

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

**การทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ ระหว่างแขนกลแสปดิก 6 องศาอิสระ
โครงสร้างแบบขนาน และ แขนกลลูกผสมแบบขนาน 5 แกนตระกูล เอช-4
Master-Slave Operation for a 6-DOF Parallel Haptic Device and
a Hybrid 5-Axis H-4 Family Parallel Manipulator**

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

งานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ สำหรับสร้างชิ้นงานแบบก๊ัดแขนหุ่นยนต์ที่ทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟที่พัฒนาขึ้นนี้ประกอบด้วยแขนกลแสปดิก 6 องศาอิสระโครงสร้างแบบขนานทำหน้าที่เป็นแขนกลนำหรือมาสเตอร์ และแขนกลลูกผสมที่มีโครงสร้างแบบขนาน 5 แกนตระกูลเอช-4 ทำหน้าที่เป็นแขนกลตามหรือสเลฟ การพัฒนาระบบแขนกลนี้ มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้สามารถทำงานร่วมกับผู้ดำเนินการในการสร้างชิ้นงานที่จัดให้มีการสร้างชิ้นงานต้นแบบอย่างรวดเร็วด้วยวิธีการก๊ัดชิ้นงานแบบ 5 แกน โดยแขนกลแสปดิกจะทำการเก็บข้อมูลตำแหน่งพื้นผิวของชิ้นงานที่ต้องการทำซ้ำ จากนั้นจึงส่งข้อมูลตำแหน่งดังกล่าวไปยังระบบควบคุมแขนกลตามเพื่อให้แขนกลตามเคลื่อนที่ตามตำแหน่งที่บันทึกจากแขนกลนำและทำการก๊ัดชิ้นงาน

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการเคลื่อนที่และความสามารถในการสร้างแรงสะท้อนกลับไปยังมือของผู้ควบคุมแขนกลนำที่เป็นแขนกลแสปดิกที่สร้างขึ้น พบว่าผู้ดำเนินการสามารถควบคุมการทำงานของระบบแขนกลได้ดีและแรงสะท้อนกลับที่เกิดขึ้นส่งผลต่อความรู้สึกที่มือของผู้ควบคุมในขณะที่ก๊ัดชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนการปรับปรุงแขนกลตามเพื่อให้สามารถก๊ัดชิ้นงานวัสดุไม้ และ โฟม พบว่าชิ้นงานที่ก๊ัดได้จากแขนกลตามมีขนาดผิดพลาดในระดับ 1 มิลลิเมตรซึ่งเป็นข้อจำกัดของความสามารถในการวัดของอุปกรณ์ตรวจจับที่ติดตั้งในแขนกลทั้งสอง

คำหลัก: แสปดิก / ชิ้นงานต้นแบบ / แรงสะท้อนกลับ

Abstract

This paper illustrates a master-slave operation, for material removal processes, using in part prototyping processes which are consisted of a 6-DOF parallel haptic device as a master arm and a hybrid 5-Axis H-4 family parallel manipulator as a slave arm. The master-slave system is designed and built for 5-axis milling processes and aimed to use in a man-machine interfaced for material removal processes of rapid prototyping system. The haptic arm or the master arm with force reflection capability is used for measuring of 3D surface information, points and orientations, of the referenced object. The measured coordinates are used as reference information to control positions and orientations of the end-effector of the slave manipulator arm, a 5-Axis machine. The experimental results show that the operator with feeling of force, by operating the haptic device, can better control of the slave manipulator arm in material removal processes. Force reflection information improves the feeling of operation significantly. The results also show good accuracy with average error about 1 mm due to the limitation of the measurement sensors attached.

Keywords: Haptic / Master-Slave / Parallel Manipulator

1. บทนำ

งานวิศวกรรมย้อนกลับ (reverse engineering) และ งานสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็ว (rapid prototyping) มีประโยชน์ต่อภาคอุตสาหกรรมอย่างมาก แต่ในขณะเดียวกันผู้ดำเนินการก็ต้องอาศัยทักษะ ความรู้ และความชำนาญด้านต่างๆ เช่น การวัดขนาดด้วยเครื่องวัด CMM การทำงานกับเครื่อง CNC และการใช้โปรแกรมด้าน CAD/CAM เมื่อพิจารณางานวิศวกรรมย้อนกลับพบว่า มีขั้นตอนการทำงานเริ่มจากการวัดขนาดของชิ้นงานต้นแบบดินเหนียวหรือชิ้นงานที่ต้องการทำซ้ำแล้วจึงนำพิกัดของชิ้นงานที่วัดได้ไปสร้างแบบสามมิติในคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมด้าน CAD และ ใช้โปรแกรมด้าน CAM เพื่อสร้างเส้นทางการกัดชิ้นงานด้วยเครื่อง CNC ต่อไป ส่วนการสร้างชิ้นงานต้นแบบอย่างรวดเร็วจะอาศัยแบบสามมิติที่ได้จากโปรแกรมด้าน CAD แล้วจึงนำไปใช้กับการสร้างชิ้นงานด้วยเครื่องสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็ว

