

การทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟของแขนกลแฮบติคหกงศาอิสระแบบใหม่ที่มีโครงสร้างแบบขนาน
สำหรับงานสร้างชิ้นงานต้นแบบ



นายทวี งามวิไลกร

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

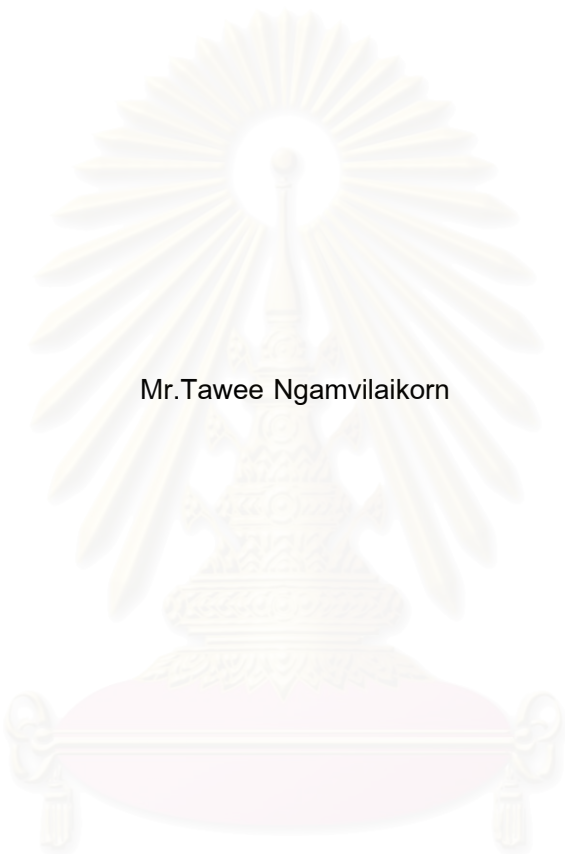
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MASTER-SLAVE OPERATION OF A NOVEL 6-DOF PARALLEL HAPTIC DEVICE
FOR PROTOTYPING PRODUCT.




Mr.Tawee Ngamvilaikorn

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Engineering Program in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic year 2006
Copyright of Chulalongkorn University

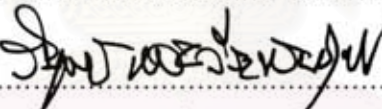
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟของแขนกลแฮบติคคองคาสอิสรระบบใหม่ที่มีโครงสร้างแบบขนานสำหรับงานสร้างชิ้นงานต้นแบบ
โดย	นายทวิ งามวิไลกร
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิบัณฑิต

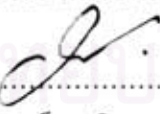

..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ติเรก ลาวัฒน์ศิริ)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


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


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันท์เจริญ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วัฒนสุโกประสิทธิ์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิชัย คีวะโกศิษฐ)

ทวิ งามวิไลกร : การทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟของแขนกลแบริคตคทงศาอิสระแบบใหม่
ที่มีโครงสร้างแบบขนานสำหรับงานสร้างชิ้นงานต้นแบบ (MASTER-SLAVE OPERATION
OF A NOVEL 6-DOF PARALLEL HAPTIC DEVICE FOR PROTOTYPING
PRODUCTS) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 93หน้า.

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบแขนกลเคลื่อนที่นำและแขนกลเคลื่อนที่ตามเพื่อสร้างชิ้นงานต้นแบบ
ประกอบด้วยแขนกลแบริคตคแบบ 6 องศาอิสระที่มีโครงสร้างแบบขนานและแขนกลตามแบบ 5 องศา
อิสระที่มีโครงสร้างแบบขนานในตระกูล เอช 4 แขนกลแบริคตคได้ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นเพื่อให้ใช้
งานง่ายมีความคล่องตัวสูงและสามารถสร้างแรงสะท้อนกลับสู่ผู้ควบคุมได้ แขนกลตามได้ถูก
ปรับปรุงให้สามารถกัดเซาะชิ้นงานได้ ในงานวิจัยนี้แขนกลแบริคตคถูกใช้เป็นแขนกลเคลื่อนที่นำที่
สามารถเก็บข้อมูลตำแหน่งของพื้นผิวของชิ้นงานที่ต้องการทำซ้ำ ข้อมูลตำแหน่งที่ได้จะถูกส่งไปที่
แขนกลตามเพื่อให้แขนกลตามกัดเซาะชิ้นงานต้นแบบออกมา ในงานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์
เชิงตำแหน่งทั้ง Forward Kinematics, Inverse Kinematics และความสัมพันธ์เชิงความเร็ว

แขนกลแบริคตคที่สร้างขึ้นได้ถูกทดสอบความแม่นยำในการเคลื่อนที่และความสามารถในการ
สร้างแรงสะท้อนกลับที่ปลายแขนกลกับมือของผู้ควบคุม แขนกลตามที่ปรับปรุงได้ถูกทดสอบการกัด
เซาะชิ้นงานโดยใช้กับวัตถุ 2 ชนิด คือ ไม้ และโฟม ชิ้นงานต้นแบบที่สร้างมีขนาดผิดพลาดอยู่ใน
ระดับ 1 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นข้อจำกัดของความสามารถในการวัดของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ตั้งในแขนกล
ทั้งสอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต..... ทวิ งามวิไลกร
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา 2549 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4571807421 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: HAPTIC / MASTER-SLAVE / PARALLEL ROBOT / H-4 / FORCE CONTROL

TAWEE NGAMVILAIKORN : MASTER-SLAVE OPERATION OF A NOVEL 6-DOF
PARALLEL HAPTIC DEVICE FOR PROTOTYPING PRODUCTS.

THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D, 93 pp.

This paper illustrates the novel design of a 6-DOF parallel Haptic device. Haptic device is used as Master Manipulator in a master-slave operation for a force reflecting system. The slave manipulator is a parallel mechanism with H-4 configuration. It has five degrees of freedom. The Master-Slave manipulator is designed and built for 5-axis milling processes and aimed to use in a human interfaced rapid prototyping system. In addition to the use as a master arm with force reflect, the haptic device can measure the 3-D surface coordinate of an object and use as the reference to control position and orientation of the slave manipulator. The forward and inverse position and velocity relationships of the master arm are presented.

The experimental results show that the operator, by operating the haptic device, can control the slave manipulator for product prototyping very well. Force reflection information improves the feeling of operation significantly. The results also show good accuracy with average error about 1 mm due to the limitation of the measurement sensors attached.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department..... Mechanical Engineering... Student's signature..... *Tawee*
Field of study Mechanical Engineering... Advisor's signature..... *Viboon*
Academic year 2006..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่ให้โอกาสและส่งเสริมให้ได้รับการศึกษามาจนถึงปัจจุบัน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างยิ่งของรศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้กรุณาสละเวลาเพื่อให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่างๆในการวิจัยครั้งนี้ พร้อมทั้งจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้มาด้วยดีโดยตลอด ขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคนที่คอยช่วยเหลือ ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทและเอกทุกท่านที่สนับสนุนการวิจัยเสมอมา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2. ความรู้เบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ความรู้เบื้องต้นของอุปกรณ์แฮบติคและโครงสร้างแบบขนาน	4
2.2 งานวิจัยอุปกรณ์แฮบติคและโครงสร้างแบบขนานที่ผ่านมา	5
3. การออกแบบแขนกลแฮบติค	10
3.1 การออกแบบกลไกของแขนกลแฮบติค	10
3.3 รายละเอียดของอุปกรณ์แฮบติค	11
4. จลศาสตร์ของอุปกรณ์แฮบติค	16
4.1 สมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์	16
4.2 สมการอินเวิร์สคิเนแมติกส์	21
4.3 จาคอเบียน (Jacobian)	25
4.4 Singularity	29
5. แขนกลเคลื่อนที่ตามแบบขนานในตระกูลเอช 4	30
5.1 รูปแบบของแขนกลแบบขนานในตระกูลเอช 4	30
5.2 สมการอินเวิร์สคิเนแมติกส์	31
5.4 สมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์	35
6. การควบคุม	39
6.1 การบังคับและการควบคุมแขนกลแฮบติค	39
6.2 การตั้งตำแหน่งเริ่มต้นของแขนกลตาม	42
6.3 การหาตำแหน่งและทิศทางที่ใช้ควบคุมแขนกลตาม	43

บทที่	หน้า
6.4 อุปกรณ์และระบบควบคุมของแขนกลตาม.....	45
6.5 การสร้างแรงโต้ตอบกลับของแขนกลแบบตึกที่มีต่อมือของผู้ควบคุม	46
7. การทดสอบแขนกลแบบตึกและแขนกลตาม	52
7.1 การทดสอบแขนกลแบบตึก.....	52
7.1.1 การทดสอบความแม่นยำของแขนกลแบบตึก.....	52
7.1.2 การทดสอบการสร้างแรงโต้ตอบของแขนกลแบบตึก	56
7.2 การทดสอบแขนกลแบบตึกและแขนกลตาม	58
7.3 การทดสอบการกักเซาะชิ้นงาน.....	61
7.3.1 ผลการทดสอบการกักเซาะโดยใช้ชิ้นงานรูปหกเหลี่ยมและวงกลม.....	61
7.3.2 ผลการทดสอบการกักเซาะโดยใช้ชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยม	62
7.3.3 ผลการทดสอบการกักเซาะโดยใช้ชิ้นงานชิ้นส่วนข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซล.....	63
7.3.4 ผลการทดสอบการกักเซาะโดยใช้ชิ้นงานรูปขวดนูน	64
7.3.5 ผลการทดสอบการกักเซาะโดยใช้ชิ้นงานรูปสปู	64
7.3.6 ผลการทดสอบการกักเซาะโดยใช้ชิ้นงานรูปกันขวด	64
7.3.7 ผลการทดสอบการกักเซาะโดยใช้ชิ้นงานรูปขวดทรงแบน.....	66
7.3.8 ผลการทดสอบการกักเซาะโดยใช้ชิ้นงานรูปหน้าคน	67
7.4 การทดสอบการสร้างแรงโต้ตอบของแขนกลแบบตึกขณะที่แขนกลตาม กักเซาะชิ้นงาน	67
7.4.1 การทดสอบแรงโต้ตอบกลับของแขนกลแบบตึกเมื่อแขนกลตามชนวัตถุ	68
7.4.2 การทดสอบแรงโต้ตอบกลับของแขนกลแบบตึกเมื่อแขนกลตาม กักเซาะชิ้นงานในแนวแกน X	75
7.4.3 การทดสอบแรงโต้ตอบกลับของแขนกลแบบตึกเมื่อแขนกลตาม กักเซาะชิ้นงานในแนวแกน Y.....	78
8. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	83
8.1 สรุปผลการวิจัย.....	83
8.2 ข้อเสนอแนะ	84
รายการอ้างอิง	85
ภาคผนวก.....	88
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	93

