

- [4] D. B. Reynolds, D. W. Repperger, C. A. Philips and G. Bandry, "Dynamic characteristics of pneumatic muscle", *Computers in Biology and Medicine*. Submitted.
- [5] D. B. Reynolds, D. W. Repperger, C. A. Phillips, and G. Bandry, "Modeling the Dynamic characteristics of pneumatic muscle", *Ann. Biomed. Eng.*, vol. 31, 2003, pp. 310–317.
- [6] J. Lilly, "Adaptive tracking for pneumatic muscle actuators in bicep and tricep configurations" *IEEE Trans. Neural Systems Rehabilitation Eng.*, vol. 11, no. 3, Sep. 2003, pp. 333-339.
- [7] J. Lilly and P. Quesada, "A Two-Input Sliding-Mode Controller for a Planar Arm Actuated by Four Pneumatic Muscle Groups" *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.*, vol. 12, no. 3, Sep. 2004, pp. 349–359.
- [8] J. Lilly and L. Yang, "Sliding Mode Tracking for Pneumatic Muscle Actuators in Opposing Pair Configuration", *IEEE Trans. Control System Technology*, vol. 13, July 2005, pp. 550-558.
- [9] X. Chang and J. Lilly, "The Dynamics of PM Arm and Its Control", at University of Louisville, March 2003.

2. วัตถุประสงค์

- 2.1 ออกแบบตัวควบคุมสำหรับกล้ามเนื้อประดิษฐ์ระบบนิวเมติกส์
- 2.2 ทดสอบกล้ามเนื้อประดิษฐ์ระบบนิวเมติกส์และหาประสิทธิภาพของตัวควบคุม

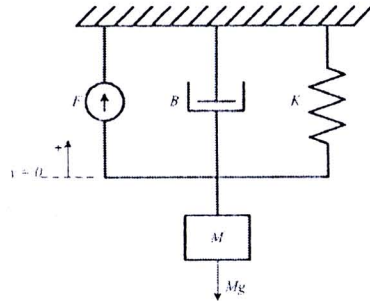
3. วิธีทดลอง

- 3.1 รวบรวมเอกสารที่เกี่ยวข้องกับปัญหาที่เกี่ยวกับการควบคุมกล้ามเนื้อประดิษฐ์ระบบนิวเมติกส์
- 3.2 ศึกษาและวิเคราะห์เพื่อหาเทคนิคและผลการวิจัยที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับปัญหาที่ต้องการทำวิจัยของแขนกลที่ขับเคลื่อนด้วยกล้ามเนื้อประดิษฐ์
- 3.3 สร้างโปรแกรมเพื่อจำลองการทำงานของกล้ามเนื้อประดิษฐ์
- 3.4 ทำการศึกษาเพื่อหาตัวควบคุมของแขนกลหลายก้านต่อที่ขับเคลื่อนโดยกล้ามเนื้อประดิษฐ์
- 3.5 ทดสอบตัวควบคุมแขนกลที่ขับเคลื่อนด้วยกล้ามเนื้อประดิษฐ์ระบบนิวเมติกส์

4. ผลการศึกษา

แบบจำลองทางพลศาสตร์ของกล้ามเนื้อประดิษฐ์

แบบจำลองทางพลศาสตร์ของกล้ามเนื้อประดิษฐ์ใน [4] และ [5] ได้พิจารณาให้กล้ามเนื้อประดิษฐ์สามารถแทนด้วยส่วนประกอบทางกล 3 ส่วน ดังรูปที่ 1 ซึ่งก็คือ ส่วนของสปริง ส่วนของตัวหมุน และส่วนของแรงเนื่องจากการหดตัว โดยค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 3 ส่วนมีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นกับความดันภายในของกล้ามเนื้อประดิษฐ์



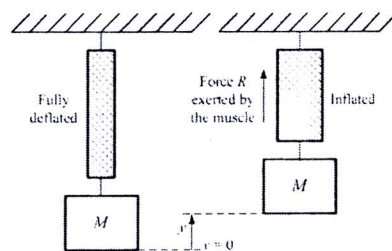
รูปที่ 1 แบบจำลองทางพลศาสตร์ของกล้ามเนื้อประดิษฐ์

เมื่อพิจารณารูปที่ 1 ดังนั้น แรงลัพธ์ที่กล้ามเนื้อประดิษฐ์ออกแรงกระทำกับมวลมีความสัมพันธ์เป็นดังนี้

$$R = F(P) - B(P)\dot{y} - K(P)y \quad (1)$$

โดยที่ K เป็นฟังก์ชันสัมพันธ์ของสปริง B เป็นฟังก์ชันสัมพันธ์ของตัวหน่วง และ F เป็นฟังก์ชันสัมพันธ์ของแรงเนื่องจากการหดตัว

การทดลองใน [4] และ [5] เพื่อต้องการหาความสัมพันธ์ของฟังก์ชันสัมพันธ์ทั้ง 3 ฟังก์ชัน โดยได้ทำการแขวนกล้ามเนื้อประดิษฐ์ในแนวดิ่ง แล้วนำมวลมาผูกติดอยู่กับปลายด้านล่าง ดังรูปที่ 2 เมื่อกล้ามเนื้อประดิษฐ์พองตัวออก ทำให้กล้ามเนื้อประดิษฐ์หดสั้นลง แล้วจึงเกิดแรงดึงที่ยกมวลขึ้น โดยให้ $y = 0$ เป็นตำแหน่งที่กล้ามเนื้อประดิษฐ์ยืดตัวมากที่สุด ที่สภาวะความดันภายใน P คงที่ ทำให้แรง F คงที่ด้วย แบบจำลองในสภาวะนี้จึงประกอบด้วย ส่วนของสปริงกับตัวหน่วงต่อขนานกัน ซึ่งฟังก์ชันสัมพันธ์ของสปริงกับตัวหน่วงสามารถหาได้โดยใช้วิธีการรบกวน (perturbation) ทางสถิติศาสตร์ ด้วยการทดสอบที่ค่าความดันคงที่หลายๆ ค่า ส่วนฟังก์ชันของแรงที่เกิดขึ้นเนื่องจากการหดตัวหาได้จากการตอบสนองของสัญญาณขาเข้าที่เป็นฟังก์ชันสเตป (step) โดยพิจารณาร่วมกับผลที่ได้จากในส่วนของสปริงและตัวหน่วงที่ได้จากการรบกวนทางสถิติศาสตร์



รูปที่ 2 กล้ามเนื้อประดิษฐ์ขณะเกิดแรงยกมวล

จากการทดลองใน [4] สามารถประมาณค่าสัมพันธ์ของกล้ามเนื้อประดิษฐ์ทั้ง 3 ส่วน ให้มีความสัมพันธ์ขึ้นกับความดันภายในดังนี้

$$K(P) = K_0 + K_1 P = 32.58 + 1.209 P \quad (2)$$

$$B(P) = B_{0t} + B_{1t} P = 5.748 + 0.2719 P \text{ (การหดตัว)} \quad (3ก)$$

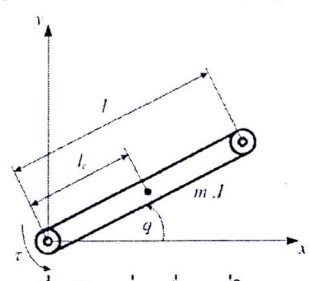
$$B(P) = B_{0d} - B_{1d} P = 3.41 - 0.0316 P \text{ (การยืดตัว)} \quad (3ข)$$

$$F(P) = F_1 P - F_2 P^2 = 3.77 P - 0.0138 P^2 \quad (4)$$

สมการ (2) – (4) เป็นฟังก์ชันของความดันภายในสำหรับค่าความดันในช่วง $0 \leq P \leq 130$ psi (1 psi $\approx$ 6.895 kPa)

พลศาสตร์ของแขนกล

เมื่อพิจารณาแขนกลเชิงเกร็งหนึ่งก้าน ดังรูปที่ 3 โดย q แทนมุมที่ข้อต่อ, l แทนความยาวของก้าน และ l_c แทนความยาวตั้งแต่จุดเริ่มต้นที่ฐานจนถึงจุดศูนย์กลางมวล



รูปที่ 3 แขนกลหนึ่งก้านที่เคลื่อนที่ในระนาบตามแนวตั้ง

พลังงานจลน์ของแขนกลนี้ คือ

$$T = \frac{1}{2} m v_c^2 + \frac{1}{2} I \omega^2 = \frac{1}{2} m l_c^2 \dot{q}^2 + \frac{1}{2} I \dot{q}^2 \tag{5}$$

โดยที่ I เป็นโมเมนต์ความเฉื่อยของก้านแขนกล และพลังงานศักย์ของแขนกล คือ

$$V = m g l_c \sin q \tag{6}$$

ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันลากรางจ์เป็น

$$L = T - V = \frac{1}{2} m l_c^2 \dot{q}^2 + \frac{1}{2} I \dot{q}^2 - m g l_c \sin q \tag{7}$$

จากสมการออยเลอร์-ลากรางจ์ที่มีความสัมพันธ์เป็น $\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = \tau$ ดังนั้น เราสามารถหา

สมการพลศาสตร์ของแขนกลเชิงเกร็งหนึ่งก้านได้เป็นดังนี้

$$m l_c^2 \ddot{q} + I \ddot{q} + m g l_c \cos q = \tau$$

โดยที่ τ เป็นแรงบิดที่ต้องการในการขับเคลื่อนข้อต่อ

สำหรับหุ่นยนต์หลายก้านต่อเราสามารถห้สมการฟังก์ชันลากรางจ์ ได้ดังนี้

$$L = K - V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} \dot{q}_i \dot{q}_j - V(q)$$

โดยกำหนดให้ $q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ เป็นเวกเตอร์ของเจนเนอไลซ์โคออร์ดิเนต (generalized coordinates) ถ้ากำหนดให้ $\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n]^T$ เป็นเวกเตอร์ของเจนเนอไลซ์ฟอร์ซ (generalized forces) ที่กระทำกับระบบ เราจะได้ว่า

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} = \sum_{j=1}^n d_{kj} (q) \dot{q}_j$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} = \sum_{j=1}^n d_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n d_{kj}(q) \dot{q}_j = \sum_j d_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} \dot{q}_i \dot{q}_j$$

ดังนั้นสมการของออยเลอร์-ลากรางจ์ สามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$\sum_{j=1}^n d_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} - \frac{1}{2} \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right\} \dot{q}_i \dot{q}_j - \frac{\partial V}{\partial q_k} = \tau_k \text{ เมื่อ } k = 1, \dots, n$$

จัดรูปใหม่

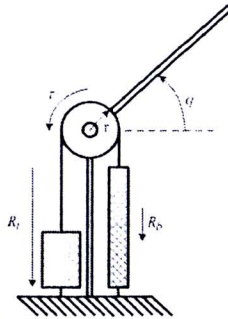
$$\sum_{j=1}^n d_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ijk}(q) \dot{q}_i \dot{q}_j + f_k(q) = \tau_k \quad (8)$$

โดยที่

$$c_{ijk} := \frac{1}{2} \left\{ \frac{\partial d_{kj}}{\partial q_i} + \frac{\partial d_{ki}}{\partial q_j} - \frac{\partial d_{ij}}{\partial q_k} \right\} \text{ และ } f_k = \frac{\partial V}{\partial q_k}$$

พลศาสตร์ของตัวขับเคลื่อนแบบกล้ามเนื้อประดิษฐ์

กำหนดให้แบบจำลองตัวขับเคลื่อนนี้มีลักษณะเป็นกลุ่มกล้ามเนื้อประดิษฐ์ 2 กลุ่มที่ออกแรงต่อต้านกัน นั่นคือ กลุ่มกล้ามเนื้อไบเซพกับไตรเซพ เพื่อจำลองให้เหมือนกับระบบกล้ามเนื้อมนุษย์ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แขนกลหนึ่งก้านที่ขับเคลื่อนด้วยกล้ามเนื้อประดิษฐ์

ดังนั้นพลศาสตร์ของตัวขับเคลื่อนแบบกล้ามเนื้อประดิษฐ์สามารถอธิบายได้ดังนี้ โดยสมมุติว่ามีกล้ามเนื้อประดิษฐ์ จำนวน n คู่ ถูกผูกเข้าด้วยกันรอบเฟืองที่มีรัศมี r ผลต่างของแรงดึงที่ต่อต้านกันเป็นผลทำให้เกิดแรงบิดที่ขับเคลื่อนเฟือง และพิจารณาให้ค่าสัมประสิทธิ์ของกล้ามเนื้อประดิษฐ์ของกล้ามเนื้อไบเซพและไตรเซพไม่จำเป็นต้องมีค่าเหมือนกัน เมื่อให้ $R_l > R_h$ ทำให้แรงบิดที่เกิดขึ้นมีทิศทวนเข็มนาฬิกา ดังนั้น แรงบิดที่เฟืองที่ถูกขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนแบบกล้ามเนื้อประดิษฐ์ คือ

$$\tau = \tau_l - \tau_h = (R_l - R_h)r \quad (9)$$

โดยที่ R_h และ R_l เป็นแรงลัพธ์เนื่องจากกลุ่มกล้ามเนื้อ ไบเซพและไตรเซพ ตามลำดับ ซึ่งมีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการ (1) สามารถกำหนดได้ดังนี้

$$R_h = n(F_h - K_h x_h - B_h \dot{x}_h) \quad (10ก)$$

$$R_l = n(F_l - K_l x_l - B_l \dot{x}_l) \quad (10ข)$$

โดยที่ x_h และ x_l เป็นระยะจัดของกล้ามเนื้อไบเซพ และไตรเซพ ตามลำดับ แทน (10) ลงในสมการ (9) ดังนั้น แรงบิดลัพธ์ที่ขับเคลื่อนเฟืองมีความสัมพันธ์เป็น

$$\tau = n(F_i - K_i x_i - B_i \dot{x}_i - F_b + K_b x_b + B_b \dot{x}_b) r \quad (11)$$