ขั้นตอนการทำงานดังที่ได้กล่าวมานั้นต้องอาศัยระยะเวลาในการดำเนินการค่อนข้างมากเนื่องจากจุดพิกัดของผิวชิ้นงานที่วัดได้จากส่วนของงานวิศวกรรมย้อนกลับนั้นยังไม่สามารถนำไปสร้าง

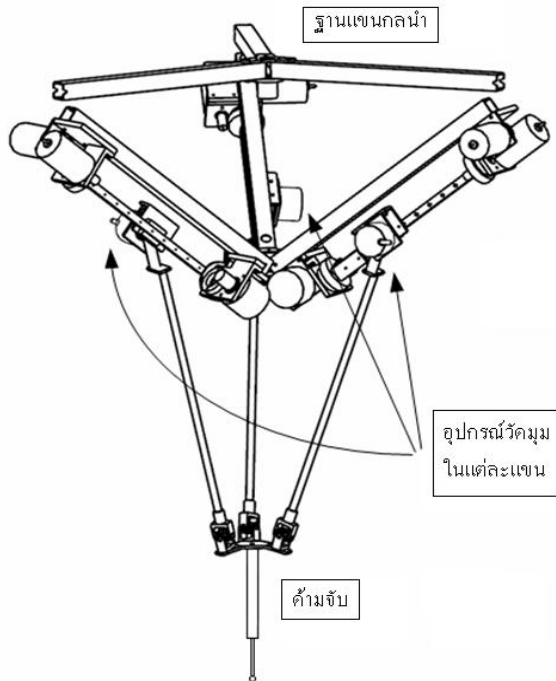
เส้นทางการเดินของเครื่อง CNC โดยตรง แต่ต้องผ่านกระบวนการสร้างแบบสามมิติและการปรับแต่งพื้นผิวด้วยโปรแกรมทางด้าน CAD ก่อน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้นำเสนอแนวทางเพื่อการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการใช้ระบบแขนกลซึ่งประกอบด้วย แขนกลนำและแขนกลตามทำหน้าที่เริ่มตั้งแต่การวัดขนาดของชิ้นงานจนกระทั่งทำการกัดชิ้นงานตามแบบที่ต้องการไปพร้อมๆกัน

2. แขนกลนำ (Master Arm)

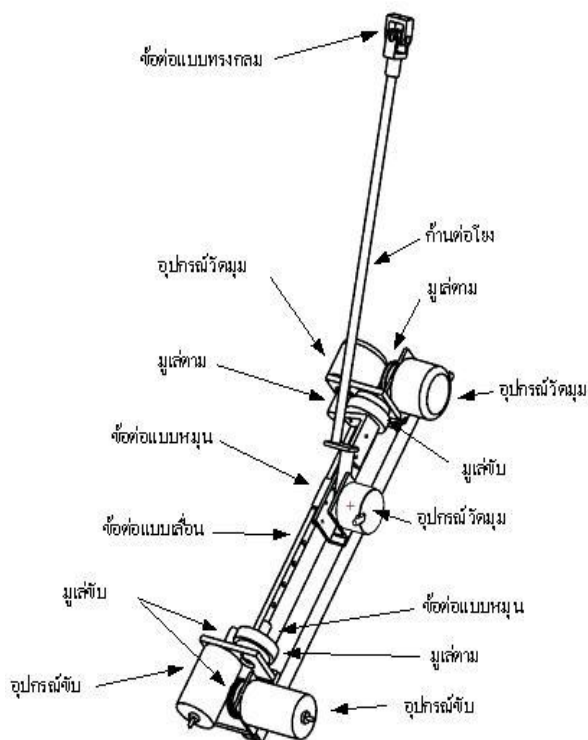
แขนกลนำที่ได้พัฒนาขึ้นมาแสดงไว้ในรูปที่ 1 เป็นแขนกลแบบปิด 6 องศาอิสระโครงสร้างแบบขนานแบ่งโครงสร้างเป็น 3 แขน แต่ละแขนมีลักษณะเหมือนกันและมีฐานวางตำแหน่งทำมุมกัน 120 องศาแขนทั้งสามเชื่อมต่อไปยังด้ามจับด้วยข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซล (universal) อุปกรณ์หลักของแต่ละแขนประกอบด้วย อุปกรณ์วัดมุม (Encoder) จำนวน 3 ตัว และ มอเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนเพื่อสร้างแรงกระทำต่อมือผู้ดำเนินการจำนวน 2 ตัว ดังในรูปที่ 2

