



การวิเคราะห์และการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่แบบทูนนิฟอร์ม

นายวิฑูร จูราหะวงศ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

พ.ศ. 2549

การวิเคราะห์และการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่แบบทวนนิฟอร์ม

นายวิฑูร จูราหะวงศ์ วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2549

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... (ผศ.ดร.สโรช ไทรเมฆ)	ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์
..... (ดร.ถวิดา มณีวรรณ)	กรรมการ
..... (ผศ.ดร.อรรณพ เรืองวิเศษ)	กรรมการ
..... (ผศ.ดร. สภาพร ลักษณะเจริญ)	กรรมการ

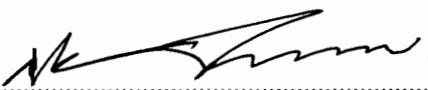
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

การวิเคราะห์และการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่แบบทูนนิฟอร์ม

นายวิฑูร จูราหะวงศ์ วศ.บ. (วิศวกรรมเครื่องกล)

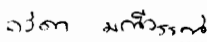
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
พ.ศ. 2549

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



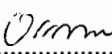
(ผศ.ดร.สโรช ไทรเมธ)

ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์



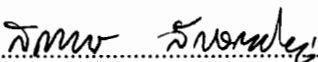
(ดร.ถวิดา มณีวรรณ)

กรรมการ



(ผศ.ดร.อรรณพ เรืองวิเศษ)

กรรมการ



(ผศ.ดร. สธภาพร ลักษณะเจริญ)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

สำนักหอสมุด

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์และการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่แบบ ทูนิฟอร์ม
หน่วยกิต	12
ผู้เขียน	นายวิฑูร จูราหะวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ศโรช ไตรเมฆ
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
คณะ	วิศวกรรมศาสตร์
พ.ศ.	2549

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาลักษณะการว่ายน้ำของปลาแบบทูนิฟอร์ม ประกอบด้วย ลำตัว โค้นหาง และหาง ยึดติดอยู่บนรางเลื่อนในลักษณะของ XY table ให้เคลื่อนที่บนน้ำนิ่ง การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เกิดจากการพับโบกของโคนหางและหาง เป็นมุมการเคลื่อนที่เรียกว่ามุมฮีฟวิ่ง (heaving angle) และมุมพิตช์ (pitching angle) จากความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาสมการการเคลื่อนที่ด้วยสมการลากรองจ์ (Lagrange equation) โดยกำหนดให้ของไหลเป็นแบบสองมิติ (2D-flow) มีคุณสมบัติเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (incompressible fluid) ไม่มีความหนืด (inviscid fluid) และไม่มี การหมุนวน (irrotational) การพิจารณาสมการการเคลื่อนที่จะไม่รวมถึงผลของกระแสไหลวน (vortex) และผลกระทบอื่นๆ ซึ่งในการวัดผลนั้นจะทำการเปรียบเทียบผลจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองจริงของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่เป็นแบบการสั่นและการเคลื่อนที่แบบลูกคลื่น

คำสำคัญ : หุ่นยนต์ปลา, การเคลื่อนที่แบบทูนิฟอร์ม

Thesis Title	Analysis and Mathematical Modeling of Thunniform Motion
Thesis Credits	12
Candidate	Mr. Witoon Juwarahawong
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Saroj Saimek
Program	Master of Engineering
Field of Study	Mechanical Engineering
Department	Mechanical Engineering
Faculty	Engineering
B.E.	2549

Abstract

This thesis aims to study motion of a fish-robot, under thunniform mode, which composes of body, peduncle and flapping tail. The robot moves by oscillating angles of peduncle and flapping tail, known as heaving and pitching, respectively. We determine the equations of motion by using the total kinetics energy as the Lagrangian and applying Euler- Lagrangian principle. This research assumes that the fluid flow is two-dimensional, inviscid, incompressible, and irrotational. Additionally, the effects of free and central vortex are ignored. The results of oscillation and undulation motion are compared with the simulation and the real implementation.

Keyword Fish Robot/ Thunniform Motion

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณความอนุเคราะห์ของ ผศ.ดร.สโรช ไตรเมฆ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการวิจัยที่กรุณาให้แนวคิดและคำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย ข้อมูลทางด้านวิชาการ ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ประกอบด้วย ผศ.ดร.อรรณพ เรืองวิเศษ ดร.ถิศา มณีวรรณ และ ผศ.ดร.สถาพร ลักษณะเจริญ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ผู้ทำการวิจัยขอขอบพระคุณสถาบัน Southeast Asian Fisheries Development Center (SEAFDEC) ที่ให้ข้อมูลทางด้านขนาดและความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับปลาหูช้าง นำครีบเหลือง ขอขอบคุณสำนักงบประมาณที่สนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณภาควิชากรรมโยธา สาขา วิศวกรรมชลศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดลอง ขอขอบคุณสถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม (FIBO) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ สถานที่ รวมถึงคณาจารย์ เจ้าหน้าที่และนักศึกษาปริญญาโทของสถาบันฯ ที่ให้คำปรึกษาการแก้ปัญหาต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอขอบคุณอาจารย์วีระชัย แก่นทรัพย์ ที่แนะนำแนวทางการแก้ปัญหาและช่วยเสริมสร้างประสบการณ์การทำงานด้านอุตสาหกรรม ขอขอบคุณภาควิชาเครื่องกล ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดลอง ช่างเทคนิคประจำภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน สำหรับความช่วยเหลือในการจัดสร้างโครงสร้างรางน้ำเพื่อใช้ในการทดลอง ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่อนุเคราะห์เรื่องการประสานงานเอกสาร

และที่สำคัญยิ่งต้องขอขอบพระคุณ คุณพ่อ สงวน จูราหะวงศ์ และคุณแม่ วราภรณ์ จูราหะวงศ์ ทุกคนในครอบครัวที่คอยห่วงใย เป็นกำลังใจ ในขณะประสบปัญหาในการดำเนินงาน และให้ความสนับสนุนทางการเงินสำหรับใช้ในการศึกษาครั้งนี้ และเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ ประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความอนุเคราะห์ของท่าน ดังนั้นผู้ทำวิจัยใคร่ขอขอบคุณทุกท่านไว้เป็นอย่างสูง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
รายการตาราง	ช
รายการรูปประกอบ	ฉ
รายการสัญลักษณ์	ฎ
ประมวลศัพท์และคำย่อ	ด
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผลในการวิจัย	1
1.2 การสำรวจเอกสารที่น่าสนใจ	2
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์	8
1.4 ขอบเขตงานวิทยานิพนธ์	8
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	8
1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์	9
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์	10
2.1 คินมาติกส์ของหุ่นยนต์ (Kinematics of Swimming Machine)	10
2.2 พลศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Dynamics of Swimming Machine)	12
2.3 สมการของ ลากรองจ์ (Lagrange's Equation)	14
2.3.1 พิจารณาหาสมการการเคลื่อนที่ (Equation of Motion)	16
2.3.2 วิธีการตรวจสอบทางคณิตศาสตร์ ($\dot{M} - 2C$)	21
3. การออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์และการเชื่อมต่อระบบ	24
3.1 การออกแบบทางกล	24
3.1.1 การออกแบบกลไกการเคลื่อนที่	24
3.1.2 การออกแบบโครงสร้างรางน้ำ	31

	หน้า
3.2 ส่วนโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์	35
3.2.1 การรับข้อมูลจากเซ็นเซอร์	35
3.2.2 การควบคุมการทำงานของมอเตอร์	37
4. การทดลองและผลการทดลอง	39
4.1 วิธีการทดลอง	39
4.2 ผลการจำลองการเคลื่อนที่	41
4.2.1 ผลจำลองการเคลื่อนที่แบบฮีพวิ่ง	42
4.2.2. ผลจำลองการเคลื่อนที่แบบพิตซิ่ง	43
4.2.3. ผลจำลองการเคลื่อนที่แบบเฟสเท่ากับศูนย์	44
4.2.4. ผลจำลองการเคลื่อนที่แบบเฟสมีค่าไม่เท่ากับศูนย์	49
4.3 ผลการเคลื่อนที่	56
4.3.1 ผลการเคลื่อนที่แบบฮีพวิ่ง	56
4.3.2. ผลการเคลื่อนที่แบบพิตซิ่ง	56
4.3.3. ผลการเคลื่อนที่แบบเฟสเท่ากับศูนย์	57
4.3.4. ผลการเคลื่อนที่แบบเฟสมีค่าไม่เท่ากับศูนย์	59
5. สรุปและข้อเสนอแนะ	61
5.1 สรุปผลการวิจัย	61
5.2 วิเคราะห์ผลการวิจัย	62
5.2 ข้อเสนอแนะ	63
เอกสารอ้างอิง	64
ภาคผนวก	69
ก ค่าคงที่และค่าพารามิเตอร์	69
ข รายละเอียดแบบโครงสร้างหุ่นยนต์	71
ประวัติผู้วิจัย	78

ตารางที่		หน้า
4.3.7	ตารางแสดงผลการเคลื่อนที่แบบ เฟสมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ มุม ฮีพวี่ง และ มุม พิตซิ่ง มีค่าเท่ากับ 30 องศา	59
4.3.8	ตารางแสดงผลการเคลื่อนที่แบบ เฟสมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ โดยกำหนดให้มุม ฮีพวี่ง และมุม พิตซิ่ง มีค่าเท่ากับ 40 องศา	59
4.3.9	ตารางแสดงผลการเคลื่อนที่แบบ เฟสมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ โดยกำหนดให้มุม ฮีพวี่ง และมุม พิตซิ่ง มีค่าเท่ากับ 50 องศา	60
4.3.10	ตารางแสดงผลการเคลื่อนที่แบบ เฟสมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ โดยกำหนดให้มุม ฮีพวี่ง และมุม พิตซิ่ง มีค่าเท่ากับ 60 องศา	60

รายการรูปประกอบ

รูป		หน้า
1.1	แสดงลักษณะและตำแหน่งครีบของปลาทั่ว ๆ ไป	1
1.2.1	แสดงไคอะแกรมความสัมพันธ์ระหว่างการขับเคลื่อนและลักษณะการว่ายน้ำของปลา	2
1.2.2	แสดงลักษณะการว่ายน้ำ [3] (a) การว่ายน้ำแบบ BCF Propulsion , (b) การว่ายน้ำแบบ MPF Propulsion	3
1.2.3	แสดงรูปแบบของการเคลื่อนที่แบบต่างๆ A) Anguilliform, B) Subcarangiform, C) Carangiform, D) Thunniform	4
1.2.4	หุ่นยนต์ปลาหุ่นน้ำ (Charlie I)	5
1.2.5	แสดงลักษณะการเคลื่อนที่แบบ feathering และการเคลื่อนที่แบบ lead-lag	6
1.2.6	แสดงหุ่นยนต์ของมหาวิทยาลัยมินเนโซตา(Minnesota)	6
1.2.7	แสดงหุ่นยนต์ของสถาบันเทคโนโลยีแคลิฟอร์เนีย (Caltech)	7
1.2.8	แสดงหุ่นยนต์ของมหาวิทยาลัยวอชิงตัน (University of Washington)	7
2.1	แบบจำลองสมมูลของระบบ	10
2.2	แสดงการเกิดแรงยก (Lift force) บริเวณหาง ขณะหุ่นยนต์เคลื่อนที่	13
2.3	การคิดโมเมนต์ที่เกิดขึ้น	13
3.1	แสดงแบบจำลองการทำงานของหางและแรงกระทำ	24
3.2	ลักษณะของหุ่นยนต์	25
3.3	แสดงลักษณะการติดตั้งหุ่นยนต์กับรางน้ำ	25
3.4	ลักษณะของหุ่นยนต์ด้านบน	26
3.5	ลักษณะของหุ่นยนต์ด้านข้าง	27
3.6	ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นขณะเริ่มเคลื่อนที่บนระนาบ x-y	29
3.7	ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นขณะเริ่มเคลื่อนที่บนระนาบ x-z	30
3.8	ลักษณะของความดันน้ำที่กระทำกับผนังรางน้ำ	31
3.9	พิจารณาความแรงดันน้ำที่กระทำกับผนังในลักษณะ Cantilever bar	32
3.10	พิจารณาน้ำหนักของน้ำและรางน้ำที่กระทำกับเสารับน้ำหนัก	33
3.11	บอร์ด Basic Stamp 2SX	36
3.12	เซ็นเซอร์วัดความเร่ง MEMSIC 2125 a) ลักษณะของเซ็นเซอร์ b) การติดตั้งเซ็นเซอร์	36

รูป	หน้า
3.13 สัญญาณที่เอาพุตที่ได้จาก MEMSIC 2125	37
3.14 แสดง 4-Q-EC Servo-amplifier DES50/5	37
3.15 แสดงการทำงานของ Hall sensor และการส่งสัญญาณของ encoder	38
3.16 แสดงการโปรแกรมทดสอบการทำงานของมอเตอร์	38
4.1.1 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบ ฮีฟวี่	39
4.1.2 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบ พิตซิ่ง	40
4.1.3 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบ เฟสเท่ากับศูนย์	40
4.1.4 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบ เฟสมีค่าไม่เท่ากับศูนย์	41
4.2.1 แสดงการเคลื่อนที่แบบ ฮีฟวี่โดยมีค่ามุม ฮีฟวี่ 30 องศา	42
4.2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม ฮีฟวี่ กับความเร็วและระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ในช่วงเวลาเท่ากับ 30 วินาที	43
4.2.3 แสดงการเคลื่อนที่แบบ พิตซิ่ง โดยมีค่ามุม พิตซิ่ง 30 องศา	43
4.2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม พิตซิ่ง กับความเร็วและระยะทางที่พิจารณาที่เวลา 30 วินาที	44
4.2.5 แสดงการเคลื่อนที่แบบ เฟสเท่ากับศูนย์ โดยมีค่ามุม ฮีฟวี่และมุมพิตซิ่ง เท่ากับ 30 องศา และ 60 องศา ตามลำดับ	45
4.2.6 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่แบบ เฟสเท่ากับศูนย์ ระหว่างค่ามุม พิตซิ่ง กับความเร็วโดยมีค่ามุม ฮีฟวี่ เท่ากับ 30 องศา	46
4.2.7 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่แบบ เฟสเท่ากับศูนย์ ระหว่างค่ามุม พิตซิ่ง กับความเร็วโดยมีค่ามุม ฮีฟวี่ เท่ากับ 40 องศา	47
4.2.8 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่แบบ เฟสเท่ากับศูนย์ ระหว่างค่ามุม พิตซิ่ง กับความเร็วโดยมีค่ามุม ฮีฟวี่ เท่ากับ 50 องศา	48
4.2.9 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่แบบ เฟสเท่ากับศูนย์ ระหว่างค่ามุม พิตซิ่ง กับความเร็วโดยมีค่ามุม ฮีฟวี่ เท่ากับ 60 องศา	49
4.2.10 แสดงการเคลื่อนที่แบบ เฟสมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ โดยมีค่ามุม ฮีฟวี่ และมุม พิตซิ่ง เท่ากับ 30 องศา และมีมุม เฟส เท่ากับ 60 องศา ตามลำดับ	49
4.2.11 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่แบบ เฟสมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ระหว่างมุม เฟส กับความเร็ว โดยมีค่ามุม ฮีฟวี่ 20 องศา และ ค่ามุม พิตซิ่ง 20 องศา	50

รูป	หน้า
4.2.12 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่แบบ เฟสมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ระหว่างมุม เฟส กับความเร็ว โดยมีค่ามุม ฮีฟวิ่ง 30 องศาและ ค่ามุม พิตชิง 30 องศา	51
4.2.13 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่แบบ เฟสมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ระหว่างมุม เฟส กับความเร็ว โดยมีค่ามุม ฮีฟวิ่ง 40 องศา และ ค่ามุม พิตชิง 40 องศา	52
4.2.14 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่แบบ เฟสมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ระหว่างมุม เฟส กับความเร็ว โดยมีค่ามุม ฮีฟวิ่ง 50 องศา และ ค่ามุม พิตชิง 50 องศา	53
4.2.15 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่แบบ เฟสมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ระหว่างมุม เฟส กับความเร็ว โดยมีค่ามุม ฮีฟวิ่ง 60 องศา และ ค่ามุม พิตชิง 60 องศา	54
4.2.16 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่แบบ เฟสมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ระหว่างมุม เฟส กับความเร็ว	55
ข.1 ลักษณะของหุ่นยนต์	71
ข.2 แสดงภาพรวมของชุด Support Motor	72
ข.3 แสดงภาพรวมของชุด Y-Axis	73
ข.4 แสดงภาพรวมของชุด Wheel Support	74
ข.5 แสดงภาพรวมของชุด Co-Axial Shaft	75
ข.6 แสดงภาพรวมของชุด Link2	76

รายการสัญลักษณ์

A	=	พื้นที่
A_t	=	พื้นที่ของแผ่นหาง
A_w	=	ความกว้างของลูกคลื่น wake
C_D	=	สัมประสิทธิ์แรงต้าน (drag coefficient)
$C_L(\alpha)$	=	สัมประสิทธิ์แรงยก (lift coefficient) ที่ขึ้นกับค่าของมุมปะทะ (angle of attack)
$C(q, \dot{q})$	=	เมตริกซ์ของคอริโอลิส (coriolis) และแรงสู่ศูนย์กลาง (centripetal)
C_{ij}	=	สมาชิกของ coriolis และ centripetal Matrix ที่ตำแหน่งแถวที่ i หลักที่ j
D	=	แรงต้านการเคลื่อนที่
$D_{b,x}$	=	ส่วนประกอบแรงต้านบริเวณลำตัวในแนวแกน x ตามลำดับ
$D_{b,y}$	=	ส่วนประกอบแรงต้านบริเวณลำตัวในแนวแกน y ตามลำดับ
E	=	ค่ามอดูลัสของการยืดหยุ่น (modulus of elasticity)
F_x	=	แรงลัพธ์เชิงเส้นในแนวระนาบอ้างอิงแกน x
F_y	=	แรงลัพธ์เชิงเส้นในแนวระนาบอ้างอิงแกน y
F_ϕ	=	แรงลัพธ์เชิงมุมในแนวระนาบอ้างอิงแกน z
F_i	=	แรงวางนัยทั่วไป (generalized force)
$L(q, \dot{q})$	=	ผลต่างของพลังงานจลน์ ($T(q, \dot{q})$) กับพลังงานศักย์ ($V(q)$)
$L_{t,x}$	=	ส่วนประกอบแรงยกบริเวณหางในแนวแกน x ตามลำดับ
$L_{t,y}$	=	ส่วนประกอบแรงยกบริเวณหางในแนวแกน y ตามลำดับ
M_D	=	โมเมนตัมที่เกิดจากแรงต้าน
$M_{D,b}$	=	โมเมนตัมที่เกิดจากแรงต้านบริเวณลำตัว
$M(q)$	=	เมตริกซ์ความเฉื่อย (inertia mass matrix)
$\bar{P}_B$	=	เวกเตอร์ตำแหน่ง (position vector) ของแกนลำตัว ณ จุดศูนย์กลางมวลเคลื่อนที่ได้เทียบกับแกนอ้างอิง
P_{Cr}	=	โหลดวิกฤต (critical load)
QC	=	ระยะ 1/4 จากขอบของแผ่นหาง (quarter chord)
R_B	=	เมตริกซ์การหมุน (orientations matrix) รอบแกน z ของตัวหุ่นยนต์เทียบกับแกนอ้างอิง

R_1	=	เมตริกซ์การหมุน (orientations matrix) รอบแกน z ของแกนโคนหาง (peduncle) เทียบกับแกนของตัวหุ่นยนต์
R_2	=	เมตริกซ์การหมุน (orientations matrix) รอบแกน z ของแผ่นหาง (flapping tail) เทียบกับแกนที่ 1
St	=	ค่าสตรูฮอล (Strouhal number)
$T(q, \dot{q})$	=	พลังงานจลน์ของระบบ
V	=	ความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า
V_a	=	ความเร็วที่ไหลผ่านผิวของครีบ (translational velocity) ที่ตำแหน่ง a
$V(q)$	=	พลังงานศักย์ของระบบ
V_{qc}	=	ความเร็วที่ตำแหน่งระยะ 1/4 ของความยาวของครีบ (hydrofoil)
$\ddot{X}$	=	อนุพันธ์อันดับสองของระยะการเคลื่อนที่ในแกน x
d_{x_i}	=	ระยะจากจุดศูนย์กลางมวลของแกน i ถึงจุดหมุนที่ปลายแกน i-1 บนระนาบอ้างอิงแกน x
d_{y_i}	=	ระยะจากจุดศูนย์กลางมวลของแกน i ถึงจุดหมุนที่ปลายแกน i-1 บนระนาบอ้างอิงแกน y
d_{z_i}	=	ระยะจากจุดศูนย์กลางมวลของแกน i ถึงจุดหมุนที่ปลายแกน i-1 บนระนาบอ้างอิงแกน z
$f_{s,x}$	=	แรงด้านการเคลื่อนที่ที่เกิดจากรางเลื่อนแนวแกน x
$f_{s,y}$	=	แรงด้านการเคลื่อนที่ที่เกิดจากรางเลื่อนแนวแกน y
f	=	ความถี่ของการ โบกกลับ ไปกลับมาของหาง
h	=	ความสูงของแผ่นหาง
l_B	=	ความยาวจากจุดศูนย์กลางมวลของลำตัวถึงจุดหมุนของแกนที่ 1
l_1	=	ความยาวของแกนที่ 1
l_2	=	ความยาวของแกนที่ 1
l_{c_1}	=	ความยาวจากจุดหมุนของแกนที่ 1 ถึงจุดศูนย์กลางมวลของแกนที่ 1
l_{c_2}	=	ความยาวจากจุดหมุนของแกนที่ 2 ถึงจุดศูนย์กลางมวลของแกนที่ 2
l_f	=	ความยาวของแผ่นหาง (flapping tail)
l_p	=	ความยาวของโคนหาง (peduncle)

$\bar{l}_B$	=	เวกเตอร์ความยาวจากจุดศูนย์กลางมวลของลำตัวถึงจุดหมุนของแกนที่ 1
$\bar{l}_{c_1}$	=	เวกเตอร์ความยาวจากจุดหมุนแกนที่ 1 ถึงจุดศูนย์กลางมวลของแกนที่ 1
$\bar{l}_{c_2}$	=	เวกเตอร์ความยาวจากจุดหมุนแกนที่ 2 ถึงจุดศูนย์กลางมวลของแกนที่ 2
$\tilde{l}_e$	=	เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย
m_{ij}	=	สมาชิกเมตริกซ์ความเฉื่อย (inertia mass matrix) ที่ตำแหน่งแถวที่ i หลักที่ j
m_x	=	มวลความเฉื่อย (mass inertia) ของแกนการเคลื่อนที่ x
m_y	=	มวลความเฉื่อย (mass inertia) ของแกนการเคลื่อนที่ y
$\bar{p}_{c_1}$	=	เวกเตอร์ตำแหน่ง (position vector) ของแกนที่ 1 ณ จุดศูนย์กลางมวล เคลื่อนที่ได้เทียบกับแกนอ้างอิง
$\bar{p}_{c_2}$	=	เวกเตอร์ตำแหน่ง (position vector) ของแกนที่ 2 ณ จุดศูนย์กลางมวล เทียบกับแกนอ้างอิง
$\bar{p}_i$	=	เวกเตอร์ตำแหน่ง (position vector) ของแกน i เคลื่อนเทียบกับแกนอ้างอิงเมื่อ i =1,2
$\dot{\bar{p}}_B$	=	เวกเตอร์ความเร็ว (velocity vector) ของแกนลำตัวเทียบกับแกนอ้างอิง
$\dot{\bar{p}}_{c_1}$	=	เวกเตอร์ความเร็ว (velocity vector) ณ จุดศูนย์กลางมวลของแกนที่ 1 เทียบกับแกนอ้างอิง
$\dot{\bar{p}}_{c_2}$	=	เวกเตอร์ความเร็ว (velocity vector) ณ จุดศูนย์กลางมวลของแกนที่ 2 เทียบกับแกนอ้างอิง
$\dot{\bar{p}}_i$	=	เวกเตอร์ความเร็ว (velocity vector) ณ จุดศูนย์กลางมวลของแกนที่ i เทียบกับแกนอ้างอิง เมื่อ i =1,2
q_1	=	ตำแหน่งของการเคลื่อนที่จุดศูนย์กลางมวลบริเวณลำตัวบนแนวแกน x
q_2	=	ตำแหน่งของการเคลื่อนที่จุดศูนย์กลางมวลบริเวณลำตัวบนแนวแกน y
q_3	=	มุมการเคลื่อนที่ของแกนที่ 1
q_4	=	มุมการเคลื่อนที่ของแกนที่ 2
q_i	=	พิกัดวงนัยทั่วไป (generalized coordinate)

$\dot{q}$	=	อนุพันธ์อันดับหนึ่งของพิกัดวางนัยทั่วไป
$\ddot{q}$	=	อนุพันธ์อันดับสองของพิกัดวางนัยทั่วไป
r	=	เวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector)
u_1	=	ทอร์คของมอเตอร์แกนที่ 1
u_2	=	ทอร์คของมอเตอร์แกนที่ 2
$\bar{v}_B$	=	ความเร็วของการเคลื่อนที่เมื่อพิจารณาที่ลำตัว
$\bar{v}_{c_1}$	=	ความเร็วของการเคลื่อนที่ที่จุดศูนย์กลางมวลของแกนที่ 1
$\bar{v}_{c_2}$	=	ความเร็วของการเคลื่อนที่ที่จุดศูนย์กลางมวลของแกนที่ 2
$\bar{v}_i$	=	เวกเตอร์ความเร็ว (velocity vector) ของแกนที่ i เคลื่อนที่ได้เทียบกับแกนอ้างอิง เมื่อ i = 1, 2
x	=	ระยะการเคลื่อนที่ในแกน y
$\dot{x}$	=	อนุพันธ์อันดับหนึ่งของระยะการเคลื่อนที่ในแกน x
$\dot{x}_m$	=	อนุพันธ์อันดับหนึ่งของระยะการเคลื่อนที่ในแนวแกน x ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นหาง
$\ddot{y}$	=	อนุพันธ์อันดับสองของระยะการเคลื่อนที่ในแกน y
y	=	ระยะการเคลื่อนที่ในแกน y
$\dot{y}$	=	อนุพันธ์อันดับหนึ่งของระยะการเคลื่อนที่ในแนวแกน y
$\dot{y}_m$	=	อนุพันธ์อันดับหนึ่งของระยะการเคลื่อนที่ในแนวแกน y ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นหาง
z	=	ระยะการเคลื่อนที่ในแกน z
α	=	มุมกระทบของของไหลกับครีป (angle of attack)
τ	=	โมเมนต์ที่เกิด ณ จุดกึ่งกลางของแผ่นหาง
ρ	=	ความหนาแน่นของของไหล
$\bar{\omega}_1$	=	เวกเตอร์ความเร็วเชิงมุม (angular velocity vector) ของแกนที่ 1 เทียบกับแกนอ้างอิง
$\bar{\omega}_2$	=	เวกเตอร์ความเร็วเชิงมุม (angular velocity vector) ของแกนที่ 2 เทียบกับแกนอ้างอิง
$\bar{\omega}_B$	=	เวกเตอร์ความเร็วเชิงมุม (angular velocity vector) ของแกนลำตัวเทียบกับแกนอ้างอิง
$\bar{\omega}_{c_1}$	=	เวกเตอร์ความเร็วเชิงมุม (angular velocity vector) ณ จุดศูนย์กลางมวลของแกน 1 เทียบกับแกนอ้างอิง
$\bar{\omega}_{c_2}$	=	เวกเตอร์ความเร็วเชิงมุม (angular velocity vector) ณ จุด

		ศูนย์กลางมวลของแกน 2 เทียบกับแกนอ้างอิง
$\vec{\omega}_i$	=	เวกเตอร์ความเร็วเชิงมุม (angular velocity vector) ที่ หุ่นยนต์หรือแกนแต่ละแกนเคลื่อนที่ได้เทียบกับแกนอ้างอิง เมื่อ $i=1,2$
θ_1	=	มุมการเคลื่อนที่ของแกนที่ 1
$\dot{\theta}_1$	=	อนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของมุมการเคลื่อนที่ของแกนที่ 1
$\ddot{\theta}_1$	=	อนุพันธ์อันดับที่สองของมุมการเคลื่อนที่ของแกนที่ 1
θ_2	=	มุมการเคลื่อนที่ของแกนที่ 2
$\dot{\theta}_2$	=	อนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของมุมการเคลื่อนที่ของแกนที่ 2
$\ddot{\theta}_2$	=	อนุพันธ์อันดับที่สองของมุมการเคลื่อนที่ของแกนที่ 2
$\dot{\theta}_i$	=	อนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของมุมการเคลื่อนที่ของแกน i เมื่อ $i=1,2$
ϕ	=	มุมการเคลื่อนที่ของแกนลำตัว
$\dot{\phi}$	=	อนุพันธ์อันดับที่หนึ่งของมุมการเคลื่อนที่ของแกนลำตัว
$\ddot{\phi}$	=	อนุพันธ์อันดับที่สองของมุมการเคลื่อนที่ของแกนลำตัว
τ_1	=	โมเมนต์ที่เกิดขึ้นของแกนที่ 1
τ_2	=	โมเมนต์ที่เกิดขึ้นของแกนที่ 2
ψ_1	=	มุมการเคลื่อนที่ของแกนที่ 1 เทียบกับแกนอ้างอิงของโลก
ψ_2	=	มุมการเคลื่อนที่ของแกนที่ 2 เทียบกับแกนอ้างอิงของโลก

