

การศึกษาแบบจำลองความเสียดทานที่แสดงผลของสัญญาณความถี่สูง

5.1 นำเรื่อง

จากที่ได้เคยกล่าวไว้ในตอนต้นถึงผลกระทบต่างๆ ของแรงเสียดทานที่มีต่อระบบทางกล ได้มีนักวิจัยหลายๆ ท่านได้ศึกษา ค้นคว้าและนำเสนอวิธีการหลีกเลี่ยงหรือลดผลของแรงเสียดทานที่มีต่อระบบมาอย่างมากมาย หนึ่งในวิธีที่นิยมกันมากที่สุดคือการใช้แบบจำลองของความเสียดทานในการประมาณค่าของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น และทำการชดเชยค่านั้นๆ เพื่อลดผลของแรงเสียดทานที่มีต่อระบบ อีกวิธีที่มีการนำเสนอคือการเพิ่มสัญญาณความถี่สูงให้แก่ระบบเพื่อลดผลของปรากฏการณ์ Stick-Slip Motion ที่ความเร็วใกล้ศูนย์ ซึ่งลักษณะของสัญญาณความถี่สูงได้กล่าวไว้ในบทต่อไป

เนื่องจากคุณลักษณะของแรงเสียดทานที่ความเร็วใกล้ศูนย์ มีความไม่เชิงเส้นสูงมาก ทำให้ยากแก่การศึกษาและประมาณขนาดของแรงเสียดทาน การเพิ่มสัญญาณความถี่สูงแก่ระบบเป็นการเพิ่มความไม่เชิงเส้นแก่แรงเสียดทานที่ความเร็วใกล้ศูนย์ แล้วพัฒนาแบบจำลองของความเสียดทานที่สามารถแสดงผลของสัญญาณความถี่สูงได้ จึงเป็นงานที่ค้นคว้าวิจัย และได้นำเสนอในส่วนของงานวิจัย

5.2 ผลของสัญญาณความถี่สูงที่มีต่อระบบ

ในส่วนนี้จะนำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับผลของสัญญาณความถี่สูงที่มีต่อระบบควบคุม ซึ่งประกอบด้วย ระบบควบคุมแบบปิด โดยจะทำการศึกษาความสามารถในการลดค่าความผิดพลาดสุดท้ายของระบบเมื่อเพิ่มสัญญาณความถี่สูง เข้าสู่ระบบควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robotics เปรียบเทียบกับการจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์ และในระบบที่ใช้การควบคุมแบบเปิด โดยศึกษาพฤติกรรมของแรงเสียดทานของระบบที่เกิดขึ้นจริงและพฤติกรรมของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากการจำลองระบบด้วยคอมพิวเตอร์ด้วยแบบจำลองความเสียดทานชนิดต่างๆ

5.2.1 รูปแบบของสัญญาณความถี่สูง

สัญญาณความถี่สูงหรือ Dither ที่จะนำมากล่าวจากนี้คือ สัญญาณคาบที่มีขนาดและความถี่ค่าหนึ่ง ซึ่งส่งเข้าสู่ระบบพร้อมกับสัญญาณควบคุม โดยสัญญาณความถี่สูงนี้จะทำให้ระบบเคลื่อนที่ไป กลับ ด้วยขนาดของแอมพลิจูดที่มีขนาดเล็ก เพื่อลดปัญหาที่เกิดจากความไม่เชิงเส้นของความเสียดทานโดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อระบบเข้าใกล้ตำแหน่งที่มีความเร็วเป็นศูนย์

ค่าสัญญาณอินพุตความถี่สูง หรือ dither ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้มีรูปแบบเป็นคลื่นรูปไซน์ จากการทดสอบในหุ่นยนต์ CRS Robotics และการจำลองระบบในคอมพิวเตอร์ ขนาดของสัญญาณความถี่สูงที่นำมาพร้อมกับสัญญาณคำสั่ง ต้องมีค่าสูงกว่าค่าแรงเสียดทานสถิตย์ และมีค่าความถี่อยู่ในช่วงความถี่ใช้งานของระบบ จึงจะสามารถทำให้ค่าความผิดพลาดสุดท้ายในระบบควบคุมมีค่าลดลงได้

สำหรับการทดลองในหุ่นยนต์ CRS Robotics จากข้อมูลที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 พบว่าขนาดของแรงเสียดทานสถิตย์ที่เกิดขึ้นมีค่าประมาณ 0.25 โวลต์ของสัญญาณคำสั่ง และจากการทดสอบโดยการปรับค่าความถี่ของสัญญาณความถี่สูงหลายๆ ครั้ง พบ สัญญาณความถี่สูงที่มีผลทำให้ค่าความผิดพลาดสุดท้ายลดลงอย่างเห็นได้ชัด และนำมาใช้ในการทดลองเพื่อยืนยันผลจากการจำลองระบบ มีขนาด 0.5 โวลต์ และมีค่าความถี่ 20 Hz

5.2.2 การศึกษาผลของสัญญาณความถี่สูงที่มีต่อระบบควบคุม

ในหัวข้อนี้ของวิทยานิพนธ์ นำเสนอผลของสัญญาณความถี่สูงที่มีต่อระบบควบคุมโดยมีขั้นตอนของการศึกษาเริ่มจากการควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robotics เพื่อพิจารณาผลของแรงเสียดทานที่มีต่อค่าความผิดพลาดสุดท้าย และช่วงความถี่ใช้งานของสัญญาณคำสั่ง เพื่อนำมาปรับแต่งขนาด ความถี่ของสัญญาณความถี่สูง และค่าตัวแปรต่างๆ ของแบบจำลองความเสียดทานที่สามารถแสดงผลของสัญญาณความถี่สูงที่ช่วงความถี่ใช้งานของระบบ จากนั้นจะทำการพิจารณาการจำลองระบบควบคุม เพื่อเปรียบเทียบผลที่เกิดขึ้นในระบบควบคุมแบบปิด โดยพิจารณาสัญญาณคำสั่งแบบขั้นบันไดขนาด 5 10 30 องศา และสัญญาณคำสั่งรูปไซน์ ขนาด 30 องศา ความถี่ 1 และ 5 Hz.

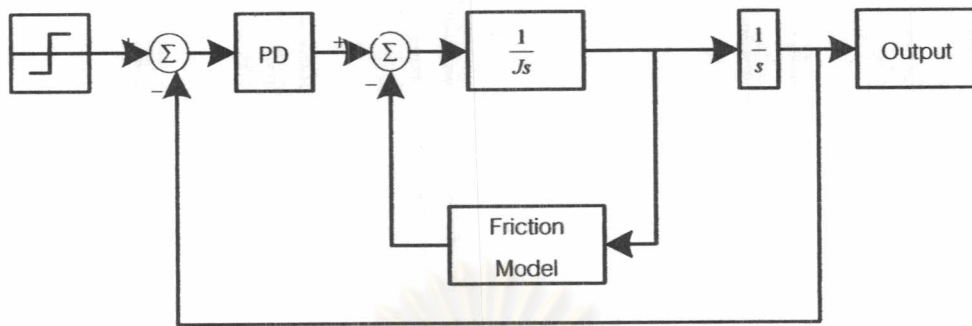
จากนั้นเป็นการศึกษาพฤติกรรมของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในหุ่นยนต์ CRS Robotics ซึ่งจะพิจารณาจากระบบควบคุมแบบเปิดโดยการใช้ แผนภาพความเร็วและแรงเสียดทานในการพิจารณา โดยมีขั้นตอนของการศึกษาเริ่มจากการควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robotics ด้วยระบบควบคุมแบบเปิดโดยใช้สัญญาณคำสั่งรูปไซน์ ที่มีขนาดของแอมป์พลิจูด 72.59 Nm และมีความถี่อยู่ในช่วงใช้งาน (0-5 Hz) เพื่อพิจารณาพฤติกรรมของแรงเสียดทาน เมื่อเพิ่มสัญญาณความถี่สูงเข้าสู่ระบบควบคุมแบบเปิด และทำการจำลองระบบในคอมพิวเตอร์เพื่อเปรียบเทียบผลของการควบคุมแบบเปิดเมื่อใช้แบบจำลองความเสียดทานชนิดต่างๆ เทียบกับผลการทดสอบในหุ่นยนต์ CRS Robotics

