



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ Μ.Κ. & Α.Ε.
Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

Διπλωματική Εργασία

**Πειραματικός Προσδιορισμός Υδροδυναμικών Παραμέτρων
και Σχεδιασμός Νέου Ρομποτικού Ψαριού**

Εμμανουήλ Σωτηρόπουλος

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ Μ.Κ. & Α.Ε.
Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

Διπλωματική Εργασία

**Πειραματικός Προσδιορισμός Υδροδυναμικών Παραμέτρων
και Σχεδιασμός Νέου Ρομποτικού Ψαριού**

Εμμανουήλ Σωτηρόπουλος

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2018

Περίληψη

Η γνώση των υδροδυναμικών δυνάμεων και ροπών που ασκούνται σε ένα υποβρύχιο ρομπότ είναι σημαντική για την αποδοτικότερη πρόωση και έλεγχο της κίνησης ενός τέτοιου συστήματος. Ο πειραματικός προσδιορισμός αυτών των παραμέτρων αποτελεί έγκυρη και άμεση μέθοδο, ενώ αποτελεί και κριτήριο σύγκρισης με άλλες τεχνικές προσδιορισμού των υδροδυναμικών μεγεθών, όπως οι υπολογιστικές μέθοδοι. Η διπλωματική αυτή εργασία πραγματεύεται αρχικά τον έλεγχο κίνησης ενός μηχανισμού ρυμούλκησης, ο οποίος χρησιμοποιείται ως πειραματική πλατφόρμα για τον προσδιορισμό υδροδυναμικών παραμέτρων, όπως είναι ο αδιάστατος συντελεστής οπισθέλκουσας, σε μικρού μεγέθους βιομηχανικά ρομποτικά ψάρια. Ο μηχανισμός αυτός είναι εμπνευσμένος από τον τομέα της ναυπηγικής μηχανικής με δοκιμασμένα και αξιόπιστα αποτελέσματα. Η υλοποίηση του σερβομηχανισμού έγινε με την χρήση χαμηλού κόστους ενσωματωμένο υπολογιστικό σύστημα και ανοιχτό λογισμικό που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου. Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των κατάλληλων πειραμάτων για τον προσδιορισμό όλων των επιθυμητών παραμέτρων, περιελάμβανε την χρήση εξωτερικού αισθητήρα δυνάμεων/ροπών. Ο δεύτερος στόχος της εργασίας είναι ο σχεδιασμός ενός νέου σώματος του υπάρχοντος ρομποτικού ψαριού του Εργαστηρίου. Οι προδιαγραφές που τέθηκαν αφορούσαν μεταξύ άλλων την εύκολη συναρμολόγηση και αποσυναρμολόγηση των τμημάτων που απαρτίζουν το ρομπότ, την ικανότητα σύνδεσης με την υπάρχουσα ουρά, την επίτευξη υδροδυναμικού σχήματος, την πλήρη στεγανότητα του εσωτερικού και την εξασφάλιση χώρου για ενσωμάτωση κάμερας και πιθανών άλλων αισθητήρων. Επιπλέον, σχεδιάστηκε με στόχο την τελική κατασκευή του με χρήση 3d printer, οπότε και λήφθηκαν υπόψιν οι περιορισμοί της τεχνικής αυτής.

Λέξεις κλειδιά: Μηχανοτρονική, Ενσωματωμένα Συστήματα, Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου, Οπισθέλκουσα, Άνωση, Συντελεστές Υδροδυναμικών Παραμέτρων, Ρομποτικό Ψάρι, Φορείο Ρυμούλκησης, Μέτρηση Δυνάμεων, Μηχανολογικός Σχεδιασμός.

Abstract

The knowledge of hydrodynamic forces and moments that act upon an underwater robot is important in terms of more efficient propulsion and the automatic control of the movement of such system. The experimental identification of those parameters is a valid and direct method while it also serves as a comparison criteria to other techniques of calculating the hydrodynamic parameters, such as computational methods. This thesis initially involves the control of movement of a tow-tank carriage that is being used as an experimental platform in order to identify hydrodynamic parameters, such as the dimensionless drag coefficient, in small-scale bio-mimetic robotic fish. This mechanism is inspired by relative systems used in naval engineering, providing reliable results. The implementation of the servomechanism was achieved by operating a low cost embedded system and runs on open-source software developed at CSL. The design and the implementation of the appropriate experiments included the usage of an external force/torque sensor. The second goal of this thesis was the design of a new body for the existing robotic fish of CSL. The specifications of the new design included the ease of assembling and dismantling of the parts consisting the fish, the ability to connect with the existing tail part of the robotic fish, the ensurement of full waterproof properties and the capability to host a camera and other sensors. Additionally, the design took into consideration limitations that are being raised because of the decision to be constructed with a 3d printer.

Keywords: Mechatronics, Embedded Systems, Automatic Control Systems, Hydrodynamic Drag, Hydrodynamic Lift, Hydrodynamic Parameters' Coefficients, Robotic Fish, Tow-Tank Carriage, Force Estimation, Mechanical Design.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με στήριξαν με οποιοδήποτε τρόπο κατά το χρονικό διάστημα εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Ε. Παπαδόπουλο για τις πολύτιμες συμβουλές του και την απαραίτητη καθοδήγηση του. Χάρη στην ευκαιρία που μου έδωσε να εκπονήσω την διπλωματική αυτή εργασία και με την υποστήριξη του απέκτησα σημαντικές γνώσεις και εμπειρία στον τομέα της μηχανολογίας και της μηχανοτρονικής.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον φίλο και υποψήφιο Διδάκτορα Μ. Μακροδημήτρη για τις πολύτιμες γνώσεις του, που μοιράστηκε μαζί μου και γενικά για την βοήθεια, τις συμβουλές του και τις μακροσκελείς συζητήσεις μας.

Θερμές ευχαριστίες στους φίλους και συνάδελφους Γ. Μπολανάκη, Ι. Βάλβη, Σ. Χατζηζαχαρία, Ν. Μαυρίκη, Δ.Λ. Παπαναγιώτου και Κ.Νάνο που πρόσφεραν καθοριστική βοήθεια σε θέματα της διπλωματικής μου, τόσο με τις θεωρητικές γνώσεις τους όσο και σε τεχνικά ζητήματα, αλλά και για την υποστήριξή τους.

Επίσης ευχαριστώ όλα τα παιδιά του Εργαστηρίου Αυτομάτου Ελέγχου για την προθυμία τους και την βοήθεια τους, αλλά και για το ευχάριστο περιβάλλον που δημιούργησαν στον χώρο εργασίας μας. Ιδιαίτερη μνεία στα παιδιά της ομάδας του ρομποτικού τετραπύδου με τα οποία μοιραζόμασταν την ίδια αίθουσα.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω ολόθερμα τους γονείς μου, τον αδερφό μου και τους φίλους μου για όλη την στήριξη τους, σε κάθε επίπεδο, όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1	Ρομποτικά Ψάρια	7
1.2	Σκοπός Εργασίας	10
1.3	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	10
1.4	Δομή Εργασίας	11
2	Θεωρία Υδροδυναμικών Μεγεθών	12
2.1	Εισαγωγή	12
2.2	Υδροδυναμικές Παράμετροι	12
2.3	Τρόποι Προσδιορισμού Υδροδυναμικών Παραμέτρων	17
3	Σύντομη Περιγραφή Υποσυστημάτων Τεχνολογικού Εξοπλισμού	20
3.1	Εισαγωγή	20
3.2	Beaglebone	20
3.3	Συστήματα Επενεργητών	22
3.3.1	Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος	22
3.3.2	Αυξητική Παλμογεννήτρια	24
3.3.3	Μειωτήρες Στροφών	28
3.4	H-Bridge	28
3.5	Differential Line Receiver	30
3.6	Μετατροπέας Στάθμης Τάσεων (Voltage Level Translator)	32
3.7	Ψηφιακός Απομονωτής (Digital Isolator)	33
3.8	Αισθητήρας Δύναμης/Ροπής	35
3.9	Πλακέτα Ηλεκτρονικών	36
4	Ανάπτυξη Λογισμικού και Προγραμματισμός Περιφερειακών του Beaglebone	38
4.1	Εισαγωγή	38
4.2	Code Composer Studio	38
4.3	Starterware	39
4.4	Παλμοί Μεταβλητού Εύρους (PWM)	43
4.5	Enhanced Quadrature Encoder Peripheral	47
4.6	Περιφερειακό Ακροδεκτών Γενικής Χρήσης Εισόδου-Εξόδου (GPIO)	50
4.7	Περιφερειακό Σημάτων Διακοπής	52
4.8	Timers	53
4.9	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter - UART	55
4.9.1	Βασικές Αρχές Λειτουργίας της Σειριακής Επικοινωνίας και του Υποσυστήματος UART	56
4.10	Υλοποίηση Τροχιών και Ελέγχου	58
4.10.1	Υλοποίηση Ελέγχου	58
4.11	Τροχιά	60
4.11.1	Τραπεζοειδές Προφίλ	61
4.11.2	Double S-Curve	62
4.12	Διάγραμμα Ροής του Προγράμματος Ελέγχου Κινητήρα Σταθερού Ρεύματος	64
5	Σχεδιασμός Νέου Ρομποτικού Ψαριού	65

6	Διεξαγωγή Πειραμάτων και Αποτελέσματα	70
6.1	Εισαγωγή	70
6.2	Περιγραφή Πειραματικής διάταξης	70
6.2.1	Υπολογισμός Ροπής Αδράνειας	73
6.2.2	Υπολογισμός Συντελεστών Υδροδυναμικών Δυνάμεων	76
6.2.3	Προσδιορισμός Συντελεστή Προστιθέμενης Μάζας	90
7	Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία	92
7.1	Συμπεράσματα	92
7.2	Μελλοντική Εργασία	93
	Appendix	94

Κατάλογος σχημάτων

1.1	Κατηγοριοποίηση ψαριών ανάλογα με το ποσοστό κίνησης του σώματος τους [1].	7
1.2	Εναλλακτικοί σχεδιασμοί κίνησης ρομποτικών ψαριών [2].	8
1.3	A set of four subfigures.	8
1.4	Το ρομποτικό ψάρι του εργαστηρίου με υδροδυναμικού σχήματος κάλυμμα.	9
1.5	Το ρομποτικό ψάρι του εργαστηρίου μέσα στην δεξαμενή.	9
1.6	Το ρομποτικό ψάρι του εργαστηρίου.	9
2.1	Μηχανισμός δημιουργίας των υδροδυναμικών (και αεροδυναμικών) δυνάμεων σε αεροτομή [3].	13
2.2	Υπολογισμός προστιθέμενης μάζας σε κύλινδρο που κινείται μέσα σε ρευστό,[4].	14
2.3	Σχηματική απεικόνιση της κατεύθυνσης των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα ψάρι, [5].	16
2.4	Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης του εργαστηρίου, με το φορείο ρυμούλκησης, τη δοκό σύζευξης, τον αισθητήρα δύναμης και το ρομποτικό ψάρι, [6].	18
3.1	Ο μικροϋπολογιστής Beaglebone.	21
3.2	Σχηματική παράσταση κινητήρα σταθερού ρεύματος,[7].	23
3.3	Παράδειγμα διαγράμματος χαρακτηριστικής λειτουργίας κινητήρα σταθερού ρεύματος,[8].	24
3.4	Σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας του open collector.	26
3.5	Σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας του push-pull.	26
3.6	Απλός παλμός που μεταδίδεται σε ένα κανάλι.	27
3.7	Διαφορικά σήματα (differential signals).	27
3.8	A set of two subfigures.	27
3.9	Σχηματική απεικόνιση ενός H-Bridge, [9].	28
3.10	Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας ενός H-Bridge, [9].	29
3.11	Σχηματική απεικόνιση H-Bridge, [10].	29
3.12	Το High-Power Motor Driver 18v15 της Pololu.	30
3.13	Σχηματική απεικόνιση του High-Power Motor Driver 18v15 της Pololu.	30
3.14	A set of two subfigures.	31
3.15	Διαδικασία απομάκρυνσης θορύβου μέσω συζυγών σημάτων.	31
3.16	Απλοποιητική απεικόνιση της διαδικασίας απομάκρυνσης θορύβου μέσω συζυγών σημάτων.	31
3.17	A set of two subfigures.	32
3.18	Η μέθοδος ρύθμισης της τάσης με open drain.	32
3.19	A set of two subfigures.	34
3.20	Τρόποι γαλβανικής απομόνωσης σήματος.	35
3.21	A set of two subfigures.	35
3.22	Σχηματική απεικόνιση του αισθητήρα.	36
3.23	Σχηματική απεικόνιση όλης της συνδεσμολογίας και του κυκλώματος.	37
3.24	Ηλεκτρονική διάταξη.	37
4.1	Το περιβάλλον εργασίας του CCS.	38
4.2	Τα στρώματα οργάνωσης του Starterware.	41
4.3	Η δομή οργάνωσης των περιεχομένων του Starterware.	42
4.4	Υπολογισμός μέσης τιμής του PWM, [11].	44
4.5	Χαρακτηριστικοί καταχωρητές για παραγωγή PWM.	46
4.6	Αυξητική παλμογεννήτρια με μαγνητοαντίσταση.	48
4.7	Quadrature σήματα και καθορισμός φοράς περιστροφής.	48
4.8	Ευκρίνεια περιφερειακού eQEP.	49

4.9	Προγραμματιστική πορεία περιφερειακού Interrupts.	53
4.10	Προγραμματιστική ακολουθία εντολών για ορθή χρήση των timer.	54
4.11	Ένα frame μετάδοσης δεδομένων.	56
4.12	Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας αποστολής και λήψης δεδομένων μέσω UART.	57
4.13	Προγραμματιστική ακολουθία για το περιφερειακό σύστημα UART [12].	58
4.14	Δομικό διάγραμμα PID ελέγχου.	58
4.15	Ο ρόλος των όρων του PID.	59
4.16	Διάγραμμα ροής PID ελέγχου.	60
4.17	A set of two subfigures.	61
4.18	Διάγραμμα ροής προγράμματος ελέγχου κινητήρα.	64
5.1	A set of two subfigures.	67
5.2	Τα τρία κομμάτια του νέου ρομποτικού ψαριού.	68
5.3	Διαφορετική όψη των τριών τμημάτων του νέου ρομποτικού ψαριού.	68
5.4	A set of two subfigures.	69
5.5	Συναρμολογημένα τα κομμάτια του νέου σώματος και κεφαλιού.	69
6.1	A set of two subfigures.	70
6.2	Το φορείο.	71
6.3	Οι άξονες κίνησης του φορείου.	71
6.4	A set of three subfigures.	72
6.5	A set of two subfigures.	72
6.6	Αισθητήρας δυνάμεων/ροπών προσδεμένος πάνω στην δοκό σύζευξης.	73
6.7	Σχηματική απεικόνιση του πειράματος προσδιορισμού της ροπής αδράνειας.	74
6.8	Φωτογραφία από τη διαδικασία του πειράματος.	74
6.9	Δύναμη Οπισθέλκουσας για κίνηση χωρίς φορτίο, με ταχύτητα 30cm/s.	77
6.10	Το ρομποτικό ψάρι κινείται ευθύγραμμα, με τον διαμήκη άξονα του παράλληλο στην διεύθυνση της ταχύτητας.	78
6.11	A set of two subfigures.	79
6.12	Διάγραμμα οπισθέλκουσας-χρόνου για ταχύτητα 30cm/s και γωνία 0°.	80
6.13	Διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου, όπως καταγράφηκε από το Beaglebone.	81
6.14	Διαγράμματα οπισθέλκουσας και ταχύτητας για τα πειράματα που εκτελέστηκαν: a) Οπισθέλκουσα για ταχύτητα 0,10m/s, b) Επιθυμητό και πραγματικό προφίλ ταχύτητας για διάγραμμα οπισθέλκουσας του a, c) Οπισθέλκουσα για ταχύτητα 0,15m/s, d) Επιθυμητό και πραγματικό προφίλ ταχύτητας για διάγραμμα οπισθέλκουσας του c, e) Οπισθέλκουσα για ταχύτητα 0,20m/s, f) Επιθυμητό και πραγματικό προφίλ ταχύτητας για διάγραμμα οπισθέλκουσας του e.	82
6.15	Μέση τιμή οπισθέλκουσας, κατά τον X άξονα, ως προς την ταχύτητα (ψάρι σε γωνία 0°).	83
6.16	Συντελεστής Οπισθέλκουσας ως προς τον αριθμό Reynolds, όπως προέκυψε από τα πειράματα.	84
6.17	Συντελεστής Οπισθέλκουσας ως προς τον αριθμό Reynolds για διάφορα σχήματα, [13].	84
6.18	Το ρομποτικό ψάρι κινείται ευθύγραμμα, με τον διαμήκη άξονα του υπό γωνία σε σχέση με την διεύθυνση της ταχύτητας.	85
6.19	Διάγραμμα οπισθέλκουσας-χρόνου, για ταχύτητα 10cm/s και υπό γωνία 40°.	86
6.20	Διάγραμμα άνωσης-χρόνου, για ταχύτητα 10cm/sec και υπό γωνία 40°.	86

6.21	Διαγράμματα οπισθέλκουσας και άνωσης για διάφορες ταχύτητες και υπό διαφορετικές γωνίες: a) Διάγραμμα οπισθέλκουσας για $v=0.10\text{m/s}$ και υπό γωνία 15° , b) Διάγραμμα άνωσης για $v=0.10\text{m/s}$ και υπό γωνία 15° , c) Διάγραμμα οπισθέλκουσας για $v=0.20\text{m/s}$ και υπό γωνία 15° , d) Διάγραμμα άνωσης για $v=0.20\text{m/s}$ και υπό γωνία 15° , e) Διάγραμμα οπισθέλκουσας για $v=0.20\text{m/s}$ και υπό γωνία 40° και f) Διάγραμμα άνωσης για $v=0.20\text{m/s}$ και υπό γωνία 40° .	87
6.22	Διαγράμματα συντελεστών και μέσω δυνάμεων οπισθέλκουσας και άνωσης ως συνάρτηση της γωνίας, για ταχύτητα 10cm/s .	88
6.23	Διαγράμματα συντελεστών και μέσω δυνάμεων οπισθέλκουσας και άνωσης ως συνάρτηση της γωνίας, για ταχύτητα 20cm/s .	89
6.24	Διαγράμματα ροπής-χρόνου στην αριστερή στήλη και της αντίστοιχης γωνιακής ταχύτητας στην δεξιά).	90

Κατάλογος πινάκων

1	Συνοπτικός πίνακας των χαρακτηριστικών του Beaglebone.	22
2	Δυνατές επιλογές Baud Rate στο Beaglebone.	57
3	Πειραματικές Μετρήσεις και Επεξεργασία τους για Προσδιορισμό της Περίο- δου Ταλάντωσης.	75
4	Μέση τιμή δύναμης-αντίστασης στην σταθερή κίνηση και συντελεστής οπι- σθέλκουσας για διάφορες τιμές ταχύτητας κίνησης.	82
5	Υπολογισμός μέσης δύναμης στους άξονες X και Y και των συντελεστών οπι- σθέλκουσας και άνωσης.	88
6	Υπολογισμός συντελεστή ροπής.	90
7	Πειραματικός Προσδιορισμός Προστιθέμενης μάζας κατά την επιτάχυνση του ψαριού υπό μηδενική γωνία.	91

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ρομποτικά Ψάρια

Η βιομιμητική στο τομέα της ρομποτικής αποτελεί έναν ιδιαίτερα σημαντικό κλάδο για την επιστημονική κοινότητα. Τα μέλη του ζωικού βασιλείου έχουν αναπτύξει μέσω της φυσικής επιλογής και της διαδικασίας της εξέλιξης αποδοτικά συστήματα κίνησης σε σχέση με το περιβάλλον που βρίσκονται και το είδος της ζωής που πραγματοποιούν.

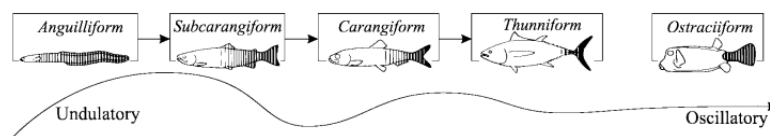
Τα ψάρια δεν αποτελούν εξαίρεση. Η μελέτη της κίνησης τους, αλλά και η προσπάθεια μίμησης τους από ρομποτικά οχήματα, εκτός από ακαδημαϊκό ενδιαφέρον, προσφέρουν ιδιαίτερα σημαντικά οφέλη. Για παράδειγμα, τέτοια ρομποτικά οχήματα μπορούν να βοηθήσουν στον σχεδιασμό καλύτερων από τους σημερινούς προωθητήρες τόσο σε επιδόσεις όσο και σε επιμέρους χαρακτηριστικά τους (π.χ. αθόρυβη πρόωση).

Γενικά, τα ψάρια κινούνται χάρη στις κινήσεις του σώματος ή της ουράς τους ή χρησιμοποιώντας ενδιάμεσα ζεύγη πτερυγίων [5]. Ο δεύτερος τρόπος επιλέγεται συνήθως από τα ψάρια στις χαμηλές ταχύτητες (εφόσον έχουν τα κατάλληλα πτερύγια), ενώ ο πρώτος τρόπος κίνησης επιτυγχάνει μεγαλύτερη ταχύτητα πρόωσης και επιτάχυνσης [5].

Μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μέθοδος με την κίνηση του σώματος ή της ουράς, αφού μια από τις βασικές παραμέτρους απόδοσης ενός οχήματος, παραδοσιακά αποτελεί η ικανότητα επίτευξης υψηλής ταχύτητας και επιτάχυνσης.

Με αυτόν τον τρόπο κίνησης λοιπόν, τα ψάρια μπορούν να κατηγοριοποιηθούν περαιτέρω σε 5 βασικές κατηγορίες, με βάση το ποσοστό του σώματος τους που κινούν (βλ. Σχήμα 1.1). Έχουμε επομένως:

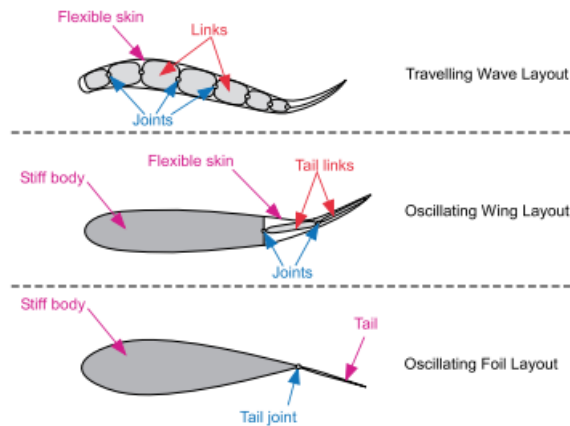
- Χελιοειδής (Anguilliform)
- Υποκαραγκιδοειδής (Subcarangiform)
- Καραγκιδοειδής (Carangiform)
- Θυννοειδής (Thunniform)
- Ουραιοειδής (Ostraciiform)



Σχήμα 1.1: Κατηγοριοποίηση ψαριών ανάλογα με το ποσοστό κίνησης του σώματος τους [1].

Στα ρομποτικά ψάρια, οι κινήσεις αυτές αντιστοιχούν κυρίως σε ρομπότ τριών εναλλακτικών κατηγοριών (βλ. Σχήμα 1.2):

- Travelling Wave Layout
- Oscillating Wing Layout
- Oscillating Foil Layout

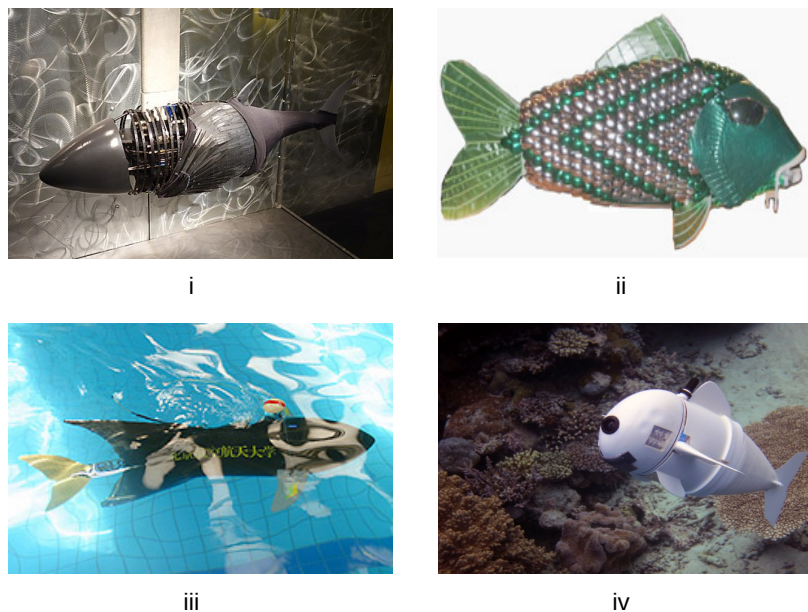


Σχήμα 1.2: Εναλλακτικοί σχεδιασμοί κίνησης ρομποτικών ψαριών [2].

Τα ρομποτικά ψάρια που κινούν το σώμα τους με έναν από τους παραπάνω τρόπους επιλέγονται διότι, όπως δείχνουν μελέτες με επαναλαμβανόμενες και ακριβείς μετρήσεις, τα ρομποτά αυτά παρουσιάζουν υπό συνθήκες (αριθμούς Reynolds περίπου 10^6) πάνω από 50% μείωση της οπισθέλκουσας, δηλαδή της αντίστασης στην κίνηση τους [14]. Έτσι με την πάροδο του χρόνου και την ολοένα μεγαλύτερη βελτίωση των ρομποτικών ψαριών, τα ρομποτικά ψάρια χρησιμοποιούνται για ολοένα και περισσότερες εφαρμογές (π.χ. εδώ [15]). Ενδεικτικά αναφέρονται μερικές εφαρμογές:

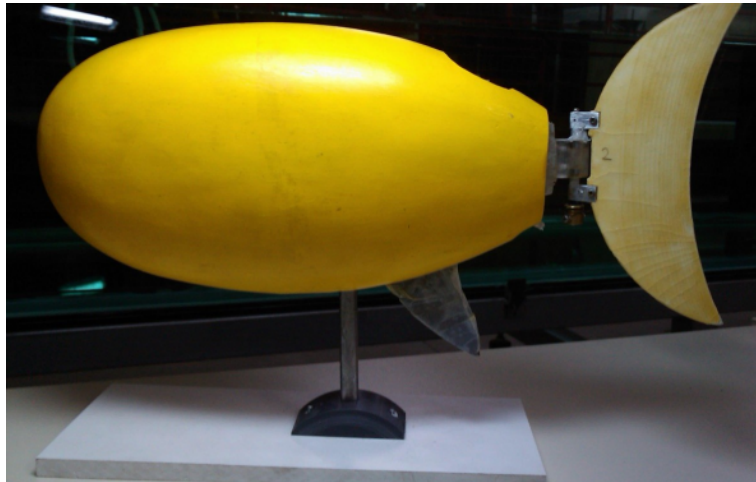
- υποβρύχιες εξερευνήσεις
- έλεγχος τυχόν ζημιών σε καρίνες πλοίων, υδροηλεκτρικών φραγμάτων, κ.λπ.
- παρακολούθηση ιχθυοκαλλιεργειών κ.α.

Από το πρώτο ρομποτικό ψάρι που κατασκευάστηκε στο MIT, το RoboTuna, μέχρι σήμερα έχουν κατασκευαστεί πολλά ρομποτικά ψάρια, για παράδειγμα βλ. Σχήμα 1.3.

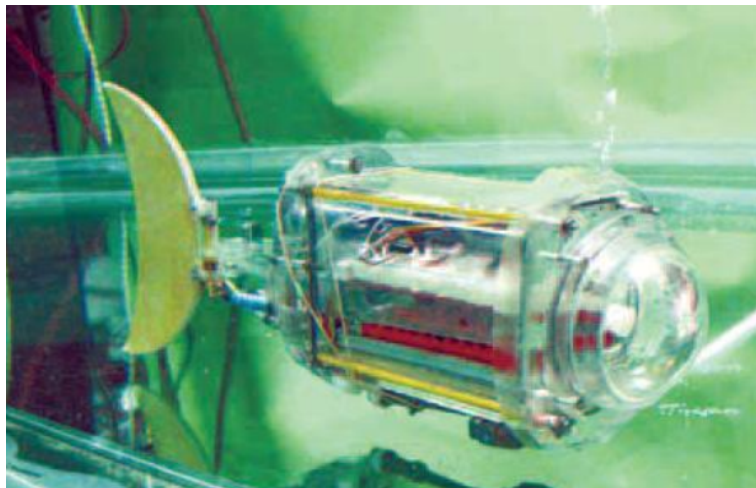


Σχήμα 1.3: Μερικά ρομποτικά ψάρια που έχουν κατασκευαστεί: i) Robotuna I, MIT [16], ii) Το ρομποτικό ψάρι του πανεπιστημίου του Έσσεξ, [17], iii) Το υποβρύχιο όχημα του πανεπιστημίου του Πεκίνο, [18] και, iv) Sofi, το πιο πρόσφατο ρομποτικό ψάρι από το MIT, [19].

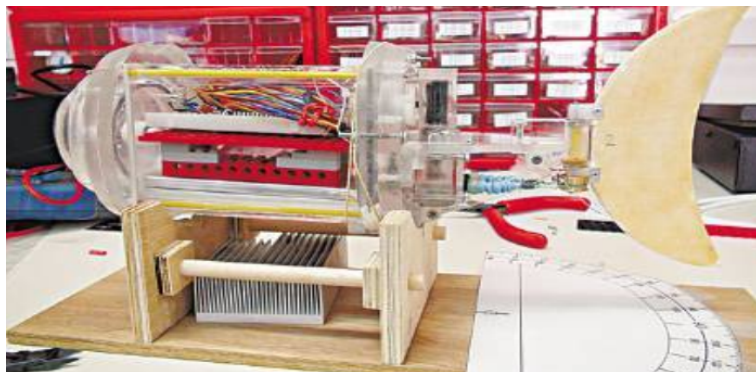
Στο εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου της Σχολής Μηχανολόγων, έχει κατασκευαστεί επίσης ένα ρομποτικό ψάρι της κατηγορίας Oscillating Foil Layout [20] το οποίο φαίνεται στα Σχήματα 1.4, 1.5 και 1.6.



Σχήμα 1.4: Το ρομποτικό ψάρι του εργαστηρίου με υδροδυναμικού σχήματος κάλυμμα.



Σχήμα 1.5: Το ρομποτικό ψάρι του εργαστηρίου μέσα στην δεξαμενή.



Σχήμα 1.6: Το ρομποτικό ψάρι του εργαστηρίου.

1.2 Σκοπός Εργασίας

Η χρησιμότητα των ρομποτικών ψαριών είναι ιδιαίτερα σημαντική. Για την πιο αποδοτική όμως χρήση των ρομπότ αυτών, είναι χρήσιμη η ύπαρξη ενός ικανοποιητικού μοντέλου περιγραφής της δυναμικής του ψαριού μέσα στο νερό. Οι λόγοι είναι πολλοί. Από την αποδοτικότερη πρόωση, την πραγματοποίηση ακριβέστερων και πιο ευαίσθητων ελιγμών, την δημιουργία καλύτερων μοντέλων ελέγχου του ρομπότ (βασισμένων για παράδειγμα σε model based control), μέχρι και την εξοικονόμηση ενέργειας.

Ο σκοπός της εργασίας επομένως είναι ο πειραματικός προσδιορισμός των συντελεστών οπισθέλκουσας που αναπτύσσεται στο ρομποτικό ψάρι του εργαστηρίου σε διάφορες συνθήκες πλεύσης. Στο [21] υπολογίστηκαν με χρήση υπολογιστικών μεθόδων (CFD) οι υδροδυναμικοί συντελεστές και οι υδροδυναμικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στο ρομποτικό ψάρι του εργαστηρίου. Στην παρούσα διπλωματική έγινε προσπάθεια πειραματικής αξιολόγησης των εν λόγω υδροδυναμικών συντελεστών και δυνάμεων. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του φορείου ρυμούλκησης που έχει κατασκευαστεί και υπάρχει στο εργαστήριο, το οποίο μέσω μιας ατράκτου προσφέρει στερεή σύζευξη με το ρομποτικό ψάρι [22].

Ο πειραματικός προσδιορισμός των υδροδυναμικών παραμέτρων του ρομποτικού ψαριού μέσω του μηχανισμού του φορείου ρυμούλκησης είναι μια σύνθετη διεργασία η οποία προκειμένου να πραγματοποιηθεί στηρίζεται σε βασικές αρχές της Ρομποτικής, της Μηχανοτρονικής, της Ηλεκτρονικής, του Αυτομάτου Ελέγχου και του προγραμματισμού Μικροϋπολογιστών, που είναι ιδιαίτερα χρήσιμες για την εκπαίδευση ενός μηχανικού. Μέσω αυτών των αρχών κατέστη δυνατός ο έλεγχος θέσης και κίνησης του μηχανισμού ρυμούλκησης του ρομποτικού ψαριού και κατ' επέκταση της πραγματοποίησης των επιθυμητών πειραμάτων, αλλά και της δημιουργίας ενός απλού πλαισίου για πραγματοποίηση αντίστοιχης φύσης πειραμάτων σε οποιοδήποτε σώμα μπορεί να προσδεθεί στο φορείο.

Ο δεύτερος στόχος της εργασίας αυτής είναι ο σχεδιασμός ενός πρότυπου νέου μοντέλου ρομποτικού ψαριού, προκειμένου να αναπτυχθεί μια εξελιγμένη έκδοση του ρομποτικού ψαριού του εργαστηρίου, το οποίο και θα πληρεί συγκεκριμένες προδιαγραφές. Ειδικότερα, πέρα από τις αρχικές προδιαγραφές, όπως αυτές είχαν προσδιοριστεί στο παρελθόν (βλ. [23]) και οι οποίες διαφοροποιήθηκαν όπου υπήρχε ανάγκη (π.χ στις διαστάσεις), εμπλουτίστηκαν και με νέες. Οι επιπλέον προδιαγραφές προέκυψαν τόσο από την χρήση του υπάρχοντος ρομποτικού ψαριού στο εργαστήριο όσο και από τις νέες βελτιώσεις που τέθηκαν σαν στόχος να συμπεριληφθούν στο νέο ρομποτικό ψάρι. Έτσι, με την χρήση κατάλληλου σχεδιαστικού λογισμικού και με στόχο την χρήση κυρίως τρισδιάστατα τυπωμένων τμημάτων για την μελλοντική κατασκευή, σχεδιάστηκε ένα νέο ρομποτικό ψάρι, το οποίο μένει να κατασκευαστεί και δοκιμαστεί με επιτυχία προκειμένου να αντικαταστήσει το παλιό.

1.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στην παρούσα παράγραφο γίνεται μια προσπάθεια συνοπτικής καταγραφής της βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε για την συγγραφή της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Μια εισαγωγή στα ρομποτικά ψάρια, τις βασικές αρχές λειτουργίας τους, καθώς και τα πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματά τους έναντι άλλων υποβρύχιων οχημάτων (π.χ UUV, υποβρύχια κλπ) γίνεται στα [5], [15] και [14].

Η θεωρία των υδροδυναμικών δυνάμεων που ασκούνται σε ένα σώμα που κινείται μέσα σε ένα ασυμπίεστο πρακτικά μέσο, όπως το νερό αναλύεται στα βιβλία [24], [25], [26], [27], την διπλωματική [23] και το paper [28]. Επίσης στα [6], [23] γίνεται αναφορά στις πειραματικές διαδικασίες που συνηθίζονται για τον προσδιορισμό των υδροδυναμικών δυνάμεων και γενικά σχετικών μεγεθών.

Για τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν, πέρα από τα τεχνικά φυλλάδια τους (βλ. Παράρτημα Α), στα [29], [30] και [31] αναλύονται ο τρόπος λειτουργίας και προ-

γραμματισμού του μικροϋπολογιστή (Beaglebone) που χρησιμοποιήθηκε, ενώ στα [32], [33] περιγράφονται οι αρχές λειτουργίας του συστήματος που απαρτίζουν τους επενεργητές (κινητήρες, αυξητικές παλμογεννήτριες και κιβώτιο ταχυτήτων). Όσον αφορά τις τεχνικές υλοποίησης βασικών ελεγκτών, όπως ο PID που εφαρμόστηκε, περιγράφονται στα [34], [35] και [36], ενώ στο [37] παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της επιθυμητής τροχιάς με την οποία τροφοδοτείται ο κλειστός βρόχος ελέγχου.

1.4 Δομή Εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια τα οποία και αναλύονται περιληπτικά στην συνέχεια.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η θεωρία για τις υδροδυναμικές δυνάμεις που αναπτύσσονται σε ένα υποβρύχιο σώμα. Μετά από μια σύντομη αναφορά στις στατικές δυνάμεις, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην δυναμική που ενδιαφέρει περισσότερο, αφού και οι προς πειραματικό προσδιορισμό υδροδυναμικές παράμετροι, αφορούν δυναμικά μεγέθη. Παρατίθενται επίσης οι βασικές μέθοδοι που υπάρχουν για τον προσδιορισμό των παραμέτρων αυτών, όπως μέθοδοι προσομοίωσης, διαφορετικές πειραματικές διαδικασίες και λοιπά.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το υλικό (hardware) που επιλέχθηκε, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και υποσυστήματά τους, καθώς και αναλύονται οι βασικές αρχές λειτουργίας τους.

Το τέταρτο κεφάλαιο εμπεριέχει μια αναλυτικότερη ανάπτυξη του τρόπου λειτουργίας των περιφερειακών συστημάτων του μικροϋπολογιστή που χρησιμοποιήθηκε, καθώς και περιγράφεται το λογισμικό (software) που χρησιμοποιήθηκε και αναπτύχθηκε. Ειδικότερα, αναφέρονται και επεξηγούνται κάποια βασικά σημεία της λογικής προγραμματισμού σε ενσωματωμένα συστήματα, η βασική βιβλιοθήκη που χρησιμοποιείται σαν βάση, αλλά και παρουσιάζονται συνοπτικά τόσο τα θεωρητικά όσο και η λογισμική ανάπτυξη της θεωρίας ελέγχου και του σχεδιασμού τροχιάς που αναπτύχθηκε για τον έλεγχο θέσης του φορείου ρυμούλκησης του ρομποτικού ψαριού. Τα παραπάνω συνοψίζονται και σε μορφή συνοπτικού λογικού διαγράμματος.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, περιγράφεται ο σχεδιασμός ενός νέου βελτιωμένου σώματος του ρομποτικού ψαριού. Πιο αναλυτικά, καταδεικνύονται τα προβλήματα που ανακύπτουν από διάφορους περιορισμούς (στεγανοποιήσεις, περιορισμοί χώρου κλπ) και περιγράφεται ο τρόπος αντιμετώπισής τους.

Στο έκτο κεφάλαιο, γίνεται αναλυτική περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό των υδροδυναμικών παραμέτρων και παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν.

Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο περιλαμβάνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την υλοποίηση της διπλωματικής και οποία είναι χρήσιμα για οποιαδήποτε μελλοντική χρήση.

2 Θεωρία Υδροδυναμικών Μεγεθών

2.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο και γίνεται προσπάθεια κατανόησης της φύσης των υδροδυναμικών μεγεθών που απασχολούν, προκειμένου να μπορούν να προσδιοριστούν και πειραματικά οι υδροδυναμικές δυνάμεις που ασκούνται στο ρομποτικό ψάρι του Εργαστηρίου όταν κινείται στο νερό. Σε αυτό το πλαίσιο παρουσιάζονται οι αδιάστατοι συντελεστές οπισθέλκουσας, άνωσης και ροπής αντίστασης, καθώς και το μέγεθος της προστιθέμενης μάζας.

2.2 Υδροδυναμικές Παράμετροι

Γενικά ένα σώμα που βρίσκεται ή/και κινείται μέσα στο νερό δέχεται δυνάμεις. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται χαρακτηρίζονται ως στατικές ή δυναμικές ανάλογα με το αν το σώμα που μελετάμε βρίσκεται σε στατική ισορροπία (η κατάσταση του σώματος δεν μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου) ή όχι.

Οι στατικές αφορούν την ισορροπία του σώματος όταν αυτό βρίσκεται σε ακινησία ή σε κίνηση με σταθερή ταχύτητα, ενώ οι δυναμικές αφορούν το σώμα όταν αυτό βρίσκεται σε κάποιας μορφής επιταχυνόμενη κίνησης [27].

Για ένα σώμα που βρίσκεται σε ηρεμία μέσα στο νερό, οι δυνάμεις (στατικής φύσεως) ουσιαστικά περιγράφονται από την αρχή του Αρχιμήδη [27]. Σύμφωνα με αυτήν ένα σώμα το οποίο βυθίζεται σε ρευστό δέχεται δύναμη προς τα πάνω ίση με το βάρος του εκτοπιζόμενου από το ίδιο, ρευστό. Η αρχή αυτή βρίσκει εφαρμογή τόσο σε περιπτώσεις πλήρους βύθισης όσο και μερικής (π.χ πλέει στην επιφάνεια).

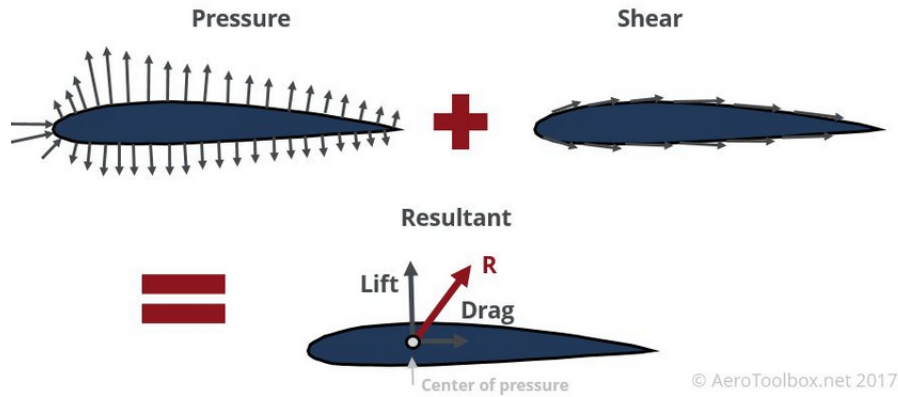
Όταν πάλι ένα σώμα ή ένα ψάρι κινείται μέσα στο νερό, μεταφέρεται ορμή από το ψάρι στο περιβάλλον νερό (και αντίστροφα). Αυτό συμβαίνει μέσω της ανάπτυξης οπισθέλκουσας, άνωσης και δυνάμεων αντίδρασης στην επιτάχυνση. Ειδικότερα, η οπισθέλκουσα απαρτίζεται από [5]:

1. αντίσταση επιφάνειας (skin friction). Αναπτύσσεται μεταξύ του ψαριού και του οριακού του στρώματος (boundary layer) και είναι αποτέλεσμα του ιξώδους (viscosity) του νερού σε περιοχές με μεγάλη κλίση ταχύτητας. Ουσιαστικά, πρόκειται για δύναμη που οφείλεται στις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στην επιφάνεια του σώματος.
2. πιέσεις που σχηματίζονται κατά την μετατόπιση του ψαριού και την ταυτόχρονη απόπτωση του νερού από αυτό (form drag). Η αντίσταση αυτή εξαρτάται από το σχήμα του σώματος.
3. ενέργεια που καταναλώνεται στις δίνες που σχηματίζονται από την κίνηση των πτερυγίων, τα οποία συνεισφέρουν επίσης στην πρόωση.

Οι δυο τελευταίες κατηγορίες ουσιαστικά συνθέτουν την οπισθέλκουσα πίεσης (pressure drag) και πρακτικά, όπως βέβαια ισχύει και για την άνωση, είναι αποτέλεσμα ασυμμετριών στην ροή του ρευστού σε συνδυασμό με το ιξώδες του νερού.

Στην άνωση, η ασυμμετρία αυτή συνεπάγεται την ύπαρξη διαφοράς πίεσης εκατέρωθεν των πλευρών του σώματος, η οποία σημαίνει τον σχηματισμό δύναμης στην κάθετη, ως προς την κατεύθυνση της ροής, διεύθυνση.

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται ο μηχανισμός δημιουργίας οπισθέλκουσας και άνωσης σε αεροτομή, όμως ισχύει και για τα υδροδυναμικά σώματα.



Σχήμα 2.1: Μηχανισμός δημιουργίας των υδροδυναμικών (και αεροδυναμικών) δυνάμεων σε αεροτομή [3].

Επομένως για ένα σώμα που κινείται μέσα σε ένα ρευστό, κατά την διεύθυνση της κίνησης, ισχύει ότι:

$$F_{inertial} + F_{drag} = F_{prop}. \quad (1)$$

όπου είναι: $F_{inertial}$: η δύναμη λόγω αδράνειας [N], F_{drag} : η οπισθέλκουσα [N] και F_{prop} : η δύναμη πρόωσης [N].

Η δύναμη της αδράνειας σχετίζεται και με την μάζα του ρευστού που παρασύρει μαζί του το προς μελέτη σώμα. Δίνεται από την εξίσωση:

$$F_{inertial} = (m_{vehicle} + m_{added})\dot{u} \quad (2)$$

όπου είναι: $m_{vehicle}$: μάζα οχήματος, m_{added} : προστιθέμενη μάζα και \dot{u} : επιτάχυνση του σώματος.

Όσον αφορά την προστιθέμενη μάζα (added mass), μια ποιοτική περιγραφή του μεγέθους είναι πως είναι η μάζα εκείνη του νερού που επιταχύνεται γύρω από το σώμα καθώς αυτό επιταχύνεται μέσα στο νερό και κινείται μαζί του. Όταν λοιπόν επιταχύνεται το σώμα, το ίδιο πρέπει να κάνει και το νερό που περιβάλλει το σώμα. Επομένως, όσο μεγαλύτερη η επιτάχυνση, τόσο μεγαλύτερη αντίσταση εμφανίζεται αφού μαζί επιταχύνεται και το νερό που περιβάλλει το σώμα.

Στην πραγματικότητα, δεν υπάρχει μια πεπερασμένη μάζα νερού γύρω από το σώμα που επιταχύνεται μαζί του [25]. Με την κίνηση του σώματος, όλη η μάζα του νερού γύρω του ταλαντώνεται με διαφορετικό εύρος ταλάντωσης σε κάθε σωματίδιο του ρευστού. Ωστόσο, όσο πιο μακριά από το σώμα βρισκόμαστε, οι ταλαντώσεις αποσβένονται άμεσα με αποτέλεσμα να αμελούνται.

Επομένως, ένα ισοδύναμο σώμα μάζας αυτής του αρχικού σώματος μαζί με μιας προστιθέμενης μάζας νερού που περιβάλλει το σώμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μονάχα σαν μηχανικό ανάλογο. Σε κάθε περίπτωση, η προστιθέμενη μάζα που εισέρχεται στην εξίσωση (2) δεν υπάρχει πραγματικά, αλλά αποτελεί ένα εικονικό (virtual) μέγεθος με το οποίο προσομοιάζεται η μάζα του νερού που παρασύρνεται από το σώμα.

Θεωρητικά για τον υπολογισμό της προστιθέμενης μάζας, αρκεί να υπολογιστεί η υδροδυναμική αντίσταση κατά την φορά της επιτάχυνσης. Για παράδειγμα [4], για έναν κύλινδρο, που κινείται μέσα σε ρευστό κατά τον άξονα x και με την προϋπόθεση της αστρόβιλης ροής, αρκεί να υπολογιστεί το ολοκλήρωμα της πίεσης που ασκείται στη βρεχόμενη επιφάνεια (wetted area),

$$F_x = \int P \cdot dA_x \quad (3)$$

όπου: F : η δύναμη [N] που ασκείται στο σώμα, P : η πίεση [Pa] και $dA_x [m^2]$: η συνιστώσα στον x άξονα από το στοιχειώδες εμβαδόν της βρεχόμενης επιφάνειας, βλ. Σχήμα 2.2.

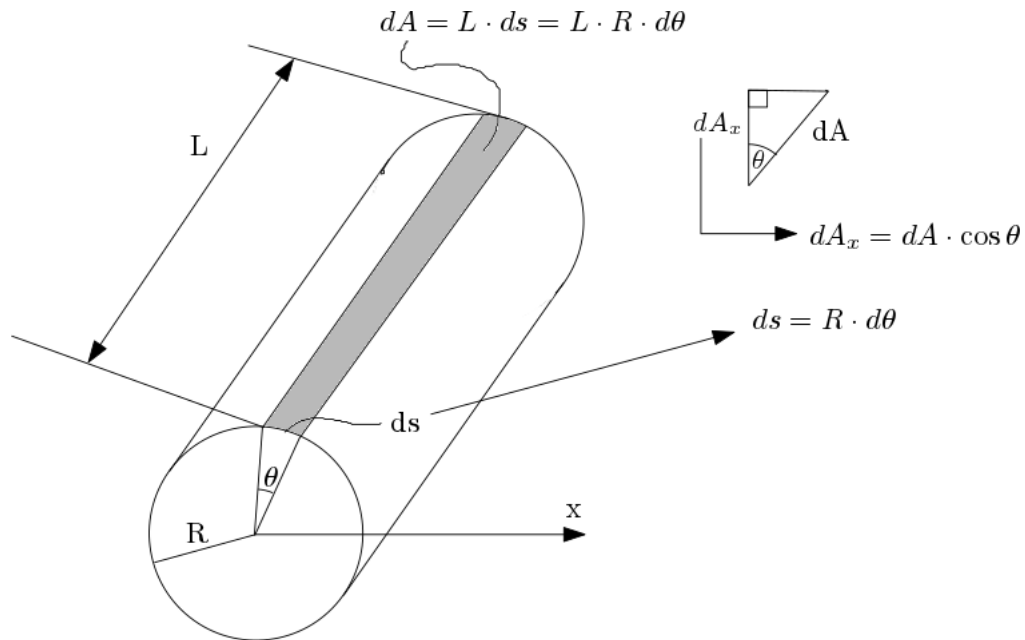
Θεωρώντας αστρόβιλο πεδίο ροής (δηλαδή ισχύει: $\nabla \times \mathbf{u} = 0$), η ταχύτητα (\mathbf{u}) μπορεί να γραφεί με την βοήθεια ενός βαθμωτού δυναμικού ταχύτητας (ϕ). Ισχύει δηλαδή:

$$\mathbf{u} = \nabla \phi \quad (4)$$

Υποθέτοντας ασυμπύεστο ρευστό, η πυκνότητα (ρ , [kg/m^3]) είναι σταθερή και εάν είναι και μη συνεκτικό ρευστό (αμελούνται δηλαδή οι εσωτερικές τριβές στα μόρια των ρευστών), τότε ισχύει η εξίσωση του Euler για την διατήρηση της ορμής:

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \rho \mathbf{g} - \text{grad} p \quad (5)$$

όπου: D/Dt : ο τελεστής Euler, \mathbf{g} : το διάνυσμα της επιτάχυνσης της βαρύτητας [m/s^2] και p : η πίεση [Pa].



Σχήμα 2.2: Υπολογισμός προστιθέμενης μάζας σε κύλινδρο που κινείται μέσα σε ρευστό,[4].

Με ολοκλήρωση της εξίσωσης του Euler και αντικατάσταση της ταχύτητας από το δυναμικό ϕ , προκύπτει η εξίσωση Bernoulli για μη μόνιμη (χρονικά μη σταθερή) ροή, η οποία ως προς την πίεση γράφεται:

$$P = -\rho \left(\frac{\theta \phi}{\theta t} + \frac{1}{2} |\nabla \phi|^2 \right) \quad (6)$$

Για ροή γύρω από κύλινδρο ακτίνας R , το δυναμικό της ταχύτητας είναι [4]:

$$\phi = u \frac{R^2}{r} \cos \theta \quad (7)$$

Για $r = R$ η (7) γίνεται:

$$\phi = uR \cos \theta \quad (8)$$

Ενώ θα είναι και:

$$\left(\frac{\theta \phi}{\theta t} \right)_{r=R} = \dot{u} \frac{R^2}{R} \cos \theta = \dot{u} R \cos \theta \quad (9)$$

$$\frac{1}{2}(|\nabla\phi|^2)_{r=R} = \frac{1}{2} \left| \left(-u \frac{R^2}{r^2} \cos\theta, -u \frac{R^2}{r^2} \sin\theta \right) \right|^2 = \frac{1}{2} u^2 \quad (10)$$

Αντικαθιστώντας τις (8), (9) και (10) στην (6) και (3), προκύπτει:

$$F_x = \int_0^{2\pi} \left[-\rho[\dot{u}R \cos\theta + \frac{1}{2}u^2] \right] \cos\theta RL d\theta = -\rho R^2 L \dot{u} \int_0^{2\pi} \cos^2\theta d\theta - \frac{1}{2} \rho R L u^2 \int_0^{2\pi} \cos\theta d\theta \quad (11)$$

Στην (11) τα δύο ολοκληρώματα υπολογίζονται π και 0 αντίστοιχα, επομένως προκύπτει:

$$F_x = -\rho\pi LR^2 \dot{u} \quad (12)$$

Το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει πως η δύναμη αυτή αντιτίθεται στην κίνηση. Από την (12), που είναι της μορφής $F = m\alpha$, προκύπτει πως η προστιθέμενη μάζα είναι:

$$m_{added} = \rho\pi LR^2 = V_{cyl} \rho_{water} \quad (13)$$

Στην βιβλιογραφία ωστόσο (για παράδειγμα στο [38]) υπάρχουν και πειραματικές μετρήσεις για διάφορα σχήματα.

Η δύναμη της οπισθέλκουσας προκύπτει από την κλασική Νευτώνεια εξίσωση και ουσιαστικά δηλώνει πως η οπισθέλκουσα είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας. Η εξίσωση με την οποία υπολογίζεται είναι η:

$$F_{drag} = D = \frac{1}{2} c_d S \rho V^2 \quad (14)$$

όπου: c_d είναι ένας αδιάστατος συντελεστής που ονομάζεται συντελεστής οπισθέλκουσας και εξαρτάται από το σχήμα του σώματος και τον αριθμό Reynolds (Re). Ενώ, S είναι η βρεχόμενη επιφάνεια [m^2] (wetted area), ρ η πυκνότητα [kg/m^3] και V η ταχύτητα του σώματος [m/s].

Ο συντελεστής αυτός είναι από τις βασικές υδροδυναμικές παραμέτρους, αφού με βάση αυτόν και τις χαρακτηριστικές καμπύλες $c_d - Re$ ενός σώματος μπορεί να προσδιοριστεί η οπισθέλκουσα που αναμένεται να εμφανιστεί στην κίνηση του σώματος μέσα σε ένα ρευστό. Ο προσδιορισμός της τιμής του συντελεστή οπισθέλκουσας έχει υπολογιστεί πειραματικά για διάφορα σώματα και για διάφορες τιμές του αριθμού Reynolds στη βιβλιογραφία [24]. Για παράδειγμα, ένα αξονοσυμμετρικό σώμα υδροδυναμικού σχήματος (συγκεκριμένα streamlined shape) όταν βρίσκεται σε ροή με αριθμό Reynolds περίπου 10^6 , έχει συντελεστή οπισθέλκουσας που δίνεται από την εξίσωση:

$$c_d = 0.33(d/l) + c_{flam}(3(l/d) + 3d/l)^{0.5} \quad (15)$$

όπου: d,l είναι η διάμετρος και το μήκος του σώματος αντίστοιχα και c_{flam} είναι αδιάστατος συντελεστής της αντίστασης επιφάνειας (skin friction) σε στρωτή ροή.

