

การควบคุมความลึกและมุมหันเหของยานใต้น้ำ "BENBAM-G2" ด้วยตัวควบคุมป้อนกลับเอาต์พุต Depth and Yaw-Angle Controls for "BENBAM-G2" Underwater Vehicle using Output Feedback Controller

<u>ณรงค์ศักดิ์ ขุนซิต</u>¹* และ ปรัชญาเปรมปราณีรัชต์²

¹ สถาบันไทย-เยอรมัน 700/1 ม.1 ถนนบางนา-ตราด ตำบลคลองตำหรุ อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20000 ² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก คลองหก ธัญบุรี ปทุมธานี 12110 *ติดต่อ: E-mail narongsak.khun@gmail.com, โทรศัพท์ 086 696 7692

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยการออกแบบยานใต้น้ำอัตโนมัติ โดยนำเสนอวิธีการควบคุมเพื่อรักษาความ ลึกและมุมหันเหของยานใต้น้ำ BENBAM-G2 ด้วยตัวควบคุมป้อนกลับเอาต์พุต โดยตัวควบคุมมีหลักการคือ นำค่าเอาต์พุต ตำแหน่งความลึกของยานที่สามารถหาค่าได้จากเซนเซอร์วัดความดันและมุมหันเหที่วัดได้จากเซนเซอร์วัดมุม มาประมาณ ค่าตัวแปรสถานะที่เซนเซอร์ของยานไม่สามารถวัดค่าได้ ซึ่งก็คือความเร็วในแนวดิ่งและความเร็วเชิงมุมรอบแกนแนวดิ่ง จากนั้นนำค่าเวกเตอร์สถานะคูณกับค่าขยายแล้วรวมเข้ากับสัญญาณอ้างอิงซึ่งก็คือค่าความลึกและมุมหันเหที่ต้องการ เพื่อ กำเนิดเป็นสัญญาณสร้างแรงผลักให้กับยานใต้น้ำ เพื่อควบคุมและรักษาระดับความลึกกับมุมหันเหของยานให้ได้ตาม ต้องการ และจากการจำลองผลการควบคุมเทียบกับการควบคุมด้วยตัวควบคุม PID ตัวควบคุมแบบป้อนกลับสัญาณอินพุต ให้ผลเป็นที่น่าพอใจกว่า

้*คำหลัก:* การควบคุมความลึก, การควบคุมมุมหันเห, ตัวควบคุมป้อนกลับเอาต์พุต, ยานใต้น้ำ

Abstract

This article is a part of control design research for an underwater vehicle. The output feedback controller is formulated in this study to maintain a constant depth as well as heading angle of "BENBAM-G2" underwater vehicle. The principle of this controller is to feedback a depth position measured from a pressure sensor and a yaw angle measured from a magnetometer into an observer to estimate all state variables. The unmeasured states are vehicle vertical velocity, rotational velocity around z-axis for depth and heading controls. Then, estimated states are multiplied with feedback gain and combined with reference depth and heading signals to generate control inputs for vehicle thrusters so that the desired depth and heading angle can be maintained. From dynamics simulations, the output feedback controller yield better performance than the PID controller for both depth and heading control of this underwater vehicle.

Keywords: Depth Control, Heading Control, Output Feedback Controller, Underwater Vehicle

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการนำยานใต้น้ำ (underwater vehicle) มาประยุกต์ใช้กับงานต่างๆอย่างกว้างขวาง เช่นการ สำรวจใต้น้ำ ถ่ายภาพใต้น้ำ เก็บตัวอย่างน้ำ สำรวจความ เสียหายของระบบใต้น้ำเช่นระบบท่อ ปฏิบัติการกู้ภัยใต้ น้ำ เป็นต้น และปัจจุบันก็มีผู้ที่สนใจและทำการศึกษาด้าน ยานใต้น้ำกันอย่างกว้างขวางทั้งในและต่างประเทศ เช่น ธีรยุทธ ชาติชนะยืนยง [1] ทำการศึกษาออกแบบตัวควบ ควบคุมแบบสไลดิ้งโมดเพื่อควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ ของหุ่นยนต์ใต้น้ำ อนุพนธ์ พิมพ์ช่วย และคณะ [7]



นำเสนอการออกแบบและสร้างต้นแบบยานสำรวจใต้น้ำ แบบอัตโนมัติ ธีรภัทร หลิ่มบุญเรื่องและคณะ [8] นำเสนอการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์ต้นแบบสำหรับ การสำรวจใต้น้ำ Wei Wang [6] ได้ทำการวิจัยเพื่อพัฒนา ระบบควบคุมอัตโนมัติของ ROV เพื่อเคลื่อนที่ตาม เส้นทางที่กำหนดโดยใช้การควบคุมแบบ sliding mode ควบคุมความลึกของยาน

การเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำจะไม่เป็นเชิงเส้นสูง ระบบ ควบคุมสมัยใหม่จึงเหมาะที่จะนำมาใช้ควบคุมการ เคลื่อนที่ของยานใต้น้ำ ซึ่งระบบควบคุมสมัยใหม่ ้จำเป็นต้องทราบค่าของตัวแปรสถานะเพื่อใช้ร่วมกับกฎ การควบคม โดยอาจวัดค่าด้วยเซนเซอร์ หรืออีกวิธีคือใช้ ้ตัวสังเกตสถานะเพื่อประมาณค่าของตัวแปรสถานะที่ไม่ สามารถวัดค่าได้ ซึ่งในนี้จะนำเสนอวิธีการควบคุมเพื่อ รักษาความลึกและมุมหันเหของยานใต้น้ำ BENBAM-G2 ด้วยตัวควบคุมป้อนกลับเอาต์พุต โดยตัวควบคุมมี หลักการคือ นำค่าเอาต์พุตของตำแหน่งความลึกและมุม หันเหของยานที่สามารถหาค่าได้จากเซนเซอร์วัดความดัน และเซนเซอร์วัดมม มาประมาณค่าตัวแปรสถานะที่ เซนเซอร์ของยานไม่สามารถวัดค่าได้ซึ่งก็คือความเร็วใน แนวดิ่งและความเร็วเชิงมุมรอบแกนแนวดิ่งของยาน จากนั้นนำค่าเวกเตอร์สถานะคูณกับค่าขยายแล้วรวมเข้า กับสัญญาณอ้างอิงซึ่งก็คือค่าความลึกและมุมหันเหที่ ต้องการ เพื่อกำเนิดเป็นสัญญาณสร้างแรงผลักให้กับยาน ใต้น้ำ เพื่อควบคุมและรักษาระดับความลึกและมุมหันเห ของยานให้ได้ตามต้องการ รูปที่ 1 เป็นรูปของยานใต้น้ำ BENBAM-G2 ที่ทำการควบคุม



