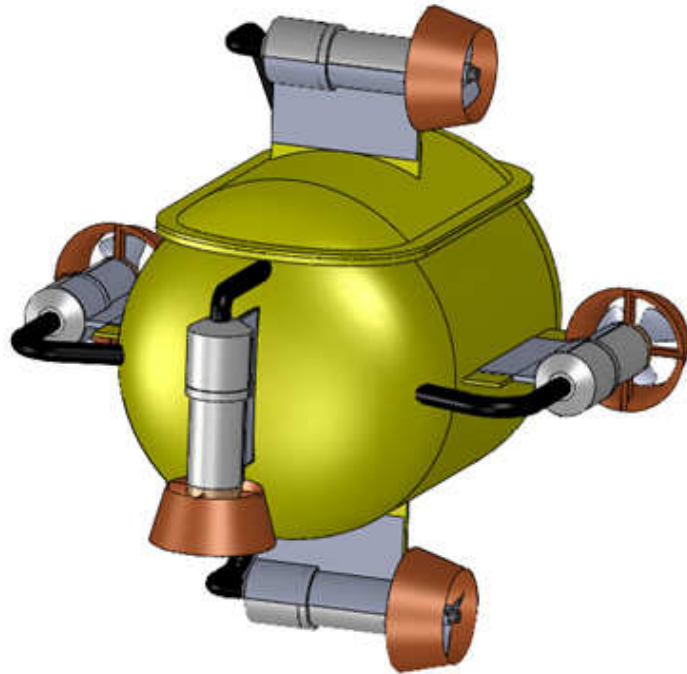


4.3 การควบคุมแบบสนามความเร็วช่วยควบคุมเส้นทางของยานใต้น้ำอัตโนมัติ (Velocity Field Control Assistance for Autonomous Underwater Vehicle Path Control)

4.3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของยานใต้น้ำขนาดเล็ก

ยานใต้น้ำขนาดเล็กออกแบบเป็นรูปทรงกระบอกหัวท้ายมน ผิวภายนอกทำจากแผ่นสแตนเลสหนา 3 มิลลิเมตร น้ำหนักของยานใต้น้ำรวมอุปกรณ์ทั้งหมด 89.5 กิโลกรัม มีต้นกำลังขับ (Thruster) 3 คู่ วางอยู่ในระนาบแนวเดียวกับจุดศูนย์กลางของตัวยาน



รูปที่ 4.19 ยานใต้น้ำขนาดเล็ก

4.3.1.1 พลศาสตร์ของยานใต้น้ำขนาดเล็ก

สมการการเคลื่อนที่ในรูปแบบทั่วไปของยานใต้น้ำ [46] สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + G = T \quad (4.3.1)$$

โดยที่ M คือ เมตริกซ์ของมวลและความเฉื่อย (mass and inertia matrix)

$C(\mathcal{V})$ คือ เมตริกซ์ของคอริโอลิสและเซนตริพีทัล (coriolis and centripetal matrix)

$D(\mathcal{V})$ คือ เมตริกซ์ค่าความหน่วงของของเหลว (hydrodynamic damping matrix)

G คือ เวกเตอร์ของค่าความโน้มถ่วงและแรงลอยตัว (gravitational and buoyancy vector)

\mathcal{T} คือ เวกเตอร์ของแรงภายนอกและทอร์กที่กระทำ (external force and torque input vector)

และ \mathcal{V} คือ เวกเตอร์ของความเร็วสถานะ (velocity state vector)

4.3.1.2 พจน์ของเมตริกซ์มวลและความเฉื่อย (Mass and inertia matrix term)

เมตริกซ์ของมวลและความเฉื่อย (M) มีความสมมาตรและมีค่าเป็นบวก (symmetric and positive definite) $M = M^T > 0$ ประกอบด้วยมวลและโมเมนต์ความเฉื่อยของวัตถุ (rigid body's mass and moment of inertia; M_{RB}) และ มวลที่เพิ่มขึ้นจากผลของของเหลว (hydrodynamic added mass; M_A)

$$M = M_{RB} + M_A \quad (4.3.2)$$

โดยที่ M_{RB} เป็นเมตริกซ์ของมวลและความเฉื่อยคงที่ของตัวยาน มีความสมมาตรและมีค่าเป็นบวก (constant symmetric and positive definite mass and inertia metric)

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (4.3.3)$$

โดยที่ m เป็นน้ำหนักสุทธิของยานใต้น้ำ และ I_z เป็นโมเมนต์ความเฉื่อยของยานใต้น้ำรอบแกน Z ขณะที่ยานใต้น้ำเคลื่อนที่ผ่านของเหลว อนุภาคของเหลวรอบๆ ตัวยานถูกทำให้เกิดความเร่ง และมีแรงปฏิกิริยาพยายามทำให้ยานเคลื่อนที่ช้าลง แรงปฏิกิริยานี้สัมพันธ์กับมวลที่เพิ่มเข้ามา (the added mass) ผลของมวลที่เพิ่มขึ้นอยู่กับรูปร่างของยานจะคงที่เมื่อยานจมมิดอยู่ใต้น้ำ [47]

$$M_A = M_A^T > 0 \quad (4.3.4)$$

เมตริกซ์ความเฉื่อยของมวลที่เพิ่ม (An inertia matrix of added mass) เขียนได้เป็น

$$M_A = \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{\dot{v}} & 0 \\ 0 & 0 & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (4.3.5)$$

โดยที่ $X_{\dot{u}}$ เป็นมวลเพิ่ม (added mass) ในทิศทาง x

$Y_{\dot{v}}$ เป็นมวลเพิ่มในทิศทาง y

และ $N_{\dot{r}}$ เป็นมวลเพิ่มของการหมุนรอบแกน z

4.3.1.3 พจน์ของเมตริกซ์คอริโอลิสและเซนตริพีทัล (Coriolis and centripetal matrix term)

เมตริกซ์ของคอริโอลิสและเซนตริพีทัล (coriolis and centripetal matrix; $C(\mathcal{V})$) ประกอบด้วย คอริโอลิสของวัตถุ (rigid body's coriolis; C_{RB}) และคอริโอลิสและเซนตริพีทัลของมวลที่เพิ่ม (added mass of coriolis; C_A) ซึ่งมีค่าสมมาตรในแนวทแยง (skew-symmetric) ซึ่ง $C(\mathcal{V}) = C^T(\mathcal{V})$, $\forall \mathcal{V} \in R^n$

$$\text{และ } C = C_{RB} + C_A \quad (4.3.6)$$

C_{RB} เป็นเทอมของคอริโอลิสและเซนตริพีทัลของวัตถุ (rigid body's coriolis and centripetal term)

$$C_{RB} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -m(d_x r + v) \\ 0 & 0 & -m(d_y r - u) \\ m(d_x r + v) & m(d_y r - u) & 0 \end{bmatrix} \quad (4.3.7)$$

