

การศึกษาแรงกัดชิ้นงานในขณะที่ดอกกัดเคลื่อนที่ ด้วยระบบการทำงานแบบ มาสเตอร์-สเลฟ

Cutting Force Monitoring in the Master-Slave Operating System

เรืองยศ อารยวงษ์กุล¹ และ วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330.
E-mail Ruengyos.A@Student.chula.ac.th, viboon.s@chula.ac.th, 0-2218-6610-1, โทรสาร 0-2252-8889

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการกัดชิ้นงานด้วยระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟระหว่างแขนกลที่มีโครงสร้างแบบขนานประกอบด้วยแขนกลแอปติคทำหน้าที่เป็นแขนกลนำหรือมาสเตอร์ และ แขนกลลูกผสมโครงสร้างแบบขนาน 5 แกนตระกูล เอช-4 ทำหน้าที่เป็นแขนกลตามหรือสเลฟ โดยได้มีการวัดค่าแรงที่เกิดขึ้นในขณะที่ทำการกัดชิ้นงานด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้แรง เพื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะของแรงกัดที่เกิดขึ้นโดยกำหนดให้ความลึกในการกัดและอัตราการเคลื่อนที่ของดอกกัดเปลี่ยนแปลงไป เมื่อทำการทดลองกัดชิ้นงานเป็นร่องในแนวเส้นตรงด้วยการเคลื่อนด้ามจับของแขนกลแอปติคตามการเคลื่อนที่ของก้านางเสมือน พบว่าลักษณะของแรงกัดชิ้นงานในแนวการเคลื่อนที่ของดอกกัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความลึกร่องในการกัดและอัตราการเคลื่อนที่ของดอกกัด ส่วนตำแหน่งปลายของแขนกลแอปติคจะมีความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งของก้านางเสมือนเล็กน้อยและแขนกลแอปติคได้สร้างแรงสะท้อนกลับไปยังมือของผู้ดำเนินการ

คำหลัก: แอปติค / ก้านางเสมือน / แรงกัด / แรงสะท้อนกลับ

Abstract

This paper illustrates a master-slave operation for material removal processes which is consisted of two parallel manipulators. The haptic device is performed as a master arm and a hybrid 5-Axis H-4 family parallel manipulator is used as a slave arm. Cutting force is measured by a piezoelectric force sensor in milling processes to indicate its characteristics when depth of cut and feed rate are changed. The slot milling is achieved by moving the haptic's handle with virtual wall constrain on the moving direction. Experimental results show that the cutting force is increased when depth of cut and feed rate increase. The haptic device can generate reflection force against the operator's hand related to its deviation from the virtual wall position.

Keywords: Haptic / Virtual Wall / Cutting Force / Reflection Force

1. บทนำ

การกัดชิ้นงานให้ได้ชิ้นงานคุณภาพดีและใช้ระยะเวลาการดำเนินงานน้อยนั้นจะต้องมีการกำหนดสภาวะสำหรับกัดชิ้นงานให้เหมาะสม โดยมีค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ประกอบด้วย อัตราการเคลื่อนที่ของดอกกัด, ความเร็วรอบของดอกกัด และความลึกในการกัด [5] โดยปกติการกัดชิ้นงานด้วยเครื่องกัด CNC จะมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ก่อนเริ่มการทำงานโดยอาศัยประสบการณ์ของผู้ดำเนินงาน แต่เมื่อทำการกัดชิ้นงานจริงต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์บ่อยๆ โดยเฉพาะความลึกในการกัดชิ้นงาน ดังนั้นการกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้คงที่ไว้ก่อนอาจเกิดความไม่เหมาะสมได้ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาแนวทางการควบคุมการทำงานของเครื่อง CNC เพื่อให้เกิดลักษณะการกัดชิ้นงานที่เหมาะสมต่อสภาวะต่างๆ มากยิ่งขึ้น [8]

การควบคุมแรงในการกัดชิ้นงานนับว่าเป็นแนวทางหนึ่งในการช่วยลดการสึกหรอของดอกกัด โดยอาศัยการวัดแรงกัดโดยตรงด้วยอุปกรณ์วัดแรง (Force Sensor) หรือ การวัดแรงโดยอ้อมจากปริมาณกระแสที่มอเตอร์ใช้ขับเคลื่อนดอกกัดชิ้นงานในขณะที่ทำการกัดชิ้นงาน [7] ลักษณะของดอกกัดที่นิยมใช้ในการกัดเซาะชิ้นงานคือดอกกัดชนิด Ball-End จึงได้มีงานวิจัยทำการศึกษาร่างที่เกิเกิดขึ้นจากการตัดเฉือนชิ้นงานของดอกกัดชนิดนี้และทำการทดลองเปรียบเทียบผล [5,6]

ในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาร่างที่เกิเกิดขึ้นจากการกัดชิ้นงานของดอกกัดซึ่งติดตั้งอยู่กับแขนกลตามในระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ โดยการเคลื่อนที่ของดอกกัดชิ้นงานจะเป็นไปตามการเคลื่อนที่ตามจับแขนกลนำด้วยมือของผู้ดำเนินการ

2. การทำงานแบบ มาสเตอร์ – สเลฟ

ในขณะที่เริ่มต้นตำแหน่งปลายแขนกลทั้งสองอยู่นิ่งจึงสามารถกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของปลายแขนกลด้วยเวกเตอร์เทียบกับฐานของแขนกล เมื่อแขนกลนำเคลื่อนที่ไปทำให้เกิดเวกเตอร์ตำแหน่งของแขนกลนำที่เวลาใดๆ ($\bar{X}_m$) หากนำผลต่างของ

เวกเตอร์ตำแหน่งแขนกลนำ ไปบวกกับเวกเตอร์ตำแหน่งเริ่มต้นของแขนกลตาม ($\bar{X}_{sr}$) จะทำให้สามารถหาสมการสำหรับเวกเตอร์ตำแหน่งของแขนกลตามที่ต้องการได้ [3]

$$\bar{X}_{sd} = G_p \cdot (\bar{X}_m - \bar{X}_{mr}) + \bar{X}_{sr} \quad (1)$$

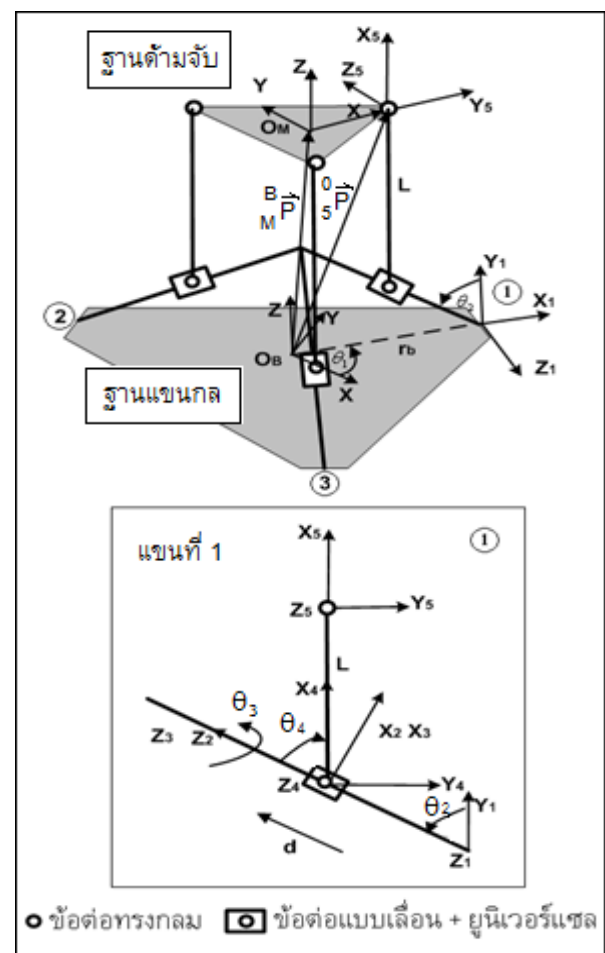
$\bar{X}_{sr}$ คือเวกเตอร์ตำแหน่งเริ่มต้นของแขนกลตาม

$\bar{X}_{mr}$ คือเวกเตอร์ตำแหน่งเริ่มต้นของแขนกลนำ

$\bar{X}_{sd}$ คือเวกเตอร์ตำแหน่งของแขนกลตามที่ต้องการ

$\bar{X}_m$ คือเวกเตอร์ตำแหน่งของแขนกลนำที่เวลาใดๆ

G_p คือค่าเกนขยายของตำแหน่ง



รูปที่ 1 ตำแหน่งแกนบนโครงสร้างแขนกลนำ

เมื่อกำหนดตำแหน่งแกนบนโครงสร้างแขนกลนำ ดังรูปที่ 1 สามารถหาเวกเตอร์ตำแหน่งของปลายก้านต่อโยงสำหรับแต่ละแขนที่เวลาใดๆ จากสมการฟอร์เวิร์ดคิเนเมติกดังต่อไปนี้ [3]

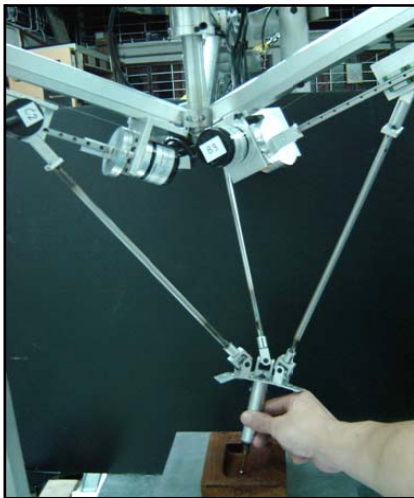
(กำหนดให้ $c\theta = \cos\theta$, $s\theta = \sin\theta$, $i = 1, 2$ และ 3)

$$\begin{bmatrix} {}^B_5\bar{P}^i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left((c\theta_1^i c\theta_2^i c\theta_3^i - s\theta_1^i s\theta_3^i) s\theta_4^i - c\theta_1^i s\theta_2^i c\theta_4^i \right) L \\ -d^i (c\theta_1^i s\theta_2^i) + r_b c\theta_1^i \\ \left((s\theta_1^i c\theta_2^i c\theta_3^i + c\theta_1^i s\theta_3^i) s\theta_4^i - s\theta_1^i s\theta_2^i c\theta_4^i \right) L \\ -d^i (s\theta_1^i s\theta_2^i) + r_b s\theta_1^i \\ \left((s\theta_2^i c\theta_3^i s\theta_4^i + c\theta_2^i c\theta_4^i) L + d^i (c\theta_2^i) \right) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ตำแหน่งกึ่งกลางฐานด้ามจับ (${}^B_5\bar{P}$) สามารถหาได้จากตำแหน่งปลายก้านต่อโยงทั้งสามดังนี้

$${}^B_5\bar{P} = \frac{1}{3} ({}^B_5\bar{P}^1 + {}^B_5\bar{P}^2 + {}^B_5\bar{P}^3) \quad (3)$$

ปลายก้านต่อโยงจะเชื่อมต่อไปยังฐานด้ามจับและด้ามจับของแขนกลนำดังแสดงในรูปที่ 2



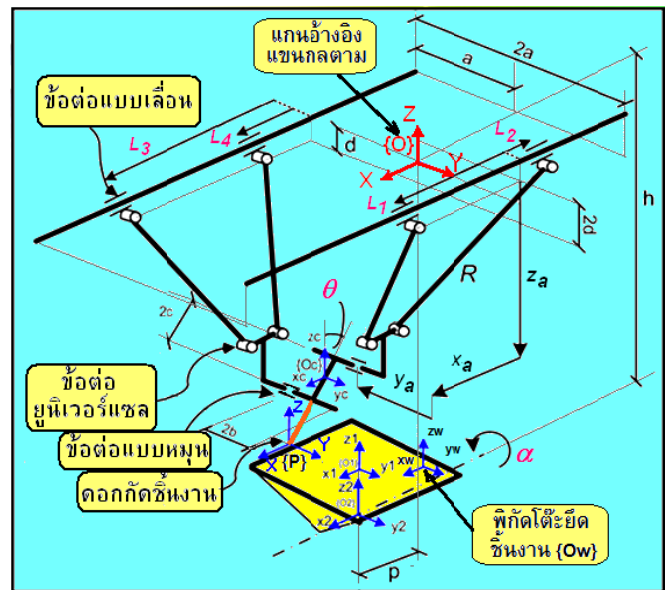
รูปที่ 2 แขนกลนำที่ใช้ในการทดลอง

ตำแหน่งปลายแขนกลตามหรือดอกกัทชันงาน $\{P\}$ บนพิกัดโต๊ะยึดชิ้นงานของแขนกลตาม $\{O_w\}$ ดังแสดงในรูปที่ 3 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4-6 เมื่อทราบตำแหน่งปลายแขนกล (x , y และ z) บนแกนอ้างอิงของแขนกลตาม $\{O\}$ จากสมการฟอร์เวิร์ดคิเนมติก [1,2]

