

การวิเคราะห์และการออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์ปลา

Analysis and Construction Design of Fish Robot

วิฑูร จูราหะวงศ์¹ และ สโรจ ไทรเมฆ²

^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม (FIBO)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถ. ประชาอุทิศ แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
E-Mail: j_iamwitoon@fibo.kmutt.ac.th

Witoon JUWARAHAWONG¹ and Saroj SAIMEK²

^{1,2}Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Institute of Field roBOTics (FIBO)
King Mongkut's University of Technology Thonburi.91 Pracha-u-tit Rd. Bangmod Tungkru Bangkok 10140
E-Mail: j_iamwitoon@fibo.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอหลักการและเหตุผลในการพัฒนาหุ่นยนต์ปลาขนาดใหญ่ รวมทั้งการคำนวณเพื่อออกแบบและวิเคราะห์ผลการออกแบบการเคลื่อนที่ของหางแบบการเคลื่อนที่กลับไปกลับมา นอกจากนี้กลไกทั้งหมดต้องอยู่ในน้ำเพื่อให้การทำงานของกลไกเป็นไปได้อย่างสะดวก ระบบ Electro-Hydraulic จึงถูกนำมาใช้ในการขับเคลื่อน ซึ่งกลไกการทำงานเป็นแบบการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาบนระนาบแบบ 4 แกนหมุนที่อิสระต่อกันโดยแต่ละแกนถูกขับเคลื่อนด้วยกระบอกไฮดรอลิก จากผลการวิเคราะห์พบว่ากำลังที่ต้องการในการขับเคลื่อนระบบมีค่าสูง ทำให้อุปกรณ์ที่มีอยู่ในท้องตลาดไม่เหมาะสมในการใช้งานทำให้จำเป็นต้องมีการวิจัยเพื่อสร้างระบบขับเคลื่อนที่มีประสิทธิภาพต่อไป

คำหลัก : หุ่นยนต์ปลา, การเคลื่อนที่แบบกลับไปกลับมา

Abstract

This research introduces the concept and the necessity of the large-scaled fish robot development including mechanical design criteria as well as the analysis of oscillatory motion simulation. Since all components of the robot are under the water and the smooth motion is required, electro-hydraulic system is used as the main power unit. Our key propelling mechanism is a 4 degree-of-freedom planar reciprocating mechanism that a hydraulic cylinder drives each of degrees of freedom individually. From the analyses and the simulations, we could conclude that the very high power system is needed to satisfy our calculation and there is no that kind of the power unit provided in the today

market; therefore, it is necessary to improve the efficiency of our propulsion.

Keywords: Fish robot, Oscillatory motion

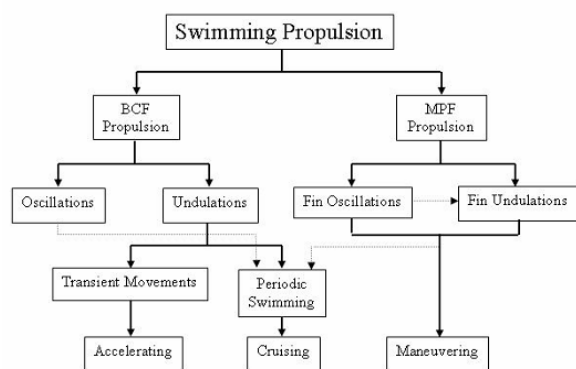
1. บทนำ

เนื่องจากปลาและสัตว์ที่อาศัยอยู่ในน้ำมีความสามารถในการเคลื่อนที่แตกต่างจากมนุษย์และสัตว์บกอย่างมาก ความต้องการที่จะเข้าใจลักษณะและกลไกการเคลื่อนที่ของสัตว์เหล่านั้น อาจจะทำให้มนุษย์สามารถพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ ได้ งานวิจัยนี้ นับเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาดังกล่าว โดยที่จุดมุ่งหมายหลักของงานวิจัยอยู่ที่การสร้างหุ่นยนต์ปลาที่มีลักษณะคล้ายปลาทูน่า และมีความสามารถในการเคลื่อนที่ไปในน้ำได้อย่างอิสระ ซึ่งทำให้สามารถแบ่งโครงการออกเป็น 4 ส่วนได้แก่ การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ การเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ การออกแบบระบบควบคุม และการทดลองสรุปผล โดยบทความฉบับนี้กล่าวถึงการออกแบบหุ่นยนต์ปลาที่สามารถว่ายน้ำได้คล้ายปลา โดยเลียนแบบรูปลักษณะภายนอกและลักษณะการเคลื่อนที่จากปลาทูน่า ซึ่งจัดเป็นปลาในตระกูลของ Scombrids ที่มีลักษณะการว่ายน้ำแบบ Thunniform [3] เนื่องจากปลาตระกูลนี้ต้องดำรงชีพด้วยการว่ายน้ำเป็นระยะทางไกลที่ความเร็วสูง ดังนั้นปลาชนิดนี้น่าจะต้องต้องใช้พลังงานในการเคลื่อนที่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด จากสมมุติฐานที่มีตัวแปรที่น่าสนใจคือประสิทธิภาพของการว่ายน้ำที่สูงขึ้น ได้แก่ ความสามารถในการลดแรงต้านและสามารถเพิ่มแรงขับ อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์การว่ายน้ำของปลาที่มีชีวิตเป็นไปได้ยากทั้งในเรื่องของการควบคุมลักษณะการว่ายน้ำในทิศทางหรือตำแหน่งที่ต้องการ หรือแม้แต่การวัดค่าต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการว่ายน้ำ ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้นจึงทำให้การศึกษานี้ต้องอาศัยหุ่นยนต์ที่ถูกสร้างเลียนแบบปลา

ในส่วนขอบทความฉบับนี้ประกอบไปด้วย การจำแนกลักษณะการเคลื่อนที่ของปลา ลักษณะการออกแบบกลไกการขับเคลื่อน และผลสรุปการดำเนินการ

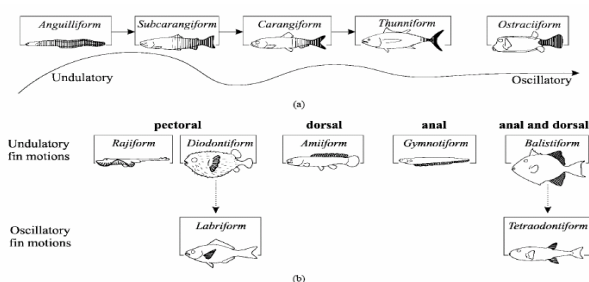
2. การจำแนกลักษณะการเคลื่อนที่ของปลา

สฟาคิโอทาซิสและพวก [3] กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะการขับเคลื่อนและลักษณะการว่ายน้ำของปลา ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงไดอะแกรมความสัมพันธ์ระหว่างการขับเคลื่อนและลักษณะการว่ายน้ำของปลา [3]

จากไดอะแกรมในรูปที่ 3 สามารถจำแนกลักษณะการเคลื่อนที่เป็น 2 ประเภทหลัก คือ การว่ายน้ำโดยอาศัยลำตัวและ/หรือหางในการเคลื่อนที่ (Body and/or Caudal Fin Propulsion; BCF) และการว่ายน้ำโดยอาศัยครีบอกและ/หรือครีบท้องในการเคลื่อนที่ (Median and/or Paired Fin Propulsion; MPF)



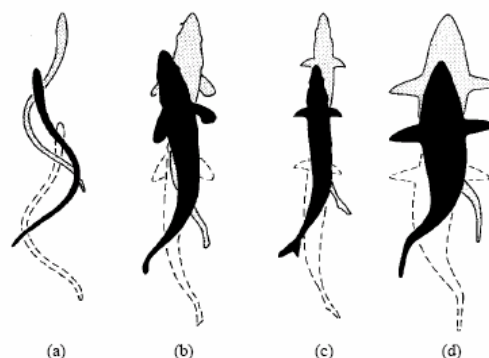
รูปที่ 2 [3] (a) แสดงลักษณะการว่ายน้ำในแบบ BCF Propulsion, (b) แสดงลักษณะการว่ายน้ำในแบบ MPF Propulsion

โดยสามารถแสดงพฤติกรรมการว่ายน้ำของปลาแต่ละประเภทได้อย่างชัดเจน คือ ปลาที่ว่ายน้ำแบบ BCF จะเป็นลักษณะของปลาที่ว่ายน้ำหรืออาศัยอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ต้องอาศัยการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง

ว่ายน้ำเร็วและมีความแรงสูง ในขณะที่ปลาที่ว่ายน้ำแบบ MPF จะเป็นปลาที่มีลักษณะการเคลื่อนที่ที่คล่องแคล่วว่องไว ซึ่งการว่ายน้ำในลักษณะของ BCF สามารถจำแนกได้เป็น 5 ลักษณะ จากการเคลื่อนที่แบบคลื่น (Undulatory) ไปสู่การเคลื่อนที่แบบสั้น (Oscillatory) ได้แก่ การ

เคลื่อนที่แบบ Anguilliform, Subcarangiform, Carangiform, Thunniform และแบบ Ostraciiform ในขณะที่การว่ายน้ำในลักษณะของ MPF สามารถแบ่งลักษณะการเคลื่อนที่ได้เป็น การเคลื่อนที่แบบคลื่น คือ Rajiform, Diodontiform, Amiiform, Gymnotiform, และ Balistiform และการเคลื่อนที่แบบสั้น คือ Labriform, และ Tetraodontiform

จากข้อมูลดังกล่าวพบว่าการเคลื่อนที่แบบ Carangiform และ Thunniform จะเป็นลักษณะการเคลื่อนที่ของปลาที่ต้องมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วตลอดเวลา เช่น ปลาทูน่าครีบน้ำเงิน หรือปลาทูน่าครีบทอง ซึ่งการเคลื่อนที่ลักษณะนี้อาศัยการขยับตัวเพื่อให้หางมีการเคลื่อนที่เพื่อสร้างแรงดันคล้ายปีกเครื่องบินที่มีความเร็วของของไหลผ่านปีกด้วยความเร็วที่ต่างกันเพื่อสร้างแรงยก



รูปที่ 3 แสดงรูปแบบของการเคลื่อนที่แบบต่างๆ [3]
a) Anguilliform, b) Subcarangiform, c) Carangiform, d) Thunniform

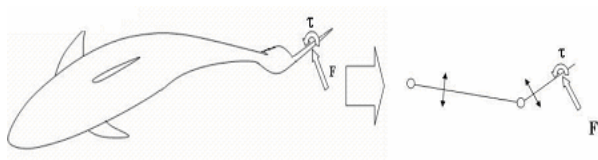
3. การออกแบบกลไกขับเคลื่อน

หุ่นยนต์ปลาที่เรียกว่า Robotuna หรือ Charlie1 (รูปที่ 4) ถูกสร้างขึ้นที่ MIT [4] โดยมีจุดประสงค์ในการศึกษาการว่ายน้ำของปลา โดยหุ่นยนต์ดังกล่าวมีรูปร่างภายนอกคล้ายกับปลาทูน่าครีบน้ำเงิน (Thunnus Thynnus) วัตถุประสงค์ข้อหนึ่งของการศึกษาคือการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของยานทางน้ำที่มีโครงสร้างที่หุ่นตัวกับยานทางน้ำโดยทั่วไป ซึ่งต่อมาได้มีการพัฒนาไปสู่หุ่นยนต์ปลาที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ แต่ไม่มีการเปิดเผยรายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบแต่อย่างใด



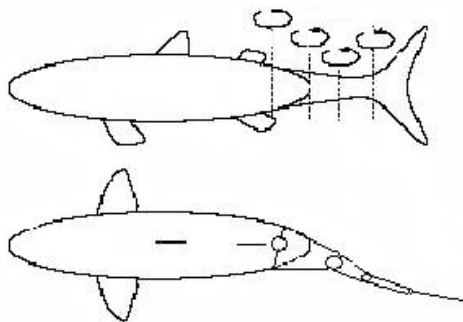
รูปที่ 4 หุ่นยนต์ปลาทูน่า (Robotuna) [4]

ในปัจจุบันการสร้างหุ่นยนต์ปลาเริ่มมีมากขึ้นในหลายรูปแบบ รวมทั้งมีการนำวิธีการในการควบคุมหลายๆชนิดมาทำการประยุกต์ อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาสวนใหญ่ต้องการอย่างน้อย 2 แกนหมุน (Revolute Joints) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์กันระหว่างการเคลื่อนที่แบบ Heaving และการเคลื่อนที่แบบ Pitching ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงแบบจำลองการเคลื่อนที่ของหางและแรงกระทำ

เพื่อให้การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เป็นไปอย่างราบเรียบขึ้นเราได้ออกแบบให้มีกลไกการทำงานแบบ 4 แกนและขับเคลื่อนด้วยระบบไฮดรอลิก



รูปที่ 6 แบบจำลองที่ใช้ในการออกแบบ

3.1 การคำนวณเพื่อการออกแบบระบบไฮดรอลิกเบื้องต้น

เนื่องจากหุ่นยนต์มีการขยายขนาดเป็นสองเท่าของมาตราส่วนแบบจำลองของปลาจริง (ขนาดของปลาทูน่า มีความยาวเฉลี่ย 1.2 เมตร) ภายใต้การพิจารณาแบบ "Quasi-Steady Fluid Flow" ดังสมการ

$$L = \frac{1}{2} \rho C A V^2 \quad (1)$$

เมื่อ L คือ แรงยก

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ

C คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแรงยก

A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ

V คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่

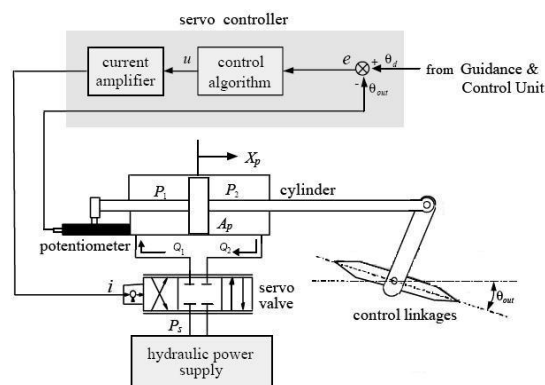
จากนิยามของ Strouhal number (St)

$$St = \frac{fA}{V} \quad (2)$$

โดยที่ f คือความถี่ของการโบกกลับไปกลับมาของหาง (Hz)

A คือความกว้างของ wake ซึ่งโดยทั่วไปจะให้ค่าเท่ากับ ความกว้างที่ปลายหางกวาดไป (m)

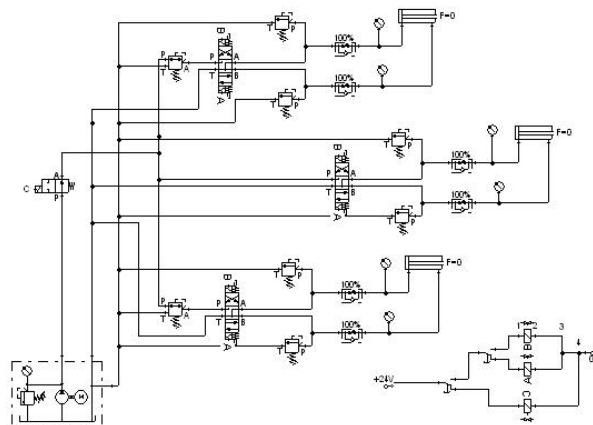
U คือความเร็วเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า (m/s)



รูปที่ 7 แสดงระบบการทำงานของแต่ละแกน

กำหนดให้ความถี่ที่ใช้ในการเคลื่อนที่มีค่าเท่ากับ 1 Hz มุมทำงานสูงสุดเท่ากับ ± 25 องศา ค่า St (Strouhal Number) อยู่ในช่วง $0.25 < St < 0.40$ [11] จากสมการที่(1)และ(2) จะได้ความเร็วในการเคลื่อนที่มีค่าเท่ากับ 1.16 m/s จากข้อมูลดังกล่าวสามารถคำนวณหาแรงต้านการเคลื่อน (Drag Force) ในแนวหน้าตัดลำตัว (Drag Body) เท่ากับ 340.39 N แรงต้านที่เกิดขึ้นกับหางมากที่สุดที่แกนที่ 1 มีค่าเท่ากับ 824.18 N ที่เกิดกับแกนที่ 2 มีค่าเท่ากับ 225.8 N ที่เกิดกับแกนที่ 3 มีค่าเท่ากับ 36.59 N และที่เกิดกับปลายหาง มีค่าเท่ากับ 1.95 N

จากค่าของแรงต้านที่ได้สามารถหาขนาดของอุปกรณ์หลักๆที่ใช้ในวงจร Electro-Hydraulic ได้ดังตารางที่ 1



รูปที่ 8 แสดงระบบ Electro-Hydraulic จำลองที่ใช้ในการขับเคลื่อน

ตารางที่ 1 แสดงขนาดของกระบอกสูบไฮดรอลิกที่เลือกใช้

	Bore (mm)	Rod (mm)	stroke(mm)	P (Bar)	Q (l/min)
Cyl1	50	25	110	51.69	11.8
Cyl2	30	15	55	29.5	2.3
Cyl3	30	15	55	8.29	1.9
Cyl4	20	10	30	0.62	0.6

จากตารางที่ 1 จะได้ว่าอัตราการไหลรวมเท่ากับ 12.4 l/min ดังนั้นจึงเลือกปั๊มแบบ Internal Gear Pump ขนาด $12.3 \text{ cm}^3/\text{rev}$ ทำงานที่ความดันสูงสุด 150 Bar เนื่องจากมีขนาดเล็ก และน้ำหนักเบาประมาณ 3.7 kg เมื่อเทียบกับปั๊มลักษณะอื่นๆ โดยเลือกใช้ DC มอเตอร์ เป็นต้นกำลังขนาด 2.75 kW ทำงานที่ 170 Volt

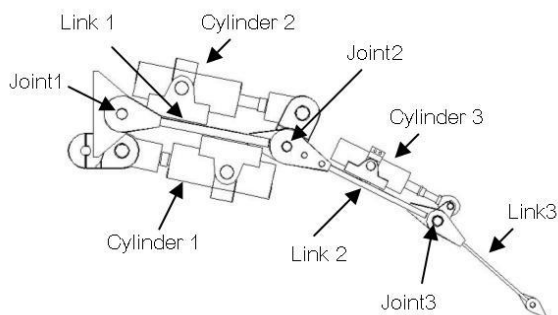
3.2 การเลือกขนาดถังพักน้ำมันไฮดรอลิก

ขนาดบรรจุน้ำมันมีขนาดเท่ากับ 3 เท่าของอัตราการไหลสูงสุด (Q_{Max}) ของปั๊ม ซึ่งเลือกใช้ปั๊มขนาด $12.3 \text{ cm}^3/\text{rev}$ ทำงานที่ 1450 rev จะได้อัตราการไหลเท่ากับ 17.85 l/min จะได้ว่า ถังพักน้ำมันมีขนาดเท่ากับ 53.6 l เลือกใช้น้ำมันชนิด HL mineral oil DIN 51524 ความหนาแน่นเท่ากับ 0.875 kg/l

การคำนวณข้างต้นเป็นการคำนวณเพื่อใช้ในการจัดเตรียมอุปกรณ์ในการดำเนินงาน เนื่องจากในทางปฏิบัติค่าสัมประสิทธิ์ของแรงต้าน (C_D) และค่า St ที่แท้จริงนั้นจะทราบได้จากการทดลองเท่านั้น ซึ่งในการออกแบบยังต้องคำนึงถึงการเลือกวัสดุที่มีผลกระทบต่อค่าตัวแปรต่างๆ รวมถึงการพิจารณาการขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อลดค่าใช้จ่ายให้น้อยลง

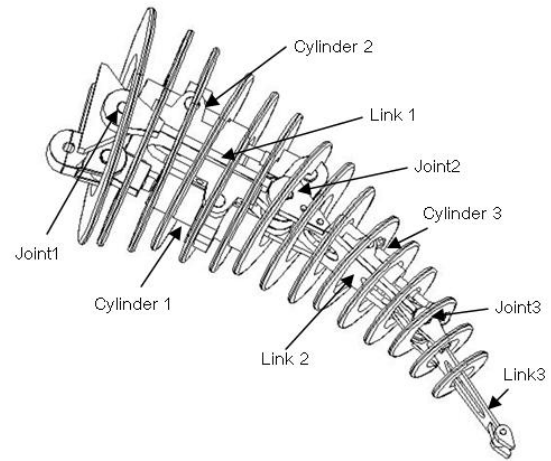
3.3 ลักษณะกลไกที่ใช้ในการขับเคลื่อน

ข้อมูลข้างต้นสามารถออกแบบโครงสร้างการทำงานได้ดังรูปที่ 9



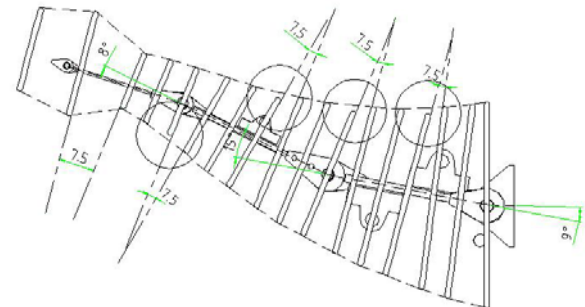
รูปที่ 9 แสดงลักษณะกลไกทำงานระบบขับเคลื่อน

การพิจารณาผิวที่ห่อหุ้มระบบขับเคลื่อนนั้นจะต้องมีความยืดหยุ่นรองรับการทำงานของกลไกและให้ผิวที่ห่อหุ้มมีลักษณะเป็นส่วนโค้งที่ค่อนข้างราบเรียบ ดังรูปที่ 10 โดยตัวโครงสร้างนี้ทำจากโฟม ซึ่งมีข้อดีคือ ช่วยสร้างแรงลอยตัวบริเวณทางในการรักษาสมดุลกับแรงลอยตัวที่เกิดจากปริมาตรของลำตัว(ถึงแม้ที่ประกอบด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ) ส่วนข้อเสียในการติดตั้งโครงสร้างลักษณะแสดงไว้ดังรูปที่ 11 ซึ่งรูปแบบการวางทางตรง เมื่อเส้นประแสดงถึงผิวที่ห่อไว้ จะเห็นว่าระบบทำงานจะเกิดการเกยกันระหว่างชั้นโฟม(โฟมหนา 10 mm มีระยะห่างระหว่างชั้น 50 mm) ดังแสดงในวงกลม ส่งผลให้มุมที่สามารถทำงานได้ของระบบมีขนาดลดลงจากเดิม ± 25 องศา ของแต่ละแกนเป็น ± 8 , ± 15 และ ± 8 องศาเมื่อวัดเทียบกับระหว่างแกน และทำให้มุมที่เกยกันระหว่างชั้นโฟมที่จะทำให้ผิวส่วนโค้งที่ราบเรียบมีค่าประมาณ 7.5 องศา



รูปที่ 10 แสดงลักษณะการติดตั้งโฟม

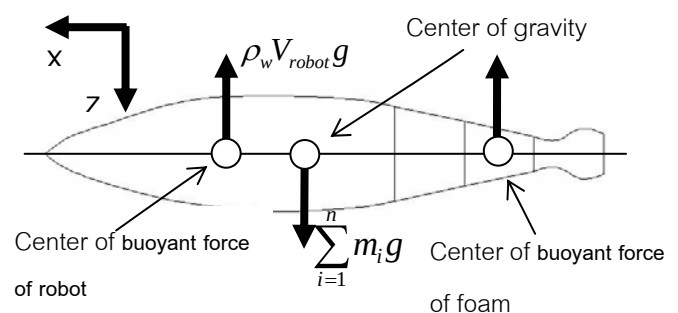
แต่อย่างไรก็ตามการเกยกันไม่ได้ทำให้ลักษณะการเคลื่อนที่คลาดเคลื่อนจากปลาจริง เนื่องจากปลาทูนไม่สามารถสร้างมุมกวาดที่สูงในขณะเคลื่อนที่



รูปที่ 11 แสดงลักษณะการเกยกันของชั้นโฟม

3.4 การวิเคราะห์สภาวะเสถียรภาพของหุ่นยนต์ขณะลอยน้ำ

การพิจารณาเสถียรภาพของหุ่นยนต์ขณะลอยน้ำถือเป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบ ซึ่งเป็นการพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นในแนวดิ่ง (แกน Z) ซึ่งเกิดจากน้ำหนักของหุ่นยนต์กับแรงลอยตัวของหุ่นยนต์และการรักษาระดับบนระนาบที่เกิดขึ้นเนื่องจากโมเมนต์ของน้ำหนักกับแรงลอยตัวของตัวหุ่นยนต์ (แกน Y) เนื่องจากระยะเยื้องของจุดศูนย์กลางมวลกับจุดศูนย์กลางของแรงลอยตัว



รูปที่ 12 แสดงลักษณะของแรงลอยตัวและน้ำหนักของหุ่นยนต์

เนื่องจากหุ่นยนต์มีลักษณะที่สมมาตรกันในระนาบ X-Y และ X-Z
พิจารณาแรงที่เกิดตามแนวแกน Z

$$\text{แกน Z: จาก} \quad \sum F_z = 0; \quad (3)$$

$$\text{จะได้ว่า} \quad \sum_{i=1}^n m_i g - \rho_w V_{robot} g = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n m_i}{V_{robot}} = \rho_w \quad (5)$$

เมื่อ m_i = มวลของอุปกรณ์ต่างๆที่ติดตั้ง

ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำ

พิจารณาโมเมนต์รอบแกน y

$$\text{แกน y: จาก} \quad \sum M_{y,CG} = 0; \quad (6)$$

$$\text{จะได้ว่า} \quad f_b \times r_b - F_R \times r_R = 0 \quad (7)$$

$$F_R \times r_R = \rho_w V_{robot} g \times r_b \quad (8)$$

เมื่อ f_b คือ แรงลอยตัวที่เกิดจากปริมาตรของหุ่นยนต์

r_b คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางมวลถึงตำแหน่งที่เกิดแรงลอยตัว
ของหุ่นยนต์

F_R คือ Transverse buoyant force

r_R คือ ระยะจากจุดศูนย์กลางมวลถึงจุดศูนย์กลางของโคม

จากการพิจารณาเบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าหุ่นยนต์ควรมีความหนาแน่น
ใกล้เคียงกับความหนาแน่นของน้ำ

4. วิจัยและสรุปการดำเนินงาน

เนื่องจากหุ่นยนต์ปลา มีลักษณะการทำงานโดยอิสระบนระนาบ 3 มิติได้น้ำ ดังนั้นเรื่องของการรักษาสมดุลและการป้องกันการรั่วซึมจึงเป็นสิ่งสำคัญในการพิจารณา รวมถึงข้อจำกัดในเรื่องของพื้นที่ภายในตัวหุ่นยนต์เพื่อใช้ในการติดตั้งระบบการทำงานและอุปกรณ์ที่ใช้แหล่งพลังงานขนาดใหญ่ จากการที่ผู้วิจัยพบปัญหาสำคัญคือ

1. หุ่นยนต์ถูกออกแบบให้สามารถลอยตัวอยู่ได้โดยมีความหนาแน่นของหุ่นยนต์ให้มีความน้อยกว่าความหนาแน่นของน้ำโดยใช้ค่า Safety Factor เท่ากับ 0.2 ซึ่งจะได้ว่าน้ำหนักโดยประมาณของหุ่นยนต์ที่มีปริมาตร 0.240 m³ มีค่าเท่ากับ 192 kg จากการรวมค่าน้ำหนักของอุปกรณ์ต่างๆ นั้นมีค่าสูงกว่า น้ำหนักที่คำนวณไว้มาก

2. ระบบขับเคลื่อน Electro-Hydraulic เป็นระบบที่สามารถสร้างอัตราส่วนระหว่างแรงต่อน้ำหนักสูงเป็นระบบที่มีการติดตั้งไม่ซับซ้อนสามารถป้องกันการรั่วซึมได้ง่าย แต่เนื่องจากเป็นระบบที่มีการสูญเสียพลังงานมากจำเป็นต้องใช้แหล่งต้นกำลังขนาดใหญ่ ซึ่งภาระงานของระบบ Electro-Hydraulic นั้นแปรผันตามความถี่และองศาการทำงานของกลไกการขับเคลื่อนแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยกำหนดความถี่และองศาการทำงานของกลไกการขับเคลื่อนที่ 1 Hz, ± 25 องศา ต้องใช้ต้น

กำลังเป็นมอเตอร์แบบ DC ขับที่ประมาณ 2.75 kW ที่ 170 Volt และความต้องการอัตราการไหลในการทำงานของระบบมีค่าน้อยมาก (น้อยกว่า 3 l/min ต่อ 1 วงจรการทำงาน) เนื่องจากข้อจำกัดทางกลไกที่ตั้งกล่าวมาแล้ว (องศาการทำงานน้อยทำให้ระยะชักของกระบอกมีค่าน้อย) ซึ่งการใช้วาล์วที่ในงานอุตสาหกรรมไม่เหมาะสมในการใช้งานในระบบ (20l/min ขึ้นไป) จึงจำเป็นต้องสั่งทำในลักษณะเฉพาะ ซึ่งน้ำหนักโดยรวมของทั้งระบบมีค่าประมาณ 102.5 kg

3. เนื่องจากต้นกำลังมีขนาดใหญ่ แหล่งพลังงานที่ใช้จึงมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย โดยกำหนดระยะเวลาทำงานที่ 1 ชั่วโมง ขนาดของแบตเตอรี่ที่เลือกใช้มีค่าเท่ากับ 32 AH 12 Volt

4. ขนาดตัวหุ่นยนต์มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมากเนื่องจากข้อจำกัดในเรื่องขนาดของอุปกรณ์และสัดส่วนของแบบจำลองของปลาที่ใช้ทำให้ต้องการสถานที่ในการทดลองขนาดใหญ่ ดังแสดงดังรูปที่ 10. เพื่อลดความผิดพลาดของผลการทดลองจากผลกระทบของคลื่นที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

5. งานวิจัยและการดำเนินงานในอนาคต

จากการดำเนินงานที่ผ่านมาผู้วิจัยได้พบว่าในทางปฏิบัตินั้นมีข้อจำกัดอยู่มากทั้งในเรื่องของการสร้างชิ้นงานขนาดใหญ่ อุปกรณ์ที่มีขนาดเฉพาะและแหล่งกำเนิดพลังงานที่จะติดตั้ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาอุปกรณ์ทางด้านระบบ Electro-Hydraulic บางส่วนที่มีลักษณะเฉพาะ ทำให้ต้องมีการเตรียมการเพื่อหาองค์ความรู้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงพัฒนาหุ่นยนต์ขนาดเล็กที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อนเพื่อใช้ในการทดสอบเก็บค่าตัวแปรต่างๆ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสถาบัน Southeast Asian Fisheries Development Center (SEAFDEC) ที่ให้ข้อมูลทางด้านขนาดและความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับปลาทุ่นครีบเหลือง ขอขอบคุณสำนักงบประมาณที่สนับสนุนทุนวิจัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทดลอง สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม (FIBO) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ สถานที่ รวมถึงคณาจารย์และนักศึกษาปริญญาโทของสถาบันที่ให้คำปรึกษาการแก้ปัญหาต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอขอบคุณ รศ. สงศรี มหาสวัสดิ์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการหาข้อมูลในการติดต่อสถานที่เพื่อขอข้อมูลทางชีววิทยา

เอกสารอ้างอิง

- [1]. Mark W. Westneat and Stephen A. Wainwright, "Mechanical Design for Swimming: Muscle, Tendon, and Bone," Fish Physiology, vol.19, pp. 271-311.
- [2]. John D. Altringham and Robert E. Shadwick, "Swimming and Muscle Function," Fish Physiology, vol.19, pp. 313-344.
- [3]. Michael Sfakiotakis, David M. Lane, and J. Bruce C. Davies, "Review of Fish Swimming Mode for Aquatic Locomotion",

- IEEE Journal of Oceanic engineering, vol.24, no.2, 1999, pp.237-259.
- [4]. D. S. Barrett. *Forces and Efficiency of a Flexible Hull Vehicle*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- [5]. Ikuo Yamamoto, Yuuzi Rerada, Tetuo Nagamatu, and Yoshiteru Imaizumi, "Propulsion System with Flexible/Rigid Oscillation Fin," IEEE Journal of Oceanic engineering, vol.20, no.1, 1995, pp.23-30.
- [6]. James C. Liao, "Swimming in needlefish (Belonidae) : anguilliform locomotion with fins," The Journal of experimental Biology 205, Department of Organismic and Evolutionary Biology, Harvard University, Cambridge, 2002, pp. 2875-2884.
- [7]. Naomi Kato and Motonori Furushima, "Pectoral fin model for Maneuver of Underwater Vehicles," Tokai University, 1996, pp.49-56.
- [8]. Karen A. Harper, Matthew D. Berkemeier, and Sheryl Grace, "Modeling the Dynamics of Spring-Driven Oscillating-Foil Propulsion", IEEE Journal of Oceanic engineering, vol.23, no.3, 1998, pp. 285-296.
- [9]. Eliot G. Drucker and George V.Lauder, "A Hydrodynamic Analysis of Fish Swimming Speed: Wake Structure and Locomotors Force in Slow and Fast Labriform Swimmer," The Journal of experimental Biology 203., 2000, pp. 2379-2393.
- [10]. Matthew J.McHenry, Emanuel Azizi, and Jame A. Strother, "The Hydrodynamics of Locomotion at Intermediate Reynolds Numbers:Undulatory Swimming in Ascidians Larvae," The Journal of experimental Biology 206, 2002.
- [11]. Jennifer C. Nauen and George V.Lauder, "Three-Dimensional Analysis of Finlet Kinematics in the Chub Mackerel," Department of Organismic and Evolutionary Biology, Harvard University, 2000, pp. 9-19.
- [12]. A.h. Techet and M.S. Triantafyllou, "Boundary Layer Relaminarization in Swimming Fish", International Offshore and Polar Engineer Conference, Brest, France, 1999, pp. 415-418.
- [13]. Jennifer C. Nauen and George V. Lauder, "Hydrodynamics of Caudal Fin Locomotion by Chub Mackerel, *Scomber japonicus* (Scombridae)", The Journal of Experimental Biology 205, 2002, pp. 1709-1724.
- [14]. M.S. Triantafyllou, G.S. Triantafyllou, and D.K.P. Yue, "Hydrodynamics of Fishlike Swimming", Annual Reviews, Fluid Mechanics, 2000, pp. 33-53.
- [15]. M. Nakashima, K. Tokuo, K. Kmainaga, and K. Ono, "Experimental study of a self-propelled two joint dolphin robot," In *Proceedings of the ninth International Offshore and Polar Engineering Conference*, pages 419—424, Brest, France, 1999.
- [16]. N. Kato. "Control performance in the horizontal plane of a fish robot with mechanical pectoral fins," IEEE Journal of Oceanic Engineering, 25(1):121—129, 2000.