

การหาค่าพารามิเตอร์ของแขนกลความเร็วสูงแบบออนไลน์ On-line Parameters Identification of a High Speed Manipulator Arm

รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ นายจิรพงศ์ วชิรธนาภรณ์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พญาไท กรุงเทพฯ 10330
โทร 022186389, โทรสาร 022521513, E-Mail: Viboon.s@eng.chula.ac.th

Viboon Sangveraphunsiri and Jiraphong Wachirathanaporn
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Phayatai Rd., Bangkok 10330.
Tel: 022186389, Fax: 022521513

บทคัดย่อ

บทความนี้จะกล่าวถึงวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์ของแขนหุ่นยนต์จู่ฬา 3 ที่ออกแบบให้มีความเร็วในการเคลื่อนที่ค่อนข้างสูง โดยมีความเร็วสูงสุดประมาณ 5 เท่าของความเร็วของแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมมาตรฐานที่ขายในอุตสาหกรรม โครงสร้างของแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจู่ฬา 3 นั้นจะมีแกนที่ 2 และ 3 เป็นลักษณะ Five-bar linkage แขนกลที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ผลกระทบของทอมที่มีรูปแบบไม่เป็นเชิงเส้นนั้นไม่สามารถละเลยได้ และผลกระทบดังกล่าวนี้จะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับตำแหน่ง (position) และการเรียงตัว (orientation) ของแขนกล และการเคลื่อนที่ ดังนั้นถ้าต้องการควบคุมการเคลื่อนที่ที่มีความแม่นยำสูง จำเป็นที่จะต้องหาสมการการเคลื่อนที่และค่าพารามิเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างการเคลื่อนที่ให้ใกล้เคียงกับระบบจริงให้มากที่สุด โดยงานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการ Input Error Method และวิธีการ Output Error Method สำหรับการหาค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์เพื่อใช้ร่วมกับระบบควบคุม

Abstracts

This paper describes the on-line parameters identification techniques for the Chula III manipulator arm. The Chula III is a high-speed manipulator arm developed by ME Lab. The maximum speed is approximately 5 times faster than typical commercial robots. The second and third joint of the arm formed as a five-bar linkage. For the high-speed motion, the nonlinear terms, appearing in robot dynamic models, which normally neglected in low-speed motion, cannot be neglected. The

nonlinear terms will be varying according to position/orientation of the manipulator and robot motions. So, if more accuracy in motion control required, it is necessary to obtain the more accuracy of robot dynamic equations. The Input Error Method and the Output Error Method are used as on-line parameters identification tools, so that the more accuracy dynamic model can be obtained on-line.

1. บทนำ

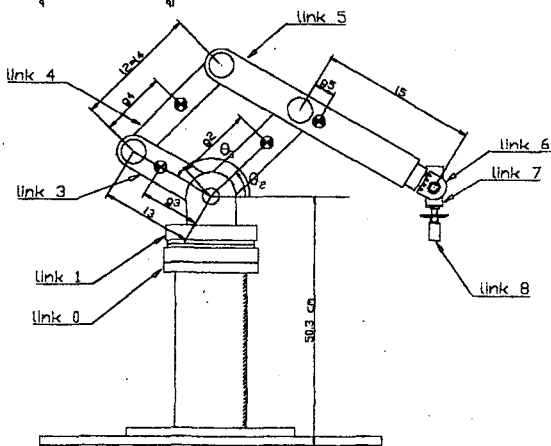
การออกแบบระบบควบคุมของแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมส่วนมากแล้วจะขึ้นอยู่กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์หรือที่เรียกว่า Model-Based Controller. แต่การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์นั้นเราไม่สามารถหาแบบจำลองที่ถูกต้องแม่นยำได้ ย่อมต้องมีความคาดเคลื่อน ความคลาดเคลื่อนนี้อาจจะอยู่ค่าพารามิเตอร์ของระบบ หรืออาจจะเนื่องมาจากความสมบูรณ์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ว่าครอบคลุมรายละเอียดของแบบจำลองได้มากน้อยแค่ไหน เช่นแบบจำลองของระบบเพียงทด ความเสียดทานของระบบ เป็นต้นถ้าเราหาแบบจำลองได้ถูกต้องแม่นยำมากเท่าไรเราก็สามารถเพิ่มช่วงความถี่การทำงานของระบบหรือ Bandwidth ได้ การออกแบบแขนหุ่นยนต์ที่ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมโดยมากแล้วจะใช้การควบคุมมาตรฐานเช่นตัวควบคุมแบบ PID และออกแบบโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายเช่น ในรูปแบบของมวลเป็นก้อนหรือ lump mass model และกำหนดว่าเมื่อแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่นั้นแขนแต่ละแขนไม่มีผลกระทบซึ่งกันและกัน. (decouple) การออกแบบระบบควบคุมแบบนี้สามารถใช้งานได้เมื่อแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วไม่สูงมาก แต่ในกรณีที่แขนหุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่ความเร็วสูง ระบบควบคุมดังกล่าวอาจจะทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพได้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้แทนการ

เคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์นั้นจะประกอบด้วยพารามิเตอร์ของแขนกลกับตัวแปรสถานะ (State Variables) รวมขึ้นเป็นเทอมต่างๆ ซึ่งบางเทอมมีรูปแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Terms) และบางครั้งเราก็ไม่สามารถหาแบบจำลองที่ใช้แทนพฤติกรรมบางส่วนของระบบได้เช่น ความเสียดทาน (Friction), Backlash ที่เกิดขึ้นชุดถ่ายเทกำลังหรือชุดเฟืองทด เป็นต้น ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวการทำการประมาณค่าเทอมหรือกลุ่มพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบตลอดเวลาหรือ On-line parameters identification ในขณะที่แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่จะทำให้เกิดผลกระทบที่เกิดจากเทอมที่ใช้การประมาณค่าในการจำลอง หรือเทอมที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อแขนหุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่ การประมาณค่าแบบตลอดเวลาทำให้ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการควบคุมมีความละเอียดหรือใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากขึ้น นอกจากนั้นวิธีการทำ On-line parameters identification สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมขั้นสูง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงวิธีการดังกล่าวด้วย

งานวิจัยนี้จะใช้วิธีการหาค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ (on-line parameters identification) เพื่อหาค่ากลุ่มพารามิเตอร์ของระบบที่ใกล้เคียงกับระบบจริงของแขนกลจุฬา 3 ซึ่งเป็นแขนกลที่ออกแบบให้สามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง พัฒนาขึ้นที่ห้องปฏิบัติการวิจัยหุ่นยนต์อุตสาหกรรมภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยวิธีที่นำเสนอมีอยู่สองวิธีคือ 1) วิธี Input Error (Indirect Adaptive Control) และ 2) วิธี Output Error (Adaptive Control) เพื่อหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลจุฬา 3 ให้ใกล้เคียงระบบจริง

2. โครงสร้างของแขนกลจุฬา 3

แขนกลจุฬา 3 เป็นแขนกลเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมี 6 แกน โดยที่ แกนที่ 1, 2 และ 3 ทำงานด้วยความเร็วสูง โดยมีความเร็วเชิงมุมสูงสุดประมาณ 0.6-1.0 rev/s ส่วนแกนที่ 4, 5 และ 6 ทำงานด้วยความเร็วปกติ โดยมีความเร็วเชิงมุมสูงสุดประมาณ 0.1-0.3 rev/s โครงสร้างของแขนกลจุฬา 3 แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 รูปแสดงโครงสร้างของแขนกลจุฬา 3

สมการการเคลื่อนที่

เราสามารถหาสมการการเคลื่อนที่ของ 3 ลิงค์แรกของแขนกลซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ให้อยู่ในรูปของทอร์กได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial H_{11}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_2 + \frac{\partial H_{11}}{\partial \theta_3} \dot{\theta}_3 & \frac{\partial H_{12}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_2 & \frac{\partial H_{13}}{\partial \theta_3} \dot{\theta}_3 \\ -\frac{1}{2} \frac{\partial H_{11}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_1 + \frac{\partial H_{23}}{\partial \theta_3} \dot{\theta}_3 & 0 & \frac{\partial H_{23}}{\partial \theta_3} \dot{\theta}_3 \\ -\frac{1}{2} \frac{\partial H_{11}}{\partial \theta_3} \dot{\theta}_1 & \frac{\partial H_{23}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{g2} \\ \tau_{g2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_{fr1} \\ \tau_{fr2} \\ \tau_{fr3} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} H_{11} &= m_2 d_2^2 + m_3 d_3^2 + m_4 (d_3 - d_4)^2 + m_5 (d_2 - d_5)^2 + I_{zz1} \\ &\quad + I_{yy2} + I_{yy3} + I_{yy4} + I_{yy5} \\ &\quad + (m_2 g_2^2 + m_4 g_4^2 + m_5 l_5^2 + I_{zz2} - I_{yy2} + I_{zz4} - I_{yy4}) \cos^2 \theta_2 \\ &\quad + (m_3 g_3^2 + m_4 l_3^2 + m_5 g_5^2 + I_{zz3} - I_{yy3} + I_{zz5} - I_{yy5}) \cos^2 \theta_3 \\ &\quad + 2 \cdot (m_4 g_4 l_3 - m_5 g_5 l_2) \cos \theta_2 \cos \theta_3 \\ &\quad + I_{yz5} \sin 2\theta_3 \end{aligned}$$

$$H_{22} = m_2 g_2^2 + m_4 g_4^2 + m_5 l_2^2 + I_{xx2} + I_{xx4}$$

$$H_{33} = m_3 g_3^2 + m_4 l_3^2 + m_5 g_5^2 + I_{xx3} + I_{xx5}$$

$$H_{12} = H_{21} = (m_2 d_2 g_2 + m_4 d_4 g_4 - m_4 d_3 g_4 + m_5 d_2 l_2 - m_5 d_2 l_2) \sin \theta_2$$

$$\begin{aligned} H_{13} &= H_{31} \\ &= (-m_3 d_3 g_3 - m_4 d_3 l_3 + m_4 d_4 l_3 + m_5 d_5 g_5 - m_5 d_2 g_2 + I_{yz5}) \sin \theta_3 \\ &\quad + I_{xz5} \cos \theta_3 \end{aligned}$$

$$H_{23} = H_{32} = (m_4 g_4 l_3 - m_5 g_5 l_2) \cos(\theta_3 - \theta_2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_{11}}{\partial \theta_2} &= -(m_2 g_2^2 + m_4 g_4^2 + m_5 l_5^2 + I_{zz2} - I_{yy2} + I_{zz4} - I_{yy4}) \sin 2\theta_2 \\ &\quad - 2 \cdot (m_4 g_4 l_3 - m_5 g_5 l_2) \sin \theta_2 \cos \theta_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_{11}}{\partial \theta_3} &= -(m_3 g_3^2 + m_4 l_3^2 + m_5 g_5^2 + I_{zz3} - I_{yy3} + I_{zz5} - I_{yy5}) \sin 2\theta_3 \\ &\quad - 2 \cdot (m_4 g_4 l_3 - m_5 g_5 l_2) \cos \theta_2 \sin \theta_3 + 2 I_{yz5} \cos 2\theta_3 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial H_{12}}{\partial \theta_2} = (m_2 d_2 g_2 + m_4 d_4 g_4 - m_4 d_3 g_4 + m_5 d_2 l_2 - m_5 d_2 l_2) \cos \theta_2$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial H_{13}}{\partial \theta_3} &= (-m_3 d_3 g_3 - m_4 d_3 l_3 + m_4 d_4 l_3 + m_5 d_5 g_5 - m_5 d_2 g_2 + I_{yz5}) \cos \theta_3 \\ &\quad - I_{xz5} \sin \theta_3 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial H_{23}}{\partial \theta_2} = (m_4 g_4 l_3 - m_5 g_5 l_2) \sin(\theta_3 - \theta_2)$$

$$\frac{\partial H_{23}}{\partial \theta_3} = -(m_4 g_4 l_3 - m_5 g_5 l_2) \sin(\theta_3 - \theta_2)$$

$$\tau_{g2} = (m_2 g_2 g + m_4 g_4 g + m_5 l_2 g) \cos \theta_2$$

$$\tau_{g3} = (m_3 g_3 g + m_4 l_3 g - m_5 g_5 g) \cos \theta_3$$

$$\tau_{fr1} = v_1 \cdot \dot{\theta}_1 + c_1 \cdot \text{sgn}(\dot{\theta}_1)$$

$$\tau_{fr2} = v_2 \cdot \dot{\theta}_2 + c_2 \cdot \text{sgn}(\dot{\theta}_2)$$

$$\tau_{fr3} = v_3 \cdot \dot{\theta}_3 + c_3 \cdot \text{sgn}(\dot{\theta}_3)$$

โดยที่

g_2, g_3, g_4 แทนระยะถึงจุดศูนย์กลางมวล (Center of Mass) ของลิงค์ 2, 3, 4 ตามลำดับ

g_5 แทนระยะถึงจุดศูนย์กลางมวลของลิงค์ 5, 6, 7, 8 รวมกัน

I_5 แทน Inertia tensor ของลิงค์ 5, 6, 7, 8 รวมกัน

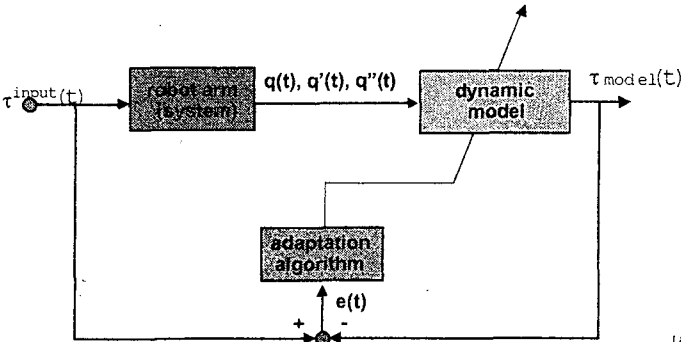
m_5 แทนมวลของลิงค์ 5, 6, 7, 8 รวมกัน

3. วิธีการที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์

วิธีการที่ใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์แบบออนไลน์ (on-line parameters identification) นั้น เป็นวิธีการที่สร้างขึ้นเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของระบบที่เราต้องการโดยการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์จะทำในขณะที่ระบบกำลังเคลื่อนที่ ซึ่งก็คือหากมีพารามิเตอร์ได้มีการเปลี่ยนค่าไปขณะทำการทดลองเราก็จะสามารถรู้ได้ทันที โดยที่ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการหา นั้นอาจจะเป็น inertia tensor, position of center-of-mass, friction หรืออาจเป็นกลุ่มของตัวแปรก็ได้ ซึ่งวิธีการที่เสนอมียู่ 2 วิธีคือ

1. Input Error Method (Indirect Adaptive Control)
2. Output Error Method (Adaptive Control)

1) Input Error Method หลักการของวิธีนี้คือ นำเอาค่าความคลาดเคลื่อนของทอร์กที่ใส่ให้กับระบบจริงและทอร์กที่คำนวณได้จากสมการการเคลื่อนที่ไปทำการคำนวณและปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของระบบเป็นค่าใหม่จนได้ค่าที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงแผนผังของวิธี Input Error

อัลกอริทึมที่ใช้ในการปรับเปลี่ยนค่าเราจะเลือกใช้วิธี Least-Squares With Exponential Forgetting ซึ่งเป็นวิธีที่ค่าประมาณที่ได้จะลู่เข้าสู่ค่าจริงได้เร็ว โดยหลักการคือ เราจะทำการหาค่าพารามิเตอร์โดยการหาค่าต่ำสุดของค่าความแตกต่างของอินพุตค่าจริงกับค่าประมาณยกกำลังสอง เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$J = \int_0^t \|y(r) - Y(r) \cdot \hat{a}(t)\|^2 dr$$

โดยเราจะหาค่า $\hat{a}(t)$ ที่ทำให้ได้ J ต่ำที่สุด ซึ่งจะได้

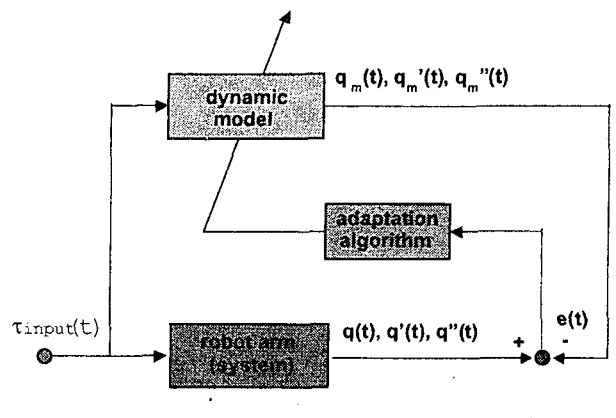
$$\dot{\hat{a}} = -P(t) \cdot Y^T \cdot e_1$$

$$\dot{P} = \lambda(t) \cdot P - P \cdot Y^T(t) \cdot Y(t) \cdot P$$

ซึ่งวิธีนี้สามารถนำไปใช้กับระบบที่มีตัวควบคุมอยู่แล้วหรือนำไปช่วยในการควบคุมได้

สำหรับการประยุกต์นำวิธี Input Error ไปใช้ควบคุมระบบจริงนั้น เราจะนำเอาวิธีการควบคุมแบบ Feedback Linearization (Compute Torque Control) ซึ่งเป็นวิธีการควบคุมที่ต้องใช้ค่าพารามิเตอร์ของระบบในตัวควบคุม ซึ่งการควบคุมจะได้ผลหรือได้ผลตามที่ต้องการก็ต่อเมื่อค่าที่นำมาใช้ใกล้เคียงกับค่าจริง ดังนั้นเราจึงสามารถนำวิธีการประมาณค่ามาช่วยในการควบคุมได้

2) Output Error Method หลักการของวิธีนี้คือ นำเอาค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งที่วัดได้จริงและตำแหน่งที่คำนวณได้จากสมการการเคลื่อนที่ไปทำการคำนวณและปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ของระบบใหม่จนได้ค่าที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงแผนผังของวิธี Output Error

เนื่องจากการคำนวณหาค่าตำแหน่งจากสมการการเคลื่อนที่โดยตรงโดยเฉพาะระบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear System) นั้นยากและจะต้องใช้เวลาในการคำนวณมาก ดังนั้นวิธีที่นำเสนอจึงเลือกใช้ค่าอ้างอิงแทน ซึ่งมีวิธีการดังนี้

$$\tau = Y \cdot \hat{a} - K_D s$$

โดยที่

$$\dot{\hat{a}} = -\Gamma Y^T s$$

เมื่อ s คือ sliding surfaces สหาคได้จาก

$$s = (\dot{\theta}_p - \dot{\theta}_d) + \lambda(\theta_p - \theta_d)$$

แต่วิธีการหาค่าพารามิเตอร์แบบนี้จะใช้ได้เมื่อเป็นตัวควบคุมด้วยเท่านั้น

ในการหาค่าพารามิเตอร์ทั้งสองวิธีที่กล่าวมาจะได้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าจริงหรือเท่ากับค่าจริงก็ต่อเมื่อเส้นทางการควบคุม (trajectory) ที่ทำการควบคุมทำให้ระบบอยู่ในสภาวะ "persistent excitation" เท่านั้น

จัดทอมพารามิเตอร์ที่ต้องการหาค่า

เขียนสมการการเคลื่อนที่ของลิงค์ 1, 2, 3 ให้อยู่ในรูปของ $\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}) \cdot \hat{a}$ โดยที่ \hat{a} ค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการจะหาค่า ซึ่งสามารถจัดทอมต่างๆได้ดังนี้

$$a_1 = m_2 d_2^2 + m_3 d_3^2 + m_4 (d_3 - d_4)^2 + m_5 (d_2 - d_5)^2 + I_{zz1} + I_{yy2} + I_{yy3} + I_{yy4} + I_{yy5}$$

$$a_2 = m_2 g_2^2 + m_4 g_4^2 + m_5 l_5^2 + I_{zz2} - I_{yy2} + I_{zz4} - I_{yy4}$$

$$a_3 = m_3 g_3^2 + m_4 l_3^2 + m_5 g_5^2 + I_{zz3} - I_{yy3} + I_{zz5} - I_{yy5}$$

$$a_4 = m_4 g_4 l_3 - m_5 g_5 l_2$$

$$a_5 = m_2 g_2^2 + m_4 g_4^2 + m_5 l_2^2 + I_{xx2} + I_{xx4}$$

$$a_6 = m_3 g_3^2 + m_4 l_3^2 + m_5 g_5^2 + I_{xx3} + I_{xx5}$$

$$a_7 = m_2 g_2 g + m_4 g_4 g + m_5 l_2 g$$

$$a_8 = m_3 g_3 g + m_4 l_3 g - m_5 g_5 g$$

$$a_9 = c_1$$

$$a_{10} = c_2$$

$$a_{11} = c_3$$

$$a_{12} = v_1$$

$$a_{13} = v_2$$

$$a_{14} = v_3$$

$$a_{15} = m_2 d_2 g_2 + m_4 d_4 g_4 - m_4 d_3 g_4 + m_5 d_2 l_2 - m_5 d_2 l_2$$

$$a_{16} = -m_3 d_3 g_3 - m_4 d_3 l_3 + m_4 d_4 l_3 + m_5 d_5 g_5 - m_5 d_2 g_2 + I_{xy5}$$

$$a_{17} = I_{yz5}$$

$$a_{18} = I_{xz5}$$

ค่าของพารามิเตอร์ของแขนหุ่นยนต์จู่ฬา 3 ที่หาได้คือ

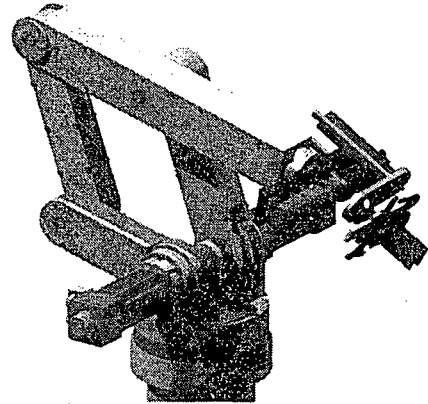
$$a_1 = 0.581, \quad a_2 = 0.880, \quad a_3 = 0.660$$

$$a_4 = -0.365, \quad a_5 = 1.593, \quad a_6 = 0.900$$

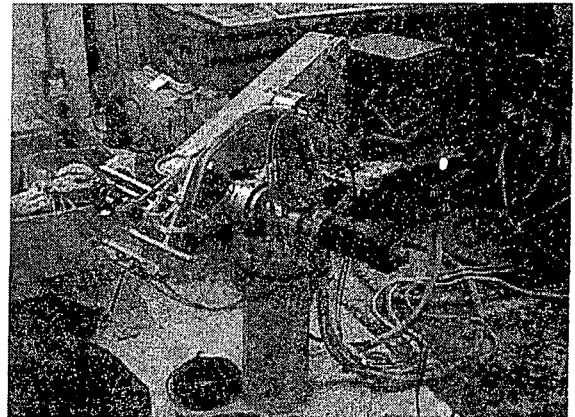
$$a_7 = 34.0643, \quad a_8 = -7.237, \quad a_{15} = 0.027$$

$$a_{16} = -0.036, \quad a_{17} = -0.004, \quad a_{18} = -0.003$$

ซึ่งค่าข้างต้นนี้หาได้จากการจำลองชิ้นส่วนต่างๆของแขนกลจู่ฬา 3 ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการออกแบบ 3 มิติแบบทรงตัน (Solid Modeling) ดังรูปที่ 4 ค่าดังกล่าวนี้เราจะใช้สมมติฐานว่าเป็นค่าที่มีความใกล้เคียงกับความจริง รูปที่ 5 เป็นรูปแขนหุ่นยนต์จู่ฬา 3 ที่พัฒนาขึ้นที่ห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 4 รูปจำลองสามมิติของแขนกลจู่ฬา 3



รูปที่ 5 แขนกลจู่ฬา 3

4. การทดลอง

เราจะทำการทดลองควบคุมแขนกลจู่ฬา 3 โดยใช้ทั้งวิธี Input Error Method และ Output Error Method มาช่วยในการควบคุม โดยการทดลองจะแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนได้ดังนี้

1. ทำการควบคุมโดยวิธี Feedback Linearization และนำค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากวิธี Input Error มาช่วยในการควบคุม
2. ทำการควบคุมและหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Output Error Control
3. เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้กับค่าจริง

จากค่าจริงของพารามิเตอร์จะเห็นว่าพารามิเตอร์ตัวที่ 15 ถึง 18 มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าอื่น ดังนั้นเพื่อเพิ่มความเร็วในการคำนวณ การทดลองนี้จึงประมาณค่าพารามิเตอร์เพียง 14 ตัว คือตัวที่ 1 ถึง 14

เส้นทางการเดิน (Trajectory) ที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาพารามิเตอร์คือ

$$\theta_{1d} = \frac{(1 - \cos(5 * t))}{2}$$

$$\theta_{2d} = \frac{\pi}{2} \frac{\cos(6.5 * t - \pi/2)}{4}$$

$$\theta_{3d} = \pi + \frac{(-1 + \cos(6 * t))}{6}$$

ซึ่งความเร็วสูงสุดของของลิงค์ต่างๆที่ใช้ในการทดลองคือ

$$V_{1dmax} = 143.24 \text{ deg/s}$$

$$V_{2dmax} = 88.81 \text{ deg/s}$$

$$V_{3dmax} = 57.30 \text{ deg/s}$$

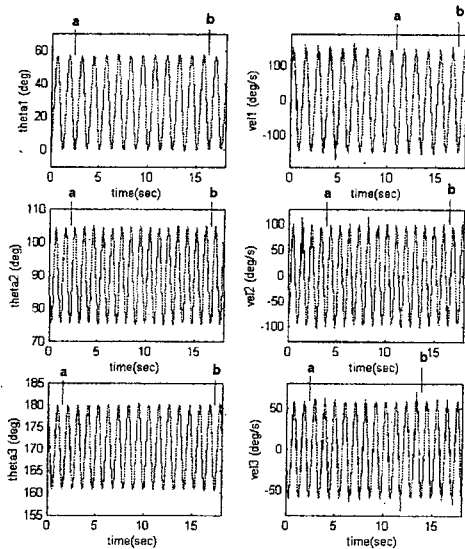
ผลการทดลอง

สำหรับกราฟที่ 1 และ 2

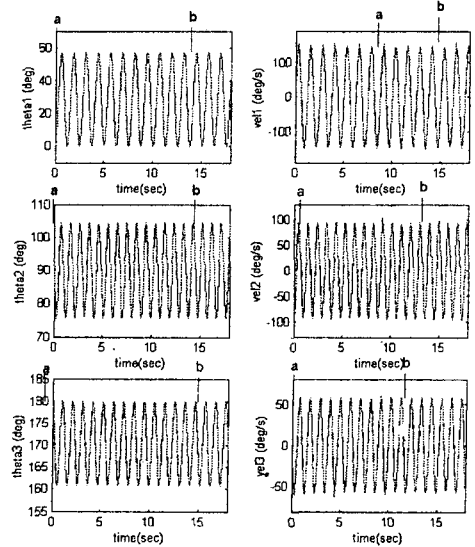
- a (เส้นสีเขียวหรือจางกว่า) คือค่าจริงที่วัดได้
- b (เส้นสีน้ำเงินหรือเข้มกว่า) คือค่าเราออกแบบไว้

สำหรับกราฟที่ 3 และ 4

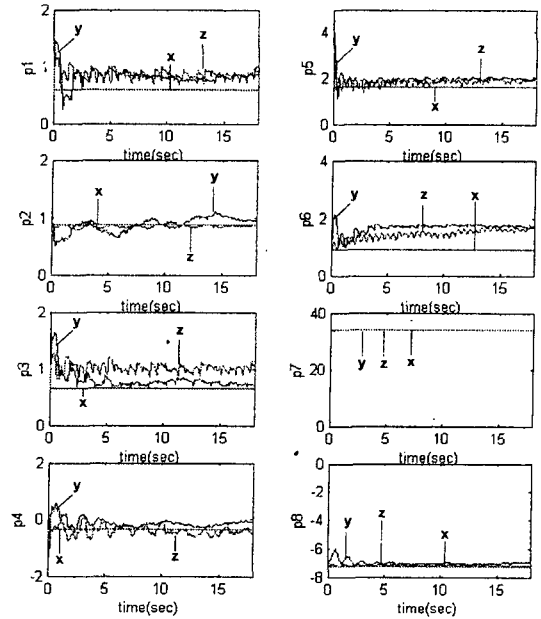
- x (เส้นสีแดง) คือค่าจริง
- y (เส้นสีน้ำเงิน) คือค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธี Input Error
- z (เส้นสีเขียว) คือค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากวิธี Output Error



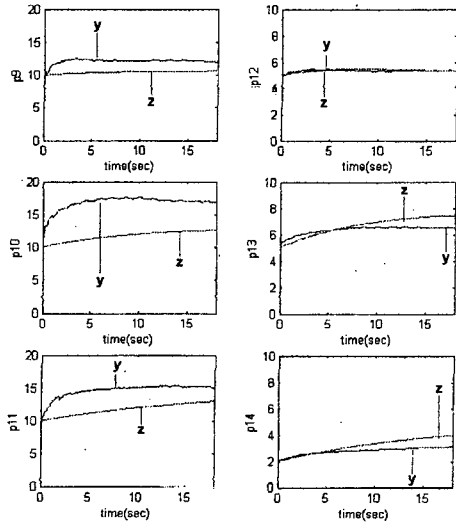
กราฟที่ 1 แสดงตำแหน่งและความเร็วของลิงค์ที่ 1,2,3 เมื่อควบคุมด้วยวิธี Input Error Method เปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ต้องการ



กราฟที่ 2 แสดงตำแหน่งและความเร็วของลิงค์ที่ 1,2,3 เมื่อควบคุมด้วยวิธี Output Error Method เปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ต้องการ



กราฟที่ 3 แสดงค่าพารามิเตอร์ a₁ ถึง a₆ ที่คำนวณได้เมื่อควบคุมด้วยวิธี Input Error และ Output Error เปรียบเทียบกับค่าจริง



กราฟที่ 4 แสดงค่าพารามิเตอร์ a_9 ถึง a_{10} ที่คำนวณได้เมื่อควบคุมด้วยวิธี Input Error และ Output Error

วิเคราะห์ผลการทดลอง

จากกราฟที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นกราฟแสดงผลของตำแหน่งและความเร็วที่ได้จากการควบคุมด้วยวิธี Input Error และวิธี Output Error จะเห็นว่าทั้ง 2 วิธีเราสามารถควบคุมตำแหน่งและความเร็วให้เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ได้เป็นอย่างดี โดยช่วงแรกจะเป็นช่วงปรับค่าพารามิเตอร์ซึ่งทำให้มีความคลาดเคลื่อน (error) อยู่บ้างเล็กน้อย แต่เมื่อเวลาผ่านไป ค่าความคลาดเคลื่อนก็น้อยลง ส่วนค่าความเร็วจะเห็นว่าส่วนที่เป็นจุดสูงสุดต่ำสุดจะมีบางค่ามากผิดปกติ ซึ่งก็เป็นเพราะว่าค่าความเร็วนี้ได้มาจากการหาอนุพันธ์ของตำแหน่งโดยตรงรวมถึงการปิดเศษของคอมพิวเตอรื (truncates) จึงทำให้บางค่ามากผิดปกติ และจะสังเกตเห็นได้ว่าความเร็วที่ได้จากการควบคุมด้วยวิธี Output Error จะเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ดีกว่าแบบ Input Error อยู่เล็กน้อย

กราฟที่ 3 เป็นกราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการควบคุมทั้งสองวิธีเทียบกับค่าจริงซึ่งใช้ค่าที่หาได้จากการจำลองแขนกลจุฬา 3 จะเห็นว่าทั้งสองวิธีค่าพารามิเตอร์ที่ได้จะใกล้เคียงกันและลู่เข้าหาค่าจริง แต่จะมีบางกราฟที่ค่าพารามิเตอร์จากทั้งสองวิธีลู่เข้าหาค่าเดียวกันแต่ไม่ลู่เข้าหาค่าจริง แต่ต่างจากค่าจริงไม่มาก ซึ่งอาจเป็นเพราะค่าจริงที่นำมาอ้างอิงนั้นหามาได้จากการจำลองแขนกลซึ่งค่าที่ได้ก็อาจจะคลาดเคลื่อนกับค่าที่แท้จริงได้

กราฟที่ 4 เป็นกราฟแสดงค่าพารามิเตอร์ที่เป็นแรงเสียดทานซึ่งประกอบด้วย coulomb friction และ viscous friction ซึ่งทั้งสองวิธีค่าแรงเสียดทานที่ได้บางค่าจะใกล้เคียงกันแต่บางค่าจะต่างกัน ซึ่งเป็นเพราะว่าผลของการควบคุมทั้งสองวิธีไม่เหมือนกัน ทำให้ค่าตำแหน่งและความเร็ว ณ เวลาใดๆ ไม่ตรงกันทีเดียว ทำให้ค่าแรงเสียดทานที่หาได้ไม่เท่ากัน แต่ก็ต่างกันไม่มาก

จากกราฟ 3 และ 4 จะเห็นว่าค่าพารามิเตอร์ของวิธี Input Error จะเข้าหาค่าจริงได้เร็วกว่าวิธี Output Error แต่จะมี Overshoot มากกว่าวิธี Output Error

5. สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองทั้งสองวิธีจะเห็นว่า ทั้งวิธี Input Error และ Output Error สามารถนำไปใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ได้ดี และยังสามารถใช้ในการควบคุมได้ดีอีกด้วย โดยวิธีการ Input Error เหมาะที่จะนำไปใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ได้ดี ส่วนวิธี Output Error นั้นเหมาะที่จะนำไปใช้ในการควบคุมระบบที่ต้องการความแม่นยำในการควบคุมสูงและมีเสถียรภาพดี เพราะวิธี Input Error ค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแปลงเร็ว โอกาสที่ระบบจะไม่มีเสถียรภาพจึงสูงกว่าวิธี Output Error

เอกสารอ้างอิง

- [1] John J. Craig, Silma, Inc., "Introduction to Robotics, Mechanics and Control, 2nd edition", Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- [2] Haruhiko Asada and Kamal Youcef-Toumi, "Direct-Drive Robots, Theory and Practice", The MIT Press, London, 1987.
- [3] H. Asada and J.-J. E. Slotine, "Robot Analysis and Control", John Wiley and Sons, Inc., 1986.
- [4] Jean-Jacques E. Slotine and Weiping Li, "Applied Nonlinear Control", Prentice-Hall International, Inc., 1991.
- [5] Fariborz Behi and Delbert Tesar, "Parametric Identification for Industrial Manipulators Using Experimental Modal Analysis", IEEE Transactions on Robotics And Automation, Vol. 7, No. 5, October 1991.
- [6] Albert Y. Zomaya and V. Sreeram, "On the Fast Robot Dynamic Parameters Learning", IEEE, 1992.
- [7] Predeep K. Khosla and Takeo Kanade, "Parameter Identification of Robot Dynamics", IEEE, 1985.
- [8] M. Gautier, P.O Vandanjon and C. Presse, "Identification of Inertial and Drive Gain Parameters of Robots", IEEE, 1994.
- [9] Hai-An Zhu and James C. Hung, "Identification of Dynamic systems : a Systematic approach", IEEE 1990
- [10] Jean-Jacques E. Slotine, "Adaptive Manipulator Control: A Case Study", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 33, No. 11, November 1988.
- [11] P. Dutkiewicz, K. R. Kozlowski and W. S. Wroblewski, "Experimental Identification of Load Parameters", IEEE 1993.
- [12] Woonchul Ham, "Adaptive Control Based on Explicit Model of Robot Manipulator", IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. 38, No. 4, April 1993.

- [13] J. S. Yu and P. C. Muller, "Indirect Adaptive Control for Nonlinear Robotic Systems", IEEE Conference on Control Applications, September 13-16, 1993.
- [14] Asada H. and Kamal Y., "Analysis and Design of a Direct-Drive Arm with a five-bar-link Parallel Drive Mechanism", ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1986.
- [15] K. Youcef-Toumi and A.T.Y. Kuo, "High-Speed Trajectory Control of a Direct-Drive Manipulator", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 9, No.1, February 1993.
- [16] K. Youcef-Toumi, "Analysis and Design of Manipulators With Decoupled and Configuration-Invariant Inertia Tensors Using Remote Actuation", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control Vol. 114, Number 2, June 1992.
- [17] Shankar Sastry and Marc Bodson, "Adaptive Control, Stability, Convergence, and Robustness", Prentice-Hall International, Inc., 1989.
- [18] Karl Johan Astrom and Bjorn Wittenmark, " Adaptive Control, 2nd edition", Reading, Mass. : Addison-Wesley, 1995.
- [19] P.E. Wellstead and M.B. Zarrop, "Self-tuning System", Chichester : John Wiley, 1991.