โดยที่ F_b , K_b และ B_b ขึ้นอยู่กับความดันภายในของกล้ามเนื้อไบเซพ ส่วน F_i , K_i และ B_i ขึ้นอยู่กับความดันภายในของกล้ามเนื้อไตรเซพ และมีความสัมพันธ์เป็นไปตามฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ในสมการ (2)

– (4)

เมื่อมุมข้อต่อ $q = -90^\circ$ เป็นช่วงที่กลุ่มกล้ามเนื้อไตรเซพยืดออกยาวที่สุด ส่วนกลุ่มกล้ามเนื้อไบเซพหดสั้นที่สุด และที่มุม $q = 90^\circ$ เป็นช่วงที่กลุ่มกล้ามเนื้อไตรเซพหดสั้นที่สุด ส่วนกลุ่มกล้ามเนื้อไบเซพยืดออกยาวที่สุด ดังนั้น ระยะขจัดของกล้ามเนื้อประติษฐ์ x_i และ x_b มีความสัมพันธ์เป็น

$$x_b = \left(\frac{\pi}{2} - q \right) r \quad (12ก)$$

$$x_i = \left(q + \frac{\pi}{2} \right) r \quad (12ข)$$

กำหนดให้ความดันภายในของกล้ามเนื้อไบเซพ P_b และไตรเซพ P_i มีความสัมพันธ์เป็น

$$P_b = P_{0b} - \Delta p \quad (13ก)$$

$$P_i = P_{0i} + \Delta p \quad (13ข)$$

โดยที่ P_{0b} และ P_{0i} เป็นความดันภายในเริ่มต้นที่เป็นค่าคงที่บวกใด ๆ และ Δp เป็นความดันที่เปลี่ยนแปลงตามสัญญาณขาเข้าจากตัวควบคุม ด้วยการกำหนดใน (13) ทำให้ทั้งกลุ่มกล้ามเนื้อไบเซพและไตรเซพรับสัญญาณขาเข้าจากตัวควบคุมเดียวกันคือ Δp

ดังนั้น เราสามารถหาความสัมพันธ์ของแรงบิด τ ได้โดยอาศัยสมการ (11) - (13) และฟังก์ชันสัมประสิทธิ์ในสมการ (2) - (4) ได้ดังนี้

$$\tau = a_A \Delta p^2 - (b_B(t) \dot{q} + a_C q + a_D) \Delta p + b_E(t) \dot{q} + a_F q + a_G \quad (14)$$

โดยที่

$$a_A = n(F_{2b} - F_{2i}) r \quad (15ก)$$

$$b_B(t) = \begin{cases} -n(B_{1bi} + B_{1id}) r^2, & \dot{q} < 0 \\ 0, & \dot{q} = 0 \\ n(B_{1ii} + B_{1id}) r^2, & \dot{q} > 0 \end{cases} \quad (15ข)$$

$$a_C = n(K_{1i} - K_{1b}) r^2 \quad (15ค)$$

$$a_D = \frac{n}{2} (4F_{2i} P_{0i} + 4F_{2b} P_{0b} + rK_{1b} \pi - 2F_{1i} - 2F_{1b}) r \quad (15ง)$$

$$b_E(t) = \begin{cases} -n(B_{0bi} - B_{0id} P_{0i} + B_{0id} + B_{0b} P_{0b}) r^2, & \dot{q} < 0 \\ 0, & \dot{q} = 0 \\ -n(B_{0id} + B_{0i} P_{0i} + B_{0i} - B_{0id} P_{0b}) r^2, & \dot{q} > 0 \end{cases} \quad (15จ)$$

$$a_F = -n(K_{1b} P_{0b} + K_{1i} P_{0i} + K_{0b} + K_{0i}) r^2 \quad (15ฉ)$$

$$a_G = -\frac{n}{2} (-rK_{1b} P_{0b} \pi + 2F_{1b} P_{0b} - rK_{0b} \pi + 2F_{2i} P_{0i}^2 - 2F_{2b} P_{0b}^2 - 2F_{1i} P_{0b}^2 + rK_{0i} \pi + rK_{1i} P_{0i} \pi) r \quad (15ซ)$$

สัมประสิทธิ์ใน (15) เกิดจากการพิจารณาให้กลุ่มกล้ามเนื้อไบเซพกับไตรเซพไม่จำเป็นต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ของกล้ามเนื้อประติษฐ์เหมือนกัน โดยที่ตัวห้อย b และ t เป็นการกำหนดว่าเป็นตัวแปร

ของกล้ามเนื้อไบเซพ และไตรเซพ ตามลำดับ ส่วนตัวห้อย i และ d ของฟังก์ชัน B ถูกกำหนดให้
เหมาะสมกับสภาวะการหดตัว และการยืดตัว ตามลำดับ

เมื่อรวมสมการพลศาสตร์ของแขนกล n ข้อต่อ (8) เข้ากับสมการพลศาสตร์ของตัวขับเคลื่อน
แบบกล้ามเนื้อประดิษฐ์ (14) และ (15) ดังนั้น สมการพลศาสตร์ของแขนกลที่ขับเคลื่อนด้วยกล้ามเนื้อ
ประดิษฐ์ คือ

$$\ddot{q} = D^{-1}(q)\{A_A \bar{p} - H(q, \dot{q}, b_{Bi}(t))\Delta p + B_E(t)\dot{q} + A_F q + \hat{a}_G - C(q, \dot{q})\dot{q} - f(q)\} \quad (16)$$

โดยที่ แรงบิดของแต่ละข้อต่อคือ

$$\tau_i = a_{Ai} \Delta p_i^2 - h_i(q_i, \dot{q}_i, b_{Bi}(t))\Delta p_i + b_{Ei}(t)\dot{q}_i + a_{Fi} q_i + a_{Gi}, \quad i = 1, \dots, n$$

เขียนเป็นรูปเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\tau = A_A \bar{p} - H(q, \dot{q}, b_{Bi}(t))\Delta p + B_E(t)\dot{q} + A_F q + \hat{a}_G$$

โดยที่

$$A_A = \text{diag}\{a_{Ai}\}$$

$$\bar{p} = [\Delta p_1^2, \Delta p_2^2, \dots, \Delta p_n^2]^T$$

$$\Delta p = [\Delta p_1, \Delta p_2, \dots, \Delta p_n]^T$$

$$H(q, \dot{q}, b_{Bi}(t)) = \text{diag}\{h_i(q_i, \dot{q}_i, b_{Bi}(t))\}$$

$$B_E(t) = \text{diag}\{b_{Ei}(t)\}$$

$$A_F = \text{diag}\{a_{Fi}\}$$

$$\hat{a}_G = [a_{F1}, a_{F2}, \dots, a_{Fn}]^T$$

การออกแบบตัวควบคุมแบบอะแดพทีฟ

ในการวิจัยนี้เราจะทำการออกแบบตัวควบคุม Δp ที่แก้ปัญหาในการบังคับให้มุมข้อต่อเคลื่อนที่
ตามเส้นทางการเคลื่อนที่ที่กำหนด สำหรับแขนกลที่ขับเคลื่อนด้วยกล้ามเนื้อประดิษฐ์ โดยกำหนดให้
สัญญาณอ้างอิง $y_r(t) \in C^1$ สำหรับ $\varepsilon > 0$ ถ้าเราสามารถหาตัวควบคุม ที่ทำให้

ก) ตัวแปรสเตท $(q, \dot{q})$ ของระบบลูปปิด (closed-loop system) มีอยู่และหาค่าได้ (well-
defined) บนช่วงเวลา $[0, +\infty)$ และมีขอบเขตแบบวงกว้าง (globally bounded)

ข) สำหรับทุกๆ $[q(0), \dot{q}(0)]^T \in \mathbb{R}^{2n}$ มีค่าเวลาที่จำกัด (finite time) $T > 0$ ที่ทำให้มุมข้อต่อ
ของระบบลูปปิด (16) สอดคล้องกับ $|y(t) - y_r(t)| < \varepsilon \quad \forall t \geq T > 0$

ในการออกแบบตัวควบคุมแบบอะแดพทีฟ เริ่มแรก เรากำหนดตัวแปร สเตทใหม่ให้เป็น
 $e = [e_1, \dots, e_n] = q - q_r$ และ $\bar{e} = [\bar{e}_1, \dots, \bar{e}_n] = \dot{q}$ ดังนั้นระบบ (16) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\dot{e} = \bar{e} - \dot{q}_r$$

$$\dot{\bar{e}} = D^{-1}(q)\{A_A \bar{p} - H(q, \dot{q}, b_{Bi}(t))\Delta p + B_E(t)\dot{q} + A_F q + \hat{a}_G - C(q, \dot{q})\dot{q} - f(q)\} \quad (17)$$

พิจารณาให้ฟังก์ชันเลียปูนอฟ

$$V = \frac{1}{2} e^T e + \frac{\mu_M}{2\lambda} \xi^T \xi \quad (18)$$

โดยกำหนดให้ตัวแปร $\xi_i = \bar{e}_i + (1+K)e_i$ ขณะที่ μ_M เป็นค่าคงที่บวกใดๆ ที่เป็นขอบเขตบนของเมตริกซ์ความเฉื่อย $D(q)$ และฟังก์ชันไม่ลด $K(t) \geq 1$ มีความสัมพันธ์เป็น

$$\dot{K} = \begin{cases} \text{sat}_\beta \left(\|q - q_r\| - \frac{\varepsilon}{2} \right), & \|q - q_r\| \geq \frac{\varepsilon}{2} \\ 0, & \|q - q_r\| < \frac{\varepsilon}{2} \end{cases} \quad \text{โดยที่} \quad K(0) = 1, \forall \beta > 0 \quad (19)$$

และฟังก์ชันอิ่มตัว $\text{sat}_\beta(s) \in \mathbb{R}$ ถูกกำหนดให้เป็น

$$\text{sat}_\beta(s) = \begin{cases} s, & |s| \leq \beta \\ \text{sgn}(s)\beta, & |s| > \beta \end{cases} \quad \forall s \in \mathbb{R} \quad (20)$$

ดังนั้นอนุพันธ์เมื่อเทียบกับเวลาของฟังก์ชันเลียบูโนฟในสมการ (18) ภายใต้ระบบสมการ (17) คือ

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e^T \dot{e} + \frac{\mu_M}{\lambda} \xi^T \dot{\xi} \\ &= e^T \dot{e} - \frac{\mu_M}{\lambda} \xi^T D^{-1}(q) H(\cdot) \Delta p + \frac{\mu_M}{\lambda} \xi^T D^{-1}(q) \{B_E(t)\dot{q} + A_F q + \hat{a}_G - C(q, \dot{q})\dot{q} - f(q)\} \\ &\quad + \frac{\mu_M}{\lambda} \xi^T \{(1+K)\dot{e} + \dot{K}e\} \end{aligned} \quad (21)$$

ใช้คุณสมบัติของระบบ (16) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} e_1 \dot{e}_1 &= e_1 \bar{e}_1 - e_1 \dot{q}_r \leq e_1 \bar{e}_1 + |e_1| M \leq e_1 \bar{e}_1 + K e_1^2 + \frac{M^2}{4K} \\ &= -e_1^2 + e_1 \xi_1 + \frac{M^2}{4K} \leq -\frac{e_1^2}{2} + \frac{\xi_1^2}{2} + \frac{M^2}{4K} \end{aligned}$$

ประยุกต์ใช้ในลักษณะเดียวกันกับพจน์ที่ $i = 2, \dots, n$ จะได้ว่า

$$e^T \dot{e} = \sum_{i=1}^n e_i \dot{e}_i \leq \sum_{i=1}^n \left(-\frac{e_i^2}{2} + \frac{\xi_i^2}{2} \right) + \frac{\Theta_1(n, M)}{K} \quad (22)$$

โดยที่ $\Theta_1(n, M) = \frac{nM^2}{4} > 0$ เป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า

จาก (21) เราสังเกตได้ว่าพจน์

$$\|B_E(t)\dot{q} + A_F q + \hat{a}_G\| \leq \Phi_E \|\dot{q}\| + \Phi_F \|q\| + \Phi_G \leq \Phi_E \|\bar{e}\| + \Phi_F \|e\| + \Phi_F M + \Phi_G \quad (23)$$

จากคุณสมบัติทางกายภาพของ (16) เราสามารถสรุปว่า

$$\begin{aligned} \|-C(q, \dot{q})\dot{q} - f(q)\| &\leq C_M \|\dot{q}\|^2 + F_M \\ &= C_M \|\bar{e}\|^2 + F_M \end{aligned} \quad (24)$$

จาก (23) และ (24) เมื่อใช้ร่วมกับคุณสมบัติของก้านต่อจะได้ว่า

$$\begin{aligned}
& \frac{\mu_M}{\lambda} \xi^T D^{-1}(q) \{B_E(t)\dot{q} + A_F q + \hat{a}_G - C(q, \dot{q})\dot{q} - f(q)\} \\
& \leq \frac{\mu_M}{\lambda} \|\xi\| \|D^{-1}(q)\| \|B_E(t)\dot{q} + A_F q + \hat{a}_G\| + \frac{\mu_M}{\lambda} \|\xi\| \|D^{-1}(q)\| \|C(q, \dot{q})\dot{q} - f(q)\| \\
& \leq \frac{\mu_M}{\lambda \mu_m} \|\xi\| (\Phi_E \|\bar{e}\| + \Phi_F \|e\| + \Phi_G M + \Phi_G) + \frac{\mu_M}{\lambda \mu_m} \|\xi\| (C_M \|\bar{e}\|^2 + F_M) \\
& \leq \|\xi\|^2 (K \|d\|^2 + K \|\bar{e}\|^2 + K \|\bar{e}\|^4 + K) + \frac{\Theta_2(\cdot)}{K} \\
& := \sum_{i=1}^n \xi_i^2 \rho(e, \bar{e}, K) + \frac{\Theta_2(\cdot)}{K} \tag{25}
\end{aligned}$$

โดยที่ $\Theta_2(\cdot) = \left(\frac{\mu_M}{\lambda \mu_m}\right)^2 \frac{\{\Phi_E^2 + \Phi_F^2 + C_M^2 + (\Phi_F M + \Phi_G + F_M)^2\}}{4} > 0$ เป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า

พิจารณาพจน์ที่เกี่ยวข้องกับ $K(t)$ ในสมการ (24) ร่วมกับคุณสมบัติของก้านต่อของหุ่นยนต์เชิงเกร็ง เราจะได้ว่า

$$\begin{aligned}
\frac{\mu_M}{\lambda} \xi_i \{(1+K)\dot{e}_i + \dot{K}e_i\} & \leq \frac{\mu_M}{\lambda} |\xi_i| \{(1+K)(|\bar{e}_i| + M) + \beta |e_i|\} \\
& \leq \frac{\mu_M}{\lambda} |\xi_i| \{2K|\bar{e}_i| + 2KM + \beta |e_i|\} \\
& \leq \xi_i^2 (K^3 \bar{e}_i^2 + K^3 + K e_i^2) + \left(\frac{\mu_M}{\lambda}\right)^2 \frac{(4 + 4M^2 + \beta^2)}{4K}
\end{aligned}$$

ประยุกต์ใช้ในลักษณะเดียวกันกับพจน์ที่ $i = 2, \dots, n$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
\frac{\mu_M}{\lambda} \xi^T \{(1+K)\dot{e} + \dot{K}e\} & \leq \sum_{i=1}^n \xi_i^2 (K^3 \bar{e}_i^2 + K^3 + K e_i^2) + \frac{\Theta_3(\cdot)}{K} \\
& := \sum_{i=1}^n \xi_i^2 \hat{\rho}_i(e_i, \bar{e}_i, K) + \frac{\Theta_3(\cdot)}{K} \tag{26}
\end{aligned}$$

โดยที่ $\Theta_3(\cdot) = n \left(\frac{\mu_M}{\lambda}\right)^2 \frac{(4 + 4M^2 + \beta^2)}{4} > 0$ เป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า

แทนผลที่ได้จาก (22), (25) และ (26) ลงใน (21) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
\dot{V} & \leq \sum_{i=1}^n \left(-\frac{e_i^2}{2} + \frac{\xi_i^2}{2}\right) + \frac{\Theta_1(\cdot)}{K} - \frac{\mu_M}{\lambda} \xi^T D^{-1}(q) H(\cdot) \Delta p + \sum_{i=1}^n \xi_i^2 \rho(e, \bar{e}, K) + \frac{\Theta_2(\cdot)}{K} \\
& \quad + \sum_{i=1}^n \xi_i^2 \hat{\rho}_i(e_i, \bar{e}_i, K) + \frac{\Theta_3(\cdot)}{K} \\
\dot{V} & \leq \sum_{i=1}^n \left(-\frac{e_i^2}{2} + \frac{\xi_i^2}{2}\right) - \frac{\mu_M}{\lambda} \xi^T D^{-1}(q) H(\cdot) \Delta p + \sum_{i=1}^n \xi_i^2 (\rho(\cdot) + \hat{\rho}_i(\cdot)) + \frac{\Theta}{K} \tag{4.27}
\end{aligned}$$

โดยที่ $\Theta = \Theta_1(\cdot) + \Theta_2(\cdot) + \Theta_3(\cdot)$ เป็นค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่าและไม่ขึ้นอยู่กับ K

จากสมมุติฐานที่กำหนดไว้ว่า $\forall h_i(\cdot) > 0$ ซึ่ง $h_i(\cdot)$ ทุกตัวเป็นสมาชิกของเมตริกซ์ $H(\cdot) = \text{diag}(h_i(\cdot))$ ที่เป็นเมตริกซ์สมมาตรและเป็นค่าบวกแน่นอน จากคุณสมบัติ 2.1 ที่ว่าเมตริกซ์ความเฉื่อย $D(q)$ เป็นเมตริกซ์สมมาตรและเป็นค่าบวกแน่นอน ทำให้ $D^{-1}(q)$ ยังคงเป็นเมตริกซ์

สมมาตรและเป็นค่าบวกแน่นอนอีกด้วย ดังนั้น $D^{-1}(q)H(\cdot)$ จึงสมมาตรและเป็นค่าบวกแน่นอนเช่นเดียวกัน นั่นคือ

$$\xi^T D^{-1}(q)H(\cdot)\xi \geq 0 \quad (28)$$

เมื่อพิจารณา (27) และ (28) จึงเลือกตัวควบคุมที่มีความสัมพันธ์เป็น

$$\Delta p_i = \xi_i(1 + \rho(\cdot) + \hat{\rho}_i(\cdot)) \quad (29)$$

ซึ่ง $1 + \rho(\cdot) + \hat{\rho}_i(\cdot) \geq 0$ ดังนั้นเวกเตอร์ของสัญญาณขาเข้า Δp มีความสัมพันธ์เป็น

$$\Delta p = \psi(\cdot)\xi \quad (30)$$

โดยที่ $\psi(\cdot) = \text{diag}\{1 + \rho(\cdot) + \hat{\rho}_i(\cdot)\}$ เป็นเมตริกซ์สมมาตรและเป็นค่าบวกแน่นอน เมื่อทั้งเมตริกซ์ $H(\cdot)$, $D^{-1}(q)$ และ $\psi(\cdot)$ ต่างก็เป็นเมตริกซ์สมมาตรและเป็นค่าบวกแน่นอนทั้งหมด ดังนั้น

$$\xi^T D^{-1}(q)H(\cdot)\psi(\cdot)\xi \geq 0 \quad \text{หรือ} \quad \xi^T D^{-1}(q)H(\cdot)\Delta p \geq 0 \quad (31)$$

ดังนั้น(31) สามารถเขียนได้ว่า

$$\begin{aligned} -\frac{\mu_M}{\lambda} \xi^T D^{-1}(q)H(\cdot)\Delta p &\leq -\frac{1}{\lambda} \xi^T H(\cdot)\Delta p \\ &\leq -\sum_{i=1}^n \xi_i^2 \frac{h_i(\cdot)}{\lambda} \psi_i(\cdot) \end{aligned} \quad (32)$$

นอกจากนี้เราสามารถกำหนดว่า

$$\begin{aligned} h_i(\cdot) &\geq \lambda \\ \frac{h_i(\cdot)}{\lambda} &\geq 1 \end{aligned} \quad (33)$$

จาก (32) และ (33) พิจารณาร่วมกับ (27) จะได้ว่า

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (e_i^2 + \xi_i^2) + \frac{\Theta}{K} \leq -bV + \frac{\Theta}{K} \quad (34)$$

โดยที่ $b = \min\left\{1, \frac{\lambda}{\mu_M}\right\} > 0$

ในส่วนที่เหลือคือเราต้องแสดงให้เห็นว่าตัวแปรสเตรตทุกตัวในระบบวงปิด นั้นมีอยู่และหาค่าได้บนช่วงเวลา $[0, +\infty)$ และมีขอบเขต นอกจากนี้ เมื่อกำหนดให้ $\varepsilon > 0$ เป็นบวกใดๆ และมีค่าเวลาจำกัด T_ε ที่ทำให้ความผิดพลาดของการติดตามตำแหน่งไม่เกิน $\|q - q_r\| \leq \varepsilon$ สำหรับ $\forall t \geq T_\varepsilon$

จากสมการ (37) จะได้ว่า

$$\dot{V} \leq -bV + \Theta \quad (35)$$

ซึ่งมีความหมายว่า (e, ξ, K) มีอยู่และหาค่าได้บนช่วงเวลา $[0, +\infty)$ และ (e, ξ) มีขอบเขต โดยเซตกระชับ $\Omega = \left\{e, \xi \mid V(e, \xi) \leq a, \forall a \geq \frac{\Theta}{b}\right\}$ ที่ไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจาก V เป็นค่าบวกแน่นอนและเรเดียลลิอันแบนด์เดด ส่วน $\dot{V}$ เป็นค่ากึ่งลบแน่นอน สำหรับ $\forall e, \xi \in \Omega$ จากนั้นเราต้องการแสดงว่า $K(t)$ มีขอบเขต โดยใช้การพิสูจน์ให้ขัดแย้งกับสมมุติฐานที่ว่า $K(t)$ ไม่มีขอบเขต นั่นคือ ต้องมีค่าเวลาจำกัด T^* ที่ทำให้

$$K(t) \geq \frac{\Theta}{\varepsilon^*}, \quad \varepsilon^* = \frac{b\varepsilon^2}{16} \quad \text{สำหรับ } \forall t \geq T^*$$

และจากสมการ (35) เขียนได้เป็น

$$\dot{V} \leq -bV + \varepsilon^* \quad \text{สำหรับ } \forall t \geq T^*$$

ดังนั้น

$$V(t) \leq e^{-b(t-T^*)} \left(V(T^*) - \frac{\varepsilon^*}{b} \right) + \frac{\varepsilon^*}{b} \quad \text{สำหรับ } \forall t \geq T^* \quad (36)$$

ผลส่วนนี้มีความหมายว่ามีค่าเวลาจำกัดค่าอื่นคือ T_1 ที่ทำให้

$$\frac{\|q - q_r\|^2}{2} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n e_i^2 \leq V(t) \leq \frac{2\varepsilon^*}{b} = \frac{\varepsilon^2}{8} \quad \text{สำหรับ } \forall t \geq T_1$$

ซึ่งขัดแย้งกับสมมุติฐานที่ว่า $K(t)$ ไม่มีขอบเขต เมื่อ

$$\dot{K}(t) = 0 \quad \text{สำหรับ } \forall t \geq T_1$$

นั่นคือ $K(t)$ มีขอบเขต เราจึงสามารถสรุปได้ว่า ทุกตัวแปรสเตรต (e, $\bar{e}$, K) ของสมการ (17), (29) และ (19) นั้นมีอยู่และหาค่าได้บนช่วงเวลา $[0, +\infty)$ และมีขอบเขต ทำให้การเคลื่อนที่ของระบบวงปิดที่เกิดขึ้นโดยสมการ (17), (29) และ (19) มีอยู่และหาค่าได้บนช่วงเวลา $[0, +\infty)$ และมีขอบเขต

เมื่อค่าอินทิเกรตของ $\dot{K}(t)$ ตั้งแต่ 0 ถึงค่าอนันต์ แล้วมีค่า และเป็นค่าจำกัด นั่นคือ

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t \dot{K}(\tau) d\tau = K(\infty) - K(0) < +\infty$$

เมื่อพิสูจน์โดยใช้บทตั้งของบาบาแลต(Barbalat's lemma)จะได้ว่า

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{K}(t) = 0$$

จากผลส่วนนี้เมื่อพิจารณาพร้อมกับสมการ (19) มีความหมายว่ามีค่าเวลาจำกัด T_ε ที่ทำให้

$$\|q(t) - q_r(t)\| \leq \varepsilon \quad \text{สำหรับ } t \geq T_\varepsilon > 0$$

การทดสอบตัวควบคุมแขนกลที่ขับเคลื่อนด้วยกล้ามเนื้อประดิษฐ์ระบบนิวเมติกส์

ในหัวข้อนี้ เราต้องการแสดงประสิทธิภาพของแผนการควบคุมแบบอะแดปทีฟที่พัฒนาขึ้น โดยได้ทำการยกตัวอย่างการจำลองการเคลื่อนที่ของตัวควบคุมในกรณีของแขนกลสองก้านที่ขับเคลื่อนด้วยกล้ามเนื้อประดิษฐ์ และใช้ตัวควบคุมตามแผนการควบคุมแบบอะแดปทีฟที่ได้พัฒนาขึ้นดังนี้

เมื่อพิจารณาพลศาสตร์ของแขนกลสองก้านที่ขับเคลื่อนด้วยกล้ามเนื้อประดิษฐ์ พบว่าสมการพลศาสตร์มีรูปแบบที่สอดคล้องกับรูปแบบทั่วไปของพลศาสตร์สำหรับหุ่นยนต์หลายก้านที่ขับเคลื่อนด้วยกล้ามเนื้อประดิษฐ์ นั่นคือ

$$\ddot{q} = D^{-1}(q) \{ A\bar{p} - H(q, \dot{q}, b_{Bi}(t)) \Delta p + B_E(t) \dot{q} + A_F q + \hat{a}_G - C(q, \dot{q}) \dot{q} - f(q) \} \quad (37)$$

จากความสัมพันธ์ของตัวควบคุมในสมการ (29) สามารถกำหนดเป็นตัวควบคุมสำหรับกรณีนี้เป็น



$$\begin{bmatrix} \Delta p_1 \\ \Delta p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi_1 (1 + \rho + \hat{\rho}_1) \\ \xi_2 (1 + \rho + \hat{\rho}_2) \end{bmatrix} \quad (38)$$

โดยที่ $\rho = K\|e\|^2 + K\|\bar{e}\|^2 + K\|\bar{e}\|^4 + K$, $\hat{\rho}_1 = K^3 \bar{e}_1^2 + K^3 + Ke_1^2$ และ $\hat{\rho}_2 = K^3 \bar{e}_2^2 + K^3 + Ke_2^2$
ขณะที่อัตราขยายสัญญาณแบบอะแดปทีฟมีความสัมพันธ์เป็น

$$\dot{K} = \begin{cases} \text{sat}_\beta \left(\|q - q_r\| - \frac{\varepsilon}{2} \right), & \|q - q_r\| \geq \frac{\varepsilon}{2} \\ 0, & \|q - q_r\| < \frac{\varepsilon}{2} \end{cases} \quad \text{โดยที่ } K(0) = 1, \forall \beta > 0 \quad (39)$$

ระบบวงปิด (37), (38) และ (4.39) ถูกจำลองการเคลื่อนที่โดยกำหนดตัวแปรทางกายภาพของ
แขนกลดังนี้ $m_1 = m_2 = 1$ slug, $l_1 = 20$ in., $l_{c1} = 10$ in., $l_2 = 20$ in., $l_{c2} = 10$ in., $r_1 = 2$ in. และ $r_2 = 3$ in. นอกจากนี้ยังกำหนดให้ใช้กล้ามเนื้อประดิษฐ์ สำหรับข้อต่อแรกจำนวน 6 คู่ ($n_1 = 6$) และสำหรับ
ข้อต่อที่สองจำนวน 3 คู่ ($n_2 = 3$)

ตัวควบคุมถูกออกแบบบนพื้นฐานความสัมพันธ์ที่เป็นฟังก์ชันโพลีโนเมียลของสัมประสิทธิ์
กล้ามเนื้อประดิษฐ์โดยคิดว่ากลุ่มกล้ามเนื้อไบเซพและไตรเซพไม่จำเป็นต้องมีสัมประสิทธิ์ของ
กล้ามเนื้อประดิษฐ์เหมือนกัน และยังสมมุติว่ากล้ามเนื้อประดิษฐ์ ทุกมัดในแต่ละข้อต่อรับคำสั่งจาก
สัญญาณขาเข้าสัญญาณเดียวกัน นั่นคือ Δp_1 และ Δp_2 เป็นสัญญาณขาเข้าสำหรับข้อต่อแรก และข้อ
ต่อที่สอง ตามลำดับ

พิจารณาตารางที่ 1 เป็นการกำหนดค่าคงที่ของสัมประสิทธิ์กล้ามเนื้อประดิษฐ์ โดยกลุ่มแรก
เป็นค่ากลางซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลองใน Reynolds at el. (Trans.) ส่วนกลุ่มที่สองและสาม
กำหนดให้ค่าคงที่เพิ่มขึ้น 50% (+50%) และลดลง 50% (-50%) จากค่ากลาง ตามลำดับ ตาม
ความสัมพันธ์สมการ (2.33) แสดงว่ากลุ่มค่าสัมประสิทธิ์มีค่าเพิ่มขึ้น 50% (หรือลดลง 50%)
หมายความว่า แรงเกิดขึ้นโดยกลุ่มกล้ามเนื้อประดิษฐ์ จะเพิ่มขึ้น 50% (หรือลดลง 50%) ด้วย ทั้งที่
เป็นกล้ามเนื้อไบเซพและไตรเซพ

ตารางที่ 1 กลุ่มค่าสัมประสิทธิ์ของกล้ามเนื้อประดิษฐ์

สัมประสิทธิ์	ค่ากลาง	+50%	-50%
F_1	3.7700	5.6550	1.8850
F_2	0.1380	0.2070	0.0690
K_0	32.5800	48.8700	16.2900
K_1	1.2090	1.8135	0.6045
B_{0_i}	5.7480	8.6220	2.8740
B_{1_i}	0.2719	0.4079	0.1360
B_{0_d}	3.4100	5.1150	1.7050
B_{1_d}	0.0316	0.0474	0.0158

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่.....-5 ต.ค. ๖๖.....
เลขทะเบียน.....246881.....
เลขเรียกหนังสือ.....

เราได้กำหนดกรณีศึกษาของการจำลองการเคลื่อนที่ภายใต้ตัวควบคุม ดังตารางที่2 จากความคิดที่ว่ากลุ่มกล้ามเนื้อไบเซพและไตรเซพไม่จำเป็นต้องมีค่าสัมประสิทธิ์ของกล้ามเนื้อประดิษฐ์เท่ากัน โดยกำหนดให้ในกรณี ก เป็นกรณีที่มีค่าสัมประสิทธิ์เหมือนกัน ส่วนกรณี ข, ค, ง และ จ เป็นกรณีที่มีค่าสัมประสิทธิ์ต่างกัน

ตาราง2 กรณีศึกษาของการจำลองการเคลื่อนที่

กรณี	ข้อต่อแรก		ข้อต่อที่สอง	
	ไบเซพ1 (b1)	ไตรเซพ1 (t1)	ไบเซพ2 (b2)	ไตรเซพ2 (t2)
ก	ค่ากลาง	ค่ากลาง	ค่ากลาง	ค่ากลาง
ข	+50%	-50%	+50%	-50%
ค	-50%	+50%	-50%	+50%
ง	+50%	-50%	-50%	+50%
จ	-50%	+50%	+50%	-50%

สำหรับการจำลองการเคลื่อนที่ของระบบนี้ เราใช้ค่า $\mathcal{E} = 0.1 \text{ rad.}$ และ $\beta = 10$ โดยให้ค่าเริ่มต้น $q_1(0)=q_2(0)=1 \text{ rad.}$ และ $\dot{q}_1(0)=\dot{q}_2(0)=0.01 \text{ rad./s}$ สมมุติให้ความดันภายในมีค่าเริ่มต้น $P_{0b1} = 40 \text{ psi}$, $P_{0t1} = 60 \text{ psi}$, $P_{0b2} = 60 \text{ psi}$ และ $P_{0t2} = 40 \text{ psi}$ นอกจากนี้ เพื่อให้ความดันภายในมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ภายในช่วงความดัน $0 \leq P \leq 130 \text{ psi}$ ได้กำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติมว่า ถ้าความดันภายในมีค่าต่ำกว่า 0 psi ก็กำหนดให้ความดันภายในมีค่าเท่ากับ 0 psi ถ้าความภายในมีค่ามากกว่า 130 psi ก็กำหนดให้ความดันภายในมีค่าเท่ากับ 130 psi ทั้งกล้ามเนื้อไบเซพและไตรเซพ

เราทำการทดสอบความสามารถในการติดตามตำแหน่งของปลายแขนในพิกัดคาร์ทีเซียน (พิกัด x-y) โดยต้องการให้ปลายแขนเคลื่อนที่เป็นวงกลมซึ่งมีความสัมพันธ์ของตำแหน่งอ้างอิงดังนี้

$$x_d = 16 + 8\sin(0.4\pi \cdot t) \qquad \text{in.} \qquad (40ก)$$

$$y_d = 16 + 8\cos(0.4\pi \cdot t) \qquad \text{in.} \qquad (40ข)$$

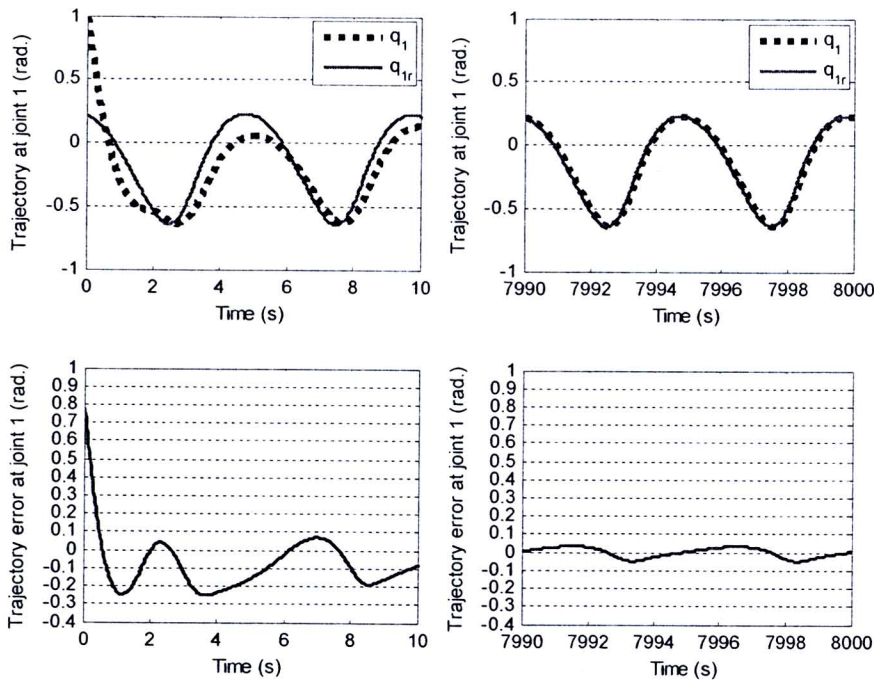
โดยที่ x_d เป็นพิกัดของปลายแขนที่ต้องการตามแนวแกน x และ y_d เป็นพิกัดของปลายแขนที่ต้องการตามแนวแกน y ขณะที่ตำแหน่งอ้างอิงสำหรับตัวควบคุมต้องระบุเป็นมุมข้อต่อ จึงต้องมีการแปลงจากพิกัดคาร์ทีเซียนกลับเป็นมุมข้อต่อ โดยใช้หลักการของจลนศาสตร์ผกผันในภาคผนวก ค.4

จากการจำลองการเคลื่อนที่ของระบบวงปิด (37), (38) และ (39) ที่มีตำแหน่งอ้างอิงเคลื่อนที่เป็นวงกลมตามสมการ (40) ได้แสดงการเปลี่ยนแปลงของมุมและค่าความผิดพลาดของมุมข้อต่อแรกในกรณี ก, ข, ค, ง และ จ ดังรูปที่ 5, 9, 13, 17 และ 20 ตามลำดับ และการเปลี่ยนแปลงของมุมและค่าความผิดพลาดของมุมข้อต่อที่สองในกรณี ก, ข, ค, ง และ จ ดังรูปที่ 6, 10, 14, 18 และ 22 ตามลำดับ นอกจากนั้น ได้แสดงนอร์มของค่าความผิดพลาดในกรณี ก, ข, ค, ง และ จ ดังรูปด้านล่างของรูปที่ 7,

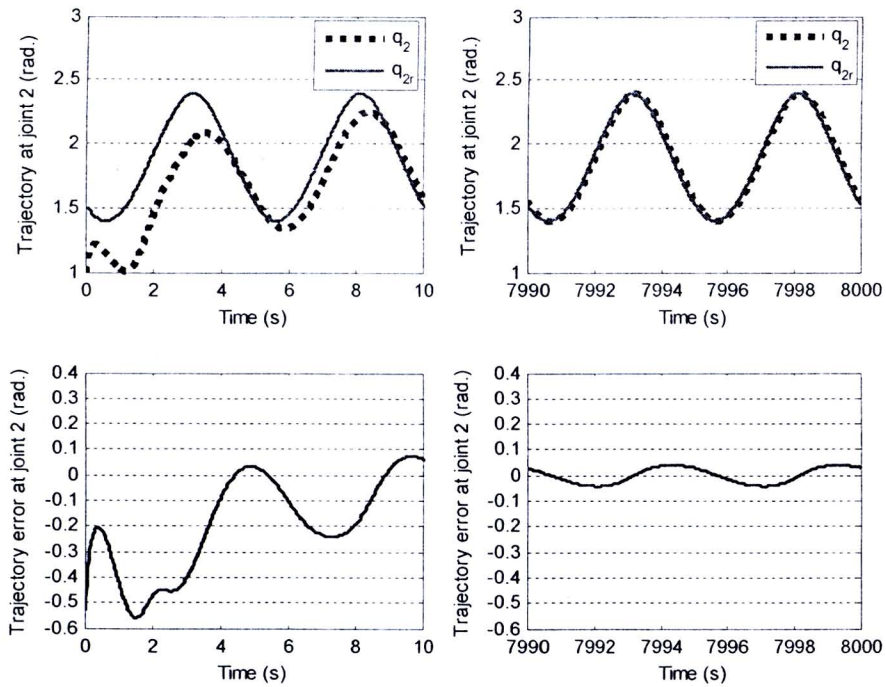
11, 15, 19 และ 23 ตามลำดับ พบว่าในทุกกรณีสามารถบังคับให้นอร์มของค่าความผิดพลาดไม่เกิน $\|q(t) - q_r(t)\| < \varepsilon$ เมื่อ $\varepsilon = 0.1$ rad. หลังจากค่าเวลาจำกัด ค่าหนึ่ง

รูปด้านบนของรูปที่ 7, 11, 15, 19 และ 23 ได้แสดงอัตราขยายสัญญาณในกรณี ก, ข, ค, ง และ จ ตามลำดับ พบว่าในทุกกรณีสามารถระบุได้ว่าฟังก์ชันอัตราขยายสัญญาณ $K(t)$ ที่กำหนดใน (4.32) เป็นฟังก์ชันไม่ลดและมีขอบเขตบนช่วงเวลา $[0, \infty)$

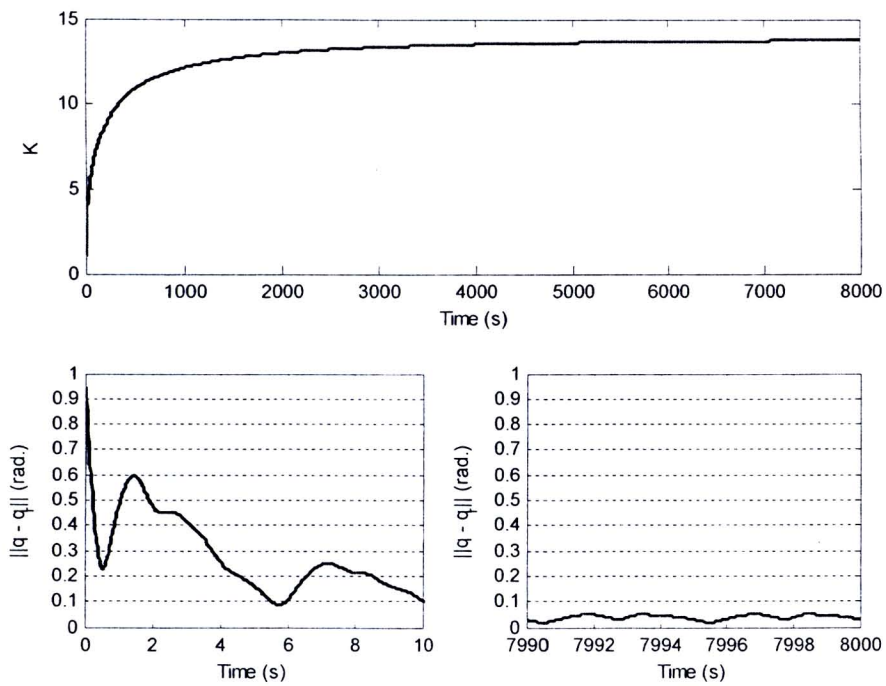
การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาเข้า Δp_1 และ Δp_2 กับความดันภายใน P_{b1} , P_{b2} , P_{r1} และ P_{r2} ของทั้ง 2 ข้อต่อ ดังแสดงในรูป 8, 12, 16, 20 และ 24 ตามลำดับ ซึ่งพบว่าความดันภายใน P_{b1} , P_{b2} , P_{r1} และ P_{r2} ในทุกกรณี มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ภายในช่วงความดัน $0 \leq P \leq 130$ psi



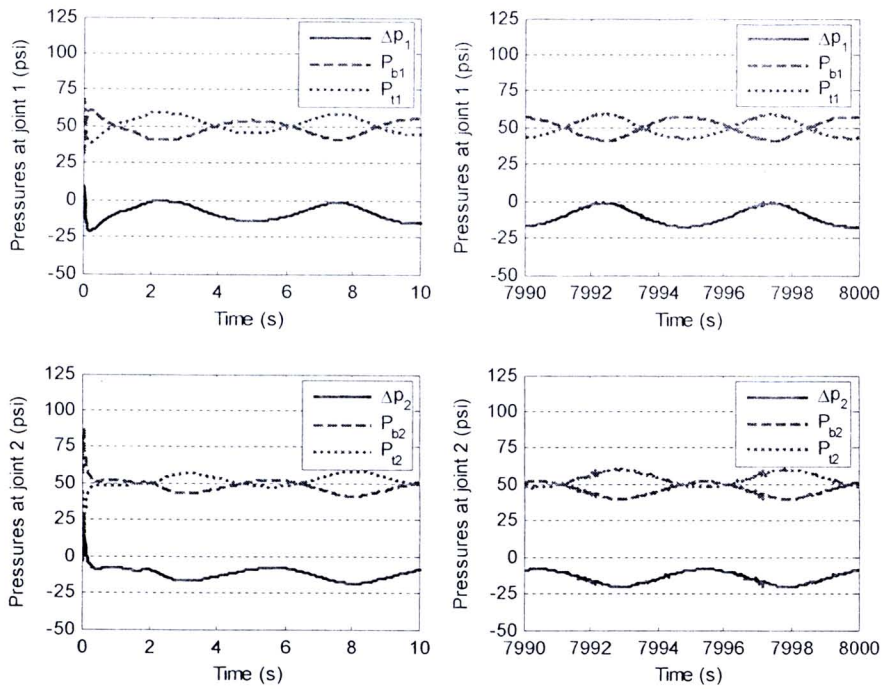
รูป 5 การเปลี่ยนแปลงของมุม และค่าความผิดพลาดของมุมข้อต่อแรกในกรณี ก



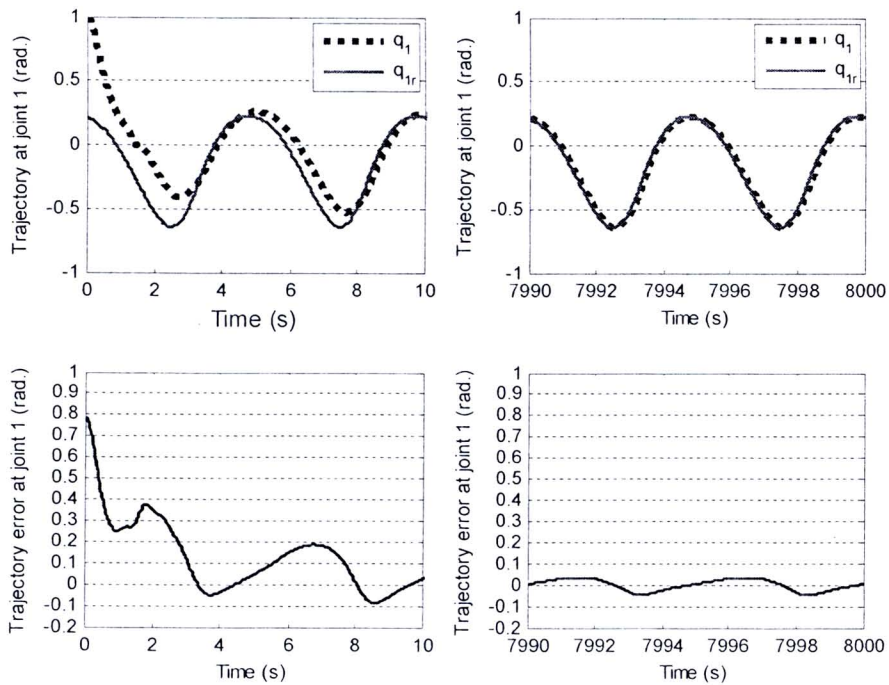
รูป 6 การเปลี่ยนแปลงของมุม และค่าความผิดพลาดของมุมข้อต่อที่สองในกรณี ก



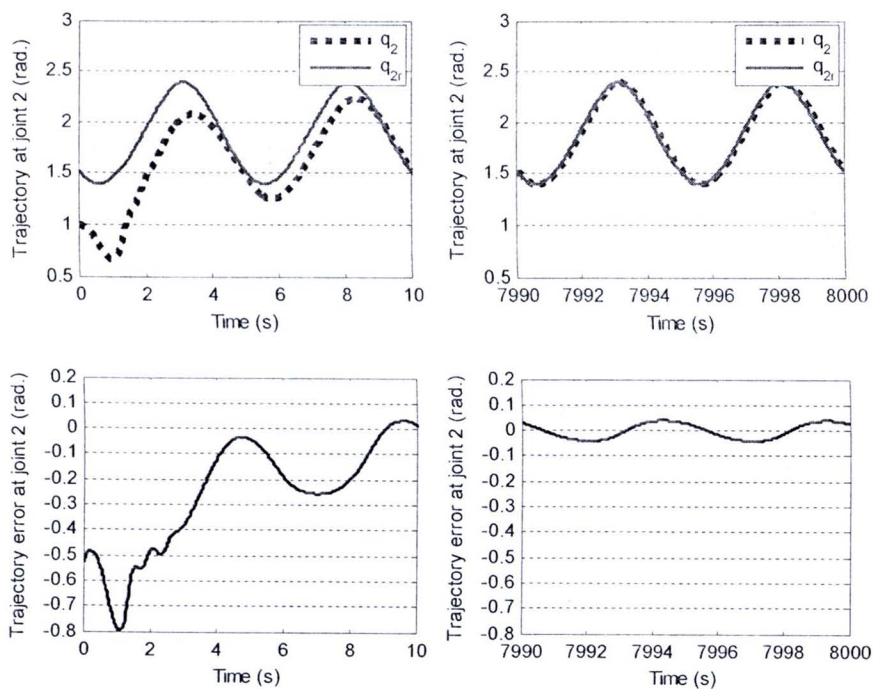
รูป 7 อัตราการขยายสัญญาณแบบอะแดพทีฟ และนอร์มของค่าความผิดพลาดในกรณี ก



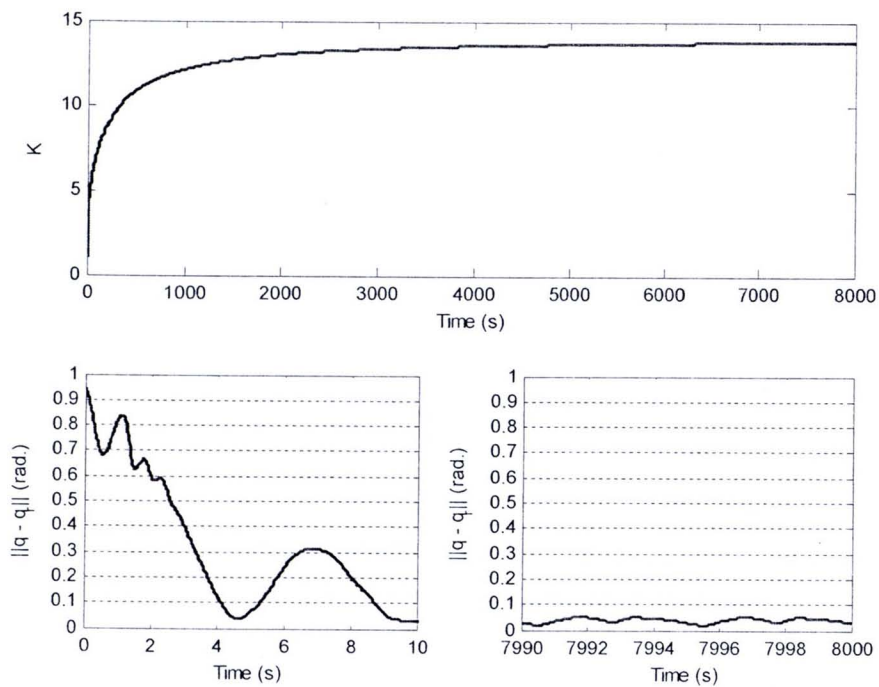
รูป 8 การเปลี่ยนแปลงความดันที่ข้อต่อแรก และข้อต่อที่สองในกรณี ก



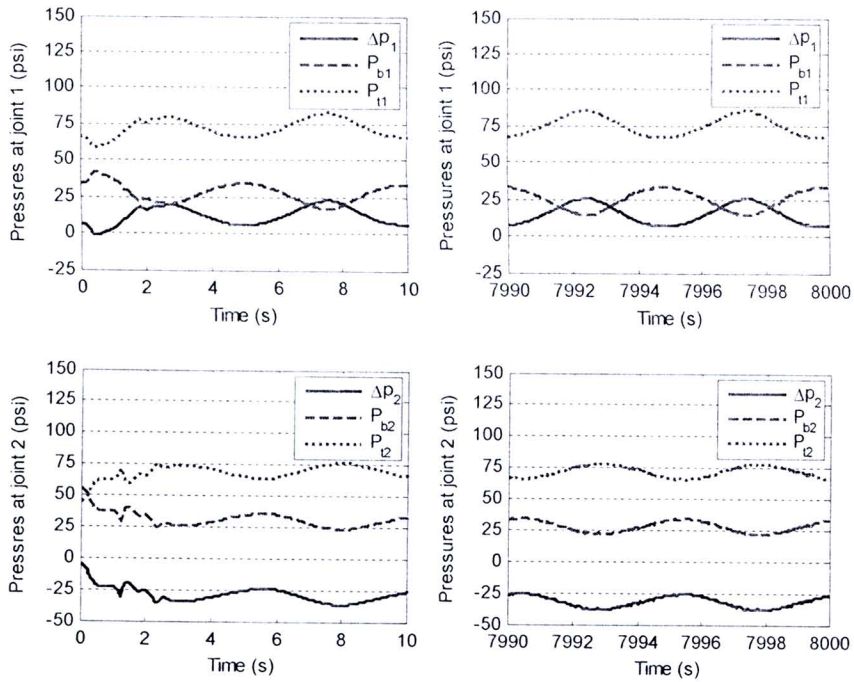
รูป 9 การเปลี่ยนแปลงของมุม และค่าความผิดพลาดของมุมข้อต่อแรกในกรณี ข



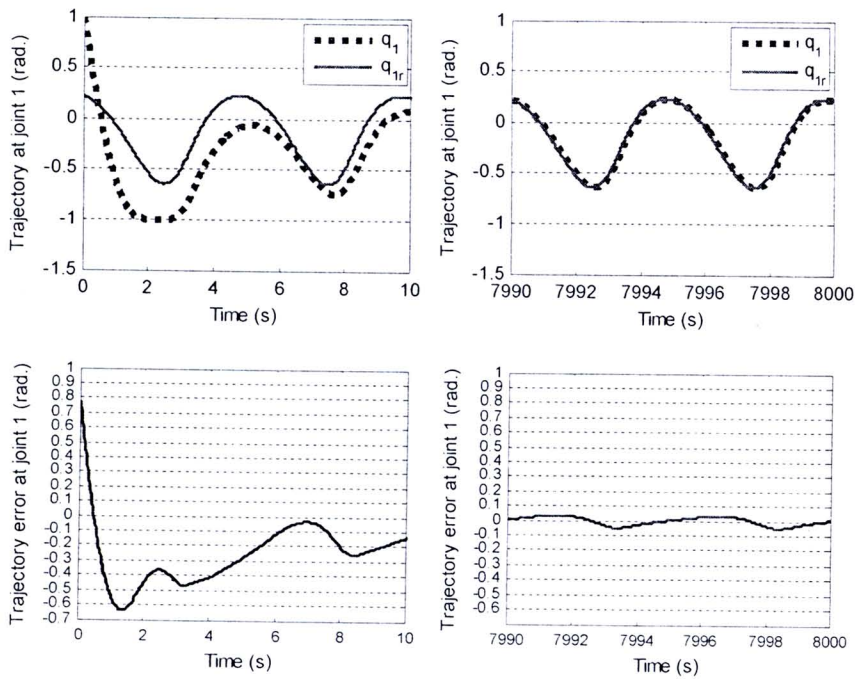
รูป 10 การเปลี่ยนแปลงของมุม และค่าความผิดพลาดของมุมข้อต่อที่สองในกรณี ข



