



Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου και Ρυθμίσεως Μηχανών

**Μοντελοποίηση και Αναγνώριση Παραμέτρων Δυναμικού
Μοντέλου Τηλεχειριζόμενου Υποβρυχίου Ρομποτικού
Οχήματος**

Δημήτριος Ε. Παρασκευάς

Διπλωματική Εργασία υπό την επίβλεψη του καθηγητή
Κωνσταντίνου Ι. Κυριακόπουλου

Αθήνα 2012

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την μοντελοποίηση και αναγνώριση των δυναμικών παραμέτρων ενός ημί-αυτόνομου υποβρύχιου ρομποτικού οχήματος. Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου και Ρυθμίσεως Μηχανών, της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, υπό την επίβλεψη του καθηγητή Κωνσταντίνου Κυριακόπουλου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κυριακόπουλο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου, για την διαθεσιμότητα και τις πολύτιμες συμβουλές του καθ'όλη την διάρκεια της εργασίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον διδάκτορα Καρρά Γεώργιο και τον προπτυχιακό φοιτητή Παρσινά-Πυλόροφ Δημήτριο, για τις πολύτιμες συμβουλές τους τόσο σε θεωρητικό όσο και πρακτικό επίπεδο, καθώς και τα υπόλοιπα μέλη του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου για την προθυμία τους και για το ιδιαίτερα ευχάριστο κλίμα συνεργασίας αλλά και συμβίωσης που δημιουργήθηκε.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, Εμμανουήλ και Ελένη, που όσο φορτικοί και αν γίνονται ώρες ώρες, χωρίς την δια βίου αρωγή και καθοδήγηση τους δεν θα είχα την δυνατότητα να πετύχω τα όσα έχω πετύχει μέχρι τώρα.

Παρασκευάς Δημήτριος

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	1
1.1: Γενικά.....	1
1.2: Διατύπωση του προβλήματος.....	1
1.3: Σημασία επίλυσης του προβλήματος.....	2
1.4: Δομή εργασίας.....	3
Κεφάλαιο 2: Τεχνική διατύπωση του προβλήματος	4
2.1: Περιγραφή πειραματικής διάταξης	4
2.1.1: Remotely Operated Vehicle (ROV)	4
2.1.2: Σύστημα μέτρησης θέσης και προσανατολισμού Polhemus Isotrak II	9
2.1.3: Αισθητήρας IMU	9
2.1.4: Ακουστικός αισθητήρας USBL.....	11
2.1.4: Δεξαμενή	12
2.2: Ανάλυση-Προσέγγιση προβλήματος	12
2.2.1: Εισαγωγή στην αναγνώριση συστημάτων	12
2.2.2: Μοντελοποίηση θαλάσσιων οχημάτων	15
2.2.2.1: Κινηματικό μοντέλο θαλάσσιων οχημάτων	15
2.2.2.2: Κινηματικό μοντέλο LBV-150.....	19
2.2.2.3: Δυναμικό μοντέλο θαλάσσιων οχημάτων	20
2.2.2.4: Δυναμικό μοντέλο LBV-150.....	25
Κεφάλαιο 3: Τεχνική επίλυση του προβλήματος	27
3.1: Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας	27
3.2: Επεξεργασία πειραματικών δεδομένων	34
3.2.1: Εκτίμηση διανύσματος κατάστασης offline (state estimation)	34
3.2.2: Τροποποιημένη online τεχνική ταυτόχρονης εκτίμησης διανύσματος κατάστασης και διανύσματος παραμέτρων	43
Κεφάλαιο 4: Πειραματικά αποτελέσματα	46
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα – Μελλοντικές κατευθύνσεις	56
5.1: Συνεισφορά εργασίας	56
5.2: Μελλοντικές κατευθύνσεις	56
Βιβλιογραφία	57
Παράρτημα	58

The road goes on and on

-Bilbo Baggins-

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1: Γενικά

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας τα τελευταία, και όχι μόνο, χρόνια είναι ένα φαινόμενο στο οποίο δεν χωρά αμφισβήτηση. Έτσι, η επιστήμη της Ρομποτικής δεν θα μπορούσε να μείνει αμέτοχη στις ραγδαίες αυτές εξελίξεις, όντας ένας επιστημονικός κλάδος που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον όχι μόνο για τους μελετητές της, αλλά και για όσους έρχονται σε επαφή με τα επιτεύγματά της. Η συνεχής ανάπτυξη αυτή λοιπόν, είχε σαν άμεσο αποτέλεσμα την δημιουργία διαφόρων ποικιλόμορφων ειδών ρομπότ σχεδιασμένα για ένα μεγάλο εύρος διαφόρων λειτουργιών-εργασιών. Πρόκειται για εφαρμογές εξαιρετικά διαδεδομένες, εξαιτίας της χρηστικότητας τους, αλλά κυρίως, λόγω της καινοτόμου αλλαγής που εισήγαγαν στις ζωές των ανθρώπων, που δεν είναι άλλη από την αντικατάσταση του ανθρώπινου παράγοντα τόσο στην εκτέλεση έργου όσο και στην λήψη αποφάσεων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εκτεταμένη χρησιμοποίησή τους για την αυτοματοποίηση βιομηχανικών διαδικασιών (γραμμές παραγωγής, συναρμολόγησης, ποιοτικός έλεγχος προϊόντων) , αλλά και την συμμετοχή τους σε πιο ιδιαίτερα περιβάλλοντα, που χωρίς αυτά, θα παρέμεναν απροσπέλαστα και ανεξερεύνητα για τον άνθρωπο (διάστημα, βυθός).

Αναφορικά με τα *Μη Επανδρωμένα Υποβρύχια Οχήματα* (Unmanned Underwater Vehicles, UUVs), αναπτύχθηκαν με σκοπό την χρησιμοποίησή τους για την εξερεύνηση του απρόσιτου, υπό κανονικές συνθήκες, ως προς τον άνθρωπο κόσμο του βυθού της θάλασσας και των ωκεανών. Διακρίνονται σε 2 κατηγορίες, τα πλήρως *Αυτόνομα Υποβρύχια Οχήματα* (Autonomous Underwater Vehicles, *AUVs*), τα οποία είναι ικανά να λειτουργήσουν χωρίς την παρουσία χειριστή, και τα *ήμι-Αυτόνομα Υποβρύχια Οχήματα* ή αλλιώς *Τηλεχειζόμενα Υποβρύχια Οχήματα* (Remotely Operated Underwater Vehicles, *ROVs*).

Πιο συγκεκριμένα, η διάταξη λειτουργίας των *ROVs* απαιτεί την ύπαρξη καλωδίου (*tether*), που εξασφαλίζει την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στο υποβρύχιο, καθώς και την επικοινωνία (σε επίπεδο πληροφορίας, όπως π.χ. αποστολή ληφθείσας εικόνας) με κάποιον σταθμό στην επιφάνεια της θάλασσας, όπου βρίσκεται ο χειριστής που ελέγχει το όχημα. Αντίθετα, τα *AUVs* είναι πλήρως αυτόνομα, πράγμα που καθιστά την παρουσία χειριστή στην επιφάνεια της θάλασσας περιττή.

Σημαντικό πλεονέκτημα των *AUVs* είναι η μη ύπαρξη καλωδίου, το μήκος του οποίου περιορίζει το εύρος του βάθους στο οποίο μπορούν να λειτουργήσουν τα *ROVs*. Ενδεικτικά αναφέρεται πως τα *AUVs* έχουν την δυνατότητα να λειτουργήσουν σε βάθη της τάξης των 4500 μέτρων. Οι διαφορές αυτές που παρουσιάζουν μεταξύ τους, καθιστά τα *ROVs* και τα *AUVs* κατάλληλα για διαφορετικού είδους εργασίες. Τα *AUVs* χρησιμοποιούνται για ωκεανογραφικούς σκοπούς, όπως χαρτογράφηση ωκεανών (ocean mapping), εξόρυξεις κοιτασμάτων χρήσιμων ουσιών (π.χ. πετρέλαιο), κατασκευή υποθαλάσσιων έργων και διάφορα

άλλα. Τα ROVs λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων τους στην προσέγγιση βάθους, χρησιμοποιούνται σε λιγότερο απαιτητικές εφαρμογές, αλλά εξίσου χρήσιμες, όπως η επιθεώρηση υποθαλάσσιων κατασκευών και υφάλων πλοίων. Ο συνήθης εξοπλισμός των υποβρυχίων οχημάτων περιλαμβάνει κάμερα για την συλλογή οπτικών πληροφοριών. Πολλές φορές όμως, στα οχήματα προσαρτώνται νέα, επιπλέον εξαρτήματα (βραχίονες, διάφοροι αισθητήρες), με αποτέλεσμα να διευρύνονται οι δυνατότητες τους και να χρησιμοποιούνται σε επιπλέον εφαρμογές.

1.2: Διατύπωση του προβλήματος

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μοντελοποίηση καθώς και η αναγνώριση των δυναμικών παραμέτρων ενός υποβρυχίου ρομποτικού οχήματος. Το ROV που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας είναι το LBV 150 της εταιρίας Seabotix (Seabotix, San Diego, California, USA), το οποίο υπάρχει στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου, καταρχήν αναπτύχθηκε, με τη βοήθεια της βιβλιογραφίας, ένα μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει την δυναμική συμπεριφορά του υποβρυχίου οχήματος με άγνωστες, σε πρώτη φάση, τις δυναμικές παραμέτρους. Κατόπιν, πραγματοποιήθηκαν πειράματα με σκοπό την συλλογή δεδομένων, που έπειτα από επεξεργασία, η οποία θα αναλυθεί στην συνέχεια (κεφάλαιο 3), θα μας οδηγήσει στον προσδιορισμό των παραμέτρων αυτών, που αποτελεί το 2^ο κομμάτι της εργασίας. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικοί αισθητήρες:

- Ένας αισθητήρας μέτρησης θέσης και προσανατολισμού ως προς σταθερό σύστημα αναφοράς (position tracking system)
- Ένας αισθητήρας IMU (Inertial Measurement Unit) που παρέχει γραμμικές επιταχύνσεις, γωνιακές ταχύτητες και γωνίες τύπου Euler (Euler angles).
- Ένας ακουστικός αισθητήρας μέτρησης της θέσης (USBL Acoustic Tracking system).

Το λογισμικό που αναπτύχθηκε για να πραγματοποιηθούν όλες αυτές οι εργασίες αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού C++, σε περιβάλλον λειτουργίας Linux Ubuntu.

1.3: Σημασία επίλυσης του προβλήματος

Γενικά, η αναγνώριση ενός συστήματος (system identification) είναι μια διαδικασία με ιδιαίτερη σημασία για όλα τα υπό μελέτη συστήματα.

Καταρχήν, μέσα από τον προσδιορισμό του μοντέλου που περιγράφει το σύστημα, επιτρέπει την μετάβαση από το εμπειρικό στο, σίγουρα πιο ακριβές,

μαθηματικό επίπεδο. Παραδείγματος χάριν, ο ανθρώπινος εγκέφαλος, έχει μάθει πως για να στραφεί η τροχιά κίνησης ενός αυτοκινήτου, χρειάζεται μία άσκηση δύναμης ώστε να στραφεί το τιμόνι, που με τη σειρά του, στρέφει τους μπροστινούς τροχούς του αυτοκινήτου και κατά συνέπεια, το ίδιο το αυτοκίνητο. Παρ'όλα αυτά, δεν γνωρίζει πόση ακριβώς δύναμη πρέπει να ασκηθεί, λειτουργεί δηλαδή εμπειρικά. Αν όμως εφαρμοσθεί η τεχνική αναγνώρισης συστήματος στη συγκεκριμένη περίπτωση, θα είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε την ακριβή σχέση που συνδέει τη δύναμη που ασκούμε στο τιμόνι με την στροφή που συνεπάγεται για τον προσανατολισμό του οχήματος.

Κατόπιν, η αναγνώριση συστήματος, επιτρέπει την πραγματοποίηση περαιτέρω διεργασιών, από τεχνικής άποψης, πάνω στο υποβρύχιο και γενικότερα στα συστήματα που αναγνωρίζονται. Γενικά, η αναγνώριση συστημάτων χρησιμοποιείται κυρίως στους τρεις παρακάτω τομείς:

- ανάπτυξη εκτενέστερου ελέγχου από τον ήδη υπάρχοντα (control design),
- μοντελοποίηση και προσομοίωση συστημάτων (modeling and simulation),
- καθώς και σε προβλεπτικούς αλγορίθμους (prediction).

1.4: Δομή της εργασίας

Στο 2^ο κεφάλαιο της εργασίας δίνεται η τεχνική διατύπωση του προβλήματος. Περιγράφεται ο εξοπλισμός και η πειραματική εγκατάσταση που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση αυτής της εργασίας. Επίσης, αναλύονται τα απαραίτητα θεωρητικά στοιχεία, στα οποία θα στηριχθεί η τεχνική επίλυση που ακολουθεί.

Στο 3^ο κεφάλαιο αναλύεται η τεχνική επίλυση του προβλήματος. Περιγράφονται εκτενώς όλες οι μεθοδολογίες που ακολουθήθηκαν για την ανάπτυξη κατάλληλου αλγορίθμου ώστε να επιτευχθεί η αναγνώριση του εν λόγω συστήματος, καθώς και η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία, καθώς και αυτά που προέκυψαν από επεξεργασία των δεδομένων αυτών με χρήση του προγραμματιστικού περιβάλλοντος Matlab™ (Mathworks).

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν αναφορικά με την συγκεκριμένη εφαρμογή, καθώς και προτάσεις για μελλοντικές κατευθύνσεις.

Κεφάλαιο 2

Τεχνική Διατύπωση του Προβλήματος

2.1: Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Στο κομμάτι αυτό γίνεται εκτενής τεχνική περιγραφή του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε κατά την διάρκεια της εργασίας.

2.1.1: Remotely Operated Vehicle (ROV)

Το ROV που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας είναι το LBV 150 της εταιρίας Seabotix (Seabotix, San Diego, California, USA), το οποίο υπάρχει στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.



Σχήμα 2.1: Το υποβρύχιο όχημα LBV 150 στην δεξαμενή του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου

Πρόκειται για ένα όχημα καλά σχεδιασμένο για παράκτιες εφαρμογές που περιλαμβάνουν κατά κύριο λόγο διάφορα είδη επιθεωρήσεων για ποικίλους σκοπούς (υποθαλάσσια ζωή, ύφαλα πλοίων κ.α.).

Ο χρήστης δύναται να ελέγξει το LBV 150 μέσω ενός χειριστηρίου (Operator Control Unit, OPC), το οποίο με την σειρά του για να λειτουργήσει πρέπει να

συνδεθεί στην κονσόλα ελέγχου (Integrated Control Console, ICC) που παρέχεται επίσης από τον προμηθευτή. Το χειριστήριο παρέχει την δυνατότητα ελέγχου των κινητήρων, και κατά συνέπεια, της κίνησης του οχήματος, την κάμερα (focus+, focus-, tilt up, tilt down) τους προβολείς (light on, light off, light intensity), λειτουργία διατήρησης σταθερού προσανατολισμού (auto heading), πυξίδα και μετρητή βάθους. Πλήρη στοιχεία για την κατάσταση του οχήματος, μαζί φυσικά με την εικόνα, φαίνονται στην οθόνη της κονσόλας ανά πάσα στιγμή. Για την κίνηση του στο νερό, το όχημα είναι εξοπλισμένο με 4 κινητήρες χωρίς ψύκτρες (brushless motors), που του δίνουν την ικανότητα να είναι ενεργοποιημένο (actuated) σε τέσσερις (4) βαθμούς ελευθερίας. Επίσης, περιλαμβάνει μια LED κάμερα που παρέχει εικόνα στο οπτικό πεδίο του οχήματος. Τέλος, διαθέτει και δύο (2) προβολείς, τοποθετημένους συμμετρικά εκατέρωθεν της κάμερας. Σημειώνεται, πως η επικοινωνία με ηλεκτρονικό υπολογιστή γίνεται μέσω μιας RS-232 θύρας σειριακής επικοινωνίας. Στην περίπτωση αυτή, όλα τα χαρακτηριστικά του οχήματος καθορίζονται μέσω λατάλληλου software που τρέχει στον Η/Υ. Η παροχή ρεύματος γίνεται μέσω της κονσόλας, όπως και η μεταφορά δεδομένων, με την βοήθεια του καλωδίου, μήκους στην δική μας περίπτωση, 100 μέτρων.



Σχήμα 2.2: Κονσόλα ελέγχου LBV-150



Σχήμα 2.3: Joystick ελέγχου LBV-150



Σχήμα 2.4: Καλώδιο (tether) οχήματος για την μεταφορά δεδομένων

Στη συνέχεια αναλύονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά (specifications) του οχήματος που μας ενδιαφέρουν. Τα συνολικά τεχνικά χαρακτηριστικά του οχήματος μπορούν να βρεθούν στην ιστοσελίδα του κατασκευαστή.

Όπως προαναφέρθηκε, το συγκεκριμένο ROV διαθέτει 4 βαθμούς ελευθερίας (surge, sway, heave, yaw, βλ. παρακάτω). Δηλαδή, έχει την δυνατότητα κίνησης κατά τον οριζόντιο άξονα x (surge), τον εγκάρσιο y (sway), τον κατακόρυφο z (heave), και την δυνατότητα περιστροφής γύρω από τον κατακόρυφο άξονα (yaw). Σημειώνεται, ότι η κίνηση στον οριζόντιο άξονα και η στροφή γύρω από τον κατακόρυφο παράγονται μέσω 2 κινητήρων (αριστερός-Port & δεξιός-Starboard), ενώ οι αντίστοιχες στους άλλους άξονες μέσω των υπόλοιπων 2, όπου ο καθένας τους χρησιμεύει κατά αποκλειστικότητα για μία από αυτές (Lateral για την εγκάρσια, Vertical για την κατακόρυφη).

Οι κινητήρες είναι συνεχούς ρεύματος και σχεδιασμένοι με τον ίδιο τρόπο (identically designed) και ώστε να παράγουν συμμετρική ώση (θα χρησιμεύσει αργότερα, βλ. κεφάλαιο 3). Οι 2 που κινούν το όχημα στον οριζόντιο άξονα βρίσκονται στο κάτω μέρος του οχήματος, αυτός που το κινεί κατακόρυφα βρίσκεται στην μέση αυτού, και ο τελευταίος που το κινεί εγκάρσια βρίσκεται κάτω από το κυρίως σώμα του οχήματος, και κοντά στο κέντρο βάρους του. Σημειώνεται πως ο προσανατολισμός των κινητήρων με την συγκεκριμένη τοποθέτηση είναι ίδιος με την κίνηση την οποία πρέπει να παράγουν (οριζόντια, κατακόρυφα και εγκάρδια δηλαδή αντίστοιχα).



Σχήμα 2.5.1: Διάταξη κινητήρων (Port & Starboard thrusters)



Σχήμα 2.5.2: Διάταξη κινητήρων (Lateral thruster)



Σχήμα 2.5.3: Διάταξη κινητήρων (Vertical thruster)

2.1.2: Σύστημα μέτρησης θέσης και προσανατολισμού Polhemus Isotrak II

Ο αισθητήρας Isotrak II , κατασκευασμένος από την εταιρία Polhemus (Polhemus Inc., Vermont, USA) , που διαθέτει το Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου, χρησιμοποιήθηκε καθ'όλη την διάρκεια των πειραμάτων που διεξήχθησαν. Περιλαμβάνει έναν αισθητήρα (σχήμα 2.4, κάτω αριστερά) που λειτουργεί σαν δέκτης και το σταθερό, κατά την διάρκεια των μετρήσεων, κομμάτι(σχήμα 2.4, κάτω δεξιά), που λειτουργεί σαν πομπός. Αυτό συμβαίνει, διότι, η αρχή λειτουργίας του αισθητήρα αυτού στηρίζεται στην μεταβολή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ως προς ένα σταθερό σύστημα αναφοράς. Μέσω της μεταβολής αυτής, προσδιορίζεται μέσω κατάλληλου μαθηματικού αλγορίθμου η θέση (x,y,z) και ο προσανατολισμός (roll,pitch,yaw) του αντικειμένου στο οποίο είναι τοποθετημένος ο δέκτης. Συνδέεται στον Η/Υ μέσω μιας θύρας σειριακής επικοινωνίας RS-232. Η συχνότητα δειγματοληψίας του ποικίλλει και μπορεί να φθάσει έως και τα 60Hz για χρήση με έναν δέκτη, και έως 30Hz για δύο ταυτόχρονα συνδεδεμένους δέκτες. Οι μετρήσεις θεωρούνται ακριβείς όσο ο δέκτης βρίσκεται εντός ακτίνας 76 cm από τον πομπό. Η ακρίβεια σε αυτή την εμβέλεια είναι:

- 0.24 cm για τις μετρούμενες θέσεις
- 0.75° για τον μετρούμενο προσανατολισμό



Σχήμα 2.6: Σύστημα θέσης και προσανατολισμού Isotrak II

2.1.3: Αισθητήρας IMU

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας Mti της εταιρίας Xsens. Παρέχει γραμμικές επιταχύνσεις στους 3 άξονες κίνησης, γωνιακές ταχύτητες στους 3 άξονες περιστροφής και γωνίες τύπου Euler. Οι μετρήσεις αυτές προκύπτουν από τη συνδυαστική χρήση επιταχυνσιομέτρων και γυροσκοπίων. Στον μαθηματικό αλγόριθμο από τον οποίο προκύπτουν τα μεγέθη, έχει συμπεριληφθεί και ένα φίλτρο

Kalman για την αποκοπή του εισερχόμενου, στις μετρήσεις, θορύβου (σφάλμα). Τα σφάλματα του, σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης, είναι:

- $5 \text{ }^\circ/\text{s}$ για τις γωνιακές ταχύτητες
- $0.02 \text{ m}^2/\text{s}$ για τις επιταχύνσεις

Σημαντικό είναι να αναφερθεί το γεγονός πως επειδή, σε αντίθεση με το σύστημα Isotrak, το σύστημα Mti δεν εμπεριέχει κάποιο αδρανειακό σύστημα αναφοράς, πρέπει να τοποθετηθεί πάνω στο όχημα με προσοχή, κοιτώντας οι άξονες μέτρησής του να είναι πλήρως ευθυγραμμισμένοι με αυτούς του οχήματος. Επίσης, καλό είναι να τοποθετείται όσο πιο κοντά γίνεται στο κέντρο βάρους, εφ' όσον είναι δυνατόν πάνω σε αυτό, ώστε να μην υπεισέρχονται επιπλέον όροι σφάλματος (offsets). Επιπλέον, επειδή μιλάμε για πειράματα κάτω από το νερό, ο αισθητήρας τοποθετήθηκε σε στεγανό δοχείο, το οποίο είναι με τη σειρά του σταθερά τοποθετημένο πάνω σε βάση κατασκευασμένη από πλεξιγκλάς (μη μαγνητικό υλικό), ώστε να μην υπάρχουν παρεμβολές στις μετρήσεις του Isotrak, του οποίου ο αισθητήρας μέτρησης επίσης θα τοποθετηθεί πάνω σε αυτήν. Τέλος, τροφοδοτείται με ρεύμα από τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος και επικοινωνεί με τον Η/Υ μέσω θύρας σειριακής επικοινωνίας RS-232.



