελιγμένες με δοκιμές
Μέγιστο κάθετο σφάλμα θέσης (ft)	7.9124	8.3458	10.2202
Μέσο κάθετο σφάλμα θέσης (ft)	2.7308	1.7287	1.60
Χρόνος (sec)	2035.4	2044.8	2075
Μήκος πορείας (ft)	3636.6016	3634.6776	3641.308

Πίνακας 9-9: Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, σύγκριση αποτελεσμάτων πλοήγησης σε τροποποιημένη πορεία



Σχήμα 9-28: Βελτιστοποίηση ελεγκτών κίνησης, σύγκριση αποτελεσμάτων πλοήγησης σε τροποποιημένη πορεία

Από τον Πίνακα 9-9 μπορεί να διαπιστωθεί ότι οι γενετικά εξελιγμένοι ασαφείς ελεγκτές κίνησης έχουν την καλύτερη απόδοση σε όλες τις συγκρίσεις εκτός από το μέγιστο κάθετο σφάλμα θέσης που είναι μεγαλύτερο κατά 7,4% από αυτό των ευρετικών συναρτήσεων συμμετοχής.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων οι γενετικά βελτιστοποιημένοι ελεγκτές κίνησης μπορούν να εξασφαλίσουν πλοήγηση με μικρό σφάλμα θέσης όταν το όχημα κινείται σε πορεία διαφορετική από αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την εξέλιξη των ελεγκτών.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειράματα που έγιναν σε πραγματικό όχημα για τον έλεγχο του επιπέδου ελέγχου κίνησης της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής πλοήγησης αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων.

10° Κεφάλαιο

Πειραματικά αποτελέσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από πειράματα που έγιναν έτσι ώστε να δοκιμαστεί σε πραγματικές συνθήκες η προτεινόμενη μεθοδολογία πλοήγησης αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων.

Τα πειράματα έγιναν στην δεξαμενή του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου και Ρυθμίσεως Μηχανών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. με το υποβρύχιο όχημα του εργαστηρίου. Το όχημα είναι τηλεκατευθυνόμενο τύπου Remote Operated Vehicle (ROV). Είναι το πρώτο μοντέλο παραγωγής της εταιρίας VideoRay, που έχει την έδρα της στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής. Ο προσδιορισμός της θέσης του οχήματος έγινε με οπτικό τρόπο και συγκεκριμένα με την βοήθεια του ίχνους δύο πομπών πολωμένου φωτός Laser. Η μεθοδολογία οπτικού προσδιορισμού θέσης που χρησιμοποιήθηκε έχει δημοσιευτεί στο [238].

Για την αυτόνομη πλοήγηση του οχήματος, ο έλεγχος του έγινε από Η/Υ χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση κατά την διάρκεια των πειραμάτων.

Ο προσδιορισμός της θέσης του οχήματος γίνεται ως προς στόχο που εντοπίζει η κάμερα του οχήματος και απομονώνεται από το περιβάλλον με την βοήθεια αλγορίθμων επεξεργασίας εικόνας [239]. Για την εύρεση της σχετικής θέσης του οχήματος ως προς τον στόχο απομονώνονται από την κάμερα που τροφοδοτεί η εικόνα τα ίχνη πομπών φωτός Laser που

έχουν προσαρμοστεί στο όχημα. Το μέγεθος του κάθε ίχνους και η θέση του στην εικόνα επεξεργάζονται με αλγόριθμο υπολογισμού θέσης και δίνουν το διάνυσμα θέσης του οχήματος στον χώρο, όπως εξηγείται στην συνέχεια.

Η μεθοδολογία προσδιορισμού θέσης του οχήματος αναπτύχθηκε με σκοπό την αυτόματη ακινητοποίηση του οχήματος πάνω από στόχους που επιλέγονται από τον χειριστή, ώστε να μπορεί να γίνει ακριβής παρατήρηση με την κάμερα, χωρίς η εικόνα να έχει προβλήματα εστίασης και διαταραχών από την κίνηση του οχήματος.

Λόγω της οπτικής μεθόδου υπολογισμού θέσης προέκυψαν περιορισμοί στον σχεδιασμό των πειραμάτων που αναλύονται παρακάτω. Ο κυριότερος περιορισμός είναι ότι για να υπάρξει πληροφορία για την θέση του οχήματος, πρέπει αυτό να βρίσκεται σε τέτοια θέση ώστε ο στόχος και τμήμα του περιβάλλοντος του να βρίσκονται μέσα στο οπτικό πεδίο της κάμερας. Αυτό είχε επίδραση στον σχεδιασμό των πειραμάτων, δεδομένου ότι δεν μπορούσαν να γίνουν πειράματα όπου το όχημα εκτελεί πορείες με γενική μορφή, αν δεν υπάρχει ο στόχος στο οπτικό πεδίο σε όλη την διάρκεια της πορείας.

Στην πρώτη παράγραφο παρουσιάζεται το υποβρύχιο όχημα και η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε.

Στη δεύτερη παράγραφο παρουσιάζονται η μεθοδολογία του οπτικού προσδιορισμού θέσης και τα συστήματα συντεταγμένων.

Στην τρίτη παράγραφο δίνονται οι ασαφείς ελεγκτές, που σχεδιάστηκαν για τον έλεγχο της κίνησης του οχήματος.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων, που έγιναν με την προτεινόμενη μεθοδολογία ελέγχου παρουσιάζονται στην τέταρτη παράγραφο.

Η πέμπτη παράγραφος ολοκληρώνει το κεφάλαιο με σύγκριση των αποτελεσμάτων που παρατίθενται.

10.1 Υποβρύχιο όχημα και πειραματική διάταξη

Στην παράγραφο αυτή περιγράφονται όλα τα συστήματα που συνθέτουν την πειραματική εγκατάσταση. Αναλυτικότερα περιγράφονται το τηλεχειριζόμενο υποβρύχιο όχημα ROV, η πισίνα στην οποία έγιναν τα πειράματα, η κάμερα και η κάρτα δέσμευσης εικόνας που είναι απαραίτητη για την λειτουργία της και η μονάδα ελέγχου του οχήματος με την σειριακή θύρα, τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και το λειτουργικό του.

10.1.1 Τηλεχειριζόμενο υποβρύχιο όχημα

Το όχημα που χρησιμοποιήθηκε είναι εκείνο που διαθέτει το Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου και Ρυθμίσεως Μηχανών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και φαίνεται στο Σχήμα 10-1α.

Το όχημα μπορεί να κινείται στον χώρο με τρεις βαθμούς ελευθερίας (surge, heave, yaw) και είναι σταθεροποιημένο στις κινήσεις διατοιχισμού (roll) και πρόνευσης (pitch) λόγω της θέσης του κέντρου βάρους του. Διαθέτει τρεις ωθητήρες, με τους οποίους μπορεί να κινηθεί κατά τον οριζόντιο άξονα X , τον κατακόρυφο Z και να περιστραφεί γύρω από τον Z . Οι δύο είναι τοποθετημένοι διαμήκως κατά τον άξονα X , εξασφαλίζοντας την εμπρός και πίσω κίνηση του ρομπότ και την περιστροφή περί τον κατακόρυφο άξονα Z , ενώ ο τρίτος στην μέση, εξασφαλίζοντας την ανάδυση και κατάδυση του οχήματος. Λόγω του αριθμού και της χωροθέτησης των κινητήρων του οχήματος δεν είναι δυνατή η άμεση μετακίνηση του κατά τον εγκάρσιο άξονα Y (sway) διότι δεν υπάρχει κινητήρας σε αυτήν την κατεύθυνση. Η μετακίνηση κατά τον άξονα Y γίνεται με συγχρονισμένες αλλαγές κατεύθυνσης και διαμήκους θέσης. Αυτό έχει ληφθεί υπόψιν στον σχεδιασμό του ελεγκτή κίνησης που παρουσιάζεται παρακάτω.

Οι κινητήρες έχουν τάση λειτουργίας από 0 έως 24 V και δέχονται ως εντολή κίνησης ένα αναλογικό σήμα με εύρος 0 – 200. Για την αναστροφή της φοράς περιστροφής αναστρέφεται η τάση του κινητήρα. Ανάλογα με την φορά περιστροφής το όχημα κινείται εμπρός ή πίσω και αναδύεται η καταδύεται (μεσαίος κινητήρας). Όταν οι δύο πλευρικοί κινητήρες δέχονται την ίδια τάση το ρομπότ κινείται σε ευθύγραμμη τροχιά, ενώ όταν δέχονται διαφορετική το όχημα στρίβει γύρω από τον Z άξονα του τοπικού συστήματος συντεταγμένων του.



Σχήμα 10-1: (α) Τηλεχειριζόμενο υποβρύχιο όχημα Videoray, (β) Πισίνα δοκιμών

10.1.2 Πισίνα δοκιμών

Η πισίνα που χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα, είναι αυτή που διαθέτει το Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. Έχει διάμετρο 2 m και ύψος 1.5 m (Σχήμα 10-1β).

10.1.3 Κάμερα και κάρτα δέσμευσης εικόνας

Το ROV διαθέτει μία έγχρωμη CCD κάμερα, με δυνατότητα περιστροφής tilt up, tilt down και ταυτόχρονης εστίασης. Για την αξιοποίηση της κάμερας στο μοντέλο αυτό είναι απαραίτητη η σύνδεση της μονάδας ελέγχου με ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω της κάρτας δέσμευσης εικόνας.

Η κάρτα δέσμευσης εικόνας που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου PCI της εταιρίας Imagenation (model PXC 200A). Μπορεί να λειτουργήσει σε τρία λειτουργικά συστήματα : Windows, QNX και Linux. Στην εν λόγω πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκε Linux.

Το υποβρύχιο όχημα φέρει δύο προβολείς τοποθετημένους συμμετρικά στο μπροστινό του μέρος. Η φωτεινότητα των προβολέων ρυθμίζεται από το εύρος της τάσης που δέχονται (0 – 200). Λόγω του μικρού βάθους, στο οποίο διεξήχθησαν τα πειράματα, αξιοποιήθηκε ο φωτισμός του χώρου χωρίς την χρήση των προβολέων του οχήματος.

10.1.4 Μονάδα ελέγχου οχήματος

Το τηλεχειριζόμενο όχημα Videoray συνοδεύεται από μία μονάδα ελέγχου, η οποία επιτρέπει στον χρήστη να χειρίζεται το όχημα (Σχήμα 10-2). Με την βοήθεια της μονάδας ελέγχου το όχημα μπορεί να ελεγχθεί στους τρεις βαθμούς ελευθερίας που διαθέτει. Οι κινήσεις γίνονται με τη βοήθεια ενός χειριστηρίου, που βρίσκεται πάνω στην μονάδα ελέγχου.

Η μονάδα ελέγχου είναι εξοπλισμένη με πυξίδα και μετρητή βάθους, που λειτουργεί με βάση τη διαφορά πίεσης και διαθέτει οθόνη, η οποία ενημερώνει τον χειριστή για το βάθος στο οποίο βρίσκεται το όχημα καθώς και για τον προσανατολισμό του με βάση τα σημεία του ορίζοντα. Συνδέεται με το ROV με ένα καλώδιο μήκους 80 ποδιών, που χρησιμεύει για τροφοδοσία ισχύος και μεταφορά δεδομένων.

Για την επικοινωνία με Η/Υ η μονάδα ελέγχου διαθέτει σειριακή θύρα (RS-232) και συνδέεται με τον Η/Υ με την βοήθεια ενός σειριακού καλωδίου. Με την βοήθεια της σειριακής θύρας μπορεί να υπάρχει επικοινωνία του ROV με τον υπολογιστή. Τα δεδομένα από το όχημα (εικόνα από την κάμερα) στέλνονται στον Η/Υ και επιστρέφονται οι εντολές κίνησης (αναλογική τάση και φορά περιστροφής κινητήρων). Έτσι το καλώδιο χρησιμεύει μόνο για την παροχή ρεύματος στο ρομπότ και για την ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ του οχήματος και του Η/Υ.

Με την σύνδεση της μονάδας ελέγχου με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή, το τηλεχειριζόμενο όχημα μετατρέπεται σε αυτόνομο υποβρύχιο όχημα. Ο έλεγχος και η ροή πληροφοριών στο ROV είναι ίδιος με τον έλεγχο και την ροή πληροφοριών σε ένα αυτόνομο υποβρύχιο όχημα, με μόνη διαφορά τις δυνάμεις που δέχεται το όχημα από το καλώδιο, οι οποίες απουσιάζουν σε ένα αυτόνομο όχημα, το οποίο έχει την ενσωματωμένη την υπολογιστική μονάδα, ενώ η παροχή της απαιτούμενης ενέργειας εξασφαλίζεται από συσσωρευτές που μεταφέρει το όχημα.

Ο Η/Υ που χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο του οχήματος και την διενέργεια των πειραμάτων, έχει επεξεργαστή AMD στα 1.6 GHz και μνήμη RAM 1024 MB. Το λειτουργικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε είναι Red Hat Linux 7.3 με έκδοση πυρήνα 2.4.18-3.



Σχήμα 10-2: Μονάδα ελέγχου τηλεχειριζόμενου υποβρύχιου οχήματος.

10.2 Οπτικός υπολογισμός θέσης

Ο προσδιορισμός του διανύσματος θέσης και προσανατολισμού του οχήματος του υποβρυχίου ρομποτικού οχήματος γίνεται ως προς ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς το οποίο τοποθετείται στο κέντρο βάρους του υπό επιθεώρηση στόχου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10-3. Το διάνυσμα θέσης είναι ένα διάνυσμα της μορφής :

$$n = \begin{bmatrix} n_1^T & n_2^T \end{bmatrix}^T; n_1 = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^T; n_2 = \begin{bmatrix} \phi & \theta & \psi \end{bmatrix}^T$$

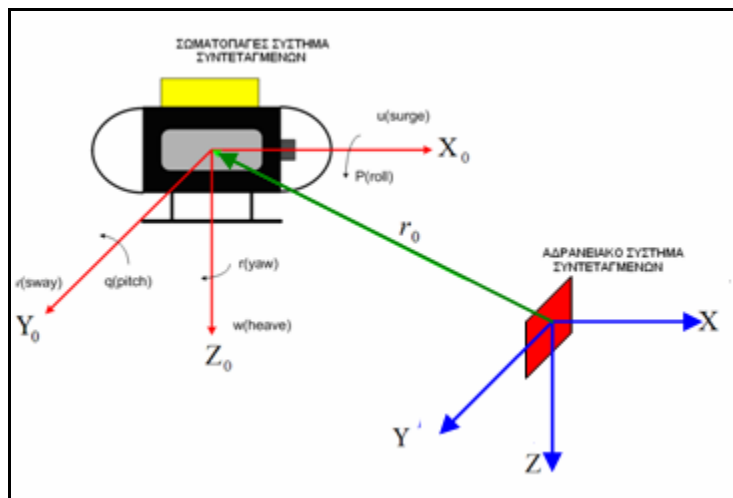
Τα τρία πρώτα στοιχεία του διανύσματος περιγράφουν τη θέση του υποβρυχίου ως προς το αδρανειακό σύστημα ενώ τα τρία τελευταία τις γωνίες διατοιχισμού, προσανατολισμού και πρόνευσης.

Για τον υπολογισμό του διανύσματος θέσης γίνεται σύγκριση των ιχνών των δεικτών laser που αναγνωρίζονται στην οθόνη. Η αρχή του αδρανειακού συστήματος συντεταγμένων τοποθετείται στο κέντρο βάρους του στόχου, το οποίο επαναυπολογίζεται σε κάθε κύκλο. Αυτό δημιουργεί

λάθη στην θέση του οχήματος, που υπολογίζεται και επιστρέφεται στον ασαφή ελεγκτή κίνησης. Ο άξονας X έχει κατεύθυνση προς το βάθος του στόχου, ο Y έχει κατεύθυνση προς τα δεξιά και ο Z έχει κατεύθυνση προς τα κάτω.

Ο υπολογισμός της κατακόρυφης απόστασης z του υποβρυχίου ως προς το κέντρο βάρους του στόχου γίνεται με σύγκριση της κατακόρυφης θέσης των ιχνών των Laser Pointers στην εικόνα που επιστρέφει η κάμερα.

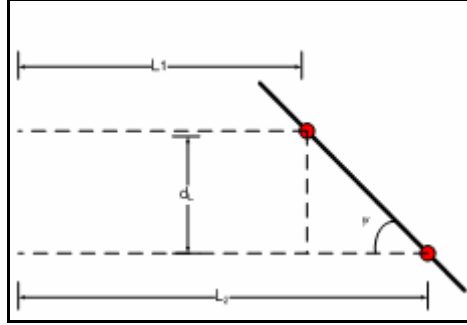
Για τον υπολογισμό των συντεταγμένων x και y και της γωνίας κατεύθυνσης τα ίχνη των δεικτών laser συγκρίνονται με έτοιμους πίνακες θέσης που δείχνουν την θέση των ιχνών για δεδομένες γνωστές θέσεις του οχήματος. Οι γωνίες πρόνευσης και διατοιχισμού του υποβρυχίου δεν μπορούν να υπολογιστούν με την συγκεκριμένη μεθοδολογία και την διάταξη με δύο δείκτες που χρησιμοποιήθηκε. Για τον υπολογισμό της γωνίας πρόνευσης είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός τρίτου δείκτη σε επίπεδο διαφορετικό από αυτό των δύο υπαρχόντων δεικτών. Ο υπολογισμός της γωνίας διατοιχισμού δεν είναι δυνατός διότι η κάμερα περιστρέφεται μαζί με τους δείκτες και κατά συνέπεια δεν παρατηρείται καμία αλλαγή στην εικόνα που θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για τον υπολογισμό της αντίστοιχης γωνίας.



Σχήμα 10-3: Ορισμοί συστημάτων συντεταγμένων

Όταν το όχημα κινείται στη διεύθυνση μίας ευθείας κάθετης στο επίπεδο πρόσπτωσης της κουκίδας, τότε ο γεωμετρικός τόπος της κουκίδας του δείκτη στην εικόνα της κάμερας είναι μία ευθεία δεδομένου οι δείκτες laser είναι τοποθετημένοι έτσι ώστε να είναι παράλληλοι με τον άξονα της κάμερας και παράλληλοι μεταξύ τους. Όταν το όχημα τοποθετηθεί σε μία σταθερή και κατακόρυφη απόσταση από το επίπεδο του στόχου, στην εικόνα της κάμερας εμφανίζονται τα δύο ίχνη των δεικτών. Καθώς το όχημα κινείται προς στόχο, τα ίχνη των δεικτών laser απομακρύνονται από το κέντρο της εικόνας. Αντίθετα όταν όχημα απομακρύνεται από τον στόχο τα ίχνη των δεικτών laser κινούνται προς το κέντρο της εικόνας. Έτσι σε κάθε θέση του υποβρυχίου, αντιστοιχεί μια διαφορετική θέση του κέντρου βάρους του ίχνους κάθε δείκτη ως

προς το κέντρο της εικόνας της κάμερας. Η θέση του ίχνους των δεικτών έχει υπολογιστεί για διάφορες τιμές της απόστασης από τον στόχο και υπάρχει σε έτοιμους πίνακες. Με σύγκριση της θέσης του ίχνους με τα δεδομένα των πινάκων για την θέση του ίχνους για διάφορες γνωστές θέσεις του οχήματος, υπολογίζεται η θέση του οχήματος στην χρονική στιγμή που η κάρτα δέσμευσης εικόνας δεσμεύει την εικόνα που βλέπει η κάμερα.



Σχήμα 10-4: Υπολογισμός γωνίας κατεύθυνσης

Ο υπολογισμός της θέσης του οχήματος γίνεται με τις αποστάσεις των δύο δεικτών από το επίπεδο του στόχου, σε σχέση με την θέση του κέντρου βάρους του στόχου στην εικόνα. Ο υπολογισμός της γωνίας κατεύθυνσης γίνεται σύμφωνα με το Σχήμα 10-4.

Οι αποστάσεις L_1 και L_2 υπολογίζονται από τα Laser που βρίσκονται στο πάνω μέρος του υποβρυχίου και κατά συνέπεια η γωνία ψ θα δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\begin{aligned} d_r &= L_1 - L_2 \\ \psi &= \arctan(d_L / d_r) \end{aligned} \quad (10.1)$$

Η θέση του οχήματος ως προς το αδρανειακό σύστημα που έχει αρχή το κέντρο βάρους του στόχου υπολογίζεται σύμφωνα με το Σχήμα 10-5. Αν $n = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T$ είναι το διάνυσμα θέσης του οχήματος ως προς τον στόχο, τότε αναλυτικά τα στοιχεία του διανύσματος υπολογίζονται ως ακολούθως [238]:

Η συντεταγμένη x υπολογίζεται ως εξής:

$$n_1 = x \Rightarrow n_1 = X_0 \cos \phi \Rightarrow n_1 = (L_1 + c) \cos\left(\frac{\pi}{2} - b\right) \Rightarrow n_1 = \left[L_1 + \tan\left(\frac{\pi}{2} - b\right) \frac{d_L}{2}\right] \cos\left(\frac{\pi}{2} - b\right) \quad (10.2)$$

Η συντεταγμένη y υπολογίζεται ως εξής:

$$n_2 = y_1 + y_2 = \frac{Y_0}{\cos \phi} + X_0 \sin \phi = \frac{Y_0}{\cos(\frac{\pi}{2} - b)} + X_0 \sin(\frac{\pi}{2} - b) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow n_2 = \frac{u - x_0 x}{a_x \cos(\frac{\pi}{2} - b)} + [L_1 + \tan(\frac{\pi}{2} - b) \frac{d_L}{2}] \sin(\frac{\pi}{2} - b)$$
(10.3)

Η συντεταγμένη z υπολογίζεται ως εξής:

$$n_3 = \frac{v - y_0 x}{a_y}$$
(10.4)

Η γωνία κατεύθυνσης ψ υπολογίζεται ως εξής:

$$n_6 = \psi = \frac{\pi}{2} - b \Rightarrow n_6 = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{d_L}{L_2 - L_1}\right),$$
(10.5)

όπου:

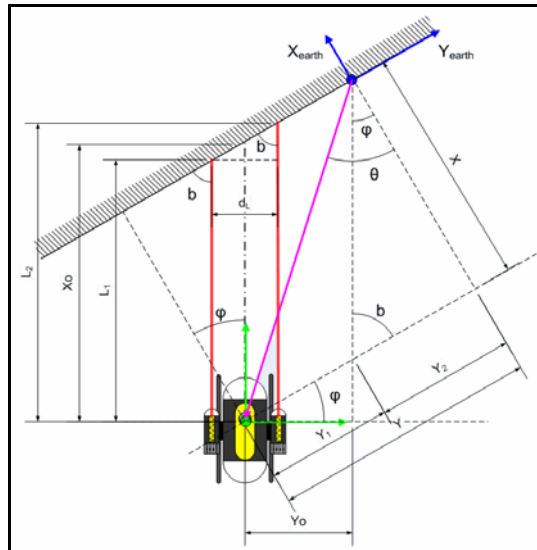
L_1, L_2 : Οι αποστάσεις που επιστρέφουν οι δείκτες 1, 2.

b : Η γωνία που υπολογίζεται από τους δείκτες 1, 2.

X_0 : Η κατακόρυφη απόσταση του υποβρυχίου από την επιφάνεια.

Y_0 : Η οριζόντια απόσταση του υποβρυχίου από τον στόχο.

x, y, ϕ : Οι συντεταγμένες και η κλίση γύρω από τον Z άξονα του οχήματος, ως προς το αδρανειακό σύστημα αναφοράς που ορίζεται από τον στόχο.



Σχήμα 10-5: Οπτικός υπολογισμός θέσης υποβρυχίου οχήματος.

10.3 Ασαφείς ελεγκτές κίνησης

Για τον έλεγχο της κίνησης του υποβρυχίου οχήματος ROV Videoray εφαρμόστηκε η προτεινόμενη μεθοδολογία ελέγχου κίνησης αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων που αναλύεται στην παράγραφο 6.5. Το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου της παραγράφου 6.5 περιλαμβάνει πέντε υποσυστήματα ελέγχου κίνησης και συγκεκριμένα:

Το επίπεδο ελέγχου κίνησης αποτελείται από πέντε ασαφή υποσυστήματα ελέγχου:

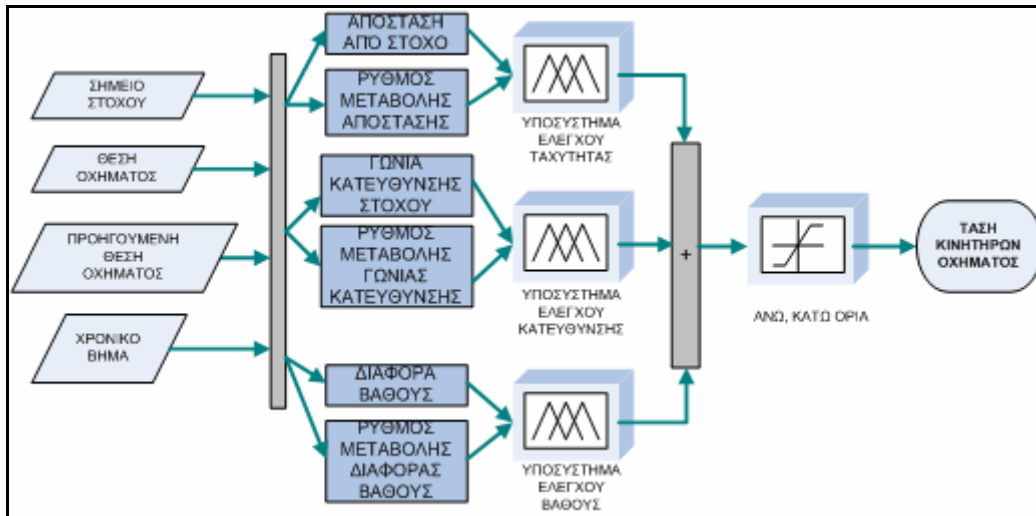
1. Το υποσύστημα ελέγχου ταχύτητας.
2. Το υποσύστημα ελέγχου κατεύθυνσης.
3. Το υποσύστημα ελέγχου βάθους, το οποίο ρυθμίζει την γωνία πρόνευσης και το βάθος.
4. Το υποσύστημα ελέγχου διατοιχισμού.
5. Το υποσύστημα ελέγχου θαλασσίου ρεύματος.

Δεδομένου ότι δεν υπάρχει θαλάσσιο ρεύμα, διατοιχιστική κίνηση και ένδειξη θέσης για την γωνία πρόνευσης, τα υποσυστήματα ελέγχου διατοιχισμού και ελέγχου διατοιχισμού καθώς επίσης και το τμήμα ρύθμισης της γωνίας πρόνευσης του ελεγκτή κίνησης της παραγράφου 6.5 μπορούν να απενεργοποιηθούν, οπότε ο ελεγκτής κίνησης απλοποιείται στην μορφή του Σχήματος 10-6, που περιλαμβάνει τους τρεις ασαφείς ελεγκτές ταχύτητας, κατεύθυνσης και βάθους. Τα δεδομένα εισόδου επεξεργάζονται και υπολογίζονται οι διαφορές και οι ρυθμοί μεταβολής που τροφοδοτούνται στους τρεις ελεγκτές κίνησης.

Σε κάθε κύκλο στον ελεγκτή εισάγονται τα δεδομένα της θέσης του οχήματος, που προσδιορίζονται από τον οπτικό αλγόριθμο. Τα δεδομένα αυτά είναι ένα διάνυσμα της μορφής

$$\eta = [x, y, z, \psi], \quad (10.6)$$

που περιέχει την θέση του οχήματος στους άξονες X , Y , Z και την γωνία κατεύθυνσης ψ του οχήματος.



Σχήμα 10-6: Ελεγκτής κίνησης ρομποτικού οχήματος Videoray.

Για τον υπολογισμό των διαφορών θέσης και των ταχυτήτων κρατιέται στην μνήμη το διάνυσμα της θέσης του οχήματος στον προηγούμενο κύκλο και υπολογίζεται το χρονικό διάστημα που μεσολάβησε από την προηγούμενη επικοινωνία Η/Υ – οχήματος. Έτσι το διάνυσμα εισόδου στον ασαφή ελεγκτή έχει την μορφή:

$$data = \begin{bmatrix} [x, y, z, y]_n, & [x, y, z, y]_{n-1}, & \Delta t \end{bmatrix}. \quad (10.7)$$

Ο υπολογισμός των διαφορών γωνιών και απόστασης γίνεται σύμφωνα με όσα αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 6.5.2. Η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ υπολογιστή και οχήματος γίνεται όταν ολοκληρωθούν οι υπολογισμοί σε χρονικά βήματα περίπου 0.2 sec.

Οι τρεις ασαφείς ελεγκτές *ταχύτητας*, *κατεύθυνσης* και *βάθους* σχεδιάστηκαν ώστε να έχουν όμοια δομή με τον ίδιο αριθμό εισόδων και εξόδων καθώς και με την ίδια βάση κανόνων για υπολογιστική απλότητα. Το επίπεδο ελέγχου κίνησης με τους τρεις ελεγκτές γράφτηκε σε γλώσσα προγραμματισμού C έτσι ώστε όταν ένας από τους τρεις ελεγκτές πρέπει να δώσει συμπέρασμα και εντολή κίνησης να καλείται η ίδια συνάρτηση που περιέχει την βάση κανόνων. Ο κώδικας δίνεται στο Παράρτημα Γ.

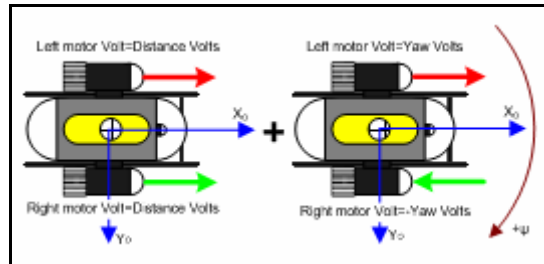
Τα ορίσματα της συνάρτησης αποτελούνται αφενός από τις συναρτήσεις συμμετοχής του κάθε ελεγκτή και αφετέρου από τις εισόδους του ελεγκτή. Οι συναρτήσεις συμμετοχής και οι επιφάνειες ελέγχου και των τριών ελεγκτών *ταχύτητας*, *κατεύθυνσης* και *βάθους* έχουν την ίδια μορφή και για αυτό τον λόγο παρακάτω παρουσιάζονται σε διαγράμματα οι συναρτήσεις συμμετοχής και η επιφάνεια ελέγχου μόνο του ελεγκτή βάθους.

Η τάση που δίνει ο ελεγκτής *βάθους* τροφοδοτείται αυτούσια στον κάθετο κινητήρα του οχήματος. Το άθροισμα των τάσεων που δίνουν οι ελεγκτές *απόστασης* και *κατεύθυνσης* τροφοδοτείται στον αριστερό κινητήρα του οχήματος ενώ η διαφορά τους τροφοδοτείται στον δεξιό κινητήρα,

όπως φαίνεται στο Σχήμα 10-7. Πριν την αποστολή των τάσεων στο όχημα τίθεται το όριο ελάχιστης και μέγιστης τιμής δηλαδή -200 και 200 αντίστοιχα. Έτσι:

$$\text{Left motor Volt} = \text{Distance Volts} + \text{Yaw Volts}$$

$$\text{Right motor Volt} = \text{Distance Volts} - \text{Yaw Volts}. \quad (10.8)$$



Σχήμα 10-7: Υπολογισμός τάσεων αριστερού και δεξιού κινητήρα.

10.3.1 Ασαφής ελεγκτής βάθους

Ο ασαφής ελεγκτής βάθους ρυθμίζει την τάση στον κάθετο κινητήρα του οχήματος ώστε αυτό να διατηρείται στο επιθυμητό βάθος. Οι εισοδοί του ελεγκτή βάθους είναι :

1. Η διαφορά βάθους από τον στόχο με λεκτικές μεταβλητές: [μεγάλη αρνητική, αρνητική, μηδέν, θετική, μεγάλη θετική].
2. Ο ρυθμός μεταβολής διαφοράς βάθους με λεκτικές μεταβλητές: [αρνητικός, μηδέν, θετικός].

Η έξοδος του ελεγκτή βάθους είναι:

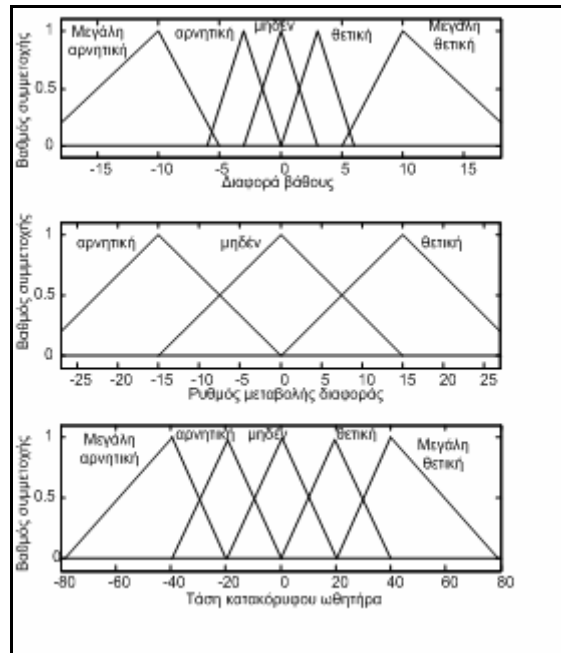
1. Η τάση του κατακόρυφου κινητήρα με λεκτικές μεταβλητές: [μεγάλη αρνητική, αρνητική, μηδέν, θετική, μεγάλη θετική].

Οι κανόνες του ελεγκτή βάθους φαίνονται στον Πίνακα 10-1.

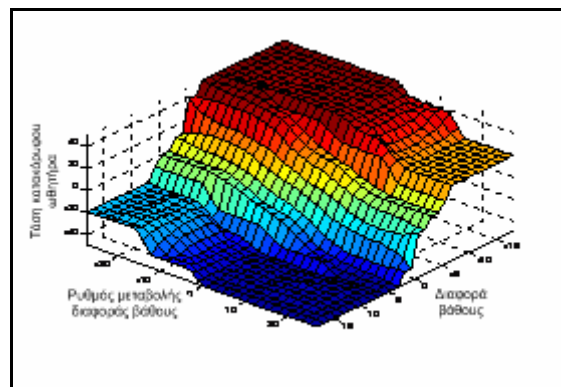
		Διαφορά βάθους				
		μεγάλη αρνητική	αρνητική	μηδέν	θετική	μεγάλη θετική
Ρυθμός μεταβολής διαφοράς βάθους	αρνητικός	μεγάλη θετική	μεγάλη θετική	θετική	μηδέν	αρνητική
	μηδέν	μεγάλη θετική	θετική	μηδέν	αρνητική	μεγάλη αρνητική
	θετικός	θετική	μηδέν	αρνητική	μεγάλη αρνητική	μεγάλη αρνητική

Πίνακας 10-1: Βάση κανόνων ελεγκτή βάθους

Οι συναρτήσεις συμμετοχής των εισόδων και της εξόδου για τον ασαφή ελεγκτή βάθους φαίνονται στο Σχήμα 10-8. Στο Σχήμα 10-9 φαίνεται η επιφάνεια ελέγχου, που προκύπτει από τους κανόνες.