▪ การศึกษาผลของสัญญาณความถี่สูงในระบบควบคุมแบบปิด

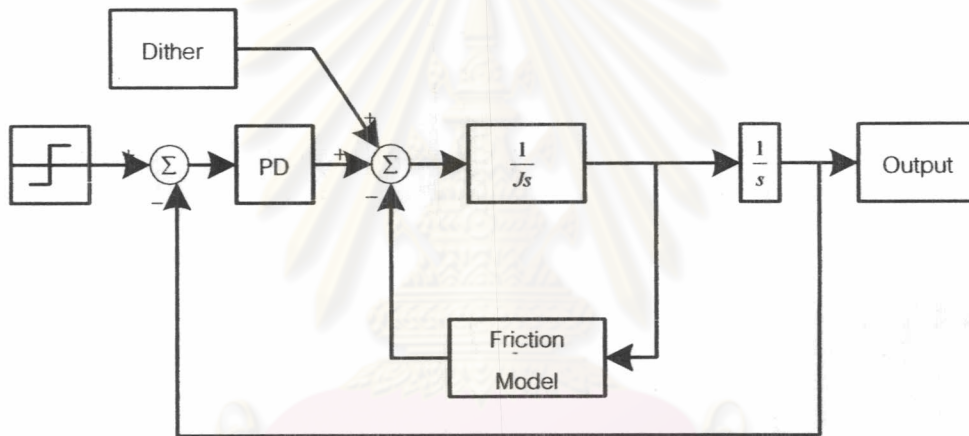
ในส่วนนี้ของงานวิจัย กล่าวถึงการจำลองระบบและการควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robotics เพื่อศึกษาผลของสัญญาณความถี่สูงที่มีต่อการควบคุมตำแหน่งแบบปิด โดยพิจารณาจากค่าความผิดพลาดสุดท้าย ในที่นี้ใช้โปรแกรม Matlab®-Simulink® ในการจำลองและการควบคุมระบบ โดยใช้ตัวแปรที่ได้จากวิธีการในบทที่ 4 คือ ค่า $27.68 \text{ Nm} \cdot \text{s}^2$ ค่าแรงเสียดทานจลน์ 33.535 Nm และค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดคือ $0.000049 \text{ Nm} \cdot \text{s}$

จากรูปที่ 5.1ก การจำลองระบบควบคุม ใช้แบบจำลองความเสียดทานของ Coulomb Viscous Friction โดยในที่นี้จะใช้ตัวควบคุมแบบ PD Controller โดยมีค่า k_p และ k_d คือ 0.5 และ 0.05 ตามลำดับ สัญญาณตำแหน่งอ้างอิงขนาด 10 องศา โดยเปรียบเทียบผลของการควบคุมในหุ่นยนต์ CRS Robotics เทียบกับการจำลองในคอมพิวเตอร์เมื่อใช้แบบจำลองความเสียดทานชนิดต่างๆ และเพื่อสังเกตผลของสัญญาณความถี่สูงที่มีต่อระบบ จึงได้เพิ่มสัญญาณความถี่สูงเข้าสู่ระบบดังในรูปที่ 5.1ข