Όσον αφορά την υδροδυναμική άνωση (hydrodynamic lift), αυτή είναι μια δύναμη που γενικά ασκείται κάθετα στην κίνηση του σώματος. Συνήθως είναι δύναμη που ασκείται στον κατακόρυφο άξονα και για αυτό είναι αυτή που εξισορροπεί την δύναμη του βάρους (μαζί με την δύναμη πλευστότητας (buoyancy force) που είναι στατική δύναμη). Αυτό συμβαίνει ωστόσο στις περιπτώσεις όπου το σώμα είναι αξονοσυμμετρικό προς επίπεδο διερχόμενο από την διεύθυνση της ταχύτητας. Σε περίπτωση όμως που το σώμα δεν έχει τέτοια συμμετρία ή κατά την διάρκεια για παράδειγμα, ενός ελιγμού, όπου ο άξονας συμμετρίας του σώματος δεν είναι παράλληλος με την διεύθυνση της ταχύτητας, εμφανίζεται δύναμη όχι μόνο στο κατακόρυφο επίπεδο (lift) και στην διεύθυνση της ταχύτητας (drag), αλλά και σε μια κάθετη στην ταχύτητα διεύθυνση στο οριζόντιο επίπεδο. Δημιουργείται δηλαδή μια πλευρική δύναμη, η οποία είναι πολύ σημαντική, για παράδειγμα σε μανούβρες (π.χ. σε κυκλική

κίνηση) ή στην περίπτωση που για κάποιο λόγο το σώμα κινείται με τον διαμήκη άξονά του υπό γωνία σε εξίσωση με την διεύθυνση της ταχύτητάς του.

Η πλευρική αυτή δύναμη, που θα ονομάζεται και αυτή σαν δύναμη άνωσης (lift), οφείλεται στον μηχανισμό που προαναφέρθηκε και για την οπισθέλκουσα πίεσης. Δηλαδή, λόγω της ασυμμετρίας της ροής, υπάρχει διαφορά ταχυτήτων του ρευστού μεταξύ των πλευρών του σώματος και σε συνδυασμό με το ιξώδες του νερού δημιουργείται δύναμη που ωθεί το σώμα προς συγκεκριμένη κατεύθυνση.

Αντίστοιχα με την δύναμη της οπισθέλκουσας, η άνωση δίνεται από την εξίσωση:

$$L = \frac{1}{2} c_L S \rho V^2 \quad (16)$$

Η μόνη διαφορά σε σχέση με την (14), είναι πως στην (16) υπάρχει πλέον ο αντίστοιχος αδιάστατος συντελεστής c_L . Ο συντελεστής αυτός ονομάζεται συντελεστής άνωσης και εξαρτάται από τον αδιάστατο αριθμό Reynolds, το σχήμα του σώματος, από την γωνία πρόσπτωσης (angle of attack) μεταξύ της ταχύτητας και του σώματος κ.α. Για τον υπολογισμό του, έχουν αναπτυχθεί διάφορες προσεγγιστικές μέθοδοι (όπως η εξίσωση του Jorgensen, η θεωρία λεπτών αεροτομών κ.α.), ενώ χρησιμοποιούνται και πειραματικά αποτελέσματα (βλ. [24]).

Για παράδειγμα, για λεπτές αεροτομές και με τις παραδοχές ασυμπίεστου, μη συνεκτικού ρευστού και αστρόβιλης ροής, ισχύει ικανοποιητικά στις μικρές γωνίες η εξίσωση (17), [27]:

$$c_L = 2\pi(\alpha - \alpha_o) \quad (17)$$

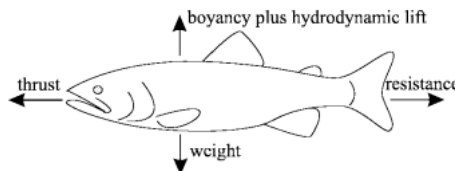
όπου α : η γωνία πρόσπτωσης [degrees] και α_o η γωνία πρόσπτωσης για την οποία η άνωση μηδενίζεται.

Από κάποια τιμή γωνίας και έπειτα βέβαια (η οποία εξαρτάται και από τον τύπο της αεροτομής), το ρευστό παύει να συμπεριφέρεται ως μη συνεκτικό και η άνωση αντί να αυξάνει μειώνεται (φαινόμενο απώλειας στήριξης, stall).

Συνοπτικά λοιπόν οι δυνάμεις που ασκούνται σε ένα σώμα, όπως το ρομποτικό ψάρι είναι:

- βάρος, δύναμη πλευστότητας (buoyancy) και άνωση (lift), λόγω ιξώδους του νερού στην κατακόρυφη διεύθυνση,
- πρόωση, οπισθέλκουσα (drag) και δύναμη αδράνειας στην οριζόντια διεύθυνση.

και φαίνονται εποπτικά στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Σχηματική απεικόνιση της κατεύθυνσης των δυνάμεων που ασκούνται σε ένα ψάρι, [5].

Έτσι, για την πρόωση του ρομποτικού ψαριού με σταθερή ταχύτητα απαιτείται ισορροπία δυνάμεων και ροπών. Ενώ, για μια επιταχυνόμενη κίνηση, η δύναμη πρόωσης θα πρέπει να υπερβαίνει την όποια αντίσταση.

Οι υδροδυναμικές δυνάμεις που αναφέρθηκαν και ασκούνται στο σώμα κατά την κίνηση του, σχηματίζουν μια συνισταμένη δύναμη η οποία εφαρμόζεται στο κέντρο της κατανομής των πιέσεων. Το κέντρο κατανομής πιέσεων δεν συμπίπτει πάντα με το κέντρο βάρους του σώματος, με αποτέλεσμα την δημιουργία ροπών στο σώμα. Επιπλέον των υδροδυναμικών

δυνάμεων, στο ρομποτικό ψάρι δημιουργούνται επομένως και ροπές με έμμεσο αποτέλεσμα τις γωνιακές περιστροφές (roll, pitch, yaw) του σώματος.

Η εξίσωση από την οποία προκύπτει η ροπή, κατά αντιστοιχία με αυτές της οπισθέλκουσας και της άνωσης, είναι [39]:

$$M = -K_D \omega |\omega| \quad (18)$$

όπου: ω είναι η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής [rad/s] και K_D ο αδιάστατος συντελεστής ροπής αντίστασης.

Παρατηρείται δηλαδή εξάρτηση της ροπής από το τετράγωνο της (γωνιακής) ταχύτητας, όπως ακριβώς και στην οπισθέλκουσα και στην υδροδυναμική άνωση.

Οι τρεις υδροδυναμικοί συντελεστές που παρουσιάστηκαν (c_l, c_D, K_D) απλοποιούν ιδιαίτερα την μελέτη της κίνησης σωμάτων μέσα σε ρευστό, αφού μέσω των συντελεστών αυτών εκφράστηκαν οι εξωτερικές δυνάμεις και ροπές ως συναρτήσεις της γραμμικής και γωνιακής ταχύτητας. Χωρίς την ύπαρξη αυτών των συντελεστών, η διαδικασία υπολογισμού των εξωτερικών δυνάμεων και ροπών γίνεται ιδιαίτερα επίπονη και δύσκολη, αφού απαιτείται η γνώση της ακριβούς κατανομής της πίεσης και των διατμητικών τριβών μέσω των εξισώσεων ορμής και κατόπιν η ολοκλήρωση τους κατά μήκος της επιφάνειας του σώματος για κάθε συνιστώσα της ταχύτητας.

2.3 Τρόποι Προσδιορισμού Υδροδυναμικών Παραμέτρων

Ο προσδιορισμός των υδροδυναμικών παραμέτρων ενός οποιουδήποτε υποβρύχιου ρομποτικού οχήματος, όπως προαναφέρθηκε, είναι ιδιαίτερης σημασίας, αφού η γνώση των παραμέτρων αυτών επιτρέπει τον καλύτερο και αποδοτικότερο σχεδιασμό των υποβρύχιων οχημάτων.

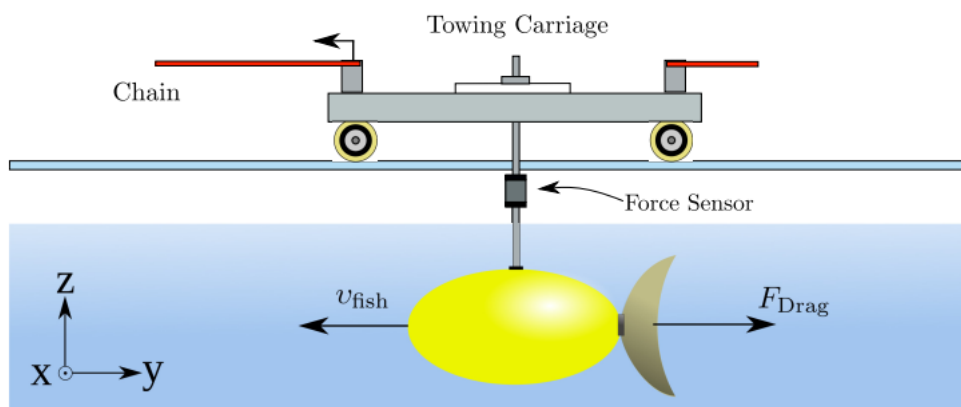
Ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να γίνει όμως η αναγνώριση αυτών των παραμέτρων ποικίλει. Στην παρούσα παράγραφο γίνεται μια προσπάθεια συνοπτικής καταγραφής βασικών μεθοδολογιών που έχουν αναπτυχθεί.

1. Χρησιμοποιώντας Computational Fluid Dynamics (CFD) και υπολογιστική προσομοίωση.
2. Από πειραματικές μετρήσεις για απλές γεωμετρίες (βλ. [24]).
3. Πειραματικά, σε αεροδυναμική σήραγγα. Το σώμα είναι σταθερά τοποθετημένο πάνω σε μια βάση, ενώ βρίσκεται μέσα σε ροή αέρα. Ελέγχοντας τις στροφές του ανεμιστήρα της αεροδυναμικής σήραγγας, μεταβάλλουμε την ταχύτητα του αέρα, ενώ ταυτόχρονα μέσω αισθητήρα δύναμης καταγράφεται η αεροδυναμική αντίσταση του σώματος. Κατόπιν, χρησιμοποιώντας την μέθοδο διαστατικής ανάλυσης (π.χ μέσω δυναμικής ομοιότητας και του θεωρήματος του Buckingham [27]), είναι εφικτή η μετατροπή των δεδομένων των αεροδυναμικών μεγεθών στα αντίστοιχα υδροδυναμικά.
4. Πειραματικά σε δεξαμενή νερού:
 - Με φορείο ρυμούλκησης του ρομπότ και αισθητήρα. Η διάταξη εδώ έχει ως εξής: το αντικείμενο του οποίου μετράμε την υδροδυναμική αντίσταση είναι μηχανικά συζευγμένο με το φορείο ρυμούλκησης, ενώ παρεμβάλλεται ένας αισθητήρας δύναμης. Το φορείο παρασύρει το σώμα και ο αισθητήρας καταγράφει τις δυνάμεις και τις ροπές που ασκούνται στο σώμα.
 - Με αισθητήρες πίεσης κατευθείαν τοποθετημένων στο ψάρι ή στη ροή ακριβώς γύρω του. Παραδείγματος χάρη, αισθητήρες πίεσης και ταχύτητας (π.χ σωλήνας pitot) θα προσέφεραν μια επί τόπου (in situ) πειραματική μέτρηση με ικανοποιητική ακρίβεια, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε έναν αριθμό επαναλαμβανόμενων πειραμάτων που έχουν σχεδιαστεί από πριν. Η λύση αυτή είναι από τις πλέον

αποδοτικές, μπορεί όμως να είναι μια λύση με ιδιαίτερα υψηλό κόστος, εξαιτίας της ανάγκης για ιδιαίτερα ευαίσθητους αισθητήρες. Ακόμα, δεν είναι δυνατή για μικρά σχήματα όπως το ρομποτικό ψάρι.

- Με φορείο ρυμούλκησης, χωρίς αισθητήρες (sensorless method), [6]. Πρόκειται για έλεγχο της απόκρισης του συστήματος και ειδικότερα των μετρήσεων ρεύματος που απαιτούν οι σερβομηχανισμοί κίνησης του μηχανισμού. Η μέθοδος αυτή μπορεί να είναι ευαίσθητη στην ακρίβεια των μετρήσεων, εξαιτίας του θορύβου που μπορεί να υπεισέρχεται, αλλά αποτελεί μια πολύ οικονομική μέθοδο με πολύ καλά αποτελέσματα [6].

Για τον προσδιορισμό των υδροδυναμικών παραμέτρων του ρομποτικού ψαριού του εργαστηρίου, επιλέχθηκε η μέθοδος ρυμούλκησης του ρομποτικού ψαριού με φορείο και την παρεμβολή αισθητήρα δύναμης, διάταξη που φαίνεται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης του εργαστηρίου, με το φορείο ρυμούλκησης, τη δοκό σύζευξης, τον αισθητήρα δύναμης και το ρομποτικό ψάρι, [6].

Στην μέθοδο αυτή υπάρχουν σημεία που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής:

1. Το συνολικό φορτίο που κινεί ο επενεργητής (ο κινητήρας που κινεί το φορείο) αποτελείται από τον μηχανισμό, τη δοκό και το ρομποτικό ψάρι λόγω της προσδέσεως του ρομποτικού ψαριού στον άξονα και κατόπιν η ρυμούλκηση του από το κινούμενο φορείο. Αμελώντας λοιπόν τις τριβές του κινητήρα και τις τριβές κίνησης του φορείου (κύλινδρος πάνω σε γυαλί της δεξαμενής), οι δυνάμεις που απομένουν είναι από τις εξωτερικές δυνάμεις του επενεργητή και από τις εξωτερικές υδροδυναμικές δυνάμεις. Για τον προσδιορισμό των υδροδυναμικών δυνάμεων που ασκούνται στο ρομποτικό ψάρι επομένως θα πρέπει είτε να αμεληθούν οι δυνάμεις που δέχεται η δοκός σύζευξης είτε να αφαιρεθεί η επίδραση των πρώτων από τις συνολικές (αφού πρώτα προσδιοριστούν από πείραμα όπου το φορείο ρυμούλκησης εκτελεί την ίδια κίνηση χωρίς όμως το ρομποτικό ψάρι να είναι προσδεμένο).
2. Η σύζευξη της δοκού με το ρομποτικό ψάρι θα πρέπει να είναι σταθερή και να υπάρχει ακαμψία του συστήματος. Διαφορετικά, παραμόρφωση ή κάμψη της δοκού αλλάζει την καταγραφή των δυνάμεων στους άξονες του αισθητήρα.
3. Τέλος, το είδος της κίνησης που εκτελείται είναι και αυτό που καθορίζει το είδος των υδροδυναμικών δυνάμεων που αναπτύσσονται. Συνεπώς, οι σχέσεις που περιγράφηκαν για τους συντελεστές οπισθέλκουσας, άνωσης και ροπής λαμβάνονται υπό την προϋπόθεση μόνιμης κατάστασης και άρα σταθερής ταχύτητας. Διαφορετικά, πέρα από το φαινόμενο της προστιθέμενης μάζας που πρέπει να ληφθεί υπόψιν, υπάρχει ο

κίνδυνος οι εξισώσεις (14), (16) και (18) να μην ισχύουν αφού μπορούν να λαμβάνουν χώρα και άλλα φαινόμενα που να επηρεάζουν την δυναμική του ρομποτικού ψαριού όπως μεταβατικά φαινόμενα.

Με τη χρήση, όμως κατάλληλου νόμου ελέγχου, οι μετρήσεις λαμβάνονται σε μόνιμη κατάσταση, ενώ τα διάφορα μεταβατικά φαινόμενα θεωρούνται μικρά κλάσματα στην διάρκεια του χρόνου. Έτσι μπορεί να αμεληθούν.

3 Σύντομη Περιγραφή Υποσυστημάτων Τεχνολογικού Εξοπλισμού

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το hardware που χρησιμοποιήθηκε για την επίτευξη των επιθυμητών πειραμάτων. Ειδικότερα παρουσιάζεται όλος ο τεχνολογικός εξοπλισμός που ήταν αναγκαίος για την διεξαγωγή των πειραμάτων στο φορείο ρυμούλκησης και γίνεται αναφορά στις βασικές αρχές λειτουργίας των επί μέρους συστημάτων. Επίσης παρουσιάζεται η συνδεσμολογία των ηλεκτρονικών στοιχείων και η τελική πλακέτα των ηλεκτρονικών που επιτρέπει τον έλεγχο του φορείου ρυμούλκησης.

3.2 Beaglebone

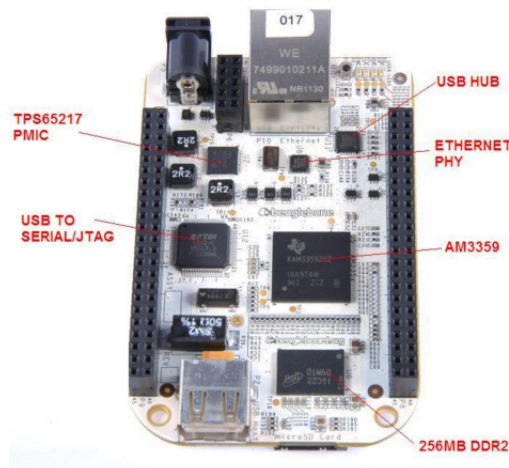
Σήμερα, υπάρχει ολοένα και αυξανόμενο ενδιαφέρον, σε όλο και ευρύτερο κοινό, για μικρές αναπτυξιακές πλατφόρμες μικροϋπολογιστών. Οι μικροϋπολογιστές αυτοί εξαιτίας της υψηλής επεξεργαστικής τους ισχύος, το ιδιαίτερα μικρό μέγεθος τους (συχνά μέγεθος πιστωτικής κάρτας), το χαμηλό κόστος τους, την χαμηλή κατανάλωση ισχύος, την δυνατότητα διεπαφής με εξωτερικές συσκευές, αισθητήρες και περιφερειακά και την υψηλή προσαρμοστικότητα τους, είναι χρήσιμοι σε πολλές εφαρμογές πολλών και διαφορετικών τομέων, όπως η ρομποτική, το λεγόμενο Internet of Things, το Cloud Computing κ.α. Τέτοιες πλατφόρμες μικροϋπολογιστών είναι για παράδειγμα τα Arduino, Mega2560, Raspberry Pi και το Beaglebone.

Οι πλακέτες αυτές προσφέρουν τα πλεονεκτήματα ενός υπολογιστή, συχνά με υποστήριξη ακόμα και για λειτουργικό σύστημα (συνήθως κάποια διανομή των Linux), δίνοντας όμως στον χρήστη και τη δυνατότητα για πρόσβαση και χρήση ενός πλήθους από περιφερειακά υποσυστήματα με τα οποία είναι εφοδιασμένες, τα οποία επιτρέπουν την διεπαφή με πολλές συσκευές και αισθητήρες. Τέτοιου τύπου περιφερειακά υποσυστήματα με τα οποία είναι εφοδιασμένα οι μικροϋπολογιστές, είναι ενδεικτικά για παράδειγμα τα:

1. **General Purpose Input/Output (GPIO):** Το περιφερειακό αυτό προσφέρει την δυνατότητα επικοινωνίας με εξωτερικές συσκευές μέσα από κανάλια μεταφοράς δεδομένων ανά bit. Είναι ο πιο εύκολος και άμεσος τρόπος επικοινωνίας και ελέγχου εξωτερικών στοιχείων.
2. **Serial Peripheral Interphase (SPI):** Είναι ένα υποσύστημα που επιτρέπει τη σύγχρονη σειριακή επικοινωνία. Χρησιμοποιείται κυρίως για επικοινωνίες με συσκευές σε μικρή απόσταση.
3. **Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART):** Το υποσύστημα αυτό δίνει την δυνατότητα για ασύγχρονη σειριακή επικοινωνία. Η ταχύτητα και η μορφή των δεδομένων είναι διαμορφώσιμες από τον χρήστη. Αποτελεί γενικά έναν πολύ απλό (απαιτούνται μόνο τρία καλώδια για αμφίδρομη επικοινωνία), αξιόπιστο και εύκολο τρόπο επικοινωνίας.
4. **Inter-integrated Circuit (I2C):** Πρόκειται για τρόπο σύγχρονης σειριακής επικοινωνίας, αλλά προτιμάται όταν η ταχύτητα δεν είναι υψηλής προτεραιότητας, ειδικά σε σχέση με την ευκολία χρήσης και το χαμηλό κόστος. Το κυριότερο όμως είναι η ικανότητα για έλεγχο της επικοινωνίας πολλαπλών συσκευών (δίκτυο συσκευών) με 2 μόνο ακροδέκτες γενικής χρήσης, σε αντίθεση π.χ με το SPI.
5. **Pulse Width Modulation (PWM):** Με το υποσύστημα αυτό είναι δυνατή η παραγωγή ελεγχόμενου σήματος μορφής παλμών με μεταβλητό πλάτος. Με τον τρόπο αυτό πα-

ράγεται ψηφιακό σήμα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ψευδοαναλογικό σε πολλές εφαρμογές.

Ειδικότερα, μιλώντας για το Beaglebone (Σχήμα 3.1), της εταιρείας Texas Instruments, το οποίο και επιλέχθηκε στην εργασία αυτή, για τους λόγους που αναφέρονται εδώ [6], πρόκειται για μια πλατφόρμα που βασίζεται σε ένα ισχυρότατο System-On-a-Chip, SoC της σειράς Sitara και συγκεκριμένα το AM335X που ενσωματώνει τον επεξεργαστή Cortex A8 της εταιρείας ARM.



Σχήμα 3.1: Ο μικροϋπολογιστής Beaglebone.

Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά του, συνοψίζονται στον Πίνακα 1 και καταδεικνύουν γιατί είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε ρομποτικές εφαρμογές. Στην παρούσα εργασία τα υποσυστήματα που χρησιμοποιήθηκαν (και θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο) ήταν τα:

- **ehrPWM:** Το υποσύστημα αυτό μας δίνει την δυνατότητα για παραγωγή ελεγχόμενου σήματος 0-3,3V. Μέσω του λογισμικού, μπορούμε να εισάγουμε τιμές στους καταχωρητές του υποσυστήματος και έτσι να αλλάξουμε την συχνότητα και το εύρος των παραγόμενων σημάτων παλμού.
- **eQEP:** Στο υποσύστημα αυτό, λαμβάνεται και αποκωδικοποιείται το σήμα από αυξητικές παλμογεννήτριες (incremental encoders).
- **DMTimer:** Ένα υποσύστημα που μας δίνει την ευκαιρία, χάρη στα ψηφιακά ρολόγια ακριβείας που το απαρτίζουν, για χρονομέτρηση με ακρίβεια μs . Είναι ένα περιφερειακό σύστημα ιδιαίτερα χρήσιμο, ειδικά όταν συνδυάζεται με την παραγωγή σημάτων διακοπής (interrupts) για την έγκαιρη, χρονικά, εξυπηρέτηση συγκεκριμένων διεργασιών.
- **UART:** Με το περιφερειακό αυτό επιτυγχάνεται η επικοινωνία με εξωτερικές συσκευές μέσω του σειριακού πρωτοκόλλου επικοινωνίας RS232 ή RS485.
- **AINTC:** Στο υποσύστημα αυτό γίνεται η διαχείριση των σημάτων διακοπής και στέλνονται τα κατάλληλα αιτήματα στον επεξεργαστή (Cortex A8) για την εξυπηρέτησή τους.
- **GPIO:** Αυτό το υποσύστημα δίνει στον χρήστη την δυνατότητα για επικοινωνία με εξωτερικά ηλεκτρονικά κυκλώματα, αλλά και με άλλες συσκευές. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της παροχής πολλαπλών ακροδεκτών σαν κανάλια επικοινωνίας-μεταφοράς δεδομένων.

Πίνακας 1: Συνοπτικός πίνακας των χαρακτηριστικών του Beaglebone.

Processing	720Mhz 32-bit Cortex-A8 CPU
	2x 32-bit PRU-ICSS, real-time co-processors
	Cortex-M3 Wakeup/Power-down co-processor for power management
	VFPv3 and NEON hardware Floating-Point and vectorization units
Memory	64KB Internal (non-cached) RAM
	256MB DDR2 external RAM
Input-Output	6-Channel PWM output
	3-Channel quadrature encoder input
	12-bit ADC
	UART, SPI, I ² C, CAN, Ethernet communication
Timing	Real-Time Clock (RTC)
	8 Digital Timers
Storage	4GB microSD ROM storage
Power Supply	3.3V signals on the P8 and P9 pin-out headers, a total of 92 pins
	5V input power supply
	5V and 3.3V output power buses
Programming	JTAG debugger
	FTDI serial-over-USB connection IC, routed to be host port

3.3 Συστήματα Επενεργητών

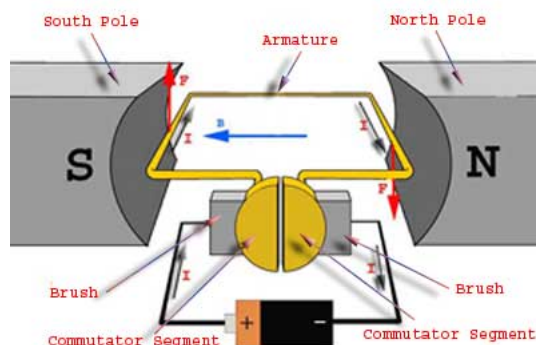
3.3.1 Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος

Οι Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος (DC Motors), όπως αυτοί που χρησιμοποιήθηκαν για την κίνηση του φορείου ρυμούλκησης του ρομποτικού ψαριού, μετατρέπουν ηλεκτρική ισχύ μορφής συνεχούς ρεύματος σε μηχανική ισχύ και δη σε περιστροφή ενός άξονα. Οι κινητήρες αυτοί είναι κατάλληλοι για εφαρμογές που απαιτείται υψηλή ροπή και μεγάλη διακύμανση παραγόμενων στροφών του άξονα.

Τα δύο βασικά στοιχεία που απαρτίζουν τους κινητήρες σταθερού ρεύματος είναι ο στάτης (σταθερό τμήμα), που φέρει τα τυλίγματα πεδίου ή μόνιμους μαγνήτες και ο δρομέας ή τύμπανο, δηλαδή το κινούμενο μέρος, που φέρει τα τυλίγματα. Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος γενικά μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες[33]:

1. Κινητήρες που έχουν ψήκτρες (brushes) και συλλέκτες (commutators), οι οποίοι κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον τρόπο που τροφοδοτείται ο στάτης (σε Ξένης Διέγερσης, Παράλληλης Διέγερσης, Διέγερση σειράς και Σύνθετης Διέγερσης, βλ. περισσότερα εδώ [33]).
2. Κινητήρες που δεν έχουν τα προαναφερθέντα στοιχεία και συχνά αναφέρονται απλά ως κινητήρες σταθερού ρεύματος χωρίς ψήκτρες (DC Brushless Motors).

Το φορείο ρυμούλκησης του ρομποτικού ψαριού του εργαστηρίου, κινείται με κινητήρες συνεχούς ρεύματος με ψήκτρες (βλ. σε παράρτημα τα μοντέλα και τις τεχνικές προδιαγραφές τους). Για τον λόγο αυτό, θα γίνει μια σύντομη αναφορά στην αρχή λειτουργίας και σε κάποιων χαρακτηριστικών τέτοιου τύπου κινητήρων (βλ. και Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2: Σχηματική παράσταση κινητήρα σταθερού ρεύματος,[7].

Ο στάτης δημιουργεί ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο, είτε εξαιτίας μόνιμων μαγνητών, όπως αυτοί που αποτελούν μέρος του φορείου ρυμούλκησης, είτε μέσω της ροής ρεύματος στα τυλίγματα πηνίου. Στο εσωτερικό του κινητήρα, τοποθετείται ο δρομέας που είναι και το στρεφόμενο μέρος και συνδέεται με μια πηγή σταθερού ρεύματος, μέσω ενός ζεύγους κυκλικών τομέων (αποτελούν τον συλλέκτη). Όταν το ρεύμα ρέει μέσα στους αγωγούς του σπλισμού, αναπτύσσεται πάνω τους ζεύγος δυνάμεων σύμφωνα με τον νόμο του Lorentz. Το ζεύγος δυνάμεων είναι η ροπή εκείνη που αρχίζει και περιστρέφει τον δρομέα. Καθώς περιστρέφονται οι κυκλικοί τομείς του συλλέκτη, συνδέονται εναλλάξ και με τους δύο πόλους της πηγής κι έτσι εξασφαλίζεται ότι η φορά του ρεύματος είναι τέτοια ώστε η φορά της ροπής να παραμένει ίδια σε όλη την διάρκεια της κίνησης. Βέβαια, κατά την περιστροφή του δρομέα, εμφανίζεται και ένα δεύτερο φαινόμενο, αυτό της επαγωγής τάσης στους αγωγούς, που λέγεται αντι-ηλεκτρεγερτική δύναμη πόλων (ΑΗΕΔ) και έχει πάντοτε πολικότητα αντίστροφη της πηγής που τροφοδοτεί τον κινητήρα, με αποτέλεσμα να καταναλώνει ηλεκτρική ισχύ από την πηγή.

Επίσης στις κατακόρυφες σχεδόν θέσεις (ουδέτερες θέσεις), η ροπή είναι μηδενική (οι ψύκτρες δεν ακουμπούν το συλλέκτη ή ακουμπούν και τους δύο τομείς), οπότε η κίνηση του δρομέα δεν είναι ομαλή. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται ως εξής: στον δρομέα τοποθετείται επιπλέον βρόχος, με ξεχωριστό ζευγάρι δαχτυλιδιών στο συλλέκτη. Σε μια τέτοια διαμόρφωση, όταν ο πρώτος βρόχος και ο αντίστοιχος συλλέκτης είναι κατακόρυφος, ο άλλος είναι οριζόντιος και σε επαφή με τις ψήκτρες και άρα την πηγή τροφοδοσίας. Έτσι εξασφαλίζεται πως πάντα υπάρχουν κατάλληλες δυνάμεις για ομαλή περιστροφή. Μάλιστα, όσο πιο πολλούς τέτοιους βρόχους προσθέσουμε τόσο πιο ομαλή κίνηση επιτυγχάνεται.

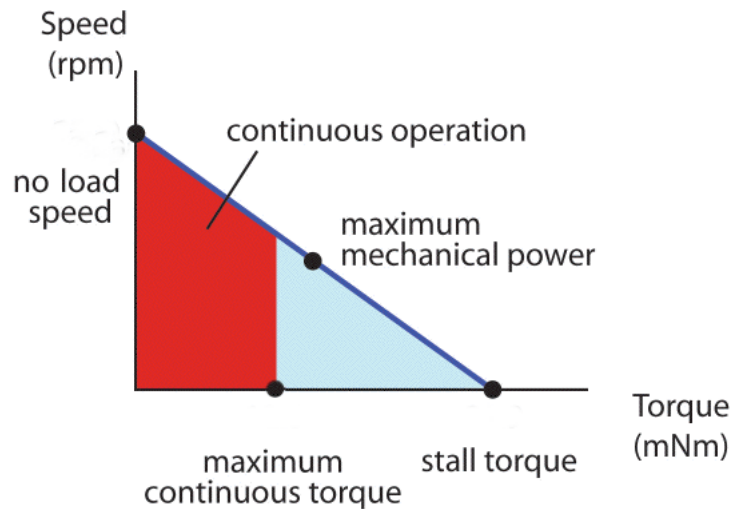
Στην πράξη, οι αγωγοί του κυκλώματος του δρομέα, βρίσκονται μέσα σε αυλακώσεις από ελάσματα χάλυβα υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας. Η ιδιότητα αυτή της χαμηλής μαγνητικής αντίστασης αυξάνει την επίδραση της μαγνητικής ροής. Ωστόσο, στους κινητήρες της Maxon, υπάρχουν στρεφόμενου πηνίου (ironless) δρομείς (δηλαδή χωρίς πυρήνα) και ψήκτρες από γραφίτη (graphite brushes). Γενικά με ironless ρότορες επιτυγχάνεται μείωση των τριβών και των θερμικών απωλειών, ενώ παράλληλα μέσω της μικρής αδράνειας του ρότορα και του μικρότερου βάρους επιτυγχάνεται υψηλή επιτάχυνση και γρήγορος χρόνος απόκρισης στις κινήσεις. Όσον αφορά τα τυλίγματα του δρομέα, αυτά συνήθως τυλίγονται σε ειδικά λοξά ή κυψελοειδή μοτίβα, ώστε να εξασφαλίζεται μηχανική αντοχή και να καταναλώνεται ομοιόμορφα η μαγνητική ροή.

Επίσης λόγω της απουσίας πυρήνα στο δρομέα, οι κινητήρες τέτοιου τύπου έχουν χαμηλή αυτεπαγωγή και συνεπώς παρατηρούνται χαμηλότερα επίπεδα σπινθηρισμού μεταξύ συλλέκτη και ψηκτρών από τους κινητήρες των οποίων οι δρομείς έχουν ελάσματα ατσαλιού. Ένα μειονέκτημα είναι η υπερθέρμανση όταν υπερβούν το μέγιστο φορτίο για περισσότερο από ένα μικρό χρονικό διάστημα.

Στους συγκεκριμένους κινητήρες της Maxon υπάρχει πατενταρισμένος τρόπος κατασκευής δρομέων στρεφόμενου πηνίου με πλεονεκτήματα που μπορεί κανείς να βρει στους

καταλόγους της εταιρείας [32].

Η χαρακτηριστική καμπύλη ταχύτητας-ροπής είναι ένα βασικό στοιχείο για την επιλογή και τον έλεγχο του κινητήρα. Η καμπύλη αυτή περιγράφει γενικά την μηχανική συμπεριφορά του κινητήρα σε σταθερή τάση και στροφές και από το διάγραμμα αυτό μπορεί να υπολογιστεί το σημείο λειτουργίας για συγκεκριμένο φορτίο. Γενικά η μείωση της ταχύτητας σημαίνει γραμμική αύξηση της ροπής. Ένα παράδειγμα διαγράμματος χαρακτηριστικής καμπύλης κινητήρα φαίνεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: Παράδειγμα διαγράμματος χαρακτηριστικής λειτουργίας κινητήρα σταθερού ρεύματος,[8].

Από το διάγραμμα της χαρακτηριστικής καμπύλης (όπως στο σχήμα 3.3) ιδιαίτερα σημαντικά είναι τα δύο ακραία σημεία. Η ταχύτητα περιστροφής χωρίς φορτίο (μηδενική ροπή) και η (μέγιστη) ροπή ακινητοποίησης (stall torque). Τα δύο αυτά σημεία μεταβάλλονται αναλογικά με την εφαρμοζόμενη τάση. Η κλίση αυτή της καμπύλης επιτρέπει την σύγκριση μεταξύ διαφορετικών κινητήρων. Μικρότερη κλίση σημαίνει λιγότερο απότομη μεταβολή της ταχύτητας στις αλλαγές του φορτίου και άρα ισχυρότερος κινητήρας. Στο διάγραμμα επίσης φαίνονται οι περιοχές:

- μόνιμης λειτουργίας (κόκκινη περιοχή), η οποία περιορίζεται από τις καμπύλες μέγιστης μόνιμης συνεχούς ροπής και μέγιστης αποδεκτής ταχύτητας. Στην περιοχή αυτή οποιαδήποτε τιμή αντιπροσωπεύει ένα σημείο λειτουργίας στο οποίο μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια ο κινητήρας.
- μικρής διάρκειας λειτουργία (άσπρη περιοχή). Στην περιοχή αυτή οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι ιδιαίτερα υψηλές, λόγω του φαινομένου του Joule. Ειδικότερα, υπάρχει μια μέγιστη τιμή ρεύματος που μπορεί να διαρρέει μόνιμα τα τυλίγματα του κινητήρα, έτσι ώστε η εκλυόμενη θερμότητα από τα τυλίγματα να μην δημιουργεί πρόβλημα στα ίδια τα τυλίγματα. Προκειμένου λοιπόν, να μην λιώσουν τα τυλίγματα του κινητήρα, συνιστάται μικρής χρονικής διάρκειας λειτουργία, η οποία εξαρτάται από τα θερμικά χαρακτηριστικά των τυλιγμάτων.

3.3.2 Αυξητική Παλμογεννήτρια

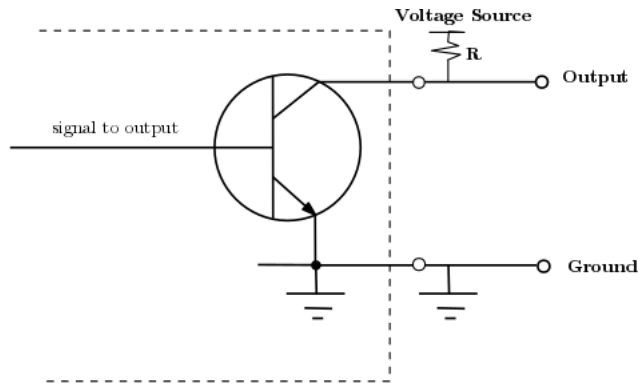
Κάθε ένας από τους κινητήρες συνοδεύεται από μια αυξητική παλμογεννήτρια, που είναι και προτεινόμενη από την εταιρεία παραγωγής των κινητήρων (Maxon). Πιο αναλυτικά, οι χρησιμοποιούμενες αυξητικές παλμογεννήτριες στην πειραματική διάταξη είναι:

- Encoder MR Type ML, with 128-1000 CPT, 3 Channels and Line Driver, προσαρμοσμένος στον κινητήρα RE 25, Graphite Brushes at 20Watt.

- Encoder MR Type L, with 258-1024 CPT, 3 Channels and Line Driver, προσαρμοσμένος στον κινητήρα RE30, Graphite Brushes at 60 Watt.
- Encoder MR Type ML, with 3 Channels and Line Driver, προσαρμοσμένος στον κινητήρα RE 25, Precious Metal Brushes at 10 Watt.

Ο ρόλος των αισθητήρων αυτών είναι να παρέχουν πληροφορία για την γωνιακή μετατόπιση (περιστροφή) του άξονα του κινητήρα στον οποίο είναι προσδεμένοι. Αυτό το επιτυγχάνουν με την παραγωγή σήματος τετραγωνικών παλμών, των οποίων η καταμέτρηση δίνει πληροφορίες για την ακριβή θέση και την ταχύτητα του άξονα. Γενικά για έναν αυξητικό περιστροφικό αισθητήρα (incremental rotary encoder) υπάρχουν κάποια χαρακτηριστικά στοιχεία που τον καθιστούν ή όχι κατάλληλο σε μια εφαρμογή:

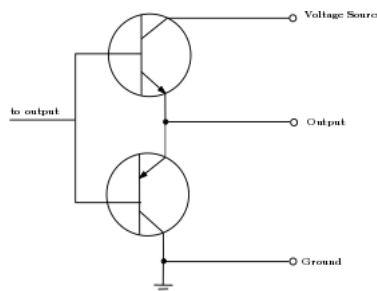
- Η ανάλυση (resolution) του αισθητήρα.
- Ο τρόπος πρόσδεσης στον κινητήρα και η διάμετρος του άξονα που μπορεί να τον υποδεχτεί.
- Ο αριθμός καναλιών εξόδου. Η επιλογή αυτή σχετίζεται με το αν θέλουμε να έχουμε επιπλέον πληροφορίες από την μετατόπιση όπως για παράδειγμα την διεύθυνση περιστροφής ή/και πληροφορία για πραγματοποίηση μια πλήρους περιστροφής. Επίσης σχετίζεται με ζητήματα θορύβου στα σήματα. Ανάλογα με τον αριθμό των καναλιών, οι αισθητήρες χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:
 1. Τύπος "A", Μονό Κανάλι ("A" Single Channel): Η περίπτωση αυτή είναι ιδιαίτερα απλή και παρέχεται η δυνατότητα για παραγωγή τετραγωνικού παλμού που πληροφορεί μονάχα για την περιστροφική μετατόπιση αλλά δεν δίνεται πληροφορία για τη φορά περιστροφής.
 2. Τύπος "Q", Διπλό Κανάλι ("A" Dual Channel or Quadrature Output): Τα δύο αυτά κανάλια παράγουν παλμούς, για την ίδια μετατόπιση, με διαφορά φάσης (quadrature phase), με συνήθη διαφορά τις 90° . Το σήμα που προπορεύεται υποδηλώνει και τη φορά περιστροφής. Σε περίπτωση που δεν είναι απαραίτητη ο προσδιορισμός της φοράς περιστροφής, το δεύτερο κανάλι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξάλειψη του θορύβου που δημιουργείται λόγω ταλαντώσεων του δίσκου του αισθητήρα κατά το σταμάτημα της περιστροφής (φαινόμενο: encoder edge jitter).
 3. Τύπος "R", Quadrature with Index: Η κατηγορία αυτή είναι ίδια με αυτή του Διπλού Καναλιού, μόνο που έχει προστεθεί ένα επιπλέον κανάλι το οποίο παράγει μόνο ένα παλμό αναφοράς (Index Pulse), σε συγκεκριμένη θέση, στην διάρκεια μιας πλήρους περιστροφής του δίσκου του αισθητήρα. Ο παλμός αυτός χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό ενός σημείου αναφοράς στην περιστροφή του άξονα.
- Τα επίπεδα τάσης/ρεύματος που παράγονται στα σήματα εξόδου από τον αισθητήρα. Υπάρχουν διαφορετικές κατηγορίες τρόπου παραγωγής σημάτων εξόδου, μερικές από τις πιο συνηθισμένες είναι οι:
 1. Open Collector: Το σήμα προς έξοδο από τον αισθητήρα, με την τεχνική αυτή, αντί να έχει μια συγκεκριμένη τιμή, εφαρμόζεται στη βάση από ένα τρανζίστορ, του οποίου ο συλλέκτης (collector) είναι συνδεδεμένος, μέσω pull-up αντίστασης, με εξωτερική πηγή. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η επιλογή του επιπέδου της τάσης του παραγόμενου σήματος όταν πρέπει να λάβει την λογική τιμή "1", ενώ για το λογικό "0" οδηγεί σε γείωση (βλ. Σχήμα 3.4). Επιτυγχάνεται δηλαδή μεταβολή του επιπέδου της τάσης (voltage level shifting) σύμφωνα με την εξωτερική πηγή και δεν επηρεάζεται από την τάση με την οποία τροφοδοτείται η παλμογεννήτρια.



Σχήμα 3.4: Σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας του open collector.

Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η πρόσθεση εξωτερικής αντίστασης, διότι αυτό σημαίνει ταυτόχρονη αύξηση της κατανάλωσης, ενώ επηρεάζει και ποιοτικά χαρακτηριστικά του σήματος. Ένα τέτοιο χαρακτηριστικό του σήματος που επηρεάζεται από την εξωτερική pull-up αντίσταση, είναι ο ρυθμός της μεταβολής από λογικό '0' σε '1' και αντίστροφα (slew rate). Ειδικότερα, οι τετραγωνικοί παλμοί στην πραγματικότητα και όχι σαν ιδανικό μοντέλο, χρειάζονται κάποιο χρονικό διάστημα για την μεταβολή από το ένα λογικό επίπεδο στο άλλο. Η κλίση αυτή (slew rate), η οποία καθορίζει την ταχύτητα λειτουργίας του αισθητήρα (και κατ' επέκταση και την ανάλυση του), επηρεάζεται άμεσα από την pull-up αντίσταση, αφού χαμηλές τιμές αντίστασης να μην αυξάνουν το slew rate, αλλά αυξάνουν και την καταναλισκόμενη ισχύ, αφού αυξάνει το ρεύμα.

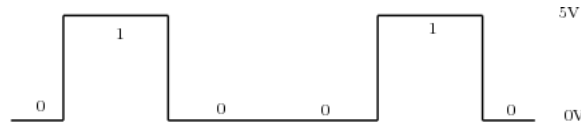
2. Push-Pull. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή χρησιμοποιούνται δύο τρανζίστορ, σε σύγκριση με την τεχνική Open Collector (π.χ όπως στο Σχήμα 3.5). Όταν το σήμα εξόδου είναι λογικό "1" τότε το κάτω τρανζίστορ λειτουργεί ως ανοιχτός διακόπτης, ενώ το πάνω τρανζίστορ επιτρέπει τη ροή ρεύματος προς την έξοδο με βάση την πηγή τάσης του συστήματος. Αντίθετα, για λογικό "0", τα τρανζίστορ λειτουργούν αντίστροφα με αποτέλεσμα το σήμα εξόδου να οδηγείται στην γείωση.



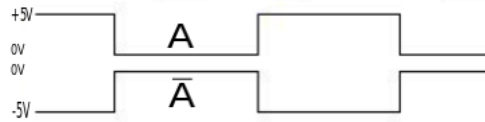
Σχήμα 3.5: Σχηματική απεικόνιση της αρχής λειτουργίας του push-pull.

3. Differential Line Driver. Στην τεχνική αυτή, το παραγόμενο σήμα δημιουργείται με την ίδια διάταξη από τρανζίστορ με την τεχνική push-pull, αλλά αντί για την παραγωγή ενός σήματος, παράγονται δύο. Τα σήματα αυτά αναφέρονται σαν διαφορικό ζεύγος (differential pair) και είναι συμπληρωματικά (ή συζυγή) μεταξύ τους, δηλαδή το ένα είναι το ακριβώς αντίθετο του άλλου.

Έτσι, αντί για την αποστολή μέσω ενός καλωδίου, παλμών μεταξύ των τιμών λογικού '0' και '1' (βλ. Σχήμα 3.6), αποστέλλονται δύο σήματα (βλ. Σχήμα 3.7), προσφέροντας σημαντική μείωση (έως και απαλοιφή) του θορύβου (signal noise).



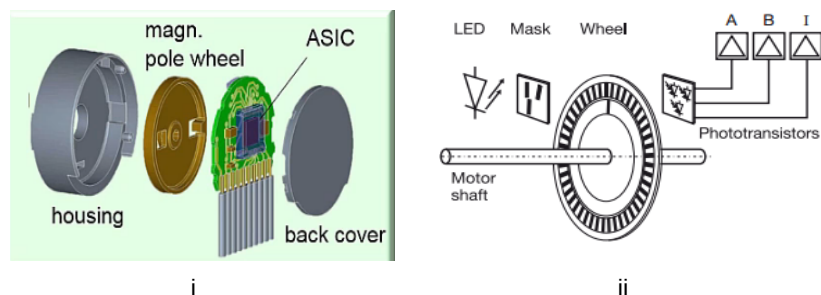
Σχήμα 3.6: Απλός παλμός που μεταδίδεται σε ένα κανάλι.



Σχήμα 3.7: Διαφορικά σήματα (differential signals).

Όσον αφορά την αρχή λειτουργίας μιας αυξητικής παλμογεννήτριας, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο παράγει το κατάλληλο σήμα και μετράει την περιστροφή του άξονα, υπάρχουν διάφορες τεχνικές:

- Μέσω μαγνητικών ιδιοτήτων. Σύμφωνα με την τεχνική αυτή, μόνιμοι μαγνητικοί πόλοι είναι τοποθετημένοι σε ένα δίσκο γύρω από τον άξονα του κινητήρα. Κατά την διάρκεια της περιστροφής του άξονα, οι αλλαγές στην μαγνητική ροή καταγράφονται από τον αισθητήρα και παράγουν το ανάλογο σήμα (βλ. Σχήμα 3.8). Ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο μετράνε την αλλαγή στο μαγνητικό πεδίο, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: σε Hall sensors αν μετράνε την αλλαγή μέσω της τάσης και Magnetoresistive αν το μετράνε μέσω της αλλαγής του μαγνητικού πεδίου. Στην τελευταία κατηγορία ανήκουν οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.
- Μέσω αισθητήρων βασισμένων στο οπτοηλεκτρικό φαινόμενο. Στις περιπτώσεις αυτές, ένας μικρός λαμπτήρας LED φωτίζει έναν περιστρεφόμενο δίσκο, ο οποίος είναι τοποθετημένος πάνω στον άξονα και ο οποίος έχει κατάλληλα τοποθετημένες οπές στην περιφέρεια του. Στην πίσω πλευρά από τον δίσκο, υπάρχει κάποιο φωτοτρανζίστορ το οποίο δέχεται φωτεινά ή σκοτεινά σήματα, ανάλογα με το αν κατά την περιστροφή το LED φωτίζει μια οπή ή τμήμα του δίσκου και ανάλογα παράγει τάση (βλ. Σχήμα 3.8).
- Μέσω επαγωγικού αισθητήρα. Σε αυτούς τους αισθητήρες ένα υψίσυχο εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, αλλάζει χαρακτηριστικά (αυξάνεται το ρεύμα) όταν κινείται μέσα σε αυτό ο άξονας περιστροφής, παράγοντας κατάλληλο σήμα.



Σχήμα 3.8: Σχηματική απεικόνιση δύο εκ των βασικών ειδών αυξητικών παλμογεννητριών: *i* με αρχή λειτουργίας που βασίζεται σε μαγνητικές ιδιότητες, [32] *ii* με αρχή λειτουργίας που βασίζεται στο οπτοηλεκτρικό φαινόμενο, [32].

3.3.3 Μειωτήρες Στροφών

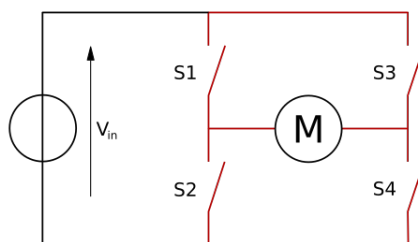
Οι κινητήρες παρέχουν υψηλές στροφές και χαμηλή ροπή για τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται. Για την διευκόλυνση της συνεργασίας κινητήρα-φορτίου, ο άξονας του κινητήρα συνδέεται με κατάλληλο μειωτήρα στροφών (αυξάνοντας επομένως και την αναπτυσσόμενη ροπή). Για την επιλογή του κατάλληλου τρόπου μείωσης των στροφών, αποφασιστικό ρόλο παίζει η μέγιστη μεταδιδόμενη ισχύς, δηλαδή το γινόμενο ροπής επί της ταχύτητας. Μερικές από τις επιλογές που προσφέρει η Maxon είναι:

- Πλανητικό σύστημα (planetary gearhead). Χρήσιμο για μετάδοση υψηλής ροπής (μέχρι και $180m$). Συνήθως ο μηχανισμός είναι εφοδιασμένος με ένσφαιρα ρουλεμάν στην έξοδο του. Οι λόγοι μετάδοσης που επιτυγχάνουν κυμαίνονται από 4:1 έως 6285:1.
- Ευθείς οδοντωτοί τροχοί (spur gearhead). Καταλληλότεροι για χαμηλότερες ροπές (μέχρι $2Nm$). Ο μηχανισμός αποτελείται από 1 ή 2 βαθμίδες. Μία βαθμίδα αντιστοιχεί σε ζεύγος οδοντωτών τροχών. Το πηνιόν είναι απευθείας συνδεδεμένο στον άξονα του κινητήρα. Οι λόγοι μετάδοσης που επιτυγχάνουν κυμαίνονται από 6:1 έως 5752:1. Χαρακτηρίζονται από υψηλή αποδοτικότητα και χαμηλά επίπεδα θορύβου.
- Κοαχdrive, πρόκειται για συνδυασμό ατέρμονα κοχλία (worm gear) και πλανητικού συστήματος. Αποτελεί ιδιαίτερα αθόρυβη μέθοδο ακόμα και σε υψηλό φορτίο και παρουσιάζει και τα πλεονεκτήματα του πλανητικού συστήματος.

Οι μειωτήρες που συνόδευαν τους κινητήρες της Maxon, φαίνονται στο Παράρτημα Α.

3.4 H-Bridge

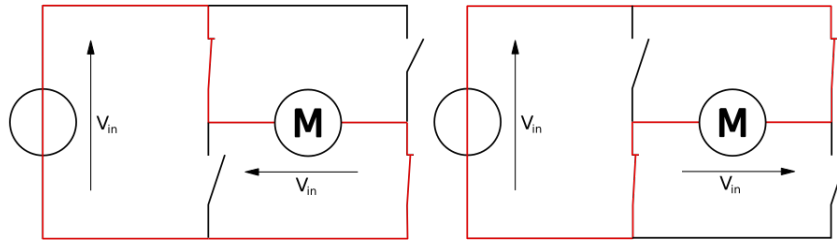
Το H-Bridge είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα το οποίο επιτρέπει την εναλλαγή της πολικότητας της τάσης που ασκείται σε ένα φορτίο, το οποίο βρίσκεται στο κέντρο (σχηματίζοντας με τα υπόλοιπα στοιχεία του ένα νοητό "H", εξού και το όνομα). Συνηθίζεται να χρησιμοποιείται στην ρομποτική και κατά κόρον με κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC motors), προκειμένου την εναλλαγή της φοράς περιστροφής του άξονα του κινητήρα. Μια απλοϊκή απεικόνιση του H-Bridge συνδεδεμένου με έναν τέτοιο κινητήρα δίνεται στο Σχήμα 3.9, ενώ στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζεται μια σχηματική απεικόνιση των δύο βασικών καταστάσεων του (με κόκκινη γραμμή φαίνεται η πορεία του ρεύματος).



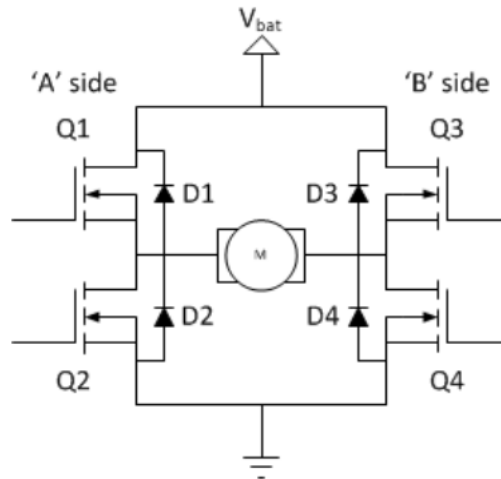
Σχήμα 3.9: Σχηματική απεικόνιση ενός H-Bridge, [9].

Στην πραγματικότητα το κύκλωμα δεν αποτελείται από διακόπτες, όπως διακρίνεται στο Σχήμα 3.9, αλλά την θέση τους παίρνουν συνήθως κάποια τρανζίστορς (bipolar ή FET), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.11.

Η βασική του λειτουργία χαρακτηρίζεται από την επιλογή των 2 καταστάσεων καθενός από τα τρανζίστορ-διακόπτες από τις οποίες μπορεί να διαλέξει ο χρήστης και οι οποίες είναι τελείως ανεξάρτητες μεταξύ τους. Όταν οι διαγώνιοι διακόπτες (π.χ Q1 και Q4) είναι κλειστοί τότε ρεύμα διαρρέει τον κινητήρα και αυτός λειτουργεί κανονικά (με φορά που καθορίζεται από την φορά του ρεύματος στο εσωτερικό του κινητήρα). Ωστόσο, η περίπτωση



Σχήμα 3.10: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας ενός H-Bridge, [9].



Σχήμα 3.11: Σχηματική απεικόνιση H-Bridge, [10].

κατά την οποία στην A ή στην B πλευρά είναι ταυτόχρονα κλειστοί οι διακόπτες, πρέπει να αποφεύγεται καθώς έτσι δημιουργείται ένα βραχυκύκλωμα μεταξύ εξωτερικής πηγής τάσης και γείωσης (shoot-through condition), με αποτέλεσμα την καταστροφή του κυκλώματος και εν δυνάμει και του κινητήρα-φορτίου.

Στην περίπτωση λοιπόν που χρειάζεται σταθερή λειτουργία του κινητήρα (σταθερή ταχύτητα), αρκεί το κλείσιμο των δύο διαγωνίων διακοπών και ανάλογα με το ποιοι διακόπτες είναι αυτοί καθορίζεται και η φορά.