Σχήμα 10-8: Συναρτήσεις συμμετοχής ασαφή ελεγκτή βάθους



Σχήμα 10-9: Επιφάνεια ελέγχου ελεγκτή βάθους

10.3.2 Ασαφής ελεγκτής κατεύθυνσης

Ο ασαφής ελεγκτής κατεύθυνσης ρυθμίζει την τάση που προστίθεται στον αριστερό κινητήρα και που αφαιρείται από τον δεξιό κινητήρα ώστε να δημιουργηθεί ροπή αλλαγής της γωνίας κατεύθυνσης του οχήματος. Οι είσοδοι του ελεγκτή κατεύθυνσης είναι :

1. Η διαφορά γωνίας κατεύθυνσης από τον στόχο με λεκτικές μεταβλητές: [μεγάλη αρνητική, αρνητική, μηδέν, θετική, μεγάλη θετική].
2. Ο ρυθμός μεταβολής διαφοράς γωνίας κατεύθυνσης με λεκτικές μεταβλητές: [αρνητικός, μηδέν, θετικός].

Η έξοδος του ελεγκτή κατεύθυνσης είναι:

1. Η *τάση των κινητήρων* με λεκτικές μεταβλητές: [μεγάλη αρνητική, αρνητική, μηδέν, θετική, μεγάλη θετική].

10.3.3 Ασαφής ελεγκτής απόστασης

Ο ασαφής ελεγκτής κατεύθυνσης ρυθμίζει την τάση που προστίθεται στον αριστερό και στον δεξιό κινητήρα, ώστε να δημιουργηθεί δύναμη που κινεί το όχημα κατά την διεύθυνση του άξονα X , έτσι ώστε να ελέγχεται η απόσταση από το σημείο στόχου. Οι είσοδοι του ελεγκτή απόστασης είναι :

1. η *απόσταση* από τον στόχο με λεκτικές μεταβλητές: [μηδέν, θετική, μεγάλη θετική].
2. ο *ρυθμός μεταβολής απόστασης* με λεκτικές μεταβλητές: [αρνητικός, μηδέν, θετικός].

Η έξοδος του ελεγκτή απόστασης είναι:

1. η *τάση των κινητήρων* με λεκτικές μεταβλητές: [μεγάλη αρνητική, αρνητική, μηδέν, θετική, μεγάλη θετική].

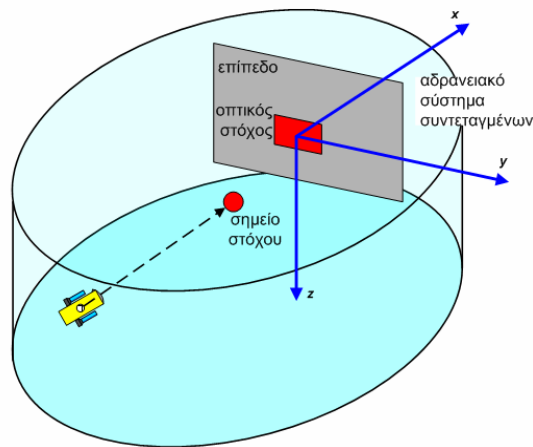
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η είσοδος *απόσταση* από τον στόχο υπολογίζεται ως η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος του τετραγώνου των συντεταγμένων της θέσης του οχήματος και είναι πάντα θετική.

10.4 Πειράματα ελέγχου κίνησης με το υποβρύχιο όχημα Videoray

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων, που έγιναν για τον έλεγχο της μεθοδολογίας ελέγχου κίνησης με το υποβρύχιο ρομποτικό όχημα ROV Videoray. Σχεδιάστηκαν τρία πειράματα, λαμβανομένου υπόψη του περιορισμού που θέτει ο οπτικός προσδιορισμός θέσης του οχήματος. Συγκεκριμένα, για να υπάρξει υπολογισμός και ανατροφοδότηση ένδειξης θέσης το όχημα θα πρέπει να βρίσκεται σε όλη την διάρκεια του πειράματος σε τέτοια θέση ώστε ο οπτικός στόχος και τα ίχνη των δεικτών να βρίσκονται στην εικόνα της κάμερας. Επίσης, για να μην υπάρχουν λανθασμένοι υπολογισμοί απόστασης του κάθε δείκτη από το επίπεδο του στόχου και κατά συνέπεια λάθη στους υπολογισμούς θέσης και κατεύθυνσης, θα πρέπει τα ίχνη των δεικτών να βρίσκονται πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια και όχι στην καμπύλη επιφάνεια της δεξαμενής.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε περιλαμβάνει μια δεξαμενή με διάμετρο 2m και βάθος 1,5m μέσα στην οποία τοποθετήθηκε ένα επίπεδο έλασμα διαστάσεων 1,4 m x 1,0 m. Πάνω στο έλασμα υπήρχε ένας οπτικός στόχος από κόκκινο τετράγωνο χαρτί διαστάσεων 20 cm x 25 cm.

Η πειραματική διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 10-10.



Σχήμα 10-10: Πειραματική διάταξη

Η θέση του οχήματος προσδιορίζεται ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων που έχει αρχή το κέντρο βάρους του οπτικού στόχου και αναπροσδιορίζεται σε κάθε κύκλο. Το όχημα κατευθύνεται προς ένα ή περισσότερα σημεία στόχου με σταθερές συντεταγμένες στο αδρανειακό σύστημα αξόνων.

Σχεδιάστηκαν και πραγματοποιήθηκαν τρία πειράματα τα οποία περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

10.4.1 Πλοήγηση προς στόχο

Στο πρώτο πείραμα το όχημα ξεκινάει από μια θέση στην πίσина προς ένα σταθερό σημείο στόχου. Αφού φτάσει στο σημείο στόχου σταθεροποιείται μέχρι την ολοκλήρωση των κύκλων του πειράματος.

Έγιναν τέσσερις δοκιμές με ήρεμο νερό και για κάθε δοκιμή έγιναν τα διαγράμματα της θέσης του οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο όπου με κύκλο σημαίνεται το σημείο στόχου.

Έγιναν τα διαγράμματα της θέσης του οχήματος στους άξονες X , Y και Z σε συνάρτηση με τον χρόνο και το διάγραμμα της γωνίας κατεύθυνσης για κάθε κύκλο επικοινωνίας οχήματος και υπολογιστή, όπου με κόκκινες γραμμές σημειώνονται οι συντεταγμένες του σημείου στόχου.

Η κάθε δοκιμή χωρίζεται σε δύο τμήματα. Στο πρώτο τμήμα το όχημα κατευθύνεται από το αρχικό σημείο προς το σημείο στόχου. Για να αξιολογηθεί η απόδοση του ελεγκτή στο τμήμα αυτό μετρήθηκε για κάθε κύκλο η κάθετη απόσταση από την ευθεία κατεύθυνσης που ενώνει την αρχική θέση του οχήματος με το σημείο στόχου. Επίσης υπολογίστηκε η μέση κάθετη απόσταση.

Το δεύτερο τμήμα της δοκιμής αφορά έλεγχο του οχήματος έτσι ώστε να μένει ακίνητο στο σημείο στόχου. Όταν η απόσταση του οχήματος γίνει μικρότερη από 10 cm τότε θεωρείται ότι το όχημα έχει επιτύχει το σημείο στόχου. Για να αξιολογηθεί η ικανότητα του οχήματος να αιωρείται πάνω από ένα σταθερό σημείο, σε κάθε κύκλο μετράται για κάθε κύκλο η καρτεσιανή απόσταση του οχήματος από το σημείο στόχου και υπολογίζεται ο μέσος όρος των αποστάσεων όλων των κύκλων.

Η μέση κάθετη απόσταση από την ευθεία κατεύθυνσης στο πρώτο τμήμα της δοκιμής και η καρτεσιανή απόσταση από το σημείο στόχου στο δεύτερο τμήμα της δοκιμής δίνονται σε διαγράμματα για κάθε δοκιμή. Σημειώτεον ότι στο διάγραμμα της καρτεσιανής απόστασης από το σημείο στόχου στο δεύτερο τμήμα έχει προστεθεί και η καρτεσιανή απόσταση που αφορά το πρώτο τμήμα με πράσινο χρώμα χωρίς να έχει ληφθεί υπόψιν στον υπολογισμό του μέσου όρου.

Οι μέσοι όροι των σφαλμάτων θέσης σε κάθε δοκιμή και ο μέσος όρος όλων των δοκιμών φαίνονται στον Πίνακα 10-2.

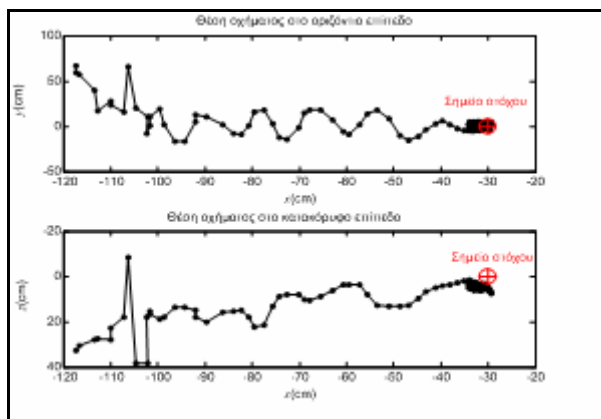
	<i>ΤΜΗΜΑ 1: ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΠΡΟΣ ΣΤΟΧΟ</i>	<i>ΤΜΗΜΑ 2: ΑΙΩΡΗΣΗ ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΣΤΟΧΟ</i>
<i>ΔΟΚΙΜΗ</i>	<i>ΜΕΣΗ ΚΑΘΕΤΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΕΥΘΕΙΑ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ (cm)</i>	<i>ΜΕΣΗ ΚΑΡΤΕΣΙΑΝΗ ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΑΠΟ ΣΤΟΧΟ (cm)</i>
1	24.847	5.9833
2	15.155	10.193
3	31.224	10.557
4	15.213	12.725
<i>ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ</i>	21.609	9.864

Πίνακας 10-2: Πλοήγηση προς στόχο, μέσος όρος σφάλματος θέσης

Τέλος έγιναν τα διαγράμματα των εντολών κίνησης στον αριστερό, στον δεξιό και στον κάθετο κινητήρα του οχήματος για κάθε κύκλο του πειράματος. Οι εντολές στους αρχικούς κύκλους όπου το όχημα κατευθύνεται προς τον στόχο, φαίνονται σε ξεχωριστό τμήμα των διαγραμμάτων για να είναι ευκρινέστερες. Τα αποτελέσματα της δοκιμής 1 παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο, ενώ τα αποτελέσματα των δοκιμών 2 έως 4 παρουσιάζονται στο Παράρτημα Δ.

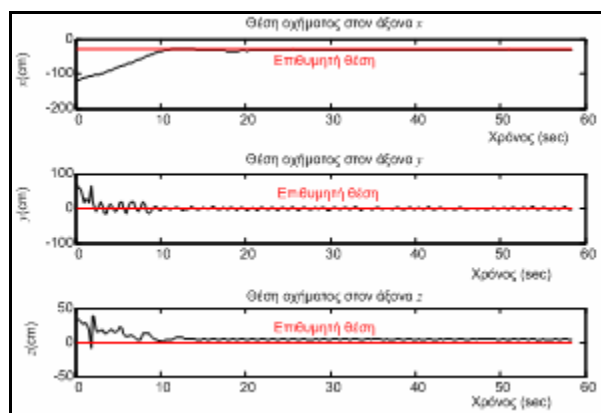
10.4.1.1 Πλοήγηση προς στόχο - Δοκιμή 1

Το σημείο στόχου έχει συντεταγμένες: $\text{targetpoint} = [-30, 0, 0]$. Στο Σχήμα 10-11 έχει σχεδιαστεί η θέση του οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο.

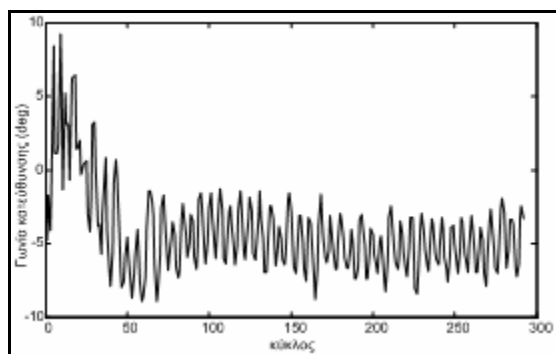


Σχήμα 10-11: Πλοήγηση προς στόχο - Δοκιμή 1, θέση οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο

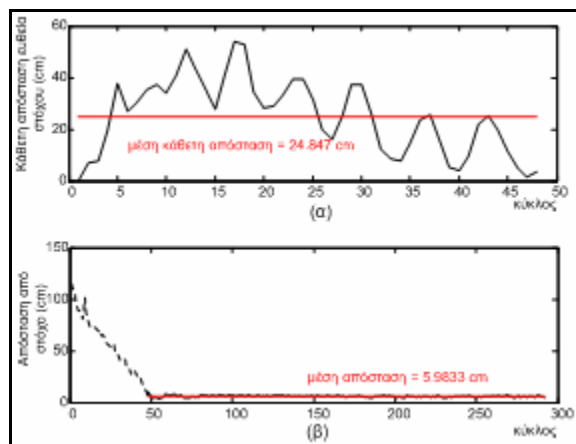
Στο Σχήμα 10-12 έχει σχεδιαστεί η θέση του οχήματος στους άξονες X , Y , Z . Στο Σχήμα 10-13 δίνεται η γωνία κατεύθυνσης ανά κύκλο. Στο Σχήμα 10-14 φαίνεται για την φάση πλοήγησης προς τον στόχο η κάθετη απόσταση από την ευθεία στόχου και για την φάση στόχευσης η απόσταση από το σημείο στόχου ανά κύκλο. Στο Σχήμα 10-15 δίνονται οι εντολές τάσης στους κινητήρες ανά κύκλο.



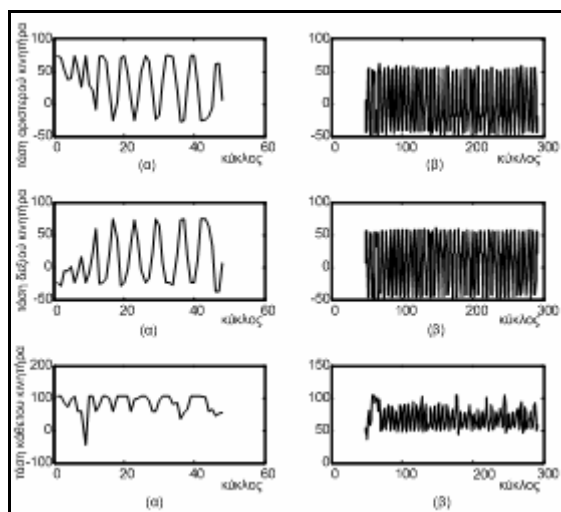
Σχήμα 10-12: Πλοήγηση προς στόχο -Δοκιμή 1, θέση οχήματος στους άξονες X , Y , Z σε συνάρτηση με τον χρόνο



Σχήμα 10-13: Πλοήγηση προς στόχο -Δοκιμή 1, γωνία κατεύθυνσης ανά κύκλο



Σχήμα 10-14: Πλοήγηση προς στόχο –Δοκιμή1 , (α) φάση πλοήγησης προς τον στόχο - κάθετη απόσταση ανά κύκλο, (β) φάση αιώρησης πάνω από στόχο- απόσταση από στόχο



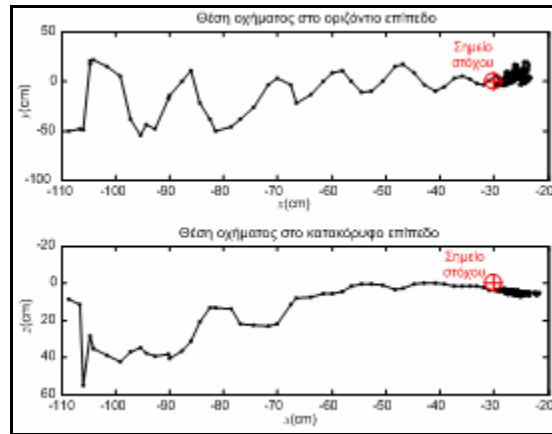
Σχήμα 10-15: Πλοήγηση προς στόχο -Δοκιμή1, εντολές στους κινητήρες ανά κύκλο, (α) φάση πλοήγησης προς τον στόχο, (β) φάση αιώρησης πάνω από στόχο

10.4.2 Πλοήγηση προς στόχο με ρεύμα

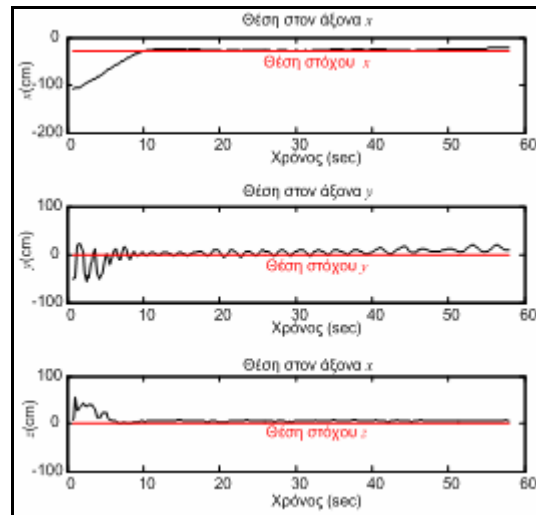
Στο πείραμα αυτό το όχημα στοχεύει σε ένα σημείο με συντεταγμένες: $\text{targetpoint} = [-30, 0, 0]$. Κατά την διάρκεια της δοκιμής ήταν σε λειτουργία η αντλία κυκλοφορίας νερού της δεξαμενής και υπήρχε ρεύμα νερού στην εγκάρσια κατεύθυνση της δεξαμενής. Λόγω του μικρού μεγέθους της δεξαμενής το νερό ήταν σε κίνηση με τυχαία κατεύθυνση.

Στο Σχήμα 10-16 έχει σχεδιαστεί η θέση του οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο. Στο Σχήμα 10-17 δίνεται η θέση του οχήματος στους άξονες X , Y , Z . Στο Σχήμα 10-18 φαίνεται η γωνία κατεύθυνσης ανά κύκλο. Στο Σχήμα 10-19 φαίνεται για την φάση πλοήγησης προς τον στόχο η κάθετη απόσταση από την ευθεία στόχου και για την φάση στόχευσης η απόσταση από

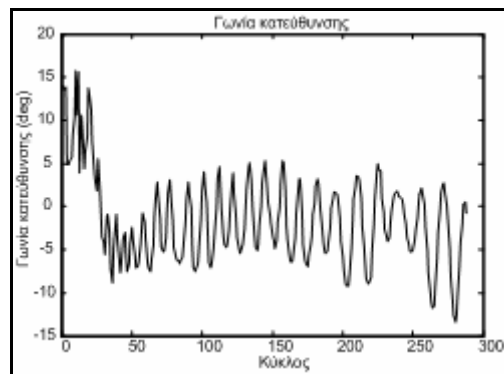
το σημείο στόχου ανά κύκλο. Στο Σχήμα 10-20 δίνονται οι εντολές τάσης στους κινητήρες ανά κύκλο.



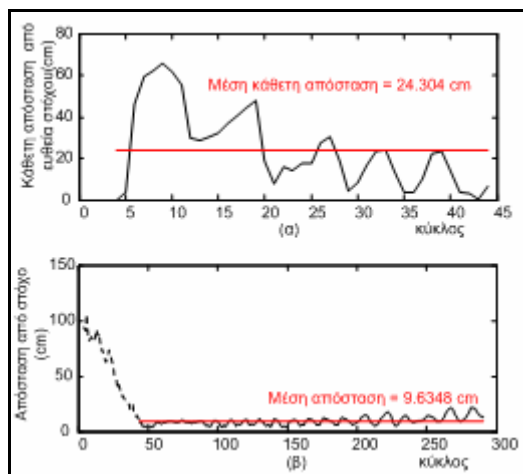
Σχήμα 10-16: Πλοήγηση προς στόχο με ρεύμα, θέση οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο



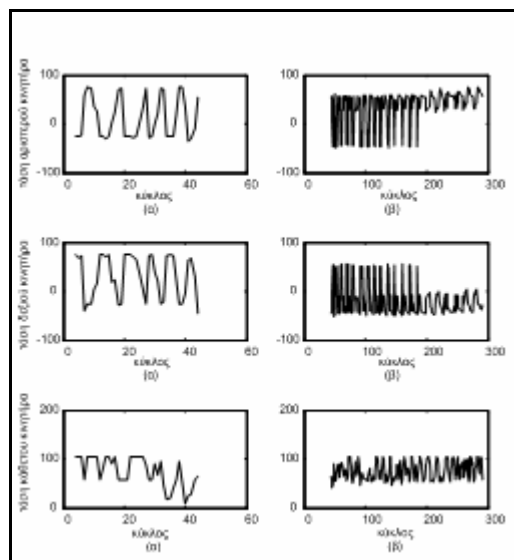
Σχήμα 10-17: Πλοήγηση προς στόχο με ρεύμα, θέση οχήματος στους άξονες X, Y, Z σε συνάρτηση με τον χρόνο



Σχήμα 10-18: Πλοήγηση προς στόχο με ρεύμα, γωνία κατεύθυνσης ανά κύκλο



Σχήμα 10-19: Πλοήγηση προς στόχο με ρεύμα, (α) φάση πλοήγησης προς στόχο - κάθετη απόσταση ανά κύκλο, (β) φάση αιώρησης πάνω από στόχο- απόσταση από στόχο



Σχήμα 10-20: Πλοήγηση προς στόχο με ρεύμα, εντολές στους κινητήρες ανά κύκλο, (α) φάση πλοήγησης προς στόχο, (β) φάση αιώρησης πάνω από στόχο

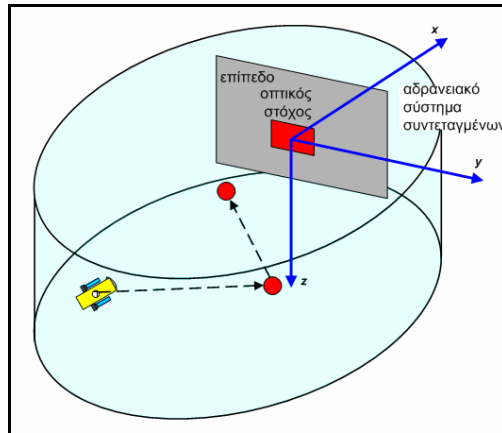
10.4.3 Πλοήγηση σε διαδοχικά σημεία στόχου

Το πείραμα αυτό έγινε για να αξιολογηθεί η ικανότητα του οχήματος με τους ασαφείς ελεγκτές να ακολουθήσει μια προσχεδιασμένη πορεία. Με δεδομένο τον περιορισμό από το μέγεθος της δεξαμενής και με ζητούμενο το όχημα να έχει σε όλη την διάρκεια της πορείας τον στόχο μέσα στο πεδίο της κάμερας και τα ίχνη από τους δείκτες πάνω στο κάθετο επίπεδο του ελάσματος, δεν ήταν με την συγκεκριμένη πειραματική διάταξη εφικτή η πραγματοποίηση πορειών περίπλοκου σχήματος και μεγάλου μήκους. Έτσι επιλέχθηκε το όχημα να έχει δύο σημεία στόχου τα οποία να πρέπει να επιτύχει σε σειρά. Μαζί με την αρχική θέση του οχήματος τα δύο σημεία στόχου σχηματίζουν ένα τμήμα πορείας τριών σημείων το οποίο αποτελεί το θεμελιώδες τμήμα

της διακριτοποιημένης πορείας στην γενική περίπτωση που η πορεία περιγράφεται με καμπύλη B-Spline. Το κάθε σημείο στόχου θεωρείται ότι έχει επιτευχθεί όταν η καρτεσιανή απόσταση του από το όχημα είναι μικρότερη από την ακτίνα του κύκλου αποδοχής, δηλ. όταν το σημείο βρεθεί μέσα στον κύκλο αποδοχής. Η ακτίνα αποδοχής τέθηκε :

$$\text{radius of acceptance} = 10 \text{ cm} \quad (10.9)$$

Η πειραματική διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 10-21.



Σχήμα 10-21: Πλοήγηση σε διαδοχικά σημεία στόχου, πειραματική διάταξη

Έγιναν τέσσερις δοκιμές και για κάθε δοκιμή υπολογίστηκε το μέσο σφάλμα θέσης που δίνεται στον Πίνακα 10-3.

ΔΟΚΙΜΗ	ΜΕΣΟ ΣΦΑΛΜΑ ΘΕΣΗΣ (cm)
1	7.797
2	6.615
3	8.528
4	8.160
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	7.775

Πίνακας 10-3: Πείραμα πλοήγησης σε διαδοχικά σημεία στόχου, μέσο σφάλμα θέσης

Τα αποτελέσματα της δοκιμής 1 παρουσιάζονται παρακάτω, ενώ τα αποτελέσματα των δοκιμών 2 έως 4 παρουσιάζονται στο Παράρτημα Γ.

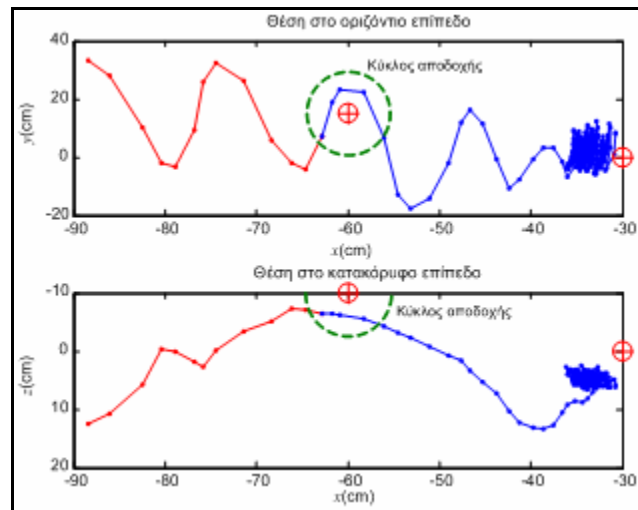
10.4.3.1 Πείραμα πλοήγησης σε διαδοχικά σημεία στόχου-Δοκιμή 1

Τα σημεία στόχου της δοκιμής είναι: $\text{targetpoint1} = [-60, 15, -10]$ και $\text{targetpoint2} = [-30, 0, 0]$.

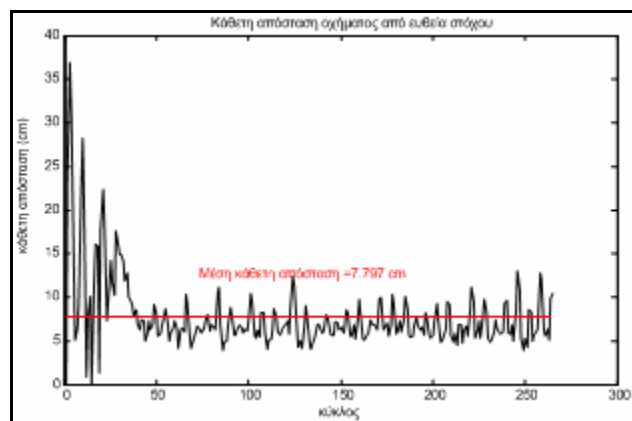
Με τα αποτελέσματα έγιναν στο Σχήμα 10-22 τα διαγράμματα της θέσης του οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο, όπου η πορεία του οχήματος όταν αυτό στοχεύει το πρώτο σημείο στόχου σημειώνεται με κόκκινο χρώμα, ενώ η πορεία αφού επιτευχθεί το πρώτο σημείο στόχου,

οπότε το όχημα στοχεύει το δεύτερο σημείο, σημειώνεται με μπλε χρώμα. Επίσης στα διαγράμματα σημειώνονται οι συντεταγμένες των σημείων στόχου.

Στο Σχήμα 10-23 έχει σχεδιαστεί η κάθετη απόσταση από την ευθεία στόχου, όπου για κάθε θέση του οχήματος μετράται ως σφάλμα θέσης η κάθετη απόσταση από την ευθεία που συνδέει την αρχική θέση με το πρώτο σημείο στόχου, όταν το όχημα στοχεύει το πρώτο σημείο, ή το σημείο μετάβασης με το δεύτερο σημείο, όταν το όχημα στοχεύει το δεύτερο σημείο στόχου.



Σχήμα 10-22: Πλοήγηση σε διαδοχικά σημεία στόχου - Δοκιμή 1, θέση οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο



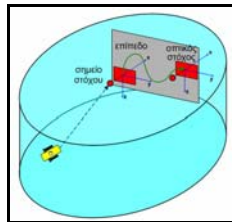
Σχήμα 10-23: Πλοήγηση σε διαδοχικά σημεία στόχου -Δοκιμή , κάθετη απόσταση από ευθεία στόχου

10.4.4 Παρακολούθηση κινούμενου στόχου

Το πείραμα αυτό έγινε για να αξιολογηθεί η ικανότητα του οχήματος με τους ασαφείς ελεγκτές να ακολουθήσει ένα κινούμενο στόχο. Η ικανότητα αυτή είναι σημαντική σε εφαρμογές σε πραγματικές συνθήκες, όταν το όχημα πρέπει να σταθεροποιηθεί πάνω από ένα κινούμενο στόχο

για να τον παρακολουθήσει με την κάμερα του, πχ. στην περίπτωση επιθεώρησης της γάστρας ενός πλοίου που κινείται από προσπίπτοντες κυματισμούς.

Ο οπτικός στόχος δεν ήταν σταθερός πάνω στο κάθετο έλασμα, αλλά ήταν πάνω σε ένα κινούμενο φορείο το οποίο κινούσε αυθαίρετα ένας χειριστής. Οι κινήσεις γίνονταν ταυτόχρονα κατά τον άξονα Y και άξονα Z . Το όχημα στοχεύει σε ένα σημείο στόχου με σταθερές συντεταγμένες ως προς το αδρανειακό σύστημα που ορίζεται στο κέντρο του κινούμενου στόχου και κατά συνέπεια ακολουθεί τον κινούμενο στόχο. Η θέση του οχήματος σε κάθε κύκλο προσδιορίζεται σε σχέση με το κέντρο βάρους του στόχου και έτσι οι μεταβολές θέσης του στόχου γίνονται αντιληπτές ως σφάλματα θέσης του οχήματος τα οποία προσπαθεί να διορθώσει ο ελεγκτής. Με αυτό τον τρόπο το όχημα ακολουθούσε ικανοποιητικά τον στόχο, αν και υπήρχαν μεγάλες διαταραχές από το καλώδιο. Η διάταξη του πειράματος φαίνεται στο Σχήμα 10-24.



Σχήμα 10-24: Διάταξη πειράματος παρακολούθησης κινούμενου στόχου

Έγιναν τρεις δοκιμές με συντεταγμένες σημείου στόχου: $\text{targetpoint} = [-30, 0, 0]$

Ποσοτική εκτίμηση των αποτελεσμάτων του πειράματος μπορεί να γίνει με τον υπολογισμό σε κάθε κύκλο της καρτεσιανής απόστασης του οχήματος από το σημείο στόχου που κινείται μαζί με τον κινούμενο στόχο, που δίνεται σε διαγράμματα. Επίσης υπολογίστηκε η μέση απόσταση από τον στόχο. Τα ποσοτικά αποτελέσματα ομαδοποιούνται στον Πίνακα 10-4:

ΔΟΚΙΜΗ	ΜΕΣΟ ΣΦΑΛΜΑ ΘΕΣΗΣ (cm)
1	15.238
2	11.196
3	10.681
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	12.372

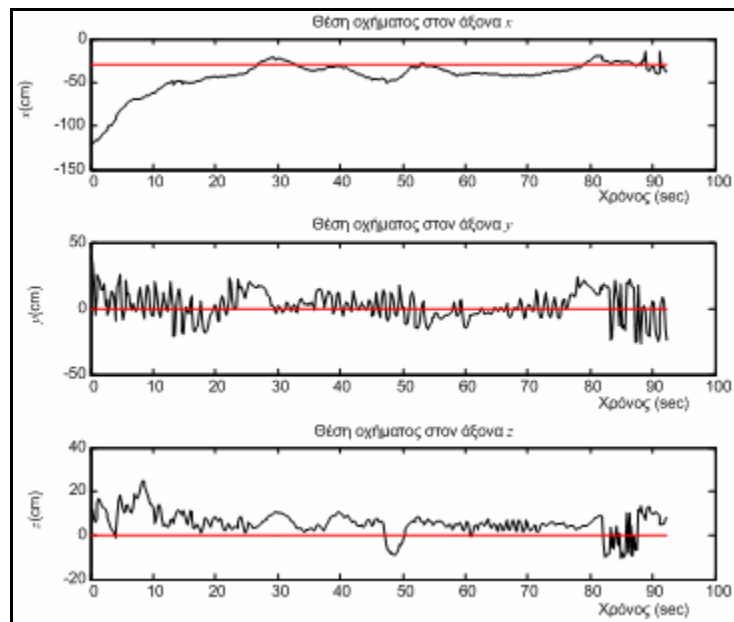
Πίνακας 10- 4: Πείραμα παρακολούθησης κινούμενου στόχου, μέσο σφάλμα θέσης

Τα αποτελέσματα της δοκιμής 1 παρουσιάζονται παρακάτω, ενώ τα αποτελέσματα των δοκιμών 2 και 3 δίνονται στο Παράρτημα Γ:

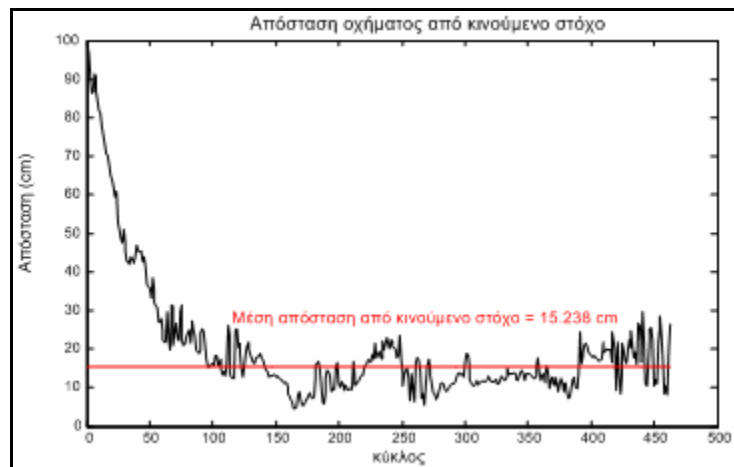
10.4.4.1 Πείραμα παρακολούθησης κινούμενου στόχου Δοκιμή 1

Στο σχήμα 10-21 έχει σχεδιαστεί για την πρώτη δοκιμή η θέση του οχήματος στους άξονες X , Y και Z ανά κύκλο προσομοίωσης, ενώ με κόκκινο χρώμα φαίνεται η επιθυμητή θέση του κινούμενου σημείου στόχου.

Στο σχήμα 10-22 φαίνεται η απόσταση του οχήματος από το κινούμενο σημείο στόχου ανά κύκλο προσομοίωσης.



Σχήμα 10-25: Παρακολούθηση κινούμενου στόχου-Δοκιμή 1: θέση οχήματος στους άξονες X , Y και Z σε συνάρτηση με τον χρόνο



Σχήμα 10-26: Παρακολούθηση κινούμενου στόχου -Δοκιμή 1: σφάλμα θέσης οχήματος για κάθε κύκλο

10.5 Αξιολόγηση πειραματικών αποτελεσμάτων.