ตำแหน่งการเคลื่อนที่และทิศทางของปลายแขนกลนำสามารถหาจากสมการฟอร์เวอร์คินเมติก

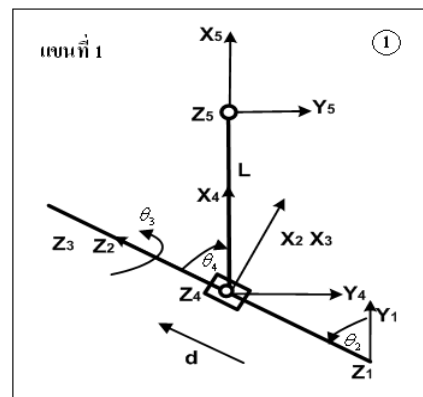
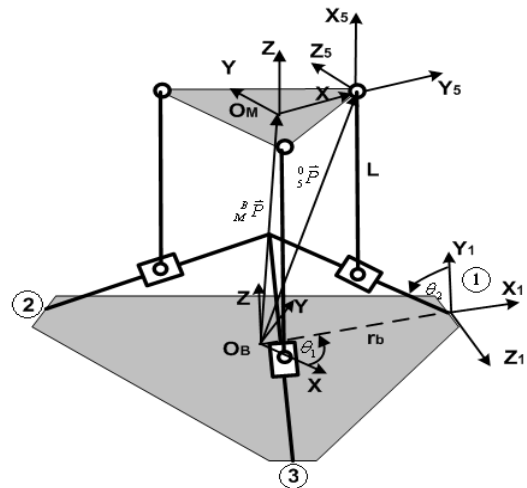
หากเราทราบตำแหน่งการหมุนของอุปกรณ์วัดมุมทั้งหมด 9 ตัว เพื่อให้สะดวกต่อการพิจารณาในขั้นตอนการวิเคราะห์ฟอร์เวิร์ดคิเนเมติกจึงได้แสดงภาพแขนกลนำโดยหมุนภาพกลับขึ้นมาในแนวตั้งดังรูปที่ 3



รูปที่ 1 โครงสร้างของแขนกลนำ



รูปที่ 2 โครงสร้างแต่ละแขนของแขนกลนำ



● ข้อต่อทรงกลม □ ข้อต่อแบบเลื่อน + ยูนิเวอร์แซล

รูปที่ 3 การกำหนดตำแหน่งแกนบนโครงสร้าง

เมื่อกำหนดตำแหน่งของแกนต่างๆ ตัวแปรและค่าพารามิเตอร์จะสามารถหาพิกัดของแกนที่ 5 (Coordinate Frame 5) สำหรับแขนกลนำในแต่ละแขนได้จากฟอร์เวิร์ดคิเนเมติกดังนี้

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

เมื่อตัวแปร i แทนแขนที่ 1 2 และ 3 หากได้ทำการหาตำแหน่งแกนที่ 5 ของแขนทั้ง 3 แขนแล้วจะสามารถหาตำแหน่งพิกัดของฐานค้ำมือจับ (O_M) เทียบกับฐาน (O_B) คือ

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

ส่วนทิศทาง (Orientation) ของด้ามจับเทียบกับ
กับฐาน (O_B) แสดงโดยเวกเตอร์ $\vec{n}$ $\vec{o}$ และ $\vec{a}$

$$\vec{n} = \frac{\frac{B}{5}\vec{P}^1 - \frac{B}{M}\vec{P}}{\left|\frac{B}{5}\vec{P}^1 - \frac{B}{M}\vec{P}\right|} \quad (3)$$

$$\vec{o} = \frac{\frac{B}{5}\vec{P}^2 - \frac{B}{5}\vec{P}^3}{\left|\frac{B}{5}\vec{P}^2 - \frac{B}{5}\vec{P}^3\right|} \quad (4)$$

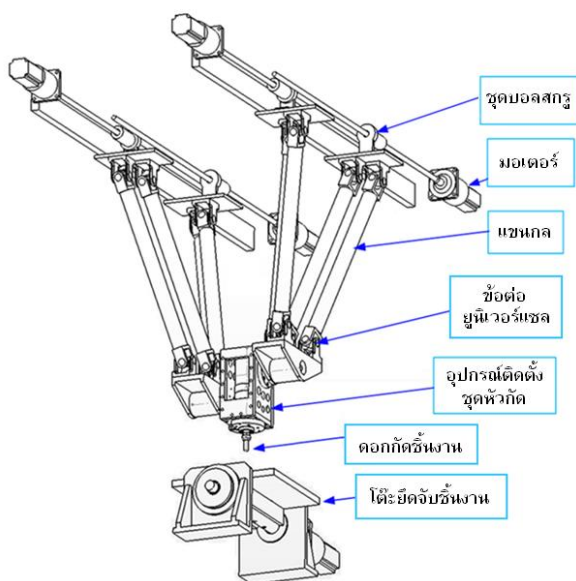
$$\vec{a} = \vec{n} \times \vec{o} \quad (5)$$

สามารถทำการจัดรูปแบบเมตริกซ์
(Transformation Matrix) ระหว่างฐานด้ามจับ และ
ฐานของแขนกลนำ ดังนี้

$${}^B_M T = \begin{bmatrix} \vec{n} & \vec{o} & \vec{a} & \frac{B}{M}\vec{P} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

