

การควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบบปรับเปลี่ยนได้โดยใช้การประมาณค่าความเสียดทานในเวลาจริง

Adaptive Control of Industrial Robots based on Real-time Friction Estimation

วัชร เลิศพิริยสุวัฒน์ และ รัชทิน จันทร์เจริญ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10300

โทร 218-6588, โทรสาร 252-2889, Email : Vatchara.L@Chula.ac.th

Vatchara Lertpiriyasuwat and Ratchatin Chancharoen,

Department of Mechanical Engineering

Chulalongkorn University,

Bangkok, 10300, Thailand

Tel : 218-6588, Fax : 252-2889

บทคัดย่อ

ความเสียดทานทางกลเป็นอุปสรรคสำคัญของการควบคุมตำแหน่งของอุปกรณ์ที่ต้องการความแม่นยำสูงเช่น แขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม และเครื่องจักรกล ในบทความนี้ได้เสนอการใช้ระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนค่าได้ ซึ่งใช้การประมาณค่าความเสียดทานในเวลาจริงร่วมกับระบบควบคุมแบบ PD ระบบประมาณค่าความเสียดทานที่ใช้เป็นระบบประมาณค่าปริภูมิแบบเชิงเส้น โดยให้แรงบิดเสียดทานเป็นหนึ่งในค่าปริภูมิ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนได้สามารถควบคุมให้แขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งสุดท้ายที่ต้องการได้อย่างถูกต้อง ในขณะที่การใช้ระบบควบคุมแบบ PD เพียงอย่างเดียวจะเกิดความผิดพลาด

Abstract

Mechanical friction is widely known to be a major source of inaccuracy in precision machines such as industrial robots and machine tools. In this paper, an adaptive control algorithm that uses a conventional Proportional-plus-Derivative (PD) control with compensation from a real-time friction estimator is proposed. The friction estimator is a linear state estimator with friction torque being one of the state. Experimental results of this adaptive control applied to a 5-axis industrial robot showed zero steady-state error for all slew maneuvers, while those of PD control alone with no friction compensation consistently have nonzero steady-state error.

1. บทนำ

ปัญหาที่มักพบในการควบคุมตำแหน่งของอุปกรณ์ที่ต้องการความแม่นยำสูงเช่นแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรม และเครื่องจักรกลแบบ NC นั้นคือ ความเสียดทานทางกล (Mechanical friction) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวที่มีการเคลื่อนที่สัมผัสกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเสียดทานในระบบขับเคลื่อนหรือระบบส่งกำลังเช่น ระบบเฟือง แบบริ้ง และแปรงถ่านของมอเตอร์ ในการออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งของเครื่องจักรที่มีความเสียดทานแต่ต้องการความแม่นยำสูงเหล่านี้ จำเป็นจะต้องคำนึงถึงผลของความเสียดทานด้วย

ระบบควบคุมแบบ Proportional-plus-Integral-plus-Derivative (PID) เป็นระบบควบคุมที่ใช้กันแพร่หลายในแขนหุ่นยนต์และเครื่องจักรแบบ NC ในปัจจุบัน ซึ่งใช้ผลรวมสะสมของความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งจริงกับตำแหน่งที่ต้องการที่เรียกว่า Integral Control เป็นตัวชดเชยความเสียดทานที่เกิดขึ้น แต่ข้อเสียของระบบควบคุมแบบ PID คืออาจจะทำให้เกิด limit cycles [1] นอกจากนี้ ยังจำเป็นต้องมีการ Reset ค่า Integral Control เป็นระยะเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการอิ่มตัวของมอเตอร์และแอมพลิไฟเออร์

เนื่องจากความเสียดทานนั้นเป็นปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา [2] ทำให้ยากที่จะสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สามารถทำนายความเสียดทานได้อย่างแม่นยำ นักวิจัยหลายคนจึงให้ความสนใจกับระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนค่าได้ ว่าเป็นวิธีหนึ่งที่น่าจะสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรที่มีความเสียดทานได้อย่างแม่นยำ โดย Canudas et al. [3] ใช้ recursive least squares ในการประมาณค่าความเสียดทานในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงในขณะทำงาน และใช้ค่าความเสียดทานที่ประมาณได้นี้ชดเชยให้กับระบบควบคุมแบบปริภูมิเพื่อควบคุม