หน้า

ตาราง 7.1 ผลการทดสอบความแม่นยำครั้งที่ 1 ของแขนกลแฮบติคกับอุปกรณ์สอบเทียบ.....	53
ตาราง 7.2 ผลการทดสอบความแม่นยำครั้งที่ 2 ของแขนกลแฮบติคกับอุปกรณ์สอบเทียบ.....	53
ตาราง 7.3 ผลการทดสอบความแม่นยำครั้งที่ 3 ของแขนกลแฮบติคกับอุปกรณ์สอบเทียบ.....	54
ตาราง 7.4 ผลการทดสอบความแม่นยำครั้งที่ 4 ของแขนกลแฮบติคกับอุปกรณ์สอบเทียบ.....	54
ตาราง 7.5 ผลการทดสอบความแม่นยำของแขนกลแฮบติคและแขนกลตามในแนวแกน X.....	59
ตาราง 7.6 ผลการทดสอบความแม่นยำของแขนกลแฮบติคและแขนกลตามในแนวแกน Y.....	59
ตาราง 7.7 ผลการทดสอบความแม่นยำของแขนกลแฮบติคและแขนกลตามในแนวแกน Z.....	60



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 Y-Star Parallel Manipulator [Tremblay, 1999]	6
รูปที่ 2.2 Agile eye [Gosselin, 1994].....	6
รูปที่ 2.3 Kaist Master [Woo, 1998]	7
รูปที่ 2.4 UCI Hand Controller [Collins, 1995].....	8
รูปที่ 2.5 Parallel Mechanism [Yoon, 2000].....	9
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของแขนกลแฮบติคที่ออกแบบไว้.....	10
รูปที่ 3.2 โครงสร้างแขนแต่ละด้านของอุปกรณ์แฮบติค	11
รูปที่ 3.3 ข้อต่อแบบเลื่อนและระบบสายพานมูเล่	12
รูปที่ 3.4 รายละเอียดข้อต่อหมุนตัวที่ 1	13
รูปที่ 3.5 รายละเอียดของข้อต่อหมุนที่ 2	13
รูปที่ 3.6 รายละเอียดของข้อต่อทรงกลมที่ฐานบนรูปสามเหลี่ยมและคั่นบังคับ	14
รูปที่ 3.7 โครงสร้างอุปกรณ์แฮบติคที่ออกแบบไว้.....	15
รูปที่ 3.8 อุปกรณ์แฮบติคที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว.....	15
รูปที่ 4.1 โครงสร้างของอุปกรณ์แฮบติค	17
รูปที่ 4.2 Coordinate frame ที่กำหนดไว้บนโครงสร้าง	18
รูปที่ 4.3 ตำแหน่งของเวกเตอร์ของแต่ละแขน	21
รูปที่ 4.4 เวกเตอร์ที่กำหนดไว้บนโครงสร้าง	22
รูปที่ 4.5 เวกเตอร์ที่ตำแหน่งต่างๆของขาที่ j	26
รูปที่ 5.1 แขนกลแบบขนานในตระกูลเอช 4.....	30
รูปที่ 5.2 รายละเอียดของแขนกลแบบเอช 4ที่ปรับปรุงใหม่	31
รูปที่ 5.3 รูปแบบการกำหนดตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆของแขนกล	32
รูปที่ 5.4 แนวการเคลื่อนที่ของจุด B.....	33
รูปที่ 5.5 การตั้งแกนของโต๊ะจับชิ้นงาน	34
รูปที่ 5.6 การตั้งแกนของปลายแขนกลตาม	35
รูปที่ 5.7 รูปร่างและการตั้งแกนเมื่อมองจากด้านข้างของแขนกลตาม	35
รูปที่ 5.8 รูปร่างและการตั้งแกนเมื่อมองจากด้านบนของแขนกลตาม	36
รูปที่ 6.1 การตั้งตำแหน่งเริ่มต้นของคั่นบังคับ	39
รูปที่ 6.2 การจับคั่นบังคับสัมผัสผิวของชิ้นงาน	40
รูปที่ 6.3 การกำหนดพื้นที่การทำงานของแขนกลแฮบติค	41
รูปที่ 6.4 รูปแบบการควบคุมแขนกลแฮบติค.....	42
รูปที่ 6.5 ระยะเวลาการตั้งตำแหน่งเริ่มต้นของแขนกลเคลื่อนที่ตามเมื่อมองจากด้านบน	42
รูปที่ 6.6 การหาตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการให้แขนกลตามเคลื่อนที่ไป.....	43