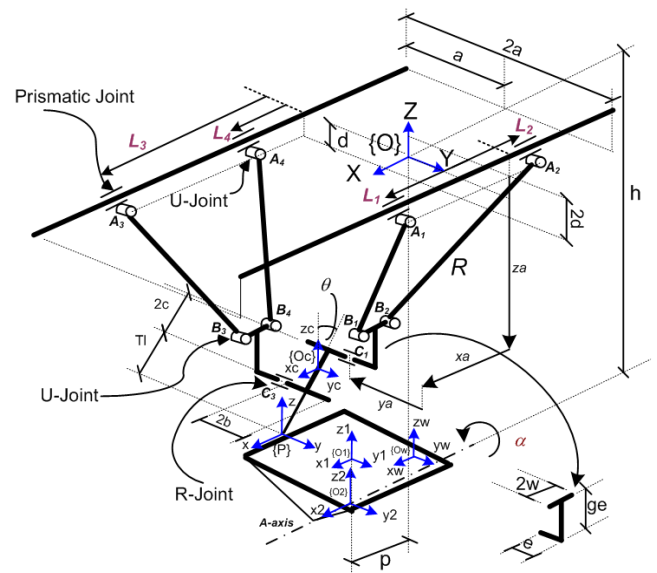
3. แขนกลตาม (Slave Arm)

แขนกลเคลื่อนที่ตามเป็นแขนกลที่มี
โครงสร้างแบบขนาน 5 แกนตระกูลเอช-4 จะมีการ
เคลื่อนที่แบบ 5 องศาอิสระประกอบด้วยสาม
องศาอิสระในทิศทางการเลื่อนไถลตามแนวแกน x y z
หนึ่งองศาอิสระในทิศทางการหมุนรอบแกน y และ
อีกหนึ่งองศาอิสระจากการหมุนไต่ะยึดจับชิ้นงาน
สามารถแสดงส่วนประกอบต่างๆของแขนกลดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ส่วนประกอบของแขนกลตาม

การวิเคราะห์อินเวอร์สคิเนเมติกเพื่อหามุมที่
มอเตอร์แต่ละตัวจะต้องหมุนไปขับเคลื่อนชุดบอลสกรู
จนกระทั่งปลายดอกกัดอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการนั้น
สามารถทำได้โดยกำหนดตัวแปรและค่าพารามิเตอร์
ต่างๆ ของแขนกลดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 การกำหนดตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ

ระยะทางที่ข้อต่อแบบเลื่อน (prismatic joint)
เคลื่อนที่ไปนั้นเกิดจากการหมุนของมอเตอร์และ
ระยะพิตช์ของบอลสกรู เราสามารถหาระยะทางที่
ข้อต่อแบบเลื่อนทั้งสี่ข้อต่อจะต้องเคลื่อนที่ไปได้
จากสมการอินเวอร์สคิเนเมติกของแขนกลตาม
ดังสมการที่ 7-10

$$I_1 = (x_w + x_{O_w}^{O_1} + p) + (T_L + 2c)\sin(\theta) + w + \sqrt{R^2 - \left[\frac{-(y_w + y_{O_w}^{O_1})\cos(\alpha) + (z_w + z_{O_1}^{O_2})\sin(\alpha)}{-b + a - e} \right]^2} \quad (7)$$

$$\sqrt{\left[\frac{-(y_w + y_{O_w}^{O_1})\sin(\alpha) - (z_w + z_{O_1}^{O_2})\cos(\alpha)}{+h - (T_L + 2c)\cos(\theta) + d - ge} \right]^2}$$

$$I_2 = (x_w + x_{O_w}^{O_1} + p) + (T_L + 2c)\sin(\theta) - w - \sqrt{R^2 - \left[\frac{-(y_w + y_{O_w}^{O_1})\cos(\alpha) + (z_w + z_{O_1}^{O_2})\sin(\alpha)}{-b + a - e} \right]^2} \quad (8)$$

$$\sqrt{\left[\frac{-(y_w + y_{O_w}^{O_1})\sin(\alpha) - (z_w + z_{O_1}^{O_2})\cos(\alpha)}{+h - (T_L + 2c)\cos(\theta) + d - ge} \right]^2}$$

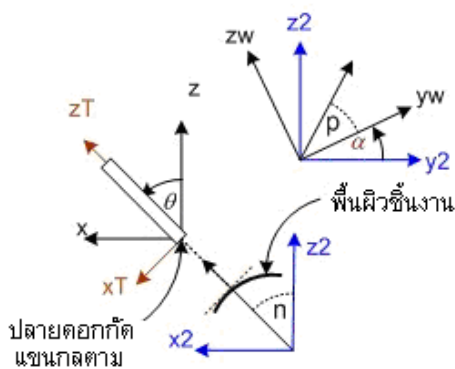
$$I_3 = (x_w + x_{O_w}^{O_1} + p) + T_L \sin(\theta) + w + \sqrt{R^2 - \left[(y_w + y_{O_w}^{O_1}) \cos(\alpha) - (z_w + z_{O_1}^{O_2}) \sin(\alpha) \right]^2 - \left[-b + a - e \right]^2} \quad (9)$$