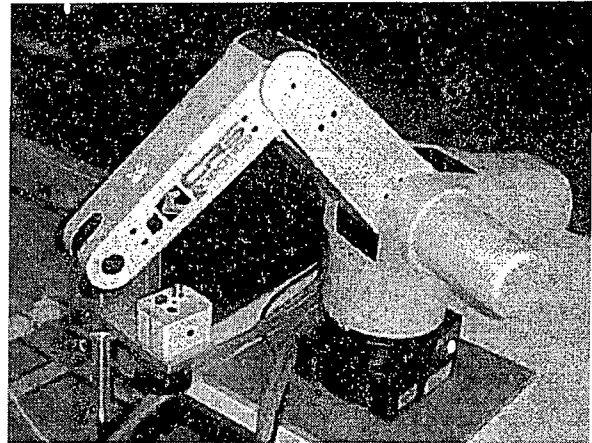
คุมความเร็ว Friedland และ Park [4] ได้เสนอวิธีการประมาณขนาดของความเสียหายโดยใช้ state observer เพื่อใช้ในการชดเชยให้กับระบบควบคุม Liebst และ Hulett [5] เสนอให้ใช้ extended Kalman filter เพื่อประมาณค่าความเสียหายในระบบควบคุมตำแหน่งของแกนหมุนของระบบกล Hirschorn และ Miller [6] ใช้ nonlinear observer เพื่อประมาณค่าความเสียหายในระบบมูเล่และสายพานในขณะที่ทำงาน และเพื่อชดเชยความเสียหายในการควบคุมตำแหน่ง Ramasubramanian และ Ray [7] ใช้ระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนได้ที่มี extended Kalman-Bucy filter สำหรับประมาณค่าความเสียหายในการควบคุมตำแหน่งของชุดทดลองขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ได้ โดยมีความแม่นยำสูงกว่าระบบควบคุมแบบ PID เกินกว่า 2 เท่า

งานวิจัยที่นำเสนอในบทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเพื่อเพิ่มความถูกต้อง (accuracy) ในการควบคุมตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมและเครื่องจักรแบบ NC สำหรับใช้ในการผลิต โดยในบทความนี้ได้เสนอการใช้ระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนค่าได้ ซึ่งใช้ประมาณค่าความเสียหายในเวลาจริงร่วมกับระบบควบคุมแบบ Proportional-plus-Derivative (PD) สำหรับควบคุมตำแหน่งของระบบทางกล และได้แสดงผลการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนค่าได้ เมื่อใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจริง

2. เครื่องมือที่ใช้

ในการวิจัยนี้ใช้แขนหุ่นยนต์แบบ articulated ของบริษัท CRS Robotic รุ่น A255 ดังแสดงในรูปที่ 1 แขนหุ่นยนต์นี้มี 5 แกนหมุน กล่าวคือแกน $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ โดยในแต่ละแกนจะขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงพร้อมชุดเฟืองทดและมี Encoder สำหรับวัดตำแหน่งเชิงมุมของข้อต่อ

ระบบประมวลสัญญาณของแขนหุ่นยนต์นี้เป็นไมโครคอมพิวเตอร์ รุ่น Pentium II ความเร็ว 400 MHz ซึ่งใช้ xPC เป็นระบบจัดการในเวลาจริง ระบบนี้ยังประกอบไปด้วยแผงรับส่งสัญญาณ A/D ที่มีความละเอียด 12 bits สำหรับส่งสัญญาณไปที่แอมพลิฟายเออร์เพื่อขับมอเตอร์ไฟฟ้า และแผงรับสัญญาณดิจิทัลสำหรับรับสัญญาณจากวงจรประมวลผลตำแหน่งของ Encoder ที่มีขนาดข้อมูล 24 bits ระบบควบคุมของแขนหุ่นยนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เขียนขึ้นด้วยโปรแกรม Matlab®/Simulink™