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 6.7 ระบบควบคุมแขนกลแฮบติค	51
รูปที่ 6.8 ระบบควบคุมแขนกลตาม	51
รูปที่ 7.1 อุปกรณ์สอบเทียบ	52
รูปที่ 7.2 ชิ้นงานต้นแบบที่ 1 และวิธีการทดสอบ.....	55
รูปที่ 7.3 ตำแหน่งของจุดที่วัดได้โดยใช้แขนกลแฮบติคและพื้นผิวที่ สร้างจากจุดที่วัดได้ของชิ้นงานรูปสปู.....	55
รูปที่ 7.4 ตำแหน่งของจุดที่วัดได้โดยใช้แขนกลแฮบติคและพื้นผิวที่ สร้างจากจุดที่วัดได้ของชิ้นงานรูปทรงกลม	56
รูปที่ 7.5 กำแพงเสมือนเพื่อช่วยในการใช้งานของแขนกลแฮบติค	57
รูปที่ 7.6 ผลการทดสอบการใช้กำแพงเสมือนเพื่อช่วยในการทำงาน.....	57
รูปที่ 7.7 การวัดตำแหน่งปลายแขนกลตาม	58
รูปที่ 7.8 รูปข้อมูลจุดจากชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมได้จากแขนกลแฮบติค และชิ้นงานต้นแบบที่กัดได้จากแขนกลตาม.....	61
รูปที่ 7.9 รูปข้อมูลจุดจากชิ้นงานรูปหกเหลี่ยมและวงกลมที่ได้จาก แขนกลแฮบติคและชิ้นงานต้นแบบที่กัดได้จากแขนกลตาม.....	62
รูปที่ 7.10 รูปข้อมูลจุดจากชิ้นงานที่เป็นชิ้นส่วนข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซล ที่ได้จากแขนกลแฮบติคและชิ้นงานต้นแบบที่กัดได้จากแขนกลตาม.....	63
รูปที่ 7.11 รูปข้อมูลจุดจากชิ้นงานรูปขวดนูนที่ได้จากแขนกลแฮบติค และชิ้นงานต้นแบบที่กัดได้จากแขนกลตาม.....	64
รูปที่ 7.12 รูปข้อมูลจุดจากชิ้นงานรูปสปูที่ได้จากแขนกลแฮบติค และชิ้นงานต้นแบบที่กัดได้จากแขนกลตาม.....	65
รูปที่ 7.13 รูปข้อมูลจุดจากชิ้นงานรูปก้นขวดที่ได้จากแขนกลแฮบติค และชิ้นงานต้นแบบที่กัดได้จากแขนกลตาม.....	65
รูปที่ 7.14 รูปข้อมูลจุดจากชิ้นงานรูปขวดแบนที่ได้จากแขนกลแฮบติค และชิ้นงานต้นแบบที่กัดได้จากแขนกลตาม.....	66
รูปที่ 7.15 รูปข้อมูลจุดจากชิ้นงานรูปหน้าคนที่ได้จากแขนกลแฮบติค และชิ้นงานต้นแบบที่กัดได้จากแขนกลตาม.....	67
รูปที่ 7.16 การทดสอบแรงโต้ตอบเมื่อแขนกลตามชนิดวัตถุในแนวแกน X	68
รูปที่ 7.17 กราฟแสดงตำแหน่งของแขนกลตามในแนวแกน X.....	68
รูปที่ 7.18 กราฟแสดงตำแหน่งของแขนกลตามในแนวแกน Y.....	69
รูปที่ 7.19 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขนกลแฮบติค กับแขนกลตามในแนวแกน X และ Y	69

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 7.20 แรงโต้ตอบที่แขนกลแฮบติคกระทำต่อมือผู้ควบคุมในแนวแกน X.....	70
รูปที่ 7.21 แรงโต้ตอบที่แขนกลแฮบติคกระทำต่อมือผู้ควบคุมในแนวแกน Y.....	70
รูปที่ 7.22 การทดสอบแรงโต้ตอบเมื่อแขนกลตามชนวัตถุในแนวแกน Y	71
รูปที่ 7.23 กราฟแสดงตำแหน่งของแขนกลตามในแนวแกน X.....	72
รูปที่ 7.24 กราฟแสดงตำแหน่งของแขนกลตามในแนวแกน Y.....	72
รูปที่ 7.25 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขนกลแฮบติค กับแขนกลตามในแนวแกน X และ Y	73
รูปที่ 7.26 แรงโต้ตอบที่แขนกลแฮบติคกระทำต่อมือผู้ควบคุมในแนวแกน X.....	74
รูปที่ 7.27 แรงโต้ตอบที่แขนกลแฮบติคกระทำต่อมือผู้ควบคุมในแนวแกน Y.....	74
รูปที่ 7.28 เส้นทางเดินของดอกกัท.....	75
รูปที่ 7.29 ตำแหน่งของแขนกลตาม	75
รูปที่ 7.30 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขนกลแฮบติค กับแขนกลตามในแนวแกน X และ Y	76
รูปที่ 7.31 ความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่ปลายแขนกลแฮบติค กับแขนกลตามในแนวแกน X และ Y	76
รูปที่ 7.32 แรงโต้ตอบที่แขนกลแฮบติคกระทำต่อมือผู้ควบคุมในแนวแกน X.....	77
รูปที่ 7.33 แรงโต้ตอบที่แขนกลแฮบติคกระทำต่อมือผู้ควบคุมในแนวแกน X.....	77
รูปที่ 7.34 เส้นทางเดินของดอกกัท.....	78
รูปที่ 7.35 ตำแหน่งของแขนกลตาม	79
รูปที่ 7.36 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขนกลแฮบติค กับแขนกลตามในแนวแกน X และ Y	79
รูปที่ 7.37 แสดงความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่ปลายแขนกลแฮบติค กับแขนกลตามในแนวแกน X และ Y	80
รูปที่ 7.38 แรงโต้ตอบที่แขนกลแฮบติคกระทำต่อมือผู้ควบคุมในแนวแกน X.....	80
รูปที่ 7.39 แรงโต้ตอบที่แขนกลแฮบติคกระทำต่อมือผู้ควบคุมในแนวแกน X.....	81
รูปที่ ก.1 มอเตอร์กระแสตรงของข้อหมุนที่ 1 และ ข้อต่อแบบเลื่อน	88
รูปที่ ก.2 อุปกรณ์วัดมุม	88
รูปที่ ก.3 ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมของข้อหมุนตัวที่ 2	89
รูปที่ ก.4 ตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมของข้อต่อแบบเลื่อน	89
รูปที่ ก.5 ระบบสายพานและมู่เล่ของข้อหมุนตัวที่ 1	90
รูปที่ ก.6 ระบบสายพานและมู่เล่ของข้อต่อแบบเลื่อน.....	90
รูปที่ ก.7 ระบบมู่เล่สายพานของอุปกรณ์วัดมุมของข้อต่อแบบเลื่อน	90

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ ก.8 รายละเอียดของคันบังคับ	91
รูปที่ ก.9 วิธีการจับคันบังคับ	91
รูปที่ ก.10 การ์ดนับค่าอุปกรณ์วัดมุม	91
รูปที่ ก.11 การ์ดแปลงสัญญาณจากดิจิตอลไปเป็นอนาลอก.....	92
รูปที่ ก.12 ชุดขยายกระแสขับมอเตอร์กระแสตรง	92



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

งานด้านวิศวกรรมย้อนกลับ (reverse engineering) และงานสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็ว (rapid prototype) มีประโยชน์มากในภาคอุตสาหกรรม จากประสบการณ์ในการทำงานด้านนี้ของผู้วิจัยพบว่าภาคอุตสาหกรรมยังขาดแคลนทักษะและความรู้ทางด้านนี้อยู่มากทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากเครื่องมือที่เกี่ยวข้องเช่น เครื่องวัดขนาด (CMM) เครื่องจักร CNC เครื่องทำต้นแบบอย่างรวดเร็ว และโปรแกรม CAD/CAM เช่น UG หรือ CATIA มีราคาสูง อีกทั้งในการใช้โปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับงานทั้งสองด้านนี้ต้องอาศัยความชำนาญเป็นส่วนประกอบสำคัญ ลักษณะงานด้านวิศวกรรมย้อนกลับ (reverse engineering) ที่พบได้แก่

- เริ่มจากการวัดขนาดของชิ้นงานที่จะทำต้นแบบที่ทำจากดินเหนียวหรือไม้แล้วนำพิกัดที่วัดได้ไปสร้างแบบสามมิติในคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้าน CAD จากนั้นก็ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้าน CAM สร้างทางเดินของเครื่อง CNC เพื่อกัดชิ้นงานต้นแบบออกมา
- เริ่มจากการวัดขนาดของชิ้นงานที่มีอยู่แล้วเพื่อการทำซ้ำโดยนำพิกัดที่วัดได้ไปสร้างแบบสามมิติในคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้าน CAD จากนั้นก็ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ด้าน CAM สร้างทางเดินของเครื่อง CNC เพื่อกัดชิ้นงานออกมา

ลักษณะงานสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็ว (rapid prototype) ที่พบได้แก่

- ใช้โปรแกรมเฉพาะทางของเครื่องสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็วเพื่อสร้าง support ให้กับแบบสามมิติของชิ้นงานที่ออกแบบไว้ด้วยโปรแกรม CAD จากนั้นก็ส่งเข้าเครื่องสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็วสร้างชิ้นงานต้นแบบเพื่อนำไปใช้ในงานแม่พิมพ์ต่อไป
- ใช้โปรแกรมเฉพาะทางของเครื่องสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็วเพื่อสร้าง support กับแบบสามมิติของชิ้นงานที่ออกแบบไว้ด้วยโปรแกรม CAD จากนั้นก็ส่งเข้าเครื่องสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็วสร้างชิ้นงานต้นแบบเพื่อนำไปใช้ในการทดสอบผลิตภัณฑ์ก่อนที่จะผลิตชิ้นงานจริงออกมา