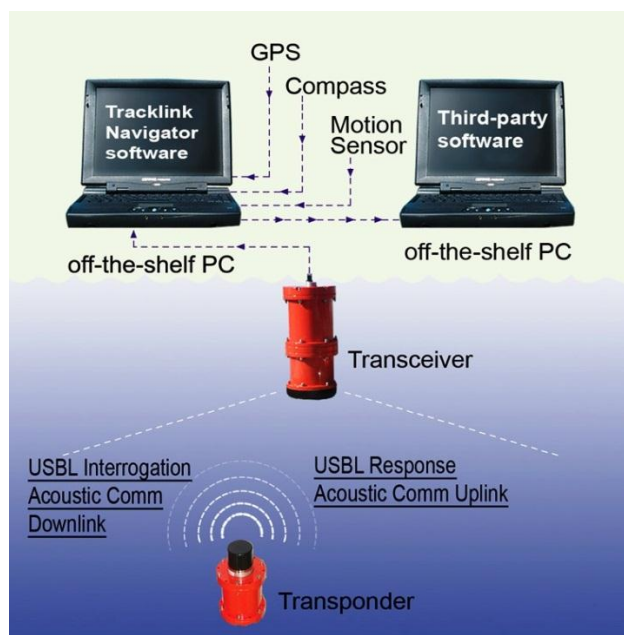
Σχήμα 2.7: Αισθητήρας IMU (Mti Xsens)



Σχήμα 2.8: Δοχείο τοποθέτησης Mti, τοποθετημένο σταθερά πάνω στην ειδική βάση

2.1.4: Ακουστικός αισθητήρας USBL

Πρόκειται για έναν ακουστικό αισθητήρα, της εταιρίας Tracklink, που δύναται να παρέχει μετατοπίσεις στους 3 κύριους άξονες. Η αρχή λειτουργίας του ακουστικού αισθητήρα USBL είναι η εξής: Αποτελείται από 2 κομμάτια, τον πομπό και τον δέκτη. Ο πομπός, που είναι σταθερά τοποθετημένος, στέλνει ακουστικό σήμα στον χώρο κατά την κωνική έννοια υπό σταθερή, προκαθορισμένη γωνία κλίσης (στην δική μας περίπτωση, πρόκειται για 120° ή 150°), το οποίο λαμβάνει ο δέκτης, ο οποίος βρίσκεται σε ειδική βάση πάνω στο όχημα. Το σήμα ανακλάται πίσω στον πομπό, ο οποίος μέσω κατάλληλης εσωτερικής επεξεργασίας υπολογίζει το διάνυσμα της απόστασης μεταξύ αυτών. Η ακρίβεια μέτρησης του είναι γύρω στα 24 εκατοστά, και η συχνότητα δειγματοληψίας του είναι $\leq 1\text{Hz}$.



Σχήμα 2.9: Σχηματική αναπαράσταση αρχής λειτουργίας αισθητήρα USBL (link-quest official site)

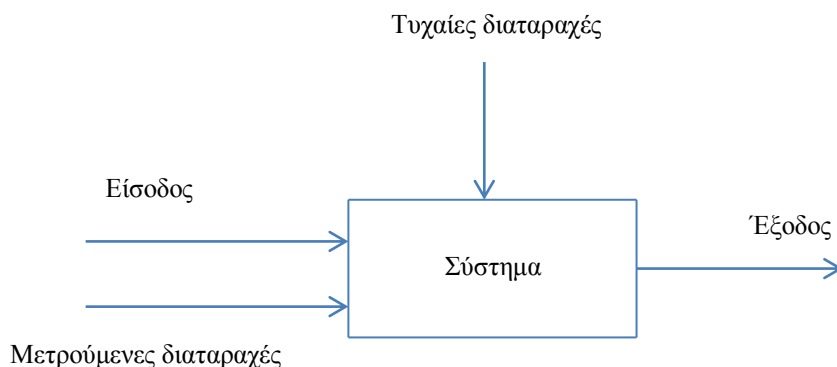
2.1.5: Δεξαμενή

Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκε η δεξαμενή του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου (βλέπε Σχήμα 2.1). Η διάμετρος της είναι 2m και το ύψος της στα 1.5m.

2.2: Ανάλυση-Προσέγγιση Προβλήματος

2.2.1: Εισαγωγή στην αναγνώριση συστημάτων

Η αναγνώριση συστημάτων ασχολείται με το πρόβλημα της κατασκευής μαθηματικών μοντέλων δυναμικών συστημάτων. Αυτό γίνεται, με βάση την παρατήρηση δεδομένων που αφορούν την συμπεριφορά του υπό μελέτη συστήματος. Γενικά, σαν σύστημα θεωρούμε ένα αντικείμενο μέσα στο οποίο αλληλεπιδρούν διαφορές μεταβλητές και παράγουν παρατηρήσιμα σήματα. Τα παρατηρήσιμα αυτά σήματα καλούνται έξοδοι του συστήματος (outputs). Το σύστημα επηρεάζεται επίσης από εξωγενείς παράγοντες. Όσοι από αυτούς μπορούν να ελεγχθούν από τον χρήστη, καλούνται είσοδοι του συστήματος (inputs). Οι υπόλοιποι καλούνται διαταραχές (disturbances), και διαχωρίζονται σε εκείνους που μπορούν να μετρηθούν απευθείας με κάποιο τρόπο (measured disturbances), και εκείνους που γίνονται αντιληπτοί μόνο μέσω της επιρροής που έχουν στις εξόδους του συστήματος (unmeasured disturbances).



Σχήμα 2.9: Σχηματική αναπαράσταση δυναμικού συστήματος

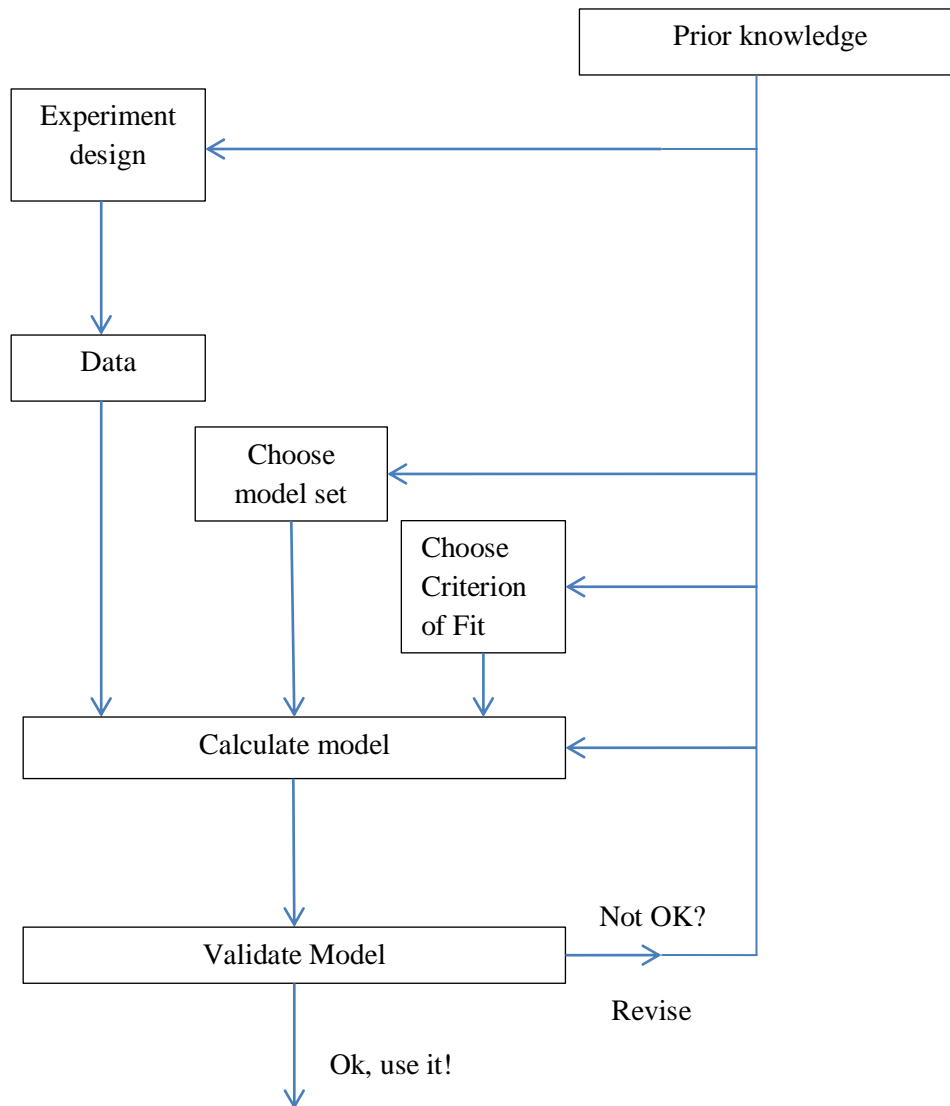
Αφού οριστεί λοιπόν με σαφήνεια το σύστημα και τι αυτό περιλαμβάνει, περνάμε στο επόμενο στάδιο, το οποίο είναι η αναγνώριση αυτού. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο αλγόριθμος που ακολουθείται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων. Η κατασκευή ενός μοντέλου απαιτεί 3 πράγματα:

- 1) *Ένα σετ από υποψήφια μαθηματικά μοντέλα.* Γενικά, η επιλογή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως :
 - Το σύστημα μας υπόκειται σε κάποιους βασικούς φυσικούς νόμους, οι οποίοι πρέπει να αναγνωρισθούν και να προσδιορισθούν.
 - Συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται απλοποιήσεις και εμπειρικές σχέσεις που είναι αποτέλεσμα εκ των προτέρων γνώσης χαρακτηριστικών του συστήματος, αλλά και πείρας.
 - Σχέδον πάντα υπάρχουν διαφόρων ειδών περιορισμοί (φυσικοί, χωρικοί, μηχανικοί κτλ.) που παίζουν ρόλο στην μοντελοποίηση.
 - Όλοι οι παραπάνω παράγοντες, και όσοι δεν έχουν αναφερθεί, έχουν σαν κοινή τους συνιστώσα την ακρίβεια που θέλει να πετύχει ο μελετητής. Προφανώς, όσο μεγαλύτερη ακρίβεια επιδιώκει, τόσο περισσότερους πρέπει να λάβει υπόψιν.

Κατά κοινή παραδοχή, πρόκειται για το πιο δύσκολο κομμάτι της αναγνώρισης συστημάτων.

- 2) *Πειραματικά δεδομένα.* Το κομμάτι αυτό περιλαμβάνει καταγραφή σημάτων (εισόδων και εξόδων) του συστήματος, κατά την διάρκεια κατάλληλα σχεδιασμένου πειράματος από τον μελετητή. Είναι στο χέρι του να ρυθμίσει το ποιιά σήματα να μετράει κάθε φορά, καθώς και το πότε να μετράει το καθένα, με απώτερο σκοπό στο τέλος της πειραματικής διαδικασίας, τα δεδομένα που θα έχει συλλέξει να περιλαμβάνουν όσο περισσότερες πληροφορίες για το σύστημα γίνεται.
- 3) *Επεξεργασία-Φιλτράρισμα μετρήσεων.* Αυτό το κομμάτι είναι γνωστό και ως μέθοδος αναγνώρισης (identification method). Σε αυτό το στάδιο, γίνεται

έλεγχος της ποιότητας του μοντέλου αναφορικά με την ακρίβεια με την οποία αναπαράγει τα μετρούμενα σήματα. Όσο πιο κοντά στα μετρούμενα είναι, τόσο καλύτερο ποιοτικά το μοντέλο.



The system identification loop (Ljung, System identification-Theory for the user)

Σχήμα 2.10: Αλγόριθμος αναγνώρισης συστήματος

Με το πέρας των παραπάνω διεργασιών, ο χρήστης έχει πλέον στα χέρια του ένα μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει την δυναμική του συστήματος που μελετά. Το μόνο που απομένει ώστε η αναγνώριση να λάβει τέλος, είναι να μελετηθεί η εγκυρότητα του μοντέλου, όχι ως προς το πόσο καλά περιγράφει το σύστημα, αλλά ως προς τον σκοπό για τον οποίο θα χρησιμοποιηθεί (model validation). Τα tests εγκυρότητας γίνονται με διάφορους τρόπους, που δεν αποτελούν κομμάτι της

παρούσας εργασίας, καθώς αυτή η διεργασία αφορά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί εκ του μηδενός, ενώ το μαθηματικό μοντέλο που θα αναπτυχθεί στην συνέχεια για την δική μας περίπτωση είναι ένα γενικό μοντέλο για όλα τα υποβρύχια οχήματα που προέρχεται από την βιβλιογραφία και τυγχάνει ευρείας αποδοχής και χρήσης.

2.2.2: Μοντελοποίηση θαλάσσιων οχημάτων

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει η μαθηματική ανάλυση που θα οδηγήσει σε γενικό κινηματικό και δυναμικό μοντέλο υποβρυχίων οχημάτων, που έπειτα, με κατάλληλες παραδοχές και απλουστεύσεις θα προσαρμοστεί στο LBV-150. Τα στοιχεία που θα παρουσιαστούν παρακάτω αποτελούν συνοπτική περιγραφή της έρευνας που έχει γίνει. Ο αναγνώστης παραπέμπεται στο [1] για περισσότερες πληροφορίες.

2.2.2.1: Κινηματικό μοντέλο θαλάσσιων οχημάτων

Για να προσδιοριστεί το διάνυσμα θέσης και ο προσανατολισμός ενός σώματος (γενικά) ως προς ένα σύστημα αναφοράς, χρειάζονται 6 στοιχεία: 3 θέσεις ως προς τους 3 άξονες κίνησης και οι 3 αντίστοιχες γωνίες, που περιγράφουν τον προσανατολισμό του.

Έτσι, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως η κίνηση των οχημάτων θαλάσσης περιγράφεται στην γενική της μορφή από 6 βαθμούς ελευθερίας (Degrees of Freedom, DOF). Ο συμβολισμός των μεγεθών που εμπλέκονται σε αυτή την διατύπωση ακολουθεί συγκεκριμένη σημειογραφία, η οποία έχει οριστεί ως εξής:

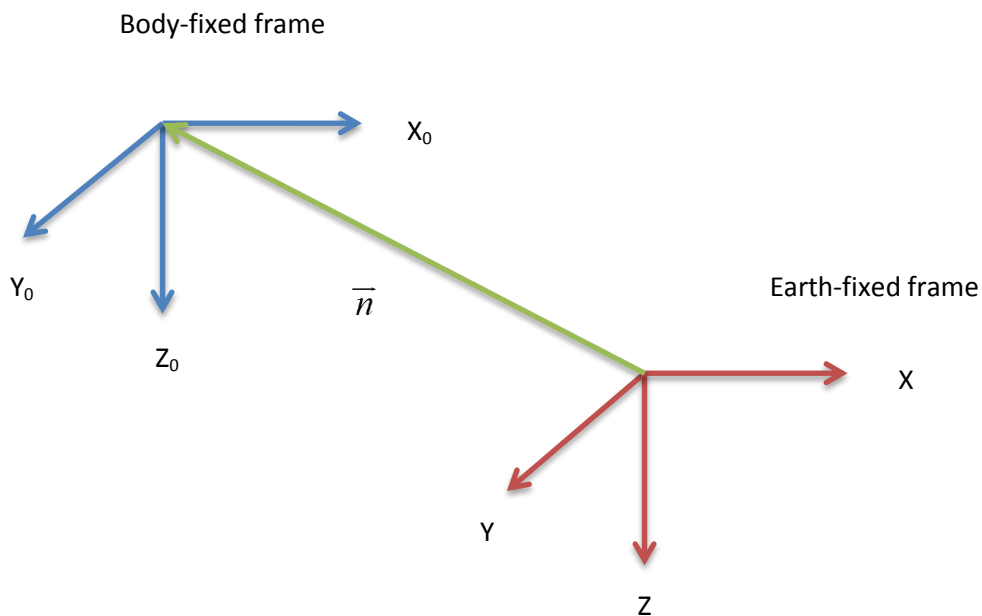
DOF		Δυνάμεις και ροπές	Γραμμικές και γωνιακές ταχύτητες	Θέση και γωνίες Euler
1	Κίνηση στην κατεύθυνση x (surge)	X	u	x
2	Κίνηση στην κατεύθυνση y (sway)	Y	v	y
3	Κίνηση στην κατεύθυνση z (heave)	Z	w	z
4	Περιστροφή γύρω από τον άξονα x (roll)	K	p	φ
5	Περιστροφή γύρω από τον άξονα y (pitch)	M	q	θ
6	Περιστροφή γύρω από τον άξονα z (yaw)	N	r	ψ

Η ανάλυση της κίνησης των θαλάσσιων οχημάτων χρησιμοποιώντας 6 βαθμούς ελευθερίας ξεκινά με τον καθορισμό 2 συστημάτων συντεταγμένων. Το ένα είναι το κινούμενο σύστημα (X_0, Y_0, Z_0) που συνήθως προσαρτάται στο κέντρο

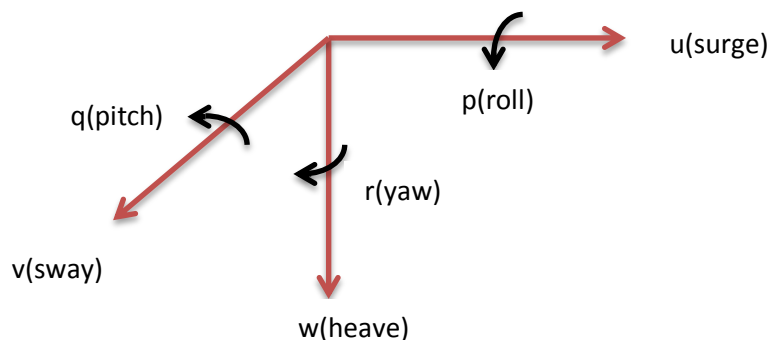
βάρους του οχήματος και ονομάζεται σωματόδετο σύστημα συντεταγμένων (body-fixed frame). Το άλλο είναι το σταθερό σύστημα (αδρανειακό).

Στην περίπτωση των θαλάσσιων οχημάτων, τα οποία γενικά κινούνται με χαμηλές ταχύτητες πλευσης, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η κίνηση της Γης επηρεάζει ελάχιστα έως και καθόλου την κίνηση τους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να κινούμαστε με βάση την παραδοχή ότι ένα σύστημα συντεταγμένων οπουδήποτε πάνω στην Γη μπορεί να θεωρηθεί ως αδρανειακό (earth-fixed frame). Μια τέτοια παραδοχή έχει σαν άμεση συνέπεια την απαίτηση η περιγραφή των κινηματικών μεγεθών του θαλάσσιου οχήματος να γίνεται ως εξής:

- Η θέση και ο προσανατολισμός να περιγράφονται ως προς το αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων,
- Ενώ οι ταχύτητες (γραμμικές και γωνιακές) ως προς το σωματόδετο σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 2.11: Σωματόδετο και αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων



Σχήμα 2.12: Ορισμός κινηματικών μεγεθών θαλάσσιων οχημάτων

Έτσι, η κίνηση των θαλάσσιων οχημάτων περιγράφεται από τα διανύσματα που συνοψίζονται παρακάτω:

$$\begin{aligned}
 \eta &= [\eta_1^T, \eta_2^T]^T; & \eta_1 &= [x, y, z]^T; & \eta_2 &= [\varphi, \theta, \psi]^T; \\
 v &= [v_1^T, v_2^T]^T; & v_1 &= [u, v, w]^T; & v_2 &= [p, q, r]^T; \\
 \tau &= [\tau_1^T, \tau_2^T]^T; & \tau_1 &= [X, Y, Z]^T; & \tau_2 &= [K, M, N]^T;
 \end{aligned}$$

Όπου:

- η το διάνυσμα θέσης και προσανατολισμού ως προς το αδρανειακό σύστημα,
- v το διάνυσμα των γραμμικών και γωνιακών ταχυτήτων ως προς το σωματόδετο σύστημα,
- και τ , το διάνυσμα των δυνάμεων και ροπών που ενεργούν στο όχημα, εκφρασμένες και αυτές στο σωματόδετο σύστημα συντεταγμένων.

Μετασχηματισμός Γραμμικής Ταχύτητας

Η τροχιά του οχήματος ως προς το αδρανειακό σύστημα αναφοράς προκύπτει από τον ακόλουθο μετασχηματισμό:

$$\dot{\eta}_1 = J_1(\eta_2)v_1 \quad \Rightarrow \quad v_1 = J_1^{-1}(\eta_2)\dot{\eta}_1 \quad (2.1)$$

Όπου $J_1(\eta_2)$ ο πίνακας μετασχηματισμού που σχετίζεται με τις γωνίες Euler και προκύπτει από τις τρεις διαδοχικές κύριες περιστροφές αξόνων (principal axis rotation), ως εξής:

- πρώτα στρέφεται ο άξονας z κατά γωνία ψ
- στη συνέχεια, ακολουθεί η περιστροφή του άξονα y κατά γωνία θ ,
- και τέλος η στροφή του άξονα x κατά γωνία φ

Αν θεωρήσουμε πως κάθε στροφή περιγράφεται και από ένα μητρώο $(C_{z,\psi}^T, C_{y,\theta}^T, C_{x,\varphi}^T)$ αντίστοιχα, τότε ισχύει:

$$J_1(\eta_2) = C_{z,\psi}^T C_{y,\theta}^T C_{x,\varphi}^T \quad (2.2)$$

Αντικαθιστώντας τα μητρώα περιστροφής στην παραπάνω σχέση, προκύπτει η τελική μορφή του πίνακα μετασχηματισμού:

$$J_1(\eta_2) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\varphi + c\psi s\theta s\varphi & s\psi s\varphi + c\psi c\varphi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\varphi + s\varphi s\theta s\psi & -c\psi s\varphi + s\theta s\psi c\varphi \\ -s\theta & c\theta s\varphi & c\theta c\varphi \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Σημειώνεται πως στην παραπάνω σχέση τα σύμβολα c και s αποτελούν συντομεύσεις για τις τριγωνομετρικές συναρτήσεις των συνημίτονου (cosine) και ημίτονου (sine) αντίστοιχα.

Μετασχηματισμός Γωνιακής Ταχύτητας

Σε αντιστοιχία με τον μετασχηματισμό της γραμμικής ταχύτητας, ο αντίστοιχος για την γωνιακή γίνεται σύμφωνα με την σχέση:

$$\dot{\eta}_2 = J_2(\eta_2)v_2 \quad (2.4)$$

όπου το μητρώο $J_2(\eta_2)$ ισούται με:

$$J_2(\eta_2) = \begin{bmatrix} 1 & s\varphi t\theta & c\varphi t\theta \\ 0 & c\varphi & -s\varphi \\ 0 & \frac{s\varphi}{c\theta} & \frac{c\varphi}{c\theta} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

όπου το σύμβολο t συμβολίζει την εφαπτομένη (tangent). Επίσης, σημειώνεται πως με τον τρόπο που έχουν οριστεί τα εμπλεκόμενα μεγέθη, το διάνυσμα της γωνιακής ταχύτητας δεν μπορεί να ολοκληρωθεί απευθείας ώστε να προκύψει το διάνυσμα προσανατολισμού, καθώς η ποσότητα $\int_0^t v_2(\tau) d\tau$ δεν αποτελεί μέγεθος με κάποια φυσική σημασία. Παρόλα αυτά, το διάνυσμα $\eta_2 = [\varphi, \theta, \psi]^T$ αναπαριστά κατάλληλα γενικευμένες συντεταγμένες. Επιπλέον, για $\theta = \pm 90^\circ$, το παραπάνω μητρώο δεν ορίζεται. Συνεπώς ισχύει ότι $J_2^{-1}(\eta_2) \neq J_2^T(\eta_2)$.

Συνοπτικά λοιπόν, η κινηματική ανάλυση κατά Euler περιγράφεται από την ακόλουθη μητρική εξίσωση:

$$\begin{bmatrix} \dot{\eta}_1 \\ \dot{\eta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1(\eta_2) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & J_2(\eta_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

2.2.2.2: Κινηματικό μοντέλο του LBV-150

Όπως έχει αναφερθεί και πριν, το όχημα υπό μελέτη έχει 4 βαθμούς ελευθερίας (surge, sway, heave, yaw). Με βάση αυτό λοιπόν, το παραπάνω γενικευμένο κινηματικό μοντέλο μπορεί να απλοποιηθεί ώστε να προσαρμοστεί στην περίπτωση μας.

Ξεκινώντας από την σχέση (2.6), για να αρχίσει ο προσδιορισμός του κινηματικού μοντέλου του ROV, καταρχήν αμελούμε τις γραμμές και τις στήλες που αναφέρονται στους βαθμούς ελευθερίας που δεν έχει το όχημα μας, δηλαδή τις γραμμές και στήλες υπ' αριθμόν 4 (roll-περιστροφή κατά τον άξονα x) και 5 (pitch-περιστροφή κατά τον άξονα y). Παρατηρούμε πως στα επιμέρους στοιχεία που έχουν απομείνει στην μητρική εξίσωση, συνεχίζουν να υπάρχουν μεγέθη που να σχετίζονται με αυτούς τους βαθμούς ελευθερίας. Έτσι λοιπόν, χωρίς σφάλμα, θεωρούμε $\varphi = \theta = 0$, κάτι το οποίο εξασφαλίζεται από την εκ κατασκευής ιδιότητα του LBV να έχει ουδέτερη πλευστότητα (neutrally buoyant), η οποία τείνει να το επαναφέρει στην επιφάνεια όταν αφήνεται ελεύθερο (χωρίς δικό μας έλεγχο επ' αυτού) διατηρώντας σταθερά και μηδενικά roll και pitch κατά την διάρκεια οποιασδήποτε κίνησης επιτρέπει. Έτσι, προκύπτει το ακόλουθο κινηματικό μοντέλο:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= u \cos(\psi) - v \sin(\psi) \\ \dot{y} &= u \sin(\psi) + v \cos(\psi) \\ \dot{z} &= w \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \quad (2.7)$$

όπου:

- u η γραμμική ταχύτητα στον άξονα x του τοπικού σ.σ.
- v η γραμμική ταχύτητα στον άξονα y του τοπικού σ.σ.
- ψ η γωνία στροφής περί τον άξονα z του αδρανειακού σ.σ.
- r η γωνία στροφής ως προς τον ίδιο άξονα
- x, y, z η θέση του ROV στους αντίστοιχους άξονες του αδρανειακού σ.σ.

2.2.2.3: Δυναμικό μοντέλο θαλάσσιων οχημάτων

Η δυναμική ανάλυση των θαλάσσιων οχημάτων χωρίζεται σε δύο κομμάτια, την δυναμική του στερεού σώματος (Rigid-body dynamics) και την ανάλυση των υδροδυναμικών φαινομένων που παρουσιάζονται κατά την κίνηση του οχήματος, που στην δική μας περίπτωση, μιλάμε για υδροδυναμικές δυνάμεις και ροπές (Hydrodynamic forces and moments). Και στα δύο αυτά σκέλη, για την εξαγωγή των εξισώσεων, χρησιμοποιείται η προσέγγιση των Νεύτονα και Euler (Newton-Euler approach). Γενικά, οι γενικευμένες εξισώσεις κίνησης ενός οχήματος 6 βαθμών ελευθερίας συνοψίζονται στην παρακάτω μητρική εξίσωση:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (2.8)$$

όπου:

- M : μητρώο που περιλαμβάνει τους όρους αδράνειας
- $C(v)$: μητρώο που περιλαμβάνει όρους Coriolis και κεντρομόλου
- $D(v)$: μητρώο που περιλαμβάνει όρους απόσβεσης της κίνησης
- $g(\eta)$: μητρώο που περιλαμβάνει δυνάμεις και ροπές λόγω βαρύτητας
- τ : στήλη που περιλαμβάνει τις εισόδους ελέγχου στο σύστημα (control inputs)

Εξισώσεις κίνησης στερεού σώματος για 6 βαθμούς ελευθερίας

Οι εξισώσεις γράφονται με χρήση συμβόλων που ακολουθούν την σημειογραφία που παρουσιάστηκε παραπάνω. Σύμφωνα λοιπόν με την Νευτόνια ανάλυση που ξεφεύγει από τα όρια αυτής της εργασίας, οι εξισώσεις κίνησης στερεού σώματος είναι οι εξής:

$$X = m \left[\dot{u} - vr + wq - x_G (q^2 + r^2) + y_G (pq - \dot{r}) + z_G (pr + \dot{q}) \right]$$

$$Y = m \left[\dot{v} - wp + ur - y_G (r^2 + p^2) + z_G (qr - \dot{p}) + x_G (qp + \dot{r}) \right]$$

$$Z = m \left[\dot{w} - uq + vp - z_G (p^2 + q^2) + x_G (rp - \dot{q}) + y_G (rq + \dot{p}) \right]$$

$$\begin{aligned}
K &= I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr - (\dot{r} + pq)I_{xz} + (r^2 - q^2)I_{yz} + (pr - q)I_{xy} \\
&\quad + m \left[y_G (\dot{w} - uq + vp) - z_G (\dot{v} - wp - ur) \right] \\
M &= I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp - (\dot{p} + qr)I_{xy} + (p^2 - r^2)I_{zx} + (qp - \dot{r})I_{yz} \\
&\quad + m \left[z_G (\dot{u} - vr + wq) - x_G (\dot{w} - uq + vp) \right] \\
N &= I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq - (\dot{q} + rp)I_{yz} + (q^2 - p^2)I_{xy} + (rq - \dot{p})I_{zx} \\
&\quad + m \left[x_G (\dot{v} - wp + ur) - y_G (\dot{u} - vr + wq) \right]
\end{aligned} \tag{2.9}$$

όπου $r_G = [x_G, y_G, z_G]^T$ οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους του οχήματος αναφορικά με το σωματόδετο σύστημα συντεταγμένων. Μια συνήθης πρακτική, που απλοποιεί κατά πολύ την μορφή των παραπάνω εξισώσεων, είναι να λαμβάνεται η αρχή των αξόνων του σωματόδετου σ.σ. έτσι ώστε να συμπίπτει με το κέντρο βάρους του οχήματος, πράγμα που σημαίνει ότι $r_G = [0, 0, 0]^T$. Επιπλέον, οι άξονες του σωματόδετου σ.σ. λαμβάνονται με τέτοιο τρόπο ώστε να συμπίπτουν με τους κύριους άξονες αδράνειας (principal axis of inertia). Έτσι, οι εξισώσεις (2.9) απλοποιούνται περαιτέρω, καθώς κάτι τέτοιο συνεπάγεται ότι τα μη διαγώνια στοιχεία του πίνακα I που περιέχει τις ροπές αδράνειας είναι μηδενικά, ή αλλιώς, $I = \text{diag}(I_x, I_y, I_z)$.

Δυνάμεις και ροπές εξαιτίας υδροδυναμικών φαινομένων

Για την εξαγωγή των εξισώσεων που αφορούν τις δυνάμεις και ροπές εξαιτίας υδροδυναμικών φαινομένων, θεωρούμε 2 υπό-προβλήματα. Οι εξισώσεις θα προκύψουν από την υπέρθεση των συμπερασμάτων που θα λάβουμε από τα υπό-προβλήματα αυτά. Έτσι είναι:

- Υποπρόβλημα 1: Δυνάμεις που προκαλούνται από ακτινοβολία (radiation-induced forces)
- Υποπρόβλημα 2: Δυνάμεις Froude-Kriloff και λόγω διάθλασης (Froude-Kriloff and diffraction forces)

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε μόνο με το πρόβλημα 1. Η έννοια των δυνάμεων λόγω ακτινοβολίας περιλαμβάνει τρία βασικά συστατικά:

- Φαινόμενα προστιθέμενης μάζας νερού, λόγω της αδράνειας του υγρού που περιβάλλει το όχημα. (added-mass terms)
- Δυνητική απόσβεση που προκαλείται από ακτινοβολία λόγω της ενέργειας που μεταφέρουν τα κύματα που δημιουργούνται στην επιφάνεια.
- Δυνάμεις επαναφοράς, όπως αυτές έχουν ορισθεί στην αρχή του Αρχιμήδη (βάρος και άνωση δηλαδή). (restoring forces)

Πέρα από το φαινόμενο απόσβεσης που περιγράφηκε παραπάνω, πρέπει να λάβουμε υπόψιν και άλλα παρόμοια φαινόμενα που εμφανίζονται κατά την κίνηση του οχήματος κάτω από το νερό, όπως η εμφάνιση τριβών και η επιρροή σε περίπτωση όπου υπάρχουν δίνες.

Μαθηματικά, τα παραπάνω συνοψίζονται ως εξής:

$$\tau_H = -M_A \dot{v} - C_A(v)v - D(v)v - g(\eta) \quad (2.10)$$

όπου:

- $-M_A, -C_A(v)$ τα μητρώα αδράνειας και Coriolis αντίστοιχα εξαιτίας του φαινομένου της προστιθέμενης μάζας νερού
- $D(v)$ το μητρώο που περιλαμβάνει όλους τους όρους από τα φαινόμενα απόσβεσης
- $g(\eta)$ το μητρώο που περιλαμβάνει τους όρους δυνάμεων επαναφοράς.

Όροι προστιθέμενης μάζας νερού

Για την εξαγωγή της ακριβούς μορφής των δύο μητρώων, χρησιμοποιήθηκε ενεργειακή προσέγγιση με εξισώσεις Kirchhoff. Η τελική μορφή των μητρώων είναι η εξής:

$$M_A = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & X_{\dot{v}} & X_{\dot{w}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{u}} & Y_{\dot{v}} & Y_{\dot{w}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{u}} & Z_{\dot{v}} & Z_{\dot{w}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{u}} & K_{\dot{v}} & K_{\dot{w}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{u}} & M_{\dot{v}} & M_{\dot{w}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{u}} & N_{\dot{v}} & N_{\dot{w}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

όπου $X_{\dot{u}} = \frac{\partial X}{\partial \dot{u}}$, και κατ'επέκταση ανάλογα προκύπτουν και οι άλλοι όροι,

και

$$C_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_3 & 0 & -a_1 \\ 0 & 0 & 0 & -a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & -a_3 & a_2 & 0 & -b_3 & b_2 \\ a_3 & 0 & -a_1 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 & 0 & -b_2 & b_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

όπου:

$$a_1 = X_{\dot{u}}u + X_{\dot{v}}v + X_{\dot{w}}w + X_{\dot{p}}p + X_{\dot{q}}q + X_{\dot{r}}r$$

$$a_2 = X_{\dot{v}}u + Y_{\dot{v}}v + Y_{\dot{w}}w + Y_{\dot{p}}p + Y_{\dot{q}}q + Y_{\dot{r}}r$$

$$a_3 = X_{\dot{w}}u + Y_{\dot{w}}v + Z_{\dot{w}}w + Z_{\dot{p}}p + Z_{\dot{q}}q + Z_{\dot{r}}r$$

$$b_1 = X_{\dot{p}}u + Y_{\dot{p}}v + Z_{\dot{p}}w + K_{\dot{p}}p + K_{\dot{q}}q + K_{\dot{r}}r$$

$$b_2 = X_{\dot{q}}u + Y_{\dot{q}}v + Z_{\dot{q}}w + K_{\dot{q}}p + M_{\dot{q}}q + M_{\dot{r}}r$$

$$b_3 = X_{\dot{r}}u + Y_{\dot{r}}v + Z_{\dot{r}}w + K_{\dot{r}}p + M_{\dot{r}}q + K_{\dot{r}}r$$

Στην περίπτωση των οχημάτων που βρίσκονται ολόκληρα κάτω από το νερό (fully-submerged vehicles), η κίνηση με υψηλές ταχύτητες είναι ιδιαίτερα μη-γραμμική και συζευγμένη, που σημαίνει ότι ο κάθε βαθμός ελευθερίας δεν είναι ανεξάρτητος από τους άλλους. Δηλαδή, μια τυχούσα κίνηση σε έναν βαθμό ελευθερίας, ενδεχομένως να συνεπάγεται και μια μετατόπιση-κίνηση σε κάποιον από τους άλλους, χωρίς ωστόσο αυτό να διατάσσεται στο πλαίσιο ελέγχου που ασκείται εκείνη την στιγμή στο όχημα. Όμως, είναι σύνηθες τα υποβρύχια οχήματα αυτού του είδους που εξετάζουμε να κινούνται σε χαμηλές ταχύτητες. Έτσι, οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να πάρουν την, κατά πολύ απλούστερη, παρακάτω μορφή:

$$M_A = -\text{diag} \{ X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{w}}, K_{\dot{p}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{r}} \} \quad (2.13)$$

$$C_A(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v \\ 0 & 0 & 0 & Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u \\ 0 & 0 & 0 & -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 \\ 0 & -Z_{\dot{w}}w & Y_{\dot{v}}v & 0 & -N_{\dot{r}}r & M_{\dot{q}}q \\ Z_{\dot{w}}w & 0 & -X_{\dot{u}}u & N_{\dot{r}}r & 0 & -K_{\dot{p}}p \\ -Y_{\dot{v}}v & X_{\dot{u}}u & 0 & -M_{\dot{q}}q & K_{\dot{p}}p & 0 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Για να είναι πλήρως αιτιολογημένη η χρήση των παραπάνω τύπων, υπάρχει και η επιπλέον απαίτηση το όχημα να είναι συμμετρικό και στα 3 επίπεδα συμμετρίας. Σε κάθε περίπτωση όμως, μιας και αυτή η τριπλη συμμετρία είναι σπάνιο κατασκευαστικά φαινόμενο, η διαγώνια αυτή μορφή είναι αρκετά ελκυστική στους

ερευνητές, καθώς τα μη-διαγώνια στοιχεία της πλήρους μορφής που παρουσιάστηκε πιο πάνω είναι δύσκολο να υπολογιστούν τόσο πειραματικά, όσο και θεωρητικά. Γενικά πάντως, στις πρακτικές εφαρμογές η διαγώνια μορφή έχει αποδειχθεί να είναι κάτι παραπάνω από επαρκής, και αυτό γιατί οι τιμές των μη-διαγώνιων στοιχείων είναι, στις περισσότερες περιπτώσεις, πολύ μικρότερες από αυτές των διαγώνιων.

Όροι λόγω φαινομένων απόσβεσης

Τα φαινόμενα απόσβεσης που περιγράφηκαν παραπάνω, εισάγουν όρους διαφόρων και υψηλών τάξεων στο δυναμικό μοντέλο, που στις πρακτικές εφαρμογές είναι αρκετά δύσκολο να υπολογιστούν. Έτσι προέκυψε η ανάγκη για την ακόλουθη παραδοχή. Οι αποσβέσεις έχουν τις ίδιες ιδιότητες με την κίνηση του οχήματος. Δηλαδή, όταν το όχημα κινείται με μεγάλες ταχύτητες λαμβάνουν μη-γραμμική και συζευγμένη μορφή, φαινόμενο το οποίο περιορίζεται όταν οι ταχύτητες γίνουν μικρές. Μία πρόχειρη προσέγγιση είναι να θεωρήσουμε μια διαγώνια μορφή του μητρώου D , κρατώντας μόνο τους γραμμικούς και τους τετραγωνικούς ($2^{ης}$ τάξης) όρους. Έτσι, έχουμε ότι:

$$D(v) = -\text{diag} \{ X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r \} - \text{diag} \{ X_{u|u}|u|, Y_{v|v}|v|, Z_{w|w}|w|, K_{p|p}|p|, M_{q|q}|q|, N_{r|r}|r| \} \quad (2.15)$$

Δυνάμεις και ροπές λόγω φαινομένων επαναφοράς

Όπως έχει αναφερθεί, σε αυτό το κομμάτι εξετάζουμε την επιρροή του βάρους και της άνωσης. Μαθηματικά, ορίζονται ως εξής:

- $W = mg$ ασκούμενο στο κέντρο βάρους με συντεταγμένες $r_G = [x_G, y_G, z_G]^T$
- $B = \rho g \nabla$ ασκούμενη στο κέντρο άνωσης με συντεταγμένες $r_B = [x_B, y_B, z_B]^T$

Με εφαρμογή του $2^{ου}$ νόμου του Νεύτωνα, και μεταφορά των διανυσμάτων των δυνάμεων στην αρχή των αξόνων του σωματόδετου συστήματος συντεταγμένων, προκύπτουν τα εξής:

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} (W - B)s\theta \\ -(W - B)c\theta s\varphi \\ -(W - B)c\theta c\varphi \\ -(y_G W - y_B B)c\theta c\varphi + (z_G W - z_B B)c\theta s\varphi \\ (z_G W - z_B B)s\theta + (x_G W - x_B B)c\theta c\varphi \\ -(x_G W - x_B B)c\theta s\varphi - (y_G W - y_B B)Bs\theta \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Πλέον, που γνωρίζουμε την μορφή όλων των επιμέρους μητρώων του δυναμικού μοντέλου μας, επιστρέφοντας στην εξίσωση (2.8) μπορούμε να επανορίσουμε με μεγαλύτερη σαφήνεια τα μεγέθη που εμφανίζονται σε αυτήν. Έτσι, έχουμε:

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau$$

$$M = M_{RB} + M_A \quad , \quad C(v) = C_{RB}(v) + C_A(v) \quad (2.17)$$

2.2.2.4: Δυναμικό μοντέλο LBV-150

Το συγκεκριμένο όχημα έχει ενεργοποιητές για τα surge, sway, heave, yaw. Έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε τα roll και pitch αμελητέα, λόγω της μη ύπαρξης ενεργοποιητών αλλά και ιδιότητας της ουδέτερης πλευστότητας του εν λόγω οχήματος. Κατά συνέπεια είναι:

$$\varphi = \theta = p = q = 0$$

$$v = [u \ v \ w \ r]^T$$

Επιπλέον, πάλι εξαιτίας της ιδιότητας της ουδέτερης πλευστότητας του υποβρυχίου, και με την παραδοχή ότι τα κέντρα βάρους και άνωσης συμπίπτουν, μπορούμε να αμελήσουμε τους όρους επαναφοράς από το μοντέλο.

