การควบคุมแรงและตำแหน่งของแขนกลลูกผสมแบบขนาน 5 แกน ตระกูลเอช-4 ในขณะทำการกัดชิ้นงาน

ว่าที่ร้อยตรี เรืองยศ อารยวงษ์กุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository(CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

FORCE AND POSITION CONTROL FOR A HYBRID 5-AXIS H-4 FAMILY PARALLEL MANIPULATOR IN MILLING PROCESSES

Mr. Ruengyos Arayavongkul

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic year 2011
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมแรงและตำแหน่งของแขนกลลูกผสมแบบขนาน 5 แกน ตระกูลเอช-4 ในขณะทำการกัดชิ้นงาน
โดย	ว่าที่ร้อยตรี เรืองยศ อารยวงษ์กุล
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

.... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ)

.... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อาจารย์ ดร.กรรมมันต์ ชูประเสริฐ)

เรืองยศ อารยวงษ์กุล : การควบคุมแรงและตำแหน่งของแขนกลลูกผสมแบบขนาน 5 แกน ตระกูลเอช-4 ในขณะทำการกัดชิ้นงาน (FORCE AND POSITION CONTROL FOR A HYBRID 5-AXIS H-4 FAMILY PARALLEL MANIPULATOR IN MILLING PROCESSES)
อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 90 หน้า.

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการควบคุมแรงและตำแหน่งสำหรับกระบวนการกัดชิ้นงานโดยใช้เครื่องกัดแบบ 5 แกนที่ได้พัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการ เครื่องกัดที่มีลักษณะเป็นแขนกลลูกผสมแบบขนาน 5 แกนประกอบด้วยแขนกลที่มีโครงสร้างขนานแบบเอช-4กับการหมุนของโต๊ะยึดชิ้นงานอีก 1 ทิศทาง ระบบแขนกลสำหรับการกัดชิ้นงานซึ่งพัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการประกอบด้วยแขนกลแฮปติค 6 องศาอิสระโครงสร้างแบบขนานที่ทำหน้าที่เป็นแขนกลนำ และแขนกลลูกผสมแบบขนาน 5 แกนที่ทำหน้าที่เป็นแขนกลตาม โดยระบบแขนกลดังกล่าวจะทำงานแบบแขนกลนำ-ตาม หรือ มาสเตอร์-สเลฟ ที่มีการสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการ แขนกลนำทำหน้าที่กำหนดเส้นทางเดินของดอกกัดที่ต้องการ เส้นทางเดินของดอกกัดดังกล่าวจะนำมาใช้เป็นเส้นทางอ้างอิงสำหรับสำหรับแขนกลตาม การทดลองกัดชิ้นงานเป็นร่องแนวเส้นตรงและร่องแนววงกลมแสดงถึงความสามารถในการควบคุมแรงและตำแหน่งของระบบแขนกล ในขณะเดียวกันแขนกลนำสามารถสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการได้

แรงกัดชิ้นงานตรวจวัดค่าได้โดยตรงจากอุปกรณ์ตรวจรู้แรงซึ่งติดตั้งอยู่บนโต๊ะยึดจับชิ้นงานของแขนกลตาม ชิ้นงานที่ต้องการติดตั้งอยู่กับอุปกรณ์ตรวจรู้แรงเพื่อที่จะสามารถตรวจวัดแรงกัดได้ในขณะมีการกัดชิ้นงาน การควบคุมแรงในขณะกัดชิ้นงานที่จะนำเสนอในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการควบคุมแรงโดยตรง ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนการควบคุมแรงและส่วนการควบคุมตำแหน่ง ลูปด้านในของระบบควบคุมคือการควบคุมตำแหน่ง และลูปด้านนอกของระบบควบคุมคือการควบคุมแรง ค่าแรงกัดที่เหมาะสมต่อการควบคุมแรงกัดซึ่งจะนำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับการควบคุมแรงกัดสามารถประมาณค่าได้จากการทดลองกัดชิ้นงาน ผลการทดลองพบว่าแรงสะท้อนกลับที่สร้างขึ้นโดยแขนกลนำแสดงนัยสำคัญต่อการเลื่อนมือของผู้ดำเนินการ ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของดอกกัดชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งอ้างอิงของดอกกัดชิ้นงานแสดงถึงความแม่นยำของการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของดอกกัด และการควบคุมแรงกัดซึ่งวัดค่าได้ในระหว่างการกัดชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงกัดที่กำหนดไว้ในโปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบแขนกล

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต..
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.......................................
ปีการศึกษา 2554 ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม..

5071820321 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS :: Master-Slave / Force Reflection / Direct Force Control / Milling Process

RUENGYOS ARAYAVONGKUL : FORCE AND POSITION CONTROL FOR A HYBRID 5-AXIS H-4 FAMILY PARALLEL MANIPULATOR IN MILLING PROCESSES

THESIS ADVISOR : PROF.VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D, 90 pp.

This thesis purposes a force and position control scheme for material removal processes using a 5-axis milling machine. The 5-axis milling machine, which developed in-house, has configuration based on a hybrid 5-axis H-4 family type parallel manipulator arm with a single axis rotating table. The total system consisted of a 6-DOF parallel haptic device (developed in-house) as a master arm and the hybrid 5-axis milling machine as a slave arm to form the master-slave operation with force reflection. The master arm is used to generating desired tool paths used as referenced path for the slave arm and can generate force reflection against an operator arm. Straight-line paths and circular paths are used for illustrating the ability of force and position control technique purposed.

Cutting forces are directly monitored by force sensor attached to the rotating table of the slave arm where a workpiece is mounted. The Direct force control technique purposed is consisted of 2-loop, the inner loop is position control loop while the outer loop is force control loop. The suitable cutting force that is used as a referenced force in the force control loop can be obtained experimentally. From the experimental results, they are shown that force reflect which is generated at the master arm has significant effect on the operator hand. The motion of the tool tip also approached the reference paths with acceptable accuracy specific for this type of operation. The cutting forces measured during the cutting process are also controlled closed to the desired cutting force which is set in the control program.

Department : Mechanical Engineering Student's Signature……………………………

Field of Study : Mechanical Engineering Advisor's Signature..……………………………

Academic Year : 2011 Co-advisor's Signature……………………….

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ ศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ท่านได้กรุณาสละเวลาเพื่อให้คำปรึกษา แสดงข้อคิดเห็น และให้คำแนะนำต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอแสดงความขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลซึ่งให้คำแนะนำในด้านวิชาเรียน ขอขอบคุณรุ่นพี่ปริญญาเอกที่คอยช่วยเหลือและสนับสนุนการวิจัย และ ขอขอบใจรุ่นน้องปริญญาโทที่คอยให้กำลังใจเสมอมา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ

กิตติกรรมประกาศ .... ฉ

สารบัญ .... ช

สารบัญรูป .... ซ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์ 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

2 ความรู้เบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3

2.1 การควบคุมแขนกลเมื่อมีการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม 4

2.2 การทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ 5

2.3 การสร้างเส้นทางเดินดอกกัด 7

2.4 การศึกษาและวิเคราะห์แรงกัดชิ้นงาน 8

3 การออกแบบระบบควบคุมที่ใช้กับการควบคุมการทำงานแบบแขนกลนำและแขนกลตาม .... โดยมีแรงสะท้อนกลับ 15

3.1 การควบคุมตำแหน่งปลายแขนกลตาม 17

3.2 การควบคุมแรงโดยตรง 27

3.3 การสร้างแรงสะท้อนกลับ 35

4 ผลการทดลอง 38

4.1 ผลการทดลองเบื้องต้น 41

4.2 ทดลองกัดชิ้นงานเป็นร่องแนวเส้นตรง (Slot) 53

4.3 ทดลองกัดชิ้นงานเป็นหลุม (Pocket) 61

4.4 ทดลองกัดชิ้นงานเป็นวงกลม 71

5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ 80

รายการอ้างอิง 82

ภาคผนวก 86

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 90

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ปลายแขนกลมีการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม (แผ่นชิ้นงาน) 5
รูปที่ 2.2 ระบบแขนกลมีการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟและในขณะสัมผัสกับวัสดุฟองน้ำ........ 6
รูปที่ 2.3 ขนาดและตำแหน่งของดอกกัดที่เหมาะสมเมื่อมีการกำหนดบริเวณกลุ่มข้อมูลจุด....... 7
รูปที่ 2.4 ลักษณะกลุ่มจุดข้อมูลและการสร้างโครงข่ายสามเหลี่ยมในสามมิติ 8
รูปที่ 2.5 แบบจำลองทางกายภาพของดอกกัดหัวทรงกลม 11
รูปที่ 2.6 ภาพจำลองความหนาเศษ (chip thickness) สำหรับการกัดชิ้นงาน 11
รูปที่ 2.7 แบบจำลองแรงกัดชิ้นงานในสภาวะสถิต (ดอกกัดไม่มีการสั่น) 12
รูปที่ 2.8 ลักษณะของแรงกัดที่เกิดขึ้นจากมุมการหมุนของดอกกัด 13
รูปที่ 2.9 การทดลองและการจำลองผลลัพธ์ของแรงกัดเพื่อแสดงค่าที่ทำให้ดอกกัดเกิดการสั่นแชตเตอร์(chatter).. 14
รูปที่ 3.1 ระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟในงานวิจัยนี้.. 15
รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบหลักของแขนกลนำและแขนกลตามในงานวิจัยนี้................................ 16
รูปที่ 3.3 การตั้งแกนอ้างอิงเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลตาม. 17
รูปที่ 3.4 โครงสร้างแสดงข้อต่อต่าง ๆของแขนกลนำ 20
รูปที่ 3.5 โครงสร้างแสดงข้อต่อต่าง ๆของแขนกลตาม 22
รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงการควบคุมตำแหน่งและแรงโดยตรง 28
รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงระบบควบคุมตำแหน่งและแรงโดยตรงของแขนกลตาม 32
รูปที่ 3.8 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคอมไพลแอนท์.. 33
รูปที่ 3.9 แบบจำลองของดอกกัดในขณะกัดชิ้นงาน... 28
รูปที่ 3.10 แรงกัดชิ้นงานที่วัดค่าได้ (Fx, Fy และ Fz) เมื่อกัดชิ้นงานเป็นคลื่น....................... 34
รูปที่ 3.11 ส่วนประกอบโครงสร้างของแขนกลนำ.. 36
รูปที่ 3.12 โครงสร้างแขนกลนำในแต่ละแขนสำหรับการวิเคราะห์เมตริกจาโคเบียน 36
รูปที่ 4.1 ตำแหน่งเริ่มต้นการทำงาน (Home Position) ของแขนกลนำและแขนกลตาม.......... 38
รูปที่ 4.2 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและการยึดจับชิ้นงาน.. 39
รูปที่ 4.3 การติดตั้งแขนกลนำบนรางเลื่อนสำหรับการกัดชิ้นงาน 40
รูปที่ 4.4 ตำแหน่งของดอกกัดในแนวแกน Xw เมื่อดอกกัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2,6 และ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ (ความลึกในการกัด 2 มิลลิเมตร)............................ 42
รูปที่ 4.5 แรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Xw เมื่อดอกกัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2,6 และ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ (ความลึกในการกัด 2 มิลลิเมตร) 43

หน้า

รูปที่ 4.6 แรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Yw เมื่อดอกกัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2,6 และ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ (ความลึกในการกัด 2 มิลลิเมตร) 43
รูปที่ 4.7 แรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Zw เมื่อดอกกัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2,6 และ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ (ความลึกในการกัด 2 มิลลิเมตร) 44
รูปที่ 4.8 ตำแหน่งของดอกกัดในแนวแกน Zw เมื่อความลึกการกัดจากผิวชิ้นงานคือ 1,3 และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ดอกกัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที)............ 44
รูปที่ 4.9 แรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Xw เมื่อความลึกการกัดจากผิวชิ้นงานคือ 1,3 และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ดอกกัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที)............ 45
รูปที่ 4.10 แรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Yw เมื่อความลึกการกัดจากผิวชิ้นงานคือ 1,3 และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ดอกกัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที 46
รูปที่ 4.11 แรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Zw เมื่อความลึกการกัดจากผิวชิ้นงานคือ 1,3 และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ดอกกัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที)............ 46
รูปที่ 4.12 แรงกัดชิ้นงานเมื่อวางชิ้นงานเอียง 10 องศาและดอกกัดเคลื่อนที่ในทิศทาง –Xw ด้วยความเร็ว 2 และ 4 มิลลิเมตรต่อวินาที.. 47
รูปที่ 4.13 ตำแหน่งคอมไพลแอนท์แนวแกน Xw เมื่อปรับค่าเกน K_A และ K_V 48
รูปที่ 4.14 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของดอกกัดในแนวแกน Xw เมื่อวางชิ้นงานเป็นมุมเอียง (กำหนดให้ดอกกัดเคลื่อนที่ทิศทาง –Xw ความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที)............. 49
รูปที่ 4.15 แรงกัดในแนวแกน Xw เมื่อวางชิ้นงานเป็นมุมเอียง (กำหนดให้ดอกกัดเคลื่อนที่ทิศทาง –Xw ความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที)............. 50
รูปที่ 4.16 ลักษณะการเลื่อนด้ามจับแขนกลนำของผู้ดำเนินการในทิศทาง -X 51
รูปที่ 4.17 ความเร็วการเคลื่อนที่ของด้ามจับและแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือผู้ดำเนินการ 52
รูปที่ 4.18 ชิ้นงานที่ได้จากการกัดเป็นเส้นตรง (ความลึก 2 มิลลิเมตร) 54
รูปที่ 4.19 ตำแหน่งของดอกกัดบนระนาบ XwYw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นเส้นตรง.............. 54
รูปที่ 4.20 ตำแหน่งและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Xw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นเส้นตรง 55
รูปที่ 4.21 ตำแหน่งและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Yw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นเส้นตรง 55
รูปที่ 4.22 ตำแหน่งและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Zw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นเส้นตรง 56
รูปที่ 4.23 ตำแหน่งของดอกกัดในแนวแกน Xw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นเส้นตรง (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในทิศทาง -Xw) 57
รูปที่ 4.24 ตำแหน่งของดอกกัดและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Xw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นเส้นตรง (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในทิศทาง -Xw) 58

หน้า

รูปที่ 4.25 ตำแหน่งของดอกกัดและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Yw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นเส้นตรง (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในทิศทาง -Xw) 58
รูปที่ 4.26 ตำแหน่งของดอกกัดและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Zw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นเส้นตรง (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในทิศทาง -Xw) 58
รูปที่ 4.27 ตำแหน่งคอมไพลแอนท์ในแนวแกน Xw Yw และ Zw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นเส้นตรง (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในทิศทาง -Xw) 60
รูปที่ 4.28 แรงสะท้อนกลับต่อมือผู้ดำเนินการแนวแกน X Y และ Z เมื่อกัดชิ้นงานเป็นเส้นตรง (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในทิศทาง -Xw) 60
รูปที่ 4.29 ชิ้นงานที่ได้จากการกัดเป็นหลุม (ความลึก 2 มิลลิเมตร) 61
รูปที่ 4.30 ตำแหน่งของดอกกัดบนระนาบ XwYw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นหลุม 62
รูปที่ 4.31 ตำแหน่งและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Xw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นหลุม 63
รูปที่ 4.32 ตำแหน่งและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Yw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นหลุม 64
รูปที่ 4.33 ตำแหน่งและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Zw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นหลุม 64
รูปที่ 4.34 ตำแหน่งของดอกกัดในแนวแกน Xw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นหลุม (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในแนวแกน Xw)... 65
รูปที่ 4.35 ตำแหน่งของดอกกัดและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Xw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นหลุม (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในแนวแกน Xw).. 66
รูปที่ 4.36 ตำแหน่งของดอกกัดและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Yw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นหลุม (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในแนวแกน Xw).. 67
รูปที่ 4.37 ตำแหน่งของดอกกัดและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Zw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นหลุม (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในแนวแกน Xw).. 67
รูปที่ 4.38 ตำแหน่งคอมไพลแอนท์ในแนวแกน Xw Yw และ Zw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นหลุม (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในแนวแกน Xw).. 68
รูปที่ 4.39 แรงสะท้อนกลับต่อมือผู้ดำเนินการแนวแกน X Y และ Z เมื่อกัดชิ้นงานเป็นหลุม (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในแนวแกน Xw).. 69
รูปที่ 4.40 ชิ้นงานที่ได้จากการกัดเป็นวงกลม (ความลึก 2 มิลลิเมตร) 71
รูปที่ 4.41 ตำแหน่งของดอกกัดบนระนาบ XwYw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นวงกลม............... 72
รูปที่ 4.42 ตำแหน่งและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Xw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นวงกลม 73
รูปที่ 4.43 ตำแหน่งและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Yw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นวงกลม 74
รูปที่ 4.44 ตำแหน่งและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Zw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นวงกลม 74

หน้า

รูปที่ 4.45 ตำแหน่งของดอกกัดบนระนาบ XwYw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นวงกลม (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟแนวระนาบ XwYw) 75
รูปที่ 4.46 ตำแหน่งของดอกกัดและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Xw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นวงกลม (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟแนวระนาบ XwYw) 76
รูปที่ 4.47 ตำแหน่งของดอกกัดและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Yw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นวงกลม (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟแนวระนาบ XwYw) 77
รูปที่ 4.48 ตำแหน่งของดอกกัดและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Zw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นวงกลม (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟแนวระนาบ XwYw) 77
รูปที่ 4.49 ตำแหน่งคอมไพลแอนท์ในแนวแกน Xw Yw และ Zw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นวงกลม (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟแนวระนาบ XwYw) 78
รูปที่ 4.50 แรงสะท้อนกลับต่อมือผู้ดำเนินการแนวแกน X Y และ Z เมื่อกัดชิ้นงานเป็นวงกลม (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟแนวระนาบ XwYw) 79
รูปที่ ก.1 ส่วนประกอบต่างๆในไดอะลอก (Dialog) 87

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เมื่อหุ่นยนต์อุตสาหกรรมทำงานในลักษณะมีการสัมผัส (Interaction) กับ สิ่งแวดล้อม (Environment) เช่น การขัดผิวชิ้นงาน การประกอบชิ้นส่วน เป็นต้น การควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อการทำงานเนื่องจากในทางปฏิบัติไม่สามารถสร้างแบบจำลองความแม่นยำสูงระหว่างการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ (Kinematics and dynamics) กับ รูปร่างของสิ่งแวดล้อม (Geometry and Mechanical Feature) ถ้าหากการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ที่ปลายของแขนหุ่นยนต์เกิดความผิดพลาดไปจากที่ได้ออกแบบไว้หุ่นยนต์อาจเพิ่มแรงกระทำต่อสิ่งแวดล้อมจนเกิดความเสียหายต่อพื้นผิวของสิ่งแวดล้อมหรือหุ่นยนต์เองดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาระบบควบคุมแรงและตำแหน่งควบคู่กัน (Caccavale et al.,2005)

การกัดชิ้นงานเป็นกระบวนการหนึ่งสำหรับนำเนื้อวัสดุออก (Material removal process) จากชิ้นงานเริ่มต้นจนกระทั่งได้ชิ้นงานที่มีลักษณะตามต้องการ ในการกัดชิ้นงานจะต้องมีการสัมผัสระหว่างคมของดอกกัดและเนื้อวัสดุ การเคลื่อนดอกกัดตามเส้นทางเดินที่กำหนดขึ้น (tool path) จะทำให้เกิดแรงกัดชิ้นงานในทิศทางต่างๆ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้แรง (Force sensor) เมื่อกำหนดให้ดอกกัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว (feed-rate) หรือมีความลึกในการกัด (depth of cut) ที่ไม่เหมาะสมจะส่งผลถึงพื้นผิวของชิ้นงานและการสึกหรอของดอกกัด เนื่องจากแรงกัดที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของดอกกัดในขณะทำการกัดชิ้นงาน จึงได้มีการศึกษาวิธีการนำค่าแรงกัดชิ้นงานมาใช้ตรวจสอบพฤติกรรมของดอกกัดที่เกิดขึ้นในขณะกัดชิ้นงาน ลักษณะของดอกกัดที่มีการศึกษาแรงกัดผิวชิ้นงานเป็นส่วนมากคือดอกกัดชนิดหัวทรงกลม (Ball-Ended Milling Tool) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในงานกัดพื้นผิวที่มีความสลับซับซ้อนได้ดี

การควบคุมแรงโดยตรงเป็นวิธีการควบคุมแรงที่เกิดขึ้นขณะที่ปลายแขนกลมีการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมโดยอาศัยการวัดค่าแรงจากอุปกรณ์ตรวจรู้แรง และทำการควบคุมแรงนั้นให้ได้ตามค่าที่กำหนดพร้อมกับการควบคุมตำแหน่งปลายแขนกลให้เป็นไปตามเส้นทางเดินที่ต้องการ โดยปกติอุปกรณ์ตรวจรู้แรงจะมีค่าสัมประสิทธิ์สปริงสูงเมื่อปลายแขนกลมีการสัมผัสชิ้นงานเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำการตรวจวัดค่าแรงได้ ส่งผลให้การควบคุมแรงกระทำในขณะปลายแขนกลเริ่มสัมผัสผิวชิ้นงานมีความสะดวกขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้เสนอวิธีการควบคุมแรงโดยตรงสำหรับประยุกต์ใช้ในการควบคุมแรงและตำแหน่งของดอกกัดในขณะทำการกัดชิ้นงาน

ด้วยแขนกลที่มีโครงสร้างแบบขนาน 5 แกน ตระกูล เอช-4 ซึ่งได้พัฒนาขึ้นสำหรับการกัดชิ้นงาน ร่วมกับแขนกลแฮปติค 6 องศาอิสระที่มีโครงสร้างแบบขนาน เพื่อให้แรงกัดชิ้นงานที่วัดค่าได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดและตำแหน่งของดอกกัดเป็นไปตามค่าที่ต้องการ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อพัฒนาวิธีการควบคุมแรงที่ปลายแขนกลแบบขนานตระกูลเอช 4 ในงานการกัดชิ้นงาน (Milling) โดยอาศัยการวัดแรงในขณะกัดชิ้นงานโดยตรง
2. เพื่อศึกษาลักษณะการนำแรงที่เกิดขึ้นขณะทำการกัดชิ้นงาน มาใช้ให้เกิดความรู้สึกต่อมือของผู้ดำเนินการ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. สามารถควบคุมแรงและตำแหน่งของปลายแขนกลขณะทำการกัดชิ้นงานโดยอาศัยการวัดค่าแรงโดยตรง
2. สามารถใช้ระบบแขนกลตามร่วมกับแขนกลแฮบติคเพื่อสร้างชิ้นงานต้นแบบ โดยมีการสะท้อนแรงกระทำ (Force Reflection) ไปที่มือของผู้ดำเนินการ

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาและวิเคราะห์ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ศึกษาการทำงานของแขนกลแฮปติค และ แขนกลตาม
3. ทำการทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนกลตามร่วมกับแขนกลแฮปติค
4. ศึกษาระบบควบคุมแรงจากการวัดค่าแรงโดยตรง
5. ทดลองการเคลื่อนที่ของแขนกลตามและบันทึกค่าแรงที่วัดได้
6. ทำการทดลองควบคุมแรงที่เกิดขึ้นขณะกัดชิ้นงาน
7. ทำการทดลองการทำงานของแขนกลตามร่วมกับแขนกลแฮปติค
8. สรุปผลและจัดทำบทความสำหรับการตีพิมพ์ในวรสาร

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ระบบกลแขนกลแบบขนานสำหรับกัดชิ้นงานที่สามารถควบคุมแรงและตำแหน่งในการกัดชิ้นงาน
2. ระบบการทำงานร่วมกันระหว่างแขนกลเคลื่อนที่ตามและแขนกลแฮปติคโดยมีการส่งผ่านแรงกระทำขณะกัดชิ้นงานต่อมือของผู้ดำเนินการ
3. สร้างองค์ความรู้ในการควบคุมแรงและตำแหน่งของระบบแขนกลแบบขนาน

บทที่ 2

ความรู้เบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในส่วนนี้ประกอบด้วยข้อมูลจากงานวิจัยและข้อมูลเบื้องต้นที่เกี่ยวข้อง ซึ่งผู้วิจัยได้รวบรวมจากวรสารทางวิชาการเพื่อให้เกิดแนวทางในการศึกษาต่อไป โดยได้จัดกลุ่มหัวข้องานวิจัยออกเป็น 4 กลุ่ม ประกอบด้วย 1) การควบคุมแขนกลเมื่อมีการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม 2) การทำงานแบบมาสเตอร์ – สเลฟ 3) การสร้างเส้นทางเดินของดอกกัดเพื่อกัดชิ้นงาน และ 4) การศึกษาและวิเคราะห์แรงกัดชิ้นงาน

เมื่อทำการศึกษางานวิจัยในแต่ละกลุ่ม พบว่าการควบคุมแขนกลขณะมีการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมนั้นมีความสำคัญต่อการทำงานเป็นอย่างมาก เนื่องจากงานที่แขนกลทำจะต้องมีการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนและมีการทำงานร่วมกับอุปกรณ์อื่นๆ โดยเฉพาะเมื่อแขนกลเป็นส่วนหนึ่งในระบบการทำงานแบบแขนกลนำ-ตาม หรือ มาสเตอร์-สเลฟ (Master-Slave operation) ปลายแขนกลของแขนกลตามจะเกิดการเคลื่อนที่ตามตำแหน่งหรือเส้นทางที่กำหนดโดยแขนกลนำ โดยที่ในแต่ละคาบเวลา (sampling period) ที่ใช้ในการควบคุมซึ่งไม่ได้มีการกำหนดค่าตำแหน่งเอาไว้ก่อนล่วงหน้า เมื่อเกิดการชนกับสิ่งกีดขวางหรือเกิดการกระทำกับสิ่งแวดล้อม ทำให้การเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์ไม่เป็นไปตามค่าตำแหน่งที่กำหนดโดยแขนกลนำ และอาจเกิดความเสียหายต่อบริเวณที่เกิดการสัมผัสหรือการชนนั้น การทำงานของปลายแขนกลในลักษณะการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟนั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานได้หลายประเภท เช่น การใช้แขนกลในงานการแพทย์เพื่อการผ่าตัดศัลยกรรม การทำงานหยิบจับสิ่งของแทนมนุษย์ การประกอบหรือตกแต่งชิ้นงาน เป็นต้น ซึ่งปลายแขนหุ่นยนต์ตาม (slave manipulator arm) จะต้องมีการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม การควบคุมตำแหน่งของปลายแขนจึงจะต้องพิจารณาทั้งการควบคุมตำแหน่งและการความคุมแรงกระทำกับสิ่งแวดล้อมควบคู่กันไป

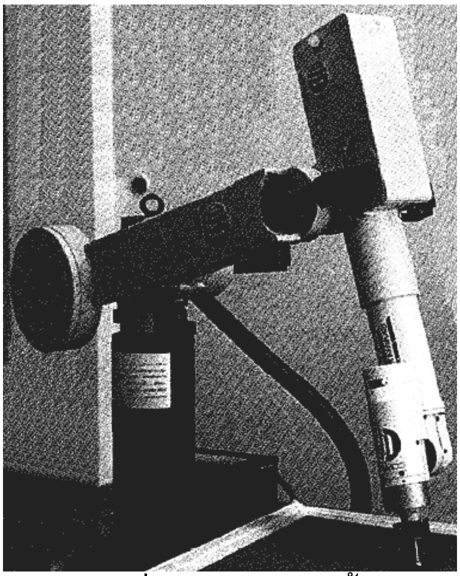
การสร้างชิ้นงานด้วยวิธีการกัดตามเส้นทางเดินที่กำหนดไว้เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างของพื้นผิวตามต้องการ นิยมใช้ดอกกัดหัวทรงกลม (Ball-End Mill) เนื่องจากความสามารถในการสร้างผิวชิ้นงานที่มีความซับซ้อนทำได้ดีกว่าดอกกัดที่มีรูปทรงต่างออกไป จึงได้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาการสร้างเส้นทางเดินสำหรับการเคลื่อนดอกกัดชิ้นงานหัวทรงกลมและทดสอบการกัดชิ้นงานด้วยเครื่องกัด CNC โดยการเคลื่อนที่ดอกกัดนั้น จะต้องมีการกำหนดให้ความเร็วการเคลื่อนที่หรือความเร็วของการกัดชิ้นงาน (feed-rate) มีความเร็วที่หมาะสม เพื่อให้ได้ผิวชิ้นงานที่มีคุณภาพดีและใช้ระยะเวลาในการดำเนินการสั้น งานวิจัยจำนวนมากพยายามศึกษาแรงกัดที่เกิดขึ้นในขณะทำการกัดชิ้นงานเพื่อเป็นข้อมูลประกอบสำหรับการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการกัด (cutting conditions) ซึ่งประกอบด้วย ความเร็วการเคลื่อนที่

ของดอกกัด (feed-rate) ความเร็วการหมุนของดอกกัด(spindle speed) และความลึกในการกัด (depth of cut) ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุที่ใช้ในการกัดขึ้นรูป (workpiece material) และวัสดุที่ใช้ในการทำดอกกัด (cutting tool material)

เมื่อทำการติดตั้งดอกกัดชิ้นงานไว้ที่ปลายแขนกลสำหรับใช้ในการกัดชิ้นงานแล้วจึงควรทำการศึกษาแรงที่เกิดขึ้นในขณะที่ดอกกัดมีการสัมผัสกับเนื้อวัสดุของชิ้นงานเพื่อเป็นข้อมูลประกอบสำหรับการกัดชิ้นงาน งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอผลการศึกษาแรงกัดชิ้นงานที่เกิดขึ้นเพื่อใช้ประกอบการควบคุมแรงกัดและตำแหน่งของดอกกัดในขณะทำการกัดชิ้นงาน

2.1 การควบคุมแขนกลเมื่อปลายแขนกลมีการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม

เมื่อปลายแขนกลมีการเคลื่อนที่จนเกิดการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมซึ่งอาจเป็นพื้นผิวที่แข็งก็จะเกิดแรงกระทำระหว่างพื้นผิวนั้นกับปลายแขนกล ถ้าหากแรงที่เกิดขึ้นมีค่ามากอาจทำให้พื้นผิวของสิ่งแวดล้อมนั้นหรือพื้นผิวของปลายแขนกลเกิดความเสียหายได้ จึงได้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาวิธีการควบคุมแขนกลให้สามารถทำงานในขณะที่มีการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมได้ เช่น Chiaverini and Sciavicco(1993) แสดงระบบจำลองสำหรับใช้ในการศึกษาการควบคุมแรงและตำแหน่งปลายแขนกลเมื่อเกิดการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมโดยให้ลำดับความสำคัญของแรงมากกว่าตำแหน่งปลายแขนกล ผลการจำลองโดยสมมติให้สิ่งแวดล้อมมีความยืดหยุ่น พบว่าการจำลองแรงที่เกิดขึ้นส่งผลดีแม้ว่าไม่มีการคาดหมายตำแหน่งของสิ่งแวดล้อมเอาไว้ก่อน Chiaverini et al.(1994) ศึกษาการควบคุมแรงให้มีค่าเป็นศูนย์ (Regulation) ด้วยระบบจำลองสำหรับแขนกลเมื่อตำแหน่งปลายแขนกลของระบบจำลองเปลี่ยนแปลงไปจนเกิดการสัมผัสกับแบบจำลองสิ่งแวดล้อม โดยแสดงผลการคำนวณเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการควบคุมแรง Ferretti et al.(1995) ทำการทดลองควบคุมแรงที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่ติดตั้งที่ปลายแขนกลขณะเกิดการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม โดยใช้การควบคุมแรงแบบอินทิกรัล (Integral) เพื่อสนับสนุนแบบจำลองทางทฤษฎี พบว่าการควบคุมแรงแบบอินทิกรัลยังคงให้ผลที่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับการควบคุมแรงแบบสัดส่วน (Proportional) Chiaverini et al.(1998) ทำการทดลองควบคุมแรงที่วัดค่าได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและตำแหน่งปลายแขนกลให้ได้ตามค่าที่กำหนดไว้ (ดังแสดงในรูปที่ 2.1) โดยใช้วิธีการปรับค่าพารามิเตอร์ในการจำลองความแข็งของสิ่งแวดล้อม (Stiffness Adaptation) ร่วมกับวิธีการควบคุมแบบป้อนไปข้างหน้า (Feed Forward control) และแบบจำลองระบบทางพลวัต (Dynamic Model) ส่งผลให้ลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้มากขึ้น และส่งผลที่ดีในขณะที่ปลายแขนกลเริ่มสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการปรับค่าพารามิเตอร์ในการจำลองความแข็งของสิ่งแวดล้อม

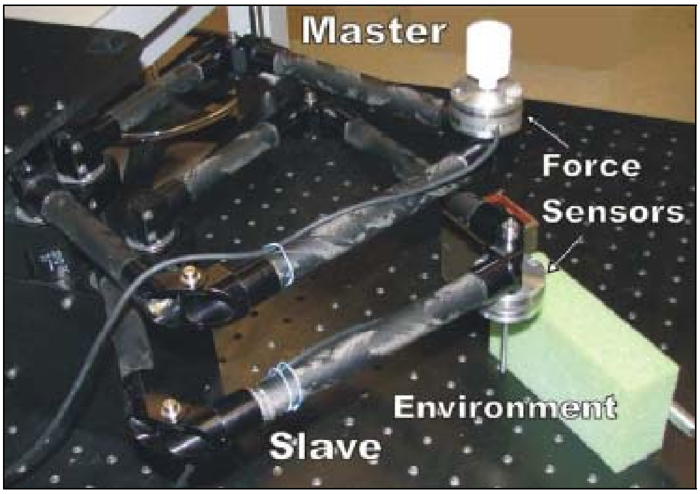


รูปที่ 2.1 ปลายแขนกลมีการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม (แผ่นชิ้นงาน) (Chiaverini et al.,1998)

2.2 การทำงานแบบมาสเตอร์ – สเลฟ (Master-Slave Operation)

ระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ ประกอบด้วย แขนกลนำ (master arm) และแขนกลตาม (slave arm) ซึ่งมีการทำงานสอดคล้องกันภายในบริเวณที่กำหนดขึ้น แขนกลตามจะทำงานได้โดยอาศัยการรับและส่งค่าจากแขนกลนำผ่านชุดอุปกรณ์ควบคุม โดยมนุษย์จะควบคุมแขนกลนำให้เคลื่อนไปตามทางเดินที่มนุษย์เป็นผู้กำหนด การทำงานในลักษณะนี้เป็นการทำงานที่เป็นการผสมผสานระหว่างสิ่งดีของมนุษย์และเครื่องจักรกล กล่าวคือ มนุษย์มีความยืดหยุ่นในการทำงาน สามารถตัดสินใจที่สลับซับซ้อนได้ค่อนข้างดี ในขณะที่แขนหุ่นยนต์ที่ควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์สามารถทำงานที่มีความแม่นยำสูงได้ การทำงานในลักษณะแขนกลนำ-ตามจึงเหมาะสำหรับการทำงานโดยตรงกับสิ่งแวดล้อมแทนมนุษย์ ในพื้นที่อันตราย พื้นที่ระยะไกล หรือ งานที่ไม่สามารถกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลไว้ก่อน เช่น งานทางการแพทย์หรือการผ่าตัด เพราะผู้ดำเนินการสามารถปรับการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลตามโดยการเคลื่อนด้ามจับของแขนกลนำไปยังตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการ จากนั้นระบบควบคุมจะทำให้ปลายแขนของแขนกลตามเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งและทิศทางนั้นๆเอง โดยปกติแขนกลนำจะมีอุปกรณ์สร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการหรือเป็นอุปกรณ์ที่เรียกว่า อุปกรณ์แฮปติค (Haptic Device) เพื่อให้ผู้ดำเนินการหรือผู้ควบคุมแขนกลนำเกิดความรู้สึกขึ้นขณะเกิดการเคลื่อนที่เข้าไปในบริเวณที่ไม่ต้องการ หรือ ขณะปลายแขนกลตามสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม งานวิจัยที่มีการศึกษาการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ เช่น Ibeas and de la Sen (2006) ได้ออกแบบระบบควบคุมเพื่อให้เกิดเสถียรภาพขณะแขนกลตามสัมผัสกับสิ่งกีดขวางโดยใช้การประมาณค่าพารามิเตอร์แบบหลายค่า(Multi-Estimation scheme) ในแต่ละคาบเวลาทั้งในส่วนของแขนกลนำและแขนกลตาม ผลการทดลองกับสิ่งกีดขวางที่มีความยืดหยุ่น แสดงให้เห็นว่าการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบหลายค่าทำให้สามารถควบคุม

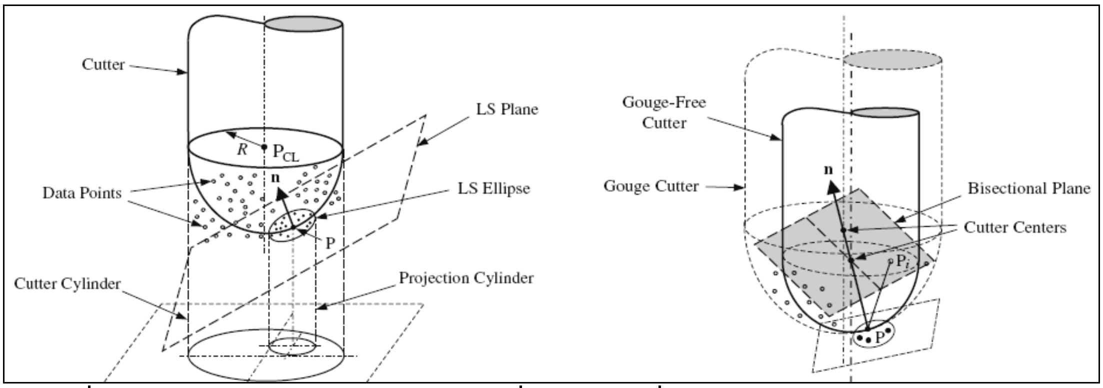
แรงในขณะเกิดการสัมผัสได้ดีกว่าการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบค่าเดียว ระบบควบคุมดังกล่าวจึงให้ความรู้สึกที่ดีต่อมือของผู้ดำเนินการได้มากขึ้น Katherine et al.(2006) ได้เสนอแนวทางการลดผลกระทบจากแรงสะท้อนกลับที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของแขนกลนำ โดยจำลองระบบเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงสะท้อนกลับและตำแหน่งที่เปลี่ยนแปลงจากการพิจารณาโครงสร้างของแขนกลนำ งานวิจัยนี้ได้เสนอผลการเปรียบเทียบในกรณีที่มีการเคลื่อนที่ 1 องศาอิสระ Gasparetto et al.(2009) เสนอวิธีการควบคุมแรงสะท้อนกลับเพื่อให้ผู้ดำเนินการเกิดความรู้สึกที่ดี ขณะทำการควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องมือผ่าตัดโดยอาศัยวิธีการปรับค่าการสร้างแรงสะท้อนกลับจากค่าตำแหน่งของปลายแขนกลนำ และค่าแรงที่วัดได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้แรงในขณะที่ปลายแขนกลตามสัมผัสกับชิ้นงาน Malysz and Sirouspour (2009) แสดงการจำลองแรงสะท้อนกลับที่กระทำต่อมือผู้ดำเนินการแบบไม่เป็นเชิงเส้นเพื่อประยุกต์ใช้กับกรณีที่แขนกลตามสัมผัสกับพื้นผิวอ่อนนุ่ม (ดังรูปที่ 2.2) โดยทดลองกับวัสดุฟองน้ำเมื่อแขนกลทั้งสองเคลื่อนที่แบบ 2 แกนในแนวราบ (plane motion) Hyoung et al.(2010) กล่าวถึงการประมาณค่าแรงขณะปลายแขนกลตามสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมสำหรับประยุกต์ใช้กับงานด้านศัลยกรรมโดยไม่ต้องมีอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่ปลายแขนกลตาม ระบบแขนกลประกอบด้วยแขนกล Phantom เป็นแขนกลนำและใช้แขนกลตามที่สามารถเคลื่อนที่ได้เพียง 1 แกนเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่สัมผัสกับวัสดุ 2 ชนิดแล้วส่งแรงสะท้อนกลับมายังมือของผู้ดำเนินการ หากใช้วิธีการประมาณค่าจะได้ค่าแรงที่มีลักษณะการสั่นน้อยกว่าการใช้ค่าแรงที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้แรงโดยตรง Hosseini-Suny et al.(2010) ได้เสนอวิธีการควบคุมระบบแขนกลให้มีเสถียรภาพเมื่อมีความล่าช้าของเวลา (time delay) ในการส่งข้อมูลทั้งในส่วนของแขนกลนำและแขนกลตาม โดยได้แนะนำการประมาณค่าเวลาที่เกิดความล่าช้าและใช้การทำนายแรงและตำแหน่งของแขนกลตามเมื่อเกิดการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม



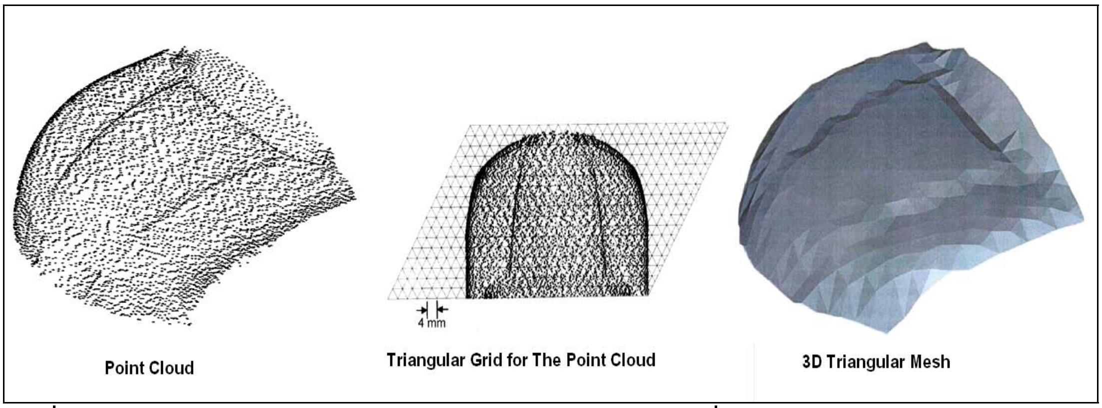
รูปที่ 2.2ระบบแขนกลมีการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟในขณะสัมผัสกับวัสดุฟองน้ำ
(Malysz and Sirouspour, 2009)

2.3. การสร้างเส้นทางเดินดอกกัดและการกัดชิ้นงาน

ข้อมูลจุดบนพื้นผิวของชิ้นงานสามารถหาได้โดยตรงจากเครื่องมือในงานวิศวกรรมย้อนกลับ กระบวนการจำลองพื้นผิวของชิ้นงานโดยอาศัยกลุ่มของข้อมูลจุด (point cloud) ดังกล่าวค่อนข้างซับซ้อนและใช้ระยะเวลาการดำเนินการมากในการที่จะสร้างหรือจำลองพื้นผิว 3 มิติจากข้อมูลจุดดังกล่าว โดยเฉพาะเมื่อมีปริมาณข้อมูลจุดเป็นจำนวนมาก ดังนั้น เพื่อลดขั้นตอนการจำลองพื้นผิวชิ้นงานจึงมีงานวิจัยที่เสนอวิธีการดังต่อไปนี้ Teng et al.(2006) ได้นำเสนอการสร้างเส้นทางเดินของดอกกัดหัวทรงกลมสำหรับการกัดแบบ 3 แกนในบริเวณที่พื้นผิวมีความซับซ้อนให้มีประสิทธิภาพ โดยทำการแบ่งชุดของข้อมูลจุด (data points) ตรงบริเวณที่พื้นผิวมีความสลับซับซ้อนให้เป็นบริเวณที่มีความหนาแน่นสูงและความหนาแน่นต่ำและเลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของดอกกัดให้เหมาะสม (ดังรูปที่ 2.3) โดยเลือกใช้ดอกกัดขนาดใหญ่สำหรับบริเวณที่ข้อมูลจุดมีความหนาแน่นต่ำ และ เลือกดอกกัดขนาดเล็กสำหรับบริเวณที่ข้อมูลจุดมีความหนาแน่นสูงซึ่งเป็นบริเวณที่พื้นผิวชิ้นงานมีความซับซ้อนสูง เพื่อลดความผิดพลาดซึ่งอาจจะเกิดจากการกัดเข้าไปในบริเวณที่ไม่ต้องการ (Gouge-Free) Chui et al.(2008)ได้เสนอวีธีการสร้างเส้นทางเดินของดอกกัดหัวทรงกลมสำหรับการกัดชิ้นงานแบบ 5 แกน โดยอาศัยการสร้างโครงข่ายสามเหลี่ยมในสามมิติ (3D triangular mesh) จากกลุ่มข้อมูลจุด (point cloud) (ดังรูปที่ 2.4) เมื่อกำหนดให้ผิวของดอกกัดสัมผัสกับผิวของโครงข่ายสามเหลี่ยมแล้วจะสามารถหาตำแหน่งกึ่งกลางของปลายหัวดอกกัดชิ้นงานได้ ส่วนทิศทางการเคลื่อนที่ของดอกกัดชิ้นงานหาได้จากการวิเคราะห์การเชื่อมต่อของเส้นโค้งซึ่งสร้างขึ้นจากผิวโครงข่ายสามเหลี่ยมในสามมิติ Yang et al.(2009) ได้เสนอวิธีการสร้างพื้นผิวชิ้นงานที่มีความต่อเนื่องจากข้อมูลกลุ่มจุดโดยตรง โดยอาศัยวิธีการ Moving Least-Squares เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการออกแบบพื้นผิวของผลิตภัณฑ์ หรือ งานสร้างต้นแบบ Makki et al.(2010) ได้แสดงลักษณะของชิ้นงานซึ่งได้จากการกัดโดยใช้เครื่องกัดแบบ 5 แกน โดยใช้การสร้างเส้นทางเดินของดอกกัดจากกลุ่มข้อมูลจุดเมื่อกำหนดให้พื้นที่ที่เกิดการซ้อนทับกันระหว่างพื้นผิว (overlapping area) ให้มีค่าน้อยกว่าวิธีการปกติ