โดยที่ d_x และ d_y เป็นระยะห่างจากจุดศูนย์กลางแรงลอยตัวกับจุดศูนย์กลางมวลในทิศทาง x และ y

C_A เป็นเทอมของคอริโอลิสและเซนตริพีทัลของมวลเพิ่ม (added mass coriolis and centripetal term)

$$C_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & Y_{\dot{v}} v \\ 0 & 0 & -X_{\dot{u}} u \\ -Y_{\dot{v}} v & X_{\dot{u}} u & 0 \end{bmatrix} \quad (4.3.8)$$

โดยที่ $X_{\dot{u}}$ เป็นมวลที่เพิ่มจากค่าสัมประสิทธิ์ต้านของมวลเพิ่ม (added mass from the drag coefficient)

ในทิศทางแกน x ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของสตริป (Strip Theory) [48]

$$X_{\dot{u}} = C_{Dx} m \quad (4.3.9)$$

โดยที่ C_{Dx} เป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านในทิศทาง x

$$Y_{\dot{v}} = C_{Dy} m \quad (4.3.10)$$

C_{Dy} เป็นค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านในทิศทาง y

4.3.1.4 พจน์ของเมตริกซ์ค่าความหน่วงของของเหลว (Hydrodynamic damping matrix term)

เมตริกซ์ค่าความหน่วงของของเหลว (hydrodynamic damping matrix)

$D(\mathcal{V})$ เป็นค่าความต้านและแรงยก ซึ่งกระทำบนยานที่กำลังเคลื่อนที่ได้ผิวน้ำของยานและมีค่าเป็นบวกเสมอ $D(\mathcal{V}) > 0$

$$D(\mathcal{V}) = \begin{bmatrix} X_u + X_{u|u}|u| & 0 & 0 \\ 0 & Y_v + Y_{v|v}|v| & 0 \\ 0 & 0 & N_r + N_{r|r}|r| \end{bmatrix} \quad (4.3.11)$$

โดยที่ X_u เป็นค่าผลกระทบจากค่าความหน่วง (damping effect) ในทิศทาง x

Y_v เป็นค่าผลกระทบจากค่าความหน่วง (damping effect) ในทิศทาง y

และ N_r เป็นค่าผลกระทบจากค่าความหน่วง (damping effect) ในทิศทาง z

โดยที่

$$X_{u|u} = -0.5 \cdot \rho \cdot C_{D_x} \cdot A_x \quad (4.3.12)$$

$$Y_{v|v} = -0.5 \cdot \rho \cdot C_{D_y} \cdot A_y \quad (4.3.13)$$

$$\text{และ } N_{r|r} = -0.5 \cdot \rho \cdot C_{D_z} \cdot A_z \quad (4.3.14)$$

4.3.1.5 เวกเตอร์ของแรงกระทำ (Restoring force vector)

G เป็นค่าเวกเตอร์ของแรงกระทำซึ่งอยู่ในรูปแรงโน้มถ่วงและโมเมนต์

$$G = \begin{bmatrix} (W - B)\sin\psi \\ -(W - B)\cos\psi \\ -(x_G W - x_B B)\cos\psi + (y_G W - y_B B) \end{bmatrix} \quad (4.3.15)$$

โดยที่ W เป็นค่าน้ำหนักโน้มถ่วงของยานใต้น้ำ และ B เป็นแรงลอยตัวของยาน

4.3.1.6 เวกเตอร์ของแรงและทอร์กจากภายนอก (External force and torque vector)

\mathcal{T} เป็นเวกเตอร์ของแรงและทอร์กภายนอกที่มากระทำ (the external force and torque input vector)

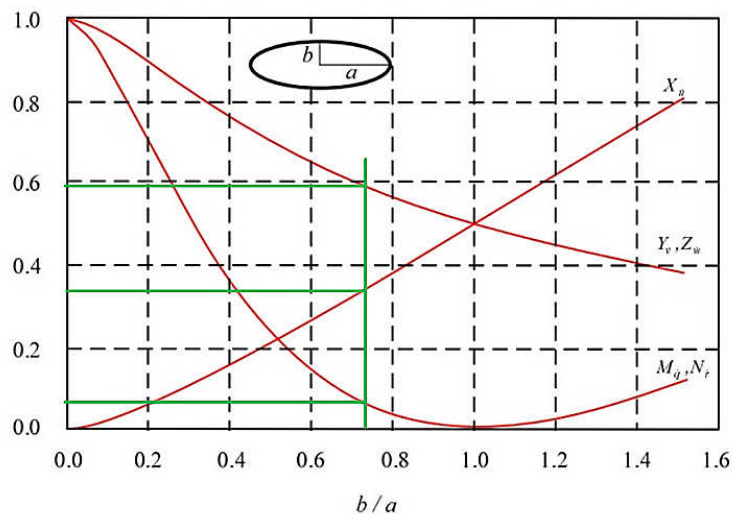
$$\tau = [\tau_x \quad \tau_y \quad \tau_r]^T \quad (4.3.16)$$

\mathcal{V} เป็นกลุ่มของเวกเตอร์ของความเร็วเชิงเส้นและความเร็วเชิงมุมของยานใต้น้ำ (linear velocity and angular velocity vector)

$$\mathcal{V} = [u \ v \ r]^T \quad (4.3.17)$$

4.3.2 วิเคราะห์สมการทางคณิตศาสตร์ของยานใต้น้ำ (The AUV Mathematical Model Analysis)

จากเนื้อหาก่อนหน้านี้ มีตัวแปรหลายตัวที่สัมพันธ์กับรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของยานใต้น้ำ ดังนั้นตัวแปรเหล่านี้จะต้องมีค่าที่ถูกต้อง เนื่องจากผลของพลศาสตร์ของเหลว (hydrodynamic effects) ขึ้นอยู่กับเพียงรูปร่างของยานเท่านั้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของยานใต้น้ำรูปทรงหัวกระสุน ซึ่งอัตราส่วนของแกนรองต่อแกนหลักคือ $\frac{b}{a} = 0.73$ ดังแสดงในรูปที่ 4.24 บนแกน x ค่าสัมประสิทธิ์ $C_{Dx} = 0.34$



รูปที่ 4.20 สัมประสิทธิ์แรงต้านของหน้าตัดรูปวงรี [49]