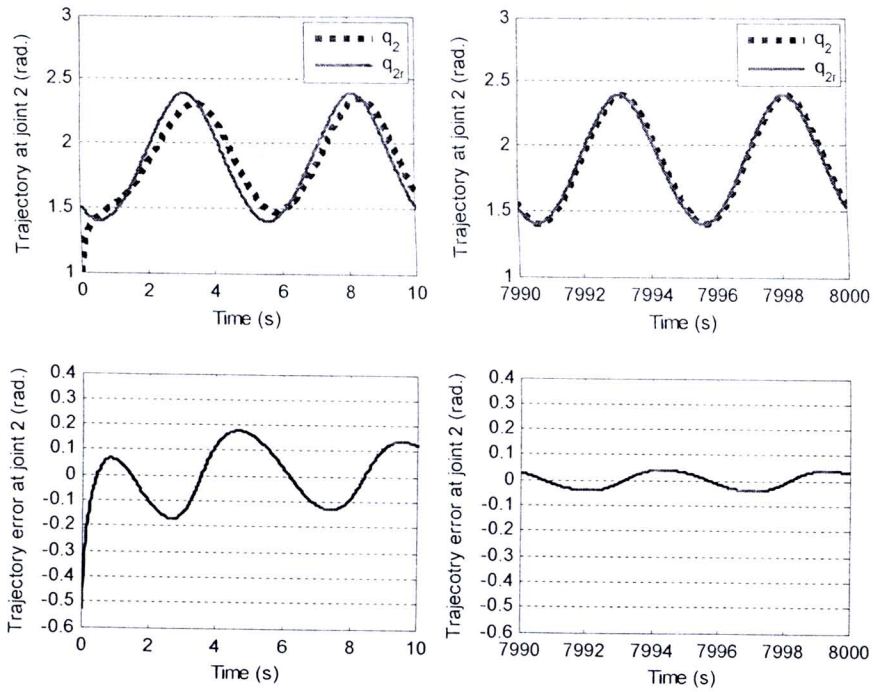
รูป 11 อัตราการขยายสัญญาณแบบอะแดพทีฟ และนอร์มของค่าความผิดพลาดในกรณี ข



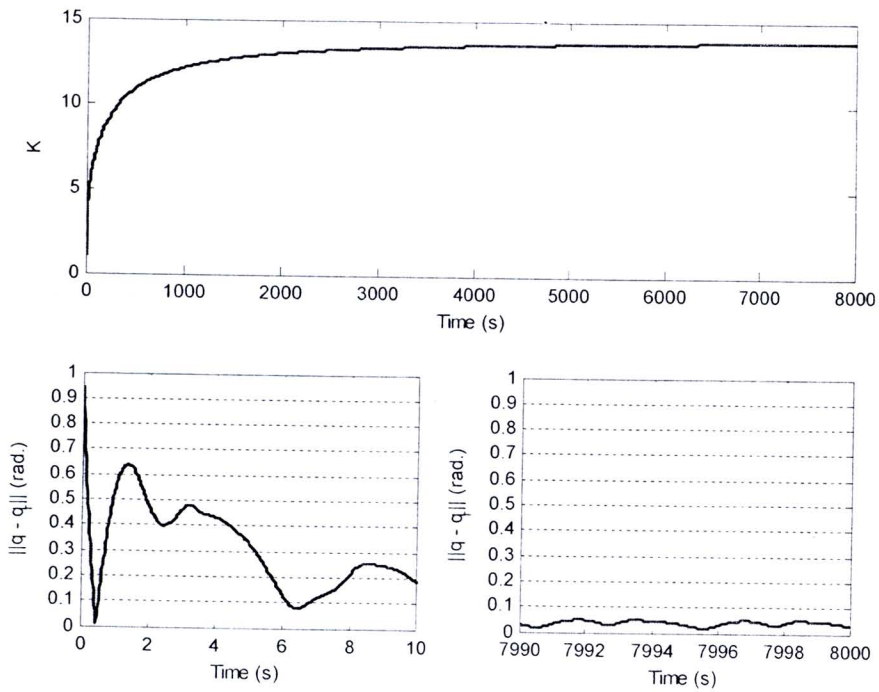
รูป 12 การเปลี่ยนแปลงความดันที่ข้อต่อแรก และข้อต่อที่สองในกรณี ข



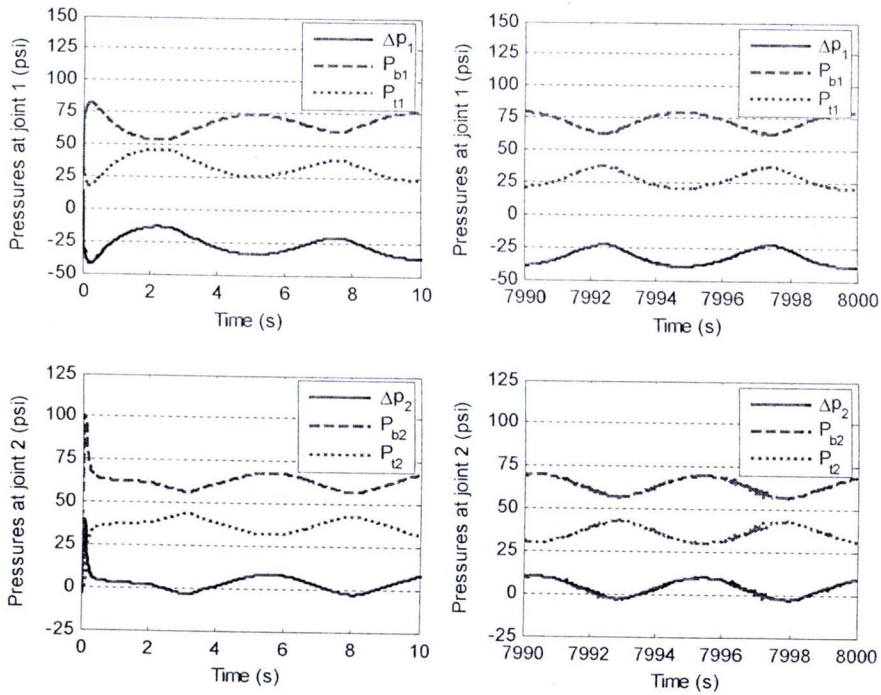
รูป 13 การเปลี่ยนแปลงของมุม และค่าความผิดพลาดของมุมข้อต่อแรกในกรณี ค



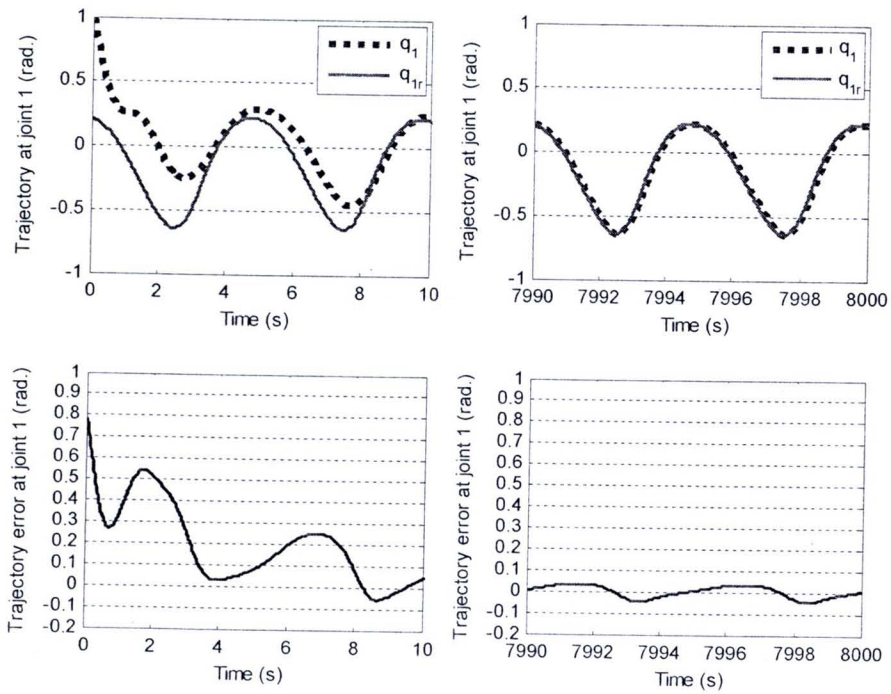
รูป 14 การเปลี่ยนแปลงของมุม และค่าความผิดพลาดของมุมข้อต่อที่สองในกรณี ค



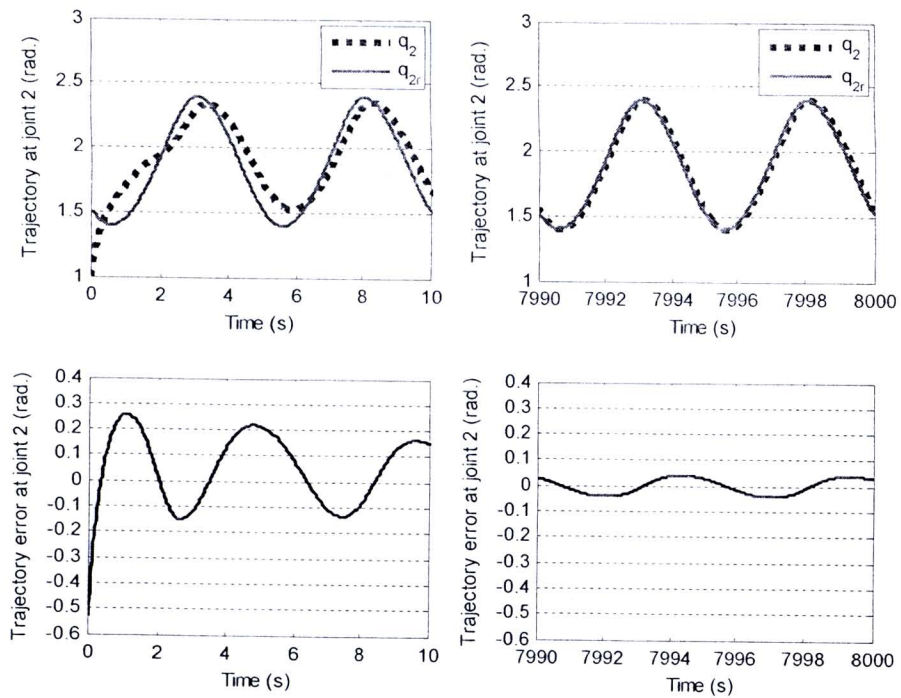
รูป 15 อัตราการขยายสัญญาณแบบอะแดพทีฟ และนอร์มของค่าความผิดพลาดในกรณี ค



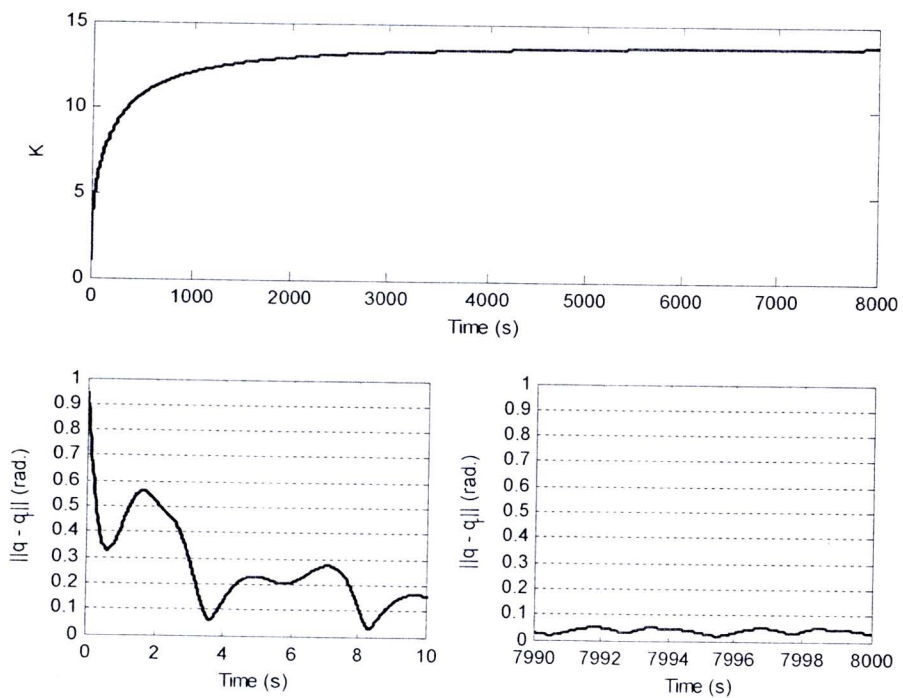
รูป 16 การเปลี่ยนแปลงความดันที่ข้อต่อแรก และข้อต่อที่สองในกรณี ค



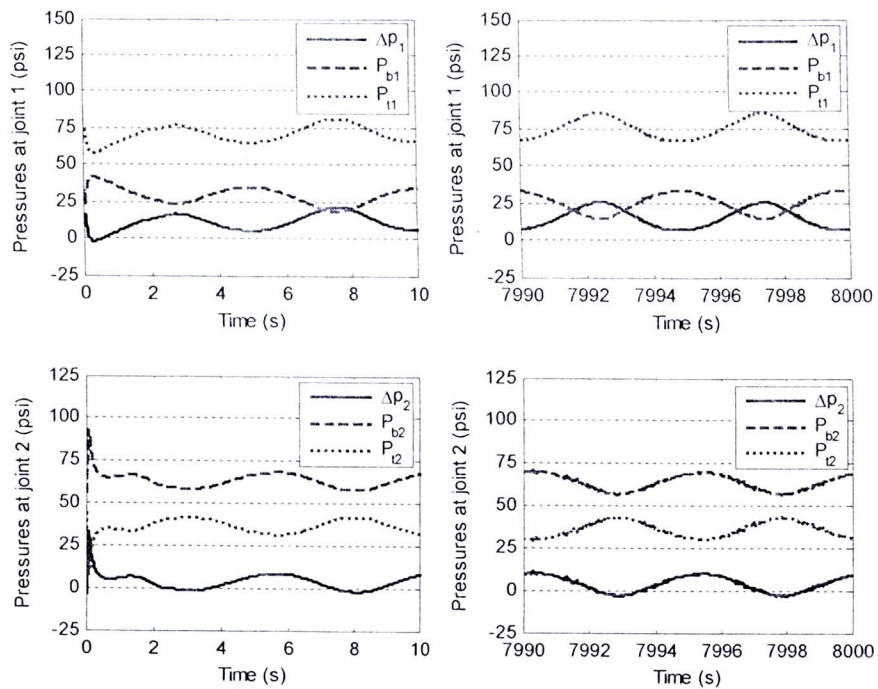
รูป 17 การเปลี่ยนแปลงของมุม และค่าความผิดพลาดของมุมข้อต่อแรกในกรณี ง