Τέλος, όσον αφορά τη συμμετρία του υποβρυχίου, αυτό είναι συμμετρικό στο επίπεδο x-z και περίπου συμμετρικό στο επίπεδο x-y. Έτσι, θεωρούμε ότι οι κινήσεις surge, sway και heave είναι αποσυνδεδεμένες εξαιτίας της x-z συμμετρίας. Επιπλέον, μιας και θα κινούμε το όχημα σε χαμηλές ταχύτητες, θεωρούμε ότι ο βαθμός ελευθερίας heave είναι αποσυνδεδεμένος από τα roll και pitch (επίπεδο x-y). Παρόλαυτα, παρατήρηση της κίνησης του οχήματος στην πισίνα έδειξε ότι η σύζευξη των βαθμών ελευθερίας surge, sway και yaw δεν μπορεί να αμεληθεί. Έτσι, με τις παραπάνω παραδοχές, και διαγράφοντας από τις πλήρεις μορφές των μητρώων τις 4^{ες} και 5^{ες} γραμμές και στήλες, όπως στην κινηματική ανάλυση, προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$\begin{aligned}
X &= (m - X_{\dot{u}})\dot{u} + (Y_{\dot{v}} - m)rv - X_u u - X_{u|u}|u| \\
Y &= (m - Y_{\dot{v}})\dot{v} + (m - X_{\dot{u}})ur - Y_v v - Y_{v|v}|v| \\
Z &= (m - Z_{\dot{w}})\dot{w} - Z_w w - Z_{w|w}|w| \\
N &= (I_z - N_{\dot{r}})\dot{r} + (X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}})uv - N_r r - N_{r|r}|r|
\end{aligned} \tag{2.18}$$

Κεφάλαιο 3

Τεχνική επίλυση του προβλήματος

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει παράθεση των μεθοδολογιών που οδήγησαν στην επίλυση του προβλήματος.

3.1: Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Πριν ξεκινήσει η πειραματική διαδικασία, υπάρχουν δύο παράγοντες που πρέπει να καθοριστούν και οι οποίοι επηρεάζουν σημαντικά την επιλογή του τρόπου με τον οποίο θα διεξαχθούν τα πειράματα.

Πρώτον, το αν θα αναγνωρίσουμε κάθε βαθμό ελευθερίας του οχήματος ξεχωριστά από τους άλλους ή συνδυαστικά μεταξύ τους. Πρακτικά, αυτό σημαίνει πως πρέπει να αποφασίσουμε το αν το όχημα θα κινείται κατά την διάρκεια των πειραμάτων σε κάθε άξονα ξεχωριστά, ή αν θα υπάρξουν και σύνθετες κινήσεις. Η δεύτερη περίπτωση είναι σαφές ότι είναι περισσότερο περίπλοκη από την πρώτη, μιάς και τα φαινόμενα σύζευξης (coupling) μεταξύ των εμπλεκόμενων στην κίνηση βαθμών ελευθερίας θα είναι πιο έντονα, αλλά και επειδή τέτοιου είδους πειράματα απαιτούν περισσότερο χώρο κίνησης διαθέσιμο για το υποβρύχιο, δηλαδή μεγαλύτερο μέγεθος πισίνας. Το περιορισμένο μέγεθος της πισίνας στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου και το γεγονός ότι κινούμαστε με χαμηλές ταχύτητες, οδήγησαν στην επιλογή του πρώτου τρόπου.

Δεύτερον, πρέπει να καθοριστεί το αν ο αλγόριθμος αναγνώρισης συστήματος θα τρέχει παράλληλα με την διεξαγωγή των πειραμάτων (online), ή κατόπιν αφού έχουμε συλλέξει τις απαραίτητες πληροφορίες από το πείραμα (offline). Γενικά, οι μεθοδολογίες για offline αναγνώριση συστημάτων είναι περισσότερο ευέλικτες και στηρίζονται σε επαναληπτικές μεθόδους οι οποίες εκμεταλλεύονται το πλεονέκτημα του να έχεις ένα σύνολο απο δεδομένα έτοιμα για επεξεργασία. Από την άλλη, οι online μεθοδολογίες λειτουργούν με βάση την ανάκτηση πληροφοριών παράλληλα με την διεξαγωγή του πειράματος, όποτε αυτές είναι διαθέσιμες, πράγμα που σημαίνει ότι ο χρονισμός του συστήματος που μελετάται είναι πολύ σημαντικός σε αυτή την περίπτωση. Στην δική μας περίπτωση, χρησιμοποιήθηκε τόσο μια offline τεχνική όσο και μια τροποποιημένη online, που αποδείχθηκε ανώτερη της προηγούμενης (βλ. παρακάτω).

Έχοντας καθορίσει τα παραπάνω, μπορούμε να προχωρήσουμε στον σχεδιασμό του πειράματος, που περιλαμβάνει τον καθορισμό τόσο των κινήσεων που θα γίνουν στην πισίνα όσο και τα μεγέθη που θα επιλέξουμε να μετράνε οι αισθητήρες μας. Και τα δύο αποτελούν συνάρτηση του μαθηματικού μοντέλου του υποβρυχίου που εξάγαμε στο κεφάλαιο 2. Παρατηρώντας προσεκτικά την εξίσωση (2.18), η οποία παρατίθεται παρακάτω για ευκολία,

$$X = (m - X_{\dot{u}}) \dot{u} + (Y_{\dot{v}} - m) rv - X_u u - X_{|u|} u |u|$$

$$Y = (m - Y_{\dot{v}}) \dot{v} + (m - X_{\dot{u}}) ur - Y_v v - Y_{|v|} v |v|$$

$$Z = (m - Z_{\dot{w}}) \dot{w} - Z_w w - Z_{|w|} w |w|$$

$$N = (I_z - N_{\dot{r}}) \dot{r} + (X_{\dot{u}} - Y_{\dot{v}}) uv - N_r r - N_{|r|} r |r|$$

παρατηρούμε ότι στο μοντέλο περιλαμβάνονται όροι επιτάχυνσεις και ταχύτητας. Είναι συνήθης πρακτική των μελετητών να διεξάγουν δύο διαφορετικών ειδών πειράματα όσον αφορά στην διέγερση του συστήματος (system excitation):

- Σε πρώτη φάση, διεξάγονται πειράματα διατηρώντας την ταχύτητα στον άξονα που μας ενδιαφέρει σταθερή και σε χαμηλά επίπεδα. Σε αυτή την περίπτωση οι όροι μάζας μπορούν να αμεληθούν, μιας και για σταθερή ταχύτητα συνεπάγεται ότι η επιτάχυνση είναι μηδενική. Ένα τέτοιο πείραμα θα οδηγήσει στον προσδιορισμό των όρων απόσβεσης.
- Διεξαγωγή πειραμάτων με μεταβαλλόμενες ταχύτητες για τον προσδιορισμό των υπολειπόμενων όρων μάζας. Αυτή η προσέγγιση όμως είναι χρονοβόρα, καθώς απαιτεί διπλά πειράματα. Στην δική μας περίπτωση, επιλέξαμε να διεγείρουμε το σύστημα μας ημιτονοειδώς (ημιτονοειδή σήματα ελέγχου), ώστε να συμπυκνώσουμε τις δύο παραπάνω πρακτικές σε μια. Η συχνότητα και το πλάτος των ημιτόνων διατηρήθηκε σταθερό κατά την διάρκεια των πειραμάτων για κάθε άξονα, και σε τέτοια ένταση ώστε οι αισθητήρες μέτρησης να μπορούν να ακολουθούν την κίνηση του υποβρυχίου και να μετρούν αξιόπιστα.

Όσον αφορά στα μετρούμενα μεγέθη, οι αισθητήρες που είχαμε διαθέσιμους παρέχουν απευθείας τα παρακάτω:

$$\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, r$$

Όμως εμείς χρειαζόμαστε επιπλέον τις 3 υπολειπόμενες ταχύτητες και μια επιτάχυνση, δηλαδή τα:

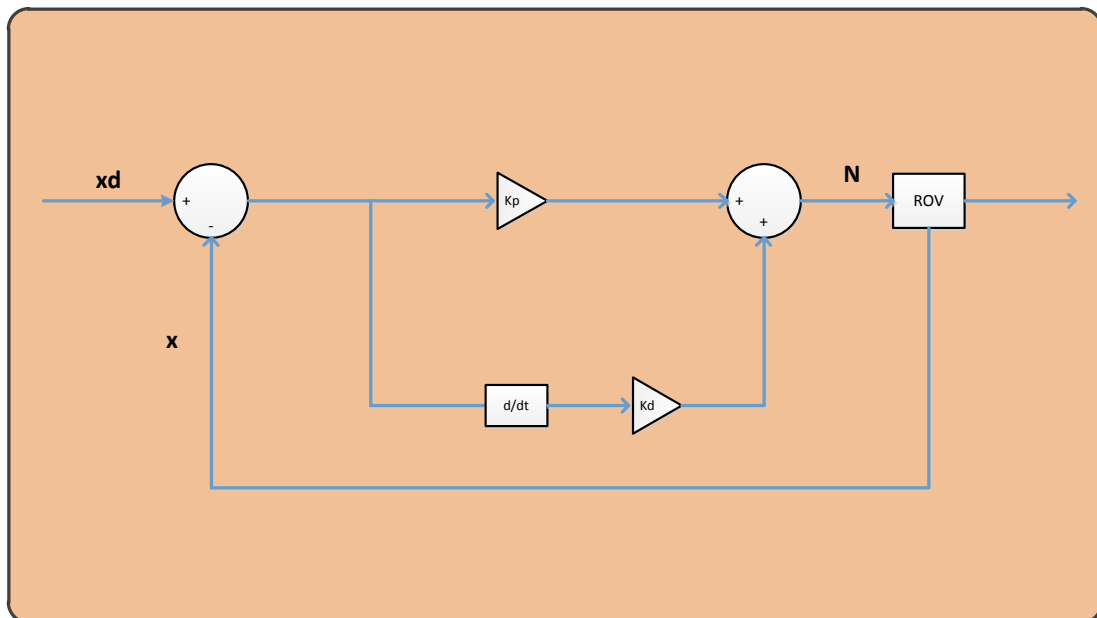
$$u, v, w, \dot{r}$$

Για τον προσδιορισμό αυτών των μεγεθών, δεν υπάρχει άλλη επιλογή (με τον παρόντα εξοπλισμό) από την χρήση τεχνικών εκτίμησης κατάστασης (state estimation). Υλοποιήθηκε μια τεχνική Unscented Kalman Filtering για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, που θα περιγραφεί στην συνέχεια.

Διεξαγωγή προκαταρκτικών πειραμάτων (πισίνα Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου)

Συνοψίζοντας τα συμπεράσματα από πριν, καταλήξαμε στο ότι θα διεγείρουμε το σύστημα μας σε έναν βαθμό ελευθερίας κάθε φορά, και πως τα σήματα ελέγχου (inputs) που θα στέλνουμε θα έχουν ημιτονοειδή μορφή.

Όμως, όπως έχει ήδη αναφερθεί πιο πριν, υπάρχουν φαινόμενα coupling που επηρεάζουν τις κινήσεις surge, sway και yaw. Αυτό σημαίνει πως αν στείλουμε σήμα στο υποβρύχιο για να κινηθεί αποκλειστικά σε έναν από τους παραπάνω άξονες, η κίνηση του αυτή θα συνεπάγεται και μετατόπιση-στροφή(yaw) ως προς τους υπόλοιπους. Είναι ένα φαινόμενο που οφείλεται στην φύση του υποβρυχίου και δεν μπορεί να εξαλειφθεί ή να περιοριστεί παρά μόνον με κάποιου είδους νόμο ελέγχου στην κίνηση του. Για αυτόν τον λόγο, υλοποιήθηκε έλεγχος αναλογικού-διαφορικού τύπου (PD-Controller). Το δομικό διάγραμμα ενός τέτοιου τύπου ελεγκτή φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 3.1: Δομικό διάγραμμα ελεγκτή αναλογικού-διαφορικού τύπου (PD)

Η μαθηματική εξίσωση ενός τέτοιου ελεγκτή είναι η παρακάτω:

$$N = K_p e + K_d \dot{e} \quad (3.1)$$
$$e = x_d - x$$

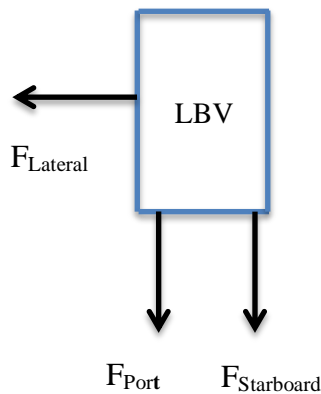
Τα μεγέθη που παρουσιάζονται στη παραπάνω εξίσωση ορίζονται ως εξής:

- x_d : Είναι το μέγεθος εκείνο που εκδηλώνει την επιθυμία μας, π.χ. αν μιλάμε για έλεγχο θέσης (όπως στις δικές μας περιπτώσεις, που θα φανεί παρακάτω),

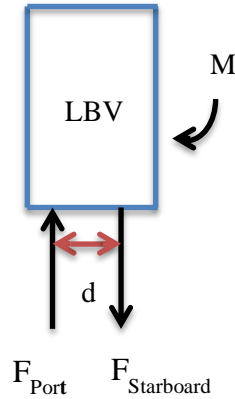
αποτελεί την θέση στην οποία επιθυμούμε να διατηρηθεί το όχημα υπό την επήρεια του ελεγκτή.

- x : Είναι το μέγεθος που προκύπτει ως ανάδραση του συστήματος και συγκρίνεται σε κάθε κύκλο με το επιθυμητό, ώστε να προσδιοριστεί η διαφορά τους, και να καθοριστεί το σφάλμα θέσης e . Προφανώς, όσο μικρότερο το σφάλμα τόσο πιο κοντά στο επιθυμητό βρισκόμαστε.
- K_p, K_d : Πρόκειται για τα λεγόμενα κέρδη του ελεγκτή (tuning gains). Είναι σταθερές που επηρεάζουν πόσο γρήγορα και ομαλά θα γίνει η σύγκλιση του σφάλματος e όσο πιο κοντά στο 0 γίνεται. Πιο συγκεκριμένα, το p κέρδος (proportional) καθορίζει το πόσο γρήγορος (aggressive) θα είναι ο ελεγκτής, ενώ το κέρδος d (derivative) λειτουργεί σαν αντισταθμιστής των ταλαντώσεων του συστήματος. Όσο μεγαλώνει το κέρδος p , πρέπει να μεγαλώνει αντίστοιχα, σε μικρότερη κλίμακα βέβαια, και το κέρδος d ώστε η προσέγγιση του επιθυμητού σημείου να γίνεται όσο πιο ομαλά γίνεται.
- N : Πρόκειται για την έξοδο του ελεγκτή, και εκφράζει μεγέθη όπως δυνάμεις, ροπές, τάσεις, οι οποίες με την σειρά τους θα αποτελέσουν είσοδο στο σύστημα που μελετάται αναμένοντας κάποιο είδος επίδρασης σε αυτό. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η εξαγωγή του σήματος x , όπως αυτό έχει οριστεί πιο πάνω.

Για τις ανάγκες των πειραμάτων, υλοποιήθηκαν ελεγκτές για τις κινήσεις surge, sway, και yaw. Σχηματικά, αυτοί φαίνονται στα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση δυνάμεων αντισταθμισμού φαινομένων coupling μέσω PD-ελέγχου για τις κινήσεις στο επίπεδο x-y



Σχήμα 3.3: Σχηματική αναπαράσταση ροπής αντιστάθμισης coupling μέσω PD-ελέγχου για φαινόμενα περιστροφής περί τον άξονα z

Οι εξισώσεις από τις οποίες θα προκύψουν οι δυνάμεις και οι ροπές και έπειτα, από αυτές τα σήματα ελέγχου που θα σταλούν στο LBV φαίνονται συνοπτικά παρακάτω:

Ελεγκτής θέσης στον άξονα x

Στην περίπτωση αυτή επιθυμούμε να διατηρηθεί το όχημα ‘καρφωμένο’ σε μια συγκεκριμένη συντεταγμένη στον άξονα x. Πριν την εκκίνηση του υποβρυχίου, λαμβάνεται μια προκαταρκτική μέτρηση, ώστε να ληφθεί σαν σημείο αναφοράς το σημείο εκκίνησης του, x_D . Οι εξισώσεις έχουν ως εξής:

$$\begin{aligned} X &= -F_{Port} - F_{Starboard} \\ F_{Port} &= F_{Starboard} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Εφαρμόζοντας τον έλεγχο, λαμβάνουμε:

$$\begin{aligned} X &= K_p (x_D - x) + K_d (\dot{x}_D - \dot{x}) \\ x_D &= const \Rightarrow \dot{x}_D = 0 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Οπότε προκύπτει:

$$F_{Port} = F_{Starboard} = -\frac{X}{2} \quad (3.4)$$

Για να υπολογιστεί το σήμα ελέγχου, κινούμαστε βάση της παραδοχής ότι η δύναμη που παράγεται από έναν κινητήρα είναι συνάρτηση ενός κέρδους και του τετραγώνου των rpm με τα οποία περιστρέφεται, δηλαδή:

$$F = kn |n| \quad (3.5)$$

Έπειτα από επικοινωνία με τους μηχανικούς της κατασκευαστικής εταιρίας, μάθαμε ότι το σήμα ελέγχου που στέλνει ο χρήστης στο όχημα μέσω H/Y, μετατρέπεται μέσω μιας γραμμικής συνάρτησης στα rpm στα οποία αυτό αντιστοιχεί. Συνεπώς, συμπυκνώνοντας όλα τα κέρδη σε έναν όρο, έχουμε τελικά:

$$F = (gain_x)(control_input)(|control_input|)$$

$$control_input = \begin{cases} -\sqrt{\frac{F}{gain_x}}, & F < 0 \\ \sqrt{\frac{F}{gain_x}}, & F \geq 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

$$control_input_{Port} = control_input_{Starboard}$$

Στην συνέχεια, για ευκολία, για την έκφραση των κερδών θα χρησιμοποιείται το γράμμα k και για τα control inputs το γράμμα n, συνοδευόμενα από δείκτες ανάλογα με τους άξονες στους οποίους αναφέρονται.

Ελεγκτής θέσης στον άξονα y

Σε αυτή την περίπτωση, επιθυμούμε να διατηρηθεί σταθερή η συντεταγμένη y του οχήματος. Όπως και προηγουμένως, λαμβάνουμε μια προκαταρκτική μέτρηση ώστε να λάβουμε σαν σημείο αναφοράς το σημείο εκκίνησης, y_D . Οι εξισώσεις είναι ως εξής:

$$Y = -F_{Lateral} \quad (3.7)$$

Εφαρμόζοντας τον PD-έλεγχο, έχουμε:

$$Y = K_p (y_D - y) + K_d (\dot{y}_D - \dot{y})$$

$$y_D = const \Rightarrow \dot{y}_D = 0 \quad (3.8)$$

και αντίστοιχα με πριν, τα σήματα ελέγχου προκύπτουν ως εξής:

$$F_y = k_y n_y |n_y|$$

$$n_y = \begin{cases} -\sqrt{\frac{F_y}{k_y}}, & F_y < 0 \\ \sqrt{\frac{F_y}{k_y}}, & F_y \geq 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

Ελεγκτής για την περιστροφή γύρω από τον άξονα z

Τα ίδια με πριν ισχύουν και σε αυτή την περίπτωση, με μια μικρή παραλλαγή. Σε αυτή την περίπτωση, δεν απαιτείται προκαταρκτική μέτρηση, καθώς από την τοποθέτηση των συστημάτων αξόνων γνωρίζουμε εκ των προτέρων σε ποιές μοίρες πρέπει να παραμείνει ο προσανατολισμός του υποβρυχίου για τις ανάγκες των πειραμάτων, συγκεκριμένα στις -90° . Οι εξισώσεις είναι ως εξής:

$$M = F_{Port} d$$

$$F_{Port} = -F_{Starboard} \quad (3.10)$$

Εφαρμόζοντας τον νόμο ελέγχου, έχουμε:

$$M = K_p \left(-\frac{\pi}{2} - Azimuth \right) + K_d \left(-\frac{d}{dt} Azimuth \right) \quad (3.11)$$

Και αντίστοιχα με πριν, τα σήματα ελέγχου προκύπτουν ως εξής:

$$F_{Port} = -F_{Starboard} = \frac{M}{d}$$

$$F_{Port} = k_{yaw} n_{Port} |n_{Port}|$$

$$n_{Port} = \begin{cases} -\sqrt{\frac{F_{Port}}{k_{yaw}}}, & F_{Port} < 0 \\ \sqrt{\frac{F_{Port}}{k_{yaw}}}, & F_{Port} \geq 0 \end{cases} \quad (3.12)$$

$$n_{Starboard} = -n_{Port}$$

Τέλος, απέμεινε να αποφασιστεί πως και πότε θα χρησιμοποιηθούν οι πιο πάνω ελεγκτές. Παρατηρώντας την εξέλιξη της κίνησης του υποβρυχίου όντας τελείως ελεύθερο από επιρροές ελέγχου (open-loop κίνηση), καταλήξαμε στο ποιούς ελεγκτές θα χρησιμοποιήσουμε ανάλογα με την κίνηση που θέλουμε να πετύχουμε. Τα συμπεράσματα συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα. Σημειώνεται πως, παρά το γεγονός ότι με βάση την θεωρία η κίνηση στον άξονα z είναι αποσυνδεδεμένη από τις υπόλοιπες, για πιο ομαλή κίνηση χρησιμοποιήθηκε ελεγκτής για την μετατόπιση στον

άξονα y. Η μετατόπιση (μικρή) αυτή οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα στην επίδραση του καλωδίου του υποβρυχίου, που ενδεχομένως με κατάλληλη διάταξη αυτού να μειωνόταν ή να μην υπήρχε και καθόλου.

Πειραματική κίνηση	Ενεργοί ελεγκτές
X	Yaw
Y	X, Yaw
Z	Y
Yaw	X, Y

Διεξαγωγή πειραμάτων (δεξαμενή Εργαστηρίου Υδροδυναμικής ΕΜΠ)

Επιπρόσθετα, διεξήχθησαν πειράματα και σε διαφορετικό περιβάλλον, για να ελεγχθεί η εγκυρότητα των προκαταρκτικών και να διορθωθούν τυχούσες αποκλίσεις και σφάλματα. Οι διαφορές που εμφανίζονται στον τρόπο διεξαγωγής αυτών των πειραμάτων σε σύγκριση με τα προηγούμενα, έγκεινται σε 2 βασικά σημεία:

- Σε αυτά τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε το USBL έναντι του Isotrak για την μέτρηση της θέσης. Σε αυτή την περίπτωση, η γωνία yaw μετρήθηκε από το προαναφερθέν imu.
- Το γεγονός ότι η συχνότητα αυτή είναι κατά πολύ μεγαλύτερη της αντίστοιχης του δεύτερου αισθητήρα που χρησιμοποιήθηκε σε αυτά τα πειράματα (mti) , θα μας οδηγήσει στο να επεξεργαστούμε τις μετρήσεις μας λίγο διαφορετικά σε σχέση με πριν, κάτι που θα αναλυθεί παρακάτω.
- Τα πειράματα αυτά, σε αντίθεση με τα προηγούμενα, έγιναν χωρίς ανάδραση (open-loop), λόγω του γεγονότος ότι δεν υπήρχε η δυνατότητα επεξεργασίας των μετρήσεων του USBL κατά την διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος από τον υπολογιστή που έτρεχε το κυρίως πρόγραμμα.

3.2: Επεξεργασία πειραματικών δεδομένων

3.2.1: Εκτίμηση διανύσματος κατάστασης offline (state estimation)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι αισθητήρες που είχαμε διαθέσιμους κατά την διάρκεια των πειραμάτων δεν είναι ικανοί να μας παρέχουν όλα τα μεγέθη που χρειαζόμαστε για να εκτελέσουμε την αναγνώριση του συστήματος. Έτσι, πρέπει να καταφύγουμε σε τεχνικές εκτίμησης κατάστασης, μία από τις οποίες είναι και ο μαθηματικός αλγόριθμος του Kalman, γνωστός ως φίλτρο Kalman (Kalman Filter, KF). Υπάρχουν βέβαια διάφορες τεχνικές που κάνουν την ίδια δουλειά, χρησιμοποιήθηκε όμως η παραπάνω, όχι μόνο λόγω της πρακτικής της υπεροχής έναντι των υπολοίπων, αλλά κυρίως γιατί στην θεωρία αποδεικνύεται πως επιτυγχάνει ελαχιστοποίηση της διακύμανσης του σφάλματος εκτίμησης.

Ο μαθηματικός αυτός αλγόριθμος διατυπώθηκε στην πρώτη του μορφή, που αφορά στα γραμμικά συστήματα, την δεκαετία του 1960 και αρχικά είχε σχεδιαστεί για χρήση στην πλοήγηση εναέριων μέσων. Στη συνέχεια όμως, διαπιστώθηκε η χρησιμότητα του σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, οπότε και γενικεύθηκε η χρήση του. Η κύρια χρήση του είναι η εκτίμηση καταστάσεων συστημάτων, όταν αυτές δεν μπορούν να προσδιορισθούν άμεσα, ή όταν ο άμεσος προσδιορισμός τους αποδεικνύεται να είναι ανακριβής.

Παρόλαυτα, στα συστήματα στην φύση σπάνια συναντάμε καθαρά γραμμικές συμπεριφορές. Η ανάγκη εφαρμογής του αλγορίθμου Kalman και σε μη-γραμμικά συστήματα οδήγησε τους ερευνητές στην υλοποίηση επεκτάσεων του αρχικού αλγορίθμου, αναφορικά πάντα με αυτόν. Οι πιο δημοφιλείς αυτή την στιγμή είναι η EKF (Extended Kalman Filter), και η UKF (Unscented Kalman filter) που είναι και αυτή που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία. Παρακάτω, ακολουθεί η μαθηματική διατύπωση του αλγορίθμου.

Μαθηματικός αλγόριθμος εκτίμησης κατάστασης UKF

Για τον υπολογισμό του πλήρους διανύσματος κατάστασης του οχήματος p (θέση, προσανατολισμός, γραμμικές και γωνιακή ταχύτητες, γραμμικές και γωνιακή επιταχύνσεις), πρώτο βήμα είναι να διατυπωθεί το σύστημά μας, σε χρονικά διακριτή (δηλαδή όχι συνεχή) μορφή, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση (3.14):

$$p = [\eta^T \quad v^T \quad \dot{v}^T]^T \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} x(k+1) &= f[x(k), u(k), v(k), k] \\ y(k) &= h[x(k), u(k), k] + w(k) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Όπου:

- $x(k)$ είναι το διάνυσμα στήλη κατάστασης του συστήματος, διάστασης n , στο χρονικό βήμα k
- $u(k)$ είναι το διάνυσμα στήλη που περιέχει τις εισόδους στο σύστημα
- $v(k)$ είναι το μητρώο που εκφράζει τον θόρυβο κατάστασης (state-process noise), διάστασης q (τετραγωνικός πίνακας), που οφείλεται σε διαταραχές και λάθη στο στάδιο της μοντελοποίησης
- $y(k)$ είναι το διάνυσμα στήλη που περιέχει τα σήματα μέτρησης που έχουν παρατηρηθεί κατά την πειραματική διαδικασία
- $w(k)$ είναι το μητρώο που εκφράζει τον θόρυβο των μετρήσεων (τετραγωνικός πίνακας)

- Η f αποτελεί την συνάρτηση που συνδέει την κατάσταση του συστήματος την χρονική στιγμή k με αυτή στην επόμενη $(k+1)$ (βλ. Παρακάτω).
- Η h αποτελεί την συνάρτηση του μοντέλου μέτρησης (βλ. Παρακάτω)

Γενικότερα, η συνάρτηση h δεν είναι απαραίτητο να έχει τετριμμένη μορφή. Παρόλαυτα, η τοποθέτηση των αισθητήρων πάνω στο όχημα έγινε με τέτοιο τρόπο, ώστε οι μετρήσεις μας να έχουν αντιστοιχία 1:1 ως προς τις πραγματικές (στήλη $y(k)$). Έτσι λοιπόν, έχουμε τα εξής μοντέλα μέτρησης για το isotrak και το mti αντίστοιχα:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \psi \end{bmatrix}_k = h_A \left(\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \psi \end{bmatrix}_{measured} \right), w_A \quad (3.15)$$

$$\begin{bmatrix} r \\ a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}_k = h_B \left(\begin{bmatrix} r \\ a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}_{measured} \right), w_B$$

Όπου:

- h_A και h_B τα μητρώα που συνθέτουν το μοντέλο μέτρησης, και στην δική μας περίπτωση $h_A = h_B = I_{4 \times 4}$ όπου I ο μοναδιαίος πίνακας.
- w_A και w_B είναι τα μητρώα που περιέχουν τους θορύβους μέτρησης των αισθητήρων. Γίνεται η παραδοχή πως οι θόρυβοι είναι λευκοί με μέσο όρο μηδέν (zero-mean white noise) με διακυμάνσεις R_A και R_B αντίστοιχα. Οι διακυμάνσεις προκύπτουν υψώνοντας τα δεδομένα, από τα εγχειρίδια χρήσης, σφάλματα μέτρησης των αισθητήρων στο τετράγωνο.

Όσον αφορά την συνάρτηση f , το γεγονός ότι η αναγνώριση του συστήματος γίνεται off-line δεν μας επιτρέπει να διακριτοποιήσουμε τις εξισώσεις του δυναμικού μοντέλου και να της χρησιμοποιήσουμε, για τον απλούστατο λόγο ότι δεν ξέρουμε τις τιμές των παραμέτρων που εμφανίζονται εκεί. Κατά συνέπεια, πρέπει να χρησιμοποιήσουμε κάποιο κινηματικό μοντέλο για τον προσδιορισμό των καταστάσεων του συστήματος. Έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα, επιλέχθηκε όμως να χρησιμοποιηθεί το διακριτό μοντέλο επιτάχυνσης κατά Wiener (DWPA, Discrete Wiener Process Acceleration model). Βασική παραδοχή αυτού του μοντέλου είναι ότι η χρονική παράγωγος της επιτάχυνσης (jerk) είναι σταθερή. Οι εξισώσεις του παρουσιάζονται παρακάτω:

$$x(k+1) = Fx(k) + \Gamma u(k)$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & T & T^2/2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} T^2/2 \\ T \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$Q = \Gamma \sigma_v^2 \Gamma' = \begin{bmatrix} T^4/4 & T^3/2 & T^2/2 \\ T^3/2 & T^2 & T \\ T^2/2 & T & 1 \end{bmatrix} \sigma_v^2 \quad (3.17)$$

Όπου:

- $x(k)$ το διάνυσμα κατάστασης του συστήματος την στιγμή k .
- T η περίοδος δειγματοληψίας πειραματικών δεδομένων
- $u(k)$ είναι ο λευκός θόρυβος κατάστασης (zero-mean), που εκφράζει την όποια αύξηση της επιτάχυνσης κατά την περίοδο δειγματοληψίας k .
- σ_v είναι η διακύμανση του $u(k)$. Πρακτικά, οι τιμές του κυμαίνονται στο κλειστό διάστημα $\left[\frac{1}{2} \Delta_{\alpha_M}, \Delta_{\alpha_M} \right]$, με το Δ_{α_M} να είναι η μέγιστη αύξηση της επιτάχυνσης κατά την διάρκεια μιας περιόδου δειγματοληψίας.
- Q είναι το μητρώο συνδιακύμανσης του θορύβου κατάστασης και του πίνακα Γ .

Σημειώνεται πως στις παραπάνω εξισώσεις, η πρώτη γραμμή των μητρώων αφορά στις μετατοπίσεις, η δεύτερη στις ταχύτητες, και η τρίτη στις επιταχύνσεις. Επιπλέον, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, οι ταχύτητες και οι επιταχύνσεις εκφράζονται στο σωματόδετο σύστημα συντεταγμένων, ενώ η θέση και ο προσανατολισμός στο απόλυτο. Βάση λοιπόν του παραπάνω μοντέλου και αυτής της παραδοχής, προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$\begin{aligned}
x_{-e} &= x + T(u \cos(\psi) - v \sin(\psi)) \\
y_{-e} &= y + T(u \sin(\psi) + v \cos(\psi)) \\
z_{-e} &= z + Tw \\
\psi_{-e} &= \psi + Tr \\
u_{-e} &= u + Ta_x \\
v_{-e} &= v + Ta_y \\
w_{-e} &= z + Ta_z \\
r_{-e} &= r + Ta_\psi \\
a_{x_{-e}} &= a_x \\
a_{y_{-e}} &= a_y \\
a_{z_{-e}} &= a_z \\
a_{\psi_{-e}} &= a_\psi
\end{aligned} \tag{3.18}$$

Σε σχέση με το μοντέλο που παρουσιάστηκε πιο πάνω, αυτό είναι πιο απλό, με την έννοια ότι κάποιοι όροι παραλείφθηκαν, αφού παρατηρήθηκε πως πρακτικά δεν είχαν κάποια ιδιαίτερη αξία στους υπολογισμούς.

Έχοντας ορίσει πλέον τα μοντέλα μέτρησης και επεξεργασίας, μπορούμε να προχωρήσουμε στο μαθηματικό κομμάτι του αλγορίθμου.

Τα βήματα που ακολουθεί αυτός ο αλγόριθμος είναι τα εξής:

- Αρχικοποίηση του φίλτρου:

$$\begin{aligned}
x_0 &= E[x_0] \\
P_0 &= E\left[(x_0 - x_0)(x_0 - x_0)^T\right]
\end{aligned} \tag{3.19}$$

- Υπολογισμός sigma-points:

$$X_{k-1} = \begin{bmatrix} x_{k-1} & x_{k-1} + \gamma\sqrt{P_{k-1}} & x_{k-1} - \gamma\sqrt{P_{k-1}} \end{bmatrix} \tag{3.20}$$

Όπου $\gamma = \sqrt{n + \lambda}$, με το n να είναι ίσο με τον αριθμό μεταβλητών κατάστασης, δηλαδή 12, και το λ να είναι μια παράμετρος κλίμακας, που υπολογίστηκε όπως στην [].

- Χρονική ανανέωση-Εξισώσεις πρόβλεψης

$$\begin{aligned}
X_{k|k-1}^* &= f[X_{k-1}, u_{k-1}] \\
\bar{x}_k &= \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} X_{i,k|k-1}^* \\
P_k^- &= \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} [X_{i,k|k-1}^* - \bar{x}_k^-] [X_{i,k|k-1}^* - \bar{x}_k^-]^T + Q_k
\end{aligned} \tag{3.21}$$

- Υπολογισμός καινούριων sigma-points:

$$\begin{aligned}
X_{k|k-1} &= [\bar{x}_k \quad \bar{x}_k + \gamma \sqrt{P_k^-} \quad \bar{x}_k - \gamma \sqrt{P_k^-}] \\
Y_{k|k-1} &= h(X_{k|k-1}) \\
\bar{y}_k &= \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} Y_{i,k|k-1}
\end{aligned} \tag{3.22}$$

όπου οι συναρτήσεις W ορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned}
W_0^{(m)} &= \frac{\lambda}{n + \lambda} \\
W_0^{(c)} &= \frac{\lambda}{n + \lambda} + (1 - a^2 + \beta) \\
W_i^{(m)} = W_i^{(c)} &= \frac{1}{2(n + \lambda)}, \quad i = 1, \dots, 2n
\end{aligned} \tag{3.23}$$

Με τα a και β να είναι επίσης παράμετροι κλίμακας. Το a καθορίζει το πόσο θα εξαπλωθούν τα sigma-points γύρω από το x , και το β εκφράζει προγενέστερη γνώση όσον αφορά στην στατιστική κατανομή του x . Οι τιμές τους κυμαίνονται στα παρακάτω επίπεδα:

$$\begin{aligned}
10^{-4} &\leq a \leq 1 \\
\beta &= 2 \quad \text{για Γκαουσιανές κατανομές}
\end{aligned}$$

- Προβλεπόμενες μετρήσεις:

$$\begin{aligned}
P_{y_k y_k}^- &= \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} [Y_{i,k|k-1} - \bar{y}_k^-] [Y_{i,k|k-1} - \bar{y}_k^-]^T + R_k \\
P_{x_k y_k}^- &= \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} [X_{i,k|k-1} - \bar{x}_k^-] [Y_{i,k|k-1} - \bar{y}_k^-]^T
\end{aligned} \tag{3.24}$$

- Εκτίμηση διανύσματος κατάστασης:

$$\begin{aligned}
 K_k &= P_{x_k y_k} P_{y_k y_k}^{-1} \\
 x_k &= \bar{x}_k + K_k \left(y_k - \bar{y}_k \right) \\
 P_k &= P_k^- - K_k P_{y_k y_k}^- K_k^T
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

Τεχνική εκτίμησης διανύσματος δυναμικών παραμέτρων (offline parameter estimation)

Για να γίνει η εκτίμηση του διανύσματος των παραμέτρων, οι βασικές εξισώσεις του συστήματος μας (2.18) γράφονται στην μορφή:

$$\tau = Y\pi \tag{3.26}$$

όπου,

- τ : Μητρώο στήλη που περιέχει τις εισόδους στο υπό-μελέτη σύστημα
- Y : Μητρώο που περιέχει μη-γραμμικές εκφράσεις των μεγεθών που εκφράζουν την κατάσταση του υποβρυχίου
- π : Μητρώο στήλη, που περιέχει τις προς αναγνώριση παραμέτρους του συστήματος

Σημειώνεται πως αυτή η μαθηματική προσέγγιση είναι αρκετά συνηθισμένη σε μεθόδους αναγνώρισης συστημάτων σε μη-πραγματικό χρόνο (off-line). Σύμφωνα λοιπόν με την εξίσωση (2.18), οι παραπάνω πίνακες παίρνουν την εξής μορφή:

$$\begin{aligned}
 \tau &= [X \quad Y \quad Z \quad N]^T \\
 \pi &= [m_{11} \quad m_{22} \quad X_u \quad X_{u|u|} \quad Y_v \quad Y_{v|v|} \quad m_{33} \quad Z_w \quad Z_{w|w|} \quad (I_z - N_{\dot{r}}) \quad N_r \quad N_{r|r|}]^T \tag{3.27} \\
 Y &= \begin{bmatrix} \dot{u} & -vr & -u & -u|u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ ur & \dot{v} & 0 & 0 & -v & -v|v| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{w} & -w-w|w| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ uv & -uv & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{r} & -r & -r|r| \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Στην παραπάνω αναπαράσταση δεν έχει ληφθεί υπόψιν η συνεισφορά του καλωδίου του υποβρυχίου στην δυναμική του. Για να γίνει κάτι τέτοιο, προσθέσαμε έναν επιπλέον όρο στην εξίσωση του βαθμού ελευθερίας περιστροφής γύρω από τον άξονα z, με συνέπεια να έχουμε τις εξής μεταβολές:

$$Y = \begin{bmatrix} \dot{u} & -vr & -u & -u|u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ ur & \dot{v} & 0 & 0 & -v & -v|v| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{w} & -w & -w|w| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ uv & -uv & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{\psi} & -r & -r|r| & \left(\psi - \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix}$$

$$\pi = \left[m_{11} \quad m_{22} \quad X_u \quad X_{u|u|} \quad Y_v \quad Y_{v|v|} \quad m_{33} \quad Z_w \quad Z_{w|w|} \quad (I_z - N_{\dot{\psi}}) \quad N_r \quad N_{r|r|} \quad K_T \right]^T$$

Το μόνο που απομένει πλέον, είναι να συσχετιστεί το σήμα που στέλνει ο χρήστης μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή στο υποβρύχιο, με την δύναμη που εξέρχεται από τους κινητήρες κίνησης. Οι δυνάμεις αυτές είναι τα στοιχεία του μητρώου τ . Σύμφωνα με την βιβλιογραφία, ο καλύτερος τρόπος να μοντελοποιηθεί μια δύναμη που εξέρχεται από έναν κινητήρα τέτοιου είδους είναι με χρήση μιας ήμι-γραμμικής συνάρτησης της γωνιακής ταχύτητας περιστροφής (ω), και της γραμμικής ταχύτητας του υποβρυχίου (v). Η εξίσωση αυτή είναι:

$$\tau_i = k_1 |\omega_i| \omega_i - k_2 |\omega_i| v_i \quad (3.28)$$

Βάση της παραδοχής ότι θα κινούμαστε με μικρές ταχύτητες, άρα $v_i \cong 0$, προκύπτει η απλοποιημένη σχέση:

$$\tau_i = \kappa |\omega_i| \omega_i$$

Ο όρος κ αποτελεί την χαρακτηριστική σταθερά του κινητήρα, που εδώ προσομοιάζεται με ένα σταθερό κέρδος, κάτι που δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα.