แทนค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_{Dx}) และมวลของยานใต้น้ำลงในสมการ (4.3.9) เขียนได้เป็น

$$X_{\dot{u}} = 0.34 \times 89.5 = 30.43 \text{ kg.m} \quad (4.3.18)$$

เช่นเดียวกันค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านในทิศทาง y มีค่าเป็น $C_{Dy} = 0.58$ และค่าสัมประสิทธิ์ด้านการหมุนรอบแกน z เป็น $C_{Dz} = 0.07$ เขียนสมการได้เป็น

$$Y_{\dot{v}} = 51.91 \text{ kg} \cdot \text{m} \quad (4.3.19)$$

$$N_{\dot{r}} = 6.265 \text{ kg} \cdot \text{m} \quad (4.3.20)$$

4.3.2.1 วิเคราะห์เมตริกซ์มวลและความเฉื่อย (Mass and inertia matrix analysis)

โมเมนต์ความเฉื่อย (moment of inertia, I_z) ของยานใต้น้ำคำนวณจากโปรแกรม SolidWorks โดยจำลองขนาด มวลและน้ำหนักของอุปกรณ์ได้ $I_z = 4.14 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

แทนค่ามวลและโมเมนต์ความเฉื่อยของยานใต้น้ำลงในสมการ (4.3.3) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} 89.50 & 0 & 0 \\ 0 & 89.50 & 0 \\ 0 & 0 & 4.14 \end{bmatrix} \quad (4.3.21)$$

เมตริกซ์มวลที่เพิ่ม (added mass matrix) M_A เขียนได้เป็น

$$M_A = \begin{bmatrix} 30.43 & 0 & 0 \\ 0 & 51.91 & 0 \\ 0 & 0 & 6.26 \end{bmatrix} \quad (4.3.22)$$

แทนสมการที่ (4.3.21) และ (4.3.22) ลงในสมการ (4.3.2) จะได้มวลของยานใต้น้ำรวมกับมวลที่เพิ่มเป็น

$$M = \begin{bmatrix} 119.93 & 0 & 0 \\ 0 & 141.41 & 0 \\ 0 & 0 & 10.40 \end{bmatrix} \quad (4.3.23)$$

4.3.2.2 วิเคราะห์เมตริกซ์ของคอรียอลิสและเซนตริฟิวทัล (Coriolis and centripetal matrix analysis)

จากสมการที่ (4.3.7) เราพิจารณาระยะห่าง d_x และ d_y สมมุติว่าแรงลอยตัวของยานเท่ากับน้ำหนักของยานพอดี ($W = B$) และจุดศูนย์กลางของมวลอยู่นิ่งแนวนอนเดียวกับแรงลอยตัว ($d_x = 0, d_y = 0$) แทนลงในสมการที่ (4.3.7) เทอมคอรียอลิสและเซนตริฟิวทัลของวัตถุเขียนได้เป็น

$$C_{RB} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -89.50v \\ 0 & 0 & 89.50u \\ 89.50v & -89.50u & 0 \end{bmatrix} \quad (4.3.24)$$

แทนสมการที่ (4.3.18) และ (4.3.19) ลงในสมการที่ (4.3.8)

$$C_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -51.91v \\ 0 & 0 & 30.43u \\ 51.91v & -30.43u & 0 \end{bmatrix} \quad (4.3.25)$$

แทนสมการที่ (4.3.24) และ (4.3.25) ลงในสมการที่ (4.3.6) จะได้สมการคอร์โวลิสและเซนตริฟิวทัลเป็น

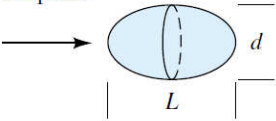
$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -141.41v \\ 0 & 0 & 119.93u \\ 141.41v & -119.93u & 0 \end{bmatrix} \quad (4.3.26)$$

4.3.2.3 วิเคราะห์เมตริกซ์ค่าความหน่วงของของเหลว (Hydrodynamic damping matrix analysis)

ผลของของเหลรรอบ ๆ ยานเคลื่อนที่ เป็นผลมาจากแรงต้านและแรงยกบนตัวยาน แรงนี้จะปรากฏในรูปของผลกระทบจากความหน่วง ซึ่งสามารถอธิบายเป็นเชิงเส้นและเทอมของความหน่วงเป็นสองเท่า (quadratic damping terms) เนื่องจากว่าความเร็วของยานใต้น้ำมีค่าน้อย เราจึงสามารถตัดพจน์ผลของความหน่วงได้ [50] นั่นคือ

$$X_u = Y_v = N_r = 0 \quad (4.3.27)$$

อัตราส่วนของแกนหลักของตัวยาน $\frac{L}{d} = 1.37$

Ellipsoid:		Laminar	Turbulent
	L/d	0.75	0.2
	1	0.47	0.2
	2	0.27	0.13
	4	0.25	0.1
	8	0.2	0.08

รูปที่ 4.21 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านตามอัตราส่วนแกนหลักของตัวยาน [51]

จากรูปที่ 4.21 สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน $C_{D_x} = 0.396$
พื้นที่หน้าตัดตามทิศทาง x คือ

$$A_x = \pi(0.225)^2 = 0.159 \text{ m}^2 \quad (4.3.28)$$

แทน A_x ลงในสมการที่ (4.3.12)

$$X_{u|u|} = -0.5 \times 997 \times (-0.396) \times 0.159 = 31.39 \text{ kg} \cdot \text{m} \quad (4.3.29)$$

ทำนองเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านตามทิศทาง y และ z สามารถคำนวณได้เป็น

$$C_{Dy} = C_{Dz} = 0.396, A_y = A_z = 0.257 \text{ m}^2 \quad (4.3.30)$$

$$Y_{v|v|} = 50.73 \text{ kg} \cdot \text{m} \quad (4.3.31)$$

$$N_{r|r|} = 58.64 \text{ kg} \cdot \text{m} \quad (4.3.32)$$

แทนสมการที่ (4.3.27), (4.3.29), (4.3.31) และ (4.3.32) ลงในสมการที่ (4.3.11) $D(\mathcal{V})$ สามารถเขียนได้เป็น

$$D(\mathcal{V}) = \begin{bmatrix} 31.39|u| & 0 & 0 \\ 0 & 50.73|v| & 0 \\ 0 & 0 & 58.64|r| \end{bmatrix} \quad (4.3.33)$$

4.3.2.4 วิเคราะห์เวกเตอร์ของแรงกระทำ (Restoring force vector analysis)