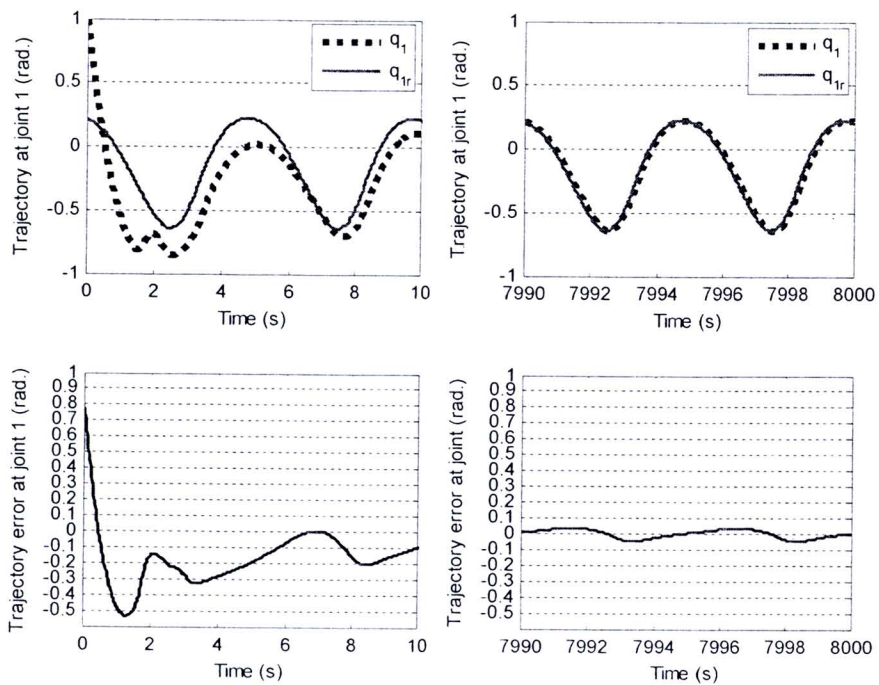
รูป 18 การเปลี่ยนแปลงของมุม และค่าความผิดพลาดของมุมข้อต่อที่สองในกรณี ง



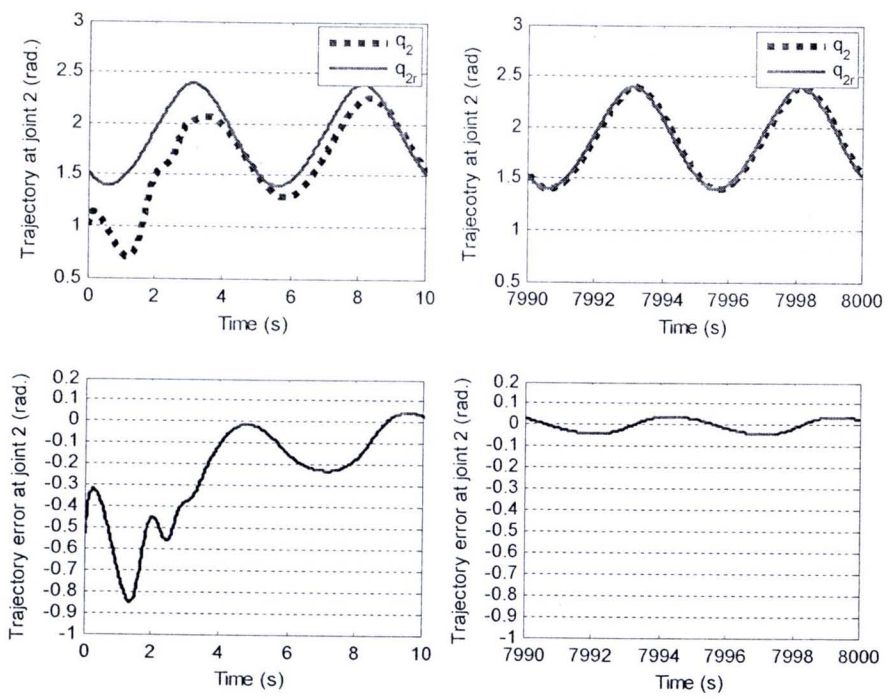
รูป 19 อัตราการขยายสัญญาณแบบอะแดพทีฟ และนอร์มของค่าความผิดพลาดในกรณี ง



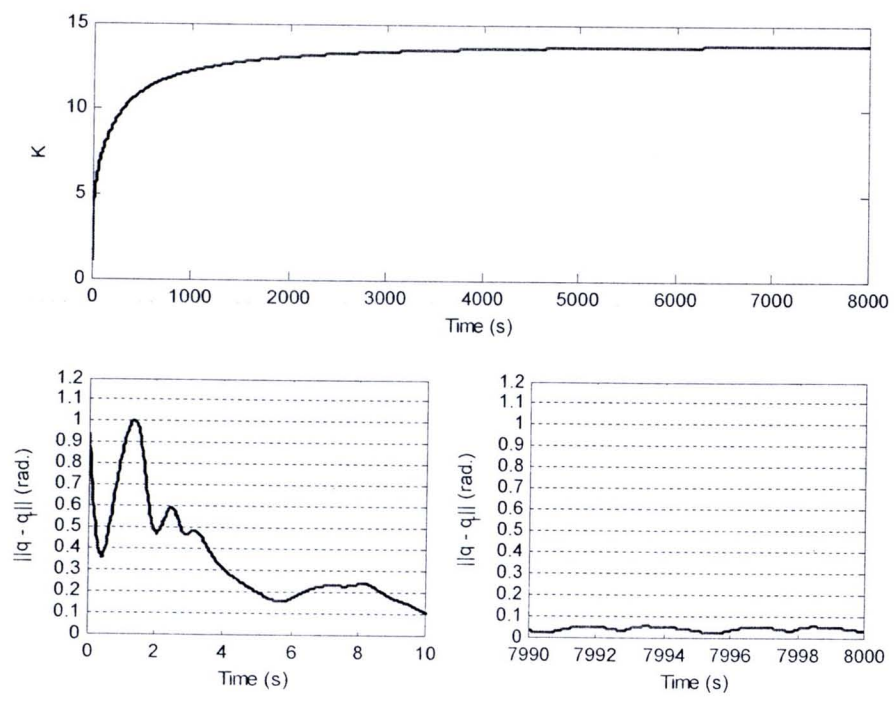
รูป 20 การเปลี่ยนแปลงความดันที่ข้อต่อแรก และข้อต่อที่สองในกรณี ง



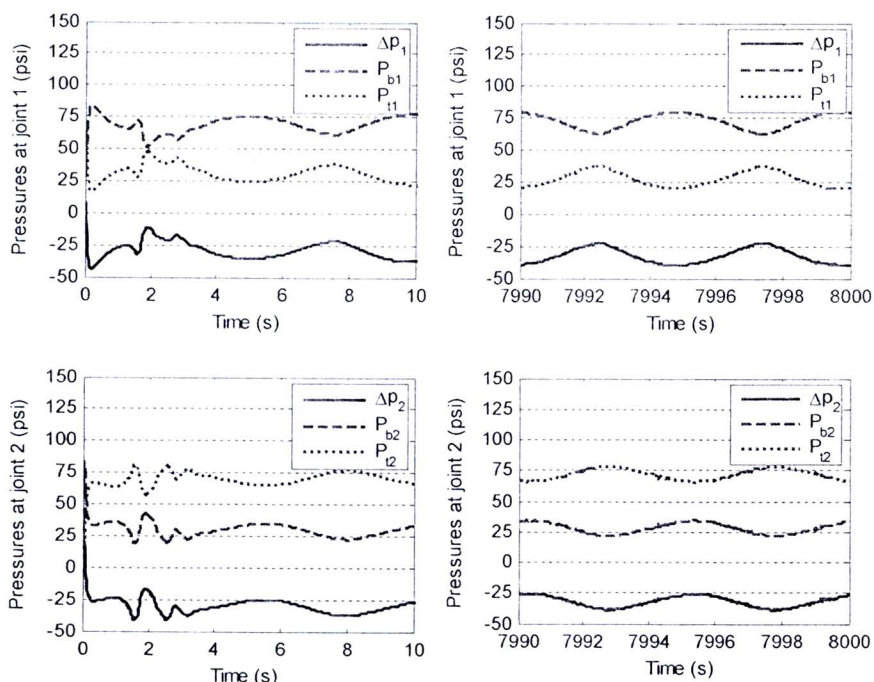
รูป 21 การเปลี่ยนแปลงของมุม และค่าความผิดพลาดของมุมข้อต่อแรกในกรณี จ



รูป 22 การเปลี่ยนแปลงของมุม และค่าความผิดพลาดของมุมข้อต่อที่สองในกรณี จ



รูป 23 อัตราการขยายสัญญาณแบบอะแดพทีฟ และนอร์มของค่าความผิดพลาดในกรณี จ



รูป 24 การเปลี่ยนแปลงความดันที่ข้อต่อแรก และข้อต่อที่สองในกรณี จ

ในทางปฏิบัติ อาจมีการใช้งานแขนกลในการหยิบจับวัตถุขณะกำลังเคลื่อนที่ ซึ่งทำให้การควบคุมตำแหน่งของปลายแขนเป็นไปได้ยากขึ้น ดังนั้น เราจึงทำการศึกษาโดยการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลสองก้านที่ขับเคลื่อนด้วยกล้ามเนื้อประดิษฐ์ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงภาระที่ปลายแขน โดยมีพลศาสตร์สำหรับกรณีนี้อยู่ในภาคผนวก ค.3 ซึ่งพบว่ารูปแบบของสมการสอดคล้องกับรูปแบบทั่วไปของพลศาสตร์สำหรับหุ่นยนต์หลายก้านที่ขับเคลื่อนด้วยกล้ามเนื้อประดิษฐ์ ดังนี้

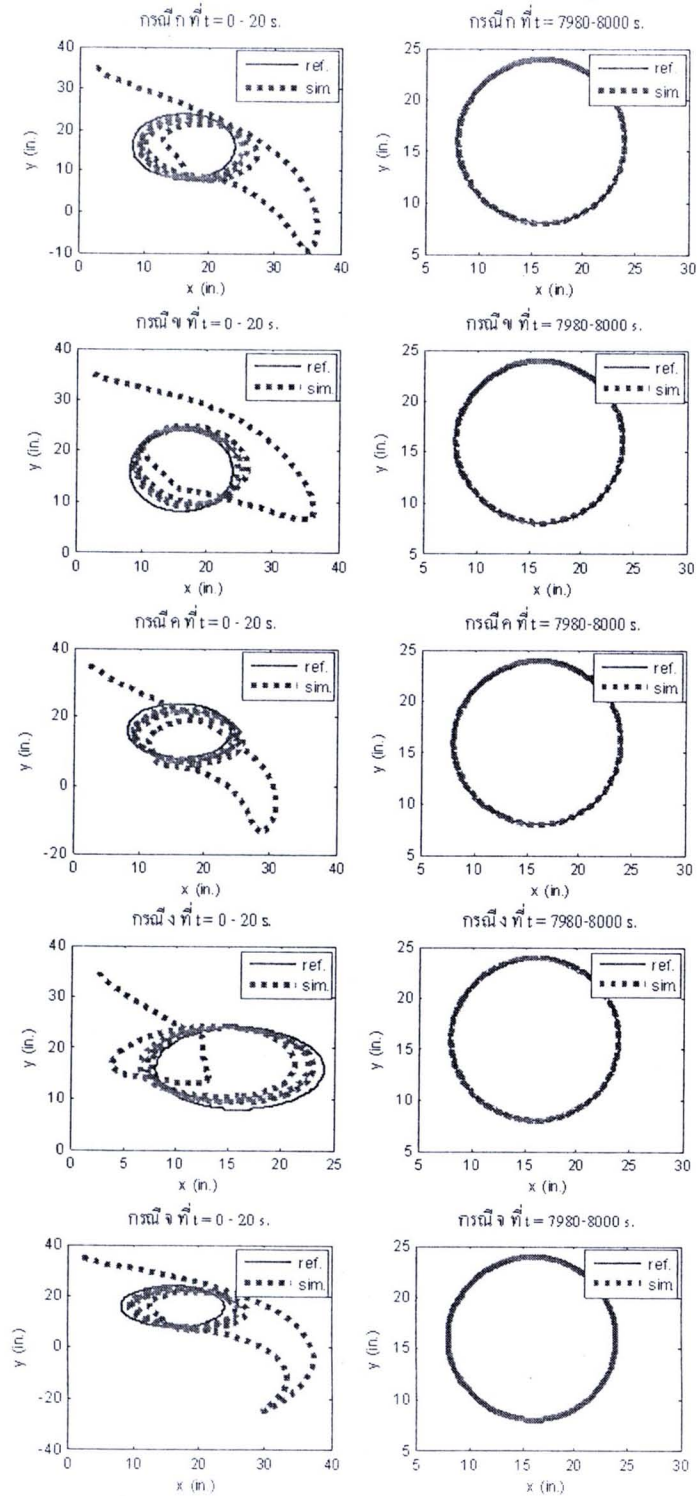
$$\ddot{q} = \hat{D}^{-1}(q) \{ A\bar{p} - H(q, \dot{q}, b_{B_i}(t)) \Delta p + B_E(t) \dot{q} + A_F q + \hat{a}_G - \hat{C}(q, \dot{q}) \dot{q} - \hat{f}(q) \} \quad (41)$$

เนื่องจากตัวแปรสเททของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลง จึงสามารถใช้ตัวควบคุมมีความสัมพันธ์เหมือนกันกับกรณีไม่รับภาระที่ปลายแขน ขณะที่อัตราขยายสัญญาณแบบอะแดปทีฟมีความสัมพันธ์เป็นไปตาม (39) นั้นเอง และกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงรับภาระของปลายแขนที่เป็นมวล $M = 1$ slug. ในช่วงเวลา 0-8000 วินาที ดังตารางที่3

ตาราง3 การรับภาระของปลายแขนในช่วงเวลา 0-8000 วินาที

เวลา (s)	มวล (slug.)	เวลา (s)	มวล (slug.)
$0 \leq t < 1000$	1	$4000 \leq t < 5000$	1
$1000 \leq t < 2000$	0	$5000 \leq t < 6000$	0
$2000 \leq t < 3000$	1	$6000 \leq t < 7000$	1
$3000 \leq t < 4000$	0	$7000 \leq t \leq 8000$	0

จากผลการจำลองการเคลื่อนที่ของระบบวงปิด (41), (38) และ (39) ที่มีตำแหน่งอ้างอิงเคลื่อนที่เป็นวงกลมตามสมการ (40) พบว่าในทุกกรณีศึกษา (ดังตารางที่ 2) สามารถบังคับตำแหน่งให้ปลายแขนเคลื่อนที่เป็นวงกลมได้ เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 25



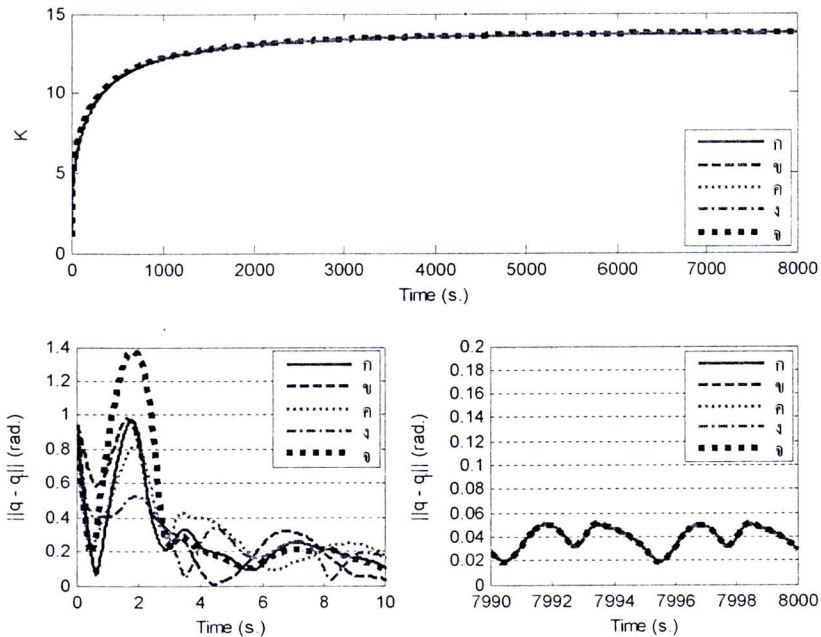
รูป 25 การเคลื่อนที่ของปลายแขนในพิกัด x-y

รูปด้านบนของรูปที่ 26 ได้แสดงอัตราขยายสัญญาณแบบอะแดพทีฟ พบว่าในทุกกรณีสามารถระบุได้ว่าอัตราขยายสัญญาณ $K(t)$ ที่มีการเปลี่ยนแปลงตาม (39) เป็นฟังก์ชันไม่ลดและมีขอบเขตบนช่วงเวลา $[0, \infty)$ และยังสังเกตได้ว่า $K(t)$ ในแต่ละกรณีมีการเปลี่ยนแปลงไม่แตกต่างกัน

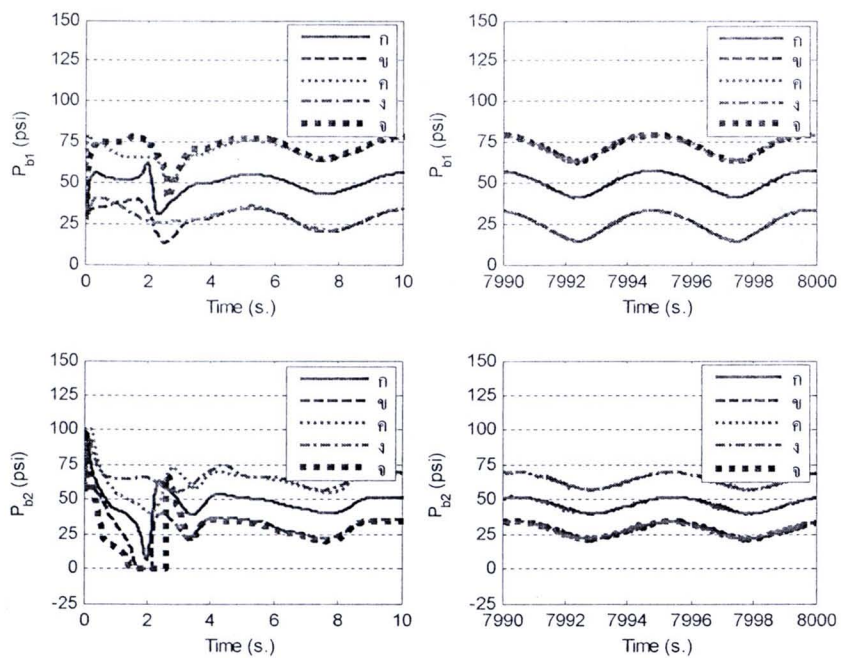
เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง ส่วนรูปด้านล่างของรูปที่ 25 ได้แสดงนอร์มของค่าความผิดพลาด พบว่าในทุกกรณีสามารถบังคับให้มีค่าไม่เกิน $\|q(t)-q_r(t)\| < \varepsilon$ เมื่อ $\varepsilon = 0.1\text{rad}$. และมีการเปลี่ยนแปลงในแต่ละกรณีไม่แตกต่างกัน หลังจากค่าเวลาจำกัดค่าหนึ่ง

การเปลี่ยนแปลงความดันภายในของกลัมน้ำมันไฮดรอลิกทั้ง 2 ข้อต่อ (P_{b1} และ P_{b2}) ดังรูป 27 และการเปลี่ยนแปลงความดันภายในของกลัมน้ำมันไฮดรอลิกทั้ง 2 ข้อต่อ (P_{r1} และ P_{r2}) ดังรูป 28 พบว่า P_{b1} , P_{b2} , P_{r1} และ P_{r2} ในทุกกรณี มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ภายในช่วงความดัน $0 \leq P \leq 130$ psi

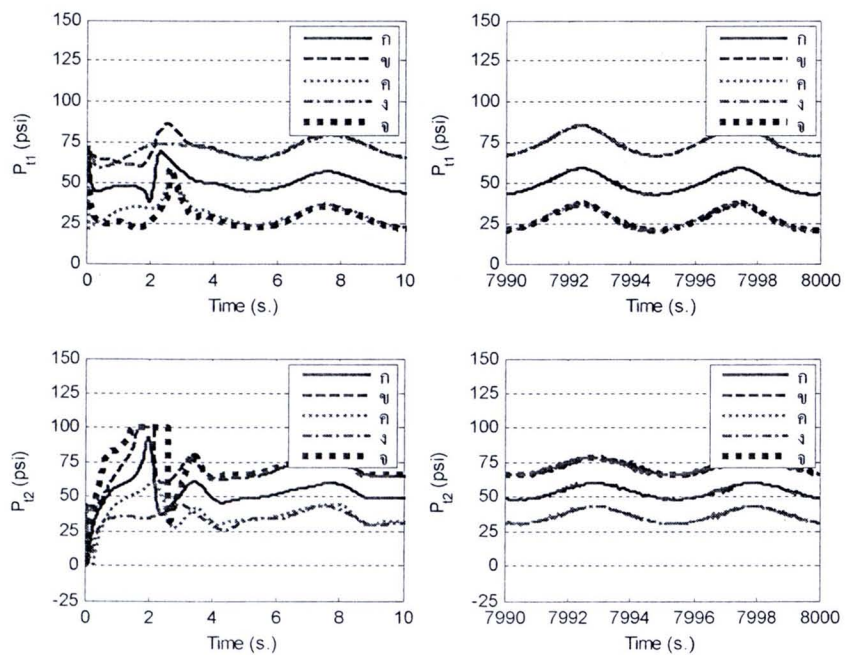
ดังรูปที่ 28 ได้แสดงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาเข้าทั้ง 2 ข้อต่อ (Δp_1 และ Δp_2) ในทุกกรณีศึกษา ส่วนดังรูปที่ 29 ได้แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Δp_1 และ Δp_2 ช่วงเวลา 0- 8000 วินาที ในกรณี ก สังเกตได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของ Δp_1 และ Δp_2 ที่เป็นฟังก์ชันของมุมและความเร็วเชิงมุมของแต่ละข้อต่อ และอัตราขยาย $K(t)$ มีความแตกต่างกัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของภาระที่ปลายแขนเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วเชิงมุมในแต่ละข้อต่อ เพราะว่า $K(t)$ และมุมแต่ละข้อต่อในแต่ละกรณีมีการเปลี่ยนแปลงไม่แตกต่างกัน เมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง



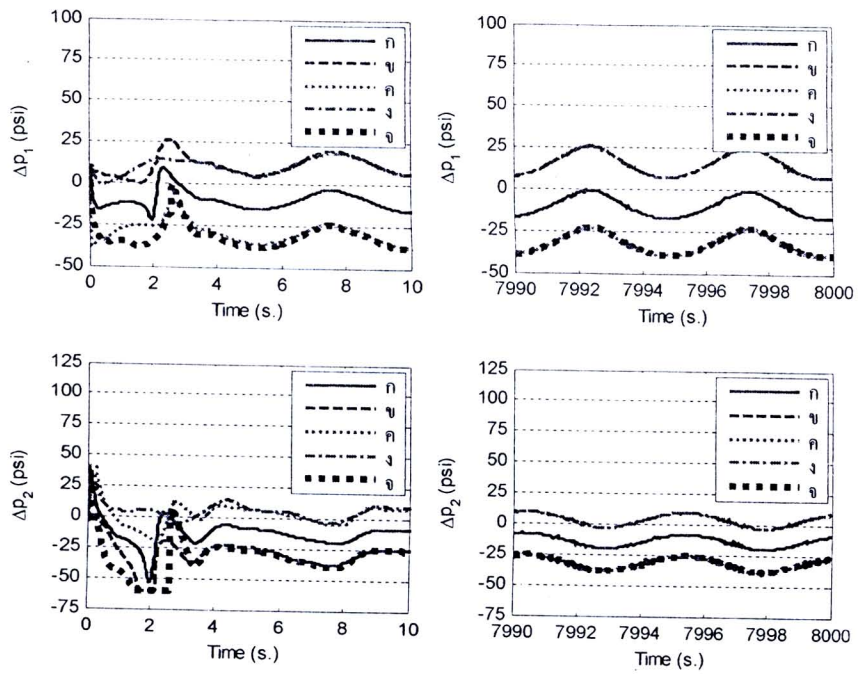
รูป 26 อัตราการขยายสัญญาณแบบอะแดปทีฟ และนอร์มของค่าความผิดพลาด



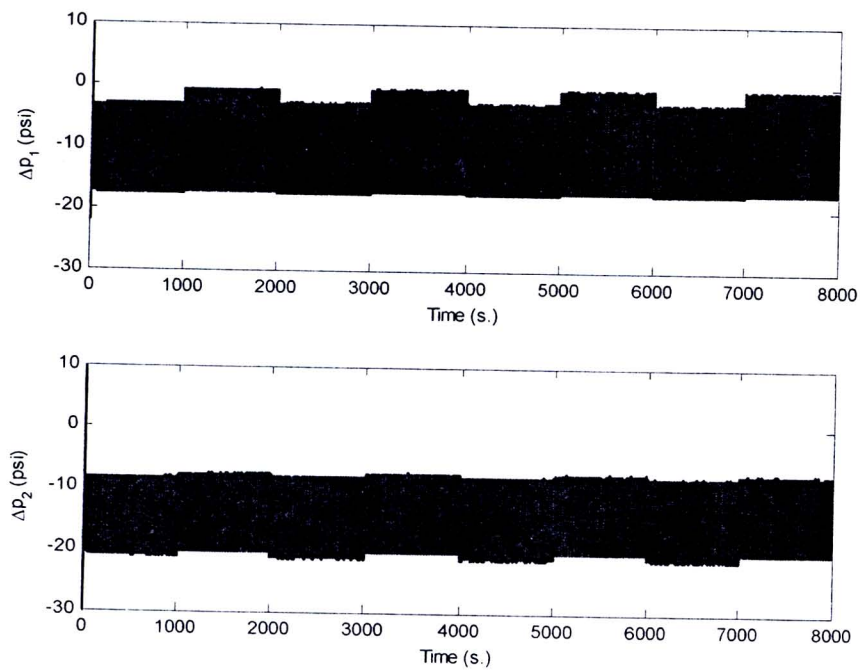
รูป 27 การเปลี่ยนแปลงความดันภายในของกล้ามเนื้อไบเซพทั้ง 2 ข้อมือ



รูป 28 การเปลี่ยนแปลงความดันภายในของกล้ามเนื้อไตรเซพทั้ง 2 ข้อมือ



รูป 29 การเปลี่ยนแปลงสัญญาณขาเข้าทั้ง 2 ข้อต่อ



รูป 30 การเปลี่ยนแปลงสัญญาณขาเข้าทั้ง 2 ข้อต่อในกรณี ก ช่วงเวลา 0-8000 วินาที