

แบบจำลองการควบคุมเรือดำน้ำแบบมีสายควบคุม Simulation Controller for an Underwater ROV

พชร จัยพลอย¹ และ สว่างทิพย์ ศรีกิจสุวรรณ²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนนพิบูลสงคราม วงศ์สว่าง บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
E-mail: ¹ taetaeac@gmail.com, ² sawangtits@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเรือดำน้ำแบบมีสายควบคุม (Remotely Operated Vehicle (ROV)) เพื่อแสดงให้เห็นพฤติกรรมการณ์การเคลื่อนที่รวมถึงการควบคุมการเคลื่อนที่ของ ROV ด้วยการควบคุมแบบระบบป้อนกลับ ค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นของ ROV ที่จัดสร้างขึ้น รวมถึงการกำหนดผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม ที่กระทำต่อ ROV เช่น ผลกระทบจากความเร็วของวัตถุที่เคลื่อนที่ในน้ำที่จะก่อให้เกิด การหน่วงผลกระทบที่เกิดจากแรงลอยตัว [1] ผลกระทบของแรงเฉื่อยที่เกิดจากพฤติกรรมของวัสดุ ที่เคลื่อนที่ในน้ำเป็นต้น โดยความคาดหวังถึงการควบคุมการเคลื่อนที่ของเรือดำน้ำแบบมีสายควบคุมให้เป็นไปตามการเคลื่อนที่ที่ออกแบบไว้เพื่อให้ได้ตัวควบคุมที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริง

คำหลัก: การควบคุมแบบป้อนกลับ, การควบคุมไม่เชิงเส้น, เรือดำน้ำแบบมีสายควบคุม

Keywords: Feedback Control, Nonlinear Control, ROV

1. บทนำ

การควบคุมการเคลื่อนที่ของเรือดำน้ำแบบมีสายควบคุม (ROV) มีวิธีการควบคุมที่สามารถปรับเปลี่ยนการเคลื่อนที่ได้จากการควบคุมบนฝั่งหรือบนเรือ [1] ผู้ควบคุมต้องเข้าใจถึงพฤติกรรมและผลกระทบต่าง ๆ ที่มากระทำกับ ROV ผ่านการสังเกตการเปลี่ยนแปลงจากค่าที่ได้จากระบบเซนเซอร์และกล้องภายใน ROV ในการศึกษาการเคลื่อนที่โดยมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ [1] ที่มีค่าพารามิเตอร์ของ ROV ตามรูปที่ 1 ที่ได้จัดสร้างขึ้น ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของ ROV จะมีการผลกระทบจากสิ่งแวดล้อม เช่น ผลกระทบจากอุทกพลศาสตร์ ผลกระทบจากแรงลอยตัว $g(\eta)$ ผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงความเฉื่อย M_A, C_A และความหนืดและแรงต้านของน้ำ $D_{Damping}, D_{Lif}$ เป็นต้น ซึ่งทำให้ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้น [3] ส่งผลกระทบต่อการเคลื่อนที่ของ ROV ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่จึงอาศัยจากการสังเกตจากเซนเซอร์ที่ใช้ในการตรวจวัดสถานะต่าง ๆ บน ROV

อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจสอบการเคลื่อนที่ของ ROV โดยทั่วไปทำการติดตั้งตัววัดความเร่งแบบ 6 องศาอิสระ

และกล้องวิดีโอ พบว่าในการติดตั้งตัววัดความเร่งทำได้ยากถ้าให้ติดตั้งที่จุดศูนย์กลางมวลเพื่อแสดงความจริงในการเคลื่อนที่ของ ROV [6] อีกทั้งในส่วนการควบคุม ROV ในการควบคุมนั้น ROV จะถูกควบคุมผ่านแรงและโมเมนต์ตลอดเวลาตามผลกระทบจากภายนอกที่ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ทุกแนวการเคลื่อนที่ หากในการออกแบบ ROV ไม่ได้ออกแบบให้มีเสถียรภาพก็เป็นการยากในการควบคุมให้ ROV เคลื่อนที่ตามที่ต้องการ