สำหรับแรงโน้มถ่วง สมมุติว่าแรงลอยตัวเท่ากับน้ำหนักตัวของยาน

$$W = B \quad (4.3.34)$$

ดังนั้น สมการที่ (4.3.15) เขียนได้เป็น

$$G = [0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (4.3.35)$$

4.3.2.5 วิเคราะห์เวกเตอร์ของแรงและทอร์กจากภายนอก (External force and torque vector analysis)

กำลังขับ (thruster forces) ในทิศทาง x ประกอบด้วยแรง P_1 และแรง P_2 ทอร์กจากการหมุน (τ_r) เกิดจากแรงขับ P_1 และ P_2 แรงและทอร์กเหล่านี้สามารถเขียนได้เป็น

$$\tau_x = P_1 + P_2 \quad (4.3.36)$$

$$\tau_y = 0 \quad (4.3.37)$$

$$\tau_r = 0.358(P_1 - P_2) \quad (4.3.38)$$

แทนสมการ (4.3.36), (4.3.37) และ (4.3.38) ลงในสมการ (4.3.16) เวกเตอร์ทอร์กสามารถเขียนได้เป็น

$$\tau = [P_1 + P_2, 0, 0.358(P_1 - P_2)]^T \quad (4.3.39)$$

4.3.2.6 สมการการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำ (Equation of motion of the AUV)

แทนสมการ (4.3.23), (4.3.26), (4.3.33), (4.3.35) และ (4.3.39) ลงในสมการ (4.3.1) สมการการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{bmatrix} 119.93 & 0 & 0 \\ 0 & 141.41 & 0 \\ 0 & 0 & 10.40 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & -141.41v \\ 0 & 0 & 119.93u \\ 141.41v & -119.93u & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 31.39|u| & 0 & 0 \\ 0 & 50.73|v| & 0 \\ 0 & 0 & 58.64|r| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 + P_2 \\ 0 \\ 0.358(P_1 - P_2) \end{bmatrix} \quad (4.3.40)$$

จากสมการข้างบนสามารถกระจายได้เป็น

$$\dot{u} = (141.41vr - 31.39|u|u + P_1 + P_2)/119.93 \quad (4.3.41)$$

$$\dot{v} = (-119.93ur - 50.73|v|v)/141.41 \quad (4.3.42)$$

$$\dot{r} = (-21.48ur - 58.64|r|r + 0.358(P_1 - P_2))/10.40 \quad (4.3.43)$$

เขียนสมการข้างบนให้อยู่ในรูปเต็มสถานะ (full-state) ผลลัพธ์ในรูปของ

$$\dot{x} = u \quad (4.3.44)$$

$$\dot{u} = 1.1791vr - 0.2617|u|u + 0.008338(P_1 + P_2) \quad (4.3.45)$$

$$\dot{y} = v \quad (4.3.46)$$

$$\dot{v} = 0.8481ur - 0.3587|v|v \quad (4.3.47)$$

$$\dot{z} = r \quad (4.3.48)$$

$$\dot{r} = -2.0654uv - 5.6385|r|r + 0.0344(P_1 - P_2) \quad (4.3.49)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{u} \\ \dot{y} \\ \dot{v} \\ \dot{\psi} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.2617(|u| + u * \text{sign}(u)) & 0 & 1.1791r & 0 & 1.1791v & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.8481r & 0 & -0.3587(|v| + v * \text{sign}(v)) & 0 & -0.8481u & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -2.0654v & 0 & -2.0654u & 0 & -5.6385(|r| + r * \text{sign}(r)) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ u \\ y \\ v \\ \psi \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0.008338 & 0.008338 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0.0344 & -0.0344 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} \quad (4.3.50)$$

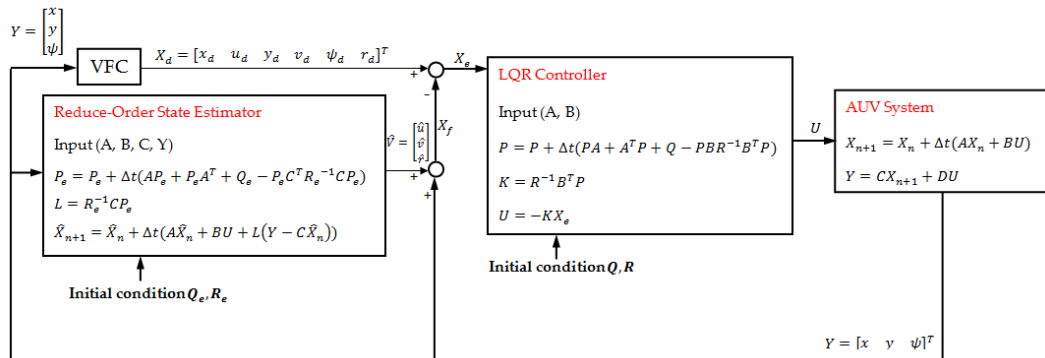
$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ u \\ y \\ v \\ \psi \\ r \end{bmatrix} + D \quad (4.3.51)$$

$$D = 0 \quad (4.3.52)$$

4.3.3 การจำลอง (Simulations)

โดยทั่วไปวิธีการควบคุมเชิงเส้นถูกออกแบบมาเพื่อให้ควบคุมการทำงานในจุดที่มีความแม่นยำ ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะควบคุมยานใต้น้ำในช่วงการปฏิบัติการระดับกลาง (mid-range) วิธีการควบคุมที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น เช่นการควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น ต้องการแบบจำลองที่แม่นยำเพื่อให้ทำงานได้คงทน (robust operations) ซึ่งเป็นเรื่องยากที่จะออกแบบ เนื่องจากข้อจำกัดด้านเครื่องมือที่สามารถใช้ในการออกแบบระบบควบคุมให้ระบบที่ถูกจำลองได้อย่างมีประสิทธิภาพและเพื่อให้สามารถติดตามเส้นทางของยานใต้น้ำได้ เราจึงเสนอให้ใช้ VFC ร่วมกับวิธีการควบคุมแบบแอลคิวอาร์ (LQR control) วิธีการนี้ช่วยเปลี่ยนความคลาดเคลื่อนสัญญาณทางเข้าของ LQR จากความคลาดเคลื่อนของสถานะที่ต้องการกับสถานะจริง แม้ว่าการเปลี่ยนแปลงของความคลาดเคลื่อนใน LQR ทำให้ไม่สามารถควบคุมให้มีการติดตามตำแหน่ง ณ เวลาที่กำหนดได้ สำหรับการใช้งานของยานใต้น้ำนี้ เวลาไม่ใช่ข้อกำหนดที่สำคัญ ซึ่งทำให้วิธีการควบคุมง่ายกว่าการใช้เครื่องมือเพียงชนิดใดชนิดหนึ่ง รูปที่ 4.22 แสดงแผนผังข้อมูลของ VFC ช่วยเหลือการควบคุมเส้นทางของยานใต้น้ำ VFC คำนวณสถานะที่ต้องการ (desired state, X_d) เปรียบเทียบกับสถานะเต็ม (full state, X_f) ซึ่งถูกรวมเข้ากับสัญญาณทางออก (output state, Y) จากระบบของยานใต้น้ำและตัวประมาณความเร็ว (velocity estimator, \hat{V}) จากส่วนประมาณสถานะแบบลดลำดับ (reduce-order state estimator) ซึ่งให้ความคลาดเคลื่อนของ