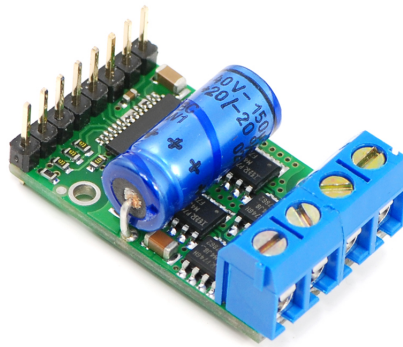
Στην περίπτωση όμως που επιθυμείται και έλεγχος της ταχύτητας τότε αυξάνει λίγο η πολυπλοκότητα. Συγκεκριμένα, για τον έλεγχο της ταχύτητας συνήθως επιλέγεται η χρήση PWM (Pulse Width Modulation) σήματος. Το PWM είναι ένα περιοδικό σήμα, μορφής παλμού, όπου η τιμή εναλλάσσεται μεταξύ λογικού '0' και '1' για μεταβαλλόμενο χρονικό διάστημα (αναλυτικότερα για το PWM σήμα σε επόμενο κεφάλαιο). Το ψηφιακό αυτό σήμα εναλλάσσεται τόσο γρήγορα μεταξύ των ακραίων τιμών, που ο κινητήρας, ο οποίος τροφοδοτείται από αυτό, να "βλέπει" την μέση τιμή της τάσης αντί για διαδοχικές καταστάσεις ανοιχτού-κλειστού (ενώ έτσι μειώνεται και η εκλυόμενη θερμότητα).

Με βάση τώρα τον επιλεγόμενο συνδυασμό της κατάστασης των τρανζίστορ του h-bridge που επιλέγεται, κατά την διάρκεια της ανοιχτής και κλειστής κατάστασης του PWM σήματος, ο έλεγχος του κινητήρα χωρίζεται σε κατηγορίες όπως lock anti-phase drive και phase magnitude drive (περισσότερα εδώ [10]).

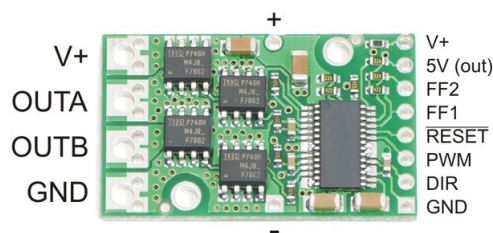
Επίσης να αναφερθεί πως σε ένα επαγωγικό φορτίο όπως ο κινητήρας, η ύπαρξη στοιχείων (τρανζίστορ) που λειτουργούν σαν διακόπτες και που προκαλούν απότομες αλλαγές της τάσης είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα για τον κινητήρα. Αυτό συμβαίνει διότι στις απότομες αυτές αλλαγές, το ρεύμα στα τυλίγματα του κινητήρα δεν μπορεί να απομακρυνθεί με αποτέλεσμα την δημιουργία υπερτάσεων και πιθανή εμφάνιση σπινθήρων που μπορούν να προκαλέσουν την καταστροφή του κινητήρα. Για τον λόγο αυτό, παράλληλα στα τρανζίστορ

του h-bridge τοποθετούνται δίοδοι ελεύθερης ροής (freewheeling diodes). Οι δίοδοι ελεύθερης ροής είναι απλά δίοδοι που επιτρέπουν την ροή του ρεύματος όταν ακριβώς υπάρχει ο κίνδυνος που προαναφέρθηκε. Έτσι ο κινητήρας μπορεί να οδηγηθεί από το h-bridge με ασφάλεια.

Στην εργασία αυτή, χρησιμοποιήθηκε το High-Power Motor Driver 18v15 (βλ. Σχήματα 3.12 και 3.13) της εταιρείας Pololu. Το συγκεκριμένο περιλαμβάνει MOSFETs και επιτρέπει τον έλεγχο ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος. Λειτουργεί σε ένα εύρος τάσεων από 5,5-30V και μπορεί να παρέχει ρεύμα μέχρι 15A.



Σχήμα 3.12: Το High-Power Motor Driver 18v15 της Pololu.

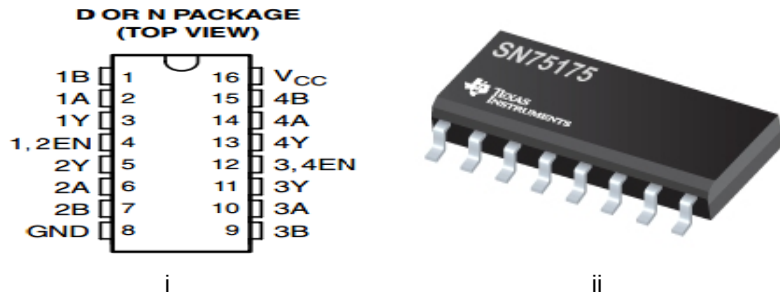


Σχήμα 3.13: Σχηματική απεικόνιση του High-Power Motor Driver 18v15 της Pololu.

3.5 Differential Line Receiver

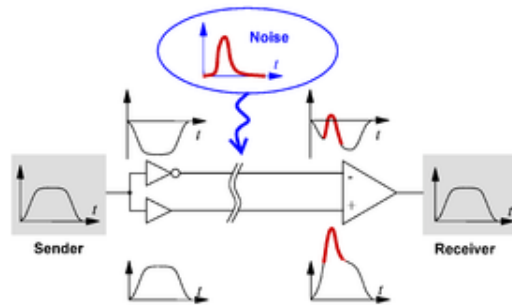
Το παραγόμενο σήμα από την αυξητική παλμογεννήτρια, όπως είδαμε στο αντίστοιχο υποκεφάλαιο, οδηγείται στην έξοδο από τον αισθητήρα μέσω ενός differential line driver. Η τελική έξοδος λοιπόν αποτελείται από ένα ζεύγος συμπληρωματικών σημάτων (complementary signal pair). Το Beaglebone βέβαια, στο eQEP υποσύστημα του, όπου πραγματοποιείται η λήψη και αποκωδικοποίηση των σημάτων σε φάση 90° (quadrature signals), δεν μπορεί να λάβει διαφορικό ζεύγος σημάτων (differential pair) και για αυτό απαιτείται η παρεμβολή ενός differential line receiver κυκλώματος, το οποίο θα λαμβάνει τα συμπληρωματικά σήματα, θα υπολογίζει την διαφορά τους και θα παρέχει το επιθυμητό μονοκάναλο σήμα (single ended signal).

Συγκεκριμένα, για differential line receiver επιλέχτηκε το SN75175 της Texas Instruments (βλ. Σχήμα 3.14). Το κύκλωμα αυτό πρακτικά αποκρίνεται στην διαφορά δυναμικού (τάση) μεταξύ των δύο συμπληρωματικών σημάτων αντί για την συνήθη μέτρηση της διαφοράς του single ended σήματος με αυτό της αναφοράς (δηλαδή την γείωση), όπως συνήθως γίνεται.

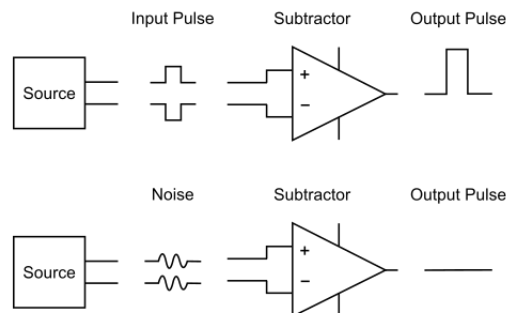


Σχήμα 3.14: Το SN75175: *i* Σχηματική απεικόνιση *ii* Το ολοκληρωμένο κύκλωμα σε φωτογραφία.

Έτσι, σε συνδυασμό και με την παραδοχή (η οποία όμως είναι αποδεκτή χωρίς βλάβη της γενικότητας) πως τα κοινά καλώδια που βρίσκονται στο ίδιο περιβάλλον και στις ίδιες συνθήκες, υπόκεινται σε κοινό θόρυβο, τότε στα δύο συμπληρωματικά σήματα υπεισέρχεται η ίδια διαταραχή. Όταν, το line receiver όμως, μετρήσει την διαφορά τάσης των δύο (αφαιρέσει δηλαδή τα δύο σήματα), η κοινή διαταραχή θα εξαλειφθεί και θα απομείνει ένα σήμα συμβατό με την τεχνολογία TTL (Transistor-transistor logic), όπως φαίνεται και στα Σχήματα 3.15 και 3.16.



Σχήμα 3.15: Διαδικασία απομάκρυνσης θορύβου μέσω συζυγών σημάτων.



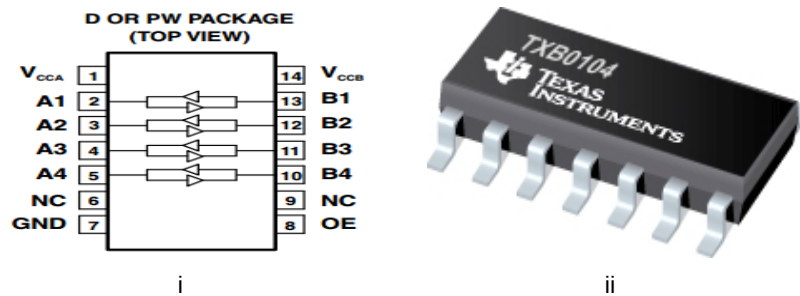
Σχήμα 3.16: Απλοποιητική απεικόνιση της διαδικασίας απομάκρυνσης θορύβου μέσω συζυγών σημάτων.

Συνεπώς με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η απομάκρυνση του θορύβου και επομένως αυξάνεται η αξιοπιστία μετάδοσης σημάτων, όπως αυτό που προκύπτει από την αυξητική παλμογεννήτρια, δηλαδή σήματα υψηλής ταχύτητας μεταδιδόμενων δεδομένων (bitrate).

3.6 Μετατροπείας Στάθμης Τάσεων (Voltage Level Translator)

Όπως έχει προαναφερθεί, το Beaglebone δέχεται και παράγει, στους ακροδέκτες γενικής χρήσης του, σήματα τάσης με μέγιστη τιμή τα 3.3V. Ο περιορισμός αυτός της τάσης περιορίζει την σύνδεση του με άλλες συσκευές αφού πολλές λειτουργούν σε υψηλότερες τάσεις. Ωστόσο υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να αρθεί ο περιορισμός και να υπάρξει συμβατότητα.

Για παράδειγμα, η χρήση διαίρετη τάσης ή κατάλληλων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, όπως το TXB0104 της Texas Instruments (βλ. Σχήμα 3.17) που χρησιμοποιήθηκε, για την μεταβολή της τάσης στο επιθυμητό επίπεδο (Voltage Level Translation). Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε για την μετατροπή του σήματος της αυξητικής παλμογεννήτριας, μετά από την επεξεργασία τους στο Differential Line Receiver, από 5V (η τάση του παρεχόμενου σήματος από την παλμογεννήτρια) σε 3,3V (τάση λειτουργίας στους ακροδέκτες του BB).

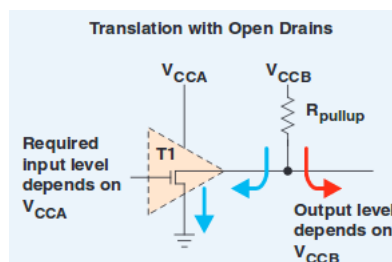


Σχήμα 3.17: Το TXB0104: i Σχηματική απεικόνιση ii Το ολοκληρωμένο κύκλωμα σε φωτογραφία

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.17, το ολοκληρωμένο κύκλωμα χωρίζεται σε 2 απομονωμένες περιοχές με ξεχωριστά κανάλια παρεχόμενης τάσης V_{CCA} και V_{CCB} , τα οποία παίρνουν τιμές από 1,2 έως 3,6V το κανάλι A και 1,65 έως 5,5V (ενώ πρέπει πάντα η τάση στο κανάλι A να είναι μικρότερη από την εφαρμοζόμενη στο κανάλι B). Ο διαχωρισμός αυτός επιτρέπει την ασφαλή μετατροπή της τάσης του σήματος από το ένα επίπεδο στο άλλο.

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για την υλοποίηση του voltage level translation. Για παράδειγμα, αναφέρονται μερικές:

- η χρήση συσκευών με διπλή παροχή τάσης (dual supply level translator), όπου η μετατροπή είναι εφικτή και από τις δύο πλευρές της συσκευής (bidirectional), ανάλογα με ένα σήμα ελέγχου της κατεύθυνσης (direction control signal) που στέλνει ο χρήστης. Δηλαδή, μπορεί να γίνει μετατροπή από μια χαμηλή τάση (στην μια πλευρά) σε μια υψηλότερη (στην άλλη πλευρά) ή και το αντίστροφο. Οι συσκευές αυτές έχουν συνήθως πολύ χαμηλή κατανάλωση.
- η χρήση συσκευών με open drain (βλ. Σχήμα 3.18). Χρησιμοποιείται δηλαδή ένα τρανζίστορ όπου η έξοδος συνδέεται με εξωτερική πηγή, η οποία ανάλογα με την τιμή της (μεγαλύτερη ή μικρότερη από αυτήν της εισόδου θα κάνει αύξηση ή μείωση (αντίστοιχα) της παραγόμενης τάσης.



Σχήμα 3.18: Η μέθοδος ρύθμισης της τάσης με open drain.

- με συσκευές που έχουν ανοχή σε τάσεις εισόδου, μεγαλύτερες από αυτήν στην οποία λειτουργούν. Τέτοιες συσκευές, μπορούν να κάνουν μετατροπή της τάσης μόνο προς την μια κατεύθυνση (unidirectional). Συγκεκριμένα, στην είσοδό τους μπορούν να λάβουν τάσεις με υψηλότερες τιμές από αυτές της λειτουργίας τους και στην έξοδο να παράγουν σήμα με επίπεδο τάσης αυτό της λειτουργίας τους.
- με συσκευές αυτόματης κατεύθυνσης (auto-direction) της μετατροπής της τάσης. Ουσιαστικά λειτουργούν όπως οι συσκευές διπλής παροχής τάσης, αλλά δεν χρειάζονται σήματα για την κατεύθυνση της μετατροπής της τάσης. Τέτοια συσκευή αποτελεί και το ολοκληρωμένο κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε, το TXB0104.

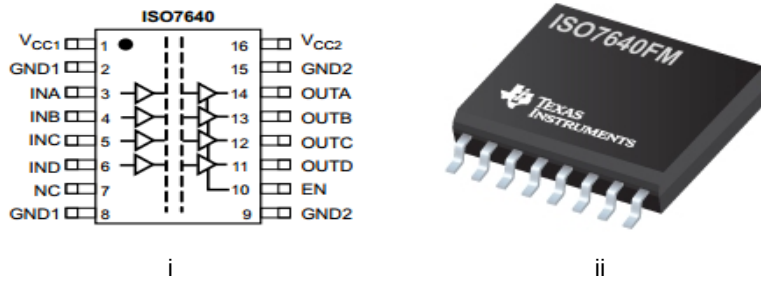
3.7 Ψηφιακός Απομονωτής (Digital Isolator)

Το Beaglebone δέχεται και παράγει στους ακροδέκτες γενικής χρήσεως του (GPIO pins), σήματα των οποίων η μέγιστη τιμή της τάσης είναι $3.3V$. Το άνω αυτό όριο είναι το επιτρεπτό για λόγους ασφαλείας όταν οι ακροδέκτες χρησιμοποιούνται ως είσοδος, ενώ είναι αδύνατο να ξεπεραστεί για τους ακροδέκτες όταν χρησιμοποιούνται ως έξοδος λόγω των εσωτερικών του κυκλωμάτων. Όσον αφορά τα ρεύματα που παράγονται (source current) ή απορροφώνται (sink current), τα ανώτατα όρια είναι $6mA$ και $8mA$ αντίστοιχα (εκτός από μερικούς ακροδέκτες που αναφέρονται στο τεχνικό φυλλάδιο του SOC AM335x και οι οποίοι παράγουν μέχρι $4mA$).

Οι ακροδέκτες αυτοί ωστόσο αποτελούν τον βασικό (φυσικό) τρόπο επικοινωνίας με εξωτερικές συσκευές, όπως για παράδειγμα οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος που πραγματοποιούν την κίνηση του φορείου ρυμούλκησης του ρομποτικού ψαριού. Τέτοιοι κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC Motors) συχνά μπορεί να απαιτούν για τη λειτουργία τους, πολύ υψηλές (για τα κυκλώματα του Beaglebone) τιμές ρεύματος. Ειδικά μάλιστα σε περιπτώσεις όπως το φαινόμενο inductive kickback, όπου σε απότομες αλλαγές (π.χ ξαφνικό μηδενισμό) του ρεύματος και εξαιτίας της αδράνειας της ροής του ρεύματος σε έναν επαγωγέα (π.χ στα τυλίγματα του πηνίου του κινητήρα) παρατηρείται σαν αντίδραση, απότομη και στιγμιαία αύξηση της τάσης. Η απότομη αυτή αύξηση της τάσης, παρότι διαρκεί ελάχιστα, είναι ικανή να προκαλέσει την καταστροφή του Beaglebone, καθώς το κύκλωμα που κλείνει μεταξύ κινητήρα και Beaglebone επιτρέπει την διέλευση μέσα από το Beaglebone ρεύματος που ξεπερνά τα ασφαλή όρια λειτουργίας του τελευταίου.

Για τον λόγο αυτό και προκειμένου να εξασφαλιστεί ασφαλής λειτουργία επιλέχθηκε η παρεμβολή μεταξύ κινητήρα (και του h-bridge που προηγείται) και του Beaglebone ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος (IC) το οποίο αποτελεί δικλείδα ασφαλείας. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε η χρήση του IC, ISO7640FM Low-Power Quad-Channel Digital Isolator (βλ. Σχήμα 3.19). Το κύκλωμα αυτό παρέχει γαλβανική απομόνωση μεταξύ των δύο (βασικών) τμημάτων (κινητήρα και Beaglebone). Η γαλβανική απομόνωση επιτρέπει την ανταλλαγή πληροφορίας και ισχύος μεταξύ των δυο προαναφερθέντων τμημάτων, ενώ εμποδίζεται η πραγματική ροή του ρεύματος. Στην ουσία προσφέρει δυο πλεονεκτήματα:

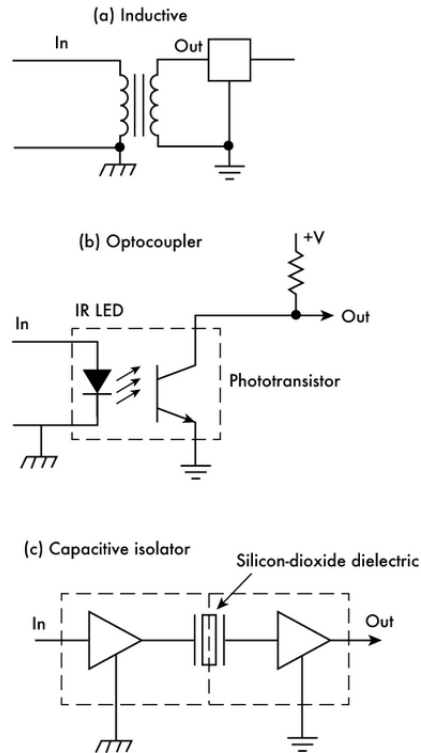
1. προστασία του εξοπλισμού και συγκεκριμένα του Beaglebone που είναι πιο ευαίσθητο σε υψηλές τιμές ρεύματος.
2. αποτρέπει από ακούσιο σχηματισμό διαφοράς τάσης σε δύο διαφορετικά σημεία του κυκλώματος που θα έπρεπε όμως να έχουν κοινή γείωση (ground loops). Το φαινόμενο αυτό προκαλεί ισχυρό θόρυβο στα σήματα, που σημαίνει προβληματική λειτουργία.



Σχήμα 3.19: Το ISO7640FM: **i** Σχηματική απεικόνιση **ii** Το ολοκληρωμένο κύκλωμα σε φωτογραφία

Για την επίτευξη γαλβανικής απομόνωσης υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι (βλ. Σχήμα 3.20), οι οποίοι στοχεύουν να μην στην μεταφορά σημάτων/ισχύος, αλλά αποτρέπουν την απευθείας ηλεκτρική επαφή μεταξύ εισόδου και εξόδου. Οι τρόποι είναι οι ακόλουθοι:

1. η χρήση μετασχηματιστή (transformer). Δύο απομονωμένα τυλίγματα πηνίων μέσω των οποίων τα σήματα μεταφέρονται με επαγωγή. Αποτελεί μια αποδοτική λύση, αλλά έχει μειονέκτημα το μεγάλο μέγεθος και το υψηλό κόστος.
2. οι οπτικοί συζεύκτες (optocouplers). Τα σήματα προς μεταφορά μεταφέρονται σε IR Led το οποίο ανοιγοκλείνει κατάλληλα ώστε να ενεργοποιηθεί ένα φωτοτρανζίστορ, το οποίο και παράγει το επιθυμητό σήμα στην έξοδο.
3. οι capacitive isolators. Λειτουργεί ως εξής: το σήμα περνά από έναν πυκνωτή με διηλεκτρικό με μόνωση. Ο πυκνωτής μπλοκάρει τα σταθερά ρεύματα, αλλά επιτρέπει σήματα υψηλής συχνότητας. Έτσι μέσω κατάλληλου κυκλώματος υλοποιεί έναν πομπό σημάτων με λογική επαναλαμβανόμενου ανοίγματος-κλεισίματος και με διαφορετικές συχνότητες. Θέτει ένα όριο (threshold) πάνω από το οποίο το αρχικό σήμα θεωρείται λογικό "1" και τότε ενεργοποιεί έναν φορέα υψηλής συχνότητας, ο οποίος μεταδίδεται από τον φραγμό του πυκνωτή. Αντίστροφα, στο λογικό "0" το σήμα αντιμετωπίζεται σαν σταθερό ρεύμα και δεν περνά από τον πυκνωτή.



Σχήμα 3.20: Τρόποι γαλβανικής απομόνωσης σήματος.

Η λύση που επιλέχθηκε ήταν η χρήση του ISO7640FM Low-Power Quad-Channel Digital Isolator της Texas Instruments, το οποίο βασίζεται στον τρίτο τρόπο απομόνωσης ψηφιακών σημάτων, δηλαδή την τεχνική capacitive isolation barrier, για λόγους ευκολίας χρήσης, σε συνδυασμό με χαμηλό κόστος και ικανοποιητική απόδοση.

3.8 Αισθητήρας Δύναμης/Ροπής

Για τη μέτρηση των δυνάμεων και των ροπών που αναπτύχθηκαν στο ρομποτικό ψάρι κατά την διάρκεια της κίνησής του στο νερό της δεξαμενής, χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας της εταιρείας ATI Industrial Automation, με όνομα ATI Nano17 (βλ. Σχήμα 3.21), με τον οποίο είναι εφοδιασμένο το εργαστήριο. Ο αισθητήρας αυτός δίνει την δυνατότητα μέτρησης των έξι βαθμών ελευθερίας (τρεις δυνάμεις και τρεις ροπές).



Σχήμα 3.21: Ο αισθητήρας ATI Nano17: **i** Φωτογραφία **ii** Σχηματική αναπαράσταση με τους β.ε.

Στο εσωτερικό του αισθητήρα υπάρχουν τρεις συμμετρικά τοποθετημένοι, μικροί, μεταλλικοί κύλινδροι, οι οποίοι όταν τους ασκείται δύναμη ή/και ροπή παραμορφώνονται σύμφωνα

με τον νόμο του Hooke:

$$\sigma = \epsilon E$$

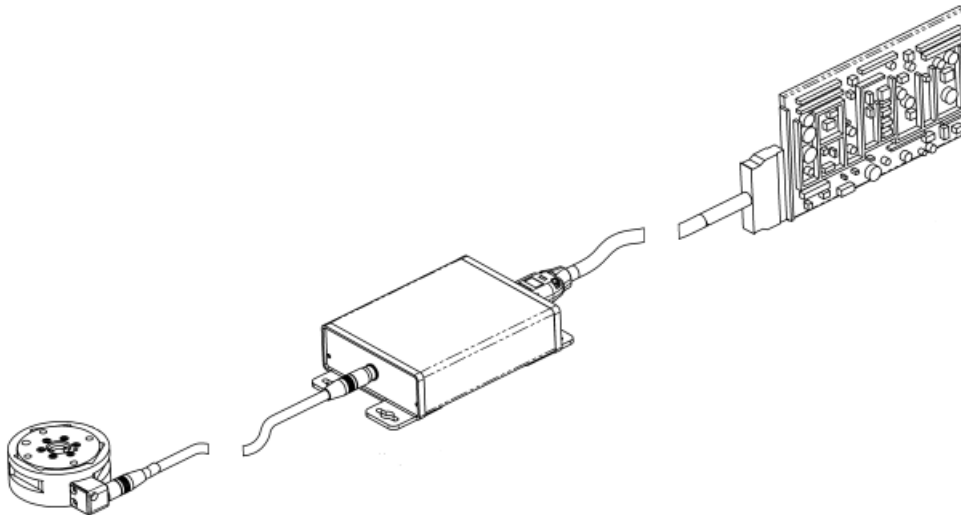
όπου σ : η τάση που εφαρμόζεται στην δοκό [Pa], E : η σταθερά ελαστικότητας της δοκού [Pa] και ϵ : η παραμόρφωση της δοκού (αδιάστατο μέγεθος).

Πάνω στους κυλίνδρους αυτούς, είναι προσαρμοσμένα strain gauges, δηλαδή αισθητήρες με αντιστάσεις ευαίσθητες στην μηχανική τάση. Έτσι, κάθε παραμόρφωση σε κάποιον από τους κύλινδρους του αισθητήρα, σημαίνει ταυτόχρονα και παραμόρφωση των strain gauges. Αποτέλεσμα είναι η μεταβολή της αντίστασης των strain gauges κατά:

$$\Delta R = S_a R_o \epsilon$$

όπου είναι: ΔR : η μεταβολή της αντίστασης, S_a : συντελεστής Gauge factor, R_o : η αντίσταση η δεν υπάρχει παραμόρφωση και ϵ : η παραμόρφωση.

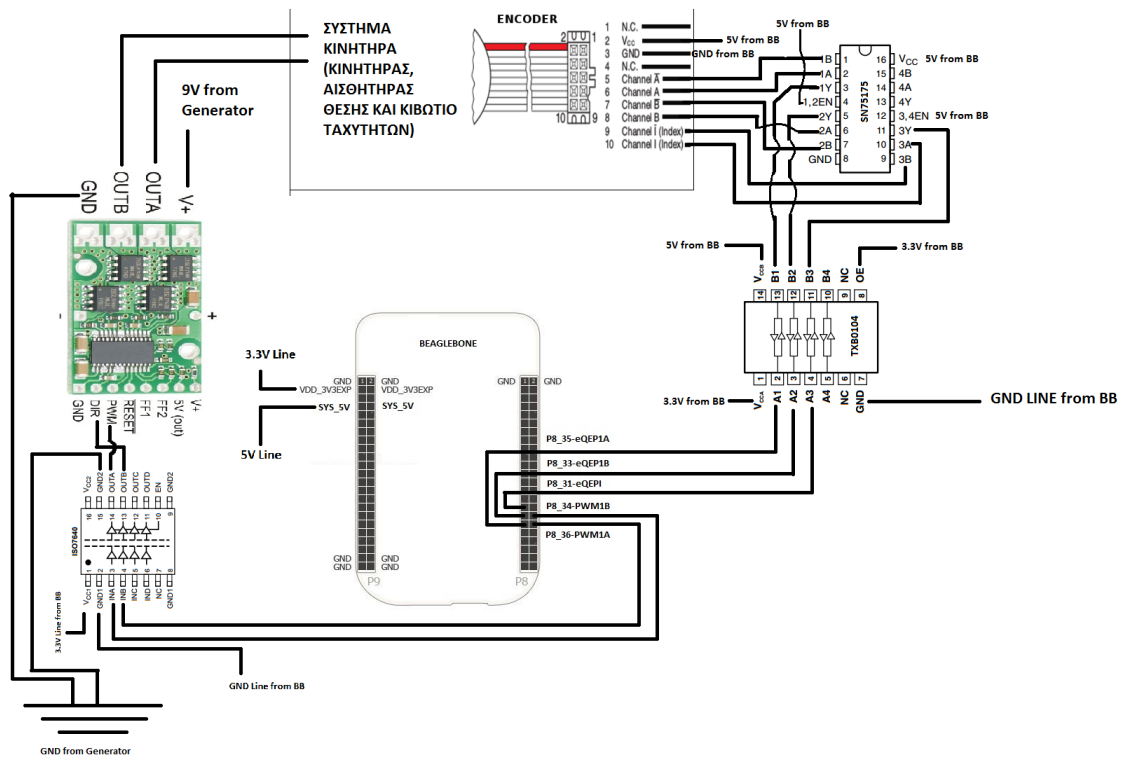
Η μεταβολή αυτή της αντίστασης μέσω κατάλληλου hardware ενισχύεται και συλλέγεται και τελικά μέσω κατάλληλου λογισμικού μετατρέπεται στις δυνάμεις και τις ροπές που έχουν μετρηθεί πως έχουν εφαρμοστεί στον αισθητήρα. Όλη η διάταξη παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 3.22.



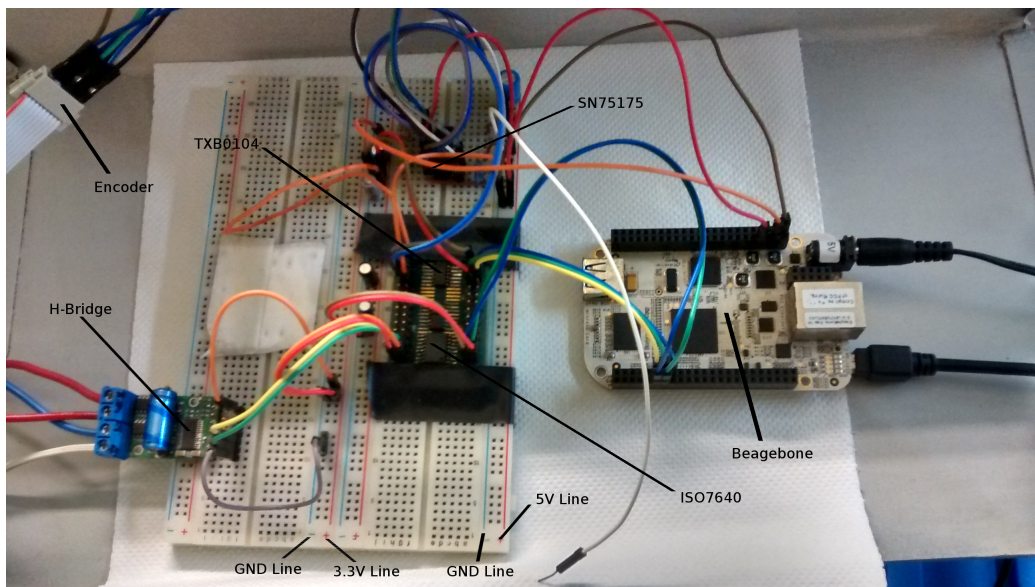
Σχήμα 3.22: Σχηματική απεικόνιση του αισθητήρα.

3.9 Πλακέτα Ηλεκτρονικών

Εδώ παρουσιάζεται ο συνδυασμός όλων των ηλεκτρονικών που παρουσιάστηκαν (Beaglebone, H-Bridge, SN75175, TXB0104, ISO7640) σε μια πλακέτα breadboard, όπου διακρίνεται η συνδεσμολογία των επί μέρους στοιχείων. Στο Σχήμα 3.23 φαίνεται μια απλή σχηματική απεικόνιση, ενώ στο Σχήμα 3.24 φαίνεται μια φωτογραφία του πραγματικού breadboard, όπου εκτός από τα προαναφερθέντα στοιχεία έχουν τοποθετηθεί και κάποιες απαραίτητες αντιστάσεις και πυκνωτές.



Σχήμα 3.23: Σχηματική απεικόνιση όλης της συνδεσμολογίας και του κυκλώματος.



Σχήμα 3.24: Ηλεκτρονική διάταξη.

4 Ανάπτυξη Λογισμικού και Προγραμματισμός Περιφερειακών Μονάδων του Beaglebone

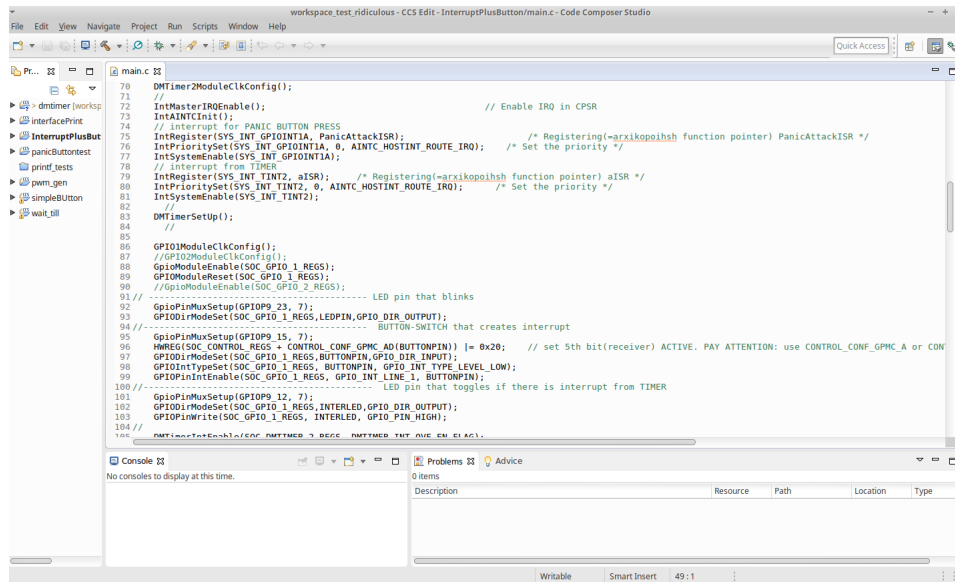
4.1 Εισαγωγή

Για την χρησιμοποίηση του hardware που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο απαιτείται η κατανόηση των απαραίτητων υποσυστημάτων του Beaglebone, καθώς και ο προγραμματισμός τους. Έτσι, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα υποσυστήματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά κόρον και ο τρόπος με τον οποίο προγραμματίστηκαν.

4.2 Code Composer Studio

Για την ανάπτυξη του λογισμικού, το μόνο που χρειάζεται πέρα από τον μεταγλωττιστή (compiler) και τον linker, που θα παράγουν το τελικό εκτελέσιμο από τον μικροϋπολογιστή πρόγραμμα, είναι ένα πρόγραμμα επεξεργασίας κειμένου. Ωστόσο, για τους προγραμματιστές, οι ευκολίες που παρέχει ένα Ολοκληρωμένο Περιβάλλον Ανάπτυξης (IDE - Integrated Development Environment), καθιστούν το τελευταίο αναγκαίο. Τέτοια προγράμματα επεξεργασίας κειμένου-κώδικα και IDE υπάρχουν τόσο ελεύθερου λογισμικού όσο και ως εμπορικά πακέτα.

Στην παρούσα εργασία, μεταξύ άλλων έγινε χρήση του Code Composer Studio (CCS) ενός δωρεάν IDE της εταιρείας Texas Instruments (TI), ο οποίος βέβαια βασίζεται στο ελεύθερο λογισμικό του IDE, Eclipse. Το περιβάλλον εργασίας του CCS φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Ο λόγος για τον οποίο γίνεται αναφορά στο συγκεκριμένο πρόγραμμα, δεν είναι η διαφήμιση του, αλλά διότι το συγκεκριμένο πρόγραμμα διευκολύνει ιδιαίτερα όσους προγραμματίζουν επεξεργαστές όπως αυτόν του Beaglebone (αλλά και άλλων της ίδιας εταιρείας).



Σχήμα 4.1: Το περιβάλλον εργασίας του CCS.

Οι διευκολύνσεις που παρέχει είναι πολλές. Αρχικά με τις πρότυπες φόρμες (template) για διάφορες γλώσσες προγραμματισμού (όπως και της C η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία). Ακόμα παρέχει την δυνατότητα για μεταγλώττιση και σύνδεση (μέσω κατάλληλου linker) του πηγαίου προγράμματος, μέσω τουλάχιστον δύο διαφορετικών μεταγλωττιστών (έναν compiler της gcc αλλά και έναν της TI) σε εκτελέσιμο αρχείο, αρχιτεκτονικής του επεξεργαστή που εμπεριέχεται στην αναπτυξιακή πλακέτα του χρήστη (εδώ του Beaglebone). Με άλλα λόγια, δίνεται η δυνατότητα να αναπτύσσουμε κώδικα για το

Beaglebone, όχι μόνο στο ίδιο το Beaglebone, αλλά από οποιοδήποτε οικοδεσπότη (host) υπολογιστή είναι εγκατεστημένο το Code Composer Studio χωρίς να χρειαστεί η εγκατάσταση αλυσίδας διαπλατορμικής μεταγλώττισης (cross-compile toolchain).

Επιπλέον, ίσως η σημαντικότερη παροχή που προσφέρει το Code Composer Studio και που αποτέλεσε τον κύριο λόγο χρησιμοποίησής του, είναι πως λειτουργεί και σαν εξομοιωτής (emulator) σε επίπεδο hardware του μικροεπεξεργαστή και δίνει έτσι την δυνατότητα και για αποσφαλμάτωση (debugging του κώδικα στον μικροεπεξεργαστή. Παρέχει επίσης, ανάλογα με τον μικροεπεξεργαστή (ή την οικογένεια μικροεπεξεργαστών) για τον οποίο γράφεται ο κώδικας, εξειδικευμένα αρχεία, που ονομάζονται General Extension Language (GEL) files και αφορούν μεταξύ άλλων την αρχικοποίηση του μικροεπεξεργαστή και την χαρτογράφηση της μνήμης για τον αποσφαλματωτή (debugger memory map). Τα GEL αυτά αρχεία είναι ιδιαίτερα χρήσιμα αφού γλυτώνουν τον προγραμματιστή από πολύ δουλειά σε χαμηλό επίπεδο, κερδίζοντας έτσι χρόνο του για ανάπτυξη λειτουργικών εφαρμογών.

4.3 Starterware

Το Beaglebone είναι ένας μικροϋπολογιστής ο οποίος συνήθως χρησιμοποιείται με προεγκατεστημένο λειτουργικό σύστημα, όπως είναι οι διάφορες διανομές του δημοφιλούς λειτουργικού συστήματος Linux (Debian, Ubuntu κτλ). Ένα λειτουργικό σύστημα όμως είναι εκ της δημιουργίας του, έτσι διαμορφωμένο ώστε να μην ακολουθεί ιεράρχιση των εντολών που εκτελεί (μη προληπτικός προγραμματισμός (non-preemptive programming)). Στις εφαρμογές όπου απαιτείται εκτέλεση λειτουργιών σε πραγματικό χρόνο Real-Time, κάθε μικροϋπολογιστής που έχει τέτοιο λειτουργικό σύστημα, όσο υπολογιστικά ισχυρός κι αν είναι, δεν μπορεί να εκτελέσει τις εντολές εντός αυστηρών χρονικών περιθωρίων, σε σύγκριση με έναν απλό και χαμηλού κόστους μικροεπεξεργαστή, ο οποίος όμως είναι εξειδικευμένος στην εκτέλεση διεργασιών στα συγκεκριμένα αυτά χρονικά πλαίσια. Ωστόσο υπάρχουν διάφορες εναλλακτικές που μπορούν να υιοθετηθούν για λειτουργία σε Real-Time. Συγκεκριμένα, για το Beaglebone, υπήρχαν τουλάχιστον οι ακόλουθες τρεις:

1. Πρώτη εναλλακτική ήταν η χρήση κάποιου λειτουργικού συστήματος με πυρήνα πραγματικού χρόνου (Real-Time Linux Kernel). Στην περίπτωση αυτή, αυτό που επιχειρείται να διευθετηθεί είναι ο προληπτικός προγραμματισμός των διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στον επεξεργαστή. Ειδικότερα, ένας τέτοιος Kernel ιεραρχεί την προτεραιότητα και ακολούθως εκτελεί τις διάφορες εντολές με βάση αυτήν (preemptive scheduling), σε αντίθεση με την λογική του σύνηθους λειτουργικού συστήματος, το οποίο διακόπτει προσωρινά μια διεργασία για την ικανοποίηση άλλης χωρίς να λαμβάνει υπόψιν την κρισιμότητα οποιασδήποτε από αυτές.
2. Η δεύτερη εναλλακτική, προσφέρεται από το σύστημα επί ψηφίδας (System-on-Chip, SoC) με το οποίο είναι ήδη εφοδιασμένο το Beaglebone, γι αυτόν ακριβώς τον λόγο. Συγκεκριμένα, το σύστημα AM335X Sitara Processor πέρα από τον επεξεργαστή ARM Cortex-A8 περιλαμβάνει ακόμα δύο αφιερωμένους μικροεπεξεργαστές πραγματικού προγραμματισμού Programmable Real-Time Units: PRU, αρχιτεκτονικής RISC στα 200MHz. Η μονάδα αυτή προσφέρει τη δυνατότητα ακόμα και για παράλληλη υπολογιστική ισχύ με τον βασικό επεξεργαστή. Έχει δική της εσωτερική μνήμη, δικό της σετ οδηγίων, ικανότητα για διεπαφή με τον βασικό Cortex-A8 επεξεργαστή μέσω πρόσβασης στην κεντρική μνήμη και τέλος έναν (περιορισμένο μεν) αριθμό ενσωματωμένων περιφερειακών μονάδων (για την ακρίβεια ικανότητα άμεσης χρήσης κάποιων περιφερειακών μονάδων που χρησιμοποιούνται και από τον βασικό επεξεργαστή).
3. Τρίτη εναλλακτική, η οποία και επιλέχτηκε, είναι η χρησιμοποίηση του Beaglebone bare-metal. Με τον όρο αυτό, εννοείται η απομάκρυνση του (όποιου) λειτουργικού συ-

στήματος και ο προγραμματισμός του Cortex-A8 επεξεργαστή μας σε επίπεδο καταχωρητών (registers), με την βοήθεια της πλατφόρμας του Starterware. Το τελευταίο, το οποίο βέβαια πλέον ενσωματώθηκε στην πλατφόρμα Processor SDK RTOS της ίδιας εταιρείας (Texas Instruments), είναι ένα αναπτυξιακό πακέτο λογισμικού που προσφέρει υποστήριξη σε διάφορα SoCs, όπως για παράδειγμα του AM335X Sitara Processor του Beaglebone χωρίς την παρεμβολή λειτουργικού συστήματος. Πρακτικά, αποτελεί μια συλλογή από βιβλιοθήκες και παραδείγματα για πληθώρα οικογενειών μικροϋπολογιστών.

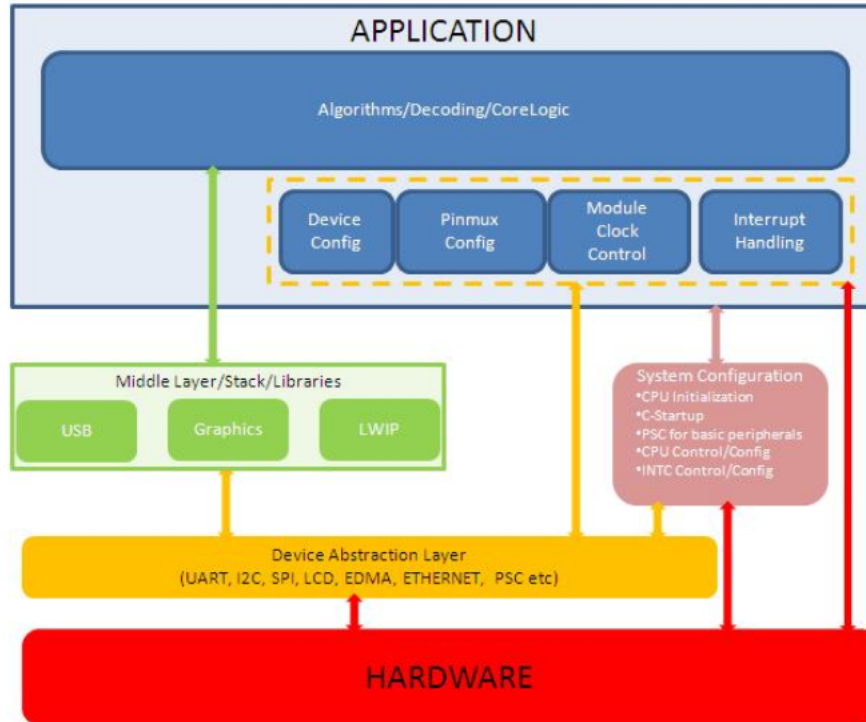
Γενικά, κάθε υπολογιστής εκτελεί σειριακά εντολές (ακόμα και στην χρήση παράλληλων επεξεργαστών, ο κάθε ένας από αυτούς λειτουργεί σειριακά) και ο κύκλος εντολών απαιτεί κάποιο χρόνο για την διεκπεραίωση του. Συνεπώς, η πραγματοποίηση μιας διεργασίας σε πραγματικό χρόνο δεν μπορεί να γίνει. Αυτό που όμως έχει καθιερωθεί να αποκαλείται σαν σύστημα πραγματικού χρόνου είναι ένα σύστημα που εγγυάται για την απόκριση του (εκτέλεση εντολών, διαχείριση εισερχόμενων και εξερχόμενων σημάτων) μέσα σε αυστηρά και (προ)καθορισμένα χρονικά περιθώρια, ανεξαρτήτως του (υπολογιστικού) φορτίου [10].

Έτσι λοιπόν, όταν υπάρχουν εφαρμογές όπου η καθυστέρηση σε συγκεκριμένη χρονική απόκριση (latency) κάποιας συγκεκριμένης δραστηριότητας είναι ιδιαίτερης σημασίας (π.χ. καθυστέρηση απόκρισης οδηγεί σε απώλεια στόχου, όπως είναι η διατήρηση της ισορροπίας ενός ρομπότ ή της οδήγησης ενός ευαίσθητου ρομποτικού οχήματος εντός επιθυμητής τροχιάς), τότε υπάρχει αναγκαιότητα διαχείρισης του συστήματος σε πολύ αυστηρά χρονικά πλαίσια, δηλαδή απαιτείται Hard Real-Time system. Αντίθετα, όταν μια αντίστοιχη καθυστέρηση δεν σημαίνει αποτυχία της λειτουργίας του ρομποτικού συστήματος, αλλά ίσως μια μείωση της ποιότητας της λειτουργικότητας τότε απαιτείται Soft Real-Time system.

Η απαίτηση για Real-Time λειτουργία του Beaglebone στην συγκεκριμένη εφαρμογή (υλοποίηση ελέγχου θέσης των κινητήρων του φορείου ρυμούλκησης του ρομποτικού ψαριού), δεν ήταν απαραίτητη εφόσον οι ταχύτητες κίνησης (σε όλους τους άξονες) της πλατφόρμας ρυμούλκησης του ρομποτικού ψαριού είναι τέτοιες που επιτρέπουν την υλοποίηση του ελέγχου σε όχι ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες κλειστού βρόχου (closed loop time). Εντούτοις, επιλέχθηκε η υλοποίηση ενός συστήματος πραγματικού χρόνου, έτσι ώστε να είναι δυνατή η απόκριση του συστήματος και στις πιο απαιτητικές συνθήκες.

Από τις τρεις εναλλακτικές που παρουσιάστηκαν, η πρώτη απορρίφθηκε αφού τα πραγματικού χρόνου λειτουργικά συστήματα (RTOS) βρίσκονται σε διαδικασία περαιτέρω βελτίωσης από την διεθνή κοινότητα, αφού δεν είναι (τουλάχιστον) ακόμα το ίδιο αποδοτικά με τις άλλες δύο λύσεις. Μεταξύ των εναλλακτικών της χρήσης των PRU μικροεπεξεργαστών και της χρήσης του Starterware σε bare-metal περιβάλλον του Beaglebone, προτιμήθηκε η τελευταία. Ο λόγος είναι ότι είναι γενικότερη στο πλαίσιο των ενσωματωμένων συστημάτων, αφού ως προς την λογική ανάπτυξης κώδικα και δη τον απευθείας προγραμματισμό των καταχωρητών ενός επεξεργαστή, μπορεί ο προγραμματισμός να αφορά σε πρώτο στάδιο την εκάστοτε οικογένεια των επεξεργαστών ARM, αλλά η λογική αυτή μπορεί να γενικευτεί και να μεταφερθεί σε οποιονδήποτε μικροϋπολογιστή. Αντίθετα, οι PRU μικροεπεξεργαστές δεν διευκολύνουν τη μετάβαση σε άλλον μικροεπεξεργαστή αφού έχουν δικό τους σετ εντολών και λογικής που βρίσκεται σε πιο περιορισμένο αριθμό αναπτυξιακών πλακετών. Επίσης, η χρήση του κεντρικού επεξεργαστή του Beaglebone εξασφάλιζε ακόμα μεγαλύτερες δυνατότητες (π.χ. ταχύτητα εκτέλεσης εντολών) σε σχέση με τους PRU μικροεπεξεργαστές.

Η πλατφόρμα του Starterware, αποτελεί μια βιβλιοθήκη γραμμένη κατά κύριο λόγο στην προγραμματιστική γλώσσα C. Πιο συγκεκριμένα, ένας συνοπτικός πίνακας με τα επίπεδα διαστρωμάτωσης της βιβλιοθήκης, όσον αφορά τα στοιχεία που την αποτελούν και με το τι μπορεί να υλοποιηθεί μέσω αυτών, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2:



Σχήμα 4.2: Τα στρώματα οργάνωσης του Starterware.

όπου διακρίνονται τα εξής επίπεδα:

- Device Abstraction Layer: επίπεδο που περιέχει βιβλιοθήκες από διεπαφές προγραμματιστικών εφαρμογών (APIs) για υποστηριζόμενα περιφερειακά.
- Peripheral Examples: εδώ βρίσκονται παραδείγματα που αναδεικνύουν τις δυνατότητες των αντίστοιχων περιφερειακών, χρησιμοποιώντας τις βιβλιοθήκες που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο επίπεδο.
- System Configuration Code: εδώ βρίσκεται κώδικας που οργανώνει τον επεξεργαστή και προετοιμάζει το σύστημα για την εκτέλεση των εφαρμογών
- Platform Code: σ' αυτό το στρώμα περιέχεται ειδικευμένος, ως προς την κάθε πλατφόρμα που υποστηρίζεται από το Starterware, κώδικας για την αρχικοποίηση και ενεργοποίηση της εκτέλεσης των προγραμμάτων.

Παρατίθεται επίσης στο Σχήμα 4.3 η δομή των περιεχόμενων της βιβλιοθήκης:

Directory Structure

```
----StarterWare_#.#.#.#
-- Software-manifest.pdf
-- docs
|  -- ReleaseNotes-#.#.#.#.pdf
|  -- UserGuide-#.#.#.#.pdf
-- drivers
-- examples
|  -- evmAM335x
|      |  -- uart
-- grlib
-- usblib
-- mmcslib
-- nandlib
-- host_apps
-- build
|  -- armv7a
|      |  -- gcc
|          |  -- am335x
|              |  -- drivers
|              |  -- system_config
|              |  -- evmAM335x
|                  |  -- uart
|                  |  -- platform
|                  |  -- bootloader
-- binary
|  -- armv7a
|      |  -- gcc
|          |  -- am335x
|              |  -- drivers
|              |  -- system_config
|              |  -- evmAM335x
|                  |  -- uart
|                  |  -- platform
|                  |  -- bootloader
-- include
|  -- hw
|  -- armv7a
|      |  -- am335x
-- platform
|  -- evmAM335x
|  -- beaglebone
-- system_config
|  -- armv7a
|      |  -- am335x
|          |  -- gcc
-- bootloader
|  -- include
|  -- src
-- third_party
-- tools
-- utils
-- test_bench
```

Σχήμα 4.3: Η δομή οργάνωσης των περιεχομένων του Starterware.

Από τα περιεχόμενα, τα οποία αναλυτικά περιγράφονται στο εγχειρίδιο χρήσης του Starterware (βλ. Παράρτημα Α), ενδεικτικά αναφέρονται κάποια από τα πιο απαραίτητα στην εφαρμογή του ελέγχου των κινητήρων:

- **drivers**: εδώ βρίσκεται ο πηγαίος κώδικας (source files) για τις διεπαφές προγραμματιστικών εφαρμογών (APIs).
- **include**: στον φάκελο αυτό παρατίθενται τα αρχεία κεφαλίδας (header files), απαραίτητα συνοδευτικά του πηγαίου κώδικα.
- **systemConfig**: εδώ περιέχονται αρχεία με κώδικα αρχικοποίησης και διαμόρφωσης εκκίνησης των προγραμμάτων, καθώς και αρχικοποίηση του διανύσματος σημάτων διακοπής. Τα αρχεία εδώ είναι και σε συμβολική γλώσσα (assembly).
- **platform**: εδώ υπάρχουν αρχεία στοχευμένα στα περιφερειακά που βρίσκονται σε συγκεκριμένες αναπτυξιακές πλακέτες.
- **binary**: εδώ τοποθετούνται τα εκτελέσιμα αρχεία που προκύπτουν είτε από την αλυσίδα μεταγλώττισης της gcc είτε από την αντίστοιχη της ti - texas instruments και τα οποία είναι αυτά που πρέπει να φορτωθούν στην μνήμη της αναπτυξιακής πλακέτας για την εκτέλεση του προγράμματος.

Οι βιβλιοθήκες του Starterware είναι έτσι δομημένες, ώστε ανάλογα με το περιφερειακό υποσύστημα που θέλει ο χρήστης να χρησιμοποιήσει, να ανατρέχει στο κατάλληλο αρχείο

όπου υπάρχει πλήθος συναρτήσεων συνοδευμένες με μικρή επεξήγηση, καθώς επίσης παρατίθεται και περιγραφή της μορφής δεδομένων εισόδου και εξόδου που απαιτούνται από τον χρήστη αλλά και παράγονται από την συνάρτηση αντίστοιχα. Στον οδηγό χρήσης της πλατφόρμας [12] δίνεται επίσης για κάθε περιφερειακό μια σειρά οδηγιών προγραμματισμού του (programming guidelines). Οι οδηγίες αυτές αφορούν τις συναρτήσεις εκείνες που πρέπει να κληθούν, αλλά και τη σειρά με την οποία πρέπει να γίνει η κλήση αυτή, από την κύρια συνάρτηση εκτέλεσης του προγράμματος (main function).

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται όταν για την ενεργοποίηση κάποιου περιφερειακού πρέπει πρώτα να έχει ενεργοποιηθεί κάποιο άλλο περιφερειακό, από το οποίο εξαρτάται η ορθή λειτουργία του πρώτου. Για παράδειγμα, για την χρήση του υποσυστήματος των ακροδεκτών γενικού σκοπού εισόδου/εξόδου με στόχο την λήψη σήματος με το πάτημα κάποιου διακόπτη που συνδέεται με έναν ακροδέκτη και ταυτόχρονα το σήμα αυτό να λειτουργεί σαν σήμα διακοπής (interrupt), τότε θα πρέπει απαραίτητα και πριν από όλα να έχει ενεργοποιηθεί (με την χρήση των κατάλληλων συναρτήσεων) ο Ελεγκτής των Σημάτων Διακοπής (Interrupt Controller). Συνεπώς, η ορθή χρήση της πλατφόρμας έγκειται στην προσεκτική ανάγνωση τόσο του Οδηγού Χρήστη όσο και του Τεχνικού Φυλλαδίου του συστήματος επί ψηφίδας, Sitara AM335x, με στόχο να εντοπιστούν ποια υποσυστήματα είναι αλληλοεξαρτώμενα και ποια περιφερειακά ή δίαυλοι διασύνδεσης πρέπει να ενεργοποιούνται για την (τελική) χρήση του περιφερειακού που είναι επιθυμητή.

