

ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΥΠΟΒΡΥΧΙΟΥ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΕΙΚΟΝΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Σάββας Πιπερίδης, Νικόλαος Τσουρβελούδης

Εργαστήριο Ευφών Συστημάτων και Ρομποτικής, Τμήμα Μηχανικών
Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο πειραματισμός με Αυτόνομα Υποβρύχια Ρομποτικά Σκάφη (ΑΥΡΟΣ) παρουσιάζει δυσκολίες και προβλήματα ικανά να αποθαρρύνουν την ερευνητική διάθεση προς την κατεύθυνση αυτή. Με την παρούσα εργασία επιχειρείται η προσέγγιση στη σχεδίαση και έλεγχο ενός τέτοιου σκάφους με τη βοήθεια περιβάλλοντος ρομποτικών προσομοιώσεων. Αρχικά περιγράφονται οι σχεδιαστικές επιλογές που οδήγησαν στη μοντελοποίηση ενός σκάφους που μπορεί να επιχειρεί σε μικρές δεξαμενές εσωτερικού χώρου και αποτελεί εφικτή κατασκευή. Στη συνέχεια αναφέρονται οι παράμετροι που περιγράφουν την θέση και την κίνησή του. Περιγράφεται η εξέλιξη ενός ελεγκτή κίνησης και η δυνατότητα ελέγχου ομάδας σκαφών με τη βοήθεια πρωτότυπης αρχιτεκτονικής λογισμικού.

Λέξεις κλειδιά: Υποβρύχια Ρομποτικά Σκάφη, Προσομοίωση, Έλεγχος Κίνησης.

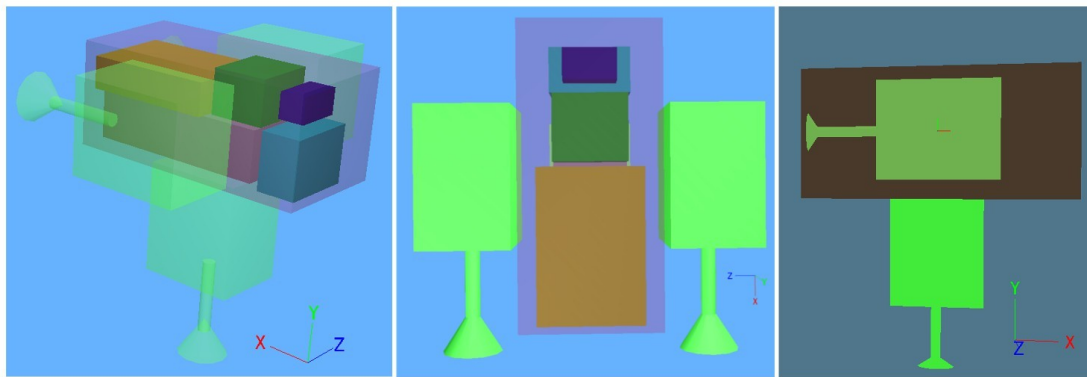
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πρόσφατα έχουν παρουσιαστεί εργασίες αναφερόμενες σε ρομποτικά ψάρια, με διαστάσεις και δυνατότητες κατάλληλες για να λειτουργούν σε μικρές δεξαμενές εσωτερικού χώρου (Zhou, 2008) (Liu, 2010) (Yang, 2009) επιδεικνύοντας και συνεργατική συμπεριφορά (Zhang, 2005). Ωστόσο στην κατηγορία των Αυτόνομων Υποβρύχιων Ρομποτικών Σκαφών (ΑΥΡΟΣ), τα σύγχρονα πρωτότυπα απαιτούν, το λιγότερο, χώρο μιας αθλητικής πισίνας για την πειραματική λειτουργία τους (AUVSI Foundation & ONR's 2010 International RoboSub Competition, 2010) και ανοιχτή θάλασσα για την πλήρη ανάπτυξη ομάδας σκαφών. Στον τομέα προσομοίωσης με Η/Υ έχουν παρουσιαστεί εργασίες παλαιότερα που αφορούν περιβάλλον όπου επιχειρεί ένα μοναδικό σκάφος, (Brutzman, 1994) και (McMillan, 1995), ή ομάδα σκαφών (Komerska, 2006) και (Borges, 1997). Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια πρώτη προσέγγιση στην υλοποίηση ενός περιβάλλοντος, που αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας την εμπορική εφαρμογή ρομποτικής προσομοίωσης Webots (Webots, 2010), για τον πειραματισμό με ΑΥΡΟΣ. Στο περιβάλλον αυτό είναι εφικτή η μελέτη σχετικά με μεθοδολογίες ελέγχου αλλά και η σύνταξη και αξιολόγηση σεναρίων που αναδεικνύουν συνεργατική συμπεριφορά ομάδας ΑΥΡΟΣ. Το περιβάλλον χρησιμοποιήθηκε για να εξεταστεί η ορθότητα των σχεδιαστικών επιλογών και των αλγορίθμων ελέγχου στο μοντέλο του σκάφους που προτείνεται για χρήση σε μικρές δεξαμενές εσωτερικού χώρου με βάθος μέχρι 4 μέτρα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά εξαρτήματα ενός ΑΥΡΟΣ στα πλαίσια αρχικής σχεδίασης τέτοιου σκάφους. Στο τμήμα 3 της εργασίας περιγράφεται το περιβάλλον προσομοίωσης που περιλαμβάνει τη δομή του λογισμικού και τις αναγκαίες εξισώσεις για την αναπαράσταση της υποβρύχιας κίνησης. Επίσης παρουσιάζεται ο ελεγκτής που ελέγχει την κίνηση του ΑΥΡΟΣ. Η εργασία ολοκληρώνεται με την παρουσίαση πειραματικών σεναρίων κίνησης και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

2. ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΚΑΦΟΥΣ

Η διαδικασία της σχεδίασης βασίστηκε σε επιλογές οι οποίες καθιστούν εφικτή την άμεση κατασκευή του σκάφους συνδυάζοντας έτοιμα εμπορικά προϊόντα με απλές κατασκευαστικές τεχνικές που εφαρμόζονται στο μοντελισμό. Το σκάφος αποτελείται από ένα στεγανό θάλαμο στον οποίο προσαρμόζονται οι τρεις μονάδες παραγωγής κίνησης όπως φαίνεται στις όψεις της Εικόνας 1. Ο στεγανός θάλαμος περικλείει τα παρακάτω εξαρτήματα:

- συστοιχία συσσωρευτών τεχνολογίας Lithium-ion polymer 3S1P, που χρησιμοποιούνται για την παροχή ενέργειας στις ηλεκτρονικές συσκευές.



Εικόνα 1: Όψεις σχεδιαστικού μοντέλου ΑΥΡΟΣ χωρίς υδροδυναμικά βοηθήματα

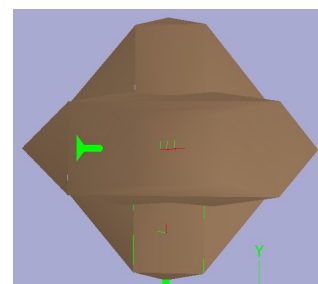
- συστοιχία συσσωρευτών τεχνολογίας NiMH 7.2V-3000mAh, που χρησιμοποιούνται για την παροχή ενέργειας στους ηλεκτροκινητήρες
- έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή προδιαγραφών pico_ITX
- έναν ρομποτικό ελεγκτή εφοδιασμένο με αναλογικές και ψηφιακές εισόδους και εξόδους (οοPIC-C)
- ηλεκτρονική μονάδα οδήγησης των ηλεκτροκινητήρων (αποτελείται από δύο Sabertooth Dual 5A Motor Drivers)

Πίνακας 1: Οι διαστάσεις και η μάζα των εξαρτημάτων του σκάφους

Εξάρτημα	Διαστάσεις σε μέτρα, $M \times P \times Y$	Μάζα σε κιλά
Θάλαμος ηλεκτρονικών	0,19×0,09×0,08	0.6
Συστοιχία συσσωρευτών Lipo	0,14×0,05×0,04	0.4
Συστοιχία συσσωρευτών NiMH	0,045×0,055×0,03	0.02
H/Y pico ITX	0,1×0,07×0,03	0.2
Ρομποτικός ελεγκτής οοPIC-C	0,035×0,02×0,02	0.01
Μονάδα οδήγησης των ηλεκτροκινητήρων	0,042×0,035×0,048	0.04
Μονάδα κίνησης (χωρίς άξονα και προπέλα)	0,09×0,06×0,075	1.9
Συνολική μάζα του σκάφους $m_{AUV}=4.03\text{kg}$		
Συνολικές διαστάσεις σκάφους: $AUV_x=0.32\text{m}$, $AUV_y=0.31\text{m}$, $AUV_z=0.28\text{m}$		
Εμβαδά μετωπικών επιφανειών του σκάφους: $S_{xy}=0,0569\text{m}^2$, $S_{xz}=0,0536\text{m}^2$, $S_{yz}=0,039\text{m}^2$		

Στο στεγανό θάλαμο του σκάφους προσαρτώνται τρεις μονάδες παραγωγής κίνησης με τον τρόπο που φαίνεται στην Εικόνα 1. Κάθε μια από αυτές αποτελείται από ένα ηλεκτροκινητήρα σταθερού ρεύματος, Graupner Multispeed 140, έναν στεγανό άξονα μετάδοσης κίνησης και την προπέλα. Οι διαστάσεις και η μάζα των εξαρτημάτων και του σκάφους περιγράφονται στον Πίνακα 1.