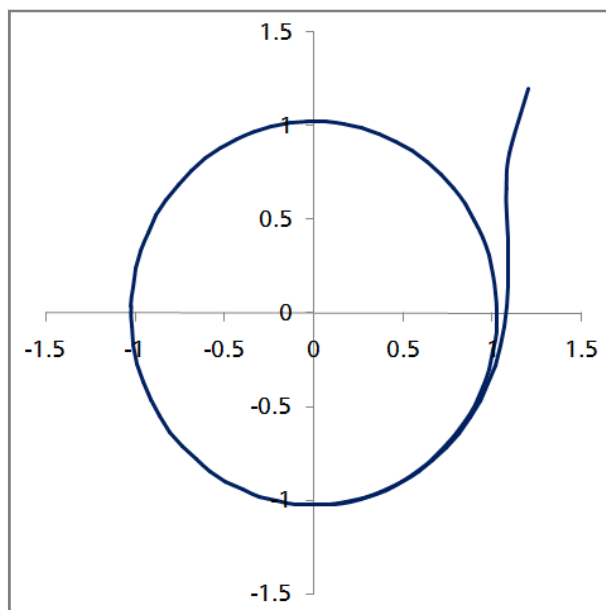
สถานะ (X_e) ความคลาดเคลื่อนถูกป้อนเข้าไปยัง ส่วนควบคุม (LQR controller) เพื่อสร้างสัญญาณควบคุม U เพื่อให้สามารถติดตามเส้นทางที่ออกแบบได้



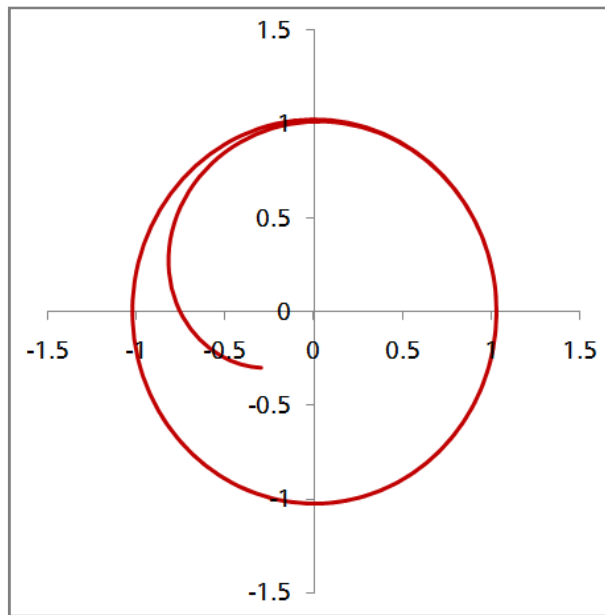
รูปที่ 4.22 ตัวควบคุมระบบยานใต้น้ำอัตโนมัติ

4.3.3.1 สนามความเร็ววงกลม (Circular Velocity Field)

ตัวอย่างการวางแผนเส้นทางของยานใต้น้ำถูกกำหนดเป็นวงกลมรัศมี 1 เมตร บนพื้นที่สี่เหลี่ยมวงกลม 3×3 เมตร รูปที่ 4.23 แสดงเส้นทางโคจรที่กำหนดของยานใต้น้ำอัตโนมัติเริ่มต้นจากจุด $(1.2, 1.2)$ และ รูปที่ 4.24 แสดงเส้นทางโคจรที่กำหนดของยานใต้น้ำอัตโนมัติเริ่มต้นจากจุด $(-0.3, -0.3)$



รูปที่ 4.23 เส้นทางโคจรที่กำหนดของยานใต้น้ำอัตโนมัติ เริ่มต้นจากจุด $(1.2, 1.2)$



รูปที่ 4.24 เส้นทางโคจรที่กำหนดของยานได้นำ้อัด โนมัตติ เริ่มต้นจากจุด $(-0.3, -0.3)$

สมการเส้นทางวงกลมเป็น

$$f(x, y) = x^2 + y^2 - r_c^2 \quad (4.3.53)$$

โดยที่ r_c เป็นรัศมีของเส้นทางวงกลม

ความเร็วที่ต้องการในทิศทาง x เป็น

$$u_d = \dot{x} = y - x(x^2 + y^2 - r_c^2) \quad (4.3.54)$$

ความเร็วที่ต้องการในทิศทาง y เป็น

$$v_d = \dot{y} = -x - y(x^2 + y^2 - r_c^2) \quad (4.3.55)$$

มุมหรือทิศที่ต้องการของยานได้นำ้อัด โนมัตติเป็น

$$\psi_d = \arctan2(\dot{y}, \dot{x}) \quad \text{For } -\pi < \psi_d < \pi \quad (4.3.56)$$

ความเร็วเชิงมุมที่ต้องการเขียนได้เป็น

$$r_d = \dot{\psi} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \psi}{\partial x} & \frac{\partial \psi}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} \quad (4.3.57)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{-y}{(x^2+y^2)} & \frac{x}{(x^2+y^2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{x}}{\partial x} \\ \frac{\partial \dot{y}}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (4.3.58)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = \begin{bmatrix} \frac{-y}{(x^2+y^2)} & \frac{x}{(x^2+y^2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{x}}{\partial y} \\ \frac{\partial \dot{y}}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (4.3.59)$$

$$r_d = \begin{bmatrix} \frac{-y}{(x^2+y^2)} & \frac{x}{(x^2+y^2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial \dot{x}}{\partial x} & \frac{\partial \dot{x}}{\partial y} \\ \frac{\partial \dot{y}}{\partial x} & \frac{\partial \dot{y}}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} \quad (4.3.60)$$

