

4.2 จำลองการควบคุมแบบลดผลกระทบด้วยสนามความเร็ว (Passive Velocity Field Control; PVFC)

พิจารณาสมการทั่วไปของระบบทางกล ใน n มิติ (n -dimensional) สมการพลศาสตร์สามารถเขียนได้ในรูปของ

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} = G(q)u \quad (4.2.1)$$

โดยที่ q เป็นตำแหน่งเฉพาะของหุ่นยนต์ $q = [q_1 \quad q_2 \quad \dots \quad q_n]^T$

$M(q)$ เป็นเมตริกซ์ของมวลและโมเมนต์ความเฉื่อย

$C(q, \dot{q})$ เป็นเทอมของ คอริโอลิสและเซนตริพิทัล (the Coriolis and Centripetal terms)

u เป็นสัญญาณการควบคุมของแรงและทอร์ก (the coupling control force and torque)

และ $G(q)$ เป็นเมตริกซ์ของความสัมพันธ์ของทอร์กแต่ละชุดขับเคลื่อน

4.2.1 ระบบเพิ่มเติมทางกล (The Augmented Mechanical System)

สำหรับระบบ PVFC พลังงานจลน์ของระบบปิด ถูกเก็บไว้ในเทอมพลศาสตร์ของล้อช่วยแรง (flywheel) เสมือนซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการควบคุมทางพลศาสตร์ [31, 32, 33, 34]

$$M_F \ddot{q}_{n+1} = \tau_{n+1} \quad (4.2.2)$$

ความเฉื่อยของล้อช่วยแรง (flywheel inertia) $M_F > 0$

τ_{n+1} เป็นทอร์กที่ให้กับล้อช่วยแรง (the input torque to the flywheel)

จากสมการที่ (4.2.1) สามารถเขียนพลศาสตร์ของระบบเพิ่มเติมทางกลได้เป็น

$$\bar{M}(\bar{q})\ddot{\bar{q}} + \bar{C}(\bar{q}, \dot{\bar{q}})\dot{\bar{q}} = \bar{G}(\bar{q})\bar{u} \quad (4.2.3)$$

$$\bar{M}(\bar{q}) = \begin{bmatrix} M(q) & 0 \\ 0 & M_F \end{bmatrix} \quad (4.2.4)$$

$$\bar{C}(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) = \begin{bmatrix} C(q, \dot{q}) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.2.5)$$

$$\bar{u} = \begin{bmatrix} u \\ u_{n+1} \end{bmatrix} \quad (4.2.6)$$

$$\bar{G}(\bar{q}) = \begin{bmatrix} G(q) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2.7)$$

$$\bar{q} = \begin{bmatrix} q \\ q_{n+1} \end{bmatrix} \quad (4.2.8)$$

โดยที่ $\bar{M}(\bar{q})$ เป็นเมตริกซ์ความเฉื่อยของระบบเพิ่มเติม (the inertia matrix of the augmented system)

$\bar{C}(\bar{q}, \dot{\bar{q}})$ เป็นเมตริกซ์คอริโอลิสช่วยเหลือ (the augmented Coriolis matrix)

\bar{n} เป็น คู่ของทอร์กของระบบเสริม (the coupling torque of augmented system)

$\bar{G}(\bar{q})$ เป็นความสัมพันธ์เมตริกซ์แต่ละคู่ของระบบเสริม (the matrix relation of each coupling torque of augmented system)

และ \bar{q} เป็นตำแหน่งเฉพาะที่ของระบบเสริม (local coordinates of augmented system)

เรากำหนดค่าพลังงานจลน์ของระบบพลศาสตร์เสริมแสดงในรูปของเทอมตำแหน่งเฉพาะ

$$\bar{K}(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) = \frac{1}{2} \dot{\bar{q}}^T \bar{M}(\bar{q}) \dot{\bar{q}} \quad (4.2.9)$$

พลังงานจลน์ของระบบทั้งหมดของระบบเสริมสามารถเขียนได้ในรูปสนามความเร็ว (velocity field)

$$\bar{K}(\bar{q}, \bar{V}(\bar{q})) = \frac{1}{2} \bar{V}(\bar{q})^T \bar{M}(\bar{q}) \bar{V}(\bar{q}) = \bar{E} > 0 \quad (4.2.10)$$