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 10.4, από τους Πίνακες 10-2, 10-3 και 10-4 καθώς και από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Παράρτημα Γ , παράγραφος 12.3.2, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

1. Το επίπεδο ελέγχου κίνησης με του ασαφείς ελεγκτές βάθους, κατεύθυνσης και ταχύτητας μπορεί να καθοδηγήσει το όχημα από ένα σημείο του χώρου σε ένα άλλο. Το μέσο κάθετο σφάλμα θέσης του οχήματος από την ευθεία που ενώνει την αρχική του θέση με το σημείο στόχου ήταν 21.609 cm όταν το όχημα κατευθύνεται προς ένα σημείο στόχου και 7.775 cm όταν το όχημα κατευθύνεται σε διαδοχικά σημεία στόχου. Το σφάλμα αυτό κρίνεται καταρχήν ικανοποιητικό, δεδομένου ότι οι ελεγκτές που χρησιμοποιήθηκαν δεν είναι βελτιστοποιημένοι αλλά ευρετικά ρυθμισμένοι. Από τα αποτελέσματα φάνηκε ότι με το προτεινόμενο επίπεδο ελέγχου κίνησης το όχημα μπορεί να εκτελέσει σύνθετες πορείες.
2. Το όχημα ήταν ικανό να αιωρείται πάνω από ένα σημείο στόχου. Συγκεκριμένα στο πείραμα όπου το όχημα κατευθυνόταν προς ένα σημείο στόχου, αφού το πετύχαινε, έμενε πάνω στο σημείο στόχου με μέση απόσταση από αυτό 9.864 cm.
3. Υπήρξε ικανοποιητικά ακριβής έλεγχος και όταν το όχημα βρισκόταν σε νερό με τυχαίο ρεύμα. Στο πείραμα που έγινε με την παρουσία ισχυρού τυχαίου ρεύματος με εγκάρσια διεύθυνση που δημιουργούσε η αντλία κυκλοφορίας της δεξαμενής, το όχημα είχε κατά την φάση της πλοήγησης προς τον στόχο μέσο κάθετο σφάλμα θέσης από την γραμμή στόχου ίσο με 24.304 cm. Αφού πετύχαινε το σημείο στόχου, το σφάλμα θέσης κατά την φάση της αιώρησης πάνω αυτό ήταν 9.635 cm. Οι τιμές των σφαλμάτων θέσης στις δύο φάσεις της πλοήγησης προς τον στόχο και της αιώρησης πάνω από αυτόν με την παρουσία ρεύματος είναι συγκρίσιμες με αυτές χωρίς την παρουσία ρεύματος, πράγμα που σημαίνει ότι το προτεινόμενο επίπεδο ελέγχου κίνησης μπορεί να είναι αξιόπιστο και να βοηθήσει το όχημα να επιτύχει τους στόχους της αποστολής, όταν υπάρχουν επιδράσεις από το θαλάσσιο περιβάλλον και ρεύματα που είναι απρόβλεπτα δεν μπορούν να είναι καθορισμένα εκ των προτέρων. Τα παραπάνω επιτεύχθηκαν με έναν ελεγκτή κίνησης σε απλή μορφή χωρίς την ύπαρξη υποσυστήματος ελέγχου ρεύματος, λόγω της απουσίας των απαραίτητων αισθητήρων μέτρησης της ταχύτητας του ρεύματος. Τα αποτελέσματα αναμένεται να βελτιωθούν με την προσθήκη τέτοιων αισθητήρων, όπως έχει φανεί από τις προσομοιώσεις.
4. Με το προτεινόμενο επίπεδο ελέγχου κίνησης το όχημα μπορούσε να ακολουθήσει έναν στόχο που ήταν κινούμενος. Στο αντίστοιχο πείραμα η μέση απόσταση από τον στόχο βρέθηκε να είναι ίση με 12.372 cm. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι χρήσιμο σε περιπτώσεις που το όχημα πρέπει να ακολουθεί έναν κινούμενο στόχο με την κάμερα του χωρίς αλλοιώσεις της ποιότητας της εικόνας.

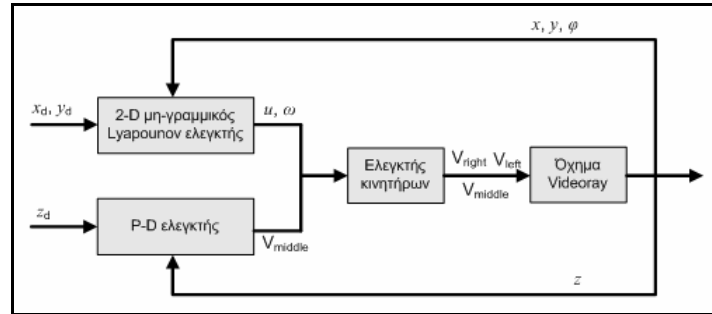
5. Τα παραπάνω πραγματοποιήθηκαν με τις ανακρίβειες που να εμπεριέχει η οπτική μέθοδος προσδιορισμού της θέσης του οχήματος, χωρίς την χρήση ακριβέστερων αισθητήρων – οργάνων. Με την χρήση ακριβέστερων μεθόδων υπολογισμού και ανατροφοδότησης θέσης, όπως με τριγωνισμό από ηχητικούς αισθητήρες, τα δεδομένα που ανατροφοδοτούνται στο επίπεδο ελέγχου θα περιέχουν μικρότερο σφάλμα και τα σφάλματα θέσης του οχήματος αναμένεται να μειωθούν.
6. Επιπλέον φάνηκε ότι οι διαταραχές από το καλώδιο δεν είχαν αποτέλεσμα αστάθεια και απώλεια ελέγχου. Οι εξωτερικές δυνάμεις που επάγει το καλώδιο στο όχημα αποτελούν απρόβλεπτες διαταραχές και έχουν σημαντική επίδραση λόγω του μικρού μεγέθους του οχήματος και των περιορισμένων διαστάσεων της δεξαμενής, εξαιτίας των οποίων οι εντολές κίνησης προς τους κινητήρες ήταν μικρές σε αριθμητικές τιμές. Μεγαλύτερες εντολές κίνησης θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε μεγαλύτερη δεξαμενή ή σε ανοικτή θάλασσα, όπου θα υπάρχει περισσότερος διαθέσιμος χώρος για την κίνηση του οχήματος. Σε αυτή την περίπτωση η επίδραση του καλωδίου θα ήταν αναλογικά μικρότερη. Στα πειράματα που έγιναν η δύναμη από το καλώδιο είχε ως αποτέλεσμα την διαφορετική συμπεριφορά του οχήματος σε κάθε δοκιμή. Έτσι, ενώ η γενικότερη συμπεριφορά είναι ίδια, λόγω της ύπαρξης του καλωδίου τα μέσα σφάλματα θέσης διέφεραν σε κάθε πείραμα.
7. Ο έλεγχος ήταν ικανοποιητικά ακριβής, έστω και αν λόγω απουσίας μαθηματικού μοντέλου κίνησης του οχήματος δεν έγινε γενετική βελτιστοποίηση και εξέλιξη των ασαφών ελεγκτών κίνησης. Έτσι δεν αξιοποιήθηκε και δεν δοκιμάστηκε το επίπεδο γενετικής βελτιστοποίησης των ελεγκτών κίνησης, που από ότι φάνηκε από τις προσομοιώσεις που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 9, είχαν θετική συνεισφορά στην μείωση των σφαλμάτων θέσης του αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος NPS-Phoenix.

10.6 Συγκρίσεις

Προκειμένου να γίνει αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν με την προτεινόμενη μεθοδολογία ελέγχου, έγιναν πειράματα ελέγχου του υποβρυχίου οχήματος Videoray με έναν ελεγκτή κίνησης ο οποίος βασίζεται στην μη-γραμμική θεωρία ελέγχου (non-linear control) και συγκριμένα στην ευστάθεια κατά Lyapunov. Δεδομένου ότι η πειραματική διάταξη δεν μεταβάλλεται, τα αποτελέσματα προέκυψαν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άμεση σύγκριση της προτεινόμενης μεθοδολογίας με μια άλλη, ήδη υπάρχουσα και χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία ελέγχου.

10.6.1 Μη γραμμικός ελεγκτής κίνησης υποβρυχίου οχήματος Videoray

Ο μη-γραμμικός-PD ελεγκτής χρησιμοποιείται για έλεγχο κίνησης του υποβρυχίου οχήματος Videoray και περιγράφεται στα [248], [238]. Αποτελείται από ένα κατά Lyapunov ελεγκτή στο οριζόντιο επίπεδο και ένα αναλογικό-διαφορικό ελεγκτή στο κατακόρυφο επίπεδο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10-27 [238].



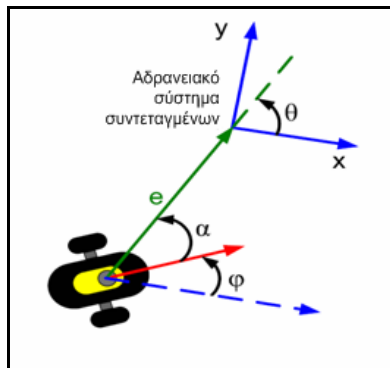
Σχήμα 10-27: Δομικό διάγραμμα μη-γραμμικού ελεγκτή κίνησης στο οριζόντιο και το κατακόρυφο επίπεδο

Η είσοδος στον ελεγκτή είναι οι συντεταγμένες του σημείου στόχου (x_d, y_d, z_d).

Ο μη-γραμμικός ελεγκτής στο οριζόντιο επίπεδο προκύπτει με θεώρηση των κινηματικών εξισώσεων του οχήματος, που γράφονται ως εξής:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= u \cos \psi \\ \dot{y} &= u \sin \psi \\ \dot{z} &= w \\ \dot{\psi} &= r,\end{aligned}\tag{10.10}$$

όπου x, y, z είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες του οχήματος, u συνιστώσα της ταχύτητας περί τον σωματοπαγή X_o άξονα, r η γωνιακή ταχύτητα περί τον Z άξονα και ψ η γωνία κατεύθυνσης περί τον Z άξονα.



Σχήμα 10-28: Πολικές συντεταγμένες θέσης υποβρυχίου οχήματος

Οι εξισώσεις (10.10) μπορούν να γραφτούν σε πολικές συντεταγμένες, χρησιμοποιώντας το σφάλμα απόστασης e και την κατεύθυνση ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων, που φαίνονται στο Σχήμα 10-28, ως εξής [248]:

$$\begin{aligned}\dot{e} &= -u \cos \alpha \\ \dot{a} &= -r + u \frac{\sin \alpha}{e} \\ \dot{\theta} &= u \frac{\sin \alpha}{e},\end{aligned}\tag{10.11}$$

όπου $\alpha = \theta - \psi$.

Στο [249] έχει αποδειχθεί ότι ο νόμος ελέγχου:

$$\begin{aligned}u &= (\gamma \cos \alpha) \varepsilon, \quad \gamma > 0 \\ r &= ka + \gamma \frac{\cos \alpha \sin \alpha}{a} (a + \eta \theta), \quad k, h > 0,\end{aligned}\tag{10.12}$$

οδηγεί ασυμπτωτικά το όχημα, από το διάνυσμα κατάστασης $[e, a, \theta]$, στην θέση $[0, 0, \theta]$.

Έτσι, οι σχέσεις (10.12) προσδιορίζουν για κάθε θέση του οχήματος κατάλληλο ζεύγος γραμμικής και γωνιακής ταχύτητας $[u, r]$, ώστε το όχημα να οδηγηθεί προς το σημείο στόχου, με μηδενική διαφορά γωνίας ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων. Προκειμένου οι τιμές της γραμμικής και γωνιακής ταχύτητας να μετασχηματιστούν σε εντολές στους οριζόντιους κινητήρες του οχήματος, έχει σχεδιαστεί στο [248] ένας ελεγκτής των κινητήρων που εκφράζει την σχέση:

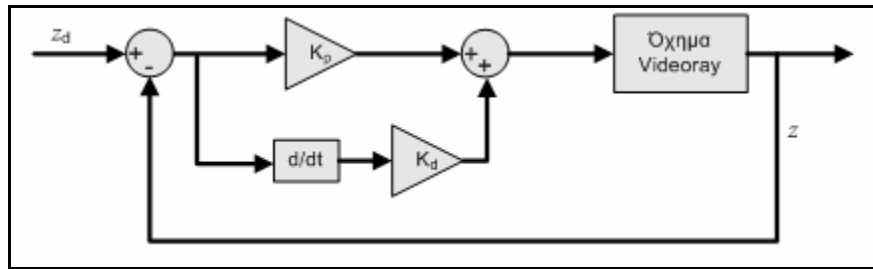
$$\begin{bmatrix} V_{left} \\ V_{right} \end{bmatrix} = G(u, r),\tag{10.13}$$

η οποία μετασχηματίζει τις εντολές κίνησης $[u, r]$ από τον ελεγκτή Lyapunov, σε εντολές τάσης στον αριστερό και στον δεξιό κινητήρα.

Ο έλεγχος στο κατακόρυφο επίπεδο γίνεται από ένα αναλογικό-διαφορικό ελεγκτή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10-29. Η εντολή τάσης στον κατακόρυφο κινητήρα είναι:

$$V_{middle} = K_p e + K_d \dot{e}, \quad K_p, K_d > 0,\tag{10.14}$$

όπου $e = z_d - z$ το σφάλμα θέσης.



Σχήμα 10- 29: Δομικό διάγραμμα αναλογικού-διαφορικού ελεγκτή στο κατακόρυφο επίπεδο

10.6.2 Πειράματα με μη-γραμμικό-PD ελεγκτή κίνησης

Με τον μη-γραμμικό κατά Lyapunov ελεγκτή που παρουσιάστηκε παραπάνω, έγιναν πειράματα πλοήγησης προς ένα σημείο στόχου και πειράματα παρακολούθησης κινούμενου στόχου. Συγκεκριμένα έγιναν 7 πειράματα πλοήγησης προς σημείο στόχου, 4 πειράματα πλοήγησης προς σημείο στόχου παρουσία ρεύματος που δημιουργούσε η αντλία ανάδευσης του νερού της δεξαμενής και 4 πειράματα παρακολούθησης κινούμενου στόχου.

Τα πειράματα πλοήγησης προς σημείο στόχου διαιρέθηκαν σε δύο τμήματα: στο *τμήμα πλοήγησης* προς τον στόχο και στο *τμήμα αιώρησης* πάνω από τον στόχο, το οποίο ξεκινάει όταν το όχημα βρεθεί σε ένα κύκλο αποδοχής με ακτίνα 10 cm. Στο τμήμα πλοήγησης προς τον στόχο, σε κάθε κύκλο, μετρήθηκε η κάθετη απόσταση από την ευθεία που συνδέει αρχική θέση του οχήματος με το σημείο στόχου και υπολογίστηκε η μέση κάθετη απόσταση. Στο τμήμα αιώρησης πάνω από τον στόχο, μετρήθηκε σε κάθε βήμα η καρτεσιανή απόσταση από το σημείο στόχου και υπολογίστηκε η μέση απόσταση από τον στόχο.

Στα πειράματα παρακολούθησης κινούμενου στόχου, τον οποίο κινούσε αυθαίρετα ένας χειριστής, το ζητούμενο ήταν το όχημα να μπορέσει να ακολουθεί τον στόχο. Εφόσον το κέντρο βάρους του στόχου επαναυπολογίζεται σε κάθε κύκλο και αποτελεί την αρχή του αδρανειακού συστήματος αξόνων και το σημείο στόχου έχει συντεταγμένες στο αδρανειακό σύστημα αξόνων, η απόσταση από το σημείο στόχου αποτελεί μέτρο της ευστάθειας του ελέγχου. Έτσι σε κάθε κύκλο μετρήθηκε η καρτεσιανή απόσταση από το σημείο στόχου και υπολογίστηκε η μέση απόσταση.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων που έγιναν με τον μη-γραμμικό-PD ελεγκτή, παρουσιάζονται στον Πίνακα 10-5.

Πείραμα πλοήγησης προς σημείο στόχου

	Πλοήγηση προς στόχο	Αιώρηση πάνω από στόχο
	Μέση κάθετη απόσταση από ευθεία στόχου	Μέση απόσταση από στόχο
	(cm)	(cm)
Πείραμα 1	43,043	14,873
Πείραμα 2	33,260	14,144
Πείραμα 3	44,450	14,624
Πείραμα 4	32,140	13,965
Πείραμα 5	23,198	13,227
Πείραμα 6	23,332	13,564
Πείραμα 7	28,790	13,147
Μέσος όρος	32,602	13,935

Πείραμα πλοήγησης προς σημείο στόχου με ρεύμα

	Πλοήγηση προς στόχο	Αιώρηση πάνω από στόχο
	Μέση κάθετη απόσταση από ευθεία στόχου	Μέση απόσταση από στόχο
	(cm)	(cm)
Πείραμα 1	30,955	18,579
Πείραμα 2	25,415	22,806
Πείραμα 3	42,438	12,889
Πείραμα 4	42,805	14,789
Μέσος όρος	35,403	17,266

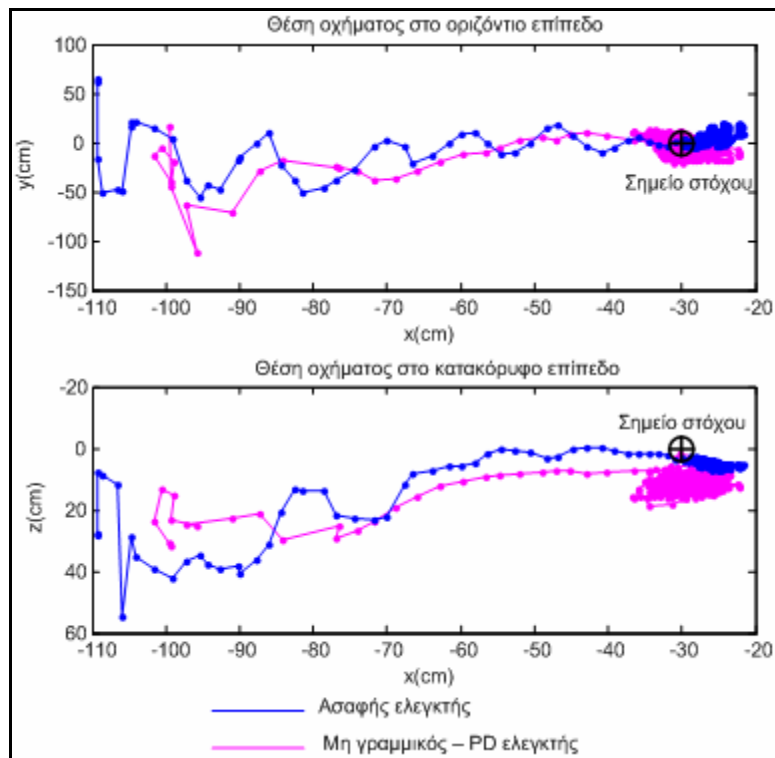
Πείραμα παρακολούθησης κινούμενου στόχου

	Αιώρηση πάνω από στόχο
	Μέση απόσταση από στόχο
	(cm)
Πείραμα 1	17,606
Πείραμα 2	20,390
Πείραμα 3	27,154
Πείραμα 4	32,883
Μέσος όρος	24,508

Πίνακας 10- 5: Αποτελέσματα πειραμάτων με μη-γραμμικό-PD ελεγκτή

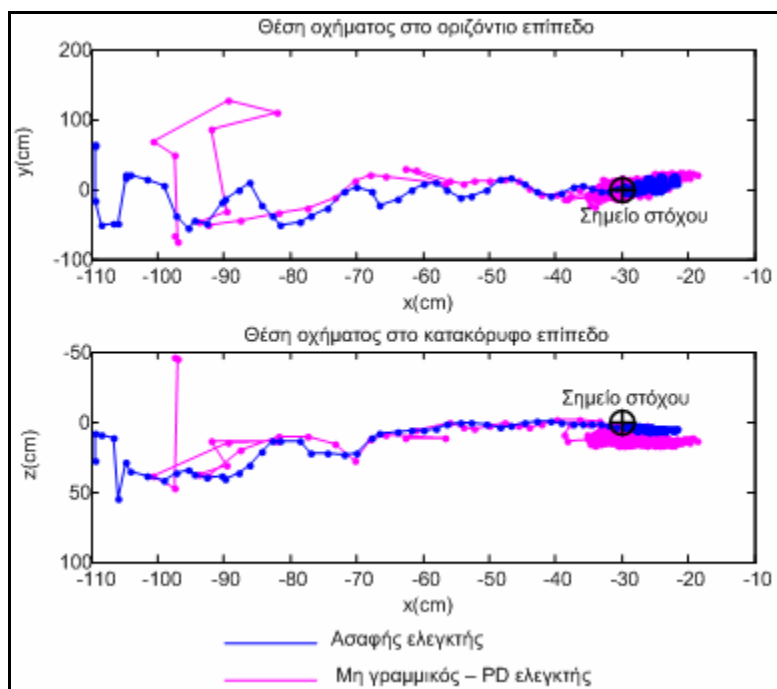
10.6.3 Συγκρίσεις ασαφούς και μη-γραμμικού-PD ελεγκτή κίνησης

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα με τον μη-γραμμικό-PD ελεγκτή, μπορούν να συγκριθούν με τα αποτελέσματα των πειραμάτων που έγιναν με τους ασαφείς ελεγκτές κίνησης και παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 10.4. Έτσι, στο Σχήμα 10-30 έχει σχεδιαστεί η θέση του οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο, με τους δύο ελεγκτές, για το πείραμα πλοήγησης προς σημείο στόχου.



Σχήμα 10-30: Πείραμα πλοήγησης προς σημείο στόχου-Σύγκριση ελεγκτών κίνησης

Στο Σχήμα 10-31 φαίνεται η θέση του οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο για το πείραμα πλοήγησης προς σημείο στόχου με παρουσία τυχαίου ρεύματος.



Σχήμα 10-31: Πείραμα πλοήγησης προς σημείο στόχου με ρεύμα - Σύγκριση ελεγκτών κίνησης

Σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τον ασαφή και τον μη γραμμικό-PD ελεγκτή, μπορεί να γίνει στον Πίνακα 10-6, όπου αυτά ομαδοποιούνται και παρουσιάζονται συνοπτικά.

	Πείραμα πλοήγησης προς σημείο στόχου		Πείραμα πλοήγησης προς σημείο στόχου με ρεύμα		Πείραμα παρακολούθησης κινούμενου στόχου
	Πλοήγηση προς στόχο	Αιώρηση πάνω από στόχο	Πλοήγηση προς στόχο	Αιώρηση πάνω από στόχο	Αιώρηση πάνω από στόχο
	Μέση κάθετη απόσταση από ευθεία στόχου	Μέση απόσταση από στόχο	Μέση κάθετη απόσταση από ευθεία στόχου	Μέση απόσταση από στόχο	Μέση απόσταση από στόχο
	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
Μη-γραμμικός-PD ελεγκτής	32,602	13,935	35,403	17,266	24,508
Ασαφής ελεγκτής	21,609	9,864	24,304	9,635	12,372
Διαφορά %	33,72	29,21	31,35	44,20	49,52

Πίνακας 10- 6: Σύγκριση ακρίβειας θέσης ασαφούς και μη-γραμμικού-PD ελεγκτή

Συμπεράσματα επίσης μπορούν να εξαχθούν με τον υπολογισμό της διανυθείσας απόστασης και της ενέργειας που δαπάνησαν οι κινητήρες του οχήματος με τους δύο διαφορετικούς ελεγκτές.

Για τις δοκιμές που παρουσιάζονται στα Σχήματα 10-30 και 10-31 και αφορούν στην πλοήγηση προς σημείο στόχου, χωρίς και με την παρουσία θαλασσίου ρεύματος αντίστοιχα, υπολογίστηκε

για την φάση πλοήγησης, ο λόγος της διανυθείσας απόστασης προς την αρχική απόσταση του οχήματος από τον στόχο. Ως μέτρο της καταναλωθείσας ενέργειας υπολογίστηκε το άθροισμα για τον χρόνο πλοήγησης του γινομένου του αθροίσματος των απόλυτων τιμών των εντολών τάσης επί το χρονικό βήμα:

$$E = \sum_{t_{\text{πλοήγησης}}} (|V_{\text{right}}| + |V_{\text{left}}| + |V_{\text{vert}}|) \Delta t \quad (10.15)$$

Το πηλίκο της συνολικής καταναλωθείσας ενέργειας με την αρχική απόσταση του οχήματος από τον στόχο, παρέχει το μέτρο σύγκρισης για την κατανάλωση ενέργειας στην φάση της πλοήγησης.

Στην φάση αιώρησης πάνω από τον στόχο, υπολογίζεται η διανυθείσα απόσταση ανά μονάδα χρόνου, που εκφράζει την μέση ταχύτητα του οχήματος, η οποία για τέλεια αιώρηση θα πρέπει να είναι 0. Επίσης υπολογίζεται η ενέργεια που καταναλώνεται ανά μονάδα χρόνου.

Τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται στον Πίνακα 10-7.

	Πείραμα πλοήγησης προς σημείο στόχου				Πείραμα πλοήγησης προς σημείο στόχου με ρεύμα			
	Πλοήγηση προς στόχο		Αιώρηση πάνω από στόχο		Πλοήγηση προς στόχο		Αιώρηση πάνω από στόχο	
	Διανυθείσα απόσταση / αρχική απόσταση	Ενέργεια ανά μονάδα απόστασης	Διανυθείσα απόσταση / χρόνο	Ενέργεια ανά μονάδα χρόνου	Διανυθείσα απόσταση / αρχική απόσταση	Ενέργεια ανά μονάδα απόστασης	Διανυθείσα απόσταση / χρόνο	Ενέργεια ανά μονάδα χρόνου
Μη-γραμμικός-PD ελεγκτής	6,238	168,330	22,165	143,620	6,431	182,390	26,365	145,510
Ασαφής ελεγκτής	6,617	157,600	9,430	157,140	6,177	157,600	9,430	157,140
διαφορά %	-6,08	6,37	57,45	-9,41	3,96	13,59	64,23	-7,99

Πίνακας 10- 7: Σύγκριση διανυθείσας απόστασης και απαιτήσεων ενέργειας ασαφούς και μη-γραμμικού-PD ελεγκτή

Από τους Πίνακες 10-6 και 10-7, όσον αφορά την σύγκριση της προτεινόμενης μεθοδολογίας ελέγχου με ασαφή λογική και του ελέγχου με τον υπάρχοντα μη-γραμμικό κατά Lyapunov σε συνδυασμό με PD ελεγκτή, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Ο ασαφής ελεγκτής πετυχαίνει συγκριτικά μεγαλύτερη ακρίβεια θέσης, σε σχέση με τον μη-γραμμικό-PD ελεγκτή.
2. Η βελτίωση του σφάλματος θέσης, με τον ασαφή ελεγκτή είναι της τάξης του 30% για την πλοήγηση προς ένα στόχο. Για την αιώρηση πάνω από ένα σταθερό στόχο υπάρχει βελτίωση της τάξης του 45% όταν υπάρχει παρουσία διαταραχών από τυχαίο ρεύμα.
3. Με τον ασαφή ελεγκτή υπάρχει βελτίωση της τάξης του 49%, της ικανότητας του οχήματος να ακολουθεί έναν τυχαία κινούμενο στόχο.

4. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο έλεγχος ενός υποβρυχίου οχήματος με την προτεινόμενη μεθοδολογία σε σχέση με τον μη-γραμμικό-PD έλεγχο είναι περισσότερο εύρωστος και ανταπεξέρχεται καλύτερα σε τυχαίες διαταραχές.
5. Το όχημα όταν ελέγχεται με τον ασαφή ελεγκτή, στην φάση πλοήγησης διανύει μεγαλύτερη απόσταση, πράγμα κατανοητό δεδομένου στον μη-γραμμικό κατά Lyapunov ελεγκτή, χρησιμοποιείται μέθοδος ελαχιστοποίησης της ενέργειας κίνησης, στηριγμένη στο κινηματικό μοντέλο.
6. Στην φάση της πλοήγησης χωρίς ρεύμα, με τον ασαφή ελεγκτή, δεν υπάρχει σημαντική μείωση της απαιτούμενης ενέργειας (η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας είναι της τάξης του 6%). Αντίθετα, με την παρουσία ρεύματος, υπάρχει εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 13%. Αυτό είναι σημαντικό, δεδομένου ότι τα υποβρύχια οχήματα λειτουργούν σε περιβάλλοντα με άγνωστες και μη προβλέψιμες διαταραχές και σύμφωνα με τα αποτελέσματα των πειραμάτων, με την προτεινόμενη μεθοδολογία ελέγχου, προκύπτει σημαντική παράταση της ωφέλιμης διάρκειας της μπαταρίας του οχήματος.
7. Στην φάση της αιώρησης πάνω από τον ακίνητο στόχο, αν και με τον ασαφή ελεγκτή διανύεται σημαντικά μικρότερη απόσταση, υπάρχει απαίτηση για μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας, ανεξάρτητα από την παρουσία ρεύματος. Αυτό σχετίζεται με την ευστάθεια του ελεγκτή ο οποίος τείνει να ενεργεί αντίθετα στις διαταραχές εξασφαλίζοντας μικρές μετακινήσεις του οχήματος ως προς τον στόχο, καταναλώνοντας όμως παράλληλα περισσότερη ενέργεια.

10.6.4 Συγκρίσεις ασαφούς ελεγκτή κίνησης με άλλες μεθοδολογίες

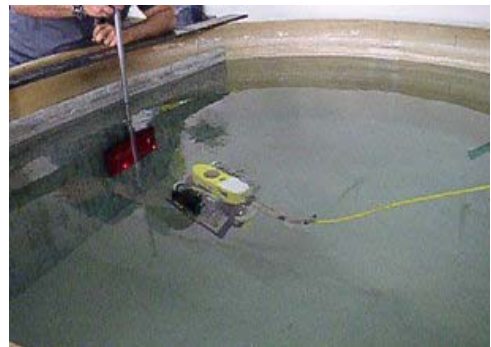
Σύγκριση των αποτελεσμάτων πλοήγησης με την προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να γίνει με αυτά που παρουσιάζονται στο [156], όπου το ίδιο όχημα ελέγχεται σε πειράματα πραγματικού χρόνου με ελεγκτές σθεναρού ελέγχου ολίσθησης (sliding mode) πάνω σε μια ευθεία πορεία. Δεδομένου ότι η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στην παραπάνω δημοσίευση διαφέρει ως προς το ότι το όχημα πλοηγήθηκε σε μια πισίνα με μήκος 25 m, και στο ότι χρησιμοποιήθηκε διάταξη ακουστικού τριγωνισμού για τον υπολογισμό θέσης, τα αποτελέσματα που προέκυψαν έχουν σχετική σημασία και δεν μπορούν να χρησιμεύσουν για να εξαχθούν απόλυτα συμπεράσματα. Στα αποτελέσματα των πειραμάτων που δημοσιεύονται στο [156], το όχημα είχε μέσο σφάλμα θέσης έως 20 cm, ενώ στο αντίστοιχο πείραμα πλοήγησης προς σημείο στόχου με την προτεινόμενη μεθοδολογία, που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 10.4.1, το όχημα είχε μέσο σφάλμα θέσης 21.609 cm. Κατά συνέπεια η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε μπορεί να δώσει αποτελέσματα συγκρίσιμα με αυτά που δίνουν οι ελεγκτές σθεναρού ελέγχου ολίσθησης (sliding mode) και να εξασφαλίσει έλεγχο με ικανοποιητικά μικρό σφάλμα θέσης κατά την εκτέλεση μια πορείας.

Ποιοτική σύγκριση των μεθοδολογιών πλοήγησης, μπορεί επίσης να γίνει με τα αποτελέσματα προσομοιώσεων που έχουν δημοσιευτεί στο [240], όπου συγκρίνονται μεθοδολογίες ελέγχου με προσομοίωση οχήματος παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα πραγματικού χρόνου που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή και όπου συμπεραίνεται ότι ο ασαφής έλεγχος είναι η βέλτιστη τεχνική ελέγχου κίνησης.

10.7 Φωτογραφίες πειραμάτων



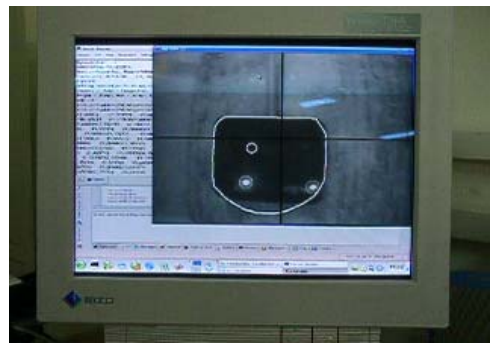
(1)



(2)



(3)



(4)



(5)



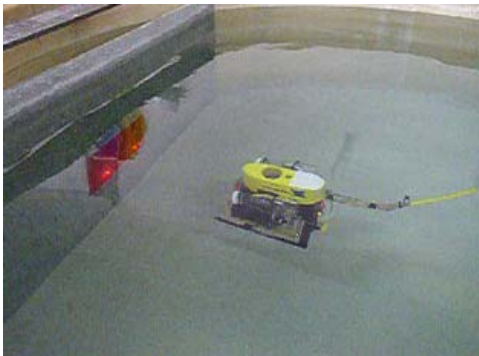
(6)



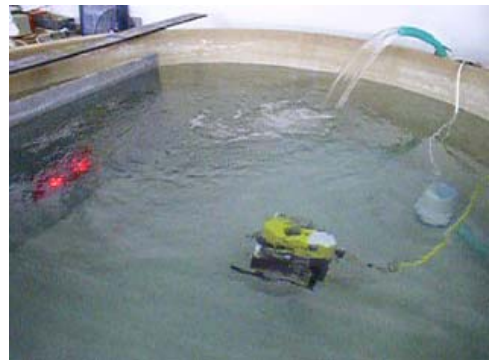
(7)



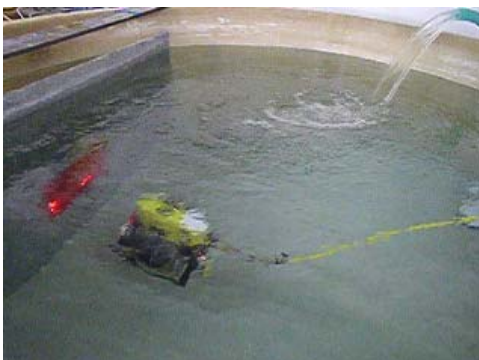
(8)



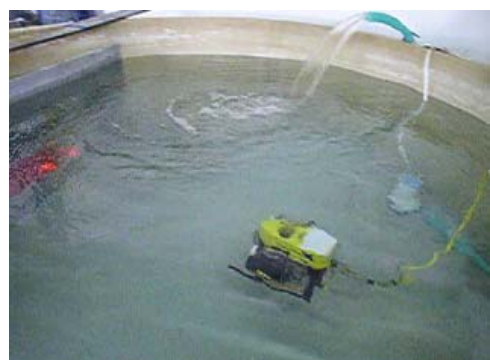
(9)



(10)



(11)



(12)

Φωτογραφίες 1, 2, 3: δοκιμή με κινούμενο στόχο.

Φωτογραφία 4: αναγνώριση οπτικού στόχου.

Φωτογραφίες 6, 7, 8, 9: δοκιμή με σταθερό στόχο.

Φωτογραφίες 10, 11, 12: δοκιμή με σταθερό στόχο παρουσία ρεύματος.