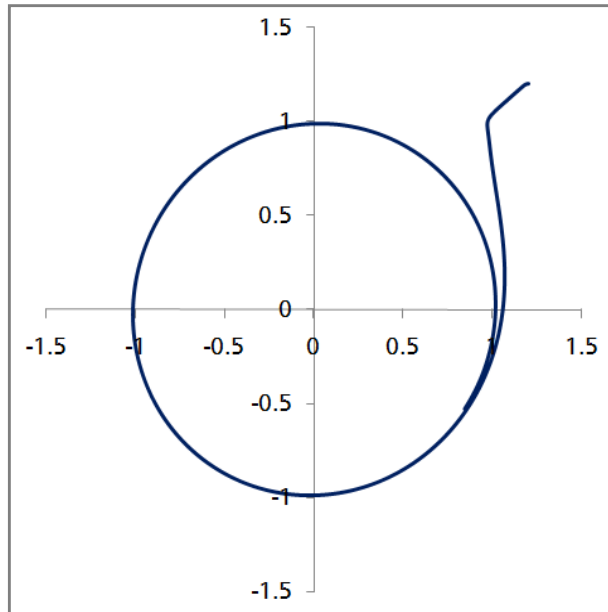
ความเร็วที่ต้องการ (desired velocity, \mathcal{V}_d) สามารถเขียนรวมได้เป็น

$$\mathcal{V}_d = [u_d \quad v_d \quad r_d]^T \quad (4.3.61)$$

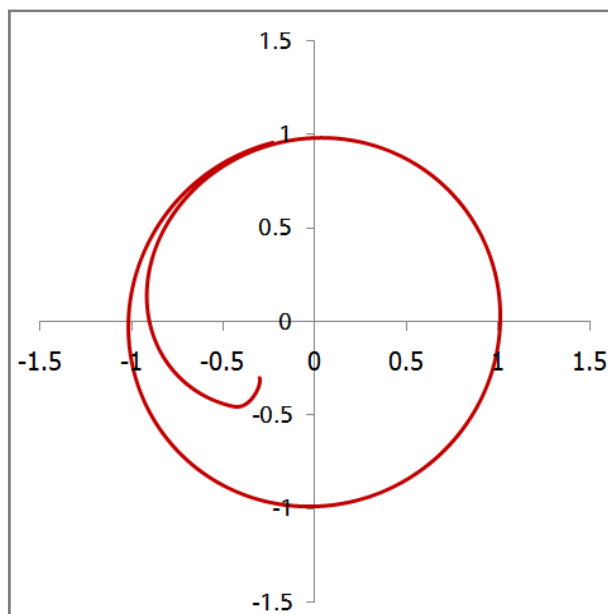
ความเร็วที่ต้องการ (desired velocity) ในสมการที่ (4.3.61) นี้จะถูกป้อนเข้าไปในการควบคุม LQR เพื่อให้ติดตามเส้นทางของยานใต้น้ำอัตโนมัติได้

4.3.3.2 ผลการจำลอง (Simulation Results)

สังเกตได้ว่าการจำลองถูกกำหนดให้จุดเริ่มต้นจากคู่ลำดับเป็นบวก กำหนดให้เป็นเส้นทางโคจรที่ต้องการ เพื่อแสดงวิธีการของเรา จากนั้นกำหนดให้จุดเริ่มต้นที่แตกต่างกันสำหรับยานใต้น้ำอัตโนมัติ เพื่อแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนของเราทำให้ยานใต้น้ำอัตโนมัติสามารถทำงานได้ที่จุดเริ่มต้นใด ๆ ผลลัพธ์การจำลองของ VFC ช่วยควบคุมเส้นทางของยานใต้น้ำแสดงดังรูปที่ 4.25 และ รูปที่ 4.26 รูปที่ 4.25 แสดงผลการจำลองจากจุดเริ่มต้นที่คู่ลำดับ x และ y (1.2, 1.2) ซึ่งยานใต้น้ำเข้าสู่เส้นทางที่ออกแบบไว้ตามทิศทางสนามความเร็วที่กำหนดจากนั้นเซตจุดเริ่มต้นอยู่ที่ (-0.3, -0.3) ยานใต้น้ำเคลื่อนที่ออกและเข้าสู่เส้นทางวงกลมดังแสดงในรูปที่ 4.26



รูปที่ 4.25 ผลการจำลองเส้นทางของยานใต้น้ำจากจุดเริ่มต้นที่ (1.2,1.2)

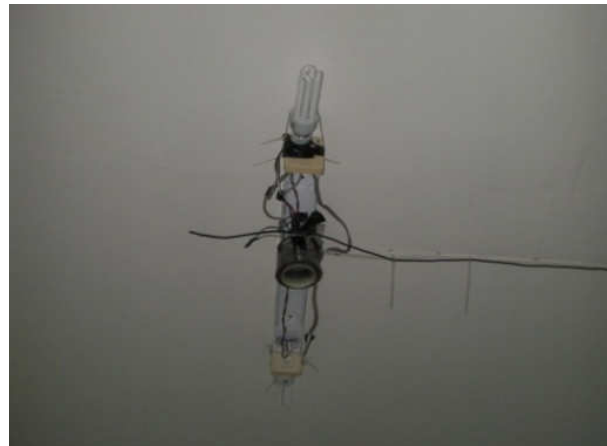


รูปที่ 4.26 ผลการจำลองเส้นทางของยานใต้น้ำจากจุดเริ่มต้นที่ (-0.3,-0.3)

4.3.3.3 วิธีการทดสอบ (Testing Methodology)

เพื่อเป็นการพิสูจน์การควบคุมแบบสนามความเร็วช่วยควบคุมติดตามการโคจรของยานใต้น้ำอัตโนมัติ ได้ทำการทดลองในสระน้ำขนาด 3×3 เมตร ใช้การควบคุมป้อนกลับด้วยภาพจากกล้อง USB เพื่อแสดงเป็นตำแหน่งของตัวยานใต้น้ำ กล้อง USB ถูกติดตั้งบริเวณตรงกลางฝ้าด้านบนดังแสดงในรูปที่ 4.27 ซึ่งจัดเตรียมให้มองครอบคลุมพื้นที่ 3×3 เมตร แผ่นวงกลมสีแดงถูกติดตั้งบนตัว

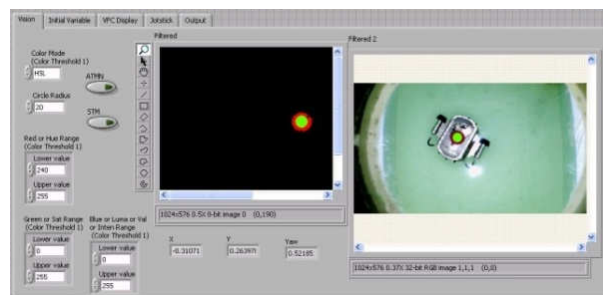
ยานเพื่อแสดงตำแหน่งของยานใต้น้ำดังแสดงในรูปที่ 4.28 ภาพจากกล้อง USB ถูกกรองด้วยระบบการมองเห็น (vision system) ในโปรแกรม LabVIEW โปรแกรมจะปรับภาพให้เห็นเพียงสีแดงกับสีดำดังรูปที่ 4.29 จุดศูนย์กลางของวงกลมสีแดงจะถูกใช้เป็นตำแหน่งของยานใต้น้ำ ซึ่งแสดงเป็นความละเอียดภาพขนาด 640×480 pixel ความละเอียดของภาพถูกแปลงเป็นระยะบนแกน x และแกน y เพื่อวัดเป็นตำแหน่งของยานใต้น้ำ สำหรับการติดตามการควบคุมเส้นทางโคจร



รูปที่ 4.27 การติดตั้งกล้อง USB



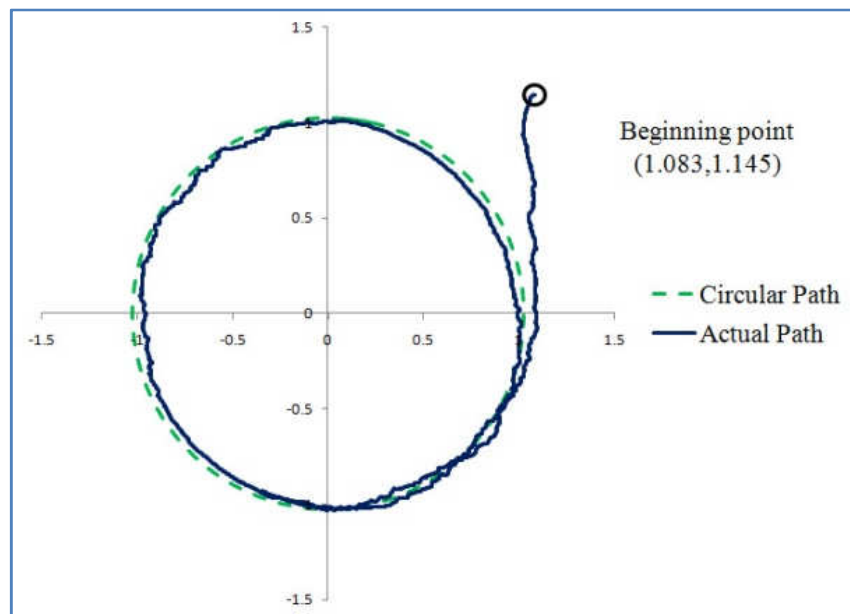
รูปที่ 4.28 แผ่นวงกลมสีแดงบนยานใต้น้ำอัตโนมัติ



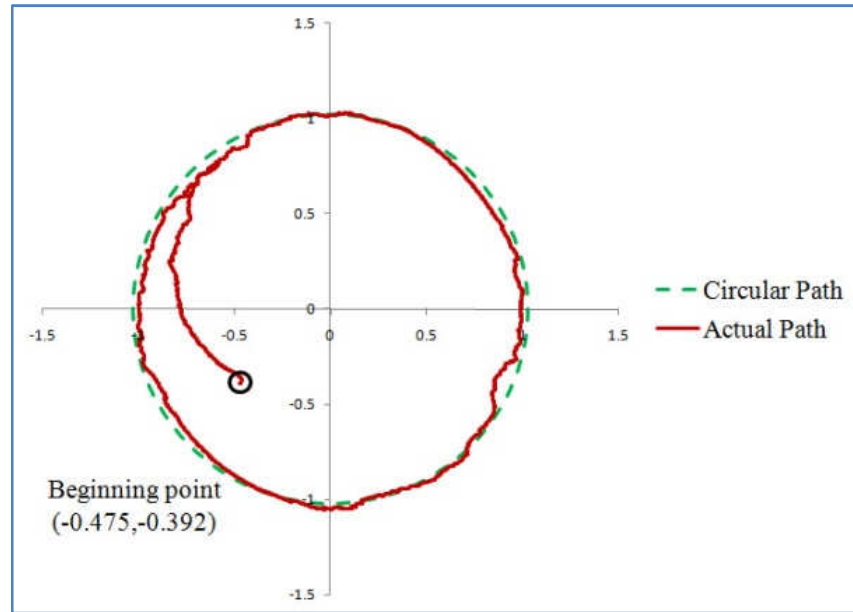
รูปที่ 4.29 ระบบการมองเห็นของโปรแกรม LabView vision

4.3.3.4 ผลการทดสอบ (Testing Results)

เพื่อควบคุม VFC ช่วยเหลือ LQR เมตริกซ์น้ำหนักตัวประมาณค่า (weight matrix) และ LQR ได้แก่ R_e , Q_e , R , และ Q จะต้องปรับจนกระทั่งยานลู่เข้าสู่เส้นทางที่ต้องการ (desired paths) เมตริกซ์น้ำหนักทั้งหมดจากการจำลองถูกนำมาใช้ในการควบคุมการทดสอบ อย่างไรก็ตามการปรับค่าอัตราขยายให้ได้ผลดีจะต้องกระทำในการควบคุมจริง ข้อจำกัดของการประยุกต์ใช้งานนี้ก็คือการตอบสนองของระบบ เนื่องจากระบบการมองเห็น (vision system) ซึ่งจะใช้เวลาเกือบทั้งหมดของการประมวลผล ดังนั้นความละเอียดของภาพจะต้องน้อยเพื่อเวลาในการประมวลผลน้อยลง การทดลองแรก เริ่มจากจุด x และ y อยู่นอกวงกลมรัศมี 1 เมตร ดังนั้นตำแหน่งของยานจะเป็นบวกทั้งในทิศทาง x และ y เทียบกับศูนย์กลาง xy ในการทดลองที่สอง ยานได้นำอัตโนมัติเริ่มจากคู่ลำดับ x และ y ที่เป็นลบและอยู่ภายในรัศมี 1 เมตร ในการทดลองแรก VFC ช่วยเหลือตัวควบคุม LQR ยานได้นำอัตโนมัติซึ่งลู่เข้าสู่เส้นทางที่ต้องการ มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ ± 6.92 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.30 ในการทดลองที่สอง เมื่อจุดเริ่มต้นอยู่ภายในเส้นทางที่ต้องการ ยานได้นำอัตโนมัติควบคุมและลู่เข้าสู่เส้นทางที่ต้องการ มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ ± 6.30 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.30 การใช้เครื่องมือ VFC ของยานได้นำอัตโนมัติ จุดเริ่มต้นอยู่นอกเส้นทางวงกลม



