



บทที่ 4

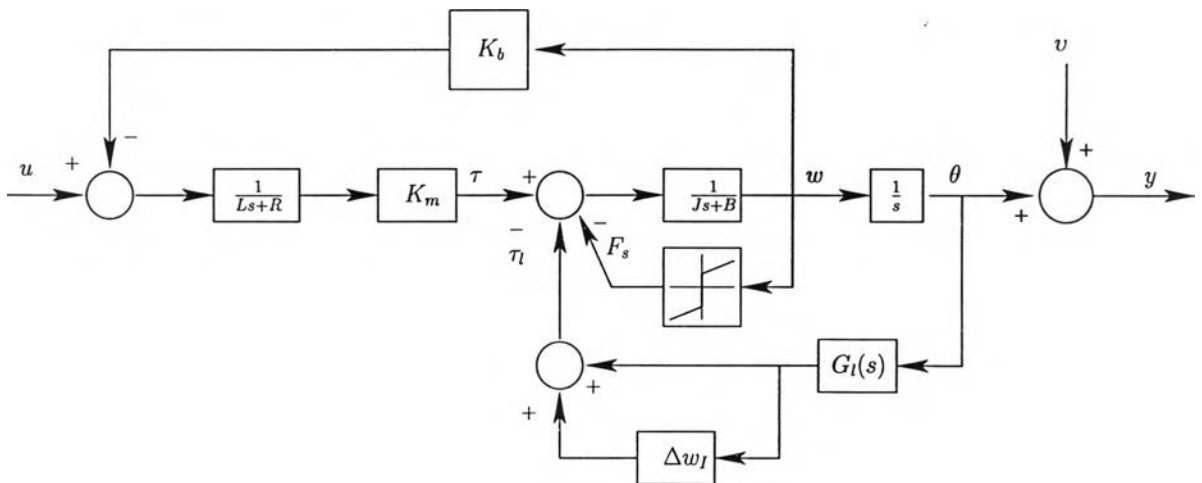
การสังเคราะห์ตัวควบคุมพลวัตสำหรับระบบสายพานลำเลียง

4.1 บทนำ

วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำเป็นแนวทางหนึ่งที่มีการหาเอกลักษณ์กับการสังเคราะห์ตัวควบคุม กลไกการทำงานมีรูปแบบเหมือนกับการควบคุมแบบปรับตัว วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำสามารถออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบพลวัตโดยคำนึงถึงสมรรถนะของระบบวงปิด ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1994 มีการประยุกต์ใช้วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำกับระบบอุตสาหกรรม ได้แก่ระบบสายส่งยึดหุ่นยนต์ [20] แขนกลแบบอ่อนตัว [22] ระบบเลี้ยงลูกบอลบนคนคาน [23] และระบบควบคุมอุณหภูมิในท่อ [21] เป็นต้น ระบบสายพานลำเลียงเป็นระบบหนึ่งที่ใช้อย่างแพร่หลายในการลำเลียงผลิตภัณฑ์แม้ว่าระบบนี้มีสัญญาณเข้าเดียวและสัญญาณออกเดียว แต่แบบจำลองของระบบมีความซับซ้อน อีกทั้งพารามิเตอร์บางตัวไม่อาจทราบค่าได้ และพลวัตของกระบวนการมีการเปลี่ยนแปลงหรือมีความไม่แน่นอน ทำให้การออกแบบตัวควบคุมที่ให้สมรรถนะสูงมีความยุ่งยาก ด้วยเหตุผลดังกล่าว เราจึงสนใจประยุกต์วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำกับการควบคุมระบบนี้ การจำลองผลตอบสนองด้วยคอมพิวเตอร์บ่งชี้ว่าวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำให้สมรรถนะการทำงานที่ยอมรับได้

ระบบสายพานลำเลียงประกอบด้วยส่วนสายพานลำเลียงที่ยึดอยู่กับมอเตอร์กระแสตรง ตำแหน่งเชิงมุมของระบบจะถูกป้อนกลับเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง ระบบควบคุมวงปิดมีแผนภาพแสดงดังรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าระบบสายพานลำเลียงเป็นระบบสัญญาณเข้าเดียวสัญญาณออกเดียว พิจารณาแบบเวลาต่อเนื่อง ประกอบด้วยแบบจำลองมอเตอร์กระแสตรงที่รับสัญญาณเข้าเพื่อขับมอเตอร์กระแสตรง โดยที่สัญญาณเข้า u เป็นแรงดันไฟฟ้า และสัญญาณออกเป็นตำแหน่งเชิงมุม θ ที่อาจมีความคลาดเคลื่อนจากสัญญาณรบกวน v ตารางที่ 4.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของระบบ [31] เป็นที่สังเกตว่า พลวัตของมวลภาระ $G_I(s)$ ส่งผลกระทบต่อตำแหน่งของมอเตอร์กระแสตรงและแรงบิด τ_I นอกจากนี้ แบบจำลองนี้คำนึงถึงความไม่แน่นอนที่ประกอบด้วย พลวัตเนื่องจากการปรับมวลภาระ Δw_I และแรงเสียดทานที่เป็นฟังก์ชันของความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์กระแสตรง แบบจำลองทางกลศาสตร์มาจากการเคลื่อนที่ของมอเตอร์กระแสตรง โดยมีสัญญาณออกเป็นความเร็วเชิงมุม ω และแบบจำลองพลวัตของภาระส่งผลกระทบต่อแบบจำลองทางกลศาสตร์โดยตรง นั่นหมายความว่า ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของมวลภาระทำให้แบบจำลองทางกลศาสตร์ของระบบสายพานลำเลียงเปลี่ยนแปลงไปด้วย

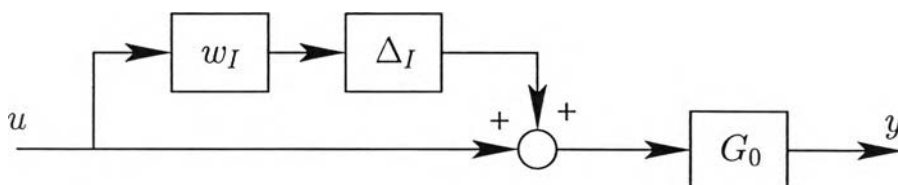
โดยทั่วไป แบบจำลองระบบสายพานลำเลียงสามารถเขียนในรูปแบบจำลองระบุ (Nominal model) และความไม่แน่นอน ดังรูปที่ 4.2 โดยที่ G_o เป็นแบบจำลองระบุ Δw_I เป็นส่วนที่มีความไม่แน่นอน



รูปที่ 4.1: ระบบสายพานลำเลียงที่รวมแบบจำลองความไม่แน่นอน และแรงเสียดทาน

ตารางที่ 4.1: ค่าพารามิเตอร์ของระบบสายพานลำเลียง

พารามิเตอร์	สัญกรณ์	ค่า	หน่วย
โมเมนต์ความเฉื่อย	J	1.2	$\text{Kg}\cdot\text{m}^2$
ตัวประกอบการหน่วง	B	2.2	$\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$
ค่าคงที่แรงบิด	K_m	3.42×10^{-2}	$\text{N}\cdot\text{m}/\text{A}$
ค่าคงที่แรงเคลื่อนเหนี่ยวนำ	K_b	3.42×10^{-2}	$\text{Volt}/\text{rad}/\text{s}$
ตัวต้านทาน	R	0.6	Ω
ตัวเหนี่ยวนำ	L	1.24	H
น้ำหนักมวลถาวร	M	0.5	Kg
น้ำหนักสายพานลำเลียงของ i^{th} ช่วง	m_i	0.01	Kg
ค่าคงที่สปริง	k_i	20	N/m
รัศมีของมอเตอร์กระแสตรง	r	0.1	m
ความแข็งตึง	σ_0	10	N/m
ค่าความหน่วง	σ_1	$\sqrt{10}$	Ns/m
แรงเสียดทานคูลอมบ์ของ i^{th}	F_c^i	$1 \times m_i$	N
แรงเสียดทานของความหนืด	F_v	0.5	N
แรงเสียดทานความเครียด i^{th}	F_s^i	$2 \times F_c$	N
ความเร็วสทริกเบคด์	v_s	0.001	m/s



รูปที่ 4.2: ความไม่แน่นอนเชิงการคูณ

4.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระบบสายพานลำเลียง

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสายพานลำเลียงหาได้ด้วยการใช้กฎของนิวตันของมวล พิจารณาร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของสปริงและแรงเสียดทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น โดยแรงเสียดทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นสามารถหาแบบจำลองได้ 3 วิธี [32, 33] ซึ่งประกอบด้วย

1. แบบจำลองที่ไม่มี ความจำ ความหนืดรวมกับคูลอมบ์ (Viscous plus coulomb memoryless model)
2. แบบจำลองอาร์มสตรอง (Armstrong model)
3. แบบจำลองลูจร์ (Lugre model)

4.2.1 พลวัตของระบบสายพานลำเลียง

รูปที่ 4.3 แสดงการแบ่งสายพานลำเลียงออกเป็น N ส่วน ซึ่งแต่ละส่วนประกอบด้วยแบบจำลองของระบบสปริงมวล รูปที่ 4.4 แสดงแผนภาพรูปร่างอิสระของมวลที่มีแรงกระทำ สมมติให้สายพานลำเลียงมีลักษณะเป็นสปริงที่ไม่เป็นเชิงเส้น สมการพลวัตของระบบสายพานลำเลียงเป็นดังนี้

$$M\ddot{x}_m = -F_{\text{fric}}^M + k_m(x_1 - x_m) + b_m(x_1 - x_m)^3 - k_0(x_m - r\theta) - b_0(x_m - r\theta)^3 \quad (4.1)$$

$$m\ddot{x}_j = -F_{\text{fric}}^j + k_j(x_{j-1} - x_j) + b_j(x_{j-1} - x_j)^3 - k_{j+1}(x_j - x_{j+1}) - b_{j+1}(x_j - x_{j+1})^3 \quad (4.2)$$

$$m\ddot{x}_N = -F_{\text{fric}}^N + k_N(r\theta - x_N) + b_N(r\theta - x_N)^3 - k_{N-1}(x_N - x_{N-1}) - b_N(x_N - x_{N-1})^3 \quad (4.3)$$

โดยที่ τ เป็นแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรง x_j เป็นระยะกระจัดของส่วน j^{th} x_m เป็นระยะกระจัดของมวล ภาระ k กับ b เป็นค่าพารามิเตอร์ของสปริง และ θ เป็นตำแหน่งเชิงมุมของมอเตอร์กระแสตรงกำหนดให้ j เป็นจำนวนเต็มใน $[0, N]$ และ F_{fric} เป็นแรงเสียดทานที่ขึ้นกับวิธีหาแบบจำลองทั้ง 3 วิธีตามที่ได้กล่าวมาแล้ว

ต่อไปเป็นการพิจารณาพลวัตของมอเตอร์กระแสตรง การเคลื่อนที่เชิงมุมสอดคล้องกับสมการดังนี้

$$J\ddot{\theta} = \tau + r(T_1 - T_2) \quad (4.4)$$

$$T_1 = k_0(x_m - r\theta) \quad (4.5)$$

$$T_2 = k_N(r\theta - x_N) \quad (4.6)$$

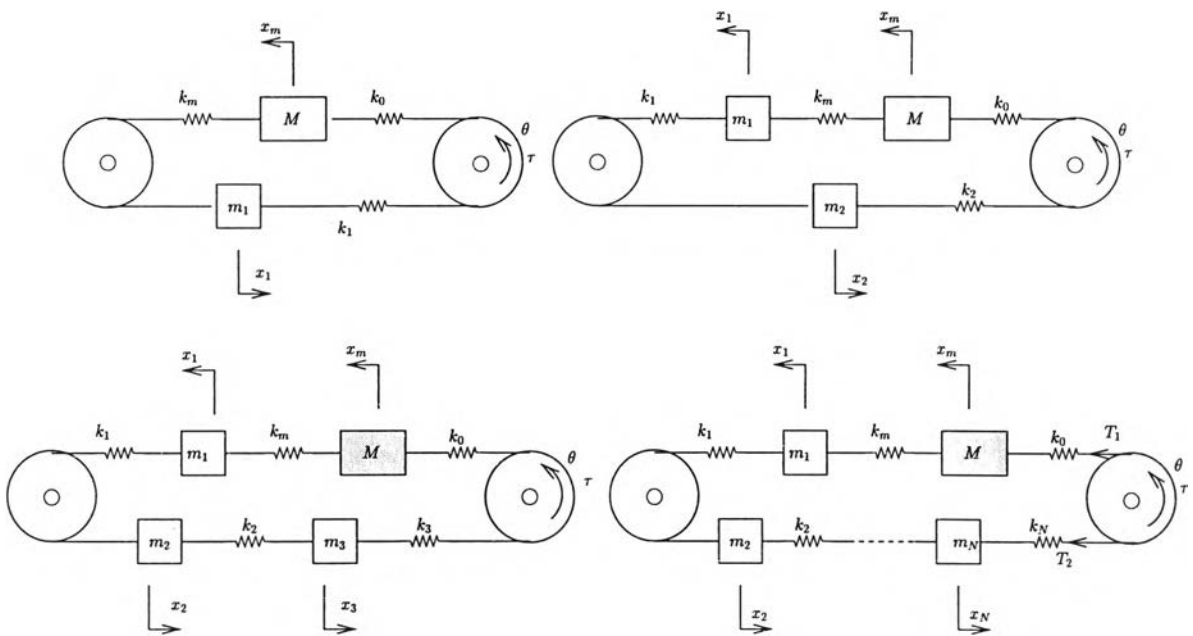
เมื่อแทน T_1 และ T_2 จากสมการ (4.5) และ (4.6) ลงใน (4.4) จะได้ว่า

$$J\ddot{\theta} = \tau + rk_0x_m + rk_Nx_N - r^2\theta(k_0 + k_N) \quad (4.7)$$

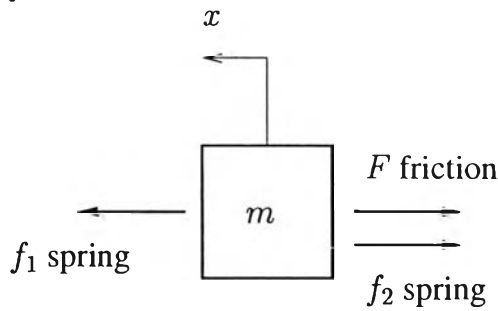
$$\ddot{\theta} = \frac{\tau}{J} + \frac{rk_0x_m}{J} + \frac{rk_Nx_N}{J} - \frac{r^2\theta}{J}(k_0 + k_N) \quad (4.8)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของมอเตอร์กระแสตรง τ กับกระแสของมอเตอร์กระแสตรง i_a เป็นดังนี้

$$\tau = K_m i_a \quad (4.9)$$



รูปที่ 4.3: การแบ่งสายพานลำเลียงเป็น N ส่วน



รูปที่ 4.4: แผนภาพรูปร่างอิสระ

$$\dot{i}_a = \frac{V}{L} - \frac{R}{L}i_a - \frac{e_b}{L} \tag{4.10}$$

$$e_b = K_b \dot{\theta} \tag{4.11}$$

เมื่อแทน (4.11) ใน (4.10) จะได้ว่า

$$\dot{i}_a = \frac{V}{L} - \frac{R}{L}i_a - \frac{K_b}{L}\dot{\theta} \tag{4.12}$$

และแทน (4.9) ลงใน (4.8) จะได้ว่า

$$\ddot{\theta} = \frac{K_m}{J}i_a + \frac{rk_0x_m}{J} + \frac{rk_Nx_N}{J} - \frac{r^2\theta}{J}(k_0 + k_N) \tag{4.13}$$

4.2.2 แบบจำลองเชิงเส้นเชิงเส้นของระบบสายพานลำเลียง

ในกรณีที่เราระบายความไม่เป็นเชิงเส้นของสปริงและแรงเสียดทาน สมการพลวัตเป็นดังนี้

$$\ddot{x}_m = \frac{k_0}{M} r\theta - \frac{k_0 + k_m}{M} x_m + \frac{k_m}{M} x_1 \quad (4.14)$$

$$\ddot{x}_1 = \frac{k_m}{m_1} x_m - \frac{k_m + k_1}{m_1} x_1 + \frac{k_1}{m_1} x_2 \quad (4.15)$$

$$\ddot{x}_2 = \frac{k_1}{m_2} x_1 - \frac{k_1 + k_2}{m_2} x_2 + \frac{k_2}{m_2} x_3 \quad (4.16)$$