11^ο Κεφάλαιο

Ανακεφαλαίωση και συμπεράσματα

Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε ο έλεγχος με ασαφή λογική και οι γενετικοί αλγόριθμοι για την πλοήγηση και το έλεγχο των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων και παρουσιάστηκε μια υβριδική αρχιτεκτονική ελέγχου και πλοήγησης αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων. Οι ασαφείς ελεγκτές που προτείνονται εξασφαλίζουν την πλοήγηση του οχήματος με συμπεριφορά στόχου. Η συμπεριφορά στόχου εναλλάσσεται σε συμπεριφορά αντίδρασης για την αποφυγή εμποδίων, σε περίπτωση που τέτοια ανιχνευτούν από τους αισθητήρες του οχήματος. Η ανίχνευση εμποδίων και η εναλλαγή συμπεριφοράς πλοήγησης γίνεται με χρήση ασαφών μηχανών συμπεράσματος. Στις αποστολές αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων είναι βασικής σημασίας ο σχεδιασμός της βέλτιστης πορείας, που εξασφαλίζει ότι το όχημα βρίσκεται μακριά από εμπόδια. Η βέλτιστη πορεία πρέπει να έχει μορφή που μπορεί να ακολουθήσει το όχημα, λαμβανομένων υπόψη της σχεδίασης του και των χαρακτηριστικών του και είναι βασική προϋπόθεση της επιτυχίας της αποστολής ενός αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος ειδικά στις αποστολές κοντά στον πυθμένα. Στην παρούσα διατριβή ο σχεδιασμός της βέλτιστης πορείας γίνεται με πολυπαραμετρικές καμπύλες που βελτιστοποιούνται με γενετικούς αλγόριθμους. Με δεδομένη την βέλτιστη πορεία, βελτιστοποιούνται οι ασαφείς ελεγκτές με γενετικούς αλγόριθμους, ώστε να εξασφαλίζεται ότι το όχημα έχει μικρό σφάλμα θέσης καθώς ακολουθεί την βέλτιστη πορεία. Με δεδομένη την ύπαρξη δυναμικών ή άγνωστων εμποδίων στον πυθμένα, ο σχεδιασμός της πορείας μπορεί να επαναλαμβάνεται όποτε το όχημα βρεθεί

εγκλωβισμένο σε εμπόδια, τα οποία δεν έχουν ληφθεί υπόψη στον αρχικό σχεδιασμό πορείας. Τα παραπάνω ομαδοποιούνται σε μια υβριδική αρχιτεκτονική ελέγχου τριών επιπέδων.

Η προτεινόμενη υβριδική αρχιτεκτονική ελέγχου εξασφαλίζει σχεδιασμό πορείας και αυτόνομη πλοήγηση με ταυτόχρονη αποφυγή εμποδίων και έλεγχο των κινητήρων και των πτερυγών του οχήματος. Περιλαμβάνει τρία επίπεδα, το επίπεδο σχεδιασμού πορείας, το επίπεδο βελτιστοποίησης ασαφών ελεγκτών και το επίπεδο ελέγχου κίνησης. Το επίπεδο ελέγχου κίνησης αποτελείται από το τμήμα ανάγνωσης αισθητήρων, το τμήμα αποφυγής σύγκρουσης και το τμήμα κατώτερου ελέγχου κίνησης.

Με την προτεινόμενη μεθοδολογία σχεδίασης της βέλτιστης πορείας υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα, έναντι άλλων μεθόδων που έχουν προταθεί. Κατ' αρχήν, η πορεία αναπαρίσταται με μια ομαλή καμπύλη με γνωστή μαθηματική αναπαράσταση και όχι με μια ακολουθία σημείων στόχου. Το πολύγωνο ελέγχου της καμπύλης βελτιστοποιείται με γενετικούς αλγόριθμους, ώστε με γνωστή την μορφολογία του πυθμένα, να μην υπάρχουν εμπόδια στην κίνηση του οχήματος. Στον σχεδιασμό της πολυπαραμετρικής καμπύλης λαμβάνονται υπόψη εκτός από την μορφολογία του πυθμένα και οι ελκτικές ικανότητες του οχήματος, ώστε η βέλτιστη πορεία να μην περιέχει τμήματα με απότομες αλλαγές καμπυλότητας. Αλλαγές καμπυλότητας και κατεύθυνσης συνήθως έχουν ως αποτέλεσμα λάθη θέσης κατά την εκτέλεση της πορείας. Με την προτεινόμενη μεθοδολογία σχεδιασμού πορείας, προκύπτουν καμπύλες που αναπαριστούν φυσικές πορείες και εκτελούνται με ευκολία από το όχημα. Ο σχεδιασμός της βέλτιστης πορείας γίνεται σε αρχικό στάδιο πριν την έναρξη της αποστολής και επαναλαμβάνεται σε περίπτωση που κατά την πλοήγηση διαπιστωθεί ότι υπάρχουν εμπόδια που δεν είχαν ληφθεί υπόψη στον αρχικό σχεδιασμό. Με αυτόν τον τρόπο, γίνεται μια πρωτογενής αποφυγή εμποδίων, καθώς εξασφαλίζεται ότι το όχημα θα κινηθεί σε περιοχή ελεύθερη από εμπόδια.

Για να εξασφαλιστεί η κίνηση του οχήματος στην βέλτιστη πορεία χωρίς λάθη στην θέση του σχεδιάστηκε το επίπεδο βελτιστοποίησης των ελεγκτών κίνησης. Στο επίπεδο αυτό χρησιμοποιούνται γενετικοί αλγόριθμοι για να βρεθούν οι βέλτιστες συναρτήσεις συμμετοχής των ασαφών ελεγκτών κίνησης, που δίνουν το ελάχιστο σφάλμα θέσης. Για την γενετική βελτιστοποίηση των ελεγκτών κίνησης χρησιμοποιείται αντικειμενική συνάρτηση που καλεί το μοντέλο προσομοίωσης του οχήματος για να αξιολογήσει την ακρίβεια των ελεγκτών κίνησης. Επίσης λαμβάνεται υπόψη το μήκος και ο χρόνος της πορείας που πραγματοποιεί το όχημα, χαρακτηριστικά που εξασφαλίζουν εξοικονόμηση ενέργειας των συσσωρευτών του οχήματος. Οι βέλτιστοι ελεγκτές κίνησης, όπως αποδείχθηκε μπορούν να παρέχουν έλεγχο με αποδεκτή ακρίβεια, όταν το όχημα εκτελεί πορεία διαφορετική από αυτήν για την οποία βελτιστοποιήθηκαν. Έτσι η ακριβής πλοήγηση εξασφαλίζεται και στην περίπτωση ανασχεδιασμού πορείας σε πραγματικό χρόνο κατά την διάρκεια της αποστολής.

Ο έλεγχος των κινήσεων του οχήματος γίνεται με ασαφή λογική σε ένα επίπεδο που ενσωματώνει την ανάγνωση των ενδείξεων των αισθητήρων για την αναγνώριση των εμποδίων, την αναγνώριση επικινδυνότητας του περιβάλλοντος και την λήψη απόφασης αποφυγής σύγκρουσης. Το πλεονέκτημα

του ελέγχου με ασαφή λογική έναντι άλλων προσεγγίσεων είναι ότι δεν απαιτεί μαθηματική μοντελοποίηση του οχήματος και των υδροδυναμικών του χαρακτηριστικών και οι αποφάσεις ελέγχου λαμβάνονται μέσω λεκτικών μεταβλητών, που προσεγγίζουν την αναπαράσταση της έμπειρης γνώσης. Με τον ασαφή έλεγχο μπορούν να ελεγχθούν μη γραμμικά και χρονικά μεταβαλλόμενα συστήματα χωρίς περιορισμούς γραμμικοποίησης και μαθηματικής μοντελοποίησης των άλλων τεχνικών ελέγχου. Το όχημα μπορεί να κάνει δυναμική αποφυγή εμποδίων εναλλάσσοντας την συμπεριφορά στόχου σε συμπεριφορά αντίδρασης. Έτσι το όχημα αποφεύγει τα εμπόδια και να πλοηγείται προς το επιθυμητό σημείο. Η σχεδίαση του επιπέδου ελέγχου κίνησης και αποφυγής εμποδίων έγινε με την μεγαλύτερη γενικότητα ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα. Αν και για την βελτιστοποίηση των προτεινόμενων ασαφών ελεγκτών, απαιτείται η ύπαρξη μαθηματικού μοντέλου κίνησης, ο έλεγχος του οχήματος με ευρετικά προσδιορισμένους ασαφείς ελεγκτές μπορεί να εξασφαλίσει, όπως φάνηκε στις προσομοιώσεις και στα πειράματα πραγματικού χρόνου, έλεγχο με βελτιωμένα χαρακτηριστικά ακρίβειας και ευστάθειας έναντι άλλων προσεγγίσεων.

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική ελέγχου ελέγχθηκε με προσομοιώσεις για κάθε ένα από τα επίπεδα που περιλαμβάνει. Για τον λόγο αυτό προγραμματίστηκε στην γλώσσα Matlab και δοκιμάστηκε για το αυτόνομο υποβρύχιο όχημα NPS-Phoenix με ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Έγιναν προσομοιώσεις για το επίπεδο σχεδιασμού πορείας, το επίπεδο βελτιστοποίησης ελεγκτών κίνησης και ελέγχου κίνησης και αποφυγής εμποδίων.

Επίσης έγιναν πειράματα πραγματικού χρόνου για το επίπεδο ελέγχου κίνησης, όπου διαπιστώθηκε ότι η σχεδίαση του προτεινόμενου ελεγκτή ανταποκρίνεται στο πρόβλημα του ελέγχου ενός αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος. Στα πειράματα αξιολογήθηκε η ικανότητα του οχήματος να πλοηγείται προς ένα σημείο στόχου και να πετυχαίνει διαδοχικά σημεία στόχου, σε ήρεμο νερό και με την παρουσία τυχαίου ρεύματος. Επίσης αξιολογήθηκε η ικανότητα του οχήματος να σταθεροποιείται και να αιωρείται σε ένα σημείο. Τέλος έγιναν πειράματα στα οποία το όχημα παρακολουθούσε ένα κινούμενο στόχο. Τα πειράματα έδειξαν ότι το προτεινόμενο επίπεδο το όχημα μπορεί να εξασφαλίσει έλεγχο με ικανοποιητική ακρίβεια σε όλες τις περιπτώσεις.

Τα πειράματα πραγματικού χρόνου, για λόγους σύγκρισης, με έναν ελεγκτή κίνησης που βασίζεται στην μη-γραμμική θεωρία και στην ευστάθεια κατά Lyapunov στο οριζόντιο επίπεδο και στον PD έλεγχο στο κατακόρυφο επίπεδο. Από την σύγκριση προκύπτει ότι με το προτεινόμενο επίπεδο ελέγχου, υπάρχει μείωση του σφάλματος θέσης έναντι του μη-γραμμικού-PD ελεγκτή. Επίσης προκύπτει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, ιδιαίτερα όταν υπάρχουν διαταραχές από κίνηση του νερού σε τυχαία κατεύθυνση. τυχαίο ρεύμα. Τέλος, φάνηκε ότι το προτεινόμενο επίπεδο ελέγχου είναι περισσότερο εύρωστο, με την έννοια ότι εξασφαλίζει μικρότερα σφάλματα, όταν υπάρχουν διαταραχές που δεν έχουν μοντελοποιηθεί.

Μελλοντική επέκταση της αρχιτεκτονικής ελέγχου είναι η προσθήκη γενετική βελτιστοποίηση των κανόνων των ελεγκτών κίνησης, ώστε να μην υπάρχει η πιθανότητα να εισέρχονται λάθη ανθρώπινου σχεδιασμού στην πλοήγηση των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων. Επίσης οι ελεγκτές κίνησης θα πρέπει να βελτιστοποιούνται με διαφορετικά κριτήρια ανάλογα με την φύση της αποστολής. Τέτοια κριτήρια μπορούν να είναι η μέγιστη εξοικονόμηση ενέργειας, ο ελάχιστος χρόνος πορείας, η ελάχιστη απόσταση από τον πυθμένα, η ελάχιστη απόκλιση από την πορεία κ.λ.π. Επίσης για την ολοκλήρωση της σχεδίασης της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής ελέγχου και πλοήγησης θα πρέπει να γίνουν πειράματα πραγματικού χρόνου σε πραγματικό θαλάσσιο περιβάλλον.

Παραρτήματα

12.1 Παράρτημα Α: Αισθητήρες υποβρυχίων οχημάτων

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των αυτόνομων υποβρυχίων οχημάτων οι αποστολές μπορούν να διαφέρουν και να είναι από μια απλή αποφυγή εμποδίων σε ένα εκπαιδευτικό όχημα έως μια αποστολή χαρτογράφησης σε ένα μεγάλο βάθος. Αναφορικά με τις εφαρμογές πλοήγησης υποβρυχίων οχημάτων και για διάφορες αποστολές μπορούμε να ξεχωρίσουμε τα ακόλουθα προβλήματα πλοήγησης [8], [160]:

- Πλοήγηση κοντά στην επιφάνεια όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν δεδομένα από αισθητήρες δορυφορικού εντοπισμού θέσης (GPS). Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αισθητήρες κλίσης, μαγνητικές πυξίδες, μονάδες μέτρησης αδράνειας και μετρητές απόστασης για να εκτιμηθεί η κινηματική κατάσταση και η θέση του οχήματος.
- Πλοήγηση στην ζώνη μέσου βάθους μακριά από την επιφάνεια και μακριά από τον πυθμένα. Σε αυτή την περίπτωση ακουστικοί αισθητήρες και μονάδες μέτρησης αδρανείας είναι οι μόνοι αξιόπιστοι αισθητήρες.
- Πλοήγηση στην ζώνη κοντά στον πυθμένα όπου οι ανάγκες για ακριβή δειγματοληψία πυθμένα, εποπτεία υποβρυχίων καλωδίων, εντοπισμό ναυαγίων δημιουργούν ανάγκες για ακριβή προσδιορισμό θέσης και εντοπισμό εμποδίων κυρίως μέσω αισθητήρων υπερήχων.

Έτσι η επιλογή των αισθητήρων είναι βασικής σημασίας για την εκπλήρωση της αποστολής των υποβρυχίων οχημάτων οι τύποι των αισθητήρων με τους οποίους μπορούν να είναι εφοδιασμένα τα υποβρύχια οχήματα. αναφέρονται συνοπτικά στο Προσάρτημα Α. Οι κυριότεροι αισθητήρες για τον προσδιορισμό θέσης είναι: (α) αισθητήρες ταχύτητας Doppler, (β) ηχητικοί αισθητήρες μεγάλου μήκους κύματος (Long base line, LBL) και βραχέων κυμάτων (Ultra short base line, USBL), (γ) δορυφορικοί αισθητήρες θέσης GPS [241], [242]

Η ύπαρξη των αισθητήρων είναι απαραίτητη για να μπορέσει το όχημα να λειτουργήσει αυτόνομα σε άγνωστο θαλάσσιο περιβάλλον διότι παρέχουν την ανάδραση που χρειάζεται έτσι ώστε να υπάρξει ένα σύστημα ελέγχου με ανάδραση. Η έξοδος του συστήματος ελέγχου είναι η κατάλληλη τιμή της μεταβλητής ελέγχου η οποία ασκείται στο φυσικό σύστημα του οχήματος. Η απόκριση μετράται από τους αισθητήρες στον κλάδο ανάδρασης, που ενημερώνουν το σύστημα ελέγχου για το αποτέλεσμα της μεταβολής της μεταβλητής ελέγχου πάνω στο όχημα.

Οι ενδείξεις των αισθητήρων περιέχουν σφάλματα ανάγνωσης και ανακρίβειες και παρέχονται σε χρονικά διαστήματα διαφορετικά από τα διαστήματα ανάγνωσης του συστήματος ελέγχου. Στοιχεία που χαρακτηρίζουν τους αισθητήρες είναι το εύρος λειτουργίας, η κατανάλωση ενέργειας, το μέγιστο σφάλμα, το μέγιστο βάθος λειτουργίας και τέλος το κόστος. Για τις εφαρμογές πλοήγησης υποβρυχίων οχημάτων υπάρχουν οι ακόλουθοι τύποι αισθητήρων:

- Ενεργητικοί Αισθητήρες Υπερήχων
- Παθητικοί Αισθητήρες Ήχου
- Μαγνητικοί Αισθητήρες
- Γυροσκοπικοί Αισθητήρες
- Αισθητήρες Πίεσης
- Αισθητήρες Δορυφορικού Προσδιορισμού θέσης (GPS)

Ακολουθεί περιγραφή ανά κατηγορία των διαφόρων ειδών αισθητήρων που υπάρχουν.

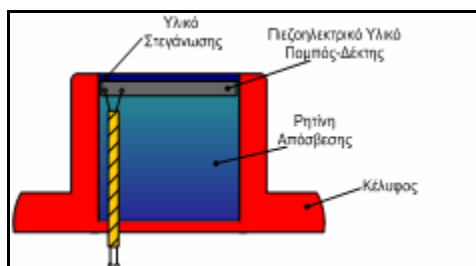
12.1.1 Ενεργητικοί ακουστικοί αισθητήρες

Οι ενεργητικοί ακουστικοί αισθητήρες αποτελούνται από ένα ζεύγος πομπού-δέκτη και λειτουργούν με αντανάκλαστική αίσθηση υπερήχων. Ο πομπός εκπέμπει ένα παλμό υπερήχων κατόπιν σιγεί και ο δέκτης περιμένει την ηχώ η οποία έρχεται όταν ο ήχος ανακλαστεί σε κάποιο αντικείμενο.

Ο παλμός εκπομπής υπερήχων έχει μια πεπερασμένη διάρκεια (δεν είναι εφικτό να είναι μηδενικής διάρκειας) στο τέλος της οποίας ο πομπός δεν εκπέμπει ήχο ώστε να μην ακούσει ο δέκτης απευθείας την εκπομπή. Ο δέκτης περιμένει μέχρι την στιγμή που θα επιστρέψει η ηχώ και ο επεξεργαστής του αισθητήρα μετρά τον χρόνο t_e που πέρασε από το τέλος του παλμού εκπομπής μέχρι την πρώτη επιστροφή της ηχούς. Με την υπόθεση ότι ο ήχος μεταδίδεται με σταθερή ταχύτητα V_{sound} στο νερό, υπολογίζεται η απόσταση του εμποδίου.

Με βάση την αρχή λειτουργίας των αισθητήρων υπερήχων, μπορούν να διαπιστωθούν αιτίες δημιουργίας λαθών στις ενδείξεις. Κατ' αρχήν η ταχύτητα του ήχου δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται με την θερμοκρασία και την πυκνότητα του νερού. Επίσης η ακρίβεια του αισθητήρα αυξάνεται με την μείωση του χρονικού πλάτους του παλμού εκπομπής, διότι έτσι προσδιορίζεται ακριβέστερα η αρχή της εκπομπής. Αντίθετα με την μείωση του χρονικού πλάτους του παλμού εκπομπής μειώνεται η ισχύς εκπομπής και η πιθανότητα ανίχνευσης εμποδίου. Άλλος παράγοντας που μπορεί να δημιουργήσει λάθη είναι οι αντανάκλασεις του ήχου σε στερεά σύνορα, τα οποία μπορεί να παρεμβάλουν επιπλέον απόσταση στην πορεία του ήχου ή να ανακλούν τον ήχο υπό γωνία μη εντοπίσιμη από τον δέκτη.

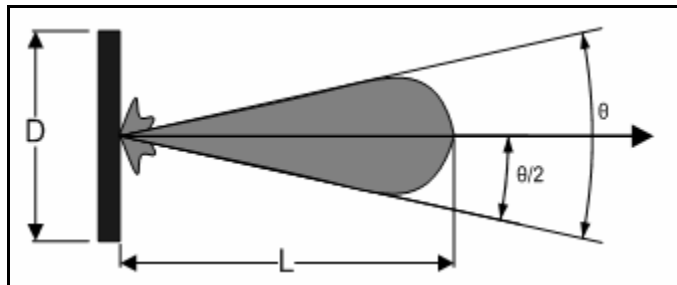
Στο Σχήμα Π-1 φαίνονται τα βασικά κατασκευαστικά στοιχεία ενός αισθητήρα υπερήχων. Αποτελείται από ένα πομπό-δέκτη σε Σχήμα δίσκου από πιεζοηλεκτρικό υλικό, το οποίο μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε ακουστική και αντίστροφα. Ο πομποδέκτης βρίσκεται σε ένα κέλυφος και απομονώνεται ακουστικά με μια ρητίνη απόσβεσης. Τέλος την υδατοστεγανότητα παρέχει ένα λεπτό στρώμα ειδικής ρητίνης.



Σχήμα Π- 1: Κατασκευή αισθητήρα υπερήχων

Τα ηχητικά κύματα που εκπέμπονται από τον πομπό έχουν μια κύρια δέσμη η γωνία εύρους της οποίας εξαρτάται από την διάμετρο του πομπού και την συχνότητα του ήχου και καθορίζει πόσοι αισθητήρες απαιτούνται για κάλυψη κάποιας γωνίας.

Στο Σχήμα π-2 φαίνεται η μορφή της δέσμης υπερήχων που παράγει ένας ταλαντευόμενος δίσκος από πιεζοηλεκτρικό υλικό διαμέτρου D.



Σχήμα Π- 2: Εύρος δέσμης υπερήχων

Αν λ είναι το μήκος κύματος των εκπεμπόμενων υπερήχων, η γωνία εύρους της δέσμης δίνεται από την σχέση:

$$\sin(\theta / 2) = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{D} \quad (12.1)$$

Το μήκος L της περιοχής η οποία βρίσκεται στο εύρος της ζώνης των υπερήχων αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας και δίνεται από την σχέση:

$$L = \frac{D^2}{4 \cdot \lambda} \quad (12.2)$$

Συμπερασματικά, η αύξηση της συχνότητας των υπερήχων έχει ως αποτέλεσμα την συγκέντρωση της δέσμης και την αύξηση της μέγιστης απόστασης λειτουργίας. Σύννηθες εύρος συχνοτήτων για αισθητήρες υπερήχων για υποβρύχια οχήματα είναι από 100-200 kHz.

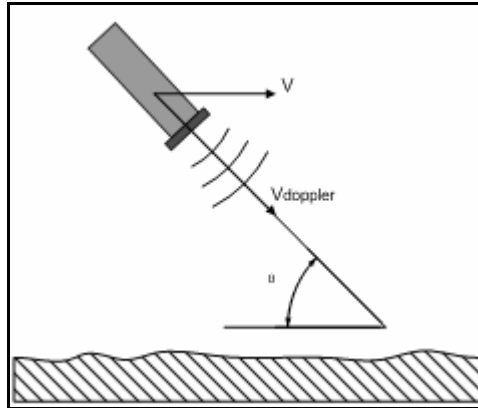
Ως αισθητήρες υπερήχων μπορούν να χαρακτηριστούν οι εξής τύποι αισθητήρων:

- **Μετρητές απόστασης (altimeters).** Συμπεριλαμβάνουν σταθερό πομπό και δέκτη, καθώς και επεξεργαστή μέσα σε ενιαίο στεγανό κέλυφος. Συνδέονται συνήθως με θύρα RS-232 με την υπολογιστική μονάδα του οχήματος και επιστρέφουν την απόσταση μέχρι το εμπόδιο που εντοπίζουν. Οι εφαρμογές τους μπορεί να είναι ο εντοπισμός και η αποφυγή εμποδίων, η μέτρηση του βάθους, η μέτρηση της απόστασης από τον πυθμένα. Επίσης με τέτοιους αισθητήρες μπορεί να γίνεται μέτρηση και παρακολούθηση του ύψους του θαλάσσιου κύματος, εφόσον τοποθετηθούν σε σταθερό σημείο του πυθμένα. Μια τυπική απόσταση λειτουργίας τους είναι 100 m.
- **Αισθητήρες εικόνας.** Οι αισθητήρες αυτοί περιλαμβάνουν περιστρεφόμενο πομπό – δέκτη υπερήχων και επιστρέφουν απόσταση εντοπιζόμενων εμποδίων καλύπτοντας περιστροφικά ένα προδιαγεγραμμένο εύρος. Έτσι σχηματίζουν μια εικόνα του περιβάλλοντος αντίστοιχη με αυτή ενός radar. Μειονεκτήματα τους είναι η μη κάλυψη περιοχών που βρίσκονται πίσω από εμπόδια και η υψηλότερη τιμή τους. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές υποβρυχίων οχημάτων όπου απαιτείται να υπάρχει αντίληψη μεγάλου τμήματος του περιβάλλοντος χώρου, όπως εντοπισμός ναυαγίων, χαρτογράφηση βυθού. Η ενσωμάτωση των ενδείξεων τους σε αυτόνομα συστήματα πλοήγησης γίνεται με χρήση τεχνικών αναγνώρισης εικόνας.
- **Αισθητήρες Doppler Μέτρησης Ταχύτητας.** Οι αισθητήρες αυτοί τοποθετούνται στο κάτω μέρος του οχήματος και εκπέμπουν ηχητικούς παλμούς προς τα κάτω οι οποίοι ανακλώνται είτε από τον πυθμένα είτε από σωματίδια που περιέχονται στο νερό. Η δέσμη υπερήχων έχει μικρή γωνία εύρους (1° έως $3,5^\circ$). Από την μεταβολή στην συχνότητα των ανακλώμενων κυμάτων (φαινόμενο Doppler) υπολογίζεται η ταχύτητα του οχήματος, η οποία επιστέφεται ως διάνυσμα στον υπολογιστή του οχήματος

Οι αισθητήρες μέτρησης ταχύτητας τοποθετούνται συνήθως υπό γωνία 45° όπως στο Σχήμα 4-10. Η φαινόμενη σχετική ταχύτητα του πυθμένα υπολογίζεται από την σχέση:

$$V = V_{doppler} / \cos(\alpha) \quad (12.3)$$

Όπου $V_{doppler}$: η ταχύτητα που υπολογίζεται από το όργανο μέσω του φαινομένου Doppler και α η γωνία κλίσης του οργάνου.



Σχήμα Π- 3: Μέτρηση ταχύτητας με Doppler Sonar

12.1.2 Παθητικοί ακουστικοί αισθητήρες

Οι παθητικοί ακουστικοί αισθητήρες είναι υδρόφωνα τα οποία μπορούν να προσδιορίσουν την διεύθυνση όπου εντοπίζουν τον λαμβανόμενο ήχο. Συνήθως τοποθετούνται σε τριάδες οπότε με τριγωνισμό μπορεί να εντοπιστεί, σε σχέση με το όχημα, η διεύθυνση ενός ακουστικού φάρου που εκπέμπει ήχους γνωστής συχνότητας.

12.1.3 Μαγνητικοί αισθητήρες

Οι μαγνητικοί αισθητήρες μετρούν την μεταβολή του μαγνητικού πεδίου της γης. Το μαγνητικό πεδίο της γης έχει μέση ένταση 0,5 Gauss και μπορεί να αναπαρασταθεί με το μαγνητικό πεδίο ενός δίπολου με κλίση 11° από τον άξονα περιστροφής της γης. Οι μαγνητικοί αισθητήρες μπορούν να χωριστούν στις εξής κατηγορίες ανάλογα με τις πληροφορίες που παρέχουν:

Μαγνητικές πυξίδες. Δίνουν την διεύθυνση του μαγνητικού βορά και μετρούν μεταβολές στην γωνία κατεύθυνσης yaw του οχήματος.

Κλισιόμετρα. Μετρούν γωνίες πρόνευσης και διατοιχισμού.

12.1.4 Αισθητήρες επιτάχυνσης

Αναφέρονται ως μονάδες μέτρησης αδράνειας (Inertial Measurement Units) και μετρούν την επιτάχυνση σε δύο ή τρεις άξονες. Από τις επιταχύνσεις με ολοκλήρωση προκύπτουν οι ταχύτητες στους τρεις άξονες και στην συνέχεια οι διανυθίσεις αποστάσεις.

12.1.5 Γυροσκοπικοί αισθητήρες

Δίνουν πληροφορίες για την αλλαγή των γωνιών κατεύθυνσης αντίστοιχες με αυτές των μαγνητικών πυξίδων με χρήση γυροσκοπίων. Αν και είναι ακριβείς έχουν τα μειονέκτημα του σημαντικά

μεγαλύτερου όγκου και κόστους και χρησιμοποιούνται σε μεγάλα οχήματα με υψηλές απαιτήσεις ακριβείας.

12.1.6 Αισθητήρες πίεσης

Δίνουν το βάθος που βρίσκεται το όχημα με μέτρηση με πιεζοηλεκτρική διάταξη, της υδροστατικής πίεσης.

12.1.7 Αισθητήρες διαρροής

Αποτελούνται από ηλεκτρικές επαφές που κλείνουν κύκλωμα και ενεργοποιούν διατάξεις αυτοματισμού και ασφαλείας σε περίπτωση που υπάρξει βλάβη της στεγανότητας και εισροή νερού στο όχημα.

12.1.8 Δορυφορικοί αισθητήρες θέσης

Δίνουν την θέση του οχήματος στο αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων με χρήση συστήματος δορυφόρων προσδιορισμού θέσης (GPS). Δεδομένου ότι οι δορυφόροι αυτοί εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα τα οποία δεν μεταδίδονται κάτω από το νερό, οι αισθητήρες αυτοί λειτουργούν για πλοήγηση όταν το όχημα βρίσκεται στην επιφάνεια και για διόρθωση της θέσης όπως αυτή υπολογίζεται με τεχνικές εύρεσης θέσης όταν το όχημα αναδύεται.

12.2 Παράρτημα Β: Δυναμικό μοντέλο και κώδικες προσομοίωσης οχήματος NPS-Phoenix

12.2.1 Εξισώσεις κίνησης

εξίσωση κίνησης Surge

$$\begin{aligned}
 & (m - \frac{\rho}{2} L^3 X_{\dot{u}}) \dot{u} + m z_G \dot{q} - m y_G \dot{r} = \\
 & = m [vr - wq + x_G(q^2 + r^2) - y_G pq - z_G qr] \\
 & + (\rho/2) L^4 [X_{pp} p^2 + X_{qq} q^2 + X_{rr} r^2 + X_{pr} pr] \\
 & + (\rho/2) L^3 [X_{wq} wq + X_{vp} vp + X_{vr} vr + uq ((X_{uq\delta b}/2)(\delta_{pbR} + \delta_{pbL}) + (X_{uq\delta s}/2)(\delta_{psR} + \delta_{psL})) \\
 & \quad + ur ((X_{ur\delta r}/2)(\delta_{rbT} + \delta_{rbB}) + (X_{ur\delta r}/2)(\delta_{rsT} + \delta_{rsB}))] \\
 & + (\rho/2) L^2 [X_{vv} v^2 + X_{ww} w^2 + uv(X_{uv\delta r}/2)(\delta_{rsT} + \delta_{rsB}) + uw((X_{uw\delta b}/2)(\delta_{pbR} + \delta_{pbL}) \\
 & \quad + (X_{uw\delta s}/2)(\delta_{psR} + \delta_{psL})) + u|u| (X_{u|u|\delta b\delta b} ((\delta_{pbR} + \delta_{pbL})/2)^2 + X_{u|u|\delta s\delta s} ((\delta_{psR} + \delta_{psL})/2)^2 \\
 & \quad + X_{u|u|\delta r\delta r} ((\delta_{rbT} + \delta_{rbB})/2)^2 + X_{u|u|\delta r\delta r} ((\delta_{rsT} + \delta_{rsB})/2)^2)] \\
 & - (W-B)\sin(\theta) \\
 & + (\rho/2) L^2 C_{d0} [(2ft/sec/700rpm)^2 (1/2) (n_{port} |n_{port}| + n_{stbd} |n_{stbd}| - u|u|]
 \end{aligned}$$

εξίσωση κίνησης Sway

$$\begin{aligned}
 & (m - \frac{\rho}{2} L^3 Y_{\dot{v}}) \dot{v} + (-m z_G - \frac{\rho}{2} L^4 Y_{\dot{r}}) \dot{p} + (m x_G - \frac{\rho}{2} L^4 Y_{\dot{r}}) \dot{r} = \\
 & = m [-ur + wp - x_G pq + y_G (p^2 + r^2) - z_G qr] \\
 & + (\rho/2) L^4 [Y_{pq} pq + Y_{qr} qr] \\
 & + (\rho/2) L^3 [Y_{uq} uq + Y_{uv} ur + Y_{vq} vq + Y_{wp} wp + Y_{wr} wr] \\
 & + (\rho/2) L^2 [Y_{uv} uv + Y_{vw} vw + u|u| ((Y_{u|u|\delta r\delta b}/2)(\delta_{rbT} + \delta_{rbB}) + (Y_{u|u|\delta r\delta s}/2)(\delta_{rsT} + \delta_{rsB}))] \\
 & - (\rho/2) \int_{tail}^{nose} [(c_{dy} h(x)(v+xr)^2 + c_{dz} b(x)(w-xq)^2] ((v+xr) / U_{cf}(x)) dx \\
 & + (W-B) \cos(\theta) \sin(\varphi) \\
 & + (2lb/24^2 Volts) [V_{bow-lateral} |V_{bow-lateral}| + V_{stern-lateral} |V_{stern-lateral}|]
 \end{aligned}$$

εξίσωση κίνησης Heave

$$\begin{aligned}
 & (m - \frac{\rho}{2} L^3 Z_{\dot{w}}) \dot{w} + m y_G \dot{p} + (-m x_G - \frac{\rho}{2} L^4 Z_{\dot{q}}) \dot{q} = \\
 & = m [uq - vp - x_G pr - y_G qr + z_G (p^2 + q^2)] \\
 & + (\rho/2) L^4 [Z_{pp} p^2 + Z_{pr} pr + Z_{rr} r^2] \\
 & + (\rho/2) L^3 [Z_{uq} uq + Z_{vp} vp + Z_{vr} vr] \\
 & + (\rho/2) L^2 [Z_{uw} uw + Z_{vv} v^2 + u|u| (Z_{u|u|\delta b} ((\delta_{pbR} + \delta_{pbL})/2) + Z_{u|u|\delta s} ((\delta_{psR} + \delta_{psL})/2))] \\
 & - (\rho/2) \int_{tail}^{nose} [(c_{dy} h(x)(v+xr)^2 + c_{dz} b(x)(w-xq)^2] ((w-xq) / U_{cf}(x)) dx \\
 & + (W-B) \cos(\theta) \cos(\varphi) \\
 & - (2lb/24^2 Volts) [V_{bow-vertical} |V_{bow-vertical}| + V_{stern-vertical} |V_{stern-vertical}|]
 \end{aligned}$$

εξίσωση κίνησης Roll

$$\begin{aligned}
 (mz_G - \frac{\rho}{2} L^4 K_{\dot{y}}) \dot{y} + m y_G \dot{w} + (I_x - \frac{\rho}{2} L^5 K_{\dot{p}}) \dot{p} - I_{xy} \dot{q} + (-I_{xz} - \frac{\rho}{2} L^5 K_{\dot{r}}) \dot{r} = \\
 = [- (I_z - I_y) q r - I_{xy} p r + I_{yz} (q^2 - r^2) + I_{xz} p q] \\
 - m [y_G (-uq + vp) - z_G (ur - wp)] \\
 + (\rho/2) L^5 [K_{pq} p q + K_{qr} q r + K_{p|p}|p| + K_{pp}] \\
 + (\rho/2) L^4 [K_{|u|p}|u|p| + K_{ur} u r + K_{vq} v q + K_{wp} w p + K_{wr} w r] \\
 + (\rho/2) L^3 [K_{uv} u v + K_{vw} v w - u|u| (K_{u|u|\delta p} (\delta_{pbR} + \delta_{pbL})/2 + K_{u|u|\delta s} (\delta_{psR} + \delta_{psL})/2)] \\
 + (y_G W - y_B B) \cos(\theta) \cos(\varphi) - (z_G W - z_B B) \cos(\theta) \sin(\varphi) \\
 + (\rho/2) |y_{fin-pres}| L^2 [u|u| (Z_{u|u|\delta b} (\delta_{pbR} - \delta_{pbL})/2 + Z_{u|u|\delta s} ((\delta_{psR} - \delta_{psL})/2))] \\
 + (\rho/2) |z_{fin-pres}| L^2 [u|u| (Y_{u|u|\delta rb} (\delta_{rbT} - \delta_{rbB})/2 + Y_{u|u|\delta rs} ((\delta_{rsT} - \delta_{rsB})/2))]
 \end{aligned}$$