ในส่วนของงานวิศวกรรมย้อนกลับปัญหาที่พบคือเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการวัดขนาดของชิ้นงาน ขั้นตอนการสร้างแบบสามมิติจากพิกัดที่ได้จากการวัดขนาด ขั้นตอนการสร้างทางเดินของเครื่อง CNC ทั้งหมดนี้มีความจำเป็นและใช้เวลาค่อนข้างมาก ทั้งนี้เนื่องจากจุดหรือผิวที่ได้การวัดนั้นยังไม่สามารถนำไปสร้างทางเดินของเครื่อง CNC ได้โดยตรง

จากปัญหาดังกล่าวทำให้ผู้วิจัยเชื่อว่าสามารถสร้างระบบแขนกลที่สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ กล่าวคือเริ่มตั้งแต่การวัดขนาดของชิ้นงาน การสร้างแบบสามมิติในคอมพิวเตอร์ การสร้างทางเดินของเครื่อง CNC ในเบื้องต้นระบบแขนกลที่ใช้แก้ปัญหาดังกล่าวประกอบด้วย

1. แขนกลแอบติค 6 องศาอิสระที่มีโครงสร้างแบบขนานที่สามารถสร้างแรงโต้ตอบกับผู้ควบคุมได้ แขนกลแอบติคนี้ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นมาใหม่
2. แขนกลเคลื่อนที่ตาม เป็นแขนกลแบบขนานในตระกูลเอช 4 ที่ ออกแบบและพัฒนาเพื่อให้มีความแข็งแรงและความคล่องตัวสูง
3. ระบบควบคุมการทำงานของระบบแขนกล

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. พัฒนาและสร้างแขนกลแอบติคหกองศาอิสระที่มีโครงสร้างแบบขนานให้สามารถใช้ควบคุมการทำงานของแขนกลเคลื่อนที่ตามแบบขนานในตระกูลเอช 4 ได้
2. พัฒนาและสร้างแขนกลเคลื่อนที่ตามแบบขนานในตระกูลเอช 4 ให้สามารถกัดเซาะชิ้นงานได้
3. พัฒนาและสร้างระบบควบคุมแขนกลแอบติคและแขนกลเคลื่อนที่ตามเพื่อให้สามารถสร้างชิ้นงานต้นแบบได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. สามารถใช้ระบบแขนกลแอบติคและแขนกลเคลื่อนที่ตามสร้างชิ้นงานต้นแบบได้
2. ชิ้นงานต้นแบบที่สร้างมีขนาดผิดพลาดอยู่ในระดับ 1 มิลลิเมตร

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาและวิเคราะห์ผลการวิจัยที่มีผ่านมาเพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบแขนกล
2. ออกแบบลักษณะกลไกของแขนกลสร้างแบบจำลองอย่างง่ายและวิเคราะห์กลไกที่ออกแบบ
3. ทำ Simulation เพื่อศึกษากลไกที่ได้ออกแบบไว้
4. ออกแบบ สร้าง และเลือกชิ้นส่วนต่างๆ เพื่อประกอบเป็นแขนกลพร้อมแก้ไขข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้
5. ออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งความเร็วและแรง
6. ทดลองการเคลื่อนที่พื้นฐาน
7. ทดสอบระบบโดยรวม และสรุปผล

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. แขนกลแอบติคที่มีความคล่องตัวสูงที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้ควบคุมแขนกลเคลื่อนที่ตามและแขนกลเคลื่อนที่ตามที่สามารถกักเซาะชิ้นงานได้
2. ระบบควบคุมที่ช่วยให้การทำงานระหว่างแขนกลแอบติคและแขนกลเคลื่อนที่ตามทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ
3. ระบบแขนกลที่สามารถใช้ในงานสร้างชิ้นงานต้นแบบซึ่งสามารถลดขั้นตอนการวัดขนาดชิ้นงาน ขั้นตอนสร้างแบบสามมิติ และขั้นตอนสร้างเส้นทางเดิน CNC ของงานด้านวิศวกรรมย้อนกลับ

บทที่ 2

ความรู้เบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้เบื้องต้นของอุปกรณ์แอสติคและโครงสร้างแบบขนาน

การพัฒนาแขนกลแอสติคในปัจจุบันจะมีรูปแบบหรือโครงสร้างหลักที่แตกต่างไปจากแขนกลที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมกล่าวคือต้องออกแบบให้แขนกลแอสติคเหมาะสมกับผู้ควบคุม ในขณะที่แขนกลที่ใช้ในอุตสาหกรรมจะถูกออกแบบให้มีลักษณะเหมาะสมกับประเภทของงานที่จะนำแขนกลไปใช้ ดังนั้นจากงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปลักษณะเฉพาะที่จำเป็นสำหรับการออกแบบโครงสร้างของแขนกลแอสติคได้ดังนี้

- 2.1.1 ความสามารถในการขับเคลื่อนกลับ (Back-drive-ability) อุปกรณ์แอสติคต้องมีความสามารถในการขับเคลื่อนกลับ (Back drive) ที่เหมาะสม Douglas [1991] , Fischer [1990] ความสามารถในการขับเคลื่อนกลับของอุปกรณ์แอสติคจะขึ้นอยู่กับอัตราทดของระบบส่งผ่านกำลัง ระบบส่งผ่านกำลังที่มีอัตราทดสูงจะมีความสามารถในการขับเคลื่อนกลับน้อยขณะที่ระบบส่งผ่านกำลังที่มีอัตราทดต่ำจะมีความสามารถในการขับเคลื่อนกลับสูงความสามารถในการขับเคลื่อนกลับมีผลต่ออุปกรณ์แอสติคดังนี้ ความสามารถในการขับเคลื่อนกลับสูงทำให้อุปกรณ์แอสติคมีความคล่องตัวสามารถถูกบังคับให้เคลื่อนที่โดยมือของผู้ควบคุมได้ง่าย แต่อุปกรณ์แอสติคอาจจะต้องใช้มอเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ ขณะที่อุปกรณ์แอสติคที่มีความสามารถในการขับเคลื่อนกลับน้อยจะทำให้ผู้ควบคุมต้องออกแรงบังคับอุปกรณ์แอสติคมาก
- 2.1.2 ปริมาตรหรือบริเวณการทำงาน (Volume of operation) บริเวณการทำงานควรมีขนาดที่เหมาะสมกับการใช้งานและพื้นที่ที่จะใช้งาน เช่นไม่มากจนเกินไปจนทำให้นำไปใช้งานในบริเวณที่มีพื้นที่จำกัดไม่ได้และทำให้ผู้ควบคุมเกิดความรู้สึกเมื่อยล้า Fischer et al. [1990] แต่ถ้ามีบริเวณการทำงานที่น้อยเกินไปก็จะทำให้ควบคุมความแม่นยำได้ไม่ดี เนื่องจากโครงสร้างที่ออกแบบเป็นโครงสร้างแบบขนานดังนั้นบริเวณการทำงานที่ได้จะมีน้อยเมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบอนุกรม ดังนั้นถ้าต้องการให้มีบริเวณพื้นที่ที่ใช้ทำงานที่มากต้องออกแบบให้โครงสร้างแบบขนานมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น
- 2.1.3 ความหวมของชุดเฟืองทด (Backlash) คือความหวมของชุดเฟืองทดที่ใช้ในระบบส่งผ่านกำลังซึ่งส่งกำลังจากมอเตอร์ไปยังก้านต่อโยงของแขนกล ความหวมของชุดเฟืองทดทำให้มีผลกระทบกล่าวคือทำให้เกิดแรงกระแทกที่มือของผู้ควบคุม Fischer [1990] และทำให้อุปกรณ์วัดมุมมีการวัดค่ามุมที่ผิดพลาดเนื่องจากความหวมของชุดเฟือง

2.1.4 ความเฉื่อยของอุปกรณ์แฮบติก (inertia) ในการใช้งานอุปกรณ์แฮบติก ก้านต่อโยง แต่ละก้านจะมีการเคลื่อนที่ไปตามการบังคับของผู้ควบคุม ดังนั้นก้านต่อโยงที่มีความเฉื่อยมากจะทำให้ผู้ควบคุมต้องออกแรงมากเพื่อที่จะบังคับให้อุปกรณ์แฮบติกเคลื่อนที่ ทำให้ผู้ควบคุมนั้นเกิดความรู้สึกเมื่อยล้า Yokokohji [1993], Douglas [1991] และ Fischer [1990] และในการสร้างแรงโต้ตอบที่มีต่อผู้ควบคุมอุปกรณ์แฮบติกที่มีความเฉื่อยมากจะทำให้แรงโต้ตอบที่เกิดขึ้นกับผู้ควบคุมไม่ถูกต้องตามความเป็นจริง ทั้งนี้เนื่องจากว่าแรงโต้ตอบที่อุปกรณ์สร้างขึ้นส่วนหนึ่งจะหายไปเนื่องจากผลของความเฉื่อยของอุปกรณ์แฮบติกสร้างขึ้นมา

2.1.5 ความแข็งแรง (Stiffness) ชิ้นส่วนต่างๆของอุปกรณ์แฮบติกเช่น ก้านต่อโยง อุปกรณ์ส่งผ่านกำลัง และข้อต่อควรมีความแข็งแรงเพียงพอ Douglas [1991] ในกรณีที่อุปกรณ์แฮบติกสร้างแรงตอบสนองให้แก่ผู้ควบคุมถ้าอุปกรณ์แฮบติกไม่มีความแข็งแรงเพียงพอจะทำให้แรงโต้ตอบที่มีต่อผู้ควบคุมมีค่าผิดพลาดไปจากความเป็นจริงและยังทำให้เกิดความผิดพลาดในการควบคุมตำแหน่งและทิศทางของอุปกรณ์แฮบติกได้อีกด้วย