$$\sqrt{\left[- (y_w + y_{O_w}^{O_1}) \sin(\alpha) - (z_w + z_{O_1}^{O_2}) \cos(\alpha) \right]^2 + \left[h - T_L \cos(\theta) - d - ge \right]^2}$$

$$I_4 = (x_w + x_{O_w}^{O_1} + p) + T_L \sin(\theta) - w - \sqrt{R^2 - \left[(y_w + y_{O_w}^{O_1}) \cos(\alpha) - (z_w + z_{O_1}^{O_2}) \sin(\alpha) \right]^2 - \left[-b + a - e \right]^2} \quad (10)$$

$$\sqrt{\left[- (y_w + y_{O_w}^{O_1}) \sin(\alpha) - (z_w + z_{O_1}^{O_2}) \cos(\alpha) \right]^2 + \left[h - T_L \cos(\theta) - d - ge \right]^2}$$

มุมการหมุนรอบแกน y (θ) และ มุมการหมุนของโต๊ะหมุน (α) ตามสมการที่ 7-10 แสดงไว้ในรูปที่ 6 โดยสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 16-17



รูปที่ 6 การตั้งแกนของปลายแขนกลตาม

$$\alpha = \pm 90^\circ - \arctan\left(\frac{K_w}{J_w}\right) \quad (16)$$

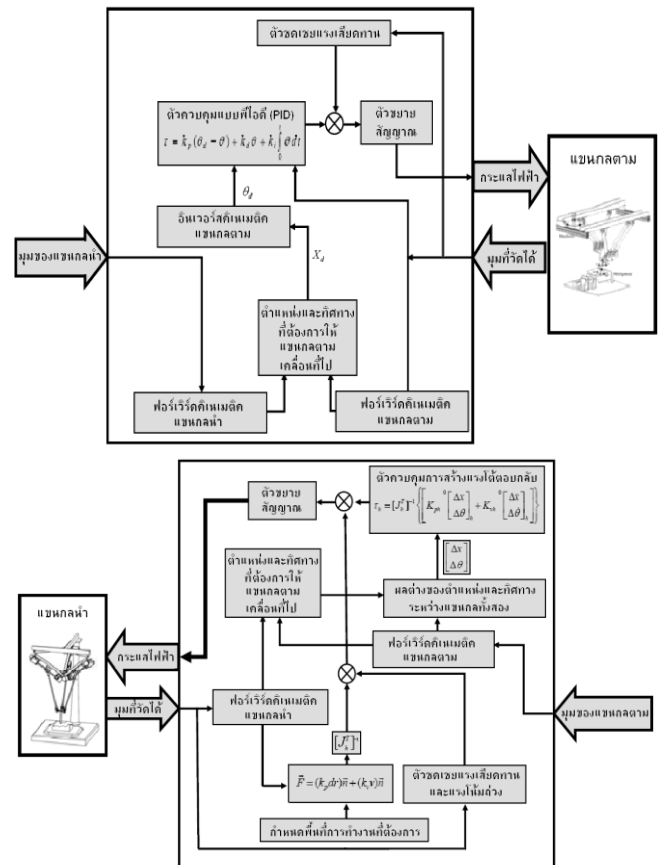
$$\theta = \arctan\left(\frac{I_w}{\sqrt{J_w^2 + K_w^2}}\right) \quad (17)$$

เมื่อ I_w, J_w และ K_w เป็นเวกเตอร์ตามแนวแกน x_w, y_w และ z_w ตามลำดับ

ค่าของ I_w, J_w, K_w หาได้โดยอาศัยข้อมูลตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลนำที่เวลาต่างๆ ดังนั้นจึงต้องมีระบบควบคุมเพื่อให้แขนกลตามเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งและทิศทางที่แขนกลนำเคลื่อนไปได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว

4. การทำงานของระบบแขนกล

แขนกลตามจะต้องทำการกั๊ตขึ้นงานโดยอาศัยข้อมูลตำแหน่งและทิศทางที่ปลายคอกกั๊ตจะต้องเคลื่อนที่ไปจากแขนกลนำ จึงต้องมีระบบควบคุมเพื่อให้แขนกลตามเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ แผนภาพของระบบควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แผนภาพการทำงานของระบบแขนกล