εξίσωση κίνησης Pitch

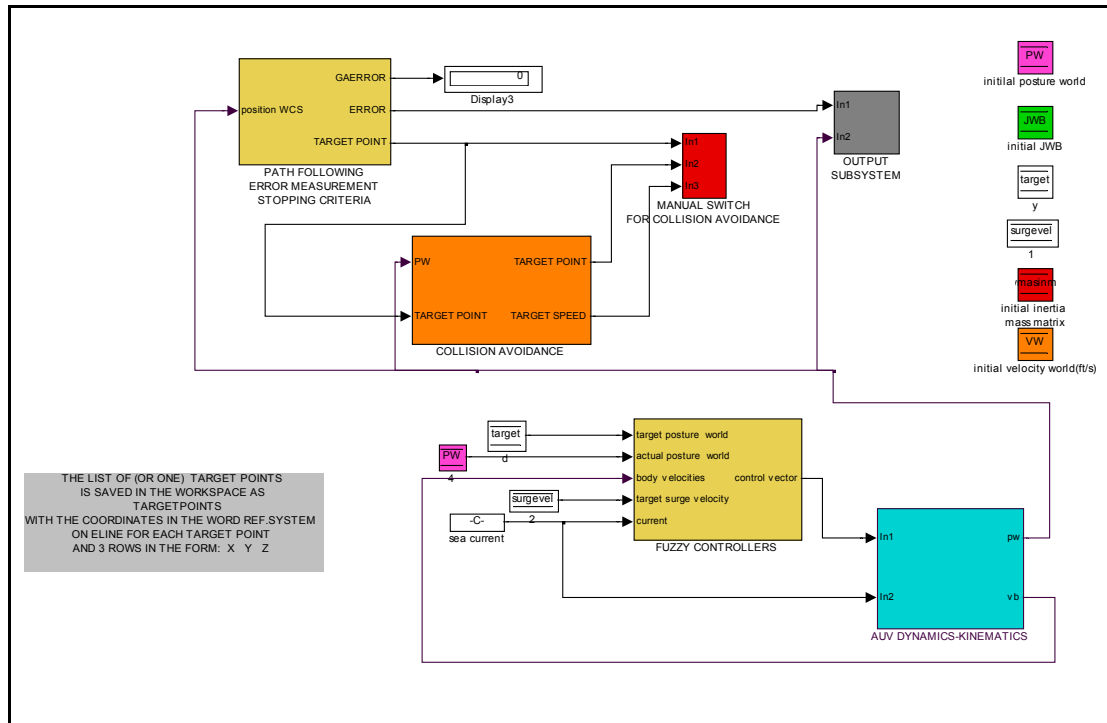
$$\begin{aligned}
 m z_G \dot{u} + (-m x_G - \frac{\rho}{2} L^4 M_{\dot{w}}) \dot{w} - I_{xy} \dot{p} + (I_y - \frac{\rho}{2} L^5 M_{\dot{q}}) \dot{q} - I_{yz} \dot{r} = \\
 = [- (I_x - I_z) p r + I_{yz} q r - I_{yz} p q - I_{xz} (p^2 - r^2)] \\
 + m [x_G (-uq + vp) - z_G (-vr + wq)] \\
 + (\rho/2) L^5 [M_{pp} p^2 + M_{pr} p r + M_{r|r}|r|r + M_{q|q}|q|q + M_{qq}] \\
 + (\rho/2) L^4 [M_{uq} u q + M_{vp} v p + M_{vr} v r] \\
 + (\rho/2) L^3 [M_{uw} u w + K_{vv} v^2 + u|u| (M_{u|u|\delta b} (\delta_{pbR} + \delta_{pbL})/2 + M_{u|u|\delta s} (\delta_{psR} + \delta_{psL})/2)] \\
 + (\rho/2) \int_{tail}^{nose} [(c_{dy} h(x) (v + xr)^2 + c_{dz} b(x) (w - xq)^2) ((w - xq)x / U_{cf}(x)) dx \\
 - (x_G W - x_B B) \cos(\theta) \cos(\varphi) - (z_G W - z_B B) \sin(\theta) \\
 - (2lb/24^2 Volts) [V_{bow-vertical} |V_{bow-vertical}| x_{bow-vertical} + V_{stern-vertical} |V_{stern-vertical}| x_{stern-vertical}]
 \end{aligned}$$

εξίσωση κίνησης Yaw

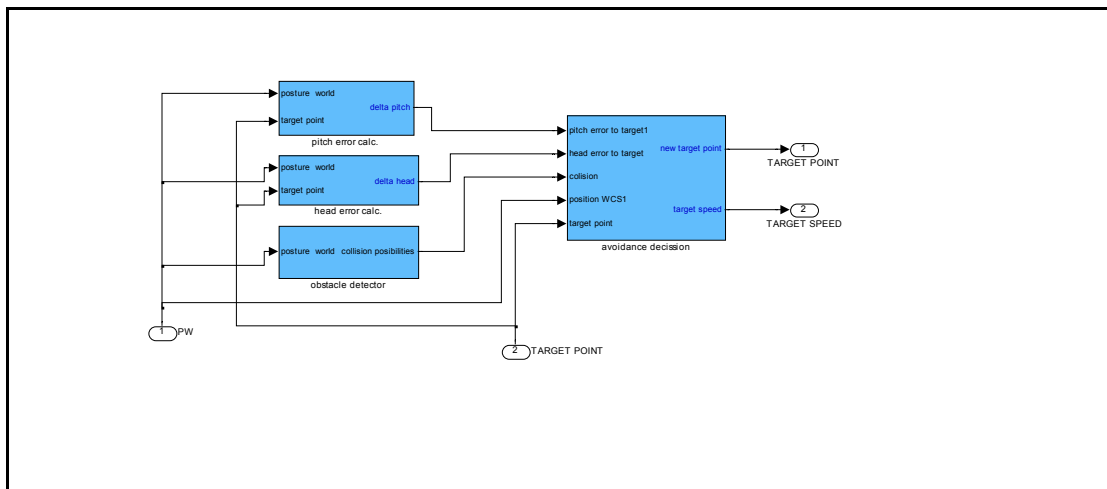
$$\begin{aligned}
 m y_G \dot{u} + (m x_G - \frac{\rho}{2} L^4 N_{\dot{y}}) \dot{y} + (-I_{xz} - \frac{\rho}{2} L^5 N_{\dot{p}}) \dot{p} - I_{yz} \dot{q} + (I_z - \frac{\rho}{2} L^5 N_{\dot{r}}) \dot{r} = \\
 = [- (I_y - I_x) p q + I_{xy} (p^2 - q^2) + I_{yz} p r - I_{xz} q r] \\
 - m [x_G (ur - wp) - y_G (-vr + wq)] \\
 + (\rho/2) L^5 [N_{pq} p q + N_{qr} q r + N_{r|r}|r|r + N_{rr}] \\
 + (\rho/2) L^4 [N_{up} u p + N_{ur} u r + N_{vq} v q + N_{wp} w p + N_{wr} w r]
 \end{aligned}$$

12.2.2 Μοντέλο Simulink

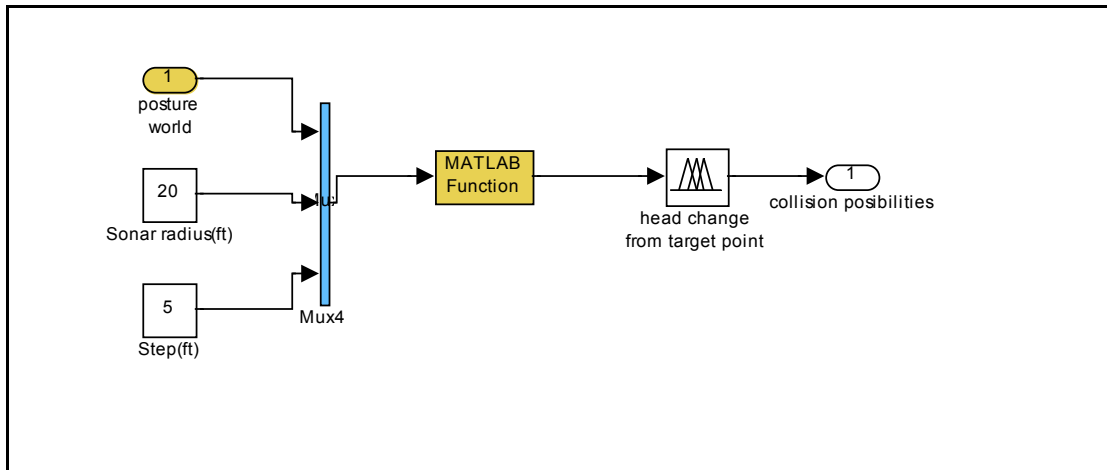
Στα Σχήματα Π-4 έως Π-12 δίνεται το μοντέλο σε Simulink που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος NPS-Phoenix.



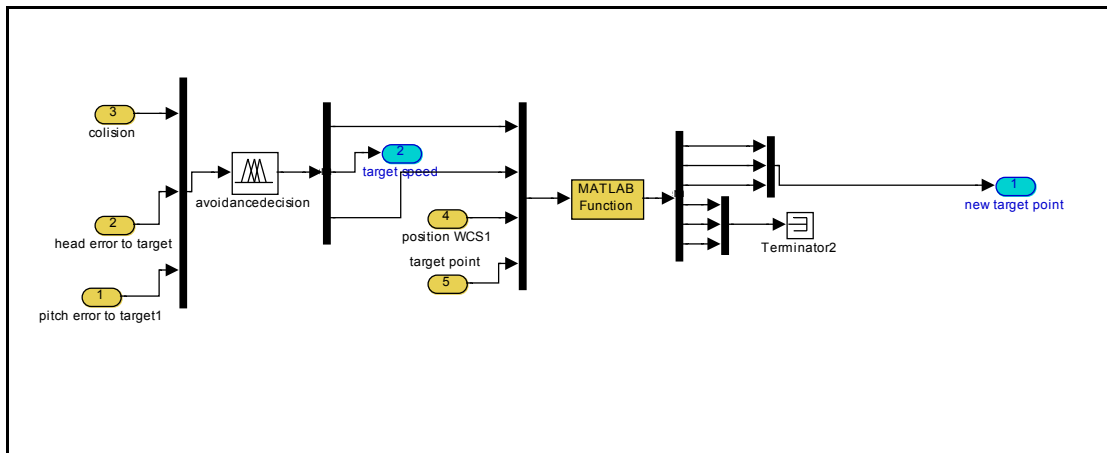
Σχήμα Π-4: Μοντέλο προσομοίωση του NPS-Phoenix σε Simulink



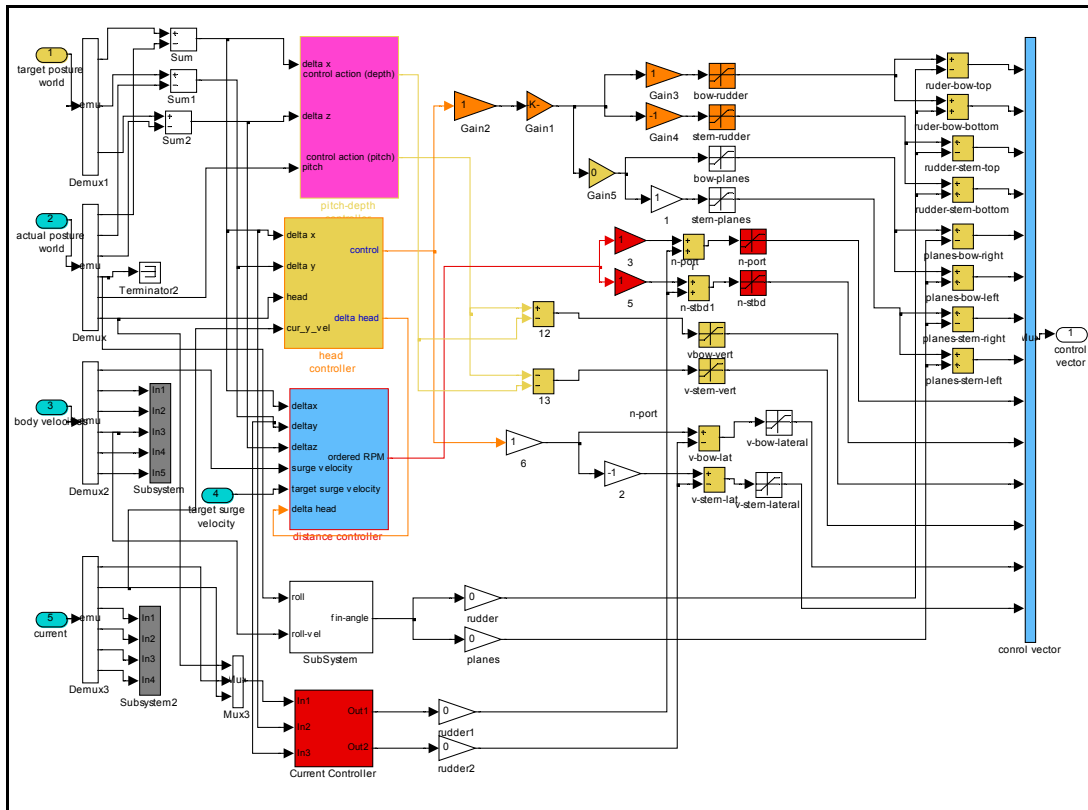
Σχήμα Π-5: Αποφυγή εμποδίων



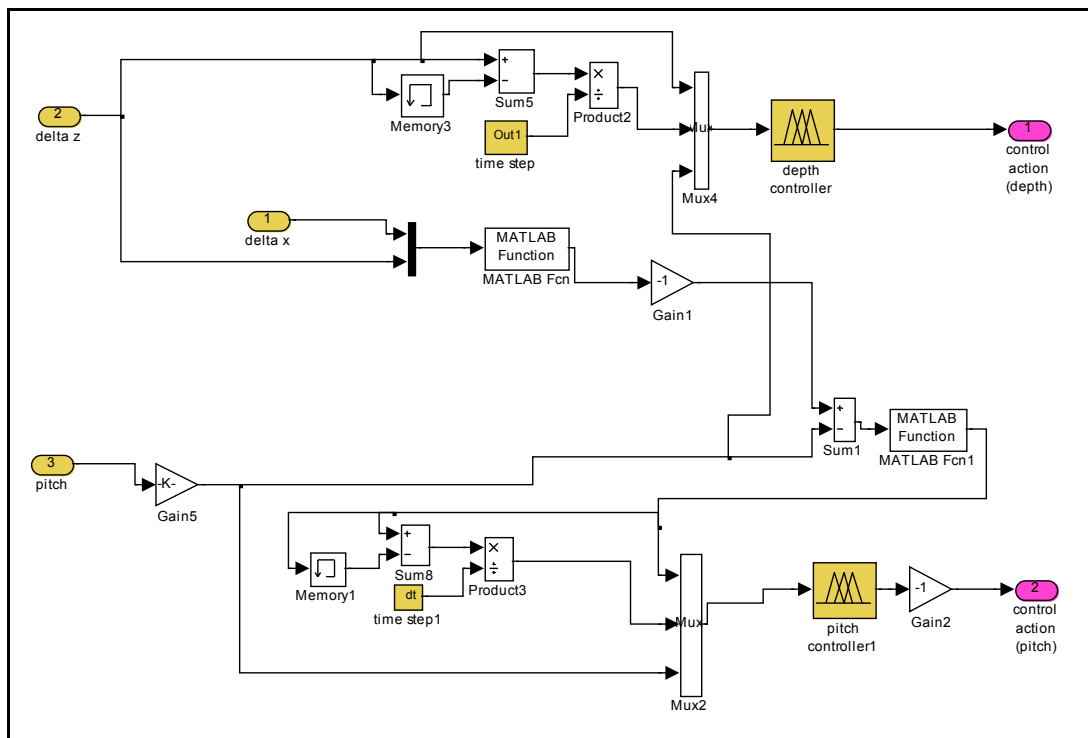
Σχήμα Π-6: Ανίχνευση εμποδίων



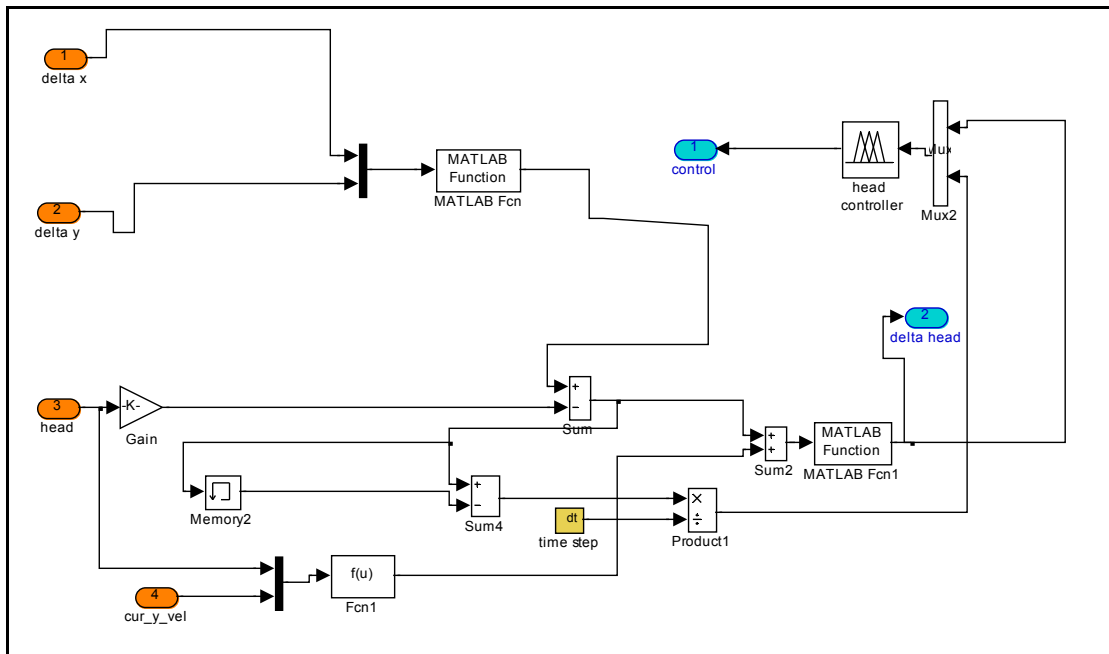
Σχήμα Π-7: Απόφαση αποφυγής σύγκρουσης



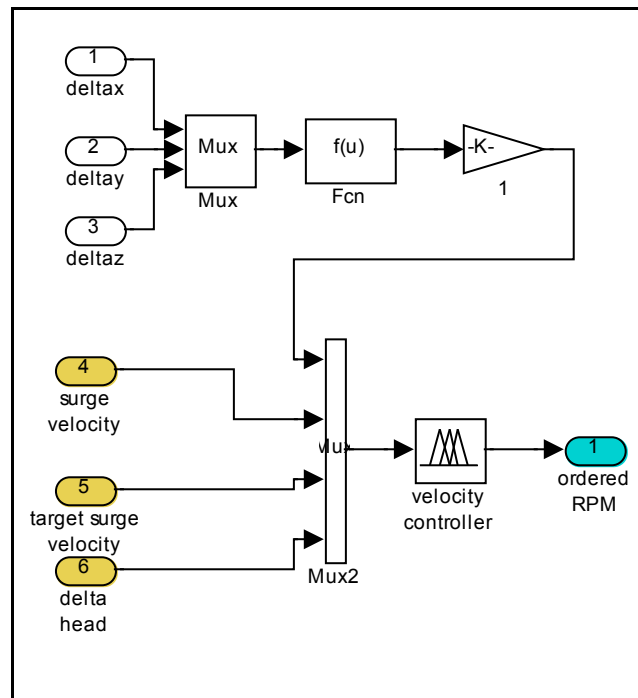
Σχήμα Π-8: Έλεγχος κίνησης



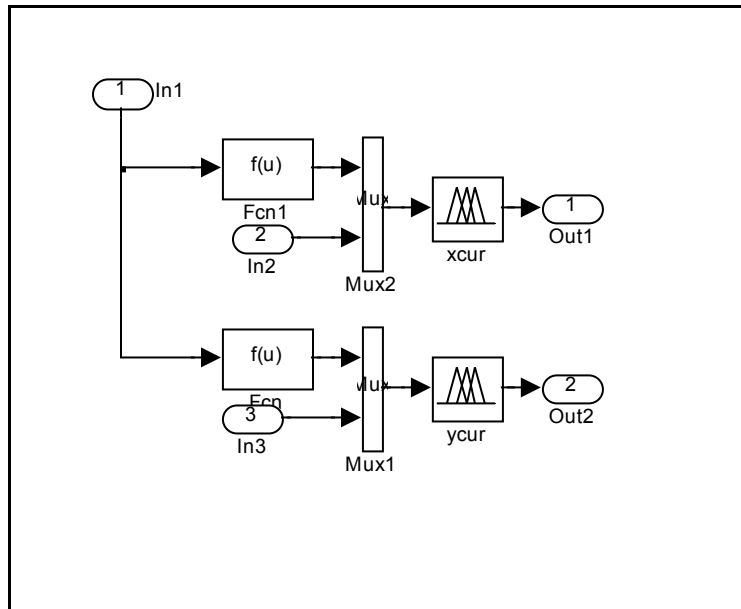
Σχήμα Π-9: Έλεγχος βάθους και γωνίας πρόνευσης



Σχήμα Π-10: Έλεγχος γωνίας κατεύθυνσης



Σχήμα Π-11: Έλεγχος ταχύτητας



Σχήμα Π-12: Ελεγκτής θαλασσίου ρεύματος

12.2.3 Αντικειμενική συνάρτηση γενετικού προσδιορισμού πορείας

```
function ff=fitnessfunction1(ftmp)
%
ftmp1=ftmp(1:3)';
ftmp2=ftmp(4:6)';ftmp3=ftmp(7:9)';ftmp4=ftmp(10:12)';ftmp5=ftmp(13:15)';
ftmp6=ftmp(16:18)';
%
startpoint=[-400;-350;90];
secondpoint=[-210.2594;-193.4002;90.0000];
endpoint=[1550;1150;90];
global point1;global point2;global point3;
%
coefs=[startpoint';startpoint';startpoint';secondpoint';ftmp1';ftmp2';
ftmp3';ftmp4';ftmp5';ftmp6';endpoint';endpoint';endpoint'];% ok
u=[0 0 0 0 0 1/8 2/8 3/8 4/8 5/8 6/8 7/8 1 1 1 1]; % ok
sp=spmak(u,coefs);
%define bounding box
maxx=max(startpoint(1),max(secondpoint(1),endpoint(1)));minx=min(startpoint(1),min(secondpoint(1),endpoint(1)));
maxy=max(startpoint(2),max(secondpoint(2),endpoint(2)));miny=min(startpoint(2),min(secondpoint(2),endpoint(2)));
margin=100; % the margin of the box outside max-min coordinates
maxx=maxx+margin; mixx=minx-margin;maxy=maxy+margin; miny=miny-margin;
maxz=100; minz=85; % define z axis max- min values
%evaluate Bspline values at certain points
pointnumber=30; %the number of spline points
j=1;
for i=0:1/pointnumber:1
    if i==0
        val(:,j)=startpoint;
    else if i>0
        val(:,j)=fnval(sp,i);
    end
    j=j+1;
end
%
%calculate ratio of length of curve to straight distance
%
length=0;
j=size(val);
j=j(1,2);
for i=1:j-1
    length=length+ ((val(1,i)-val(1,i+1)).^2+(val(2,i)-val(2,i+1)).^2+(val(3,i)-val(3,i+1)).^2).^0.5;
end
straightdistance=((val(1,1)-val(1,j)).^2+(val(2,1)-val(2,j)).^2+(val(3,1)-val(3,j)).^2).^0.5;
lengthratio=(length/straightdistance);
%
% calculate ratio of points under the bottom surface and outside the bounding box
%
```

```

j=size(val);
j=j(1,2);
count1=0;count2=0;count3=0;count4=0;
for i=1:j
xval=val(1,i); yval=val(2,i); zval=val(3,i);
zbottom=zcalc(xval,yval);
if zbottom<zval
    count1=count1+1;    % the number of points under the bottom surfase
end
if (xval>maxx)==1
    count2=count2+1; % the number of points out x,y limits
end
if (xval<minx)==1
    count2=count2+1;
end
if (yval>maxy)==1
    count2=count2+1;
end
if (yval<miny)==1
    count2=count2+1;
end
if (zval>maxz)==1
    count3=count3+1; % the number of points out z limits
end
if (zval<minz)==1
    count3=count3+1;
end
end
end
pointratio=count1/j;
boundxyratio=count2/(pointnumber*2);
boundzratio=count3/pointnumber;
%
%
%calculate ratio of min distanse / safety distanse for each spline point
%
safedist=10; % define safety distanse
margin=10; % the margin of the box outside x-y coordinates
n=5;      % the number of equal parts for mesh generation
j=size(val);
j=j(1,2);
for i=1:j
    xval=val(1,i); yval=val(2,i); zval=val(3,i);
    xmi=xval-margin; xma=xval+margin; ymi=yval-margin; yma=yval+margin;
    r=2*margin; r=r/n;
    [x,y]=meshgrid(xmi:r:xma,ymi:r:yma);
    z=zcalc(x,y);
    for j=1:( n+1)
        for k=1:( n+1)
            x1=x(j,k); y1=y(j,k);
            z1=zcalc(x1,y1);
            di(j,k)=((xval-x1).^2+(yval-y1).^2+(zval-z1).^2).^0.5;
        end
    end
end
end

```

```

        dist =min(min(di(:,:))); % the array of minimum distanse between the
spline points and the bottom
if (dist <safedist)==1
    count4=count4+1; % the number of point within the minimum distanse
end
end
j=size(val);
j=j(1,2);
distratio=count4/(j+1);
    % evaluate curvarture of spline along its discrete points
    j=size(val);
j=j(1,2);
r=zeros(1,j-1);r(1,1)=0;
for i=2:j-1
    point1=val(:,i-1);point2=val(:,i);point3=val(:,i+1);
    di12=((point1(1)-point2(1)).^2+(point1(2)-point2(2)).^2+(point1(3)-
point2(3))).^.5;
    di23=((point3(1)-point2(1)).^2+(point3(2)-point2(2)).^2+(point3(3)-
point2(3))).^.5;
    di13=((point1(1)-point3(1)).^2+(point1(2)-point3(2)).^2+(point1(3)-
point3(3))).^.5;
    di123=(di12+di23+di13)/3;
    x0=[point2(1) point2(2) point2(3) di123];
    options = optimset('Display','off');
    [radius,fval] = fsolve(@circle,x0,options);
r(1,i)=radius(4);
end
a=size(r);
a=a(2);
r=r(2:a) ;    r=min(r);
    minr=200; %the minimum radius of the curve with no penalty
    maxpenalty=0.35; % the maximum penalty for zero radius
    if r<=minr
        radiuspenalty=maxpenalty-(maxpenalty*r/minr);
    else
        radiuspenalty=0;
    end
% evaluate fitness function
%
a1=0.67; a2=0.04 ;a3=0.1 ; a4=0.14 ; a5=0.05;
ff=a1*pointratio+a2*lengthratio+a3*boundxyratio+a4*boundzratio+a5*distratio+radiuspenalty;

```


12.2.4 Αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης ελεγκτών κίνησης

```
function error=fisoptml2(input)
%evaluates mean simulation error with input the coefs of trimmfs of fis
% the input is a 38 x 1 sized array
%uses mirror symetricity for inputs-outputs
% pitch1 with :----->
% input : 1          delta pitch={neg, zero, pos}
(functions 1,2,3)
%          2          delta pitch rate = {neg, normal, pos}
(functions 4,5,6)
%          3          actual pitch = {off_lim_neg, nornal,off_lim_pos}
(functions 7,8,9)
%
% output :4          control_action = {neg, zero, pos}
(functions 10,11,12)
%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
% depth with :----->
% input : 5          delta z = { neg, zero, pos}
(functions 13,14,15)
%          6          delta z rate = { neg, normal, pos}
(functions 16,17,18)
%          7          pitch = { neg, zero, pos}
(functions 19,20,21)
% output :8          control_action = { neg, zero, pos }
(functions 22,23,24)
%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
% head with :----->
% input : 9          delta head = {neg, zero, pos}
(functions 25,26,27)
%          10          head rate = { neg, normal, pos}
(functions 28,29,30)
% output :11          control_action = {neg, zero, pos,}
(functions 31,32,33)
%
%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
%each triangular membership function is represented by the three points
(left,center,right)
%each z-shaped membership function is represented by the two
points%(center,right)
%each s-shaped membership function is represented by the two
points%(left,center)
%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
global pitch ;global depth ;global head ; % declare global variables
%
index=[1 1 3
        2 4 6
        3 7 9
        4 10 12
        5 13 15
        6 16 18
        7 19 21
        8 22 24
        9 25 27
        10 28 30
        11 31 33];
```

```

%
left=zeros(33,1); center=left; right=left;
%assign inputs to create triangles
for i=1:11
    right(3*i-1)=input(3*i-2); left(3*i)=input(3*i-1);
center(3*i)=input(3*i); %assign inputs
    center(3*i-2)=-center(3*i);right(3*i-2)=-left(3*i); left(3*i-1)=-
right(3*i-1);%apply symmetry
    left(3*i-2)=center(3*i-2); right(3*i)=center(3*i);%assign values
for left and right for zmf, smf
end
%
    right(12)=input(12)+(input(12)-input(11)); left(10)=-
right(12);%create symmetric output trmf
    right(24)=input(24)+(input(24)-input(23)); left(22)=-right(24);
    right(33)=input(33)+(input(33)-input(32)); left(31)=-right(33);
%
%+++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
pitch=readfis('pitch'); depth=readfis('depth');head=readfis('head');
fis(1)=pitch; fis(2)=depth; fis(3)=head;
%
i=1;
for j=1:3
    inpnum=size(fis(j).input);
    inpnum=inpnum(2);
    for k=1:inpnum
        for m=1:3
            type=fis(j).input(1,k).mf(1,m).type;
            switch (type)
                case 'zmf'
                    fis(j).input(1,k).mf(1,m).params=[center(i) right(i)];
                    left(i)=fis(j).input(1,k).range(1);i=i+1;
                case 'trimf'
                    fis(j).input(1,k).mf(1,m).params=[left(i) center(i) right(i)];
                    i=i+1;
                case 'smf'
                    fis(j).input(1,k).mf(1,m).params=[left(i) center(i) ];
                    right(i)=fis(j).input(1,k).range(2); i=i+1;
            end
        end
    end
end
%
    for n=1:3
        fis(j).output.mf(1,n).params=[left(i) center(i) right(i)];i=i+1;
    end
end
%
pitch=fis(1);
depth=fis(2);
head=fis(3);
%
%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
% set penalties and modify mfs
penaltyflag1=0;penaltyflag2=0;penaltyflag3=0;

```

```

% compare position for center points
%+++++
%
for j = 1 : 11
    for i=index(j,2):(index(j,3)-1)
        if center(i)>center(i+1)
            dif=center(i)-center(i+1);
            center(i+1)=center(i+1)+dif;
            center(i)=center(i)-dif;
            penaltyflag1=penaltyflag1+1;
        end
    end
end
%
%+++++
% compare position of right to center and to left for 20 functions
for i=1:33
    if (left(i)>center(i))
        left(i)=center(i);
        penaltyflag1=penaltyflag1+1;
    end
    if (center(i)>right(i))
        right(i)=center(i);
        penaltyflag1=penaltyflag1+1;
    end
    if (left(i)>right(i))
        right(i)=center(i);
        penaltyflag1=penaltyflag1+1;
    end
    %(left(i)>right(i))
end
%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

%%compare left to right positions for inputs
for j = 1 : 11

    for i=(index(j,2)+1):(index(j,3)-1)
        if left(i)<left(i-1)
            penaltyflag2=penaltyflag2+1;

        end
        if right(i)>right(i+1)
            penaltyflag2=penaltyflag2+1;

        end
        if left(i+1)<right(i-1) %(1)
            penaltyflag2=penaltyflag2+1;
        end
        if left(i)>right(i-1) || right(i)<left(i+1)
            penaltyflag3=penaltyflag3+1;
        end
    end
end
end

```

```

%XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
    %simulate model and extract error
    [t,x,yout]=sim('splinemodel8');
    count=size(yout);

error=yout(count(1),1)+penaltyflag1*.03+penaltyflag2*.01+penaltyflag3*.0
05;
    %error=penaltyflag1*5+penaltyflag2*2+penaltyflag3*1;

```

12.3 Προσάρτημα Γ: Κώδικας και διαγράμματα πειραμάτων με το υποβρύχιο όχημα Videoray

12.3.1 Κώδικας C ασαφών ελεγκτών

```
#include "fuzzycontroller.h"
float* controller(float x,float y,float z,float yaw, float prevx, float
prevy,
                float prevz,float prevyaw,float dt,float targetx,float
targety,float targetz,float* motorvolts)
{
    /* depth controller */
    float dz,prevdz,zdif,dzrate,zvolt;
    dz=targetz-z;
    prevdz=targetz-prevz;
    zdif=dz-prevdz;
    dzrate=zdif/dt;

    zvolt=fuzzyinf(3,0,3,6,5,10,20,    15,0,15,30,    20,    0,
20,40,20,40,80,dz,dzrate);

    /* yaw controller */
    float dpsi,prevdpsi,psidif,psirate,yawvolt;
    dpsi=psidiffcalc(x,y,yaw,targetx,targety);
    prevdpsi=psidiffcalc(prevx,prevy,prevyaw,targetx,targety);
    psidif=dpsi-prevdpsi;
    psirate=psidif/dt;

    yawvolt=fuzzyinf(2,0,9,20,10,20,50,    20,10,20,40,    20,    0,
20,40,20,40,80,dpsi,psirate);

    /* distance controller */
    float dist,prevdist,distdif,distrate,distvolt;
    dist=distcalc(x,y,dpsi,targetx,targety);

    prevdist=distcalc(prevx,prevy,prevdpsi,targetx,targety);
    distdif=dist-prevdist;

    distrate=distdif/dt;

    distvolt=-fuzzyinf(10,0,10,20,10,20,40,    70,0,70,140,    10,    0,
10,20,10,20,40,dist,distrate);

    /* motor volts */
    float rvolt,lvolt;
    rvolt=distvolt-yawvolt;
    lvolt=distvolt+yawvolt;
    printf("%f    %f    %f", distvolt,yawvolt, zvolt);

    motorvolts[0] = 1.0*(lvolt);
    motorvolts[1] = 1.0*(rvolt);
```

```

        motorvolts[2] =30.0+ 1.0*(zvolt);
return motorvolts;
}

/* SUB - FUNCTIONS */
float psidiffcalc(float x,float y,float yaw,float targetx,float targety)
{
    float dx,dy,psitarg,pi,psd;

    pi=2*asin(1);
    dx=targetx-x;
    dy=targety-y;
    psitarg=0;

    if (dx<0)
    {
        if (dy<0) psitarg=-180+atan(dy/dx)*180/pi;
        if (dy>=0) psitarg=180+atan(dy/dx)*180/pi;
    }

    if (dx>0)
    {
        if (dy>=0) psitarg=atan(dy/dx)*180/pi;
        if (dy<0) psitarg=atan(dy/dx)*180/pi;
    }
    if (dx==0)
    {
        if (dy>0) psitarg=90;
        if (dy<0) psitarg=-90;
        if (dy==0) psitarg=0;
    }

    psd=psitarg-yaw;
    return(psd);
}

float distcalc(float x,float y,float dpsi,float targetx,float targety)
{
    float dx,dy,di;
    dx=targetx-x;
    dy=targety-y;
    di=sqrt(dx*dx+dy*dy);
    return(di);
}

float fuzzyinf(float input1, float input2, float input3, float input4,
float input5, float input6,float input7,
                float input8, float input9, float input10,float
input11,float input12,float input13,float input14,
                float input15,float input16,float input17,float
input18,float error,float errororder)
{
    int rule [15][3]={
        3, 2, 3,

