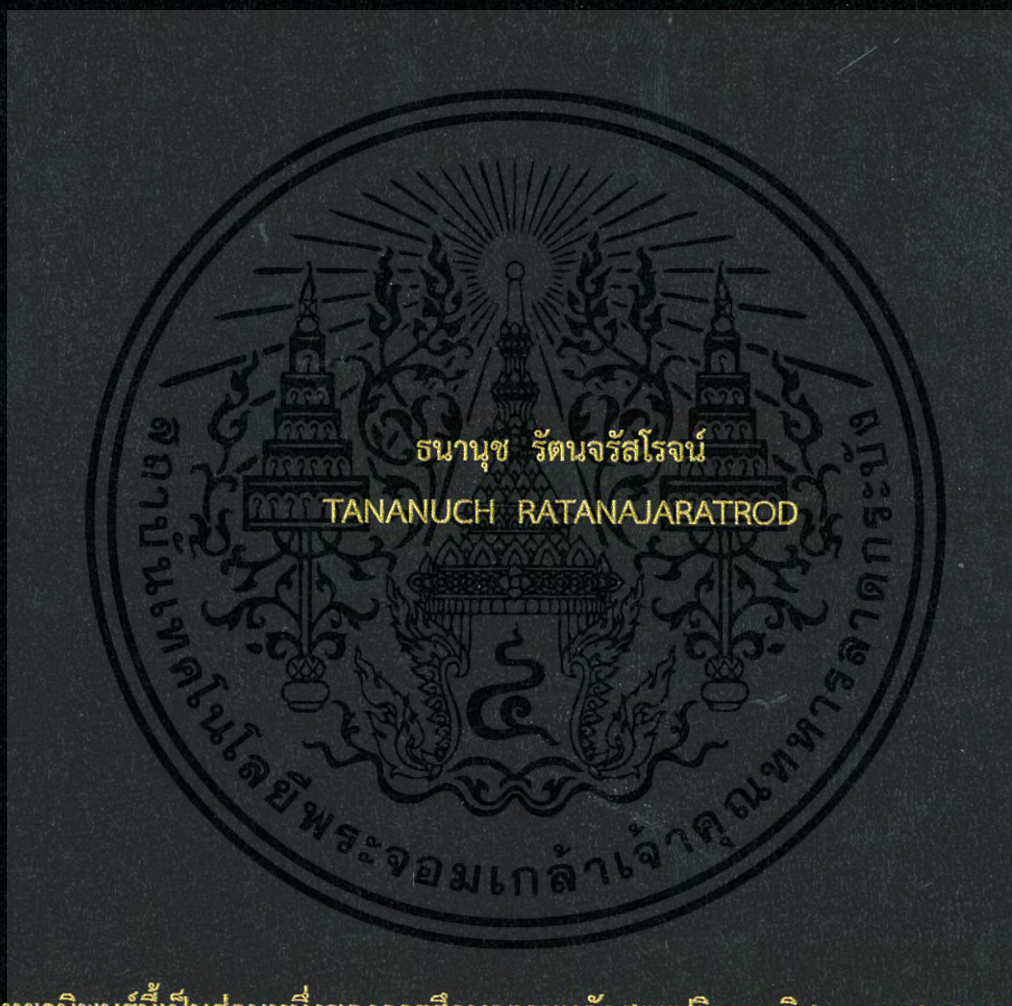


การพัฒนาวิธีกำหนดตำแหน่งและการเปลี่ยนแปลงสมดุ
ลในปริภูมิสามมิติสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนไหวใต้น้ำ

AN IMPLEMENTATION ON 3D POSITIONING AQUATIC ROBOT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-060-092

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาวิธีกำหนดตำแหน่งและการเปลี่ยนแปลงสมดุ
ลในปริภูมิสามมิติสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนไหวน้ำ

AN IMPLEMENTATION ON 3D POSITIONING AQUATIC ROBOT



T148664



ธนาช รัตนจรสโรจน์

TANANUCH RATANAJARATROD

เลขหมู่
เลขทะเบียน 148664
รับเดือนปี 14 พ.ค. 2560

b.00265037
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

KMITL-2017-EN-M-060-092

AN IMPLEMENTATION ON 3D POSITIONING AQUATIC ROBOT



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

KMITL-2017-EN-M-060-092

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

เอกสาร KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การพัฒนาวิธีกำหนดตำแหน่งและการเปลี่ยนแปลงสมดุลงในปริภูมิสามมิติสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนไหวในน้ำ
Thesis Title An Implementation on 3D Positioning Aquatic Robot
นักศึกษา นางสาวณานุช รัตนจรัสโรจน์
รหัสประจำตัว 57601218
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.พงษ์ชัย นิลาศ
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-060-092

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ฟูศักดิ์	ชีวิสุวิทย์	
รศ.ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	
รศ.สักริยา	ชิตวงศ์	
รศ.ทรงชัย	วีระทวีมาศ	
ผศ.ดร.พงษ์ชัย	นิลาศ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 18 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 13.00-15.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาของนักศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และวันที่ 18 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาวิธีกำหนดตำแหน่งและการเปลี่ยนแปลงสมดุลงในปริภูมิสามมิติสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนไหวในน้ำ
นักศึกษา	นางสาวธนาณัฐ รัตนจรัสโรจน์
รหัสประจำตัว	57601218
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ชัย นิลาศ

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้นำเสนอวิธีการศึกษาและออกแบบกลไกการเอียง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนาหุ่นยนต์ปลาในด้านการเอียงตัวในน้ำ หุ่นยนต์ปลาทั่วไปมีวิธีการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าหรือเลี้ยวโดยการสับัดครีบหาง กลไกการเอียงสามารถทำให้หุ่นยนต์ปลายกตัวหรือกดตัวลงจากระนาบในแนวนอนเมื่อนำกลไกการสับัดครีบหางและกลไกการเอียงมาไว้ด้วยกัน หุ่นยนต์ปลาจึงสามารถแสดงประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ในน้ำได้ครอบคลุมในระบบสามมิติ กลไกการเอียงอาศัยหลักการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวล รายละเอียดการออกแบบทางกายภาพของกลไกการเอียงได้ประยุกต์ใช้เซอร์โวมอเตอร์ขนาดเล็กจำนวนหลายตัวมาจัดเรียงในรูปแบบที่แตกต่างกัน บริเวณแขนของเซอร์โวมอเตอร์แต่ละตัวออกแบบให้ติดน้ำหนักถ่วงไว้ น้ำหนักถ่วงสามารถเปลี่ยนตำแหน่งและส่งผลให้เกิดแรงโมเมนต์ลัพท์เพื่อเลื่อนจุดศูนย์กลางถ่วงของหุ่นยนต์ได้ วิธีการควบคุมกลไกการเอียงถูกนำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ถึงสองวิธีที่แตกต่างกัน ได้แก่ การหาความสัมพันธ์จากโมเดลคณิตศาสตร์และการกำหนดตำแหน่งโดยอ้างอิงจากฐานข้อมูล ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบทางกายภาพและวิธีการควบคุมโดยชี้ถึงประโยชน์และข้อจำกัดของกลไกการเอียงในรูปแบบที่แตกต่างกัน

Thesis Title	An Implementation on 3D Positioning Aquatic Robot
Student	Miss Tananuch Ratanajaratrod
Student ID.	57601218
Degree	Master of Engineering
Program	Instrumentation Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assistant Professor Dr. Phongchai Nilas

ABSTRACT

The thesis presents the study and designs of orientation mechanism for aquatic robots in 3D environment. Generally, most aquatic robot maneuvering relies on their caudal fin which limit the robot position and orientation. This thesis design the roll and pitch orientation mechanism that enhance the robot movement capability. The design employs anti-weight equilibrium technique that shift the center of gravity of the robot to provide its orientation. Several servomotors are arranged together in various patterns to form anti-weight equilibrium from metal-cylinder weights. By the aim to control orientation automatically, the control method of orientation characteristic and the summation vector of forces are provided in two ways, mathematical model and positioning control from experimental database. The experimental result not only shows capability from hardware and software design but also indicates benefit and limitation of two systems.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้จัดทำขึ้น ณ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งผู้จัดทำยินดีที่ได้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาวิจัยและพัฒนาหุ่นยนต์ปลา ณ ห้องปฏิบัติการแห่งนี้

ในลำดับแรกขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ชัย นิลาศ ผู้มีความอดทนไม่สิ้นสุดในการให้ความรู้ คำแนะนำ ตรวจสอบและแก้ไขในสิ่งที่ผิด รวมไปถึงการแสดงแนวทางการแก้ปัญหาในงานวิจัย ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้การออกแบบหุ่นยนต์ปลาสามารถสำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี ดร. พงษ์ชัยได้ถ่ายทอดความทั้งความรู้และความเข้าใจในแขนงวิชาวิศวกรรม รวมไปถึงประสบการณ์ชีวิตให้แก่นักเรียน อีกทั้งยังช่วยให้ข้อคิดในการดำเนินชีวิตทั้งในช่วงที่ดีและร้าย ดิฉันจึงรู้สึกมีความสุขและโชคดีที่ได้มีโอกาสพัฒนาหุ่นยนต์ปลาภายใต้การควบคุมดูแลของอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณนายพงศ์พันธ์ วาหะสุนทรพงศ์ นักศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้เอื้อเฟื้อเวลา รวมไปถึงอุปกรณ์ในการสร้างชิ้นงานจากแผ่นอะคริลิกให้เป็นหุ่นยนต์ปลาต้นแบบได้สำเร็จ

ขอขอบคุณนายณัฐทัศน์ โตรณะคุณและนางสาวเมธิณี สงไทย สำหรับการให้คำปรึกษาแนะนำ ในระเบียบ ขั้นตอนและวิธีการจัดทำวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงการชี้แนะแนวทางปฏิบัติในการแก้ไข ปัญหาต่าง ๆ ตลอดเวลาที่ได้ศึกษาอยู่ที่ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

ขอขอบคุณอาจารย์ท่านอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวชื่อนาม ณ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม ที่ได้แสดงถึงความสนใจในงานวิจัยของดิฉันและให้คำปรึกษาที่เป็นประโยชน์ นอกจากนี้ยังต้องขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมที่ให้ดิฉันค้นหาความสำคัญในการเรียนรู้และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานวิจัย และการทดลอง

ขอขอบคุณนักศึกษารุ่นน้อง สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุมที่ได้ให้กำลังใจ ทักทายและใช้เวลาที่ติวร่วมกันทั้งในด้านการเรียนและการทำกิจกรรมต่าง ๆ

ท้ายที่สุดนี้ขอขอบคุณพ่อ แม่และน้องสาว ผู้ที่ซึ่งดิฉันทุ่มเททำงานวิจัยชิ้นนี้เพื่อมอบความสำเร็จให้แก่พวกเขา วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้ถ้าปราศจากความรักและกำลังใจจากครอบครัว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์.....	6
2.1 หุ่นยนต์ใต้น้ำและกำเนิดหุ่นยนต์ปลา.....	6
2.2 การแบ่งประเภทและรูปแบบการเคลื่อนที่ของปลา.....	7
2.3 หุ่นยนต์ปลาและกลไกเลียนแบบการสับัดหางของปลา.....	9
2.4 หุ่นยนต์ปลาของนิลาศ.....	10
2.5 การเลียนแบบธรรมชาติของกลไกภายในหุ่นยนต์ปลา.....	11
2.5.1 ครีบอก.....	11
2.5.2 กระเพาะปลา.....	12
2.6 หุ่นยนต์ทรงกลม.....	14
2.7 สรุป.....	15
บทที่ 3 สัณฐานวิทยาและกลศาสตร์การเคลื่อนที่ของปลา.....	16
3.1 ชนิดและหน้าที่ของครีบปลา.....	16
3.1.1 ครีบเดี่ยว.....	16
3.1.2 ครีบคู่.....	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 โครงสร้างและการทำงานของกระเพาะปลา	21
3.2.1 โครงสร้างของกระเพาะปลา	22
3.2.2 หน้าที่ของกระเพาะปลา	22
3.3 กลศาสตร์การเคลื่อนที่ของปลา.....	23
3.3.1 แรงและการเคลื่อนที่ของปลา.....	23
3.3.2 สมดุลของแรงในน้ำกับปลา	25
3.3.3 การจำแนกลักษณะการเคลื่อนที่ของปลา	25
3.4 สรุป	32
บทที่ 4 ฟิสิกส์และการออกแบบหุ่นยนต์ใต้น้ำ	33
4.1 แรงลอยตัว.....	33
4.2 เสถียรภาพและสมดุลของวัตถุในน้ำ.....	35
4.2.1 จุดศูนย์ถ่วง.....	35
4.2.2 จุดศูนย์ถ่วงปริมาตรใต้แนวน้ำ	37
4.2.3 สมดุลและเสถียรภาพของวัตถุในน้ำ	37
4.3 โมเมนต์ของแรง	39
4.3.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของโมเมนต์.....	39
4.3.2 โมเมนต์กับวัตถุในน้ำ.....	40
4.4 การหมุนในปริภูมิสามมิติ.....	41
4.5 สรุป	44
บทที่ 5 กลไกการเอียง.....	45
5.1 แนวคิดและพื้นฐานการออกแบบกลไกการเอียงภายในหุ่นยนต์ปลา.....	45
5.1.1 โมเมนต์และแรงลอยตัวจากน้ำหนักถ่วง	45
5.1.2 มุมเอียงกับโครงสร้างของหุ่นยนต์.....	46
5.2 การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์เบื้องต้น.....	47
5.2.1 Parallel Pattern	48
5.2.2 In-line Pattern.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3 การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์จำนวนสี่ตัว.....	50
5.4 การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบสองชั้น.....	57
5.4.1 แนวความคิดในการออกแบบการทำงานของกลไกการหมุน.....	57
5.4.2 การออกแบบกลไกการเอียงทางกายภาพ.....	61
5.4.3 วิธีการควบคุมกลไกการเอียงแบบสองชั้น.....	62
5.5 สรุป.....	71
บทที่ 6 การออกแบบหุ่นยนต์ปลา.....	72
6.1 ลักษณะทางกายภาพของหุ่นยนต์ปลา.....	72
6.1.1 โครงสร้างของหุ่นยนต์ปลา.....	74
6.1.2 ครีบหางของหุ่นยนต์ปลา.....	76
6.1.3 การออกแบบวงจรไฟเลี้ยงของหุ่นยนต์ปลา.....	78
6.1.4 กลไกการเอียงของหุ่นยนต์ปลา (Orientation Mechanism).....	79
6.2 โครงสร้างของซอฟต์แวร์ที่ใช้ในหุ่นยนต์ปลา.....	81
6.2.1 โครงสร้างและการทำงานของซอฟต์แวร์บนไมโครคอนโทรลเลอร์.....	82
6.2.2 โครงสร้างและการทำงานของส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้บนคอมพิวเตอร์.....	89
6.3 สรุป.....	90
บทที่ 7 การทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	91
7.1 การทดลองสำหรับกลไกการเอียงแบบโมเดลคณิตศาสตร์.....	91
7.1.1 สภาพแวดล้อมในการทดลอง.....	91
7.1.2 การออกแบบการทดลองและผลการทดลอง.....	92
7.1.3 การทดลองหามุมเอียงเมื่อใช้เซอร์โวมอเตอร์จำนวนสี่ตัวจัดวางแบบ In-line.....	106
7.2 การทดลองสำหรับกลไกการเอียงแบบสองชั้น.....	109
7.2.1 สภาพแวดล้อมในการทดลอง.....	109
7.2.2 ผลการทดลอง.....	109
7.3 สรุป.....	114

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 8 บทสรุป.....	115
8.1 สรุปผลการวิจัย.....	115
8.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต.....	118
เอกสารอ้างอิง.....	119
ภาคผนวก ก ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์.....	124
ภาคผนวก ข รายละเอียดการออกแบบหุ่นยนต์ปลาและกลไกการเอียง.....	131
ประวัติผู้เขียน.....	134



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของปลาในครีบบางแต่ละแบบ [16]	18
5.1 การค้นหารูปแบบการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์และคุณลักษณะจากการทดสอบ	51
5.2 ทิศทางการเอียงและตำแหน่งแกนของเซอร์โวมอเตอร์จากการทดสอบบนพลาสติกครึ่งทรงกลม	54
5.3 มุมมองด้านข้างและแนวแรงโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในระบบ	55
5.4 วิธีการกำหนดตำแหน่งเซอร์โวมอเตอร์ให้เกิดประสิทธิภาพการเอียงสูงสุด	59
5.5 ฐานข้อมูลตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์เพื่อการปรับความละเอียดของมุมเอียง	60
5.6 เกณฑ์การจำแนกขนาดของมุมเอียงจากผู้ใช้งานในกระบวนการ Input Fuzzification	63
5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงในระนาบ X-Y กับชื่อเรียกในการแบ่งพื้นที่	65
5.8 เงื่อนไขในการตัดสินใจเลือกพื้นที่การเอียงบนระนาบ X-Y	66
6.1 น้ำหนักของอุปกรณ์ทั้งหมดที่ถูกติดตั้งในหุ่นยนต์ปลา	72
6.2 รายละเอียดของอุปกรณ์และโครงสร้างของหุ่นยนต์ปลา	75
6.3 รูปแบบการเคลื่อนที่ของแขนเซอร์โวมอเตอร์สำหรับกลไกการเอียงภายในหุ่นยนต์	81
6.4 การตั้งค่าอุปกรณ์การวัดภายใน MEMS Motion Sensor MPU-9150 [23]	86
6.5 ค่าพารามิเตอร์สำหรับรูปแบบการเคลื่อนที่ต่าง ๆ ในหุ่นยนต์ปลา	88
7.1 เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการคำนวณและการทดลองเพื่อหามุม θ ที่ระนาบ X-Z สำหรับเซอร์โวมอเตอร์จำนวนหนึ่งตัว	94
7.2 เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการคำนวณและการทดลองเพื่อหามุม β ที่ระนาบ Y-Z สำหรับเซอร์โวมอเตอร์ S1 ในการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ Parallel	98
7.3 เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการคำนวณและการทดลองเพื่อหามุม β ที่ระนาบ Y-Z สำหรับเซอร์โวมอเตอร์ S2 ในการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ Parallel	99
7.4 เปรียบเทียบผลลัพธ์จากการคำนวณตำแหน่งแกนเซอร์โวมอเตอร์ S1 และ S2 เมื่อมุมเอียง β มีค่าเท่ากัน	100
7.5 เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการคำนวณและการทดลองเพื่อหามุม β ที่ระนาบ Y-Z สำหรับเซอร์โวมอเตอร์ S1 ในการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ In-line	102
7.6 เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการคำนวณและการทดลองเพื่อหามุม β ที่ระนาบ Y-Z สำหรับเซอร์โวมอเตอร์ S2 ในการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ In-line	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
7.7 เปรียบเทียบผลลัพธ์จากการคำนวณของตำแหน่งแกนเซอร์โวมอเตอร์ S1 และ S2 เมื่อมุมเอียง β มีค่าเท่ากัน	105
7.8 ผลการทดลองแสดงมุมเอียงในระบบเมื่อแกนเซอร์โวมอเตอร์เปลี่ยนตำแหน่งไปตามทิศทางในระนาบ X-Y	106
7.9 ผลการทดลองการสั่งงานกลไกการเอียงโดยการระบุมุมเอียงที่ต้องการ	112



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ภาพจำลองแสดงกลุ่มกล้ามเนื้อ Dorsal และ Ventral	8
3.1 สัณฐานวิทยาของปลา.....	16
3.2 ลักษณะทางกายวิภาคของครีบหางตามโครงสร้างของกระดูกภายใน [29]	18
3.3 ตำแหน่งของกระเพาะปลา.....	21
3.4 โครงสร้างของกระเพาะปลา [26].....	22
3.5 แรงต้านของน้ำกับการเคลื่อนที่ของปลา.....	24
3.6 สมดุลของแรงในน้ำกับปลา	25
3.7 การเกิดน้ำวนและการสร้างแรงผลักของปลา.....	26
3.8 การเคลื่อนที่แบบ Body and/or Caudal Fin [9]	27
3.9 การเคลื่อนที่ของก้านครีบและแรงลัพท์ในการเคลื่อนที่ [9].....	28
3.10 กลศาสตร์การเคลื่อนที่ของครีบอกในการสร้างแรงผลัก [9].....	30
3.11 กลศาสตร์การเคลื่อนที่ของครีบอกในการสร้างแรงยก [9].....	30
3.12 การเคลื่อนที่ของปลาในปริภูมิสามมิติ.....	31
4.1 การวัดขนาดแรงลอยตัวของวัตถุในของเหลว	33
4.2 สมดุลของแรงกับวัตถุในของเหลว [28]	34
4.3 การหาจุดศูนย์ถ่วงของวัตถุ [21]	36
4.4 จุดศูนย์ถ่วงปริมาตรใต้แนวน้ำ (CB) และจุดศูนย์ถ่วงของวัตถุ (CG).....	37
4.5 สมดุลของวัตถุในน้ำ [28].....	38
4.6 โมเมนต์ของแรง [27]	39
4.7 สภาวะสมดุลของวัตถุเมื่อจุด CB และ CG อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน [21].....	40
4.8 ทิศทางของแรงและแกนโมเมนต์ d [21]	41
4.9 แกนอ้างอิงในปริภูมิสามมิติ.....	42
4.10 การหมุนของปลาในปริภูมิสามมิติและแกนอ้างอิง.....	43
5.1 เซอร์โวมอเตอร์และน้ำหนัถ่วง	45
5.2 มุมเอียงที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างของหุ่นยนต์	46
5.3 การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ Parallel Pattern.....	48
5.4 การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ In-line Pattern.....	49

เอก 5.5 พัลลาสติคครึ่งทรงกลมลอยในน้ำพร้อมการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์.....

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.6 การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์และมุมมองในการวิเคราะห์	53
5.7 กลไกการหมุนและพื้นที่ในการทำงาน	57
5.8 การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ ณ ตำแหน่งเริ่มต้นการทำงาน.....	58
5.9 ตัวอย่างการกำหนดตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์ ก. ตำแหน่ง O, Y ข. ตำแหน่ง X, Y	59
5.10 กลไกการเอียง	61
5.11 โมเดลการออกแบบกลไกการเอียง	61
5.12 ภาพรวมกระบวนการทำงานของระบบควบคุมกลไกการเอียง.....	63
5.13 กราฟแสดงการแบ่งช่วงมุมเอียงในระบบภาษาศาสตร์	63
5.14 ส่วนประกอบของสี่เหลี่ยมคางหมู	64
5.15 การแบ่งพื้นที่การทำงานของกลไกการเอียงบนระนาบ X-Y.....	65
5.16 ตัวอย่างความสัมพันธ์ของพื้นที่บนระนาบ X-Y และฐานข้อมูล	66
6.1 ขนาดของหุ่นยนต์ปลา.....	74
6.2 โครงสร้างในภาพรวมของหุ่นยนต์ปลา.....	74
6.3 โมเดลจำลองหุ่นยนต์ปลาจากโปรแกรม SolidWorks.....	75
6.4 การแบ่งลำตัวของปลาเป็นสัดส่วน [1].....	76
6.5 แอมพลิจูดของการสับดีในแต่ละข้อต่อ [1].....	77
6.6 ครีบทองของหุ่นยนต์ปลา	78
6.7 การจัดเรียงเซอร์โวมอเตอร์สำหรับกลไกการเอียงในหุ่นยนต์ปลา	80
6.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์และการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก	82
6.9 ผังงานโปรแกรมแสดงการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์.....	83
6.10 ซอฟต์แวร์ส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้บนคอมพิวเตอร์ (GUI).....	89
7.1 สิ่งแวดล้อมและการจัดสภาวะการทดลอง	91
7.2 การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์จำนวนหนึ่งตัวและแกนอ้างอิง	92
7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแกนเซอร์โวมอเตอร์และมุมเอียงที่เกิดขึ้น ในระนาบ X-Z และ ระนาบ Y-Z.....	93
7.4 การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ Parallel และแกนอ้างอิง.....	95
7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงและตำแหน่งของแกนเซอร์โวมอเตอร์ S1 สำหรับ การจัดวางเซอร์โว	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
7.6 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงและตำแหน่งของแกนเซอร์โวมอเตอร์ S2 สำหรับ การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ Parallel	97
7.7 การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ In-line และแกนอ้างอิง.....	100
7.8 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงและตำแหน่งของแกนเซอร์โวมอเตอร์ S2 สำหรับ การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ In-line.....	101
7.9 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงและตำแหน่งของแกนเซอร์โวมอเตอร์ S1 สำหรับ การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ In-line.....	101
7.10 การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์จำนวน 4 ตัวแบบ In-line และแกนอ้างอิง.....	106
7.11 มุมเอียงของระบบในการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ 4 ตัวแบบ In-line.....	107
7.12 ตำแหน่งแกนเซอร์โวมอเตอร์ S1 ถึง S4 และมุมเอียง θ (Angle Y).....	108
7.13 ตำแหน่งแกนเซอร์โวมอเตอร์ S1 ถึง S4 และมุมเอียง β (Angle X).....	108
7.14 ขอบเขตการทำงานสูงสุดของกลไกการเอียงแบบสองชั้น	110
7.15 ความละเอียดในการปรับตำแหน่งของมุมเอียง.....	111
7.16 การตอบสนองและความสามารถในการทำซ้ำของกลไกการเอียง	111
7.17 เปรียบเทียบมุมเอียงจากการป้อนค่าและผลลัพธ์ในทางปฏิบัติ.....	112
7.18 การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาในปริภูมิสามมิติ.....	114

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

หุ่นยนต์ปลาต้นแบบของงานวิจัยชิ้นนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาก่อนโดย ผศ.ดร.พงษ์ชัย นิลาศ ซึ่งประกอบขึ้นมาจากกล่องอะคริลิกและถูกนำมาเรียงต่อกันเป็นข้อต่อตามแนวกระดูกสันหลังของปลา ภายในกล่องอะคริลิกกั้นน้ำเหล่านี้ได้บรรจุเซอร์โวมอเตอร์ ซึ่งใช้เป็นข้อต่อระหว่างกล่องอะคริลิกด้วยกัน เซอร์โวมอเตอร์เหล่านี้ถูกควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีตำแหน่งอยู่บริเวณส่วนหัวของหุ่นยนต์พร้อมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ได้แก่ อินฟราเรดเซนเซอร์ แบตเตอรี่และวงจรไฟเลี้ยง เป็นต้น อย่างไรก็ตามกลไกเหล่านี้เป็นเพียงส่วนหนึ่งเพื่อทดสอบโมเดลคณิตศาสตร์สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาของนิลาศ [1] เท่านั้น

สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาของนิลาศ [1] เป็นตรรกะที่เกิดจากการสังเกตรูปแบบการเคลื่อนที่ของปลาตามธรรมชาติ แล้วประยุกต์มาเป็นคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายและควบคุมกลไกการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาที่สร้างขึ้นมาจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้สามารถเคลื่อนไหวได้สอดคล้องตามรูปแบบการเคลื่อนที่ของปลาจริง สมการของนิลาศ [1] ได้กลายมาเป็นพื้นฐานในการออกแบบหุ่นยนต์ปลาขึ้นมาอีกหนึ่งตัวในขณะที่ศึกษาอยู่ระดับชั้นปริญญาตรีร่วมกับเพื่อน ๆ หุ่นยนต์ปลาตัวแรกที่ได้สร้างขึ้นกับเพื่อน ๆ นั้น ทำให้เข้าใจในหลักการการออกแบบชิ้นงานทางวิศวกรรมไปจนถึงการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์ซึ่งมีรายละเอียดที่ต้องเอาใจใส่ ตั้งแต่กระบวนการการออกแบบไปจนถึงการประกอบหุ่นยนต์ขึ้น และส่วนของซอฟต์แวร์ออกแบบชิ้นงานต่าง ๆ เพื่อจำลองให้เห็นภาพรวม และแสดงแนวความคิดในคอมพิวเตอร์ก่อนกระบวนการสร้างหุ่นยนต์ขึ้นมาจริง ๆ นอกจากนี้ยังได้เริ่มต้นฝึกฝนทักษะต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น การเขียนโปรแกรมภาษาซีเพื่อควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ออกแบบการจัดวางอุปกรณ์ภายในหุ่นยนต์ปลาและประกอบหุ่นยนต์ปลาให้ทำงานได้ปกติพร้อมระบบกั้นน้ำ รวมไปถึงการศึกษาและเลือกใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อออกแบบวงจรไฟเลี้ยง และการใช้ซอฟต์แวร์จำลองเพื่อออกแบบลายวงจรก่อนการสร้างวงจรไฟเลี้ยงขึ้นมาใช้จริงภายในหุ่นยนต์ เป็นต้น ความรู้เหล่านี้ทำให้เกิดพื้นฐานเบื้องต้นสำหรับการสร้างหุ่นยนต์ปลาขึ้นมาอีกครั้งเมื่อศึกษาต่อในระดับปริญญาโท อย่างไรก็ตามการสร้างสรรคผลงานในระดับปริญญาโทจำเป็นที่จะต้องมีความคิดใหม่ ๆ เพื่อที่จะวิจัยและศึกษาเป็นความรู้เฉพาะของตนเอง ดังนั้นจึงตัดสินใจที่จะออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ปลาขึ้นมาใหม่ให้มีความสามารถพิเศษเพิ่มเติม คือ การเอียงตัวในน้ำ เพื่อให้หุ่นยนต์ปลาสามารถเคลื่อนที่ได้ในปริภูมิสามมิติ โดยใช้หลักการและทฤษฎีที่เคยได้ศึกษามาก่อนหน้านี้นำมาประยุกต์เพื่อสร้างหุ่นยนต์ปลาตัวใหม่ให้ดีขึ้นกว่าเดิม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากประสบการณ์ในการทำงานที่ผ่านมา [2] หุ่นยนต์ปลาที่ผู้เขียนเคยสร้างขึ้นได้เน้นไปที่ การศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของปลาและกลไกการขับเคลื่อนในส่วนของครีบหางเท่านั้น ดังจะเห็น ได้ว่าวิธีการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาประเภทนี้ถูกจำกัดให้อยู่ในเฉพาะระนาบแนวนอน ส่งผลให้ ภาพรวมในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาไม่มีชีวิตชีวาและความเหมือนจริงเท่าที่ควร อย่างไรก็ตามก็ ยังมีวิศวกรผู้ออกแบบหุ่นยนต์ปลาบางกลุ่มที่ทำการศึกษาลักษณะการทำงานของอวัยวะส่วนอื่น ๆ ของปลาและสร้างกลไกเลียนแบบอวัยวะที่เขาได้ศึกษาขึ้นมา เช่น ครีบบอก ครีบหลังและกระเพาะปลา เป็นต้น แต่ด้วยความซับซ้อนในการทำงานของกล้ามเนื้อและลักษณะทางชีวภาพของปลาแต่ละสาย พันธุ์ ทำให้สิ่งประดิษฐ์เหล่านั้นเป็นการจำลองเพียงแค่ส่วนหนึ่งของการเคลื่อนที่ที่สามารถพบได้ใน ปลาตามธรรมชาติเท่านั้น ดังนั้นเพื่อการเป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยในสายหุ่นยนต์ปลา งานวิจัยชิ้นนี้จึง ศึกษาและเน้นไปที่กลไกการเอียงซึ่งเลียนแบบการทำงานของกระเพาะปลา ซึ่งมีจุดเด่นของงานวิจัย คือ การออกแบบให้หุ่นยนต์ปลาเคลื่อนที่ได้ในสามมิติจากการทำงานร่วมกันของกลไกที่สร้างขึ้น ทั้งหมด

สำหรับในส่วนของกลไกการเอียงนั้น ได้มีแนวคิดมาจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของ น้ำหนักถ่วงภายในหุ่นยนต์ปลา เพื่อที่จะสร้างแรงเหวี่ยงจากกลไกภายในและส่งแรงเหวี่ยงออกไปยัง โครงสร้างของหุ่นยนต์ปลาภายนอก ทำให้หุ่นยนต์เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลขณะเคลื่อนที่อยู่ในน้ำ ซึ่งยังไม่มีผู้ใดวิจัยในหัวข้อนี้มาก่อน จากแนวคิดดังกล่าว งานวิจัยชิ้นนี้จึงได้ออกแบบกลไกการเอียง สำหรับการติดตั้งภายในหุ่นยนต์ปลา เซอร์โวมอเตอร์ขนาดเล็กถูกนำมาประยุกต์ใช้ โดยการติด น้ำหนักถ่วงบริเวณปลายแขนเซอร์โวมอเตอร์ ประกอบกับการนำเซอร์โวมอเตอร์ในลักษณะนี้ จำนวน หลาย ๆ ตัวมาจัดเรียงไว้ด้วยกันให้วางอยู่ในรูปแบบต่าง ๆ ผลการทดลองแสดงความสัมพันธ์ของมุม เอียงที่เกิดขึ้นกับหุ่นยนต์ปลาและตำแหน่งของแขนเซอร์โวมอเตอร์ที่ถูกจัดวางอยู่ในรูปแบบต่าง ๆ ผลลัพธ์จากงานวิจัยชิ้นนี้ ส่งผลให้หุ่นยนต์ปลาที่ทำการติดตั้งกลไกการเอียงไว้ภายใน สามารถเอียงตัว หมุนรอบแกนสมมติในปริภูมิสามมิติได้ตามที่ต้องการขณะทำการเคลื่อนที่ในน้ำ ซึ่งรูปแบบการ เคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาบริเวณกลไกการสะบัดนั้น ยังต้องอาศัยพื้นฐานจากสมการการเคลื่อนที่ของ หุ่นยนต์ปลาที่นิลาศได้คิดค้นไว้เป็นหลัก

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษากลไกการเคลื่อนที่หวตามธรรมชาติของปลา รูปแบบการเคลื่อนที่และแรง ลอยตัว
2. วิเคราะห์ ออกแบบกลไกที่เป็นส่วนประกอบของหุ่นยนต์สำหรับเลียนแบบการปรับ ตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่หวในน้ำ
3. ออกแบบระบบควบคุมและจัดสร้างแพลตฟอร์มสำหรับการทดสอบกลไกที่ทำขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. จัดสร้างและทดสอบ รวมทั้งวิเคราะห์ประสิทธิภาพของกลไกการปรับตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่ได้รับการออกแบบ

5. ทำการทดลอง วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปวิทยานิพนธ์

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ค้นหาวิธีการที่ทำให้หุ่นยนต์ได้นำทรงตัวและเปลี่ยนแปลงตำแหน่งภายใต้ขอบเขตองศาของมุมเอียงที่กำหนดไว้ โดยใช้ระนาบอ้างอิงภายในปริภูมิสามมิติ

2. ศึกษาความสัมพันธ์ของเวกเตอร์ลัพธ์จากแรงโมเมนต์เพื่อเลื่อนตำแหน่งของจุดศูนย์กลางมวลของวัตถุในน้ำ และใช้ประโยชน์จากหลักการดังกล่าวเพื่อออกแบบกลไกการเอียง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานเป็นการวางแผนและตรวจสอบการทำงานในแต่ละช่วง เพื่อให้ตรงตามกำหนดเวลาในการทำงาน รวมไปถึงทำให้สามารถมองภาพรวมและแนวทางการทำงานได้ครบทุกองค์ประกอบ สำหรับการวิจัยและออกแบบกลไกการเอียงจะมีกระบวนการทำงานและขั้นตอนต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. อ่านงานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องเพื่อค้นหาและรวบรวมแนวความคิด รวมไปถึงรูปแบบการทำงานที่เป็นประโยชน์หรือโดดเด่นในแวดวงที่เกี่ยวข้องกับการสร้างหุ่นยนต์ปลา

2. ทดลองสร้างฮาร์ดแวร์หรือกลไกอย่างง่ายเพื่อทดสอบแนวความคิดของกลไกการเอียงที่จะนำไปใช้กับหุ่นยนต์ปลาว่ามีความเป็นไปได้มากหรือน้อยเพียงใด

3. ศึกษาฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องอย่างละเอียดเพื่อรวบรวมข้อมูลและทักษะสำหรับการสร้างสรรค์ผลงาน ทำให้สามารถใช้เครื่องมือที่มีอยู่ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

4. ออกแบบและสร้างสรรค์ผลงาน ตั้งแต่ซอฟต์แวร์ควบคุมกลไกการเอียงในไมโครคอนโทรลเลอร์ และโปรแกรมประสานติดต่อกับผู้ใช้งานบนคอมพิวเตอร์ ออกแบบฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์จากประสบการณ์และงานวิจัยอื่น ๆ ในอดีต รวมไปถึงการหาวัสดุและอุปกรณ์ตามท้องตลาดที่สามารถนำมาประกอบเป็นหุ่นยนต์ให้ทำงานตามที่ต้องการได้

5. ทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลจากฮาร์ดแวร์ที่สร้างขึ้น แล้วนำข้อมูลเหล่านั้นมาวิเคราะห์บนคอมพิวเตอร์อีกครั้ง เพื่อหาวิธีการควบคุมกลไกการเอียงของหุ่นยนต์ปลา

6. ตีพิมพ์ผลงานทางวิชาการและจัดทำวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. มีความรับผิดชอบ ใส่ใจในการทำงาน รู้จักการบริหารจัดการเวลาและลำดับความสำคัญของงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สัมผัสโลกของการศึกษาและวิชาการมากยิ่งขึ้น จากการจัดทำผลงานวิจัยให้ได้รับการตอบรับ ตีพิมพ์และการนำเสนอผลงานทางวิชาการ
3. ใช้สมองทั้งสองซีกในการสร้างสรรค์ผลงานและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการออกแบบและสร้างชิ้นงานจากอุปกรณ์ที่มีอยู่ในมือ
4. ทดสอบและท้าทายขีดจำกัดที่มีอยู่เพื่อบรรลุความต้องการในการสร้างสรรค์ผลงานบนขอบของแนวคิดและกระบวนการทางวิศวกรรม
5. สามารถออกแบบและสร้างหุ่นยนต์โดยใช้องค์ความรู้พื้นฐาน ประกอบกับแนวคิดและกระบวนการทางวิศวกรรม เช่น การใช้ซอฟต์แวร์ออกแบบหุ่นยนต์ การเขียนโปรแกรมโดยใช้ภาษาขั้นสูงเพื่อติดต่อกับคอมพิวเตอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์ การเลือกใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน เป็นต้น

1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้เรียบเรียงให้ในแต่ละบทมีเนื้อหาเฉพาะ ซึ่งแสดงแนวความคิดที่สำคัญและนำไปสู่ความเข้าใจในการสร้างกลไกการเอียงและหุ่นยนต์ปลา ซึ่งมีรายละเอียดแสดงดังต่อไปนี้

บทที่ 1 ทำให้เห็นภาพรวมและความเป็นมาของผู้เขียน โดยได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของวิทยานิพนธ์ จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับและรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ได้ยกงานวิจัยที่มีความสำคัญทางประวัติศาสตร์ในการสร้างหุ่นยนต์ปลา รวมไปถึงงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องมาอธิบาย เพื่อนำผู้อ่านให้เข้าสู่โลกของการสร้างหุ่นยนต์ปลาและหุ่นยนต์ใต้น้ำ งานวิจัยที่ยกมาทั้งหมดได้ทำให้ผู้เขียนเกิดแนวความคิดในการออกแบบกลไกการเอียงและมีอิทธิพลต่อการออกแบบหุ่นยนต์ปลาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 3 กล่าวถึงสัญญาณวิทยาและกลศาสตร์การเคลื่อนที่ของปลา ซึ่งเป็นการอธิบายลักษณะทางกายภาพของปลาและเหตุผลของการเกิดการเคลื่อนที่ของปลาในน้ำ ความเข้าใจและคำศัพท์เฉพาะในบทนี้จะถูกใช้อ้างอิงในการบรรยายไปตลอด

บทที่ 4 กล่าวถึงทฤษฎีฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของปลาในน้ำ โดยภายหลังจากที่ผู้อ่านได้เข้าใจกลศาสตร์การเคลื่อนที่ของปลาจะพบว่า การว่ายน้ำของปลาสามารถอธิบายได้โดยทฤษฎีเรื่องแรง และการเคลื่อนที่ในปริภูมิสามมิติ

บทที่ 5 กล่าวถึงแนวความคิดในการออกแบบกลไกการเอียงที่ใช้ภายในหุ่นยนต์ปลา ซึ่งมีการแสดงสมการคณิตศาสตร์และวิธีคิดทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้อง รวมไปถึงแสดงแนวทางการทดสอบรูปแบบการจัดวางตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์สำหรับกลไกการเอียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 กล่าวถึงการออกแบบในส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในหุ่นยนต์ปลา โดยได้แสดงขั้นตอน วิธีการออกแบบและผลลัพธ์จากการออกแบบ ทั้งในส่วกายภาพซึ่งเป็นโครงสร้างของหุ่นยนต์ปลา และในส่วนจินตภาพซึ่งเป็นลำดับขั้นในการทำงานของซอฟต์แวร์

บทที่ 7 กล่าวถึงการออกแบบการทดลอง วิธีการทดลอง และแสดงการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อค้นหาสมการคุณลักษณะของการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ในรูปแบบต่าง ๆ ที่เป็นไปได้สำหรับกลไกการเอียงในหุ่นยนต์ปลา ซึ่งมีการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองและผลลัพธ์ที่ได้จากสมการคุณลักษณะในรูปแบบตาราง รวมไปถึงการแสดงประสิทธิภาพของกลไกการเอียงที่ได้จากวิธีการควบคุมโดยใช้ฐานข้อมูลที่ได้จากผลการทดลอง

บทที่ 8 เป็นบทสุดท้ายในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ซึ่งเป็นการสรุปใจความสำคัญทั้งหมดของวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงแสดงข้อเสนอแนะและแนวทางการวิจัยต่อภายในอนาคต ซึ่งสามารถอ้างอิงค์ความรู้พื้นฐานจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้เพื่อแตกแขนงออกเป็นงานวิจัยเฉพาะทางที่หลากหลาย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

บทนี้เป็นการรวบรวมผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแนวคิดการสร้างหุ่นยนต์ใต้น้ำ หุ่นยนต์ปลา รวมไปถึงงานวิจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลต่อแนวความคิดทั้งทางตรงและทางอ้อมในการออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์ปลาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

2.1 หุ่นยนต์ใต้น้ำและกำเนิดหุ่นยนต์ปลา

การสร้างหุ่นยนต์ใต้น้ำไม่ใช่เรื่องใหม่ สิ่งประดิษฐ์เหล่านี้เริ่มเกิดขึ้นตั้งแต่ยุค 90's ในยุคนั้น นักวิทยาศาสตร์มีความต้องการที่จะสำรวจสิ่งแวดล้อมใต้น้ำ ทำให้ต้องอาศัยวิศวกรในการสร้างหุ่นยนต์เพื่อก้าวข้ามขีดจำกัดของมนุษย์ในการสำรวจ หุ่นยนต์ใต้น้ำทั้งหมดที่ถูกสร้างขึ้นในยุค 90's เป็นต้นมาถูกจัดประเภทให้เป็นยานพาหนะ เรียกว่า หุ่นยนต์ใต้น้ำอัตโนมัติไร้คนขับ หรือ Unmanned Undersea Vehicle (UUV) จากความสำเร็จของ UUV ทำให้ความต้องการใช้งานหุ่นยนต์ใต้น้ำของมนุษย์เพิ่มมากขึ้น ในภายหลังเทคโนโลยีการสร้างหุ่นยนต์ใต้น้ำจึงได้มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อรองรับความต้องการของมนุษย์ในการทำภารกิจใต้น้ำต่าง ๆ หุ่นยนต์ใต้น้ำถูกพัฒนาประสิทธิภาพให้รองรับกับสภาพแวดล้อมในการทำงานด้านต่าง ๆ เช่น การพัฒนาในด้านความเร็วขณะเคลื่อนที่ และการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง เป็นต้น จากหัวข้อในการพัฒนาดังกล่าว วิศวกรจึงมองหาวิธีการแก้ไขปัญหาเพื่อทำให้หุ่นยนต์ในอนาคตของพวกเขาสามารถพัฒนาประสิทธิภาพไปในทิศทางที่เขาต้องการ จากรูปแบบการเคลื่อนที่ที่ใช้การสับัดของครีบหางที่พบได้ในปลาตามธรรมชาติซึ่งมีความโดดเด่นและมีประสิทธิภาพสำหรับการเคลื่อนที่ใต้น้ำมากกว่าการขับเคลื่อนโดยใช้มอเตอร์แบบหมุน วิศวกรในยุคนั้นจึงให้ความสนใจและศึกษากลศาสตร์การเคลื่อนที่ของปลา และได้ให้กำเนิดหุ่นยนต์ใต้น้ำที่ใช้กลไกการเคลื่อนที่เลียนแบบการทำงานของครีบหางปลาตามธรรมชาติขึ้น

หุ่นยนต์ใต้น้ำตัวแรก ๆ ของโลกที่มีลักษณะคล้ายปลามีชื่อว่า RoboTuna ถูกสร้างขึ้นมาที่ MIT ในปี 1996 โดย Barrett และทีมงาน [3] พวกเขาออกแบบกลไกการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาให้ทำงานเลียนแบบการสับัดของครีบหางในปลาตามธรรมชาติ ผลงานการออกแบบของเขาทำให้ลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ใต้น้ำตัวนี้มีชีวิตชีวาและมีประสิทธิภาพ หลังจากงานวิจัยของเขาได้ถูกตีพิมพ์ จึงส่งผลให้รูปแบบการพัฒนาหุ่นยนต์ปลาที่ MIT หันมาให้ความสนใจกับการศึกษาคูณลักษณะการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำรอบหุ่นยนต์ โดยค้นหาวิธีการสับัดครีบหางของหุ่นยนต์ปลาที่ให้กำเนิดคุณลักษณะการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำโดยเทียบเคียงให้ใกล้เคียงกับปลาตามธรรมชาติมากที่สุด [4] [5] ในภายหลัง RoboTuna ยังกลายเป็นแรงบันดาลใจให้กับวิศวกรรุ่นถัดมาที่ทำการศึกษา

และวิจัยในแนวคิดหุ่นยนต์ใต้น้ำอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี 2002 Anderson และ Chhabra [6] ได้รับแรงบันดาลใจจาก RoboTuna จึงทำให้เขาสร้างหุ่นยนต์ปลาขึ้นมาใหม่ โดยเลียนแบบการเคลื่อนที่ของปลา Yellowfin Tuna หุ่นยนต์ปลาตัวใหม่นี้มีชื่อว่า Robotic Tuna ซึ่งในการพัฒนาได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจาก The Charles Stark Draper Laboratory. Robotic Tuna ถูกพัฒนาให้กลไกการสะบัดบริเวณครีบหางมีความโดดเด่นในด้านการว่ายน้ำที่มีชีวิตชีวาและเป็นธรรมชาติ กลไกการสะบัดถูกติดตั้งในหุ่นยนต์ปลาตั้งแต่บริเวณครึ่งหลังของหุ่นยนต์ไปจนถึงครีบหางที่เป็นรูปพระจันทร์เสี้ยว ซึ่งถูกออกแบบให้มีความยืดหยุ่นเฉพาะและสามารถโค้งงอเลียนแบบโคנהางของปลาทูน่าได้ กลไกการสะบัดทั้งหมดถูกควบคุมด้วยอุปกรณ์ไฮดรอลิก ครึ่งแรกของหุ่นยนต์ปลาตัวนี้หรือบริเวณส่วนหัวเป็นวัตถุแข็งเกร็ง ภายในในกลวงและบรรจุอุปกรณ์ที่สำคัญต่าง ๆ ได้แก่ แบตเตอรี่ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ บัลลัสต์และอุปกรณ์ขับเคลื่อนระบบไฮดรอลิก เป็นต้น งานวิจัยชิ้นนี้ถูกตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการซึ่งแสดงรูปภาพของ Robotic Tuna ทำให้เป็นที่ประจักษ์ว่า สามารถอกล่าตัวตั้งแต่ส่วนครึ่งหลังเพื่อกวาดน้ำและสร้างแรงผลักดันคล้ายกับลักษณะการว่ายน้ำของปลาตามธรรมชาติได้จริง

2.2 การแบ่งประเภทและรูปแบบการเคลื่อนที่ของปลา

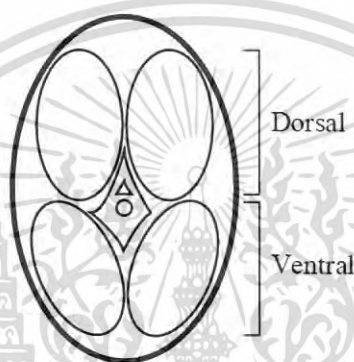
เมื่อกระแสดความนิยมในการสร้างหุ่นยนต์ปลาเพิ่มขึ้น นักวิทยาศาสตร์บางกลุ่มจึงหันมาศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของปลาและจำแนกรูปแบบการเคลื่อนที่ให้เป็นหมวดหมู่ ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้ได้กลายมาเป็นพื้นฐานที่สำคัญให้กับกลุ่มผู้สนใจ บทความที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ แสดงผลงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของปลา

Sir James Gray นักสัตวศาสตร์ชาวอังกฤษ เกิดความสงสัยในรูปแบบการเคลื่อนที่ของโลมา ซึ่งแตกต่างจากการเคลื่อนที่ของปลาชนิดอื่น โลมาเป็นสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่ใช้ครีบหางสะบัดขึ้นและลงใต้น้ำเมื่อต้องการเคลื่อนที่ จากรูปแบบการเคลื่อนที่ของโลมาและการสร้างความเร็วขณะว่ายน้ำที่น้ำตื้น เขาจึงได้วิจัยเพื่อหาเหตุผลสนับสนุนและตีพิมพ์ผลงานวิจัยในปี 1936 [7] งานวิจัยชิ้นนี้กล่าวถึงการสร้างแรงผลักดันจากกล้ามเนื้อของโลมา เพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ใต้น้ำได้ เขาค้นพบว่ากล้ามเนื้อที่ยึดและทำหน้าที่สะบัดครีบหางของโลมานั้น เป็นกล้ามเนื้อกลุ่มเดียวกับปลาชนิดอื่นที่มีรูปแบบการสะบัดครีบหางไปทางซ้ายและทางขวาขณะเคลื่อนที่ กลุ่มกล้ามเนื้อที่ใช้สร้างแรงเหล่านี้มีชื่อว่า Dorsal และ Ventral แสดงในรูปที่ 2.1

กลุ่มกล้ามเนื้อ Dorsal และ Ventral มีตำแหน่งพาดผ่านลำตัวในแนวยาวของปลาทั้งหมดไปจนถึงจุดยึดบริเวณโคנהาง การเคลื่อนที่ของปลาโดยทั่วไปที่มีการสะบัดครีบหางไปทางซ้ายและทางขวา กล้ามเนื้อ Dorsal และ Ventral ที่ติดกับแนวกระดูกสันหลังซีกซ้ายและซีกขวา จะทำงานสัมพันธ์กันโดยการยืดและหดสลับกันเป็นจังหวะอย่างต่อเนื่อง สำหรับการเคลื่อนที่ของโลมาที่ซึ่งครีบหางสะบัดขึ้นและลงขณะเคลื่อนที่ รูปแบบการทำงานของกล้ามเนื้อ Dorsal และ Ventral ทั้งชุดในซีกบนและซีกล่างของแนวกระดูกสันหลังจะยืดและหดอย่างสัมพันธ์กันเช่นเดียวกัน ขณะที่ปลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่ในน้ำ กลุ่มกล้ามเนื้อเหล่านี้จะทำงานอย่างต่อเนื่องและเป็นจังหวะ ทำให้การเคลื่อนที่ของ ครีบหางปลา มีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์ กล้ามเนื้อเล็ก ๆ เหล่านี้เมื่ออยู่รวมกันเป็นมัดสามารถช่วยกัน ออกแรงเพื่อสร้างแรงต้านกับน้ำในขณะที่เคลื่อนที่ได้ ถึงแม้ว่าการสับตัดครีบหางในการเคลื่อนที่ของ ปลาจะเกิดจากกล้ามเนื้อกลุ่มเดียวกัน แต่เมื่อสังเกตลักษณะการว่ายน้ำของปลาส่วนใหญ่ที่ใช้ กล้ามเนื้อกลุ่ม Dorsal และ Ventral ในการเคลื่อนที่เป็นหลักกลับพบว่า ลักษณะการเคลื่อนที่ของ ปลาในแต่ละสายพันธุ์กลับมีความแตกต่างกันออกไปและมีเอกลักษณ์เฉพาะอย่างชัดเจน จากความ แตกต่างที่มีอยู่ จึงมีการสร้างเกณฑ์เพื่อจำแนกลักษณะการเคลื่อนที่ของปลาที่พบเห็นในแต่ละชนิด



รูปที่ 2.1 ภาพจำลองแสดงกลุ่มกล้ามเนื้อ Dorsal และ Ventral

ในปี 1984 Webb [8] เป็นนักวิจัยรายแรก ๆ ที่จำแนกรูปแบบการเคลื่อนที่ของปลา เขา เริ่มต้นโดยการสังเกตวิธีการว่ายน้ำของปลาแต่ละสายพันธุ์ซึ่งมีลักษณะนิสัยและวิถีชีวิตแตกต่างกัน ออกไป จากงานวิจัยของเขาพบว่า ปลาแต่ละสายพันธุ์มีความโดดเด่นเฉพาะต่อรูปแบบการเคลื่อนที่ ที่แตกต่างกันออกไป ความสามารถเฉพาะที่ Webb ใช้จำแนกเหล่านั้น ได้แก่ ความสามารถในการทำ ความเร็วพบใน Pike ความสามารถในการหลบหลีกสิ่งกีดขวางพบใน Banded Butterfly Fish และ ความสามารถในประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ในน้ำพบใน Tuna เป็นต้น อย่างไรก็ตามปลาบางสายพันธุ์ ก็สามารถที่จะแสดงรูปแบบการว่ายน้ำที่กล่าวมาได้ทั้งหมด แต่ไม่มีความโดดเด่นเป็นพิเศษต่อรูปแบบ การเคลื่อนที่เฉพาะในลักษณะใดลักษณะหนึ่ง พบได้ใน Surfperch เป็นต้น นอกจากลักษณะเฉพาะ ในการว่ายน้ำของปลาทั้ง 3 แบบ Webb ยังได้นำเสนอเกณฑ์การจำแนกความโดดเด่นจากลักษณะใน การเคลื่อนที่ โดยพิจารณาจากความกว้างของคาบเวลาของคลื่นรูปไซน์ที่ปรากฏบนอวัยวะของปลา บริเวณลำตัวและครีบต่าง ๆ ว่า คาบเวลาที่ปรากฏถูกคลื่นนั้นเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องหรือเกิดขึ้นเพียงแค่ ช่วงระยะเวลาสั้น ๆ ซึ่งนอกจากการใช้คาบเวลาที่ปรากฏของรูปคลื่นเป็นเกณฑ์แล้ว Webb ยังใช้ ตำแหน่งที่ปรากฏถูกคลื่น ณ อวัยวะเฉพาะ เช่น บริเวณลำตัวและครีบหาง ครีบที่มีลักษณะยาวและ ครีบที่มีลักษณะสั้น เป็นตัวบ่งชี้เพิ่มเติมอีกด้วย

ในปัจจุบันเกณฑ์ในการจำแนกรูปแบบการเคลื่อนที่ของปลาได้เปลี่ยนไป เนื่องจากงานวิจัย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ของ M. Sfakiotakis [9] ได้ศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของปลาจากอวัยวะที่ใช้ในการสร้างแรงขณะมี ไม่ว่างครีบใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเคลื่อนที่ โดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพบนแผ่นฟิล์มเพื่อสังเกตรูปแบบการเคลื่อนที่ของปลาที่เกิดขึ้น โดยละเอียด ถึงแม้ว่าเกณฑ์ที่ใช้ในการแบ่งประเภทการเคลื่อนที่จะเปลี่ยนไป แต่ผลงานของ M. Sfakiotakis ก็ยังมีพื้นฐานมาจากงานวิจัยของ Webb [8] ซึ่งได้แบ่งลักษณะการเคลื่อนที่ของปลา อย่างง่ายไว้ ความโดดเด่นในรูปแบบการเคลื่อนที่และการปรากฏของรูปคลื่นไซน์อธิบายไว้ในบทที่ 3 หน้าที่ 16 ซึ่งบรรยายถึงสัจฐานวิทยาของปลาและลักษณะการเคลื่อนที่ของปลา โดยรวบรวมข้อมูล จากแหล่งต่าง ๆ และอ้างอิงวิธีการจำแนกลักษณะการเคลื่อนที่ของปลาจากงานวิจัยของ M. Sfakiotakis เป็นหลัก

2.3 หุ่นยนต์ปลาและกลไกเลียนแบบการสับัดหางของปลา

ในปี 1975 หนังสือ Flying and Swimming in Nature [10] ได้ตีพิมพ์โมเดลการเคลื่อนที่ ของปลา ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในชื่อว่า Lighthill's Swimming Mode of Slender Fish โมเดล คณิตศาสตร์ของ Lighthill [11] ได้กลายมาเป็นพื้นฐานสำหรับการควบคุมกลไกการเคลื่อนที่ของ หุ่นยนต์ปลาที่อาศัยรูปแบบการเคลื่อนที่แบบ BCF สมการของ Lighthill แสดงดังต่อไปนี้

$$Y(t, f) = (C_1 X + C_2 X^2) \sin(2\pi X/T + 2\pi ft) \quad (2.1)$$

โดย	$Y(t, f)$	คือ ระยะกระจัดที่ครีบกางสับัดออกจากแนวแกนอ้างอิง ณ เวลา t
	C_1, C_2	คือ สัมประสิทธิ์ของสมการเส้นตรงและสมการกำลังสองในแอมพลิจูดของ คลื่นรูปไซน์
	T	คือ คาบเวลาของช่วงความยาวคลื่น
	f	คือ ความถี่ในการสับัดของรูปคลื่นไซน์

เมื่อพิจารณาสมการที่ (2.1) อย่างละเอียด พบว่าที่จริงแล้วลูกคลื่น $Y(t, f)$ ที่ปลาสร้างขึ้นโดย วิธีการยัดและหดกล้ามเนื้อบริเวณข้างลำตัว มีลักษณะเป็นคลื่นรูปไซน์ที่มีคาบเวลาของช่วงความยาว คลื่น T และความถี่ในการสับัด f แตกต่างกันไปตามปลาแต่ละสายพันธุ์ สัมประสิทธิ์ C_1, C_2 เปรียบเสมือนกับความสามารถในการหดและยัดกล้ามเนื้อเพื่อขอลำตัวเป็นรูปตัว S หรือถ้ามองให้การ เคลื่อนที่ของปลาเป็นลูกคลื่น สัมประสิทธิ์ C_1, C_2 จึงเป็นขนาดของแอมพลิจูดในคลื่นรูปไซน์ ตัวอย่าง การเคลื่อนที่ของสัตว์ที่สมการของ Lighthill ครอบคลุมไปถึงและสามารถเห็นแอมพลิจูดในการ เคลื่อนที่ได้อย่างชัดเจน ได้แก่ การเลื้อยของงูและการว่ายน้ำของปลาไหล เป็นต้น จากโมเดล คณิตศาสตร์ของ Lighthill จึงมีนักวิจัยหลายกลุ่มนำโมเดลคณิตศาสตร์มาตีความ และออกแบบกลไก การขับเคลื่อนที่ใช้ในหุ่นยนต์ปลา ซึ่งหุ่นยนต์ปลาที่พวกเขาออกแบบได้นำสมการของ Lighthill มาใช้

เป็นหลักการเพื่อควบคุมกลไกการเคลื่อนที่ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 หุ่นยนต์ปลาของนิลาส

งานวิจัยชิ้นต่อไปนี้เป็นงานวิจัยที่ผู้เขียนใช้เป็นต้นแบบในการทำวิทยานิพนธ์ ซึ่งมีอิทธิพลต่อการออกแบบหุ่นยนต์ปลาทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุม ในปี 2011 P. Nilas [1] ได้ศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของปลาแบบ Body and/or Caudal Fin (BCF) และโมเดลสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาขึ้นมา รวมไปถึงสร้างหุ่นยนต์ปลาขึ้นเพื่อพิสูจน์โมเดลคณิตศาสตร์ที่เขาได้สร้างขึ้น ผลที่ได้ทำให้หุ่นยนต์ปลาที่เขาได้สร้างขึ้น มีความพิเศษที่จะสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบการเคลื่อนที่ได้อัตโนมัติตามสภาพแวดล้อมในน้ำ งานวิจัยชิ้นนี้มีรายละเอียดและกระบวนการการศึกษาที่ได้อธิบายไว้ในผลงานตีพิมพ์ ดังต่อไปนี้

- ศึกษาการเกิดแรงและทิศทางของแรงที่เกิดจากกล้ามเนื้อของปลาขณะเคลื่อนที่ในน้ำ และศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ของปลาในโหมด BCF ทั้ง 4 แบบ ได้แก่ Anguilliform, Subcarangiform, Carangiform และ Thunniform
- สังเกตลักษณะการสับทิศทางของปลาคาร์ฟ และระบุตำแหน่งของแนวกระดูกสันหลัง ซึ่งทำให้พบว่า เมื่อปลาคาร์ฟเคลื่อนที่จะสับทิศทางเป็นรูปร่างคล้ายตัวอักษรรูปตัว “C”
- แบ่งความยาวลำตัวตามแนวกระดูกสันหลังของปลาคาร์ฟออกเป็น 4 ส่วน และสร้างโมดูลจำนวน 4 โมดูลซึ่งเปรียบเสมือนแนวกระดูกสันหลังของปลา จากโมดูลที่สร้างขึ้น จึงทำให้สามารถที่จะจำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของแต่ละโมดูล ให้เป็นวัตถุแข็งเกร็งไม่เคลื่อนที่หรือสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ รูปแบบการกำหนดการเคลื่อนที่ของโมดูลทั้งหมด จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับรูปแบบการเคลื่อนที่ของปลาในแบบที่ต้องการ ได้แก่ การเคลื่อนที่แบบ Subcarangiform, Carangiform และ Thunniform เป็นต้น
- ออกแบบโมเดลคณิตศาสตร์สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของโมดูลที่เขาได้สร้างขึ้น โดยอาศัยพื้นฐานจากสมการของ Lighthill โมเดลคณิตศาสตร์ของ P. Nilas ทำให้ทราบตำแหน่งของโมดูลแต่ละโมดูลในระนาบ X-Y เมื่อเกิดการสับทิศทางของข้อต่อ ซึ่งในที่นี้ใช้เซอร์โวมอเตอร์ในการขับเคลื่อน รวมไปถึงสามารถที่จะกำหนดแอมพลิจูดการสับทิศทางหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปข้างหน้าหรือเลี้ยวหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้
- สร้างหุ่นยนต์ปลาโดยใช้โมดูลจำนวน 4 โมดูลที่ทำมาจากกล่องอะคริลิก ติดตั้งครีบอก ครีบก้น และครีบท้องเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ รวมไปถึงติดตั้งอินฟราเรดเซนเซอร์เพื่อตรวจจับสิ่งกีดขวาง แน่นอนว่าในการประกอบหุ่นยนต์ปลาขึ้นมาจะต้องมีระบบกันน้ำเพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ออกแบบซอฟต์แวร์ควบคุมหุ่นยนต์ปลาโดยใช้ระบบ Spreading Activation Network (SAN) [12] เพื่อให้หุ่นยนต์ปลาปรับเปลี่ยนรูปแบบการเคลื่อนที่ตามสภาวะแวดล้อมที่ต้องการและเป็นไปอย่างอัตโนมัติ รูปแบบการเคลื่อนที่ที่หุ่นยนต์ปลาของ P. Nilas สามารถปรับเปลี่ยนได้มีดังต่อไปนี้ การเคลื่อนที่แบบ Subcarangiform, Carangiform และ Thunniform
- เขียนซอฟต์แวร์บนคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลา ซึ่งมีประโยชน์ในการศึกษารูปแบบการเคลื่อนที่ที่จะเกิดขึ้นกับหุ่นยนต์ปลาเมื่อมีการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ภายในโมเดลคณิตศาสตร์ที่เขาได้ออกแบบขึ้น
- ทำการทดสอบสมรรถภาพของหุ่นยนต์ปลาเพื่อทราบวิธีการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่เขาสร้างขึ้น โดยออกแบบการทดลองให้หุ่นยนต์ปลาเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงและเป็นวงกลม และทำการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์เพื่อหาขีดจำกัดของหุ่นยนต์ปลาขณะทำการเคลื่อนที่ หลังจากทราบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแล้ว จึงนำค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นมาใช้ควบคุมรูปแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาให้เป็นไปอย่างอัตโนมัติ

จากกระบวนการที่กล่าวมาทั้งหมด ตั้งแต่แนวคิดในการออกแบบไปจนถึงการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ ทำให้ทราบว่าสมการของ P. Nilas สามารถที่จะนำมาดัดแปลงให้เข้ากับหุ่นยนต์ปลาใด ๆ ก็ตามที่มีการเคลื่อนที่ในโหมด BCF ได้ ดังนั้นผู้เขียนจึงนำวิธีคิดและรูปแบบการทำงานมาประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์ปลาในส่วนของกลไกการสะบัดสำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้

2.5 การเลียนแบบธรรมชาติของกลไกภายในหุ่นยนต์ปลา

บทความในส่วนนี้จะบรรยายถึงงานวิจัยอื่น ๆ ที่มีจุดเด่นในการนำอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่สามารถหาได้ทั่วไปมาออกแบบ และประยุกต์สร้างอุปกรณ์เฉพาะ เพื่อเลียนแบบการทำงานตามอวัยวะส่วนต่าง ๆ ของปลา งานวิจัยเหล่านี้เป็นตัวอย่างที่ดีสำหรับการออกแบบหุ่นยนต์และการออกแบบการทดลองในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

2.5.1 ครีบอก

ในปี 1996 N. Kato และทีมงาน [13] ได้ศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของครีบอก ซึ่งผลงานวิจัยของเขามีการจัดตั้งการทดลองขึ้นมาหลายครั้งในแต่ละช่วงของการศึกษาวิจัย โดยเริ่มตั้งแต่การทดลองเพื่อค้นหารูปแบบการทำงานของครีบอกของปลาตามธรรมชาติ ไปจนถึงการติดตั้งกลไกการทำงานของครีบอกกับหุ่นยนต์ปลา ปลาที่เขาใช้ในการศึกษาคั้งนี้ คือ Black Bass เพราะปลาชนิดนี้มีครีบอกขนาดใหญ่ ทำให้สามารถสังเกตการทำงานในน้ำได้โดยง่าย ในการศึกษาการทำงานของครีบอก เขาได้จัดเตรียมตู้ปลาขึ้นมา 2 แบบ ได้แก่ ตู้ปลาทรงยาวสำหรับการเคลื่อนที่ในแนวตรง ทั้งไปข้างหน้าและถอยหลัง และตู้ปลาทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสเพื่อบังคับให้ปลาเลี้ยว ตู้ปลาทั้งสองชนิดมีกล้องวิดีโอเพื่อบันทึกภาพของปลาขณะเคลื่อนที่จากมุมด้านข้างและมุมสูง ภาพที่ได้จากกล้อง

วิถีโอถูกนำมาวิเคราะห์ เพื่อหาลักษณะการทำงานของครีบออกในขณะที่มีการเคลื่อนที่ไปด้านหน้า ถอยหลังและขณะทำการเลี้ยว จากภาพที่บันทึกได้ ทำให้ทราบว่าครีบออกมีการทำงาน 2 แบบดังนี้

- Lead-Lag Motion เมื่อมองจากมุมสูง ครีบออกจะสลับเข้าและออกจากลำตัว ด้านข้างของปลา ทำให้สามารถดึงน้ำบริเวณข้างลำตัวไปด้านหน้าหรือด้านหลังได้
- Feathering Motion เมื่อมองจากมุมด้านข้าง กล้ามเนื้อที่ยึดครีบออกไว้จะควบคุมให้ ครีบออกหมุนอยู่กับที่ โดยครีบออกจะหมุนไปด้านหน้าหรือด้านหลัง

การทำงานของครีบออกทั้งสองแบบได้ถูกวิเคราะห์ให้สามารถมองเห็นภาพอย่างง่ายโดยใช้การ จำลองลักษณะการเคลื่อนที่ของครีบออกกับระนาบของตัวปลา ซึ่งภาพที่ได้จากกล้องวิดีโอทำให้เขา สามารถที่จะหามุมที่เกิดขึ้นขณะครีบออกทำงานเมื่อปลาวายน้ำในรูปแบบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ การ เคลื่อนที่ไปข้างหน้า การเคลื่อนที่ไปข้างหลัง และการเลี้ยวขวา ผลการทดลองที่ได้แสดงเป็นกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและมุมของครีบออกขณะเคลื่อนที่

เมื่อได้ศึกษาการทำงานของครีบออกอย่างเป็นรูปธรรมแล้ว เขาจึงออกแบบกลไกการทำงานของ ครีบออกขึ้นมาโดยใช้เซอร์โวมอเตอร์จำนวนสองตัวมาวางซ้อนกัน ทำให้ครีบออกที่เขาสร้างขึ้น สามารถหมุนได้รอบแกน X และแกน Z วัสดุที่เขาใช้ในการสร้างครีบออก มีชื่อว่า F.R.P. ซึ่งถูก ออกแบบให้มีขนาดใหญ่กว่าครีบของปลา Black Bass ถึง 6.4 เท่า และมีขนาดความหนาแตกต่างกันไป งานวิจัยของเขาแสดงผลการทดสอบสมรรถภาพกลไกการทำงานของครีบออกที่เขาได้สร้างขึ้น ก่อนที่จะนำไปติดตั้งในหุ่นยนต์ปลา หลังจากทำการทดลองเฉพาะส่วนกลไกที่ครีบออกเสร็จสิ้น เขาจึง สร้างหุ่นยนต์ปลาขึ้นมาเพื่อทดสอบลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ หุ่นยนต์ปลาที่เขาสร้างขึ้นนี้ ไม่มีกลไกการสลับที่ส่วนหาง จึงเปรียบได้เสมือนกับวัตถุแข็งเกร็งที่มีรูปทรงคล้ายปลา ซึ่งถูกติดตั้ง กลไกการทำงานของครีบออกไว้ภายในเท่านั้น ในการทดลองเขาได้จัดให้หุ่นยนต์ปลาอยู่ในแหล่ง บรรจุน้ำและตั้งกล้องวิดีโอบันทึกภาพจากมุมสูง ผลการทดลองที่ได้แสดงวิถีการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ปลาเมื่อทำการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงและทำการเลี้ยว สำหรับการเลี้ยว ผลการทดลองได้แสดงให้เห็น ว่ากลไกครีบออกสามารถทำให้วิถีการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาเป็นเส้นโค้งได้เมื่อใช้เพียงครีบออกในการ ขับเคลื่อน

2.5.2 กระเพาะปลา

ในปี 2011 Le Minh Thuan และทีมงาน [14] ได้สร้างหุ่นยนต์ปลาขึ้น โดยความพิเศษของ หุ่นยนต์ปลาตัวนี้อยู่ที่ความสามารถในการเปลี่ยนระดับความลึกใต้น้ำ สิ่งที่ทำให้หุ่นยนต์ปลาของเขามี ความพิเศษก็คือกลไกที่ถูกติดตั้งเอาไว้ภายใน งานวิจัยชิ้นนี้แสดงการออกแบบอุปกรณ์ที่เรียกว่า กระเพาะปลาจำลอง โดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงปริมาตร กลไกที่เขาสร้างขึ้นสามารถกักเก็บและสูบ น้ำที่ถูกกักเก็บไว้ภายในออกสู่ภายนอกได้ เมื่อมองภาพรวมในการออกแบบหุ่นยนต์ปลาจะพบว่า กลไกที่กล่าวมานี้ถูกติดตั้งไว้บริเวณส่วนหน้าของหุ่นยนต์พร้อมอุปกรณ์อื่น ๆ ได้แก่ อินฟราเรด เซนเซอร์ ไมโครติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย ไมโครคอนโทรลเลอร์และแบตเตอรี่ สำหรับส่วนครึ่งหลัง

ของหุ่นยนต์ปลาซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้หุ่นยนต์ปลาเคลื่อนที่ได้ทำการติดตั้งกลไกการสะบัด ซึ่งใช้เซอร์โวมอเตอร์จำนวน 3 ตัวพร้อมโครงยึด เซอร์โวมอเตอร์เหล่านี้ทำหน้าที่เป็นข้อต่อและสะบัดเคลื่อนไหวคล้ายปลาจริง อย่างไรก็ตามเนื่องจากงานวิจัยชิ้นนี้เน้นไปที่การออกแบบกระเพาะปลาจำลอง ผลงานวิจัยจึงได้กล่าวถึงเฉพาะการออกแบบฮาร์ดแวร์และคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับกระเพาะปลาจำลองเป็นหลัก ไม่ได้เน้นไปที่รูปแบบการเคลื่อนที่ของกลไกการสะบัดบริเวณส่วนลำตัวและส่วนหาง

กลไกของกระเพาะปลาจำลองเลือกใช้วัสดุที่สามารถหาได้ในท้องตลาดมาออกแบบและประยุกต์ให้เกิดรูปแบบการทำงานที่ต้องการ ในที่นี้ Le Minh Thuan และทีมงานได้ใช้กระบอกฉีดยา สกรู ชุดเกียร์และเซอร์โวมอเตอร์มาประกอบกัน ในการทำการติดตั้ง ปลายกระบอกฉีดยาจะสัมผัสกับน้ำภายนอกหุ่นยนต์ตลอด ภายในกระบอกฉีดยามีจุกยางที่เมื่ออยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น ณ ปลายกระบอกฉีดยา จุกยางจะสามารถกันน้ำไม่ให้เข้าไปภายในหุ่นยนต์ได้ เมื่อใดก็ตามที่จุกยางเกิดการเคลื่อนที่ จะเกิดสุญญากาศภายในกระบอกฉีดยาทำให้น้ำจากภายนอกไหลเข้าไปแทนที่จนเต็ม เพื่อที่จะทำให้อากาศเคลื่อนที่ภายในกระบอกฉีดยาได้อย่างอัตโนมัติ สกรู ชุดเกียร์ และเซอร์โวมอเตอร์จึงถูกนำมาใช้ในการออกแบบกระเพาะปลาจำลองครั้งนี้ ปลายของสกรูด้านหนึ่งทำหน้าที่เป็นตัวยึดจุกยางเอาไว้ ส่วนอีกด้านหนึ่งถูกติดตั้งไว้กับชุดเกียร์ เมื่อเซอร์โวมอเตอร์หมุน สกรูจะหมุนผ่านชุดเกียร์ไปด้วย ทำให้อากาศเคลื่อนที่เข้าและออกได้อย่างอัตโนมัติ ปริมาตรของน้ำภายในกระบอกฉีดยาแปรผันเป็นเส้นตรงกับจำนวนรอบการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์ เนื่องจากกระบวนการสูบน้ำเข้าและออกจากกระบอกฉีดยา มีแรงดันน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องกับ Le Minh Thuan และทีมงานจึงต้องหาสมการมาอธิบายแรงที่เกิดขึ้นกับอุปกรณ์ของเขาในขณะที่จุกยางเคลื่อนที่เข้าและออก สมการที่ได้นั้นถูกนำไปใช้ในการคำนวณแรงบิด (T) เพื่อเลือกใช้เซอร์โวมอเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของกระเพาะปลาจำลอง การปรับเปลี่ยนปริมาตรภายในหุ่นยนต์ปลานั้นเกี่ยวข้องกับทฤษฎีทางฟิสิกส์เรื่องแรงลอยตัวและปริมาตรโดยตรง แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$B = \rho v g \quad (2.2)$$

จากสมการที่ (2.2) ตัวแปรที่กระเพาะปลาจำลองได้ทำการเปลี่ยนแปลง คือ ปริมาตร v ซึ่งส่งผลโดยตรงกับแรงลอยตัวในน้ำ B ที่ทำหน้าที่พยุงน้ำหนักของหุ่นยนต์ทั้งหมดเอาไว้ เมื่อใดก็ตามที่ปริมาตรของน้ำในกระบอกฉีดยาเต็ม หุ่นยนต์ปลาจะจมลง ในทางตรงกันข้ามเมื่อกระบอกฉีดยาว่างเปล่า หุ่นยนต์ปลาจะลอยขึ้นมาบนผิวน้ำ ดังนั้นผลงานวิจัยที่ Le Minh Thuan และทีมงานได้นำเสนอจึงกล่าวถึงสมการคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับจลศาสตร์การเคลื่อนที่ของวัตถุในน้ำ ประกอบกับการทดลอง เพื่อแสดงเวลาในการเปลี่ยนระดับความลึกของหุ่นยนต์ปลา โดยใช้กลไกของกระเพาะปลาจำลองเปรียบเทียบกับ การเปลี่ยนแปลงขนาดของน้ำหนักถ่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยเหล่านี้ แสดงแนวความคิดในการออกแบบกลไกเลียนแบบหน้าที่ของอวัยวะในปลา ตามธรรมชาติ สิ่งเหล่านี้แสดงถึงความสามารถของมนุษย์ในเรื่องความคิดสร้างสรรค์และการประยุกต์ พลิกแพลงจากสิ่งของที่มีอยู่ และนำมาประกอบกันให้เกิดกลไกที่มีคุณสมบัติการทำงานตามที่ต้องการ กลไกเหล่านี้ได้รับการยืนยันความสามารถจากผลการทดลองและคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง

2.6 หุ่นยนต์ทรงกลม

ความปรารถนาที่จะทำให้หุ่นยนต์ปลาเคลื่อนที่ได้ในปริภูมิสามมิติกลายมาเป็นส่วนสำคัญต่อการตัดสินใจตั้งแต่ในกระบวนการการออกแบบไปจนถึงกระบวนการสร้างให้หุ่นยนต์ปลาเป็นรูปเป็นร่าง เนื่องจากหุ่นยนต์ปลาที่ถูกสร้างขึ้นมาในอดีต ไม่เคยมีหุ่นยนต์ปลาตัวใดที่สามารถเคลื่อนที่แบบสามมิติภายในน้ำได้ จากเหตุผลที่กล่าวมาทำให้การออกแบบหุ่นยนต์ปลาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ต้องอาศัยแนวความคิดในการออกแบบและพัฒนาจากผู้ทำหุ่นยนต์ในรูปแบบอื่น ๆ

จากแนวคิดของเหล่าวิศวกรผู้ออกแบบสร้างสรรค์หุ่นยนต์ทรงกลม ที่ต้องการประดิษฐ์ หุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ได้ทุกทิศทางอย่างอัตโนมัติจากกลไกภายใน ทำให้วิศวกรผู้สร้างหุ่นยนต์ทรงกลม คิดและค้นหาวิธีการต่าง ๆ ที่จะทำให้หุ่นยนต์เกิดการเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่โดยใช้แรงเหวี่ยงจาก น้ำหนักภายในนั้น เป็นหนึ่งในแนวทางที่มีอยู่หลากหลายที่วิศวกรผู้สร้างหุ่นยนต์ทรงกลมได้คิดค้นขึ้น และทดสอบโดยการพัฒนากลไกการขับเคลื่อนภายใน การขับเคลื่อนหุ่นยนต์ทรงกลมโดยใช้การสร้าง แรงเหวี่ยงนั้น ถูกนำมาพิจารณาและใช้เป็นแนวทางในการออกแบบกลไกการเอียงของหุ่นยนต์ปลาใน วิทยานิพนธ์เล่มนี้

ในปี 2014 S.-S. Ahn และ Y.-J. Lee [15] ได้นำเสนอวิธีการใหม่ในการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ทรงกลม จากหุ่นยนต์ทรงกลมในอดีตที่ใช้น้ำหนักเพียงจุดเดียวในการสร้างแรงเหวี่ยงเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ มาเป็นหุ่นยนต์ทรงกลมที่ใช้น้ำหนักจำนวนสองจุด พร้อมกลไกควบคุม การเปลี่ยนตำแหน่งของน้ำหนักซึ่งบังคับโดยมอเตอร์ การพัฒนาที่เกิดขึ้นทำให้ข้อจำกัดในเรื่องวิธีการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ทรงกลมได้รับการแก้ไขให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น ในสมัยก่อนการใช้น้ำหนักเพียงจุดเดียวในหุ่นยนต์ทรงกลม ทำให้วิธีการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เกิดขึ้นเพียงระนาบเดียวเท่านั้น ซึ่งก็คือ การเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและการเคลื่อนที่ถอยหลัง แต่ระบบที่ S.-S. Ahn และ Y.-J. Lee ได้นำเสนอ ในปัจจุบัน ทำให้หุ่นยนต์ทรงกลมสามารถที่จะเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ข้างหลัง และเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ได้ทันทีเมื่อต้องการเลี้ยวซ้ายหรือเลี้ยวขวา ขั้นตอนในการออกแบบหุ่นยนต์ทรงกลม เริ่มจากการใช้ซอฟต์แวร์ออกแบบหุ่นยนต์และจัดวางอุปกรณ์ในคอมพิวเตอร์ ภายในหุ่นยนต์ถูกออกแบบให้มี เฟรมทรงกลม เพื่อให้มอเตอร์เกาและเคลื่อนที่อยู่ในแนวเฟรมนั้น เมื่อมอเตอร์เคลื่อนที่ จะพาน้ำหนักถ่วงให้ย้ายตำแหน่ง เฟรมทรงกลมถูกออกแบบมาให้น้ำหนักถ่วงเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระทั้งในแนวแกน X และแนวแกน Y ซึ่งการหมุนของมอเตอร์ทั้งหมดถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ตำแหน่งของหุ่นยนต์ทรงกลมขณะที่มีการเคลื่อนที่ทราบได้จากเซนเซอร์ AHRS แต่ตำแหน่งของ

น้ำหนักถ่วงทั้งสองจุดจะทราบได้จากเอ็นโค้ดเดอร์ตรวจวัดตำแหน่งที่มอเตอร์และเคาเตอร์ ถึงแม้ไมโครคอนโทรลเลอร์จะควบคุมการทำงานทั้งหมดของหุ่นยนต์ แต่ก็ไม่สามารถที่จะสั่งมอเตอร์ให้หมุนได้โดยตรง เนื่องจากกระแสไม่เพียงพอ ดังนั้นสัญญาณที่ออกจากไมโครคอนโทรลเลอร์จะผ่านเข้าชุดมอเตอร์ไครฟ์ก่อนที่จะสั่งให้มอเตอร์หมุน เพื่อป้องกันความปลอดภัยให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ไฟเลี้ยงต่ำกว่ามอเตอร์และป้องกันกระแสไหลย้อนจากมอเตอร์อีกด้วย การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อธิบายโดยใช้สมการคณิตศาสตร์ซึ่งอยู่บนพื้นฐานกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันและ Lagrange Method ตัวหุ่นยนต์ใช้ PID ในการควบคุมซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมหาได้จากการจำลองบนโปรแกรม MATLAB ในตอนท้ายของผลงานที่ถูกต้องพิมพ์ ได้แสดงรูปภาพหุ่นยนต์ทรงกลมของ S.-S. Ahn และ Y.-J. Lee ขณะทำการเลี้ยวและเคลื่อนที่เป็นวงกลม จึงเป็นที่ประจักษ์ว่า กลไกการเคลื่อนที่ภายในแบบใช้น้ำหนักถ่วงสองตำแหน่งทำให้หุ่นยนต์ทรงกลมมีวิธีการเคลื่อนที่ตรงตามคุณสมบัติที่กล่าวไปในตอนต้น

จากแนวความคิดในการสร้างแรงเหวี่ยงที่ใช้กับหุ่นยนต์ทรงกลม ทำให้กลไกการเอียงของหุ่นยนต์ปลาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ถูกออกแบบให้ใช้น้ำหนักถ่วงประกอบกับเซอร์โวมอเตอร์ที่จะทำให้จุดศูนย์ถ่วงเปลี่ยนตำแหน่งเช่นเดียวกันกับหุ่นยนต์ทรงกลมข้างต้น

2.7 สรุป

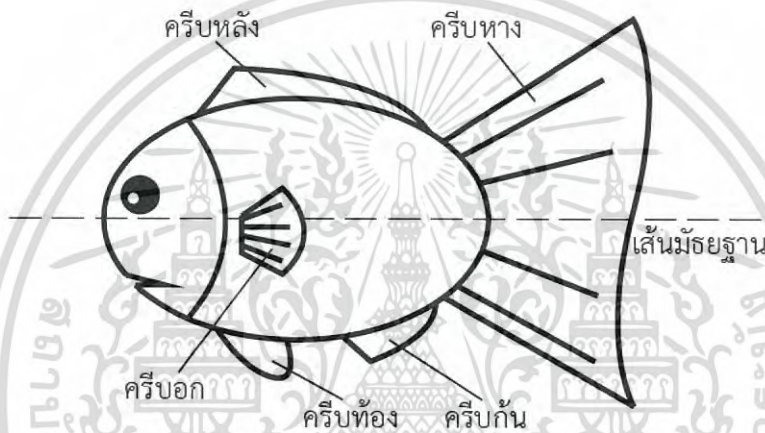
บทนี้ได้เรียบเรียงภาพรวมของงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยแสดงถึงประวัติศาสตร์ของหุ่นยนต์ใต้น้ำและการกำเนิดหุ่นยนต์ปลา การแบ่งประเภทของการเคลื่อนที่ในปลาตามธรรมชาติ โมเดลคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายรูปแบบการเคลื่อนที่ของปลา หุ่นยนต์ปลาของนิลาศที่ใช้โมเดลคณิตศาสตร์ของ Lighthill มาควบคุมการเคลื่อนที่ การสร้างกลไกเลียนแบบการทำงานของอวัยวะต่าง ๆ จากปลาธรรมชาติและแนวความคิดในการออกแบบกลไกการเอียงของหุ่นยนต์ปลาจากหุ่นยนต์ทรงกลม ทุกหัวข้อที่กล่าวมาข้างต้นได้กลายมาเป็นพื้นฐานให้กับการออกแบบหุ่นยนต์ปลาและกลไกการเอียงในวิทยานิพนธ์เล่มนี้

บทที่ 3

สัณฐานวิทยาและกลศาสตร์การเคลื่อนที่ของปลา

การศึกษาสัณฐานวิทยาของปลาเป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้สามารถเข้าใจสาเหตุการวิวัฒนาการและกลศาสตร์การเคลื่อนที่ในน้ำของปลา ซึ่งจะถูกใช้อ้างอิงในการบรรยายไปตลอด

3.1 ชนิดและหน้าที่ของครีบปลา



รูปที่ 3.1 สัณฐานวิทยาของปลา

ครีบปลาเป็นอวัยวะสำคัญที่ปลาใช้ในการเคลื่อนที่ที่เปรียบได้เสมือนกับแขนและขาของมนุษย์ ซึ่งในการแบ่งประเภทของครีบปลานั้น จะใช้ความยาวของครีบเทียบกับความยาวของลำตัวปลาทั้งหมด จึงสามารถจำแนกครีบปลาได้เป็นครีบแบบสั้นและครีบแบบยาว โดยถ้าพิจารณาอย่างละเอียดแล้วจะพบว่าครีบปลาอยู่ในตำแหน่งตั้งฉากหรือขนานไปกับทิศทางการไหลของน้ำ ซึ่งส่งผลโดยตรงกับการกำหนดทิศทางในการเคลื่อนที่ โดยถ้าจำแนกลักษณะทางกายภาพของครีบตามที่มีมองเห็นจากตัวปลา แสดงดังรูปที่ 3.1 จะสามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

3.1.1 ครีบเดี่ยว

ครีบเดี่ยว (Median Fin) มีหน้าที่ช่วยพยุงลำตัวของปลาให้อยู่ในแนวตรงขณะที่ปลาเคลื่อนที่ และรักษาลำตัวของปลาไม่ให้เอียงไปทางด้านซ้ายหรือด้านขวา ครีบเดี่ยวประกอบไปด้วยครีบย่อยในหมวดหมู่ดังต่อไปนี้

3.1.1.1 ครีบหลัง

ครีบหลัง (Dorsal Fin) มีตำแหน่งอยู่บริเวณส่วนบนของตัวปลา มีลักษณะทางกายวิภาคเป็นเอ็กก้านครีบแข็งหรือก้านครีบอ่อนออกจากแนวกระดูกสันหลัง อาจมีจำนวนหนึ่งหรือสองครีบขึ้นอยู่กับไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายพันธุ์ โดยจะมีขนาดและความยาวแตกต่างกันไป การที่ปลาวิวัฒนาการครีบหลังขึ้นมา มีจุดประสงค์เพื่อที่จะใช้รักษาสมดุลของลำตัวในน้ำให้อยู่ในแนวตรงเพื่อต้านการหมุน และนอกจากนี้ ครีบหลังยังมีส่วนช่วยให้ปลาสามารถเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่อย่างกะทันหัน

3.1.1.2 ครีบกัน

ครีบกัน (Anal Fin) อยู่บริเวณส่วนล่างของลำตัวปลา เริ่มต้นตั้งแต่รูทวารหนักยาวไปทาง ครีบหาง ปลาส่วนใหญ่จะมีครีบกันเพียงครีบเดียว มีหน้าที่ช่วยรักษาสมดุลของลำตัวขณะว่ายน้ำ ปลาบางสายพันธุ์ เช่น วงศ์ปลากราย มีครีบกันยาวไปจนถึงครีบหาง ทำให้การสับดีครีบกันส่งผลต่อการว่ายน้ำไปด้านข้าง ด้านหน้าหรือถอยหลัง ในขณะที่ปลาบางสายพันธุ์ เช่น ปลาสลาด มีครีบกันขนาดเล็กมากซึ่งแทบจะไม่ส่งผลต่อทิศทางการเคลื่อนที่

3.1.1.3 ครีบหาง

ครีบหาง (Caudal Fin) มีตำแหน่งอยู่บริเวณท้ายสุดของโคนหาง มักมีขนาดใหญ่กว่าครีบชนิดอื่น ๆ มีหน้าที่หลักในการสร้างแรงผลักดันและควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ ครีบหางที่พบมีหลายแบบตามชนิดและสายพันธุ์ โดยสามารถแบ่งครีบหางตามโครงสร้างของกระดูกภายในได้เป็น 4 ประเภท ดังนี้

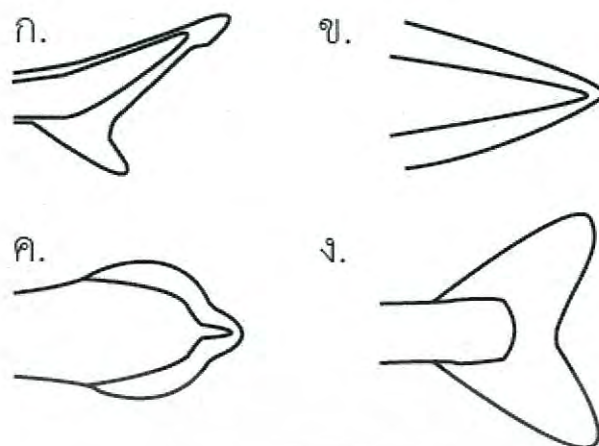
1. Heterocercal กระดูกที่ส่วนหางจะยืดออกไปเฉพาะบริเวณหางส่วนบน ทำให้ครีบหางส่วนบนยาวกว่าครีบหางส่วนล่าง ดังรูปที่ 3.2 (ก.) ครีบหางลักษณะนี้ยังสามารถที่จะยืดออกไปเฉพาะบริเวณหางส่วนล่างได้อีกด้วย (Reversed Heterocercal) ครีบหางลักษณะนี้สามารถพบได้ในฉลาม ปลาไม่มีขากรรไกรซึ่งส่วนใหญ่สูญพันธุ์ไปแล้ว เป็นต้น

2. Protocercal กระดูกที่ส่วนหางจะยืดออกไปอย่างสมมาตร มีลักษณะคล้ายสามเหลี่ยมมุมแหลม ครีบหางจึงไม่แผ่ออกกว้างเหมือนครีบปลาชนิดอื่น ๆ ดังรูปที่ 3.2 (ข.) พบได้ในแอมฟิออกซัส

3. Diphyrcal กระดูกที่ส่วนหางจะยืดออกเฉพาะบริเวณปลายกระดูกเท่านั้น ครีบหางจึงมีลักษณะสมมาตรและแผ่ออกตามแนวกระดูกมีลักษณะคล้ายวงกลม ดังรูปที่ 3.2 (ค.) พบได้ในปลาปิเซียร์ ปลาปอด เป็นต้น

4. Homocercal เป็นลักษณะทางกายภาพของครีบหางที่สามารถพบเห็นได้ในปลาชั้นสูง มีลักษณะสมมาตร ครีบหางชนิดนี้สามารถแผ่ออกได้เป็นรูปร่างที่หลากหลาย โดยกระดูกที่ส่วนหางจะยืดออกไปเพียงเล็กน้อยเท่านั้นแสดงดังรูปที่ 3.2 (ง.) การแผ่ออกของครีบหางในปลาชั้นสูงสามารถพบได้ถึง 6 แบบ ตามตารางที่ 3.1 ดังนี้ ครีบหางรูปกลมในปลาช่อน ปลาหมอไทย ครีบหางรูปใบโพในปลานู๋ ครีบหางรูปตัดตรงในปลาลิ้นหมาบางชนิด ครีบหางเว้าเล็กน้อยในปลาเท็ดโคน ปลาข้างลาย ครีบหางรูปส้อมในปลาทุ ปลาปากขลุ่ย และครีบหางพระจันทร์เสี้ยวในปลาแซลมอน ปลาทูน่า เป็นต้น


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ลักษณะทางกายวิภาคของครีบหางตามโครงสร้างของกระดูกภายใน [29]

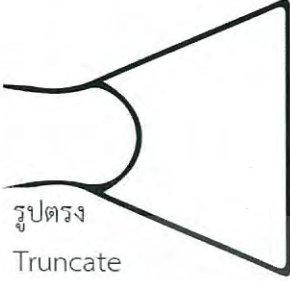


ครีบหางของปลาแต่ละแบบสามารถบ่งบอกประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ของปลาชนิดนั้น ๆ ได้ โดยพิจารณาลักษณะทางกายภาพที่เกี่ยวข้องในการสร้างแรงผลักและความเร่งเพื่อการเคลื่อนที่ ซึ่งปัจจัยที่ใช้ในการบ่งบอกประสิทธิภาพการเคลื่อนที่นั้น ได้แก่ พื้นที่ผิวสัมผัสและความแข็งของเนื้อเยื่อบริเวณครีบหางของปลา แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ประสิทธิภาพการเคลื่อนที่ของปลาในครีบหางแต่ละแบบ [16]

ชื่อและรูปลักษณะ	คุณสมบัติ
 <p data-bbox="171 1509 291 1595">รูปกลม Rounded</p>	<p data-bbox="952 1215 1265 1711">พื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำมีบริเวณกว้าง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการสร้างแรงผลัก ความเร่งและการหลบหลีกสูง ข้อเสียของครีบหางลักษณะนี้คือแรงต้านขณะการเคลื่อนที่จะมีมากเนื่องจากพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำมาก</p>


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

ชื่อและรูปลักษณะ	คุณสมบัติ
 <p>รูปตรง Truncate</p>	<p>ประสิทธิภาพในการสร้างแรงผลัก ความเร่งและการหลบหลีกสูงเพราะพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำมาก แรงต้านขณะเคลื่อนที่น้อยกว่าครีบทหารูปใบโพและรูปกลม</p>
 <p>รูปโค้งเว้าเล็กน้อย Emarginate</p> <p>รูปโค้งเว้าสองชั้น</p>	<p>ประสิทธิภาพในการสร้างแรงผลัก ความเร่งและการหลบหลีกสูง แรงต้านขณะเคลื่อนที่น้อยกว่าครีบทหารูปกลม รูปใบโพและรูปตรง เพราะมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำน้อยกว่า</p>
 <p>รูปส้อม Forked</p>	<p>ประสิทธิภาพในการสร้างแรงผลัก ความเร่งและการหลบหลีกดี เนื่องจากครีบทมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำน้อยจึงทำให้เกิดแรงต้านขณะเคลื่อนที่น้อย</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

ชื่อและรูปลักษณะ	คุณสมบัติ
 <p>รูปพระจันทร์เสี้ยว Lunate</p>	<p>ครีบหางลักษณะนี้มีความแข็งแรงและมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับน้ำน้อยทำให้เกิดแรงต้านขณะเคลื่อนที่น้อย ประสิทธิภาพในการสร้างความเร่งยอดเยี่ยม แต่ประสิทธิภาพในการสร้างแรงผลักและการหลบหลีกลดลง</p>

3.1.2 ครีบคู่

ครีบคู่ (Paired Fin) เป็นครีบที่มีหน้าที่ช่วยทรงตัวต่อการเคลื่อนที่ในแนวขึ้นและแนวตั้ง มีจำนวนสองครีบในหนึ่งชุด ซึ่งประกอบไปด้วยครีบต่าง ๆ ดังนี้

3.1.2.1 ครีบอก

ครีบอก (Pectoral Fin) พบที่ข้างลำตัวของปลาทั้งสองข้าง ข้างละครีบ มีตำแหน่งอยู่บริเวณเหงือกของปลา มีหน้าที่ในการสร้างแรงพยุงตัวและสามารถกางออกเพื่อต้านน้ำในขณะที่ต้องการหยุดเคลื่อนที่ รูปร่างของครีบอกมีลักษณะแตกต่างกันไปตามสายพันธุ์และลักษณะของปลา ในปลาสำลี ครีบอกจะมีลักษณะเล็กและแหลม ปลาบางชนิดไม่มีครีบอกหรือครีบอกเป็นฝอย เช่น ปลาสลิด ส่วนปลากระเบนจะมีครีบอกขนาดใหญ่แผ่ออกข้างลำตัว เนื่องจากปลากระเบนมีลำตัวที่ค่อนข้างแบนเมื่อมองจากมุมสูงทำให้ปลากระเบนมีลักษณะคล้ายวงกลมจากครีบอกที่แผ่ออกมา

3.1.2.2 ครีบท้อง

ครีบท้อง (Pelvic Fin) ปลาส่วนใหญ่จะพบครีบท้องอยู่ตำแหน่งบริเวณใต้ช่องท้องถัดจากครีบอก ครีบท้องทำหน้าที่คล้ายกับครีบอก ช่วยให้ปลาสามารถว่ายน้ำขึ้นและลง ช่วยในการเลี้ยงที่มุมแคบ ๆ และช่วยให้ปลาสามารถหยุดว่ายน้ำได้อย่างรวดเร็ว ปลาแต่ละสายพันธุ์จะมีครีบท้องแตกต่างกันไปตามวิวัฒนาการ ปลาบางชนิดจะใช้ครีบท้องเพื่อสร้างแรงผลักดันในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า เช่น ปลาแสงอาทิตย์ เป็นต้น

3.2 โครงสร้างและการทำงานของกระเพาะปลา



รูปที่ 3.3 ตำแหน่งของกระเพาะปลา

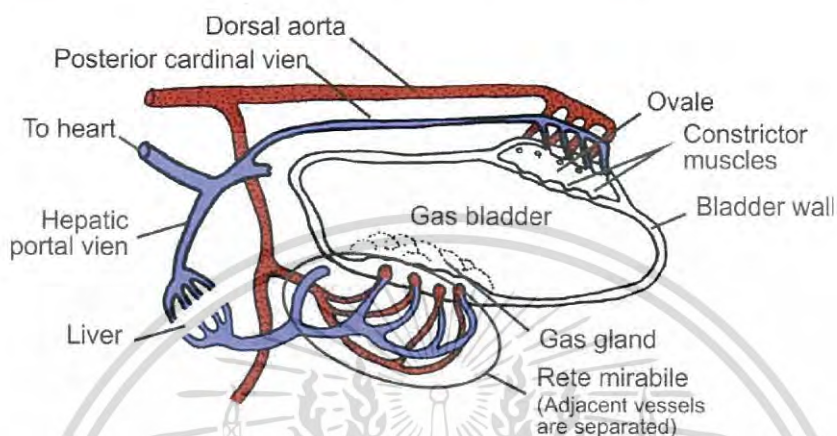
กระเพาะปลา (Swim Bladder) เป็นอวัยวะภายในตัวปลา มีตำแหน่งอยู่บริเวณช่องท้อง ด้านบนแสดงดังรูปที่ 3.3 มีหน้าที่กักเก็บอากาศไว้ภายใน ซึ่งส่งผลโดยตรงกับความสามารถในการควบคุมแรงลอยตัว ปลาใช้อวัยวะส่วนนี้เพื่อควบคุมระดับความลึกของตัวปลาในน้ำ

อากาศที่กักเก็บไว้ภายในกระเพาะปลา ทำให้ปลาสามารถลอยขึ้นจากน้ำโดยไม่จำเป็นต้องออกแรงในการเคลื่อนที่ บริเวณท้องของปลาสามารถแบ่งออกเป็นกระเพาะปลาส่วนล่างและกระเพาะปลาส่วนบน กระเพาะปลาส่วนล่างประกอบไปด้วยเครื่องในของปลา เช่น หัวใจ ตับ กระเพาะ ลำไส้ เป็นต้น กระเพาะปลาส่วนบนเป็นที่อยู่ของถุงลมที่ปลาใช้ในการกักเก็บอากาศ ทำให้ความหนาแน่นของกระเพาะปลาส่วนบนมีค่าน้อยกว่ากระเพาะปลาส่วนล่าง จากการพิจารณาปริมาณกล้ามเนื้อบริเวณ Dorsal ซึ่งมากกว่ากล้ามเนื้อบริเวณ Ventral ถึงสองเท่าโดยประมาณ และตำแหน่งของกระเพาะปลา ซึ่งอยู่บริเวณส่วนล่างของลำตัว ทำให้จุดศูนย์กลางมวลของปลาอยู่สูงกว่าจุดศูนย์กลางปริมาตรได้แนวน้ำ ปลาส่วนใหญ่จึงลอยอยู่ในน้ำแบบไม่เสถียร [17] ปลายังมีวิวัฒนาการที่สามารถทำให้กระเพาะปลาเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นเสียงหรือรับคลื่นเสียงความถี่สูงจากภายนอกได้ ซึ่งมนุษย์ใช้ประโยชน์จากจุดนี้เพื่อหาตำแหน่งของปลาในทะเลจากโซนาร์เซนเซอร์ กระเพาะปลาจะพบเฉพาะในปลากระดูกแข็ง แต่ไม่พบในปลากระดูกอ่อน ฉลามและกระเบนเป็นสัตว์กระดูกอ่อนที่ไม่มีกระเพาะปลาเพื่อช่วยในการลอยตัว แต่สัตว์ประเภทนี้ก็สามารถที่จะขึ้นมายังผิวน้ำได้โดยการสร้างแรงยกจากครีบอกเปรียบได้เสมือนกับปีกของเครื่องบิน สิ่งมีชีวิตในน้ำบางชนิดรู้จักวิธีสะสมไขมันหรือน้ำมันไว้ภายในร่างกาย เนื่องจากไขมันมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำจึงทำให้สัตว์ประเภทนี้สามารถที่จะลอยตัวขึ้นมายังผิวน้ำได้ ปลาน้ำลึกบางชนิดมีวิวัฒนาการเปลี่ยนจากถุงลมไปเป็นถุงเก็บไขมันแทนเพื่อช่วยในเรื่องแรงลอยตัว และตัดปัญหาเรื่องแรงอัดอากาศในขณะดำรังชีวิตบริเวณน้ำลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 โครงสร้างของกระเพาะปลา

กระเพาะปลามีวิวัฒนาการมาจากปอด มีลักษณะเป็นถุงลมจำนวนสองถุงอยู่ตามแนวกระดูกสันหลังของปลา ปลาบางสายพันธุ์มีถุงลมเพียงถุงเดียวเท่านั้น กระเพาะปลาเป็นกล้ามเนื้อยืดหยุ่นที่สามารถหด และยืดขยายออกได้ตามความดันของสภาพแวดล้อมใต้น้ำ



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของกระเพาะปลา [26]

กล้ามเนื้อรอบผนังของกระเพาะปลามีเส้นเลือดมาหล่อเลี้ยงน้อยมาก เส้นเลือดเหล่านี้ถูกล้อมรอบไปด้วย Guanine Crystal ทำให้อากาศไม่สามารถแพร่ออกจากกระเพาะปลาได้ การที่ปลาจะเอาอากาศเข้าและออกจาก Gas Bladder จะใช้วิธีต่าง ๆ ทำงานร่วมกัน แสดงดังรูปที่ 3.4 ส่วน Oval ที่ต่อออกมาจากกระเพาะปลาถูกยึดด้วยกล้ามเนื้อ Constrictor Muscles เมื่อใดก็ตามที่ปลาต้องการนำอากาศออกจาก Gas Bladder ปลาจะปล่อยฮอร์โมนเข้าสู่กระแสเลือด มีผลทำให้กล้ามเนื้อ Constrictor Muscles ขยาย ส่วน Oval ที่เชื่อมกับ Gas Bladder มีเส้นเลือดใหญ่มาหล่อเลี้ยง อากาศจึงแพร่ออกจาก Gas Bladder อย่างรวดเร็ว ในการเอาอากาศเข้าไปกักเก็บใน Gas Bladder ปลาจะใช้วิธีส่วน Gas Gland และ Rete Mirabile ทำงานร่วมกัน เริ่มจากปลาจะปล่อยกรดแลคติกออกจาก Rete Mirabile ส่งผลให้ออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ละลายไปกับเลือดน้อยลง เมื่อเลือดไหลเข้าสู่ Gas Gland อากาศจึงแพร่ออกจากเส้นเลือดไปยัง Gas Bladder อย่างไรก็ตามวิธีการเหล่านี้ไม่สามารถใช้อ้างอิงกับปลาน้ำลึกได้ เพราะวิธีการนี้ มีประสิทธิภาพไม่เพียงพอที่จะสามารถบังคับอากาศให้เข้าไปกักเก็บที่กระเพาะปลาภายใต้สภาวะความดันสูงใต้น้ำได้

3.2.2 หน้าที่ของกระเพาะปลา

ปลาที่ลอยนิ่งอยู่ในน้ำ แทบจะไม่ต้องใช้พลังงานในการรักษาระดับการลอยตัวทั้งในการจมและการลอย การเปลี่ยนแปลงระดับของปลาสามารถอธิบายได้จากทฤษฎีการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศ เมื่อปลาต้องการจะเคลื่อนที่ลึกลงไปในน้ำ ความดันของสภาพแวดล้อมรอบตัวปลาจะเพิ่มขึ้น

ทำให้กระเพาะปลาถูกบีบให้เล็กลง เนื่องจากอากาศในกระเพาะปลาถูกบีบตัว แรงลอยตัวที่เคยมีจึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อยลงไป ปลาจึงเริ่มจมลงไปใต้น้ำเพราะแรงลอยตัวค่อย ๆ มีค่าติดลบ ในทางตรงกันข้าม เมื่อไหร่ก็ตามที่ปลาต้องการลอยขึ้น ความดันของสภาพแวดล้อมที่บีบอากาศในกระเพาะปลาจึงเริ่มลดลง อากาศในกระเพาะปลาจึงสามารถที่จะขยายตัว ปลาจึงเริ่มลอยขึ้นจากน้ำ ซึ่งขณะนี้อากาศที่อยู่ในกระเพาะปลาจะเริ่มแพร่ไปสู่เส้นเลือด ปลาบางสายพันธุ์มีท่อลมเล็ก ๆ ต่อกับกระเพาะปลาที่ปากจึงสามารถอำพรางอากาศที่ผิวหนังได้โดยตรง กระเพาะปลามีข้อดีคือ สามารถช่วยแก้ปัญหาการเปลี่ยนแปลงความดันที่เกิดจากสภาพแวดล้อมและช่วยสร้างแรงลอยตัว แต่การมีกระเพาะปลาก็มีข้อเสียคือ ปลาจะไม่สามารถลอยตัวขึ้นจากน้ำได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากกระเพาะปลามีการขยายตัวของอากาศที่กักเก็บไว้ขณะลอยขึ้นจากน้ำ ถ้าปลาเปลี่ยนระดับความลึกเร็วเกินไปกระเพาะปลาจะระเบิดได้ ดังนั้นปลาที่มีท่ออากาศเชื่อมต่อกับกระเพาะปลาโดยตรงจึงสามารถแก้ไขปัญหานี้ได้ โดยการเรอเอาอากาศออกมาทางปากอย่างรวดเร็ว [18]

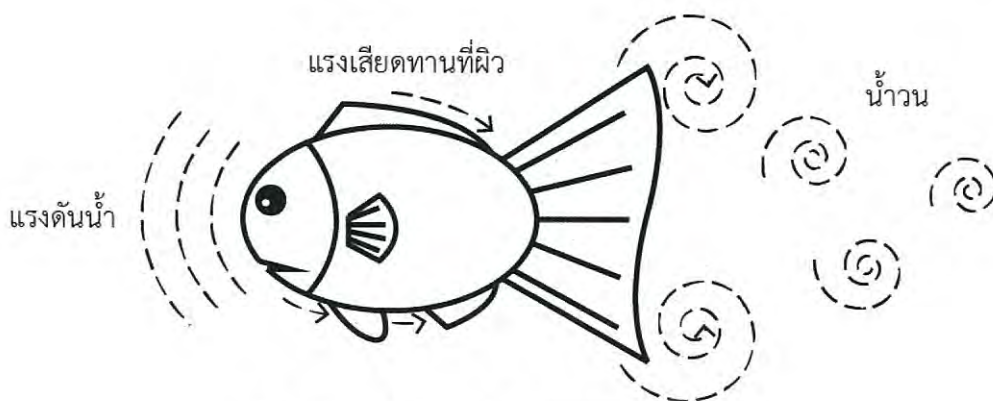
นอกจากกระเพาะปลาจะทำหน้าที่ปรับแรงดันอากาศภายในถุงลมแล้ว ในบางสถานะของกระเพาะปลา ยังทำให้ปลาสามารถที่จะหมุนตัวใต้น้ำได้อีกด้วย โดยขณะที่ปลาเอาอากาศออกจากกระเพาะปลาจนหมดหรือ “ปลาที่ไม่มีกระเพาะปลา ทำให้แรงลอยตัวของปลามีค่าติดลบเสมอ ดังนั้นปลาเหล่านี้จึงมีโอกาสที่จะหมุนตัวใต้น้ำ” [19] ซึ่งกลไกการเอียงสำหรับหุ่นยนต์ปลาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้ทำหน้าที่เลียนแบบการทำงานของกระเพาะปลาโดยออกแบบฮาร์ดแวร์ให้สามารถเอียงตัวใต้น้ำ

3.3 กลศาสตร์การเคลื่อนที่ของปลา

กลศาสตร์การเคลื่อนที่ของปลาเป็นการศึกษาถึงสาเหตุของการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ ซึ่งจะอธิบายถึงสาเหตุของการเกิดแรงและทิศทางของแรงซึ่งส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของปลา โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ M. Sfakiotakis [9] เป็นหลัก

3.3.1 แรงและการเคลื่อนที่ของปลา

การว่ายน้ำ คือการสร้างโมเมนตัมจากกล้ามเนื้อและส่งผ่านแรงไปยังน้ำที่อยู่บริเวณรอบ ๆ แรงที่ปลาสร้างขึ้นหลัก ๆ ได้แก่ แรงดึงหรือแรงผลัก แรงยกตัว และการสร้างความเร่ง ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วจะพบว่าขณะที่ปลาว่ายน้ำจะเกิดแรงตามหลักพลศาสตร์การเคลื่อนที่ ดังนี้



รูปที่ 3.5 แรงต้านของน้ำกับการเคลื่อนที่ของปลา

3.3.1.1 แรงเสียดทานที่ผิวของปลากับน้ำ (Frictional Drag)

โดยธรรมชาติแล้วเมื่อวัตถุสองชนิดมาถูกันจะเกิดแรงเสียดทานที่ผิวขึ้น เช่นเดียวกับการเคลื่อนที่ของปลาในน้ำ เนื่องจากน้ำมีความหนืดจึงต้านการเคลื่อนที่ของปลาจนกว่าจะ ขนาดของแรงเสียดทานชนิดนี้ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของปลาที่สัมผัสกับน้ำ ความเร็วในการว่ายน้ำ รวมไปถึงธรรมชาติการไหลของน้ำที่ผ่านตัวปลา อย่างไรก็ตามจะพบว่าปลาส่วนใหญ่ได้มีวิวัฒนาการให้ลำตัวเรียวและลู่ น้ำ เพื่อลดแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการปะทะกับน้ำขณะเคลื่อนที่ แสดงในรูปที่ 3.5

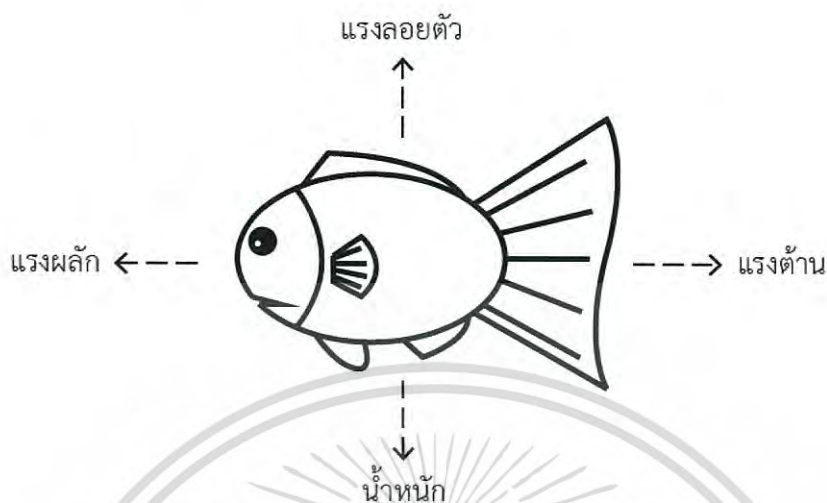
3.3.1.2 แรงต้านจากแรงดันน้ำ (Pressure Drag)

จากพลศาสตร์การเคลื่อนที่พบว่า เมื่อของแข็งเคลื่อนที่ผ่านของไหล จะทำให้ของไหลเปลี่ยนรูปร่างไปตามวัตถุนั้น ๆ เช่นเดียวกับการเคลื่อนที่ของปลาในน้ำ ด้านหน้าของปลาจะดันน้ำให้ไหลผ่านไปบริเวณข้างลำตัว ในขณะที่น้ำจึงมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปตามทรวดทรงของปลา แสดงในรูปที่ 3.5 โดยปลาที่มีลักษณะเพรียวจะสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็ว เนื่องจากกล้ามเนื้อของปลาออกแรงน้อยกว่าเพื่อที่จะเอาชนะแรงดันน้ำ

3.3.1.3 พลังงานที่สูญเสียจากน้ำวน (Vortex Drag)

การเคลื่อนที่ของปลาในน้ำใช้การสับครีบหางและครีบอกเป็นหลักเพื่อสร้างแรงผลักและแรงยกตัว แรงที่ได้จากการขยับครีบเหล่านี้ ส่งผลให้โมเลกุลของน้ำเคลื่อนที่ไปตามแนวแรงที่ออกจากกล้ามเนื้อ จากลักษณะของการสับครีบหางและครีบอกทำให้โมเลกุลของน้ำเกิดการหมุนวนทั้งท้ายการเคลื่อนที่ที่เพิ่งผ่านไป แสดงในรูปที่ 3.5

3.3.2 สมดุลของแรงในน้ำกับปลา



รูปที่ 3.6 สมดุลของแรงในน้ำกับปลา

ปลาวายอยู่ในน้ำได้เนื่องจากสมดุลของแรง แรงที่เกี่ยวข้องกับการว่ายน้ำ ได้แก่ แรงลอยตัว และน้ำหนักของปลาซึ่งเป็นแรงในแนวตั้ง รวมไปถึงแรงผลักและแรงต้านซึ่งเป็นแรงในแนวนอน แสดงดังรูปที่ 3.6 เมื่อพิจารณาสมดุลของแรงในแนวตั้งจะพบว่าน้ำหนักของปลาทำให้ค่าแรงลอยตัวติดลบ แต่เมื่อใดก็ตามที่ปลาวายอยู่ในน้ำ ความหนาแน่นของน้ำจะช่วยพยุงตัวปลา แรงลอยตัวของน้ำได้ชดเชยน้ำหนักของตัวปลาจึงเกิดสมดุลของแรงในแนวตั้ง ปลาจึงไม่จมลงไปใต้น้ำ สมดุลของแรงในแนวตั้งนี้เกิดจากกระเพาะปลาที่ช่วยสร้างแรงลอยตัว ในปลาบางชนิดที่ไม่มีกระเพาะปลาจะทำการสะสมไขมันออกอย่างต่อเนื่องเพื่อสร้างแรงยกให้ตัวปลาลอยขึ้น สำหรับสมดุลของแรงในแนวนอนดังรูปที่ 3.6 จะพิจารณาจากกฎการอนุรักษ์พลังงาน ทำให้แรงผลักและแรงต้านมีค่าเท่ากัน แรงโมเมนตัมที่สร้างขึ้นจากกล้ามเนื้อของปลาสร้างแรงผลักน้ำ ทำให้ตัวปลาเคลื่อนที่ไปข้างหน้า แต่เนื่องจากโมเลกุลของน้ำมาปะทะกับตัวปลา ตามหลักพลศาสตร์การเคลื่อนที่จึงเกิดแรงต้านขึ้น ยิ่งปลาออกแรงผลักน้ำมากเท่าไร แรงต้านที่เกิดขึ้นก็จะมีมากเท่านั้น แรงต้านนี้รวมถึงการสูญเสียของแรงที่ส่งผ่านไปยังโมเลกุลของน้ำด้วย

3.3.3 การจำแนกลักษณะการเคลื่อนที่ของปลา

ในการจำแนกลักษณะการเคลื่อนที่ของปลาที่จะกล่าวต่อไปนี้มีต้นกำเนิดและอ้างอิงมาจากงานของ Breder [20] ซึ่งได้ถูกใช้กันอย่างกว้างขวางเพื่อเป็นพื้นฐานและเป็นกรอบในการแบ่งแยกประเภท โดยในการจำแนกจะสังเกตจากอวัยวะที่ปลาใช้ในการเคลื่อนที่ ได้แก่ ครีบหาง ครีบอกและครีบท้อง อย่างไรก็ตามปลาตามธรรมชาติจะมีรูปแบบในการว่ายน้ำมากกว่าหนึ่งแบบเวลาเดียวกันขึ้นอยู่กับสถานการณ์ เช่น การว่ายน้ำเป็นระยะทางไกลเพื่ออพยพ การหลบหลีกและการเลี้ยวเพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การล่าเหยื่อหรือหลีกเลี่ยงจากนักล่า เป็นต้น ซึ่งลักษณะการเคลื่อนที่ของปลา สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะใหญ่ ๆ ดังนี้

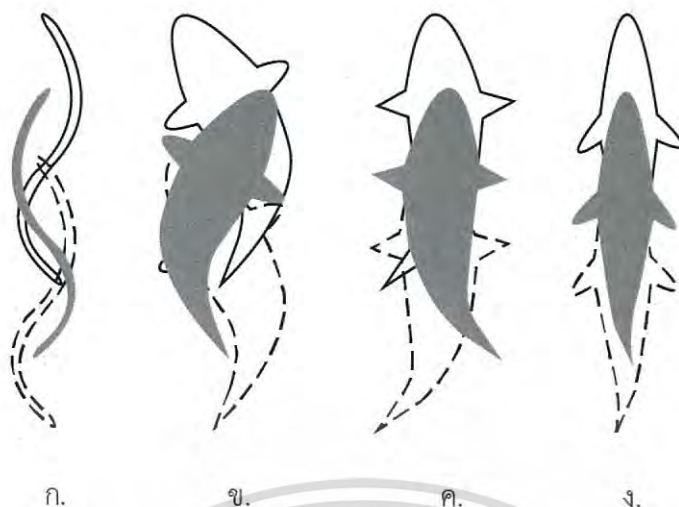
3.3.3.1 Body and/or Caudal Fin Locomotion (BCF)

ปลาส่วนใหญ่มีลักษณะการเคลื่อนที่อยู่ในประเภทนี้ จากรูปที่ 3.7 เมื่อปลาต้องการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ปลาจะใช้การโค้งงอลำตัวเป็นรูปตัว C เพื่อดึงน้ำเข้าหาตัว ในขณะที่ปลางอลำตัวนั้น น้ำที่อยู่บริเวณกล้ามเนื้อที่หดจะเปลี่ยนเป็นน้ำวน เพราะโมเมนตัมของน้ำได้รับแรงโมเมนตัมและเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปตามกล้ามเนื้อที่เคลื่อนที่ จากนั้นปลาจะยืดกล้ามเนื้อออกเพื่อผลักน้ำวนที่ได้สร้างขึ้นออกไปด้านหลัง ในจังหวะนี้จะเกิดแรงผลักส่งให้ปลาเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ในขณะที่ปลาวายน้ำนั้น การยืดและหดของกล้ามเนื้อบริเวณข้างลำตัวจะสลับกันไปมาตลอดเวลา ทำให้เกิดน้ำวนทั้งซ้ายและขวาที่ปลาเคลื่อนที่ไปตลอด



รูปที่ 3.7 การเกิดน้ำวนและการสร้างแรงผลักของปลา

เมื่อมองจากมุมสูงไปที่ตัวปลาจะพบว่า การยืดและหดกล้ามเนื้อข้างลำตัวด้านซ้ายและด้านขวาอย่างต่อเนื่องทำให้ปลาโค้งงอมีลักษณะคล้ายตัว S ซึ่งเปรียบได้เสมือนกับส่วนหนึ่งของคลื่นรูปไซน์ นอกจากนี้การยืดและหดของกล้ามเนื้อข้างลำตัว ทำให้ปลาสามารถเอียงตัวตามแนวนอน (Yaw Orientation) ได้ อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่แบบ BCF ยังสามารถแบ่งออกตามสัดส่วนของความยาวลำตัวที่ใช้ในการยืดและหดกล้ามเนื้อขณะว่ายน้ำได้เป็น 5 แบบ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.8 การเคลื่อนที่แบบ Body and/or Caudal Fin [9]

1. Anguiliform

กล้ามเนื้อทุกสัดส่วนของลำตัวปลาจะยืดและหด โดยเริ่มตั้งแต่ส่วนหัวไปจนถึงปลายหาง และมีการโค้งงอลำตัวมาก ทำให้เกิดคลื่นรูปไซน์ในแอมพลิจูดที่กว้างเต็มลูกคลื่น การเคลื่อนที่ลักษณะนี้ทำให้ปลาสามารถเคลื่อนที่ถอยหลังได้ เพราะมีความยืดหยุ่นของร่างกายสูง แสดงในรูปที่ 3.8 (ก.) พบได้ในปลาที่มีช่วงลำตัวยาว เช่น ปลาไหล ลูกอ๊อด เป็นต้น

2. Subcarangiform

ที่ส่วนหัวของปลากล้ามเนื้อด้านข้างจะไม่เกิดการยืดและหด มีเพียงกล้ามเนื้อครึ่งตัวตั้งแต่บริเวณกลางลำตัวไปจนถึงครีบหางเท่านั้น ที่ยืดและหดเป็นคลื่นรูปไซน์ เนื่องจากส่วนหัวของปลาไม่เคลื่อนไหวทำให้ปลาสามารถเคลื่อนที่แทรกผ่านน้ำได้รวดเร็วขึ้น ปลาที่เคลื่อนที่ในรูปแบบนี้ส่วนใหญ่จะมีความยืดหยุ่นของลำตัวไม่มาก และมีลักษณะค่อนข้างแข็ง ทำให้ความคล่องแคล่วในการหลบหลีกลดลง แสดงในรูปที่ 3.8 (ข.) สามารถพบการเคลื่อนที่แบบนี้ได้ในปลาเทราท์ ปลาทิมะ ฯลฯ

3. Carangiform

ส่วนหัวไปจนถึงความยาวสามส่วนสี่ของลำตัวด้านหน้าไม่มีการขยับเกิดขึ้น ซึ่งปลาประเภทนี้จะมีวิวัฒนาการครีบหางให้แข็ง ในการที่จะสร้างแรงผลักดันให้ได้มากขึ้น เพื่อชดเชยในส่วนของลำตัวด้านหน้าที่ไม่เกิดการขยับ แสดงในรูปที่ 3.8 (ค.) ปลาที่มีการเคลื่อนที่แบบนี้สามารถว่ายน้ำได้เร็วกว่าแบบ Subcarangiform ซึ่งสามารถพบได้ในปลาทุ ปลาแซลมอน ฯลฯ

4. Thunniform

การสร้างแรงผลักดันของปลาประเภทนี้เกิดขึ้นที่บริเวณโคนหางและครีบหางเท่านั้น ซึ่งมีความโดดเด่นที่ความเร็วในการว่ายน้ำสูงและสามารถทำให้ปลาวว่ายน้ำได้ในระยะทางไกล ๆ เป็นรูปแบบการเคลื่อนที่ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดของปลา ครีบหางของปลาประเภทนี้จะแข็ง และลำตัว

มีลักษณะเพรียว เพื่อลดแรงปะทะของน้ำขณะเคลื่อนที่ แสดงในรูปที่ 3.8 (ง.) วิวัฒนาการเหล่านี้พบได้ในปลาทูน่าและสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมในทะเล ฯลฯ

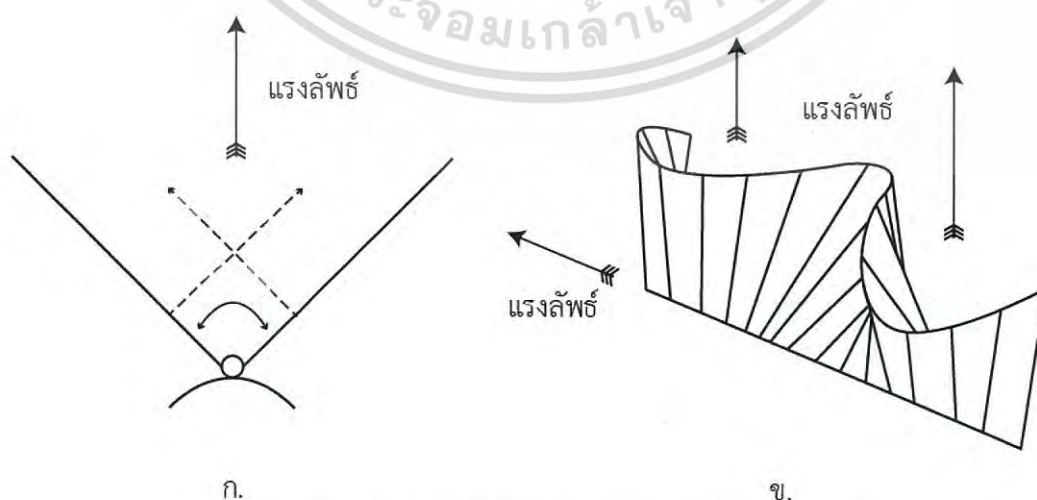
5. Ostraciiform

เป็นการเคลื่อนที่ที่ใช้การสลับเฉพาะส่วนของครีบหางเพียงอย่างเดียวเท่านั้น กล้ามเนื้อบริเวณลำตัวและโคนหางไม่มีการขยับใด ๆ ทั้งสิ้น ครีบหางของปลาประเภทนี้มีลักษณะที่แข็ง และกล้ามเนื้อบริเวณลำตัวมีความยืดหยุ่นสูง พบได้ในวงศ์ของปลาปักเป้า ในขณะที่ออกหาอาหารหรือเคลื่อนที่จะใช้ครีบอกและครีบท้องเป็นหลักในการสร้างแรง เนื่องจากครีบหางมีประสิทธิภาพในการตั้งน้ำต่ำ การสลับของครีบหางจึงเป็นแค่เพียงการช่วยเพิ่มแรงผลักดันด้านหน้าเท่านั้น

เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา จึงแบ่งลำตัวของปลาออกเป็นสี่ส่วน ได้แก่ ส่วนหัว ส่วนลำตัว ตอนต้น ส่วนลำตัวตอนกลาง และส่วนหาง จากรูปที่ 3.8 จะสังเกตเห็นได้ว่าส่วนลำตัวของปลาที่แสดงรูปคลื่นไซน์นั้นลดหลั่นกันไป ตั้งแต่การแสดงคลื่นรูปไซน์เต็มลูกที่ส่วนหัวของปลาจนถึงส่วนหางของปลาในการเคลื่อนที่แบบ Anguiliiform และการแสดงคลื่นรูปไซน์เพียงแค่บริเวณส่วนของหางในการเคลื่อนที่ในแบบ Thunniform และ Ostraciiform เท่านั้น

3.3.3.2 Median and/or Paired Fin Locomotion (MPF)

การเคลื่อนที่แบบ MPF เป็นการพิจารณาการเคลื่อนที่ของครีบเดี่ยวและครีบอกของปลา ซึ่งมีปลาจำนวนน้อยมากที่ใช้ครีบเดี่ยวและครีบอกในการเคลื่อนที่เป็นหลัก ครีบปลาก็คือกระดูกเล็ก ๆ ของปลาหลาย ๆ เส้น มาเรียงต่อกันเป็นแผง ซึ่งก้านครีบแข็งเหล่านี้เชื่อมต่อกันด้วยเยื่อบาง ๆ ที่ยืดหยุ่น กระดูกเล็ก ๆ เหล่านี้สามารถเคลื่อนที่ได้ในสองมิติ ซึ่งจะเกิดการสร้างแรงลอยตัวหรือแรงผลักดันนั่นเอง เมื่อสังเกตการเคลื่อนที่ที่แผงของครีบจะพบว่ามีการเคลื่อนที่เป็นรูปคลื่นไซน์หลายลูกคลื่นอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 3.9 การเคลื่อนที่ของก้านครีบและแรงผลักดันในการเคลื่อนที่ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.9 (ก.) แสดงการเคลื่อนที่ของก้านครีบหนึ่งก้านในสองมิติ เมื่อก้านครีบโบกไปมาซ้ายและขวา ทำให้เกิดแรงลัพธ์มีทิศทางขึ้นข้างบน ซึ่งเป็นวิธีการที่ปลาใช้ครีบเพื่อสร้างแรงลอยตัวขึ้นไปในน้ำ เมื่อก้านครีบหลาย ๆ ก้านมาเรียงต่อกันเป็นแผงดังรูปที่ 3.9 (ข.) พบว่า ก้านครีบไม่ได้เคลื่อนที่ไปด้านใดด้านหนึ่งในเวลาเดียวกันทั้งหมด แต่กลับจัดเรียงเป็นรูปคลื่นไซน์เต็มลูกคลื่นหลาย ๆ ลูกปรากฏอย่างต่อเนื่องตามความยาวของแผงครีบ ทำให้แรงลัพธ์จากการรวมกันของก้านครีบหลาย ๆ ก้านมีทิศทางในแนวตั้งและแนวนอน โดยทั่วไปปลามีการจัดเรียงตัวของครีบทั้งในแนวนอนและแนวตั้ง ขึ้นอยู่กับว่าครีบนั้นอยู่ที่ส่วนใด ยกตัวอย่างเช่น การจัดเรียงตัวของครีบในแนวนอนของปลากระเบน ซึ่งมีครีบอกขนาดใหญ่ล้อมรอบลำตัวด้านข้างและแผ่ออกไปในแนวนอน เมื่อปลากระเบนเคลื่อนที่ในน้ำ ครีบอกของปลากระเบนจะแสดงรูปคลื่นไซน์เต็มลูกคลื่นจำนวนมากตลอดความยาวครีบ จากแรงลัพธ์รวมจึงส่งผลให้ปลากระเบนสามารถเคลื่อนที่ไปด้านหน้าได้ สำหรับตัวอย่างการจัดเรียงของครีบในแนวตั้ง คือ ปลาไหลไฟฟ้าเมื่อโตเต็มวัยจะมีความยาวเกือบ 2 เมตร ซึ่งมีก้านของครีบกันเรียงต่อกันตั้งแต่บริเวณใต้ท้องไปจนสุดที่ส่วนหาง ก้านครีบที่เรียงต่อกันนี้แสดงรูปคลื่นไซน์จำนวนมากตลอดความยาวครีบ การเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของปลาไหลไฟฟ้านอกจากจะใช้ครีบกันเพื่อสร้างแรงแล้ว ปลาไหลไฟฟ้ายังมีการเคลื่อนที่แบบ Anguilliform ร่วมอีกด้วย

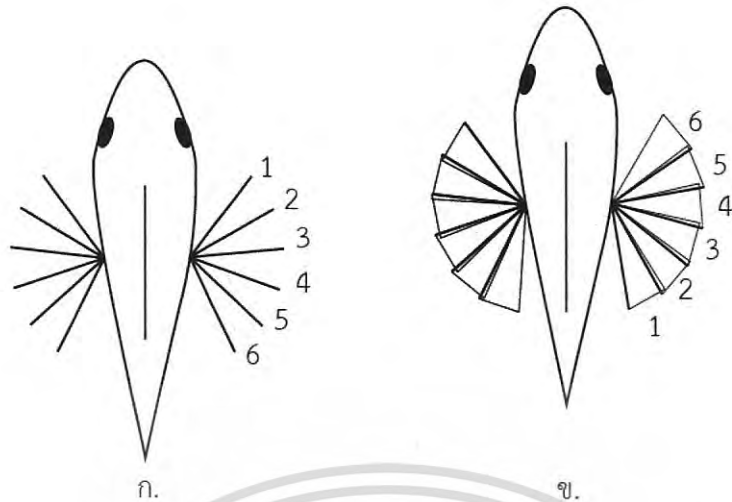
ในส่วนของครีบอกของปลา สามารถที่จะมีการเคลื่อนที่ได้หลายแบบ ตั้งแต่การแสดงรูปคลื่นไซน์บริเวณครีบอกอย่างเดียว หรือมีการสะบัดกล้ามเนื้อเป็นวงกลมรวมกับการแสดงรูปคลื่นไซน์เพื่อสร้างแรงผลักดัน ในวงศ์ปลาปักเป้าจะใช้ครีบอกเป็นหลักเพื่อสร้างแรงในการเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่ของครีบอกสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ดังนี้

1. การดึงน้ำเพื่อสร้างแรงผลัก (Drag-Based Mode)

เป็นการใช้พื้นที่ผิวของครีบอกเพื่อดึงน้ำผ่านข้างลำตัวและสร้างแรงผลักไปข้างหน้า โดยเป็นการดึงน้ำให้อยู่ระนาบเดียวกับการเคลื่อนที่ของปลา ปลาจะใช้วิธีการเคลื่อนที่ในลักษณะนี้เมื่อต้องการเคลื่อนที่ช้า ๆ สลับกับการเคลื่อนที่แบบ BCF โดยจะประกอบไปด้วยขั้นตอนย่อยอีก 2 ขั้นตอน คือ

1.1 Power Stroke ในจังหวะแรกปลาจะกางครีบอกออกให้พื้นที่ผิวสัมผัสของครีบตั้งฉากกับผิวน้ำ โดยปลาจะหมุนกล้ามเนื้อบริเวณครีบอกให้อยู่บริเวณส่วนหัว จากนั้นปลาจะสะบัดครีบอกกวาดน้ำด้วยความเร็วไปจนสุดระยะที่ครีบอกสามารถหมุนไปได้ แสดงในรูปที่ 3.10 (ก.)

1.2 Recovery Stroke ที่ตำแหน่งสุดท้ายในการกวาดน้ำ ปลาจะหมุนครีบอกให้ขนานกับผิวน้ำเพื่อลดแรงต้านจากน้ำและลากกลับมายังตำแหน่งตั้งต้นของ Power Stroke เพื่อที่จะเตรียมทำซ้ำตามขั้นตอนแรก ดังรูปที่ 3.10 (ข.)



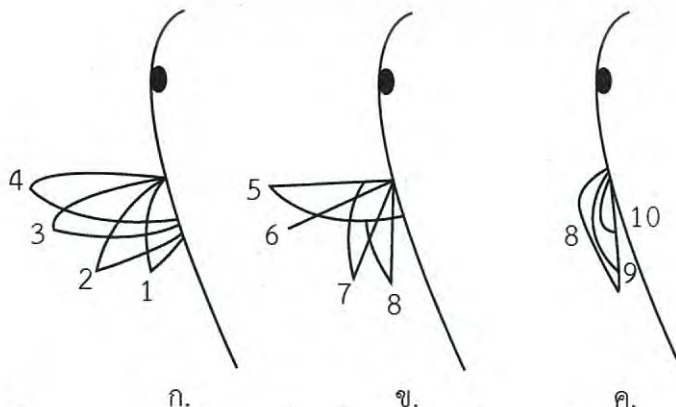
รูปที่ 3.10 กลศาสตร์การเคลื่อนที่ของครีบอกในการสร้างแรงผลัก [9]

2. การดึงน้ำเพื่อสร้างแรงยก (Lift-Based Mode)

การสร้างแรงยกของปลา คือการที่ครีบอกเคลื่อนที่ตั้งฉากกับระนาบในแนวนอนของตัวปลา ส่งผลให้น้ำบริเวณครีบอกสามารถพยุงตัวปลาให้ยกตัวในแนวตั้งได้ การสร้างแรงยกไม่มีความจำเป็นที่จะต้องจัดครีบให้อยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น เนื่องจากครีบอกสามารถสร้างแรงยกได้ตลอดเวลา ขั้นตอนในการสร้างแรงยกมี 2 ขั้นตอน ดังนี้

2.1 Abduction Phase เป็นการเคลื่อนครีบให้ออกจากลำตัวไปทางด้านล่าง ให้พื้นที่ผิวสัมผัสขนานกับผิวน้ำ จากนั้นครีบอกจะเคลื่อนที่กลับมาอยู่ข้างลำตัวปลาเหมือนเดิมอย่างรวดเร็ว ในจังหวะนี้พื้นที่ผิวสัมผัสจะซ้อนน้ำขึ้นมา ทำให้เกิดแรงพยุงตัวปลาให้ลอยขึ้นด้านบน แสดงดังรูปที่ 3.11 (ก.) และรูปที่ 3.11 (ข.)

2.2 Refractory Phase ครีบอกจะหมุนกลับขึ้นไปยังตำแหน่งปกติ เพื่อเตรียมทำซ้ำในขั้นตอน Abduction Phase อีกครั้ง แสดงดังรูปที่ 3.11 (ค.)

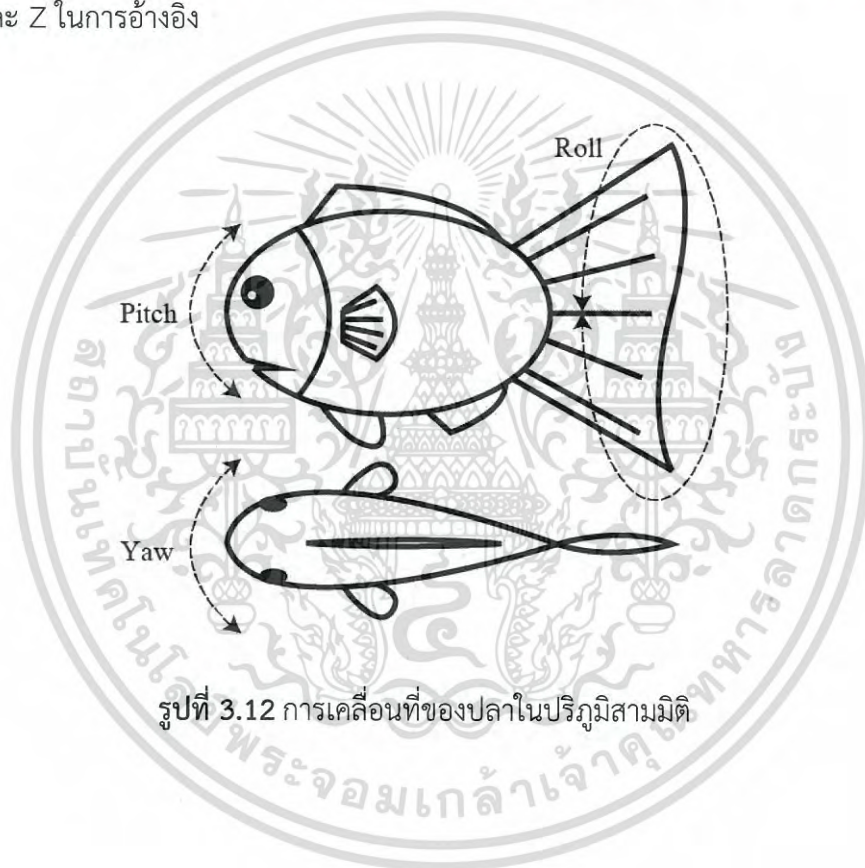


รูปที่ 3.11 กลศาสตร์การเคลื่อนที่ของครีบอกในการสร้างแรงยก [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.11 พบว่ากล้ามเนื้อที่บังคับครีบอก หมุนและพลิกครีบอกตลอดเวลาเพื่อจะดึงน้ำให้ได้มากที่สุด ครีบอกจึงเคลื่อนที่ท่ามุมต่าง ๆ กับลำตัวของปลา ผลที่ได้จึงทำให้ปลาเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงระหว่างการว่ายน้ำได้

เนื่องจากปลามีครีบอกทั้งสองข้าง เมื่อใดก็ตามที่ครีบอกแต่ละข้างสร้างแรงยกไม่เท่ากัน จะส่งผลให้ตัวปลาเกิดการหมุน (Roll Orientation) หรือเปลี่ยนตำแหน่งของหัวปลาให้เซดขึ้นหรือกดลงไปในน้ำ (Pitch Orientation) โดยเมื่อรวมกับการสับของหางที่ทำให้ตัวปลาส่ายไปทางด้านซ้ายและด้านขวาขณะที่เคลื่อนที่ (Yaw Orientation) จึงทำให้ปลาสามารถที่จะเคลื่อนที่ในปริภูมิสามมิติได้อย่างสมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.12 การหมุนของตัวปลาจะใช้ปริภูมิสามมิติสมมติตามแนวแกนสามมิติ X, Y และ Z ในการอ้างอิง



รูปที่ 3.12 การเคลื่อนที่ของปลาในปริภูมิสามมิติ

3.4 สรุป

ปลาแต่ละสายพันธุ์มีวิวัฒนาการที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับนิสัยและลักษณะการใช้ชีวิต ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อลักษณะการเคลื่อนที่อย่างเห็นได้ชัด จากวิวัฒนาการที่หลากหลายทำให้เกิดการจัดหมวดหมู่ตามลักษณะการเคลื่อนที่ของปลา และเกิดเป็นการศึกษากลศาสตร์การเคลื่อนที่ในรูปแบบต่าง ๆ ขึ้น กลศาสตร์การเคลื่อนที่ของปลาได้อธิบายถึงการเกิดแรงจากการเคลื่อนที่ของอวัยวะของปลา และทิศทางของแรงที่ปลาได้สร้างขึ้น ลักษณะการเคลื่อนที่ของปลาสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบหลัก ๆ ดังนี้ การเคลื่อนที่แบบ Body and/or Caudal Fin (BCF) และการเคลื่อนที่แบบ Median and/or Paired Fin Locomotion (MPF) จากการศึกษาพบว่าการเคลื่อนที่ของปลาทุกชนิดไม่ว่าจะอยู่ในรูปแบบใดก็ตาม จะมีรูปคลื่นไซน์ปรากฏบริเวณลำตัวหรือครีบใด ๆ เสมอ ซึ่งสมการคณิตศาสตร์ได้เข้ามาช่วยในการอธิบายวิธีการเคลื่อนที่ของตัวปลาและครีบปลาในน้ำ

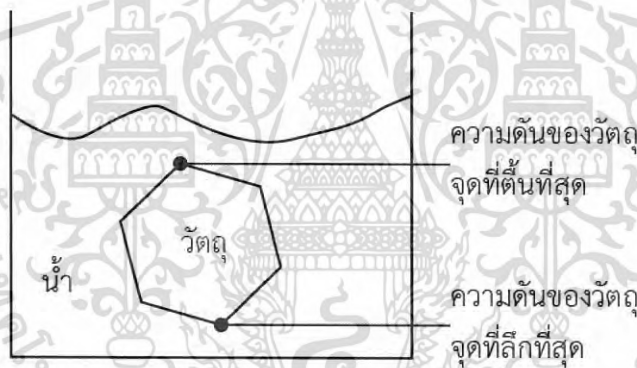
สำหรับกระเพาะปลาซึ่งเป็นอวัยวะพิเศษ ทำหน้าที่ให้ปลาสามารถลอยอยู่ในน้ำและรักษาระดับความลึกที่ต้องการอาศัยไว้ได้ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ ถูกอธิบายด้วยสมดุลของแรงในน้ำระหว่างน้ำหนักของปลาและแรงลอยตัวของเหลวช่วยพยุง ดังนั้นการศึกษากการเคลื่อนที่ของปลาจึงทำให้เห็นภาพรวมและทำให้เกิดความเข้าใจต่อการเคลื่อนที่ของปลาในน้ำ ซึ่งเกิดจากการรังสรรค์ของธรรมชาติ ดังนั้นในการสร้างหุ่นยนต์ปลาจึงจำเป็นที่จะต้องสามารถนำทฤษฎีดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นมาพลิกแพลงและประยุกต์ เพื่อสร้างสรรค์ให้เกิดขึ้นงานที่เลียนแบบธรรมชาติได้อย่างสมบูรณ์

บทที่ 4

ฟิสิกส์และการออกแบบหุ่นยนต์ใต้น้ำ

4.1 แรงลอยตัว

แรงลอยตัว (Buoyancy) คือ แรงยกจากของเหลวที่ช่วยพยุงน้ำหนักของวัตถุที่ลอยอยู่ในของเหลวนั้น ๆ เมื่อระดับความลึกของของเหลวเพิ่มขึ้น ความดัน ณ ตำแหน่งที่ผิวของของเหลวจะมีค่าน้อยกว่าความดัน ณ ตำแหน่งความลึกใด ๆ ที่อยู่ในของเหลวนั้น ทั้งนี้เนื่องจากของเหลวเองก็มีน้ำหนัก และเมื่อของเหลวทับซ้อนกันทำให้บริเวณส่วนที่ล่างสุดของของเหลว รองรับน้ำหนักของเหลวทั้งหมดที่ทับซ้อนกันอยู่ ในการหาขนาดของแรงลอยตัวสำหรับวัตถุใด ๆ ในน้ำ จะวัดจากความแตกต่างของแรงดัน ณ ตำแหน่งที่วัตถุอยู่ตื้นที่สุดและลึกที่สุดในขณะวัตถุลอยอยู่ในน้ำ ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งหมายถึงขนาดของแรงจากน้ำที่ช่วยพยุงวัตถุใด ๆ นั่นเอง



รูปที่ 4.1 การวัดขนาดแรงลอยตัวของวัตถุในของเหลว

จากเหตุผลที่กล่าวมาจึงต้องมีการคำนึงถึงความหนาแน่นของวัตถุกับความหนาแน่นของของเหลว ยกตัวอย่างเช่น ถ้านำทองคำที่มีค่าความหนาแน่น 19.3 g/cm^3 ไปลอยในน้ำที่มีค่าความหนาแน่น 1 g/cm^3 หรือ 1.025 g/cm^3 สำหรับน้ำทะเล ทองคำจะจมลงไปใต้น้ำ เพราะน้ำไม่สามารถที่จะพยุงน้ำหนักของทองคำเอาไว้ได้ สำหรับวัตถุที่มีค่าความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำก็จะสามารถลอยอยู่บนผิวน้ำได้ เช่น น้ำมันที่มีค่าความหนาแน่น 0.9 g/cm^3 อย่างไรก็ตามเรือที่มีค่าความหนาแน่นมากกว่าน้ำ ก็ยังสามารถลอยบนผิวน้ำได้ ทั้งนี้เป็นผลมาจากรูปร่างของเรือที่ทำให้เกิดการกระจายแรงขึ้น ดังนั้นวัตถุใด ๆ ที่มีรูปร่างเหมาะสม จึงมีโอกาที่จะสามารถลอยน้ำได้เช่นกัน ในการพิจารณาค่าความหนาแน่น (ρ) จะได้มาจากการวัดมวลของวัตถุต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร

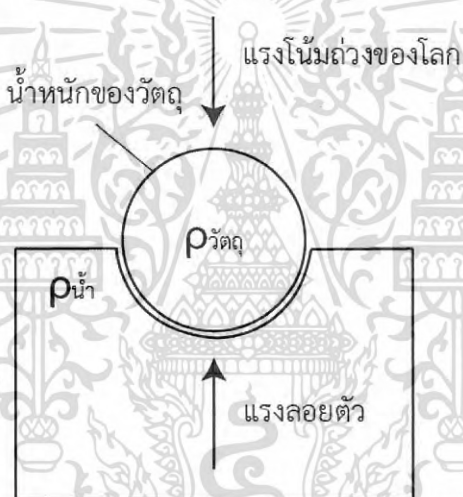
แรงลอยตัวมีทิศทางตรงกันข้ามกับแรงโน้มถ่วงของโลก โดยพิจารณาจากปริมาตรของวัตถุที่ถูกล้อมรอบด้วยของเหลวและความหนาแน่นของวัตถุ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$B = \rho_{fluid} V_{disp} g \quad (4.1)$$

โดย	B	คือ แรงลอยตัว
	ρ_{fluid}	คือ ความหนาแน่นของของเหลว
	V_{disp}	คือ ปริมาตรของวัตถุที่ถูกแทนที่ด้วยของเหลว
	g	คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีค่า 9.81 m/s^2

การที่วัตถุสามารถลอยอยู่ในน้ำได้ เนื่องจากแรงลัพท์ในแนวตั้งที่กระทำกับวัตถุมีค่าเท่ากับ ศูนย์ โดยเมื่อพิจารณาแรงในแนวตั้งแล้วจะพบว่า ณ ตำแหน่งที่วัตถุที่ลอยอยู่ในน้ำ จะต้องรับค่าแรงโน้มถ่วงของโลกและน้ำหนักของตัววัตถุเอง ให้เท่ากับแรงลอยตัวที่น้ำช่วยพยุง แสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สมดุลของแรงกับวัตถุในของเหลว [28]

สมดุลในการลอยของวัตถุบนของเหลว สามารถอธิบายโดยใช้ผลรวมของแรงลัพท์จากแรงลอยตัวและน้ำหนักของวัตถุ เมื่อใดก็ตามที่สมดุลของแรงลอยตัวได้สูญเสียไป จะทำให้วัตถุจมหรือลอยอยู่บนของเหลว โดยถ้าแรงลอยตัวมีค่ามากกว่าน้ำหนักของวัตถุ วัตถุก็จะลอย แต่ถ้าน้ำหนักของวัตถุมีค่ามากกว่าแรงลอยตัวของของเหลว วัตถุนั้นก็จม สมดุลของแรงสามารถอธิบายได้ดังสมการต่อไปนี้

$$W = B \quad (4.2)$$

$$mg = \rho_{fluid} V_{disp} g \quad (4.3)$$

$$\sum force = mg - \rho_{fluid} V_{disp} g \quad (4.4)$$

$$\sum force = 0 \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย m	คือ มวลของวัตถุ
W	คือ น้ำหนักของวัตถุจากแรงโน้มถ่วงของโลก

ในกรณีที่ค่าความหนาแน่นเฉลี่ยของวัตถุมีค่าเท่ากับของเหลวที่วัตถุนั้นจมอยู่ วัตถุนั้นจะไม่ลอยขึ้นมาที่ผิวหรือจมลงไปใต้อกของเหลว เพราะแรงลอยตัวจะพยุงน้ำหนักของวัตถุที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลกไว้ทั้งหมด กรณีที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า Neutral Buoyancy สิ่งมีชีวิตที่สามารถทำปรากฏการณ์เช่นนี้ได้ก็คือ ปลา เนื่องจากปลามีกระเพาะปลาที่ช่วยในการควบคุม Neutral Buoyancy ในที่นี้หมายถึงอากาศในกระเพาะปลานั้นเอง ปลาจึงสามารถที่จะว่ายน้ำที่ระดับความลึกต่าง ๆ ได้ ซึ่งทำให้ปลาเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของตัวเองให้สูงหรือต่ำกว่าน้ำที่ปลาอาศัยอยู่ การที่ปลาจมลงไปใต้น้ำเป็นเพราะน้ำหนักของกล้ามเนื้อและกระดูก กล้ามเนื้อเป็นส่วนประกอบหลักของสัตว์และมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ กล้ามเนื้อซึ่งก็คือโปรตีนและกระดูกซึ่งก็คือแคลเซียม สารทั้งสองชนิดนี้มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ เมื่อกระเพาะปลาไม่มีอากาศอยู่ภายใน ตัวปลาจึงจมลงไปใต้น้ำ ดังนั้นสัตว์น้ำจึงมีวิวัฒนาการให้มีกระเพาะปลา เพื่อที่จะไม่ต้องใช้ชีวิตอยู่ใต้น้ำไปตลอด นอกจากกระเพาะปลาแล้ว การเก็บสะสมไขมันหรือน้ำมันก็สามารถช่วยให้ปลาสามารถลดความหนาแน่นของร่างกายให้ใกล้เคียงกับน้ำได้ สัตว์น้ำบางชนิดที่ไม่มีอวัยวะเพื่อช่วยในการสร้างแรงลอยตัว เช่น หมึก จึงจำเป็นต้องพ่นน้ำเพื่อสร้างแรงผลักดันตลอดเวลา เมื่อไหร่ก็ตามที่หมึกหยุดพ่นน้ำ ตัวของหมึกก็จะจมลงไป เช่นเดียวกับการสร้างหุ่นยนต์ปลา การที่จะทำให้หุ่นยนต์ปลาสามารถที่จะลอยขึ้น จมลง หรืออยู่ในน้ำ ความสัมพันธ์ระหว่างแรงลอยตัว (B) และน้ำหนักของหุ่นยนต์ (W) จึงเป็นส่วนสำคัญที่จะต้องพิจารณาเพื่อกำหนดตำแหน่งความลึกของหุ่นยนต์ใต้น้ำ

4.2 เสถียรภาพและสมดุลของวัตถุในน้ำ

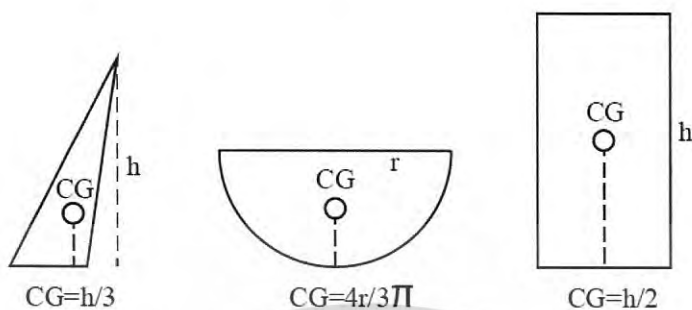
เสถียรภาพของวัตถุในน้ำเป็นการพิจารณาถึงสมดุลของแรง โดยวัตถุที่มีคุณสมบัติในการรักษาเสถียรภาพจะสามารถคืนตัวกลับไปอยู่ในตำแหน่งสมดุลได้เอง หลังจากการถูกรบกวนหรือทำให้อยู่ในสภาวะไม่สมดุล การพิจารณาสมดุลของวัตถุในน้ำมีตัวแปรที่ต้องคำนึงถึงดังนี้

4.2.1 จุดศูนย์ถ่วง

จุดศูนย์ถ่วง (Center of Gravity: CG) คือ จุดที่ซึ่งน้ำหนักทั้งหมดของวัตถุ เสมือนมากระทำที่จุดนั้น โดยตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงจะขึ้นอยู่กับรูปทรงของวัตถุ ในวัตถุที่มีรูปทรงปกติ เช่น ทรงกลม จุดศูนย์ถ่วงจะอยู่บริเวณศูนย์กลางของวัตถุ และสี่เหลี่ยมจัตุรัส จุดศูนย์ถ่วงจะอยู่ที่จุดตัดเส้นแบ่งครึ่งมุมฉากทุกด้านของสี่เหลี่ยม นอกจากนี้จุดศูนย์ถ่วงยังใช้ในการระบุถึงตำแหน่งของวัตถุที่เคลื่อนที่จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง (Translation) และอธิบายการหมุน (Rotation) ของวัตถุอีกด้วย ซึ่งหมายถึงการหมุนของวัตถุใด ๆ จะเกิดขึ้นรอบจุดศูนย์ถ่วงนั่นเอง ยกตัวอย่างเช่น การกลิ้งของบอล

การเอียงตัวของเครื่องบิน เป็นต้น จากเหตุผลข้างต้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องสามารถระบุไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดศูนย์กลางถ่วงจากรูปทรงต่าง ๆ ได้ การระบุตำแหน่งของจุดศูนย์กลางถ่วงเกิดจากการหาตำแหน่งศูนย์กลางของรูปทรงต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.3



ก.



ข.

รูปที่ 4.3 การหาจุดศูนย์กลางถ่วงของวัตถุ [21]

รูปที่ 4.3 (ก.) เป็นการหาจุดศูนย์กลางถ่วงของรูปทรงเรขาคณิตต่าง ๆ จากการคำนวณ โดยสมมติให้วัตถุใด ๆ มีความหนาแน่นเท่ากันตลอดทั้งรูปทรง แต่สำหรับวัตถุที่มีรูปร่างทั่วไป จุดศูนย์กลางถ่วงของวัตถุจะสามารถหาได้ดังรูปที่ 4.3 (ข.) ซึ่งสามารถอธิบายเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้ ขั้นตอนที่ 1 แขนงวัตถุไว้กับเชือกและปล่อยให้วัตถุสมดุลตัวเองในอากาศ ลากเส้นประทั้งไว้บนวัตถุให้เป็นแนวเดียวกับเส้นเชือกที่แขวนวัตถุนั้น จุดศูนย์กลางถ่วงของวัตถุจะอยู่ในแนวเส้นประที่วัตถุนั้นเกิดการสมดุลตัวเอง ขั้นตอนที่ 2 เปลี่ยนมุมในการแขวนวัตถุแล้วทำซ้ำตามวิธีในขั้นตอนที่ 1 เส้นประที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนที่ 2 จะมีจุดที่ตัดกับเส้นประเส้นแรก จุดที่ตัดกันของเส้นประทั้ง 2 เส้นก็คือจุดศูนย์กลางถ่วงของวัตถุนั้นเอง (CG) [21] สำหรับวัตถุที่มีความหนาแน่นไม่เท่ากันทั้งรูปทรงหรือมีรูปร่างไม่แน่นอนจะใช้วิธีการคำนวณน้ำหนักในปริภูมิสามมิติโดยใช้การอินทิเกรตร่วมกับการระบุค่าความหนาแน่นของวัตถุ ดังสมการดังต่อไปนี้

$$W = \int xdw \quad (4.6)$$

$$W = g \iiint x\rho dx dy dz \quad (4.7)$$

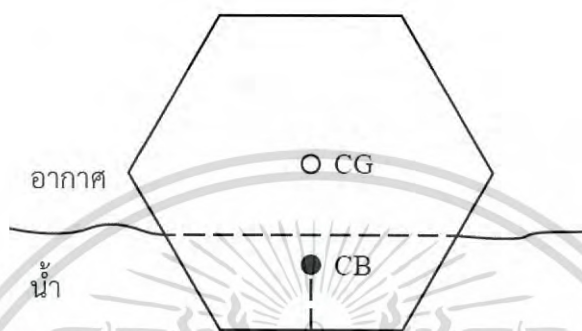
โดย W คือ น้ำหนักรวมของวัตถุ

$\rho(x, y, z)$ คือ ค่าความหนาแน่นของวัตถุในปริภูมิสามมิติ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 จุดศูนย์กลางปริมาตรไต้แนวน้ำ

จุดศูนย์กลางปริมาตรไต้แนวน้ำ (Center of Buoyancy: CB) คือ จุดศูนย์กลางเสมือนของวัตถุ โดยจะคิดเฉพาะปริมาตรของวัตถุที่จมอยู่ในน้ำเท่านั้น โดยส่วนใหญ่ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางปริมาตรไต้แนวน้ำจะอยู่ใกล้เคียงกับบริเวณผิวน้ำและบริเวณศูนย์กลางของวัตถุที่จมอยู่ในน้ำแสดงดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 จุดศูนย์กลางปริมาตรไต้แนวน้ำ (CB) และจุดศูนย์กลางของวัตถุ (CG)

การหาตำแหน่งที่แน่นอนของจุดศูนย์กลางปริมาตรไต้แนวน้ำได้มาจากการอินทิเกรตพื้นที่ของชิ้นส่วนของวัตถุที่จมอยู่ในน้ำซึ่งมีความยุ่งยากในการคำนวณ อีกทั้งวัตถุที่ต้องการคำนวณมีอาจรูปร่างแตกต่างกันไป จึงใช้การประมาณตำแหน่งโดยมีหลักการตามที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

4.2.3 สมดุลและเสถียรภาพของวัตถุในน้ำ

การพิจารณาสมดุลของวัตถุที่อยู่ในน้ำว่ามีเสถียรภาพหรือไม่ จะพิจารณาถึงตำแหน่งของจุดศูนย์กลาง (CG) และจุดศูนย์กลางปริมาตรไต้แนวน้ำ (CB) ซึ่งสภาวะของวัตถุในน้ำสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

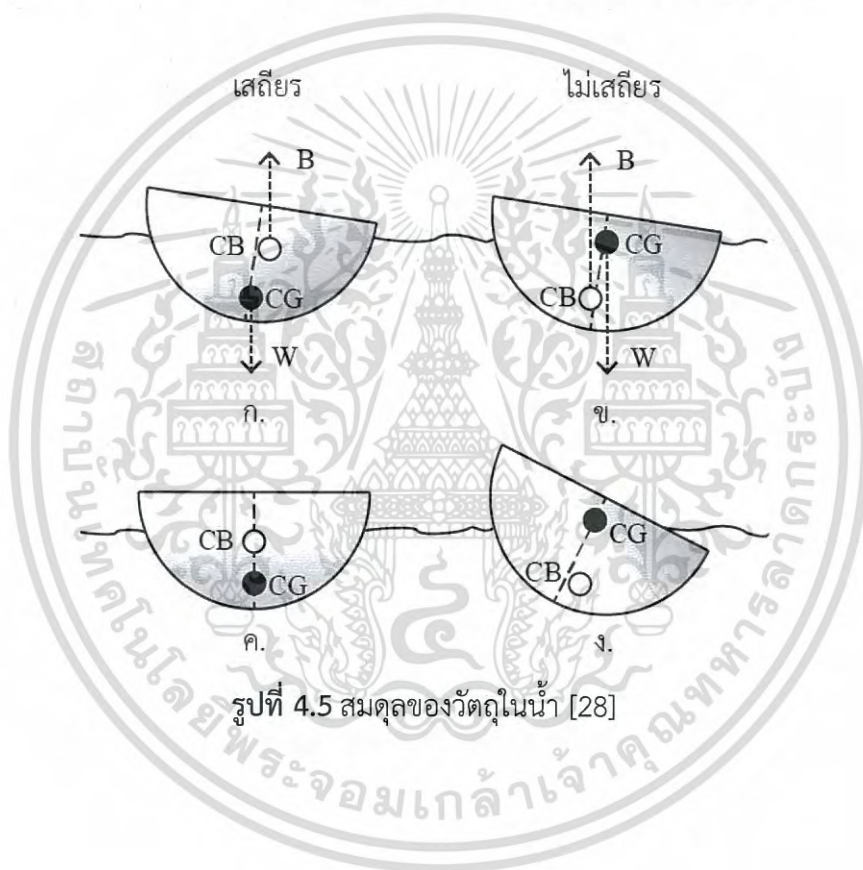
4.2.3.1 สภาวะเสถียร (Stable)

วัตถุในน้ำที่อยู่ในสภาวะเสถียรดังรูปที่ 4.5 (ก.) และรูปที่ 4.5 (ค.) ตำแหน่งของจุดศูนย์กลาง (CG) จะอยู่ต่ำกว่าตำแหน่งของจุดศูนย์กลางปริมาตรไต้แนวน้ำเสมอ (CB) เนื่องจากบริเวณจุดศูนย์กลางเปรียบได้เสมือนกับจุดที่น้ำหนักทั้งหมดของวัตถุมากระทำที่จุดนั้น ดังนั้นน้ำหนัก (W) ที่มีทิศทางพุ่งลงตามแรงโน้มถ่วงของโลกจึงสามารถสมดุลวัตถุและเอาชนะแรงลอยตัว (B) ที่มีทิศทางพุ่งขึ้นจากจุดศูนย์กลางปริมาตรไต้แนวน้ำได้ อย่างไรก็ตามจุดศูนย์กลางและจุดศูนย์กลางปริมาตรไต้แนวน้ำไม่จำเป็นที่จะต้องอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันเสมอไปดังรูปที่ 4.5 (ก.) ซึ่งในกรณีนี้วัตถุจะสามารถลอยเอียงในน้ำได้อย่างเสถียร การเอียงของวัตถุนั้นเกิดจากโมเมนต์ของแรงลอยตัวและน้ำหนักของวัตถุมากระทำกัน ถ้าระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลาง (CG) และจุดศูนย์กลางปริมาตรไต้แนวน้ำ (CB) ยิ่งมีมากเท่าไร ความเสถียรของวัตถุในน้ำก็จะยิ่งมากขึ้นเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3.2 สถานะไม่เสถียร (Unstable)

ในทางตรงกันข้าม ถ้าเมื่อใดก็ตามที่ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางถ่วง (CG) อยู่สูงกว่าตำแหน่งของจุดศูนย์กลางปริมาตรได้แนวน้ำ (CB) วัตถุนั้นก็จะอยู่ในสภาพไม่เสถียร จากรูปที่ 4.5 (ข.) น้ำหนักของวัตถุ (W) และแรงลอยตัว (B) ไม่ได้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน จึงทำให้เกิดการสร้างโมเมนต์ของแรง ซึ่งส่งผลต่อการเอียงและการหมุนของวัตถุในน้ำ แรงโมเมนต์ที่เกิดขึ้นนี้เปรียบเสมือนกับความพยายามที่จะทำให้จุดศูนย์กลางถ่วง (CG) ของวัตถุพลิกมาอยู่ในตำแหน่งต่ำกว่าจุดศูนย์กลางปริมาตรได้แนวน้ำ (CB) ดังนั้นวัตถุจึงมีโอกาที่จะสามารถพลิกคว่ำได้ดังรูปที่ 4.5 (ง.) ซึ่งเป็นไปโดยอัตโนมัติเนื่องจากวัตถุพยายามที่จะจัดตำแหน่งของตัวเองให้กลับเข้าไปอยู่ในสถานะสมดุลเสมอ

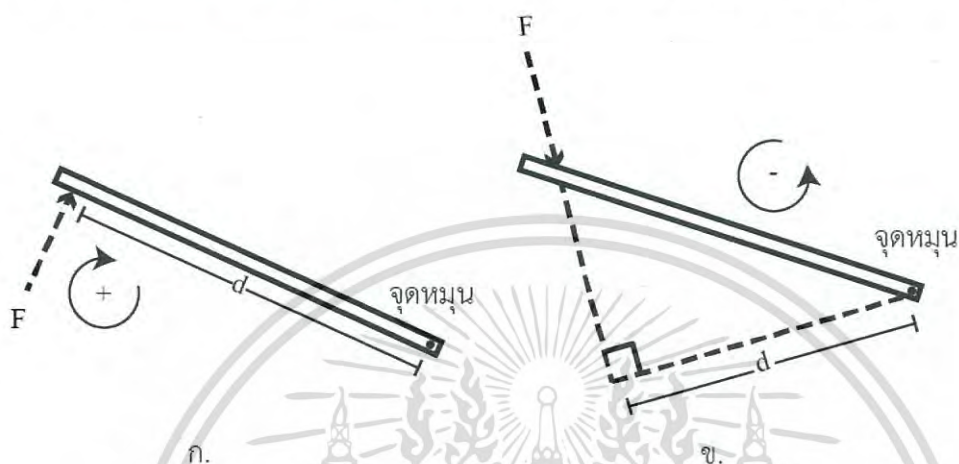


รูปที่ 4.5 สมดุลของวัตถุในน้ำ [28]

4.3 โมเมนต์ของแรง

4.3.1 ทฤษฎีเบื้องต้นของโมเมนต์

แรงที่มากกระทำบริเวณปลายของคานหนึ่ง ในขณะที่ปลายของคานอีกฝั่งหนึ่งมีจุดยึดไว้ (Fulcrum) ซึ่งแรงที่มากกระทำมีแนวโน้มที่จะทำให้เกิดการหมุนของคานรอบจุดยึดนั้น แรงดังกล่าวนี้



รูปที่ 4.6 โมเมนต์ของแรง [27]

เรียกว่า โมเมนต์ (Moment of the Force) มีหน่วยเป็น นิวตันเมตร (M·m) ขนาดของโมเมนต์ขึ้นอยู่กับขนาดของแรงที่มากกระทำกับวัตถุ (F) และระยะทางจากจุดที่แรงมากกระทำบนวัตถุในแนวฉากไปจนถึงจุดหมุน (d) วัตถุที่ถูกแรงมากกระทำสามารถมีแนวโน้มที่จะหมุนได้ทั้งตามเข็มนาฬิกา และทวนเข็มนาฬิกา โดยโมเมนต์ตามเข็มนาฬิกามีทิศทางเป็นบวกดังรูปที่ 4.6 (ก.) และโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกามีทิศทางเป็นลบแสดงดังรูปที่ 4.6 (ข.)

ในการคำนวณหาขนาดของโมเมนต์ (M) หรือทอร์ก (τ) จะได้จากผลลัพธ์ของการคูณระหว่างแรงที่มากกระทำในแนวตั้งฉากกับวัตถุ (F) และระยะทางจากจุดที่แรงมากกระทำบนวัตถุในแนวฉากไปจนถึงจุดหมุน (d) ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\tau = F \times d \quad (4.8)$$

เมื่อพิจารณาสมการจะพบว่าในขณะที่แรง F มีค่าคงที่ ถ้าเมื่อใดก็ตามระยะทางจากจุดที่แรงมากกระทำบนวัตถุในแนวฉากไปจนถึงจุดหมุน d หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า แขนโมเมนต์ (Moment Arm) มีระยะทางเพิ่มขึ้น โมเมนต์ที่เกิดขึ้นก็จะมีค่ามากตามไปด้วยโดยไม่จำเป็นที่จะต้องเพิ่มปริมาณแรง F ที่มากกระทำกับคาน จากหลักการนี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องมือได้หลายอย่าง เช่น กรรไกร คีมลีด เป็นต้น ถ้าเมื่อใดก็ตามแรง F ที่กระทำต่อระบบมีมากกว่าหนึ่งแรง แรงทั้งหมดจะ

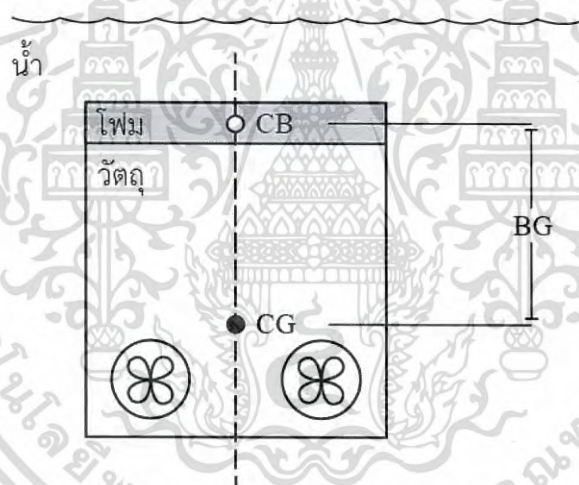
ประสานหรือหักล้างกันเกิดเป็นโมเมนต์ลัพธ์ (M) โดยมีจุดศูนย์กลางมวล (C.G.) เป็นจุดหมุนของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในสื่อออนไลน์ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบ สมการที่ (4.9) เป็นหลักฟิสิกส์ที่นำมาพัฒนาหลักการเอียง วิธีการประยุกต์ใช้สมการได้อธิบายไว้ในบทที่ 5

$$\sum M = \tau_1 \pm \dots \pm \tau_n \quad (4.9)$$

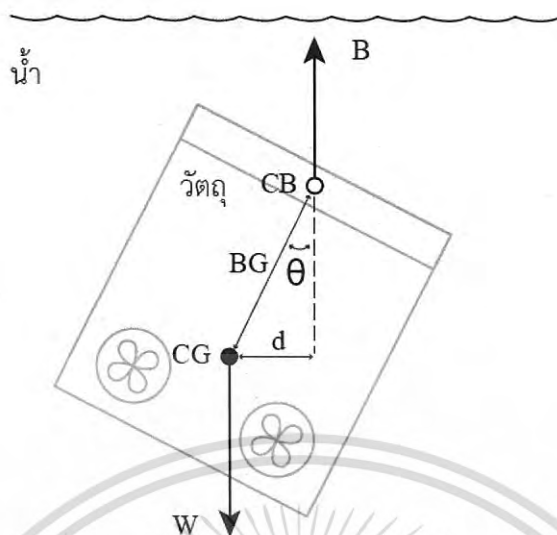
4.3.2 โมเมนต์กับวัตถุในน้ำ

โมเมนต์ที่เกิดขึ้นกับวัตถุในน้ำจะเกิดจากแรงลอยตัวและน้ำหนักของวัตถุที่มีทิศทางตรงกันข้ามกันมากระทำกัน ความเสถียรของวัตถุในน้ำ สามารถระบุได้จากระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางและจุดศูนย์กลางปริมาตรได้แนวน้ำ หรือระยะ BG แสดงดังรูปที่ 4.7 เมื่อใดก็ตามที่ระยะ BG มาก เสถียรภาพของวัตถุในน้ำก็จะมีมากขึ้น ถ้าตำแหน่งของจุดศูนย์กลางและจุดศูนย์กลางปริมาตรได้แนวน้ำมาอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันดังรูปที่ 4.7 โมเมนต์ก็จะไม่เกิดขึ้น เพราะเวกเตอร์ลิฟต์ของแรงลอยตัวและน้ำหนักของวัตถุ ได้หักล้างกันพอดี วัตถุจึงเสถียรและไม่หมุนเมื่ออยู่ในน้ำ



รูปที่ 4.7 สภาวะสมดุลของวัตถุเมื่อจุด CB และ CG อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน [21]

เมื่อใดก็ตามที่วัตถุมีการเอียงตัวในน้ำ จุดศูนย์กลางและจุดศูนย์กลางปริมาตรได้แนวน้ำจะเคลื่อนออกจากแนวเส้นตรง ทำให้แนวแรงจากโมเมนต์ของน้ำหนักและแรงลอยตัวของวัตถุซึ่งมีทิศทางตรงกันข้ามกันมากระทำกัน แขนโมเมนต์จะขึ้นอยู่กับระยะ d ซึ่งสามารถวัดได้จากระยะห่างที่ตั้งฉากกับแนวแรงของจุดศูนย์กลางและจุดศูนย์กลางปริมาตรได้แนวน้ำดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ทิศทางของแรงและแขนโมเมนต์ d [21]

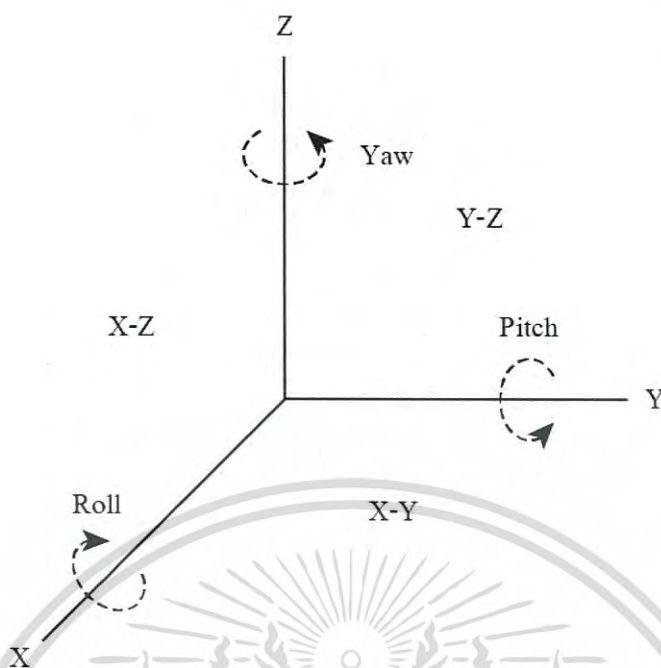
จากรูปที่ 4.8 จะสังเกตได้ว่าเมื่อวัตถุอยู่ในสภาพไม่สมดุล แรงลอยตัว B จากจุดศูนย์กลางถ่วงปริมาตรใต้แนวน้ำ จะช่วยพยุงหรือหมุนวัตถุให้กลับมาอยู่ในสภาพสมดุลดังรูปที่ 4.7 โดยแรงที่เกิดขึ้นนี้เป็นแรงโมเมนต์ซึ่งจะสามารถคำนวณหาขนาดของแรงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$M = W \times d \quad (4.10)$$

$$M = W \times BG \cos \theta \quad (4.11)$$

4.4 การหมุนในปริภูมิสามมิติ

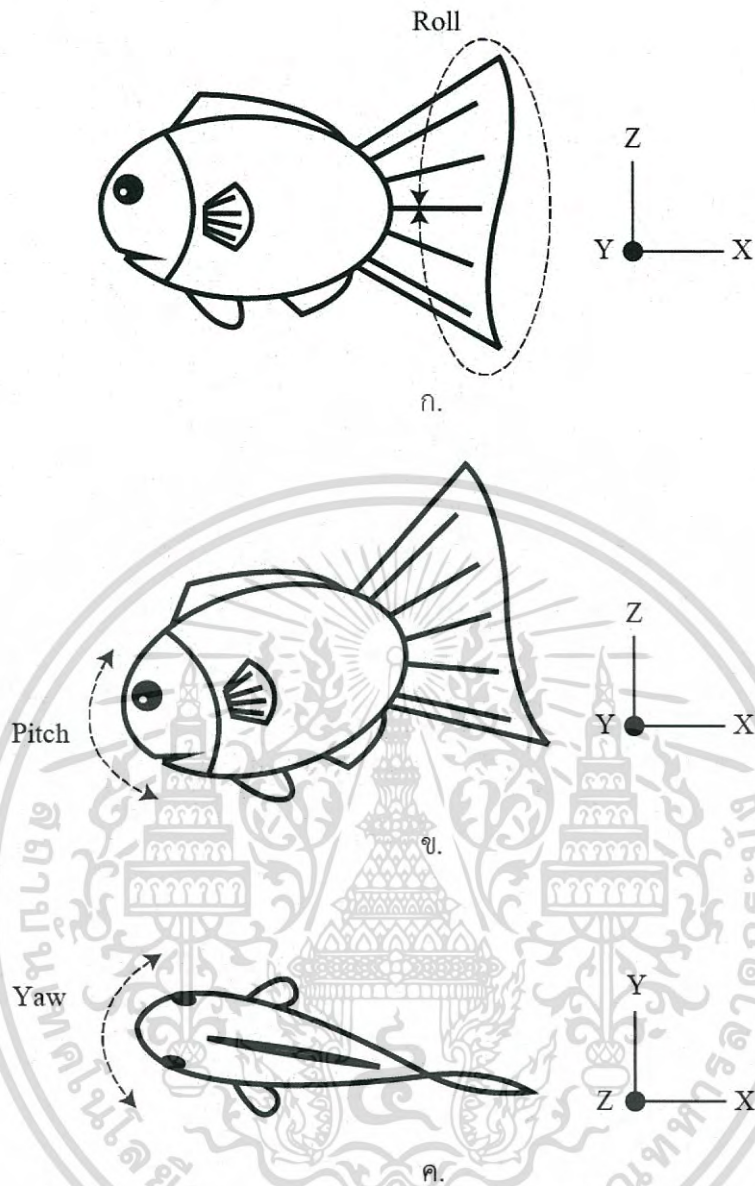
ในการเคลื่อนที่ของวัตถุจำเป็นต้องมีจุดอ้างอิงเสมอเพื่อให้เกิดบรรทัดฐานเดียวกันในการสื่อสาร การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะใช้แกนสามมิติในการอ้างอิง โดยเมื่อหุ่นยนต์เกิดการหมุน การหมุนที่เกิดขึ้นจะสามารถอธิบายได้ว่าหุ่นยนต์เคลื่อนที่หมุนรอบแกนใด จากรูปที่ 4.9 แกน X , Y และ Z จะตั้งฉากกันเสมอซึ่งทำให้เกิดระนาบสองมิติระหว่างแกนต่าง ๆ ได้แก่ ระนาบ X - Y ระนาบ X - Z และระนาบ Y - Z



รูปที่ 4.9 แกนอ้างอิงในปริภูมิสามมิติ

การเคลื่อนที่ของปลาในน้ำสามารถอธิบายโดยใช้ความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ในปริภูมิสามมิติได้ดังต่อไปนี้

1. Row Orientation เป็นการหมุนรอบแนวแกน X ซึ่งเมื่อเกิดขึ้นกับปลาโดยการสะบัดครีบออกหรือครีบท้องจะทำให้ปลาสามารถเอียงตัวหรือหมุนรอบตัวเองได้ดังรูปที่ 4.10 (ก.)
2. Pitch Orientation เป็นการหมุนรอบแนวแกน Y ซึ่งสำหรับปลาจะเป็นการเขีตหัวขึ้นหรือลงไปในน้ำ ทำให้เมื่อมีการสะบัดครีบหาง ปลาจึงเคลื่อนที่ขึ้น หรือต่ำลงไปที่ระดับความลึกต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.10 (ข.)
3. Yaw Orientation เป็นการหมุนรอบแนวแกน Z เกิดจากการสะบัดครีบหาง ซึ่งเมื่อเกิดการสะบัดจะทำให้ส่วนลำตัว รวมไปถึงส่วนหัวของปลา สายไปทางด้านซ้ายและด้านขวา ดังรูปที่ 4.10 (ค.)



รูปที่ 4.10 การหมุนของปลาในปริภูมิสามมิติและแกนอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 สรุป

แม้การว่ายน้ำของปลาจะเป็นธรรมชาติ แต่ธรรมชาติก็คือฟิสิกส์ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องมีความเข้าใจหลักการพื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการนำไปพัฒนาต่อได้อย่างสมบูรณ์และไม่มีข้อสงสัยสำหรับการเคลื่อนที่ขึ้นและลงในน้ำของปลาเป็นแนวตั้ง ปลาได้ใช้ความสามารถของกระเพาะปลาในการเก็บกักอากาศเพื่อทำหน้าที่นี้โดยเฉพาะ ความสามารถในการกักเก็บอากาศทำให้กระเพาะปลามีความเกี่ยวข้องกับแรงลอยตัวตามทฤษฎีทางฟิสิกส์โดยตรง

ในการสร้างหุ่นยนต์ปลาซึ่งประกอบขึ้นมาจากวัสดุและกลไกแมคคานิกส์ ซึ่งในการใช้งานหุ่นยนต์จะต้องว่ายน้ำในน้ำ ดังนั้นการที่จะสั่งให้หุ่นยนต์ปลาสามารถที่จะลอยอย่างสมดุลหรือเอียงตัวในน้ำ ทฤษฎีทางฟิสิกส์เรื่องโมเมนต์และแกนอ้างอิงจึงเข้ามามีส่วนสำคัญเพราะสิ่งเหล่านี้จะระบุทิศทางของแรงโมเมนต์ลัพธ์และมุมเอียงที่เกิดขึ้นในระบบ นอกจากนี้จุดศูนย์ถ่วงและจุดศูนย์ถ่วงปริมาตรได้แนวน้ำล้นเป็นปัจจัยหลักที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบกลไกการเอียงและจัดวางอุปกรณ์ภายในหุ่นยนต์ให้มีความเสถียรเมื่อหุ่นยนต์ทำงานในน้ำ



บทที่ 5

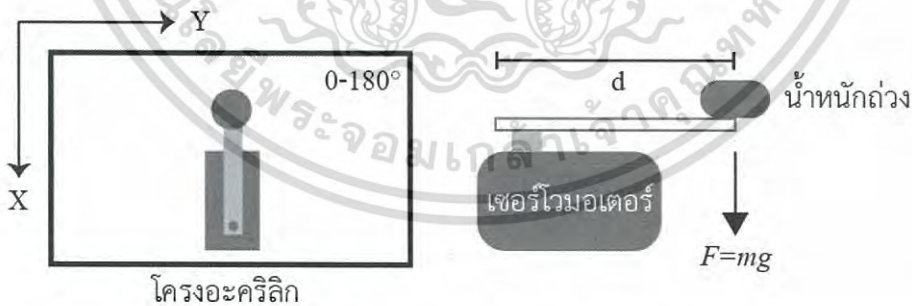
กลไกการเอียง

5.1 แนวคิดและพื้นฐานการออกแบบกลไกการเอียงภายในหุ่นยนต์ปลา

บทนี้แสดงแนวความคิดและวิธีการในการออกแบบกลไกการเอียงสำหรับติดตั้งภายในหุ่นยนต์ปลา กลไกการเอียงมีพื้นที่ทำงานครอบคลุมบนระนาบ X-Y ในปริภูมิสามมิติโดยการหมุนรอบแกน X (Roll) และแกน Y (Pitch) น้ำหนักถ่วงมากกว่าหนึ่งชิ้นถูกนำมาประกอบอยู่บนแขนของเซอร์โวมอเตอร์จึงทำให้เกิดการรวมแรงและเกิดเป็นโมเมนต์ลัพท์ ผลลัพธ์ที่เกิดจากการรวมแรงทำให้จุดศูนย์ถ่วงของระบบสามารถเลื่อนไปยังตำแหน่งใหม่ใกล้กับมุมเอียงที่ต้องการ ดังนั้นเมื่อติดตั้งกลไกการเอียงร่วมกับหุ่นยนต์ปลาจึงทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ในปริภูมิสามมิติได้

5.1.1 โมเมนต์และแรงลอยตัวจากน้ำหนักถ่วง

กลไกการเอียง (Orientation Mechanism) ใช้การสร้างโมเมนต์ลัพท์เพื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงภายในหุ่นยนต์ ซึ่งสามารถทำได้โดยการประยุกต์ใช้คุณลักษณะของเซอร์โวมอเตอร์ โดยที่บริเวณปลายแขนเซอร์โวมอเตอร์ได้ทำการติดตั้งน้ำหนักถ่วงและนำมาวางบนโครงอะคริลิก แขนของเซอร์โวมอเตอร์สามารถหมุนเพื่อเคลื่อนที่ได้ตั้งแต่ 0-180 องศาในระนาบแนวนอนตามทฤษฎี กำหนดให้ความยาวของแขนเซอร์โวมอเตอร์ d และขนาดน้ำหนักถ่วง mg แสดงดังรูปที่ 5.1



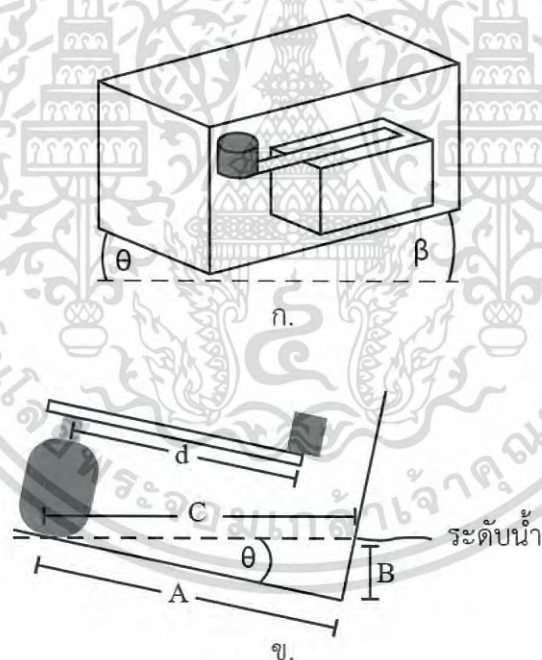
รูปที่ 5.1 เซอร์โวมอเตอร์และน้ำหนักถ่วง

โครงอะคริลิกถูกใช้เป็นโครงสร้างหลักในการสร้างหุ่นยนต์ปลาที่เคลื่อนที่ในน้ำ เซอร์โวมอเตอร์พร้อมน้ำหนักถ่วงจึงถูกนำไปจัดวางบนโครงอะคริลิก เมื่อใดก็ตามที่แขนของเซอร์โวมอเตอร์หมุนออกจากจุดเริ่มต้นไปทางซ้ายและทางขวา จะพบว่าโครงสร้างของหุ่นยนต์ขณะที่ลอยอยู่ในน้ำจะเกิดการเอียงตัวตามทิศทางของแขนเซอร์โวมอเตอร์ที่เคลื่อนที่ ตำแหน่งที่ติดตั้งน้ำหนักถ่วงจะเกิดโมเมนต์ τ ขึ้นในระบบ โดยในรูปที่ 5.1 แรง $\tau = F$ เนื่องจากมีน้ำหนักถ่วงแค่หนึ่งชิ้น โมเมนต์จากเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้ำหนักถ่วงมีทิศทางพุ่งลงตามแรงโน้มถ่วงของโลก ซึ่งตรงกันข้ามกับทิศของแรงลอยตัวเสมอ ภายในโครงสร้างของโครงอะคริลิกได้บรรจุโฟมเพื่อช่วยในการสร้างแรงลอยตัว ทำให้หุ่นยนต์สามารถลอยตัวบนน้ำได้แม้มีน้ำหนักถ่วงติดตั้งอยู่ภายใน เมื่อเซนเซอร์ไว้มอเตอร์หมุน ตำแหน่งของน้ำหนักถ่วงจะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ดังนั้นตำแหน่งของจุดศูนย์กลางถ่วงภายในระบบจึงเคลื่อนที่ออกจากจุดเริ่มต้นไปยังตำแหน่งใหม่ ในกรณีนี้โมเมนต์จากน้ำหนักถ่วง เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการเอียงตัว นอกจากนี้ปัจจัยเรื่องแรงที่ไต่กล่าวมาข้างต้น รูปทรงและขนาดของโครงอะคริลิกยังส่งผลโดยตรงกับการเอียงตัวของหุ่นยนต์ในน้ำซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับแรงลอยตัวที่เกิดขึ้นภายในระบบ

5.1.2 มุมเอียงกับโครงสร้างของหุ่นยนต์

การเอียงที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างของหุ่นยนต์สามารถวัดได้โดยการติดตั้ง Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) Motion Sensor ไว้ภายใน โดยเซนเซอร์นี้จะทำหน้าที่ตรวจวัดมุมเอียงที่เกิดขึ้นภายในระบบว่ามีการหมุนรอบแกน X หรือแกน Y เป็นค่าเท่าใด ดังนั้นแกนอ้างอิงที่ใช้กับหุ่นยนต์จะขึ้นอยู่กับลักษณะการติดตั้ง MEMS Motion Sensor



รูปที่ 5.2 มุมเอียงที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างของหุ่นยนต์

จากรูปที่ 5.2 (ก.) สมมติให้มุม θ และมุม β เป็นตัวแทนของมุมเอียงที่เกิดขึ้นในปริภูมิสามมิติบนระนาบ X-Z และ Y-Z ตามลำดับ ซึ่งค่ามุมเหล่านี้วัดได้จากการใช้ MEMS Motion Sensor อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณามุมเอียงที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างของหุ่นยนต์ในรูปที่ 5.2 (ข.) จะพบว่ามุมเอียงที่เกิดขึ้นสามารถที่จะคำนวณได้จากการสังเกต โดยพบว่ามุมเอียง θ นั้นกลายเป็นส่วนหนึ่งของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามเหลี่ยมมุมฉาก ซึ่งมีด้านประกอบมุมฉากเป็นระยะ A, B และมี C เป็นด้านตรงข้ามมุมฉาก รายละเอียดของด้านประกอบมุมฉากแสดงดังต่อไปนี้

ระยะ A เริ่มจากจุดหมุนของระบบจนถึงขอบของโครงอะคริลิก ซึ่งในที่นี้จุดหมุนของระบบอยู่บริเวณกึ่งกลางของโครงอะคริลิก

ระยะ C คล้ายระยะ A แต่แตกต่างกันตรงที่ระยะ C วัดจากระนาบของผิวน้ำ

ระยะ B เป็นความลึกของโครงอะคริลิกที่จมลงไปใต้น้ำซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาจากการหมุนของแขนเซอร์โวมอเตอร์

เมื่อมองโครงอะคริลิกจากจุดสังเกตในระนาบ X-Z (θ) เพียงระนาบเดียว แขนของเซอร์โวหรือระยะ d สามารถหมุนและหายไปจากสายตาได้ ในขณะที่แขนเซอร์โวหายไปจากระนาบ X-Z โครงอะคริลิกจึงเสมือนกับไม่เอียง แต่โมเมนต์จากน้ำหนักถ่วงที่อยู่บริเวณปลายแขนเซอร์โวกลับไปส่งผลกับการเอียงของโครงอะคริลิกอย่างชัดเจนในระนาบ Y-Z (β) แทน สมการของสามเหลี่ยมมุมฉากที่อธิบายการเอียงของโครงอะคริลิกแสดงได้ดังต่อไปนี้

$$C^2 = A^2 + B^2 \quad (5.1)$$

$$\tan \theta = B/A \quad (5.2)$$

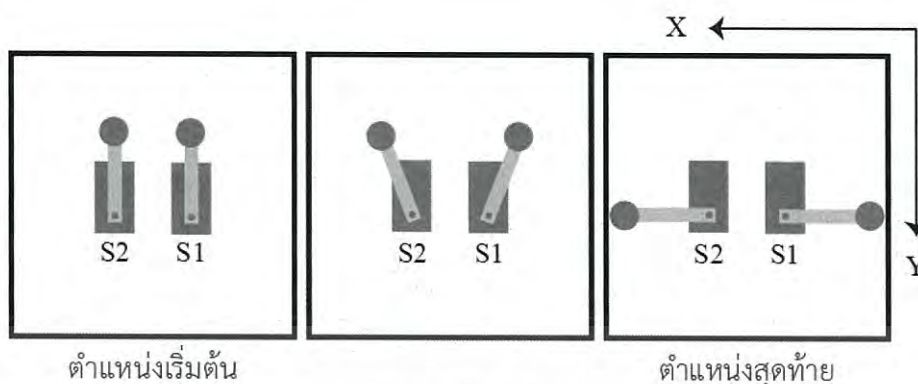
$$\theta = \kappa \tan^{-1}(B/A) \quad (5.3)$$

การเอียงของโครงอะคริลิกที่เกิดขึ้นนั้นมีปัจจัยหลายอย่างที่ต้อคำนึงถึง ได้แก่ แรงลอยตัวและแรงโมเมนต์ ดังนั้นในการที่จะคำนวณมุมเอียงที่แน่นอนของโครงอะคริลิกจึงจำเป็นที่จะต้องใส่ค่าคงที่ κ ไว้ในสมการที่ (5.3) ซึ่งค่าคงที่ κ นั้นเป็นการแสดงความคำนึงถึงขนาดของน้ำหนักถ่วงที่ใช้ซึ่งเป็นตัวแทนของแรงโมเมนต์ลัพธ์ รวมไปถึงขนาดและรูปร่างของโครงอะคริลิกซึ่งเป็นตัวแทนของแรงลอยตัวนั่นเอง นอกจากนี้การคำนวณมุมเอียง β ในระนาบ Y-Z นั้น สามารถที่จะคำนวณได้โดยใช้วิธีการเดียวกันกับการคำนวณมุมเอียง θ ในระนาบ X-Z ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น

5.2 การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์เบื้องต้น

เนื่องจากเซอร์โวมอเตอร์เพียงตัวเดียวสามารถหมุนได้ตั้งแต่ 0-180 องศา จึงมีข้อจำกัดเกิดขึ้นกับพื้นที่การทำงานในระบบเพราะส่งผลโดยตรงกับทิศในการเอียงตัวของหุ่นยนต์ ดังนั้นการเพิ่มจำนวนเซอร์โวมอเตอร์ร่วมกับรูปแบบการจัดเรียงเซอร์โวมอเตอร์จึงได้เกิดขึ้น รูปแบบการจัดเรียงเซอร์โวมอเตอร์และการอธิบายลักษณะของการเกิดแรงที่ใช้ในกลไกการเอียง สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ ดังนี้

5.2.1 Parallel Pattern



รูปที่ 5.3 การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ Parallel Pattern

เซอร์โวมอเตอร์สองตัวถูกนำมาวาง ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของตัวหุ่นยนต์ โดยถูกจัดวางให้ขนานกันตามแนวยาว ที่ตำแหน่งเริ่มต้น แขนเซอร์โวถูกตั้งให้อยู่ที่ตำแหน่ง 90 องศา ปลายแขนเซอร์โวทั้งสองตัวได้ติดน้ำหนักถ่วง m_g ไว้ แสดงดังรูปที่ 5.3

การเคลื่อนที่ของแขนเซอร์โวจะเริ่มต้นจากตำแหน่ง 90 องศาทั้งสองแขน ในสภาวะเริ่มต้น มุมเอียงที่เกิดขึ้นกับหุ่นยนต์จะมากที่สุดเนื่องจากการรวมกันของโมเมนต์จากน้ำหนักถ่วงทั้งสองไปในทิศทางพุ่งลง คณิตศาสตร์ที่อธิบายโมเมนต์ในสภาวะดังกล่าวเป็นไปตามสมการดังนี้

$$\sum M_{\max} = \tau_{S1} + \tau_{S2} \quad (5.4)$$

$$\sum M_{\max} = (F_{S1} \times d_{S1}) + (F_{S2} \times d_{S2}) \quad (5.5)$$

เมื่อกลไกทำงานแขนเซอร์โวจะเคลื่อนที่ออกจากกันไปในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้แรงโมเมนต์รวมมีค่าลดลงไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งในตำแหน่งสุดท้ายที่แรงโมเมนต์หักล้างกันหมด โมเมนต์รวมในระบบจึงมีค่าเป็นศูนย์เพราะน้ำหนักถ่วงอยู่ในทิศตรงกันข้ามกัน ดังนั้นหุ่นยนต์จึงลอยขนานกับระนาบผิวน้ำ โดยสามารถอธิบายเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\sum M_{\min} = 0 \quad (5.6)$$

$$\sum M_{\min} = \tau_{S1} - \tau_{S2} \quad (5.7)$$

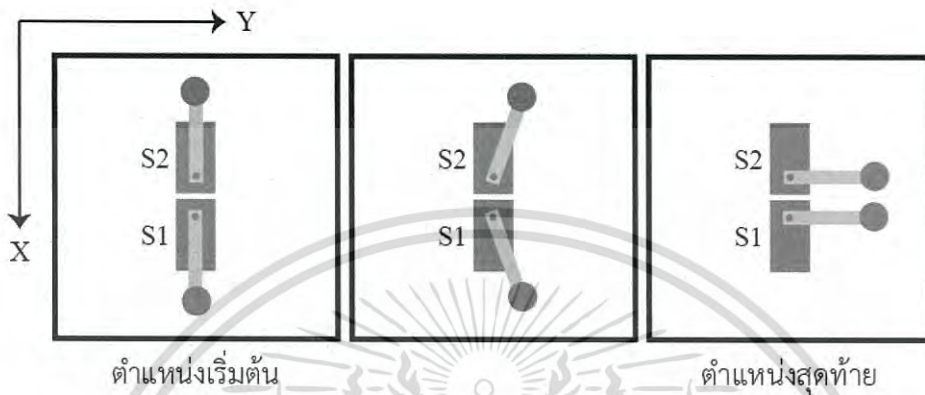
$$\sum M_{\min} = (F_{S1} \times d_{S1}) - (F_{S2} \times d_{S2}) \quad (5.8)$$

อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ในรูปแบบนี้จะทำให้เกิดมุมเอียงสูงสุด แต่ด้วยข้อจำกัดของเซอร์โวมอเตอร์และทิศการหมุนของตัวเอง จึงทำให้การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะนี้ไม่ครอบคลุมพื้นที่การทำงานที่ควรจะเป็นไปได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ในรูปแบบอื่น

5.2.2 In-line Pattern



รูปที่ 5.4 การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ In-line Pattern

เซอร์โวมอเตอร์จำนวนสองตัวถูกนำมาวางต่อกันตามแนวยาวในแนวเส้นตรงเดียวกัน โดยหันหัวเข้าหากันและตั้งอยู่บริเวณกึ่งกลางของหุ่นยนต์ ที่ปลายแขนเซอร์โวมีน้ำหนักถ่วง mg ติดเอาไว้ ซึ่งแขนเซอร์โวที่ตำแหน่งเริ่มต้นถูกตั้งไว้ที่ 90° องศา ดังรูปที่ 5.4

ที่ตำแหน่งเริ่มต้น หุ่นยนต์จะอยู่ในสภาวะสมดุลและลอยขนานกับระนาบของผิวน้ำ โมเมนต์จากแขนเซอร์โวแต่ละข้างซึ่งมีค่าเท่ากันและอยู่ในทิศทางตรงกันข้าม ทำให้โมเมนต์รวมในระบบเกิดการหักล้างกันกลายเป็นศูนย์ จุดหมุนของระบบมีตำแหน่งอยู่ ณ ระยะกึ่งกลางของระยะห่างระหว่างน้ำหนักถ่วงที่ปลายแขนเซอร์โวทั้งสองข้าง ดังนั้นหุ่นยนต์จึงอยู่ในสภาวะสมดุล คณิตศาสตร์ที่อธิบายสภาวะดังกล่าวสามารถใช้สมการเดียวกันกับตำแหน่งสุดท้ายของการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ Parallel Pattern ในรูปที่ 5.3 ซึ่งก็คือสมการที่ (5.6) ถึงสมการที่ (5.8)

ถึงแม้ว่าในการอธิบายแรงลัพธ์ของระบบจะใช้สมการเดียวกัน แต่การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ In-line Pattern กลับมีข้อได้เปรียบมากกว่าในเรื่องของพื้นที่การทำงานที่ยืดหยุ่นและครอบคลุมในการสร้างมุมเอียงที่ต้องการ เมื่อพิจารณาการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ในแบบ In-line Pattern จะพบว่า แขนเซอร์โวสามารถที่จะหมุนได้ในรูปแบบที่หลากหลาย

ในกรณีแรก แขนเซอร์โวหมุนไปในทิศทางตรงกันข้ามกับแขนเซอร์โวอีกตัวหนึ่งแต่อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน หุ่นยนต์จึงอยู่ในสภาวะสมดุล เพราะโมเมนต์ลัพธ์มีค่าเป็นศูนย์

กรณีที่สอง เซอร์โวมอเตอร์หมุนอย่างอิสระและอยู่ในตำแหน่งใด ๆ มุมเอียงที่เกิดขึ้นในกรณีที่สองนี้สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (5.2) และสมการที่ (5.3) โดยใช้วิธีการของสามเหลี่ยมมุมฉากดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 5.1.2 หน้า 46

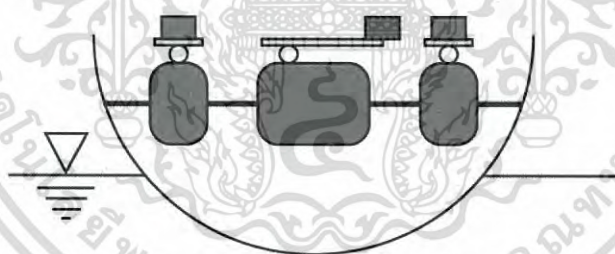
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีสุดท้าย เมื่อแขนเซอร์โวหมุนเข้าหากันและมาขนานที่ตำแหน่งสุดท้ายดังรูปที่ 5.4 ทำให้แรงโมเมนต์จากน้ำหนักถ่วงทั้งสองรวมกันและมีโมเมนต์ลัพธ์เป็นทิศพุ่งลงในแนวดิ่ง ซึ่งโมเมนต์ลัพธ์ที่ได้ในกรณีที่สามจะมีค่าสูงที่สุด ดังนั้นมุมเอียงที่เกิดขึ้นกับหุ่นยนต์ในกรณีนี้จึงมีค่ามากที่สุดด้วย เมื่อแขนของเซอร์โวมอเตอร์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งสุดท้ายโครงอะคริลิกจะเอียงจากระนาบผิวน้ำที่อยู่ในแนวนอนซึ่งเป็นระนาบอ้างอิงของระบบ คณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายสภาวะนี้ได้แก่สมการที่ (5.4) และสมการที่ (5.5)

รูปแบบการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ Parallel Pattern และแบบ In-line Pattern มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงมุมเอียงต่อการกำหนดตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์ไม่ซับซ้อน ดังนั้นการหาโมเดลคณิตศาสตร์จากคุณลักษณะของฮาร์ดแวร์ที่แสดงในกระบวนการทดลองจึงไม่มีความยุ่งยากในการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ โมเดลควบคุมกลไกการเอียงในลักษณะนี้แสดงในบทที่ 7

5.3 การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์จำนวนสี่ตัว

การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์จำนวนสี่ตัว เกิดขึ้นเพื่อทดสอบแนวความคิดในการนำทฤษฎีเรื่องโมเมนต์และแรงมาใช้ในการกำหนดตำแหน่งของหุ่นยนต์ เริ่มต้นโดยการนำพลาสติกครึ่งทรงกลมกลวงมาเป็นฐานสำหรับลอยน้ำ โดยทำการติดตั้งกระดาดแข็งที่เจาะช่องจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ให้ติดตั้งไว้ภายในครึ่งทรงกลม แสดงดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 พลาสติกครึ่งทรงกลมลอยในน้ำพร้อมการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์

หลังจากที่ได้นำครึ่งทรงกลมไปลอยน้ำจึงค้นพบว่าพลาสติกครึ่งทรงกลมเอียงไปตามทิศทางที่แนวแรงของโมเมนต์ลัพธ์เคลื่อนไป ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อแขนเซอร์โวหมุนเพื่อเปลี่ยนตำแหน่ง ดังนั้นจึงทำการทดสอบรูปแบบการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์จากแพลตฟอร์มพลาสติกครึ่งทรงกลม เพื่อค้นหารูปแบบการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ที่สามารถทำให้เกิดการเอียงของแพลตฟอร์มได้มากที่สุด โดยใช้ขนาดน้ำหนักถ่วงเท่ากันจำนวนสี่ชิ้น รูปแบบการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบเพื่อหาลักษณะการเอียงตัวและข้อจำกัดต่าง ๆ แสดงดังตารางต่อไปนี้

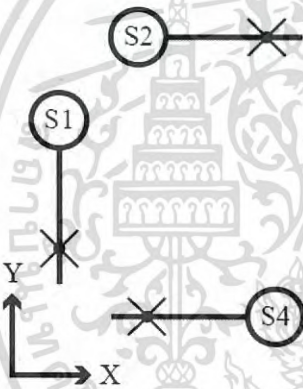
ตารางที่ 5.1 การค้นหารูปแบบการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์และคุณลักษณะจากการทดสอบ

รูปแบบ ที่	การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์	คุณลักษณะ
1		<p>เซอร์โวมอเตอร์ S1, S2, S3 และ S4 มีจุดหมุนหันเข้าหากันบริเวณกึ่งกลาง เซอร์โวมอเตอร์ถูกวางให้มีความสมมาตรและบริเวณปลายแขนเซอร์โวติดน้ำหนักร่องเอาไว้ ในตำแหน่งเริ่มต้นก่อนการหมุนโมเมนต์ลัพท์นั้นได้หักล้างกันหมด ระบบจึงสมดุล เมื่อสั่งแขนเซอร์โวให้หมุนในระนาบ X-Y พบว่าถ้าต้องการให้แพลตฟอร์มเอียงไปในทิศทาง X, 0 จะเหลือแขนของเซอร์โวมอเตอร์ S1 ที่ไม่สามารถช่วยให้หุ่นยนต์ทำมุมเอียงกับระนาบแนวนอนได้มากเท่าที่จะเกิดได้</p>
2		<p>การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ในลักษณะนี้เป็นการนำเซอร์โวมอเตอร์มาวางต่อกันในลักษณะหัวต่อหาง ซึ่งที่ปลายแขนเซอร์โวได้มีการติดน้ำหนักร่องเอาไว้ ถ้ากำหนดให้น้ำหนักร่องเป็นส่วนหัวและจุดหมุนที่บริเวณแขนเซอร์โวเป็นส่วนหาง เซอร์โวมอเตอร์จะเรียงกันแบบหัวต่อหาง ในลักษณะล้อมรอบเป็นทรงสี่เหลี่ยมกรณีแรก เมื่อทดสอบการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์ในระนาบ X-Y พบว่า ถ้าต้องการปรับแขนเซอร์โวให้หมุนไปยังทิศ X, 0 จะเหลือแขนเซอร์โว S4 ที่ไม่สามารถหมุนไปตามทิศทางเดียวกันกับแขนเซอร์โวมอเตอร์ตัวอื่น ๆ จึงทำให้การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ในลักษณะนี้ มุมเอียงของแพลตฟอร์มกับระนาบผิวน้ำไม่มากพอเท่าที่สมควร</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

รูปแบบ ที่	การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์	คุณลักษณะ
		<p>ในอีกกรณีหนึ่ง เมื่อต้องการเอียงหุ่นยนต์ไปยังทิศ X, Y เซอร์โวมอเตอร์ทั้ง 4 ตัวสามารถที่จะหมุนไปยังตำแหน่งเฉพาะต่าง ๆ กันทำให้มุมเอียงที่เกิดขึ้นกับแพลตฟอร์มของหุ่นยนต์ มีค่าสูงที่สุด การหมุนของแขนเซอร์โวมอเตอร์ทั้ง 4 แขนในกรณีนี้ แสดงดังต่อไปนี้ $S1 > 45^\circ$, $S2 > 135^\circ$, $S3 > 180^\circ$ และ $S4 > 0^\circ$ เป็นต้น</p>
3		<p>การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ในลักษณะนี้ถูกนำไปติดตั้งในหุ่นยนต์ปลาต้นแบบ ซึ่งเป็นแบบหัวต่อหัว ซึ่งหมายถึงการนำน้ำหนักถ่วงของแขนเซอร์โวแต่ละตัวมาเจอกันที่ตำแหน่งเริ่มต้นของการทำงาน การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ในลักษณะนี้ตำแหน่งเริ่มต้นของหุ่นยนต์จะอยู่ในสภาวะสมดุล เนื่องจากโมเมนต์ลัพธ์ได้หักล้างกันหมด เพราะลักษณะการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์มีความสมมาตร</p> <p>กรณีแรก เมื่อต้องการที่จะเลื่อนจุดศูนย์ถ่วงของระบบไปยังทิศ X, 0 เซอร์โวมอเตอร์ S1 และ S2 สามารถที่จะหมุนมายังตำแหน่ง 0° และ 180° ตามลำดับเพื่อรวมแรงกันกับเซอร์โวมอเตอร์ S4 และ S1 ที่เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 180° และ 0° ตามลำดับ ผลลัพธ์ที่ได้จากแรงลัพธ์ของโมเมนต์ในรูปแบบนี้ สร้างมุมเอียงสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้กับหุ่นยนต์</p>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.1 (ต่อ)

รูปแบบที่	การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์	คุณลักษณะ
		ในอีกกรณีหนึ่ง เมื่อต้องการเอียงหุ่นยนต์ไปยังทิศ X, Y แขนเซอร์โว S1 และ S4 จะหมุนไปที่ 45° และ 135° ตามลำดับ ทำให้เกิดแรงลัพท์เพื่อช่วยแขนเซอร์โว S2 และ S3 หมุนไปยังตำแหน่ง 0° และ 180° ตามลำดับ ให้เกิดมุมเอียงของหุ่นยนต์มากขึ้น ผลลัพท์ก็คือ หุ่นยนต์จะทำมุมเอียงกับระนาบที่ผิวน้ำมากที่สุด

หลังจากที่ทดสอบรูปแบบการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์เสร็จสิ้น ขั้นตอนต่อไปจะค้นหาแนวแรงโมเมนต์ลัพท์ จากการสังเกตการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเคลื่อนที่ของเซอร์โวมอเตอร์เพื่ออธิบายมุมเอียงที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนที่ของเซอร์โวมอเตอร์พร้อมกันทั้ง 4 ตัว



รูปที่ 5.6 การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์และมุมมองในการวิเคราะห์

รูปที่ 5.6 แสดงการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์จากมุมสูงของพลาสติกทรงกลม ในการวิเคราะห์จะสั่งแขนเซอร์โวให้หมุนไปยังตำแหน่งต่าง ๆ เพื่อที่จะเอียงพลาสติกทรงกลมไปยังทิศที่ต้องการบนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


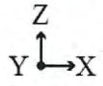
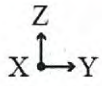
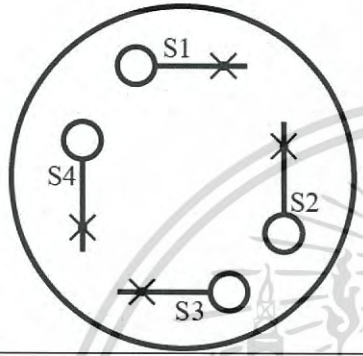

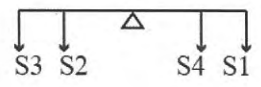
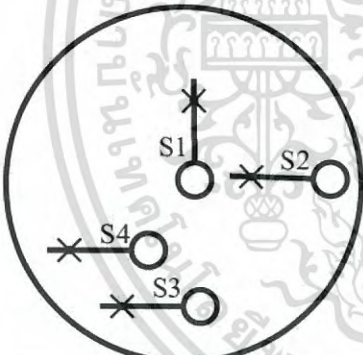
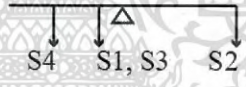
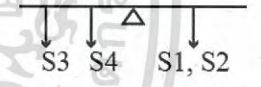
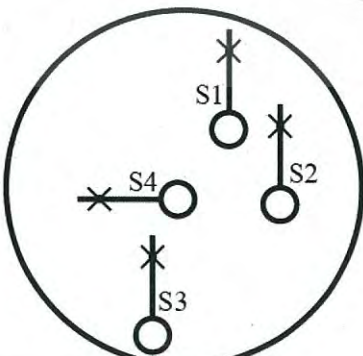
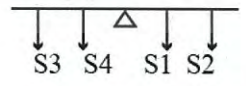
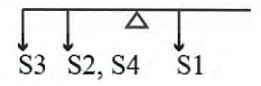
ระนาบ X-Y ซึ่งเป็นแกนอ้างอิง ลำดับการหมุนแกนเซอร์โวมอเตอร์บนระนาบ X-Y สำหรับการจัดวาง เซอร์โวมอเตอร์ดังรูปที่ 5.6 แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.2 ทิศทางการเอียงและตำแหน่งแกนของเซอร์โวมอเตอร์จากการทดสอบบนพลาสติกครึ่งทรงกลม

ทิศทางการเอียง ตามแนวแกน อ้างอิง	ตำแหน่งของแกนเซอร์โวมอเตอร์			
	S1	S2	S3	S4
0, 0	90	90	90	90
X, 0	180	180	90	0
0, -Y	180	90	0	0
-X, 0	90	0	180	180
0, Y	0	0	180	90


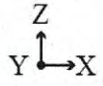
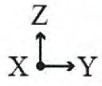
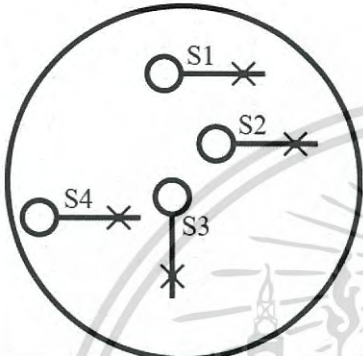
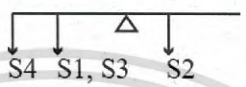
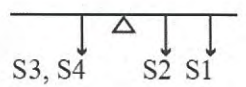
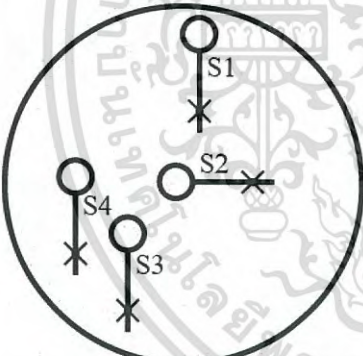
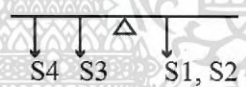
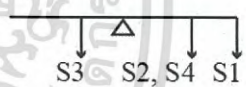
เมื่อกำหนดรูปแบบการเคลื่อนที่ของแกนเซอร์โวทั้งหมดเสร็จเรียบร้อยแล้ว ในขั้นตอนถัดไปจึงนำตำแหน่งสุดท้ายของแกนเซอร์โวมอเตอร์ทั้งหมดภายใต้มุมเอียง ณ ทิศต่าง ๆ มาวิเคราะห์แนวแรงที่เกิดขึ้นจากมุมมองทางด้านข้าง (Side View) ทั้งจากมุมมองในระนาบ X-Z และระนาบ Y-Z แนวแรงจากการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์ที่ถูกจัดวางในรูปที่ 5.6 แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.3 มุมมองด้านข้างและแนวแรงโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในระบบ

ลำดับที่	ทิศทางการหมุนของแขนเซอร์โวมอเตอร์บนระนาบ X-Y 	แนวแรงจากมุมมองในระนาบ X-Z 	แนวแรงจากมุมมองในระนาบ Y-Z 
1	0, 0 	 $M4 + M1 = M3 + M2$	 $M3 + M2 = M4 + M1$
2	X, 0 	 $M4 < (M1 + M3) + M2$	 $M3 + M4 = (M1 + M2)$
3	0, -Y 	 $M3 + M4 = M1 + M2$	 $M3 + (M2 + M4) > M1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 (ต่อ)

ลำดับที่	ทิศทางการหมุนของแขนเซอร์โวมอเตอร์บนระนาบ X-Y 	แนวแรงจากมุมมองในระนาบ X-Z 	แนวแรงจากมุมมองในระนาบ Y-Z 
4	-X, 0 	 $M4 + (M1 + M3) > M2$	 $(M3 + M4) = M2 + M1$
5	0, Y 	 $M4 + M3 = (M1 + M2)$	 $M3 < (M2 + M4) + M1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

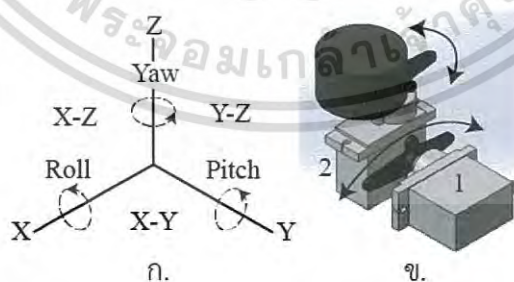
ตารางที่ 5.3 แสดงโมเมนต์ลัพท์ที่เกิดขึ้นกับหุ่นยนต์ในสภาวะต่าง ๆ ซึ่งสอดคล้องกับทิศทางการเอียงของหุ่นยนต์ตามแนวแกนอ้างอิงบริเวณส่วนหัวของตาราง โดยเป็นการยืนยันว่าการหมุนของแขนเซอร์โวมอเตอร์ทั้ง 4 ตัวที่จะทำให้หุ่นยนต์เอียงไปยังทิศทางที่แตกต่างกันในสภาวะความต้องการต่าง ๆ มีความเป็นไปได้ อย่างไรก็ตามสมการแสดงแนวแรงลัพท์เหล่านี้ ไม่สามารถที่จะบอกขนาดมุมเอียงที่เกิดขึ้นได้จากการคำนวณแรง เนื่องจากปัจจัยเรื่องขนาดของหุ่นยนต์และน้ำหนักถ่วงซึ่งส่งผลกระทบต่อโดยตรงกับแรงลอยตัว ดังแสดงให้เห็นในสมการ (5.3) หน้า 47

การหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของหุ่นยนต์และตำแหน่งของแขนเซอร์โวมอเตอร์สำหรับการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ในลักษณะนี้แสดงในรูปที่ 7.12 และรูปที่ 7.13 หน้า 108 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า โมเดลคณิตศาสตร์ไม่เหมาะสมที่จะนำมาอธิบายคุณลักษณะของกลไกการเอียง ดังนั้นเพื่อลดข้อจำกัดทางด้านกายภาพและวิธีการที่จะนำมาใช้ในการควบคุมการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบสองชั้นจึงถูกนำเสนอในหัวข้อถัดไป

5.4 การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบสองชั้น

5.4.1 แนวความคิดในการออกแบบการทำงานของกลไกการหมุน

เพื่อให้หุ่นยนต์ปลามีความละเอียดในการกำหนดตำแหน่ง กลไกการเอียงจึงถูกเปลี่ยนแปลงรูปแบบการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ใหม่โดยใช้ข้อดีของการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ In-line pattern มาประยุกต์โดยการติดตั้งเซอร์โวมอเตอร์เพิ่มอีกหนึ่งตัว เซอร์โวมอเตอร์ที่เพิ่มเข้ามาเป็นฐานการหมุนที่ทำให้การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ In-line pattern สามารถเข้าถึงตำแหน่งที่ต้องการได้ลึกขึ้น การออกแบบที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวมีชื่อเรียกว่ากลไกการหมุน หนึ่งชุดของกลไกการหมุนแสดงดังรูปที่ 5.7(ข)

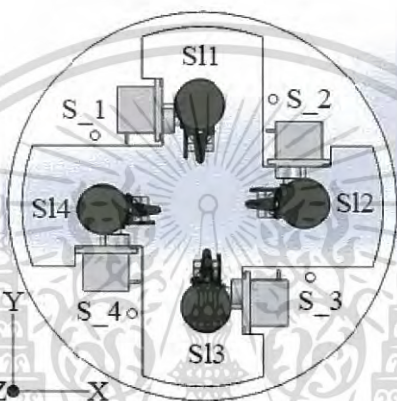


รูปที่ 5.7 กลไกการหมุนและพื้นที่ในการทำงาน

เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่การทำงานของกลไกการหมุนกับแกนในปริภูมิสามมิติพบว่า เซอร์โวมอเตอร์หมายเลข 1 ทำหน้าที่เปลี่ยนระนาบการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์หมายเลข 2 จากระนาบ X-Y ไปสู่ระนาบ Y-Z ได้ เซอร์โวมอเตอร์หมายเลข 2 ทำหน้าที่เปลี่ยนตำแหน่งของน้ำหนักถ่วงภายในเอกซ์ระนาบที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์หมายเลข 1 หลักการทำงานของกลไกการเคลื่อนที่ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหมุนสามารถกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า เซอร์โวมอเตอร์หมายเลข 1 ช่วยเพิ่มพื้นที่ทำงานในการสร้างตำแหน่งของโมเมนต์ลัพท์ใหม่ใด ๆ ใ้แก่น้ำหนักถ่วงและเซอร์โวมอเตอร์หมายเลข 2 ช่วยให้น้ำหนักถ่วงเปลี่ยนตำแหน่งได้

ในการนำกลไกการหมุนมากกว่าหนึ่งชุดมาทำงานร่วมกัน ได้มีการคำนึงถึงรูปแบบการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ให้มีความสมดุลเกิดขึ้น ณ จุดเริ่มต้น ลักษณะของฐานที่มารองรับการทำงานของกลไกการหมุนถูกออกแบบให้รองรับพื้นที่การทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ขณะหมุน ลักษณะการจัดวางกลไกการเอียงในสภาวะสมดุลและการตั้งชื่อเซอร์โวมอเตอร์แสดงในรูปที่ 5.8



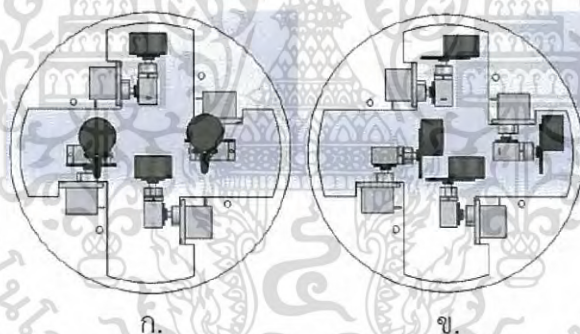
รูปที่ 5.8 การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ ณ ตำแหน่งเริ่มต้นการทำงาน

เซอร์โวมอเตอร์ที่วางในแนวนอนใช้ชื่อว่า S_x และเซอร์โวมอเตอร์ที่วางในแนวตั้งใช้ชื่อว่า Slx กลไกการเอียงในรูปแบบนี้ใช้เซอร์โวมอเตอร์ทั้งหมด 8 ตัวโดยแบ่งวางเซอร์โวมอเตอร์ในแนวนอนและในแนวตั้งให้เท่ากัน ชื่อของเซอร์โวมอเตอร์จะถูกใช้อ้างอิงขณะทำการกำหนดตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์ไปตลอด

กลไกการเอียงที่ใช้การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ในรูปแบบนี้ ทำให้การเอียงในน้ำมีความละเอียดมากขึ้นซึ่งหมายถึง การต้องแลกมาด้วยความซับซ้อนในการกำหนดตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์ทั้งหมด 8 ตัว วิธีการที่ใช้หาความสัมพันธ์ของมุมเอียงที่เกิดขึ้นกับตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์ทั้งหมดเริ่มต้นจากการหารูปแบบหลักและตำแหน่งเฉพาะของเซอร์โวมอเตอร์แต่ละตัวที่ทำให้การเอียงไปในทิศหลักบนระนาบ X-Y เกิดการเอียงสูงสุด ในที่นี้จะกำหนดให้กลไกการเอียงเปลี่ยนตำแหน่งไปยัง 8 ทิศหลัก โดยตำแหน่งเฉพาะของเซอร์โวมอเตอร์ทั้งหมดของแต่ละทิศสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.4 และตัวอย่างลักษณะในการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์จากตารางที่ 5.4 แสดงดังรูปที่ 5.9

ตารางที่ 5.4 วิธีการกำหนดตำแหน่งเซอร์โวมอเตอร์ให้เกิดประสิทธิภาพการเอียงสูงสุด

ทิศ การ เอียง	ตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์							
	S_1	S_2	S_3	S_4	Sl1	Sl2	Sl3	Sl4
0, 0	90	90	90	90	90	90	90	90
0, Y	20	90	160	90	90	160	90	20
X, Y	20	20	160	160	20	160	160	20
X, 0	90	20	90	160	20	90	160	90
X, -Y	160	20	20	160	20	20	160	160
0, -Y	160	90	20	90	90	20	90	160
-X, -Y	160	160	20	20	160	20	20	160
-X, 0	90	160	90	20	160	90	20	90
-X, Y	20	160	160	20	160	160	20	20



รูปที่ 5.9 ตัวอย่างการกำหนดตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์ ก. ตำแหน่ง 0, Y ข. ตำแหน่ง X, Y

ภายใต้สภาวะการทำงานและสิ่งแวดล้อมจริง มุมเอียงสูงสุดในแต่ละทิศทางอาจไม่ใช่คำตอบที่ดีที่สุดเสมอไปสำหรับการปรับตำแหน่งมุมเอียงภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน ดังนั้นการปรับความละเอียดของมุมเอียงจากจุดสมดุลไปยังตำแหน่งมุมเอียงสูงสุดสำหรับแต่ละทิศหลักจึงเป็นสิ่งจำเป็น ขณะกลไกการเอียงทำงานแขนของเซอร์โวมอเตอร์ทุกตัวจะค่อย ๆ เปลี่ยนจากตำแหน่งเริ่มต้นพร้อมกัน โดยยึดลักษณะการกำหนดตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์ในตารางที่ 5.4 เป็นแนวทางไปยังตำแหน่งสุดท้าย วิทยานิพนธ์เล่มนี้ความละเอียดของมุมเอียงต่อหนึ่งทิศหลักถูกแบ่งออกเป็น 4 ระดับ จากขนาดมุมเอียงน้อย (1) ไปหาขนาดมุมเอียงมาก (4) แสดงไว้ในตารางที่ 5.5 ข้อมูลในตารางทั้งหมดได้มาจากการเก็บข้อมูลขณะทำการทดลอง นอกจากนี้ข้อมูลในตารางที่ 5.5 ยังได้ถูกนำมาใช้เป็นฐานข้อมูลในกระบวนการควบคุมบนไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อปรับตำแหน่งกลไกการเอียงให้เป็นไปอย่างอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 ฐานข้อมูลตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์เพื่อการปรับความละเอียดของมุมเอียง

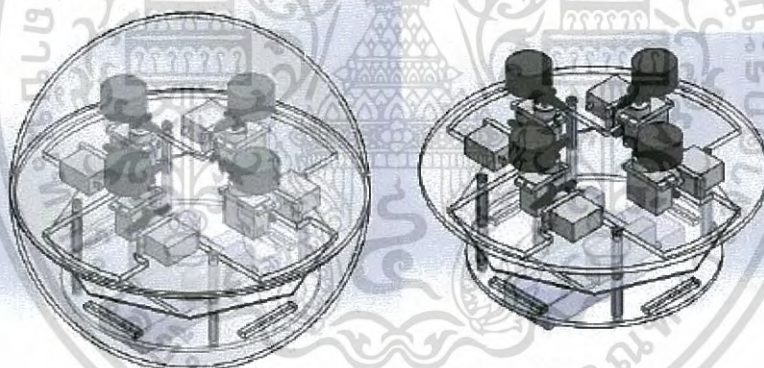
ทิศ การ เอียง	รูป แบบ ที่	ตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์							
		S_1	S_2	S_3	S_4	Sl1	Sl2	Sl3	Sl4
0, Y	1	85	90	95	90	90	95	90	85
	2	80	90	100	90	90	100	90	80
	3	70	90	110	90	90	110	90	70
	4	60	90	120	90	90	120	90	60
X, Y	1	85	85	95	95	85	95	95	85
	2	80	80	100	100	90	100	100	80
	3	70	70	110	110	70	110	110	70
	4	60	60	120	120	60	120	120	60
X, 0	1	90	85	90	95	85	90	95	90
	2	90	80	90	100	80	90	100	90
	3	90	70	90	110	70	90	110	90
	4	90	60	90	120	60	90	120	90
X, -Y	1	95	85	85	95	85	85	95	95
	2	100	80	80	100	80	80	100	100
	3	110	70	70	110	70	70	110	110
	4	120	60	60	120	60	60	120	120
0, -Y	1	95	90	85	90	90	85	90	95
	2	100	90	80	90	90	80	90	100
	3	110	90	70	90	90	70	90	110
	4	120	90	60	90	90	60	90	120
-X, -Y	1	95	95	85	85	95	85	85	95
	2	100	100	80	80	100	80	80	100
	3	110	110	70	70	110	70	70	110
	4	120	120	60	60	120	60	60	120
-X, 0	1	90	95	90	85	95	90	85	90
	2	90	100	90	80	100	90	80	90
	3	90	110	90	70	110	90	70	90
	4	90	120	90	60	120	90	60	90

ตารางที่ 5.5 (ต่อ)

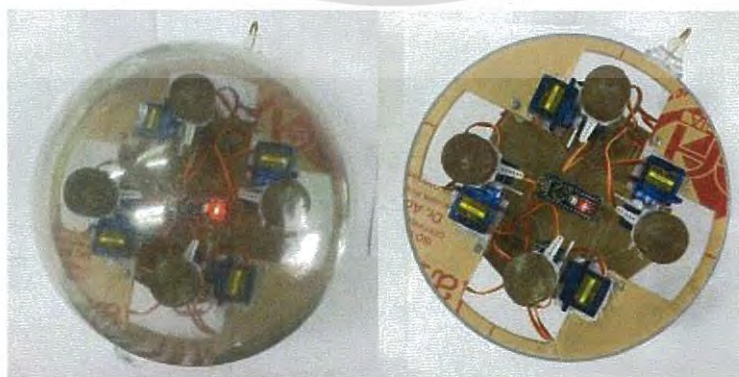
ทิศ การ เอียง	รูป แบบ ที่	ตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์							
		S_1	S_2	S_3	S_4	Sl1	Sl2	Sl3	Sl4
-X, Y	1	85	95	95	85	95	95	85	85
	2	80	100	100	80	100	100	80	80
	3	70	110	110	70	110	110	70	70
	4	60	120	120	60	120	120	60	60

5.4.2 การออกแบบกลไกการเอียงทางกายภาพ

ทรงกลมกลวงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 เซนติเมตรถูกนำมาใช้สำหรับรองรับกลไกการเอียงขณะทำการทดลองในน้ำ ซึ่งภายในลูกบอลได้บรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่จำเป็นสำหรับการทำงานของกลไกการเอียงเอาไว้ รูปลักษณะของกลไกการเอียงแสดงในรูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.11 โมเดลการออกแบบกลไกการเอียง



รูปที่ 5.10 กลไกการเอียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.11 สามารถเห็นได้ชัดเจนว่ากลไกการเอียงในฐานทรงกลมกลวงสามารถแบ่งการจัดวางอุปกรณ์ได้เป็น 3 ชั้น ซึ่งแต่ละชั้นในการออกแบบมีจุดประสงค์แตกต่างกันออกไปดังหัวข้อย่อยต่อไปนี้

1. พื้นที่การทำงานสำหรับกลไกการเอียง มีตำแหน่งอยู่ชั้นบนสุดในการจัดวางอุปกรณ์ ฐานสำหรับวางเซอร์โวมอเตอร์ใช้อะคริลิกรูปวงกลมเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 19.3 เซนติเมตร มาออกแบบโดยตัดให้บริเวณกึ่งกลางกลวงสำหรับเป็นพื้นที่ให้เซอร์โวมอเตอร์เกิดการหมุน อุปกรณ์ในส่วนนี้เป็นส่วนที่เป็นหัวใจในการทำงานของหุ่นยนต์ เนื่องจากทำให้เกิดโมเมนต์ลัพท์และเลื่อนตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของระบบ

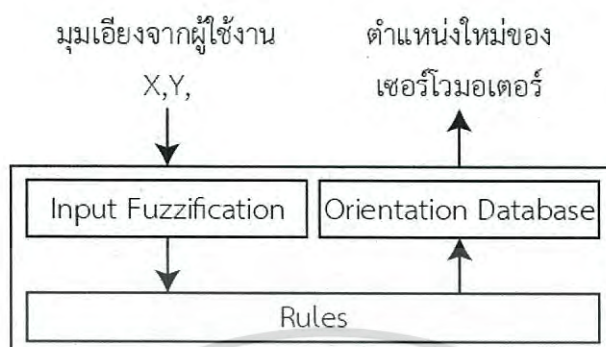
2. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ชั้นกึ่งกลางเป็นแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed Circuit Board) ซึ่งถูกเลือกนำมาใช้งานเพื่อช่วยในเรื่องของการลดจำนวนสายไฟฟ้าและช่วยให้การจัดวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่จำเป็นมีความแม่นยำ ตำแหน่งในการจัดวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ส่งผลต่อการกระจายแรงและการเกิดสมดุลในระบบ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ติดตั้งบนแผ่นวงจรพิมพ์ ได้แก่ ไมโครคอนโทรลเลอร์ เซนเซอร์ตรวจจับการเอียง โมดูลสื่อสารไร้สายแบบวิทยุและจุดเชื่อมต่อของเซอร์โวมอเตอร์ทุกตัวในระบบ

3. น้ำหนักถ่วง มีตำแหน่งอยู่ชั้นล่างสุดของการจัดวางอุปกรณ์ในหุ่นยนต์ ชั้นนี้มีจุดประสงค์เพื่อถ่วงน้ำหนักของระบบภายในทรงกลมกลวงให้มีเสถียรภาพขณะลอยในน้ำ ดังนั้นอุปกรณ์ขนาดใหญ่ที่จำเป็นสำหรับการทำงานของหุ่นยนต์จึงถูกจัดวางไว้ที่บริเวณนี้ทั้งหมด ได้แก่ แบตเตอรี่และตัวแปลงระดับไฟฟ้า

5.4.3 วิธีการควบคุมกลไกการเอียงแบบสองชั้น

หลังจากฮาร์ดแวร์ของกลไกการเอียงพร้อมทดสอบ การควบคุมตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์ทั้งหมดในระยะแรกขณะยังไม่มีฐานข้อมูลใด ๆ จึงเป็นการป้อนค่าตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์ทั้ง 8 ตัวโดยตรงผ่านคอมพิวเตอร์และโมดูลสื่อสารไร้สายแบบวิทยุมายังกลไกการเอียงซึ่งลอยอยู่บนผิวน้ำ ในระยะแรกของการทดลอง เริ่มจากการป้อนตำแหน่งให้แก่เซอร์โวมอเตอร์ทุกตัวโดยใช้ข้อมูลในตารางที่ 5.4 เพื่อหาขอบเขตการเอียงสูงสุดที่ฮาร์ดแวร์สามารถทำได้และคุณลักษณะการเอียงของหุ่นยนต์จากการเปลี่ยนตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์ ในระยะที่สอง เป็นการนำเอาผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และใช้ประโยชน์ในการออกแบบฐานข้อมูลของระบบควบคุม จุดมุ่งหมายในการออกแบบระบบควบคุมคือ การออกแบบระบบให้ผู้ใช้งานเพียงแค่ป้อนมุมเอียงที่ต้องการในรูปแบบของ X,Y, องศาและให้ระบบควบคุมปรับตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์ทั้งแปดตัวอย่างอัตโนมัติ การออกแบบระบบควบคุมสามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ดังนี้ ส่วนรับคำสั่งและประมวลผลข้อมูลจากผู้ใช้ งาน ส่วนการแบ่งพื้นที่การทำงานและฐานข้อมูล และส่วนสุดท้ายคือ ส่วนเงื่อนไขและกฎในการเอียงนี้ เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัดสินใจ วิธีการควบคุมกลไกการเอียงที่นำเสนอในส่วนนี้เป็นวิธีการควบคุมกลไกการเอียงที่ถูกนำมาใช้แทนที่ใช้โมเดลคณิตศาสตร์ ภาพรวมของระบบควบคุมอธิบายไว้ในรูปที่ 5.12



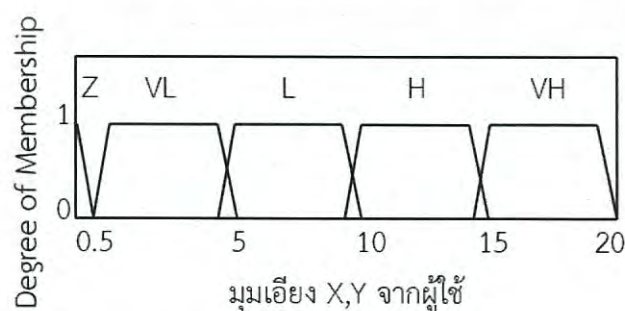
รูปที่ 5.12 ภาพรวมกระบวนการทำงานของระบบควบคุมกลไกการเอียง

5.4.3.1 ส่วนรับคำสั่งและประมวลผลข้อมูลจากผู้ใช้งาน

เนื่องจากความละเอียดในการปรับระดับมุมมองสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ระดับดังตารางที่ 5.5 ดังนั้นขนาดของมุมมองที่ถูกป้อนจากผู้ใช้งานจึงถูกนำมาประมวลผลโดยใช้กระบวนการ Input Fuzzification [22] เพื่อหาขนาดของมุมมองในรูปแบบของภาษาศาสตร์ดังแสดงในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.6 เกณฑ์การจำแนกขนาดของมุมมองจากผู้ใช้งานในกระบวนการ Input Fuzzification

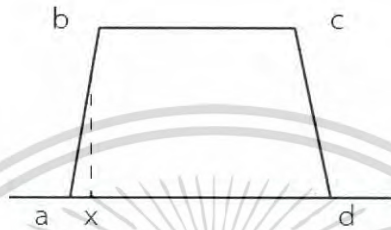
ช่วงการแบ่งมุมมองจากผู้ใช้งาน	ผลลัพธ์ในระบบภาษาศาสตร์
0-0.5	Z (ZERO)
0.5-5	VL (VERY LOW)
4.5-10	L (LOW)
9.5-15	H (HIGH)
14.5-20	VH (VERY HIGH)



รูปที่ 5.13 กราฟแสดงการแบ่งช่วงมุมมองในระบบภาษาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประมวลผลในส่วนนี้จะคำนึงถึงเพียงแค่ขนาดของมุมเอียงว่ามีขนาดมากหรือน้อยเท่าใด และตกอยู่ในช่วงใดของผลลัพธ์ในระบบภาษาศาสตร์เท่านั้นไม่ได้คำนึงถึงทิศทางหรือเครื่องหมายของมุมเอียง การคำนวณหาค่า Degree of membership เป็นส่วนสำคัญในการระบุขนาดมุมเอียงจากผู้ใช้งานควรอยู่ในระบบภาษาศาสตร์ใด ดังนั้นคณิตศาสตร์ที่ใช้ในส่วนนี้จึงขึ้นอยู่กับรูปลักษณะของกราฟในรูปที่ 5.13 ซึ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู



รูปที่ 5.14 ส่วนประกอบของสี่เหลี่ยมคางหมู

จากรูปที่ 5.14 ตัวแปร a, b, c และ d แทนที่ช่วงการแบ่งมุมเอียงจากผู้ใช้งาน ส่วนตัวแปร x เป็นตัวอย่างแสดงตำแหน่งที่อยู่จากขนาดของมุมเอียงที่ผู้ใช้งานป้อนเข้ามา ในการหาค่า Degree of membership (dom) สมการคณิตศาสตร์จึงถูกนำมาใช้งานในแต่ละช่วงของสี่เหลี่ยมคางหมู

ช่วง a ถึง b:
$$dom = \frac{x-a}{b-a}$$

ช่วง c ถึง d:
$$dom = \frac{d-x}{d-c}$$

ช่วง b ถึง c:
$$dom = 1$$

นอกเหนือสี่เหลี่ยมคางหมู:
$$dom = 0$$

วิธีการคำนวณถูกนำไปใช้เขียนโปรแกรมโดยตัวแปร a, b, c, และ d ภายในโปรแกรมจะเปลี่ยนไปตามช่วงการแบ่งมุมเอียงที่กำหนดไว้ดังตารางที่ 5.6 ค่า Degree of membership ของแต่ละช่วงที่ได้จากการคำนวณจะถูกนำมาเปรียบเทียบและหาค่าสูงสุดเพื่อระบุผลลัพธ์ในระบบภาษาศาสตร์ ถ้าเมื่อใดก็ตามช่วงของมุมเอียงที่ป้อนจากผู้ใช้งานตกไปอยู่ในช่วงที่มีการซ้อนทับกันช่วงมุมเอียงใดที่มีค่า degree of membership สูงที่สุด มุมเอียงจากผู้ใช้งานก็จะตกลงไปเป็นสมาชิกของช่วงมุมเอียงนั้นโดยสมบูรณ์ ผลลัพธ์ในระบบภาษาศาสตร์ที่ได้จากกระบวนการในส่วนนี้ถูกนำไปประมวลผลในส่วนของกฎและการตัดสินใจ เพื่อให้ผลลัพธ์สุดท้ายออกมาเป็นตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์ทั้ง 8 ตัว

5.4.3.2 การแบ่งพื้นที่การทำงานและการกำหนดฐานข้อมูล

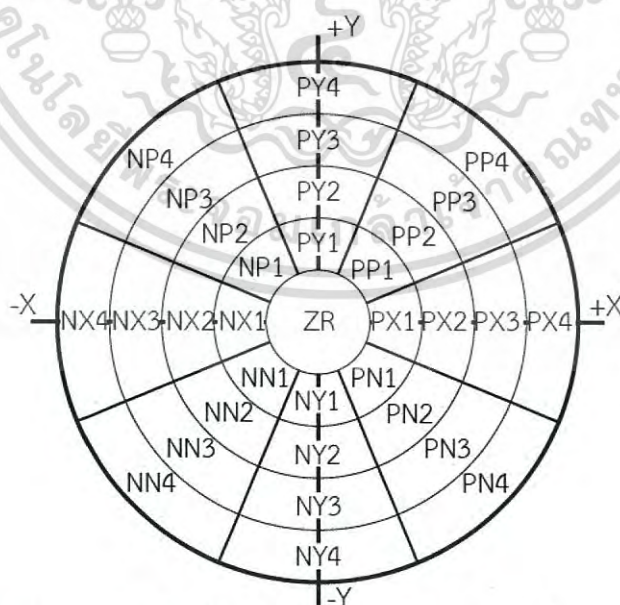
การเอียงของกลไกการเอียงทรงกลมเมื่อมองจากมุมบนสามารถฉายออกมาให้อยู่ในระนาบ X-Y จากนั้นจึงจัดแบ่งพื้นที่การทำงานออกเป็นทิศทางการเอียงและระดับความลึกในการเอียงของไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางนั้น ๆ ทิศทางการเอียง 9 ทิศหลักมีชื่อเรียกในแต่ละทิศบนระนาบ X-Y แสดงในรูปที่ 5.15 ซึ่งสอดคล้องกับมุมเอียงของแพลตฟอร์มทรงกลมกลวงแสดงในตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงในระนาบ X-Y กับชื่อเรียกในการแบ่งพื้นที่

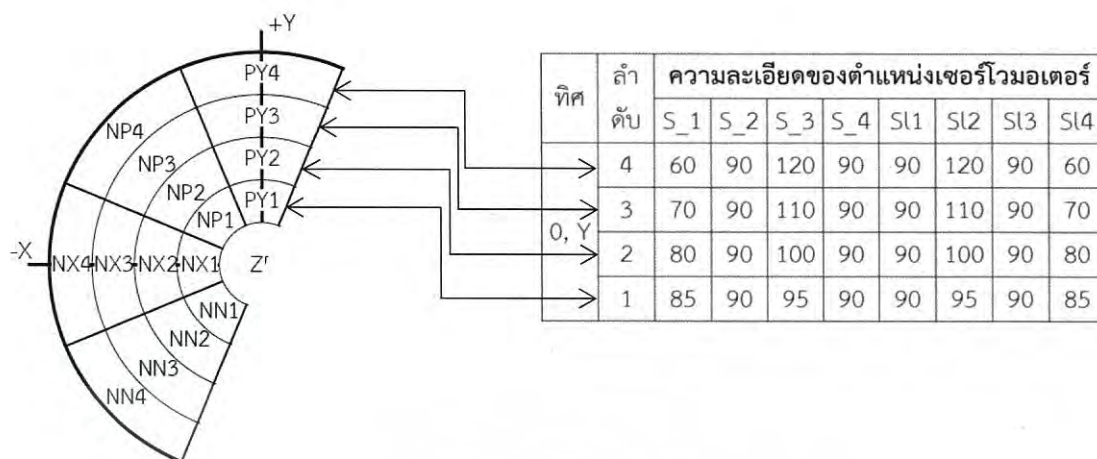
ทิศของมุมเอียงบนระนาบ X-Y	ชื่อเรียกในการแบ่งพื้นที่
0, 0	ZR (ZERO)
0, Y	PY (POSITIVE Y)
X, Y	PP (POSITIVE POSITIVE)
X, 0	PX (POSITIVE X)
X, -Y	PN (POSITIVE NEGATIVE)
0, -Y	NY (NEGATIVE)
-X, -Y	NN (NEGATIVE NEGATIVE)
-X, 0	NX (NEGATIVE X)
-X, Y	NP (NEGATIVE POSITIVE)

ถ้าเปรียบเทียบการแบ่งทิศของมุมเอียงบนระนาบ X-Y ให้เป็นแต่ละภูมิภาคในประเทศ การแบ่งความละเอียดของมุมเอียงในทิศหลักจึงเปรียบเสมือนจังหวัด ความละเอียดของมุมเอียงแบ่งออกเป็น 4 ระดับจากน้อยไปมากอธิบายได้ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 การแบ่งพื้นที่การทำงานของกลไกการเอียงบนระนาบ X-Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.16 ตัวอย่างความสัมพันธ์ของพื้นที่บนระนาบ X-Y และฐานข้อมูล

ฐานข้อมูลการเอียงและตำแหน่งของเซอร์ไวมอเตอร์ภายในตารางที่ 5.5 ถูกบันทึกไว้ในแต่ละช่วงของการแบ่งพื้นที่บนระนาบ X-Y แสดงในรูปที่ 5.16 โดยขนาดของมุมเอียงที่ใช้ในการแบ่งพื้นที่บนระนาบ X-Y เป็นไปตามการแบ่งช่วงขนาดของมุมเอียงของระบบภาษาศาสตร์ดังตารางที่ 5.6 ฐานข้อมูลตำแหน่งของเซอร์ไวมอเตอร์ที่กำหนดไว้สำหรับแต่ละพื้นที่บนระนาบ X-Y เป็นผลลัพธ์สุดท้ายให้ไมโครคอนโทรลเลอร์สั่งการควบคุมตำแหน่งของแขนเซอร์ไวมอเตอร์ทั้ง 8 ตัว

5.4.3.3 กฎและการตัดสินใจเลือกพื้นที่บนระนาบ X-Y

กฎที่ใช้ในระบบควบคุมตั้งขึ้นมาโดยอ้างอิงความเป็นไปได้จากกฎของฟิสิกส์และลักษณะการตัดสินใจของมนุษย์ ทำให้มีความยืดหยุ่นและเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลาซึ่งเป็นจุดเด่นของระบบ การประมวลผลในส่วนนี้เป็นส่วนที่เชื่อมโยงระหว่างข้อมูลที่ผู้ใช้งานป้อนเข้ามากับฐานข้อมูลตำแหน่งของเซอร์ไวมอเตอร์ในไมโครคอนโทรลเลอร์ เงื่อนไขที่ใช้ในการพิจารณาเลือกพื้นที่บนระนาบ X-Y ได้แก่ ขนาดมุมเอียงจากกระบวนการ Input Fuzzification และทิศทางของมุมเอียงบนระนาบ X-Y ซึ่งก็คือเครื่องหมายลบและบวกจากการป้อนค่าของผู้ใช้งานนั่นเอง กฎที่ใช้ในกระบวนการควบคุมกลไกการเอียงแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 5.8 เงื่อนไขในการตัดสินใจเลือกพื้นที่การเอียงบนระนาบ X-Y

ทิศทางการเอียง จากผู้ใช้งาน		ช่วงของมุมเอียง ในระบบภาษาศาสตร์		พื้นที่ของมุมเอียง บนระนาบ X-Y
X	Y	X	Y	
		Z	Z	ZR
+	+	Z	VL	PX1
		Z	VL	PX2

ตารางที่ 5.8 (ต่อ)

ทิศทางการเอียง จากผู้ใช้งาน		ช่วงของมุมเอียง ในระบบภาษาศาสตร์		พื้นที่ของมุมเอียง บนระนาบ X-Y
X	Y	X	Y	
+	+	Z	H	PX3
		Z	VH	PX4
		VL	Z	PY1
		VL	VL	PP1
		VL	L	PP1
		VL	H	PX2
		VL	VH	PX3
		L	Z	PY2
		L	VL	PP1
		L	L	PP2
		L	H	PP2
		L	VH	PX3
		H	Z	PY3
		H	VL	PY2
		H	L	PP2
		H	H	PP3
		H	VH	PP3
		VH	Z	PY4
		VH	VL	PY3
		VH	L	PP3
VH	H	PP3		
VH	VH	PP4		
+	-	Z	Z	ZR
		Z	VL	NX1
		Z	L	NX2
		Z	H	NX3
		Z	VH	NX4
		VL	Z	PY1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อสาธารณะ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 (ต่อ)

ทิศทางการเอียง จากผู้ใช้งาน		ช่วงของมุมเอียง ในระบบภาษาศาสตร์		พื้นที่ของมุมเอียง บนระนาบ X-Y
X	Y	X	Y	
+	-	VL	VL	NP1
		VL	L	NP1
		VL	H	PY2
		VL	VH	PY3
		L	Z	PY2
		L	VL	NP1
		L	L	NP2
		L	H	NP2
		L	VH	NX3
		H	Z	PY3
		H	VL	PY2
		H	L	NP2
		H	H	NP3
		H	VH	NP3
		VH	Z	PY4
		VH	VL	PY3
		VH	L	NP3
		VH	H	NP3
		VH	VH	NP4
		-	-	Z
Z	VL			NX1
Z	L			NX2
Z	H			NX3
Z	VH			NX4
VL	Z			NY1
VL	VL			NN1
VL	L			NN1
		VL	H	NN2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 (ต่อ)

ทิศทางการเอียง จากผู้ใช้งาน		ช่วงของมุมเอียง ในระบบภาษาศาสตร์		พื้นที่ของมุมเอียง บนระนาบ X-Y
X	Y	X	Y	
-	-	VL	VH	NY3
		L	Z	NY2
		L	VL	NN1
		L	L	NN2
		L	H	NN2
		L	VH	NX3
		H	Z	NY3
		H	VL	NY2
		H	L	NN2
		H	H	NN3
		H	VH	NN3
		VH	Z	NY4
		VH	VL	NY3
		VH	L	NN3
		VH	H	NN3
		VH	VH	NN4
-	+	Z	Z	ZR
		Z	VL	PX1
		Z	L	PX2
		Z	H	PX3
		Z	VH	PX4
		VL	Z	NY1
		VL	VL	PN1
		VL	L	PN1
		VL	H	PX2
		VL	VH	PX3
		L	Z	NY2
L	VL	PN1		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ข้อมูลเหล่านี้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.8 (ต่อ)

ทิศทางการเอียง จากผู้ใช้งาน		ช่วงของมุมเอียง ในระบบภาษาศาสตร์		พื้นที่ของมุมเอียง บนระนาบ X-Y
X	Y	X	Y	
-	+	L	L	PN2
		L	H	PN2
		L	VH	PX3
		H	Z	NY3
		H	VL	NY2
		H	L	PN2
		H	H	PN3
		H	VH	PN3
		VH	Z	NY4
		VH	VL	NY3
		VH	L	PN3
		VH	H	PN3
		VH	VH	PN4

โปรแกรมบนไมโครคอนโทรลเลอร์ใช้เงื่อนไขจากตารางที่ 5.8 มาเขียนโดยใช้เงื่อนไข if-else ซ้อนกันหลายชั้นสำหรับคัดกรองการเข้าถึงฐานข้อมูล ผลลัพธ์ที่ได้จากเงื่อนไขข้างต้นออกมาเป็นพื้นที่มุมเอียงบนระนาบ X-Y เพื่อนำมาใช้เรียกฐานข้อมูลตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์เฉพาะพื้นที่นั้น ๆ ลำดับถัดไป ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งแขนของเซอร์โวมอเตอร์ให้หมุนไปยังตำแหน่งสุดท้ายตามฐานข้อมูลที่ถูกเลือกก่อให้เกิดมุมเอียงที่ผู้ใช้งานต้องการ ฐานข้อมูลตำแหน่งของแขนเซอร์โวมอเตอร์ที่ได้จากการทดลองทั้งหมดถูกบันทึกไว้ล่วงหน้าบนไมโครคอนโทรลเลอร์

ข้อดีจากระบบควบคุมในส่วนนี้ คือ การที่ผู้ใช้งานสามารถปรับเปลี่ยนทิศและขนาดมุมเอียงได้โดยง่ายจากการป้อนตำแหน่งมุมเอียงในรูปแบบ X,Y โดยที่ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องเข้าใจวิธีการกำหนดตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์ทั้ง 8 ตัวภายในกลไกการเอียง

5.5 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงองค์ประกอบทั้งหมดซึ่งถูกนำมาใช้ในการออกแบบกลไกการเอียง (Orientation Mechanism) สำหรับหุ่นยนต์ปลา ตั้งแต่แนวคิดพื้นฐานในการออกแบบ ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงและตำแหน่งแกนของเซอร์โวมอเตอร์ รวมถึงตำแหน่งของเวกเตอร์แรงลัพธ์ โดยได้นำเสนอความหลากหลายของรูปแบบการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ไล่เรียงตั้งแต่จำนวนเซอร์โวมอเตอร์ที่ใช้จากมากไปน้อย ดังต่อไปนี้ เซอร์โวมอเตอร์จำนวนสองตัว สี่ตัวและแปดตัว

การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์จำนวน 2 ตัวมีการจัดเรียงในรูปแบบ Parallel Pattern และ In-line Pattern ซึ่งรูปแบบการกำหนดตำแหน่งสามารถอธิบายได้โดยการหาโมเดลคณิตศาสตร์ นอกจากนี้ยังมีการทดสอบความเป็นไปได้ในการเกิดโมเมนต์ลัพท์สำหรับการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์จำนวน 4 ตัวในรูปแบบต่าง ๆ กัน หนึ่งในรูปแบบการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์จำนวน 4 ตัวจากรูปแบบทั้งหมดที่ได้นำเสนอไปข้างต้นได้ถูกนำมาติดตั้งภายในหุ่นยนต์ปลาทันแบบ อย่างไรก็ตามเพื่อพัฒนา กลไกการเอียงให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น รูปแบบการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบสองชั้นซึ่งใช้เซอร์โวมอเตอร์ขนาดเล็กทั้งหมด 8 ตัวจึงได้ถูกขี้นนำเสนอพร้อมกับวิธีการควบคุมกลไกการเอียงแบบไม่ใช้โมเดลคณิตศาสตร์ ดังนั้นในบทนี้จึงแสดงถึงความหลากหลายและกระบวนการคิดในการพัฒนา กลไกการเอียงตั้งแต่จุดเริ่มต้นไปจนถึงกระบวนการที่ซับซ้อน

บทที่ 6

การออกแบบหุ่นยนต์ปลา

6.1 ลักษณะทางกายภาพของหุ่นยนต์ปลา

หุ่นยนต์ปลาจะเกิดขึ้นไม่ได้ถ้าไม่มีการจำลองโครงสร้างของหุ่นยนต์ในซอฟต์แวร์ เนื่องจากความซับซ้อนของระบบและการออกแบบ ทำให้กระบวนการการจำลองรูปแบบหุ่นยนต์ปลาบนซอฟต์แวร์ มีความสำคัญและไม่สามารถที่จะมองข้ามไปได้ การออกแบบหุ่นยนต์ปลา จะเริ่มจากการคำนวณน้ำหนักอุปกรณ์ทั้งหมดที่ต้องทำการติดตั้ง ให้พอดีกับปริมาตรของโครงอะคริลิก เพื่อให้หุ่นยนต์ปลาสามารถที่จะลอยอยู่ในน้ำได้ที่ระดับความลึกบริเวณผิวน้ำพอดีและมี Neutral Buoyancy ที่ทำให้หุ่นยนต์ปลาไม่ลอยหรือจมลงไปในน้ำ การคำนวณขนาดและรูปร่างของหุ่นยนต์ปลา จะเริ่มจากการใช้สมการที่ (4.2) และสมการที่ (4.3) ในหน้า 34 ซึ่งถูกยกมาแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$W = B \quad (6.1)$$

$$mg = \rho_{fluid} V_{disp} g \quad (6.2)$$

จากสมการข้างต้นต้องการทราบค่าตัวแปร V_{disp} ซึ่งหมายถึงปริมาตรของหุ่นยนต์ปลาทั้งหมดที่จะมาแทนที่น้ำ ค่า V_{disp} ทำให้สามารถคำนวณขนาดความกว้างและความสูงของหุ่นยนต์ปลา ส่งผลให้สามารถคำนวณค่าแรงลอยตัว B ให้เหมาะสมกับระดับความลึกที่ต้องการให้หุ่นยนต์ปลาลอยอยู่ในน้ำได้ ตัวแปร m หมายถึง น้ำหนักของหุ่นยนต์ปลา ซึ่งก็คือวัสดุทั้งหมดที่ใช้ในการประกอบและติดตั้งไว้ภายใน มีรายละเอียดแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 6.1 น้ำหนักของอุปกรณ์ทั้งหมดที่ถูกติดตั้งในหุ่นยนต์ปลา

รายชื่ออุปกรณ์	จำนวน	น้ำหนัก (กรัม)
แบตเตอรี่	1	41.4
เซอร์โวมอเตอร์ชนิดกันน้ำ	1	60.0
Arduino Nano	1	5.7
สายส่งข้อมูลความยาว 1 เมตร	1	60.0
เซอร์โวมอเตอร์สำหรับกลไกการเอียง	4	14.3
อินฟราเรดเซนเซอร์	3	9.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 (ต่อ)

รายชื่ออุปกรณ์	จำนวน	น้ำหนัก (กรัม)
ขนาดน้ำหนักถ่วง	4	59.8
โครงอะคริลิกและวัสดุอื่น ๆ	-	≈ 500.0
น้ำหนักรวม (m)		≈ 1,000

แทนค่าสมการ

$$m = 1000g = 1kg$$

$$\rho_{fluid} = 1000kg / m^3$$

$$mg = \rho_{fluid} V_{disp} g \quad (6.3)$$

$$(1kg) \times g = (1000kg / m^3) \times V_{disp} \times g \quad (6.4)$$

$$V_{disp} = 1m^3 = 1000cm^3 \quad (6.5)$$

จากสมการที่ (6.3) สามารถใช้คำนวณปริมาตรของหุ่นยนต์ปลาได้เท่ากับ 1000 cm^3 ปริมาตรที่คำนวณได้ สามารถที่จะนำมาหาขนาดของหุ่นยนต์ปลาโดยประมาณ โดยจะคำนวณขนาดเฉพาะส่วนลำตัว เนื่องจากเป็นส่วนที่มีปริมาตรของอากาศอยู่ภายในมากที่สุด แสดงดังรูปที่ 6.1 ได้ตั้งสมการต่อไปนี้

$$V_{fish_robot} = length \times width \times height \quad (6.6)$$

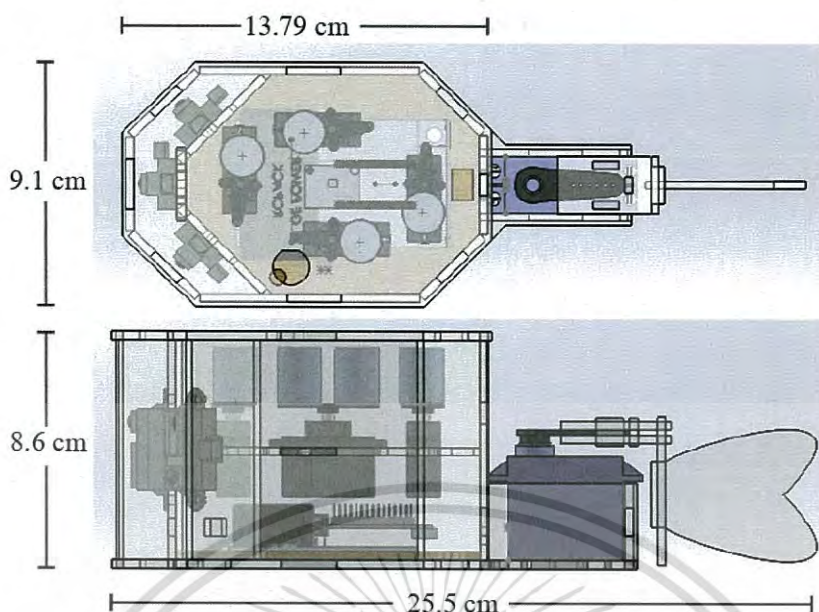
$$V_{fish_robot} = 13.79cm \times 9.1cm \times 8cm \quad (6.7)$$

$$V_{fish_robot} = 1003.91cm^3 \approx 1000cm^3 \quad (6.8)$$

$$V_{fish_robot} = V_{disp} \quad (6.9)$$

จากสมการที่ (6.9) เมื่อปริมาตรของหุ่นยนต์ปลาจากการคำนวณเท่ากับปริมาตรของน้ำที่ ต้องการนำมาแทนที่ จึงทำให้ทราบว่า ขนาดของหุ่นยนต์ปลาที่ได้ออกแบบไว้ในสมการที่ (6.7) แสดงดังรูปที่ 6.1 จะสามารถทำให้หุ่นยนต์ปลา มีแรงลอยตัวในน้ำในสภาวะ Neutral Buoyancy ได้นอกจากนี้เมื่อกระบวนการการคำนวณปริมาตรของหุ่นยนต์ปลาเสร็จสิ้น จึงสามารถเริ่มออกแบบรูปร่างของหุ่นยนต์ปลาอย่างละเอียด เพื่อการออกแบบและจัดวางอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในหุ่นยนต์ปลา จากสิ่งของที่มีอยู่ ซอฟต์แวร์ SolidWorks 2013 ถูกนำมาใช้เพื่อจำลองความเป็นไปได้ในการหาความเหมาะสมของตำแหน่งอุปกรณ์ทุกชิ้น และจำลองสถานการณ์ที่จะเกิดขึ้นทั้งหมดขณะที่หุ่นยนต์ปลาทำงาน ซึ่งจะไม่สามารถสำเร็จลุล่วงได้ถ้าไม่ได้ใช้ซอฟต์แวร์ในการออกแบบโครงสร้างและการจัดวาง

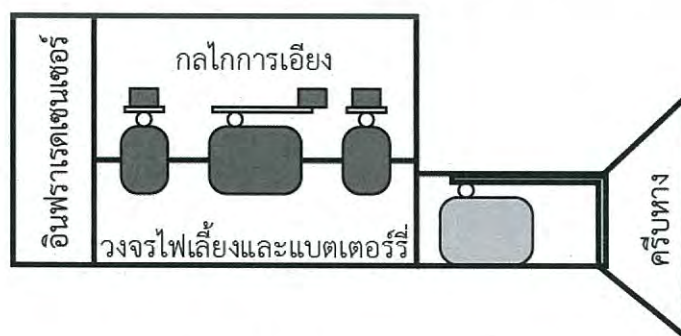
เอกอุปกรณ์ภายในทั้งหมดไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.1 ขนาดของหุ่นยนต์ปลา

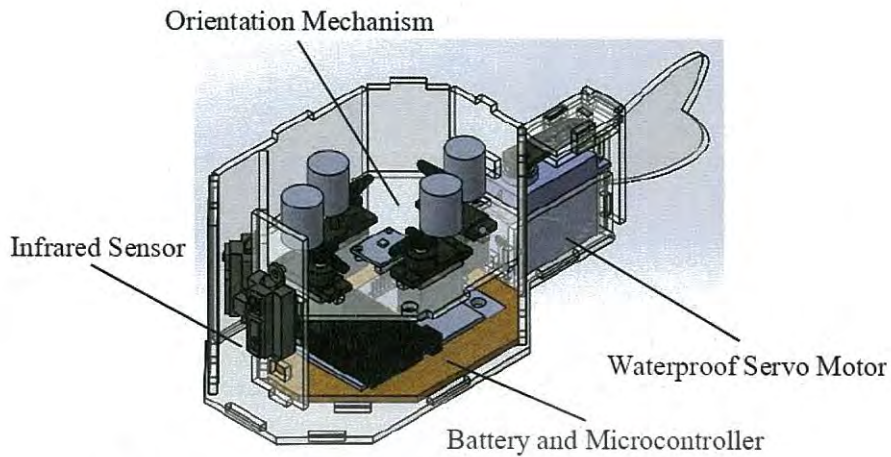
6.1.1 โครงสร้างของหุ่นยนต์ปลา

โครงสร้างของหุ่นยนต์ปลาถูกออกแบบมาเพื่อที่จะบรรจุกลไกการเอียงไว้ภายในกล่องอะคริลิกทรงแปดเหลี่ยม ซึ่งเปรียบเสมือนส่วนหัวและลำตัวของปลา นอกจากนี้ภายในกล่องอะคริลิกบริเวณส่วนหัว ยังบรรจุไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรไฟเลี้ยง แบตเตอรี่ และอินฟราเรดเซนเซอร์สำหรับหลบหลีกสิ่งกีดขวาง โครงสร้างของหุ่นยนต์ปลาเกิดจากการประกอบกันของแผ่นอะคริลิกซึ่งถูกออกแบบให้มีลิ้มและช่องว่างสำหรับการประกบเพื่อสร้างความแข็งแรง นอกจากนี้หุ่นยนต์ปลาจำเป็นต้องมีระบบกันน้ำเพื่อปกป้องอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในหุ่นยนต์ ดังนั้นช่องว่างระหว่างรอยต่อของแผ่นอะคริลิกแต่ละชั้นจึงใช้ซิลิโคนสีใสมาทาปิดทับ หุ่นยนต์ปลาที่สร้างขึ้นมีโครงสร้างแสดงดังรูปที่ 6.2 และรูปที่ 6.3 รวมไปถึงรายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละชิ้นที่ใช้ในหุ่นยนต์ปลาแสดงในตารางที่ 6.2



รูปที่ 6.2 โครงสร้างในภาพรวมของหุ่นยนต์ปลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 โมเดลจำลองหุ่นยนต์ปลาจากโปรแกรม SolidWorks

ตารางที่ 6.2 รายละเอียดของอุปกรณ์และโครงสร้างของหุ่นยนต์ปลา

รายชื่ออุปกรณ์	รายละเอียด
ไมโครคอนโทรลเลอร์	Arduino Nano, ATmega328
เซอร์โวมอเตอร์ชนิดกันน้ำ	Hitec HS-5646WP แรงบิด (7.4 V) 12.9 kg/cm
เซอร์โวมอเตอร์สำหรับกลไกการเอียง	Tower Pro MG90S แรงบิด 2.5 kg/cm
เซนเซอร์ตรวจจับสิ่งกีดขวาง	Sharp Infrared Sensor, GP2D120XJ00F ระยะตรวจจับ 4 - 30 cm
แบตเตอรี่	Lithium Polymer ขนาดแรงดัน 7.4 V ความจุ 1,500 mAh
จำนวนข้อต่อของหุ่นยนต์ปลา	ข้อต่อเดียวทำจากแผ่นอะคริลิก
น้ำหนักถ่วง	ทรงกระบอกตัน เส้นผ่าศูนย์กลาง 16 mm ความยาว 20 mm น้ำหนัก 59.8 g
ขนาดของหุ่นยนต์ปลา	ความกว้าง 91 mm ความยาว 255 mm ความสูง 86 mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.2 ครีบหางของหุ่นยนต์ปลา

ครีบหางของหุ่นยนต์ปลาเมื่อสะบัดแล้ว จะทำให้หุ่นยนต์ส่ายไปทางซ้ายและทางขวามองจากมุมสูง ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า หุ่นยนต์ปลามีการหมุนรอบแกน Z (Yaw) วิธีการเคลื่อนที่ที่นำมาใช้กับหุ่นยนต์ปลาในปริภูมิตwodimensional นี้มีพื้นฐานมาจากโมเดลคณิตศาสตร์ของนิลาศ [1] ซึ่งมาจากการสังเกตการเคลื่อนที่ของปลาในแบบ Body and/or Caudal Fin (BCF) โมเดลคณิตศาสตร์ควบคุมหุ่นยนต์ปลาให้แสดงการเคลื่อนที่เป็นรูปคลื่นไซน์ โดยเริ่มจากการแบ่งลำตัวของปลาตามความยาวออกเป็นสัดส่วน ได้แก่ ส่วนหัว ส่วนลำตัวตอนต้น ส่วนลำตัวตอนปลายและส่วนครีบหาง ดังรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 การแบ่งลำตัวของปลาเป็นสัดส่วน [1]

หลังจากนั้นจึงออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์ปลาให้เป็นสัดส่วนตามความยาวลำตัวที่แบ่งไว้ โดยแต่ละส่วนจะสร้างขึ้นมาจากกล่องอะคริลิกที่อยู่ในบรรจุเซอร์โวมอเตอร์ไว้เป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อน เซอร์โวมอเตอร์ทำหน้าที่เป็นข้อต่อเสมือนซึ่งมีตำแหน่งตามแนวกระดูกสันหลังของปลา สมการการเคลื่อนที่ของนิลาศ [1] จึงสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ให้หุ่นยนต์ปลาแสดงรูปคลื่นไซน์ที่ความถี่และแอมพลิจูดต่าง ๆ กัน

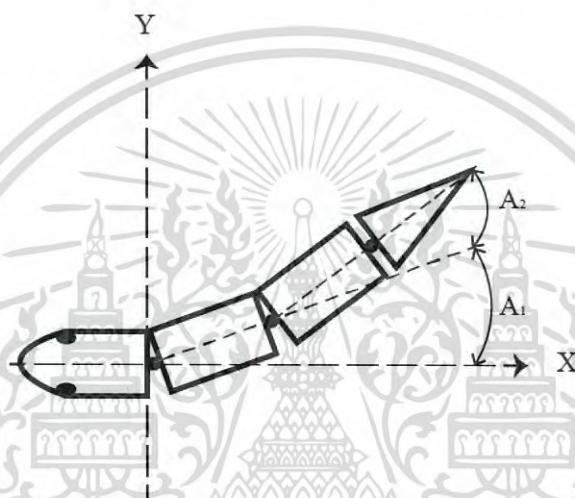
สมการคณิตศาสตร์ถูกออกแบบมาให้สามารถปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้อย่างหลากหลายโดยการควบคุมค่าพารามิเตอร์ของสมการ โมเดลคณิตศาสตร์ของนิลาศแสดงดังสมการต่อไปนี้

$$A_n = K_a \sin(2\pi ft - B_{n-1}) + TA \quad (6.10)$$

$$TA = K_i (A_{\max} - A_{\text{actual}}) / A_{\text{actual}} \quad (6.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย	A_n	คือ แอมพลิจูดลิฟท์ในการเคลื่อนที่
	K_a	คือ สัมประสิทธิ์เพื่อปรับแอมพลิจูดของคลื่นไซน์
	f	คือ ความถี่ในการสะบัด
	B	คือ เวลาหน่วงในการสะบัดของแต่ละข้อต่อ
	K_i	คือ สัมประสิทธิ์การเลี้ยว
	A_{max}	คือ แอมพลิจูดสูงสุดสำหรับการเลี้ยว
	A_{actual}	คือ แอมพลิจูดจริงที่ใช้ในการเลี้ยว

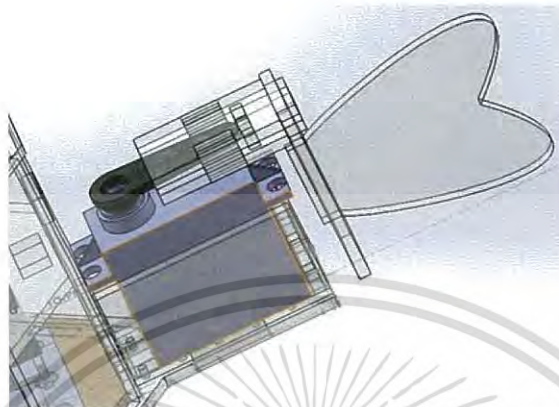


รูปที่ 6.5 แอมพลิจูดของการสะบัดในแต่ละข้อต่อ [1]

จากรูปที่ 6.5 แอมพลิจูด A_1 เป็นความกว้างในการสะบัดของส่วนลำตัวตอนต้น แอมพลิจูด A_2 เป็นความกว้างในการสะบัดของส่วนลำตัวตอนปลายพร้อมส่วนครีบหาง ขนาดของแอมพลิจูดในการสะบัดของแต่ละข้อต่อคำนวณโดยใช้สมการ (6.10) ในการสร้างหุ่นยนต์ปลาขึ้นมานั้น ไม่จำเป็นที่โครงสร้างของหุ่นยนต์จะต้องมีเพียงข้อต่อเดียวเสมอไป ถ้าหุ่นยนต์มีหลายข้อต่อการหาแอมพลิจูด A_n สำหรับข้อต่อใด ๆ จะใช้สมการเดียวกันนี้ในการคำนวณ อย่างไรก็ตามเพื่อให้หุ่นยนต์ปลาที่มีหลายข้อต่อแสดงการเคลื่อนที่เป็นรูปคลื่นไซน์ แต่ละข้อต่อจึงเริ่มสะบัดที่แอมพลิจูดต่าง ๆ กันซึ่งหมายถึงการเพิ่มเวลาหน่วงในการสะบัด B ให้เหมาะสมกับรูปแบบการเคลื่อนที่ที่ต้องการนั่นเอง

ในส่วนครีบหางของหุ่นยนต์ปลานั้น ทำมาจากแผ่นอะคริลิกซึ่งออกแบบมาให้สามารถส่งผ่านแรงบิดจากแกนเซอร์โวมอเตอร์ชนิดกันน้ำไปยังครีบหางรูปหัวใจ ครีบหางรูปหัวใจมีพื้นที่ผิวสำหรับผลักดันน้ำไปด้านข้างเพื่อที่จะสร้างแรงผลัก (Thrust Force) ให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปข้างหน้า ข้อต่อที่ทำมาจากอะคริลิกนี้ถูกกำหนดให้ตำแหน่งเริ่มต้นของเซอร์โวมอเตอร์กันน้ำในการสะบัดอยู่ที่ 90 องศา ดังรูปที่ 6.6 ซึ่งเปรียบได้เสมือนกับแนวกระดูกสันหลังของปลา รูปลักษณะของครีบหางที่เป็นรูปหัวใจ ซึ่งมีเส้นสายและความโค้งงอทำให้สามารถลดการสูญเสียที่เกิดขึ้นจากแรงลิฟท์ทั้งหมดที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่ แรงสูญเสียที่เกิดขึ้นนี้ คือ แรงที่ทำให้ปลามีแนวโน้มที่จะเคลื่อนที่ไปด้านข้าง แรง

ชนิดนี้เรียกว่า แรงด้านข้าง (Lateral Force) นั่นเอง ซึ่งโดยปกติแล้วแรงผลึกและแรงด้านข้างมักพบในปลาที่มีรูปแบบการเคลื่อนที่แบบ BCF เสมอ ซึ่งเกิดจากการยึดและหดของกล้ามเนื้อเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่



รูปที่ 6.6 ครีบหางของหุ่นยนต์ปลา

เมื่อหุ่นยนต์ปลาเริ่มต้นทำงาน เซอร์โวมอเตอร์ชนิดกั้นน้ำจะเริ่มสลับไปและกลับอย่างต่อเนื่อง ทำให้ครีบหางแสดงการเคลื่อนที่เป็นรูปคลื่นไซน์ องศาในการสลับของแขนเซอร์โวมอเตอร์ชนิดกั้นน้ำจะอยู่ภายในแอมพลิจูด A_n ซึ่งเปรียบได้เสมือนกับการยึดและหดกล้ามเนื้อข้างลำตัวของปลาในการเคลื่อนที่แบบ BCF ตำแหน่งของแขนเซอร์โวมอเตอร์ชนิดกั้นน้ำจะถูกควบคุมโดยสมการของนิลาสดังสมการที่ (6.10) และ (6.11) แสดงในหน้า 76 ซึ่งสมการเหล่านี้ถูกฝังไว้ในไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อพบสิ่งกีดขวางอินฟราเรดเซนเซอร์จะส่งสัญญาณนาฬิกาไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ ในขณะที่ไมโครคอนโทรลเลอร์รับค่าพารามิเตอร์มาจากคอมพิวเตอร์ทางการสื่อสารแบบอนุกรม (Serial Communication) ทำให้สามารถที่จะคำนวณรูปแบบการสลับของครีบหางสำหรับหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ เซอร์โวมอเตอร์ชนิดกั้นน้ำสามารถปรับตำแหน่งเริ่มต้นในการสลับครีบหางเพื่อการเลี้ยวหลบ รวมไปถึงการปรับขนาดของแอมพลิจูด A_n ตามค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับมาจากคอมพิวเตอร์อีกด้วย ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ช่วยให้รูปแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาสามารถปรับเปลี่ยนได้อย่างยืดหยุ่นและหลากหลาย

6.1.3 การออกแบบวงจรไฟเลี้ยงของหุ่นยนต์ปลา

ซอฟต์แวร์ Altium Designer 2013 ถูกใช้เพื่อการออกแบบวงจรไฟเลี้ยงและแผ่นปริ้นต์ (PCB) เนื่องจากแบตเตอรี่ในหุ่นยนต์ปลามีขนาดแรงดัน 7.4 V จึงต้องใช้วงจรรักษาระดับแรงดันเพื่อให้ขนาดแรงดันขาออกมีค่าเท่ากับ 6 V ซึ่งเป็นระดับแรงดันที่เหมาะสมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายในหุ่นยนต์ปลาทั้งหมด การออกแบบวงจรไฟเลี้ยงของหุ่นยนต์ปลาแสดงในภาคผนวก ข

คอนเนคเตอร์ P2 ใช้สำหรับต่อกับแบตเตอรี่ Li-ion 7.4 V โดยจะเชื่อมต่อกับคอนเนคเตอร์ P1 ที่มีสายไฟต่อออกมาภายนอก ทำให้สามารถชาร์จไฟเข้าแบตเตอรี่ได้โดยไม่ต้องถอดแบตเตอรี่

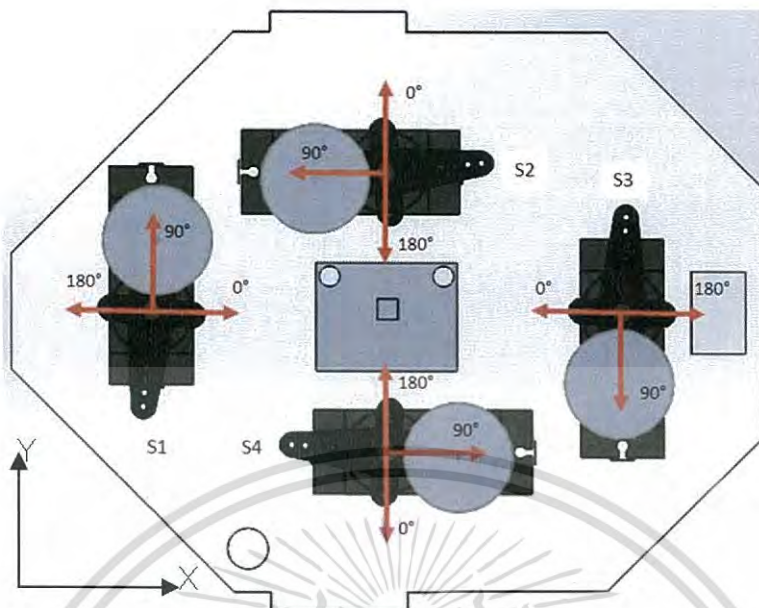
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกมาจากตัวหุ่นยนต์ สวิตช์ P3 ซึ่งเป็นสวิตช์แบบกันน้ำควบคุมการเปิดและปิดไฟเลี้ยงทั้งหมดในหุ่นยนต์ปลาโดยสามารถควบคุมได้จากภายนอกหุ่นยนต์บริเวณส่วนหัวของหุ่นยนต์ปลา ซีเนอร์ไดโอด D1 ทำหน้าที่ป้องกันความเสียหายของวงจรทั้งหมดถ้าเกิดเหตุการณ์การเสียบแบตเตอรี่ฝืดชั่วคราว ระดับแรงดันไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ถูกลดลงให้เหลือขนาดแรงดัน 6 V โดยใช้ IC เบอร์ 7806 (U1) ซึ่งใช้จ่ายแรงดันไปสู่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด ได้แก่ ไมโครคอนโทรลเลอร์ เซอร์โวมอเตอร์ขนาดเล็กจำนวน 4 ตัว เซอร์โวมอเตอร์ชนิดกันน้ำขนาดมาตรฐานจำนวน 1 ตัวและอินฟราเรดเซนเซอร์จำนวน 3 ตัว คอนเนคเตอร์ P5, P6, P7, P8 ทำหน้าที่รองรับคอนเนคเตอร์ของเซอร์โวมอเตอร์ขนาดเล็ก คอนเนคเตอร์ P15 ทำหน้าที่รองรับคอนเนคเตอร์ของเซอร์โวกันน้ำและคอนเนคเตอร์ P10, P11, P12 ทำหน้าที่รองรับคอนเนคเตอร์ของอินฟราเรดเซนเซอร์ คอนเนคเตอร์สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ดังกล่าว เลือกใช้คอนเนคเตอร์ชนิด 3 ขั้วต่อ เพื่อรองรับสัญญาณไฟเลี้ยง 6 V กราวด์ และสัญญาณควบคุมตำแหน่งมอเตอร์หรือสัญญาณตรวจจับจากอินฟราเรดเซนเซอร์ คอนเนคเตอร์ P9, P13 และ P14 ทำหน้าที่เชื่อมสัญญาณจากแผ่น PCB ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino NANO ทั้งนี้กราวด์ของอุปกรณ์ทั้งหมดถูกเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์

6.1.4 กลไกการเอียงของหุ่นยนต์ปลา (Orientation Mechanism)

กลไกการเอียงของหุ่นยนต์ปลาถูกออกแบบให้มีตำแหน่งอยู่บริเวณส่วนล่างของลำตัวหุ่นยนต์ เนื่องจากน้ำหนักถ่วงที่ใช้ในกลไกการเอียงเมื่อทำการติดตั้งที่ตำแหน่งดังกล่าว ทำให้จุดศูนย์กลางของหุ่นยนต์ปลาอยู่ต่ำ การวางกลไกการเอียงในลักษณะนี้เป็นการป้องกันการพลิกคว่ำในขณะที่หุ่นยนต์ปลาเคลื่อนที่ในน้ำ สาเหตุของการพลิกคว่ำเกิดขึ้นจากการขาดเสถียรภาพของวัตถุในน้ำ เพราะจุดศูนย์กลางของระบบมีตำแหน่งอยู่สูงกว่าจุดศูนย์กลางปริมาตรได้แนวนอนนั่นเอง

การออกแบบกลไกการเอียงของหุ่นยนต์ปลาต้นแบบ ได้ใช้เซอร์โวมอเตอร์จำนวน 4 ตัวมาจัดเรียงดังรูปที่ 6.7 การจัดเรียงของเซอร์โวมอเตอร์ในรูปแบบดังกล่าวเป็นการประยุกต์มาจากรูปแบบการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ In-line Pattern บริเวณตรงกลางของโครงอะคริลิกได้เจาะรูรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจำนวน 4 รู เพื่อยึดเซอร์โวมอเตอร์บนแผ่นอะคริลิกรูปแปดเหลี่ยมซึ่งออกแบบขึ้นมาให้เสมือนกับรูปร่างในส่วนลำตัวของหุ่นยนต์ MEMS Motion Sensor ถูกติดตั้งบริเวณกึ่งกลางของหุ่นยนต์ปลาเพื่อตรวจวัดมุมเอียงที่เกิดขึ้นกับหุ่นยนต์ในน้ำ เนื่องจากหุ่นยนต์ปลาประกอบขึ้นมาจากแผ่นอะคริลิกหลายแผ่นโดยนำมาประกบกันในระบบลิ้ม ดังนั้นบริเวณด้านล่างและด้านบนของแผ่นอะคริลิกจึงมีพื้นที่ยื่นออกมา เพื่อใช้เกาะกับโครงอะคริลิกชิ้นอื่น ๆ จากรูปที่ 6.7 ส่วนหัวของหุ่นยนต์ปลาหันไปทางทิศ -X และเซอร์โวมอเตอร์ทั้ง 4 ตัวมีชื่อว่า S1, S2, S3 และ S4 ตามลำดับ



รูปที่ 6.7 การจัดเรียงเซอร์โวมอเตอร์สำหรับกลไกการเอียงในหุ่นยนต์ปลา

รูปแบบการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ในรูปที่ 6.7 เป็นการออกแบบให้เซอร์โวมอเตอร์ทั้ง 4 ตัว มีพื้นที่ทำงานครอบคลุมในระนาบ X-Y ผลที่เกิดขึ้นทำให้หุ่นยนต์ปลาต้นแบบสามารถเคลื่อนที่ได้ใน ปริภูมิสามมิติ ตำแหน่งของแขนเซอร์โวทั้ง 4 ตัวสามารถปรับเปลี่ยนได้โดยการรับข้อมูลจาก คอมพิวเตอร์ที่ส่งค่าตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์จากผู้ใช้งานผ่านการสื่อสารแบบอนุกรม ขณะที่ หุ่นยนต์เริ่มต้นทำงาน แขนเซอร์โวมอเตอร์ทั้ง 4 ตัวได้ถูกตั้งให้มีตำแหน่งเริ่มต้นอยู่ที่ 90 องศาเสมอ ณ จุดนี้โมเมนต์ลัพท์ของระบบจึงมีค่าเป็นศูนย์ ส่งผลให้หุ่นยนต์ลอยอย่างสมดุลในระนาบเดียวกับผิวน้ำ ในกรณีที่ต้องการให้หุ่นยนต์เอียงตัวในน้ำ แขนของเซอร์โวมอเตอร์ทั้ง 4 ตัวที่ทำการติดน้ำหนัก ถ่วงไว้ จะเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งเริ่มต้นไปในทิศทางต่าง ๆ กัน ตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วงในหุ่นยนต์ ปลาจึงเกิดการเคลื่อนที่และเปลี่ยนตำแหน่ง ดังนั้นแรงลัพท์จากจุดศูนย์ถ่วงในตำแหน่งใหม่จึงทำให้ หุ่นยนต์ปลาเกิดการเอียงตัวในน้ำ ทิศทางของการหมุนของแขนเซอร์โวมอเตอร์สำหรับหุ่นยนต์ปลา ต้นแบบแสดงในตารางที่ 6.3 รูปแบบการหมุนของแขนเซอร์โวมอเตอร์ที่แสดงในตารางขึ้นอยู่กับทิศ ทิศทางการเอียงตัวในระนาบ X-Y แกนอ้างอิงที่ใช้ประกอบตารางที่ 6.3 แสดงในรูปที่ 6.7 ทั้งนี้การตั้ง แนวแกนอ้างอิงขึ้นอยู่กับลักษณะการติดตั้ง MEMS Motion Sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 รูปแบบการเคลื่อนที่ของแขนเซอร์โวมอเตอร์สำหรับกลไกการเอียงภายในหุ่นยนต์

ทิศทางการเอียง ของหุ่นยนต์ตาม แกนอ้างอิง	ตำแหน่งของแขนเซอร์โวมอเตอร์			
	S1	S2	S3	S4
0, Y	90	0	90	180
X, Y	45	0	180	135
X, 0	0	180	180	90
X, -Y	0	180	135	45
0, -Y	90	180	90	0
-X, -Y	180	135	45	0
-X, 0	180	90	0	180
-X, Y	135	45	0	180

ตารางที่ 6.3 แสดงตัวอย่างการหมุนแขนเซอร์โวมอเตอร์ไปยังตำแหน่งต่าง ๆ เพื่อหามุมเอียงสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในหุ่นยนต์ปลาต้นแบบ องค์การหมุนของแขนเซอร์โวมอเตอร์ที่ระบุไว้ในตาราง สามารถที่จะปรับเปลี่ยนให้มีความละเอียดเพิ่มขึ้น เพื่อให้การเอียงตัวของหุ่นยนต์เป็นไปอย่างค่อยเป็นค่อยไปและมีความละเอียดในการปรับตำแหน่ง เนื่องจากหุ่นยนต์ปลาสามารถติดต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านทางวิธีการสื่อสารแบบอนุกรมได้ ดังนั้นที่คอมพิวเตอร์จึงมี Graphic User Interface เพื่อแสดงและติดตามค่าของมุมเอียงที่เกิดขึ้นในระบบ อย่างไรก็ตาม รูปแบบการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์สำหรับกลไกการเอียงในหุ่นยนต์ปลาสามารถที่จะจัดวางในรูปแบบใดก็ได้ที่เหมาะสมกับการใช้งานและการออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์ปลาจากฮาร์ดแวร์ที่มีอยู่ แต่การที่จะควบคุมตำแหน่งการหมุนของแขนเซอร์โวมอเตอร์ให้เป็นไปอย่างอัตโนมัติ นั้น กลไกการเอียงและการเคลื่อนที่ของแขนเซอร์โวมอเตอร์จำเป็นที่จะต้องนำมาวิเคราะห์เพื่อหาสมการคุณลักษณะของการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ในรูปแบบเฉพาะต่าง ๆ สมการคุณลักษณะที่ได้จากการทดลองเป็นสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์จากมุมเอียงที่ผู้ใช้งานต้องการ วิธีการหาสมการคุณลักษณะแสดงไว้ในบทที่ 7

6.2 โครงสร้างของซอฟต์แวร์ที่ใช้ในหุ่นยนต์ปลา

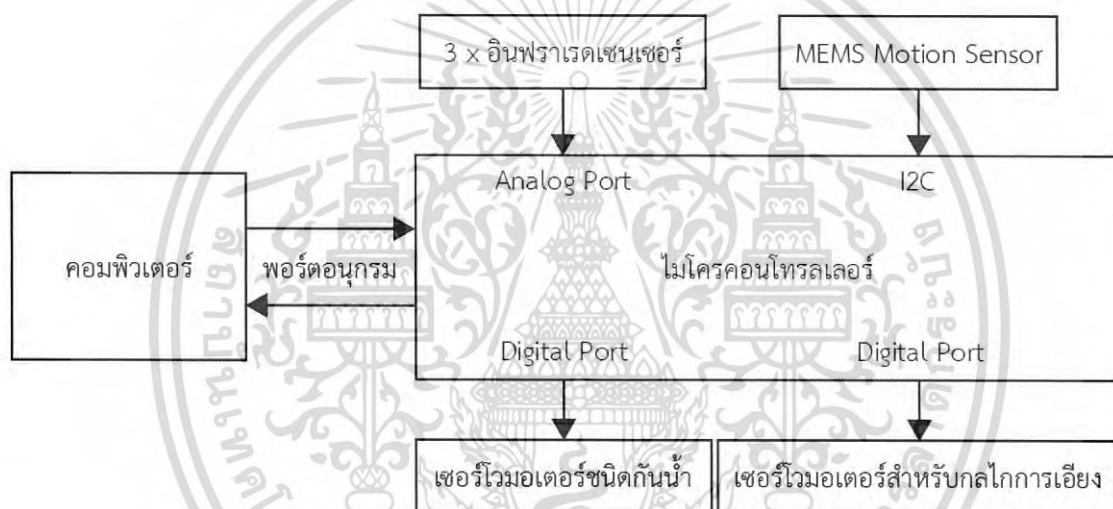
ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน ได้แก่ ซอฟต์แวร์ฝังตัวบนไมโครคอนโทรลเลอร์และซอฟต์แวร์สำหรับติดต่อกับผู้ใช้งานบนคอมพิวเตอร์ ซอฟต์แวร์ทั้งสองฝั่งใช้วิธีการสื่อสารแบบอนุกรม ทั้งนี้ส่วนควบคุมหลักและการตัดสินใจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นอยู่กับไมโครคอนโทรลเลอร์ในหุ่นยนต์ปลา ซอฟต์แวร์บนคอมพิวเตอร์ทำหน้าที่แสดงมุมมองที่เกิดขึ้นกับหุ่นยนต์ปลาและส่งข้อมูลจากผู้ใช้งานไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เท่านั้น

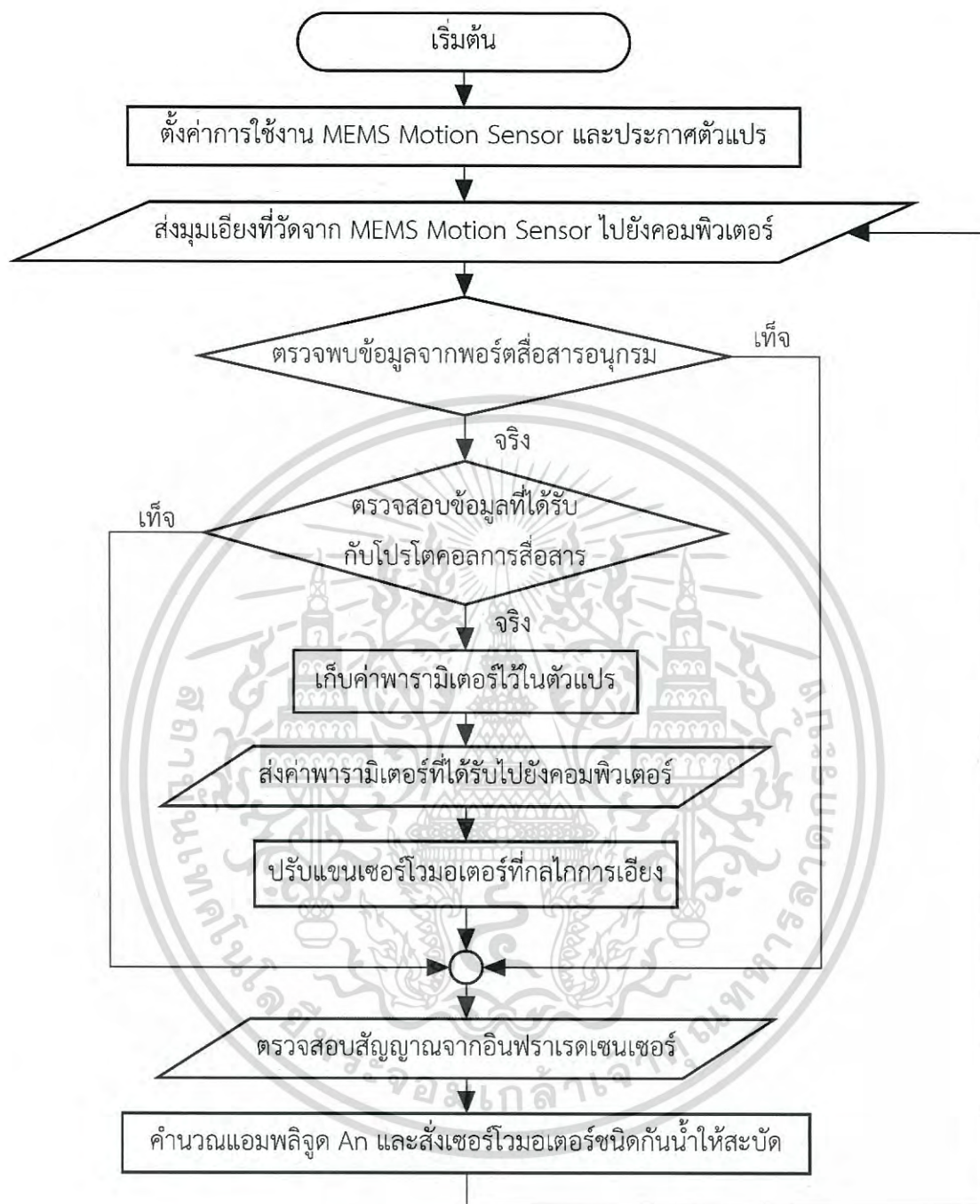
6.2.1 โครงสร้างและการทำงานของซอฟต์แวร์บนไมโครคอนโทรลเลอร์

หุ่นยนต์ปลาที่สร้างขึ้นใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่น Arduino Nano เนื่องจากมีขนาดเล็ก จึงประหยัดพื้นที่ในการติดตั้ง สำหรับหุ่นยนต์ปลาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ไมโครคอนโทรลเลอร์เปรียบได้เสมือนศูนย์กลางการรับและส่งข้อมูล เนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แต่ละชิ้นที่ใช้กับไมโครคอนโทรลเลอร์มีรูปแบบการรับและส่งของสัญญาณแตกต่างกัน ดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์เองจึงต้องมีพอร์ตเพียงพอที่จะรองรับการติดต่อสื่อสารกับอุปกรณ์ภายนอกทั้งหมด แผนผังแสดงการติดต่อกันระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงดังรูปที่ 6.8



รูปที่ 6.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์และการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก

เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายนอกมีไฟเลี้ยงเพียงพอ โปรแกรมการทำงานภายในไมโครคอนโทรลเลอร์จะเริ่มทำงานและทำการวนซ้ำไม่มีที่สิ้นสุด ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Nano ที่ใช้ในหุ่นยนต์ปลาถูกโปรแกรมให้มีขั้นตอนในการประมวลผลแสดงดังผังงานต่อไปนี้



รูปที่ 6.9 ผังงานโปรแกรมแสดงการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

จากรูปที่ 6.9 การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์จะเริ่มต้นที่การตั้งค่าการใช้งาน MEMS Motion Sensor เนื่องจากเซนเซอร์ชนิดนี้ติดต่อสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์ผ่าน I2C Bus ดังนั้นก่อนที่จะเริ่มใช้งาน MEMS Motion Sensor จึงมีความจำเป็นที่จะต้องเข้าถึงรีจิสเตอร์ของเซนเซอร์เพื่อปรับตั้งค่าต่าง ๆ เช่น กำหนดช่วงและความละเอียดในการวัด เป็นต้น หลังจากเข้าไปตั้งค่าที่รีจิสเตอร์แล้ว ไมโครคอนโทรลเลอร์จำเป็นที่จะต้องทราบ Address ของ MEMS Motion Sensor เพื่อที่จะอ่านข้อมูลผ่าน I2C Bus อีกด้วย อย่างไรก็ตามหุ่นยนต์ปลาจะเริ่มเคลื่อนที่ก็ต่อเมื่อได้รับไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพารามิเตอร์ของสมการมาจากคอมพิวเตอร์ โดยผู้ใช้งานจำเป็นจะต้องกรอกค่าพารามิเตอร์บนส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้หรือ Graphic User Interface (GUI) บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ให้ครบถ้วน ซึ่งหมายถึงโปรโตคอลฝั่งรับบนไมโครคอนโทรลเลอร์ จะตรวจสอบข้อมูลที่รับมาว่ามีความสอดคล้องกับโปรโตคอลที่ถูกตั้งค่าไว้ให้ติดต่อสื่อสารระหว่างกันหรือไม่ หากโปรโตคอลการสื่อสารถูกต้องไมโครคอนโทรลเลอร์จะเก็บค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นไว้ในตัวแปรและสามารถเรียกใช้ค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นได้ตลอดเวลาที่ต้องการคำนวณแอมพลิจูดการสลับ A_n การเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่เก็บไว้ในตัวแปรบนไมโครคอนโทรลเลอร์จะถูกเปลี่ยนแปลงเมื่อผู้ใช้งานส่งค่าพารามิเตอร์ใหม่มาจากคอมพิวเตอร์ซ้ำอีกครั้งหนึ่ง ข้อมูลที่ส่งมาจากคอมพิวเตอร์ประกอบด้วยตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์สำหรับกลไกการเอียงและค่าพารามิเตอร์สำหรับคำนวณแอมพลิจูดการสลับ A_n เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์เก็บค่าพารามิเตอร์ไว้ในตัวแปรแล้ว จะทำการส่งข้อมูลเหล่านี้กลับไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงให้ผู้ใช้งานทราบ และยืนยันว่าได้รับข้อมูลครบถ้วน หลังจากกระบวนการดังกล่าวเสร็จสิ้น เซนเซอร์โวมอเตอร์ที่กลไกการเอียงจะปรับตำแหน่งและอินฟราเรดเซนเซอร์จะตรวจจับสิ่งกีดขวาง เนื่องจากอินฟราเรดเซนเซอร์มีถึงสามตัวที่ทำงานร่วมกันในหุ่นยนต์ปลา โปรแกรมบนไมโครคอนโทรลเลอร์จะตรวจสอบเงื่อนไขเพื่อเลือกรูปแบบการเคลื่อนที่ และค่าพารามิเตอร์ให้ตรงกับเงื่อนไขการตรวจจับสิ่งกีดขวางของอินฟราเรดเซนเซอร์ เช่น การว่ายน้ำข้างหน้า การเลี้ยวซ้ายหรือขวาในระยะประชิด และถ้าอินฟราเรดเซนเซอร์ตรวจจับสิ่งกีดขวางที่มีตำแหน่งอยู่ไกลออกไป หุ่นยนต์ปลาจะสามารถแสดงการหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้ โดยใช้รัศมีการเลี้ยวที่แตกต่างกับการหลบหลีกสิ่งกีดขวางในระยะประชิด เป็นต้น อย่างไรก็ตามองศาการเอียงของหุ่นยนต์ปลาที่วัดจาก MEMS Motion Sensor จะถูกส่งไปแสดงผลบน GUI ตลอดเวลา เพื่อให้ผู้ใช้งานทราบถึงความเปลี่ยนแปลงของมุมเอียงกับการเคลื่อนที่ในระบบขณะปัจจุบัน

การออกแบบซอฟต์แวร์บนไมโครคอนโทรลเลอร์ มีกระบวนการเริ่มต้นตั้งแต่การตั้งค่าอุปกรณ์เซนเซอร์และการสอบเทียบสัญญาณที่วัดได้จากอุปกรณ์ชนิดต่าง ๆ ดังรายการต่อไปนี้

6.2.1.1 อินฟราเรดเซนเซอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Nano มีพอร์ตรับสัญญาณอนาล็อก ทำให้ขาสัญญาณที่ออกจากอินฟราเรดเซนเซอร์สามารถต่อเข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์โดยตรงได้ ในการเขียนโปรแกรมจำเป็นที่จะต้องมีการแบ่งช่วงระยะห่างของสิ่งกีดขวางที่ตรวจพบ ทำให้ไมโครคอนโทรลเลอร์จำเป็นต้องใช้กระบวนการแปลงค่าสัญญาณให้ผู้เขียนโปรแกรมสามารถเข้าใจ และนำไปเขียนเป็นเงื่อนไขสำหรับรูปแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาได้โดยง่าย อินฟราเรดเซนเซอร์ที่ใช้ในหุ่นยนต์ปลามีคุณสมบัติเบื้องต้นแสดงดังต่อไปนี้

- รุ่น SHARP GP2D120
- Analog Output

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Operating Voltage: 4.5 V – 5.5 V
- Distance Measuring Range: 4 cm – 30 cm
- Average Current Consumption: 33 mA

จากข้อมูลเชิงเทคนิคเบื้องต้นของอินฟราเรดเซนเซอร์ เมื่อนำมาพิจารณาพบว่า ขณะที่ใช้งานกับหุ่นยนต์ปลาได้จ่ายไฟเลี้ยง 6 V จากแบตเตอรี่ผ่านวงจรรักษาระดับแรงดันให้อินฟราเรดเซนเซอร์ทำงาน ดังนั้นสัญญาณอนาล็อกซึ่งเป็นระยะทางจากการวัดที่ได้จากอินฟราเรดเซนเซอร์ จึงมีค่าตั้งแต่ 0 V – 6 V ซึ่งขนาดแรงดันที่สูงที่สุดจะมีค่าขึ้นอยู่กับขนาดของไฟเลี้ยง ขนาดของแรงดันที่ออกจากอินฟราเรดเซนเซอร์แสดงระยะทางของสิ่งกีดขวางที่ตรวจพบ ถ้าขนาดแรงดันที่ออกจากอินฟราเรดเซนเซอร์มาก วัดจะอยู่ใกล้ ถ้าขนาดของแรงดันที่ออกจากอินฟราเรดเซนเซอร์น้อย วัดจะอยู่ไกล ซึ่งคุณลักษณะของขนาดของแรงดันต่อระยะทางของสิ่งกีดขวางแปรผันกันเป็นกราฟเส้นโค้งลง ทั้งนี้อินฟราเรดเซนเซอร์ที่ใช้ในหุ่นยนต์ปลา ทำหน้าที่ตรวจจับสิ่งกีดขวางเท่านั้น จึงไม่จำเป็นที่จะต้องใช้สมการคณิตศาสตร์ในการคำนวณระยะทางของสิ่งกีดขวางให้เป็นขนาดของแรงดัน เพื่อให้เกิดความแม่นยำจากคุณลักษณะของอินฟราเรดเซนเซอร์ที่ได้กล่าวไป เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์รับสัญญาณเข้ามาจากพอร์ตอนาล็อกจะเก็บค่าที่ได้เป็นตัวเลข Integer ตั้งแต่ 0 - 1023 โปรแกรมภายในไมโครคอนโทรลเลอร์จะมีฟังก์ชันเพื่อแปลงค่า Integer ให้กลับเป็น 0 V – 6 V ดังเดิมเพื่อความเข้าใจของผู้พัฒนาในการเขียนเงื่อนไขขณะสร้างโปรแกรม

6.2.1.2 MEMS Motion Sensor

เซนเซอร์ตรวจวัดการเคลื่อนไหวที่ใช้ในกลไกการเอียงและหุ่นยนต์ปลาติดต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์โดยตรงผ่าน I2C Bus ซึ่งก่อนการใช้งานจะต้องมีการตั้งค่าเซนเซอร์ โดยการเข้าถึงรีจิสเตอร์ภายในเซนเซอร์เพื่อทำการอ่านหรือเขียน การอ่านหรือเขียนรีจิสเตอร์ของเซนเซอร์ได้ใช้เลขฐานสิบหกเพื่อเข้าถึงแต่ละบิตภายในรีจิสเตอร์ ซึ่งหมายถึงการเปลี่ยนแปลงการทำงานและการตั้งค่าการทำงานของ MEMS Motion Sensor ทั้งหมด รวมไปถึงการรายงานสถานะของฮาร์ดแวร์ภายใน MEMS Motion Sensor เช่น ตำแหน่งการเอียงบนแนวแกน X - Y - Z จาก Accelerometer หรือความเร็วเชิงมุมรอบแกน X - Y - Z จาก Gyroscope เป็นต้น

MEMS Motion Sensor ที่ใช้ในหุ่นยนต์ปลา คือ ยี่ห้อ InvenSense รุ่น MPU-9150 มี 9 Degrees of Freedom (9DOF) แบ่งเป็น 3-axis Gyroscope, 3-axis Accelerometer และ 3-axis Digital Compass การใช้งาน MEMS Motion Sensor ของกลไกการเอียงและหุ่นยนต์ปลาอาศัยความสามารถของ Gyroscope และ Accelerometer เท่านั้น ซึ่งเพียงพอสำหรับการระบุทิศทาง การเอียง และความเร็วเชิงมุมในการเอียงรอบแนวแกน MEMS Motion Sensor ถูกตั้งค่าในรีจิสเตอร์ให้มีคุณสมบัติการวัดแสดงดังตารางต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.4 การตั้งค่าอุปกรณ์การวัดภายใน MEMS Motion Sensor MPU-9150 [23]

รีจิสเตอร์	พารามิเตอร์	ช่วงการวัด	ความไว	ความคลาดเคลื่อน
1B GYRO_CONFIG	Xgyro	± 250 °/s	131 LSB/(°/s)	± 20 °/s
	Ygyro	± 250 °/s	131 LSB/(°/s)	
	Zgyro	± 250 °/s	131 LSB/(°/s)	
1C ACCL_CONFIG	Xaccl	± 2 g	16,384 LSB/g	± 80 mg
	Yaccl	± 2 g	16,384 LSB/g	
	Zaccl	± 2 g	16,384 LSB/g	± 150 mg

หมายเหตุ การตั้งค่ารีจิสเตอร์ขณะเขียนโปรแกรม อ้างอิงจาก Register Map และ Product Specification จากผู้ผลิต

เนื่องจากการสื่อสารบน I2C Bus สามารถส่งข้อมูลได้ครั้งละ 8 บิตต่อการร้องขอ แต่ความละเอียดของเซนเซอร์มีถึง 16 บิต ซึ่งถูกแบ่งเก็บไว้อย่างละ 8 บิตในรีจิสเตอร์ที่ตำแหน่งต่างกันบนเซนเซอร์ จากกรณีดังกล่าว โปรแกรมบนไมโครคอนโทรลเลอร์จึงมีวิธีการร้องขอข้อมูลและวิธีการจัดเรียงข้อมูลที่ได้รับให้มีความถูกต้องก่อนการนำไปใช้ กระบวนการทำงานของโปรแกรมสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้ เริ่มต้นจากการร้องขอการอ่านค่าจากเซนเซอร์ที่รีจิสเตอร์ Low Bit และนำมาเก็บไว้ในไมโครคอนโทรลเลอร์ในตัวแปร L จากนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จึงส่งคำร้องไปยังเซนเซอร์อีกครั้ง โดยอ่านรีจิสเตอร์ที่บรรจุข้อมูล High Bit และนำมาเก็บไว้ในตัวแปร H ข้อมูลที่เก็บไว้ทั้งหมดในตัวแปร H และ L ที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ถูกนำมาจัดเรียงตำแหน่งของบิตให้ถูกต้อง โดยใช้หลักการเลื่อนตำแหน่งและการบวกเลขฐานสอง ข้อมูลเลขฐานสองซึ่งอยู่ภายในตัวแปร H จะถูกเลื่อนขึ้นไป 8 Digit หลังจากทำการเลื่อนบิต H เสร็จเรียบร้อยแล้ว ข้อมูลที่ได้จะถูกนำมาบวกกับตัวแปร L ซึ่งเก็บค่า 8 Digit หลัง ทำให้ข้อมูลที่ได้จากการอ่านค่าเซนเซอร์มี 16 บิตอย่างสมบูรณ์

ข้อมูลทั้ง 16 บิตนี้เปรียบได้เสมือนกับสัญญาณไฟฟ้าที่ออกมาจาก MEMS Motion Sensor เท่านั้น ยังไม่สามารถนำมาบอกมุมเอียงในรูปแบบองศาได้ ดังนั้นภายในไมโครคอนโทรลเลอร์จึงจำเป็นต้องมีฟังก์ชันคณิตศาสตร์ สำหรับเปลี่ยนข้อมูลที่รับได้มาให้เป็นองศาการเอียงก่อนการนำไปใช้งานและแสดงค่ามุมเอียงที่คอมพิวเตอร์ สำหรับค่ามุมของหุ่นยนต์ปลาที่ได้จากคำนวณในสมการคณิตศาสตร์จะออกมาเป็นองศาการหมุนรอบแกน X และแกน Y ซึ่งหมายถึงค่า Row และค่า Pitch นั้นเอง ข้อมูล 16 บิตที่ส่งมายังคอมพิวเตอร์จะถูกแปลงเป็นมุมเอียงโดยใช้สมการดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Angle}X(\theta) = \arctan\left(\frac{\text{acc}Y}{\sqrt{\text{acc}Z^2 + \text{acc}X^2}}\right) \quad (6.12)$$

$$\text{Angle}Y(\beta) = \arctan\left(\frac{\text{acc}X}{\sqrt{\text{acc}Z^2 + \text{acc}Y^2}}\right) \quad (6.13)$$

6.2.1.3 การออกแบบโปรโตคอลสำหรับการสื่อสารข้อมูลระหว่างหุ่นยนต์ปลาและคอมพิวเตอร์

โปรโตคอลสื่อสารที่ใช้ในหุ่นยนต์ปลาดัดแปลงมาจาก [2] โดยมีการเพิ่มการควบคุมตำแหน่ง แชนเซอร์ไวท์ทั้ง 4 ตัวของกลไกการหมุนเข้าไป ในการส่งข้อมูลโปรแกรมทั้งสองฝั่ง ได้แก่ ฝั่งรับที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ และฝั่งส่งที่คอมพิวเตอร์จะทำงานอย่างสอดคล้องประสานกัน สำหรับโปรโตคอลฝั่งส่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ได้มีการเข้ารหัสข้อมูลเพิ่มเติมจากค่าพารามิเตอร์ที่มีอยู่ ทำให้การสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์มีประสิทธิภาพในด้านของการส่งข้อมูลที่ไม่คลาดเคลื่อนและครบถ้วน ตัวอย่างโปรโตคอลการสื่อสารที่ใช้ในหุ่นยนต์ปลาแสดงดังต่อไปนี้

st,11,22,33,44,31,32,33,0.5,0.5,0.5,-0.5,0,0.5,2,2,2,10,10,10,en,

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาและกลไกการเอียงมีหลายค่า ดังนั้นจึงมีการแยกแยะและระบุข้อมูลให้เป็นสัดส่วน จากตัวอย่างข้างต้น เครื่องหมายจุดภาค (,) ถูกนำมาใช้คั่นระหว่างค่าพารามิเตอร์แต่ละตัว นอกจากนี้อักขระ st และ en ยังเป็นอักขระเริ่มต้นและปิดท้ายการส่งข้อมูล ซึ่งมีขึ้นเพื่อแจ้งเตือนให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทราบสถานะการมาถึงและการสิ้นสุดการส่งข้อมูล ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงสามารถตรวจสอบรูปแบบของข้อมูลที่มาถึงได้ถูกต้อง และเก็บค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับไว้ในตัวแปรตามลำดับข้อมูลที่ส่งไปจากคอมพิวเตอร์ได้อย่างครบถ้วน

ถ้าไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับข้อมูลใด ๆ ผ่านทางพอร์ตการสื่อสารแบบอนุกรม แต่ไม่ตรงตามโปรโตคอลการรับและส่งข้อมูลที่เขียนไว้ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะไม่สนใจข้อมูลที่ได้รับ เนื่องจากเงื่อนไขของโปรแกรมที่ฝั่งรับไม่เอื้ออำนวยให้เกิดการเก็บข้อมูลลงไปยังตัวแปร อย่างไรก็ตามหลังจากที่หุ่นยนต์ปลาได้รับค่าพารามิเตอร์จากโปรโตคอลที่ถูกต้องเรียบร้อยแล้ว หุ่นยนต์ปลาจะสามารถตัดสินใจ และทำงานตามเงื่อนไขที่เขียนไว้ในไมโครคอนโทรลเลอร์อย่างอัตโนมัติ ดังนั้นการควบคุมหุ่นยนต์ปลาจึงจำเป็นต้องใช้การสั่งงานจากผู้ใช้งานผ่านทาง GUI เพื่อส่งค่าตัวแปรไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์หลังจากการเปิดเครื่องเพื่อเริ่มต้นการทำงานของหุ่นยนต์ปลาเสมอ

6.2.1.4 สมการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลา

สมการของนิลาศ [1] เมื่อนำมาใช้เขียนโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลานั้น ได้มีการดัดแปลงสมการคณิตศาสตร์ให้มีความซับซ้อนน้อยลง เพื่อลดเวลาการคำนวณในไมโครคอนโทรลเลอร์ อย่างไรก็ตามการดัดแปลงสมการที่เกิดขึ้นยังคงแนวความคิดมาจากสมการพื้นฐานทั้งหมด ฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาในไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงดังต่อไปนี้

$$Angle = [Ka \times A1max \times \sin(44/7) \times f \times t] + [(1 - Ka) \times Ki \times A1max] \quad (6.14)$$

จากสมการข้างต้น ก่อนการคำนวณมีค่าพารามิเตอร์ที่ต้องรอรับจาก GUI บนคอมพิวเตอร์ดังต่อไปนี้ Ka, A1max, f และ Ki โดยถ้าไม่มีการส่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จากคอมพิวเตอร์มายังไมโครคอนโทรลเลอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะตั้งให้ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เท่ากับศูนย์ ดังนั้นผู้ใช้งานจึงไม่เห็นเซอร์โวมอเตอร์ชนิดก้านน้ำที่ครีบบางสะบัด เนื่องจากแอมพลิจูดในการสะบัดของเซอร์โวมอเตอร์ก้านน้ำที่ผ่านการคำนวณจากสมการมีค่าเท่ากับศูนย์

สมการของนิลาศถูกออกแบบมาให้สามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบการเคลื่อนที่ได้หลากหลาย จึงต้องมีการเลือกโหมดการเคลื่อนที่ โดยใช้เงื่อนไขจากอินฟราเรดเซนเซอร์เพื่อเลือกชุดของค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมรูปแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน ชุดของค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ได้แก่ การเคลื่อนที่ตรงไปข้างหน้า การเคลื่อนที่เพื่อเลี้ยวหลบสิ่งกีดขวางไปทางซ้ายหรือทางขวา เป็นต้น ค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดมาจากการส่งข้อมูลจาก GUI ที่คอมพิวเตอร์ ค่าพารามิเตอร์และรูปแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาแสดงดังตารางต่อไปนี้

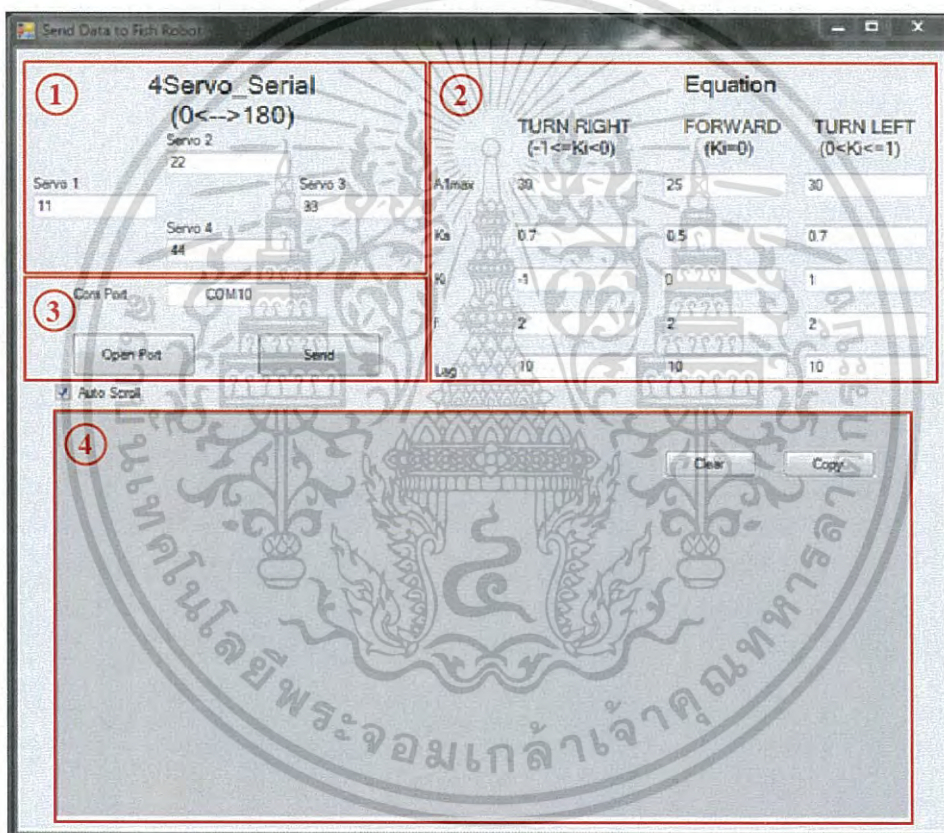
ตารางที่ 6.5 ค่าพารามิเตอร์สำหรับรูปแบบการเคลื่อนที่ต่าง ๆ ในหุ่นยนต์ปลา

ทิศทางการเคลื่อนที่	พารามิเตอร์					
	A1max	Ka	Ki	f	Lag	
เลี้ยวขวา	30	0.7	-1	2	10	
ว้ายตรง	25	0.5	0	2	10	
เลี้ยวซ้าย	30	0.7	1	2	10	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2.2 โครงสร้างและการทำงานของส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้บนคอมพิวเตอร์

ซอฟต์แวร์ส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้บนคอมพิวเตอร์ (GUI) มีหน้าที่หลักในการส่งค่าพารามิเตอร์จากคอมพิวเตอร์ไปยังหุ่นยนต์ปลาผ่านพอร์ตอนุกรม และแสดงข้อมูลที่รับจากไมโครคอนโทรลเลอร์ ได้แก่ องศาการเอียงของหุ่นยนต์ปลา และค่าพารามิเตอร์ที่ผู้ใช้งานได้ส่งไปเพื่อยืนยันความถูกต้องของข้อมูล เป็นต้น การสร้าง GUI เขียนขึ้นบนโปรแกรมพัฒนาแอปพลิเคชันบนคอมพิวเตอร์จาก Microsoft ชื่อว่า Visual Studio 2013 โดยใช้ภาษา VB.NET ซึ่งช่วยให้การพัฒนาซอฟต์แวร์มีความง่ายและรวดเร็ว เนื่องจากแพลตฟอร์มในการพัฒนารองรับรูปแบบการเขียนโปรแกรมที่เหมาะสมกับความต้องการของผู้พัฒนาและผู้ใช้งาน



รูปที่ 6.10 ซอฟต์แวร์ส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้บนคอมพิวเตอร์ (GUI)

ซอฟต์แวร์ส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้บนคอมพิวเตอร์ (GUI) ในรูปที่ 6.10 สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนหลักดังต่อไปนี้

1. ส่วนควบคุมกลไกการเอียงของหุ่นยนต์ ผู้ใช้งานสามารถควบคุมตำแหน่งของแขนเซอร์โวมอเตอร์ในกลไกการเอียงของหุ่นยนต์ปลาได้โดยตรง โดยทำการกรอกค่าตำแหน่งของแขนเซอร์โวมอเตอร์ที่ต้องการลงในกล่องข้อความ ตำแหน่งของแขนเซอร์โวมอเตอร์มีค่าตั้งแต่ 0 องศาถึง 180 องศา ในการสั่งงานสามารถควบคุมตำแหน่งของแขนเซอร์โวมอเตอร์ได้จำนวนทั้งหมด 4 ตัวพร้อมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำออกจำหน่ายหรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อผิดพลาดประการใด ขออภัยและต้องอภัยถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ส่วนควบคุมรูปแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ กล้องข้อความในส่วนนี้ทั้งหมดรับการรอกค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาของนิลาศ โดยมีการแบ่งรูปแบบการเคลื่อนที่และชุดของค่าพารามิเตอร์ออกเป็น 3 ชุด แต่ละชุดของข้อมูลประกอบไปด้วยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งทำให้หุ่นยนต์ปลาแสดงการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง เลี้ยวซ้าย และเลี้ยวขวา เป็นต้น
3. ส่วนตั้งค่าการใช้งานสำหรับการติดต่อสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการรับและส่งข้อมูล ก่อนการเริ่มต้นการสื่อสารข้อมูลทุกครั้ง ผู้ใช้งานจำเป็นต้องระบุหมายเลขพอร์ตการสื่อสารที่คอมพิวเตอร์ใช้ติดต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ให้ถูกต้อง หมายเลขพอร์ตการสื่อสารสามารถระบุได้โดยการป้อนค่าลงไปในกลุ่มข้อความ เช่น COM10 เป็นต้น หลังจากกระบวนการดังกล่าวเสร็จสิ้น เมื่อต้องการเริ่มต้นการสื่อสารข้อมูล ผู้ใช้งานต้องกดปุ่ม “Open Port” และ “Send” เพื่อส่งค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์
4. ส่วนแสดงข้อมูลจากไมโครคอนโทรลเลอร์ มีหน้าที่แสดงข้อมูลที่คอมพิวเตอร์ส่งออกไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อยืนยันความถูกต้องของข้อมูล และองศาการเอียงจากไมโครคอนโทรลเลอร์ที่หุ่นยนต์ปลา ทั้งนี้ข้อมูลต่าง ๆ จะแสดงที่คอมพิวเตอร์ภายหลังจากการกดปุ่ม “Open Port” เท่านั้น

6.3 สรุป

ในบทนี้นำเสนอวิธีการประกอบกลไกการเอียงให้อยู่ภายในหุ่นยนต์ปลา ได้มีการแสดงตั้งแต่ในส่วนของแนวความคิดในการจัดวางอุปกรณ์ไปจนถึงวิธีการที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาในปริภูมิสามมิติ ในส่วนของฮาร์ดแวร์ได้มีการเรียบเรียงการนำเสนอโดยกล่าวถึงหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ การคำนวณขนาดทางกายภาพของหุ่นยนต์ปลาจากทฤษฎีฟิสิกส์โดยคำนึงถึงเรื่องแรงลอยตัว โครงสร้างในภาพรวมและการจัดวางอุปกรณ์ภายในของหุ่นยนต์ปลาซึ่งรวมไปถึง กลไกการสะบัด กลไกการเอียงและวงจรไฟเลี้ยง ตามลำดับ นอกจากนี้ในส่วนของซอฟต์แวร์ยังสามารถแบ่งออกได้เป็นสองส่วน ได้แก่ ซอฟต์แวร์บนไมโครคอนโทรลเลอร์และซอฟต์แวร์บนคอมพิวเตอร์ ซอฟต์แวร์บนไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งเปรียบเสมือนหัวใจของระบบได้มีการแสดงและอธิบายรูปแบบการติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ภายนอกกับไมโครคอนโทรลเลอร์ นอกจากนี้ยังได้มีการเปิดเผยแนวความคิดในการเขียนโปรแกรม พร้อมแสดงวิธีการคิดประกอบกับการอธิบายการทำงานของโปรแกรมบนไมโครคอนโทรลเลอร์ ในส่วนของซอฟต์แวร์บนคอมพิวเตอร์ซึ่งมีหน้าที่หลักสำหรับการติดต่อกับผู้ใช้งานและแสดงข้อมูลจาก MEMS Motion Sensor โดยเฉพาะ มีการแสดงหน้าต่างของซอฟต์แวร์บนคอมพิวเตอร์และอธิบายองค์ประกอบของหน้าต่างการทำงานไว้อย่างเป็นสัดส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

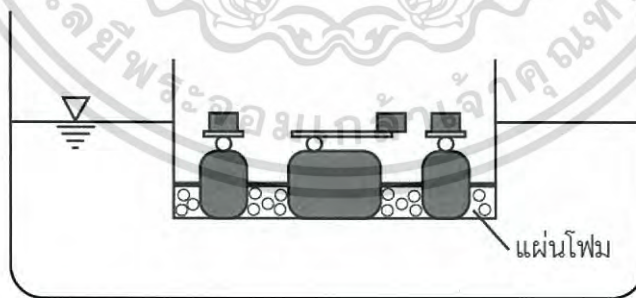
บทที่ 7

การทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

7.1 การทดลองสำหรับกลไกการเอียงแบบโมเดลคณิตศาสตร์

7.1.1 สภาพแวดล้อมในการทดลอง

แพลตฟอร์มที่ใช้ในการทดลองมีขนาดกว้างและยาว 200 มิลลิเมตรและมีความสูง 150 มิลลิเมตร ซึ่งประกอบขึ้นมาโดยใช้แผ่นอะคริลิกมาต่อกัน ช่องว่างระหว่างรอยต่อของแผ่นอะคริลิกถูกอุดด้วยซิลิโคนเพื่อกันน้ำซึม ป้องกันโอกาสที่จะทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหาย สำหรับกลไกการเอียงที่แขนของเซอร์โวมอเตอร์แต่ละตัวใช้น้ำหนักเป็นแท่งเหล็กตันขนาด 59.8 กรัม มาติดไว้ที่บริเวณปลายแขน นอกจากนี้ภายในแพลตฟอร์มได้มีการติดตั้งแผ่นโฟมเพื่อช่วยในการลอยตัวแสดงดังรูปที่ 7.1 เซนเซอร์วัดมุมเอียง MEMS Motion Sensor ถูกติดไว้บริเวณกึ่งกลางของหุ่นยนต์เนื่องจากเป็นจุดหมุนของระบบ ในขณะที่ทำการทดลอง หุ่นยนต์จะถูกปล่อยให้ลอยในอ่างน้ำขนาดใหญ่ และต่อสายออกมาเพื่อรับข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ผ่านสายสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม ซึ่งทำให้มีการรบกวนของแรงจากภายนอกขณะที่หุ่นยนต์ลอยอยู่ในน้ำ การรบกวนจากภายนอกนี้ส่งผลให้มุมเอียงของหุ่นยนต์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยในขณะที่กลไกการเอียงอยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับมุมเอียงสามารถแก้ไขได้โดยการเฉลี่ยค่ามุมเอียงขณะเริ่มต้นการทำงาน ซึ่งสามารถนำมาชดเชยค่าจากผลการทดลองได้



รูปที่ 7.1 สิ่งแวดล้อมและการจัดสถานะการทดลอง

ในการทดลองจะทำการสั่งให้แขนเซอร์โวมอเตอร์เปลี่ยนตำแหน่งและวัดค่ามุมเอียงที่เกิดขึ้นจาก MEMS Motion Sensor มุมเอียงที่วัดได้จะถูกส่งออกมาแสดงยังคอมพิวเตอร์ผ่าน GUI ตำแหน่งของแขนเซอร์โวและค่ามุมเอียงจะถูกนำมาแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ที่สร้างขึ้นจะใช้สมการคณิตศาสตร์มาประมาณแนวโน้มของความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นระหว่างตำแหน่งของแขนเซอร์โวและมุมเอียงทั้งในระนาบ X-Z และระนาบ Y-Z หลังจากการประมาณแนวโน้ม สมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนลิขสิทธิ์ทางปัญญา ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

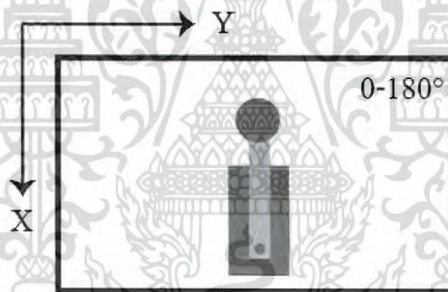
คณิตศาสตร์ที่ได้มานั้น จะเปรียบเหมือนคุณลักษณะของมุมเอียงที่เกิดขึ้นกับการจัดวางเซอร์ไวโมเตอร์ในรูปแบบนั้น ๆ สมการเหล่านี้ได้ถูกนำมาวิเคราะห์และคำนวณตำแหน่งของแกนเซอร์ไวจากมุมเอียงของหุ่นยนต์ที่ต้องการให้เกิดขึ้นในระบบ

7.1.2 การออกแบบการทดลองและผลการทดลอง

เนื่องจากรูปแบบการจัดวางเซอร์ไวโมเตอร์มีได้หลายรูปแบบ ซึ่งจะเริ่มทำการทดลองตั้งแต่เซอร์ไวโมเตอร์เพียงตัวเดียวไปจนถึงการจัดวางเซอร์ไวโมเตอร์หลายตัวในรูปแบบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

7.1.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงและเซอร์ไวโมเตอร์จำนวนหนึ่งตัว

การทดลองนี้ เกิดขึ้นเพื่อค้นหาขนาดของมุมเอียงสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบ ขณะที่ใช้น้ำหนักถ่วงขนาด 59.8 กรัม แกนอ้างอิงและรูปแบบการวางเซอร์ไวโมเตอร์แสดงดังรูปที่ 7.2 ในการทดลองแกนเซอร์ไวจะถูกตั้งให้อยู่ในตำแหน่งเริ่มต้นที่ 90° และจะถูกปรับโดยสั่งจาก GUI บนคอมพิวเตอร์ให้เปลี่ยนตำแหน่งไปที่ละ 5° จนครอบคลุมพื้นที่การทำงานที่แกนของเซอร์ไวโมเตอร์สามารถหมุนไปได้ซึ่งก็คือ $0 - 180^\circ$ นั่นเอง



รูปที่ 7.2 การจัดวางเซอร์ไวโมเตอร์จำนวนหนึ่งตัวและแกนอ้างอิง

1. ผลการทดลอง

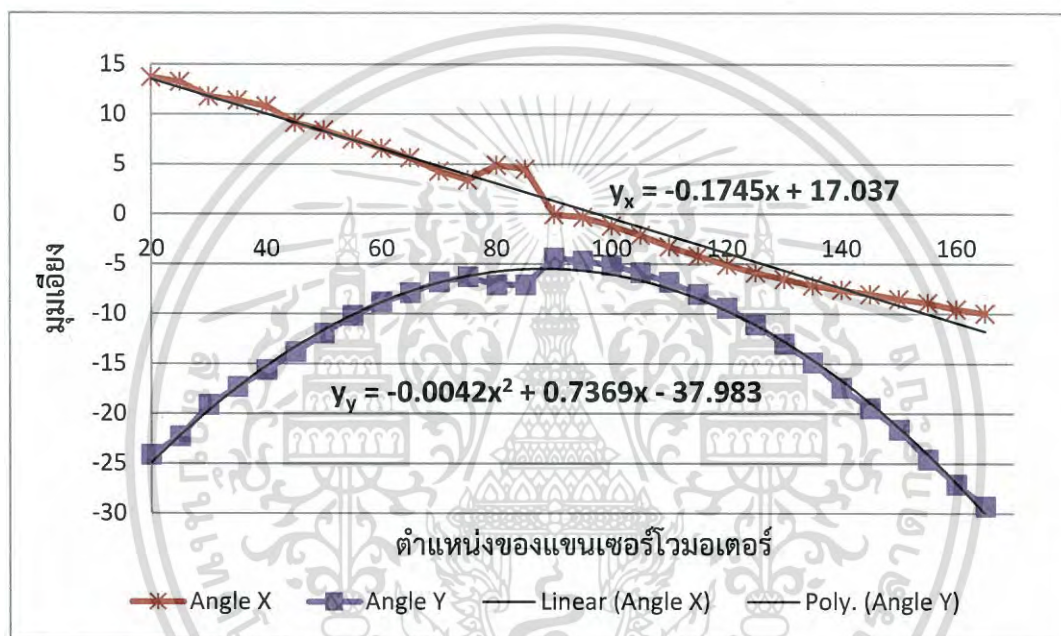
ผลการทดลองที่เกิดขึ้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงในระนาบ X-Z และระนาบ Y-Z กับตำแหน่งของแกนเซอร์ไวโมเตอร์แสดงดังรูปที่ 7.3 ในขณะที่เริ่มต้นการทำงานแกนเซอร์ไวจะถูกตั้งให้อยู่ในตำแหน่ง 90° ซึ่งเมื่อมองจากกราฟแสดงผลการทดลองในขณะที่แกนเซอร์ไวอยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น มุมเอียงในระนาบ X-Z และระนาบ Y-Z มีค่าเข้าใกล้ศูนย์องศา อย่างไรก็ตามจากกราฟแสดงผลการทดลองทำให้สามารถมองเห็นได้ว่าการใช้เซอร์ไวโมเตอร์เพียงแค่ตัวเดียวไม่สามารถจะทำให้เกิดสมดุลแรงในระบบได้

ในการหาคุณลักษณะของกราฟผลการทดลองใช้การประมาณแนวโน้มของกราฟจากสมการเส้นตรงสำหรับมุมเอียง θ ในระนาบ X-Z (Angle X) และสมการโพลิโนเมียลสำหรับมุมเอียง β ในระนาบ Y-Z (Angle Y) มุมเอียงสูงสุดที่เกิดขึ้นในระบบเกิดขึ้นในระนาบ Y-Z มีค่า $\beta = \pm 25$ องศา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้สามารถสรุปได้ว่าเซอร์โวมอเตอร์เพียงแค่ตัวเดียว จะส่งผลกับองศาการเอียงของหุ่นยนต์อย่างเต็มที่เพียงแค่ระนาบเดียวคือ ระนาบ Y-Z เท่านั้น ซึ่งไม่ครอบคลุมไปถึงพื้นที่การทำงานทั้งหมดที่ต้องการให้เกิดขึ้นบนระนาบ X-Y

2. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

สมการที่ได้จากการประมาณถูกนำมาคำนวณย้อนกลับ เพื่อหาค่าตำแหน่งของแกนเซอร์โวมอเตอร์มุมเอียงที่ต้องการในระนาบนั้น ๆ โดยจะแทนค่ามุมเอียงที่ต้องการลงไปในสมการที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ในรูปที่ 7.3



รูปที่ 7.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแกนเซอร์โวมอเตอร์และมุมเอียงที่เกิดขึ้นในระนาบ X-Z และระนาบ Y-Z

3. สมการเพื่อหามุม θ ในระนาบ X-Z

$$y_x = -0.1745x + 17.037 \quad (7.1)$$

$$x = (y_x - 17.037) / -0.1745 \quad (7.2)$$

จากรูปที่ 7.3 ค่ามุมเอียง θ (Angle X) ที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงตั้งแต่ $\theta = 13.7$ องศาถึง $\theta = -9.97$ องศา ดังนั้นเมื่อแทนค่ามุม θ กลับไปยังสมการที่ (7.2) เพื่อหาค่าตำแหน่งของแกนเซอร์โวมอเตอร์จึงแทนด้วยจำนวนเต็มตั้งแต่ 14 ถึง -10 และให้ผลลัพธ์แสดงออกมาในรูปจำนวนเต็ม เพื่อใช้สั่งตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในตารางต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.1 เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการคำนวณและการทดลองเพื่อหามุม θ ที่ระนาบ X-Z สำหรับเซอร์ไวโมเตอร์จำนวนหนึ่งตัว

ผลลัพธ์จากสมการ		ผลลัพธ์จากการทดลอง	
มุม θ	ตำแหน่งแกนเซอร์ไวโมเตอร์	มุม θ	ตำแหน่งแกนเซอร์ไวโมเตอร์
14	17	14	20
13	23	13	25
12	29	12	30
11	35	11	35
10	40	10	40
9	46	9	45
8	52	8	50
7	58	7	55
6	63	6	60
5	69	5	65
4	75	4	70
3	80	3	75
2	86	2	80
1	92	1	85
0	98	0	93
-1	103	-1	100
-2	109	-2	105
-3	115	-3	110
-4	121	-4	115
-5	126	-5	120
-6	132	-6	125
-7	138	-7	133
-8	143	-8	143
-9	149	-9	153
-10	155	-10	163

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

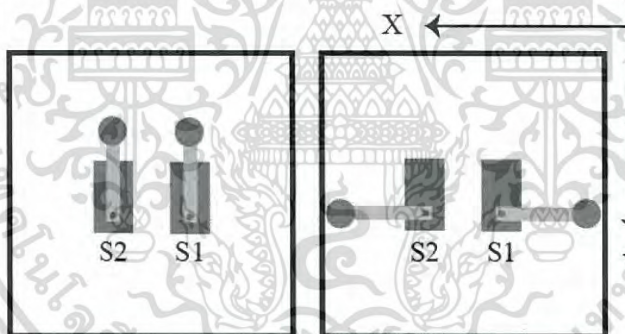
ค่าความแตกต่างระหว่างผลลัพธ์จากสมการและการทดลองอยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนนี้มีสาเหตุมาจากการทดลอง เช่น แรงบรบกวนภายนอกจากสายส่งข้อมูล สภาวะไม่สมดุลจากฮาร์ดแวร์ และรวมไปถึงแรงต้านในการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของจุดศูนย์ถ่วง ในขณะที่กำลังเปลี่ยนตำแหน่งของแกนเซอร์ไวโมเตอร์ เป็นต้น

4. สมการเพื่อหามุม β ในระนาบ Y-Z

$$y_y = -0.0042x^2 + 0.7369x - 37.983 \tag{7.3}$$

สมการที่ (7.3) เป็นสมการควอดราติกทำให้เมื่อแก้สมการออกมาแล้ว มีคำตอบออกมาสองคำตอบเสมอ ทำให้เกิดปัญหาในเลือกใช้คำตอบจากสมการที่คำนวณได้เพื่อสั่งให้แกนเซอร์ไวโมเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ผลลัพธ์ที่ได้ทำให้ไม่สามารถควบคุมมุมเอียง β ในระนาบ Y-Z ได้โดยตรงทำได้เพียงควบคุมมุม θ ผ่านสมการที่ (7.2) เท่านั้น

7.1.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงและเซอร์ไวโมเตอร์แบบ Parallel Pattern



รูปที่ 7.4 การจัดวางเซอร์ไวโมเตอร์แบบ Parallel และแกนอ้างอิง

การจัดวางเซอร์ไวโมเตอร์แบบ Parallel ใช้เซอร์ไวโมเตอร์จำนวนสองตัวมาวางขนานกันตามแนวยาว ตำแหน่งของแกนเซอร์ไวแต่ละตัวถูกตั้งให้หันไปในทิศทางเดียวกัน และมีตำแหน่งเริ่มต้นที่ 90 องศา แสดงดังรูปที่ 7.4 ในการทำการทดลองจะหมุนแกนเซอร์ไวโมเตอร์ทั้งสองออกจากกันทีละ 5° แล้วบันทึกผลการทดลองที่เกิดขึ้น ผลการทดลองที่ได้จะแบ่งออกเป็น 2 กราฟ ได้แก่ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงและตำแหน่งของแกนเซอร์ไว S1 และ S2 ตามลำดับ

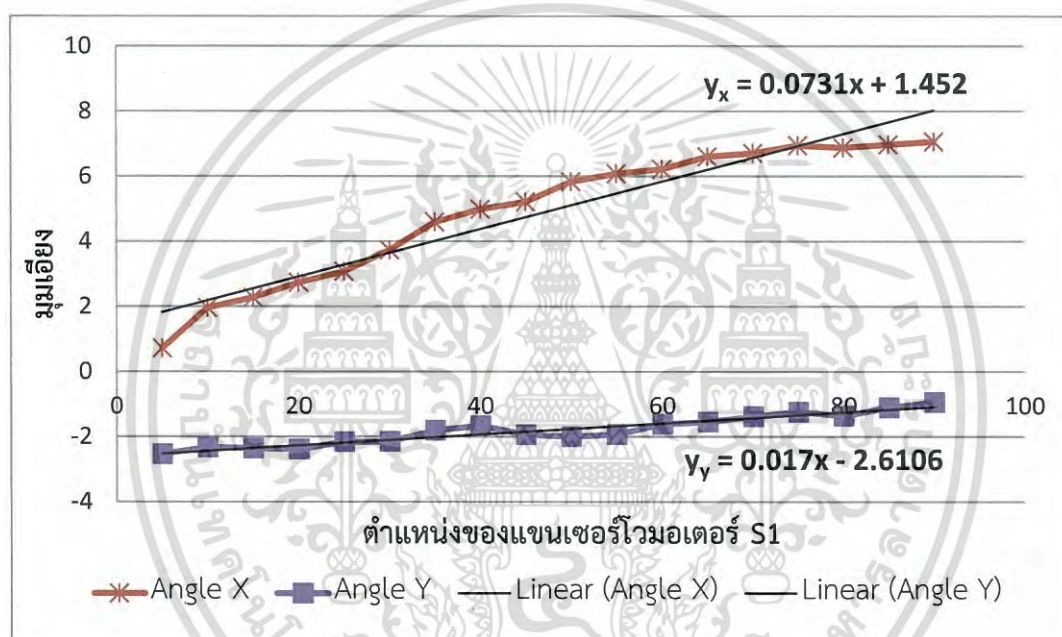
1. ผลการทดลอง

ผลการทดลองสำหรับการจัดวางเซอร์ไวโมเตอร์แบบ Parallel แสดงในรูปที่ 7.5 และรูปที่ 7.6 ซึ่งแยกกันระหว่างกราฟแสดงตำแหน่งของแกนเซอร์ไวโมเตอร์ S1 และ S2 ตามลำดับ จากผลการทดลองทั้งสองกราฟแสดงให้เห็นว่า มุมเอียง θ ในระนาบ X-Z (Angle Y) มีการเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

น้อยมากจนความชันของกราฟมีค่าใกล้เคียงศูนย์ แสดงว่าตำแหน่งของแขนเซอร์โวมอเตอร์ทั้งสองตัว ไม่มีผลกับการเปลี่ยนแปลงมุมเอียง θ ในระบบ ไม่ว่าแขนเซอร์โวมอเตอร์ทั้งสองจะอยู่ที่ตำแหน่งใดก็ตาม

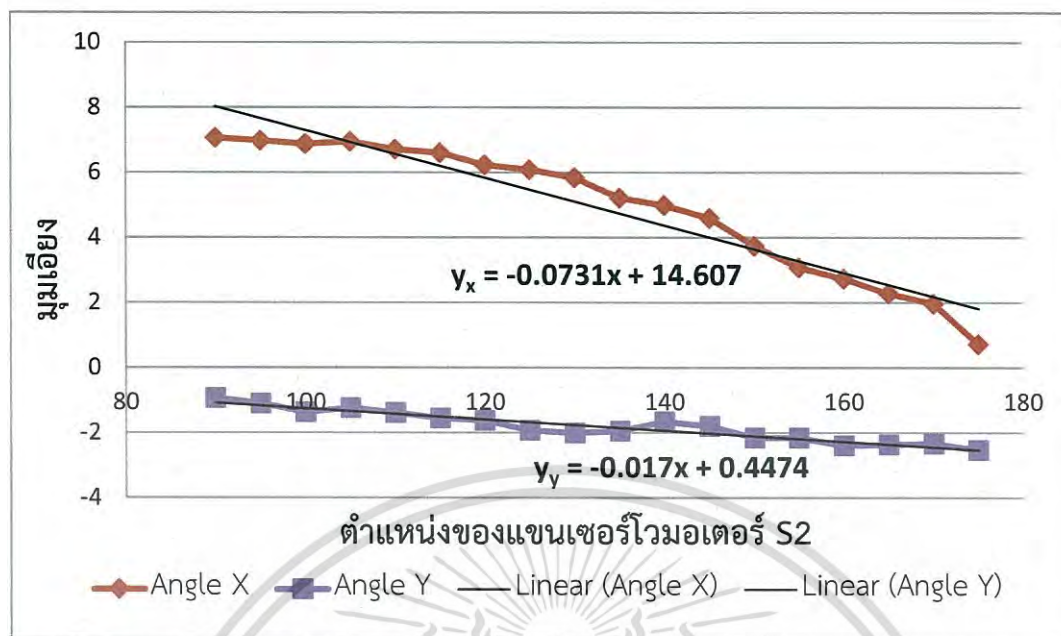
จากกราฟในรูปที่ 7.5 มุมเอียง β ในระนาบ Y-Z (Angle X) มีการเปลี่ยนแปลงความชันของกราฟซึ่งมองเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากในขณะที่เซอร์โวมอเตอร์ทั้งสองตัวอยู่ที่จุดเริ่มต้น แรงรวมของโมเมนต์ที่เกิดขึ้นจะส่งผลให้หุ่นยนต์เอียงที่มุมสูงสุด $\beta = 7$ องศา ณ ตำแหน่งแขนเซอร์โวมอเตอร์ S1 เท่ากับ 90° หลังจากนั้นในขณะที่เซอร์โวมอเตอร์ทั้งสองกำลังหมุนให้ตำแหน่งของแขนเซอร์โวมอเตอร์ออกจากกัน มุมเอียง β จึงค่อย ๆ ลดลงและมีค่าเข้าใกล้ 0° ณ ตำแหน่งของแขนเซอร์โวมอเตอร์ S1 เท่ากับ 5°



รูปที่ 7.5 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงและตำแหน่งของแขนเซอร์โวมอเตอร์ S1 สำหรับการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ Parallel

กราฟในรูปที่ 7.6 แกน X แสดงตำแหน่งของแขนเซอร์โวมอเตอร์ S2 ซึ่งเคลื่อนที่จาก 90° ไปจนถึง 180° เพราะพื้นที่การทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ S2 มีค่าตั้งแต่ 90° ถึง 180° เท่านั้น

มุมเอียงที่นำมาแสดงบนกราฟทั้งสองกราฟเป็นมุมเอียงเดียวกัน หมายถึงการบันทึกผลการทดลองถูกบันทึกค่าในขณะที่เซอร์โวมอเตอร์ S1 และ S2 ทำงานพร้อมกัน



รูปที่ 7.6 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงและตำแหน่งของแกนเซอร์ไวมอเตอร์ S2 สำหรับการจัดวางเซอร์ไวมอเตอร์แบบ Parallel

การจัดวางเซอร์ไวมอเตอร์แบบ Parallel ทำให้แกนเซอร์ไวมอเตอร์ S1 และ S2 มีช่วงการทำงานเพียงแค่ 0° ถึง 90° แม้ผลลัพธ์จากมุมเอียงที่ได้จะน่าพึงพอใจ แต่ด้วยข้อจำกัดในการเคลื่อนที่จากพื้นที่ทำงานของแกนเซอร์ไวมอเตอร์ จึงทำให้ต้องจัดวางเซอร์ไวมอเตอร์ในแบบอื่น ๆ เพื่อใช้พื้นที่ทำงานให้เกิดประโยชน์สูงสุด

2. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองในการจัดวางเซอร์ไวมอเตอร์แบบ Parallel เนื่องจากมุมเอียง θ ในระนาบ X-Z (Angle Y) มีการเปลี่ยนแปลงน้อย ดังนั้นจึงเลือกนำสมการของมุม β (Angle X) เท่านั้นมาคำนวณเพื่อหาตำแหน่งแกนของเซอร์ไวมอเตอร์

3. สมการเพื่อหามุม β ในระนาบ Y-Z ของเซอร์ไวมอเตอร์ S1

$$y_x = 0.0731x + 1.452 \quad (7.4)$$

$$x = (y_x - 1.452) / 0.0731 \quad (7.5)$$

ระยะการทำงานของเซอร์ไวมอเตอร์ S1 เริ่มตั้งแต่ 0° ถึง 90° และทำให้เกิดมุมเอียง $\beta = 0.7 - 7.0$ องศา ดังนั้นในการแทนค่าสมการที่ (7.5) เพื่อหาตำแหน่งของแกนเซอร์ไวมอเตอร์ S1 จะใช้จำนวนเต็มตั้งแต่ 0° ไปจนถึง 8° แทนมุมเอียง β ที่ต้องการและให้ผลลัพธ์จากการคำนวณออกมาเป็นจำนวนเต็มแสดงดังตารางต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.2 เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการคำนวณและการทดลองเพื่อหามุม β ที่ระนาบ Y-Z สำหรับเซอร์โวมอเตอร์ S1 ในการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ Parallel

ผลลัพธ์จากสมการ		ผลลัพธ์จากการทดลอง	
มุม β	ตำแหน่งแกนเซอร์โวมอเตอร์	มุม β	ตำแหน่งแกนเซอร์โวมอเตอร์
8	90	8	85
7	76	7	70
6	62	6	55
5	49	5	40
4	35	4	30
3	21	3	23
2	7	2	13
1	-6	1	5
0	-20	0	3

ผลการคำนวณจากสมการที่ (7.5) สามารถนำไปใช้ควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ได้ ถึงแม้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างก็ตาม เพราะสมการเส้นตรงที่นำมาประมาณผลการทดลองไม่ได้ซ้อนทับกับค่าผลการทดลองที่ได้จากกราฟตลอดช่วงที่เซอร์โวมอเตอร์ทำงาน สำหรับผลลัพธ์จากการคำนวณที่มีค่าติดลบ จะถูกตั้งเงื่อนไขการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ให้จำกัดการหมุนไปที่ตำแหน่ง 5° เสมอ เพื่อป้องกันการความเสียหายที่เกิดขึ้นกับเซอร์โวมอเตอร์ S1

4. สมการเพื่อหามุม β ในระนาบ Y-Z ของเซอร์โวมอเตอร์ S2

$$y_x = -0.0731x + 14.607 \quad (7.6)$$

$$x = (y_x - 14.607) / -0.0731 \quad (7.7)$$

การหาดำแหน่งแกนเซอร์โวมอเตอร์จากการคำนวณ จะแทนค่ามุม β ไปในสมการที่ (7.7) เป็นซึ่งเป็นจำนวนเต็มตั้งแต่ 0° ถึง 8° และให้ผลลัพธ์จากการคำนวณมีค่าเป็นจำนวนเต็ม ผลลัพธ์จากการคำนวณสามารถเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการได้ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 7.3 เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการคำนวณและการทดลองเพื่อหามุม β ที่ระนาบ Y-Z สำหรับเซอร์โวมอเตอร์ S2 ในการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ Parallel

ผลลัพธ์จากสมการ		ผลลัพธ์จากการทดลอง	
มุม β	ตำแหน่งแกนเซอร์โวมอเตอร์	มุม β	ตำแหน่งแกนเซอร์โวมอเตอร์
8	90	8	95
7	104	7	110
6	118	6	125
5	131	5	140
4	145	4	150
3	159	3	157
2	172	2	167
1	186	1	175
0	200	0	183

จากตารางที่ 7.2 จะเห็นว่าผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณตำแหน่งของแกนเซอร์โวมอเตอร์มีค่าที่ยอมรับได้และใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง แต่เนื่องจากแกนเซอร์โวมอเตอร์สามารถหมุนได้เพียงแค่ $0^\circ - 180^\circ$ ดังนั้นตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์จากการคำนวณที่เกิน 180° จะถูกตั้งให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง 175° เสมอ เพื่อป้องกันความเสียหายกับเซอร์โวมอเตอร์

5. เปรียบเทียบผลลัพธ์จากการคำนวณตำแหน่งของแกนเซอร์โวมอเตอร์ผ่านสมการ

เนื่องจากการทำงานของการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ Parallel แกนของเซอร์โวมอเตอร์ทั้งสองตัวจะต้องหมุนออกไปพร้อม ๆ กัน ดังนั้นเมื่อป้อนมุมเอียงที่ต้องการลงไปในสมการที่ (7.5) และสมการที่ (7.7) ตำแหน่งของแกนเซอร์โวมอเตอร์ S1 และ S2 จากการคำนวณ จะต้องสอดคล้องกับมุมเอียงที่เกิดขึ้น

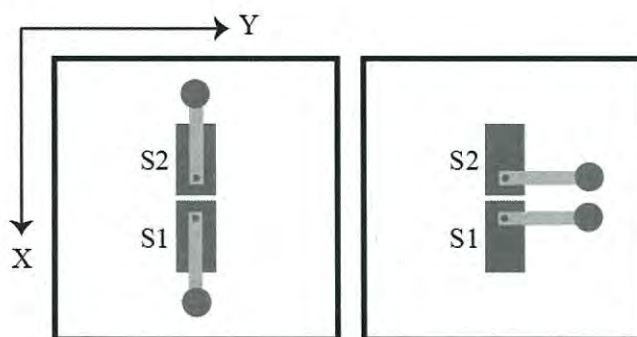
ตารางที่ 7.4 เปรียบเทียบผลลัพธ์จากการคำนวณตำแหน่งแกนเซอร์โวมอเตอร์ S1 และ S2 เมื่อมุมเอียง β มีค่าเท่ากัน

มุม β	ตำแหน่งแกนเซอร์โวมอเตอร์	
	S1	S2
8	90	90
7	76	104
6	62	118
5	49	131
4	35	145
3	21	159
2	7	172
1	-6	186
0	-20	200

จากตารางที่ 7.4 พบว่าตำแหน่งแกนเซอร์โวมอเตอร์ S1 และ S2 มีการเคลื่อนที่ที่สัมพันธ์กันเมื่อมุม β เปลี่ยนไป ดังนั้นจึงสามารถนำสมการคุณลักษณะของการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ Parallel ไปใช้ควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ทั้งสองตัวได้

7.1.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงและเซอร์โวมอเตอร์แบบ In-line Pattern

เซอร์โวมอเตอร์จำนวนสองตัวถูกวางให้หันออกจากกันและจัดให้วางอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกันแสดงดังรูปที่ 7.7 ตำแหน่งแกนของเซอร์โวมอเตอร์ทั้งสองขณะเริ่มต้นการทำงานอยู่ที่ 90° ขณะทำการทดลองทำการหมุนเซอร์โวมอเตอร์ทั้งสองตัวพร้อมกัน แกนเซอร์โวมอเตอร์เปลี่ยนตำแหน่งไปที่ละ 5° ทำให้กราฟผลการทดลองที่ออกมาสามารถแบ่งได้เป็น 2 กราฟ ได้แก่ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงและตำแหน่งแกนเซอร์โวมอเตอร์ S1 และ S2 ตามลำดับ

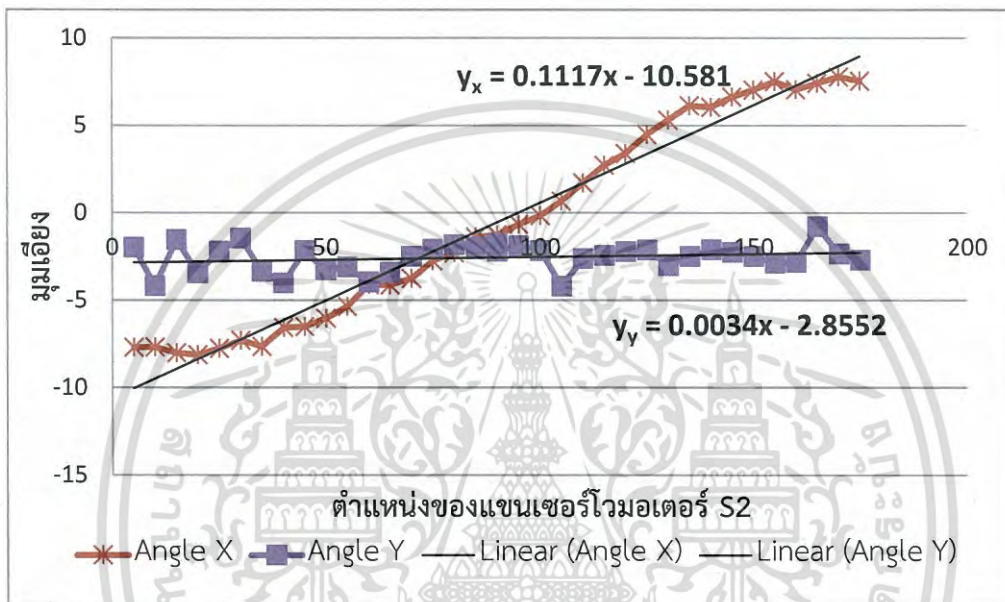


รูปที่ 7.7 การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ In-line และแกนอ้างอิง

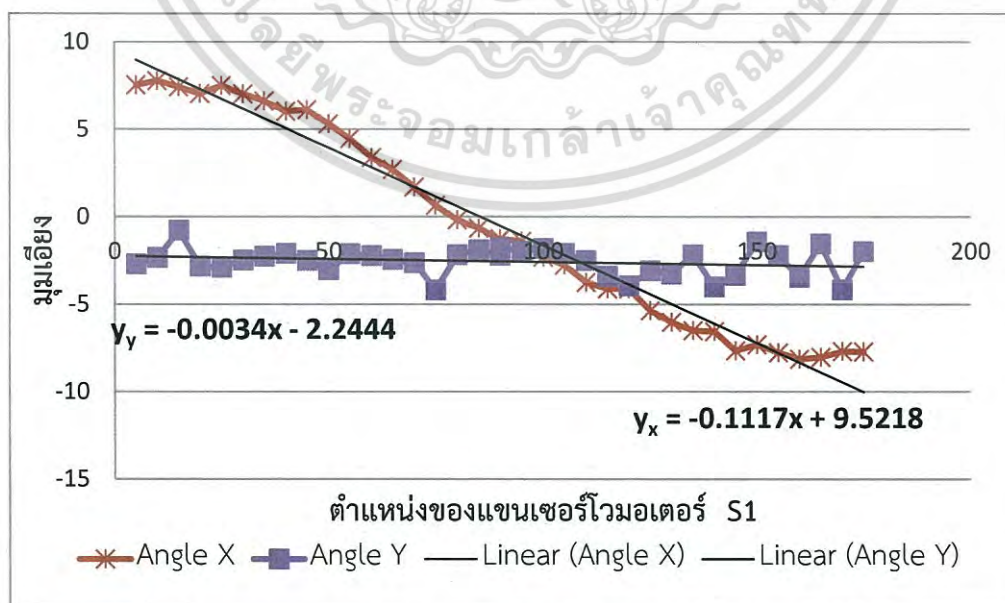
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ผลการทดลอง

กราฟแสดงผลการทดลองแบ่งออกเป็นสองกราฟสำหรับตำแหน่งของแกนเซอร์ไวมอเตอร์ S1 และ S2 ใน รูปที่ 7.9 รูปที่ 7.8 ตามลำดับ จากกราฟทั้งสองจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของมุมเอียง β ในระนาบ Y-Z (Angle X) มีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่มุมเอียง θ ในระนาบ X-Z (Angle Y) มีค่าเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงแทบจะเป็นศูนย์ ซึ่งหมายถึงหุ่นยนต์สามารถที่จะเอียงหมุนรอบแกน X เท่านั้น



รูปที่ 7.8 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงและตำแหน่งของแกนเซอร์ไวมอเตอร์ S2 สำหรับการจัดวางเซอร์ไวมอเตอร์แบบ In-line



รูปที่ 7.9 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงและตำแหน่งของแกนเซอร์ไวมอเตอร์ S1 สำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใ้ทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า การจัดวางเซอร์ไวมอเตอร์แบบ In-line ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความพิเศษสำหรับการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ In-line คือ การที่เซอร์โวมอเตอร์มีพื้นที่ทำงานได้ตั้งแต่ 0° ถึง 180° ทำให้ผลการทดลองที่ออกมามุมเอียง β ที่เกิดขึ้นบนระนาบ Y-Z (Angle X) มีค่าทั้งในช่วงบวกและติดลบ

2. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เนื่องจากสมการเส้นตรงที่ได้จากการประมาณค่ามุมเอียง θ ในระนาบ X-Z (Angle Y) แทบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้สมการสำหรับมุมเอียง β ในระนาบ Y-Z (Angle X) ที่มีค่าความชันของกราฟมากกว่ามาควบคุมมุมเอียงในหุ่นยนต์

3. สมการเพื่อหามุม β ในระนาบ Y-Z ของเซอร์โวมอเตอร์ S1

$$y_x = -0.1117x + 9.5218 \quad (7.8)$$

$$x = (y_x - 9.5218) / -0.1117 \quad (7.9)$$

จากผลการทดลองในรูปที่ 7.9 สำหรับการแทนค่าในสมการที่ (7.9) จะเลือกแทนค่ามุมเอียงที่ต้องการให้อยู่ในขอบเขตของช่วงผลการทดลองที่ได้ โดยแทนค่ามุมเอียงที่ต้องการให้เกิดขึ้นเป็นค่าจำนวนเต็มตั้งแต่ 8° ถึง -8° และให้ผลลัพธ์ของสมการซึ่งก็คือตำแหน่งของแขนเซอร์โวมอเตอร์ S1 อยู่ในรูปจำนวนเต็มเช่นกัน

ตารางที่ 7.5 เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการคำนวณและการทดลองเพื่อหามุม β ที่ระนาบ Y-Z สำหรับเซอร์โวมอเตอร์ S1 ในการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ In-line

ผลลัพธ์จากสมการ		ผลลัพธ์จากการทดลอง	
มุม β	ตำแหน่งแขน เซอร์โวมอเตอร์	มุม β	ตำแหน่งแขน เซอร์โวมอเตอร์
8	14	8	14
7	23	7	32
6	32	6	43
5	40	5	50
4	49	4	55
3	58	3	63
2	67	2	70
1	76	1	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.5 (ต่อ)

ผลลัพธ์จากสมการ		ผลลัพธ์จากการทดลอง	
มุม β	ตำแหน่งแกน เซอร์โวมอเตอร์	มุม β	ตำแหน่งแกน เซอร์โวมอเตอร์
0	85	0	80
-1	94	-1	86
-2	103	-2	100
-3	112	-3	105
-4	121	-4	115
-5	130	-5	125
-6	139	-6	130
-7	148	-7	143
-8	157	-8	160

ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองเล็กน้อย เนื่องจากสมการเส้นตรงที่ใช้ในการประมาณเส้นตรงไม่ได้ตรงกับทุกจุดของกราฟแสดงผลการทดลอง รวมไปถึงการปิดตัวเลขทศนิยมจากการคำนวณให้เป็นค่าจำนวนเต็มก็มีส่วนทำให้ตัวเลขที่คำนวณและตัวเลขจากการทดลองมีความคลาดเคลื่อน อย่างไรก็ตามเนื่องจากเซอร์โวมอเตอร์ S1 และ S2 ทำงานพร้อมกันจึงทำให้แรงโมเมนต์ที่เกิดขึ้นในระบบมีค่ามากพอที่จะทำให้การเอียงของหุ่นยนต์เป็นไปในทิศทางที่ต้องการ

4. สมการเพื่อหามุม β ในระนาบ Y-Z ของเซอร์โวมอเตอร์ S2

$$y_x = 0.1117x - 10.581 \quad (7.10)$$

$$x = (y_x + 10.581)/0.1117 \quad (7.11)$$

สำหรับการแทนค่ามุมเอียงในสมการที่ (7.11) จะใช้จำนวนเต็มตั้งแต่ 8° ถึง -8° เหมือนกับช่วงมุมเอียงที่เกิดขึ้นจากการทดลอง ผลการทดลองและผลการคำนวณที่ได้จะถูกปิดทศนิยมให้เป็นจำนวนเต็ม ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 7.6 เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการคำนวณและการทดลองเพื่อหามุม β ที่ระนาบ Y-Z สำหรับเซอร์โวมอเตอร์ S2 ในการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ In-line

ผลลัพธ์จากสมการ		ผลลัพธ์จากการทดลอง	
มุม β	ตำแหน่งแกนเซอร์โวมอเตอร์	มุม β	ตำแหน่งแกนเซอร์โวมอเตอร์
8	166	8	170
7	157	7	152
6	148	6	137
5	139	5	130
4	131	4	125
3	122	3	118
2	113	2	110
1	104	1	105
0	95	0	100
-1	86	-1	90
-2	77	-2	80
-3	68	-3	75
-4	59	-4	65
-5	50	-5	55
-6	41	-6	50
-7	32	-7	38
-8	23	-8	18

ผลลัพธ์ที่ได้รับการคำนวณในตารางที่ 7.6 มีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยจากการประมาณค่าสมการเส้นตรงและจากการปัดทศนิยมให้เป็นจำนวนเต็ม อย่างไรก็ตามสมการที่ได้สามารถนำไปใช้ในการควบคุมมุมเอียงได้เช่นกัน

5. เปรียบเทียบผลลัพธ์จากการคำนวณตำแหน่งของแกนเซอร์โวมอเตอร์ผ่านสมการ

เนื่องจากการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ In-line เซอร์โวมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว จะต้องทำงานสัมพันธ์กัน ดังนั้นจึงต้องมีการเปรียบเทียบตำแหน่งของแกนเซอร์โวมอเตอร์ที่ได้จากการคำนวณทั้งเซอร์โวมอเตอร์ S1 และ S2 ว่ามีความสัมพันธ์และสอดคล้องกันในการเปลี่ยนตำแหน่งแกนเซอร์โวมอเตอร์หรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

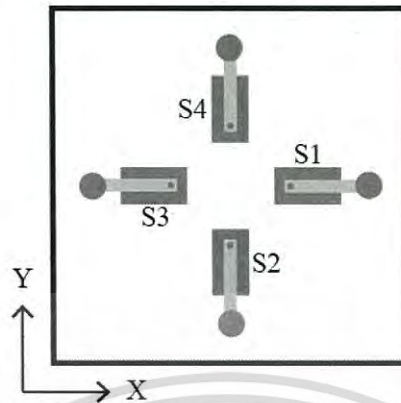
ตารางที่ 7.7 เปรียบเทียบผลลัพธ์จากการคำนวณของตำแหน่งแกนเซอร์ไวมอเตอร์ S1 และ S2 เมื่อมุมเอียง β มีค่าเท่ากัน

มุม β	ตำแหน่งแกนเซอร์ไวมอเตอร์	
	S1	S2
8	14	166
7	23	157
6	32	148
5	40	139
4	49	131
3	58	122
2	67	113
1	76	104
0	85	95
-1	94	86
-2	103	77
-3	112	68
-4	121	59
-5	130	50
-6	139	41
-7	148	32
-8	157	23

จากตารางที่ 7.7 ตำแหน่งแกนเซอร์ไวมอเตอร์มีความสัมพันธ์กันในการทำงาน ซึ่งยืนยันว่าสมการที่ (7.9) และสมการที่ (7.11) สามารถนำไปใช้ควบคุมกลไกการเอียงของหุ่นยนต์ปลาได้ ทั้งนี้สำหรับมุมเอียงที่ตำแหน่ง $\beta = 0$ องศา แม้ว่าแกนเซอร์ไวมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวจะไม่อยู่ที่ตำแหน่ง 90° แต่หุ่นยนต์ก็สามารถอยู่ในสภาวะสมดุลได้ เนื่องจากแกนเซอร์ไวมอเตอร์ทั้งสองอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน ส่งผลให้แรงโมเมนต์หักล้างกันได้พอดีและผลลัพธ์จากสมการมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.3 การทดลองหามุมเอียงเมื่อใช้เซอร์โวมอเตอร์จำนวนสี่ตัวจัดวางแบบ In-line



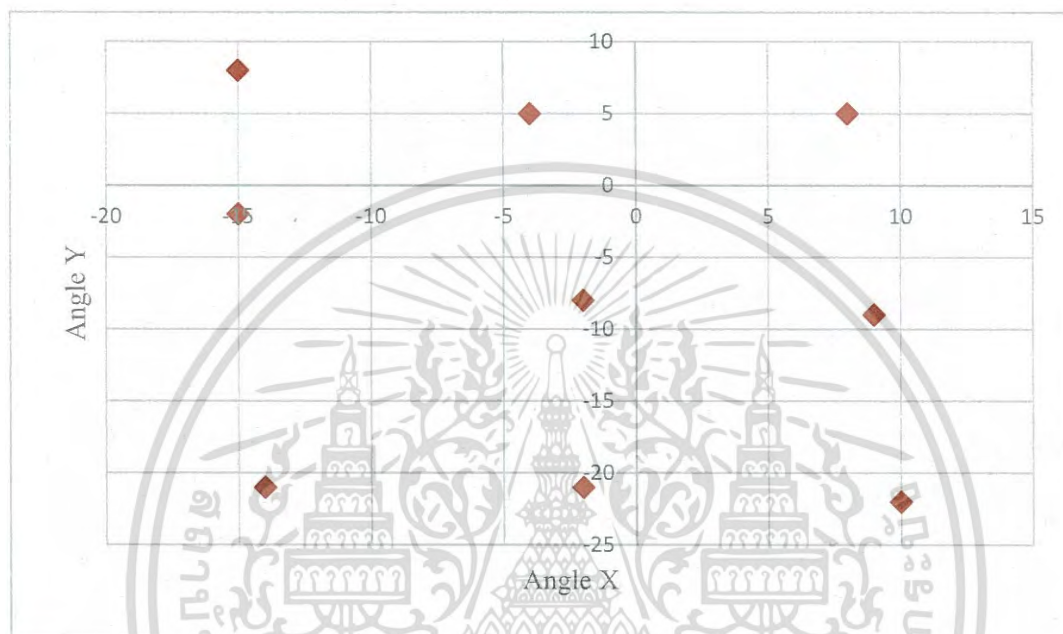
รูปที่ 7.10 การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์จำนวน 4 ตัวแบบ In-line และแกนอ้างอิง

การทดลองนี้เกิดขึ้นเพื่อหาข้อจำกัดของหุ่นยนต์ ในขณะที่ควบคุมเซอร์โวมอเตอร์จำนวน 4 ตัวให้ทำงานร่วมกัน มีการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ In-line จำนวนสองชุดเพื่อหามุมเอียง θ และ β ของระบบว่ามีขนาดเท่าไร ในการทดลองจะปรับแกนเซอร์โวมอเตอร์ให้หุ่นยนต์เอียงไปในทิศทางที่ต้องการตามแนวแกนบนระนาบ X-Y แสดงดังตารางที่ 7.8 โดยการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์และแกนอ้างอิงแสดงในรูปที่ 7.10

ตารางที่ 7.8 ผลการทดลองแสดงมุมเอียงในระบบเมื่อแกนเซอร์โวมอเตอร์เปลี่ยนตำแหน่งไปตามทิศทางในระนาบ X-Y

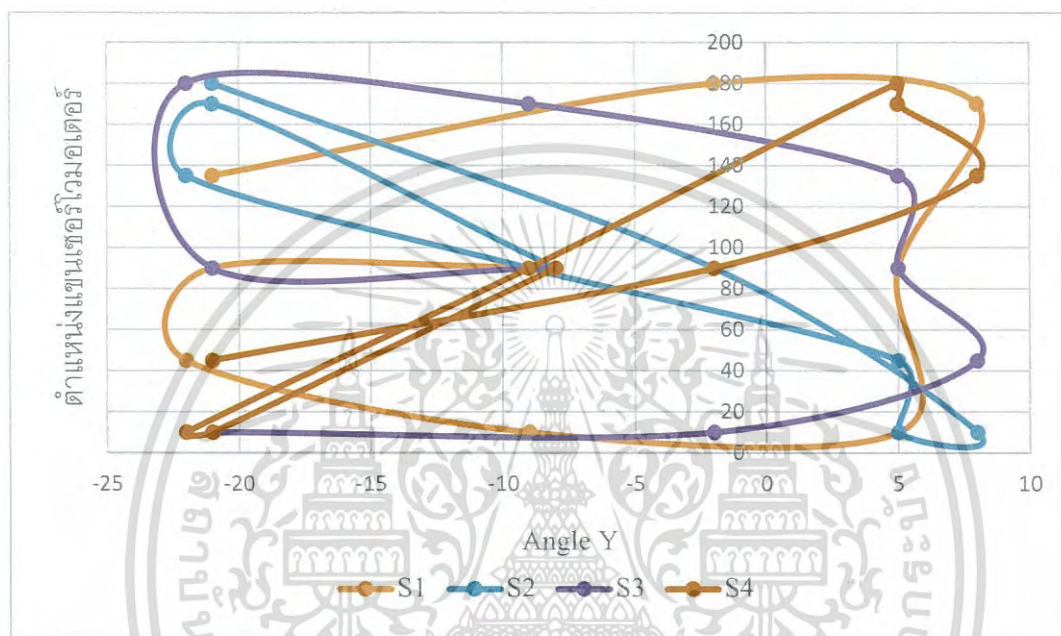
ทิศทางในระนาบ	มุมเอียง		ตำแหน่งแกนเซอร์โวมอเตอร์			
	β (Angle X)	θ (Angle Y)	S1	S2	S3	S4
0, 0	-2	-8	90	90	90	90
x, 0	-2	-21	90	170	90	10
x, -y	10	-22	45	135	180	10
0, -y	9	-9	10	90	170	90
-x, -y	8	5	10	45	135	180
-x, 0	-4	5	90	10	90	170
-x, y	-15	8	170	10	45	135
0, y	-15	-2	180	90	10	90
x, y	-14	-21	135	180	10	45

ผลการทดลองที่ได้เกิดจากการทำการทดลองซ้ำจำนวน 10 ครั้ง จากนั้นจึงเก็บค่าเฉลี่ยของมุมเอียงในแต่ละรอบของแต่ละตำแหน่งมาเฉลี่ยกัน และปัดค่ามุมเอียงที่ได้ให้เป็นจำนวนเต็ม ซึ่งเมื่อนำมาพล็อตกราฟแสดงมุมเอียงที่เกิดขึ้นในระบบดังรูปที่ 7.11 ทำให้สามารถเห็นมุมเอียงที่มากที่สุดของระบบในแต่ละทิศทางได้ชัดเจน ซึ่งหมายถึงมุมเอียงที่มากที่สุดที่หุ่นยนต์สามารถเอียงได้ในระนาบ X-Y

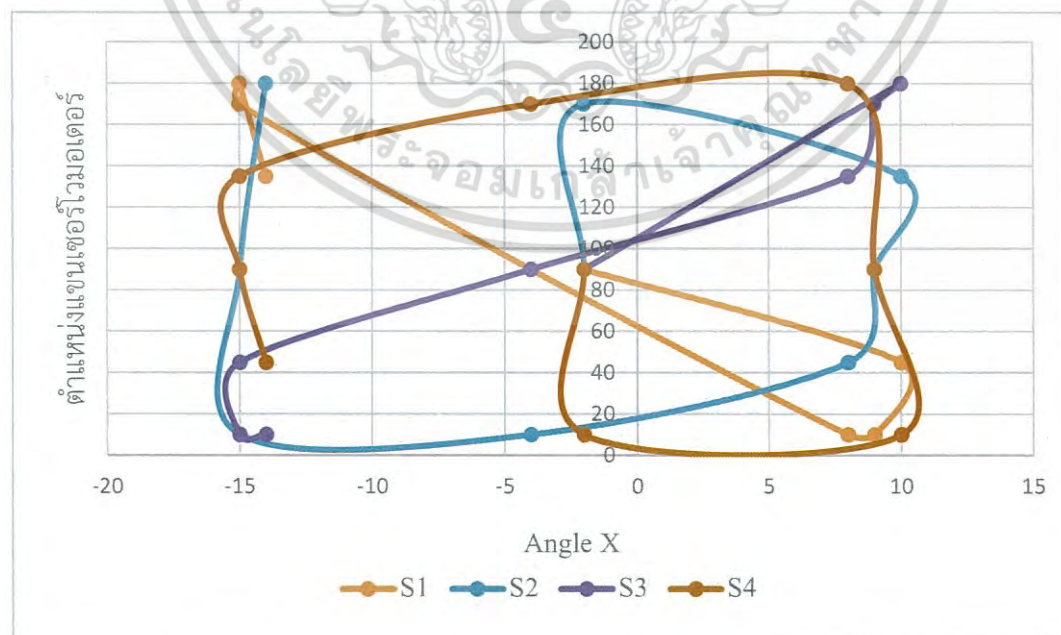


รูปที่ 7.11 มุมเอียงของระบบในการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ 4 ตัวแบบ In-line

กราฟในรูปที่ 7.12 และรูปที่ 7.13 แสดงความสัมพันธ์ของแกนเซอร์โวมอเตอร์กับมุมเอียง มุมเอียง θ (Angle Y) ในระนาบ X-Z และมุมเอียง β (Angle X) ในระนาบ Y-Z ตามลำดับ ซึ่งจากกราฟจะเห็นได้ว่าการประมาณแนวโน้มของกราฟโดยใช้สมการคณิตศาสตร์จะมีความซับซ้อน และไม่มีรูปแบบที่ตายตัว ทำให้การควบคุมกลไกการเอียงโดยการสั่งให้แกนเซอร์โวมอเตอร์ทั้ง 4 ตัวทำงานอย่างสัมพันธ์กันผ่านการประมาณค่ากราฟเพื่อหาโมเดลคณิตศาสตร์เป็นเรื่องที่ซับซ้อน



รูปที่ 7.12 ตำแหน่งแกนเซอร์โวมอเตอร์ S1 ถึง S4 และมุมเอียง θ (Angle Y)



รูปที่ 7.13 ตำแหน่งแกนเซอร์โวมอเตอร์ S1 ถึง S4 และมุมเอียง β (Angle X)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นในการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์จำนวน 4 ตัว จึงใช้ประโยชน์จากการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ In-line มาควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ทีละคู่ ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่า การควบคุมเซอร์โวมอเตอร์แบบ In-line ให้ผลลัพธ์ที่แน่นอนกว่า เนื่องจากตำแหน่งแกนของเซอร์โวมอเตอร์แต่ละคู่ถูกควบคุมโดยสมการเส้นตรง ดังแสดงให้เห็นในหัวข้อที่ 7.1.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงและเซอร์โวมอเตอร์แบบ In-line ในหน้าที่ 100

7.2 การทดลองสำหรับกลไกการเอียงแบบสองชั้น

7.2.1 สภาพแวดล้อมในการทดลอง

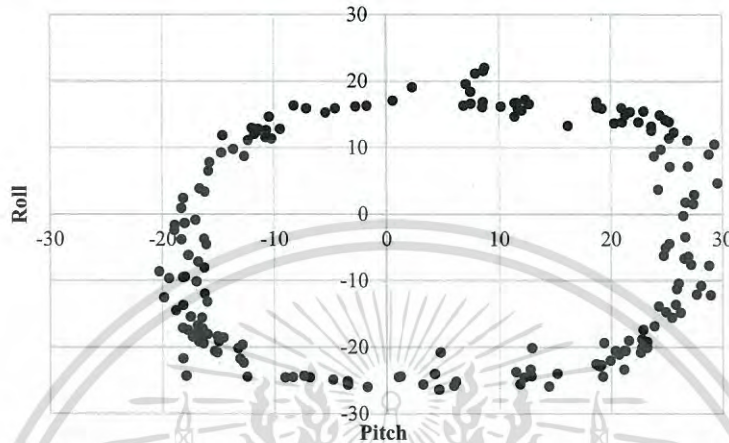
ลูกบอลทรงกลมกลวงซึ่งภายในบรรจุกลไกการเอียงและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมด 3 ชั้น ได้ถูกปล่อยให้ลอยบนผิวน้ำนิ่ง การรับและส่งข้อมูลขณะทำการทดลองระหว่างคอมพิวเตอร์และโมดูลใช้การสื่อสารผ่านวิทยุ ดังนั้นจึงไม่มีแรงรบกวนจากภายนอกกระทำกับกลไกการเอียง อย่างไรก็ตาม ความคลาดเคลื่อนในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่เกิดขึ้นขณะทำการทดลองสามารถเกิดได้จาก 2 ปัจจัยคือ ตำแหน่งสมดุลงานเริ่มต้นไม่ได้มีมุมเอียงที่ 0 องศารอบแนวแกน X และ Y ตามทฤษฎีและการสั่งของเซอร์โวมอเตอร์ขณะที่แกนเซอร์โวมอเตอร์ทำการเปลี่ยนตำแหน่ง ซึ่งส่งผลต่อค่าที่ MEMS Motion Sensor วัดได้ เนื่องจากเซนเซอร์มีความละเอียดในการวัดสูง รวมไปถึงความไม่สมดุลจากน้ำหนักของแบตเตอรี่

7.2.2 ผลการทดลอง

การทดลองที่จัดทำขึ้นต่อไปนี้จะถูกออกแบบเพื่อให้รู้จักสมรรถนะของกลไกการเอียงที่สร้างขึ้น ความเข้าใจในคุณลักษณะของกลไกการเอียงและการวิเคราะห์ผลการทดลองจึงนำไปสู่การจัดทำฐานข้อมูลสำหรับกระบวนการควบคุมตามลำดับ

7.2.2.1 ขอบเขตการทำงานสูงสุดของกลไกการเอียง

รูปแบบการกำหนดตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์ในตารางที่ 5.4 ถูกนำมาป้อนให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เปลี่ยนตำแหน่งมุมเอียงสูงสุดจากทิศหนึ่งไปยังทิศใกล้เคียงต่อกันไปจนครบ 8 ทิศหลักในระนาบ X-Y ขอบเขตการเอียงที่ได้จากการทดลองแสดงในรูปที่ 7.14

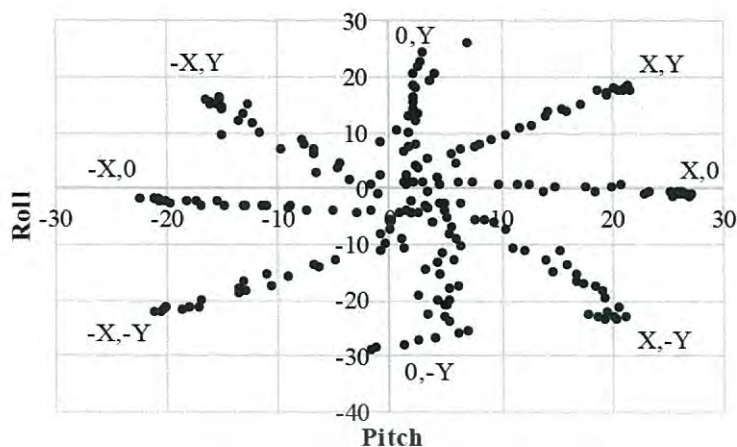


รูปที่ 7.14 ขอบเขตการทำงานสูงสุดของกลไกการเอียงแบบสองชั้น

รูปที่ 7.14 แสดงว่ากลไกการเอียงมีประสิทธิภาพการทำมุมเอียงได้ตั้งแต่ช่วง 20 ถึง -20 องศารอบแกน X (Roll) และ 25 ถึง -20 องศารอบแกน Y (Pitch) จากกราฟการทดลองเห็นได้อย่างชัดเจนว่าจุดเริ่มต้นของกลไกการเอียงที่ตำแหน่งสมดุลมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยโดยเอียงไปทางขวามือรอบแกน Y

7.2.2.2 ความละเอียดของกลไกการเอียงในการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง

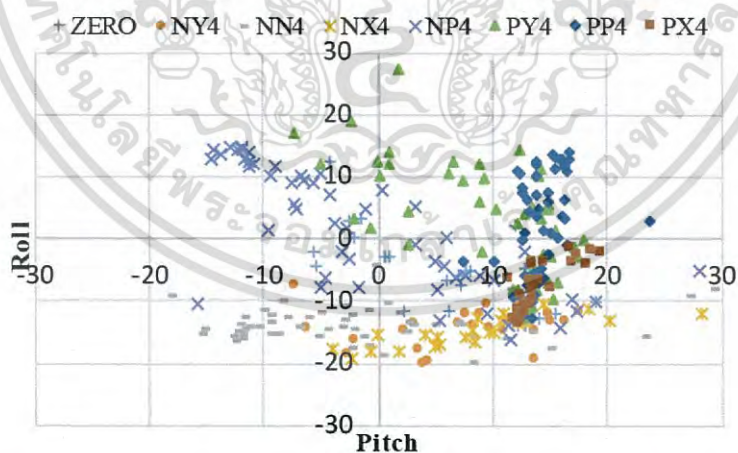
การทดลองนี้เกิดขึ้นเพื่อศึกษาความละเอียดในการเปลี่ยนมุมเอียงของกลไกการเอียงจากจุดเริ่มต้นที่ตำแหน่งสมดุลไปยังจุดสูงสุดของการเกิดมุมเอียงในแต่ละทิศ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลองทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งเซอร์โวมอเตอร์ใด ๆ และมุมเอียงขณะทำการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งสุดท้าย ความสัมพันธ์ดังกล่าวถูกนำมาวิเคราะห์ในภายหลังเพื่อจัดทำฐานข้อมูลสำหรับโปรแกรมควบคุม



รูปที่ 7.15 ความละเอียดในการปรับตำแหน่งของมุมเอียง

7.2.2.3 ความแน่นอนและความสามารถในการทำซ้ำ

การทดลองนี้เกิดขึ้นเพื่อเข้าใจความสัมพันธ์ในขณะนี้น้ำหนักถ่วงเปลี่ยนตำแหน่งกับปฏิกิริยา การตอบสนองของทรงกลมในน้ำ โดยสั่งให้กลไกการเอียงเปลี่ยนตำแหน่งจากต้นทางที่หลากหลาย มายังปลายทางซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 7.16 โดยสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนว่ากลไกการเอียงมีความแน่นอนและมีความสามารถในการทำซ้ำเพราะถึงแม้ว่ากลไกการเอียงจะเคลื่อนที่มา จากทิศใดก็สามารถรักษามุมเอียงที่ตำแหน่งปลายทางได้อย่างสม่ำเสมอ ในที่นี้ตำแหน่งปลายทาง คือ PN3



รูปที่ 7.16 การตอบสนองและความสามารถในการทำซ้ำของกลไกการเอียง

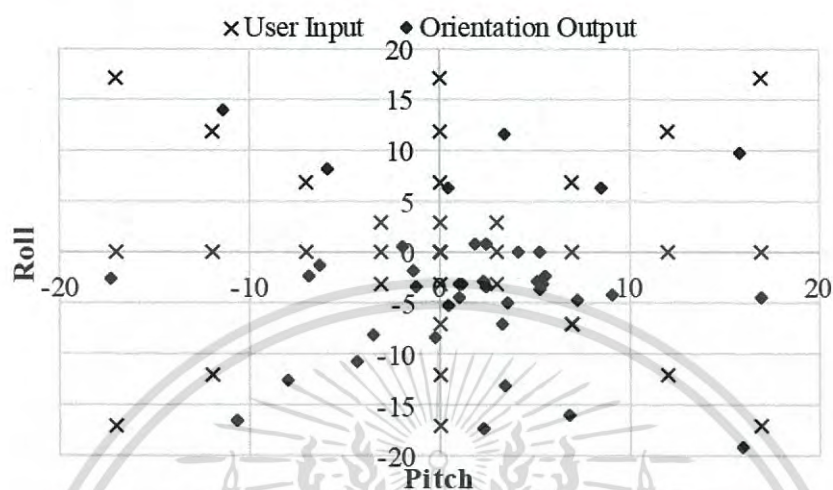
7.2.2.4 ซอฟต์แวร์ควบคุมและผลลัพธ์

การทดลองในส่วนนี้เป็นการทดสอบผลลัพธ์ที่ได้จากระบบควบคุมของกลไกการเอียงเมื่อ ป้อนมุมเอียง X,Y ที่ต้องการผ่านซอฟต์แวร์มอนิเตอร์ ผลการทดลองเปรียบเทียบความสามารถในการ ทำมุมเอียงระหว่างค่ามุมเอียงที่ผู้ใช้งานกรอกข้อมูลและมุมเอียงที่กลไกการเอียงสามารถทำได้ จากรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการวิจัยและเผยแพร่ความรู้เท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลไปใช้เพื่อการค้า หรือทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ 7.17 สังเกตได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้ในทางปฏิบัติมีวิถีใกล้เคียงค่ามุมเอียงจากผู้ใช้งาน แม้จะมีความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการสั้นของเซอร์โวมอเตอร์ขณะเปลี่ยนตำแหน่งและการเอียงจากสมดุลงานเริ่มต้น ผลการทดลองถูกบันทึกไว้ในตารางที่ 7.9



รูปที่ 7.17 เปรียบเทียบมุมเอียงจากการป้อนค่าและผลลัพธ์ในทางปฏิบัติ

ตารางที่ 7.9 ผลการทดลองการสั่งงานกลไกการเอียงโดยการระบุมุมเอียงที่ต้องการ

มุมเอียงจากผู้ใช้งาน		มุมเอียงลัพธ์	
X	Y	Roll	Pitch
0	0	-5.26	0.5
0	3	0.05	5.2
0	7	-3.01	5.37
0	12	-4.14	9.06
0	17	-4.33	16.93
0	0	-1.69	-1.44
0	-3	-3.12	0.99
0	-7	-3.22	-1.28
0	-12	-2.23	-6.85
0	-17	-2.5	-17.27
0	0	-3.37	2.43
3	0	-2.76	2.26
7	0	0.94	1.93
12	0	6.44	0.48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 7.9 (ต่อ)

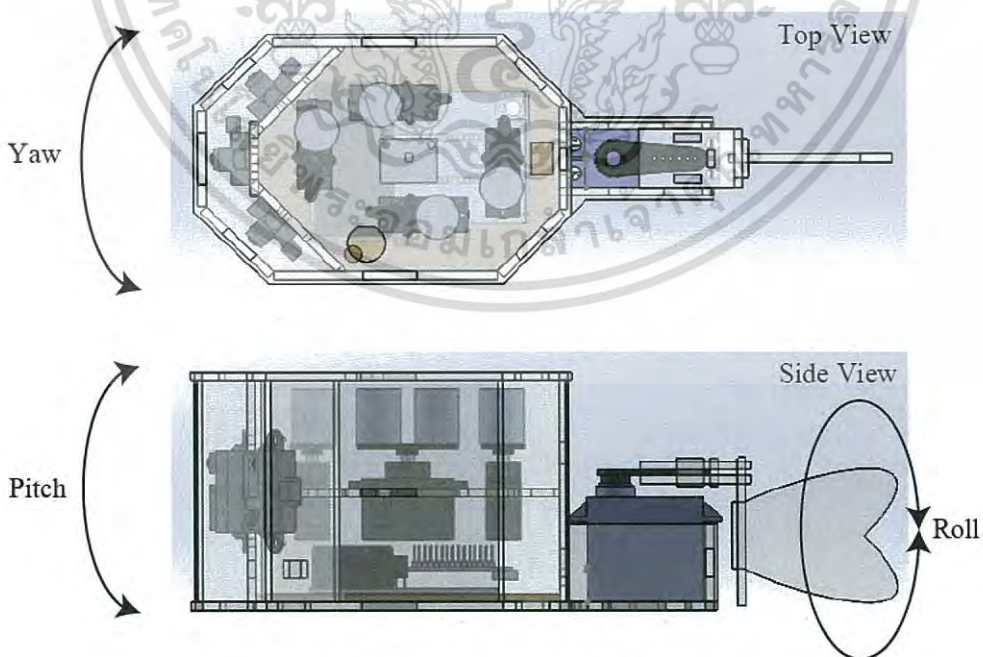
มุมเอียงจากผู้ใช้งาน		มุมเอียงลัทธิ	
X	Y	Roll	Pitch
17	0	11.56	3.44
0	0	-0.04	4.07
0	0	-1.17	-6.24
-3	0	-4.41	1.08
-7	0	-8.44	-0.26
-12	0	-13.09	3.37
-17	0	-17.19	2.31
0	0	-4.91	3.57
3	3	-2.74	5.16
7	7	0.77	2.37
12	12	6.44	8.46
17	17	9.87	15.83
0	0	-2.35	5.47
3	-3	-3.01	1.2
7	-7	0.46	-1.87
12	-12	8.2	-5.85
17	-17	13.88	-11.35
0	0	-3.59	5.31
-3	3	-4.7	7.18
-7	7	-6.92	3.25
-12	12	-16	6.78
-17	17	-19.02	15.9
0	0	-1.17	-6.24
-3	-3	-8.03	-3.49
-7	7	-10.57	-4.31
-12	-12	-12.54	-8.05
-17	-17	-16.44	-10.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3 สรุป

ในบทนี้ ได้ทำการรวบรวมผลการทดลองที่แสดงคุณลักษณะของการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ในรูปแบบต่าง ๆ กับมุมเอียงที่เกิดขึ้น ได้แก่ การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์จำนวนหนึ่งตัว การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์จำนวน 2 ตัวแบบ Parallel และ In-line การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์จำนวน 4 ตัวแบบ In-line รวมไปถึงการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบสองชั้น การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แต่ละแบบได้ทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ของมุมเอียงกับตำแหน่งของแขนเซอร์โวมอเตอร์ การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์สำหรับการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ Parallel และ In-line ได้ใช้โมเดลคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายและประมาณแนวโน้ม มีการแสดงสมการผลลัพธ์และการเปรียบเทียบค่ามุมเอียงที่ได้จากการคำนวณกับค่ามุมเอียงที่ได้ในทางปฏิบัติสำหรับมุมเอียง θ และ β ในระนาบ X-Z และ Y-Z ตามลำดับ สำหรับการจัดวางมอเตอร์ในแบบที่ซับซ้อน เช่น การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์จำนวน 4 ตัวและการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบสองชั้น ได้มีการรวบรวมคุณลักษณะของกลไกการเอียงและนำเสนอผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการควบคุมมุมเอียงแบบอาศัยฐานข้อมูลเพื่อหลีกเลี่ยงความซับซ้อนของการประมาณค่าโมเดลคณิตศาสตร์

อย่างไรก็ตามวิธีการคิดและผลการทดลองที่แสดงไว้สำหรับการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แต่ละรูปแบบสามารถนำมาประยุกต์ติดตั้งในหุ่นยนต์ปลาได้ จากรูปแบบของกลไกการเอียงต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอ เมื่อนำมาติดตั้งจะทำให้หุ่นยนต์ปลาที่สามารถที่จะเคลื่อนที่ได้ในสามมิติ ซึ่งหมายถึงหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่หมุนรอบแกน X (Roll) แกน Y (Pitch) และแกน Z (Yaw) ได้ แสดงในรูปที่ 7.18



รูปที่ 7.18 การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาในปริภูมิสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

บทสรุป

8.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์เล่มนี้มีจุดประสงค์เพื่อที่จะนำเสนอแนวทางและพื้นฐานในการออกแบบกลไกการเอียง (Orientation Mechanism) ประกอบกับการออกแบบหุ่นยนต์ปลาเพื่อให้ออกแบบเคลื่อนที่ได้สามมิติจากการติดตั้งกลไกการเอียงที่ได้ออกแบบขึ้นไว้สำหรับติดตั้งภายใน เนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้มีการรวบรวมงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ ได้แก่ สันฐานวิทยาของปลา ทฤษฎีทางฟิสิกส์ในการออกแบบหุ่นยนต์ปลาและกลไกการเอียง เป็นต้น รวมไปถึงแสดงแนวคิดและวิธีการออกแบบกลไกการเอียงและหุ่นยนต์ปลาทั้งในส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ และวิธีการทดลองเพื่อแสดงคุณลักษณะของกลไกการเอียงในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อให้กลไกการเอียงทำงานอย่างอัตโนมัติ

กลไกการเอียงที่นำเสนอเป็นการประยุกต์นำเซอร์โวมอเตอร์ขนาดเล็ก ซึ่งบริเวณปลายแขนเซอร์โวมอเตอร์ได้ติดตั้งน้ำหนักถ่วงเป็นแท่งเหล็กทรงกระบอกตัน แท่งเหล็กนี้ทำให้เกิดแรง mg สำหรับใช้ในการเอียงหรือสมดุลหุ่นยนต์ปลาตามระนาบแนวนอน กลไกการเอียงถูกติดตั้งไว้บริเวณจุดศูนย์ถ่วง (C.G.) ของหุ่นยนต์ปลา โดยประกอบด้วยน้ำหนักถ่วงจำนวน 4 ชิ้นที่ได้ติดตั้งไว้บริเวณปลายแขนของเซอร์โวมอเตอร์ซึ่งได้ถูกนำมาจัดวางไว้ให้อยู่ในรูปแบบต่าง ๆ กัน เมื่อกลไกการเอียงทำงาน แขนของเซอร์โวมอเตอร์จะหมุนทำให้ทิศทางของแรงโมเมนต์ลัพธ์จากน้ำหนักถ่วง mg เคลื่อนที่จากตำแหน่งสมดุล โดยมุ่งหวังให้ให้ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของหุ่นยนต์ปลาในน้ำเปลี่ยนไป หุ่นยนต์ปลาจึงเกิดการเอียง รูปแบบการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้แก่ การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์จำนวนสองตัว เรียกว่า Parallel Pattern และ In-line Pattern การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์จำนวนสี่ตัว และการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบสองชั้น เป็นต้น รูปแบบการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ทิศทางของแรงลัพธ์เพื่อหาสมการคุณลักษณะ โดยใช้ทฤษฎีฟิสิกส์เรื่องโมเมนต์และสมดุลแรง ซึ่งวิธีในการควบคุมกลไกการเอียงแบ่งออกได้เป็นสองประเภท

1. การควบคุมกลไกการเอียงจากโมเดลคณิตศาสตร์ ใช้สำหรับควบคุมการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์อย่างง่าย เช่น Parallel Pattern และ In-line Pattern เป็นต้น การระบุตำแหน่งของแขนเซอร์โวมอเตอร์หาได้จากการประมาณแนวโน้มกราฟให้เป็นสมการโดยการวิเคราะห์ผลการทดลองและนำมาคำนวณย้อนกลับเพื่อควบคุมตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์บนไมโครคอนโทรลเลอร์

2. การควบคุมกลไกการเอียงจากฐานข้อมูลและกฎการตัดสินใจ การควบคุมมุมเอียงของกลไกการเอียงในรูปแบบนี้เกิดจากการวิเคราะห์รูปแบบการกำหนดตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์จากผลการทดลอง มีการสร้างซอฟต์แวร์ควบคุมโดยใช้กระบวนการ Input Fuzzification ร่วมกับกฎในการตัดสินใจเลือกมุมเอียงที่ตั้งขึ้นไว้ล่วงหน้า ทำให้ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องมีความเข้าใจรูปแบบการกำหนดตำแหน่งของแขนเซอร์โวมอเตอร์ จึงเหมาะกับการนำไปใช้งานในสำหรับการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ที่มีความซับซ้อน เช่น การจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบ 4 ตัว และการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์แบบสองชั้น

นอกจากการออกแบบกลไกการเอียงแล้ว ในการติดตั้งกลไกการเอียงภายในหุ่นยนต์ปลาจึงจะต้องพิจารณาถึงการออกแบบ การสร้างหุ่นยนต์ปลาเริ่มต้นจากการคำนวณปริมาตรของหุ่นยนต์ที่จะนำมาแทนที่ปริมาตรของน้ำโดยมีความสัมพันธ์กับทฤษฎีทางฟิสิกส์เรื่องแรงลอยตัว ซึ่งการจะใช้คณิตศาสตร์เพื่อหาปริมาตรของหุ่นยนต์ปลาดังกล่าวจำเป็นที่จะต้องทราบน้ำหนักของอุปกรณ์ทั้งหมดที่นำมาประกอบหุ่นยนต์ปลาขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณในเบื้องต้นทำให้สามารถระบุขนาดของหุ่นยนต์ปลาได้ ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการเริ่มต้นที่สำคัญก่อนการนำเข้าไปสู่กระบวนการการออกแบบรูปร่างและการจัดวางอุปกรณ์ซึ่งใช้ซอฟต์แวร์ช่วยในการออกแบบทั้งหมด หุ่นยนต์ปลาประกอบขึ้นมาจากแผ่นอะคริลิกและถูกออกแบบให้เชื่อมต่อกันด้วยระบบลิ้ม ภายในหุ่นยนต์ปลาประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ แบตเตอรี่ อินฟราเรดเซนเซอร์ เซนเซอร์วัดมุมเอียง (MEMS Motion Sensor) กลไกการเอียง น้ำหนักถ่วง เซอร์โวมอเตอร์และครีบบาง แน่นอนว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ถูกบรรจุไว้ในหุ่นยนต์ปลาซึ่งมีระบบกันน้ำ เพื่อป้องกันความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากน้ำและความชื้น ที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นเป็นเพียงครึ่งหนึ่งของการออกแบบหุ่นยนต์ปลาเฉพาะในส่วนของฮาร์ดแวร์เท่านั้น หุ่นยนต์ปลาจะทำงานได้อย่างสมบูรณ์ก็ต่อเมื่อมีกระบวนการควบคุมหรือสมการคณิตศาสตร์ ประกอบกับการเขียนซอฟต์แวร์ในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์และคอมพิวเตอร์ร่วมด้วย

ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ปลามีสองส่วน ส่วนแรกคือคอมพิวเตอร์ มีหน้าที่ติดต่อกับผู้ใช้งาน โดยการแสดงข้อมูลและส่งข้อมูลจากผู้ใช้งานไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ที่หุ่นยนต์ปลา ส่วนที่สองคือไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำหน้าที่หลักในการตัดสินใจและส่งข้อมูลไปแสดงผลยังคอมพิวเตอร์ การตัดสินใจของไมโครคอนโทรลเลอร์มีอิทธิพลต่อลักษณะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลา ตั้งแต่การสับัดของครีบบางไปจนถึงการควบคุมกลไกการเอียง สำหรับการสับัดของครีบบางได้ใช้

โมเดลการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาจากสมการของ P. Nilas มาควบคุมการเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถทำให้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงและเลี้ยวหลบหลีกสิ่งกีดขวาง พร้อมกับการปรับความถี่ในการสับของ ครีบหางโดยอัตโนมัติ สำหรับการควบคุมกลไกการเอียงนั้น สมการคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาใช้ในการควบคุมตำแหน่งของแขนเซอร์โวมอเตอร์จากรูปแบบกลไกการเอียงที่ได้ทำการติดตั้ง ซึ่งเป็นสมการคุณลักษณะเฉพาะของรูปแบบการจัดการเซอร์โวมอเตอร์ การโปรแกรมสมการเหล่านี้ในไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำให้สามารถคำนวณตำแหน่งของแขนเซอร์โวมอเตอร์จากมุมเอียงที่ต้องการให้หุ่นยนต์ปลาเอียงในน้ำได้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากขนาดและรูปร่างของหุ่นยนต์ปลาได้ส่งผลโดยตรงกับสมการควบคุมกลไกการเอียงจากอิทธิพลของแรงลอยตัวและน้ำหนักของหุ่นยนต์ปลา ดังนั้นกลไกการเอียงจึงมีประโยชน์ในการช่วยลดข้อจำกัดของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาในน้ำได้ กลไกการเอียงทำให้เกิดการหมุนของหุ่นยนต์ปลารอบแกน X (Roll) และแกน Y (Pitch) เมื่อมาประกอบกับการสับของครีบหางซึ่งควบคุมโดยสมการของ P. Nilas ทำให้หุ่นยนต์ปลาสามารถเคลื่อนที่ หมุนรอบแกน Z (Yaw) ได้ ดังนั้นหุ่นยนต์ปลาจึงสามารถเคลื่อนไหวได้ครบทุกแกนอ้างอิงในปริภูมิสามมิติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.2 ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

งานวิจัยในอนาคตมีทิศทางในการพัฒนาความสามารถของของหุ่นยนต์ปลาให้มีประสิทธิภาพ และการเคลื่อนที่ที่เหมือนธรรมชาติมากยิ่งขึ้น ซึ่งมีประเด็นและหัวข้อวิจัยที่น่าสนใจ ดังต่อไปนี้

1. การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับกลไกการเอียงให้ครอบคลุมรูปแบบการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ต่าง ๆ เนื่องสมการคุณลักษณะที่ใช้ในกลไกการเอียง ยังไม่ครอบคลุมรูปแบบการจัดวางเซอร์โวมอเตอร์ทั้งหมด ในอนาคตจึงจะต้องทำการทดลองเก็บค่ามุมเอียงที่เกิดขึ้น จากการหมุนของแขนเซอร์โวมอเตอร์ให้แขนเซอร์โวอยู่ในตำแหน่งการเอียงที่ทั้งหมดโดยไม่มีช่องโหว่ การทดลองนี้จะสร้างฐานข้อมูล และเป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาซอฟต์แวร์ในการควบคุมกลไกการเอียงของหุ่นยนต์ปลาให้มีความฉลาดในจุดที่จะเทียบเทียบความสามารถในการตัดสินใจของมนุษย์ หรือที่เรียกว่า ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ซึ่งยังต้องมีการพัฒนาซอฟต์แวร์ส่วนต่อประสานสำหรับการตรวจจับสภาพแวดล้อมภายนอกของหุ่นยนต์ปลาร่วมกับการสั่งงานในการกำหนดตำแหน่งการเอียงให้เหมาะสม
2. การพัฒนาฮาร์ดแวร์และวัสดุที่นำมาประกอบหุ่นยนต์ปลา ฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์ปลาในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ประกอบขึ้นมาจากวัสดุที่สามารถหาได้ตามท้องตลาด ทำให้มีขีดจำกัดในเรื่องของการออกแบบหุ่นยนต์ปลาให้เหมือนปลาตามธรรมชาติมากที่สุด เนื่องจากโครงสร้างภายนอกของหุ่นยนต์ปลาประกอบมาจากแผ่นอะคริลิกหลาย ๆ ชั้นทำให้มีช่องว่างระหว่างรอยต่อ ซึ่งเป็นความเสี่ยงให้น้ำซึมเข้าไปภายในหุ่นยนต์ปลา ดังนั้นนอกจากกระบวนการการออกแบบหุ่นยนต์ปลาบนซอฟต์แวร์ให้สมบูรณ์แล้ว ขั้นตอนการขึ้นรูปโดยใช้เครื่องจักรที่มีประสิทธิภาพจะทำให้ลดข้อจำกัดของการออกแบบหุ่นยนต์ปลาในอนาคต และทำให้จินตนาการในการออกแบบมีความเป็นไปได้มากยิ่งขึ้น
3. การพัฒนากลไกการสะบัด ถึงแม้ว่ากลไกการสะบัดของหุ่นยนต์ปลาจะถูกควบคุมโดยสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาของ P. Nilas แต่หุ่นยนต์ปลาที่สร้างขึ้นนั้นไม่มีระบบตรวจสอบตำแหน่งปัจจุบันในการเคลื่อนที่ของครีบหางและส่งค่าตำแหน่งกลับมายังไมโครคอนโทรลเลอร์ ในมนุษย์กลไกที่ทำหน้าที่นี้คือเส้นเอ็น เช่น เมื่อก้าวขาขึ้นบันได เส้นเอ็นจะทำให้มนุษย์ทราบองศาการงอของหัวเข่าโดยไม่ต้องใช้ตามองที่หัวเข่าตลอดเวลา การพัฒนาระบบดังกล่าว จำเป็นจะต้องใช้เซนเซอร์วัดมุมเอียงนำมาติดตั้งบริเวณข้อต่อในการสะบัดของหุ่นยนต์ปลา ส่งผลให้หุ่นยนต์ปลาสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างมีชีวิตชีวาและเป็นธรรมชาติมากยิ่งขึ้น ทั้งนี้จะต้องร่วมกับการพัฒนาซอฟต์แวร์ควบคุมกลไกการสะบัดให้ที่มีประสิทธิภาพและความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Nilas, "A Prototypical Multi-Locomotive Robotic Fish Parametric Research and Design," in *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2011*, San Francisco, 2011.
- [2] จ. รัตน์จรัสโรจน์, น. พรหมจรรย์ และ ณ. มากศิริ, หุ่นยนต์เคลื่อนไหวน้ำ, ปรินธิญาธิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556.
- [3] D. Barrett, Propulsive Efficiency of a Flexible Hull Underwater Vehicle, Ph.D. Diss., Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- [4] M. S. Triantafyllou, A. H. Techet, Q. Zhu, D. N. Beal, F. S. Hover and P. D. Yue, "Vorticity Control in Fish-like Propulsion and Maneuvering," *Integrative and Comparative Biology*, vol. 42, no. 5, pp. 1026-1031, 2002.
- [5] Q. Zhu, M. J. Wolfgang, D. P. Yue and S. M. Triantafyllou, "Three-dimensional Flow Structures and Vorticity Control in Fish-like Swimming," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 468, pp. 1-28, 2002.
- [6] J. M. Anderson and N. K. Chhabra, "Maneuvering and Stability Performance of a Robotic Tuna," *Integrative and Comparative Biology*, vol. 42, no. 1, pp. 118-126, 2002.
- [7] J. Gray, "The Propulsive Powers of the Dolphin," in *Studies in Animal Locomotion*, Cambridge, 1936, pp. 192-199.
- [8] P. W. Webb, "Form and Function in Fish Swimming," *Scientific American*, vol. 251, no. 1, pp. 72-82, 1984.
- [9] D. M. Lane, M. Sfakiotakis and B. J. Davies, "Review of Fish Swimming Mode for Aquatic Locomotion," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 24, no. 2, April 1999.
- [10] T. Y.-T. Wu, C. J. Brokaw and C. Brennen, "Hydrodynamical Aspects of Fish Swimming Volume 2," in *Swimming and Flying in Nature*, New York, Plenum Press, 1975, pp. 615-634.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [11] M. J. Lighthill, "Note of Swimming of a Slender Fish," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 9, pp. 305-317, 1960.
- [12] K. Kawamura, P. Nilas and K. Muguruma, "An Agent-Based Architecture for an Adaptive Human-Robot Interface," in *Proceedings of the 26th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'03)*, Hawaii, 2002.
- [13] N. Kato and M. Furushima, "Pectoral Fin Model for Maneuver of Underwater Vehicles," in *Proceedings of the 1996 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*, Monterey, CA, 1996.
- [14] L. M. Thuan, N. T. Thinh and N. N. Phuong, "Study of Artificial Fish Bladder System for Robot Fish," in *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Thailand, 2011.
- [15] S. Ahn and Y. Lee, "Novel Spherical Robot with Hybrid Pendulum Driving Mechanism," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 6, pp. 1-14, 2014.
- [16] Y. Kilawati, "SlidePlayer," 2012. [Online]. Available: <http://slideplayer.info/slide/3036672/>. [Accessed 8 March 2016].
- [17] P. W. Webb and D. Weihs, "Hydrostatic Stability of Fish with Swim Bladders: Not All Fish Are Unstable," *Canadian Journal of Zoology*, vol. 72, no. 6, pp. 1149-1154, 1994.
- [18] R. M. Alexander, *Exploring Biomechanics: Animals in Motion*, New York: Scientific American Library, 1992.
- [19] P. Kestemont, K. Dabrowski and R. C. Summerfelt, *Biology and Culture of Percid Fishes: Principles and Practices*, Dordrecht, Netherlands: Springer, 2015, p. 304.
- [20] C. M. Breder, "The Locomotion of Fishes," *Zoologica*, vol. 4, pp. 159-256, 1926.
- [21] Glenn Research Center, "Center of Gravity - cg," NASA, [Online]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/cg.html>. [Accessed 29 March 2016].

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [22] Nhivekar, G. S.; Nirmale, S. S.; Mudholker, R. R.;; "Implementation of fuzzy logic control algorithm in embeded microcomputers for dedicated application," *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 3, no. 4, pp. 276-283, 2011.
- [23] InvenSense, Inc, "MPU-9150 Product Specification Revision 4.3," 2013.
- [24] N. Kato and T. Inaba, "Guidance and Control of Fish Robot with Apparatus of Pectoral Fin Motion," in *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Leuven, Belgium, 1998.
- [25] K. A. Morganseny, P. A. Velay and J. W. Burdickz, "Trajectory Stabilization for a Planar Carangiform Robot Fish," in *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington, D.C., 2002.
- [26] J. Houseman, "Wikipedia," 21 May 2013. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Oste023c_labelled.png. [Accessed 8 March 2016].
- [27] ELECTRONIC SCIENCE TUTOR, "Moment of a force," [Online]. Available: <http://www.physchem.co.za/OB11-mec/moment.htm>. [Accessed 31 March 2016].
- [28] Wikipedia, "Buoyancy," 18 April 2016. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Buoyancy>. [Accessed 2 May 2016].
- [29] Wikipedia, "Fish Fin," 28 April 2016. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Fish_fin?oldformat=true. [Accessed 2 May 2016].
- [30] W. Wang and C. M. Clark, "Modeling and Simulation of the Video Ray Pro III Underwater Vehicle," in *OCEANS 2006 - Asia Pacific*, Singapore, 2006.
- [31] J. G. Bellingham, C. A. Goudey, T. R. Consi, J. W. Bales, D. K. Atwood, J. J. Leonard and C. Chrysostomidis, "A Second Generation Survey AUV," in *Proceedings of the 1994 Symposium on Autonomous Underwater Vehicle Technology*, Cambridge, MA, 1994.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [32] T. I. Fossen, Handbook of Marine Craft Hydronamics and Motion Control, United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [33] P. Tristan and T. I. Fossen, "Kinematics Model for Manoeuvring and Seakeeping of Marine Vessels," *Modeling, Identification and Control*, vol. 28, no. 1, pp. 19-30, 2007.
- [34] N. Kato และ S. Kamimura, Bio-mechanisms of Swimming and Flying, Japan: Springer, 2008.
- [35] M. Anton, Z. Chen, M. Kruusmaa and X. Tan, "Analytical and Computational Modeling of Robotic Fish Propelled by Soft Actuation Material-based Active Joints," in *The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, St. Louis USA, 2009.
- [36] Wikipedia, "Ionic polymer-metal composites," 19 November 2015. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Ionic_polymer%E2%80%93metal_composites. [Accessed 18 May 2016].
- [37] M. Shahinpoor, Y. Bar-Cohen, T. Xue, J. O. Simpson and J. Smith, "Ionic Polymer-Metal Composites (IPMC) as Biomimetic Sensors and Actuators-Artificial Muscles," in *Proceedings of SPIE's 5th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, San Diego, CA, 1998.
- [38] J. Yu, M. Tan and J. Zhang, "Fish-Inspired Swimming Simulation and Robotic Implementation," in *ISR/ROBOTIK 2010*, Munich, 2010.
- [39] M. Malec, M. Morawski and J. Zajac, "Fish-Like Swimming Prototype of Mobile Underwater Robot," *Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems*, vol. 4, no. 3, pp. 25-30, 2010.
- [40] H. Dewar and J. B. Graham, "Studies of Tropical Tuna Swimming Performance in a Large Water Tunnel," *J. exp. Biol.*, vol. 192, no. 1, pp. 13-31, 1994.

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [41] T. Ratanajaratrod and P. Nilas, "An Implementation on 3D Positioning Aquatic Robot," in *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2016 Vol I (IMECS2016)*, Hong Kong, 2016.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำวิทยานิพนธ์และได้รับการตีพิมพ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

An Implementation on 3D Positioning Aquatic Robot

T. Ratanajaratrod and P. Nilas

Abstract—This paper presents a study and design of a robotic fish that imitates bladder function of a fish by focusing on the orientation performance. The main focus of the research is to develop the robotic fish which can perform the natural orientation of a fish. Not only the turning maneuver of the robotic fish takes place in horizontal plane or vertical plane at a time, but also in both of horizontal and vertical planes simultaneously. The orientation of the robot is conducted by anti-weight equilibriums, which are installed near the center of gravity of the robot, to maintain the desired position. The collection of robotic orientations is operated by designed apparatus including 4 anti-weight objects which attached with servo motors for rolling and pitching. The implementation of the proposed robotic fish shows a good performance as well as illustrate the robustness of such a robotic framework.

Index Terms—Artificial intelligence, intelligent robots, motion control

I. INTRODUCTION

HUMAN have been impressed by the diversity of habitual characteristic and incredible swimming ability of the fish for decades. Great effort has been focused on the high efficiency and maneuverability of its propulsion and maneuvering mechanism. The splendid characteristics of real fishes attract robotics researchers greatly in recent years. A numbers of animal-like aquatic robots have been researched in the past. Thus, developing a robotic fish with a new level of performance close to actual fish has been challenging.

Engineers and Sciences have been inspired to study how aquatic animals swim and maneuver for long time [1], [2]. In 1960, Lighthill [8] presented the research of observation of a swimming fish. In 1995, the aquatic robot named RoboTuna which mimicked the bluefin tuna was developed by a research team at MIT. Kato established fish robot with apparatus of pectoral fin motion in 1998 [9]. Morgansen adapted the carangiform-like movement of aquatic animal into robotic fish to help with trajectory stabilization in 2002 [10]. In 2011, Nilas [3] presented fish robot which could change swimming behavior within BCF movement. In the

same year, a research team from UTE [4] developed the pseudo fish bladder which stored water inside the robot. This mechanism allows their robotic fish to change swimming depth via remote controller. In 2014, Lee and Ahn [5] designed spherical robot by using hybrid pendulum. The robot can maneuver by changing the center of gravity and the moment of a force. Despite a number of previous works, the depth control and orientation of the aquatic robots have been a great challenge. The depth and orientation play an important role in mimicking the fish robot maneuver. This paper utilizes anti-weight balances to develop orientation mechanism. The anti-weight balances are the result of moment of force, buoyancy, and changing center of gravity. The paper studies and designs the bladder-like system for depth, position and orientation of the robot. This paper is organized as in the following. First section is mentioned an introduction and inspiration of the work, including relevant academic researches, to provide ideas for creating new robotic fish. Second section is described a background of fish swimming mechanism and mathematical model of fish locomotion. Third section is shown physical theories and orientation mechanisms employed in this research. Forth section is shown designing concept and implementation of the robotic fish. Relevant topics are included; mathematical models, hardware and software designs. Fifth section is shown experimental results as graph between tilt angle and servo arm position. The last section is described an experimental conclusion and ways to improve the future work.

II. SWIMMING CONCEPT OF FISH

A. Forces of Swimming Fish

Movement of fish organism affects the direction of swimming and maneuvering. To overcome water friction, fish generates force from many tiny muscles and exerts it against the medium, surrounding water. To swim through the water, the forces in swimming can be analyzed into 2 main forces [3].

The forces in swimming can be generated from the extensibility and contractility of muscle relatively. A combination of vectors between lateral force (F_L) and thrust force (F_T) gives forward locomotion. The former force, F_L , becomes an energy loss. It provides lateral movement that helps fish maneuver in the water. The latter force, F_T , mainly provides forward locomotion.

B. General Form of BCF Swimmer

The extensibility and contractility of muscle are a

Manuscript received December, 2015; revised January, 2016.

T. Ratanajaratrod is a Master Degree student in Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok Thailand 10520. (e-mail: 57601218@kmitl.ac.th).

P. Nilas, Ph.D. is with Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok Thailand 10520. (e-mail: phongchai.ni@kmitl.ac.th).

locomotive pattern that commonly found in species of fish. This method of movement is classified under body and/or caudal fin mode (BCF). Four locomotive forms in BCF mode are categorized as the following:

--Anguilliform, the entire body of fish performs full wave. Its body structure is non-rigid. Therefore, the whole body is flexible. Found in eel, tadpole, etc.

--Subcarangiform, the entire body of fish performs full wave like Anguilliform but the amplitude of the movement occurs in half of the body. Found in trout, cod, etc.

--Carangiform, sine wave occurs only at the last part of a body length. One-third of a body length is rigid. Because the more rigid part appears, the more fish tends to swim faster than the previous. Found in salmon, mackerel, etc.

--Thunniform, the most efficiency pattern appears in fish. The last part of a body length only performs sine wave. The whole body of fish is almost rigid except a caudal fin. It propels itself by exerting force against the surrounding water. Found in tuna and mammal in sea.

C. Mathematical Model of Fish Locomotion

The method of movement using in the robotic fish is based on Nilas mathematical model [3]. Body length of fish was divided into body modules, each module imitates part of fish in BCF mode. Servo motor is a joint that link body modules together. Mathematical model, which imitates fish locomotion, is designed to control amplitude and frequency of servo motor. It gave a more natural robot locomotion so the robot can change locomotive pattern flexibly. Mathematical models can be expressed as follows

$$A_n = K_a \sin(2\pi ft - B_{n-1}) + TA \quad (1)$$

$$TA = K_i (A_{max} - A_{actual}) / A_{actual} \quad (2)$$

where A_n is the propelling coefficient, K_a is the adjusting amplitude of sine wave, f is the frequency of propelling, B is the time lag of n_{th} joint, K_i is the turning angle coefficient, A_{max} is the maximum amplitude of turning angle, A_{actual} is the actual amplitude of turning angle.

III. DESIGN CONCEPT

A. Moment of Force and Buoyancy

Orientation mechanism is installed inside the robotic fish. It employs a mechanical part which can adjust the center of gravity of the robot. The system applies a weight that attached on servo arm which could rotate horizontally. The servo arm length d and weight mg illustrated in Fig. 1

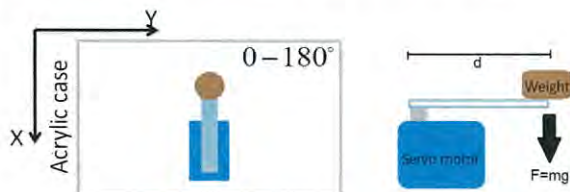


Fig. 1. Servo motor with the arm length d

In addition, several foam balls are also installed inside the

robot to buoy the fish body. The moment of a force τ appears in the system causes the robot body inclined from the horizontal plane. This moment of a force τ directs downward which is opposite to a buoyancy. When the servo arm rotates, weight has been changed its position. Thus, the center of gravity has shifted from the original position. The buoyancy also helps the robot stay afloat in the water. The size and shape of the robot affect the overall system. In this case, the moment of a force causes the robot inclined.

B. Tilt Angle of Robot Body

MEMS motion sensor, which installed inside the robot body, is used to measure tilt angle of the overall system. A reference axis depends on an installation of the sensor.

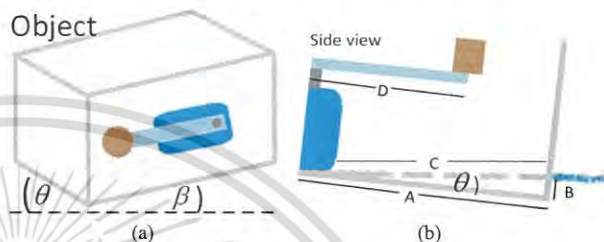


Fig. 2. (a) Tilt angle of the robot body in X-Z plane (θ) and Y-Z plane (β)
(b) Side view of the robot body that contain servo motor

Supposing that the angle θ and β are the angle of inclination in X-Z and Y-Z plane respectively, as shown in Fig. 2(a). Its values are both measured from the MEMS motion sensor. Tilt angle, however, can be calculated by hand. In Fig. 2(b), tilt angle θ is the part of a right triangle. First, A is adjacent to angle θ that is measured from pivot point to the other end of the robot. Next, C is the hypotenuse that is measured horizontally. Finally, B is the opposite side of angle θ that is measured by depth level of immersed robot body. Depth level B is subject to change due to length D . The servo arm can rotate back and forth and may be gone from observer sight depending on the servo arm position. On the other hand, the moment of a force from weight is still has an effect on the system by affecting another plane, Y-Z. The equations for the tilt angle in terms of finding θ in X-Z plane can be expressed as

$$C^2 = A^2 + B^2 \quad (3)$$

$$\tan \theta = B/A \quad (4)$$

$$\theta = \kappa \tan^{-1}(B/A) \quad (5)$$

The tilt angles which appear in the system have two important factors to consider: the buoyancy and the moment of a force. To calculate tilt angle, the constant κ must be inserted to the equation accordingly. The constant κ represents the effect of a weight on the servo arm and a container size and shape. The angle of inclination β in Y-Z could be calculated by using the similar concept and equation.

C. The Number of Servo Motors Uses in Robotic Fish

The previous section describes an occurrence of the robot body with servo motor inside. Servo motor can rotate from

0 to 180 degrees, which means that orientation of the robot in the working sphere has been limited. An effective way to solve the problem is to increase the number of servo motors. The patterns used in this paper are shown in the following sections:

--Parallel patterns, two servo motors are established at the center of a waterproof robot body. They are parallel to each other and move in the same direction. A starting position of servo arms is set to 90 degrees. At the end of the length of servo arms have been attached weights mg as shown in Fig. 3

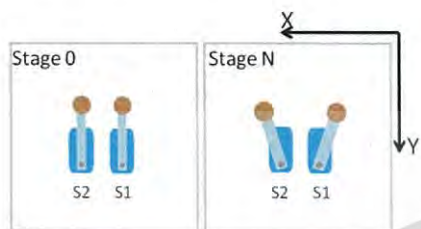


Fig. 3. Parallel pattern of servo motors and the position of servo arms during the starting stage and the N_{th} stage

During the starting stage, servo arms are set to 90 degrees. The moments of a force from weights combines into a vector sum that moves in the downward direction. Therefore, the summation of all forces is the reciprocal of the maximum tilt angle. The moment of a force at the starting position can be expressed in the following equations

$$\sum M_{\max} = \tau_{S1} + \tau_{S2} \quad (6)$$

$$\sum M_{\max} = (F_{S1} \times d_{S1}) + (F_{S2} \times d_{S2}) \quad (7)$$

In the N_{th} stage, servo arms are rotated apart in equal angle. S1 rotates from 90 to 0 degrees and S2 rotates from 90 to 180 degrees. During the rotation, the maximum tilt angle is gradually decreased until it reaches a minimum in the last stage. Therefore, the robot body floats horizontally in the water. It implied that the resultant of all forces and all moments are equal to zero. The moment of a force on the large stage is expressed in the following equations

$$\sum M_{\min} = 0 \quad (8)$$

$$\sum M_{\min} = \tau_{S1} - \tau_{S2} \quad (9)$$

$$\sum M_{\min} = (F_{S1} \times d_{S1}) - (F_{S2} \times d_{S2}) \quad (10)$$

The parallel pattern provides the maximum tilt angle, it cannot cover all the position in working sphere.

--In-line pattern, two servo motors are established at the center of robot body. They are aligned and move in the opposite direction. At the end of the length of each servo arm has been attached weight mg . The starting position of servo arms is set to 90 degrees as shown in Fig. 4

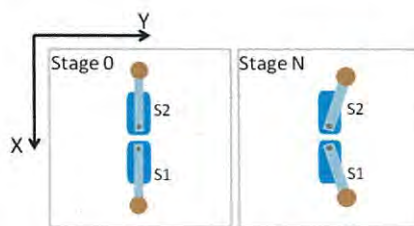


Fig. 4. In-line pattern of servo motors and the position of servo arms during the starting stage and the N_{th} stage

During the starting stage, robot body floats horizontally on the water. All the forces and moments are equal and opposite, thus, the robot is in a balance mode. They against each other at the pivot point of the robot body. To explain the occurrence, the equation (8), (9) and (10), which are the same equations appearing on the final stage of parallel patterns, can be used. However, in-line pattern has more advantages than the previous. It covers more rotating position in the working sphere. Therefore, many rotating patterns can happen. In the first case, servo arms rotate in the opposite alignment. Given that the summation of all moments is equal to zero, the robot body is still floating horizontally. In the second case, servo arms rotate freely at any positions thus tilt angles can be calculated by using the equation (4) and (5). In the last case, servo arms are parallel to each other. At this point, two moments combine into a maximum value. It causes the robot body to tilt from a reference plane, water surface. This occurrence can be expressed in the equation (6) and (7). From the flexibility of in-line pattern, it is a guideline for the design of an orientation mechanism of the robotic fish.

IV. IMPLEMENTATION

A. Robotic Fish Structure

The main structure of the robot is assembled with acrylic sheets. The body is shaped as a long octagonal prism to reduce friction impacts from the water. Interior components of the robot body consist of microcontroller, power management circuit, battery, and infrared sensors. The robot also has a caudal fin as shown in Fig. 5 and 6.

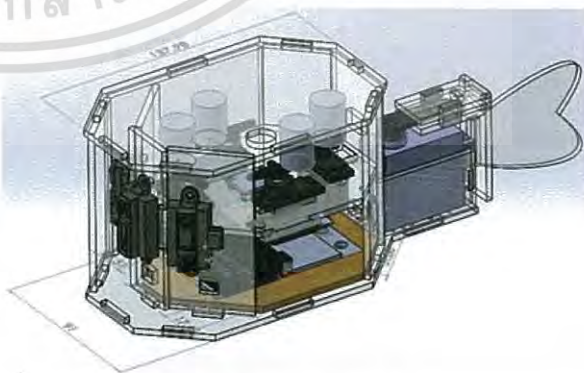


Fig. 5. Robotic fish model

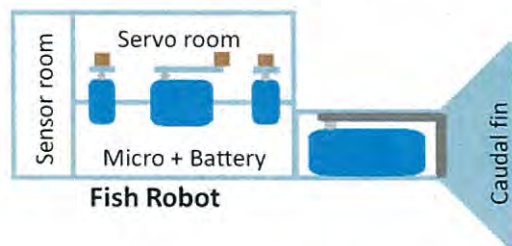


Fig. 6. Overview structure of the robotic fish

TABLE I
 OVERVIEW OF ROBOTIC FISH AND THE COMPONENTS

Devices and Components	Details
microcontroller	Arduino NANO, ATmega328
waterproof servo motor	torque 12.9 kg.cm
orientation mechanism	torque 2.2 kg.cm
servo motor	
obstacle detection sensor	infrared sensor, detection range 4-30 cm
battery	lithium polymer, 7.4V, 1500 mAh
joint	1 acrylic joint
cylinder weight	length 20 mm, perimeter 16 mm, weight 59.8 g
fish robot dimension	length × width × height: 255 mm × 91 mm × 100 mm

B. Caudal Fin of Robotic Fish

Caudal fin of the robotic fish is made from acrylic sheets. Its parts are assembled into a joint which is attached to the waterproof servo motor. The joint has been designed to imitate the movement of a fish vertebral column. In the starting stage, servo arm position is set to 90 degrees as shown in Fig. 7. When the robot is operated, the caudal fin performs a sine wave by rotating back and forth smoothly within an amplitude A_n . This action provides a similar effect as the extensibility and contractility of muscle in a fish. The caudal fin is a heart-shaped acrylic sheet with an arc line to reduce lateral force acting on the robot. A surface area of the caudal fin is enough to push surrounding water.

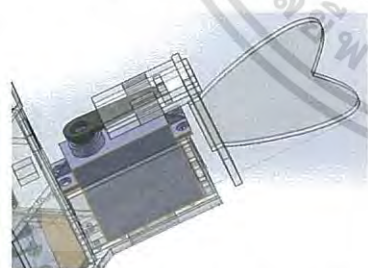


Fig. 7. Caudal fin of the robotic fish

A position of the caudal fin is controlled automatically by a microcontroller. Infrared sensors of the robot are used in obstacle detection and send signal to a microcontroller. To avoid collisions, swimming direction is subject to change by the sensor signal. The microcontroller executes a program embedded equation (1) and (2) inside. The equations must have parameter values to calculate propelling amplitude A_n . The parameters are sent from a graphical user interface (GUI) via serial communication.

C. Orientation Mechanism

Orientation mechanism is located at the bottom of the robotic fish. This location is suitable for prevention of instability. The instability occurs when the center of gravity and the center of buoyancy are not vertical aligned. A cylinder steel weight is attached on a servo arm. Employing in-line pattern, servo motors are established on square-shaped holes as shown in Fig. 8. MEMS motion sensor is installed to measure the tilt angles.

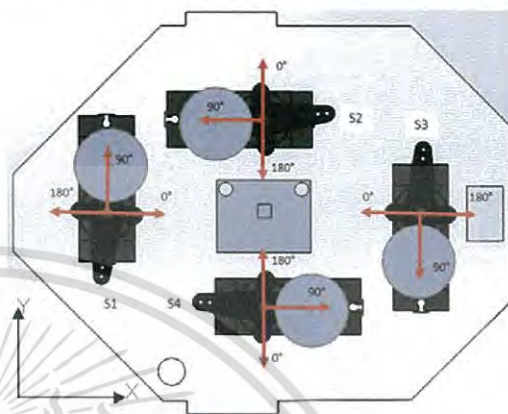


Fig. 8. Orientation mechanism inside the robotic fish and rotating areas

Servo arm positions can be adjusted on GUI. During the starting stage, servo arm positions are set to 90 degrees. A sum vector of all moments is equal to zero. So the robotic fish floats horizontally. To orient the robotic fish in the water, four servo arms are rotated to different positions. The resultant of all moments makes the center of gravity shifted. Heading of the robot depends on the rotation patterns as shown in Table II. The patterns are set by the directions of the sum vector. A reference plane is X-Y plane which depends on the installation of MEMS motion sensor. S1 to S4 are the names of servo motor used in the orientation mechanism as shown in Fig. 8. The system has been designed to cover all the positions and orientations of all degrees in the working space of the robot. It is able to fine-tune angle and position in a small degree that reflects the position and the heading of the robot. Tilt angles of the system can monitor on GUI software.

TABLE II
 ROTATION PATTERNS OF SERVO ARMS

The Robot Heading in X-Y Plane	Servo Arm Position (Degrees)			
	S1	S2	S3	S4
0, Y	90	0	90	180
X, Y	45	0	180	135
X, 0	0	180	180	90
X, -Y	0	180	135	45
0, -Y	90	180	90	0
-X, -Y	180	135	45	0
-X, 0	180	90	0	180
-X, Y	135	45	0	180

The positioning patterns have been modeled in order to find the tilt angle. Section V describes the experimental results of the servo positioning and the tilt angle.

D. Control Software

Control software has two parts, an on-board system and a user GUI. They transfer data and command via serial communication. A communication protocol is designed to send data packets from the GUI to the microcontroller which received infrared sensor signal and calculating the propelling amplitude A_n . The received data has been translated into parameter values and orientation patterns. Moreover, the microcontroller also sends the measuring data from MEMs motion sensor to a computer for monitoring. The GUI includes orientation control section, movement control section and monitoring data section as shown in Fig. 9.



Fig. 9. Graphical User Interface (GUI) for sending and monitoring data

V. EXPERIMENT

A. Experimental Environment

The dimension of robot body is 200 mm in length and width, and 150 mm in height. Every joint of construction has been sealed with silicone sealant to prevent the leakage. The iron cylinder weight, which has been attached on servo arm, is 59.8 g. The inside of the robot has been installed a foam sheet and MEMS motion sensor to buoy the robot up and measure angle values, respectively. The sensor has been installed at the center of a foam sheet because this position is the pivot point of the system. The robot body floats in a large basin while electrical components, as well as battery, microcontroller and electrical wires, have been connected outside the basin. Thus, the electrical wires cause a disturbance to the robot body. An error occurring in the system can be neglected because tilt angle can be compensated by the average value at the starting position.

Experimental results are presented in graphs with mathematical equations. The relations between tilt angle and servo arm position can be estimated by linear equation and polynomial equation. The mathematical equation is the characteristic of the established pattern using for calculation of servo arm positions from desired tilt angles.

B. The Relation between Tilt Angle and a Servo Motor

For a servo motor, reference frame and experimental platform are shown in Fig. 1. The platform size has been reduced to suit an operating area. Servo arm rotates from 0

to 180 degrees. Its position is adjusted every 5 degrees to collect the experimental data. The experimental result presents the relation between tilt angle in X-Z and Y-Z plane, and servo arm position as shown in Fig. 10.

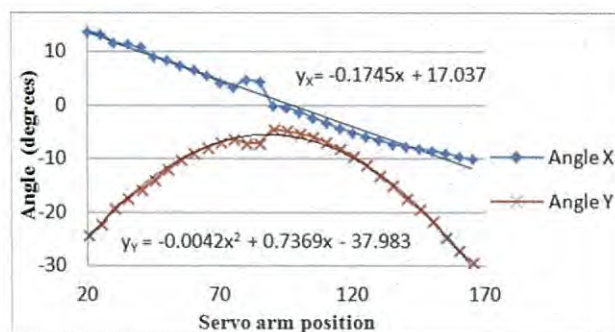


Fig. 10. The characteristic of a servo motor between servo arm position and tilt angle

In the starting stage, servo arm position is set to 90 degrees. Tilt angles of X-Z and Y-Z plane are both closer to 0 degrees. An experimental result implied that a servo motor cannot make the robot body float horizontally. To find the characteristic of this pattern, linear and polynomial equation is used for estimating the trendlines of angle θ in X-Z plane (Angle X) and angle β in Y-Z plane (Angle Y), respectively. The characteristic of angle β is a polynomial equation because the servo arm rotates about the X-axis. Thus, the robot body is rotated about the X-axis also. The results show that a servo motor has an effect only on a single axis but does not cover the working sphere.

C. The Relation between Tilt Angle and Servo Motors

--Parallel pattern, servo motors have been established with a reference axis as shown in Fig. 3. To collect the experimental data, servo arms are rotated apart every 5 degrees. The experimental results are shown in Fig. 11 and 12. Two separate graphs are shown servo arm position of servo motor S1 and S2, respectively. From the two graphs, the angle θ of X-Z plane (Angle Y) do slightly change. This change has no effect on the system. The angle β of Y-Z plane (Angle X) has the maximum tilt angle when both servo arms are parallel. The characteristic of the pattern employs linear equation to estimate the trendlines. The mathematical equations can be used for calculating servo arm position from a desired tilt angle.

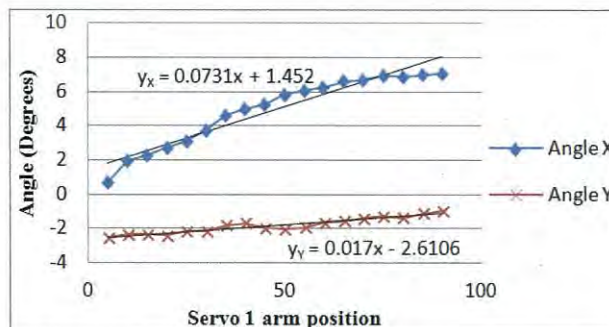


Fig. 11. The characteristic of parallel pattern between Servo 1 arm position and tilt angle

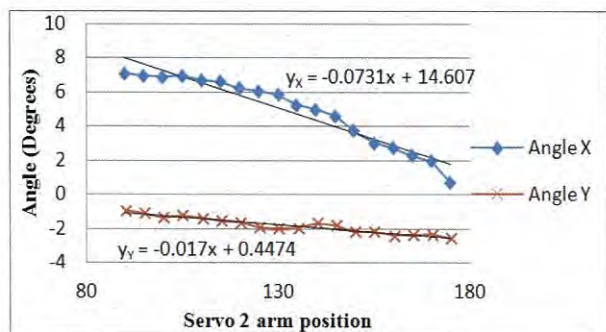


Fig. 12. The characteristic of parallel pattern between Servo 2 arm position and tilt angle

--In-line pattern, servo motors have been established with a reference axis as shown in Fig. 4. The experimental results are shown in Fig. 13 and 14. From the two graphs, the tilt angle β of Y-Z plane (Angle X) increases to the maximum position. In the X-Z plane (Angle Y), the average values of angle θ is about zero. The experimental results show that the robot body rotates about X-axis only. However, in-line pattern has flexibility to be used with the orientation mechanism. The characteristic employs linear equation to estimate the trendlines. The mathematical equations can be used for calculating servo arm position from a desired tilt angle.

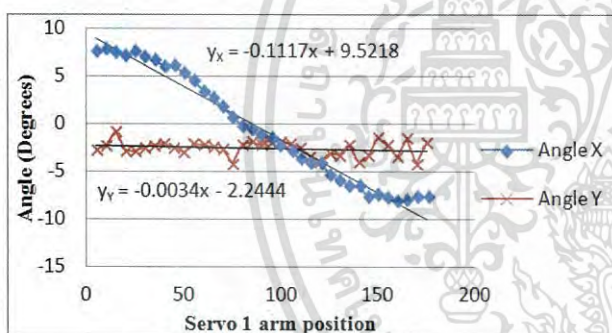


Fig. 13. The characteristic of in-line pattern between Servo 1 arm position and tilt angle

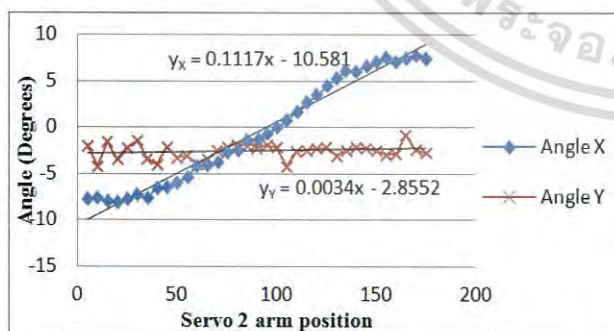


Fig. 14. The characteristic of in-line pattern between Servo 2 arm position and tilt angle

VI. CONCLUSION

The orientation mechanism of this fish robot employs the servo motor position pattern. The orientation mechanism uses two sets of in-line pattern to establish perpendicularly.

The desired tilt angle happens when all servo motors are controlled by the mathematical equations. Weight and platform size directly affect the orientation because it depends on the moment and buoyancy. The number of servo motors in the robot body reduces a limit of the robot orientation. Actually, servo motors can establish in various patterns. Any established pattern depends on a usage and a limit of a hardware design. The aim of this paper is to become a background in developing orientation mechanism area. It provides the mathematical equation to describe the robot orientation appearing in the system. Future works are about finding a general equation to describe the characteristics of servo pattern and the relation between weight and platform shape.

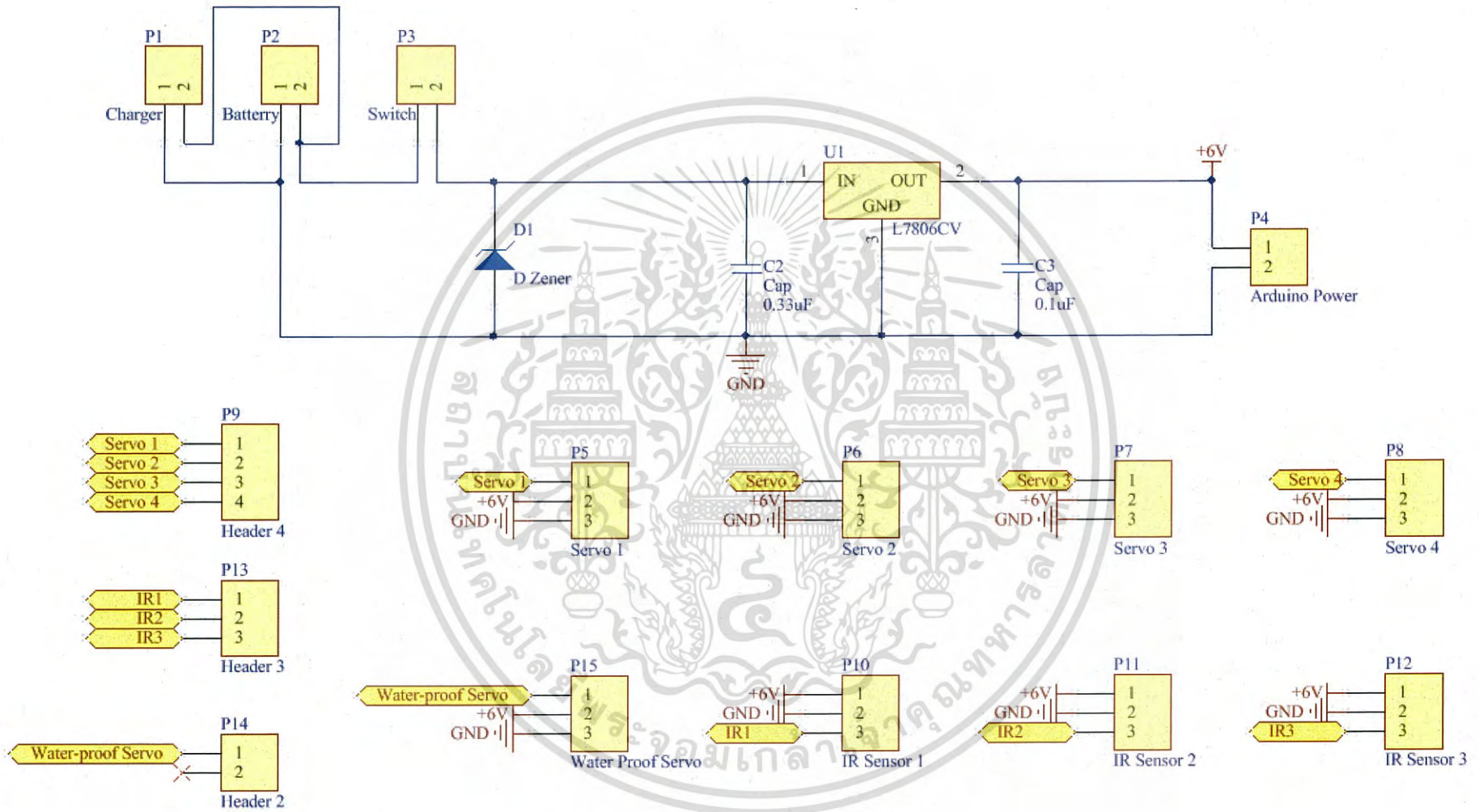
REFERENCES

- [1] J. Gray, "The propulsive powers of the dolphin," *Journal of Experimental Biology*, pp. 192-199, August 1935.
- [2] C.M. Breder, "The locomotion of fishes," *Zoologica*, vol. 4, pp. 159-256, 1926.
- [3] P. Nilas, "A Prototypical Multi-Locomotive Robotic Fish Parametric Research and Design," *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2011*, vol. 1, USA, pp. 343-348, 2011.
- [4] Le Minh Thuan, Nguyen Trung Tinh, Nguyen Ngoc Phuong, "Study of Artificial Fish Bladder System for Robot Fish," *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Thailand, pp. 2126-2130, December 2011.
- [5] Ahn, S.-S. and Lee, Y.-J., "Novel Spherical Robot with Hybrid Pendulum Driving Mechanism," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 2014, 456727, pp. 14, 2014
- [6] D. M. Lane, M. Sfakiotakis, and B. J. Davies, "Review of Fish Swimming Mode for Aquatic Locomotion," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 24, no. 2, April 1999.
- [7] Buoyancy, Stability, and Ballast 2. Cornerstone Electronics Technology and Robotics III.
- [8] M. J. Lighthill, "Note of swimming of a slender fish," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 9, pp. 305-317, 1960.
- [9] N. Kato and T. Inaba, "Guidance and Control of Fish Robot with Apparatus of Pectoral Fin Motion," *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation Leuven*, Belgium, pp. 446-451, May 1998.
- [10] K. A. Morganseny, P. A. Velay, and J. W. Burdickz, "Trajectory Stabilization for a Planar Carangiform Robot Fish," *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 756-762, 2002.

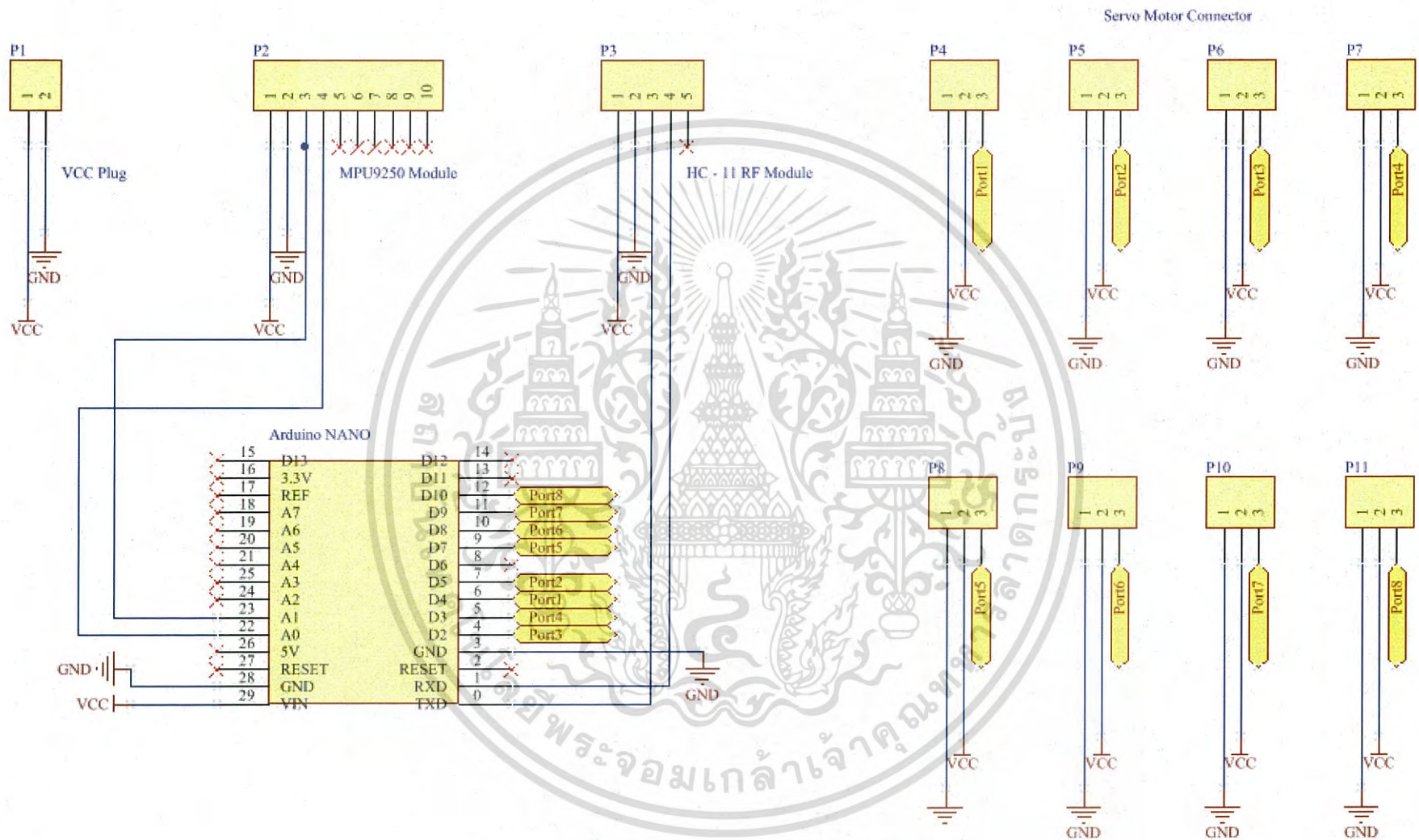


ภาคผนวก ข
รายละเอียดการออกแบบหุ่นยนต์ปลาและกลไกการเอียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ระบบไฟเลี้ยงของหุ่นยนต์ปลา



ระบบไฟเลี้ยงของกลไกการเอียงแบบสองชั้น

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวณานุช รัตนจรัสโรจน์
ประวัติการศึกษา 2556 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน การออกแบบหุ่นยนต์ปลา
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย
พ.ศ. 2559 T. Ratanajaratrod and P. Nilas, "An Implementation on 3D
Positioning Aquatic Robot," in *Proceedings of the International
MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2016
Vol I (IMECS2016)*, Hong Kong, 2016.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้