Οι συναρτήσεις του Starterware είναι γραμμένες σε προγραμματιστική γλώσσα C και διέπονται από τους κανόνες της γλώσσας αυτής. Ιδιαίτερα σημαντική αναφορά πρέπει να γίνει ωστόσο σε δύο απλές μακροεντολές που χρησιμοποιούνται και αποτελούν κλειδί για τον προγραμματισμό των καταχωρητών του Beaglebone. Πρόκειται για τις συναρτήσεις:

```
1 define HWREG(x) (*(volatile unsigned int*)(x)) /* for 32bits registers */
```

και:

```
1 define HWREGH(x) (*(volatile unsigned short*)(x)) /* for 16bits registers */
```

Οι μακροεντολές αυτές, στην πράξη λειτουργούν ως συναρτήσεις οι οποίες ως δεδομένο εισόδου x δέχονται μια διεύθυνση μνήμης (συνήθως με την μορφή ενός αθροίσματος, της διεύθυνσης έναρξης της βασικής διεύθυνσης του υποσυστήματος στο οποίο πάμε να αλλάξουμε κάποια τιμή καταχωρητή και ενός offset όπου αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο καταχωρητή που μας ενδιαφέρει στο συγκεκριμένο υποσύστημα) και μας επιστρέφουν το περιεχόμενό τους. Αυτό συμβαίνει χάρη στις ιδιότητες των δεικτών (pointers) που χρησιμοποιούνται. Ειδικά, το δεδομένο εισόδου πρώτα απαιτείται (casted) να είναι δείκτης σε volatile unshorted int και εκ των υστέρων γίνεται απο-αναφορά (dereferenced), για να πάρουμε το περιεχόμενό της διεύθυνσης που δείχνει ο δείκτης. Η διαφορά των δύο μακροεντολών έγκειται στο μέγεθος του καταχωρητή στον οποίο έχουν προσπέλαση. Η πρώτη απευθύνεται σε μεγαλύτερο καταχωρητή αφού αναμένει δείκτη σε θετικό ακέραιο, ενώ η δεύτερη μακροεντολή αναφέρεται σε μικρότερο καταχωρητή αφού αναμένει δείκτη σε μικρότερο θετικό ακέραιο (short int).

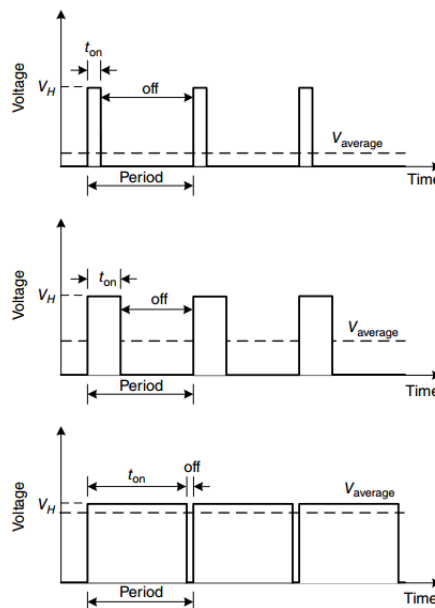
4.4 Παλμοί Μεταβλητού Εύρους (PWM)

Η οδήγηση σήματος σε ένα οποιοδήποτε (κατάλληλο) φορτίο από κάποιον μικροϋπολογιστή ή μικροεπεξεργαστή είναι απαραίτητη. Πολλές συσκευές χρειάζονται για την λειτουργία τους την είσοδο σήματος με μεταβλητή ισχύ, πράγμα που στην περίπτωση μιας ηλεκτρικής συσκευής μεταφράζεται σε δυνατότητα παροχής αναλογικής τάσης ή ρεύματος. Παραδείγματα αυτής της ανάγκης είναι ο έλεγχος της φωτεινότητας ενός λαμπτήρα (LED) και ο έλεγχος της ταχύτητας ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος (dc motor).

Ένα τέτοιο αναλογικό σήμα σημαίνει την ύπαρξη συνεχόμενων και μεταβλητών τιμών στο φάσμα του συνεχούς χρόνου, με άπειρη ευκρίνεια (resolution) τόσο στο εύρος όσο και στο πλάτος του.

Για τους ψηφιακούς μικροελεγκτές, όπως το Beaglebone, η παραγωγή αναλογικού σήματος δεν είναι δυνατή χωρίς την παρεμβολή ειδικών κυκλωμάτων μετατροπής ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (DAC: Digital to Analog Converter). Η χρήση τέτοιων κυκλωμάτων μπορεί να αποδειχθεί επίπονη καθώς αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος. Επίσης είναι επιζήμια σε όρους κόστους και μη αποδοτική, ειδικά σε περιπτώσεις όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια, καθώς τότε μπορεί να απαιτούνται κυκλώματα ογκώδη, πολύ ευαίσθητα σε θόρυβο και πιθανώς επιρρεπή σε ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών εξαιτίας της υψηλής διάχυσης ενέργειας με μορφή θερμότητας από τις αντιστάσεις του κυκλώματος.

Εναλλακτική λύση, η οποία χρησιμοποιείται κατά κόρον και προτιμήθηκε, είναι η χρήση Παλμών Μεταβλητού Εύρους (PWM). Το PWM είναι μια μέθοδος για παραγωγή ψευδοαναλογικού σήματος. Για την ακρίβεια αποτελεί ένα πολύ αποτελεσματικό τέχνασμα για την παραγωγή μεταβλητών επιπέδων τάσης. Ειδικότερα, στην μέθοδο αυτή, παράγεται από τον ελεγκτή σήμα μορφής τετραγωνικού παλμού, μεταξύ μιας χαμηλής τιμής (π.χ τάσης V_L , συνήθως ίσης με μηδέν) και μιας υψηλής τιμής (τάση V_H , συνήθως 3.3V ή 5V) (βλ. Σχήμα 4.4). Καθότι λοιπόν το σήμα μεταβαίνει διαρκώς μεταξύ των δύο καταστάσεων (υψηλή-χαμηλή τάση), πολύ γρήγορα, το φορτίο δεν προλαβαίνει να επηρεαστεί από την εναλλαγή κι έτσι αντιλαμβάνεται στην είσοδο του την μέση τιμή, στην διάρκεια της περιόδου, του σήματος. Η μέση τιμή της τάσης μπορεί εύκολα να υπολογιστεί κάθε φορά, εάν ορίσουμε τα ακόλουθα μεγέθη (βλ. Σχήμα 4.4):



Σχήμα 4.4: Υπολογισμός μέσης τιμής του PWM, [11].

t_{on} :διάρκεια χρόνου όπου το σήμα έχει υψηλή τιμή

t_{off} :διάρκεια χρόνου όπου το σήμα έχει χαμηλή τιμή

$$\text{duty cycle (d.c)} = \frac{t_{on}}{T_{period}} 100\%$$

, είναι δηλαδή ο ποσοστιαίος λόγος της διάρκειας του λογικού 1 ως προς την περίοδο του σήματος.

Έτσι η μέση τιμή της τάσης προκύπτει από την σχέση:

$$V_{average} = d.cV_H + (1 - d.c)V_L \quad (19)$$

όπου χρησιμοποιήθηκαν τα μεγέθη:

V_H = μέγιστη τιμή τάσης,

V_L = ελάχιστη τιμή τάσης.

Συνήθως, στη μέθοδο αυτή η συχνότητα (δηλαδή το αντίστροφο της περιόδου) διατηρείται σταθερή και σε τιμή τέτοια ώστε οι μεταβολές του σήματος να είναι ικανοποιητικά γρήγορες, για τον λόγο που προαναφέρθηκε και το μέγεθος που μεταβάλλεται είναι το duty cycle, παρέχοντας μας έτσι την δυνατότητα μεταβολής της μέσης τιμής του σήματος που βλέπει το φορτίο. Έτσι γίνεται παραγωγή ψευδο-αναλογικού σήματος. Για λόγους πληρότητας, αξίζει εδώ να οριστεί και το μέγεθος της ευκρίνειας (resolution) του σήματος PWM, ως η διασπορά των τιμών που μπορεί να λάβει το duty cycle.

Το BeagleBone έχει τρία υποσυστήματα eHRPWM (Enhanced High-Resolution PWM Modules) στα οποία παράγεται PWM σήμα. Σε κάθε ένα από αυτά υπάρχουν οι ακόλουθες 7 λειτουργικές μονάδες:

1. Time-Base SubModule: σχετική με την ρύθμιση του χρονισμού των γεγονότων (events) στο υποσύστημα (module).
2. Counter-Compare SubModule: σχετική με τον καθορισμό του duty cycle.
3. Action Qualifier SubModule: σχετική με την λήψη αποφάσεων δράσης του συστήματος την στιγμή που λαμβάνει χώρα κάποιο γεγονός (set, clear, toggle της παραγόμενης τάσης).
4. Dead-Band SubModule: σχετική με την αποφυγή του κινδύνου δημιουργίας βραχυκυκλώσεων εξαιτίας της ταχύτερης ενεργοποίησης ισχύος του φορτίου έναντι της απενεργοποίησής του.
5. PWM-Chopper SubModule: σχετική με την διαμόρφωση της ακριβούς μορφής του παλμού.
6. Event Trigger SubModule: σχετική με την παραγωγή γεγονότων-εναυσμάτων σε επίπεδο hardware (triggering interrupts).
7. Trip-Zone SubModule: σχετική με την δράση προστασίας των εξωτερικών ακροδεκτών, στην περίπτωση προβληματικών συνθηκών λειτουργίας.

Οι καταχωρητές των τριών πρώτων λειτουργικών μονάδων ουσιαστικά υλοποιούν την βασική παραγωγή του τετραγωνικού παλμού. Οι καταχωρητές λοιπόν που μας ενδιαφέρουν πρωτίστως είναι οι TBCTL, TBCNT, TBPRD και CMPA/B.

Ο πρώτος, ανήκει στην μονάδα του Time-Base και επιλέγοντας κατάλληλα την τιμή του δίνει την δυνατότητα να χρησιμοποιείται ένα μόνο κλάσμα της συχνότητας (το f_{TBCLK}) του βασικού ρολογιού (SYSCLKOUT) που τροφοδοτεί και χρονίζει ολόκληρο το σύστημα. Έτσι, πλέον ο χρονισμός στο εσωτερικό του συστήματος πραγματοποιείται με βάση αυτήν την, υπό κλίμακα του κεντρικού ρολογιού, τιμή.

Ο δεύτερος καταχωρητής ανήκει κι αυτός στην ίδια μονάδα και ουσιαστικά αποτελεί έναν μετρητή, ο οποίος μεταβάλλει την τιμή του, τόσο γρήγορα όση είναι η συχνότητα f_{TBCLK} . Υπάρχουν τρεις τρόποι λειτουργίας του καταχωρητή αυτού:

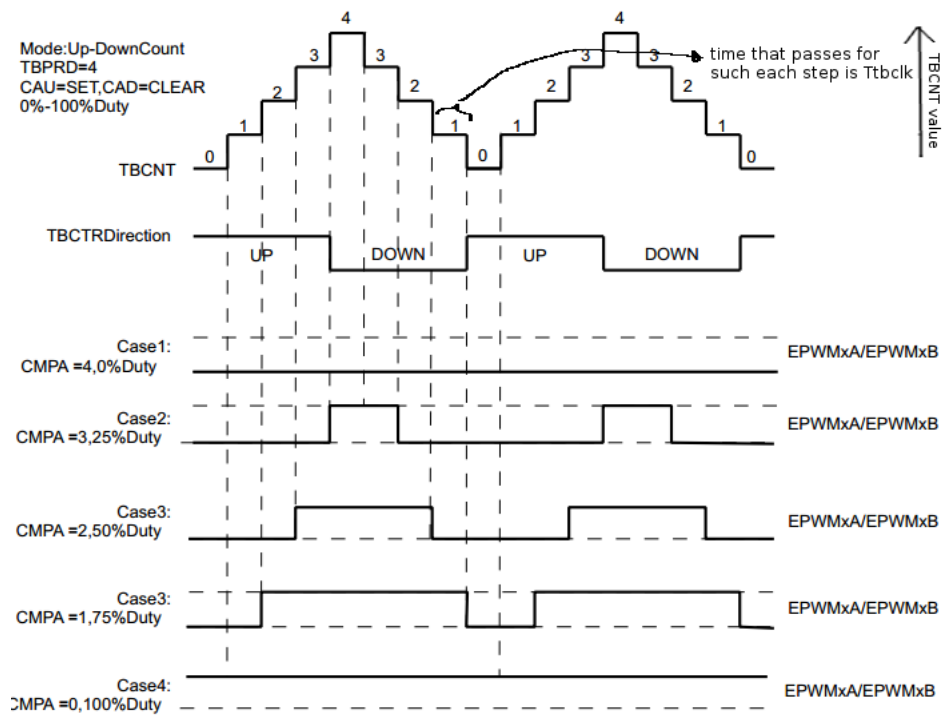
1. Αύξηση από μια ελάχιστη τιμή (π.χ 0) έως μια μέγιστη τιμή,
2. Μείωση από την μέγιστη τιμή έως την ελάχιστη,
3. Αύξηση από την ελάχιστη τιμή στην μέγιστη και ακολούθως μείωση ξανά έως την ελάχιστη.

Η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει ο (TBCNT) σχετίζεται με την ευκρίνεια (resolution) του καταχωρητή και η οποία, στον συγκεκριμένο επεξεργαστή είναι τα 16bit (άρα μέγιστη τιμή είναι η $0xFFFF = 65535_{10}$). Ο τρόπος που θα επιλεγεί η μέγιστη αυτή τιμή επαφίεται στον χρήστη, ανάλογα με την ανάγκη της εφαρμογής του και καθορίζεται ξανά μέσω του καταχωρητή TBCTL.

Ο τρίτος καταχωρητής TBPRD ουσιαστικά καθορίζει την περίοδο (άρα και την συχνότητα) του παραγόμενου σήματος. Αυτό συμβαίνει διότι η τιμή του 16-bit καταχωρητή αποτελεί την μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει ο καταχωρητής-μετρητής TBCNT. Όταν ο τελευταίος, λάβει την τιμή που ορίζει ο TBPRD, τότε επαναφέρει την τιμή του στην αρχική και δίνει, εάν επιλεγεί, ένα σμα για δημιουργία κάποιου γεγονότος interrupt.

Οι καταχωρητές (CMPA/B), ουσιαστικά καθορίζουν το duty cycle. Ειδικότερα, αυτό επιτυγχάνεται χάρη στην ικανότητα της μονάδας Counter-Compare, όπου και ανήκουν οι 2 καταχωρητές, να πραγματοποιεί (διαρκώς) σύγκριση της τιμής τους με αυτήν του TBCNT και όποτε υπάρχει σύμπτωση των τιμών αυτών, τότε, με βάση και το περιεχόμενο του καταχωρητή AQCTLA/B της Action Qualifier μονάδας, να αποφασίζεται το γεγονός (event) που πρέπει να συμβεί. Καθορίζεται δηλαδή η τιμή της παραγόμενης τάσης σε V_L ή V_H . Επομένως, επιλέγοντας κατάλληλα την τιμή του CMP register αποφασίζουμε το ποσοστό της υψηλής τιμής τάσης στην διάρκεια της περιόδου σε σχέση με την χαμηλή τιμή, δηλαδή το duty cycle.

Τα παραπάνω αποτυπώνονται και στο διάγραμμα του Σχήματος 4.5, ενώ παρατίθενται και οι σχέσεις που επιτρέπουν τον υπολογισμό των σημαντικών μεγεθών με βάση τον τρόπο που μετράει ο TBCNT:



Σχήμα 4.5: Χαρακτηριστικοί καταχωρητές για παραγωγή PWM.

Γενικά η προγραμματιστική πορεία που πρέπει να ακολουθηθεί για την εύρυθμη λειτουργία του υποσυστήματος, υπάρχει αναλυτικά στο τεχνικό φυλλάδιο του Starterware. Παρακάτω παρατίθεται ένα παράδειγμα του κώδικα για την ρύθμιση του TBCTL καταχωρητή:

```
1 void set_TBCTL(int index2take, double * scaler, double * possible_tbprd, int
   count_mode)
2 {
3     int index = 0;
4     int clkdivNum = 0;
5     int hspNum = 0;
6     /* */
7     index = (int) index2take/8;
8     hspNum = hsp[index];
9     clkdivNum = scaler[index]/hspNum;
10    /* here we set @TBCTL reg the clkdiv and hspclkdiv values */
11    HWREGH(baseAddr + EHRPWM_TBCTL) = (HWREGH(baseAddr + EHRPWM_TBCTL) &
12        (~EHRPWM_TBCTL_CLKDIV)) | ((clkdivNum <<
13        EHRPWM_TBCTL_CLKDIV_SHIFT) & EHRPWM_TBCTL_CLKDIV);
14
15    HWREGH(baseAddr + EHRPWM_TBCTL) = (HWREGH(baseAddr + EHRPWM_TBCTL) &
16        (~EHRPWM_TBCTL_HSPCLKDIV)) | ((hspNum <<
17        EHRPWM_TBCTL_HSPCLKDIV_SHIFT) & EHRPWM_TBCTL_HSPCLKDIV);
18
19    /* here we set the TBPRD value. */
20    HWREGH(baseAddr + EHRPWM_TBPRD) = possible_tbprd[index2take];
21 }
```

4.5 Enhanced Quadrature Encoder Peripheral

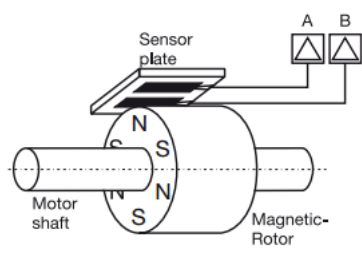
Το υποσύστημα eQEP (Enhanced Quadrature Encoder Pulse) που εμπεριέχεται στο Beaglebone, μας επιτρέπει την ανάγνωση και επεξεργασία της θέσης, της φοράς και της ταχύτητας περιστροφής του άξονα ενός κινητήρα, μέσω της λήψης και αποκωδικοποίησης των σημάτων που παρέχει μιας περιστροφικής αυξητικής παλμογεννήτριας (incremental encoder). Οι πληροφορίες αυτές χρησιμοποιούνται συνήθως σε συστήματα όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια και απόδοση ενός κλειστού συστήματος ελέγχου θέσης όπως είναι το φορείο ρυμούλκησης του ρομποτικού ψαριού.

Για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του υποσυστήματος ακολουθεί μια σύντομη επισκόπηση της αρχής λειτουργίας αισθητήρων θέσεως, όπως αυτού που χρησιμοποιήθηκαν.

Η βασική αρχή λειτουργίας ενός τέτοιου αισθητήρα στηρίζεται στο φαινόμενο της μαγνητοαντίστασης (magneto-resistance). Σύμφωνα με αυτό το φαινόμενο σε λεπτά φύλλα υλικών (thin film materials), συνήθως σιδηρομαγνητικών, αλλάζει η ηλεκτρική τους αντίσταση όταν αλλάζει η σχετική κατεύθυνση της ροής του ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου στο οποίο είναι τοποθετημένα. Έτσι, σε έναν κύλινδρο που είναι τοποθετημένος γύρω από τον άξονα του κινητήρα, τοποθετούνται μαγνήτες οι οποίοι καθώς περιστρέφονται μαζί με τον άξονα, δημιουργούν τις απαραίτητες αλλαγές στο μαγνητικό πεδίο στις θέσεις ακριβώς του αισθητήρα (βλ. Σχήμα 4.6). Παράγονται λοιπόν έτσι, ημιτονοειδή και συνημιτονοειδή σήματα (σήματα δηλαδή με διαφορά φάσης 90°) για κάθε μαγνητικό πόλο. Κατόπιν τα σήματα αυτά επεξεργάζονται περαιτέρω (A/D conversion-interpolation) και τελικά παράγονται τα επιθυμητά quadrature (δηλαδή με διαφορά φάσης 90°) σήματα μορφής τετραγωνικών παλμών, των καναλιών A,B και του Index, δηλαδή του σήματος αναφοράς.

Ένας αισθητήρας αυτού του είδους, παράγει σήματα όπως αυτά από αντίστοιχους αισθητήρες που στηρίζονται στο οπτοηλεκτρικό φαινόμενο και μας προσφέρουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες (βλ. Σχήμα 4.7):

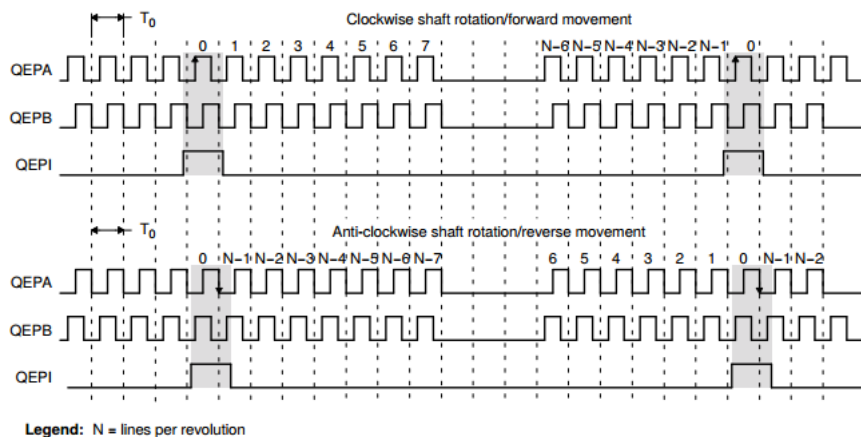
- τη θέση του άξονα, μέσω του αριθμού των μεταβολών από λογικό '0' σε λογικό '1' (high-low transitions) στο σήμα A (ή B). Ο αριθμός των μεταβολών που μετράει, σχετίζεται



Σχήμα 4.6: Αυξητική παλμογεννήτρια με μαγνητοαντίσταση.

και με την ευκρίνεια (resolution) του αισθητήρα, δηλαδή με το μέγεθος της μετατόπισης που μπορεί να μετρήσει.

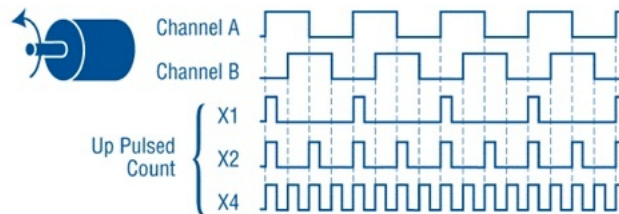
- τα σήματα A,B αποτελούν πανομοιότυπα σήματα με διαφορά φάσης, μεταξύ τους, 90° , όπως αναφέρθηκε. Με βάση το ποιο σήμα προπορεύεται μπορεί να καθοριστεί και η φορά περιστροφής του άξονα.
- το Index σήμα, είναι παλμός που παράγεται σε μια μόνο συγκεκριμένη θέση και χρησιμοποιείται για υπόδειξη της απόλυτης θέσης αφού σηματοδοτεί μιας πλήρους περιστροφής. Το σήμα αυτό μπορεί να είναι είτε προσαρμοσμένο (gated) σε κάποια ακμή παλμού ή και όχι.
- με βάση τον ρυθμό με τον οποίο μετρώνται οι εισερχόμενοι παλμοί μπορεί να προσδιοριστεί και η ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται ο άξονας του κινητήρα.



Σχήμα 4.7: Quadrature σήματα και καθορισμός φοράς περιστροφής.

Στο Beaglebone, υπάρχουν 3 περιφερειακά υποσυστήματα eQEP που επεξεργάζονται τα σήματα από μια αυξητική παλμογεννήτρια, χωρίς να απαιτείται η ανάπτυξη λογισμικού, διευκολύνοντας έτσι τον χρήστη, αλλά και προσφέροντας μεγαλύτερη ακρίβεια. Η απλοποίηση αυτή, αλλά και η αύξηση της αξιοπιστίας, έγκειται στο γεγονός πως πλέον ο χρήστης δεν χρειάζεται να γράψει λογισμικό για να στέλνει σήματα διακοπής κάθε φορά που εισέρχεται κάποιος παλμός από τον αισθητήρα και ακολούθως να μετράει αυτούς τους παλμούς προκειμένου να βρει την μετατόπιση του άξονα, απασχολώντας τον επεξεργαστή. Αντίθετα, το συγκεκριμένο υποσύστημα αναλαμβάνει να κάνει τα παραπάνω σε επίπεδο hardware κι έτσι ανά πάσα στιγμή η θέση είναι απλά το διάβασμα κάποιου καταχωρητή. Επίσης, αν και η ευκρίνεια resolution (η μικρότερη αντιληπτή και άρα μετρούμενη μεταβολή της θέσης δηλαδή) του αισθητήρα είναι καθορισμένη από τον τρόπο κατασκευής του ίδιου του αισθητήρα, το eQEP προσφέρει την δυνατότητα για αύξηση της ακρίβειας. Αυτό επιτυγχάνεται ως εξής:

Έστω πως ο αισθητήρας δίνει την δυνατότητα παραγωγής 500 παλμών κατά την διάρκεια μιας πλήρους περιστροφής. Το eQEP δίνει την επιλογή για διάβασμα μερικών ή όλων των ακμών των παλμών. Δηλαδή, και της ακμής-αρχής και της ακμής-τέλους είτε του παλμού A είτε του B είτε και των δύο (βλ. Σχήμα 4.8). Με αυτόν τον τρόπο, πρακτικά, αντί να μετρήσουμε μόνο 500 ακμές, μετράμε $4 * 500 = 2000$ counts σε μια πλήρη περιστροφή, στην περίπτωση που μετράει όλες τις ακμές και των δύο σημάτων. Το γεγονός αυτό σημαίνει πως η ευκρίνεια του αισθητήρα πλέον από μετατοπίσεις που αντιστοιχούσαν σε $\frac{1}{500} = 0,002$ του κύκλου, δηλαδή $0,72^\circ$, μπορεί να μετράει $\frac{1}{2000} = 0,0005$ του κύκλου, δηλαδή $0,18^\circ$.



Σχήμα 4.8: Ευκρίνεια περιφερειακού eQEP.

Το σύστημα eQEP, απαρτίζεται από τις ακόλουθες λειτουργικές μονάδες:

1. Programmable Input Qualification for each Pin (part of GPIO Mux), αφορά την ρύθμιση των ακροδεκτών γενικής χρήσης ως ακροδέκτες που θα λαμβάνουν τα σήματα του αισθητήρα.
2. Quadrature Decoder Unit (QDU). Στην μονάδα αυτή υλοποιείται μια μηχανή πεπερασμένων καταστάσεων η οποία ανά πάσα στιγμή μπορεί να βρεθεί σε τέσσερις καταστάσεις, ανάλογα με την τιμή των εισαχθέντων σημάτων. Κάθε μετάβαση που συμβαίνει έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση ή τη μείωση του καταχωρητή QPOSCNT. Πρακτικά δηλαδή, εδώ πραγματοποιείται η αποκωδικοποίηση του σήματος. Υπάρχουν 4 βασικά είδη λειτουργίας που καθορίζονται με βάση τις τιμές του καταχωρητή QDECCTL. Οι λειτουργίες αυτές είναι οι:
 - (α) Quadrature-count mode, για την κλασική λειτουργία που περιγράφηκε, με δύο σήματα σε quadrature φάση.
 - (β) Direction-count mode. Στην λειτουργία αυτή ο αισθητήρας (δηλαδή μια εξωτερική πηγή) παρέχει ένα σήμα κατεύθυνσης και ένα σήμα ρολογιού αντί για σήματα σε quadrature φάση. Τότε το A σήμα λειτουργεί σαν μετρητής παλμών και το B περιέχει την πληροφορία για την κατεύθυνση.
 - (γ) UP-count mode. Ο μετρητής θέσης δίνει την συχνότητα του σήματος, ενώ αυτός της κατεύθυνσης αυξάνει προς την μια κατεύθυνση.
 - (δ) DOWN-count mode. Αντίστοιχα με το UP-count mode, αλλά με αντίθετη κατεύθυνση.
3. Position Counter and Control Unit for Position Measurement (PCCU). Η μονάδα αυτή έχει βασικούς καταχωρητές τους QEPCTL, QPOSCCTL και QPOSCMP. Με βάση αυτούς τους καταχωρητές αρχικοποιείται η τιμή του μετρητή θέσης και πραγματοποιούνται συγκρίσεις του μετρητή με τιμές που θέτει ο χρήστης (π.χ όταν έρχεται παλμός αναφοράς Index pulse ή όταν ο μετρητής λάβει την μέγιστη τιμή κλπ) προκειμένου να είναι δυνατή η πραγματοποίηση κάποιων γεγονότων (π.χ παραγωγή σήματος διακοπής, μηδενισμός του μετρητή θέσης και ξεκίνημα νέου μετρήματος κλπ).
4. Quadrature Edge Capture Unit for Low-Speed Measurement (QCAP). Στην μονάδα αυτή μπορεί και μετρείται ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ δύο παλμών και έτσι μπορεί να γίνει υπολογισμός της ταχύτητας περιστροφής του άξονα που μετράει ο αισθητήρας.

5. Unit-Time Base for Speed/Frequency Measurement (UTIME). Με την μονάδα αυτή είναι δυνατή η παραγωγή σημάτων διακοπής σχετιζόμενους με υπολογισμούς για την ταχύτητα περιστροφής.
6. Watchdog Timer for Detecting Stalls (QWDOG). Η μονάδα αυτή προσφέρει ένα σύστημα ελέγχου της ποιότητας του quadrature σήματος που λαμβάνεται και παράγει σήματα διακοπής αν παρατηρηθεί εσφαλμένη λειτουργία.

Οι βασικοί καταχωρητές του περιφερειακού αυτού, είναι οι:

- QPOSCNT (καταχωρητής θέσης). Πρόκειται για καταχωρητή μεγέθους 32bits από τον οποίο προκύπτει η τρέχουσα γωνιακή θέση του άξονα. Η τιμή του καταχωρητή είτε αυξάνεται, είτε μειώνεται ανάλογα με τα εισερχόμενα σήματα QEPA και QEPB.
- QDECCTL. Ο καταχωρητής αυτός δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει το είδος της αποκωδικοποίησης του σήματος. Για παράδειγμα με τα bits 14 και 15, μπορεί να ορίσει το είδος λειτουργίας.
- QEPCTL. Ο καταχωρητής αυτός περιλαμβάνει ρυθμίσεις που αφορούν τη συνολική λειτουργία του περιφερειακού. Για παράδειγμα τα bits 12 και 13 καθορίζουν κάθε πότε ο μετρητής θέσης θα επανεκκινεί την μέτρηση του.
- QPOSINIT. Περιλαμβάνει την τιμή στην οποία αρχικοποιείται ο καταχωρητής θέσης τη στιγμή πυροδότησης κάποιου συμβάντος, το είδος του οποίου ορίζεται στον καταχωρητή QEPCTL
- QPOSMAX. Περιλαμβάνει την μέγιστη δυνατή τιμή του καταχωρητής θέσης.
- QPOSCMP. Περιλαμβάνει την τιμή με την οποία συγκρίνεται ο καταχωρητής θέσης, προκειμένου την παραγωγή κάποιου γεγονότος.

Η προγραμματιστική πορεία του υποσυστήματος παρέχεται και αυτή από το τεχνικό φυλλάδιο του Starterware. Στη συνέχεια παρατίθεται κομμάτι κώδικα για την αρχικοποίηση του υποσυστήματος:

```

1 void eqepSetup ()
2 {
3     HMREG(SOC_EQEP_1_REGS+EQEP_QPOSCNT) = 0x00000000 ;
4     HMREG(SOC_EQEP_1_REGS+EQEP_QPOSINIT)=0x0000 ;
5     HMREG(SOC_EQEP_1_REGS+EQEP_QPOSMAX) =2500000;
6     // eqep_init_config(eqep_initialization);
7     HMREG(SOC_EQEP_1_REGS+EQEP_QDECCTL) = (HMREG(SOC_EQEP_1_REGS+EQEP_QDECCTL) & (~
8     EQEP_QDECCTL_XCR)) | ((1 << EQEP_QDECCTL_XCR_SHIFT) & EQEP_QDECCTL_XCR) ;
9     HMREG(SOC_EQEP_1_REGS+EQEP_QDECCTL) = (HMREG(SOC_EQEP_1_REGS+EQEP_QDECCTL) & (~
10    EQEP_QDECCTL_QRSC)) | ((2 << EQEP_QDECCTL_QRSC_SHIFT) & EQEP_QDECCTL_QRSC) ;
11    HMREGH(SOC_EQEP_1_REGS+EQEP_QEPCTL) = 0x108C ;
12    HMREGH(SOC_EQEP_1_REGS+EQEP_QEINT) = 0x0000 ;
13    HMREGH(SOC_EQEP_1_REGS+EQEP_QFLG) = 0x0000 ;
14 }

```

4.6 Περιφερειακό Ακροδεκτών Γενικής Χρήσης Εισόδου-Εξόδου (GPIO)

Ο επεξεργαστής του Beaglebone, AM335x, δίνει την δυνατότητα προγραμματισμού της λειτουργίας έως και 128 ακροδεκτών γενικής χρήσεως εισόδου/εξόδου (GPIO), παρά την φυσική ύπαρξη μόνο 92 φυσικών ακροδεκτών, χωρισμένων σε δύο κεφαλίδες (pin headers P8, P9) με 46 ακροδέκτες η καθεμιά, μέσω της χρήσης των πολυπλεκτών που υφίστανται στην αρχιτεκτονική του. Έτσι είναι δυνατός ο τρόπος διεπαφής με εξωτερικά συστήματα και ηλεκτρονικά κυκλώματα με πολύ απλό τρόπο.

Ο AM335x επεξεργαστής έχει συγκεκριμένα 4 ελεγκτές (controllers) των GPIO, κάθε ένας εκ των οποίων ελέγχει 32 ακροδέκτες (pins). Οι βασικές λειτουργίες που μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να επιτελούν τα pins είναι οι ακόλουθες:

- παραλαβή δεδομένων ως είσοδο στο σύστημα (data input-capture)
- οδήγηση σήματος σε εξωτερική συσκευή (output-drive signal)
- διεπαφή με πληκτρολόγιο με λειτουργίες debounce (το debounce αφορά την αντιμετώπιση του προβλήματος που σχετίζεται με την ιδιότητα των πλήκτρων, όταν πατιώνται πολλές φορές να μην γίνεται μία και μοναδική επαφή όπως αναμένεται, με αποτέλεσμα την παραγωγή επιπλέον των επιθυμητών σημάτων).
- δημιουργία σημάτων διακοπής.

Εκτός από τη βασική λειτουργία των ακροδεκτών, μέσω των καταχωρητών του GPIO controller μπορεί να ορισθούν και άλλες παράμετροι όπως η κατεύθυνση (Input - Output), η ενεργοποίηση των εσωτερικών Pull-up αντιστάσεων, η ενεργοποίηση πυροδότησης εξωτερικής διακοπής (interrupt) κ.α.

Κάθε ένας από αυτούς τους ακροδέκτες μπορεί να επιτελέσει πλήθος διαφορετικών λειτουργιών (μια λειτουργία την φορά) αν ρυθμιστεί κατάλληλα (με μέγιστο αριθμό δυνατών λειτουργιών ενός ακροδέκτη να είναι οι 8, mode 0-7).

Όσον αφορά την ονοματολογία των pins, υπάρχουν πολλαπλά ονόματα για το κάθε ένα (εξυπηρετώντας διαφορετικούς σκοπούς). Για παράδειγμα, ο ακροδέκτης 42 στην κεφαλίδα P8, όπως φαίνεται στο τεχνικό φυλλάδιο έχει το όνομα (signal name), GPIO2_11 (το οποίο χαρακτηρίζει την προεπιλεγμένη λειτουργία, δηλαδή στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι γενικής χρήσεως και όχι π.χ για σειριακή επικοινωνία), το οποίο για τον μικροεπεξεργαστή είναι το pin T2. Το signal name είναι αυτό που χρησιμοποιείται και από το Starterware για την ονοματολογία των ακροδεκτών. Επίσης για τον kernel, όταν το Beaglebone χρησιμοποιείται με λειτουργικό σύστημα, ο ακροδέκτης έχει το όνομα GPIO75, το οποίο προκύπτει από την σχέση:

$$\text{Αριθμός GPIO} = xx \cdot 32 + y$$

όπου τα x,y προκύπτουν από το Signal name που είναι της μορφής GPIOxxPy. Επίσης το τεχνικό φυλλάδιο χρησιμοποιεί το όνομα που έχουν οι ακροδέκτες στο mode 0, προκειμένου να βρεθεί η απόσταση (offset) από τον κεντρικό καταχωρητή που ξεκινάνε όλοι οι καταχωρητές του εκάστοτε GPIO controller.

Παρακάτω παρατίθεται ενδεικτικά μέρος του προγράμματος που υλοποιήθηκε και είναι υπεύθυνο για την παραμετροποίηση της λειτουργίας των ακροδεκτών που επιλέχθηκαν σαν ακροδέκτες παραγωγής του PWM σήματος:

```
1 void gpioConfig ()
2 {
3     // enable gpio modules
4     GPIO1ModuleClkConfig ();
5     GPIO2ModuleClkConfig ();
6     GpioModuleEnable (SOC_GPIO_1_REGS);
7     GPIOModuleReset (SOC_GPIO_1_REGS);
8     GpioModuleEnable (SOC_GPIO_2_REGS);
9     GPIOModuleReset (SOC_GPIO_2_REGS);
10    // pin muxing
11    // ehrrpwm pinmux
12    // ehrrpwm1A
13    GpioPinMuxSetup (GPIOP8_34, 2);
14    GPIODirModeSet (SOC_GPIO_2_REGS, GPIO_PWM_B, GPIO_DIR_OUTPUT);
15 }
```

Οι συναρτήσεις αυτές με την σειρά τους, βρίσκονται σε άλλο αρχείο πηγαίου κώδικα που καλείται μέσω κατάλληλου header file και είναι:

```

1 void GPIOModuleReset(unsigned int baseAdd)
2 {
3     HWREG(baseAdd + GPIO_SYSCONFIG) |= (GPIO_SYSCONFIG_SOFTRESET);
4     while (!(HWREG(baseAdd + GPIO_SYSSTATUS) & GPIO_SYSSTATUS_RESETDONE));
5 }
6
7 void GPIOModuleEnable(unsigned int baseAdd)
8 {
9     HWREG(baseAdd + GPIO_CTRL) &= ~(GPIO_CTRL_DISABLEMODULE);
10 }
11
12 void GpioPinMuxSetup(unsigned int offsetAddr, unsigned int padConfValue)
13 {
14     HWREG(SOC_CONTROL_REGS + offsetAddr) = (padConfValue);
15 }
16
17 void GPIOModuleDisable(unsigned int baseAdd)
18 {
19     /* Setting the DISABLEMODULE bit in Control(CTRL) register. */
20     HWREG(baseAdd + GPIO_CTRL) |= (GPIO_CTRL_DISABLEMODULE);
21 }
22 }

```

4.7 Περιφερειακό Σημάτων Διακοπής

Η λειτουργία ενός μικροεπεξεργαστή μπορεί να διακοπεί για την εξυπηρέτηση κάποιου άλλου συγκεκριμένου τμήματος του κώδικα (το ονομαζόμενο interrupt routine) από αυτό που εκτελείται. Η διακοπή αυτή συντελείται μέσω ειδικών σημάτων διακοπής (interrupt requests - IRQ), τα οποία ενημερώνουν τον μικροεπεξεργαστή πως είναι ανάγκη για άμεση απόκριση σε εξωτερικά (κυρίως) γεγονότα. Έτσι, τα σήματα αυτά προκαλούν την παύση (suspend) του ο,τιδήποτε και εάν πρόκειται να πραγματοποιηθεί, αποθηκεύοντας το σημείο στο οποίο έχει σταματήσει την προηγούμενη λειτουργία του ο επεξεργαστής με αποτέλεσμα την άμεση εκτέλεση εκείνου του interrupt routine που ανταποκρίνεται στο εξωτερικό συμβάν που προκάλεσε το σήμα διακοπής.

Ειδικότερα, για έναν οποιοδήποτε μικροεπεξεργαστή, η πραγματοποίηση μιας λειτουργίας με δεδομένα (π.χ η εκτέλεση μιας πράξης) απαιτεί την ύπαρξη γενικής χρήσεως καταχωρητών (general purpose registers), στους οποίους μπορεί να αποθηκεύει μια τιμή, με την οποία δουλεύει, αλλά και άλλων πιο ειδικών τύπων καταχωρητών. Για παράδειγμα ο μετρητής προγράμματος (program counter), ο οποίος περιέχει την διεύθυνση της τρέχουσας εντολής που πρέπει να εκτελεστεί και ο δείκτης σωρού (stack pointer), που αποθηκεύει την τρέχουσα διεύθυνση μνήμης της κορυφής του σωρού.

Όταν ο μικροεπεξεργαστής ανιχνεύσει ένα σήμα διακοπής, σταματά την εκτέλεση της ακολουθίας των εντολών που εκτελούσε, αποθηκεύει τη διεύθυνση της εντολής που θα ακολουθούσε φυσιολογικά στον σωρό και μεταπηδά στο πρόγραμμα εξυπηρέτησης του σήματος διακοπής interrupt routine. Το πρόγραμμα αυτό, βέβαια, είναι χρήσιμο να εκτελεί και κάποιες τυπικές διαδικασίες, όπως είναι η επαναφορά της ικανότητας ανίχνευσης κάποιου interrupt, προκειμένου να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά. Το πρόγραμμα λοιπόν που εξυπηρετεί το σήμα διακοπής, που λέγεται επίσης και interrupt handler or interrupt service routine (ISR), στην πραγματικότητα λειτουργεί σαν μια απλή υπορουτίνα του προγράμματος, η οποία όμως δεν καλείται από το πρόγραμμα σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή, αλλά όπως προαναφέρθηκε λαμβάνει χώρα σε στιγμές που καθορίζει το hardware (ή και από το λογισμικό σε μερικές περιπτώσεις).

Η ικανότητα ενός ISR να παρακάμπτει οποιαδήποτε άλλη λειτουργία (αν δεν υπάρχει βέβαια κάποιο άλλο interrupt υψηλότερης προτεραιότητας), καθιστά τα σήματα διακοπής ιδιαίτερα χρήσιμα ακόμα και όταν δεν υπάρχει κάποιο εξωτερικό γεγονός (π.χ κάποιο σήμα

διακοπής που οφείλεται στην λήψη κάποιου σειριακού μηνύματος στον δέκτη λήψης του μικροϋπολογιστή). Για παράδειγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εξυπηρέτηση κάποιας ιδιαίτερα σημαντικής διεργασίας σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, όπως και πραγματοποιήθηκε. Ειδικότερα, στην εφαρμογή του ελέγχου της κίνησης του φορείου ρυμούλκησης του ρομποτικού ψαριού, απαιτήθηκε η υλοποίηση ελέγχου της θέσης του φορείου (δηλαδή και της θέσης του άξονα του κινητήρα που κινεί το φορείο) σε συγκεκριμένα αυστηρά χρονικά διαστήματα. Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκε η χρησιμοποίηση ενός ρολογιού του Beaglebone το οποίο ανά καθορισμένο χρονικό διάστημα παράγει σήμα διακοπής (interrupt), του οποίου το πρόγραμμα εξυπηρέτησής του (ISR) θα σήμαινε την υλοποίηση του αυτόματου ελέγχου της κίνησης.

Στο Beaglebone, το SoC AM335x χρησιμοποιεί τον ελεγκτή των σημάτων διακοπής (interrupt controller) του Cortex A8 για να ιεραρχεί όλα τα σήματα διακοπής και να διαχειρίζεται μέχρι και 128 τέτοια σήματα. Η προτεραιότητα χαρακτηρίζεται από έναν αριθμό, με 0 να είναι η υψηλότερη. Ενώ, υπάρχει και η δυνατότητα για σήματα διακοπής ακόμα μεγαλύτερης προτεραιότητας, τα οποία χαρακτηρίζονται σαν Fast Interrupt Request - FIQ, από αυτά που αναφέρθηκαν μέχρι στιγμής (IRQ). Τα FIQ εξυπηρετούνται πιο άμεσα από τα IRQ και χρησιμοποιούνται από τους επεξεργαστές της ARM ακόμα και για να διακόψουν την εξυπηρέτηση ενός IRQ. Ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται αυτό ξεφεύγει των σκοπών της εργασίας αυτής (μπορεί κανείς να ανατρέξει σε τεχνικά φυλλάδια της αρχιτεκτονικής των επεξεργαστών της ARM) και αφορά τον τρόπο υλοποίησης της εξυπηρέτησης των σημάτων σε επίπεδο hardware (π.χ ύπαρξη παραπάνω καταχωρητών που σχετίζονται με την εξυπηρέτηση των δεδομένων).

Στο Σχήμα 4.9 παρατίθεται η προγραμματιστική πορεία που εφαρμόζεται, όπως αναφέρεται στο τεχνικό φυλλάδιο του Starterware, για τον ορθό προγραμματισμό του περιφερειακού.

Programming Guidelines

Interrupt Service Routines are part of the application. The application shall decide the priority level to be assigned for each interrupt. Also, there should be a registered interrupt service routine for each system interrupts enabled for processing.

- The following sequence can be used to set up the Cortex A8 interrupt controller for a system interrupt.
 - Initialize the Cortex A8 interrupt controller using `IntAINTCInit()`. This will reset the interrupt controller.
 - Register the ISR using `IntRegister()`. After this point, when an interrupt is generated, the control will reach the ISR if the interrupt processing is enabled at the peripheral and interrupt controller.
 - Set the system interrupt priority and the required host interrupt generation controller using `IntPrioritySet()`. The interrupt shall be routed to IRQ.
 - Enable the system interrupt at AINTC using `IntSystemEnable()`.
 - Enable IRQ in CPSR using `IntMasterIRQEnable()`

Σχήμα 4.9: Προγραμματιστική πορεία περιφερειακού Interrupts.

4.8 Timers

Ένα από τα βασικά υποσυστήματα του Beaglebone (και γενικά των μικροϋπολογιστών) είναι αυτά των χρονιστών (timers). Οι timers στην πραγματικότητα είναι απλοί μετρητές (counters), οι οποίοι μετρούν τον αριθμό των κύκλων ρολογιού του μικροεπεξεργαστή.

Συνήθως, ένας timer αποτελείται από έναν prescaler, δηλαδή έναν N-bit καταχωρητή, έναν ή παραπάνω καταχωρητές capture, ένα ή παραπάνω καταχωρητές σύγκρισης (compare registers) και τέλος μερικούς καταχωρητές ελέγχου και κατάστασης του υποσυστήματος (για ρύθμιση και παρακολούθηση του υποσυστήματος).

Το βασικό στοιχείο στο υποσύστημα αυτό, είναι ένας μετρητής, ο οποίος μετράει τους εισερχόμενους από το ρολόι του συστήματος, παλμούς. Εφόσον το ρολόι είναι χρονισμένο σε συγκεκριμένη συχνότητα, με βάση και τους prescalers που έχουν επιλεγεί, τότε κάθε εισερχόμενος παλμός μετρείται σε καθορισμένη χρονική στιγμή.

Όσον αφορά τους prescalers και την λειτουργία τους, πρέπει να αναφερθεί πως στην πραγματικότητα ο ρόλος τους είναι να διαιρούν την συχνότητα με την οποία φτάνουν οι παλμοί από το ρολόι του συστήματος, δίνοντας έτσι το επιθυμητό κλάσμα συχνότητας στο οποίο μετράμε παλμούς (και άρα τον χρόνο για το υποσύστημα αυτό). Ο ρυθμός δηλαδή που μετράει ο μετρητής αλλάζει, επομένως επιτυγχάνεται διαφορετικός χρονισμός από αυτόν που επιβάλλει το ρολόι του συστήματος το οποίο είναι πολύ γρήγορο. Βέβαια, οι τιμές που μπορεί να λάβει ο prescaler δεν είναι μη πεπερασμένες. Αυτό, συχνά, έχει σαν συνέπεια μια διαρκής αντιστάθμιση (tradeoff) στην αντίθετη σχέση μεταξύ ακρίβειας (resolution) και εύρους (range) του χρόνου που μπορεί να μετράει ο μετρητής.

Η βασική ιδέα πίσω από την χρήση των timers είναι πολύ απλή. Ο μετρητής όπως προαναφέρθηκε αυξομειώνεται (ανάλογα με το πώς τον ρυθμίζουμε αυξάνεται ή μειώνεται) κάθε φορά που ένας παλμός του ρολογιού του συστήματος εισέρχεται. Για ένα ρολόι με συχνότητα π.χ 4MHz, δηλαδή με περίοδο:

$$T = \frac{1}{frequency} = \frac{1}{4} = 0.00025ms$$

σημαίνει πως κάθε 0.00025ms ο μετρητής μετράει. Εάν λοιπόν είναι επιθυμητή η μέτρηση ενός χρονικού διαστήματος, έστω 10ms, τότε αρκεί να ρυθμιστεί ο μετρητής (που αυξάνει κάθε 0.00025ms) να μετρήσει μέχρι την τιμή, η οποία θα δίνεται από την σχέση:

$$timercount = \frac{desiredT}{clocktimeperiod} - 1$$

Στο παράδειγμα λοιπόν αρκεί να μετρήσει από το 0 μέχρι την τιμή 39999. Άρα, εάν ο μετρητής μπορεί να λάβει μέχρι και αυτήν την τιμή τουλάχιστον, τότε είναι δυνατή η χρονομέτρηση κάθε 10ms.

Έτσι, γίνεται κατανοητό πως τόσο η περίοδος/συχνότητα του ρολογιού όσο και το μέγεθος του μετρητή (έναν 16bit counter δίνει την δυνατότητα για μέτρηση μέχρι την τιμή 65535, ενώ ένας 8 bit counter, από 0 έως 255) διαδραματίζουν καίριο ρόλο στην δυνατότητα ικανοποιητικής χρονομέτρησης.

Οι timers μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολλές εφαρμογές, όπως:

1. για να παράγονται σήματα διακοπής σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Για παράδειγμα, ο PID controller για την κίνηση του φορέιου ρυμούλκησης του ρομποτικού ψαριού, υλοποιείται σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές που καθορίζονται από σήματα διακοπής, τα οποία λάμβαναν χώρα σε μετρημένα, από έναν timer, χρονικά διαστήματα.
2. για την χρονομέτρηση κάποιου εξωτερικού γεγονότος, π.χ διάρκεια αποστολής σημάτων σε άλλο μικροϋπολογιστή.

Για τον προγραμματισμό των timers του Beaglebone, ακολουθείται η προγραμματιστική ακολουθία που προτείνει το Starterware (βλ. Σχήμα 4.10).

- To enable the DMTimer to operate in Timer mode, the following sequence has to be followed.
 - Configure the timer for One-shot or Auto-reload operation by calling the API `DMTimerModeConfigure()`.
 - Load the count value for the timer by calling the API `DMTimerCounterSet()`.
 - If Auto-reload operation is enabled then use the API `DMTimerReloadSet()` to load the reload value.
 - Enable the timer interrupts by using the API `DMTimerIntEnable()`.
 - Start/Enable the timer by calling the API `DMTimerEnable()`. The timer will start counting.
 - Stop/Disable the timer by calling the API `DMTimerDisable()`. The timer will stop counting.

Σχήμα 4.10: Προγραμματιστική ακολουθία εντολών για ορθή χρήση των timer.

4.9 Universal Asynchronous Receiver/Transmitter - UART

Μια από τις σημαντικότερες δυνατότητες που παρέχει το Beaglebone είναι η δυνατότητα επικοινωνίας και ανταλλαγής δεδομένων με εξωτερικές συσκευές. Για την επίτευξη της επικοινωνίας παρέχονται από την πλακέτα πολλοί τρόποι:

- μέσω Ενιαίου Σειριακού Δίαυλου (USB - Universal Serial Bus)
- με Ethernet
- με UART - Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
- μέσω SPI - Serial Peripheral Interface
- μέσω I2C - Inter-Integrated Circuit

Ο σκοπός για τον οποίο υπήρξε ενδιαφέρον για κάποια μέθοδο επικοινωνίας ήταν η ανάγκη για διεπαφή του beaglebone με έναν κεντρικό (host) υπολογιστή. Η διεπαφή αυτή είναι απαραίτητη για διάφορους λόγους:

- για διάδραση με τον χρήστη κατά την διάρκεια (on-line) της εκτέλεσης του ελέγχου των κινητήρων, με προβολή μηνυμάτων στον χρήστη αλλά και λήψη παραμέτρων-εντολών από αυτόν, μέσω προσομοιωτή τερματικού (terminal emulator).
- για λόγους αποσφαλμάτωσης (debugging)
- για τη μεταφορά δεδομένων σε έναν κεντρικό υπολογιστή (host pc), για την επεξεργασία τους μετά το πέρας (offline processing) του ελέγχου των κινητήρων (π.χ την γραφική απεικόνιση της θέσης του άξονα του κινητήρα, με στόχο την επιβεβαίωση πραγματοποίησης της επιθυμητής τροχιάς από τον ελεγκτή).

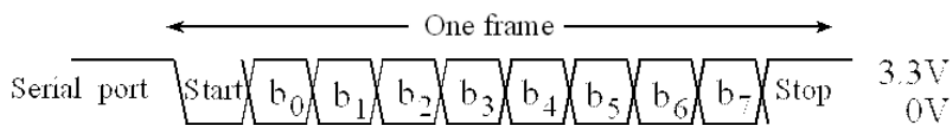
Ένας πολύ εύκολος και αποδοτικός τρόπος που παρέχει την δυνατότητα αποστολής και λήψης δεδομένων από το Beaglebone στον κεντρικό υπολογιστή, είναι μέσω σειριακής επικοινωνίας. Από τις δυνατές επιλογές που παρέχει το Beaglebone (UART, SPI, I2C κλπ), επιλέχθηκε το υποσύστημα UART αφού είναι ιδιαίτερα απλό και εξυπηρετικό στην χρήση. Το UART είναι ένα υποσύστημα (module) του hardware του Beaglebone με το οποίο είναι δυνατή η σειριακή ασύγχρονη επικοινωνία (συνήθως μάλιστα χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τα πρωτόκολλα επικοινωνίας RS-232, RS-422, RS-485), αφού παραλαμβάνει παράλληλα πακέτα δεδομένων και τα αποστέλλει σειριακά σε έναν ακροδέκτη αποστολής (TxD pin) ή, αντίστοιχα, τα παραλαμβάνει σε έναν ακροδέκτη λήψης (RxD pin), χωρίς να απαιτείται η ύπαρξη κάποιου κοινού, στις δύο συσκευές, ρολογιού για συγχρονισμό.

Εφόσον για το ένα μέρος από το οποίο απαρτίζεται το σύστημα επικοινωνίας, δηλαδή (το Beaglebone), επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος τρόπος επικοινωνίας, μένει να καθοριστεί ένας συμβατός τρόπος και για το δεύτερο μέρος, δηλαδή τον κεντρικό υπολογιστή. Χρειάζεται λοιπόν, μια σειριακή θύρα στον κεντρικό υπολογιστή.

Το Beaglebone ωστόσο, παρέχει (μέσω κατάλληλου ενσωματωμένου hardware, του FTDI FT2232H Dual USB-FIFO IC) την δυνατότητα για χρήση του USB με το οποίο είναι εφοδιασμένο, ως μια εικονική σειριακή πύλη. Υπάρχει λοιπόν μεταφορά του σειριακού σήματος μέσω του USB. Έτσι, δεν απαιτείται από τον κεντρικό υπολογιστή η χρήση πραγματικά σειριακής θύρας, αλλά πολύ απλά μέσω ενός καλωδίου USB και την χρησιμοποίηση ενός τερματικού (το οποίο ρυθμίζεται κατάλληλα ώστε να συνδεθεί με την κατάλληλη εικονική θύρα και με το κατάλληλο baud rate) επιτυγχάνεται η ζητούμενη επικοινωνία, με πολύ απλό και εύκολο τρόπο, χωρίς πολλές ρυθμίσεις από την πλευρά του κεντρικού υπολογιστή (λογική plug and play).

4.9.1 Βασικές Αρχές Λειτουργίας της Σειριακής Επικοινωνίας και του Υποσυστήματος UART

Η σειριακή επικοινωνία γενικά περιλαμβάνει την αποστολή δεδομένων (bits), ένα-ένα ανά μονάδα χρόνου. Ο συνολικός αριθμός από δεδομένα (bits) που αποστέλλονται ανά μονάδα χρόνου λέγεται baud rate. Επομένως, αν ο αριθμός του baud rate είναι, έστω x bits/s, τότε ο χρόνος που απαιτείται για να σταλεί ένα bit θα είναι $\frac{1}{x}$ (s). Μια ομάδα από τον ελάχιστο αριθμό δεδομένων (bits) που μπορεί να αποτελέσει μονάδα σειριακής μετάδοσης δεδομένων, ονομάζεται frame και στην απλούστερη μορφή είναι όπως στο Σχήμα 4.11. Αποτελείται από ένα bit που υποδηλώνει την αρχή των δεδομένων (και είναι το 0), οχτώ bits που αποτελούν το μήνυμα προς αποστολή ($b_0 - b_7$) και τέλος, άλλο ένα bit (ή και δύο μερικές φορές), που υποδηλώνει την λήξη των δεδομένων (με την τιμή 1). Επίσης μπορεί να παρέχεται η δυνατότητα για αποστολή και ενός (bit) ασφαλείας (parity bit), το οποίο όμως τώρα πια δεν συνηθίζεται.



Σχήμα 4.11: Ένα frame μετάδοσης δεδομένων.

Αναλυτικότερα, ο τρόπος με τον οποίο χειρίζεται το UART ένα frame, εάν διαχωρίσουμε την διαδικασία σε δύο κομμάτια, ένα της αποστολής και ένα της λήψης του frame, έχει ως εξής:

- Για την αποστολή:

Συνηθίζεται το υποσύστημα του UART να είναι εφοδιασμένο με έναν FIFO (First-In-First-Out) buffer (το Beaglebone έχει buffer χωρητικότητας 64 bits), δηλαδή μια ενδιάμεση μνήμη η οποία μεσολαβεί μεταξύ του καταχωρητή ο οποίος περιέχει τα δεδομένα προς αποστολή (THR register) και ενός καταχωρητή ολίσθησης (shift register), ο οποίος αποστέλλει τελικά ένα ένα τα δεδομένα. Αφού ο χρήστης γράψει στον καταχωρητή την τιμή που θέλει να αποστείλει και εφόσον δεν συντρέχει κάποιος λόγος (για παράδειγμα το buffer να είναι γεμάτο ή έχουμε υπερχείλιση, πράγμα που υποδηλώνεται μέσω κάποιου κατάλληλου flag), τότε τα δεδομένα εισέρχονται στο buffer. Κατόπιν και αφού ελεγχθούν flags που αφορούν την ορθή λειτουργία της αποστολής (π.χ σχετίζονται με την ανεύρεση σφαλμάτων), τα δεδομένα αντιγράφονται στον καταχωρητή ολίσθησης και τελικά αποστέλλονται σειριακά και με βάση τον ρυθμό που καθορίζει το εσωτερικό ρολόι του υποσυστήματος. Στο Beaglebone το ρολόι αυτό έχει συχνότητα ίση με κλάσμα του κεντρικού ρολογιού του υποσυστήματος που έχει συχνότητα 48 MHz. Ειδικότερα, δίνονται 17 επιλογές υποδιαίρεσης του ρολογιού παράγοντας έτσι τις τυποποιημένες τιμές baud rate που φαίνονται και στον Πίνακα 2. Ο λόγος για τον οποίο υπάρχουν τυποποιημένες τιμές baudrate (π.χ συνηθισμένες τιμές είναι 9600bts, 115200bts κλπ) δεν είναι άλλος από την ανάγκη για συγχρονισμό των συσκευών αποστολής και λήψης δεδομένων σε κοινή ταχύτητα, καθώς ταχύτερη αποστολή δεδομένων από την ικανότητα λήψης, όπως είναι λογικό θα σήμαινε ελαττωματική ανταλλαγή δεδομένων.

- Όσον αφορά την λήψη των δεδομένων:

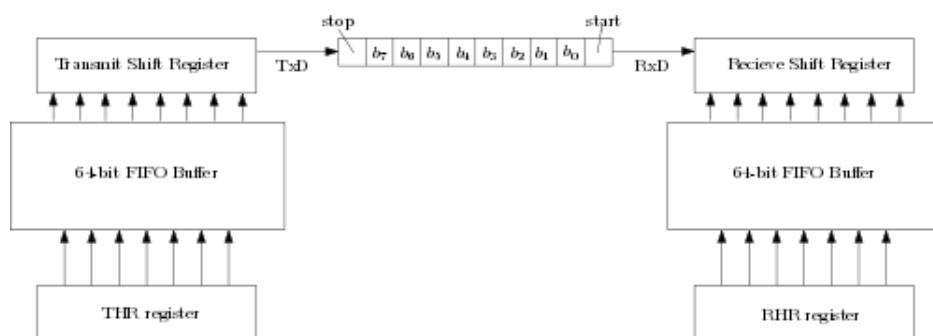
Κι εδώ η διαδικασία πραγματοποιείται μέσω της χρήσης κατάλληλης ενδιάμεσης μνήμης (FIFO buffer). Στο ίδιο υποσύστημα UART επομένως, συνυπάρχουν buffer τόσο για την αποστολή όσο και την λήψη δεδομένων. Κι εδώ, το υποσύστημα UART αρχικά λαμβάνει ένα-ένα τα δεδομένα μέσω ενός ακροδέκτη λήψης (TxD) σε έναν καταχωρητή

ολίσθησης. Εφόσον ο καταχωρητής ολίσθησης γεμίσει και αφού ελεγχθούν τα κατάλληλα flags (π.χ που σχετίζονται με σφάλματα αποστολής στα δεδομένα (corrupted data) ή την περίπτωση όπου υπάρχει εισροή δεδομένων ταχύτερη από ότι η εκροή από τον γεμάτο FIFO buffer (περίπτωση overrun) κλπ), τότε τα δεδομένα γράφονται στον καταχωρητή λήψης (RHR register) από που και μπορεί να τα διαβάσει/επεξεργαστεί ο χρήστης.

Πίνακας 2: Δυνατές επιλογές Baud Rate στο Beaglebone.

Baud Rate	BaudMultiple	DLH,DLL (Hex)	Actual Baud Rate	Error (%)
0.3 kbps	16x	10000	0.3 kbps	0
0.6 kbps	16x	5000	0.6 kbps	0
1.2 kbps	16x	2500	1.2 kbps	0
2.4 kbps	16x	1250	2.4 kbps	0
4.8 kbps	16x	625	4.8 kbps	0
9.6 kbps	16x	312	9.6153 kbps	+0.16
14.4 kbps	16x	208	14.423 kbps	+0.16
19.2 kbps	16x	156	19.231 kbps	+0.16
28.8 kbps	16x	104	28.846 kbps	+0.16
38.4 kbps	16x	78	38.462 kbps	+0.16
57.6 kbps	16x	52	57.692 kbps	+0.16
115.2 kbps	16x	26	115.38 kbps	+0.16
230.4 kbps	16x	13	230.77 kbps	+0.16
460.8 kbps	13x	8	461.54 kbps	+0.16
921.6 kbps	13x	4	923.08 kbps	+0.16
1.843 Mbps	13x	2	1.846 Mbps	+0.16
3.6884 Mbps	13x	1	3.6923 Mbps	+0.16

Οι διαδικασίες αποστολής και λήψης δεδομένων παρουσιάζονται συνδυαστικά στο Σχήμα 4.12.



Σχήμα 4.12: Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας αποστολής και λήψης δεδομένων μέσω UART.

Για τον προγραμματισμό τώρα του υποσυστήματος αυτού, ακολουθήθηκαν αρχικώς οι προγραμματιστικές αρχές του Starterware, όπως φαίνονται στο Σχήμα 4.13. η πραγματοποίηση των βημάτων αυτών μας επιτρέπει την ορθή ενεργοποίηση του υποσυστήματος, την επιλογή και ρύθμιση του ρολογιού που τελικά καθορίζει το baud rate και τέλος επιτρέπει την χρήση συναρτήσεων όπως για παράδειγμα η UARTprintf που λειτουργεί όπως η γνωστή printf της προγραμματιστικής γλώσσας C για το τύπων δεδομένων στο τερματικό.

Programming sequence

Interrupt Mode

- Firstly, configure the system clocks for UART instance using the function provided in the platform directory.
- Perform Pin Multiplexing for the UART instance.
- Invoke the API `UARTModuleReset()` to perform a module reset of the UART instance.
- If the UART is to be configured in FIFO mode, use the API `UARTFIFOConfig()` to perform FIFO configurations.
- The specified baud rate of communication is achieved by appropriately programming the Divisor Latch registers. Specifically, the divisor value is a function of the Operating frequency and the desired baud rate. The computation formula for the divisor latch value also differs based on the operating mode specified. Use the API `UARTDivisorValCompute()` to compute the divisor value that is to be programmed to the Divisor Latch registers.
- Invoke the API `UARTDivisorLatchWrite()` to program the computed divisor value to the divisor latch registers.
- Switch to Register Configuration Mode B using the API `UARTRegConfigModeEnable()` passing appropriate parameters.
- Configure the Line Characteristics using the API `UARTLineCharacConfig()` passing appropriate parameters.
- Disable access to the divisor latch registers using the API `UARTDivisorLatchDisable()`.
- Ensure that the Break condition is disabled using the API `UARTBreakCtl()` passing appropriate parameters.
- Call the API `UARTOperatingModeSelect()` with appropriate parameters to switch the UART to 16x operating mode.
- Configure the ARM interrupt controller to generate UART interrupt by registering the UART ISR.
- Enable required UART interrupts using the API `UARTIntEnable()` passing appropriate parameters.

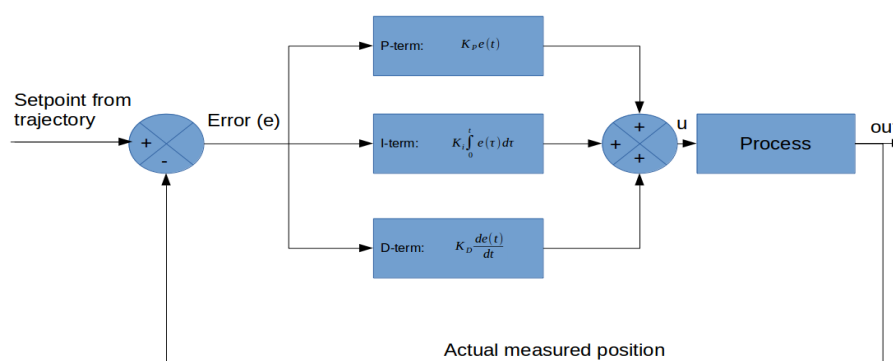
Σχήμα 4.13: Προγραμματιστική ακολουθία για το περιφερειακό σύστημα UART [12].

4.10 Υλοποίηση Τροχιών και Ελέγχου

4.10.1 Υλοποίηση Ελέγχου

Ο ελεγκτής που επιλέχθηκε για τον έλεγχο της μετατόπισης του φορείου ρυμούλκησης (η οποία προκύπτει μέσα από την περιστροφή του άξονα του κινητήρα) είναι ο κλασικός Proportional-Integral-Derivative (PID). Είναι ένας από τους πιο διαδεδομένους ελεγκτές (controllers) και αποτελεί έναν μηχανισμό ανατροφοδότησης σήματος σε βρόχο ελέγχου.

Ένας ελεγκτής PID (βλ. Σχήμα 4.14) προσπαθεί να διορθώσει το λάθος μεταξύ μιας μετρημένης από κατάλληλο αισθητήρα μεταβλητής (π.χ. θέση ή ταχύτητα) και ενός επιθυμητού σημείου λειτουργίας (setpoint), που προκύπτει από κατάλληλο σχεδιασμό τροχιάς (trajectory planning), μέσω της παραγωγής διορθωτικού σήματος, το οποίο τροφοδοτεί την ελεγχόμενη εγκατάσταση.

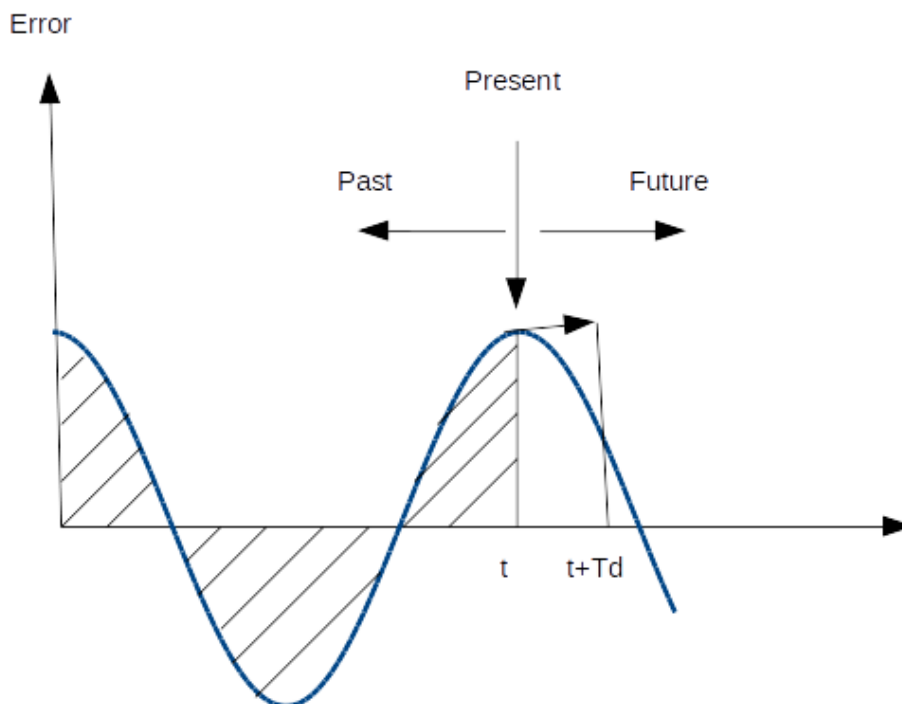


Σχήμα 4.14: Δομικό διάγραμμα PID ελέγχου.

Ο υπολογισμός της εξόδου του PID περιλαμβάνει τρεις όρους που επιδρούν πάνω στο σφάλμα που προκύπτει από την σύγκριση του επιθυμητού και του μετρημένου πραγματικού σημείου λειτουργίας. Οι όροι αυτοί είναι ο αναλογικός, ο ολοκληρωτικός και ο διαφορικός. Οι όροι αυτοί σχετίζονται με τις δράσεις του ελέγχου που αφορούν το παρόν, το παρελθόν και το μέλλον του συστήματος, Σχήμα 4.15. Ο αναλογικός όρος καθορίζει την αντίδραση στο τρέχον λάθος, πολλαπλασιάζοντας το σφάλμα με μια σταθερά. Ο ολοκληρωτικός όρος καθορίζει την αντίδραση βασισμένη στο άθροισμα των λαθών, λαμβάνοντας έτσι υπόψιν το ιστορικό των μετρήσεων, μέσω του υπολογισμού του ολοκληρώματος του σφάλματος στον χρόνο. Τέλος ο παραγωγικός όρος επεμβαίνει ανάλογα με το ποσοστό αλλαγής του λάθους, δηλαδή λαμβάνει υπόψιν την παράγωγο του σφάλματος ως προς τον χρόνο και δίνει την τάση για την μελλοντική τιμή του σφάλματος. Οι τρεις αυτοί όροι αθροίζονται σταθμισμένα παράγοντας το διορθωτικό σήμα. Η εξίσωση που αποτυπώνει τα παραπάνω είναι η:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (20)$$

όπου: K : είναι ένα αναλογικό κέρδος, T_i : χρονική σταθερά ολοκλήρωσης, T_d : χρονική σταθερά παραγωγίσις και e : το σφάλμα (desired point - setpoint).



Σχήμα 4.15: Ο ρόλος των όρων του PID.

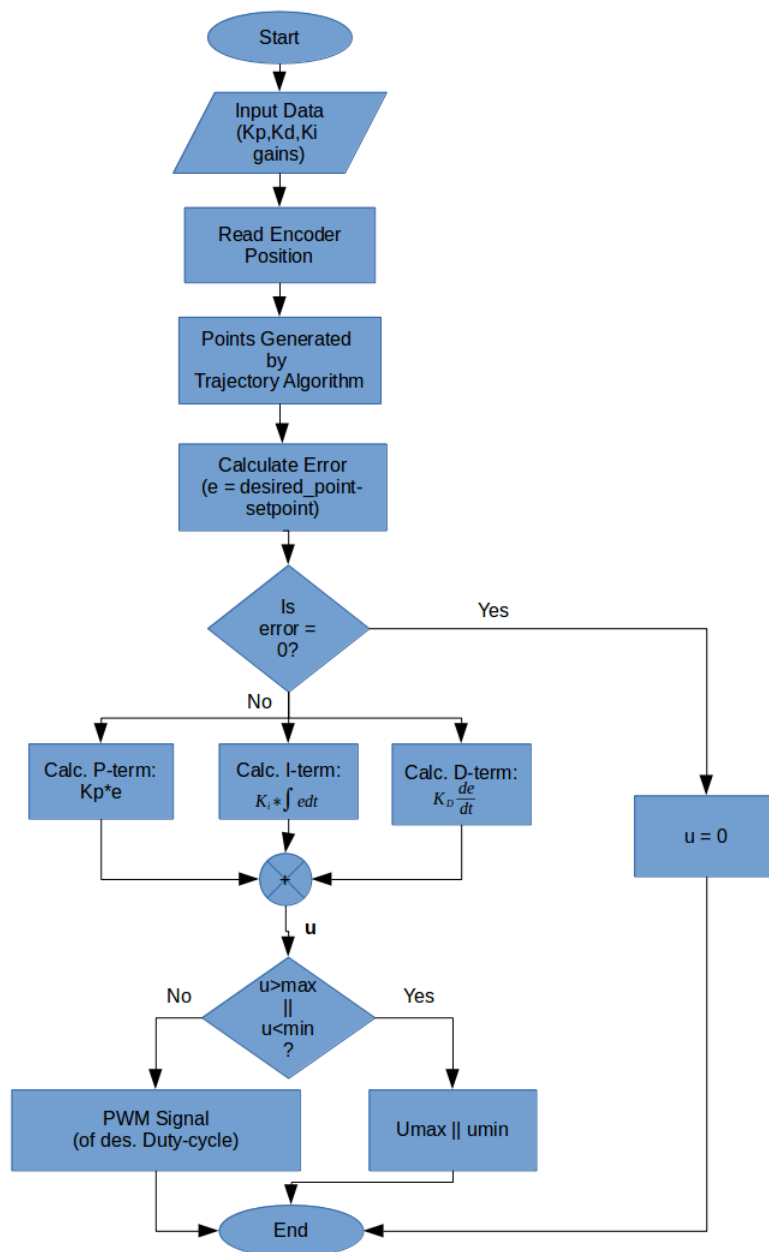
Η (20) γράφεται και ως εξής:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (21)$$

όπου είναι: K_p : το αναλογικό κέρδος, $K_i = \frac{K}{T_i}$, το κέρδος του ολοκληρωτή και $K_D = K \cdot T_i$, το κέρδος του διαφορικού όρου.

Για τον προσδιορισμό των κερδών K_p , K_D και K_i υπάρχουν πολλές μεθοδολογίες. Ιδιαίτερα διαδεδομένες είναι η διαδικασία επαναλαμβανόμενων δοκιμών και σφάλματος (trial and error) και η μέθοδος Ziegler-Nichols.

Προγραμματιστικά, η υλοποίηση του PID ελεγκτή έγινε σύμφωνα με το διάγραμμα ροής (flow chart) του Σχήματος 4.16.



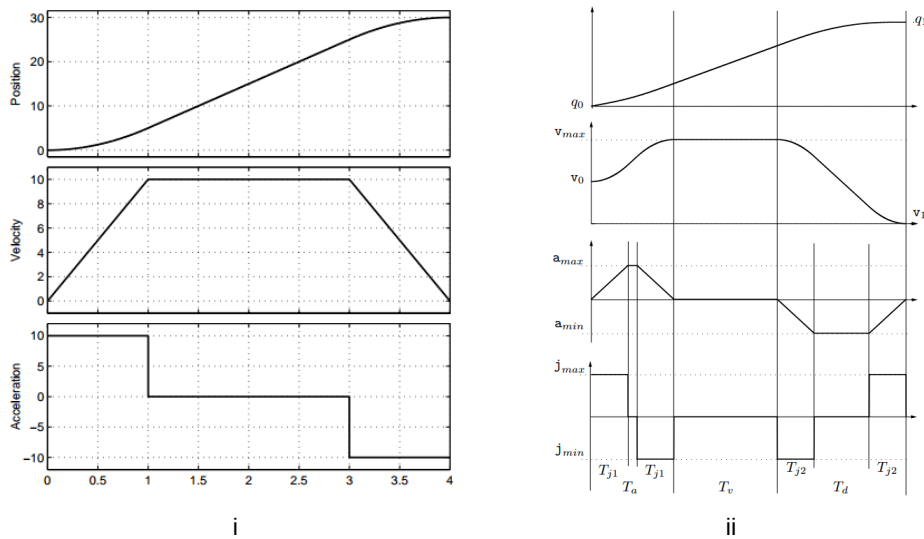
Σχήμα 4.16: Διάγραμμα ροής PID ελέγχου.

4.11 Τροχιά

Για την υλοποίηση του ελέγχου, το σήμα ανάδρασης, δηλαδή η θέση του φορείου εκφρασμένη από τη γωνία που έχει πραγματοποιήσει ο άξονας του κινητήρα και που παρέχεται στο σύστημα του μικροϋπολογιστή μέσω της αυξητικής παλμογεννήτριας, πρέπει να συγκρίνεται με την επιθυμητή θέση αν δεν υπήρχαν απώλειες, τριβές και άλλοι λόγοι (π.χ μη ικανοποιητική μοντελοποίηση του συστήματος) που οδηγούν το σύστημα σε απόκλιση. Προκύπτει επομένως η ανάγκη για την τροφοδότηση του ελεγκτή με την επιθυμητή θέση κάθε χρονική στιγμή. Για τον σκοπό αυτό τροφοδοτείται ο ελεγκτής με την επιθυμητή τροχιά (trajectory).

Για τον σκοπό αυτό επιλέχθηκαν να υλοποιηθούν δύο είδη τροχιάς για λόγους που θα παρουσιασθούν παρακάτω. Ο χρήστης να μπορεί να επιλέγει ποιο προφίλ ταχύτητας επιθυμεί.

Η πρώτη τροχιά είναι ένα τραπεζοειδές προφίλ ταχύτητας και το δεύτερο και πιο βελτιωμένο ακολουθεί το προφίλ του διπλού S, double S-Curve. Τα δύο προφίλ φαίνονται στο Σχήμα 4.17.



Σχήμα 4.17: Διαγράμματα θέσης, ταχύτητας και επιτάχυνσης [37]: **i** για τραπεζοειδές προφίλ ταχύτητας **ii** double s-curve.

4.11.1 Τραπεζοειδές Προφίλ

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.17, η ταχύτητα ουσιαστικά μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις κατηγορίες. Στο πρώτο τμήμα είναι αυξανόμενη με σταθερό ρυθμό/κλίση, πρόκειται δηλαδή για μια επιταχυνόμενη κίνηση. Στο δεύτερο τμήμα είναι σταθερή και στο τρίτο μειώνεται σταθερά, άρα είναι επιβραδυνόμενη. Αντίστοιχες παρατηρήσεις γίνονται και από το διάγραμμα, στο ίδιο Σχήμα, που αφορά την ολοκλήρωση της ταχύτητας, δηλαδή την θέση. Παρατηρείται λοιπόν, πρώτα μια παραβολική καμπύλη με αυξανόμενη κλίση, κατόπιν μια γραμμικά ως προς τον χρόνο αυξανόμενη μετατόπιση και τέλος μια παραβολική καμπύλη με μειούμενη, αυτήν την φορά, κλίση. Όσον αφορά το διάγραμμα της επιτάχυνσης, παρατηρούνται ουσιαστικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τον χαρακτηρισμό της κίνησης στα προηγούμενα. Δηλαδή, πως στο πρώτο τμήμα υπάρχει σταθερή θετική επιτάχυνση, στο δεύτερο μηδενική επιτάχυνση (άρα ομαλή κίνηση) και τέλος σταθερή αρνητική επιτάχυνση, που σημαίνει ομαλά επιβραδυνόμενη κίνηση.

Άξιο αναφοράς στο διάγραμμα της επιτάχυνσης, είναι πως οι μεταβολές στις τρεις διαφορετικές φάσεις, από επιταχυνόμενη σε σταθερή και από σταθερή σε επιβραδυνόμενη κίνηση, είναι ιδιαίτερα απότομες. Οι ακραίες αυτές μεταβολές έχουν σαν αντίκτυπο την εμφάνιση μη ομαλότητας της κίνησης. Παρατηρείται δηλαδή ένα μικρό τίναγμα, το οποίο θα μπορούσε να επιφέρει ταλαντώσεις στον μηχανισμό μετάδοσης κίνησης του φορείου (σύστημα άξονα κινητήρα - τροχαλία - αλυσίδα μετάδοσης κίνησης). Ωστόσο στις ταχύτητες και τις επιταχύνσεις που χρησιμοποιούνται για τη ρυμούλκηση του φορείου, το φαινόμενο δεν είναι ιδιαίτερα έντονο (ουσιαστικά ανεπαίσθητο) με αποτέλεσμα να μην υπάρχει πρόβλημα στην χρήση του.

Προκειμένου να τροφοδοτείται ο ελεγκτής με την επιθυμητή θέση του άξονα και κατ' επέκταση του φορείου, σε κάθε χρονική στιγμή που υλοποιείται ο έλεγχος, χρειάζεται ένα μαθηματικό μοντέλο που να περιγράφει τη θέση σε κάθε χρονική στιγμή. Η εξαγωγή αυτού του μαθηματικού μοντέλου στηρίχτηκε στην παρατήρηση του διαγράμματος της ταχύτητας και την μαθηματικής έκφρασης των τριών φάσεων που περιγράφηκε προηγουμένως. Έπειτα,

με τη βοήθεια μαθηματικής ολοκλήρωσης και παραγώγισης με τις κατάλληλες οριακές συνθήκες εξάχθηκαν και οι αντίστοιχες μαθηματικές εκφράσεις της μετατόπισης-θέσης και της επιτάχυνσης. Έτσι προκύπτει (έστω $t_0 = 0$ =αρχική χρονική στιγμή):

$$q = \begin{cases} q_0 + \frac{v_{max}}{2T_a} t^2, & \text{if } t \in [0, T_a] \\ q_0 - \frac{v_{max}T_a}{2} + v_{max}t, & \text{if } t \in [T_a, t_1 - T_a] \\ q_{final} - \frac{v_{max}t_1^2}{2T_a} + \frac{v_{max}t_1}{T_a} - \frac{v_{max}}{2T_a}, & \text{if } t \in [t_1 - T_a, t_1] \end{cases} \quad (22)$$

$$\dot{q} = \begin{cases} \frac{v_{max}}{T-a} t, & \text{if } t \in [0, T_a] \\ v_{max}, & \text{if } t \in [T_a, t_1 - T_a] \\ \frac{v_{max}t_1}{T_a} - \frac{v_{max}}{T_a} t, & \text{if } t \in [t_1 - T_a, t_1] \end{cases} \quad (23)$$

και

$$\ddot{q} = \begin{cases} \frac{v_{max}}{T-a}, & \text{if } t \in [0, T_a] \\ 0, & \text{if } t \in [T_a, t_1 - T_a] \\ -\frac{v_{max}}{T_a}, & \text{if } t \in [t_1 - T_a, t_1] \end{cases} \quad (24)$$

όπου: έχει θεωρηθεί πως αρχική και τελική ταχύτητα είναι μηδενικές, T_a : η χρονική διάρκεια της επιτάχυνσης, η οποία λαμβάνεται ίση με την αντίστοιχη της επιβράδυνσης. Ακόμα, v_{max} είναι η μέγιστη ταχύτητα με την οποία πραγματοποιείται το σταθερό τμήμα της κίνησης. Τα q_0, q_1 είναι αντίστοιχα η αρχική και η τελική θέση. Τέλος με t_1 συμβολίζεται ο συνολικός χρόνος στον οποίο πραγματοποιείται η κίνηση.

Για την εξαγωγή των εξισώσεων έχουν υποθεθεί πολυώνυμα δεύτερου βαθμού για την μετατόπιση στις επιταχυνόμενες κινήσεις και γραμμικές εξισώσεις για την περιγραφή των ταχυτήτων κατά την διάρκεια των επιταχύνσεων. Οι άγνωστοι συντελεστές αυτών των σχέσεων προσδιορίζονται μέσω των αρχικών συνθηκών (αρχική θέση και ταχύτητα) και μέσω της επίλυσης των συστημάτων εξισώσεων που προκύπτουν από την απαίτηση για συνέχεια των τιμών στις χρονικές στιγμές μετάβασης από το ένα είδος κίνησης στο άλλο.

4.11.2 Double S-Curve

Παρά το γεγονός πως οι ταχύτητες και οι επιταχύνσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην κίνηση του φορείου ήταν τέτοιες ώστε η κίνηση του φορείου να είναι σχετικά ομαλή ακόμα στις χρονικές στιγμές που η επιτάχυνση μεταβάλλεται απότομα, δόθηκε η δυνατότητα στον χρήστη να χρησιμοποιήσει και μια δεύτερη τροχιά. Η τροχιά αυτή, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.17 λύνει το πρόβλημα της απότομης μεταβολής της επιτάχυνσης. Ο τρόπος με τον οποίο το επιτυγχάνει αυτό είναι πως στα κρίσιμα σημεία υπεισέρχονται καμπύλες δεύτερου βαθμού με τις οποίες η μετάβαση από την θετική στην μηδενική και κατόπιν στην αρνητική επιτάχυνση γίνεται γραμμικά. Έτσι το πρόβλημα της ασυνέχειας εμφανίζεται στην παράγωγο της επιτάχυνσης (jerk), το οποίο όμως δεν επηρεάζει την ομαλότητα (smoothness) της κίνησης. Πλέον, διακρίνουμε στο διάγραμμα της ταχύτητας παραπάνω από τρεις φάσεις. Αυτές είναι:

- Καμπύλη δεύτερου βαθμού με θετική κλίση και τα κοίλα πάνω.
- Γραμμική αύξηση, άρα ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση.
- Καμπύλη δεύτερου βαθμού με αρνητική κλίση και τα κοίλα πάνω.
- Σταθερή ταχύτητα, αντίστοιχα όπως και στο τραπεζοειδές προφίλ.
- Καμπύλη δεύτερου βαθμού με θετική κλίση και τα κοίλα κάτω.

- Γραμμική μεταβολή με αρνητική κλίση (μείωση), δηλαδή ομαλά επιβραδυνόμενη κίνηση.
- Καμπύλη δεύτερου βαθμού με αρνητική κλίση και τα κοίλα κάτω.

Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις και με αντίστοιχο τρόπο με αυτόν που ακολουθήθηκε στο τραπεζοειδές προφίλ, δηλαδή μέσω αρχικών συνθηκών και την απαίτηση συνέχειας των τιμών, προσδιορίζονται όλες οι παράμετροι. Οι εξισώσεις που προκύπτουν είναι οι [37]:

$$q = \begin{cases} q_0 + v_0 t + j \frac{t^3}{6}, & \text{if } t \in [0, T_{j1}] \\ q_0 + v_0 t + \frac{j T_{j1}}{6} (3t^2 - 3T_{j1}t + T_{j1}^2), & \text{if } t \in [T_{j1}, T_a - T_{j1}] \\ q_0 + (v_{max} + v_0) \frac{T_a}{2} - v_{max}(T_a - t) + j \frac{(T_a - t)^3}{6}, & \text{if } t \in [T_a - T_{j1}, T_a] \\ q_0 + (v_{max} + v_0) \frac{T_a}{2} + v_{max}(t - T_a), & \text{if } t \in [T_a, T_a + T_v] \\ q_f - (v_{max} + v_1) \frac{T_d}{2} + v_{max}(t - T + T_d) - j \frac{(t - T + T_d)^3}{6}, & \text{if } t \in [T - T_d, T - T_d + T_{j2}] \\ q_f - (v_{max} + v_1) \frac{T_d}{2} + v_{max}(t - T + T_d) - \frac{j T_{j2}}{6} \left(3(t - T + T_d)^2 - 3T_{j2}(t - T + T_d) + T_{j2}^2 \right), & \text{if } t \in [T - T_d + T_{j2}, T - T_{j2}] \\ q_f - v_1(T - t) - j \frac{(T - t)^3}{6}, & \text{if } t \in [T - T_{j2}, T] \end{cases} \quad (25)$$

$$\dot{q} = \begin{cases} v_0 + j \frac{t^2}{2}, & \text{if } t \in [0, T_{j1}] \\ v_0 + j T_{j1} \left(t - \frac{T_{j1}}{2} \right), & \text{if } t \in [T_{j1}, T_a - T_{j1}] \\ v_{max} - j \frac{(T_a - t)^2}{2}, & \text{if } t \in [T_a - T_{j1}, T_a] \\ v_{max}, & \text{if } t \in [T_a, T_a + T_v] \\ v_{max} - j \frac{(t - T + T_d)^2}{2}, & \text{if } t \in [T - T_d, T - T_d + T_{j2}] \\ v_{max} - j T_{j2} \left(t - T + T_d - \frac{T_{j2}}{2} \right), & \text{if } t \in [T - T_d + T_{j2}, T - T_{j2}] \\ v_1 + j \frac{(T - t)^2}{2}, & \text{if } t \in [T - T_{j2}, T] \end{cases} \quad (26)$$

$$\ddot{q} = \begin{cases} j, & \text{if } t \in [0, T_a] \\ j T_{j1}, & \text{if } t \in [T_a, t_1 - T_a] \\ j(T_a - t), & \text{if } t \in [t_1 - T_a, t_1] \\ 0, & \text{if } t \in [T_a, T_a + T_v] \\ -j(t - T + T_d), & \text{if } t \in [T - T_d, T - T_d + T_{j2}] \\ -j T_{j2}, & \text{if } t \in [T - T_d + T_{j2}, T - T_{j2}] \\ -j(T - t), & \text{if } t \in [T - T_{j2}, T] \end{cases} \quad (27)$$

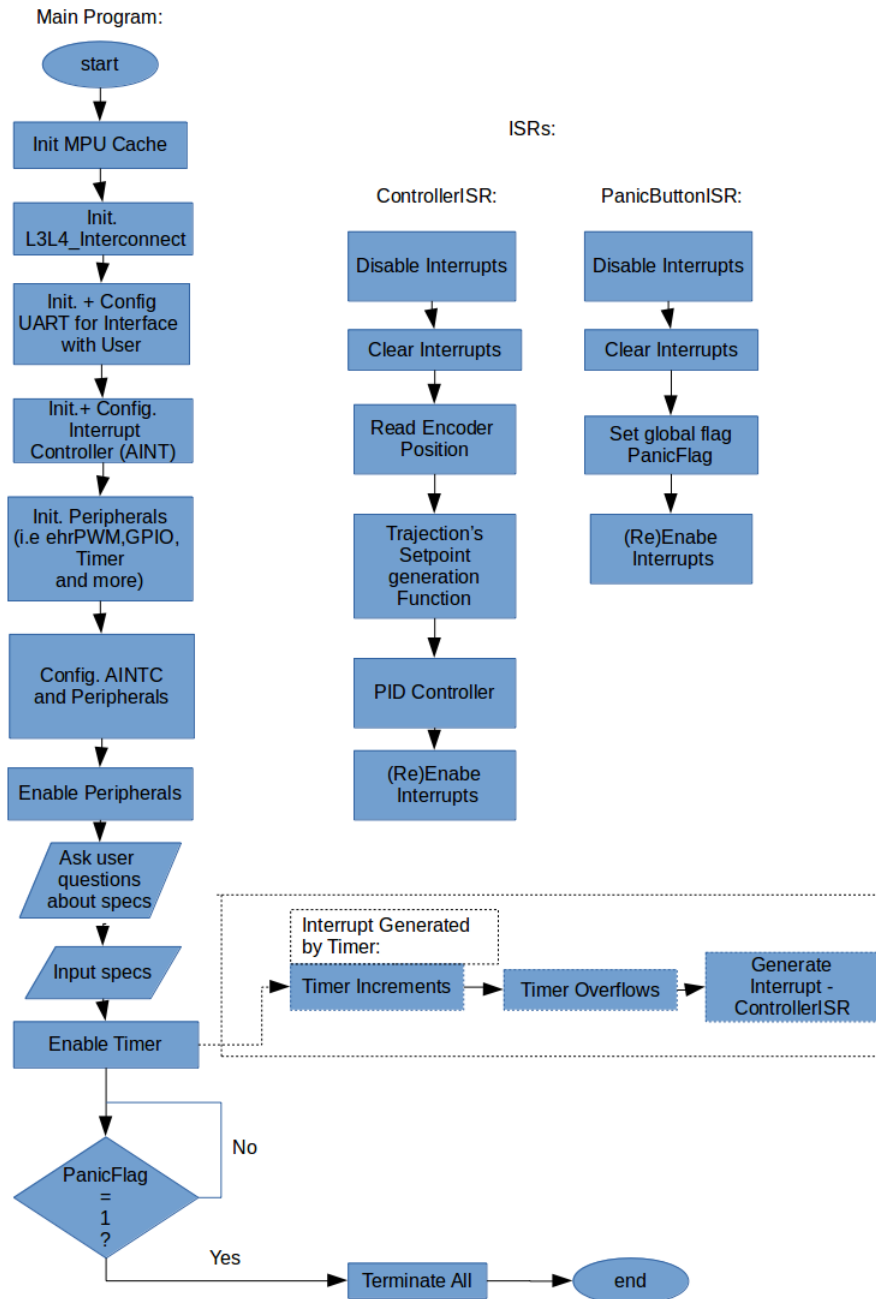
και

$$\ddot{\ddot{q}} = \begin{cases} j, & \text{if } t \in [0, T_a] \\ 0, & \text{if } t \in [T_a, t_1 - T_a] \\ -j, & \text{if } t \in [t_1 - T_a, t_1] \\ 0, & \text{if } t \in [T_a, T_a + T_v] \\ -j, & \text{if } t \in [T - T_d, T - T_d + T_{j2}] \\ 0, & \text{if } t \in [T - T_d + T_{j2}, T - T_{j2}] \\ j, & \text{if } t \in [T - T_{j2}, T] \end{cases} \quad (28)$$

Τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις φαίνονται στο Σχήμα 4.17β.

4.12 Διάγραμμα Ροής του Προγράμματος Ελέγχου Κινητήρα Σταθερού Ρεύματος

Στο Σχήμα 4.18, παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του κώδικα που αναπτύχθηκε για τον έλεγχο θέσης ενός κινητήρα.



Σχήμα 4.18: Διάγραμμα ροής προγράμματος ελέγχου κινητήρα.

Ο κώδικας είναι διαθέσιμος στο [Github](#).

5 Σχεδιασμός Νέου Ρομποτικού Ψαριού

Με το κεφάλαιο αυτό γίνεται προσπάθεια να καταγραφούν οι λόγοι που οδήγησαν στον σχεδιασμό νέου κεφαλιού και σώματος για το ρομποτικό ψάρι του Εργαστηρίου. Ακόμα παρουσιάζονται οι προδιαγραφές που θα πρέπει να ικανοποιούνται από το νέο σχέδιο και τέλος παρουσιάζεται ο τελικός σχεδιασμός που πραγματοποιήθηκε.

Ένα ρομποτικό ψάρι, όπως είναι ευνόητο, για να είναι λειτουργικό πρέπει να πληροί κάποιες προδιαγραφές. Μερικές από τις πλέον βασικές είναι:

- να παρέχει ικανοποιητικό χώρο στο εσωτερικό του σώματός του, προκειμένου να χωράνε όλα τα ηλεκτρονικά και μηχανικά μέρη που θα του επιτρέπουν την εξυπηρέτηση όλων των λειτουργιών για τις οποίες και έχει κατασκευαστεί.
- η επίτευξη πλήρους στεγανότητας του χώρου στον οποίο θα βρίσκονται τουλάχιστον τα προαναφερθέντα στοιχεία, υπό τις προβλεπόμενες συνθήκες λειτουργίας.
- να έχει μηχανική αντοχή στις συνθήκες λειτουργίας για τις οποίες έχει σχεδιαστεί (π.χ απαιτείται διαφορετική αντοχή στην υδροστατική πίεση που αναπτύσσεται σε ένα ενυδρείο οικιακής εγκατάστασης και διαφορετική στον βυθό μιας θάλασσας) προκειμένου να μην υπάρξει καταστροφή του ρομπότ.
- η ύπαρξη υδροδυναμικού σχήματος του ρομποτικού ψαριού, αφού έτσι επιτυγχάνεται κίνηση στο νερό με μικρότερες αντιστάσεις. Δηλαδή επιτυγχάνεται ενεργειακά πιο συμφέρουσα κίνηση, αλλά και τίθενται προϋποθέσεις αυτόνομης (ενεργειακά) κίνησης.

Το ρομποτικό ψάρι που κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου των Μηχανολόγων Μηχανικών ικανοποιεί πολλές από τις βασικές προδιαγραφές που είχαν αρχικά τεθεί. Με τον καιρό όμως, προέκυψαν διάφοροι λόγοι οι οποίοι οδήγησαν στην ανάγκη για το σχεδιασμό ενός νέου σώματος. Τέτοιοι λόγοι είναι οι ακόλουθοι:

- η φθορά εξαιτίας της μηχανικής κόπωσης του πλεξιγκλάς από το οποίο ήταν κατασκευασμένο το κυρίως σώμα του ρομπότ. Κατά την αποσυναρμολόγηση και επανασυναρμολόγηση του και τη σύσφιξη-συγκράτηση του κυρίως σώματος με τα τμήματα του κεφαλιού και της ουράς, μέσω της χρήσης ντιζών, παρατηρήθηκε η ύπαρξη μικρορωγμών που έθεταν σε κίνδυνο την στεγανότητα του κυρίου σώματος, το οποίο είναι ευαίσθητο στο νερό εξαιτίας των ηλεκτρονικών που υπάρχουν.
- η διαρκής καταπόνηση των δακτυλίων στεγάνωσης (o-rings), όπου είχαν τοποθετηθεί, και συγκεκριμένα με συνεχή ένταση, οδήγησε στη φυσιολογική φθορά τους και έτσι κρίθηκε αναγκαία η αντικατάστασή τους. Το σώμα έχει διαμορφωμένα αυλάκια για την υποδοχή των o-rings, σχήματος ορθογώνιου παραλληλόγραμμου. Η διαμόρφωση αυτή ενδείκνυται να αποφεύγεται όταν είναι δυνατό καθώς οι οξείες ακμές καταπονούν τοπικά τα o-rings σε μεγάλο βαθμό, προκαλώντας την γρηγορότερη φθορά τους.
- εξαιτίας κάποιων βελτιώσεων στον εξοπλισμό του ρομποτικού ψαριού (π.χ πρόθεση για ενσωμάτωση της δεξαμενής ελέγχου του βάθους στο εσωτερικό του λειτουργικού ρομπότ), θεωρήθηκε αναγκαία η αύξηση των διαστάσεων του κυρίου σώματος, προκειμένου να επιτευχθεί άνετη εγκατάσταση όλων των τμημάτων στο εσωτερικό του σώματος.
- η ευκολία συναρμολόγησης και αποσυναρμολόγησης του ρομποτικού ψαριού. Η συγκράτηση των τριών τμημάτων του ψαριού πραγματοποιούνταν μέσω της χρήσης ντιζών που διέτρεχαν το σώμα του ψαριού. Η ένταση που αναπτυσσόταν από τις ντιζες κατά την σύσφιξη των περικοχλίων, εφάρμοζε την κατάλληλη ένταση στους δακτύλιους στεγάνωσης, ώστε να καλύπτουν πλήρως τους κενούς χώρους από όπου θα

μπορούσε να υπάρξει διαρροή νερού στο εσωτερικό του σώματος του ρομπότ. Οι κενοί αυτοί χώροι ήταν στα σημεία σύνδεσης των τριών τμημάτων του ρομπότ και συγκεκριμένα στα αυλάκια πρόσδεσης (πατούρες) του κυρίου σώματος με το κεφάλι και την ουρά αντίστοιχα. Η συνδεσμολογία αυτή αν και επιτύγχανε και εξυπηρετούσε πλήρως την λειτουργικότητα του ρομπότ, ωστόσο δεν ήταν ιδιαίτερα φιλική στον μηχανικό ο οποίος είτε για λόγους συντήρησης, είτε επισκευής, είτε αναβάθμισης του ηλεκτρομηχανολογικού υλικού που βρίσκεται στο εσωτερικό του ρομποτικού ψαριού, θα αναγκαζόταν να αποσυναρμολογήσει και επανασυναρμολογήσει το ρομπότ. Αντίθετα, η διαδικασία έκρυβε κινδύνους, αφού στην πράξη παρατηρήθηκε πως η επανασυναρμολόγηση μπορούσε να σημάνει είτε αστοχία του υλικού (πλεξιγκλάς) από την άσκηση έντασης με την επανασύσφιξη των ντιζών είτε διαρροή νερού στο εσωτερικό εξαιτίας της μόνιμης παραμόρφωσης που είχε υποστεί το πλεξιγκλάς σε μερικά σημεία, τα οποία σε συνδυασμό με την φθορά των ελαστικών δαχτύλιων στεγάνωσης δεν επαρκούσαν για την ασφάλεια των ηλεκτρονικών από το νερό.

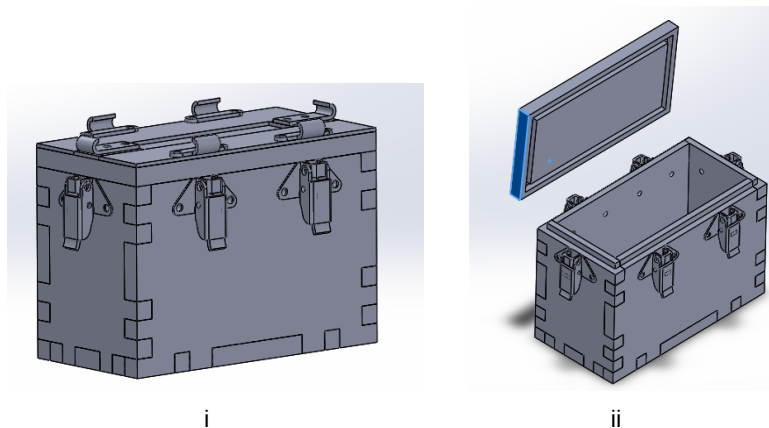
- η απουσία υδροδυναμικού σχήματος. Το ρομποτικό ψάρι αποκτούσε υδροδυναμικό σχήμα, μέσω της προσθήκης εξωτερικού καλύμματος. Συγκεκριμένα δύο ελλειψοειδείς πλαστικές επιφάνειες κατασκευασμένες από καλούπι περιέβαλλαν το κεφάλι και το σώμα του ρομπότ. Η χρήση ωστόσο, έφθειρε τις δυο αυτές επιφάνειες αρκετά, ώστε να χρήζουν αντικατάστασης. Επίσης το συγκεκριμένο κάλυμμα δεν είχε σχεδιαστεί με σκοπό να επιφέρει σημαντικό βαθμό στεγανότητας. Επόμενο ήταν λοιπόν να υπεισέρχεται νερό μεταξύ των δύο αυτών επιφανειών και του σώματος από πλεξιγκλάς του ρομπότ, αυξάνοντας βέβαια κάπως και το συνολικό βάρος, το οποίο όμως δεν αποτελούσε πρόβλημα για το ρομπότ. Κρίθηκε σκόπιμο ωστόσο να αποφευχθεί στο μέλλον αυτή η εισροή νερού στο εσωτερικό του καλύμματος.
- η εξυπηρέτηση επιπλέον λειτουργιών στο ρομποτικό όχημα. Νέες λειτουργίες όπως για παράδειγμα η τοποθέτηση κάμερας στο εσωτερικό του ψαριού που μπορεί να παρέχει εικόνα (είτε σε πραγματικό χρόνο είτε σε βιντεοσκόπηση) του περιβάλλοντος του. Με αυτόν τον τρόπο ο άνθρωπος θα μπορούσε να γλυτώνει χρόνο, κινδύνους και να μειώσει το κόστος επίβλεψης εργασιών μέσα στο νερό. Όπως είναι για παράδειγμα ο έλεγχος για τυχών ζημιές σε καρίνες πλοίων ή υδροηλεκτρικά φράγματα, η προσέγγιση κάποιου δύσβατου για δύτη υποθαλάσσιου χώρου, η παρατήρηση της συμπεριφοράς του θαλάσσιου ζωικού βασιλείου χωρίς κάποιο επεμβατικό ή επικίνδυνο για τα ζώα όχημα, για λόγους ακαδημαϊκούς και εν γένει επιστημονικούς. Στο υπάρχον ψάρι-ρομπότ του εργαστηρίου μας, η κάμερα είχε αφαιρεθεί ως μη απαραίτητη τουλάχιστον στην πρώτη έκδοση του ρομπότ, ωστόσο είναι χρήσιμο να υπάρχει κατάλληλος χώρος για επανατοποθέτησή της.
- η εμφάνιση από πλευράς αισθητικής. Παρότι το κύριο μέλημα είναι η κατασκευή ενός λειτουργικού ρομπότ, δεν παύει να απασχολεί και η αισθητική πλευρά. Ιδιαίτερα μάλιστα αν ληφθεί υπόψη πως τα σχήματα των ψαριών, διαμορφωμένα μετά από αιώνες εξέλιξης, εξυπηρετούν πάντοτε υδροδυναμικούς λόγους (και άρα προσφέρουν πλεονεκτήματα στην κίνηση και ζωή στο θαλάσσιο περιβάλλον). Έτσι ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός σχήματος ρομποτικού ψαριού που, στο πλαίσιο της βιομιμητικής, θα προσομοιάζει κάποιο είδος ψαριού σε όσο το δυνατόν καλύτερο επίπεδο, αποτελεί έναν ικανό λόγο για περαιτέρω βελτίωση του σχεδιασμού του ρομπότ.

Για όλους αυτούς τους λόγους και έχοντας σαν πρωταρχικό στόχο την αντιμετώπιση εκείνων των προβλημάτων που καθιστούσαν μη λειτουργικό το ρομπότ (π.χ εξαιτίας μικρορωγμών που οδηγούσαν σε διαρροή νερού), αλλά και εξαιτίας του ότι τα παραπάνω καθιστούσαν το πρόβλημα ιδιαίτερα ενδιαφέρον τόσο σε ακαδημαϊκό επίπεδο όσο και σαν μηχανολογική πρόκληση, αποφασίστηκε ο σχεδιασμός και (μελλοντικά η) κατασκευή ενός νέου ρομποτικού

ψαριού το οποίο θα λύνει ή θα βελτιώνει πολλά από τα παραπάνω προβλήματα που παρουσιάστηκαν σαν αιτίες επανασχεδιασμού του ψαριού. Για λόγους όμως οικονομίας χρόνου και χρημάτων, αλλά καθώς και η όλη προσπάθεια αντιμετωπίστηκε σαν μια ευκαιρία πειραματισμού και ανάπτυξης μιας βάσης ενός πρωτότυπου με προοπτικές περαιτέρω εξέλιξης και βελτιστοποίησης στο μέλλον (αν κρινόταν επιτυχής), αποφασίστηκε η διατήρηση του τμήματος της ουράς και η σχεδίαση νέου κεφαλιού και σώματος το οποίο όμως θα έχει την δυνατότητα σύνδεσης με την υπάρχουσα αυτή ουρά.

Τα βασικότερο πρόβλημα στις διάφορες ιδέες για νέο σχεδιασμό του ρομποτικού ψαριού, αφορούσε την πλήρη στεγανότητα ενός χώρου που θα φιλοξενεί τα ηλεκτρονικά στοιχεία. Μια από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους επίλυσης του προβλήματος της διαρροής νερού σε ενώσεις στοιχείων είναι η χρήση o-rings που βρίσκονται σε ένταση από βίδες (ή κάτι αντίστοιχο), τα οποία βρίσκονται μέσα σε αυλάκι. Προκειμένου όμως να ικανοποιηθεί σαν προδιαγραφή η απλότητα συναρμολόγησης-αποσυναρμολόγησης, η αναζήτηση λύσεων στράφηκε σε απουσία χρήσης κοχλιών ή έστω την ελάχιστη χρήση τους.

Η ιδέα που προκρίθηκε επομένως ήταν η ύπαρξη ενός αδιάβροχου και στεγανού κουτιού (όπως για παράδειγμα αυτό στο Σχήμα 5.1) στο εσωτερικό του ρομποτικού ψαριού. Όπως και στο υπάρχον ρομπότ το κουτί αυτό θα περιέχει όλα τα ηλεκτρονικά στοιχεία. Το κουτί αυτό επιλέχτηκε να είναι από πλεξιγκλάς εξαιτίας της ικανοποιητικής αντοχής του υλικού (π.χ για τις πιέσεις που αναπτύσσονται στην δεξαμενή του εργαστηρίου). Το κουτί αυτό θα έχει την δυνατότητα να ανοίγει μόνο από πάνω. Το καπάκι έχει αυλάκι ώστε να τοποθετείται o-ring και κατόπιν να υποδέχεται την διαμόρφωση του υπόλοιπου κουτιού. Η απαραίτητη φόρτιση του o-ring πραγματοποιείται με την βοήθεια μικρών βιδών ή μέσω κλιπς όπως αυτά στο Σχήμα 5.1 για ευκολότερη χρήση.



Σχήμα 5.1: Το υδατοστεγές κουτί που σχεδιάστηκε, με κλιπς: **i** κλειστό **ii** ανοιχτό, όπου διακρίνεται το αυλάκι υποδοχής του λάστιχου στεγάνωσης

Το κουτί αυτό στην μια πλευρά έχει στυπιοθλίπτη από τον οποίο περνάνε τα καλώδια που οδηγούνται στον κινητήρα που βρίσκεται στην ουρά. Έχοντας εξασφαλίσει την στεγανότητα, ο σχεδιασμός επικεντρώθηκε στο υδροδυναμικό σχήμα του ρομπότ. Όπως και για τον σχεδιασμό του υδατοστεγούς κουτιού, το κέλυφος σχεδιάστηκε στο λογισμικό Solidworks.

Όλος ο σχεδιασμός πραγματοποιήθηκε με στόχο την επίτευξη ενός κελύφους που θα έχει το απαραίτητο υδροδυναμικό σχήμα, θα χωράει εξολοκλήρου το υδατοστεγές κουτί, θα συναρμολογείται και θα αποσυναρμολογείται εύκολα και θα είναι στεγανό. Εφόσον στόχος είναι η κατασκευή του, το κόστος έπρεπε να μην είναι υψηλό. Για αυτό επιλέχθηκε να σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορεί να κατασκευαστεί σε 3d printer.

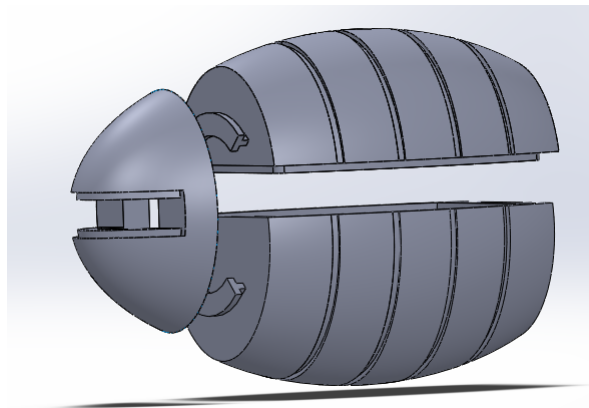
Η παράμετρος αυτή της χρήσης 3d printer πρόσθεσε επιπλέον προδιαγραφές. Συγκεκριμένα, το σχήμα του πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μπορεί να στηριχθεί και κατασκευαστεί από έναν 3d printer. Επιπλέον, πρέπει να γίνει εξοικονόμηση υλικού, ώστε να διατηρηθεί

χαμηλό το κόστος κατασκευής. Η εξοικονόμηση υλικού όμως δεν πρέπει να αφαιρεί από την αντοχή και τη στεγανότητα του ρομπότ. Για αυτό και είχε σημασία το πάχος του κελύφους.

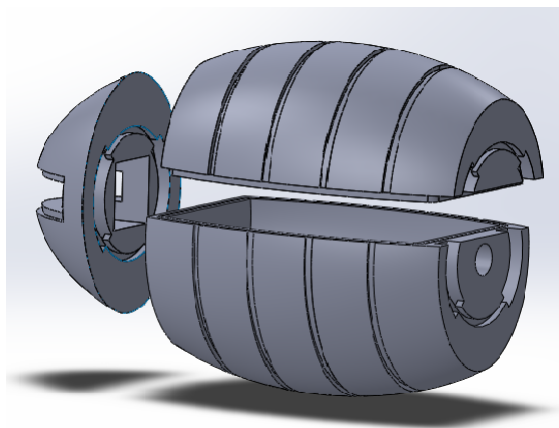
Επιπλέον το πάχος του κελύφους παίζει ρόλο και στην ικανότητα επίτευξης στεγανότητας. Μικρό πάχος σημαίνει πως δεν υπάρχει ιδιαίτερη ικανότητα για αλληλοεπικαλύψεις των στρωμάτων (layers) που χτίζει ο 3d printer και άρα είναι πιθανότερη η ύπαρξη κενών που επιτρέπουν την πρόσβαση στο νερό. Γενικά, τα 3d printed τεμάχια, εξαιτίας του τρόπου με τον οποίο κατασκευάζονται (ένα στρώμα εναποτίθεται πάνω στο άλλο από μηχανική ακίδα) δεν μπορούν να υποσχεθούν πλήρη στεγανότητα αν δεν υπάρξει ιδιαίτερη μέριμνα για ειδικές αλληλοεπικαλύψεις των στρωμάτων (και ίσως και κατάλληλη επιλογή κατάλληλου υλικού, χωρίς βέβαια να είναι εξασφαλισμένη).

Τελικά, το κέλυφος σχεδιάστηκε ώστε να αποτελείται από τρία κομμάτια. Το πρώτο κομμάτι είναι το κεφάλι όπου υπάρχει χώρος για τοποθέτηση ψηφιακής κάμερας και έχει κατάλληλη διαμόρφωση στο μπροστινό μέρος, στο οποίο προβλέπεται να κολληθεί διαφανές πλεξιγκλάς, ώστε να έχει καθαρό οπτικό πεδίο.

Τα άλλα δύο κομμάτια, ουσιαστικά αποτελούν το κέλυφος του σώματος. Το ένα από τα δύο έχει περιμετρικά αυλάκι για τοποθέτηση o-ring, ενώ το άλλο έχει κατάλληλη διαμόρφωση ώστε να μπορεί να συναρμολογηθεί με το πρώτο. Στο εξωτερικό των δύο τμημάτων θα υπάρχουν κατάλληλες αυλακώσεις στις οποίες θα τοποθετούνται επαναχρησιμοποιήσιμα δεματικά τα οποία θα εξασφαλίζουν την κατάλληλη πίεση για ασφαλή λειτουργία στα λάστιχα στεγάνωσης. Τα τρία αυτά τμήματα φαίνονται στα Σχήματα 5.2 και 5.3.



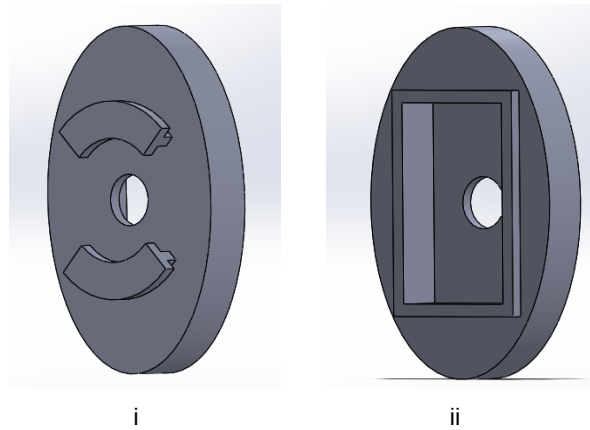
Σχήμα 5.2: Τα τρία κομμάτια του νέου ρομποτικού ψαριού.



Σχήμα 5.3: Διαφορετική όψη των τριών τμημάτων του νέου ρομποτικού ψαριού.

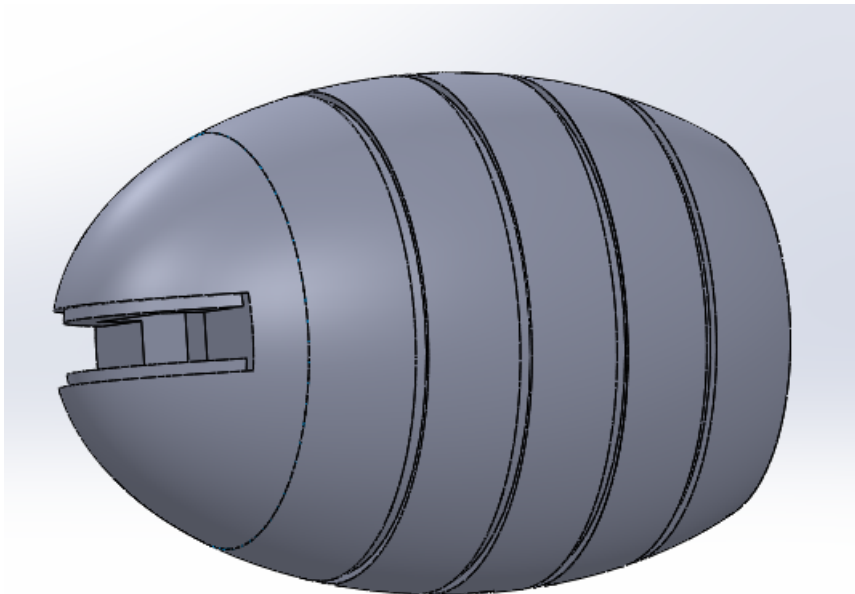
Τέλος, τόσο το κεφάλι όσο και η ουρά θα συνδέονται με το κυρίως σώμα με κατάλληλη υποδοχή στην οποία τα ξεχωριστά τμήματα θα κουμπώνουν με μια περιστροφική κίνηση.

Για την ουρά συγκεκριμένα, προκειμένου να μπορεί να προσδεθεί θα υπάρχει ένα ενδιάμεσο σώμα μετατροπέας (από πλεξιγκλάς), βλέπε Σχήμα 5.4, το οποίο θα είναι μόνιμα κολλημένο στην ουρά από την μια πλευρά και από την άλλη θα έχει την κατάλληλη διαμόρφωση ώστε να μπαίνει στην υποδοχή του σώματος, όπως θα συμβαίνει και με το κεφάλι.



Σχήμα 5.4: Το κομμάτι που ενώνει ουρά και κύριο σώμα: **i** επιφάνεια σύνδεσης με το σώμα **ii** επιφάνεια μόνιμα συνδεδεμένη με την ουρά.

Στο Σχήμα 5.5 φαίνεται συναρμολογημένο το κεφάλι και το σώμα του νέου ρομπότ.



Σχήμα 5.5: Συναρμολογημένα τα κομμάτια του νέου σώματος και κεφαλιού.

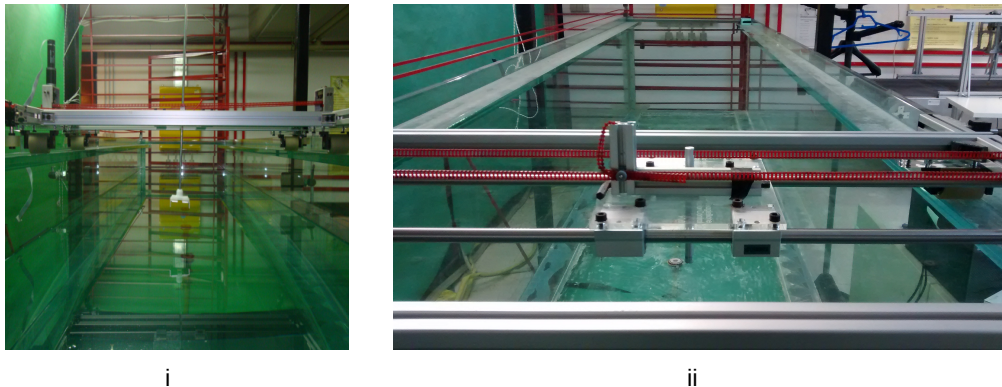
6 Διεξαγωγή Πειραμάτων και Αποτελέσματα

6.1 Εισαγωγή

Το τελικό στάδιο μετά την ανάπτυξη λογισμικού για τον έλεγχο, μέσω Beaglebone, του φορείου ρυμούλκησης είναι η διεξαγωγή πειραμάτων που θα συμβάλουν στον προσδιορισμό των υδροδυναμικών μεγεθών που ενδιαφέρουν και αναπτύχθηκαν στο δεύτερο κεφάλαιο. Έτσι στο κεφάλαιο αυτό, μετά από μια περιγραφή της πειραματικής διάταξης, παρουσιάζονται και αναλύονται τα πειράματα που εκτελέστηκαν και τα αποτελέσματά τους.

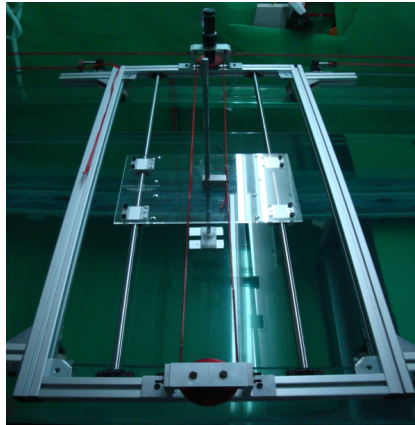
6.2 Περιγραφή Πειραματικής Διάταξης

Στο Εργαστήριο Αυτόματου Ελέγχου των Μηχανολόγων Μηχανικών υπάρχει μια δεξαμενή νερού με διαστάσεις $5m \times 1m \times 1m$, στην οποία εδράζεται και κινείται το φορείο ρυμούλκησης (βλ. Σχήμα 6.2). Προκειμένου να γεμίσει η δεξαμενή, χρησιμοποιείται νερό από γεώτρηση του Ε.Μ. Πολυτεχνείου. Για να μειωθεί η υψηλή περιεκτικότητα του νερού αυτού σε ασβέστιο (το οποίο προκαλεί μακροχρόνια θόλωση των τζαμιών της δεξαμενής) περνάει πρώτα για επεξεργασία από αποσκληρυντή (τον Autotrol Osmonics 255/460 της General Electric). Επιπλέον, το νερό καθαρίζεται από φίλτρο καθαρισμού υπεριώδους ακτινοβολίας, για την αποφυγή ανάπτυξης μικροοργανισμών.



Σχήμα 6.1: Η δεξαμενή μαζί με το φορείο.
i Δεξαμενή ii Φορείο.

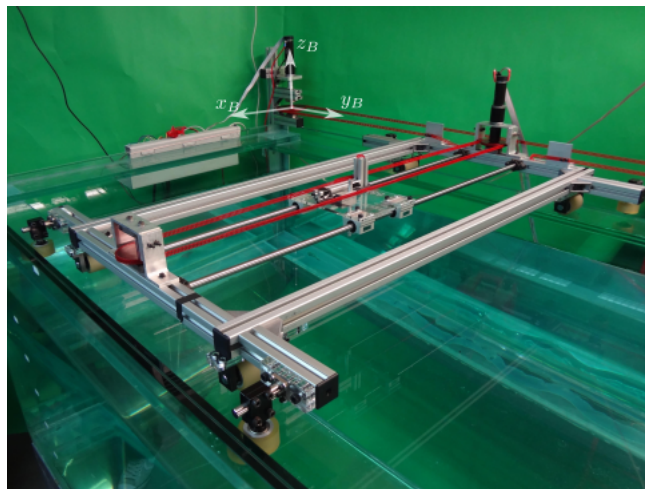
Το φορείο ρυμούλκησης (βλ. Σχήμα 6.2) αποτελείται από ένα ορθογώνιο πλαίσιο, το οποίο έχει τη δυνατότητα κίνησης κατά μήκος της δεξαμενής (Καρτεσιανός Υ άξονας), μέσω συστήματος κινητήρα-μειωτήρα στροφών-τροχαλίας-αλυσίδας.



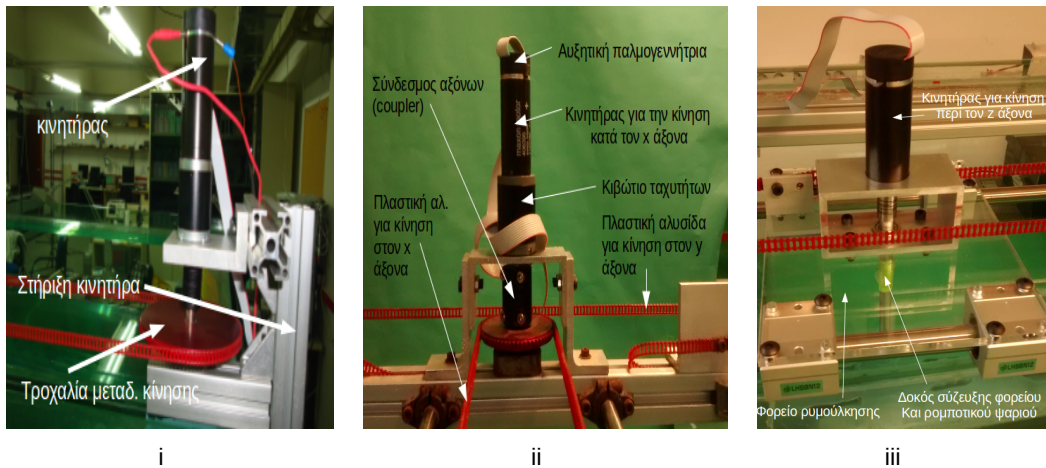
Σχήμα 6.2: Το φορείο.

Στο εσωτερικό του πλαισίου υπάρχει μια τετραγωνική πλατφόρμα, η οποία έχει δυνατότητα κίνησης σε άξονα κάθετο (Καρτεσιανός X) σε αυτόν της κίνησης του πλαισίου, καλύπτοντας το πλάτος της δεξαμενής, με τρόπο αντίστοιχο με το σύστημα κίνησης στον X άξονα. Το φορείο είναι κατασκευασμένο όπως αναφέρεται στην [22]. Η πλατφόρμα φέρει κινητήρα ο οποίος δίνει κίνηση στη δοκό σύζευξης με το ρομποτικό ψάρι. Ο κινητήρας αυτός κινεί τον εγκάρσιο (Z) άξονα και επιτρέπει την περιστροφή του ρομποτικού ψαριού γύρω από αυτόν τον άξονα. Οι κινητήρες που κινούν τους άξονες φαίνονται και στο Σχήμα 6.3.

Η κίνηση σε κάποιον από τους τρεις Καρτεσιανούς άξονες του φορείου και της δοκού σύζευξης με το ρομποτικό ψάρι, επιτυγχάνεται μέσω του ελέγχου κίνησης του αντίστοιχου κινητήρα με τον οποίο είναι εφοδιασμένο το σύστημα (βλ. Σχήμα 6.4).



Σχήμα 6.3: Οι άξονες κίνησης του φορείου.

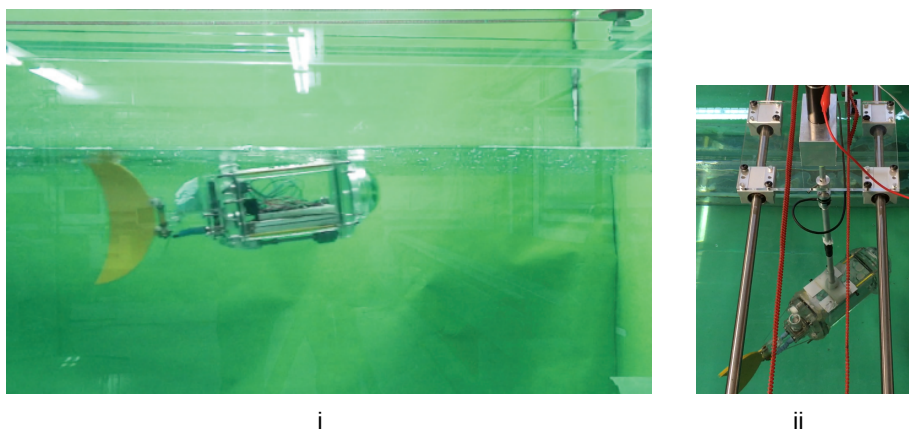


Σχήμα 6.4: Οι τρεις κινητήρες που ελέγχουν την κίνηση του μηχανισμού: **i** κατά μήκος του άξονα X **ii** κατά μήκος του άξονα Y **iii** γύρω από τον άξονα Z

Ο έλεγχος των κινητήρων πραγματοποιείται μέσω του Beaglebone και της πλακέτας, η οποία απαρτίζεται από στοιχεία που αναπτύχθηκαν στο τρίτο κεφάλαιο:

- SN65175, Quadruple Differential Line Receiver, της Texas Instruments.
- TXB0104, Voltage Level Translator, της Texas Instruments.
- ISO7640, Low-Power Quad-Channel Digital Isolator, της Texas Instruments.
- H-Bridge, High-Power Motor Driver 18v15, της Pololu.

Βεβαίως, υπάρχει το ρομποτικό ψάρι (βλ. Σχήμα 6.5), που αποτελεί το φορτίο που κινείται από το φορείο ρυμούλκησης. Το ρομποτικό ψάρι αποτελείται από δύο τμήματα, το κυρίως σώμα και την ουρά. Τα ηλεκτρονικά του απαρτίζονται από μικροελεγκτή και προσαρμοσμένα ηλεκτρονικά που αναπτύχθηκαν στο εργαστήριο in-house. Τροφοδοτείται από μπαταρία Li-ion η οποία και αυτή τοποθετείται μαζί με τα ηλεκτρονικά στο κύριο σώμα. Η κίνηση του ρομποτικού ψαριού στο οριζόντιο επίπεδο επιτυγχάνεται από τον έλεγχο κίνησης του ουραίου πτερυγίου, ενώ στο κατακόρυφο επίπεδο το βάθος ελέγχεται με αισθητήρα πίεσης χαμηλού κόστους, μια μικρής αντλία, μιας 3d printed δεξαμενής νερού και ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος (περισσότερα εδώ [40]).



Σχήμα 6.5: Το ρομποτικό ψάρι του εργαστηρίου: **i** αυτόνομο, εν δράσει **ii** συζευγμένο με το φορείο ρυμούλκησης.

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων δύναμης/ροπής, χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας δύναμης/ροπής ATI Nano17. Ο αισθητήρας αυτός παρεμβάλλεται μεταξύ φορείου και ρομποτικού ψαριού προσαρμοσμένος και στερεά τοποθετημένος πάνω στην δοκό σύζευξης φορείου-ρομποτικού ψαριού (βλ. Σχήμα 6.6). Οι μετρήσεις του αισθητήρα αφού ενισχυθούν και μετατραπούν από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα με την βοήθεια μετατροπέα που παρέχεται μαζί με τον αισθητήρα, καταλήγουν για επεξεργασία σε ηλεκτρονικό υπολογιστή του Εργαστηρίου.

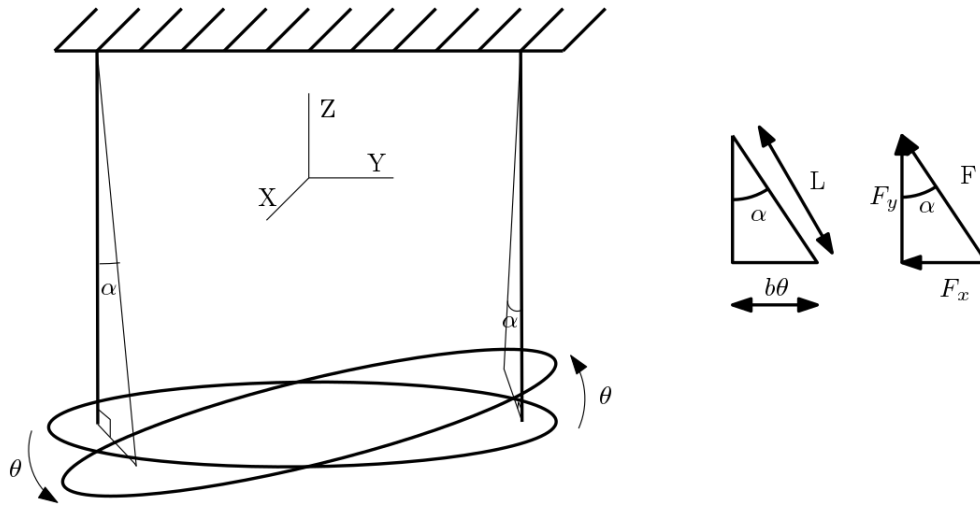


Σχήμα 6.6: Αισθητήρας δυνάμεων/ροπών προσδεμένος πάνω στην δοκό σύζευξης.

6.2.1 Υπολογισμός Ροπής Αδράνειας

Μια από τις βασικές παραμέτρους που προσδιορίστηκαν είναι η ροπή αδράνειας του ρομποτικού ψαριού ως προς άξονα Z που περνά από το κέντρο μάζας του. Εξαιτίας του σχήματος του, ο αναλυτικός προσδιορισμός με χρήση της θεωρίας δεν είναι δυνατός. Γι αυτόν τον λόγο επιλέχθηκε η διεξαγωγή ενός πειράματος για τον προσδιορισμό της. Εναλλακτικές λύσεις θα ήταν είτε ο προσδιορισμός του μέσω κάποιου σχεδιαστικού πακέτου, εφόσον υπάρχει το μοντέλο, είτε αναλυτικά μετά από προσέγγιση του σχήματος του από κάποιο/α γνωστό/α σχήματα. Οι λύσεις αυτές απορρίφθηκαν αφού δεν εξασφάλιζαν ικανοποιητική ακρίβεια.

Η ροπή αδράνειας που υπολογίζεται είναι αυτή του σώματος ως προς τον κατακόρυφο άξονα Z, αφού οι μανούβρες που εκτελεί το ρομποτικό ψάρι στην κίνηση του στο επίπεδο (π.χ. στροφή) περιέχουν περιστροφές γύρω από αυτόν τον άξονα. Για τον λόγο αυτό, το πείραμα που πραγματοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της είχε σκοπό την εύρεση αυτής της αδράνειας I_{ZZ} . Η μέθοδος που ακολουθήθηκε στηρίζεται στην μέτρηση της ταλάντωσης του σώματος όταν αυτό εκτελεί περιστροφική, ταλαντωτική κίνηση, γύρω από τον κατακόρυφο άξονα Z, ενώ κρέμεται από 2 παράλληλα σκοινιά (bifilar pendulum, βλ. Σχήματα 6.7 και 6.8). Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται ωστόσο ώστε το ρομποτικό ψάρι να ταλαντώνεται στο συγκεκριμένο επίπεδο μόνο, διαφορετικά η αδράνεια που θα υπολογιστεί δεν θα είναι η ζητούμενη, αφού θα υπάρχει κίνηση και γύρω από άλλους άξονες.



Σχήμα 6.7: Σχηματική απεικόνιση του πειράματος προσδιορισμού της ροπής αδράνειας.



Σχήμα 6.8: Φωτογραφία από τη διαδικασία του πειράματος.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής:
 Το ρομποτικό ψάρι αφέθηκε από μικρή γωνία, σε σχέση με τον διαμήκη άξονα του, να εκτελέσει ταλαντώσεις γύρω από τον άξονα Z. Χρονομετρήθηκαν πέντε χρονικές περιόδους του περιοδικού φαινομένου της ταλάντωσης. Κατόπιν το πείραμα επαναλήφθηκε, συνολικά για 10 φορές. Τα δεδομένα κατεγράφησαν και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Πειραματικές Μετρήσεις και Επεξεργασία τους για Προσδιορισμό της Περιόδου Ταλάντωσης.

5Periods time [s]	Period [s]
16.93	3.386
17.24	3.448
16.53	3.306
16.47	3.294
17.05	3.41
17.31	3.462
16.83	3.366
16.48	3.296
17.26	3.452
16.97	3.394
	Average Period [s]
	3.3814

Ο λόγος για τον οποίο χρονομετρήθηκαν πέντε περίοδοι και το πείραμα επαναλήφθηκε δέκα φορές ήταν για την στατιστική εξαγωγή συμπερασμάτων, καθότι ήταν αδύνατο να αποφευχθεί η εισαγωγή σφαλμάτων, όπως η αδυναμία έναρξης και λήξης της χρονομέτρησης ακριβώς με την έναρξη και το πέρας της ταλάντωσης (σφάλμα παρατηρητή).

Όπως φαίνεται και στα αποτελέσματα, από την περίοδο των πέντε πλήρων ταλαντώσεων εξάχθηκε ο χρόνος μιας πλήρους ταλάντωσης και ύστερα βρέθηκε η μέση τιμή της ταλάντωσης μετά από δέκα δοκιμές. Έτσι προέκυψε ο μέσος χρόνος της περιόδου της ταλάντωσης.

Με βάση το Σχήμα 6.7, που δείχνει δύο τυχαίες θέσεις από την ταλάντωση του σώματος, εξάγονται οι ακόλουθες εξισώσεις:

$$F_x = F_y \tan \alpha \quad (29)$$

όπου F_x, F_y οι συνιστώσες της τάσης F [N] του νήματος. Το βάρος μοιράζεται στα δύο νήματα συνεπώς η τάση σε κάθε νήμα θα είναι: $\frac{mg}{2}$. Ακόμα, για πολύ μικρές γωνίες ισχύει ότι: $\tan \alpha \approx \alpha$ και $\sin \alpha \approx \alpha$. Επίσης από το Σχήμα 6.7 προκύπτει: $\sin \alpha = \frac{b\theta}{L}$, άρα: $\alpha = \frac{b\theta}{L}$.

Επομένως ισχύει:

$$F_x = \frac{mg}{2} \frac{b\theta}{L} \quad (30)$$

Συνεπώς, η ροπή που ασκείται στο σώμα, δίνεται από την εξίσωση:

$$M = -bF_x \quad (31)$$

Άρα η (31) εξαιτίας της (30) γράφεται:

$$M = -\frac{mgb^2\theta}{2L} \quad (32)$$

Για περιστροφικές κινήσεις ισχύει ότι: $M = I\dot{\omega}$ Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, το σώμα περιστρέφεται κατά γωνία θ , με γωνιακή επιτάχυνση $\ddot{\theta}$. Άρα:

$$M = I_z\ddot{\theta} \quad (33)$$

Για την λύση της διαφορικής εξίσωσης δεύτερης τάξης (33), υποτίθεται η λύση: $\theta = Ae^{j\omega t}$. Επομένως, εάν γραφεί και το $\dot{\omega}$ ως $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ και συνδυαστούν με τις εξισώσεις (32) και (33), τότε λύνοντας ως προς την ροπή αδράνειας προκύπτει:

$$I = \frac{mgb^2T^2}{4\pi^2L^2} = \frac{mgD^2T^2}{16\pi^2L} \quad (34)$$

όπου: m : η μάζα του ρομποτικού ψαριού, η οποία μετρήθηκε σε ζυγαριά 0,88 [kg], D : η απόσταση των δύο σκοινιών, που μετρήθηκε με χάρακα 0,09 [m], T : η περίοδος της ταλάντωσης [s], όπως προέκυψε στον πίνακα 3 και L : το μήκος των νημάτων, το οποίο μετρήθηκε με χάρακα 0,90 [m].

Έτσι η ροπή αδράνειας προέκυψε ίση με:

$$I_{zz} = 0.005415 \text{kgm}^2$$

Συνοπτικά, τα σφάλματα που εμπεριέχονται:

1. Το σφάλμα του παρατηρητή, έγινε προσπάθεια να αποφευχθεί μέσω της εξαγωγής στατιστικού μέσου όρου, αλλά σίγουρα δεν μπορεί να υπάρχει πλήρης βεβαιότητα για την ακρίβεια της μέτρησης.
2. Η εξασφάλιση της παραλληλίας των σκοινιών που συγκρατούσαν το ψάρι, πραγματοποιήθηκε με την μέτρηση της απόστασης με χάρακα στα σημεία πρόσδεσης των νημάτων τόσο πάνω στο ψάρι όσο και στο πακτωμένο άκρο από όπου αιωρούνταν. Σίγουρα, δεν έχει εξασφαλιστεί με απόλυτη βεβαιότητα η παραλληλία, αλλά το σφάλμα πρέπει να θεωρηθεί μικρό.
3. Το ρομποτικό ψάρι, όταν αιωρούνταν από τα νήματα, έπρεπε να είναι οριζόντιο. Διαφορετικά, υπήρχε κίνδυνος να παρουσιαστούν ταλαντώσεις και γύρω από άλλους άξονες εκτός του επιθυμητού. Η τοποθέτηση του χωρίς κλίση, έγινε μετά από παρατήρηση και βελτίωση (trial and error) της θέσης και με την βοήθεια ορθογωνικού χάρακα, του οποίου οι δύο πλευρές χρησίμευσαν για την εξασφάλιση καθετότητας μεταξύ του κάθετου τοίχου και του διαμήκη άξονα του ρομποτικού ψαριού. Και εδώ υπεισέρχεται αντίστοιχο σφάλμα παρατηρητή, το οποίο όμως θεωρείται πως δεν ήταν μεγάλο.
4. Η μεγαλύτερη δυσκολία ήταν η εξασφάλιση πως το ρομποτικό ψάρι αφήνεται και εκτελεί ταλάντωση μόνο στο επίπεδο που πρέπει. Κάθε, έστω και μικρή ώθηση δημιουργούσε ταλαντώσεις και γύρω από άλλους άξονες. Εκτός από την προσοχή που δόθηκε κατά την εκτέλεση του πειράματος, ενώ μέσω και της εξαγωγής στατιστικού μέσου όρου της περιόδου, θεωρείται πως το σφάλμα δεν ήταν ιδιαίτερα μεγάλο.
5. Όπως αναφέρθηκε, έχει γίνει παραδοχή ότι $\tan \alpha \approx \alpha$ και $\sin \alpha \approx \alpha$. Οι παραδοχές αυτές δεν είναι απαγορευτικές όταν οι γωνίες είναι πολύ μικρές. Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων, το ρομποτικό ψάρι αφήθηκε από μικρές γωνίες, έτσι το συγκεκριμένο σφάλμα θεωρείται ιδιαίτερα μικρό.

6.2.2 Υπολογισμός Συντελεστών Υδροδυναμικών Δυνάμεων

Όπως έγινε αντιληπτό και στο κεφάλαιο της θεωρίας των υδροδυναμικών δυνάμεων, αλλά και σε αυτό της εισαγωγής, ο προσδιορισμός των αδιάστατων συντελεστών άνωσης (c_L), οπισθέλκουσας (c_D) και του συντελεστή ροπής πρόνευσης (k_D) είναι ιδιαίτερης σημασίας.

Υπενθυμίζονται οι εξισώσεις που δίνουν τους συντελεστές οπισθέλκουσας, άνωσης και ροπής αντίδρασης:

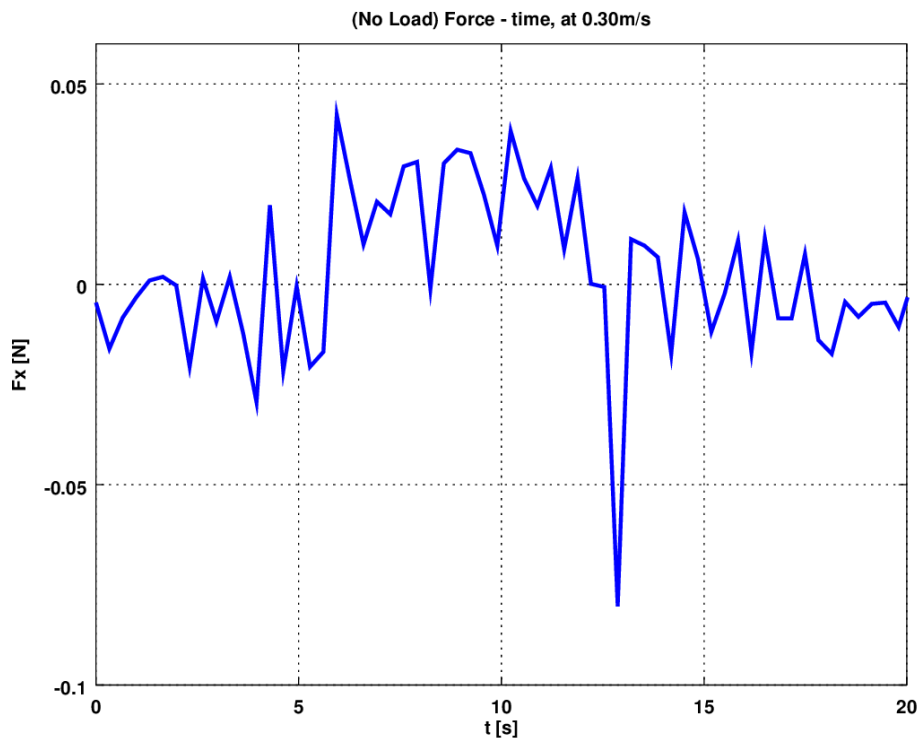
$$c_D = \frac{F_{Drag}}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (35)$$

$$c_L = \frac{F_{Lift}}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (36)$$

$$k_D = \frac{M}{\omega |\omega|} \quad (37)$$

όπου υπενθυμίζεται πως είναι: F_{Drag} [N] η δύναμη οπισθέλκουσας, F_{Lift} [N] η δύναμη άνωσης, M [Nm] η ροπή αντίστασης, A είναι η βρεχόμενη επιφάνεια [m^2] (wetted area), ρ η πυκνότητα [kg/m^3], U η ταχύτητα του σώματος [m/s], ω η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής [rad/s] και K_D ο αδιάστατος συντελεστής ροπής αντίστασης.

Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων σημαντική ήταν η σύγκριση των μετρήσεων που παρείχε ο αισθητήρας δύναμης/ροπής σε κάθε ένα από τα πειράματα με την τιμή που καταγράφηκε από την απλή μεταφορά της δοκού (με τον αισθητήρα προσαρμοσμένο πάνω) χωρίς να υπάρχει συζευγμένο το φορτίο-ρομποτικό ψάρι (ενδεικτικό τέτοιο διάγραμμα στο Σχήμα 6.9). Η διαφορά της τιμής αυτής από τις τιμές που προέκυψαν από τα διάφορα πειράματα που εκτελέστηκαν με το ψάρι συνδεδεμένο στο φορείο ουσιαστικά αποτελεί τις δυνάμεις που δέχεται το ρομποτικό ψάρι από την κίνηση του στο νερό. Οι μετρούμενες αυτές δυνάμεις είναι πρακτικά οι υδροδυναμικές δυνάμεις που αναπτύσσονται από την σχετική κίνηση ψαριού με το νερό της δεξαμενής.



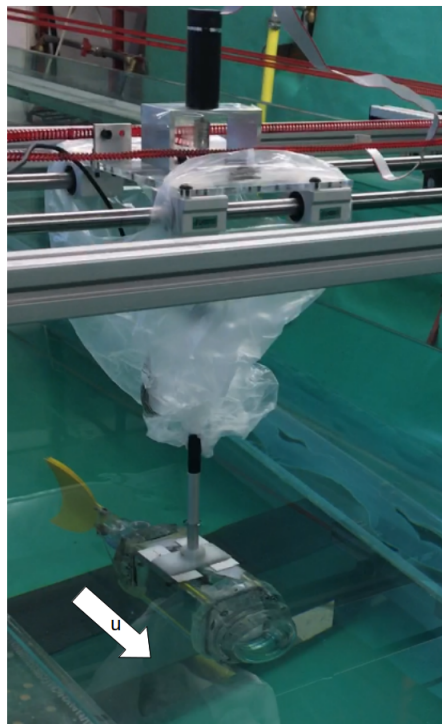
Σχήμα 6.9: Δύναμη Οπισθέλκουσας για κίνηση χωρίς φορτίο, με ταχύτητα 30cm/s.

Ωστόσο, οι μετρήσεις έδειξαν πως η μέση δύναμη που ασκείται στην δοκό χωρίς το ρομποτικό ψάρι να είναι συζευγμένο, είναι πάρα πολύ μικρή σε σχέση με όταν υπάρχει φορτίο, στις χαμηλότερες ταχύτητες. Για τον λόγο αυτό όποτε ίσχυε μεγάλη διαφορά (διαφορά τάξης μεγέθους), η δύναμη από την μεταφορά μόνο της δοκού αμελήθηκε.

Έτσι λοιπόν σχεδιάστηκαν και εκτελέστηκαν τα ακόλουθα πειράματα:

1. Το ρομποτικό ψάρι, προσδεδεμένο με τη δοκό σύζευξης η οποία με τη σειρά της είναι πακτωμένη με το φορείο ρυμούλκησης, κινείται σε ευθύγραμμη κίνηση, κατά μήκος της δεξαμενής. Το σώμα του ψαριού ήταν τοποθετημένο με τον διαμήκη άξονα του σε θέση παράλληλη με την διεύθυνση της ταχύτητάς του (βλ. Σχήμα 6.10). Στο ρομποτικό ψάρι

δεν επιτρέπεται κάποια άλλη κίνηση πέρα από την ευθύγραμμη μετατόπιση η οποία περιγράφηκε. Το προφίλ ταχύτητας της κίνησης που επιλέχθηκε ήταν τραπεζοειδές, με το ενδιαφέρον στο συγκεκριμένο πείραμα να εστιάζεται στο τμήμα εκείνο της κίνησης που αντιστοιχεί σε σταθερή ταχύτητα. Η σταθερή ταχύτητα είναι απαραίτητη προκειμένου να αποφύγουμε διαταραχή από την προστιθέμενη μάζα (added mass) και διότι με σταθερή ταχύτητα επιτυγχάνεται η εξισορρόπηση της προωθητικής δύναμης με αυτήν της οπισθέλκουσας, με αποτέλεσμα ο αισθητήρας ATI nano-17 να καταγράφει απευθείας την τιμή της οπισθέλκουσας. Με δεδομένη την τιμή της οπισθέλκουσας (είναι η μέση τιμή δύναμης που καταγράφηκε από τον αισθητήρα στην σταθερή κίνηση), τότε μόνοι άγνωστοι για τον υπολογισμό του συντελεστή οπισθέλκουσας (βλ. Εξίσωση (35), είναι η πυκνότητα του νερού (ρ) και η μετωπική επιφάνεια (A).



Σχήμα 6.10: Το ρομποτικό ψάρι κινείται ευθύγραμμα, με τον διαμήκη άξονα του παράλληλο στην διεύθυνση της ταχύτητας.

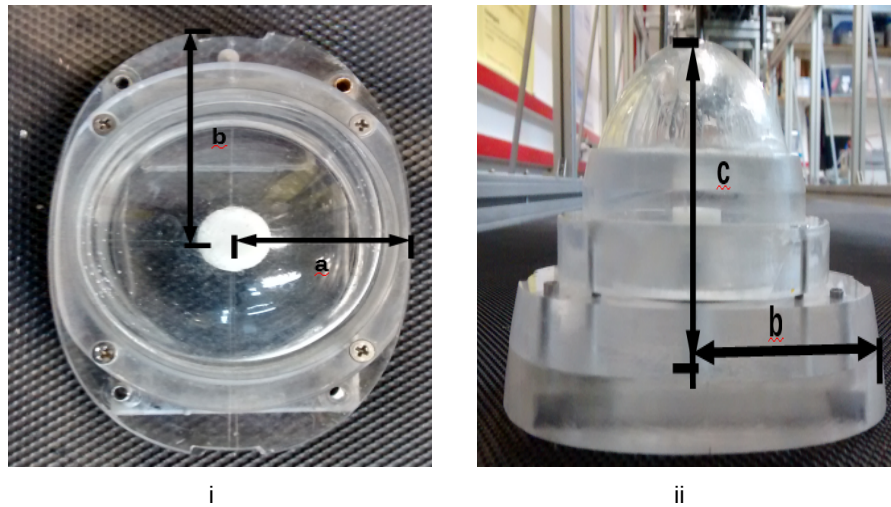
Για τον υπολογισμό της μετωπικής επιφάνειας, το κεφάλι του ρομποτικού ψαριού, που είναι και η μόνη βρεχόμενη επιφάνεια (wetted area) που ενδιαφέρει στους υπολογισμούς, θεωρήθηκε πως είναι σχήματος ελλειψοειδούς, με:

$$a = \frac{85}{2} = 42.5\text{cm}, b = \frac{117.5}{2} = 58.75\text{cm}, c = 0.56\text{cm}$$

όπου a , b , c είναι οι 3 άξονες του ελλειψοειδούς (βλ. Σχήμα 6.11). Έτσι για τον υπολογισμό της επιφάνειας του ελλειψοειδούς χρησιμοποιήθηκε η προσεγγιστική σχέση του Knud Thomsen [41]:

$$A = 4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{a^p b^p + a^p c^p + b^p c^p}{3} \right)^{\frac{1}{p}}$$

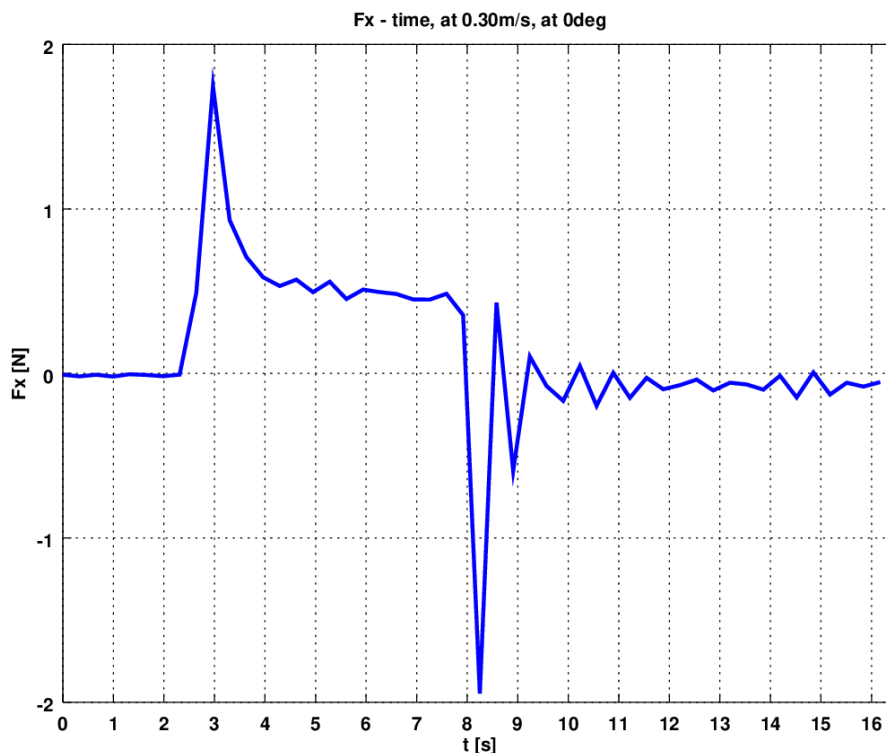
όπου ρ είναι μια σταθερά (ίση με 1,6075) και δηλώνει ένα μέγιστο σχετικό σφάλμα 1,061%. Όσον αφορά την πυκνότητα αυτή λήφθηκε ίση προς $998,2 \frac{Kg}{m^3}$, όπως προκύπτει για νερό στην θερμοκρασία των $20^\circ C$.



Σχήμα 6.11: Διαστάσεις του κεφαλιού του ρομποτικού ψαριού: **i** κάτοψη, **ii** πλαινή όψη.

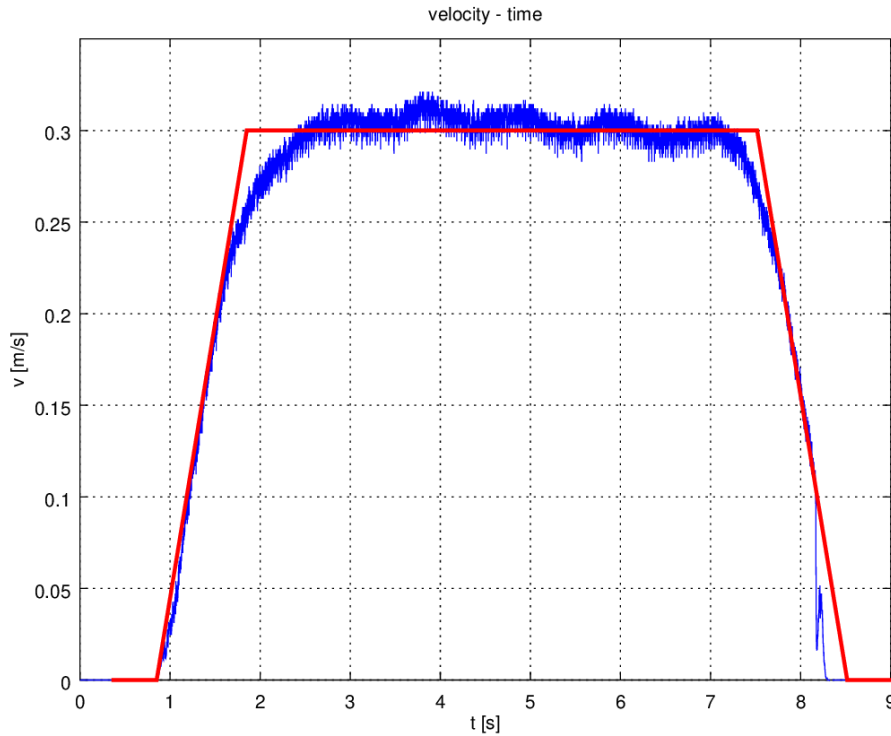
Με αντικατάσταση αυτών των τιμών στην (35) είναι δυνατόν να εξαχθεί ο συντελεστής οπισθέλκουσας για την τιμή της ταχύτητας στην οποία πραγματοποιήθηκε το πείραμα. Το ρομποτικό ψάρι είναι σχεδιασμένο ώστε η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να αναπτύξει να είναι τα $30 \frac{cm}{s}$. Για τον λόγο αυτό και προκειμένου να ελεγχθεί ένα εύρος ταχυτήτων, το πείραμα επαναλήφθηκε για διάφορες τιμές ταχυτήτων και κατασκευάστηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα $F_x - t$.

Κατόπιν, υπολογίστηκε η μέση τιμή της δύναμης για την κίνηση σε σταθερή ταχύτητα. Το διάστημα της σταθερής κίνησης μπορεί να υπολογιστεί με βάση τον χρόνο, αφού η κίνηση που εκτελείται είναι ένα προφίλ ταχύτητας με συγκεκριμένα, γνωστά, χρονικά διαστήματα των τριών φάσεων του (επιταχυνόμενη, σταθερή και επιβραδυνόμενη κίνηση). Επίσης επιβεβαιώνεται από την παρατήρηση πως στην επιταχυνόμενη κίνηση η δύναμη είναι αυξανόμενη, στη σταθερή παραμένει σταθερή, στην επιβραδυνόμενη η δύναμη μειώνεται και στο φρενάρισμα παρατηρούνται κάποιες μικρές ταλαντώσεις, μέχρι την εξασθένηση της δύναμης. Στο Σχήμα 6.12 παρουσιάζεται το πείραμα όπου ο διαμήκης άξονας του ρομποτικού ψαριού ήταν παράλληλος με το διάνυσμα της ταχύτητας, δηλαδή για γωνία 0° και φαίνονται όσα περιγράψαμε παραπάνω για την δύναμη.



Σχήμα 6.12: Διάγραμμα οπισθέλκουσας-χρόνου για ταχύτητα 30cm/s και γωνία 0° .

Όπως διακρίνεται στο Σχήμα 6.12, το ρομποτικό ψάρι το πρώτο δευτερόλεπτο είναι ακίνητο (δεν έχει δοθεί εντολή να ξεκινήσει ακόμα). Κατόπιν και για ένα δευτερόλεπτο εκτελεί επιταχυνόμενη κίνηση (η αντίσταση στην φορά κίνησης αυξάνεται) μέχρι να αναπτύξει ταχύτητα $0,30\text{m/s}$, όπου και διατηρεί αυτήν την ταχύτητα για περίπου έξι δευτερόλεπτα (η αντίσταση διατηρείται περίπου σταθερή). Ύστερα, για άλλο ένα δευτερόλεπτο επιβραδύνεται ομαλά (η αντίσταση μειώνεται) και στην συνέχεια ακινητοποιείται. Στο τέλος παρατηρούνται κάποιες μικρές ταλαντώσεις στην αντίσταση που καταγράφηκε, πιθανότατα εξαιτίας και της μάζας ρευστού που ακολουθεί την κίνηση του ψαριού και με καθυστέρηση το σπρώχνει ενώ δεν του εφαρμόζεται πλέον δύναμη πρόωσης. Το προφίλ της ταχύτητας που περιγράφηκε παραπάνω για την περιγραφή του Σχήματος 6.12, επιβεβαιώνεται από την σύγκριση με το Σχήμα 6.13, όπου φαίνεται τόσο το προφίλ της ταχύτητας που δόθηκε σαν εντολή στον κινητήρα όσο και το προφίλ που πραγματοποιήθηκε με βάση τα στοιχεία του αισθητήρα που κατέγραψε το Beaglebone.



Σχήμα 6.13: Διάγραμμα ταχύτητας-χρόνου, όπως καταγράφηκε από το Beaglebone.

Παρατηρώντας το Σχήμα 6.13 επιβεβαιώνεται από την καταγραφή της ταχύτητας από το Beaglebone πως η μέση ταχύτητα στην σταθερή κατάσταση ήταν $0,303m/s$ και πως γενικά το προφίλ που πραγματοποιήθηκε ήταν το επιθυμητό. Ωστόσο να αναφερθεί πως από το Beaglebone καταγράφεται η ταχύτητα σε counts/s. Ένα χρήσιμο μέγεθος επομένως είναι ο όρος:

$$f = \frac{N_{enc}i}{2\pi R} \quad (38)$$

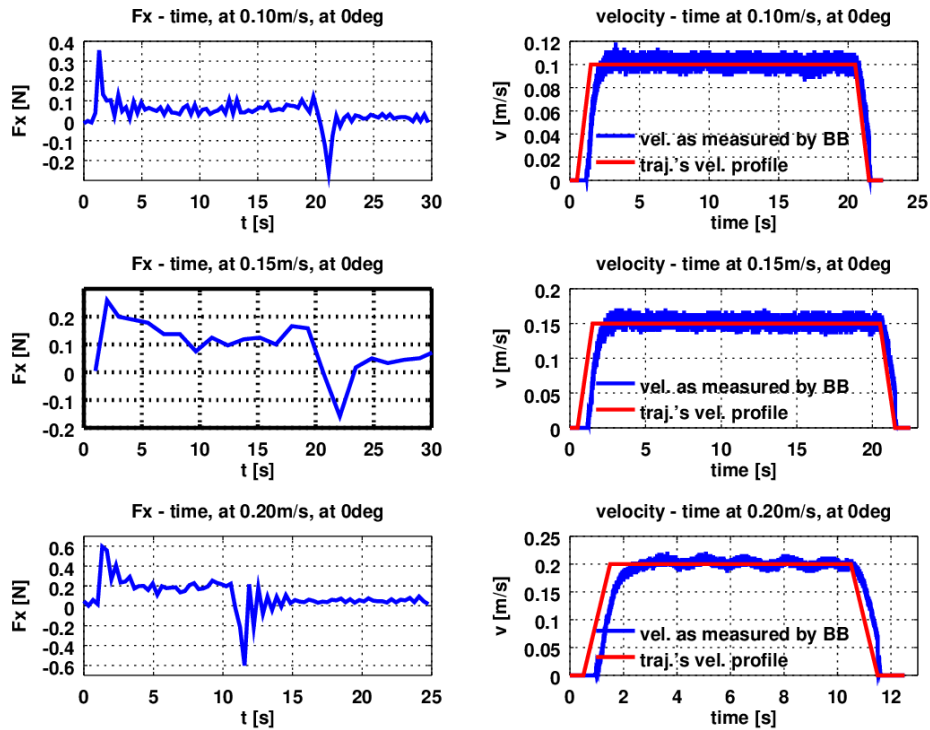
όπου N_{enc} είναι ο αριθμός των counts που καταγράφει ο αισθητήρας σε μια πλήρη περιστροφή, i ο λόγος μείωσης από το κιβώτιο ταχυτήτων του κινητήρα, R η ακτίνα της τροχαλίας που μεταδίδει την κίνηση στο φορείο και f είναι ο αριθμός των counts ανά μέτρο μετατόπισης. Συνεπώς, για την μετατροπή από counts/s σε m/s αρκεί να διαιρεθεί η ταχύτητα που μετρείται σε counts/s με τον όρο f .

Έτσι από την σύγκριση αυτών των δύο διαγραμμάτων, επιβεβαιώθηκε η εγγυρότητα της μέτρησης και στη συνέχεια προσδιορίστηκε η μέση δύναμη στην σταθερή κίνηση. Από τη μέση τιμή της δύναμης της σταθερής κατάστασης αφαιρέθηκε (αφού η διαφορά δεν ήταν αμελητέα) η μέση τιμή της δύναμης στην σταθερή κίνηση του φορείου χωρίς το ρομποτικό ψάρι, αλλά μόνο με την δοκό σύζευξης. Η εξαγωγή αυτής της τιμής έγινε από το αντίστοιχο διάγραμμα (βλ. Σχήμα 6.9), με τον ίδιο τρόπο που περιγράφηκε και για την περίπτωση που το φορείο έφερε φορτίο.

Επίσης αφαιρέθηκε και η μέση τιμή της δύναμης που καταγράφει ο αισθητήρας κατά την ηρεμία. Η τιμή αυτή που κατέγραφε ο αισθητήρας στην ηρεμία είναι θόρυβος, ο οποίος θεωρείται σταθερός καθόλη την διάρκεια του πειράματος.

Επομένως, από την μέση τιμή που προέκυψε και σε συνδυασμό με την εξίσωση (35) υπολογίζεται ο συντελεστής οπισθέλκουσας. Στο Σχήμα 6.14 παρουσιάζονται τα διαγράμματα οπισθέλκουσας ως προς τον χρόνο, μαζί με αυτά της ταχύτητας (επιθυμητής

και πραγματικής) ως προς τον χρόνο για τα πειράματα που εκτελέστηκαν για διαφορετικές ταχύτητες κίνησης. Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζονται παράλληλα για σύγκριση, όπως αναλύθηκε και για το πείραμα με ταχύτητα 30cm/s.



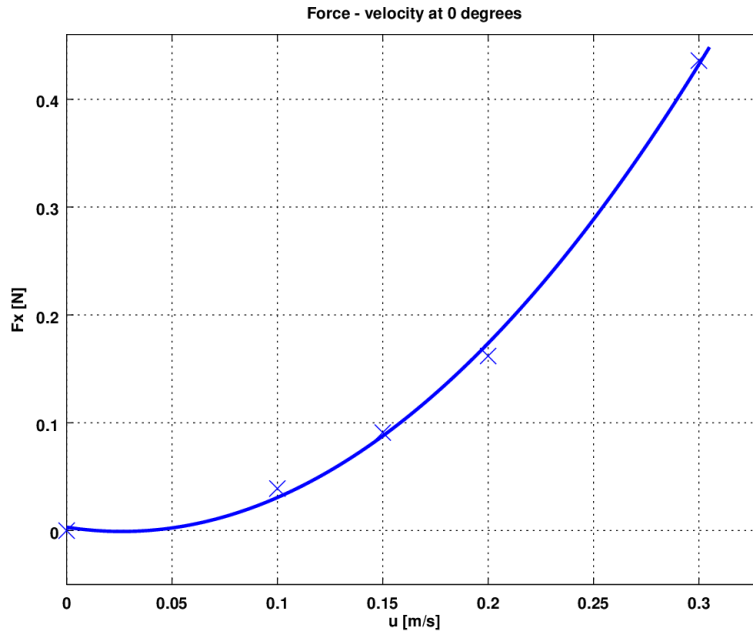
Σχήμα 6.14: Διαγράμματα οπισθέλκουσας και ταχύτητας για τα πειράματα που εκτελέστηκαν: a) Οπισθέλκουσα για ταχύτητα 0,10m/s, b) Επιθυμητό και πραγματικό προφίλ ταχύτητας για διάγραμμα οπισθέλκουσας του a, c) Οπισθέλκουσα για ταχύτητα 0,15m/s, d) Επιθυμητό και πραγματικό προφίλ ταχύτητας για διάγραμμα οπισθέλκουσας του c, e) Οπισθέλκουσα για ταχύτητα 0,20m/s, f) Επιθυμητό και πραγματικό προφίλ ταχύτητας για διάγραμμα οπισθέλκουσας του e.

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται συνοπτικά για τις διάφορες ταχύτητες, η μέση δύναμη και ο συντελεστής οπισθέλκουσας που υπολογίστηκε.

Πίνακας 4: Μέση τιμή δύναμης-αντίστασης στην σταθερή κίνηση και συντελεστής οπισθέλκουσας για διάφορες τιμές ταχύτητας κίνησης.

Velocity [cm/s]	10	15	20	30
\bar{f}	0.039	0.091	0.162	0.436
c_d	0.433	0.449	0.450	0.538

Στο Σχήμα 6.15 παρουσιάζεται η μέση τιμή της δύναμης από κάθε πείραμα συναρτήσει της ταχύτητας, όπου επιβεβαιώνεται πως η οπισθέλκουσα είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας.

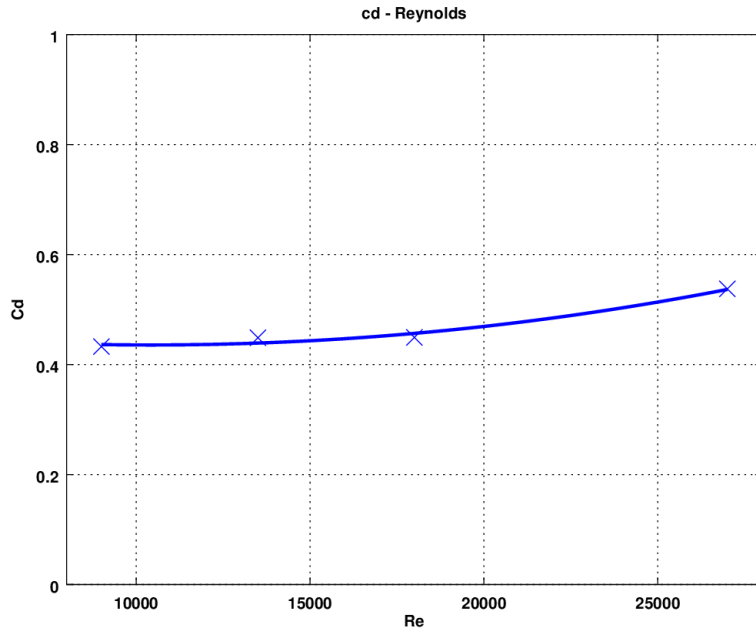


Σχήμα 6.15: Μέση τιμή οπισθέλκουσας, κατά τον X άξονα, ως προς την ταχύτητα (ψάρι σε γωνία 0°).

Στην συνέχεια υπολογίστηκε ο αδιάστατος αριθμός Reynolds:

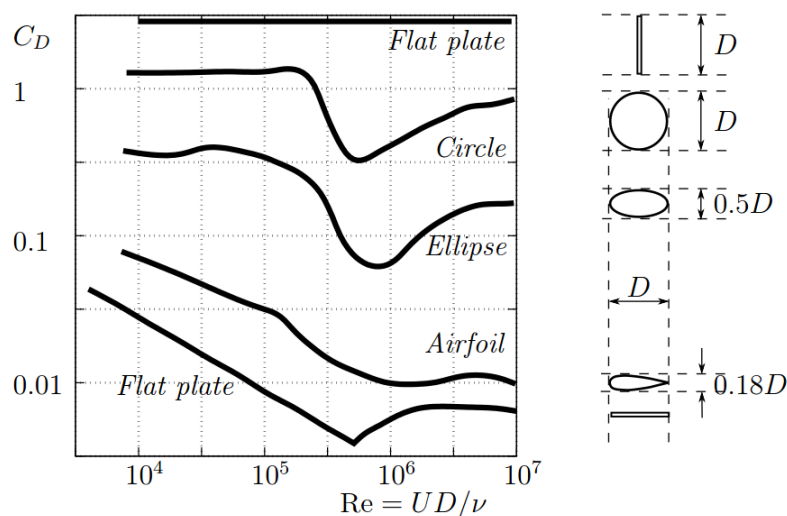
$$Re = \frac{uL}{\nu} \quad (39)$$

όπου u : η ταχύτητα της ροής ως προς το σώμα, L : μια χαρακτηριστική γραμμική διάσταση του σώματος, όπου καθότι δεν υπάρχει βεβαιότητα για το αν οι διατμητικές δυνάμεις επικρατούν στον σχηματισμό της οπισθέλκουσας, οπότε και σαν χαρακτηριστικό μέγεθος θα έπρεπε να ληφθεί το μήκος του σώματος ή αν επικρατούν οι διαφορές πιέσεων μόλις η ροή "συναντήσει" την έλλειπτική επιφάνεια του κεφαλιού, οπότε και η διάμετρος θεωρείται το χαρακτηριστικό μέγεθος, επιλέχθηκε το δεύτερο σαν χαρακτηριστικό μήκος αφού κρίθηκε πως στην συγκεκριμένη περίπτωση η διάσταση αυτή είναι πιο καθοριστική σε αντίθεση για παράδειγμα με μια πλάκα όπου θα λαμβανόταν το μήκος της εξαιτίας της μικρής κάθετης επιφάνειας της. Ακόμα είναι ν : το κινηματικό ιξώδες, για το ρομποτικό ψάρι στα συγκεκριμένα πειράματα και κατασκευάστηκε το διάγραμμα $c_D - Re$. Είναι: $L = 0.09m$ (η διάμετρος του κεφαλιού του ρομποτικού ψαριού), $\nu = 10^{-6}m^2/s$ για νερό σε θερμοκρασία 15° . Οπότε για τις ταχύτητες στις οποίες πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα ο αριθμός Reynolds κυμαίνεται μεταξύ 9000 και 27000. Στο Σχήμα 6.16 απεικονίζεται η σχέση των δύο μεγεθών.



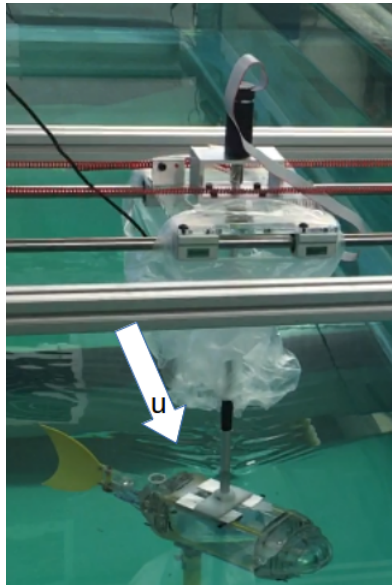
Σχήμα 6.16: Συντελεστής Οπισθέλκουσας ως προς τον αριθμό Reynolds, όπως προέκυψε από τα πειράματα.

Όπως και στην βιβλιογραφία (π.χ [13]), για τους αριθμούς Reynolds αυτής της τάξης, οι τιμές του c_d είναι περίπου σταθερές, βλέπε και Σχήμα 6.17, όπου δίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα c_d - Re για διάφορα σχήματα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η σύγκριση γίνεται με την καμπύλη εκείνη που αφορά το σχήμα της έλλειψης, όπου και για τις τιμές του αριθμού Reynolds της τάξης 10^4 είναι περίπου σταθερή. Ωστόσο, η μέση τιμή του συντελεστή που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία (και ήταν ίση με 0,468) έχει απόκλιση από αυτή του διαγράμματος στο Σχ. 6.17. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού η έλλειψη που δίνεται στην βιβλιογραφία έχει χαρακτηριστικά μεγέθη που δεν αντιστοιχούν ακριβώς με το σχήμα του ρομποτικού ψαριού του Εργαστηρίου, επομένως μια μετατόπιση της καμπύλης είναι αναμενόμενη.



Σχήμα 6.17: Συντελεστής Οπισθέλκουσας ως προς τον αριθμό Reynolds για διάφορα σχήματα, [13].

2. Το ρομποτικό ψάρι τοποθετήθηκε αυτή την φορά υπό γωνία ως προς τον διαμήκη άξονά του. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε γωνία 15° και 40° (βλ. Σχήμα 6.18) και για ταχύτητες 10 και $20\text{cm}/s$. Στόχος αυτών των πειραμάτων ήταν η καταγραφή των δυνάμεων στο επίπεδο, η ανάλυση τους σε δύο βασικές συνιστώσες και ο εν τέλει καθορισμός τόσο του συντελεστή οπισθέλκουσας όσο και αυτού της άνωσης, αφού όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο της θεωρίας η δύναμη που ασκείται σε διεύθυνση κάθετη στην ταχύτητα, ακόμα και αν δεν είναι στο κατακόρυφο επίπεδο, αποτελεί την δύναμη άνωσης.



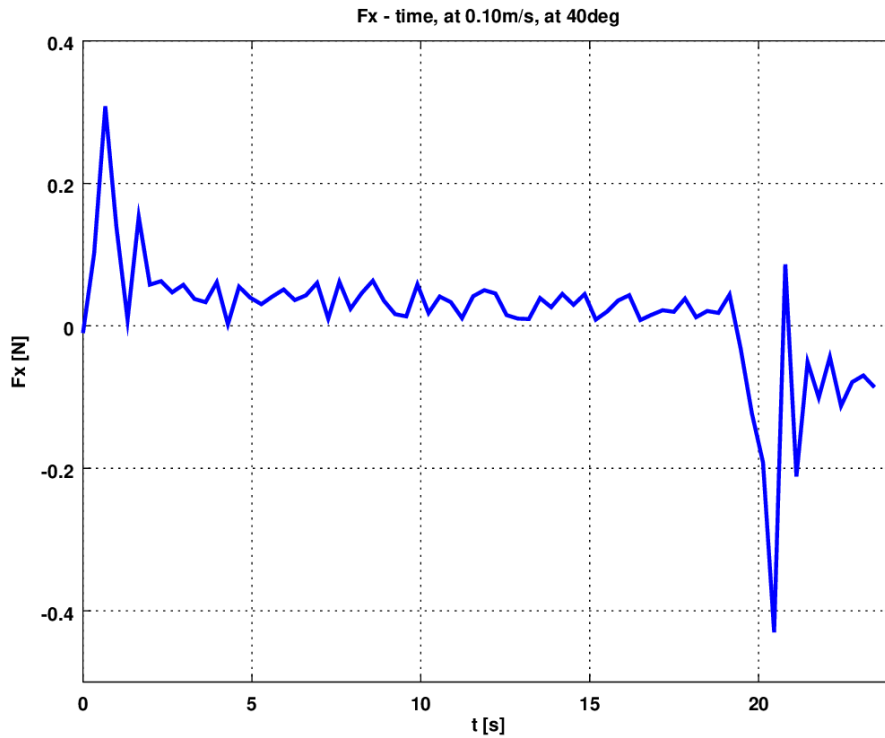
Σχήμα 6.18: Το ρομποτικό ψάρι κινείται ευθύγραμμα, με τον διαμήκη άξονά του υπό γωνία σε σχέση με την διεύθυνση της ταχύτητας.

Η αντίστοιχη λοιπόν διαδικασία ανάλυσης ακολουθήθηκε και στα πειράματα όπου το ρομποτικό ψάρι είχε τοποθετηθεί με τον διαμήκη άξονά του να είναι υπό γωνία σε σχέση με την διεύθυνση του διανύσματος της ταχύτητας με την οποία κινείται. Μόνη σημαντική αλλαγή αποτελεί πως πλέον η βρεχόμενη επιφάνεια που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς περιγράφεται από την Εξίσωση (40):

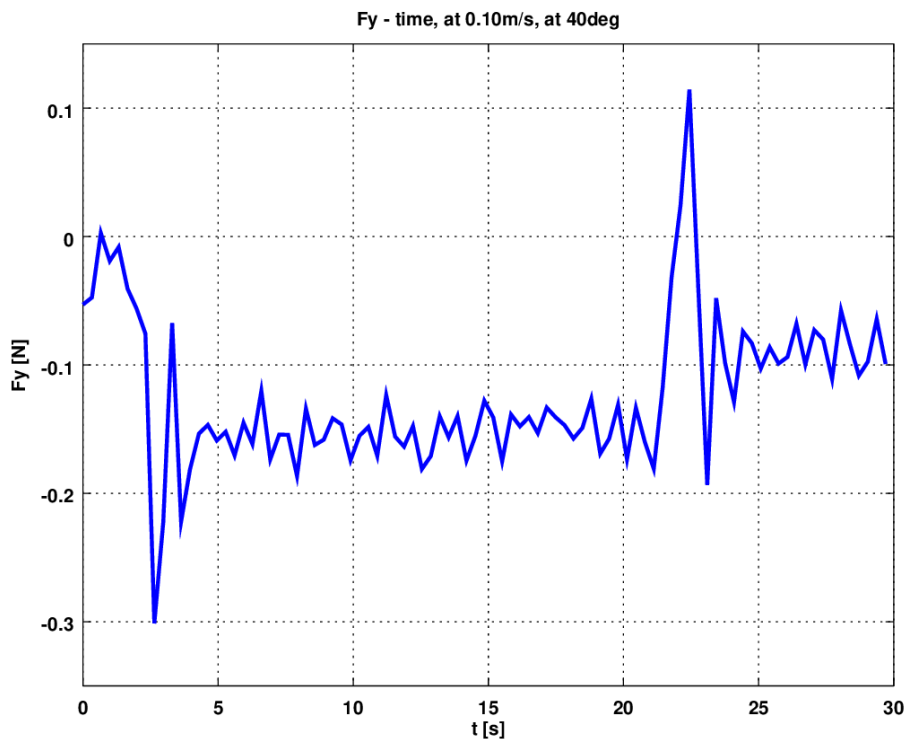
$$A = A_{body} \cdot \sin\alpha + A_{head} \cdot \cos\alpha \quad (40)$$

όπου A_{body} είναι το εμβαδόν του σώματος του ψαριού, σχήματος ορθογώνιου παραλληλόγραμμου και της ουράς. A_{head} είναι το εμβαδόν του ελλειψοειδούς που αποτελεί το κεφάλι του ψαριού και α είναι η γωνία ως προς τον διαμήκη άξονα του ρομπότ που ήταν αρχικώς παράλληλο ως προς τον Καρτεσιανό άξονα Y όπως ορίστηκε προηγουμένως.

Αυτή την φορά όμως κατεγράφησαν και οι τιμές για την άνωση. Αρχικά παρατίθενται ενδεικτικά και σχολιάζονται τα διαγράμματα για την δύναμη στον άξονα X και Y (βλ. Σχήμα 6.19 και 6.20) για ταχύτητα $10\text{cm}/s$ υπό γωνία 40° .



Σχήμα 6.19: Διάγραμμα οπισθέλκουσας-χρόνου, για ταχύτητα 10cm/s και υπό γωνία 40° .



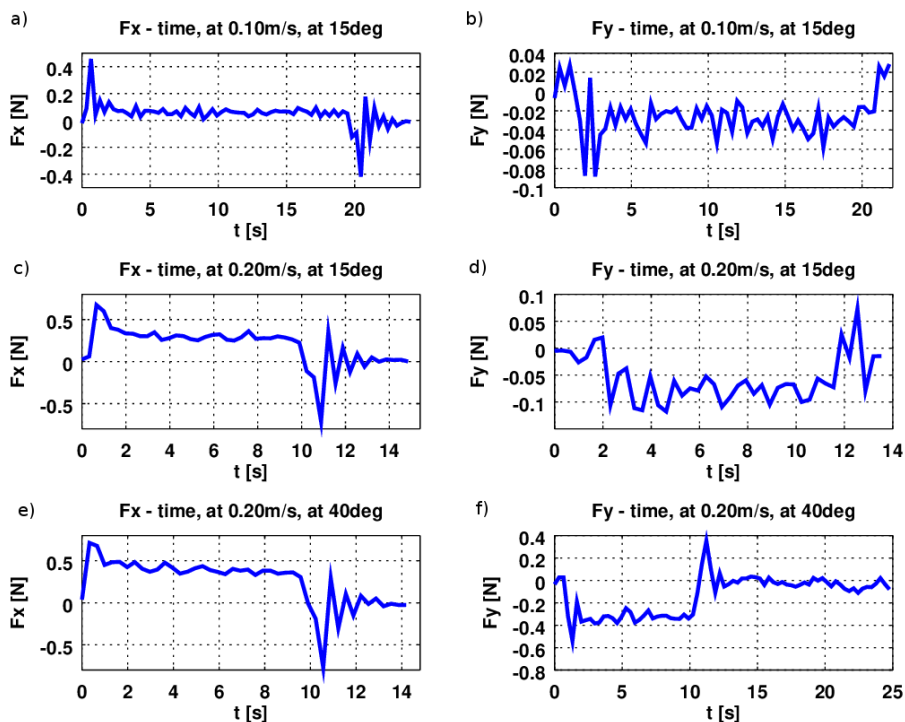
Σχήμα 6.20: Διάγραμμα άνωσης-χρόνου, για ταχύτητα 10cm/sec και υπό γωνία 40° .

Στο διάγραμμα της άνωσης, το αρνητικό πρόσημο αφορά το πως είχε τοποθετηθεί ο

αισθητήρας πάνω στη δοκό. Σχετίζεται δηλαδή με την κατεύθυνση στην οποία ήταν τα θετικά και τα αρνητικά ως προς το εσωτερικό σύστημα συντεταγμένων του αισθητήρα και δεν έχει κάποιο φυσικό νόημα.

Από τα διαγράμματα της δύναμης κατά τον X και Y άξονα, παρατηρείται και πάλι η ίδια μορφή της καμπύλης με αυτήν που παρατηρήθηκε και στα πειράματα με μηδενική γωνία μεταξύ του σώματος του ρομπότ και του δανύσματος της ταχύτητας, όπως και αναμενόταν. Η μορφή σχετίζεται με το προφίλ ταχύτητας, το οποίο και πάλι ήταν τραπεζοειδές προφίλ.

Στο Σχήμα 6.21 παρουσιάζονται τα διαγράμματα οπισθέλκουσας και άνωσης για όλες τις ταχύτητες στις οποίες πραγματοποιήθηκαν πειράματα.



Σχήμα 6.21: Διαγράμματα οπισθέλκουσας και άνωσης για διάφορες ταχύτητες και υπό διαφορετικές γωνίες: a) Διάγραμμα οπισθέλκουσας για $v=0.10\text{m/s}$ και υπό γωνία 15° , b) Διάγραμμα άνωσης για $v=0.10\text{m/s}$ και υπό γωνία 15° , c) Διάγραμμα οπισθέλκουσας για $v=0.20\text{m/s}$ και υπό γωνία 15° , d) Διάγραμμα άνωσης για $v=0.20\text{m/s}$ και υπό γωνία 15° , e) Διάγραμμα οπισθέλκουσας για $v=0.20\text{m/s}$ και υπό γωνία 40° και f) Διάγραμμα άνωσης για $v=0.20\text{m/s}$ και υπό γωνία 40° .

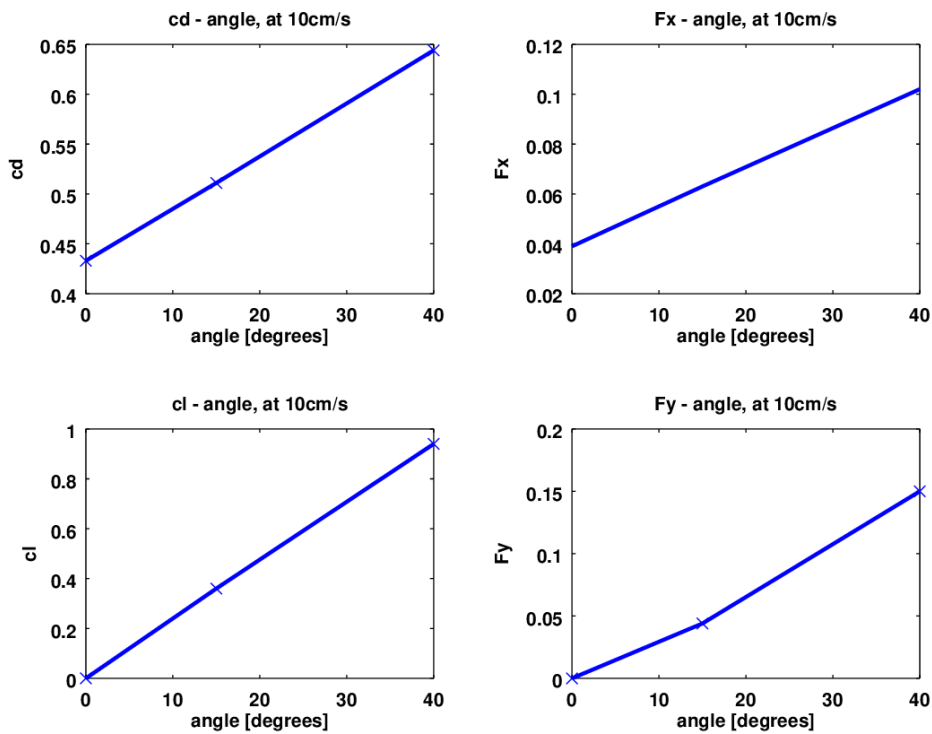
Η ίδια ανάλυση που ακολουθήθηκε για τον συντελεστή οπισθέλκουσας, χρησιμοποιήθηκε και για τον υπολογισμό του συντελεστή άνωσης. Προκύπτουν επομένως τα δεδομένα του Πίνακα 5.

Πίνακας 5: Υπολογισμός μέσης δύναμης στους άξονες X και Y και των συντελεστών οπισθέλκουσας και άνωσης.

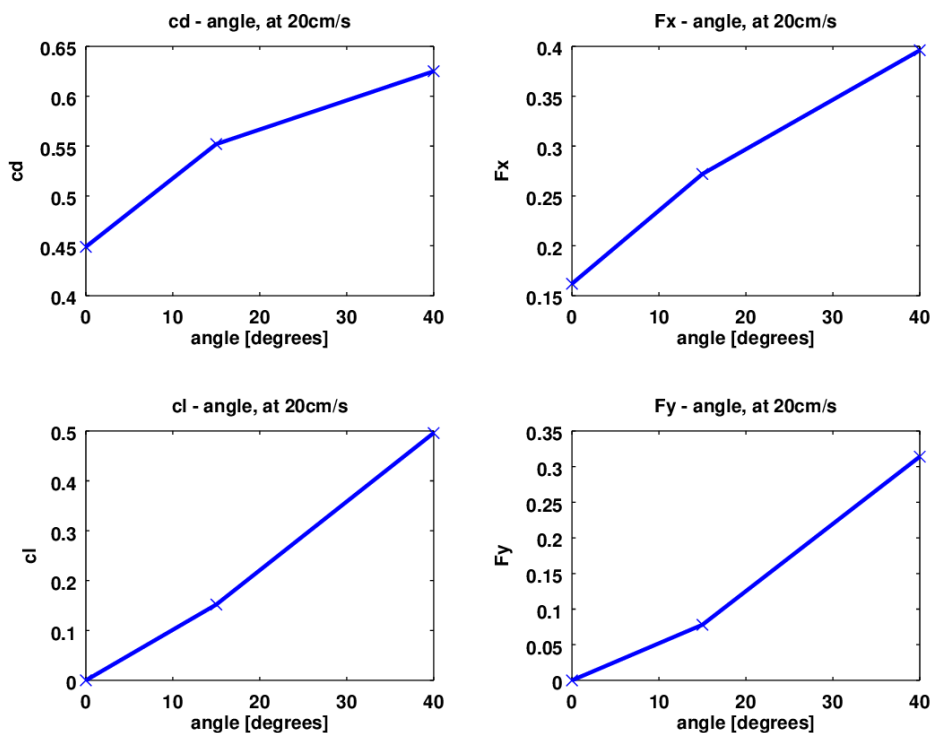
Velocity [cm/sec]	10	10	20	20
angle [degrees]	15	40	15	40
$\overline{f_X}$	0.063	0.102	0.272	0.396
$\overline{f_Y}$	0.044	0.150	0.075	0.314
c_d	0.511	0.644	0.552	0.625
c_l	0.360	0.940	0.151	0.496

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα διαπιστώνεται αύξηση της τιμής της αντίστασης και της άνωσης με την αύξηση της γωνίας για κάθε ταχύτητα όπως ήταν αναμενόμενο.

Τα αποτελέσματα από την ευθύγραμμη κίνηση, για όλες τις γωνίες κίνησης παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.22 και 6.23.



Σχήμα 6.22: Διαγράμματα συντελεστών και μέσω δυνάμεων οπισθέλκουσας και άνωσης ως συνάρτηση της γωνίας, για ταχύτητα 10cm/s.

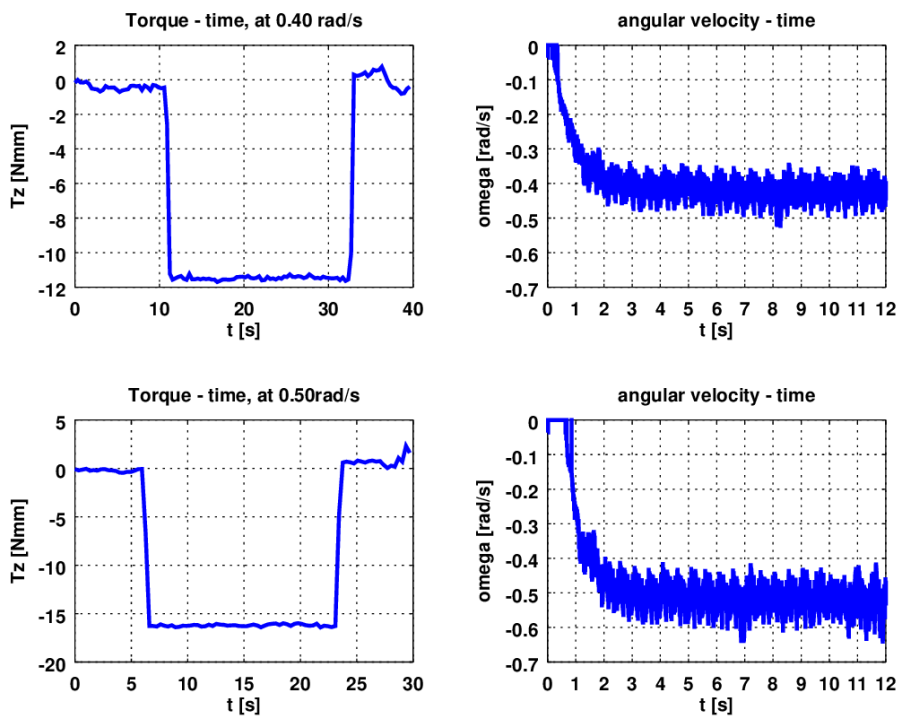


Σχήμα 6.23: Διαγράμματα συντελεστών και μέσω δυνάμεων οπισθέλκουσας και άνωσης ως συνάρτηση της γωνίας, για ταχύτητα 20cm/s .

Σχετικά με την μορφή των διαγραμμάτων του συντελεστή οπισθέλκουσας και άνωσης ως προς την γωνία, να αναφερθεί πως παρά τα λίγα σημεία που έχουν πειραματικά προσδιοριστεί για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, κρίνεται σωστή η τάση για αύξηση των τιμών των συντελεστών με την αύξηση της γωνίας. Αυτό συμβαίνει επειδή το εμβαδόν της βρεχόμενης επιφάνειας αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας με διαφορετικό ωστόσο ρυθμό (μικρότερο) από την αύξηση της δύναμης αντίστασης (οπισθέλκουσας και άνωσης αντίστοιχα). Τα αποτελέσματα της μορφής των διαγραμμάτων έρχονται σε συμφωνία με την βιβλιογραφία για διάφορα σχήματα που μελετήθηκαν (π.χ εδώ [42] για αεροτομές και τα [43], [44] για άλλα σχήματα).

3. Σε αυτό το πείραμα, το φορείο παρέμεινε ακινητοποιημένο ως προς του δύο οριζόντιους άξονες (όπως αυτοί έχουν οριστεί προηγουμένως, βλ. Σχήμα 6.3) και πραγματοποιήθηκε περιστροφή της δοκού σύζευξης φορείου-ρομποτικού ψαριού, άρα και του ρομποτικού ψαριού, γύρω από τον κατακόρυφο Z άξονα, με σταθερή ταχύτητα. Πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα στις ταχύτητες $0, 40\text{rad/s}$ και $0, 50\text{rad/s}$. Με το πείραμα αυτό ζητούμενο ήταν η καταγραφή της ροπής και άρα ο προσδιορισμός του συντελεστή ροπής αντίστασης. Εδώ το προφίλ ταχύτητας πρέπει να είναι απλά μια συνεχής σταθερή τιμή, για αυτό και δόθηκε προφίλ βηματικής ταχύτητας.

Στο Σχήμα 6.24 παρουσιάζονται τα διάγραμμα της ροπής γύρω από τον Z άξονα καθώς και του προφίλ της ταχύτητας που πραγματοποίησε (όπως το κατέγραψε το Beaglebone) όταν το ρομποτικό ψάρι περιστρεφόταν με $0,40\text{rad/s}$ ($\approx 23^\circ/\text{s}$) και $0,50\text{rad/s}$ ($\approx 29^\circ/\text{s}$). Οι καμπύλες στα διαγράμματα βρίσκονται στα αρνητικά εξαιτίας του τρόπου πρόσδεσης του αισθητήρα και του εσωτερικού του συστήματος συνταγμένων και δεν αντιστοιχεί σε κάποιο φυσικό φαινόμενο.



Σχήμα 6.24: Διάγραμματα ροπής-χρόνου στην αριστερή στήλη και της αντίστοιχης γωνιακής ταχύτητας στην δεξιά).

Αντίστοιχα με τον υπολογισμό της μέσης δύναμης στα προηγούμενα, υπολογίστηκε και η μέση τιμή της ροπής που ασκείται. Έτσι είναι δυνατός ο προσδιορισμός του συντελεστή ροπής αντίστασης μέσω της Εξίσωσης (37). Τα αποτελέσματα για τα δύο πειράματα φαίνονται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6: Υπολογισμός συντελεστή ροπής.

ω [rad/s]	40	50
$\overline{T_z}$ [Nmm]	-11.472	-16.214
K_D	0.067	0.063

6.2.3 Προσδιορισμός Συντελεστή Προστιθέμενης Μάζας

Εκτός από τις υδροδυναμικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στο ρομποτικό ψάρι κατά την κίνηση του μέσα στον νερό με σταθερή ταχύτητα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζεται και στην επιταχυνόμενη κίνηση. Όπως αναπτύχθηκε και στο κεφάλαιο της θεωρίας των υδροδυναμικών δυνάμεων, σε μια τέτοια επιταχυνόμενη κίνηση, το ρομποτικό ψάρι επιταχύνει μαζί του και το νερό που το περιβάλλει. Επομένως, χρειάζεται επιπλέον δύναμη για την επιτάχυνση του ρομποτικού ψαριού από ότι θα χρειαζόταν για την επιτάχυνση του στο κενό.

Η δύναμη ισούται με μάζα επί επιτάχυνση. Επομένως η επιπλέον αυτή δύναμη που απαιτείται για την επιτάχυνση του νερού που περιβάλλει ακριβώς το ρομποτικό ψάρι, μπορεί να υποθεθεί σαν το γινόμενο της επιτάχυνσης επί μια φανταστική προστιθέμενη μάζα (added

mass). Η συνισταμένη αδρανειακή δύναμη λοιπόν που ασκείται στο ψάρι υπενθυμίζεται πως προκύπτει από την εξίσωση:

$$F_{inertial} = (m_{roboticfish} + m_{addedmass}) \cdot \dot{U} \quad (41)$$

Ο υπολογισμός του συντελεστή προστιθέμενης μάζας μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα μέσω της θεωρίας λεπτών σωμάτων (slender body theory), των παραγόντων του Lamb (Lamb's factors) [45], είτε προσεγγιστικά σαν ένα ποσοστό της συνολικής μάζας του σώματος που μελετάται (π.χ 10%-15%) είτε και πειραματικά (για γνωστά σχήματα σωμάτων υπάρχουν πειραματικές μετρήσεις στην βιβλιογραφία, π.χ. [24]).

Στην εργασία αυτή επιχειρήθηκε ο πειραματικός προσδιορισμός του συντελεστή αυτού. Ειδικότερα, πραγματοποιήθηκε ευθύγραμμη επιταχυνόμενη κίνηση του φορείου και του ρομποτικού ψαριού με παράλληλη καταγραφή της δύναμης από τον αισθητήρα ATI nano-17.

Η δύναμη που καταγράφηκε ουσιαστικά είναι το άθροισμα της οπισθέλκουσας και της αδρανειακής δύναμης. Δηλαδή:

$$F_{sensor} = (m_{roboticfish} + m_{addedmass}) \cdot \dot{U} + \frac{1}{2}\rho U^2 A_{cD} \quad (42)$$

Επιλύοντας την εξίσωση αυτή ως προς $m_{addedmass}$ προκύπτει:

$$m_{addedmass} = \frac{F_{sensor} - \frac{1}{2}\rho U^2 A_{cD}}{\dot{U}} - m_{roboticfish} \quad (43)$$

Από το προφίλ ταχύτητας της κίνησης που εφαρμόζεται σε κάθε πείραμα, η ταχύτητα και η επιτάχυνση είναι γνωστές για κάθε χρονική στιγμή, ενώ ο συντελεστής οπισθέλκουσας προκύπτει από τις προηγούμενες μετρήσεις. Συνεπώς, μπορεί να υπολογιστεί μια πειραματική τιμή του συντελεστή προστιθέμενης μάζας, όπως και έγινε στα πειράματα ευθύγραμμης κίνησης, χωρίς το σώμα του ψαριού να είναι υπό γωνία, στις ταχύτητες: 10cm/s, 15cm/s και 30cm/s.

Επομένως από τα σημεία που κατέγραψε ο αισθητήρας κατά την επιταχυνόμενη κίνηση (της οποίας η διάρκεια προσδιορίζεται όπως αναλύθηκε προηγουμένως) και σύμφωνα με την (43), προκύπτουν οι τιμές της προστιθέμενης μάζας κάθε χρονική στιγμή. Η μέση τιμή της προστιθέμενης μάζας υπολογίστηκε και παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 7: Πειραματικός Προσδιορισμός Προστιθέμενης μάζας κατά την επιτάχυνση του ψαριού υπό μηδενική γωνία.

ταχύτητα πρόωσης [cm/sec]	προστιθέμενη μάζα [kg]	ποσοστό επί συνολικού βάρους
10	0.150	17.04%
15	0.129	14.66%
30	0.139	15.80%

Τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα δείχνουν πως ο εμπειρικός προσεγγιστικός κανόνας πως η προστιθέμενη μάζα κυμαίνεται στο 10%-15% του συνολικού βάρους κρίνεται σχετικά ικανοποιητικός. Εδώ να σημειωθεί πως εξαιτίας περιορισμών στην εκτέλεση των πειραμάτων (το σχετικά μικρό μήκος του καλωδίου του αισθητήρα σε συνδυασμό με το δεδομένο μήκος της δεξαμενής νερού) δεν επέτρεπαν να διεξαχθούν πειράματα με μεγάλο χρονικό διάστημα επιτάχυνσης και έτσι τα πειραματικά δεδομένα που καταγράφησαν από τον αισθητήρα δεν ήταν πολλά σε πλήθος.

7 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

7.1 Συμπεράσματα

Η εργασία αυτή αποσκοπούσε πρωταρχικά στον πειραματικό προσδιορισμό βασικών υδροδυναμικών παραμέτρων, όπως η οπισθέλκουσα και η άνωση και δευτερεύον στον σχεδιασμό ενός νέου σώματος για το ρομποτικό ψάρι.

Όσον αφορά την πειραματική διαδικασία, όπως αυτή αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 2, πραγματοποιήθηκε μέσω της ύπαρξης εξωτερικού αισθητήρα δύναμης και ενός φορείου ρυμούλκησης, του οποίου η κίνηση ελέγχθηκε με την χρήση του Beaglebone. Σχετικά με το τεχνικό κομμάτι, η υλοποίηση του ελέγχου πραγματοποιήθηκε επιτυχώς και μάλιστα με την απαίτηση Real Time συστήματος αφού η συχνότητα υλοποίησης του βρόγχου ελέγχου ήταν περίπου στο $1kHz$.

Συμπεράσματα όμως εξάγονται και για τα αποτελέσματα των αδιάστατων συντελεστών που προσδιορίστηκαν (οπισθέλκουσας, άνωσης και ροπής αντίστασης). Όπως φάνηκε, για τον συντελεστή οπισθέλκουσας που προέκυψε για το πείραμα της ευθύγραμμης κίνησης του ψαριού, χωρίς γωνία μεταξύ του διανύσματος της ταχύτητας και της διεύθυνσης του διαμήκη άξονα του, τα αποτελέσματα κρίνονται ικανοποιητικά σε σύγκριση με τις τιμές που προκύπτουν από την βιβλιογραφία για παρεμφερή σχήματα και όπως φάνηκε ικανοποιούν την μορφή της καμπύλης $c_D - Re$ που αναμενόταν (βλ. περιοχή του Σχήματος 6.17), αφού προέκυψαν τιμές περίπου σταθερές.

Στα πειράματα που αφορούσαν την ευθύγραμμη κίνηση υπό γωνία του σώματος ως προς το διάνυσμα της ταχύτητας κίνησης, τα αποτελέσματα ως προς την συμπεριφορά τους κρίνονται αναμενόμενα (μεγαλύτερη γωνία τοποθέτησης του ψαριού επέφερε και αύξηση τόσο στον συντελεστή οπισθέλκουσας όσο και σε αυτόν της άνωσης (και στις αντίστοιχες δυνάμεις). Ωστόσο, ειδικά για την γωνία των 40° , όπου είναι πιθανή η εμφάνιση αποκόλλησης της ροής, η τιμή των συντελεστών δεν μπορεί να κριθεί με ασφάλεια αφού όπως αναφέρθηκε αναμένεται αποκόλληση οριακού στρώματος, οπότε και η χρήση της εξίσωσης (33) δεν ενδείκνυται αφού πλέον τα φαινόμενα που επικρατούν και περιγράφουν την ροή είναι αρκετά πιο σύνθετα.

Τα πειράματα που αφορούσαν τον προσδιορισμό του συντελεστή ροπής αντίστασης έδειξαν πως η αύξηση της ταχύτητας επέφερε αναμενόμενη αύξηση της ροπής αντίστασης. Ωστόσο, ο αδιάστατος συντελεστής ροπής μειώθηκε. Πιθανότατα, η ταχύτητα περιστροφής ήταν αρκετά μεγάλη με αποτέλεσμα η ροή να γίνεται πολύπλοκη και να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (35).

Σχετικά με τον συντελεστή προστιθέμενης μάζας, όπως φάνηκε κυμαίνεται εντός των πλαισίων που θέτει ο εμπειρικός κανόνας πως κυμαίνεται μεταξύ 10-15%. Ωστόσο για τους περιορισμούς που αναφέρθηκαν και που περιόριζαν την λήψη περισσότερων δεδομένων προτείνεται η αύξηση της δειγματοληψίας του αισθητήρα, αλλά και η εκτέλεση προφίλ ταχύτητας κίνησης με μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα επιτάχυνσης.

Όσον αφορά τον σχεδιασμό του νέου σώματος από την διαδικασία αναζήτησης λύσεων (brainstorming) μέχρι και τον τελικό σχεδιασμό, τα συμπεράσματα που εξήχθησαν αφορούσαν την δυσκολία επίτευξης στεγάνωσης όταν αυξάνεται ο αριθμός των ανεξάρτητων τμημάτων, τα οποία όμως πρέπει να επιτρέπουν την επικοινωνία των διάφορων τμημάτων μέσω αναγκαίων καλωδίων μεταφοράς σημάτων. Επίσης, προκειμένου την χρήση 3d printer για το εξωτερικό περίβλημα, υπήρξε ανάγκη επανασχεδιασμού (που πραγματοποιήθηκε) έτσι ώστε να επιτευχθεί εξοικονόμηση υλικού, αλλά και να μπορεί να κατασκευαστεί από τον 3d printer χωρίς πρόβλημα στην στήριξη του κατά την διαδικασία κατασκευής του.

7.2 Μελλοντική Εργασία

Με βάση τα συμπεράσματα που αναπτύχθηκαν και εστιάζοντας ιδιαίτερα σε αυτά που δεν συμβάδιζαν με τις απαιτήσεις που είχαν τεθεί, προτείνονται κάποιες βελτιώσεις που θα μπορούσαν να αποτελέσουν μέρος μελλοντικής εργασίας με στόχο την περαιτέρω βελτίωση τόσο της πειραματικής διαδικασίας όσο και του υπό κατασκευή νέου ρομποτικού ψαριού.

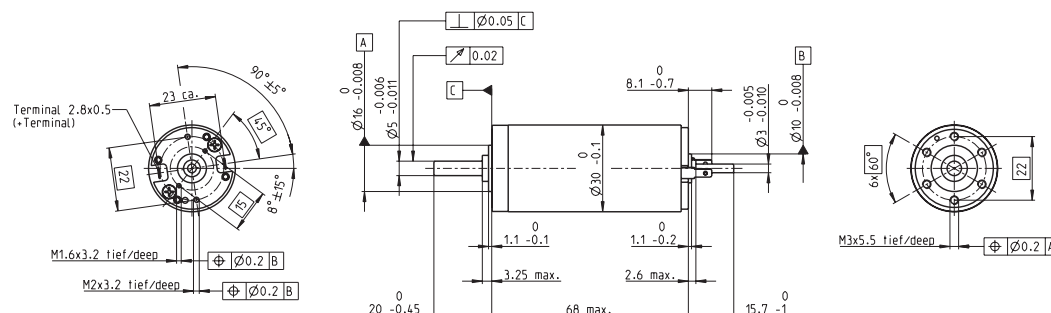
- Όσον αφορά το Beaglebone, θα ήταν χρήσιμο να υλοποιεί τον έλεγχο και των τριών κινητήρων του φορείου ταυτόχρονα και συγχρονισμένα για την παραγωγή οποιασδήποτε κίνησης στο επίπεδο. Ωστόσο, πέρα από τον συγχρονισμό που λείπει (αφού έλεγχος ξεχωριστά για κάθε κινητήρα είναι εφικτός ήδη) θα πρέπει να λυθεί και το πρόβλημα πως ο κινητήρας που σχετίζεται με την περιστροφή γύρω από τον Z άξονα κινείται μαζί με το φορείο και συνεπώς μάλλον θα χρειαστεί να τοποθετηθεί επιπλέον μικρουπολογιστής πάνω στο ίδιο το φορείο.
- Επίσης η πλακέτα των ηλεκτρονικών θα ήταν καλύτερο να μην είναι πλέον σε πλακέτα διασύνδεσης χωρίς κολλήσεις (breadboard), αλλά να κατασκευαστεί μια πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (Printed Circuit Board - PCB), αφού έτσι θα εξασφαλιστεί μεγαλύτερη σταθερότητα και ακρίβεια των συνδέσεων των στοιχείων, ενώ και θα μειωθεί και ο όγκος της πλακέτας.
- Σχετικά με τα πειράματα προσδιορισμού των υδροδυναμικών παραμέτρων, προτείνεται:
 - Επανάληψη των πειραμάτων υπό μηδενική γωνία μεταξύ του σώματος του ρομπότ και της ταχύτητας, σε περισσότερες ταχύτητες. Με αυτόν τον τρόπο το δείγμα των μετρήσεων θα γίνει πιο αξιόπιστο.
 - Για τα ίδια πειράματα, αλλά και για αυτά που το ρομποτικό ψάρι βρίσκεται υπό γωνία με την διεύθυνση της ταχύτητας, η συγκράτηση του ψαριού στην επιθυμητή γωνία, προτείνεται να υλοποιείται πλέον με την βοήθεια του κινητήρα που βρίσκεται πάνω στο φορείο και όχι με μηχανικό τρόπο, αυξάνοντας έτσι την ακρίβεια.
 - Για την περιστροφική κίνηση του ψαριού, προτείνεται η επανάληψη των πειραμάτων σε μεγαλύτερο εύρος ταχυτήτων αφού όπως φάνηκε σε υψηλές ταχύτητες τα αποτελέσματα δεν κρίθηκαν ιδιαίτερα ικανοποιητικά.
 - Σχετικά με την προστιθέμενη μάζα, προτείνεται διεξαγωγή επιπλέον πειραμάτων με μεγαλύτερη διανυόμενη απόσταση υπό επιτάχυνση προκειμένου να ληφθούν περισσότερα πειραματικά δεδομένα από τον αισθητήρα, ώστε να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα.
- Στο σχεδιαστικό κομμάτι, η κατασκευή του σχεδίου είναι ένας από τους άμεσους στόχους. Ωστόσο, προτείνεται και ο σχεδιασμός και η κατασκευή και καινούριας ουράς, καθώς μερικά από τα προβλήματα που εμφανίστηκαν στο κυρίως σώμα λόγω φθοράς, κάνουν την εμφάνισή τους και στο τμήμα αυτό. Έτσι εάν η κατασκευή με τον 3d printer αποδειχτεί ικανοποιητική λύση σε θέματα κυρίως στεγανότητας θα μπορούσε να επανασχεδιαστεί ολόκληρο το ρομπότ, εφόσον πλέον δεν υπάρχει περιορισμός και για την διατήρηση παλιών τμημάτων του ρομπότ, ώστε να αποκτήσει υδροδυναμικό σχήμα που να προσομοιώνει αυτό ενός ψαριού. Βοηθητικά θα μπορούσαν δηλαδή να χρησιμοποιηθούν τα τρισδιάστατα μοντέλα και από αληθινά ψάρια που έχουν σαρωθεί με κατάλληλους scanners [46].

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Στο παρόν παράρτημα παρατίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά από τα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν, το τεχνικό φυλλάδιο του Beaglebone και ο οδηγός χρήσης του Starterware.

Datasheet Κινητήρα Υ Αξονα

RE 30 Ø30 mm, Graphite Brushes, 60 Watt



M 1:2

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

Part Numbers

according to dimensional drawing
shaft length 15.7 shortened to 8.7 mm

310005	310006	310007	310008	310009
268193	268213	268214	268215	268216

Motor Data

Values at nominal voltage		12	18	24	36	48
1 Nominal voltage	V	12	18	24	36	48
2 No load speed	rpm	8170	8590	8810	8590	8490
3 No load current	mA	301	213	165	106	78.6
4 Nominal speed	rpm	7630	7910	8050	7840	7760
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	51.6	75.5	85.6	86.6	89.7
6 Nominal current (max. continuous current)	A	4	4	3.47	2.28	1.74
7 Stall torque	mNm	852	1000	1020	1000	1050
8 Starting current	A	61.1	50.3	39.3	25.2	19.6
9 Max. efficiency	%	85	87	87	87	88
Characteristics						
10 Terminal resistance	Ω	0.196	0.358	0.611	1.43	2.45
11 Terminal inductance	mH	0.0345	0.0703	0.119	0.281	0.513
12 Torque constant	mNm/A	13.9	19.9	25.9	39.8	53.8
13 Speed constant	rpm/V	685	479	369	240	178
14 Speed / torque gradient	rpm/mNm	9.64	8.61	8.69	8.61	8.09
15 Mechanical time constant	ms	3.4	3.24	3.05	2.98	2.94
16 Rotor inertia	gcm ²	33.7	35.9	33.5	33.1	34.7

Specifications

Thermal data	
17 Thermal resistance housing-ambient	6.0 K/W
18 Thermal resistance winding-housing	1.7 K/W
19 Thermal time constant winding	16.3 s
20 Thermal time constant motor	525 s
21 Ambient temperature	-30...+100°C
22 Max. permissible winding temperature	+125°C
Mechanical data (ball bearings)	
23 Max. permissible speed	12000 rpm
24 Axial play	0.05 - 0.15 mm
25 Radial play	0.025 mm
26 Max. axial load (dynamic)	5.6 N
27 Max. force for press fits (static) (static, shaft supported)	110 N
28 Max. radial loading, 5 mm from flange	1200 N

Other specifications

29 Number of pole pairs	1
30 Number of commutator segments	13
31 Weight of motor	260 g

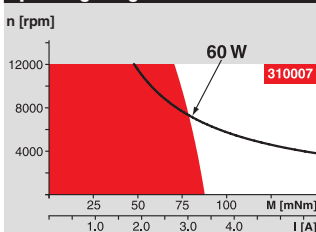
Values listed in the table are nominal.
Explanation of the figures on page 71.

△ Tolerances may vary from the standard specification.

Option

Preloaded ball bearings

Operating Range



Comments

- Continuous operation**
In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.
= Thermal limit.
- Short term operation**
The motor may be briefly overloaded (recurring).
- Assigned power rating**

maxon Modular System

Overview on page 20 - 25

Planetary Gearhead

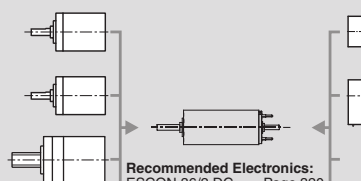
Ø32 mm
0.75 - 6.0 Nm
Page 259-265

Koaxdrive

Ø32 mm
1.0 - 4.5 Nm
Page 268

Spindle Drive

Ø32 mm
Page 286-288



Recommended Electronics:

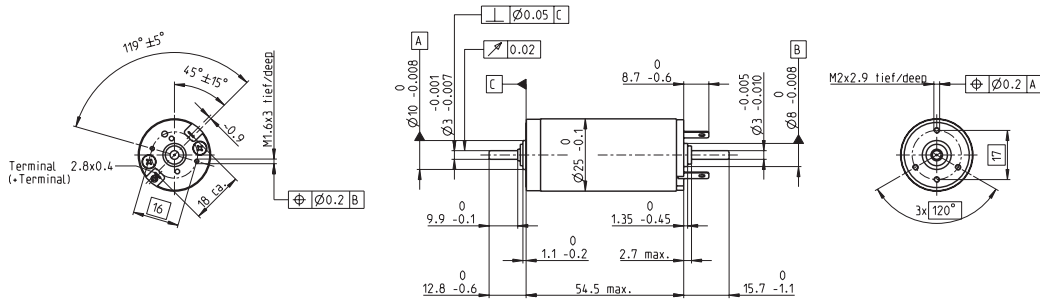
ESCON 36/2 DC	Page 320
ESCON 50/5, Module 50/5	321
ESCON 70/10	321
EPOS2 Module 36/2	330
EPOS2 24/5	331
EPOS2 50/5	331
EPOS2 P 24/5	334
EPOS3 70/10 EtherCAT	337
Notes	22

Encoder MR
256 - 1024 CPT,
3 channels
Page 303

Encoder HED_ 5540
500 CPT,
3 channels
Page 305/309

Datasheet Κινητήρα X Άξονα

RE 25 Ø25 mm, Graphite Brushes, 20 Watt



M 1:2

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

Part Numbers

according to dimensional drawing
shaft length 15.7 shortened to 4 mm

118749	118750	118751	118752	118753	118754	118755	118756	118757
302002	302003	302004	302005	302006	302007	302001	302008	302009

Motor Data		9	15	18	24	30	42	48	48	48
Values at nominal voltage										
1 Nominal voltage	V	9	15	18	24	30	42	48	48	48
2 No load speed	rpm	10000	9660	10200	9560	9860	11100	10300	8240	5050
3 No load current	mA	110	60.8	53.9	36.9	30.5	25.2	20.1	15.2	8.52
4 Nominal speed	rpm	8970	8430	8850	8330	8640	9920	9160	7040	3830
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	11.1	20.5	22.9	26.3	26.7	27.1	27.7	28.7	30
6 Nominal current (max. continuous current)	A	1.5	1.5	1.46	1.16	0.968	0.784	0.653	0.536	0.343
7 Stall torque	mNm	232	225	220	243	249	283	264	209	129
8 Starting current	A	29.1	15.8	13.5	10.4	8.72	7.94	6.03	3.81	1.44
9 Max. efficiency	%	76	82	83	85	86	87	87	86	84
Characteristics										
10 Terminal resistance	Ω	0.309	0.952	1.33	2.32	3.44	5.29	7.96	12.6	33.4
11 Terminal inductance	mH	0.0275	0.0882	0.115	0.238	0.353	0.551	0.832	1.31	3.48
12 Torque constant	mNm/A	7.96	14.3	16.3	23.4	28.5	35.6	43.8	55	89.6
13 Speed constant	rpm/V	1200	670	586	408	335	268	218	174	107
14 Speed / torque gradient	rpm/mNm	46.5	44.7	48	40.3	40.4	39.8	39.6	39.8	39.7
15 Mechanical time constant	ms	5.68	4.87	4.77	4.55	4.47	4.4	4.37	4.37	4.35
16 Rotor inertia	gcm ²	11.7	10.4	9.49	10.8	10.6	10.6	10.5	10.5	10.5

Specifications

Thermal data

- 17 Thermal resistance housing-ambient: 14 K/W
- 18 Thermal resistance winding-housing: 3.1 K/W
- 19 Thermal time constant winding: 12.5 s
- 20 Thermal time constant motor: 612 s
- 21 Ambient temperature: -30...+100°C
- 22 Max. permissible winding temperature: +125°C

Mechanical data (ball bearings)

- 23 Max. permissible speed: 14000 rpm
- 24 Axial play: 0.05 - 0.15 mm
- 25 Radial play: 0.025 mm
- 26 Max. axial load (dynamic): 3.2 N
- 27 Max. force for press fits (static) (static, shaft supported): 64 N
- 28 Max. radial loading, 5 mm from flange: 800 N

Other specifications

- 29 Number of pole pairs: 1
- 30 Number of commutator segments: 11
- 31 Weight of motor: 130 g

Values listed in the table are nominal. Explanation of the figures on page 71.