```

```

2, 2, 4,
1, 2, 5,
4, 2, 2,
5, 2, 1,
3, 1, 4,
3, 3, 2,
2, 1, 5,
4, 3, 1,
1, 1, 5,
5, 3, 1,
2, 3, 3,
4, 1, 3,
1, 3, 4,
5, 1, 2
};
float mfs[18]={
    input1,  input2,  input3,  input4,  input5,  input6,
input7, input8, input9,

input10,input11,input12,input13,input14,input15,input16,input17,input18
};

float mf1[15];
float mf2[9];
float mf3[15];
mf1[0]=-mfs[6];
mf1[1]=-mfs[5];
mf1[2]=-mfs[4];
    mf1[3]=-mfs[3];
    mf1[4]=-mfs[2];
    mf1[5]=-mfs[1];
        mf1[6]=-mfs[0];
        mf1[7]=0;
        mf1[8]=mfs[0];
            mf1[9]= mfs[1];
            mf1[10]=mfs[2];
            mf1[11]=mfs[3];
                mf1[12]=mfs[4];
                mf1[13]=mfs[5];
                mf1[14]=mfs[6];
mf2[0]=-mfs[10];
mf2[1]=-mfs[9];
mf2[2]=-mfs[8];
    mf2[3]=-mfs[7];
    mf2[4]=0;
    mf2[5]=mfs[7];
        mf2[6]=mfs[8];
        mf2[7]=mfs[9];
        mf2[8]=mfs[10];
mf3[0]=-mfs[17];
mf3[1]=-mfs[16];
mf3[2]=-mfs[15];
    mf3[3]=-mfs[14];
    mf3[4]=-mfs[13];
    mf3[5]=-mfs[12];
        mf3[6]=-mfs[11];
        mf3[7]=0;

```

```

        mf3[8]=mfs[11];
        mf3[9]= mfs[12];
        mf3[10]=mfs[13];
        mf3[11]=mfs[14];
        mf3[12]=mfs[15];
        mf3[13]=mfs[16];
        mf3[14]=mfs[17];
/* set limits to inputs*/
/
if ( error < -0.8*mfs[6] )    error=-0.8*mfs[6];
if ( error >  0.8*mfs[6] )    error= 0.8*mfs[6];
if (errororder<-0.8*mfs[10])    errororder=-0.8*mfs[10];
if (errororder> 0.8*mfs[10])    errororder= 0.8*mfs[10];
/* calculate fire strength for rules*/
int i;
float a,b;
float firestr[15];
for (i=0;i<=14;i++)
{
    firestr[i]=0;
}
for (i=0;i<=14;i++)
{
    a=triang(    mf1[    3*rule[i][0]-3    ]    ,    mf1[3*rule[i][0]-2],
mf1[3*rule[i][0]-1], error) ;
    b=triang(    mf2[    3*rule[i][1]-3    ]    ,    mf2[3*rule[i][1]-2],
mf2[3*rule[i][1]-1], errororder) ;
    firestr[i]=min(a,b);
}
/* defuzzification*/
float outrange;
float outpoint[101];
float pointdist;
float fire[101];
outrange=mf3[14]-mf3[0];
pointdist=outrange/100;
for (i=0;i<=100;i++)
{
    outpoint[i]=mf3[0]+(pointdist*(i));
}
for (i=0;i<=100;i++)
{
    fire[i] =0.0;
}

/* output for membership function 1*/
int j;
int flag1;
int flag2;
int flag3;
int flag;
for (i=0;i<=14;i++)
{
    for (j=0;j<=100;j++)
    {
        flag1=0;
        flag2=0;

```



```

        flag3=0;
        if (outpoint[j]<mf3[2]) flag1=1;
        if (outpoint[j]>mf3[0]) flag2=1;
        if (rule[i][2]==1) flag3=1;
        flag=flag1*flag2*flag3;
        if (flag==1) fire[j]=max(fire[j],firestr[i]);
    }
}

/* output for membership function 2*/
for (i=0;i<=14;i++)
{
    for (j=0;j<=100;j++)
    {
        flag1=0;
        flag2=0;
        flag3=0;
        if (outpoint[j]<mf3[5]) flag1=1;
        if (outpoint[j]>mf3[3]) flag2=1;
        if (rule[i][2]==2) flag3=1;
        flag=flag1*flag2*flag3;
        if (flag==1) fire[j]=max(fire[j],firestr[i]);
    }
}

/* output for membership function 3*/
for (i=0;i<=14;i++)
{
    for (j=0;j<=100;j++)
    {
        flag1=0;
        flag2=0;
        flag3=0;
        if (outpoint[j]<mf3[8]) flag1=1;
        if (outpoint[j]>mf3[6]) flag2=1;
        if (rule[i][2]==3) flag3=1;
        flag=flag1*flag2*flag3;
        if (flag==1) fire[j]=max(fire[j],firestr[i]);
    }
}

/* output for membership function 4*/
for (i=0;i<=14;i++)
{
    for (j=0;j<=100;j++)
    {
        flag1=0;
        flag2=0;
        flag3=0;
        if (outpoint[j]<mf3[11]) flag1=1;
        if (outpoint[j]>mf3[9]) flag2=1;
        if (rule[i][2]==4) flag3=1;
        flag=flag1*flag2*flag3;
        if (flag==1) fire[j]=max(fire[j],firestr[i]);
    }
}

```

```

        /* output for membership function 5*/
        for (i=0;i<=14;i++)
        {
            for (j=0;j<=100;j++)
            {
                flag1=0;
                flag2=0;
                flag3=0;
                if (outpoint[j]<mf3[14]) flag1=1;
                if (outpoint[j]>mf3[12]) flag2=1;
                if (rule[i][2]==5) flag3=1;
                flag=flag1*flag2*flag3;
                if (flag==1) fire[j]=max(fire[j],firestr[i]);
            }
        }

        /* momment of output calculation-numerator*/
        float prod[101];
        for (i=0;i<=100;i++)
        {
            prod[i]=outpoint[i]*fire[i];
        }
        float num;
        num=0;
        for (i=0;i<=100;i++)
        {
            num=num+prod[i];
        }
        /* momment of output calculation-denominator*/
        float denum;
        denum=0;
        for (i=0;i<=100;i++)
        {
            denum= denum+fire[i];
        }
        /* momment - output calculation*/
        float out;
        if (denum==0) out=0;
        else
        {
            out=num/denum;
        }
        return(out);
    }

float min (float x,float y)
{
    float val;
    if (y>x)
    {
        val=x;
    }
    else
    {

```

```

        val=y;
    }
    return(val);
}

```

```

float max (float x,float y)
{
    float val;
    if (y<x)
    {
        val=x;
    }
    else
    {
        val=y;
    }
    return(val);
}

```

```

float triang (float a, float b,float c,float x)
{
    float y;
    int flg1;
    int flg11;
    int flg12;
    int flg2;
    int flg3;
    flg11=0;
    flg12=0;
    flg2=0;
    flg3=0;
    if (a == b) flg11=1;
    if (b == c) flg12=1;
    flg1=flg11*flg12;
    if (a == b) flg2=1;
    if (b == c) flg3=1;
    y=max( min( (x-a)/(b-a) , (c-x)/(c-b) ) , 0) ;
    if (flg1==1) y=a;
    if (flg2==1) y=((c-x)/(c-b)*(b<=x)*(x<=c));
    if (flg3==1) y=((x-a)/(b-a)*(a<=x)*(x<=b));

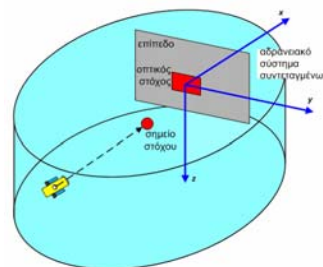
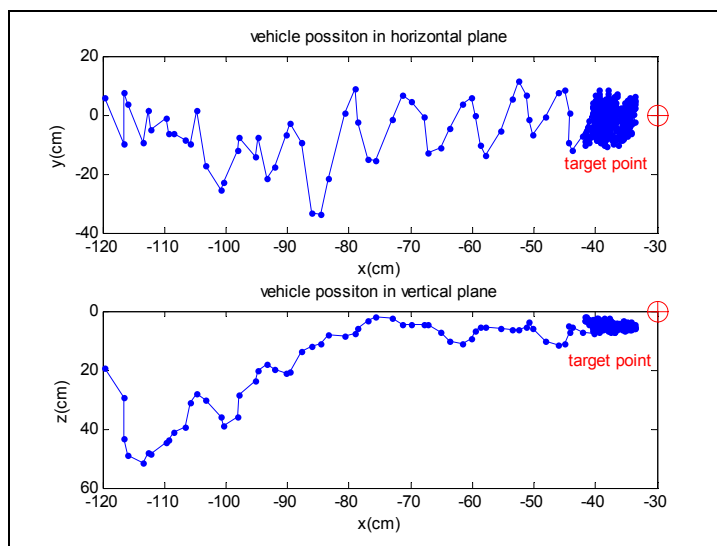
    return(y);
}

```

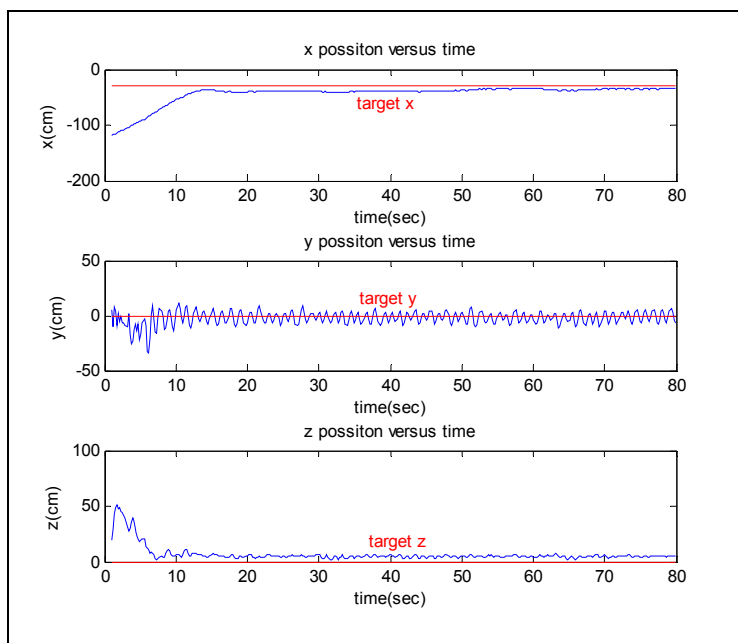
12.3.2 Διαγράμματα πειραμάτων με το υποβρύχιο όχημα Videoray

12.3.2.1 Πείραμα πλοήγησης προς στόχο - Δοκιμή 2

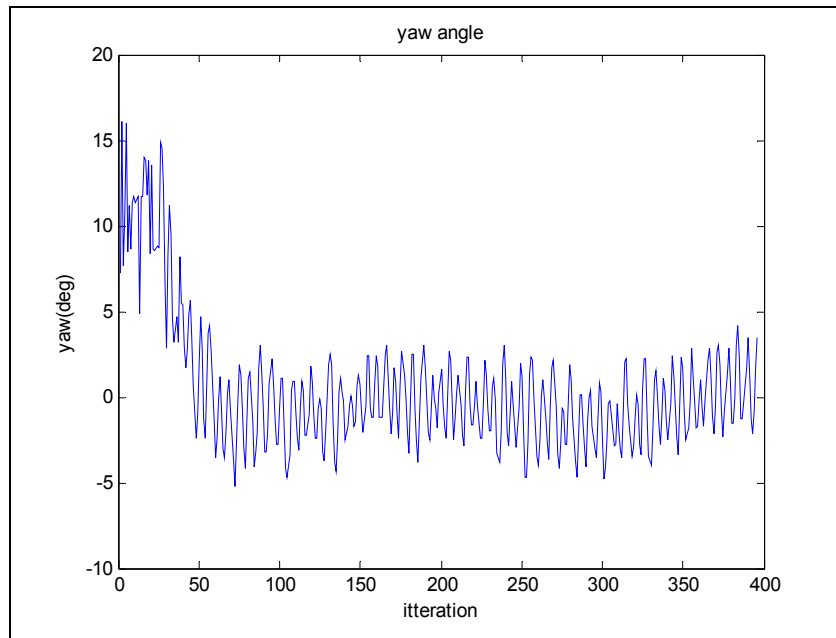
Το σημείο στόχου έχει συντεταγμένες : $\text{targetpoint} = [-30, 0, 0]$



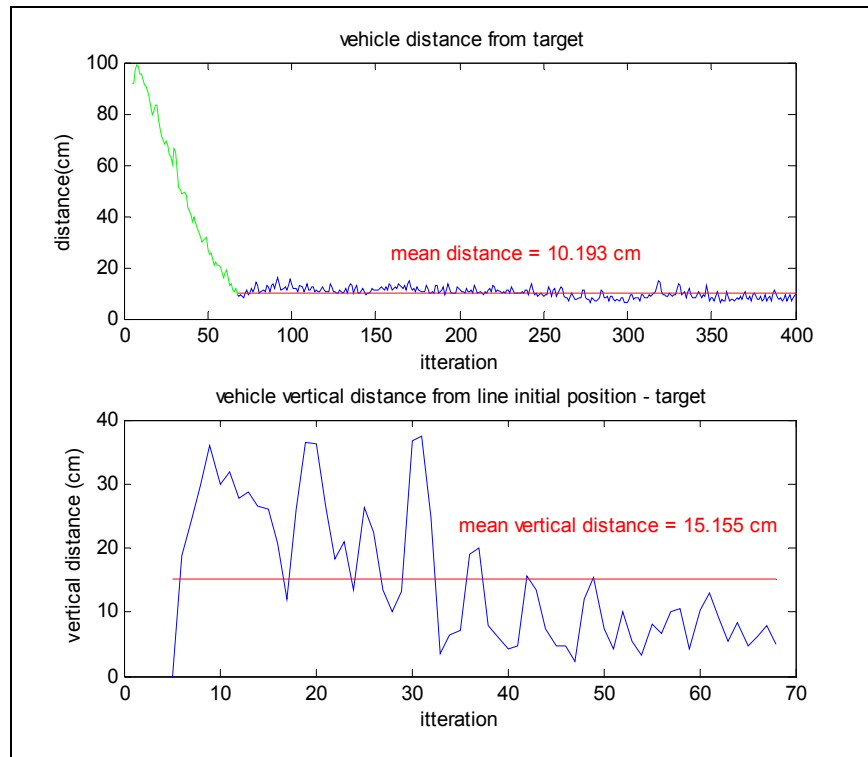
Σχήμα Π-13: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 2, θέση οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο



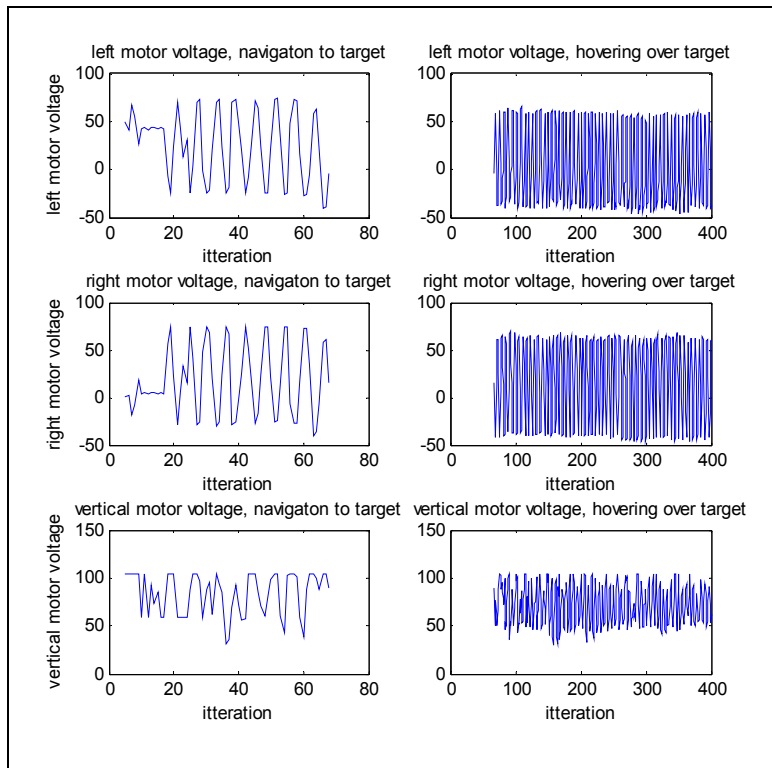
Σχήμα Π-14: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 2, θέση οχήματος στους άξονες x, y, z σε συνάρτηση με τον χρόνο



Σχήμα Π-15: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 2, γωνία κατεύθυνσης ανά κύκλο



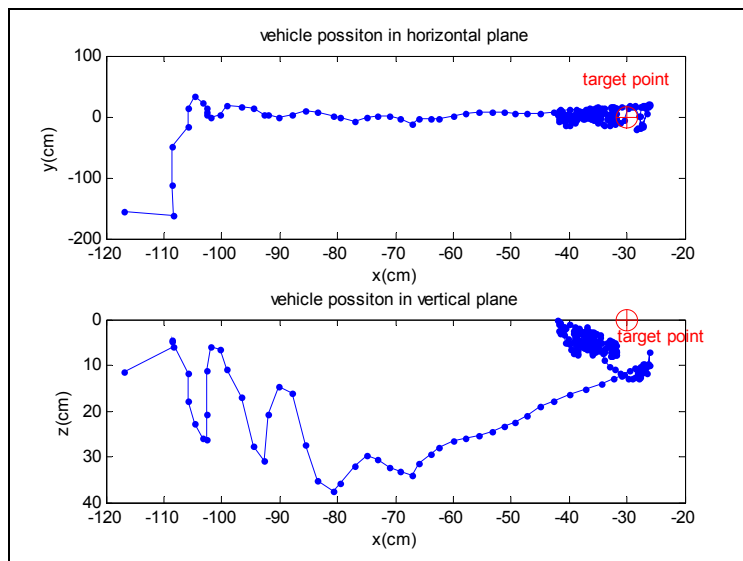
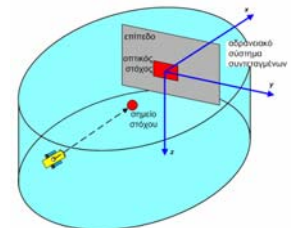
Σχήμα Π-16: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 2, A) φάση στόχευσης πάνω από στόχο- απόσταση από στόχο, B) φάση πλοήγησης προς στόχο - κάθετη απόσταση ανά κύκλο



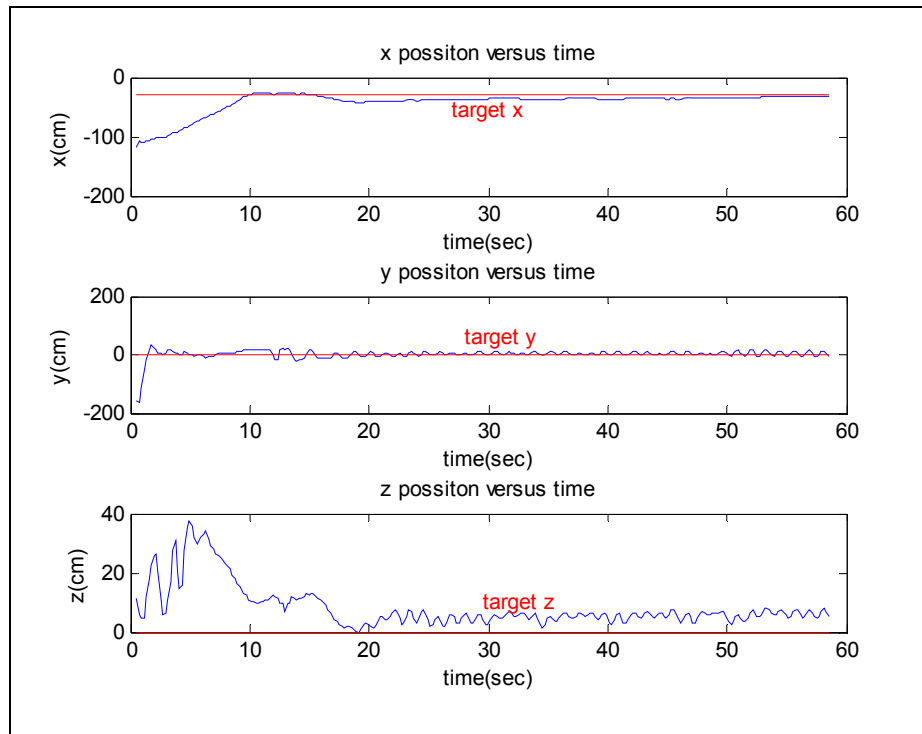
Σχήμα Π-17: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 2, εντολές στους κινητήρες ανά κύκλο

12.3.2.2 Πείραμα πλοήγησης προς στόχο - Δοκιμή 3

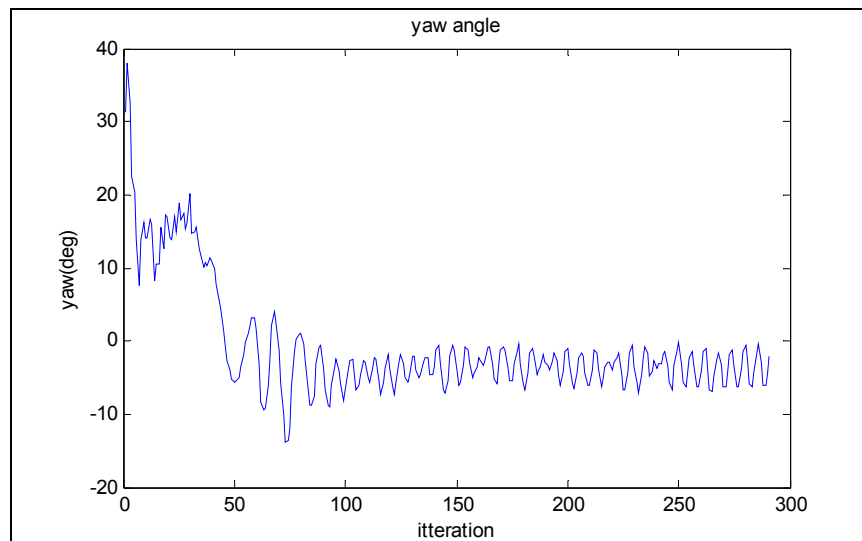
Το σημείο στόχου έχει συντεταγμένες : $\text{targetpoint} = [-30, 0, 0]$



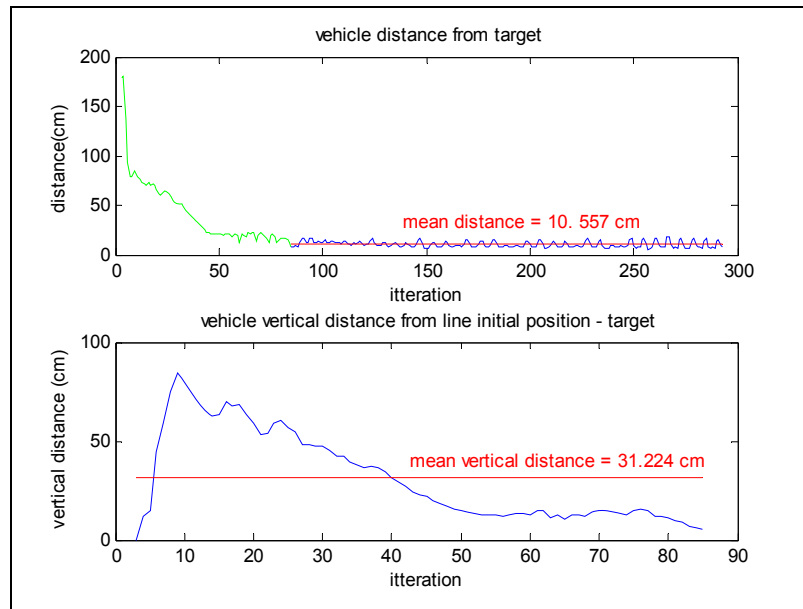
Σχήμα Π-18: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 3, θέση οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο



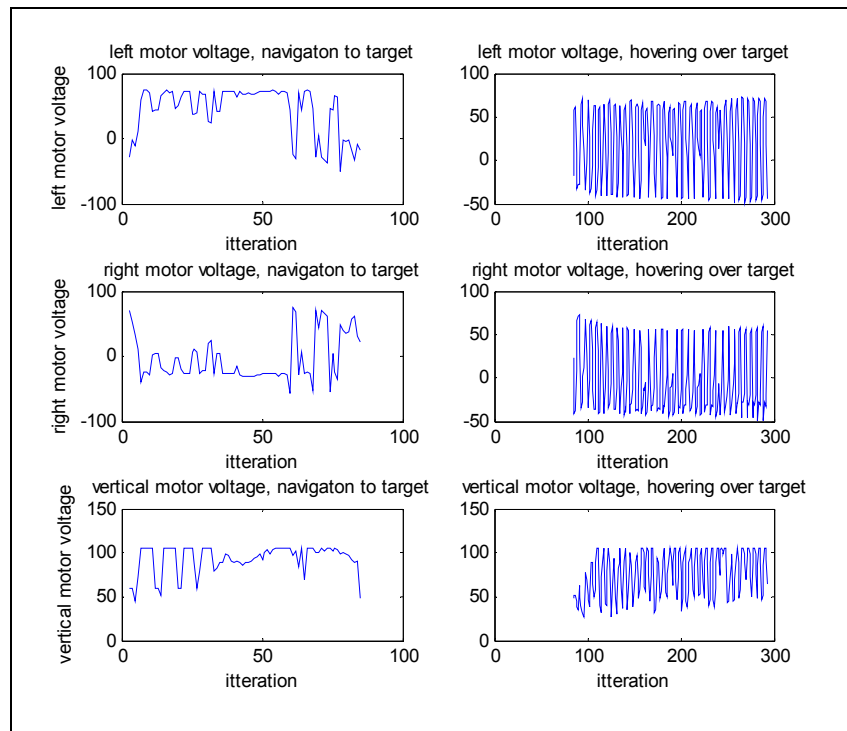
Σχήμα Π-19: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 3, θέση οχήματος στους άξονες x , y , z σε συνάρτηση με τον χρόνο



Σχήμα Π-20: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 3, γωνία κατεύθυνσης (yaw) ανά κύκλο



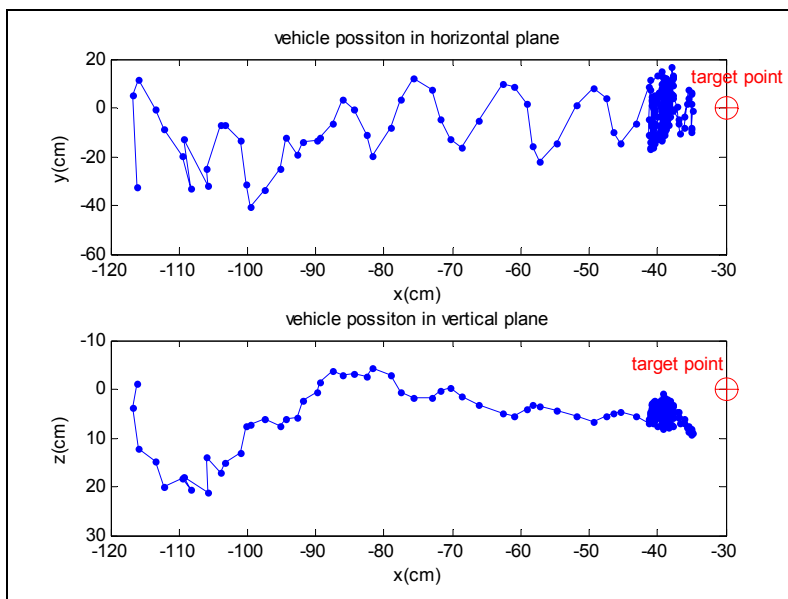
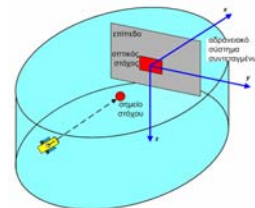
Σχήμα Π-21: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 3, Α) φάση στόχευσης πάνω από στόχο- απόσταση από στόχο, Β) φάση πλοήγησης προς στόχο - κάθετη απόσταση ανά κύκλο



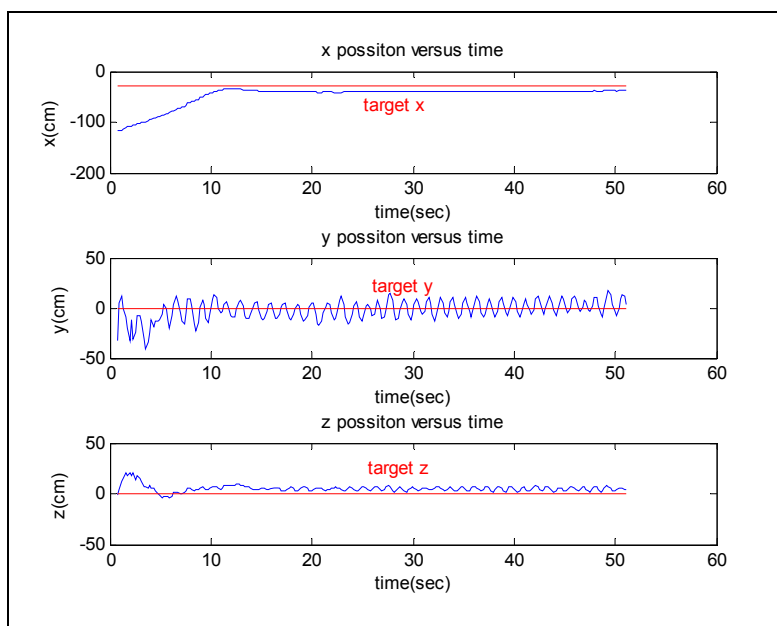
Σχήμα Π-22: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 3, εντολές στους κινητήρες ανά κύκλο

12.3.2.3 Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 4

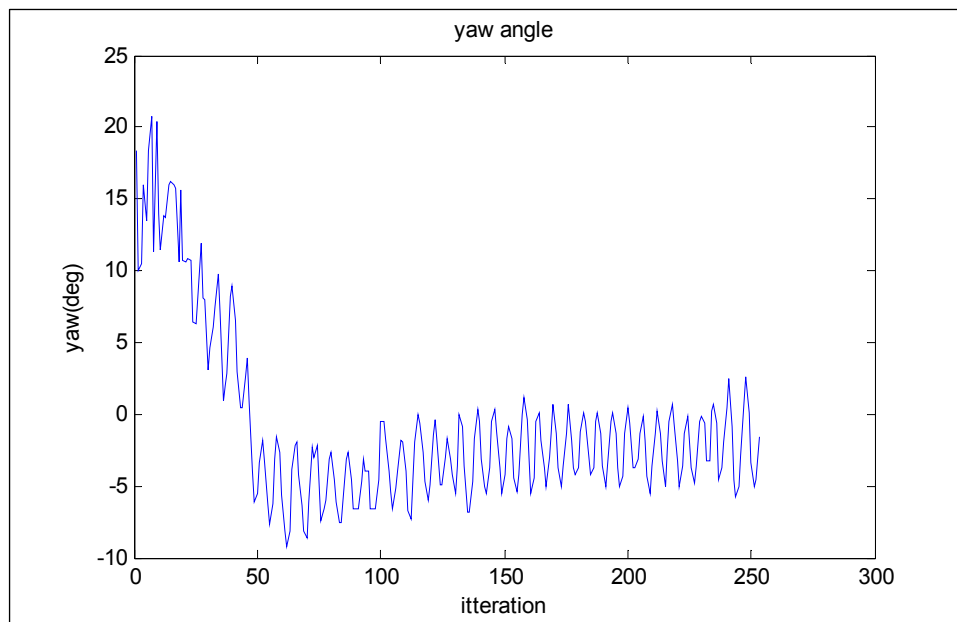
Το σημείο στόχου έχει συντεταγμένες : $\text{targetpoint} = [-30, 0, 0]$



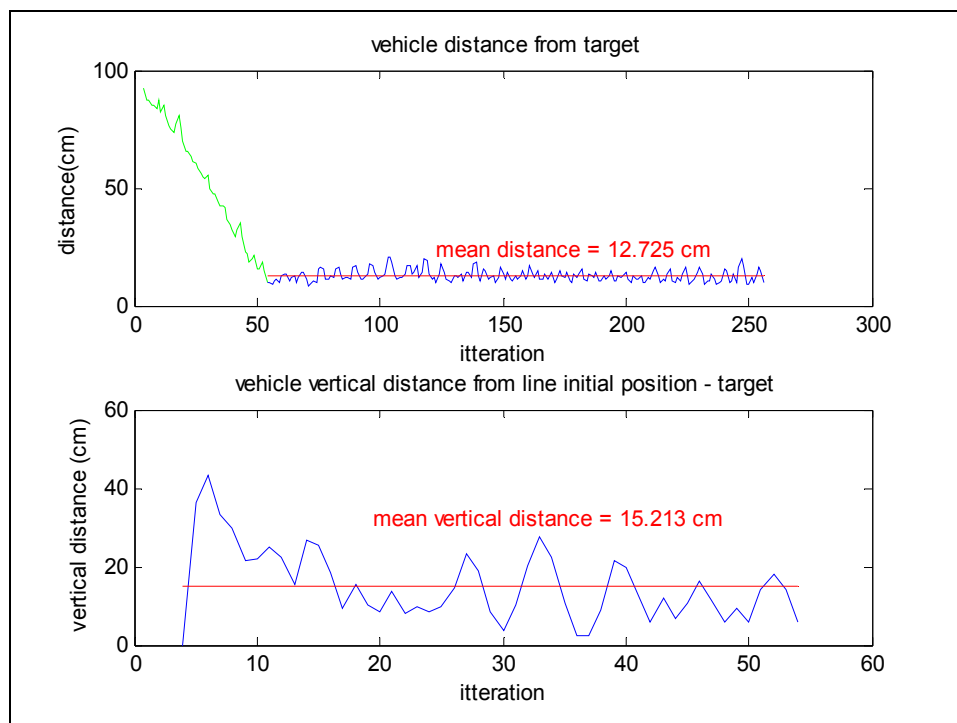
Σχήμα Π-23: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο - Δοκιμή 4, θέση οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο



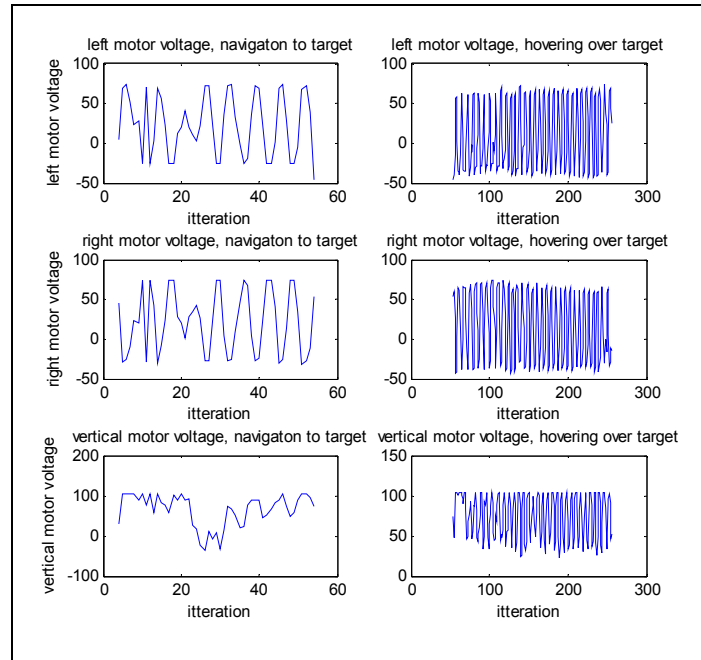
Σχήμα Π-24: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 4, θέση οχήματος στους άξονες x, y, z σε συνάρτηση με τον χρόνο