การทำงานของระบบแขนกลมีขั้นตอนดังนี้

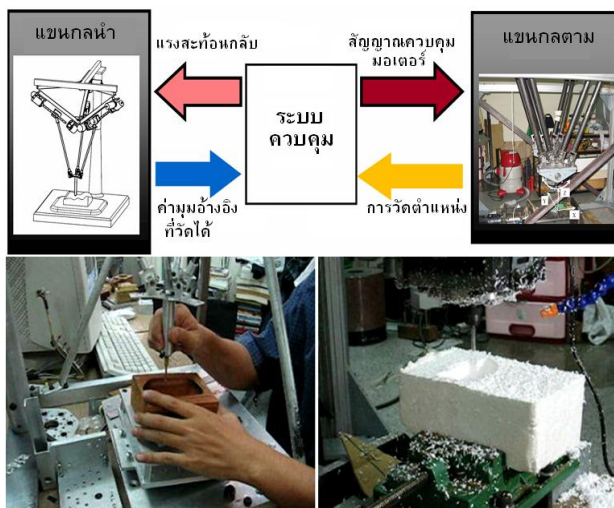
1. ระบบจะรับค่ามุมจากอุปกรณ์วัดมุมของแขนกลนำแล้วจึงทำการแปลงค่ามุนั้นเป็นตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลนำ
2. ส่งค่าตำแหน่งและทิศทางปลายแขนกลนำนี้ไปที่ส่วนของการหาตำแหน่งและทิศทางที่ปลายแขนกลตามจะต้องเคลื่อนที่ไป
3. นำค่าตำแหน่งและทิศทางปลายแขนกลตามที่คำนวณได้มาหาค่ามุนที่ต้องการให้มอเตอร์ของแขนกลตามแต่ละตัวหมุนไปจากสมการอินเวอร์สคิเนเมติก

4. ทำการควบคุมการหมุนของมอเตอร์แกนกลตามให้เป็นไปตามค่ามุมการหมุนในขั้นตอนที่ 3 โดยใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์ (PD)

5. นำค่ามุมการหมุนของมอเตอร์ที่วัดได้มาคำนวณหาตำแหน่งปลายแขนกลตามด้วยสมการฟอว์เวอร์ดคินเมติก

6. เปรียบเทียบผลต่างระหว่างค่าตำแหน่งของแขนกลตามที่ได้จากขั้นตอนที่ 5 และค่าตำแหน่งของแขนกลนำที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 1 แล้วจึงนำค่ามาใช้ในการสร้างสะท้อนกลับไปยังมือของผู้ดำเนินการ

ลักษณะการใช้งานระบบแขนกลในรูปที่ 8 ผู้ดำเนินการจะจับคั่นบังคับแขนกลนำให้เคลื่อนที่ส่งผลให้แขนกลตามเคลื่อนที่กีดเซาะชิ้นงานออกมา



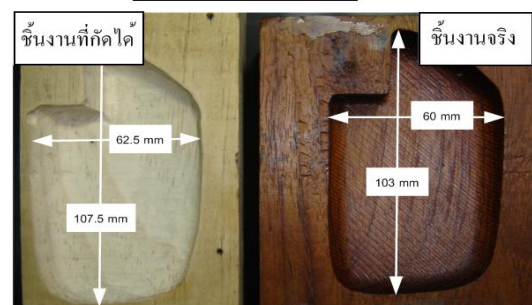
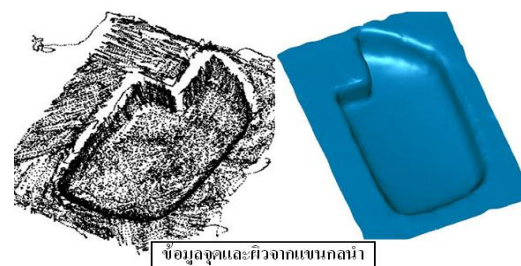
รูปที่ 8 การทำงานร่วมกับระบบแขนกล

5. การทดสอบการกีดเซาะชิ้นงาน

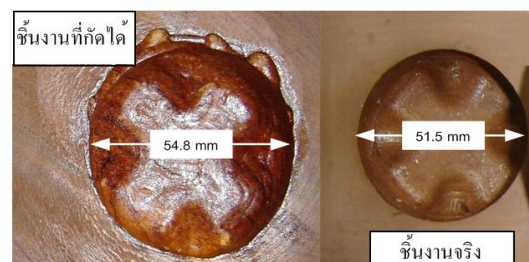
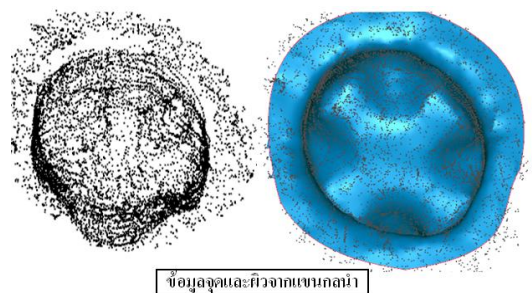
ทำการทดสอบการกีดเซาะชิ้นงานโดยการนำชิ้นงานจริงที่ต้องการทำซ้ำมาวางที่ฐานของแขนกลนำและนำวัตถุดิบ เช่น ไม้หรือโฟม มาวางบนฐานของแขนกลตาม จากนั้นจึงเริ่มการกีดเซาะชิ้นงานโดยผู้ดำเนินการใช้มือจับที่ด้ามจับของแขนกลนำแล้วทำการเคลื่อนด้ามจับให้ปลายด้ามจับซึ่งมีลักษณะเป็นลูกเหล็กทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 มิลลิเมตร สัมผัสไปบนผิวชิ้นงานจริงจนทั่วชิ้นงานในระหว่างนั้นแขนกลตามจะทำการกีดเซาะวัตถุดิบไปพร้อมๆกับการเคลื่อนมือของผู้ดำเนินการจนได้