Στην γενική περίπτωση που οι κινητήρες δεν έχουν σχεδιασθεί για παραγωγή συμμετρικής ώσης, έχουμε διαφορετικά κ για την μπρος και πίσω κίνηση σε κάθε βαθμό ελευθερίας (θετικά και αρνητικά ω αντίστοιχα). Οπότε είναι:

$$\tau_i = \kappa_{forward} |\omega_i| \omega_i, \quad \omega_i > 0$$

$$\tau_i = \kappa_{backward} |\omega_i| \omega_i, \quad \omega_i < 0$$

$$\omega_i = \frac{2\pi n}{60}, \quad n \rightarrow (rpm)$$

Στο κεφάλαιο 2 της παρούσας εργασίας όμως, όπου παρουσιάστηκαν εν τάχει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του υποβρυχίου, αναφέρθηκε ότι οι κινητήρες του είναι σχεδιασμένοι για παραγωγή συμμετρικής ώσης. Συνεπώς, ο όρος κ θα παραμένει σταθερός για θετικά και αρνητικά (ω) στην δική μας περίπτωση, ή

$$\kappa_{forward} = \kappa_{backward}$$

Έπειτα από επικοινωνία με τους μηχανικούς της κατασκευάστριας εταιρίας του LBV-150, ενημερωθήκαμε πως τα rpm με τα οποία περιστρέφεται ο κινητήρας συνδέονται σχεδόν γραμμικά με το σήμα που στέλνεται από το χρήστη μέσω του H/Y. Κατά συνέπεια, είναι:

$$n = (\textit{gain}) * (\textit{thruster_gain}) * (\textit{command_value})$$

Ο όρος (*thruster_gain*) που αναφέρεται στην πιο πάνω εξίσωση, αποτελεί μια σταθερά η οποία εκφράζει το ποσοστό της διαθέσιμης ισχύος με την οποία τροφοδοτείται ο κινητήρας. Ο όρος (*command_value*) είναι το σήμα που δίνεται από τον χρήστη, και βρίσκεται εντός του παρακάτω ορίου, που καθορίστηκε από το πρωτόκολλο επικοινωνίας του οχήματος:

$$(\textit{command_value}) \in [-102, 102]$$

Έτσι λοιπόν, με την πιο πάνω ανάλυση, καταλήγουμε στο ότι οι δυνάμεις που περιλαμβάνονται στο μητρώο τ , μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει του σήματος εισόδου, ως εξής:

$$F = k_i T_i^2 c_i |c_i|, \text{ όπου}$$

- F η ώση που παράγει ο κινητήρας
- k_i η σταθερά του κινητήρα
- T_i^2 σταθερά που περιλαμβάνει τους όρους (*gain*) και (*thruster_gain*) μαζί (δεν αποτελεί στόχο της παρούσας εργασίας να προσδιορισθούν ξεχωριστά).
- c_i το σήμα εισόδου του χρήστη στο σύστημα.

Οπότε, η τελική μορφή της $\tau = Y\pi$ μορφής, είναι η παρακάτω:

$$\tau = \begin{bmatrix} c_x |c_x| \\ c_y |c_y| \\ c_z |c_z| \\ c_x |c_x| L \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} \dot{u} & -vr & -u & -u|u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & ur & \dot{v} & -v & -v|v| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{w} & -w & -w|w| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -uv & uv & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{r} & -r & -r|r| & \left(\psi - \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix}$$

$$\pi = \left[\frac{m_{11}}{k_x T_x^2} \quad \frac{m_{22}}{k_x T_x^2} \quad \frac{X_u}{k_x T_x^2} \quad \frac{X_{u|u|}}{k_x T_x^2} \quad \frac{m_{11}}{k_y T_y^2} \quad \frac{m_{22}}{k_y T_y^2} \quad \frac{Y_v}{k_y T_y^2} \quad \frac{Y_{v|v|}}{k_y T_y^2} \quad \frac{m_{33}}{k_z T_z^2} \quad \frac{Z_w}{k_z T_z^2} \quad \frac{Z_{w|w|}}{k_z T_z^2} \quad \frac{m_{66}}{k_x T_x^2} \quad \frac{N_r}{k_x T_x^2} \quad \frac{N_{r|r|}}{k_x T_x^2} \quad \frac{K_T}{k_x T_x^2} \right]^T$$

Το διάνυσμα των παραμέτρων, π , υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (3.26), με χρήση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων.

3.2.2: Τροποποιημένη online τεχνική ταυτόχρονης εκτίμησης διανύσματος κατάστασης και διανύσματος παραμέτρων.

Αυτή η τεχνική που θα παρουσιασθεί σε αυτό το σημείο, αποτελεί έναν συνδυασμό της τεχνικής UKF που αναπτύχθηκε παραπάνω και του αλγορίθμου RLS (Recursive Least Squares, [10]) που θα χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του διανύσματος των παραμέτρων. Διαφέρει από την προηγούμενη προσέγγιση σε 2 κεντρικά σημεία:

- Πρόκειται για μια τροποποιημένη τεχνική με online προσανατολισμό, με την έννοια ότι οι 2 αλγόριθμοι τρέχουν σειριακά μέσα στον ίδιο επαναληπτικό βρόγχο, με αποτέλεσμα η εκτίμηση τόσο του διανύσματος κατάστασης, όσο και του διανύσματος παραμέτρων να γίνονται ταυτόχρονα και να αλληλεπιδρούν. Συγκεκριμένα, αρχικά τρέχει το φίλτρο ukf, που τροφοδοτεί με τις εκτιμώμενες καταστάσεις το φίλτρο RLS, που με την σειρά του υπολογίζει τις δυναμικές παραμέτρους για κάθε βρόγχο.
- Ο αλγόριθμος RLS (βλ. παρακάτω) έχει διατυπωθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να υπάρχει μαθηματική απόδειξη της σύγκλισης του ανεξάρτητα από το διάνυσμα αρχικοποίησής του. Αυτό το γεγονός μας ενθάρρυνε αναφορικά με την χρήση δυναμικής έναντι κινηματικής μοντελοποίησης (προηγούμενη μέθοδος). Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν οι δυναμικές εξισώσεις του συστήματος.

Μαθηματικός Αλγόριθμος RLS (Recursive Least Squares)

Καταρχήν, ξεκαθαρίζεται πως αυτός ο αλγόριθμος θα χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά και μόνο για τον προσδιορισμό των παραμέτρων. Ακολουθεί η μαθηματική του διατύπωση:

- Αρχικοποίηση αλγορίθμου (πρόβλεψη μέσης τιμής και απόκλισης των τιμών των παραμέτρων):

$$\begin{aligned}x_0 &= E[x_0] \\ P_0 &= E\left[(x_0 - x_0)(x_0 - x_0)^T\right]\end{aligned}\tag{3.29}$$

Σε περίπτωση που η εκτίμηση της αρχικής τιμής της παραπάνω μέσης τιμής γίνεται χωρίς προγενέστερη γνώση για αυτήν, η διακύμανση πρέπει να λάβει υψηλή αρχική τιμή.

- Επανάληψη των 2 παρακάτω βημάτων
 1. Λήψη καινούριας μέτρησης y_k , υποθέτοντας ότι δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$y_k = H_k x + v_k\tag{3.30}$$

όπου v_k είναι το μητρώο λευκού θορύβου, με μηδενική μέση τιμή και διακύμανση R_k .

2. Ενημέρωση των εκτιμήσεων x και P :

$$\begin{aligned}K_k &= P_{k-1} H_k^T (H_k P_{k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \\ x_k &= x_{k-1} + K_k (y_k - H_k x_{k-1}) \\ P_k &= (I - K_k H_k) P_{k-1}\end{aligned}\tag{3.31}$$

Οι δυναμικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν γράφονται στην γενική (διακριτή) τους μορφή παρακάτω:

1. Surge Dynamics:

$$\begin{aligned}
 x_k &= x_{k-1} + u_{k-1} * \cos(\psi) * dt \\
 u_k &= u_{k-1} + \left(X_u * u_{k-1} + X_{|u|} * u_{k-1} * |u_{k-1}| + k * F_x \right) * dt \\
 a_{x_{k-1}} &= a_{x_{k-1}}
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

2. Sway Dynamics:

$$\begin{aligned}
 y_k &= y_{k-1} + v_{k-1} * \sin(\psi) * dt \\
 v_k &= v_{k-1} + \left(Y_v * v_{k-1} + Y_{|v|} * v_{k-1} * |v_{k-1}| + k * F_y \right) * dt \\
 a_{y_{k-1}} &= a_{y_{k-1}}
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

3. Heave Dynamics:

$$\begin{aligned}
 z_k &= z_{k-1} + w_{k-1} * dt \\
 w_k &= w_{k-1} + \left(Z_w * w_{k-1} + Z_{|w|} * w_{k-1} * |w_{k-1}| + k * F_z \right) * dt \\
 a_{z_{k-1}} &= a_{z_{k-1}}
 \end{aligned} \tag{3.34}$$

4. Yaw dynamics:

$$\begin{aligned}
 \psi_k &= \psi_{k-1} + r_{k-1} * dt \\
 r_k &= r_{k-1} + \left(N_r * r_{k-1} + N_{|r|} * r_{k-1} * |r_{k-1}| + k_{yaw} * F_{yaw} \right) * dt
 \end{aligned} \tag{3.35}$$

Μπορούν να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Οι δυναμικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι πιο απλές από αυτές που έχουν αναπτύχθηκαν στο 2^ο κεφάλαιο, μιας και είναι εξαιρετικά διαδεδομένη πρακτική στους ερευνητές να χρησιμοποιούν αποσυζευγμένα (decoupled) μοντέλα.
- Λόγω του ότι δεν υπάρχει διαθέσιμη μέτρηση για την επιτάχυνση στην περιστροφή κατά yaw, χρησιμοποιήθηκαν 2 εξισώσεις (3.35), σε αντίθεση με τους υπόλοιπους βαθμούς ελευθερίας όπου χρησιμοποιήθηκαν 3.
- Κριτήριο ορθής σύγκλισης των παραμέτρων είναι η προσπάθεια αναπαραγωγής των μετρούμενων επιταχύνσεων σε κάθε άξονα, αφού αφαιρεθεί ο θόρυβος από αυτές μέσω του φίλτρου Kalman. Στο βαθμό ελευθερίας yaw, συγκρίνουμε με την παράγωγο του φιλτραρισμένου ρυθμού περιστροφής.

Κεφάλαιο 4

Πειραματικά Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιασθούν τα πειραματικά αποτελέσματα που ελήφθησαν για την παρούσα διπλωματική εργασία, τόσο από τα πειράματα που έλαβαν χώρα στην πισίνα του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου, όσο και από την επίσκεψη μας στην δεξαμενή του Εργαστηρίου Υδροδυναμικής.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγιναν πολλά πειράματα με ποικιλία, όσον αφορά τόσο στην συχνότητα, όσο και το πλάτος των σημάτων εισόδου. Αυτά ενώθηκαν και εν τέλει συνέθεσαν τα συνολικά 'πειράματα', στα οποία και αφορούν τα αποτελέσματα και τα γραφήματα που θα δωθούν παρακάτω.

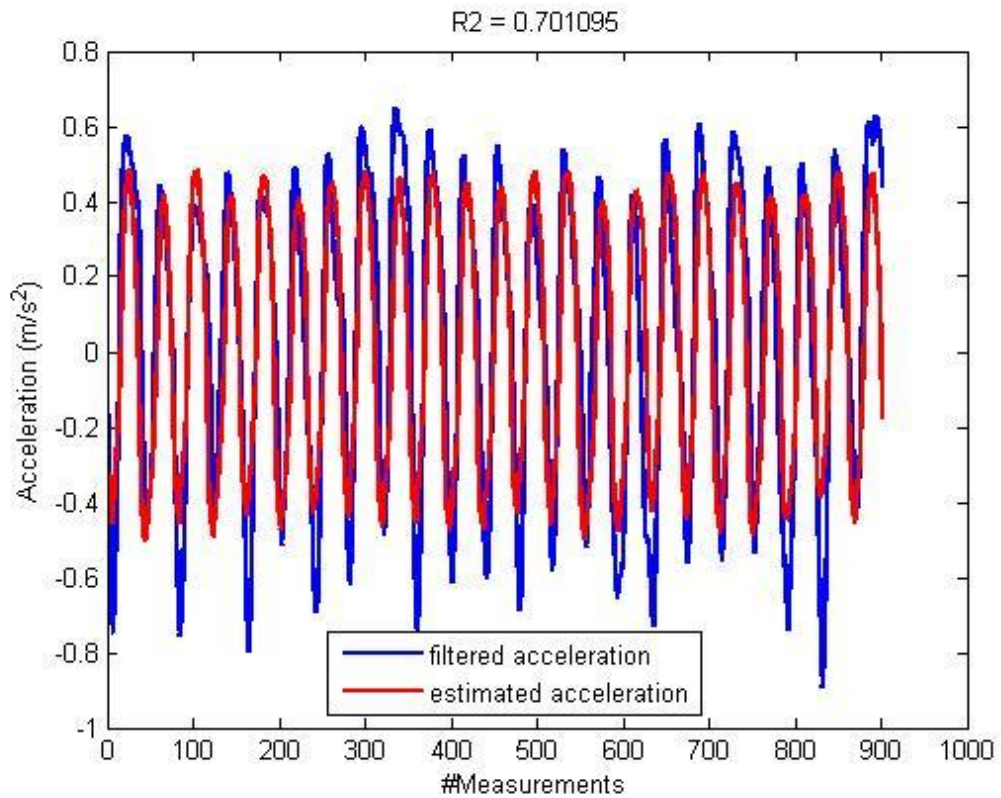
Τα διαγράμματα που θα παρουσιασθούν παρακάτω, περιλαμβάνουν για κάθε βαθμό ελευθερίας τα εξής στοιχεία:

- Διάγραμμα σύγκλισης επιτάχυνσης: Σε αυτό το διάγραμμα, φαίνεται κατά πόσον συμπίπτει η επιτάχυνση που έχει υπολογίσει ο αλγόριθμος συγκριτικά με την αθόρυβη μετρούμενη. Φαίνεται επίσης η ακριβής τιμή του βαθμού σύγκλισης R^2 .
- Διάγραμμα σύγκλισης παραμέτρων: Σε αυτό το διάγραμμα φαίνεται η σύγκλιση με τον χρόνο των παραμέτρων που καλούμαστε να υπολογίσουμε.

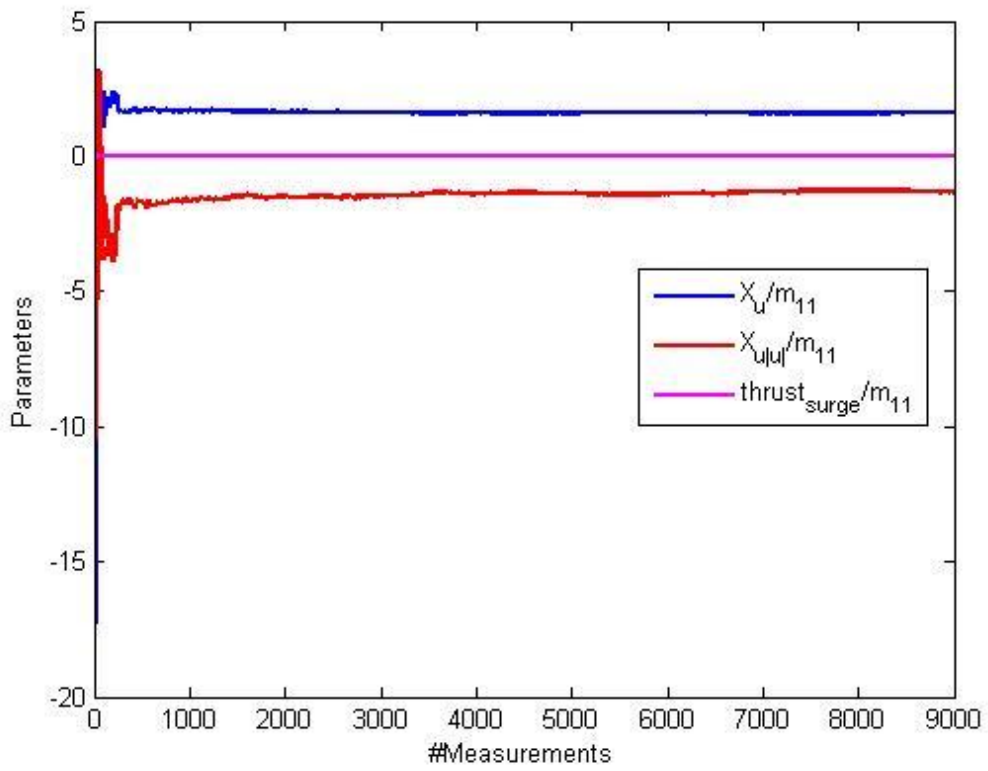
Σημειώνεται πως στα διαγράμματα που ακολουθούν, λόγω του μεγάλου αριθμού δεδομένων που λάβαμε (>80000 για κάθε βαθμό ελευθερίας), τα δεδομένα που απεικονίζονται είναι ενδεικτικά του συνολικού αριθμού και των τελικών αποτελεσμάτων. Και αυτό για κανέναν άλλο λόγο, πέραν του να υπάρχει ξεκάθαρη εικόνα και καλή εποπτεία των αποτελεσμάτων.

Η παράθεση των διαγραμμάτων ξεκινά με αυτά που αφορούν στα πειράματα που έγιναν στην πισίνα, και ακολουθούν αυτά που έγιναν στην δεξαμενή του εργαστηρίου Υδροδυναμικής.

Άξονας X (Surge)

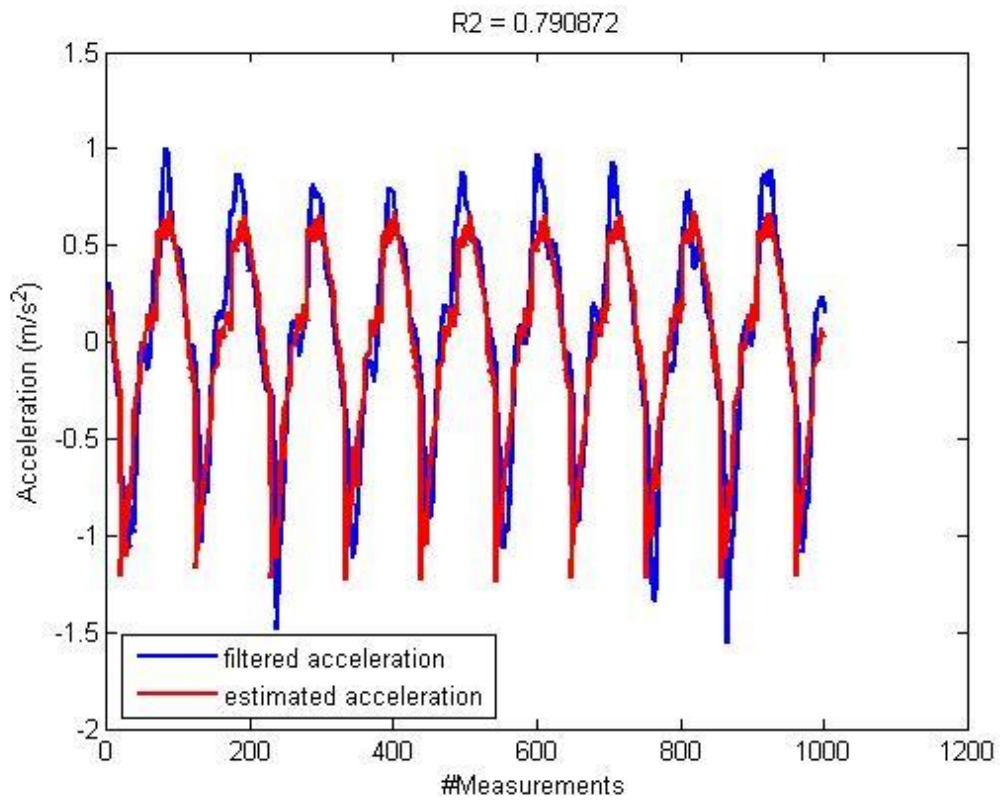


Σχήμα 4.1: Σύγκριση αθόρυβης και υπολογιζόμενης (μέσω του δυναμικού μοντέλου) επιτάχυνσης (surge)

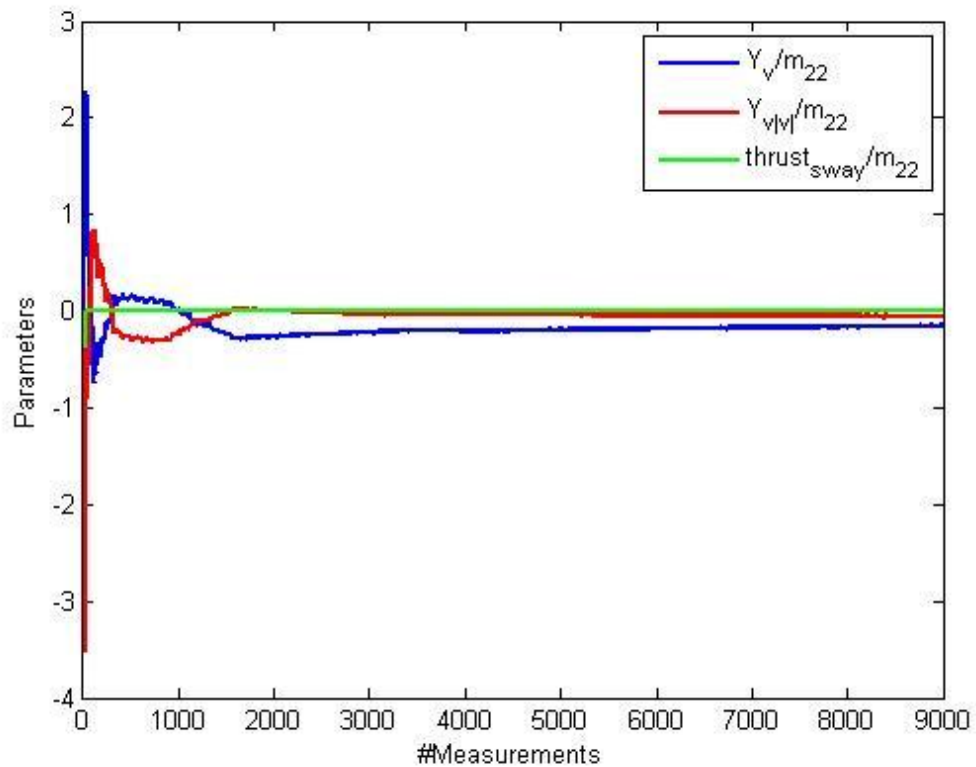


Σχήμα 4.2: Σύγκλιση δυναμικών παραμέτρων (surge)

Άξονας Y (Sway)

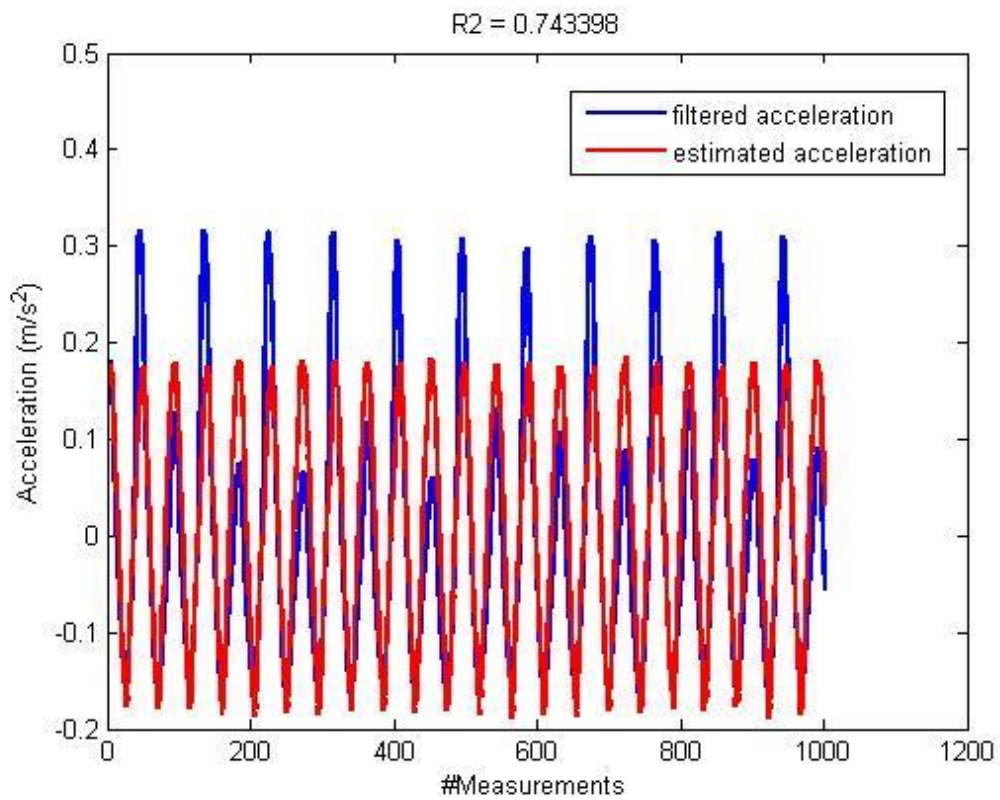


Σχήμα 4.3: Σύγκριση αθόρυβης και υπολογιζόμενης επιτάχυνσης (sway)

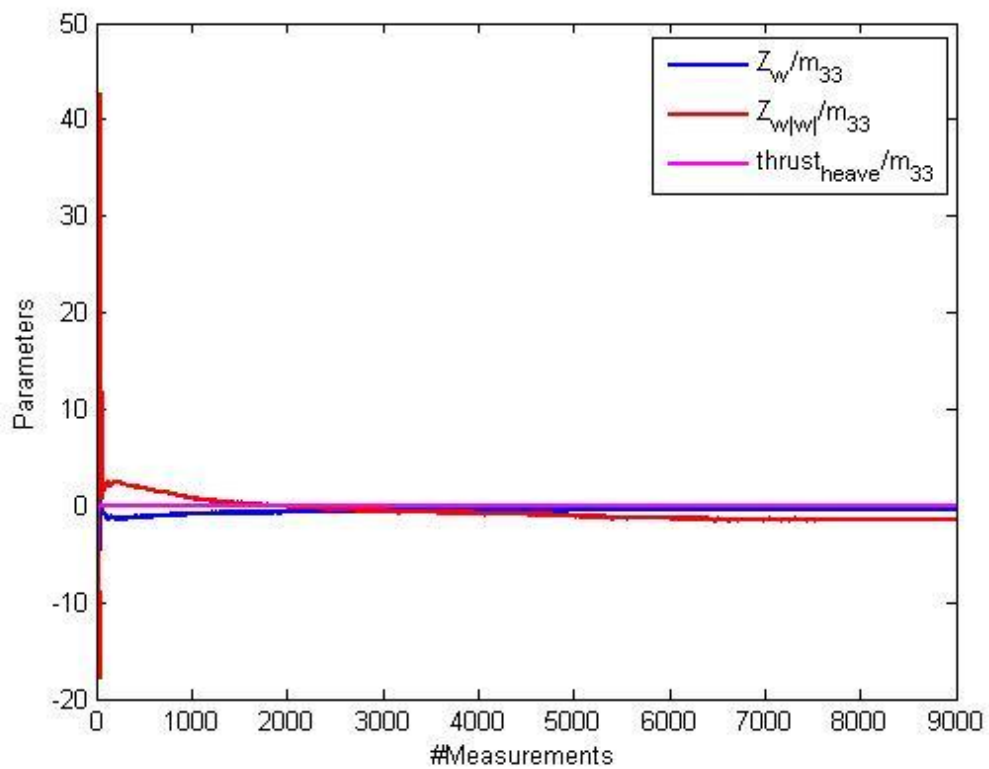


Σχήμα 4.4: Σύγκλιση δυναμικών παραμέτρων (sway)

Άξονας Z (Heave)

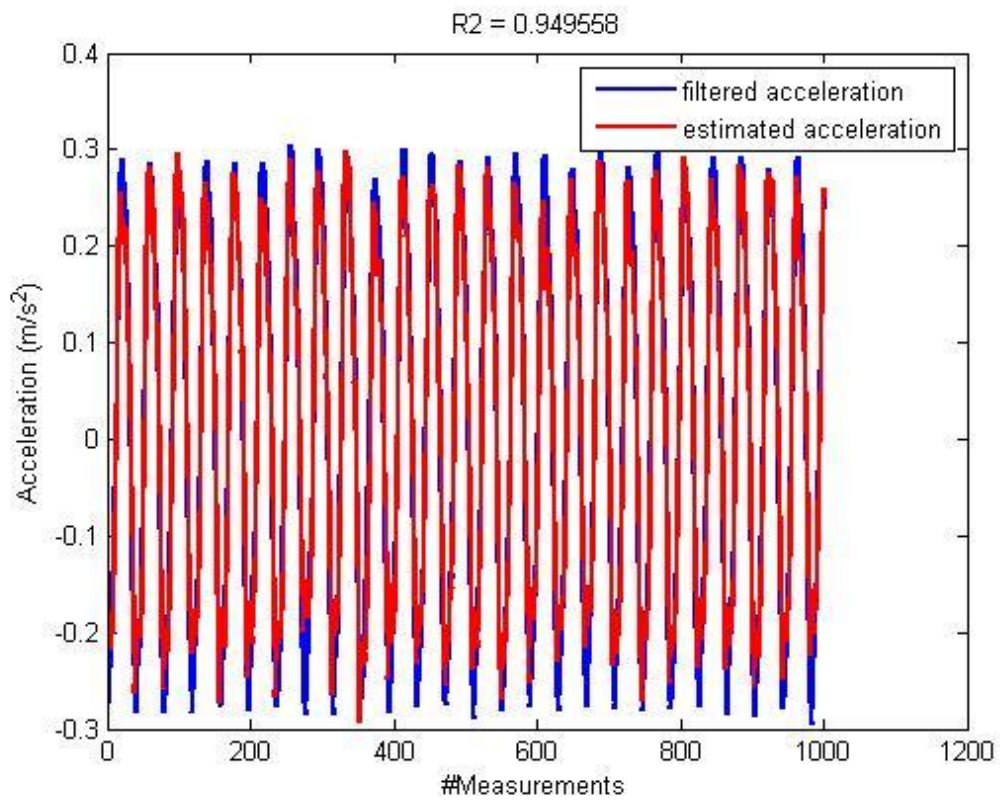


Σχήμα 4.5: Σύγκριση αθόρυβης και υπολογιζόμενης επιτάχυνσης (heave)

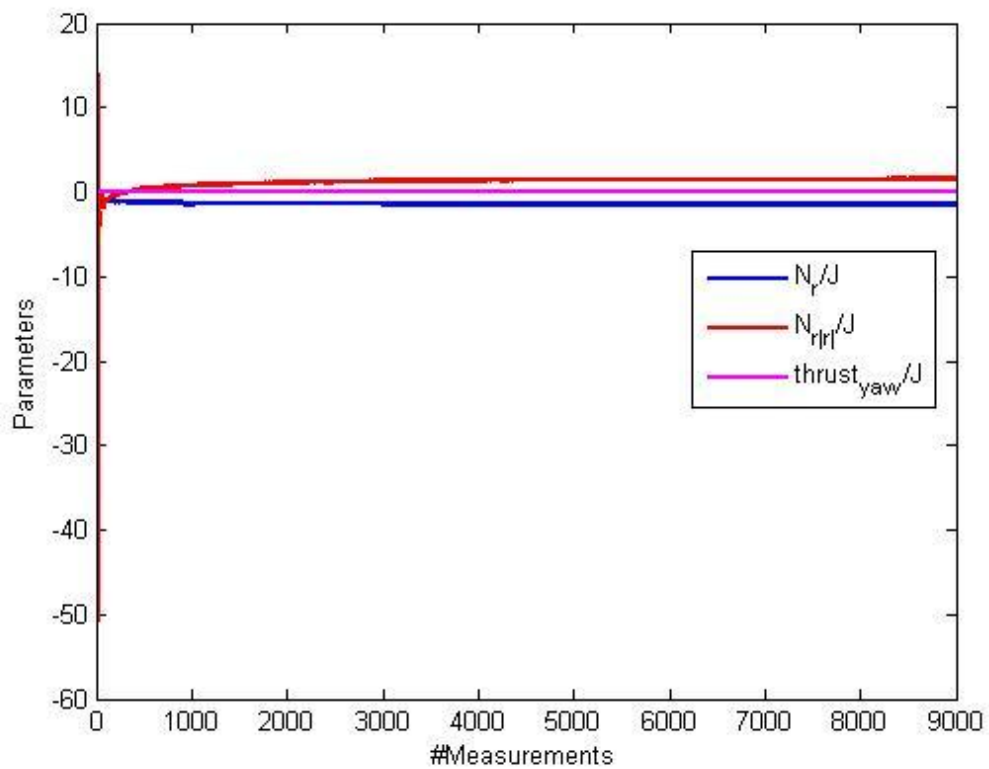


Σχήμα 4.6: Σύγκλιση δυναμικών παραμέτρων (heave)

Περιστροφή κατά Yaw

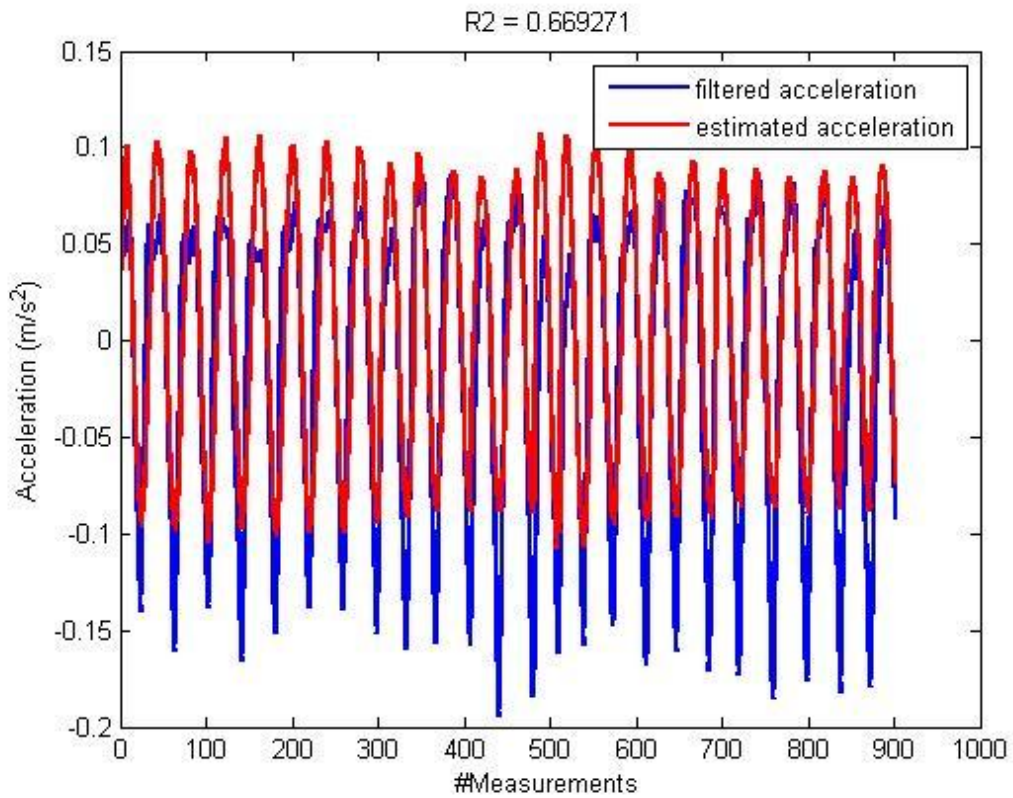


Σχήμα 4.7: Σύγκριση προκύπτουσας από παραγωγή και υπολογιζόμενης (μέσω του δυναμικού μοντέλου) επιτάχυνσης (περιστροφή κατά yaw)

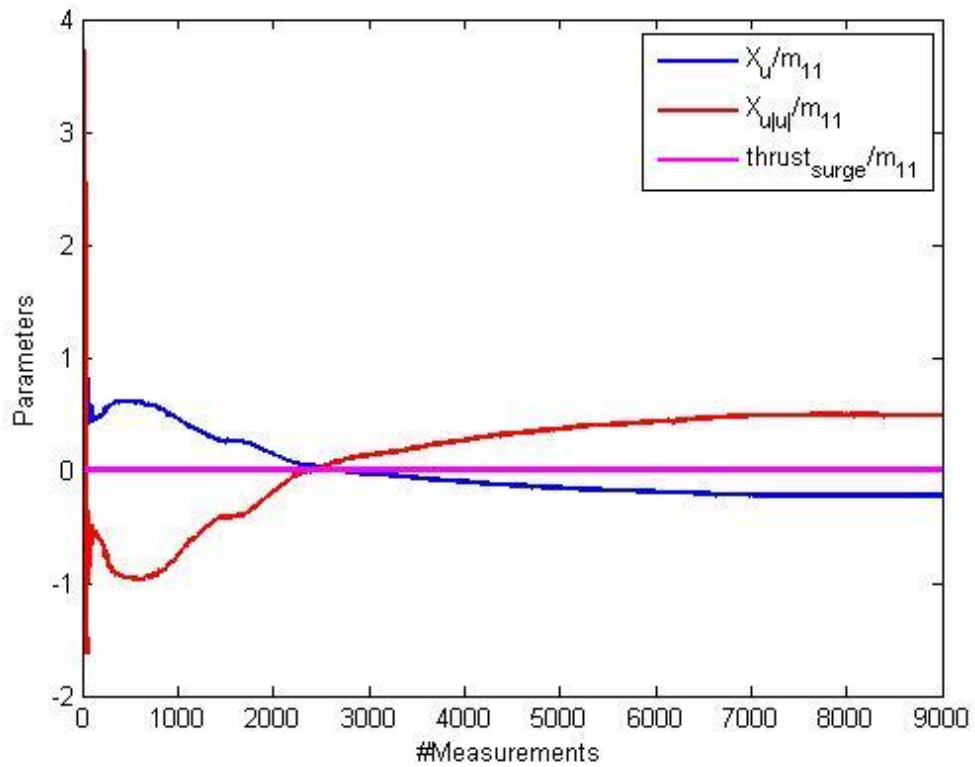


Σχήμα 4.8: Σύγκλιση δυναμικών παραμέτρων (περιστροφή κατά yaw)

Άξονας X (Surge) (Εργαστήριο Υδροδυναμικής, Ε.Υ.)

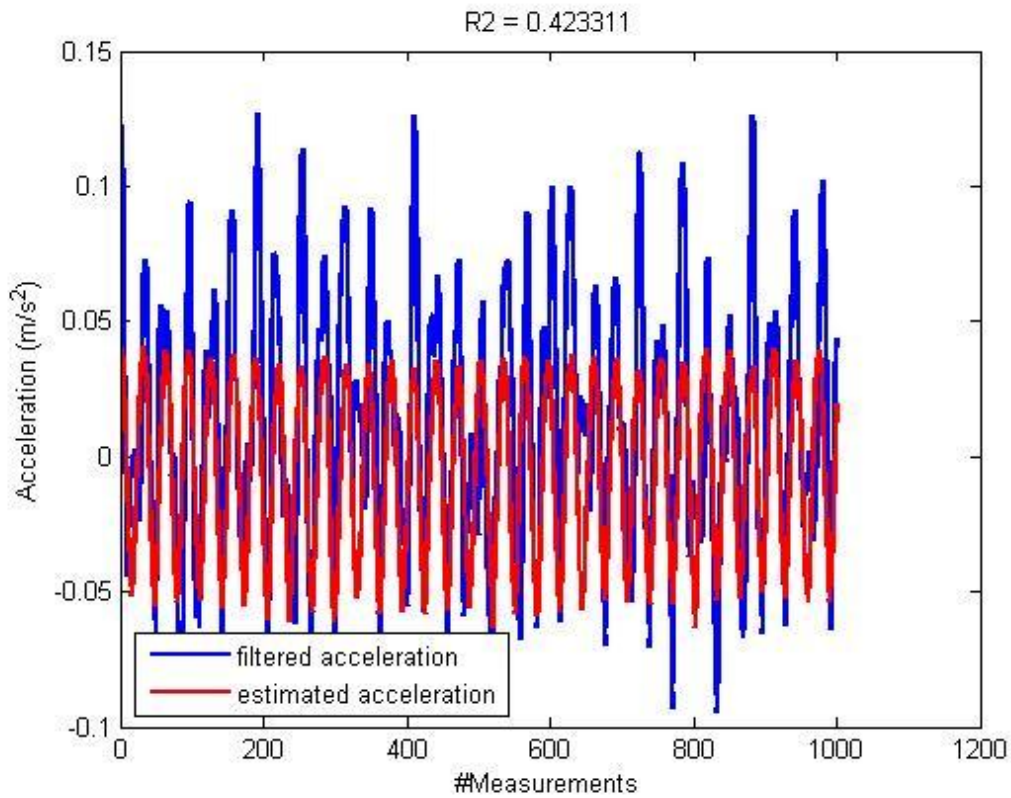


Σχήμα 4.9: Σύγκριση προκύπτουσας από παραγωγή και υπολογιζόμενης (μέσω του δυναμικού μοντέλου) επιτάχυνσης (surge)

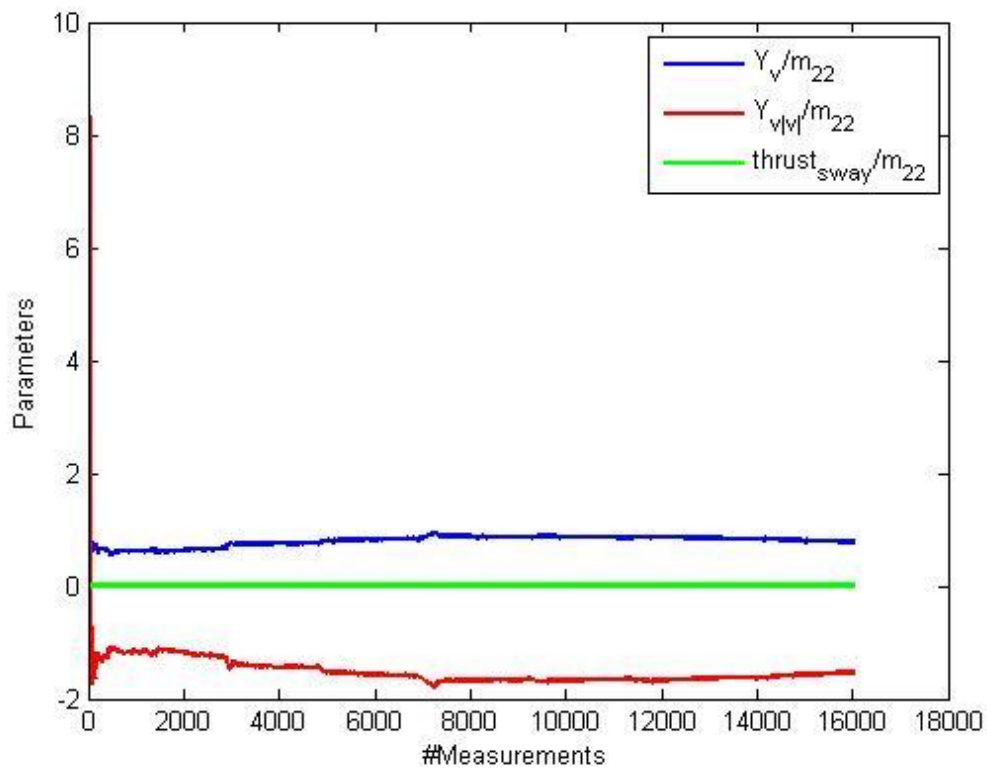


Σχήμα 4.10: Σύγκλιση δυναμικών παραμέτρων (surge)

Άξονας Y (Sway) (Εργαστήριο Υδροδυναμικής)

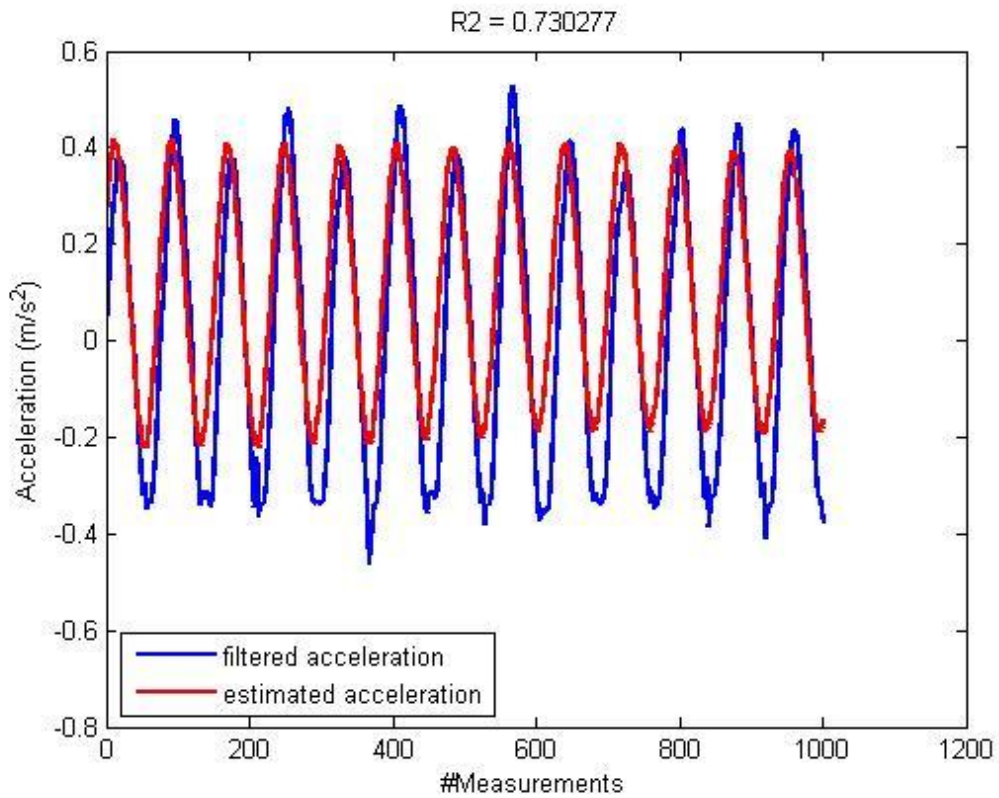


Σχήμα 4.11: Σύγκριση προκύπτουσας από παραγωγή και υπολογιζόμενης (μέσω του δυναμικού μοντέλου) επιτάχυνσης (sway)

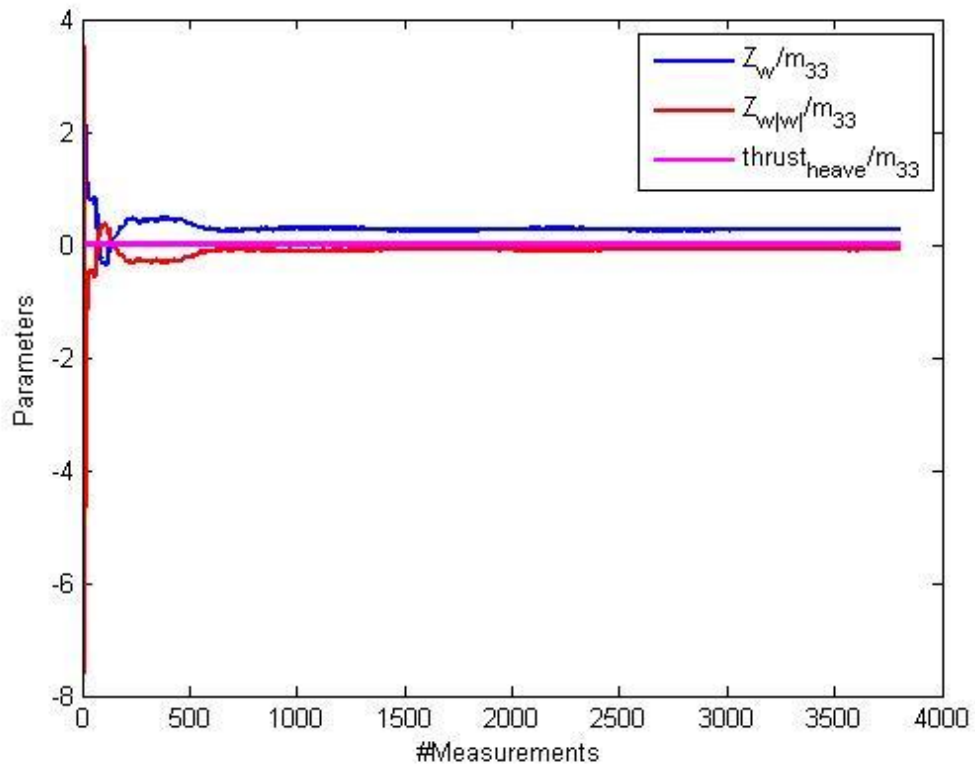


Σχήμα 4.12: Σύγκλιση δυναμικών παραμέτρων (sway)

Άξονας Z (Heave) (Εργαστήριο Υδροδυναμικής)

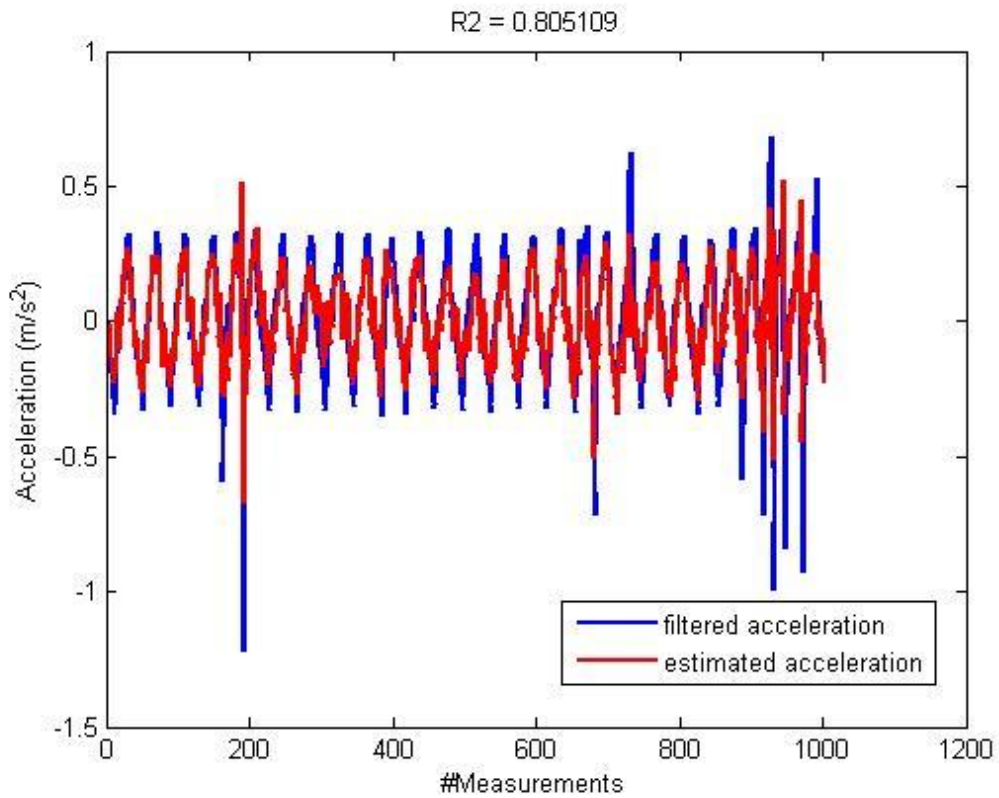


Σχήμα 4.13: Σύγκριση προκύπτουσας από παραγωγή και υπολογιζόμενης (μέσω του δυναμικού μοντέλου) επιτάχυνσης (sway)

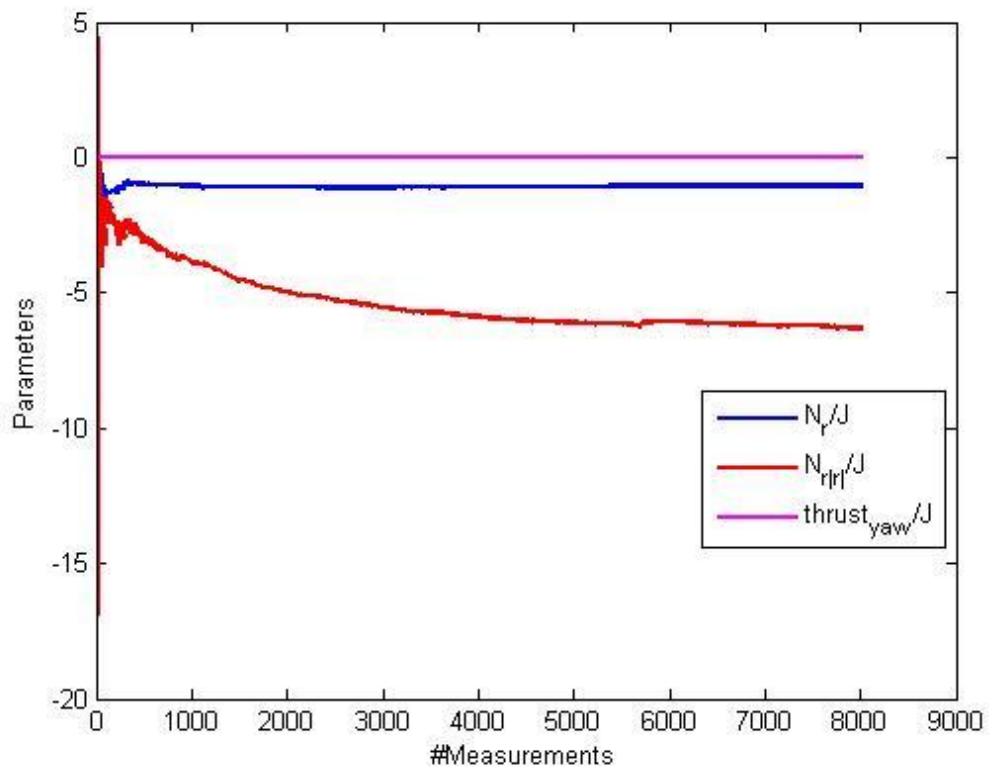


Σχήμα 4.14: Σύγκλιση δυναμικών παραμέτρων (sway)

Περιστροφή κατά Yaw (Εργαστήριο Υδροδυναμικής)



Σχήμα 4.15: Σύγκριση προκύπτουσας από παραγωγή και υπολογιζόμενης (μέσω του δυναμικού μοντέλου) επιτάχυνσης (περιστροφή κατά yaw)



Σχήμα 4.16: Σύγκλιση δυναμικών παραμέτρων (περιστροφή κατά yaw)

Συγκεντρωτικά, οι τιμές των παραμέτρων που προέκυψαν από τα 2 πειραματικά περιβάλλοντα, φαίνονται παρακάτω:

	$\frac{X_u}{m_{11}}$	$\frac{X_{u u }}{m_{11}}$	$\frac{k_x}{m_{11}}$	$\frac{Y_v}{m_{22}}$	$\frac{Y_{v v }}{m_{22}}$	$\frac{k_y}{m_{22}}$
E.A.E.	1.2484	-1.1386	0.0011	-0.1375	-0.0056	0.0071
E.Y.	-0.2194	0.4834	0.0002	0.7831	-1.5292	0.0001

	$\frac{Z_w}{m_{33}}$	$\frac{Z_{w w }}{m_{33}}$	$\frac{k_z}{m_{33}}$	$\frac{N_r}{J}$	$\frac{N_{r r }}{J}$	$\frac{k_{yaw}}{J}$
E.A.E.	0.2107	-4.1803	0.0007	-1.3335	1.8801	0.0007
E.Y.	0.2628	-0.0547	0.0005	-1.0359	-6.3177	0.0023

Μερικές παρατηρήσεις επί των αποτελεσμάτων:

- Είναι σαφές ότι οι τιμές των παραμέτρων στις 2 δύο περιπτώσεις διαφέρουν μεταξύ τους. Αυτό είναι εύλογο, καθώς υπήρχαν σημαντικές διαφορές στην πειραματική διάταξη στα δύο περιβάλλοντα. Πιο συγκεκριμένα, κατά την διάρκεια των πειραμάτων στο Εργαστήριο Υδροδυναμικής, η πειραματική βάση βρισκόταν περίπου 2 μέτρα ψηλότερα από την επιφάνεια του νερού. Κατά συνέπεια, η δυναμική του οχήματος, λόγω του επιλέον βάρους που προσέθεταν τα μεγάλα μήκη των καλωδίων τόσο του υποβρυχίου όσο και των αισθητήρων, αλλάζει άρδην σε αυτή την περίπτωση.
- Όσον αφορά στον άξονα y, λόγω τεχνικών δυσκολιών, δεν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθεί πείραμα για αυτόν τον βαθμό ελευθερίας ανεξάρτητα από τους άλλους. Κατά συνέπεια, πραγματοποιήθηκε ένα συνδυασμένο πείραμα (στο επίπεδο xy, με σταθερό βάθος δηλαδή), που εστίαζε παρόλαυτα στην κίνηση αυτή. Τα αποτελέσματα δεν είναι ικανοποιητικά, κάτι που οφείλεται εν μέρει στο απλουστευμένο δυναμικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε (απλοποίηση όρων σύζευξης), και σε ενδεχόμενη κακή ποιότητα του πειράματος, λόγω των ιδιαιτεροτήτων που παρουσίαζε.
- Η χρονική διάρκεια κάθε πειραματικού κύκλου (loop) είχε καθοριστεί στα 200 ms. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 όμως, ο αισθητήρας USBL μετρά στην καλύτερη περίπτωση (όπως στην δική μας) κάθε ένα δευτερόλεπτο. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τα δεδομένα να χρειάζονται ένα είδος επεξεργασίας ώστε να συγχρονιστούν με τα αντίστοιχα του mtι. Επιλέχθηκε η μέθοδος του resample, το οποίο είναι έτοιμη συνάρτηση (built-in function) του προγραμματιστικού πακέτου της Matlab. Για αυτόν τον λόγο εν τέλει, τα αποτελέσματα που λάβαμε από τα πειράματα στο E.A.E. θεωρούνται πιο αξιόπιστα και αυτά θα χρησιμοποιηθούν σαν αναφορά σε μελλοντικές εργασίες.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα - Μελλοντικές κατευθύνσεις

5.1: Συνεισφορά εργασίας

Η συνεισφορά της παρούσας εργασίας συνοψίζεται στους παρακάτω τομείς:

- Κινηματική και δυναμική μοντελοποίηση του ημί-αυτόνομου υποβρυχίου οχήματος LBV-150, τεσσάρων βαθμών ελευθερίας (surge, sway, heave, yaw), της εταιρίας Seabotix.
- Υλοποίηση μαθηματικού αλγορίθμου τόσο για εκτίμηση του διανύσματος κατάστασης του υποβρυχίου με χρήση κινηματικού μοντέλου. Υλοποίηση φίλτρου ταυτόχρονης εκτίμησης κατάστασης και εκτίμησης των δυναμικών παραμέτρων, με χρήση της δυναμικής μοντελοποίησης, αυτή την φορά, του υποβρυχίου.
- Προκαταρκτική αναγνώριση των δυναμικών παραμέτρων των τεσσάρων βαθμών ελευθερίας, σε ικανοποιητικό επίπεδο, σύμφωνα με τα όρια που είχαν τεθεί στην αρχή της εργασίας.

5.2: Μελλοντικές κατευθύνσεις

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τομείς στους οποίους μελλοντικά θα μπορούσε να επεκταθεί η ερευνητική δραστηριότητα αυτής της εργασίας:

- Αναγνώριση περισσότερο πολύπλοκων, και κατά συνέπεια ακριβέστερων δυναμικών μοντέλων. Θα μπορούσαν για παράδειγμα, να αναγνωριστούν μοντέλα που θα περιέχουν όρους σύζευξης ανάμεσα στους βαθμούς ελευθερίας, μοντελοποίηση του καλωδίου του υποβρυχίου, μοντελοποίηση εξωτερικών διαταραχών και λοιπών όρων που έχουν παραλειφθεί και που ενδεχομένως να υπάρχει νόημα να αναγνωριστούν.
- Περισσότερα πειράματα σε εναλλακτικό περιβάλλον για εξαγωγή περισσότερων συμπερασμάτων. Αυτό βέβαια προϋποθέτει την υπάρξει κατάλληλου εξοπλισμού, συγκεκριμένα ενός γρήγορου (στην μέτρηση) αισθητήρα αντίστοιχου του Isotrak, που θα παρέχει όμως μεγαλύτερη εμβέλεια μέτρησης για περισσότερο πολύπλοκες κινήσεις και μεγαλύτερα εύρη.
- Σχεδιασμός και υλοποίηση σχημάτων ελέγχου κίνησης με χρήση του δυναμικού μοντέλου του οχήματος.

Βιβλιογραφία

- [1] T. Fossen. *Guidance and Control of Ocean Vehicles*. Wiley, New York, 1994
- [2] S. J. Julier and J. K. Uhlmann. A New Extension of the Kalman Filter to Nonlinear Systems. *In Proc. of AeroSense: The 11th Int. Symp. on Aerospace/Defence Sensing, Simulation and Controls*, 1997.
- [3] R. Van der Merwe and E. Wan. The square-root unscented kalman filter for state and parameter-estimation. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, pages 3461–3464, 2001.
- [4] L. Ljung. *System Identification, Theory for the user*. Prentice Hall, 1987
- [5] P. Ridao, J. Battle, and M. Carreras. Model identification of a low-speed uuv with on-board sensors. *Proc. of the IFAC Control Applications in Marine Systems Conference*, 2001.
- [6] P. Ridao, A. Tiano, A. El-Fakdi, M. Carreras, and A. Zirilli. On the identification of non-linear models of unmanned underwater vehicles. *Control Engineering Practice 12*, pages 1483–1499, 2004.
- [7] Yaakov Bar-Shalom, X.Rong Li, Thiagalingam Kirubarajan, *Estimation with Applications to Tracking and Navigation – Theory and Algorithms and Software*, Wiley, New York, 2001.
- [8] G. Indiveri, *Modelling and Identification of Underwater Robotic Systems – Ph.D Thesis*, 1998.
- [9] Γεώργιος Χ. Καρράς, Τηλεχειρισμός με οπτική ανατροφοδότηση υποβρυχίων ρομποτικών οχημάτων- Διδακτορική Διατριβή, 2010.
- [10] D. Simon, *Optimal State Estimation*. Wiley, New York, 2006.

Παράρτημα

Ευρετήριο συναρτήσεων αλγορίθμου RLS&UKF

Παρακάτω ακολουθούν όλες οι συναρτήσεις που αποτελούν κομμάτι του παραπάνω αλγορίθμου, συνοδευόμενες με μερικά σχόλια όσον αφορά στην λειτουργία τους. Ενδεικτικά αναφέρονται οι συναρτήσεις για το πρόγραμμα που έτρεχε για τον άξονα X, με τις υπόλοιπες να προκύπτουν κατά αντιστοιχία.

- *RLS_X.m*: Το κεντρικό αρχείο όπου τρέχει ο αλγόριθμος. Σε αυτό φορτώνονται οι μετρήσεις και οι απαραίτητες αρχικές συνθήκες για την εκκίνηση του αλγορίθμου.
- *LBVDynamicsRLS_Surge.m*: Περιέχει τις διακριτοποιημένες δυναμικές εξισώσεις για το υποβρύχιο (ukf process model), όπως έχουν αναπτυχθεί στο κεφάλαιο 3.
- *Measurement_model_surge.m*: Περιλαμβάνει το μοντέλο μέτρησης που απαιτεί ο αλγόριθμος UKF (ukf measurement model), όπως έχει αναπτυχθεί στο κεφάλαιο 3.
- *UnscentedTransform.m*: Αυτό το αρχείο, πραγματοποιεί τον unscented μετασχηματισμό, με δεδομένο process model, που στην δική μας περίπτωση δίνεται στο αρχείο *LBVDynamicsRLS_Surge.m*.
- *SigmaPoints.m*: Υπολογισμός των σημείων σιγμα που απαιτούνται από τον ukf αλγόριθμο.
- *Rsquare.m*: Συνάρτηση που, παίρνοντας σαν inputs 2 στήλες ίδιου μήκους, υπολογίζει το στατιστικό μέγεθος R^2 που αφορά σε αυτές.