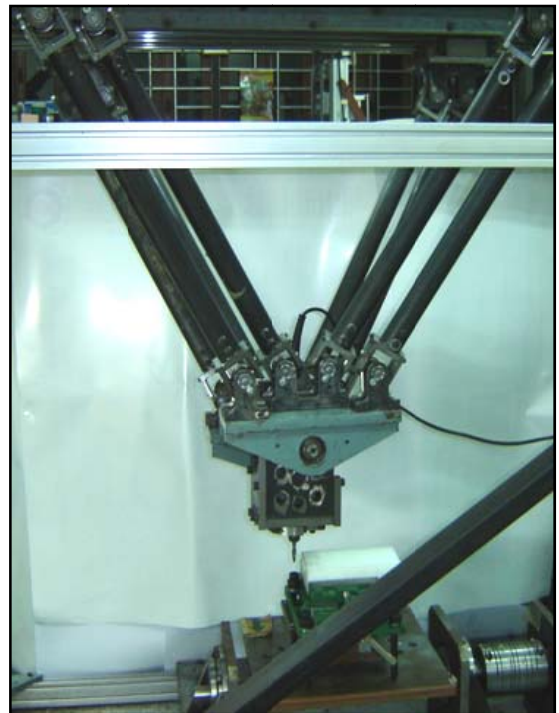
$$x_w = x + p + x_{o1}^{ow} \quad (4)$$

$$y_w = y \cdot \cos(\alpha) + (z + h) \cdot \sin(\alpha) + y_{o1}^{ow} \quad (5)$$

$$z_w = (z + h) \cdot \cos(\alpha) - y \cdot \sin(\alpha) + z_{o2}^{o1} \quad (6)$$

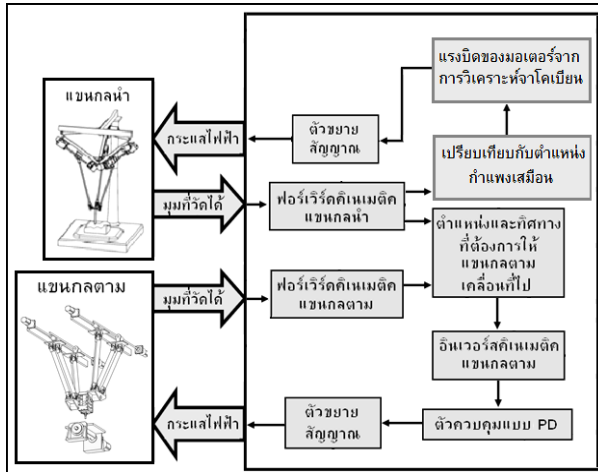


รูปที่ 3 ตำแหน่งแกนบนโครงสร้างแขนกลตาม



รูปที่ 4 แขนกลตามที่ใช้ในการทดลอง

เนื่องจากแขนกลตามดังแสดงในรูปที่ 4 จะต้องทำการกัทชันงาน โดยอาศัยข้อมูลตำแหน่งที่ปลายดอกกัทจะเคลื่อนที่ไปในแต่ละคาบเวลาจากข้อมูลตำแหน่งของแขนกลนำ จึงต้องมีระบบควบคุมเพื่อให้แขนกลตามเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการแผนภาพของระบบควบคุมดังกล่าวแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนภาพการทำงานของระบบแขนกล

เมื่อทราบตำแหน่งที่ต้องการให้ปลายแขนกลตามเคลื่อนที่ไปแล้วจะต้องทำการควบคุมการหมุนของมอเตอร์ขับเคลื่อนชุดบอลสกรูเพื่อให้ได้ตำแหน่งดังกล่าวโดยอาศัยค่าจากการคำนวณด้วยการวิเคราะห์อินเวอร์สคิเนมาติกของแขนกลตาม [2,3,4]

3. แรงสะท้อนกลับของแขนกลหน้า

การสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือผู้ดำเนินการของแขนกลหน้า(แขนกลแฮปติก)อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของอุปกรณ์ขับเคลื่อนแต่ละตัวซึ่งติดตั้งไว้ที่ฐานของแขนกลหน้า และ แรงที่ต้องการให้เกิดขึ้นที่ตามจับของแขนกลหน้า ความสัมพันธ์ดังกล่าวหาได้โดยการวิเคราะห์จาโคเบียน (Jacobian) ของแขนกลหน้า [3]

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}^T \boldsymbol{\tau} \quad (7)$$

เมื่อ $\mathbf{J}^T$ คือ ทรานสโพสของเมทริกซ์จาโคเบียน

$\mathbf{F}$ คือ โมเมนต์ (M) และแรง (F) กระทำกับมือผู้ดำเนินการ ($\mathbf{F} = [M_x \ M_y \ M_z \ F_x \ F_y \ F_z]^T$)

$\boldsymbol{\tau}$ คือ แรงในทิศทางเคลื่อน (f_i) และแรงบิด (τ_i) ในทิศทางหมุนที่เกิดจากอุปกรณ์ขับเคลื่อนแต่ละตัว ($\boldsymbol{\tau} = [f_1 \ \tau_1 \ f_2 \ \tau_2 \ f_3 \ \tau_3]^T$)

จาโคเบียนของแขนกลหน้าเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของฐานตามจับ (Moving Platform) กับ ความเร็วของแต่ละข้อต่อที่มี

อุปกรณ์ขับเคลื่อน (Active Joint) ซึ่งแสดงในรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

$$\mathbf{Bt} = \mathbf{Aq} \quad (8)$$

เมื่อ $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ แทนเมทริกซ์ของโครงสร้างแบบขนาน $\mathbf{t}$ คือความเร็วของแผ่นบนประกอบด้วยความเร็วเชิงมุม (ω) และความเร็วเชิงเส้น ($\mathbf{v}$)

$$\left(\mathbf{t} = \begin{bmatrix} \omega \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_x & \omega_y & \omega_z & v_x & v_y & v_z \end{bmatrix}^T \right)$$

$\mathbf{q}$ คือความเร็วของแต่ละข้อต่อที่มีอุปกรณ์ขับเคลื่อน

$$\left(\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \dot{d}^1 & \dot{\theta}_3^1 & \dot{d}^2 & \dot{\theta}_3^2 & \dot{d}^3 & \dot{\theta}_3^3 \end{bmatrix}^T \right)$$

สามารถแสดงความเร็วที่จุด P_j ($j = 1, 2$ และ 3) ในรูปที่ 6 ได้ดังนี้

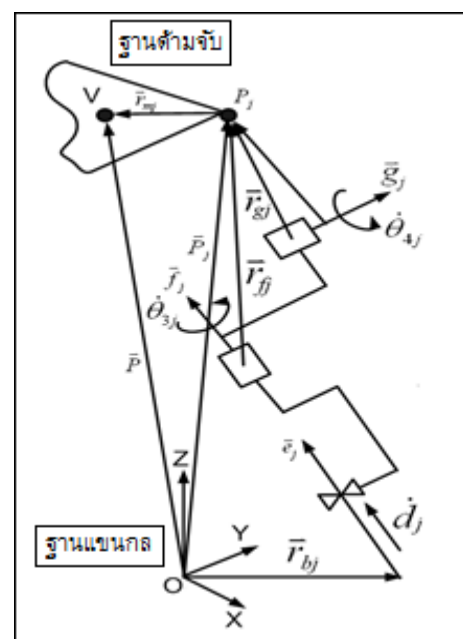
$$\bar{\mathbf{P}}_j = d\bar{\mathbf{S}}_{j1} + \dot{\theta}_3 \bar{\mathbf{S}}_{j2} + \dot{\theta}_4 \bar{\mathbf{S}}_{j3} \quad (9)$$

$$\text{หรือ} \quad \bar{\mathbf{P}}_j = \bar{\mathbf{v}} - \bar{\omega} \times \bar{\mathbf{r}}_{mj} \quad (10)$$

$$\text{เมื่อ} \quad \bar{\mathbf{S}}_{j1} = \bar{\mathbf{e}}_j, \quad \bar{\mathbf{S}}_{j2} = \bar{\mathbf{f}}_j \times \bar{\mathbf{r}}_{fj}, \quad \bar{\mathbf{S}}_{j3} = \bar{\mathbf{g}}_j \times \bar{\mathbf{r}}_{gj},$$

$$\bar{\mathbf{r}}_{mj} = \bar{\mathbf{P}} - \bar{\mathbf{P}}_j, \quad \bar{\mathbf{r}}_{fj} = \bar{\mathbf{r}}_{gj} = \bar{\mathbf{P}}_j - \frac{B}{4}\bar{\mathbf{P}}_j = \bar{\mathbf{P}}_j - \frac{B}{3}\bar{\mathbf{P}}_j$$

$$\bar{\mathbf{r}}_{fj} = L \begin{bmatrix} (c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 - s\theta_1 s\theta_3) s\theta_4 - c\theta_1 s\theta_2 c\theta_4 \\ (s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3 + c\theta_1 s\theta_3) s\theta_4 - s\theta_1 s\theta_2 c\theta_4 \\ s\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 + c\theta_2 c\theta_4 \end{bmatrix}$$



รูปที่ 6 เวกเตอร์ตำแหน่งต่างๆในแต่ละก้านต่อโยง

ทำการจัดรูปแบบดังสมการที่ 8 จะสามารถหาเมตริกซ์ **A** และ **B** ได้ดังนี้ (กำหนดให้ $j=1, 2, 3$)

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{32} \end{bmatrix} \quad (11)$$

เมื่อกำหนดให้ $a_{j1} = -\cos \theta_{4j}$, $a_{j2} = -L \sin \theta_{4j}$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{12} \\ b_{21} \\ b_{22} \\ b_{31} \\ b_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\bar{\mathbf{I}}_1 \times \bar{\mathbf{r}}_{m1})^T & \bar{\mathbf{I}}_1^T \\ (\bar{\mathbf{M}}_1 \times \bar{\mathbf{r}}_{m1})^T & \bar{\mathbf{M}}_1^T \\ (\bar{\mathbf{I}}_2 \times \bar{\mathbf{r}}_{m2})^T & \bar{\mathbf{I}}_2^T \\ (\bar{\mathbf{M}}_2 \times \bar{\mathbf{r}}_{m2})^T & \bar{\mathbf{M}}_2^T \\ (\bar{\mathbf{I}}_3 \times \bar{\mathbf{r}}_{m3})^T & \bar{\mathbf{I}}_3^T \\ (\bar{\mathbf{M}}_3 \times \bar{\mathbf{r}}_{m3})^T & \bar{\mathbf{M}}_3^T \end{bmatrix} \quad (12)$$

เมื่อ $\bar{\mathbf{I}}_j = \frac{\bar{\mathbf{S}}_{j2} \times \bar{\mathbf{S}}_{j3}}{|\bar{\mathbf{S}}_{j2} \times \bar{\mathbf{S}}_{j3}|}$ คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ขนานกับเวกเตอร์ $(\bar{\mathbf{S}}_{j2} \times \bar{\mathbf{S}}_{j3})$

$$\bar{\mathbf{I}}_j = \begin{bmatrix} (s\theta_1 s\theta_3 - c\theta_1 c\theta_2 c\theta_3) s\theta_4 + c\theta_1 s\theta_2 c\theta_4 \\ -(c\theta_1 s\theta_3 + s\theta_1 c\theta_2 c\theta_3) s\theta_4 + s\theta_1 s\theta_2 c\theta_4 \\ -(s\theta_2 c\theta_3 s\theta_4 + c\theta_2 c\theta_4) \end{bmatrix}$$

$\bar{\mathbf{M}}_j = \frac{\bar{\mathbf{S}}_{j3} \times \bar{\mathbf{S}}_{j1}}{|\bar{\mathbf{S}}_{j3} \times \bar{\mathbf{S}}_{j1}|}$ คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ขนานกับเวกเตอร์ $(\bar{\mathbf{S}}_{j3} \times \bar{\mathbf{S}}_{j1})$