ชิ้นงานออกมา ดอกกีดที่ใช้ในการกีดเซาะชิ้นงานนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร จึงต้องนำขนาดของลูกเหล็กทรงกลมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดอกกีดมาพิจารณาด้วย

ในขณะทำการกีดเซาะชิ้นงานจะมีการเพิ่มความเสถียรสบายให้กับผู้ดำเนินการโดยทำการชดเชยน้ำหนักของแขนกลนำ ลดภาระจากแรงเสียดขณะเคลื่อนที่ของแขนกลนำ และ การสร้างแรงสะท้อนกลับต่อมือของผู้ดำเนินการเมื่อตำแหน่งของปลายแขนกลตามเริ่มมีค่าผิดพลาดไป



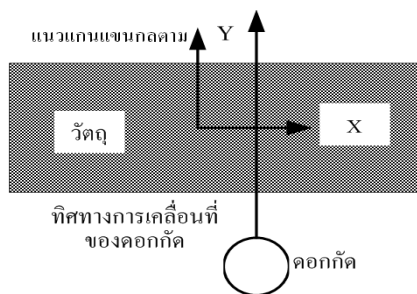
รูปที่ 9 ชิ้นงานรูปกระจกมองหลังที่กีดเซาะได้จากแขนกลตาม และ ชิ้นงานจริงที่ต้องการทำซ้ำ



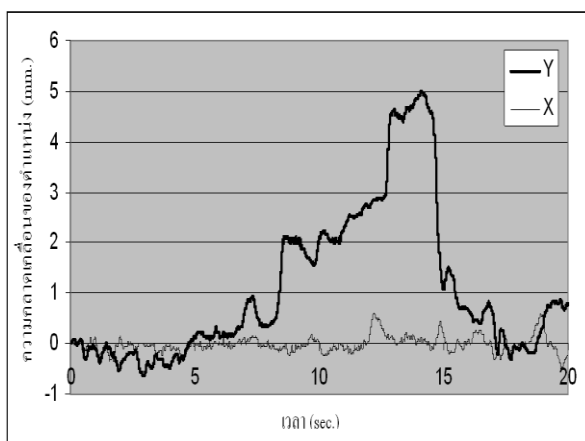
รูปที่ 10 ชิ้นงานรูปก้นขวดที่กีดเซาะได้จากแขนกลตาม และ ชิ้นงานจริงที่ต้องการทำซ้ำ

การกัดเซาะชิ้นงานรูปกระจกมองหลังวัสดุไม้จากชิ้นงานจริงดังแสดงในรูปที่ 9 เมื่อทำการขัดเซาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกเหล็กทรงกลมและดอกกัดแล้วชิ้นงานที่กัดเซาะได้ควรมีขนาดความสูงเท่ากับ 105.5 มิลลิเมตร และความกว้างเท่ากับ 62.5 มิลลิเมตร ดังนั้นชิ้นงานที่กัดเซาะได้จึงมีความสูงผิดพลาดไป 2 มิลลิเมตร ส่วนการกัดเซาะชิ้นงานรูปก้นขดวัสดุไม้ในรูปที่ 10 เมื่อทำการขัดเซาะขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกเหล็กทรงกลมและดอกกัดแล้วชิ้นงานที่กัดเซาะได้ควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร ดังนั้นชิ้นงานที่กัดเซาะได้จึงมีค่าผิดพลาดไป 0.8 มิลลิเมตร

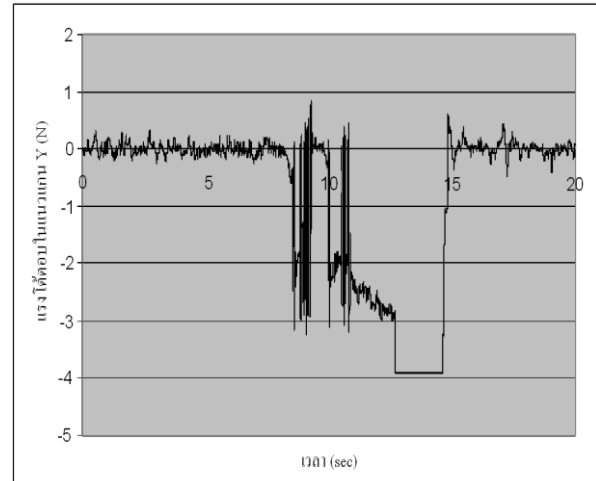
การทดสอบแรงสะท้อนกลับต่อมือของผู้ดำเนินการเมื่อแขนกลตามกัดเซาะชิ้นงานตามแนวแกน y ของแขนกลตาม จำนวน 1 ครั้งดังรูปที่ 11



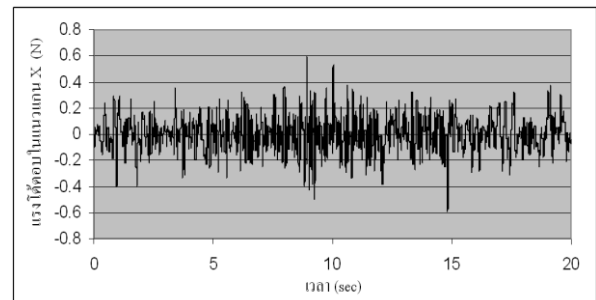
รูปที่ 11 การเคลื่อนที่ของดอกกัดในการทดสอบแรงสะท้อนกลับ



รูปที่ 12 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งระหว่างปลายแขนกลนำและปลายแขนกลตามในแนวแกน x และ y



รูปที่ 13 แรงสะท้อนกลับที่แขนกลนำจะกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการในแนวแกน Y



รูปที่ 14 แรงสะท้อนกลับที่แขนกลนำจะกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการในแนวแกน X

ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของดอกกัดชิ้นงานตามแนวแกน Y แสดงดังรูปที่ 12-14 ความคลาดเคลื่อนระหว่างตำแหน่งปลายแขนกลนำและปลายแขนกลตามส่งผลให้มีแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการ โดยขณะที่ยังไม่มีการกัดชิ้นงานแขนกลตามสามารถเคลื่อนที่ไปพร้อมกับแขนกลนำเป็นอย่างดีความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งระหว่างแขนกลทั้งสองมีค่าไม่เกิน 1 มิลลิเมตรดังนั้นแขนกลนำจึงยังไม่สร้างแรงสะท้อนกลับต่อมือผู้ดำเนินการ แต่เมื่อดอกกัดเริ่มการกัดชิ้นงานในขณะเวลาผ่านไปประมาณ 8 วินาที ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างตำแหน่งแขนกลทั้งสองในแนวแกน Y (ดังรูปที่ 12) มีค่ามากขึ้นจนมากกว่า 2 มิลลิเมตร จะทำให้แขนกลนำสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการตามทิศทางแกน Y (ดังรูปที่ 13)

โดยขนาดของแรงกระทำสามารถปรับได้ตามความเหมาะสมด้วยค่าอัตราขยายที่กำหนดขึ้น แต่จะให้แรงโต้ตอบมีค่าเปลี่ยนแปลง เป็นสัดส่วนกับค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขนกล ส่วนแรงโต้ตอบที่เกิดตามแนวแกน X (ดังรูปที่ 14) มีค่าน้อยมากจึงอาจไม่นำไปสร้างแรงสะท้อนกลับจริง เมื่อผู้ดำเนินการหยุดการเคลื่อนที่ของแขนกลนำพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งระหว่างแขนกลนำและ แขนกลตามลดลงจนมีค่าต่ำกว่า 1 มิลลิเมตร เช่นเดิม

6. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอระบบการทำงานของแขนกลแบบมาสเตอร์-สเลฟ สำหรับการสร้างชิ้นงานจากชิ้นงานจริงด้วยวิธีการกัด การทดลองกัดชิ้นงานวัสดุไม้พบว่าชิ้นงานที่ได้มีลักษณะคล้ายกับชิ้นงานจริงแต่ยังคงมีขนาดที่ผิดพลาดไปประมาณด้านละ 1 มิลลิเมตร ส่วนการทดสอบการเคลื่อนที่ของดอกกัดตามแนวแกน Y เพื่อหาลักษณะของแรงสะท้อนกลับที่จะกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการ พบว่าแรงที่เกิดขึ้นจะมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของปลายดอกกัดและมีการเปลี่ยนแปลงขนาดตามค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างตำแหน่งปลายแขนกลนำและแขนกลตามขนาดและทิศทางของแรงสะท้อนกลับที่เกิดขึ้นจะถูกส่งไปคำนวณค่าแรงบิดเพื่อให้มอเตอร์ของแขนกลนำสร้างแรงกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการต่อไป

7. 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] Viboon angveraphunsiri, Tawee Ngamvilai Korn (2002). Design and Development of a Six DOF

Master-Slave Human-Assisted Manipulator Arm, JSAE Annual Congress, Yokohama, Japan.

- [3] G. Sen Gupta, S.C. Mukhopadhyay, C.H. Messom and S. Demidenko (2005). Master-Slave Control of a Teleoperated Anthropomorphic Robotic Arm with Gripping Force Sensing, Extended paper for I&M Transactions-Special Issue of IMTC 2005.

- [4] Lorenzo Sciavicco and Bruno Siciliano (1996). *Modeling and Control of Robot Manipulators*, McGraw-Hill, Italy.

- [5] กรมมนต์ ชูประเสริฐ (2550). การควบคุมแรงแบบฝังตัว สำหรับแขนกลลูกผสมแบบขนาน 5 แกน ตระกูลเอช-4. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- [6] เอกพจน์ สุนทรมาตถก (2551). การสอบเทียบระบบกลไกแขนกลแบบขนาน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย