

ผลกระทบของแรงสะท้อนกลับที่มีต่อระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ ในขณะทำการกัดชิ้นงาน

Effects of Force Reflection on Master-Slave Operating System in Milling Processes

เรืองยศ อารยวงศ์กุล^{1*} และ วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330.

*ติดต่อ Email: Ruengyos.A@Student.chula.ac.th, viboon.s@chula.ac.th, โทรศัพท์: 0-2218-6449, โทรสาร: 0-2218-6583

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการประยุกต์ใช้แรงสะท้อนกลับมากระทำต่อมือของผู้ดำเนินการเมื่อทำการกัดชิ้นงานด้วยระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ ซึ่งประกอบด้วยแขนกลโครงสร้างแบบขนานสำหรับงานกัดชิ้นงาน ส่วนของแขนกลนำเป็นอุปกรณ์แฮนด์คัลเลอร์ที่สามารถสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการโดยอาศัยการอ้างอิงค่าแรงกัดที่วัดได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจจับแรง ในขณะที่แขนกลตามทำการกัดชิ้นงาน ผลการทดลองกัดชิ้นงานพลาสติกเป็นร่องแนวเส้นตรงเมื่อมีการใช้แรงสะท้อนกลับเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้แรงสะท้อนกลับ พบว่ากรณีใช้แรงสะท้อนกลับผู้ดำเนินการจะรู้สึกถึงแรงกระทำต่อมือในขณะที่เลื่อนด้ามจับของแขนกลนำอย่างมีนัยสำคัญ โดยผู้ดำเนินการจะต้องใช้แรงในการเลื่อนด้ามจับเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความเร็วการเลื่อนด้ามจับจะมีค่าลดลง ส่งผลให้ดอกกัดของแขนกลตามเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ลดลงและมีตำแหน่งการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกับการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลนำเนื่องจากการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ

คำหลัก: แรงสะท้อนกลับ / แรงกัดชิ้นงาน / มาสเตอร์-สเลฟ

Abstract

This research work applies force reflection to the operator hand on the master-slave operating system which consists of parallel mechanisms for milling processes. The master arm can generate force reflection against the operator hand related to cutting force which is measured by force sensor in milling task. In comparing with no force reflection, experimental results of slot milling with force reflection indicate significant effects on the operator hand. Thus, the operator can increase his acting force to move the master's handle while its moving velocity is reduced. The milling tool's feed rate is decreased and its motion is closed to the master tip's movement because of the master-slave operation.

Keywords: Force Reflection / Cutting Force / Master-Slave

1. บทนำ

การทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบเพื่อส่งผ่านการเคลื่อนที่ระหว่างแขนกลนำและแขนกลตาม งานวิจัยที่ได้มีการศึกษาเป็นอย่างมากและผลิตเชิงพาณิชย์ เช่น การใช้หุ่นยนต์ช่วยในการผ่าตัดด้านศัลยกรรม การทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟนั้นผู้ดำเนินการจะทำงานสัมพันธ์กับ

ส่วนของแขนกลนำและใช้ระบบควบคุมเพื่อให้แขนกลตามเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่กำหนดตามการเคลื่อนที่ของแขนกลนำ[1] กรณีที่แขนกลตามมีปฏิสัมพันธ์กับวัตถุแวดล้อม ส่วนของแขนกลนำจะสร้างแรงสะท้อนกลับไปยังผู้ดำเนินการส่งผลให้ผู้ดำเนินการรู้สึกได้ว่าในขณะนั้นมีสิ่งกีดขวางการเคลื่อนที่ของแขนกลตามผู้ดำเนินการจะสามารถตัดสินใจได้ว่าการเคลื่อนที่

ในช่วงเวลาถัดไปควรจะดำเนินการอย่างไร [1-2] แสดงให้เห็นว่าแรงสะท้อนกลับที่เกิดขึ้นระหว่างแขนกลนำกับมือของผู้ดำเนินการนั้นมีความสำคัญต่อการทำงานร่วมกันของผู้ควบคุมและระบบการทำงานแขนกลแบบมาสเตอร์-สเลฟ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อแขนกลตามมีการสัมผัสกับวัตถุหรือสิ่งกีดขวาง