Σχήμα Π-25: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 4, γωνία κατεύθυνσης (yaw) ανά κύκλο



Σχήμα Π-26: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 4, Α) φάση στόχευσης πάνω από στόχο- απόσταση από στόχο Β) φάση πλοήγησης προς στόχο - κάθετη απόσταση ανά κύκλο



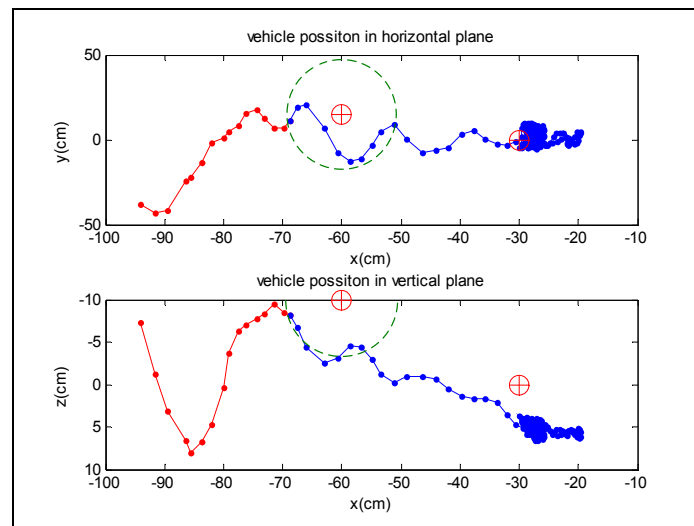
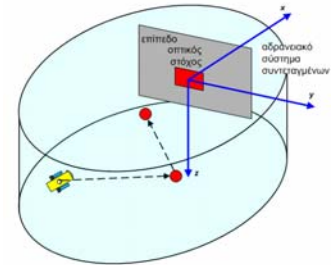
Σχήμα Π-27: Πείραμα πλοήγησης προς στόχο -Δοκιμή 4, εντολές στους κινητήρες ανά κύκλο

12.3.2.4 Πείραμα πλοήγησης σε διαδοχικά σημεία στόχου -Δοκιμή 2

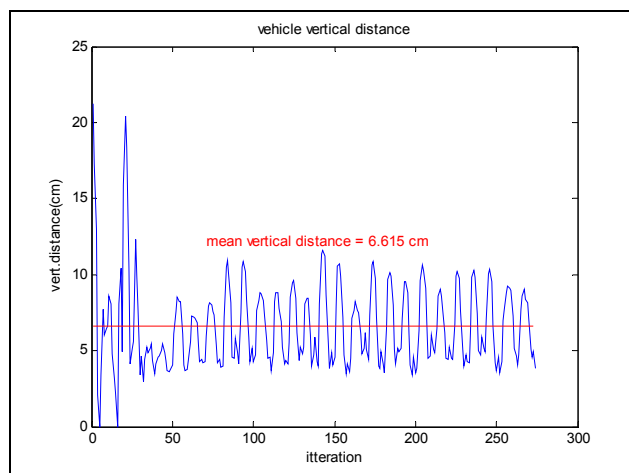
Τα σημεία στόχου της δοκιμής είναι:

$$t \arg etpo \text{ int } 1 = [-60, 15, -10]$$

$$t \arg etpo \text{ int } 2 = [-30, 0, 0]$$



Σχήμα Π-28: Πείραμα πλοήγησης σε διαδοχικά σημεία στόχου -Δοκιμή 2: θέση οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο

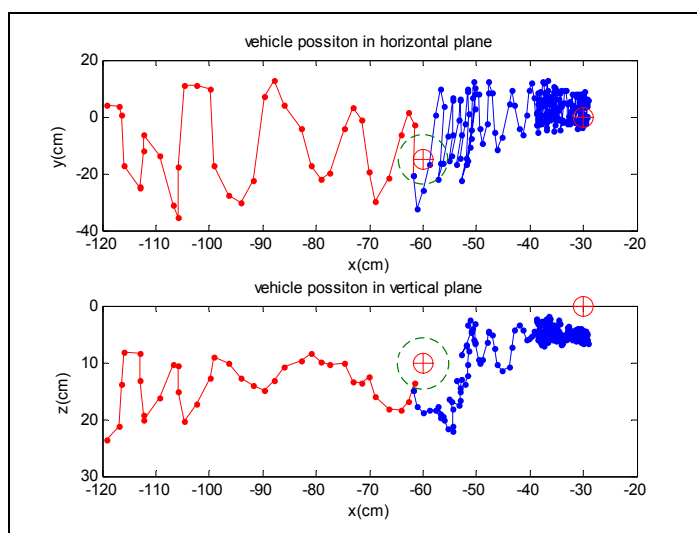
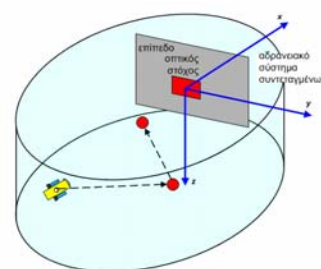


Σχήμα Π-29: Πείραμα πλοήγησης σε διαδοχικά σημεία στόχου -Δοκιμή 2 : κάθετη απόσταση από ευθεία στόχου

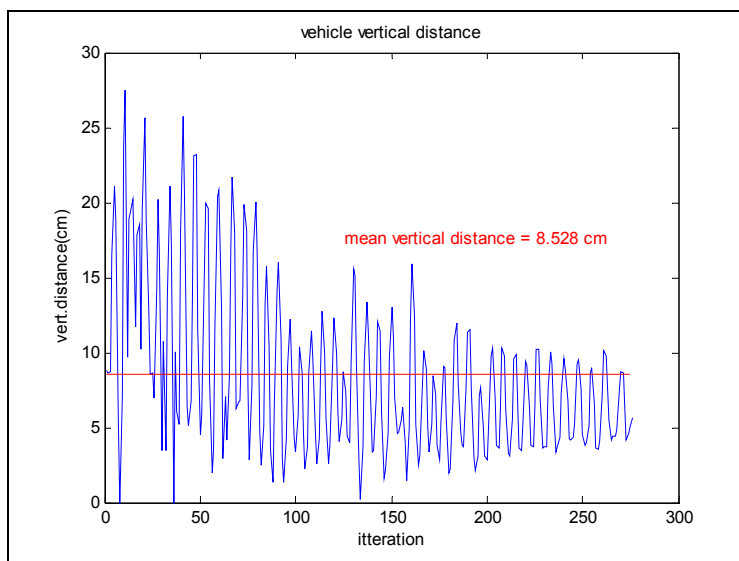
12.3.2.5 Πείραμα πλοήγησης σε διαδοχικά σημεία στόχου -Δοκιμή 3.

Τα σημεία στόχου της δοκιμής είναι:

$$t \arg etpo \text{ int } 1 = [-60, -15, +10], \quad t \arg etpo \text{ int } 2 = [-30, 0, 0]$$



Σχήμα Π-30: Πείραμα πλοήγησης σε διαδοχικά σημεία στόχου -Δοκιμή 3: θέση οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο

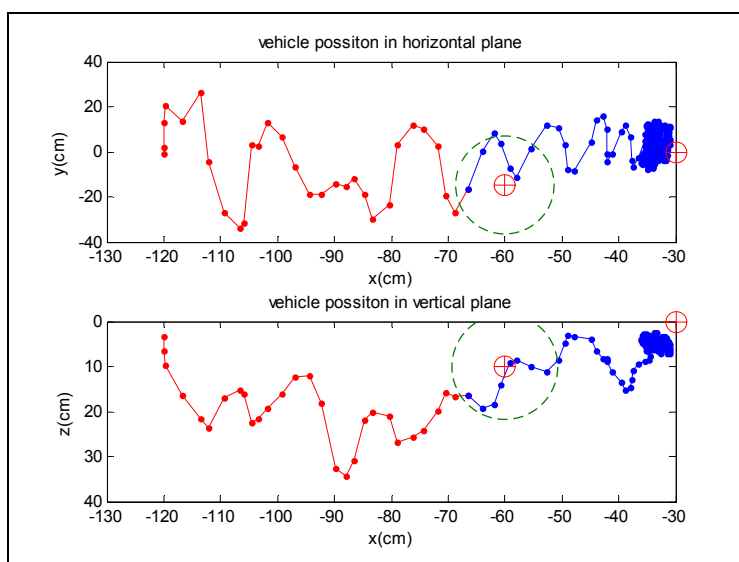
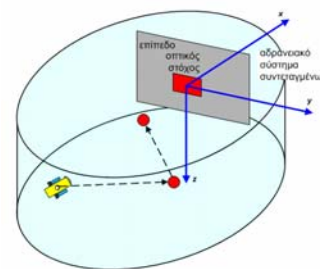


Σχήμα Π-31: Πείραμα πλοήγησης σε διαδοχικά σημεία στόχου -Δοκιμή 3: κάθετη απόσταση από ευθεία στόχου

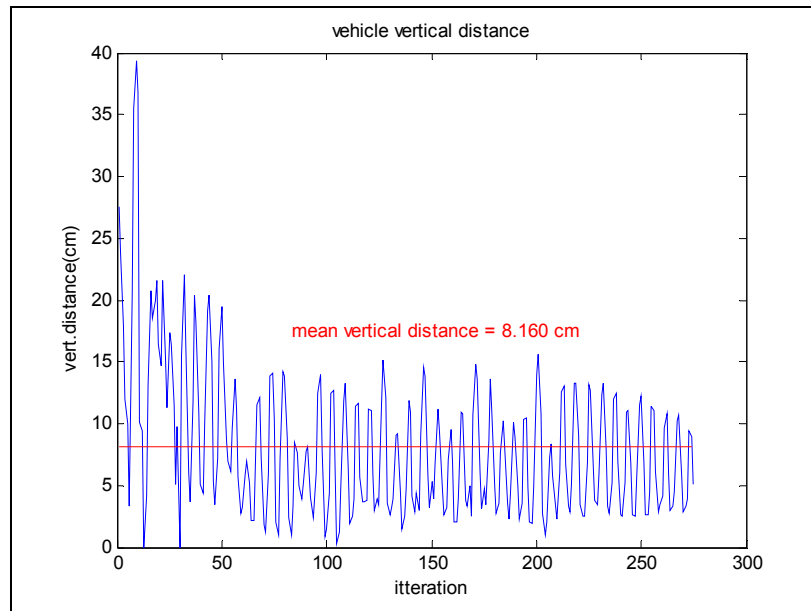
12.3.2.6 Πείραμα πλοήγησης σε διαδοχικά σημεία στόχου -Δοκιμή 4

Τα σημεία στόχου της δοκιμής είναι:

$$t \arg etpo \text{ int } 1 = [-60, -15, +10], \quad t \arg etpo \text{ int } 2 = [-30, 0, 0]$$

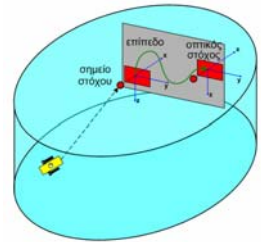
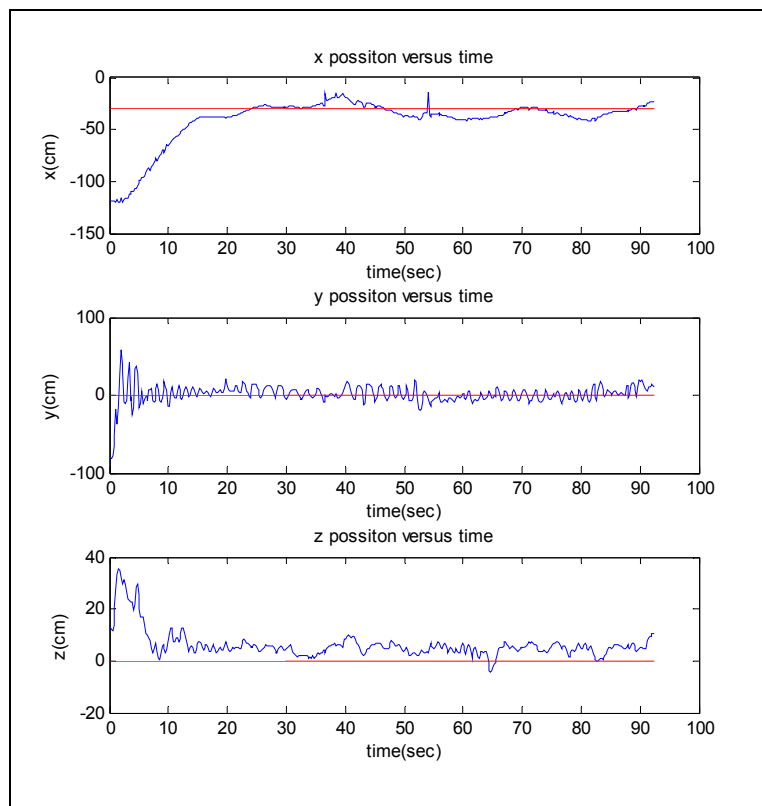


Σχήμα Π-32: Πείραμα πλοήγησης σε διαδοχικά σημεία στόχου -Δοκιμή 4: θέση οχήματος στο οριζόντιο και στο κατακόρυφο επίπεδο

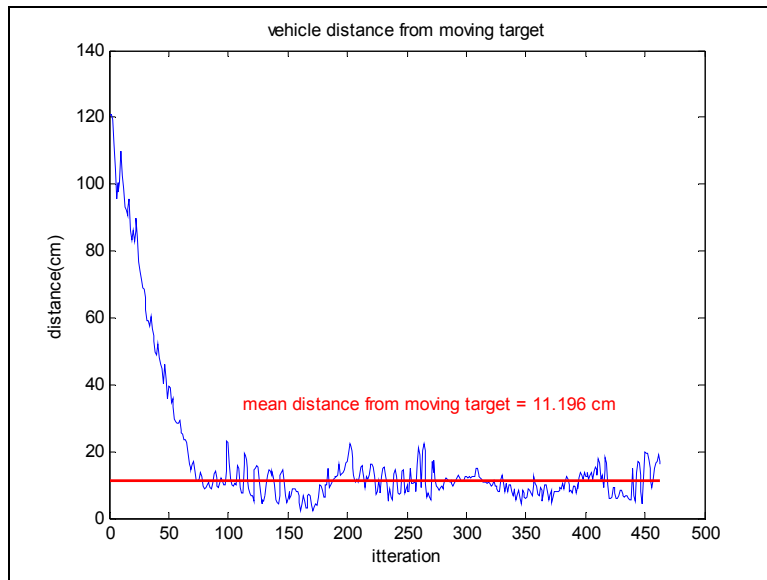


Σχήμα Π-33: Πείραμα πλοήγησης σε διαδοχικά σημεία στόχου -Δοκιμή 4: κάθετη απόσταση από ευθεία στόχου

12.3.2.7 Πείραμα παρακολούθησης κινούμενου στόχου -Δοκιμή 2

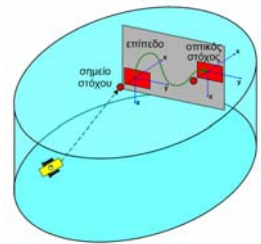
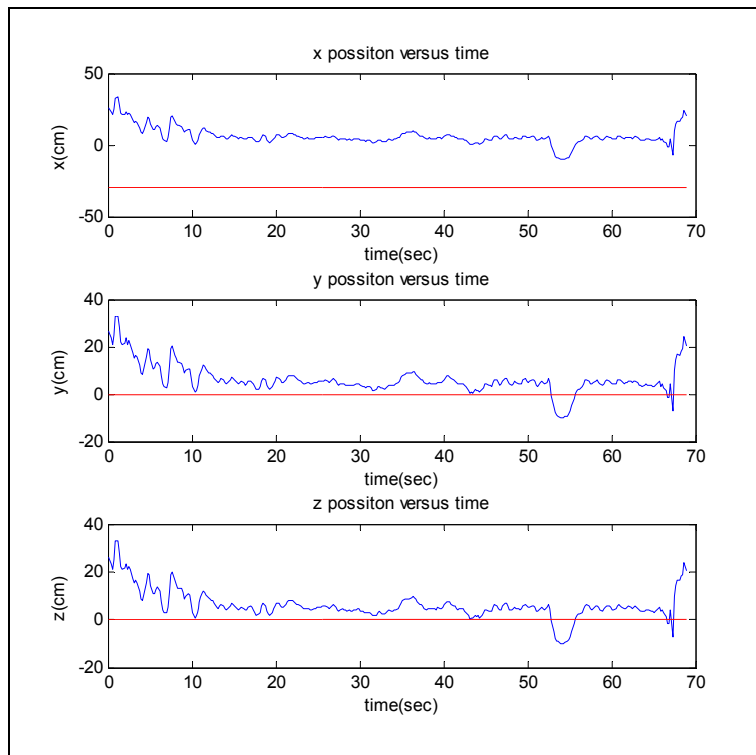


Σχήμα Π-34: Πείραμα παρακολούθησης κινούμενου στόχου -Δοκιμή 2: θέση οχήματος στους άξονες x, y, z σε συνάρτηση με τον χρόνο

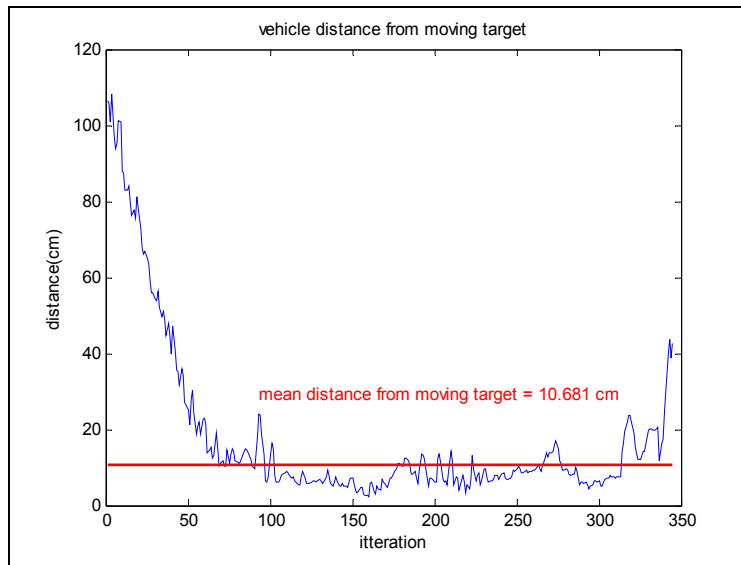


Σχήμα Π-35: Πείραμα παρακολούθησης κινούμενου στόχου -Δοκιμή 2: σφάλμα θέσης οχήματος για κάθε κύκλο

12.3.2.8 Πείραμα παρακολούθησης κινούμενου στόχου -Δοκιμή 3



Σχήμα Π-36: Πείραμα παρακολούθησης κινούμενου στόχου -Δοκιμή 3: θέση οχήματος στους άξονες x , y , z σε συνάρτηση με τον χρόνο



Σχήμα Π-37: Πείραμα παρακολούθησης κινούμενου στόχου -Δοκιμή 3: σφάλμα θέσης οχήματος για κάθε κύκλο

Βιβλιογραφία

- [1] Yuh J., "Design and Control of Autonomous Underwater Robots: Survey", *International Journal of Autonomous Robots*, vol. 8, no. 1, pp. 7-24(18), 2000.
- [2] Harbinson D., Westwood J., "Deepwater Oil & Gas – An Overview of the World Market", in *Proc. Deep Ocean Technology Conference*, New Orleans, 1998.
- [3] Alt C., "Autonomous Underwater Vehicles", Woods Hole Oceanographic Institution, *Autonomous Underwater Lagrangian Platforms and Sensors Workshop*, March 24-26, 2003, http://www.geoprose.com/ALPS/white_papers/alt.pdf
- [4] Hornfeld W., "DeepC, the German AUV Development Project", http://www.imar-navigation.de/download/deep_c_auv.pdf.
- [5] Danson E., "The Economies of Scale: Using Autonomous Underwater Vehicles (AUVs) for Wide-Area Hydrographic Survey and Ocean Data Acquisition", in *Proc. FIG XXII International Congress, TS4.4 Hydrographic Surveying II*, Washington, D.C. USA, April 19-26, 2002, http://www.fig.net/pub/fig_2002/Ts4-4/TS4_4_danson.pdf.
- [6] Bingham D., Drake T., Hill A., Lott R., "The Application of Autonomous Underwater Vehicle (AUV) Technology in the Oil Industry – Vision and Experiences", in *Proc. FIG XXII International Congress, TS4.4 Hydrographic Surveying II*, Washington, D.C. USA, April 19-26, 2002, http://www.fig.net/pub/fig_2002/Ts4-4/TS4_4_bingham_etal.pdf.
- [7] Gomes R., Sousa A., Fraga S. L., Martins A., Sousa J. B., Pereira F. L., "A New ROV Design: Issues on Low Drag and Mechanical Symmetry", *Oceans 05*, vol 2, pp.957- 962, Brest, France, June 20-23, 2005.
- [8] Kinsey J. C., Eustice R. M., Whitcomb L. L., "A Survey of Underwater Vehicle Navigation: Recent Advances and New Challenges", in *Proc. IFAC Conference of Manoeuvring and Control of Marine Craft*, Lisbon, Portugal, 2006.
- [9] Wernli R. L., "AUV'S – The Maturity of the Technology", *Oceans 99*, vol. 1, pp. 189-195, 1999, <http://www.nosc.mil/robots/pubs/oceans99.pdf>.
- [10] Williams S., "A Terrain-aided Tracking Algorithm for Marine Systems", in *Proc. International Conference on Field and Service Robotics*, July 14–16, 2003.
- [11] Gwin, R.C. Smith, J.T., "A Distributed Launch and Recovery System for an AUV and a Manned Submersible", in *Proc. of the 1992 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*, vol. 2, Issue 3, pp 267, 1992.
- [12] Whitcomb, L. L., "Underwater robotics: Out of the Research Laboratory and Into the Field", in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, CA, pp. 709– 716, 2000.
- [13] Nebot E., Durrant H., "Initial Calibration and Alignment of Low-Cost Inertial Navigation Units for Land Vehicle Applications", *Journal of Robotic Systems*, vol. 16, no. 2 , pp. 81 – 92,1999.
- [14] Matos A., Cruz N., Borges de Sousa J., Lobo Pereira F., "AUV and ROV Developments at Porto University", *IFAC Workshop of Modelling and Analysis of Logic Controlled Dynamic Systems*, Irkutsk, Lake Baikal, Rússia, (CD-ROM), 2003.
- [15] Hetet A., Quidu I., Dupas Y., "Obstacle detection and avoidance for AUV: problem analysis and first results", in *Proc. Marine Environment Characterization*, October 16-19, Brest – France, 2006, http://www.ensieta.fr/e3i2/publi/HETET_06a.pdf.
- [16] Dorf R. C., Bishop R. H., *Modern Control Systems*, 7th ed., Addison-Wesley, 1995.
- [17] Antsaklis P. J., Lemmon M. D., Stive J. A., "Hybrid System Modeling and Event Identification", *Technical Report of the ISIS Group at the University of Notre Dame*, ISIS-93-002, Notre Dame, IN, January 1993, <http://citeseer.ist.psu.edu/28564.html>.
- [18] Fleischer S. D., Rock S. M., "Experimental validation of a real-time vision sensor and navigation system for intelligent underwater vehicles", in *Proc. 1998 IEEE International*

Conference on Intelligent Vehicles, October 1998,
<http://sun-valley.stanford.edu/papers/FleischerR:98.pdf>.

- [19] Nikolos, I.K., Valavanis, K.P., Tsourveloudis, N.C., Kostaras A.N.: "Evolutionary Algorithm Based Off-Line Path Planner for UAV Navigation", *Automatika Journal*, vol. 42, no. 3-4, pp. 143-150, 2001.
- [20] Clement P., Yan P., Pedro P., Yvan P., Jonathan E., Dave L., "Path Planning for Autonomous Underwater Vehicles", *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 23, no. 2, April 2007.
- [21] Vasudeyan C., Ganesan K., "Case-Based Path Planning for Autonomous Underwater Vehicles", in *Proc. IEEE International Symposium on Intelligent Control*, pp. 160-165, 16-18 Aug. 1994.
- [22] Warren C. W., "A technique for autonomous underwater vehicle route planning", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 15, no. 3, July 1990.
- [23] Carroll K.P., McClaran S.R., Nelson E.L., Barnett D.M., Friesen D.K., Williams G.N., "AUV path planning: An A* approach", in *Proc. Symposium on AUV Technology*, pp. 3-8, 1992.
- [24] Qiu, K, Feng, X., "Trajectory planning of underwater vehicle using dynamic CRP model", in *Proc. of the 1991 Symposium on AUV Technology*, pp. 1082-1086, 1991.
- [25] Petres C., Pailhas Y., Petillot Y., Lane D.M., "Underwater Path Planning Using Fast Marching Algorithms", *IEEE Oceans Europe 2005*, vol. 2, pp. 814-819, June 2005.
- [26] Alvarez A., Caiti A., Onken R., "Evolutionary path planning for autonomous underwater vehicles in a variable ocean", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 29, no. 2, pp. 418 – 429, April 2004.
- [27] Fossen T., "Underwater Vehicle Dynamics", in *Underwater Robotic Vehicles: Design and Control*, J. Yuh (Editor), TSI Press, pp.15-40, 1995.
- [28] Petillot Y., Ruiz I. T., Lane D. M., "Underwater Vehicle Obstacle Avoidance and Path Planning Using a Multi-beam Forward Looking Sonar", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 26, no. 2, pp. 240-251, April 2001.
- [29] Moitie, R., Seube, N., "Guidance Algorithms for UUVs Obstacle Avoidance Systems", *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition*, vol. 3, pp.1853-1860, Brest, France, 2000.
- [30] Kanakakis, V., Valavanis, K. P., Tsourveloudis, N. C., "Fuzzy-Logic Based Navigation of Underwater Vehicles", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 40, no. 1, pp. 45–88, 2004.
- [31] Carreras M., Battle J., Ridao P., Roberts G.N., "An Overview On Behaviour-Based Methods For Auv Control", In *Proc. of the IFAC*, 2000, <http://citeseer.ist.psu.edu/530436.html>.
- [32] Zhao S., "Experimental study on Advanced Underwater Robot Control", *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 21, no. 4, pp. 695-703, 2005.
- [33] Nakamura, Y., Savant, S., "Nonlinear Tracking Control of Autonomous Underwater Vehicles", in *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, pp. A4-A9, 1992.
- [34] Yoerger, D. N., Slotine, J.E., "Robust Trajectory Control of Underwater Vehicles", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 10, no. 4, pp. 462-470, 1985.
- [35] Cristi R., Papoulias F.A., Healey A.J., "Adaptive sliding mode control of autonomous underwater vehicles in the dive plane", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 462-470, 1991.
- [36] Smith S.M., et al., "Fuzzy Logic Control of an Autonomous Underwater Vehicle", *Control Engineering Practice*, vol. 2, no.2, pp. 32/1-33/1, 1994.
- [37] Yuh J., "A neural net controller for underwater robotic vehicles", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 161- 166, 1990.
- [38] Nikolos I.K., Valavanis K.P., Tsourveloudis N.C., Kostaras A.N., "Evolutionary Algorithm Based Offline/Online Path Planner for UAV Navigation", *IEEE Transactions on Systems, Man*

and Cybernetics, part B: Cybernetics, vol. 13, no. 6, pp.898-912, 2003.

- [39] Brutzman D. P. "A virtual world for an autonomous underwater vehicle", PhD Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, CA, 1994.
- [40] Yuh J., (ed.), *Underwater Robotic Vehicles: Design and Control*, TSI Press, 1995.
- [41] Staff O.N., *Remotely Operated Vehicles of the World*, Palm City, Florida: Ocean News and Technology Press, 1998.
- [42] Williams D. A., Torchio R., "M.V. Derbyshire Surveys-UK/EC Assessors' Report: A Summary", London, Department of the Environment, Transport and the regions, Eland House, Bressenden place, London SW1E 5DU, 1998.
- [43] Ura T., "Development of Autonomous Underwater Vehicles in Japan", *Journal of Advanced Robotics*, vol. 16, no. 1, pp. 3-15, 2002.
- [44] Drtil M., "Electronics and sensor design for an autonomous underwater vehicle", Diplom-Ingenieur Thesis, University of Western Australia, February 2006, <http://robotics.ee.uwa.edu.au/theses/2006-AUV-Drtil.pdf>
- [45] Kyo M., Hiyazaki E., Tsukioka S., Ochi H., Amitani Y., Tsuchiya T., Aoki T., Takegawa S., "The Sea Trial of 'KAIKO', the Full Ocean Depth Research ROV", in *Proc. OCEANS 95, MTS/IEEE*, 1995.
- [46] Wernli R. L., "AUV Commercialization - Who's Leading the Pack?", in *Proc. OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition*, vol. 1, pp. 391 - 395, 2000.
- [47] Healley A. J., Marco D. B., Mc Ghee R.B, Brutzmann D.P., Cristi R., "Evaluation of the NPS Phoenix autonomous underwater vehicle hybrid control system", in *Proc. of the 1995 American Control Conference*, pp. 2954-2963, Seattle, USA, 1995.
- [48] Harbinson D., Westwood J., "Deepwater Oil & Gas – An Overview of the World Market", in *Proc. Deep Ocean Technology Conference*, New Orleans, 1998.
- [49] Sona S., "Advancements in ROV and trenching technology", *MTS/IEEE Conference and Exhibition OCEANS 2000*, vol.1, pp. 505 – 508, 2000.
- [50] Newman, J. B., Stakes, D.1994, "Tiburion: Development of an ROV for Ocean Science Research", in *Proc. OCEANS'94*, vol. II, pp. 483-488, Brest, France, Sept. 1994,
- [51] http://www.rovexchange.com/mc_rov_overview.php
- [52] Kandebo S.W., AW&ST, AUVSI 1997-98, *International Guide to Unmanned Vehicles*, New York, McGraw-Hill, Inc.,1997.
- [53] Mindell D., Bingham B., "New Archaeological Uses of Autonomous Underwater Vehicles", in *Proc. OCEANS, MTS/IEEE Conference and Exhibition*, vol. 1, pp. 555 – 558, 2001.
- [54] Wernli R. L., "Low Cost UUV'S for Military Applications: is the technology Ready?", Space and Naval Warfare Systems Center San Diego, California, U.S.A., <http://www.nosc.mil/robots/pubs/pacon2001a.pdf>.
- [55] Hagen P.E., Kristensen J., "The HUGIN AUV 'Plug and play' payload system", *MTS/IEEE Oceans*, vol. 1, no. 29-31, pp. 156 – 161, 2002.
- [56] Bellingham J., Goudey C., Consi T., Chrysostomidis C., "A small long range autonomous vehicle for deep ocean exploration", in *Proc.of the 2nd International Offshore and Polar Engineering Conference*, San Francisco, CA, pp. 148-155, 1992.
- [57] Curtin, T. B., Bellingham, J. G., Catapovic, J., Webb, D., "Autonomous oceanographic sampling networks". *Oceanographics* vol. 6, no. 3, pp. 86 – 93, 1993.
- [58] Yoerger D.R., Bradley A.M., Walden B.B., "Autonomous Benthic Explorer, Deep ocean scientific AUV for seafloor Exploration: Untethered, on station one year without support ship", *Sea Technology*, vol. 33, pp. 50-54, 1992.
- [59] Purcell, C. von Alt, "REMUS: A Small, Low Cost AUV, System Description, Field Trials, and Performance Results", in *proc. IEEE Oceans Conference '97*, Halifax, N.S. pp. 994-1000, 1997.

- [60] Desa E., Madhan R., Maurya P., "Potential of autonomous underwater vehicles as new generation ocean data platforms", <http://www.ias.ac.in/currsci/may102006/1202.pdf>.
- [61] Funnell C., (Ed.), *Jane's Underwater Technology Yearbook 2001–2002*, Jane's Information Group, Coulsdon, Surrey, UK, pp. 543, 2001.
- [62] Fernandes P. G., Stevenson P., Brierley A. S., Armstrong F., Simmonds E. J., "Autonomous underwater vehicles: future platforms for fisheries acoustics", http://www.st-andrews.ac.uk/~perg/Fernandes_et_al_ICES_J_Mar_Sci_60_2003.pdf
- [63] Coste-Maniere, E., Wang, H. H., Peuch, "Control architectures: What's going on?", in *Proc. of International Program Development in Undersea Robotics and Intelligent Control (URIC): A Joint U.S./Portugal Workshop*, pp. 54–60, Lisbon, Portugal, 1995.
- [64] Krauthamer J. T., "Current Status, Future Projections and Inventory: Manned Undersea Vehicles, Remotely Operated Vehicles, Autonomous Undersea Vehicles, Sustained Ocean Observatories, Cruise Ships Marine Technology", Report to the U.S. COMMISSION ON OCEAN POLICY, Society 5565 Sterrett Place, Suite 108 Columbia, MD 21044, 2002.
- [65] Bellingham, J. G., Goudey, C. A., et. al. "A Second Generation Survey AUV", in *Proc. IEEE Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*, pp. 148-156, July 1994.
- [66] Smith, S. M., Dunn, S., "The Ocean Voyager II: An AUV Designed for Coastal Oceanography", in *Proc. IEEE Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*, pp. 139-148, July 1994.
- [67] Alt V. C., Allen B., Austin T., Stokey R., "Remote Environmental Measuring Units", in *Proc. IEEE Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*, AUV '94, pp. 13-20, July 1994.
- [68] Brancart, C., "The Evolution of the DARPA / ARPA UUV Program", in *Proc. of the 1994 NSF IARP Workshop on Mobile Robots for Subsea Environments*, MBARI, Pacific Grove, CA, May 1994
- [69] Agoras, C., Lee, C. O., Hills, S., Carlino, D., "U. S. Navy UUV Navigation", *Sea Technology*, , pp. 56-60, January 1996.
- [70] Marks, R. L., Rock, S. M., Lee, M. J., "Real Time Video Mosaicking of the Ocean Floor", in *Proc. IEEE Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*, pp. 21-28, July 1994.
- [71] Healey, A.J., Marco, D. B., "Slow Speed Flight Control of Autonomous Underwater Vehicles: Experimental Results with NPS AUV II", in *Proc. of the 2nd International Offshore and Polar Engineering Conference*, San Francisco, July 14-19, 1992.
- [72] Pascoal A., "The AUV MARIUS: Mission Scenarios, Vehicle Design, Construction and Testing", in *Proc. of the 2nd Workshop on Mobile Robotics for Subsea Environments*, Monterey bay Aquarium, Monterey, California, May 1994.
- [73] Perrier M., Rigaud V., Peuch A., Coste-Maniere E., Simon B., " Vortex: A versatile Testbed Vehicle for Control Algorithms Evaluation", in *Proceedings of the 8th. UUST*, Durham New Hampshire, September 27-29, pp. 29-36, 1993.
- [74] Kiehne H.A., "Battery Technology Handbook", New York, Marcel – Dekker, 1989.
- [75] Valavanis K. P., Gracanin D., Matijasevic M., Kolluru R., Demetriou G. A., "Control architectures for autonomous Underwater vehicles," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 17, pp. 48-64, 1997.
- [76] Hwang Y., Ahuja N. "Gross motion planning-A survey", *ACM Computing Surveys*, 24(3), pp. 219-292, 1992.
- [77] Khatib O., "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots", *The International Journal of Robotics Research*, vol. 5, no. 1, pp. 90– 98, 1986.
- [78] Tsourveloudis N., Valavanis K. P., Hebert T., "Autonomous vehicle navigation utilizing electrostatic potential fields and fuzzy logic", *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, vol. 17, no. 4, pp. 490– 497, 2001.