Κύριο χαρακτηριστικό της σχεδίασης του σκάφους είναι η απλότητα κατασκευής και οι μικρές διαστάσεις. Η τοποθέτηση των δύο κινητήριων μονάδων του σκάφους εκατέρωθεν του στεγανού θαλάμου επιτρέπει την επιτόπου περιστροφή του, αλλά και την διαγραφή ευθείας ή καμπύλης τροχιάς στο επίπεδο XZ της Εικόνας 1, ανάλογα με τη



Εικόνα 2: Τελική μορφή του σκάφους, πλάγια όψη

σχετική ταχύτητα και φορά περιστροφής τους. Η τρίτη μονάδα κίνησης έχει τοποθετηθεί κάθετα στο επίπεδο XZ ώστε να ρυθμίζει την κατακόρυφη κίνησή του σκάφους. Επίσης με την τοποθέτησή της, η τρίτη μονάδα κίνησης μετακινεί το κέντρο μάζας του σκάφους 5 εκατοστά χαμηλότερα και προσδίδει έτσι την απαραίτητη σταθερότητα στην πλεύση του. Λόγω του χαμηλού κέντρου βάρους το σκάφος διορθώνει παθητικά τις όποιες διαταράξεις τείνουν να το παρασύρουν από την κατακόρυφη θέση ισορροπίας. Η συνολική μάζα του σκάφους ρυθμίστηκε έτσι ώστε αυτό να παρουσιάζει ελάχιστη θετική πλευστότητα. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται πως θα επιπλεύσει αν αδρανήσουν όλες οι κινητήριες μονάδες και επίσης επιτυγχάνεται χαμηλή κατανάλωση ενέργειας κατά την κίνησή του.

Την σχεδίαση του σκάφους ολοκληρώνουν τα πρόσθετα υδροδυναμικά βοηθήματα που εξομαλύνουν τις ακμές των σχημάτων μειώνοντας έτσι τις υδροδυναμικές αντιστάσεις στην κίνηση του. Επίσης επιτυγχάνουν συμμετρική κατανομή στις υδροδυναμικές δυνάμεις, διασφαλίζοντας έτσι τη σταθερότητα πλεύσης. Με τη χρήση των βοηθημάτων, αν και αυξάνεται η μετωπική επιφάνεια του σκάφους, προσεγγίζεται η μορφή σταγόνας σε όλες τις όψεις του σκάφους και έτσι τα χαρακτηριστικά πλεύσης βελτιώνονται σημαντικά. Στην Εικόνα 2 φαίνεται το πλήρες σκάφος μετά την τοποθέτηση των υδροδυναμικών βοηθημάτων.

3. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

3.1 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Ο εικονικός κόσμος στο περιβάλλον της προσομοίωσης έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εφικτός ο πειραματισμός τόσο με ένα, μοναδικό, σκάφος όσο και με μια ομάδα από αυτά. Ο πληθυσμός της ομάδας περιορίζεται μόνο από την υπολογιστική ισχύ του ηλεκτρονικού υπολογιστή που εκτελεί την προσομοίωση. Έχουν ολοκληρωθεί με επιτυχία προσομοιώσεις με πληθυσμό μέχρι δέκα σκάφη.



Εικόνα 3: Η αρχιτεκτονική του λογισμικού της προσομοίωσης

Ο κόσμος της προσομοίωσης αποτελείται από τα μοντέλα των σκαφών, το λογισμικό που αναπτύχθηκε για τον έλεγχό τους και τη μηχανή προσομοίωσης Φυσικής ODE (Open Dynamics Engine, 2010), που υλοποιεί τις φυσικές ιδιότητες των στερεών σωμάτων. Η εφαρμογή ρομποτικής προσομοίωσης Webots παρέχει ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ της εσωτερικής μηχανής προσομοίωσης πραγματικού χρόνου και του λογισμικού που περιγράφεται. Κάθε ένα σκάφος που προστίθεται στον εικονικό κόσμο διαθέτει το δικό του, τοπικής εμβέλειας, ελεγκτή που είναι πιστό αντίγραφο ενός πρότυπου, κοινού για όλα τα σκάφη. Υπάρχει μόνο ένας διαφοροποιημένος ελεγκτής επίβλεψης, ο οποίος έχει πρόσβαση σε όλες τις συσκευές όλων των σκαφών και μπορεί επίσης να αλλάξει και παραμέτρους της προσομοίωσης, όπως για παράδειγμα οι θέσεις σωμάτων που περιλαμβάνονται στον κόσμο. Ο επιβλέπων ελεγκτής είναι απαραίτητος για την υλοποίηση δυναμικά μεταβαλλόμενων σεναρίων πειραματισμού. Κάθε ένας από τους ελεγκτές χρησιμοποιεί τις δομές δεδομένων που περιλαμβάνει το πρωτόκολλο επικοινωνίας για την ανταλλαγή πληροφοριών με την εσωτερική μηχανή της προσομοίωσης. Με τον τρόπο αυτό στην αρχή του κάθε ενός από τα διακριτά και

αυστηρά χρονισμένα βήματα της προσομοίωσης, ο ελεγκτής του κάθε σκάφους ανταλλάσσει δεδομένα με τις συσκευές που περιλαμβάνονται σε αυτό. Λαμβάνει πληροφορίες από τις συσκευές εισόδου, όπως οι αισθητήρες του σκάφους και μεταδίδει, αντίστοιχα, προς τις συσκευές εξόδου. Τέλος το κάθε σκάφος και ο αντίστοιχος ελεγκτής του δέχονται και υλοποιούν τις παρεμβάσεις του επιβλέποντος ελεγκτή.

Με τη βοήθεια των δομών δεδομένων που περιλαμβάνονται στη βιβλιοθήκη ODE, υπολογίζονται τα μεγέθη που είναι απαραίτητα για την περιγραφή της κίνησης στερεού σώματος, όπως οι συντεταγμένες του, ο προσανατολισμός του, η γραμμική και γωνιακή ταχύτητά του. Επίσης ανιχνεύονται πιθανές συγκρούσεις μεταξύ των στερεών σωμάτων και υπολογίζονται οι δυνάμεις και ροπές που ασκούνται σε αυτά.

3.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΚΑΦΟΥΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Οι απαραίτητες παράμετροι για τον έλεγχο του σκάφους, αλλά και για την υλοποίηση υποθετικών σεναρίων ανάδειξης συνεργατικών συμπεριφορών υπολογίζονται στη συνέχεια. Στους υπολογισμούς λαμβάνεται υπόψη η σχετική θέση, που σε κάθε βήμα της προσομοίωσης, έχει το σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων του σκάφους, Εικόνα 4. Τα διανύσματα

$$n_1 = [x, y, z]^T, v = [v_1^T, v_2^T], v_1 = [u, v, w]^T, v_2 = [p, q, r]^T,$$

υπολογίζονται από την εσωτερική μηχανή φυσικής ODE σε κάθε βήμα της προσομοίωσης, όπου $n_1 = [x, y, z]^T$ είναι οι συντεταγμένες του σκάφους ως προς το κύριο σύστημα συντεταγμένων $X_w Y_w Z_w$ του κόσμου της προσομοίωσης Webots, v το διάνυσμα ταχυτήτων, v_1 το διάνυσμα γραμμικής ταχύτητας και v_2 το διάνυσμα γωνιακής ταχύτητας, τα τρία τελευταία ως προς το σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων $X_{UAV} Y_{UAV} Z_{UAV}$ του κάθε σκάφους. Ο προσανατολισμός του σκάφους αποθηκεύεται σε ένα πίνακα τα στοιχεία του οποίου είναι οι συντεταγμένες των μοναδιαίων διανυσμάτων του περιστραμμένου σωματοπαγούς συστήματος ως προς το κύριο σύστημα συντεταγμένων $X_w Y_w Z_w$ (Russell, 2006). Για την προσομοίωση όμως είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του διανύσματος προσανατολισμού του σκάφους που περιλαμβάνει τις γωνίες Euler (roll, pitch, yaw): $n_1 = [\varphi, \theta, \psi]^T$. Το διάνυσμα n_1 υπολογίζεται από το λογισμικό που αναπτύχθηκε και προκύπτει τριγωνομετρικά από τον πίνακα RotationMatrix. Για παράδειγμα η γωνία ψ υπολογίζεται ως ακολούθως:

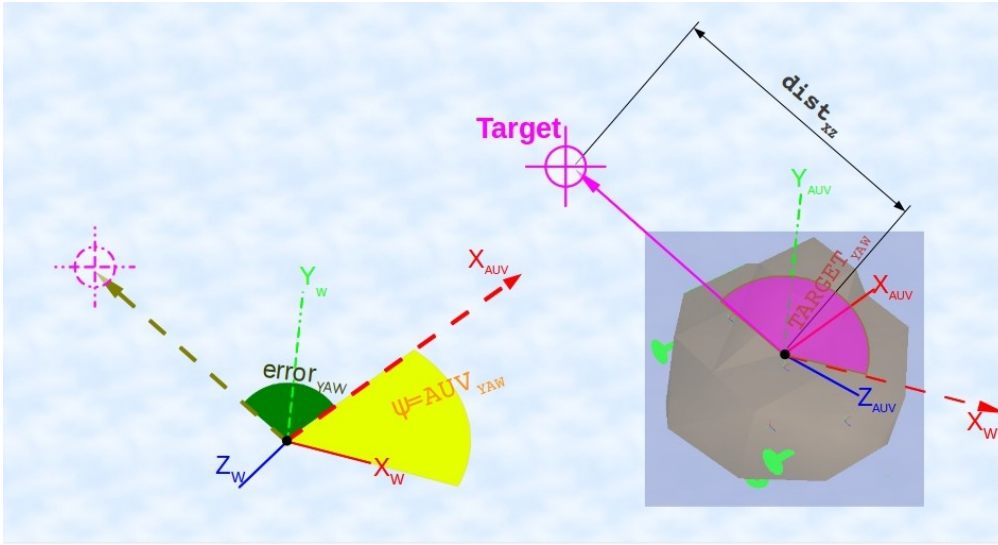
$$\psi = AUV_{YAW} = \arctan2(\text{RotationMatrix}[2], \text{RotationMatrix}[10]) \quad (1)$$

Άλλα δύο απαραίτητα μεγέθη, που υπολογίζονται από το λογισμικό που αναπτύχθηκε, σε κάθε βήμα της προσομοίωσης, είναι οι γωνίες $TARGET_{YAW}$ και $error_{YAW}$. Οι γωνίες αυτές παρουσιάζονται στην Εικόνα 4, όπου φαίνεται ένα στιγμιότυπο από τον κόσμο, σε προβολή στο επίπεδο $X_w Z_w$ για να προβληθούν πιο καθαρά τα μεγέθη. Στην εικόνα φαίνονται το κύριο και το σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων, η θέση του σκάφους και του στόχου, $TARGET$, της πορείας του. $TARGET_{YAW}$ είναι η γωνία που σχηματίζει, στο επίπεδο $X_w Z_w$ ο άξονας X_w με τον άξονα που ενώνει το κέντρο του σωματοπαγούς συστήματος $X_{UAV} Y_{UAV} Z_{UAV}$ με τον στόχο της πορείας του σκάφους. Για τη γωνία $TARGET_{YAW}$ ισχύει:

$$TARGET_{YAW} = \begin{cases} \arctan2((TARGET_x - x) - (TARGET_y - y)) - \pi/2, & \text{αν } \pi \geq TARGET_{YAW} \geq -\pi/2 \\ TARGET_{YAW} = \arctan2((TARGET_x - x) - (TARGET_y - y)) + 3\pi/2, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (2)$$

όπου $[TARGET_x, TARGET_y, TARGET_z]^T$ οι συντεταγμένες του στόχου πορείας ως προς το κύριο σύστημα συντεταγμένων. Η $error_{YAW}$ είναι η γωνία που σχηματίζει, στο επίπεδο $X_w Z_w$, ο άξονας X_{AUV} με τον άξονα που ενώνει το κέντρο του σωματοπαγούς συστήματος με τον στόχο της πορείας του σκάφους και υπολογίζεται με τη βοήθεια του παρακάτω αλγορίθμου:

AN $AUV_{YAW} * TARGET_{YAW} \geq 0$ **TOTE** $error_{YAW} = TARGET_{YAW} - AUV_{YAW}$
ΑΛΛΙΩΣ AN $AUV_{YAW} \geq 0$ **TOTE**
 {
 $error_{YAW} = (\pi - AUV_{YAW}) + (\pi + TARGET_{YAW})$
AN $error_{YAW} > \pi$ **TOTE** $error_{YAW} = -(2\pi - error_{YAW})$
 }
ΑΛΛΙΩΣ AN $AUV_{YAW} < 0$
 {
 $error_{YAW} = -AUV_{YAW} + TARGET_{YAW}$
AN $error_{YAW} > \pi$ **TOTE** $error_{YAW} = -(\pi - error_{YAW})$
 }



Εικόνα 4: Η γεωμετρία για τον υπολογισμό των σημαντικότερων παραμέτρων για την κίνηση του σκάφους

Κατά την υποβρύχια κίνηση του σκάφους ισχύει η παρακάτω σχέση μεταξύ των ασκούμενων σε αυτό δυνάμεων (Fossen, 1994):

$$M \dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(n) = \tau \quad (3)$$

όπου M είναι ο πίνακας αδράνειας του σκάφους, $C(v)$ ο πίνακας για τις φυγόκεντρες δυνάμεις και τις δυνάμεις Coriolis, $g(n)$ είναι οι δυνάμεις βαρύτητας και άνωσης, $D(v)$ οι δυνάμεις υδροδυναμικής αντίστασης που οφείλονται στην κίνηση του σκάφους μέσα στο νερό και τ οι δυνάμεις που ασκούνται στο σκάφος από τις προπέλες του.

Στον 6×6 πίνακα M περιλαμβάνονται πληροφορίες για τη μάζα m_{AUV} , τις ροπές αδράνειας I_{ij} : $i, j = X_{AUV}, Y_{AUV}, Z_{AUV}$ και την πρόσθετη μάζα. Λόγω της συμμετρίας που παρουσιάζει το σκάφος ως προς τους άξονες $X_{AUV}, Y_{AUV}, Z_{AUV}$ και με την παραδοχή πως το σκάφος, μορφολογικά, προσεγγίζει το σχήμα ενός ελλειψοειδούς στερεού με άξονες συμμετρίας τους $X_{AUV}, Y_{AUV}, Z_{AUV}$ τότε ο πίνακας M είναι διαγώνιος και τα στοιχεία της κύριας διαγωνίου είναι (Fossen, 1994):

$$\begin{aligned}
 M_{11} &= m_{AUV} + \pi \rho (AUV_Y/2)^2, \quad M_{22} = M_{33} = m_{AUV} + \pi \rho (AUV_X/2)^2 \\
 M_{44} &= I_{X_{AUV} X_{AUV}} + 1/8 \pi \rho ((AUV_Y/2)^2 - (AUV_Z/2)^2)^2, \\
 M_{55} &= I_{Y_{AUV} Y_{AUV}} + 1/8 \pi \rho ((AUV_X/2)^2 - (AUV_Z/2)^2)^2, \\
 M_{66} &= I_{Z_{AUV} Z_{AUV}} + 1/8 \pi \rho ((AUV_X/2)^2 - (AUV_Y/2)^2)^2
 \end{aligned} \quad (4)$$

όπου m_{AUV} η μάζα και AUV_X, AUV_Y, AUV_Z οι διαστάσεις του σκάφους, ρ η πυκνότητα του νερού. Ο δεύτερος όρος του κάθε αθροίσματος αφορά την πρόσθετη μάζα.

$C(v)$ είναι ο 6×6 πίνακας για τις φυγόκεντρες δυνάμεις και τις δυνάμεις Coriolis (Zufferey, 2006):

$$C(v) = \begin{bmatrix} O_{3 \times 3} & S(M_{11}v_1 + M_{12}v_2) \\ S(M_{11}v_1 + M_{12}v_2) & S(M_{21}v_1 + M_{22}v_2) \end{bmatrix} \quad (5)$$

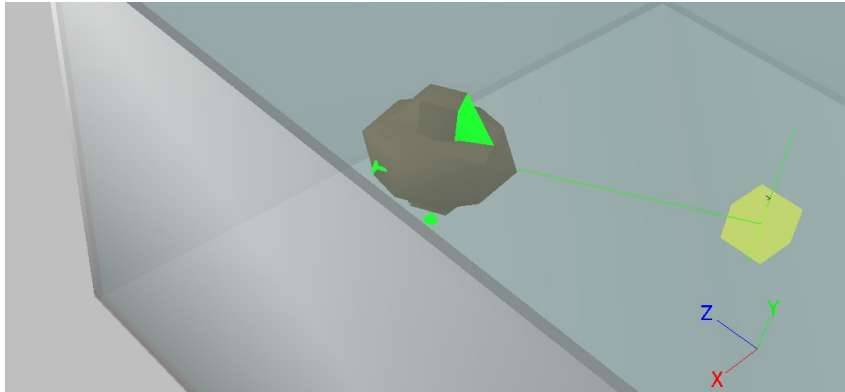
$O_{3 \times 3}$ είναι ο μηδενικός πίνακας, M_{ij} $i, j=1,2$ οι τέσσερις 3×3 υποπίνακες του πίνακα μάζας $M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}$ και $S(\lambda) = \begin{bmatrix} 0 & -\lambda_3 & \lambda_2 \\ \lambda_3 & 0 & -\lambda_1 \\ -\lambda_2 & \lambda_1 & 0 \end{bmatrix}$, όπου $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]^T$.

Τέλος, για τις δυνάμεις υδροδυναμικής αντίστασης, $D(v)$, χρησιμοποιούμε την παραδοχή ότι μπορεί να αναλυθούν σε τρεις τετραγωνικές συνιστώσες D_X, D_Y, D_Z , μια για κάθε συνιστώσα της γραμμικής ταχύτητας του σκάφους v_1 και τρεις γραμμικές συνιστώσες D'_X, D'_Y, D'_Z , μια για κάθε συνιστώσα της γωνιακής ταχύτητας του σκάφους v_2 (Zufferey, 2006). Έτσι προκύπτει:

$$\begin{aligned} D(v) &= -(D_X + D_Y + D_Z + D'_X + D'_Y + D'_Z), \\ D_X &= \frac{1}{2} C_{d_x} \rho u^2 S_X, \quad D_Y = \frac{1}{2} C_{d_y} \rho v^2 S_Y, \quad D_Z = \frac{1}{2} C_{d_z} \rho w^2 S_Z \\ D'_X &= \frac{1}{2} C'_{d_x} \rho p, \quad D'_Y = \frac{1}{2} C'_{d_y} \rho q, \quad D'_Z = \frac{1}{2} C'_{d_z} \rho r \end{aligned} \quad (6)$$

Οι επί μέρους συντελεστές της τετραγωνικής υδροδυναμικής αντίστασης, C_d , και γραμμικής, C'_d , υπολογίζονται προσεγγίζοντας τη μορφολογία του σκάφους με τη βοήθεια βασικών γεωμετρικών σχημάτων (Schjølberg, 1994 και Webots, 2010, *blimp.lis sample simulation*): $C_{d_x}=1, C_{d_y}=C_{d_z}=0.8, C'_{d_x}=0.0012, C'_{d_y}=0.017, C'_{d_z}=0.018$.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΣΜΟΙ ΜΕ PD ΕΛΕΓΚΤΗ



Εικόνα 5: Στιγμιότυπο από πειραματισμό στο εικονικό περιβάλλον προσομοίωσης για τον καθορισμό των παραμέτρων του PD ελεγκτή κίνησης

Εκτεταμένοι πειραματισμοί πραγματοποιήθηκαν στο περιβάλλον προσομοίωσης για την παραμετροποίηση ενός PD ελεγκτή. Το σενάριο που χρησιμοποιήθηκε, αρχικά, τοποθετεί το σκάφος σε τυχαία σημεία του κόσμου με σκοπό να προσεγγίσει έναν ακίνητο ή μετακινούμενο στόχο. Με τον τρόπο αυτό ελέγχθηκε η ορθότητα των γεωμετρικών υπολογισμών και ρυθμίστηκαν οι παράμετροι του PD ελεγκτή. Στη συνέχεια οι θέσεις του σκάφους και του στόχου ήταν σταθερές, Εικόνα 5, και με διαδοχικές επαναλήψεις έγιναν μικρορυθμίσεις στις παραμέτρους ώστε να επιτευχθεί η συντομότερη δυνατή προσέγγιση του στόχου με την ελάχιστη δυνατή ενεργειακή κατανάλωση.

Στον Πίνακα 2, παρουσιάζονται κάποια χαρακτηριστικά αποτελέσματα των πειραματισμών για την εξέλιξη ενός PD ελεγκτή. Ο έλεγχος του σκάφους διακρίνει το λάθος στην τοποθέτηση του σκάφους ως προς το στόχο. Ο ελεγκτής προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει το $error_{YAW}$, Εικόνα 4, χρησιμοποιώντας την έξοδό του: $U_Y = Kp_Y * error_{YAW} + Kd_Y * \dot{error}_{YAW}$, την απόσταση $dist_{XZ}$ χρησιμοποιώντας την έξοδό

του: $U_d = Kp_d * dist_{xz} + Kd_d * \dot{dist}_{xz}$ και τέλος την απόσταση h στον άξονα Y_w μεταξύ σκάφους και στόχου χρησιμοποιώντας την έξοδό του: $U_h = Kp_h * h + Kd_h * \dot{h}$. Η παράμετρος της κατανάλωσης είναι ένας τρόπος για να συγκριθούν οι επιδόσεις των διαφορετικών ελεγκτών. Για κάθε ένα βήμα της προσομοίωσης υπολογίζεται, για κάθε κινητήρα, το γινόμενο του μέτρου της δύναμης που ασκεί επί το χρονικό διάστημα που διαρκεί αυτό το βήμα. Αθροίζοντας τα γινόμενα αυτά για τους τρεις κινητήρες προκύπτει η τιμή της κατανάλωσης για το αντίστοιχο χρονικό διάστημα.

Πίνακας 2: Πειραματικά δεδομένα από την εξέλιξη του ελεγκτή του σκάφους

Παράμετροι	Χρόνος Προσέγγισης	Κατανάλωση
$Kp_Y=1, Kd_Y=12000, Kp_H=1, Kd_H=1200, Kp_D=0.4, Kd_D=15000$	1.7947	43.1949
$Kp_Y=2, Kd_Y=12000, Kp_H=2, Kd_H=1200, Kp_D=0.4, Kd_D=15000$	0.9328	43.2168
$Kp_Y=3, Kd_Y=15000, Kp_H=3, Kd_H=1500, Kp_D=0.4, Kd_D=15000$	0.7616	43.3884
$Kp_Y=4, Kd_Y=15000, Kp_H=4, Kd_H=1500, Kp_D=0.4, Kd_D=16000$	0.6181	43.6277
$Kp_Y=5, Kd_Y=15000, Kp_H=2, Kd_H=1500, Kp_D=0.4, Kd_D=17000$	0.5335	43.1992
$Kp_Y=5, Kd_Y=18000, Kp_H=1.5, Kd_H=1500, Kp_D=0.5, Kd_D=18000$	0.5925	42.9410

Τα καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν στην περίπτωση που διορθώνεται 'νευρικά' το $error_{YAW}$, (μεγαλύτερες τιμές στα Kp_Y και Kd_Y) διατηρώντας μικρό ρυθμό διόρθωσης στο $dist_{xz}$ και το h .

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Χρησιμοποιώντας το περιβάλλον προσομοίωσης που περιγράφεται στην εργασία είναι εφικτός ο πειραματισμός με ΑΥΡΟΣ, κάτι που πρακτικά παραμένει σήμερα πολύ δύσκολο. Η προσομοίωση υλοποιεί την επικοινωνία και την συλλογή πληροφοριών για την κατάσταση των σκαφών, κάτι που είναι ιδιαίτερα δύσκολο να υλοποιηθεί στην πραγματικότητα. Σχεδιάστηκαν ελεγκτές και δοκιμάστηκε η αποτελεσματικότητά τους. Αναλύθηκε το γεωμετρικό μοντέλο της κίνησης και βελτιώθηκαν οι σχεδιαστικές επιλογές για τη μορφή που θα αποκτήσει το σκάφος. Μελετήθηκε το φυσικό μοντέλο που διέπει την κίνηση του σκάφους και τις δυνάμεις, ροπές που ασκούνται σε αυτό. Αναπτύχθηκε λογισμικό που υλοποιεί μια αρχιτεκτονική κατάλληλη για πειραματισμό με ομάδα ρομποτικών σκαφών. Μελλοντικό στόχο αποτελεί η μελέτη και η ανάδειξη συνεργατικών συμπεριφορών από ομάδα ομοειδών ή ετερογενών ΑΥΡΟΣ και η μεταφορά του μοντέλου από τον εικονικό κόσμο της προσομοίωσης στην πραγματικότητα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- AUVSI Foundation & ONR's International RoboSub Competition (2010), <http://www.auvsifoundation.org/auvsi/foundation/Competitions/AUVCompetition>
- Borges João de Sousa, Aleks Göllü (1997), 'A simulation environment for the coordinated operation of multiple autonomous underwater vehicles', *Proceedings of the 29th conference on Winter simulation*, Atlanta, Georgia, United States
- Brutzman P. Donald (1994), 'A Virtual World for an Autonomous Underwater Vehicle', Naval Postgraduate School, Monterey California.
- Fossen I. Thor (1994), 'Guidance and Control of Ocean Vehicles', Wiley, New York.
- Komerska J. Rick, Chappell G. Steven (2006), 'A Simulation Environment for Testing and Evaluating Multiple Cooperating Solar-powered AUVs', *Autonomous Undersea Systems Institute*
- Liu Jindong, Huosheng Hu (2010), 'Biological Inspiration: From Carangiform Fish to Multi-Joint Robotic Fish', *Journal of Bionic Engineering*, Volume 7, Issue 1, Pages 35-48.
- Open Dynamics Engine (2010), <http://www.ode.org>.

Schjølberg Ingrid and Thor I. Fossen (1994), 'Modelling and Control of Underwater Vehicle-Manipulator Systems', in Proc. rd Conf. on Marine Craft maneuvering and control, pages 45-57.

Russell Smith (2006), 'OPEN DYNAMICS ENGINE V 0.5 USER GUIDE', www.ode.org.

Yang Shao-bo, Jing Qiu, Xiao-yun Han (2009), 'Kinematics Modeling and Experiments of Pectoral Oscillation Propulsion Robotic Fish', *Journal of Bionic Engineering*, vol. 6, pp. 174-179.

Webots (2010), <http://www.cyberbotics.com>. Commercial Mobile Robot Simulation Software.

Zhang Dandan, Yimin Fang, Guangming Xie, Junzhi Yu and Long Wang (2005), 'A Coordination Method for Multiple Biomimetic Robotic Fish Box-pushing', *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation*, Niagara Falls, Canada.

Zhou Chao, Min Tan, Zhiqiang Cao, Shuo Wang, Douglas Creighton, Nong Gu and Saeid Nahavandi (2008), 'Kinematic Modeling of a Bio-Inspired Robotic Fish', *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Pasadena, CA, USA, pp.695-699.

Zufferey Jean-Christophe, Alexis Guanella, Antoine Beyeler and Dario Floreano (2006), 'Flying over the Reality Gap: From Simulated to Real Indoor Airships', *Autonomous Robots*, Volume 21, Number 3, Pages 243-254.