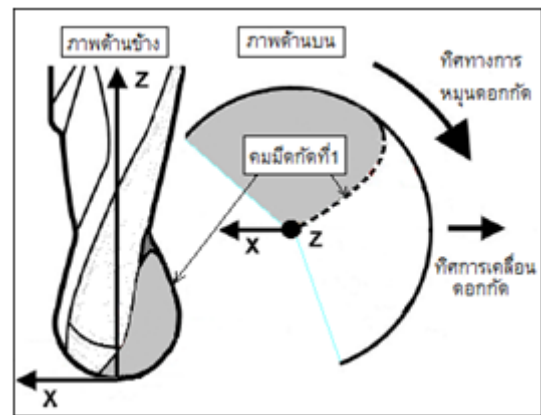
$$\bar{\mathbf{M}}_j = \begin{bmatrix} (c\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 + s\theta_1 c\theta_3) \\ (s\theta_1 c\theta_2 s\theta_3 - c\theta_1 c\theta_3) \\ s\theta_2 s\theta_3 \end{bmatrix}$$

สามารถหาโคเบียนเมตริกซ์ได้จากเมตริก **A** และ **B** ดังสมการที่ 13

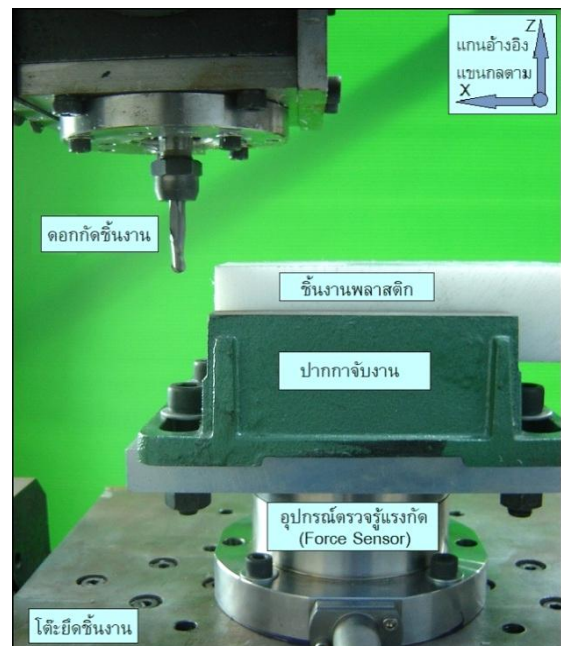
$$\mathbf{J} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \quad (13)$$

4. ลักษณะการกัดชิ้นงาน

การกัดชิ้นงานเป็นการตัดเฉือนเนื้อวัสดุออกจากชิ้นงานด้วยการหมุนและการเคลื่อนที่ของดอกกัด ชิ้นงานดังแสดงในรูปที่ 7 ดอกกัดชิ้นงานที่นำมาทำการทดลองเป็นชนิด Ball-Ended Mill ติดตั้งอยู่กับแขนกลตามเพื่อทำการกัดชิ้นงานพลาสติก ในขณะที่กัดชิ้นงานจะทำการตรวจวัดแรงกัดไปพร้อมๆกันด้วยลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดแรงกัดชิ้นงานสำหรับการทดลองนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 8

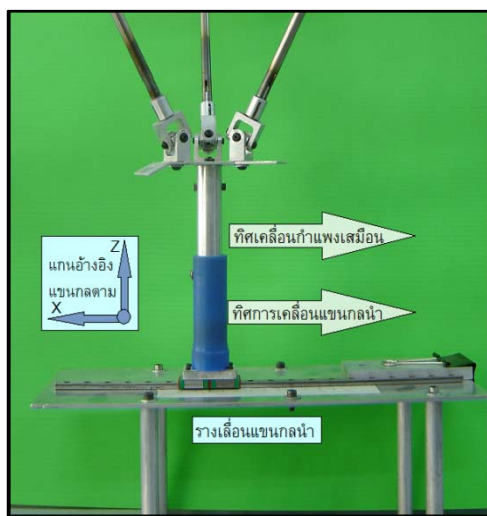


รูปที่ 7 ลักษณะของดอกกัดชิ้นงาน Ball-Ended Mill



รูปที่ 8 ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการทดลองกัดชิ้นงาน

ดอกกัดชิ้นงานเป็นส่วนประกอบหนึ่งของ
แขนกลตามที่มีการเคลื่อนที่ตามการเคลื่อนที่ของ
แขนกลนำ ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดความเร็วการ
เคลื่อนที่ที่แขนกลนำด้วยกำลังเหมือนขึ้นเพื่อให้
ผู้ดำเนินการสามารถเคลื่อนด้ามจับแขนกลนำได้
ใกล้เคียงกับความเร็วที่กำหนดไว้โดยแขนกลนำจะมี
แรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือผู้ดำเนินการหาก
ผู้ดำเนินการเคลื่อนตำแหน่งด้ามจับเร็วกว่าการเคลื่อน
กำลังเหมือนซึ่งแสดงทิศทางการเคลื่อนไว้ในรูปที่ 9



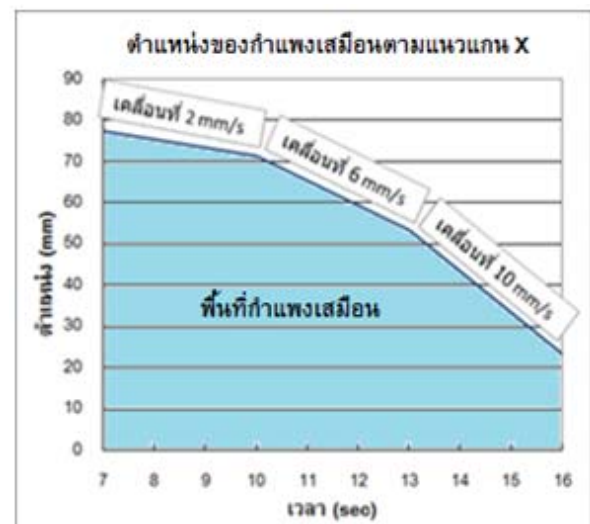
รูปที่ 9 ทิศทางการเคลื่อนที่ของแขนกลนำ และ
กำลังเหมือน บนชุดอุปกรณ์รางเลื่อน

5. ผลทดสอบการกัดชิ้นงาน

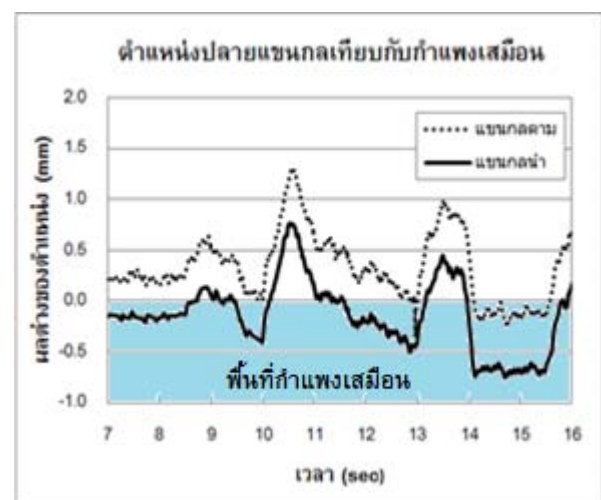
การศึกษาแรงที่เกิดจากการกัดชิ้นงานโดยใช้ดอกกัด
ชนิด Ball-Ended Mill ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง
8 mm ความเร็วรอบในการหมุนดอกกัด 7,500 rpm
ทดลองการกัดเป็นเส้นตรงในแนวแกน -x ของ
แขนกลตาม โดยได้บันทึกค่าแรงกัดที่วัดได้จาก
อุปกรณ์ตรวจรู้แรง (Force Sensor) ทุกๆคาบเวลา
0.001 sec และนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบ
กรณีการเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนที่ของ
กำลังเหมือน และ ความลึกในการกัดชิ้นงาน

การเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนที่ของกำลัง
เหมือนจาก 2 mm/s เป็น 6 mm/s และ 10 mm/s
ดังรูปที่ 10 ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของแขนกลนำและ
แขนกลตามในแต่ละคาบเวลาเปลี่ยนแปลงไป

โดยมีความแตกต่างของตำแหน่งในแนวแกน X
เมื่อกัดชิ้นงานความลึก 3 mm ดังรูปที่ 11 กรณีที่
ความแตกต่างมีค่าเป็นบวกแสดงว่าแขนกลนำ
เคลื่อนที่ได้ช้ากว่าการเคลื่อนที่ของกำลังเหมือน
ส่วนกรณีที่เป็นค่าลบแสดงว่าแขนกลนำมีการเคลื่อนที่
เร็วกว่าการเคลื่อนที่ของกำลังเหมือนและได้เคลื่อนเข้า
ไปในพื้นที่ของกำลังเหมือนแล้ว ทำให้แขนกลนำ
สร้างแรงสะท้อนกลับมายังมือของผู้ดำเนินการเพื่อ
ชะลอการเคลื่อนที่ของผู้ดำเนินการให้มีความเร็ว
ใกล้เคียงกับการเคลื่อนที่ของกำลังเหมือนมากขึ้น

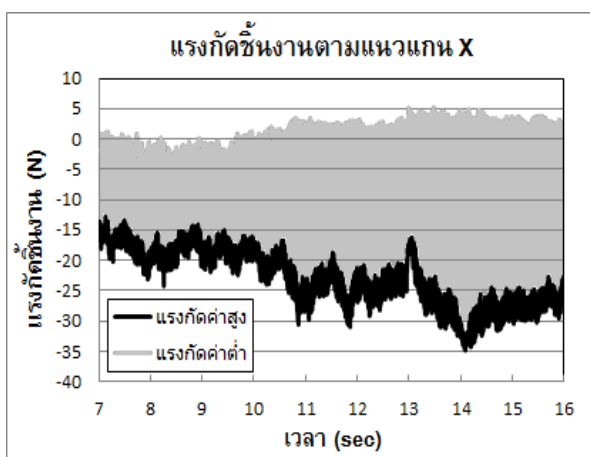


รูปที่ 10 ตำแหน่งของกำลังเหมือนตามแนวแกน X
เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป

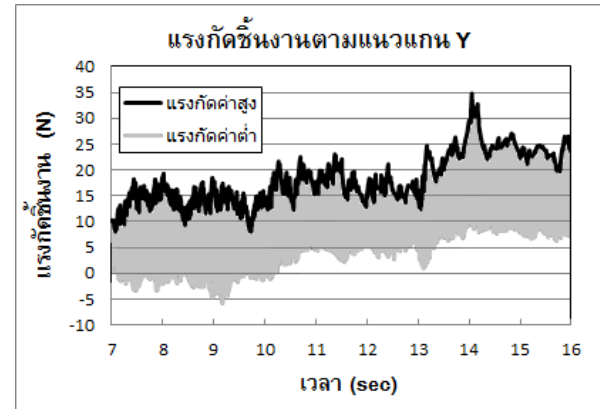


รูปที่ 11 ความแตกต่างระหว่างตำแหน่งปลายแขนกล
ทั้งสองในแนวแกน X เมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่
ของกำลังเหมือน

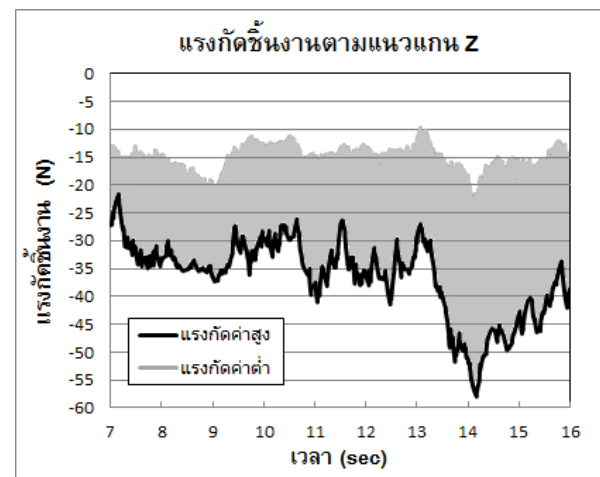
ในขณะที่แขนกลนำเคลื่อนที่จะส่งผลให้แขนกลตามเกิดการเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันกันด้วยระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ ส่งผลให้ดอกกัดชิ้นงานเคลื่อนที่กัดชิ้นงานในแต่ละคาบเวลาในงานวิจัยนี้จึงทำการวัดค่าแรงกัดชิ้นงานด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้แรงในแนวแกนของแขนกลตามประกอบด้วยแรงในแนวแกน X Y และ Z ดังแสดงในรูปที่ 12 13 และ 14 ตามลำดับ เนื่องจากการกัดชิ้นงานมีลักษณะเป็นร่อง (slot) ที่มีความลึก 3 mm ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแรงในแต่ละคาบเวลาจะเกิดการเพิ่มขึ้นและลดลงตามการหมุนของดอกกัดชิ้นงานส่งผลให้แรงกัดที่วัดได้มีการเปลี่ยนแปลงค่ากลับไปกลับมาระหว่างแรงค่าต่ำและแรงค่าสูง โดยแรงกัดที่มีค่าสูงในแนวแกน X เกิดขึ้นในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของดอกกัด (ทิศทาง -X ของแขนกลตาม) ส่วนแรงกัดในแนวแกน Y มีค่าสูงในทิศทางบวกตามลักษณะการหมุนของดอกกัด และ แรงกัดในแนวแกน Z มีค่าเป็นลบ (ทิศทาง -Z ของแขนกลตาม) ซึ่งแสดงว่ามีแรงกดลง บนชิ้นงานในขณะที่ทำการกัดผลการทดลองพบว่าขนาดของแรงกัดที่วัดได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทั้งในแนวแกน X Y และ Z ตามการเพิ่มความเร็วการเคลื่อนที่ของก้านแปรงเสมือน



รูปที่ 12 แรงกัดชิ้นงานที่วัดได้ตามแนวแกน X ของแขนกลตาม



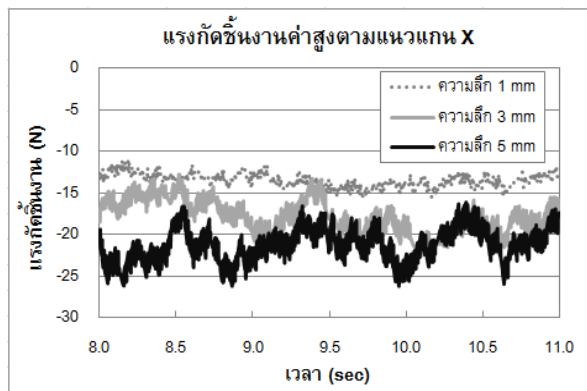
รูปที่ 13 แรงกัดชิ้นงานที่วัดได้ตามแนวแกน Y ของแขนกลตาม



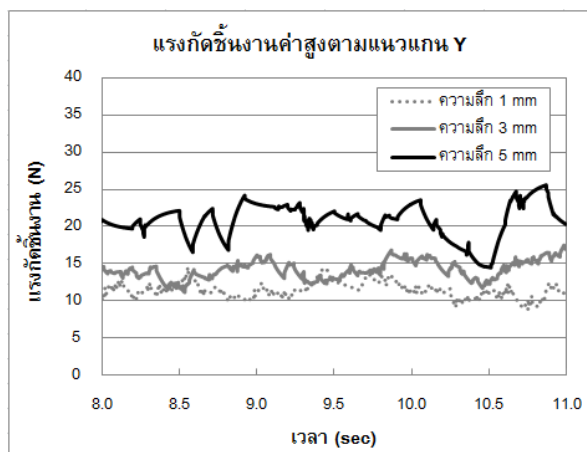
รูปที่ 14 แรงกัดชิ้นงานที่วัดได้ตามแนวแกน Z ของแขนกลตาม

เมื่อทำการกัดชิ้นงานโดยกำหนดให้การเคลื่อนที่ของก้านแปรงเสมือนมีค่าคงที่ 2 mm/s และ กำหนดค่าความลึกในการกัดชิ้นงานเป็น 1 mm 3 mm และ 5mm พบว่าแรงกัดชิ้นงานค่าสูงเมื่อพิจารณาในแนวแกน X ดังรูปที่ 15 มีทิศทางของแรงกัดเป็นค่าลบ แนวแกน Y ดังรูปที่ 16 มีทิศทางของแรงกัดเป็นค่าบวก และ แนวแกน Z ดังรูปที่ 17 มีทิศทางของแรงกัดเป็นค่าลบ เมื่อทำการเพิ่มความลึกร่องในการกัดชิ้นงานพบว่า ขนาดแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน X Y และ Z มีขนาดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความลึกร่อง และ ลักษณะของแรงกัดที่วัดได้จะมีช่วงของการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะเมื่อความลึกร่อง

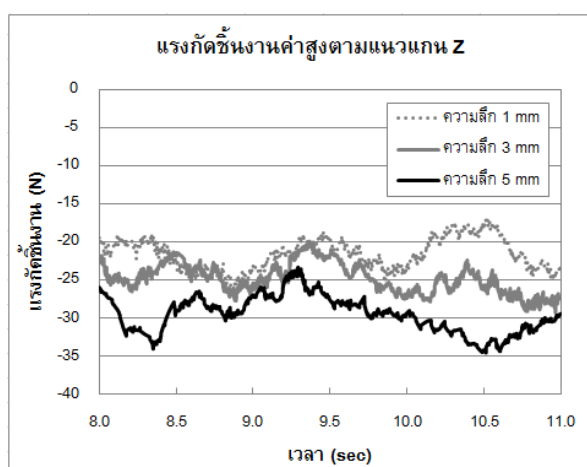
เป็น 5 mm ค่าแรงกักในแนวแกน X แนวแกน Y และ
แนวแกน Z มีการเปลี่ยนแปลงในช่วงประมาณ 10 N



รูปที่ 15 แรงกักสูงสุดในแนวแกน X
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความลึกในการกัด

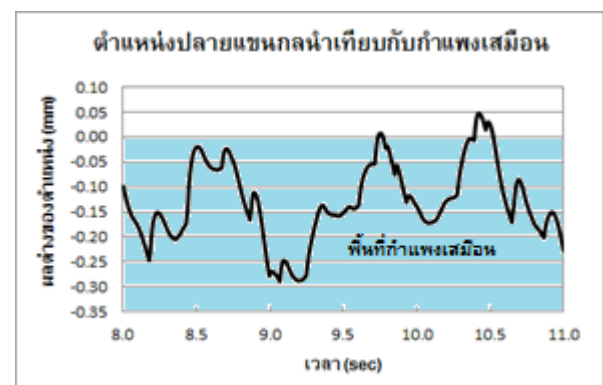


รูปที่ 16 แรงกักสูงสุดในแนวแกน Y
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความลึกในการกัด

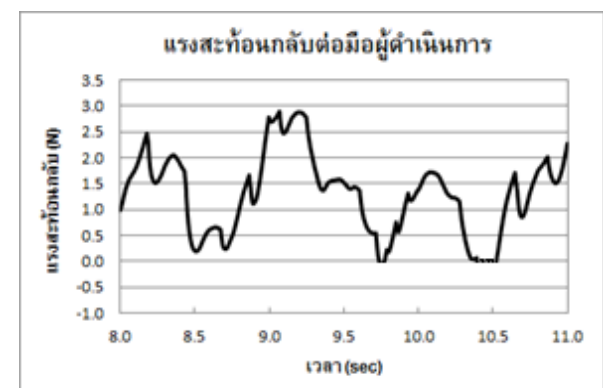


รูปที่ 17 แรงกักสูงสุดในแนวแกน Z
เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความลึกในการกัด

ความแตกต่างระหว่างตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ
ปลายแกนกลนำเทียบกับการเคลื่อนที่ของกำแพง
เสมือน กรณีที่กำแพงเสมือนเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว
2 mm/s แสดงดังรูปที่ 18 ส่วนใหญ่มีค่าเป็นลบ
แสดงว่าแกนกลนำเคลื่อนที่เร็วกว่าการเคลื่อนที่ของ
กำแพงเสมือน และ แกนกลนำได้สร้างแรงสะท้อนกลับ
กระทำต่อมือผู้ดำเนินการในทิศตรงข้ามการเคลื่อนที่
ดังแสดงในรูปที่ 19 ขนาดของแรงสะท้อนกลับสามารถ
ปรับค่าให้อยู่ในช่วงที่พอเหมาะได้โดยการปรับค่า
อัตราขยายของแรงที่เกิดขึ้นจากค่าความแตกต่างของ
ตำแหน่ง ขนาดของแรงสะท้อนกลับนี้จะนำไปใช้
เพื่อคำนวณหาแรงบิดที่จำเป็นสำหรับมอเตอร์ของ
แกนกลนำแต่ละตัวด้วยการวิเคราะห์หาค่าโคเบียงเพื่อให้
แกนกลนำสร้างแรงกระทำต่อมือผู้ดำเนินการได้



รูปที่ 18 ความแตกต่างระหว่างตำแหน่งปลาย
แกนกลนำเทียบกับกำแพงเสมือนความเร็ว 2 mm/s



รูปที่ 19 แรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือผู้ดำเนินการ
ในแนวแกน X กรณีที่กำแพงเสมือนเคลื่อนที่
ด้วยความเร็ว 2 mm/s

6. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลของแรงกีดกันงานซึ่งวัดได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจแรง ในระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ ระหว่างแขนกลโครงสร้างแบบขนานที่ได้จัดเตรียมขึ้นสำหรับการทดลองกีดกันงานพลาสติก โดยกำหนดให้แขนกลนำมีการเคลื่อนที่เป็นลักษณะเส้นตรงตามการเคลื่อนที่ของแกนเลื่อน พบว่าแขนกลตามสามารถเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันและดักกีดกันการกีดกันงานไปพร้อมๆกัน จึงสามารถทำการตรวจวัดแรงกีดกันงานในแต่ละคาบเวลาได้

ผลการทดลองพบว่าขนาดค่าแรงกีดกันงานจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความถี่ในการกีดกันงาน และการเพิ่มความเร็วการเคลื่อนที่ของแกนเลื่อน ส่วนการสร้างแรงสะท้อนกลับกรณีที่แขนกลนำเคลื่อนที่เร็วกว่าแกนเลื่อนส่งผลให้ผู้ดำเนินการเกิดความรู้สึกว่ามีแรงต้านจึงสามารถทำการเคลื่อนที่ตามจับแขนกลนำได้ใกล้เคียงกับการเคลื่อนที่ของแกนเลื่อนมากขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการศูนย์ระดับภูมิภาคเทคโนโลยีหุ่นยนต์ภายใต้โครงการเพิ่มศักยภาพด้านวิศวกรรมศาสตร์สหสาขาเพื่อพัฒนาและสร้างความเป็นเลิศด้านวิศวกรรมศาสตร์ในระดับภูมิภาคและการเรียนการสอนไปสู่ระดับโลกในแผนพัฒนาวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (จุฬฯ 100 ปี)

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kumman Chooprasird and Viboon Sangveraphunsiri (2009). Dynamics and Control of a 5 DOF Manipulator Base on H-4 Parallel Mechanism, Thammasat Interjournal of Science and Technology, vol.14 (No.1), January-March (2009) , pp. 43-60.
- [2] กรมมณฑ์ ชูประเสริฐ (2550). การควบคุมแรงแบบฝังตัวสำหรับแขนกลลูกผสมแบบขนาน 5 แกน

ตระกูลเอช 4. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[3] ทวี งามวิไลกร (2549). การทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟของแขนกลแอพลิเคชันของศาสตร์แบบใหม่ที่มีโครงสร้างแบบขนานสำหรับงานสร้างชิ้นงานต้นแบบ วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[4] เรืองยศ อารยวงศ์กุล และ วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ (2553). การทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ ระหว่างแขนกลแอพลิเคชัน 6 องศาอิสระ โครงสร้างแบบขนานและ แขนกลลูกผสมแบบขนาน 5 แกนตระกูลเอช-4. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 จังหวัดอุบลราชธานี

[5] Ismail Lazoglu (2003) Sculpture Surface Machining : A Generalized Model of Ball-End Milling Force System, International Journal of Machine Tools & Manufacture

[6] Y.Altintas and P.Lee (1998) Mechanics and Dynamics of Ball End Milling, Trans of ASME Vol.120

[7] Atsushi Matsubara and Soichi Ibaraki (2009) Monitoring and Control of Cutting Forces in Machining Process : A Review, Int. J. of Automation Technology Vol.3 No.4

[8] Uros Zuperl, Franci Cus and Edvard Kiker (2006) Intelligent Adaptive Cutting Force Control in End-Milling, Technical Gazette