- [79] Tanner H. G., Loizou S., Kyriakopoulos K. J., "Nonholonomic Stabilization with Collision Avoidance for Mobile Robots", in *Proc. of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Maui, Hawaii, USA, Oct. 29 - Nov. 03, 2001, <http://www.unm.edu/~tanner/Papers/IROS01.pdf>
- [80] Sequeira J., Ribeiro M. I., "A Two Level Approach to AUV Path Planning", in *Proc. IEEE Conf. OCEANS'94*, pp. II-87,II-91, Brest, France, 1994.
- [81] Sequeira J., Ribeiro M. I., "AUV Path Planning under Current Constraints", in *Autonomous Underwater Vehicles*, Kluwer Publishers, 1996.
- [82] Lozano-Perez T., Wesley M.A., "An Algorithm for Planning Collision-Free Paths Among Polyhedral Obstacles", IBM Thomas J. Watson Research Center, <http://people.csail.mit.edu/tlp/publications/collision-free-planning-cacm.pdf>.
- [83] Yilmaz N. K., "Path planning of autonomous underwater vehicles (AUVs) for adaptive sampling," Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, September 2005.
- [84] Yilmaz N.K., Evangelinos C., Patrikalakis N.M., Lermusiaux P.F.J., Haley P.J., Leslie W.G., Robinson A.R., Wang D., Schmidt H., "Path Planning Methods for Adaptive Sampling of Environmental and Acoustical Ocean Fields", <http://acoustics.mit.edu/faculty/henrik/LAMSS/ConferencePaperNKY.pdf>.
- [85] Stentz A., "Optimal and Efficient Path Planning for Partially-Known Environments", *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 1994, <http://www.frc.ri.cmu.edu/~axs/doc/icra94.pdf>
- [86] Sullivan S. O., "An Empirical Evaluation Of Map Building Methodologies in Mobile Robotics Using The Feature Prediction Sonar Noise Filter And Metric Grid Map Benchmarking Suite", Thesis, University of Limerick, 2003, <http://www.skynet.ie/~sos/masters/Masters%20Thesis.pdf>
- [87] Alvarez A., Caiti A., "Energy Saving Benefits of Path Planning for Autonomous Underwater Vehicles in Marine Environments with Eddies of variable Size", <http://www.nt.ntnu.no/users/skoge/prost/proceedings/ecc03/pdfs/571.pdf>.
- [88] Kruger D., Stolkin R., Blum A., Briganti J., "Optimal AUV path planning for extended missions in complex, fast-flowing estuarine environments", in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4265-4270, 2007.
- [89] Foskey M., Garber M., Ming C., Manocha L. D., "A Voronoi-Based Hybrid Motion Planner", <http://www.cs.unc.edu/~geom/voronoi/vplan/>.
- [90] Aurenhammer F., "Voronoi Diagrams - a Survey of a Fundamental Geometric Data Structure", *ACM Computing Surveys*, vol. 23, no. 3, pp. 345-405, 1991.
- [91] Choset H., Burdick J., "Sensor Based Planning: The Hierarchical Generalized Voronoi Graph", in *Proc. Workshop on Algorithmic Foundations of Robotics*, 1996.
- [92] Loggins C.D., A comparison of forward-looking sonar design alternatives, in *Proc. Of MTS/IEEE Oceans '01*, pp. 1536-1545, Honolulu, Hawaii, USA, 2001.
- [93] Horner D. P., Healey A.J., Kragelund S. P., "AUV Experiments in Obstacle Avoidance", in *Proc. of MTS/IEEE OCEANS*, vol. 2, pp. 1464- 1470, 2005
- [94] Healey A. J., Horner D. P., Kragelund S. P., "Obstacle Detection and Avoidance Using Blazed Array Forward Look Sonar", End of Year Report, 2006 ONR, 2006, <http://web.nps.navy.mil/~me/healey/papers/MWHealey2.doc>
- [95] Rubo Z., Guochang G.U., Guoyin Z., "AUV obstacle avoidance based on information fusion of multi-sensors", in *Proc. IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems*, pp. 1381-1384, 1997.
- [96] Kamon I., Rivlin E., "Sensory-based motion planning with global proofs", *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, vol. 13, no. 6, 1997.
- [97] Lynn L.T., Fodrea R., Healey A. J., "Obstacle Avoidance Control for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle", <http://web.nps.navy.mil/~me/healey/papers/GCUUV.pdf>.

- [98] Healey A.J., "Obstacle Avoidance While Bottom Following for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle", <http://www.stormingmedia.us/90/9006/A900634.html>.
- [99] Borenstein J., Koren Y., "The Vector Field Histogram-Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 7, no 3, pp. 278-288, 1991.
- [100] Healey A. J., Lienard D., "Adaptive sliding mode control of autonomous underwater vehicles in the dive plane", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 15, no. 3, pp.152-159.
- [101] Fossen T. I., Sagatun S. I., "Adaptive control of nonlinear underwater robotic systems", in *Proc.of the IEEE Conference on Robotics and Automation*, pp. 1687-1695, Sacramento, CA, April 1991.
- [102] Healey A. J., Riedel J. S., "Model based predictive control of AUVs for station keeping in a shallow water wave environment", in *Proc. International Advanced Robotics Program IARP98*, pp. 77-102, University of South Louisiana, 1998.
- [103] Fossen T. I., *Guidance and control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 1991.
- [104] Williams S. B., Newman P., Rosenblatt J., Dissanayake G., Durrant-Whyte H., "Autonomous Underwater Navigation and Control", *Robotica* vol. 19, no.5, pp.481-496.
- [105] Chanop Silpa-Anan, "Autonomous Underwater Robot : Vision and Control", Master of Engineering Thesis, Australian National University, February 2001.
- [106] Naeem W., "Model Predictive Control of an Autonomous Underwater Vehicle", Marine and Industrial Dynamic Analysis Group, Department of Mechanical and Marine Engineering, <http://www.cranfield.ac.uk/sas/marine/research/ukacc.pdf>
- [107] Oh M. H., Oh J. H., "Homing and Docking Control of AUV Using Model Predictive Control", *Proceedings of The Fifth (2002) ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium*, Daejeon, Korea, November 17-20, 2002.
- [108] Duwaish, H., W. Naeem, "Nonlinear model predictive control of Hammerstein and Wiener Models using Genetic Algorithms", in *Proc. of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications (CCA'01)*, 5-7 September, Mexico City, Mexico, pp. 465- 469, 2001.
- [109] Yu Z., Bao X., Nonami K., "Control and Navigation of An Autonomous Boat Based On A Novel Dynamic Model", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2007.
- [110] Paulino N., Silvestre C., Cunha R., Pascoal A., "A Path-Following Preview Controller for Autonomous Underwater Vehicles", http://welcome.isr.ist.utl.pt/img/pdfs/1511_pconf15.pdf
- [111] Paulino N., Silvestre C., Cunha R., Pascoal A., "A Bottom-Following Preview Controller for Autonomous Underwater Vehicles", http://welcome.isr.ist.utl.pt/img/pdfs/1515_pconf19.pdf
- [112] Maurya P., Desa E., Pascoal A., Barros E., Navelkar G., Madhan R., Mascarenhas A., Prabhudesai S., Afzulpurkar S., Gouveia A., Naroji S., Sebastiao L., "Control of the MAYA AUV in the Vertical and Horizontal Planes, Theory and Practical Results", http://welcome.isr.ist.utl.pt/img/pdfs/1531_C4.pdf.
- [113] Aicardi M., Casalino G., Indiveri G., Aguiar A., Encarna P., Pascoal A., "A planar path following controller for underactuated marine vehicles", http://med.ee.nd.edu/MED9/Papers/Invited_sessions/Marine_control/WM1-A/med01-153.pdf.
- [114] Rapoulas F., Papadopoulos E., "Trajectory Planning and Tracking Control of Underactuated AUVs", http://nereus.mech.ntua.gr/pdf_ps/icra305.pdf.
- [115] Rodrigues L., Tavares P., Prado M., "Sliding Mode Control for an AUV in the Diving and Steering Plane", in *Proc. of OCEAN '96*, Coastal Prospect for the 21st Century by the Marine Technical Society, 1996.
- [116] Healey A. J., Lienard, D., "Multivariable Sliding Mode Control for Autonomous Diving and Steering of Unmanned Underwater Vehicles", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 18, no. 3, pp. 327-339, 1993.
- [117] Dougherty F., Sherman T., Woolweaver G., Lovell G., "An autonomous underwater vehicle (AUV) flight control system using sliding mode control", *Oceans '88*, pp. 1265-1270, 1988.

- [118] Yuh J., "Modeling and control of underwater robotic vehicles" *IEEE Transactions of Systems Man and Cybernetics*, vol. 20, 1990.
- [119] Tabaii S. S. et al., "Hybrid Adaptive Control of Autonomous Underwater Vehicle", in *Proc. of Symposium of Autonomous Underwater Vehicle Technology*, pp. 275-282., 1994.
- [120] Antonelli G. et al., "Adaptive Control of an Autonomous Underwater Vehicle Experimental Results on ODIN", in *Proc. IEEE International Symposium On Computational Intelligence on Robotics and Control*, 1999.
- [121] Saffioti A., "Handling uncertainty in control of autonomous robots", in A. Hunters and A. Parsons, eds, *Uncertainty in information systems*, LNAI 1455 (Springer, DE, 1988) pg. 198-224.
- [122] Choi S. K. and J. Yuh., "Experimental Study on a Learning Control System with Bound Estimation for Underwater Robots", *International Journal of Autonomous Robots*, vol. 3, no.2, pp. 187- 194, 1996.
- [123] Nie J. et al., "On-Board Sensor-based Adaptive Control of Sinal1 UUVs in Very Shallow Water", *IFAC CAM'98*, Fukuoka, Japan, 1998.
- [124] Yuh J., West M. E., Lee P.M., "An Autonomous Underwater Vehicle Control with a Non-regressor Based Algorithm", in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, pp. 2363 – 2368, 2001.
- [125] Antonelli G., Cassavale F., Chiaverini S., Fusco, G. "A novel adaptive control law for underwater vehicles", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 11, no. 2, pp. 221–232, 2003.
- [126] Corradini M. L., Orlando G. "A discrete adaptive variable structure controller for MIMO systems and its application to an underwater ROV", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 5, pp.349–359, 1997.
- [127] Yuh J. Nie J., Lee C. S. G., "Experimental study on adaptive control of underwater robots", *Proc. of IEEE Internat. Conference on Robotics and Automation*, Detroit, MI, 1999, pp. 393–398.
- [128] Dumon G.A., Huzmezan M., "Concepts, methods and techniques in adaptive control", , *Proceedings of the American Control Conference*, vol. 2, pp. 1137 – 1150, 2002.
- [129] Goheen K. R., Jefferys E. R., "Multivariable self-tuning autopilots for autonomous and remotely operated underwater vehicles", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 15(3), pp.144-151, 1990.
- [130] Yoerger D. R., Slotine J. E., "Adaptive sliding control of an experimental underwater vehicle", in *Proc. International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2746-2751, 1991.
- [131] Yuh J., "Issues on control of underwater robotic vehicles", in *Proc. of International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol.3, no. 17-20, pp 313 – 315, Oct 1993.
- [132] Tshii K. et al., "A Quick Adaptation Method in a Neural Network Based Control System for AUVs", in *Proc. Symposium of Autonomous Underwater Vehicle Technology*, pp. 269-274, 1994.
- [133] Ishii K., Fujii T., Ura T., "Neural Network System for On-line Controller Adaptation and Its Application to Underwater Robot", in *Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 756-761, 1998.
- [134] DeBitetto P. A., "Fuzzy Logic for Depth Control of Unmanned Undersea Vehicles" in *Proc. Symposium of Autonomous Underwater Vehicle Technology*, pp. 233-241, 1994.
- [135] Kato N. "Applications of fuzzy algorithm to guidance and control of underwater vehicles", In J. Yuh (ed.). *Underwater Robotic Vehicles: Design and Control*, Albuquerque: TSI, 1995.
- [136] DeBitetto P., "Fuzzy logic for depth control of unmanned undersea vehicles", *IEEE Journal Oceanic Engineering*, vol. 20, no.3, pp. 242–248, 1995.
- [137] Healey A. J., "Analytical redundancy and fuzzy inference in AUV fault detection and compensation", in *Proc. of Oceanology*, Brighton, pp. 45–50, 1998.

- [138] Tsourveloudis N., Gracanin D., Valavanis K. P., "Design and testing of navigation algorithm for shallow water autonomous underwater vehicle", in *Proc. OCEANS '98*, 1998.
- [139] Vukic Z., Omerdic E., Kuljaca L., "Fuzzy autopilot for ships experiencing shallow water effect in manouvering", in *Proc. of the 4th IFAC Conf. on Manouvering and Control of Marine Craft*, Brijuni, HR, pp. 69–74, 1997.
- [140] Zaslavsky G. R., Kandel, A., "Longitudinal fuzzy control of a submerged vehicle", *Fuzzy Sets Systems*, vol. 115(2), pp. 305–319, 2000.
- [141] White K. A., Smith S. M., Ganesan K., Kronen D., Rae G. J. S., Langenbach, R. M., "Performance results of a fuzzy behavioral altitude flight controller and rendezvous and docking of an autonomous underwater vehicles with fuzzy control", in *Proc. Symposium on AUV Technology*, pp. 117–124, 1996.
- [142] Guo J., Huang S. H., "Control of an autonomous underwater vehicle testbed using fuzzy logic and genetic algorithms, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, National Taiwan University, Taipei.
- [143] Wang J. S., Lee C. S. G., Yuh, J., "An on-line self-organizing neuro-fuzzy control for autonomous underwater vehicles", in *Proc. of IEEE Internat. Conf. on Robotics and Automation*, Detroit, MI, pp. 2416–2421, 1999.
- [144] Brutzman D. P., "Virtual world for an autonomous underwater vehicle", Tutorial notes, *MTS/IEEE OCEANS '96*, 1996.
- [145] Healey, A. J., Brutzman, D. P., "Underwater Robotics Workshop", in *Proc. of the 8th Internat. Conf. on Advanced Robotics*, July 1997.
- [146] Healey A. J., Marco D. B., McGhee R. B., Brutzman D. P., Cristi R., Papoulias F. A., "Coordinating the hovering behaviors of the NPS AUVII using onboard sonar servoing", in *Proc. of IARP 2nd Workshop on Mobile Robots for Subsea Environments*, Monterey, CA, pp. 53–62, 1994.
- [147] Clarin M. D., "Discrete asynchronous Kalman filtering of navigation data for the Phoenix AUV", Tutorial, March 1996.
- [148] Cui Y., Sarkar N., "A unified force control approach to autonomous underwater manipulation", in *Proc. of IEEE Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, CA, pp. 1263–1268, 2000.
- [149] Ganesan K., Smith S. M., "A pragmatic software architecture for UUVs", in *Proc. Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*, pp. 209–215, 1996.
- [150] Saffiotti A., "The uses of fuzzy logic for autonomous robot navigation", *Soft Computing* Issue 1(4), pp. 180–197, 1997.
- [151] Amat J., Monferrer A., Batlle J., Cufi X., "GARBI: A low-cost underwater vehicle", *Microprocessors Microsystems* 23, pp. 61–67, 1999.
- [152] Rosenblatt J., Williams S., Durrant-Whyte H., "Behavior-based control for autonomous underwater exploration", in *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, CA, 2000.
- [153] An P.E., Healey A., Park J., Smith S.M., "Asynchronous data fusion for AUV navigation via heuristic fuzzy filtering techniques", 1997.
- [154] Wang J.S., Lee C.S., Yuh J., "Self-Adaptive Neuro-Fuzzy systems with fast parameter learning for Autonomous Underwater Vehicles", in *Proc. of 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, San Francisco, CA, pg. 3861-3865, 2000.
- [155] Milgram J. H., "Strip Theory for Underwater Vehicles in Water of Finite Depth" <http://oe.mit.edu/flowlab/NewmanBook/Milgram.pdf>.
- [156] Wang W, "Autonomous Control of a Differential Thrust Micro ROV", Master thesis, Waterloo, Ontario, Canada, 2006, http://www.uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/10012/2683/1/master_v4.pdf.
- [157] Kinsey J. C., Whitcomb L. L., "Towards in-situ calibration of gyro and doppler navigation sensors for precision underwater vehicle navigation", in *Proc. IEEE International Conference*

on Robotics and Automation, Washington, DC, 2002.

- [158] Whitcomb L. L., Yoerger D. R., Singh H., "Advances in Doppler-based navigation of underwater robotic vehicles", in *Proc. International Conference on Robotics and Automation*, Detroit, Michigan, 1999.
- [159] Smallwood D., Bachmayer R., and Whitcomb L., "A New Remotely Operated Underwater Vehicle for Dynamics and Control Research", in *Proc. of the 11th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*, Durham, NH, pp. 370-377, 1999, http://robotics.me.jhu.edu/~smallw/papers/uust_99.pdf.
- [160] Benett L. J., Smith A. C., Jacob H., Feder S., "Autonomous Underwater Vehicle Navigation", *MIT Marine Robotics Laboratory Technical Memorandum 98-1*, http://cml.mit.edu/~jleonard/pubs/tech_report981.pdf.
- [161] Barshan B., Durrant-Whyte H. F., "An inertial navigation system for a mobile robot", in *Proc. International Conference Intelligent Robots and Systems*, Yokohama, Japan, pp. 2243-2248, 1993.
- [162] Kaniewski P., "Integrated Positioning System for AUV Molecular and Quantum Acoustics", vol. 26, pp.115, 2005.
- [163] Kapaldo A., "Gyroscope Calibration and Dead Reckoning for an Autonomous Underwater Vehicle", Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [164] Olson E., Leonard J., Teller S., "Robust Range-Only Beacon Localization", Massachusetts Institute of Technology, <http://cml.mit.edu/~jleonard/pubs/eolsonAUV2004.pdf>
- [165] Paglia J. G., Wyman W. F., "DARPA's Autonomous Minehunting and Mapping Technologies (AMMT) Program: An Overview", *IEEE Oceans*, pages 794-799, Ft. Lauderdale, FL, USA, 1996.
- [166] Cruz N., Madureira L., Matos A., Pereira F., "A Versatile Acoustic Beacon for Navigation and Remote Tracking of Multiple Underwater Vehicles", http://paginas.fe.up.pt/~lsts/lsts_www/files/1829-1834.pdf.
- [167] Matos A., Cruz N., Martins A., Pereira F., "Development and Implementation of a Low-Cost LBL Navigation System for an AUV", *OCEANS 99 MTS/IEEE, Riding the Crest into the 21st Century*, vol.2, pp. 774 - 779, 1999.
- [168] Hahn M., Rice J., "Undersea Navigaton via a Distributed Acoustic Communication Network", http://www.tica05.org/papers/MatthewHahn_Rice.pdf.
- [169] Hunt M.M., Marquet W.M., Moller D. A., Peal K. P., Smith W. K., Spindell R. C., "An Acoustic Navigation System", Woods Hole, Massachusetts 02543 USA, 1974.
- [170] Yoerger D. R., "Precise Control of Underwater Robots", *International Advanced Robotics Program Workshop on Mobile Robots for Sea Environments*, Monterey, CA, USA, 1990.
- [171] Singh H., Catipovic J., Eastwood R., Freitag L., Henricksen H., Hover F., Yoerger D., Bellingham J., Moran B., "An Integrated Aproach to Multiple AUV communications, Navigation and Docking", in *Proc. of the OCEANS 96 MTS/IEEE Conference*, Fort Lauredale, FL, USA, pp. 59-64, 1996.
- [172] Smallwood D., Bachmayer R., Whitcomb L., "A New Remotely Operated Vehicle for Dynamics and Control Research", http://robotics.me.jhu.edu/dscl/ps/uust99_rov_preprint.pdf.
- [173] Panez R., "Simplifeid Method for Obtaining Navigation Information from Hydrophone Arrays", M.S. Thesis, University of Florida, 2004.
- [174] Santos-Victor J., Sentiero J., "The role of vision for underwater vehicles", in *Proc. IEEE International Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology AUVT94*, Boston, USA, July 1994.
- [175] Tommasini T., Roberto V., Fusiello A., Trucco E., "Robust feature tracking in underwater video sequences", in *Proc. of IEEE OCEANS '98 Conference*.
- [176] Carreras M., Ridao P., Batlle J. "An EKF Vision-Based Nanigation af an UUV in a Structured

Environment”, <http://vicorob.udg.es/fixers/articles/doc/23.pdf>.

- [177] Foresti G.L., “Visual inspection of sea bottom structures by an autonomous underwater vehicle”, *IEEE transactions on systems, man and cybernetics, part B: cybernetics*, vol. 31, no. 5, pp. 691-705, October 2001.
- [178] Dalglish F. R., Tetlow S., Allwood R. L., “A laser-assisted vision sensor for AUV navigation”, Offshore Technology Centre, Cranfield University Cranfield, Bedfordshire, UK.
- [179] Caccia M., “Optical triangulation-correlation sensor for ROV slow motion estimation: experimental results (July 2002 at-sea trials)”, <http://www.robotlab.ian.ge.cnr.it/~caccia/pdf/reportVisionMotEst03.pdf>
- [180] Wettergreen D., Gaskett C., Zelinsky A., “Autonomous Guidance and Control for an Underwater Robotic Vehicle”, Robotic Systems Laboratory, Department of Systems Engineering, RSISE, Australian National University, http://users.rsise.anu.edu.au/~rsl/rsl_papers/99fsr.kambara.pdf
- [181] Beckman R., Martinez A., Bourgeois B., “AUV Positioning Using Bathymetry Matching”, U.S. Naval Research Laboratory, *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition*, vol. 3, pp.2123 – 2127, 2000.
- [182] Tuohy S.T., Leonard J.J., Bellingham J.G., Patrikalakis N.M., Crysostomidis C., “Map Based Navigation for Autonomous Underwater Vehicles, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, vol. 6(1), pp. 9-18, March 1996.
- [183] Tyren C., “Magnetic Anomalies as a Reference for Ground-speed and Map-matching Navigation”, *The Journal of Navigation*, vol. 35, no. 2, pp.242-254, May 1982.
- [184] Λουκάκης Θ., Αθανασούλης Γ., Γάνος Γ., “Υδροδυναμική Πλοίου”, Αθήνα 1985.
- [185] SNAME, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, “Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body through a fluid”, *Technical and Research Bulletin* No. 1- 5, 1950.
- [186] Fjellstad O. E., Fossen T. I., “Quaternion Feedback Regulation of Underwater Vehicles”, *Proc. of the 3rd IEEE Conference on Control Applications*, Glasgow, Aug. 24-26, 1994.
- [187] Heally A.J., Rock S.M., Cody S., Miles D., Brown J.P., “Towards an improved understanding of thruster dynamics for underwater vehicles”, 0-7803-1808-0/94, IEEE, 1994.
- [188] Triantafyllou M.S., Amsallag A.M., “A new generation of underwater unmanned tethered vehicles carrying heavy equipment at large depths”, *Technical report MITSG 85-30TN*, MIT Dea Grant, Boston, MA.
- [189] Kanakakis V., Tsourveloudis N. C., Valavanis K. P., “Design and testing of a fuzzy logic controller for an autonomous underwater vehicle”, in *Proc. of the IARP Internat. Workshop on Underwater Robotics for Sea Exploration and Environmental Monitoring*, Rio de Janeiro, Brazil, October 2001.
- [190] Zadeh L.A., “Fuzzy Sets,” *IEEE Information and Control*, vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [191] Driankov d., Hellendoorn H., Reinfrank M., “An Introduction to Fuzzy Control”, Springer , Second Edition, 1996.
- [192] Holland J. H., “*Adaptation in Natural and Artificial Systems*”, University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, 1975.
- [193] Holland J. H., “Genetic Algorithms”, *Scientific America*, vol. 267, pp. 66-72, 1992.
- [194] Michalewicz Z., *Genetic Algorithms Data Structures & Evolution Programs*, Springer Publ., Third Edition, 1999.
- [195] Griffiths G., Millard N. W., Mc Phail S. D., Stevenson P., Challenor P. G., “On the Reliability of the Autosub Autonomous Underwater Vehicle”, *International Journal of the Society for Underwater Technology*, vol. 25, no.4, pp. 175-184, 2001.
- [196] Stokey R., Allen B., Austin T., Goldsborough R., Forrester N., Purcell M., Alt C., “Enabling Technologies for REMUS Docking: An Integral Component of an Autonomous Ocean

Sampling Network", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 26, pp. 487-497, Oct 2001

- [197] Ruina A., "Non-Holonomic Stability Aspects of Piecewise-Holonomic Systems", http://ruina.tam.cornell.edu/research/topics/nonholonomic_dynamics/papers/nonholonomic_stability_aspects.pdf
- [198] Ridao P., Batlle J., Amat J., Roberts G.N., "Recent Trends in Control Architectures for Autonomous Underwater Vehicles", *International Journal of Systems Science*, vol. 30, no. 9, pp. 1033-1056, 1999.
- [199] Demetriou G.A., Valavanis K.P., "A State Configured Sensor Based Control Architecture for an Autonomous Underwater Vehicle", <http://med.ee.nd.edu/MED5/PAPERS/037/037.PDF>.
- [200] Brooks R. A., "A robust layered control system for a mobile robot", *IEEE Journal of Robotics Automation* 2, pp. 14-23, 1986.
- [201] Bellingham J. G., Consi T. R. , "State Configured Layered Control, in Proc. of Mobile Robots for Subsea Environments", *Int. Advanced Robotics Programme*, pp. 75-80, Monterey, California, 1991.
- [202] Batlle J., Ridao P., Garcia R., Carreras M., Cufí X., El-Fakdi A., Ribas D., Nicosevici T., Batlle E., Oliver G., Ortiz A., Antich J., "URIS: Underwater Robotic Intelligent System" , <http://viconrob.udg.es/fitxers/articles/doc/136.pdf>
- [203] Antsaklis P. J., "Intelligent Control for High Autonomy in Unmanned Underwater Vehicles", *Proceedings of the International Program Development in Undersea Robotics & Intelligent Control (URIC)*, A Joint U.S./Portugal Workshop, 25-32, March 2-3, 1995.
- [204] Smith S., "An Approach to Intelligent Distributed Control for Autonomous Underwater Vehicles", *Proceedings of the 1994 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*, July 19-20, Cambridge, Massachusetts, USA, 1994.
- [205] Horowitz R., Varaiya P., "Control design of an automated highway system", <http://citeseer.ist.psu.edu/104524.html>.
- [206] Lygeros J., Godbole D. N., Sastry S., "Verified hybrid controllers for automated vehicles," *IEEE Transactions on Automation and Control*, vol. 43, pp. 522-539, Apr. 1998.
- [207] Tomlin C., Pappas G. J., Sastry S., "Conflict resolution for air traffic management: A study in multi-agent hybrid systems," *IEEE Transactions on Automation and Control*, vol. 43, no. 4, pp. 509-521, April 1998.
- [208] Pepyne D., Cassandras C., "Optimal control of hybrid systems in manufacturing," in *Proc. IEEE*, vol. 88, no. 7, pp. 1108-1123, July 2000.
- [209] Song M., Tarn T. J., Xi N., "Integration of task scheduling, action planning, and control in robotic manufacturing", in *Proc. IEEE*, vol. 88, pp. 1097-1107, July 2000.
- [210] Beji L., Abichou A., Slim R., "Longitudinal and Steering Stabilization of an Underactuated Autonomous Vehicle", <http://isciii.net/Papers/beji.pdf>.
- [211] Frazzoli E., Dahleh M. A., Feron E., "Robust Hybrid Control for Autonomous Vehicle Motion Planning", <http://web.mit.edu/~feron/Public/www/leeetac.pdf>.
- [212] John T., Sastry S., "Hybrid Control of Unmanned Aerial Vehicles for Autonomous Landing", *2nd AIAA "Unmanned Unlimited" Systems, Technologies, and Operations — Aerospace*, 15 - 18 September 2003, San Diego, California.
- [213] Aguiar A. P., Pascoal A. M., "Stabilization of an Underactuated Autonomous Underwater Vehicle via Logic-Based Hybrid Control", <http://med.ee.nd.edu/MED10/pdf/495.pdf>
- [214] Marco D.B., Healey A.J., McGhee R.B., "Autonomous Underwater Vehicles: Hybrid Control of Mission and Motion", *Autonomous Robots*, vol. 3, no. 2, pp. 169-186(18), June 1996.
- [215] Bhattacharyya S., Kumar R., Tangirala S., O'Connor M., Holloway L. E., "Animation/Simulation of missions for Autonomous Underwater Vehicles with Hybrid-Model based Hierarchical Mission Control Architecture", <http://home.eng.iastate.edu/~rkumar/PUBS/acc06-auv-simulate.pdf>
- [216] Antsaklis P. J., Passino K. M., Wang S. J., "An Introduction to Autonomous Control

Systems", *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 11, no. 4, pp. 5-13, June 1991.

- [217] Antsaklis P. J., Lemmon M., Stiver J. A., "Learning to be Autonomous: Intelligent Supervisory Control", <http://citeseer.ist.psu.edu/antsaklis93learning.html>.
- [218] Perez M. C., "A Proposal of a Behaviour-Based Control Architecture with Reinforcement Learning of an Autonomous Underwater Robot", PhD Thesis, [http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UdG/ AVAILABLE/ TDX-0114104-123825/tmcp1de3.pdf](http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UdG/AVAILABLE/TDX-0114104-123825/tmcp1de3.pdf)
- [219] L. Piegl, W. Tiller, *The Nurbs Book*, 2nd ed: Springer, 1997
- [220] Doitsidis L., Valavanis K. P., Tsourveloudis N. C., "Fuzzy Logic Based Autonomous Skid Steering Vehicle Navigation", in *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, DC, May 2002.
- [221] Doitsidis L., Valavanis K. P., Tsourveloudis N. C., "Sonar sensor based autonomous navigation and collision avoidance of skid-steering mobile robots", *Journal of Autonomous Robots*, 2004.
- [222] Valavanis K. P., Hebert T., Kolluru R., Tsourveloudis N., "Mobile robot navigation in 2-dynamic environments using electrostatic potential fields", *IEEE Trans. Systems Man Cybernet, Part A*, vol. 30, no. 2, pp.187–196, 2000.
- [223] Farinwata S. S., Filev D. E., Langari R. (eds), *Fuzzy Control: Synthesis and Analysis*, Wiley, New York, 2000.
- [224] Yen J., Langari, R., *Fuzzy Logic*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1999.
- [225] Arkin R. C., *Behavior-Based Robotics*, MIT Press, 1998.
- [226] Langer D., Hebert M., "Building qualitative elevation maps from underwater sonar data for autonomous underwater navigation", in *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 3, pp. 2478–2483, 1991.
- [227] De Moustier C., Matsumoto H., "Seafloor acoustic remote sensing with multibeam echosounders and bathymetric sidescan sonar systems", *Marine Geophysical Researches*, vol. 15, no. 1, pp. 27– 42, 1993.
- [228] Williams S., "A Terrain-aided Tracking Algorithm for Marine Systems", *International Conference on Field and Service Robotics*, July 14–16, 2003.
- [229] Smierzchalski R., "Evolutionary trajectory planning of ships in navigation traffic areas," *Journal of Marine Science Technology*, vol. 4, pp. 1–6, 1999.
- [230] Smierzchalski R., Z. Michalewicz, "Modeling of ship trajectory in collision situations by an evolutionary algorithm," *IEEE Transactions on Computing*, vol. 4, pp. 227–241, Sept. 2000.
- [231] Naeem W., Sutton R., Ahmad S. M., Burns R. S., "A Review of Guidance Laws Applicable to Unmanned Underwater Vehicles," *Journal of Navigation*, vol. 56, pp. 15–29, 2003.
- [232] Jang J. S. R., Gulley N., "MATLAB Fuzzy Logic Toolbox User's Guide Version 1", <http://citeseer.ist.psu.edu/494846.html>
- [233] Kihun K., Joonyong K, Choi H.S, Kyu-Yeul L., Woojae S., "Estimation of hydrodynamic coefficients of a test-bed AUV-SNUUV I by motion test", *MTS/IEEE Oceans*, vol.1, no. 29-31, pp. 186 – 190, Oct. 2002.
- [234] Riedel J., Healey A., Marco D., Beyazay B., "Design and Development of Low Cost Variable Boyancy System for the Soft Grounding of Autonomous Underwater Vehicles", <http://citeseer.ist.psu.edu/399581.html>.
- [235] Nickell C. L., "Modular Modification of a Buoyant AUV for Low-Speed Operation", Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [236] Goodwill A. M., "Concepts behind the GEBCO global bathymetric grid", <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gebco/grid/concepts/concepts.pdf>, March 2004.
- [237] George R. A., "High-Resolution AUV Surveys of the Eastern Sigsbee Escarpment Lindsay Gee", http://www.ivs3d.com/news/auv_survey.pdf.

- [238] Karras G., Panagou D., Kyriakopoulos K. J., "Target-referenced Localization of an Underwater Vehicle using a Laser-based Vision System", *OCEANS 2006*, pp. 1-6, Sep. 2006.
- [239] Kass M., Witkin A., Terzopoulos D., "Snakes: Active contour models", *International Journal of Computer Vision*, vol. 1, no. 4, pp. 321-331, 1987.
- [240] Neokleous K, Neokleous C., "A comparison of classical, neural and fuzzy control for an underwater vehicle", <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2006cavtat/papers/523-109.pdf>.
- [241] Zhao L., Gao W., "The experimental study on GPS/INS/DVL integration for AUV Position", *Location and Navigation Symposium, PLANS 2004*, vol. 26-29, pp. 337 – 340, 2004.
- [242] Jouffroy J., Opderbecke J., "Underwater vehicle navigation using diffusion-based trajectory observers", <http://www.cesos.ntnu.no/~jouffroy/Publications/Jouffroy-2006joe.pdf>.
- [243] McFarlane J.R., "Underwater technology 2000 ROVs and AUVs: tools for exploring, exploiting and defending the ocean frontier", in *Proc. of the 2000 International Symposium on Underwater Technology Volume*, pp. 65 – 471, 2000.
- [244] Blidberg D. Richard, "The Development of Autonomous Underwater. Vehicles (AUVs); A Brief Summary", in *Proc. of ICRA*, Seoul, Korea, May 2001.
- [245] Saade, J.J.; Diab, H.B., "Defuzzification techniques for fuzzy controllers", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Part B, Vol. 30, Issue 1, pp. 223 – 229, 2000.
- [246] Mitchell M., "An Introduction to Genetic Algorithms", MIT Press, Cambridge, MA, 1996.
- [247] Ridao P., Yuh J., Batlle J., Sugihara K., "On AUV control architecture", in *Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 2, pp. 855 - 860 vol.22000.
- [248] Πανάγου Δ., "Ανάπτυξη και εφαρμογή ενός αλγορίθμου κίνησης για την σταθεροποίηση ως προς στόχο ενός μη επανδρωμένου υποβρυχίου οχήματος ", Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2006.
- [249] Aicardi M., Casalino G., Bicchi A., Balestrino A., "Closed Loop Steering of Unicycle-like Vehicles via Lyapunov Techniques", *IEEE Robotics and Automation magazine*, Vol. 2, no. 1, pp. 27-35, 1995.