⋮

$$\ddot{x}_i = \frac{k_{i-1}}{m_i} x_{i-1} - \frac{k_{i-1} + k_i}{m_i} x_i + \frac{k_i}{m_i} x_{i+1} \quad (4.17)$$

$$\ddot{x}_N = \frac{k_{N-1}}{m_N} x_{N-1} - \frac{k_{N-1} + k_N}{m_N} x_N + \frac{k_N}{m_N} r\theta \quad (4.18)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{K_m}{J} i_a + \frac{r k_0 x_m}{J} + \frac{r k_N x_N}{J} - \frac{r^2 \theta}{J} (k_0 + k_N) \quad (4.19)$$

$$i_a = \frac{V}{L} - \frac{R}{L} i_a - \frac{K_b}{L} \dot{\theta} \quad (4.20)$$

กำหนดให้ z, y, u เป็นตัวแปรสถานะ สัญญาณออกของระบบ และสัญญาณเข้าของระบบตามลำดับ นั่นคือ

$$z = [x_m \ x_1 \ \dots \ x_N \ \dot{x}_m \ \dot{x}_1 \ \dots \ \dot{x}_N \ \theta \ \dot{\theta} \ i_a]^T \quad (4.21)$$

$$y = \theta \quad (4.22)$$

$$u = V \quad (4.23)$$

เราสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการปริภูมิสถานะ (State-space equation)

$$\dot{z} = Az + Bu \quad (4.24)$$

$$y = Cz + Du \quad (4.25)$$

กำหนดให้ $n = 2N + 4$ โดยที่ $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times 1}$, $C \in R^{1 \times n}$ และ $D \in R$ เป็นเมทริกซ์ของสมการสถานะ

ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ $N = 1$ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ของระบบสายพานลำเลียงจากงานวิจัย [31] จะได้ว่า

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -80 & 40 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 \\ 2000 & -4000 & 0 & 0 & 200 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 200 & 200 & 0 & 0 & -40 & 0 & 200 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.2 & -2 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2 \end{bmatrix},$$

$$C = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0], \quad D = 0$$

มีค่าลักษณะเฉพาะเฉพาะเป็น $\pm 63.48j$, $-0.2006 \pm 10.34j$, $-0.800 \pm 4.65j$, และ 0

ในกรณีนี้ $N = 2$ เมทริกซ์ของสมการสถานะเป็น

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -80 & 40 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 \\ 2000 & -4000 & 2000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2000 & -4000 & 0 & 0 & 0 & 200 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 200 & 0 & 200 & 0 & 0 & 0 & -40 & 0 & 200 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.2 & -2 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2 \end{bmatrix},$$

$$C = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0], \quad D = 0$$

มีค่าลักษณะเฉพาะเป็น $\pm 77.53i$, $-0.0001 \pm 45.06i$, $-0.2312 \pm 9.86i$, $-0.7687 \pm 4.58i$, และ 0

4.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์ตัวควบคุมพลวัต

วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำเป็นการออกแบบตัวควบคุมที่บูรณาการการหาเอกลักษณ์ของระบบพร้อมกับการสังเคราะห์ตัวควบคุม ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. กำหนดให้การควบคุมแบบปรับตัวอ้างอิงแบบจำลอง มีรูปแบบแสดงในรูปที่ 2.2 โดยที่ $G_o(q)$ เป็นระบบวงเปิดของระบบสายพานลำเลียง มีพารามิเตอร์ไม่ทราบค่าและมีความไม่แน่นอนของมวลภาระ $C_r(q, \rho)$ และ $C_y(q, \rho)$ เป็นตัวควบคุมเชิงเส้นไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา และกำหนดให้ ρ เป็นเวกเตอร์พารามิเตอร์ของตัวควบคุม $T^d(q)$ เป็นแบบจำลองอ้างอิงเชิงเส้นไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา $r_k \in R$ เป็นสัญญาณเข้าอ้างอิง $u_k(\rho)$ เป็นสัญญาณเข้าควบคุม $y_k(\rho)$ เป็นสัญญาณออกที่อยากให้เป็นไปตามสัญญาณออกอ้างอิง y_k^d นั่นคือ กำหนดให้ y_k^d เป็นสัญญาณที่ออกจากแบบจำลองอ้างอิง $T^d(q)$ $\tilde{y}_k(\rho)$ เป็นสัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณออกของระบบกับสัญญาณออกอ้างอิง v_k เป็นสัญญาณรบกวนที่ไม่สามารถวัดค่าได้ มีแบบจำลองเป็นกระบวนการพินสุ่ม ที่มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ k เป็นตัวแปรเวลาของระบบไม่ต่อเนื่อง และ q เป็นตัวดำเนินการเลื่อน
2. กำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์เป็นแบบเกาส์เซียนกำลังสองเชิงเส้น ซึ่งประกอบด้วย นอร์มกำลังสองของความผิดพลาดระหว่างสัญญาณออกของระบบกับสัญญาณออกอ้างอิง และนอร์มกำลังสองของสัญญาณเข้าควบคุม ดังสมการ (2.8) โดย $E[\cdot]$ เป็นค่าคาดหวัง λ เป็นตัวประกอบของนอร์มกำลังสองของสัญญาณเข้าควบคุม L_y และ L_u เป็นตัวกรอง สำหรับสัญญาณ $\tilde{y}_k(\rho)$ และ $u_k(\rho)$ ตามลำดับ
3. พิจารณาปัญหาการหาค่าต่ำสุดของฟังก์ชันจุดประสงค์โดยมีพารามิเตอร์ตัวควบคุม ρ เป็นตัวแปรจากฟังก์ชันจุดประสงค์ในข้อ 2 ค่า ρ ที่ต่ำสุดกำหนดโดยสมการ (2.9) การหาค่าตอบที่ทำให้ฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าต่ำสุดขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการหาเกรเดียนต์ของฟังก์ชันจุดประสงค์ในสมการ (2.11) พบ

ว่าเกเรเดียนต์ของสัญญาณออกและเกเรเดียนต์ของสัญญาณเข้าควบคุม หาได้จากสมการ (2.20) และ (2.33) ตามลำดับ โดยมี $T_o(\rho)$ และ $S_o(\rho)$ เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด และฟังก์ชันความไว

4. เก็บบันทึกสัญญาณที่เกี่ยวข้อง เพื่อคำนวณหาเกเรเดียนต์ของสัญญาณออก และเกเรเดียนต์ของสัญญาณเข้าควบคุม
 - (a) ป้อนสัญญาณเข้าอ้างอิงแก่ระบบวงปิด $r_k^1 = r_k$ และเก็บบันทึกสัญญาณ $y_k^1(\rho_i)$ และ $u_k^1(\rho_i)$ ดังแสดงในรูปที่ 4.5
 - (b) ป้อนสัญญาณผลต่างระหว่างสัญญาณเข้าอ้างอิงกับสัญญาณออกจากข้อ (a) แก่ระบบวงปิด $r_k^2 = r_k - y_k^1(\rho_i)$ แล้วเก็บบันทึกสัญญาณ $y_k^2(\rho_i)$ และ $u_k^2(\rho_i)$ ดังแสดงในรูปที่ 4.6
 - (c) ป้อนสัญญาณเข้าอ้างอิงแก่ระบบวงปิด $r_k^3 = r_k$ แล้วเก็บบันทึกสัญญาณ $y_k^3(\rho_i)$ และ $u_k^3(\rho_i)$ ดังแสดงในรูปที่ 4.7
5. เกเรเดียนต์ของฟังก์ชันจุดประสงค์เทียบกับ ρ หาจากเกเรเดียนต์ของสัญญาณออกและเกเรเดียนต์ของสัญญาณเข้าควบคุมที่ได้มาจากการเก็บบันทึกสัญญาณตามสมการ (2.25) และ (2.38) ตามลำดับ
6. ถ้าปัญหามีคำตอบต่ำสุด เราหาคำตอบได้จากวิธีวนซ้ำเกาส์-นิวตัน ดังสมการ (2.12) โดยที่ B_i เป็นค่าประมาณเฮสเซียนเมทริกซ์ของฟังก์ชันจุดประสงค์ ได้มาจากการคำนวณการปรับวิธีนิวตัน-เสมือน โดยเลือกใช้วิธี BFGS ส่วน γ_i เป็นขนาดความยาวของการค้นหาที่ได้มาจากการคำนวณการปรับวิธีการตามรอยถอยหลัง โดยที่ i เป็นดรรชนีบอกจำนวนรอบที่ได้วนซ้ำ
7. ปรับจูนตัวควบคุมโดยการปรับพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจาก ρ_i ไปเป็น ρ_{i+1} พิจารณาผลตอบสนองของระบบวงปิด ถ้าเป็นไปตามที่ต้องการก็จบขั้นตอนแต่ถ้าไม่เป็นไปตามที่ต้องการให้กลับไปเก็บบันทึกสัญญาณใหม่

4.4 ตัวอย่างเชิงเลข

ในตอนนี้นำเสนอตัวอย่างการสังเคราะห์ตัวควบคุมสำหรับระบบสายพานลำเลียง พิจารณาตัวควบคุมพีไอดี (PID controller) ที่เป็นผลรวมของสัดส่วน (Proportional) ปริพันธ์ (Integral) และอนุพันธ์ (Derivative) ของสัญญาณเข้าอ้างอิงและสัญญาณป้อนกลับ โดยที่

$$C_r(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (4.26)$$

$$C_y(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (4.27)$$

ดังนั้น พารามิเตอร์ของตัวควบคุมเป็นค่าอัตราขยายทั้ง 3 ตัว

$$\rho = [K_p \quad K_i \quad K_d]^T \quad (4.28)$$

เริ่มต้นกำหนดให้ระบบทำงานในสภาวะปกติ แล้วมีการเปลี่ยนแปลงมวลภาวะ นั่นคือ ระบบจะมีพลวัตเปลี่ยนไปตามมวลภาวะ ในการสังเคราะห์ตัวควบคุมนี้ กำหนดให้ตัวกรอง $L_y = 1$, $L_u = 1$ และตัวประกอบ $\lambda = 1$ เมื่อตั้งให้เวลาสุ่มเป็น 0.01 วินาที และช่วงเวลาที่เก็บข้อมูลเท่ากับ 300 วินาที จำนวนข้อมูลที่เก็บเท่ากับ $N_s = 30,000$ ปัญหาการควบคุมมีรูปแบบเป็นการตามรอยสัญญาณเข้าอ้างอิง กำหนดให้สัญญาณเข้าอ้างอิงเป็นสัญญาณตำแหน่งของสายพานลำเลียงแบบขั้นบันไดขนาด 10 เซนติเมตร และแบบจำลองอ้างอิง $T^d(q) = 1$. จากฟังก์ชันจุดประสงค์ เราพยายามลดค่าสัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณออกของระบบกับสัญญาณออกอ้างอิงและสัญญาณเข้าควบคุม ดังนั้นฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าเท่ากับ

$$J(\rho) = \frac{1}{2N_s} E \left[\sum_{k=1}^{N_s} \tilde{y}_k(\rho)^2 + \sum_{k=1}^{N_s} u_k(\rho)^2 \right] \quad (4.29)$$

สำหรับวิธีวนซ้ำเกาส์-นิวตันเราใช้วิธีการตามรอยถอยหลัง โดยตั้งให้ $\gamma_0 = 1$, $\alpha = 0.5$ และ $\beta = 0.1$ ส่วนค่าประมาณเฮสเซียนเมทริกซ์ใช้วิธี BFGS ดังนี้

$$B_{i+1} = B_i + \frac{(z_i - B_i s_i)(z_i - B_i s_i)^T}{(z_i - B_i s_i)^T s_i} \quad (4.30)$$

โดยที่ $s_i = \rho_{i+1} - \rho_i$ และ $z_i = \frac{\partial J(\rho_{i+1})}{\partial \rho} - \frac{\partial J(\rho)}{\partial \rho}$

ในตัวอย่างการสังเคราะห์ตัวควบคุมสำหรับระบบสายพานลำเลียงนี้ แบ่งการจำลองออกเป็น 5 ส่วน คือ การจำลองส่วนแรกจะใช้แบบจำลองระบบสายพานลำเลียงที่เป็นเชิงเส้น โดยแรงเสียดทานไม่เชิงเส้นจะไม่นำมาพิจารณากับแบบจำลอง ดังนั้นการจำลองในส่วนแรกแรกนี้ระบบสายพานลำเลียงจะเป็นระบบเชิงเส้นที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา ส่วนที่สองของการจำลองจะใช้แบบจำลองที่มีแรงเสียดทานไม่เชิงเส้นเข้ามาพิจารณาด้วย ตามแบบจำลองในรูปที่ 4.1 ซึ่งการจำลองในส่วนที่สองนี้สร้างขึ้นเพื่อให้มีความใกล้เคียงกับระบบที่ใช้ในห้องปฏิบัติการจริง ส่วนที่สามเป็นการจำลองเมื่อระบบมีความไม่แน่นอนในแบบต่างๆ ส่วนที่สี่เป็นการจำลองเพื่อทดสอบช่วงเวลาที่เก็บข้อมูลเหมาะสมที่สุด ส่วนสุดท้ายเป็นการจำลองโดยกำหนดให้สัญญาณเข้าอ้างอิงเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู

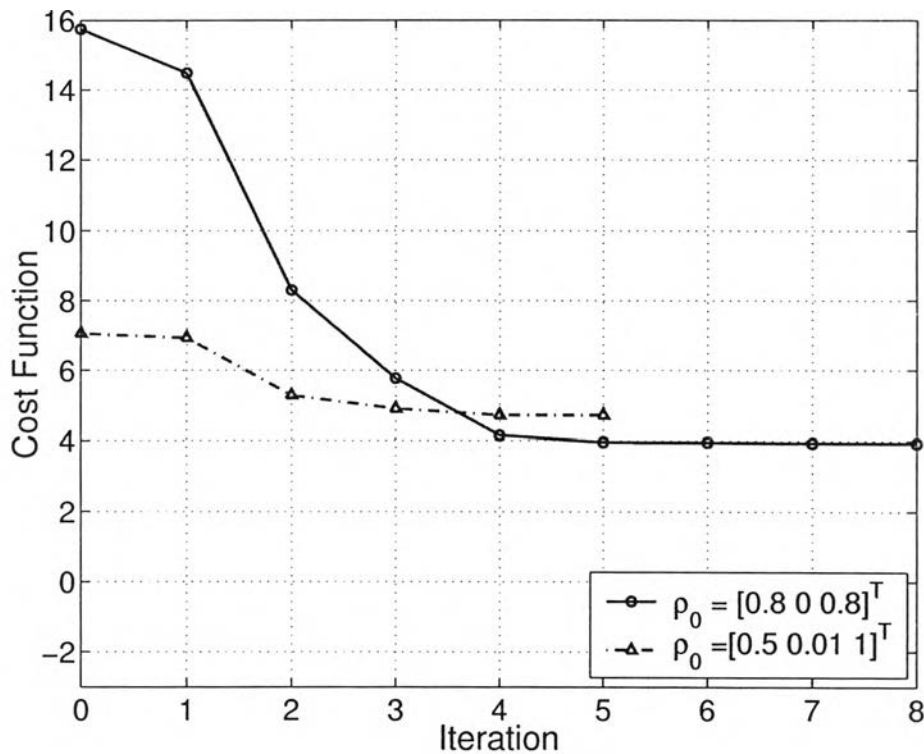
การจำลองในแต่ละส่วนจะถูกแบ่งออกเป็นรูปแบบต่างๆ เช่น การเปลี่ยนแบบจำลองพลวัตของภาวะซึ่งจะส่งผลกระทบต่อตรงกับแบบจำลองระบบสายพานลำเลียง การเปลี่ยนแปลงความไม่แน่นอนที่ประกอบด้วยพลวัตเนื่องจากการปรับมวลภาวะ สุดท้ายจะเปรียบเทียบผลเนื่องจากการแปรเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมพีไอดี

4.4.1 แบบจำลองไม่พิจารณาแรงเสียดทานไม่เชิงเส้น

สภาวะการทำงานที่ 1

กำหนดให้พลวัตของมวลภาวะในสภาวะการทำงานที่ 1 เป็น

$$G_{11}(s) = \frac{2s + 6}{s^2 + 20s + 125} \quad (4.31)$$



รูปที่ 4.8: ค่าจุดประสงค์ในแต่ละรอบการวนซ้ำ เปรียบเทียบระหว่างค่าเริ่มต้นของตัวควบคุม 2 ค่า

พารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมมีค่าเท่ากับ

$$\rho_0 = [0.8 \ 0 \ 0.8]^T$$

หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 8 วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำให้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมเป็น

$$\rho_8 = [0.812 \ 0.021 \ 0.800]^T$$

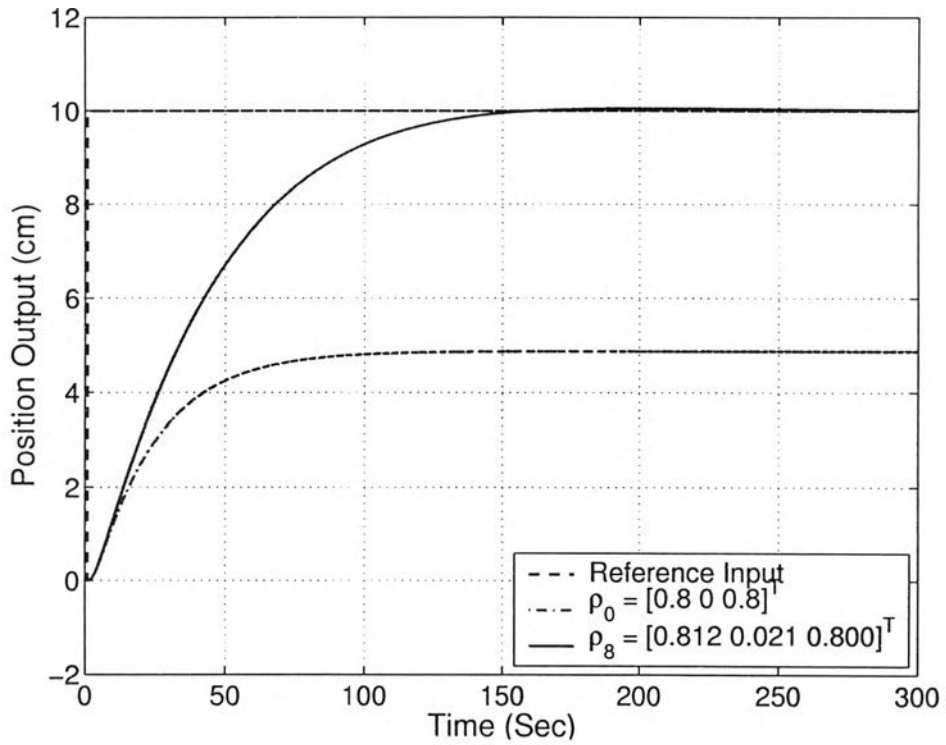
รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงตามลำดับการวนซ้ำ รูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นผลตอบสนองเริ่มต้นมีความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัวสูงมาก ประมาณ 5 เซนติเมตร หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 8 ผลตอบสนองมีแนวโน้มปรับตัวได้ดีขึ้น นั่นคือ ไม่มีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัว และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเร็วขึ้น ประมาณ 150 วินาที ส่วนรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองเริ่มต้นยังคงมีสัญญาณเข้าควบคุมที่ค่อนข้างสูง ประมาณ 0.1 โวลต์ หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 8 สัญญาณควบคุมลดลง ช่วงเวลาประมาณ 50 วินาทีที่มีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.05 โวลต์

ตัวอย่างถัดไปกำหนดให้พลวัตของมวลภาระในสภาวะการทำงานยังคงเดิม แต่ปรับเปลี่ยนการตั้งค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมเป็น

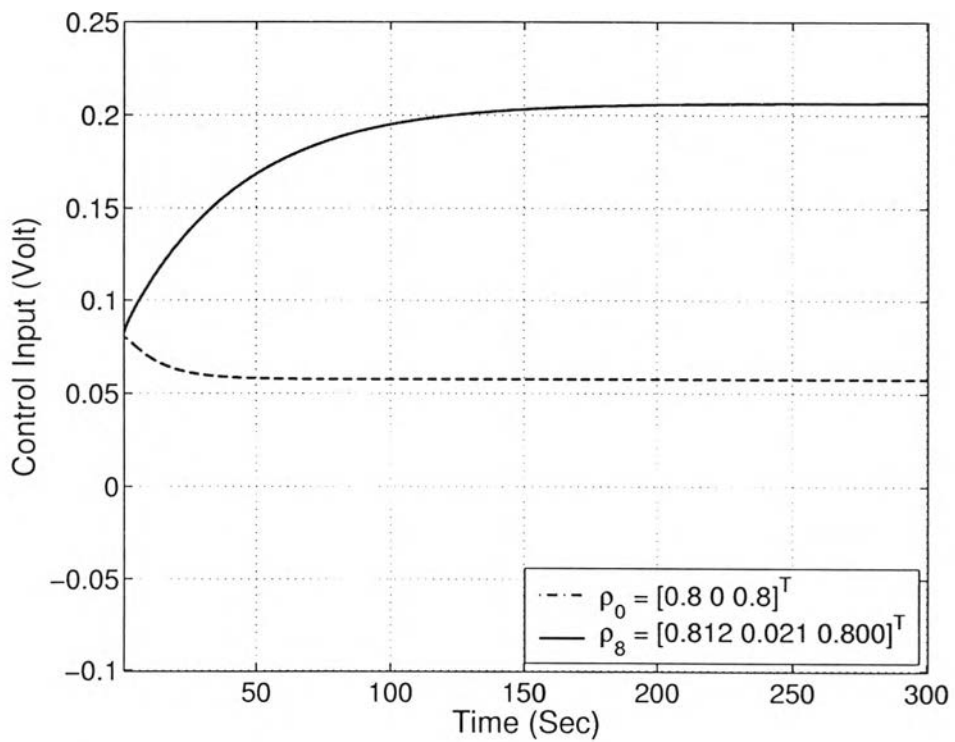
$$\rho_0 = [0.5 \ 0.01 \ 1]^T$$

หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 5 วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำให้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมเป็น

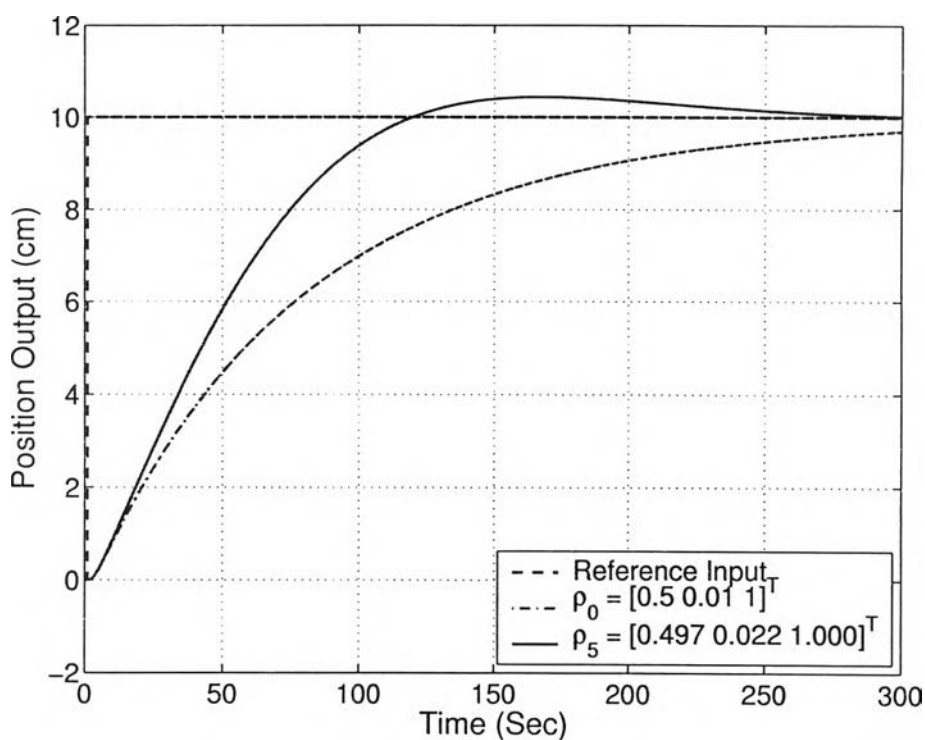
$$\rho_5 = [0.497 \ 0.022 \ 1.000]^T$$



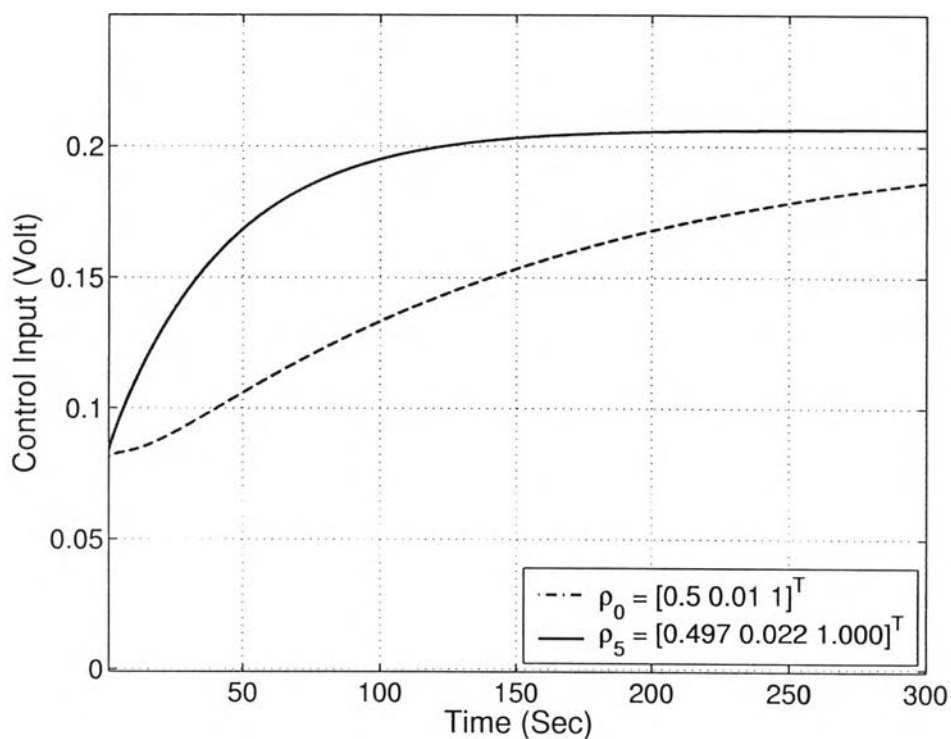
รูปที่ 4.9: ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 8 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



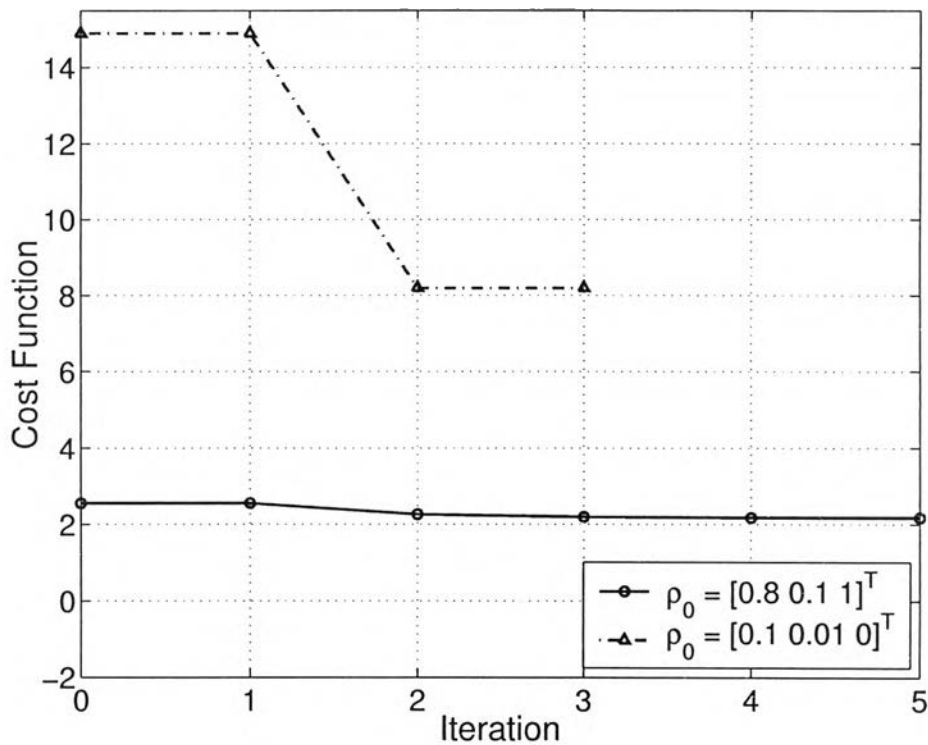
รูปที่ 4.10: สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 8 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 4.11: ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 5 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 4.12: สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 5 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 4.13: ค่าจุดประสงค์ในแต่ละรอบการวนซ้ำ เปรียบเทียบระหว่างค่าเริ่มต้นของตัวควบคุม 2 ค่า

รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงตามลำดับการวนซ้ำ รูปที่ 4.11 แสดงให้เห็นผลตอบสนองเริ่มต้นมีช่วงเวลาเข้าที่ช้ามาก มากกว่า 300 วินาที หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 5 ผลตอบสนองมีแนวโน้มปรับตัวได้ดีขึ้น นั่นคือ ไม่มีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัว และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเร็วขึ้น ประมาณ 280 วินาที แต่ยังคงมีส่วนพุ่งเกินคิดเป็น 5 % ส่วนรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองเริ่มต้นยังคงมีสัญญาณเข้าควบคุมที่ค่อนข้างสูง ประมาณ 0.1 โวลต์ หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 5 สัญญาณควบคุมลดลงช่วงเวลาประมาณ 50 วินาทีที่มีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.08 โวลต์

สภาวะการทำงานที่ 2

สมมุติเหตุการณ์ต่อเนื่องจากสภาวะการทำงานแรก แต่มวลภาระมีการเปลี่ยนแปลงทำให้พลวัตของมวลภาระเปลี่ยนแปลงไป โดยมีพลวัตของมวลภาระเปลี่ยนเป็น

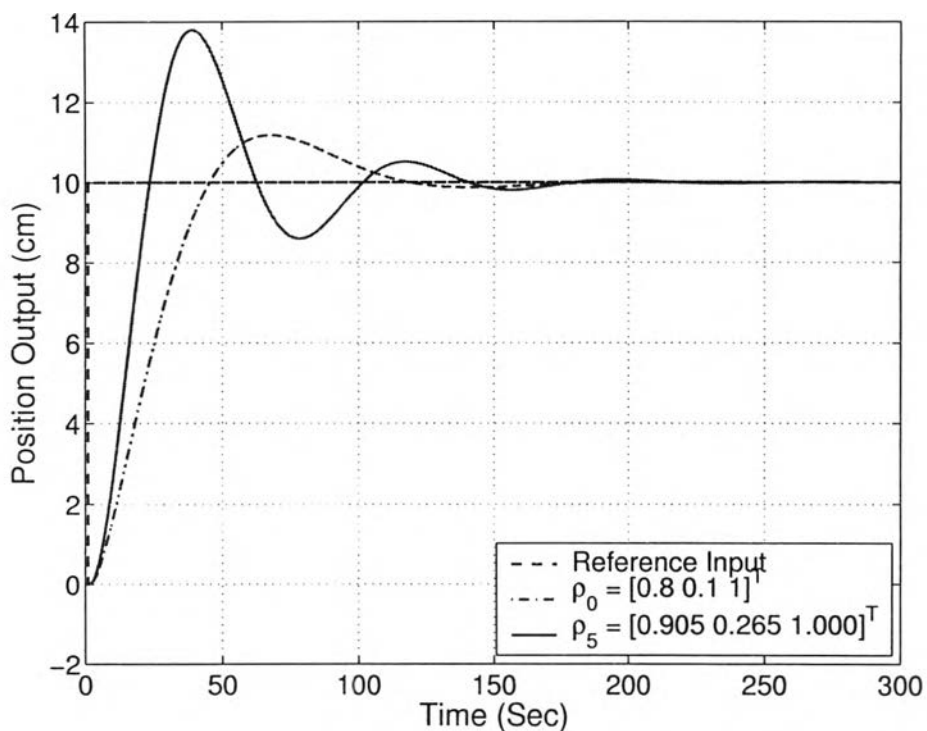
$$G_{l2}(s) = \frac{2}{10s + 25} \quad (4.32)$$

พารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมมีค่าเท่ากับ

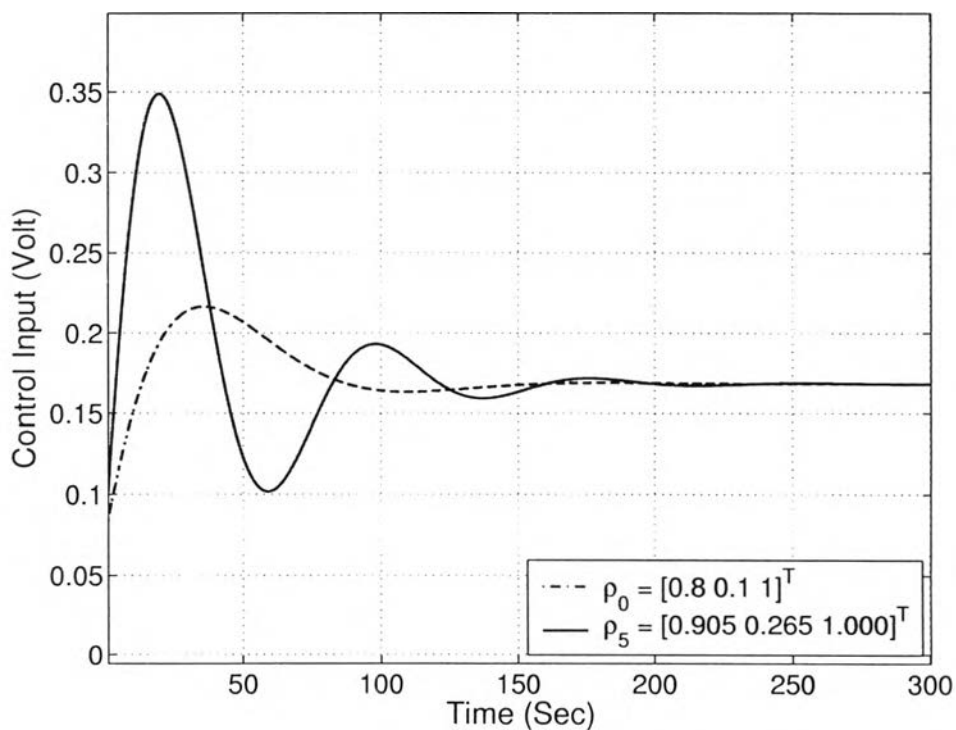
$$\rho_0 = [0.8 \ 0.1 \ 1]^T$$

ต่อมาใช้วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ 5 รอบได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเป็นดังนี้

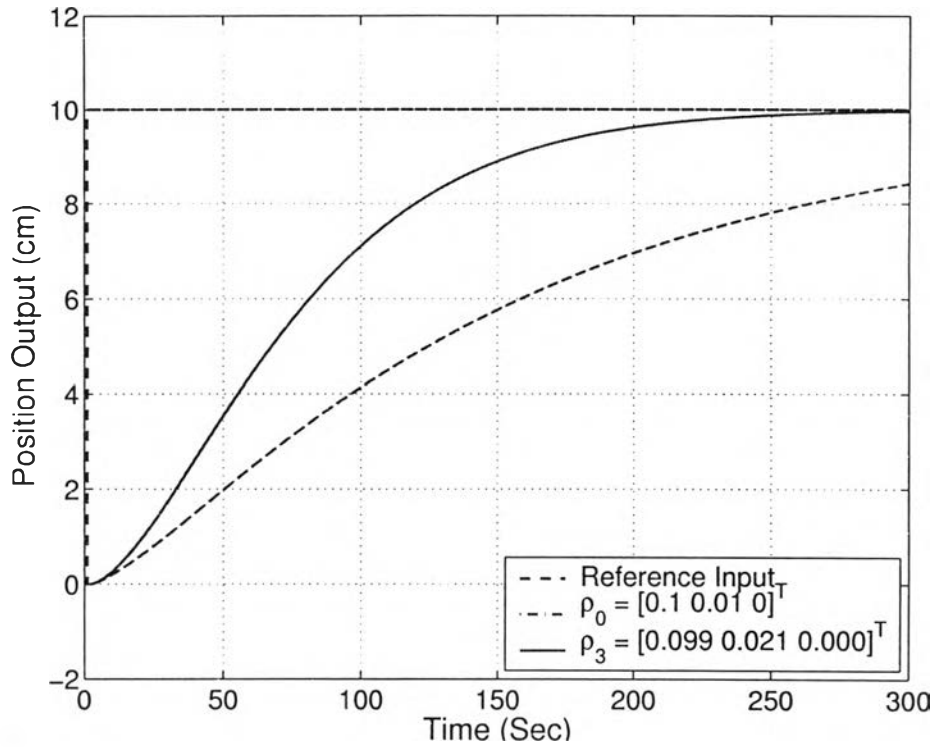
$$\rho_5 = [0.905 \ 0.265 \ 1.000]^T$$



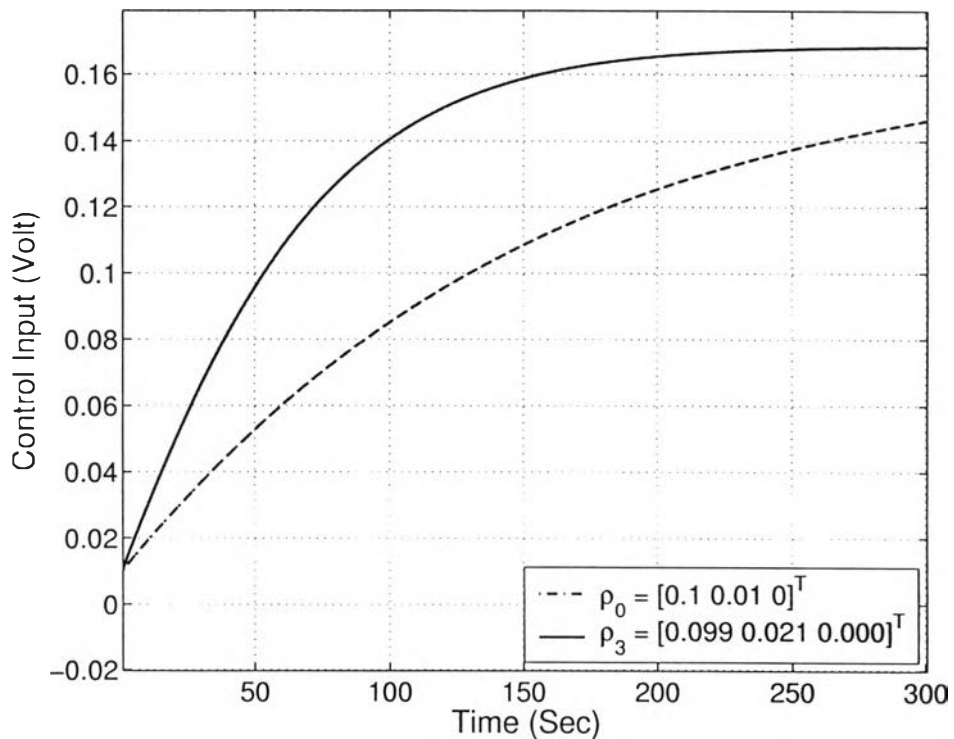
รูปที่ 4.14: ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 5 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 4.15: สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 5 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 4.16: ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 3 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 4.17: สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 3 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ

รูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงตามลำดับการวนซ้ำ รูปที่ 4.14 แสดงให้เห็นผลตอบสนองเริ่มต้นมีช่วงเวลาเข้าที่ช้ามาก ประมาณ 220 วินาที หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 5 ผลตอบสนองมีแนวโน้มปรับตัวได้ดีขึ้น นั่นคือ ไม่มีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัว และมีช่วงเวลาเข้าที่เร็วขึ้น ประมาณ 180 วินาที แต่ยังคงมีส่วนพุ่งเกินคิดเป็น 35 % ส่วนรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองเริ่มต้นยังคงมีสัญญาณเข้าควบคุมที่ค่อนข้างสูง ประมาณ 0.1 โวลต์ หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 5 สัญญาณควบคุมลดลงช่วงเวลาประมาณ 50 วินาทีที่มีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.08 โวลต์

ตัวอย่างถัดไปกำหนดให้พลวัตของมวลภาระในสภาวะการทำงานยังคงเดิม แต่ปรับเปลี่ยนการตั้งค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมเป็น

$$\rho_0 = [0.1 \quad 0.01 \quad 0]^T$$

หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 3 วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำให้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมเป็น

$$\rho_3 = [0.099 \quad 0.021 \quad 0.000]^T$$

รูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงตามลำดับการวนซ้ำ รูปที่ 4.16 แสดงให้เห็นผลตอบสนองเริ่มต้นมีช่วงเวลาเข้าที่ช้ามาก มากกว่า 300 วินาที หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 3 ผลตอบสนองมีแนวโน้มปรับตัวได้ดีขึ้น นั่นคือ ไม่มีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัว และมีช่วงเวลาเข้าที่เร็วขึ้น ประมาณ 270 วินาที ส่วนรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองเริ่มต้นยังคงมีสัญญาณเข้าควบคุมที่ค่อนข้างสูง ประมาณ 0.17 โวลต์ หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 3 สัญญาณควบคุมลดลง ช่วงเวลาประมาณ 300 วินาทีที่มีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.15 โวลต์

4.4.2 แบบจำลองพิจารณาแรงเสียดทานไม่เชิงเส้น

สภาวะการทำงานที่ 1

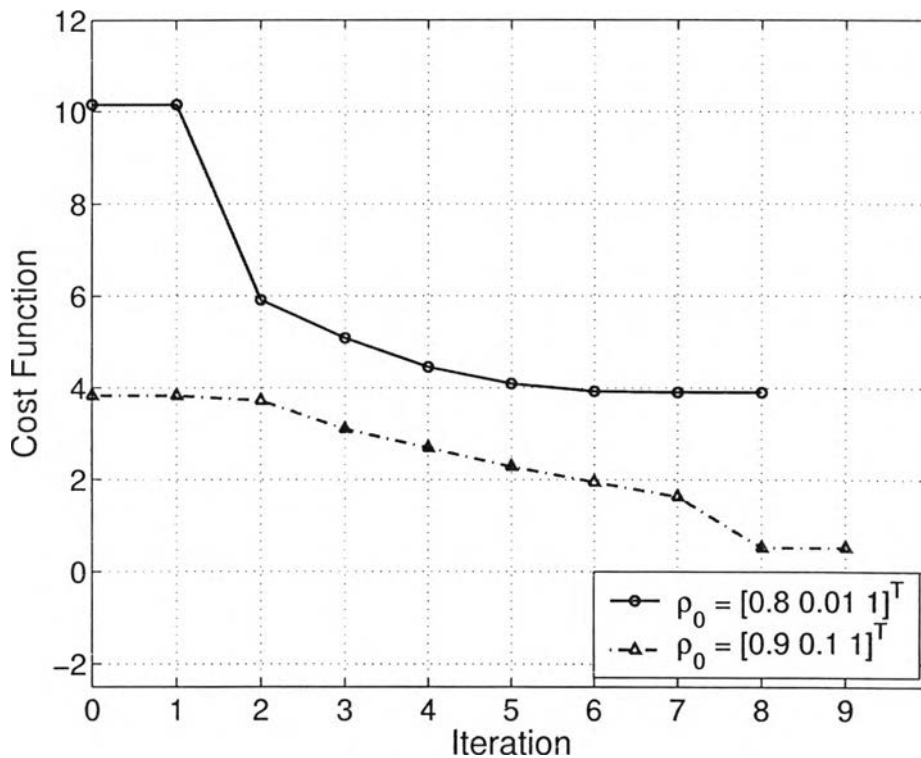
กำหนดให้พลวัตของมวลภาระในสภาวะการทำงานที่ 1 จากสมการ (4.31) พารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมมีค่าเท่ากับ

$$\rho_0 = [0.8 \quad 0.01 \quad 1]^T$$

หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 8 วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำให้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมเป็น

$$\rho_8 = [0.827 \quad 0.156 \quad 1.000]^T$$

รูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงตามลำดับการวนซ้ำ รูปที่ 4.19 แสดงให้เห็นผลตอบสนองเริ่มต้นมีช่วงเวลาเข้าที่ช้ามาก มากกว่า 300 วินาที หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 8 ผลตอบสนองมีแนวโน้มปรับตัวได้ดีขึ้น นั่นคือ ไม่มีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัว และมีช่วงเวลาเข้าที่เร็วขึ้น ประมาณ 280 วินาที แต่ยังคงมีส่วนพุ่งเกินคิดเป็น 10 % ส่วนรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองเริ่มต้นยังคงมีสัญญาณเข้าควบคุมที่ค่อนข้างสูง ประมาณ 0.2 โวลต์ หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 8 สัญญาณควบคุมลดลงช่วงเวลาประมาณ 150 วินาทีที่มีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.1 โวลต์



รูปที่ 4.18: ค่าจุดประสงค์ในแต่ละรอบการวนซ้ำ เปรียบเทียบระหว่างค่าเริ่มต้นของตัวควบคุม 2 ค่า

ตัวอย่างถัดไปกำหนดให้พลวัตของมวลภาวะในสภาวะการทำงานยังคงเดิม แต่ปรับเปลี่ยนการตั้งค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมเป็น

$$\rho_0 = [0.9 \ 0.1 \ 1]^T$$

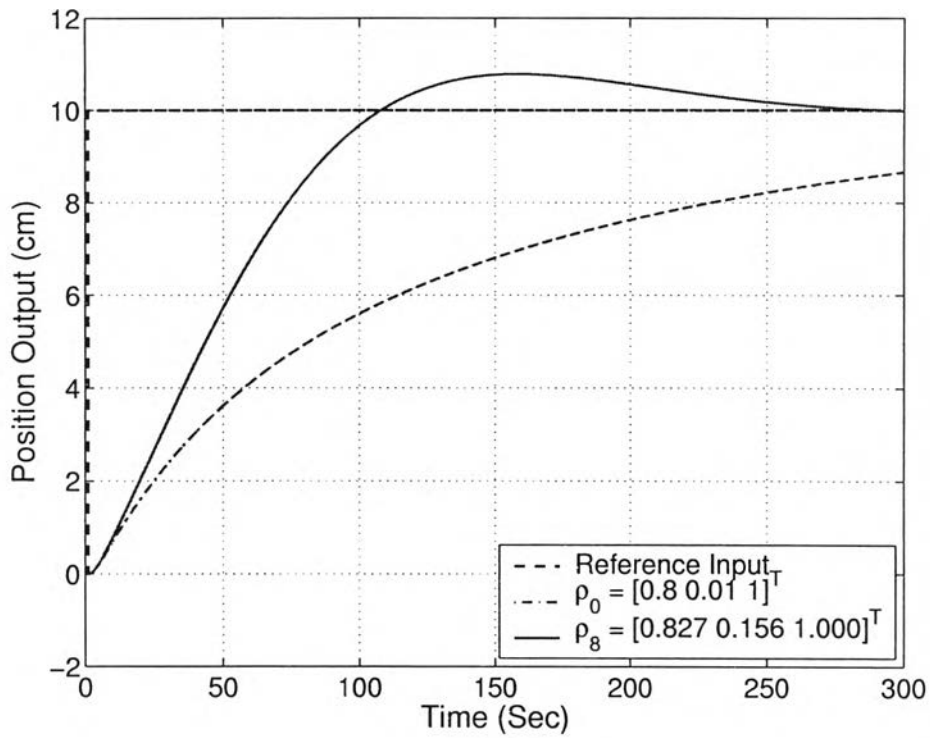
หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 9 วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำให้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมเป็น

$$\rho_9 = [4.045 \ 0.472 \ 1.000]^T$$

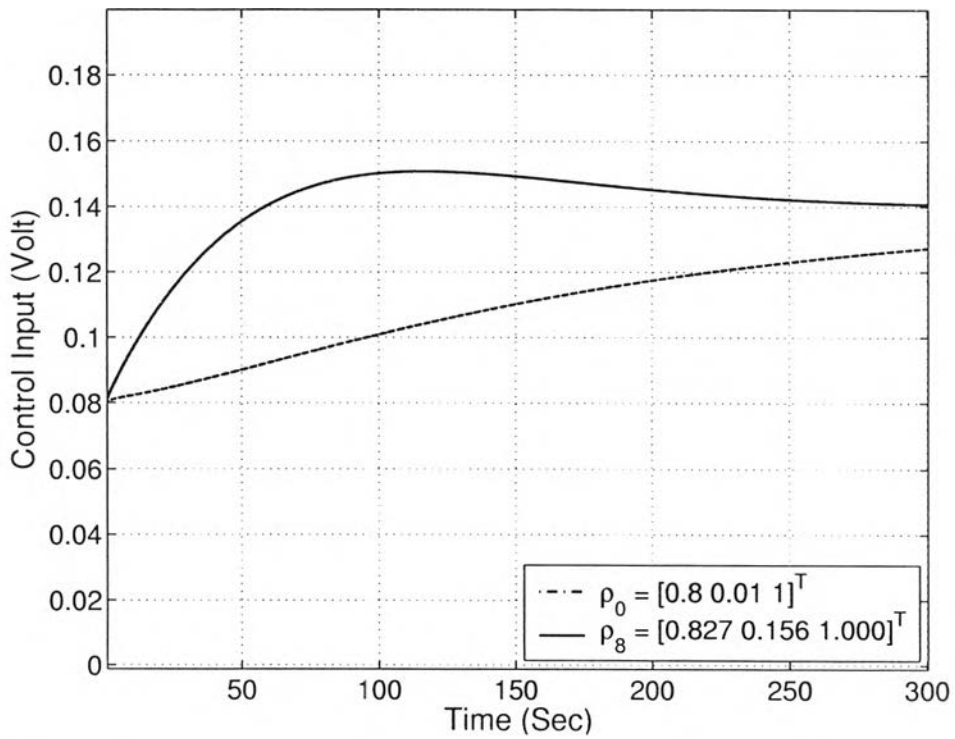
รูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงตามลำดับการวนซ้ำ รูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นผลตอบสนองเริ่มต้นมีช่วงเวลาเข้าที่ช้ามาก มากกว่า 300 วินาที หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 9 ผลตอบสนองมีแนวโน้มปรับตัวได้ดีขึ้น นั่นคือ ไม่มีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัว และมีช่วงเวลาเข้าที่เร็วขึ้น ประมาณ 45 วินาที แต่ยังคงมีส่วนพุ่งเกินคิดเป็น 50 % ส่วนรูปที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองเริ่มต้นยังคงมีสัญญาณเข้าควบคุมที่ค่อนข้างสูง ประมาณ 0.3 โวลต์ หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 9 สัญญาณควบคุมลดลงช่วงเวลาประมาณ 50 วินาทีที่มีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.1 โวลต์

สภาวะการทำงานที่ 2

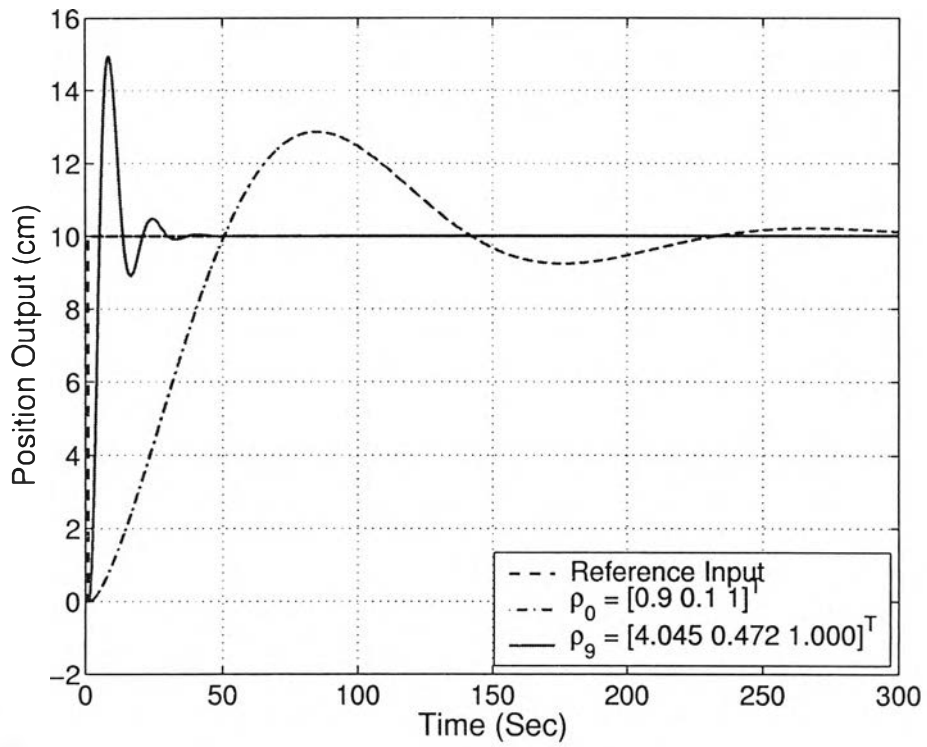
สมมุติเหตุการณ์ต่อเนื่องจากสภาวะการทำงานแรก แต่มวลภาวะมีการเปลี่ยนแปลงทำให้พลวัตของมวลภาวะเปลี่ยนแปลงไป โดยมีพลวัตของมวลภาวะเปลี่ยนเป็น ดังสมการ (4.32) พารามิเตอร์เริ่มต้นของ



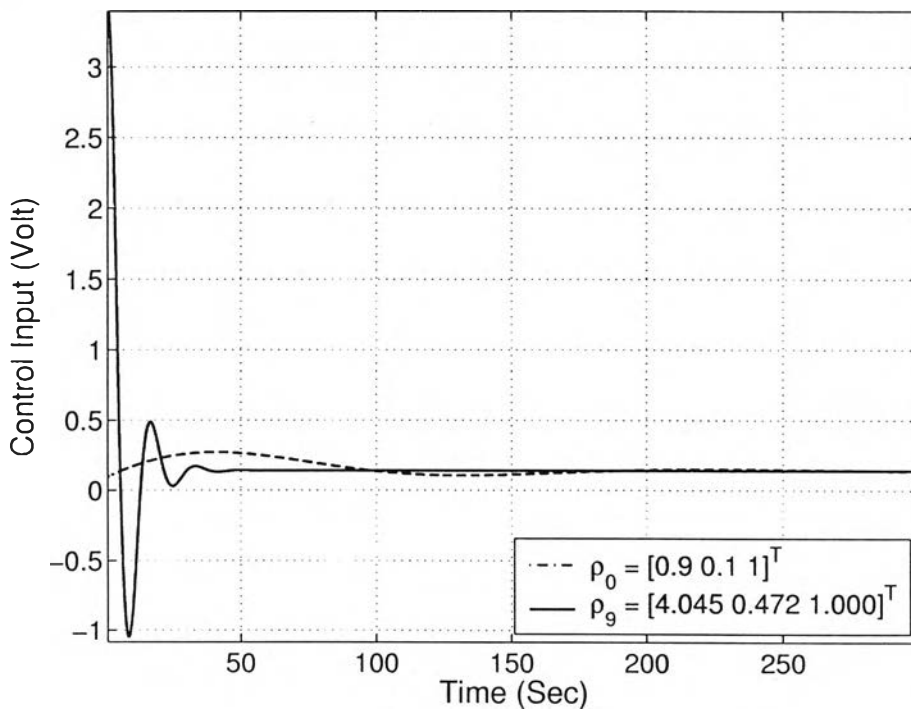
รูปที่ 4.19: ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 8 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



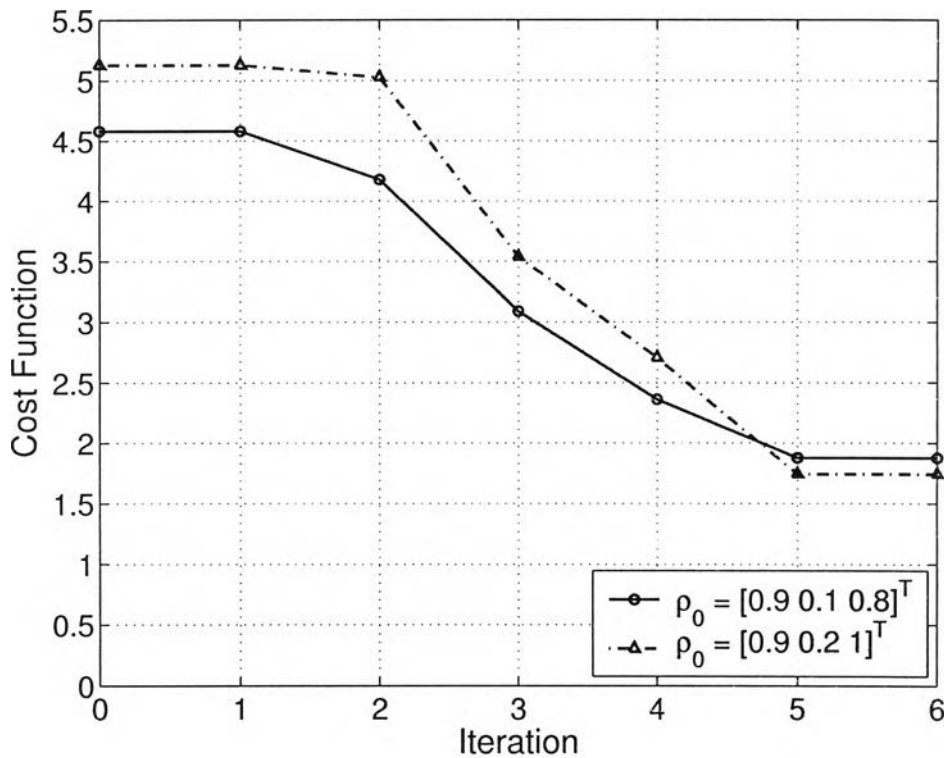
รูปที่ 4.20: สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 8 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 4.21: ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 9 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 4.22: สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 9 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 4.23: ค่าจุดประสงค์ในแต่ละรอบการวนซ้ำ เปรียบเทียบระหว่างค่าเริ่มต้นของตัวควบคุม 2 ค่า

ตัวควบคุมมีค่าเท่ากับ

$$\rho_0 = [0.9 \ 0.1 \ 0.8]^T$$

ต่อมาใช้วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ 6 รอบได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเป็นดังนี้

$$\rho_6 = [3.484 \ 0.260 \ 0.800]^T$$

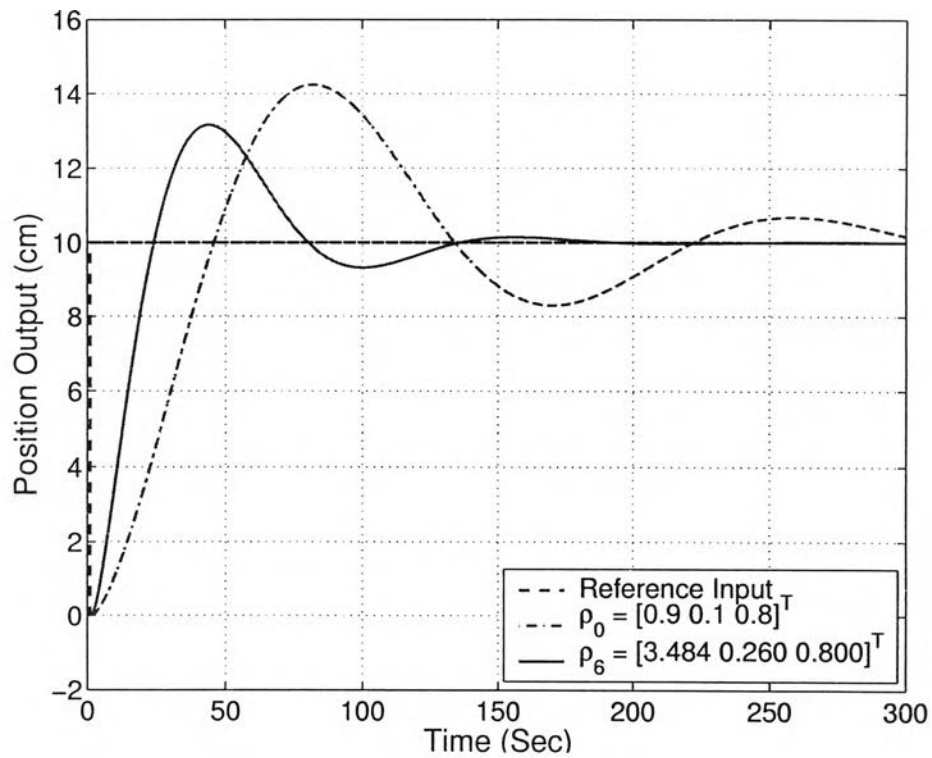
รูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงตามลำดับการวนซ้ำ รูปที่ 4.24 แสดงให้เห็นผลตอบสนองเริ่มต้นมีช่วงเวลาเข้าที่ช้ามาก มากกว่า 300 วินาที และยังคงมีส่วนพุ่งเกินสูงมาก คิดเป็น 40 % หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 6 ผลตอบสนองมีแนวโน้มปรับตัวได้ดีขึ้น นั่นคือ ไม่มีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัว และมีช่วงเวลาเข้าที่เร็วขึ้น ประมาณ 150 วินาที แต่ยังคงมีส่วนพุ่งเกินคิดเป็น 30 % ส่วนรูปที่ 4.25 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองเริ่มต้นยังคงมีสัญญาณเข้าควบคุมที่ค่อนข้างสูง ประมาณ 0.4 โวลต์ หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 6 สัญญาณควบคุมลดลง ช่วงเวลาประมาณ 50 วินาทีที่มีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.25 โวลต์

ตัวอย่างถัดไปกำหนดให้พลวัตของมวลภาระในสภาวะการทำงานยังคงเดิม แต่ปรับเปลี่ยนการตั้งค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมเป็น

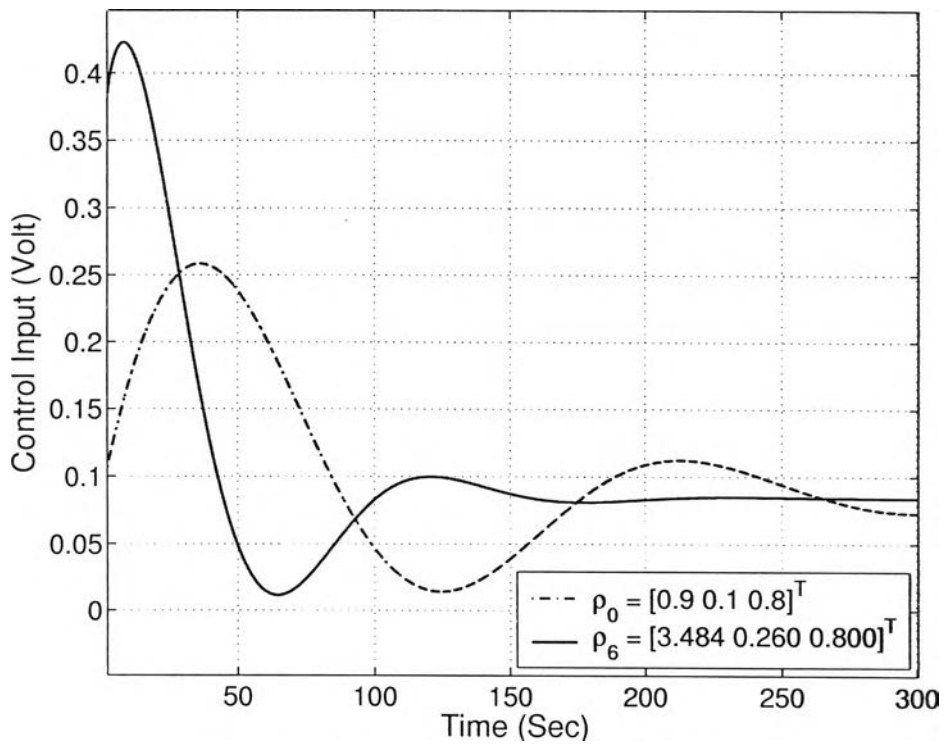
$$\rho_0 = [0.9 \ 0.2 \ 1]^T$$

หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 6 วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำให้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมเป็น