รูปที่ 1 แขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่ใช้ในการทดลอง

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์

เนื่องจากประเด็นหลักของบทความนี้เป็นการนำเสนอระบบควบคุมการเคลื่อนที่แบบปรับเปลี่ยนได้สำหรับระบบทางกลที่มีความเสียหาย ดังนั้นงานวิจัยในบทความนี้จึงศึกษาการควบคุมตำแหน่งข้อต่อของแขนหุ่นยนต์ในขณะที่เคลื่อนที่ข้อต่อที่ 1 เพียงข้อต่อเดียวเท่านั้น

สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในขณะที่เคลื่อนที่เพียงข้อต่อเดียวคือ

$$J\ddot{\theta} = \tau_m - \tau_f \quad (1)$$

โดยที่ J คือ ความเฉื่อยแรงบิดของส่วนที่เคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์

θ คือ ตำแหน่งเชิงมุมของข้อต่อ (องศา)

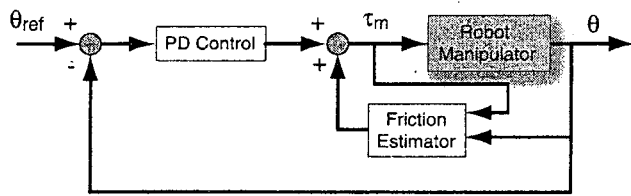
τ_m คือ แรงบิดจากมอเตอร์ (นิวตัน·เมตร)

τ_f คือ แรงบิดจากมอเตอร์ (นิวตัน·เมตร)

จากสมการที่ 1 จะเห็นว่า τ_f นั้นหมายถึงผลรวมของแรงบิดเนื่องจากแรงเสียดทานทั้งหมด ซึ่งโดยทั่วไปประกอบด้วยสองส่วนหลักคือ แรงเสียดทานเนื่องจากความหนืด (viscous friction) ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ของข้อต่อ และแรงเสียดทานที่เรียกว่า stick-slip friction

4. ระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนได้

ระบบควบคุมตำแหน่งข้อต่อของแขนหุ่นยนต์แบบปรับเปลี่ยนได้ที่นำเสนอในบทความนี้ประกอบด้วยสองส่วนหลักคือระบบควบคุมแบบ Proportional-plus-Derivative (PD) และระบบประมาณค่าแรงเสียดทานในเวลาจริง (Real-time Friction Estimation) แผนผังของระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนค่าได้แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนได้

การออกแบบระบบควบคุมแบบ PD

การออกแบบระบบควบคุมแบบ PD นั้น ไม่คิดผลของระบบประมาณค่าแรงเสียดทาน ดังนั้น ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบปิด (Closed-loop transfer function) คือ

$$\frac{\Theta(s)}{\Theta_{ref}(s)} = \frac{K_p + K_d s}{Js^2 + K_d s + K_p}$$

ซึ่ง PD control = $K_p + K_d s$

โดยที่ K_p คือ proportional gain

K_d คือ derivative gain

ระบบควบคุมแบบ PD นี้ จะทำหน้าที่เหมือนกับสปริงและตัวหน่วง (damping) ให้กับหุ่นยนต์ โดยมีค่าคงที่ของสปริง (Spring stiffness) เป็น K_p ค่าสัมประสิทธิ์ของการหน่วง (Damping coefficient) เป็น K_d และตำแหน่งสมดุลของสปริงนี้เป็น Θ_{ref}

ในบทความนี้ ระบบควบคุมแบบ PD ได้รับการออกแบบเพื่อให้แขนหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ในย่านความถี่ตั้งแต่ 0-3 Hz (Bandwidth frequency = 3 Hz) โดยมีสัดส่วนความหน่วง (Damping ratio) เป็น 0.7

ดังที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า การควบคุมแขนหุ่นยนต์หรือระบบทางกลอื่นๆ ซึ่งมีแรงเสียดทาน ให้เคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปยังตำแหน่งอื่น โดยใช้ระบบควบคุมแบบ PD นั้น จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ตำแหน่งสุดท้ายของแขนหุ่นยนต์จะผิดพลาดไปจากตำแหน่งที่ต้องการ (steady-state error) เนื่องจากแรงบิดซึ่งเกิดจากระบบควบคุมแบบ PD ไม่สามารถเอาชนะแรงเสียดทานในขณะที่หุ่นยนต์หยุดอยู่ที่ตำแหน่งสุดท้ายได้

