

Πολυτεχνείο Κρήτης Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Ηλεκτρονικής

Μελέτη και Κατασκευή Ρομποτικού Μηχανισμού Κυματοειδούς Μετακίνησης: Πολύχαιτος - Νηρηίς

Κωνσταντίνος Καρακασιλιώτης

26 Νοεμβρίου 2007

Υπεύθυνος Καθηγητής: Γ. Σταυρακάκης

Εξεταστική Επιτροπή Γ. Σταυρακάκης Δ. Π. Τσακίρης Μ. Ε. Ζερβάκης



Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας Εργαστήριο Υπολογιστικής Όρασης και Ρομποτικής Ινστιτούτο Πληροφορικής Υπεύθυνος Ερευνητής: Δ. Π. Τσακίρης

Eυχαριστίες 1

Σίγουρα σε μία συνεργασία σαν κι αυτή πολλά είναι τα πρόσωπα που συμβάλλουν έτσι ώστε το αποτέλεσμα να δικαιώσει την προσπάθεια. Για τον λόγο αυτό και εγώ νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους όσους, με τον τρόπο του ο καθένας, με βοήθησαν όχι μόνο να ολοκληρώσω με επιτυχία το έργο μου, αλλά και να γίνει ευχάριστη η διαδρομή.

Θέλω να ευχαριστήσω τον Δρ. Γ. Σταυραχάχη, καθηγητή του τομέα ηλεκτρονικής του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την άμεση εμπιστοσύνη και ενεργοποίησή του για να με βοηθήσει να υλοποιήσω τους στόχους μου φέρνοντάς με σε επαφή με το Ι.Τ.Ε., αλλά και για την καθοδήγησή του.

Ειδικές ευχαριστίες οφείλω στον Δρ. Δ. Π. Τσακίρη, ερευνητή του Εργαστηρίου Υπολογιστικής Όρασης και Ρομποτικής του Ινστιτούτου Πληροφορικής του Ι.Τ.Ε. και υπεύθυνο για την εργασία αυτή, για την εμπιστοσύνη του να συνεχίσω το έργο τους, αλλά και για τις πολύτιμες συμβουλές του, και στον Δρ. Μ. Σφακιωτάκη, στον οποίο οφείλεται ένα μεγάλο μέρος του υπόβαθρου της εργασίας αυτής, για την καθοδήγησή του, αλλά και για την άψογη συνεργασία μας. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Π. Γεωργιάδη για τη βοήθεια που μας παρείχε, τόσο στην επίλυση προβλημάτων hardware, όσο και στην ανάπτυξη των διάφορων πλακετών που χρειαστήκαμε. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον Ν. Πατερομιχελάκη για την εργασία του πάνω στη μέτρηση των δυνάμεων που ασκούνται στα παραπόδια του ρομποτικού πρωτότυπου.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οιχογένειά μου, για την ηθιχή και οικονομική τους υποστήριξη, αλλά και τις Παλιοσειρές που έκαναν εύκολη τη μετακόμιση μου για ένα εξάμηνο στο Ηράχλειο, αλλά και για όλες τις εμπειρίες που μοιραστήκαμε τα 6 αυτά χρόνια. Ειδικότερα, ευχαριστώ τον αδερφό μου, Ιωάννη Καρακασιλιώτη, ο οποίος, με την ιδιότητα του Βιολόγου, με βοήθησε σημαντικά στην μελέτη και κατανόηση της βιολογίας των πολύχαιτων.

¹Η χρηματοδότηση της ανάπτυξης του πειραματιχού συστήματος έγινε από το Εργαστήριο Υπολογιστιχής Όρασης χαι Ρομποτιχής του Ινστιτούτου Πληροφοριχής του Ι.Τ.Ε. χαι από το Ευρωπαϊχό πρόγραμμα Έρευνας χαι Ανάπτυξης VECTOR, στο οποίο συμμετέχει το Ι.Τ.Ε.

Περιεχόμενα

1	1 Εισαγωγή				9
	1.1	Εισαγ	ωγή		10
	1.2	Βιολογία των πολύχαιτων			12
		1.2.1	Το σώμα	α του πολύχαιτου	12
		1.2.2	Η κίνηση	η του πολύχαιτου	14
1.3 Πρωτότυπα χυματοειδούς μετακίνησης μέχρι σήμερα			ατοειδούς μεταχίνησης μέχρι σήμερα	16	
		1.3.1	Σύνοψη		16
		1.3.2	Μηχανισ	ημοί με ρόδες	16
			1.3.2.1	$ACM - R3 \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	16
			1.3.2.2	Amphibot - I	18
		1.3.3	Μηχανισ	υμοί χωρίς ρόδες για επίγεια μεταχίνηση	19
			1.3.3.1	Τα ρομποτικά φίδια Modsnakes	19
			1.3.3.2	Ρομποτικό φίδι	20
			1.3.3.3	Ρομποτικά πρωτότυπα πολύχαιτου δακτυλιοσκώλη-	
				ха	20
		1.3.4	Μηχανισ	υμοί χωρίς ρόδες για υποθαλάσσια μεταχίνηση	22
			1.3.4.1	Ρομποτική λάμπραινα	22
			1.3.4.2	Ρομποτικό χέλι	23
2	Mo	ντελο	πດίηση	και Προσομοίωση	25
-	2.1	Θεωσί		BOUCHETAXWAR	20 26
	2.1 2.2	Kuur-	a ropuloe		20 20
	4.4	πυμαι	υεισης με	(u, v) = u = u = u = u = 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1	20

	2.3	Μοντε	οντελοποίηση της χίνησης του πολύχαιτου			
	2.4	Προσα	μοίωση			
		2.4.1	Αλληλεπίδραση με το περιβάλλον	33		
		2.4.2	Αποτελέσματα προσομοιώσεων	35		
3	Kα	τασχει	υή Ρομποτικών Πρωτοτύπων	39		
	3.1	Εισαγα	ωγή	40		
	3.2	Το αρχ	χικό πρωτότυπο			
		3.2.1	Προδιαγραφές			
		3.2.2	Κατασκευή με χρήση C.A.D	42		
			3.2.2.1 Εισαγωγή	42		
			3.2.2.2 Το Βασικό Τμήμα Μηχανισμού (BTM)	42		
		3.2.3	Πρωτότυπο δύο και τριών τμημάτων	47		
			3.2.3.1 Ηλεκτρονικά μέρη και έλεγχος	47		
			3.2.3.2 Πειράματα	48		
		3.2.4	Μηχανισμός κυματοειδούς μετακίνησης με αισθητήρες	52		
			3.2.4.1 Κατασκευή του μηχανισμού	52		
			3.2.4.2 Βαθμονόμηση αισθητήρων	55		
	3.3	Το τελ	λικό πρωτότυπο	58		
		3.3.1	Κατασκευή με χρήση C.A.D	58		
		3.3.2	Τελικό πρωτότυπο πέντε τμημάτων	61		
			3.3.2.1 Κατασκευή και συναρμολόγηση	61		
			3.3.2.2 Ηλεκτρονικά μέρη και έλεγχος	66		
			3.3.2.3 Κινητήρες	67		
			3.3.2.4 Επικοινωνία	70		
4	Πει	ράματ	α με τα Ρομποτικά Πρωτότυπα	73		
	4.1	Πειράμ	Ιειράματα με αισθητήρες			
	4.2	Πειράμ				
	4.3	Πειράμ				
		4.3.1	Πειράματα σε χαρτόνι	80		

6

	4.3.3	Περιστρα	φές του μηχανισμού	87
		4.3.3.1	Περιστροφή με χυματοειδή μεταχίνηση	87
		4.3.3.2	Μία πλευρά παραποδίων με σταθερό ψ	88
		4.3.3.3	Μία πλευρά παραποδίων με μεταβλητό ψ	91
		4.3.3.4	Δ ύο πλευρές παραποδίων με μεταβλητό ψ	91
	4.3.4	Ανάλυση	η πειραματικών δεδομένων	92
	4.3.5	Πειράμα	α εκτός εργαστηρίου	97
	4.3.6	Διεθνής	Έκθεση Θεσσαλονίκης	100
5	Συμπεράα	σματα		103
6	Βιβλιογρα	αφία		111

Ι	Παράρτημα Α	- Λεπτομερής	Περιγραφή	Ηλεκτρον-
ιχά	ον Μερών και	Κυκλωμάτων		115

II	Παραρτημα Β - C.A.D. Σχέδια Μηχανικών Μερά	νč
του	Αρχικού και Τελικού Πρωτότυπου	125

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Ένα από τα βασικότερα, και παράλληλα πολύ ενδιαφέροντα, προβλήματα της ρομποτικής είναι η μετακίνηση. Η μετακίνηση για τον ίδιο τον άνθρωπο αποτέλεσε αντικείμενο έρευνας πολλά χρόνια πριν και συνεχίζει να τον απασχολεί ακόμα και σήμερα. Η λύση στα προβλήματα μετακίνησής του τον βοήθησαν να εξελιχθεί. Με παρόμοιο τρόπο είναι ριζικής σημασίας η αναζήτηση λύσεων για καλύτερη μετακίνηση για την βελτίωση των ρομποτικών συστημάτων μας.

Παρόλο που η φαντασία μας είναι αρχετά αναπτυγμένη, δε μπορεί να συγχριθεί με την εχατομμυρίων ετών πείρα της φύσης στα προβλήματα της μεταχίνησης σε αντίξοα περιβάλλοντα. Μέσω της εξελιχτικής διαδιχασίας, η φύση έχει δώσει, στους οργανισμούς που την αποτελούν, λύσεις σε πολλά από αυτά τα προβλήματα. Για το λόγο αυτό χαι εμείς, εχμεταλλευόμενοι αυτές τις προϋπάρχου-σες λύσεις, μελετάμε τους οργανισμούς της χαι αντλούμε έμπνευση χαι γνώση από αυτούς.

Η ευέλικτη και αποδοτική ρομποτική μετακίνηση σε αντίξοα περιβάλλοντα όπως η άμμος, τα χαλίκια, οι στενοί σωλήνες, το χιόνι και η λάσπη, αποτελεί ένα από τα δυσκολότερα και πιο ενδιαφέροντα προβλήματα. Ξεκινώντας από την καθημερινότητα, μηχανισμοί με την παραπάνω ικανότητα θα βελτιώσουν τόσο το επίπεδο της ζωής μας, όσο και το επίπεδο της έρευνάς μας. Οι επιχειρήσεις αναζήτησης και διάσωσης θα αυξήσουν το ποσοστό επιτυχίας τους είτε πρόκειται για σεισμόπληκτες περιοχές, είτε για περιοχές υψηλής επικινδυνότητας μετά από ατύχημα, είτε σε περιπτώσεις χιονοστοιβάδων. Το εσωτερικό του ανθρώπινου σώματος είναι και αυτό ένα από τα δυσκολότερα περιβάλλοντα. Με την ανάπτυξη μικρών μηχανισμών θα διευκολυνθούν οι ενδοσκοπίες και ίσως βελτιωθεί και η απόδοσή τους. Τέλος, μηχανισμοί όπως οι παραπάνω θα βελτιώσουν την ικανότητά μας να εξερευνούμε το διάστημα και τους πλανήτες του, με αποτέλεσμα την διεύρυνση της γνώσης και τη λύση των μυστικών του σύμπαντος.

Η χυματοειδής μεταχίνηση που χρησιμοποιούν τα ερπετά χαι οι σχώληχες, είναι ένας πολύ αποδοτικός χαι ευέλιχτος τρόπος μεταχίνησης σε δύσχολα περιβάλλοντα με αποτέλεσμα συχνά να γίνονται επίχεντρο μελέτης χαι μίμησης από τους ερευνητές. Μία κατηγορία σκωλήκων, που ονομάζονται πολύχαιτοι δακτυλιοσκώληκες, ζουν στον πυθμένα της θάλασσας και είτε κολυμπάνε στο νερό, είτε έρπουν πάνω στην άμμο και τις πέτρες, είτε τρυπώνουν σε αυτές. Η κίνησή τους χαρακτηρίζεται από κυματώσεις στο σώμα τους, από την ουρά προς το κεφάλι, σε συνδυασμό με την περιοδική ενε-ργοποίηση πλευρικών απολήξεων που ονομάζονται παραπόδια. Η συνδιασμένη αυτή κίνηση ονομάστηκε ποδοκυματοειδής και αυξάνει την ευελιξία της κίνησής τους στα διάφορα δύσκολα περιβάλλοντα, ενώ προσδίδει σταθερότητα στη μετακίνηση. Για αυτό το λόγο οι πολύχαιτοι αποτελούν σπουδαίο παράδειγμα για μελέτη και μίμηση.



Σχήμα 1.1: Διάφορα είδη πολύχαιτων

Δεν είναι, όμως, η πρώτη φορά που οι πολύχαιτοι γίνονται αντιχείμενο μελέτης. Στο Ινστιτούτο Πληροφοριχής του Ι.Τ.Ε., αρχιχά, αναπτύχθηκαν θεωρητικά και υπολογιστικά μεντέλα, καθώς και υπολογιστικά εργαλεία για την χυματοειδή και ποδοχυματοειδή μεταχίνηση, eel – like και polychaete – like. Αυτές οι υπολογιστηκές μελέτες καθοδήγησαν τον σχεδιασμό ρομποτικών πρωτοτύπων. Η συνεργασία του Ι.Π. του Ι.Τ.Ε. με την Scuola Superiore Sant' Anna ανέπτυξε ρομποτικά πρωτότυπα polychaete – like χυματοειδούς μεταχίνησης με τα οποία διεξήχθησαν πειράματα σε διάφορα υποστρώματα, όπως, άμμος και χαλίκια. Τα πειραματικά αποτελέσματα αναλύθηκαν και μοντελοποιήθηκαν από το Ι.Π. του Ι.Τ.Ε. με τα υπολογιστικά εργαλεία που είχε αναπτύξει. Αναπτύχθηκαν, επίσης, και υπολογιστικά μοντέλα για την κυματοειδή μετακίνηση κλειστού βρόγχου και μελετήθηκαν βιομιμητικές αναδραστικές συμπεριφορές. Στην ενότητα 1.3.2.2 θα αναφερθούμε πιο αναλυτικά στις παραπάνω μελέτες και εργασίες.

Ως συνέχεια των παραπάνω, η εργασία αυτή επικεντρώνεται στον ποδοχυματοειδή τρόπο μεταχίνησης χαι στον τρόπο υλοποίησής του με την χατασκευή ρομποτιχών πρωτότυπων. Γίνεται προσπάθεια εξαγωγής συμπερασμάτων χαι παραμέτρων που βοηθούν στην βελτίωση χαι ανάπτυξη των υπολογιστιχών μοντέλων που είχαν αναπτυχθεί από την προηγούμενη μελέτη. Εξάγονται συγχριτιχά συμπεράσματα για την απόδοση της χυματοειδούς μεταχίνησης σε σχέση με την ποδοχυματοειδή μεταχίνηση. Παράλληλα, γίνεται χαι η ανάπτυξη, πάνω στο ίδιο πρωτότυπο, της χυματοειδούς μεταχίνησης χλειστού βρόγχου με τη χρήση αισθητήρων εχτελώντας βιομιμητιχές αναδραστιχές συμπεριφορές. Το μεγάλο ενδιαφέρον αυτής της εργασίας έγχειται στο ότι τα αποτελέσματά της ήταν πολύ θετιχά για την αποδοτιχότητα της ποδοχυματοειδούς μεταχίνησης σε σχέση με την απλή χυματοειδή μεταχίνηση. Ξεχωρίζουν, ωστόσο, χαι τα θετιχά αποτελέσματα για την χυματοειδή μεταχίνηση με τη χρήση αισθητήρων (χλειστού βρόγχου).

1.2 Βιολογία των πολύχαιτων

Οι πολύχαιτοι, με πάνω από 10.000 είδη στην κλάση τους, εμφανίζουν ποικιλομορφία στη μορφολογία και στο μέγεθος μεταξύ τους. Αυτό, όμως, δε σημαίνει ότι δε διατηρούν μία ομοιομορφία στα γενικότερα χαρακτηριστικά και στον τρόπο κίνησης [1].

1.2.1 Το σώμα του πολύχαιτου

Το σώμα του πολύχαιτου χωρίζεται σε τρία χύρια μέρη: το χεφάλι, το χυρίως σώμα και το ουραίο τμήμα. Στο χεφάλι βρίσχονται τα εγχεφαλιχά γάγγλια, το στόμα και τα αισθητήρια όργανα για την αντίληψη του περιβάλλοντος.



Σχήμα 1.2: Τα χύρια μέρη του σώματος ενός πολύχαιτου [1]

Το κύριο σώμα του πολύχαιτου χαρακτηρίζεται από τμήματα που διατάσσονται σε σειρά κατά μήκος αυτού. Στο κάθε τμήμα, το οποίο είναι μικρό σε μήκος και μεγαλύτερο σε πλάτος, υπάρχει η δυνατότητα συστολής και διαστολής των πλευρικών μερών με τη βοήθεια οριζόντιων μυών. Έτσι, το σώμα, έχοντας μέχρι και 200 τέτοια τμήματα σε σειρά, αποκτά ευλυγισία και κατά συνέπεια ικανότητα κυμάτωσης. Στα πλευρικά τοιχώματα του κάθε τμήματος βρίσκονται δύο επιμήκεις και πεπλατυσμένες κατα ύψος προεξοχές, τα παραπόδια [16-18]. Μπορεί, όπως είπαμε και πριν, να υπάρχουν διαφορές στη μορφή των παραποδίων από είδος σε είδος, όμως η ενεργοποίηση και η λειτουργία τους γίνονται με παρόμοιο τρόπο σε όλα.

Τα παραπόδια, όπως και το ίδιο τους το όνομα περιγράφει, δεν είναι πόδια και δεν έχουν τη λειτουργικότητα ποδιών, αλλά ψευδοπόδια με μειωμένους βαθμούς ελευθερίας. Στο εσωτερικό τους διαθέτουν έναν απλό, αλλά πολύ αποτελεσματικό μηχανισμό για να μετατρέπονται, έστω και με του λίγους αυτούς βαθμούς ελευθερίας, σε σημαντικούς συντελεστές στην κίνηση.



Σχήμα 1.3: Εγκάρσια τομή τμήματος πολύχαιτου.(αριστερά πάνω) Το σύστημα μυών που ενεργοποιούν και απενεργοποιούν τα παραπόδια. (δεξιά πάνω) Οι οριζόντιοι μύες που προκαλούν την κυμάτωση [1]

Ένα σύστημα μυών, εκτείνοντας ακίδες, ενεργοποιεί τα παραπόδια, δίνοντάς τους τη σταθερότητα που απαιτείται όταν αυτά καλούνται να βοηθήσουν στην κίνηση, ενώ με την αντίστροφη διαδικασία τα απενεργοποιεί [2]. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.3, το σύστημα μυών σχήματος λάμδα που περιβάλλει ένα άκρο κάθε ακίδας, αναγκάζει την ακίδα σε μέσα-έξω κίνηση, κάνοντας τα παραπόδια να χαλαρώνουν ή να σκληραίνουν αντίστοιχα. Η αποδοτικότητα στην πρόσφυση των παραποδίων κατά την επαφή με το περιβάλλον ενισχύεται από τριχίδια (chaeta) οι οποίες βρίσκονται στην άκρη αυτών.

1.2.2 Η κίνηση του πολύχαιτου

Ο πολύχαιτος είναι οργανισμός που βασίζεται στην χυμάτωση του σώματός του, όπως και τα φίδια, για να κινηθεί. Η διαφορά του, όμως, από τα τελευταία είναι στη φορά μετάδοσης του κύματος κατά μήκος του σώματός τους. Τα φίδια, όπως είδαμε και στο πρώτο κεφάλαιο, χρησιμοποιούν την κυμάτωση από το κεφάλι προς την ουρά, ενώ οι πολύχαιτοι το αντίθετο, δηλαδή, από την ουρά προς το κεφάλι. Όπως ήδη αναφέραμε, την κυμάτωση του σώματος προκαλούν οριζόντιοι πλευρικοί μύες.

Την ώρα που το σώμα εκτελεί την κυμάτωση, τα παραπόδια εκτελούν τη δι-

κή τους περιοδική κίνηση. Όσο πιο κοντά σε κάποια κορυφή κύματος είναι ένα παραπόδιο, τόσο πιο έντονη είναι η έκτασή του, έτσι ώστε να αυξάνει η επιφάνεια αλληλεπίδρασής του με το περιβάλλον (Σχήμα 1.4).



Σχήμα 1.4: Τμήματα σώματος του πολύχαιτου καθώς κινείται. Με έντονο χρώμα φαίνονται οι μύες που συστέλλονται για τη δημιουργία κυματισμού στο σώμα. Ανάλογα με τη φάση του κύματος, σε κάθε τμήμα φαίνεται και η διαφορά στην έκταση των παραποδίων, καθώς και στη γωνία τους με τον άξονα κίνησης

Μπορεί η κίνηση του πολύχαιτου να βασίζεται στη διαστολή και συστολή των παραποδίων σε συνδυασμό με τον κυματισμό του σώματος, παρατηρούνται, ωστόσο, πλάγιες και κάθετες κινήσεις των παραποδίων ως προς το σώμα. Η πλάγια κίνηση των παραποδίων φαίνεται σε μικρό βαθμό και στο σχήμα 1.4 όπου, πάνω δεξιά, τα ενεργοποιημένα παραπόδια αποκλίνουν από τον κάθετο άξονα προς το σώμα. Η δυνατότητα των παραποδίων να εκτελούν και πλάγιες κινήσεις, δίνει, επιπλέον, τη δυνατότητα στον οργανισμό να εκτελεί αργές μετακινήσεις, χωρίς κυματώσεις του σώματος, όταν κάτι τέτοιο απαιτείται.

1.3 Πρωτότυπα χυματοειδούς μεταχίνησης μέ χρι σήμερα

1.3.1 Σύνοψη

Παρόλο που οι περισσότερες έρευνες μέχρι σήμερα έχουν στραφεί προς τους μηχανισμούς με ρόδες, τα τελευταία χρόνια άρχισε να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην αλληλεπίδραση των μηχανισμών κυματοειδούς μετακίνησης άμεσα με το περιβάλλον τους. Το ενδιαφέρον φάνηκε να πηγάζει από την ανάγκη μας να κατασκευάσουμε τέτοιου είδους μηχανισμούς ώστε να μπορούν να κινούνται σε δύσκολα περιβάλλοντα, όπου οι ρόδες δε λειτουργούν αποτελεσματικά. Από τις έρευνες που έχουν γίνει μπορούμε να θεωρήσουμε ότι είναι εφικτό ένα μαθηματικό μοντέλο που με ικανοποιητικό τρόπο αναπαράγει κάποια βασικά χαρακτηριστικά για την αλληλεπίδραση του μηχανισμού με το περιβάλλον.

Σημαντικό είναι, επίσης, το γεγονός, ότι οι πολυάριθμοι κατασκευασμένοι μηχανισμοί και η αναλυτική περιγραφή των διαδικασιών κατασκευής τους, μας δίνει μια *a priori* γνώση για το μηχανικό μέρος, όταν σκοπεύουμε να κατασκευάσουμε έναν νέο μηχανισμό. Ωστόσο, δεν έχει γίνει ακόμα μελέτη ή προσπάθεια για κατασκευή παραποδίων, παρόλο που η βάση για το μαθηματικό τους μοντέλο και το νόμο χίνησης έχει χτιστεί (1.3.5).

1.3.2 Μηχανισμοί με ρόδες

$1.3.2.1 \quad ACM - R3$

Το ACM - R3 [4] αναπτύχθηκε στο Tokyo Institute of Technology από την ομάδα του καθηγητή Hirose [19] και είναι ένα ρομποτικό φίδι τριών διαστάσεων του οποίου η κίνηση συνδυάζεται από αλλαγές στο σχήμα του σώματος και από ρόδες που καλύπτουν ολόκληρο το σώμα (Σχήμα 1.5). Το σώμα του δομείται από τη σειριακή σύνδεση βασικών τμημάτων που έχουν δύο βαθμούς ελευθερίας, μία για pitch και μία για yaw.

1.3. ПР Ω ТОТ
 ТПА К ТМАТОЕІ Δ О Т
 Σ МЕТАКІNH
 Σ Н
EXPI Σ HMEPA17



Σχήμα 1.5: Το ρομποτικό φίδι ACM - R3 [4]



Σχήμα 1.6: Τμήμα του σώματος. Στο κέντρο φαίνεται ο σερβοκινητήρας και τα γρανάζια τα οποία ορίζουν τις γωνίες των αρθρώσεων του σώματος. Στα πλαϊνά βρίσκονται παθητικές ρόδες [4]



Σχήμα 1.7: Διάφοροι τρόποι βηματισμού. (α) πλευρικό κύλισμα, (β) πλευρικό κύλισμα σε ημιτονικό σχήμα, (γ) πλευρικό κύλισμα ανασηκώνοντας το σώμα, (δ) κυματοειδής μετακίνηση ανασηκώνοντας το σώμα, (ε) *pedal* κύμα, (ζ) πλευρική μετατόπιση ανασηκώνοντας το σώμα [4]

Ο μηχανισμός αυτός έχει κατασκευαστεί έτσι ώστε να μπορεί να αναπαράγει διάφορους τρόπους βηματισμού των φιδιών. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται κάποιοι από αυτούς.

1.3.2.2 Amphibot -I

Στη σχολή υπολογιστών και τηλεπικοινωνιών, του EPFL, στη Λωζάνη, κατασκευάστηκε ένας αμφίβιος μηχανισμός κυματοειδούς μετακίνησης Amphibot – I [5]. Η κατασκευή του είναι παρόμοια με τα υπόλοιπα πρωτότυπα. Το σώμα του είναι αποτέλεσμα της σειριακής σύνδεσης επτά ομοίων τμημάτων που έχουν έναν περιστροφικό βαθμό ελευθερίας. Χαρακτηριστικά αυτού του μηχανισμού είναι η στεγανότητα και η αυτονομία του κάθε τμήματος. Η μπαταρία, ο κινητήρας και ο ελεγκτής βρίσκονται σε κάθε ένα από τα τμήματα που επικοινωνούν με δίκτυο I^2C .



 Σχήμα 1.8: (αριστερά) Δύο βασικά τ
μήματα συνδεδεμένα, (δεξιά) Το εσωτερικό ενός τμήματος [5]

Για τον έλεγχο της θέσης, ταχύτητας και ροπής των κινητήρων κατασκευάστηκε ένας PD ελεγκτής που ενσωματώθηκε σε κάθε τμήμα του σώματος. Παρόλο που οι κατασκευαστές του μηχανισμού ανέπτυξαν έναν νόμο ελέγχου με τη βοήθεια CPG (Central Pattern Generator), ικανό να παράγει κυματώσεις διαφόρων πλατών, τα πειράματα με το μηχανισμό έγιναν με το νόμο ελέγχου ημιτόνου. Όπως αναφέρουν χαρακτηριστικά οι κατασκευαστές, η επιλογή αυτή έγινε λόγω της

1.3. ПР
ОТОТ ΥΠΑ ΚΥΜΑΤΟΕΙΔΟΥΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ ΜΕΧΡΙ ΣΗΜΕΡΑ19

πρακτικά μικρής διαφοράς στα παραγόμενα σήματα και της απλούστερης συστηματικής αλλαγής του μήκους κύματος. Η μέγιστη ταχύτητα του μηχανισμού, χρησιμοποιώντας ρόδες, επτά τμήματα και συχνότητα κυμάτωσης 0,25Hz, ήταν 0,035m/s.

1.3.3 Μηχανισμοί χωρίς ρόδες για επίγεια μετακίνηση

1.3.3.1 Τα ρομποτικά φίδια Modsnakes

Στο Ινστιτούτο Ρομποτικής του Carnegie Mellon, στο εργαστήριο του καθηγητή H. Choset [23], έχουν κατασκευαστεί μια σειρά από ρομποτικά φίδια (Σχήμα 1.9) με τη βοήθεια των οποίων έχουν μελετηθεί διάφοροι τρόποι βηματισμού και κινήσεων. Η δουλειά τους εστιάζεται στην κατασκευή ρομποτικών φιδιών τα οποία χρησιμοποιούν συμβατικούς σερβοκινητήρες τους οποίους έχουν ενισχύσει με επιπλέον ηλεκτρονικά μέρη. Ασχολούνται με την κίνηση των φιδιών καθώς αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον τους και αναπτύσουν βηματισμούς, για ευθεία πορεία, για κολύμβηση και αναρρίχηση.



Σχήμα 1.9: Κάποια από τα τελευταία ρομποτικά φίδια Modsnakes.

1.3.3.2 Ρομποτικό φίδι

Οι Saito, Fukaya και Iwasaki στο [8] ασχολούνται με τη μελέτη μηχανισμών κυματοειδούς μετακίνησης χωρίς ρόδες. Εξετάζουν το απλό μοντέλο τριβής και το συγκρίνουν με το μοντέλο τριβής Coulomb. Ασχολούνται, επίσης, με την επίλυση προβλημάτων ανοιχτού και κλειστού βρόγχου. Για τα πειράματά τους, αναπτύξανε ένα ρομποτικό πρωτότυπο πέντε τμημάτων το οποίο αφήσανε να κινηθεί σε χαλί. Το κάθε τμήμα έχει μήκος 15cm και η αλλαγή στις γωνίες των αρθρώσεων γίνεται με DC κινητήρες. Για την αλληλεπίδραση με το υπόστρωμα τοποθετήθηκαν στο κάτω μέρος του σώματος του μηχανισμού λεπίδες με σκοπό τη διαφοροποίηση της τριβής στην κάθετη από την εφαπτόμενη κατεύθυνση. Οι οδηγοί των κινητήρων, όπως και ο ελεγκτής, βρίσκονται πάνω στο μηχανισμό.

Για τη μελέτη του συστήματος κλειστού βρόγχου χρησιμοποιήθηκε camera η οποία έστελνε εικόνες στον υπολογιστή και από εκεί, η πληροφορία για τις συντεταγμένες του κέντρου του κεντρικού τμήματος οδηγούνταν στον ελεγκτή του μηχανισμού μέσω RS232.



Σχήμα 1.10: Ένα ρομποτικό φίδι πέντε τμημάτων [8]. Δεξιά φαίνονται οι λεπίδες που χρησιμοποιούνται για την αλληλεπίδραση με το υπόστρωμα.

1.3.3.3 Ρομποτικά πρωτότυπα πολύχαιτου δακτυλιοσκώληκα

Στο Ινστιτούτο Πληροφορικής του ΙΤΕ και στη Suola Superiore Sant'Anna, στα πλαίσια του προγράμματος BIOLOCH με σκοπό τη μελέτη μηχανισμών για τη μετακίνηση μέσα στο ανθρώπινο σώμα, αλλά και γενικότερα σε δύσκολα περιβάλ-

λοντα, αναπτύχθηκαν, τόσο μοντέλα προσομοίωσης μηχανισμών κυματοειδούς μετακίνησης, όσο και πειραματικά πρωτότυπα για την επαλήθευσή τους [9],[10].

Χρησιμοποιώντας τα υπολογιστικά εργαλεία SIMUUN του Ι.Τ.Ε., έγινε η μοντελοποίηση της κυματοειδούς μετακίνησης από την ουρά προς το κεφάλι στην άμμο, καθώς και προσομοιώσεις τέτοιων μηχανισμών για διάφορους τρόπου βηματισμού [14]. Το μοντέλο τριβής, που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο της αλληλεπίδρασης του μηχανισμού με την άμμο, ήταν το μοντέλο Coulomb. Η επιλογή του προηγούμενου μοντέλου τριβών έγινε με βάση πειραματικές μετρήσεις που έγιναν σε ρομποτικά πρωτότυπα.

Υλοποιήθηκαν δύο ρομποτικά πρωτότυπα (Σχήμα 1.11), οκτώ και έντεκα τμημάτων, των οποίων οι αρθρώσεις ελέγχονται με σερβοχινητήρες. Το πρωτότυπο των οκτώ τμημάτων υλοποιήθηκε πρώτο, ενώ σε σύντομο χρονικό διάστημα υλοποιήθηκε και το επόμενο, των έντεκα τμημάτων, με σκοπό τη βελτίωση των δυνατοτήτων του πειραματικού πρωτότυπου. Στο κάθε τμήμα δίνεται η δυνατότητα τοποθέτησης λεπίδων, τόσο στην κάθετη όσο και στη εφαπτόμενη κατεύθυνση. Οι χινητήρες ελέγχονται από τον ολοχληρωμένο ελεγχτή Pololu, ο οποίος λαμβάνει τις τιμές των γωνιών, μέσω της σειριαχής θύρας, από τον υπολογιστή. Τα πειράματα που έγιναν με το πρωτότυπο των έντεκα τμημάτων συμπεριέλαβαν: (i) μετρήσεις συντελεστών τριβής στις δύο κατευθύνσεις, κάθετη και εφαπτόμενη, για διάφορες ταχύτητες μεταχίνησης, (ii) την εχτέλεση ευθείας μεταχίνησης, στροφής, επί τόπου περιστροφής και παράλληλης μετακίνησης και (iii) την υλοποίηση των προηγούμενων τρόπων βηματισμού σε άλλα περιβάλλοντα, εχτός της άμμου, όπως σε τραχιά άμμο και χαλίκια. Τα δύο αυτά ρομποτικά πρωτότυπα, εκτελούν κυματοειδέις κινήσεις από την ουρά προς το κεφάλι μιμούμενοι την κίνηση των πολύχαιτων, αλλά στην κατασκευή τους δε συμπεριλαμβάνονται παραπόδια. Ωστόσο, η κυματοειδής μεταχίνηση με τη χρήση παραποδίων μελετήθηχε, μοντελοποιήθηχε χαι εξετάστηκε σε περιβάλλον προσομοίωσης, τόσο για την ευθεία πορεία, όσο και για τους διάφορους τρόπους περιστροφής που εισάγει η χρήση παραποδίων.



Σχήμα 1.11: Ρομποτικά πρωτότυπα πολύχαιτου δακτυλιοσκώληκα [9],[10]

1.3.4 Μηχανισμοί χωρίς ρόδες για υποθαλάσσια μετακίνηση

1.3.4.1 Ρομποτική λάμπραινα

Στο Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών, του Northeastern University, στις Η.Π.Α. κατασκευάστηκε μία ρομποτική λάμπραινα [3] σχεδιασμένη να κινείται στο νερό. Το ρομπότ αποτελείται από τρία κύρια μέρη: το κεφάλι, κατασκευασμένο από κυλινδρικό Plexiglas, περιέχει τα ηλεκτρονικά μέρη, το σώμα πέντε τμημάτων, που εκτελεί κυματοειδή κίνηση και την ουρά η οποία κινείται παθητικά και αποτελεί το 25% του συνολικού μήχους του μηχανισμού.



Σχήμα 1.12: Η ρομποτική λάμπραινα [3]

1.3. ΠΡΩΤΟΤΥΠΑ ΚΥΜΑΤΟΕΙΔΟΥΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ ΜΕΧΡΙ ΣΗΜΕΡΑ23



Σχήμα 1.13: Ένα τμήμα σώματος. Δεξιά και αριστερά φαίνονται οι σπόνδυλοι, στο κέντρο και πλευρικά φαίνονται οι δομές που βοηθούν το σώμα να επιπλέει και να διατηρεί το κυλινδρικό σχήμα. Τα μεταλλικά σύρματα είναι τα SMA [3].

Το σώμα του μηχανισμού αποτελείται από έξι σπονδύλους που εκτελούν κυματοειδή κίνηση με τη βοήθεια δέκα SMA (shape memory alloys) που ενεργοποιούνται από ένα πρόγραμμα βασισμένο σε νευρωνικά δίκτυα. Το πλάτος της συστολής των SMA, και κατ' επέκταση του σώματος, ελέγχεται με PWM (Pulse-width modulation). Στα ηλεκτρονικά μέρη που βρίσκονται στο μπροστινό μέρος, συμπεριλαμβάνονται και οι αισθητήρες για έλεγχο των pitch και roll, καθώς και μία πυξίδα, που επικοινωνούν με τον ελεγκτή ή τον υπολογιστή με σειριακό πρωτόκολλο. Με σειριακό πρωτόκολλο επικοινωνεί και ο επεξεργαστής με το interface των οδηγών των SMA.

1.3.4.2 Ρομποτικό χέλι

Το Instituto de Matematicas y Fisica Fundamental, σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο της Πενσυλβάνια, στο [7] παρουσιάζουν μια διαδικασία υπολογισμού βέλτιστων λύσεων για τη μεταχίνηση ενός ρομποτιχού χελιού. Επικεντρώνονται στη χρήση μίας βάσης ημιτονοειδών εισόδων με σχοπό τον εύχολο υπολογισμό της βέλτιστης ενέργειάς τους. Οι προσομοιώσεις δείχνουν ότι με την παραπάνω διαδικασία προσεγγίζονται οι βέλτιστες λύσεις για διάφορους τρόπους βηματισμού (εμπρόσθια χαι όπισθεν μεταχίνηση, περιστροφή χ.ά.). Για να ελέγξουν χαι στην πράξη τα παραπάνω αποτελέσματα, χατασχεύασαν το ρομποτιχό μηχανισμό *REEL*- II (Σχήμα 1.14) ο οποίος αποτελείται από πέντε τμήματα. Η γωνίες των αρθρώσεων ελέγχονται από σερβοχινητήρες, ενώ οι τιμές των γωνιών στέλνονται ασύρματα στους τελευταίους. Ο μηχανισμός είναι στεγανοποιημένος χαι ελεύθερος από εξωτεριχά χαλώδια, με αποτέλεσμα να χινείται ελεύθερα στο νερό. Τα ποιοτιχά αποτελέσματα από τα πειράματα με το μηχανισμό ήταν ανάλογα με αυτά των προσομοιώσεων.



Σχήμα 1.14: Το ρομπό
τ $REEL-II\ [7]$

Κεφάλαιο 2

Μοντελοποίηση και

Προσομοίωση

2.1 Θεωρία χυματοειδούς μεταχίνησης

Η χυματοειδής (undulatory) μεταχίνηση είναι η χίνηση που χρησιμοποιούν τα ερπετά, οι σχώληχες χαι τα χέλια. Το ίδιο το όνομά της χαραχτηρίζει ότι πρόχειται για μία μεταχίνηση η οποία εξαρτάται από χυματώσεις που παράγονται στα σώματα των οργανισμών. Για την αχρίβεια, πρόχειται για μία μεταχίνηση η οποία παράγεται από το συνδυασμό της μεταβολής των γωνιών του σώματος με χυματοειδή τρόπο χαι την αλληλεπίδραση, χυρίως λόγω της τριβής, μεταξύ του σώματος χαι του περιβάλλοντος.



Σχήμα 2.1: Οργανισμοί χυματοειδούς μεταχίνησης

Για να περιγράψουμε έναν οργανισμό χυματοειδούς μεταχίνησης με ένα μηχανιχό μοντέλο, θα πρέπει να σκεφτούμε τα βασιχά χαραχτηριστικά του οργανισμού αυτού. Συνήθως, τέτοιοι οργανισμοί έχουν επίμηκες και στενό σώμα με μεγάλη ευελιξία. Για να μπορέσουμε να κατασκευάσουμε αρθρώσεις χρησιμοποιούμε κινητήρες, με αποτέλεσμα να είναι εμφανής η ανάγχη της τμηματοποίησης του σώματος του μηχανισμού σε επιμέρους τμήματα τα οποία θα έχουν τη δυνατότητα να ελέγχουν και να αλλάζουν τη μεταξύ τους γωνία. Έτσι, το σώμα ενός μηχανισμού κυματοειδούς μεταχίνησης αποτελείται από τμήματα συνδεδεμένα σε σειρά μεταξύ τους δημιουργώντας μια μαχρόστενη αλυσίδα από τμήματα.

Όπως είπαμε και προηγούμενα, η κίνηση τέτοιων μηχανισμών οφείλεται στην συνεχή μετακίνηση ενός κύματος κατά μήκος του σώματος τους. Έτσι, αν θεωρήσουμε ότι έχουμε ένα μηχανισμό που αποτελείται από N τμήματα και έχει N – 1 αρθρώσεις, τότε οι γωνίες ϕ_i (Σχήμα 1.2), που σχηματίζονται ανάμεσα στους διαμήχεις άξονες διαδοχιχών τμημάτων, σαν συναρτήσεις του χρόνου, έχουν τη μορφή της εξίσωσης 1.1:

$$\phi_i(t) = Asin \left(2\pi f t + (N-i)\phi_{lag}\right) + \psi , \ i = 1, ..., N-1$$
(1.1)

Αυτή η περιοδική μεταβολή της κάθε άρθρωσης υλοποιεί ένα εγκάρσιο αρμονικό οδεύον κύμα που μεταδίδεται κατά μήκος του σώματος του μηχανισμού.

Με το πλάτος A μπορούμε να ορίσουμε το πλάτος χυμάτωσης της χάθε άρθρωσης του μηχανισμού, δηλαδή, στην ουσία, το μέγιστο εύρος που μπορεί να χινηθεί η γωνία ϕ είτε δεξιά είτε αριστερά από τον οριζόντιο άξονα. Η συχνότητα f επηρεάζει την ταχύτητα με την οποία μεταδίδεται το χύμα μέσα από το σώμα, ενώ ο όρος $(N - i) \phi_{lag}$ δημιουργεί τη διαφορά φάσης που χρειάζονται τα διαδοχικά ϕ_i , έτσι ώστε, την ίδια χρονιχή στιγμή να παίρνουν τις διάφορες τιμές των δειγμάτων ημιτόνου. Για να είναι το μήχος χύματος του οδεύοντος χύματος ίσο με το συνολιχό μήχος του μηχανισμού, θα πρέπει να ισχύει η παραχάτω σχέση για το ϕ_{lag} :

$$\phi_{lag} = 2\pi/N \tag{1.2}$$



Σχήμα 2.2: Το μοντέλο μηχανισμού χυματοειδούς μεταχίνησης [11]

Το πρόσημο του ϕ_{lag} ορίζει και την κατεύθυνση μετάδοσης του κύματος στο σώμα. Για $\phi_{lag} > 0$ το κύμα μεταδίδεται από την ουρά προς το κεφάλι ενώ για $\phi_{lag} < 0$ το κύμα έχει την αντίθετη κατεύθυνση. Όταν για την παράμετρο ψ

ισχύει $\psi = 0$ τότε ο μηχανισμός κινείται σε ευθεία γραμμή. Όταν όμως ισχύει $\psi \neq 0$ τότε ο μηχανισμός κινείται σε καμπύλη τροχιά, η καμπυλότητα της οποίας εξαρτάται από την τιμή του ψ .

Η κατεύθυνση κίνησης του μηχανισμού όμως δεν ταυτίζεται πάντα με την κατεύθυνση κίνησης του κύματος. Εξαρτάται και από τον τύπο της αλληλεπίδρασης με το υπόστρωμα. Διαγωρίζουμε δύο τύπους αλληλεπίδρασης, αυτόν που έχει τα χαρακτηριστικά της αλληλεπίδρασης του χελιού με το περιβάλλον του (ο οποίος αναφέρεται στη συνέχεια ως eel - like) και αυτόν που έχει τα χαρακτηριστικά της αλληλεπίδρασης του πολύχαιτου με το περιβάλλον του (polychaete-like), ανάλογα με τις δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ του υποστρώματος και του κάθε τμήματος του μηχανισμού [11]. Δύο είναι οι συνιστώσες δυνάμεις που ασκούνται, κάθετη στην κίνηση του κάθε τμήματος δύναμη F_N (Normal Force) και η εφαπτόμενη (παράλληλη) στην χίνηση δύναμη F_T (Tangential Force) (Σχήμα 2.2). Στην περίπτωση που η $F_T < F_N$ τότε η αλληλεπίδραση είναι τύπου eel-like και η κατεύθυνση μετάδοσης του κύματος είναι αντίθετη στην κατεύθυνση της κίνησης του μηχανισμού. Αυτή είναι και η αλληλεπίδραση που χρησιμοποιούν τα φίδια και τα χέλια. Στην αντίθετη περίπτωση που η $F_T > F_N$, τότε η αλληλεπίδραση είναι τύπου polychaete – like και η κατεύθυνση κίνησης του μηχανισμού είναι προς την κατεύθυνση μετάδοσης του κύματος. Αυτή είναι η αλληλεπίδραση που αξιοποιούν οι πολύχαιτοι. Η κατεύθυνση, επίσης, της στροφής του μηχανισμού εξαρτάται από τον τύπο αλληλεπίδρασης και από τα πρόσημα των παραμέτρων ψ και ϕ_{lag} [11].

2.2 Κυματοειδής μετακίνηση με αισθητήρες

Εκμεταλλευόμενοι τη γενικότερη μελέτη των μηχανισμών κυματοειδούς μετακίνησης, που μας επιτρέπει το πειραματικό μοντέλο πέντε τμημάτων, κάναμε κάποια πρώτα βήματα στην εισαγωγή αλληλεπιδράσεων μεταξύ των μηχανισμών αυτών και του περιβάλλοντος. Η εισαγωγή αισθητήρων σε τέτοιου είδους μηχανισμούς έχει την ιδιαίτερη δυσκολία της μεταβλητότητας των μετρήσεων των αισθητήριων οργάνων λόγω της κυματοειδούς κίνησης του σώματος του μηχανισμού. Μιμούμενοι τη συμπεριφορά της μέλισσας, όταν διέρχεται μέσα από κλειστούς και στενούς χώρους, θα προσπαθήσουμε να αναπτύξουμε τον αντίστοιχο νόμο ελέγχου για τους μηχανισμούς κυματοειδούς μετακίνησης. Η αντίδραση των μελισσών ονομάζεται συμπεριφορά centering και περιγράφει την τάση των εντόμων αυτών να πετούν στο μέσο των κλειστών χώρων [6],[12],[13].



Σχήμα 2.3: Το μοντέλο μηχανισμού κυματοειδούς μεταχίνησης με αισθητήρες [12]

Υποθέτοντας ότι έχουμε M ζευγάρια από αισθητήρες απόστασης στο μηχανισμό, και δηλώνοντας ως $d_{L,j}$ και $d_{R,j}$, $(1 \le j \le M)$ τις εξόδους αυτών, τότε η γωνιαχή μετατόπιση ψ υπολογίζεται με τη βοήθεια της μετριχής s(t) [12],[13], η οποία υπολογίζεται ως:

$$s(t) = \frac{1}{\sum_{j=1}^{M} w_j d_{L,j}(t)} - \frac{1}{\sum_{j=1}^{M} w_j d_{R,j}(t)},$$
(1.3)

όπου τα βάρη w_j δηλώνουν τη συνεισφορά του χάθε αισθητήρα στον υπολογισμό της γωνιαχής μετατόπισης, η οποία τελιχά υπολογίζεται ως $\psi_i(t) = gs(t)$ με g ένα σταθερό χέρδος. Ο νόμος ελέγχου χλειστού βρόγχου για τη συμπεριφορά centering περιγράφεται από την εξίσωση (1.4):

$$\phi_i(t) = Asin \left(2\pi f t + (N-i)\phi_{lag}\right) + gs(t) , \ i = 1, ..., N-1.$$
(1.4)

Μια δεύτερη συμπεριφορά που μελετήθηκε ονομάζεται wall – following. Η αντίδραση του μηχανισμού σε μια τέτοια συμπεριφορά είναι να προσπαθεί να διατηρεί

σταθερή απόσταση από ένα εμπόδιο (π.χ. τοίχο) καθώς κινείται παράλληλα σε αυτό. Το εμπόδιο δεν είναι απαραίτητο να είναι ευθύγραμμο, αλλά μπορεί να εμφανίζει οποιαδήποτε καμπυλότητα.

Ο νόμος ελέγχου κλειστού βρόγχου και σε αυτήν την περίπτωση περιγράφεται από την εξίσωση (1.4) και εξαρτάται μόνο από τις μετρήσεις των αισθητήρων που βρίσκονται προς την πλευρά του εμποδίου. Στην περίπτωση αυτή, η μετρική s(t) υπολογίζεται ως:

$$s(t) = d_{avg}(t) - d_{thr}, \qquad (1.5)$$

όπου $d_{avg}(t) = \frac{1}{MT} \sum_{i=1}^{M} \int_{t-T}^{t} d_i(\tau) d\tau$, d_{thr} η επιθυμητή απόσταση που θα πρέπει να διατηρεί ο μηχανισμός από το εμπόδιο, M ο αριθμός των αισθητήρων, d_i η μέτρηση του *i*-στου αισθητήρα και T ο χρόνος ολοκλήρωσης μίας περιόδου κυμάτωσης.

2.3 Μοντελοποίηση της κίνησης του πολύχαιτου

Θα ονομάσουμε την χυματοειδή μεταχίνηση με παραπόδια, ποδοχυματοειδή (pedundulatory) μεταχίνηση. Στο μηχανιχό μοντέλο για την χυματοειδή μεταχίνηση του σχήματος 2.2 προσθέτουμε σε χάθε τμήμα δύο πλευριχά παραπόδια μήχους l_p σε απόσταση b από την άρθρωση του τμήματός τους. Η ένωσή τους με το τμήμα έχει ένα βαθμό ελευθερίας περιστροφιχής χίνησης χαι χατεύθυνσης χάθετης προς το επίπεδο χίνησης του μηχανισμού. Οι γωνίες των παραποδίων, σε σχέση με τον οριζόντιο άξονα που ορίζουν τα σημεία ένωσής τους με το μηχανισμό, δηλώνονται ως χ_i και ζ_i . Το μηχανιχό μοντέλο για την ποδοχυματοειδή μεταχίνηση φαίνεται στο σχήμα 2.4.

Ο νόμος χίνησης του σώματος είναι ίδιος με το νόμο χίνησης για την χυματοειδή μεταχίνηση (εξίσωση 1.2). Πρέπει όμως να οριστεί ένας νόμος χίνησης για τα παραπόδια, τα οποία θα πρέπει να ενεργοποιούνται χαι να απενεργοποιούνται με τέτοιον τρόπο ώστε να συνεισφέρουν στην ώση προς τα πίσω. Ο βέλτιστος χρονισμός των παραποδίων, για να συμβεί το παραπάνω, έχει σχέση με τον χυματισμό του σώματος χαι ειδιχότερα, η ενεργοποίησή τους γίνεται όταν το τμήμα στο οποίο βρίσκονται φτάνει στην κορυφή της κύρτωσης του σώματος και η απενεργοποίησή τους όταν το τμήμα φτάνει στο πιο ακραίο σημείο του κοίλου μέρους του σώματος.

31



Σχήμα 2.4: Μοντέλο μηχανισμού ποδοχυματοειδούς μεταχίνησης [12]

Ο αχριβής τρόπος για να επιτευχθεί χάτι τέτοιο στον μηχανισμό του σχήματος 2.4 αφορά τον τρόπο με τον οποίο το δεξί χαι το αριστερό παραπόδιο του *i*-στού τμήματος θα εναλλάσσονται χαι περιγράφεται ως εξής:

$$\chi_{i} = \begin{cases} A_{p}, & \gamma \iota \alpha \, s_{i} > r_{i} \\ 0, & \alpha \lambda \lambda \iota \dot{\omega} \varsigma \end{cases}, \quad \zeta_{i} = \begin{cases} A_{p}, & \gamma \iota \alpha \, s_{i} < -r_{i} \\ 0, & \alpha \lambda \lambda \iota \dot{\omega} \varsigma \end{cases}, \quad (2.1)$$

για $s_i = sin (2\pi ft + (N + b/l - i) \phi_{lag})$, όπου ο όρος b/l αναφέρεται στην τοποθέτηση των παραποδίων σε σχέση με την άρθρωση. Είναι προφανές ότι ο όρος αυτός επηρεάζει το χρονισμό των παραποδίων, γιατί πάντα ένα σημείο είναι αυτό που βρίσκεται στην κορυφή του κύματος, και η θέση του παραποδίου θα πρέπει να ταυτίζεται με αυτή. Το r_i είναι ένα κατώφλι (0 < r_i < 1) το οποίο ορίζει τη χρονική στιγμή κατά την οποία ένα συγκεκριμένο παραπόδιο αρχίζει να αλληλεπιδρά με το υπόστρωμα και τη χρονική στιγμή κατά την οποία παύει να αλληλεπιδρά (Σχήμα 2.5). Με άλλα λόγια, ορίζει τη διάρκεια της ενεργοποιημένης κατάστασης ενός παραποδίου. A_p είναι το πλάτος της γωνίας κίνησης του παραποδίου, η οποία θα πρέπει να είναι τόση ώστε, όταν το παραπόδιο είναι ενεργοποιημένο, να αλληλεπιδρά όσο δυνατόν περισσότερο με το υπόστρωμα και όταν είναι απενεργοποιημένο, αντίθετα.



Σχήμα 2.5: Το κατώφλι r_i ορίζει την περιοχή στην οποία ένα συγκεκριμένο παραπόδιο ενεργοποιείται και αλληλεπιδρά με το υπόστρωμα.

2.4 Προσομοίωση

Με τη βοήθεια των υπολογιστικών εργαλείων SIMUUN [14], τα οποία έχουν αναπτυχθεί στο Ινστιτούτο Πληροφορικής του ΙΤΕ και βασίζονται στο Matlab, και παράλληλα με την ανάπτυξη και τον πειραματισμό του μηχανισμού, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο που προσομοιώνει την κίνηση του μηχανισμού αλλά και την αλληλεπίδρασή του με το περιβάλλον. Η ανάπτυξη ικανών μοντέλων που προσομοιώνουν ικανοποιητικά την ποδοκυματοειδή μετακίνηση, δίνει τη δυνατότητα μελέτης του μηχανισμού στον υπολογιστή, με όσες ευκολίες συνεπάγεται αυτό. Η παράλληλη ανάπτυξή του με τον πειραματισμό του μηχανισμού ήταν αναγκαία ώστε να προσδιοριστούν, κυρίως, οι παράμετροι που καθορίζουν την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον. Παράμετροι, όπως, ευκολίες ή αδυναμίες κατασκευής στο μηχανολογικό τομέα, επηρέασαν επίσης κατά πολύ, όπως θα δούμε παρακάτω, τη μορφή του μηχανικού μοντέλου.

Τα παλαιότερα υπολογιστικά μοντέλα που προσομοίωναν την ποδοκυματοει-

δή μεταχίνηση χρησιμοποιούσαν δύο βαθμούς ελευθερίας [10] για την ελλειπτιχή χίνηση των παραποδίων. Για να χατασχευαστεί, όμως, ένα παρόμοιο μηγανιχό μοντέλο απαιτείται η ανάπτυξη πολύπλοκων συστημάτων κίνησης (π.χ. χρήση και κατασκευή επιπλέον γραναζιών) που, εν γένει, είναι δύσκολα στην κατασκευή και, ίσως, ασταθή και ευαίσθητα σε βλάβες. Έτσι, στην προσπάθειά μας να απλοποιήσουμε το πρόβλημα μελετήσαμε τις διαφορές που προχύπτουν μεταξύ της χρήσης δύο βαθμών ελευθερίας και ενός βαθμού ελευθερίας. Ο ένας βαθμός ελευθερίας επιτρέπει σε ένα παραπόδιο μόνο την κατακόρυφη περιστροφική κίνηση σε σχέση με το εκάστοτε τμήμα του μηχανισμού. Στην ουσία, η κατακόρυφη παλινδρομική χίνηση των παραποδίων προσομοιώνει την έχταση χαι συστολή των παραποδίων του πολύχαιτου, αφού τα πειράματά μας θα περιοριστούν σε στερεά υποστρώματα. Η σύγχριση προσομοιώσεων του παλιού μοντέλου με του χαινούριου, με μόνη διαφορά τους βαθμούς ελευθερίας, δεν έδειξαν σημαντική διαφορά στις επιδόσεις των δύο μηχανισμών. Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο, αφού η παράλληλη προς την χίνηση συνιστώσα δύναμης, που ωθεί το μηχανισμό, εξαρτάται χυρίως από τη γωνία του τμήματος που φέρει το παραπόδιο με τον χεντριχό άξονα χίνησης. Πιο συγκεκριμένα, αν το δεξί παραπόδιο του ουραίου τμήματος του μηχανισμού του σχήματος 2.4, είχε επιπλέον κλίση προς τα μπροστά, θα είχε περισσότερη τάση να σπρώξει προς τα αριστερά το μηχανισμό παρά προς τα μπροστά.

2.4.1 Αλληλεπίδραση με το περιβάλλον

Η χίνηση ενός συστήματος χυματοειδούς μεταχίνησης επιτυγχάνεται με το συνδυασμό των αλλαγών στο σχήμα του σώματος και των διάφορων περιορισμών, οι οποίοι συνήθως είναι δυνάμεις τριβής που αντιστέκονται στην προσπάθεια χίνησης των τμημάτων του σώματος. Για να προσεγγίσουμε αυτές τις αλληλεπιδράσεις, θεωρούμε δύο δυνάμεις, οι οποίες ασκούνται σε χάθε τμήμα. Η μία παράλληλα στη φορά της χίνησης του τμήματος και η άλλη χάθετα (F_T και F_N , αντίστοιχα)(Σχήμα 2.4), οι οποίες εξαρτώνται από τις συνιστώσες ταχύτητας του εχάστοτε τμήματος u_T και u_N . Τέτοιου είδους μοντέλα δυνάμεων έχουν μελετηθεί στο [15] και έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο σε θαλάσσια όσο και χερσαία μεταχίνηση. Θεωρώντας ισοτροπική αλληλεπίδραση Coulomb με το υπόστρωμα, οι συνιστώσες της δύναμης που αντιστέκεται στην κίνηση του *i*-στού τμήματος B_i του σώματος λαμβάνονται από τις εξισώσεις:

$$F_T^{B_i} = -\mu_T mgsgn\left(u_T^{B_i}\right),\tag{2.2}$$

$$F_N^{B_i} = -\mu_N mgsgn\left(u_N^{B_i}\right),\tag{2.3}$$

όπου mείναι η μάζα του τμήματος, gη επιτάχυνση της βαρύτητας, ενώ μ_T και μ_N είναι οι συντελεστές Coulomb στην εφαπτόμενη και κάθετη κατεύθυνση. Οι συντελεστές αυτοί εξαρτώνται από τη δομή και το υλικό, τόσο της επιφάνειας του τμήματος που αλληλεπιδρά με το υπόστρωμα, όσο και από τη δομή και το υλικό του υποστρώματος αυτού. Γενικά, όσο πιο μεγάλη είναι η διαφορά μεταξύ των δύο συντελεστών για τις δύο κατευθύνσεις, τόσο πιο μεγάλη είναι η απόσταση που διανύει το σύστημα σε έναν ολοχληρωμένο χυματισμό του σώματός του. Επιπλέον, η αναλογία συντελεστών τριβής επηρεάζει, σε μεγάλο βαθμό, την κατεύθυνση χίνησης του μηχανισμού, με δεδομένη τη φορά μετάδοσης της χυμάτωσης στο σύστημα [10]. Οι περισσότερες ερευνητικές προσπάθειες που αφορούν συστήματα χυματοειδούς μεταχίνησης, χρησιμοποιούν την eel – like μεταχίνηση ορίζοντας στο μοντέλο τριβής την αναλογία $\mu_N/\mu_T \gg 1$, οδηγούμενοι σε συστήματα, που για την εμπρόσθια κίνησή τους, υλοποιούν κυματισμούς από το κεφάλι προς την ουρά (π.χ. [7],[8] και [19-22]). Αντίστοιχα, αν η αντίσταση στην εφαπτόμενη κατεύθυνση (T) είναι μεγαλύτερη από αυτή στην κάθετη (N), το οποίο σημαίνει ότι $\mu_N/\mu_T < 1$, όπως συμβαίνει στην polychaete-like μεταχίνηση, τότε η εμπρόσθια χίνηση επιτυγχάνεται με την μετάδοση του χύματος από την ουρά προς το χεφάλι ([10], [11]).

Πειράματα που έγιναν με το ρομποτικό πρωτότυπο [11], έδειξαν ότι το παραπάνω απλό μοντέλο τριβής Coulomb είναι ικανοποιητικό για την περιγραφή της αλληλεπίδρασης του *i*-στού παραποδίου P_i με το υπόστρωμα. Οι συντελεστές τριβής f_N και f_T προσδιορίζονται πειραματικά.

$$F_T^{P_i} = -f_T g sgn\left(u_T^{P_i}\right),\tag{2.4}$$



Σχήμα 2.6: Τροχιές που διαγράφουν οι άχρες των παραποδίων κατά τη διάρκεια μιας περιόδου επιτόπιας ποδοκυματοειδούς κίνησης του συστήματος. Με κόκκινο φαίνονται οι τροχιές στη διάρκεια των οποίων τα παραπόδια έρχονται σε επαφή με το υπόστρωμα. Με μπλε και κυανό είναι οι ταχύτητες των παραποδίων στην x και y κατεύθυνση αντίστοιχα, φανερώνοντας την τάση τους να κατευθύνονται προς την ουρά. Με μαύρο φαίνονται οι τροχιές των αρθρώσεων [11]

2.4.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Προσομοιώσεις του μηχανισμού χωρίς τη χρήση υποστρώματος, δηλαδή, απουσία δυνάμεων τριβής, με αποτέλεσμα ο μηχανισμός να μην μεταχινείται προς χάποια κατεύθυνση και να εχτελεί ποδοχυματοειδή χίνηση σε μια σταθερή θέση, έδειξαν ότι ο νόμος ελέγχου για τα παραπόδια, όταν αυτός συνδυάζεται με χυματώσεις από την ουρά προς το χεφάλι, εξασφαλίζουν την οπίσθια χίνηση των παραποδίων όταν αυτά θα είναι σε επαφή με το υπόστρωμα (Σχήμα 2.6).

Όπως περιγράφεται στο [10], συστήματα που χρησιμοποιούν ποδοχυματοειδή μεταχίνηση έχουν διάφορους και ενδιαφέροντες τρόπους να στρίβουν, και αυτό

35

οφείλεται στα παραπόδια και τους εναλλακτικούς τρόπους ενεργοποίησής τους. Στην πιο απλή περίπτωση, τα παραπόδια δεν συμμετέχουν στην κίνηση, ενώ η στροφή επιτυγχάνεται μόνο με κυματοειδή μετακίνηση θέτοντας το $\psi \neq 0$. Χρησιμοποιώντας τα παραπόδια, έχουμε τρεις επιπλέον συνδυασμούς που δίνουν πιο αποτελεσματικές μεθοδους περιστροφής:

- Τα παραπόδια λειτουργούν κανονικά με τον τρόπο που περιγράφει ο νόμος κίνησής τους στις εξισώσεις (2.1), ενώ θέτουμε το ψ ≠ 0.
- Τα παραπόδια παραμένουν ανενεργά στη μία πλευρά, ενώ στην άλλη λειτουργούν κανονικά. Τώρα, το $\psi = 0$.
- Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω. Μπορούμε να ενεργοποιήσουμε μόνο τη μία πλευρά παραποδίων, ενώ θέτουμε το ψ ≠ 0. Αυτό οδηγεί στην πιο απότομη στροφή του μηχανισμού σε σχέση με τους προηγούμενους τρόπους.

Οι τρόποι αυτοί στροφής του μηχανισμού θα γίνουν πιο κατανοητοί στην ενότητα 4.3.3, όπου παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα του τελικού πρωτότυπου.

Στην παράγραφο αυτή θα δούμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του ρομπότ ΝΗΡΗΙΣ, με τη βοήθεια του υπολογιστικού πακέτου SIMUUN, παρουσιάζοντας την ποδοκυματοειδή μετακίνηση σύμφωνα με τις στρατηγικές ελέγχου που αναπτύξαμε σε προηγούμενες ενότητες. Οι παράμετροι του μηχανισμού (μάζα, διαστάσεις, κ.λ.π.) του μοντέλου, που αναπτύχθηκε στο SIMUUN, αντιπροσωπεύουν αυτές του πραγματικού πρωτότυπου.

Για την προσομοίωση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ σώματος, αλλά και παραποδίων με το υπόστρωμα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στο πραγματικό πρωτότυπο, κινούμενο σε επίπεδη άμμο, προσδιορίζοντας τις παραμέτρους των εξισώσεων (2.2-2.5).

Στις προσομοιώσεις που παρουσιάζονται στα σχήματα 2.7 και 2.8, έχει χρησιμοποιηθεί το μοντέλο δυνάμεων τριβής Coulomb με $\mu_T = 0,518$ και $\mu_N = 0,463$, ενώ οι παράμετροι για το μοντέλο παραποδίων είναι $f_N = 1,75$ και $f_T = 0,06$.

Με δεδομένες τις παραπάνω παραμέτρους για το μοντέλο δύναμης, χρησιμοποιούμε τις εξισώσεις θέτοντας το $\phi_{lag} = 2\pi/N$, με N = 5. Απενεργοποιώντας
τα παραπόδια του μηχανισμού μπορούμε να πάρουμε καθαρά κυματοειδείς τροχιές, προκειμένου να αποτιμηθεί συγκριτικά η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου τρόπου ποδοκυματοειδούς μετακίνησης. Αποτελέσματα της σύγκρισης των δύο μεθόδων φαίνεται στο σχήμα 2.7, ενώ στο σχήμα 2.8 φαίνονται δύο από τους τρόπους στροφής του μηχανισμού που αναφέραμε προηγουμένως.



Σχήμα 2.7: Τροχιές του ουραίου τμήματος του προσομοιωμένου μοντέλου σε χρόνο 10 κύκλων σε ευθεία πορεία. Στο πάνω μέρος φαίνεται η τροχιά με κυματοειδή τρόπο μετακίνησης ενώ στο κάτω με ποδοκυματοειδή. Στον *x*-άξονα φαίνεται η διαφορά στην απόσταση που διανύουν [11]



Σχήμα 2.8: Δύο τρόποι στροφής του μηχανισμού ποδοχυματοειδούς μεταχίνησης με χοινό το $\psi = 8^{\circ}$. Με έντονη χυρτότητα φαίνεται η τροχιά του μηχανισμού όταν έχει απενεργοποιημένη τη δεξιά πλευρά παραποδίων, ενώ μιχρότερη χυρτότητα παρατηρείται όταν χαι οι δύο πλευρές παραποδίων είναι ενεργοποιημένες [11]

Η κατάλληλη, λοιπόν, χρήση των παραποδίων μπορεί να δώσει αποτελέσματα στην ευθεία πορεία όσο και στις στροφές (Σχήμα 2.8). Στην ευθεία, η διανυόμενη απόσταση υπερδιπλασιάζεται (Σχήμα 2.7).

Κεφάλαιο 3

Κατασκευή Ρομποτικών

Πρωτοτύπων

3.1 Εισαγωγή

Παρά τη συστηματική μελέτη των προσομοιώσεων ([10],[11]), η γνώση μας για την απόδοση ενός μηχανικού πολύχαιτου σε πραγματικά περιβάλλοντα ήταν ακόμα ελλειπής. Σκοπός μας, λοιπόν, ήταν η κατασκευή ενός πρωτότυπου που θα έχει τα ίδια χαρακτηριστηκά με τα θεωρητικά μοντέλα, ώστε να μπορεί να γίνει, αφ΄ ενός μεν έλεγχος των μαθηματικών μοντέλων, αφ΄ ετέρου δε η διαπίστωση των αναμενόμενων αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις.

Ακριβώς, όμως, επειδή είχαμε ελλειπή γνώση για τέτοιου είδους συστήματα έπρεπε να κατασκευαστεί ένα αρχικό - πειραματικό πρωτότυπο το οποίο θα μπορούσε να κατασκευαστεί άμεσα και οικονομικά, αλλά θα παρείχε τα βασικά χαρακτηριστικά για την εξαγωγή χρήσιμων αποτελεσμάτων. Εκτός από τη μελέτη των αποτελεσμάτων, μία τέτοια κατασκευή θα μας έβαζε γρήγορα στη διαδικασία της μελέτης και επίλυσης προβλημάτων τοπολογίας των λειτουργικών αντικειμένων του μηχανισμού, όπως, οι κινητήρες, τα παραπόδια, οι μπαταρίες και οι λεπίδες, αλλά και στον τρόπο ελέγχου των ηλεκτρονικών μερών.

Μετά την κατασκευή και τον πειραματισμό με το αρχικό πρωτότυπο άρχισε η κατασκευή του τελικού πρωτότυπου, στο οποίο φάνηκε καταλυτική η πρότερη μελέτη μας για τη μορφολογία καθώς και για τα ηλεκτρονικά μέρη του μηχανισμού. Στο τελικό πρωτότυπο έγιναν εκτεταμένα πειράματα, τα αποτελέσματα των οποίων φάνηκαν να δικαιώνουν πολλές από τις αρχικές μας υποθέσεις, αλλά και πεποιθήσεις.

3.2 Το αρχικό πρωτότυπο

3.2.1 Προδιαγραφές

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, οι απαιτήσεις που πρέπει να πληρεί το αρχικό πρωτότυπο έχουν να κάνουν τόσο με το χρόνο υλοποίησης όσο και με την οικονομία, αλλά και με τα απαραίτητα χαρακτηριστικά για να κριθούν αξιόπιστα τα πειραματικά αποτελέσματα.

40

Στην γρήγορη κατασκευή βοήθησε το συστεγασμένο μηχανουργείο του Ι.Τ.Ε. αλλά και επιλογή του αλουμίνιου για το υλικό κατασκευής του σκελετού του μηχανισμού. Το αλουμίνιο ήταν το πιο κατάλληλο υλικό για την κατασκευή μας, μιας και έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Είναι εύχολα επεξεργάσιμο χαι οιχονομιχό.
- Είναι ελαφρύ, χαρακτηριστικό που μειώνει το συνολικό βάρος του μηχανισμού και κατα συνέπεια διευκολύνει τη μετακίνησή του.
- Είναι άχαμπτο και ανθεκτικό.

Μπορεί το αρχικό πρωτότυπο να είχε απλουστευμένο σκελετό, αλλά οι κινητήρες θα έπρεπε να είναι ίδιοι με αυτούς που θα χρησιμοποιούνταν στον τελικό μηχανισμό.

Έτσι, οι προδιαγραφές που θα έπρεπε να πληρεί το αρχικό πρωτότυπο ήταν οι παρακάτω:

- Το σώμα αποτελείται από πέντε τμήματα (τέσσερα για το σώμα και ένα για το κεφάλι) τα οποία συνδέονται μεταξύ τους μέσω τεσσάρων, συνολικά, αρθρώσεων, η ενεργοποίηση των οποίων ελέγχεται μέσω σερβοκινητήρων.
- Το κάθε τμήμα έχει το ίδιο μέγεθος και βάρος, εκτός του κεφαλιού.
- Απαραίτητη είναι η πρόβλεψη γαι τη δυνατότητα τοποθέτησης και άλλων τύπων παραποδίων, διαφορετικών σε σχήμα ή μέγεθος από την αρχική κατασκευή.
 Επίσης, θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής θέσης των παραποδίων κατά μήκος του εκάστοτε τμήματος του μηχανισμού, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για τον τρόπο που επηρεάζει η θέση των παραποδίων την κίνηση.
- Το υπόστρωμα του κάθε τμήματος θα πρέπει να μπορεί να δέχεται, και στην κάθετη και στην παράλληλη κατεύθυνση, πολλαπλό αριθμό από λεπίδες για την παραγωγή των δύο τύπων μετακίνησης (eel-like και polychaete-like).
- Τέλος, θα πρέπει η συναρμολόγηση και η αποσυναρμολόγησή του να γίνεται εύκολα και γρήγορα.

3.2.2 Κατασκευή με χρήση C.A.D.

3.2.2.1 Εισαγωγή

Η κατασκευή του αρχικού πρωτότυπου, πρώτα σε υπολογιστικό εργαλείο C.A.D., βοήθησε στο να καταλήξουμε γρήγορα σε μία επιθυμητή τοπολογία για τους κινητήρες αλλά και μορφολογία για το σκελετό. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό ήταν το Solidworks 2005. Φυσικά, εδώ, παρουσιάζεται η τελευταία έκδοση του σχεδιασμού, μιας και το πρωτότυπο επηρεάστηκε από τα πρώτα πειράματα του πραγματικού μηχανισμού.



Σχήμα 3.1: Το αρχικό πρωτότυπο σχεδιασμένο σε C.A.D.

3.2.2.2 Το Βασικό Τμήμα Μηχανισμού (BTM)

Ακολουθώντας το μοντέλο του μηχανισμού πέντε τμημάτων, η κατασκευή χωρίστηκε σε τέσσερα ίδια μέρη και ένα πέμπτο, μορφολογικά όμοιο με τα υπόλοιπα, αλλά όχι λειτουργικά. Το τελευταίο θεωρείται ως το κεφάλι του μηχανισμού. Τα τέσσερα όμοια τμήματα αποτελούν την επανάληψη του βασικού τμήματος του μηχανισμού (BTM).

Το ΒΤΜ είναι μία δομή που περιλαμβάνει το σύστημα χίνησης, το σχελετό

στήριξης, το σύστημα λεπίδων, τα παραπόδια, καθώς και τα ηλεκτρονικά κυκλώματα και μπαταρίες, στα οποία θα αναφερθούμε εκτενέστερα σε επόμενες ενότητες.

Το σύστημα χίνησης είναι αυτό που δημιουργεί τον χυματισμό του σώματος ενώ παράλληλα δίνει κατάλληλα χίνηση στα παραπόδια. Αποτελείται από τρεις σερβομηχανισμούς. Έναν χεντριχό για τη ρύθμιση της γωνίας που σχηματίζεται μεταξύ δύο συνεχόμενων τμημάτων, και δύο πλευριχούς για τη ρύθμιση της θέσης των παραποδίων. Οι σερβομηχανισμοί είναι κατάλληλοι για τέτοιου είδους μηχανισμούς στους οποίους απαιτείται η ρύθμιση γωνιών. Γνωρίζοντας εχ των προτέρων ότι στο σώμα θα ενεργούν υψηλές εξωτεριχές δυνάμεις, ειδικότερα όταν τα πειράματα γίνονται σε άμμο, θεωρήσαμε αναγκαία την επιλογή ενός υψηλής ροπής σερβομηχανισμού για τη ρύθμιση του χυματισμού. Για τα παραπόδια, αντίθετα, δεν χρειάστηχαν δυνατοί σερβομηχανισμοί λόγω της χάθετης, ως προς τη διεύθυνση χίνησης, παλινδρόμησής τους.

Ο σχελετός του BTM είναι η βάση στην οποία τοποθετούνται και στηρίζονται όλα τα υπόλοιπα συστήματα. Το σχήμα του (Σχήμα 3.2(α)) είναι απλό για να μπορεί να κατασχευαστεί εύκολα, ενώ παράλληλα να υπάρχει ελευθερία χώρου, έτσι ώστε να επιτρέπεται ο πειραματισμός με τις θέσεις είτε των κινητήρων των παραποδίων, είτε των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και μπαταριών. Στο μπροστινό μέρος τοποθετείται ο κινητήρας του σώματος που θα περιστρέφει τον άξονά του, και κατ' επέκταση το επόμενο BTM, γύρω από την τρύπα στην οποία εισέρχεται ένα τμήμα του. Παρακάτω θα δούμε τη χρησιμότητα του τμήματος αυτού.

Στο σημείο αυτό ο σκελετός στενεύει για την αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ του μπροστινού μέρους ενός BTM με το πίσω του επόμενου κατά την περιστροφή. Στο κέντρο του σκελετού ένα κάθετο τμήμα χρησιμοποιείται για τη στήριξη του κινητήρα σώματος. Για τη μετάδοση της κίνησης από τον κεντρικό κινητήρα στο επόμενο BTM χρησιμοποιείται ο συνδετήρας του σχήματος 3.2(γ). Τα δύο παράλληλα τμήματα του συνδετήρα βιδώνουν στην κεφαλή και στη βάση του κινητήρα. Το τμήμα της βάσης που αναφέραμε λίγο πριν, το οποίο διέρχεται μέσω της τρύπας στο κάτω μέρος του σκελετού, είναι αυτό που συνδέεται στο ένα άκρο του συνδετήρα. Η χρησιμότητα της τελευταίας σύνδεσης έγκειται καθαρά σε θέμα στήριξης και όχι κίνησης. Αντίθετα, η σύνδεση της κεφαλής του κινητήρα με τον συνδετήρα είναι αυτή που μεταφέρει την περιστροφική κίνηση στο επόμενο BTM. Τέλος, ένα άλλο κάθετο τμήμα, το οποίο βρίσκεται στο πίσω μέρος του σκελετού, γίνεται υποδοχή για το συνδετήρα του προηγούμενου BTM. Είναι σαφές, λοιπόν, ότι με την κατασκευή αυτή μπορεί να δημιουργηθεί μία αλυσίδα από BTM τα οποία θα μπορούν να αλλάζουν γωνίες μεταξύ τους.



Σχήμα 3.2: (α) Ο σχελετός του BTM. (β) Το επίπεδο στήριξης των λεπίδων με το σχελετό. (γ) Ο συνδετήρας μεταξύ των διαδοχικών BTM. (δ) Οι λεπίδες.



Σχήμα 3.3: Διάφορες όψεις του BTM με την προτεινόμενη τοποθέτηση για τους κινητήρες.

Το σύστημα λεπίδων είναι αυτό που καθορίζει τον τύπο της αλληλεπίδρασης του σώματος του μηχανισμού με το υπόστρωμα. Η υλοποίησή του είναι τέτοια που να επιτρέπει την τοποθέτηση μέχρι και τεσσάρων ή πέντε λεπίδων κάθετα ή παράλληλα στη διεύθυνση κίνησης. Αυτό επιτυγχάνεται με το ενδιάμεσο επίπεδο στήριξης των λεπίδων πάνω στο οποίο προσαρμόζονται αυτές με βίδες κατά μήκος των κάθετων ή παράλληλων αρμών (Σχήμα 3.2(β)). Στο κέντρο του επιπέδου αυτού οι τέσσερεις τρύπες για βίδες συνδέουν το σύστημα λεπίδων με τον σκελετό επιλέγοντας και εδώ την διεύθυνση των λεπίδων ως προς το σκελετό. Οι λεπίδες (Σχήμα 3.2(δ)) είναι ειδικά σχεδιασμένες έτσι ώστε να παράγουν όσο το δυνατόν μικρότερη αντίσταση προς τη μία κατεύθυνση και τη μέγιστη στην άλλη.

Τα παραπόδια, για τους λόγους που θα περιγράψουμε στην ενότητα 3.2.3.2, σχεδιάστηκαν όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4. Το κυκλικό μέρος τους βιδώνεται στην κεφαλή των μικρών πλευρικών κινητήρων, έτσι ώστε η επιφάνειά τους να είναι κάθετη προς το επίπεδο κίνησης του μηχανισμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο τρόπος που έχει σχεδιαστεί ο σκελετός επιτρέπει την επιλογή της θέσης των παραποδίων κατά μήκος του BTM με στόχο τον πειραματισμό.



Σχήμα 3.4: Το παραπόδιο



Σχήμα 3.5: Ένα ολο
κληρωμένο BTM και ο τρόπος τοποθέτησης των παραποδίων

Για να ολοκληρώσουμε τον σχεδιασμό του πειραματικού μηχανισμού μεγέθους πέντε τμημάτων, αρκεί να χρησιμοποιήσουμε τέσσερα BTM του σχήματος 3.5 και να τα ενώσουμε σε σειρά. Το πέμπτο τμήμα θα είναι ένα BTM χωρίς το σύστημα κινητήρων (Σχήμα 3.1).

3.2.3 Πρωτότυπο δύο και τριών τμημάτων

Με σχοπό τον έλεγχο του σχεδιασμού χαι χάποιον αρχιχό πειραματισμό κατασχευάσθηκαν στο μηχανουργείο τρία BTM με τα χαραχτηριστικά που περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

3.2.3.1 Ηλεκτρονικά μέρη και έλεγχος

Για τον γρήγορο και εύκολο έλεγχο των δύο ή τριών τμημάτων επιλέχθηκε ο ολοκληρωμένος ελεγκτής Brainstem GP της εταιρίας Acroname.O Brainstem παρέχει ένα πλήθος από hardware και software χαρακτηριστικά.

Μπορεί να προγραμματιστεί με τη γλώσσα προγραμματισμού C/C + + και να εκτελέσει 9000 εντολές/δευτερόλεπτο. Έχει τη δυνατότητα επικοινωνίας, μέσω I^2C δικτύου, με άλλους όμοιους ελεγκτές και, μέσω της σειριακής θύρας, με τον υπολογιστή. Διαθέτει ψηφιακές και αναλογικές εισόδους καθώς και τέσσερις εξόδους PWM. Ο ελεγκτής Brainstem GP φαίνεται στο σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.6: Ο ελεγκτής Brainstem GP.

Οι κινητήρες που χρησιμοποιήθηκαν για την κίνηση των BTM καθώς και των παραποδίων περιγράφονται λεπτομερώς στην ενότητα 3.3.2.3.

3.2.3.2 Πειράματα

Μετά τη συναρμολόγηση των μηχανισμών δύο και τριών τμημάτων έγιναν δοκιμές σε διάφορα υποστρώματα, σε σκληρό πάτωμα, σε άμμο και σε σπόγγο.

Η σύγκριση των επιδόσεων, για να είναι όσο γίνεται πιο αντικειμενική, γίνεται με βάση τον αριθμό των κύκλων της περιοδικής κυμάτωσης του σώματος, που χρειάζονται για να διανύσει ο μηχανισμός απόσταση ίση με το μήκος του σώματός του. Με τον όρο κύκλο εννοούμε μία περίοδο ημιτόνου της εξίσωσης 1.1 που ισοδυναμεί με μία περιστροφή της κεφαλής του κινητήρα από τη μία άκρη στην άλλη και πίσω.



Σχήμα 3.7: Αλληλεπίδραση τύπου eel – like με τρεις λεπίδες.

Σε όλα τα πειράματα ο τύπος της αλληλεπίδρασης που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο eel-like. Με polychaete-like τα αποτελέσματα ήταν λιγότερο καλά, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν ήταν και αναμενόμενο, μιας και ο αριθμός αυτός των τμημάτων είναι ανεπαρκής για τις απαιτήσεις του συγκεκριμένου τρόπου αλληλεπίδρασης.



Σχήμα 3.8: Μηχανισμός δύο τμημάτων σε πάτωμα. Μεταχίνηση ενός μήχους σώματος σε χρόνο 9 χύχλων.

Στην περίπτωση eel – like αλληλεπίδρασης με πάτωμα, πιθανώς λόγω της διαφοράς βάρους του μπροστινού μέρους κάθε τμήματος, λόγω του κινητήρα, από το πίσω, δημιουργείται μια ροπή προς τα μπροστά. Στο σχήμα 3.8 φαίνεται η παραπάνω περίπτωση όπου ο μηχανισμός σε χρόνο 9 κύκλων μετακινείται κατά ένα μήκος σώματος.



Σχήμα 3.9: Μηχανισμός τριών τμημάτων σε πάτωμα. Μετακίνηση ενός μήκους σώματος σε χρόνο 7 κύκλων

Στο ίδιο υπόστρωμα, δοχιμάζοντας με το μηχανισμό τριών τμημάτων χωρίς παραπόδια, πήραμε καλύτερα αποτελέσματα της τάξης των 7 χύχλων ανά μήχος σώματος (Σχήμα 3.9). Για να υπάρχει ομοιομορφία στις μάζες των BTM, στο μπροστινό μέρος του χεφαλιού τοποθετήθηχε ένα βάρος παρόμοιο με το βάρος ενός κινητήρα.



Σχήμα 3.10: Μηχανισμός τριών τμημάτων σε άμμο. Μετακίνηση περίπου ενός μήκους σώματος σε χρόνο 42 χύχλων.

Τα πρώτα πειράματα στην άμμο έγιναν με τον μηχανισμό τριών τμημάτων με eel – like αλληλεπίδραση τριών λεπίδων. Το αποτέλεσμα ήταν η μεταχίνηση του μηχανισμού περίπου ενός μήχους σώματος σε χρόνο 42 χύχλων (Σχήμα 3.10). Αξίζει να σημειωθεί ότι για να παραχθεί το παραπάνω αποτέλεσμα τέθηχε η διαφορά φάσης $\phi_{lag} = 2\pi/6$ αντί για $\phi_{lag} = 2\pi/3$ όπως απαιτείται από τον τύπο (1.2) αφού στην περίπτωσή μας το N = 3. Επίσης, δε μπορεί να αιτιολογηθεί η αντίθετη χίνηση του μηχανισμού σε σχέση με το πάτωμα.



Σχήμα 3.11: Μηχανισμός δύο τμημάτων χωρίς παραπόδια. Μετακίνηση ενός μήκους σώματος σε χρόνο 13 κύκλων.

50



Σχήμα 3.12: Μηχανισμός δύο τμημάτων με παραπόδια. Μεταχίνηση ενός μήχους σώματος σε χρόνο 5 χύχλων.

Σημαντικά ήταν, όμως, τα αποτελέσματα των πειραμάτων για τη σύγκριση της κυματοειδούς και της ποδοκυματοειδούς μετακίνησης από το μηχανισμό δύο τμημάτων με ένα ζευγάρι παραποδίων τοποθετημένα στο πίσω τμήμα. Όπως φαίνεται και στα σχήματα 3.11 και 3.12, η ταχύτητα του μηχανισμού σχεδόν τριπλασιάζεται ενώ η μετακίνηση γίνεται πιο σταθερή.



Σχήμα 3.13: Το παραπόδιο τύπου μοχλού από φύλλο μετάλλου.

Το παραπάνω πείραμα δεν ήταν σημαντικό μόνο για την απόδειξη ότι τα παραπόδια βοηθούν σε μεγάλο βαθμό την κίνηση, αλλά και για τη μελέτη τόσο της μορφής των παραποδίων, όσο και της καταλληλότητας των κινητήρων. Τα παραπόδια του μηχανισμού δύο τμημάτων κατασκευάστηκαν από λεπτό και πλατύ φύλλο μετάλλου, λίγο ελαστικό, σε σχηματισμό μοχλού. Η ελαστικότητα των παραποδίων προς τη μία κατεύθυνση δε θα είχε μεγάλη επίδραση στην λειτουργικότητά τους ως προς την δύναμη που πρέπει να ασκούν στο υπόστρωμα προς τα πίσω, ενώ, παράλληλα, δε θα ανύψωναν το μηχανισμό κατά την επαφή τους σε συμπαγές έδαφος. Μια τέτοια ανύψωση θα άλλαζε τον τρόπο αλληλεπίδρασης του σώματος του μηχανισμού με το υπόστρωμα.

Παρά τα θετικά της παραπάνω κατασκευής των παραποδίων, η παρατήρηση και οι απαιτήσεις για παραπόδια που θα βοηθούν την κίνηση σε οποιοδήποτε υπόστρωμα μας οδήγησαν στην κατασκευή νέων παραποδίων όπως παρουσιάστηκαν στο σχήμα 3.4. Τα πλεονεκτήματα που παρέχουν τα καινούρια παραπόδια σε σχέση με την αρχική σχεδίαση είναι η εύκολη κατασκευή, η καλύτερη σταθερότητα και αντοχή και η συνεισφορά τους σε κάθε υπόστρωμα. Το πεπλατισμένο σχήμα τους σε σχέση με το στενό σχήμα των παραποδίων μοχλών έχει, σαφώς, ενισχυμένη απόδοση στην άμμο και τη λάσπη, ενώ το μικρό του πλάτος αυξάνει τη διεισδυτικότητα ακόμα και σε χαλίκια (εκτός της άμμου και της λάσπης) μειώνοντας την απαιτούμενη δύναμη στην κατακόρυφη κίνηση. Η δεύτερη παρατήρηση που έγινε αφορούσε τους κινητήρες των παραποδίων, οι οποίοι δεν είχαν την απαιτούμενη αντοχή για τις απαιτήσεις του μηχανισμού. Ο κύριος λόγος ήταν τα πλαστικά γρανάζια που χρησιμοποιούσαν στους μειωτήρες τους.

3.2.4 Μηχανισμός κυματοειδούς μετακίνησης με αισθητήρες

3.2.4.1 Κατασκευή του μηχανισμού

Ο μηχανισμός πέντε τμημάτων που είδαμε στην ενότητα 1.2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πλατφόρμα για τα πειράματα χυματοειδούς μεταχίνησης με αισθητήρες. Για την προσθήχη όμως των αισθητήρων είναι απαραίτητη η χατασχευή μιας βάσης στήριξης. Αχολουθώντας το μοντέλο της προηγούμενης υποενότητας, ο μηχανισμός έχει τέσσερις αισθητήρες τοποθετημένους στο χεφάλι στις 90° χαι 45° εχατέρωθεν του χύριου άξονα.

52

Η κατασκευή της βάσης στήριξης έγινε από πλακέτα τυπωμένων κυκλωμάτων για να είναι ελαφριά και ανθεκτική. Χρησιμοποιήθηκαν πέντε κομμάτια, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.14, από τα οποία τέσσερα ορίζουν τα επίπεδα των 90° και 45°, ενώ το πέμπτο συνδέει τα επίπεδα μεταξύ τους αλλά και με το κεφάλι.



Σχήμα 3.14: Η βάση στήριξης των αισθητήρων στο μπροστινό μέρος του κεφαλιού (καφέ επίπεδα).



Σχήμα 3.15: Ο μηχανισμός πέντε τμημάτων χωρίς παραπόδια με τους αισθητήρες στο μπροστινό μέρος του χεφαλιού. (πάνω) με δύο λεπίδες ανά τμήμα. (χάτω) με δύο ρόδες ανά τμήμα.

Για την διευκόλυνση της μελέτης μας, τοποθετήσαμε ρόδες στο μηχανισμό, έτσι ώστε να μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για την απόκρισή του με αισθητήρες χωρίς να πρέπει να συνυπολογίσουμε αβέβαιους παράγοντες αλληλεπίδρασης με το υπόστρωμα. Οι ρόδες, τοποθετημένες με τον τρόπο που φαίνεται στο σχήμα 3.15, δίνουν μεγάλη διαφορά στην κάθετη από την εφαπτόμενη δύναμη, οπότε έχουμε πολύ καλή απόδοση στην eel – like μετακίνηση, την οποία και θα αξιοποιήσουμε στα πειράματα. Οι ρόδες προέρχονται από παιχνίδια LEGO και έχουν κολληθεί με ταινία διπλής όψης στο κάτω μέρος κάθε τμήματος του μηχανισμού.

Οι αισθητήρες απόστασης που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα είναι οι GP2D-12, για τις 90°, και GP2Y0A02YK, για τις 45°, της Sharp. Είναι και οι δύο αναλογικοί αισθητήρες, υπέρυθρης ακτινοβολίας, με μη γραμμική έξοδο. Οι αποστάσεις που λειτουργούν είναι από 10cm έως 80cm για τον πρώτο και 20cm έως 150cm για τον δεύτερο. Αυτός είναι και ο λόγος που οι τελευταίοι τοποθετήθηκαν στις 45° .



Σχήμα 3.16: (αριστερά) Ο αισθητήρας GP2D12. (δεξιά) Ο αισθητήρας GP2Y0A02YK.



Σχήμα 3.17: Παράδειγμα συνάρτησης τάσης - απόστασης για τον αισθητήρ
αGP2D12.

Η μη γραμμικότητα των αισθητήρων, αλλά και η διαφοροποίηση της συνάρτησης εξόδου σε σχέση με τις περιβαλλοντικές παραμέτρους, όπως το υλικό του υποστρώματος και των τοιχωμάτων που ανακλά, απαιτεί την αυτόνομη βαθμονόμηση και συνάρτηση αντιστοίχισης για κάθε αισθητήρα. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται στην επόμενη ενότητα.

3.2.4.2 Βαθμονόμηση αισθητήρων

Η βαθμονόμηση των αισθητήρων απόστασης έγινε ενώ αυτοί ήταν τοποθετημένοι στις προβλεπόμενες θέσεις τους και ενώ ο μηχανισμός βρισκόταν στο περιβάλλον που θα γίνονταν τα πειράματα. Αυτό θα εξασφάλιζε σε κάποιο βαθμό την αξιοπιστία των αισθητήρων για τις πραγματικές αποστάσεις.



Σχήμα 3.18: Η διαδικασία βαθμονόμησης των αισθητήρων. Ο μηχανισμός είναι τοποθετημένος ανάμεσα σε δύο σειρές πλαστικών τοιχωμάτων και μετακινείται από τον ένα τοίχο προς τον άλλο δίνοντας μέσω της σειριακής θύρας τα δεδομένα των τεσσάρων αποστάσεων στον υπολογιστή.



Σχήμα 3.19: Διαδικασία υπολογισμού των αποστάσεων μετρώντας μία από αυτές. Ο μηχανισμός πέντε τμημάτων με αισθητήρες ανάμεσα σε δύο ευθύγραμμους τοίχους. Με μαύρο χρώμα φαίνονται οι αισθητήρες.

Τα τοιχώματα στα οποία θα γίνονταν και τα πειράματα είναι πλαστικά και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή λαβύρινθων για micro – mouse. Είναι κατάλληλα για αισθητήρες υπέρυθρων λόγω του άσπρου χρώματός τους. Οι αισθητήρες μεγαλύτερης απόστασης τοποθετήθηκαν στις 45°, ενώ οι μικρότερης στις 90°. Η τοποθέτηση αυτή είναι λογική, μιας και στις 45° οι αισθητήρες 'βλέπουν' μεγαλύτερες αποστάσεις. Τα δεδομένα των αισθητήρων μεταφέρονται από τον επεξεργαστή μέσω της σειριακής θύρας στον υπολογιστή και καταγράφονται. Επειδή η έξοδος των αισθητήρων, όπως είδαμε, είναι αναλογική, τη βάζουμε είσοδο στις αναλογικές θύρες του επεξεργαστή και την ψηφιοποιούμε μέσω ενός A/D μετατροπέα που βρίσκεται ενσωματωμένος στο ολοκληρωμένο. Το ψηφιακό σήμα στη συνέχεια είναι αυτό που μεταφέρεται από τη σειριακή θύρα.

Για τον υπολογισμό των πραγματικών αποστάσεων μεταξύ των τεσσάρων αισθητήρων και των τοιχωμάτων δεν είναι απαραίτητη η άμεση μέτρησή τους, για κάθε αισθητήρα ξεχωριστά, αλλά αρκεί να μετρηθεί μία από αυτές. Στη συνέχεια ο υπολογισμός των υπόλοιπων γίνεται με την παρακάτω μαθηματική διαδικασία.

Θεωρώντας ότι γνωρίζουμε την απόσταση d_1 , οι άλλες αποστάσεις θα δίνονται από τους τύπους:

$$d_{3} = d_{walls} - d_{1} - 2s_{off},$$

$$s_{off\phi} = \frac{s_{off}}{\cos\phi},$$

$$d_{2} = \frac{d_{1} + s_{off}}{\cos\phi} - s_{off\phi} \stackrel{(3.1)}{=} \frac{d_{1}}{\cos\phi},$$

$$d_{4} = \frac{d_{3}}{\cos\phi},$$

$$(3.1)$$

όπου s_{off} είναι η απόσταση που φαίνεται στο σχήμα 3.19. Ομοίως φαίνεται και η απόσταση $s_{off\phi}$. Με d_1 , d_2 , d_3 και d_4 δηλώνονται οι πραγματικές αποστάσεις από τους τοίχους και ϕ είναι η γωνία των 45°. Η απόσταση μεταξύ των δύο παράλληλων τοίχων δηλώνεται ως d_{walls} .

Για να μπορέσουμε να εξάγουμε μία συνάρτηση για την έξοδο των αισθητήρων σε σχέση με την απόσταση, λάβαμε δείγματα από τα 4 cm μέχρι και τα 80 cm για την απόσταση d_1 με βήμα 2 cm μετακινώντας το μηχανισμό κάθετα προς τους τοίχους. Η δειγματοληψία αυτή μας έδωσε μια αντιστοιχία μεταξύ της πραγματικής απόστασης και της τάσης εξόδου των αισθητήρων. Με τη βοήθεια του Matlab βρήκαμε μία πολυωνυμική συνάρτηση η οποία περιγράφει καλά την παραπάνω σχέση (Σχήμα 3.20 - εξίσωση 3.2):

$$y = 21x^6 - 190x^5 + 660x^4 - 1200x^3 + 130x^2 - 770x + 230$$
(3.2)



Σχήμα 3.20: Η συνάρτηση τάσης εξόδου αισθητήρα - απόστασης (με κόκκινο χρώμα) και η πολυωνυμική συνάρτηση έκτου βαθμού που την προσεγγίζει (με μπλε χρώμα).

3.3 Το τελικό πρωτότυπο

3.3.1 Κατασκευή με χρήση C.A.D.

Τα βασικά ερωτήματα για τη μορφή του μηχανισμού και την τοποθέτηση των στοιχείων του, απαντήθηκαν με τα πειράματα του πρώτου πρωτότυπου. Με κριτήρια τη μέγιστη αποδοτικότητα στο ελάχιστο βάρος, τις δυνατότητες του μηχανουργείου και την απαιτούμενη καλαισθησία, σχεδιάσαμε ένα κέλυφος που θα αντικαθιστούσε τις βάσεις από αλουμίνιο. Το κέλυφος, για προφανείς λόγους, χωρίστηκε σε δύο τμήματα, τη θήκη και το καπάκι.

Το μπροστινό μέρος της θήκης σχεδιάστηκε κυρτό ενώ το πίσω μέρος κοίλο.

Για το τμήμα, που είναι πρώτο η ύπαρξη χυρτότητας θα αυξήσει τη διεισδυτικότητά του σε περιβάλλοντα όπως άμμος και λάσπη. Ένα τμήμα, που είναι μέρος του σώματος, με τη βοήθεια της κυρτότητάς του και της κοιλότητας του επόμενου, μειώνει το κενό στο σημείο της άρθρωσης, με αποτέλεσμα έναν συμπαγή μηχανισμό, που, όσα εμπόδια ξεπερνάει το κεφάλι, δε θα τα αντιμετωπίζουν τα τμήματα του σώματος. Επίσης, στο μπροστινό μέρος υπάρχει και μία θέση στην οποία βιδώνεται ο κινητήρας της άρθρωσης με το απαραίτητο κενό στο κάτω μέρος για τα καλώδια που έχουν έξοδο από το μπροστινό μέρος του κινητήρα.



Σχήμα 3.21: Η θήκη του κελύφους ενός BTM του τελικού πρωτότυπου.



Σχήμα 3.22: Το καπάκι του κελύφους ενός BTM του τελικού πρωτότυπου.

Η σπουδαιότητα του σχεδιασμού του κελύφους δε βασίζεται μόνο στη διεισδυτική του ικανότητα, αλλά και στον τρόπο σταθεροποίησης των παραποδίων. Τα κενά στο μέσο των πλευρικών τοιχωμάτων της θήκης επιτρέπουν στα παραπόδια να εκτελούν την κατακόρυφη κίνησή τους σειρόμενα μέσα σε αυτά. Το πλάτος των κενών είναι αντίστοιχο με το πάχος των παραποδίων, με αποτέλεσμα, όταν ένα παραπόδιο δέχεται δύναμη οριζόντια, να μη μεταφέρεται η δύναμη στην κεφαλή του κινητήρα παραποδίων, αλλά στο τοίχωμα της θήκης. Αυτό δεν αυξάνει μόνο το χρόνο ζωής του κινητήρα, αλλά σταθεροποιεί το παραπόδιο από ταλαντώσεις που προέρχονται από τη σύνδεση μεταξύ κεφαλής του κινητήρα και παραποδίου, στην οποία υπάρχει κάποια ελαστικότητα (μία παρατήρηση που φάνηκε αρκετά στο πειραματικό πρωτότυπο).



Σχήμα 3.23: Η τοποθέτηση κινητήρων και παραποδίων στο κέλυφος ενός BTM του τελικού πρωτότυπου.

Το καπάκι του κελύφους δεν έχει μόνο αισθητικό χαρακτήρα, αλλά και λειτουργικό. Στο πίσω μέρος του γίνεται στήριξη του ενός τμήματος με την κεφαλή του κινητήρα του προηγούμενου. Στο μπροστινό μέρος ένα άνοιγμα επιτρέπει την περιστροφική κίνηση του συνδετήρα, που μεταφέρει την κίνηση σε επόμενο BTM, με εύρος κίνησης 180 μοιρών. Τα κενά στο μέσο των πλευρικών τοιχωμάτων είναι επεκτάσεις των κενών που είδαμε στη θήκη. Σκοπός τους είναι να επιτρέπουν την μέγιστη είσοδο των παραποδίων στο σώμα για μικρότερη αλληλεπίδραση με το περιβάλλον, όταν αυτό απαιτείται.

Η συναρμολόγηση ενός BTM του τελιχού πρωτότυπου φαίνεται στο σχήμα 3.23, ενώ το τελιχό πρωτότυπο σχεδιασμένο σε C.A.D. φαίνεται στο σχήμα 3.24.



Σχήμα 3.24: Το τελικό πρωτότυπο σχεδιασμένο σε C.A.D.

3.3.2 Τελικό πρωτότυπο πέντε τμημάτων

3.3.2.1 Κατασκευή και συναρμολόγηση

Η κατασκευή του κελύφους του μηχανισμού έγινε στο μηχανουργείο του Ι.Τ.Ε. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν πλαστικό και η κατεργασία έγινε ξεχωριστά για το κάθε κέλυφος με όργανα κοπής. Όπως ήταν αναμενόμενο, υπήρξαν μικρές διαφοροποιήσεις στο σχεδιασμό λόγω των κατασκευαστικών δυνατοτήτων των εργαλείων. Η ομοιότητα όμως στη μορφή, αλλά και στη λειτουργικότητα, μεταξυ του *C.A.D.* μοντέλου και του πραγματικού είναι εμφανής (Σχήματα 3.24 και 3.31). Το κέλυφος, χωρισμένο σε θήκη και καπάκι όπως και στο σχέδιο του C.A.D., έχει την κύρτωση στο μπροστινό μέρος και τη θέση για τον κινητήρα της άρθρωσης ενώ το κάτω μέρος του είναι καμπυλωμένο με σκοπό τη μείωση της τριβής με το υπόστρωμα. Στο μέσο των πλευρικών τοιχωμάτων υπάρχουν τα απαραίτητα κενά για την έξοδο των παραποδίων από το σώμα, ενώ το πίσω μέρος έχει την κοιλότητα που σχεδιάστηκε και στο C.A.D.

62



Σχήμα 3.25: Το πλαστικό κέλυφος του πραγματικού ΒΤΜ σε διάφορες όψεις.

Για την ένωση των BTM, κατασκευάστηκε ένας αλουμινένιος αγωγός που επιτρέπει την διέλευση καλωδίων από το ένα τμήμα στο επόμενο (Σχήμα 3.29). Ο αγωγός αυτός βιδώνεται στο πίσω μέρος της θήκης, σε ειδική υποδοχή, και στην κεφαλή του κινητήρα του προηγούμενου τμήματος. Σε αντίθεση με το σχέδιο του σχήματος 3.22, στο πραγματικό κέλυφος, το κενό, που επιτρέπει την περιστροφή του αλουμινένιου αγωγού, κατασκευάστηκε στη θήκη και όχι στο καπάκι, με μόνη απώλεια την αδυναμία στεγανοποίησης του μπροστινού τμήματος. Κάτι τέτοιο, όμως, δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα πειράματα στα περιβάλλοντα που θα ασχοληθούμε στην παρούσα εργασία.

Η κατασκευή των παραποδίων στο τελικό πρωτότυπο έγινε από πλακέτες τυπωμένων κυκλωμάτων, όπως και στο αρχικό, αφού η απόδοσή τους ήταν άκρως ικανοποιητική. Για την τοποθέτησή τους στις κεφαλές των κινητήρων των παραποδίων έγιναν δύο τρύπες και στο κυκλικό μέρος των παραποδίων, και στις κεφαλές, ενώ η σταθεροποίηση έγινε με βίδες και παξιμάδια (Σχήμα 3.26).



Σχήμα 3.26: Δύο παραπόδια βιδωμένα στις πλαστικές κεφαλές δύο κινητήρων παραποδίων.



Σχήμα 3.27: Τα επιμέρους τμήματα του ρομπότ ΝΗΡΗΙΣ. Αριστερά φαίνονται οι πλακέτες με τα ηλεκτρονικά μέρη και τον ελεγκτή. Στο κέντρο φαίνονται τα πλαστικά κελύφη. Στο κάτω μέρος φαίνεται η κωνική κατασκευή του κεφαλιού. Δεξιά φαίνονται οι κινητήρες των αρθρώσεων, τα παραπόδια και στην άκρη δεξιά οι κινητήρες των παραποδίων.

64

Επειδή τα ηλεκτρονικά μέρη δεν ήταν δυνατόν να χωρέσουν σε ένα κέλυφος όπως τα προηγούμενα, κατασκευάστηκε ένα κωνικό κεφάλι από μία πλαστική κορίνα. Στο σχήμα 3.27 φαίνεται το κεφάλι με κίτρινο χρώμα.

Αφού βιδωθούν τα παραπόδια στις κεφαλές των κινητήρων, και αυτές με τη σειρά τους στους κινητήρες, τοποθετούμε το σύστημα αυτό στη θήκη. Η τοποθέτηση γίνεται βιδώνοντας τους κινητήρες, άμεσα, πάνω στα τοιχώματα της θήκης, στα σημεία που φαίνονται στην πλαϊνή όψη της θήκης στο σχήμα 3.25. Για να μπορούν να βιδωθούν οι κινητήρες με την πλαϊνή τους μεριά στα τοιχώματα, έγιναν δύο τρύπες στο καπάκι των κινητήρων, προσέχοντας να μην επηρεαστούν τα γρανάζια των μειωτήρων που βρίσκονται στη θέση αυτή. Στη συνέχεια βιδώνονται και οι κινητήρες των αρθρώσεων, και τα τμήματα ενώνονται μέσω των αγωγών αλουμινίου. Η σύνδεση των καλωδίων και η τοποθέτηση των πλακετών στο κεφάλι ολοκληρώνουν τη διαδικασία κατασκευής του ρομποτικού πολύχαιτου. Το συνολικό μήκος του μηχανισμού είναι 50*cm* και το κάθε BTM έχει μήκος 10*cm*, πλάτος 6, 5*cm* και ύψος 6, 5*cm*.



Σχήμα 3.28: Το παραπόδιο βιδώνεται στην κεφαλή του κινητήρα, και η τελευταία στον κινητήρα. Η επιφάνεια του παραποδίου που θα βιδωθεί η κεφαλή του κινητήρα καθορίζει και το αν είναι δεξί ή αριστερό παραπόδιο.



Σχήμα 3.29: Οι κινητήρες παραποδίων βιδώνονται στα πλευρικά τοιχώματα και στη συνέχεια τοποθετείται ο κινητήρας άρθρωσης και ο συνδετήρας - αγωγός.



Σχήμα 3.30: Ο μηχανισμός συναρμολογημένος χωρίς τα ηλεκτρονικά μέρη και τα καπάκια.





Σχήμα 3.31: Ο ρομποτικός πολύχαιτος σε λειτουργία.

3.3.2.2 Ηλεκτρονικά μέρη και έλεγχος

Για τον έλεγχο χρησιμοποιήσαμε τον ελεγκτή DSP56F807 της Motorola. Ο συνδυασμός της επεξεργαστικής ισχύος ενός DSP και της λειτουργικότητας ενός μικροελεγκτή με ένα ευέλικτο σετ από περιφερειακά σε ένα ολοκληρωμένο, μας δίνει τη δυνατότητα να ελέγζουμε σερβομηχανισμούς και να λάβουμε δεδομένα

66

από αισθητήρες ταυτόχρονα. Ο ελεκτής αυτός δουλεύει στα 3,3V, οπότε ήταν αναγκαία η χρήση ενός buffer (SN74HCT240DW) για την ενίσχυση των σημάτων PWM που από τα 3.3V ανεβαίνουν στα 5V ώστε να αναγνωρίζονται από τους σερβοκινητήρες. Ο μηχανισμός έχει δυνατότητα αυτονομίας χρησιμοποιώντας μπαταρία που βρίσκεται στο τμήμα του κεφαλιού. Για τις απαιτήσεις των πειραμάτων, όπως, η διάρκεια λειτουργίας και η σταθερότητα της τάσης εισόδου, υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης του μηχανισμού σε τροφοδοτικό.

3.3.2.3 Κινητήρες

Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται στο μηχανισμό του ρομπότ ΝΗΡΗΙΣ είναι δύο ειδών. Ο ένας τύπος είναι αυτός που κινεί τις αρθρώσεις μεταξύ των BTM, ενώ ο δεύτερος, αυτός που κινεί τα παραπόδια. Είναι προφανής ο λόγος που αυτά τα δύο είδη πρέπει να είναι διαφορετικά: οι κινητήρες παραποδίων δεν απαιτούν μεγάλη ροπή, αλλά απαιτούν μικρή μάζα.

Κινητήρες Αρθρώσεων

Η επιλογή των χινητήρων αρθρώσεων βασίστηχε, χυρίως, στη ροπή. Η μεγάλη ροπή είναι πρωταρχιχή απαίτηση, γιατί γνωρίζουμε ότι η άμμος χαι, γενιχότερα, χάθε δύσχολο περιβάλλον, χρειάζεται δύναμη για να βεβαιώνεται ότι η επιθυμητή χυμάτωση είναι χαι αυτή που εχτελεί τελιχά ο μηχανισμός. Οι υπόλοιπες παράμετροι που δεν παύουν να είναι αρχετά σημαντιχές, αφορούν στην αντοχή του χινητήρα σε μεγάλες αντιστάσεις, στην ταχύτητα περιστροφής του χαι στο βάρος του. Το βάρος ειδιχότερα του χινητήρα απαιτείται να είναι όσο πιο μιχρό γίνεται, έτσι ώστε να μειώνεται το συνολιχό βάρος του μηχανισμού. Ο χινητήρας που φάνηχε να πληρεί όλες αυτές τις απαιτήσεις είναι ο HSR - 5995TG της Hitec, τα χαραχτηριστηχά του οποίου φαίνονται αναλυτιχά στο παράρτημα.



Σχήμα 3.32: Ο κινητήρας άρθρωσης HSR - 5995TG.

Η βαθμονόμηση των χινητήρων 5995TG έγινε με ανάλυση ειχόνων οι οποίες έδειχναν τη θέση που παίρνει η χεφαλή του χινητήρα, όταν σε αυτόν δίναμε είσοδο ένα PWM διαφορετιχού εύρους χάθε φορά. Ένα παράδειγμα τέτοιας ειχόνας φαίνεται στο σχήμα 3.33. Για τις διάφορες τιμές που πήραμε από αυτήν την ανάλυση, βρήχαμε μία σχέση μεταξύ εύρους παλμού PWM χαι γωνιαχής θέσης της χεφαλής του χινητήρα. Αυτή τη σχέση, με τη βοήθεια του Matlab, την προσεγγίσαμε με μία γραμμιχή συνάρτηση (εξίσωση 3.3).



Σχήμα 3.33: Εύρεση γωνια
κής μετατόπισης (κόκκινο χρώμα) της κεφαλής του κινητήρα (μπλε
 χρώμα) για PWMεύρους 1360ms.

$$y = 4,9x + 1500\tag{3.3}$$



Σχήμα 3.34: Σχέση μεταξύ εύρους παλμού PWM και γωνιακής θέσης της κεφαλής του κινητήρα (μπλε) και η γραμμική συνάρτηση προσσέγισής της (κόκκινη).



Σχήμα 3.35: Ο κινητήρας παραποδίων HS - 81MG.

Κινητήρες Παραποδίων

Για τους λόγους που αναλύσαμε σε προηγούμενες παραγράφους (3.3.1), οι κινητήρες παραποδίων δεν απαιτούν μεγάλη ροπή. Έτσι, αυτό που έχει ενδιαφέρον για την επιλογή του κατάλληλου κινητήρα παραποδίων είναι οι διαστάσεις, η μάζα και η ταχύτητα. Κατάλληλος κινητήρας φάνηκε ο HS-81MG της Hitec, τα χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται αναλυτικά στο παράρτημα.



Σχήμα 3.36: Διάγραμμα ροής δεδομένων από το
νDSPπρος τον υπολογιστή και αντίστροφα.

3.3.2.4 Επικοινωνία

70

Η επικοινωνία με το μηχανισμό γίνεται ενσύρματα, αλλά και ασύρματα. Η ενσύρματη επικοινωνία γίνεται μέσω της σειριακής θύρας του υπολογιστή. Μέσω του Hyper Terminal, ο χρήστης πληκτρολογεί εντολές με τη μορφή απλών χαρακτήρων, τα σήματα μέσω του ολοκληρωμένου Max232 οδηγούνται σε επίπεδο TTL και γίνονται είσοδος στη σειριακή θύρα του επεξεργαστή. Η ασύρματη επικοινωνία δεν διαφέρει πολύ από την ενσύρματη. Πάλι, ο έλεγχος γίνεται μέσω του Hyper Terminal και τα σήματα οδηγούνται μέσω του Max232 στον επεξεργαστή, όμως μεταξύ της σειριακής του υπολογιστή και του ολοκληρωμένου Max232, αντί για καλώδια, μεσολαβούν δύο όμοιες συσκευές που επικοινωνούν ασύρματα από τη σειριακή μετατρέπονται σε Bluetooth, μεταδίδονται από τη μία συσκευή, λαμβάνονται από την άλλη, μετατρέπονται σε RS232 και καταλήγουν στο Max232 για να συνεχίσουν τη διαδικασία όπως περιγράψαμε πριν. Οι συσκευές είναι WCS-232 της Systembase και η λειτουργία τους βασίζεται στη μετατροπή του RS232 σε Bluetooth.



Σχήμα 3.37: WCS-232.Συσ
χευές μετατροπής RS232 σε Bluetooth.
Κεφάλαιο 4

Πειράματα με τα

Ρομποτικά Πρωτότυπα

4.1 Πειράματα με αισθητήρες

Ο πειραματισμός για χυματοειδή μεταχίνηση με αισθητήρες έγινε χυρίως για τη συμπεριφορά centering. Ο μηχανισμός που χρησιμοποιήθηχε ήταν αυτός των πέντε τμημάτων χωρίς παραπόδια χαι με ρόδες σε eel – like αλληλεπίδραση (Σχήμα 3.15). Στα σχήματα 4.2-4.5 φαίνονται μεριχά από τα πειράματα που έγιναν για διάφορες διαδρομές περιορισμένες από τα πλαστιχά τειχάχια που περιγράψαμε προηγουμένως. Το πρώτο πείραμα έγινε σε μία διαδρομή στενού περάσματος με μία δεξιά μετατόπιση των τοιχωμάτων μετά το μέσον της διαδρομής, το δεύτερο έγινε σε μία διαδρομή έντονων χαμπυλώσεων σε σχήμα χαμπυλωτού ζήτα χαι το τελευταίο, χαι πιο δύσχολο, έγινε σε μία χλειστή χαι στενή, χυχλιχή, διαδρομή.

Η τοποθέτηση μιας πορτοχαλί σφαίρας από ελαφρύ υλιχό στην ουρά του μηχανισμού λειτουργεί ως marker για την παραχολούθηση της διαδρομής της ουράς σε χάθε πείραμα. Οι ειχόνες από τα video χάθε πειράματος επεξεργάστηχαν στο Matlab όπου χαι σχεδιάστηχαν οι διαδρομές. Ως σημείο της διαδρομής σε χάθε ειχόνα λάβαμε το χέντρο βάρους της αναγνωρισμένης πορτοχαλί περιοχής. Το σημείο αυτό επισημαίνεται στα σχήματα 2.2-2.4 με έναν χίτρινο αστερίσχο.



Σχήμα 4.1: Μία πορτοκαλί σφαίρα λειτουργεί ως markerγια την παρακολούθηση της κίνησης της ουράς.



Σχήμα 4.2: Ο μηχανισμός εκτελεί την συμπεριφορά centering σε στενό πέρασμα με κλίση στο μέσον της διαδρομής. Με μπλε φαίνεται η τροχιά της ουράς του μηχανισμού, ενώ με κίτρινο αστερίσκο το κέντρο βάρους της πορτοκαλί περιοχής [13].



Σχήμα 4.3: Ο μηχανισμός εκτελεί την συμπεριφορά centering σε στενό πέρασμα σχήματος ζήτα. Με μπλε φαίνεται η τροχιά της ουράς του μηχανισμού, ενώ με χίτρινο αστερίσκο το κέντρο βάρους της πορτοκαλί περιοχής [13].



Σχήμα 4.4: Ο μηχανισμός εκτελεί την συμπεριφορά centering σε στενή, κλειστή, κυκλική διαδρομή. Με μπλε φαίνεται η τροχιά της ουράς του μηχανισμού ενώ με κίτρινο αστερίσκο το κέντρο βάρους της πορτοκαλί περιοχής. Στο πείραμα αυτό ο μηχανισμός είναι και ενεργειακά αυτόνομος με μπαταρία 5V [13].



Σχήμα 4.5: Ο μηχανισμός εκτελέι την συμπεριφορ
άwall-following σε διαδρομή με καμπύλη περίπου 90°.

Με τον ίδιο μηχανισμό δοχιμάστηκε και η συμπεριφορά wall – following. Τα πλαστικά τειχάχια αυτή τη φορά στήθηκαν μόνο στη δεξιά πλευρά του μηχανισμού δημιουργώντας μία χαμπυλότητα περίπου 90° και η απόσταση που έπρεπε να διατηρεί τέθηκε στα 80 cm.

Τα αποτελέσματα και των δύο συμπεριφορών στο μηχανισμό κυματοειδούς μετακί-νησης έδωσαν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα, πράγμα που αποδεικνύει την ορθότητα των νόμων ελέγχου.

4.2 Πειράματα με το αρχικό πρωτότυπο

Η πρώτη δοχιμή των παραποδίων στο μηχανισμό δύο τμημάτων είχε δώσει ενδιαφέροντα αποτελέσματα (παρ. 3.2.3.2) σχετιχά με τη χρήση παραποδίων στην χυματοειδή μεταχίνηση. Για να δούμε αν αυτό ισχύει χαι στο μηχανισμό των πέντε τμημάτων, στην άμμο αυτή τη φορά χαι με τα επανασχεδιασμένα παραπόδια, χατασχευάσαμε ένα χώρο μαχρόστενο, στον οποίο βάλαμε άμμο με ύψος ιχανό ώστε να μην αχουμπάει ο μηχανισμός στον πυθμένα, χαθώς χινείται, πλάτος ιχανό για να μπορεί να χινηθεί με ευχολία σε ευθεία για οποιοδήποτε πλάτος χυμάτωσης χαι μήχος τέτοιο, ώστε να μπορεί να χινηθεί περισσότερο από ένα μήχος σώματος.

Στη φάση αυτή έγιναν αρχετά πειράματα για τις διάφορες παραμέτρους του μηχανισμού. Τέτοιες παράμετροι είναι, η χρήση ή μη λεπίδων και σε πια κατεύθυνση, η φορά μετάδοσης του χύματος και το πλάτος χύματος.

Μελετώντας τη συμπεριφορά του μηχανισμού και για τις δύο τοποθετήσεις των λεπίδων παρατηρήσαμε ότι έχουν σχεδόν την ίδια απόδοση και, μάλιστα, μικρή σε σχέση με τα αναμενόμενα από τις προσομοιώσεις. Επίσης, πολύ μικρό βήμα παρατηρήσαμε στις δοκιμές για φορά μετάδοσης κύματος με eel – like τρόπο.

Ικανοποιητικά αποτελέσματα είχαμε αφαιρώντας τις λεπίδες από το μηχανισμό. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η διαφορά της διανυόμενης απόστασης σε χρόνο δέκα κύκλων για τρεις διαφορετικές τιμές του πλάτους A της εξίσωσης 1.1. Οι μαύρες ταινίες απέχουν η κάθε μία από την επόμενή της 10 cm και ο μηχανισμός ξεκινάει ακουμπώντας την ουρά στην αριστερή πλευρά.



Σχήμα 4.6: Ποδοκυματο
ειδής μεταχίνηση διάρχειας δέκα κύκλων του μηχανισμού στην άμμο με πλάτο
ς $A=30^{\circ}.$



Σχήμα 4.7: Ποδοκυματο
ειδής μετακίνηση διάρκειας δέκα κύκλων του μηχανισμού στην άμμο με πλάτο
ς $A=45^\circ.$



Σχήμα 4.8: Ποδοκυματοειδής μετα
κίνηση διάρκειας δέκα κύκλων του μηχανισμού στην άμμο με πλάτο
ς $A=60^\circ.$

4.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΑΡΧΙΚΟ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ

Παρατηρώντας τη δυσκολία του μηχανισμού να μετακινηθεί, καθώς αρκετό μέρος του κάθε τμήματος βυθίζεται στην άμμο, δοκιμάσαμε να βγάλουμε τη βάση στήριξης των παραποδίων (Σχήμα 3.1(β)). Αυτή η αλλαγή μειώνει το βάρος σε κάποιο βαθμό, αλλά κυρίως μειώνει την επιφάνεια που εισέρχεται και καλύπτεται από την άμμο, κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των δυνάμεων που αντιστέκονται στην κίνηση. Το αποτέλεσμα ήταν σαφώς καλύτερο από τα προηγούμενα πειράματα (Σχήμα 4.9).



Σχήμα 4.9: Ποδοχυματοειδής μεταχίνηση διάρχειας δέχα χύχλων του μηχανισμού στην άμμο με πλάτος $A = 60^{\circ}$, χωρίς λεπίδες και χωρίς το τμήμα στήριξης αυτών.

Παρά την αβεβαιότητα για τις διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν την χίνηση, αβεβαιότητα που προχύπτει χυρίως από το πολύπλοκο σχήμα του χάθε τμήματος, βασιχά συμπεράσματα μπόρεσαν να διατυπωθούν από το πειραματικό πρωτότυπο. Η πρώτη παρατήρηση έχει να χάνει με την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου σε σχέση με την χυματοειδή στη μεταχίνηση στην άμμο. Όπως είδαμε από τα πειράματα, ο μηχανισμός δεν μπόρεσε να μεταχινηθεί χωρίς τη χρήση παραποδίων. Μια δεύτερη παρατήρηση, έστω χαι χωρίς τεχμηριωμένη απόδειξη, δείχνει ότι ο νόμος χίνησης και η επιλογή του χατωφλίου r_i στην εξίσωση 2.1 χρονίζει τα παραπόδια όπως θα έπρεπε και όπως φαινόταν στις προσομοιώσεις. Επίσης, μία σημαντιχή παρατήρηση είναι ότι τα πέντε τμήματα είναι αρχετά για να πραγματοποιηθεί ένας ιχανοποιητικός χυματισμός. Η τελευταία παρατήρηση, που έχει σχέση με την απόδοση του μηχανισμού όταν αφαιρέσαμε τη βάση των παραποδίων, θα λειτουργήσει σαν γνώμονας για την ανάπτυξη του εξωτερικού καλύμματος του τελικού πρωτότυπου.

4.3 Πειράματα με το τελικό πρωτότυπο

Με την ολοχλήρωση της κατασκευής του τελικού πρωτότυπου, άρχισε μια σειρά πειραμάτων, με σκοπό τη μελέτη των διάφορων παραμέτρων του μηχανισμού. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν (i) η χρήση, ή μη, παραποδίων, (ii) η χρήση, ή μη, λεπίδων και σε ποια κατεύθυνση, (iii) η φορά μετάδοσης του κύματος και (iv) οι διάφορες τιμές του πλάτους A και της γωνιακής μετατόπισης ψ. Επίσης, έγιναν πειράματα σύγκρισης των δύο τύπων μετακίνησης και αντιπαραβολή με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Τα πειράματα έγιναν κυρίως σε άμμο, μιας και είναι από τα δυσκολότερα περιβάλλοντα όπου δεν είναι απαραίτητη η στεγανοποίηση του μηχανισμού.



Σχήμα 4.10: (αριστερά) Παράλληλη τοποθέτηση λεπίδων. (δεξιά) Κάθετη τοποθέτηση λεπίδων.

4.3.1 Πειράματα σε χαρτόνι

Σύμφωνα με τις προσομοιώσεις, σε λεία επιφάνεια, που οι δυνάμεις στην παράλληλη και την κάθετη κατεύθυνση είναι πολύ μικρές, ένας μηχανισμός κυματοειδούς μετακίνησης δεν μπορεί να κινηθεί. Για να διαπιστώσουμε αν αυτό συμβαίνει και στο ρομπότ ΝΗΡΙΗΣ, όταν έχει απενεργοποιημένα τα παραπόδια, κάναμε τα παρακάτω πειράματα, διαφοροποιώντας κάποιες παραμέτρους κίνησης του συστήματος. Τόσο με eel-like, όσο και με polychaete-like τρόπο μετακίνησης και αλληλεπίδρασης, ο μηχανισμός έκανε επι τόπου κυματοειδείς κινήσεις χωρίς να μετακινείται.



Σχήμα 4.11: Ο μηχανισμός σε χαρτόνι εκτελεί επι τόπου κυματοειδείς κινήσεις χωρίς να μετακινείται, σε κάθε περίπτωση.

4.3.2 Πειράματα στην άμμο

Τα πειράματα στην άμμο χωρίστηκαν σε τέσσερις κατηγορίες: στην eel – like με λεπίδες, στην eel – like χωρίς λεπίδες και στις αντίστοιχες polychaete – like. Όλες οι παραπάνω κατηγορίες χωρίζονται σε αυτές με παραπόδια και χωρίς.

Α. Χωρίς παραπόδια (κυματοειδής μετακίνηση)

Eel-like με λεπίδες: Το αποτέλεσμα ήταν οι επι τόπου χυματοειδείς χινήσεις χωρίς μεταχίνηση του μηχανισμού.

Eel-like χωρίς λεπίδες: Σε αυτήν την περίπτωση τα αποτελέσματα ήταν αρχετά απρόσμενα μιας χαι ο μηχανισμός χινήθηκε προς τα πίσω, με μιχρή, σχετιχά,

82 $KE\Phi A\Lambda AIO$ 4. $\Pi EIPAMATA$ ME TA POMILOTIKA $\Pi P\Omega TOT\Upsilon\Pi A$

ταχύτητα.



Σχήμα 4.12: Σημείο εκκίνησης για το παραπάνω πείραμα.



Σχήμα 4.13: Η μετατόπιση του μηχανισμού μετά από χρόνο 24 περίπου κύκλων.

Polychaete-like με λεπίδες: Η θέση εκκίνησης θα είναι και σε αυτό το πείραμα, όπως και στα επόμενα, η αριστερή θέση όπως φαίνεται στο σχήμα 4.12.



4.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΤΕΛΙΚΟ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ











(δ)

Σχήμα 4.14: Ο μηχανισμός με λεπίδες σε polychaete-like χυματοειδή μεταχίνηση. Μετατόπιση σε χρόνο 19 χύχλων με συχνότητα f=1Hzγια (α) $A=20^\circ$ (β) $A=30^\circ$ (γ) $A=45^\circ$ (δ) $A=60^\circ.$

Polychaete-like χωρίς λεπίδες: Στην περίπτωση αυτή, όπως είχε φανεί και από τα πειράματα του αρχικού πρωτότυπου, ο μηχανισμός κινείται αποδοτικότερα σε σχέση με το μηχανισμό με λεπίδες. Σε μικρότερα πλάτη, το φαινόμενο της διαφοράς αυτής αυξάνεται.



 (α)



(β)



(γ)



 (δ)

Σχήμα 4.15: Ο μηχανισμός χωρίς λεπίδες σε polychaete – like κυματοειδή μεταχίνηση. Μετατόπιση σε χρόνο 18 κύκλων με συχνότητα f=1Hzγια (α) $A=20^{\circ}$ (β) $A=30^{\circ}$ (γ) $A=45^{\circ}$ (δ) $A=60^{\circ}$.

B. Mε παραπόδια

Eel-like με λεπίδες: Τα παραπόδια στην περίπτωση που έχουμε *eel – like* μεταχίνηση, ενεργοποιούνται αντίστροφα από τον νόμο ελέγχου για την *polychaete– like*. Και σε αυτήν την περίπτωση το αποτέλεσμα ήταν οι επί τόπου χυματοειδείς χινήσεις χωρίς μεταχίνηση του μηχανισμού.

Eel-like χωρίς λεπίδες: Στις επόμενες ειχόνες φαίνονται τα αποτελέσματα για διάφορες τιμές του πλάτους. Φαίνεται ότι η αύξηση του πλάτους χίνησης προχαλεί μείωση της αποδοτιχότητας. Όπως είδαμε, στα πειράματα της eel – like μεταχίνησης χωρίς λεπίδες χαι χωρίς παραπόδια, ο μηχανισμός έχει την τάση να χινείται προς τα πίσω. Ο χρονισμός των παραποδίων, όμως, είναι τέτοιος ώστε να ευνοείται η εμπρόσθια μεταχίνηση. Έτσι, από τη μείωση της απόδοσης συμπεραίνουμε ότι, όσο αυξάνει το πλάτος χίνησης, η αλληλεπίδραση του σώματος με το υπόστρωμα επηρεάζει περισσότερο την χατεύθυνση χίνησης απ' ό,τι η αντίστοιχη αλληλεπίδραση των παραποδίων. Μέχρι χάποιο όριο πλάτους, χάτι λιγότερο από 60°, η χατεύθυνση χίνησης εξαρτάται από τα παραπόδια. Μετά από αυτό το όριο, η χατεύθυνση χίνησης φαίνεται να εξαρτάται από το σώμα χαι να αλλάζει φορά. Για πλάτος 60°, ο μηχανισμός αφού μετατοπίστηχε χατά χάποια εχατοστά μπροστά, μέχρι να αρχίσει να βυθίζεται στην άμμο, άρχισε να χινείται πάλι προς τα πίσω με σταθερό ρυθμό.



Σχήμα 4.16: Θέση εκκίνησης του μηχανισμού.



Σχήμα 4.17: Μετατόπιση μετά από χρόνο 30
 κύκλων για πλάτος $A=20^\circ$ και συχνότητ
αf=1Hz.



Σχήμα 4.18: Μετατόπιση μετά από χρόνο 30
 χύκλων για πλάτος $A=30^\circ$ και συχνότητ
αf=1Hz.

Polychaete-like με λεπίδες: Με τη χρήση των παραποδίων η απόδοση του μηχανισμού αυξάνεται αρκετά και περισσότερο ακόμα για τα μικρότερα πλάτη κίνησης. Για την ίδια απόσταση ο μηχανισμός με παραπόδια χρειάστηκε τρεις κύκλους λιγότερους από αυτόν χωρίς παραπόδια, για πλάτος κίνησης τις 60 μοίρες. Για τα μικρότερα πλάτη, όχι μόνο χρειάστηκε 3 κύκλους λιγότερους, αλλά διάνυσε και περίπου 10 cm περισσότερα όπως φαίνεται από τις μαύρες ταινίες που απέχουν η κάθε μία από την επόμενη 10 cm και είναι τοποθετημένες κατά μήκος των τοιχωμάτων του κουτιού που γίνονται τα πειράματα.

4.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΤΕΛΙΚΟ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ



(α)











(δ)

Σχήμα 4.19: Ο μηχανισμός με λεπίδες σε polychaete – like ποδοχυματοειδή μεταχίνηση. Μετατόπιση σε χρόνο 16 χύχλων με συχνότητα f = 1Hz για (α) $A = 20^{\circ}$ (β) $A = 30^{\circ}$ (γ) $A = 45^{\circ}$ (δ) $A = 60^{\circ}$.



(α)



(β)





 (δ)

Σχήμα 4.20: Ο μηχανισμός χωρίς λεπίδες σε polychaete – like ποδοχυματοειδή μεταχίνηση. Μετατόπιση σε 7,5 χύχλους με συχνότητα f=1Hzγια (α) $A=20^\circ$ (β) $A=30^\circ$ (γ) $A=45^\circ$ (δ) $A=60^\circ.$

Polychaete-like χωρίς λεπίδες: Στην περίπτωση αυτή έχουμε την μέγιστη απόδοση του μηχανισμού, που σε μολις κάτι λιγότερο από πέντε κύκλους, διανύει απόσταση ίση με το μήκος του σώματός του (Σχήμα 4.20 (δ)).

4.3.3 Περιστροφές του μηχανισμού

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει στην ενότητα 2.3, οι στροφές του μηχανισμού επιτυγχάνονται με την αλλαγή της τιμής του ψ της εξίσωσης 1.1 και η κατεύθυνσή τους επηρεάζεται από παραμέτρους όπως η φορά μετάδοσης του κυματισμού στο σώμα του μηχανισμού και από τον τύπο αλληλεπίδρασης.

Τα πειράματα αφορούν διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν χυρίως την καμπυλότητα της περιστροφής του μηχανισμού. Αυτές είναι, η γωνιαχή μετατόπιση ψ, το πλάτος A και ο τρόπος χρήσης των παραποδίων.

4.3.3.1 Περιστροφή με χυματοειδή μεταχίνηση

Οι στροφές με χυματοειδή τρόπο μεταχίνησης επιτυγχάνονται με την αλλαγή μόνο του ψ, χωρίς τη χρήση παραποδίων. Το αποτέλεσμα που παίρνουμε καθώς αυξάνουμε την τιμή του ψ είναι αύξηση της καμπυλότητας της στροφής πάντα σε καμπύλη πορεία, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.22.



Σχήμα 4.21: Δεξιά θέση εκκίνησης μηχανισμού για τα πειράματα.









 (γ)

Σχήμα 4.22: Περιστροφές με χυματοειδή τρόπο μεταχίνησης του μηχανισμού για (α) $\psi = 4^{\circ}$ (β) $\psi = 6^{\circ}$ χαι (γ) $\psi = 8^{\circ}$.

4.3.3.2 Μία πλευρά παραποδίων με σταθερό ψ

Στην περίπτωση αυτή θα δούμε την αντίδραση του μηχανισμού στην ενεργοποίηση μίας πλευράς παραποδίων όταν το $\psi = 0^{\circ}$, δηλαδή ο μηχανισμός, στην περίπτωση μόνο χυματοειδούς μεταχίνησης, δεν έχει την τάση να στρίβει από μόνος του, όπως γινόταν στην προηγούμενη παράγραφο.

4.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΤΕΛΙΚΟ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ













 (δ)

Σχήμα 4.23: Περιστροφή μηχανισμού με ενεργοποιημένη την αριστερή πλευρά παραποδίων για (α) $A=20^\circ$ (β) $A=30^\circ$ (γ) $A=45^\circ$ (δ) $A=60^\circ$.

Στις παραπάνω εικόνες ο μηχανισμός χρησιμοποιεί την αριστερή πλευρά παραποδίων και η θέση εκκίνησης είναι από τα αριστερά, μεταβάλλοντας το πλάτος A.



(α)



(β)



 (γ)

Σχήμα 4.24: Περιστροφή του μηχανισμού ενεργοποιώντας την δεξιά μόνο πλευρά παραποδίων για σταθερό $A=60^\circ$ και (α) $\psi=4^\circ$ (β) $\psi=6^\circ$ και (γ) $\psi=8^\circ$.

4.3.3.3 Μία πλευρά παραποδίων με μεταβλητό ψ

Η μεταβολή του ψ, στην περίπτωση που είναι ενεργοποιημένη μία μόνο σειρά παραποδίων, έχει ως συνέπεια την αύξηση της χαμπυλότητας της στροφής. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 4.24, όπου ο μηχανισμός, με την αύξηση του ψ, στο ίδιο πλάτος χυμάτωσης, αυξάνει την χαμπυλότητα της στροφής του. Σημαντιχή παρατήρηση είναι ότι στη στροφή με τη βοήθεια μιας σειράς παραποδίων αυξάνει η σταθερότητα του μηχανισμού, αλλά χαι η ταχύτητα της περιστροφής.

4.3.3.4 Δύο πλευρές παραποδίων με μεταβλητό ψ

Στα πειράματα που έγιναν αυξάνοντας το ψ στο μηχανισμό με τη χρήση και των δύο σειρών παραποδίων, φάνηκε, όπως και στα προηγούμενα πειράματα, ότι μια τέτοια αύξηση αυξάνει και την καμπυλότητα της περιστροφής. Μια σημαντική παρατήρηση αφορά τη διαφορά της καμπυλότητας της περιστροφής με αυτήν την μέθοδο από αυτή με τη χρήση μιας σειράς παραποδίων αλλά και της περιστροφής με κυματοειδή τρόπο μετακίνησης. Μπορεί να υστερεί σε καμπυλότητα, η απόδοση της, όμως, έγκειται στην ταχύτητα με την οποία κινείται ο μηχανισμός πάνω στην καμπύλη τροχιά. Κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει φανερό και από τις παρακάτω εικόνες του σχήματος 4.25, παρατηρώντας τις τροχιές του μηχανισμού στην άμμο, όπου τα βήματα είναι σαφώς μεγαλύτερα απ΄ ό,τι αυτά στα πειράματα με χρήση μίας και καμίας πλευράς παραποδίων στις τρεις προηγούμενες παραγράφους.







 (γ)

Σχήμα 4.25: Στροφή του μηχανισμού ενεργοποιώντας και τις δύο πλευρές παραποδίων για σταθερό $A = 60^{\circ}$ και (α) $\psi = 4^{\circ}$ (β) $\psi = 6^{\circ}$ και (γ) $\psi = 8^{\circ}$.

4.3.4 Ανάλυση πειραματικών δεδομένων

Για να δούμε, λίγο πιο αναλυτικά, τα αποτελέσματα των πειραμάτων, μελετάμε λεπτομερώς τις τροχιές των πιο αποδοτικών από αυτά. Στην πρώτη περίπτωση συγκρίνουμε τις τροχιές κυματοειδούς μετακίνησης με και χωρίς τη χρήση λεπίδων (Σχήμα 4.26). Στην έναρξη της κίνησης ο μηχανισμός με λεπίδες φαίνεται να έχει μεγαλύτερο βήμα κίνησης S_L από το μηχανισμό χωρίς λεπίδες. Στη συνέχεια όμως, όταν ο μηχανισμός έχει εισχωρήσει σε κάποιο βαθμό στην άμμο, η απόδοσή του, το βήμα S_L δηλαδή, μειώνεται. Αντίθετα, ο μηχανισμός χωρίς λεπίδες φαίνεται να έχει σταθερό βήμα S_L σε όλη την διάρκεια της κίνησης, με αποτέλεσμα η χρήση λεπίδων να αποδεικνύεται λιγότερο αποδοτική. Η παραπάνω παρατήρηση γίνεται εμφανέστερη στην ενότητα 4.3.2 και ιδιαίτερα σε μικρότερα πλάτη.

4.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΤΕΛΙΚΟ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ



(α) Μηχανισμός χωρίς λεπίδες



(β) Μηχανισμός με λεπίδες

Σχήμα 4.26: Ο μηχανισμός χωρίς παραπόδια σε polychaete - like κυματοειδή μεταχίνηση. Με συχνότητα χίνησης f = 1Hz χαι πλάτος $A = 60^{\circ}$. Οι άσπρες γραμμές δείχνουν τις τροχιές της πρώτης άρθρωσης [11].

Η δεύτερη περίπτωση που αναλύσαμε είναι αυτή της χρήσης ή μη λεπίδων σε ποδοχυματοειδή μεταχίνηση. Εδώ, οι διαφορές είναι μεγάλες. Είναι προφανές από τις τροχιές των δύο μηχανισμών ότι η χρήση λεπίδων στην ποδοχυματοειδή μεταχίνηση μειώνει σημαντιχά την απόδοση.

Δεν είναι όμως ενδιαφέρουσα μόνο η σύγκριση μεταξύ της χρήσης ή μη λεπίδων, αλλά και η σύγκριση μεταξύ των τρόπων μετακίνησης, κυματοειδή και ποδοκυματοειδή. Έστω και με μειωμένη απόδοση, ο μηχανισμός ποδοκυματοειδούς μετακίνησης με λεπίδες είναι αποδοτικότερος απο κάθε περίπτωση κυματοειδούς μετακίνησης. Επίσης, από τις τροχιές στα σχήματα 4.26(α) και 4.27(α), φαίνεται ότι η χρήση παραποδίων στη κυματοειδή μετακίνηση, με κατάλληλη αλληλεπίδραση του σώματος με το περιβάλλον, υπερδιπλασιάζει το βήμα S_L του μηχανισμού.

Παρόλο που υπάρχει κάποια διαφοροποίηση μεταξύ του προσομοιωμένου μοντέλου και του πραγματικού στην περίπτωση της χρήσης λεπίδων, τα αποτελέσματα των πειραμάτων δείχνουν να συμφωνούν κατά πολύ με τις προσομοιώσεις. Οι συ-

γκρίσεις αυτές φαίνονται στα σχήματα 4.28 και 4.29.

(α) Μηχανισμός χωρίς λεπίδες.



(β) Μηχανισμός με λεπίδες.

Σχήμα 4.27: Ο μηχανισμός με παραπόδια σε polychaete - like ποδοχυματοειδή μεταχίνηση. Με συχνότητα χίνησης f = 1Hz χαι πλάτος $A = 60^{\circ}$. Οι άσπρες γραμμές δείχνουν τις τροχιές της πρώτης άρθρωσης [11].

Αυτό που είναι, τελικά, εμφανές από όλα τα πειράματα για μετακίνηση σε ευθεία, είναι ότι οι λεπίδες μειώνουν την απόδοση του μηχανισμού ειδικότερα όταν αυτός χρησιμοποιεί ποδοκυματοειδή τρόπο μετακίνησης, και ότι η προτεινόμενη ποδοκυματοειδής μετακίνηση των πολύχαιτων υπερδιπλασιάζει την απόδοση των μηχανισμών κυματοειδούς μετακίνησης. Η μέγιστη ταχύτητα του μηχανισμού παρατηρήθηκε στον ποδοκυματοειδή τρόπο μετακίνησης, χωρίς τη χρήση λεπίδων, και ξεπερνούσε τα 0, 45km/h.



Σχήμα 4.28: Κυματοειδής μεταχίνηση μηχανισμού σε ευθεία πορεία. Τιμές του βήματος S_L για διάφορα πλάτη: με συνεχείς γραμμές φαίνονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων χαι με διαχεχομμένες τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων [11].



Σχήμα 4.29: Ποδοχυματοειδής μεταχίνηση μηχανισμού σε ευθεία πορεία. Τιμές του βήματος S_L για διάφορα πλάτη: με συνεχείς γραμμές φαίνονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων και με διακεκομμένες τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων [11].

Αποδείξαμε, επίσης, πειραματικά ότι τα παραπόδια παίζουν σημαντικό ρόλο και στον τρόπο περιστροφής του μηχανισμού, διευρύνοντας τα είδη των δυνατών περιστροφών, αυξάνοντας την ταχύτητά τους, τη σταθερότητά τους και μειώνοντας, όταν είναι επιθυμητό, την ακτίνα της τροχιάς περιστροφής τους. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται ο μηχανισμός ρομπότ ΝΗΡΙΗΣ να πραγματοποιεί τους διάφορους

98 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΕ ΤΑ ΡΟΜΠΟΤΙΚΑ ΠΡΩΤΟΤΥΠΑ

τρόπους περιστροφής και να καταφέρνει να κινηθεί σε τροχιά σχήματος οκτώ κινούμενος, στις ευθείες, χρησιμοποιώντας και τις δύο πλευρές παραποδίων, ενώ στις στροφές τη μία.



Σχήμα 4.30: Στροφή του ρομπότ ΝΗΡΗΙΣ με πλάτος $A = 60^{\circ}$ (α) με μία πλευρά παραποδίων και $\psi = 0^{\circ}$, (β) με δύο πλευρές παραποδίων και $\psi = -8^{\circ}$, (γ) με μία πλευρά παραποδίων και $\psi = -8^{\circ}$. Οι τροχιές ακολουθούν την κεντρική άρθρωση [11].



Σχήμα 4.31: Τροχιά του μηχανισμού σε σχήμα ο
κτώ.

Ο συνδυασμός, λοιπόν, ενός μη-μηδενικού ψ με τη μονόπλευρη χρήση παραποδίων μειώνει σημαντικά την ακτίνα περιστροφής του μηχανισμού.

Είδαμε, επίσης, ότι η κατεύθυνση της στροφής για έναν μηχανισμό polychaete– like ποδοκυματοειδούς μετακίνησης μπορεί να οριστεί με δύο τρόπους. Είτε με την επιλογή πλευράς παραποδίων που ενεργοποιούνται, είτε επιλέγοντας το πρόσημο του ψ.



Σχήμα 4.32: Τροχιές του ρομπό
τ ΝΗΡΙΗΣ για διάφορα $\psi.$ Για αρνητικές τιμές ο μηχανι-σ
μός στρίβει δεξιά και για θετικές αριστερά [11]

4.3.5 Πειράματα εκτός εργαστηρίου

Πέρα από τις μελέτες και τα πειράματα μέσα στο εργαστήριο, όπου μπορούν να εξαχθούν ακριβέστερα συμπεράσματα για τις παραμέτρους που επηρεάζουν το μηχανισμό στους διάφορους τρόπους βηματισμού, πειράματα έγιναν και εκτός εργαστηρίου, σε περιβάλλοντα που έρχονται πιο κοντά στα φυσικά. Τα αποτελέσματα ήταν άκρως ικανοποιητηκά. Ο μηχανισμός απέδειξε την ταχύτητά του περιπλανόμενος σε γρασίδι όπου η επιφάνεια εμφάνιζε διάφορες κλίσεις, την δύναμή του διεισδύοντας και ανοίγοντας μονοπάτια σε χωράφια με πυκνή βλάστηση, και τη σταθερότητα του βήματός του, κινούμενος σε οργωμένο και ελαφρώς υγρό έδαφος.

Γρασίδι

Το γρασίδι δεν είναι ιδιαίτερα δύσχολο περιβάλλον, αλλά είναι από τα ιδανιχότερα για να δειχθεί η ταχύτητα που μπορεί να αναπτύξει ο μηχανισμός. Τα παραπόδια, λόγω της φύσης του γρασιδιού, γαντζώνονται χαλά σε αυτό, με αποτέλεσμα να μεγιστοποιείται η συνεισφορά τους στην χίνηση. Παράλληλα, το γρασίδι εμφανίζει μιχρή αντίσταση με το σώμα του μηχανισμού λόγω του λείου περιβλήματος. Αυτά, έχουν ως αποτέλεσμα το μεγάλο βήμα χίνησης. Είναι, όμως, φανερό ότι, παρόλο που η φύση του γρασιδιού ευνοεί την ποδοχυματοειδή μεταχίνηση, δεν γίνεται το ίδιο χαι με την χυματοειδή. Η μιχρή τριβή δεν επιτρέπει στον μηχανισμό να μεταχινηθεί, όταν χινείται με χυματοειδή τρόπο.

Πυχνή Βλάστηση

Εντυπωσιακά ήταν και τα αποτελέσματα της κίνησης του μηχανισμού σε πυκνή βλάστηση, όπως αυτή του σχήματος 4.33(γ) και (δ). Η πυκνή βλάστηση έχει ένα χαρακτηριστικό που μπορεί να λειτουργήσει ως μειονέκτημα για πολλούς μηχανισμούς κίνησης, αλλά και ως πλεονέκτημα για άλλους, όπως το ρομπότ ΝΗΡΙΗΣ. Η δυσκολία-μειονέκτημα αυτού του περιβάλλοντος είναι η μεγάλη πιθανότητα εμπλοκής του μηχανισμού ή των κινητήρων του στα πολλά φυτά που χαρακτηρίζονται από λεπτούς και σκληρούς κορμούς. Για το ρομπότ ΝΗΡΙΗΣ, αυτό δε φάνηκε να είναι πρόβλημα, λόγω του σχεδιασμού του σώματός του και του κωνοειδούς κεφαλιού του, αντιθέτως, όταν τα παραπόδια εξέρχονται από το σώμα του μηχανισμού είναι επιθυμητή μια τέτοια εμπλοκή, έτσι ώστε να αυξάνεται η λειτουργικότητα του εκάστοτε παραποδίου. Έχουμε αναφέρει, ότι, όσο πιο σταθερή είναι η επαφή του παραποδίου με το υπόστρωμα, τόσο πιο θετική είναι η συμβολή του στην κίνηση.

Οργωμένο Χώμα

Ούτε σε ένα τέτοιο περιβάλλον το ρομπότ ΝΗΡΙΗΣ είχε κάποια δυσκολία στην κίνησή του. Και εδώ τα παραπόδια φάνηκαν πολύ σημαντικά. Το οργωμένο χώμα, όπως αυτό της εικόνας 4.33(β), εμφανίζει πολλούς συμπαγείς χωμάτινους όγκους, που δύσκολα ένας μηχανισμός με το βάρος του ρομπότ ΝΗΡΙΗΣ μπορεί να μετακινήσει. Εχ πρώτης όψεως, μπορεί αυτό να φαίνεται μειονέχτημα, αλλά δεν είναι. Τα παραπόδια καθώς εξέρχονται από το σώμα, και καθώς προσπαθούν να κινηθούν προς τα πίσω, μη μπορώντας να μεταχινήσουν τους όγχους αυτούς, οδηγούν το μηχανισμό στο μέγιστο βήμα. Σε συνδυασμό με μικρή συχνότητα κίνησης, τα παραπόδια παρέχουν σταθερή μεταχίνηση στο μηχανισμό. Χωρίς αυτά, η χίνηση θα ήταν αρχετά ασταθής χαι, υπό συνθήχες, όχι σπάνιες, επιτόπια. Βέβαια, παρόλο που η σταθερότητα της κίνησης καθώς και η ταχύτητα είναι ικανοποιητικές, η δυσκολία ελέγχου της κατεύθυνσης παραμένει σημαντική, μιας και ένα τέτοιο περιβάλλον μπορεί να θεωρηθεί στοχαστικό, αφού ποτέ δε μπορούμε να είμαστε βέβαιοι ότι όλος ο μηχανισμός ή κάθε παραπόδιο, όταν πρέπει, βρίσκεται σε επαφή με το υπόστρωμα.





Σχήμα 4.33: Ο μηχανισμός ρομπότ ΝΗΡΙΗΣ κινείται με επιδεξιότητα σε (α) γρασίδι, (β) οργωμένο έδαφος και (γ,δ) πυκνή βλάστηση

4.3.6 Διεθνής Έκθεση Θεσσαλονίκης

Η έχθεση του ρομπότ ΝΗΡΙΗΣ στην 71^η Δ.Ε.Θ. από τις 8/9 μέχρι τις 17/9 του 2006, αποδείχθηχε ένα εχτενές χαι δύσχολο πείραμα για το μηχανισμό. Με σχοπό να υπάρχει αρχετός χώρος για να χινείται ο μηχανισμός χατασχευάστηχε ένας τετράγω-νος πάγχος 1,70m × 1,70m (Σχήμα 4.34), που γέμισε με άμμο βάθους 7cm. Η τροχιά που αχολουθούσε, χαθώς χινούνταν στην άμμο, ήταν χυχλιχή, με σχοπό την αδιάλειπτη μεταχίνησή χαι παρουσίασή του. Το είδος της μεταχίνηση ς που χρησιμοποιήθηχε ήταν η, ποδοχυματοειδής, polychaete – like μεταχίνηση χωρίς τη χρήση παραποδίων. Με, χατά μέσο όρο, τρεις ώρες λειτουργίας την ημέρα χαι χινούμενος συνεχώς σε χυ-χλιχή τροχιά, γεγονός που φθείρει σημαντιχά τα μηχανιχά μέρη του μηχανισμού, το ρομπότ ΝΗΡΙΗΣ διάνυσε συνολιχά πάνω από 8 km με μέση ταχύτητα περίπου 0, 3km/h, σε συνολιχά 30 ώρες λειτουργίας.



Σχήμα 4.34: Το ρομπότ ΝΗΡΙΗΣ στην 71
 $^{\rm \eta}$ Δ.Ε.Θ. μέσα στον πάγχο με την άμμο.

Εκτός από τις πολλές ώρες λειτουργίας, ο μηχανισμός είχε να αντιμετωπίσει και πρωτοφανείς προκλήσεις από τους μικρούς του φίλους, που, με τη φαντασία και τις λογικές τους απορίες, τον 'ταλαιπώρησαν' λίγο παραπάνω. Χαρακτηριστική είναι

4.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΕ ΤΟ ΤΕΛΙΚΟ ΠΡΩΤΟΤΥΠΟ

μια σειρά 'πειραμάτων' του μικρού φίλου της φωτογραφίας στο σχήμα 4.35(β). Στο πρώτο 'πείραμα' το ρομπότ ΝΗΡΙΗΣ είχε να αντιμετωπίσει ένα λοφίσκο άμμου ύψους περίπου ίσο με το ύψος του μηχανισμού. Σε αυτήν την περίπτωση κατάφερε να περάσει πάνω από αυτόν χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία. Στα δύο επόμενα 'πειράματα', ο λοφίσκος ήταν περίπου 1,5 φορές το ύψος του μηχανισμού. Και στα δύο το ρομπότ ΝΗΡΙΗΣ βρήκε διέξοδο από τη μία πλευρά του λόφου, δημιουργώντας την εύλογη απορία στο μικρό μας φίλο: 'Πώς πήγε από κει;'. Η απάντηση είναι συνδεδεμένη με την τάση του μηχανισμού να στρίβει το σώμα του προς μία κατεύθυνση για να πραγματοποιεί συνεχώς κυκλική πορεία εγγεγραμμένη στα τοιχώματα του πάγκου.



(α)

(β)

Σχήμα 4.35: Εικαστικές παρεμβάσεις και πειραματισμός των μικρών φίλων του ρομπότ ΝΗΡΙΗΣ στη Δ.Ε.Θ.

Έτσι, όσο πιο μεγάλη αντίσταση βρίσκει το κεφάλι, τόσο πιο έντονη γίνεται η σχεδόν επιτόπου περιστροφή του μηχανισμού. Ωστόσο, έγινε φανερή, σε κάποιο βαθμό, η τάση του μηχανισμού να διεισδύει στο σωρό της άμμου και να ανοίγει δρόμο με έντονη τη συνδρομή των παραποδίων, τόσο στην ώθηση, όσο και στο 'σκαρφάλωμα' στο λόφο.

104 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΜΕ ΤΑ ΡΟΜΠΟΤΙΚΑ ΠΡΩΤΟΤΥΠΑ

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα

Σκοπός αυτής της εργασίας ήταν να κατασκευάσουμε και να μελετήσουμε ένα νέο ρομποτικό βιομιμητικό μηχανισμό και να εισάγουμε ένα νέο τρόπο μετακίνησης για δύσκολα περιβάλλοντα, τον ποδοκυματοειδή.

Είδαμε ότι η προσπάθεια μίμησης των πολύχαιτων είναι μια διαδιχασία εφιχτή, και παρουσιάσαμε ένα μηχανικό ανάλογο που μιμείται ικανοποιητικά τη μορφολογία και τον τρόπο κίνησής τους, ενώ είναι σχετικά εύκολο να κατασκευαστεί. Παρά την πολλαπλότητα των βαθμών ελευθερίας συμπυκνωμένων σε ένα τόσο μικρό μηχανισμό και παρά τα αρχικά ερωτηματικά για το αν οι μικρές απολήξεις, τα παραπόδια, θα μπορέσουν να αντιμετωπίσουν, είτε αυτά σαν δομές, είτε οι κινητήρες τους, λόγω του μικρού μεγέθους, τις δυσκολίες και τις δυνάμεις των υποστρωμάτων που θα γίνονταν τα πειράματα, έδειξαν μεγάλη ανθεκτικότητα τόσο στο χρόνο όσο και στις δυσκολίες. Φάνηκε ότι σε αυτό συνέβαλε πολύ ο σχεδιασμός του καλύμματος των BTM, που, κατά την ενεργοποίηση, τα παραπόδια σταθεροποιούνται μηχανικά στα τοιχώματα των καλυμμάτων και δε μεταφέρουν τη δύναμη στην άρθρωση.

Στα πλαίσια της προσπάθειας μοντελοποίησης της ποδοχυματοειδούς μεταχίνησης του μηχανισμού στην άμμο, επιβεβαιώθηχε ότι το μοντέλο δυνάμεων τριβής *Coulomb* περιγράφει με αρχετή αχρίβεια τη συμπεριφορά του ρομπότ ΝΗΡΙΗΣ στην άμμο (Σχήματα 4.28,4.29). Επίσης, ο νόμος χίνησης του σώματος (εξίσωση 1.1) και των παραποδίων (εξίσωση 2.1) φάνηκαν να δίνουν το απαιτούμενο αποτέλεσμα για έναν αποδοτικό μηχανισμό.

Ένας δεύτερος σχοπός της εργασίας, όπως φαίνεται σε αρχετά σημεία του χειμένου, ειδιχότερα στην παράγραφο 4.2, είναι η σύγχριση της απλής χυματοειδούς και της σύνθετης, παράγωγης (από την προηγούμενη), ποδοχυματοειδούς μεταχίνη-σης. Σε γενικό επίπεδο είδαμε ότι ο προτεινόμενος τρόπος μεταχίνησης δίνει τη δυνατότητα στους μηχανισμούς να χινούνται σε περισσότερα περιβάλλοντα, με μεγαλύτερη ταχύτητα και ευστάθεια, πράγμα που αντισταθμίζει τις αυξημένες ενεργειαχές απαιτήσεις και τη μεγαλύτερη πολυπλοχότητα. Ειδιχότερα, και με τη χρήση των αποτελεσμάτων από τα πειράματα του ρομπότ ΝΗΡΙΗΣ, ο μηχανισμός με τα παραπόδια είδαμε να χινείται σε περιβάλλοντα, όπως, το γρασίδι, η πυχνή βλάστηση και το οργωμένο χώμα (4.3.4), στα οποία, χωρίς τη χρήση παραποδίων, δεν είχε θετικά αποτελάσματα. Αλλά αχόμα και στα περιβάλλοντα που η χυματοειδής μεταχίνηση έχει αποτέλεσμα, η χρήση παραποδίων έδωσε αχόμα και 3 φορές μεγαλύτερη ταχύτητα (Σχήμα 4.28). Ένα χαραχτηριστικό που δε μπορεί, ίσως, να μετρηθεί είναι η ευστάθεια που προσδίδουν στο μηχανισμό τα παραπόδια, τόσο στην ευθύγραμμη πορεία, όσο και στις περιστροφές.

Στα πειράματα δείχθηκε ότι ο μηχανισμός ποδοκυματοειδούς μετακίνησης μπορεί να πραγματοποιήσει όλους τους τρόπους περιστροφής που εκτελεί ένας αντίστοιχος κυματοειδούς. Συγκεκριμένα, οι νόμοι που ισχύουν για την κυματοειδή περιστροφή είναι οι ίδιοι που ισχύουν και για την αντίστοιχη ποδοκυματοειδή. Αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο ότι, ένα από τα χαρακτηριστικά του τελευταίου είδους περιστροφών, είναι η σταθερότητα. Η σταθερότητα αυτή είναι συνάρτηση και άλλων χαρακτηριστικών που αποκτά ο μηχανισμός με τη χρήση παραποδίων. Όπως και στην ευθύγραμμη κίνηση, η ταχύτητα αυξάνεται και, καθώς τα παραπόδια εισέρχονται στην άμμο, οι έντονες κινήσεις που πραγματοποιεί το σώμα του μηχανισμού για να περιστραφεί μετατρέπονται σε έντονες αλλαγές στην κατεύθυνση κίνησης. Χωρίς τη χρήση παραποδίων, οι έντονες αλλαγές στο σώμα έχουν μειωμένη αλληλεπίδραση με την άμμο, με αποτέλεσμα να καθυστερεί η περιστροφή. Επίσης, χωρίς τα παραπόδια ο μηχανισμός φαίνεται ευάλωτος στις ανομοιομορφίες της επιφάνειας της άμμου, τα αποτελέσματα των οποίων εξαλείφονται από τη διείσδυση των παραποδίων σε αυτή. Πέρα από την αύξηση της απόδοσης του μηχανισμού στις περιστροφές, είδαμε ότι η χρήση παραποδίων εισάγει νέους τρόπους περιστροφής στους μηχανισμούς χυματοειδούς μεταχίνησης (παρ. 4.3.3). Οι τρόποι αυτοί, δίνουν πολλαπλές επιλογές, ανάλογα με τις απαιτήσεις χαι τις συνθήχες, αυξάνοντας την ευελιξία, ιδιότητα που απαιτείται όταν μιλάμε για μηχανισμούς έρευνας χαι διάσωσης.

Τα θετικά αποτελέσματα από τα πειράματα κυματοειδούς μετακίνησης με τη χρήση αισθητήρων και για τις δύο συμπεριφορές, wall – following και centering, επαληθεύουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και επαληθεύουν τους νόμους ελέγχου που προτείνονται.

Νεο ενδιαφέρον, όμως, έδωσαν πολύ πρόσφατες δοχιμές για την χυματοειδή μεταχίνηση με λεπίδες, οι οποίες διεξήχθησαν σε άμμο, εντός εργαστηρίου χαι σε ευθεία πορεία. Η δοχιμές βασίστηχαν στη χρήση μίας λεπίδας σε χάθε τμήμα, τόσο για την eel - like, όσο χαι για την polychaete - like μεταχίνηση, σε αντίθεση με τις τέσσερις που χρησιμοποιήθηχαν στα πειράματα της παραγράφου 4.3.2 (Σχήμα 4.10), οι οποίες είχαν ύψος 0, 8cm. Για την eel - like μεταχίνηση, χωρίς παραπόδια, έγινε η παρατήρηση ότι το βήμα του μηχανισμού αυξάνεται με την αύξηση του ύψους των λεπίδων. Έτσι, στο χέντρο χάθε τμήματος, χαι παράλληλα προς τον διαμήχη άξονα, τοποθετήθηχε μία λεπίδα ύψους 2cm χαι παχους περίπου 2mm (Σχήμα 5.1).



Σχήμα 5.1: Ο μηχανισμός με μία λεπίδα στο
 χέντρο κάθε τμήματος σεeel-likeαλληλεπίδραση.

Το μέσο βήμα που πήραμε από τη δοχιμή του μηχανισμού με τη χρήση μίας λεπίδας σε χάθε τμήμα ήταν μεγαλύτερο από 11cm το οποίο αντιστοιχεί σε ταχύτητα μεταχίνησης μεγαλύτερη από 0, 4km/h, ταχύτητα που αγγίζει τη μέγιστη απόδοση της ποδοχυματοειδούς μεταχίνησης χωρίς λεπίδες που ξεπερνούσε τα 0, 45km/h(παρ. 4.3.4).

Για την polychaete – like μεταχίνηση η γενιχότερη παρατήρηση ήταν ότι η αύξηση του ύψους των λεπίδων μειώνει την απόδοση του μηχανισμού, αλλά αυτό συμβαίνει μετά από χάποιο όριο. Δηλαδή, ο μηχανισμός χινείται αποδοτιχότερα έχοντας λεπίδες, αλλά αυτές δε θα πρέπει να είναι μεγάλου ύψους. Αυτό αποδείχθηχε με τη δοχιμή του μηχανισμού με μία λεπίδα των 0, 8cm σε χάθε τμήμα, χαι χωρίς. Στις δύο περιπτώσεις οι λεπίδες τοποθετήθηχαν χάθετα στον διαμήχη άξονα των τμημάτων χαι στο μπροστινό μέρος χάθε τμήματος (Σχήμα 5.2). Η επιλογή της τοποθέτησης των λεπίδων στο μπροστινό μέρος των τμημάτων έγινε μετά από δοχιμές που έγιναν, τόσο για την τοποθέτηση στη μέση, όσο χαι στο πίσω μέρος του χάθε τμήματος. Ο μηχανισμός έδειξε να χινείται αποδοτιχότερα με τις λεπίδες στο μπροστινό μέρος χάθε τμήματος. Το βήμα του μηχανισμού ξεπέρασε τα 9cm, δηλαδή, χινείθηχε με ταχύτητα πάνω από 0,33km/h. Η ταχύτητα του μηχανισμού χωρίς λεπίδες ξεπερνούσε τα 0,23km/h.



Σχήμα 5.2: Ο μηχανισμός με μία λεπίδα στο μπροστινό μέρος
 κάθε τμήματος σε polychaete-likeαλληλεπίδραση.

Από τις παραπάνω ενδείξεις, θα μπορούσαμε να προτείνουμε, ως μελλοντική εργασία, τη διαξαγωγή συστηματικότερων και λεπτομερέστερων πειραμάτων για

108
τους δύο τύπους αλληλεπίδρασης με τη χρήση λεπίδων. Επιπλέον, τα προηγούμενα πειράματα θα μπορούσαν να εμπλουτιστούν, και να εξεταστεί και η ποδοκυματοειδής μετακίνηση με τη χρήση λεπίδων. 110

Βιβλιογραφία

- [1] http://reefkeeping.com/issues/2003-03/rs/index.php
- [2] Robin J. Wootton, Invertebrate Paraxial Locomotory Appendages: Design, Deformation and Control, The Journal of Experimental Biology 202, 3333-3345 (1999).
- Joseph Ayers, Cricket Wilbur, Chris Olcott, "Lamprey Robots", Proceedings of the International Symposium on Aqua Biomechanisms, pp. 1-6, (2000)
- [4] Makoto MORI, Shigeo HIROSE, "Three-dimensional serpentine motion and lateral rolling by Active Cord Mechanism ACM-R3", Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ, Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 829-834, 2002.
- [5] Alessandro Crespi, Andre Badertscher, Andre Guignard, Auke Jan Ijspeert, "AmphiBot I: an amphibious snake-like robot", Robotics and Autonomous Systems 50, 163-175, (2005).
- [6] A. Argyros, D.P. Tsakiris and C. Groyer, "Biomimetic Centering Behavior for Mobile Robots with Panoramic Sensors", IEEE Robotics and Automation Magazine, special issue on "Panoramic Robotics", Eds. K. Daniilides and N. Papanikolopoulos, Vol. 11, No. 4, pp. 21-30, December 2004.

- J. Cortes, S. Martinez, J. Ostrowski, and K. McIsaac, "Optimal gaits for dynamic robotic locomotion", Int. J. Rob. Res., vol. 20, no. 9, pp. 707-728, 2001.
- [8] M. Saito, M. Fukaya, and T. Iwasaki, "Modeling, analysis, and synthesis of serpentine locomotion with a multilink robotic snake", IEEE Control Syst. Mag., vol. 22, no. 1, pp. 64-81, 2002.
- D.P. Tsakiris, A. Menciassi, M. Sfakiotakis, G. La Spina, P. Dario, Undulatory locomotion of polychaete annelids: mechanics, neural control and robotic prototypes, in: The Annual Computational Neuroscience Meeting (CNS*2004), Abstract #288, Baltimore, USA, 2004.
- [10] D.P. Tsakiris, M. Sfakiotakis, A. Menciassi, G. La Spina, and P. Dario, "Polychaete-like undulatory robotic locomotion", in Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'05), Barcelona, Spain, pp. 3029-3034, 2005.
- [11] M. Sfakiotakis, D. P. Tsakiris, and K. Karakasiliotis, "Polychaetelike pedundulatory robotic locomotion", in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., Roma, Italy, pp. 269-274, 2007.
- [12] Michael Sfakiotakis, Dimitris P. Tsakiris and Anastasios Vlaikidis, "Biomimetic Centering for Undulatory Robots", IEEE/RAS-EMBS Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob 2006), Pisa, Italy, February 20-22, 2006.
- [13] Michael Sfakiotakis and Dimitris P. Tsakiris, "Biomimetic Centering Behavior for Undulatory Robots", Int. J. Rob. Res., vol. 26, no. 12, 2007.

- [14] M. Sfakiotakis and D.P. Tsakiris, "SIMUUN: A simulation environment for undulatory locomotion", Int. J. Model. Simul., vol. 26, no. 4, pp. 4430-4464, 2006.
- [15] G. Taylor, "Analysis of the swimming of long and narrow animals", Proc. R. Soc. Lond. Ser. A, vol. 214, pp. 158-183, 1952.
- [16] J. Gray, "Annelids", in Animal Locomotion. London: Weidenfeld and Nicolson, pp. 377-410, 1968.
- [17] R. Brusca and G. Brusca, *Invertebrates*. Sunderland: Sinauer Associates, 1990.
- [18] R. Clark and D. Tritton, "Swimming mechanisms in nereidiform polychaetes", J. Zool., vol. 161, pp. 257-271, 1970.
- [19] S. Hirose, "Biologically Inspired Robots: Snake-Like Locomotors and Manipulators", New York: Oxford University Press, 1993.
- [20] S. Hirose and E. Fukushima, "Snakes and strings: New robotic components for rescue operations", Int. J. Rob. Res., vol. 23, no. 4/5, pp. 341-349, 2004.
- [21] J. Ostrowski and J. Burdick, "The geometric mechanics of undulatory robotic locomotion", Int. J. Rob. Res., vol. 17, no. 7, pp. 683-701, 1998.
- [22] S. Kelly and R. Murray, "Modelling efficient pisciform swimming for control", Int. J. Robust Nonl. Contr., vol. 10, no. 4, pp. 217-241, 2000.
- [23] http://www.cs.cmu.edu/ biorobotics/projects/modsnake/

Παράρτημα Α Λεπτομερής Περιγραφή Ηλεκτρονικών Μερών και Κυκλωμάτων DSP56F807/D Rev. 7.0, 1/2002

DSP56F807

Preliminary Technical Data DSP56F807 16-bit Digital Signal Processor

- Up to 40 MIPS at 80 MHz core frequency
- DSP and MCU functionality in a unified, C-efficient architecture
- Hardware DO and REP loops
- MCU-friendly instruction set supports both DSP and controller functions: MAC, bit manipulation unit, 14 addressing modes
- 60K × 16-bit words Program Flash
- 2K × 16-bit words Program RAM
- $8K \times 16$ -bit words Data Flash
- 4K × 16-bit words Data RAM
- $2K \times 16$ -bit words Boot Flash

- Up to 64K × 16- bit words each of external program and data memory
- Two 6 channel PWM Modules
- Four 4 channel, 12-bit ADCs
- Two Quadrature Decoders
- CAN 2.0 B Module
- Two Serial Communication Interfaces (SCIs)
- Serial Peripheral Interface (SPI)
- Up to four General Purpose Quad Timers
- JTAG/OnCETM port for debugging
- 14 Dedicated and 18 Shared GPIO lines
- 160-pin LQFP or 160 MAPBGA Packages



*includes TCS pin which is reserved for factory use and is tied to VSS

Figure 1. DSP56F807 Block Diagram

GENERAL SPECIFICATION OF UPDATE JAN 01,2004 HSR-5995TG CORELESS DIGITAL SERVO

PREPARED BY JUN HEE, LEE



ANNOUNCED SPECIFICATION OF HS-81 SUB MICRO SERVO

1.TECHNICAL VALUES CONTROL SYSTEM OPERATING VOLTAGE RANGE OPERATING TEMPERATURE RANGE TEST VOLTAGE OPERATING SPEED STALL TORQUE OPERATING ANGLE DIRECTION IDLE CURRENT RUNNING CURRENT DEAD BAND WIDTH CONNECTOR WIRE LENGTH DIMENSIONS WEIGHT

0

:+PULSE WIDTH CONTROL 1500usec NEUTRAL :4.8V TO 6.0V :-20°C TO +60°C :AT 4.8V AT 6.0V :0.11sec/60° AT NO LOAD 0.09sec/60° AT NO LOAD :2.6kg.cm(36.10oz.in) 3kg.cm(41.66oz.in) :40%/ONE SIDE PULSE TRAVELING 400usec :CLOCK WISE/PULSE TRAVELING 1500 TO 1900usec :8.8mA 9.1mA :220mA AT NO LOAD 280mA AT NO LOAD :8usec :160mm (6.29in) :29.8x12x29.6mm (1.17x0.47x1.16in) :16.6g(0.58oz)





2.FEATURES 3-POLE FERRITE MOTOR HYBRID I.C DIRECT POTENTIOMETER DRIVE

3.APPLICATIONS AIRCRAFT UP TO 15 POUNDS 1/10TH SCALE STEERING

WCS-232 SPEC SHEET

WCS-232

RS232 to Wireless Converter

WCS-232 converts RS232 signal to wireless Bluetooth signal. If both ends of communication use WCS-232, wireless 1:1 data communication is available. Portability is maximized so that it can be applied PC, laptop, PDA, etc. It is fully compatible with the serial COM port of PC, and the product needs to be used in pairs.



Beyond the Limits of Wired Communication

RS232 signal is converted to wireless Bluetooth signal. There is no need for extra communication cabling, and simple communication environment can be conveniently established.

Bluetooth Operation

With Bluetooth, an efficient solution in wireless communication between devices, you can experience stable, noise-free, and reliable communication.

Applicable to Portable Devices

The lightness of 33g and the size even smaller than the business card make WCS-232 easy to attach to portable devices. Now any portable device can be upgraded into portable communication device, resulting in a handy feature enhancement.



Features

WCS-232 Specifications

Communi cati on

Mode	Point to Point
Speed	Max 115.2Kbps
Distance	Max 100m
RF Specification	Bluetooth Specification Version 1.1
Bandwidth	2.402-2.483GHz (ISM Band)
RF Type	Hopping Frequency
Channels	79
Modulation	GFSK
Connector	1 RS232 port (DB-9 Female)
Flow Control	RTS/CTS, DTR/DSR/DCD

Hardware

Dimension	75(W) * 37(D)* 19(H)mm		
Weight	33g		
LED	Tx, Rx, Link		
	5-12V DC power supply		
Power	PC USB port through USB cable or		
	DB9 pin connector		
Antenna Type	Inner Type, Chip Antenna		
Current	Max 200mA (5V DC)		
Temperature	-20 ~ 70°C		

<u>Note</u>

Additional	USB power cable
Additional	Power adapter
Documentation	User Manual



MAX232, MAX232I DUAL EIA-232 DRIVERS/RECEIVERS

MAX232 ... D, DW, N, OR NS PACKAGE MAX232I ... D, DW, OR N PACKAGE

(TOP VIEW)

1

C1+ [

V_{S+} [] 2 C1- [] 3

C2+ 4

C2- 5

V_{S-} [6

R2IN 8

SLLS047L - FEBRUARY 1989 - REVISED MARCH 2004

16 V_{CC}

15 GND

13 R1IN

11 T1IN

10 T2IN

14 T10UT

12 R10UT

9 R20UT

- Meets or Exceeds TIA/EIA-232-F and ITU Recommendation V.28
- Operates From a Single 5-V Power Supply With 1.0-μF Charge-Pump Capacitors
- Operates Up To 120 kbit/s
- Two Drivers and Two Receivers
- ±30-V Input Levels
- Low Supply Current . . . 8 mA Typical
- ESD Protection Exceeds JESD 22

 2000-V Human-Body Model (A114-A)
- Upgrade With Improved ESD (15-kV HBM) and 0.1-μF Charge-Pump Capacitors is Available With the MAX202
- Applications
 - TIA/EIA-232-F, Battery-Powered Systems, Terminals, Modems, and Computers

description/ordering information

The MAX232 is a dual driver/receiver that includes a capacitive voltage generator to supply TIA/EIA-232-F voltage levels from a single 5-V supply. Each receiver converts TIA/EIA-232-F inputs to 5-V TTL/CMOS levels. These receivers have a typical threshold of 1.3 V, a typical hysteresis of 0.5 V, and can accept ±30-V inputs. Each driver converts TTL/CMOS input levels into TIA/EIA-232-F levels. The driver, receiver, and voltage-generator functions are available as cells in the Texas Instruments LinASIC[™] library.

TA	PACKAGET		ORDERABLE PART NUMBER	TOP-SIDE MARKING
	PDIP (N)	Tube of 25	MAX232N	MAX232N
		Tube of 40	MAX232D	
000 1. 7000	SOIC (D)	Reel of 2500	MAX232DR	MAX232
	SOIC (DW)	Tube of 40	MAX232DW	MAX232
		Reel of 2000	MAX232DWR	
	SOP (NS)	Reel of 2000	MAX232NSR	MAX232
	PDIP (N)	Tube of 25	MAX232IN	MAX232IN
	SOIC (D) Tube of Reel of	Tube of 40	MAX232ID	
–40°C to 85°C		Reel of 2500	MAX232IDR	MAX2321
		Tube of 40	MAX232IDW	MAY0201
		Reel of 2000	MAX232IDWR	101472321

ORDERING INFORMATION

[†] Package drawings, standard packing quantities, thermal data, symbolization, and PCB design guidelines are available at www.ti.com/sc/package.



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.

LinASIC is a trademark of Texas Instruments.

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.



Copyright © 2004, Texas Instruments Incorporated

SN54HCT 24Q, SN74HCT 24O OCTAL BUFFERS AND LINE DRIVERS WITH 3-STATE OUTPUTS

SCLS174C - MARCH 1984 - REVISED FEBRUARY 2000

- Inputs Are TTL-Voltage Compatible
- 3-State Outputs Drive Bus Lines or Buffer Memory Address Registers
- High-Current Outputs Drive up to 15 LSTTL Loads
- Package Options Include Plastic Small-Outline (DW), Thin Shrink Small-Outline (PW), and Ceramic Flat (W) Packages, Ceramic Chip Carriers (FK), and Standard Plastic (N) and Ceramic (J) DIPs

description

These octal buffers and line drivers are designed specifically to improve both the performance and density of 3-state memory address drivers, clock drivers, and bus-oriented receivers and transmitters. The 'HCT240 devices are organized as two 4-bit buffers/drivers with separate output-enable (\overline{OE}) inputs. When \overline{OE} is low, the device passes inverted data from the A inputs to the Y outputs. When \overline{OE} is high, the outputs are in the high-impedance state.

The SN54HCT240 is characterized for operation over the full military temperature range of -55° C to 125°C. The SN74HCT240 is characterized for operation from -40° C to 85°C.

	(TOP VIEW)				
1OE [1A1 [2Y4 [1A2 [2Y3 [1A3 [2Y2 [1A4 [2Y1 [GND [1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	σ	20 19 18 17 16 15 14 13 12 11	V _{CC} 2OE 1Y1 2A4 1Y2 2A3 1Y3 2A2 1Y4 2A1	
			_		

SN54HCT240 ... J OR W PACKAGE

SN74HCT240 . . . DW, N, OR PW PACKAGE

SN54HCT240 . . . FK PACKAGE (TOP VIEW)



FUNCTION TABLE (each buffer/driver)

	(each buller/uliver)			
I	INPUTS OE A		OUTPUT Y	
I				
ľ	L	Н	L	
	L	L	Н	
	Н	Х	Z	

52

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.



Copyright © 2000, Texas Instruments Incorporated On products compliant to ML-PRF-38535, all parameters are tested unless otherwise noted. On all other products, production processing does not necessarily include testing of all parameters.

1

SHARP

GP2D12/GP2D15

Features

- 1. Less influence on the color of reflective objects, reflectivity
- 2. Line-up of distance output/distance judgement type Distance output type (analog voltage) : **GP2D12** Detecting distance : 10 to 80cm

Distance judgement type : GP2D15

Judgement distance : 24cm

(Adjustable within the range of 10 to 80cm)

3. External control circuit is unnecessary

4. Low cost

Applications

1. TVs

- 2. Personal computers
- 3. Cars
- 4. Copiers

■ Absolute Maximum Ratings

		(Ta=25°C,	Vcc=5V)
Parameter	Symbol	Rating	Unit
Supply voltage	Vcc	-0.3 to +7	V
Output terminal voltage	Vo	-0.3 to Vcc +0.3	V
Operating temperature	Topr	-10 to +60	°C
Storage temperature	Tstg	-40 to +70	°C

General Purpose Type Distance Measuring Sensors

Outline Dimensions



Notice In the absence of confirmation by device specification sheets, SHARP takes no responsibility for any defects that may occur in equipment using any SHARP devices shown in catalogs, data books, etc. Contact SHARP in order to obtain the latest device specification sheets before using any SHARP device. Internet address for Electronic Components Group http://www.sharp.co.jp/ecg/

GP2Y0A02YK

Features

- 1. Less influence on the colors of reflected objects and their reflectivity, due to optical triangle measuring method
- 2. Distance output type (Detection range:20 to 150cm)
- 3. An external control circuit is not necessary Output can be connected directly to a microcomputer

Applications

1. For detection of human body and various types of objects in home appliances, OA equipment, etc

Absolute Maximum Ratings (T_a=25°C)

Parameter	Symbol	Rating	Unit
Supply voltage	V _{CC}	-0.3 to +7	V
*1 Output terminal voltage	Vo	-0.3 to V _{CC} +0.3	V
Operating temperature	T _{opr}	-10 to +60	°C
Storage temperature	T _{stg}	-40 to +70	°C
*1.0			

*1 Open collector output

Recommended Operating Conditions

Parameter	Symbol	Rating	Unit
Operating Supply voltage	V _{CC}	4.5 to 5.5	V

Long Distance Measuring Sensor



Notice In the absence of confirmation by device specification sheets, SHARP takes no responsibility for any defects that may occur in equipment using any SHARP devices shown in catalogs, data books, etc. Contact SHARP in order to obtain the latest device specification sheets before using any SHARP device. Internet address for Electronic Components Group http://sharp-world.com/ecg/



Παράρτημα Β C.A.D. Σχέδια Μηχανικών Μερών του Αρχικού και Τελικού Πρωτότυπου











	1	2	3	4
A		,69		
В	C C		02' <u>2</u> 64	,67
		92,58		
С		3,10		
D				
E				
	UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	DEBUR AN BREAK SH EDGES	D DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
F	NAME SIGNATURE DRAWN	DATE	K. Kara	kasiliotis
	Q.A	MATERIAL:	bwg NO. kapak	ki BTM
		WEIGHT:	SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1

	1	2		3	4	
A						
В		I	–			
С	243,15°		210			
D	³⁹	0 90	28 M			
E						
	UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: FINISH DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH:	:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION	
	TOLERANCES: LINEAR:					
		E DATE		TITLE:		
				K Karaka	asiliotis	
	APPV'D					
F	MFG Q.A	MATERIAL:		DWG NO.		
				parapo	odium 📙	A4
		WEIGHT:		SCALE:1:2	SHEET 1 OF 1	