เปลี่ยนค่าของพลังงานให้คงที่ที่ \bar{E}

$$\bar{E} = \frac{1}{2} \bar{V}(\bar{q})^T \bar{M}(\bar{q}) \bar{V}(\bar{q}) = \frac{1}{2} M(q) V^2(q) + \frac{1}{2} M_F V_{n+1}^2(q) \quad (4.2.11)$$

$$V_{n+1}(q) = \sqrt{\frac{2}{M_F} (\bar{E} - \frac{1}{2} V(q)^T M(q) V(q))} \quad (4.2.12)$$

4.2.2 สนามความเร็วที่กำหนดของระบบเสริม (Augmented Desired Velocity Field; $\bar{V}(\bar{q})$)

สนามความเร็วที่กำหนด (The desired velocity field, V) ที่ทุก ๆ จุดของ q ในหุ่นยนต์ในพื้นที่ของโครงสร้าง

$$\bar{V}(\bar{q}) = \begin{bmatrix} \alpha V(q) \\ V_{n+1}(q) \end{bmatrix} \quad (4.2.13)$$

$$\alpha V = \begin{bmatrix} \alpha_x v_{dx} \\ \alpha_y v_{dy} \end{bmatrix} \quad (4.2.14)$$

โดยที่

$$\alpha_x = K_x(x_d - x) \quad (4.2.15)$$

$$V_x = \alpha_x v_x \quad (4.2.16)$$

$$\alpha_y = K_y(y_d - y) \quad (4.2.17)$$

$$V_y = \alpha_y v_y \quad (4.2.18)$$

α_x และ α_y เป็นความคลาดเคลื่อนของอัตราขยายของการติดตามเส้นทางโคจร

4.2.3 กฎการควบคุมคู่ (Coupling Control Law)

เนื่องจากการควบคุมคู่ของ PVFC สามารถเขียนได้ในรูปสมการ (4.2.19)

$$\bar{\tau}(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) = \bar{\tau}_c(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) + \bar{\tau}_f(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) \quad (4.2.19)$$

โดยที่

$$\bar{\tau}_c(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) = \frac{1}{2E} (\bar{w}\bar{P}^T - \bar{P}\bar{w}^T)\dot{\bar{q}} \quad (4.2.20)$$

$$\bar{\tau}_f(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) = \gamma(\bar{P}\bar{p}^T - \bar{p}\bar{P}^T)\dot{\bar{q}} \quad (4.2.21)$$

$$\bar{p}(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) = \bar{M}(\bar{q})\dot{\bar{q}} \quad (4.2.22)$$

$$\bar{P}(\bar{q}) = \bar{M}(\bar{q})\bar{V}(\bar{q}) \quad (4.2.23)$$

และ

$$\bar{w}(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) = \bar{M}(\bar{q})\dot{\bar{V}}(\bar{q}) + \bar{C}(\bar{q}, \dot{\bar{q}})\bar{V}(\bar{q}) \quad (4.2.24)$$

กำหนดให้

$$\bar{G}(\bar{q})\bar{u} = \bar{\tau}(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) \quad (4.2.25)$$

$$\bar{u} = (\bar{G}(\bar{q})^T \bar{G}(\bar{q}))^{-1} \bar{G}(\bar{q})^T \bar{\tau}(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) \quad (4.2.26)$$

สังเกตว่า E จะเป็นค่าที่เลือกให้มีค่ามากเพียงพอที่ทำให้สมการที่ (4.2.12) มีผลเฉลยจริงในสมการที่ (4.2.21) γ เป็นอัตราขยายป้อนกลับ (feedback control gain) ไม่จำเป็นต้องมีค่าเป็นบวก ซึ่งหาได้จากอัตราการลู่เข้า (convergence rate) และความรู้สึกลงในสนามความเร็วตามที่กำหนด $\dot{\bar{V}}(\bar{q})$ เป็นเกรเดียนต์ของสนามความเร็วที่กำหนด เขียนได้เป็น

$$\dot{\bar{V}}(\bar{q}) = \sum_{k=1}^{n+1} \frac{\partial \bar{V}_i(\bar{q})}{\partial q_k} \dot{q}_k \quad (4.2.27)$$

4.2.4 การจำลองระบบของยานใต้น้ำอัตโนมัติ (Modeling of The AUV System)

เรากำหนดให้ใช้ต้นกำลังขับ (thruster) เพียง 2 คู่คือ คู่ P_1, P_2 และคู่ P_3, P_4 สำหรับการติดตามการเคลื่อนที่บนระนาบ สมมติให้ต้นกำลังขับ (thruster) แต่ละคู่ทำงานด้วยความเร็วที่เท่ากัน ($P_y = P_1 = P_2$ สำหรับในทิศทาง y และ $P_x = P_3 = P_4$ สำหรับในทิศทาง x)

เพื่อให้่ายในการควบคุม สมมติให้ยานใต้น้ำเคลื่อนที่บนระนาบ xy โดยไม่มีการหมุน ทำให้อานใต้น้ำมีคุณสมบัติระบบขับเคลื่อนเต็มรูปแบบ (fully actuated) สำหรับการติดตามการควบคุมบนระนาบ (2-DOF) ดังแสดงในรูปที่ 4.12

สมการการเคลื่อนที่ในทิศทาง x (x-direction EOM)

$$M\ddot{x} + \frac{\rho C_{Dx} A_x \dot{x}^2}{2} = P_3 + P_4 \quad (4.2.28)$$

$$\ddot{x} = \frac{P_3 + P_4}{M} - \frac{\rho C_{Dx} A_x \dot{x}^2}{2M} \quad (4.2.29)$$

สำหรับ $P_x = P_3 = P_4$

$$\ddot{x} = \frac{2P_x}{89.50} - 0.787\dot{x}^2 \quad (4.2.30)$$

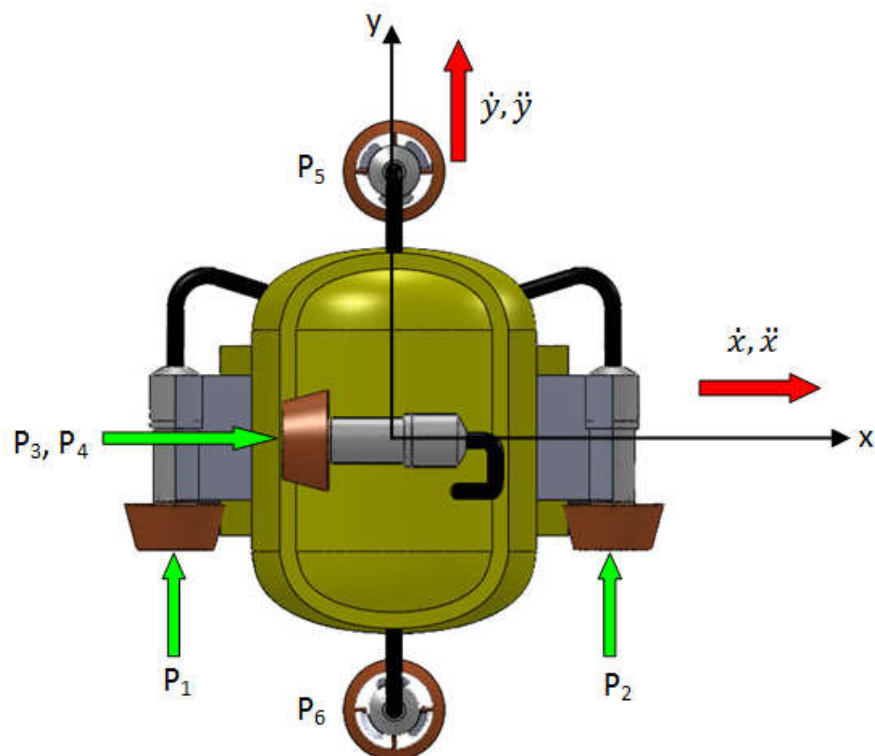
สมการการเคลื่อนที่ในทิศทาง y (y-direction EOM)

$$M\ddot{y} + \frac{\rho C_{Dy} A_y \dot{y}^2}{2} = P_1 + P_2 \quad (4.2.31)$$

$$\ddot{y} = \frac{P_1 + P_2}{M} - \frac{\rho C_{Dy} A_y \dot{y}^2}{2M} \quad (4.2.32)$$

สำหรับ $P_y = P_1 = P_2$

$$\ddot{y} = \frac{2P_y}{89.50} - 0.425\dot{y}^2 \quad (4.2.33)$$



รูปที่ 4.12 แผนภาพอิสระของยานบนระนาบ xy (ROV's free body diagram in xy-plane)

กำหนดให้ยานมวลของยานใต้น้ำเป็น $M = 89.50 \text{ kg}$ สัมประสิทธิ์แรงต้านการเคลื่อนที่ในทิศทาง x และทิศทาง y มีค่าเป็น $C_{Dx} = 0.55$ และ $C_{Dy} = 0.48$ พื้นที่หน้าตัดของยานใต้น้ำในแกน x และแกน y มีค่าเป็น $A_x = 0.257 \text{ m}^2$ และ $A_y = 0.159 \text{ m}^2$ ความหนาแน่นน้ำเป็น $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$ เพื่อที่จะเปลี่ยนรูปของการควบคุมทอร์คคู่ ($\bar{\tau}$) เพื่อให้แรงของชุดขับเคลื่อนยานใต้น้ำ (\bar{u}) จากสมการที่ (4.2.26) ความสัมพันธ์ของเมตริกซ์ของทอร์คแต่ละคู่ ($\bar{G}(\bar{q})$) สามารถเขียนได้เป็น

$$\bar{G}(\bar{q}) = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2.34)$$

$$\bar{u} = [P_x \quad P_y \quad \tau_{n+1}]^T = (\bar{G}^T \bar{G})^{-1} \bar{G}^T \bar{\tau} \quad (4.2.35)$$

4.2.5 การติดตามการโคจรยานใต้น้ำบนระนาบ (The AUV Planar Trajectory Tracking)

การวางแผนเส้นทางของยานใต้น้ำถูกกำหนดเป็นเส้นทางโคจรรูปวงกลมรัศมี 3 เมตร บนพื้นที่สี่เหลี่ยมขนาด 10×10 เมตร สำหรับตัวอย่างสมมุติจุดเริ่มต้นจากจุด $(x,y)=(-5,-5)$ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และจากจุด $(x,y)=(1,1)$ ดังรูปที่ 4.13

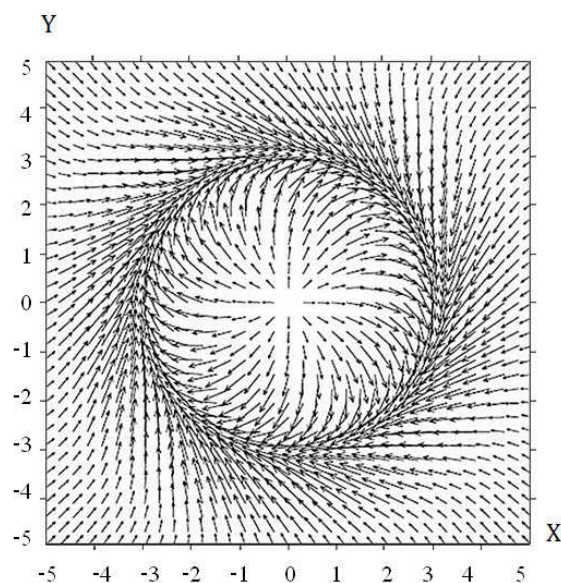
สมการเส้นโค้งวงกลมเป็น $f(x,y) = x^2 + y^2 - r^2$ (4.2.36)

ความเร็วที่กำหนดในทิศทาง x เป็น $v_x = \dot{x} = y - x(x^2 + y^2 - r^2)$ (4.2.37)

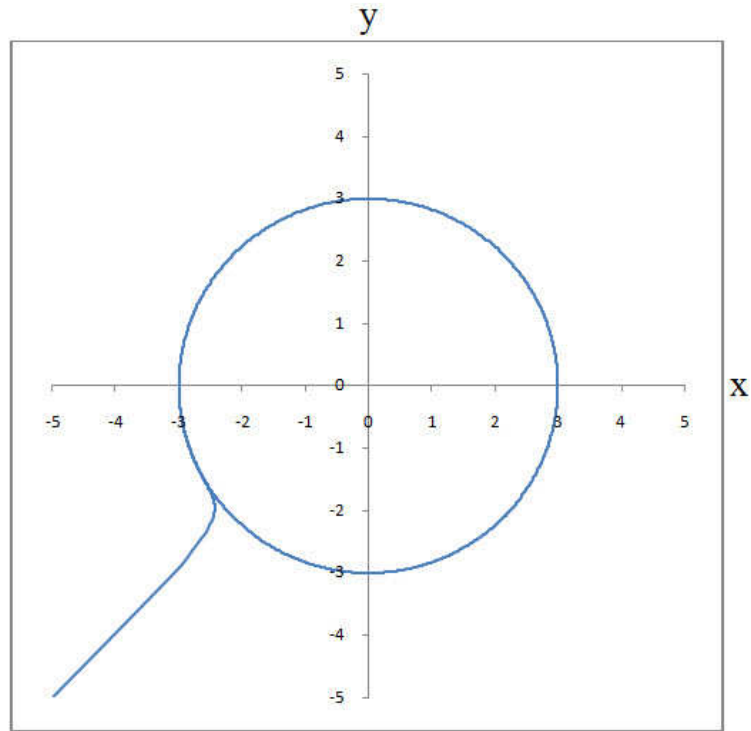
ความเร็วที่กำหนดในทิศทาง y เป็น $v_y = \dot{y} = -x - y(x^2 + y^2 - r^2)$ (4.2.38)

รวมสมการความเร็วทั้งสองทิศทางเป็น (\mathcal{V}) $v = [\dot{x} \quad \dot{y}]^T$ (4.2.39)

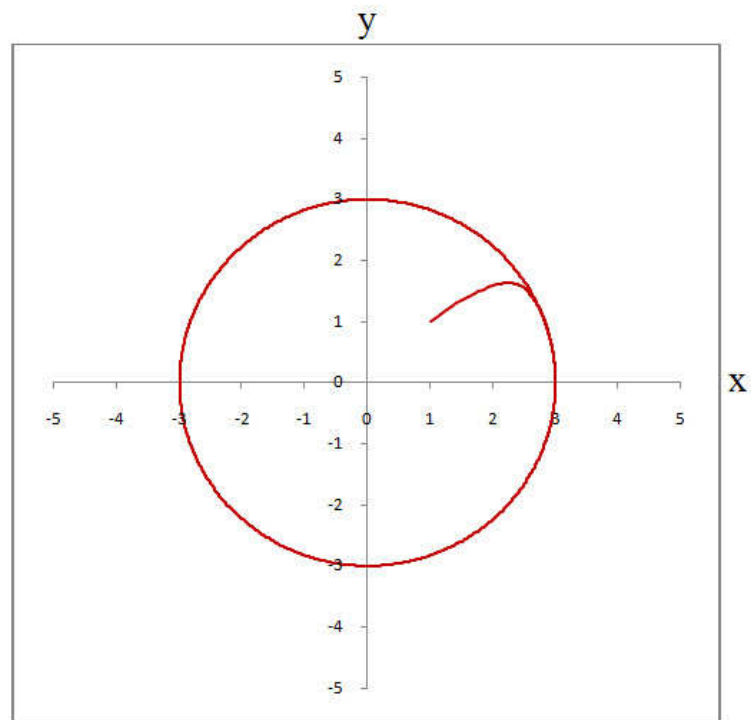
สมการความเร็ว (4.2.39) ถูกป้อนเข้าไปยังส่วนควบคุมความเร็วแบบพีไอดี (PID speed control) เพื่อรักษาความเร็วการโคจรของยานใต้น้ำ



รูปที่ 4.13 สนามความเร็วของเส้นทางโคจรแบบวงกลม



รูปที่ 4.14 ความเร็วที่กำหนดเมื่อจุดเริ่มต้นอยู่ที่ $(-5, -5)$

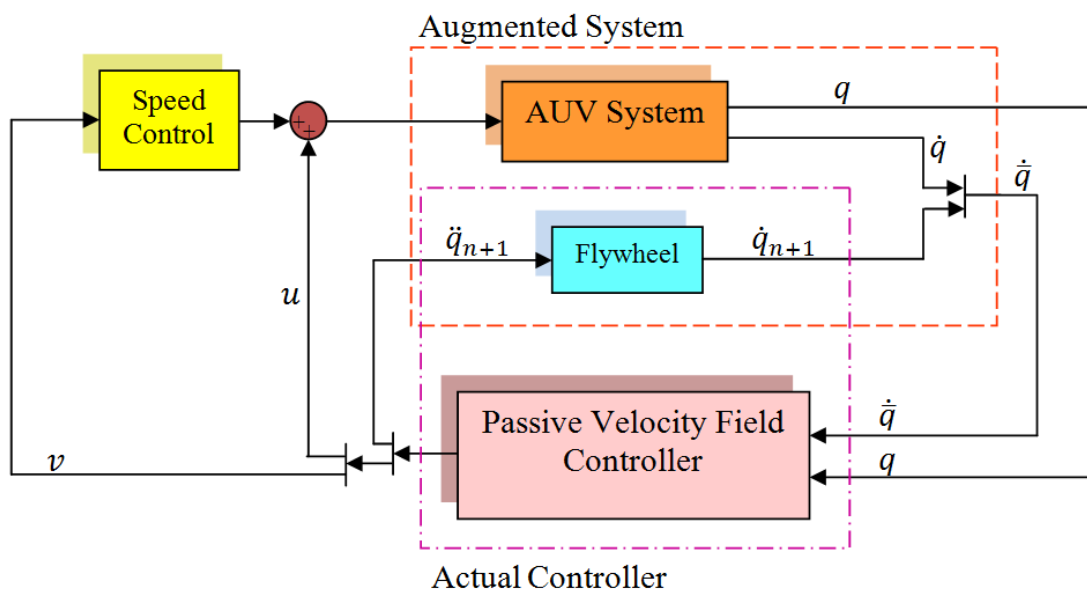


รูปที่ 4.15 ความเร็วที่กำหนดเมื่อจุดเริ่มต้นอยู่ที่ $(1, 1)$

จากรูปที่ 4.13 แสดงสนามความเร็วของเส้นทางโคจรวงกลมบนพื้นที่สี่เหลี่ยม รูปที่ 4.14 แสดงเส้นทางโคจรที่กำหนด (desired path) เริ่มต้นจากจุด (-5, -5) และรูปที่ 4.15 แสดงเส้นทางโคจรที่กำหนด เริ่มต้นจากจุด (1,1)

4.2.6 การจำลองและผลลัพธ์ (Simulation and Results)

สมการการเคลื่อนที่ของยานใต้น้ำที่ (4.2.30) และสมการที่ (4.2.31) แสดงส่วนการควบคุมระบบของยานใต้น้ำ ตำแหน่งใด ๆ ของยาน ($q = [x \ y]^T$) และตำแหน่งความเร็วเสริมใด ๆ (the local augmenting velocities) ($\dot{q} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{q}_{n+1}]^T$) จะถูกป้อนเข้าไปยังส่วนของ PVFC เพื่อประมาณหาค่าความเร็วที่ต้องการ (desired velocity) เพื่อติดตามเส้นทางโคจร ส่วนการควบคุม \ddot{u} สมการที่ (4.2.35) ถูกป้อนเข้าไปยังระบบเสริม (augmented system) ความเร็วที่ต้องการ (desired velocity) (v) ถูกป้อนเข้าไปยังส่วนควบคุมความเร็วแบบพีไอดี (PID speed control) เพื่อควบคุมความเร็วเชิงมุมการโคจรของยานใต้น้ำ แผนผังการควบคุมแสดงได้ดังรูป 4.16

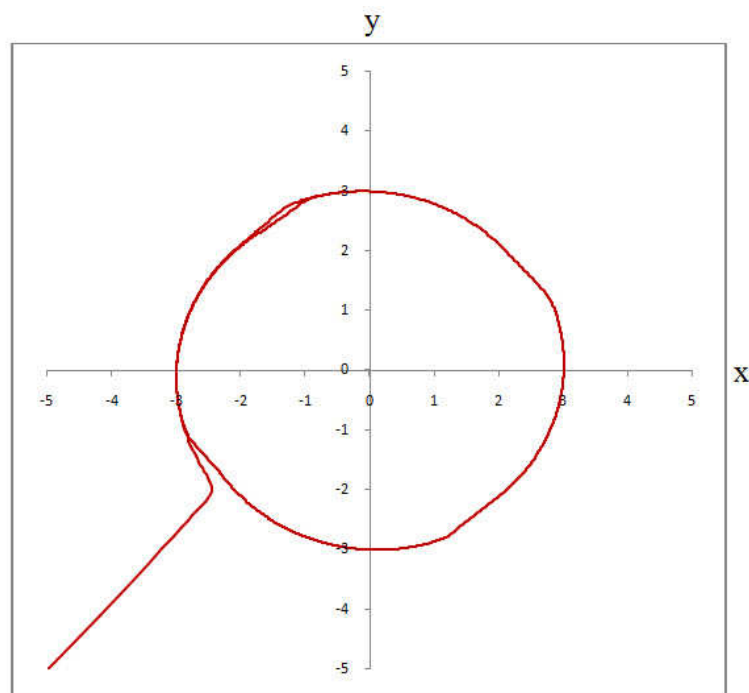


รูปที่ 4.16 แผนผังการทำงานของ PVFC

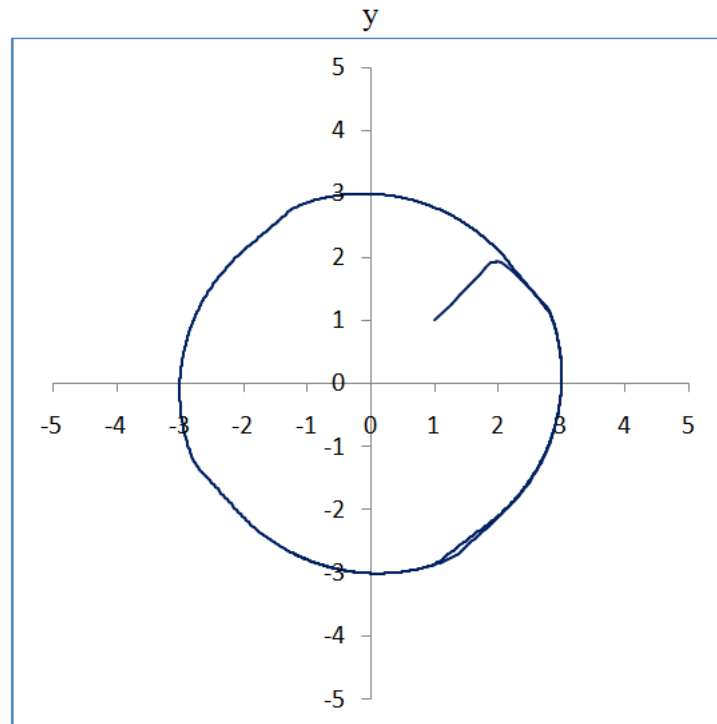
เทคนิคการปรับค่าอัตราขยาย (Gain tuning techniques)

1. เลือกค่า \bar{E} ให้มากที่สุดที่ทำให้สมการที่ (4.2.12) หาผลเฉลยได้จริง ($\bar{E} = 5000000$)
2. กำหนดค่าความถี่ของล้อช่วยแรง $M_F > 0$. ($M_F = 100$)
3. เลือก γ เพื่อกำหนดอัตราการลู่เข้า ($\gamma = -\frac{1}{450}$)
4. กำหนดค่าอัตราขยายคลาดเคลื่อนของการติดตามเส้นทางโคจร ($K_x = \text{sign}(x)$) และ $K_y = \text{sign}(y)$)
5. ปรับแต่งค่าอัตราขยายของพีไอดี (PD gain) K_p และ K_d สำหรับควบคุมความเร็วเชิงมุมในการโคจรของยานได้น้ำ ($K_{Px} = K_{Py} = 100$ and $K_{Dx} = K_{Dy} = 100$)
6. ตั้งเวลาที่ใช้ในการจำลอง ($t = 850$)

ผลลัพธ์จากการจำลองแสดงให้เห็นว่ายานได้น้ำลู่เข้าไปยังเส้นทางที่ต้องการตามสนามความเร็วที่ได้ ออกแบบไว้ รูปที่ 4.17 แสดงผลการจำลองที่จุดเริ่มต้นจาก (-5, -5) และรูปที่ 4.18 จากจุดเริ่มต้นที่ (1, 1)



รูปที่ 5.17 ผลการจำลองการควบคุมจุดเริ่มต้นอยู่ที่ (-5, -5)



รูปที่ 4.18 ผลการจำลองการควบคุมจุดเริ่มต้นอยู่ที่ (1, 1)

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าวิธีการของ PVFC สามารถประยุกต์เข้ากับการติดตามการควบคุมเส้นทางโคจรในระนาบของยานได้นำ PVFC เป็นระบบควบคุมหลักสำหรับการออกแบบสนามความเร็ว การควบคุมแบบพีไอดี (PID control) ถูกนำเข้ามาเพื่อควบคุมความเร็วเชิงมุมการโคจรของยานได้นำโดยอ้างอิงจากความเร็วที่ต้องการ (desired velocity; \mathcal{V}) ผลการจำลองยืนยันได้ว่า PVFC สามารถประยุกต์ใช้งานได้กับการติดตามเส้นทางโคจรของยานได้นำในทุก ๆ จุดบนระนาบ