# ME-NETT 24

# **DRC 18**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

# แบบจำลองแรงเสียดทานสำหรับใช้ร่วมกับแบบจำลองพลศาสตร์เพื่อการควบคุม การเคลื่อนที่ของแขนกลแบบขนานตระกูลเอชสี่ Implementing Friction Model with the Dynamic Model of an H-4 Parallel Manipulator arm to Improve Motion Control

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ<sup>1,</sup>\* และ กรรมมันต์ ชูประเสริฐ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 <sup>2</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ \*E-Mail: <u>Viboon.S@eng.chula.ac.th</u> โทร 0-2218-6610-1 โทรสาร 0-2252-8889

#### บทคัดย่อ

กลไกมากมายซึ่งประกอบชิ้นส่วนที่สวมต่อกันแบบลื่นไถลและแบบกลิ้งหลายชิ้นส่วนไม่สามารถ เขียนบอกด้วยลักษณะการเกิดแรงเสียดทานแบบง่าย ๆเช่น การลื่นไถลของผิวราบเรียบสองชิ้น หรือ การ กลิ้งของวัตถุกลมบนผิวราบเรียบ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองความเสียดทานที่จะนำไปใช้ร่วมกับ แบบจำลองพลศาสตร์ของแขนกลตระกูลเอซสี่ซึ่งได้จากการคำนวณเพื่อสำหรับการควบคุมแบบเวลาจริง. แบบจำลองความเสียดทานที่ได้อยู่ในรูปความเสียดทานสถิตย์นี้จะใช้ได้เฉพาะกลไกแขนกลแบบขนานเอซ สี่เท่านั้น การทดสอบระบบติดตามที่นำแบบจำลองความเสียดทานชุดนี้สามารถลดความผิดพลาดทาง ดำแหน่งลงได้ถึง 0.4 มิลลิเมตร. แบบจำลองนี้แสดงให้เห็นการมีส่วนช่วยลดความเสียดทานโดยรวม ทั้งหมดของชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่ของกลไกแบบขนานของแขนกลตระกูลเอซ ดำหลัก: แขนกลตระกูลเอชสี่, แบบจำลองความเสียดทาน, การควบคุมแบบเวลาจริง

#### Abstract

Mechanisms which have numerous sliding and rolling parts can not be described by friction generated by simple cases such as sliding of two flat faces or rolling of rounded body on a flat surface. This paper presents the friction models included in the derived dynamics equations of H-4 manipulator for real time controls. Friction models in static friction mode used to implement in only parallel H-4 mechanism. Tracking experiments used to test friction model which can be reduced the errors to 0.4 millimeter. This model identifies the contribution to the overall friction of every moving part of H-4 parallel mechanism.

Keywords: H-4 parallel mechanism, friction model, real time control

ควบคุมตำแหน่งหรือแรงโดยใช้ค่าอัตราขยาย ป้อนกลับสูง (high gain feedback), การชดเชย ้ความเสียดทานที่ผ่านอัตราขยายป้อนกลับที่ปรับ ค่าได้ (adaptive feedback) และ การชดเชย ความเสียดทานแบบคงทน (robust nonlinear)

ส่วนจำเป็นที่สำคัญต่อการพัฒนาระบบ ควบคุมคือ แบบจำลองหน่วยชดเชยความเสียด ทาน โดยหน่วยชดเชยนี้อาจจะฝ<sup>ั</sup>่งตัวร่วมอยู่หรือ แยกส่วนจากระบบควบคุม และ แบบจำลอง ความเสียดทานที่แตกต่างกันมากมายได้ถูกเสนอ ้ออกมา เช่น แบบจำลองความเสียดทานสถิตย์ อันได้แก่ แบบจำลอง Karnopp, แบบจำลอง หรือแบบจำลองความเสียดทาน Armstrong พลศาสตร์ อันได้แก่ แบบจำลอง Dahl, แบบจำลอง Bristle, แบบจำลอง LuGre เป็นต้น แบบจำลองทั้งหลายที่ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ อธิบายปรากฏการณ์ ไม่เชิงเส้นของความเสียด ทานในรูปแบบง่ายดังเช่น การลื่นไถลระหว่าง สองผิวสัมผัสเรียบ, การกลิ้งของวัตถุทรงกลมบน ผิวเรียบ ในขณะเดียวกันก็ได้มีการนำแบบจำลอง เหล่านั้นไปใช้อธิบายปรากฏการณ์ไม่เชิงเส้นใน กลไกที่มีความซับซ้อนมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ้สำหรับกลไกที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนจำนวนมากที่ ้มีการสัมผัสแบบลื่นไถลและการกลิ้งไม่สามารถ ใช้แบบจำลองธรรมดาที่กล่าวถึงมาแล้วอธิบาย ปรากฏการณ์ความซับซ้อนของความเสียดทานที่ ้เกิดขึ้นทั้งหมดในกลไกได้

ในป<sup>ั</sup>จจุบันกลไกหุ่นยนต์แบบขนานถูกพัฒนา มาใช้ในงานอุตสาหกรรมตั้งแต่ได้มีการสร้าง กลไกสจ็วตขนานในปี 1965 สำหรับใช้จำลองการ บิน โดยลักษณะทางกายภาพของหุ่นยนต์แบบ ขนานนั้นมีข้อเด่นกว่าหุ่นยนต์แบบอนุกรมเช่น ส่วนของโครงสร้างที่ความแข็งแรงรับภาระงาน ได้มาก, สมรรถนะการเคลื่อนไหวทางตำแหน่งที่ ้เร็วแม่นยำ แต่ก็มีข้อด้อยในเชิงพื้นที่การทำงานที่ น้อยกว่าพร้อมกับขนาดและความซับซ้อนที่ มากกว่า ซึ่งความซับซ้อนของข้อต่อกลไกใน

การศึกษาเกี่ยวกับความเสียดทานในส่วน

วิศวกรรมเครื่องจักรกลมีอย่างมากในอดีตและ ้ยังคงมีมาอย่างต่อเนื่อง จากระบบเทคโนโลยีการ วัดที่แม่นยำซึ่งได้พัฒนาขึ้นและถูกนำไปเพิ่ม ศักยภาพในการขับเคลื่อนในอุตสาหกรรมที่ หลากหลายตั้งแต่ อุตสาหกรรม disc-drive ไป จนถึง อุตสาหกรรมรถยนต์ ทำให้เรื่องความเสียด ทานมีความสำคัญมากต่อระบบขับเคลื่อนต่างๆ และกลไกที่ต้องการความแม่นยำสูงๆ เช่น หุ่นยนต์ เป็นต้น ความเสียดทานมีพฤติกรรม ลักษณะเป็นระบบไม่เชิงเส้นและอาจจะส่งผลต่อ ระบบให้เกิด steady state error, limit cycles, poor performance. ความเสียดทานจึงต้องถูก คำนึงถึงในช่วงต้นๆของการออกแบบระบบโดย ลดให้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้เพื่อให้ได้ระบบ ฮาร์ดแวร์ที่ดี

ระบบควบคุมการขับเคลื่อนที่สำคัญอย่าง หนึ่งคือระบบติดตามตำแหน่งแบบความเร็วต่ำที่ แม่นยำเป็นระบบหนึ่งที่จำเป็นในการขับเคลื่อน อุปกรณ์เชิงกลหลายอย่างเช่น เครื่องมือแพทย์, แขนกลขนาดจิ๋ว เป็นต้น สมรรถนะต่อระบบ ควบคุมการขับเคลื่อนอุปกรณ์เชิงกลเหล่านี้จะถูก ้จำกัดโดยความเสียดทานโดยทำให้เกิดความ ผิดพลาดทางตำแหน่งและความเร็ว ความ ผิดพลาดนี้เป็นผลจากการเคลื่อนที่แบบ stick-โดยเฉพาะผลจากการหน่วง (negative slip effect) ซึ่งทำให้เกิดความไม่ damping เสถียรภาพที่ความเร็วต่ำ และความไม่ เสถียรภาพนี้ก็จะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิด limit cycles และ steady state error. ระบบควบคุม หลายแบบได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อนำมาใช้ แก้ปัญหาต่างๆที่มาจากสาเหตุ stick-slip รูปแบบระบบควบคุมที่พบโดยส่วนใหญ่ในการ ทบทวนบทความที่ผ่านมาได้มีการใส่ ส่วนของ การชดเชยความเสียดทานร่วมกับสัญญาณ การชดเชยความเสียดทานที่ผ่านการ dither.



#### 1. บทน้ำ

# **DRC 18**



ในบทความนี้จึงได้แสดงวิธีการหาและ ทดสอบแบบจำลองชดเชยความเสียดทานเฉพาะ ส่วนของความเสียดทานแบบสถิตย์ร่วมกับระบบ ควบคุมติดตามตำแหน่งที่ปลายแขนโดยใช้ สมการพลศาสตร์ย้อนกลับ (Inverse Dynamics) ของหุ่นยนต์กลไกแบบขนานในตระกูลเอชสี่ [3]

หุ่นยนต์แบบขนานนี้ส่งผลให้ความเสียดทานของ ระบบมีค่าที่มากขึ้น จากลักษณะดังกล่าวของ กลไกชนิดนี้เมื่อนำมาทำการควบคุมระบบ ติดตามตำแหน่งที่ปลายแขนกลโดยใช้สมการ พลศาสตร์ให้ได้ผลที่แม่นยำจำเป็นอย่างยิ่งที่ จะต้องพิจารณาถึงแบบจำลองความเสียดทานที่ เหมาะสม



รูปที่1 หุ่นยนต์แบบเอช 5 แกนที่ออกแบบสำหรับงานวิจัยนี้และแสดงแกนอ้างอิง

และวัสดุเช่นเดียวกับแขนกลจำลองจากโปรแกรม จำลองการเคลื่อนไหว



รูปที่2 เส้นทางเดินวงกลมของปลายแขนกล บนพื้นผิวทรงกลม ในรูปที่1แขนของหุ่นยนต์ทั้งสี่จะติดกับชุด Linear guide ซึ่งต่ออยู่กับชุดบอลสกรูและเซอร์ โวมอเตอร์ ชิ้นส่วนแต่ละชิ้นทั้งหมดจะถูก คำนวณตามลำดับหาแรงในแนวแกนโดยสมการ ลากานต์แล้วนำมารวมเป็นสมการพลศาสตร์ของ

## แบบจำลองความเสียดทานของ หุ่นยนต์แบบเอช

จากรูปที่1 ที่แสดงโครงสร้างของหุ่นยนต์ แบบเอชในงานวิจัยนี้และระบบสมการพลศาสตร์ ของแขนกลแบบเอชที่ได้แสดงไว้ในบทความ[3] การทดสอบได้ทำขึ้นเพื่อเปรียบเทียบค่าแรงบิดที่ ได้จากสมการพลศาสตร์ย้อนกลับกับค่าแรงบิดที่ เกิดขึ้นจริงของแขนกลในขณะทำงาน ค่าแรงบิด จริงที่ได้จะมาจากโปรแกรมคำสั่งแรงบิดซึ่งแปร ผันโดยตรงกับตัวขยายสัญญาณแบบกระแส ตัว ขยายสัญญาณนี้จะสร้างกระแสที่ตรงกับความ ต่างศักย์ที่ต้องการด้วยอัตราขยายที่เหมาะสม โดยการใช้โปรแกรมคำสั่งแรงบิดสั่งไปที่สมการ อินเวอร์สคิเนแมติกส์ให้ปลายแขนหุ่นยนต์ เคลื่อนที่เป็นรูปวงกลมตามในรูปที่2 แขนกลจริง ที่ทำการทดสอบจะใช้ชิ้นส่วนทั้งหมดที่มีขนาด



ระบบแขนกลเอช ในความเป็นจริงความเสียด ทานไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ในระบบทางกล ดังนั้นแบบจำลองชดเชยความเสียดทานจึง จำเป็นต้องเพิ่มลงไปร่วมอยู่กับชุดแบบจำลอง พลศาสตร์ ความเสียดทานเป็นปรากฏการณ์ที่ ขึ้นอยู่กับความเร็วและตำแหน่ง ในหุ่นยนต์ชนิด อนุกรมแบบจำลองความเสียดทานจะเป็นฟังก์ชั่น ของตำแหน่งเชิงมุม ( $\theta$ ) ของข้อต่อสำหรับความ เสียดทานสถิตย์ และเป็นฟังก์ชั่นของความเร็ว เชิงมุม ( $\dot{\theta}$ )ของข้อต่อสำหรับความเสียดทานลื่น ไถลดังใน [2]. แบบจำลองความเสียดทาน สามารถเขียนให้อยู่ในรูปอนุกรมฟูเรียร์ดังนี้

$$\tau_{sf} \ \theta = A_0 + \frac{\pi}{2} \sum_{j=1}^{J} A_j \sin\left(\frac{2\pi}{C_j} - B_j\right)$$
(1)

สำหรับแบบจำลองแบบสถิต

$$\mathcal{T}_{f} \ \theta, \dot{\theta} = A_{0} \ \dot{\theta} + \frac{\pi}{2} \sum_{j=1}^{J} A_{j} \ \dot{\theta} \ \sin\left(\frac{2\pi}{C_{j}} - B_{j} \ \dot{\theta}\right)$$
(2)

สำหรับแบบจำลองความเสียดทานสถิตย์และ ความเสียดทานลื่นไถล โดยที่ <sup>θ</sup> เป็นตำแหน่ง เชิงมุมของชิ้นแขนกล 2 ชิ้นที่ต่อกัน

ในกลไกของหุ่นแบบขนานส่วนก้านแขนกล ที่ต่ออยู่กับชุดขับเคลื่อนและส่วนที่ไม่ต่อกับชุด ขับเคลื่อนโดยทั่วไปจะประกอบกันเป็นวงรอบปิด (Closed loop chain) เมื่อมีการสั่งชุดขับเคลื่อน ้ตัวหนึ่งตัวใดเคลื่อนไปด้วยความเร็วย่อมจะทำให้ ชิ้นส่วนทั้งหมดที่ไม่ได้ต่อกับชุดขับเคลื่อนที่เหลือ สามชุดและปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่สัมพัทธ์ ตาม ในขณะที่กลไกแขนกลแบบอนุกรมเมื่อมี การสั่งชุดขับเคลื่อนตัวใดตัวหนึ่งจะทำให้มีการ เคลื่อนที่สัมพัทธ์เฉพาะสองชิ้นส่วนที่ต่ออยู่ ระหว่างชุดขับเคลื่อนชุดนั้นเท่านั้นโดยใช้ ความเร็วในการขับเคลื่อนที่ค่าต่ำมาก โดย เหตุผลนี้การหาความเสียดทานในแขนกลแบบ ขนานในข้อต่อใดข้อต่อหนึ่งจะทำได้ลำบากและ จะยากมากขึ้นเมื่อต้องการหาความเสียดทาน ของทุกข้อต่อของแขนกลทุกจุดที่มีการเปลี่ยน

ตำแหน่งสัมพัทธ์ไปจากเดิม ในกรณีของเรา แบบจำลองความเสียดทานลัพธ์ของแต่ละชุด ขับเคลื่อนจะสามารถหาได้ภายใต้สมมติฐานที่แต่ ละชุดขับจะถูกสั่งให้เคลื่อนที่ที่ความเร็วต่ำ ๆหรือ ภายใต้ผลกระทบเฉพาะความเสียดทานสถิตย์ เท่านั้น

ในการหาความเสียดทานสถิตย์สำหรับแต่ละ ชุดขับเคลื่อนของแขนกลโครงสร้างแบบเอช ดำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลสามารถหา ได้จากสมการอินเวอร์สคิเนแมติกส์ ฟังก์ชั่น ความเสียดทานแบบสถิตย์ก็สามารถเขียนให้อยู่ ในรูปของตัวแปรข้อต่อชุดขับเคลื่อนหรือ ดำแหน่งและทิศทางของแพ็ทฟอร์ม (platform) รวมสื่องศาอิสระดังนี้

$$\tau_{sf} \ i = f_i \ l_1, l_2, l_3, l_4 = g_i \ x_c, y_c, z_c, \theta \tag{3}$$

โดยที่ I1-I4 เป็นระยะของชุดข้อต่อเลื่อนไถล วัดตามแนว x วัดจากแกนอ้างอิง XYZ

xc,yc,zc เป็นตำแหน่งของกึ่งกลางแพ็ท ฟอร์มวัดจากแกนอ้างอิง XYZ ตามแนวแกน ตามลำดับ

θ แสดงมุมบอกทิศของปลายแขนกลเทียบ
 แกน z

การทดสอบหาค่าความเสียดทานจำนวน มากจะต้องทำภายใต้ตลอดช่วงปริมาตรการ ทำงานทั้งหมดบนลักษณะรูปร่างของแขนกลที่ วางตัวแตกต่างกันพร้อมกับกำหนดทิศทางการ หมุนปลายแขนกลที่ต่างกันสำหรับการหาความ เสียดแบบสถิตย์ของแต่ละชุดขับเคลื่อน เส้นทาง เดินวงกลมของปลายแขนกลถูกนำมาใช้ทดสอบ กับระบบควบคุมแบบติดตามตำแหน่งที่ปลาย แขนโดยใช้สมการพลศาสตร์ย้อนกลับร่วมกับ แบบจำลองความเสียดทานที่สร้างขึ้น โดยพื้นที่ การทดสอบวัดจากกึ่งกลางของพื้นที่ใช้งาน อยู่ ในช่วง:

 $633mm \leq x_c \leq 807mm$  ,  $-21mm \leq y_c \leq 21mm$  ,



# $-652mm \leq z_c \leq -642mm$ ແລະ $-10^\circ \leq heta \leq 10^\circ$

เนื่องจากในช่วงการทำงานดังกล่าวนี้ เรา สังเกตุว่า เมื่อป้อนอัตราเร็วต่ำไปที่ปลายแขนกล โดยชุดขับเคลื่อนทั้งสี่ การเคลื่อนที่ของต่ำแหน่ง ที่ปลายแขน (xc-yc-zc) นั้นมีค่าเปลี่ยนไปน้อย กว่าเมื่อนำมาเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของมุม (θ) และเนื่องจากความเร็วที่ใช้มีค่าต่ำ ขนาด ของความเสียดทานลื่นไถลจึงไม่นำมาคิด ดังนั้น โดยสมมติฐานของเราความเสียดทานสถิตย์ ตลอดการเคลื่อนที่วงกลมสามารถเขียนได้เป็น:

$$\mathcal{T}_{sf} \ i = g_i \ \theta \tag{4}$$

i = 1,2,3,4 จากชุดตำแหน่งของเส้นทางเดินวงกลมที่ ต้องการในเทอมของเวลาคือ

 $\mathbf{x}_{T}^{TP}(t) = \begin{bmatrix} x_{w}(t) & y_{w}(t) & z_{w}(t) & \theta(t) & \alpha(t) \end{bmatrix}^{T}$ ได้ถูกแปลงโดยอินเวอร์สคิเนแมติกส์เป็นชุดตัว แปรของแขนกล  $\begin{bmatrix} l_{1}(t) & l_{2}(t) & l_{3}(t) & l_{4}(t) & \alpha(t) \end{bmatrix}^{T}$ เพื่อ ป้อนเข้า สู่ ระบบควบคุมแบบ joint command. สัญญาณที่ได้นี้จะส่งไปที่เซอร์โว มอเตอร์กระแสตรงทั้งสี่ตัวแปลงเป็นแรงบิดตาม ต้องการ แรงบิดที่ได้จากมอเตอร์ทั้งสี่แสดงให้ เห็นด้วยเส้นสีแดงในรูปที่4



รูปที่3 ส่วนประกอบแขนกลแบบเอชบนรูป ภาพเสมือน จากสมการพลศาสตร์ของแขนกลแบบเอชที่ ประกอบด้วยชิ้นส่วน 5 ส่วน ได้แก่ ส่วน Platform (p or MH) 1 ชิ้น

# **DRC 18**

สมการพลศาสตร์ของชิ้นส่วนทั้ง 5 ส่วน ได้ ถูกสร้างขึ้นโดยสมการลากานต์ ดังนี้

$$F_{pi} = \frac{d}{dt} \frac{\partial (K.E_p)}{\partial l_i} - \frac{\partial (K.E_p)}{\partial l_i} + \frac{\partial (P.E_p)}{\partial l_i}$$
(4a)

$$\sum_{j=1}^{2} F_{CHji} = \frac{d}{dt} \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{2} K.E_{CHj}\right)}{\partial \dot{l}_{i}} - \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{2} K.E_{CHj}\right)}{\partial l_{i}} + \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{2} P.E_{CHj}\right)}{\partial l_{i}} \quad (4b)$$

$$\sum_{j=1}^{8} F_{Amji} = \frac{d}{dt} \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{8} K.E_{Amj}\right)}{\partial \dot{l}_{i}} - \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{8} K.E_{Amj}\right)}{\partial l_{i}} + \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{8} P.E_{Amj}\right)}{\partial l_{i}} \quad (4c)$$

$$\sum_{j=1}^{4} F_{LJji} = \frac{d}{dt} \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{4} K.E_{LJj}\right)}{\partial l_i} = \sum_{j=1}^{4} m_{LJj} l_i \qquad (4d)$$
$$\sum_{j=1}^{16} F_{UCji} = \frac{d}{dt} \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{16} K.E_{UCj}\right)}{\partial l_i} - \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{16} K.E_{UCj}\right)}{\partial l_i} + \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{16} P.E_{UCj}\right)}{\partial l_j}$$

$$T_{Cji} = \frac{d}{dt} \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{j} 1 - \frac{\partial \left(U_{Cj}\right)}{\partial i_{i}}\right)}{\partial i_{i}} - \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{j} 1 - \frac{\partial \left(U_{Cj}\right)}{\partial i_{i}}\right)}{\partial l_{i}} + \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^{j} 1 - \frac{\partial \left(U_{Cj}\right)}{\partial i_{i}}\right)}{\partial l_{i}}$$
(4e)

จากผลรวมจากสมการที่ (4a)-(4e) เราจะได้ แรงตามแนวแกน F1-F4 ดังในรูปที่5 และสมการ พลศาสตร์ของระบบสามารถเขียนแทนได้ตาม สมการที่(5) ดังแสดงแล้วในเอกสารอ้างอิง [3]

$$F_{i} = \frac{d}{dt} \frac{\partial (K.E.)}{\partial \dot{l}_{i}} - \frac{\partial (K.E.)}{\partial l_{i}} + \frac{\partial (P.E.)}{\partial l_{i}}$$

(5)

i=1,2,3,4 และแรงบิดที่ใช้ที่ แนวแกนบอลสกฐสามารถหาได้จากสมการ

$$\mathcal{T}_{i} = \frac{F_{i}D_{p}}{2} \left[ \frac{L_{d} + \mu\pi D_{p}}{\pi D_{p} - \mu L_{d}} \right] + (J_{motor} + J_{screw}) \left( \frac{2\pi \ddot{l}_{i}}{L_{d}} \right) + \tau_{friction1}$$
(6)

โดยแรงบิดที่ได้จากสมการที่(6) หาได้จาก สมมุติฐานที่ว่า แรงบิดที่ใช้ขณะที่จะยกแพ็ท ฟอร์มเคลื่อนที่ขึ้นสวนทางกับทิศแรงโน้มถ่วง ชุด บอลสกรูนั้นอยู่ในลักษณะล็อคด้วยแรงใน แนวแกน (Fi) ที่ขนานกับรางเลื่อน ดังนั้นสมการ



แรงบิดที่ใช้ขณะที่จะยกแพ็ทฟอร์มให้เคลื่อนที่ลง

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\tau}_{i} &= \frac{F_{i}D_{p}}{2} \left[ \frac{\mu \pi D_{p} - L_{d}}{\pi D_{p} + \mu L_{d}} \right] \\ &+ (J_{motor} + J_{screw}) \left( \frac{2\pi \boldsymbol{\vec{l}}_{i}}{L_{d}} \right) - \boldsymbol{\tau}_{friction2} \end{aligned}$$

$$(7)$$

Dp = เส้นผ่าศูนย์กลางพิตซ์ของบอลสกรู

= 0.016 เมตร

Ld = ระยะลีดของสกรู

= 0.005 มิลลิเมตรต่อรอบ

μ = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสำหรับการ สัมผัสโดยการกลิ้งดังได้แสดงใน [4]

Jmotor+Jscrew = โมเมนต์ความเฉื่อยของ โรเตอร์และบอลสกรู

= 0.00007569 กิโลกรัม

มิลลิเมตร สำหรับมอเตอร์ 1,2,3

= 0.000157689 กิโลกรัม

มิลลิเมตร สำหรับมอเตอร์ 4

Tfriction = แรงบิดต้านทั้งหมดเนื่องมาจาก ความเสียดทานสถิตย์ของข้อต่อทั้งหมด

แรงบิดความเสียดทานใน (4) สามารถหาได้ โดยการวัดแรงบิดสูงสุดที่มากพอให้ชุดรางเลื่อน แขนกลเกิดการการเคลื่อนขยับ เนื่องจากแรงบิด ความเสียดทานมีค่าไม่คงที่โดยเป็นฟังก์ชั่นของ มุม θ ดังนั้นแรงบิดจากความเสียดทานสถิตย์จะ ถูกวัดในทิศทวนและตามเข็มนาพิกาที่ตำแหน่ง ชุดขับเคลื่อนทั้งสี่ตัวตามตำแหน่งมุม θ ที่มี กำหนดค่าให้เท่ากับ -10°, 0°, 10° ตามรูปที่4



จากผลการวัดค่าแรงบิดนำมาสร้างสมการ เชิงเส้นของแบบจำลองความเสียดทานของแขน สำหรับแต่ละชุดขับเคลื่อนดังสมการ สำหรับชุดขับเคลื่อนที่ 1:

 $\tau_{friction1} = 0.0019743^* \theta + C_{11}$  (a)

$$\tau_{friction2} = -0.0022429^{*}\theta + C_{12}$$
 (b)

สำหรับชุดขับเคลื่อนที่ 2:

 $\tau_{friction1} = -0.00112815^*\theta + C_{21}$  (C)

$$\tau_{friction2} = -0.00338445^* \theta + C_{22}$$
 (d)

สำหรับชุดขับเคลื่อนที่ 3:

 $\tau_{friction1} = -0.0022563^*\theta + C_{31}$  (e)

$$F_{friction2} = 0.00112815^*\theta + C_{32}$$
 (f)

สำหรับชุดขับเคลื่อนที่ 4:

$$\tau_{friction1} = -0.000112815^*\theta + C_{41}$$
(g)

$$\tau_{friction2} = 0.00112815^*\theta + C_{42}$$
 (h)

โดยที่ θ เป็นตำแหน่งมุมหมุนของปลายแขน หน่วยเป็นองศา

ผลของแรงบิดที่คำนวณจากสมการ (5), (6), (7) ร่วมกับแบบจำลอง (a)-(h) ได้ถูกนำมา เปรียบเทียบกับผลของแรงบิดเฉลี่ยที่ใช้จริงจาก การทดสอบการเคลื่อนที่ของปลายแขนเป็น เส้นทางวงกลมเพื่อหาค่าคงที่ C11-C42 จากการ เปรียบเทียบสำหรับชุดขับเคลื่อนที่ 1 ได้ค่า C11, C12 ตามสมการ (8), (9)



รูปที่5 เปรียบเทียบแรงบิดชุดขับเคลื่อนที่1 ที่ได้จากการผลคำนวณจากสมการ พลศาสตร์แขนกลกับผลการทดสอบจริง

 $\tau_{friction1} = 0.0019743^{*}\theta + 0.205887$  (8)

 $\tau_{friction2} = -0.0022429^{*}\theta + 0.087949$  (9)



สำหรับชุดขับเคลื่อนที่ 2 ได้ค่า C<sub>21</sub>, C<sub>22</sub> ตาม สมการ (10), (11)



รูปที่6 เปรียบเทียบแรงบิดชุดขับเคลื่อนที่2 ที่ได้ จากการผลคำนวณจากสมการพลศาสตร์แขนกล กับผลการทดสอบจริง

$$\tau_{\text{friction1}} = -0.00112815^*\theta + 0.25935 \tag{10}$$

 $\tau_{friction2} = -0.00338445^*\theta + 0.13166$ (11)

สำหรับชุดขับเคลื่อนที่ 3 ได้ค่า C<sub>31</sub>, C<sub>32</sub> ตาม สมการ (12), (13)



รูปที่7 เปรียบเทียบแรงบิดชุดขับเคลื่อนที่3ที่ได้ จากการผลคำนวณจากสมการพลศาสตร์แขนกล กับผลการทดสอบจริง

 $\tau_{friction1} = -0.0022563^*\theta + 0.179193$ (12)

$$\tau_{\text{friction2}} = 0.00112815^*\theta + 0.0676595 \tag{13}$$

สำหรับชุดขับเคลื่อนที่ 4 ได้ค่า C<sub>41</sub>, C<sub>42</sub> ตาม สมการ (14), (15)



รูปที่8 เปรียบเทียบแรงบิดชุดขับเคลื่อนที่4 ที่ได้จากการผลคำนวณจากสมการพลศาสตร์ แขนกลกับผลการทดสอบจริง

 $\boldsymbol{\tau}_{friction1} = -0.000112815^{*}\theta + 0.4174155$  (14)

 $\tau_{friction2} = 0.00112815^*\theta + 0.2446005$ (15)

โดยแรงบิดจริงของแต่ละชุดขับเคลื่อนแสดง ด้วยเส้นสีแดงในขณะที่ค่าแรงบิดจากสมการ พลศาสตร์ร่วมกับแบบจำลองความเสียดทาน แสดงด้วยเส้นสีน้ำเงิน

### การทดสอบแบบจำลองความเสียด ทานร่วมกับระบบควบคุมติดตามตำแหน่ง

การทดสอบแบบจำลองความเสียดทานจะ ทดสอบโดยจากระบบการควบคุมแบบติดตาม ดำแหน่งที่มีเส้นทางการเดินที่เป็นวงกลมตามรูป ที่10 โดยติดตั้งหัวกัดชิ้นงานหรือหัวToolที่ปลาย แขนของหุ่นยนต์เอช แล้วทำการควบคุมให้ปลาย หัว Tool เคลื่อนที่ไปตามเส้นรอบวงของวงกลมที่ มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 104.38 มิลลิเมตร มีจุด ศูนย์กลางอยู่ที่ ( $x_w, y_w, z_w$ ) = (0, 0, 115.9928) ตามรูปที่ 9 และ ปลายแขนกลนี้จะเคลื่อนที่ด้วย อัตราเร็ว 13.66มิลลิเมตรต่อวินาที โดยขณะที่ เคลื่อนที่ไปทิศทางปลายหัว Tool จะตั้งฉากกับ พื้นผิวทรงกลมที่มีรัศมี 300 มิลลิเมตร.และจุด ศูนย์กลางอยู่ที่ ( $x_w, y_w, z_w$ ) = (0, 0, -180.0) เสมอ ความถี่ของการสุ่มข้อมูลในระบบอยู่ที่ 600 รอบ ต่อวินาที

# **DRC** 18





รูปที่ 9 ภาพการทดสอบการควบคุมแบบ

Inverse Dynamic Control

รูปที่ 10 เป็นแผนภาพแสดงการควบคุม ตำแหน่งแบบ Inverse dynamic control โดยที่ ค่าที่ต้องการควบคุมคือ

1. ตำแหน่งและทิศทาง

$$(x_{d} = \begin{bmatrix} x_{wd}, y_{wd}, z_{wd}, \theta_{d}, \alpha_{d} \end{bmatrix})$$

- 2. ความเร็วและความเร็วเซิงมุม  $(\dot{x}_d)$
- ความเร่งและความเร่งเชิงมุม (x,)



รูปที่ 10 แผนภาพแสดงแบบจำลองความเสียดทานร่วมลงไปกับระบบควบคุม แบบติดตามตำแหน่งที่ใช้สมการพลศาสตร์ย้อนกลับ

> ในขณะที่มุม  $^{lpha}$  และความเร็วเชิงมุม  $\dot{lpha}$  ของโต๊ะ หมุนนั้นใช้การควบคุมแบบ PD

> เมื่อความเร็วปลายแขนกลลงเหลือ 13.66 มิลลิเมตร/วินาที ระยะที่เคลื่อนที่เท่ากับ 1 รอบวงกลม ใช้เวลาการเคลื่อนที่เท่ากับ 24 วินาที

> ตำแหน่งที่ต้องการให้ปลายหัวTool เคลื่อนที่ มีค่า เท่ากับค่าที่ป้อนเข้าไป คือ

$$\begin{split} x_{wd} &= 52.1913\cos\!\left(\frac{\pi}{12}t\right)\\ y_{wd} &= -6.34009 + 52.1913\sin\!\left(\frac{\pi}{12}t\right)\\ z_{wd} &= 115.9928 \end{split}$$

หน่วยเป็น มิลลิเมตร

$$\theta_d = \frac{\pi}{18} \cos\left(\frac{\pi}{12}t\right)$$
  
 $\alpha_d = \frac{\pi}{18} \sin\left(\frac{\pi}{12}t\right)$ หน่วยเป็น เรเดียน

โดยที่ค่า $x_w, y_w, z_w$ จะเป็นค่าตำแหน่งที่ปลายแขน ของหุ่นยนต์ในพิกัด working coordinate ส่วนค่า มุม $\theta$  และ  $\alpha$  จะเป็นการเรียงตัวหรือ orientation ของ ปลายแขนและโต๊ะหมุน ซึ่งจะเป็นตัวแปรที่กำหนด แนวกระทำหรือทิศทางของแรง เป้าหมายของตัว ควบคุมตำแหน่งนี้ก็เพื่อให้ดำแหน่งและการเรียงตัวให้ ใกล้เคียงกับตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการหรือ  $x_d = [x_{wd}, y_{wd}, z_{wd}, \theta_d, \alpha_d]$  โดยใช้ตัวควบคุมแบบ Inverse Dynamics Control ในที่นี้เราจะเลือกค่าเกน  $K_p, K_p$ ของตัวควบคุมให้มีค่าเท่ากับ

1

$$K_{p} = \begin{bmatrix} 8400 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 7000 \end{bmatrix}$$
$$K_{p} = \begin{bmatrix} 90 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 80 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 80 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 80 \end{bmatrix}$$



$$\dot{x}_{wd} = -52.1913 \frac{\pi}{12} \sin\left(\frac{\pi}{12}t\right)$$

$$\dot{y}_{wd} = 52.1913 \frac{\pi}{12} \cos\left(\frac{\pi}{12}t\right)$$

$$\dot{z}_{wd} = 0.0$$

หน่วยเป็น มิลลิเมตร/วินาที

$$\begin{split} \dot{\theta}_d &= -\frac{\pi^2}{216} \sin\!\left(\!\frac{\pi}{12} t\right) \\ \dot{\alpha}_d &= \frac{\pi^2}{216} \cos\!\left(\!\frac{\pi}{12} t\right) \end{split}$$

หน่วยเป็น เรเดียน/วินาที

$$\begin{split} \ddot{x}_{wd} &= -52.1913 \frac{\pi^2}{144} \cos\left(\frac{\pi}{12}t\right) \\ \ddot{y}_{wd} &= -52.1913 \frac{\pi^2}{144} \sin\left(\frac{\pi}{12}t\right) \\ \ddot{z}_{wd} &= 0.0 \end{split}$$

หน่วยเป็น มิลลิเมตร/วินาที2

$$\ddot{\theta}_d = -\frac{\pi^3}{2592}\cos(\frac{\pi}{12}t)$$

หน่วยเป็น เรเดียน/วินาที2

การทดสอบประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ 1 ไม่มีการใส่ค่าชดเชยแรงเสียดทาน จากแบบจำลองแรงเสียดทานที่หาได้ พร้อมกับไม่มี การใส่สัญญาณ dither ในระบบควบคุม ผลที่ได้แสดง ไว้ในรูปที่11



รูปที่ 11 ค่าผิดพลาดทางตำแหน่งของตำแหน่ง ปลายแขนกลจริง $^{(x_{we},y_{we},z_{we})}$ กับค่าตำแหน่ง อ้างอิง $^{(x_{wd},y_{wd},z_{wd})}$ บนแกน $^{X_wY_wZ_w}$ 

บนโต๊ะหมุนจากส่วนที่ 1 ส่วนที่ 2 ไม่มีการชดเชยความเสียดทานจาก

แบบจำลองแรงเสียดทานที่หาได้ ในขณะที่มีการใส่ สัญญาณ dither เข้าไปในระบบควบคุมด้วย ผลที่ได้ แสดงไว้ในรูปที่ 12



รูปที่ 12 ค่าผิดพลาดทางตำแหน่งของตำแหน่ง ปลายแขนกลจริง  $(x_{we}, y_{we}, z_{we})$  กับค่าตำแหน่ง อ้างอิง $(x_{wd}, y_{wd}, z_{wd})$ บนแกน $X_w Y_w Z_w$ บนโต๊ะหมุนจาก ส่วนที่ 2

ส่วนที่ 3 มีการใส่ค่าชดเชยจากแบบจำลอง แรงเสียดทานที่หาได้ร่วมกับการใส่สัญญาณ dither ร่วมเข้าไปในตัวควบคุมด้วย ผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 13



รูปที่ 13 ค่าผิดพลาดทางตำแหน่งของตำแหน่ง ปลายแขนกลจริง  $(x_{we}, y_{we}, z_{we})$ กับค่าตำแหน่ง อ้างอิง $(x_{wd}, y_{wd}, z_{wd})$ บนแกน $X_w Y_w Z_w$ บนโต๊ะหมุนจาก ส่วนที่ 3

จากผลการทดลองที่แสดงในรูป 11 - 13 พบว่า การใส่สัญญาณ dither ในส่วนที่สองนั้นทำให้ลดค่า ผิดพลาดจากตำแหน่งลงได้โดยเฉพาะแกน <sup>X</sup><sub>w</sub>ซึ่ง ได้รับผลจากแรงเสียดทานสถิตย์ของ บอลสกรู มากกว่าแกน<sup>Y</sup><sub>w</sub>และแกน<sup>Z</sup><sub>w</sub>และยังเห็นได้ว่า ลักษณะ รูปร่างของเส้นกราฟทั้งคู่มีความคล้ายคลึงกัน นอกจากนี้จะพบว่า ค่าของความผิดพลาดนั้นจะมีค่า สูงกว่าบริเวณอื่นในช่วง 0 -2.3 วินาที, 11-14 วินาที



และ 22-24 วินาที เนื่องจาก เป็นช่วงที่มีการ เปลี่ยนแปลง ความเร็วในทิศทางการเคลื่อนที่ใน แนวแกน<sup>X</sup>

เพื่อที่จะลดค่าผิดพลาด ชุดชดเชยจากแบบจำลอง แรงเสียดทานในสมการที่ 8-15 ถูกนำมาเพิ่มในส่วนที่ 3 จากรูปที่ 13 จะพบว่าค่าผิดพลาดลดลง ซึ่งเห็นได้ จากช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในทิศ <sup>X</sup> แต่ อย่างไรก็ตาม ค่าผิดพลาดยังคงมีอยู่ในช่วง 0.35 มิลลิเมตร.

#### 4. บทสรุป

แบบจำลองความเสียดทานที่ได้อยู่ในรูปความ เสียดทานสถิตย์นี้จะใช้ได้เฉพาะกลไกแขนกลแบบ ขนานเอชสี่เท่านั้น การทดสอบระบบติดตามที่นำ แบบจำลองความเสียดทานชุดนี้ที่ประกอบด้วย แบบจำลองความเสียดทานเสียดทานสถิตย์รวมกับ สัญญาณ dither สามารถลดความผิดพลาดทาง ตำแหน่งจาก0.7 มิลลิเมตรได้ถึง 0.4 มิลลิเมตร หรือ คิดเป็น 43 % แบบจำลองนี้แสดงให้เห็นการมีส่วน ช่วยลดความเสียดทานโดยรวมทั้งหมดของชิ้นส่วนที่ เคลื่อนที่ของกลไกแบบขนานของแขนกลตระกูลเอช

#### เอกสารอ้างอิง

H. Olsson, K.J. Åström, C. Canudas de Wit,
 M. Gäfvert and P. Lischinsky (1998). Friction
 Models and Friction Compensation: European
 journal of control, Vol.4, pp 176-195.

[2] Milos R. Popovi'c and Andrew A. Goldenberg
(1998). Modeling of Friction Using Spectral
Analysis: IEEE Transactions on Robotics and
Automation, Vol. 14, No. 1, February 1998.

[3] K. Chooprasird and V. Sangveraphunsiri,
Analytical Kinematics and Dynamics for 5 axis H4 parallel Manipulator: The 22nd Conference of
Mechanical Engineering Network of Thailand, 1517 October 2008.

[4] Dumitru Olaru, George C. Puiu, Liviu C. Balan,Vasile Puiu (2005): A New Model to Estimate

Friction Torque in a Ball Screw System. Product Engineering Springer Netherlands, page333-346.

[5] K. Chooprasird and V. Sangveraphunsiri, Embedded Force Control for a Hybrid 5-Axis H-4 Family Parallel Manipulator. The 22nd Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, 15-17 October 2008.