รูปที่ 1 ยานใต้น้ำ "BENBAM-G2"

1.1 .สัญลักษณ์และความหมาย

สัญลักษณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องมีดังนี้ [1-2]

- *{B}* : กรอบอ้างอิงบนตัวยาน
- *{E}* : กรอบอ้างอิงบนพื้นโลก
- X^o, Y^o, Z^o : แกน x, y, z ของกรอบอ้างอิงบนตัวยาน

X,Y,Z : แกน x, y, z ของกรอบอ้างอิงบนพื้นโลก

x, y, z : ตำแหน่งเทียบกับแกน x, y, z

u,v,w : ความเร็วเชิงเส้นตามแนวแกน x, y, z

p,q,r : ความเร็วเชิงเส้นมุมรอบแกน x, y, z

 $\phi, heta, \psi$: Yaw, pitch, roll angle

m : มวลของยาน

W, *B* : น้ำหนักยานและแรงลอยตัว

v : เวกเตอร์สถานะ

η : เวกเตอร์ตำแหน่งและทิศทาง

M : เมทริกซ์ความเฉื่อย (inertia matrix) รวมกับ Added mass

 $\mathbf{C}(\mathbf{v})$: เมทริกซ์ Coriolis และ Centripetal

D(v) : เมทริกซ์ความหน่วงและแรงยก ทาง-Hydrodynamic

 $g(\eta)$: เวกเตอร์แรงโน้มถ่วง แรงลอยตัวและโมเมนต์ au : เวกเตอร์ของแรงและแรงบิดอินพุต

 I_x, I_y, I_z : โมเมนต์ความเฉื่อยของมวลรอบแกน x, y และ z

 $X_{\dot{u}}, Y_{\dot{\upsilon}}, Z_{\dot{w}}$: Added mass ตามแนวแกน x, y และ z

 $K_{\dot{p}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{r}}$: Added mass รอบแกน x, y และ z

 X_u, Y_v, Z_w : สัมประสิทธิ์ความหน่วงเชิงเส้น ตามแนว แกน x, y และ z

 K_p, M_q, N_r : สัมประสิทธิ์ความหน่วงเชิงเส้นรอบแกน x, y และ z

 $X_{u|u|}, Y_{v|v|}, Z_{w|w|}$: สัมประสิทธิ์ความหน่วงกำลังสอง ตามแนวแกน x, y และ z

 $K_{p|p|}, M_{q|q|}, N_{r|r|}$: สัมประสิทธิ์ความหน่วงกำลังสอง รอบแกน x, y และ z

2. แบบจำลองพลวัต

2.1 กรอบอ้างอิง

กรอบอ้างอิง (reference frame) สำหรับบ่งบอก ตำแหน่งและทิศทางของยานใต้น้ำมีสองส่วนคือ กรอบ อ้างอิงที่เทียบกับตำแหน่งของตัวยานหรือเรียกว่า Bodyfixed frame และกรอบอ้างอิงเทียบกับตำแหน่งบนโลก หรือเรียกว่า Earth-fixed frame ดังแสดงในรูปที่ 2







2.2 แบบจำลองพลวัตของยานใต้น้ำ

สมการการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นเชิงเส้นของยานใต้น้ำ ที่มีองศาอิสระเท่ากับ 6 (6 degree of freedom: 6 DOF) เขียนเป็นรูปทั่วไปในกรอบอ้างอิงของตัวยาน ได้ดัง สมการที่ (1) [3]

> $\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\mathbf{\eta}) = \mathbf{\tau}$ (1)

 $\mathbf{v} = \begin{bmatrix} u & v & w & p & q & r \end{bmatrix}^T$ (2)

$$\mathbf{\eta} = \begin{bmatrix} x & y & z & \phi & \theta & \psi \end{bmatrix}^T \tag{3}$$

เมื่อพิจารณาเป็นการเคลื่อนที่ที่เป็นเชิงเส้นสมการ (1) เขียนใหม่ได้เป็น [3]

$$\mathbf{M}\Delta\dot{\mathbf{v}} + \frac{\partial f_{c}(\mathbf{v})}{\partial v}\Big|_{v_{0}}\Delta\mathbf{v} + \frac{\partial f_{d}(\mathbf{v})}{\partial v}\Big|_{v_{0}}\Delta\mathbf{v} + \frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{\eta})}{\partial \eta}\Big|_{\eta_{0}}\Delta\mathbf{\eta} = \Delta\mathbf{\tau}$$
(4)

โดยที่ตำแหน่งที่ทำการปฏิบัติงานนั้นจะแสดงได้เป็น

$$\mathbf{v}_0 = \begin{bmatrix} u_0 & \upsilon_0 & w_0 & p_0 & q_0 & r_0 \end{bmatrix}^T$$
(5)
under $\mathbf{\eta}_0 = \begin{bmatrix} x_0 & y_0 & z_0 & \phi_0 & \theta_0 & \psi_0 \end{bmatrix}^T$ (6)

$$\Delta \mathbf{v} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_0$$
(7)

$$\Delta \boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\eta}_0 \tag{8}$$

$$\Delta \mathbf{\tau} = \mathbf{\tau} - \mathbf{\tau}_0 \tag{9}$$

$$f_c(\mathbf{v}) = \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} \tag{10}$$

$$f_d(\mathbf{v}) = \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} \tag{11}$$