ผู้วิจัยจึงได้นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาจำลองการเคลื่อนที่รวมทั้งใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับ เพื่อช่วยในการควบคุมการเคลื่อนที่ของเรือดำน้ำแบบมีสายควบคุมให้มีเสถียรภาพและเคลื่อนที่ได้เป็นไปตามคำสั่งควบคุม

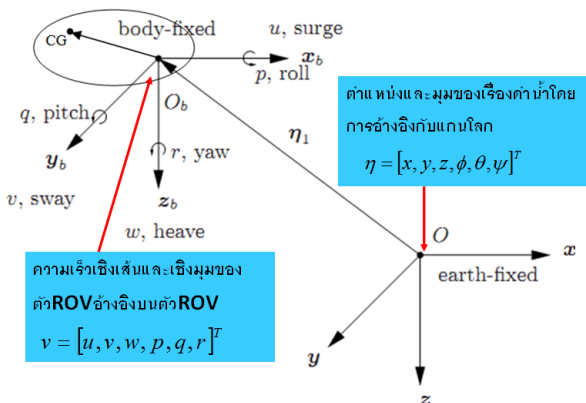
2. แบบจำลองการเคลื่อนที่ของ ROV

ในการเคลื่อนที่ของ ROV ในการศึกษาถูกจัดอยู่ในรูปแบบสมการ องศาอิสระอันดับที่ 6 (6 degrees of freedom) มีสัญลักษณ์ตามตารางที่ 1 อีกทั้งการพิจารณาการเคลื่อนที่ของ ROV ถูกอ้างอิงจากสองระบบคือ ระบบแกนโลก (Earth-fixed) และระบบบนตัวเรือ

ROV เอง (Body-fixed) ซึ่งในระบบนี้ ที่ถือว่าจุดกำเนิด (Origin) เป็นจุดสังเกตซึ่งอาจไม่อยู่จุดเดียวกับจุดศูนย์กลางมวลก็ได้ (CG) ตามรูปที่ 1 ทั้งสองระบบนี้สามารถเปลี่ยนจากระบบหนึ่งไปอีกระบบหนึ่งได้ (Coordinate Transformation)

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์ของพารามิเตอร์

DOF	Surge	Sway	Heave	Roll	Pitch	Yaw
Linear and Angular Velocity	u	v	w	p	q	r
Position and Attitude	x	y	z	ϕ	θ	ψ
Force and Moment	X	Y	Z	K	M	N



รูปที่ 1 ระบบอ้างอิงระหว่างแกนโลกกับตัวเรือ

2.1 การเปลี่ยนแปลงระบบอ้างอิง

ในการควบคุม ROV แบบมีสายควบคุมสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ผ่านระบบแกนอ้างอิงบนตัว ROV คือ การให้แรงและโมเมนต์ที่ตัว ROV แต่ในการควบคุมที่ต้องการทราบตำแหน่งของการเคลื่อนที่ ซึ่งตำแหน่งนี้ถูกอ้างอิงบนพื้นโลกหรือแกนโลก (Earth-fixed) เห็นได้ว่าการควบคุมและการห้วงผลจากการควบคุมถูกอ้างอิงบนระบบอ้างอิงที่ต่างกัน จึงจำเป็นต้องมีการเปลี่ยนระบบอ้างอิงตลอดเวลาเพื่อให้ได้การควบคุมที่ถูกต้อง และสามารถออกแบบกฎการควบคุมได้อย่างถูกต้อง โดยมีสมการที่ (1) และ (2) [1] ต่อไปนี้เป็นสมการสำหรับเปลี่ยนแปลงระบบอ้างอิงจากระบบหนึ่งไประบบหนึ่ง

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (1)$$

$$J(\eta) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\theta + c\psi s\theta\phi & s\psi s\theta\phi + c\psi s\theta\phi & 0 & 0 & 0 \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta + s\psi s\theta\phi & -c\psi s\theta\phi + s\psi s\theta\phi & 0 & 0 & 0 \\ -s\theta & c\theta\phi & c\theta\phi & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & s\phi\theta & c\phi\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

โดย $s = \sin(\cdot)$, $c = \cos(\cdot)$ และ $J(\eta)$ คือ ทรานฟอร์มเมชันเมตริก (Transformation matrix) เป็นฟังก์ชันของมุมที่วัดจาก ROV (Body-fixed)

2.2 การเคลื่อนที่แบบวัตถุแข็งเกร็ง

การเคลื่อนที่ของ ROV ถ้าไม่มีผลกระทบจาก ปัจจัยอื่น การเคลื่อน ที่มีพฤติกรรมเหมือนวัตถุ แข็งเกร็งทั่วไป (Rigid-Body Equations of Motion) องค์ประกอบแรกคือมวลและโมเมนต์ความเฉื่อย M_{RB} ของ ROV ซึ่งขึ้นอยู่กับมวลและรูปร่างลักษณะของ ROV โดยตรง องค์ประกอบต่อมาคือ Coriolis และแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง (Centripetal) C_{RB} ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่เกิ ดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของวัตถุที่มีการอ้าง กับแกนอ้างอิง แกนโลก และวัตถุที่เคลื่อนที่แนววงกลมทำให้เกิดองค์ประกอบทั้ง สองนี้ สามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่ได้ [1]

$$M_{RB} \dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau_{RB} \quad (3)$$

2.3 ผลกระทบจากอุทกพลศาสตร์

ผลกระทบจากอุทกพลศาสตร์ที่มีต่อการเคลื่อนที่ในของเหลวทำให้ ROV มีพฤติกรรมเคลื่อนที่ต่างจากการเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็งในอากาศ ผลกระทบนี้เพิ่มเข้าไปในพฤติกรรมเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็งทำให้การเคลื่อนที่ไม่เป็นไปตามคำสั่งควบคุม ผลกระทบจากอุทกพลศาสตร์ดังกล่าวมีดังนี้

ผลกระทบแรกอยู่ในส่วนเพิ่มของมวลหรือความเฉื่อยของวัตถุ M_A [1] เมื่อ ROV อยู่ในของเหลววัตถุนั้นเสมือนมีมวลที่มากขึ้นหรือมีความเฉื่อยมากขึ้น ในทำนองเดียวกันเมื่อวัตถุมีการเคลื่อนที่ในน้ำทำให้เหมือนมวลหรือความเฉื่อยของวัตถุเพิ่มขึ้นยอมส่งผลให้แรง Coriolis และแรงเข้าสู่ศูนย์กลาง (Centripetal) C_A มีมากขึ้นตามไปด้วย

ผลกระทบต่อมาจะประกอบไปด้วย Damping และ Lift $D_{dampinglift}$ ซึ่งทั้งสองจะเกิดจากความหนืดของน้ำทำให้เกิดความเสียดทานที่ผิวของวัตถุจะสร้างแรงผลักดันที่วัตถุเมื่อวัตถุเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วในของเหลวและจากความหนืดของน้ำที่ไหลผ่านวัตถุทำให้เกิดแรงผลักดันที่วัตถุนั้นเช่นการไหลของอากาศในปีกเครื่องบินที่ทำให้เกิดแรงยกแรงนั้นคือ Lift แต่ใน ROV นั้น Lift อาจส่งผลต่อ ROV ได้ทุกทิศทาง

ผลกระทบสุดท้ายคือ แรงลอยตัวและแรงโน้มถ่วง $g(\eta)$ [1] ผลกระทบนี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของของเหลว ลักษณะของวัตถุ ผลกระทบในส่วนนี้มีผลโดยตรงต่อการเคลื่อนที่หรือแม้กระทั่ง ROV อยู่หนึ่งกับที่ก็ตาม ผลกระทบนี้ไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วหรือการเคลื่อนที่ของ ROV จากผลกระทบที่กล่าวมาทั้งหมดรวมกับสมการการเคลื่อนที่ของ ROV เขียนอยู่ในสมการเคลื่อนที่ได้ดังนี้ [1]

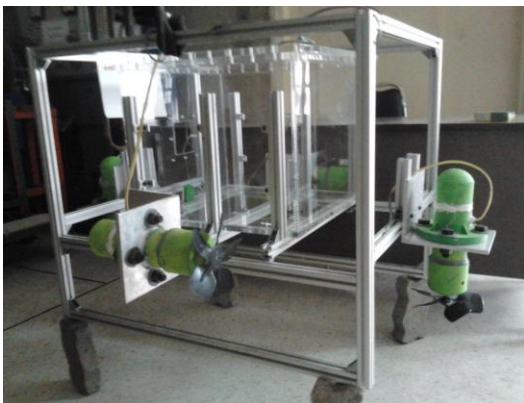
$$[M_{RB} + M_A] \dot{v} + [C_{RB} + C_A] v + [D_{Damping} + D_{Lif}] v + g(\eta) = \tau \quad (4)$$

$$M \dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau \quad (5)$$

จากสมการเคลื่อนที่ดังกล่าวนำไปจำลองการเคลื่อนที่และออกแบบชุดควบคุมใน MATLAB โดยการใส่ตามพารามิเตอร์ในส่วนต่อท้าย

3. ขนาดและภารกิจของ ROV

ขนาดของ ROV ที่ได้ทำการออกแบบ 50 x 80 x 70 เซนติเมตร น้ำหนัก 80 กิโลกรัม ตามรูปที่ 2 ออกแบบเพื่อใช้ในการศึกษาการเคลื่อนที่ของ ROV การศึกษาการออกแบบชุดควบคุมการเคลื่อนที่ และการเชื่อมโยงสัญญาณจากเซนเซอร์ภายใน ROV โดยในการทดสอบจะเน้นภารกิจที่ออกแบบคือ สำรวจ และถ่ายภาพใต้น้ำที่ระดับความลึก 20 เมตร



รูปที่ 2 ROV ที่ออกแบบและจัดสร้าง

4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการควบคุม

ในการออกแบบชุดควบคุมการเคลื่อนที่ของ ROV ใช้ชุดควบคุมแบบ PID เพื่อศึกษาการควบคุมการเคลื่อนที่

การออกแบบการเคลื่อนที่ และการรักษาเสถียรภาพของ ROV

ในการออกแบบกฎการควบคุมแบบป้อนกลับในบทความนี้ การควบคุมการเคลื่อนที่ได้ออกแบบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ ROV $\eta = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T$ การเคลื่อนให้เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ โดยค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่กับคำสั่ง (Tracking error) การควบคุมแสดงอยู่ในรูปของสมการที่ (6) [3] คือค่าที่ได้จากการวัดตำแหน่งเปรียบเทียบกับแกนโลก (Earth-fixed) จาก ROV ลบด้วยค่าจากตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่ถูกออกแบบไว้

$$\tilde{\eta} = \eta - \eta_d \quad (6)$$

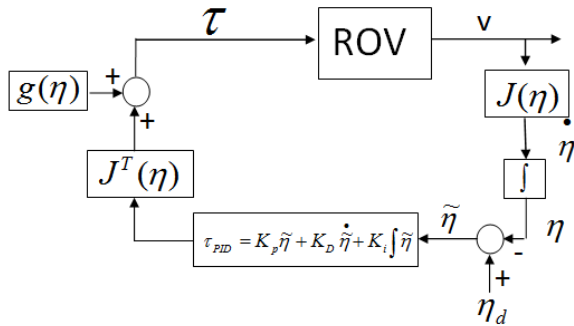
จากสมการที่ (1),(4),(5),(6) สามารถออกแบบกฎการควบคุมแบบ PID ได้ดังสมการที่ (7) [1] เพื่อไปใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของ ROV

$$\tau_{PID} = K_p \tilde{\eta} + K_d \dot{\tilde{\eta}} + K_i \int \tilde{\eta} \quad (7)$$

$K_p, K_d, K_i \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ เมทริกซ์ค่าคงที่บวกแน่นอนสำหรับปรับขนาดการควบคุม

เนื่องด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของ ROV มีความไม่เป็นเชิงเส้น การควบคุมจึงต้องมีการปรับและชดเชยการควบคุมในกฎการควบคุมแบบ PID คือการเพิ่มผลกระทบจากแรงลอยตัวและแรงโน้มถ่วง $g(\eta)$ [1] เข้ามาในกฎการควบคุม รวมถึงการทำทรานฟอร์มเมชัน $J^T(\eta)$ (Transformation) กฎการควบคุมแบบ PID เพื่อใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของ ROV หรือกล่าวได้ว่าเพื่อใช้ควบคุมบนสมการที่ (5) การควบคุมแบบป้อนกลับในบทความนี้สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (8) [1] และโครงสร้างการควบคุมตามรูปที่ 3

$$\tau = J^T \tau_{PID} + g(\eta) \quad (8)$$



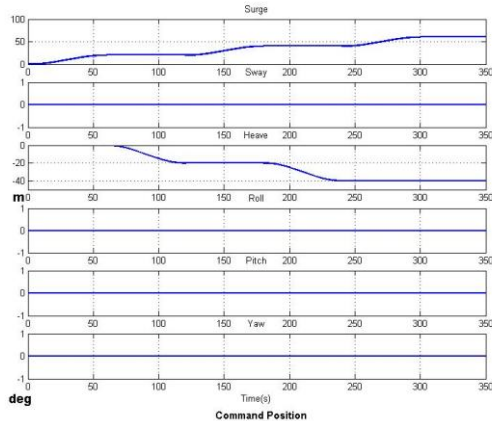
รูปที่ 3 โครงสร้างการควบคุมแบบป้อนกลับในการควบคุม ROV

5. การจำลองการเคลื่อนที่ของ ROV

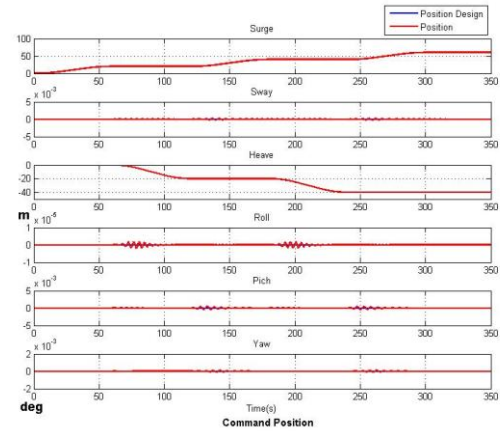
การจำลองการควบคุมบนโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ (Simulation Control) ให้ ROV มีการสร้างแรงและโมเมนต์ได้ทุกทิศทาง การออกแบบตำแหน่งของการเคลื่อนที่ให้ ROV เคลื่อนที่เป็นไปตามตำแหน่งที่ถูกออกแบบไว้โดยแสดงตามตัวแปร $(x, y, z, \phi, \theta, \psi)$ เพื่อบอกตำแหน่งและมุมเทียบกับแกนอ้างอิงแกนโลก (Earth-fixed) จำลองการเคลื่อนที่ที่กำหนดพิกัดและมุมดังต่อไปนี้

$\{ (0,0,0,0,0,0), (20,0,0,0,0,0), (20,0,-20,0,0,0), (40,0,-20,0,0,0), (40,0,-40,0,0,0), (60,0,-40,0,0,0) \}$

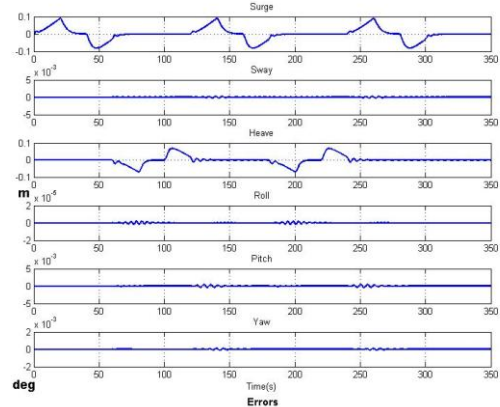
ความเร็วสูงสุด 0.2 m/s แรงและโมเมนต์ที่ ROV สร้างได้สูงสุด 500 นิวตัน, นิวตันเมตร ได้ผลการจำลองเป็นไปดังรูปที่ 4, 5, 6 และ 7 การเคลื่อนที่ของ ROV ทั้งหมด 100 เมตร เคลื่อนที่ไปด้านหน้า (Surge) 20 เมตร สามช่วง และต่ำลง (Heave) 20 เมตร สองช่วง



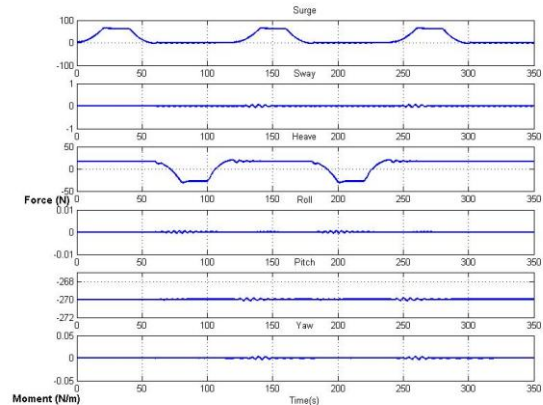
รูปที่ 4 กราฟตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่ออกแบบไว้



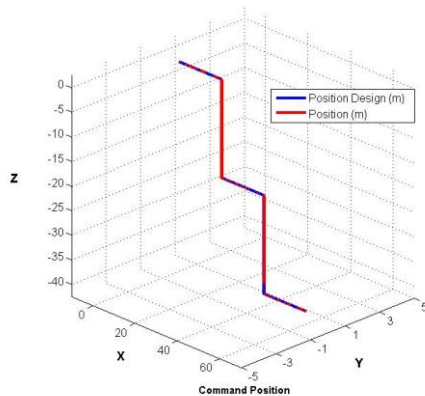
รูปที่ 5 การเคลื่อนที่ของ ROV เทียบกับตำแหน่งการเคลื่อนที่อ้างอิง



รูปที่ 6 ค่าความผิดพลาด (Tracking error)

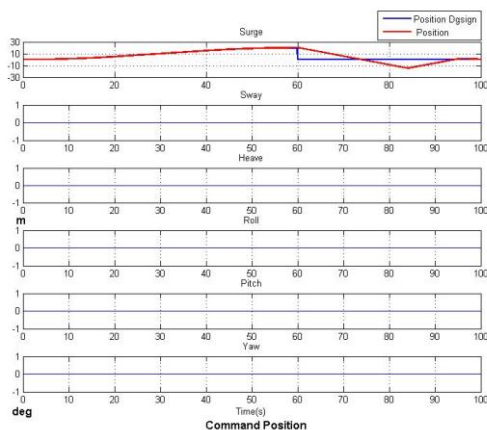


รูปที่ 7 แรงและโมเมนต์

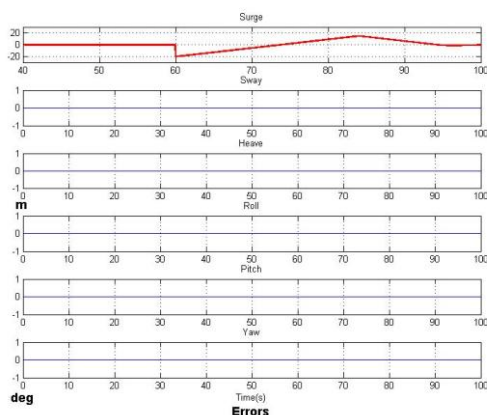


รูปที่ 8 การเคลื่อนที่ของ ROV เทียบกับตำแหน่งการเคลื่อนที่อ้างอิง (3D)

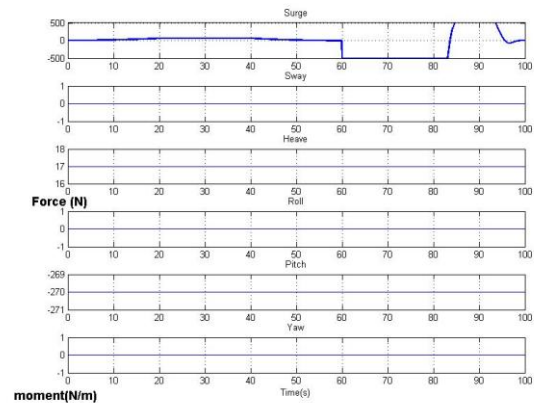
การจำลองการควบคุมต่อมาทดสอบ ให้ ROV เคลื่อนที่แบบกลับทิศทางการเคลื่อนที่กระแทกหันโดยเคลื่อนที่ไปด้านหน้า (Surge) 20 เมตรแล้วเคลื่อนที่กลับด้านหลัง (Surge) 20 เมตรแบบกระแทกหันหันได้ผลการจำลองเป็นไปตามรูปที่ 9, 10 และ 11



รูปที่ 9 การเคลื่อนที่ของ ROV เทียบกับตำแหน่งการเคลื่อนที่อ้างอิง



รูปที่ 10 ค่าความผิดพลาด (Tracking error)



รูปที่ 7 แรงและโมเมนต์

ผลของการจำลองการควบคุมนี้ (Simulation Control) การเคลื่อนที่ ROV ตามรูปที่ 5 และรูปที่ 8 สำหรับตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่ไม่สามารถวัดจาก ROV ได้โดยตรงเพราะตำแหน่งถูกวัดจากการอ้างอิงแกนโลกกระทำได้แต่เพียงการประมาณค่าตำแหน่ง ซึ่งแสดงไว้ในสมการที่ (1) ได้ผลการทดลองออกมาตามรูปที่ 5 และรูปที่ 8 โดย ROV สามารถเคลื่อนที่ตามตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่ออกแบบไว้ตามรูปที่ 4 ทั้งหมด 100 เมตรเคลื่อนที่ไปด้านหน้า (Surge) 20 เมตร สามช่วง และด้านล่าง (Heave) 20 เมตร สองช่วง จากการจำลองมีความผิดพลาดเพียงเล็กน้อย

ในส่วนของค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ (Tracking error) ตามรูปที่ 6 เกิดขึ้นได้ตามแนว Surge และ Heave ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงของการเคลื่อนที่ตามการเคลื่อนที่ที่ออกแบบไว้

ส่วนต่อมาตามรูปที่ 7 คือแรงและโมเมนต์ เห็นได้ว่าแรงและโมเมนต์จะเกิดทุกแนวแกนทั้งที่การเคลื่อนที่ออกแบบให้เคลื่อนที่เฉพาะแนวแกน Surge และ Heave เท่านั้น โดยเฉพาะโมเมนต์ที่เกิดในแนว Pitch เพื่อให้ ROV เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ต้องการต้องการแสดงให้ว่าการเคลื่อนที่ของ ROV นอกจากแรงและโมเมนต์ที่ใช้ในการเคลื่อนที่แล้วยังต้องมีแรงและโมเมนต์เพื่อรักษาเสถียรภาพหรือทิศทางของ ROV ด้วย

ส่วนต่อมาตามรูปที่ 9 และ 10 เห็นได้ว่า ROV เกิดความผิดพลาดมากในการเคลื่อนที่ในช่วงที่เกิดการเคลื่อนที่แบบกลับทิศทางการเคลื่อนที่และเมื่อไปดูที่กราฟแรงและโมเมนต์ รูปที่ 11 เห็นได้ว่าต้องใช้แรงมากที่สุดที่ ROV ทำได้เพื่อให้ ROV เคลื่อนที่ตามที่ต้องการ

6. สรุป

จากการจำลองการควบคุมได้ผลการทดลองที่แสดงให้เห็นว่าการควบคุมด้วยวิธีแบบป้อนกลับได้ผลการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 8 มีความคลาดเคลื่อนตามคำสั่งตำแหน่งการเคลื่อนที่เล็กน้อยแต่ต้องใช้แรงโมเมนต์มากโดยเฉพาะมุมของตัวเรือดำน้ำที่บ่งบอกถึงความไม่มีเสถียรภาพเล็กน้อยในการควบคุมด้วยความถี่สมการการเคลื่อนที่ของ ROV มีความไม่เป็นเชิงเส้น จึงทำให้การควบคุมด้วยวิธีแบบป้อนกลับเกิดความไม่มีเสถียรภาพในการควบคุมเล็กน้อยซึ่งอาจไม่เหมาะกับการเคลื่อนที่ที่มีความซับซ้อน เช่นการเคลื่อนที่แบบกลับทิศทางแบบกะทันหัน , การเคลื่อนที่เป็นเกลียวกลม เป็นต้น

เพื่อลดความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ในการทำภารกิจควรมีการกำหนดการเคลื่อนที่ให้มีความซับซ้อนมากขึ้นหรือไม่ควรให้ ROV มีการเคลื่อนที่แบบกลับทิศทางแบบกะทันหันเพราะจะทำให้ต้องใช้พลังงานมากในการเคลื่อนที่และรักษาเสถียรภาพ ในการออกแบบของ ROV มีส่วนสำคัญเพราะจากการจำลองการควบคุมบนโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ (Simulation Control) ROV ที่ออกแบบไว้ไม่มีเสถียรภาพในแนว Pitch จากการที่ต้องใช้โมเมนต์รักษาเสถียรตลอดการเคลื่อนที่ จากผลการจำลองยอมทำให้การควบคุมเป็นไปได้ยาก รวมถึงต้องใช้พลังงานมากในการรักษาเสถียรภาพของ ROV ในแนวดังกล่าวซึ่งในทางปฏิบัติอาจต้องมีการปรับแก้โครงสร้างของ ROV หรือการถ่วงสมดุลของ ROV [9] ในส่วนของชุดควบคุมของ ROV เพื่อลดความยุ่งยากในการควบคุมรวมทั้งทำให้การปฏิบัติภารกิจเป็นไปได้สะดวก จึงจำเป็นต้องออกแบบชุดควบคุมให้สามารถรักษาเสถียรภาพก่อนการสั่งงานให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ต้องการ ชุดควบคุมที่ออกแบบไว้ยังมีข้อดีและข้อเสียตามที่สรุปเบื้องต้น ดังนั้นผลที่ได้จึงเป็นแนวทางในการออกแบบปรับปรุง ROV ให้มีเสถียรภาพมากขึ้น รวมทั้งจากสมการการเคลื่อนที่และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทำให้ผู้วิจัยสามารถพัฒนาชุดควบคุมที่มีประสิทธิภาพได้ต่อไปในอนาคต

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Yuh. Underwater Robotic Vehicles. Albuquerque. New Mexico USA, 1995.
- [2] Z. Ke-qiang, Z. Hai-yang, Z. Yu-song and G. Jie. A Multi-Body Space-Coupled Motion Simulation

for A Deep-Sea Tethered Remotely Operated Vehicle. Journal for Hydrodynamics, Vol. 20, No.2, 2008, page 210-215.

- [3] Thor I. Fossen, Svein and I. Sagatun. Adaptive Control of Nonlinear Underwater Robotic Systems. IEEE Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, April 1991.
- [4] G. Antonelli, F. Caccavale, and S. Chiaverini. Adaptive Tracking Control of Underwater Vehicle-Manipulator Systems Based on the Virtual Decomposition Approach. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 20, No. 3, June 2004.
- [5] B. Siciliano, O. Khatib, and F. Groen. Underwater Robots Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems. Springer Tracts in Advanced Robotics Volume 2
- [6] D. Christ and L. Wernli SR. The ROV Manual. UK, first edition, 2007.
- [7] N. Q. Hoang and E. Kreuzer. Adaptive PD-Controller for Positioning of a Remotely Operated Vehicle. Hamburg University of Technology, Germany.
- [8] Bruno S. Oussama K. Frans G. Underwater Robots Motion and Force Control of Vehicle-Manipulator Systems. Springer Tracts in Advanced Robotics Volume 2.
- [9] Robert D. Christ and Robert L. Wernli Sr. The ROV Manual: A Guide for Observation-Class Remotely Operated Vehicles. Oxford, UK

ส่วนต่อท้าย

พารามิเตอร์ของ ROV ที่ได้ออกแบบเพื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยการประมาณ [8]

$$M_A = \begin{bmatrix} 99.0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 108.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 126.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 32.9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 29.1 \end{bmatrix}$$

$$K_d = \begin{bmatrix} 60 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 60 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 60 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 17 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 17 \end{bmatrix}$$

$$C(v) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 26w & -28v \\ 0 & 0 & 0 & -26w & 0 & 18u \\ 0 & 0 & 0 & 2v & 18u & 0 \\ 0 & 26w & -28v & 0 & 5r & -6q \\ -26w & 0 & 18u & -5r & 0 & p \\ 2v & -18 & 0 & 6q & -p & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.6 \end{bmatrix}$$

$$D_d(v) = \begin{bmatrix} 227.2|u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 105.1|v| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 178|w| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.2|p| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 14|q| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12.9|r| \end{bmatrix}$$

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} -17s\theta \\ 17c\theta s\phi \\ 17c\theta c\phi \\ -279c\theta c\phi \\ -279(s\theta + c\theta c\phi) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$K_p = \begin{bmatrix} 250 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 270 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 200 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 20 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 40 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 \end{bmatrix}$$

$$K_i = \begin{bmatrix} 50 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 40 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 50 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$