รูปที่ 2.3 ขนาดและตำแหน่งของดอกกัดที่เหมาะสมเมื่อมีการกำหนดบริเวณกลุ่มข้อมูลจุด (Teng et al., 2006)



รูปที่ 2.4 ลักษณะกลุ่มจุดข้อมูลและการสร้างโครงข่ายสามเหลี่ยมในสามมิติ (Chui et al., 2008)

2.4 การวิเคราะห์แรงกัดชิ้นงาน

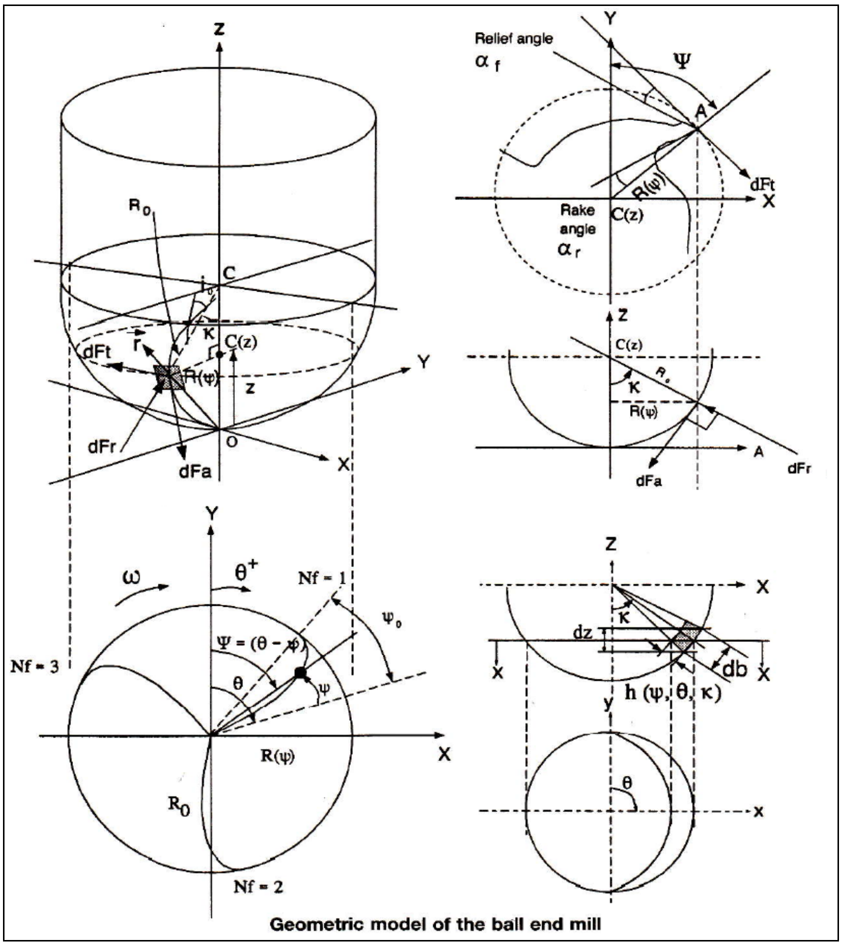
การสร้างชิ้นงานด้วยวิธีการกัดแบบเซาะร่อง (milling) เป็นวิธีการสร้างชิ้นงานแบบการนำเนื้อวัสดุออกจากชิ้นงานเริ่มต้น (material removal process) จนกระทั่งได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างตามต้องการ โดยอาศัยการเคลื่อน (feed) ดอกกัดชิ้นงานที่หมุน (spin) ไปตามเส้นทางเดินที่ได้เตรียมไว้ โดยดอกกัดจะเคลื่อนที่ไปที่ตำแหน่งต่าง ๆของเครื่องกัดชิ้นงานตามคำสั่งของผู้ดำเนินการ

การกัดชิ้นงานที่มีพื้นผิวค่อนข้างซับซ้อนนิยมกัดด้วยเครื่องกัด CNC ชนิด 3 แกน และ 5 แกน โดยนิยมใช้ดอกกัดชิ้นงานชนิดหัวทรงกลม (Ball-End milling tool) โดยเส้นทางเดินของดอกกัดอาจได้มาจากการใช้โปรแกรมทางด้าน CAM (Computer Aided Manufacturing) โดยที่โปรแกรม CAM จะแปลงเส้นทางด้านของหัวกัด (tool path) ให้อยู่ในรูปของโปรแกรมรหัสจี (G-code) โปรแกรมรหัสจีที่สร้างจากโปรแกรม CAM นี้จะมีลักษณะเป็นชุดคำสั่งมาตรฐานที่เครื่อง CNC ที่มีขายอยู่ในท้องตลาดสามารถเข้าใจได้ โดยชุดควบคุมเครื่อง CNC จะทำการแปลรหัสจีให้เป็นคำสั่งในการควบคุมการทำงานของเครื่อง CNC พฤติกรรมหรือลักษณะการทำงานของดอกกัด (cutting conditions) ในขณะกัดชิ้นงานส่งผลถึงคุณภาพของผิวชิ้นงานและระยะเวลาที่ต้องใช้ในการดำเนินการ จึงได้มีการศึกษาผลของพารามิเตอร์ที่สำคัญในการกัดชิ้นงาน เช่น ความเร็วการหมุนของดอกกัด (spindle speed) ความเร็วการเคลื่อนที่ของดอกกัด (feed rate) และ ความลึกในการกัดของแต่ละทางเดิน (depth of cut) ในการกัดชิ้นงาน การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของเงื่อนไขในการกัดเพื่อต้องการให้การกัดชิ้นงานใช้เวลาน้อย ถ้าไม่ระวังอาจจะก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนแบบแชตเตอร์ (chattering vibration) คือหัวกัดจะสั่นที่ความถี่สูงทำให้มีผลต่อคุณภาพของผิวชิ้นงานที่ได้จากการกัด นอกจากนี้เมื่อทำการศึกษาแรงกัดที่เกิดขึ้นในขณะที่ดอกกัดเคลื่อนที่กัดชิ้นงาน จะทำให้ทราบถึงข้อมูลการสึกหรอ หรือการสั่นสะเทือนแบบแชตเตอร์ (chatter) ของดอกกัดที่จะส่งผลต่อคุณภาพพื้นผิวของชิ้นงาน Altintas and Lee(1998)ได้แสดงการวิเคราะห์แรงกัดด้วยได้สร้างแบบจำลองแรงของการกัดที่

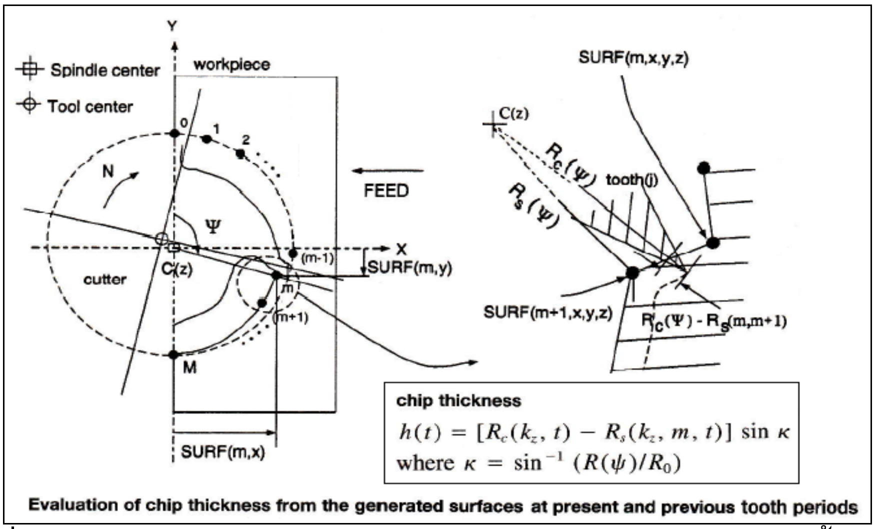
เกิดขึ้นกับการใช้ดอกกัดชนิดหัวทรงกลม (ดังแสดงในรูปที่ 2.5-2.7) และทำการทดลองกัดชิ้นงานที่เป็นวัสดุ Titanium Alloy (Ti6Al4V) ด้วยดอกกัดหัวทรงกลมแบบ 2 ฟันเป็นร่องเส้นตรงเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองแรงกัด พบว่าสามารถทำนายแรงกัดในกรณีที่ดอกกัดเกิดการสั่นซัตเตอร์ และไม่เกิดการสั่นซัตเตอร์ได้ ทำให้แบบจำลองทางกายภาพของดอกกัดดังกล่าวได้รับการยอมรับและมีการอ้างอิงจากงานวิจัยต่าง ๆ ต่อมา Lazoglu(2003) ได้เสนอวิธีการหาแบบจำลองแรงกัดชิ้นงานของดอกกัดหัวทรงกลม 4 ฟัน โดยพิจารณาจากข้อมูลตำแหน่งของดอกกัด พื้นผิวชิ้นงาน และบริเวณผิวที่ดอกกัดสัมผัสชิ้นงาน ทำการทดสอบวัดแรงกัดชิ้นงานที่เป็นวัสดุ Titanium Alloy (Ti6Al4V) เปรียบเทียบกับการคำนวณด้วยแบบจำลองเมื่อดอกกัดหมุนครบ 1 รอบ โดยแสดงให้เห็นว่าแรงกัดชิ้นงานจริงมีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกับแบบจำลอง Fussell et al.(2003) ได้จำลองแรงกัดและแสดงแบบจำลองลักษณะชิ้นงานที่ได้จากการกัดเปรียบเทียบกับการทดลองกัดชิ้นงานด้วยเครื่องกัดชนิด 5 แกน โดยทดลองกัดชิ้นงานที่เป็นวัสดุสแตนเลส (stainless steel) และ วัสดุอะลูมิเนียม 6061 Aluminum ด้วยดอกกัดแบบหัวทรงกลม โดยใช้แบบจำลองการประมาณการเคลื่อนที่ของดอกกัดแบบการกัด 3 แกน แบ่งการพิจารณาแรงกัดบริเวณที่ดอกกัดสัมผัสกับชิ้นงานเป็นช่วง ๆตามแนวแกนของดอกกัด (Z-buffer Spacing) แรงกัดที่จำลองได้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการกัดชิ้นงาน โดยแรงกัดที่จำลองได้ควรจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้หากสามารถตรวจสอบการสึกหรอของดอกกัดได้อย่างแม่นยำมากขึ้น Lamikiz et al.(2004) ได้อาศัยแบบจำลองแรงกัดชิ้นงานพื้นฐานของ Y. Altintas เพื่อประมาณแรงกัดของวัสดุอะลูมิเนียม Al7075-T6 และ วัสดุเหล็ก (AISI H13 52 HRC) เมื่อดอกกัดชิ้นงานมีการเคลื่อนที่ในทิศขึ้นหรือลงตามแนวลาดเอียงของชิ้นงาน โดยแยกพิจารณาส่วนของแรงกัดที่เกิดขึ้นจากคมมีดของดอกกัด (cutting edge) และแรงกัดที่เกิดขึ้นจากการตัดเฉือนเนื้อวัสดุ (chip thickness) ในบริเวณที่วิเคราะห์พบว่าดอกกัดมีการสัมผัสกับชิ้นงาน Milfelner et al.(2005) ได้ทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกัดชิ้นงานที่เป็นวัสดุ 16MnCr5 กับ สภาวะในการกัดด้วยดอกกัดแบบหัวทรงกลม เมื่อทำการกัดชิ้นงานด้วยเครื่อง CNC และวัดค่าแรงกัดด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้แรง (Force sensor) โดยกำหนดสภาวะในการกัดประกอบด้วยความลึกการกัดตามแนวรัศมี ความลึกการกัดตามแนวแกน ความเร็วการเคลื่อนดอกกัด และ อัตราการป้อนคมกัด งานวิจัยได้เสนอแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดจากผลการทดลองปรับสภาวะในการกัดจำนวน 45 ครั้ง Fontaine et al.(2006) ได้นำเสนอวิธีการทำนายแรงกัดชิ้นงานโดยใช้แบบจำลอง Thermo mechanic โดยพิจารณาค่าความเค้นเฉือน(Shear stress) และค่าความเครียดเฉือน (Shear strain) ในขณะเกิดการตัดเฉือน (Oblique cutting) แบบจำลองสามารถทำนายแรงกัดได้ดีเมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองวัดแรงกัดชิ้นงานจากเครื่องกัด CNC แบบ 3 แกน โดยเฉพาะเมื่อได้พิจารณาผลของแบบจำลองการสึกหรอของดอกกัด Salami et al.(2007) ได้เสนอการปรับปรุงอัตราการเคลื่อนที่ (feed-rate) ของดอกกัด

หัวทรงกลมแบบใช้ใบมีดตัด 1 ฟัน ให้มีความเหมาะสมเพื่อลดระยะเวลาในการดำเนินการกัดชิ้นงานที่ใช้วัสดุ CK45 Carbon Steel โดยอาศัยข้อมูลแรงกัดชิ้นงานซึ่งวัดได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้แรง Kistler รุ่น 9255A Gonzalo et al.(2009) ได้เสนอวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ในแบบจำลองแรงกัดของ Y. Altintas ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยอาศัยค่าแรงกัดที่วัดได้จากการทดลองกัดชิ้นงานโดยใช้วัสดุ AISI 4340 Steel เพื่อเป็นทางเลือกในการประมาณค่าแรงกัดเมื่อชิ้นงานมีรูปร่างซับซ้อน Ozturk et al.(2009) ได้ศึกษาผลกระทบจากทิศทางของดอกกัดหัวทรงกลม (Lead angle and Tilt angle) ที่มีต่อแรงกัดและเสถียรภาพในขณะกัดชิ้นงานซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของพื้นผิวชิ้นงานเมื่อทำการกัดชิ้นงานแบบ 5 แกน โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้สามารถเลือกสภาวะในการกัดชิ้นงานให้เหมาะสมต่อคุณภาพของผิวชิ้นงานและระยะเวลาการกัดได้ดียิ่งขึ้น Budak et al.(2009) ได้จำลองการกัดชิ้นงานแบบ 5 แกน โดยใช้ข้อมูลตำแหน่งของดอกกัดชิ้นงาน (cutting location data) เพื่อหาค่าแรงกัดเมื่อดอกกัดเปลี่ยนแปลงทิศทาง (Lead angle and Tilt angle) และทำการพิจารณาเสถียรภาพในขณะกัดชิ้นงาน Zeroudi et al.(2010) ได้แสดงตำแหน่งของดอกกัดชิ้นงานหัวทรงกลม (cutter location) และตำแหน่งที่ดอกกัดสัมผัสกับผิวชิ้นงาน (cutter contact) เมื่อดอกกัดเคลื่อนที่ตามข้อมูลเส้นทางเดินดอกกัดซึ่งได้มาจากโปรแกรมด้าน CAM งานวิจัยได้เปรียบเทียบผลการทำนายแรงกัดกับการวัดแรงกัดชิ้นงานจริงโดยใช้วัสดุ 42CrMo4 แนวการกัดเป็นร่องในลักษณะคลื่น (wave like) โดยทำการกัดชิ้นงานด้วยเครื่อง CNC แบบ 3 แกน Liang et al.(2010) ได้ทำนายแรงกัดชิ้นงานของดอกกัดหัวทรงกลม เมื่อดอกกัดมีการเคลื่อนที่แนวเฉียงเป็นมุมต่าง ๆ โดยการวิเคราะห์พื้นที่สัมผัสกับผิวชิ้นงาน แยกออกเป็นส่วนย่อย ๆ ทางกายภาพของดอกกัด และ ทำการทดลองเปรียบเทียบค่าแรงกัดชิ้นงานที่ใช้วัสดุเหล็ก 1045 Steel แสดงแรงกัดที่เกิดขึ้นในทิศทางของแกน X แกน Y และ แกน Z

แบบจำลองแรงกัดชิ้นงานของดอกกัดหัวทรงกลมอ้างอิงจาก Altintas and Lee (1998) แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2.5 แบบจำลองทางกายภาพของดอกกัดหัวทรงกลม (Altintas and Lee, 1998)



รูปที่ 2.6 ภาพจำลองความหนาของเศษ (chip thickness) สำหรับการกัดชิ้นงาน (Altintas and Lee,1998)

Modeling of Cutting Forces.

$$dF_t(\theta, z) = K_{te}dS + K_{tc}h(\theta, \psi, \kappa)db$$
$$dF_r(\theta, z) = K_{re}dS + K_{rc}h(\theta, \psi, \kappa)db$$
$$dF_a(\theta, z) = K_{ae}dS + K_{ac}h(\theta, \psi, \kappa)db$$

Ball End Mill Geometry

$$dS = \|d\mathbf{r}\| = \sqrt{(R'(\psi))^2 + R^2(\psi) + R_0^2 \cot^2 i_0}\, d\psi$$
$$R'(\psi) = \frac{-R_0(\psi \cot i_0 - 1)\cot i_0}{\sqrt{1 - (\psi \cot i_0 - 1)^2}}$$
$$db = dz/\sin\kappa$$
$$h(t) = [R_c(k_z, t) - R_s(k_z, m, t)]\sin\kappa$$

$$\begin{bmatrix} dF_x \\ dF_y \\ dF_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\kappa)\sin(\Psi) & -\cos(\Psi) & -\cos(\kappa)\sin(\Psi) \\ -\sin(\kappa)\cos(\Psi) & \sin(\Psi) & -\cos(\kappa)\cos(\Psi) \\ \cos(\kappa) & 0 & -\sin(\kappa) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} dF_r \\ dF_t \\ dF_a \end{bmatrix}$$

Nomenclature

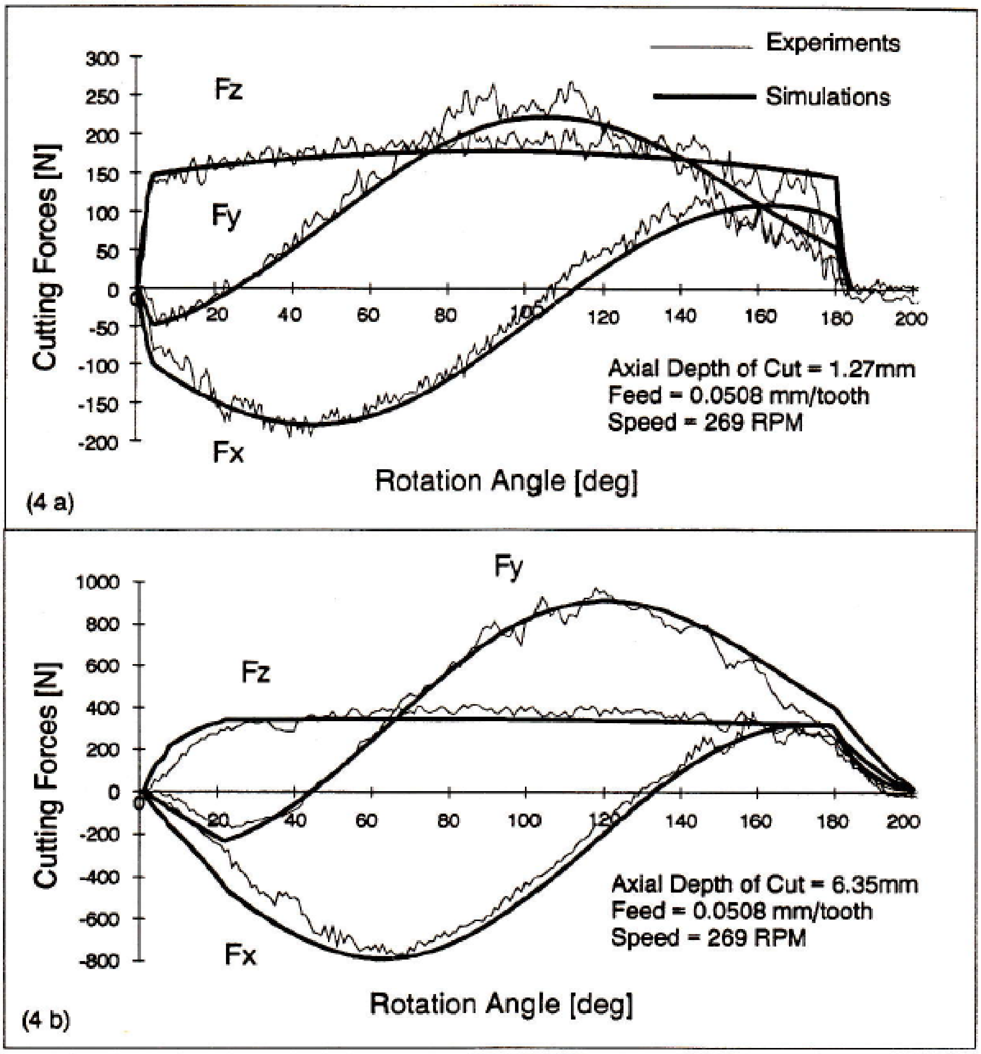
a = axial depth of cut
db = differential cutting edge length
dz = differential height in axial direction
dF_{tj}, dF_{rj}, dF_{aj} = differential cutting forces in tangential, radial, and axial directions for tooth j
f = feed speed [mm/sec]
h = uncut chip thickness normal to cutting edge in milling
i_0 = helix angle at ball shaped flute and shank meeting point
$i(\psi)$ = local helix angle or angle of obliquity on the flute
x, y, z = coordinates of a point on the cutting edge
x_s, y_s, z_s = coordinates of a point on the cut surface
$x'(t), y'(t)$ = displacements of the cutter center due to structural vibrations at time t
F_{xj}, F_{yj}, F_{zj} = milling forces in Cartesian coordinates on flute j
H_x, H_y [m/N] = Direct transfer functions in x and y directions.
K_{tc}, K_{rc}, K_{ac} = cutting force coefficients [force/area]
K_{te}, K_{re}, K_{ae} = edge force coefficients [force/length]
K_z = number of axial elements
N_f = number of flutes
N = spindle speed
R_0 = ball radius
$R(\psi)$ = tool radius in x-y plane at a point defined by ψ
R_s, R_c = Radial distance between the stationary spindle center and points on the cut surface and cutting edge, respectively
$\psi(z)$ = lag angle between the tip ($z = 0$) and a point on the helical flute at height z
Ψ = immersion angle in global coordinates, measured from y-axis (CW)
ψ_0 = maximum lag angle between the tip ($z = 0$) and uppermost cutting point ($z = a$)
θ = tool rotation angle, measured from y-axis (CW)
ϕ_p = pitch angle of the cutter ($=2\pi/N_f$)

รูปที่ 2.7 แบบจำลองแรงกัดชิ้นงานในสภาวะสถิต (ดอกกัดไม่มีการสั่น)

(Altintas and Lee, 1998)

จากรูปที่ 2.5 และ 2.6 เราพิจารณาแบ่งส่วนของดอกกัดตามแนวแกน Z จะได้ลักษณะหน้าตัดของคมตัด 1 คมตัดบนระนาบ XY โดยได้แสดงทิศทางของแรงกัดที่เกิดขึ้นจากส่วนย่อยๆของคมตัดคือ dFt, dFr และ dFa ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ทำให้สามารถจำลองแรงกัดได้จากแบบจำลองในสภาวะสถิต (ดอกกัดไม่มีการสั่น) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 แรงกัดประกอบด้วยส่วนแรงกัดเนื่องจากขอบของคมกัด (edge force) แสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์ Kte, Kre และ Kae และ ส่วนแรงกัดเนื่องจากการตัด (cutting force) แสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์ Ktc, Krc และ Kac

สามารถทำนายแรงกัดเปรียบเทียบกับผลการทดลองกัดชิ้นงานวัสดุ Titanium alloy (Ti6Al4V) โดยการกัดเป็นเส้นตรง (Slot cutting test) เมื่อดอกกัดชิ้นงานแบบ 1 ฟัน มีการหมุนเป็นมุมต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งแสดงผลของแรงกัดที่ได้จากการวัดและผลที่ได้จากการจำลอง จะเห็นว่าแบบจำลองแรงกัดชิ้นงานจะมีผลใกล้เคียงกับผลการทดลอง



Measured and predicted cutting forces for slot cutting tests. Cutting conditions: rake angle = 0 deg, i_0 = 30 deg, N = 269 rev/min, feed rate = 0.0508 mm/rev/tooth, N_f = 1 flute, R_0 = 9.525 mm. Workpiece material is Titanium alloy Ti6Al4V. See Appendix B for cutting coefficients.

รูปที่ 2.8 ลักษณะของแรงกัดที่เกิดขึ้นจากมุมการหมุนของดอกกัด (Altintas and Lee, 1998)

เมื่อทำการปรับความเร็วรอบดอกกัดและความลึกในการกัดเพื่อหาค่าที่ทำให้ดอกกัดเกิดการสั่นแบบแชตเตอร์ (chatter) ในสภาวะพลวัตหรือสภาวะที่ดอกกัดมีการเคลื่อนที่ รูปที่ 2.9 แสดงผลลัพธ์เปรียบเทียบระหว่างแรงที่ได้จากการจำลองและแรงที่ได้จากการวัดเมื่อมีการปรับความเร็วรอบ (spindle speed) ของดอกกัดและความลึกของการกัด ซึ่งจะพบว่าในกรณีที่ดอกกัดหมุนด้วยความเร็วรอบ 6,000 RPM และมีความลึกในการกัด 1.5 mm จะเกิดการสั่นแชตเตอร์ โดยสังเกตได้จากผลลัพธ์ของแรงกัด (Resultant cutting force) มีค่าสูงเป็น 2 เท่าของกรณีที่ดอกกัดหมุนด้วยความเร็วรอบ 5,000 RPM แม้ว่าค่าความลึกในการกัด (depth of cut) และอัตราการกัดต่อจำนวนฟัน (feed per tooth) ของทั้งสอง

กรณี (ความเร็วรอบ5,000 RPM และ 6,000 RPM) จะมีค่าเท่ากัน ผลลัพธ์ของแรงกัดจากการทดลองและการจำลองในระยะเวลา 0.15 วินาทีมีความสอดคล้องกัน

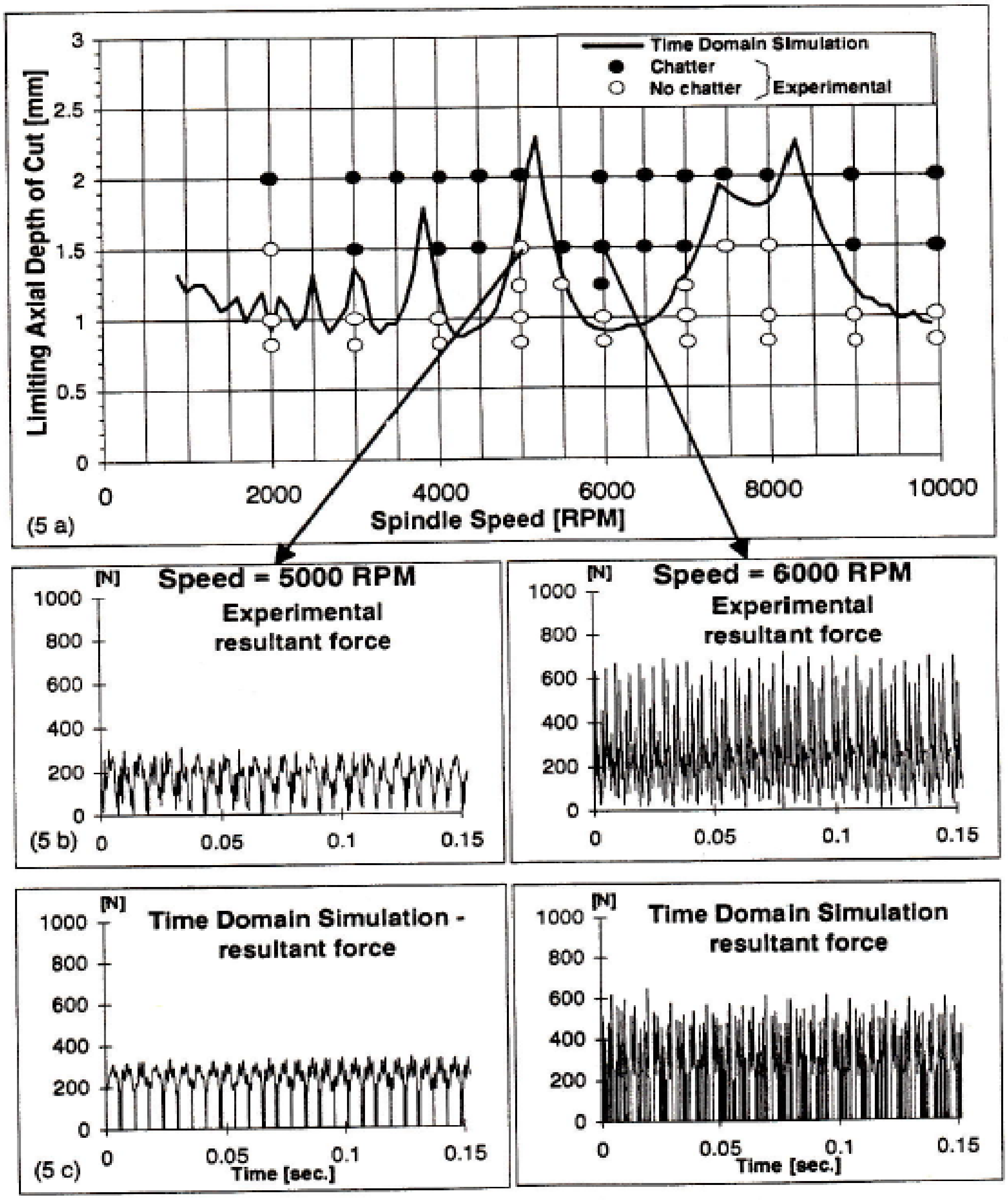


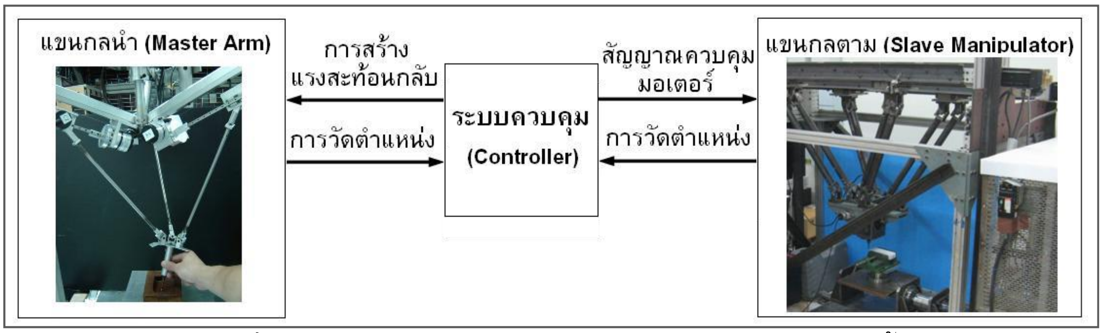
Fig. 5 (*a*) Simulated and measured chatter stability lobes for a two fluted ball end mill, (*b*) measured resultant cutting forces, (c) simulated resultant cutting forces. Cutter radius R_0 = 12.7 mm with zero helix and rake angles, 2 fluted carbide ball end mill. Feed rate = mm/rev/tooth, dry slot milling and the axial depth of cut was *a* = 1.5 mm for Figs. 5*b* to 5*c*. The workpiece material is Titanium alloy Ti6Al4V.

รูปที่ 2.9 การทดลองและการจำลองผลลัพธ์ของแรงกัดเพื่อแสดงค่าที่ทำให้ดอกกัดเกิดการสั่นแชตเตอร์(chatter) (Altintas and Lee, 1998)

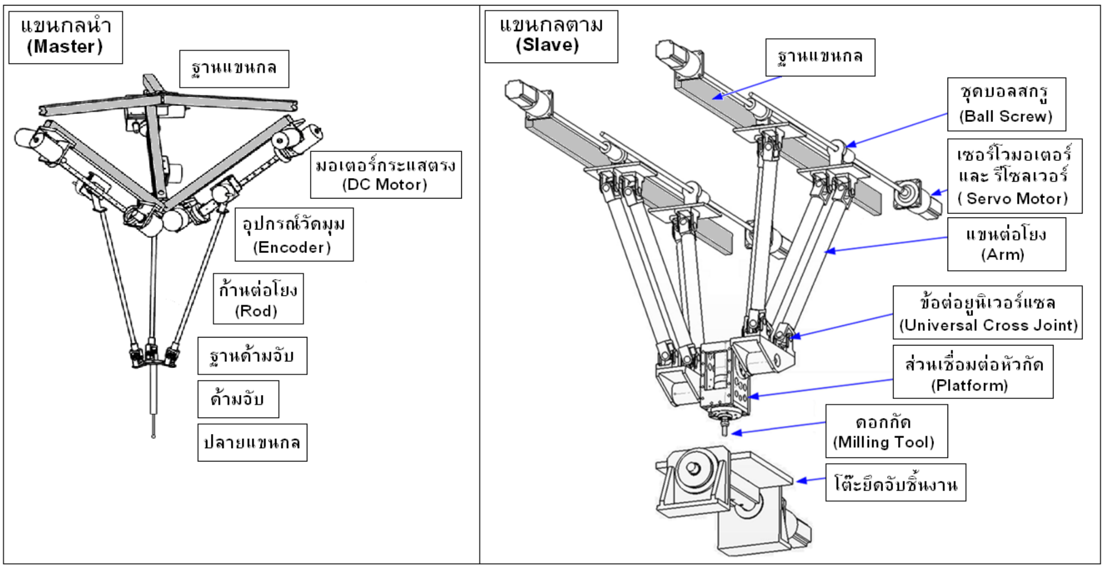
บทที่ 3

การออกแบบระบบควบคุมที่ใช้กับการควบคุมการทำงานแบบแขนกลนำและแขนกลตามโดยมีแรงสะท้อนกลับ

ระบบแขนกลที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยแขนกลที่มีโครงสร้างแบบขนาน (Parallel Mechanism) ทั้งในส่วนของแขนกลนำ (Master Manipulator Arm) และแขนกลตาม (Slave Manipulator Arm) โดยมีระบบควบคุม (Control System) ทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลตาม เมื่อแขนกลตามมีการกระทำกับสิ่งแวดล้อมก่อให้เกิดการผิดพลาดของตำแหน่ง ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่แขนกลตามนี้จะถูกนำมาใช้ในการแสดงแรงสะท้อนกลับ (Force Reflection) ที่แขนกลนำ การทำงานของระบบแขนกลดังกล่าวเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างแขนกลนำและแขนกลตามเรียกว่าระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟโดยมีแรงสะท้อนกลับ (Master-Slave Operating with force reflect) รูปที่ 3.1 แสดงระบบการทำงานแบบแขนกลนำ-ตาม โดยมีแรงสะท้อนกลับที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ผู้ควบคุมการทำงานจะทำการควบคุมแขนกลนำที่อยู่ทางด้านซ้ายมือในรูป โดยตำแหน่งปลายแขนของแขนกลนำจะถูกแปลงเป็นค่าตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนแขนกลตามเพื่อให้ได้ตำแหน่งของปลายแขนของแขนกลตามที่มีรูปแบบของตำแหน่ง (Tip Position) และการเรียงตัว (Tip Orientation) ในลักษณะเดียวกับแขนกลนำโดยใช้การวิเคราะห์ทางด้านคิเนเมติกมาช่วยในการแปลงค่าดังกล่าวซึ่งจะกล่าวต่อไป เมื่อแขนกลตามทางด้านขวามือของรูปที่ 3.1 มีการกระทบหรือกระทำกับสิ่งแวดล้อม เช่นเมื่อแขนกลตามติดตั้งหัวกัดที่ปลายแขน ในขณะที่กัดชิ้นงานก็จะมีแรงกระทำที่ปลายหัวกัด เราสามารถวัดแรงกัดนี้ได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้ที่ตัวจับชิ้นงาน แรงกัดที่วัดได้นี้จะถูกแปลงเป็นตัวแปรที่ใช้ในการสร้างแรงสะท้อนกลับที่แขนกลนำ โดยที่แขนกลนำก็จะมีมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนแขนกลเช่นกัน แรงสะท้อนกลับนี้จะเป็นแรงที่กระทำกับมือของผู้ดำเนินการ ทำให้มีความรู้สึกหรือรับรู้แรงเสมือนที่เกิดขึ้นที่ปลายแขนของแขนกลตาม



รูปที่ 3.1 ระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟในงานวิจัยนี้



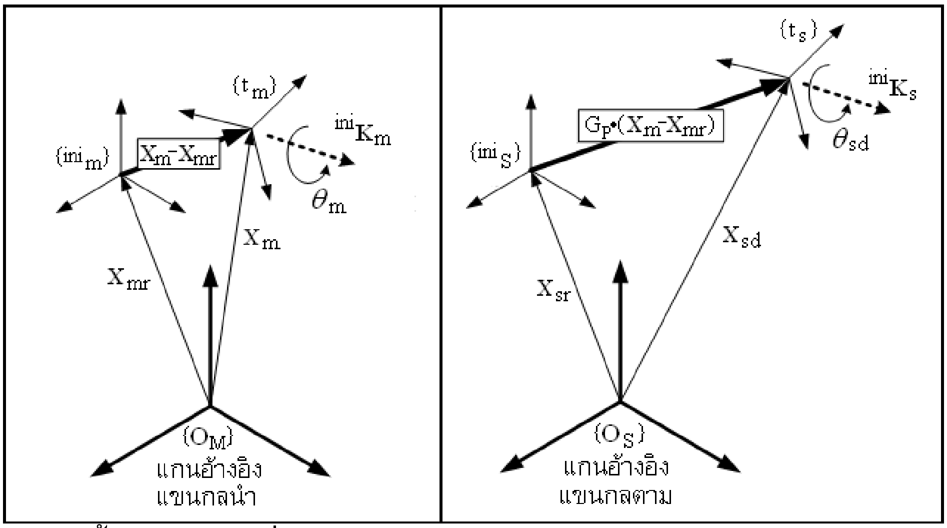
รูปที่ 3.2 ส่วนประกอบหลักของแขนกลนำและแขนกลตามในงานวิจัยนี้

ส่วนประกอบหลักของแขนกลนำและแขนกลตามในงานวิจัยนี้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 รายละเอียดของแขนกลนำและตามสามารถศึกษาได้จากงานวิจัย (Sangveraphunsiri and Ngamvilaikorn, 2005) และ (Sangveraphunsiri and Chooprasird, 2011) โดยที่แขนกลนำประกอบด้วยด้ามจับสำหรับให้ผู้ดำเนินการสามารถเคลื่อนปลายแขนกลนำไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ได้ภายในบริเวณการทำงาน (working area) โดยส่งผ่านการเคลื่อนที่ของด้ามจับไปที่ก้านต่อโยงโดยมีอุปกรณ์วัดมุมติดตั้งอยู่ระหว่างข้อต่อที่เชื่อมโยงก้านต่อโยงดังกล่าว อุปกรณ์วัดมุมดังกล่าวมีไว้เพื่อให้สามารถตรวจวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลนำได้ นอกจากนั้นแขนกลนำยังติดตั้งมอเตอร์กระแสตรงที่ฐานของแขนกลไว้ทั้งหมด 6 ตัว เพื่อสร้างแรงสะท้อนกลับที่กระทำกับมือของผู้ดำเนินการในลักษณะต้านการเคลื่อนที่ ส่วนแขนกลตามประกอบด้วยเซอร์โวมอเตอร์ทั้งหมด 4 ตัวที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนชุดบอลสกรู เพื่อส่งผ่านการเคลื่อนที่ไปยังแขนต่อโยง ส่วนเชื่อมต่อหัวกัด และ ดอกกัดชิ้นงาน ตามตำแหน่งและทิศทางที่กำหนดให้ ขณะเดียวกันโต๊ะจับชิ้นงานก็สามารถหมุนได้อีก 1 ทิศทาง ทำให้การทำงานของแขนกลตามมีลักษณะเป็นแบบ 5 องศาอิสระ (five degrees of freedom) เนื่องจากระบบควบคุมที่พัฒนาให้บทนี้ จะถูกติดตั้งอยู่กับเครื่องดิจิตอลคอมพิวเตอร์ที่ทำงานภายใต้ระบบปฏิบัติการ Windows 7 พร้อมทั้งติดตั้งแผงวงจรที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณ อนาลอคเป็นสัญญาณดิจิตอล และในทางกลับกันก็สามารถแปลงสัญญาณดิจิตอลให้เป็นสัญญาณอนาลอค โดยมีความละเอียดของการแปลงข้อมูลอยู่ที่ 14-bit นอกจากนั้นแผงวงจรดังกล่าวยังประกอบด้วยส่วนที่สามารถรับสัญญาณตำแหน่งจากอุปกรณ์วัดตำแหน่งแบบดิจิตอลเอ็นโค๊ตเดอร์ (digital encoder) คือจะมีทั้งในส่วนที่เป็น เอ็นโค๊ตเดอร์ (encoder) และดีโค๊ตเดอร์ (decoder) ที่สามารถวัดมุมหมุนหรือระยะทางของการเคลื่อนที่ได้แม่นยำ ส่วนคาบเวลาในการสุ่มข้อมูล (sampling period)

อยู่ที่ 0.001 วินาทีหรือความเร็วในการสุ่มจะอยู่ที่ 1000 รอบ/วินาที ในความเป็นจริงแล้วแผงวงจรที่แปลงสัญญาณดังกล่าวนี้สามารถกำหนดความเร็วในการสุ่มข้อมูลได้สูงกว่านี้มาก แต่เนื่องจากโปรแกรมดังกล่าวนี้ทำงานภายใต้ระบบปฏิบัติการ Windows 7 ซึ่งมีส่วนทำงานที่ใช้เวลามากในช่วงหัว (overhead activities) ทุกครั้งที่เรียกฟังก์ชันการทำงานที่ต้องมีการส่งสัญญาณเข้าและออกจากระบบคอมพิวเตอร์จะต้องการกิจกรรม (activities) มาก ทำให้เราไม่สามารถกำหนดค่าความเร็วในการสุ่มข้อมูลได้สูงมาก ในระหว่างคาบเวลาของการสุ่มเราจะสมมติว่าระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลง ทำให้อาจจะเกิดการผิดพลาดในการสมมตินี้ด้วย ซึ่งทำให้เราจำเป็นต้องจำกัดช่วงความถี่ของการทำงาน (bandwidth) หรือพูดอีกอย่างก็คือกำหนดความเร็วของการทำงานหรือการเคลื่อนที่ของแขนกล ซึ่งในงานที่ใช้นี้ เป็นงานกัดชิ้นงานหรือเป็นงานที่มีการกระทำกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งโดยปกติก็จะมีการทำงานค่อนข้างช้าอยู่แล้ว ดังนั้นปัญหาหรือผลกระทบดังกล่าวจึงมีไม่มาก

3.1 การควบคุมตำแหน่งปลายแขนของแขนกลตาม

การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลตามควรเป็นไปในทิศทางเดียวกับการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลนำเมื่อพิจารณาที่คาบเวลาของการสุ่มข้อมูล กรณีที่แขนกลทั้งสองมีโครงสร้างแตกต่างกัน (dissimilar structure) สามารถหาตำแหน่งและทิศทางสำหรับการเคลื่อนปลายแขนกลตามได้เมื่อทราบตำแหน่งและทิศทางเริ่มต้นของแขนกลทั้งสอง โดยรายละเอียดสามารถศึกษาได้จาก (Sangveraphunsiri and Ngamvilaikorn, 2005) เพื่อให้เกิดความสะดวกในการวิเคราะห์จึงกำหนดให้แกนอ้างอิงของแขนกลนำและแกนอ้างอิงของแขนกลตามตั้งอยู่ในทิศทางเดียวกันซึ่งสามารถแสดงภาพการตั้งแกนอ้างอิงเพื่อใช้การวิเคราะห์ตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลตามได้ดังรูปที่ 3.3 เมื่อทราบตำแหน่งและทิศทางเริ่มต้น (home position and orientation) ของแขนกลทั้งสองแล้ว เราสามารถหาตำแหน่งและทิศทางสำหรับปลายแขนกลตามที่เวลาใดๆได้ ดังจะแสดงวิธีการในขั้นตอนถัดไป



รูปที่ 3.3 การตั้งแกนอ้างอิงเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลตาม

<u>วิธีการคำนวณตำแหน่งปลายแขนกลตาม</u>

จากรูปที่ 3.3 ตำแหน่งปลายแขนกลตามสามารถหาได้จากสมการ

$$\mathbf{X}_{sd} = G_P \bullet (\mathbf{X}_m - \mathbf{X}_{mr}) + \mathbf{X}_{sr} \tag{3.1}$$

เมื่อกำหนดให้

$\mathbf{X}_m$ คือ ตำแหน่งปลายแขนกลนำที่เวลาใดๆ

$\mathbf{X}_{mr}$ คือ ตำแหน่งเริ่มต้นของปลายแขนกลนำ

$\mathbf{X}_{sr}$ คือ ตำแหน่งเริ่มต้นของปลายแขนกลตาม

G_P คือ ค่าเกนที่ใช้ปรับอัตราส่วนของตำแหน่งระหว่างแขนกลนำและแขนกลตาม (ค่าอัตราส่วนปกติ G_P = 1.0)

<u>วิธีการคำนวณทิศทางหรือการเรียงตัว (orientation) ที่ปลายแขนกลตาม</u>

เมตริกซ์การหมุนที่ตำแหน่งเริ่มต้นของปลายแขนกลนำสามารถหาได้จากสมการ

$$^{ini}\mathbf{R}_m = \left({}^{0}\mathbf{R}_{mr} \right)^T \, {}^{0}\mathbf{R}_m \tag{3.2}$$

โดยที่ $^{ini}\mathbf{R}_m$ คือเมตริกซ์การหมุนของเฟรม m (master) เมื่อเทียบกับเฟรม ini (initial) ซึ่งสามารถเขียนในรูปของเมตริกซ์ได้ ดังนี้คือ

$$^{ini}\mathbf{R}_m = \begin{bmatrix} rm_{11} & rm_{12} & rm_{13} \\ rm_{21} & rm_{22} & rm_{23} \\ rm_{31} & rm_{32} & rm_{33} \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

เราสามารถแปลงเมตริกซ์การหมุนของสมการที่ (3.3) ให้อยู่ในรูปของมุมการหมุนรอบแนวเวกตอร์ใดๆ ของแขนกลนำได้จากความสัมพันธ์ (Sciavicco and Siciliano, 1996) ดังนี้

$$\theta_m = \cos^{-1}\left(\frac{rm_{11} + rm_{22} + rm_{33} - 1}{2} \right) \tag{3.4}$$

โดยที่ θ_m คือค่าขนาดของมุมที่หมุน

แนวเวกเตอร์การหมุนที่แขนกลนำ สามารถหาได้จากสมการ ดังนี้

$$ {}^{ini}\mathbf{K}_m = \frac{1}{2\sin\theta_m}\begin{bmatrix} rm_{32} - rm_{23} \\ rm_{13} - rm_{31} \\ rm_{21} - rm_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_z \end{bmatrix} \tag{3.5} $$

จากแนวเวกเตอร์ของแขนกลนำ ${}^{ini}K_m$ ที่หาได้จากสมการ (3.5) สามารถแปลงให้เป็นแนวเวกเตอร์บนแขนกลตาม ได้คือ

$$ {}^{ini}\mathbf{K}_s = {}^{ini}_{0}\mathbf{R}_{sr}\,{}^{0}_{ini}\mathbf{R}_m\,{}^{ini}\mathbf{K}_m \tag{3.6} $$

เมื่อกำหนดให้

$$ k_x = \left(\frac{rm_{32} - rm_{23}}{2\sin\theta_m}\right),\quad k_y = \left(\frac{rm_{13} - rm_{31}}{2\sin\theta_m}\right),\quad k_z = \left(\frac{rm_{21} - rm_{12}}{2\sin\theta_m}\right) $$

จากสมการ (3.4) – (3.6) เราสามารถเขียนเมตริกซ์ของการหมุนของแขนกลตามเทียบกับเฟรมเริ่มต้นหรือแกนอ้างอิงได้ คือ

$$ {}^{ini}\mathbf{R}_{sd} = \begin{bmatrix} k_xk_x(1-\cos\theta_{sd})+\cos\theta_{sd} & k_xk_y(1-\cos\theta_{sd})-k_z\sin\theta_{sd} & k_xk_z(1-\cos\theta_{sd})+k_y\sin\theta_{sd} \\ k_xk_y(1-\cos\theta_{sd})+k_z\sin\theta_{sd} & k_yk_y(1-\cos\theta_{sd})+\cos\theta_{sd} & k_yk_z(1-\cos\theta_{sd})-k_x\sin\theta_{sd} \\ k_xk_z(1-\cos\theta_{sd})-k_y\sin\theta_{sd} & k_yk_z(1-\cos\theta_{sd})+k_x\sin\theta_{sd} & k_zk_z(1-\cos\theta_{sd})+\cos\theta_{sd} \end{bmatrix} \tag{3.7} $$

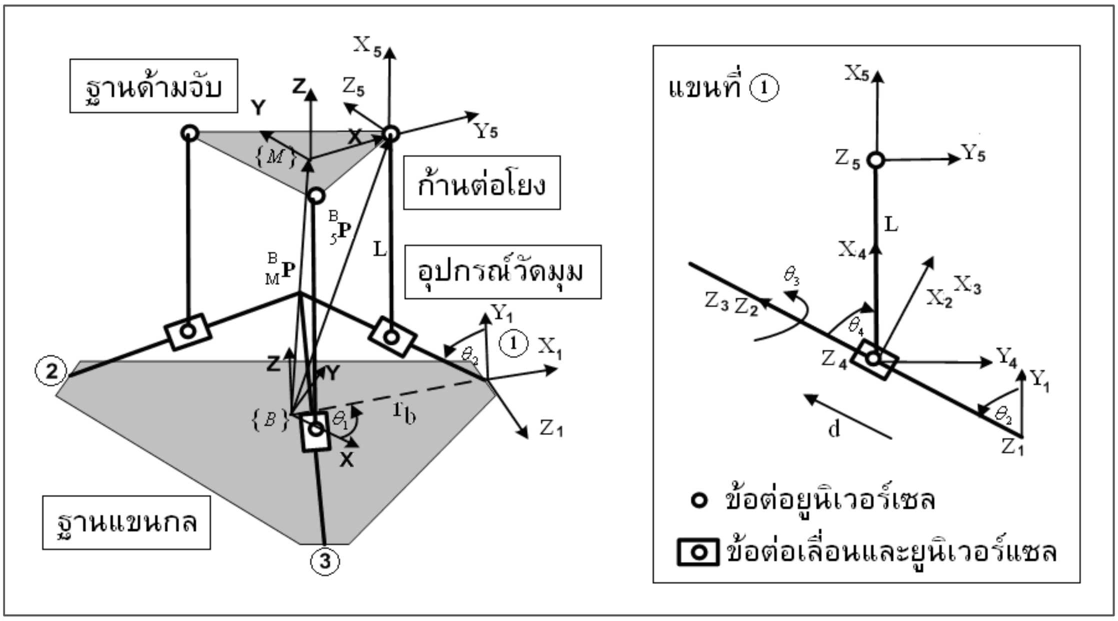
เมตริกซ์การหมุนที่ปลายแขนกลตามที่ได้จากสมการ (3.7) สามารถนำมาเขียนเทียบกับแกนอ้างอิงได้คือ

$$ {}^{0}\mathbf{R}_{sd} = {}^{0}\mathbf{R}_{sr}\,{}^{ini}\mathbf{R}_{sd} \tag{3.8} $$

เมื่อสามารถหาตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการให้แขนกลตามเคลื่อนที่ไปในแต่ละคาบเวลา ($\mathbf{X}_{sd}$ และ ${}^{0}\mathbf{R}_{sd}$) ได้จากการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลนำดังกล่าวแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลตามไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ในกรณีที่ปลายแขนกลตามยังไม่มีการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม (เช่น ชิ้นงานหรือสิ่งกีดขวางอื่นๆ) สามารถทำการควบคุมเฉพาะตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลตามได้โดยไม่ต้องพิจารณาการควบคุมแรง

ตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลนำหาได้จากการคำนวณด้วยสมการฟอร์เวิร์ดคิเนเมติค (forward kinematic) ของแขนกลนำ เมื่อทราบตำแหน่งข้อต่อต่าง ๆของโครงสร้างแขนกลนำดังแสดงในรูปที่ 3.4 ในทำนองเดียวกันตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลตามสามารถหาได้จากการคำนวณฟอร์เวิร์ดคิเนเมติคของแขนกลตามเมื่อทราบตำแหน่งข้อต่อของโครงสร้างแขนกลตามดังรูปที่ 3.5 (Sangveraphunsiri and Ngamvilaikorn, 2005)

<u>ฟอร์เวิร์ดคิเนเมติคของแขนกลนำ</u>



รูปที่ 3.4 โครงสร้างแสดงข้อต่อต่าง ๆของแขนกลนำ

จากรูปที่ 3.4 ตำแหน่งข้อต่อที่ 5 ของแต่ละแขน (แขนที่ i = 1,2,3) เมื่อเปรียบเทียบกับฐานของแขนกลหรือเฟรมอ้างอิง คือ

$$\begin{bmatrix} {}^{B}_{5}\mathbf{P}^{i} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_1^i \cos\theta_2^i \cos\theta_3^i \sin\theta_4^i L - \sin\theta_1^i \sin\theta_3^i \sin\theta_4^i L \\ -\cos\theta_1^i \sin\theta_2^i \cos\theta_4^i L - d^i \cos\theta_1^i \sin\theta_2^i + r_b \cos\theta_1^i \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \sin\theta_1^i \cos\theta_2^i \cos\theta_3^i \sin\theta_4^i L + \cos\theta_1^i \sin\theta_3^i \sin\theta_4^i L \\ -\sin\theta_1^i \sin\theta_2^i \cos\theta_4^i L - d^i \sin\theta_1^i \sin\theta_2^i + r_b \sin\theta_1^i \end{pmatrix} \\ \left(\sin\theta_2^i \cos\theta_3^i \sin\theta_4^i L + \cos\theta_2^i \cos\theta_4^i L + d^i \cos\theta_2^i\right) \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

ตำแหน่งจุดกึ่งกลางฐานด้ามจับของแขนกลนำ สามารถหาได้จากสมการ

$$ {}^{B}_{M}\mathbf{P} = \frac{1}{3}\left({}^{B}_{5}\mathbf{P}^{1} + {}^{B}_{5}\mathbf{P}^{2} + {}^{B}_{5}\mathbf{P}^{3} \right) \tag{3.10}$$

สมการที่ (3.10) เป็นสมการแสดงตำแหน่งและทิศทางหรือเวคเตอร์ของจุดกึ่งกลางฐานด้ามจับเปรียบเทียบกับฐานแขนกล ที่จะใช้ในเมตริกซ์การแปลงแบบโฮโมจีเนส (Homogeneous Transformation Matrix) ดังนี้

$$ {}^{B}_{M}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{n} & \mathbf{o} & \mathbf{a} & {}^{B}_{M}\mathbf{P} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.11} $$

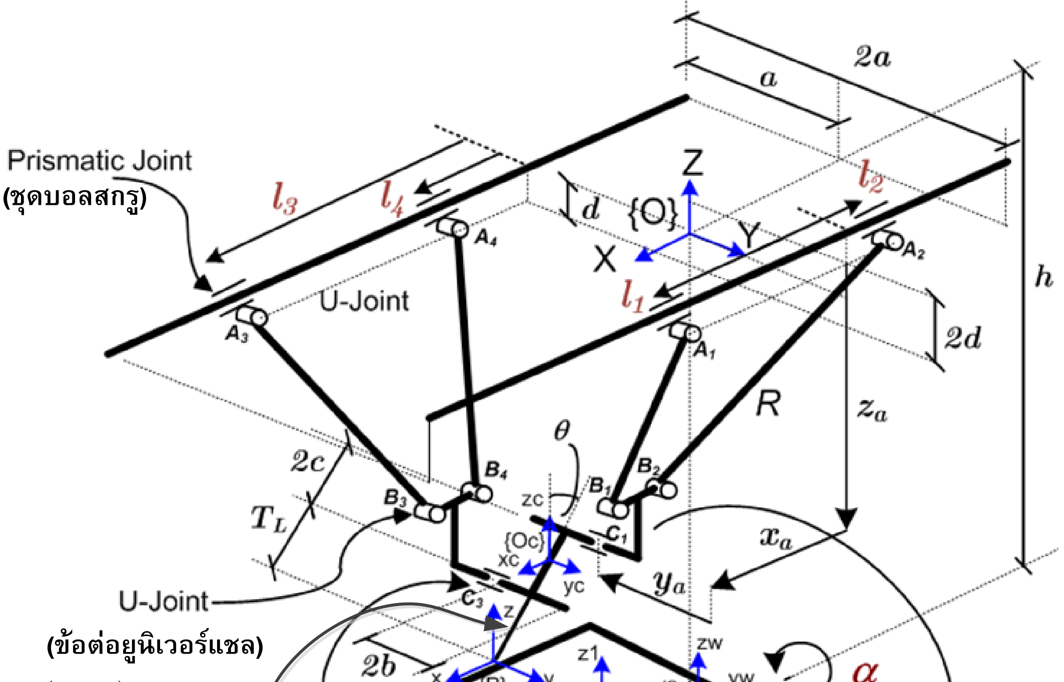
โดยที่เวกเตอร์แสดงทิศทางของด้านจับแขนกลนำซึ่งเป็นส่วนของเมตริกซ์การหมุนของสมการที่ (3.11) สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$ \mathbf{n} = \frac{{}^{B}_{5}\mathbf{P}^{1} - {}^{B}_{M}\mathbf{P}}{\left| {}^{B}_{5}\mathbf{P}^{1} - {}^{B}_{M}\mathbf{P} \right|},\ \mathbf{o} = \frac{{}^{B}_{5}\mathbf{P}^{2} - {}^{B}_{5}\mathbf{P}^{3}}{\left| {}^{B}_{5}\mathbf{P}^{2} - {}^{B}_{5}\mathbf{P}^{3} \right|}\ ,\ \mathbf{a} = \mathbf{n} \times \mathbf{o} $$

ตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลนำเทียบกับฐานแขนกลนำในรูปแบบเมตริกซ์ เมื่อ tip_x, tip_y และ tip_z เป็นระยะห่างระหว่างปลายแขนกลและจุดศูนย์กลางของฐานด้ามจับในทิศทางแนวแกน $\{M\}$ บนฐานด้ามจับ

$$ {}^{B}_{Tip}\mathbf{T} = {}^{B}_{M}\mathbf{T} \times {}^{M}_{Tip}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{n} & \mathbf{o} & \mathbf{a} & {}^{B}_{M}\mathbf{P} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & tip_x \\ 0 & 1 & 0 & tip_y \\ 0 & 0 & 1 & tip_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.12} $$

<u>ฟอร์เวิร์ดคิเนเมติคของแขนกลตาม</u>



$$d_1 = (l_1 - l_2)$$
$$d_2 = (l_3 - l_4)$$
$$x_{o1}^{ow} = (X_w - X_1)$$
$$y_{o1}^{ow} = (Y_w - Y_1)$$
$$z_{o2}^{o1} = (Z_1 - Z_2)$$

รูปที่ 3.5 โครงสร้างแสดงข้อต่อต่างๆของแขนกลตาม

จากรูปที่ 3.5 ตรงข้อต่อแบบเลื่อน (prismatic joint) จะเป็นรางเลื่อนแบบบอลสกรูขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรง 4 ตัวที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมหมุนของมอเตอร์เพื่อใช้ในการคำนวณหาระยะทางการเคลื่อนที่ (l_1, l_2, l_3, l_4) ของข้อต่อแบบเลื่อนนี้ เมื่อทราบระยะเลื่อนของชุดบอลสกรูในแต่ละแขน (l_1, l_2, l_3, l_4) จากรูปที่ 3.5 เราสามารถคำนวณหามุมการหมุนของดอกกัดรอบแนวแกน Y ได้คือ

$$\cos\theta = \sqrt{1-\left(\frac{l_1+l_2-l_3-l_4}{4c}\right)^2} \tag{3.13}$$

ตำแหน่งปลายดอกกัดบนโต๊ะยึดจับชิ้นงาน (ตามแนวแกน Xw Yw และ Zw ในรูปที่ 3.5) คือ

$$x_w = x - p + x_{o1}^{ow} \tag{3.14}$$

$$y_w = y.\cos\alpha + \left(z+h\right)\sin\alpha + y_{o1}^{ow} \tag{3.15}$$

$$z_w = \left(z+h\right)\cos\alpha - y.\sin\alpha + z_{O2}^{O1} \tag{3.16}$$

ตำแหน่งปลายดอกกัดบนแกนอ้างอิงของแขนกลตาม (ตามแนวแกน X Y และ Z ในรูปที่ 3.5) คือ

$$x = \left(\frac{l_1+l_2+l_3+l_4}{4}\right) - (c+T_L)\sin\theta \tag{3.17}$$

$$y = \left(\frac{d_1^2 - d_2^2 - 4w(d_1-d_2) - 16(d - c\cos\theta)\left(z_c + ge\right)}{16(a-b-e)}\right) \tag{3.18}$$

$$z = \left(z_c - (c+T_L)\cos\theta\right) \tag{3.19}$$

เมื่อกำหนดให้

$$z_c = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

โดยที่

$$A = \left(\frac{16^2\left(d - c\cos\theta\right)^2}{128\left(a-b-e\right)^2} + 2\right)$$

$$B = \left(4ge + \frac{512ge(d - c\cos\theta)^2}{128\left(a-b-e\right)^2} - \frac{32(d - c\cos\theta)\left(d_1^2 - d_2^2 - 4w(d_1 - d_2)\right)}{128\left(a-b-e\right)^2}\right)$$

$$C = \frac{16^2(d - c\cos\theta)^2 ge^2}{128\left(a-b-e\right)^2} - \frac{32ge\ (d - c\cos\theta)\left(d_1^2 - d_2^2 - 4w(d_1 - d_2)\right)}{128\left(a-b-e\right)^2} +$$
$$\frac{\left(d_1^2 - d_2^2 - 4w(d_1 - d_2)\right)^2}{128\left(a-b-e\right)^2} + \frac{\left(d_1^2 + d_2^2\right)}{4} + 2w^2 - w(d_1 + d_2) +$$
$$2ge^2 + 2e^2 - 2R^2 + 2\left(b-a\right)^2 - 4e(a-b) + 2(c\cos\theta - d)^2$$

ทิศทางของดอกกัดในลักษณะเวกเตอร์บนโต๊ะยึดจับชิ้นงาน

$$I_w = \pm\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\tan^2\theta}}} \qquad sign(I_w) = sign(\theta) \tag{3.20}$$

$$J_w = \pm\frac{1}{\left(\sqrt{1+\tan^2\theta}\right)\cdot\left(\sqrt{1+\tan^2(90-\alpha)}\right)} \qquad sign(J_w) = sign(\alpha) \tag{3.21}$$

$$K_w = \frac{\tan(90-\alpha)}{\left(\sqrt{1+\tan^2\theta}\right)\cdot\left(\sqrt{1+\tan^2(90-\alpha)}\right)} \qquad sign(K_w) = + \tag{3.22}$$

เมื่อสามารถคำนวณหาตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการให้แขนกลตามเคลื่อนที่ไปได้แล้ว จากสมการ (3.14) – (3.22) โดยใช้ข้อมูลระยะทางเคลื่อนที่ (l_1, l_2, l_3, l_4) ที่คำนวณได้จากอุปกรณ์วัดมุมที่ติดตั้งที่แกนหมุนของมอเตอร์ ดังนั้น เมื่อเรากำหนดตำแหน่งที่ต้องการการเคลื่อนที่ของชุดบอลสกรูแต่ละชุด ระบบควบคุมจะทำการควบคุมการหมุนของมอเตอร์ขับเคลื่อนที่ข้อแบบเลื่อนไถล (prismatic joint) เพื่อขับชุดบอลสกรูให้ได้ระยะทางการเคลื่อนที่ตามที่กำหนด ดังนั้น ตำแหน่งปลายและการเรียงตัวของปลายแขนของแขนกลตามก็จะคำนวณหาได้จากสมการ (3.14) – (3.22) ดังกล่าว การคำนวณหาตำแหน่งดังกล่าวนี้เราจะเรียกว่าการคำนวณฟอร์เวิร์ดคิเนเมติคของแขนกล (ในที่นี้คือแขนกลตาม)

การควบคุมการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อของแขนกลตามนี้จะควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยตัวควบคุมแบบพีดี (PD Control) หรืออาจจะใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID control) ในกรณีที่เราจะต้องการลดผลกระทบจากสัญญารบกวนที่ด้านขาเข้าของชุดขับ แต่ในที่นี้เราจะใช้ตัวควบคุมแบบพีดี การคำนวณหาแบบฟอร์เวิร์ดคิเนเมเติคที่กล่าวข้างต้นนี้ อาจจะไม่สะดวกในการใช้งาน ทั้งนี้ เนื่องจากว่า ปกติแล้วเราจะทราบตำแหน่งและการเรียงตัวของปลายแขนกลมากกว่า ดังนั้น จากค่าตำแหน่งและการเรียงตัวของปลายแขนกลที่ต้องการนี้ เราจะต้องนำมา

คำนวณหาระยะทางเคลื่อนที่ l_1, l_2, l_3, l_4 การคำนวณหาดังกล่าวนี้เรียกว่าการคำนวณหาอินเวอร์สคิเนเมติค โดยปกติแล้วถ้าแขนกลที่มีโครงสร้างกลไกแบบอนุกรม (serial mechanism) เราจะหาสมการฟอร์เวิร์ดคิเนเมติคได้ค่อนข้างง่ายและการสมการอินเวอร์สคิเนเมติคจะหาได้ยากกว่า ตรงกันข้ามกับแขนกลที่มีโครงสร้างกลไกแบบขนาน (parallel mechanism) ที่ใช้ในโครงการนี้ เราจะหาสมการอินเวอร์สคิเนเมติคได้ง่ายกว่ามากเมื่อเทียบกับการหาสมการฟอร์เวิร์ดคิเนเมติค สมการอินเวอร์สคิเนเมติค (Inverse Kinematic) ของแขนกลตามในงานวิจัยนี้สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.23) - (3.26) สำหรับแขนที่ 1 ถึงแขนที่ 4 ตามลำดับ

สมการอินเวอร์สคิเนเมติคสำหรับการเลื่อนตำแหน่งแขนที่ 1 ถึงแขนที่ 4 พิจารณาจากโครงสร้างแขนกลตามในรูปที่ 3.5 (Sangveraphunsiri and Chooprasird, 2011)

$$l_1 = \left(x_w + x_{O_w}^{O_1} + p\right) + \left(T_L + 2c\right)\sin\left(\theta\right) + w + \sqrt{R^2 - \begin{pmatrix} -\left(y_w + y_{O_w}^{O_1}\right)\cos\left(\alpha\right) + \left(z_w + z_{O_1}^{O_2}\right)\sin\left(\alpha\right) \\ -b + a - e \end{pmatrix}^2 - \begin{pmatrix} -\left(y_w + y_{O_w}^{O_1}\right)\sin\left(\alpha\right) - \left(z_w + z_{O_1}^{O_2}\right)\cos\left(\alpha\right) \\ +h - \left(T_L + 2c\right)\cos\left(\theta\right) + d - ge \end{pmatrix}^2} \quad (3.23)$$

$$l_2 = \left(x_w + x_{O_w}^{O_1} + p\right) + \left(T_L + 2c\right)\sin\left(\theta\right) - w - \sqrt{R^2 - \begin{pmatrix} -\left(y_w + y_{O_w}^{O_1}\right)\cos\left(\alpha\right) + \left(z_w + z_{O_1}^{O_2}\right)\sin\left(\alpha\right) \\ -b + a - e \end{pmatrix}^2 - \begin{pmatrix} -\left(y_w + y_{O_w}^{O_1}\right)\sin\left(\alpha\right) - \left(z_w + z_{O_1}^{O_2}\right)\cos\left(\alpha\right) \\ +h - \left(T_L + 2c\right)\cos\left(\theta\right) + d - ge \end{pmatrix}^2} \quad (3.24)$$

$$l_3 = \left(x_w + x_{O_w}^{O_1} + p\right) + T_L\sin\left(\theta\right) + w + \sqrt{R^2 - \begin{pmatrix} \left(y_w + y_{O_w}^{O_1}\right)\cos\left(\alpha\right) - \left(z_w + z_{O_1}^{O_2}\right)\sin\left(\alpha\right) \\ -b + a - e \end{pmatrix}^2 - \begin{pmatrix} -\left(y_w + y_{O_w}^{O_1}\right)\sin\left(\alpha\right) - \left(z_w + z_{O_1}^{O_2}\right)\cos\left(\alpha\right) \\ +h - T_L\cos\left(\theta\right) - d - ge \end{pmatrix}^2} \quad (3.25)$$

$$l_4 = \left(x_w + x_{O_w}^{O_1} + p\right) + T_L\sin\left(\theta\right) - w - \sqrt{R^2 - \begin{pmatrix} \left(y_w + y_{O_w}^{O_1}\right)\cos\left(\alpha\right) - \left(z_w + z_{O_1}^{O_2}\right)\sin\left(\alpha\right) \\ -b + a - e \end{pmatrix}^2 - \begin{pmatrix} -\left(y_w + y_{O_w}^{O_1}\right)\sin\left(\alpha\right) - \left(z_w + z_{O_1}^{O_2}\right)\cos\left(\alpha\right) \\ +h - T_L\cos\left(\theta\right) - d - ge \end{pmatrix}^2} \quad (3.26)$$

สำหรับทิศทางของปลายแขนกลตามหาได้โดยพิจารณาการเรียงตัวของปลายแขนกล (ตามแนวแกน Xw Yw และ Zw ในรูปที่ 3.5) คือ

$$\alpha = \pm 90 - \arctan\left(\frac{K_w}{J_w}\right) \tag{3.27}$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{I_w}{\sqrt{J_w^2 + K_w^2}}\right) \tag{3.28}$$

ในขณะที่มอเตอร์ของแขนกลตามหมุนได้ 1 รอบทำให้เกิดระยะเลื่อนเท่ากับระยะพิตซ์ (Pitch) ของชุดบอลสกรู ดังนั้นเมื่อต้องการควบคุมตำแหน่งการเลื่อนของแขนใดก็สามารถทำได้โดยควบคุมมุมการหมุนของมอเตอร์ขับเคลื่อนชุดบอลสกรูนั้นๆ แสดงการควบคุมการหมุนของมอเตอร์ขับเคลื่อนแต่ละตัวด้วยตัวควบคุมแบบพีดีดังสมการที่ (3.29)

แรงบิดสำหรับควบคุมการหมุนของมอเตอร์ขับเคลื่อนแขนกลตามเกิดจากค่าความผิดพลาดของมุมการหมุน และค่าความเร็วในการหมุนดังสมการ

$$\tau = k_p\left(\theta_d - \theta\right) + k_d\dot{\theta} + \tau_{friction} \tag{3.29}$$

เมื่อกำหนดให้

k_p คือ ค่าเกนแบบสัดส่วน (Proportional Gain)

k_d คือ ค่าเกนแบบอนุพันธ์ (Derivative Gain)

θ_d คือ มุมที่ต้องการให้มอเตอร์หมุนไป

θ คือ มุมที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดมุม

$\tau_{friction}$ คือ แรงบิดชดเชยเนื่องจากแรงเสียดทาน

3.2 การควบคุมแรงโดยตรง (Direct force Control)

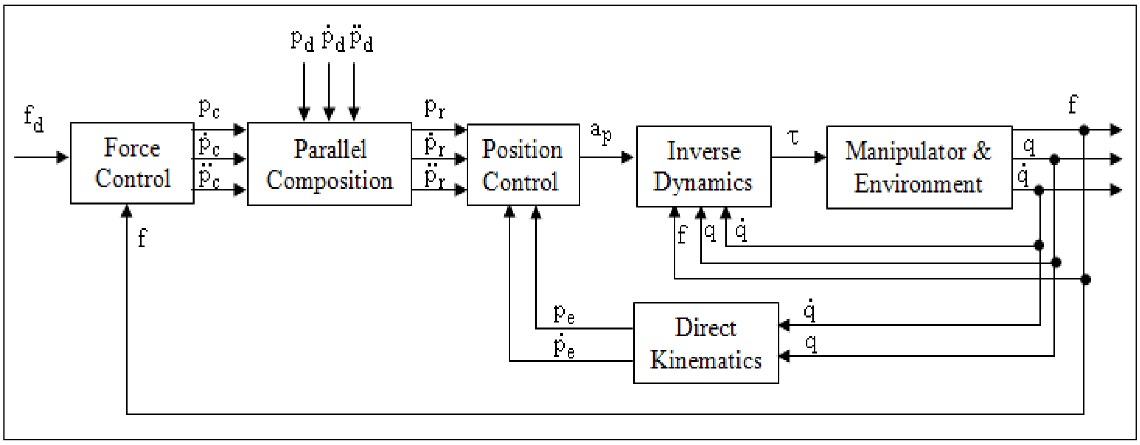
เนื่องจากการทำงานของระบบแขนกลที่เรากำลังสนใจอยู่นี้จะนำไปใช้ในการกัดชิ้นงาน ดังนั้น นอกจากการควบคุมตำแหน่งของปลายแขนของหัวกัดแล้ว การควบคุมแรงกัดหรือแรงที่กระทำกับสิ่งแวดล้อมก็ถือเป็นเป้าหมายของการออกแบบระบบควบคุม เมื่อต้องการควบคุมทั้งตำแหน่งและแรง ความยุ่งยากจะอยู่ตรงที่เมื่อไหรที่เราต้องการควบคุมแรงเราย่อมศูนย์เสียความแม่นยำของตำแหน่ง และถ้าเราต้องการความแม่นยำของตำแหน่งเราก็จำเป็นต้องศูนย์เสียความแม่นยำของการควบคุมแรง ซึ่งข้อจำกัดนี้เป็นธรรมชาติของการควบคุมการเคลื่อนที่ที่ต้องการทั้งการควบคุมตำแหน่งและการควบคุมแรงกัดพร้อมกัน ในงานวิจัยที่เกี่ยวกับการควบคุมแรงและตำแหน่งนั้นส่วนมากจะแยกการควบคุมออกเป็นสองส่วนอย่างเด่นชัด คือหาทิศทางการควบคุมแรง โดยทิศทางการควบคุมแรงจะทำการควบคุมแรงเป็นหลัก และทิศทางที่ตั้งฉากกับแรงนี้ก็สามารถควบคุมตำแหน่งและความเร็วของการเคลื่อนที่ได้ แต่ในงานวิจัยนี้เราจะพยายามควบคุมทั้ง 2 อย่างไปพร้อมกัน แน่นอนความแม่นยำของตำแหน่งย่อมศูนย์เสียไปบ้าง แต่ลักษณะของการกัดชิ้นงานที่สนใจในการวิจัยนี้เป็นการกัดชิ้นงานโดยใช้แขนกลนำแขนกลตามที่มีแรงสะท้อนกลับนั้นเราจะควบคุมแรงก่อน ส่วนการควบคุมตำแหน่งนั้นเราสามารถใช้แขนกลนำกำหนดตำแหน่งกัดซ้ำๆโดยให้แรงกัดไม่เกินที่กำหนด โดยวิธีนี้เราก็จะได้ความแม่นยำการกัดชิ้นงานของแขนกลตามโดยที่แรงกัดไม่เกินค่าที่กำหนด ทำให้คุณภาพของผิวชิ้นงานดีกว่าการที่เราไม่ได้ควบคุมแรงกัด

การควบคุมแรงกระทำกับสิ่งแวดล้อมจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆคือ การควบคุมแรงแบบทางอ้อม (indirect force control) และการควบคุมแรงแบบทางตรง (direct force control) การควบคุมแรงแบบทางอ้อมสามารถทำได้โดยการควบคุมการเคลื่อนที่ที่ปลายแขนโดยเราจำเป็นจะต้องทราบประมาณความแข็งเกร็งของสิ่งแวดล้อม (environment stiffness) และทำการปรับค่าเกนในตัวควบคุมความหยุ่นตัว (active compliance control) ของการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์ ด้วยวิธีการนี้ความแม่นยำของแรงที่กระทำกับสิ่งแวดล้อมจะขึ้นอยู่กับความถูกต้องในการหาค่าความแข็งเกร็งของการสัมผัส (contact stiffness)

การควบคุมแรงกระทำโดยตรงนั้น เราจะใช้ค่าความผิดพลาดของแรงกระทำกับสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นจริงโดยวัดผ่านอุปกรณ์ตรวจรู้แรงกับแรงกระทำอ้างอิงหรือแรงกระทำที่ต้องการมาใช้ในการปรับระบบควบคุมแรงของการเคลื่อนที่ของปลายแขนกล

เมื่อปลายแขนกลตามมีการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม (ชิ้นงานหรือสิ่งกีดขวาง) จะเกิดแรงกระทำขึ้นที่ปลายแขนกลตาม เมื่อแรงกระทำดังกล่าวมีค่ามากพอจะสามารถทำความเสียหายต่อปลายแขนกลตามหรือพื้นผิวของสิ่งแวดล้อมหรือชิ้นงานนั้นๆ ดังนั้นการควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลตามเมื่อมีการสัมผัสกับสิ่งแวดลอมจึงต้องพิจารณาแรงที่เกิดขึ้นในระหว่างดำเนินการไปพร้อมกันด้วย Siciliano and Villani (1999) ได้แสดงวิธีการควบคุมแรง

โดยตรงจากค่าแรงที่วัดได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้แรงในส่วนของการสัมผัสระหว่างปลายแขนกลตามและสิ่งแวดล้อม การควบคุมแรงให้ได้เท่ากับค่าอ้างอิงที่กำหนดจะมีผลต่อระบบการควบคุมตำแหน่ง ก่อนอื่นเราจะต้องการกล่าวถึงตำแหน่งคอมไพลแอนท์ก่อน (Compliant position) ตำแหน่งคอมไพลแอนท์หรือบางครั้งเราจะเรียกว่าตำแหน่งระนาบคอมไพลแอนท์ ซึ่งคือระนาบที่ตรงตำแหน่งกระทำระหว่างปลายแขนกลกับสิ่งแวดล้อมหรือผิวชิ้นงาน โดยที่ระนาบนี้จะตั้งฉากกับแนวแรงที่กระทำและสัมผัสกับผิวชิ้นงานที่ตรงตำแหน่งดังกล่าว โดยเมื่อมีแรงกระทำเกิดขึ้นจะทำให้ค่าตำแหน่งคอมไพลแอนท์ (Compliant position) เกิดการเปลี่ยนแปลงไปส่งผลให้ตำแหน่งอ้างอิงสำหรับปลายแขนกลตามเกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย รูปที่ 3.6 แสดงแผนภาพการควบคุมตำแหน่งและแรง ตำแหน่งที่ต้องการให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่ไปกำหนดค่าโดยตัวแปร p_d ส่วนแรงกระทำกับผิวชิ้นงานที่ต้องการกำหนดค่าโดยตัวแปร f_d โดยระบบควบคุมแรงดังกล่าวนี้จะทำการควบคุมแรงและตำแหน่งให้เข้าใกล้ค่าที่กำหนด



รูปที่ 3.6 แผนภาพแสดงการควบคุมตำแหน่งและแรงโดยตรง (Siciliano and Villani ,1999)

เมื่อมีค่าผลต่างของแรงที่ต้องการ (f_d) และแรงที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์ตัวรู้แรง (f) ในทิศทางการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคอมไพลแอนท์ โดยเราสามารถจำลองความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของแรงดังกล่าวกับตำแหน่งของระนาบคอมไพลแอนท์ได้ดังแสดงในสมการที่ (3.30) จะเห็นว่าระนาบคอมไพลแอนท์นี้จะต้องยุบตัวเมื่อแรงที่ต้องการมีค่ามากกว่าแรงที่วัดได้ โดยที่เราสามารถแก้สมการดังกล่าวเพื่อหาค่าตำแหน่งของระนาบคอมไพแอนท์เมื่อทราบค่าเริ่มต้น (initial condition) กำหนดให้ค่าเริ่มต้นของตำแหน่งคอมไพลแอนท์ $p_c(0) = 0$ จะสามารถหาค่า p_c ณ เวลาต่างๆได้จากการอินทิเกรต

$$K_A \ddot{p}_c + K_V \dot{p}_c = (f_d - f) \tag{3.30}$$

ค่าตำแหน่งอ้างอิงสำหรับการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลกำหนดโดยค่าตัวแปร p_r โดยที่ค่าตำแหน่งอ้างอิง p_r จะใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงในลูปของการควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายแขนกล ซึ่งเป็นลูปในของระบบควบคุมตำแหน่งและแรงดังแสดงในรูปที่ 3.6 ตำแหน่งอ้างอิง p_r นี้จะเกิดจากผลรวมของตำแหน่งคอมไพลแอนท์ $\left(p_c\right)$ และตำแหน่งที่ต้องการ $\left(p_d\right)$ ดังสมการที่ (3.31)

$$p_r = p_c + p_d \tag{3.31}$$

เมื่อหาอนุพันธ์ลำดับที่ 1 และ 2 ของสมการ (3.31) เราจะได้ค่าความเร็วอ้างอิง$\left(\dot{p}_r\right)$ และ ความเร่งอ้างอิง$\left(\ddot{p}_r\right)$ดังสมการที่ 3.32 และ 3.33 ตามลำดับ

$$\dot{p}_r = \dot{p}_c + \dot{p}_d \tag{3.32}$$

$$\ddot{p}_r = \ddot{p}_c + \ddot{p}_d \tag{3.33}$$

การควบคุมตำแหน่งปลายแขนกลให้มีค่าเท่ากับตำแหน่งอ้างอิง สามารถทำได้โดยการชดเชยความผิดพลาดด้วยแบบจำลองทางพลศาสตร์ (Model-based compensation) โดยกำหนดให้ค่าความเร่งที่ใช้ในระบบควบคุมดังกล่าวเขียนได้ตามสมการ (3.36) ระบบควบคุมตำแหน่งปลายแขนกลดังกล่าวสามารถสรุปได้ดังนี้ คือ

จากแบบจำลองทางพลศาสตร์ของแขนกล คือ

$$B(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + F\dot{q} + g(q) = \tau - J^T(q)h \tag{3.34}$$

โดยที่

q คือ พิกัดทั่วไป (generalized coordinate)

$B(q)$ คือ เมตริกซ์ของความเฉื่อย (inertial matrix)

$C(q,\dot{q})$ คือ เทอมที่ไม่เป็นเชิงเส้นตรง (non-linear term) ขึ้นอยู่แรงสู่ศูนย์กลางและแรงโคลิโอริส (coriolis)

$F\dot{q}$ คือ แรงเนื่องจากความเสียดทานหนืด (viscous friction)

$g(q)$ คือ แรงเนื่องจากความโน้มถ่วงโลก (gravitational force)

$J^T(q)h$ คือ แรงที่ปลายแขนกลกระทำกับสิ่งแวดล้อมโดยคิดเทียบที่พิกัดของแขนกล

τ คือ แรงที่มอเตอร์กระทำกับข้อต่อของแขนกล

ระบบควบคุมแบบการชดเชยด้วยแบบจำลองพลศาสตร์ โดยสมมติว่าเราสามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของแขนกล และเราสามารถวัดค่าตัวแปร $q, \dot{q}$ ได้ รวมถึงการวัดแรงกระทำที่ปลายแขนหุ่นยนต์กระทำกับสิ่งแวดล้อมโดยใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่ติดตั้งที่ฐานยึดจับชิ้นงาน ประกอบเราสามารถหาค่าจาโคเบียน $J\left(q\right)$ ของแขนกลที่เรากำลังทำการทดลองได้ ดังนั้น แรงที่มอเตอร์ต้องสร้างในระบบควบคุมการเคลื่อนที่ คือ

$$\tau = B(q)a_p + C(q,\dot{q})\dot{q} + F\dot{q} + g(q) + J^T(q)h \tag{3.35}$$

โดยที่ค่าความเร่ง a_p สามารถกำหนดได้จากสมการ (3.36) โดยการจูนค่าเกน K_P และ K_D ที่เหมาะสม ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทที่เกี่ยวกับการทดลอง ตัวแปร q ในที่นี้คือระยะทางแนวบอลสกรูที่ขับโดยมอเตอร์ทั้ง 4 ตัว หรือคือ l_1, l_2, l_3, l_4 โดยที่แต่ละแกนสามารถควบคุมแยกเป็นอิสระจากกัน โดยเรากำหนดให้ค่าความเร่ง a_p ได้คือ

$$a_p = \ddot{l}_e + K_D\left(\dot{l}_e - \dot{l}\right) + K_P\left(l_e - l\right) \tag{3.36}$$

โดยที่ l_e คือตำแหน่งที่ต้องการของตัวเลื่อนบนบอลสกรู (l_1, l_2, l_3, l_4) และตัวแปร l คือตำแหน่งของตัวเลื่อนบนบอลสกรูที่วัดได้

เนื่องจากการทำงานของระบบที่เรากำลังสนใจนั้น เป็นการเคลื่อนที่ที่ความเร็วไม่สูงมากจะทำให้เทอม $C(q,\dot{q})\dot{q}$ มีขนาดเล็กสามารถละทิ้งได้ เช่นเดียวกับเราสามารถสมมติว่าแรงเสียดทานความหนืดมีค่าน้อยมากเช่นกัน ส่วนเทอมที่เกี่ยวกับแรงโน้มถ่วงนั้น เนื่องจากมอเตอร์ขับเคลื่อนมวลให้เคลื่อนที่ในแนวนอนตั้งตามทิศทางของบอลสกรู ซึ่งตรงข้ามกับแรงโน้มถ่วง ดังนั้นเราจึงสามารถละทิ้งเทอมเนื่องจากแรงโน้มถ่วงได้เช่นเดียวกัน คุณสมบัติดังกล่าวข้างต้นเป็นข้อดีของโครงการแบบขนานที่พัฒนาขึ้นในห้องปฏิบัติการวิจัยเมื่อเปรียบเทียบการใช้โครงสร้างแขนกลแบบอนุกรม (serial mechanism) ซึ่งการลดค่าดังกล่าวอาจจะต้องพิจารณารายละเอียดให้มากกว่านี้

เมื่อแทนสมการ (3.35) และ (3.36) ลงในสมการ (3.34) จะได้ว่า

$$\ddot{q} = \ddot{l} = a_p = \ddot{l}_e + K_D\left(\dot{l}_e - \dot{l}\right) + K_P\left(l_e - l\right) \tag{3.37}$$

โดยที่ $\ddot{q}$ ในที่นี้ก็คือ $\ddot{l}$ ดังนั้น เราจะได้ว่า

$$\ddot{e} + K_D\dot{e} + K_P e = 0 \Leftarrow e = l_e - l \tag{3.38}$$

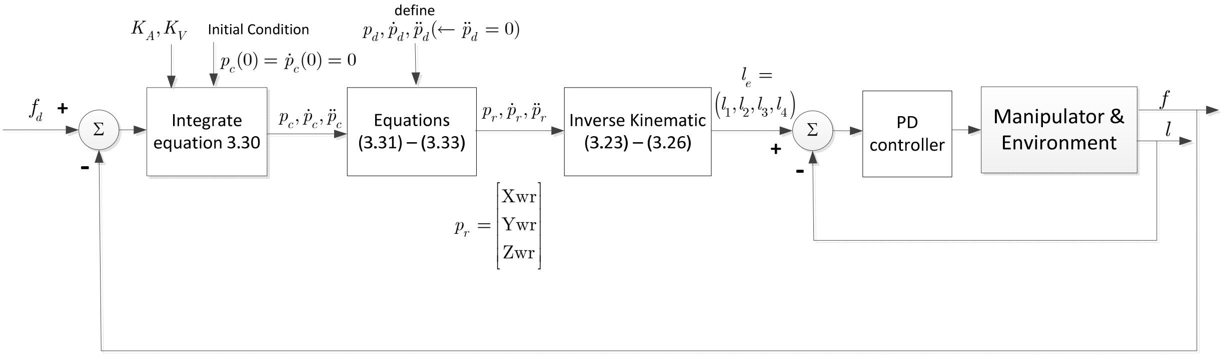
สมการ (3.38) คือสมการที่ใช้ในการออกแบบตัวควบคุมการเคลื่อนที่ตำแหน่งของปลายแขนกล ซึ่งก็คือลูปในของระบบควบคุมตำแหน่งและแรงโดยตรง

ขั้นตอนดังกล่าวมาข้างต้นสรุปได้ว่า กรณีปลายแขนกลมีการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมจะสามารถหาตำแหน่งอ้างอิง (p_r) สำหรับควบคุมปลายแขนกลที่ต้องเคลื่อนไป ได้จากผลรวมของค่าตำแหน่งคอมไพลแอนท์ (p_c) และ ค่าตำแหน่งเดิมที่ต้องการให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่ไป (p_d) จากนั้นจึงนำค่าตำแหน่งอ้างอิงมาใช้ในการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกลด้วยวิธีการควบคุมแบบชดเชยด้วยแบบจำลองพลศาสตร์ (Model-based compensation) หรือบ่อยครั้งเราจะเรียกว่า อินเวอร์สไดนามิก (Inverse Dynamic) เพื่อคำนวณหาแรงบิด (τ) สำหรับอุปกรณ์ขับเคลื่อนแต่ละตัวเพื่อให้ปลายแขนกลมีตำแหน่งและค่าแรงกระทำมีค่าเข้าใกล้ค่าที่กำหนดไว้

ค่าของตำแหน่งคอมไพลแอนท์ (p_c) หาได้จากสมการที่ (3.30) เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคอมไพลแอนท์ในทิศทางเดียวกับทิศทางของแรงที่เกิดขึ้นโดยการปรับค่าเกน K_A และ K_V เพื่อให้การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคอมไพลแอนท์มีความเหมาะสมกับแรงที่เกิดขึ้นในขณะปลายแขนกลเกิดการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม ค่าเกนดังกล่าวประมาณค่าได้จากการทดลองเมื่อทำการวิเคราะห์ผลการเคลื่อนปลายแขนกลและค่าแรงที่เกิดขึ้น

รูปที่ 3.7 แสดงแผนภาพของระควบคุมตำแหน่งและแรงโดยตรง ซึ่งปรับมาจากระบบควบคุมตามแผนภาพในรูปที่ 3.6 ซึ่งระบบควบคุมตำแหน่งและแรงโดยตรงที่ดัดแปลงนี้เกิดจากแนวคิดที่อธิบายข้างต้นตามสมการ (3.30) – (3.38) โดยใช้สมมติฐานว่าการทำงานระบบดังกล่าวนั้นมีความเร็วไม่สูงมาก ประกอบกับการควบคุมของมอเตอร์ทั้ง 4 ตัวที่ขับเคลื่อนชุดบอลสกรูสามารถทำงานแยกเป็นอิสระต่อกัน โดยขั้นตอนการทำงานสามารถสรุปได้ดังนี้

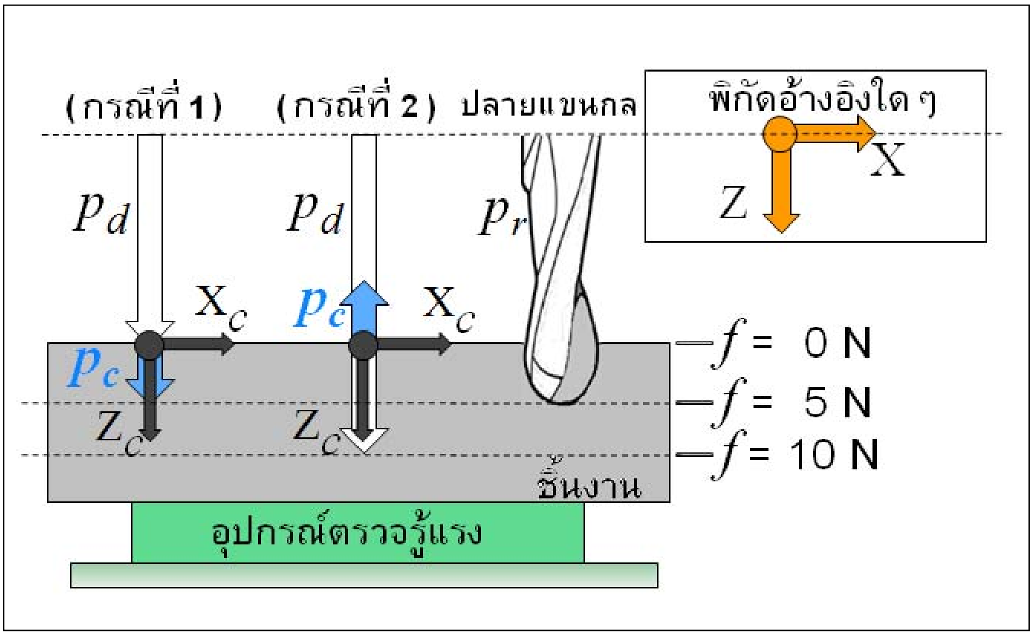
กำหนดค่าแรงกัดที่ต้องการคือ f_d เปรียบเทียบกับค่าแรงที่วัดได้คือ f ค่าความแตกต่างสามารถนำไปใช้ในสมการที่ (3.30) เราสามารถคำนวณหาค่า $p_c, \dot{p}_c, \ddot{p}_c$ ได้โดยการอินทิเกรตสมการที่ (3.30) โดยกำหนดค่าเริ่มต้น $p_c(0) = \dot{p}_c(0) = 0$ และค่า K_A, K_V (ที่สามารถหาได้จากการทดลอง ซึ่งจะกล่าวต่อไปในบทการทดลอง) จากค่า $p_c, \dot{p}_c, \ddot{p}_c$ ที่หาได้นี้พร้อมกับค่า $p_d, \dot{p}_d, \ddot{p}_d$ ที่กำหนดขึ้น เราสามารถหาค่า $p_r, \dot{p}_r, \ddot{p}_r$ ได้จากสมการ (3.31) – (3.33) นำค่า p_r ที่หามาได้นี้นำไปแทนในสมการอินเวอร์สคิเนเมติค เราจะได้ค่า $l_e = \left(l_1, l_2, l_3, l_4\right)$ ซึ่งก็คือค่าระยะทางการเคลื่อนที่ของบอลสกรูแต่ละแกน จากค่า l_e ที่ต้องการของแต่ละแกนเราสามารถใช้ตัวควบคุมพีดีเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ในการขับเคลื่อนบอลสกรูให้ได้ระยะทางตามต้องการ การทำงานของระบบควบคุมที่กล่าวมานี้สามารถเขียนเป็นแผนภาพบล็อคได้ตามรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผนภาพแสดงระบบควบคุมตำแหน่งและแรงโดยตรงของแขนกลตาม

เพื่อให้เกิดความเข้าใจการควบคุมตำแหน่งและแรงโดยตรงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยขอเสนอภาพแสดงลักษณะการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคอมไพลแอนท์เฉพาะใน 1 ทิศทางเพื่อให้เกิดความเข้าใจมากขึ้น ขณะที่ปลายแขนกลเกิดการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม (ผิวหน้าของชิ้นงาน) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 เมื่อพิจารณาแรงกระทำที่เกิดขึ้นเฉพาะแนวแกน Z ผลต่างระหว่างค่าแรงที่กำหนดและค่าแรงที่วัดได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้แรงในแนวแกน Z สามารถนำมาใช้ในการแสดงผลการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคอมไพลแอนท์

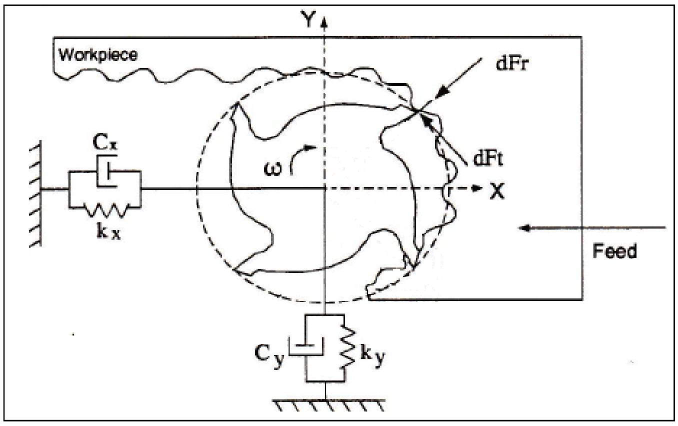
สมมุติว่าต้องการให้แรงกระทำเมื่อปลายแขนกลสัมผัสกับผิวชิ้นงานมีค่า 5 นิวตัน ค่าของแรงกระทำสามารถวัดได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้แรง (ติดตั้งไว้กับอุปกรณ์ยึดจับชิ้นงาน) กรณีชิ้นงานมีคุณสมบัติสม่ำเสมอจะพบว่าแรงที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปลายแขนกลเคลื่อนที่เข้าไปในเนื้อวัสดุมากขึ้น เราสามารถแบ่งลักษณะการสัมผัสระหว่างปลายแขนกลกับผิวชิ้นงานออกได้เป็น 2 กรณีดังนี้ กรณีที่ 1 กำหนดให้ตำแหน่งปลายแขนกลเริ่มสัมผัสผิวชิ้นงาน จะมีค่าของแรงในทิศทางการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคอมไพลแอนท์น้อยกว่าค่าที่กำหนด การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคอมไพลแอนท์จึงมีทิศทางเข้าสู่เนื้อวัสดุมากขึ้นทำให้แรงกระทำเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่ค่าที่กำหนดไว้ ส่วนในกรณีที่ 2 พบว่าแรงเริ่มต้นมีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ทำให้ทิศทางการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคอมไพลแอนท์จะมีทิศทางออกจากเนื้อหรือผิวของวัสดุมากขึ้นจนกระทั่งแรงที่วัดได้มีค่าเท่ากับแรงที่กำหนดไว้ ดังนั้นปลายแขนกลทั้งสองกรณีจะเคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งอ้างอิงของปลายแขนกล (p_r) โดยมีค่าของแรงที่วัดได้เท่ากับค่าของแรงที่กำหนดไว้ (5 นิวตัน)



รูปที่ 3.8 ลักษณะการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคอมไพลแอนท์

ในงานวิจัยนี้ ตำแหน่งปลายแขนกลที่สัมผัสกับชิ้นงานคือตำแหน่งของดอกกัดในขณะทำการกัดชิ้นงาน การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคอมไพลแอนท์ในขณะกัดชิ้นงานจึงอาศัยค่าแรงกัดซึ่งวัดค่าด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้แรง ค่าแรงกัดที่นำมาใช้ในการคำนวณจะต้องมีทิศทางของแรงที่สอดคล้องกับทิศทางการเคลื่อนที่ของดอกกัดชิ้นงาน ผู้วิจัยจึงได้ศึกษางานวิจัยที่แสดงทิศทางของแรงกัดในขณะที่ดอกกัดทำการกัดชิ้นงานเพื่อนำไปใช้อ้างอิงสำหรับการเคลื่อนดอกกัดในทิศทางอื่นๆต่อไป ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาแรงกัดชิ้นงานแสดงดังต่อไปนี้

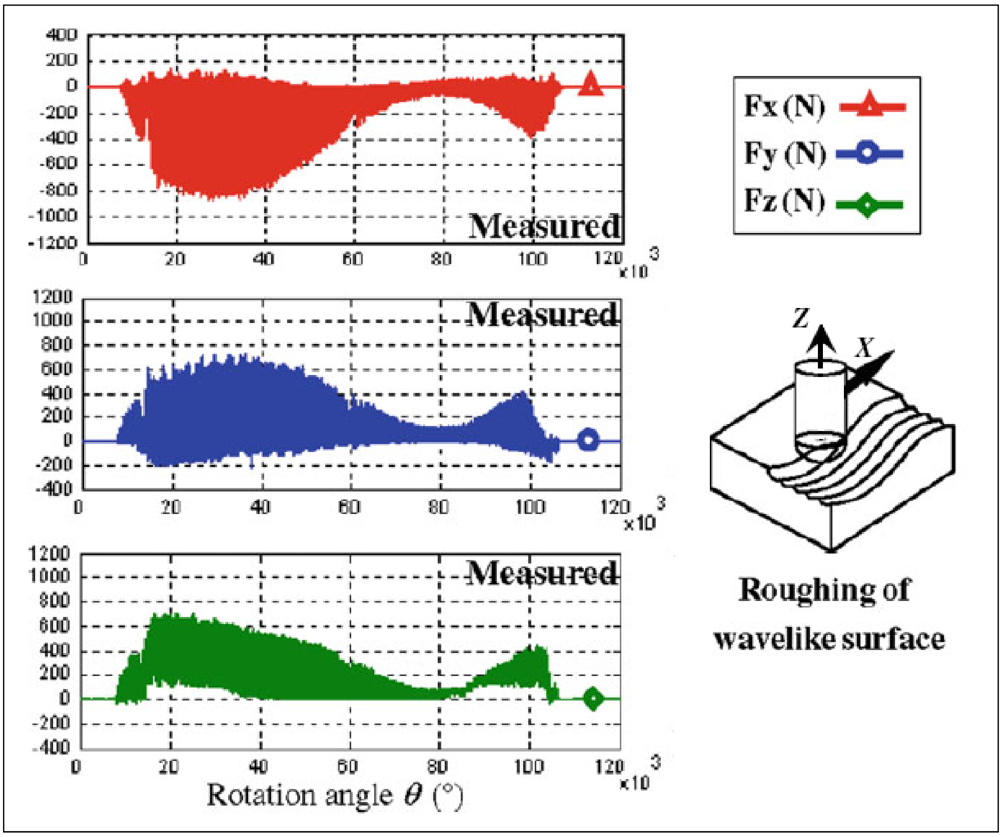
Altintas and Lee (1998) ได้แสดงการพิจารณาทิศทางของแรงกัดเมื่อดอกกัดแบบ 4 ฟัน เคลื่อนที่กัดชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.9 กรณีที่ดอกกัดอยู่นิ่งส่วนชิ้นงานมีการเคลื่อนที่ในทิศทาง –X (เสมือนดอกกัดเคลื่อนที่ในทิศทาง X)



รูปที่ 3.9 แบบจำลองของดอกกัดในขณะกัดชิ้นงาน (Altintas and Lee, 1998)

ดอกกัดชิ้นงานหมุนด้วยความเร็วรอบ ω ในทิศทางดังแสดงในรูปที่ 3.9 เมื่อพิจารณาส่วนที่คมกัดของแต่ละฟันสัมผัสชิ้นงานจะเกิดแรงกัด dFr ในทิศทางแนวรัศมีของดอกกัดและ dFt ในทิศทางการหมุนของคมดอกกัด แรงที่เกิดขึ้นจากคมกัดทั้งหมดส่งผลให้เกิดแรงในแนวแกน X และ Y ตามตำแหน่งการหมุนของคมกัดและการเคลื่อนที่ของดอกกัด เนื่องจากแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองในสภาวะพลวัต (ดอกกัดเกิดการสั่นแชตเตอร์ในแนวแกน X และ Y) จึงได้มีการจำลองค่าสัมประสิทธิ์สปริงและสัมประสิทธิ์แดมปิ้งเอาไว้ด้วย

Zeroudi et al. (2010) แสดงผลการวัดค่าแรงกัดในแนวแกน X Y และ Z เมื่อกำหนดให้ดอกกัดหัวทรงกลมแบบ 2 ฟันเคลื่อนที่กัดชิ้นงานวัสดุ 42CrMo4 เป็นลักษณะคลื่น (Wave like) (ดังแสดงในรูปขวามือด้านล่างของรูปที่ 3.10) ในทิศทางการเคลื่อนที่แนวแกน X จะได้ลักษณะของแรงกัดชิ้นงานดังรูปที่ 3.10 (ซึ่งแสดงเฉพาะ 1 เที่ยวของการกัด) สังเกตได้ว่าเมื่อดอกกัดเคลื่อนที่ในแนวแกน X แรงกัดค่าสูงในแนวแกน X (Fx) มีค่าเป็นค่าลบ (ขนาดของแรงกัดสูงสุด 800 นิวตัน) แรงกัดค่าสูงในแนวแกน Y (Fy) มีค่าเป็นบวก (ขนาดของแรงกัดสูงสุด 700 นิวตัน) และแรงกัดแนวแกน Z (Fz) มีค่าเป็นบวก (ขนาดของแรงกัดสูงสุด 700 นิวตัน) ทิศทางของแรงกัดดังกล่าวสามารถนำมาใช้อ้างอิงต่อไป



รูปที่ 3.10 แรงกัดชิ้นงานที่วัดค่าได้ (Fx,Fy และ Fz) เมื่อกัดชิ้นงานเป็นคลื่น (Zeroudi et al.,2010)

3.3 การสร้างแรงสะท้อนกลับ

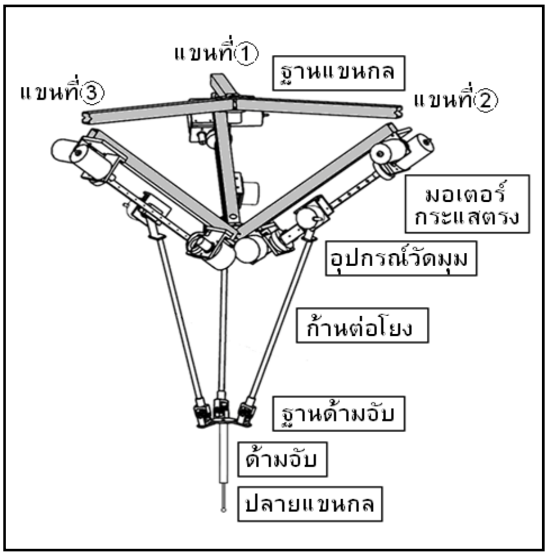
เมื่อผู้ดำเนินการทำการควบคุมแขนกลตามโดยใช้มือการขับเคลื่อนแขนกลนำ เพื่อให้ผู้ดำเนินการมีความรู้สึกถึงแรงกระทำระหว่างปลายแขนกลตามกับสิ่งแวดล้อม เราจะเป็นต้องสร้างแรงสะท้อนกลับมาที่มือของผู้ดำเนินการ เนื่องจากแขนกลนำก็เปรียบเสมือนแขนกลที่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ได้ด้วยเช่นกัน การสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการสามารถทำได้โดยสร้างแรงขับเคลื่อนจากมอเตอร์กระแสตรงจำนวน 6 ตัว ซึ่งติดตั้งไว้ที่ฐานของแขนกลนำดังรูปที่ 3.11 ผู้ดำเนินการจะรู้สึกถึงแรงกระทำเมื่ออุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Amplifier) มีการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่มอเตอร์แต่ละตัวตามสัดส่วนของแรงบิดที่ต้องการ (desired torque) ระบบควบคุมจะสามารถคำนวณหาค่าแรงบิดที่ต้องการสำหรับมอเตอร์ ($\boldsymbol{\tau}$) ได้จากแรงที่ต้องการให้เกิดขึ้นที่ปลายแขนกลนำ ($\mathbf{F}$) และเมตริกซ์จาโคเบียนของแขนกลนำ ($\mathbf{J}$) ดังนี้

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}^T \boldsymbol{\tau} \tag{3.39}$$

เมื่อ $\mathbf{F} = \begin{bmatrix} M_X & M_Y & M_Z & F_X & F_Y & F_Z \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$ ประกอบด้วยโมเมนต์ (M) และแรง (F) ในแนวแกน X Y และ Z

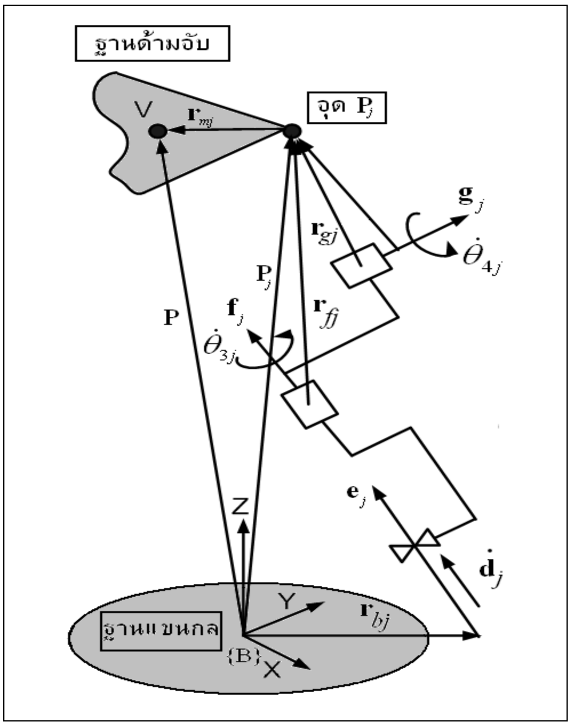
$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} f_1 & \tau_1 & f_2 & \tau_2 & f_3 & \tau_3 \end{bmatrix}^T$ ประกอบด้วยแรงในแนวเลื่อน (f) และแรงบิด (τ) ของมอเตอร์ในแขนที่ 1 2 และ 3

เมตริกซ์จาโคเบียน ($\mathbf{J}$) ประกอบด้วยอินเวอร์สของเมตริกซ์ $\mathbf{A}$ คูณกับเมตริกซ์ $\mathbf{B}$ $(\mathbf{J} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B})$ เราสามารถหาค่าเมตริกซ์ $\mathbf{A}$ และ เมตริกซ์ $\mathbf{B}$ ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างของแขนกลนำ รายละเอียดของการหาเมตริกซ์ **A** และเมตริกซ์ **B** สามารถศึกษาได้จาก (Sangveraphunsiri and Ngamvilaikorn, 2005) โดยในที่นี้จะกล่าวเฉพาะส่วนที่จำเป็นในการใช้งานกับงานวิจัยนี้เท่านั้น



รูปที่ 3.11 ส่วนประกอบโครงสร้างของแขนกลนำ

โครงสร้างแขนกลนำในแต่ละแขนสำหรับการหาค่าเมตริกซ์ $\mathbf{A}$ และ $\mathbf{B}$ แสดงในรูปที่ 3.12 โดยทำการกลับด้านโครงสร้างของแขนกลนำให้ฐานด้ามจับขึ้นด้านบน แขนกลนำมีข้อต่อซึ่งติดตั้งอุปกรณ์ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์กระแสตรง (Active joint) สามารถทำให้เกิดแรงกระทำในแนวแกน $\mathbf{e}_j$ และ แรงบิดกระทำรอบแนวแกน $\mathbf{f}_j$ เพื่อส่งแรงสะท้อนกลับไปที่ฐานด้ามจับและส่งต่อไปถึงมือของผู้ดำเนินการ



รูปที่ 3.12 โครงสร้างแขนกลนำในแต่ละแขนสำหรับการวิเคราะห์เมตริกจาโคเบียน

เมตริกซ์ **A** สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{32} \end{bmatrix} \tag{3.40}$$

เมื่อ $a_{j1} = -\cos\theta_{j4}$, $a_{j2} = -\sin\theta_{j4}L$ และ $j = 1,\ 2,\ 3$ โดยมุม θ ต่างๆ สามารถวัดได้จากอุปกรณ์วัดมุมที่ติดตั้งอยู่ที่ข้อต่อต่างๆ ในที่นี้เราติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมทั้งหมด 9 ตัว โดยติดตั้ง 3 ตัวในแต่ละแขนซึ่งจะมีทั้งหมด 3 แขน

เมตริกซ์ **B** สามารถเขียนได้ ดังนี้

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \left(\mathbf{I}_1 \times \mathbf{r}_{m1}\right)^T & \mathbf{I}_1^T \\ \left(\mathbf{M}_1 \times \mathbf{r}_{m1}\right)^T & \mathbf{M}_1^T \\ \left(\mathbf{I}_2 \times \mathbf{r}_{m2}\right)^T & \mathbf{I}_2^T \\ \left(\mathbf{M}_2 \times \mathbf{r}_{m2}\right)^T & \mathbf{M}_2^T \\ \left(\mathbf{I}_3 \times \mathbf{r}_{m3}\right)^T & \mathbf{I}_3^T \\ \left(\mathbf{M}_3 \times \mathbf{r}_{m3}\right)^T & \mathbf{M}_3^T \end{bmatrix} \tag{3.41}$$

เมื่อ $j = 1,\ 2,\ 3$

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

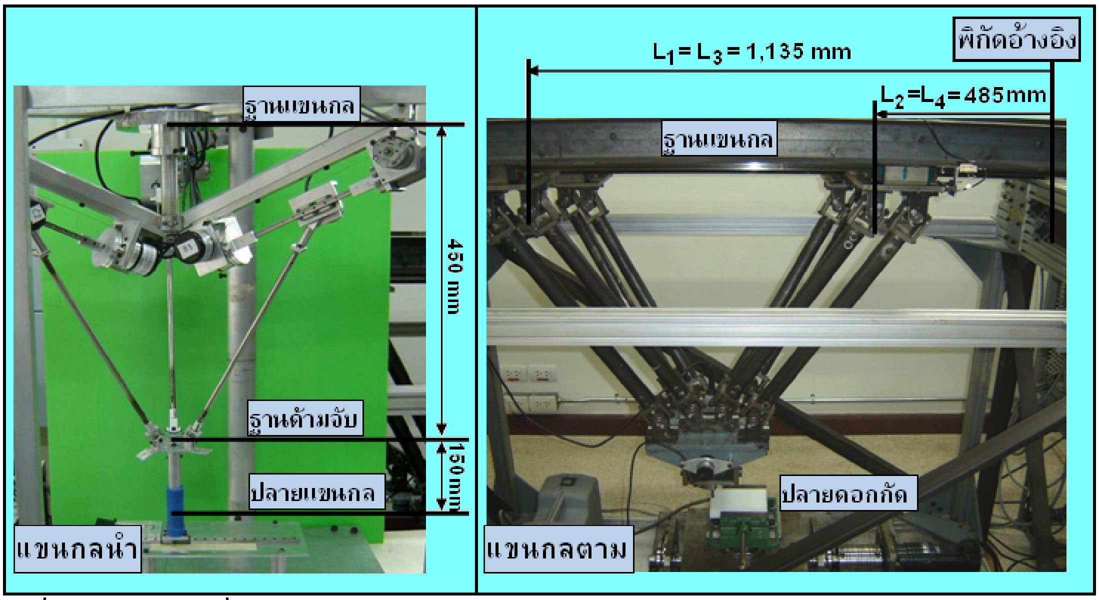
$$\mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} \left(\cos\theta_1 \cos\theta_2 \sin\theta_3 + \sin\theta_1 \cos\theta_3\right) \\ \left(\sin\theta_1 \cos\theta_2 \sin\theta_3 - \cos\theta_1 \cos\theta_3\right) \\ \left(\sin\theta_2 \sin\theta_3\right) \end{bmatrix}_j$$

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

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ก่อนเริ่มการทำงานของระบบแขนกลนำ-ตามนั้น ผู้ดำเนินการต้องปรับตำแหน่งของแขนกลนำและแขนกลตามให้อยู่ ณ ตำแหน่งเริ่มต้นการทำงาน (Home Position) รูปที่ 4.1 แสดงรูปแบบตำแหน่งเริ่มต้นของทั้งแขนกลนำและแขนกลตาม โดยตำแหน่งเริ่มต้นการทำงานนี้จะต้องมีค่าเท่ากับค่าตำแหน่งเริ่มต้นที่กำหนดไว้ในโปรแกรมควบคุมการทำงาน โดยกำหนดให้ฐานด้ามจับของแขนกลนำห่างจากฐานแขนกลนำเท่ากับ 450 mm ความยาวด้ามจับถึงปลายแขนกลนำจะเท่ากับ 150 mm ในส่วนของแขนกลตามจะต้องทำการปรับระยะห่างระหว่างพิกัดอ้างอิง(กำหนดไว้บนพื้นผิวของชิ้นส่วนอะลูมิเนียม)และข้อต่อยูนิเวอร์แซลของชุดแขนด้านในดังต่อไปนี้ ข้อต่อที่1 และ 3 คือ 1,135 mm ข้อต่อที่ 2 และ 4 คือ 485 mm

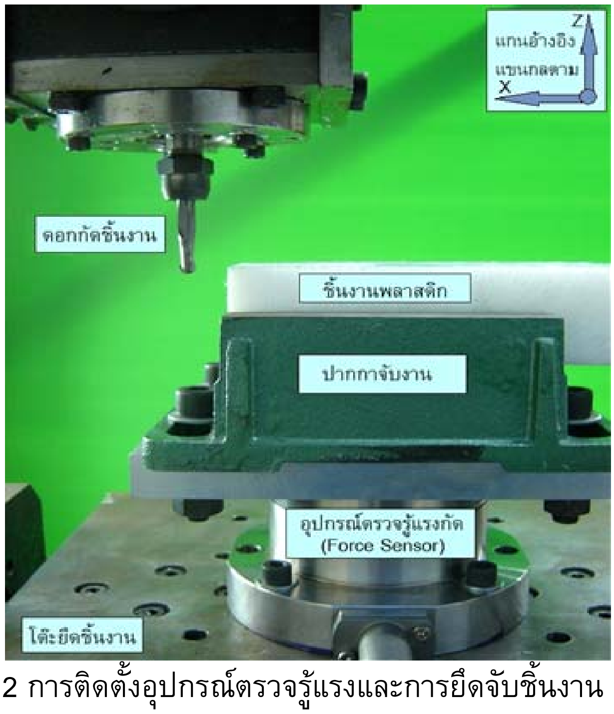


รูปที่ 4.1 ตำแหน่งเริ่มต้นการทำงาน (Home Position) ของแขนกลนำและแขนกลตาม

การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลตามนั้นจะเป็นการควบคุมแบบเซอร์โว(servo) ซึ่งจะมีการควบคุมอยู่ 2 ลักษณะ กล่าวคือ ลักษณะแรก สัญญาณอ้างอิงที่ใช้ในรูปควบคุมนั้นจะได้จากค่าตำแหน่งและทิศทางจากแขนกลนำ เมื่อแขนกลนำเคลื่อนที่อุปกรณ์วัดตำแหน่งที่ติดอยู่กับแขนกลนำจะใช้เป็นข้อมูลในการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่เพื่อใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงสำหรับควบคุมแขนกลตาม เพื่อให้แขนกลตามมีการเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับแขนกลนำ การควบคุมอีกลักษณะหนึ่งอาศัยการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ขึ้นมาเพื่อใช้เป็นสัญญาณเส้นทางอ้างอิง (referenced path) ที่ใช้ในระบบควบคุมแบบเซอร์โว โดยที่การกำหนดเส้นทางจะเป็นลักษณะบอกทิศทางและอัตราการเคลื่อนที่เพื่อให้ปลายแขนกล 5 แกน มีการเคลื่อนที่ตามที่ต้องการโดย

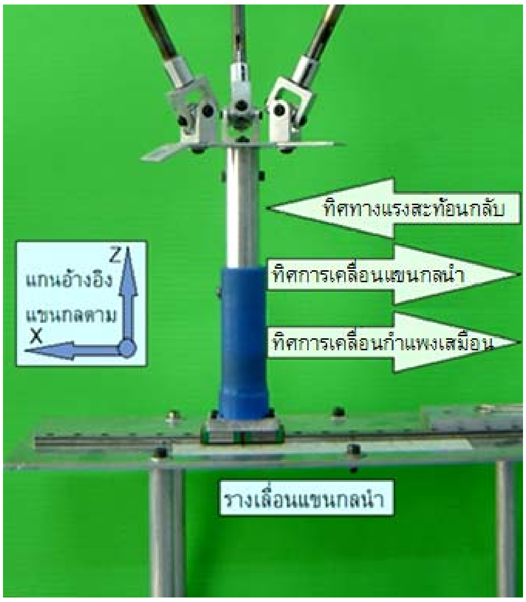
ไม่จำเป็นต้องใช้แขนกลนำเป็นตัวสร้างเส้นทางอ้างอิง การกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่โดยไม่จำเป็นต้องใช้แขนกลนำดังกล่าวจะมีประโยชน์ในกรณีที่ต้องการเคลื่อนตำแหน่งดอกกัดไปยังตำแหน่งเริ่มต้นการกัดชิ้นงาน และกรณีทำการทดลองกัดชิ้นงานโดยการเคลื่อนที่เฉพาะแขนกล 5 แกน ด้วยความเร็วคงที่ เป็นต้น

เมื่อเริ่มต้นการกัดชิ้นงาน ผู้ดำเนินการต้องยึดจับชิ้นงานด้วยปากกาจับงานซึ่งติดตั้งไว้ด้านบนของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงดังแสดงในรูปที่ 4.2 ส่วนฐานอีกด้านหนึ่งของอุปกรณ์ตรวจรู้แรงกัดจะยึดติดกับโต๊ะยึดชิ้นงานของแขนกลตาม เพื่อใช้สำหรับตรวจวัดแรงกัดในขณะที่ดอกกัดทำการกัดเซาะชิ้นงาน ดอกกัดหมุนได้โดยอาศัยการขับเคลื่อนของชุดหัวกัด (router) ซึ่งกำหนดให้มีความเร็วรอบในการหมุน 5,000 rpm ตลอดระยะเวลาการทำงาน ในงานวิจัยนี้ใช้ชุดหมุนหัวกัด (spindle) ยี่ห้อ KRESS 1050 ในการหมุนดอกกัดชนิดหัวกัดเป็นรูปทรงกลมแบบ 2 ฟัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 mm โดยใช้พลาสติกเป็นวัสดุที่ใช้ในการทดสอบการกัดชิ้นงาน และใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แรงของบริษัท Kistler ซึ่งสามารถตรวจวัดแรงได้ 3 ทิศทาง ประกอบด้วยแรงในแนวแกน x, y, และ z คือแรง Fx, Fy และ Fz ตามลำดับ และสามารถวัดค่าโมเมนต์รอบแนวแกนได้ 1 ทิศทางคือตามทิศทาง z คือแรงโมเมนต์ Mz แต่ในงานวิจัยนี้ค่าแรงโมเมนต์ Mz ไม่ได้ถูกนำมาใช้ อุปกรณ์ตรวจรู้แรงดังกล่าวที่ใช้งานวิจัยนี้จะเป็นแบบควอทซ์ (quartz) กล่าวคือ แรงที่วัดได้จะอยู่ในรูปของประจุไฟฟ้า โดยที่ประจุไฟฟ้าที่วัดได้จะส่งผ่านไปยังชุดขยายสัญญาณแบบประจุ (Charge Amplifier) เพื่อเปลี่ยนค่าประจุดังกล่าวให้อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้า (Voltage) จากนั้นจึงทำการแปลงค่าสัญญาณที่ได้มาเป็นค่าแรงกัดตามสัดส่วนที่ได้มีการแนะนำไว้ในคู่มือของอุปกรณ์ตรวจรู้แรง



รูปที่ 4.2 การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและการยึดจับชิ้นงาน

ในกรณีที่แขนกลตามเคลื่อนที่โดยอาศัยค่าตำแหน่งและทิศทางจากแขนกลนำ ลักษณะการเคลื่อนด้ามจับแขนกลนำของผู้ดำเนินการจะส่งผลต่อลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลตามและการเคลื่อนดอกกัดในขณะกัดชิ้นงาน งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อุปกรณ์รางเลื่อนดังแสดงในรูปที่ 4.3 เพื่อช่วยอำนวยความสะดวกในการทดลองกรณีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงเพราะว่าสามารถเริ่มการเคลื่อนที่ได้ทันทีจากตำแหน่งเริ่มต้นของแขนกลนำ (Home Position) ซึ่งกำหนดไว้บนอุปกรณ์รางเลื่อนดังกล่าว นอกจากนี้รางเลื่อนแขนกลนำยังมีประโยชน์ในการทดสอบค่าแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือผู้ดำเนินการในทิศทางตรงข้ามกับการเลื่อนแขนกลนำบนรางเลื่อน เช่น กรณีนี้มีการเลื่อนแขนกลนำในทิศทาง –X จะเกิดแรงสะท้อนกลับในทิศทาง X แรงสะท้อนกลับของแขนกลนำเกิดขึ้นได้จากค่าสัญญาณอ้างอิงซึ่งคำนวณได้ในระบบควบคุม สัญญาณอ้างอิงดังกล่าวอาจกำหนดขึ้นได้จากผลต่างระหว่างตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกลนำและการเคลื่อนที่ของกำแพงเสมือน กำแพงเสมือนดังกล่าวเป็นขอบเขตที่สร้างขึ้นในโปรแกรมควบคุม เพื่อช่วยจำกัดบริเวณการเคลื่อนที่ของแขนกลนำ โดยแขนกลนำจะสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือผู้ดำเนินการเมื่อเกิดการเคลื่อนที่ข้ามเขตของกำแพง ในที่นี้เราจะกำหนดให้ขอบเขตของกำแพงเสมือนมีการเลื่อนตำแหน่งไปในทิศทาง –X เช่นเดียวกับทิศการเคลื่อนของแขนกลนำ

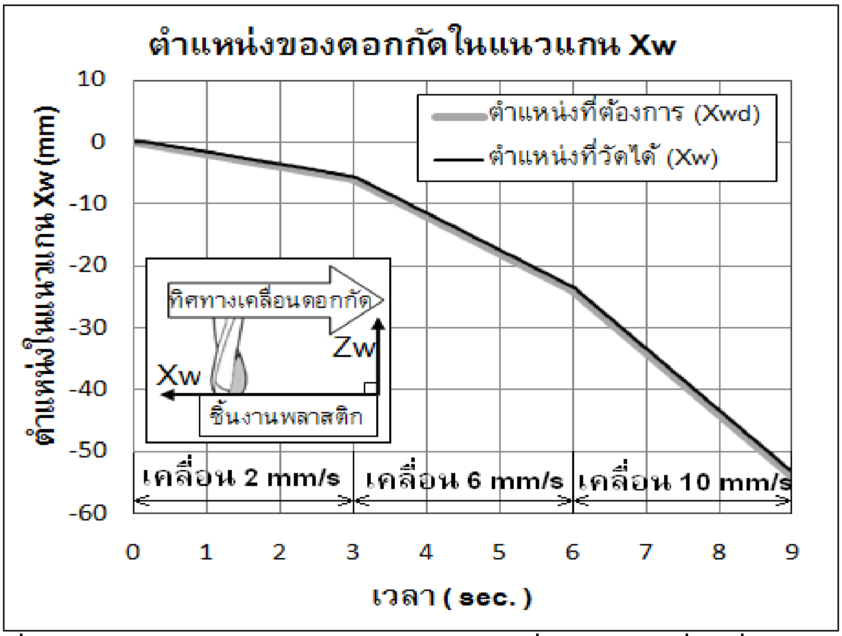


รูปที่ 4.3 การติดตั้งแขนกลนำบนรางเลื่อนสำหรับการกัดชิ้นงาน

4.1 ผลการทดลองเบื้องต้น

การทดลองเบื้องต้นนี้ ก็เพื่อต้องการศึกษาลักษณะของแรงกัดที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนที่ของดอกกัดและความลึก โดยทำการทดลองกัดเป็นร่องตามแนวเส้นตรงบนชิ้นวัสดุพลาสติกแบบ PE (Polyethylene) ระบบควบคุมจะควบคุมดอกกัดให้เคลื่อนที่กัดชิ้นงานในทิศทาง –Xw ในขณะเดียวกันอุปกรณ์ตรวจรู้แรงจะตรวจวัดแรงกัดที่คาบเวลาของสุ่มวัดข้อมูล (sampling period) โดยจะวัดตลอดช่วงเวลาของการกัด แรงกัดชิ้นงานซึ่งวัดค่าได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้แรงดังกล่าวจะประกอบด้วยแรงกัดค่าสูงและแรงกัดค่าต่ำ โดยที่ค่าแรงกัดค่าสูงจะเกิดขึ้นในขณะที่คมมีดกัดเนื้อชิ้นงานส่วนแรงกัดค่าต่ำจะเกิดขึ้นในขณะที่คมมีดไม่ได้กัดเนื้อชิ้นงาน เนื่องจากดอกกัดนี้เป็นแบบ 2 ฟัน ดังนั้นในหนึ่งรอบของการหมุนจะมีแรงกัดค่าสูงอยู่ 2 ครั้งเช่นเดียวกับค่าแรงกัดค่าต่ำ งานวิจัยนี้จะใช้เฉพาะแรงกัดค่าสูง โดยจะนำแรงกัดค่าสูงที่วัดค่าได้มาพิจารณาในขั้นตอนการควบคุมแรงกัดต่อไป

การทดลองเปลี่ยนแปลงความเร็วของการเคลื่อนที่ของดอกกัด (feed rate) โดยการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงผ่านระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลตาม รูปที่ 4.4 แสดงตำแหน่งในแนวแกน Xw เทียบกับเวลา เมื่อแบ่งการเปลี่ยนแปลงความเร็วออกเป็น 3 ช่วง คือช่วงความเร็ว 2, 6 และ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ โดยแต่ละช่วงความเร็วจะกินเวลา 3 วินาที อย่างไรก็ตาม ช่วงเวลาดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างอิสระ โดยการสั่งผ่านระบบควบคุมการเคลื่อนที่ ในการทดลองกัดครั้งนี้เรากำหนดความลึกของการกัดเท่ากับ 2 มิลลิเมตร จากรูปจะเห็นว่าค่าตำแหน่งจริงที่วัดได้จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าตำแหน่งที่ต้องการหรือตำแหน่งอ้างอิงเป็นอย่างมาก ผลดังกล่าวเพื่อยืนยันความสามารถในการควบคุมของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลที่เราพัฒนาขึ้น ถึงแม้จะมีแรงกัดซึ่งในที่นี้ถือเป็นสัญญาณรบกวนที่มากระทำกับระบบ แต่ระบบควบคุมก็ยังคงรักษาความแม่นยำในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลได้ ในการทดลองถัดไปเราจะคงค่าความเร็วของการกัดแต่จะเปลี่ยนแปลงความลึกของการกัด เราจะได้ความแม่นยำในระดับเดียวกัน ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวต่อไป

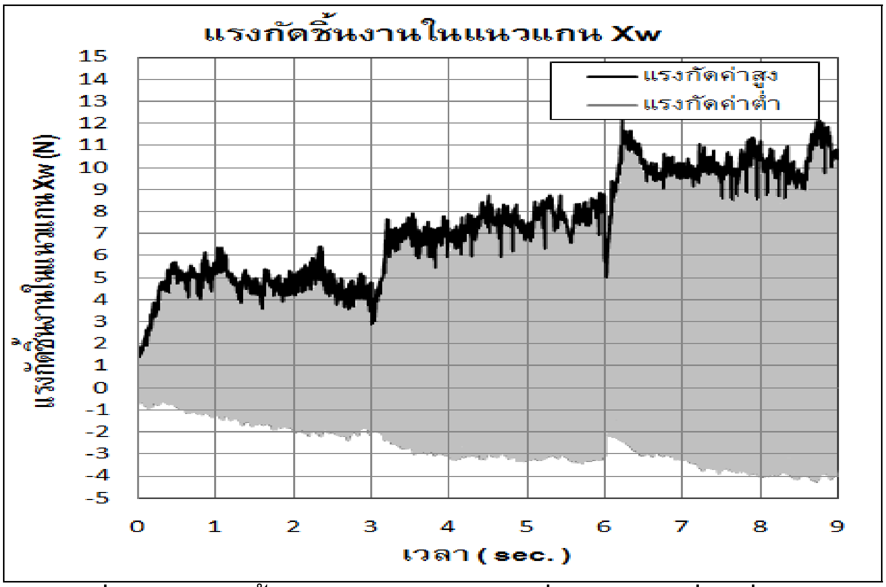


รูปที่ 4.4 ตำแหน่งของดอกกัดในแนวแกน Xw เมื่อดอกกัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2, 6 และ 10 mm/s ตามลำดับ (ความลึกในการกัด 2 มิลลิเมตร)

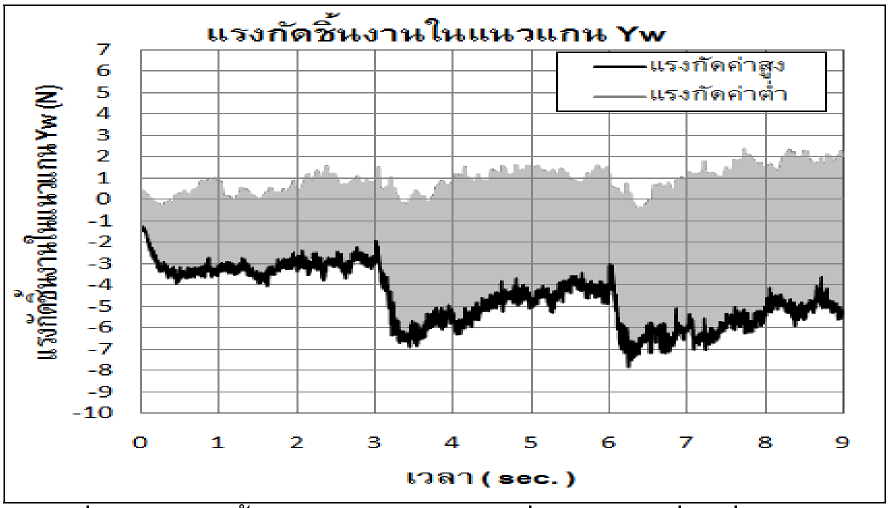
รูปที่ 4.5-4.7 แสดงค่าแรงกัดชิ้นงานที่วัดได้ในแนวแกน Xw, Yw และ Zw ตามลำดับ เมื่อกำหนดให้ดอกกัดเคลื่อนที่ในทิศทาง –Xw ด้วยความเร็ว 2, 6 และ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยการกำหนดค่าความเร็วการเคลื่อนที่ของดอกกัด (feed-rate) ผ่านระบบควบคุมการเคลื่อนที่

รูปที่ 4.5 แสดงแรงกัดชิ้นงานที่วัดค่าได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้แรงในแนวแกน Xw แรงกัดชิ้นงานค่าสูง (เส้นทึบสีดำ) แสดงค่าเป็นบวกตลอดระยะเวลาของการทดลอง โดยขนาดของแรงกัดชิ้นงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเร็วการเคลื่อนที่ของดอกกัด (feed-rate) การเปลี่ยนแปลงความเร็วการคลื่อนที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของแรงกัดชิ้นงานในขณะเริ่มต้นการเคลื่อนที่ เช่น การเปลี่ยนแปลงในขณะเวลา 3 วินาที (เริ่มเปลี่ยนแปลงความเร็วจาก 2 มิลลิเมตรต่อวินาที เป็น 6 มิลลิเมตรต่อวินาที) แรงกัดชิ้นงานเริ่มเปลี่ยนค่าจาก 3 นิวตัน จนกระทั่งมีค่าเป็น 7 นิวตัน ขณะที่เวลาผ่านไปประมาณ 0.2 วินาที และ การเปลี่ยนแปลงในขณะเวลา 6 วินาที (เริ่มเปลี่ยนแปลงความเร็วจาก 6 มิลลิเมตรต่อวินาที เป็น 10 มิลลิเมตรต่อวินาที) แรงกัดชิ้นงานเริ่มเปลี่ยนค่าจาก 5 นิวตัน จนกระทั่งมีค่าเป็น 12 นิวตัน ขณะที่เวลาผ่านไปประมาณ 0.2 วินาที เช่นกัน การเปลี่ยนแปลงค่าแรงกัดจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่ง แรงกัดชิ้นงานค่าต่ำ (สีเทา) มีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการเพิ่มความเร็วการเคลื่อนที่ของดอกกัด แรงกัดชิ้นงานค่าต่ำ (สีเทา) มีขนาดไม่เกิน 4 นิวตัน ในทิศทาง –Xw ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแรงกัดค่าสูง (เส้นทึบสีดำ) เป็นอย่างมาก รูปที่ 4.6 แสดงแรงกัดชิ้นงานที่วัดค่าได้ในแนวแกน Yw ในขณะที่ดอกกัดเคลื่อนที่ในทิศทาง –Xw ด้วยความเร็ว 2, 6 และ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ การเคลื่อนที่ของดอกกัดส่งผลให้แรงกัดชิ้นงานค่าสูง (เส้นทึบสีดำ) แสดงค่าเป็นลบ แรงกัดชิ้นงานค่าสูง (เส้นทึบสีดำ) จะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเร็วการเคลื่อนที่ของ

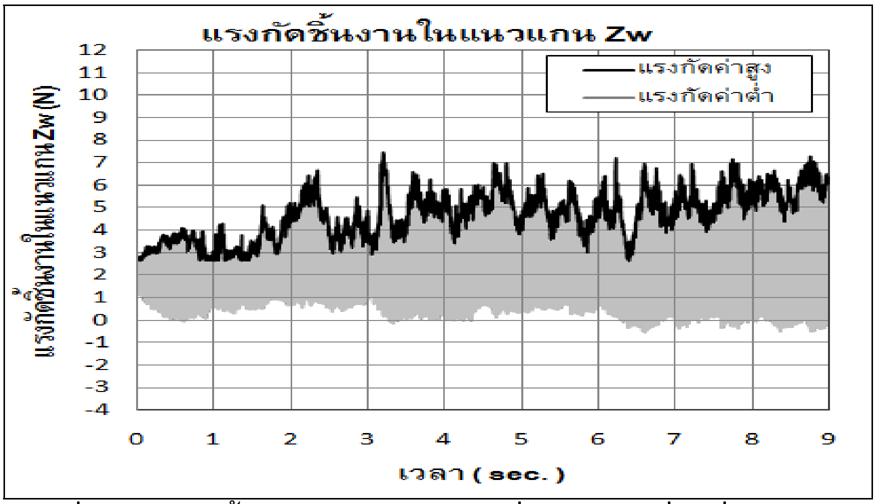
ดอกกัด (feed-rate) ขนาดของแรงกัดจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากในขณะเริ่มการเปลี่ยนแปลงความเร็วการเคลื่อนที่ในช่วงเวลา 3 วินาที และ 6 วินาที การเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงกัดจะมีค่าลดลงเมื่อเวลาผ่านไป แรงกัดชิ้นงานค่าต่ำ (สีเทา) มีค่าเพียงเล็กน้อย (แสดงค่าประมาณ 2 นิวตัน) ในขณะที่ดอกกัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 10 มิลลิเมตรต่อวินาที รูปที่ 4.7 แสดงค่าแรงกัดชิ้นงานที่วัดได้ในแนวแกน Zw แรงกัดชิ้นงานค่าสูง(เส้นทึบสีดำ)แสดงค่าเป็นบวกตลอดเวลา แสดงว่าดอกกัดมีแรงกดลงบนพื้นผิวชิ้นงาน แรงกัดดังกล่าวมีค่าระหว่าง 3 - 7 นิวตัน แรงกัดค่าต่ำ (สีเทา) จะมีค่าประมาณ 0 นิวตัน



รูปที่ 4.5 แรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Xw เมื่อดอกกัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2, 6 และ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ (ความลึกในการกัด 2 มิลลิเมตร)

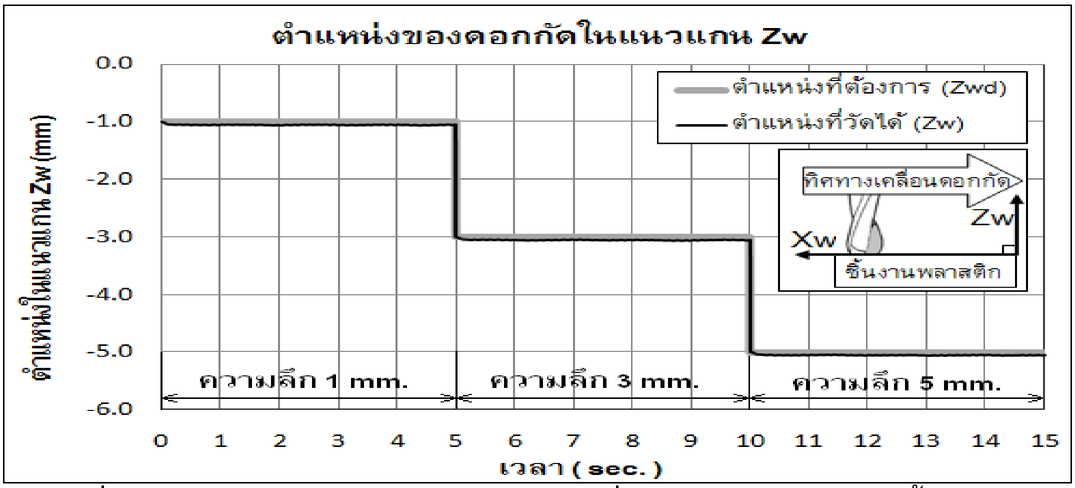


รูปที่ 4.6 แรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Yw เมื่อดอกกัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2, 6 และ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ (ความลึกในการกัด 2 มิลลิเมตร)



รูปที่ 4.7 แรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Zw เมื่อดอกกัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2, 6 และ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที ตามลำดับ (ความลึกในการกัด 2 มิลลิเมตร)

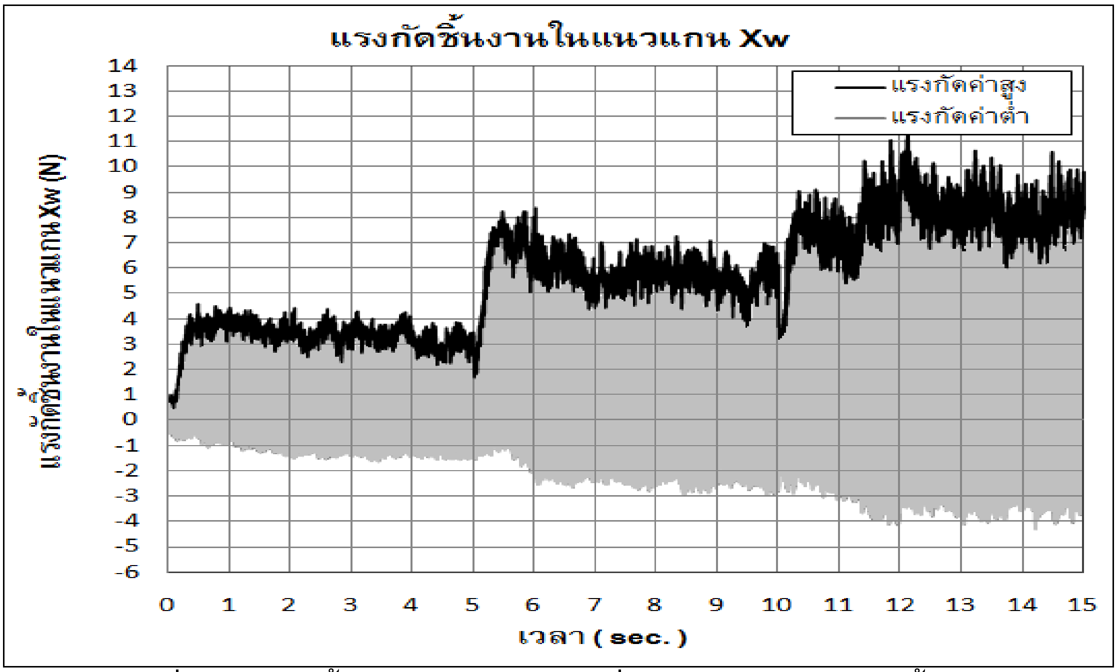
การทดลองเปลี่ยนแปลงความลึกของการกัด (depth of cut) โดยการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงผ่านระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลตามรูปที่ 4.8 แสดงตำแหน่งในแนวแกน Zw เทียบกับเวลา เมื่อแบ่งการเปลี่ยนแปลงความลึกออกเป็น 3 ช่วง คือช่วงความลึก 1, 3 และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยแต่ละช่วงความลึกจะกินเวลา 5 วินาที อย่างไรก็ตาม ช่วงเวลาดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างอิสระโดยการสั่งผ่านระบบควบคุมการเคลื่อนที่ ในการทดลองกัดครั้งนี้ เรากำหนดความเร็วการเคลื่อนที่เท่ากับ 2 มิลลิเมตรต่อวินาที จากรูปจะเห็นว่าค่าตำแหน่งจริงที่วัดได้จะมีค่าใกล้เคียงกับค่าตำแหน่งที่ต้องการหรือตำแหน่งอ้างอิงเป็นอย่างมาก แสดงว่าระบบควบคุมยังคงรักษาความแม่นยำในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลได้ในระดับเดียวกับการทดลองเปลี่ยนแปลงความเร็วในการเคลื่อนที่ของดอกกัด (ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น)



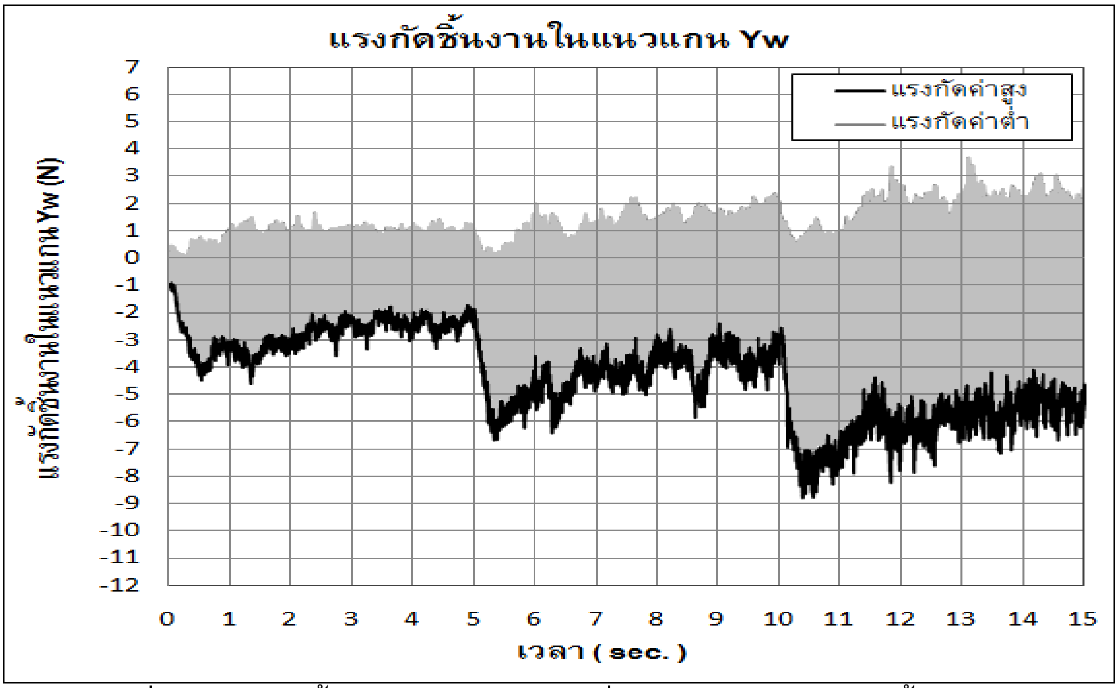
รูปที่ 4.8 ตำแหน่งของดอกกัดในแนวแกน Zw เมื่อความลึกการกัดจากผิวชิ้นงานคือ 1, 3 และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ดอกกัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที)

รูปที่ 4.9-4.11 แสดงค่าแรงกัดชิ้นงานที่วัดได้ในแนวแกน Xw, Yw และ Zw ตามลำดับ เมื่อกำหนดให้ดอกกัดทำการกัดชิ้นงานที่ความลึก (depth of cut) คือ 1, 3 และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ดอกกัดเคลื่อนที่ในทิศทาง –Xw ด้วยความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยการกำหนดตำแหน่งการเคลื่อนที่ผ่านระบบควบคุม

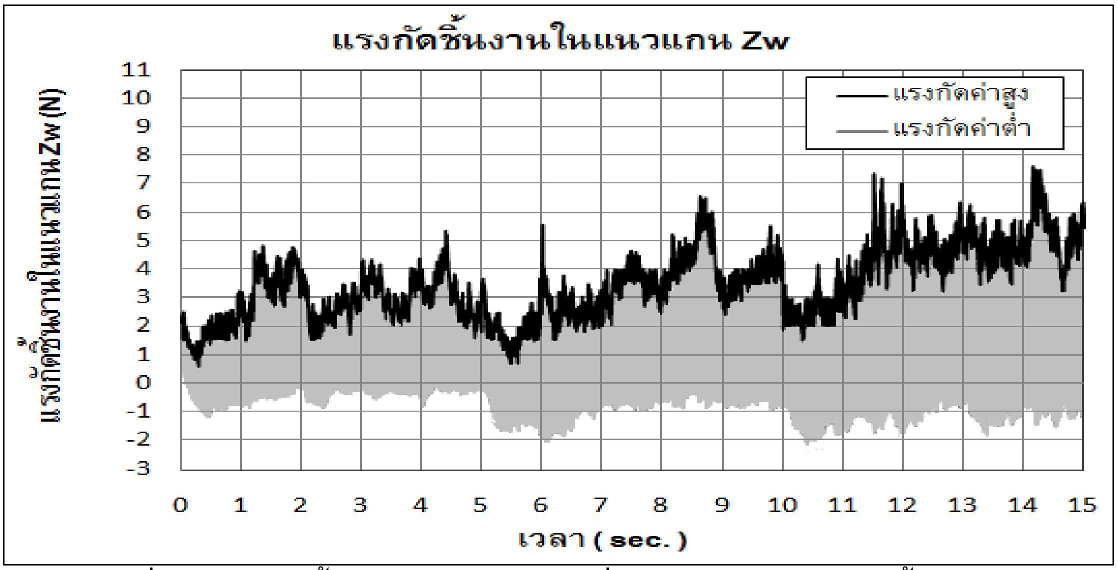
รูปที่ 4.9 แสดงแรงกัดชิ้นงานที่วัดค่าได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้แรงในแนวแกน Xw แรงกัดชิ้นงานค่าสูง (เส้นทึบสีดำ) แสดงค่าเป็นบวก การทดลองพบว่าขนาดของแรงกัดชิ้นงานค่าสูง (เส้นทึบสีดำ) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความลึกในการกัดชิ้นงาน (depth of cut) และแรงกัดชิ้นงานค่าสูง (เส้นทึบสีดำ) แสดงการสั่นในขณะกัดชิ้นงานที่ความลึก 5 มิลลิเมตร แรงกัดชิ้นงานค่าต่ำ (สีเทา) มีการเปลี่ยนแปลงตามการเพิ่มความลึกในการกัดเพียงเล็กน้อย โดยมีขนาดแรงกัดไม่เกิน 4 นิวตัน รูปที่ 4.10 แสดงแรงกัดชิ้นงานที่วัดค่าได้ในแนวแกน Yw แรงกัดค่าสูง (เส้นทึบสีดำ) แสดงค่าเป็นลบโดยมีขนาดเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความลึกในการกัดแรงกัดชิ้นงาน แรงกัดชิ้นงานค่าสูง (เส้นทึบสีดำ) เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วในขณะที่ดอกกัดเริ่มเคลื่อนที่ (ขณะเวลา 5 วินาที และ 10 วินาที) หลังจากนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าแรงกัดจะลดลง แรงกัดชิ้นงานค่าสูง (เส้นทึบสีดำ) แสดงการสั่นในขณะทำการกัดชิ้นงานที่ความลึก 5 มิลลิเมตร (ช่วงเวลา 10-15 วินาที) แรงกัดค่าต่ำ (สีเทา) ในแต่ละช่วงเวลาแสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงกัดไม่มากนักโดยมีค่าระหว่าง 1-3 นิวตัน รูปที่ 4.11 แสดงแรงกัดชิ้นงานที่วัดค่าได้ในแนวแกน Zw แรงกัดค่าสูง (เส้นทึบสีดำ) มีค่าระหว่าง 3-7 นิวตัน ค่าแรงกัดสูงสุดเกิดขึ้นมื่อดอกกัดทำการกัดชิ้นงานที่ความลึก 5 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.9 แรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Xw เมื่อความลึกการกัดจากผิวชิ้นงานคือ 1, 3 และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ดอกกัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที)

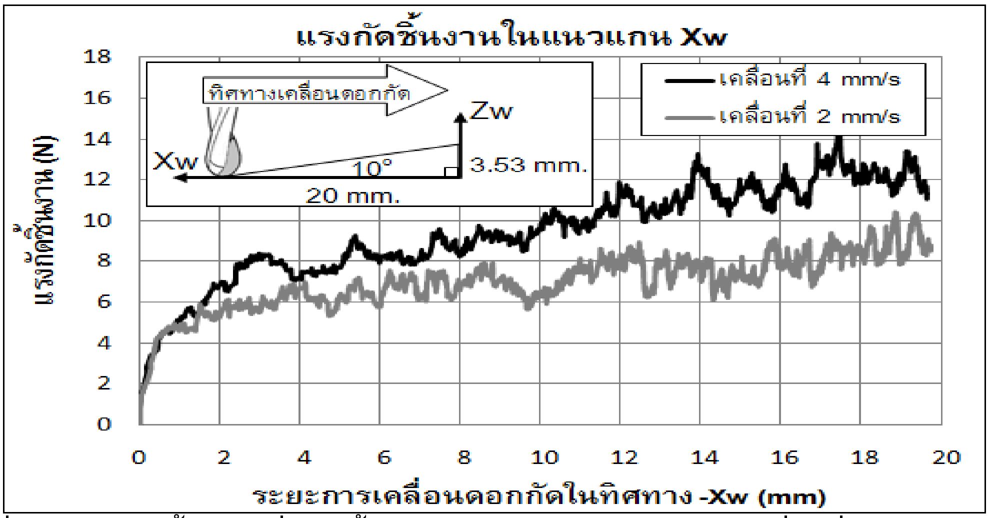


รูปที่ 4.10 แรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Yw เมื่อความลึกการกัดจากผิวชิ้นงานคือ 1, 3 และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ดอกกัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที)



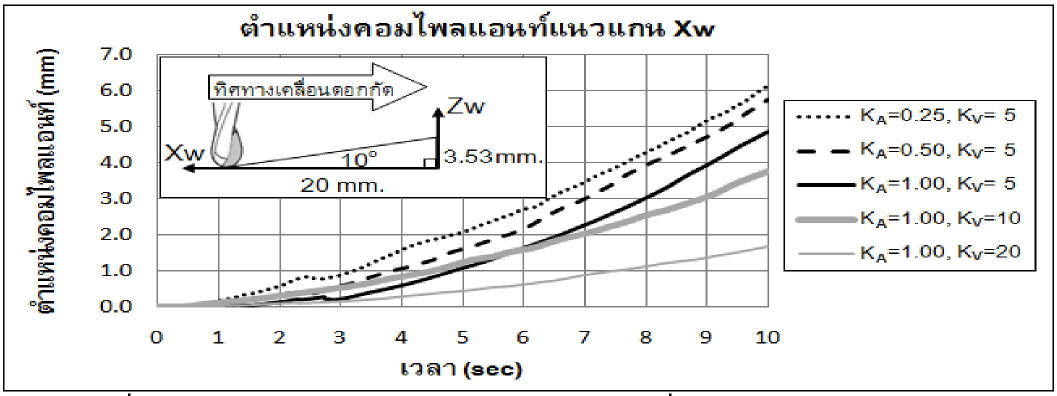
รูปที่ 4.11 แรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Zw เมื่อความลึกการกัดจากผิวชิ้นงานคือ 1, 3 และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ (ดอกกัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที)

การทดลองเพิ่มความเร็วการเคลื่อนที่ของดอกกัด (feed-rate) และการทดลองเพิ่มความลึกในการกัด (depth of cut) ส่งผลให้แรงกัดชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น (ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น) ค่าแรงกัดชิ้นงานจะมีการเปลี่ยนไปตามความเร็วการเคลื่อนที่และความลึกในการกัดชิ้นงานแต่ละครั้ง แรงกัดชิ้นงานที่มีค่าสูงเกินไปจะส่งผลต่อดอกกัดชิ้นงานและผิวชิ้นงานจนทำให้เกิดความเสียหายได้ การจัดวางชิ้นงานในลักษณะที่ไม่เหมาะสมอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อดอกกัดชิ้นงาน ดอกกัดชิ้นงานทำการกัดเซาะชิ้นงานด้วยความลึกเกินกว่าค่าที่กำหนด ส่งผลให้แรงกัดชิ้นงานมีค่าสูงขึ้นเช่นกัน ในที่นี้จะทำการศึกษาลักษณะของแรงกัดชิ้นงานวัสดุ PE(Polyethylene) และทำการควบคุมแรงกัดเมื่อมีการจัดวางพื้นผิวชิ้นงานเป็นมุมเอียงขึ้น 10 องศากับกับทิศทางการเคลื่อนที่ของดอกกัด เนื่องจากดอกกัดเคลื่อนที่แนวเส้นตรงในทิศทาง –Xw แต่ผิวหน้าของชิ้นงานมีความลาดเอียงขึ้นทำให้ความลึกในการกัดชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น แรงกัดชิ้นงานที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของดอกกัดตรวจวัดได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้แรง รูปที่ 4.12 แสดงแรงกัดชิ้นงานวัสดุ PE(Polyethylene) เทียบกับระยะการเคลื่อนที่ในทิศทาง –Xw ชิ้นงานซึ่งติดตั้งไว้กับปากกาจับชิ้นงานทำมุมเอียง 10 องศากับทิศทางการเคลื่อนที่ของดอกกัด กำหนดให้ดอกกัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว (feed-rate) 2 มิลลิเมตรต่อวินาที และ 4 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยการกำหนดค่าผ่านระบบควบคุมการเคลื่อนที่ ดอกกัดเริ่มกัดชิ้นงานที่ความลึก 1 มิลลิเมตร เมื่อดอกกัดเคลื่อนที่กัดชิ้นงานเป็นระยะ 20 มิลลิเมตร ในทิศทาง –Xw ความลึกในการกัดชิ้นงานจะเพิ่มขึ้นอีก 3.53 มิลลิเมตร ส่งผลให้ความลึกสูงสุดในการกัดชิ้นงานครั้งนี้คือ 4.53 มิลลิเมตร การทดลองวัดค่าแรงกัดชิ้นงานพบว่าแรงกัดชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่ดอกกัดเคลื่อนไป (ความลึกในการกัดมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากการวางชิ้นงานเป็นมุมเอียง) แรงกัดชิ้นงานเปลี่ยนแปลงรวดเร็วขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วการเคลื่อนที่ (feed-rate) จาก 2 มิลลิเมตรต่อวินาที เป็น 4 มิลลิเมตรต่อวินาที



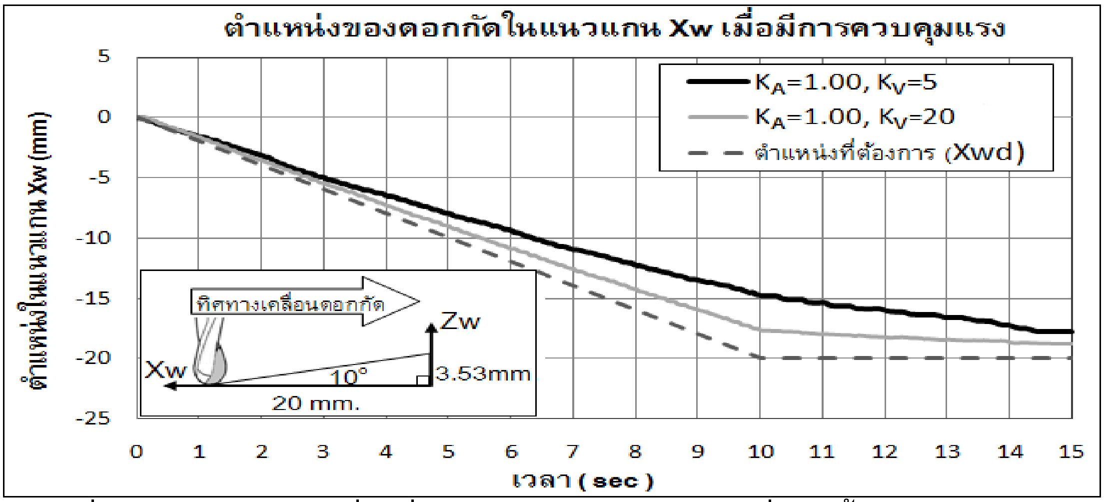
รูปที่ 4.12 แรงกัดชิ้นงาน เมื่อวางชิ้นงานเอียง 10 องศา และดอกกัดเคลื่อนที่ในทิศทาง –Xw ด้วยความเร็ว 2 และ 4 มิลลิเมตรต่อวินาที

เมื่อทราบลักษณะของแรงกัดที่เกิดขึ้นในขณะทำการกัดชิ้นงานซึ่งวางตัวเป็นมุมเอียง 10 องศาแล้ว ขั้นตอนต่อไปผู้วิจัยจะทำการศึกษาการควบคุมแรงกัดชิ้นงานโดยกำหนดให้มีการจัดวางชิ้นงานเป็นมุมเอียง 10 องศาและทำการกัดชิ้นงานโดยการกำหนดตำแหน่งของดอกกัดชิ้นงานผ่านระบบควบคุม ในเบื้องต้นผู้วิจัยต้องการประมาณค่าพารามิเตอร์สำหรับการควบคุมแรงกัดชิ้นงานวัสดุ PE(Polyethylene) ให้มีค่าแรงกัดใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้และมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของดอกกัดไม่มากจนเกินไป ค่าพารามิเตอร์สำหรับการควบคุมแรงกัดประกอบด้วยค่า K_A และ K_V การปรับค่า K_A และ K_V ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคอมไพลแอนท์ $\left(p_c\right)$ ดังแสดงในสมการที่ 3.30 $\left(K_A\ddot{p}_c + K_V\dot{p}_c = \left(f_d - f\right)\right)$ เมื่อตำแหน่งคอมไพล์แอนท์เปลี่ยนแปลงไปส่งผลให้ตำแหน่งอ้างอิงสำหรับการเคลื่อนที่ของดอกกัด เปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่งดอกกัดที่ต้องการเพื่อทำการควบคุมแรงให้ได้ใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคอมไพลแอนท์ควรเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่าไม่มากจนเกินไปเพื่อให้มีระยะเวลาในการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด รูปที่ 4.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคอมไพล์แอนท์ในขณะทำการควบคุมแรงกัดชิ้นงานโดยปรับค่าเกน K_A และ K_V (แสดงในด้านขวาของรูปที่ 4.13) การทดลองนี้กำหนดให้ดอกกัดเคลื่อนที่กัดเซาะชิ้นงานในทิศทาง –Xw ด้วยความเร็วการเคลื่อนที่ 2 มิลลิเมตรต่อวินาที โดยการกำหนดตำแหน่งที่ต้องการผ่านระบบควบคุม ผลการทดลองในขณะเวลา 10 วินาที แสดงว่าการปรับเพิ่มค่า K_A จากกรณีที่ K_A=0.25, K_V=5 (จุดสีดำ) มาเป็น กรณีที่ K_A=1.00, K_V=5 (เส้นทึบสีดำ) ทำให้ตำแหน่งคอมไพลแอนท์มีค่าลดลงขึ้น 1 มิลลิเมตร (ตำแหน่งคอมไพลแอนท์ลดลงจาก 6 มิลลิเมตร เป็น 5 มิลลิเมตร) การปรับเพิ่มค่า K_V จากกรณีที่ K_A=1.00, K_V=5 (เส้นทึบสีดำ) มาเป็น กรณีที่ K_A=1.00, K_V=20 (เส้นทึบสีเทาเส้นเล็ก) ทำให้ตำแหน่งคอมไพลแอนท์มีค่าลดลง 3.2 มิลลิเมตร (ตำแหน่งคอมไพลแอนท์ลดลงจาก 5 มิลลิเมตร เป็น 1.8 มิลลิเมตร) ในที่นี้การปรับค่า K_V ส่งผลต่อตำแหน่งคอมไพลแอนท์มาก ดังนั้น ผู้วิจัยจึงเลือกทำการศึกษาการควบคุมแรงกัดในกรณีที่ K_A=1.00, K_V=5 (เส้นทึบสีดำ) และกรณีที่ K_A=1.00, K_V=20 (เส้นทึบสีเทาเส้นเล็ก) ดังจะแสดงในขั้นตอนถัดไป

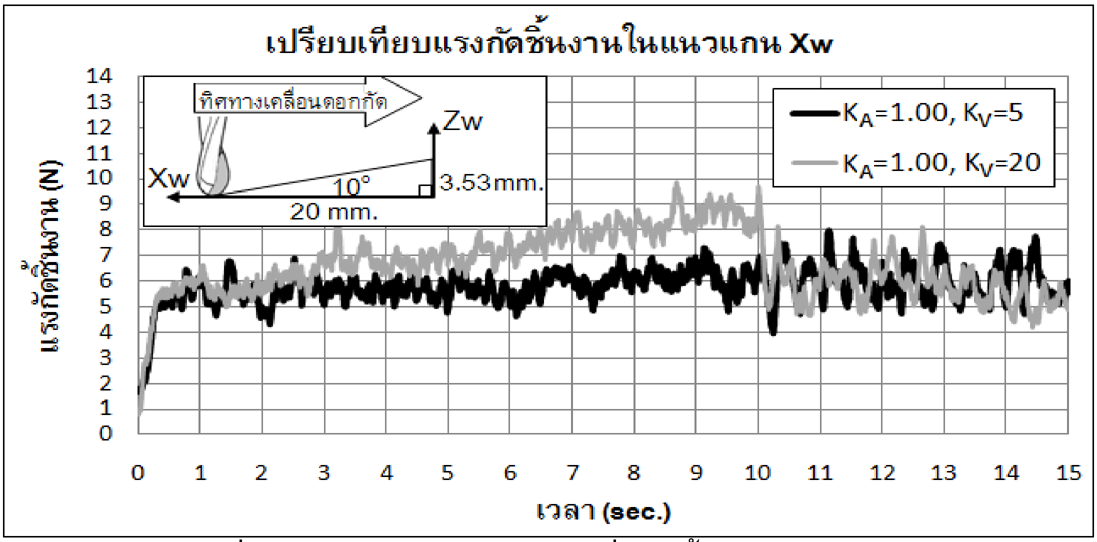


รูปที่ 4.13 ตำแหน่งคอมไพลแอนท์แนวแกน Xw เมื่อปรับค่าเกน Ka และ Kv

รูปที่ 4.14 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของดอกกัดที่วัดได้ในแนวแกน Xw เทียบกับเวลาเมื่อมีการควบคุมแรงกัดในแนวแกน Xw ผลการทดลองประกอบด้วยตำแหน่งของดอกกัดที่เกิดจากการกำหนดค่า K_A=1.00, K_V=20 (เส้นทึบสีเทา) และตำแหน่งของดอกกัดที่เกิดจากการกำหนดค่า K_A=1.00, K_V=5 (เส้นทึบสีดำ) ในที่นี้ได้แสดงตำแหน่งของดอกกัดที่ต้องการ (เส้นประสีเทา) เมื่อต้องการให้ดอกกัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาทีในทิศทาง –Xw โดยการกำหนดค่าผ่านระบบควบคุม การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคอมไพลแอนท์เพื่อทำการควบคุมแรงกัดให้ได้ใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้ (ดังสมการที่ 3.30) ส่งผลให้ตำแหน่งของดอกกัดมีการเปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่งที่ต้องการ ผลการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของดอกกัดเมื่อกำหนดค่า K_A=1.00, K_V=20 (เส้นทึบสีเทา) ทำให้ดอกกัดมีตำแหน่งต่างจากตำแหน่งที่ต้องการ 2 มิลลิเมตรในขณะเวลา 10 วินาที และ 1 มิลลิเมตรในขณะเวลา 15 วินาที ผลการทดลองเมื่อกำหนดค่า K_A=1.00, K_V=5 (เส้นทึบสีดำ) ทำให้ดอกกัดมีตำแหน่งต่างจากตำแหน่งที่ต้องการเพิ่มขึ้นเป็น 5 มิลลิเมตรในขณะเวลา 10 วินาที และ 2 มิลลิเมตรในขณะเวลา 15 วินาที ผลการทดลองแสดงว่าตำแหน่งที่วัดได้ของดอกกัดจะแตกต่างไปจากตำแหน่งที่ต้องการเมื่อมีการควบคุมแรงกัด รูปที่ 4.15 แสดงค่าแรงกัดที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้แรงในแนวแกน Xw เมื่อมีการควบคุมแรงกัดโดยกำหนดค่าแรงกัดที่ต้องการให้มีขนาด 5 นิวตันในแนวแกน Xw ดอกกัดจะเคลื่อนที่กัดชิ้นงานตามตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Xw ดังกล่าวมาข้างต้น ผลการควบคุมแรงกัดชิ้นงานโดยกำหนดค่า K_A=1.00, K_V=20 (เส้นทึบสีเทา) ไม่สามารถทำให้แรงกัดมีค่าต่ำลงในช่วงเวลา 0-10 วินาที แต่กรณีการกำหนดค่า K_A=1.00, K_V=5 (เส้นทึบสีดำ) สามารถทำให้แรงกัดที่เกิดขึ้นมีค่าเข้าใกล้แรงกัดที่กำหนดไว้ ดังนั้นเมื่อต้องการลดค่าแรงกัดชิ้นงานให้ใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้มากขึ้นควรเลือกใช้การควบคุมแรงโดยการกำหนดค่า K_A=1.00 และ K_V=5



รูปที่ 4.14 ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของดอกกัดในแนวแกน Xw เมื่อวางชิ้นงานเป็นมุมเอียง (กำหนดให้ดอกกัดเคลื่อนที่ในทิศทาง –Xw ความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที)

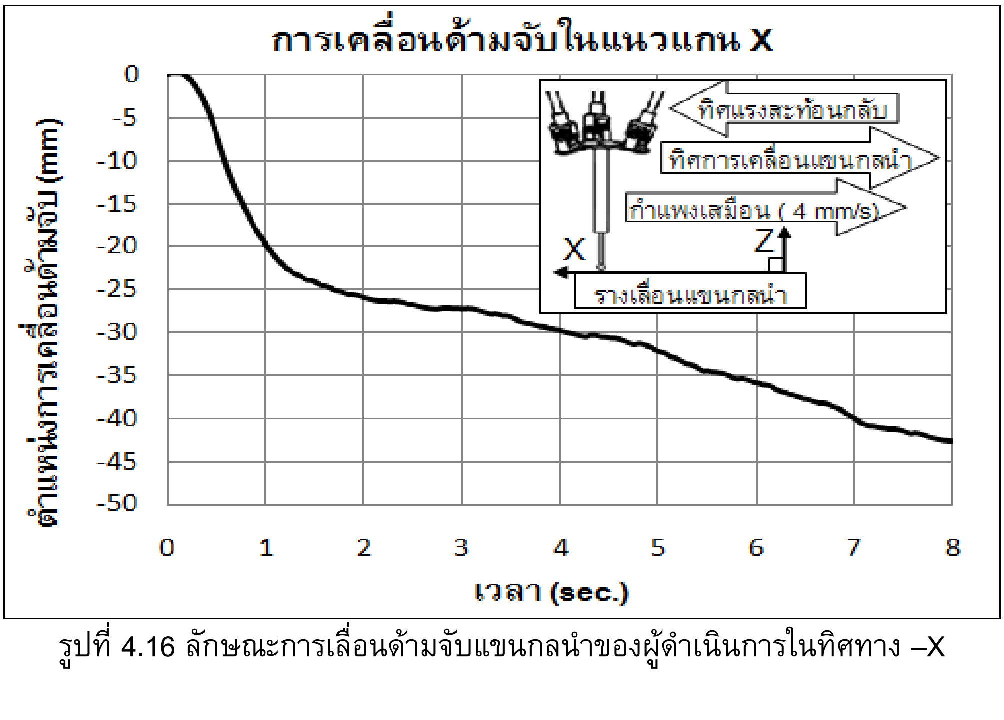


รูปที่ 4.15 แรงกัดในแนวแกน Xw เมื่อวางชิ้นงานเป็นมุมเอียง
(กำหนดให้ดอกกัดเคลื่อนที่ในทิศทาง –Xw ความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อวินาที)

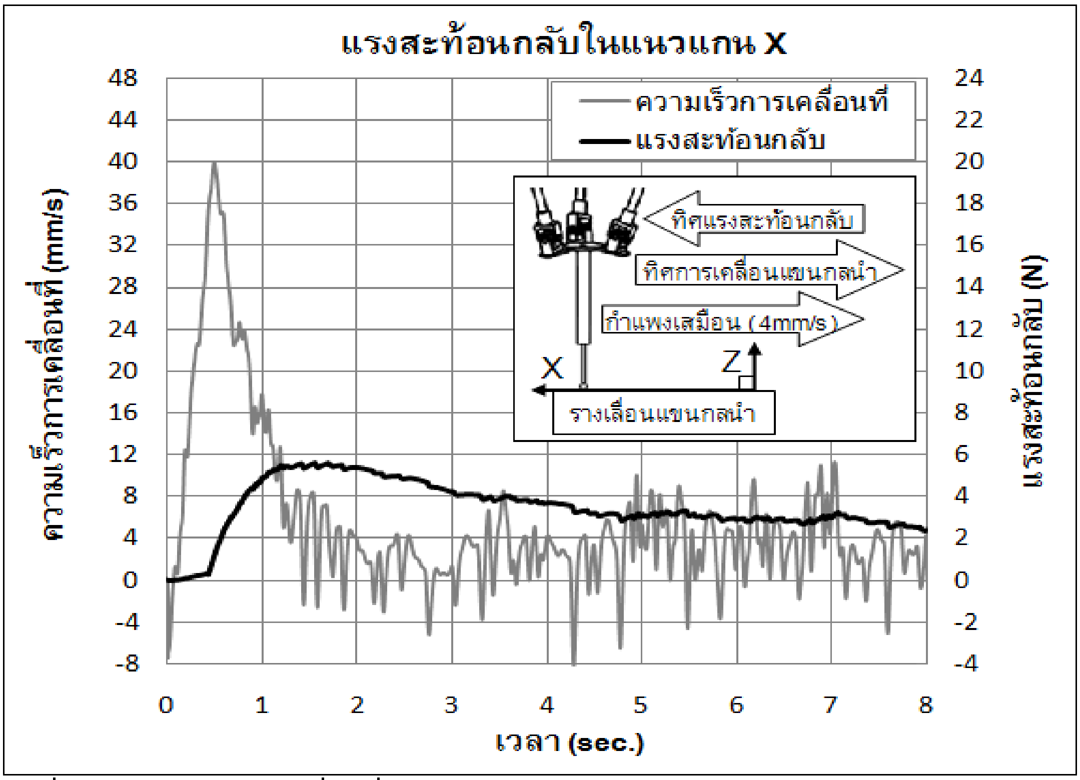
ผลการทดลองที่ได้นำเสนอมาข้างต้นเป็นการกำหนดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของดอกกัดโดยการส่งค่าผ่านระบบควบคุมการเคลื่อนที่ วิธีการดังกล่าวได้กำหนดความเร็วการเคลื่อนที่ของดอกกัด(feed-rate) ตั้งแต่เริ่มต้นการเคลื่อนที่ของดอกกัดจึงสามารถกำหนดค่าความเร็วการเคลื่อนดอกกัด (feed-rate) ให้อยู่ในระดับที่พอเหมาะได้ แต่ในกรณีที่ดอกกัดมีการเคลื่อนที่ด้วยระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ ความเร็วการเคลื่อนที่ของดอกกัดจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการเลื่อนมือของผู้ดำเนินการ เมื่อผู้ดำเนินการจะเลื่อนด้ามจับแขนกลนำจะทำให้ตำแหน่งปลายแขนกลนำมีการเปลี่ยนแปลงไป ตำแหน่งปลายแขนกลนำดังกล่าวจะนำมาใช้เป็นตำแหน่งที่ต้องการให้ดอกกัดเคลื่อนที่ เมื่อความเร็วในการเลื่อนด้ามจับแขนกลนำมีค่าสูงจะส่งผลให้ดอกกัดชิ้นงานเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงและทำให้แรงกัดชิ้นงานมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย แรงกัดชิ้นงานที่มีค่าสูงเกินไปจะส่งผลเสียต่อดอกกัดและผิวชิ้นงาน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าความเร็วในการเลื่อนด้ามจับแขนกลนำของผู้ดำเนินการมีความสำคัญต่อการกัดชิ้นงานเป็นอย่างมาก การทดลองต่อไปนี้จะทำการศึกษาการใช้แรงสะท้อนกลับของแขนกลนำมากระทำกับมือของผู้ดำเนินการเพื่อจำกัดความเร็วการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลนำไม่ให้มีค่าสูงจนเกินไป

ค่าแรงสะท้อนกลับที่เหมาะสมประมาณค่าได้จากการทดลองเคลื่อนด้ามจับแขนกลนำบนรางเลื่อนเปรียบเทียบกับการเคลื่อนที่ของกำแพงเสมือน แขนกลนำจะสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการหากผู้ดำเนินการเลื่อนด้ามจับแขนกลนำเร็วกว่าการเคลื่อนที่ของกำแพงเสมือนจนเกิดการเคลื่อนที่ข้ามเขตของกำแพงเสมือน แรงสะท้อนกลับเกิดขึ้นเป็นสัดส่วนกับผลต่างระหว่างตำแหน่งของกำแพงเสมือนและด้ามจับแขนกลนำ การทดลองนี้กำหนดให้กำแพงเสมือนเคลื่อนที่ไปในทิศทาง –X ด้วยความเร็ว 4 มิลลิเมตรต่อวินาที

รูปที่ 4.16 แสดงลักษณะการเลื่อนด้ามจับแขนกลนำในแต่ละช่วงเวลา ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงเวลา 1 วินาที ผู้ดำเนินการเลื่อนด้ามจับแขนกลนำไปในทิศทาง –X อย่างรวดเร็ว สังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของด้ามจับจากตำแหน่งเริ่มต้นไป 20 mm หลังจากนั้นการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจะมีค่าน้อยกว่าในช่วงเวลาแรก รูปที่ 4.17 แสดงผลการประมาณความเร็วในการเลื่อนด้ามจับของผู้ดำเนินการ (สเกลแกนตั้งด้านซ้าย) และค่าแรงสะท้อนกลับที่กระทำต่อมือของผู้ดำเนินการ (สเกลแกนตั้งด้านขวา) เทียบกับเวลา ผลของแรงสะท้อนกลับ (เส้นทึบสีดำ) ทำให้ผู้ดำเนินการลดความเร็วในการเลื่อนด้ามจับแขนกลนำ (เส้นประสีเทา) จนรู้สึกได้ว่าแรงสะท้อนกลับมีขนาดลดลงและสามารถเลื่อนด้ามจับแขนกลนำได้สะดวกขึ้น ผลการทดลองแสดงว่าแรงสะท้อนกลับ (เส้นทึบสีดำ) ควรมีค่าระหว่าง 2 และ 4 นิวตัน ซึ่งทำให้ผู้ดำเนินการยังคงรู้สึกถึงแรงสะท้อนกลับในขณะเคลื่อนด้ามจับแขนกลนำและสามารถเคลื่อนแขนกลนำด้วยความเร็วที่ไม่สูงมากนัก (ความเร็วสูงสุดไม่เกิน 12 มิลลิเมตรต่อวินาที) ค่าแรงสะท้อนกลับสำหรับต้านทานการเคลื่อนมือของผู้ดำเนินการควรมีค่าประมาณ 5.5 นิวตัน เนื่องจากเป็นค่าแรงสะท้อนกลับที่ทำให้ผู้ดำเนินการลดความเร็วการเลื่อนด้ามจับจนมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วของกำแพงเสมือน (ความเร็ว 4 มิลลิเมตรต่อวินาที) และเป็นค่าแรงสะท้อนกลับสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะเวลาประมาณ 1.2 วินาที



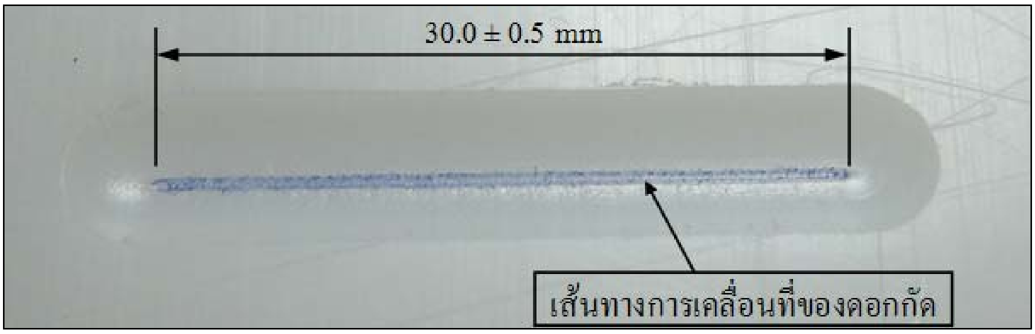
รูปที่ 4.16 ลักษณะการเลื่อนด้ามจับแขนกลนำของผู้ดำเนินการในทิศทาง –X



รูปที่ 4.17 ความเร็วการเคลื่อนที่ของด้ามจับและแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือผู้ดำเนินการ

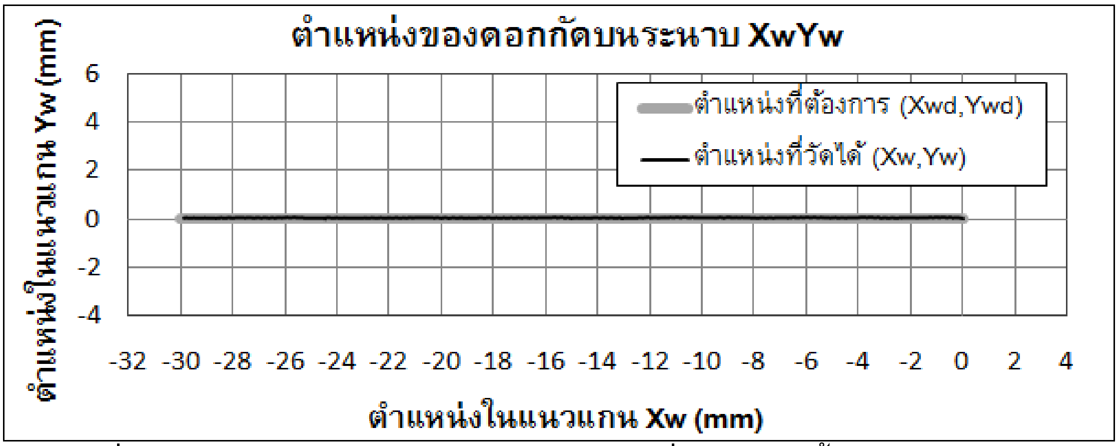
4.2 ทดลองกัดชิ้นงานเป็นร่องแนวเส้นตรง (Slot)

การทดลองกัดชิ้นงานป็นร่องแนวเส้นตรง (Slot) จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการควบคุมแรงในขณะกัดชิ้นงาน เมื่อดอกกัดเคลื่อนที่กัดชิ้นงานด้วยระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟโดยตำแหน่งที่ต้องการของดอกกัดคือตำแหน่งที่ปลายแขนกลนำเคลื่อนที่ไปในแต่ละเวลา ตำแหน่งปลายของแขนกลนำในแต่ละเวลาของการสุ่มวัดข้อมูลเกิดจากผู้ดำเนินการทำการเคลื่อนด้ามจับของแขนกลนำ ผู้ดำเนินการจะเลื่อนด้ามจับแขนกลนำด้วยอัตราเร็วมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความรู้สึกการรับรู้แรงสะท้อนกลับที่กระทำกับมือของผู้ดำเนินการดังที่ได้แสดงแสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.1 (การทดลองเบื้องต้น) เมื่อผู้ดำเนินการรับรู้แรงสะท้อนกลับที่ทำให้เกิดความรู้สึกว่ามีแรงกระทำที่กระทำกับมือจับค่อนข้างสูง ผู้ดำเนินการจะเลื่อนด้ามจับแขนกลนำด้วยความเร็วที่ลดลง ดังนั้นตำแหน่งปลายแขนกลนำที่เวลาใดๆจะเกิดการเปลี่ยนแปลงช้าลง ส่งผลให้ตำแหน่งที่ต้องการให้ดอกกัดเคลื่อนที่ไปในแต่ละเวลามีการเปลี่ยนแปลงน้อยลงตามไปด้วย การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้ความเร็วการเคลื่อนที่ของดอกกัด (feed rate) มีค่าลดลงตามไปด้วย การเคลื่อนที่ของดอกกัดไปตามตำแหน่งที่ต้องการจะทำให้เกิดแรงกัดชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น แรงกัดชิ้นงานที่เกิดขึ้นนี้วัดค่าได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้แรง เมื่อแรงกัดชิ้นงานที่วัดได้มีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ ระบบควบคุมจะต้องทำการควบคุมแรงกัดให้ได้ใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดไว้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความเสียหายต่อผิวชิ้นงานและคมมีดของดอกกัด (ฟันของดอกกัด) ในเบื้องต้นผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบแรงกัดที่เกิดขึ้น โดยไม่มีการควบคุมแรงกัด เพื่อจะนำค่าแรงกัดที่วัดได้มาเป็นค่าอ้างอิงในการกำหนดค่าแรงกัดสำหรับการควบคุมแรงกัดต่อไป การทดลองนี้กำหนดให้ดอกกัดเคลื่อนที่กัดชิ้นงานโดยการกำหนดความเร็วการเคลื่อนที่ของดอกกัด (feed rate) โดยกำหนดผ่านระบบควบคุมการเคลื่อนที่ ดอกกัดจะเคลื่อนที่กัดชิ้นงานที่เป็นวัสดุ PE (Polyethylene) ด้วยความเร็วการเคลื่อนที่ (feed rate) ที่มีค่าเท่ากับ 4 มิลลิเมตรต่อวินาที ในทิศทาง -Xw เป็นระยะทาง 30 มิลลิเมตร ทำให้เกิดร่องแนวเส้นตรงซึ่งมีความลึก 2 มิลลิเมตร รูปที่ 4.18 แสดงชิ้นงานที่ได้จากการกัด ผู้วิจัยได้แสดงบริเวณส่วนลึกของร่องแนวเส้นตรงโดยการใช้ปากกาเขียนเส้นทึบลงบนบริเวณดังกล่าวเพื่อให้รูปภาพมีความชัดเจนมากขึ้น เส้นทึบดังกล่าวมีความยาวประมาณ 30 มิลลิเมตร ซึ่งสอดคล้องกับระยะทางการเคลื่อนที่ของดอกกัดที่ต้องการในการกัดชิ้นงาน



รูปที่ 4.18 ชิ้นงานที่ได้จากการกัดเป็นเส้นตรง (ความลึก 2 มิลลิเมตร)

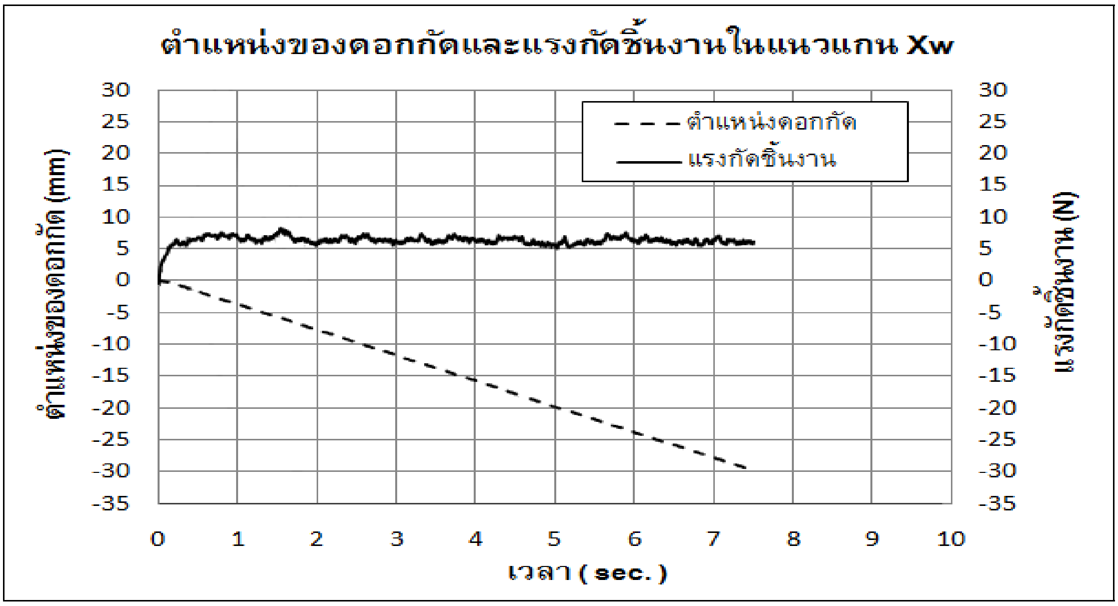
รูปที่ 4.19 แสดงตำแหน่งของดอกกัดบนระนาบ XwYw โดยทำการแสดงตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้ (เส้นทึบสีดำ) เทียบกับตำแหน่งของดอกกัดที่ต้องการ (เส้นทึบสีเทา) โดยที่การทดลองเริ่มต้นจากตำแหน่งที่ต้องการ คือ (Xw,Yw) = (0,0) จนกระทั่งตำแหน่งที่ต้องการมีค่าเป็น (Xw,Yw) = (-30,0) การทดลองพบว่าตำแหน่งของดอกกัดที่วัดค่าได้ (เส้นทึบสีดำ) มีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งของดอกกัดที่ต้องการ (เส้นทึบสีเทา) ตลอดระยะทางการเคลื่อนที่ของดอกกัด ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นในส่วนของความสามารถในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวกัดของระบบควบคุมในส่วนที่เกี่ยวกับการควบคุมการเคลื่อนที่หรือลูปในของระบบควบคุมตำแหน่งและแรงโดยตรงตามแผนภาพที่แสดงในรูปที่ 3.7



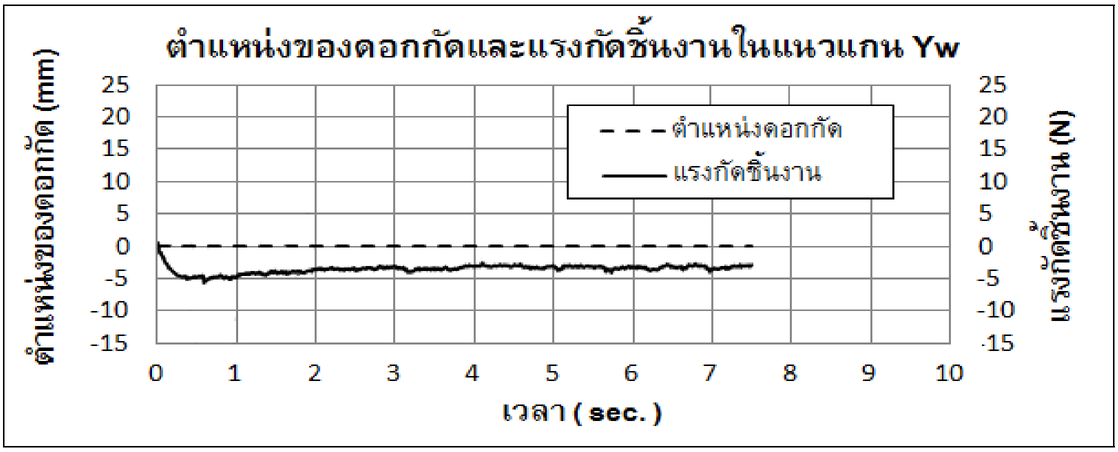
รูปที่ 4.19 ตำแหน่งของดอกกัดบนระนาบ XwYw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นเส้นตรง

รูปที่ 4.20-4.22 แสดงตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้และแรงกัดชิ้นงานเทียบกับเวลาที่ดอกกัดเคลื่อนที่ เมื่อมีการวัดค่าดังกล่าวในแนวแกน Xw Yw และ Zw ตามลำดับ ตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้ (แกนตั้งด้านซ้าย) มีการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาเฉพาะในแนวแกน Xw ทั้งนี้เนื่องจากการกำหนดให้ดอกกัดเคลื่อนที่เฉพาะในทิศทาง –Xw การที่ดอกกัดดังกล่าวถูกกำหนดให้มีการเคลื่อนที่ในทิศทาง –Xw ทำให้เกิดแรงกัดชิ้นงานทั้งในแนวแกน Xw Yw และ Zw โดยสามารถแสดงค่าแรงกัดที่เกิดขึ้นได้ ดังต่อไปนี้

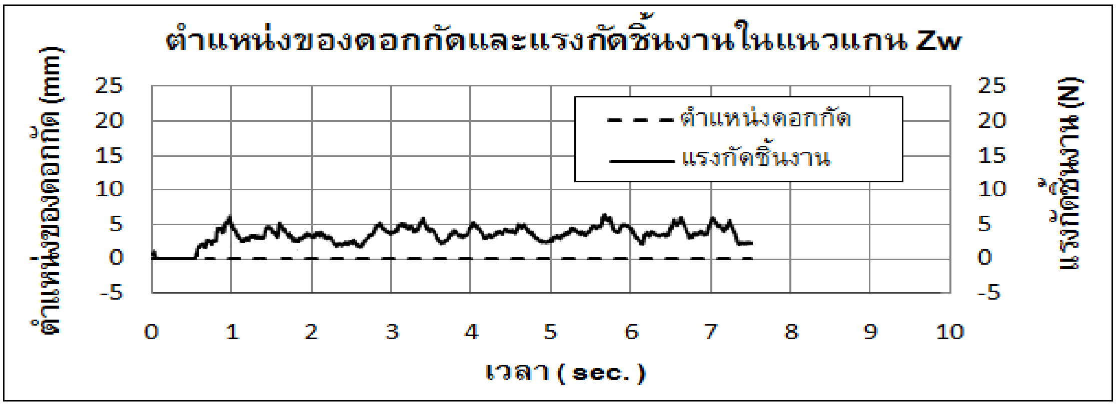
แรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Xw (แกนตั้งด้านขวาในรูปที่ 4.20) แสดงค่าแรงในทิศทางบวกซึ่งมีค่าประมาณ 6 นิวตัน แรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Yw (แกนตั้งด้านขวาในรูปที่ 4.21) แสดงค่าในทิศทางลบซึ่งมีขนาดไม่เกิน 6 นิวตัน และแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Zw (แกนตั้งด้านขวาในรูปที่ 4.22) แสดงค่าแรงกัดในทิศทางบวกซึ่งมีขนาดไม่เกิน 6 นิวตัน ผลการตรวจสอบแรงกัดที่เกิดขึ้นพบว่าแรงกัดชิ้นงานที่วัดค่าได้มีขนาดสูงสุดเกินกว่า 5 นิวตัน ทั้งในแนวแกน Xw Yw และ Zw ดังนั้น เมื่อต้องการควบคุมแรงในขณะกัดชิ้นงานจึงกำหนดให้แรงกัดที่ต้องการมีค่า 5 นิวตัน การควบคุมแรงในขณะกัดชิ้นงานจะเกิดขึ้นเมื่อแรงกัดชิ้นงานที่วัดค่าได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้แรงมีขนาดสูงเกินกว่า 5 นิวตัน



รูปที่ 4.20 ตำแหน่งและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Xw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นเส้นตรง

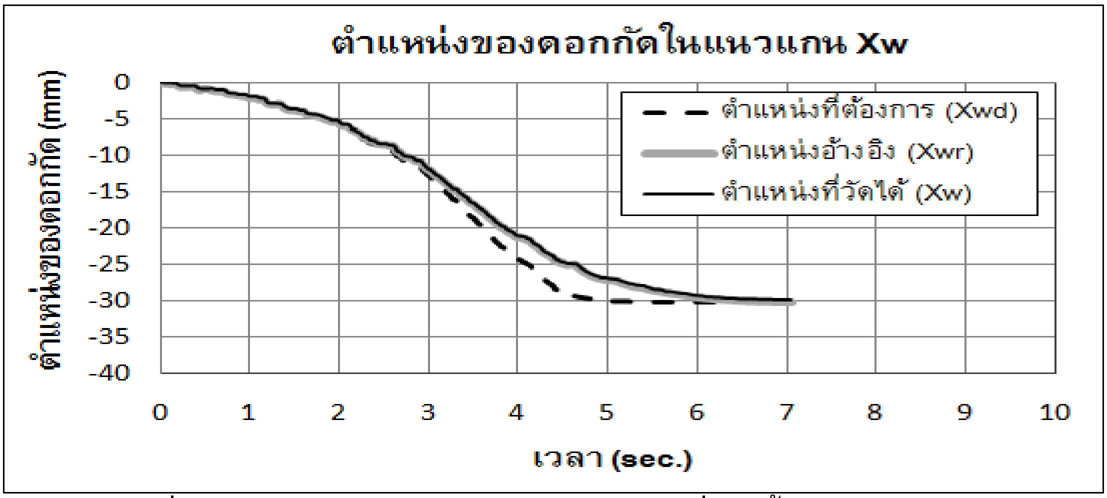


รูปที่ 4.21 ตำแหน่งและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Yw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นเส้นตรง



รูปที่ 4.22 ตำแหน่งและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Zw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นเส้นตรง

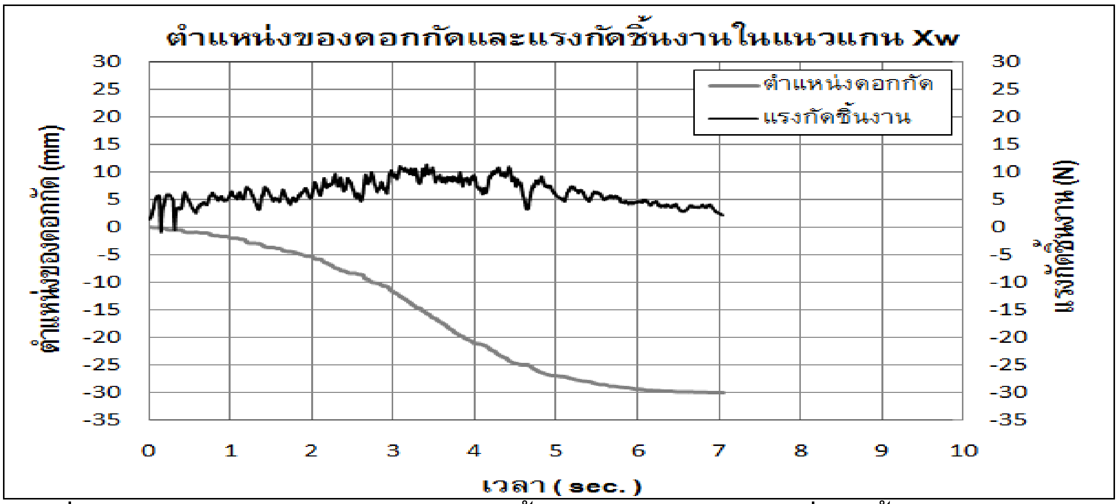
การควบคุมแรงในขณะกัดชิ้นงานเมื่อดอกกัดมีการเคลื่อนที่ด้วยระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟโดยมีแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้ เพื่อให้ผู้ดำเนินการสามารถเคลื่อนด้ามจับแขนกลนำไปเป็นแนวเส้นตรง เพื่อให้เกิดความแม่นยำในการทดสอบ เราได้สร้างอุปกรณ์รางเลื่อนช่วยยึดด้านแขนกลนำให้แขนกลนำสามารถเลื่อนได้เป็นเส้นตรงในทิศทางเดียว ผู้ดำเนินการจะทำการเคลื่อนด้ามจับแขนกลนำบนรางเลื่อนแขนกลนำเป็นระยะทาง 30 มิลลิเมตร ตำแหน่งปลายแขนกลนำที่เกิดขึ้นจากการเลื่อนด้ามจับแขนกลนำจะนำมาใช้เป็นตำแหน่งที่ต้องการให้ดอกกัดเคลื่อนที่ไป รูปที่ 4.23 แสดงตำแหน่งของดอกกัดในแนวแกน Xw เทียบกับเวลา การเลื่อนตำแหน่งปลายแขนกลนำส่งผลให้ตำแหน่งที่ต้องการ (เส้นประสีดำ) เปลี่ยนแปลงไปในทิศทาง –Xw จากจุดเริ่มต้นเป็นระยะทาง 30 มิลลิเมตร (ตำแหน่งที่ต้องการคือ -30 มิลลิเมตร) ในระยะเวลาประมาณ 5 วินาที การควบคุมแรงกัดชิ้นงานทำให้ตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้ (เส้นทึบสีดำ) มีค่าแตกต่างจากตำแหน่งของดอกกัดที่ต้องการ โดยตำแหน่งของดอกกัดที่วัดค่าได้ (เส้นทึบสีดำ) จะต้องมีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งอ้างอิงของดอกกัด (เส้นทึบสีเทา) ระบบควบคุมแรงดังแสดงในแผนภาพของรูปที่ 3.7 ได้ถูกนำมาใช้ในการควบคุมแรงกัดชิ้นงานให้ได้ใกล้เคียงกับค่าแรงกัดที่กำหนดในที่นี้ได้กำหนดค่าแรงกัดไว้คือ 5 นิวตัน



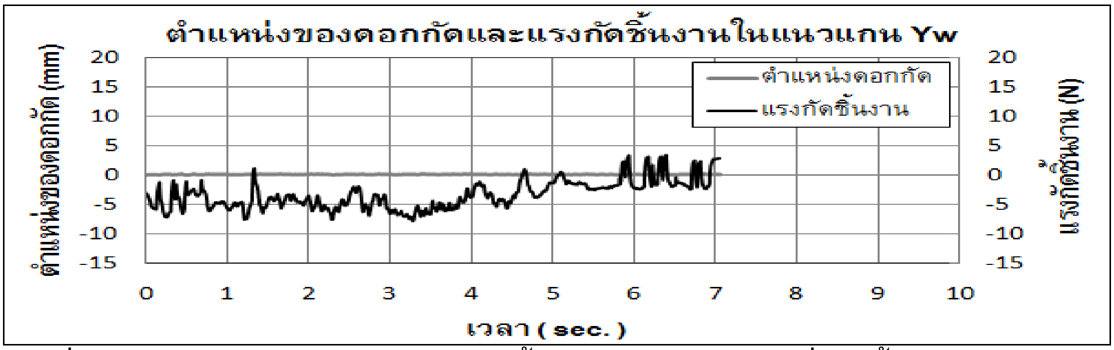
รูปที่ 4.23 ตำแหน่งของดอกกัดในแนวแกน Xw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นเส้นตรง
(เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในทิศทาง –Xw)

การทดลองพบว่าตลอดระยะเวลาของการกัดชิ้นงาน ระบบควบคุมตำแหน่งและแรงโดยตรงที่ได้กล่าวมาแล้ว สามารถควบคุมตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้ (Xw, เส้นทึบสีดำ) ให้มีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งอ้างอิงของดอกกัด (Xwr, เส้นทึบสีเทา) นอกจากนี้ระบบควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่และระบบควบคุมแรงกัดชิ้นงานจะทำให้ตำแหน่งของดอกกัดที่วัดค่าได้ (เส้นทึบสีดำ) มีการปรับเปลี่ยนค่าจนกระทั่งมีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ต้องการ (เส้นประสีดำ) ที่ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ประมาณ 7 วินาที รูปที่ 4.24 - 4.26 แสดงตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้ (เส้นทึบสีเทา) และ แรงกัดชิ้นงานที่วัดค่าได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้แรง (เส้นทึบสีดำ) โดยเทียบกับเวลาที่กัดชิ้นงาน เมื่อทำการวัดค่าในแนวแกน Xw Yw และ Zw ตามลำดับ ตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้ (อ่านค่าสเกลตามแกนตั้งด้านซ้ายมือ) แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าตำแหน่งเทียบกับเวลาเฉพาะในแนวแกน Xw เนื่องจากกำหนดให้ดอกกัดมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่ต้องการเฉพาะในทิศทาง –Xw เท่านั้น รูปที่ 4.24 แสดงแรงกัดชิ้นงานที่วัดค่าได้ในแนวแกน Xw (อ่านค่าสเกลตามแกนตั้งด้านขวา) มีค่าสูงสุดประมาณ 10 นิวตัน แรงกัดสูงสุดเกิดขึ้นในช่วงเวลา 3 - 4.5 วินาที ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้ (อ่านสเกลตามแกนตั้งด้านซ้ายมือ) มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว แรงกัดชิ้นงานที่วัดได้ (สเกลตามแกนตั้งด้านขวา) หลังจากเวลา 4.5 วินาที มีแนวโน้มลดลงจนมีค่าต่ำกว่า 5 นิวตัน ที่เวลาประมาณ 7 วินาที รูปที่ 4.25 แสดงตำแหน่งของดอกกัดและแรงกัดชิ้นงานที่วัดค่าได้ในแนวแกน Yw เทียบกับเวลา พบว่าตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้ (สเกลตามแกนตั้งด้านซ้าย) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่งเริ่มต้น แรงกัดชิ้นงานที่วัดได้ (สเกลตามแกนตั้งด้านขวา) เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของดอกกัดในทิศทาง –Xw การเคลื่อนที่ของดอกกัดทำให้แรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Yw แสดงค่าเป็นค่าลบซึ่งมีขนาดสูงสุดประมาณ 7 นิวตัน รูปที่ 4.26 แสดงตำแหน่งของดอกกัด

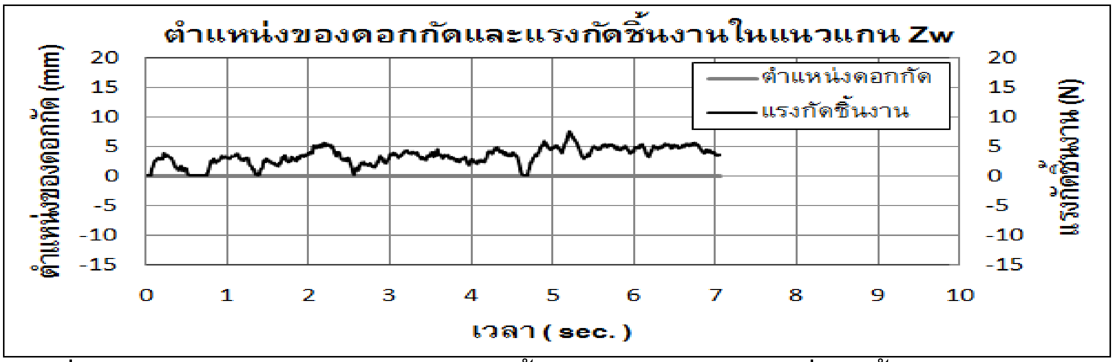
และแรงกัดชิ้นงานที่วัดค่าได้ในแนวแกน Zw แรงกัดชิ้นงานที่วัดได้ (สเกลตามแกนตั้งด้านขวา) เกิดจากการเคลื่อนที่ของดอกกัดในทิศทาง –Xw แรงกัดดังกล่าวมีค่าสูงสุดประมาณ 7 N



รูปที่ 4.24 ตำแหน่งของดอกกัดและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Xw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นเส้นตรง (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในทิศทาง –Xw)



รูปที่ 4.25 ตำแหน่งของดอกกัดและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Yw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นเส้นตรง (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในทิศทาง –Xw)



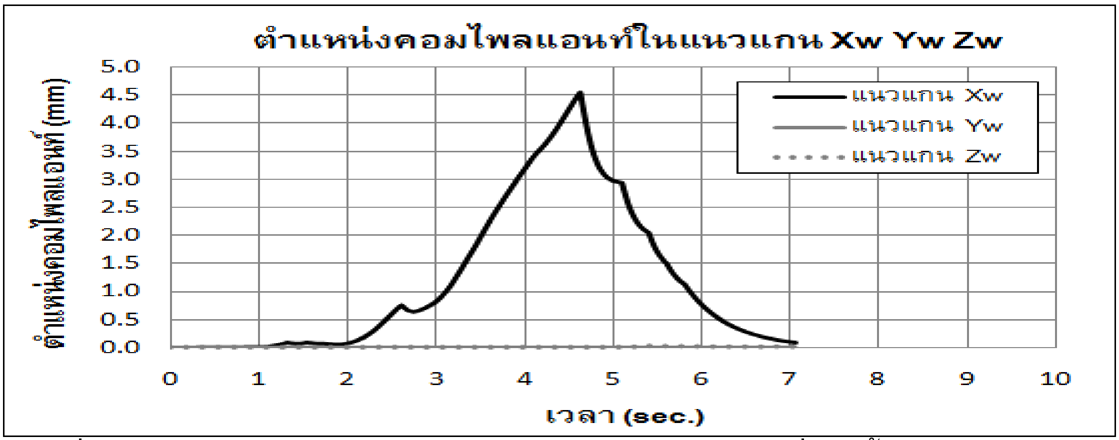
รูปที่ 4.26 ตำแหน่งของดอกกัดและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Zw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นเส้นตรง (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในทิศทาง –Xw)

รูปที่ 4.27 แสดงตำแหน่งคอมไพลแอนท์ในแนวแกน Xw Yw และ Zw ตำแหน่งคอมไพลแอนท์ดังกล่าวเกิดจากผลต่างระหว่างตำแหน่งอ้างอิงของดอกกัด และตำแหน่งของดอกกัดที่ต้องการ ในแต่ละแนวแกน เช่น ตำแหน่งคอมไพลแอนท์ในแนวแกน Xw เกิดจากผลต่างระหว่างตำแหน่งอ้างอิงของดอกกัด (Xwr) และตำแหน่งของดอกกัดที่ต้องการ (Xwd) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.23 ในการทดลองนี้ตำแหน่งคอมไพลแอนท์ในแนวแกน Xw มีค่าสูงสุดคือ 4.5 มิลลิเมตร ตำแหน่งคอมไพลแอนท์มีค่าเป็นบวกแสดงว่าตำแหน่งอ้างอิงของดอกกัด (Xwr) มีค่าสูงกว่าตำแหน่งของดอกกัดที่ต้องการ (Xwd) ระบบควบคุมตำแหน่งจะทำการควบคุมให้ตำแหน่งของดอกกัด (Xw) มีค่าเพิ่มขึ้นไปตามค่าของตำแหน่งอ้างอิงของดอกกัด (Xwr) ในที่นี้การควบคุมตำแหน่งของดอกกัดดังกล่าวส่งผลให้ดอกกัดเคลื่อนที่ช้าลงกว่าตำแหน่งของดอกกัดที่ต้องการ (Xwd) ส่วนตำแหน่งคอมไพลแอนท์ในแนวแกน Yw และ Zw มีค่าน้อยมากจนใกล้เคียงค่าศูนย์จึงไม่ส่งผลกระทบต่อการเคลื่อนที่ของดอกกัดในแนวแกน Yw และ Zw

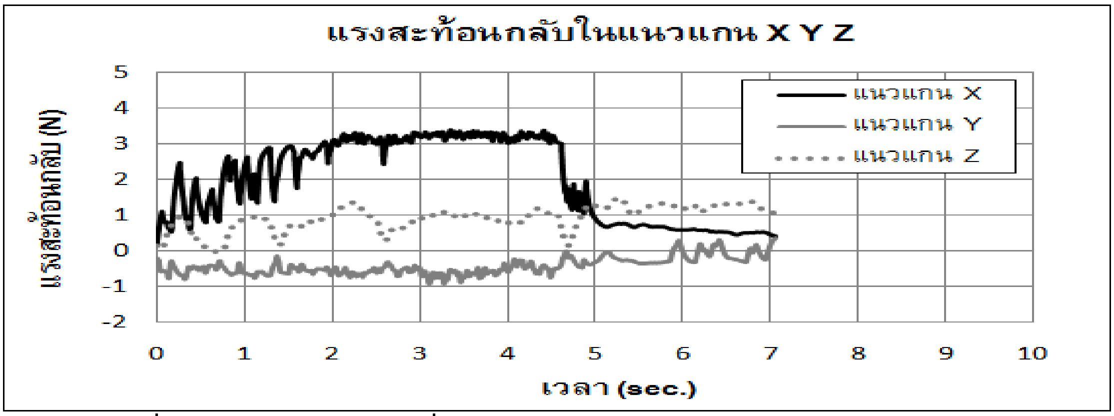
การทดลองกัดชิ้นงานโดยการเคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟได้มีการสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการเพื่อให้ผู้ดำเนินการเกิดความรู้สึกในขณะที่ดอกกัดเคลื่อนที่กัดเซาะชิ้นงาน แรงสะท้อนกลับจะทำหน้าที่จำกัดความเร็วในการเคลื่อนมือของผู้ดำเนินการไม่ให้มีค่าที่สูงจนเกินไป ดังนั้นทิศทางของแรงสะท้อนกลับจึงควรมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนมือของผู้ดำเนินการ รูปที่ 4.28 แสดงค่าแรงสะท้อนกลับที่กระทำต่อมือของผู้ดำเนินการในขณะที่ผู้ดำเนินการเคลื่อนด้ามจับของแขนกลนำบนรางเลื่อนเป็นเส้นตรง แรงสะท้อนกลับในแนวแกน X Y และ Z ของแขนกลนำจะมีค่าเป็นสัดส่วนกับแรงกัดชิ้นงานที่เกิดขึ้นในแนวแกน Xw Yw และ Zw ตามลำดับ ในที่นี้กำหนดให้แรงสะท้อนกลับในแนวแกน Xw มีค่าประมาณร้อยละ 40 ของแรงกัดในแนวแกน Xw แต่จะมีค่าไม่เกิน 3.2 นิวตัน (กำหนดค่าสูงสุดไว้ในระบบควบคุม) เนื่องจากเราพบว่าเมื่อแรงสะท้อนกลับมีค่าเกินกว่า 3.2 นิวตัน ผู้ดำเนินการจะเริ่มรู้สึกกังวลในการควบคุมแขนกลนำ การกำหนดค่า 3.2 นิวตันนี้ขึ้นอยู่กับระบบควบคุมและระบบส่งกำลังของแขนกลนำซึ่งยังมีรายละเอียดอีกมากซึ่งยังไม่ได้ครอบคลุมในงานวิจัยนี้ ส่วนแรงสะท้อนกลับที่เกิดขึ้นในแนวแกน Yw และ Zw ไม่ควรมีค่าสูงมากนักเนื่องจากไม่ใช่ทิศทางหลักในการเคลื่อนด้ามจับของผู้ดำเนินการ ในที่นี้จึงกำหนดให้ระบบควบคุมสร้างแรงสะท้อนกลับในแนวแกน Y มีค่าประมาณร้อยละ 10 ของแรงกัดที่วัดค่าได้ในแนวแกน Yw และแรงสะท้อนกลับในแนวแกน Zw จะมีค่าไม่เกิน 1.2 นิวตัน เพื่อความสะดวกในการเลื่อนด้ามจับของผู้ดำเนินการ อย่างไรก็ตามขนาดของแรงสะท้อนกลับในแต่ละแนวแกนสามารถปรับเปลี่ยนให้มีค่าแตกต่างจากที่กล่าวมาข้างต้นได้ ขึ้นอยู่กับความรู้สึกของผู้ดำเนินการแต่ละท่าน

ผลการทดลองควบคุมแรงกัดเมื่อต้องการให้ดอกกัดเคลื่อนที่กัดชิ้นงานเป็นร่องแนวเส้นตรงด้วยการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟโดยกำหนดให้แขนกลนำมีการสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการดังกล่าวมาข้างต้นแสดงว่าดอกกัดสามารถควบคุมแรงกัดชิ้นงาน

ในแนวแกนการเคลื่อนที่ของดอกกัด (แนวแกน Xw) ให้มีค่าระหว่าง 5-10 นิวตัน ในช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของดอกกัดที่ต้องการ (Xwd) นอกจากนี้ระบบควบคุมแรงและตำแหน่งการเคลื่อนที่ของดอกกัดสามารถทำการปรับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของดอกกัดจนมีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ต้องการได้ในระยะเวลาไม่เกิน 2.5 วินาที ในขณะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่ต้องการ (Xwd)



รูปที่ 4.27 ตำแหน่งคอมไพลแอนท์ในแนวแกน Xw Yw และ Zw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นเส้นตรง (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในทิศทาง –Xw)



รูปที่ 4.28 แรงสะท้อนกลับที่กระทำต่อมือผู้ดำเนินการในแนวแกน X Y และ Z เมื่อกัดชิ้นงานเป็นเส้นตรง (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในทิศทาง –Xw)

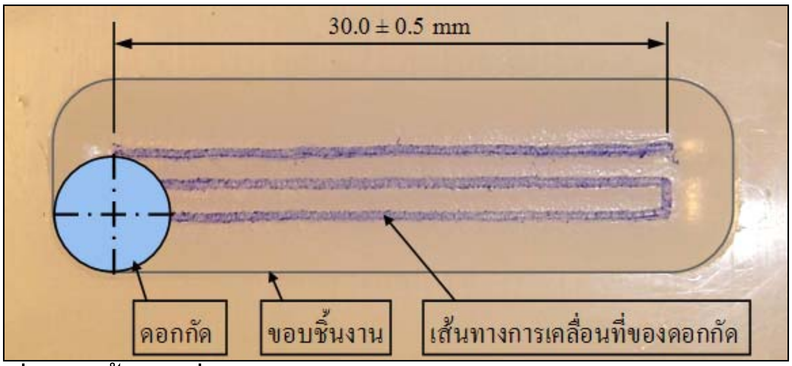
4.3 ทดลองกัดชิ้นงานเป็นหลุม (Pocket)

การทดลองกัดชิ้นงานเป็นหลุม (Pocket) จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาการควบคุมแรงกัดชิ้นงานและการสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำกับมือของผู้ดำเนินการเมื่อดอกกัดทำการกัดเซาะเนื้อชิ้นงานเพียงด้านเดียวการทดลองกำหนดให้ดอกกัดเคลื่อนที่กัดเซาะชิ้นงานด้วยระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟในแนวแกน Xw และกำหนดให้ดอกกัดสามารถเปลี่ยนแปลงตำแหน่งการเคลื่อนที่ในแนวแกน Yw ได้ โดยการกำหนดตำแหน่งที่ต้องการผ่านระบบควบคุม การทดลองดังกล่าวจะนำเสนอภายหลังจากการศึกษาลักษณะของแรงกัดและขนาดของแรงกัดที่เกิดขึ้นเมื่อดอกกัดชิ้นงานมีการกัดเซาะเนื้อชิ้นงานเพียงด้านเดียว

<u>การทดลองโดยใช้ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวกัดโดยมีไม่มีการควบคุมแรงกัด</u>

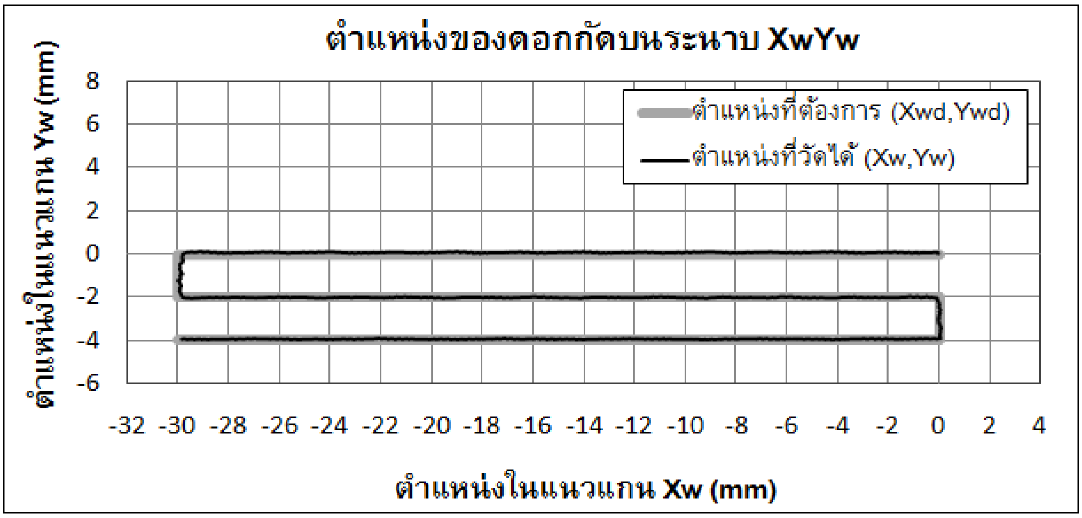
ในเบื้องต้นผู้วิจัยจะทำการศึกษาลักษณะของแรงกัดและขนาดของแรงกัดที่เกิดขึ้นโดยไม่มีการควบคุมแรงกัด ดอกกัดเคลื่อนที่ในแนวแกน Xw และ Yw โดยการกำหนดตำแหน่งของดอกกัดที่ต้องการผ่านระบบควบคุมการเคลื่อนที่ โดยลำดับการเคลื่อนที่ของดอกกัดแสดงได้ดังนี้ ดอกกัดเคลื่อนที่ในทิศทาง –Xw เป็นระยะทาง 30 มิลลิเมตร เคลื่อนที่ในทิศทาง –Yw เป็นระยะทาง 2 มิลลิเมตร เคลื่อนที่ในทิศทาง Xw เป็นระยะทาง 30 มิลลิเมตร เคลื่อนที่ในทิศทาง –Yw เป็นระยะทาง 2 มิลลิเมตร และเคลื่อนที่ในทิศทาง –Xw เป็นระยะทาง 30 มิลลิเมตร ตามลำดับ ผู้วิจัยกำหนดให้ดอกกัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็วในการกัด (feed rate) 4 มิลลิเมตรต่อวินาที ในแนวแกน Xw และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วในการกัด (feed rate) 1 มิลลิเมตรต่อวินาทีในแนวแกน Yw โดยการกำหนดค่าผ่านระบบควบคุมการเคลื่อนที่

รูปที่ 4.29 แสดงชิ้นงานเป็นวัสดุ PE (Polyethylene) ที่ได้จากการกัดตามลำดับการเคลื่อนที่ของดอกกัดดังกล่าว โดยกำหนดให้ความลึกในการกัดชิ้นงานคือ 2 มิลลิเมตร ในที่นี้ผู้วิจัยได้ใช้ปากกาเขียนเส้นทึบลงบนชิ้นงานเพื่อแสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของดอกกัดให้มีความชัดเจนมากขึ้น ความยาวของเส้นที่แสดงในแนวแกน Xw มีค่าประมาณ 30 มิลลิเมตร ซึ่งมีความสอดคล้องกับระยะการเคลื่อนที่ของดอกกัดที่ต้องการในแนวแกน Xw



รูปที่ 4.29 ชิ้นงานที่ได้จากการกัดเป็นหลุม (ความลึก 2 มิลลิเมตร)

รูปที่ 4.30 แสดงตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้เปรียบเทียบกับตำแหน่งที่ต้องการเมื่อพิจารณาตำแหน่งบนระนาบ XwYw ตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้ (เส้นทึบสีดำ) มีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งของดอกกัดที่ต้องการ (เส้นทึบสีเทา) ตำแหน่งของดอกกัดที่ต้องการ (เส้นทึบสีเทา) เริ่มต้นจากตำแหน่ง (Xw,Yw) = (0,0) และสิ้นสุดที่ตำแหน่ง (Xw,Yw) = (-30,-4)

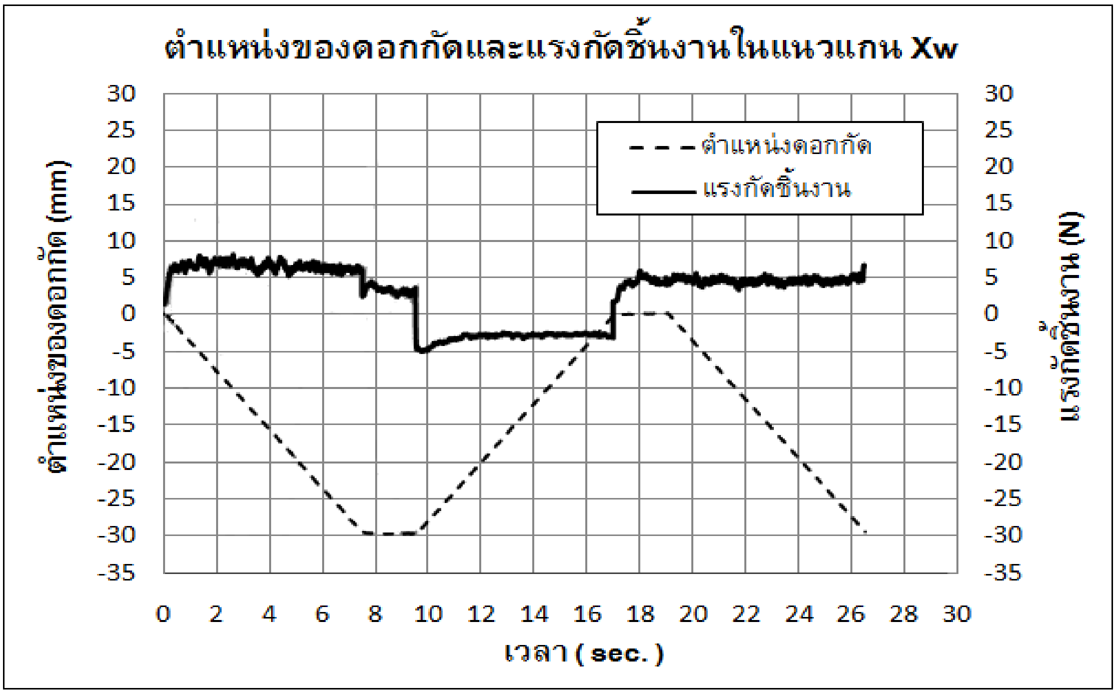


รูปที่ 4.30 ตำแหน่งของดอกกัดบนระนาบ XwYw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นหลุม

รูปที่ 4.31-4.33 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของดอกกัดที่วัดได้ (ค่าสเกลแกนตั้งด้านซ้ายมือ) และแรงกัดชิ้นงาน (ค่าสเกลแกนตั้งด้านขวามือ) เทียบกับเวลา ในแนวแกน Xw Yw และ Zw ตามลำดับ ตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้ (เส้นประสีดำ) เกิดจากการเคลื่อนที่ของดอกกัดไปตามตำแหน่งที่ต้องการ (ดังแสดงมาแล้วในรูปที่ 4.30) ดอกกัดเคลื่อนที่กัดเซาะชิ้นงานตามตำแหน่งที่ต้องการทำให้เกิดแรงกัดชิ้นงาน

รูปที่ 4.31 แสดงตำแหน่งของดอกกัดที่วัดค่าได้และแรงกัดชิ้นงานที่วัดได้ในแนวแกน Xw เทียบกับเวลา ผลการทดลองพบว่าแรงกัดชิ้นงานที่วัดค่าได้ (เส้นทึบสีดำ) มีทิศทางตรงข้ามกับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของดอกกัด (เส้นประสีดำ) ดังต่อไปนี้ ในช่วงเวลา 0-7.5 วินาที ตำแหน่งของดอกกัด (เส้นประสีดำ) มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทาง –Xw ส่งผลให้แรงกัดชิ้นงาน (เส้นทึบสีดำ) แสดงค่าเป็นบวก ซึ่งมีขนาดประมาณ 6 นิวตัน หลังจากนั้น ในช่วงเวลา 9.5-17.0 วินาที ตำแหน่งของดอกกัด (เส้นประสีดำ) มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทาง Xw ส่งผลให้แรงกัดชิ้นงาน (เส้นทึบสีดำ) แสดงค่าเป็นลบ ซึ่งมีขนาดประมาณ 3 นิวตัน และในช่วงเวลา 19.0-26.5 วินาที ตำแหน่งของดอกกัด (เส้นประสีดำ) มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทาง –Xw ส่งผลให้แรงกัดชิ้นงาน (เส้นทึบสีดำ) แสดงค่าเป็นบวกซึ่งมีขนาดประมาณ 5 นิวตัน แรงกัดชิ้นงานดังกล่าวมาข้างต้นมีขนาดสูงที่สุดประมาณ 6 นิวตัน ในขณะเวลา 0-7.5 วินาที เนื่องจากดอกกัดมีการเคลื่อนที่กัดเซาะชิ้นงานเป็นร่องแนวเส้นตรง แรงกัดชิ้นงานในช่วงเวลาที่เหลือจะมีค่า

น้อยลงเป็น 3 นิวตัน และ 5 นิวตัน ตามลำดับ เนื่องจากดอกกัดมีการสัมผัสกับเนื้อวัสดุเพียงบางส่วน ในที่นี้ดอกกัดจะสัมผัสกับพื้นผิวของชิ้นงานที่อยู่ในทิศทาง –Yw เท่านั้น นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของดอกกัดในทิศทาง –Yw ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงเวลา 7.5-9.5 วินาที และช่วงเวลา 17.0-19.0 วินาที ส่งผลให้แรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Xw แสดงค่าเป็นบวกซึ่งมีขนาดไม่เกิน 5 นิวตัน จึงยังคงสรุปได้ว่าแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Xw ในการทดลองนี้มีค่าสูงที่สุดประมาณ 6 นิวตัน

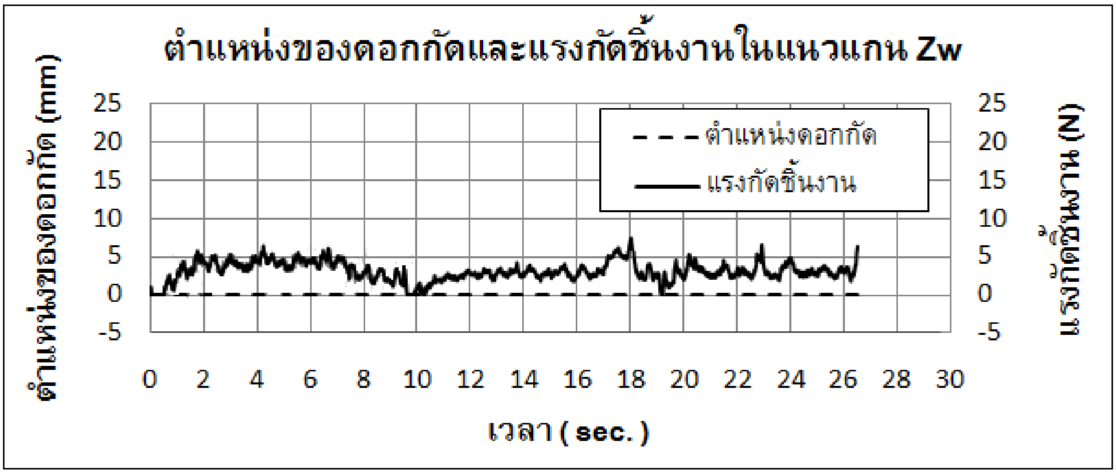


รูปที่ 4.31 ตำแหน่งและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Xw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นหลุม

รูปที่ 4.32 แสดงตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้และแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Yw เทียบกับเวลา ผลการทดลองพบว่าแรงกัดที่วัดค่าได้ (เส้นทึบสีดำ) มีทิศทางตรงข้ามกับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของดอกกัด (เส้นประสีดำ) ในช่วงเวลา 7.5-9.5 วินาที และ ช่วงเวลา 17.0-19.0 วินาที ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของดอกกัดในช่วงเวลาดังกล่าวส่งผลให้แรงกัดที่วัดค่าได้ (เส้นทึบสีดำ) มีค่าสูงสุดไม่เกิน 5 นิวตัน นอกจากนี้แรงกัดที่วัดได้ (เส้นทึบสีดำ) ในแนวแกน Yw ขณะที่ดอกกัดมีการเคลื่อนที่ในแนวแกน Xw มีค่าสูงสุดไม่เกิน 5 นิวตันด้วยเช่นกัน ทิศทางของแรงกัดชิ้นงานที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา 0-7.5 sec แสดงค่าเป็นลบเนื่องจากการเคลื่อนที่กัดชิ้นงานเป็นร่องเส้นตรง ทิศทางของแรงกัดชิ้นงานในช่วงเวลาอื่นๆแสดงค่าเป็นบวกเนื่องจากดอกกัดมีการสัมผัสกับเนื้อชิ้นงานเฉพาะที่อยู่ในทิศทาง –Yw และแรงกัดชิ้นงานจะแสดงค่าในทิศทางตรงข้ามกับการสัมผัสดังกล่าว

รูปที่ 4.32 ตำแหน่งและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Yw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นหลุม

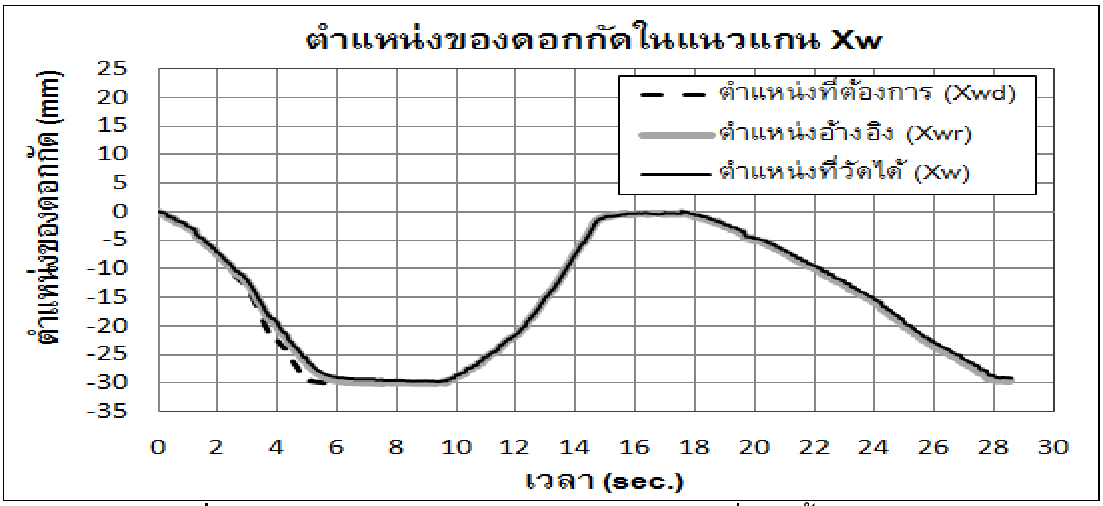
รูปที่ 4.33 แสดงตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้และแรงกัดชิ้นงานเทียบกับเวลา ตำแหน่งดอกกัดที่วัดได้ (เส้นประสีดำ) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแนวแกน Zw ตลอดระยะเวลาในการกัดชิ้นงาน ดอกกัดเคลื่อนที่กัดชิ้นงานที่ความลึก 2 มิลลิเมตร แต่ในที่นี้กำหนดให้ตำแหน่งเริ่มต้นแสดงค่าเป็นศูนย์เพื่อความสะดวกในการแสดงผล แรงกัดชิ้นงานที่วัดค่าได้ (เส้นทึบสีดำ) แสดงค่าเปลี่ยนแปลงไปตามการเคลื่อนที่ของดอกกัดในแนวแกน Xw และ Yw แรงกัดชิ้นงานมีค่าประมาณ 5 นิวตัน ในช่วงเวลา 0-7.5 วินาที แรงกัดชิ้นงานแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าระหว่าง 0-7 นิวตัน ในขณะที่ดอกกัดสัมผัสเนื้อชิ้นงานเฉพาะที่อยู่ในทิศทาง –Yw



รูปที่ 4.33 ตำแหน่งและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Zw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นหลุม

<u>การทดลองโดยมีการควบคุมแรงกัด โดยการทำงานในลักษณะมาสเตอร์-สเลฟแบบมีแรงสะท้อนกลับในแกน Xw</u>

การทดลองควบคุมแรงกัดชิ้นงานและการสร้างแรงสะท้อนกลับเกิดขึ้นเมื่อกำหนดให้ดอกกัดมีการเคลื่อนที่แบบมาสเตอร์-สเลฟในแนวแกน Xw ส่วนการเคลื่อนที่ในแนวแกน Yw นั้นจะเป็นการควบคุมการเคลื่อนที่โดยการกำหนดค่าตำแหน่งที่ต้องการการเคลื่อนที่ผ่านระบบควบคุมโดยไม่ใช่การเคลื่อนที่แบบมาสเตอร์-สเลฟ ดังนั้น การทดลองนี้จะทำการควบคุมแรงกัดที่เกิดขึ้นเฉพาะในแนวแกน Xw และ Zw เนื่องจากผู้วิจัยต้องการกำหนดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของดอกกัดในแนวแกน Yw ให้มีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ต้องการมากที่สุด

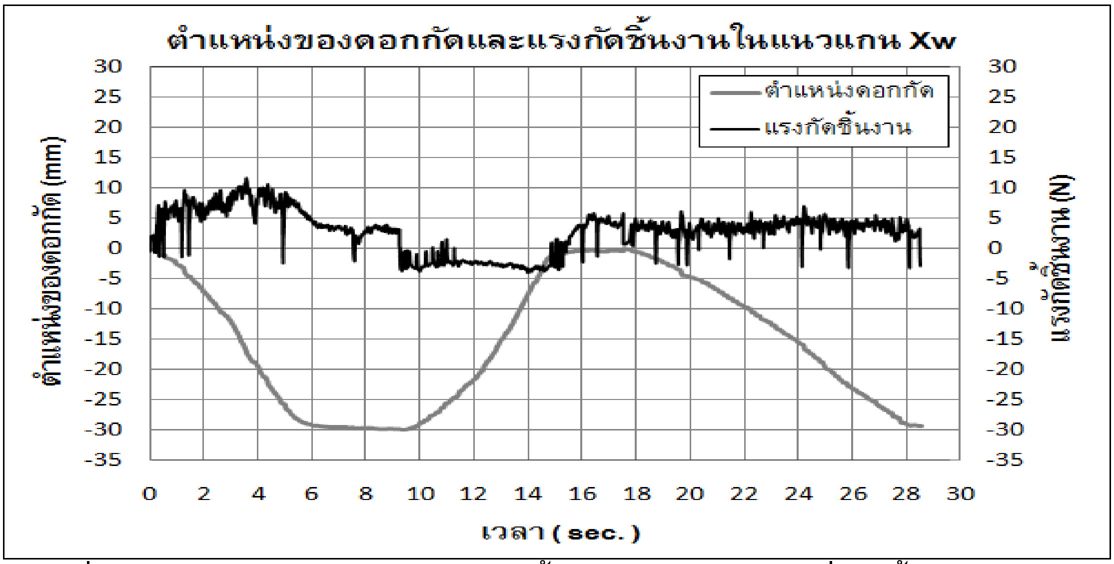


รูปที่ 4.34 ตำแหน่งของดอกกัดในแนวแกน Xw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นหลุม
(เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในแนวแกน Xw)

รูปที่ 4.34 แสดงตำแหน่งของดอกกัดในแนวแกน Xw เมื่อมีการควบคุมแรงในขณะกัดชิ้นงานวัสดุ PE (Polyethylene) ที่ความลึกในการกัด 2 มิลลิเมตร ดอกกัดเคลื่อนที่ด้วยระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟโดยมีแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการ โดยผู้ดำเนินการทำการเลื่อนด้ามจับของแขนกลนำไปบนรางเลื่อน ส่งผลให้ตำแหน่งปลายแขนกลนำมีการเปลี่ยนแปลงไปตำแหน่งปลายแขนกลนำดังกล่าว ซึ่งก็คือตำแหน่งที่ต้องการให้ดอกกัดเคลื่อนที่ไป (เส้นประสีดำ) ตำแหน่งที่ต้องการให้ดอกกัดเคลื่อนที่ (เส้นประสีดำ) เปลี่ยนแปลงไปจากจุดเริ่มต้นในทิศทาง –Xw เป็นระยะทาง 30 มิลลิเมตรจนกระทั่งเวลาผ่านไป 5 วินาที ตำแหน่งที่ต้องการจึงมีค่าคงที่ ตำแหน่งที่ต้องการให้ดอกกัดเคลื่อนที่ (เส้นประสีดำ) จะมีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งอ้างอิงของดอกกัด (เส้นทึบสีเทา) เมื่อเวลาผ่านไปเกินกว่า 6 วินาที ในที่นี้จะแสดงเฉพาะตำแหน่งอ้างอิง (เส้นทึบสีเทา) ของดอกกัดเท่านั้น ณ. เวลา 6 วินาทีนับจากเวลาเริ่มกัด ผู้วิจัยได้เริ่มทำการปรับตำแหน่งของดอกกัดที่ต้องการในทิศทาง –Yw เป็นระยะทาง 2 มิลลิเมตร โดยการกำหนดตำแหน่งผ่านระบบควบคุม เมื่อดอกกัดหยุดการเคลื่อนที่

ในแนวแกน Yw จึงทำการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่ต้องการในแนวแกน Xw ด้วยการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ เป็นระยะทาง 30 มิลลิเมตร เมื่อสิ้นสุดการเคลื่อนที่ของดอกกัดด้วยการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ ผู้วิจัยได้เลื่อนตำแหน่งของดอกกัดที่ต้องการในทิศทาง –Yw เป็นระยะทาง 2 มิลลิเมตร แล้วจึงเคลื่อนดอกกัดด้วยการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟในทิศทาง –Xw เป็นระยะทาง 30 มิลลิเมตร จนกระทั่งสิ้นสุดการทำงานในขณะเวลาประมาณ 28 วินาที

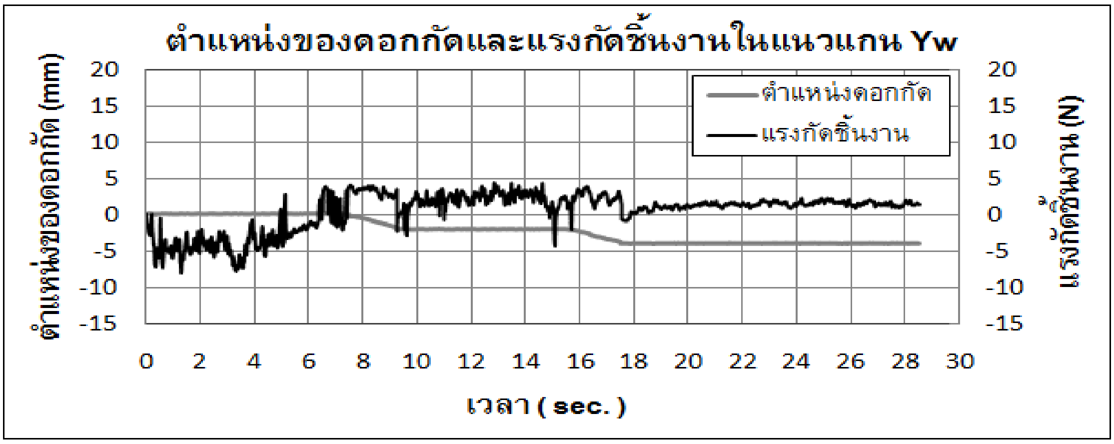
รูปที่ 4.35 แสดงตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้ (สเกลแกนตั้งด้านซ้ายมือ) และแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Xw (สเกลแกนตั้งด้านขวามือ) เทียบกับเวลา ผลการทดลองพบว่าการเคลื่อนที่ของดอกกัด ทำให้เกิดแรงกัดชิ้นงานในทิศทางตรงข้าม แรงกัดชิ้นงานมีค่าสูงสุดประมาณ 10 นิวตัน เมื่อดอกกัดเคลื่อนที่กัดเซาะชิ้นงานเป็นร่องแนวเส้นตรงในช่วงเวลาประมาณ 0-6 วินาที แรงกัดชิ้นงานในช่วงเวลาอื่นๆ จะมีขนาดไม่เกิน 5 นิวตัน แรงกัดมีลักษณะเช่นนี้ กล่าวคือในช่วงแรกมีขนาดประมาณ 10 นิวตัน และช่วงเวลาอื่นมีขนาดไม่เกิน 5 นิวตัน ทั้งนี้เป็นเพราะในการกัดเป็นหลุม (pocket) ในช่วงแรกเมื่อเริ่มกัดในทิศทาง Xw คมมีดจะกัดเข้าเนื้อชิ้นงานทั้งสองด้าน (ด้านที่ขนานกับทิศทาง Xw) ในขณะที่ช่วงเวลาอื่นคมมีดจะกัดเข้าเนื้อชิ้นงานเพียงด้านเดียว ดังนั้นแรงที่วัดได้ในช่วงแรกจึงสูงกว่าในช่วงเวลาอื่น การเคลื่อนที่ในแนวแกน Xw ในลักษณะเช่นเดียวกับการทดลองโดยการกำหนดค่าผ่านระบบควบคุม (ดังรูปที่ 4.31)



รูปที่ 4.35 ตำแหน่งของดอกกัดและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Xw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นหลุม (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในแนวแกน Xw)

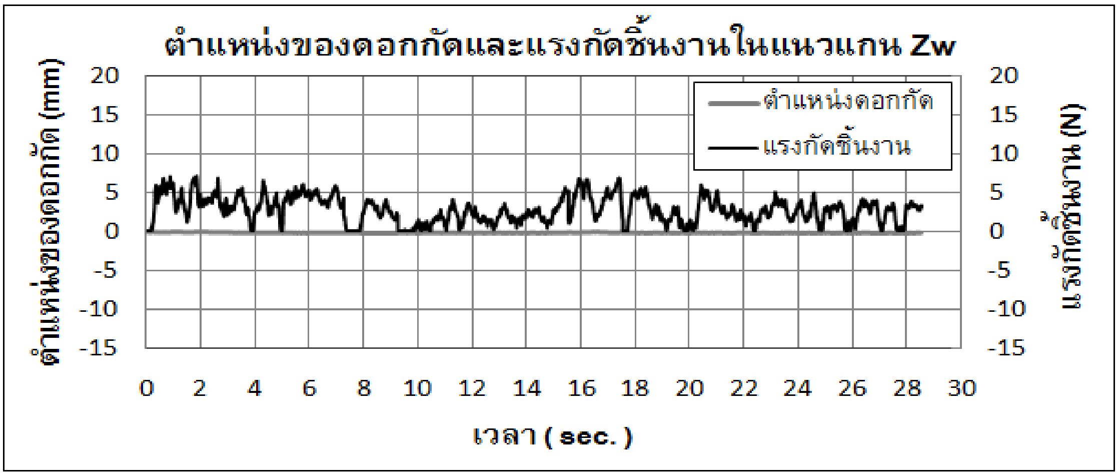
รูปที่ 4.36 แสดงตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้ (สเกลแกนตั้งด้านซ้ายมือ) และแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Yw (สเกลแกนตั้งด้านขวามือ) เทียบกับเวลา แรงกัดชิ้นงาน (เส้นทึบสีดำ) มีค่าสูงที่สุดในช่วงเวลา 0-4 วินาที ซึ่งเกิดขึ้นขณะที่ดอกกัดเคลื่อนที่กัดเซาะชิ้นงานเป็นร่อง

เส้นตรงในแนวแกน Xw แรงกัดชิ้นงาน (เส้นทึบสีดำ) ในช่วงเวลาอื่นๆ มีค่าต่ำกว่า 5 นิวตัน และมีทิศทางในลักษณะเช่นเดียวกับการทดลองโดยการกำหนดการเคลื่อนที่ผ่านระบบควบคุม (ดังรูปที่ 4.32)



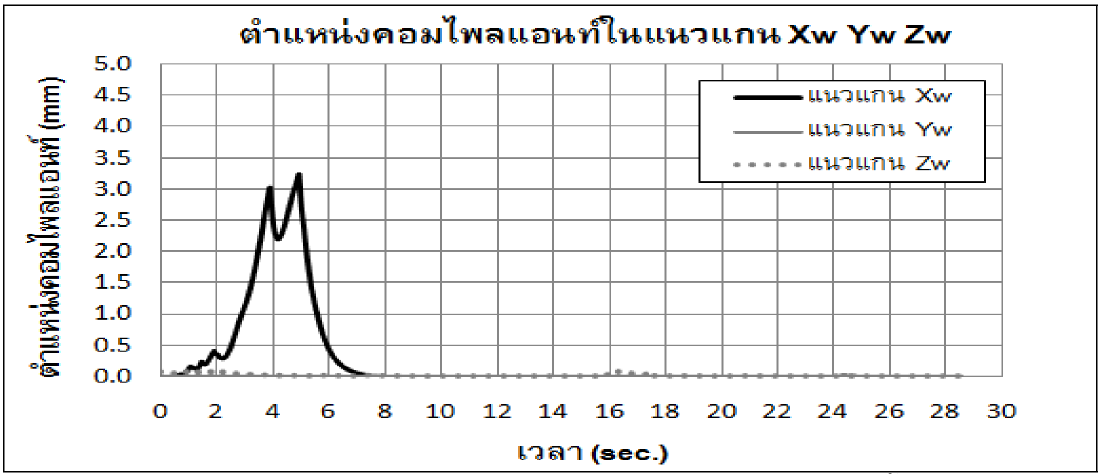
รูปที่ 4.36 ตำแหน่งของดอกกัดและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Yw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นหลุม (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในแนวแกน Xw)

รูปที่ 4.37 แสดงตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้ (สเกลแกนตั้งด้านซ้ายมือ) และแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Zw (สเกลแกนตั้งด้านขวามือ) เทียบกับเวลา ตำแหน่งของดอกกัดในแนวแกน Zw (เส้นทึบสีเทา) มีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งเริ่มต้นตลอดเวลาการทำงาน แรงกัดชิ้นงานมีค่าเปลี่ยนแปลงระหว่าง 0-7 นิวตัน การเปลี่ยนแปลงค่าเกิดขึ้นบ่อยครั้งเมื่อเปรียบเทียบกับการทดลองโดยการกำหนดการเคลื่อนที่ผ่านระบบควบคุม (ดังรูปที่ 4.33)



รูปที่ 4.37 ตำแหน่งของดอกกัดและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Zw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นหลุม (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในแนวแกน Xw)

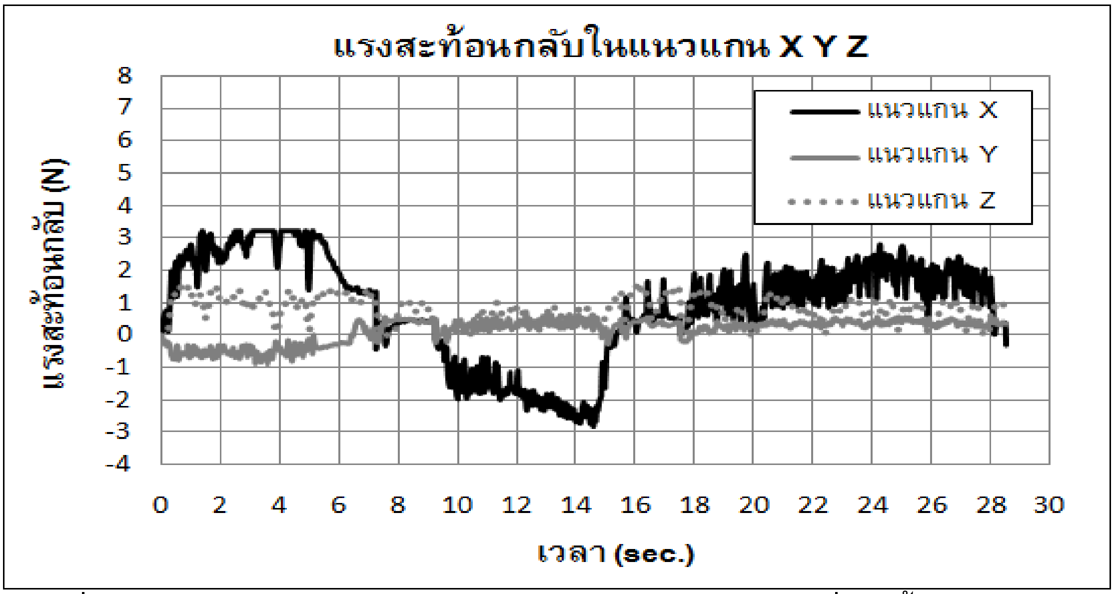
รูปที่ 4.38 แสดงตำแหน่งคอมไพลแอนท์ที่เกิดขึ้นในแนวแกน Xw, Yw และ Zw เมื่อดอกกัดเคลื่อนที่กัดเซาะชิ้นงานด้วยระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟดังกล่าวมาข้างต้น ตำแหน่งคอมไพลแอนท์ในแต่ละแนวแกนคือ ผลต่างระหว่างค่าตำแหน่งอ้างอิงและค่าที่ต้องการ เช่น ค่าตำแหน่งคอมไพลแอนท์ในแนวแกน Xw คือ ผลต่างระหว่างตำแหน่งอ้างอิงของดอกกัด (Xwr) และตำแหน่งที่ต้องการให้ดอกกัดเคลื่อนที่ไป (Xwd) ดังแสดงในรูปที่ 4.34 และเราสามารถหาผลต่างดังกล่าวมีค่าสูงสุดที่ประมาณ 3.2 มิลลิเมตร ตามแนวแกน Xw จากรูปที่ 4.38 จะเห็นว่าเมื่อนำค่าคอมไพลแอนท์ในแต่ละแนวแกนมาเปรียบเทียบพบว่า ค่าคอมไพลแอนท์ในแนวแกน Xw (เส้นทึบสีดำ) มีค่าสูงที่สุด ระบบควบคุมแรงได้พยายามควบคุมแรงกัด ในแนวแกน Xw ให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าแรงกัดที่กำหนดไว้ การควบคุมแรงกัดในแนวแกน Zw ทำให้ตำแหน่งคอมไพลแอนท์เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยโดยมีค่าประมาณ 0.1 มิลลิเมตร ในขณะเวลาประมาณ 2 วินาที และ 16 วินาที การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคอมไพลแอนท์ดังกล่าวมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความลึกในการกัดชิ้นงาน (ความลึกในการกัดชิ้นงาน 2 มิลลิเมตร) จึงไม่ส่งผลต่อการกัดชิ้นงาน



รูปที่ 4.38 ตำแหน่งคอมไพลแอนท์ในแนวแกน Xw Yw และ Zw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นหลุม (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในแนวแกน Xw)

รูปที่ 4.39 แสดงค่าแรงสะท้อนกลับที่กระทำกับมือของผู้ดำเนินการในแนวแกน X Y และ Z ในขณะที่ผู้ดำเนินการใช้มือเลื่อนด้ามจับแขนกลนำเพื่อทำให้ดอกกัดเคลื่อนที่กัดเซาะชิ้นงานด้วยระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ แรงสะท้อนกลับดังกล่าวเกิดขึ้นในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนด้ามจับของผู้ดำเนินการ แรงสะท้อนกลับสร้างขึ้นได้โดยอาศัยค่าอ้างอิงจากแรงกัดชิ้นงานที่วัดได้ในแต่ละแนวแกน แรงสะท้อนกลับในแนวแกน X (เส้นทึบสีดำ) มีค่าประมาณร้อยละ 40 ของแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Xw (มีค่าไม่เกิน 3.2 N เนื่องจากการกำหนดค่าสูงสุดไว้ในระบบควบคุม) แต่ในกรณีที่ดอกกัดสัมผัสกับผิวชิ้นงานเพียงด้านเดียว (เฉพาะพื้นผิวในทิศทาง –Yw) พบว่าแรงกัดชิ้นงานที่วัดได้ในแนวแกน Xw (ดังรูปที่ 4.35) มีค่า

ต่ำกว่าค่าแรงกัดที่กำหนดไว้ ส่งผลให้แรงสะท้อนกลับที่สร้างขึ้นมีค่าต่ำ (ในที่นี้มีค่าประมาณ 1 นิวตัน) ผู้ดำเนินการอาจไม่สามารถรับรู้แรงสะท้อนกลับได้ การทดลองนี้จึงได้ทำการปรับเพิ่มขนาดของแรงสะท้อนกลับโดยอาศัยค่าความเร็วในการเลื่อนด้ามจับของผู้ดำเนินการมาใช้เป็นค่าอ้างอิง การทดลองกำหนดให้ขนาดของแรงสะท้อนกลับที่ปรับเพิ่มขึ้น มีค่าเป็นร้อยละ 10 ของความเร็วการเลื่อนด้ามจับของผู้ดำเนินการ การปรับเพิ่มขนาดของแรงสะท้อนกลับดังกล่าวส่งผลให้ผู้ดำเนินการจะรู้สึกถึงแรงสะท้อนกลับได้ดีขึ้น แรงสะท้อนกลับในแนวแกน X (เส้นทึบสีดำ) ในช่วงเวลาประมาณ 10-15 วินาที และช่วงเวลาประมาณ 18-28 วินาที มีการปรับเพิ่มขนาดของแรงสะท้อนกลับดังกล่าว ส่งผลให้ขนาดของแรงสะท้อนกลับสูงสุดที่กระทำกับมือของผู้ดำเนินการมีค่าเกินกว่า 2 นิวตัน แรงสะท้อนกลับดังกล่าวยังคงมีทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการเลื่อนด้ามจับของผู้ดำเนินการและทิศทางการเคลื่อนที่ของดอกกัดชิ้นงาน แรงสะท้อนกลับในแนวแกน Y (เส้นทึบสีเทา) กำหนดให้มีค่าเป็นร้อยละ 10 ของแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Yw เนื่องจากแนวแกน Yw ไม่ได้เป็นทิศทางหลักในการทดลองการเคลื่อนที่ของดอกกัด แรงสะท้อนกลับในแนวแกน Zw (จุดสีเทา) แสดงค่าเป็นบวกโดยมีค่าประมาณร้อยละ 20 ของแรงกัดชิ้นงานที่วัดค่าได้ (มีค่าไม่เกิน 1.2 นิวตันเนื่องจากการกำหนดค่าสูงสุดไว้ในระบบควบคุม) แรงกัดชิ้นงานทั้งแนวแกน X Y และ Z สามารถปรับขนาดตามสัดส่วนของแรงกัดชิ้นงานได้เพื่อให้เกิดความเหมาะสมมากขึ้น โดยมีทิศทางของแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการดังกล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 4.39 แรงสะท้อนกลับต่อมือผู้ดำเนินการแนวแกน X Y และ Z เมื่อกัดชิ้นงานเป็นหลุม (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในแนวแกน Xw)

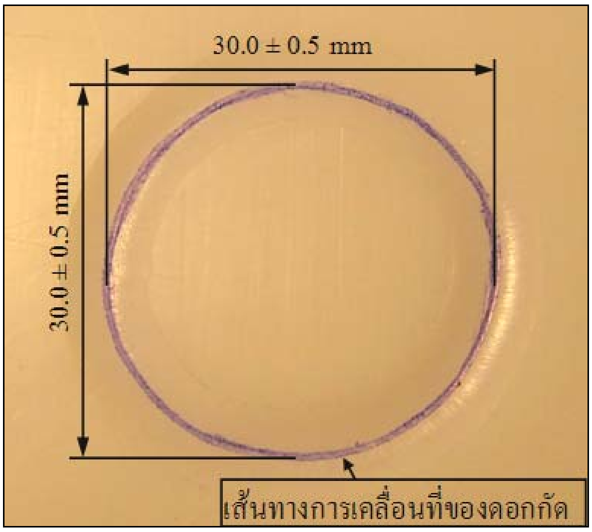
การทดลองนี้ได้นำเสนอการควบคุมแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Xw และ Zw ในขณะที่ดอกกัดมีการเคลื่อนที่กัดชิ้นงานด้วยการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ เฉพาะในแนวแกน Xw พบว่าแรงกัดชิ้นงานในขณะที่ดอกกัดมีการกัดเซาะชิ้นงานเป็นร่องแนวเส้นตรงมีค่าสูงที่สุด ระบบควบคุมแรงกัดชิ้นงานสามารถทำการควบคุมแรงให้มีค่าอยู่ระหว่าง 5-10 นิวตันได้ แรงกัดชิ้นงานดังกล่าวสามารถนำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงสำหรับสร้างแรงสะท้อนกลับที่กระทำต่อมือของผู้ดำเนินการได้ แรงสะท้อนกลับเกิดขึ้นในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนมือของผู้ดำเนินการ ความเร็วในการเคลื่อนมือของผู้ดำเนินการสามารถนำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงในการปรับเพิ่มแรงสะท้อนกลับ ในกรณีที่แรงกัดชิ้นงานในทิศทางการเคลื่อนมือของผู้ดำเนินการมีค่าต่ำ การปรับเพิ่มค่าแรงสะท้อนกลับทำให้ผู้ดำเนินการรับรู้แรงสะท้อนกลับได้ดีขึ้น

4.4 ทดลองกัดชิ้นงานเป็นวงกลม

การทดลองกัดชิ้นงานเป็นวงกลม ก็เพื่อต้องการศึกษาการควบคุมแรงกัดและตำแหน่งของดอกกัดในขณะที่ดอกกัดเคลื่อนที่กัดเซาะชิ้นงานด้วยระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟในแนวแกน Xw และ Yw โดยในขณะที่ทำการกัดชิ้นงาน แขนกลนำได้มีการสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการ การสร้างแรงสะท้อนกลับอาศัยค่าอ้างอิงจากแรงกัดชิ้นงานที่วัดค่าได้ แรงกัดชิ้นงานควรมีขนาดและทิศทางที่เหมาะสมกับทิศทางการเคลื่อนที่ของดอกกัด

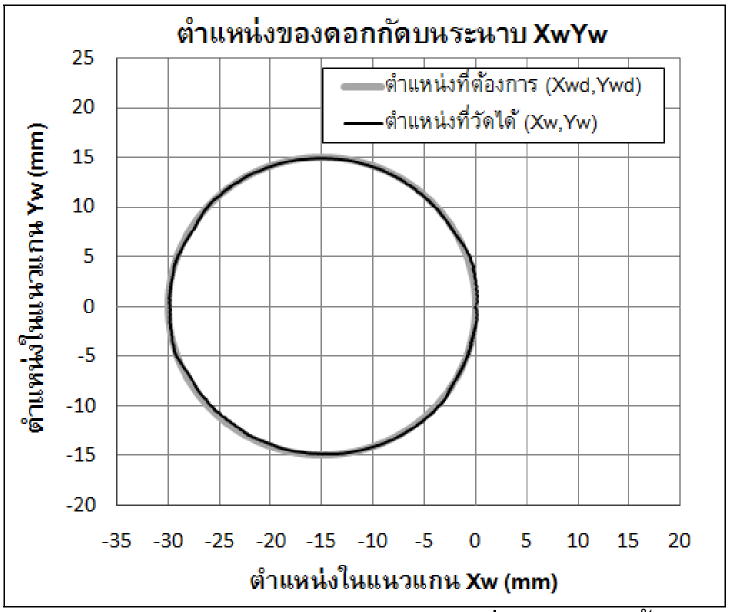
ในเบื้องต้นผู้วิจัยต้องการตรวจสอบทิศทางของแรงกัดที่เกิดขึ้นเมื่อดอกกัดมีการเคลื่อนที่ในแนวแกน Xw และ Yw เป็นลักษณะวงกลม จึงได้ทำการทดลองกำหนดค่าตำแหน่งที่ต้องการให้ดอกกัดเคลื่อนที่เป็นลักษณะวงกลมผ่านระบบควบคุมการเคลื่อนที่ การทดลองนี้กำหนดให้ดอกกัดเคลื่อนที่ด้วยความเร็วในการกัด (feed rate) 4 มิลลิเมตรต่อวินาทีเป็นเส้นทางวงกลมซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร บนระนาบ XwYw และมีความลึกในการกัด 2 มิลลิเมตร

รูปที่ 4.40 แสดงชิ้นงานวัสดุ PE (Polyethylene) ที่ได้จากการกัดโดยการกำหนดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของดอกกัดเป็นเส้นทางวงกลมผ่านระบบควบคุมการเคลื่อนที่ ในที่นี้ผู้วิจัยได้ใช้ปากกาเขียนเส้นลงบนชิ้นงานที่ได้จากการกัด เพื่อแสดงลักษณะของชิ้นงานให้ชัดเจนมากขึ้น เมื่อตรวจสอบระยะห่างสูงสุดของเส้นทางการเคลื่อนที่ดังกล่าวในแนวแกน Xw และ Yw พบว่ามีจะมีค่าประมาณ 30 มิลลิเมตร และ 29.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ค่าที่ได้จากการประมาณดังกล่าวมีความสอดคล้องกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นทางวงกลมที่ต้องการคือ 30 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.40 ชิ้นงานที่ได้จากการกัดเป็นวงกลม (ความลึก 2 มิลลิเมตร)

รูปที่ 4.41 แสดงตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้ในขณะทำการกัดชิ้นงานเปรียบเทียบกับตำแหน่งของดอกกัดที่ต้องการ โดยตำแหน่งของดอกกัดที่ต้องการนี้จะเริ่มต้นในขณะที่ตำแหน่งในแนวแกน Xw และ Yw มีค่าเป็นศูนย์ (Xw=0, Yw=0) และตำแหน่งของดอกกัดที่ต้องการจะเริ่มเคลื่อนไปในทิศทาง –Xw และ –Yw เพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไปตามลักษณะของเส้นรอบวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตรจนกระทั่งกลับมาบรรจบกับตำแหน่งเริ่มต้น (Xw=0,Yw=0) อีกครั้ง จากรูปที่ 4.41 เป็นผลการทดลองซึ่งแสดงว่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ของดอกกัดที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งที่ต้องการ ในขณะที่เส้นทางการเคลื่อนที่มีลักษณะเป็นวงกลม

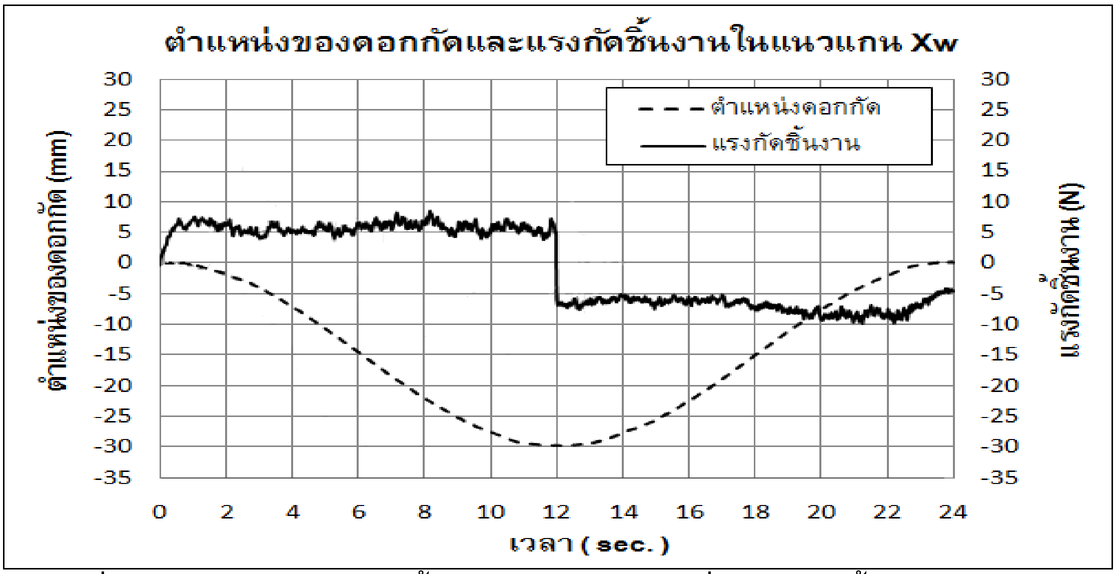


รูปที่ 4.41 ตำแหน่งของดอกกัดบนระนาบ XwYw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นวงกลม

รูปที่ 4.42-4.44 แสดงตำแหน่งของดอกกัดที่วัดค่าได้เมื่อต้องการให้ดอกกัดมีการเคลื่อนที่เป็นลักษณะวงกลมและลักษณะของแรงกัดชิ้นงานที่วัดค่าได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้แรงในแนวแกน Xw Yw และ Zw เทียบกับเวลา ในที่นี้ผู้วิจัยต้องการให้ดอกกัดมีความลึกในการกัดชิ้นงานคือ 2 มิลลิเมตร โดยการกำหนดค่าผ่านระบบควบคุมก่อนเริ่มต้นการทดลอง ดังนั้นในขณะเวลาเริ่มต้นกัด (0 วินาที) ดอกกัดชิ้นงานจะมีความลึกที่ต้องการจากผิวหน้าของชิ้นงานคือ 2 มิลลิเมตร ในที่นี้จะแสดงตำแหน่งเริ่มต้นในแนวแกน Zw คือ 0 มิลลิเมตร เพื่อความสะดวกในการแสดงตำแหน่งของดอกกัดที่วัดค่าได้ ตำแหน่งของดอกกัดในขณะเริ่มต้นการทดลองจึงแสดงค่าเป็นศูนย์ (Xw=0, Yw=0, Zw=0)

รูปที่ 4.42 แสดงตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้ (สเกลแกนตั้งด้านซ้ายมือ) และแรงกัดชิ้นงาน (สเกลแกนตั้งด้านขวามือ) ในแนวแกน Xw เทียบกับเวลา เมื่อเริ่มต้นการกัดชิ้นงานตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้จะเปลี่ยนแปลงตำแหน่งหรือเคลื่อนที่ไปในทิศทาง –Xw (แสดงค่า

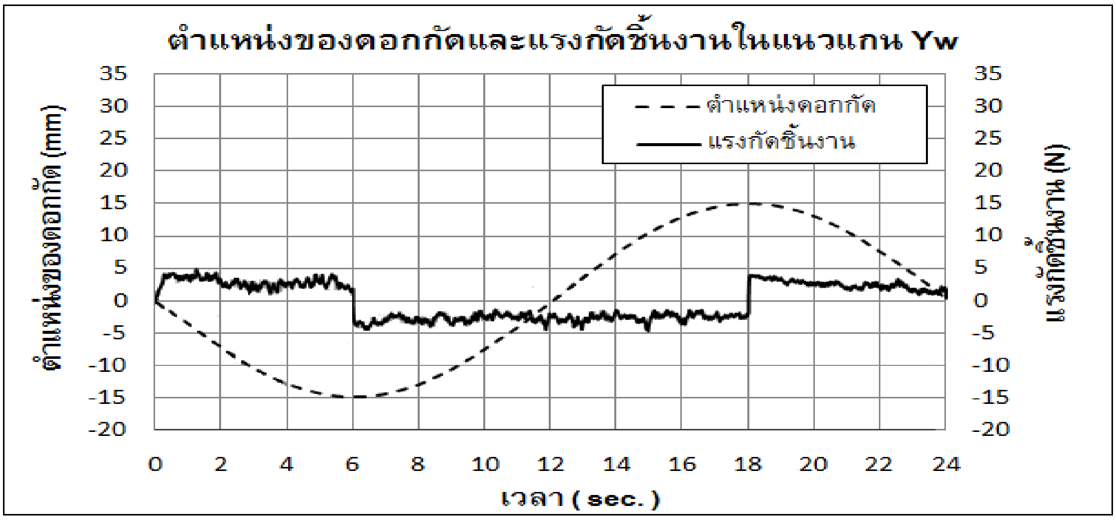
เป็นลบ) จนกระทั่งที่เวลาประมาณ 12 วินาทีจึงได้มีการปรับทิศทางการเคลื่อนที่เป็น Xw (แสดงค่าเป็นบวก) และสิ้นสุดการเคลื่อนที่ที่เวลาประมาณ 24 วินาที การเคลื่อนที่ของดอกกัดในขณะทำการกัดเซาะเนื้อชิ้นงานนั้นเราสามารถตรวจวัดแรงกัดได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจสรู้แรงที่ติดตั้งอยู่ที่ฐานของแท่นยึดจับชิ้นงาน แรงกัดชิ้นงานซึ่งตรวจวัดค่าได้นั้นมีขนาดอยู่ระหว่าง 5-10 นิวตัน โดยมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของดอกกัดกล่าวคือ เมื่อดอกกัดเคลื่อนที่ในทิศทาง –Xw (แสดงค่าเป็นลบ) แรงกัดชิ้นงานจะเกิดขึ้นในทิศทาง Xw (แสดงค่าเป็นบวก) แต่เมื่อดอกกัดเคลื่อนที่ในทิศทาง Xw (แสดงค่าเป็นบวก) แรงกัดจะเกิดขึ้นในทิศทาง –Xw (แสดงค่าเป็นลบ) แรงกัดสามารถเปลี่ยนแปลงทิศทางได้อย่างรวดเร็วในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางของดอกกัด ดังจะเห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงแรงกัดในขณะเวลา 12 วินาที



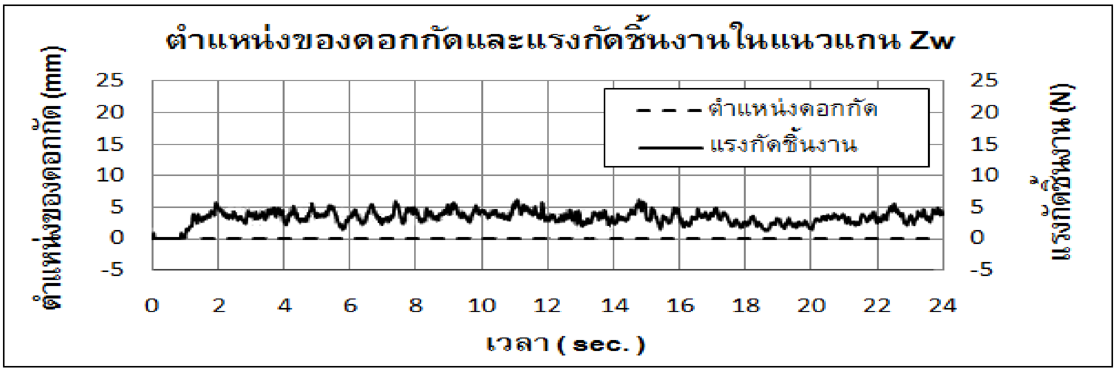
รูปที่ 4.42 ตำแหน่งและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Xw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นวงกลม

รูปที่ 4.43 แสดงตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้และแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Yw เทียบกับเวลา ตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้ (เส้นประสีดำ) มีค่าอยู่ระหว่าง -15 มิลลิเมตร และ 15 มิลลิเมตร การเปลี่ยนแปลงทิศทางของดอกกัดเกิดขึ้นขณะเวลาประมาณ 6 วินาที และ 18 วินาที ส่งผลให้แรงกัดชิ้นงานมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางด้วย แรงกัดชิ้นงาน (เส้นทึบสีดำ) เกิดขึ้นในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ของดอกกัด โดยมีขนาดแรงกัดชิ้นงานสูงสุดไม่เกิน 5 นิวตัน

รูปที่ 4.44 แสดงตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้ (สเกลแกนตั้งด้านซ้ายมือ) และแรงกัดชิ้นงาน (สเกลแกนตั้งด้านขวามือ) ในแนวแกน Zw เทียบกับเวลา ตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งเริ่มต้น (Zw=0) ตลอดระยะเวลาการกัดชิ้นงาน แรงกัดชิ้นงาน (เส้นทึบสีดำ) มีค่าอยู่ระหว่าง 0-5 นิวตัน แรงกัดชิ้นงานมีค่าเป็นบวกแสดงว่าปลายดอกกัดมีการกดลงบนผิวชิ้นงาน



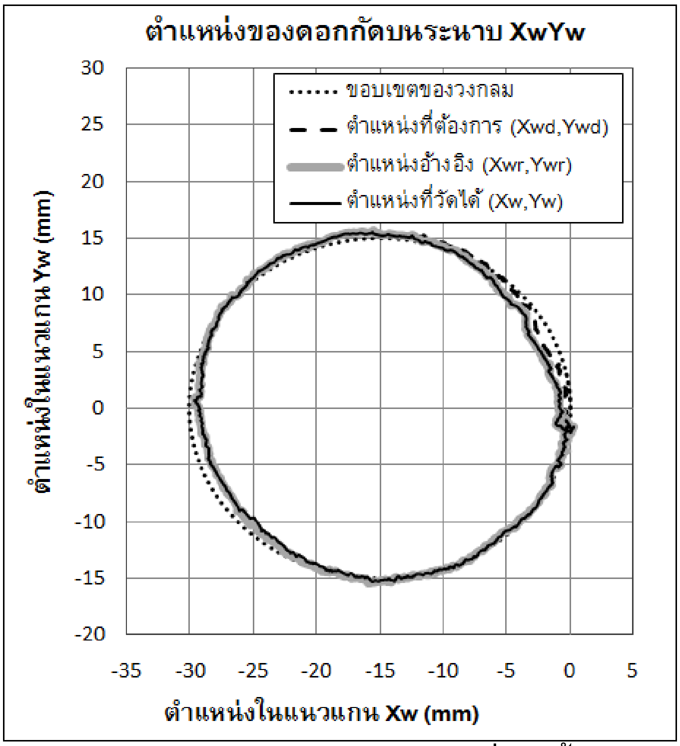
รูปที่ 4.43 ตำแหน่งและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Yw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นวงกลม



รูปที่ 4.44 ตำแหน่งและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Zw เมื่อทำการกัดชิ้นงานเป็นวงกลม

หลังจากที่ได้ทำการตรวจสอบขนาดและทิศทางของแรงกัดในขณะกัดชิ้นงานเป็นวงกลมเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนถัดไปผู้วิจัยจะทำการควบคุมแรงกัดและตำแหน่งของดอกกัดในขณะที่ดอกกัดเคลื่อนที่กัดเซาะชิ้นงานด้วยระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟโดยแขนกลนำได้มีการสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการด้วย ในการทดลองนี้ ผู้ดำเนินการจะใช้มือจับด้ามจับของแขนกลนำเพื่อเลื่อนตำแหน่งปลายแขนกลนำไปตามขอบเขตของชิ้นงานอ้างอิงที่มีลักษณะเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร แต่เนื่องจากปลายแขนกลนำเป็นลูกเหล็กทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ดังนั้นเมื่อทำการชดเชยขนาดของลูกเหล็กทรงกลมดังกล่าวส่งผลให้ขอบเขตอ้างอิงมีลักษณะเป็นวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร การทดลองนี้กำหนดให้การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลนำส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของดอกกัดเฉพาะในแนวแกน Xw และ Yw เท่านั้น ดังนั้นดอกกัดจะเคลื่อนที่กัดชิ้นงานในแนวแกน Xw และ Yw โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงความลึกในการกัด การปรับค่าความลึกในการกัดชิ้นงานสามารถกำหนดได้โดย การกำหนดค่าผ่านระบบควบคุม

รูปที่ 4.45 แสดงตำแหน่งของดอกกัดบนระนาบ XwYw เมื่อกำหนดให้การกัดชิ้นงานที่ความลึก 2 mm โดยการควบคุมการเคลื่อนที่ของดอกกัดด้วยวิธีการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟเฉพาะในแนวแกน Xw และ Yw โดยการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลนำที่เป็นลูกทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ไปตามขอบของชิ้นงานอ้างอิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร ดอกกัดชิ้นงานจะเคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งที่วัดค่าได้ที่ปลายแขนกลนำ เมื่อทำการชดเชยขนาดของปลายแขนกลนำแล้ว ปลายแขนกลนำควรเคลื่อนที่ไปตามขอบเขตของวงกลมอ้างอิงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร (แสดงด้วยจุดสีดำ) แต่เนื่องจากเกิดความผิดพลาดในการวัดตำแหน่งของปลายแขนกลนำทำให้ตำแหน่งที่ต้องการ (เส้นประสีดำ) เกิดความแตกต่างจากขอบเขตวงกลมอ้างอิง (จุดสีดำ) ตำแหน่งที่ต้องการ (เส้นประสีดำ) จะมีค่าเท่ากับตำแหน่งอ้างอิง (เส้นทึบสีเทา) ได้เฉพาะในกรณีที่แรงกัดชิ้นงานที่วัดได้มีขนาดต่ำกว่าค่าแรงกัดที่กำหนดไว้หรือค่าแรงกัดที่ต้องการ ในการทดลองนี้ตำแหน่งที่ต้องการ (เส้นประสีดำ) ไม่ค่อยปรากฏให้เห็นเนื่องจากถูกบดบังหรือถูกทับด้วยค่าตำแหน่งอ้างอิง (เส้นทึบสีเทา) เป็นส่วนใหญ่ ตำแหน่งอ้างอิง (เส้นทึบสีเทา) เป็นตำแหน่งที่ดอกกัดชิ้นงานควรจะเคลื่อนที่ไปเพื่อทำการควบคุมแรงกัดชิ้นงาน การทดลองพบว่าตำแหน่งของดอกกัดที่วัดค่าได้ (เส้นทึบสีดำ) มีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งอ้างอิงของดอกกัด (เส้นทึบสีเทา) แสดงว่าระบบควบคุมการคลื่อนที่ของดอกกัดสามารถทำงานได้เป็นอย่างดี

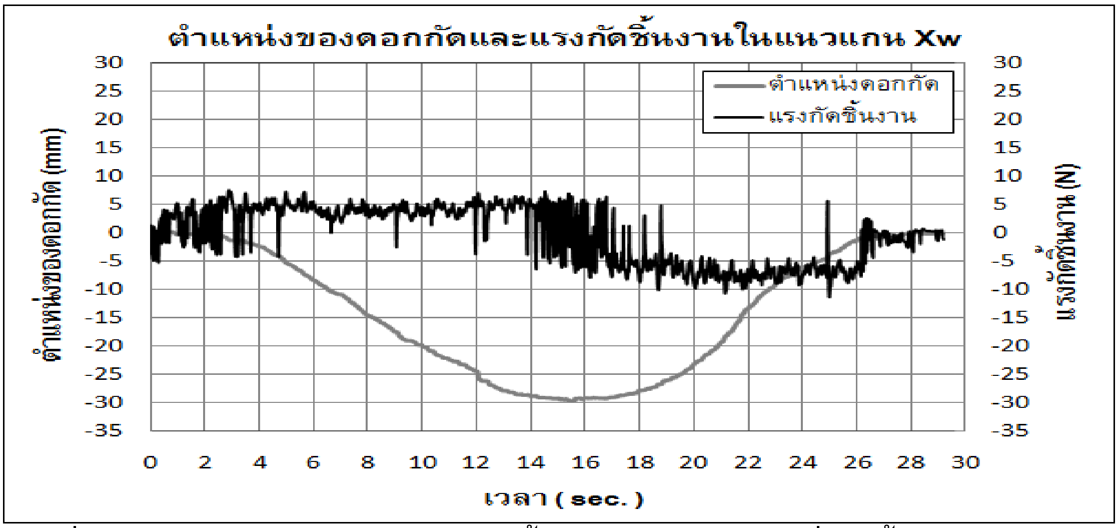


รูปที่ 4.45 ตำแหน่งของดอกกัดบนระนาบ XwYw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นวงกลม
(เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟแนวระนาบ XwYw)

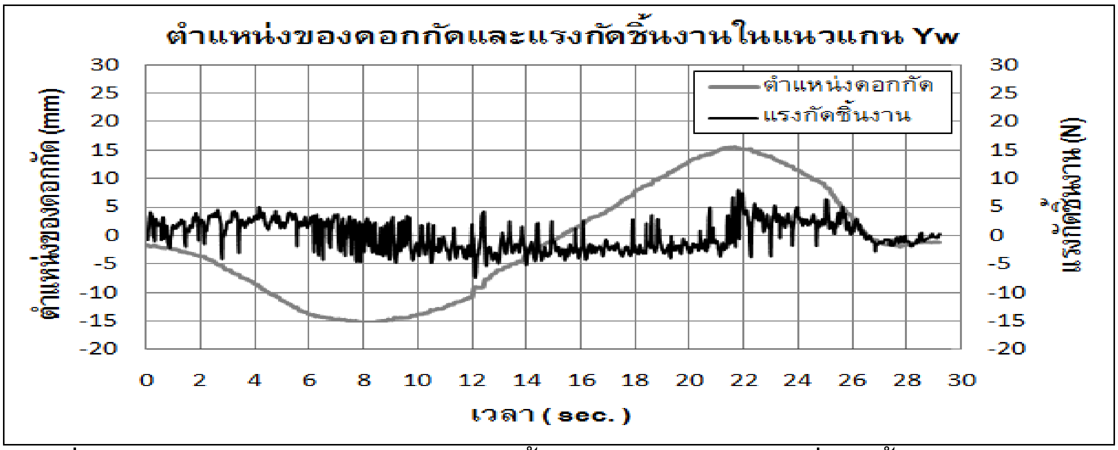
รูปที่ 4.46 แสดงตำแหน่งของดอกกัด (สเกลแกนตั้งด้านซ้ายมือ) และแรงกัดชิ้นงาน (สเกลแกนตั้งด้านขวามือ) ในแนวแกน Xw เทียบกับเวลา การทดลองพบว่าแรงกัดชิ้นงานที่วัดค่าได้ (เส้นทึบสีดำ) ส่วนใหญ่เกิดขึ้นในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของดอกกัด แรงกัดชิ้นงานบางส่วนเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่หรือหยุดการเคลื่อนที่ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ เนื่องจากการเคลื่อนที่ของแขนกลนำเป็นการบังคับด้วยมือผู้ดำเนินการ ตัวอย่างเช่น ดอกกัดมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่ในขณะเวลาประมาณ 16 วินาที ส่งผลให้แรงกัดชิ้นงานมีการเปลี่ยนทิศทางอย่างรวดเร็วระหว่างแรงกัด 6 นิวตัน และ -6 นิวตัน ผลการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแรงกัดมีค่าลดลงเมื่อดอกกัดเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่อง แรงกัดชิ้นงานมีค่าสูงสุดประมาณ 10 นิวตัน ในขณะที่ดอกกัดเคลื่อนที่ในทิศทาง Xw แสดงโดยการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของดอกกัด (เส้นทึบสีเทา) ในช่วงเวลาประมาณ 18-26 วินาที

รูปที่ 4.47 แสดงตำแหน่งของดอกกัด (สเกลแกนตั้งด้านซ้ายมือ) และแรงกัดชิ้นงาน (สเกลแกนตั้งด้านขวามือ) ในแนวแกน Yw เทียบกับเวลา การทดลองพบว่าแรงกัดชิ้นงาน (เส้นทึบสีดำ) มีทิศทางตรงข้ามกับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งการเคลื่อนที่ (เส้นทึบสีเทา) ตลอดระยะเวลาการดำเนินการ การสั่นขึ้นลงของแรงกัดเกิดขึ้นเมื่อมีการหยุดการเคลื่อนที่เป็นช่วงๆ หรือการเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่ในช่วงเวลาประมาณ 8 วินาที และ 22 วินาที แรงกัดมีขนาดสูงสุดประมาณ 7 นิวตัน

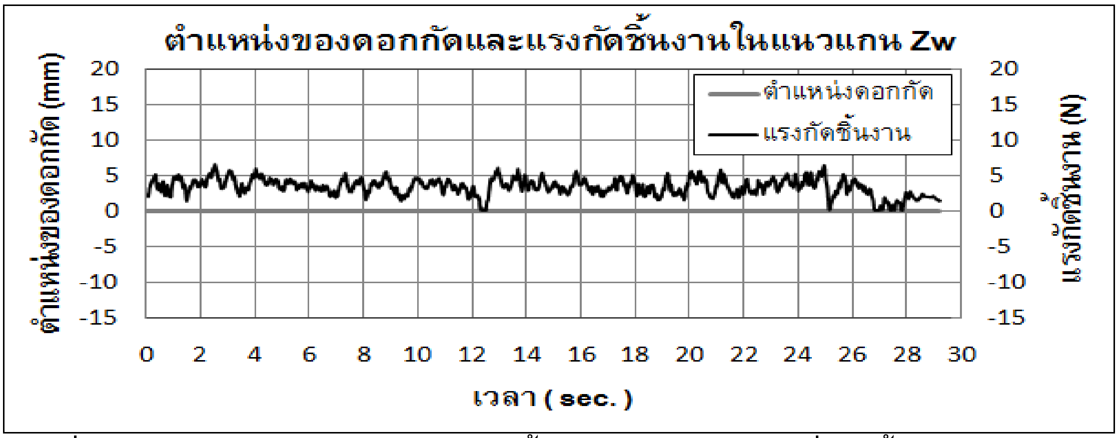
รูปที่ 4.48 แสดงตำแหน่งของดอกกัด (สเกลแกนตั้งด้านซ้ายมือ) และแรงกัดชิ้นงาน (สเกลแกนตั้งด้านขวามือ) ในแนวแกน Zw เทียบกับเวลา การทดลองพบว่าตำแหน่งของดอกกัดที่วัดได้ (เส้นทึบสีเทา) ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงไปจากค่าเริ่มต้น แรงกัดชิ้นงานมีค่าระหว่าง 0-6 นิวตัน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงหรือเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้เล็กน้อย (กำหนดขนาดแรงกัด 5 นิวตัน)



รูปที่ 4.46 ตำแหน่งของดอกกัดและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Xw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นวงกลม (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟแนวระนาบ XwYw)

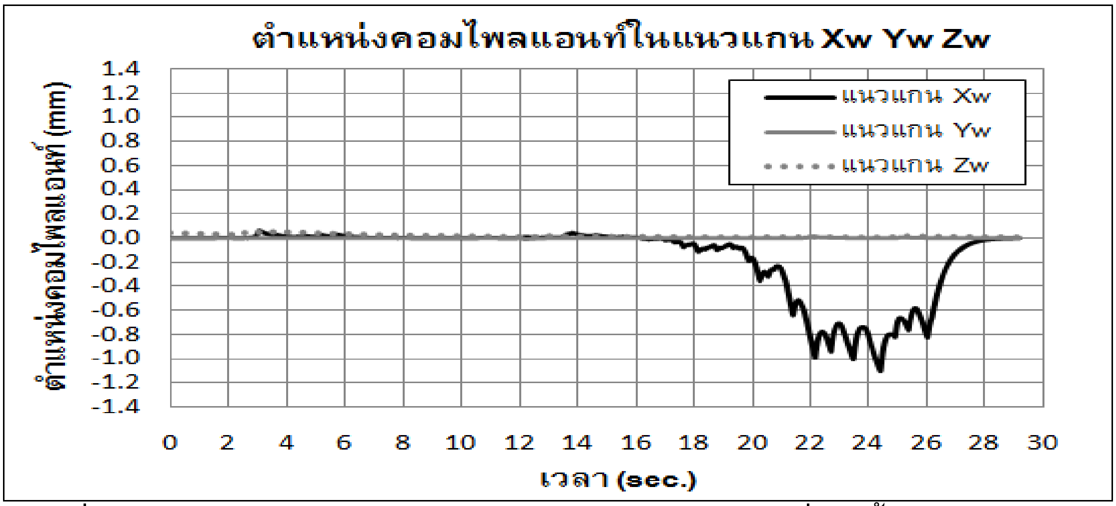


รูปที่ 4.47 ตำแหน่งของดอกกัดและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Yw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นวงกลม (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟแนวระนาบ XwYw)



รูปที่ 4.48 ตำแหน่งของดอกกัดและแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Zw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นวงกลม (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟแนวระนาบ XwYw)

รูปที่ 4.49 แสดงตำแหน่งคอมไพลแอนท์ที่เกิดขึ้นในแนวแกน Xw Yw และ Zw ในขณะที่ดอกกัดเคลื่อนที่กัดชิ้นงาน ผลการทดลองพบว่าดอกกัดมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งคอมไพลแอนท์เฉพาะในแนวแกน Xw ตำแหน่งคอมไพล์แอนท์มีขนาดสูงสุดประมาณ 1.1 มิลลิเมตร ตำแหน่งคอมไพลแอนท์มีค่ามากในช่วงเวลา 22-26 วินาที ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ดอกกัดมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเพิ่มขึ้นในแนวแกน Xw (ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกับผลที่แสดงในรูปที่ 4.46) การเกิดตำแหน่งคอมไพลแอนท์ดังกล่าวหมายความว่าดอกกัดกำลังเคลื่อนที่ในทิศทาง Xw โดยมีการเคลื่อนที่ช้ากว่าตำแหน่งที่ต้องการ ระบบควบคุมแรงและระบบควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของดอกกัดจะปรับตำแหน่งคอมไพลแอนท์จนมีค่าเป็นศูนย์ในขณะเวลาประมาณ 28 วินาที การปรับค่าดังกล่าวใช้ระยะเวลาประมาณ 2 วินาที ซึ่งแสดงว่าตำแหน่งของดอกกัดมีค่าเท่ากับตำแหน่งที่ต้องการ

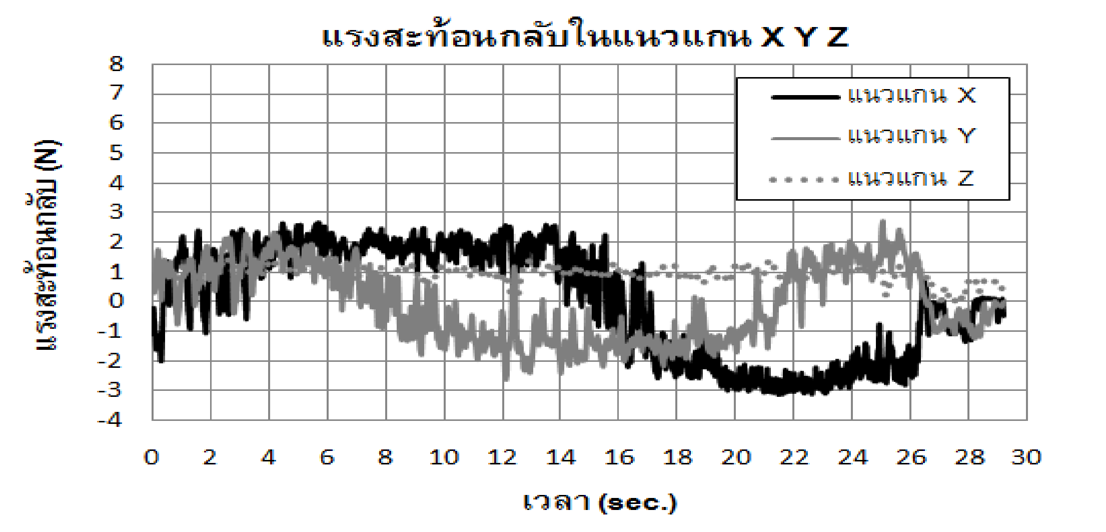


รูปที่ 4.49 ตำแหน่งคอมไพลแอนท์ในแนวแกน Xw Yw และ Zw เมื่อกัดชิ้นงานเป็นวงกลม (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟแนวระนาบ XwYw)

รูปที่ 4.50 แสดงค่าแรงสะท้อนกลับที่กระทำกับมือของผู้ดำเนินการในแนวแกน X Y และ Z ในขณะที่ดอกกัดมีการกัดเซาะชิ้นงานด้วยการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ โดยที่แรงสะท้อนกลับสร้างขึ้นได้จากแรงกัดที่วัดค่าได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้แรงในแนวแกน Xw Yw และ Zw การทดลองกำหนดให้แรงสะท้อนกลับในแนวแกน X และ Y มีค่าประมาณร้อยละ 40 ของแรงกัดชิ้นงานในแนวแกน Xw และ Yw ตามลำดับ แรงสะท้อนกลับจะกระทำกับมือของผู้ดำเนินการ ในทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ตลอดระยะเวลาในการกัดชิ้นงาน โดยมีค่าแรงสะท้อนกลับ ในแนวแกน X และ Y ไม่เกิน 3.2 นิวตัน (กำหนดค่าสูงสุดไว้ในระบบควบคุม) การกำหนดค่าแรงสะท้อนกลับสูงที่สุดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดแรงกระทำกับมือของผู้ดำเนินการมากจนเกินไป ในที่นี้ขนาดของแรงสะท้อนกลับบนระนาบ XY ของแขนกลนำจะมีค่าไม่เกิน 4.53 นิวตัน (แต่ละแนวแกนมีค่าไม่เกิน 3.2 นิวตัน) แรงสะท้อนกลับในแนวแกน Z มีค่าประมาณร้อยละ 20 ของแรงกัดชิ้นงานที่เกิดขึ้นในแนวแกน Zw แต่จะมีค่าไม่เกิน 1.2 นิวตัน (กำหนดค่าสูงสุดไว้ในระบบควบคุม) เพื่อป้องกันไม่ให้ปลายแขนกลนำเกิดการยกตัวขึ้นในขณะที่ผู้ดำเนินการเลื่อนตำแหน่งปลายแขนกลนำบนพื้นผิวของชิ้นงานอ้างอิง

การทดลองกัดชิ้นงานด้วยการเคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟในแนวแกน Xw และ Yw แสดงให้เห็นว่า ระบบควบคุมสามารถควบคุมแรงกัดชิ้นงานและตำแหน่งการเคลื่อนที่ของดอกกัดได้ดี แม้ว่าดอกกัดมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งการเคลื่อนที่ทั้งในแนวแกน Xw และ Yw ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของดอกกัดที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งอ้างอิงของดอกกัด (ดังแสดงในรูปที่ 4.45) ระบบควบคุมสามารถควบคุมขนาดแรงกัดให้มีค่าอยู่ในช่วง 5-7 นิวตันได้ (ดังแสดงในรูปที่ 4.46) นอกจากนี้การสร้างแรงสะท้อนกลับในแนวแกน X และ Y ส่งผลไปยังด้ามจับของผู้ดำเนินการ เนื่องจากมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของดอกกัด แรงสะท้อนกลับดังกล่าวจะช่วยทำให้ผู้ดำเนินการมีความระมัดระวังและสามารถปรับลักษณะ

การเคลื่อนที่ของแขนกลนำได้ก่อนที่จะเกิดปัญหาขึ้นที่แขนกลตาม และพบว่าถ้าค่าแรงสะท้อนกลับมีค่าเกินกว่า 2 N แล้วจะก่อให้เกิดการรับรู้ค่อนข้างดีแก่ผู้ดำเนินการ



รูปที่ 4.50 แรงสะท้อนกลับต่อมือผู้ดำเนินการแนวแกน X Y และ Z เมื่อกัดชิ้นงานเป็นวงกลม (เคลื่อนดอกกัดแบบมาสเตอร์-สเลฟแนวระนาบ XwYw)

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการควบคุมแรงกัดและตำแหน่งของดอกกัดซึ่งติดตั้งไว้กับชุดหมุนหัวกัด (spindle) ของแขนกลลูกผสมแบบขนาน 5 แกน ตระกูล เอช-4 ในขณะทำการกัดชิ้นงาน แรงกัดชิ้นงานที่เกิดขึ้นวัดค่าได้โดยอุปกรณ์ตรวจรู้แรงกัดซึ่งติดตั้งอยู่บนโต๊ะยึดจับชิ้นงาน ผลการทดลองเบื้องต้นแสดงว่าแรงกัดชิ้นงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มความเร็วการเคลื่อนที่ของดอกกัดและความลึกในการกัด การควบคุมแรงกัดที่เกิดขึ้นส่งผลให้ตำแหน่งของดอกกัดที่วัดค่าได้จริงเกิดการเปลี่ยนแปลงไปจากตำแหน่งที่กำหนดไว้ในโปรแกรมควบคุมจนกระทั่งแรงกัดที่วัดค่าได้มีค่าต่ำกว่าค่าแรงกัดที่กำหนดไว้ ตำแหน่งดอกกัดจะมีการปรับตัวจนมีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งที่กำหนดไว้ในโปรแกรมควบคุม ผลการทดลองแสดงถึงความสามารถในการควบคุมแรงกัดชิ้นงานและตำแหน่งของดอกกัดได้เป็นอย่างดี

การทดลองนี้กำหนดให้ดอกกัดสามารถเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในการเคลื่อนที่ได้สองกรณี คือ กรณีกำหนดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของดอกกัดผ่านระบบควบคุมและกรณีการเคลื่อนที่ด้วยระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ การทดลองได้แสดงการศึกษาทิศทางของแรงกัดที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนดอกกัดโดยการกำหนดตำแหน่งการเคลื่อนที่ผ่านระบบควบคุมเป็นลักษณะเส้นตรงและวงกลม การทดลองกัดชิ้นงานตามเส้นทางวงกลมแนวระนาบแสดงให้เห็นว่าแรงกัดชิ้นงานที่เกิดขึ้นมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของดอกกัดบนระนาบดังกล่าว แรงกัดที่เกิดขึ้นจึงมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของดอกกัดในขณะทำการกัดชิ้นงาน เมื่อได้ทำการตรวจสอบลักษณะของแรงกัดที่เกิดขึ้นแล้วจึงได้ทำการศึกษาการควบคุมแรงกัดในกรณีที่ดอกกัดมีการเคลื่อนที่ด้วยระบบการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟโดยกำหนดให้แขนกลนำสามารถสร้างแรงสะท้อนกลับมากระทำต่อมือของผู้ดำเนินการเพื่อให้ผู้ดำเนินการรู้สึกถึงแรงกระทำในขณะทำการกัดชิ้นงาน การสร้างแรงสะท้อนกลับดังกล่าวเป็นการจำกัดความเร็วในการเลื่อนมือของผู้ดำเนินการและความเร็วในการเคลื่อนที่ของดอกกัดชิ้นงาน ดอกกัดชิ้นงานสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งอ้างอิงของดอกกัดที่คำนวณไว้ได้ในกรณีที่แรงกัดชิ้นงานมีค่าเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้ในโปรแกรม ตำแหน่งของดอกกัดจะมีการปรับตัวจนมีค่าเท่ากับตำแหน่งปลายแขนกลนำ(ตำแหน่งที่ต้องการ) ในกรณีที่แรงกัดชิ้นงานมีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนดให้

การควบคุมแรงกัดในกรณีที่ดอกกัดมีการเคลื่อนที่แบบมาสเตอร์-สเลฟ ระบบควบคุมสามารถควบคุมแรงกัดให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการได้ ส่งผลให้การเคลื่อนที่ของดอกกัดในขณะทำการกัดชิ้นงานมีค่าในช่วงที่กำหนดซึ่งเป็นผลดีต่อการสร้างชิ้นงานต่อไป

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการสอบเทียบตำแหน่งการเคลื่อนที่ทั้งในส่วนของแขนกลนำและแขนกลตามให้มีความแม่นยำมากขึ้นเพื่อให้สามารถกัดชิ้นงานที่มีความซับซ้อนได้ดีขึ้น

2. ควรปรับปรุงการสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือของผู้ดำเนินการให้เกิดความรู้สึกที่ดีมากขึ้น โดยอาจใช้วิธีทำการทดลองเพื่อหาแบบจำลองของแรงสะท้อนกลับและการเคลื่อนที่ระหว่างด้ามจับของแขนกลนำและมือของผู้ดำเนินการ

3. ควรศึกษาข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างแรงสะท้อนกลับที่มือของผู้ดำเนินการและแรงกัดชิ้นงานที่วัสดุแตกต่างกันออกไป เพื่อยังคงรักษาคุณภาพของผิวชิ้นงานในการกัดขึ้นรูป

4. เมื่อต้องการกัดชิ้นงานที่มีความซับซ้อน ควรทำการตรวจสอบตำแหน่งของดอกกัดและตำแหน่งที่ดอกกัดสัมผัสชิ้นงานเพื่อให้สามารถวิเคราะห์ทิศทางของแรงกัดได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบเส้นทางเดินของดอกกัดที่เกิดขึ้นในขณะกัดชิ้นงานได้รวดเร็วขึ้น

รายการอ้างอิง

[1] Chiaverini, S., and Sciavicco, L. The Parallel Approach to Force/Position Control of Robot Manipulator. IEEE Transactions on Robotics and Automation 9, 4 (August 1993): 361-373.

[2] Chiaverini, S., Siciliano, B., and Villani, L. Force/Position Regulation of Compliant Robot Manipulators. IEEE Transactions on Automatic Control 39, 4 (March 1994): 647-652.

[3] Ferretti, G., Magnani, G., and Rocco, P. On the Stability of Integral Force Control in case of Contact with Stiff Surfaces. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control 117 (December 1995):547-553.

[4] Chiaverini, S., Siciliano, B., and Villani, L. Force and Position Tracking: Parallel Control with Stiffness Adaptation. IEEE Control Systems (February 1998): 27-33.

[5] Gasparetto, A., Vidoni, R., and Zanotto, V. DFORCE : Delayed Force ReferenCE Control for Master-Slave Robotic Systems, Mechatronics 19 (2009): 639-646.

[6] Hyoung Il, S., Bhattacharjee, T.,and Lee, D.Y. Estimation of Environmental Force for the Haptic Interface of Robotic Surgery. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery 6 (May 2010): 221-230.

[7] Kuchenbecker, K.J., and Niemeyer, G. Induced Master Motion in Force-Reflecting Teleoperation, ASME Journal of Dynamic Systems and Controls 128, 4 (2006): 800-810.

[8] Ibeas, A., and Sen, M. Robustly Stable Adaptive Control of a Tandem of Master-Slave Robotic Manipulators with Force Reflection by Using a Multiestimation Scheme. IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics-Part B 36, 5(October 2006): 1162-1179.

[9] Malysz, P., and Sirouspour, S. Nonlinear and Filtered Force/Position Mappings in Bilateral Teleoperation with Application to Enhanced Stiffness Discrimination IEEE Transaction on Robotics 25, 5(October 2009):1134-1149.

[10] Hosseini-Suny, K., Momeni H., and Janabi-Sharifi, F. Model Reference Adaptive Control Design for a Teleoperation System with Output Prediction. Journal of Intelligent Robotic System 59 (2010): 319-339.

[11] Chui, K.L, Chiu, W.K., and Yu, K.M. Direct 5-Axis Tool-Path Generation from Point Cloud Input Using 3D Biarc Fitting. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 24 (2008): 270-286.

[12] Teng, Z., Feng, H.Y., and Azzem, A. Generating Efficient Tool Paths from Point Cloud Data via Machining Area Segmentation. International Journal of Advance Manufacturing Technology 30 (2006): 254-260.

[13] Makki, M., Tournier, C., Thiebaut, F., Lartique C., and Souzani, C. 5-Axis Direct Machining of Rough Clouds of Points. Computer-Aided Design and Applications 7, 4(2010): 591-600.

[14] Yang, P., Schmidt, T., and Qian, X. Direct Digital Design and Manufacturing from Massive Point-Cloud Data. Computer-Aided Design and Applications 6 (2009): 685-699.

[15] Altintas, Y., and Lee, P., Mechanics and Dynamics of Ball End Milling. Journal of Manufacturing Science and Engineering 120 (November 1998): 684-692.

[16] Lazoglu, I., Sculpture Surface Machining : a Generalized Model of Ball-End Milling Force System. International Journal of Machine Tools & Manufacture 43 (2003): 453-462.

[17] Fussell, B.K., Jerard, R.B., and Hemmett, J.G. Modeling of Cutting Geometry and Forces for 5-Axis Sculptured Surface Machining, Computer-Aided Design 35 (2003): 333-346.

[18] Lamikiz, A., Lopez de Lacalle, L.N., Sanchez, J.A. and Salgado, M.A. Cutting Force Estimation in Sculptured Surface Milling. International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004): 1511-1526.

[19] Milfelner M., Kopac, J., Cus, F., and Zuperl, U. Genetic Equation for the Cutting Force in Ball-End Milling, Journal of Materials Processing Technology 164 (2005): 1554-1560.

[20] Fontaine, M., Devillez, A., Moufki, A., and Dudzinski, D. Predictive Force Model for Ball-End Milling and Experimental Validation with a Wavelike form Machining Test. International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006): 367-380.

[21] Salami, R., Sadeghi, M.H., and Motakef, B. Feed Rate Optimization for 3-Axis Ball-End Milling of Sculptured Surfaces. International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007): 760-767.

[22] Gonzalo, O., Jauregi, H., Uriarte, L.G., and Lopez de Lacalle, L.N. Prediction of Specific Force Coefficients from a FEM Cutting Model. International Journal of Advance Manufacturing Technology 43 (2009) 348-356.

[23] Ozturk, E., Tunc L.T., and Budak, E. Investigation of Lead and Tilt Angle Effects in 5-Axis Ball-End Milling Processes. International Journal of Machine Tools & Manufacture 49 (2009): 1053-1062.

[24] Budak, E., Ozturk, E. and Tunc, L.T. Modeling and Simulation of 5-Axis Milling Processes. CIRP Annals- Manufacturing Technology 58 (2009): 347-350.

[25] Zeroudi, N., Fontaine M., and Necib, K. Prediction of Cutting Forces in 3-Axes Milling of Sculptured Surfaces Directly from CAM Tool Path. Journal of Intelligent Manufacturing (2010).

[26] Tsai, C.L., and Liao, Y.S., Cutting force prediction in Ball-End Milling with Inclined Feed by Means of Geometrical Analysis. International Journal of Advance Manufacturing Technology 46 (2010): 529-541.

[27] Sangveraphunsiri, V., and Ngamvilaikorn, T. Design and Analysis of 6 DOF Haptic Device for Teleoperation Using a Singularity-Free Parallel Mechanism. Thammasart International Journal of Science and Technology 10 (2005): 60-69.

[28] Sangveraphunsiri, V., and Chooprasird K. Dynamics and Control of a 5-DOF Manipulator Base on an H-4 Parallel Mechanism. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 52 (2011): 343-364.

[29] Sciavicco, L., and Siciliano, B. Modeling and Control of Robot Manipulators The McGraw-Hill Companies, Inc., 1996

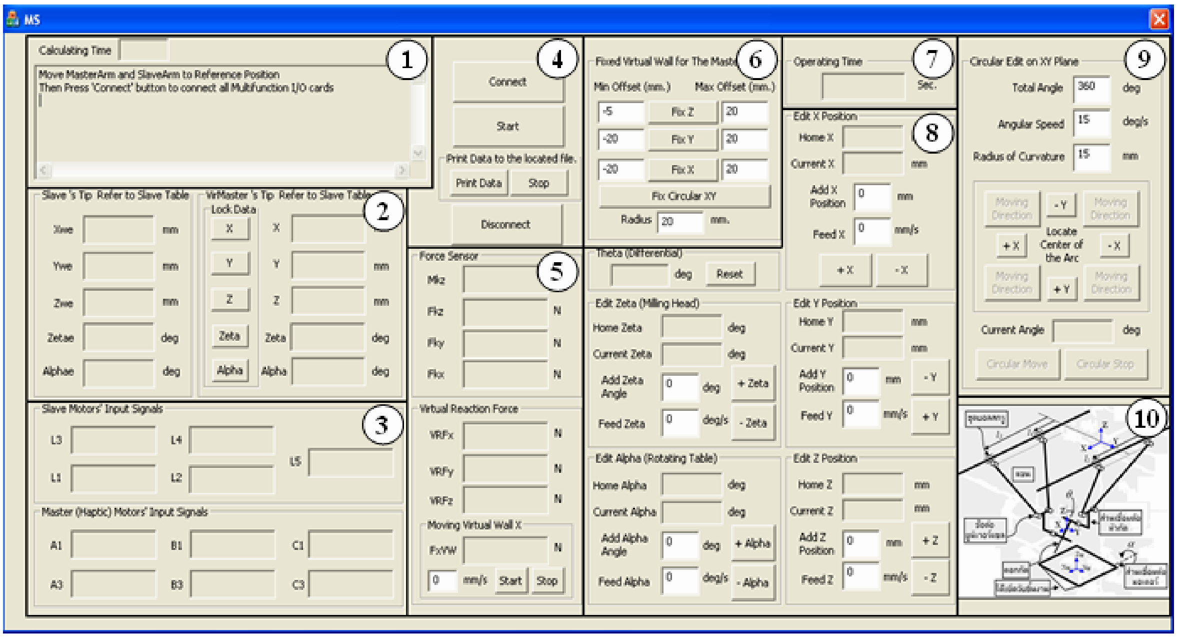
[30] Siciliano, B., and Villani, L. Robot Force Control Kluwer Academic Publishers, 1999

[31] Caccavale, F., Natale, C., Siciliano, B. and Villinani, L.. Integration for the Next Generation Embedding Force Control into Industrial Robots. IEEE Robotics & Automation Magazine (September 2005): 53-64.

ภาคผนวก

ลักษณะของโปรแกรมควบคุมการทำงาน

การพัฒนาโปรแกรมควบคุมการทำงานของแขนกล 5 แกนตระกูลเอช-4 โดยการใช้ซอฟ์แวร์ Microsoft Visual C++ 2008 แบบไดอะลอก (Dialog Base) เพื่อให้เกิดความสะดวกในขณะป้อนข้อมูลและแสดงผลดังรูปที่ 1 การส่งข้อมูลเข้าไปในโปรแกรมเกิดขึ้นเมื่อมีการกดปุ่ม (Button) ซึ่งปรากฏอยู่บนพื้นที่ของไดอะลอก ส่วนการแสดงค่าต่าง ๆบนไดอะลอกเกิดขึ้นเมื่อครบกำหนดการตั้งเวลาไว้ ในที่นี้กำหนดให้แสดงผลทุกระยะเวลา 1 วินาที



รูปที่ ก.1 ส่วนประกอบต่าง ๆในไดอะลอก (Dialog)

สามารถแสดงส่วนประกอบบนพื้นที่ไดอะลอกตามลำดับหมายเลขที่กำหนดขึ้นได้ดังนี้

1. ส่วนแสดงสถานะของโปรแกรม
2. ส่วนแสดงตำแหน่งที่วัดได้ และ ตำแหน่งที่ต้องการ สำหรับแขนกล 5 แกน
3. ส่วนแสดงค่าสัญญาณควบคุมมอเตอร์
4. ส่วนเริ่มต้นการทำงานของโปรแกรมและการบันทึกค่าในไฟล์ข้อมูล
5. ส่วนแสดงค่าแรงที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้แรงและค่าแรงสะท้อนกลับ
6. ส่วนการสร้างกำแพงเสมือน
7. ส่วนแสดงค่าเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มโปรแกรม
8. ส่วนปรับตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกล 5 แกน (ดอกกัดชิ้นงาน)
9. ส่วนกำหนดการเคลื่อนที่ของปลายแขนกล 5 แกน (ดอกกัดชิ้นงาน) เป็นลักษณะวงกลม
10. ส่วนแสดงภาพทิศทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนกล 5 แกน (ดอกกัดชิ้นงาน)

<u>ขั้นตอนการทำงานโดยสังเขป</u>

1. เลื่อนตำแหน่งปลายแขนกลนำ (แขนกลแฮปติค) และ เลื่อนตำแหน่งปลายแขนกลตามไปยังตำแหน่งเริ่มต้นการทำงาน (Home Position) และ ทำการปิด (Disable) สวิตซ์ควบคุมอุปกรณ์ขยายกระแสไฟฟ้า (Amplifier) ของมอเตอร์ทั้งหมด

2. เปิดโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงานในรูปแบบไดอะลอก (Dialog Base) โปรแกรมจะแสดงสถานะให้กดปุ่ม “Connect” (แสดงในส่วนที่ 4) เพื่อเชื่อมต่อการ์ดควบคุม (Multifunction I/O Card)

3. เมื่อสามารถเชื่อมต่อการ์ดควบคุมได้โดยไม่มีการแจ้งเตือนข้อผิดพลาด (Error Messages)

3.1 เปิดสวิตซ์จ่ายกระแสไฟฟ้า (Main Breaker) เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้ชุดควบคุมของแขนกลตาม
3.2 เปิด (Enable) สวิตซ์ควบคุมอุปกรณ์ขยายกระแสไฟฟ้า (Amplifier) ให้ชุดควบคุมทำงาน
3.3 กดปุ่ม “Start” (แสดงในส่วนที่ 4) เพื่อเริ่มต้นการทำงานของโปรแกรม ไดอะลอกจะแสดงค่าตำแหน่งปัจจุบันและตำแหน่งที่กำหนดให้ของแขนกลตามบนพิกัดโต๊ะยึดจับชิ้นงาน (แสดงในส่วนที่ 2) แสดงค่าสัญญาณควบคุมมอเตอร์ (แสดงในส่วนที่ 3) แสดงค่าแรงกัดซึ่งวัดได้จากอุปกรณ์ตรวจรู้แรง (แสดงในส่วนที่ 5) และเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มทำงาน (แสดงในส่วนที่ 7)

4. เลื่อนตำแหน่งปลายแขนกลตามไปใกล้ตำแหน่งเริ่มต้นการกัดชิ้นงานโดยการปรับตำแหน่งแนวแกน Xw Yw และ Zw (แสดงในส่วนที่ 8) อ้างอิงกับทิศทางของโต๊ะยึดจับชิ้นงาน (แสดงในส่วนที่ 10)

5. เริ่มต้นการกัดชิ้นงาน

5.1 เปิดการใช้งานอุปกรณ์ตรวจรู้แรงกัด (Force Sensor) และ อุปกรณ์หมุนดอกกัด (Spindle)
5.2 กดปุ่ม “Print Data” (แสดงในส่วนที่ 4) เพื่อบันทึกข้อมูลตำแหน่งของดอกกัดและแรงกัดชิ้นงาน
5.3 กรณีการกัดชิ้นงานด้วยการกำหนดการเคลื่อนที่ด้วยโปรแกรม สามารถกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่และความเร็วการกัดเป็นเส้นตรง (แสดงในส่วนที่ 8) หรือ การกัดเป็นเส้นโค้ง (แสดงในส่วนที่ 9)
5.4 กรณีการกัดชิ้นงานด้วยการทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟ สามารถเคลื่อนแขนกลนำไปยังตำแหน่งและทิศทางต่าง ๆภายในบริเวณขอบเขตการทำงาน สามารถกำหนดขอบเขตการทำงานให้มีบริเวณเล็กลงได้โดยการกำหนดพื้นที่กำแพงเสมือน (แสดงในส่วนที่ 6) แขนกลนำจะสร้างแรงสะท้อนกลับกระทำต่อมือผู้ดำเนินการเพื่อขัดขวางการเคลื่อนที่ออกนอกบริเวณที่

กำหนดขึ้น นอกจากนี้สามารถกำหนดให้ตำแหน่งปลายแขนกลตามมีค่าคงที่ในแต่ละทิศทางได้ โดยการกดปุ่มเพื่อหยุดการเคลื่อนที่ในทิศทางนั้นๆ (แสดงในส่วนที่ 2)

6. สิ้นสุดการกัดชิ้นงาน

6.1 กดปุ่ม “ Stop” (แสดงในส่วนที่ 4) เพื่อหยุดการบันทึกข้อมูลลงในไฟล์
6.2 เลื่อนตำแหน่งของดอกกัดกลับไปที่ตำแหน่งเริ่มต้นการทำงาน (Home Position)
โดยระมัดระวังไม่ให้เกิดการชนกับชิ้นงาน
6.3 ปิดการใช้งานอุปกรณ์ตรวจรู้แรงกัด (Force Sensor) และ อุปกรณ์หมุนดอกกัด (Spindle)
6.4 ปิด (Disable) สวิตซ์ควบคุมอุปกรณ์ขยายกระแสไฟฟ้า(Amplifier) ของมอเตอร์ทั้งหมด
6.5 กดปุ่ม “Disconnect” (ในส่วนที่ 4) เพื่อหยุดการทำงานของโปรแกรม

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ว่าที่ร้อยตรี เรืองยศ อารยวงษ์กุล เกิดเมื่อวันที่ 8 มีนาคม ปี พ.ศ.2523 เป็นชาวกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตและระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี พ.ศ.2544 และ พ.ศ.2547 ตามลำดับ เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี พ.ศ.2550