สำหรับยานใต้น้ำที่ตัวยานมีความสมมาตรทั้ง 3 ระนาบ ไม่มีการเคลื่อนที่ควบ (non-couple motion) สองทิศทางพร้อมกัน แรงลอยตัวกระทำที่ตำแหน่ง จุดศูนย์ถ่วง (center of gravity) ของยาน วางตัวใน ระนาบ ($\phi= heta=0$) และเมื่อยานมีความเร็วเชิงมุมใน การเคลื่อนที่ต่ำ พจน์ของเมตริกซ์ $C(\nu)v$ สามารถตัดทิ้ง ได้ [3] ส่วนเมตริกซ์อื่นๆ ในสมการที่ (1) มีองค์ประกอบ ย่อยดังนี้

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_{RB} + \mathbf{M}_A \tag{12}$$

$$\mathbf{M}_{RB} = diag[m_x, m_y, m_z, I_x, I_y, I_z]$$
(13)

$$\mathbf{M}_{A} = diag \left[X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, Z_{\dot{w}}, K_{\dot{p}}, M_{\dot{q}}, N_{\dot{r}} \right]$$
(14)

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = \mathbf{D}(\mathbf{v})_{L} + \mathbf{D}(\mathbf{v})_{Q}$$
(15)

$$\mathbf{D}(\mathbf{v})_{L} = diag[X_{u}, Y_{v}, Z_{w}, K_{p}, M_{q}, N_{r}] \quad (16)$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{v})_{Q} = diag \begin{bmatrix} X_{u|u|}u, Y_{v|v|}v, Z_{w|w|}w, \\ K_{p|p|}p, M_{q|q|}q, N_{r|r|}r \end{bmatrix} (17)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{\eta}) = -\begin{bmatrix} (W-B)\sin\theta \\ -(W-B)\cos\theta\sin\phi \\ -(W-B)\cos\theta\cos\phi \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} (18)$$

2.3 แบบจำลองพลวัตยานใต้น้ำ BENBAM-G2

ยานใต้น้ำ "BENBAM-G2" ดังรูปที่ 1 ถูกออกแบบ ให้มีความมีความสมมาตรทั้ง 3 ระนาบ แรงลอยตัว กระทำที่ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงของยาน น้ำหนักของยาน เท่ากับแรงลอยตัว ($\overset{\cdot}{W}=B$) หรือยานใต้น้ำจะลอยอย่าง เป็นกลาง มีความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำ (0-0.5 เมตรต่อ ้วินาที) ไม่มีการเคลื่อนที่ควบในแต่ละแกน และโดยปกติ ้จะวางตัวอยู่ในระนาบ ($\phi= heta=0$) สามารถเคลื่อนที่ขึ้น ลงแนวดิ่ง (z) หมุนรอบแกนแนวดิ่ง (ψ) และขณะ เคลื่อนที่ขึ้นลงนั้นไม่มีองค์ประกอบของความเร็วหน้าหลัง และซ้ายขวา ($u=\upsilon=0$) ดังนั้นจะได้สมการ แบบจำลองทางพลวัตที่ลดรูปลงเป็น

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} = \boldsymbol{\tau} \tag{19}$$

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} w & r \end{bmatrix}^T \tag{20}$$

$$\mathbf{\eta} = \begin{bmatrix} z & \psi \end{bmatrix}^T \tag{21}$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_z + Z_{\dot{w}} & 0\\ 0 & I_z + N_{\dot{r}} \end{bmatrix}$$
(22)

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} Z_w + Z_{w|w|} & \mathbf{0} \\ 0 & N_r + N_{r|r|} r \end{bmatrix}$$
(23)
$$\mathbf{\tau} = LU$$
(24)

เมื่อ L คือ mapping matrix ขึ้นอยู่กับการติดตั้งชุด ผลัก (thruster) ส่วน U คือ thruster vector เพื่อไม่ให้ เกิดการเคลื่อนที่ควบและง่ายต่อการออกแบบตัวควบคุม



จึงออกแบบให้ชุดผลักที่ใช้สร้างแรงและแรงบิดฉุดเป็น อิสระกัน จึงจัดสรรการใช้งานของชุดผลักดังแสดงในรูปที่ 3 และตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การจัดชุดผลักที่ใช้สร้างแรงและแรงบิด

	9							
Thruster No.	1	2	3	4	5	6	7	8
เคลื่อนที่หน้าหลัง	/	/						
หมุนรอบแกน Z			/	/				
ดำขึ้นลง					/	/		

______ โดยกำห[ิ]นดแรงฉุดอินพุตเป็นดังนี้

 $au_{\scriptscriptstyle 1}$ คือแรงที่ขับเคลื่อนยานให้เคลื่อนที่หน้าหลัง ($X_{\scriptscriptstyle \{B\}}$)

 au_2 คือแรงบิดที่ขับเคลื่อนยานให้หมุนรอบแกน $Z_{\scriptscriptstyle \{B\}}$

 $au_{_3}$ คือแรงที่ขับเคลื่อนยานให้ดำขึ้นลงในแนวดิ่ง ($Z_{_{\{B\}}})$

โดย T_i คือแรงผลักของ thruster ตัวที่ 1 ถึง 8 ส่วน L_i คือระยะตั้งฉากของแรงผลักถึงศูนย์กลางมวลของยาน และออกแบบให้ $T_1 = T_2$, $T_3 = T_4$, $T_5 = T_6$, $L_3 = L_4$ และ $L_5 = L_6$ จึงไม่มีผลของ couple ดังนั้นจึงได้แรงฉุด อินพุตเป็น

 τ_2

$$\tau_1 = T_1 + T_2 \tag{25}$$

$$= L_3 T_3 + T_4 L_4 \tag{26}$$

$$\tau_3 = T_5 + T_6$$
 (27)







(ข) มุมมองในระนาบ y-z รูปที่ 3 ตำแหน่งการติดตั้งตัวผลักและการใช้งาน

และสำหรับในที่นี้ ออกแบบตัวควบคุมเฉพาะเคลื่อนที่ แนวดิ่งและหมุนรอบแกนแนวดิ่งเท่านั้น ส่วนการเคลื่อนที่ หน้าหลังถูกออกแบบตัวควบคุมแยกออกไป au_1 จึงไม่ถูก นำมาพิจารณา ดังนั้นจากสมการที่ (24) จะได้เป็น

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_3 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$
(28)
โดยที่ $L = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ และ $U = \begin{bmatrix} \tau_3 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$

2.4 การประมาณแบบจำลองพลวัตเป็นระบบเชิงเส้น

จากแบบจำลองพลวัตยานใต้น้ำ BENBAM-G2 ที่ได้ ดังสมการที่ 19 นั้นเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น จึงทำการ ประมาณเป็นระบบแบบเชิงเส้นตามสมการที่ (4) รอบจุด สมดุล **v**₀ได้ดังนี้

$$\mathbf{M}\Delta \dot{\mathbf{v}} + \frac{\partial f_d(\mathbf{v})}{\partial v} \bigg|_{v_0} \Delta \mathbf{v} = \Delta \mathbf{\tau}$$
 (29)

$$\frac{\partial f_d(\mathbf{v})}{\partial v}\Big|_{v_0} = \begin{bmatrix} Z_w + 2Z_{w|w|}w_0 & 0\\ 0 & N_r + 2N_{r|r|}r_0 \end{bmatrix}$$
(30)

ที่สภาวะสมดุล ในที่นี้เป็นการรักษาตำแหน่งของความลึก และมุมหันเห กำหนดให้ตัวแปรต่างๆเขียนแทนด้วยตัว ห้อย o และมีค่าดังนี้

$$\mathbf{v}_{o} = \begin{bmatrix} w_{o} & r_{o} \end{bmatrix}^{T} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix}, \dot{\mathbf{v}}_{o} = 0, \mathbf{\tau}_{o} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix}$$
ดังนั้นจะได้ $\Delta \mathbf{v} = \begin{bmatrix} w - w_{o} \\ r - r_{o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w \\ r \end{bmatrix}$ (31)

$$\Delta \dot{\mathbf{v}} = \begin{bmatrix} \dot{w} - \dot{w}_o \\ \dot{r} - \dot{r}_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{r} \end{bmatrix}$$
(32)

$$\Delta \tau = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_3 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$
(33)

$$\frac{\partial f_d(\mathbf{v})}{\partial v}\Big|_{v_0} = \begin{bmatrix} Z_w & 0\\ 0 & N_r \end{bmatrix}$$
(34)

แทนค่าต่างๆลงในสมการที่ (29) จะได้

$$\begin{bmatrix} m + Z_{\dot{w}} & 0 \\ 0 & I_{z} + N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{w} & 0 \\ 0 & N_{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_{3} \\ \tau_{2} \end{bmatrix}$$
(35)

จากสมการที่ (35) พลศาสตร์ของการเคลื่อนที่แนวดิ่งกับ รอบแกนเป็นอิสระไม่ขึ้นแก่กัน ดังนั้นสามารถแยกเป็น สองสมการได้ดังนี้

$$(m_z + Z_{\dot{w}})\dot{w} + (Z_w)w = \tau_3 \tag{36}$$



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 26 ตุลาคม 2555 จังหวัดเชียงราย

$$\left(I_z + N_{\dot{r}}\right)\dot{r} + \left(N_r\right)r = \tau_2 \tag{37}$$

หรือเขียนอยู่ในเทอรมของ z และ ψ ได้เป็น

$$(m+Z_{\dot{w}})\ddot{z}+(Z_w)\dot{z}=\tau_3$$
 (38)

$$(I_z + N_{\dot{r}})\dot{\psi} + (N_r)\dot{\psi} = \tau_2 \tag{39}$$

สมการที่ (38) และ (39) สามารถออกแบบตัวควบคุม แยกเป็นสองตัวได้ คือตัวควบคุมความลึก (z) และตัว ควบคุมองศาหันเห (ψ)

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของยานใต้น้ำ BENBAM-G2

เคลื่อนขึ้นลง	หมุนรอบแกน z
$m_z = 30 \text{ kg}$	$I_z = -$
$Z_{\dot{w}} = 113.2591 \mathrm{kg}$	$N_{\dot{r}} = -$
$Z_w = 20.1603 \mathrm{N.s/m}$	$N_r = 0.1192$ N.s/rad
$Z_{w w } = 241.1425 \mathrm{N.(s/m)^2}$	$N_{r r } = 4.1228 \text{ N.}(\text{s/rad})^2$
$m + Z_{\dot{w}} = 143.2591 \text{ kg}$	$I_z + N_{\dot{r}} = 7.9708 \text{ kg.m}^2$

2.5 ฟังก์ชั่นถ่ายโอนของระบบ

ให้ $G_{pz}(s)$ และ $G_{p_w}(s)$ แทนฟังก์ชั่นถ่ายโอนของ สมการ (38) และ (39) ตามลำดับ เมื่อแทนค่าต่างๆจะได้

$$G_{PZ} = \frac{Z(s)}{\tau_2(s)} = \frac{1}{s((143.2591)s + 20.1603)}$$
(40)

$$G_{P\psi} = \frac{\psi(s)_{\psi}}{\tau_3(s)} = \frac{1}{s((7.9708)s + 0.1192)}$$
(41)

2.6 สมการสถานะของระบบ

สมการสถานะเขียนอยู่ในรูปทั่วไปคือ

$$\frac{d(\mathbf{x})}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \tag{42}$$

 $\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u}$ (43)

โดยที่ x คือตัวแปรสถานะ y คือเอาต์พุต u คืออินพุต การหาสมการสถานะของการเคลื่อนที่แนวดิ่งทำได้โดย

กำหนดให้ตัวแปรสถานะ
$$\mathbf{x}_1 = \begin{bmatrix} z \\ w \end{bmatrix}$$
และเอาต์พุตคือ z

และจัดรูปสมการที่ (36) ไหม

$$\dot{w} = -\left(\frac{Z_w}{m + Z\dot{w}}\right)w + \tau_3 \qquad (44)$$
$$w = \dot{z} \qquad (45)$$

(45)

และ

เขียนสมการอยู่ในรูปทั่วไปของสมการสถานะ ได้เป็น

$$\underbrace{\begin{cases} w \\ \dot{w} \\ \dot{w} \\ \frac{d(x_1)}{dt} \end{cases}}_{\underline{d(x_1)}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\left(\frac{Z_w}{m+Z_{\dot{w}}}\right) \\ \underline{A_1} \end{bmatrix}}_{\mathbf{A_1}} \underbrace{\begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \\ \mathbf{X} \end{bmatrix}}_{\mathbf{X}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \frac{1}{m+Z_{\dot{w}}} \end{bmatrix}}_{\mathbf{B_1}} \tau_3$$
(46)

$$y = \underbrace{\left[1 \quad 0\right]}_{C_1} \begin{bmatrix} z\\ \dot{z} \end{bmatrix}$$
(47)

แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะได้

$$A_{1} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.1407 \end{bmatrix}, B_{1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.007 \end{bmatrix}, C_{1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

ส่วนการหาสมการสถานะของการหมุนรอบแกนแนวดิง [m]

ทำได้โดยกำหนดให้ตัวแปรสถานะ
$$\mathbf{x}_2 = \begin{bmatrix} \mathcal{V} \\ r \end{bmatrix}$$
 และ
เอาต์พตคือ \mathcal{W} และจัดรปสมการที่ (37) ใหม่

$$\dot{r} = -\left(\frac{N_r}{I_z + N_{\dot{r}}}\right)r + \tau_2 \qquad (48)$$

และ

(49)

เขียนสมการอยู่ในรูปทั่วไปของของสมการสถานะได้เป็น

 $r = \dot{\psi}$

$$\begin{bmatrix} r\\ \dot{r}\\ \vdots\\ \frac{d(x_2)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1\\ 0 & -\left(\frac{N_r}{I_z + N_{\dot{r}}}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi\\ \dot{\psi}\\ \dot{\chi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0\\ 1\\ I_z + N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \tau_2$$

$$B_2$$
(50)

$$y = \underbrace{\left[1 \quad 0 \atop C_2} \begin{bmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}$$
(51)

แทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆของยาน BENBAM จะได้ดังนี้

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.0149 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1254 \end{bmatrix}, C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$$

3 การออกแบบตัวควบคุม 3.1 เงื่อนไขการออกแบบตัวควบคุม

ในการออกแบบตัวควบคุมทั้งแบบป้อนกลับเอาต์พุตและ แบบ PID นั้นออกแบบภายใต้ข้อกำหนดเดียวกันดังแสดง ในตารางที่ 3

ตารางที่	3	เงื่อนไขการออกแบบ
----------	---	-------------------

ตัวควบคุมความลึก (<i>z</i>)		ตัวควบคุมมุมแกว่ง (ψ)		
Damping ration: ζ	0.707	0.707		
Settling time : t_s	1	1		
Steady state	0	0		
error : e_{ss}				
การเคลื่อนที่แนวดิ่งจะเคลื่อนที่		การหมุนรอบแกนแนวดิ่งจะ		
เป็นระดับความลึกที่เพิ่มห ^ร	หมุนเป็นองศาที่เพิ่มหรือลดลง			
จากเดิมครั้งละ 0.1เมตร	จากเดิมครั้งละ 5 องศา			



<u>ขั้นที่สอง</u> หาค่า **K** ของการควบคุมแบบป้อนกลับ เอาต์พุต โดยพิจารณาตัวควบคุมเป็นแบบป้อนกลับ สถานะเพื่อรักษาเสถียรภาพรอบจุดสมดุลคือ R(t) = 0ตามแผนภาพกรอบในรูปที่ 5 ที่มีกฎการควบคุมคือ



รูปที่ 5 แผนภาพกรอบของการควบคุมป้อนกลับสถานะ เพื่อรักษาเสถียรภาพรอบจุดสมดุล

 $\mathbf{u} = -k_1 x_1 - k_2 x_2 \dots k_n x_n = -\mathbf{K} \mathbf{x}$ (53)

โดยที่ **K** คืออัตราขยายที่จะทำให้ระบบควบคุมมีค่าโพล ตามต้องการ กรณีเป็นระบบลำดับที่สอง สามารถหาได้ โดยการเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของ ระบบควบคุมคือ

$$\det(\mathrm{Is} - (\mathrm{A} - \mathrm{BK})) = 0 \tag{54}$$

กับสมการคุณลักษณะของระบบอันดับสองที่ต้องการคือ

$$s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2 = 0 \tag{55}$$

<u>ขั้นตอนที่สาม</u> หาค่า **N** ของการควบคุมแบบ ป้อนกลับเอาต์พุต โดยใช้วิธีปรับรูปร่างอินพุตเพื่อตาม สัญญาณอ้างอิง *R*(*t*) เพื่อให้ได้ผลตอบสนองที่สภาวะคง ตัวตามต้องการ [4-5]

รูปที่ 6 แผนภาพกรอบของการควบคุมป้อนกลับเมื่อมีการ ปรับรูปร่างอินพุต ในโดเมน s

จากแผนภาพกรอบในรูปที่ 6 ฟังชั่นถ่ายโอน T(s) คือ

$$T(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = C(sI - (A - BK))^{-1}BN(s)$$
 (56)

และ $(sI - (A - BK))^{-1}$ สามารถหาได้จาก

$$\left(sI - \left(A - BK\right)\right)^{-1} = \frac{\operatorname{adj}[sI - \left(A - BK\right)]}{\operatorname{det}[sI - \left(A - BK\right)]} \quad (57)$$

และความคลาดเคลื่อนของสัญญาณอ้างอิงกับเอาต์พุต (E(s)) คือ

3.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับเอาต์พุต

การควบคุมแบบป้อนกลับเอาต์พุต (output feedback control) เป็นการใช้ตัวสังเกตสถานะร่วมกับ ตัวควบคุมป้อนกลับสถานะในการควบคุม โดยที่ตัว ควบคุมจะใช้เวกเตอร์ xิซึ่งเป็นค่าประมาณการของ เวกเตอร์สถานะ x ในการคำนวณค่าสัญญาณ **u**



รูปที่ 4 แผนภาพกรอบของการควบคุมป้อนกลับเอาต์พุต จะสังเกตว่าโครงสร้างโดยรวมของการควบคุมจะเป็น การป้อนกลับเฉพาะเอาต์พุต [4] แสดงดังในรูปที่ 4 ที่มีกฎการควบคุมคือ

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\hat{\mathbf{x}} + \overline{\mathbf{N}} \tag{52}$$

ขั้นตอนการออกแบบตัวควบคุมแบบป้อนกลับเอาต์พุตทำ ได้หลายวิธีการ สำหรับการออกแบบนี้ มีขั้นตอนคือ

<u>ขั้นที่หนึ่ง</u> ตรวจสอบคุณสมบัติความสามารถควบคุม ได้ (Controllability) และความสามารถสังเกตได้ (Observability) ของระบบดังนี้

สำหรับระบบแบบ LTI ที่ถูกแสดงโดย

 $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}$ และ $\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u}$ โดยมี $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n, \mathbf{u} \in \mathbf{R}^m$ และระบบมีเมตริกซ์ความ สามารถควบคุมได้ ($\mathbf{C}\mathbf{o}$) และมีเมตริกซ์ความสามารถ สังเกตการณ์ได้ ($\mathbf{O}\mathbf{o}$) เป็น

 $\mathbf{Co} = \begin{pmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{AB} & \mathbf{A}^2 \mathbf{B} & \cdots & \mathbf{A}^{\mathbf{n}-\mathbf{1}} \mathbf{B} \end{pmatrix}$ $\mathbf{Oo} = \begin{pmatrix} \mathbf{C}^T & \mathbf{A}^T \mathbf{C}^T & \mathbf{A}^{T^2} \mathbf{C}^T & \cdots & \mathbf{A}^{T^{\mathbf{n}-\mathbf{1}}} \mathbf{C}^T \end{pmatrix}$ sevuvaeanunsaanove alle and the several se



$$E(s) = R(s) - Y(s) = (1 - T(s))R(s) \quad (58)$$

ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัว (e_{ss}) ของ ระบบดังรูปที่ 6 หาได้จากทฤษฎีค่าสุดท้ายคือ

$$e_{ss} = \lim_{s \to 0} sE(s) \tag{59}$$

ในที่นี้สัญญาณอ้างอิงเป็นฟังก์ชั่นขันบันได ดังนั้นจะได้

$$e_{ss} = \lim_{s \to 0} s \left[\left(1 - C \frac{\operatorname{adj}[sI - (A - BK)]]}{\operatorname{det}[sI - (A - BK)]} BN(s) \right) \frac{1}{s} \right]$$
(60)

ดังนั้นสามารถหาค่า N โดยการเทียบสมการ (60) กับค่า ความคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัวที่ต้องการ

<u>ขั้นตอนที่สี่</u> ออกแบบตัวสังเกตสถานะอันดับสมบูรณ์

 $(\hat{x}(t))$ ตามแผนภาพกรอบของการควบคุมป้อนกลับ เอาต์พุตในรูปที่ 4 โดยตัวสังเกตสถานะอันดับสมบูรณ์ เขียนอยู่ในสมการได้เป็น

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} - \mathbf{L}\mathbf{y}$$
 (61)
โดยที่ เมทริกซ์ \mathbf{L} เป็นเมทริกซ์ค่าขยายของตัวสังเกต
สถานะและเมื่อแทน \mathbf{x} ด้วย $\hat{\mathbf{x}}$ กฎการควบคุมป้อนกลับ
สถานะในสมการที่ (53) เขียนใหม่เป็น

$$\mathbf{u} = -k_1 \hat{x}_1 - k_2 \hat{x}_2 \dots k_n \hat{x}_n = -\mathbf{K} \hat{\mathbf{x}}$$
(62)

โดยสมการที่ (62) ก็คือกฎการควบคุมของการควบคุม ป้อนกลับเอาต์พุตนั่นเองที่ยังไม่มีการปรับรูปร่างอินพุต การหาค่าเมทริกซ์ L ก็สามารถหาได้ด้วยวิธีการ เช่นเดียวกับการหาค่า K กรณีเป็นระบบลำดับที่สอง สามารถหาได้โดยการเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการ คุณลักษณะของตัวสังเกตสถานะคือ

$$\det(\mathrm{Is} - (\mathrm{A} - \mathrm{LC})) = 0 \tag{63}$$

กับสมการคุณลักษณะของระบบอันดับสองที่ต้องการคือ

$$s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2 = 0 \tag{64}$$

3.3 ผลการออกแบบตัวควบคุม

จากเงื่อนไขการออกแบบประกอบกับวิธีการ ออกแบบตัวควบคุมป้อนกลับเอาต์พุตตั้งแต่ขั้นตอนที่หนึ่ง ถึงสาม ได้พารามิเตอร์ต่างๆดังนี้

ผลการออกแบบตัวควบคุมความลึกเมื่อตำแหน่งโพล ของระบบควบคุมเป็น – 4 ± 4i และตำแหน่งโพลตัว สังเกตสถานะเป็น – 8 ± 8i ได้

 $\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4571 & 1163 \end{bmatrix},$ $\mathbf{N}_1 = \begin{bmatrix} 4571 \end{bmatrix}$ และ $\mathbf{L}_1 = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 16 & 134 \end{bmatrix}^T$ ผลการออกแบบตัวควบคุมมุมแกว่งเมื่อตำแหน่งโพล ของระบบควบคุมเป็น – $4 \pm 4i$ และตำแหน่งโพลตัว สังเกตสถานะเป็น – $8 \pm 8i$ ตามลำดับ ได้ $\mathbf{K}_2 = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 255.1 & 63.9 \end{bmatrix}, \mathbf{N}_2 = \begin{bmatrix} 255.1 \end{bmatrix}$

 $\mathbf{K}_2 = [k_1 \quad k_2] = [233.1 \quad 03.9], \ \mathbf{N}_2 = [233.1]$ และ $\mathbf{L}_2 = [L_1 \quad L_2]^T = [16 \quad 128.2]^T$ 3.4 การออกแบบตัวควบคุมแบบ PID



รูปที่ 7 แผนภาพกรอบของการควบคุม PID กฎการควบคุมแบบ PID เขียนอยู่ในรูปสมการคือ

$$U(s) = \left(k_{p} + \frac{k_{i}}{s} + k_{d}s\right)E(s)$$
(65)

หรือ $U(s) = G_c(s)E(s)$ โดยที่ $G_c(s)$ เป็น ฟังก์ชั่นถ่ายโอนของตัวควบคุม และจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$G_{c}(s) = \left(k_{p} + \frac{k_{i}}{s} + k_{d}s\right)$$
(66)

U(s)คือสัญญาณควบคุม E(s) คือผลต่างของสัญญาณ อ้างอิง (R(s)) กับเอาต์พุต (Y(s)) $G_p(s)$ คือฟังก์ชั่น ถ่ายโอนของระบบ H(s) คือ คือฟังก์ชั่นถ่ายโอนของ เซนเซอร์วัด ส่วน k_p , k_i และ k_d เป็นค่าอัตราขยาย ของพจน์ P, I และ D ตามลำดับ โดยฟังก์ชั่นถ่ายโอนของ ระบบลูปปิด (T(s)) คือ

$$T(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G_{c}(s)G_{p}(s)}{1 + G_{c}(s)G_{p}(s)H(s)}$$
(67)

ดังนั้นฟังก์ชั่นถ่ายโอนของทั้งสองระบบภายใต้สมมุติฐาน เมื่อผลตอบสนองของเซนเซอร์ไวกว่าระบบมากๆและเป็น ค่าของเอาต์พุตโดยตรง ดังนั้นจึงให้ H(s)=1 และจะได้ ระบบควบคุมแบบป้อนกลับขนาดหนึ่งหน่วย (unity feedback) ที่มีฟังก์ชั่นถ่ายโอนป้อนไปข้างหน้าโดย กำหนดให้เป็น G(s) ดังสมการ

$$G(s) = G_{c}(s)G_{p}(s)$$
(68)



และสามารถหาผลต่างที่สภาวะคงตัว (steady state error) เมื่ออินพุตเป็น ฟังชั่นขั้นบันไดต่อหนึ่งหน่วยอินพุต ได้จาก

$$e_{ss} = e_{step}(\infty) = \frac{1}{1 + \lim_{s \to 0} G(s)}$$
(69)

ข้อสังเกตจากสมการที่ (67) กรณียังไม่เพิ่มตัวควบคุม พจน์ I และ D ให้กับระบบ หรือ G_c(s)=1 พบว่า ผลต่างที่สภาวะคงตัวมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นในที่นี้จึงเพิ่มตัว ควบคุม D เพียงอย่างเดียวเพื่อควบคุมความเร็วของ ผลตอบสนอง ดังนั้นตัวควบคุมจึงลดรูปเป็น PD

จากนั้นแทนค่าต่างๆ ลงในสมการ (67) จะได้ฟังชั้น ถ่านโอนของระบบควบคุมความลึกและมุมหันเหตาม สมการที่ (70) และ (71) ตามลำดับ

$$T(s)_{z} = \frac{0.007(k_{p} + k_{d}s)}{s^{2} + (1.404 + 0.007k_{d})s + 0.007k_{p}} (70)$$
$$T(s)_{\psi} = \frac{0.125(k_{p} + k_{d}s)}{s^{2} + (0.015 + 0.125k_{d})s + 0.125k_{p}} (71)$$

จากนั้นใช้วิธีเทียบสัมประสิทธิ์กับสมการคุณลักษณะของ ระบบอันดับสองมาตรฐานคือ

$$^{2} + 2\zeta \omega_{n}s + \omega_{n}^{2} = 0$$
 (72)

จากเงื่อนไขการออกแบบตามตารางที่ 3 ได้ค่าพามิเตอร์ $\zeta=0.707$ และ $\omega_{\scriptscriptstyle n}=5.658\,{
m rad/s}$ และจะได้

$$s^2 + 8s + 32 = 0 \tag{73}$$

ผลจากการเทียบสัมประสิทธิ์ ของระบบควบคุมความลึก ได้ $k_p = 4573$ และ $k_d = 942$ ส่วนระบบควบคุมมุม แกว่งได้ $k_p = 256$ และ $k_d = 64$

3.5 การออกแบบตัวควบคุมชุดผลัก

การควบคุมความเร็วรอบของชุดผลัก ทำโดยใช้ตัว ควบคุมแบบเปิดปิด (on-off control) ที่ความถี่สูง โดย แสดงเป็นแผนภาพกรอบดังรูปที่ 8 โดยมีสมมุติฐานการ ออกแบบคือ ความไวในการตอบสนองของชุดผลักสูงกว่า ความไวของยานมากๆ และชุดผลักสามารถสร้างแรงและ แรงบิดได้ตามต้องการทำให้ error ของชุดผลักเป็น 0



รูปที่ 8 แผนภาพกรอบการควบคุมความเร็วรอบชุดผลัก

3.6 Software และ Hardware

ระบบควบคุมจริงประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ Software และ Hardware ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยใช้ คอมพิวเตอร์ทำหน้าที่ รับสัญญาณอ้างอิง คำนวณค่าตัว แปรสถานะและกฎการควบคุม พร้อมทั้งแปลงสัญญาณ อินพุต u(t) เป็นความเร็วรอบเพื่อให้ thruster unit หมุนเพื่อสร้าง τ_2, τ_3 ตามต้องการ





4. ผลการทดลอง

เพื่อเปรียบเทียบกฎการควบคุมป้อนกลับเอาต์พุตใน หัวข้อ 3.3 กับกฎการควบคุมแบบ PID ในหัวห้อ 3.4 โดย การจำลองการเคลื่อนที่ด้วยโปรแกรม

MATLAB/Simulink

- เมื่อต้องการให้ยานใต้น้ำรักษาระดับอยู่ที่ความลึก
 0.1 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 8 และเมื่อเพิ่มเงื่อนไขให้ แรงผลักจากใบพัดมีการอิ่มตัวที่ ±30 N ดังแสดงใน รูปที่ 10
- เมื่อต้องการให้ยานใต้น้ำเกิดการหมุนรอบแกน z ด้วยมุมหันเห 5 องศา ดังแสดงในรูปที่ 9 และเมื่อ เพิ่มเงื่อนไขให้แรงบิดจากใบพัดมีการอิ่มตัวที่ ±15 N-m ดังแสดงในรูปที่ 11





รูปที่ 11 ผลจำลองการควบคุมมุมหันเหที่ 5 องศา

ภายใต้เงื่อนไขที่แรงบิดอินพุตเกิดการอิ่มตัวที่ ± 15 Nm

(ข) แรงบิดอินพุตต่อเวลา รูปที่ 9 ผลจำลองการควบคุมมุมหันเหที่ 5 องศา ภายใต้เงื่อนไขที่แรงบิดอินพุตไม่การอิ่มตัว



5.สรุป

ระบบควบคุมที่ทำการออกแบบทั้งชนิดป้อนกลับสัญญาณ อินพตและชนิด PID เมื่อจำลองผลการควบคุมด้วย MATLAB/Simulink ภายใต้เงื่อนไขแรงผลักและแรงบิด อินพุตไม่อิ่มตัว ในการควบคุมความลึกที่ระดับ 0.1 เมตร แสดงให้เห็นว่าผลต่างที่สภาวะคงตัวไม่ (ตามรูปที่ 8) แตกต่างกันแต่ตัวควบคุมชนิดป้อนกลับสัญญาณอินพุต เกิดการ overshoot และมีค่าแรงผลักอินพุตที่น้อยกว่า และมีผลในการประหยัดพลังงานไฟฟ้าของชุดขับมากว่า จึงเหมาะสมมากกว่า แต่การควบคุมมุมหันเหที่ 5 องศา (ตามรูปที่ 9) ให้ผลไม่แตกต่างกันมาก ส่วนผลจำลอง ภายใต้เงื่อนไขแรงผลักและแรงบิดอินพุตอิ่มตัวที่ ± 30 N และ ± 15 Nm ตามลำดับ ในการควบคุมความลึก (ตาม รูปที่ 10) แสดงให้เห็นว่า setting time เพิ่มขึ้นจากที่ได้ ออกแบบไว้คือ 1 วินาทีเป็นประมาณ 2 วินาทีแต่ตัว ควบคุมชนิดป้อนกลับสัญญาณอินพุตเกิดการ overshoot ที่น้อยและมีค่าแรงผลักอินพุตที่น้อยกว่าด้วย และการควบคุมมุมหันเหที่ 5 องศา (ตามรูปที่ 11) setting time ยังมีค่าตามออกแบบ และให้ผลอื่นที่ไม่ แตกต่างกันมาก ดังนั้นจากผลจำลอง โดยสรุปการควบคุม มุมหันเห ตัวควบคุมทั้งสองสามารถทำได้ดี ส่วนการ ควบคุมความลึกนั้นตัวควบคุมแบบป้อนกลับสัญาณ อินพุตให้ผลเป็นที่น่าพอใจกว่า

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณ สถาบันไทย-เยอรมัน ที่ให้การสนับสนุน ด้านสถานที่ เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับทดลอง คุณคุ้ม หลวง คำบุปผา ผู้ช่วยเหลือด้านการทดลอง ท้ายที่สุดนี้ ขอบคุณเพื่อนๆญาติๆภารยาและลูกที่เป็นกำลังใจตลอด มา

7. เอกสารอ้างอิง

 [1] ธีระยุทธ ชาติชนะยืนยง (2553). การควบคุมหุ่นยนต์ ใต้น้ำอัตโนมัติด้วยวิธีสไลดิ้งโหมด, *วารสารวิทยาศาสตร์* และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, 29, 4 (ต.ค. -ธ.ค. 53), หน้า 478 – 484.

[2] ณรงค์ศักดิ์ ขุนชิต และ ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์ (2555). การทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์ไฮโดรไดนามิกส์ ของยานใต้น้ำด้วยแรงฉุดคงที่, การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยรังสิต ประจำปี 2555, มหาวิทยาลัยรังสิต จังหวัดปทุมธานี [3] Fossen, Thor I. (1994). Guidance and Control of Ocean Vehicles, John Wiley & Sons, New York.

[4] สุวัฒน์ กุลธนปรีดา (2552). วิศวกรรมการควบคุม อัตโนมัติ, กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)

[5] Gene F. Franklin, J.David Powell and Abbas Emami-Naeini (1994). *Feedback Control of Dynamic Systems*, 3rd edition, ISBN: 0-201-53487-8, Addision-Wesley Publishing Company, Inc., USA.

[6] Wei Wang (2006), Autonomous Control of a Differantial Thrust Micro ROV, Master thesis, University of Waterloo, Ontario Canada
[7] อนุพนธ์ พิมพ์ช่วยและคณะ (2548). ต้นแบบยาน สำรวจใต้น้ำแบบอัตโนมัติ. การประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 19
[8] ธีรภัทร หลิ่มบุญเรื่องและคณะ (2549). หุ่นยนต์ ต้นแบบสำหรับการสำรวจใต้น้ำ. การประชุมวิชาการ เครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 20