ประมวลศัพท์และคำย่อ

θ_{12}	$\theta_1 + \theta_2$
Added mass	มวลเพิ่ม
BCF	การว่ายน้ำโดยอาศัยลำตัวและ/หรือหางในการเคลื่อนที่ (Body and/or Caudal Fin propulsion)
Brushless motor	มอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน
Cruising speed	ความเร็วเดินทาง
Caudal fin	ครีบทูปลา
Dorsal fin	ครีบที่หลัง
Flapping tail	หาง
Gravitational force	แรงโน้มถ่วง
Heaving Angle	มุมกวาดของแกนที่ 1
Incompressible fluid	ของไหลที่อัดตัวไม่ได้
Inviscid fluid	ของไหลที่ไม่มีความหนืด
Laminar	การไหลแบบราบเรียบ
Lateral motion	การเคลื่อนที่ตามข้าง
Longitudinal motion	การเคลื่อนที่ตามยาว
Modulus of Elasticity	ค่ามอดูลัสของการยืดหยุ่น
MPF	การว่ายน้ำโดยอาศัยครีบอกและ/หรือครีบที่หลังในการเคลื่อนที่ Median and/or Paired Fin propulsion
Orientation matrix	เมตริกซ์การปรับตัว
Oscillatory Motion	การเคลื่อนที่แบบสั่น
Pectoral fin	ครีบอก
Pitching Angle	มุมกวาดของแกนที่ 2
Quasi-steady fluid flow	การไหลกึ่งคงตัว
Quasi-steady uniform flow	การไหลกึ่งคงตัวสม่ำเสมอ
Revolve joints	แกนหมุน
SM	Swimming Machine
St	Strouhal number
Thunnus Thynnus	ปลาทูน่าครีบน้ำเงิน
Thrust force	แรงขับ

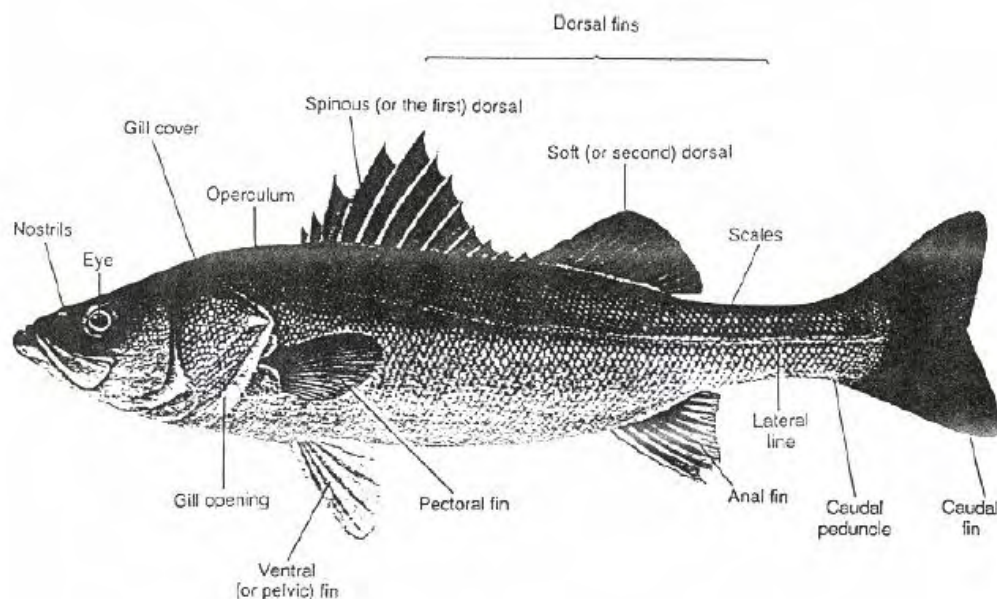
Translational velocity	ความเร็วเคลื่อนย้าย
Turbulent	การไหลแบบแปรปรวน
Underwater Robot	หุ่นยนต์ใต้น้ำ
Undulating Motion	การเคลื่อนที่แบบกลับไปกลับมา
Ventral fin	ครีบใต้ท้อง
Wake	ทางน้ำ, ระลอกน้ำ

บทที่ 1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการ เหตุผล ที่มา และขอบเขตของงานวิจัย อันจะนำไปสู่ข้อกำหนดในการศึกษาวิจัยและออกแบบระบบควบคุมกลไกการทำงานของหุ่นยนต์เคลื่อนที่คล้ายปลา ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็นหัวข้อหลักๆ ได้ดังนี้

1.1 หลักการและเหตุผลในการวิจัย

หุ่นยนต์และยานพาหนะใต้น้ำ (underwater robot) ถูกนำมาใช้ในการสำรวจเพื่อพัฒนาความรู้ทางทะเล อุตสาหกรรมทางทะเล และใช้สำหรับเฝ้าระวังการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมทางทะเลมากขึ้น เพื่อที่จะพัฒนาประสิทธิภาพในการทำงานของหุ่นยนต์ให้สูงขึ้นและสามารถเข้าถึงพื้นที่แวดล้อมที่จำกัดได้ดียิ่งขึ้น หุ่นยนต์ปลาจึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองต่อความต้องการดังกล่าว การศึกษาและพัฒนาทางด้านหุ่นยนต์ปลาจะต้องกระทำควบคู่กันไปทั้งลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ (swimming method) และวิธีการรักษาการทรงตัวของหุ่นยนต์ (balancing method) ซึ่งงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ที่มีลักษณะคล้ายการว่ายน้ำของปลาในธรรมชาติที่มีการเคลื่อนที่แบบลูกคลื่น (undulating motion) ที่ทำงานร่วมกันของหาง ครีบและลำตัว

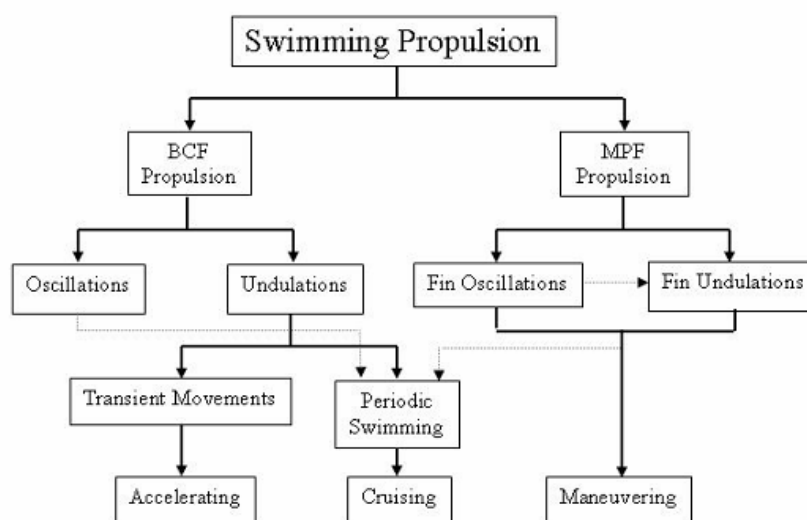


รูปที่ 1.1 แสดงลักษณะและตำแหน่งครีบของปลาทั่ว ๆ ไป [2]

1.2 การสำรวจเอกสารที่น่าสนใจ

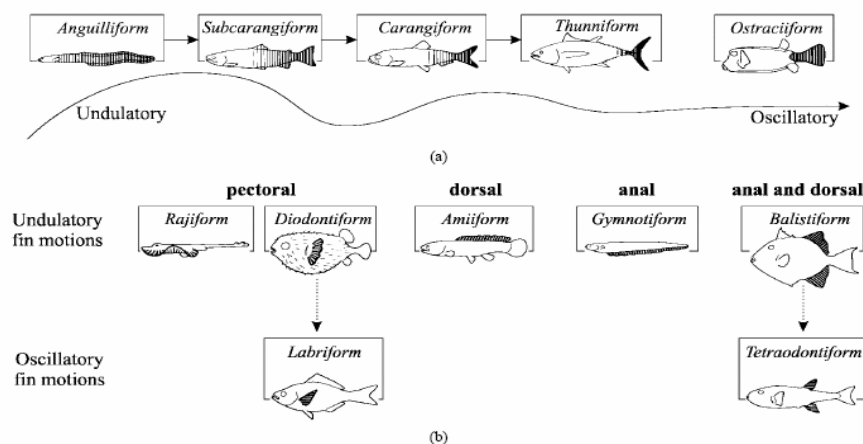
การว่ายน้ำของปลาและสัตว์ที่อาศัยอยู่ในน้ำเป็นสิ่งที่มีการศึกษากันอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน เริ่มตั้งแต่สมัยอริสโตเติล [4] ได้บันทึกการสังเกตและสรุปได้ว่าปลาใช้หางเป็นหลักในการบังคับทิศทาง ในขณะที่ปลาใช้ครีบอกเป็นหลักในการขับเคลื่อน ซึ่งเป็นการสรุปที่ไม่ถูกต้องเพราะปลาทะเลส่วนใหญ่ใช้ครีบอกเป็นในการบังคับทิศทาง การวิเคราะห์เชิงกลที่อธิบายถึงการเคลื่อนที่โดยใช้หางครั้งแรกถูกนำเสนอโดยบอร์เรลลี [4], [5] กล่าวถึงลักษณะการว่ายน้ำของปลาในรูปแบบที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับการดำรงชีวิตของปลาชนิดนั้นๆ การศึกษาจากรูปร่างลักษณะพอแบ่งออกได้เป็น 5 รูปแบบจากการเคลื่อนที่แบบกลับไปกลับมา

อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่กระตุ้นให้เกิดความพยายามในการตอบคำถามว่าปลาว่ายน้ำให้มีประสิทธิภาพสูงได้อย่างไร เซอร์เจมส์ เกรย์ [5],[6],[8] ได้นำเสนอผลงาน หรือที่รู้จักกันในนามของ Gray's Paradox เขากล่าวว่า “ถ้าแรงต้านของโลมาขณะว่ายน้ำเท่ากับแบบจำลองที่ไม่เคลื่อนที่ที่ถูกลากไปด้วยความเร็วเท่ากัน กล้ามเนื้อของโลมาจะต้องสามารถสร้างกำลังอย่างน้อยเจ็ดเท่าของกล้ามเนื้อของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม” ถึงแม้ว่างานวิจัยดังกล่าวไม่ได้กล่าวถึงการว่ายน้ำของปลาโดยตรง แต่เนื่องจากถิ่นที่อยู่และการดำเนินชีวิตของปลาและโลมามีส่วนคล้ายกัน ความเข้าใจที่ได้จากการศึกษาการว่ายน้ำของโลมาจึงน่าจะสามารถนำไปใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับการว่ายน้ำของปลาได้



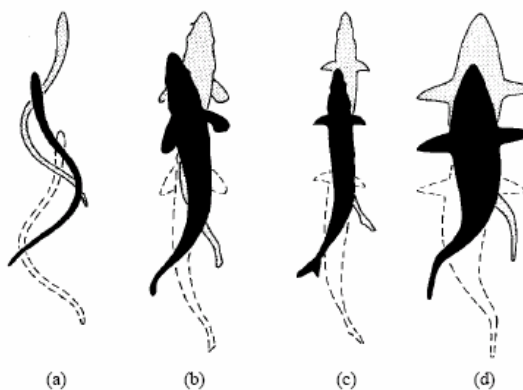
รูปที่ 1.2.1 แสดงไดอะแกรมความสัมพันธ์ระหว่างการขับเคลื่อนและลักษณะการว่ายน้ำของปลา [3]

งานวิจัยของไมเคิล (Michel) และคณะ [5], [6], [18] ได้สรุปความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะการขับเคลื่อนและลักษณะการว่ายน้ำของปลา ซึ่งสามารถจำแนกลักษณะการเคลื่อนที่เป็น 2 ประเภทหลักคือ การว่ายน้ำโดยอาศัยลำตัวและ/หรือหางในการเคลื่อนที่ (**Body and/or Caudal fin Propulsion, BCF**) และ การว่ายน้ำโดยอาศัยครีบอกและ/หรือครีบท้องในการเคลื่อนที่ (**Median and/or Paired Fin propulsion, MPF**) ดังไดอะแกรมในรูปที่ 1.2.1 สามารถอธิบายพฤติกรรมการว่ายน้ำของปลาแต่ละประเภทได้อย่างชัดเจน คือ ปลาที่ว่ายน้ำแบบ BCF จะเป็นลักษณะของปลาที่สามารถสร้างอัตราเร่งจากหยุดนิ่งได้สูงและสามารถว่ายน้ำด้วยความเร็วเดินทางสูง (cruising speed) ในขณะที่ปลาที่ว่ายน้ำแบบ MPF จะเป็นปลาที่มีลักษณะการเคลื่อนที่ได้คล่องแคล่วว่องไว การเคลื่อนที่ทั้งสองประเภทสามารถจำแนกการเคลื่อนที่เป็นอีก 2 ลักษณะคือ การเคลื่อนที่แบบกลับไปกลับมา (undulatory) และการเคลื่อนที่แบบสั่น (oscillatory) ซึ่งการว่ายน้ำในลักษณะของ BCF สามารถจำแนกได้เป็น 5 ลักษณะ จากการเคลื่อนที่แบบกลับไปกลับมา (undulatory) ไปสู่การเคลื่อนที่แบบสั่น (oscillatory) ได้แก่ การเคลื่อนที่แบบ แองกูลิฟอร์ม (anguilliform), สับคาแรงจิฟอร์ม (subcarangiform), คาแรงจิฟอร์ม (carangiform), ทูนิฟอร์ม (thunniform) และ ออสตราซิอิฟอร์ม (ostraciiform) ส่วนการว่ายน้ำในลักษณะของ MPF สามารถแบ่งลักษณะการเคลื่อนที่ได้เป็น การเคลื่อนที่แบบคลื่น คือ ราจิฟอร์ม (rajiform), ไดโอดอนทิฟอร์ม (diodontiform), เอมีอิฟอร์ม (amiiiform), จิมนอทิฟอร์ม (gymnotiform), และ บาลิสทิฟอร์ม (balistiform) และการเคลื่อนที่แบบสั่น คือ ลาบริฟอร์ม (labriform), และ เทตราโอดอนทิฟอร์ม (tetraodontiform) ดังแสดงอยู่ในรูปที่ 1.2.2



รูปที่ 1.2.2 แสดงลักษณะการว่ายน้ำ [3]

(a) การว่ายน้ำแบบ BCF Propulsion , (b) การว่ายน้ำแบบ MPF Propulsion



รูปที่ 1.2.3 แสดงรูปแบบของการเคลื่อนที่แบบต่างๆ [3]

(a) Anguilliform, (b) Subcarangiform, (c) Carangiform, (d) Thunniform

จากงานวิจัยของ ไมเคิล และคณะ [3] พบว่าการเคลื่อนที่แบบคาแรงจiform (carangiform) และ ทุนนิฟอร์ม (thunniform) จะเป็นลักษณะการเคลื่อนที่ของปลาที่ต้องการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเป็นส่วนใหญ่ เช่น ปลาทูน่าครีบน้ำเงิน หรือครีบน้ำเงิน การเคลื่อนที่ลักษณะนี้อาศัยการขยับตัวเพื่อให้หางมีการเคลื่อนที่เท่านั้น ดังนั้นในงานวิจัยจึงมุ่งความสนใจกับการเคลื่อนที่ในลักษณะนี้

ในทางปฏิบัติการทดลองเพื่อศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของปลาที่มีชีวิตนั้นทำได้ยาก ดังนั้นจึงได้มีการสร้างหุ่นยนต์ที่มีการเคลื่อนที่คล้ายปลาขึ้น นากาซึมาและคณะ [17] สร้างหุ่นยนต์โลมาที่มีสองข้อต่อโดยที่การเคลื่อนที่แบบฮีฟวิง (heaving) ถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ที่มีความเร็วคงที่ ส่วนข้อต่อที่สองเป็นการเคลื่อนที่แบบพิตช์ (pitching) เป็นข้อต่อที่ต่อกับข้อต่อแรกด้วยสปริง โดยสามารถวิเคราะห์มุมของฮีฟวิงและพิตช์ จากการทดลองได้ ซึ่งการวิเคราะห์หาสปริงที่เหมาะสมสามารถหาได้จากการศึกษาของ ฮาร์เปอร์ [15]

บุรุษ ซี เจย์น และ จอร์จ วี ลอดเดอร์ [11] ได้ศึกษาถึงผลของการบิดตัวของแนวกระดูกสันหลังของปลาที่เคลื่อนที่เป็นลูกคลื่นสม่ำเสมอ เพื่อหาความสัมพันธ์ของการความกว้างของลูกคลื่น มุมบิดระหว่างกระดูกแต่ละข้อ และมุมบิดของกระดูกเมื่อเทียบกับแนวการเคลื่อนที่ ซึ่งผลการทดลองทำให้ทราบว่ามุมการบิดของกระดูกใกล้โคนหางนั้นจะมีการบิดไม่เกินสองเท่าของมุมหางที่บิดไป และ ณ ตำแหน่งที่แนวกระดูกสันหลังเคลื่อนที่กวาดมากที่สุดกับตำแหน่งที่มีการบิดของกระดูกสูงสุดไม่ได้เป็นกระดูกข้อเดียวกัน จากการทดลองยังพบอีกว่ามุมเลื่อน (phase shift) ระหว่างระยะกวาดสูงสุดและมุมบิดระหว่างข้อสูงสุด มีผลต่อการเพิ่มความเร็วในการว่ายน้ำ และมุมปะทะที่เกิดขึ้นจะอยู่ในช่วงระหว่าง 5- 17 องศา

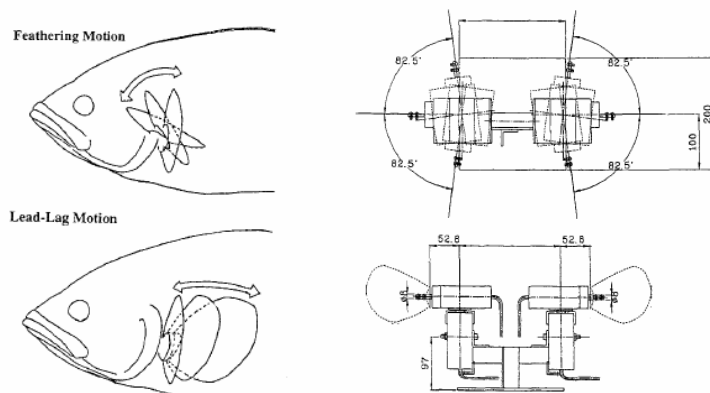
บาร์เรตต์และคณะ[12] สร้างหุ่นยนต์ที่มีกลไกการทำงานเหมือนปลาขึ้นมีชื่อเรียกว่า โรโบทูน่า (Robotuna) หรือ ชาร์ไล 1 (Charlie I) ถูกสร้างขึ้นเป็นครั้งแรกที่สถาบันเทคโนโลยีแมสซาชูเซตส์ (Massachusetts Institute of Technology: MIT) มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาการว่ายน้ำของปลา โดยหุ่นยนต์มีรูปร่างภายนอกคล้ายกับปลาทูน่าครีบน้ำเงิน (Thunnus Thynnus) บาร์เรตต์และคณะพบว่า ยานทางน้ำที่มีโครงสร้างเคลื่อนไหวเป็นลักษณะรูปคลื่นมีแรงต้านน้อยลงถึงครึ่งหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับยานลักษณะเดียวกันที่ถูกลากไปด้วยความเร็วเท่ากันในขณะที่ยานไม่ได้เคลื่อนไหว เหตุผลของการลดลงของแรงต้านถูกอธิบายในรูปของการไหลที่เรียกว่า Re-laminarization คือที่ Reynolds number สูงๆลักษณะการไหลของของไหลยังเป็นแบบราบเรียบ (laminar) ในยานที่มีการเคลื่อนไหวเป็นลักษณะรูปคลื่น ในขณะที่การไหล ณ จุดเดียวกันบนยานที่ถูกลากเป็นการไหลแบบแปรปรวน (turbulent) [16]



รูปที่ 1.2.4 หุ่นยนต์ปลาทูน่า (Charlie I) [12]

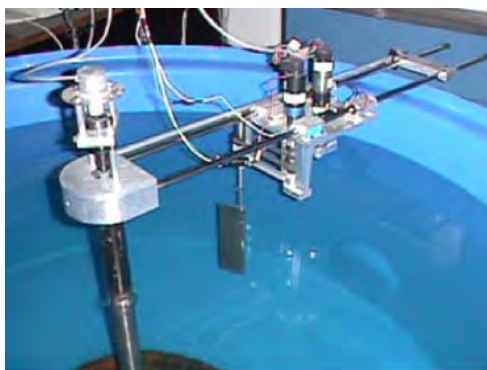
นอกจากหุ่นยนต์ปลาทูน่าครีบน้ำเงินแล้วกลุ่มงานวิจัยดังกล่าวยังได้สร้างหุ่นยนต์ปลาไพค์ (Pike) เพื่อศึกษาถึงการเคลื่อนที่ เนื่องจากปลาไพค์ มีความสามารถในการสร้างความเร่งได้สูงมากถึง 25 เท่าของอัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก แต่ไม่พบเอกสารอ้างอิงถึงผลการทดลอง ต่อจากนั้น แอนเดอร์สันและ เคอร์รี่บร็อกซ์ [19] ได้พัฒนาหุ่นยนต์ปลาทูน่าที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอัตโนมัติ แต่ทางคณะผู้วิจัยไม่ได้แสดงรายละเอียดทางด้านเทคนิคทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ถึงวิธีการที่ใช้ในหุ่นยนต์ดังกล่าว

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ นาโอมิ คาโด มหาวิทยาลัยโตเกียว [24] ที่สร้างหุ่นยนต์เพื่อศึกษาการทำงานของครีบอกที่เคลื่อนไหวด้วยมุมเฟathering motion และการเคลื่อนไหวของมุมลีด-แล็ก (lead-lag motion) ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 1.2.5



รูปที่ 1.2.5 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของมุมเฟทเทอริง (feathering motion) และการเคลื่อนที่ของมุมลีด-แล็ก (lead-lag motion) [24]

ลีและไทรเมฆ [20] มหาวิทยาลัยเมนเนสโซตา นำเสนอวิธีควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยพิจารณาแบบจำลองด้วยการประมาณค่าการกระจายของแรงดันน้ำที่เกิดขึ้น (hydrodynamic potential) ต่อมา [30] จึงได้เสนอการปัญหาการควบคุมการทำงานของระบบที่มีตัวขับเคลื่อนน้อยกว่าองศาอิสระ (underactuated system) และ นอน-มินิมัม เฟส (non-minimum phase)



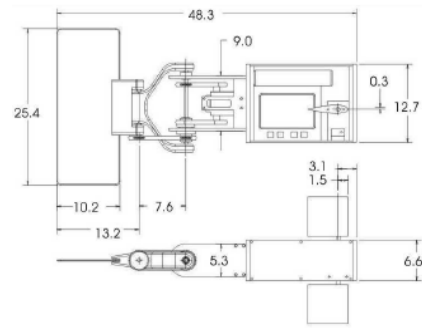
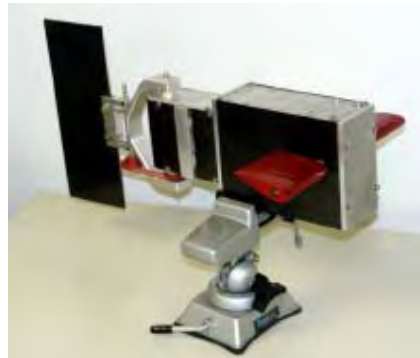
รูปที่ 1.2.6 แสดงหุ่นยนต์ของมหาวิทยาลัยเมนเนสโซตา (Minnesota) [20], [30]

สถาบันเทคโนโลยีแคลิฟอร์เนีย (California Institute of Technology) นำโดย เมอร์แกนเซน และคณะ ได้สร้างหุ่นยนต์ที่มีการเคลื่อนที่แบบคาแรงจiformบนระนาบ 2 มิติ [25], [26], [31] ดังรูปที่ 1.2.7 เพื่อศึกษาการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 1.2.7 แสดงหุ่นยนต์ของสถาบันเทคโนโลยีแคลิฟอร์เนีย (Caltech) [25], [26], [31]

ต่อมาเมื่อ เมอร์แกนเซน[32] ได้รับการสนับสนุนหุ่นยนต์ต้นแบบจากมหาวิทยาลัยวอชิงตัน (University of Washington) ดังรูปที่ 1.2.8 ในการประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์เรขาคณิตทางด้านกลไก และเรขาคณิตทางด้านการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้นในการพิจารณาหาแบบจำลอง



รูปที่ 1.2.8 แสดงหุ่นยนต์ของมหาวิทยาลัยวอชิงตัน (University of Washington) [32]

นอกจากหุ่นยนต์ปลาที่ได้กล่าวมาแล้วยังมีหุ่นยนต์ปลาอีกหลายชนิดที่ออกแบบและจัดสร้างโดยกลุ่มอุตสาหกรรมเช่น บริษัทมิตซูบิชิ สร้างหุ่นยนต์ปลาซีลาแคน แต่ไม่มีเอกสารกล่าวถึงว่าจะนำไปใช้ประโยชน์ในด้านใด บริษัทเรียวไม ได้สร้างหุ่นยนต์คินซาชิ (kinsachi) เพื่อใช้ในการตรวจสอบความปลอดภัยของสะพาน และใช้ในการรวบรวมข้อมูลทางการประมง เป็นต้น

ในส่วนของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาที่มีลักษณะเป็นหุ่นยนต์สามแกนประกอบด้วย ลำตัว, โคนหาง, และหาง มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบทูนนิฟอร์ม โดยศึกษาความสัมพันธ์ของมุมที่เกิดจากการพับโบกของโคนหาง, และหาง (หรือที่เรียกกันทั่วไปว่ามุมฮีฟวิ่ง (heaving angle) และมุมพิตชิง (pitching angle) ตามลำดับ) กับแรงที่จับที่เกิดขึ้นในขณะที่มีการโบก

สภาวะของหาง ในการพิจารณาหาสมการการเคลื่อนที่ และแรงขับ ที่เกิดขึ้นจากการพัดโบกของหาง ปลา ภายใต้การพิจารณาการไหลแบบกึ่งราบเรียบ (quasi-steady fluid flow)

1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. ออกแบบระบบขับเคลื่อนของหุ่นยนต์ปลาให้เคลื่อนที่ได้บนระนาบ XY
2. หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) ของการเคลื่อนที่แบบทูนนิฟอร์ม (thunniform) ภายใต้การพิจารณาการไหลแบบกึ่งราบเรียบ (quasi-steady fluid flow) ทำการหาสมการพลศาสตร์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยสมการลากรองจ์ (Lagrange's equation)
3. ศึกษาและเปรียบเทียบการทำงานของหุ่นยนต์ในลักษณะการว่ายน้ำของปลาในแบบทูนนิฟอร์ม (thunniform) และผลจำลองทางคณิตศาสตร์ในข้อที่ 2.
4. นำเสนอแนวทางในการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

1.4 ขอบเขตงานวิทยานิพนธ์

ศึกษาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ 3 แกน บนระนาบ XY ที่มีลักษณะการเคลื่อนที่คล้ายปลาที่ว่ายน้ำแบบทูนนิฟอร์ม ภายใต้การพิจารณาการไหลแบบกึ่งราบเรียบ (quasi-steady fluid flow) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเร็ว ระยะทาง และแรงที่เกิดขึ้นสัมพันธ์กับค่าของมุมเฮฟวิ้ง และพิตซ์ ซึ่ง เกิดจากการโปกพัดหาง รวมทั้งออกแบบสร้างเครื่องจักรว่ายน้ำดันแบบ (Swimming Machine: SM)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพื่อเป็นพื้นฐานในการพัฒนางานวิจัยให้สามารถประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์ปลาในอนาคต
2. เพื่อเป็นอุปกรณ์สำหรับการศึกษาและพัฒนาความรู้ทางด้านกลศาสตร์ของไหลและระบบควบคุมของใบพัดขับเคลื่อนแบบกลับไปกลับมา
3. เพื่อพัฒนาความรู้ทางด้านการออกแบบยานยนต์ทางน้ำ โดยใช้ใบพัดที่มีการเคลื่อนที่แบบกลับไปกลับมา

1.6 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็นทั้งหมดห้าบท

บทที่ 1 กล่าวถึงวัตถุประสงค์ของงานวิจัย งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 2 กล่าวถึงรายละเอียดในการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่โดยใช้สมการของลากรองจ์

(Lagrange's equation) ในรูปของพลังงานที่เกิดขึ้นขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ โดยพิจารณาการไหลของน้ำผ่านหุ่นยนต์เป็นการไหลกึ่งคงตัวสม่ำเสมอ (quasi-steady flow) แบบสองมิติ (2-D-flow)

บทที่ 3 กล่าวถึงรายละเอียดในการออกแบบและอุปกรณ์ที่ใช้ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ ส่วนของการออกแบบทางกลและส่วนของการเชื่อมต่ออุปกรณ์วัดค่าและควบคุมกับเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุม โดยมีรายละเอียดในการออกแบบและติดตั้ง

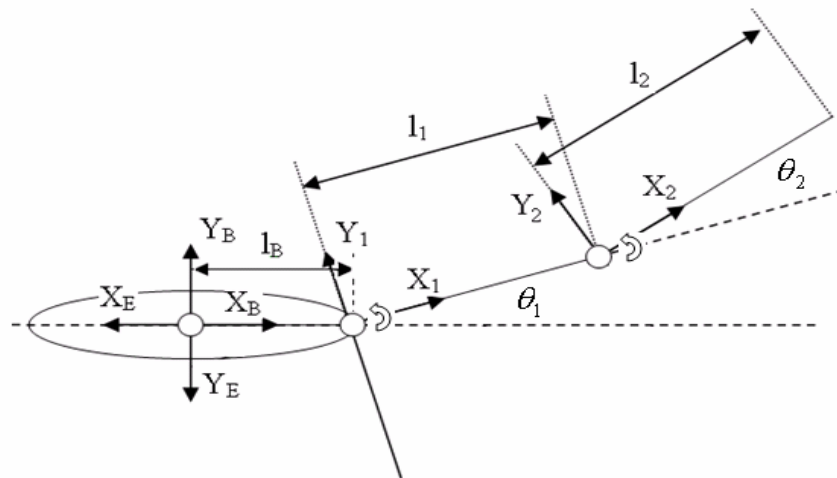
บทที่ 4 กล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองซึ่งจะแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆ คือส่วนของการทดลองโดยการจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และการทดลองกับชุดทดลองจริงที่ได้จัดสร้างขึ้น โดยผลการทดลองในแต่ละส่วนจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับในลักษณะของการทดลองแบบวงเปิด (open-loop)

บทที่ 5 กล่าวถึงข้อสรุปโดยรวมของงานวิจัยที่ได้ดำเนินงานมาทั้งหมด รวมถึงบทวิเคราะห์ผลการวิจัย ความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการทดลอง และข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัยที่จะต่อเนื่องต่อไปในอนาคต

บทที่ 2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงรายละเอียดในการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่โดยใช้สมการของลากรองจ์ (Lagrange's equation) ในรูปของพลังงานที่เกิดขึ้นขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ โดยพิจารณาการไหลของน้ำผ่านหุ่นยนต์เป็นแบบสองมิติ (2D-flow) โดยกำหนดให้ของไหลมีคุณสมบัติเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (incompressible fluid) ไม่มีความหนืด (inviscid fluid) ไม่มีการหมุนวน (irrotational) และน้ำหนักของหางมีค่าน้อยกว่าน้ำหนักโดยรวมของหุ่นยนต์มากทำให้จุดศูนย์กลางมวลไม่เปลี่ยนแปลง

2.1 คินมาติกส์ของหุ่นยนต์



รูปที่ 2.1 แบบจำลองสมมูลของระบบ

จากรูปที่ 2.1 เป็นแบบจำลองสมมูลของระบบ โดยกำหนดให้ l_B คือระยะห่างจากจุดศูนย์กลางมวลของหุ่นยนต์ถึงจุดหมุนของแกนโคนหาง l_1 คือความยาวของแกนโคนหาง (แกนที่1) l_2 คือความยาวของแผ่นหาง (แกนที่2) l_{c_1} คือจุดกึ่งกลางความยาวของแกนโคนหาง (แกนที่1) l_{c_2} คือจุดกึ่งกลางความยาวของแผ่นหาง (แกนที่2) ϕ, θ_1, θ_2 คือ มุมการเคลื่อนที่ของลำตัว โคนหาง และแผ่นหางตามลำดับ

กำหนดให้ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์คือ

$$\bar{p}_B = [x \quad y \quad 0]^T \quad (2.1)$$

เมื่อ x, y, z คือระยะจากระนาบอ้างอิงใดๆ เนื่องจากเป็นพิจารณาการเคลื่อนที่ในระนาบ 2 มิติ z จึงมีค่าเท่ากับ 0

กำหนดให้ $\theta_{12} = \theta_1 + \theta_2$

ระยะจากจุดศูนย์กลางมวลของแต่ละแกนเมื่อเทียบกับแกนอ้างอิงจะได้ว่า

แกน Body จะได้ว่า

$$\bar{p}_B = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

แกนที่1 จะได้ว่า

$$\bar{p}_{c_1} = \begin{bmatrix} x - l_B - l_{c_1} \cos \theta_1 \\ y - l_{c_1} \sin \theta_1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

แกนที่2 จะได้ว่า

$$\bar{p}_{c_2} = \begin{bmatrix} x - l_B - l_1 \cos \theta_1 - l_{c_2} \cos \theta_{12} \\ y - l_1 \sin \theta_1 - l_{c_2} \sin \theta_{12} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

เมื่อ $\bar{p}_i$ คือ เวกเตอร์ตำแหน่ง (Position vector) ที่หุ่นยนต์หรือแกนแต่ละแกนเคลื่อนที่ได้เทียบกับ
แกนอ้างอิง

$\bar{p}_{Ci}$ คือ เวกเตอร์ตำแหน่ง (Position vector) ที่หุ่นยนต์หรือแกนแต่ละแกนเคลื่อนที่ได้เทียบกับ
แกนอ้างอิง

พิจารณาหาความเร็วที่เกิดขึ้นในแต่ละแกนจะได้ว่า

ความเร็วของแกน Body จะได้ว่า

$$\bar{v}_B = \dot{\bar{p}}_B = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

ความเร็วของแกนที่1 จะได้ว่า

$$\bar{v}_{c_1} = \dot{\bar{p}}_{c_1} = \begin{bmatrix} \dot{x} + l_{c_1} \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 \\ \dot{y} - l_{c_1} \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\bar{\omega}_1 = \bar{\omega}_{c_1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix}$$

ความเร็วของแกนที่2 จะได้ว่า

$$\bar{v}_{c_2} = \dot{\bar{p}}_{c_2} = \begin{bmatrix} \dot{x} + l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 + l_{c_2} \dot{\theta}_{12} \sin \theta_{12} \\ \dot{y} - l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 - l_{c_2} \dot{\theta}_{12} \cos \theta_{12} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$\bar{\omega}_2 = \bar{\omega}_{c_2} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_{12} \end{bmatrix}$$

เมื่อ $\dot{\vec{p}}_i, \vec{v}_i$ คือ เวกเตอร์ความเร็ว (difference position vector, velocity vector) ของแกนแต่ละแกนเคลื่อนที่ได้เทียบกับแกนอ้างอิง

$\vec{\omega}_i$ คือ เวกเตอร์ความเร็วเชิงมุม (angular velocity vector) ที่หุ่นยนต์หรือแกนแต่ละแกนเคลื่อนที่ได้เทียบกับแกนอ้างอิง

2.2 พลศาสตร์ของหุ่นยนต์

การพิจารณาสมการพลศาสตร์ของหุ่นยนต์เป็นการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นขณะที่หางของหุ่นยนต์ที่มีลักษณะเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมเรียบพัดโบกอยู่ในน้ำ ทำให้เกิดแรงยก (lift force) และแรงต้าน (Drag force) กระทำกับตัวหุ่นยนต์มีค่าดังสมการที่ (2.8)

$$Lift = f(A, C_L(\alpha), V), \quad Drag = f(A, C_D(\alpha), V) \quad (2.8)$$

เมื่อ $C_L(\alpha)$ คือสัมประสิทธิ์แรงยก (lift coefficient), $C_D(\alpha)$ คือสัมประสิทธิ์แรงต้าน (drag coefficient), และ α คือ มุมกระทบ (attack angle) ซึ่งเมื่อพิจารณาการไหลของน้ำที่ไหลผ่านการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เป็นการไหลกึ่งคงตัวแบบ 2 มิติ (2D Quasi-steady theory) จากรูปที่ 2.1 ขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่จะมีความเร็วเมื่อเทียบกับระนาบอ้างอิง (X, Y) มีค่าเท่ากับ $\dot{x}$ และ $\dot{y}$ ตามลำดับ โดยที่ความเร็วที่เกิดขึ้นรอบแกน Z มีค่าเท่ากับ $\dot{\phi}$ เมื่อพิจารณาตามทฤษฎีของ ปีกเครื่องบิน (airfoil) จะได้ว่าผลของแรงทางของไหลจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งระยะ 1/4 ของความยาวปีกเครื่องบิน (airfoil) (QC: quarter chord) ฉะนั้นจะได้ว่า ความเร็วที่ตำแหน่งระยะ 1/4 ของความยาวของครีป (hydrofoil) (V_{qc}) ดังจากสมการที่ (2.9) มีค่าเท่ากับ

$$\vec{V}_{qc} = \begin{bmatrix} \dot{x} + l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 + \frac{l_{c_2}}{4} \dot{\theta}_{12} \sin \theta_{12} \\ \dot{y} - l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 - \frac{l_{c_2}}{4} \dot{\theta}_{12} \cos \theta_{12} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

เนื่องจากความเร็วที่เกิดขึ้นบริเวณหางขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่จะมีลักษณะกลับไปกลับมาดังรูปที่ 2.2 ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการพิจารณาจึงสร้างเวกเตอร์ที่แสดงถึงทิศทางของความเร็วที่เกิดขึ้น โดยกำหนดให้ $\tilde{I}_e$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย มีทิศทาง ดังสมการที่ (2.10)

$$\tilde{l}_e = - \begin{pmatrix} \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

จากสมการที่ (2.8), (2.9) และ (2.10) จะได้ว่า แรงยกที่เกิดขึ้นมีขนาดและทิศทางดังสมการที่ (2.11)

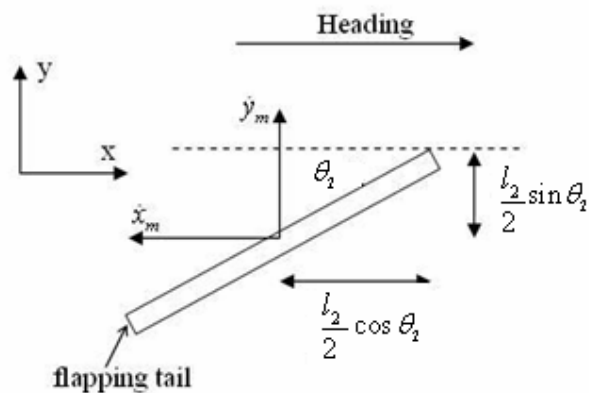
$$Lift = \frac{1}{2} \rho A(q, t) C_L(\alpha, t) (\bar{V}_{qc} \times \tilde{l}_e) \times \bar{V}_{qc} \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.2. แสดงการเกิดแรงยก (Lift force) บริเวณหาง ขณะหุ่นยนต์เคลื่อนที่

เมื่อพิจารณาความเร็วที่จุดกึ่งกลางของแผ่นหางจะได้ว่าแรงยกที่มีขนาดและทิศทางดังสมการที่ 2.11 ตามรูปที่ 2.2 ส่งผลให้เกิดโมเมนต์ (τ) ขึ้นที่บริเวณลำตัวของหุ่นยนต์ ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งค่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ

$$\tau = -\pi \frac{l_2^2}{4} (\dot{x}_m \dot{y}_m \cos(2\theta_2) + \frac{(\dot{y}_m^2 - \dot{x}_m^2)}{2} \sin(2\theta_2)) \quad (2.12)$$



รูปที่ 2.3. การคิดโมเมนต์ที่เกิดขึ้น

เมื่อพิจารณาสมการคิเนมาติกส์และสมการที่ (2.9) แรงต้านในแนวการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นบริเวณลำตัวจะมีค่ามากกว่าบริเวณหาง ดังนั้นจึงพิจารณาแรงต้านที่เกิดขึ้นบริเวณลำตัวเท่านั้น ซึ่งมีค่าดังสมการที่ (2.13)

$$Drag = \frac{1}{2} \rho C_D A \dot{q}_B \|\dot{q}_B\| \quad (2.13)$$

และค่าโมเมนต์ (M_D) ที่เกิดขึ้นรอบหุ่นยนต์เนื่องจาก แรงต้านมีค่าดังสมการที่ (2.15)

$$M_D = \frac{1}{2} \rho C_\phi A \dot{\phi}_B \|\dot{\phi}_B\| \quad (2.14)$$

จากสมการที่ (2.12)-(2.15) สามารถเขียนสมการของแรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ได้ดังสมการที่ (2.16)

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ \tau_1 \\ \tau_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{t,x} - D_{b,x} - f_{s,x} \left(\frac{\dot{x}_b}{\|\dot{x}_b\|} \right) \\ L_{t,y} - D_{b,y} - f_{s,y} \left(\frac{\dot{y}_b}{\|\dot{y}_b\|} \right) \\ u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

เมื่อ u_1, u_2 คือ ทอร์กของมอเตอร์แกนที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$L_{t,x}, L_{t,y}$ คือ ส่วนประกอบแรงยกบริเวณหางในแนวแกน X, Y ตามลำดับ

$D_{b,x}, D_{b,y}$ คือ ส่วนประกอบแรงต้านบริเวณลำตัวในแนวแกน X, Y ตามลำดับ

$f_{s,x}, f_{s,y}$ คือ แรงต้านการเคลื่อนที่ที่เกิดจากรางเลื่อน

$\dot{x}_b, \dot{y}_b$ คือ ความเร็วของหุ่นยนต์ในแนวแกน X, Y ตามลำดับ

2.3 สมการของ ลากรองจ์

แบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบสามารถสร้างขึ้นจากการพิจารณาพลังงานภายในแบบจำลอง สมมูลดังกล่าวโดยใช้สมการของลากรองจ์ (Lagrange's Equation) ซึ่งสมการของลากรองจ์มีรูปแบบดังนี้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(q_i, \dot{q}_i)}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L(q_i, \dot{q}_i)}{\partial q_i} = F_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.16)$$

เมื่อเทอมของลากรองจ์คือ

$$L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - V(q) \quad (2.17)$$

พลังงานจลน์ของหุ่นยนต์มีค่าดังสมการที่

$$T(q_i, \dot{q}_i) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m (m_i \bar{v}_{C_i}^T \bar{v}_{C_i} + {}^i \bar{\omega}_i^T {}^{C_i} I_i {}^i \bar{\omega}_i) \quad (2.18)$$

เนื่องจากการพิจารณาการเคลื่อนที่บนระนาบ XY ค่าพลังงานศักย์ในระบบจึงมีค่าเป็นศูนย์

พิจารณาความเร็วเชิงเส้นกำลังสองของแต่ละแกนจากสมการที่ 2.5-2.7 จะได้ว่า
แกนลำตัวมีค่าเท่ากับ

$$v_B^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 \quad (2.19)$$

แกนที่1 มีค่าเท่ากับ

$$v_{C_1}^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + 2l_{C_1} \dot{\theta}_1 [\dot{x} \sin \theta_1 - \dot{y} \cos \theta_1] + l_{C_1}^2 \dot{\theta}_1^2 \quad (2.20)$$

แกนที่2 มีค่าเท่ากับ

$$v_{C_2}^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + l_{C_2}^2 \dot{\theta}_{12}^2 + 2l_1 \dot{\theta}_1 [\dot{x} \sin \theta_1 - \dot{y} \cos \theta_1] \\ + 2l_{C_2} \dot{\theta}_{12} [\dot{x} \sin \theta_{12} - \dot{y} \cos \theta_{12}] + 2l_1 l_{C_2} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_{12} \cos \theta_2 \quad (2.21)$$

พจน์ของความเร็วเชิงมุมกำลังสองของแต่ละแกนมีค่าเท่ากับ

แกนที่1 มีค่าเท่ากับ

$$\dot{\omega}_1^2 = \dot{\theta}_1^2 \quad (2.22)$$

แกนที่2 มีค่าเท่ากับ

$$\dot{\omega}_2^2 = \dot{\theta}_{12}^2 = \dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2 + 2\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \quad (2.23)$$

จากการพิจารณาความเร็วกำลังสอง จากสมการที่ 2.19 -2.23 แทนลงในสมการที่ 2.18 สามารถคำนวณ
ค่าพลังงานจลน์รวมของระบบที่เกิดขึ้นได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^3 T(q, \dot{q}) = & \frac{1}{2} [(m_B + m_1 + m_2) \dot{x}^2 + (m_B + m_1 + m_2) \dot{y}^2 \\
& + (m_1 l_{C_1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{C_2}^2 + 2l_1 l_{C_2} \cos \theta_2) + I_1 + I_2) \dot{\theta}_1^2 \\
& + (m_2 l_{C_2}^2 + I_2) \dot{\theta}_2^2 + 2(m_1 l_{C_1} \sin \theta_1 + m_2 (l_1 \sin \theta_1 + l_{C_2} \sin \theta_{12})) \dot{\theta}_1 \dot{x} \\
& - 2(m_1 l_{C_1} \cos \theta_1 + m_2 (l_1 \cos \theta_1 + l_{C_2} \cos \theta_{12})) \dot{\theta}_1 \dot{y} \\
& + 2(m_2 (l_{C_2}^2 + l_1 l_{C_2} \cos \theta_2) + I_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + 2m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_2 \dot{x} \sin \theta_{12} - 2l_{C_2} m_2 \dot{\theta}_2 \dot{y} \cos \theta_{12}]
\end{aligned} \tag{2.24}$$

แทนค่าสมการที่ 2.24 ลงในสมการที่ 2.17 จะได้ว่าลากรองจ์ มีค่าเท่ากับ

$$L(q_i, \dot{q}_i) = \sum_{i=1}^3 T(q, \dot{q}) \tag{2.25}$$

2.3.1 พิจารณาหาสมการการเคลื่อนที่

แทนค่าสมการที่ 2.25 ลงในสมการที่ 2.17 และแทนค่า $q_1 = x$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
\frac{\partial L(x, \dot{x})}{\partial \dot{x}} &= (m_B + m_1 + m_2) \dot{x} \\
&+ (m_1 l_{C_1} \sin \theta_1 + m_2 (l_1 \sin \theta_1 + l_{C_2} \sin \theta_{12})) \dot{\theta}_1 \\
&+ m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_2 \sin \theta_{12} \\
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(x, \dot{x})}{\partial \dot{x}} \right) &= (m_B + m_1 + m_2) \ddot{x} \\
&+ (m_1 l_{C_1} \sin \theta_1 + m_2 l_1 \sin \theta_1 + m_2 l_{C_2} \sin \theta_{12}) \ddot{\theta}_1 + m_2 l_{C_2} \ddot{\theta}_2 \sin \theta_{12} \\
&+ (m_1 l_{C_1} \cos \theta_1 + m_2 l_1 \cos \theta_1 + m_2 l_{C_2} \cos \theta_{12}) \dot{\theta}_1^2 + m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_2^2 \cos \theta_{12} \\
&+ 2m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos \theta_{12} \\
\frac{\partial L(x, \dot{x})}{\partial x} &= 0
\end{aligned}$$

จะได้ว่าสมการการเคลื่อนที่ในแนวแกน x คือ

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(x, \dot{x})}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L(x, \dot{x})}{\partial x} &= (m_B + m_1 + m_2) \ddot{x} + m_2 l_{C_2} \ddot{\theta}_2 \sin \theta_{12} \\
&+ (m_1 l_{C_1} \sin \theta_1 + m_2 l_1 \sin \theta_1 + m_2 l_{C_2} \sin \theta_{12}) \ddot{\theta}_1 \\
&+ (m_1 l_{C_1} \cos \theta_1 + m_2 l_1 \cos \theta_1 + m_2 l_{C_2} \cos \theta_{12}) \dot{\theta}_1^2 \\
&+ m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_2^2 \cos \theta_{12} + 2m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos \theta_{12}
\end{aligned} \tag{2.26}$$

แทนค่าสมการที่ 2.25 ลงในสมการที่ 2.17 และแทนค่า $q_2 = y$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial L(y, \dot{y})}{\partial \dot{y}} &= (m_B + m_1 + m_2)\dot{y} \\
 &\quad - (m_1 l_{C_1} \cos \theta_1 + m_2 (l_1 \cos \theta_1 + l_{C_2} \cos \theta_{12}))\dot{\theta}_1 \\
 &\quad - m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_2 \cos \theta_{12} \\
 \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(y, \dot{y})}{\partial \dot{y}} \right) &= (m_B + m_1 + m_2)\ddot{y} - (m_1 l_{C_1} \cos \theta_1 + m_2 (l_1 \cos \theta_1 + l_{C_2} \cos \theta_{12}))\ddot{\theta}_1 \\
 &\quad - m_2 l_{C_2} \ddot{\theta}_2 \cos \theta_{12} + (m_1 l_{C_1} \sin \theta_1 + m_2 (l_1 \sin \theta_1 + l_{C_2} \sin \theta_{12}))\dot{\theta}_1^2 \\
 &\quad + m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_{12} + 2m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_{12} \\
 \frac{\partial L(y, \dot{y})}{\partial y} &= 0
 \end{aligned}$$

จะได้ว่าสมการการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y คือ

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(y, \dot{y})}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial L(y, \dot{y})}{\partial y} &= (m_B + m_1 + m_2)\ddot{y} - m_2 l_{C_2} \ddot{\theta}_2 \cos \theta_{12} \\
 &\quad - (m_1 l_{C_1} \cos \theta_1 + m_2 (l_1 \cos \theta_1 + l_{C_2} \cos \theta_{12}))\ddot{\theta}_1 \\
 &\quad + (m_1 l_{C_1} \sin \theta_1 + m_2 (l_1 \sin \theta_1 + l_{C_2} \sin \theta_{12}))\dot{\theta}_1^2 \\
 &\quad + m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_{12} + 2m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_{12}
 \end{aligned} \tag{2.27}$$

แทนค่าสมการที่ 2.25 ลงในสมการที่ 2.17 และแทนค่า $q_3 = \theta_1$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial L(\theta_1, \dot{\theta}_1)}{\partial \dot{\theta}_1} &= (m_1 l_{C_1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{C_2}^2 + 2l_1 l_{C_2} \cos \theta_2) + I_1 + I_2)\dot{\theta}_1 \\
 &\quad + (m_1 l_{C_1} \sin \theta_1 + m_2 (l_1 \sin \theta_1 + l_{C_2} \sin \theta_{12}))\dot{x} \\
 &\quad - (m_1 l_{C_1} \cos \theta_1 + m_2 (l_1 \cos \theta_1 + l_{C_2} \cos \theta_{12}))\dot{y} \\
 &\quad + (m_2 (l_{C_2}^2 + l_1 l_{C_2} \cos \theta_2) + I_2)\dot{\theta}_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(\theta_1, \dot{\theta}_1)}{\partial \dot{\theta}_1} \right) &= (m_1 l_{C_1} \sin \theta_1 + m_2 (l_1 \sin \theta_1 + l_{C_2} \sin \theta_{12})) \ddot{x} \\
&\quad - (m_1 l_{C_1} \cos \theta_1 + m_2 (l_1 \cos \theta_1 + l_{C_2} \cos \theta_{12})) \ddot{y} \\
&\quad + (m_1 l_{C_1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{C_2}^2 + 2l_1 l_{C_2} \cos \theta_2) + I_1 + I_2) \ddot{\theta}_1 \\
&\quad + (m_2 (l_{C_2}^2 + l_1 l_{C_2} \cos \theta_2) + I_2) \ddot{\theta}_2 - (2m_2 l_1 l_{C_2} \sin \theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\
&\quad + (m_1 l_{C_1} \cos \theta_1 + m_2 (l_1 \cos \theta_1 + l_{C_2} \cos \theta_{12})) \dot{x} \dot{\theta}_1 \\
&\quad + (m_1 l_{C_1} \sin \theta_1 + m_2 (l_1 \sin \theta_1 + l_{C_2} \sin \theta_{12})) \dot{y} \dot{\theta}_1 \\
&\quad + m_2 l_{C_2} \dot{x} \dot{\theta}_2 \cos \theta_{12} + m_2 l_{C_2} \dot{y} \dot{\theta}_2 \sin \theta_{12} - (m_2 l_1 l_{C_2} \sin \theta_2) \dot{\theta}_2^2 \\
\frac{\partial L(\theta_1, \dot{\theta}_1)}{\partial \theta_1} &= (m_1 l_{C_1} \cos \theta_1 + m_2 (l_1 \cos \theta_1 + l_{C_2} \cos \theta_{12})) \dot{\theta}_1 \dot{x} \\
&\quad + (m_1 l_{C_1} \sin \theta_1 + m_2 (l_1 \sin \theta_1 + l_{C_2} \sin \theta_{12})) \dot{\theta}_1 \dot{y} \\
&\quad + m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_2 \dot{x} \cos \theta_{12} + l_{C_2} m_2 \dot{\theta}_2 \dot{y} \sin \theta_{12}
\end{aligned}$$

จะได้ว่าสมการการเคลื่อนที่ในแนวแกน θ_1 คือ

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(\theta_1, \dot{\theta}_1)}{\partial \dot{\theta}_1} \right) - \frac{\partial L(\theta_1, \dot{\theta}_1)}{\partial \theta_1} &= (m_1 l_{C_1} \sin \theta_1 + m_2 (l_1 \sin \theta_1 + l_{C_2} \sin \theta_{12})) \ddot{x} \\
&\quad - (m_1 l_{C_1} \cos \theta_1 + m_2 (l_1 \cos \theta_1 + l_{C_2} \cos \theta_{12})) \ddot{y} \\
&\quad + (m_1 l_{C_1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{C_2}^2 + 2l_1 l_{C_2} \cos \theta_2) + I_1 + I_2) \ddot{\theta}_1 \\
&\quad + (m_2 (l_{C_2}^2 + l_1 l_{C_2} \cos \theta_2) + I_2) \ddot{\theta}_2 - (2m_2 l_1 l_{C_2} \sin \theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\
&\quad - (m_2 l_1 l_{C_2} \sin \theta_2) \dot{\theta}_2^2
\end{aligned} \tag{2.28}$$

แทนค่าสมการที่ 2.26 ลงในสมการที่ 2.17 และแทนค่า $q_4 = \theta_2$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
\frac{\partial L(\theta_2, \dot{\theta}_2)}{\partial \dot{\theta}_2} &= (m_2 l_{C_2}^2 + I_2) \dot{\theta}_2 + (m_2 (l_{C_2}^2 + l_1 l_{C_2} \cos \theta_2) + I_2) \dot{\theta}_1 \\
&\quad + m_2 l_{C_2} \dot{x} \sin \theta_{12} - m_2 l_{C_2} \dot{y} \cos \theta_{12} \\
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(\theta_2, \dot{\theta}_2)}{\partial \dot{\theta}_2} \right) &= m_2 l_{C_2} \ddot{x} \sin \theta_{12} - m_2 l_{C_2} \ddot{y} \cos \theta_{12} + (m_2 (l_{C_2}^2 + l_1 l_{C_2} \cos \theta_2) + I_2) \ddot{\theta}_1 \\
&\quad + (m_2 l_{C_2}^2 + I_2) \ddot{\theta}_2 + m_2 l_{C_2} \dot{x} \dot{\theta}_1 \cos \theta_{12} + m_2 l_{C_2} \dot{x} \dot{\theta}_2 \cos \theta_{12} \\
&\quad + m_2 l_{C_2} \dot{y} \dot{\theta}_1 \sin \theta_{12} + m_2 l_{C_2} \dot{y} \dot{\theta}_2 \sin \theta_{12} - m_2 l_1 l_{C_2} \sin \theta_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\
\frac{\partial L(\theta_2, \dot{\theta}_2)}{\partial \theta_2} &= -m_2 l_1 l_{C_2} \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2 + m_2 l_{C_2} \cos \theta_{12} \dot{\theta}_1 \dot{x} \\
&\quad + m_2 l_{C_2} \sin \theta_{12} \dot{\theta}_1 \dot{y} - (m_2 l_1 l_{C_2} \sin \theta_2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\
&\quad + m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_2 \dot{x} \cos \theta_{12} + l_{C_2} m_2 \dot{\theta}_2 \dot{y} \sin \theta_{12}
\end{aligned}$$

จะได้ว่าสมการการเคลื่อนที่ในแนวแกน θ_2 คือ

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(\theta_2, \dot{\theta}_2)}{\partial \dot{\theta}_2} \right) - \frac{\partial L(\theta_2, \dot{\theta}_2)}{\partial \theta_2} &= m_2 l_{C_2} \ddot{x} \sin \theta_{12} - m_2 l_{C_2} \ddot{y} \cos \theta_{12} \\ &+ (m_2 (l_{C_2}^2 + l_1 l_{C_2} \cos \theta_2) + I_2) \ddot{\theta}_1 + (m_2 l_{C_2}^2 + I_2) \ddot{\theta}_2 \\ &+ m_2 l_1 l_{C_2} \sin \theta_2 \dot{\theta}_1^2 \end{aligned} \quad (2.29)$$

จากสมการที่ 2.35-2.38 สามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการดังนี้

$$M_m(q) \ddot{q} + C_m(q, \dot{q}) \dot{q} = \tau \quad (2.30)$$

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

โดยที่ $M_m(q)$ คือ Inertia mass matrix

$C_m(q, \dot{q})$ คือ Coriolis และ Centripetal

m_{ij} คือ สมาชิกของ Inertia mass matrix ที่ตำแหน่งแถว i หลัก j

C_{ij} คือ สมาชิกของ Coriolis และ Centripetal matrix ที่ตำแหน่งแถว i หลัก j

τ_1 คือ โมเมนต์ที่เกิดขึ้นของแกนที่ 1

τ_2 คือ โมเมนต์ที่เกิดขึ้นของแกนที่ 2

จากสมการ (2.31) จะได้ว่าสัมประสิทธิ์ของเมตริกซ์ความเฉื่อย $M_m(q)$ สัมประสิทธิ์ของเมตริกซ์คอริ

โอริส (Coriolis matrix) และเมตริกซ์สู่ศูนย์กลาง (Centripetal matrix) $C_m(q, \dot{q})$ มีค่าดังนี้

โดยที่สัมประสิทธิ์ของเมตริกซ์ความเฉื่อย $M_m(q)$ มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} m_{11} &= m_B + m_1 + m_2 \\ m_{12} &= 0 \\ m_{13} &= (m_1 l_{C_1} + m_2 l_1) \sin \theta_1 + m_2 l_{C_2} \sin \theta_{12} \\ m_{14} &= m_2 l_{C_2} \sin \theta_{12} \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned}
m_{21} &= 0 \\
m_{22} &= m_B + m_1 + m_2 \\
m_{23} &= -m_1 l_{C_1} \cos \theta_1 - m_2 l_1 \cos \theta_1 - m_2 l_{C_2} \cos \theta_{12} \\
m_{24} &= -m_2 l_{C_2} \cos \theta_{12}
\end{aligned} \tag{2.33}$$

$$\begin{aligned}
m_{31} &= m_1 l_{C_1} \sin \theta_1 + m_2 l_1 \sin \theta_1 + m_2 l_{C_2} \sin \theta_{12} \\
m_{32} &= -m_1 l_{C_1} \cos \theta_1 - m_2 l_1 \cos \theta_1 - m_2 l_{C_2} \cos \theta_{12} \\
m_{33} &= m_1 l_{C_1}^2 + m_2 (l_1^2 + l_{C_2}^2 + 2l_1 l_{C_2} \cos \theta_2) + I_1 + I_2 \\
m_{34} &= m_2 l_{C_2}^2 + m_2 l_1 l_{C_2} \cos \theta_2 + I_2
\end{aligned} \tag{2.34}$$

$$\begin{aligned}
m_{41} &= m_2 l_{C_2} \sin \theta_{12} \\
m_{42} &= -m_2 l_{C_2} \cos \theta_{12} \\
m_{43} &= m_2 (l_{C_2}^2 + l_1 l_{C_2} \cos \theta_2) + I_2 \\
m_{44} &= m_2 l_{C_2}^2 + I_2
\end{aligned} \tag{2.35}$$

สัมประสิทธิ์ของเมตริกซ์คอริโอลิส (Coriolis matrix) และเมตริกซ์ศูนย์กลาง (Centripetal matrix)

$C_m(q, \dot{q})$ มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
C_{11} &= 0 \\
C_{12} &= 0 \\
C_{13} &= (m_1 l_{C_1} \cos \theta_1 + m_2 l_1 \cos \theta_1 + m_2 l_{C_2} \cos \theta_{12}) \dot{\theta}_1 + m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_2 \cos \theta_{12} \\
C_{14} &= m_2 l_{C_2} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos \theta_{12}
\end{aligned} \tag{2.36}$$

$$\begin{aligned}
C_{21} &= 0 \\
C_{22} &= 0 \\
C_{23} &= (m_1 l_{C_1} \sin \theta_1 + m_2 (l_1 \sin \theta_1 + l_{C_2} \sin \theta_{12})) \dot{\theta}_1 + m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_2 \sin \theta_{12} \\
C_{24} &= m_2 l_{C_2} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin \theta_{12}
\end{aligned} \tag{2.37}$$

$$\begin{aligned}
C_{31} &= 0 \\
C_{32} &= 0 \\
C_{33} &= -m_2 l_1 l_{C_2} \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \\
C_{34} &= -m_2 l_1 l_{C_2} \dot{\theta}_1 \sin \theta_2 - m_2 l_1 l_{C_2} \dot{\theta}_2 \sin \theta_2
\end{aligned} \tag{2.38}$$

$$\begin{aligned}
C_{41} &= 0 \\
C_{42} &= 0 \\
C_{43} &= m_2 l_1 l_{C_2} \dot{\theta}_1 \sin \theta_2 \\
C_{44} &= 0
\end{aligned} \tag{2.39}$$

2.3.2 วิธีการตรวจสอบทางคณิตศาสตร์ ($\dot{M} - 2C$)

ซึ่งสมการพลศาสตร์โดยทั่วไปสามารถที่จะจัดให้อยู่ในรูปแบบดังสมการที่ (2.40)

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + N(q, \dot{q}) = \tau \tag{2.40}$$

โดยที่ $M(q)$ คือ เมตริกซ์มวลและความเฉื่อย (Inertia mass matrix)
 $C(q, \dot{q})$ คือ เมตริกซ์แรงเข้าสู่ศูนย์กลาง (Centripetal force) และแรงคอริโอลิส (Coriolis force)
 $N(q, \dot{q})$ คือ เมตริกซ์แรงโน้มถ่วงของโลกและแรงต่างๆ ที่กระทำกับวัตถุ
 τ คือ เวกเตอร์แรงลัพธ์ (Force/torque vector)

จากสมการที่ (2.40) มีคุณสมบัติที่สำคัญอยู่ 2 ประการ ([30] [33] [34] และ [35]) โดยสมการที่ (2.40) จะทำให้มั่นใจได้ว่าเป็นสมการที่ถูกต้องดังคุณสมบัติขั้นต้นดังนี้

- 1) $M(q)$ มีความสมมาตร (Symmetric) และผลลัพธ์เป็นบวกเสมอ (Positive Definite)
- 1) $\dot{M} - 2C \in \mathbb{R}^{n \times n}$ เป็นเมตริกซ์ Skew-symmetric

จากสมการที่ 2.32-2.39 ที่ได้ทำการหาสมการการเคลื่อนที่ นำมาจัดรูปแบบเมตริกซ์ให้อยู่ในรูปแบบของสมการที่ 2.40 ดังสมการที่ 2.41 และสมการที่ 2.42

$$M(q) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \tag{2.41}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{bmatrix} \tag{2.42}$$

โดยที่ $M(q)$ มีความสมมาตรและผลลัพธ์เป็นบวกเสมอ และเมื่อนำสมการที่ 2.41 และ 2.42 มาจัดให้อยู่ในรูปของ $\dot{M} - 2C$ ดังเมตริกซ์ที่ 2.43

$$\dot{M}_m - 2C_m = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

จะได้ว่าสมาชิกของเมตริกซ์ $(\dot{M}_m - 2C_m)$ มีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} a_{11} &= 0 \\ a_{12} &= 0 \\ a_{13} &= -m_1 l_{C_1} \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 - m_2 l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 - m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_1 \cos \theta_{12} - m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_2 \cos \theta_{12} \\ a_{14} &= -m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_1 \cos \theta_{12} - m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_2 \cos \theta_{12} \end{aligned} \quad (2.44)$$

$$\begin{aligned} a_{21} &= 0 \\ a_{22} &= 0 \\ a_{23} &= -m_1 l_{C_1} \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 - m_2 l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 - m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_1 \sin \theta_{12} - m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_2 \sin \theta_{12} \\ a_{24} &= -m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_1 \sin \theta_{12} - m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_2 \sin \theta_{12} \end{aligned} \quad (2.45)$$

$$\begin{aligned} a_{31} &= m_1 l_{C_1} \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 + m_2 l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 + m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_1 \cos \theta_{12} + m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_2 \cos \theta_{12} \\ a_{32} &= m_1 l_{C_1} \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 + m_2 l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 + m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_1 \sin \theta_{12} + m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_2 \sin \theta_{12} \\ a_{33} &= 0 \\ a_{34} &= 2m_2 l_1 l_{C_2} \dot{\theta}_1 \sin \theta_2 + m_2 l_1 l_{C_2} \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \end{aligned} \quad (2.46)$$

$$\begin{aligned} a_{41} &= m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_1 \cos \theta_{12} + m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_2 \cos \theta_{12} \\ a_{42} &= m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_1 \sin \theta_{12} + m_2 l_{C_2} \dot{\theta}_2 \sin \theta_{12} \\ a_{43} &= -2m_2 l_1 l_{C_2} \dot{\theta}_1 \sin \theta_2 - m_2 l_1 l_{C_2} \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \\ a_{44} &= 0 \end{aligned} \quad (2.47)$$

จากสมการที่ 2.41-2.44 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} a_{13} &= -a_{31}; a_{14} = -a_{41}; a_{23} = -a_{32}; a_{24} = -a_{42}; a_{34} = -a_{43}; \\ a_{11} &= a_{12} = a_{21} = a_{22} = a_{33} = a_{44} = 0 \end{aligned} \quad (2.48)$$

จากสมการที่ 2.48 สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการที่ 2.49 จะได้ว่า

$$(\dot{M}_m - 2C_m) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & a_{13} & a_{14} \\ 0 & 0 & a_{23} & a_{24} \\ -a_{13} & -a_{23} & 0 & a_{34} \\ -a_{14} & -a_{24} & -a_{34} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

จากสมการที่ 2.49 แสดงให้เห็นว่ามีคุณสมบัติของ Skew-symmetric ในส่วนของแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง และแรงคอริโอลิส ที่ได้ทำการหามานั้นจะถูกต้องก็ต่อเมื่อเมทริกซ์ของแรงเข้าสู่ศูนย์กลางและแรงคอริโอลิส และเมทริกซ์มวลและความเฉื่อยเป็นไปตามเงื่อนไข [36] ดังสมการที่ (2.50)

ทำให้เขียนให้อยู่ในรูปของ Skew-symmetric ได้ดังสมการที่ 2.50 ได้ดังนี้

$$\dot{q}^T [M(q) - 2C(q, \dot{q})] \dot{q} = 0 \quad (2.50)$$

เมื่อพิจารณาคูสมบัติข้อที่ 2 ของ Skew-symmetric กำหนดให้ ถ้า $q = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ และ $q^T = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$

จะได้ว่า

$$\begin{aligned} q^T (\dot{M}_m - 2C_m) q &= [1 \ 1 \ 1 \ 1] \begin{bmatrix} 0 & 0 & a_{13} & a_{14} \\ 0 & 0 & a_{23} & a_{24} \\ -a_{13} & -a_{23} & 0 & a_{34} \\ -a_{14} & -a_{24} & -a_{34} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= [1 \ 1 \ 1 \ 1] \begin{bmatrix} a_{13} + a_{14} \\ a_{23} + a_{24} \\ -a_{13} - a_{23} + a_{34} \\ -a_{14} - a_{24} - a_{34} \end{bmatrix} \\ &= a_{13} + a_{14} + a_{23} + a_{24} - a_{13} - a_{23} + a_{34} - a_{14} - a_{24} - a_{34} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (2.51)$$

จากสมการที่ 2.49 และ 2.51 แสดงให้เห็นว่า เมื่อแทนค่าสมการที่ (2.32)-(2.39) ลงในสมการที่ (2.31) จะมีคุณสมบัติเป็น Skew-symmetric

บทที่ 3. การออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์และการเชื่อมต่อระบบ

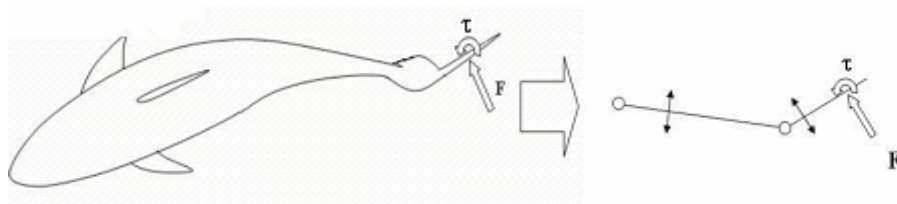
ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงรายละเอียดในการออกแบบและอุปกรณ์ที่ใช้แบ่งออกได้เป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนของการออกแบบทางกลและส่วนของการเชื่อมต่ออุปกรณ์วัดค่าและควบคุมกับเครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุม โดยมีรายละเอียดในการออกแบบและติดตั้งดังนี้

3.1 การออกแบบทางกล

การออกแบบทางกลประกอบด้วย การออกแบบกลไกเพื่อขับเคลื่อนและ โครงสร้างของร่างกายที่ใช้ในการทดลอง โดยมีรายละเอียดของแต่ละส่วนดังนี้

3.1.1 การออกแบบกลไกการเคลื่อนที่

การเคลื่อนที่แบบทูนนิฟอร์ม (thunniform motion) เป็นการเคลื่อนที่โดยอาศัยการเคลื่อนไหวเป็นลักษณะลูกคลื่นของลำตัว และหาง เพียงหนึ่งในสี่ส่วนของความยาวลำตัว ดังรูปที่ 1.2.2a และรูปที่ 1.2.3d ซึ่งแรงที่ใช้ในการขับเคลื่อนเกือบทั้งหมดจะเกิดจากการทำงานของส่วนหาง โดยใช้ครีบอกในการเลี้ยว ส่วนครีบทีหลัง และครีบใต้ท้อง ช่วยในการรักษาเสถียรภาพ จากรูปที่ 1.2.2a และรูปที่ 1.2.3d สามารถจำลองการทำงานของลำตัว และหาง เป็นลักษณะของแกนหมุน (revolve joints) 2 แกนได้ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งลักษณะของกลไกไม่ซับซ้อนมากนัก จากรูปที่ 3.1 พบว่า แกนแรกเป็นกลไกที่สร้างมุมกวาดให้กับแกนที่สอง เรียกว่าฮีฟวี่ง (heaving) แกนที่สองทำหน้าที่แทนหางปลาโดยข้อต่อของแกนนี้จะเป็นตัวกำหนดให้มุมของหางปลาเทียบกับทิศทางของการเคลื่อนที่ เรียกว่าพิตซิ่ง (pitching)



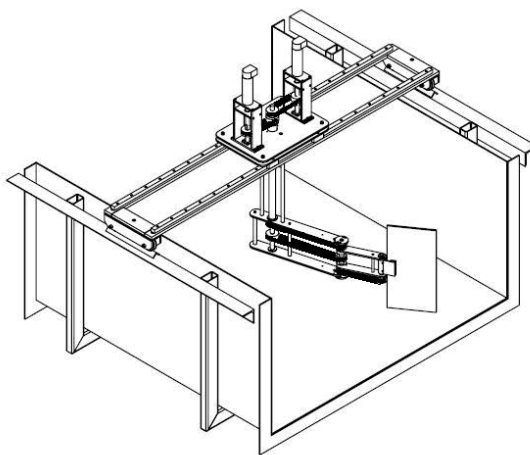
รูปที่ 3.1 แสดงแบบจำลองการทำงานของหางและแรงกระทำ [28]



รูปที่ 3.2 ลักษณะของหุ่นยนต์

ลักษณะการทำงานของหุ่นยนต์

ในส่วนของการวิจัยเป็นการพิจารณาการเคลื่อนที่บนระนาบแนวนราบ (horizontal plane) ดังนั้นเพื่อเป็นการลดปัญหาในเรื่องของการรักษาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ และเป็นการลดปัญหาในเรื่องการรั่วซึมของน้ำ ผู้วิจัยจึงออกแบบให้ชุดควบคุม ประกอบด้วย ชุดมอเตอร์ขับเคลื่อน ชุดอิเล็กทรอนิกส์ให้อยู่เหนือน้ำ และให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่อยู่บนรางน้ำ ซึ่งโครงสร้างของหุ่นยนต์จะทำด้วยอลูมิเนียมอัลลอยด์ เพื่อป้องกันการเกิดสนิมดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงลักษณะการติดตั้งหุ่นยนต์กับรางน้ำ

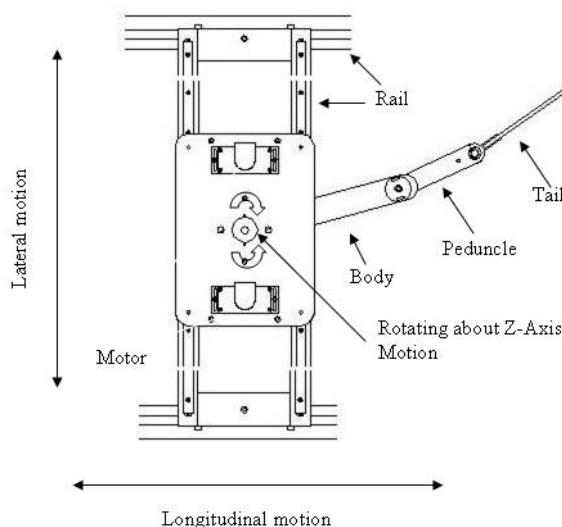
การทำงานของหุ่นยนต์เป็นลักษณะหุ่นยนต์ 3 แกน และมีลักษณะการส่ายของหางในสัดส่วน 1/4 ของความยาวลำตัว เคลื่อนที่ได้โดยอาศัยความสัมพันธ์ของส่วนที่เรียกว่าโคนหาง ทำ

หน้าที่สร้างมุมกวาดให้กับหางเรียกว่าฮีฟวิ่ง (heaving) และหางทำหน้าที่สร้างมุมของการเคลื่อนที่เรียกว่าพิตช์ (pitching)

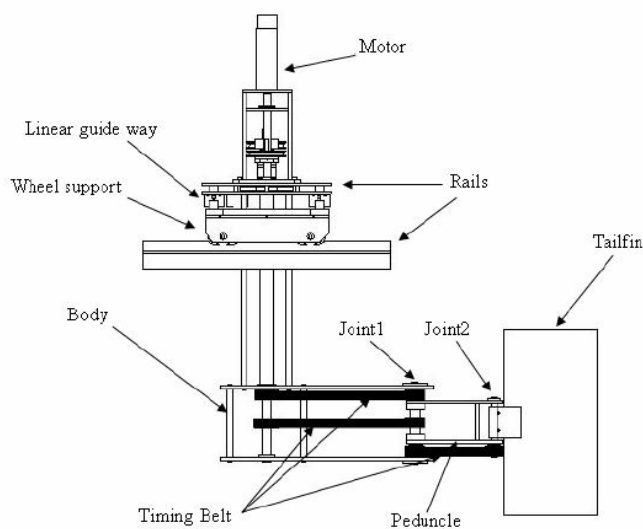
หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่บนระนาบ XY โดยในแกน x หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ด้วยล้อบนรางที่ความเสียดทานต่ำ ในแนวแกน y จะเคลื่อนที่ไปบนตัวนำทาง (linear guide way) และหมุนรอบแกน z ได้อิสระเป็นมุม ± 45 องศา การส่งกำลังจากมอเตอร์ทั้งสองตัวสามารถทำได้โดยการใช้สายพานทามมิ่ง (timing belt) คู่เพลาพร้อมแกนเดียวกัน ดังรูปที่ 3.4 และ รูปที่ 3.5 การทำงานของกลไกดังกล่าวทำให้การเคลื่อนที่ของทั้งสองแกนเคลื่อนที่อิสระต่อกัน จากการออกแบบพิจารณาให้หางและลำตัวเป็นแผ่นเรียบเพื่อง่ายต่อการสร้างและง่ายต่อการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้น โดยแผ่นเรียบที่หางจะทำหน้าที่สร้างแรงในการเคลื่อนที่ ส่วนแผ่นเรียบที่ลำตัวจะทำหน้าที่ในการสร้างแรงด้านการหมุนเพื่อทำให้เกิดความสมดุลในการหมุนรอบแกน z ขณะเคลื่อนที่

โดยเบื้องต้นได้กำหนดขนาดของหุ่นยนต์ดังนี้

- กำหนดให้
- ความยาวทั้งตัวหุ่นยนต์ (l) มีค่าเท่ากับ 1.128 m.
 - ความยาวของแกนลำตัว (l_b) มีค่าเท่ากับ 0.23 m.
 - ความยาวของแกนที่ 1 (l_1) มีค่าเท่ากับ 0.13 m.
 - ความยาวของแกนที่ 2 (l_2) มีค่าเท่ากับ 0.152 m
 - ขนาดของแผ่นหาง (A) มีขนาดเท่ากับ 0.0608 m^2



รูปที่ 3.4 ลักษณะของหุ่นยนต์ด้านบน



รูปที่ 3.5 ลักษณะของหุ่นยนต์ด้านข้าง

*หมายเหตุ รายละเอียดแบบร่าง (drawing) แสดงในภาคผนวก ข.

เกณฑ์การเลือกมอเตอร์

เนื่องจากการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เกิดจากการพัดโบกของแผ่นหาง ดังนั้นจึงพิจารณาแรงต้านของน้ำมากที่สุดที่เกิดขึ้นจากการพัดโบกของแผ่นหางจากสมการที่ 3.1

$$Drag = \frac{1}{2} \rho C_D A \dot{q} \|\dot{q}\| \quad (3.1)$$

- เมื่อ C_D คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน กำหนดให้มามีค่าเท่ากับ 2.5 [26]
 ρ คือ ค่าความหนาแน่นของน้ำมีค่าเท่ากับ 1000 kg/m^3
 A คือ พื้นที่ของแผ่นหางมีค่าเท่ากับ 0.0608 m^2
 $\dot{q}$ คือ ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ในการพัดโบก
 q คือ มุมการหมุนของมอเตอร์ในการพัดโบก

กำหนดให้ องศาการพัดโบกมีค่าสูงสุดของแต่ละแกนมีค่าเท่ากับ 60 องศา
 ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์จากสมการที่ 3.2

$$\dot{q} = q \cos(2\pi f) \quad (3.2)$$

มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 \dot{q} &= q \cos(2\pi f) \\
 &= \left(\frac{60 \times \pi}{180} \right) \cos(2\pi \times 1) \\
 &= 1.04 \frac{\text{rad}}{\text{s}}
 \end{aligned}$$

จะได้ว่าโมเมนต์สูงสุดที่เกิดขึ้นของแกนที่ 1 จากสมการที่ 3.3

$$M_H = (l_1 + l_2) \cdot Drag \quad (3.3)$$

มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 M_H &= (l_1 + l_2) \times Drag \\
 &= \frac{1}{2} (l_1 + l_2) \rho C_D A \dot{q} \|\dot{q}\| \\
 &= \frac{1}{2} (0.13\text{m} + 0.152\text{m}) \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 2.5 \times 0.0608\text{m}^2 \times 1.04^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \\
 &= 23.2 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

จะได้ว่าโมเมนต์สูงสุดที่เกิดขึ้นของแกนที่ 2 จากสมการที่ 3.3

มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 M_P &= (l_2) \times Drag \\
 &= \frac{1}{2} (l_2) \rho C_D A \dot{q} \|\dot{q}\| \\
 &= \frac{1}{2} (0.152\text{m}) \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 2.5 \times 0.0608\text{m}^2 \times 1.04^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \\
 &= 12.5 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

จากผลการคำนวณเบื้องต้นสามารถคำนวณกำลังมอเตอร์เบื้องต้นได้ดังนี้

$$P = \tau \omega \quad (3.4)$$

จะได้ว่ากำลังมอเตอร์แกนที่ 1 มีค่าเท่ากับ

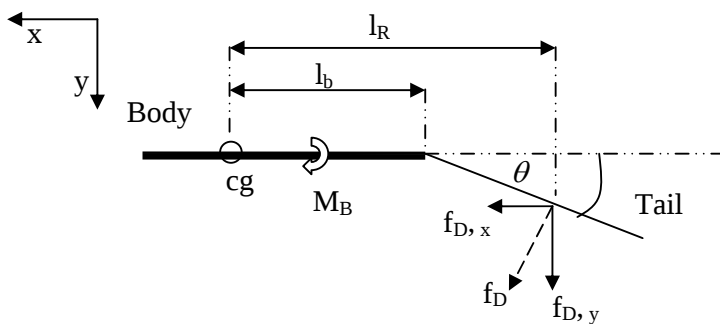
$$\begin{aligned}
 P_H &= M_H \omega \\
 &= M_H \times (2 \times \pi \times f) \\
 &= 23.2 \text{ Nm} \times 2 \times 3.14 \times 1 \text{ Hz} \\
 &= 145.8 \text{ W}
 \end{aligned}$$

จะได้ว่ากำลังมอเตอร์แกนที่ 2 มีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 P_p &= M_p \omega \\
 &= M_p \times 2 \times \pi \times f \\
 &= 12.5 \text{ Nm} \times 2 \times 3.14 \times 1 \text{ Hz} \\
 &= 78.5 \text{ W}
 \end{aligned}$$

จากการพิจารณาเบื้องต้นกำหนดให้มุมในการพับโบกของแต่ละแกนมีค่าเท่ากับ 60 องศา ที่ความถี่ 1 เฮิรตซ์ ในการขับแกนที่ 1 จะต้องใช้มอเตอร์ขนาด 150 วัตต์ และแรงบิดขนาด 23.2 นิวตันเมตร และในการขับแกนที่ 2 ใช้มอเตอร์ขนาด 78.5 วัตต์ และแรงบิดขนาด 12.5 นิวตันเมตร

การหาความกว้างของแผ่นเรียบที่ลำตัว



รูปที่ 3.6 ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นขณะเริ่มเคลื่อนที่บนระนาบ XY

จากรูปที่ 3.6 กำหนดให้ l_R คือระยะระหว่างแกนหมุนของหุ่นยนต์ถึงจุดที่แรงกระทำกับหาง เนื่องจากการโบก l_b คือความยาวของแผ่นข้างลำตัว M_B คือโมเมนต์ที่เกิดจากแผ่นเรียบข้างลำตัว $f_{D,x}$ และ $f_{D,y}$ แรงต้านในแนวแกน x และ แกน y ตามลำดับ

พิจารณาโมเมนต์รอบแกน z มีค่าเท่ากับ

จาก $\sum M_z = 0$ จะได้ว่า

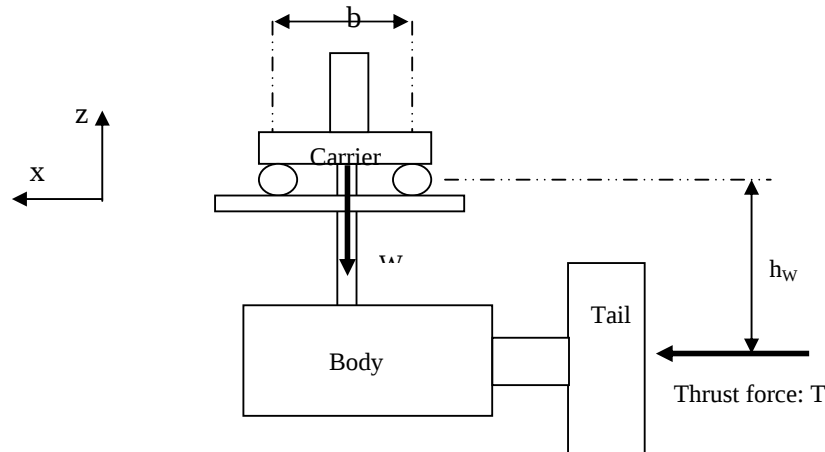
$$M_B = F_x(l_R - l_b)\sin\theta + F_y l_R \quad (3.5)$$

แทนค่า $M_B = \frac{1}{2} \rho C_D l_B^2 h \dot{q}_B \|\dot{q}_B\|$ ในสมการที่ 3.5 จะได้ว่า

$$h \dot{q}_B^2 = 2 \left(\frac{F_x(l_R - l_b)\sin\theta + F_y l_R}{\rho C_D l_B^2} \right) \quad (3.6)$$

จากสมการที่ 3.6 แสดงให้เห็นว่าความกว้างของแผ่นเรียบข้างลำตัวมีค่าผกผันกับค่าความเร็วในการส่ายของลำตัวกำลังสอง ในที่นี้จึงได้กำหนดค่าของมุมที่ยอมให้แกนลำตัวของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้มีค่าเท่ากับ 20 องศา จะได้ว่าความกว้างของแผ่นเรียบข้างลำตัวมีค่าประมาณ 30 เซนติเมตร

การหาความกว้างฐานล้อหุ่นยนต์



รูปที่ 3.7 ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นขณะเริ่มเคลื่อนที่บนระนาบ x-z

จากการความสัมพันธ์ของค่าสตรูฮาลด์ (Strouhal number: St) สามารถคำนวณความเร็วในการเคลื่อนที่เบื้องต้นได้ โดยมีนิยามดังต่อไปนี้

$$St = \frac{f A_w}{V} \quad (3.7)$$

โดยที่ f คือความถี่ของการโบกกลับไปกลับมาของหาง, A_w คือความกว้างของระลอกน้ำ (wake) ซึ่งโดยทั่วไปเท่ากับความกว้างที่ปลายหางกวาดไป (m) และ V คือความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ไป

ข้างหน้า (m/s), St ค่าอยู่ระหว่าง 0.25-0.35 (ซึ่งกำหนดเป็น 0.35) จากสมการที่ 3.5 สามารถพิจารณาหาความเร็วของการเคลื่อนที่เบื้องต้นของหุ่นยนต์และการพับโบกของแผ่นหางด้วยความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ ได้ดังนี้

$$V = \frac{fA_w}{St} \quad (3.8)$$

จากรูปที่ 3.7 เมื่อพิจารณาโมเมนต์รอบแกน Y กำหนดให้ล้อของฐานหุ่นยนต์เป็นจุดหมุน จากสมการ $\sum M_y = 0$ จะได้ว่า

$$W \frac{b}{2} - Th_w = 0 \quad (3.9)$$

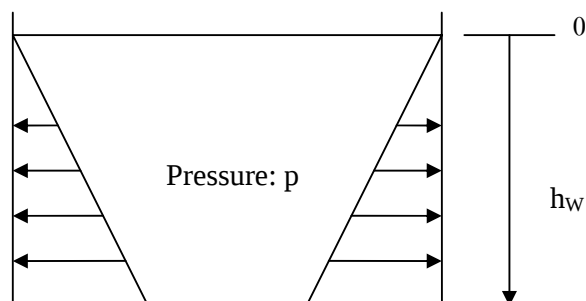
แทนค่า $T = \frac{1}{2} \rho C_D A V^2$ และสมการที่ 3.8 ลงในสมการที่ 3.9 จะได้ความกว้างของฐานหุ่นยนต์มีค่าเท่ากับ

$$b = \frac{\rho C_D A h_w}{W} \left(\frac{fA_w}{St} \right)^2 \quad (3.10)$$

จากสมการที่ 3.10 ที่ความถี่ 1 เฮิร์ตซ์ สามารถหาระยะความกว้างของฐานล้อได้ประมาณ 80 เซนติเมตร แต่เพื่อความสะดวกจึงออกแบบให้เป็นลักษณะของล้อรับด้านล่าง

3.1.2 การออกแบบโครงสร้างรางน้ำ

การทดลองการทำงานของหุ่นยนต์ปลาจะทดลองในรางน้ำ ซึ่งทำหน้าที่รองรับน้ำหนักของตัวหุ่นยนต์ และรักษาระดับของหุ่นยนต์ในคงที่อยู่ในระนาบ โดยออกแบบให้พับขึ้นรูปจากเหล็กแผ่น มีความกว้างเท่ากับ 1.5 เมตร มีความยาวเท่ากับ 6 เมตร ความลึกเท่ากับ 0.8 เมตร พิจารณาค่าแรงดันของน้ำที่กระทำกับผนังรางน้ำ



รูปที่ 3.8 ลักษณะของความดันน้ำที่กระทำกับผนังรางน้ำ

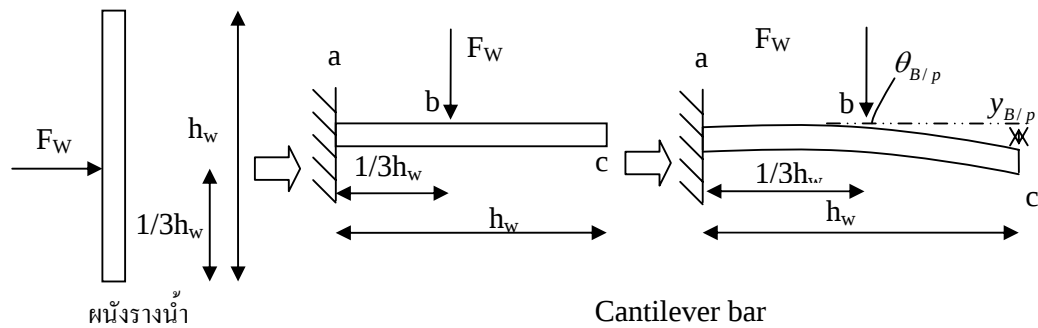
จากรูปที่ 3.8 แสดงลักษณะของความดันที่กระทำกับผนังของรางน้ำ โดย h_w คือความลึกของระดับน้ำ จากรูปที่ 3.8 สามารถหาแรงดันน้ำเฉลี่ยที่กระทำกับผนังรางน้ำจากสมการที่ 3.11

$$P_w = \frac{1}{2} \rho g h_w \quad (3.11)$$

จะได้ว่าแรงดันที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ

$$F_w = \frac{1}{2} \rho g h_w^2 L \quad (3.12)$$

จากรูปที่ 3.8 และสมการที่ 3.12 สามารถพิจารณาแรง (F_w) ที่เกิดขึ้นกระทำกับผนังของรางน้ำที่ระยะ $2/3$ ของระดับน้ำ (h_w) เป็นลักษณะของคานแบบราบเรียบสม่ำเสมอ (Cantilever bar) ได้ ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 พิจารณาความแรงดันน้ำที่กระทำกับผนังในลักษณะของคานรับน้ำหนัก (Cantilever bar)

พิจารณามุมเอียงและระยะโก่งสูงสุด

มุมเอียงสูงสุดมีค่าเท่ากับ

$$(\theta_c)_P = -\frac{P h_w^2}{18EI} \quad (3.13)$$

ระยะโก่งสูงสุดมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 (y_c)_P &= (y_b)_P + (\theta_b)_P \frac{2h_w}{3} \\
 &= -\frac{Ph_w^3}{81EI} - \frac{Ph_w^3}{27EI} \\
 &= -\frac{4Ph_w^3}{108EI}
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

เมื่อ E คือ ค่ามอดูลัสของการยืดหยุ่น (modulus of elasticity) มีค่าเท่ากับ 200 GPa

I คือ ค่าโมเมนต์ความเฉื่อย (moment of inertia)

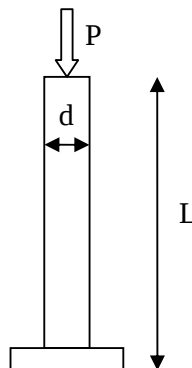
จากสมการที่ 3.13-3.14 จะได้ว่าค่ามุมเอียง $((\theta_c)_P)$ และระยะโก่งสูงสุด $((y_c)_P)$ มีค่าน้อยมาก ดังนั้นจึงเลือกความหนาของแผ่นเหล็กเท่ากับ 3 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถหาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการจัดสร้างและเคลื่อนย้าย จึงแบ่งส่วนเป็น 6 ส่วน ความยาวส่วนละ 1 เมตร ในการประกอบรายน้ำนั้นใช้ยางประกันวางกันระหว่างรายน้ำแต่ละส่วนเพื่อป้องกันการรั่วซึมของน้ำ

พิจารณาน้ำหนักของเสารับน้ำหนัก

จากขนาดของรายน้ำดังกล่าว เมื่อบรรจุน้ำที่ระดับ 70 เซนติเมตร จากกันบ่อ ปริมาตรของน้ำที่บรรจุจะมีขนาดเท่ากับ 6.3 ลูกบาศก์เมตร คิดเป็นน้ำหนักประมาณ 6.3 ตัน และรายน้ำมีน้ำหนักของโครงสร้างประมาณ 420 kg น้ำหนักโดยรวมมีค่าประมาณ 6.7 ตัน

กำหนดให้ เสารับน้ำหนักจำนวน 12 ต้น

ความยาวของเสาเท่ากับ 30 เซนติเมตร



รูปที่ 3.10 พิจารณาน้ำหนักของน้ำและรายน้ำที่กระทำกับเสารับน้ำหนัก

จะได้นำน้ำหนักเฉลี่ยต่อเสาหนึ่งต้นมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} P &= \frac{W}{12} \\ &= \frac{6.7 \times 10^3 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2}{12} \\ &= 5.47 \text{ kN} \end{aligned} \quad (3.15)$$

พิจารณาหาโหลดวิกฤตของเสาได้จากสมการที่ 3.16

$$P_{Cr} = \frac{4\pi^2 EI}{L^2} \quad (3.16)$$

เมื่อ แทนค่า $I = \frac{1}{4} \pi r^4$ ในสมการที่ 3.16 จะได้ว่า

รัศมีของเสาจะมีค่าเท่ากับ

$$r = \sqrt[4]{\frac{P_{Cr} L^2}{\pi^3 E}} \quad (3.17)$$

แทนค่า $P_{cr} = 5.47 \text{ kN}$, $E = 200 \text{ GPa}$, $L = 0.3 \text{ m}$ ลงในสมการที่ 3.17 จะได้ว่า

$$\begin{aligned} r &= \sqrt[4]{\frac{5.47 \text{ kN} \times (0.3 \text{ m})^2}{\pi^3 \times (200 \text{ GPa})}} \\ &= 2.9 \text{ mm} \end{aligned}$$

จากสมการที่ 3.17 สามารถคำนวณหาเส้นผ่าศูนย์กลางของเสาได้ประมาณ 6 มิลลิเมตร ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการจัดซื้อจึงเลือกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเสามีค่าเท่ากับ 25.4 มิลลิเมตร (1 Inc)

พิจารณาหาโหลดวิกฤตของเสาเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 2.54 เซนติเมตร ได้จากสมการที่ 3.16

$$\begin{aligned} P_{Cr} &= \frac{4\pi^2 \times 200 \times 10^9 \text{ Pa} \times \frac{1}{4} \times \pi \times \left(\frac{2.54}{2} \times 10^{-2} \text{ m}\right)^4}{(0.3 \text{ m})^2} \\ &= 1.79 \text{ MN} \end{aligned}$$

จากสมการที่ 3.15 และ 3.16 แสดงให้เห็นว่าค่าของโหลดวิกฤตมีค่ามากกว่าค่าของน้ำหนักเฉลี่ยต่อเสา มาก ($P_{Cr} \gg P$) เพื่อความสะดวกและความปลอดภัยจึงเลือกใช้เสาเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 2.54 เซนติเมตร ความยาว 0.3 เมตร

เนื่องจากการเคลื่อนที่ของหางเป็นการเคลื่อนที่แบบพัดโบกไปกลับ จึงจำเป็นต้องพิจารณา แรงบิดทวนงวงเหี่ยว (Stall torque) ที่มีค่าสูง ซึ่งเหมาะสมกับมอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน (brushless motor) โดยแกนที่ 1 เลือกใช้มอเตอร์แมกซอน (Maxon) รุ่น EC45 มีค่าแรงบิดติดตั้งเท่ากับ 3910 มิลลินิวตันเมตร เกียร์ทด (gear head) มีอัตราทดเท่ากับ 43:1 ขนาด 250 วัตต์ 24 โวลต์ แกนที่ 2 เลือกใช้มอเตอร์แมกซอน (Maxon) รุ่น EC32 มีแรงบิดทวนงวงเหี่ยว 355 มิลลินิวตันเมตร เกียร์ทด (gear head) มีอัตราทดเท่ากับ 23:1 ขนาด 80 วัตต์ 24 โวลต์ และใช้การส่งกำลังแบบสายพานไทม์มิ่ง (timing belt) โดยใช้ชุดพูลเลย์ที่มีอัตราทดประมาณ 1.875 โดยพูลเลย์ขับเคลื่อนผ่านศูนย์กลาง 32 มิลลิเมตร . และพูลเลย์ตาม 60 มิลลิเมตร . ที่มีระยะพิต 3 มิลลิเมตร . ความกว้างของแผ่นเรียบข้าง ลำตัวมีค่าประมาณ 30 เซนติเมตร . ระยะความกว้างของฐานล้อประมาณ 80 เซนติเมตร ส่วน โครงสร้างของรางน้ำขึ้นรูปจากเหล็กแผ่นขนาดกว้าง 1.2 เซนติเมตร . ยาว 2.4 เซนติเมตร .หนา 3 มิลลิเมตร .จำนวน 6 แผ่นและใช้เสานาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ 2.54 เซนติเมตร .

3.2 ส่วนโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์

โครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ใช้ในการรับข้อมูลจาก เซ็นเซอร์ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ และส่วนที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์

3.2.1 การรับข้อมูลจากเซ็นเซอร์

การรับข้อมูลจากเซ็นเซอร์จะทำหน้าที่ในการรับค่าความเร่งที่ได้จากการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ประกอบด้วยอุปกรณ์ 2 อย่างดังนี้

ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้เป็น Basic Stamp 2SX ทำงานที่ สัญญาณนาฬิกา 50 MHz หน่วยความจำ 16 กิโลไบต์ แบ่งเป็น 8 ส่วน ส่วนละ 2 กิโลไบต์ หน่วยความจำแรม 32 ไบต์ หน่วยความจำแรมสแครตช์ แพด (scratch pad RAM) 64 ไบต์ พอร์ตอินพุตเอาต์พุต 16 ช่อง ทำงานอิสระจากกัน หรือจัดเป็นกลุ่ม ได้ตั้งแต่ 4, 8 และ 16 ขาจ่ายกระแสชอร์ส/ซิงก์ต่อขา 30mA/30 mA เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่าน พอร์ตอนุกรม RS-232



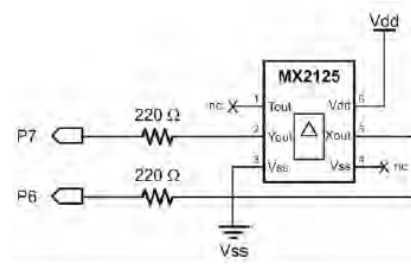
รูปที่ 3.11 บอร์ด Basic Stamp 2SX

เซ็นเซอร์วัดความเร่ง

เซ็นเซอร์วัดความเร่งที่ใช้เป็น MEMSIC 2125 ที่ใช้ตัวตรวจจับความเร่งแบบ 2 แกน ตั้งฉากกันวัดความเร่งในย่าน 2 g ความละเอียด 1 mg ทนการเปลี่ยนแปลงแบบเฉียบพลันที่ความเร่ง 50,000 g ใช้ไฟเลี้ยงได้ตั้งแต่ +3 ถึง +5.25 V. กินกระแส 4 mA



a)



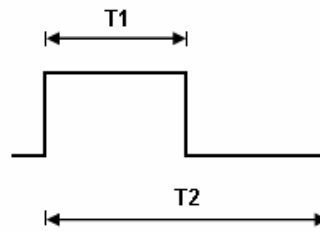
b)

รูปที่ 3.12 เซ็นเซอร์วัดความเร่ง MEMSIC 2125

a) ลักษณะของเซ็นเซอร์ b) การติดตั้งเซ็นเซอร์

หลักการทำงานของ MEMSIC 2125

ภายในอุปกรณ์ MEMSIC 2125 ประกอบด้วยตัวสร้างความร้อนขนาดเล็กซึ่งทำหน้าที่สร้างบอลลอากาศร้อนขนาดเล็ก เมื่อแรงดึงดูด (gravitational force) กระทำกับบอลลอากาศให้เคลื่อนที่ ทำให้สามารถวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บนบอร์ดจะทำหน้าที่แปลงตำแหน่งในสัญญาณรูปคลื่นที่เกิดขึ้นให้เป็นค่าความเร่ง (g-force) ที่เกิดขึ้นในแนวแกน x และ y โดยที่ค่าสัญญาณที่ได้จาก MEMSIC 2125 ที่ 50 % ของรูปคลื่นจะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0 g เมื่อรูปคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนและสามารถวัดได้จากบอร์ด Basic Stamp



รูปที่ 3.13 สัญญาณที่เอาพุตที่ได้จาก MEMSIC 2125

จากรูปที่ 3.13 สัญญาณที่ได้สามารถคำนวณหาความแรงได้จากสมการต่อไปนี้

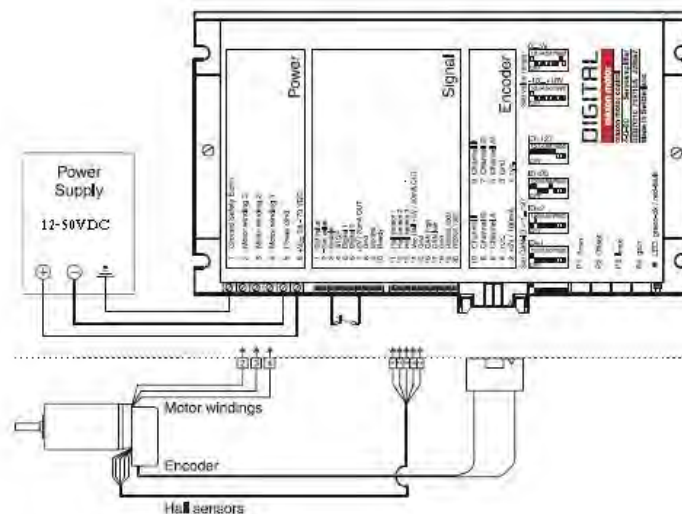
$$A(g) = 0.125\left(\frac{T1}{T2} - 0.5\right)$$

เมื่อ $A(g)$ คือ ความแรงที่คำนวณได้

$T1$ คือ ความกว้างของสัญญาณที่วัดได้จาก MEMSIC 2125 (มีหน่วยเป็น $2\text{-}\mu\text{s}$)

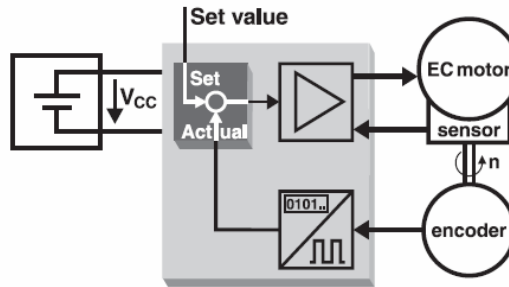
$T2$ คือ ความกว้างของสัญญาณที่ใช้ในการเปรียบเทียบ (มีหน่วยเป็น 10-ms)

3.2.2. การควบคุมการทำงานของมอเตอร์

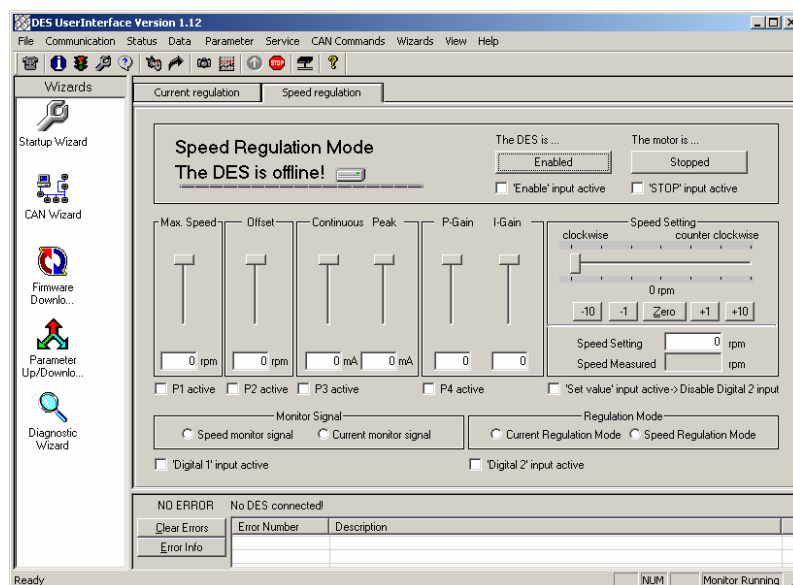


รูปที่ 3.14 แสดง 4-Q-EC Servo-amplifier DES50/5

จากรูปที่ 3.14 แสดงการติดตั้งชุดมอเตอร์ ประกอบด้วย มอเตอร์แบบไม่มีแปรงถ่าน ซึ่งใช้การส่งสนามแม่เหล็กผ่าน hall sensor ในการเคลื่อนที่ และ DES 50/5 เป็นอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของมอเตอร์ (Servo-amplifier) แบบไม่มีแปรงถ่านรุ่น EC ซึ่งจ่ายไฟได้ระหว่าง 12-50 VDC สามารถติดต่อได้โดยสายสัญญาณ RS232 หรือ CAN bus และสามารถรับสัญญาณอนาล็อกได้ระหว่าง 0 ถึง +5 V หรือ $\pm 10\text{ V}$ ควบคุมความเร็วและแรงบิดของมอเตอร์ได้



รูปที่ 3.15 แสดงการทำงานของ hall sensor และการส่งสัญญาณของ encoder



รูปที่ 3.16 แสดงการโปรแกรมทดสอบการทำงานของมอเตอร์

การส่งสัญญาณการทำงานระหว่างชุด DES 50/5 ทั้งสองด้วย CAN bus สามารถติดตั้งได้ด้วยการต่อความต้านทาน 1240 โอห์มคร่อมระหว่างขา CAN high และ CAN low เมื่อติดตั้งชุดมอเตอร์ดังรูปที่ 3.14 และต่อความต้านทานแล้ว จึงทำการติดตั้ง Firmware ของ DES 50/5 และกำหนดค่า bitrates มีค่าเท่า 1Mbit/s จากโปรแกรม DES User Interface ดังรูปที่ 3.16

บทที่ 4. การทดลองและผลการทดลอง

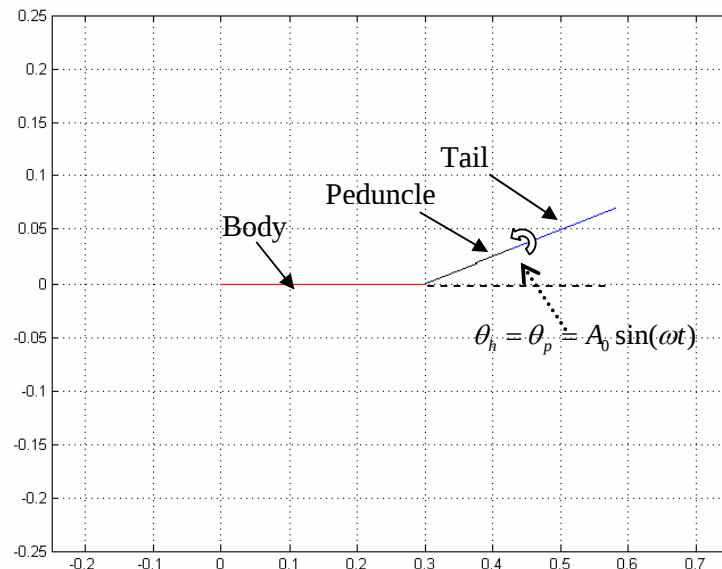
ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลองซึ่งจะแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆ คือ ส่วนของการทดลองโดยการจำลองการทำงานของระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และการทดลองกับชุดทดลองจริงที่ได้จัดสร้างขึ้น โดยผลการทดลองในแต่ละส่วนจะถูกนำมาเปรียบเทียบกันในลักษณะของการทดลองแบบวงเปิด (open-loop) โดยมีรายละเอียดในการทดลองดังนี้

4.1 วิธีการทดลอง

การทดลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบ่งออกเป็น 4 กรณีหลักคือ

กรณีที่ 1 การเคลื่อนที่แบบ ฮีพวิ้ง (Heaving motion)

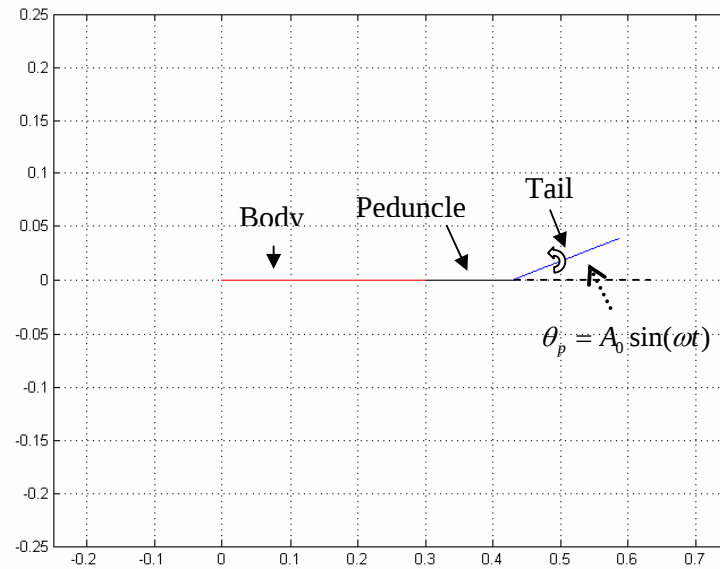
การเคลื่อนที่แบบ ฮีพวิ้ง เป็นการเคลื่อนที่ โดยกำหนดให้แกนที่ 1, 2 ที่มีมุม ฮีพวิ้ง, พิดจิง เท่ากัน ค่าของ มุมเฟส เท่ากับ ศูนย์ มีลักษณะการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 4.1.1 สามารถกำหนดดองศาการเคลื่อนที่ได้ดังนี้ เมื่อ $\theta_h = \theta_p = A_0 \sin(\omega t)$



รูปที่ 4.1.1 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบ ฮีพวิ้ง

กรณีที่ 2 การเคลื่อนที่แบบ พิดจิง (Pitching motion)

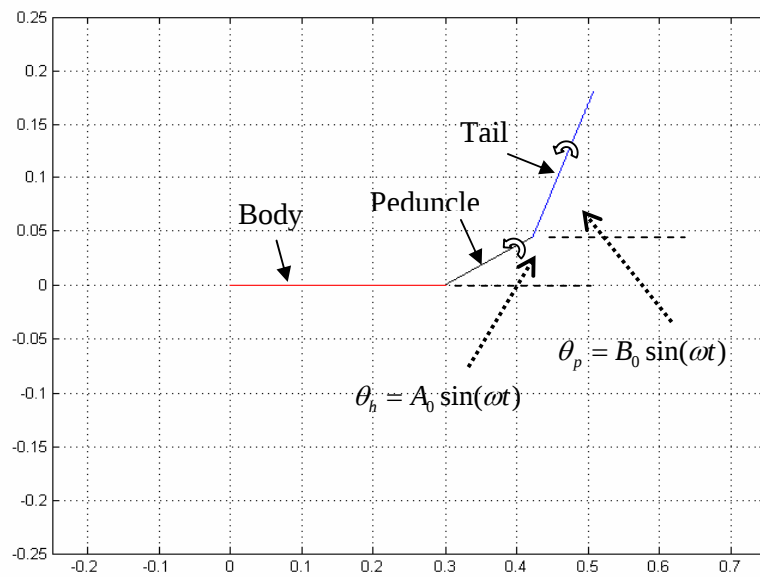
การเคลื่อนที่แบบ พิดจิง เป็นการเคลื่อนที่ โดยกำหนดให้มุม ฮีพวิ้ง มีค่าเท่ากับศูนย์ และ มุม พิดจิง มีค่าเท่ากับค่าอินพุต มีลักษณะการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 4.1.2 สามารถกำหนดดองศาการเคลื่อนที่ได้ดังนี้ เมื่อ $\theta_h = 0, \theta_p = A_0 \sin(\omega t)$,



รูปที่ 4.1.2 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบ พิดซิ่ง

กรณีที่ 3 การเคลื่อนที่แบบ เฟสเท่ากับศูนย์

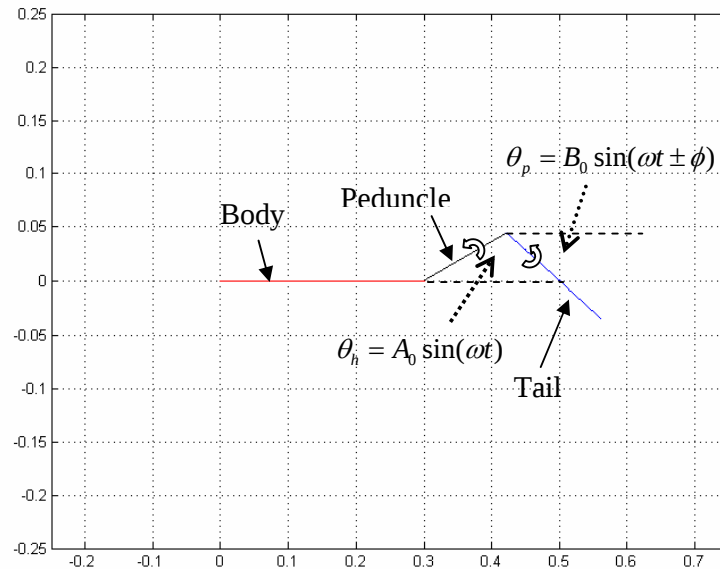
การทดลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยกำหนดให้มุม ฮีพวิ้ง และ มุม พิดซิ่ง มีค่าเท่ากับค่า อินพุต แต่ค่ามุม เฟส มีค่าเท่ากับศูนย์ มีลักษณะการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 4.1.3 สามารถกำหนดคองศาการเคลื่อนที่ได้ดังนี้ เมื่อ $\theta_h = A_0 \sin(\omega t)$, $\theta_p = B_0 \sin(\omega t)$



รูปที่ 4.1.3 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบ เฟสเท่ากับศูนย์

กรณีที่ 4 การเคลื่อนที่แบบ เฟส มีค่าไม่เท่ากับศูนย์

การทดลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยกำหนดให้มุม ฮีพวิง และ มุม พิตชิง มีค่าเท่ากับค่าอินพุต แต่ค่ามุม เฟส มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ มีลักษณะการเคลื่อนที่ดังรูปที่ 4.1.4 สามารถกำหนดองศาการเคลื่อนที่ได้ดังนี้ เมื่อ $\theta_h = A_0 \sin(\omega t)$, $\theta_p = B_0 \sin(\omega t \pm \phi)$

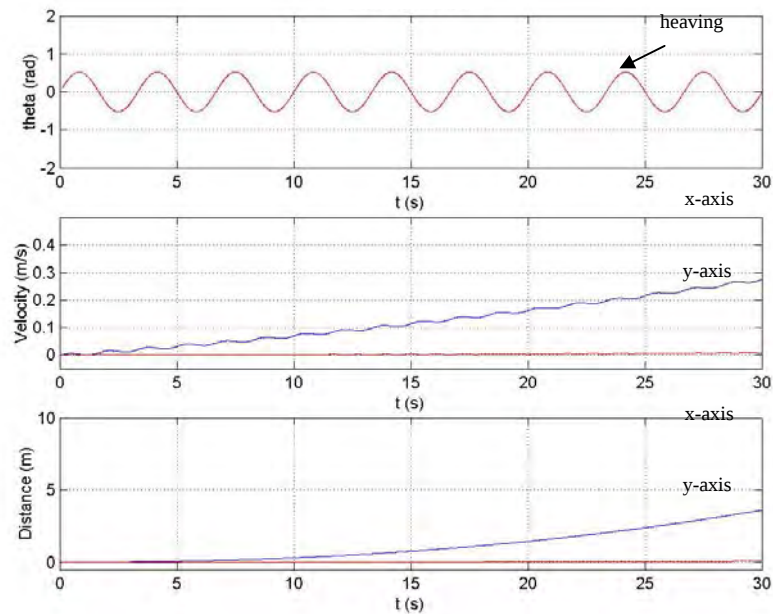


รูปที่ 4.1.4 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบ เฟส มีค่าไม่เท่ากับศูนย์

4.2 ผลการจำลองการเคลื่อนที่

การจำลองการเคลื่อนที่ที่สามารถพิจารณาได้ จากแบบจำลองที่ได้คำนวณไว้ในบทที่ 2 โดยใช้สมการของลากรองจ์ (Lagrange's equation) จากเงื่อนไขการทดลองข้างต้นสามารถนำมาพิจารณาในแบบจำลองได้ดังนี้

4.2.1 ผลจำลองการเคลื่อนที่แบบ ฮีพวิ้ง



รูปที่ 4.2.1 แสดงการเคลื่อนที่แบบ ฮีพวิ้ง

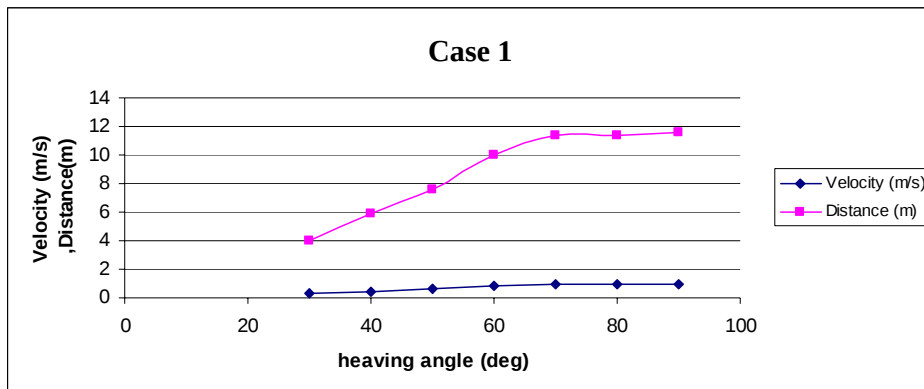
โดยมีค่ามุม ฮีพวิ้ง angle เท่ากับ 30 องศา

สรุปผลจำลองการเคลื่อนที่แบบ ฮีพวิ้ง

สามารถแสดงค่าความเร็วและระยะทาง ณ เวลาที่ 30 วินาที ที่ค่ามุมต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.2.1 จากรูปที่ 4.2.2 แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่แบบ ฮีพวิ้ง จะมีค่าความเร็วและระยะทางที่เคลื่อนที่ได้แปรผันตรงกับค่าของมุม ฮีพวิ้ง ที่เพิ่มขึ้นจนถึงค่ามุมที่ค่าเท่ากับ 70 องศา

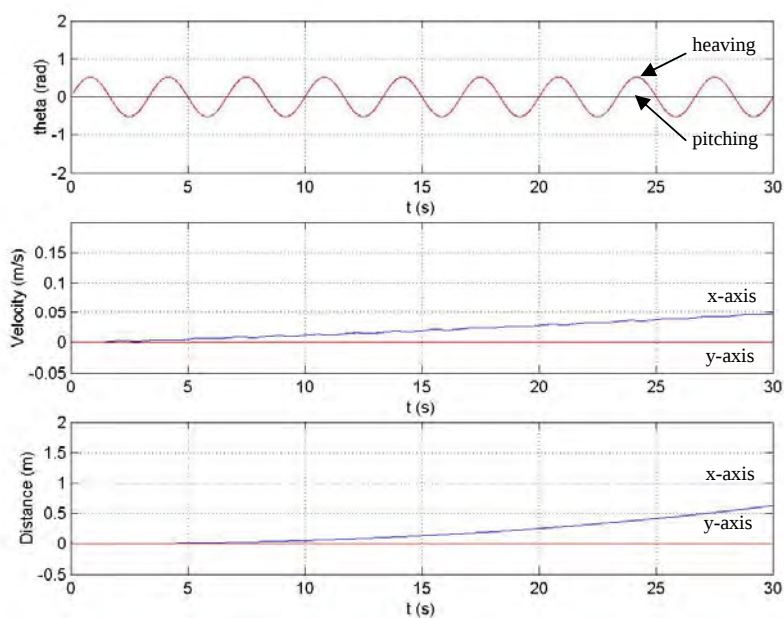
ตารางที่ 4.2.1 ตารางแสดงความเร็วและระยะทาง ณ เวลาที่ 30 วินาที ของการเคลื่อนที่แบบ ฮีพวิ้ง

Heaving (deg)	Velocity (m/s)	Distance (m)
30	0.285	4.05
40	0.443	5.93
50	0.634	7.61
60	0.822	10.01
70	0.913	11.35
80	0.921	11.36
90	0.953	11.6



รูปที่ 4.2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม ฮีพวิ้ง
กับความเร็วและระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ ในช่วงเวลาเท่ากับ 30 วินาที

4.2.2. ผลจำลองการเคลื่อนที่แบบ พิตชิง



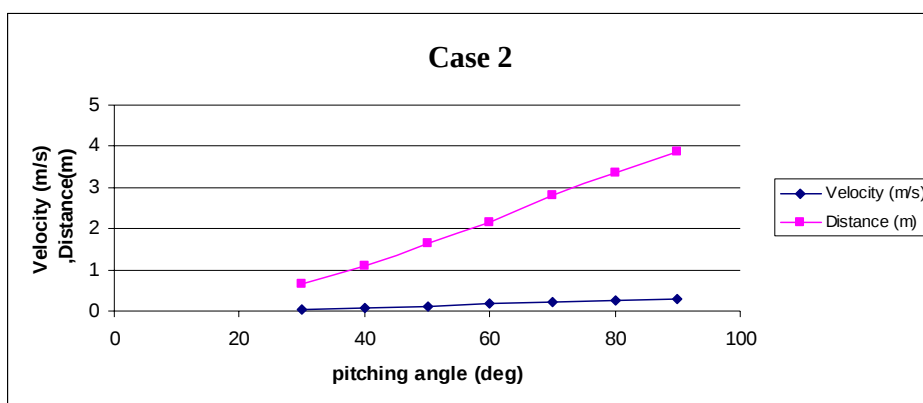
รูปที่ 4.2.3 แสดงการเคลื่อนที่แบบ พิตชิง
โดยมีค่ามุม พิตชิง เท่ากับ 30 องศา

สรุปผลจำลองการเคลื่อนที่แบบ พิตชิง

ซึ่งสามารถแสดงค่าความเร็วและระยะทางของการเคลื่อนที่แบบ พิตชิง โดยมีค่ามุม พิตชิง เท่ากับ 20, 40, 60, 80, 90 องศา ตามลำดับ ณ เวลาที่ 30 วินาทีได้ดังตารางที่ 4.2.2 จากรูปที่ 4.2.4 แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่แบบ พิตชิง จะมีค่าความเร็วและระยะทางที่เคลื่อนที่ได้แปรผันตรงกับค่า ของมุม พิตชิง ที่เพิ่มขึ้นจนถึงค่ามุมที่ค่าเท่ากับ 90 องศา

ตารางที่ 4.2.2 ตารางแสดงความเร็วและระยะทาง ณ เวลาที่ 30 วินาที ของการเคลื่อนที่แบบ พัดซิ่ง

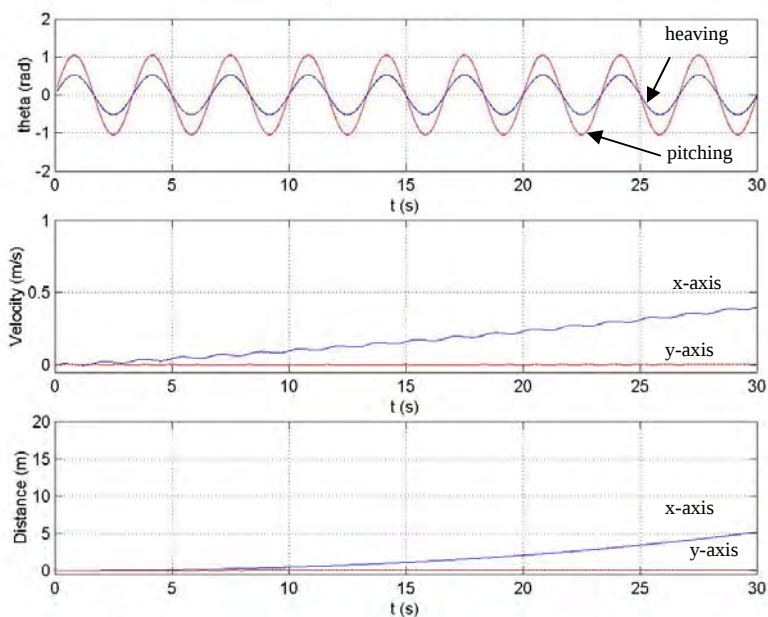
Pitching (deg)	Velocity (m/s)	Distance (m)
30	0.285	4.050
40	0.443	5.930
50	0.634	7.610
60	0.822	10.010
70	0.913	11.350
80	0.921	11.360
90	0.953	11.600



รูปที่ 4.2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามุม พัดซิ่ง
กับความเร็วและระยะทางที่พิจารณาที่เวลาเท่ากับ 30 วินาที

4.2.3. ผลจำลองการเคลื่อนที่แบบเฟสเท่ากับศูนย์

การเคลื่อนที่แบบ เฟสเท่ากับศูนย์ โดยกำหนดให้ค่าของมุม ฮีพวี่ง มีค่าระหว่าง ± 30 องศา และมุม พัดซิ่ง มีค่าระหว่าง ± 20 ตามลำดับ



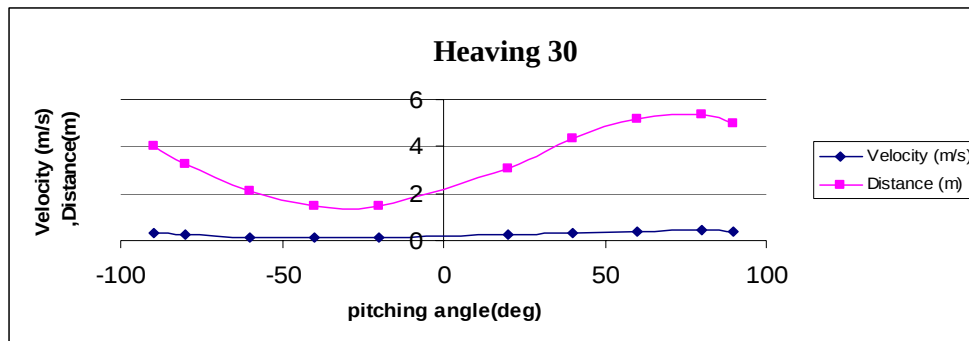
รูปที่ 4.2.5 แสดงการเคลื่อนที่แบบ เฟสเท่ากับศูนย์ โดยมีค่ามุม ฮีฟวิ่ง และมุม พิตชิง เท่ากับ 30 องศา และ 60 องศา ตามลำดับ

สรุปผลจำลองการเคลื่อนที่แบบ เฟสเท่ากับศูนย์

จากผลการจำลองการเคลื่อนที่แบบ เฟสเท่ากับศูนย์ ข้างต้นสามารถพิจารณาในรูปของความเร็วและระยะทางการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.2.3 ตารางแสดงความเร็วและระยะทาง ณ เวลาที่ 30 วินาที ของการเคลื่อนที่แบบ เฟส เท่ากับศูนย์ โดยมีค่ามุม ฮีฟวิ่ง เท่ากับ 30 องศา

Heaving (deg)	Pitching (deg)	Velocity (m/s)	Distance (m)
30	-90	0.300	4.020
	-80	0.245	3.268
	-60	0.158	2.102
	-40	0.113	1.490
	-20	0.110	1.490
	20	0.230	3.040
	40	0.292	4.310
	60	0.398	5.150
	80	0.424	5.370
	90	0.400	4.980

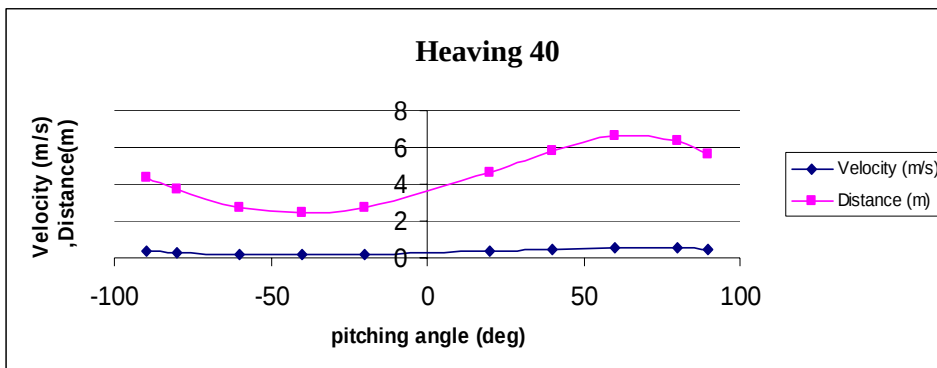


รูปที่ 4.2.6 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่แบบ เฟสเท่ากับศูนย์
ระหว่างค่ามุม พิตชิง กับความเร็ว โดยมีค่ามุม ฮีพวิ้ง เท่ากับ 30 องศา

จากรูปที่ 4.2.6 แสดงให้เห็นว่าที่มุม พิตชิง เท่ากับ -30 องศา จะมีค่าความเร็วที่ได้น้อยที่สุด และจะมีค่าความเร็วจะเพิ่มขึ้นเมื่อมุม พิตชิง มีค่ามากขึ้นหรือมีค่าน้อยลง และมีค่าลดลงเมื่อมุม พิตชิง มีค่าเท่ากับ 90 องศา

ตารางที่ 4.2.4 ตารางแสดงความเร็วและระยะทาง ณ เวลาที่ 30 วินาที ของการเคลื่อนที่แบบ เฟส
เท่ากับศูนย์ โดยมีค่ามุม ฮีพวิ้ง เท่ากับ 40 องศา

Heaving (deg)	Pitching (deg)	Velocity (m/s)	Distance (m)
40	-90	0.329	4.391
	-80	0.277	3.691
	-60	0.207	2.741
	-40	0.184	2.431
	-20	0.207	2.736
	20	0.354	4.677
	40	0.445	5.830
	60	0.510	6.595
	80	0.508	6.388
	90	0.462	5.678

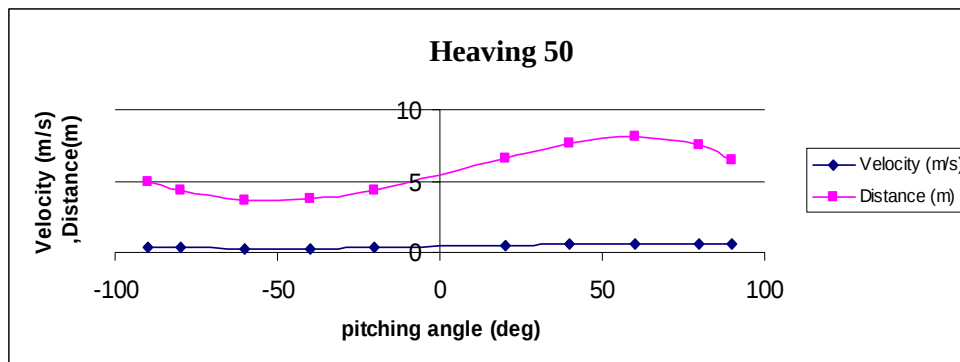


รูปที่ 4.2.7 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่แบบ เฟสเท่ากับศูนย์
ระหว่างค่ามุม พิดชิ่ง กับความเร็ว โดยมีค่ามุม ฮีพวิ้ง เท่ากับ 40 องศา

จากรูปที่ 4.2.7 แสดงให้เห็นว่าที่มุม พิดชิ่ง เท่ากับ -40 องศา จะมีค่าความเร็วที่ได้น้อยที่สุด และจะมีค่าความเร็วจะเพิ่มขึ้นเมื่อมุม พิดชิ่ง มีค่ามากขึ้นหรือมีค่าน้อยลง และมีค่าลดลงเมื่อมุม พิดชิ่ง มีค่าเท่ากับ 60 องศา

ตารางที่ 4.2.5 ตารางแสดงความเร็วและระยะทาง ณ เวลาที่ 30 วินาที ของการเคลื่อนที่แบบ เฟส
เท่ากับศูนย์ โดยมีค่ามุม ฮีพวิ้ง เท่ากับ 50 องศา

Heaving (deg)	Pitching (deg)	Velocity (m/s)	Distance (m)
50	-90	0.368	4.899
	-80	0.326	4.321
	-60	0.280	3.684
	-40	0.282	3.712
	-20	0.326	4.315
	20	0.495	6.548
	40	0.582	7.634
	60	0.633	8.163
	80	0.602	7.525
	90	0.537	6.514

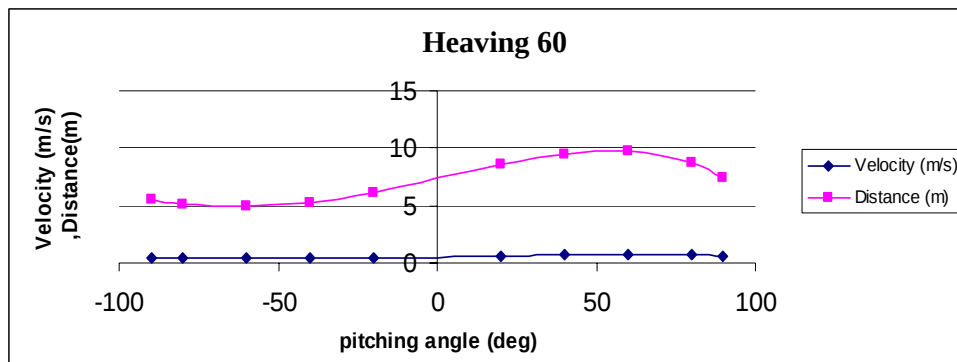


รูปที่ 4.2.8 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่แบบ เฟสเท่ากับศูนย์
ระหว่างค่ามุม พิดชิ่ง กับความเร็วโดยมีค่ามุม ฮีฟวิ้ง เท่ากับ 50 องศา

จากรูปที่ 4.2.8 แสดงให้เห็นว่าที่มุม พิดชิ่ง เท่ากับ -50 องศา จะมีค่าความเร็วที่ได้น้อยที่สุด และจะมีค่าความเร็วจะเพิ่มขึ้นเมื่อมุม พิดชิ่ง มีค่ามากขึ้นหรือมีค่าน้อยลง และมีค่าลดลงเมื่อมุม พิดชิ่ง มีค่าเท่ากับ 60 องศา

ตารางที่ 4.2.6 ตารางแสดงความเร็วและระยะทาง ณ เวลาที่ 30 วินาที ของการเคลื่อนที่แบบ เฟส
เท่ากับศูนย์ โดยมีค่ามุม ฮีฟวิ้ง เท่ากับ 60 องศา

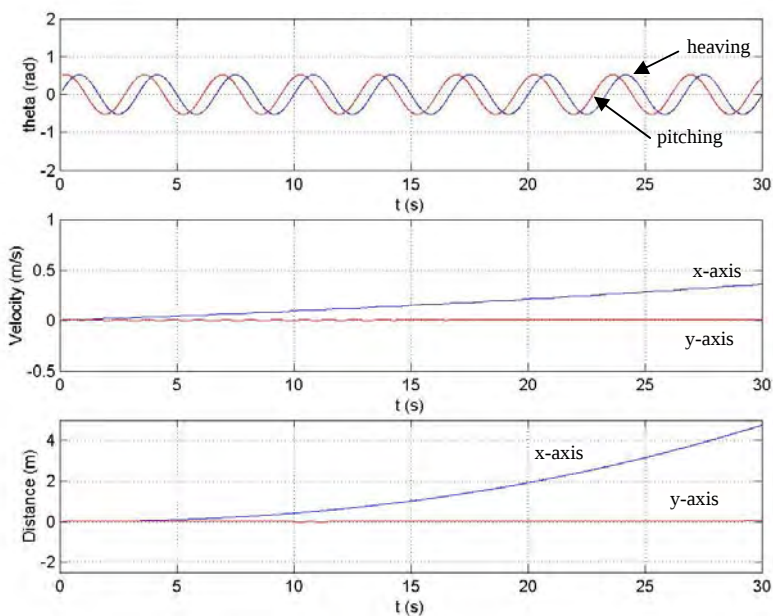
Heaving (deg)	Pitching (deg)	Velocity (m/s)	Distance (m)
60	-90	0.420	5.520
	-80	0.389	5.129
	-60	0.372	4.885
	-40	0.400	5.271
	-20	0.465	6.147
	20	0.646	8.556
	40	0.725	9.524
	60	0.760	9.794
	80	0.705	8.757
	90	0.623	7.486



รูปที่ 4.2.9 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่แบบ เฟสเท่ากับศูนย์
ระหว่างค่ามุม พิตชิง กับความเร็ว โดยมีค่ามุม ฮีฟวิ้ง เท่ากับ 60 องศา

จากรูปที่ 4.2.9 แสดงให้เห็นว่าที่มุม พิตชิง เท่ากับ -60 องศาจะมีค่าความเร็วที่ได้น้อยที่สุด และจะมีค่าความเร็วจะเพิ่มขึ้นเมื่อมุม พิตชิง มีค่ามากขึ้นหรือมีค่าน้อยลง และมีค่าลดลงเมื่อมุม พิตชิง มีค่าเท่ากับ 60 องศา จากผลการจำลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่แบบ Added- mass motion เมื่อกำหนดค่าของมุม ฮีฟวิ้ง และมุม พิตชิง มีขนาดเท่ากันแต่มีทิศตรงข้าม ความเร็วที่ได้จะมีค่าน้อยที่สุด

4.2.4. ผลจำลองการเคลื่อนที่แบบเฟสมีค่าไม่เท่ากับศูนย์



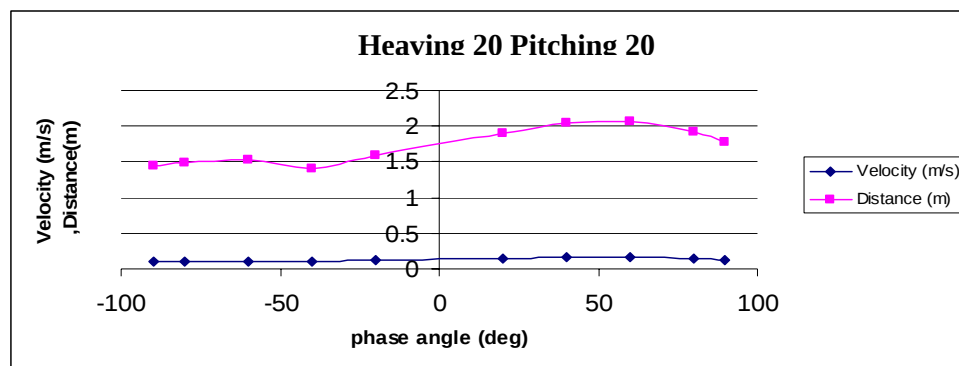
รูปที่ 4.2.10 แสดงการเคลื่อนที่แบบ เฟส มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ โดยมีค่ามุม ฮีฟวิ้ง
และมุม พิตชิง เท่ากับ 30 องศา และมีมุม เฟส เท่ากับ 60 องศา ตามลำดับ

สรุปผลจำลองการเคลื่อนที่แบบ เฟส มีค่าไม่เท่ากับศูนย์

จากผลการจำลองการเคลื่อนที่แบบ เฟส มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ข้างต้นสามารถพิจารณาในรูปของความเร็วและระยะทางการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

ตารางที่ 4.2.7 ตารางแสดงความเร็วและระยะทาง ณ เวลาที่ 30 วินาที ของการเคลื่อนที่แบบ เฟส มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ มุม ฮีพวิ้ง เท่ากับ 20 องศา และมุม พิตชิง เท่ากับ 20 องศา

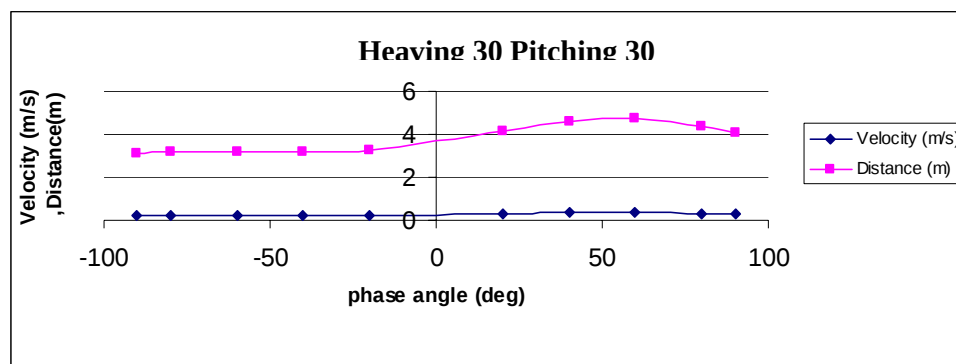
Heaving(deg)	Pitching (deg)	Phase (deg)	Velocity (m/s)	Distance (m)
20	20	-90	0.104	1.441
		-80	0.106	1.485
		-60	0.110	1.525
		-40	0.112	1.396
		-20	0.119	1.593
		20	0.145	1.898
		40	0.155	2.043
		60	0.156	2.065
		80	0.143	1.917
		90	0.133	1.782



รูปที่ 4.2.11 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่แบบ เฟส มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ระหว่างมุม เฟส กับความเร็ว โดยมีค่ามุม ฮีพวิ้ง เท่ากับ 20 องศา และ ค่ามุม พิตชิง เท่ากับ 20 องศา

ตารางที่ 4.2.8 ตารางแสดงความเร็วและระยะทาง ณ เวลาที่ 30 วินาที ของการเคลื่อนที่แบบ เฟส มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ มุม ฮีพวิ้ง เท่ากับ 30 องศา และมุม พิตชิง เท่ากับ 30 องศา

Heaving(deg)	Pitching (deg)	Phase (deg)	Velocity (m/s)	Distance (m)
30	30	-90	0.218	3.087
		-80	0.221	3.150
		-60	0.223	3.173
		-40	0.227	3.157
		-20	0.242	3.267
		20	0.318	4.150
		40	0.354	4.623
		60	0.362	4.755
		80	0.332	4.400
		90	0.304	4.055



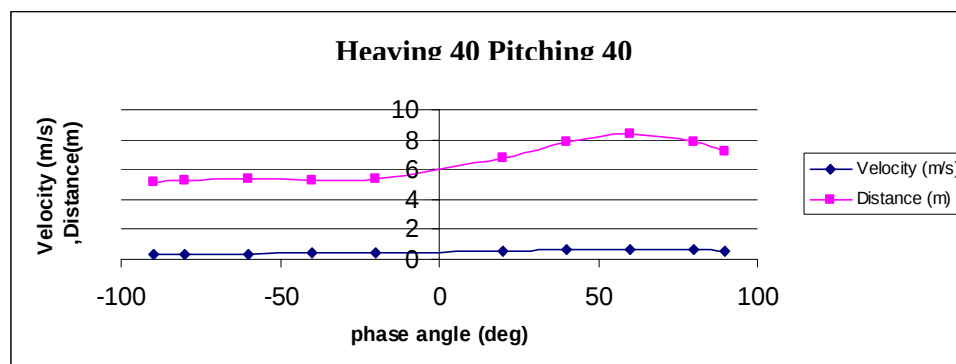
รูปที่ 4.2.12 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่แบบ เฟส มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ระหว่างมุม เฟส กับความเร็ว โดยมีค่ามุม ฮีพวิ้ง เท่ากับ 30 องศาและ ค่ามุม พิตชิง เท่ากับ 30 องศา

จากรูปที่ 4.2.11 แสดงให้เห็นว่า เมื่อกำหนดค่ามุม เฟส มีค่ามากกว่าศูนย์ ความเร็วจะมีค่ามากขึ้น จนเมื่อมุม เฟส มีค่าเท่ากับ 50 องศา ความเร็วจะมีค่าลดลง และเมื่อกำหนดค่ามุม เฟส มีค่าน้อยกว่าศูนย์ ความเร็วจะมีค่าน้อยลง

จากรูปที่ 4.2.4.42 แสดงให้เห็นว่า เมื่อกำหนดค่ามุม เฟส มีค่ามากกว่าศูนย์ ความเร็วจะมีค่ามากขึ้น จนเมื่อมุม เฟส มีค่าเท่ากับ 60 องศา ความเร็วจะมีค่าลดลง และเมื่อกำหนดค่ามุม เฟส มีค่าน้อยกว่าศูนย์ ความเร็วจะมีค่าน้อยลง

ตารางที่ 4.2.9 ตารางแสดงความเร็วและระยะทาง ณ เวลาที่ 30 วินาที ของการเคลื่อนที่แบบ เฟส มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ มุม ฮีพวี่ง เท่ากับ 40 องศา และมุม พิตชิงเท่ากับ 40 องศา

Heaving(deg)	Pitching (deg)	Phase (deg)	Velocity (m/s)	Distance (m)
40	40	-90	0.354	5.151
		-80	0.360	5.263
		-60	0.371	5.341
		-40	0.382	5.283
		-20	0.400	5.338
		20	0.519	6.812
		40	0.599	7.876
		60	0.637	8.373
		80	0.597	7.868
		90	0.547	7.242

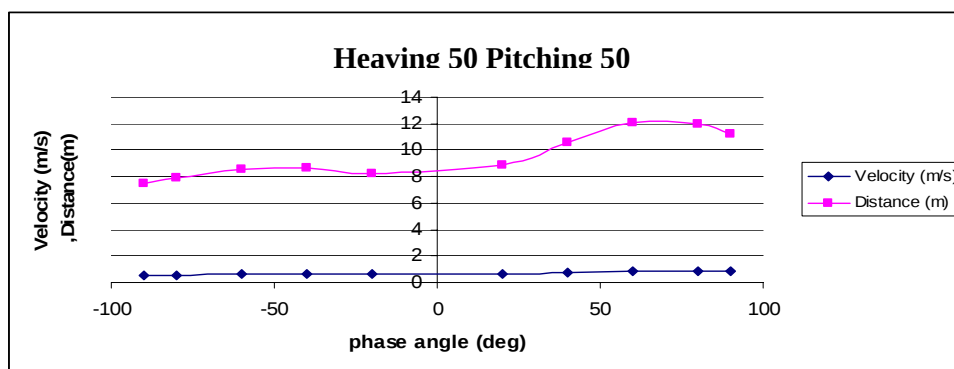


รูปที่ 4.2.13 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่แบบ เฟส มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ระหว่างมุม เฟส กับความเร็ว โดยมีค่ามุม ฮีพวี่ง เท่ากับ 40 องศา และ ค่ามุม พิตชิง เท่ากับ 40 องศา

จากรูปที่ 4.2.4.43 แสดงให้เห็นว่า เมื่อกำหนดค่ามุม เฟส มีค่ามากกว่าศูนย์ ความเร็วจะมีค่ามากขึ้น จนเมื่อมุม เฟส มีค่าเท่ากับ 60 องศา ความเร็วจะมีค่าลดลง และเมื่อกำหนดค่ามุม เฟส มีค่าน้อยกว่าศูนย์ ความเร็วจะมีค่าน้อยลง

ตารางที่ 4.2.10 ตารางแสดงความเร็วและระยะทาง ณ เวลาที่ 30 วินาที ของการเคลื่อนที่แบบ เฟส มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ มุม ฮีพวี่ง เท่ากับ 50 องศา และมุม พิตชิง เท่ากับ 50 องศา

Heaving(deg)	Pitching (deg)	Phase (deg)	Velocity (m/s)	Distance (m)
50	50	-90	0.500	7.489
		-80	0.533	7.898
		-60	0.613	8.582
		-40	0.659	8.666
		-20	0.643	8.206
		20	0.650	8.842
		40	0.770	10.574
		60	0.893	12.035
		80	0.906	11.962
		90	0.851	11.193

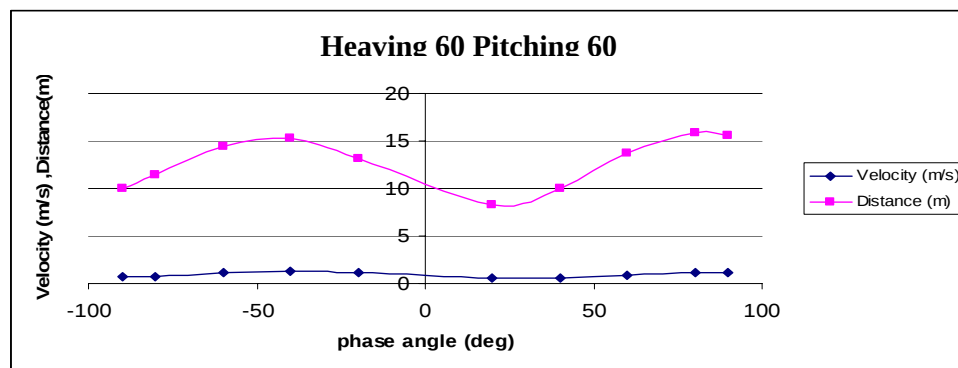


รูปที่ 4.2.14 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่แบบ เฟส มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ระหว่างมุม เฟส กับความเร็ว โดยมีค่ามุม ฮีพวี่ง เท่ากับ 50 องศา และ ค่ามุม พิตชิง เท่ากับ 50 องศา

จากรูปที่ 4.2.4.44 แสดงให้เห็นว่า เมื่อกำหนดค่ามุม เฟส มีค่ามากกว่าศูนย์ ความเร็วจะมีค่ามากขึ้น จนเมื่อมุม เฟส มีค่าเท่ากับ 60 องศา ความเร็วจะมีค่าลดลง และเมื่อกำหนดค่ามุม เฟส มีค่าน้อยกว่าศูนย์ ความเร็วจะมีค่าน้อยลง

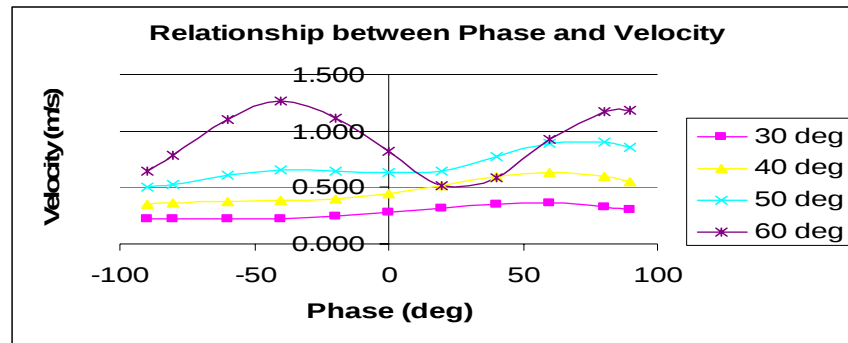
ตารางที่ 4.2.11 ตารางแสดงความเร็วและระยะทาง ณ เวลาที่ 30 วินาที ของการเคลื่อนที่แบบ เฟส มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ มุม ฮีพวี่ง เท่ากับ 60 องศา และมุม พิตชิง เท่ากับ 60 องศา

Heaving(deg)	Pitching (deg)	Phase (deg)	Velocity (m/s)	Distance (m)
60	60	-90	0.649	10.010
		-80	0.783	11.454
		-60	1.098	14.362
		-40	1.261	15.280
		-20	1.113	13.190
		20	0.511	8.215
		40	0.584	10.038
		60	0.921	13.679
		80	1.174	15.812
		90	1.186	15.559



รูปที่ 4.2.15 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่แบบ เฟส มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ระหว่างมุม เฟส กับความเร็ว โดยมีค่ามุม ฮีพวี่ง เท่ากับ 60 องศา และ ค่ามุม พิตชิง เท่ากับ 60 องศา

จากรูปที่ 4.2.4.45 แสดงให้เห็นว่า เมื่อกำหนดค่ามุม เฟส มีค่ามากกว่าศูนย์ ความเร็วจะมีค่าลดลง จนเมื่อมุม เฟส มีค่าเท่ากับ 20 องศา ความเร็วจะมีค่าเพิ่มขึ้น จนมุม เฟส มีค่าเท่ากับ 80 องศา ความเร็วจะเริ่มมีค่าลดลง และเมื่อกำหนดค่ามุม เฟส มีค่าน้อยกว่าศูนย์ ความเร็วจะมีค่าเพิ่มขึ้น จนมุม เฟส มีค่าเท่ากับ 40 องศา ความเร็วจะมีค่าลดลง



รูปที่ 4.2.16 แสดงความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่แบบ เฟส มีค่าไม่เท่ากับศูนย์
ระหว่างมุม เฟส กับความเร็ว

จากรูปที่ 4.2.11-4.2.15 เมื่อนำข้อมูลของความเร็วที่ได้มาพิจารณาดังรูปที่ 4.2.16 จะได้ว่าเมื่อ
มุม ฮีพว้าง และ พิตซิ่ง มีค่าเท่ากับ 60 องศา ค่าของความเร็วจะมีการเปลี่ยนแปลงมาก

4.3 ผลการทดลองการเคลื่อนที่

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลของการจำลองการเคลื่อนที่ โดยกำหนดระยะการเคลื่อนที่มีค่าคงที่เท่า 4 เมตร

4.3.1 ผลการเคลื่อนที่แบบฮีพวิ้ง

ตารางที่ 4.3.1 ตารางแสดงผลการเคลื่อนที่แบบ ฮีพวิ้ง

Pitching (deg)	Distance (m)	1.0 Hz		0.8 Hz		0.6 Hz		0.4 Hz		0.2 Hz	
		Time (m)	Vel (cm/s)	Time (m)	Vel (cm/s)	Time (m)	Vel (cm/s)	Time (m)	Vel (cm/s)	Time (m)	Vel (cm/s)
30	4	X	0.00	0.39	17.09	1.28	5.21	-	-	-	-
40	4	X	0.00	X	0.00	0.42	15.87	3.00	2.22	-	-
50	4	X	0.00	X	0.00	0.3	22.22	1.30	5.13	-	-
60	4	X	0.00	X	0.00	0.21	31.75	1.00	6.67	-	-
70	4	X	0.00	X	0.00	X	0.00	0.58	11.49	-	-
80	4	X	0.00	X	0.00	X	0.00	0.47	14.18	-	-
90	4	X	0.00	X	0.00	X	0.00	0.37	18.02	5.76	1.16

หมายเหตุ เครื่องหมาย “-” หมายถึงกลไกหุ่นยนต์ทำงานได้แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้
เครื่องหมาย “X” หมายถึงหุ่นยนต์ไม่สามารถทำงานได้

4.3.2. ผลการเคลื่อนที่แบบพิดซิ่ง

ตารางที่ 4.3.2 ตารางแสดงผลการเคลื่อนที่แบบ พิดซิ่ง

Pitching (deg)	Distance (m)	1.0 Hz		0.8 Hz		0.6 Hz		0.4 Hz		0.2 Hz	
		Time (m)	Vel (cm/s)	Time (m)	Vel (cm/s)	Time (m)	Vel (cm/s)	Time (m)	Vel (cm/s)	Time (m)	Vel (cm/s)
30	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ เครื่องหมาย “-” หมายถึงกลไกหุ่นยนต์ทำงานได้แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้
เครื่องหมาย “X” หมายถึงหุ่นยนต์ไม่สามารถทำงานได้

4.3.3. ผลการเคลื่อนที่แบบเฟสเท่ากับศูนย์

ตารางที่ 4.3.3 ตารางแสดงผลการเคลื่อนที่แบบ เฟสเท่ากับศูนย์ มุม ฮีพวี่ง 30 องศา

Heaving (deg)	Pitching (deg)	Dist (m)	1.0 Hz		0.8 Hz	
			Time (m)	Vel (cm/s)	Time (m)	Vel (cm/s)
30	-90	4	-	-	3.060	2.18
	-80	4	-	-	-	-
	-60	4	-	-	-	-
	-40	4	-	-	-	-
	-20	4	-	-	-	-
	20	4	0.250	26.67	0.580	11.49
	40	4	0.220	30.30	0.500	13.33
	60	4	0.210	31.75	0.320	20.83
	80	4	0.180	37.04	0.250	26.67
	90	4	0.170	39.22	0.210	31.75

หมายเหตุ เครื่องหมาย “-” หมายถึงกลไกหุ่นยนต์ทำงานได้แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้
เครื่องหมาย “X” หมายถึงหุ่นยนต์ไม่สามารถทำงานได้

ตารางที่ 4.3.4 ตารางแสดงผลการเคลื่อนที่แบบ เฟสเท่ากับศูนย์ มุม ฮีพวี่ง 40 องศา

Heaving (deg)	Pitching (deg)	Dist (m)	1.0 Hz		0.8 Hz	
			Time (m)	Vel (cm/s)	Time (m)	Vel (cm/s)
40	-90	4	-	-	8.090	0.82
	-80	4	-	-	-	-
	-60	4	-	-	-	-
	-40	4	-	-	-	-
	-20	4	-	-	5.920	1.13
	20	4	0.170	39.22	0.210	31.75
	40	4	0.130	51.28	0.170	39.22
	60	4	0.160	41.67	0.190	35.09
	80	4	0.140	47.62	0.140	47.62
	90	4	0.200	33.33	0.120	55.56

หมายเหตุ เครื่องหมาย “-” หมายถึงกลไกหุ่นยนต์ทำงานได้แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้
เครื่องหมาย “X” หมายถึงหุ่นยนต์ไม่สามารถทำงานได้

ตารางที่ 4.3.5 ตารางแสดงผลการเคลื่อนที่แบบ เฟสเท่ากับศูนย์ มุม ฮีพวิ้ง 50 องศา

Heaving (deg)	Pitching (deg)	Dist (m)	1.0 Hz		0.8 Hz	
			Time (m)	Vel (cm/s)	Time (m)	Vel (cm/s)
50	-90	4	-	-	-	-
	-80	4	-	-	-	-
	-60	4	-	-	-	-
	-40	4	-	-	4.560	1.46
	-20	4	-	-	-	-
	20	4	0.130	51.28	0.134	49.94
	40	4	0.140	47.62	0.140	47.62
	60	4	0.130	51.28	0.140	47.62
	80	4	0.120	55.56	0.142	46.88
	90	4	0.143	46.78	X	0.00

หมายเหตุ เครื่องหมาย “-” หมายถึงกลไกหุ่นยนต์ทำงานได้แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้
 เครื่องหมาย “X” หมายถึงหุ่นยนต์ไม่สามารถทำงานได้

ตารางที่ 4.3.6 ตารางแสดงผลการเคลื่อนที่แบบ เฟสเท่ากับศูนย์ มุม ฮีพวิ้ง 60 องศา

Heaving (deg)	Pitching (deg)	Dist (m)	1.0 Hz		0.8 Hz	
			Time (m)	Vel (cm/s)	Time (m)	Vel (cm/s)
60	-90	4	-	0.00	-	-
	-80	4	-	0.00	-	-
	-60	4	-	0.00	-	-
	-40	4	-	0.00	3.48	1.92
	-20	4	-	0.00	-	-
	20	4	X	0.00	X	0.00
	40	4	X	0.00	X	0.00
	60	4	X	0.00	X	0.00
	80	4	X	0.00	X	0.00
	90	4	X	0.00	X	0.00

หมายเหตุ เครื่องหมาย “-” หมายถึงกลไกหุ่นยนต์ทำงานได้แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้
 เครื่องหมาย “X” หมายถึงหุ่นยนต์ไม่สามารถทำงานได้

4.3.4. ผลการเคลื่อนที่แบบเฟสมีค่าไม่เท่ากับศูนย์

ตารางที่ 4.3.7 ตารางแสดงผลการเคลื่อนที่แบบ เฟส มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ มุม ฮีพวิ้ง และ มุม พิตชิง มีค่าเท่ากับ 30 องศา

Heaving (deg)	Pitching (deg)	Phase (deg)	Distance (m)	1.0 Hz		0.8 Hz	
				Time (min)	Vel (cm/s)	Time (min)	Vel (cm/s)
30	30	-90	4	1.090	6.12	-	-
		-80	4	0.480	13.89	0.540	12.35
		-60	4	0.310	21.51	0.350	19.05
		-40	4	0.300	22.22	0.25	26.67
		-20	4	0.330	20.20	0.26	25.64
		0	4	0.390	17.09	0.390	17.09
		20	4	2.220	3.00	1.020	6.54
		40	4	-	-	1.470	4.54
		60	4	-	-	2.220	3.00
		80	4	-	-	3.000	2.22
		90	4	-	-	-	-

หมายเหตุ เครื่องหมาย “-” หมายถึงกลไกหุ่นยนต์ทำงานได้แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้
เครื่องหมาย “X” หมายถึงหุ่นยนต์ไม่สามารถทำงานได้

ตารางที่ 4.3.8 ตารางแสดงผลการเคลื่อนที่แบบ เฟส มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ โดยกำหนดให้มุม ฮีพวิ้ง และมุม พิตชิง มีค่าเท่ากับ 40 องศา

Heaving (deg)	Pitching (deg)	Phase (deg)	Distance (m)	1.0 Hz		0.8 Hz	
				Time (min)	Vel (cm/s)	Time (min)	Vel (cm/s)
40	40	-90	4	0.270	24.69	1.060	6.29
		-80	4	0.237	28.13	0.390	17.09
		-60	4	0.230	28.99	0.250	26.67
		-40	4	X	0.00	0.220	30.30
		-20	4	X	0.00	0.240	27.78
		0	4	X	0.00	X	0.00
		20	4	X	0.00	X	0.00
		40	4	X	0.00	X	0.00
		60	4	X	0.00	X	0.00
		80	4	X	0.00	X	0.00
		90	4	X	0.00	X	0.00

หมายเหตุ เครื่องหมาย “-” หมายถึงกลไกหุ่นยนต์ทำงานได้แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้
เครื่องหมาย “X” หมายถึงหุ่นยนต์ไม่สามารถทำงานได้

ตารางที่ 4.3.9 ตารางแสดงผลการเคลื่อนที่แบบ เฟส มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ โดยกำหนดให้มุม
ฮีพวิ้ง และมุม พิตชิง มีค่าเท่ากับ 50 องศา

Heaving (deg)	Pitching (deg)	Phase (deg)	Distance (m)	1.0 Hz		0.8 Hz	
				Time	Vel	Time	Vel
				(min)	(cm/s)	(min)	(cm/s)
50	50	-90	4	0.240	27.78	0.330	20.20
		-80	4	0.230	28.99	0.230	28.99
		-60	4	0.220	30.30	0.197	33.84
		-40	4	X	0.00	0.190	35.09
		-20	4	X	0.00	X	0.00
		0	4	X	0.00	X	0.00
		20	4	X	0.00	X	0.00
		40	4	X	0.00	X	0.00
		60	4	X	0.00	X	0.00
		80	4	X	0.00	X	0.00
		90	4	X	0.00	X	0.00

หมายเหตุ เครื่องหมาย “-” หมายถึงกลไกหุ่นยนต์ทำงานได้แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้
เครื่องหมาย “X” หมายถึงหุ่นยนต์ไม่สามารถทำงานได้

ตารางที่ 4.3.10 ตารางแสดงผลการเคลื่อนที่แบบ เฟส มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ โดยกำหนดให้มุม
ฮีพวิ้ง และมุม พิตชิง มีค่าเท่ากับ 60 องศา

Heaving (deg)	Pitching (deg)	Phase (deg)	Distance (m)	1.0 Hz		0.8 Hz	
				Time	Vel	Time	Vel
				(min)	(cm/s)	(min)	(cm/s)
60	60	-90	4	0.27	24.69	0.240	27.78
		-80	4	0.21	31.75	0.180	37.04
		-60	4	0.200	33.33	0.160	41.67
		-40	4	X	0.00	0.18	37.04
		-20	4	X	0.00	X	0.00
		0	4	X	0.00	X	0.00
		20	4	X	0.00	X	0.00
		40	4	X	0.00	X	0.00
		60	4	X	0.00	X	0.00
		80	4	X	0.00	X	0.00
		90	4	X	0.00	X	0.00

หมายเหตุ เครื่องหมาย “-” หมายถึงกลไกหุ่นยนต์ทำงานได้แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้
เครื่องหมาย “X” หมายถึงหุ่นยนต์ไม่สามารถทำงานได้

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อสรุปโดยรวมของงานวิจัยที่ได้ดำเนินงานมาทั้งหมด รวมถึงบทวิเคราะห์ผลการวิจัย ความคาดเคลื่อนต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการทดลอง และข้อเสนอแนะในการดำเนินการวิจัยที่จะต่อเนื่องต่อไปในอนาคต ซึ่งผลการวิจัยและการดำเนินงานต่างๆ จะสามารถสรุปได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

-กรณีการเคลื่อนที่แบบฮีพวิ้ง

จากตารางที่ 4.3.1 แสดงให้เห็นว่าค่าความถี่น้อยที่สุดที่ทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่มีค่าเท่ากับ 0.2 Hz ที่มุมฮีพวิ้ง 90 องศา และความถี่สูงสุดที่หุ่นยนต์สามารถทำงานได้มีค่าเท่ากับ 0.8 Hz ที่มุมฮีพวิ้ง 30 องศา ความเร็วสูงสุดที่หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้มีค่าเท่ากับ 31.75 cm/s ที่ความถี่เท่ากับ 0.6 Hz มุมฮีพวิ้ง 60 องศา ซึ่งเมื่อเทียบกับผลการจำลองการเคลื่อนที่ที่มีค่าความถี่เท่ากับ 0.6 Hz มุมฮีพวิ้ง 60 องศา ความเร็วที่ได้มีค่าเท่ากับ 28.5 cm/s ค่าความผิดพลาดมีค่าเท่ากับ -10.23 %

-กรณีการเคลื่อนที่แบบพิตชิง

จากตารางที่ 4.3.2 แสดงให้เห็นว่าหุ่นยนต์สามารถทำงานได้ตามความถี่และมุมพิตชิงต่างๆ แต่ไม่สามารถทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้

-กรณีการเคลื่อนที่แบบเฟสเท่ากับศูนย์

จากตารางที่ 4.3.3-4.3.6 แสดงให้เห็นว่าที่ค่าความถี่เท่ากับ 1 Hz มุมฮีพวิ้ง 50 องศา มุมพิตชิง 80 องศา ความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์มีค่าเท่า 55.56 cm/s ซึ่งเมื่อเทียบกับผลการจำลองการเคลื่อนที่ที่มีค่าความถี่เท่ากับ 1 Hz มุมฮีพวิ้ง 50 องศา ความเร็วที่ได้มีค่าเท่ากับ 60.2 cm/s ค่าความผิดพลาดมีค่าเท่ากับ 8.35 %

-กรณีการเคลื่อนที่แบบเฟสไม่เท่ากับศูนย์

จากตารางที่ 4.3.7-4.3.10 แสดงให้เห็นว่าที่ค่าความถี่เท่ากับ 1 Hz มุมฮีพวิ้งและมุมพิตชิง 60 องศา ที่มุมเฟสเท่ากับ -60 องศา ความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์มีค่าเท่า 33.33 cm/s ซึ่งเมื่อเทียบกับผลการจำลองการเคลื่อนที่ที่มีค่าความถี่เท่ากับ 1 Hz มุมฮีพวิ้งและมุมพิตชิง 60 องศา ที่มุมเฟสเท่ากับ -60 องศา ความเร็วสูงสุดของหุ่นยนต์มีค่าเท่า 109.8 cm/s ค่าความผิดพลาดมีค่าเท่ากับ 69.64 %

5.2 วิเคราะห์ผลการวิจัย

5.2.1. กรณีการเคลื่อนที่แบบฮีฟวิ่งและการเคลื่อนที่แบบพิตซิ่ง นั้นเป็นการเคลื่อนที่ด้วยมุมฮีฟวิ่งหรือมุมพิตซิ่งอย่างเดียว ซึ่งเป็นลักษณะของการเคลื่อนที่แบบสั่น (oscillatory) ความเร็วในการเคลื่อนที่ที่แปรผันตามค่าความถี่ในการพัคโบกและมุมของการพัคโบก ผลการเคลื่อนที่ลักษณะนี้นั้น การเคลื่อนที่ด้วยมุม ฮีฟวิ่ง จะสามารถผลักดันปริมาตรของน้ำได้มากกว่าการเคลื่อนที่ด้วยมุมพิตซิ่ง แต่ใช้พลังงานในการเคลื่อนที่สูงกว่า

5.2.2. กรณีการเคลื่อนที่แบบเฟสเท่ากับศูนย์ โดยค่าของมุมฮีฟวิ่งและมุมพิตซิ่ง มีค่าไม่เท่ากัน (ถ้าค่าของมุมฮีฟวิ่งและมุมพิตซิ่ง มีค่าเท่ากัน จะเป็นการเคลื่อนที่แบบฮีฟวิ่ง) และค่าของมุม เฟส ระหว่างมุมฮีฟวิ่งกับมุมพิตซิ่ง มีค่าเท่ากับศูนย์

1. เมื่อกำหนดมุมทั้งสองมีทิศทางเดียวกัน โดยที่ มุมฮีฟวิ่งมีค่าน้อยกว่ามุมพิตซิ่งจะสามารถเคลื่อนที่ได้ดีกว่าการเคลื่อนที่แบบฮีฟวิ่ง ที่ค่าความถี่เท่ากัน เนื่องจากสามารถผลักดันปริมาตรของน้ำได้มากกว่า และเมื่อมุมฮีฟวิ่งมีค่ามากกว่ามุมพิตซิ่ง จะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เนื่องจากไม่สามารถผลักดันปริมาตรของน้ำได้มากพอ

2. เมื่อกำหนดค่ามุมทั้งสองมีทิศทางตรงข้ามกัน ผลที่ได้จะตรงข้ามกัน คือ เมื่อมุมฮีฟวิ่งมีค่าน้อยกว่ามุมพิตซิ่ง จะไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เนื่องจากไม่สามารถผลักดันปริมาตรของน้ำได้มากพอและเมื่อมุมฮีฟวิ่ง มีค่ามากกว่ามุมพิตซิ่ง จะสามารถเคลื่อนที่ได้ดีกว่าการเคลื่อนที่แบบ ฮีฟวิ่ง เนื่องจากสามารถผลักดันปริมาตรของน้ำได้มากกว่า

5.2.3. กรณีการเคลื่อนที่แบบเฟสไม่เท่ากับศูนย์เป็นการเคลื่อนที่แบบเฟสเท่ากับศูนย์ ที่มีค่าของมุมเฟสระหว่างมุมฮีฟวิ่งกับมุมพิตซิ่ง มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ จะมีแรงต้านของน้ำขณะพัคโบกน้อยกว่า ทำให้สามารถเคลื่อนที่ได้ที่ความถี่ที่สูงกว่าดีกว่าการเคลื่อนที่แบบเฟสเท่ากับศูนย์ โดยค่าของมุมเฟส จะมีผลโดยตรงกับการเคลื่อนที่ ซึ่งเมื่อมุมเฟส มีค่าเป็นบวก จะทำให้เคลื่อนที่ถอยหลัง และเมื่อมุมเฟส จะมีผลโดยตรงกับการเคลื่อนที่ ซึ่งเมื่อมุมเฟส มีค่าเป็นลบ จะทำให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้า

5.2.4. เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการวิจัยโดยกำหนดให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ในน้ำนิ่ง(ไม่มีการไหลของน้ำ) ส่งผลให้ลักษณะการไหลของน้ำผ่านหุ่นยนต์แตกต่างไปจากการไหลทางอุดมคติมาก ทำให้การเคลื่อนที่ทั้ง 4 ลักษณะเป็นการสร้างแรงเคลื่อนที่จากการผลักดันมวลของน้ำ ซึ่งแรงขับเคลื่อนจะมากหรือน้อยนั้นขึ้นกับปริมาตรของน้ำที่ผลักดันได้

5.3 ข้อเสนอแนะ

ในส่วนของการทดลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ระบบวงเปิด ยังมีความคลาดเคลื่อนและข้อจำกัดที่เกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุหลักๆ ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อพร้อมทั้งข้อเสนอแนะในการแก้ไขดังนี้

5.2.1 จากการคำนวณสมการการเคลื่อนที่ดังที่นำเสนอในบทที่ 3 เป็นการพิจารณาการเคลื่อนที่ที่เกิดจากผลของการเปลี่ยนแปลงทิศทางรถไฟของน้ำเพื่อทำให้ส่วนประกอบแรงยก (lift force) แต่ในการทดลองจริงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จากหยุดนิ่งเป็นการเคลื่อนที่โดยอาศัยการการสั่นแรงขับเคลื่อนจากการไปของหางในการผลักดันมวลของน้ำ ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยแรงบิดจากมอเตอร์สูง

5.2.2 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความละเอียดในการคำนวณหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ชนิดไม่เชิงเส้นของระบบ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ไม่เชิงเส้นที่คำนวณได้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ยังมีความคลาดเคลื่อนในการจำลองพฤติกรรมของระบบในลักษณะวงเปิด ซึ่งควรจะพิจารณารายละเอียดเพิ่มเติมในการคำนวณหาพจน์ของสมการทางคณิตศาสตร์ไม่เชิงเส้นเพิ่มเติมเข้าไปในแบบจำลองชนิดไม่เชิงเส้นของระบบ เช่น การพิจารณาค่าโมเมนต์ความเฉื่อย การพิจารณาผลกระทบจากความไม่สมดุลในโครงสร้าง หรือผลกระทบที่เกิดจากแรงเสียดทานชนิดไม่เชิงเส้นในระบบ การพิจารณาผลทางด้านของไหล รวมถึงการพิจารณาถึงผลกระทบของคลื่นสะท้อน เป็นต้น เพื่อให้ผลตอบสนองที่ได้มีความใกล้เคียงกับระบบจริงมากยิ่งขึ้น

5.2.3 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการสั่นไถลของสายพานในระบบขับเคลื่อน เนื่องจากการขับเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เป็นลักษณะการควบคุมแบบระบบเปิด ส่งผลให้ไม่สามารถควบคุมองศาการทำงานจากระบบให้แม่นยำได้

5.2.4 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการการสั่น การสั่นของระบบเกิดจากการสั่นของโครงสร้างเมื่อหุ่นยนต์ทำงานด้วยความถี่มากขึ้น ส่งผลให้เกิดการสะท้อนของคลื่นที่กระทบกับผนังรางน้ำ ดังนั้นในการติดตั้งควรพิจารณาถึงผลของ boundary layer และควรติดตั้งอุปกรณ์ดูดซับคลื่นที่ทำหน้าที่เป็น damper เพื่อลดผลสะท้อนของคลื่น

เอกสารอ้างอิง

- [1] M. W. Westneat and S. A. Wainwright, “Mechanical Design for Swimming: Muscle, Tendon, and Bone”, **Fish Physiology**, vol.19, pp. 271-311.
- [2] J. D. Altringham and R. E. Shadwick, “Swimming and Muscle Function”, **Fish Physiology**, vol.19, pp. 313-344.
- [3] O. G. Tietjens, *Applied Hydro-and Aeromechanics*, pp. 139-143.
- [4] V. L. Belenky and N. B. Sevastianov+, “Stability and safety of ships: Volume II: Risk of Capsizing”, **Elsevier Ocean Engineering book series**, vol.10, pp. 51-70.
- [5] J. Gray., August 1935, “The propulsive powers of the dolphin”, **Journal of Experimental Biology**, pp. 192-199.
- [6] W. Hoar and D. Randall, editors. **Fish Physiology**, vol.7, 1978.
- [7] D. G. Harper and R. W. Blake, 1990, “Fast-start performance of rainbow trout *Salmo Gairdneri* and northern pike *Esox Lucius*”, **Journal of Experimental Bioloty**, 150, 321—342.
- [8] J. J. Videler, “Fish Swimming”, 1993, **Fish and Fisheries Series**, 10. Chapman and Hall.
- [9] K. Streitlien. , 1994, “A simulation procedure for vortex flow over an oscillating wing,” Technical report, Massachusetts Institute of Technology Sea Grant, Report MITSG 94-7.

- [10] I. Yamamoto, Y. Rerada, T. Nagamatu, and Y. Imaizumi, 1995, "Propulsion System with Flexible/Rigid Oscillation Fin", **IEEE Journal of Oceanic engineering**, vol.20, no.1, pp.23-30.
- [11] B. C. Jayne and G. V. Lauder. , 1995, "Speed effect on midline kinematics during steady undulatory swimming of largemouth bass, *Micropterus Salmoides*," **The Journal of Experimental Biology**198, 585-602.
- [12] D. S. Barrett. , 1995, Forces and Efficiency of a Flexible Hull Vehicle. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- [13] M. S. Triantafyllou, and G. S. Triantafyllou, 1995, "An efficient swimming machine," **Scientific American**, March.
- [14] N. Kato and M. Furushima., 1996, "Pectoral fin model for Maneuver of Underwater Vehicles", Tokai University, pp.49-56.
- [15] K. A. Harper, M. D. Berkemeier, and Sheryl Grace., 1998, "Modeling the Dynamics of Spring-Driven Oscillating-Foil Propulsion," **IEEE Journal of Oceanic engineering**, vol.23, no.3, pp. 285-296.
- [16] A. h. Techet and M. S. Triantafyllou., 1999, "Boundary Layer Relaminarization in Swimming Fish," **International Offshore and Polar Engineer Conference, Brest, France**, pp. 415-418.
- [17] M. Nakashima, K. Tokuo, K. Kmainaga, and K. Ono, 1999, "Experimental study of a self-propelled two joint dolphin robot," **In Proceedings of the ninth International Offshore and Polar Engineering Conference**, pages 419-424, Brest, France.

- [18] M. Sfakiotakis, D. M. Lane, and J. Bruce C. Davies, 1999, "Review of Fish Swimming Mode for Aquatic Locomotion", **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, vol.24, no.2, pp.237-259.
- [19] J. M. Anderson and P. A. Kerrebrock, 1999, "The vorticity control unmanned undersea vehicle (VCUUV): An autonomous robot tuna", **the 11th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology**, Durham, August 23-25.
- [20] P. Li and S. Saimek. , 1999, "Modeling and estimation of hydrodynamic potentials," **In proceeding of the IEEE Conference on Decision and Control**.
- [21] E. G. Drucker and G. V.Lauder, 2000, "A Hydrodynamic Analysis of Fish Swimming Speed: Wake Structure and Locomotors Force in Slow and Fast Labriform Swimmer", **The Journal of experimental Biology** **203**, pp. 2379-2393.
- [22] J. C. Nauen and G. V.Lauder, 2000, "Three-Dimensional Analysis of Finlet Kinematics in the Chub Mackerel", Department of Organismic and Evolutionary Biology, Harvard University, pp. 9-19.
- [23] M. S. Triantafyllou, G. S. Triantafyllou, and D.K.P. Yue, 2000, "Hydrodynamics of Fishlike Swimming", *Annual Reviews, Fluid Mechanics*, pp. 33-53.
- [24] N. Kato, 2000, "Control performance in the horizontal plane of a fish robot with mechanical pectoral fins", **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, 25(1):121-129.
- [25] R. J. Mason and J.W. Burdick , 2000, "Experiments in Carangiform robotic fish locomotion", **In Proceedings of IEEE International Conference on robotics & Automation**, pp.428-435.

- [26] K. A. Morgansen, V. Duindam, R. J. Mason, J. W. Burdick, and R. M. Murray , 2001, “Nonlinear control methods for planar carangiform robot fish locomotion,” **In Proceedings of IEEE International Conference on robotics & Automation**, pp.427-434.
- [27] J. C. Liao, 2002, “Swimming in needlefish (Belonidae):anguiliform locomotion with fins”, **The Journal of experimental Biology** **205**, Department of Organismic and evolutionary Biology, Harvard University, Cambridge, pp. 2875-2884.
- [28] M. J. McHenry, E. Azizi, and J. A. Strother, 2002, “The hydrodynamics of locomotion at intermediate Reynolds numbers: undulatory swimming in ascidians larvae”, **The Journal of experimental Biology** **206**.
- [29] J. C. Nauen and G. V. Lauder, 2002, “Hydrodynamics of caudal fin locomotion by chub mackerel, *Scomber japonicus* (Scombridae) ”, **The Journal of Experimental Biology** **205**, pp. 1709-1724.
- [30] S. Saimek and P. Y. Li. , 2002, “Longitudinal Motion Planning and Control of a Swimming Machine”, **In Proceedings of International Journal of Robotics Research**.
- [31] K. A. Morgansen, P. A. Vela, J. W. Burdick, 2002, “Trajectory Stabilization for a Planar Carangiform Robot Fish”, **In Proceedings of IEEE International Conference on robotics & Automation**, pp.756-762.
- [32] K. A. Morgansen, 2003, “Geometric methods for modeling and control of a free-swimming carangiform fish robot”. **In Proceedings of the 13th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology**.

- [33] Hong-Chin Lin, Tsung-Chieh Lin, and K. H. Yae, 1995, "On the skew-symmetric property of the Newton-Euler formulation for open-chain robot manipulators". **In Proceedings of American Control Conference Seattle Washington**, pp. 2322-2326.
- [34] Murray, Richard M, Li, Zexiang, Sastry, Shankar S, 1994, "A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation", CRC.
- [35] S.R. Ploen, June 1999, "A Skew-Symmetric Form of the Recursive Newton-Euler Algorithm for the Control of Multibody Systems", **In Proc. ACC**, San Diego, pp. 3770-3773.
- [36] J.J. Slotine, W. Li, April 1987, "Adaptive Strategies in Constrained Manipulation", **In Proc. IEEE**, Seattle, pp. 595-601.

ภาคผนวก ก
ค่าคงที่และค่าพารามิเตอร์

ก. ค่าคงที่และพารามิเตอร์

ค่าคงที่และพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์ที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ มีดังนี้

ค่าคงที่สภาวะแวดล้อมทั่วไป

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของรางน้ำ

$$\mu = 0.001$$

ความหนาแน่นของน้ำ

$$\rho = 1000 \frac{kg}{m^3}$$

Modulus of Elasticity

$$E = 200 \text{ GPa}$$

ค่า Strouhal number: St

$$St = 0.35$$

พารามิเตอร์ของหุ่นยนต์

น้ำหนักของหุ่นยนต์ตามการเคลื่อนที่ในแนวแกน x

$$m_x = 12 \text{ kg}$$

น้ำหนักของหุ่นยนต์ตามการเคลื่อนที่ในแนวแกน y

$$m_y = 4.382 \text{ kg}$$

ความยาวหุ่นยนต์

$$l = 1.128 \text{ m}$$

ความยาวของแกนลำตัว

$$l_b = 0.23 \text{ m}$$

ความยาวของแกนที่ 1

$$l_1 = 0.13 \text{ m}$$

ความยาวของแกนที่ 2

$$l_2 = 0.152 \text{ m}$$

ความกว้างของหาง

$$b = 0.152 \text{ m}$$

ความสูงของหาง

$$h = 0.3 \text{ m}$$

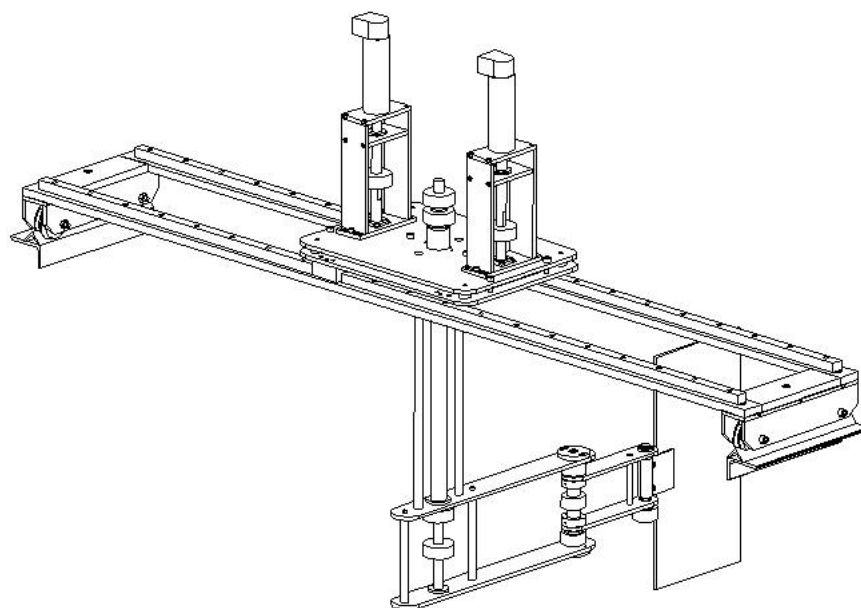
ขนาดพื้นที่ของแผ่นหาง

$$A = 0.0608 \text{ m}^2$$

ภาคผนวก ข

รายละเอียดแบบโครงสร้างหุ่นยนต์

แบบร่างโครงสร้างหลักของหุ่นยนต์



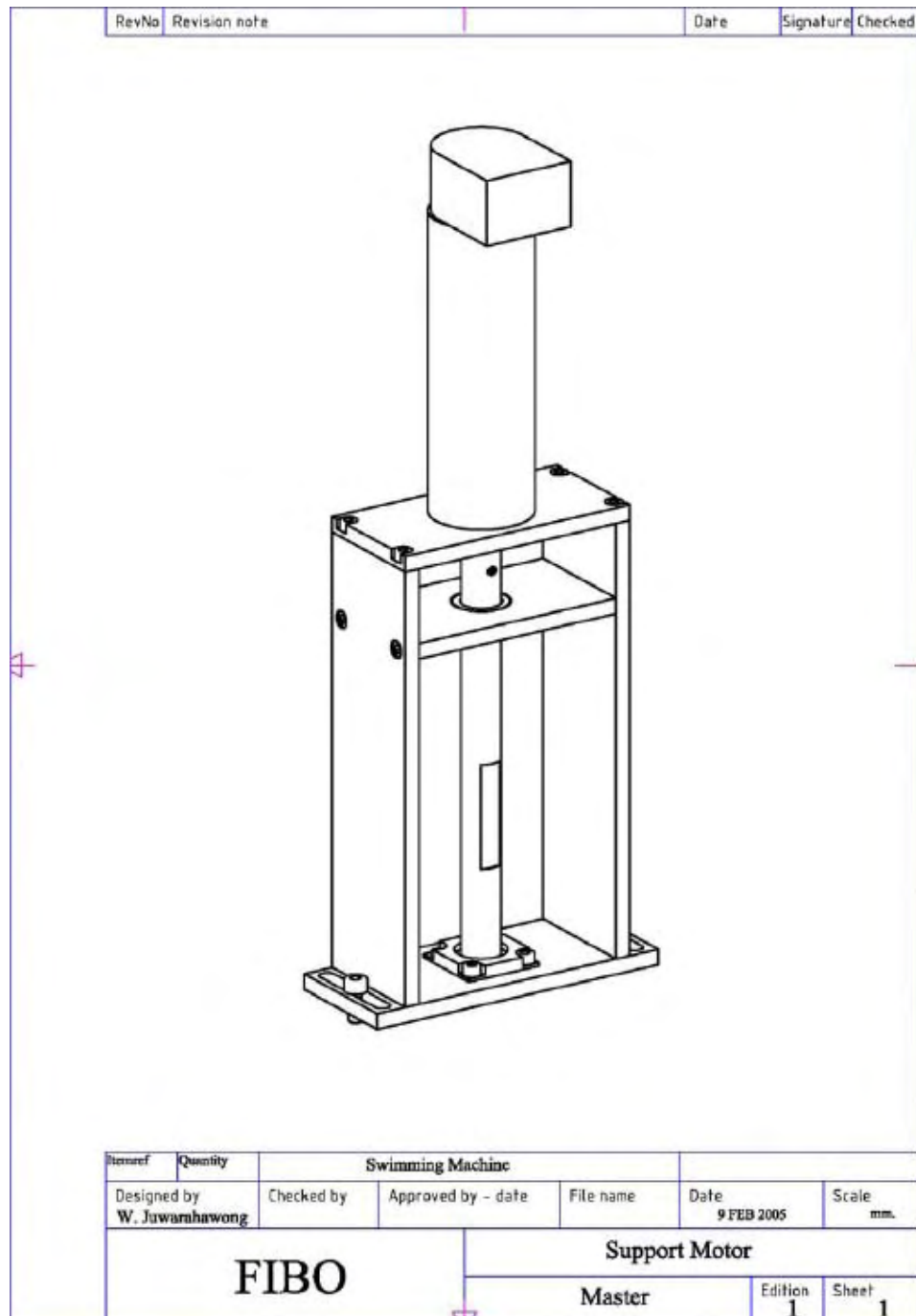
รูปที่ ข.1 ลักษณะของหุ่นยนต์

ส่วนประกอบของโครงสร้างหุ่นยนต์ประกอบด้วยส่วนหลัก 5 ส่วนคือ

1. Support Motor
2. Y-Axis
3. Wheel-Support
4. Co-Axial Shaft
5. Link 2

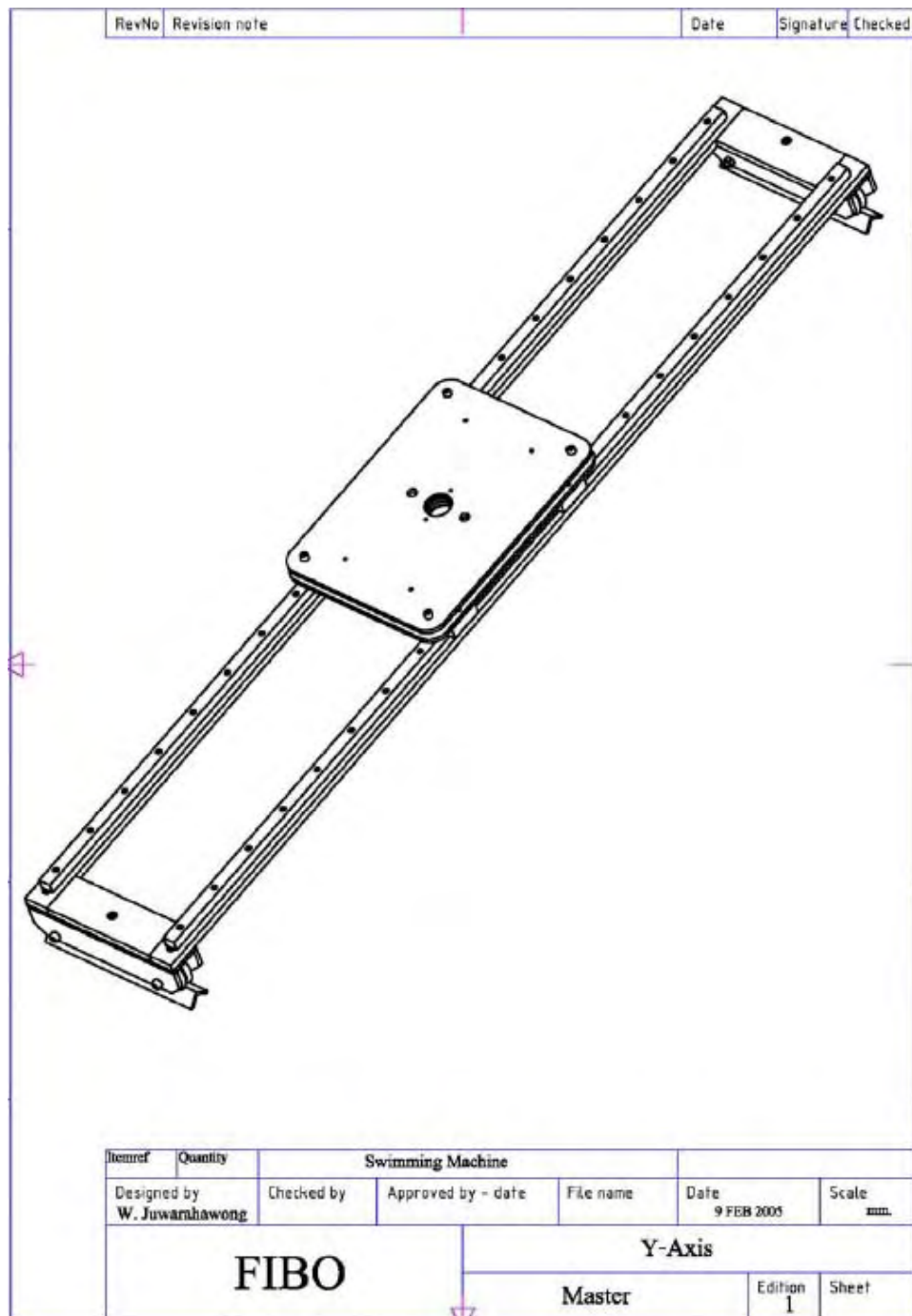
ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

แบบร่างของส่วน Support Motor



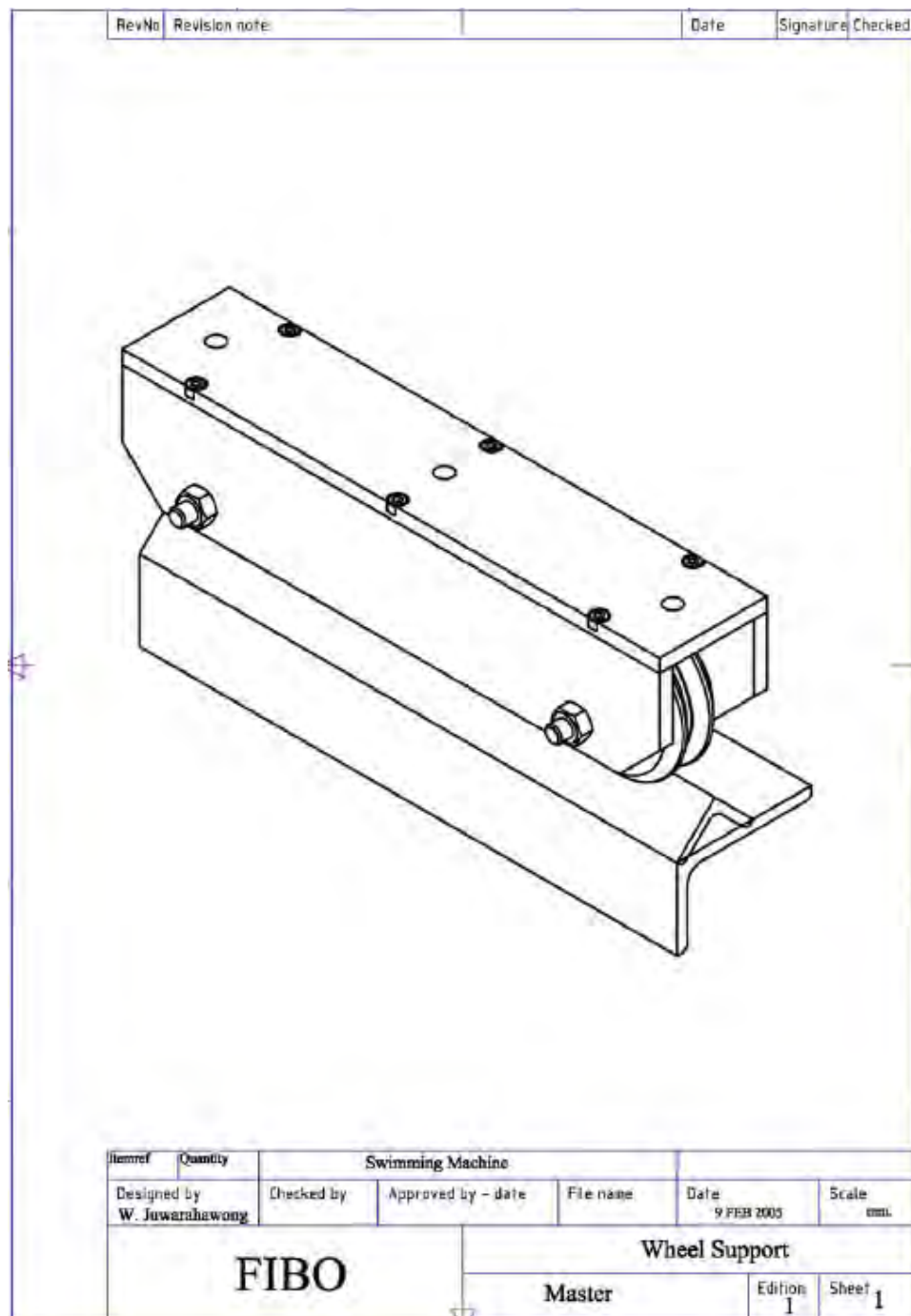
รูปที่ ข.2 แสดงภาพรวมของชุด Support Motor

แบบร่างของส่วน Y-Axis



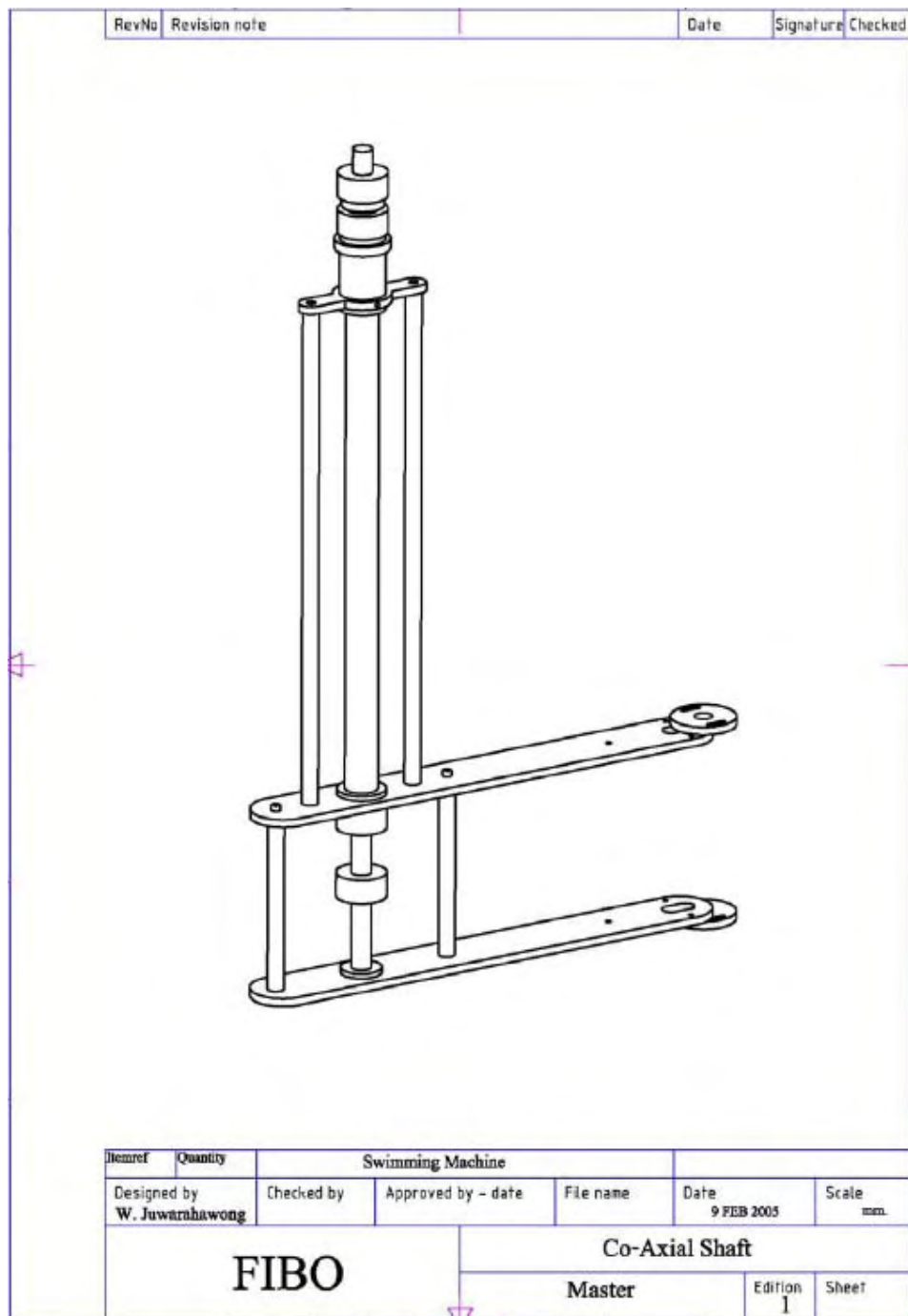
รูปที่ ข.3 แสดงภาพรวมของชุด Y-Axis

แบบร่างของส่วน Wheel Support



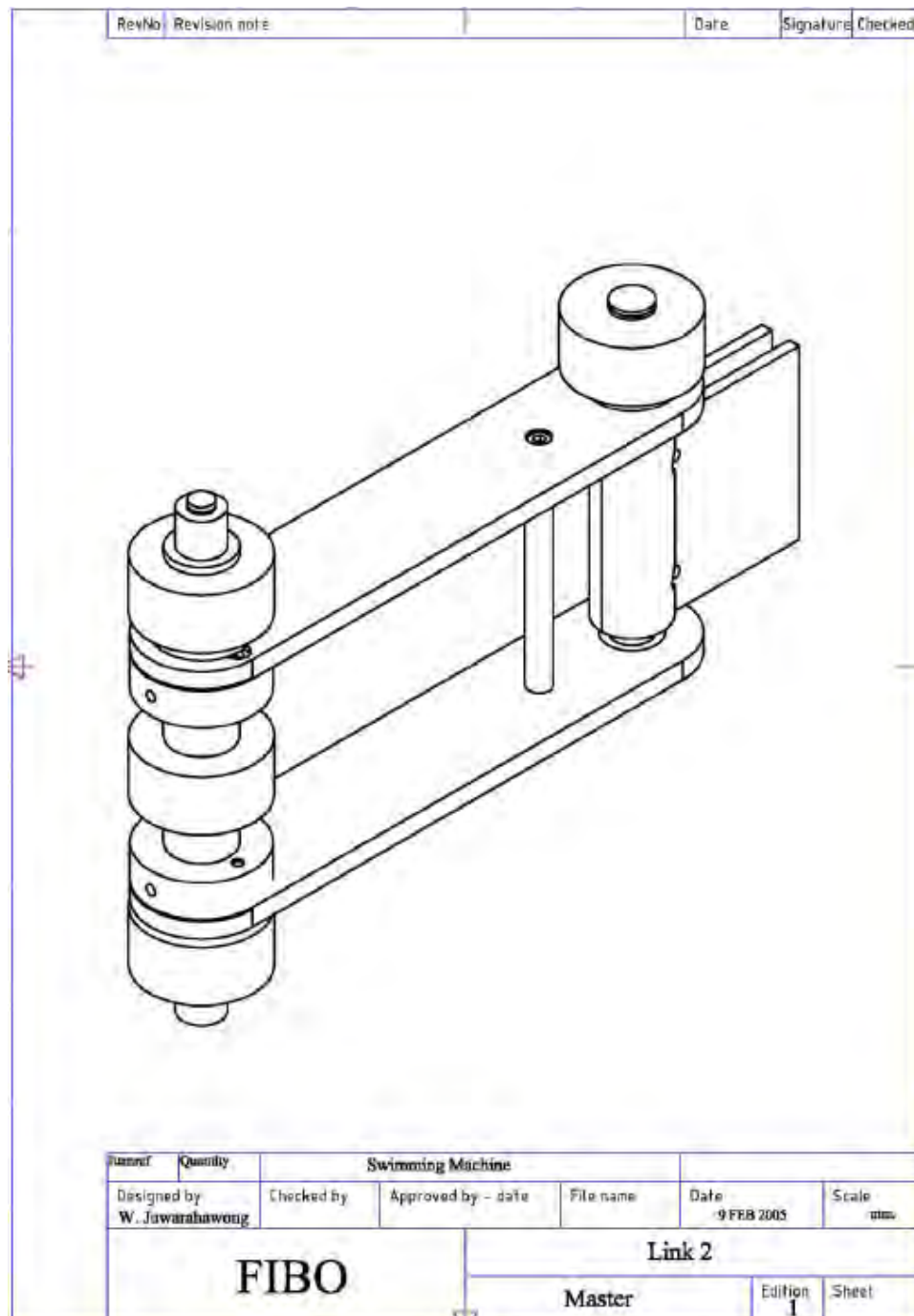
รูปที่ ข.4 แสดงภาพรวมของชุด Wheel Support

แบบร่างของส่วน Co-Axial Shaft



รูปที่ ข.5 แสดงภาพรวมของชุด Co-Axial Shaft

แบบร่างของส่วน Link 2



รูปที่ ข.6 แสดงภาพรวมของชุด Link2

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – สกุล

นายวิฑูร จูวราหะวงศ์

วัน เดือน ปีเกิด

9 พฤษภาคม 2523

ประวัติการศึกษา

ระดับมัธยมศึกษา

ประโยคมัธยมศึกษาตอนปลาย

โรงเรียนวัดราชโอรส พ.ศ. 2540

ระดับปริญญาตรี

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2544

ระดับปริญญาโท

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2548

ทุนสนับสนุนการวิจัย

โครงการวิจัยหุ่นยนต์เรื่องการวิจัยและพัฒนาหุ่นยนต์ปลา

สำนักงานงบประมาณปี พ.ศ. 2547

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

Maneewarn, T., Juwarahawong, W., Luangchaisri, J.,
Pakjan, W.,2002, “V-Move: Vertical Moving Robot”, in **Proc
of the 16th National Mechanical Engineering Conference
(ME-nett-16)**, October, 14-16,Phuket, Thailand, pp. 330-334.

Juwarahawong, W., Saimek, S.,2005, “Analysis and
Construction Design of Fish Robot”, in **Proc of the 19th
National Mechanical Engineering Conference (ME-nett-19)**,
October, 18-19, Phuket, Thailand

Juwarahawong, W., Saimek, S.,2005, “Analysis and
Mathematical modeling of Thunniform Motion”, in
**Proc of the 19th National Mechanical Engineering
Conference (ME-nett-19)**, October, 18-19, Phuket, Thailand

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ข้อตกลงว่าด้วยการโอนลิขสิทธิ์วิทยานิพนธ์

วันที่ 25 พฤษภาคม 2550

ข้าพเจ้า(นาย/นาง/นางสาว) วิฑูร จูราหะวงศ์ รหัสประจำตัว 45400116 เป็นนักศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ระดับปริญญา ☒ โท ☐ เอก หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ อยู่บ้านเลขที่ 167-171 ถนน สมเด็จพระเจ้าตากสิน ตำบล บุคคโล อำเภอ ธนบุรี จังหวัด กรุงเทพฯ รหัสไปรษณีย์ 10600 ขอโอนลิขสิทธิ์วิทยานิพนธ์ให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยมี รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์ ตำแหน่ง คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ เป็นผู้รับโอนลิขสิทธิ์และมีข้อตกลงดังนี้

1. ข้าพเจ้าได้จัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง การวิเคราะห์และการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่แบบ พู้นนิฟอร์ม ซึ่งอยู่ในความควบคุมของ ผศ.ดร.สโรช ไทรเมฆ ตามมาตรา 14 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 และถือว่า เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหลักสูตรของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
2. ข้าพเจ้าตกลงโอนลิขสิทธิ์จากผลงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการสร้างสรรค์ของข้าพเจ้าในวิทยานิพนธ์ให้กับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดอายุแห่งการคุ้มครองลิขสิทธิ์ ตามมาตรา 23 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงร่างวิทยานิพนธ์ จากมหาวิทยาลัย
3. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปใช้ในการเผยแพร่ในสื่อใดๆ ก็ตาม ข้าพเจ้าจะต้องระบุว่า วิทยานิพนธ์เป็นผลงานของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ทุกๆ ครั้งที่มีการเผยแพร่
4. ในกรณีที่ข้าพเจ้าประสงค์จะนำวิทยานิพนธ์ไปเผยแพร่ หรืออนุญาตให้ผู้อื่นทำซ้ำหรือ ดัดแปลงหรือเผยแพร่ต่อสาธารณชนหรือกระทำการอื่นใด ตามมาตรา 27, มาตรา 28, มาตรา 29 และมาตรา 30 แห่งพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 โดยมีค่าตอบแทนในเชิงธุรกิจ ข้าพเจ้าจะกระทำได้เมื่อได้รับความยินยอมเป็นลายลักษณ์อักษรจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ลงชื่อ วิฑูร จูราหะวงศ์ ผู้โอนลิขสิทธิ์
(นายวิฑูร จูราหะวงศ์)

ลงชื่อ ดร.เอก ไชยสวัสดิ์ ผู้รับโอนสิทธิ์
(รศ.ดร.เอก ไชยสวัสดิ์)

ลงชื่อ สโรช ไทรเมฆ พยาน
(ผศ.ดร.สโรช ไทรเมฆ)

ลงชื่อ เสนีย์ ศิริไชย พยาน
(ผศ.ดร.เสนีย์ ศิริไชย)