

บทที่ 4

การจำลองการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์

จากแนวคิดของการปรับปรุงวิธีออกแบบตัวควบคุมชนิดปรับตัวเองโดยตรงสำหรับแขนหุ่นยนต์ ที่แสดงอยู่ในบทที่ 3 ในบทนี้เราจะตรวจสอบผลการทำงานของตัวควบคุม ที่ออกแบบตามแนวคิดดังกล่าว โดยผลการทำงานจะได้จากการจำลองการทำงานด้วยเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ ในการจำลองการทำงานเราจะให้ตัวควบคุมทำงานร่วมกับแขนหุ่นยนต์หลาย ๆ ประเภท เพื่อตรวจสอบว่าผลการทำงานของตัวควบคุมจะเป็นอย่างไร ถ้าโครงสร้างของแขนหุ่นยนต์เปลี่ยนไป

จากแขนหุ่นยนต์ 5 ประเภทที่แสดงในภาคผนวก ก เราจะเลือกแขนหุ่นยนต์เพื่อใช้ในการจำลองการทำงานทั้งหมด 3 ประเภท ได้แก่ แขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง แขนหุ่นยนต์แบบสกรู และแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลม เราตัดแขนหุ่นยนต์แบบแกนตั้งฉากออกจากการทดสอบ เนื่องจากลักษณะของแขนหุ่นยนต์ประเภทนี้มีความเรียบง่ายเกินไป ไม่มีการรบกวนการทำงานระหว่างระบบย่อย ๆ ภายใน และไม่มีลักษณะของความไม่เป็นเชิงเส้น สำหรับระบบที่มีลักษณะเช่นนี้ ตัวควบคุมแบบง่าย ๆ เช่น ตัวควบคุมแบบพีไอดีก็สามารถควบคุมให้ระบบทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนสาเหตุที่เราตัดแขนหุ่นยนต์แบบทรงกระบอกออกก็เพราะว่า ลักษณะทางโครงสร้างของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกระบอกมีความคล้ายคลึงกับลักษณะทางโครงสร้างของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลม มีข้อแตกต่างกันตรงที่ข้อต่ออันที่ 2 ของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกระบอกเป็นข้อต่อแบบพริสแมติก ในขณะที่ข้อต่ออันที่ 2 ของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมเป็นแบบหมุน ดังนั้นโครงสร้างของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมจะมีความซับซ้อนกว่า และมีความยากลำบากในการควบคุมการทำงานมากกว่า ด้วยเหตุนี้เมื่อเราเลือกใช้แขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมในการจำลองการทำงานแล้ว เราจึงไม่เลือกแขนหุ่นยนต์แบบทรงกระบอกอีก

ขั้นตอนการจำลองการทำงาน

เราจะแบ่งขั้นตอนการจำลองการทำงานออกเป็น 2 กรณี ในกรณีแรกเราจะสมมติให้ตัวควบคุมรู้ค่าพารามิเตอร์ของระบบแขนหุ่นยนต์ โดยใช้ค่าจริงของพารามิเตอร์ระบบให้เป็นค่าเริ่มต้นของส่วนที่คำนวณหาค่าประมาณของพารามิเตอร์ระบบ เพื่อตรวจสอบว่าเมื่อเวลาผ่านไปค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและความเร็วจะเป็นอย่างไร ค่าประมาณของพารามิเตอร์ระบบจะยังคงอยู่ที่ค่าเริ่มต้นหรือไม่ ในกรณีที่ 2 เราจะสมมติให้ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์ โดยกำหนดให้ค่าเริ่มต้นของค่าประมาณ

ของพารามิเตอร์ระบบเป็นศูนย์ทั้งหมด นอกจากนี้เฉพาะในกรณีหลังเรายังจะทดลองปรับค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละพจน์ในดรชนีสมรรถนะ ที่ใช้คำนวณหาพารามิเตอร์ของตัวควบคุม เพื่อตรวจสอบว่ามีผลกระทบต่อการทำงานอย่างไรบ้าง

กรณีที่ 1 ตัวควบคุมรู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์

1. เลือกแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องเป็นระบบที่ต้องการควบคุมการเคลื่อนไหว
 2. จัดเรียงพารามิเตอร์ที่อยู่ในแบบจำลองเชิงเลขของแขนหุ่นยนต์ เพื่อให้เป็นไปตามรูปแบบของสมการ (2) หรือ (27)

3. เลือกค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับแต่ละพจน์ในดรชนีสมรรถนะ
4. ออกแบบตัวควบคุมชนิดปรับตัวเองโดยตรงที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้คุณสมบัติพิเศษ
5. สร้างเส้นทางการเคลื่อนไหวของแขนหุ่นยนต์ เพื่อใช้ในการควบคุมให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนไหว

ตาม

6. เขียนแฟ้มซึ่งเก็บชุดคำสั่งต่าง ๆ (command files) โดยแยกเป็นมอดูล (module) ต่าง ๆ ดังนี้ มอดูลของแขนหุ่นยนต์ มอดูลของตัวควบคุม มอดูลของตัวสร้างเส้นทางการเคลื่อนไหว มอดูลที่ใช้คำนวณค่าดรชนีสมรรถนะ และสุดท้ายมอดูลสำหรับการเชื่อมต่อ ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อการทำงานของมอดูลต่าง ๆ เข้าด้วยกัน

7. ป้อนแฟ้มคำสั่งทุก ๆ แฟ้มให้กับโปรแกรมสำเร็จรูป SIMNON เพื่อจำลองการทำงานของแขนหุ่นยนต์

กรณีที่ 2 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์

1. เลือกแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องเป็นระบบที่ต้องการควบคุมการเคลื่อนไหว
 2. จัดเรียงพารามิเตอร์ที่อยู่ในแบบจำลองเชิงเลขของแขนหุ่นยนต์ เพื่อให้เป็นไปตามรูปแบบของสมการ (2) หรือ (27)

3. ใช้ค่าถ่วงน้ำหนักชุดเดียวกับในกรณีที่ 1
4. ออกแบบตัวควบคุมชนิดปรับตัวเองโดยตรงที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้คุณสมบัติพิเศษ
5. ใช้ข้อมูลเส้นทางการเคลื่อนไหวชุดเดียวกับที่ใช้ในกรณีที่ 1
6. เขียนแฟ้มคำสั่งสำหรับทุก ๆ มอดูล และป้อนให้กับ SIMNON เพื่อจำลองการทำงานของแขน

หุ่นยนต์

7. เลือกค่าถ่วงน้ำหนักเพิ่มขึ้นอีก 3 ชุด โดยชุดแรกจะให้ค่าถ่วงน้ำหนักในพจน์ของค่าความผิดพลาดของตำแหน่งน้อยลง เมื่อเทียบกับค่าถ่วงน้ำหนักของพจน์อื่น ๆ ชุดที่ 2 เลือกค่าถ่วงน้ำหนักในพจน์ของค่าความผิดพลาดความเร็วน้อยลง เมื่อเทียบกับค่าถ่วงน้ำหนักของพจน์อื่น ๆ และชุดสุดท้ายจะเลือกค่าถ่วงน้ำหนักในพจน์ของสัญญาณควบคุมสูงขึ้น เมื่อเทียบกับค่าถ่วงน้ำหนักของพจน์อื่น ๆ
8. หลังจากได้ค่าถ่วงน้ำหนักชุดใหม่แต่ละชุดแล้ว ทำตามขั้นตอน 4-6 ซ้ำ
9. เลือกแขนหุ่นยนต์แบบสกรูเป็นระบบที่ต้องการควบคุมการเคลื่อนไหว และทำตามขั้นตอน 1-8 ซ้ำ
10. เลือกแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมเป็นระบบที่ต้องการควบคุมการเคลื่อนไหว และทำตามขั้นตอน 1-8 ซ้ำ

ข้อมูลที่ใช้ในการจำลองการทำงาน

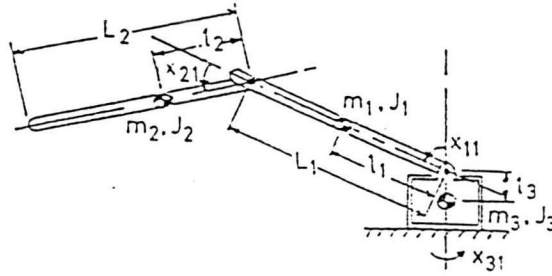
1. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องจากหนังสือ Model Reference Adaptive Control of Manipulators (Stoten, 1990)
2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์แบบสกรูจากหนังสือ Fundamentals of Robotics: Analysis and Control (Schilling, 1990)
3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมจากหนังสือ Model Reference Adaptive Control of Manipulators

การจัดเรียงพารามิเตอร์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์

ก่อนทำการออกแบบตัวควบคุม เราต้องจัดเรียงพารามิเตอร์ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์ให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมต่อการออกแบบตัวควบคุม รูปแบบดังกล่าวแสดงอยู่ในสมการ (27)

$$\begin{aligned} H(q, A)\ddot{q} + C(q, \dot{q}, A)\dot{q} + G(q, A) + F_v\dot{q} &= Y(q, \dot{q}, \ddot{q}, \dot{q})A + Y_f(\dot{q})K_f \\ &= \tau(t) \end{aligned} \quad (27)$$

1. แขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง



ภาพที่ 8 แสดงแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องของ Stoten

จากแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องที่แสดงอยู่ในภาพที่ 8 เราจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์ตามสมการ (39)

$$\begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{v1} & 0 & 0 \\ 0 & f_{v2} & 0 \\ 0 & 0 & f_{v3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix} v(t) \quad (39)$$

เมื่อ

$v(t)$ เป็นค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับวงจรขยายแรงดัน

k_i เป็นผลรวมของอัตราขยายทั้งหมดที่เกิดจาก วงจรขยายแรงดัน มอเตอร์ และส่วน

ของเฟืองทด

และ

$$h_{11} = J_1^* + J_{x2} + 2m_2 l_1 l_{c2} C_2$$

$$h_{12} = h_{21}$$

$$= J_{x2} + m_2 l_1 l_{c2} C_2$$

$$h_{22} = J_{x2}$$

$$\begin{aligned}
h_{13} &= h_{23} = h_{31} = h_{32} = 0 \\
h_{33} &= J_1^* S_1^2 + J_{1P} C_1^2 + J_{X2} S_{1+2}^2 \\
&\quad + J_{2P} C_{1+2}^2 + J_3 + 2m_2 l_1 l_{C2} S_1 S_{1+2} \\
c_{11} &= -m_2 l_1 l_{C2} S_2 \dot{q}_2 \\
c_{12} &= -m_2 l_1 l_{C2} S_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\
c_{21} &= m_2 l_1 l_{C2} S_2 \dot{q}_1 \\
c_{22} &= 0 \\
c_{13} &= -c_{31} \\
&= -(J_1^* - J_{1P}) S_1 C_1 \dot{q}_3 - (J_{X2} - J_{2P}) S_{1+2} C_{1+2} \dot{q}_3 - m_2 l_1 l_{C2} S_{2(1)+2} \dot{q}_3 \\
c_{23} &= -c_{32} \\
&= -(J_{X2} - J_{2P}) S_{1+2} C_{1+2} \dot{q}_3 - m_2 l_1 l_{C2} S_1 C_{1+2} \dot{q}_3 \\
c_{33} &= (J_1^* - J_{1P}) S_1 C_1 \dot{q}_1 + (J_{X2} - J_{2P}) S_{1+2} C_{1+2} \dot{q}_1 + m_2 l_1 l_{C2} S_{2(1)+2} \dot{q}_1 \\
&\quad + (J_{X2} - J_{2P}) S_{1+2} C_{1+2} \dot{q}_2 + m_2 l_1 l_{C2} S_1 C_{1+2} \dot{q}_2 \\
g_1 &= -m_1 g l_{C1} S_1 - m_2 g l_1 S_1 - m_2 g l_{C2} S_{1+2} \\
g_2 &= -m_2 g l_{C2} S_{1+2} \\
g_3 &= 0 \\
\text{โดย } J_1^* &= J_1 + m_1 l_{C1}^2 + m_2 l_1^2
\end{aligned}$$

เราสามารถจัดเรียงพารามิเตอร์ได้ใหม่ โดยกำหนดให้

$$\begin{aligned}
a_1 &= m_2 l_1 l_{C2} \\
a_2 &= J_1^* - J_{1P} \\
&= (J_1 + m_1 l_{C1}^2 + m_2 l_1^2) - J_{1P} \\
a_3 &= J_{X2} - J_{2P} \\
&= (J_2 + m_2 l_{C2}^2) - J_{2P} \\
a_4 &= J_1^* + J_{X2} \\
&= (J_1 + m_1 l_{C1}^2 + m_2 l_1^2) + (J_2 + m_2 l_{C2}^2) \\
a_5 &= J_{X2} \\
&= J_2 + m_2 l_{C2}^2 \\
a_6 &= J_{1P} + J_{2P} + J_3 \\
a_7 &= m_1 l_{C1} g + m_2 l_1 g \\
a_8 &= m_2 l_{C2} g
\end{aligned}$$

จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบใหม่ดังแสดงในสมการ (40)

$$\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} & y_{15} & y_{16} & y_{17} & y_{18} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} & y_{25} & y_{26} & y_{27} & y_{28} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} & y_{35} & y_{36} & y_{37} & y_{38} \end{bmatrix} \mathbf{A} + \begin{bmatrix} \dot{q}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{q}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{q}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{f1} \\ k_{f2} \\ k_{f3} \end{bmatrix} \\
= \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix} \boldsymbol{\tau}(t) \quad (40)$$

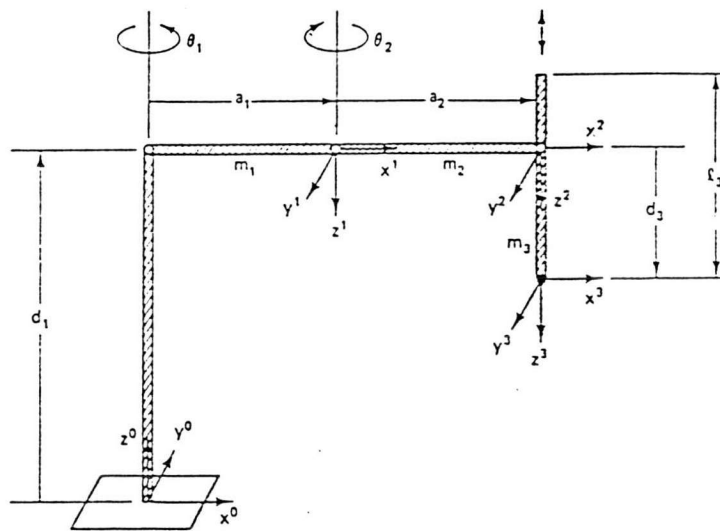
معادلات

$$\begin{aligned}
\mathbf{A}^T &= [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6 \ a_7 \ a_8] \\
y_{11} &= 2C_2\ddot{q}_1 + C_2\ddot{q}_2 - S_2\dot{q}_2\dot{q}_1 - S_2\dot{q}_1\dot{q}_2 - S_2\dot{q}_2\dot{q}_2 - S_{2(1)+2}\dot{q}_3\dot{q}_3 \\
y_{12} &= -S_1C_1\dot{q}_3\dot{q}_3 \\
y_{13} &= -S_{1+2}C_{1+2}\dot{q}_3\dot{q}_3 \\
y_{14} &= \ddot{q}_1 \\
y_{15} &= \ddot{q}_2 \\
y_{16} &= 0 \\
y_{17} &= -S_1 \\
y_{18} &= -S_{1+2} \\
y_{21} &= C_2\ddot{q}_1 + S_2\dot{q}_1\dot{q}_1 - S_1C_{1+2}\dot{q}_3\dot{q}_3 \\
y_{22} &= 0 \\
y_{23} &= -S_{1+2}C_{1+2}\dot{q}_3\dot{q}_3 \\
y_{24} &= 0 \\
y_{25} &= \ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 \\
y_{26} &= y_{27} = 0 \\
y_{28} &= -S_{1+2} \\
y_{31} &= 2S_1S_{1+2}\ddot{q}_3 + S_{2(1)+2}\dot{q}_3\dot{q}_1 + S_{2(1)+2}\dot{q}_1\dot{q}_3 + S_1C_{1+2}\dot{q}_3\dot{q}_2 + S_1C_{1+2}\dot{q}_2\dot{q}_3 \\
y_{32} &= S_1^2\ddot{q}_3 + S_1C_1\dot{q}_3\dot{q}_1 + S_1C_1\dot{q}_1\dot{q}_3 \\
y_{33} &= S_{1+2}^2\ddot{q}_3 + S_{1+2}C_{1+2}\dot{q}_3\dot{q}_1 + S_{1+2}C_{1+2}\dot{q}_3\dot{q}_2 + S_{1+2}C_{1+2}\dot{q}_1\dot{q}_3 + S_{1+2}C_{1+2}\dot{q}_2\dot{q}_3 \\
y_{34} &= y_{35} = y_{37} = y_{38} = 0 \\
y_{36} &= \ddot{q}_3 \\
k_{f1} &= f_{v1} \\
k_{f2} &= f_{v2} \\
k_{f3} &= f_{v3}
\end{aligned}$$

พารามิเตอร์ทั้งหมดของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned}
 l_1 &= 1 \text{ m}; & l_2 &= 1 \text{ m}; & l_{c1} &= 0.5 \text{ m}; & l_{c2} &= 0.5 \text{ m}; \\
 m_1 &= 10 \text{ kg}; & m_2 &= 10 \text{ kg}; \\
 J_1 &= 0.5 \text{ kgm}^2; & J_{1P} &= 0.01 \text{ kgm}^2; \\
 J_2 &= 0.5 \text{ kgm}^2; & J_{2P} &= 0.01 \text{ kgm}^2; \\
 J_3 &= 1 \text{ kgm}^2; \\
 f_{v1} &= 75 \text{ Nms}; & f_{v2} &= 10 \text{ Nms}; & f_{v3} &= 1 \text{ Nms}; \\
 k_1 &= 40 \text{ NmV}^{-1}; & k_2 &= 20 \text{ NmV}^{-1}; & k_3 &= 40 \text{ NmV}^{-1}; \\
 g &= 9.81 \text{ ms}^{-2}
 \end{aligned}$$

2. แขนหุ่นยนต์แบบสกกราว



ภาพที่ 9 แสดงแขนหุ่นยนต์แบบสกกราวของ Schilling

จากแขนหุ่นยนต์แบบสกกราวที่แสดงอยู่ในภาพที่ 9 เราจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ของแขนหุ่นยนต์ตามสมการ (41)

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{v1} & 0 & 0 \\ 0 & f_{v2} & 0 \\ 0 & 0 & f_{v3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \\
 = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix} v(t) \quad (41)
 \end{aligned}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
h_{11} &= [(m_1/3) + m_2 + m_3]l_1^2 + [m_2 + 2m_3]l_1l_2C_2 + [(m_2/3) + m_3]l_2^2 \\
h_{12} &= h_{21} \\
&= -[(m_2/2) + m_3]l_1l_2C_2 - [(m_2/3) + m_3]l_2^2 \\
h_{22} &= [(m_2/3) + m_3]l_2^2 \\
h_{13} &= h_{23} = h_{31} = h_{32} = 0 \\
h_{33} &= m_3 \\
c_{11} &= -0.5[m_2 + 2m_3]l_1l_2S_2\dot{q}_2 \\
c_{12} &= 0.5[m_2 + 2m_3]l_1l_2S_2(\dot{q}_2 - \dot{q}_1) \\
c_{21} &= 0.5[m_2 + 2m_3]l_1l_2S_2\dot{q}_1 \\
c_{22} &= 0 \\
c_{13} &= c_{31} = c_{23} = c_{32} = c_{33} = 0 \\
g_1 &= 0 \\
g_2 &= 0 \\
g_3 &= -m_3g
\end{aligned}$$

เราสามารถจัดเรียงพารามิเตอร์ได้ใหม่ โดยกำหนดให้

$$\begin{aligned}
a_1 &= [(m_1/3) + m_2 + m_3]l_1^2 \\
a_2 &= (m_2 + 2m_3)l_1l_2 \\
a_3 &= [(m_2/3) + m_3]l_2^2 \\
a_4 &= m_3g
\end{aligned}$$

จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบใหม่ดังแสดงในสมการ (42)

$$\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} \\ y_{21} & y_{21} & y_{21} & y_{24} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} \end{bmatrix} A + \begin{bmatrix} \dot{q}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{q}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{q}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{f1} \\ k_{f2} \\ k_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix} \tau(t) \quad (42)$$

เมื่อ

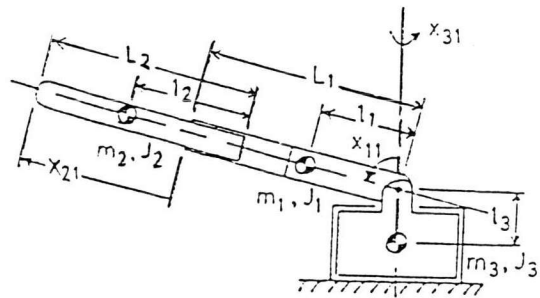
$$\begin{aligned}
A^T &= [a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4] \\
y_{11} &= \ddot{q}_1 \\
y_{12} &= C_2\ddot{q}_1 - (C_2/2)\ddot{q}_2 - (S_2/2)\dot{q}_2\dot{q}_1 - (S_2/2)\dot{q}_1\dot{q}_2 - (S_2/2)\dot{q}_2\dot{q}_2 \\
y_{13} &= \ddot{q}_1 - \ddot{q}_2 \\
y_{14} &= 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 y_{21} &= 0 \\
 y_{22} &= -(C_2/2)\ddot{q}_1 + (S_2/2)\dot{q}_1\dot{q}_1 \\
 y_{23} &= \ddot{q}_2 - \ddot{q}_1 \\
 y_{24} &= 0 \\
 y_{31} &= y_{32} = y_{33} = 0 \\
 y_{34} &= (\ddot{q}_3/g) - 1 \\
 k_{f1} &= f_{v1} \\
 k_{f2} &= f_{v2} \\
 k_{f3} &= f_{v3}
 \end{aligned}$$

พารามิเตอร์ทั้งหมดของแขนหุ่นยนต์แบบสกรามีค่าดังนี้

$$\begin{aligned}
 l_1 &= 1 \text{ m}; & l_2 &= 1 \text{ m}; \\
 m_1 &= 10 \text{ kg}; & m_2 &= 10 \text{ kg}; & m_3 &= 5 \text{ kg} \\
 f_{v1} &= 75 \text{ Nms}; & f_{v2} &= 10 \text{ Nms}; & f_{v3} &= 1 \text{ Nms}; \\
 k_1 &= 40 \text{ NmV}^{-1}; & k_2 &= 20 \text{ NmV}^{-1}; & k_3 &= 40 \text{ NmV}^{-1}; \\
 g &= 9.81 \text{ ms}^{-2}
 \end{aligned}$$

3. แขนหุ่นยนต์แบบทรงกลม



ภาพที่ 10 แสดงแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมของ Stoten

จากแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมที่แสดงอยู่ในภาพที่ 10 เราจะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์ตามสมการ (43)

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{v1} & 0 & 0 \\ 0 & f_{v2} & 0 \\ 0 & 0 & f_{v3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \\
& = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix} v(t) \quad (43)
\end{aligned}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
h_{11} &= J_1 + m_1 l_{C1}^2 + J_2 + m_2 (l + q_2)^2 \\
h_{22} &= m_2 \\
h_{12} &= h_{21} = h_{13} = h_{31} = h_{23} = h_{32} = 0 \\
h_{33} &= [J_1 + m_1 l_{C1}^2 + J_2 + m_2 (l + q_2)^2] S_1^2 + [J_{1P} + J_{2P}] C_1^2 + J_3 \\
c_{11} &= m_2 (l + q_2) \dot{q}_2 \\
c_{12} &= m_2 (l + q_2) \dot{q}_1 \\
c_{21} &= -m_2 (l + q_2) \dot{q}_1 \\
c_{22} &= 0 \\
c_{13} &= -c_{31} \\
&= -[J_1 + m_1 l_{C1}^2 + J_2 + m_2 (l + q_2)^2 - J_{1P} - J_{2P}] S_1 C_1 \dot{q}_3 \\
c_{23} &= -c_{32} \\
&= -m_2 (l + q_2)^2 S_1^2 \dot{q}_3 \\
c_{33} &= [J_1 + m_1 l_{C1}^2 + J_2 + m_2 (l + q_2)^2 - J_{1P} - J_{2P}] S_1 C_1 \dot{q}_1 \\
&\quad + m_2 (l + q_2)^2 S_1^2 \dot{q}_2 \\
g_1 &= -m_1 g l_{C1} S_1 - m_2 g (l + q_2) S_1 \\
g_2 &= m_2 g C_1 \\
g_3 &= 0
\end{aligned}$$

$$\text{โดย } l = l_1 - l_2 + l_{C2}$$

เราสามารถจัดเรียงพารามิเตอร์ได้ใหม่ โดยกำหนดให้

$$\begin{aligned}
a_1 &= J_1 + J_2 + m_1 l_{C1}^2 + m_2 l^2 \\
a_2 &= m_2 l \\
a_3 &= m_2 \\
a_4 &= J_{1P} + J_{2P} \\
a_5 &= J_3 \\
a_6 &= m_1 l_{C1}
\end{aligned}$$

จะได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบใหม่ดังแสดงในสมการ (44)

$$\begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} & y_{15} & y_{16} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} & y_{25} & y_{26} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} & y_{35} & y_{36} \end{bmatrix} A + \begin{bmatrix} \dot{q}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{q}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{q}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{f1} \\ k_{f2} \\ k_{f3} \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix} \tau(t) \quad (44)$$

เมื่อ

$$A^T = [a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad a_4 \quad a_5 \quad a_6]$$

$$y_{11} = \ddot{q}_1 - S_1 C_1 \dot{q}_3 \dot{q}_3$$

$$y_{12} = 2q_2 \ddot{q}_1 + \dot{q}_2 \dot{q}_1 + \dot{q}_1 \dot{q}_2 - 2q_2 S_1 C_1 \dot{q}_3 \dot{q}_3 - S_1 g$$

$$y_{13} = q_2^2 \ddot{q}_1 + q_2 \dot{q}_2 \dot{q}_1 + q_2 \dot{q}_1 \dot{q}_2 - q_2^2 S_1 C_1 \dot{q}_3 \dot{q}_3 - q_2 S_1 g$$

$$y_{14} = S_1 C_1 \dot{q}_3 \dot{q}_3$$

$$y_{15} = 0$$

$$y_{16} = -S_1 g$$

$$y_{21} = 0$$

$$y_{22} = -\dot{q}_1 \dot{q}_1 - S_1^2 \dot{q}_3 \dot{q}_3$$

$$y_{23} = \ddot{q}_2 - q_2 \dot{q}_1 \dot{q}_1 - S_1^2 \dot{q}_3 \dot{q}_3 + C_1 g$$

$$y_{24} = y_{25} = y_{26} = 0$$

$$y_{31} = S_1^2 \ddot{q}_3 + S_1 C_1 \dot{q}_3 \dot{q}_1 + S_1 C_1 \dot{q}_1 \dot{q}_3$$

$$y_{32} = 2q_2 S_1^2 \ddot{q}_3 + 2q_2 S_1 C_1 \dot{q}_3 \dot{q}_1 + S_1^2 \dot{q}_3 \dot{q}_2 \\ + 2q_2 S_1 C_1 \dot{q}_1 \dot{q}_3 + S_1^2 \dot{q}_2 \dot{q}_3$$

$$y_{33} = q_2^2 S_1^2 \ddot{q}_3 + q_2^2 S_1 C_1 \dot{q}_3 \dot{q}_1 + q_2 S_1^2 \dot{q}_3 \dot{q}_2 \\ + q_2^2 S_1 C_1 \dot{q}_1 \dot{q}_3 + q_2 S_1^2 \dot{q}_2 \dot{q}_3$$

$$y_{34} = C_1^2 \ddot{q}_3 - S_1 C_1 \dot{q}_3 \dot{q}_1 - S_1 C_1 \dot{q}_1 \dot{q}_3$$

$$y_{35} = \ddot{q}_3$$

$$y_{36} = 0$$

$$k_{f1} = f_{v1}$$

$$k_{f2} = f_{v2}$$

$$k_{f3} = f_{v3}$$

พารามิเตอร์ทั้งหมดของแขนหุ่นยนต์แบบทรวงกลมมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned}
 l_1 &= 1 \text{ m}; & l_2 &= 1 \text{ m}; & l_{c1} &= 0.5 \text{ m}; & l_{c2} &= 0.5 \text{ m}; \\
 m_1 &= 10 \text{ kg}; & m_2 &= 10 \text{ kg}; \\
 J_1 &= 0.5 \text{ kgm}^2; & J_{1P} &= 0.01 \text{ kgm}^2; \\
 J_2 &= 0.5 \text{ kgm}^2; & J_{2P} &= 0.01 \text{ kgm}^2; \\
 J_3 &= 1 \text{ kgm}^2; \\
 f_{v1} &= 75 \text{ Nms}; & f_{v2} &= 10 \text{ Nms}; & f_{v3} &= 1 \text{ Nms}; \\
 k_1 &= 40 \text{ NmV}^{-1}; & k_2 &= 20 \text{ NmV}^{-1}; & k_3 &= 40 \text{ NmV}^{-1}; \\
 g &= 9.81 \text{ ms}^{-2}
 \end{aligned}$$

การคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุด

เนื่องจากการจำลองการทำงานเป็นการพิจารณาผลการทำงานในช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นจะต้องดัดแปลงดรชนีสมรรถนะให้สอดคล้องกับช่วงเวลาที่พิจารณาดังแสดงในสมการ (45) ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมและกฎการปรับหาค่าประมาณของพารามิเตอร์ของระบบยังคงเป็นไปตามสมการ (34)-(38) ซึ่งแสดงอยู่ในบทที่ 3

$$J = \theta[x(t_f), t_f] + (1/2) \int_0^{t_f} [x(s)^T Q x(s) + u(s)^T R u(s) + 2x(s)^T S u(s)] ds \quad (45)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}
 \theta[x(t_f), t_f] &= V[x(t_f), t_f] \\
 &= (1/2) \{ [t_{11} \dot{q}(t_f) + T_{12} \ddot{q}(t_f)]^T H [t_{11} \dot{q}(t_f) + T_{12} \ddot{q}(t_f)] \\
 &\quad + \ddot{q}(t_f)^T P \ddot{q}(t_f) + \tilde{A}^T(t_f) \Gamma_1^{-1} \tilde{A}(t_f) + \tilde{K}_f^T(t_f) \Gamma_2^{-1} \tilde{K}_f(t_f) \}
 \end{aligned}$$

ในหัวข้อนี้เราจะเลือกค่าถ่วงน้ำหนัก Q_1 , R , และ S_1 แล้วจึงคำนวณหาพารามิเตอร์ t_{11} , T_{12} ,

K_{pp} , K_v , K_p และ P จากสมการ (34)-(36)

$$u = -K_v \dot{q} - K_p \ddot{q} = -t_{11} R^{-1} B^T T_0 x - R^{-1} S^T x \quad (34)$$

เมื่อ $B^T = [I \ 0 \ 0 \ 0]$

$$\begin{bmatrix} 0 & P & 0 & 0 \\ P & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + Q - (S^T + t_{11} B^T T_0)^T R^{-1} (S^T + t_{11} B^T T_0) = 0 \quad (35)$$

โดย P ต้องเป็นเมตริกซ์ที่มากกว่าศูนย์

$$K_{pp} = t_{11}^{-1} T_{12} \quad (36)$$

1. ค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง

$$R = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 \end{bmatrix}$$

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 25600 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 25600 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 25600 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 40000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 40000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 40000 \end{bmatrix}$$

$$S_1 = 0$$

จากสมการ (34)-(36) จะได้

$$t_{11} = 4$$

$$T_{12} = 5$$

$$P = \begin{bmatrix} 32000 & 0 & 0 \\ 0 & 32000 & 0 \\ 0 & 0 & 32000 \end{bmatrix}$$

$$K_v = \begin{bmatrix} 1600 & 0 & 0 \\ 0 & 1600 & 0 \\ 0 & 0 & 1600 \end{bmatrix}$$

$$K_p = \begin{bmatrix} 2000 & 0 & 0 \\ 0 & 2000 & 0 \\ 0 & 0 & 2000 \end{bmatrix}$$

$$K_{pp} = 1.25$$

2. ค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง

$$R = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 \end{bmatrix}$$

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 25600 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 25600 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 25600 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1600 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1600 \end{bmatrix}$$

$$S_1 = 0$$

จากสมการ (34)-(36) จะได้

$$t_{11} = 4$$

$$T_{12} = 1$$

$$P = \begin{bmatrix} 6400 & 0 & 0 \\ 0 & 6400 & 0 \\ 0 & 0 & 6400 \end{bmatrix}$$

$$K_V = \begin{bmatrix} 1600 & 0 & 0 \\ 0 & 1600 & 0 \\ 0 & 0 & 1600 \end{bmatrix}$$

$$K_P = \begin{bmatrix} 400 & 0 & 0 \\ 0 & 400 & 0 \\ 0 & 0 & 400 \end{bmatrix}$$

$$K_{PP} = 0.25$$

3. ค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สาม

$$R = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 \end{bmatrix}$$

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 8100 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8100 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 810000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 810000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 810000 \end{bmatrix}$$

$$S_1 = 0$$

จากสมการ (34)-(36) จะได้

$$t_{11} = 3$$

$$T_{12} = 30$$

$$P = \begin{bmatrix} 81000 & 0 & 0 \\ 0 & 81000 & 0 \\ 0 & 0 & 81000 \end{bmatrix}$$

$$K_v = \begin{bmatrix} 900 & 0 & 0 \\ 0 & 900 & 0 \\ 0 & 0 & 900 \end{bmatrix}$$

$$K_p = \begin{bmatrix} 9000 & 0 & 0 \\ 0 & 9000 & 0 \\ 0 & 0 & 9000 \end{bmatrix}$$

$$K_{pp} = 10$$

4. ค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่ดีที่สุด

$$R = \begin{bmatrix} 0.16 & 0 & 0 \\ 0 & 0.16 & 0 \\ 0 & 0 & 0.16 \end{bmatrix}$$

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 25600 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 25600 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 25600 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 40000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 40000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 40000 \end{bmatrix}$$

$$S_1 = 0$$

จากสมการ (34)-(36) จะได้

$$t_{11} = 8$$

$$T_{12} = 10$$

$$P = \begin{bmatrix} 32000 & 0 & 0 \\ 0 & 32000 & 0 \\ 0 & 0 & 32000 \end{bmatrix}$$

$$K_v = \begin{bmatrix} 400 & 0 & 0 \\ 0 & 400 & 0 \\ 0 & 0 & 400 \end{bmatrix}$$

$$K_p = \begin{bmatrix} 500 & 0 & 0 \\ 0 & 500 & 0 \\ 0 & 0 & 500 \end{bmatrix}$$

$$K_{pp} = 1.25$$

การออกแบบตัวควบคุมชนิดปรับตัวเองโดยตรงที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้คุณสมบัติแพสซีฟ

ในหัวข้อนี้เราจะแสดงการออกแบบตัวควบคุมชนิดปรับตัวเองโดยตรงที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้คุณสมบัติแพสซีฟ รายละเอียดในการออกแบบจะแบ่งเป็น 3 ส่วน ตามประเภทของแขนหุ่นยนต์ที่เราต้องการควบคุมการทำงาน

1. แขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง

จากค่า t_{11} , T_{12} , K_{pp} , K_v และ K_p ที่คำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักในหัวข้อที่ผ่านมา เมื่อพิจารณารวมกับค่าถ่วงน้ำหนัก Γ_1^{-1} และ Γ_2^{-1} ที่แสดงอยู่ในส่วนนี้ เราจะได้ส่วนที่คำนวณแรงบิด และส่วนที่ปรับหาค่าประมาณของพารามิเตอร์ระบบ เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง ดังที่แสดงในสมการ (46) (47) และ (48) ตามลำดับ

$$\Gamma_1^{-1} = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 \end{bmatrix}$$

$$\Gamma_2^{-1} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \tau(t) &= \hat{H}[\ddot{q}_d - K_{pp}\dot{q}] + \hat{C}[\dot{q}_{dr} - K_{pp}\dot{q}] + \hat{G} + \hat{f}_v\dot{q} - K_v\dot{q} - K_p\dot{q} \\ &= \hat{H}\ddot{q}_r + \hat{C}\dot{q}_r + \hat{G} + \hat{f}_v\dot{q} - K_v\dot{q} - K_p\dot{q} \\ &= Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \dot{q}_r)\hat{A} + Y_f(\dot{q})\hat{K}_f - K_v\dot{q} - K_p\dot{q} \end{aligned}$$

หรือ

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} y_{11}^* & y_{12}^* & y_{13}^* & y_{14}^* & y_{15}^* & y_{16}^* & y_{17}^* & y_{18}^* \\ y_{21}^* & y_{22}^* & y_{23}^* & y_{24}^* & y_{25}^* & y_{26}^* & y_{27}^* & y_{28}^* \\ y_{31}^* & y_{32}^* & y_{33}^* & y_{34}^* & y_{35}^* & y_{36}^* & y_{37}^* & y_{38}^* \end{bmatrix} \hat{\mathbf{A}} \\
&+ \begin{bmatrix} \dot{q}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{q}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{q}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{k}_{f1} \\ \hat{k}_{f2} \\ \hat{k}_{f3} \end{bmatrix} - \mathbf{K}_V \begin{bmatrix} \dot{\tilde{q}}_1 \\ \dot{\tilde{q}}_2 \\ \dot{\tilde{q}}_3 \end{bmatrix} - \mathbf{K}_P \begin{bmatrix} \tilde{q}_1 \\ \tilde{q}_2 \\ \tilde{q}_3 \end{bmatrix} \quad (46)
\end{aligned}$$

เมื่อ

$$\hat{\mathbf{A}}^T = [\hat{a}_1 \quad \hat{a}_2 \quad \hat{a}_3 \quad \hat{a}_4 \quad \hat{a}_5 \quad \hat{a}_6 \quad \hat{a}_7 \quad \hat{a}_8]$$

$$y_{11}^* = 2C_2\ddot{q}_{r1} + C_2\ddot{q}_{r2} - S_2\dot{q}_2\dot{q}_{r1} - S_2\dot{q}_1\dot{q}_{r2} - S_2\dot{q}_2\dot{q}_{r2} - S_{2(1)+2}\dot{q}_3\dot{q}_{r3}$$

$$y_{12}^* = -S_1C_1\dot{q}_3\dot{q}_{r3}$$

$$y_{13}^* = -S_{1+2}C_{1+2}\dot{q}_3\dot{q}_{r3}$$

$$y_{14}^* = \ddot{q}_{r1}$$

$$y_{15}^* = \ddot{q}_{r2}$$

$$y_{16}^* = 0$$

$$y_{17}^* = -S_1$$

$$y_{18}^* = -S_{1+2}$$

$$y_{21}^* = C_2\ddot{q}_{r1} + S_2\dot{q}_1\dot{q}_{r1} - S_1C_{1+2}\dot{q}_3\dot{q}_{r3}$$

$$y_{22}^* = 0$$

$$y_{23}^* = -S_{1+2}C_{1+2}\dot{q}_3\dot{q}_{r3}$$

$$y_{24}^* = 0$$

$$y_{25}^* = \ddot{q}_{r1} + \ddot{q}_{r2}$$

$$y_{26}^* = y_{27}^* = 0$$

$$y_{28}^* = -S_{1+2}$$

$$y_{31}^* = 2S_1S_{1+2}\ddot{q}_{r3} + S_{2(1)+2}\dot{q}_3\dot{q}_{r1} + S_{2(1)+2}\dot{q}_1\dot{q}_{r3} + S_1C_{1+2}\dot{q}_3\dot{q}_{r2} + S_1C_{1+2}\dot{q}_2\dot{q}_{r3}$$

$$y_{32}^* = S_1^2\ddot{q}_{r3} + S_1C_1\dot{q}_3\dot{q}_{r1} + S_1C_1\dot{q}_1\dot{q}_{r3}$$

$$y_{33}^* = S_{1+2}^2\ddot{q}_{r3} + S_{1+2}C_{1+2}\dot{q}_3\dot{q}_{r1} + S_{1+2}C_{1+2}\dot{q}_3\dot{q}_{r2} + S_{1+2}C_{1+2}\dot{q}_1\dot{q}_{r3} \\ + S_{1+2}C_{1+2}\dot{q}_2\dot{q}_{r3}$$

$$y_{34}^* = y_{35}^* = y_{37}^* = y_{38}^* = 0$$

$$y_{36}^* = \ddot{q}_{r3}$$

$$\hat{\mathbf{A}} = -t_{11}^2 \Gamma_1 \mathbf{Y}^T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \dot{\mathbf{q}}_r, \ddot{\mathbf{q}}_r) \mathbf{e}_v \quad (47)$$

$$\hat{\mathbf{K}}_f = -t_{11}^2 \Gamma_2 \mathbf{Y}_f^T(\dot{\mathbf{q}}) \mathbf{e}_v \quad (48)$$

เมื่อ

$$\Gamma_1 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}$$

$$\Gamma_2 = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 \end{bmatrix}$$

2. แขนหุ่นยนต์แบบสกราว

จากค่า t_{11} , T_{12} , K_{pp} , K_v และ K_p ที่คำนวณได้ และค่าถ่วงน้ำหนัก Γ_1^{-1} และ Γ_2^{-1} ที่แสดงอยู่ในส่วนนี้ เราจะได้ส่วนที่คำนวณแรงบิด และส่วนที่ปรับหาค่าประมาณของพารามิเตอร์ระบบ เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของแขนหุ่นยนต์แบบสกราว ดังที่แสดงในสมการ (49) (50) และ (51) ตามลำดับ

$$\Gamma_1^{-1} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2 \end{bmatrix}$$

$$\Gamma_2^{-1} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \tau(t) &= \hat{H}[\ddot{q}_d - K_{pp}\dot{q}] + \hat{C}[\dot{q}_{dr} - K_{pp}\dot{q}] + \hat{G} + \hat{f}_v\dot{q} - K_v\dot{q} - K_p\dot{q} \\ &= \hat{H}\ddot{q}_r + \hat{C}\dot{q}_r + \hat{G} + \hat{f}_v\dot{q} - K_v\dot{q} - K_p\dot{q} \\ &= Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \dot{q}_r)\hat{A} + Y_f(\dot{q})\hat{K}_f - K_v\dot{q} - K_p\dot{q} \end{aligned}$$

หรือ

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} y_{11}^* & y_{12}^* & y_{13}^* & y_{14}^* \\ y_{21}^* & y_{22}^* & y_{23}^* & y_{24}^* \\ y_{31}^* & y_{32}^* & y_{33}^* & y_{34}^* \end{bmatrix} \hat{A} + \begin{bmatrix} \dot{q}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{q}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{q}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{k}_{f1} \\ \hat{k}_{f2} \\ \hat{k}_{f3} \end{bmatrix} - K_v \begin{bmatrix} \dot{\tilde{q}}_1 \\ \dot{\tilde{q}}_2 \\ \dot{\tilde{q}}_3 \end{bmatrix} \\
&\quad - K_p \begin{bmatrix} \tilde{q}_1 \\ \tilde{q}_2 \\ \tilde{q}_3 \end{bmatrix} \tag{49}
\end{aligned}$$

ដើម្បី

$$\hat{A}^T = [\hat{a}_1 \quad \hat{a}_2 \quad \hat{a}_3 \quad \hat{a}_4]$$

$$y_{11}^* = \ddot{q}_{r1}$$

$$y_{12}^* = C_2 \ddot{q}_{r1} - (C_2/2) \ddot{q}_{r2} - (S_2/2) \dot{q}_2 \dot{q}_{r1} - (S_2/2) \dot{q}_1 \dot{q}_{r2} - (S_2/2) \dot{q}_2 \dot{q}_{r2}$$

$$y_{13}^* = \ddot{q}_{r1} - \ddot{q}_{r2}$$

$$y_{14}^* = 0$$

$$y_{21}^* = 0$$

$$y_{22}^* = -(C_2/2) \ddot{q}_{r1} + (S_2/2) \dot{q}_1 \dot{q}_{r1}$$

$$y_{23}^* = \ddot{q}_{r2} - \ddot{q}_{r1}$$

$$y_{24}^* = 0$$

$$y_{31}^* = y_{32}^* = y_{33}^* = 0$$

$$y_{34}^* = (\ddot{q}_{r3}/g) - 1$$

$$\hat{A} = -t_{11}^2 \Gamma_1 Y^T(q, \dot{q}, \ddot{q}_r) e_v \tag{50}$$

$$\hat{K}_f = -t_{11}^2 \Gamma_2 Y_f^T(\dot{q}) e_v \tag{51}$$

ដើម្បី

$$\Gamma_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}$$

$$\Gamma_2 = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 \end{bmatrix}$$

3. แขนหุ่นยนต์แบบทรงกลม

จากค่า t_{11} , T_{12} , K_{pp} , K_V และ K_P ที่คำนวณได้ และค่าถ่วงน้ำหนัก Γ_1^{-1} และ Γ_2^{-1} ที่แสดงอยู่ในส่วนนี้ เราจะได้ส่วนที่คำนวณแรงบิด และส่วนที่ปรับหาค่าประมาณของพารามิเตอร์ระบบ เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลม ดังที่แสดงในสมการ (52) (53) และ (54) ตามลำดับ

$$\Gamma_1^{-1} = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}$$

$$\Gamma_2^{-1} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \tau(t) &= \hat{H}[\ddot{q}_d - K_{pp}\dot{q}] + \hat{C}[\dot{q}_{dr} - K_{pp}\dot{q}] + \hat{G} + \hat{f}_v\dot{q} - K_V\dot{q} - K_P\dot{q} \\ &= \hat{H}\ddot{q}_r + \hat{C}\dot{q}_r + \hat{G} + \hat{f}_v\dot{q} - K_V\dot{q} - K_P\dot{q} \\ &= Y(q, \dot{q}, \ddot{q}_r, \dot{q}_r)\hat{A} + Y_f(\dot{q})\hat{K}_f - K_V\dot{q} - K_P\dot{q} \end{aligned}$$

หรือ

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} y_{11}^* & y_{12}^* & y_{13}^* & y_{14}^* & y_{15}^* & y_{16}^* \\ y_{21}^* & y_{22}^* & y_{23}^* & y_{24}^* & y_{25}^* & y_{26}^* \\ y_{31}^* & y_{32}^* & y_{33}^* & y_{34}^* & y_{35}^* & y_{36}^* \end{bmatrix} \hat{A} + \begin{bmatrix} \dot{q}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{q}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{q}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{k}_{f1} \\ \hat{k}_{f2} \\ \hat{k}_{f3} \end{bmatrix} \\ &\quad - K_V \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} - K_P \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (53)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} \hat{A}^T &= [\hat{a}_1 \quad \hat{a}_2 \quad \hat{a}_3 \quad \hat{a}_4 \quad \hat{a}_5 \quad \hat{a}_6] \\ y_{11}^* &= \ddot{q}_{r1} - S_1 C_1 \dot{q}_3 \dot{q}_{r3} \\ y_{12}^* &= 2q_2 \ddot{q}_{r1} + \dot{q}_2 \dot{q}_{r1} + \dot{q}_1 \dot{q}_{r2} - 2q_2 S_1 C_1 \dot{q}_3 \dot{q}_{r3} - S_1 g \\ y_{13}^* &= q_2^2 \ddot{q}_{r1} + q_2 \dot{q}_2 \dot{q}_{r1} + q_2 \dot{q}_1 \dot{q}_{r2} - q_2^2 S_1 C_1 \dot{q}_3 \dot{q}_{r3} - q_2 S_1 g \\ y_{14}^* &= S_1 C_1 \dot{q}_3 \dot{q}_{r3} \\ y_{15}^* &= 0 \end{aligned}$$

$$y^*_{16} = -S_1 g$$

$$y^*_{21} = 0$$

$$y^*_{22} = -\dot{q}_1 \dot{q}_{r1} - S_1^2 \dot{q}_3 \dot{q}_{r3}$$

$$y^*_{23} = \ddot{q}_{r2} - q_2 \dot{q}_1 \dot{q}_{r1} - S_1^2 \dot{q}_3 \dot{q}_{r3} + C_1 g$$

$$y^*_{24} = y^*_{25} = y^*_{26} = 0$$

$$y^*_{31} = S_1^2 \ddot{q}_{r3} + S_1 C_1 \dot{q}_3 \dot{q}_{r1} + S_1 C_1 \dot{q}_1 \dot{q}_{r3}$$

$$y^*_{32} = 2q_2 S_1^2 \ddot{q}_{r3} + 2q_2 S_1 C_1 \dot{q}_3 \dot{q}_{r1} + S_1^2 \dot{q}_3 \dot{q}_{r2} \\ + 2q_2 S_1 C_1 \dot{q}_1 \dot{q}_{r3} + S_1^2 \dot{q}_2 \dot{q}_{r3}$$

$$y^*_{33} = q_2^2 S_1^2 \ddot{q}_{r3} + q_2^2 S_1 C_1 \dot{q}_3 \dot{q}_{r1} + q_2 S_1^2 \dot{q}_3 \dot{q}_{r2} \\ + q_2^2 S_1 C_1 \dot{q}_1 \dot{q}_{r3} + q_2 S_1^2 \dot{q}_2 \dot{q}_{r3}$$

$$y^*_{34} = C_1^2 \ddot{q}_{r3} - S_1 C_1 \dot{q}_3 \dot{q}_{r1} - S_1 C_1 \dot{q}_1 \dot{q}_{r3}$$

$$y^*_{35} = \ddot{q}_{r3}$$

$$y^*_{36} = 0$$

$$\dot{\hat{A}} = -t_{11}^2 \Gamma_1 Y^T(q, \dot{q}, \dot{q}_r, \ddot{q}_r) e_v \quad (53)$$

$$\dot{\hat{K}}_f = -t_{11}^2 \Gamma_2 Y_f^T(\dot{q}) e_v \quad (54)$$

13/20

$$\Gamma_1 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 \end{bmatrix}$$

$$\Gamma_2 = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 \end{bmatrix}$$

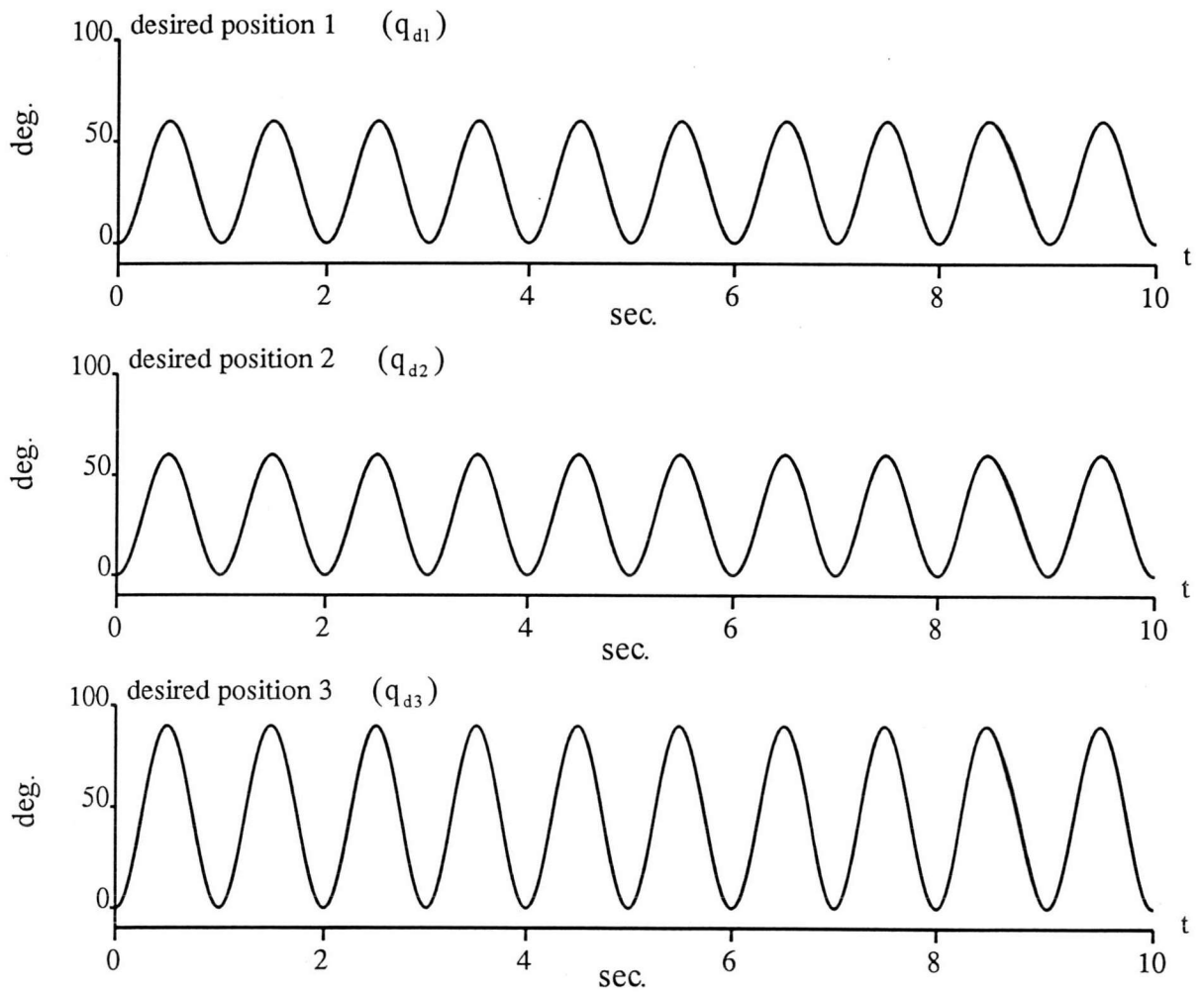
ผลการจำลองการทำงานเมื่อตัวควบคุมรู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์

1. ระบบเป็นแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง

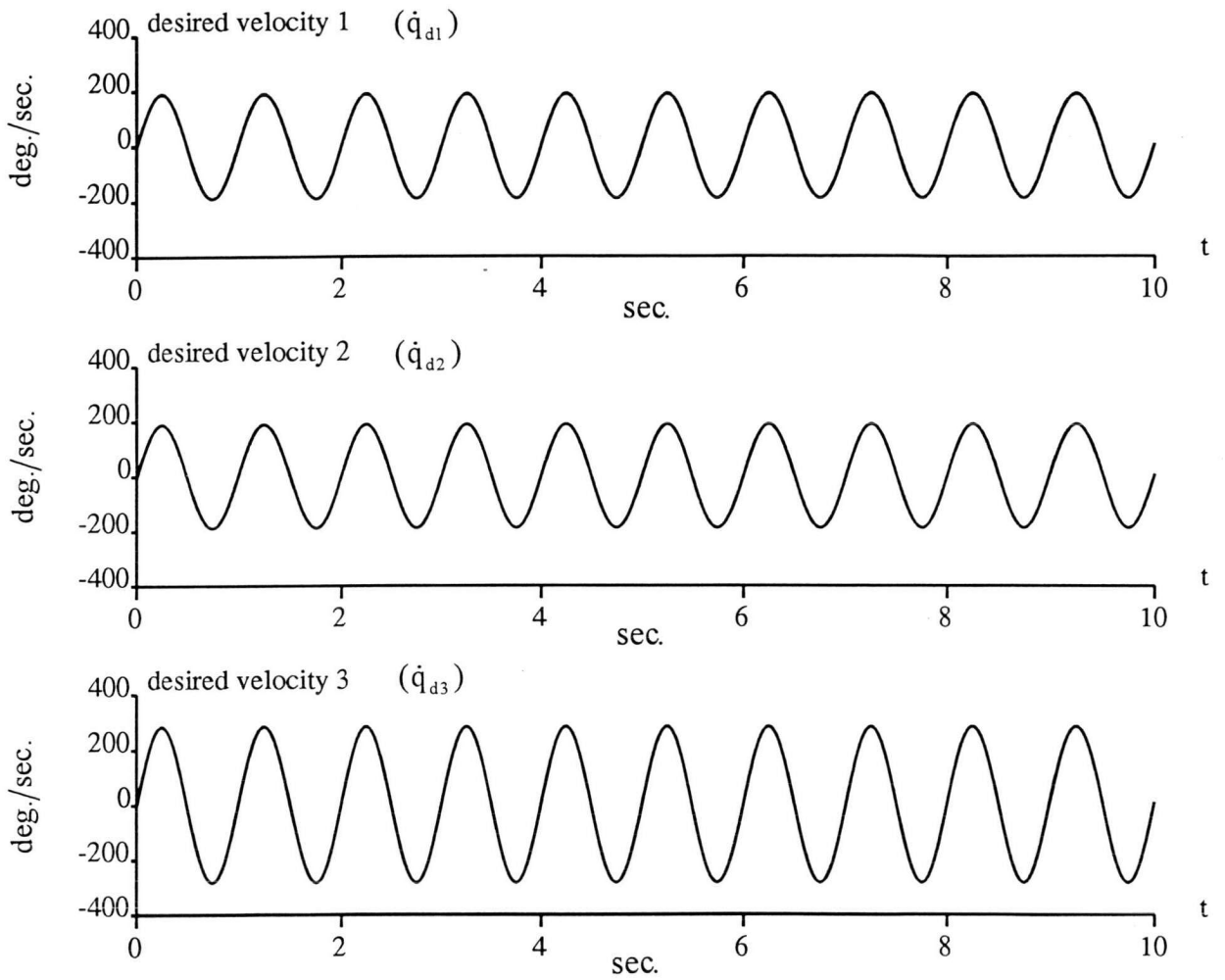
1.1 เส้นทางการเคลื่อนไหวที่ต้องการให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตาม ประกอบด้วยข้อมูลของตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของแต่ละข้อต่อ ที่เวลาต่าง ๆ

$$\begin{aligned}
 q_{d1} &= 30(1 - \cos 2\pi t) && \text{deg.} \\
 q_{d2} &= 30(1 - \cos 2\pi t) && \text{deg.} \\
 q_{d3} &= 45(1 - \cos 2\pi t) && \text{deg.} \\
 \dot{q}_{d1} &= (30 * 2\pi) \sin(2\pi t) && \text{deg./sec.} \\
 \dot{q}_{d2} &= (30 * 2\pi) \sin(2\pi t) && \text{deg./sec.} \\
 \dot{q}_{d3} &= (45 * 2\pi) \sin(2\pi t) && \text{deg./sec.} \\
 \ddot{q}_{d1} &= (30 * 2\pi * 2\pi) \cos(2\pi t) && \text{deg./sec.}^2 \\
 \ddot{q}_{d2} &= (30 * 2\pi * 2\pi) \cos(2\pi t) && \text{deg./sec.}^2 \\
 \ddot{q}_{d3} &= (45 * 2\pi * 2\pi) \cos(2\pi t) && \text{deg./sec.}^2
 \end{aligned}$$

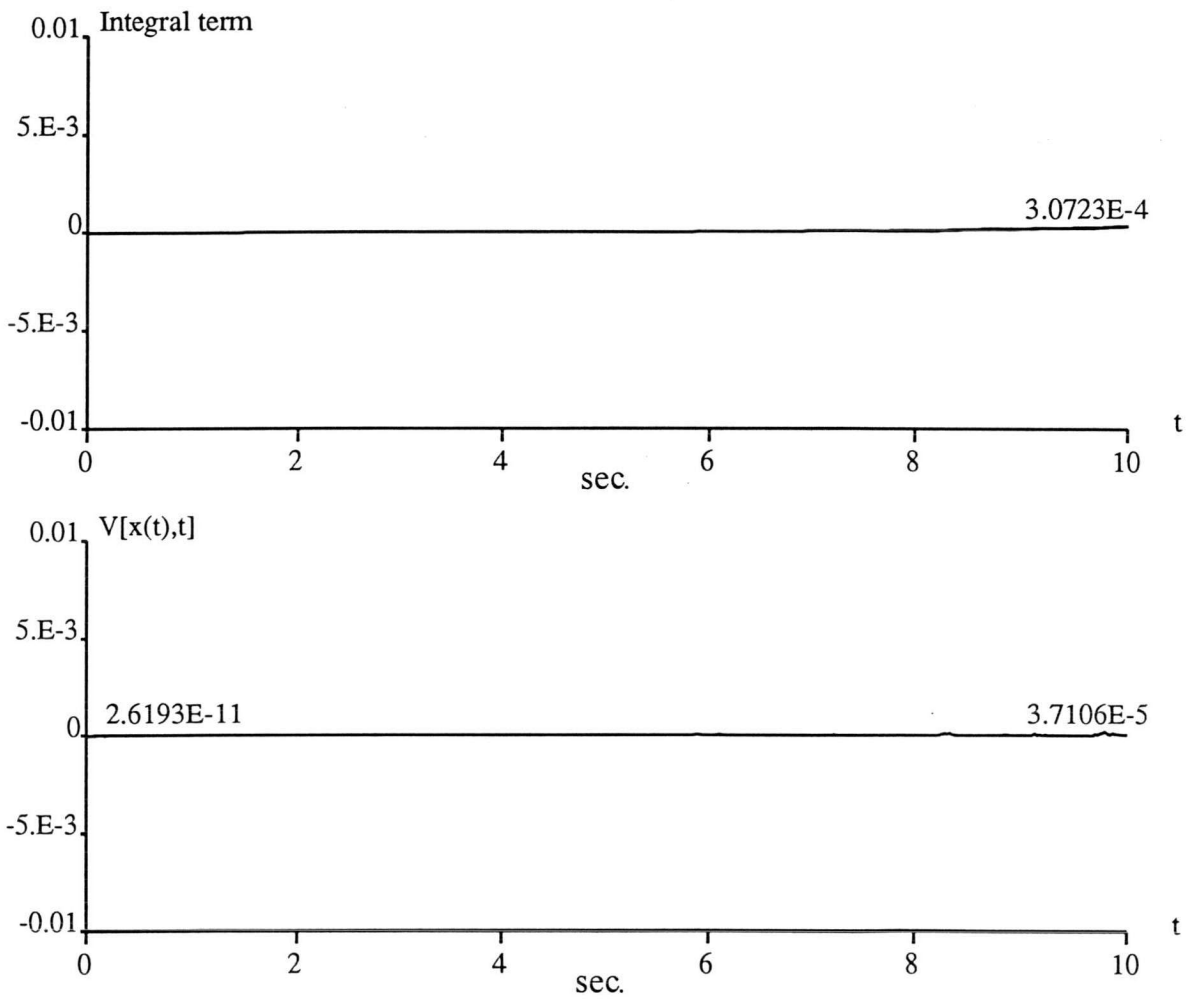
1.2 ภาพแสดงผลการจำลองการทำงาน



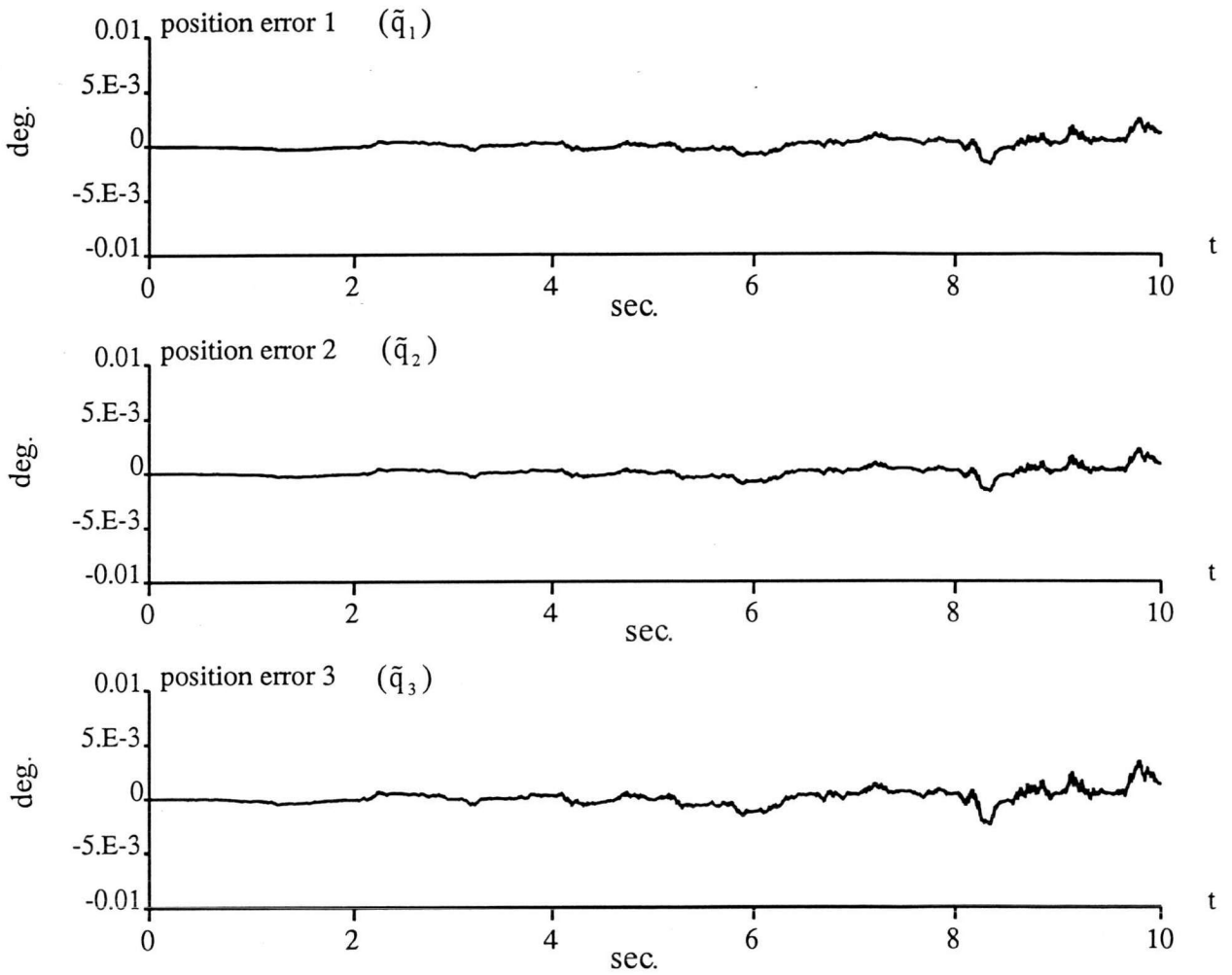
ภาพที่ 11 แสดงตำแหน่งที่ต้องการให้แต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องเคลื่อนที่ติดตาม



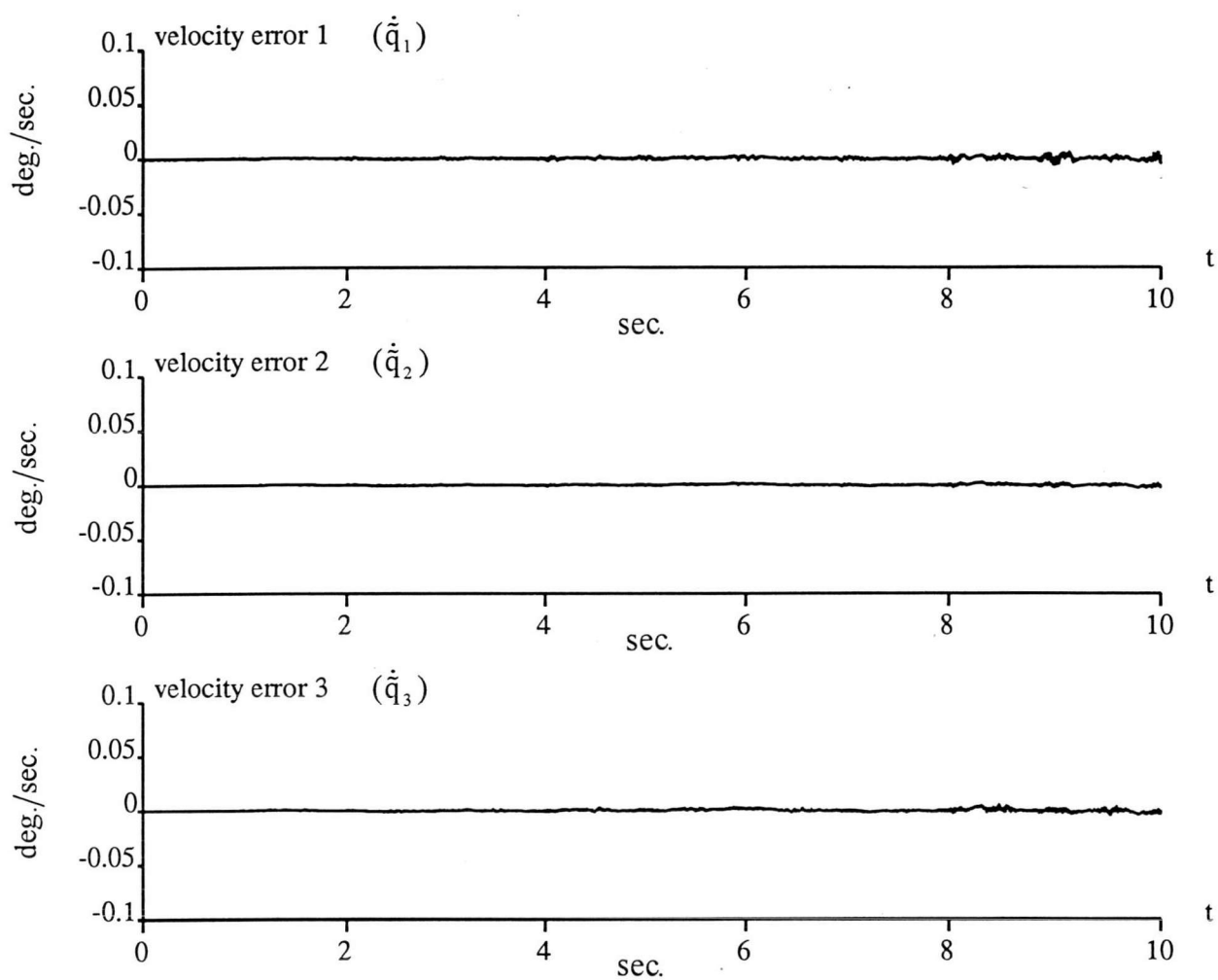
ภาพที่ 12 แสดงความเร็วที่ต้องการให้แต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องเคลื่อนที่ติดตาม



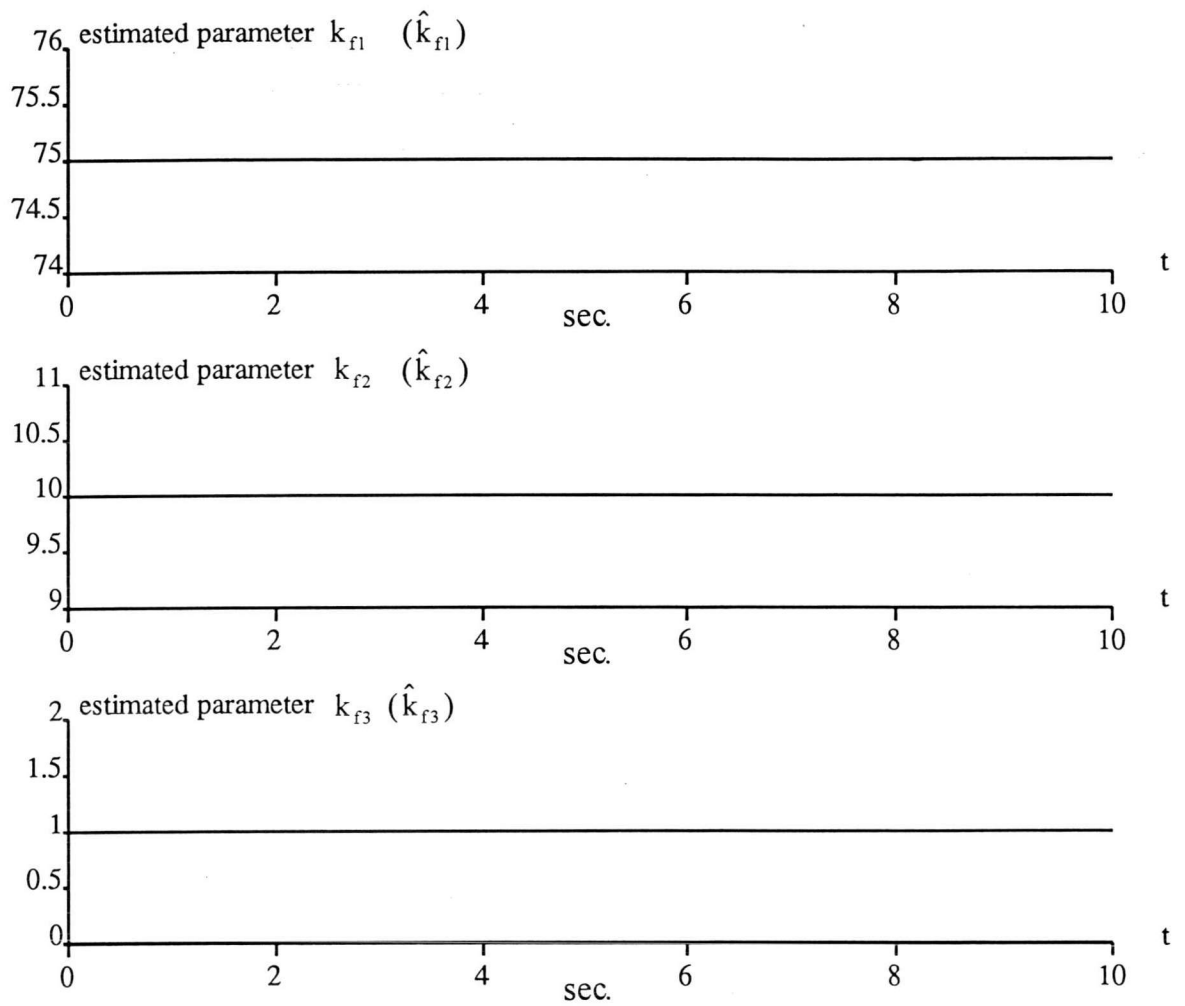
ภาพที่ 13 แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณี
ตัวควบคุมรู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง



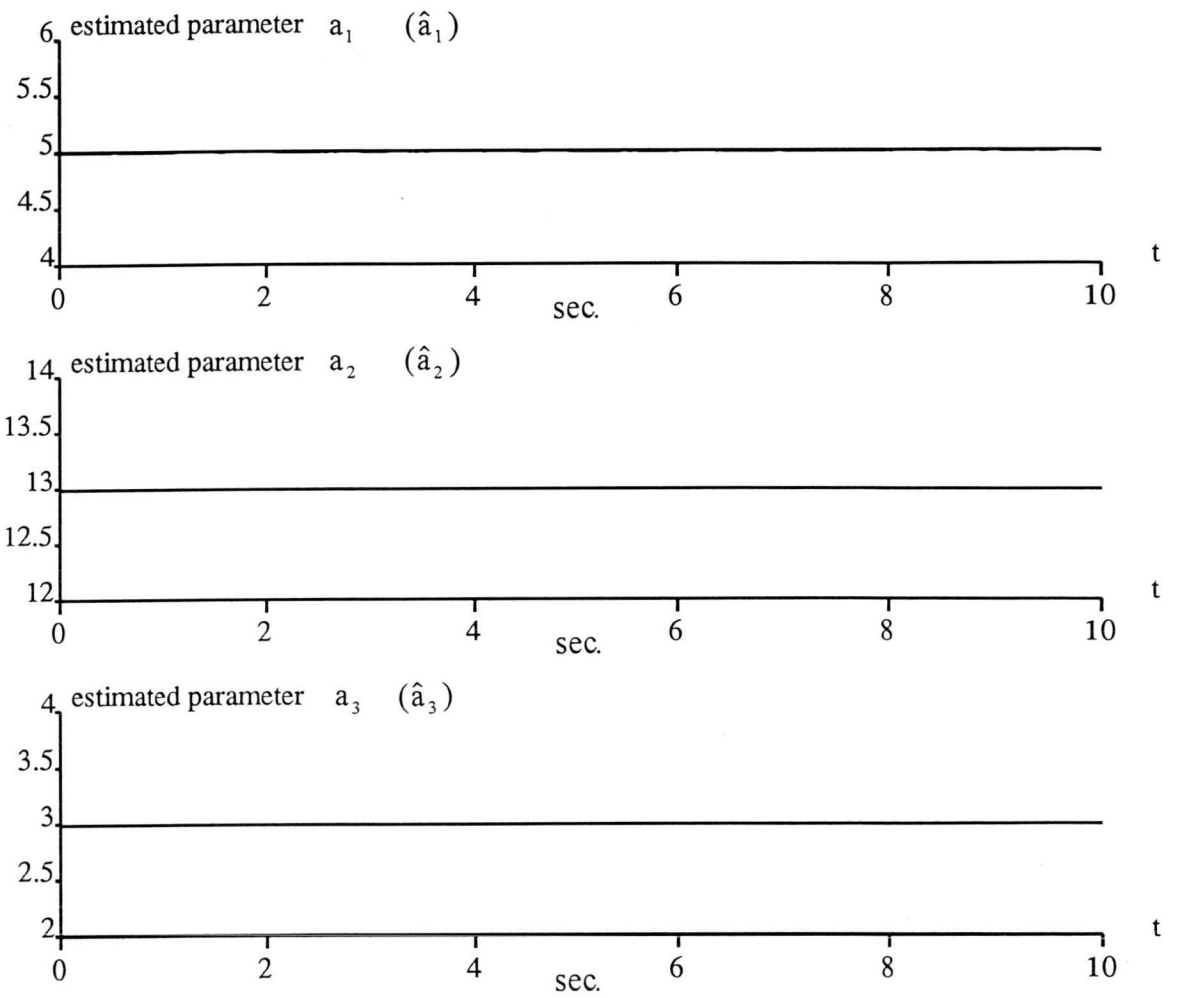
ภาพที่ 14 แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุม
รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง



ภาพที่ 15 แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุม
รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง

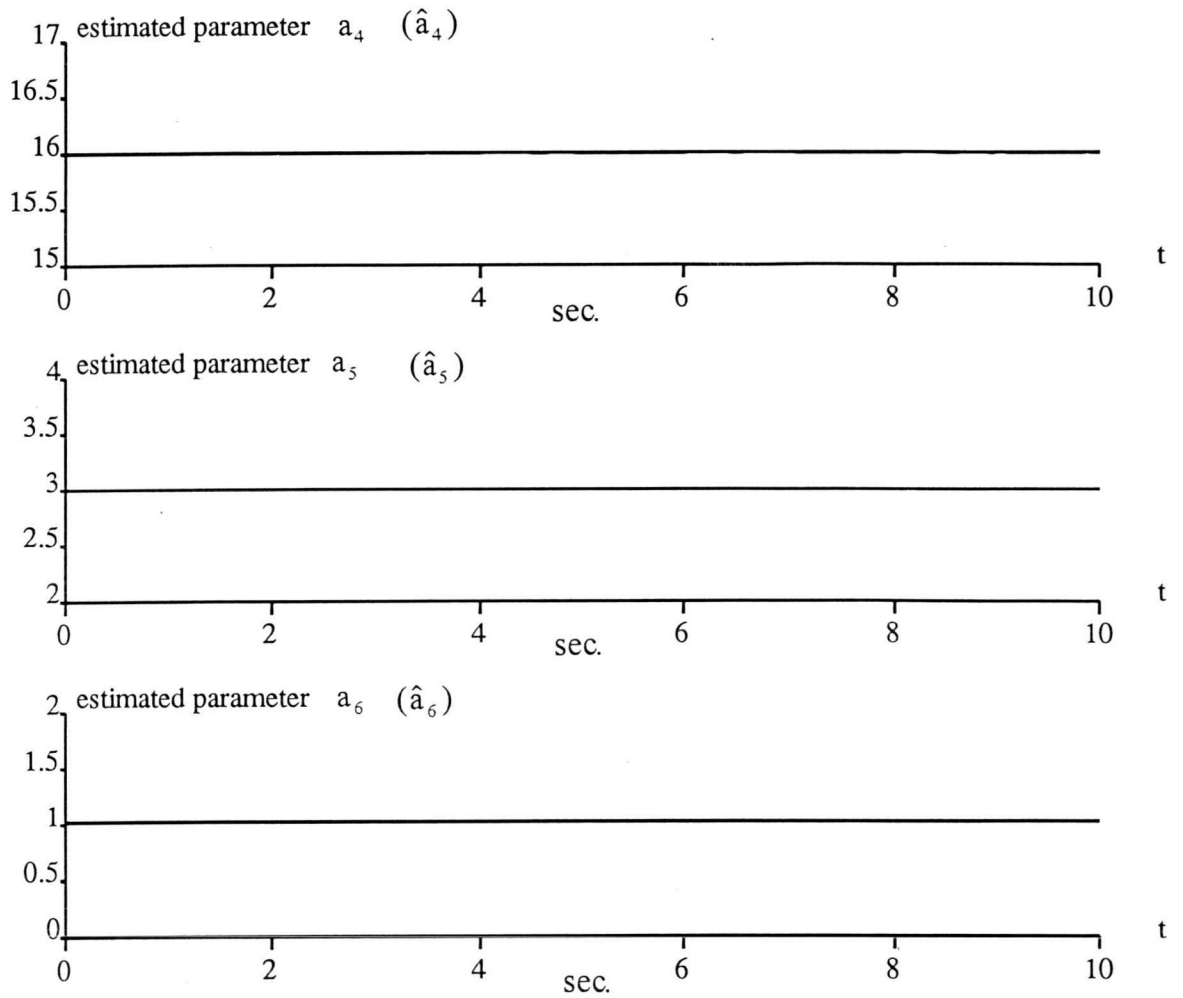


ภาพที่ 16 แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ k_{f1} , k_{f2} และ k_{f3} ในกรณี
 ตัวควบคุมรู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง



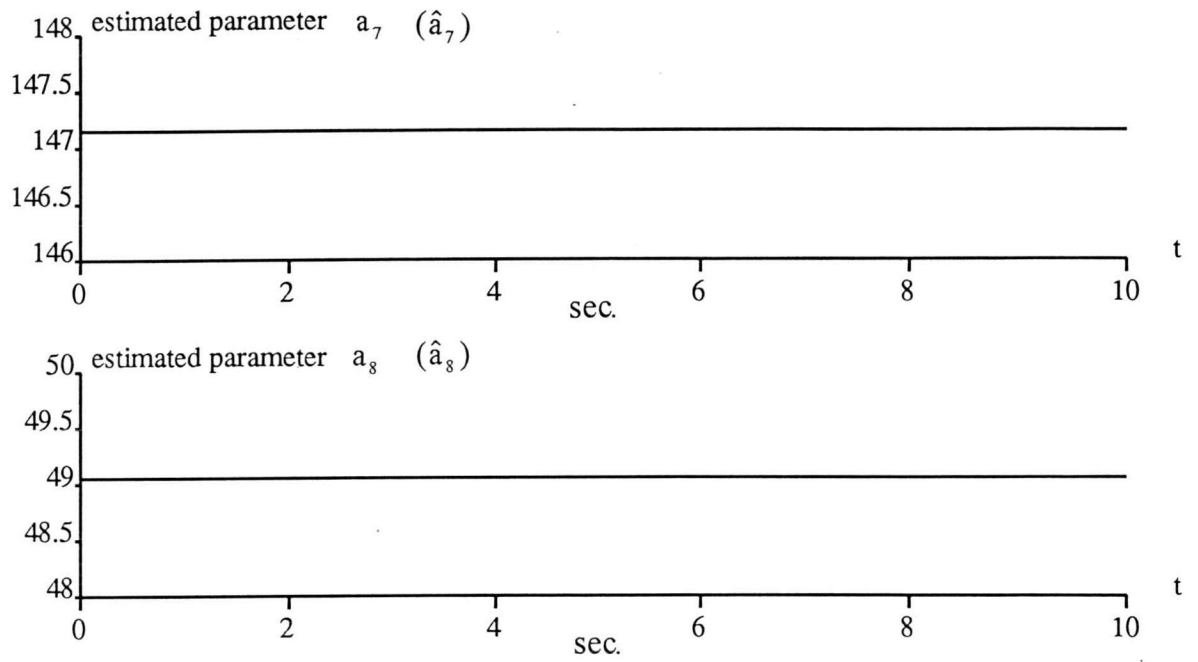
ภาพที่ 17 แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ a_1 , a_2 และ a_3 ในกรณี

ตัวควบคุมรู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง

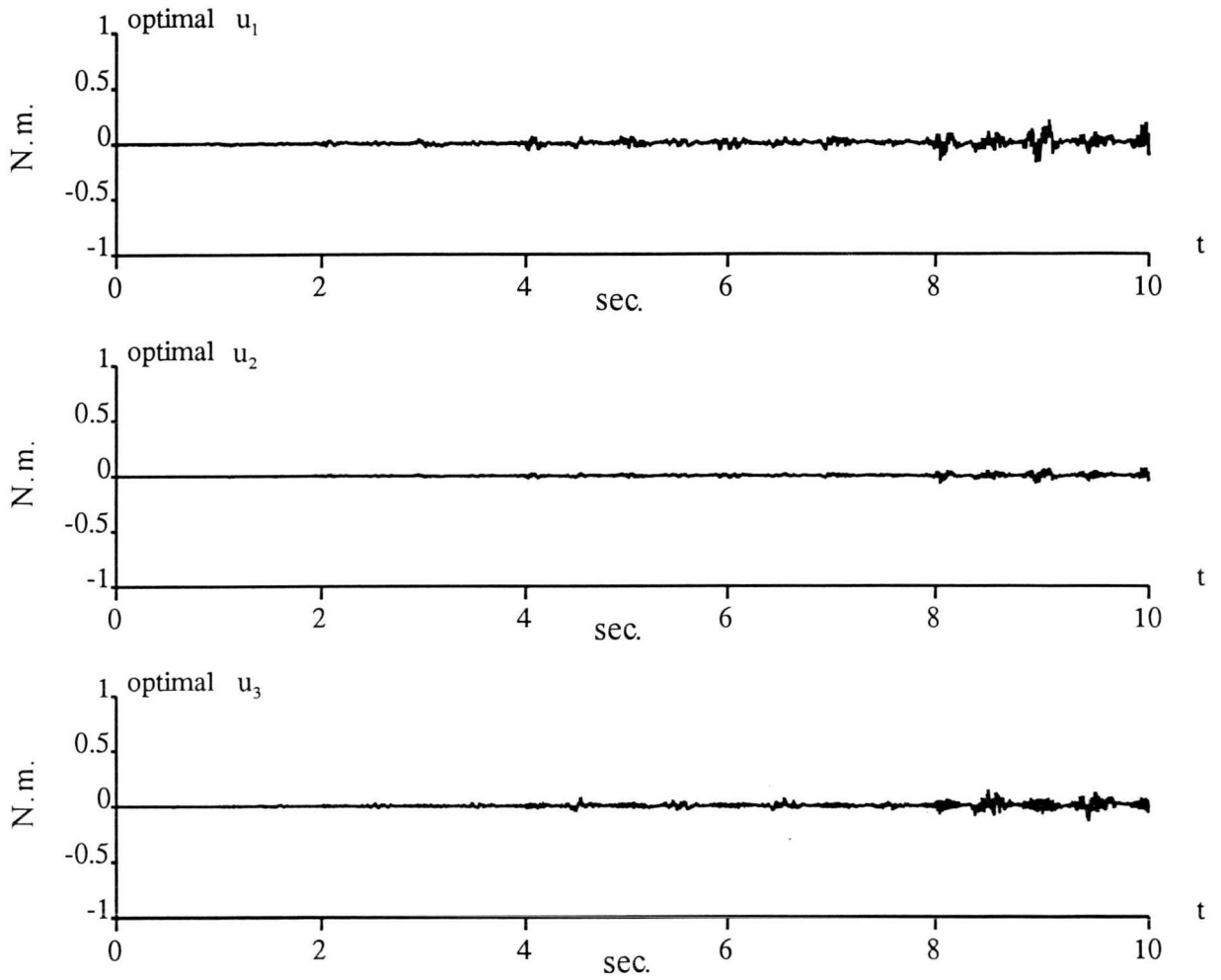


ภาพที่ 18 แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ a_4 , a_5 และ a_6 ในกรณีนี้

ตัวควบคุมรู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง



ภาพที่ 19 แสดงค่าประมาณของพารามิเตอร์ a_7 และ a_8 ในกรณีตัวควบคุม
รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของเซนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง



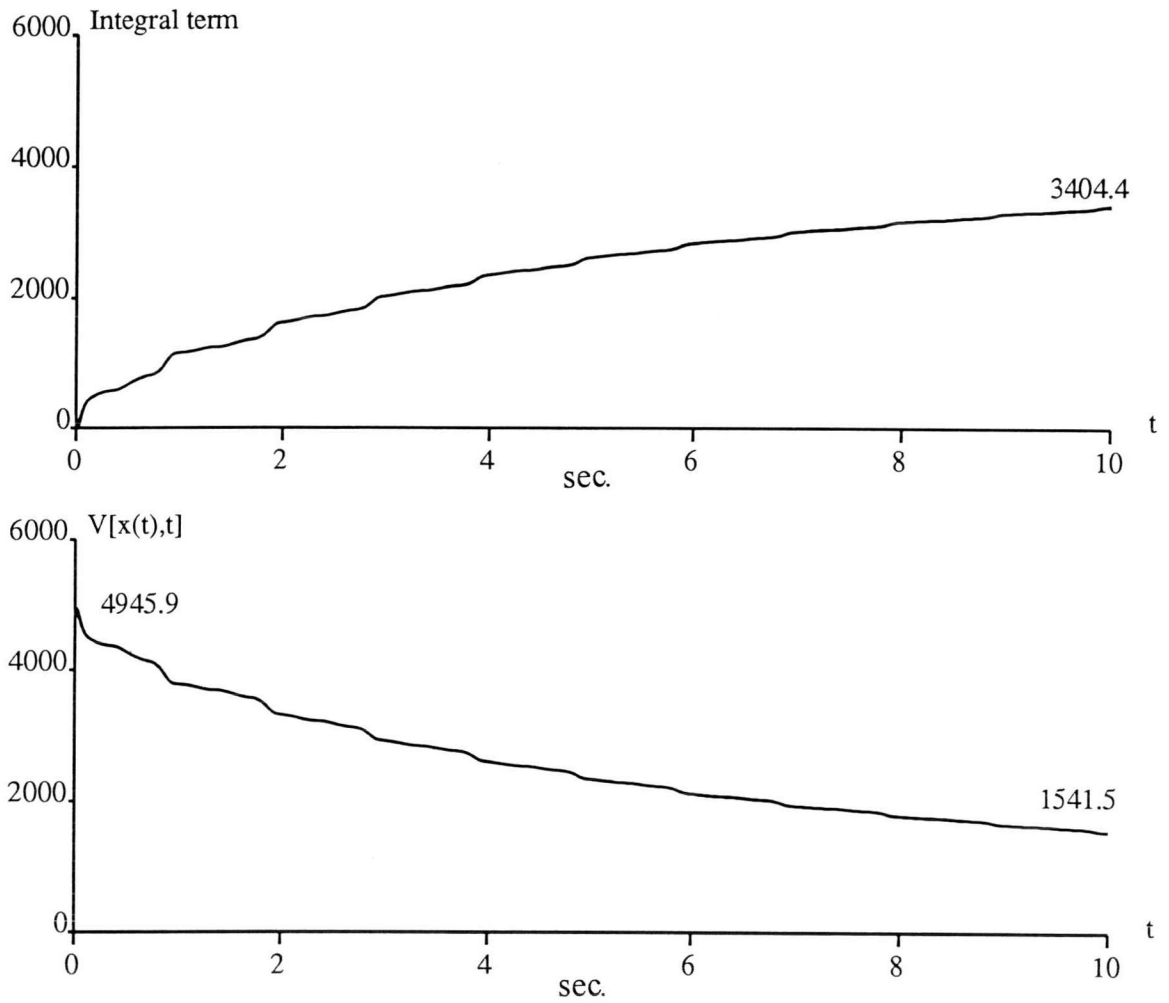
ภาพที่ 20 แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณี
ตัวควบคุมรู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง

ผลการจำลองการทำงานเมื่อตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์

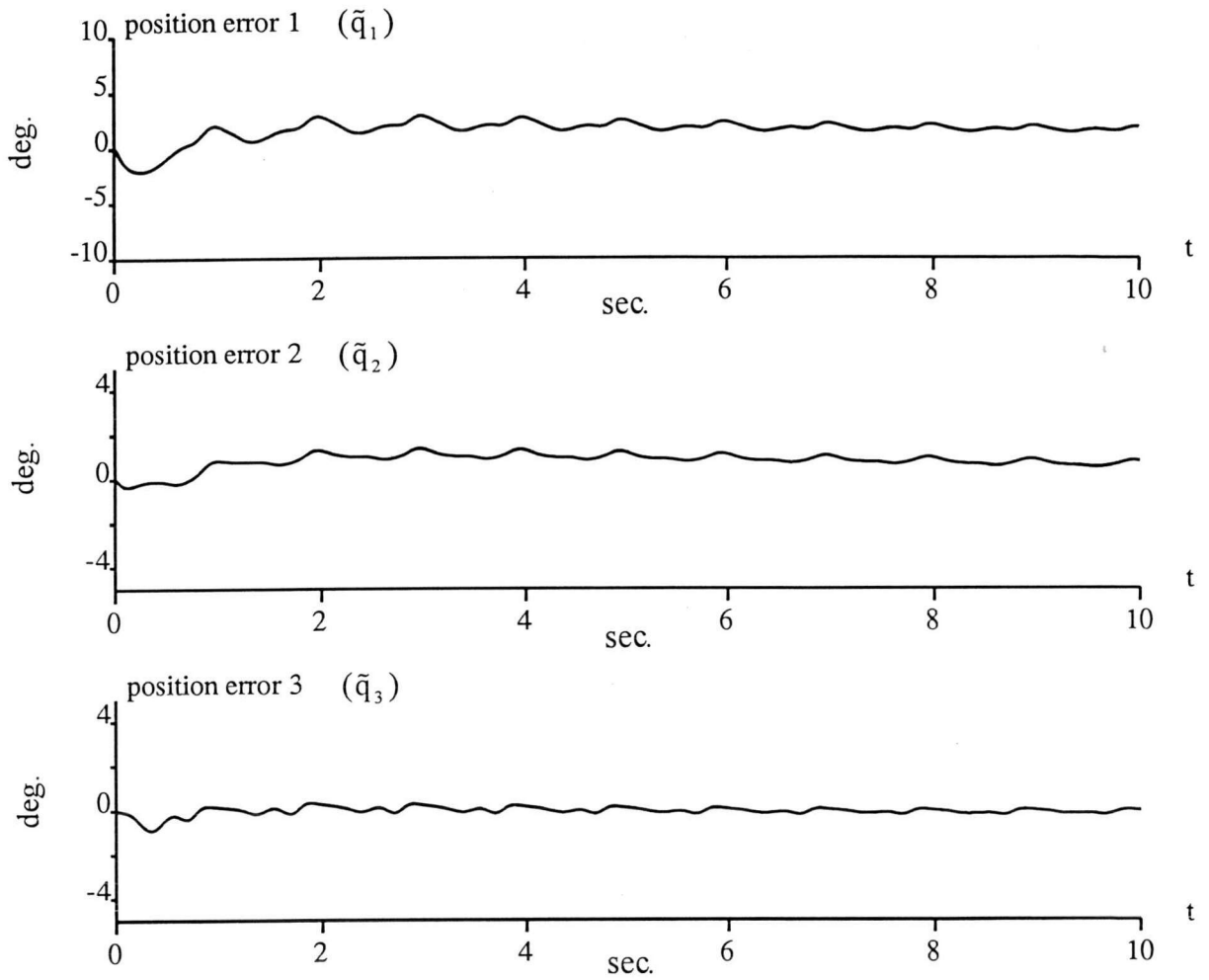
1. ระบบเป็นแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง

1.1 เส้นทางการเคลื่อนไหวที่ต้องการให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตาม ใช้ข้อมูลชุดเดียวกันกับที่ใช้ในกรณีตัวควบคุมรู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์

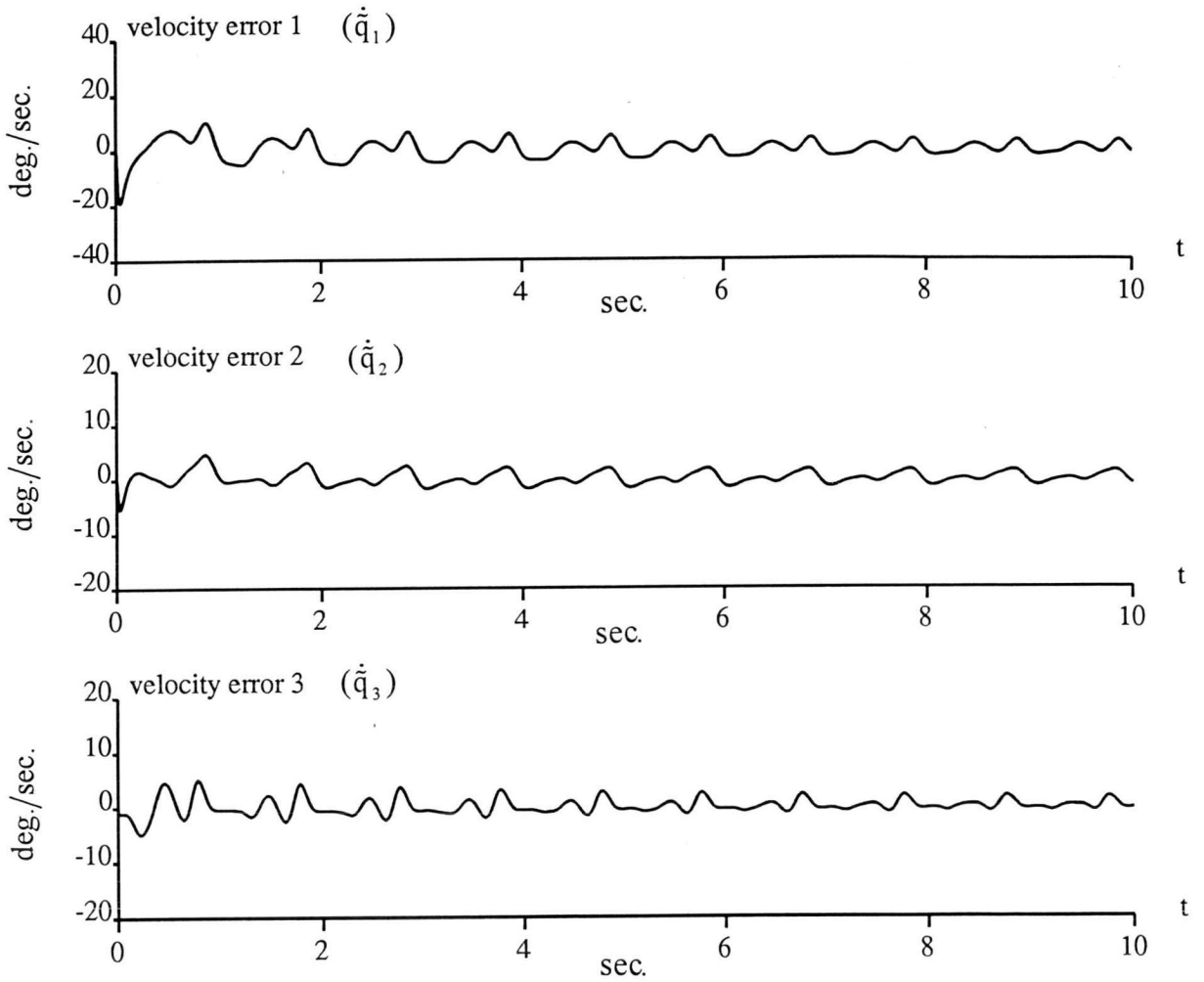
1.2 ภาพแสดงผลการจำลองการทำงาน



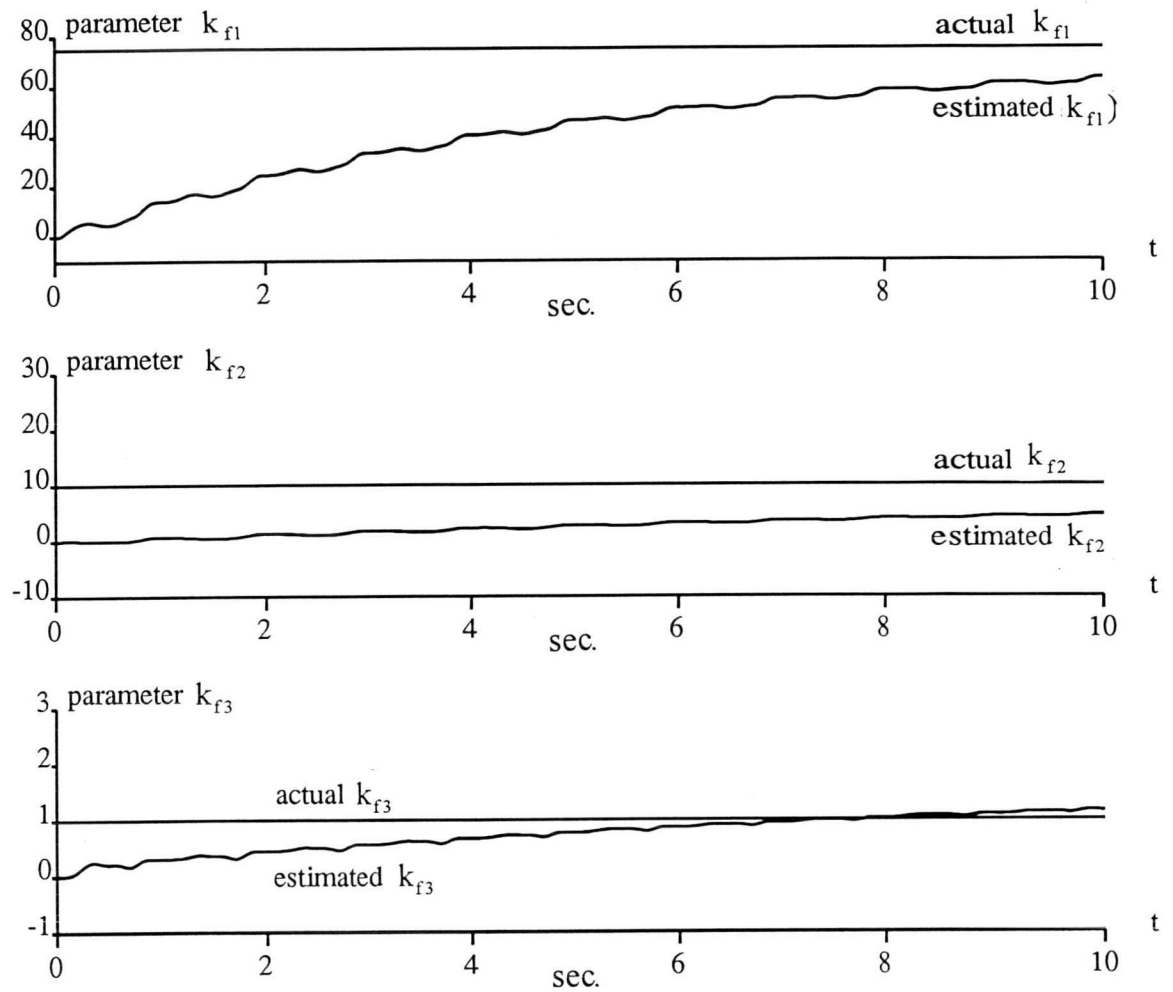
ภาพที่ 21 แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณี
ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง
และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง



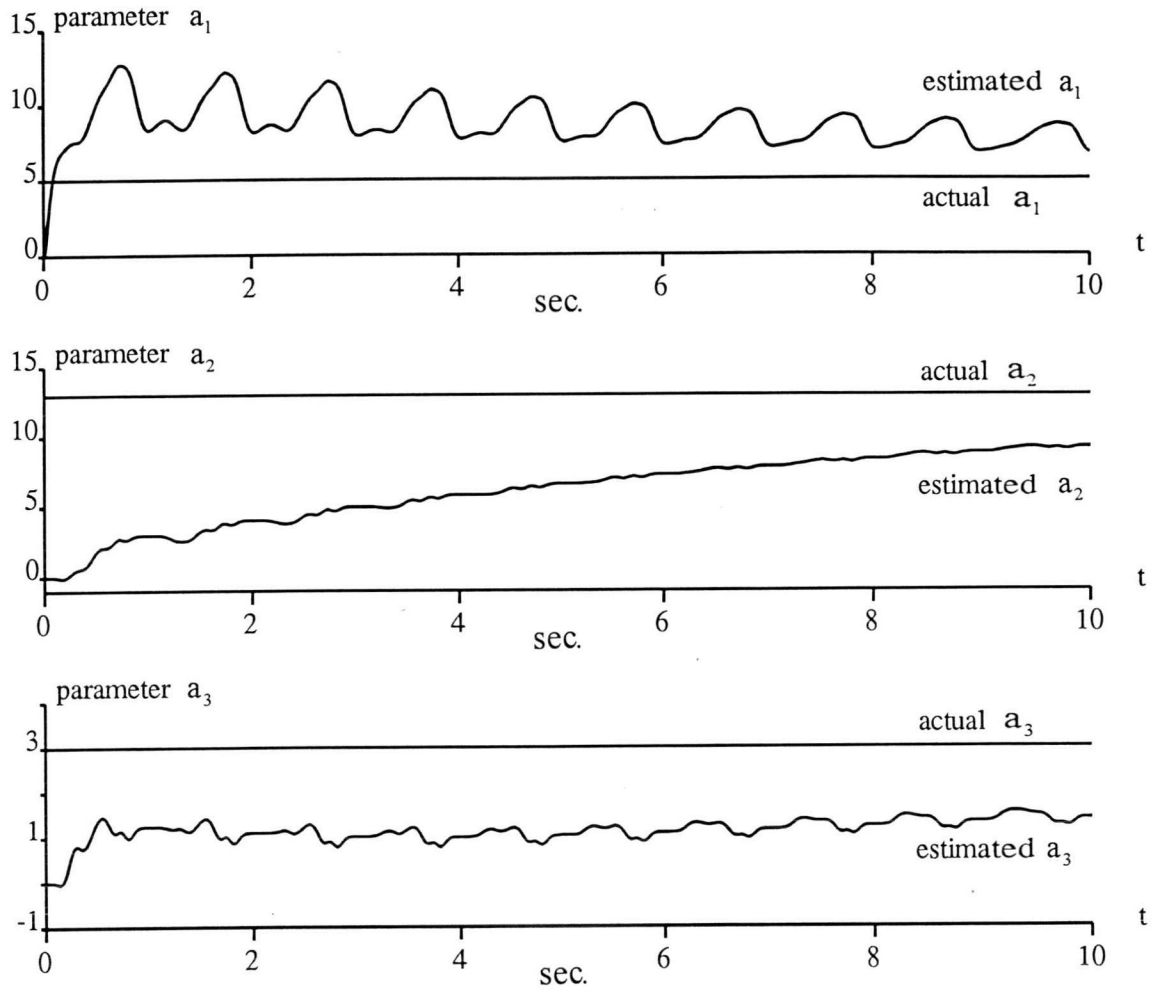
ภาพที่ 22 แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า
พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและ
พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง



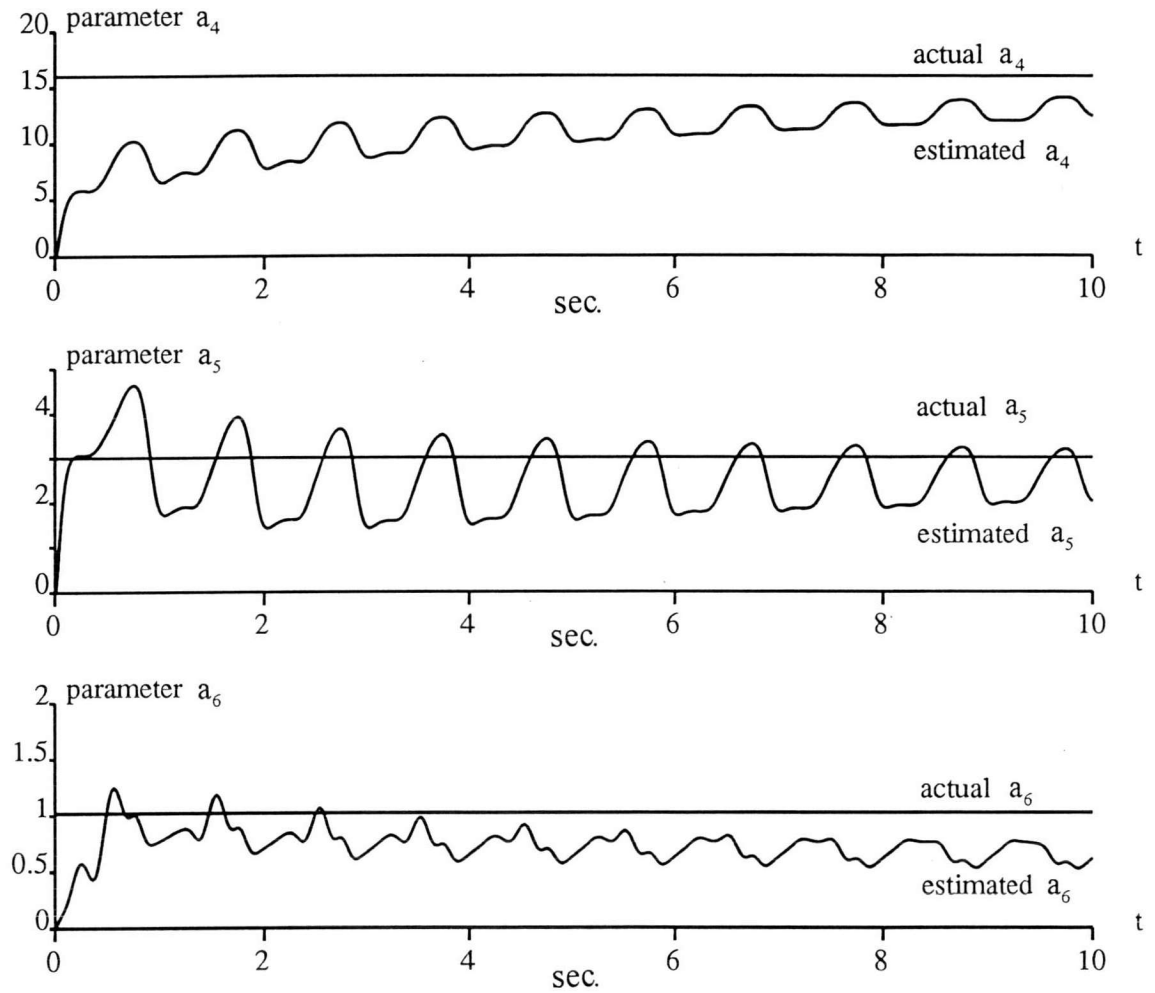
ภาพที่ 23 แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า
พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและ
พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง



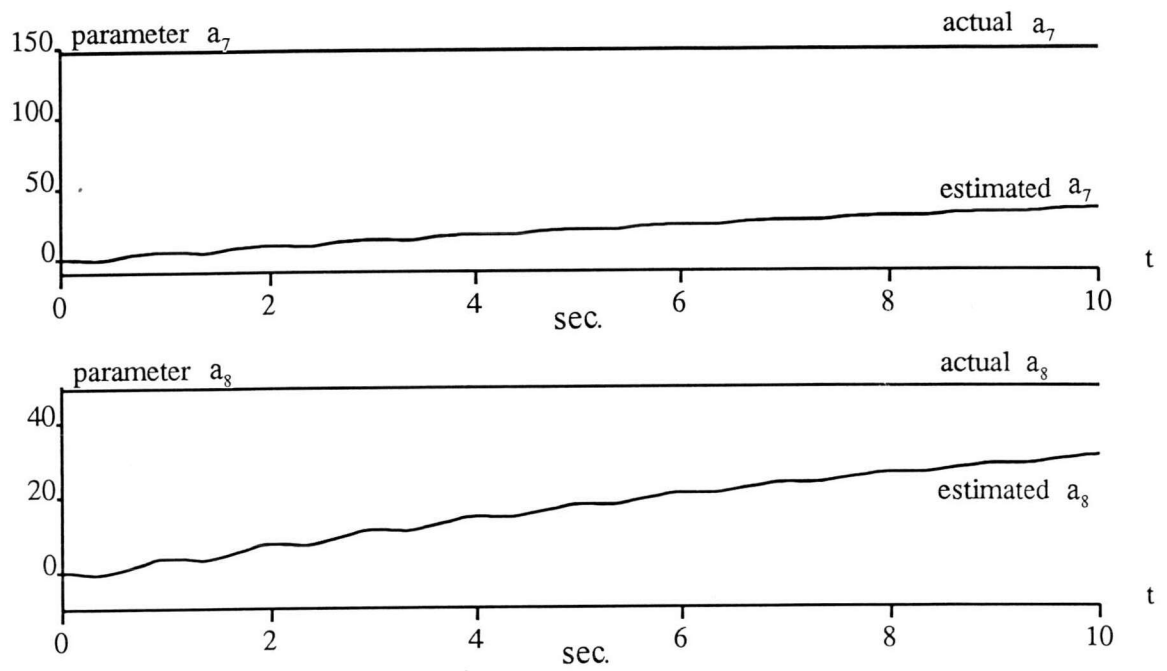
ภาพที่ 24 แสดงค่าจริงและค่าประมาณของพารามิเตอร์ k_{f1} , k_{f2} และ k_{f3} ในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและ
 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง



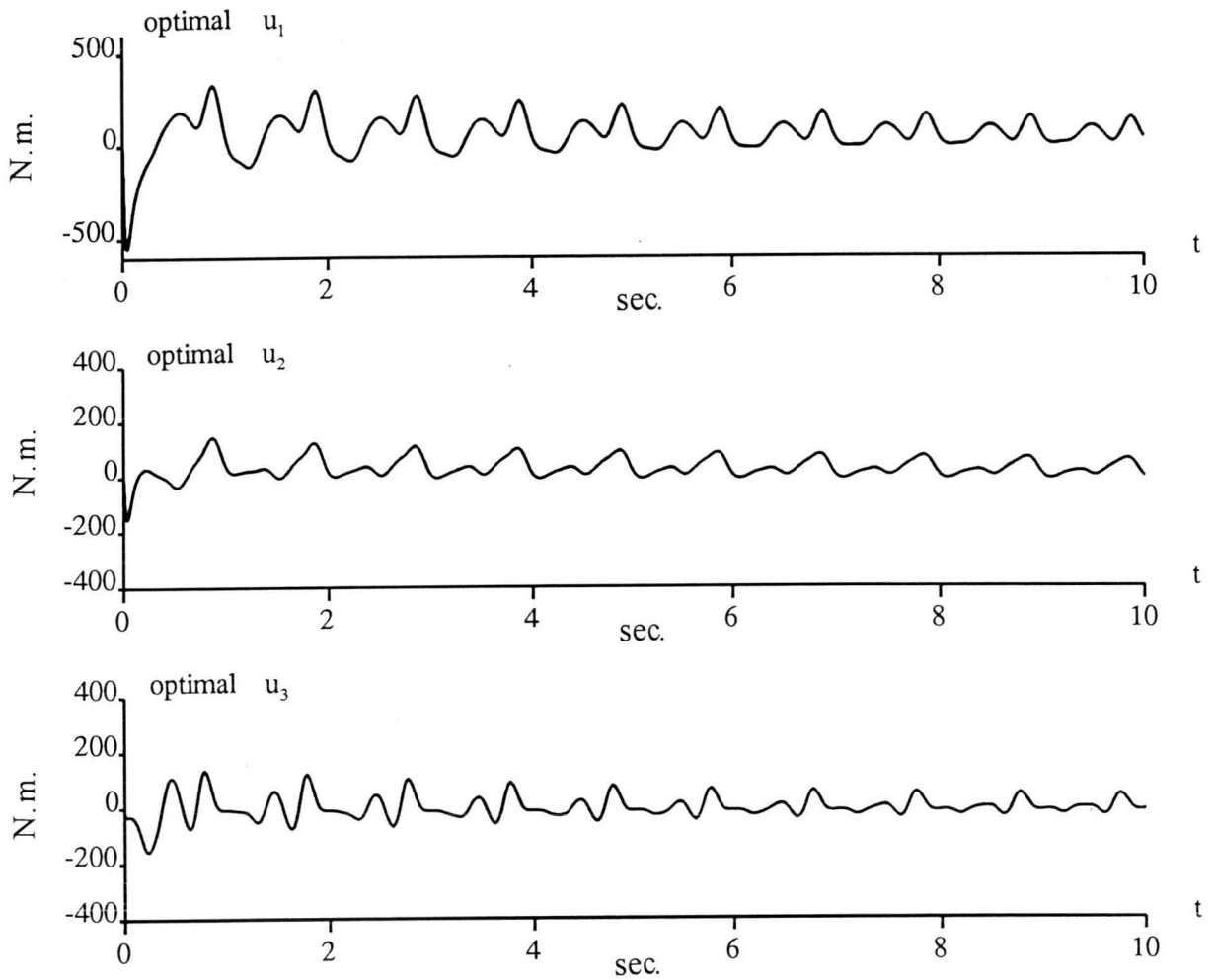
ภาพที่ 25 แสดงค่าจริงและค่าประมาณของพารามิเตอร์ a_1 , a_2 และ a_3 ในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง
 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง



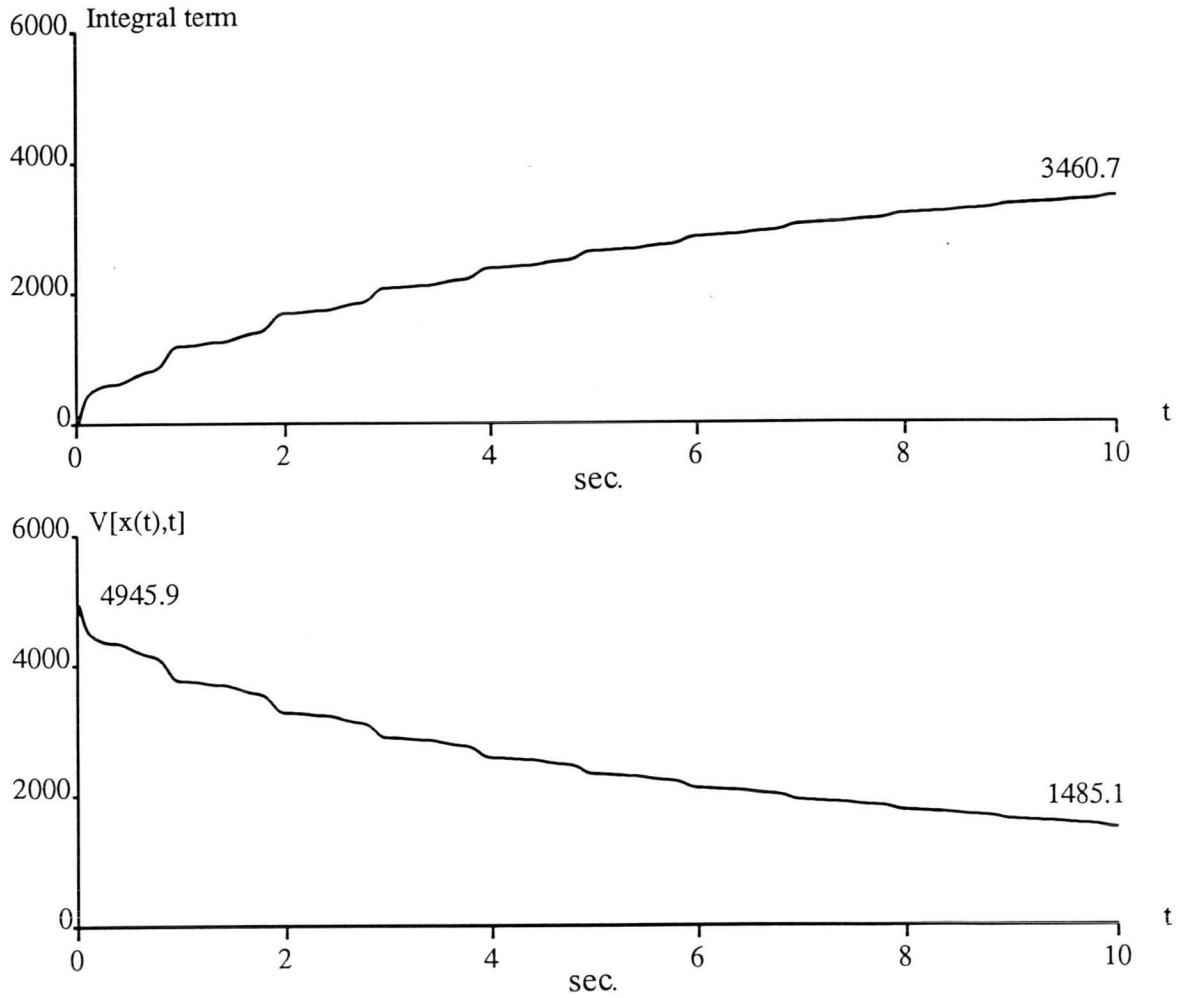
ภาพที่ 26 แสดงค่าจริงและค่าประมาณของพารามิเตอร์ a_4 , a_5 และ a_6 ในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง
 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง



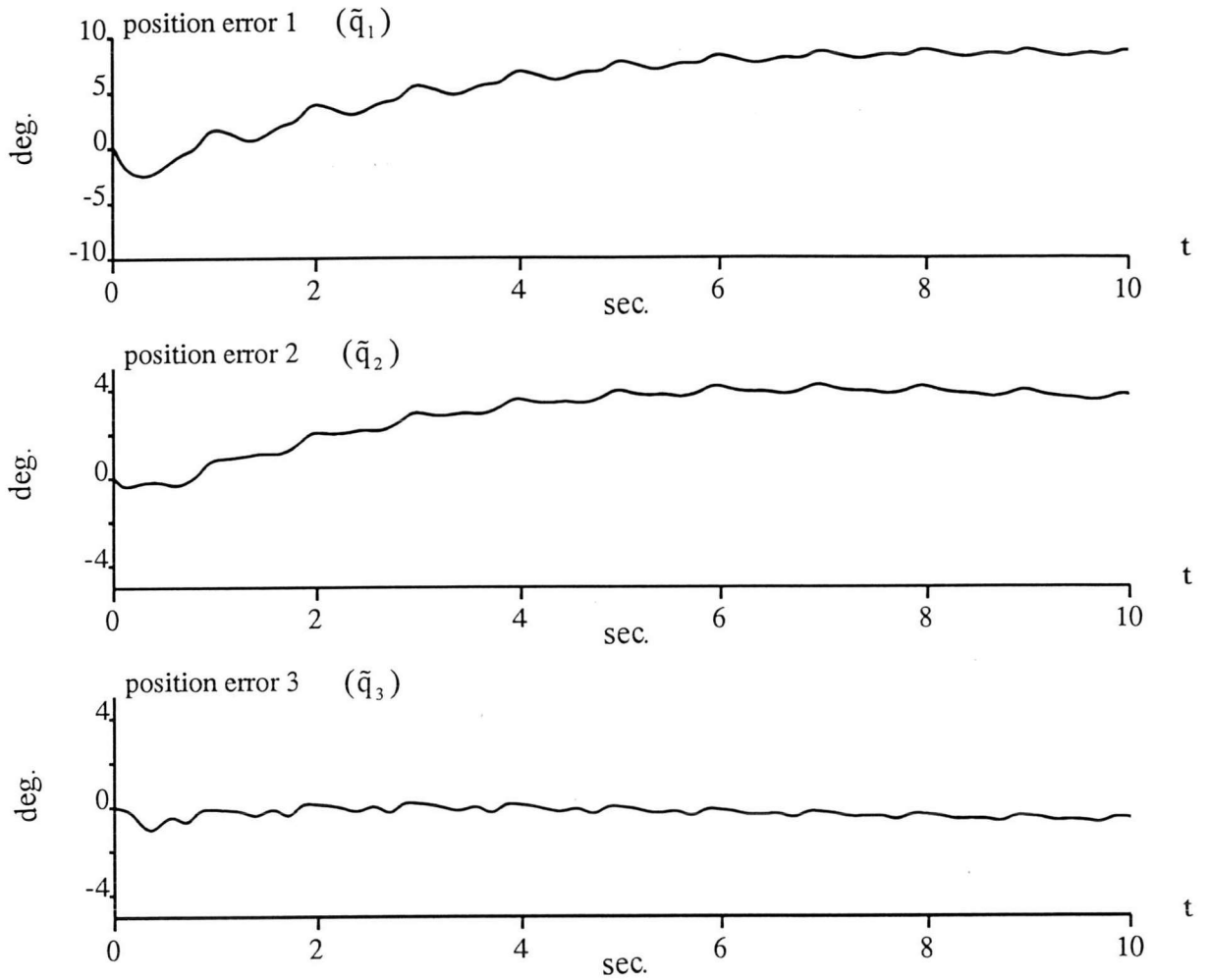
ภาพที่ 27 แสดงค่าจริงและค่าประมาณของพารามิเตอร์ a_7 และ a_8 ในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง
 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง



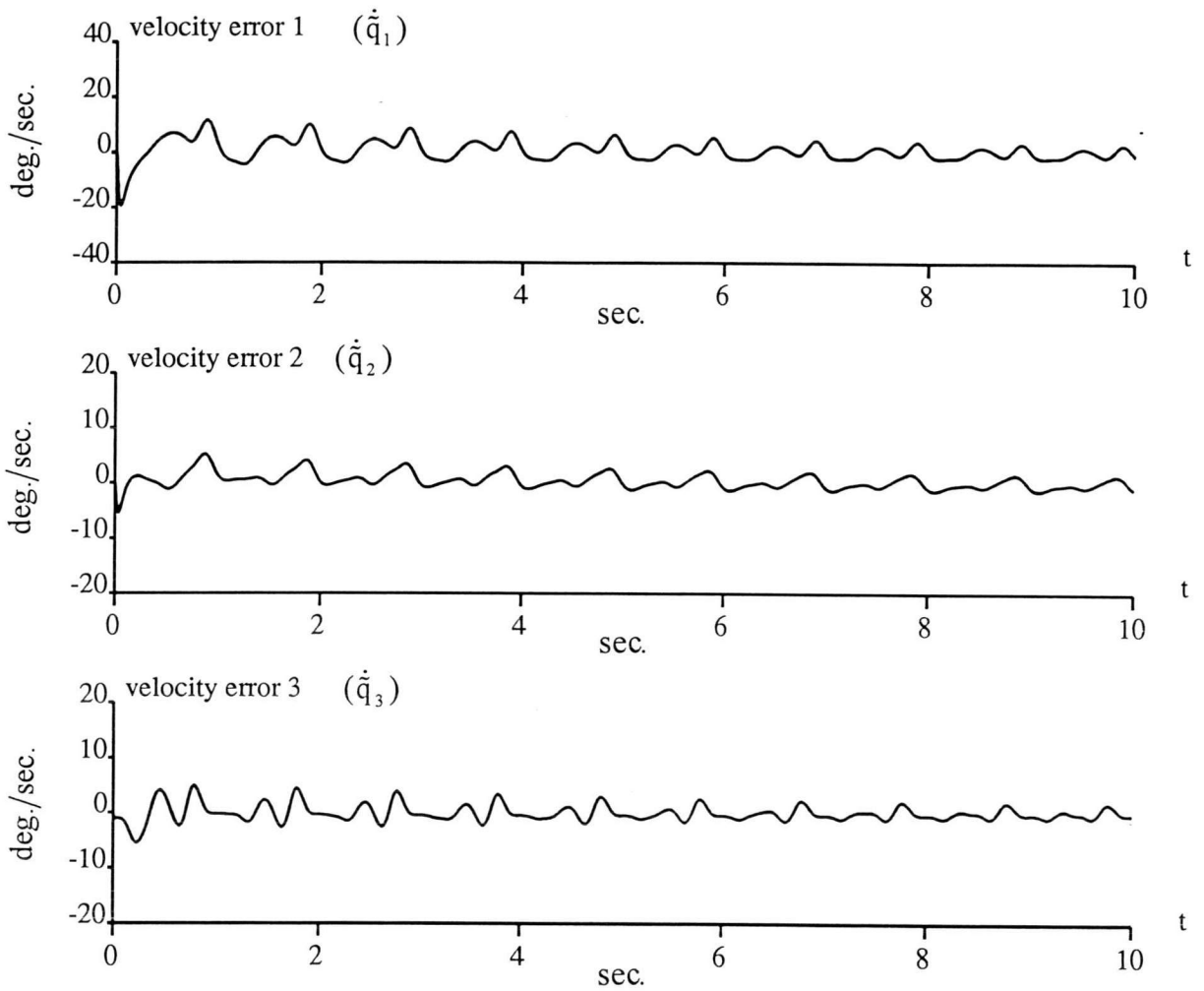
ภาพที่ 28 แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง
 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง



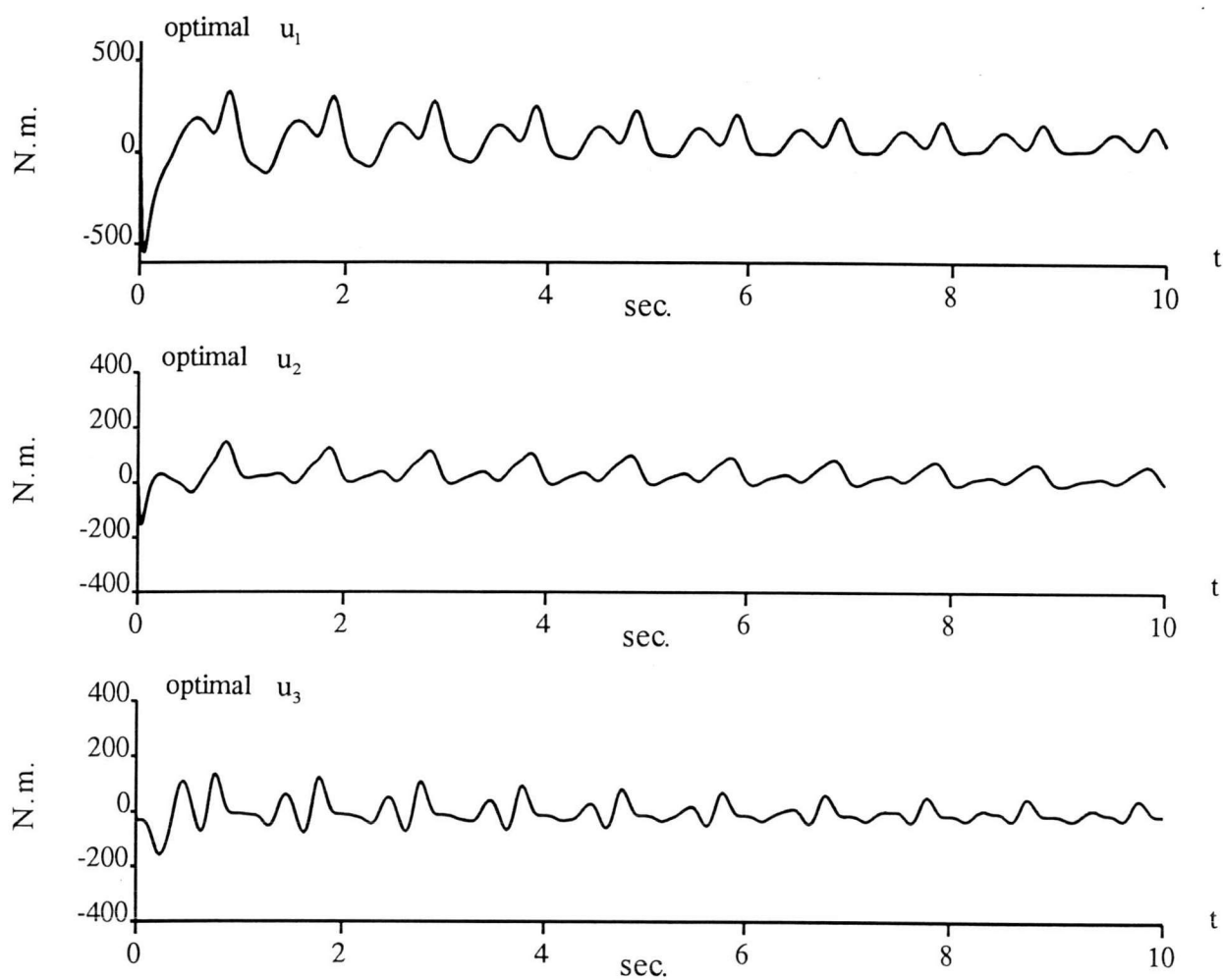
ภาพที่ 29 แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง
 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง



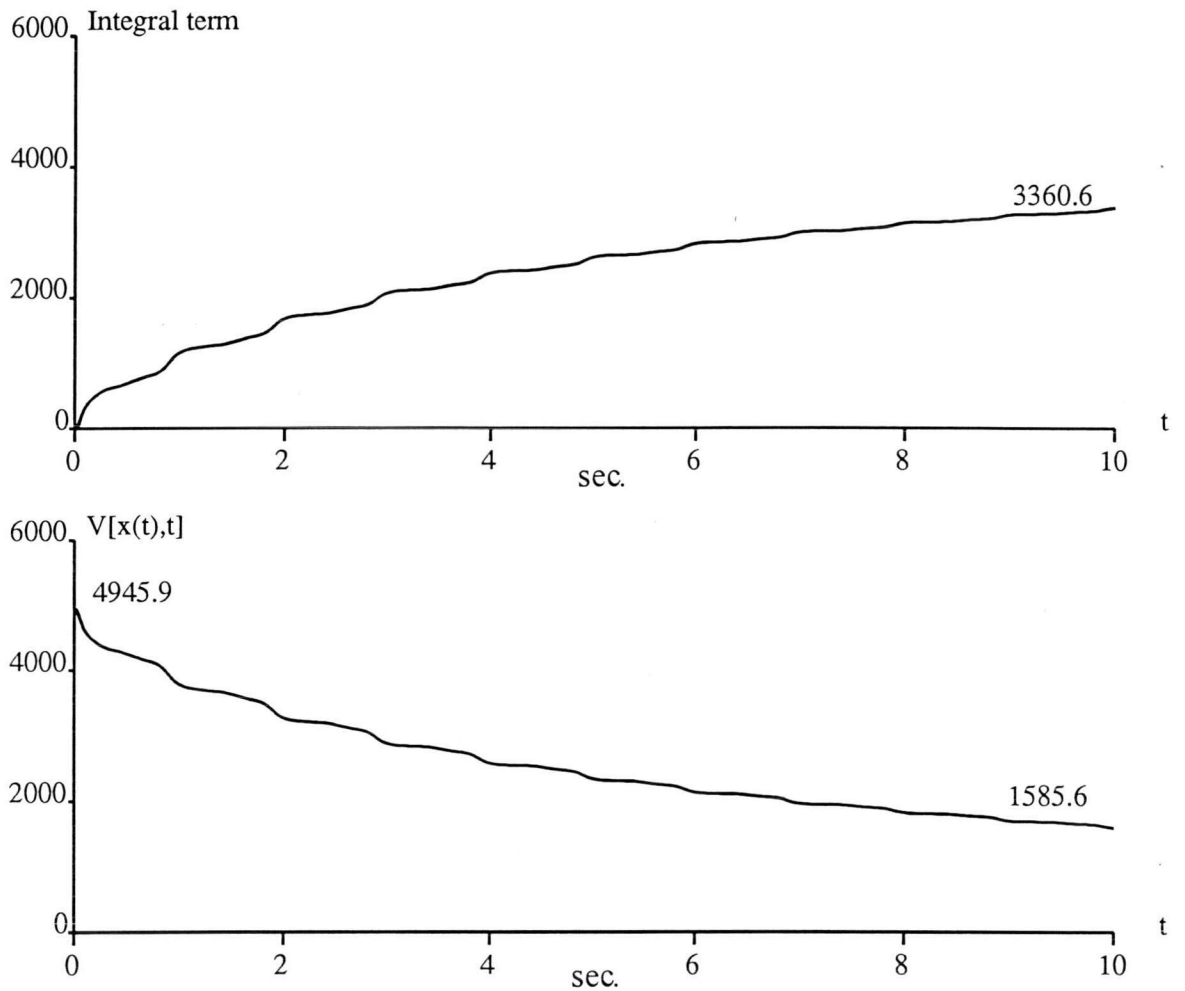
ภาพที่ 30 แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง



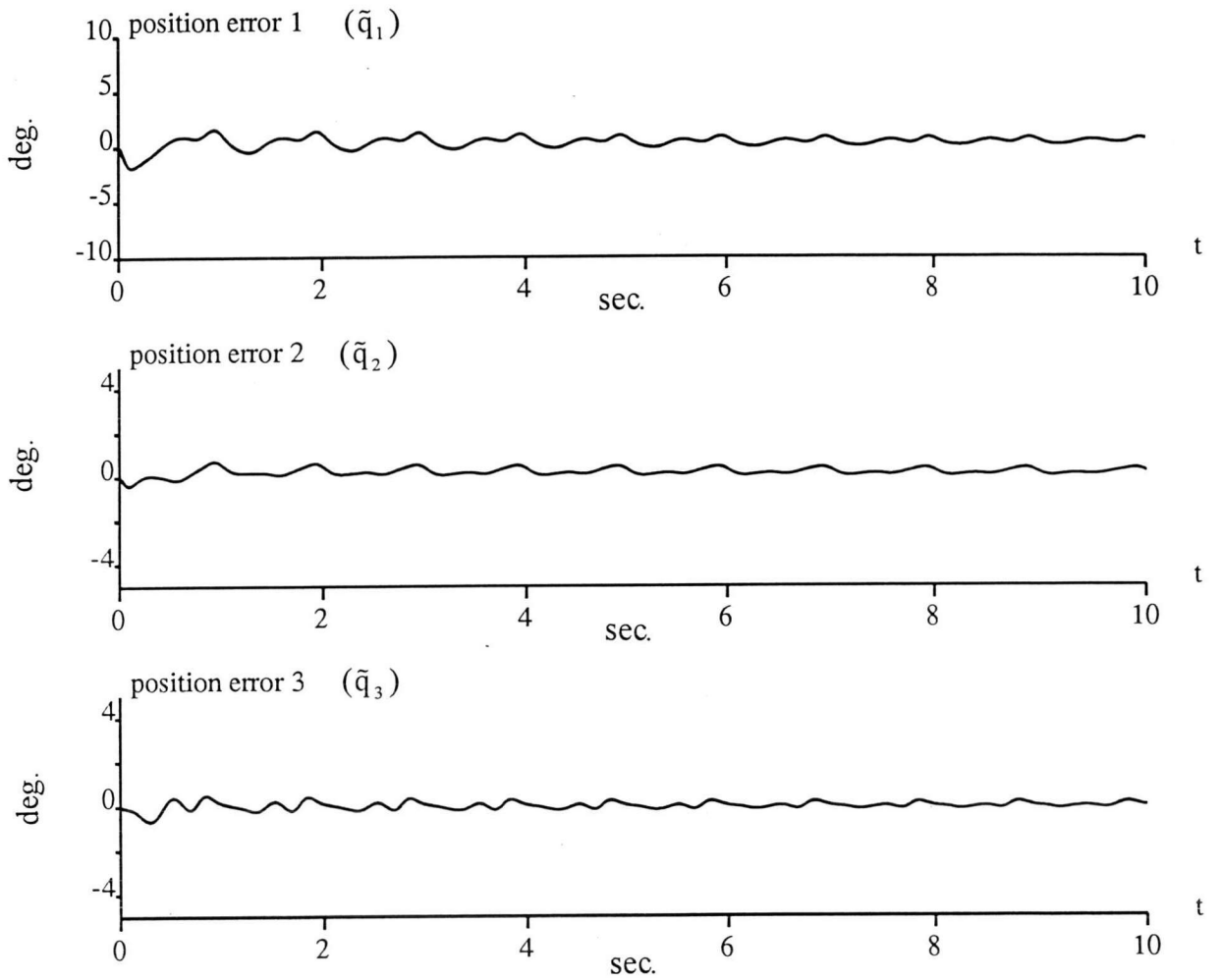
ภาพที่ 31 แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า
พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและ
พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง



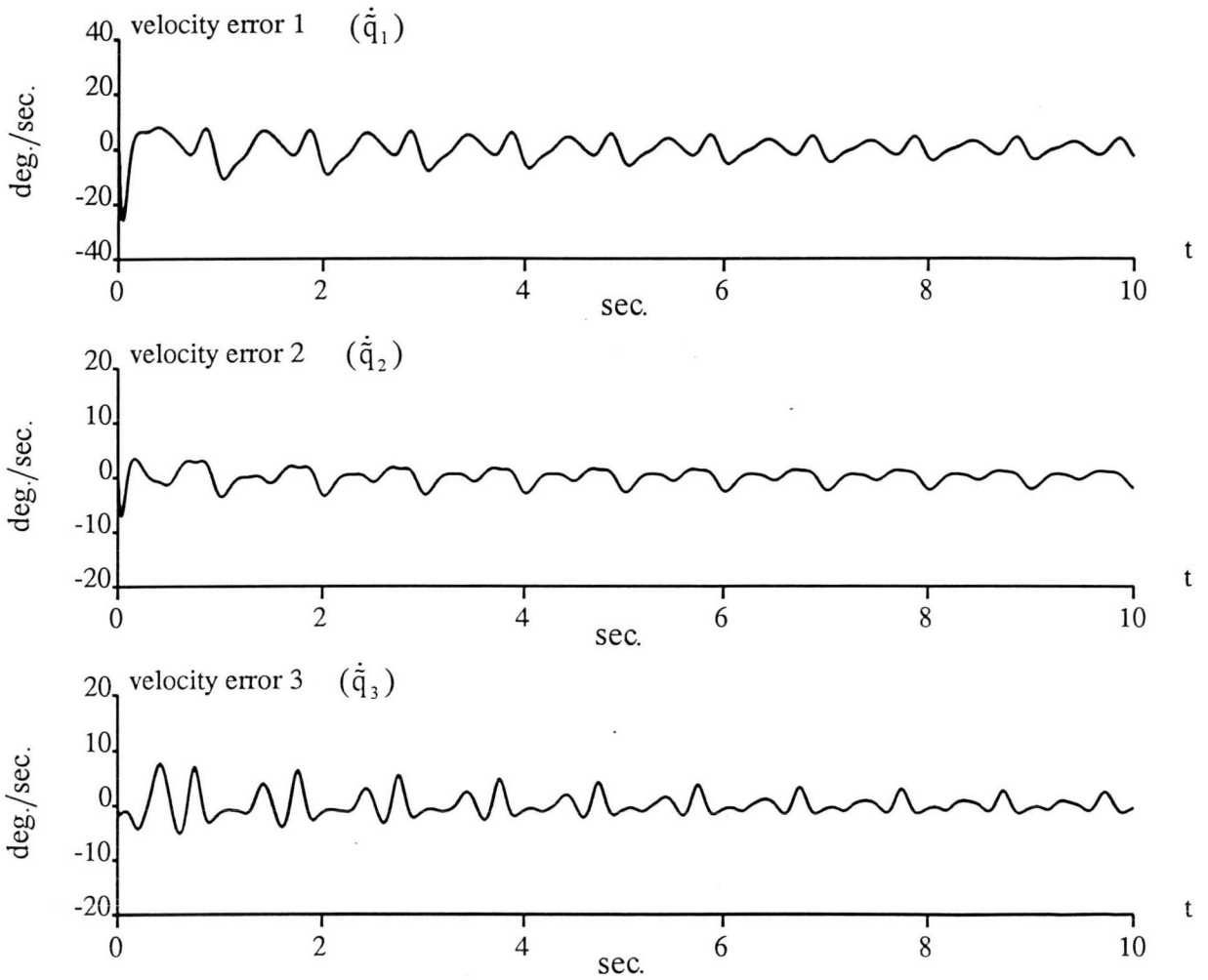
ภาพที่ 32 แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณี
ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง
และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง



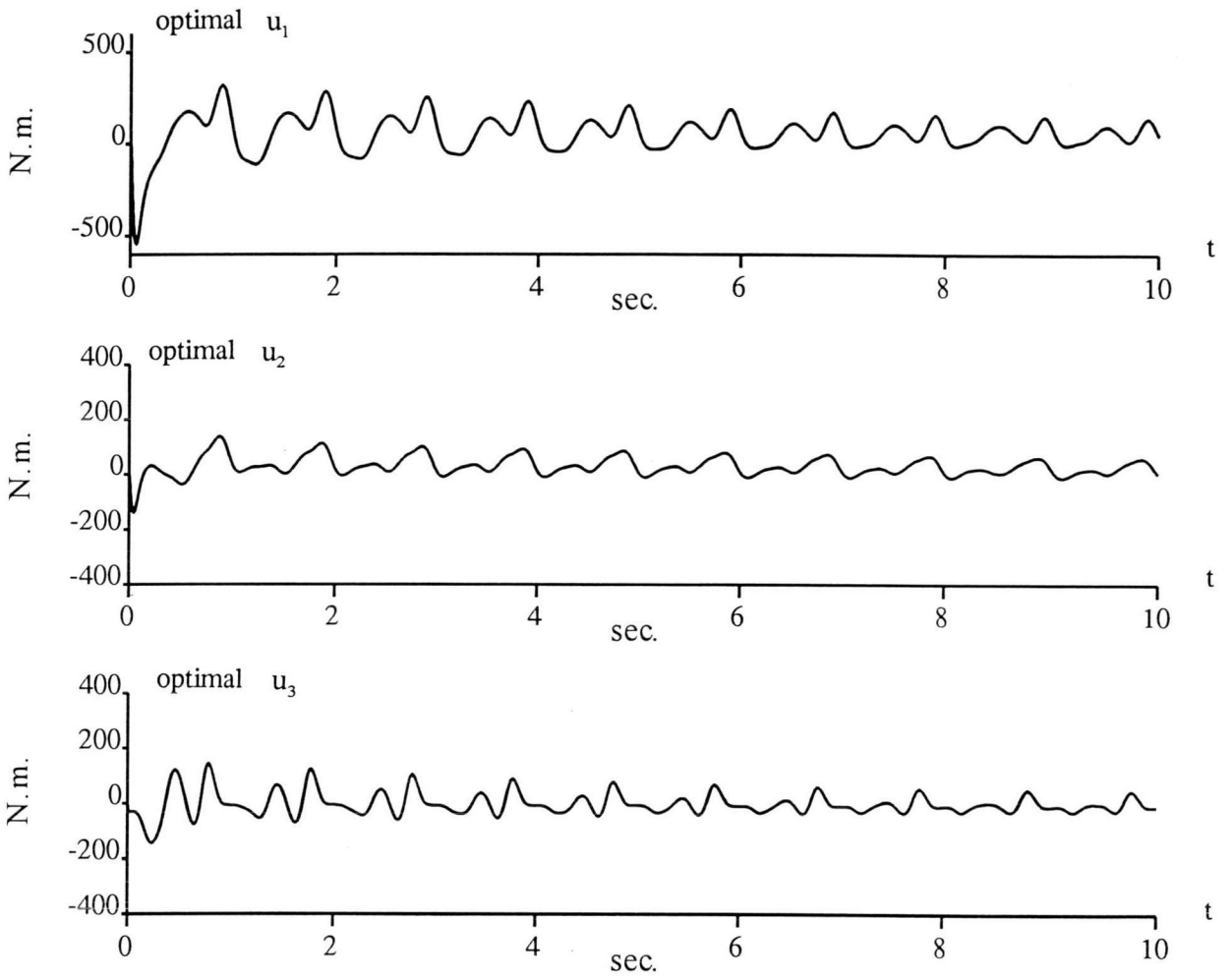
ภาพที่ 33 แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง
 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สาม



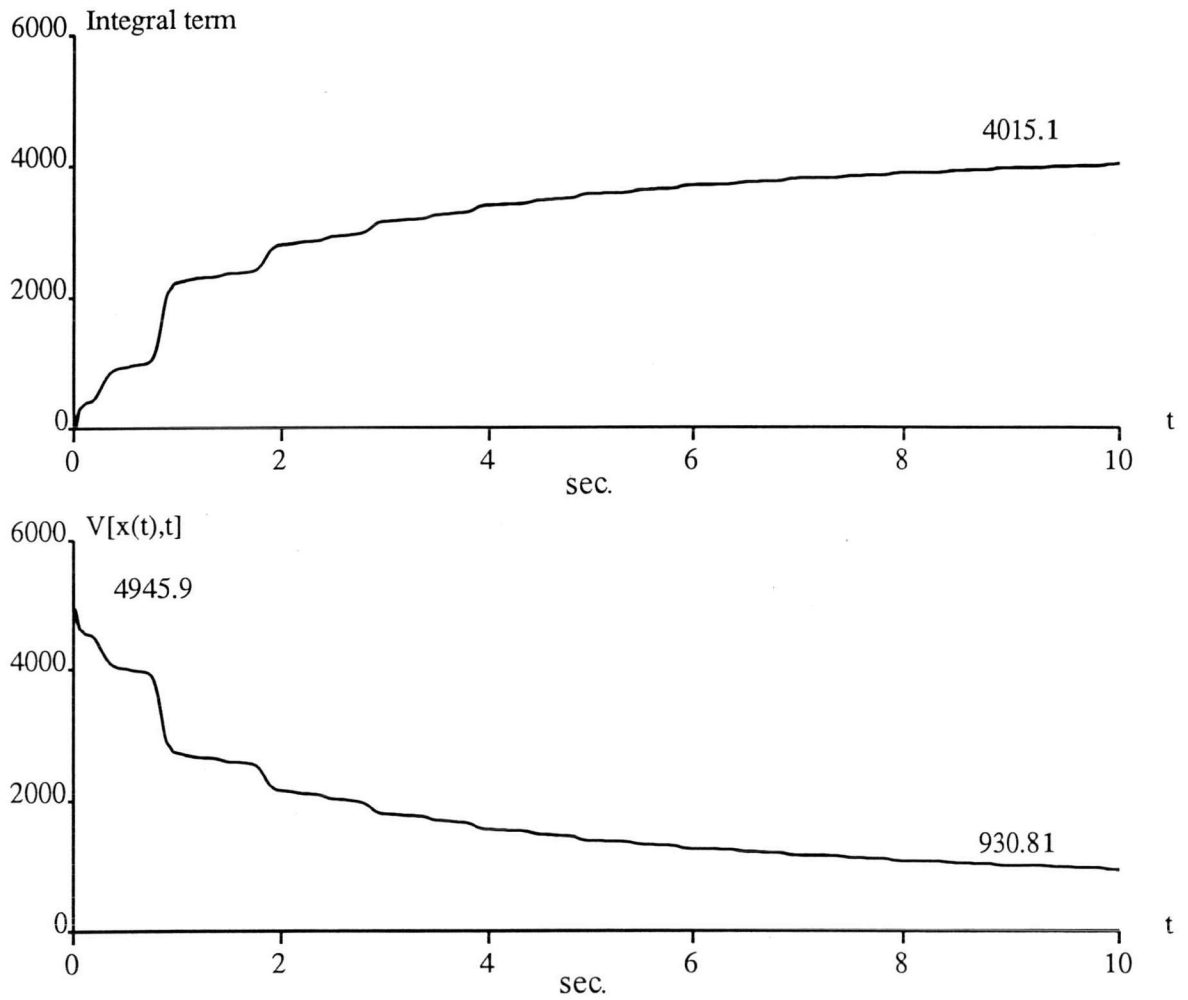
ภาพที่ 34 แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สาม



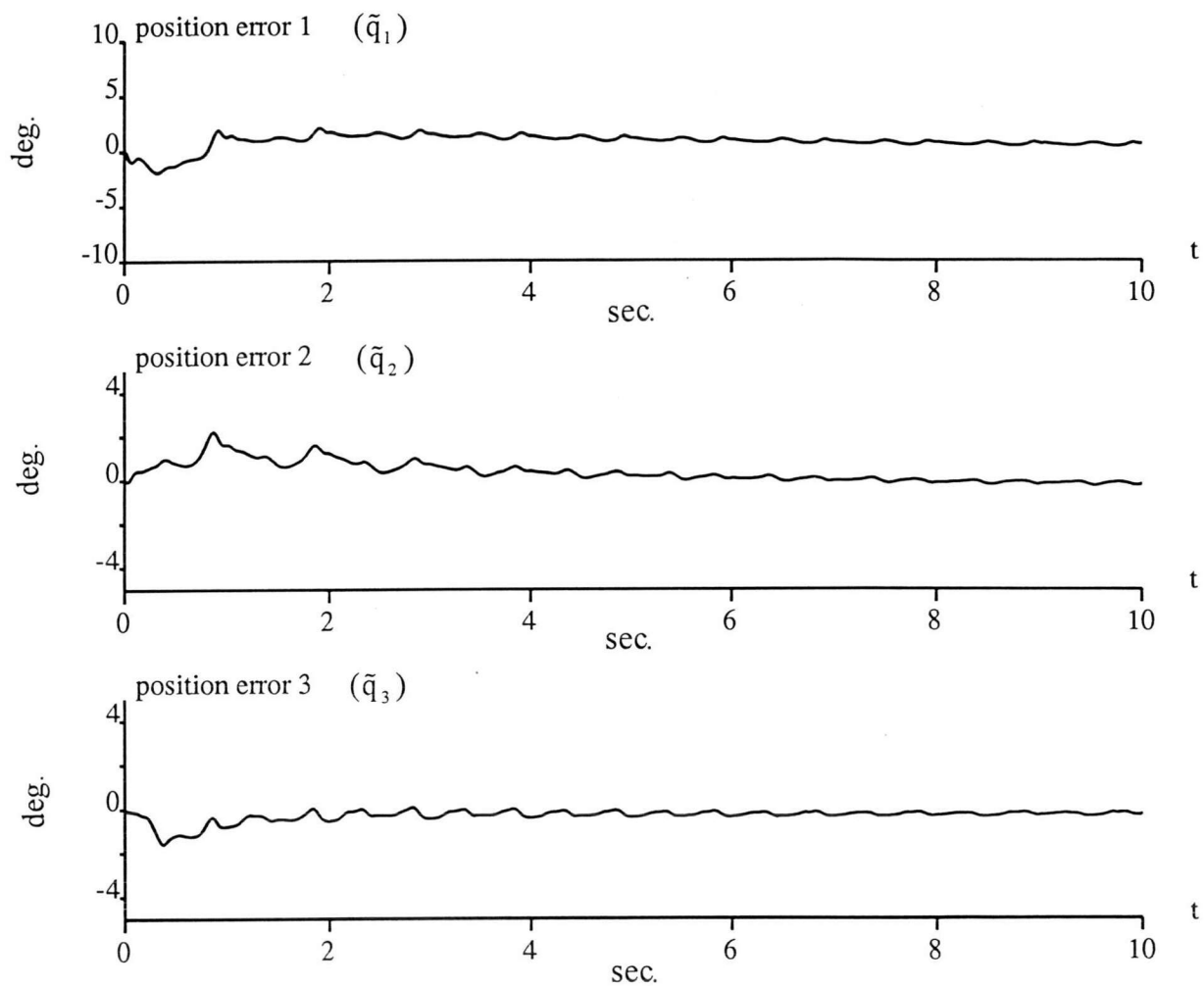
ภาพที่ 35 แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า
พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและ
พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สาม



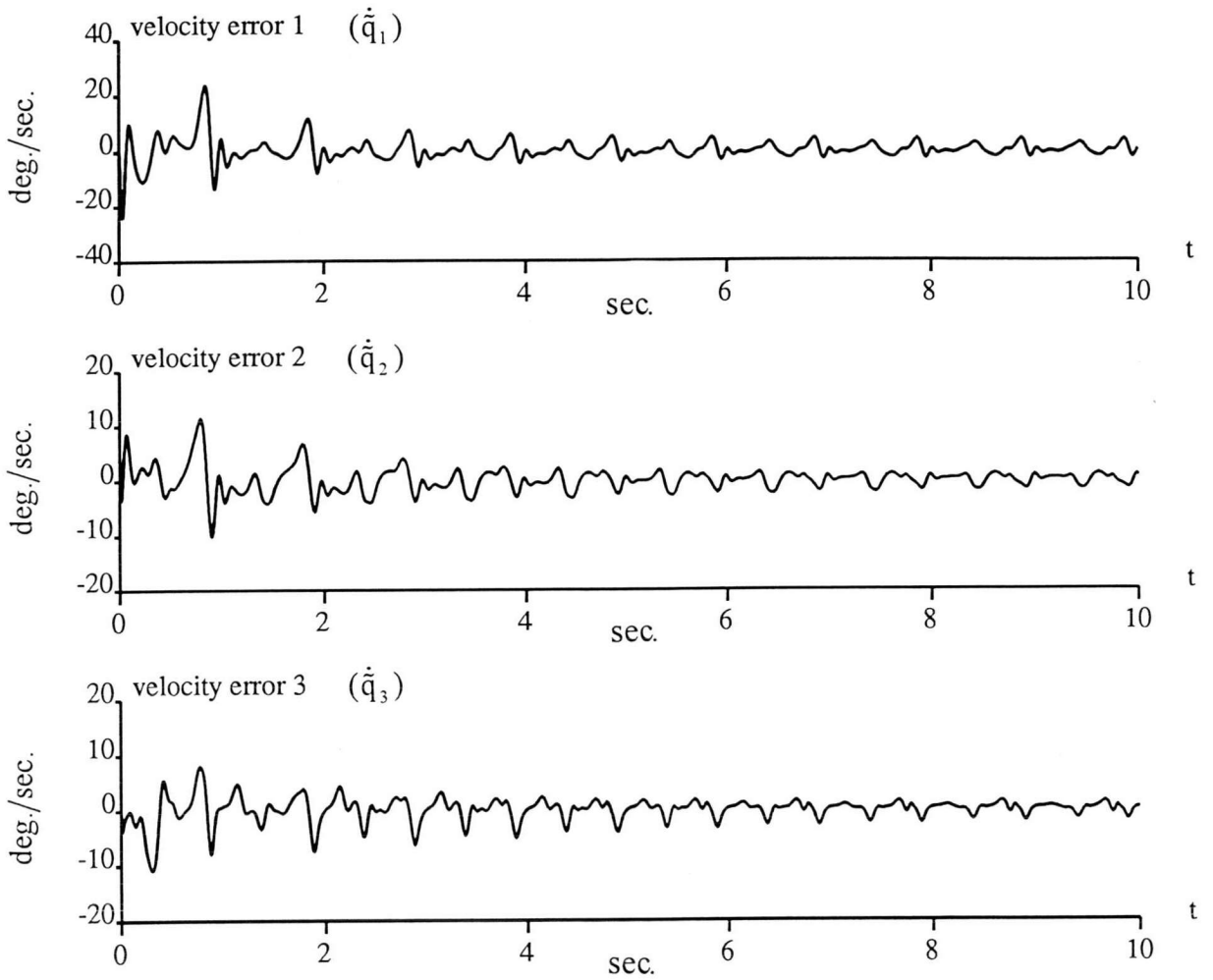
ภาพที่ 36 แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณี
ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง
และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สาม



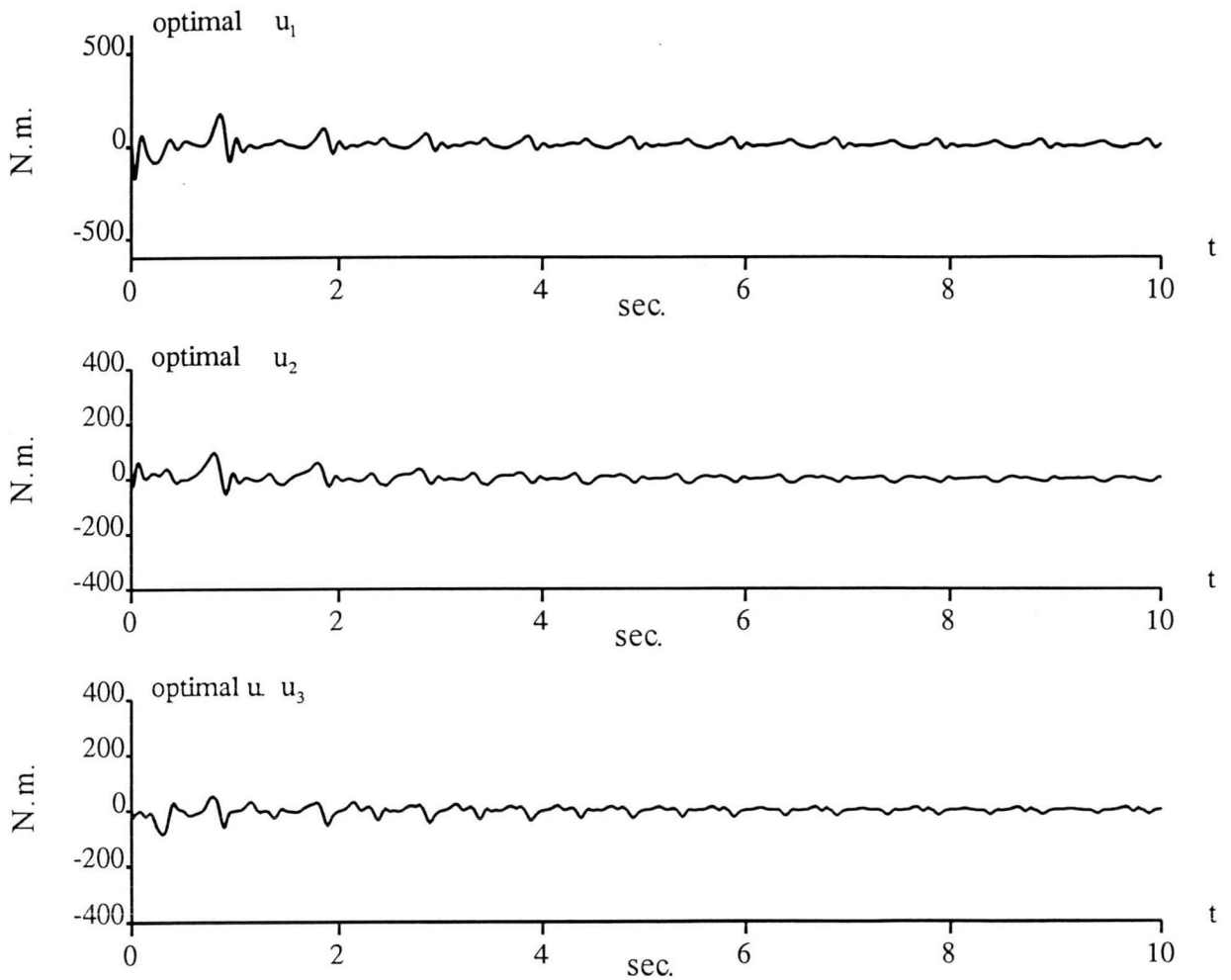
ภาพที่ 37 แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง
 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สี่



ภาพที่ 38 แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่ดี



ภาพที่ 39 แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า
พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้องและ
พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่ดี



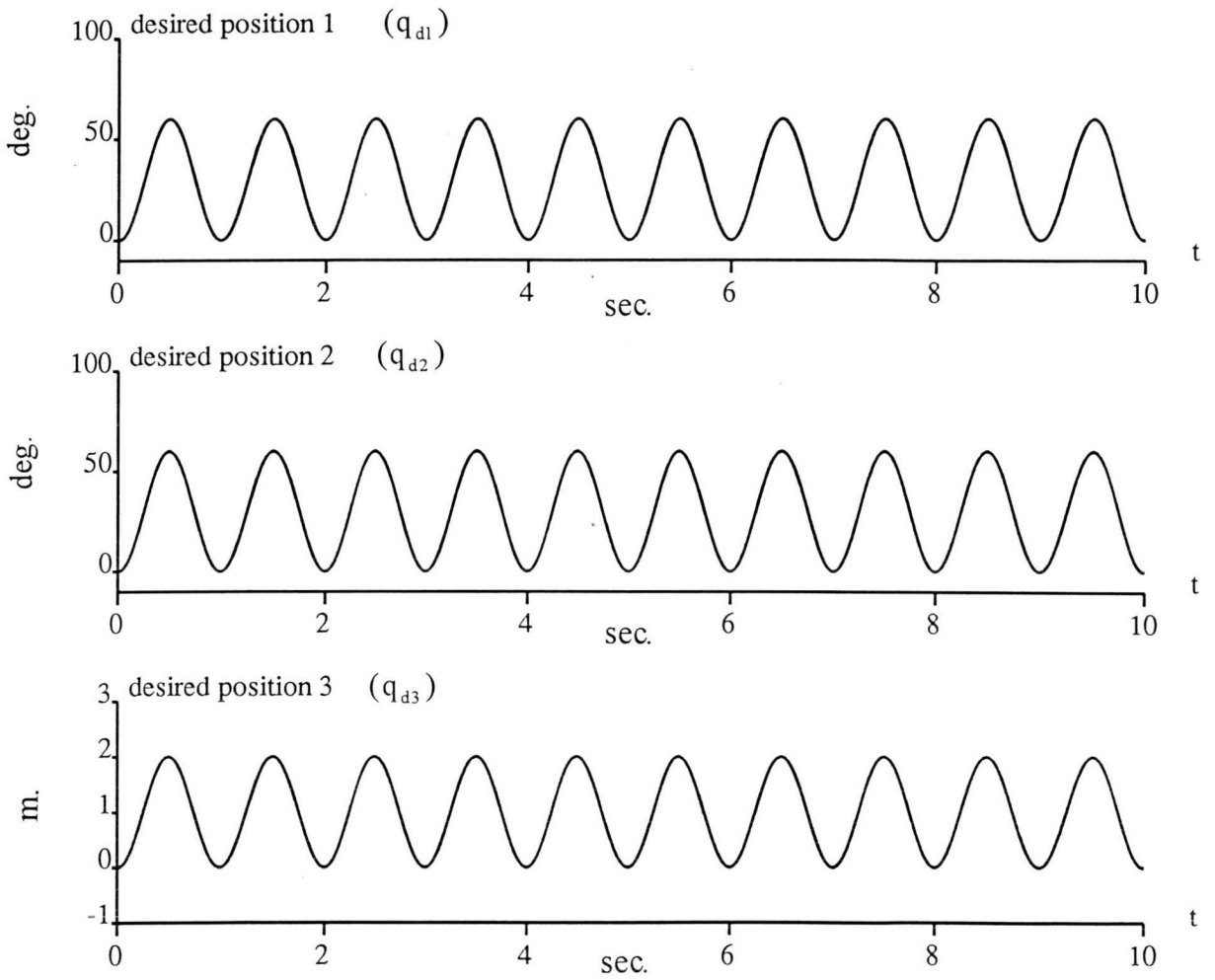
ภาพที่ 40 แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบข้อปล้อง
 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สี่

2. ระบบเป็นแขนหุ่นยนต์แบบสกาวา

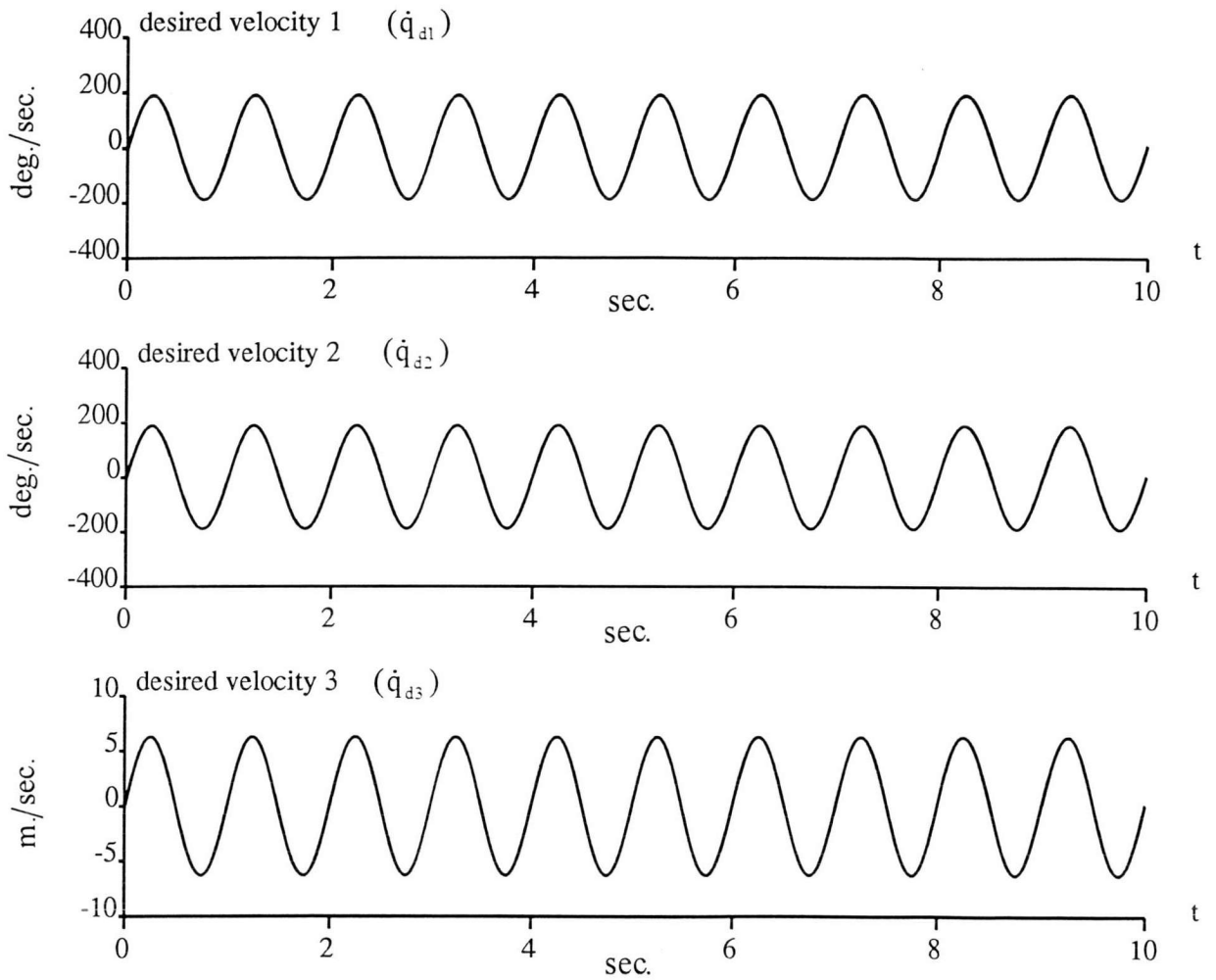
2.1 เส้นทางการเคลื่อนไหวที่ต้องการให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตาม ประกอบด้วยข้อมูลของตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของแต่ละข้อต่อ ที่เวลาต่าง ๆ

$$\begin{aligned}
 q_{d1} &= 30(1 - \cos 2\pi t) && \text{deg.} \\
 q_{d2} &= 30(1 - \cos 2\pi t) && \text{deg.} \\
 q_{d3} &= 1(1 - \cos 2\pi t) && \text{m.} \\
 \dot{q}_{d1} &= (30 * 2\pi) \sin(2\pi t) && \text{deg./sec.} \\
 \dot{q}_{d2} &= (30 * 2\pi) \sin(2\pi t) && \text{deg./sec.} \\
 \dot{q}_{d3} &= (1 * 2\pi) \sin(2\pi t) && \text{m./sec.} \\
 \ddot{q}_{d1} &= (30 * 2\pi * 2\pi) \cos(2\pi t) && \text{deg./sec.}^2 \\
 \ddot{q}_{d2} &= (30 * 2\pi * 2\pi) \cos(2\pi t) && \text{deg./sec.}^2 \\
 \ddot{q}_{d3} &= (1 * 2\pi * 2\pi) \cos(2\pi t) && \text{m./sec.}^2
 \end{aligned}$$

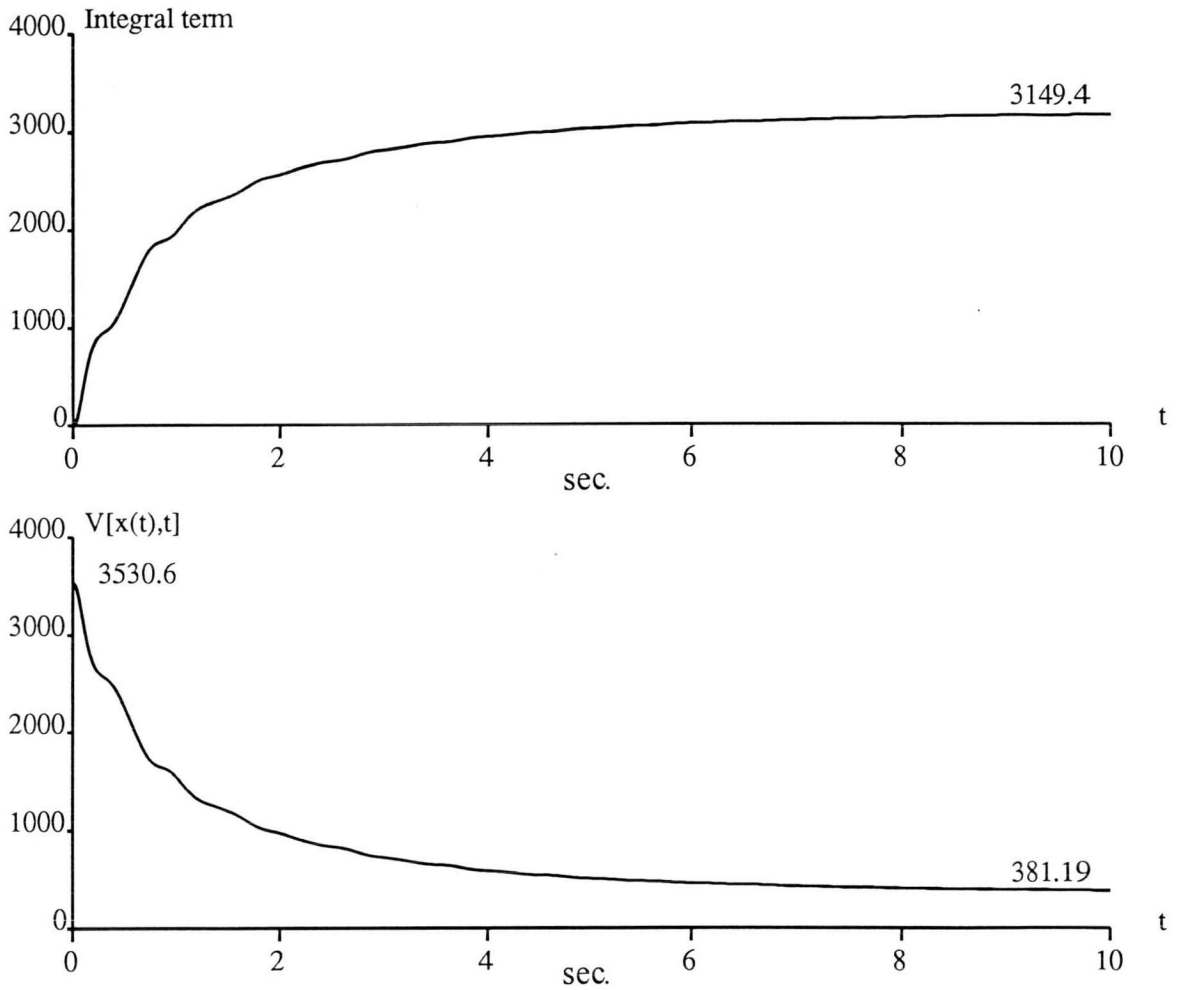
2.2 ภาพแสดงผลการจำลองการทำงาน



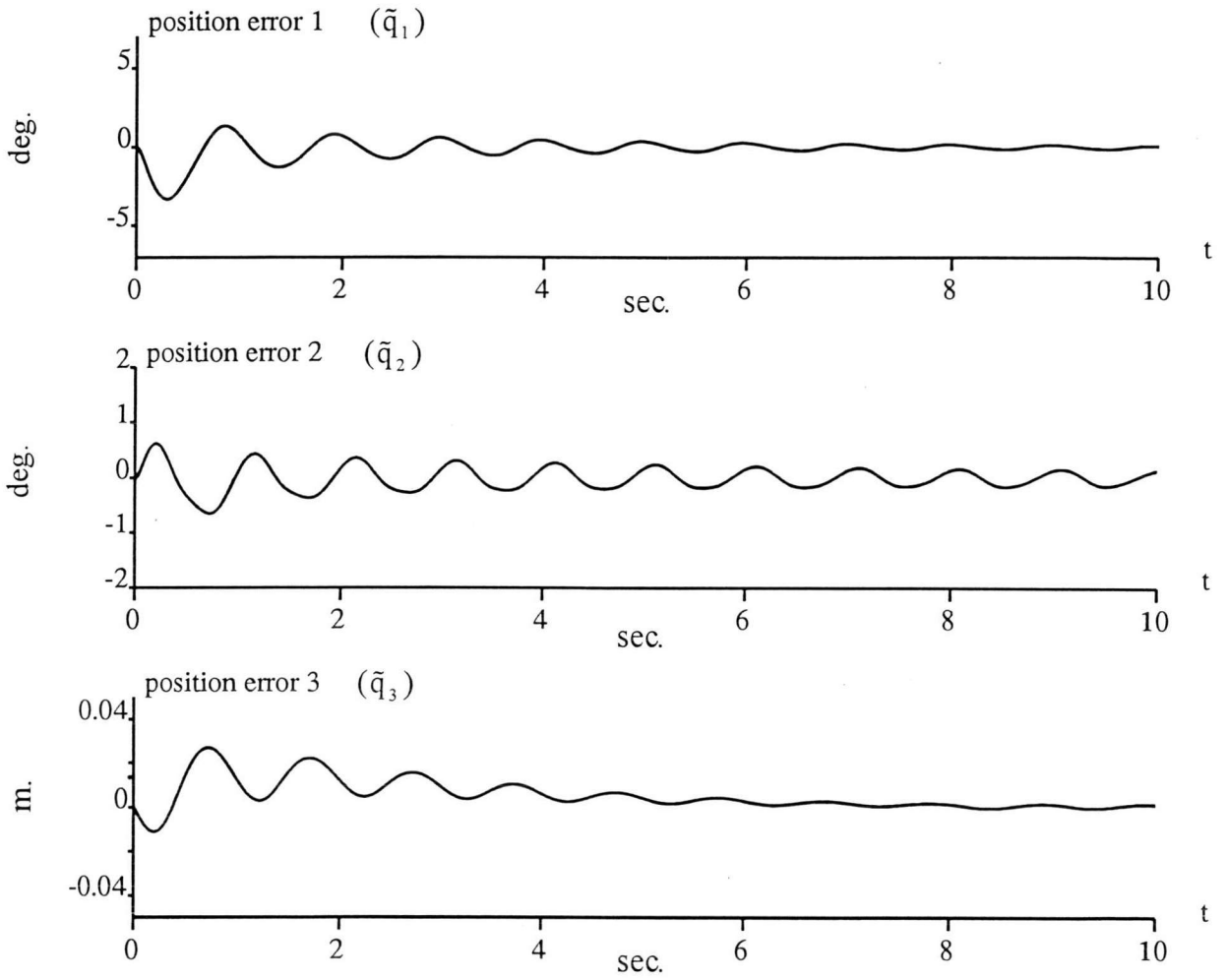
ภาพที่ 41 แสดงตำแหน่งที่ต้องการให้แต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์แบบสกราคเคลื่อนที่ติดตาม



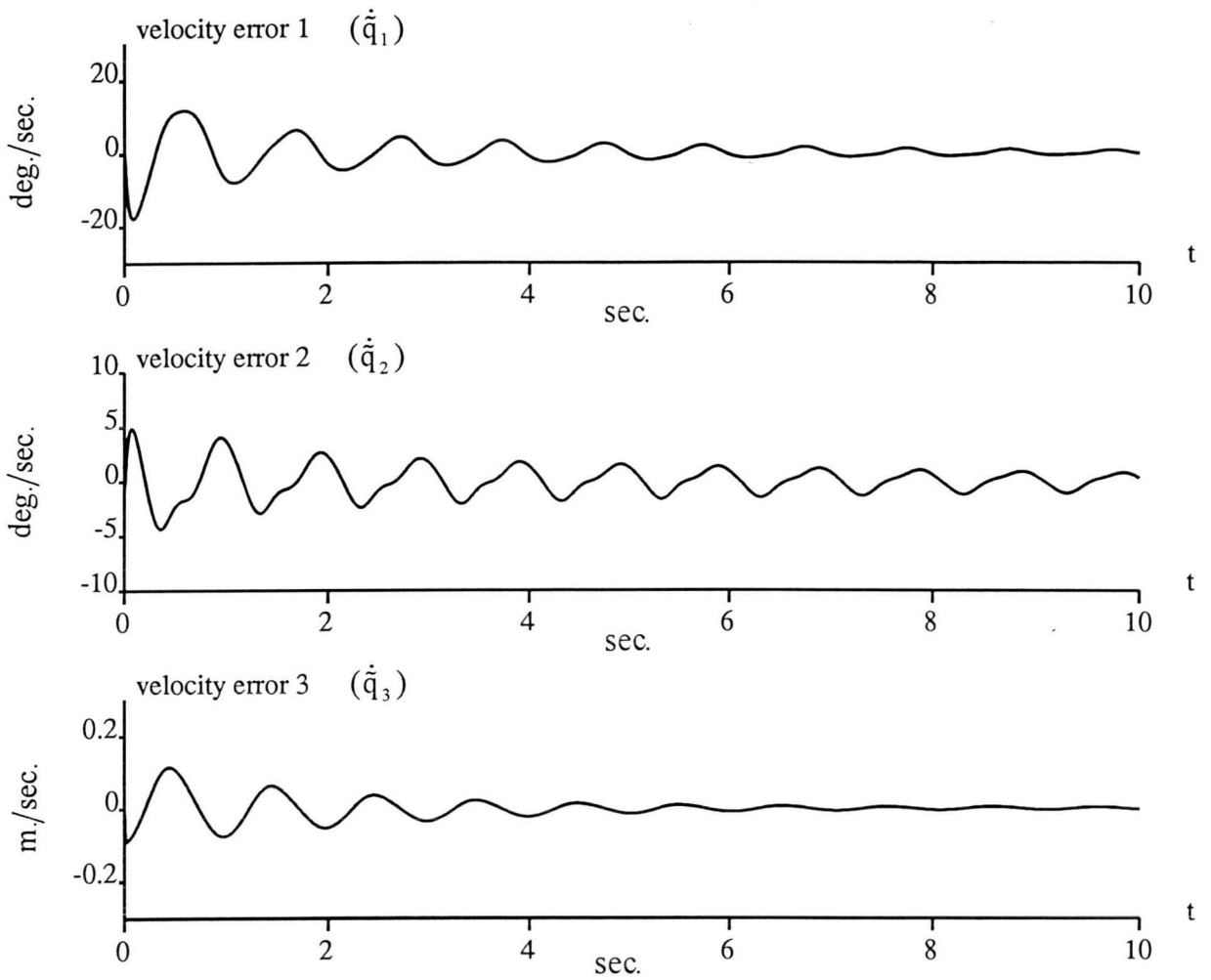
ภาพที่ 42 แสดงความเร็วที่ต้องการให้แต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์แบบสกรูเคลื่อนที่ติดตาม



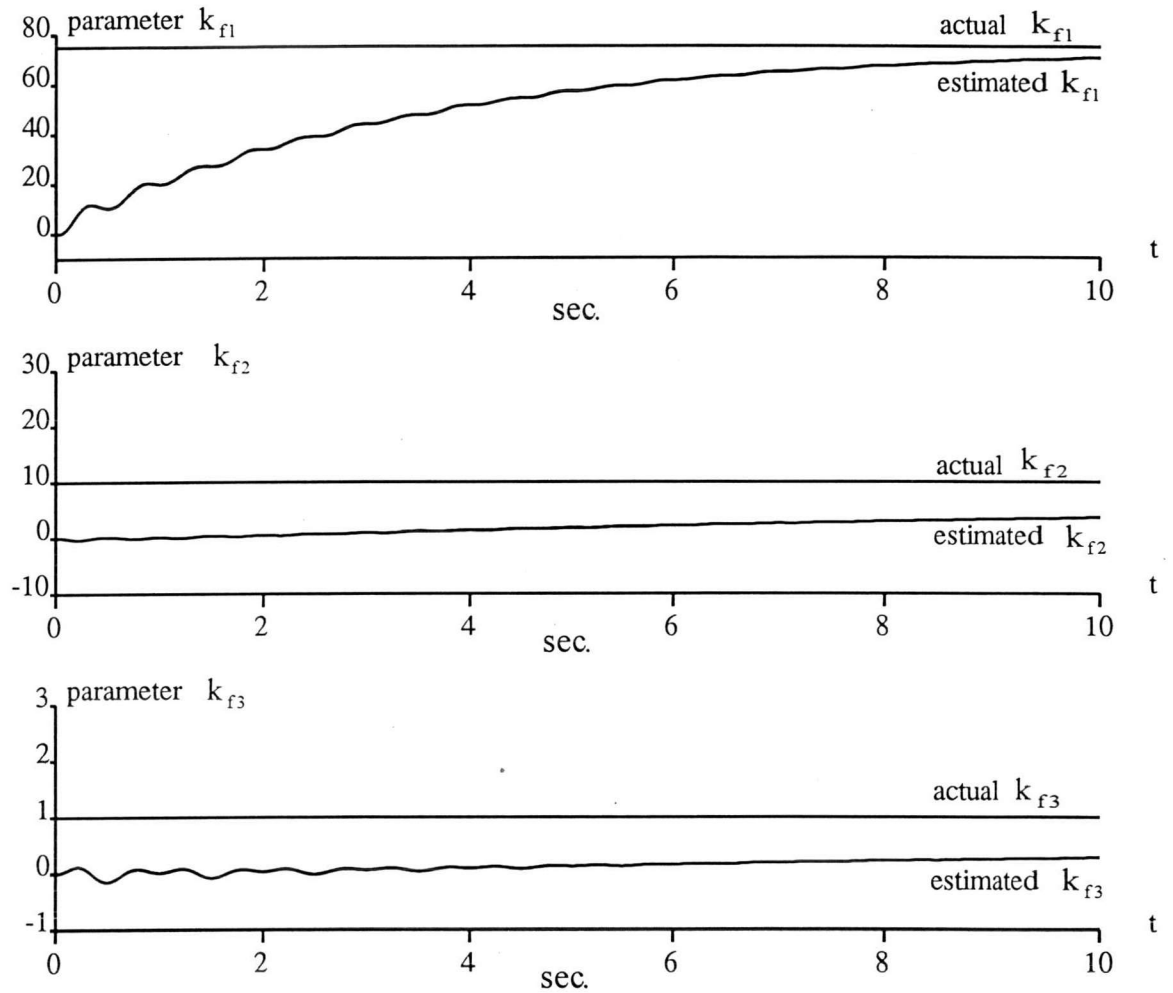
ภาพที่ 43 แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสกราวา
 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง



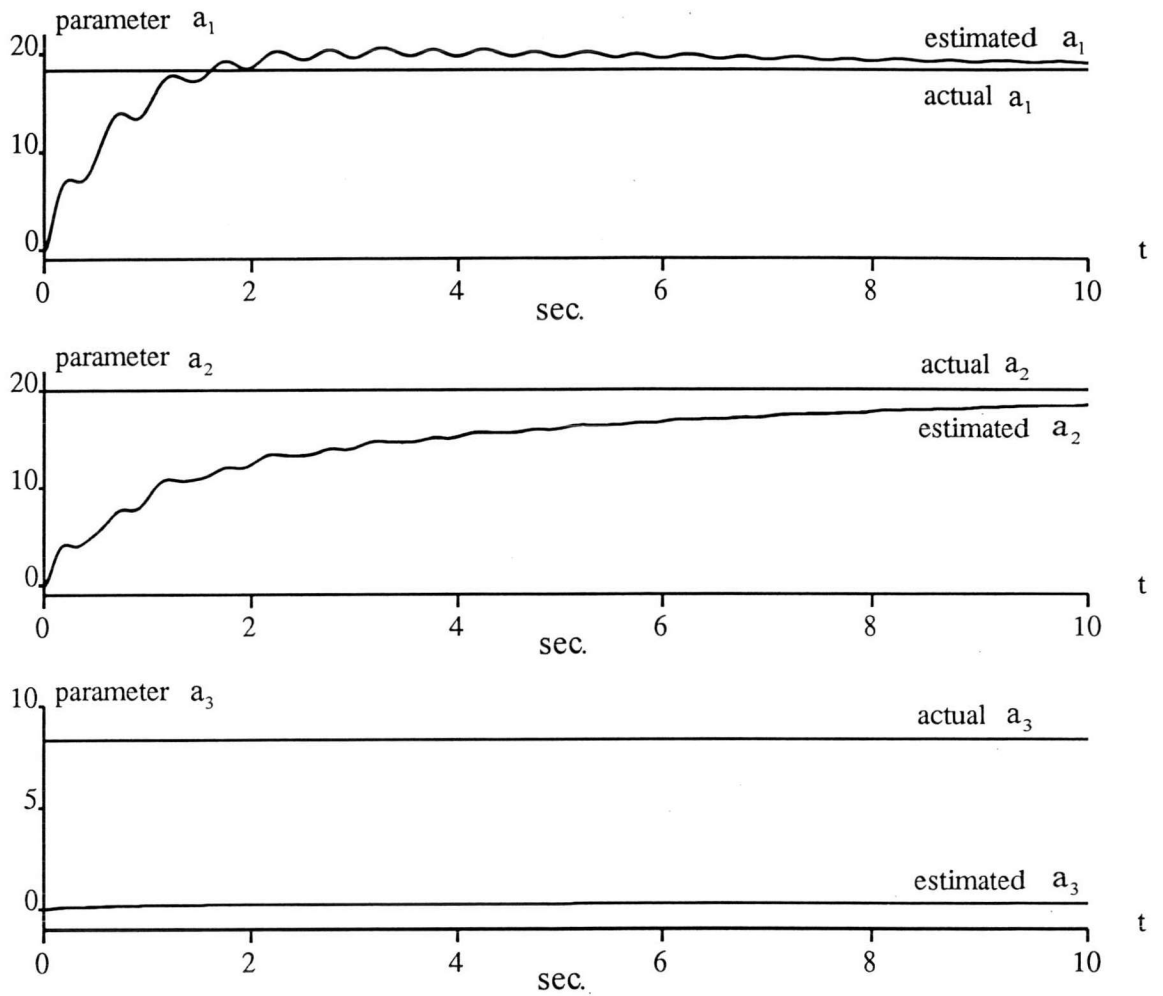
ภาพที่ 44 แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสกราราและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง



ภาพที่ 45 แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสการาและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง



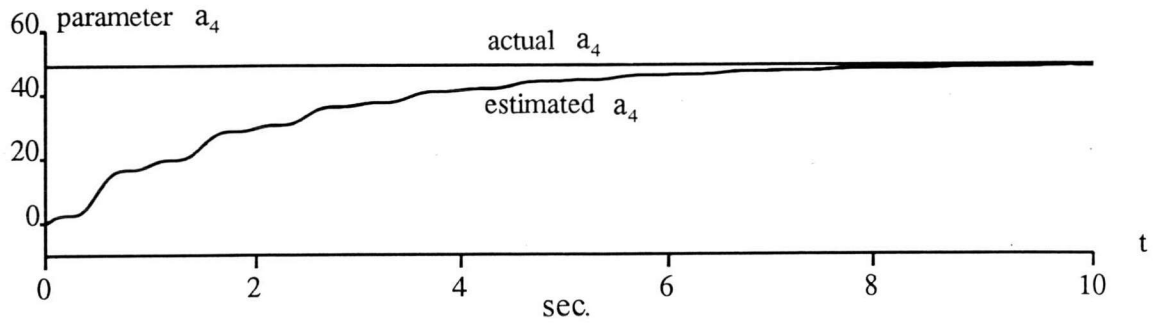
ภาพที่ 46 แสดงค่าจริงและค่าประมาณของพารามิเตอร์ k_{f1} , k_{f2} และ k_{f3} ในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสกราราและ
 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง



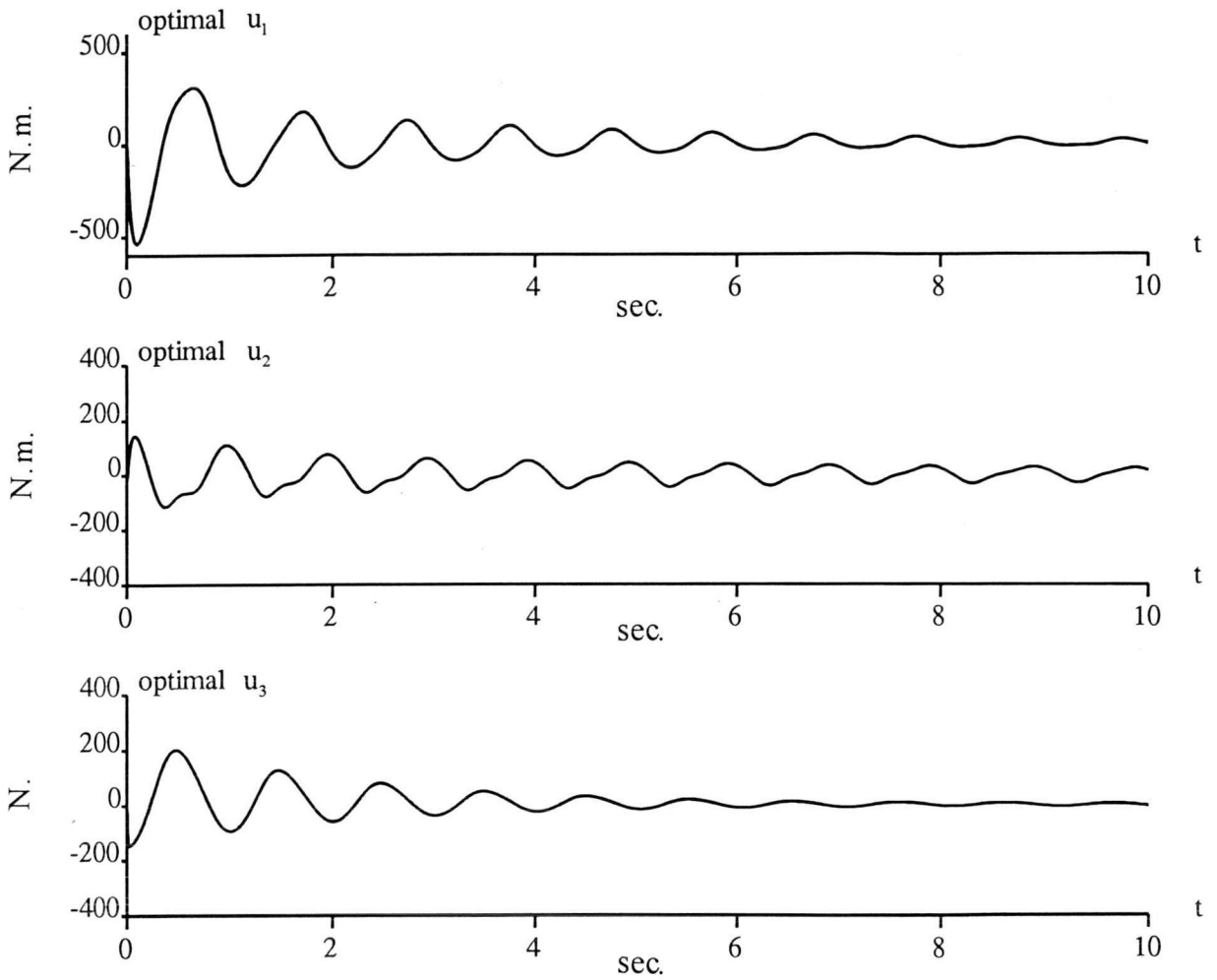
ภาพที่ 47 แสดงค่าจริงและค่าประมาณของพารามิเตอร์ a_1 , a_2 และ a_3 ในกรณี

ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสกราราและ

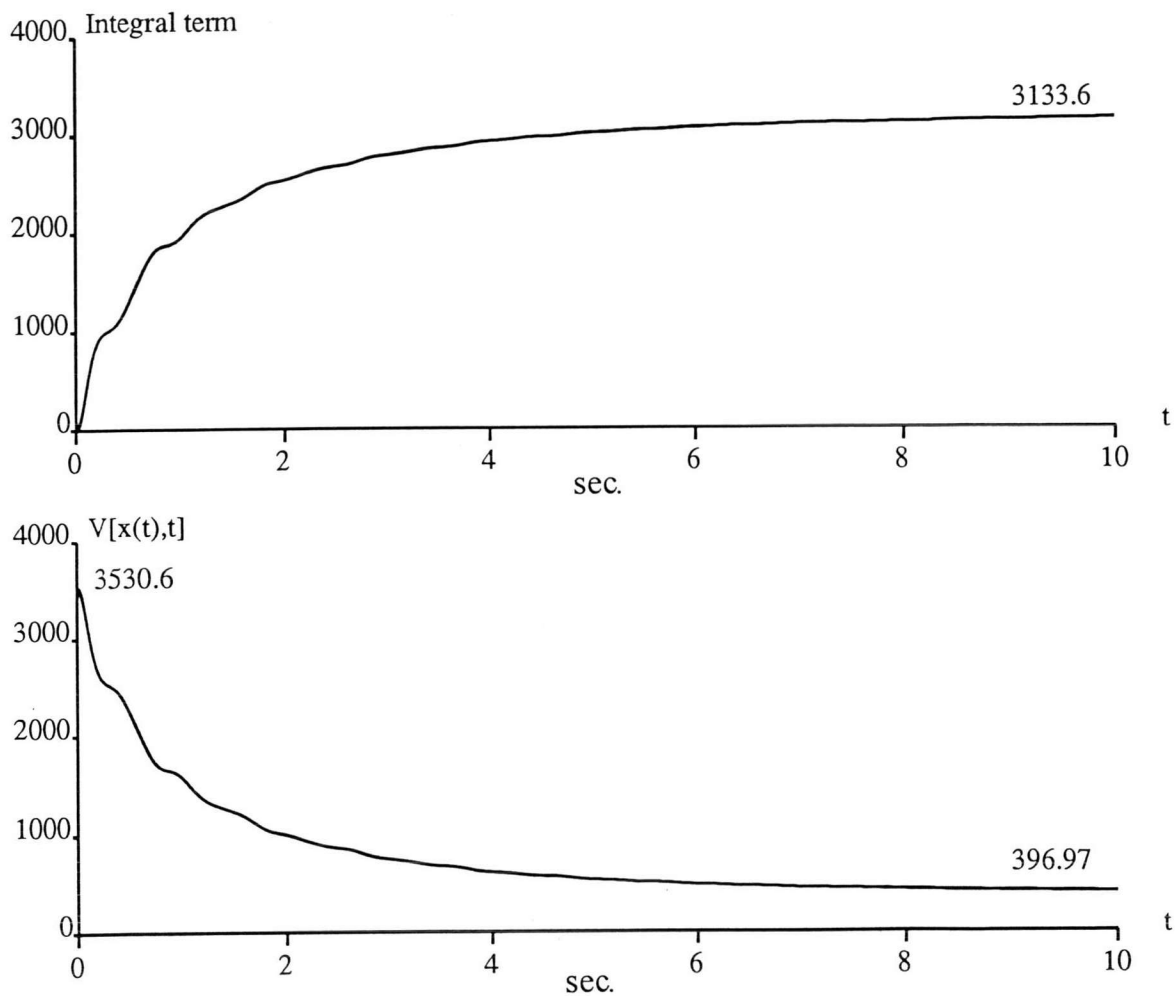
พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง



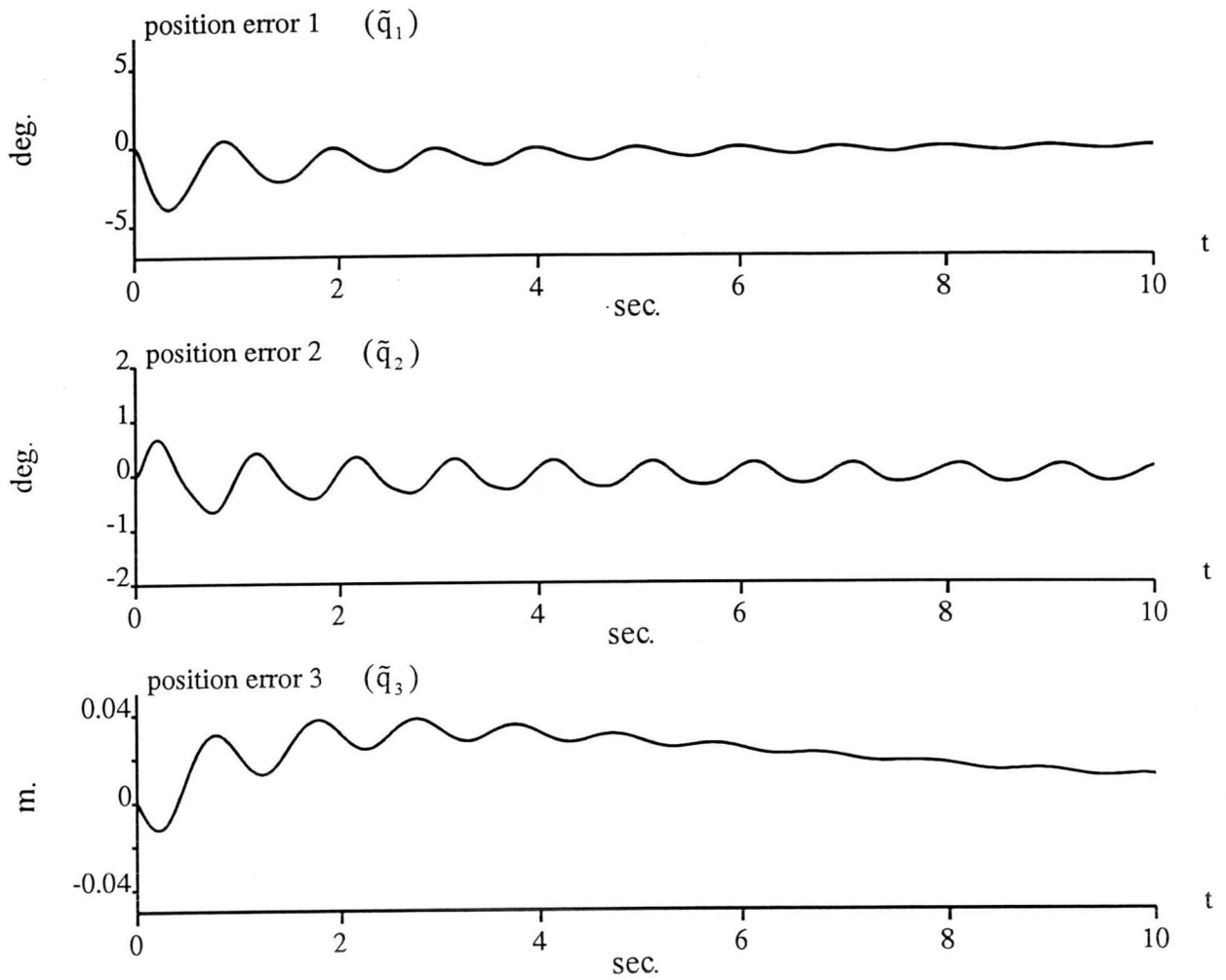
ภาพที่ 48 แสดงค่าจริงและค่าประมาณของพารามิเตอร์ a_4 ในกรณีตัวควบคุม
 ไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสกราราและ
 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง



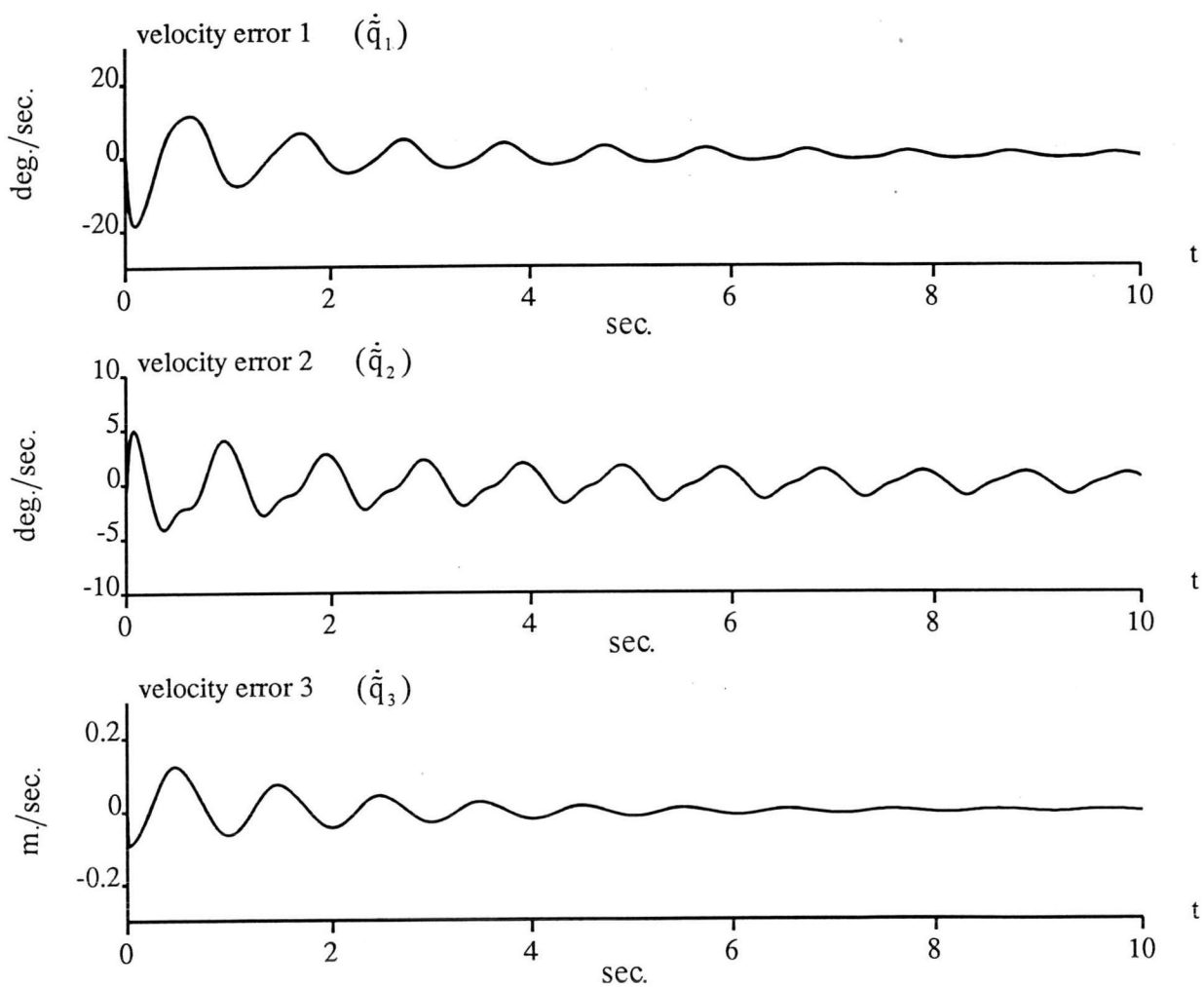
ภาพที่ 49 แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสการา
 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง



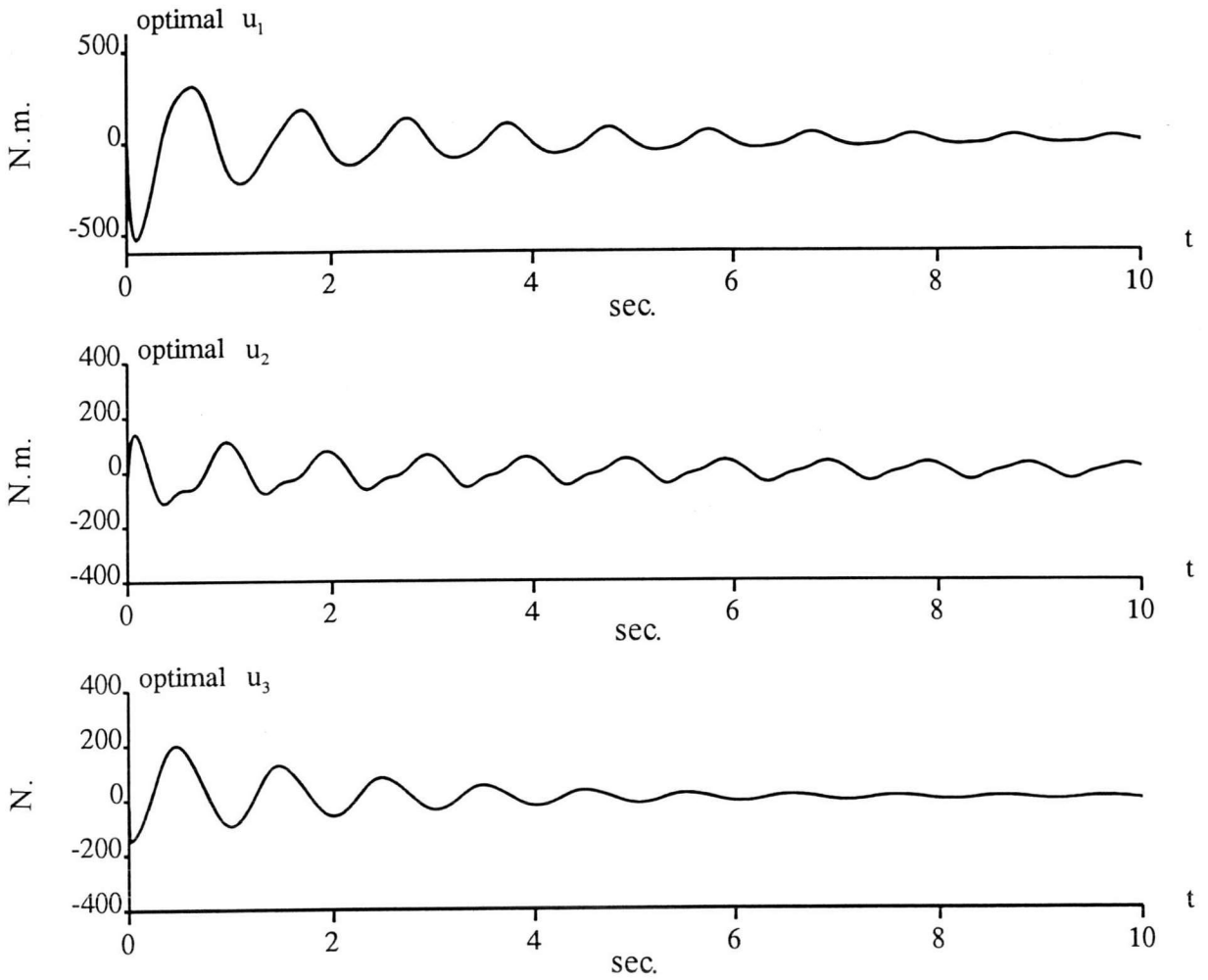
ภาพที่ 50 แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแอมัลทันในกรณี
ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสกราว
และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง



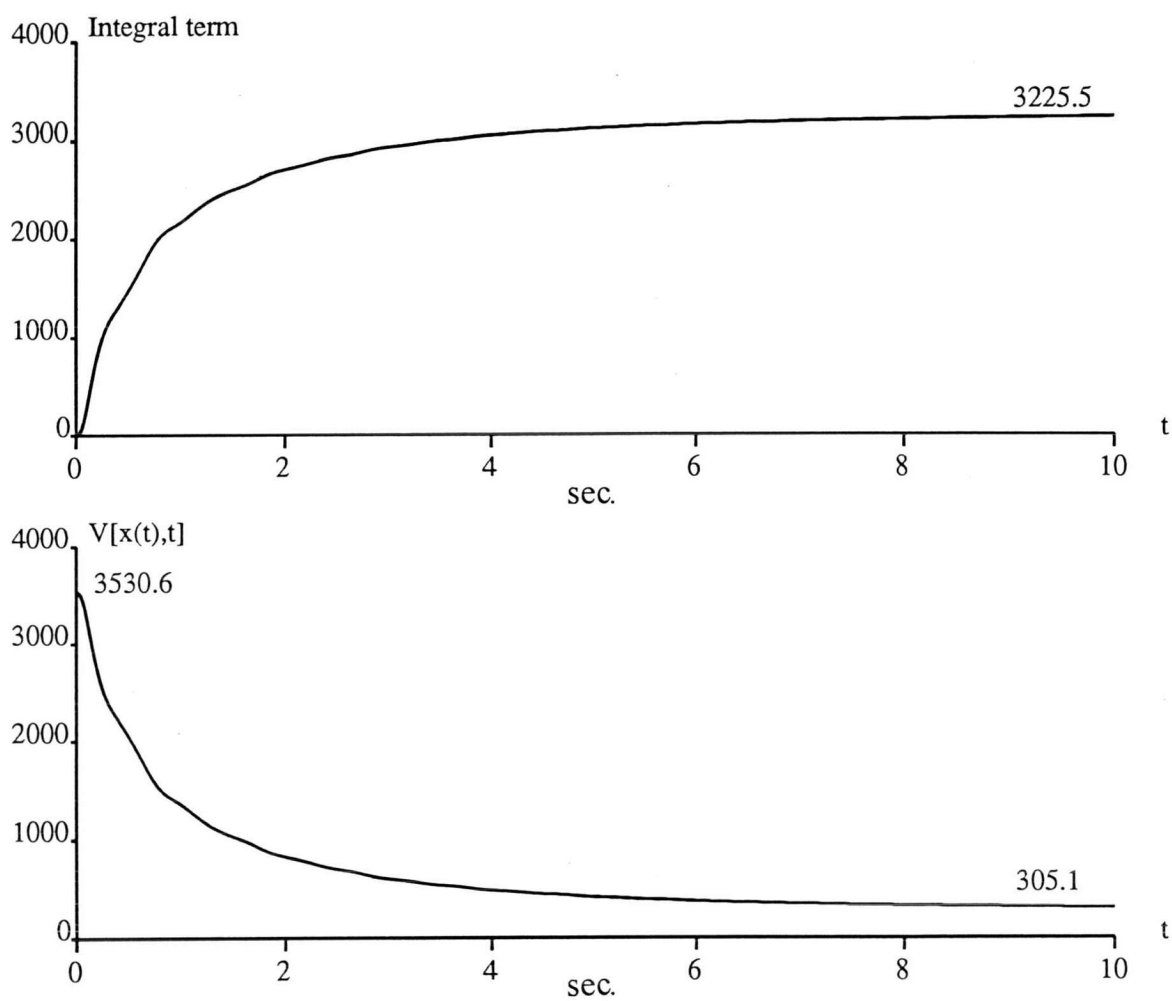
ภาพที่ 51 แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสการาและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง



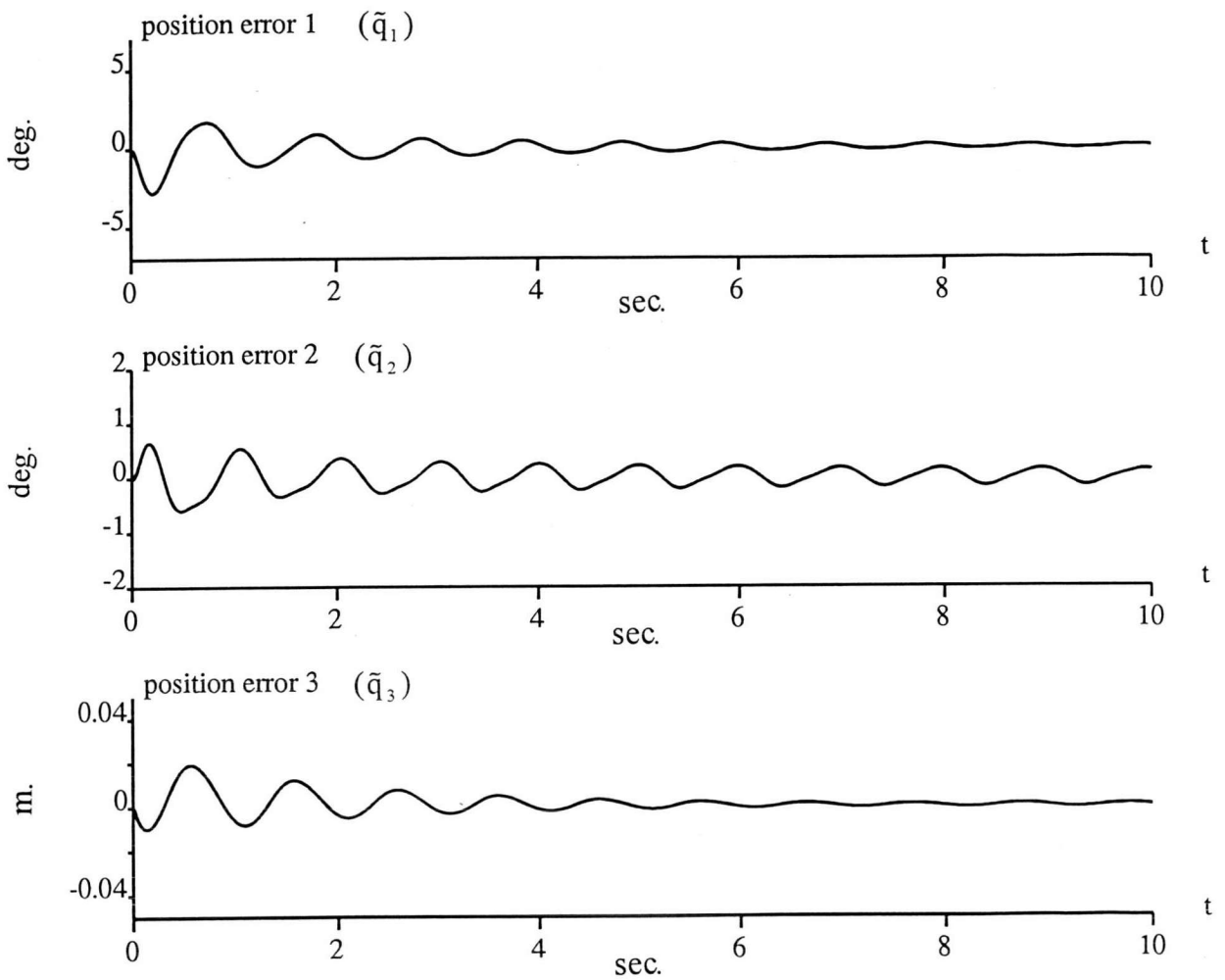
ภาพที่ 52 แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า
พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสกราราและ
พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง



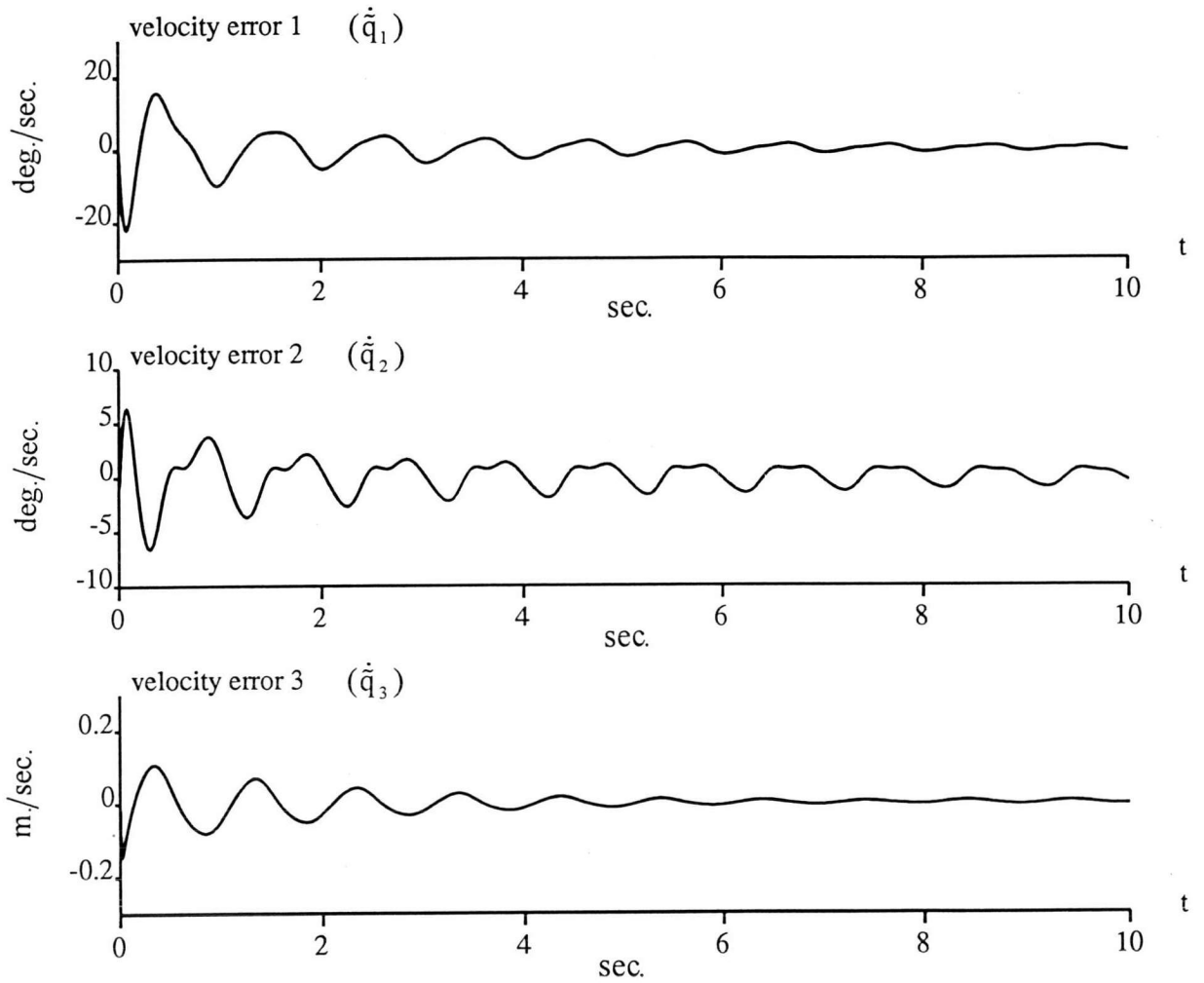
ภาพที่ 53 แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสกราว
 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง



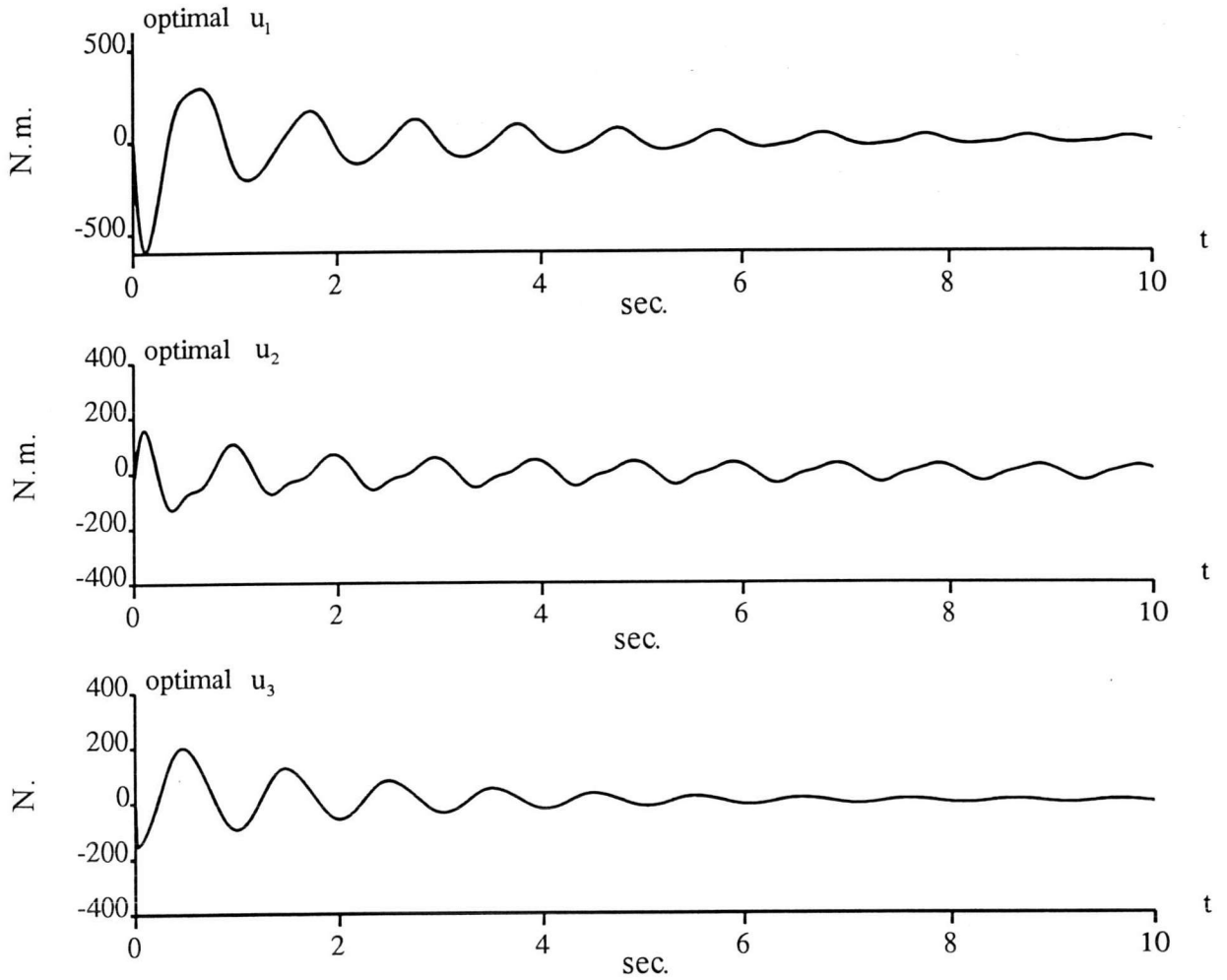
ภาพที่ 54 แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสกราว
 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สาม



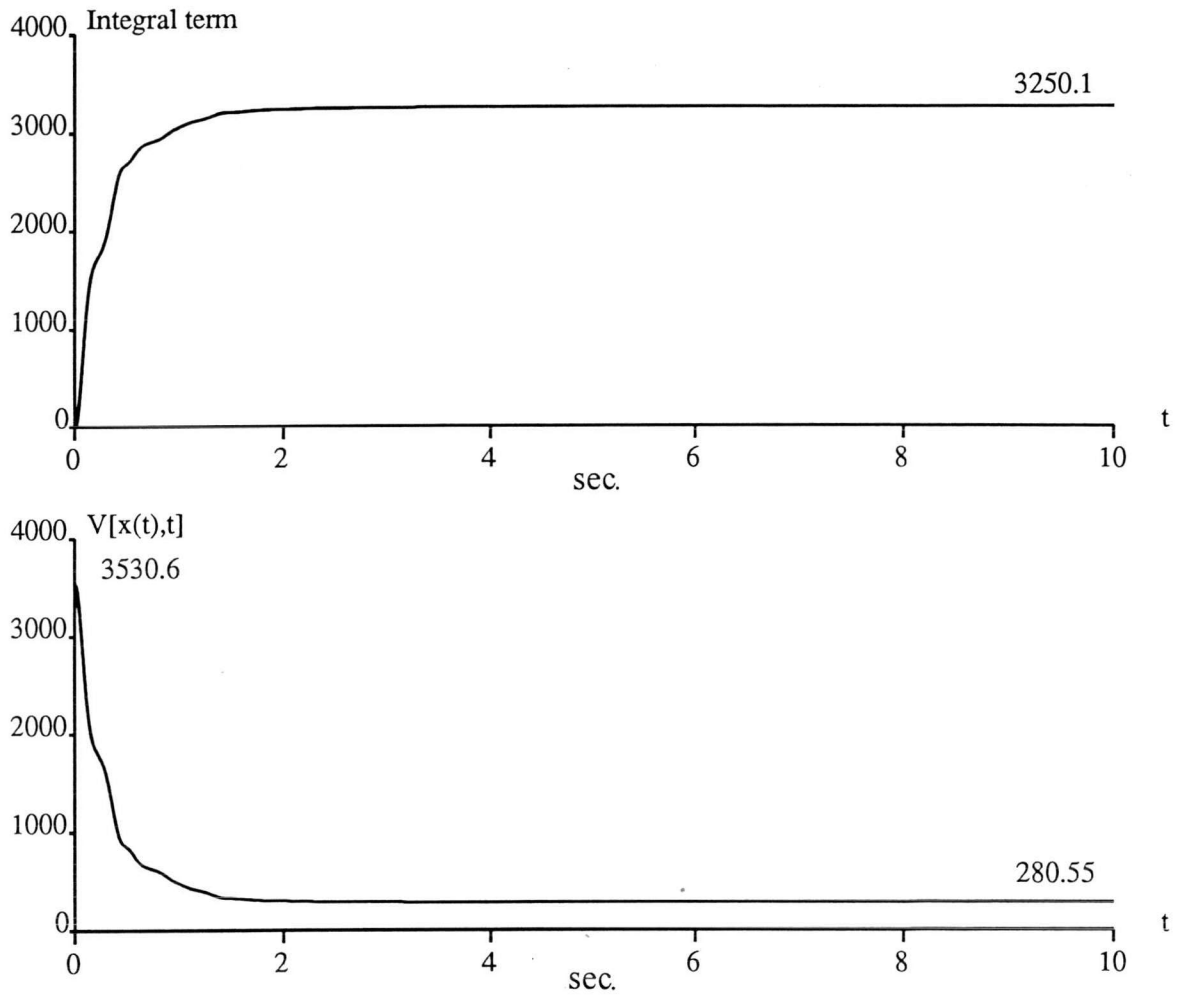
ภาพที่ 55 แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า
 พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสกราราและ
 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สาม



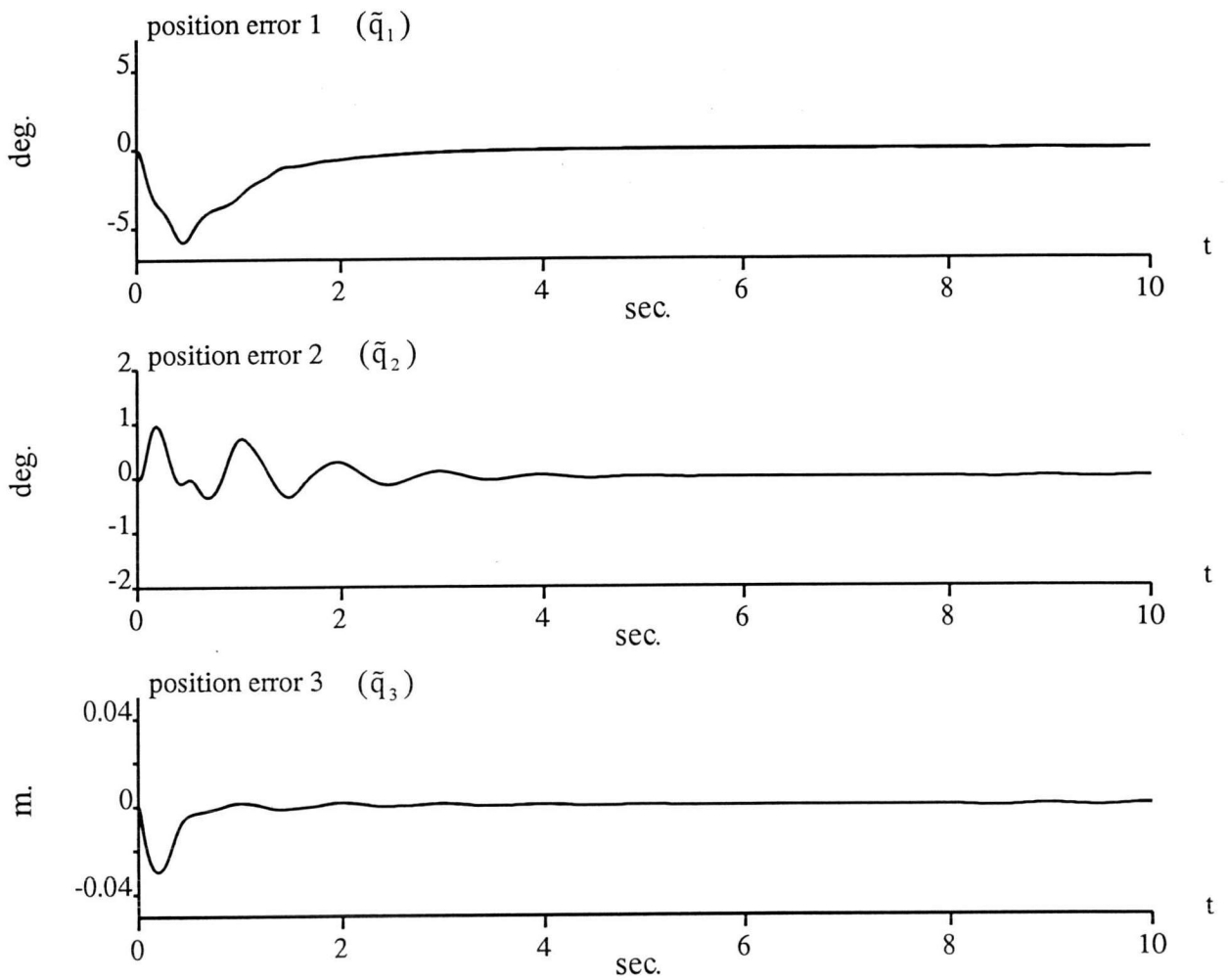
ภาพที่ 56 แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า
พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสกாரาและ
พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สาม



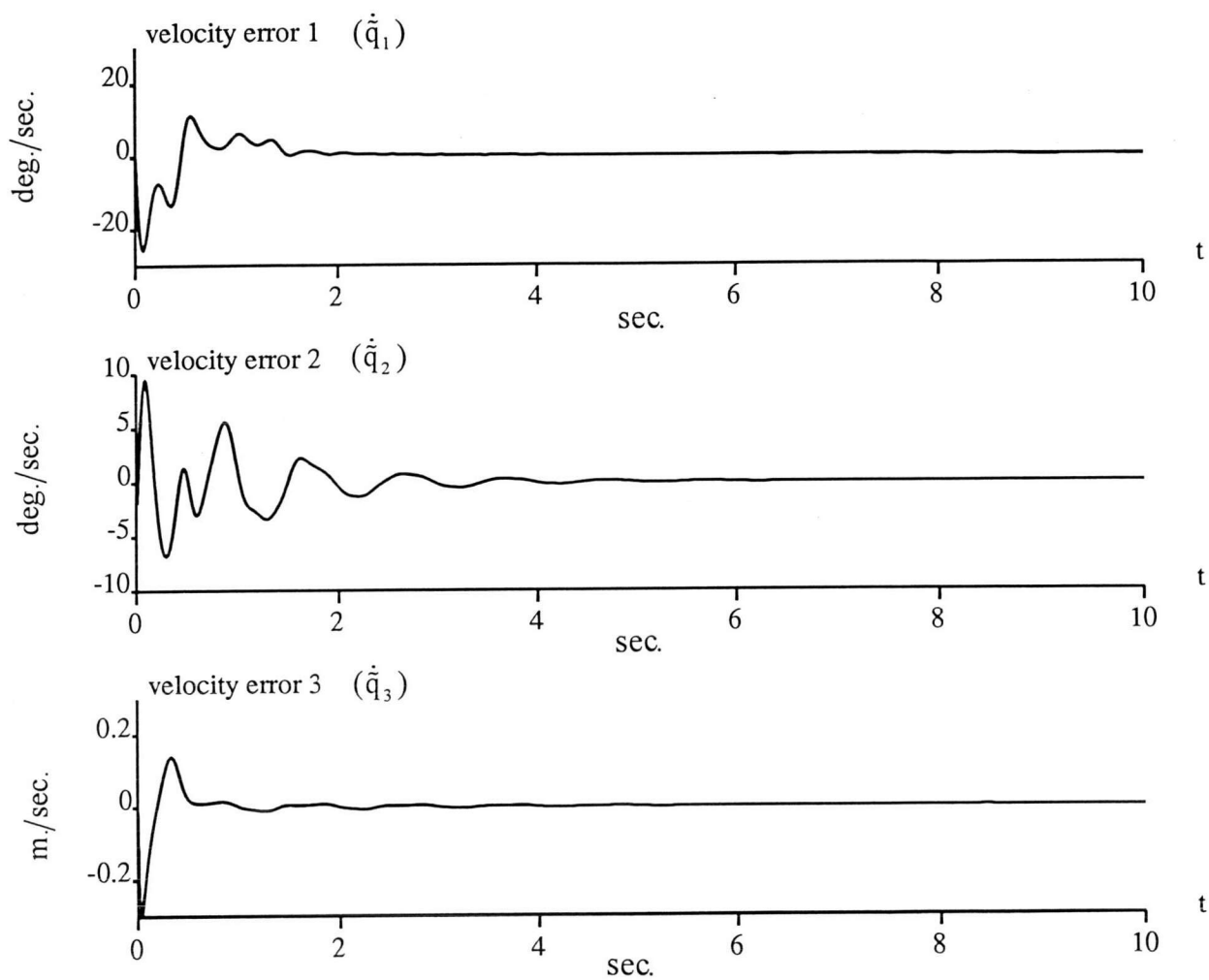
ภาพที่ 57 แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสกรู
 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สาม



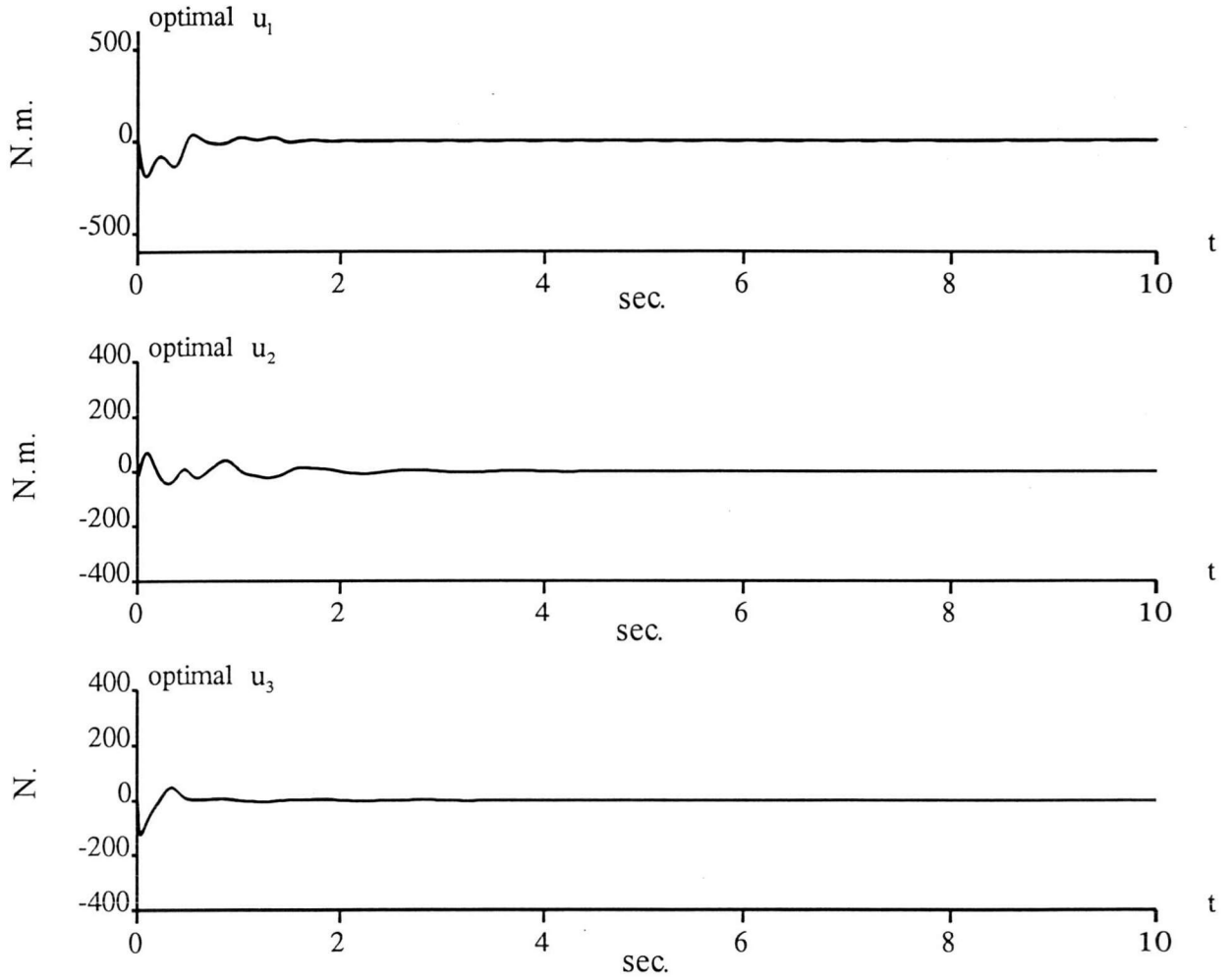
ภาพที่ 58 แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสการา
 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สี่



ภาพที่ 59 แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า
 พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสกราราและ
 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สี่



ภาพที่ 60 แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า
พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสกราราและ
พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สี่



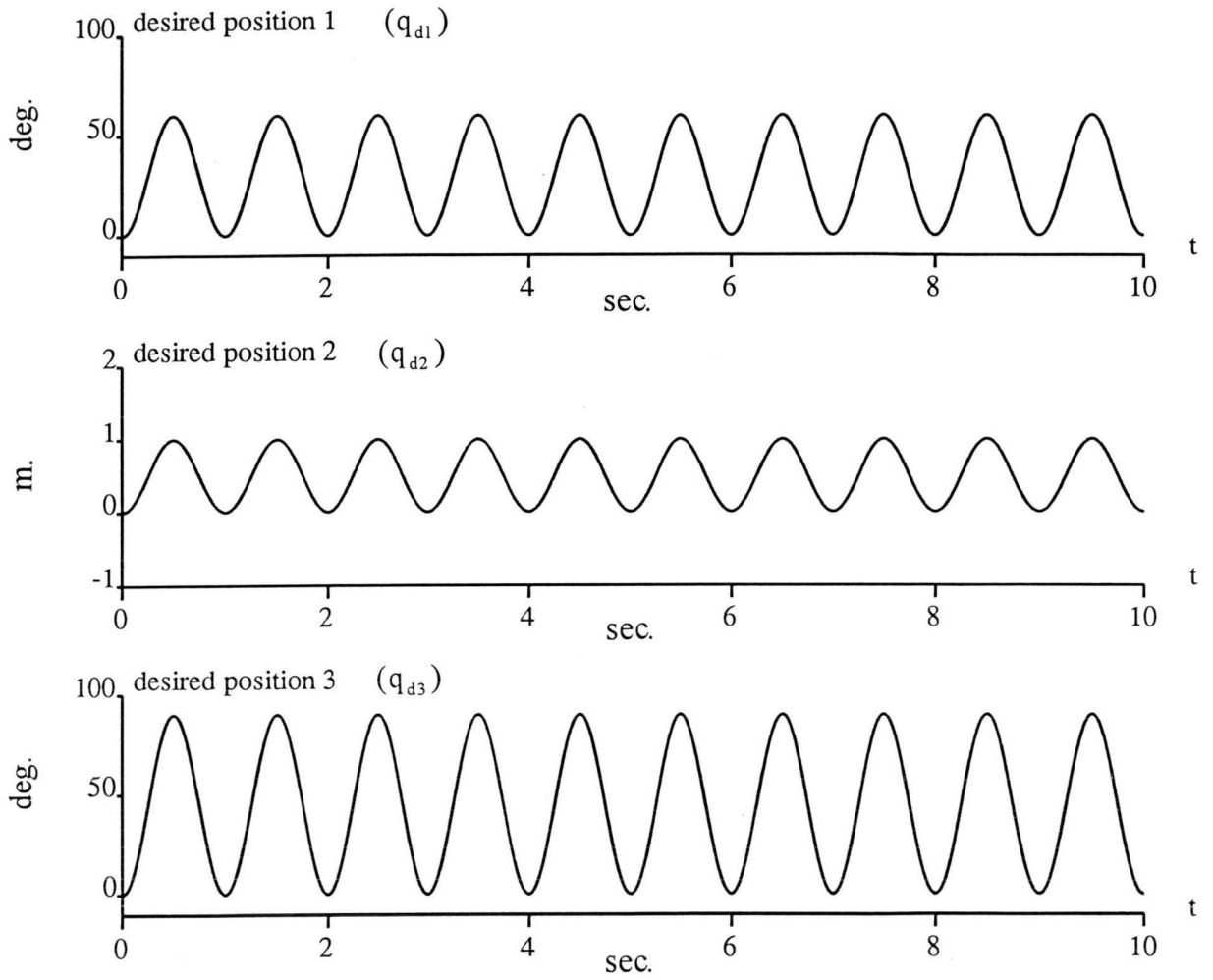
ภาพที่ 61 แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณี
ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบสกรารา
และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สี่

3. ระบบเป็นแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลม

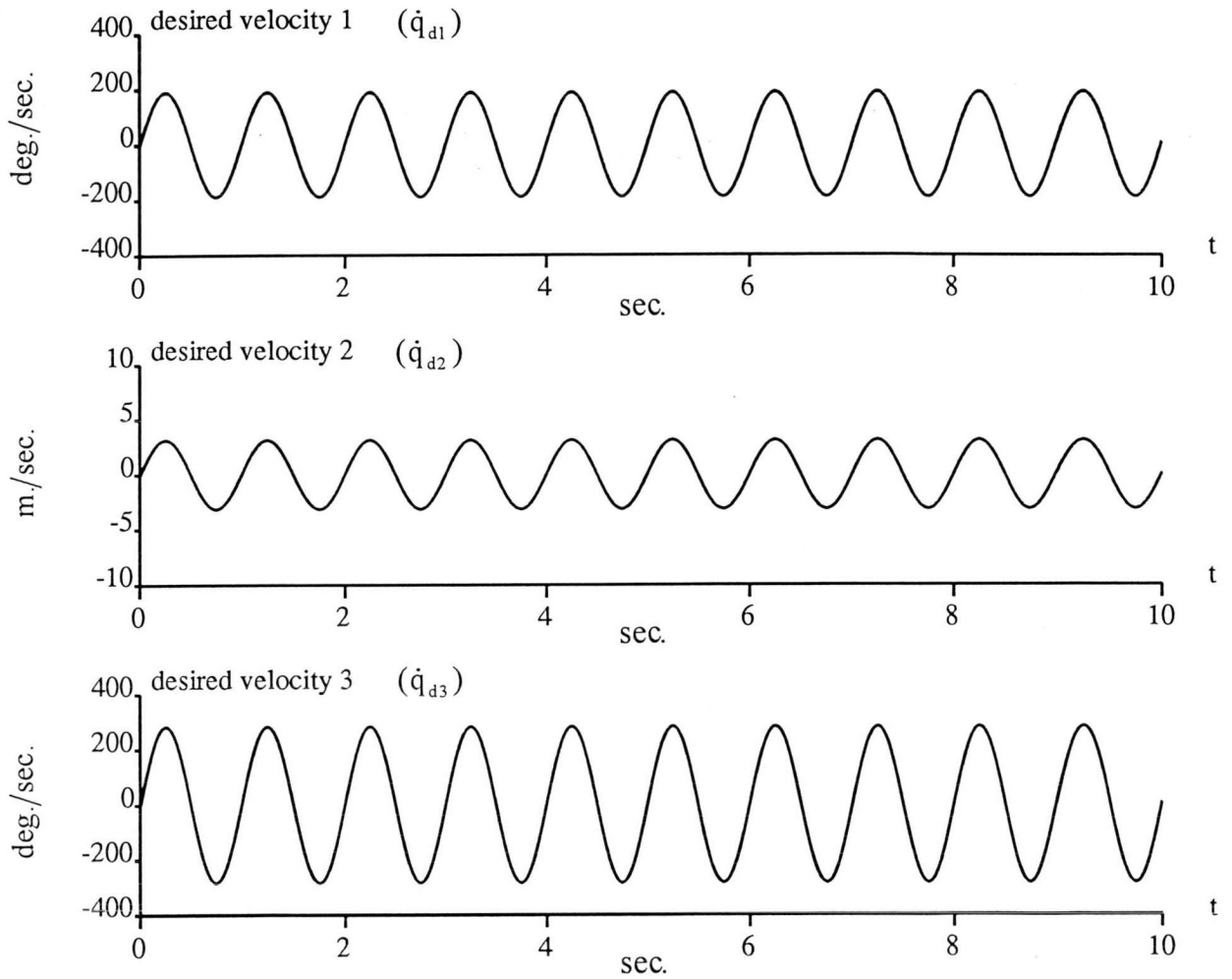
3.1 เส้นทางการเคลื่อนไหวที่ต้องการให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ติดตาม ประกอบด้วยข้อมูลของตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของแต่ละข้อต่อ ที่เวลาต่าง ๆ

$$\begin{aligned}
 q_{d1} &= 30(1 - \cos 2\pi t) && \text{deg.} \\
 q_{d2} &= 0.5(1 - \cos 2\pi t) && \text{m.} \\
 q_{d3} &= 45(1 - \cos 2\pi t) && \text{deg.} \\
 \dot{q}_{d1} &= (30 * 2\pi) \sin(2\pi t) && \text{deg./sec.} \\
 \dot{q}_{d2} &= (0.5 * 2\pi) \sin(2\pi t) && \text{m./sec.} \\
 \dot{q}_{d3} &= (45 * 2\pi) \sin(2\pi t) && \text{deg./sec.} \\
 \ddot{q}_{d1} &= (30 * 2\pi * 2\pi) \cos(2\pi t) && \text{deg./sec.}^2 \\
 \ddot{q}_{d2} &= (0.5 * 2\pi * 2\pi) \cos(2\pi t) && \text{m./sec.}^2 \\
 \ddot{q}_{d3} &= (45 * 2\pi * 2\pi) \cos(2\pi t) && \text{deg./sec.}^2
 \end{aligned}$$

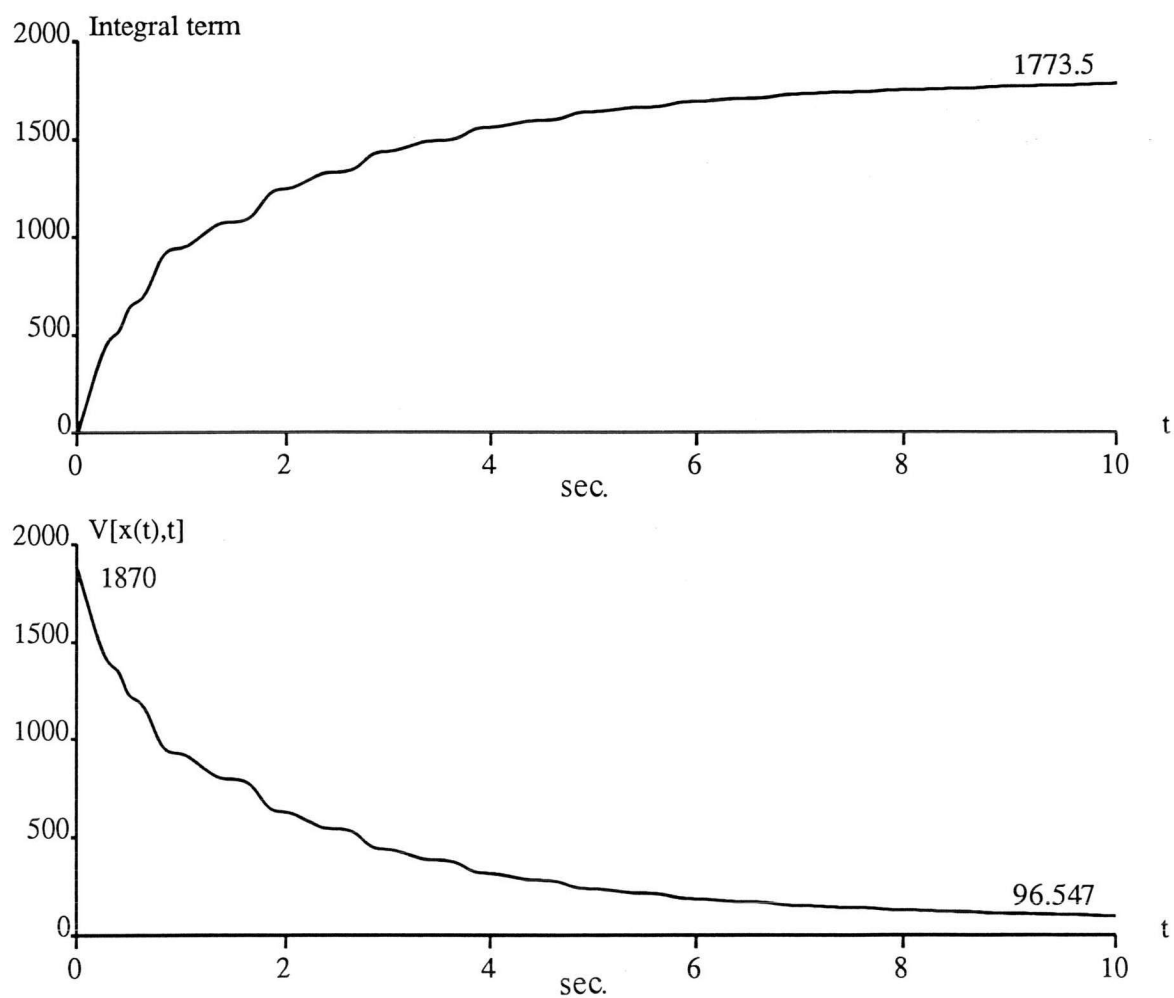
2.2 ภาพแสดงผลการจำลองการทำงาน



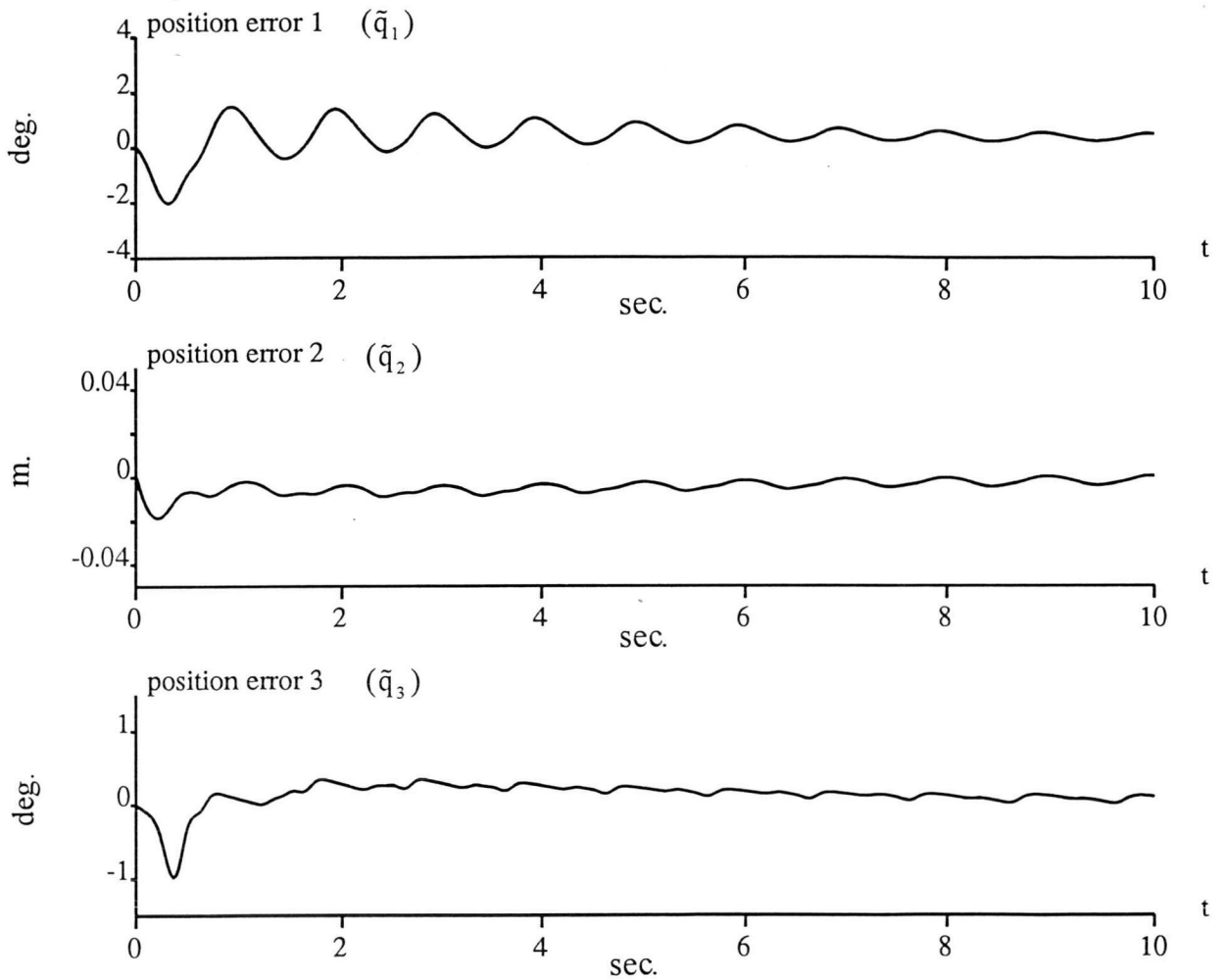
ภาพที่ 62 แสดงตำแหน่งที่ต้องการให้แต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมเคลื่อนที่ติดตาม



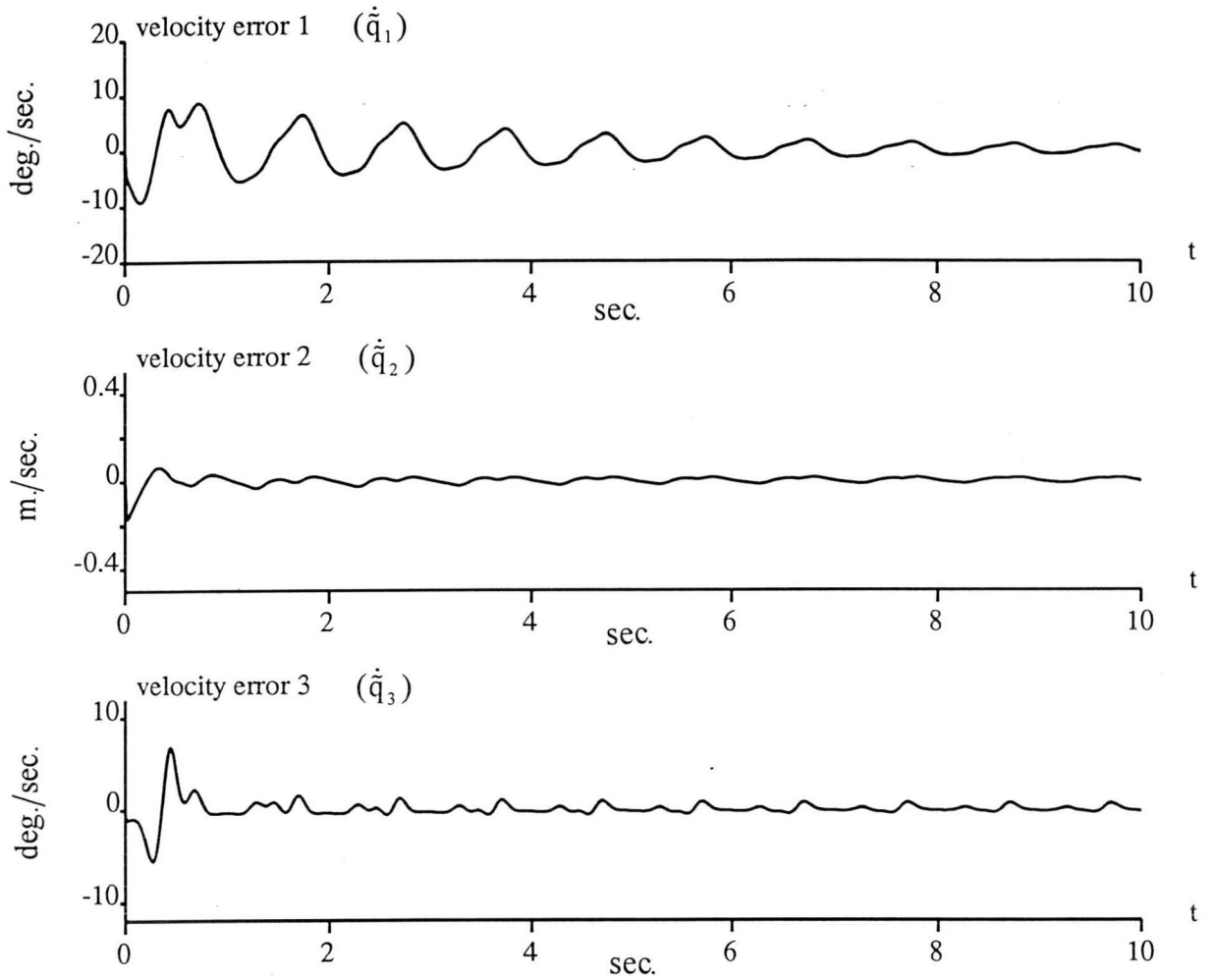
ภาพที่ 63 แสดงความเร็วที่ต้องการให้แต่ละข้อต่อของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมเคลื่อนที่ติดตาม



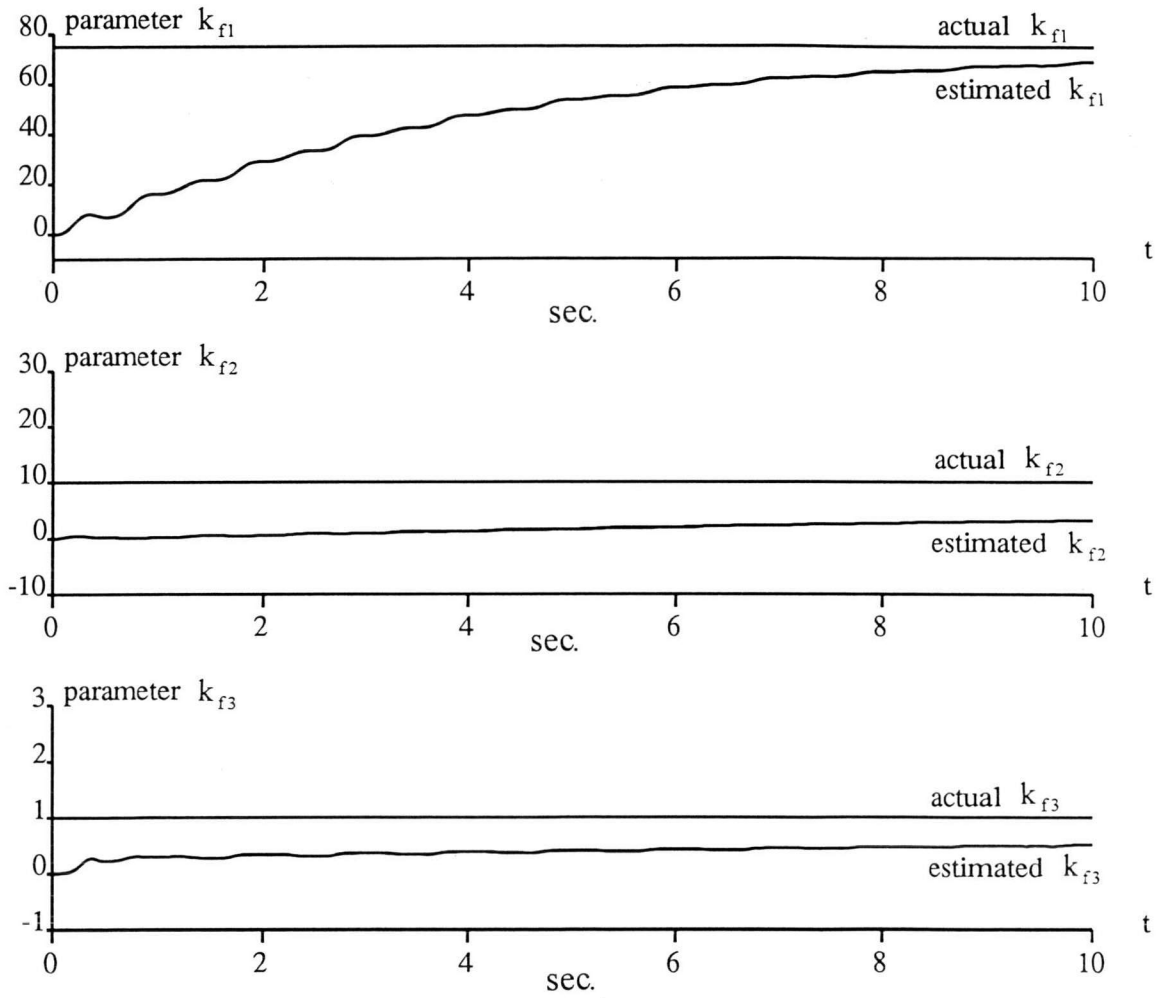
ภาพที่ 64 แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลม
 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง



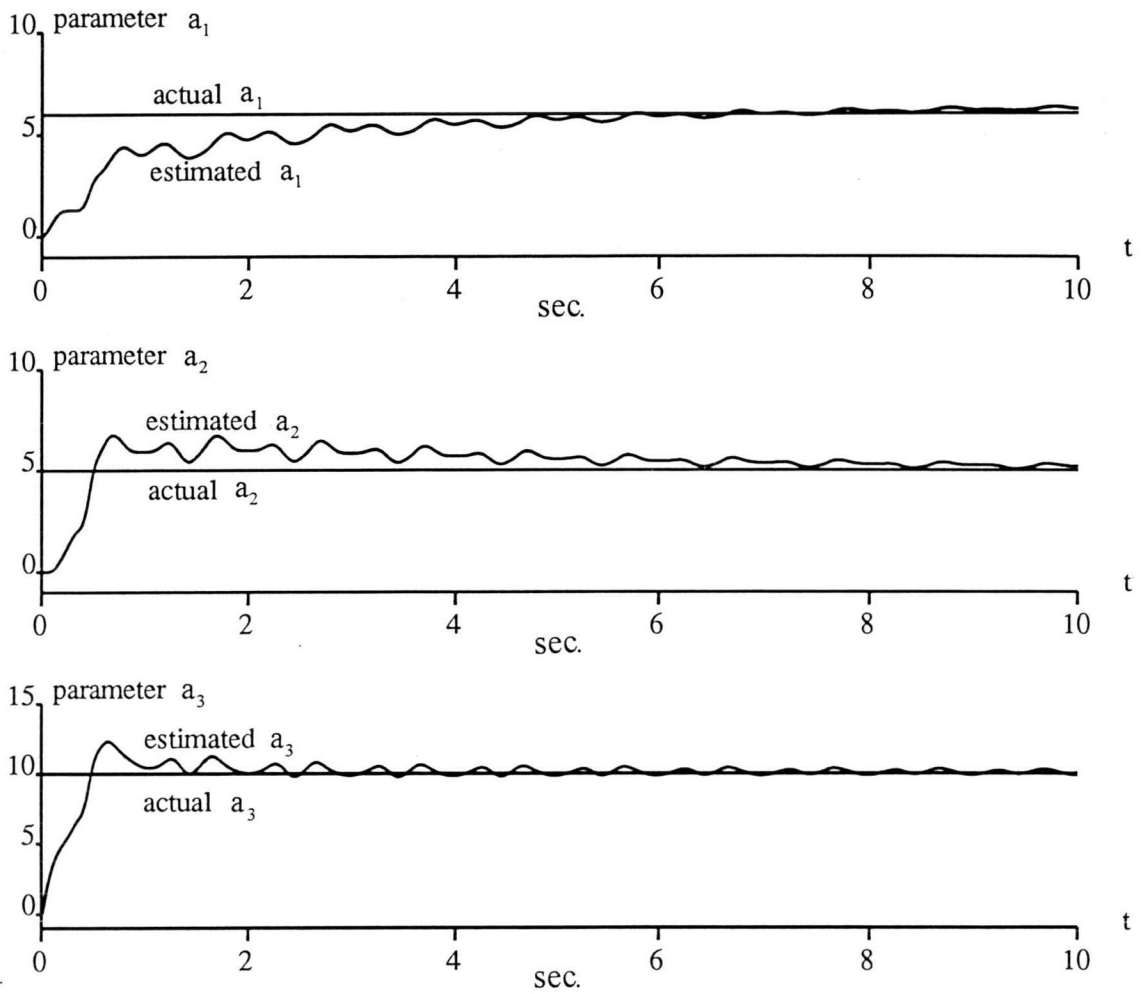
ภาพที่ 65 แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า
พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและ
พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง



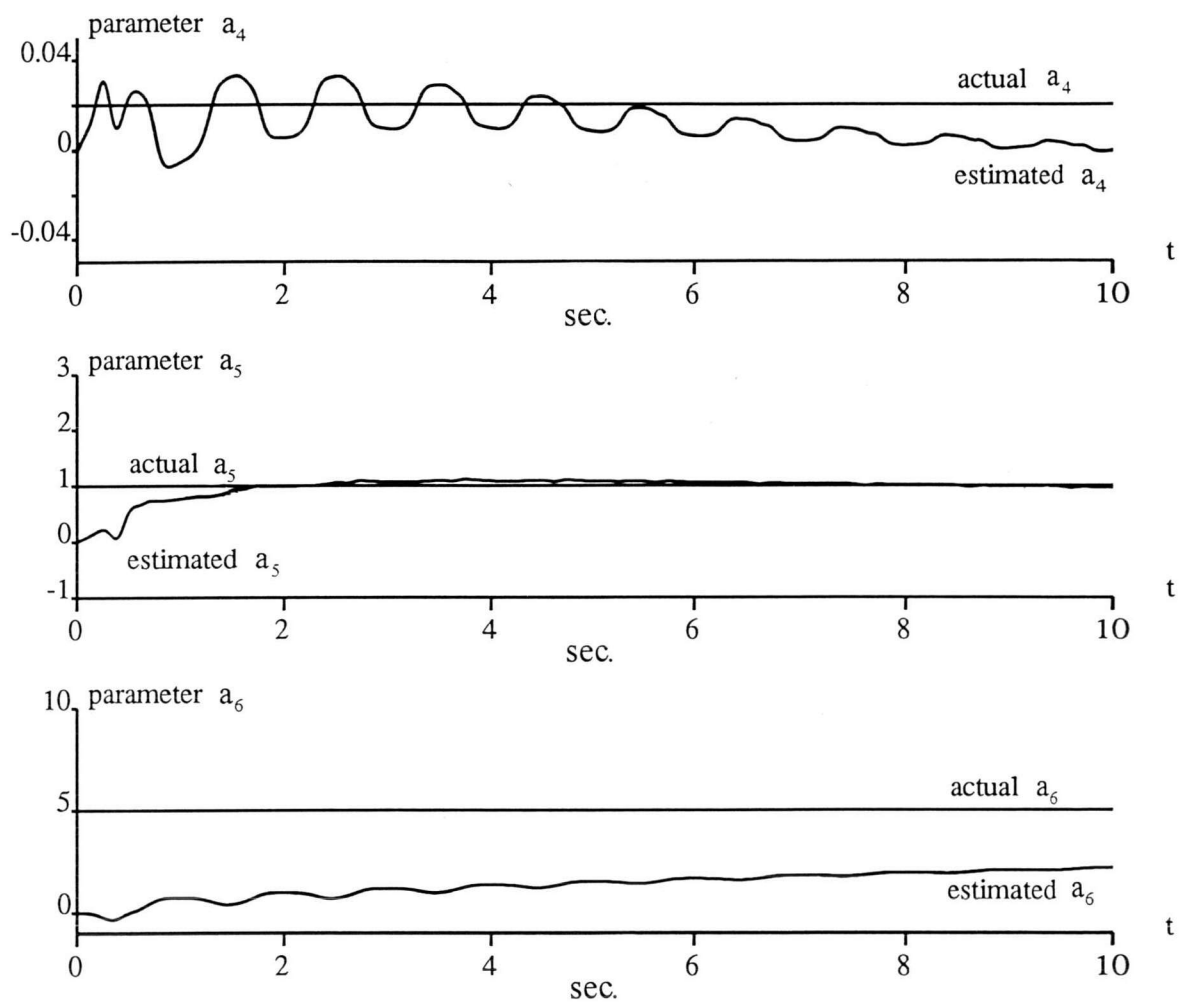
ภาพที่ 66 แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า
พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและ
พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง



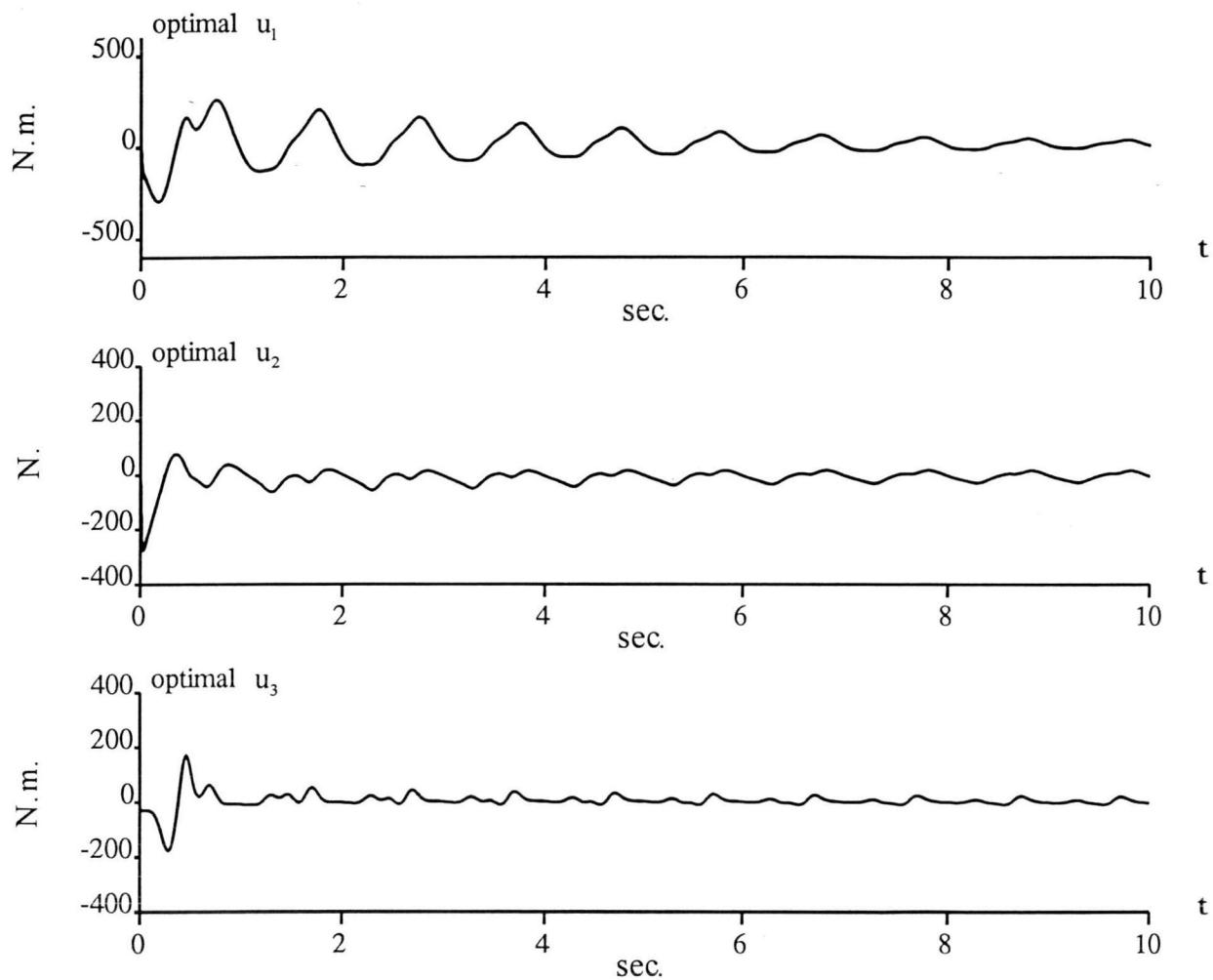
ภาพที่ 67 แสดงค่าจริงและค่าประมาณของพารามิเตอร์ k_{f1} , k_{f2} และ k_{f3} ในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและ
 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง



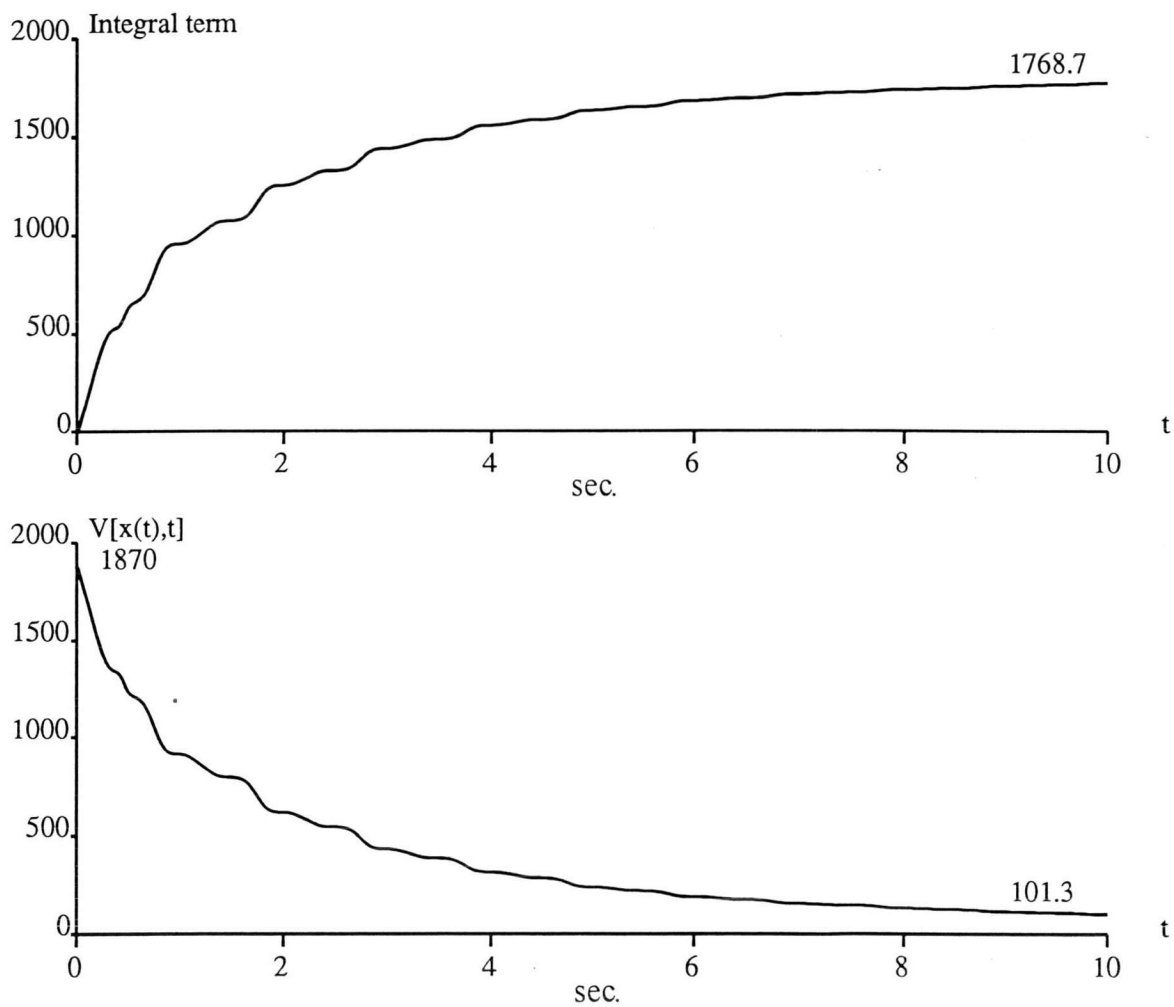
ภาพที่ 68 แสดงค่าจริงและค่าประมาณของพารามิเตอร์ a_1 , a_2 และ a_3 ในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและ
 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง



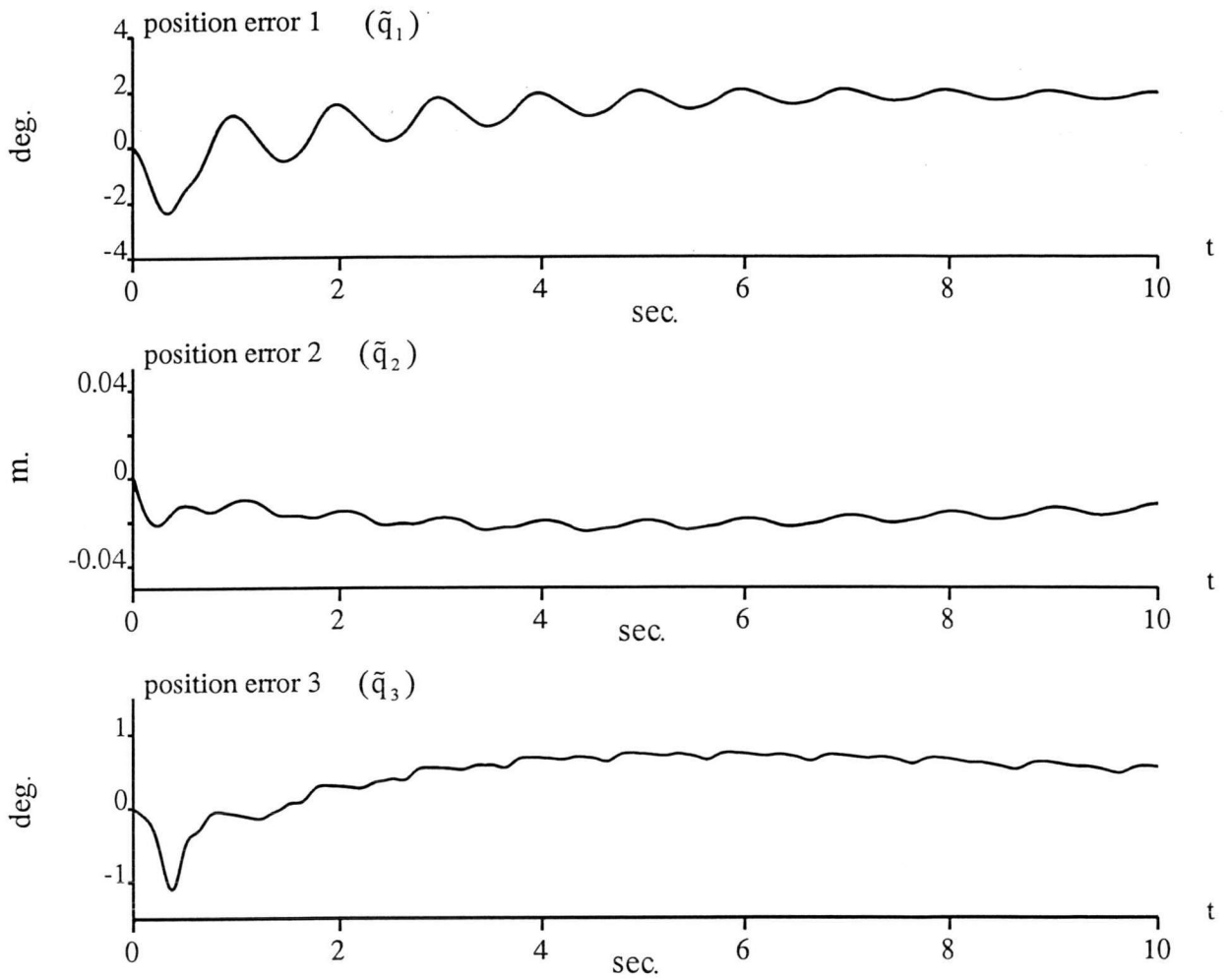
ภาพที่ 69 แสดงค่าจริงและค่าประมาณของพารามิเตอร์ a_4 , a_5 และ a_6 ในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและ
 พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง



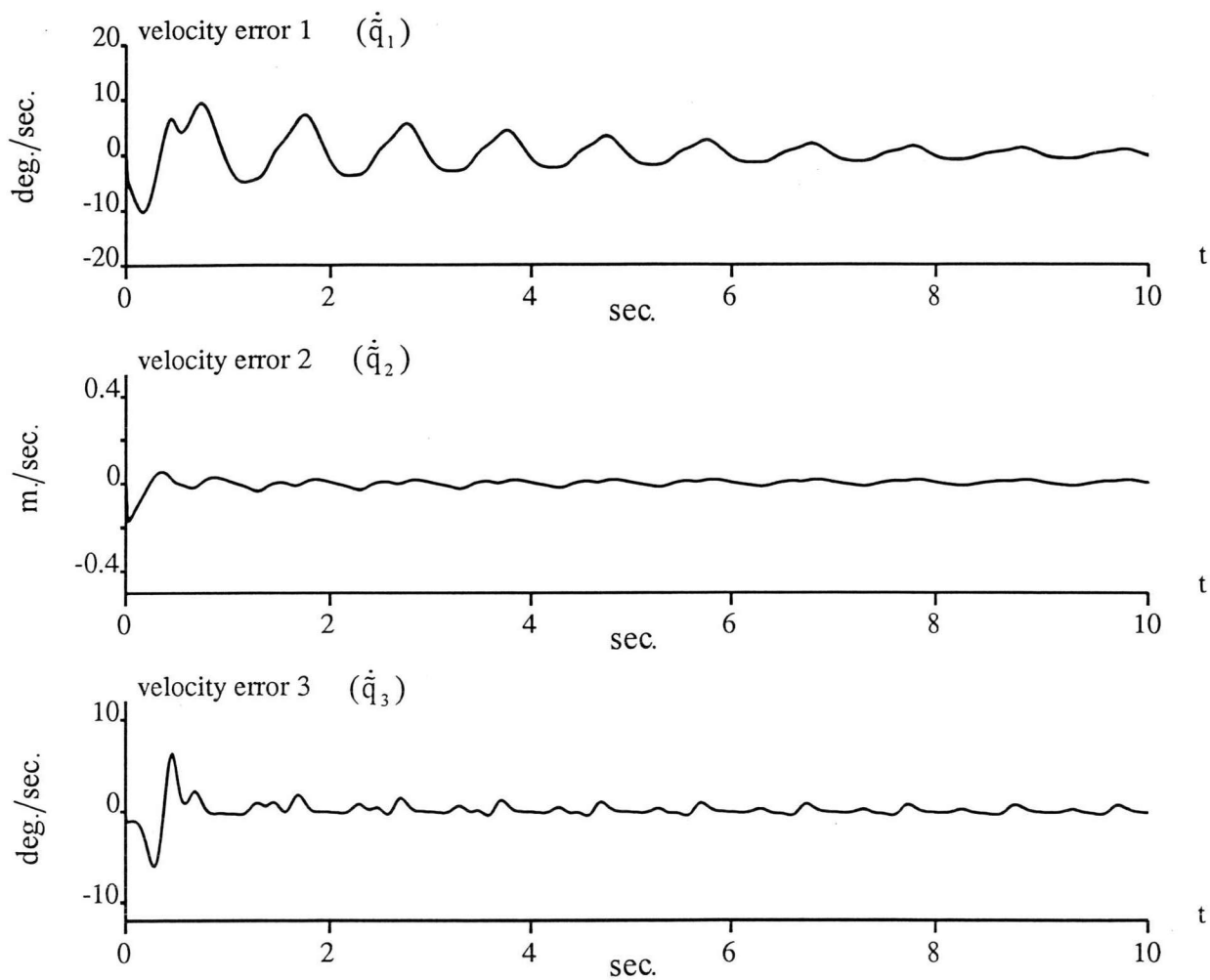
ภาพที่ 70 แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลม
 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่หนึ่ง



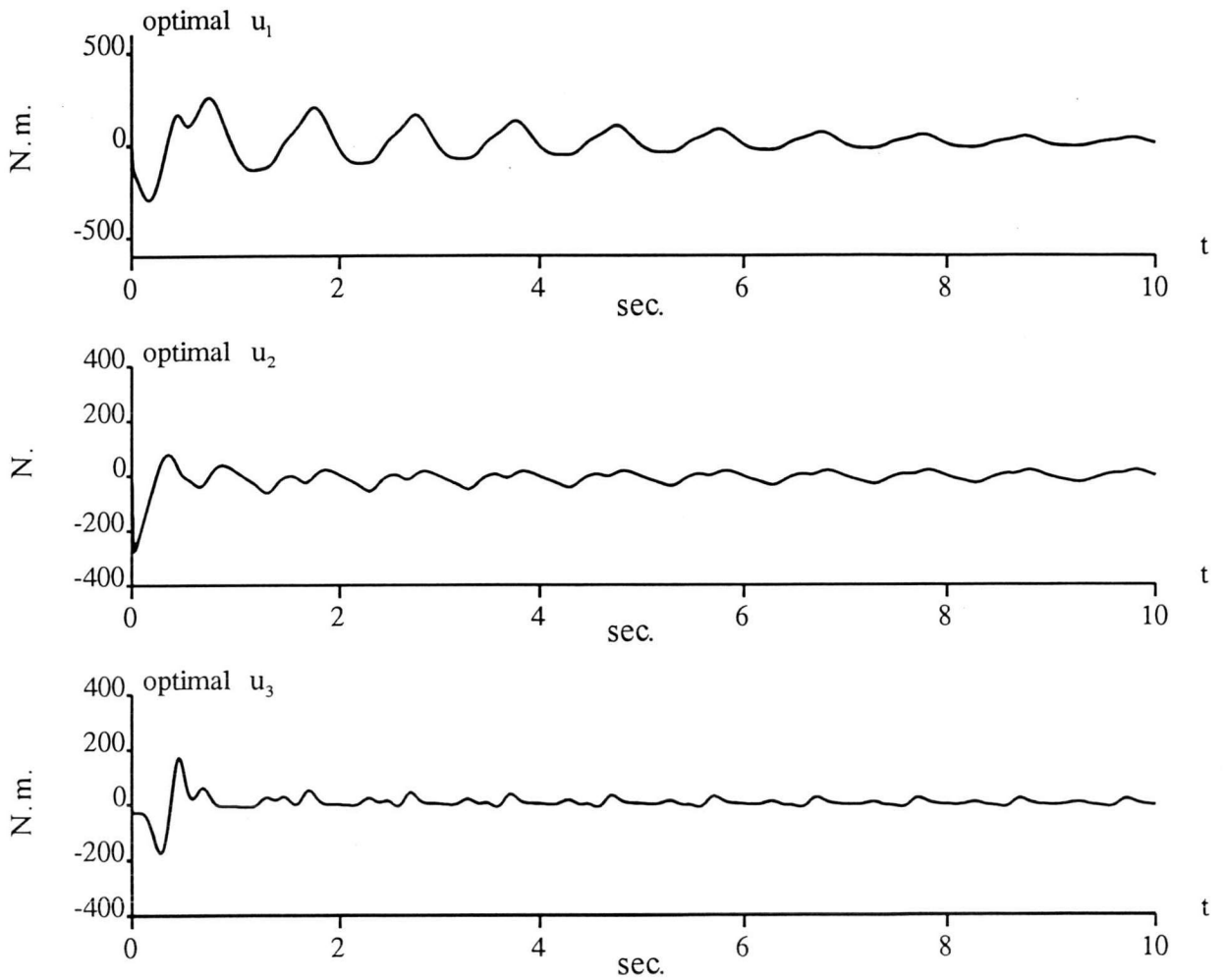
ภาพที่ 71 แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลม
 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง



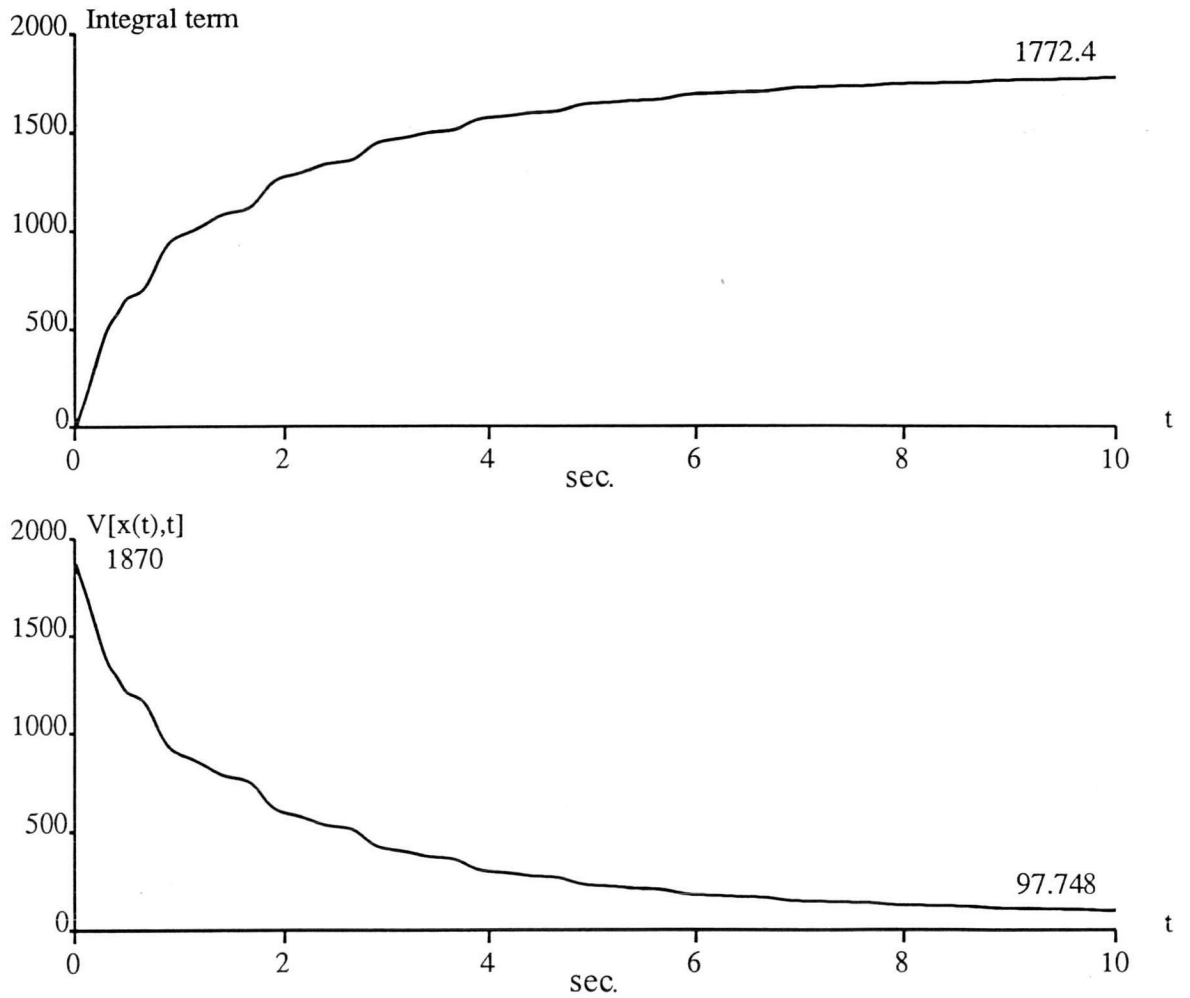
ภาพที่ 72 แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า
พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและ
พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง



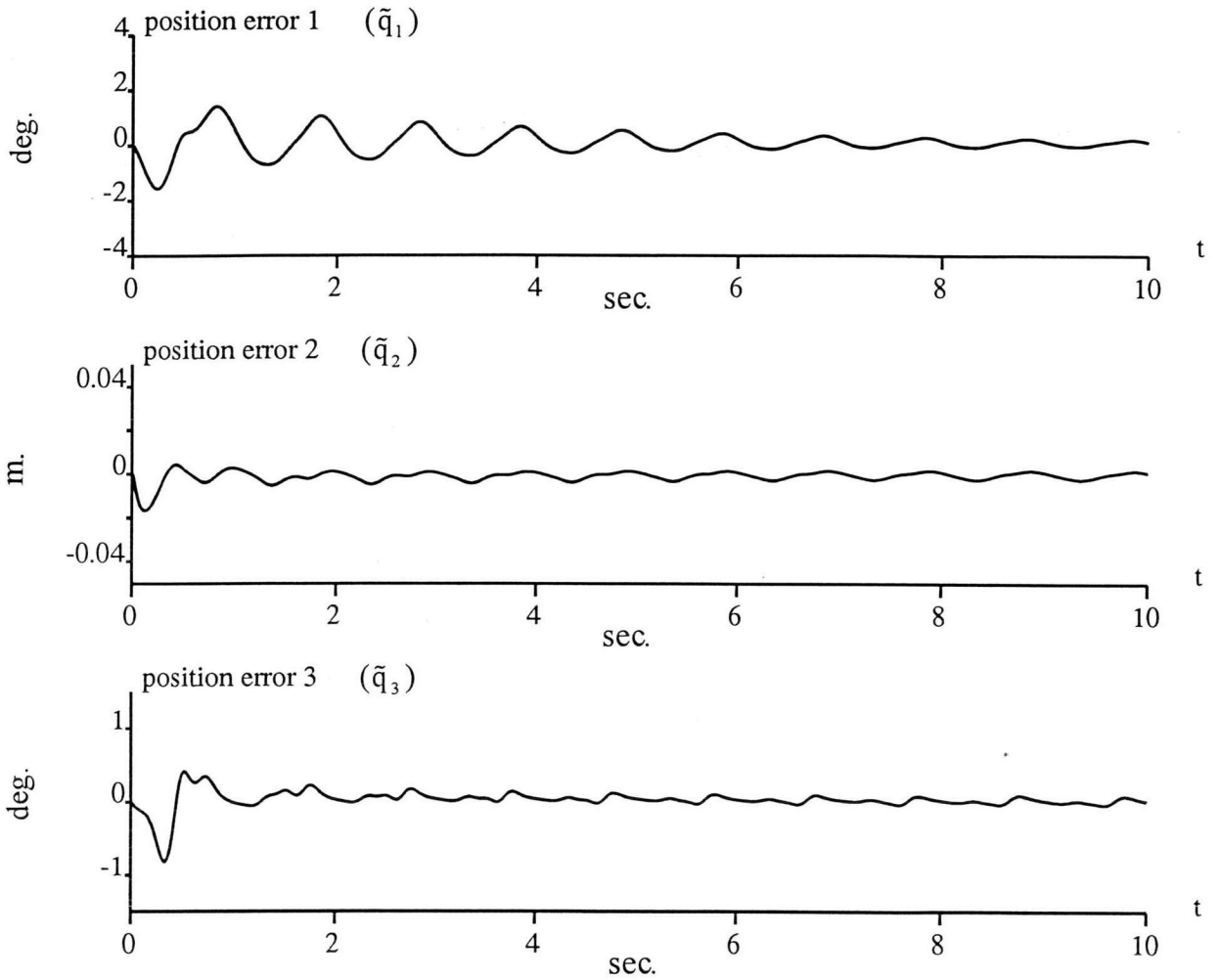
ภาพที่ 73 แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า
พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและ
พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง



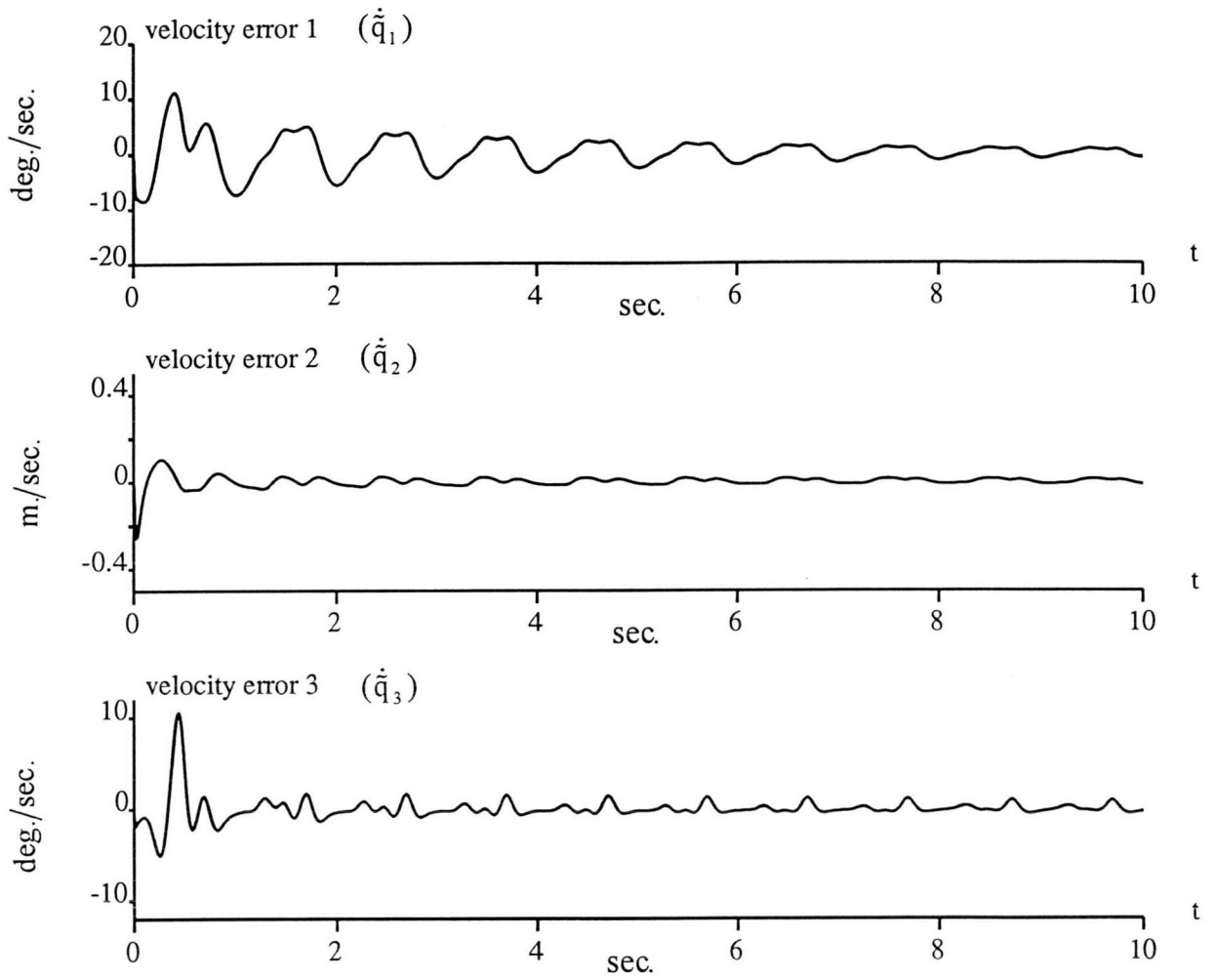
ภาพที่ 74 แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลม
 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สอง



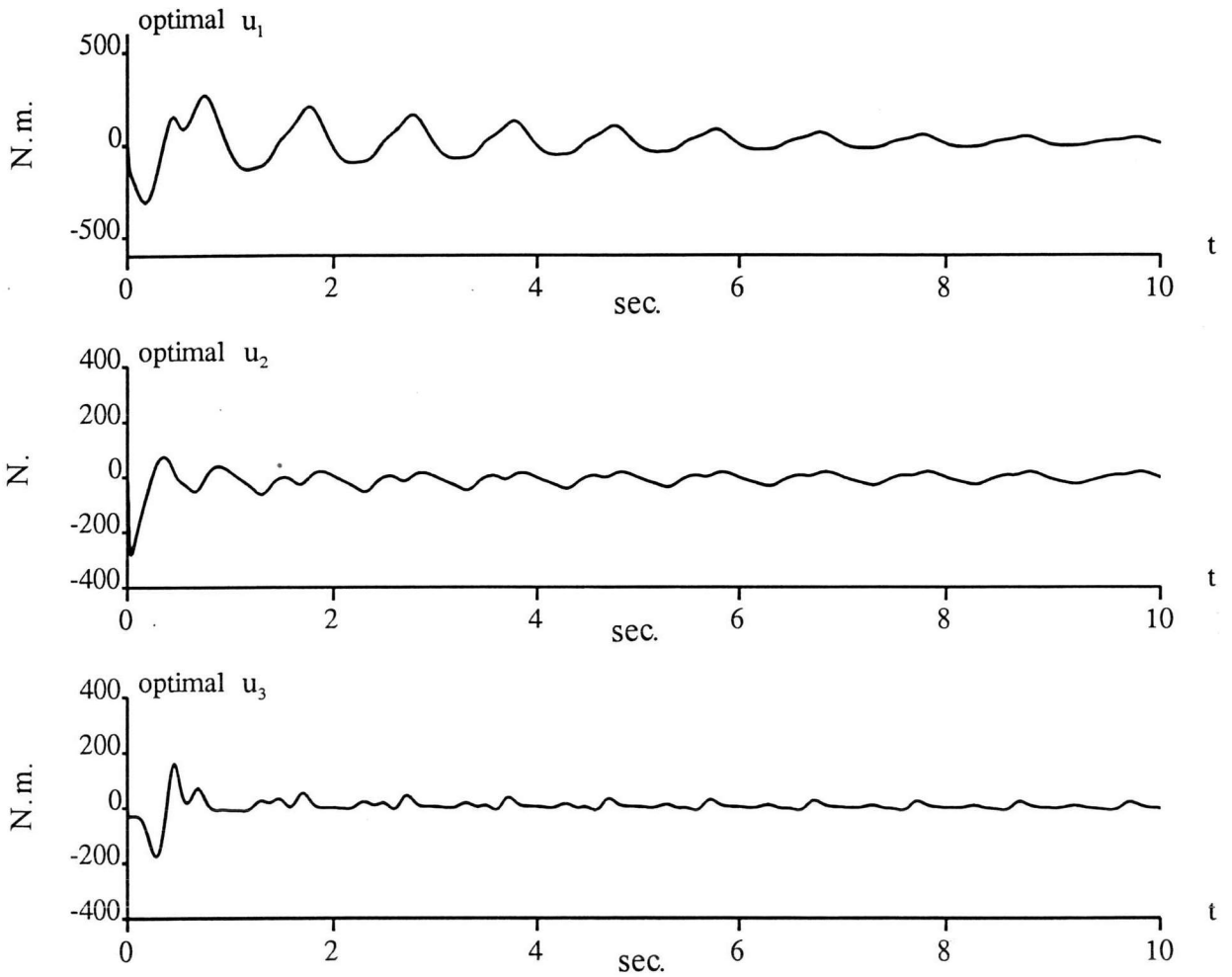
ภาพที่ 75 แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลม
 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สาม



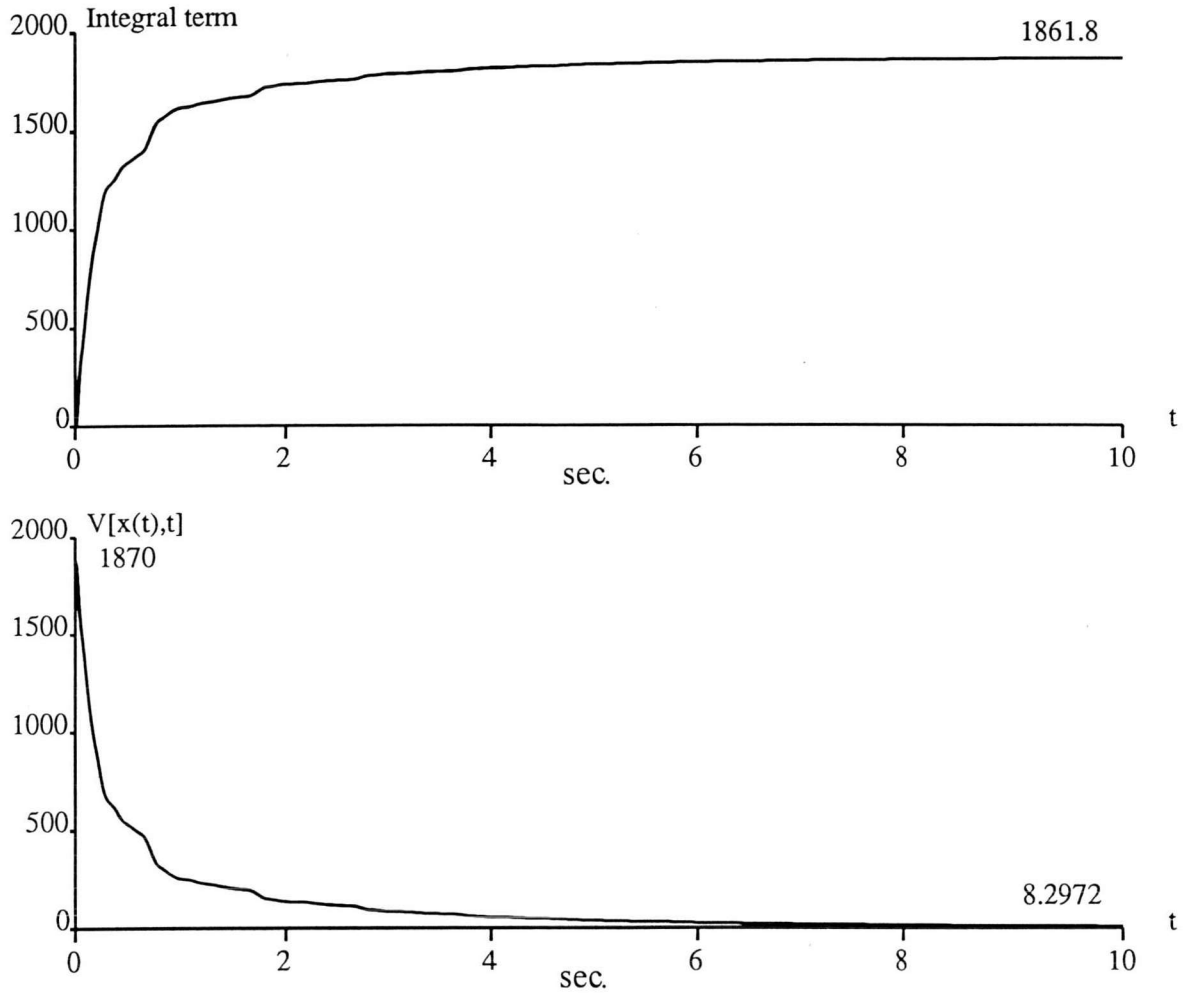
ภาพที่ 76 แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า
พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและ
พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สาม



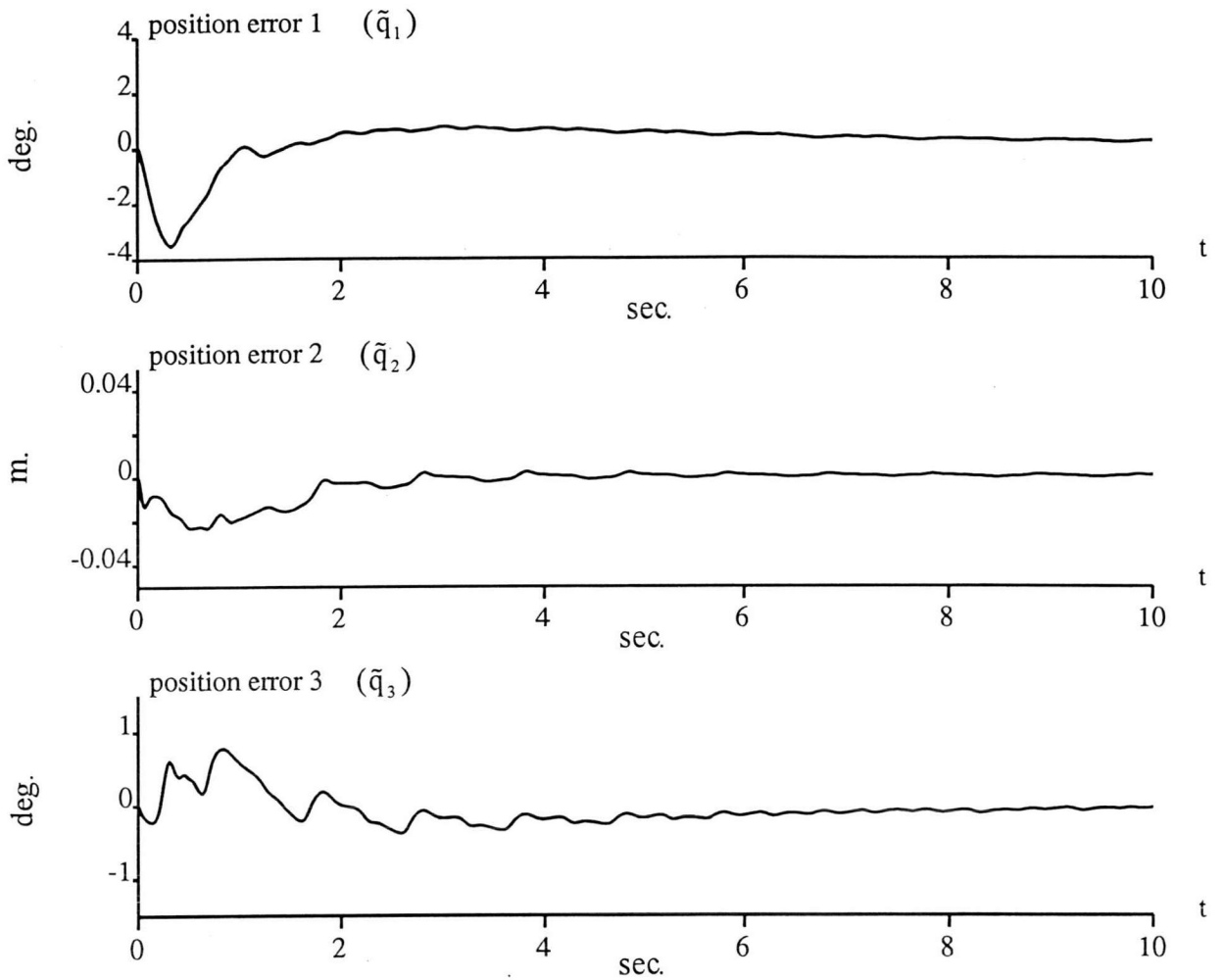
ภาพที่ 77 แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า
พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและ
พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สาม



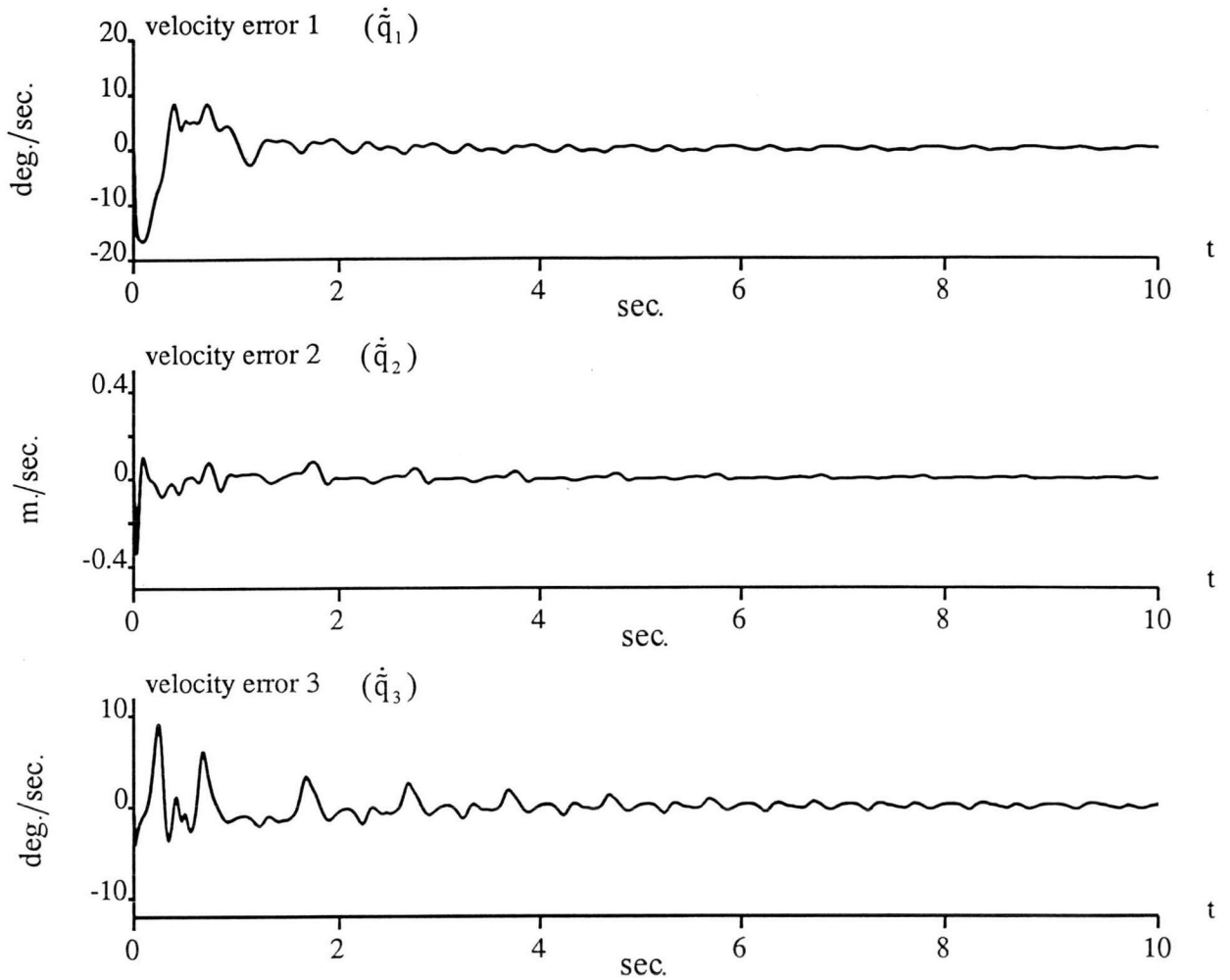
ภาพที่ 78 แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลม
 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สาม



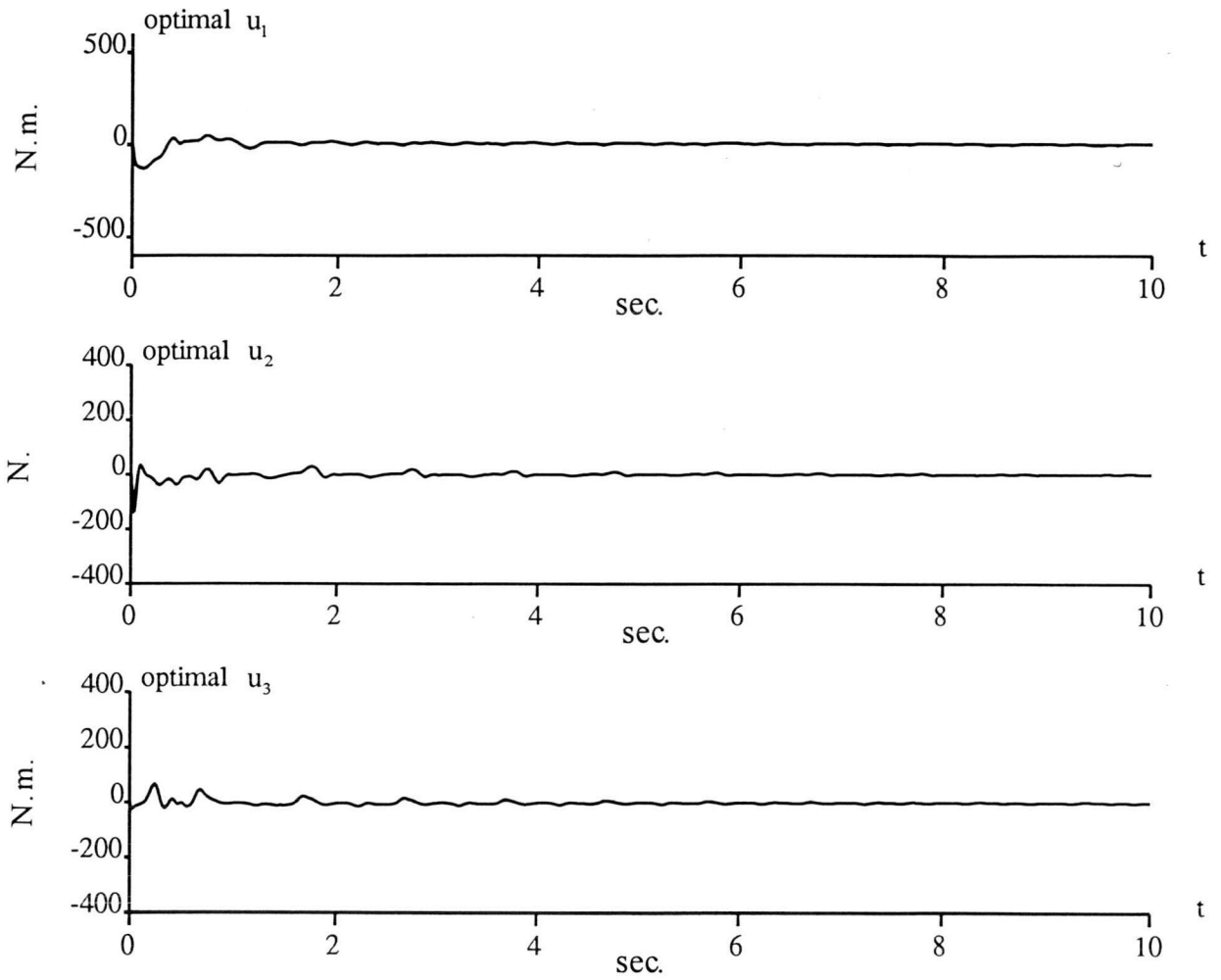
ภาพที่ 79 แสดงค่าของดรรชนีสมรรถนะและฟังก์ชันหลักของแฮมิลตันในกรณี
 ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทงกลม
 และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สี่



ภาพที่ 80 แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่า
พารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและ
พารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สี่



ภาพที่ 81 แสดงค่าความผิดพลาดของความเร็วในกรณีตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลมและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่ดีที่สุด



ภาพที่ 82 แสดงค่าสัญญาณควบคุมที่ออกแบบให้มีค่าที่เหมาะสมที่สุดในกรณี
ตัวควบคุมไม่รู้ค่าพารามิเตอร์ระบบของแขนหุ่นยนต์แบบทรงกลม
และพารามิเตอร์ของตัวควบคุมคำนวณจากค่าถ่วงน้ำหนักชุดที่สี่