รูปที่ 4.31 การใช้เครื่องมือ VFC ของยานใต้น้ำอัตโนมัติ จุดเริ่มต้นอยู่ในเส้นทางวงกลม

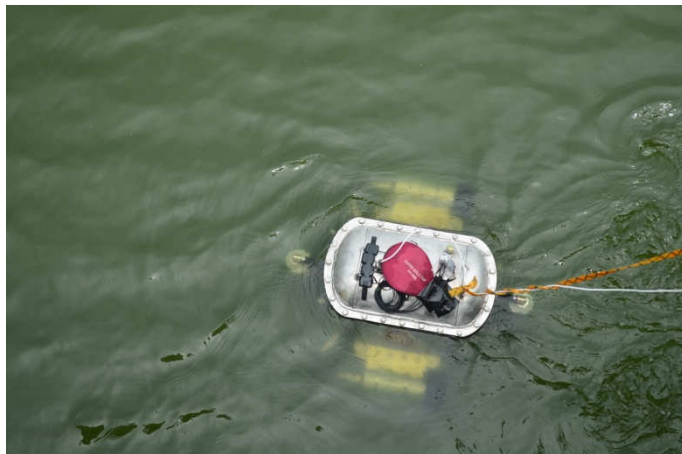
การทดลองนี้ได้ประยุกต์วิธีการ VFC สำหรับการติดตามเส้นทางโคจรของยานใต้น้ำอัตโนมัติ การควบคุมสนามความเร็ว (VFC) เปลี่ยนรูปแบบระบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear system) ให้เป็นเส้นตรง เล็ก ๆ ในช่วงเวลาหนึ่งเพื่อให้ระบบสามารถควบคุมได้ง่ายและมีความคงทน (robust) ผลการจำลอง และการทดลองแสดงและพิสูจน์ให้เห็นว่า การควบคุมสนามความเร็ว (VFC) สามารถประยุกต์กับการติดตามเส้นทางโคจรยานใต้น้ำอัตโนมัติบนระนาบได้ทุก ๆ จุดบนพื้นที่

4.4 การทดสอบการทำงานโดยผู้ควบคุม

นอกเหนือจากการทดลองระบบควบคุมแบบอัตโนมัติทั้ง 3 แบบแล้ว ได้ทำการทดลองควบคุมด้วย จอยสติค เพื่อทดสอบการทำงานของระบบต่างๆ โดยได้ทำการทดลองที่หนองสมบูรณ์ ซึ่งเป็นส่วน สาธารณะในจังหวัดนครสวรรค์ ผู้ควบคุมได้ควบคุมยานด้วยจอยสติคเพื่อให้ยานใต้น้ำเคลื่อนที่ไปยัง ตำแหน่งกลางสะพาน แล้วทดลองควบคุมไปยังตำแหน่งอื่นๆ พบว่าระบบยังมีการตอบสนองต่อคำสั่ง ซ้ำอยู่



รูปที่ 4.32 การนำยานใต้น้ำขนาดเล็กลงน้ำ



รูปที่ 4.33 ทำการควบคุมยานใต้น้ำขนาดเล็กด้วยจอยสติค



รูปที่ 4.34 ควบคุมยานใต้น้ำขนาดเล็กมายังตำแหน่งกลางสะพาน

4.5 บทส่งท้าย

การทดลองควบคุมทิศทางยานด้วยการควบคุมแบบพีไอดีเป็นการควบคุมแบบสัญญาณทางเข้าและทางออกเดียว (SISO) ทดลองควบคุมการทำงานของระบบในอ่างน้ำกลมน้ำลึกเส้นผ่าศูนย์กลาง 2 เมตร ลึก 50 เซนติเมตร ผลการทดลองสามารถควบคุมทิศทางยานใต้น้ำตามมุมที่กำหนดและการเปลี่ยนแปลงมุมแบบต่อเนื่องได้

การจำลองการควบคุมแบบลดผลกระทบด้วยสนามความเร็วร่วมกับการควบคุมแบบพีไอดี เป็นการติดตามเส้นทางโคจรของยานใต้น้ำ กำหนดเส้นทางเป็นวงกลมรัศมี 3 เมตร บนพื้นที่สี่เหลี่ยมขนาด 10×10 เมตร ทดลองการทางคณิตศาสตร์ของระบบและระบบเสริม (augmented system) สมการการเคลื่อนที่ของยาน ปรับอัตราขยาย (gain) ต่างๆ จนระบบสามารถจำลองการทำงานได้ ผลการจำลองสามารถใช้ PVFC จำลองการติดตามเส้นทางโคจรของยานใต้น้ำได้ตามต้องการในทุกๆ จุดบนระนาบ

การทดลองควบคุมแบบสนามความเร็วช่วยควบคุมเส้นทางของยานใต้น้ำอัตโนมัติ เป็นการติดตามเส้นทางโคจรของยานใต้น้ำแบบวงกลม รัศมี 1 เมตร บนพื้นที่สี่เหลี่ยม 3×3 เมตร สมการการเคลื่อนที่ของยาน คัดจากผลของมวลที่เพิ่มขึ้น (added mass) ระบบควบคุมสนามความเร็ว (VFC) นำมาช่วยควบคุมการทำงานของแอลคิวอาร์ (LQR) ร่วมกับระบบประมาณค่าแบบลดรูปสถานะ (reduce-order state estimator) ช่วยให้ระบบมีสถานะเต็ม (full state) ผลการจำลองยานใต้น้ำสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่เส้นทางโคจรที่กำหนดได้ ไม่ว่าจะเริ่มต้นที่จุดใดๆ บนระนาบ ทดสอบการทำงานของระบบในสระขนาด 3×3 เมตร กล้อง USB จับภาพเป้าสีแดงบนตัวยานส่งให้ระบบการมองเห็น (vision system) ในโปรแกรม LabVIEW แปลงเป็นพิกัดตัวยาน ผลการทดลองยืนยันได้ว่าการควบคุมแบบสนามความเร็ว (VFC) สามารถเปลี่ยนรูประบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นให้เป็นเสมือนระบบเชิงเส้น ช่วยให้ระบบควบคุมทำงานง่ายและมีความคงทน (robust)

การทดลองควบคุมโดยผู้ควบคุมจากจอยสติคผ่านคอมพิวเตอร์พีซีบนบกทำให้ผู้ควบคุมสามารถควบคุมยานไปในตำแหน่งและทิศทางต่างๆ ตามที่ต้องการได้