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

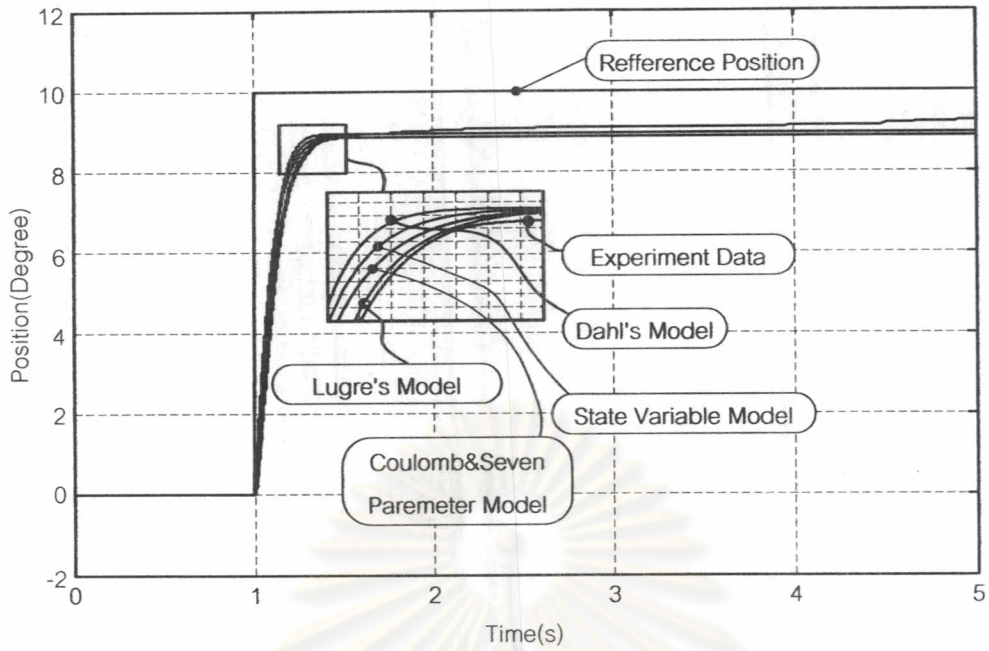


ก. แผนภาพการจำลองระบบควบคุมแบบปิด

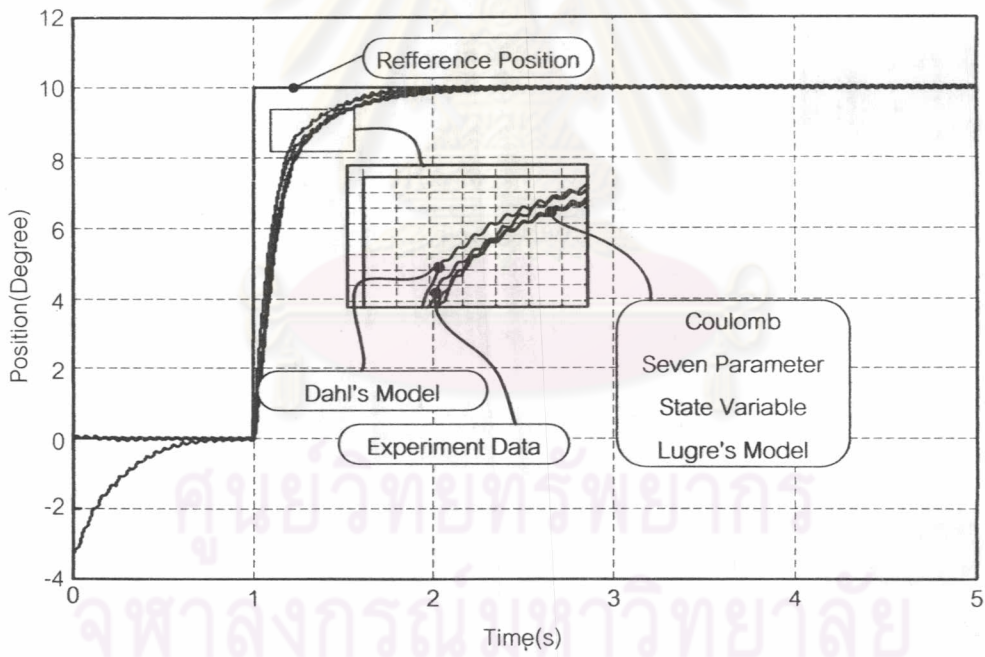


ข. แผนภาพการจำลองระบบควบคุมแบบปิดและเพิ่มสัญญาณความถี่สูงเข้าสู่ระบบ
รูปที่ 5.1 แผนภาพการจำลองระบบควบคุมแบบปิดเพื่อศึกษาผลของสัญญาณความถี่สูง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก. ผลการจำลองระบบควบคุมแบบปิดเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง



ข. ผลการควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robotics เมื่อเพิ่มสัญญาณความถี่สูง รูปที่ 5.2 ผลของสัญญาณความถี่สูงที่มีต่อระบบควบคุมแบบปิด

จากรูปที่ 5.2ก แสดงผลของการจำลองการควบคุมระบบมอเตอร์ที่มีใช้แบบจำลองความเสียดทานชนิดต่างๆ เทียบกับผลที่ได้จากการควบคุมแกนหมุนที่ 1 ในหุ่นยนต์ CRS Robotics จากรูปแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนถึงผลของแรงเสียดทาน ที่ทำให้ระบบควบคุมไม่สามารถควบคุมตำแหน่งให้ไปถึงจุดอ้างอิงได้ และเมื่อจำลองผลการควบคุมในคอมพิวเตอร์โดยใช้แบบจำลองความเสียดทานชนิดต่างๆ จะให้ผลในลักษณะเดียวกัน

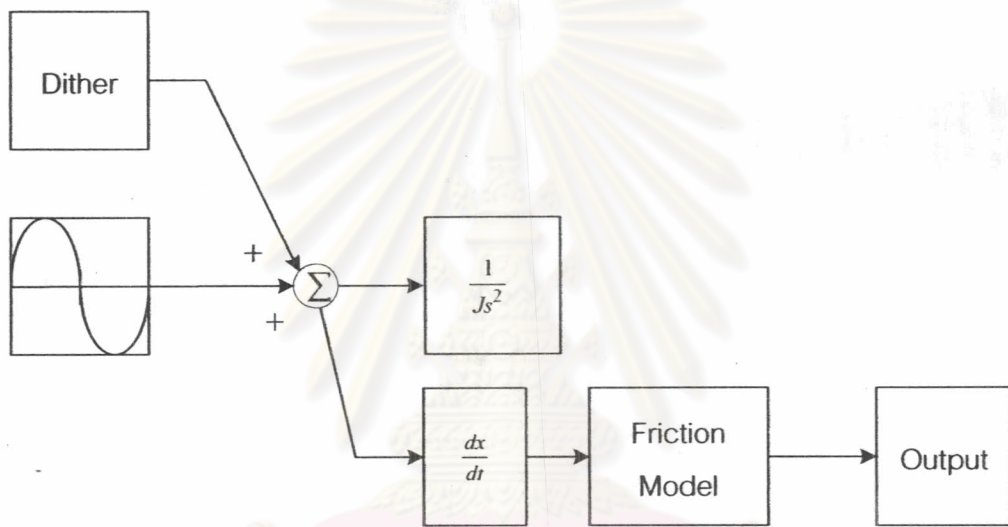
รูปที่ 5.2ข เป็นการแสดงผลของการควบคุมแกนหมุนที่ 1 ของหุ่นยนต์ CRS Robotics เมื่อเพิ่มสัญญาณความถี่สูงเข้าสู่ระบบ เปรียบเทียบกับการจำลองระบบควบคุมในคอมพิวเตอร์โดยใช้แบบจำลองความเสียดทานชนิดต่างๆ จากรูปที่ 5.2ข แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจน ถึงผลของสัญญาณความถี่สูงที่ช่วยลดค่าความผิดพลาดสุดท้าย ทั้งในการทดลองจริงในหุ่นยนต์ CRS Robotics และการจำลองระบบโดยใช้แบบจำลองชนิดต่างๆ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองความเสียดทานทุกชนิดที่ได้นำเสนอสามารถแสดงผลของสัญญาณความถี่สูงได้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลอง

■ การศึกษาผลของสัญญาณความถี่สูงในระบบควบคุมแบบเปิด

ในส่วนนี้ กล่าวถึงการจำลองระบบและการควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robotics ในระบบควบคุมแบบเปิด เพื่อศึกษาพฤติกรรมของความเสียดทานเมื่อเพิ่มสัญญาณความถี่สูงเข้าสู่ระบบ โดยพิจารณาจากรูปแบบความสัมพันธ์ของแรงเสียดทานกับความเร็วเป็นหลัก ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งเป็นแผนภาพการจำลองระบบควบคุมแบบเปิด ที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของแรงเสียดทาน โดยใช้สัญญาณคำสั่งรูปไซน์ ร่วมกับแบบจำลองความเสียดทานชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองในแขนหุ่นยนต์ CRS Robotics ดังแสดงในรูปที่ 5.4ข ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและแรงเสียดทานของหุ่นยนต์ CRS Robotics ในระบบควบคุมแบบเปิด โดยใช้สัญญาณคำสั่งรูปไซน์ ขนาด $72.59 Nm$ ความถี่ $0.25 Hz$ และเพิ่มสัญญาณความถี่สูงขนาด $59.50 Nm$ ความถี่ $20 Hz$ รวมกับสัญญาณคำสั่ง และคำนวณความเร็ว ความเร่งและหาค่าของแรงเสียดทานด้วยวิธีการดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 5.4ก ซึ่งเป็นรูปแบบความสัมพันธ์ของแรงเสียดทานและความเร็วที่เกิดจากแบบจำลองความเสียดทานชนิดต่างๆ พบว่า ในช่วงที่ความเร็วเข้าใกล้ศูนย์

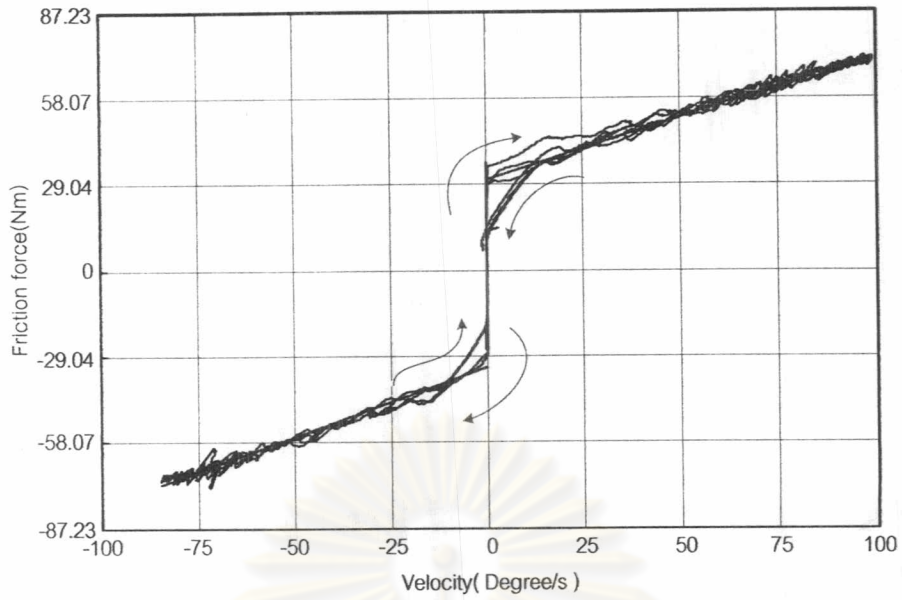
พฤติกรรมของความเสียหายที่ได้จากการทดลองจะสม่ำเสมอ และราบเรียบกว่ามาก

จากการทดสอบความสามารถในการแสดงผลของสัญญาณความถี่สูงที่มีต่อระบบควบคุมโดยแบบจำลองความเสียหายชนิดต่างๆ พบว่าแบบจำลองความเสียหายที่ได้นำเสนอมาไม่แสดงผลของสัญญาณความถี่สูงในระบบควบคุมแบบเปิด หรือกล่าวคือพฤติกรรมของแรงเสียดทานที่รอบแกนความเร็วเป็นศูนย์ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงดังนั้นก็จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองที่สามารถแสดงพฤติกรรมของแรงเสียดทานที่เป็นผลมาจากสัญญาณความถี่สูงและสอดคล้องกับระบบที่มีอยู่ได้

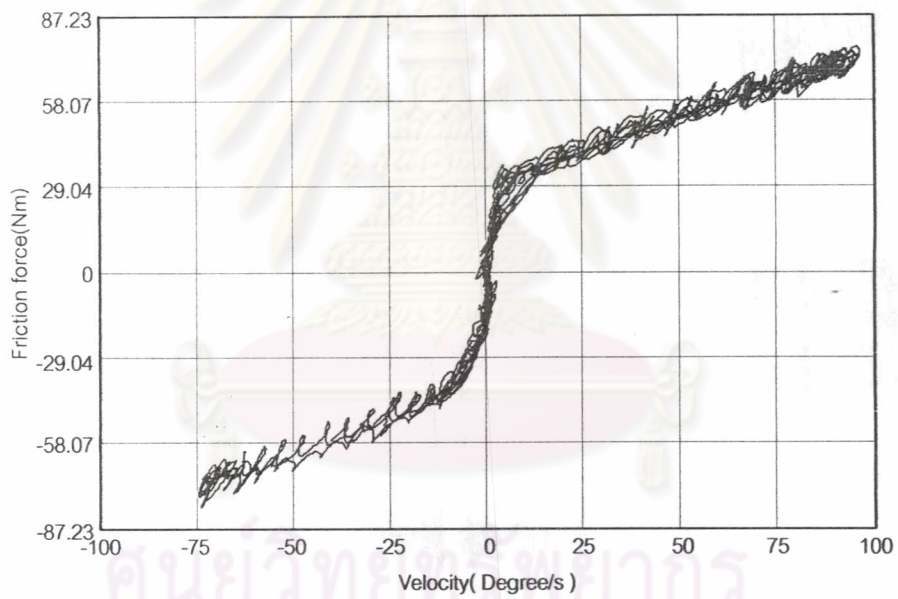


รูปที่ 5.3 แผนภาพการจำลองระบบแบบเปิด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก. พฤติกรรมของแรงเสียดทานในหุ่นยนต์ CRS Robotics



ข. พฤติกรรมของแรงเสียดทานในหุ่นยนต์ CRS Robotics เมื่อเพิ่มสัญญาณความถี่สูง
รูปที่ 5.4 การเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของเสียดทานเมื่อเพิ่มสัญญาณความถี่สูง

5.3 แบบจำลองความเสียดทานที่มีผลต่อสัญญาณความถี่สูง

จากลักษณะของความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับความเสียดทานที่รอบๆ แกนความเร็วของรูปที่ 5.4 พบว่าพฤติกรรมของแรงเสียดทาน ในระบบที่ควบคุมด้วยตัวควบคุมแบบเปิดและมีสัญญาณความถี่สูง สามารถลดความไม่เชิงเส้นของแรงเสียดทานที่ความเร็วใกล้เคียงศูนย์ และมีรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างแรงเสียดทานและความเร็วในรูป \arctan

โดยการกำหนดรูปแบบสมการเพื่อให้ได้ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงเสียดทานในช่วงความเร็วต่ำเพื่อให้ได้ลักษณะดังรูปที่ 5.4 ดังนี้

$$\tau = A \tan^{-1}\left(\frac{\pi \cdot V}{a}\right) \quad (5.1)$$

เมื่อ τ แทนแรงเสียดทานที่เกิดในช่วงความเร็วต่ำ
 A, a เป็นตัวแปรของระบบที่ขึ้นอยู่กับขนาดและความถี่ของสัญญาณคำสั่ง
 V คือความเร็วของระบบ

จากสมการข้างต้นเมื่อศึกษาภาพรวมของรูปที่ 5.4 แล้วพบว่ารูปแบบของแรงเสียดทานสามารถแบ่งเป็น 3 ช่วงคือช่วงที่ค่าความเร็วเป็นบวก ช่วงที่ค่าความเร็วเป็นลบ และช่วงที่มีการเปลี่ยนทิศทางของความเร็ว ทำให้สามารถกำหนดรูปแบบของแรงเสียดทานให้สอดคล้องกับลักษณะของแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในหุ่นยนต์ CRS Robotics คือ

$$\tau = \begin{cases} \tau_c \operatorname{sgn}(V) + c \cdot V & ; V > a, V < -a \\ A \tan^{-1}\left(\frac{\pi \cdot V}{a}\right) & ; -a < V < a \end{cases} \quad (5.2)$$

เมื่อ τ_c คือแรงเสียดทานแบบ Coulomb (Nm)
 c คือค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด (Nm · s / Degree)
 V ความเร็วเชิงมุมของระบบ (Degree / s)

จากสมการที่ 5.2 พบว่ามีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าได้แก่ A และ a ซึ่งสามารถใช้วิธีหาค่าได้จากวิธี Non-linear Least Square Method (ภาคผนวก ค) ในการหาค่าตัวแปรต่างๆ ไปพร้อมๆ กับค่าความเฉื่อยได้ (โปรแกรมการคำนวณแสดงในภาคผนวก จ) ดังรูปที่ 5.5

จากรูปที่ 5.5 เมื่อใช้วิธี Non-linear Least Square Method ในการหาค่าตัวแปรของแบบจำลองความเสียดทานที่ได้นำเสนอ เพื่อให้เหมาะสมกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง ได้ค่าตัวแปรได้จากสมการ 5.2

$$\tau_{friction} = \begin{cases} 29.998 + 0.000038\dot{\theta}, & \dot{\theta} > 0 \\ 20.23 \cdot \tan^{-1}\left(\frac{\pi V}{3.77}\right), & \dot{\theta} = 0 \\ -33.79 + 0.00047\dot{\theta}, & \dot{\theta} < 0 \end{cases} \quad Nm \quad (5.3)$$

เมื่อศึกษาพฤติกรรมของแรงเสียดทานในการตอบสนองสัญญาณความถี่สูงโดยการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณคำสั่ง และใช้วิธีการที่นำเสนอในการหาค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบ ได้ผลดังที่จะนำเสนอต่อไป

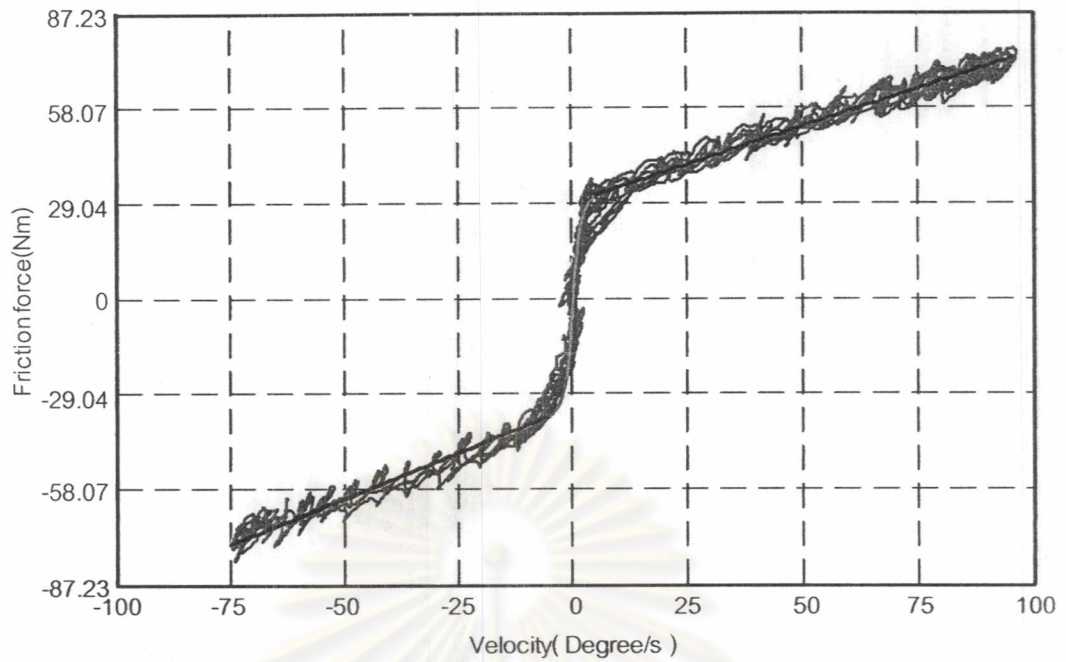
และเมื่อใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในระบบควบคุมแบบเปิด โดยมีสัญญาณคำสั่งรูปซายน์ ขนาด $72.59 Nm$ ความถี่ $0.5 Hz$ และเพิ่มสัญญาณความถี่สูงขนาด $59.5 Nm$ ความถี่ $20 Hz$ เข้าสู่ระบบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงเสียดทานได้ผลดังรูปที่ 5.6 จากรูปที่ 5.6 สามารถใช้วิธี Non-linear Least Square Method ในการหาค่าตัวแปรพบว่าสามารถหาค่าตัวแปรได้จากสมการ 5.2

$$\tau_{friction} = \begin{cases} 32.25 + 0.000041\dot{\theta}, & \dot{\theta} > 0 \\ 26.18 \cdot \tan^{-1}\left(\frac{\pi V}{4.01}\right), & \dot{\theta} = 0 \\ -36.17 + 0.00047\dot{\theta}, & \dot{\theta} < 0 \end{cases} \quad Nm \quad (5.4)$$

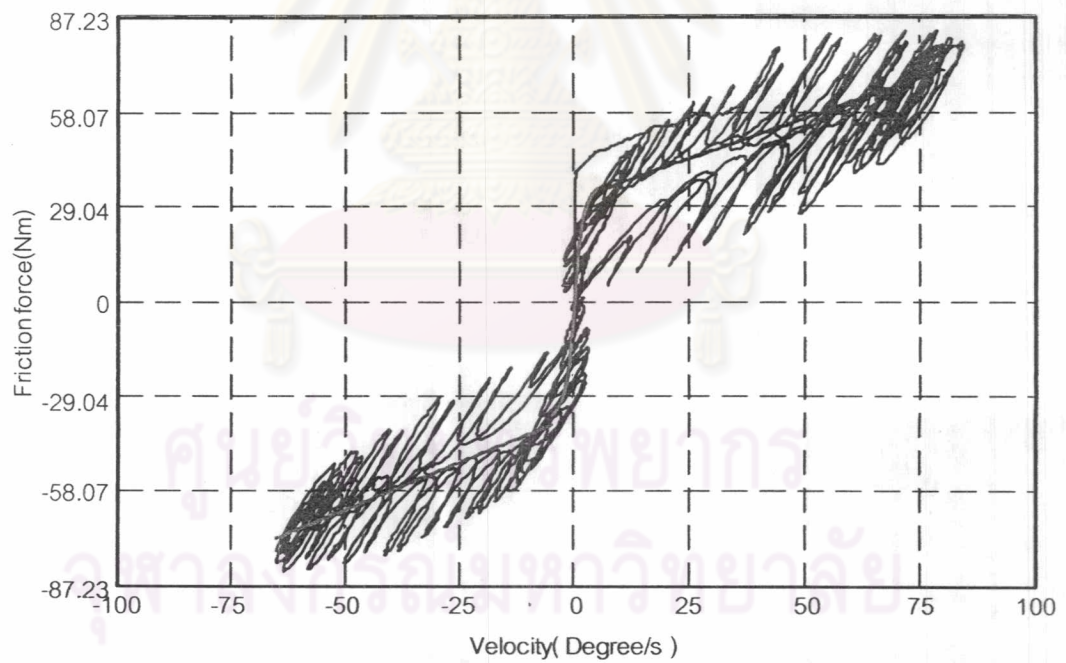
เมื่อใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในระบบควบคุมแบบเปิด โดยมีสัญญาณคำสั่งรูปซายน์ ขนาด $72.59 Nm$ ความถี่ $1 Hz$ และเพิ่มสัญญาณความถี่สูงขนาด $59.5 Nm$ ความถี่ $20 Hz$ เข้าสู่ระบบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงเสียดทานได้ผลดังรูปที่ 5.7

จากรูปที่ 5.7 สามารถใช้วิธี Non-linear Least Square Method ในการหาค่าตัวแปรพบว่าสามารถหาค่าตัวแปรได้จากสมการ 5.2

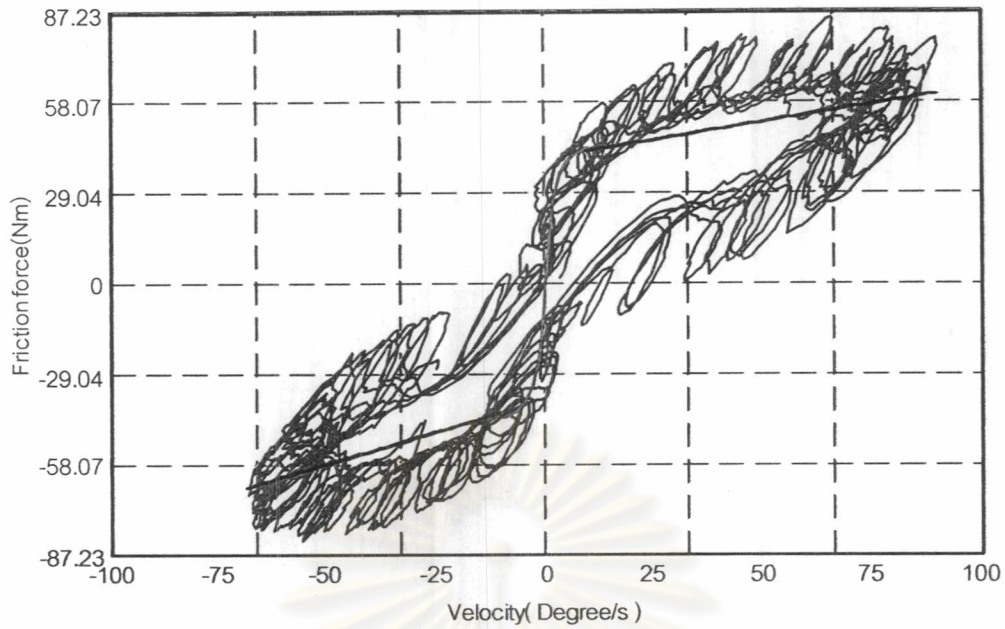
$$\tau_{friction} = \begin{cases} 39.27 + 0.0000271\dot{\theta}, & \dot{\theta} > 0 \\ 30.58 \cdot \tan^{-1}\left(\frac{\pi V}{3.67}\right), & \dot{\theta} = 0 \\ -30.58 + 0.00052\dot{\theta}, & \dot{\theta} < 0 \end{cases} \quad Nm \quad (5.5)$$



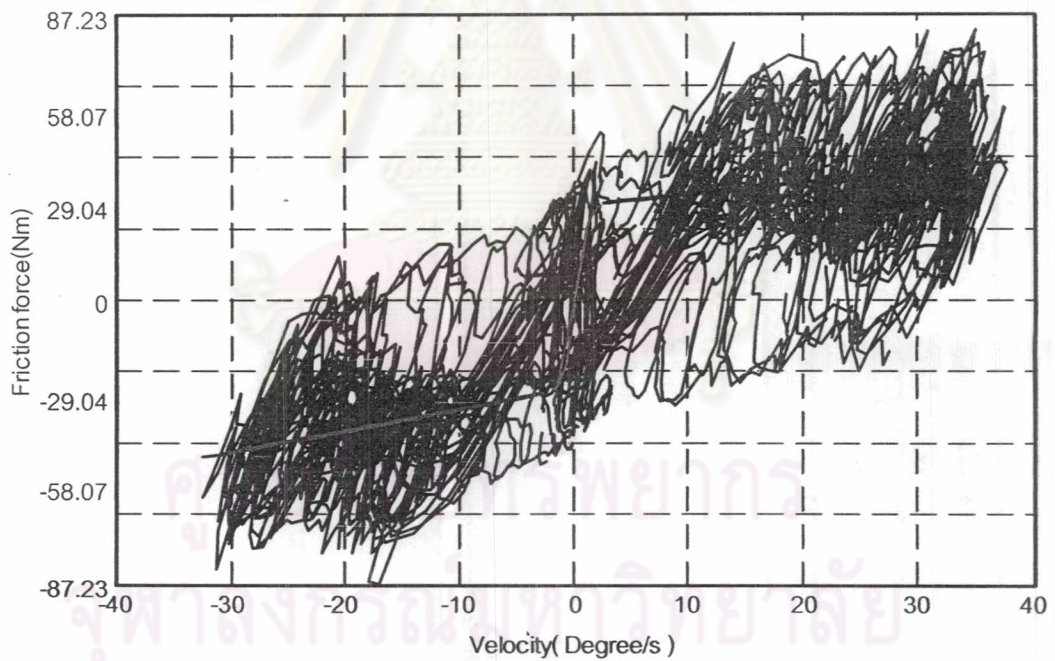
รูปที่ 5.5 พฤติกรรมของแรงเสียดทานในหุ่นยนต์ CRS Robotics เมื่อเพิ่มสัญญาณความถี่สูงที่ความถี่ของสัญญาณคำสั่ง 0.25 Hz



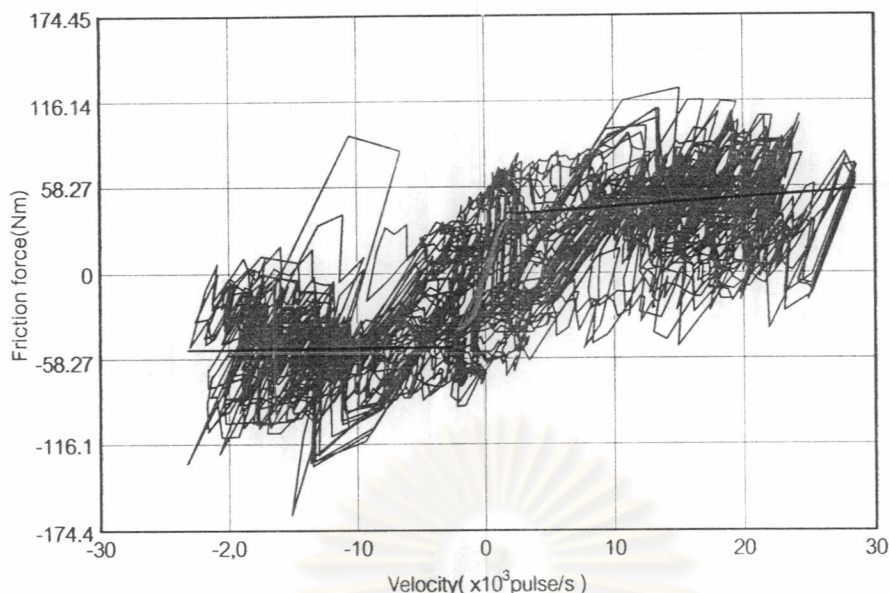
รูปที่ 5.6 พฤติกรรมของแรงเสียดทาน เมื่อเพิ่มสัญญาณความถี่สูงที่ความถี่ของสัญญาณคำสั่ง 0.5 Hz



รูปที่ 5.7 พฤติกรรมของแรงเสียดทานในหุ่นยนต์ CRS Robotics เมื่อเพิ่มสัญญาณความถี่สูงที่ความถี่ของสัญญาณคำสั่ง 1.0Hz



รูปที่ 5.8 พฤติกรรมของแรงเสียดทานในหุ่นยนต์ CRS Robotics เมื่อเพิ่มสัญญาณความถี่สูงที่ความถี่ของสัญญาณคำสั่งที่ความถี่ 3.0 Hz



รูปที่ 5.9

พฤติกรรมของแรงเสียดทานในหุ่นยนต์ CRS Robotics เมื่อเพิ่มสัญญาณความถี่สูงที่ความถี่ของสัญญาณคำสั่งที่ความถี่ 5.0 Hz

รูปที่ 5.8 แสดงพฤติกรรมของแรงเสียดทานเมื่อใช้สัญญาณคำสั่งรูปไซน์ขนาด 72.6 Nm และความถี่ 3.0 Hz และเพิ่มสัญญาณความถี่สูงขนาด 59.5 Nm ความถี่ 20 Hz จากรูปเห็นได้ว่า มีการกระจายของข้อมูลค่อนข้างสูง ทำให้ยากที่จะระบุได้ชัดเจนถึงรูปแบบของแรงเสียดทาน แต่ในที่นี่ได้ทดลองหาค่าของแรงเสียดทานโดยใช้แบบจำลองความเสียดทานแบบ ที่ได้นำเสนอมา ในการหาค่าแรงเสียดทาน และสามารถหาค่าตัวแปรของสมการแรงเสียดทานได้ใกล้เคียงกับค่าอื่นๆ ที่ได้ที่ความถี่ต่ำดังสมการที่ 5.2

เมื่อใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในระบบควบคุมแบบเปิด โดยมีสัญญาณคำสั่งรูปไซน์ขนาด 72.59 Nm ความถี่ 3 Hz และเพิ่มสัญญาณความถี่สูงขนาด 59.5 Nm ความถี่ 20 Hz เข้าสู่ระบบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงเสียดทานได้ผลดังรูปที่ 5.8

จากรูปที่ 5.8 สามารถใช้วิธี Non-linear Least Square Method ในการหาค่าตัวแปรพบว่าสามารถหาค่าตัวแปรได้จากสมการ 5.2

$$\tau_{friction} = \begin{cases} 37.96 + 0.000042\dot{\theta}, & \dot{\theta} > 0 \\ 29.98 \cdot \tan^{-1}\left(\frac{\pi V}{2.18}\right), & \dot{\theta} = 0 \\ -35.7 + 0.000075\dot{\theta}, & \dot{\theta} < 0 \end{cases} \quad Nm \quad (5.6)$$

เมื่อใช้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในระบบควบคุมแบบเปิด โดยมีสัญญาณคำสั่งรูปซายน์ ขนาด 72.59 Nm ความถี่ 5 Hz และเพิ่มสัญญาณความถี่สูงขนาด 59.5 Nm ความถี่ 20 Hz เข้าสู่ระบบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงเสียดทานได้ผลดังรูปที่ 5.9

จากรูปที่ 5.9 สามารถใช้วิธี Non-linear Least Square Method ในการหาค่าตัวแปรพบว่าสามารถหาค่าตัวแปรได้จากสมการ 5.2

$$\tau_{friction} = \begin{cases} 38.55 + 0.000052\dot{\theta}, & \dot{\theta} > 0 \\ 30.58 \cdot \tan^{-1}\left(\frac{\pi V}{2.10}\right), & \dot{\theta} = 0 \\ -34.98 + 0.000007\dot{\theta}, & \dot{\theta} < 0 \end{cases} \quad \text{Nm} \quad (5.7)$$

จากรูปที่ 5.5 ถึงรูปที่ 5.9 และสมการความของแรงเสียดทานที่ 4.3-4.7 ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลองและการใช้วิธี Non linear Least Square ในการพิจารณาค่าตัวแปรต่างๆ ของแบบจำลองความเสียดทานและสามารถนำมาสรุปเป็นตารางแสดงค่า โมเมนต์ความเฉื่อยและตัวแปรของแบบจำลองความเสียดทานได้ดังตารางที่ 5.1

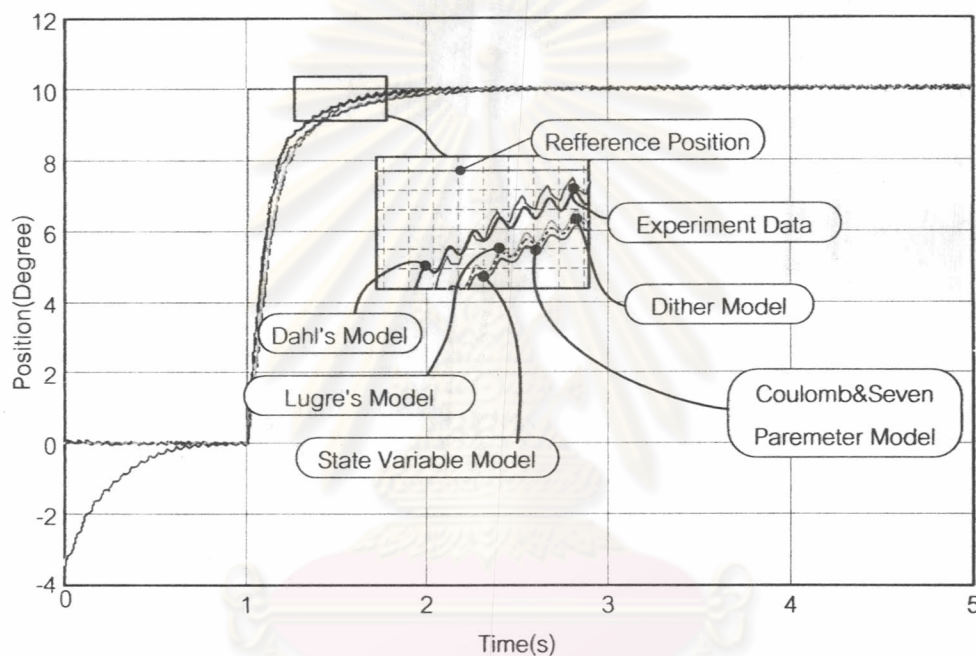
ตารางที่ 5.1 ค่าตัวแปรของแบบจำลองความเสียดทานที่แสดงผลของสัญญาณความถี่สูงที่ความถี่ใช้งาน

| ความถี่(Hz) | 0.25 | 0.5 | 1.0 | 3.0 | 5.0 | ค่าเฉลี่ย |
|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| $J(\text{Nm} \cdot \text{s}^2)$ | 33.32 | 20.56 | 20.56 | 26.18 | 26.18 | 25.36 |
| $\tau^+(\text{Nm})$ | 29.98 | 32.25 | 39.27 | 37.96 | 38.44 | 35.58 |
| $\tau^-(\text{Nm})$ | 33.79 | 36.17 | 35.10 | 35.70 | 49.98 | 38.15 |
| $c^+(\text{Nm} \cdot \text{s})$ | 0.000038 | 0.000041 | 0.000027 | 0.000042 | 0.000052 | 0.000040 |
| $c^-(\text{Nm} \cdot \text{s})$ | 0.000047 | 0.000047 | 0.000052 | 0.000075 | 0.000007 | 0.000045 |
| A | 20.23 | 26.18 | 30.58 | 29.98 | 30.58 | 27.51 |
| a | 3.77 | 4.17 | 3.67 | 2.18 | 2.10 | 3.18 |

ตารางที่ 5.1 เป็นการสรุปค่าตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองความเสียดทานที่ได้พัฒนาขึ้นมาเพื่อให้สามารถพฤติกรรมของแรงเสียดทานเมื่อเพิ่มสัญญาณความถี่สูงเข้าสู่ระบบ ได้แม่นยำมากขึ้นจากแบบจำลองความเสียดทานที่ได้เคยนำเสนอไว้ ดังแสดงในรูปที่ 5.5 ถึง 5.9 :ซึ่งเป็นการหาค่าตัวแปรของแบบจำลองความเสียดทาน โดยวิธี Non-linear Least Square Method เพื่อที่จะนำมาใช้ในการจำลองระบบ ในช่วงความถี่ใช้งาน 0 ถึง 5 Hz เมื่อนำค่าที่ได้จากตารางที่

5.1 มาหาค่าเฉลี่ยจะได้ ค่า Momet of Inertia (J) $25.36 \text{ Nm} \cdot \text{s}^2$ แรงเสียดทานจลน์ 35.58 Nm ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดคือ $0.00004 \text{ Nm} \cdot \text{s}$ เมื่อเคลื่อนที่ในทิศตามเข็มนาฬิกา และ $\text{Nm} \cdot \text{s}^2$ แรงเสียดทานจลน์ 35.15 Nm ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดคือ $0.000045 \text{ Nm} \cdot \text{s}$ เมื่อเคลื่อนที่ในทิศตามทวนเข็มนาฬิกาและค่า A และ a คือ 27.51 และ 3.18 ตามลำดับ

เมื่อได้ค่าตัวแปรที่ต้องใช้ในแบบจำลองที่สามารถแสดงผลของสัญญาณความถี่สูง ในระบบควบคุมแบบเปิด จากนั้นนำแบบจำลองที่ได้นี้ มาทดสอบในการจำลองระบบควบคุมแบบปิด เพื่อพิจารณาผลการควบคุมตำแหน่งเปรียบเทียบกับแบบจำลองชนิดอื่นๆ ที่ได้เคยนำเสนอไว้ในเบื้องต้น โดยอ้างอิงจากผลการทดลอง ที่ได้จากการควบคุมหุ่นยนต์



รูปที่ 5.10 ผลการจำลองระบบควบคุม โดยใช้แบบจำลองความเสียดทานชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลอง

จากรูปที่ 5.10 แสดงให้เห็นถึงผลการจำลองระบบควบคุมแบบปิด โดยใช้แบบจำลองความเสียดทานชนิดต่างๆ รวมถึงแบบจำลองความเสียดทานที่ได้พัฒนาขึ้นมา เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดลองในหุ่นยนต์ CRS Robotics พบว่าความสามารถในการแสดงผลของแรงเสียดทาน เมื่อเพิ่มสัญญาณความถี่สูงร่วมกับสัญญาณคำสั่งในระบบปิด ของแบบจำลองที่ได้พัฒนาขึ้นมาให้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองและแบบจำลองความเสียดทานที่มีอยู่แล้ว

5.4 สรุปผล

จากหัวข้อที่ได้กล่าวมาข้างต้นทำให้สามารถสรุปได้ว่า ในระบบควบคุมแบบปิดเมื่อใช้ตัวควบคุมแบบ PD ผลของการควบคุมตำแหน่ง ไม่สามารถทำให้ค่าผิดพลาดสุดท้ายเป็นศูนย์ได้ เนื่องจากผลของแรงเสียดทาน ซึ่งจากการทดสอบในหุ่นยนต์ CRS Robotics และการจำลองระบบโดยใช้แบบจำลองความเสียดทานชนิดต่างๆ ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน

การเพิ่มสัญญาณสัญญาณความถี่สูงที่เพิ่มให้แก่ระบบ เป็นวิธีหนึ่งซึ่งสามารถใช้ในการลดค่าความผิดพลาดสุดท้ายๆ ได้ ซึ่งสามารถยืนยันผลได้จากการทดสอบในหุ่นยนต์ CRS Robotics และเมื่อมีการจำลองระบบด้วยแบบจำลองความเสียดทานชนิดต่างๆ โดยเพิ่มสัญญาณความถี่สูงรวมเข้าไปในสัญญาณคำสั่ง พบว่าผลที่ได้จากการจำลองการควบคุมในระบบปิด โดยใช้แบบจำลองชนิดต่างๆ ให้ผลที่ใกล้เคียงกับผลจากการทดลอง คือสามารถลดค่าความผิดพลาดสุดท้ายๆ ได้ ดังรูปที่ 5.10

เมื่อพิจารณาในระบบควบคุมแบบเปิด และศึกษาพฤติกรรมของแรงเสียดทาน จากแผนภาพ ความเร็วและแรงเสียดทาน พบว่าเมื่อเพิ่มสัญญาณความถี่สูงรวมเข้ากับสัญญาณคำสั่ง ดังรูปที่ 5.5 ทำให้ระบบมีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้นที่ความเร็วใกล้ศูนย์ ทำให้สามารถประมาณค่าของแรงเสียดทานและควบคุมระบบได้ง่ายขึ้น เนื่องจากสัญญาณความถี่สูงจะลดผลของปรากฏการณ์ Stick Slip Motion ที่ความเร็วใกล้ศูนย์ แต่ปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้ไม่ปรากฏ เมื่อทำการจำลองระบบด้วย แบบจำลองความเสียดทานชนิดต่างๆ ดังนั้นจึงได้ทำการพัฒนาแบบจำลองความเสียดทานขึ้น เพื่อให้สามารถแสดงพฤติกรรมของแรงเสียดทานที่ความเร็วเข้าใกล้ศูนย์ ได้แม่นยำยิ่งขึ้น

แบบจำลองความเสียดทานที่นำมาใช้ในการจำลองระบบที่มีสัญญาณความถี่สูง ในหุ่นยนต์ CRS Robotics นี้จะมีพื้นฐานมาจากแบบจำลองความเสียดทานของ Coulomb Viscous Friction โดยมีการเปลี่ยนแปลงในส่วนที่มีความเร็วใกล้ศูนย์ดังสมการที่ 5.2 โดยค่าตัวแปรสมการสามารถหาได้จากการทดลองแบบเปิด เพื่อเก็บข้อมูลที่จำเป็น และใช้วิธี Non-Linear least square ในการระบุค่าตัวแปรของระบบ

นำแบบจำลองความเสียดทานที่สามารถแสดงผลของสัญญาณความถี่สูง และตัวแปรที่ได้ไปใช้ในการจำลองระบบควบคุมแบบปิด เพื่อศึกษาความสามารถในการลดค่าความผิดพลาดสุดท้าย และเปรียบเทียบผลของการควบคุมเทียบกับแบบจำลองความเสียดทานชนิดอื่น พบว่าผลการจำลองระบบโดยใช้แบบจำลองความเสียดทานที่พัฒนาขึ้นมานั้น ไม่สามารถให้ผลที่ดีกว่าแบบจำลองความเสียดทานที่มีอยู่แล้ว เนื่องจากแบบจำลองความเสียดทานที่มีอยู่สามารถจำลองผลการควบคุมได้ ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมาก ดังรูปที่ 5.10