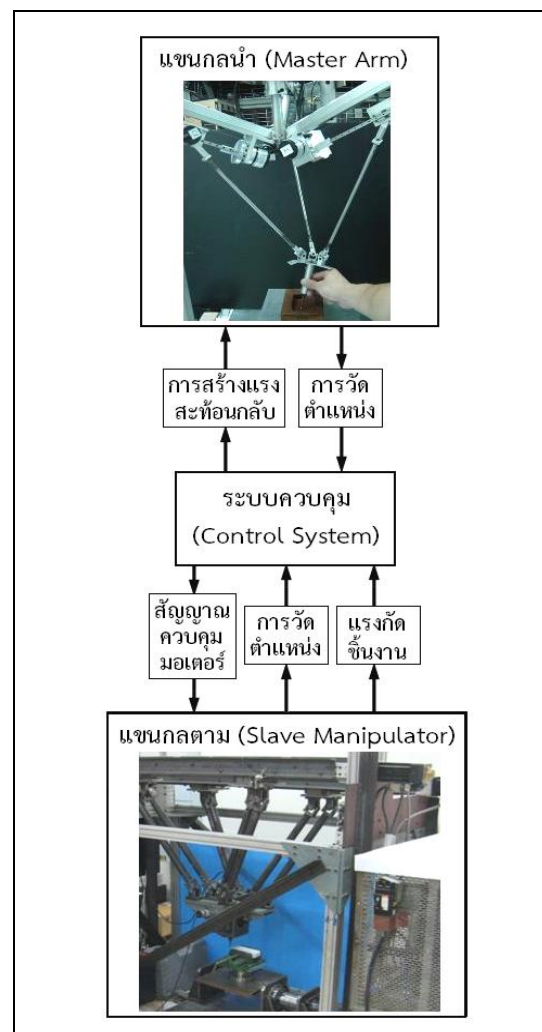
การกีดขึ้นงานนับได้ว่าเป็นที่นิยมอย่างมากในการสร้างชิ้นงานเมื่อทราบข้อมูลของพื้นผิวงาน เช่น งานด้านวิศวกรรมย้อนกลับ หรือ การสร้างชิ้นงานจากข้อมูลเส้นทางเดินของดอกกัดที่เตรียมไว้ โดยดอกกัดชิ้นงานจะทำการเคลื่อนที่ตามเส้นทางเดินที่กำหนดให้กับเครื่องกัด CNC เพื่อนำเนื้อวัสดุออกจากวัสดุเริ่มต้นจนได้รูปแบบตามต้องการ งานวิจัยที่ทำการศึกษาก่อสร้างเส้นทางเคลื่อนที่ที่ดอกกัดชนิดหัวทรงกลมจากพิกัดจุดเพื่อลดขั้นตอนของการสร้างพื้นผิวในกระบวนการวิศวกรรมย้อนกลับ เช่น [3-4] ในขณะที่ปลายดอกกัดทำการกัดเจาะชิ้นงานจะเกิดการสัมผัสระหว่างคมของดอกกัดและเนื้อชิ้นงานในลักษณะการตัดเฉือนทำให้เกิดแรงกีดขึ้นงานขึ้น และสามารถทำการจำลองแรงกีดขึ้นงานได้เมื่อทราบตำแหน่งของดอกกัดและตำแหน่งสัมผัสชิ้นงานในขณะที่ดอกกัดเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนดไว้ [5]

การกีดขึ้นงานด้วยการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ เป็นการกีดขึ้นงานโดยทำการเคลื่อนปลายแขนกลนำบนผิวชิ้นงานอ้างอิงทำให้ได้ค่าตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลนำในแต่ละคาบเวลาแล้วจึงใช้ค่าตำแหน่งและทิศทางเหล่านั้นมาเป็นค่าอ้างอิงสำหรับปลายดอกกัดของแขนกลตามให้ทำการเคลื่อนที่กีดขึ้นงานไปพร้อมๆกัน งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ค่าแรงกีดขึ้นงานซึ่งตรวจวัดได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้แรง (Force Sensor) เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการในระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ และเปรียบเทียบผลการทดลองกับกรณีที่ไม่ใช้แรงสะท้อนกลับเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นในขณะทำการกีดขึ้นงาน

2. ระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ

ระบบแขนกลที่ใช้สำหรับการกีดขึ้นงานประกอบด้วยแขนกลที่มีโครงสร้างแบบขนาน (Parallel Mechanism) ทั้งในส่วนของแขนกลนำหรือมาสเตอร์ (Master Manipulator Arm) และแขนกลตาม หรือ สเลฟ (Slave Manipulator Arm) โดยมีระบบควบคุม (Control System) ทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของ

แขนกลตาม เมื่อปลายแขนกลตามมีการกระทำกับสิ่งแวดล้อมก่อให้เกิดแรงกระทำขึ้น แรงกระทำดังกล่าวจะนำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงในการแสดงแรงสะท้อนกลับที่แขนกลนำ (Force Reflection) การทำงานของระบบแขนกลดังกล่าวมาข้างต้นเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างแขนกลนำและแขนกลตามเรียกว่าระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟโดยมีแรงสะท้อนกลับ รูปที่ 1 แสดงระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟสำหรับการกีดขึ้นงาน โดยมีการสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการในงานวิจัยนี้



รูปที่ 1 ระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟโดยมีแรงสะท้อนกลับ ในงานวิจัยนี้

ผู้ดำเนินการทำการควบคุมตำแหน่งของปลายแขนกลนำ ตำแหน่งปลายแขนกลนำที่วัดได้จะถูกแปลงเป็นค่าตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนแขนกลตามเพื่อให้ตำแหน่งปลายแขนกลตามมีรูปแบบ

ของตำแหน่งและทิศทางในลักษณะเดียวกับแขนกลนำ โดยใช้การวิเคราะห์ทางด้านคิเนเมติกมาช่วยในการแปลงค่าดังกล่าว[6,7] เมื่อแขนกลตามมีการกระทบหรือกระทำกับสิ่งแวดล้อม เช่น เมื่อแขนกลตามติดตั้งหัวกัดที่ปลายแขนก็จะมีแรงกระทำที่ปลายดอกกัดในขณะกัตขึ้นงาน เราสามารถวัดแรงกัตนี้ได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่ตัวจับยึดขึ้นงาน แรงกัตที่วัดได้นี้จะถูกแปลงเป็นตัวแปรที่ใช้ในการสร้างแรงสะท้อนกลับที่แขนกลนำ โดยที่แขนกลนำจะมีมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนแขนกลเช่นกัน แรงสะท้อนกลับนี้จะเป็แรงที่กระทำกับมือของผู้ดำเนินการ ทำให้มีความรู้สึกหรือรับรู้แรงเสมือนที่เกิดขึ้นที่ปลายแขนกลตาม

ในกรณีที่แขนกลทั้งสองมีโครงสร้างแตกต่างกัน (dissimilar structure) เราสามารถคำนวณหาตำแหน่งและทิศทางสำหรับการเคลื่อนปลายแขนกลตามได้เมื่อทราบตำแหน่งและทิศทางเริ่มต้นของแขนกลทั้งสอง เพื่อให้เกิดความสะดวกในการวิเคราะห์ตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลตามจึงกำหนดให้แกนอ้างอิงแขนกลนำและแกนอ้างอิงแขนกลตามตั้งอยู่ในทิศทางเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2 ตำแหน่งเริ่มต้นของปลายแขนกลนำและปลายแขนกลตามอยู่บนพิกัด $\{ini_m\}$ และ $\{ini_s\}$ ตามลำดับ เมื่อปลายแขนกลนำมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งไปที่พิกัด $\{t_m\}$ ตำแหน่งปลายแขนกลตามจะเคลื่อนที่ไปที่พิกัด $\{t_s\}$ โดยตำแหน่งปลายแขนกลตาม (X_{sd}) หาได้จากสมการ

$$X_{sd} = G_P \cdot (X_m - X_{mr}) + X_{sr} \quad (1)$$

เมื่อกำหนดให้

X_m คือ ตำแหน่งปลายแขนกลนำที่เวลาใดๆ

X_{mr} คือ ตำแหน่งเริ่มต้นของปลายแขนกลนำ

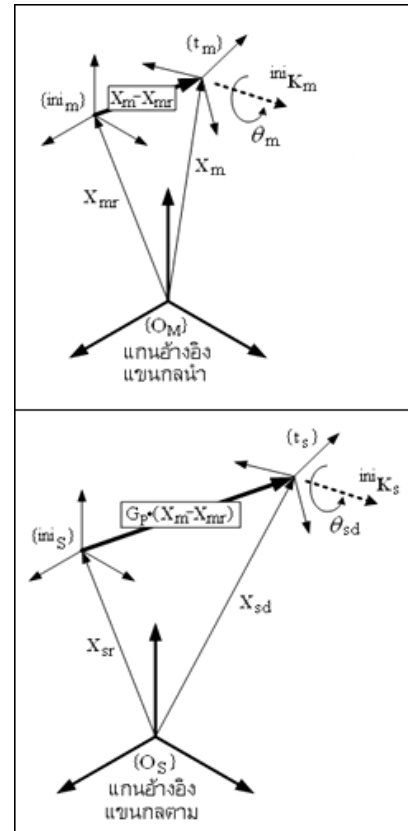
X_{sr} คือ ตำแหน่งเริ่มต้นของปลายแขนกลตาม

G_P คือ ค่าเกนที่ใช้ปรับอัตราส่วนของตำแหน่ง

ระหว่างแขนกลนำและแขนกลตาม

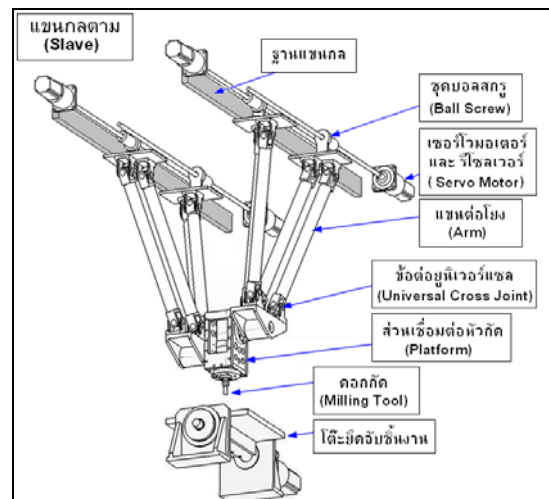
(ค่าอัตราส่วนปกติ $G_P = 1.0$)

ทิศทางของปลายแขนกลตามที่ต้องการสามารถหาค่าได้จากทิศทางของปลายแขนกลนำที่เวลาใดๆ และทิศทางเริ่มต้นของแขนกลทั้งสอง[6] แต่การทดลองที่จะนำเสนอต่อไปนี้ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางของปลายแขนกล ในที่นี้จึงไม่ได้แสดงวิธีการคำนวณทิศทางดังกล่าว



รูปที่ 2 การตั้งแกนอ้างอิงในการวิเคราะห์ตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลตาม

เมื่อทราบตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลตามที่ต้องการแล้ว เราสามารถทำการควบคุมตำแหน่งปลายแขนกลตามได้ด้วยการควบคุมการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์ขับเคลื่อนชุดบอลสกรูของแขนกลตามดังแสดงในรูปที่ 3 เพื่อให้ปลายแขนกลตาม(ดอกกัด) เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ มุมการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์หรือระยะเลื้อนของชุดบอลสกรูสามารถหาได้จากการวิเคราะห์อินเวอร์สคิเนเมติก (Inverse Kinematic) [7]



รูปที่ 3 ส่วนประกอบของแขนกลตาม

3. การสร้างแรงสะท้อนกลับของแขนกลนำ

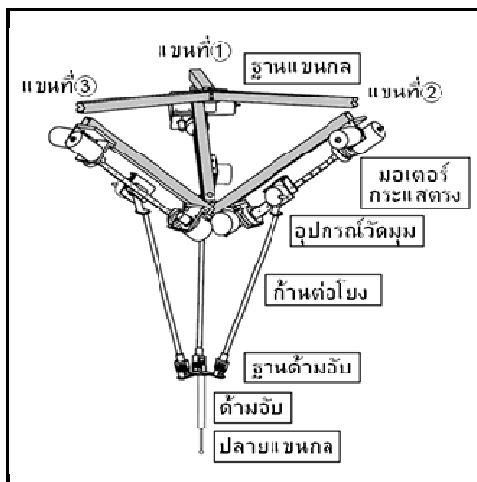
เมื่อผู้ดำเนินการทำการควบคุมแขนกลตามโดยใช้มือในการขับเคลื่อนแขนกลนำ เพื่อให้ผู้ดำเนินการรู้สึกถึงแรงกระทำระหว่างปลายแขนกลตามกับสิ่งแวดล้อม เราจำเป็นต้องสร้างแรงสะท้อนกลับมาที่มือของผู้ดำเนินการ การสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการสามารถทำได้โดยการสร้างแรงขับเคลื่อนจากมอเตอร์กระแสตรงจำนวน 6 ตัวซึ่งติดตั้งไว้ที่ฐานของแขนกลนำดังรูปที่ 4 ผู้ดำเนินการจะรู้สึกถึงแรงกระทำเมื่ออุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Amplifier) มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่มอเตอร์กระแสตรงแต่ละตัวตามสัดส่วนของค่าแรงบิดที่ต้องการ (desired torque) ระบบควบคุมสามารถคำนวณค่าแรงบิดที่ต้องการ (desired torque; τ) ได้จากค่าแรงที่ต้องการให้เกิดขึ้นที่ปลายแขนกลนำ (F) และเมตริกซ์จาโคเบียนของแขนกลนำ (J) ดังสมการต่อไปนี้ [6]

$$F = J^T \tau \quad (2)$$

เมื่อ $F = [M_X \ M_Y \ M_Z \ F_X \ F_Y \ F_Z]^T$ ประกอบด้วยโมเมนต์ (J) และ แรง (F) ในแนวแกน X Y และ Z

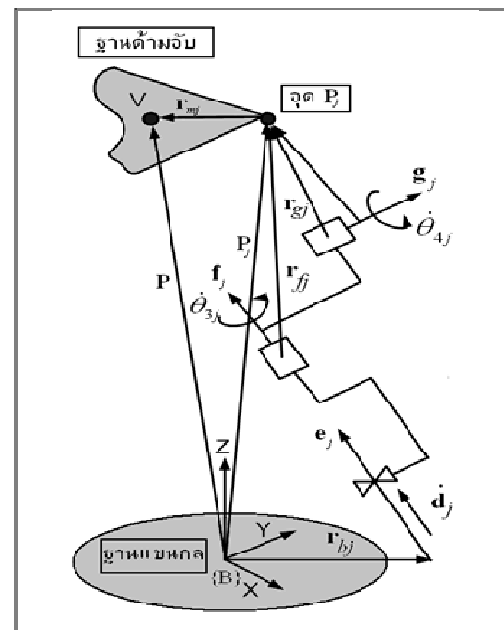
$$\tau = [f_1 \ \tau_1 \ f_2 \ \tau_2 \ f_3 \ \tau_3]^T$$

ประกอบด้วยแรงในแนวเลื่อน (f) และแรงบิด (τ) ของมอเตอร์ในแขนที่ 1 2 และ 3



รูปที่ 4 ส่วนประกอบโครงสร้างของแขนกลนำ

เมตริกซ์จาโคเบียนของแขนกลนำ (J) ประกอบด้วยอินเวอร์สของเมตริกซ์ A คูณกับเมตริกซ์ B ดังจะกล่าวต่อไป เราสามารถหาเมตริกซ์ A และเมตริกซ์ B ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างแขนกลนำในรูปที่ 5 โดยทำการกลับด้านโครงสร้างของแขนกลนำให้ฐานด้ามจับขึ้นด้านบน แขนกลนำมีข้อต่อซึ่งติดตั้งอุปกรณ์ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรง (Active Joint) สามารถทำให้เกิดแรงกระทำในแนวแกนและแรงบิดรอบแนวแกน เพื่อส่งแรงสะท้อนกลับไปที่ฐานด้ามจับและส่งต่อไปถึงมือของผู้ดำเนินการ



รูปที่ 5 โครงสร้างของแขนกลนำแต่ละแขนสำหรับการวิเคราะห์เมตริกซ์จาโคเบียน

เมตริกซ์ A สามารถเขียนได้ดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{32} \end{bmatrix} \quad (3)$$

เมื่อ $a_{j1} = -\cos \theta_{j4}$, $a_{j2} = -\sin \theta_{j4} L$ และ $j = 1, 2, 3$

โดยมุมต่างๆของแต่ละข้อต่อ สามารถวัดได้จากอุปกรณ์วัดมุมที่ติดตั้งอยู่ที่ข้อต่อต่างๆ ในที่นี้เราติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมทั้งหมด 9 ตัว โดยติดตั้ง 3 ตัวในแต่ละแขน ซึ่งมีทั้งหมด 3 แขน

เมตริกซ์ **B** สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} (\mathbf{I}_1 \times \mathbf{r}_{m1})^T & \mathbf{I}_1^T \\ (\mathbf{M}_1 \times \mathbf{r}_{m1})^T & \mathbf{M}_1^T \\ (\mathbf{I}_2 \times \mathbf{r}_{m2})^T & \mathbf{I}_2^T \\ (\mathbf{M}_2 \times \mathbf{r}_{m2})^T & \mathbf{M}_2^T \\ (\mathbf{I}_3 \times \mathbf{r}_{m3})^T & \mathbf{I}_3^T \\ (\mathbf{M}_3 \times \mathbf{r}_{m3})^T & \mathbf{M}_3^T \end{bmatrix} \quad (4)$$

เมื่อกำหนดให้ $j = 1, 2, 3$

$$\mathbf{I}_j = \begin{bmatrix} \left(\sin \theta_1 \sin \theta_3 \sin \theta_4 - \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_4 \right) \\ + \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_4 \\ - \cos \theta_1 \sin \theta_3 \sin \theta_4 - \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_4 \\ + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_4 \\ \left(-\sin \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_4 - \cos \theta_2 \cos \theta_4 \right) \end{bmatrix}_j$$

$$\mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} \left(\cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 + \sin \theta_1 \cos \theta_3 \right) \\ \left(\sin \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_3 - \cos \theta_1 \cos \theta_3 \right) \\ \left(\sin \theta_2 \sin \theta_3 \right) \end{bmatrix}_j$$

$$\mathbf{r}_{mj} = \mathbf{P} - \mathbf{P}_j$$

เมตริกซ์จาโคเบียน (Jacobian) จากการวิเคราะห์โครงสร้างของแขนกลนำคือ

$$\mathbf{J} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B} \quad (5)$$

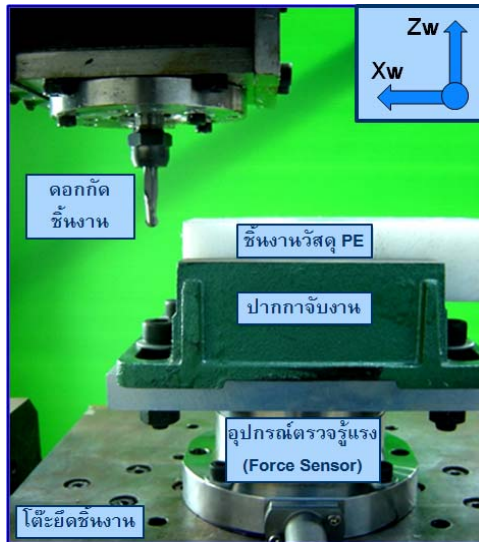
เมตริกซ์จาโคเบียนดังกล่าวสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาแรงบิดของมอเตอร์แขนกลนำแต่ละตัวดังกล่าวมาแล้วในสมการที่ (2) ได้ เมื่อกำหนดค่าแรงสะท้อนกลับที่ต้องการให้เกิดขึ้นที่ปลายแขนกลนำ (**F**)

4. ผลการทดลอง

การทดลองกีดชิ้นงานโดยที่ดอกกัตมีการเคลื่อนที่ด้วยระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟและมีแรงสะท้อนกลับ การทดลองนี้เพื่อศึกษาผลกระทบของแรงสะท้อนกลับที่มีต่อระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟในขณะกีดชิ้นงานพลาสติกวัสดุ PE (Polyethylene) เป็นร่องในแนวเส้นตรง (slot) ซึ่งเป็นการกีดชิ้นงานโดยที่ดอกกัตสัมผัสผิวชิ้นงานสองด้าน ร่วมกับการกีดโดยที่ดอกกัตสัมผัสผิวชิ้นงานเพียงด้านเดียวอีก 2 ครั้งทำให้เกิดหลุม (Pocket) ที่มีความลึก 2 มิลลิเมตร (ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของดอกกัตจะแสดงในลำดับถัดไป) ผู้ดำเนินการจะทำการเลื่อนด้ามจับแขนกลในแนวแกน X บนรางเลื่อนแขนกลนำ (การเคลื่อนที่แนวเส้นตรง) ดังรูปที่ 6 ในกรณีที่แขนกลนำมีการสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการ แรงสะท้อนกลับจะมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของแขนกลนำ เมื่อแขนกลนำมีการเคลื่อนที่ที่จะส่งผลให้ดอกกัตชิ้นงานซึ่งติดตั้งอยู่กับชุดหมุนหัวกัต (spindle) ของแขนกลตามเกิดการเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของแขนกลนำ ดอกกัตชิ้นงานจะเคลื่อนที่กีดเจาะชิ้นงานซึ่งได้ติดตั้งไว้กับปากกาจับงานและอุปกรณ์ตรวจรู้แรง (Force Sensor) รูปที่ 7 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้แรงบนโต๊ะยึดชิ้นงาน อุปกรณ์ตรวจรู้แรงจะทำหน้าที่ตรวจวัดแรงกัตที่เกิดขึ้นในขณะที่ยกดอกกัตทำการ กีดเจาะชิ้นงาน และ ส่งสัญญาณของค่าแรงกัตที่วัดได้ไปยังระบบควบคุมเพื่อนำไปใช้เป็นค่าอ้างอิงในการสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการต่อไป



รูปที่ 6 การเคลื่อนแขนกลนำบนรางเลื่อน

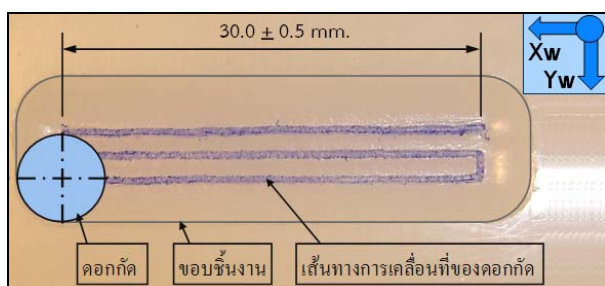


รูปที่ 7 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้แรงบนโต๊ะยึดชิ้นงาน

รูปที่ 8 แสดงชิ้นงานที่ได้จากการกัดเป็นหลุม (Pocket) ดอกกัดชิ้นงานมีการเคลื่อนที่ด้วยการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟเฉพาะในแนวแกน X_w ส่วนการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y_w เป็นการเคลื่อนที่โดยอาศัยตำแหน่งที่กำหนดขึ้นผ่านระบบควบคุมการเคลื่อนที่ ขั้นตอนการเคลื่อนที่ของดอกกัดแสดงเป็นลำดับได้ดังนี้

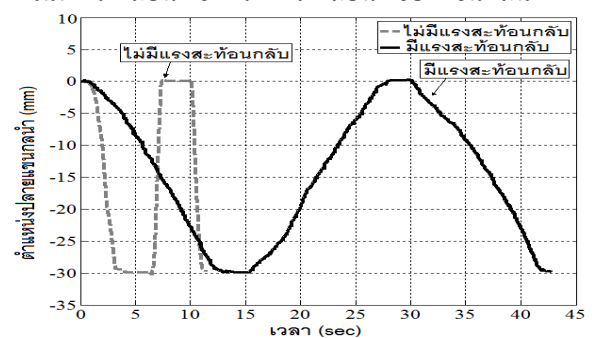
- 1.เคลื่อนที่ในทิศทาง $-X_w$ เป็นระยะทาง 30 มิลลิเมตร
- 2.เคลื่อนที่ในทิศทาง $-Y_w$ เป็นระยะทาง 2 มิลลิเมตร
- 3.เคลื่อนที่ในทิศทาง X_w เป็นระยะทาง 30 มิลลิเมตร
- 4.เคลื่อนที่ในทิศทาง $-Y_w$ เป็นระยะทาง 2 มิลลิเมตร
- 5.เคลื่อนที่ในทิศทาง $-X_w$ เป็นระยะทาง 30 มิลลิเมตร

ในที่นี้ผู้วิจัยได้แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของดอกกัดให้มีความชัดเจนขึ้นโดยใช้ปากกาเขียนลงบนชิ้นงาน เมื่อตรวจสอบความยาวของเส้นตามแนวแกน X_w พบว่ามีขนาดประมาณ 30 มิลลิเมตรซึ่งมีค่าสอดคล้องกับระยะทางที่ต้องการให้ดอกกัดเคลื่อนที่กัดเซาะชิ้นงาน การทดลองนี้กำหนดให้ใช้ดอกกัดแบบหัวทรงกลม (Ball-End Milling Tool) แบบ 2 ฟัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ดอกกัดหมุนด้วยความเร็ว 5,000 รอบต่อนาที เป็นไปตามความเร็วของชุดหมุนหัวกัด

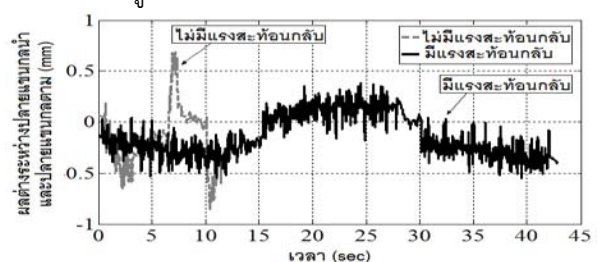


รูปที่ 8 ชิ้นงานที่ได้จากการกัดเป็นหลุม (Pocket)

รูปที่ 9 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลนำเทียบกับเวลา เมื่อผู้ดำเนินการเคลื่อนปลายแขนกลนำในแนวแกน X บนอุปกรณ์รางเลื่อนเป็นระยะทาง 30 มิลลิเมตร จำนวน 3 เที้ยว เพื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นหลุม (Pocket) ดังกล่าวมาข้างต้น การทดลองแสดงการเปรียบเทียบตำแหน่งปลายแขนกลนำระหว่างกรณีที่แขนกลนำไม่มีการสร้างแรงสะท้อนกลับ (เส้นประสีเทา) และกรณีที่แขนกลนำมีการสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการ (เส้นทึบสีดำ) เมื่อแขนกลนำมีการสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการส่งผลให้ผู้ดำเนินการเลื่อนด้ามจับแขนกลนำด้วยความเร็วที่ลดลงกล่าวคือระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนแขนกลนำเพื่อกัดชิ้นงานเป็นหลุมตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งเสร็จสิ้นกระบวนการกัดมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 12 วินาที มาเป็น 42 วินาที ผลต่างระหว่างตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกลนำและตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกลตามเทียบกับเวลาแสดงในรูปที่ 10 กรณีที่แขนกลนำไม่มีการสร้างแรงสะท้อนกลับผลต่างระหว่างตำแหน่งของแขนกลทั้งสองมีค่าสูงสุดเกินกว่า 0.6 มิลลิเมตร ในขณะที่เวลาประมาณ 7 วินาที และ 11 วินาที (เส้นประสีเทา) ส่วนในกรณีที่แขนกลนำมีการสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการนั้น การทดลองแสดงค่าผลต่างระหว่างตำแหน่งของแขนกลทั้งสองมีค่าไม่เกิน 0.5 มิลลิเมตร (เส้นทึบสีดำ) ผลต่างระหว่างตำแหน่งของแขนกลทั้งสองเกิดขึ้นในลักษณะที่แขนกลตามมีการเคลื่อนที่ช้ากว่าการเคลื่อนที่ของแขนกลนำ

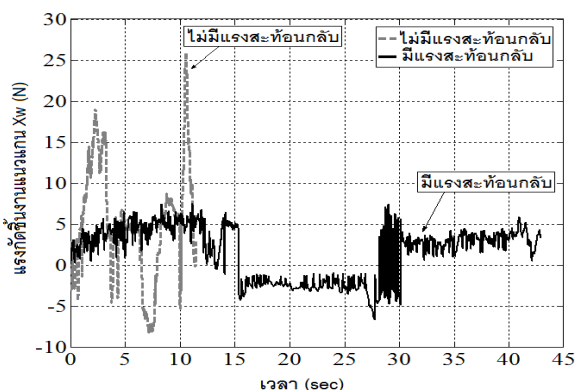


รูปที่ 9 ตำแหน่งปลายแขนกลนำ



รูปที่ 10 ผลต่างระหว่างตำแหน่งปลายแขนกลนำและตำแหน่งปลายแขนกลตาม

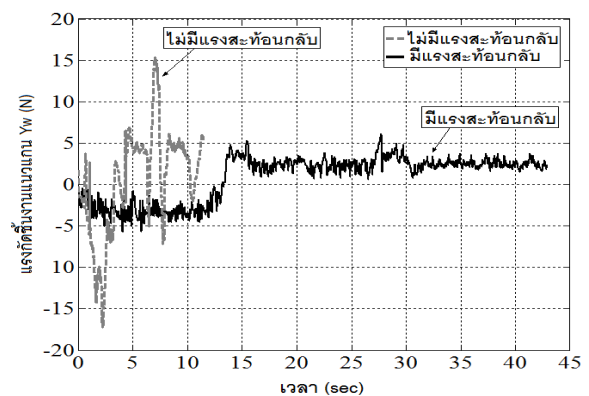
แรงกักขึ้นงานที่อุปกรณ์ตรวจรู้แรงวัดค่าได้ในขณะที่ดอกกัตเคลื่อนที่กัตเซาะขึ้นงานเป็นหลุมประกอบด้วยแรงกักขึ้นงานในแนวแกน X_w Y_w และ Z_w ค่าแรงกักขึ้นงานที่วัดได้เทียบกับเวลาแสดงในรูปที่ 11 12 และ 13 ตามลำดับ โดยได้ทำการเปรียบเทียบแรงกักขึ้นงานกรณีที่ไม่มีการสร้างแรงสะท้อนกลับและกรณีที่แกนกลนำมีการสร้างแรงสะท้อนกลับรูปที่ 11 แสดงแรงกักขึ้นงานในแนวแกน X_w ในกรณีที่ไม่มีการสร้างแรงสะท้อนกลับ (เส้นประสีเทา) และกรณีที่มีการสร้างแรงสะท้อนกลับ (เส้นทึบสีดำ) แรงกักที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ของดอกกัตดอกกัตเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของแกนกลนำ ทิศทางการเคลื่อนที่ของแกนกลนำดังกล่าวแสดงด้วยตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนกลนำดังกล่าวมาในรูปที่ 9 ตัวอย่างเช่น แกนกลนำเคลื่อนที่ในทิศทาง $-X$ ในช่วงเวลา 0-12 วินาที โดยมีการสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการ ช่วงเวลาดังกล่าวแรงกักขึ้นงานในแนวแกน X_w แสดงค่าเป็นบวก มีค่าสูงสุดประมาณ 7 นิวตัน และเมื่อแกนกลนำเคลื่อนที่ในทิศทาง X ในช่วงเวลา 15-27 วินาที ส่งผลให้แรงกักขึ้นงานที่วัดค่าได้มีค่าเป็นลบที่มีขนาดสูงสุดไม่เกิน 5 นิวตัน เมื่อทำการเปรียบเทียบแรงกักขึ้นงานพบว่า แรงกักขึ้นงานที่วัดค่าได้ในกรณีที่แกนกลนำมีการสร้างแรงสะท้อนกลับมีค่าต่ำกว่ากรณีที่แกนกลนำไม่มีการสร้างแรงสะท้อนกลับกรณีที่แกนกลนำไม่มีการสร้างแรงสะท้อนกลับ แรงกักขึ้นงานแสดงค่าสูงสุดมากกว่า 20 นิวตันซึ่งมีค่าสูงกว่ากรณีที่แกนกลนำมีการสร้างแรงสะท้อนกลับ



รูปที่ 11 แรงกักขึ้นงานที่วัดได้ในแนวแกน X_w

รูปที่ 12 แสดงค่าแรงกักขึ้นงานซึ่งวัดได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้แรงในแนวแกน Y_w แรงกักขึ้นงานที่เกิดขึ้นในขณะดอกกัตเคลื่อนที่กัตเซาะขึ้นงานที่เร็วแรก (ตั้งแต่เริ่มต้นกักขึ้นงานจนกระทั่งมีระยะ 30 มิลลิเมตร

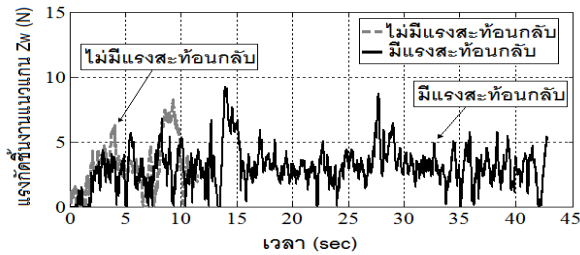
ในทิศทาง $-X_w$) แสดงค่าเป็นลบเนื่องจากดอกกัตมีการสัมผัสกับผิวขึ้นงานทั้งสองด้านแรงกักขึ้นงานที่มีค่าเป็นลบจะมีค่าสูง ส่วนการเคลื่อนที่ของดอกกัตในเที่ยวที่ 2 และ 3 ดอกกัตสัมผัสผิวขึ้นงานเพียงด้านเดียว ในที่นี้แรงกักขึ้นงานมีค่าเป็นบวก แรงกักขึ้นงานในกรณีที่แกนกลนำไม่มีการสร้างแรงสะท้อนกลับ (เส้นประสีเทา) มีค่าสูงสุดประมาณ 15 นิวตัน ส่วนแรงกักในกรณีที่แกนกลนำมีการสร้างแรงสะท้อนกลับมีค่าลดลงโดยมีค่าสูงสุดไม่เกิน 5 นิวตัน



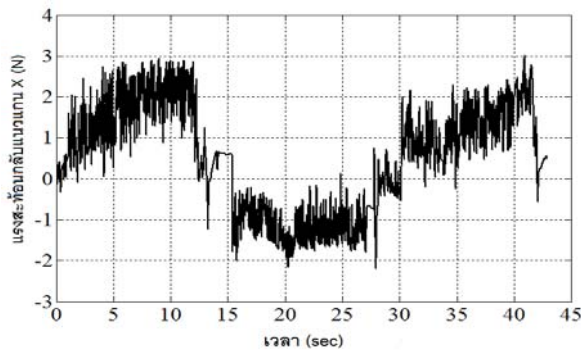
รูปที่ 12 แรงกักขึ้นงานที่วัดได้ในแนวแกน Y_w

รูปที่ 13 แสดงแรงกักขึ้นงานซึ่งตรวจวัดได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้แรงในแนวแกน Z_w แรงกักขึ้นงานมีค่าเป็นบวกแสดงว่าดอกกัตมีการกดลงบนพื้นผิวขึ้นงานในขณะที่ทำการกักขึ้นงานแรงกักขึ้นงานทั้งในกรณีที่แกนกลนำไม่มีการสร้างแรงสะท้อนกลับ (เส้นประสีเทา) และกรณีที่แกนกลนำมีการสร้างแรงสะท้อนกลับ (เส้นทึบสีดำ) มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสูงสุดไม่เกิน 8 นิวตัน

แรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการในแนวแกน X ตลอดระยะเวลาการเคลื่อนแกนกลนำแสดงในรูปที่ 14 แรงสะท้อนกลับอ้างอิงจากแรงกักที่เกิดขึ้นในแนวแกน X_w และแรงสะท้อนกลับมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนแกนกลนำ ขนาดของแรงสะท้อนกลับสามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมและความรู้สึกของผู้ดำเนินการแต่ละท่าน ในที่นี้พบว่าแรงสะท้อนกลับที่มีค่าประมาณ 2 นิวตัน ให้ความรู้สึกที่ดีในการทดลองกักขึ้นงานจึงกำหนดให้สัดส่วนของแรงสะท้อนกลับมีค่าประมาณร้อยละ 40 ของแรงกักขึ้นงานในแนวแกน X_w แต่ไม่ควรมีค่าเกินกว่า 3.5 นิวตันเนื่องจากแรงสะท้อนกลับที่มีค่ามากทำให้ผู้ดำเนินการรู้สึกกังวลในการเลื่อนแกนกลนำ และต้องใช้แรงในการเลื่อนแกนกลนำมากขึ้น ส่งผลให้ลักษณะการเลื่อนตำแหน่งแกนกลนำเกิดความไม่สม่ำเสมอได้



รูปที่ 13 แรงกีดขวางงานที่วัดได้ในแนวแกน Zw

รูปที่ 14 แรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการ
ในแนวแกน X

5. สรุปผลการทดลอง

การสร้างแรงสะท้อนกลับของแขนกลนำทำให้ผู้ดำเนินการรับรู้ถึงแรงเสมือนที่เกิดขึ้นในขณะที่ดักกีดทำการกีดขวางงาน แรงสะท้อนกลับที่อ้างอิงจากแรงกีดขวางส่งผลต่อการเลื่อนด้ามจับแขนกลนำของผู้ดำเนินการ โดยผู้ดำเนินการจะเลื่อนด้ามจับแขนกลนำได้ช้าลงกว่ากรณีที่ไม่มีการสร้างแรงสะท้อนกลับ ส่งผลให้ผลต่างระหว่างตำแหน่งแขนกลนำและแขนกลตามมีค่าลดลง และแรงกีดขวางที่วัดค่าได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้แรงในทิศทางการเคลื่อนที่ของแขนกลนำมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามเรายังคงต้องทำการศึกษาค่าแรงสะท้อนกลับที่เหมาะสมต่อการการกีดขวางงานในสถานะอื่นๆต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการศูนย์ระดับภูมิภาคเทคโนโลยีหุ่นยนต์ภายใต้โครงการเพิ่มศักยภาพด้านวิศวกรรมศาสตร์สหสาขาเพื่อพัฒนาและสร้างความเป็นเลิศด้านวิศวกรรมศาสตร์ในระดับภูมิภาคและการเรียนการสอนไปสู่ระดับโลก ในแผนพัฒนาวิชาการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (จุฬาฯ 100 ปี)

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Hyoungh Il Son, Tapomayukh Bhattacharjee and Doo Young Lee (2010). Estimation of environmental force for the haptic interface of robotic surgery, *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 6, 2010, pp. 221 – 230.
- [2] Katherine J. Kuchenbecker and Gunter Niemeyer (2006). Induced master motion in force-reflecting teleoperation, *ASME Journal of Dynamic Systems and Controls*, vol. 128(4), 2006, pp. 800-810.
- [3] K.L. Chui, W.K Chui and K.M. (2008). Direct 5-axis tool-path generation from point cloud input using 3D biarc fitting, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 24, 2008, pp.270–286.
- [4] Mohanad Makki, Christophe Tournier, Francois Thiebaut, Clair Lartique and Charyar Souzani (2010). 5-axis direct machining of rough clouds of points, *Computer-Aided Design and Application*, vol. 7(4), 2010, pp. 591 – 600.
- [5] N. Zeroudi, M.Fontaine and K.Necib (2010). Prediction of cutting forces in 3-axis milling of sculptured surfaces directly from CAM tool path, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2010, pp. 1-15-15.
- [6] T. Ngamviliakorn and V. Sangveraphunsiri (2005) Design and Analysis of a 6-DOF Haptic Device for Teleoperation Using a Singularity-Free Parallel Mechanism, *Thammasart International Journal of Science and Technology*, vol 10(4), 2005, pp.60-69
- [7] เรืองยศ อารยวงษ์กุล และ วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ (2553). การทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟระหว่างแขนกลแบริดจิก 6 องศาอิสระ โครงสร้างแบบขนานและ แขนกลลูกผสมแบบขนาน 5 แกนตระกูลเอช-4. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 จังหวัดอุบลราชธานี