การออกแบบระบบประมาณค่าแรงเสียดทานในเวลาจริง

ระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนได้ที่เสนอในบทความนี้ จะประมาณค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในแขนของหุ่นยนต์ในขณะที่ใช้งานจริงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งค่าแรงเสียดทานที่ประมาณได้นี้จะนำไปใช้ โดยแรงบิดที่มอเตอร์ใช้ขับเคลื่อนหุ่นยนต์จะเท่ากับผลรวมของแรงบิดเนื่องจากระบบควบคุมแบบ PD และแรงบิดเสียดทานที่ประมาณได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าความแม่นยำในการควบคุมตำแหน่งของระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนได้นี้จะขึ้นอยู่กับความแม่นยำของค่าแรงเสียดทานที่ประมาณได้

ระบบประมาณค่าความเสียดทานที่ใช้ในบทความวิจัยนี้เป็นระบบประมาณค่าปริภูมิแบบเชิงเส้น (Linear state estimator) โดยให้แรงบิดเสียดทานเป็นหนึ่งในค่าปริภูมิ (state) ซึ่งทำให้สามารถเขียนสมการที่ 1 ในรูปของสมการปริภูมิของแขนหุ่นยนต์ได้เป็น

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx\end{aligned}\quad (2)$$

$$\text{โดยที่ } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1/J \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/J \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$x = [\theta \quad \dot{\theta} \quad \tau_f]^T \text{ และ } u = \tau_m$$

ดังนั้น สมการของระบบประมาณค่าความเสียดทานคือ

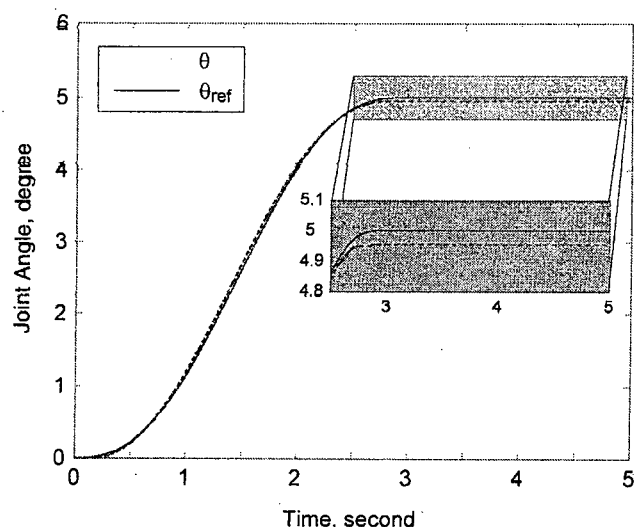
$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + K(y - C\hat{x}) \\ y_e &= [0 \quad 0 \quad 1]\hat{x}\end{aligned}\quad (3)$$

โดยที่ $\hat{x}$ คือค่าประมาณของ x , y_e คือค่าประมาณของแรงบิดเสียดทานซึ่งระบบส่งไปยังมอเตอร์ และ K เป็นเมทริกซ์คงที่ซึ่งใช้ในการออกแบบ

ในงานวิจัยนี้ ระบบประมาณค่าความเสียดทานได้รับการออกแบบให้มีการตอบสนองในย่านความถี่ตั้งแต่ 0-5 Hz โดยมีสัดส่วนความหน่วงเท่ากับ 0.7

5. ผลการทดลองและอภิปราย

ในหัวข้อนี้จะเสนอผลการทดสอบเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนได้ดังที่ได้นำเสนอในหัวข้อที่ 4 กับสมรรถนะของระบบควบคุมแบบ PD เพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการประมาณและชดเชยค่าความเสียดทาน โดยทดสอบควบคุมข้อต่อที่ 1 ของกับแขนหุ่นยนต์ CRS ในลักษณะเดียวกัน โดยมีทางเดินอ้างอิงในการควบคุมเริ่มจากตำแหน่งหยุดนิ่ง $\Theta_{ref} = 0^\circ$ ไปหยุดที่ตำแหน่ง $\Theta_{ref} = 5^\circ$ ภายในเวลา 3 วินาที เส้นทางเคลื่อนที่จะเป็นแบบ 5th-order slew ซึ่งเป็นเส้นทางเคลื่อนที่ที่มีความเร็วและความเร่งในขณะเริ่มเคลื่อนที่และหยุดการเคลื่อนที่เท่ากับ 0 ในการทดสอบนั้น ระบบควบคุมทั้งสองทำงานบนเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ดังอธิบายในหัวข้อที่ 2 ซึ่งประมวลสัญญาณทุกๆ 0.1 มิลลิวินาที

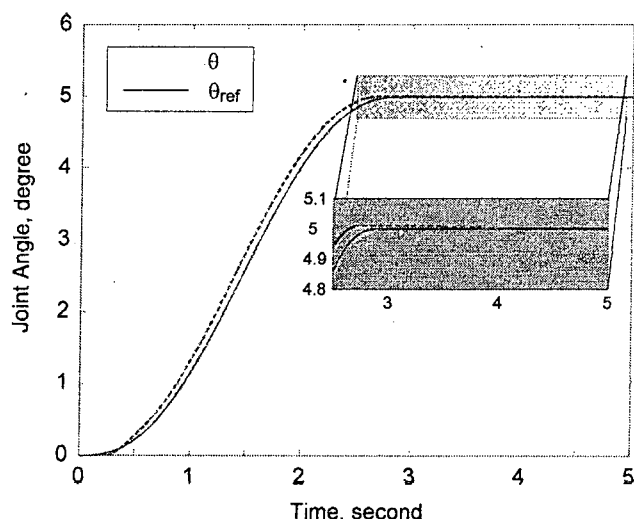


รูปที่ 3 ผลการทดสอบระบบควบคุมแบบ PD

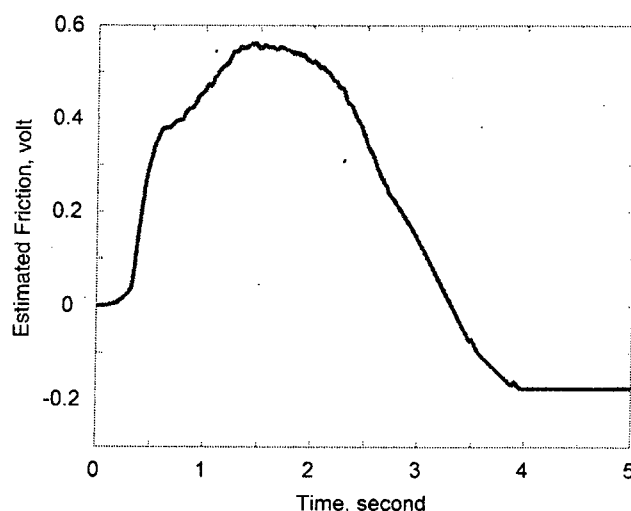
ผลการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมแบบ PD ที่ไม่มีการประมาณและชดเชยค่าความเสียดทานแสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเห็นได้ว่าระบบควบคุมแบบ PD สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้ดี โดยในขณะเคลื่อนที่ (ช่วงเวลา 0-3 วินาที) เกิดความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 0.15^\circ$ แต่ระบบควบคุมแบบ PD ไม่สามารถควบคุมให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังจุดที่ตำแหน่งสุดท้ายที่ต้องการได้ ดังเห็นได้จากตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ในช่วงเวลาหลังจาก 3 วินาที ในรูปขยายของรูปที่ 3 ทั้งนี้ สาเหตุเนื่องจากระบบควบคุมแบบ PD ไม่สามารถเอาชนะแรงเสียดทานสถิตยในขณะที่แขนหุ่นยนต์หยุดนิ่งอยู่ที่ $\theta = 4.95^\circ$ ให้เคลื่อนที่ไปยัง $\theta = 5^\circ$ ได้ อย่างไรก็ตาม เราสามารถลดขนาดของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้ได้โดยการเพิ่มค่า K_p แต่ค่า K_p ที่สูงเกินไปอาจทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพได้ และยังต้องการแรงบิดสูงเพื่อใช้ในการขับเคลื่อนแขนหุ่นยนต์ ซึ่งในทางปฏิบัติ มอเตอร์และแอมพลิฟายเออร์จะมีขีดจำกัดแรงบิดสูงสุดที่มอเตอร์สามารถสร้างขึ้นได้

ผลการทดสอบสมรรถนะของระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนได้แสดงอยู่ในรูปที่ 4 ในขณะเคลื่อนที่ในช่วงเวลา 0-3 วินาที ตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์เกิดความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 0.2^\circ$ ซึ่งใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการใช้ระบบควบคุมแบบ PD แต่หลังจากสิ้นสุดการเคลื่อนที่ แขนหุ่นยนต์ที่ควบคุมโดยระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนได้สามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งสุดท้ายที่ต้องการได้อย่างแม่นยำเมื่อเวลา 3.9 วินาที โดยไม่เกิดความผิดพลาดเหมือนในกรณีที่ใช้ระบบควบคุมแบบ PD ทั้งนี้ เนื่องจากระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนได้มีการประมาณและชดเชยค่าความเสียดทานในแขนหุ่นยนต์ในขณะใช้งานจริง ค่าความเสียดทานที่ประมาณได้ในขณะที่แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามเส้นทางในรูปที่ 4 นั้น แสดงอยู่ในรูปที่ 5 จากรูปนี้ จะเห็นว่าค่าความเสียดทานสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อเวลา 1.5 วินาที ในขณะที่แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุด ทำให้ค่าความเสียดทานเนื่องจากความหนืดซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วของการเคลื่อนที่มีค่าสูงสุดด้วย และในขณะที่แขนหุ่นยนต์หยุดการเคลื่อนที่ที่ตำแหน่ง $\theta = 5^\circ$ อย่างแม่นยำ

หลังจากเวลา 3.9 วินาทีนั้น ค่าความเสียดทานที่ประมาณได้มีค่าคงที่ ซึ่งค่านี้จะน้อยกว่าค่าความเสียดทานสถิตยสูงสุดที่จะเกิดขึ้นได้



รูปที่ 4 ผลการทดสอบระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนได้



รูปที่ 5 ค่าความเสียดทานที่ประมาณขึ้นในขณะทำงาน

6. บทสรุป

ระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนได้ที่เสนอในบทความนี้ สามารถใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่มีความเสียดทานได้ โดยระบบควบคุมนี้จะใช้ระบบควบคุมแบบ PD ในการควบคุมให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ต้องการ และใช้ระบบประมาณค่าความเสียดทานเพื่อชดเชยความเสียดทานในขณะเคลื่อนที่ ซึ่งประกอบด้วยความเสียดทานเนื่องจากความหนืดและความเสียดทานแบบ stick-slip นอกจากนี้ ระบบควบคุมแบบปรับเปลี่ยนค่าได้ยังสามารถควบคุมให้แขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งสุดท้ายที่ต้องการได้อย่างถูกต้อง

เอกสารอ้างอิง

- [1] C. Canudas de wit, H. Olsson, K. J. Astrom, and P. Lischinsky, "A New Model for Control of System with Friction," *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol.40, No.3, Mar 1995, p.419-25.
- [2] B. Armstrong-Helouvry, "Stick-Slip and Control in Low-Speed Motion," *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol.38, No.10, Oct 1993, p.1483-96.
- [3] C. Canudas de wit, K. J. Astrom, and K. Braun, "Adaptive Friction Compensation in DC-Motor Drives," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol.RA-3, No.6, Dec 1987, p.681-85.
- [4] B. Friedland, and Y. J. Park, "On Adaptive Friction Compensation," *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol.37, No.10, Oct 1992, p.1609-12.
- [5] B. S. Liebst, and W. J. Hulett, "Extended Kalman Filter Based Friction Compensation," *Proceeding of the 1st IEEE Conference on Control Applications*, Vol.2, 1992, p.841-6.
- [6] R. M. Hirschorn, and G. Miller, "Control of Nonlinear Systems with Friction," *IEEE Transaction on Control System Technology*, Vol.7, No.5, Sep 1999, p.588-95.
- [7] A. Ramasubramanian, and L. R. Ray, "Adaptive Friction Compensation using Extended Kalman-Bucy Filter Friction Estimation: A Comparative Study," *Proceeding of the American Control Conference*, Chicago, IL, Jun 2000, p.2588-94.