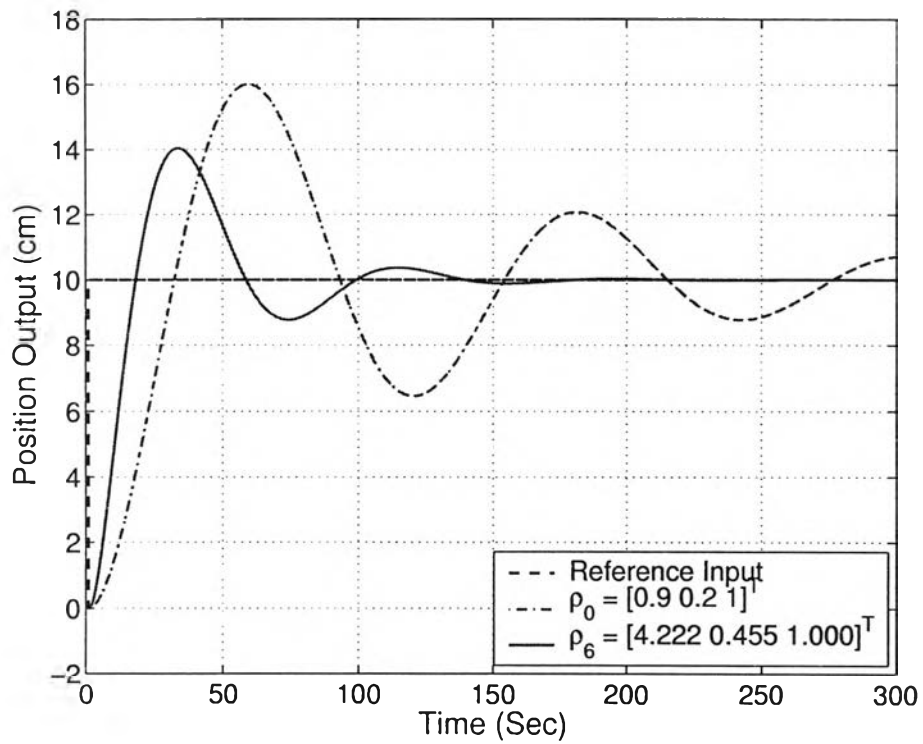
$$\rho_6 = [4.222 \ 0.455 \ 1.000]^T$$



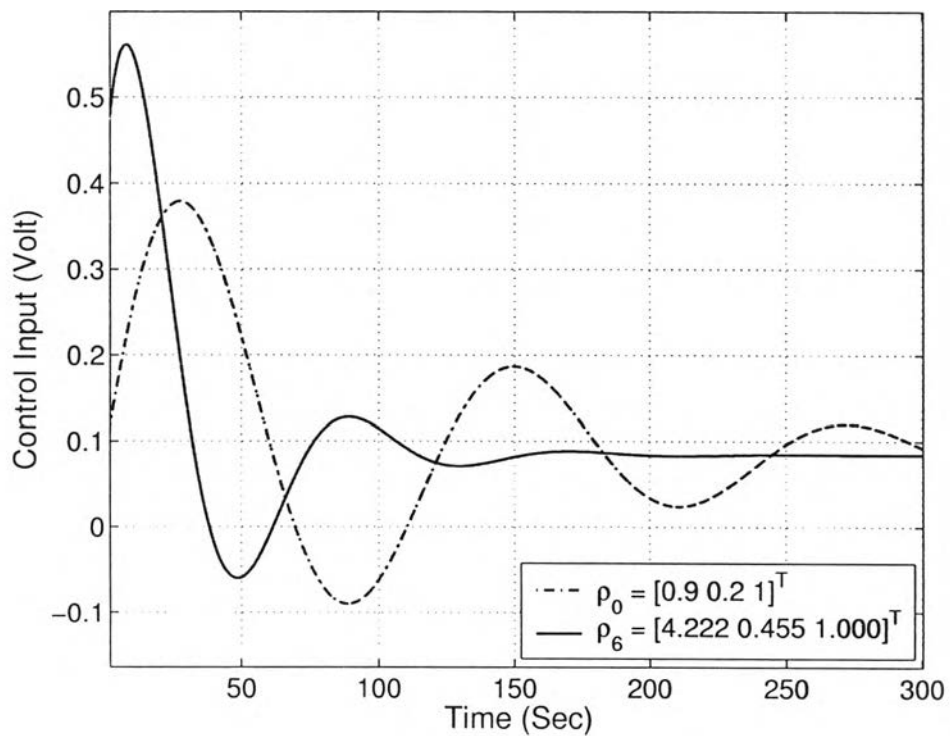
รูปที่ 4.24: ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 6 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



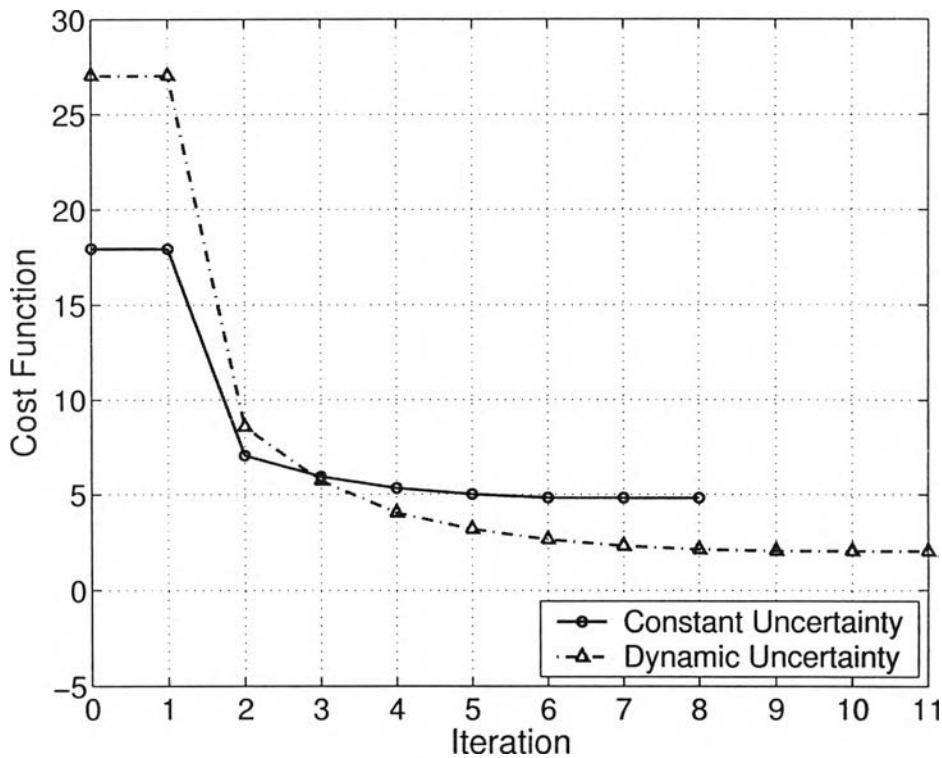
รูปที่ 4.25: สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 6 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 4.26: ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 6 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 4.27: สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 6 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 4.28: ค่าจุดประสงค์ในแต่ละรอบการวนซ้ำ เปรียบเทียบระหว่างความไม่แน่นอนของระบบ 2 แบบ

รูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงตามลำดับการวนซ้ำ รูปที่ 4.26 แสดงให้เห็นผลตอบสนองเริ่มต้นมีช่วงเวลาเข้าที่ช้ามาก มากกว่า 300 วินาที และยังคงมีส่วนพุ่งเกินสูงมาก คิดเป็น 60 % หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 6 ผลตอบสนองมีแนวโน้มปรับตัวได้ดีขึ้น นั่นคือ ไม่มีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัว และมีช่วงเวลาเข้าที่เร็วขึ้น ประมาณ 150 วินาที แต่ยังคงมีส่วนพุ่งเกินคิดเป็น 40 % ส่วนรูปที่ 4.27 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองเริ่มต้นยังคงมีสัญญาณเข้าควบคุมที่ค่อนข้างสูง ประมาณ 0.5 โวลต์ หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 6 สัญญาณควบคุมลดลง ช่วงเวลาประมาณ 50 วินาทีที่มีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.4 โวลต์

4.4.3 สภาวะทำงานที่มีความไม่แน่นอนของระบบ

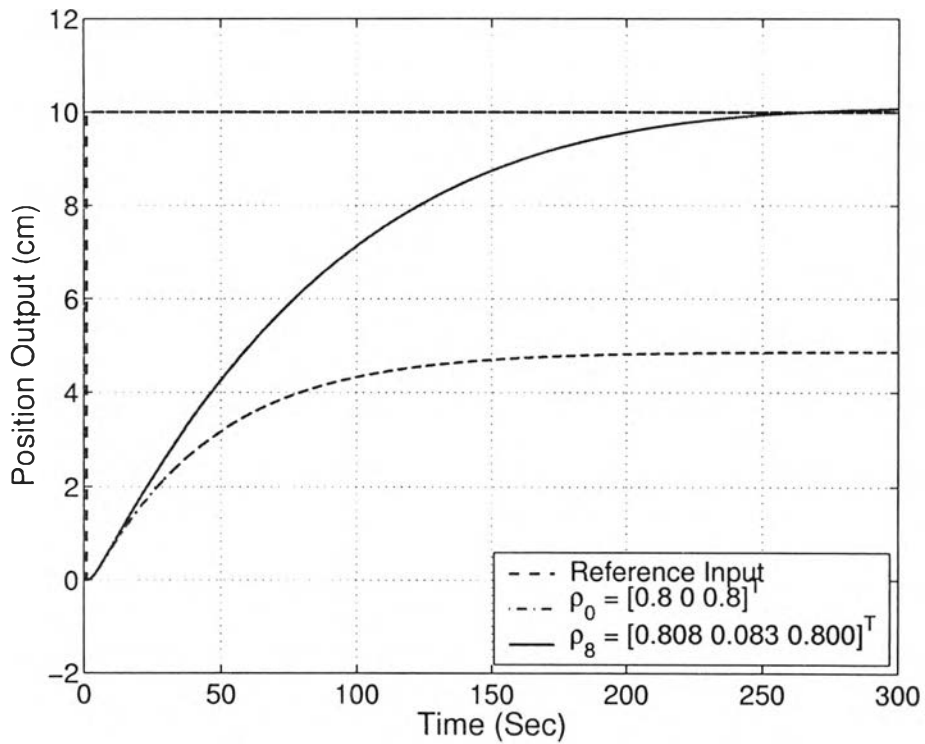
เริ่มต้นกำหนดมวลภาวะมีค่าคงที่ แต่สภาวะทำงานของระบบมีความไม่แน่นอน 20% ตามแบบจำลองในรูปที่ 4.1 นั่นคือ $\Delta w_I = 0.2$ โดยมีพลวัตของมวลภาวะเป็นดังสมการ 4.32 ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมเป็น

$$\rho_0 = [0.8 \quad 0 \quad 0.8]^T$$

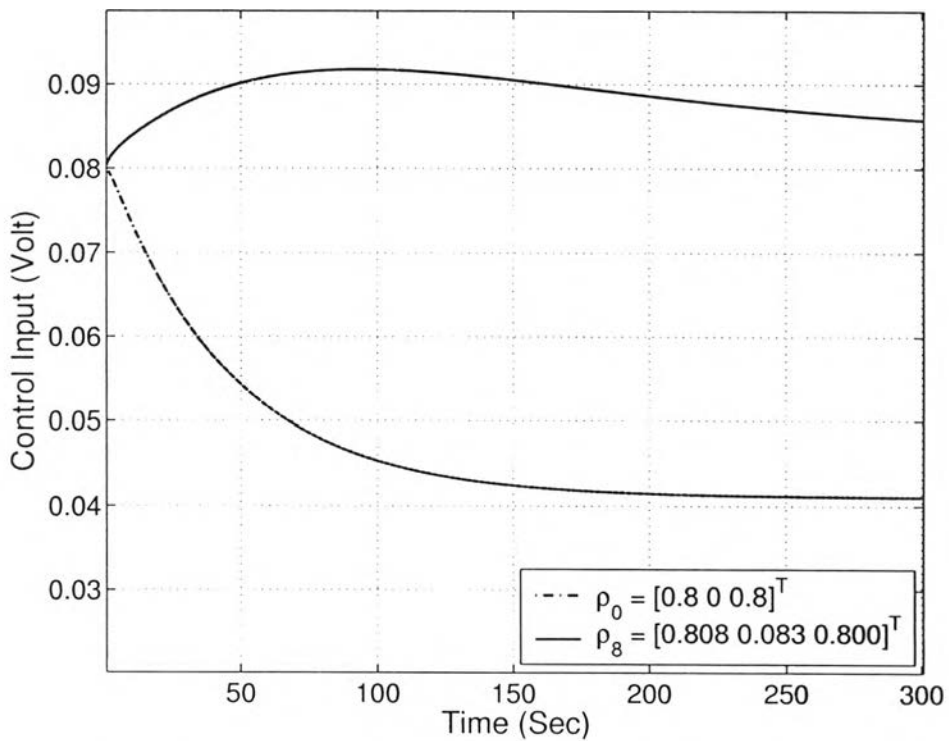
หลังจากใช้วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ 8 รอบ ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเป็นดังนี้

$$\rho_8 = [0.808 \quad 0.083 \quad 0.800]^T$$

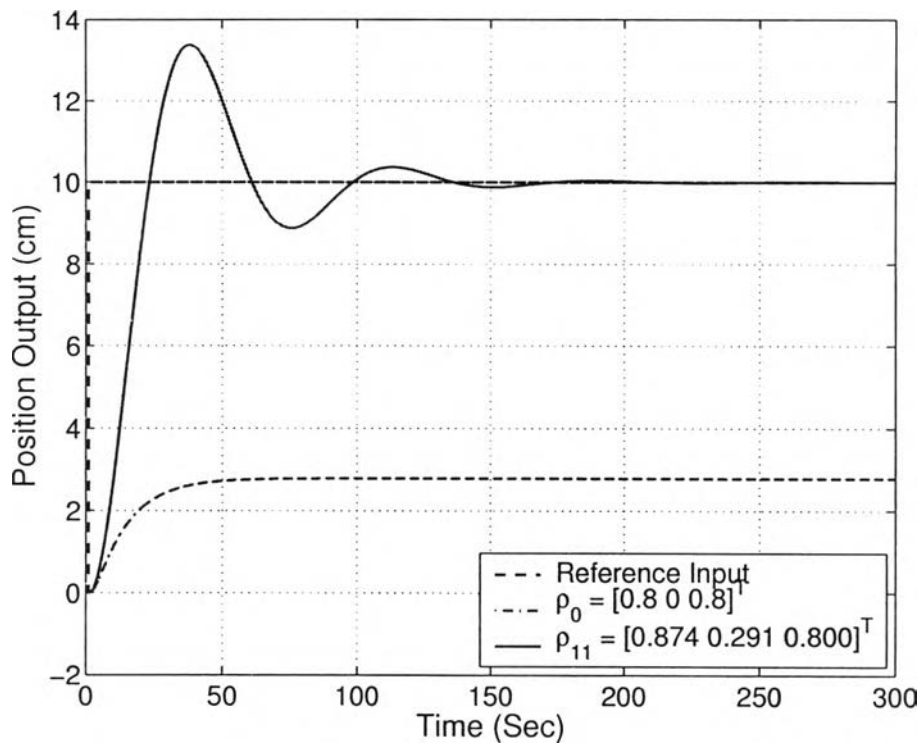
รูปที่ 4.28 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงตามลำดับการวนซ้ำ รูปที่ 4.29 แสดงให้เห็นผลตอบสนองเริ่มต้นมีช่วงเวลาเข้าที่ช้ามาก มากกว่า 300 วินาที และยังคงมีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัวสูงมาก



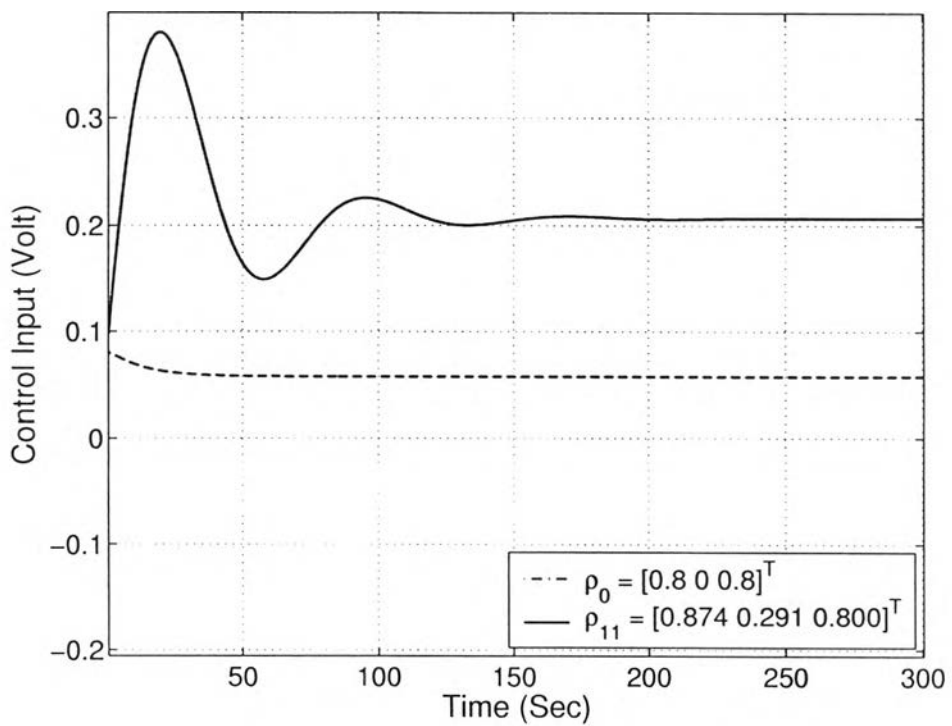
รูปที่ 4.29: ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 8 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 4.30: สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 8 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 4.31: ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 11 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 4.32: สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 11 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ

ประมาณ 5 เซนติเมตร หลังจากการรวนซ้ำครั้งที่ 8 ผลตอบสนองมีแนวโน้มปรับตัวได้ดีขึ้น นั่นคือ ไม่มีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัว และมีช่วงเวลาเข้าที่เร็วขึ้น ประมาณ 280 วินาที ส่วนรูปที่ 4.30 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองเริ่มต้นยังคงมีสัญญาณเข้าควบคุมที่ค่อนข้างสูง ประมาณ 0.18 โวลต์ หลังจากการรวนซ้ำครั้งที่ 8 สัญญาณควบคุมลดลง ช่วงเวลาประมาณ 50 วินาทีที่มีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.1 โวลต์

จากการศึกษางานวิจัย [34] กำหนดให้สภาวะทำงานของระบบมีความไม่แน่นอนเป็นแบบจำลองพลวัตนั้นคือ กำหนดให้

$$\Delta w_I = \frac{1.979s^5 + 147.9s^4 + (1.768 \times 10^4)s^3 + (2.84 \times 10^5)s^2 + (1.78 \times 10^7)s + (4.475 \times 10^7)}{s^5 + 192.6s^4 + 6304s^3 + (3.675 \times 10^5)s^2 + (4.856 \times 10^6)s + (9.465 \times 10^7)} \quad (4.33)$$

โดยมีพลวัตของมวลภาวะเป็นดังสมการ 4.32 และค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมเป็น

$$\rho_0 = [0.8 \quad 0 \quad 0.8]^T$$

หลังจากใช้วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ 11 รอบ ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเป็นดังนี้

$$\rho_{11} = [0.874 \quad 0.291 \quad 0.800]^T$$

รูปที่ 4.28 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงตามลำดับการรวนซ้ำ รูปที่ 4.31 แสดงให้เห็นผลตอบสนองเริ่มต้นมีช่วงเวลาเข้าที่ช้ามาก มากกว่า 300 วินาที และยังคงมีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัวสูงมาก ประมาณ 7 เซนติเมตร หลังจากการรวนซ้ำครั้งที่ 11 ผลตอบสนองมีแนวโน้มปรับตัวได้ดีขึ้น นั่นคือ ไม่มีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัว และมีช่วงเวลาเข้าที่เร็วขึ้น ประมาณ 280 วินาที แต่ยังคงมีส่วนพุ่งเกินคิดเป็น 10 % ส่วนรูปที่ 4.32 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองเริ่มต้นยังคงมีสัญญาณเข้าควบคุมที่ค่อนข้างสูง ประมาณ 0.18 โวลต์ หลังจากการรวนซ้ำครั้งที่ 11 สัญญาณควบคุมลดลง ช่วงเวลาประมาณ 50 วินาทีที่มีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.05 โวลต์

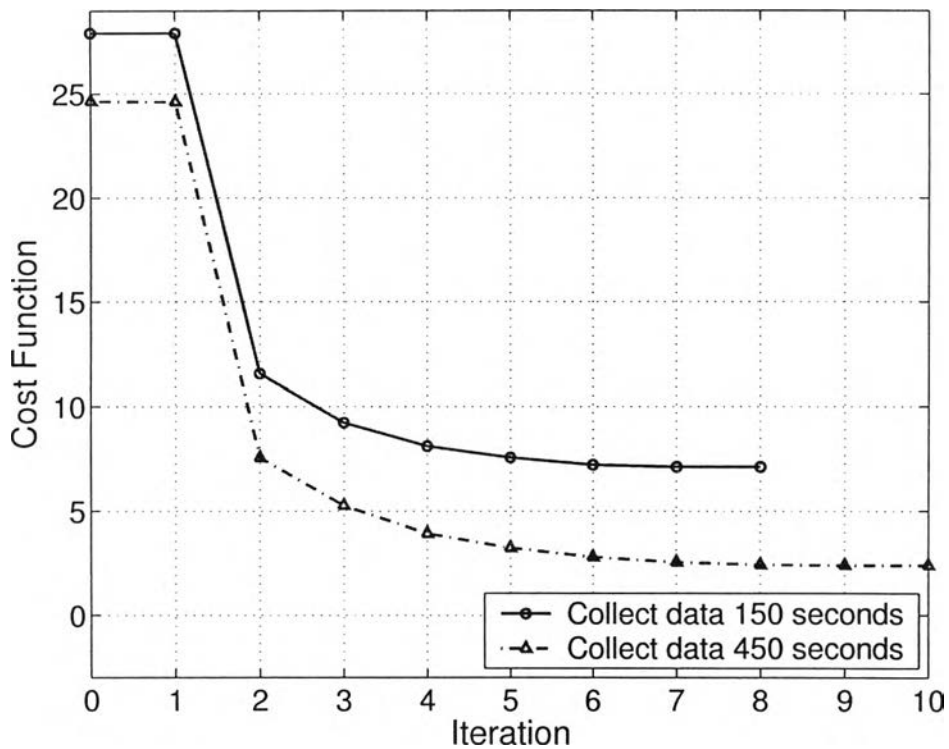
4.4.4 ช่วงเวลาเก็บข้อมูล

ในตัวอย่างตอนนี้จะกำหนดช่วงเวลาเก็บข้อมูลจากการทดลอง ซึ่งเป็นปัจจัยอย่างหนึ่งของการควบคุมด้วยวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ เริ่มต้นด้วยการกำหนดให้ช่วงเวลาเก็บข้อมูลลดลงเหลือเพียง 150 วินาที หลังจากนั้นก็จะเพิ่มช่วงเวลาเก็บข้อมูลเป็น 450 วินาที โดยกำหนดพลวัตของมวลภาวะในสภาวะการทำงานที่ 1 จากสมการ (4.31) แบบจำลองที่ใช้เป็นแบบจำลองไม่พิจารณาแรงเสียดทานไม่เชิงเส้น พารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมมีค่าเท่ากับ

$$\rho_0 = [0.8 \quad 0 \quad 0.8]^T$$

สามารถเปรียบเทียบผลการทดลองช่วงเวลาเก็บข้อมูลทั้ง 3 ช่วงเวลาได้ คือ 150 300 และ 450 วินาที

การทดลองที่ช่วงเวลาเก็บข้อมูล 300 วินาที ผลการทดลองจากการรวนซ้ำทั้ง 5 ครั้งสามารถดูได้จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันจุดประสงค์ รูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองของตำแหน่ง และรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นถึงผลตอบสนองสัญญาณเข้าควบคุม



รูปที่ 4.33: ค่าจุดประสงค์ในแต่ละรอบการวนซ้ำ เปรียบเทียบระหว่างช่วงเวลาเก็บข้อมูล 2 ค่า

การทดลองที่ช่วงเวลาเก็บข้อมูล 150 วินาที หลังจากใช้วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ 8 รอบ ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเป็นดังนี้

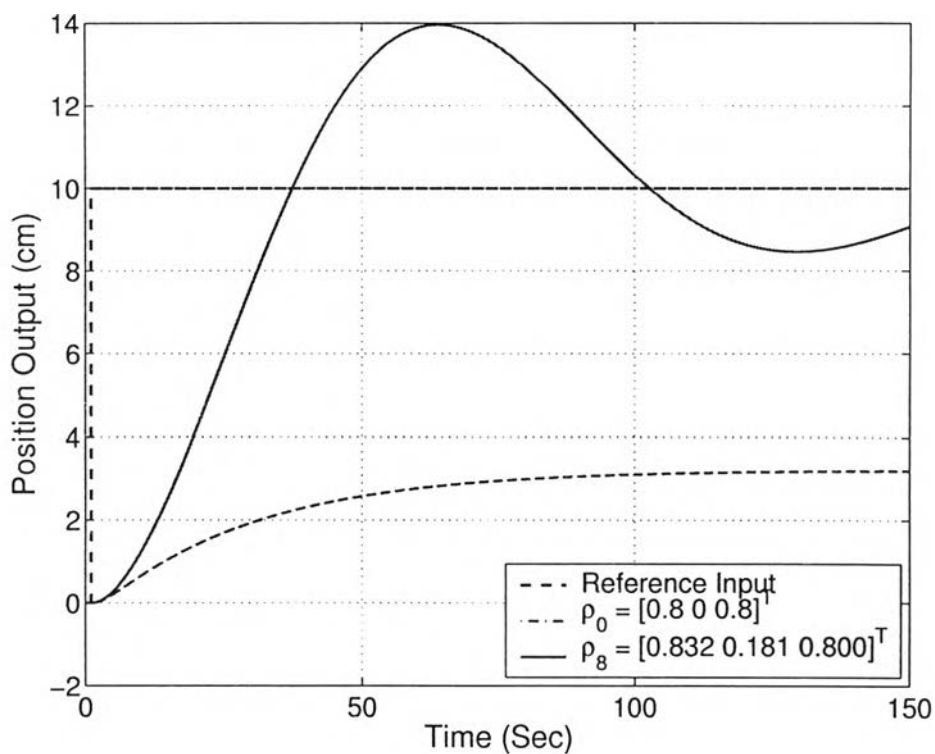
$$\rho_8 = [0.832 \quad 0.181 \quad 0.800]^T$$

รูปที่ 4.33 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงตามลำดับการวนซ้ำ รูปที่ 4.34 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองยังคงมีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัวสูงมาก ประมาณ 7 เซนติเมตร หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 8 ปรากฏว่า ผลตอบสนองยังไม่สามารถเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวได้ และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวช้ามาก มากกว่า 300 วินาที เนื่องจากยังคงมีการแกว่งไกว ส่วนรูปที่ 4.35 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองเริ่มต้นยังคงมีสัญญาณเข้าควบคุมที่ค่อนข้างสูง ประมาณ 0.4 โวลต์ หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 8 สัญญาณควบคุมลดลง ช่วงเวลาประมาณ 50 วินาทีที่มีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.1 โวลต์

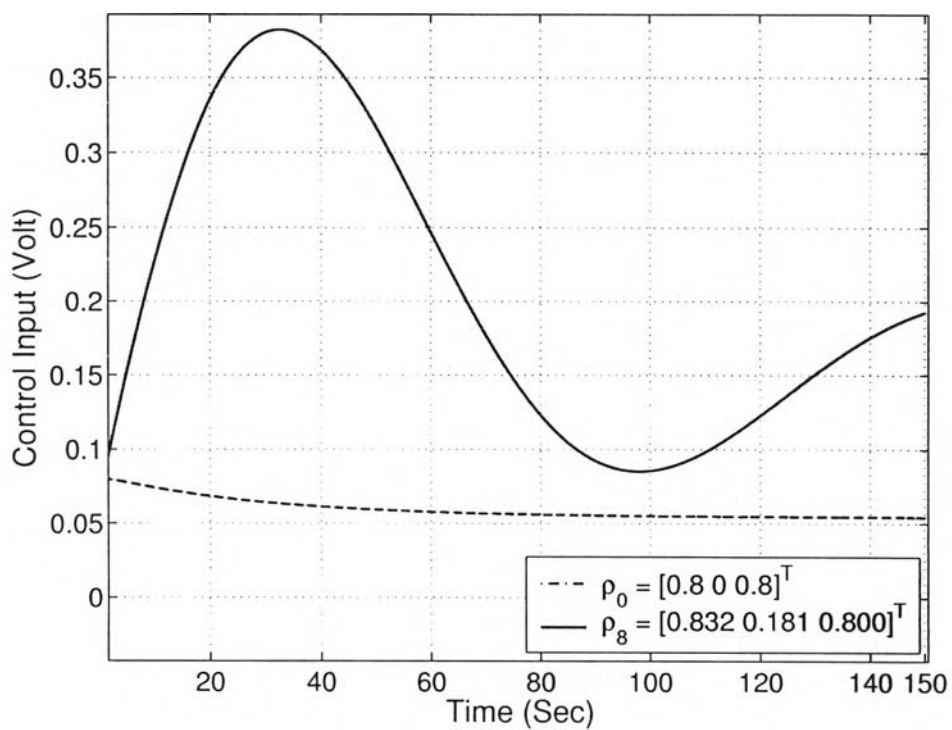
การทดลองที่ช่วงเวลาเก็บข้อมูล 450 วินาที หลังจากใช้วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ 10 รอบ ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเป็นดังนี้

$$\rho_{10} = [0.818 \quad 0.186 \quad 0.800]^T$$

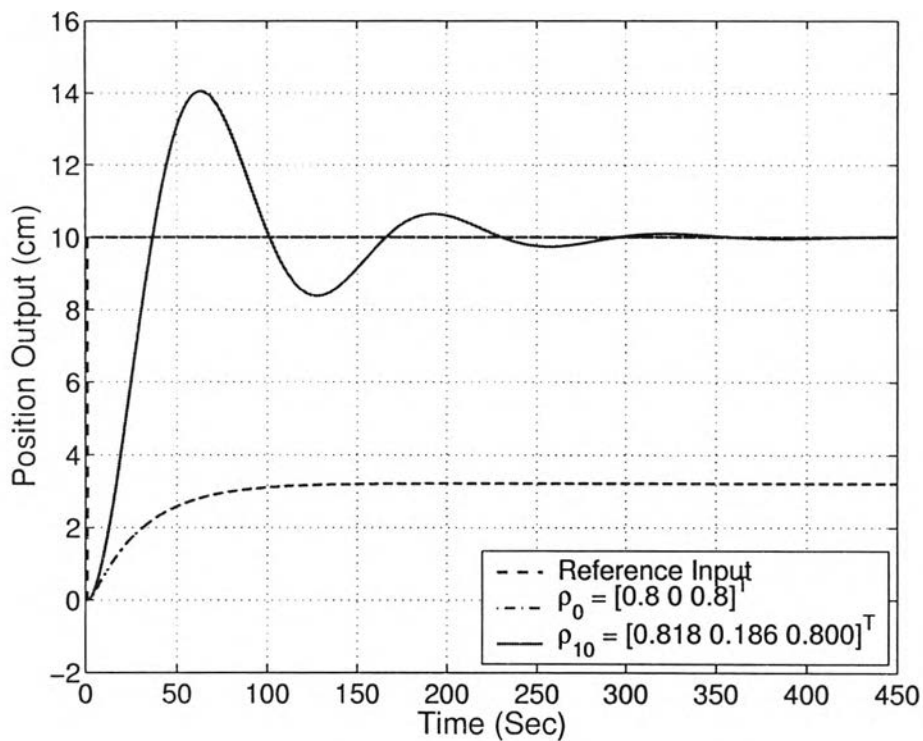
รูปที่ 4.33 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงตามลำดับการวนซ้ำ รูปที่ 4.36 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองยังคงมีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัวสูงมาก ประมาณ 7 เซนติเมตร หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 10 ปรากฏว่า ผลตอบสนองมีแนวโน้มปรับตัวได้ดีขึ้น นั่นคือ ไม่มีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัว และเข้าสู่



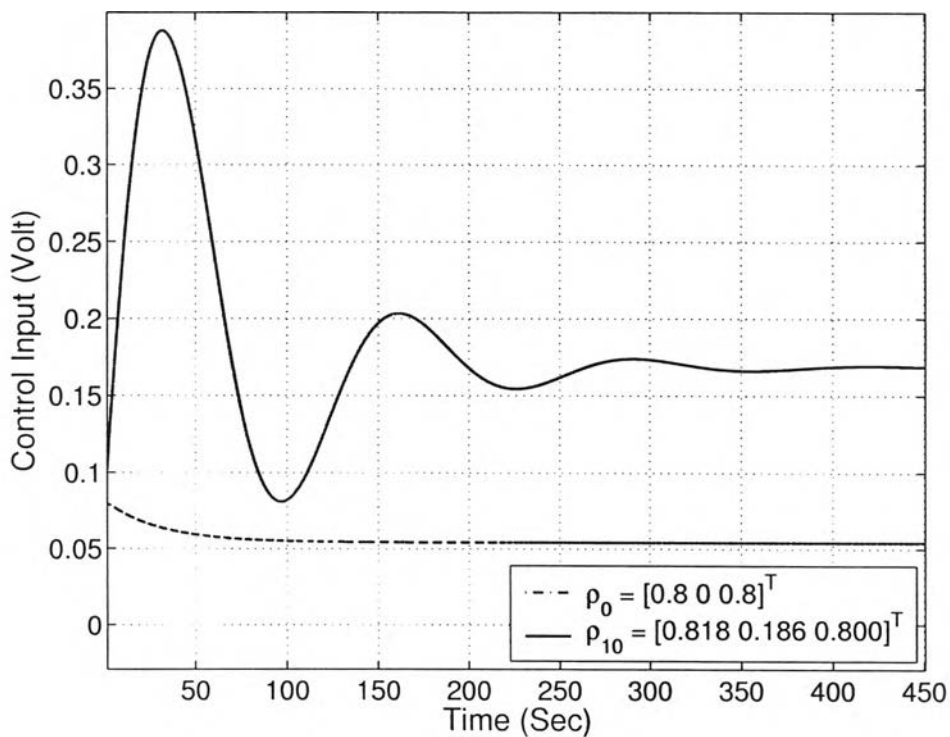
รูปที่ 4.34: ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 8 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



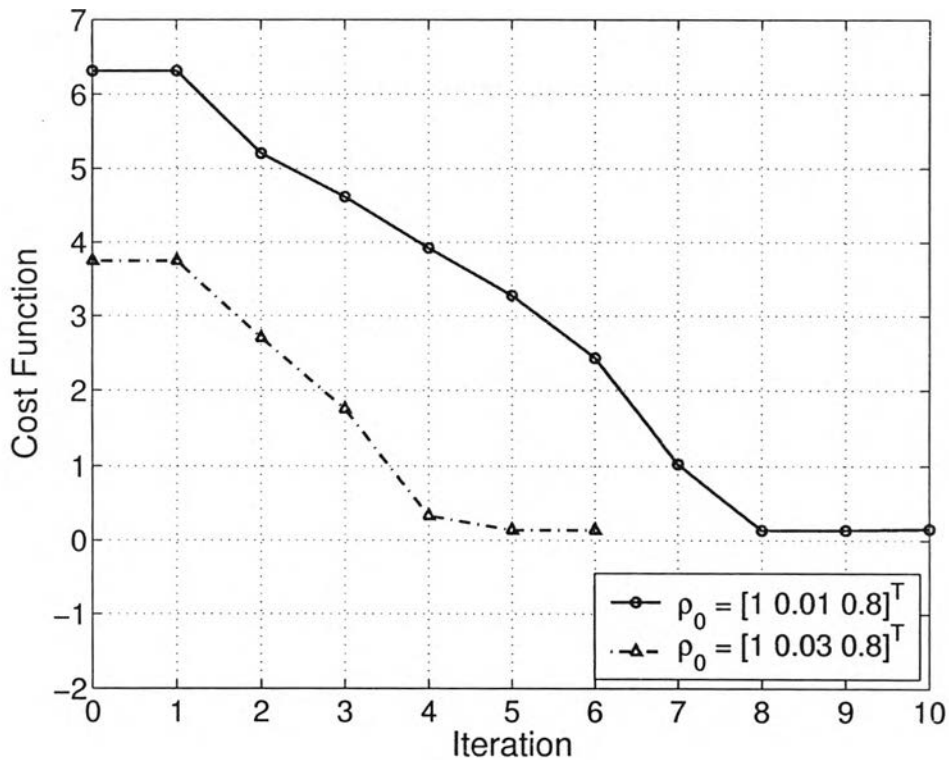
รูปที่ 4.35: สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 8 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 4.36: ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 10 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 4.37: สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 10 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 4.38: ค่าจุดประสงค์ในแต่ละรอบการวนซ้ำ เปรียบเทียบระหว่างค่าเริ่มต้นของตัวควบคุม 2 ค่า

สภาวะอยู่ตัวเร็วขึ้น ประมาณ 250 วินาที แต่ยังคงมีส่วนพุ่งเกินคิดเป็น 40% ส่วนรูปที่ 4.37 แสดงให้เห็นว่า ผลตอบสนองเริ่มต้นยังคงมีสัญญาณเข้าควบคุมที่ค่อนข้างสูง ประมาณ 0.4 โวลต์ หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 10 สัญญาณควบคุมลดลง ช่วงเวลาประมาณ 50 วินาทีที่มีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.1 โวลต์

จากตัวอย่างเชิงเลขข้างต้นจะเห็นว่า การเก็บข้อมูลประมาณ 150 วินาทียังไม่สามารถเข้าสู่สภาวะ อยู่ตัวได้ ส่วนช่วงเวลาเก็บข้อมูลประมาณ 450 วินาที ถึงแม้ว่าจะให้ผลตอบสนองที่ค่อนข้างดี แต่ยังคงเป็น ช่วงเวลาที่มากเกินไป ทำให้เสียเวลาเกินความจำเป็นสำหรับการเก็บข้อมูล แสดงให้เห็นว่าการทดลองเก็บ ข้อมูลที่ประมาณ 300 วินาทีเป็นช่วงเวลาเก็บข้อมูลเหมาะสมที่สุด

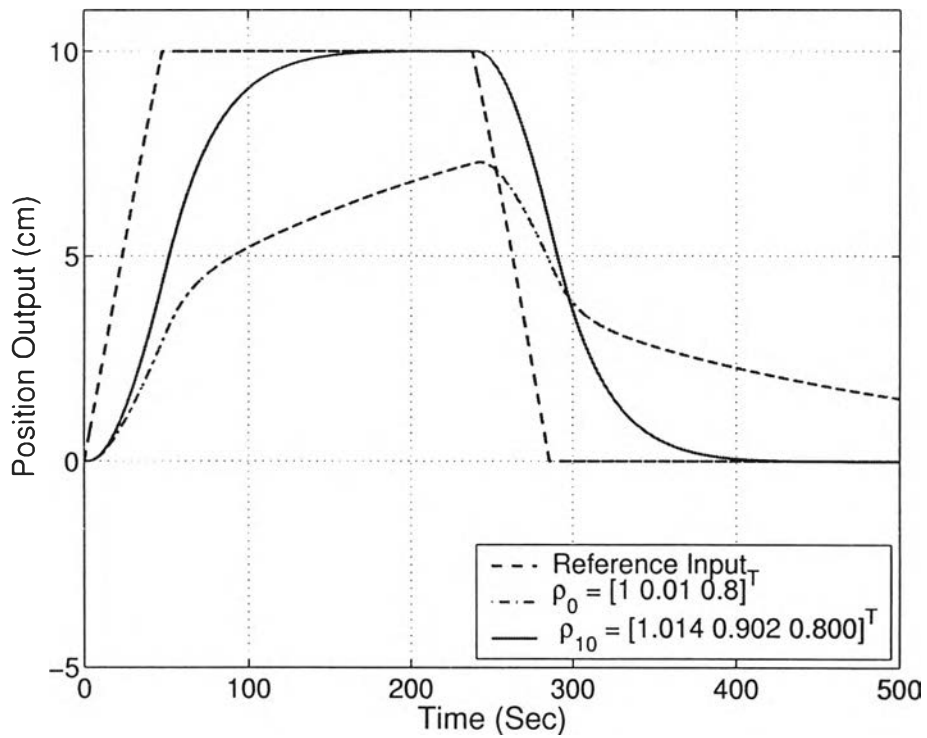
4.4.5 สัญญาณเข้าอ้างอิงแบบสี่เหลี่ยมคางหมู

ในตัวอย่างตอนนี้ยังคงเป็นปัญหาการควบคุมมีรูปแบบเป็นการตามรอยสัญญาณเข้าอ้างอิง ให้สัญญาณเข้า อ้างอิงเป็นสัญญาณตำแหน่งของสายพานลำเลียงแบบสี่เหลี่ยมคางหมูขนาด 10 เซนติเมตร กำหนดให้ พลวัตของมวลภาระในสภาวะการทำงานที่ 1 จากสมการ (4.31) แบบจำลองที่ใช้เป็นแบบจำลองไม่ พิจารณาแรงเสียดทานไม่เชิงเส้น

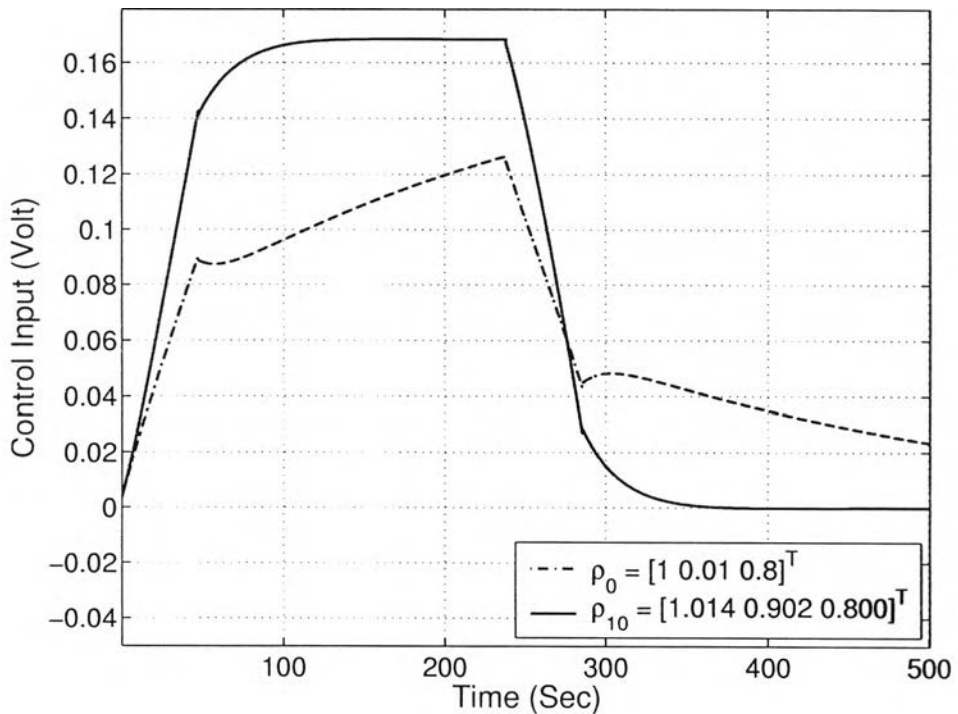
ตัวอย่างแรก กำหนดให้พารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมมีค่าเท่ากับ

$$\rho_0 = [1 \ 0.01 \ 0.8]^T$$

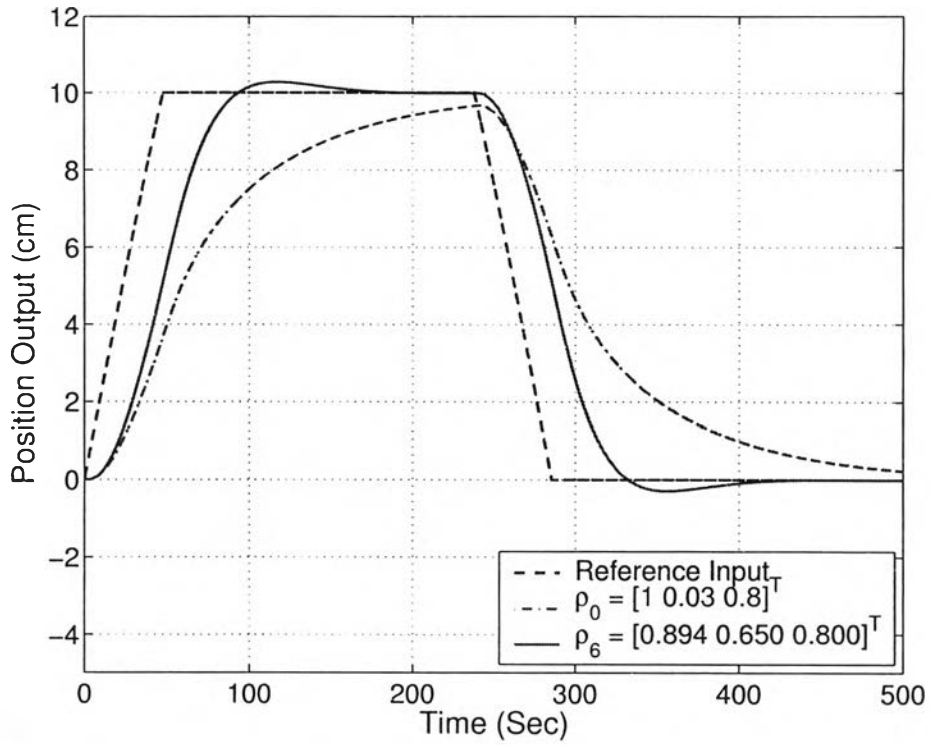
หลังจากใช้วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ 10 รอบ ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเป็นดังนี้



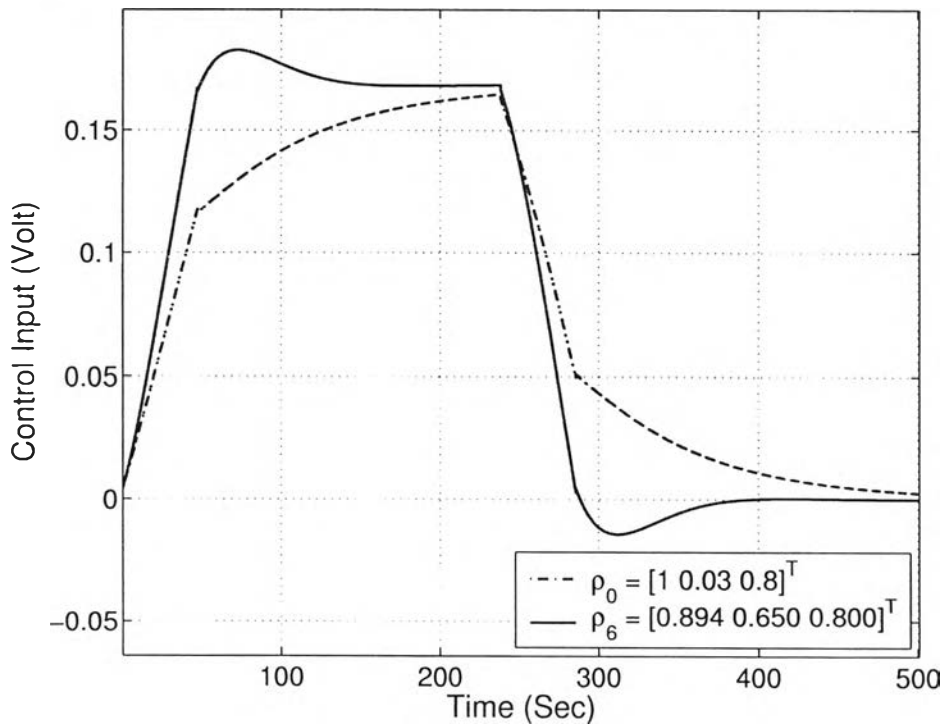
รูปที่ 4.39: ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 10 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 4.40: สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 10 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 4.41: ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 6 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 4.42: สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 6 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ

$$\rho_{10} = [1.014 \quad 0.902 \quad 0.800]^T$$

รูปที่ 4.38 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงตามลำดับการวนซ้ำ รูปที่ 4.39 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองยังคงมีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัวสูงมาก ประมาณ 3 เซนติเมตร และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวช้ามาก หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 10 ปรากฏว่า ผลตอบสนองมีแนวโน้มปรับตัวได้ดีขึ้น นั่นคือ ไม่มีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัว และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเร็วขึ้น ส่วนรูปที่ 4.40 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองที่จุดเริ่มต้นยังคงมีสัญญาณเข้าควบคุมที่ค่อนข้างสูง หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 10 วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ แสดงให้เห็นถึงสัญญาณควบคุมที่ลดลง

ตัวอย่างถัดไป กำหนดให้พารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมมีค่าเท่ากับ

$$\rho_0 = [1 \quad 0.03 \quad 0.8]^T$$

หลังจากใช้วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ 6 รอบ ได้ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมเป็นดังนี้

$$\rho_6 = [0.894 \quad 0.650 \quad 0.800]^T$$

รูปที่ 4.38 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงตามลำดับการวนซ้ำ รูปที่ 4.41 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองยังคงมีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัวสูงมาก ประมาณ 0.5 เซนติเมตร และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวช้ามาก หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 6 ปรากฏว่า ผลตอบสนองมีแนวโน้มปรับตัวได้ดีขึ้น นั่นคือ ไม่มีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัว และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเร็วขึ้น ส่วนรูปที่ 4.42 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองที่จุดเริ่มต้นยังคงมีสัญญาณเข้าควบคุมที่ค่อนข้างสูง หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 6 วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำแสดงให้เห็นถึงสัญญาณควบคุมที่ลดลง

4.5 สรุป

ระบบสายพานลำเลียงมีพลวัต และสมรรถนะการทำงานขึ้นกับมวลภาระที่อาจแปรเปลี่ยนหรือมีค่าไม่แน่นอน บทความนี้ได้ประยุกต์วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำกับระบบสายพานลำเลียง ภายใต้การเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงาน หรือความไม่แน่นอนของพลวัต ผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์แสดงให้เห็นว่าการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ สามารถปรับตัวเองและคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงมวลภาระ