

การทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ ระหว่างแขนกลแฮปติก 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 สำหรับสร้างชิ้นงานแบบกัด แขนหุ่นยนต์ที่ทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟที่พัฒนาขึ้นนี้ประกอบด้วยแขนกลแฮปติก 6 องศาอิสระ โครงสร้างแบบขนานทำหน้าที่เป็นแขนกลนำหรือมาสเตอร์ และแขนกลลูกผสมที่มีโครงสร้างแบบขนาน 5 แกนตระกูลเอช-4 ทำหน้าที่เป็นแขนกลตามหรือสเลฟ การพัฒนาระบบแขนกลนี้ มีจุดมุ่งหมายเพื่อให้สามารถทำงานร่วมกับผู้ดำเนินการในการสร้างชิ้นงานที่จัดให้เป็นการสร้างชิ้นงานต้นแบบอย่างรวดเร็วด้วยวิธีการกัดชิ้นงานแบบ 5 แกน โดยแขนกลแฮปติกจะทำการเก็บข้อมูลตำแหน่งพื้นผิวของชิ้นงานที่ต้องการทำซ้ำ จากนั้นจึงส่งข้อมูลตำแหน่งดังกล่าวไปยังระบบควบคุมแขนกลตามเพื่อให้แขนกลตามเคลื่อนที่ตามตำแหน่งที่บันทึกจากแขนกลนำและทำการกัดเซาะชิ้นงาน

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบการเคลื่อนที่และความสามารถในการสร้างแรงสะท้อนกลับไปยังมือของผู้ควบคุมแขนกลนำที่เป็นแขนกลแฮปติกที่สร้างขึ้น พบว่าผู้ดำเนินการสามารถควบคุมการทำงานของระบบแขนกลได้ดีและแรงสะท้อนกลับที่เกิดขึ้นส่งผลต่อความรู้สึกที่มือของผู้ควบคุมในขณะที่กัดชิ้นงานอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนการปรับปรุงแขนกลตามเพื่อให้สามารถกัดเซาะชิ้นงานวัสดุไม้ และ โฟม พบว่าชิ้นงานที่กัดได้จากแขนกลตามมีขนาดผิดพลาดในระดับ 1 มิลลิเมตรซึ่งเป็นข้อจำกัดของความสามารถในการวัดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ตั้ง ในแขนกลทั้งสอง

คำหลัก: แฮปติก / 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 แต่ในขณะเดียวกันผู้ดำเนินงานก็ต้องอาศัยทักษะ ความรู้ และความชำนาญด้านต่างๆ เช่น การวัดขนาดด้วยเครื่องวัด CMM การทำงานกับเครื่อง CNC และ การใช้โปรแกรมด้าน CAD/CAM เมื่อพิจารณางานวิศวกรรมย้อนกลับพบว่า มีขั้นตอนการทำงานเริ่มจากการ

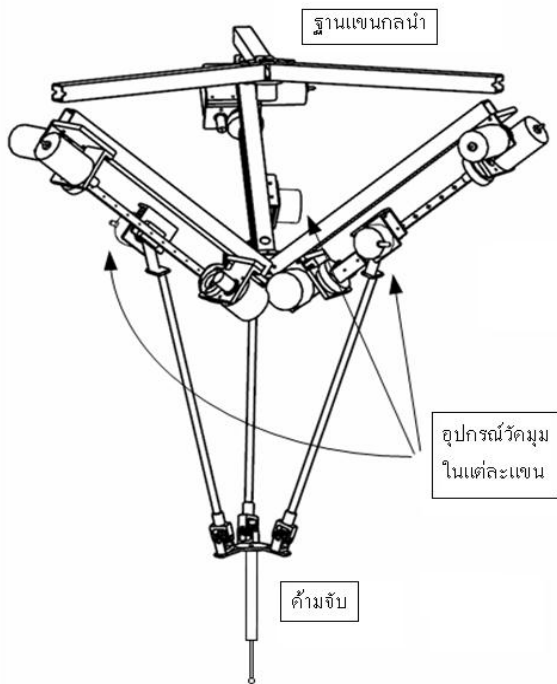
วัดขนาดของชิ้นงานต้นแบบดินเหนียวหรือชิ้นงานที่ต้องการทำซ้ำแล้ว จึงนำพิกัดของชิ้นงานที่วัดได้ไปสร้างแบบสามมิติในคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรมด้าน CAD และ ใช้โปรแกรมด้าน CAM เพื่อสร้างเส้นทางการกัดชิ้นงานด้วยเครื่อง CNC ต่อไป ส่วนการสร้างชิ้นงานต้นแบบอย่างรวดเร็วจะอาศัยแบบสามมิติที่ได้จากโปรแกรมด้าน CAD แล้วจึงนำไปใช้กับการสร้างชิ้นงานด้วยเครื่องสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็ว

ขั้นตอนการทำงานดังที่ได้กล่าวมานั้นต้องอาศัยระยะเวลาในการดำเนินการค่อนข้างมากเนื่องจาก จุดพิคคของผิวชิ้นงานที่วัดได้จาก ส่วนของงานวิศวกรรมย้อนกลับนั้นยังไม่สามารถนำไปสร้างเส้นทางเดินของเครื่อง CNC โดยตรง แต่ต้องผ่านกระบวนการสร้างแบบสาม มิติและการปรับแต่งพื้นผิวด้วยโปรแกรมทางด้าน CAD ก่อน ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอแนวทางเพื่อการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยการใช้ระบบ แขนกลซึ่งประกอบด้วยแขนกลนำและ แขนกลตามทำหน้าที่ เริ่มตั้งแต่การวัดขนาดของชิ้นงานจนกระทั่งทำการกัดชิ้นงานตามแบบ ที่ต้องการไปพร้อมๆกัน

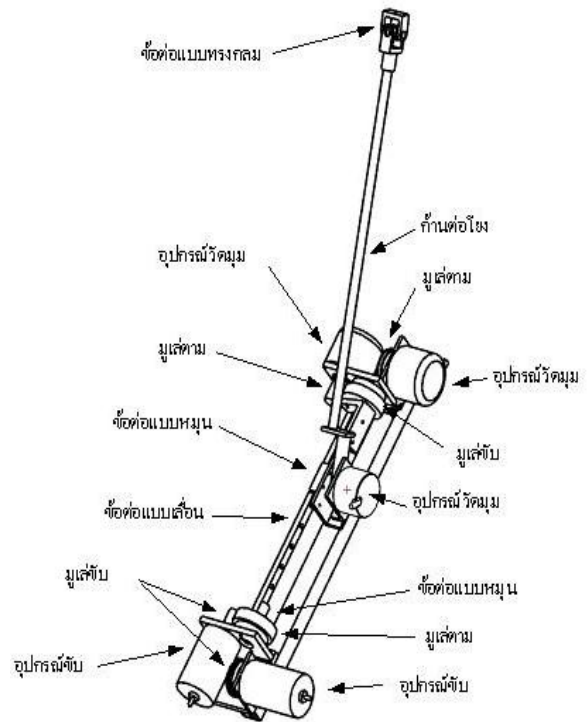
2. แขนกลนำ (Master Arm)

แขนกลนำที่ได้พัฒนาขึ้นมาแสดงไว้ในรูปที่ 1 เป็นแขนกล แสปดิก 6 องศาอิสระ โครงสร้างแบบขนานแบ่งโครงสร้างเป็น 3 แขน แต่ละแขนมีลักษณะเหมือนกันและมีฐานวางตำแหน่งทำมุมกัน 120 องศา แขนทั้งสามเชื่อมต่อไปยังค้ำจับด้วยข้อต่อแบบ ยูนิเวอร์แซล (universal) อุปกรณ์หลักของแต่ละแขนประกอบด้วย อุปกรณ์วัด มุม (Encoder) จำนวน 3 ตัว และ มอเตอร์ซึ่งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ขับ เพื่อสร้างแรงกระทำต่อมือผู้ดำเนินการจำนวน 2 ตัว ดังในรูปที่ 2

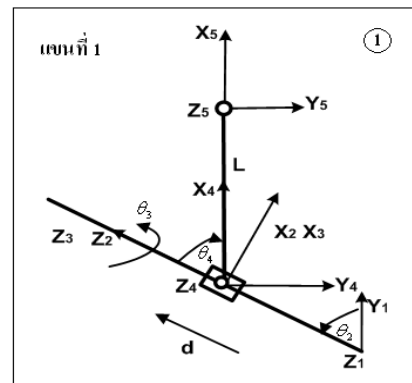
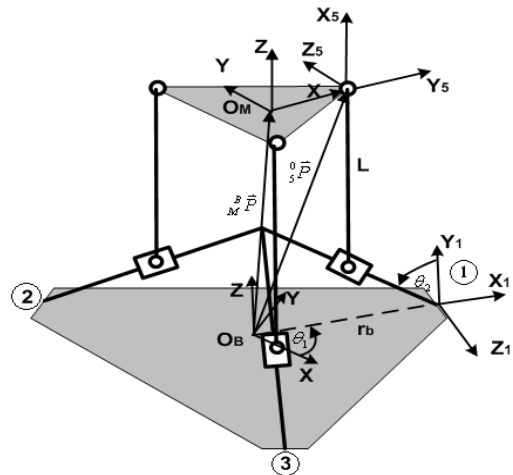
ตำแหน่งการเคลื่อนที่และทิศทางของปลายแขนกลนำ สามารถหาจากสมการพอร์เวอร์ดิกเนเมติกหากเราทราบตำแหน่งการ หมุนของอุปกรณ์วัดมุมทั้งหมด 9 ตัว เพื่อให้สะดวกต่อการพิจารณา ในขั้นตอนการวิเคราะห์พอร์เวอร์ดิกเนเมติกจึงได้แสดงภาพแขนกลนำ โดยหมุนภาพกลับขึ้นมาในแนวตั้ง ดังรูปที่ 3



รูปที่ 1 โครงสร้างของแขนกลนำ



รูปที่ 2 โครงสร้างแต่ละแขนของแขนกลนำ



○ ข้อต่อทรงกลม □ ข้อต่อแบบเลื่อน + ยูนิเวอร์แซล

รูปที่ 3 การกำหนดตำแหน่งแกนบนโครงสร้าง

เมื่อกำหนดตำแหน่งของแกนต่างๆ ตัวแปร และค่าพารามิเตอร์จะสามารถหาพิกัดของแกนที่ 5 (Coordinate Frame 5) สำหรับแขนกลนำในแต่ละแขนได้จากฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกดังนี้

$$\begin{bmatrix} {}^B_5\bar{P}^i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (c\theta_1^i c\theta_2^i c\theta_3^i - s\theta_1^i s\theta_3^i) s\theta_4^i - c\theta_1^i s\theta_2^i c\theta_4^i L - d^i (c\theta_1^i s\theta_2^i) + r_5 c\theta_1^i \\ (s\theta_1^i c\theta_2^i c\theta_3^i + c\theta_1^i s\theta_3^i) s\theta_4^i - s\theta_1^i s\theta_2^i c\theta_4^i L - d^i (s\theta_1^i s\theta_2^i) + r_5 s\theta_1^i \\ (s\theta_2^i c\theta_3^i s\theta_4^i + c\theta_2^i c\theta_4^i) L + d^i (c\theta_2^i) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

เมื่อตัวแปร i แทนแขนที่ 1 2 และ 3 หากได้ทำการหาค่าตำแหน่งแกนที่ 5 ของแขนทั้ง 3 แขนแล้วจะสามารถหาค่าตำแหน่งพิกัดของฐานค้ำมือจับ (O_M) เทียบกับ ฐาน (O_B) คือ

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

ส่วนทิศทาง (Orientation) ของค้ำมือจับเทียบกับฐาน (O_B) แสดงโดยเวกเตอร์ \vec{n} \vec{o} และ \vec{a}

$$\vec{n} = \frac{{}^B\bar{P}^1 - {}^B\bar{P}}{|{}^B\bar{P}^1 - {}^B\bar{P}|} \quad (3)$$

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

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

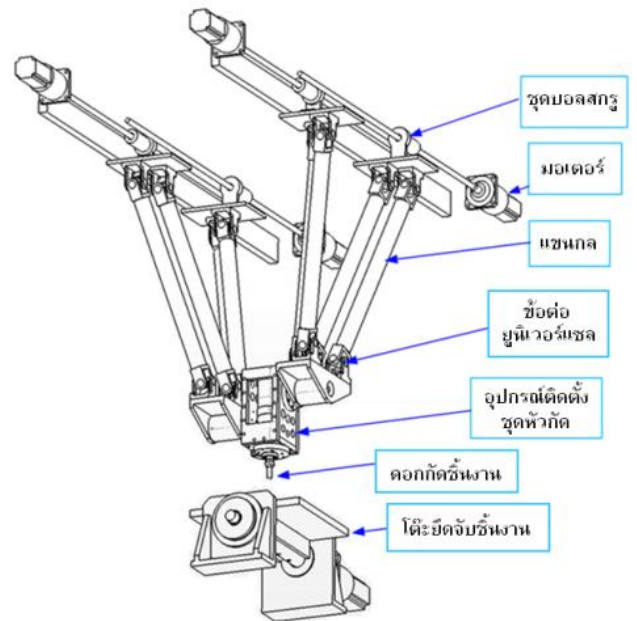
สามารถทำการจัดรูปแบบเมทริกซ์ (Transformation Matrix) ระหว่างฐานค้ำมือจับ และ ฐานของแขนกลนำ ดังนี้

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

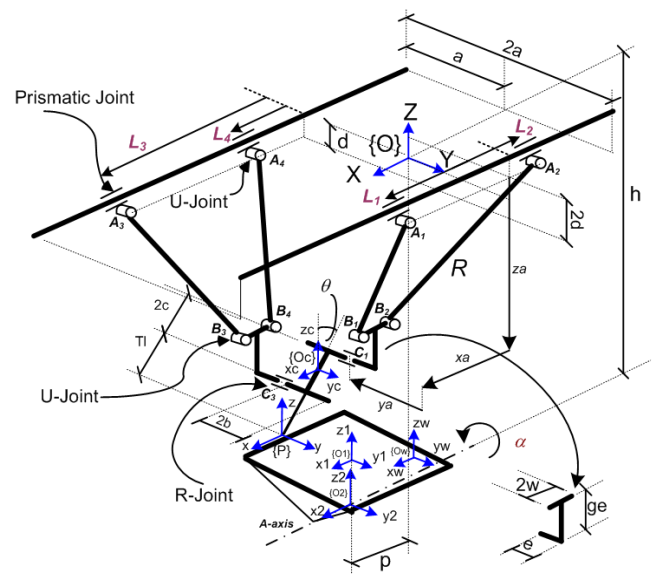
3. แขนกลตาม (Slave Arm)

แขนกลเคลื่อนที่ตามเป็นแขนกลที่มีโครงสร้างแบบขนาน 5 แกนตระกูลเอช-4 จะมีการเคลื่อนที่แบบ 5 องศาอิสระประกอบด้วย สาม องศาอิสระในทิศทางการเคลื่อนไวดตามแนวแกน $x y z$ หนึ่งองศาอิสระในทิศทางการหมุนรอบแกน y และ อีกหนึ่งองศาอิสระจากการหมุนไต่ะยึดจับชิ้นงาน สามารถแสดงส่วนประกอบต่างๆของแขนกล ดังรูปที่ 4

การวิเคราะห์ฮินเวอ์สคิเนแมติกเพื่อหามุมที่มอเตอร์แต่ละตัวจะต้องหมุนไปขับเคลื่อนชุดบอลสกรูจนกระทั่งปลายคอกกัศอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการนั้นสามารถทำได้โดยกำหนดตัวแปรและค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแขนกลดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 ส่วนประกอบของแขนกลตาม



รูปที่ 5 การกำหนดตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆ

ระยะทางที่ข้อต่อแบบเลื่อน (prismatic joint) เคลื่อนที่ไปนั้นเกิดจากการหมุนของมอเตอร์และระยะพิตซ์ของบอลสกรู เราสามารถหาระยะทางที่ ข้อต่อแบบเลื่อนทั้งสี่ข้อต่อจะต้องเคลื่อนที่ไปได้ จากสมการฮินเวอ์สคิเนแมติกของแขนกลตาม ดังสมการที่ 7-10

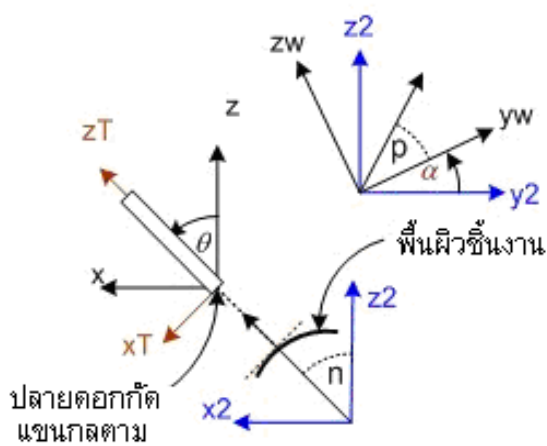
$$l_1 = (x_w + x_{O_w}^{O_1} + p) + (T_L + 2c)\sin(\theta) + w + \sqrt{R^2 - \left[\begin{matrix} -(y_w + y_{O_w}^{O_1})\cos(\alpha) + (z_w + z_{O_1}^{O_1})\sin(\alpha) \\ -b + a - e \end{matrix} \right]^2} - \sqrt{\left[\begin{matrix} -(y_w + y_{O_w}^{O_1})\sin(\alpha) - (z_w + z_{O_1}^{O_1})\cos(\alpha) \\ +h - (T_L + 2c)\cos(\theta) + d - ge \end{matrix} \right]^2} \quad (7)$$

$$l_2 = (x_w + x_{O_w}^{O_1} + p) + (T_L + 2c)\sin(\theta) - w - \sqrt{R^2 - \left[\begin{matrix} -(y_w + y_{O_w}^{O_1})\cos(\alpha) + (z_w + z_{O_1}^{O_1})\sin(\alpha) \\ -b + a - e \end{matrix} \right]^2} - \sqrt{\left[\begin{matrix} -(y_w + y_{O_w}^{O_1})\sin(\alpha) - (z_w + z_{O_1}^{O_1})\cos(\alpha) \\ +h - (T_L + 2c)\cos(\theta) + d - ge \end{matrix} \right]^2} \quad (8)$$

$$l_3 = (x_w + x_{O_w}^{O_1} + p) + T_L \sin(\theta) + w + \sqrt{R^2 - \left[\begin{matrix} (y_w + y_{O_w}^{O_1})\cos(\alpha) - (z_w + z_{O_1}^{O_1})\sin(\alpha) \\ -b + a - e \end{matrix} \right]^2} - \sqrt{\left[\begin{matrix} -(y_w + y_{O_w}^{O_1})\sin(\alpha) - (z_w + z_{O_1}^{O_1})\cos(\alpha) \\ +h - T_L \cos(\theta) - d - ge \end{matrix} \right]^2} \quad (9)$$

$$l_4 = (x_w + x_{O_w}^{O_1} + p) + T_L \sin(\theta) - w - \sqrt{R^2 - \left[\begin{matrix} (y_w + y_{O_w}^{O_1})\cos(\alpha) - (z_w + z_{O_1}^{O_1})\sin(\alpha) \\ -b + a - e \end{matrix} \right]^2} - \sqrt{\left[\begin{matrix} -(y_w + y_{O_w}^{O_1})\sin(\alpha) - (z_w + z_{O_1}^{O_1})\cos(\alpha) \\ +h - T_L \cos(\theta) - d - ge \end{matrix} \right]^2} \quad (10)$$

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



รูปที่ 6 การตั้งแกนของปลายแขนกลตาม

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

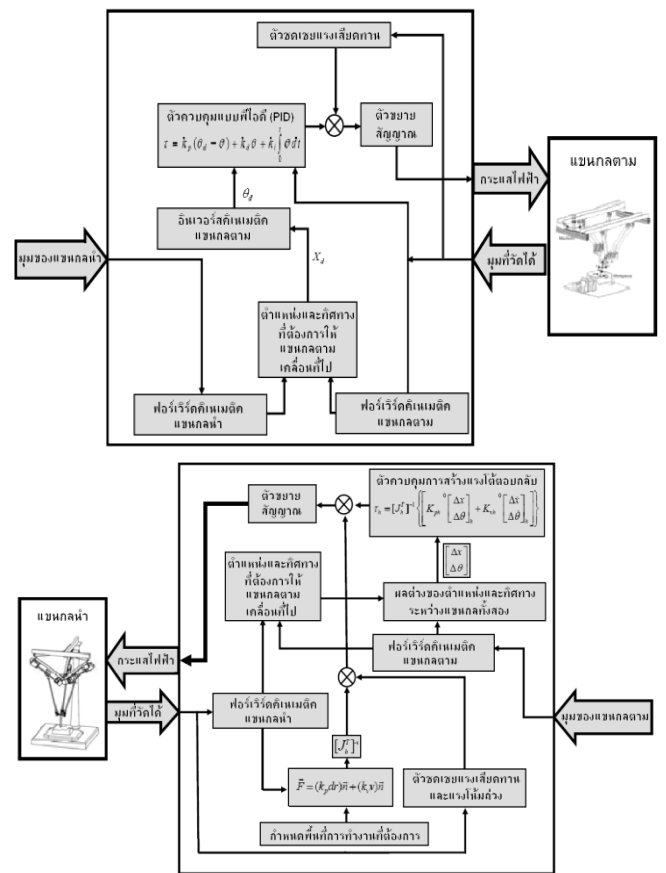
$$\theta = \arctan\left(\frac{I_w}{\sqrt{J_w^2 + K_w^2}}\right) \quad (17)$$

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

แขนกลตามจะต้องทำการกักชิ้นงานโดยอาศัยข้อมูลตำแหน่งและทิศทางที่ปลายตอกกััดจะต้องเคลื่อนที่ไปจากแขนกลนำ จึงต้องมีระบบควบคุมเพื่อให้แขนกลตามเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการแผนภาพของระบบควบคุมแสดงได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แผนภาพการทำงานของระบบแขนกล

การทำงานของระบบแขนกลมีขั้นตอนดังนี้

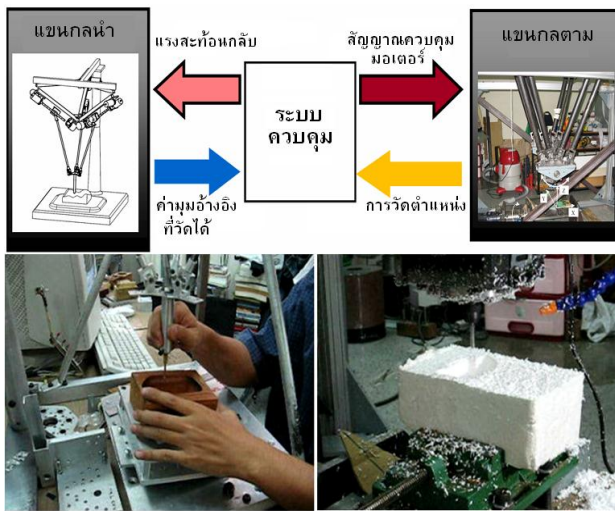
1. ระบบจะรับค่ามุมจากอุปกรณ์วัดมุมของแขนกลนำแล้วจึงทำการแปลงค่ามุนนั้นเป็นตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลนำ
2. ส่งค่าตำแหน่งและทิศทางปลายแขนกลนำนี้ไปที่ส่วนของการหาตำแหน่งและทิศทางที่ปลายแขนกลตามจะต้องเคลื่อนที่ไป
3. นำค่าตำแหน่งและทิศทางปลายแขนกลตามที่คำนวณได้มาหาค่ามุมที่ต้องการให้มอเตอร์ของ แขนกลตามแต่ละตัวหมุนไปจากสมการอินเวอร์ส คินเมติก

4. ทำการควบคุมการหมุนของมอเตอร์แกนกลตามให้เป็นไปตามค่ามุมการหมุนในขั้นตอนที่ 3 โดยใช้การควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับอนุพันธ์ (PD)

5. นำค่ามุมการหมุนของมอเตอร์ที่วัด ได้มาคำนวณหาตำแหน่งปลายแกนกลตามด้วยสมการพอร์เวอร์คินเนมติก

6. เปรียบเทียบผลต่างระหว่างค่าตำแหน่ง ของแกนกลตามที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 5 และ ค่าตำแหน่งของแกนกลนำที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ 1 แล้วจึงนำค่ามาใช้ทำการสร้างสะท้อนกลับไปยังมือของผู้ดำเนินการ

ลักษณะการใช้งานระบบแกนกลในรูปที่ 8 ผู้ดำเนินการจะจับคั่นบังคับแกนกลนำให้เคลื่อนที่ส่งผลให้แกนกลตามเคลื่อนที่ที่กั้เซาะขึ้นงานออกมา



รูปที่ 8 การทำงานร่วมกับระบบแกนกล

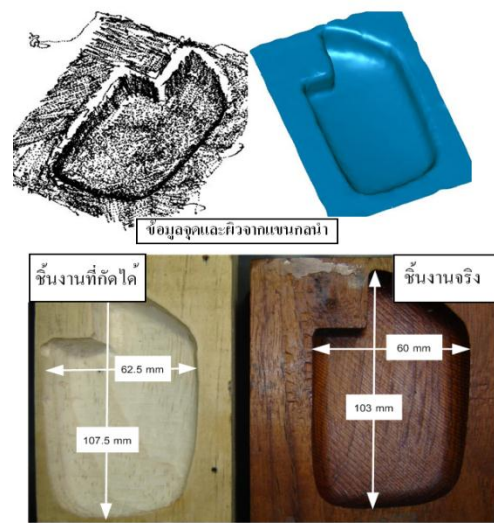
5. การทดสอบการกัดเซาะขึ้นงาน

ทำการทดสอบการกัดเซาะขึ้นงาน โดยการนำชิ้นงานจริงที่ต้องการทำซ้ำมาวางที่ฐานของแกนกลนำและนำวัตถุจับ เช่น ไม้หรือโฟม มาวางบนฐานของแกนกลตาม จากนั้นจึงเริ่มการกัดขึ้นงานโดยผู้ดำเนินการใช้มือจับที่ค้ำจับของแกนกลนำแล้ว ทำการเคลื่อนค้ำจับให้ปลายค้ำจับซึ่งมีลักษณะเป็น ลูกเหล็กทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 มิลลิเมตร สัมผัสไปบนผิวชิ้นงานจริงจนทั่วชิ้นงาน ในระหว่างนั้นแกนกลตามจะทำการกัดเซาะวัตถุจับ ไปพร้อมๆกับการเคลื่อนมือของผู้ดำเนินการจนได้ชิ้นงานออกมา ดอกกั้ดที่ใช้ในการกัดเซาะขึ้นงานนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร จึงต้องนำขนาดของลูกเหล็กทรงกลมและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ดอกกั้ดมาพิจารณาด้วย

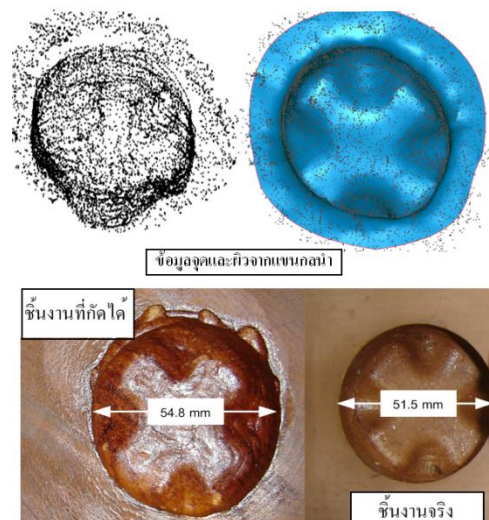
ในขณะที่ทำการกัดขึ้นงานจะมีการเพิ่มความสะดักสบายให้กับผู้ดำเนินการ โดยทำการลดขนาดหน้าของแกนกลนำ ลดภาระจากแรงเสียดขณะเคลื่อนที่ของแกนกลนำ และ การสร้างแรงสะท้อนกลับต่อมือของผู้ดำเนินการเมื่อตำแหน่งของปลาย แกนกลตามเริ่มมีค่าผิดพลาดไป

การกัดเซาะขึ้นงานรูปกระจกมองหลังวัสดุไม้จากชิ้นงานจริงดังแสดงในรูปที่ 9 เมื่อทำการชดเชยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกเหล็กทรงกลมและ ดอกกั้ดแล้วชิ้นงานที่กัดเซาะ ได้ควรจะมีความสูงเท่ากับ 105.5 มิลลิเมตร และ ความกว้างเท่ากับ 62.5 มิลลิเมตร ดังนั้นชิ้นงานที่กัดเซาะได้จึงมีความสูงผิดพลาดไป 2 มิลลิเมตร ส่วนการกัดเซาะขึ้นงาน รูปก้นขวิดวัสดุไม้ในรูปที่ 10 เมื่อทำการชดเชยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลูกเหล็กทรงกลมและดอกกั้ดแล้วชิ้นงานที่กัดเซาะได้ควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 54 มิลลิเมตร ดังนั้นชิ้นงานที่กัดเซาะได้จึงมีค่าผิดพลาดไป 0.8 มิลลิเมตร

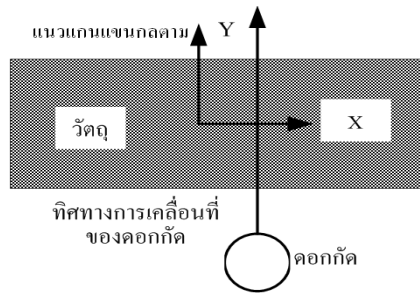
การทดสอบแรงสะท้อนกลับต่อมือของผู้ดำเนินการเมื่อแกนกลตามกัดเซาะขึ้นงานตาม แนวแกน y ของแกนกลตาม จำนวน 1 ครั้งดังรูปที่ 11



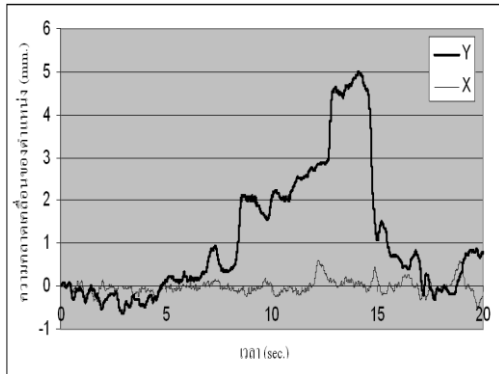
รูปที่ 9 ชิ้นงานรูปกระจกมองหลังที่กัดเซาะได้จากแกนกลตาม และ ชิ้นงานจริงที่ต้องการทำซ้ำ



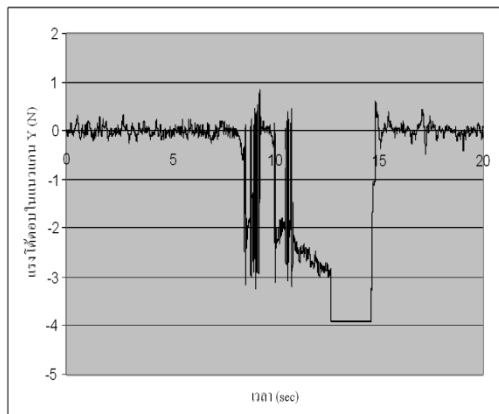
รูปที่ 10 ชิ้นงานรูปก้นขวิดที่กัดเซาะได้จากแกนกลตาม และ ชิ้นงานจริงที่ต้องการทำซ้ำ



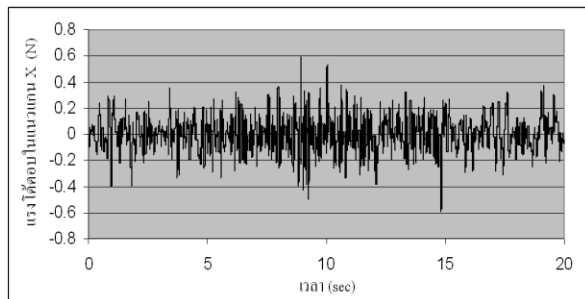
รูปที่ 11 การเคลื่อนที่ของคอกกักในการทดสอบ แรงสะท้อนกลับ



รูปที่ 12 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งระหว่างปลายแขนกลนำและปลายแขนกลตามในแนวแกน x และ y



รูปที่ 13 แรงสะท้อนกลับที่แขนกลนำจะกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการในแนวแกน Y



รูปที่ 14 แรงสะท้อนกลับที่แขนกลนำจะกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการในแนวแกน X

ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของคอกกักขึ้นงานตามแนวแกน Y แสดงดังรูปที่ 12-14 ความคลาดเคลื่อนระหว่างตำแหน่งปลายแขนกลนำและปลายแขนกลตามส่งผลให้มีแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการ โดยขณะที่ยังไม่มีการกดขึ้นงานแขนกลตามสามารถ

เคลื่อนที่ไปพร้อมกับแขนกลนำเป็นอย่างดีความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งระหว่างแขนกลทั้งสองมีค่าไม่เกิน 1 มิลลิเมตรดังนั้น แขนกลนำจึงยังไม่สร้างแรงสะท้อนกลับต่อมือผู้ดำเนินการ แต่เมื่อคอกกักเริ่มการกดขึ้นงานในขณะเวลาผ่านไปประมาณ 8 วินาที ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างตำแหน่งแขนกลทั้งสองในแนวแกน Y (ดังรูปที่ 12) มีค่ามากขึ้นจนมากกว่า 2 มิลลิเมตร จะทำให้ แขนกลนำสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการตามทิศทางแกน Y (ดังรูปที่ 13) โดยขนาดของแรงกระทำสามารถปรับได้ตาม ความเหมาะสมด้วยค่าอัตราขยายที่กำหนดขึ้น แต่จะให้แรงได้ดอปมีค่าเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนกับค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขนกล ส่วนแรงได้ดอปที่เกิดตามแนวแกน X (ดังรูปที่ 14) มีค่าน้อยมากจึงอาจไม่นำไปสร้างแรงสะท้อนกลับจริงเมื่อผู้ดำเนินการหยุดการเคลื่อนที่ของแขนกลนำพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งระหว่างแขนกลนำและ แขนกลตามลดลงจนมีค่าต่ำกว่า 1 มิลลิเมตรเช่นเดิม

6. บทสรุป

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอระบบการทำงานของแขนกลแบบ มาสเตอร์-สเลฟ สำหรับการสร้างชิ้นงานจากชิ้นงานจริงด้วยวิธีการกัด การทดลองกัดชิ้นงานวัสดุไม้พบว่าชิ้นงานที่ได้มีลักษณะคล้ายกับ ชิ้นงานจริงแต่ยังคงมีขนาดที่ผิดพลาดไปประมาณด้านละ 1 มิลลิเมตร ส่วนการทดสอบการเคลื่อนที่ของคอกกักตามแนวแกน Y เพื่อหาลักษณะของแรงสะท้อนกลับที่ จะกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการ พบว่าแรงที่เกิดขึ้น จะมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของปลายคอกกัก และมีการเปลี่ยนแปลงขนาดตามค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างตำแหน่งปลายแขนกลนำและแขนกลตามขนาดและทิศทางของแรงสะท้อนกลับที่เกิดขึ้นจะถูกส่งไปคำนวณค่าแรงบิดเพื่อให้อิมอเตอร์ของแขนกลนำ สร้างแรงกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการต่อไป

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Sangveraphunsiri, V., Chooprasird, K., 2011. Dynamics and Control of a 5-DOF Manipulator Based on H-4 Parallel Mechanism. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (IJAMT), Vol. 52, No. 1, pp. 343-364.
 [2] Sangveraphunsiri, V., Ngamvilai Korn, T., 2002. Design and Development of a Six DOF Master-Slave Human-Assisted Manipulator Arm. In: Proceedings of the JSAE Annual Congress, Yokohama, Japan.
 [3] Gupta, G. S., Mukhopadhyay, S. C., Messom, C. H., Demidenko, S., 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] Sciacivco, L., Sicialano, B., 1996. Modeling and Control of Robot Manipulators, McGraw-Hill, Italy.
 [5] กรมมันต์ ชูประเสริฐ. 2550. การควบคุมแรงแบบฝังตัว สำหรับแขนกล ลูกผสมแบบขนาน 5 แกน ตระกูลเอช-4. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร ดุษฎีบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย.
 [6] เอกพจน์ สุนทรมาตถกุล. 2551. การสอบเทียบระบบกลไกแขนกลแบบ ขนาน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.