

การวิเคราะห์และการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่แบบทูนนิฟอร์ม

Analysis and Mathematical modeling of Thunniform Motion

วิฑูร จูราหะวงศ์¹ และ สโรช ไตรเมฆ²^{1,2}ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม (FIBO)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 91 ถ.ประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140
E-mail: j_iamwitoon@fibo.kmutt.ac.thWitoon 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 Tungkr Bangkok 10140
E-mail: j_iamwitoon@fibo.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ปลาที่มีลักษณะเป็นหุ่นยนต์สามแกนประกอบด้วย body, peduncle, และ flapping tail มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบทูนนิฟอร์ม (thunniform motion) โดยศึกษาความสัมพันธ์ของมุมที่เกิดจากการพับของแกน peduncle และ flapping tail (หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า Heaving และ มุม Pitching ตามลำดับ) กับแรงที่ขับเคลื่อนขึ้นในขณะที่มีการโบกสะบัดของหาง ในการพิจารณาหาสมการการเคลื่อนที่ (equation of motion) และแรงขับ (thrust force) ที่เกิดขึ้นจากการพับของหางปลา ภายใต้การพิจารณาการไหลแบบ Quasi-steady flow โดยรายละเอียดจะประกอบไปด้วย ลักษณะการเคลื่อนที่แบบทูนนิฟอร์ม ลักษณะการทำงานของหุ่นยนต์ แบบจำลองการเคลื่อนที่ (mathematical model) และผลของการจำลองการเคลื่อนที่

คำหลัก: หุ่นยนต์ปลา, ทูนนิฟอร์ม, Quasi-steady flow, แบบจำลองการเคลื่อนที่

Abstract

This paper aims to study motion of a fish-robot, which composes of body, peduncle and flapping tail, under Thunniform motion. Our main objective is to study relation between a propulsive (thrust) force and oscillating angles of peduncle and flapping tail (known as heaving and pitching, respectively). Equation of motion of the robot with propulsive forces will be study under quasi-steady flow. This paper consists of review of Thunniform swimming, construction of three-link robot, thrust model, and simulation results.

Keywords: fish robot, Thunniform, Quasi-Steady Fluid Flow, thrust model

1. บทนำ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะศึกษาการทำงานของหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยการปรับเปลี่ยนรูปร่างของตัวเอง ปลาและสัตว์น้ำส่วนใหญ่เป็นนักว่ายน้ำที่น่าสนใจและหุ่นยนต์คล้ายปลาอาจจะสามารถเคลื่อนที่ได้ดีกว่าพาหนะประเภทอื่นๆที่มนุษย์สร้างขึ้นในหลายๆด้าน ในช่วงระยะ 10 ปีที่ผ่านมาคนที่ศึกษาทางด้านชีววิทยา (Biologists) และทางด้านกลศาสตร์ของไหล (Fluid mechanics) ได้พยายามทำความเข้าใจว่าปลาสามารถว่ายน้ำได้ด้วยประสิทธิภาพสูงได้อย่างไร ซึ่งความสนใจที่จะพัฒนาการเคลื่อนที่ให้คล้ายการเคลื่อนที่ของปลาให้เป็นยานพาหนะที่มีความคล่องแคล่วสูงกว่าการขับเคลื่อนแบบใบพัด Triantafyllou [14] ได้กล่าวถึงการพัฒนาหุ่นยนต์ปลาในอนาคตจะเป็นการว่ายน้ำแบบปลาที่พบว่าการเคลื่อนที่แบบลูกคลื่น (Undulating motion) ที่เกิดจากการเคลื่อนไหวของหางและลำตัว หรือการเคลื่อนที่แบบปลาที่พบ สามารถลดแรงต้านน้ำได้ดีเมื่อทำการลากในน้ำด้วยความเร็วคงที่ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวเป็นการสนับสนุนแนวความคิดที่เชื่อว่าลักษณะการว่ายน้ำของปลาเป็นการเคลื่อนที่ที่มีประสิทธิภาพสูง แต่ข้อมูลดังกล่าวจัดเป็นปัญหาปลายเปิดที่ว่าความจริงแล้วการเคลื่อนที่คล้ายปลานั้นมีประสิทธิภาพสูงกว่าการเคลื่อนที่แบบใบพัดหรือไม่ ซึ่งต้องอาศัยข้อมูลจากงานวิจัยด้านอื่นๆอีกมาก

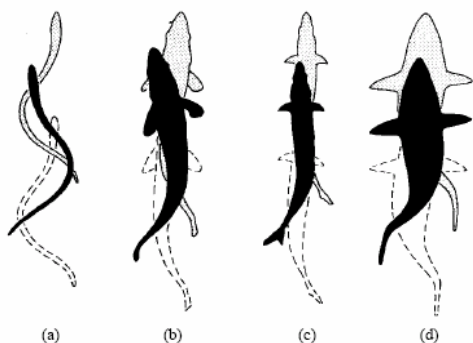
นอกจากนี้ปลาส่วนมากมีความคล่องตัวสูง ซึ่งปลาบางประเภทสามารถที่กลับตัวได้ 180 องศา ภายในช่วงของความยาวลำตัว ขณะที่เรือจำเป็นต้องใช้วงเลี้ยวที่สูงกว่ามาก [6] อีกทั้งยังสามารถสร้าง

ความเร่งได้สูงมากจากขณะหยุดนิ่ง ซึ่งความสามารถดังกล่าวเป็นข้อได้เปรียบเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่โดยใช้ใบพัด

ในส่วนของเนื้อหาจะกล่าวถึงสมมุติฐานในการสร้างแบบจำลองในการควบคุม ผลที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ และหุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดลองที่ที่โครงสร้างพื้นฐานเป็นลักษณะของหุ่นยนต์สามแกน ซึ่งมีข้อจำกัดในเรื่องของรูปร่างเพื่อทำให้ระบบนั้นงานต่อการพิจารณา

2. การว่ายน้ำแบบทูนนิฟอร์ม (Thunniform motion)

ปลาตามธรรมชาติมีความหลากหลายของสายพันธุ์ และมีการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน ในส่วนของงานวิจัยนี้มุ่งความสนใจไปที่การเคลื่อนที่แบบทูนนิฟอร์ม (Thunniform motion) ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของปลาจำพวกปลาทูน่า ปลาแมคเคอเรล ที่สามารถว่ายน้ำได้เร็ว ปลาที่มีการว่ายน้ำแบบทูนนิฟอร์ม จะว่ายน้ำโดยอาศัยการเคลื่อนไหวของปลายหางขณะที่ส่วนที่เป็นลำตัวจะไม่เคลื่อนไหวหรือมีการเคลื่อนที่เพียงเล็กน้อย ซึ่งจะอาศัยการเคลื่อนไหวลำตัวของปลาน้อยกว่าหนึ่งในสามของความยาวของลำตัวปลาเพื่อสร้างให้เกิดการโบกสะบัดของหาง ในขณะที่เดียวกันใช้การบิดตัวของหางทำน้ำไหลผ่านทางในลักษณะเดียวกับแรงยกที่เกิดขึ้นบนปีกเครื่องบิน และมีอัตราส่วนของ Aspect สูง ลักษณะของการว่ายน้ำแบบทูนนิฟอร์มจะมีลักษณะดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงรูปแบบของการเคลื่อนที่แบบต่างๆ [3]

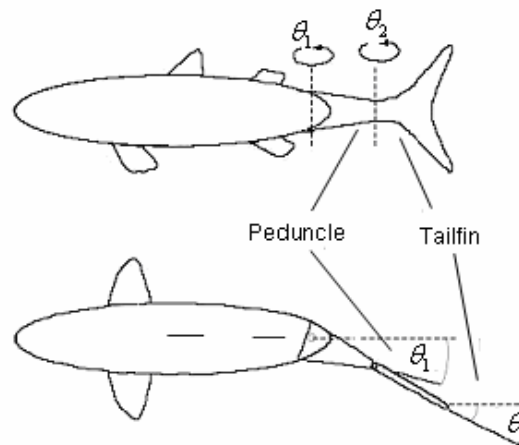
a) Anguilliform, b) Subcarangiform, c) Carangiform, d) Thunniform

โดยถือว่าส่วนที่เป็นลำตัวนั้นเป็นเสมือนวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid body) แล้วเชื่อมติดกับส่วนหาง (tail fin หรือ flapping tail) ด้วย ก้านหาง (peduncle) ที่มีลักษณะเรียวยาวทำให้แรงต้านที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย ในการพิจารณาการเคลื่อนที่แบบระนาบ 3 มิติ อิทธิพลของน้ำเป็นสิ่งสำคัญ และซับซ้อนต่อการพิจารณาการเคลื่อนที่ของปลา ดังนั้นในรายงานฉบับนี้จะจำกัดการเคลื่อนที่ให้อยู่เพียงระนาบ 2 มิติ

3. การทำงานของหุ่นยนต์

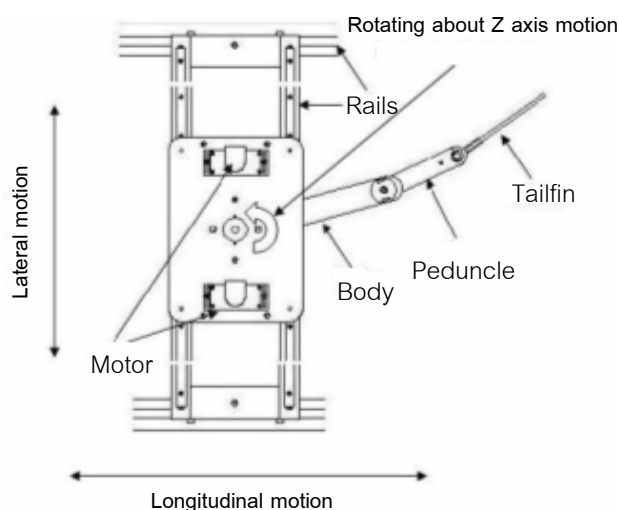
ภาพที่แสดงดังรูปที่ 2 เป็นแบบจำลองเพื่อใช้ในการออกแบบกลไกการทำงานของเครื่องจักรกลว่ายน้ำ (Swimming Machine: SM) ซึ่งเป็นหุ่นยนต์ที่มี 5 องศาอิสระ (degrees of freedom, DOF) โดยหุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่ 3 องศาอิสระ ได้แก่ longitudinal, lateral และ

การหมุนรอบแกน Z ในขณะที่ระบบขับเคลื่อนมี 2 องศาอิสระ ได้แก่ heaving (ψ_1) และ pitching (ψ_2) เมื่อ longitudinal แทนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไปด้านและหลัง lateral แทนการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไปทางด้านซ้ายและขวา ขณะที่การหมุนรอบแกน Z เปรียบเสมือนการเลี้ยวซ้ายและขวา ซึ่งกำหนดให้เคลื่อนที่ได้ ± 45 องศา เพื่อให้ระบบขับเคลื่อนทำงานได้อย่างอิสระ ดังนั้นจึงออกแบบให้ใช้เฟลาร่วมแกนกันในการส่งผ่านกำลังจากมอเตอร์ด้วยสายพาน (timing belt) ดังรูปที่ 3 ข้อดีในการออกแบบในลักษณะนี้ ทำให้สามารถวิเคราะห์แรงในแนวแกนต่างๆได้ง่าย

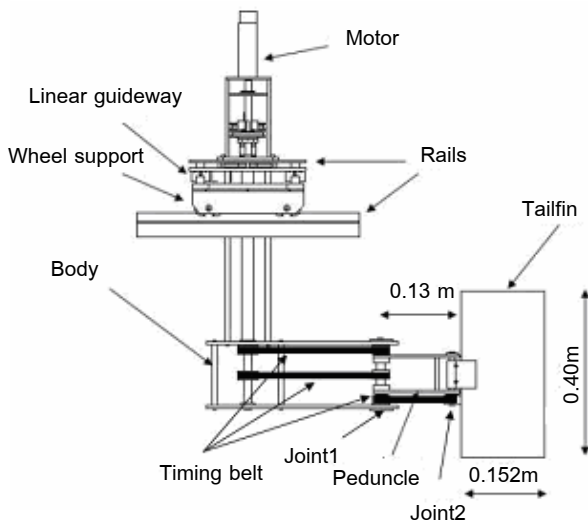


รูปที่ 2 แบบจำลองของปลา

ลักษณะของหุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะดังรูปที่ 3 และ 4 โดยหางมีลักษณะเป็นแผ่นเรียบที่มีความกว้างของ Flapping tail เท่ากับ 12.5 cm มีความยาวเท่ากับ 40 cm ความยาวของแกน peduncle เท่ากับ 12.5 cm การเคลื่อนที่ของ flapping tail และแกน peduncle ถูกขับอย่างอิสระต่อกันด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 2 ตัว ขนาด 80 W 110 mN-m สายพาน (timing belts) และแกนเฟลาร่วมศูนย์กัน 2 คู่ ทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังจากมอเตอร์ไปที่ flapping tail และแกน peduncle

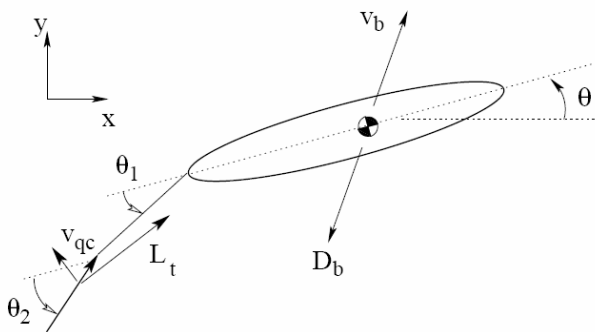


รูปที่ 3 แสดงภาพจากด้านบนของหุ่นยนต์



รูปที่ 4 แสดงภาพจากด้านข้างของหุ่นยนต์

4. การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์



รูปที่ 5 แบบจำลองการเคลื่อนที่[19]

ลักษณะการเคลื่อนแบบ Thunniform แบบ 3 แขน ซึ่งกำหนดให้ หุ่นยนต์เคลื่อนที่บนระนาบ X-Y พิจารณา flapping Tail เป็นลักษณะ ของแผ่นสี่เหลี่ยมเรียบ ซึ่งค่าของแรงยก (lift force) และแรงต้าน (drag force) เป็น Quasi-Steady Wing Theory แบบ 2-D จากรูปที่ 5 ประกอบด้วย แขนที่เป็นส่วนของลำตัว peduncle และ flapping Tail ตามลำดับ แขนทั้ง 3 จะติดกับ แขนหมุนที่ทำมุม θ_1 และ θ_2 เทียบกับ ระนาบของตัวหุ่นยนต์ เรียกว่า heaving และ pitching angle ตามลำดับ ขณะที่ ψ_1 และ ψ_2 คือมุมที่วัด เทียบกับระนาบอ้างอิง l_b เป็นระยะระหว่างจุดศูนย์กลางมวลถึงปลายแกน Peduncle, l_f เป็น ความยาวของแกน Peduncle l_f เป็นความยาวของ flapping Tail และ $\vec{l}_e$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย มีทิศทางดังสมการที่ (1)

$$\vec{l}_e = \begin{pmatrix} \cos \psi_2 \\ \sin \psi_2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่มีความเร็วเมื่อเทียบกับระนาบอ้างอิง (X, Y) มีค่าเท่ากับ $\dot{x}$ และ $\dot{y}$ ตามลำดับ โดยที่ความเร็วที่เกิดขึ้นรอบแกน Z มีค่าเท่ากับ $\dot{\phi}$ เมื่อพิจารณาตามทฤษฎีของ airfoil จะได้ว่าผลของแรง ทางของไหลจะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งระยะ 1/4 ของความยาว airfoil (q_c : quarter chord) ฉะนั้นจะได้ว่า ความเร็วที่ตำแหน่งระยะ 1/4 ของความ ยาวของ hydrofoil (V_{qc}) มีค่าเท่ากับ

$$\vec{V}_{qc} = \begin{bmatrix} \dot{x} + l_p(\dot{\phi} + \dot{\psi}_1) \sin \psi_1 - \frac{l_f}{4}(\dot{\phi} + \dot{\psi}_2) \sin \psi_2 \\ \dot{y} + l_p(\dot{\phi} + \dot{\psi}_1) \cos \psi_1 + \frac{l_f}{4}(\dot{\phi} + \dot{\psi}_2) \cos \psi_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ความเร็วที่เกิดขึ้นในระนาบ X, Y ของแกนแต่ละแกนเมื่อพิจารณา จากสมการ คินเนมาติกส์ (kinematics) จะเห็นว่าความเร็วในแนวแกน X ที่เกิดขึ้นบริเวณ flapping tail (V_{qc}) จะค่ามากที่สุด ประกอบกับขนาด ของพื้นที่ผิว (A) ที่มีค่ามากเมื่อเทียบกับ peduncle ดังสมการที่ (3)

$$Lift = f(A, C_L(\alpha), V) \quad (3)$$

เมื่อ $C_L(\alpha)$ คือ Lift Coefficient

α คือ Attack Angle



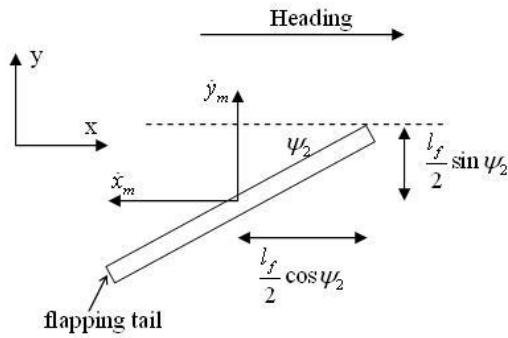
รูปที่ 6 แสดงการเกิด Lift บริเวณหาง ขณะหุ่นยนต์เคลื่อนที่ [19], [20]

ทำให้ผลของแรงยก (lift force) ที่ บริเวณ flapping Tail มีค่าสูงกว่า มาก จึงสามารถละการพิจารณาแรงยก (lift force) ที่เกิดขึ้น ณ บริเวณ peduncle ได้ จากรูปที่ 6 แสดงจังหวะการเคลื่อนที่ของหางขึ้นและลง จะได้ว่าขณะเคลื่อนที่ขึ้นค่าของมุมกระทบบมีค่าเป็นลบ (negative attack angle) ขณะเคลื่อนที่ลงของมุมกระทบบมีค่าเป็นบวก (positive attack angle) และสายลงของหาง จากสมการที่ (3) เมื่อพิจารณาโดยใช้ทฤษฎี Kutta-Joukowski ซึ่งตั้งสมมุติฐานให้ hydrofoil ที่เคลื่อนที่ ผ่านของไหลที่มีการไหลแบบ quasi-steady uniform flow จะมีความเร็วขณะนั้นเกิดขึ้นที่ hydrofoil (V_{qc}) จะได้ว่า แรงยก (lift force) ที่เกิดขึ้นมีค่าดังสมการที่ (4)

$$Lift = \frac{1}{2} \rho A(q, t) C_L(\alpha, t) (\vec{V}_{qc} \times \vec{l}_e) \times \vec{V}_{qc} \quad (4)$$

และค่าโมเมนต์ (τ) ที่เกิด ณ จุดกึ่งกลาง ดังรูปที่ 6 มีค่าเท่ากับ

$$\tau = -\pi \frac{l_f^2}{4} (\dot{x}_m \dot{y}_m \cos(2\psi_2) + \frac{(\dot{y}_m^2 - \dot{x}_m^2)}{2} \sin(2\psi_2)) \quad (5)$$



รูปที่ 7 การคิดโมเมนต์ที่กึ่งกลางบริเวณ flapping tail

เมื่อพิจารณาแรงต้าน (drag force) ที่เกิดขึ้นบริเวณลำตัวจะมีค่ามากกว่าบริเวณหาง ดังนั้นจึงพิจารณาแรงต้าน (drag force) ที่เกิดขึ้นที่ลำตัวเท่านั้น มีค่าดังสมการที่ (6)

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D h \int_{a-l}^a \|V_a \times r - s\dot{\theta}\| (V_a \times r - s\dot{\theta}) ds \quad (6)$$

และค่าโมเมนต์เนื่องจากแรงต้าน (Drag Force) มีค่าเท่ากับ

$$M_D = \frac{1}{2} \rho C_D h \int_{a-l}^a \|V_a \times r - s\dot{\theta}\| (V_a \times r - s\dot{\theta}) s ds \quad (7)$$

เมื่อ C_D คือ Drag Coefficient

V_a คือ Translational Velocity ที่ตำแหน่ง a

r คือ Unit Vector มีทิศทางตามความยาวแผ่น

ซึ่งในทางปฏิบัติการที่จะวัดค่า V_a ทำได้ยากดังนั้นสมการที่(6)

และ (7) จึงถูกพิจารณาดังสมการ

$$D = \frac{1}{2} \rho C_D A \dot{q}_B \|\dot{q}_B\| \quad (8)$$

$$\text{และ} \quad M_D = \frac{1}{2} \rho C_\phi A \dot{\phi}_B \|\dot{\phi}_B\| \quad (9)$$

ดังนั้นจากสมการข้างต้นสามารถเขียนเป็นสมการการเคลื่อนที่ได้ดังนี้

$$\begin{pmatrix} \ddot{\psi}_1 \\ \ddot{\psi}_2 \\ m_x \ddot{x} \\ m_y \ddot{y} \\ I_\phi \ddot{\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ L_{t,x} - D_{b,x} - f_s \left(\frac{\dot{x}_b}{\|\dot{x}_b\|} \right) \\ L_{t,y} - D_{b,y} - f_s \left(\frac{\dot{y}_b}{\|\dot{y}_b\|} \right) \\ \tau + (\dot{x}_m, \dot{y}_m) \times [L_{t,x}, L_{t,y}] - M_{D,b} \end{pmatrix} \quad (10)$$

เมื่อ $\ddot{\psi}_i$ คือ ความเร่งเชิงมุมของแกน

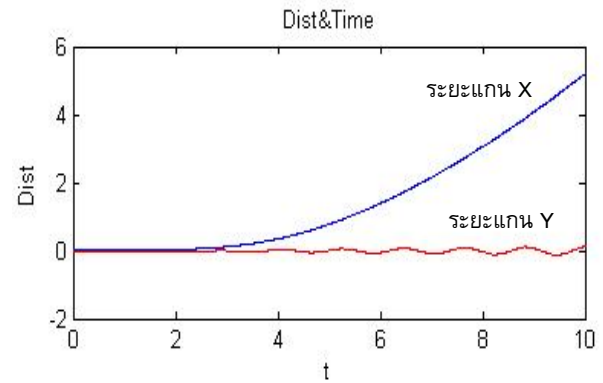
$L_{t,x}, L_{t,y}$ คือ Lift force ที่เกิดขึ้นบริเวณหางในแนวแกน x และ y ตามลำดับ

$D_{b,x}, D_{b,y}$ คือ Drag force ที่เกิดขึ้นบริเวณลำตัวในแนวแกน x และ y ตามลำดับ

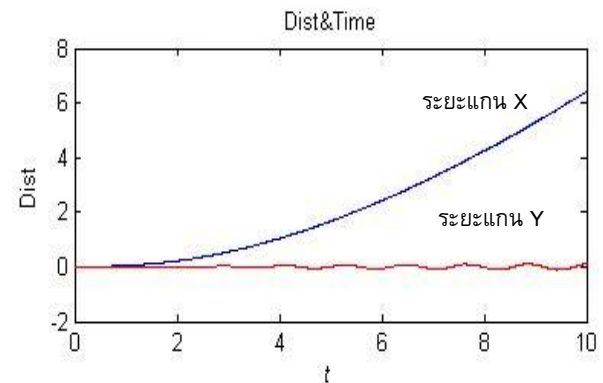
f_s คือ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบนรางเลื่อน

5.ผลการจำลองการเคลื่อนที่

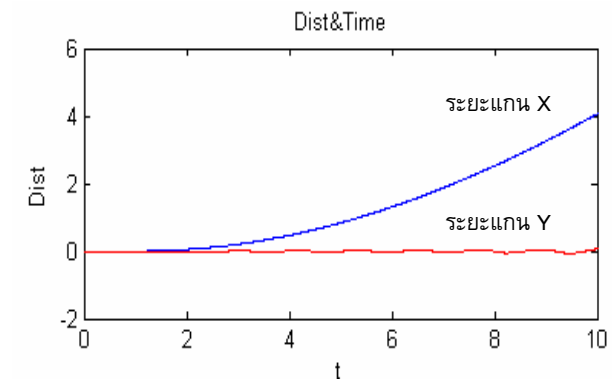
การจำลองการเคลื่อนที่ที่พิจารณาในส่วนของการเคลื่อนที่จากหยุดนิ่งในแนวแกน Longitudinal เพื่อหาค่าคงที่ที่เหมาะสมของการว่ายน้ำ รูปที่ 8 ถึงรูปที่ 11 แสดงถึงระยะทางการเคลื่อนที่ในทิศของแกน X และ Y ที่ได้จากการอินทิเกรตจากสมการที่ (10) จากการทดลองกำหนดให้มีความเร็วเชิงมุมของแต่ละแกนมีค่าเท่ากันคือ 3.5 rad/s



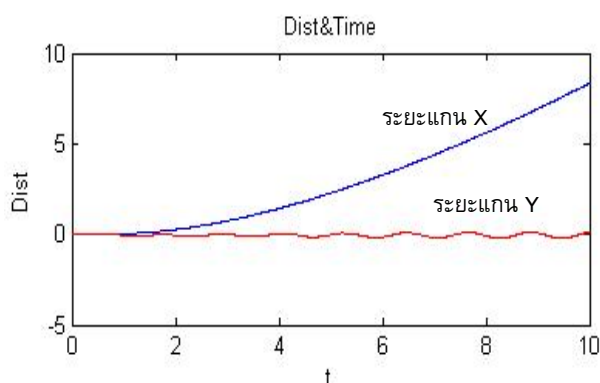
รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ของระยะทางกับเวลา
เมื่อ $\theta_1 = 1.04 \sin(3.5t)$ และ $\theta_2 = 0.523 \sin(3.5t + 0.785)$



รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ของระยะทางกับเวลา
เมื่อ $\theta_1 = 1.22 \sin(3.5t)$ และ $\theta_2 = 0.523 \sin(3.5t + 0.785)$



รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ของระยะทางกับเวลา
เมื่อ $\theta_1 = 1.3 \sin(3.5t)$ และ $\theta_2 = 0.436 \sin(3.5t + 0.785)$



รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ของระยะทางกับเวลา
เมื่อ $\theta_1 = 1.3\sin(3.5t)$ และ $\theta_2 = 0.645\sin(3.5t + 0.785)$

จากรูปที่ 8-9 กำหนดให้ Maximum Pitching angle มีค่าคงที่เท่ากับ 0.523 rad (30 deg) และ Maximum Heaving angle มีค่าเท่ากับ 1.04 rad (60 deg) และ 1.22 rad (70 deg) ตามลำดับ

จากรูปที่ 10-11 กำหนดให้ Maximum Heaving angle มีค่าคงที่เท่ากับ 1.3 rad (75 deg) และ Maximum Pitching angle มีค่าเท่ากับ 0.436 rad (25 deg) และ 0.645 rad (37 deg) ตามลำดับ

6. สรุปและงานวิจัยในอนาคต

ผลที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ของ SM ในหัวข้อที่ 5 เป็นการจำลองการเคลื่อนที่แบบ quasi-steady ผ่านคอมพิวเตอร์ ซึ่งยังไม่มี การเปรียบเทียบผลของการทำงานจริงของ ซึ่งพบว่าการเคลื่อนที่โดย ให้มุมของแกน flapping tail ตามหลังมุมที่เกิดจาก peduncle เท่ากับ ที่ เหมาะสมอยู่ที่มุม 45 องศา

งานวิจัยในอนาคตจะทำการศึกษาค่าของมุมที่มีผลต่อการ เคลื่อนที่ในแนว Lateral และการเคลื่อนที่รอบแกน Z และแก้ไข แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้ครอบคลุมการเคลื่อนที่ที่ถูกต้องมากขึ้น โดยรวมผลของตัวแปรที่ขึ้นกับเวลา (non-steady) และไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear) ของของไหลที่เกิดขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณสถาบัน Southeast Asian Fisheries Development Center (SEAFDEC) ที่ให้ข้อมูลทางด้านขนาดและ ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับปลาทุ่นครีบเหลือง ขอขอบคุณสำนักงบประมาณ ที่สนับสนุนทุนวิจัย ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมชล ศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ ในการทดลอง สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม (FIBO) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ สถานที่ รวมถึงคณาจารย์และนักศึกษาของสถาบันที่ให้คำปรึกษาการแก้ปัญหา ต่างๆอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

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]. Ikuo Yamamoto, Yuuzi Rerada, Tetuo Nagamatsu, and Yoshiteru Imaizumi, "Propulsion System with Flexible/Rigid Oscillation Fin," IEEE Journal of Oceanic engineering, vol.20, no.1, 1995, pp.23-30.
- [5]. 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.
- [6]. D. Weihs. A hydrodynamical analysis of fish turning manoeuvres. Proc.R. Soc .Lond., 1972, B. 182:59-72
- [7]. 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.
- [8]. 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.
- [9]. 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.
- [10]. 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.
- [11]. 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.
- [12]. 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.

- [13]. M.S. Triantafyllou, G.S. Triantafyllou, and D.K.P. Yue, "Hydrodynamics of Fishlike Swimming", Annual Reviews, Fluid Mechanics, 2000, pp. 33-53.
- [14]. J.M. Anderson, K. Streitlien, D.S. Berrett, and M.S. Triantafyllou. Oscillating foil of high propulsive efficiency. J Fluid Mech., 1998, 360, pp. 41-72.
- [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]. P. Li and S. Saimek. Modeling and estimation of Hydrodynamic potentials. In *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 1999.
- [17]. 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.
- [18]. Kristi A. Morgansen, Patricio A. Veta, Joel W. Burdick, "Trajectory stabilization for a planar carangiform robot fish," California Institute of Technology, 2001.
- [19]. R.J. Mason and J.W. Burdick. "Experiments in Carangiform robotic fish locomotion," In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation*, 2000, pp.428-435.
- [20]. Kristi A. Morgansen, Vincent Duindam, Richard J. Mason, Joel W. Burdick, Richard M. Murray "Nonlinear Control Methods for Planar Cangiform Robot Fish Locomotion," In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Seoul, Korea, May 21-26, 2001. pp. 427-434