Option
Preloaded ball bearings

Operating Range

Comments

- Continuous operation**
In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.
= Thermal limit.
- Short term operation**
The motor may be briefly overloaded (recurring).
- Assigned power rating**

maxon Modular System

Overview on page 20 - 25

- Planetary Gearhead**
Ø26 mm
0.75 - 4.5 Nm
Page 257
- Planetary Gearhead**
Ø32 mm
0.75 - 6.0 Nm
Page 259/260/263
- Koaxdrive**
Ø32 mm
1.0 - 4.5 Nm
Page 268
- Spindle Drive**
Ø32 mm
Page 286-288

Recommended Electronics:

- ESCON 36/2 DC Page 320
- ESCON 50/5, Module 50/5 321
- ESCON 70/10 321
- EPOS2 24/2 330
- EPOS2 Module 36/2 330
- EPOS2 24/5 331
- EPOS2 50/5 331
- EPOS2 P 24/5 334
- EPOS3 70/10 EtherCAT 337

Notes
22

June 2013 edition / subject to change

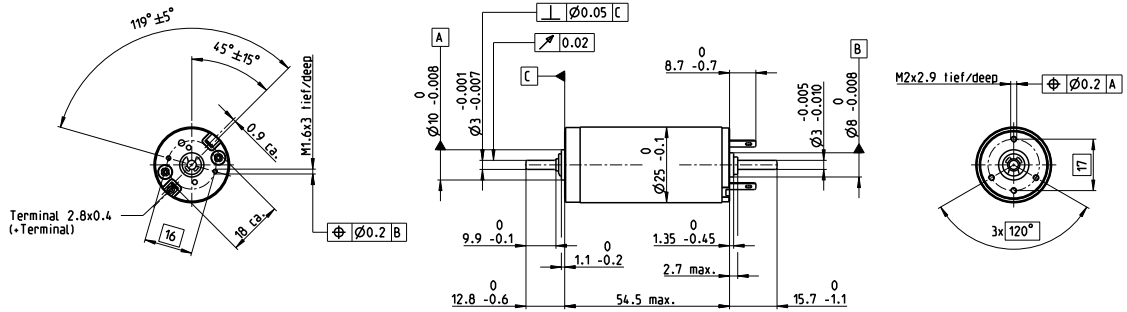
maxon DC motor

maxon DC motor 101

Datasheet Κινητήρα Z Άξονα

RE 25 Ø25 mm, Precious Metal Brushes CLL, 10 Watt

maxon RE motor



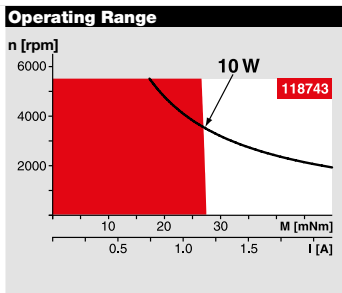
M 1:2

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

Part Numbers								
118740	118741	118742	118743	118744	118745	118746	118747	118748

Motor Data											
Values at nominal voltage											
1	Nominal voltage	V	4.5	8	9	12	15	18	24	32	48
2	No load speed	rpm	5360	5320	5230	4850	4980	4790	5190	5510	5070
3	No load current	mA	79.7	44.4	38.7	26.3	21.8	9.88	14.4	11.7	6.96
4	Nominal speed	rpm	4980	4520	4220	3800	3920	3710	4130	4450	4000
5	Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	11.4	20.9	23.9	28.6	28.2	28.7	28	27.9	27.9
6	Nominal current (max. continuous current)	A	1.5	1.5	1.5	1.24	1.01	0.811	0.652	0.516	0.317
7	Stall torque	mNm	131	132	119	129	131	126	136	144	132
8	Stall current	A	16.5	9.23	7.31	5.5	4.57	3.52	3.1	2.61	1.47
9	Max. efficiency	%	87	87	86	87	87	90	87	87	87
Characteristics											
10	Terminal resistance	Ω	0.273	0.867	1.23	2.18	3.28	5.11	7.73	12.3	32.6
11	Terminal inductance	mH	0.0275	0.0882	0.115	0.238	0.353	0.551	0.832	1.31	3.48
12	Torque constant	mNm/A	7.99	14.3	16.3	23.5	28.6	35.8	43.9	55.2	89.9
13	Speed constant	rpm/V	1200	668	584	406	334	267	217	173	106
14	Speed / torque gradient	rpm/mNm	40.9	40.5	44	37.7	38.3	38.2	38.3	38.5	38.6
15	Mechanical time constant	ms	4.99	4.4	4.37	4.25	4.23	4.22	4.22	4.22	4.23
16	Rotor inertia	gcm ²	11.7	10.4	9.49	10.8	10.6	10.6	10.5	10.5	10.5

Specifications	
Thermal data	
17 Thermal resistance housing-ambient	14 K/W
18 Thermal resistance winding-housing	3.1 K/W
19 Thermal time constant winding	12.5 s
20 Thermal time constant motor	612 s
21 Ambient temperature	-20...+85°C
22 Max. winding temperature	+100°C
Mechanical data (ball bearings)	
23 Max. speed	5500 rpm
24 Axial play	0.05 - 0.15 mm
25 Radial play	0.025 mm
26 Max. axial load (dynamic)	3.2 N
27 Max. force for press fits (static) (static, shaft supported)	64 N
28 Max. radial load, 5 mm from flange	800 N



Comments	
	Continuous operation In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient. = Thermal limit.
	Short term operation The motor may be briefly overloaded (recurring).
	Assigned power rating

Other specifications	
29 Number of pole pairs	1
30 Number of commutator segments	11
31 Weight of motor	130 g
CLL = Capacitor Long Life	
Values listed in the table are nominal. Explanation of the figures on page 64.	
Option	
Preloaded ball bearings	

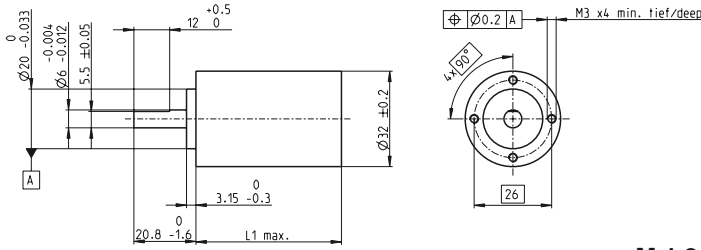
maxon Modular System		Overview on page 28-36
Planetary Gearhead Ø26 mm 0.75 - 4.5 Nm Page 332		Encoder MR 128 - 1000 CPT, 3 channels Page 404
Planetary Gearhead Ø32 mm 0.75 - 6.0 Nm Page 334/335/338	Recommended Electronics: Notes Page 30	Encoder Enc 22 mm 100 CPT, 2 channels Page 411
Koaxdrive Ø32 mm 1.0 - 4.5 Nm Page 343	ESCON Module 24/2 426 ESCON 36/2 DC 426 ESCON Module 50/5 427 ESCON 50/5 428 EPOS2 24/2 434 EPOS2 Module 36/2 434 EPOS2 50/5 435	Encoder HED_5540 500 CPT, 3 channels Page 413/415
Spindle Drive Ø32 mm Page 366-368	EPOS4 Mod./CB 24/1.5 441 EPOS4 Module/CB 50/5 442 MAXPOS 50/5 447	DC-Tacho DCT Ø22 mm 0.52 V Page 421

Πλανητικός Μειωτήρας Κινητήρων X,Y

Planetary Gearhead GP 32 BZ Ø32 mm, 0.75–4.5 Nm

Low Backlash

maxon gear



Technical Data

Planetary Gearhead	straight teeth
Output shaft	stainless steel, hardened
Bearing at output	ball bearing
Radial play, 5 mm from flange	max. 0.1 mm
Axial play	max. 0.7 mm
Max. permissible axial load	120 N
Max. permissible force for press fits	120 N
Sense of rotation, drive to output	=
Recommended input speed	< 4000 rpm
Recommended temperature range	-40...+100°C
Number of stages	1 2 3
Max. radial load, 12 mm from flange	70 N 140 N 210 N

M 1:2

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

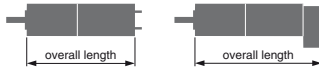
Article Numbers

358975	351942	358331	357988	358335	358385	358512	358513	358515	358516
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Gearhead Data

		358975	351942	358331	357988	358335	358385	358512	358513	358515	358516
1 Reduction		3.7 : 1	5.2 : 1	19 : 1	27 : 1	35 : 1	71 : 1	100 : 1	139 : 1	181 : 1	236 : 1
2 Reduction absolute		<small>63/17</small>	<small>57/11</small>	<small>3591/187</small>	<small>3249/121</small>	<small>1539/44</small>	<small>226233/3179</small>	<small>204687/2057</small>	<small>185193/1331</small>	<small>87723/484</small>	<small>41533/176</small>
3 Max. motor shaft diameter	mm	5.5	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4 Number of stages		1	1	2	2	2	3	3	3	3	3
5 Max. continuous torque	Nm	0.75	0.75	2.25	2.25	2.25	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Max. continuous torque within the preloading	Nm	0.5	0.5	1.1	1.1	1.1	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
6 Intermittently permissible torque at gear output	Nm	1.1	1.1	3.2	3.2	3.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
7 Max. efficiency	%	85	85	80	80	80	70	70	70	70	70
8 Weight	g	150	150	190	190	190	240	240	240	240	240
9 Average backlash no load	°	0.15	0.15	0.35	0.35	0.35	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
10 Mass inertia	gcm ²	1.25	1.25	0.75	0.75	0.75	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
11 Gearhead length L1*	mm	33.5	33.5	43.6	43.6	43.6	53.1	53.1	53.1	53.1	53.1

*for EC 32 L1 is + 6.4 mm, for RE 30 L1 is + 1.0 mm

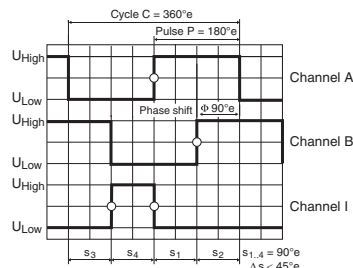


maxon Modular System

+ Motor	Page	+ Sensor/Brake	Page	Overall length [mm] = Motor length + gearhead length + (sensor/brake) + assembly parts								
RE 25	77/79			88.1	88.1	98.2	98.2	107.7	107.7	107.7	107.7	
RE 25	77/79	MR	272	99.1	99.1	109.2	109.2	118.7	118.7	118.7	118.7	
RE 25	77/79	Enc 22	274	102.2	102.2	112.3	112.3	121.8	121.8	121.8	121.8	
RE 25	77/79	HED_5540	276/278	108.9	108.9	119.0	119.0	128.5	128.5	128.5	128.5	
RE 25	77/79	DCT 22	286	110.4	110.4	120.5	120.5	130.0	130.0	130.0	130.0	
RE 25, 20 W	78			76.6	76.6	86.7	86.7	96.2	96.2	96.2	96.2	
RE 25, 20 W	78	MR	272	87.6	87.6	97.7	97.7	107.2	107.2	107.2	107.2	
RE 25, 20 W	78	HED_5540	277/280	97.4	97.4	107.5	107.5	117.0	117.0	117.0	117.0	
RE 25, 20 W	78	DCT 22	286	98.9	98.9	109.0	109.0	118.5	118.5	118.5	118.5	
RE 25, 20 W	78	AB 28	330	110.7	110.7	120.8	120.8	130.3	130.3	130.3	130.3	
RE 25, 20 W	78	HED_5540 / AB 28	277/330	127.9	127.9	138.0	138.0	147.5	147.5	147.5	147.5	
RE 25, 20 W	79	AB 28	330	122.2	122.2	132.3	132.3	141.8	141.8	141.8	141.8	
RE 25, 20 W	79	HED_5540 / AB 28	276/330	139.4	139.4	149.5	149.5	159.0	159.0	159.0	159.0	
RE 30, 60 W	80			102.6	102.6	112.7	112.7	122.2	122.2	122.2	122.2	
RE 30, 60 W	80	MR	273	114.0	114.0	124.1	124.1	133.6	133.6	133.6	133.6	
RE 35, 90 W	81			104.6	104.6	114.7	114.7	124.2	124.2	124.2	124.2	
RE 35, 90 W	81	MR	273	116.0	116.0	126.1	126.1	135.6	135.6	135.6	135.6	
RE 35, 90 W	81	HED_5540	276/278	125.3	125.3	135.4	135.4	144.9	144.9	144.9	144.9	
RE 35, 90 W	81	DCT 22	286	122.7	122.7	132.8	132.8	142.3	142.3	142.3	142.3	
RE 35, 90 W	81	AB 28	330	140.7	140.7	150.8	150.8	160.3	160.3	160.3	160.3	
RE 35, 90 W	81	HEDS 5540 / AB 28	276/330	157.9	157.9	168.0	168.0	177.5	177.5	177.5	177.5	
A-max 26	101-108			78.3	78.3	88.4	88.4	97.9	97.9	97.9	97.9	
A-max 26	101-107	MEnc 13	285	85.4	85.4	95.5	95.5	105.0	105.0	105.0	105.0	
A-max 26	102-108	MR	272	87.1	87.1	97.2	97.2	106.7	106.7	106.7	106.7	
A-max 26	102-108	Enc 22	275	92.7	92.7	102.8	102.8	112.3	112.3	112.3	112.3	
A-max 26	102-108	HED_5540	277/278	96.7	96.7	106.8	106.8	116.3	116.3	116.3	116.3	
A-max 32	109/111			96.5	96.5	106.6	106.6	116.1	116.1	116.1	116.1	
A-max 32	110/112			95.1	95.1	105.2	105.2	114.7	114.7	114.7	114.7	
A-max 32	110/112	MR	273	106.3	106.3	116.4	116.4	125.9	125.9	125.9	125.9	
A-max 32	110/112	HED_5540	277/278	115.9	115.9	126.0	126.0	135.5	135.5	135.5	135.5	
EC 32, 80 W	156			100.2	100.2	110.3	110.3	119.8	119.8	119.8	119.8	
EC 32, 80 W	156	HED_5540	277/279	118.6	118.6	128.7	128.7	138.2	138.2	138.2	138.2	
EC 32, 80 W	156	Res 26	287	120.3	120.3	130.4	130.4	139.9	139.9	139.9	139.9	
MCD EPOS, 60 W	325			153.6	153.6	163.7	163.7	173.2	173.2	173.2	173.2	
MCD EPOS P, 60 W	325			153.6	153.6	163.7	163.7	173.2	173.2	173.2	173.2	

Αυξητική Παλμογεννήτρια Κινητήρα Υ Άξονα

Encoder MR Type L, 256–1024 CPT, 3 Channels, with Line Driver



Direction of rotation cw (definition cw p. 70)

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

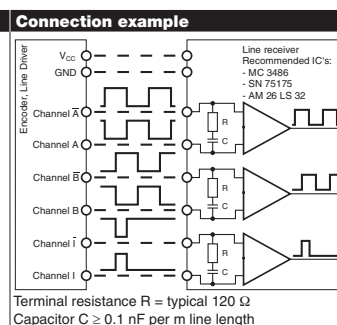
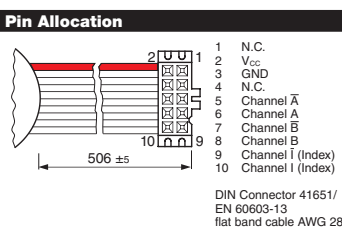
Part Numbers				
225783	228452	225785	228456	225787

Type	225783	228452	225785	228456	225787
Counts per turn	256	500	512	1000	1024
Number of channels	3	3	3	3	3
Max. operating frequency (kHz)	80	200	160	200	320
Max. speed (rpm)	18750	24000	18750	12000	18750



maxon Modular System						
+ Motor	Page	+ Gearhead	Page	+ Brake	Page	Overall length [mm] / ● see Gearhead
RE 30, 15 W	102					79.4
RE 30, 15 W	102	GP 32, 0.75 - 4.5 Nm	261			●
RE 30, 60 W	103					79.4
RE 30, 60 W	103	GP 32, 0.75 - 4.5 Nm	259			●
RE 30, 60 W	103	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	261-265			●
RE 30, 60 W	103	GP 32 S	286-288			●
RE 35, 90 W	104					82.4
RE 35, 90 W	104	GP 32, 0.75 - 4.5 Nm	259			●
RE 35, 90 W	104	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	261-265			●
RE 35, 90 W	104	GP 32, 4.0 - 8.0 Nm	266			●
RE 35, 90 W	104	GP 42, 3 - 15 Nm	270			●
RE 35, 90 W	104	GP 32 S	286-288			●
RE 40, 150 W	105					82.4
RE 40, 150 W	105	GP 42, 3 - 15 Nm	270			●
RE 40, 150 W	105	GP 52, 4 - 30 Nm	273			●
A-max 32	134/136					72.7
A-max 32	134/136	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	261-265			●
A-max 32	134/136	GS 38, 0.1 - 0.6 Nm	269			●
A-max 32	134/136	GP 32 S	286-288			●
EC-max 40, 70 W	194					73.9
EC-max 40, 70 W	194	GP 42, 3 - 15 Nm	271			●
EC-max 40, 120 W	195					103.9
EC-max 40, 120 W	195	GP 52, 4 - 30 Nm	274			●
EC-i 40, 50 W	216					41.9
EC-i 40, 50 W	216	GP 32, 1 - 6 Nm	264			●
EC-i 40, 50 W	216	GP 32 S	286-288			●
EC-i 40, 70 W	217					51.9
EC-i 40, 70 W	217	GP 32, 1 - 6 Nm	264			●
EC-i 40, 70 W	217	GP 32 S	286-288			●

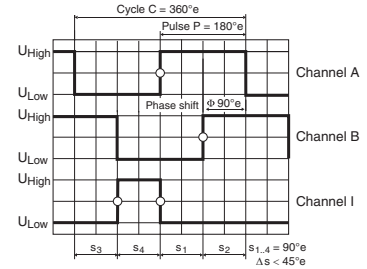
Technical Data	
Supply voltage V_{CC}	5 V \pm 5%
Output signal	TTL compatible
Phase shift ϕ	90° \pm 45°
Index pulse width	90° \pm 45°
Operating temperature range	-25...+85°C
Moment of inertia of code wheel	\leq 1.7 gcm ²
Output current per channel	max. 5 mA



Αυξητική Παλμογεννήτρια Κινητήρα Χ και Ζ Άξονα

maxon sensor

Encoder MR Type ML, 128–1000 CPT, 3 Channels, with Line Driver



Direction of rotation cw (definition cw p. 70)

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

Part Numbers

225771	225773	225778	225805	225780
--------	--------	--------	--------	--------

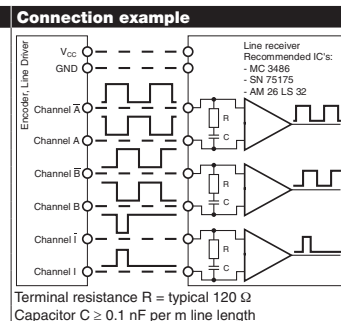
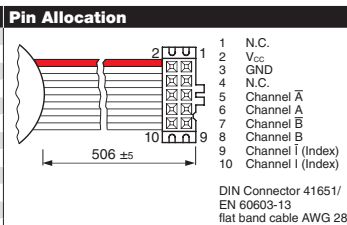
Type	225771	225773	225778	225805	225780
Counts per turn	128	256	500	512	1000
Number of channels	3	3	3	3	3
Max. operating frequency (kHz)	80	160	200	320	200
Max. speed (rpm)	37500	37500	24000	37500	12000



maxon Modular System

+ Motor	Page	+ Gearhead	Page	+ Brake	Page	Overall length [mm] / ● see Gearhead				
RE 25	99/101					65.5	65.5	65.5	65.5	65.5
RE 25	99/101	GP 26, 0.75 - 2.0 Nm	257			●	●	●	●	●
RE 25	99/101	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	259-264			●	●	●	●	●
RE 25	99/101	KD 32, 1.0 - 4.5 Nm	268			●	●	●	●	●
RE 25	99/101	GP 32 S	286-288			●	●	●	●	●
RE 25, 20 W	100					54.0	54.0	54.0	54.0	54.0
RE 25, 20 W	100	GP 26, 0.75 - 2.0 Nm	257			●	●	●	●	●
RE 25, 20 W	100	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	259-264			●	●	●	●	●
RE 25, 20 W	100	KD 32, 1.0 - 4.5 Nm	268			●	●	●	●	●
RE 25, 20 W	100	GP 32 S	286-288			●	●	●	●	●
A-max 26	126-132					53.5	53.5	53.5	53.5	53.5
A-max 26	126-132	GP 26, 0.75 - 4.5 Nm	257			●	●	●	●	●
A-max 26	126-132	GS 30, 0.07 - 0.2 Nm	258			●	●	●	●	●
A-max 26	126-132	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	259-264			●	●	●	●	●
A-max 26	126-132	GS 38, 0.1 - 0.6 Nm	269			●	●	●	●	●
A-max 26	126-132	GP 32 S	286-288			●	●	●	●	●
RE-max 29	155-158					53.5	53.5	53.5	53.5	53.5
RE-max 29	155-158	GP 32, 0.75 - 6.0 Nm	260-264			●	●	●	●	●
RE-max 29	155-158	GP 32 S	286-288			●	●	●	●	●
EC-max 30, 40 W	192							54.2		54.2
EC-max 30, 40 W	192	GP 32, 1 - 8.0 Nm	264/266					●		●
EC-max 30, 40 W	192	KD 32, 1.0 - 4.5 Nm	268					●		●
EC-max 30, 40 W	192	GP 32 S	286-288					●		●
EC-max 30, 60 W	193							76.2		76.2
EC-max 30, 60 W	193	GP 32, 8 Nm	266					●		●
EC-max 30, 60 W	193	KD 32, 1.0 - 4.5 Nm	268					●		●
EC-max 30, 60 W	193	GP 42, 3 - 15 Nm	271					●		●
EC-4pole 30	201							59.2		59.2
EC-4pole 30	201	GP 32, 4.0 - 8.0 Nm	266					●		●
EC-4pole 30	201	GP 42, 3 - 15 Nm	271					●		●
EC-4pole 30	202							76.2		76.2
EC-4pole 30	202	GP 32, 4.0 - 8.0 Nm	266					●		●
EC-4pole 30	202	GP 42, 3 - 15 Nm	271					●		●

Technical Data	
Supply voltage V_{CC}	5 V \pm 5%
Output signal	TTL compatible
Phase shift Φ	90° \pm 45°
Index pulse width	90° \pm 45°
Operating temperature range	-25...+85°C
Moment of inertia of code wheel	\leq 0.7 gcm ²
Output current per channel	max. 5 mA
The index signal I is synchronised with channel A or B.	





AM3359, AM3358, AM3357
AM3356, AM3354, AM3352

www.ti.com

SPRS717F – OCTOBER 2011 – REVISED APRIL 2013

Sitara™ AM335x ARM® Cortex™-A8 Microprocessors (MPUs)

Check for Samples: [AM3359](#), [AM3358](#)

1 Device Summary

1.1 Features

- **Highlights**
 - Up to 1-GHz Sitara™ ARM® Cortex™-A8 32-Bit RISC Microprocessor
 - NEON™ SIMD Coprocessor
 - 32KB of L1 Instruction and 32KB Data Cache with Single-Error Detection (parity)
 - 256KB of L2 Cache with Error Correcting Code (ECC)
 - mDDR(LPDDR), DDR2, DDR3, DDR3L Support
 - General-Purpose Memory Support (NAND, NOR, SRAM) Supporting Up to 16-bit ECC
 - SGX530 3D Graphics Engine
 - LCD and Touchscreen Controller
 - Programmable Real-Time Unit and Industrial Communication Subsystem (PRU-ICSS)
 - Real-Time Clock (RTC)
 - Up to Two USB 2.0 High-Speed OTG Ports with Integrated PHY
 - 10, 100, 1000 Ethernet Switch Supporting Up to Two Ports
 - Serial Interfaces Including:
 - Two Controller Area Network Ports (CAN)
 - Six UARTs, Two McASPs, Two McSPI, and Three I2C Ports
 - 12-Bit Successive Approximation Register (SAR) ADC
 - Up to Three 32-Bit Enhanced Capture Modules (eCAP)
 - Up to Three Enhanced High-Resolution PWM Modules (eHRPWM)
 - Crypto Hardware Accelerators (AES, SHA, PKA, RNG)
- **MPU Subsystem**
 - Up to 1-GHz ARM® Cortex™-A8 32-Bit RISC Microprocessor
 - NEON™ SIMD Coprocessor
 - 32KB of L1 Instruction Cache with Single-Error Detection (parity)
 - 32KB of L1 Data Cache with Single Error-Detection (parity)
 - 256KB of L2 Cache with Error Correcting Code (ECC)
 - 176KB of On-Chip Boot ROM
 - 64KB of Dedicated RAM
 - Emulation and Debug
 - JTAG
 - Interrupt Controller (up to 128 interrupt requests)
 - **On-Chip Memory (Shared L3 RAM)**
 - 64 KB of General-Purpose On-Chip Memory Controller (OCMC) RAM
 - Accessible to all Masters
 - Supports Retention for Fast Wake-Up
 - **External Memory Interfaces (EMIF)**
 - mDDR(LPDDR), DDR2, DDR3, DDR3L Controller:
 - mDDR: 200-MHz Clock (400-MHz Data Rate)
 - DDR2: 266-MHz Clock (532-MHz Data Rate)
 - DDR3: 400-MHz Clock (800-MHz Data Rate)
 - DDR3L: 400-MHz Clock (800-MHz Data Rate)
 - 16-Bit Data Bus
 - 1 GB of Total Addressable Space
 - Supports One x16 or Two x8 Memory Device Configurations
 - General-Purpose Memory Controller (GPMC)
 - Flexible 8-Bit and 16-Bit Asynchronous Memory Interface with Up to seven Chip Selects (NAND, NOR, Muxed-NOR, SRAM)
 - Uses BCH Code to Support 4-Bit, 8-Bit, or 16-Bit ECC
 - Uses Hamming Code to Support 1-Bit ECC
 - Error Locator Module (ELM)
 - Used in Conjunction with the GPMC to



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

Sitara, SmartReflex, DSP/BIOS, XDS are trademarks of Texas Instruments.
Cortex, NEON are trademarks of ARM Ltd or its subsidiaries.
ARM is a registered trademark of ARM Ltd or its subsidiaries.
EtherCAT is a registered trademark of EtherCAT Technology Group.
POWERVR SGX is a trademark of Imagination Technologies Limited.
All other trademarks are the property of their respective owners.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of the Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 2011–2013, Texas Instruments Incorporated

- Locate Addresses of Data Errors from Syndrome Polynomials Generated Using a BCH Algorithm
 - Supports 4-Bit, 8-Bit, and 16-Bit per 512-byte Block Error Location Based on BCH Algorithms
 - Programmable Real-Time Unit and Industrial Communication Subsystem (PRU-ICSS)
 - Supports protocols such as EtherCAT®, PROFIBUS, PROFINET, EtherNet/IP™, and more
 - Peripherals Inside the PRU-ICSS
 - One UART Port with Flow Control Pins, Supports Up to 12 Mbps
 - Two MII Ethernet Ports that Support Industrial Ethernet, such as EtherCAT
 - One MDIO Port
 - One Enhanced Capture (eCAP) Module
 - Power Reset and Clock Management (PRCM) Module
 - Controls the entry and Exit of Stand-By and Deep-Sleep Modes
 - Responsible for Sleep Sequencing, Power Domain Switch-Off Sequencing, Wake-Up Sequencing and Power Domain Switch-On Sequencing
 - Clocks
 - Integrated 15-35 MHz High-Frequency Oscillator Used to Generate a Reference Clock for Various System and Peripheral Clocks
 - Supports Individual Clock Enable and Disable Control for Subsystems and Peripherals to Facilitate Reduced Power Consumption
 - Five ADPLLs to Generate System Clocks (MPU Subsystem, DDR Interface, USB and Peripherals [MMC and SD, UART, SPI, I2C], L3, L4, Ethernet, GFX [SGX530], LCD Pixel Clock)
 - Power
 - Two Non-Switchable Power Domains (Real-Time Clock [RTC], Wake-Up Logic [WAKE-UP])
 - Three Switchable Power Domains (MPU Subsystem [MPU], SGX530 [GFX], Peripherals and Infrastructure [PER])
 - Implements SmartReflex™ Class 2B for Core Voltage Scaling Based On Die Temperature, Process Variation and Performance (Adaptive Voltage Scaling [AVS])
 - Dynamic Voltage Frequency Scaling (DVFS)
 - Real-Time Clock (RTC)
 - Real-Time Date (Day-Month-Year-Day of Week) and Time (Hours-Minutes-Seconds) Information
 - Internal 32.768-kHz Oscillator, RTC Logic and 1.1-V Internal LDO
 - Independent Power-on-Reset (RTC_PWRONRSTn) Input
 - Dedicated Input Pin (EXT_WAKEUP) for External Wake Events
 - Programmable Alarm Can be Used to Generate Internal Interrupts to the PRCM (for Wake Up) or Cortex-A8 (for Event Notification)
 - Programmable Alarm Can be Used with External Output (PMIC_POWER_EN) to Enable the Power Management IC to Restore Non-RTC Power Domains
- Peripherals
 - Up to Two USB 2.0 High-Speed OTG Ports with Integrated PHY
 - Up to Two Industrial Gigabit Ethernet MACs (10, 100, 1000 Mbps)
 - Integrated Switch
 - Each MAC Supports MII, RMII, RGMII and MDIO Interfaces
 - Ethernet MACs and Switch Can Operate Independent of Other Functions
 - IEEE 1588v2 Precision Time Protocol (PTP)
 - Up to Two Controller-Area Network (CAN) Ports
 - Supports CAN Version 2 Parts A and B
 - Up to Two Multichannel Audio Serial Ports (McASP)
 - Transmit and Receive Clocks Up to 50 MHz
 - Up to Four Serial Data Pins per McASP Port with Independent TX and RX Clocks
 - Supports Time Division Multiplexing (TDM), Inter-IC Sound (I2S), and similar Formats
 - Supports Digital Audio Interface Transmission (SPDIF, IEC60958-1, and AES-3 Formats)
 - FIFO Buffers for Transmit and Receive (256 bytes)
 - Up to Six UARTs
 - All UARTs Support IrDA and CIR Modes
 - All UARTs Support RTS and CTS Flow Control
 - UART1 Supports Full Modem control
 - Up to Two Master and Slave McSPI Serial Interfaces
 - Up to Two Chip Selects
 - Up to 48 MHz
 - Up to Three MMC, SD, and SDIO Ports

- 1-Bit, 4-Bit and 8-Bit MMC, SD, and SDIO Modes
- MMCSDB has dedicated Power Rail for 1.8-V or 3.3-V Operation
- Up to 48-MHz Data Transfer Rate
- Supports Card Detect and Write Protect
- Complies with MMC4.3 and SD and SDIO 2.0 Specifications
- Up to Three I2C Master and Slave Interfaces
 - Standard Mode (up to 100 kHz)
 - Fast Mode (up to 400 kHz)
- Up to Four Banks of General-Purpose IO (GPIO)
 - 32 GPIOs per Bank (Multiplexed with Other Functional Pins)
 - GPIOs Can be Used as Interrupt Inputs (Up to Two Interrupt Inputs per Bank)
- Up to Three External DMA Event Inputs That Can Also be Used as Interrupt Inputs
- Eight 32-Bit General-Purpose Timers
 - DMTIMER1 is a 1-ms Timer Used for Operating System (OS) Ticks
 - DMTIMER4 - DMTIMER7 are Pinned Out
- One Watchdog Timer
- SGX530 3D Graphics Engine
 - Tile-Based Architecture Delivering Up to 20 Million Polygons per second
 - Universal Scalable Shader Engine is a Multi-Threaded Engine Incorporating Pixel and Vertex Shader Functionality
 - Advanced Shader Feature Set in Excess of Microsoft VS3.0, PS3.0 and OGL2.0
 - Industry Standard API Support of Direct3D Mobile, OGL-ES 1.1 and 2.0, OpenVG 1.0, and OpenMax
 - Fine-Grained Task Switching, Load Balancing and Power Management
 - Advanced Geometry DMA Driven Operation for Minimum CPU Interaction
 - Programmable High-Quality Image Anti-Aliasing
 - Fully Virtualized Memory Addressing for OS Operation in a Unified Memory Architecture
- LCD Controller
 - Up to 24-Bits Data Output; 8-Bits per Pixel (RGB)
 - Resolution Up to 2048x2048 (With Maximum 126-MHz Pixel Clock)
 - Integrated LCD Interface Display Driver (LIDD) Controller
 - Integrated Raster Controller
 - Integrated DMA Engine to Pull Data from the External Frame Buffer without Burdening the Processor via Interrupts or a Firmware Timer
- 512-Word Deep Internal FIFO
- Supported Display Types:
 - Character Displays - Uses LCD Interface Display Driver (LIDD) Controller to Program these Displays
 - Passive Matrix LCD Displays - Uses LCD Raster Display Controller to Provide Timing and Data for Constant Graphics Refresh to a Passive Display
 - Active Matrix LCD Displays - Uses External Frame Buffer Space and the Internal DMA Engine to Drive Streaming Data to the Panel
- 12-Bit Successive Approximation Register (SAR) ADC
 - 200K Samples per Second
 - Input Can be Selected from any of the Eight Analog Inputs Multiplexed Through an 8:1 analog Switch
 - Can be Configured to Operate as a 4-wire, 5-wire, or 8-wire Resistive Touch Screen Controller (TSC) Interface
- Up to Three 32-Bit Enhanced Capture Modules (eCAP)
 - Configurable as Three Capture Inputs or Three Auxiliary PWM Outputs
- Up to Three Enhanced High-Resolution PWM Modules (eHRPWM)
 - Dedicated 16-Bit Time-Base Counter with Time and Frequency Controls
 - Configurable as Six Single-Ended, Six Dual-Edge Symmetric, or Three Dual-Edge Asymmetric Outputs
- Up to Three 32-Bit Enhanced Quadrature Encoder Pulse (eQEP) Modules
- Device Identification
 - Contains Electrical fuse Farm (FuseFarm) of Which Some Bits are Factory Programmable
 - Production ID
 - Device Part Number (Unique JTAG ID)
 - Device Revision (readable by Host ARM)
- Debug Interface Support
 - JTAG and cJTAG for ARM (Cortex-A8 and PRCM), PRU-ICSS Debug
 - Supports Device Boundary Scan
 - Supports IEEE 1500
- DMA
 - On-Chip Enhanced DMA Controller (EDMA) has Three Third-Party Transfer Controllers (TPTC) and One Third-Party Channel Controller (TPCC), Which Supports Up to 64 Programmable Logical Channels and Eight QDMA Channels. EDMA is Used for:
 - Transfers to and from On-Chip Memories

- Transfers to and from External Storage (EMIF, General-Purpose Memory Controller, Slave Peripherals)
- Inter-Processor Communication (IPC)
 - Integrates Hardware-Based Mailbox for IPC and Spinlock for Process Synchronization Between the Cortex-A8, PRCM, and PRU-ICSS
 - Mailbox Registers that Generate Interrupts
 - Four Initiators (Cortex-A8, PRCM, PRU0, PRU1)
 - Spinlock has 128 Software-Assigned Lock Registers
- Security
 - Crypto Hardware Accelerators (AES, SHA, PKA, RNG)
- Boot Modes
 - Boot Mode is Selected via Boot Configuration Pins Latched on the Rising Edge of the PWRONRSTn Reset Input Pin
- Packages:
 - 298-Pin S-PBGA-N298 Via Channel™ package (ZCE Suffix), 0.65-mm Ball Pitch
 - 324-Pin S-PBGA-N324 package (ZCZ Suffix), 0.80-mm Ball Pitch

1.2 Applications

- Gaming Peripherals
- Home and Industrial Automation
- Consumer Medical Appliances
- Printers
- Smart Toll Systems
- Connected Vending Machines
- Weighing Scales
- Educational Consoles
- Advanced Toys

Starterware User Guide

References

- [1] <http://beagleboard.org/static/beaglebone/latest/README.htm>
- [2] <http://www.ftdichip.com/Drivers/VCP.html>
- [3] <http://www.ti.com/tool/tmdxevm3358>
- [4] http://processors.wiki.ti.com/index.php/StarterWare_Getting_Started_02.00.XX.XX

StarterWare Getting Started 02.00.XX.XX

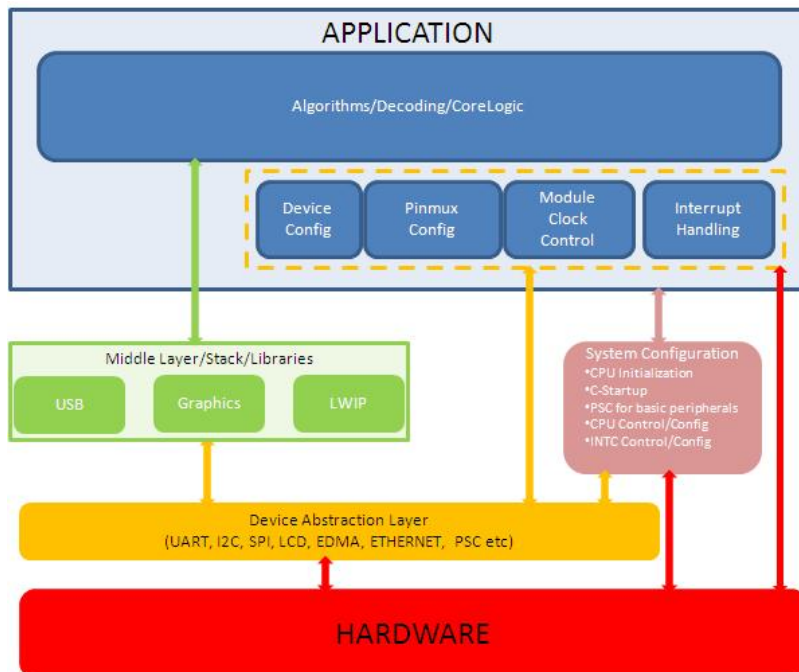


Document License

This work is licensed under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 United States License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/us/> or send a letter to Creative Commons, 171 Second Street, Suite 300, San Francisco, California, 94105, USA.

StarterWare Overview

StarterWare provides a no-OS platform support for ARM/DSP based SoCs. StarterWare provides Device Abstraction Layer (DAL) libraries and peripheral/board level sample/demo examples that demonstrate the capabilities of the peripherals. This package includes the following components:



- **Device Abstraction Layer Library**. This contains device abstraction layer APIs for supported peripherals.

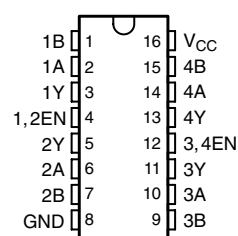
Quadruple Differential Line Receiver

SN65175, SN75175 QUADRUPLE DIFFERENTIAL LINE RECEIVERS

SLLS145C – OCTOBER 1990 – REVISED NOVEMBER 2006

- Meet or Exceed the Requirements of ANSI Standard EIA/TIA-422-B, RS-423-B, and RS-485
- Meet ITU Recommendations V.10, V.11, X.26, and X.27
- Designed for Multipoint Bus Transmission on Long Bus Lines in Noisy Environments
- 3-State Outputs
- Common-Mode Input Voltage Range –12 V to 12 V
- Input Sensitivity . . . ± 200 mV
- Input Hysteresis . . . 50 mV Typ
- High Input Impedance . . . 12 k Ω Min
- Operate From Single 5-V Supply
- Low-Power Requirements
- Plug-In Replacement for MC3486

D OR N PACKAGE
(TOP VIEW)



description

The SN65175 and SN75175 are monolithic quadruple differential line receivers with 3-state outputs. They are designed to meet the requirements of ANSI Standards EIA/TIA-422-B, RS-423-B, and RS-485, and several ITU recommendations. These standards are for balanced multipoint bus transmission at rates up to 10 megabits per second. Each of the two pairs of receivers has a common active-high enable.

The receivers feature high input impedance, input hysteresis for increased noise immunity, and input sensitivity of ± 200 mV over a common-mode input voltage range of ± 12 V. The SN65175 and SN75175 are designed for optimum performance when used with the SN75172 or SN75174 quadruple differential line drivers.

The SN65175 is characterized for operation from -40°C to 85°C . The SN75175 is characterized for operation from 0°C to 70°C .

FUNCTION TABLE
(each receiver)

DIFFERENTIAL A – B	ENABLE	OUTPUT Y
$V_{ID} \geq 0.2$ V	H	H
-0.2 V $< V_{ID} < 0.2$ V	H	?
$V_{ID} \leq -0.2$ V	H	L
X	L	Z
Open circuit	H	?

H = high level, L = low level, ? = indeterminate,
X = irrelevant, Z = high impedance (off)



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

**TEXAS
INSTRUMENTS**

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75265

Copyright © 2006, Texas Instruments Incorporated

1

Voltage Level Translator



TXB0104

www.ti.com

SCES650F – APRIL 2006 – REVISED MAY 2012

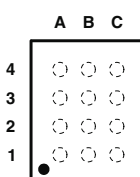
4-BIT BIDIRECTIONAL VOLTAGE-LEVEL TRANSLATOR WITH AUTOMATIC DIRECTION SENSING AND ± 15 -kV ESD PROTECTION

Check for Samples: [TXB0104](#)

FEATURES

- 1.2 V to 3.6 V on A Port and 1.65 V to 5.5 V on B Port ($V_{CCA} \leq V_{CCB}$)
- V_{CC} Isolation Feature – If Either V_{CC} Input Is at GND, All Outputs Are in the High-Impedance State
- OE Input Circuit Referenced to V_{CCA}
- Low Power Consumption, 5- μ A Max I_{CC}
- I_{off} Supports Partial-Power-Down Mode Operation
- Latch-Up Performance Exceeds 100 mA Per JESD 78, Class II
- ESD Protection Exceeds JESD 22
 - A Port
 - 2500-V Human-Body Model (A114-B)
 - 1500-V Charged-Device Model (C101)
 - B Port
 - ± 15 -kV Human-Body Model (A114-B)
 - 1500-V Charged-Device Model (C101)

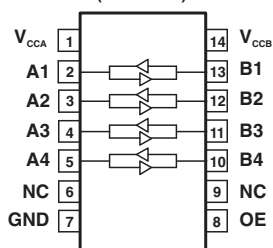
GXU/ZXU PACKAGE
(TOP VIEW)



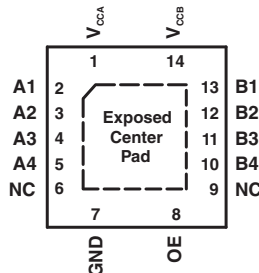
TERMINAL ASSIGNMENTS
(GXU/ZXU Package)

	A	B	C
4	A4	GND	B4
3	A3	OE	B3
2	A2	V_{CCA}	B2
1	A1	V_{CCB}	B1

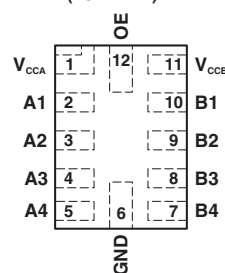
D OR PW PACKAGE
(TOP VIEW)



RGY PACKAGE
(TOP VIEW)



RUT PACKAGE
(TOP VIEW)



- N.C. – No internal connection
- For RGY, if the exposed center pad is used, it must only be connected as a secondary ground or left electrically open.
- Pull up resistors are not required on both sides for Logic I/O.
- If pull up or pull down resistors are needed, the resistor value must be over 50 k Ω .
- 50 k Ω is a safe recommended value, if the customer can accept higher V_{ol} or lower V_{oh} , smaller pull up or pull down resistor is allowed, the draft estimation is $V_{ol} = V_{ccout} \times 4.5k / (4.5k + R_{pu})$ and $V_{oh} = V_{ccout} \times R_{dw} / (4.5k + R_{dw})$.
- If pull up resistors are needed, please refer to the TXS0104 or contact TI.
- For detailed information, please refer to application note [SCEA043](#).



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

NanoFree is a trademark of Texas Instruments.

PRODUCTION DATA Information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of the Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

Copyright © 2006–2012, Texas Instruments Incorporated

Digital Isolator



ISO7640FM
ISO7641FM

www.ti.com

SLLSE89E – SEPTEMBER 2011 – REVISED JANUARY 2013

Low Power Quad Channels Digital Isolators

Check for Samples: [ISO7640FM](#), [ISO7641FM](#)

FEATURES

- Signaling Rate: 150 Mbps
- Low Power Consumption, Typical I_{CC} per Channel (3.3 V Supplies):
 - ISO7640FM: 2 mA at 25 Mbps
 - ISO7641FM: 2.4 mA at 25 Mbps
- Low Propagation Delay: 7 ns Typical
- Output Defaults to Low-state in fail-safe mode
- Wide Temperature Range: -40°C to 125°C
- 50 KV/s Transient Immunity, Typical
- Long Life with SiO_2 Isolation barrier
- Operates From 2.7V, 3.3 V and 5 V Supply and Logic Levels
- Wide Body SOIC-16 Package

APPLICATIONS

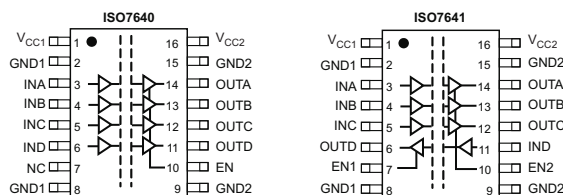
- Optocoupler Replacement in:
 - Industrial Fieldbus
 - Profibus
 - Modbus
 - DeviceNet™ Data Buses
- Servo Control Interface
- Motor Control
- Power Supplies
- Battery Packs

SAFETY AND REGULATORY APPROVALS

- 6000 V_{PK} / 4243 V_{RMS} for 1 Minute per UL 1577 (approved)
- VDE Approval for DIN EN 60747-5-2 (VDE 0884 Rev. 2), 1414 V_{PK} Working Voltage (approved)
- CSA Component Acceptance Notice 5A, IEC 60601-1 Medical Standard (approved)
- 5 KV_{RMS} Reinforced Insulation per TUV for EN/UL/CSA 60950-1 and EN/UL/CSA 61010-1 (approved)

DESCRIPTION

ISO7640FM and ISO7641FM provide galvanic isolation up to 6 KV_{PK} for 1 minute per UL and VDE. These devices are also certified up to 5 KV_{RMS} Reinforced isolation at a working voltage of 400 V_{RMS} per end equipment standards EN/UL/CSA 60950-1 and 61010-1. ISO7640F and ISO7641F are quad channel isolators; ISO7640F has four forward and ISO7641F has three forward and one reverse direction channels. Suffix F indicates that output defaults to Low-state in fail-safe conditions (see [Table 1](#)). M-Grade devices are high speed isolators capable of 150 Mbps data rate with fast propagation delays



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

UNLESS OTHERWISE NOTED this document contains PRODUCTION DATA information current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

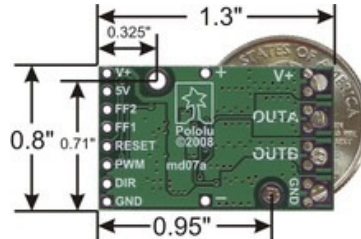
Copyright © 2011–2013, Texas Instruments Incorporated

H-Bridge



Pololu High-Power Motor Driver 18v15

Overview



The Pololu high-power motor driver is a discrete MOSFET H-bridge designed to drive large DC brushed motors. The H-bridge is made up of one N-channel MOSFET per leg, and most of the board's performance is determined by these MOSFETs (the rest of the board contains the circuitry to take user inputs and control the MOSFETs). The MOSFET datasheet is available under the "Resources" tab. The MOSFETs have an absolute maximum voltage rating of 30 V, and higher voltages can permanently destroy the motor driver. Under normal operating conditions, ripple voltage on the supply line can raise the maximum voltage to more than the average or intended voltage, so a safe maximum voltage is approximately 24 V.

Note: batteries that are nominally 24 V can be much higher than that when fully charged; this product is therefore not recommended for use with 24 V batteries unless appropriate measures are taken to limit the peak voltage.

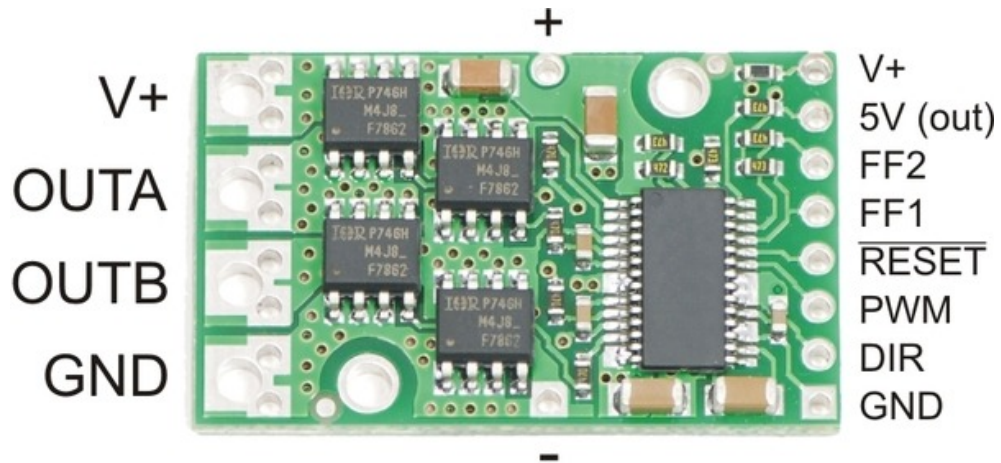
The versatility of this driver makes it suitable for a large range of currents and voltages: it can deliver up to 15 A of continuous current with a board size of only 1.3" by 0.8" and no required heat sink. With the addition of a heat sink, it can drive a motor with up to about 21 A of continuous current. The module offers a simple interface that requires as little as two I/O lines while allowing for both sign-magnitude and locked-antiphase operation. Integrated detection of various short-circuit conditions protects against common causes of catastrophic failure; however, please note that the board does not include reverse power protection or any over-current or over-temperature protection.

Using the Motor Driver Connections

The motor and motor power connections are on one side of the board, and the control connections (5V logic) are on the other side. The motor supply should be capable of supplying high current, and a large capacitor should be installed close to the motor driver. The included axial capacitor can be installed directly on the board in the pins labeled '+' and '-' as shown below. Such installations are compact but might limit heat sinking options; also, depending on the power supply quality and motor characteristics, a larger capacitor might be required. There are two options for connecting to the high-power signals (V+, OUTA, OUTB, GND): large holes on 0.2" centers, which are compatible with the included terminal blocks, and pairs of 0.1"-spaced holes that can be used with perfboards, breadboards, and 0.1" connectors.

Warning: Take proper safety precautions when using high-power electronics. Make sure you know what you are doing when using high voltages or currents! During normal operation, this product can get **hot** enough to burn you. Take care when handling this product or other components connected to it.

The logic connections are designed to interface with 5V systems (5.5 V max); the minimum high input signal threshold is 3.5 V, so we do not recommend connecting this device directly to a 3.3 V controller. In a typical configuration, only PWM and DIR are required. The two fault flag pins (FF1 and FF2) can be monitored to detect problems (see the Fault Flag Table below for more details). The RESET pin is pulled up to V+ through a 20 kΩ resistor. When held low, it puts the driver into a low-power sleep mode and clears any latched fault flags. The V+ pin on the logic side of the board gives you access to monitor the motor's power supply (it should not be used for high current). The board also provides a regulated 5 V pin which can provide a few milliamps (this is typically insufficient for a whole control circuit but can be useful as a reference or for very low-power microcontrollers).



Pinout

PIN	Default State	Description
V+		This is the main 5.5 – 30 V (absolute max) motor power supply connection, which should typically be made to the larger V+ pad. The smaller V+ pad along the long side of the board is intended for a power supply capacitor, and the smaller V+ pad on the logic side of the board gives you access to monitor the motor's power supply (it should not be used for high current).
5V (out)		This regulated 5V output provides a few milliamps. This output should not be connected to other external power supply lines. Be careful not to accidentally short this pin to the neighboring V+ pin while power is being supplied as doing so will instantly destroy the board!
GND		Ground connection for logic and motor power supplies.
OUTA		A motor output pin.
OUTB		B motor output pin.

Αναφορές

- [1] C. Lindsey, "Form, function and locomotory habits in fish," *Locomotion*, 1978.
- [2] D. Tzeranis, E. Papadopoulos, and G. Triantafyllou, "On the design of an autonomous robot fish," in *Proc. of the 11th IEEE Mediterranean Conf. on Control and Automation*, pp. 17–20, 2003.
- [3] <https://aerotoobox.net/lift-drag-moment-coefficient/>.
- [4] http://web.mit.edu/2.016/www/handouts/Added_Mass_Derivation_050916.pdf.
- [5] M. Sfakiotakis, D. M. Lane, and J. B. C. Davies, "Review of fish swimming modes for aquatic locomotion," *IEEE Journal of oceanic engineering*, vol. 24, no. 2, pp. 237–252, 1999.
- [6] Π. Τσούνης, "Σχεδιασμός και Υλοποίηση Σερβομηχανισμού Ρυμούλκησης Υποβρύχιων Ρομποτικών Συστημάτων," 2015.
- [7] <http://electricalschools.blogspot.com/2013/10/dc-motor-working-animation.html>.
- [8] http://hades.mech.northwestern.edu/index.php/Brushed_DC_Motor_Theory.
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/H_bridge.
- [10] <http://www.modularcircuits.com/blog/articles/h-bridge-secrets/h-bridges-the-basics/>.
- [11] http://www.ti.com/analog/docs/analogtechdoc_hh.tsp?viewType=mostuseful&rootFamilyId=3387&familyId=3020&docCategoryId=2.
- [12] <http://processors.wiki.ti.com/index.php/StarterWare>.
- [13] B. R. Munson, D. F. Young, T. H. Okiishi, and W. W. Huebsch, "Fundamentals of fluid mechanics. hoboken," *John Wiley & Sons, Inc*, vol. 69, p. 520, 2006.
- [14] D. Barrett, M. Triantafyllou, D. Yue, M. Grosenbaugh, and M. Wolfgang, "Drag reduction in fish-like locomotion," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 392, pp. 183–212, 1999.
- [15] M. Saxena and N. R. Chauhan, "A review study on bio-inspired robotic fish," *International Journal of Mechanisms and Robotic Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 1–23, 2017.
- [16] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RoboTuna,_1994,_view_2_-_MIT_Museum_-_DSC03730.JPG.
- [17] <https://dces.essex.ac.uk/staff/hhu/jliua/picgallery.htm>.
- [18] <http://www.technovelgy.com/ct/Science-Fiction-News.asp?NewsNum=283>.
- [19] <https://www.csail.mit.edu/news/soft-robotic-fish-swims-alongside-real-ones-coral-reefs>.
- [20] E. Papadopoulos, E. Apostolopoulos, and P. Tsigkourakos, "Design, control, and experimental performance of a teleoperated robotic fish," in *Control and Automation, 2009. MED'09. 17th Mediterranean Conference on*, pp. 766–771, IEEE, 2009.

- [21] M. Makrodimitris, K. Nanos, and E. Papadopoulos, "A novel trajectory planning method for a robotic fish," in *Control and Automation (MED), 2017 25th Mediterranean Conference on*, pp. 1119–1124, IEEE, 2017.
- [22] Π. Π. Ντούσκας, "Σχεδιασμός και κατασκευή φορείου, με κάμερα και αλγόριθμο επεξεργασίας εικόνας, για τον έλεγχο κίνησης ρομποτικού ψαριού," Master's thesis, 2011.
- [23] E. Apostolopoulos, "Υλοποίηση, Έλεγχος και Πειραματική Αξιολόγηση Τηλεχειριζόμενου Υποβρύχιου Οχήματος με Πρόωση από Ουραίο Πτερύγιο," 2005.
- [24] S. F. Hoerner, "Fluid dynamic drag. 1965," *Bricktown, NJ: Published by the author*, 1992.
- [25] T. I. Fossen, "Marine control system-guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles," *Marine Cybernetics*, 2002.
- [26] M. Renilson, *Submarine hydrodynamics*. Springer, 2015.
- [27] Π. Τσαγγάρης, "Μηχανική των Ρευστών," *Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ*, 2005.
- [28] M. S. Triantafyllou, G. Triantafyllou, and D. Yue, "Hydrodynamics of fishlike swimming," *Annual review of fluid mechanics*, vol. 32, no. 1, pp. 33–53, 2000.
- [29] D. Molloy, *Exploring BeagleBone: tools and techniques for building with embedded Linux*. John Wiley & Sons, 2014.
- [30] <http://users.ece.utexas.edu/~valvano/Volume1/E-Book/>.
- [31] J. Prabahar, *BeagleBone By Example*. Packt Publishing Ltd, 2016.
- [32] https://www.electromate.com/assets/catalog-library/pdfs/maxon/maxonmotor_2012_2013_catalog.pdf.
- [33] Π. Παπαδόπουλος, "Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα Μετατροπής Ενέργειας," *ΕΜΠ, Αθήνα*, 2000.
- [34] R. C. Dorf and R. H. Bishop, *Modern control systems*. Pearson, 2011.
- [35] K. Ogata and Y. Yang, *Modern control engineering*, vol. 4. Prentice hall India, 2002.
- [36] J. J. DiStefano, A. J. Stubberud, and I. J. Williams, *Schaum's outline of feedback and control systems*. McGraw-Hill Professional, 1997.
- [37] L. Biagiotti and C. Melchiorri, *Trajectory planning for automatic machines and robots*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [38] A. I. Korotkin, *Added Masses of Ship Structures*. Springer Publishing Company, Incorporated, 1st ed., 2008.
- [39] S. B. Behbahani, J. Wang, and X. Tan, "A dynamic model for robotic fish with flexible pectoral fins," in *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2013 IEEE/ASME International Conference on*, pp. 1552–1557, IEEE, 2013.
- [40] M. Makrodimitris, I. Aliprantis, and E. Papadopoulos, "Design and implementation of a low cost, pump-based, depth control of a small robotic fish," in *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), 2014 IEEE/RSJ International Conference on*, pp. 1127–1132, IEEE, 2014.

- [41] https://www.web-formulas.com/Math_Formulas/Geometry_Surface_of_Ellipsoid.aspx.
- [42] <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/inclind.html>.
- [43] A. Mohamed, H. Kchaou, M. S. Abid, and Z. Driss, "Numerical study of attack angle effect on drag coefficient of auv hull design," 2017.
- [44] H. Moria, "Experimental study of aerodynamic behaviour of stretchable sport fabrics," 2013.
- [45] H. Lamb, "Hydrodynamics (sixth edn)," 1945.
- [46] <https://osf.io/ecmz4/wiki/Fishes/>.