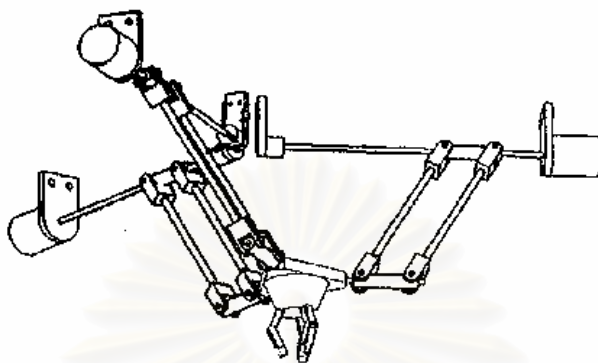
2.1.6 แรงเสียดทาน (Friction) แรงเสียดทานที่ระบบส่งผ่านกำลังและข้อต่อต่างๆของอุปกรณ์แฮบติกควรมีค่าน้อย เพื่อให้ผู้ควบคุมจะได้ไม่ต้องออกแรงบังคับให้อุปกรณ์แฮบติกเกิดการเคลื่อนที่มากจนเกินไป แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อแรงโต้ตอบที่อุปกรณ์แฮบติกสร้างขึ้นซึ่งมีผลต่อผู้ควบคุม เนื่องจากแรงบิดที่อุปกรณ์ขับเคลื่อนหรือมอเตอร์ที่สร้างขึ้นเพื่อนำไปสร้างแรงโต้ตอบให้แก่ผู้ควบคุม ส่วนหนึ่งจะต้องถูกนำไปชดเชยให้กับแรงเสียดทานที่มีอยู่ ดังนั้นทำให้แรงโต้ตอบที่มีต่อผู้ควบคุมจึงมีค่าผิดพลาดไปจากความเป็นจริง

2.2 งานวิจัยอุปกรณ์แฮบติกและโครงสร้างแบบขนานที่ผ่านมา

ในการออกแบบสร้างแขนกลเพื่อให้ได้ลักษณะเฉพาะที่จำเป็นตามที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจำเป็นต้องศึกษางานวิจัยที่ได้ทำมาก่อนหน้านี้เพื่อนำมาใช้พิจารณาในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์แฮบติก เท่าที่ได้ศึกษามาจะกล่าวเฉพาะงานวิจัยที่น่าสนใจซึ่งมีดังต่อไปนี้

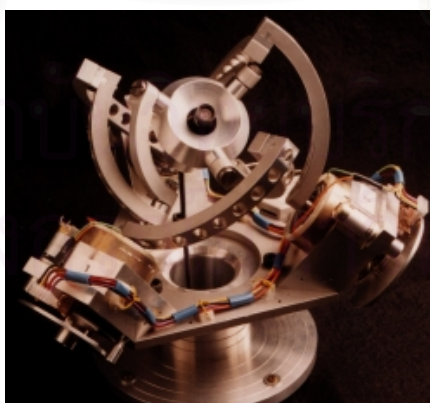
2.2.1 Y-Star Parallel Manipulator โดย Tremblay [1999] ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบขนานที่มี 3 องศาอิสระคือมีเฉพาะการเคลื่อนที่ในแนวแกน X-Y-Z (Translation) เท่านั้น โดยที่แต่ละขาวางห่างเท่าๆกันด้วยมุมที่มีขนาดเท่ากับ 120 องศา โดยมีอุปกรณ์ขับเคลื่อน (Actuator) 3 ตัวขับเคลื่อนระบบส่งผ่านกำลังที่เป็นแบบบอลสกรู (Ball Screw) เพื่อไปขับเคลื่อนทั้ง 3 อันซึ่งเป็นแบบ Four-Bar Linkage โดยที่แขนทั้ง 3 อันนี้ต่อเข้ากับระบบส่งผ่านกำลังที่เป็นแบบบอลสกรูด้วยข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซล (Universal Joint)

และปลายอีกด้านหนึ่งของแขนทั้ง 3 อันนี้ต่อเข้ากับแผ่นที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (Moving Plate) หรือปลายแขน (End-Effector) ด้วยข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซล (Universal Joint) ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 Y-Star Parallel Manipulator [Tremblay, 1999]

2.2.2 Agile eye โดย Gosselin [1994] มีโครงสร้างเป็นแบบ Spherical Parallel Manipulator ซึ่งมี 3 องศาอิสระคือมีเฉพาะการหมุนรอบแนวแกน X-Y-Z or Roll-Pitch-Yaw (Orientation) เท่านั้น รายละเอียดแสดงไว้ดังรูปที่ 2.2 จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าทุกก้านต่อโยง (Link) มีรูมากมายซึ่งสาเหตุที่ต้องรูมากก็เพื่อเป็นการลดน้ำหนักของก้านต่อโยงลงซึ่งจะมีผลโดยตรงทำให้ความเฉื่อยมีค่าลดลง ก้านต่อโยงจะต่อด้วยข้อต่อแบบหมุน (Revolute Joint) และแนวแกนหมุนของข้อต่อทุกข้อต่อตัดกันที่จุดๆเดียวกันซึ่งเรียกว่าจุดศูนย์กลางของการหมุน (Center of Rotation) จุดนี้เป็นจุดศูนย์กลางของการหมุนของอุปกรณ์นี้ด้วยและที่ฐานมีอุปกรณ์ขับ 3 ตัววางห่างเท่าๆกันด้วยมุมที่มีขนาดเท่ากับ 120 องศา



รูปที่ 2.2 Agile eye [Gosselin, 1994]

2.2.3 Kaist Master โดย Woo [1998] โครงสร้างแขนกลเป็นแบบขนานที่มี 6 องศาอิสระ โดยนำโครงสร้างแบบ Five-Bar Linkage 3 ชุดมาวางห่างเท่าๆกันด้วยมุมที่มีขนาดเท่ากับ 120 องศาโดย Five-Bar Linkage ทั้ง 3 ชุดนี้ต่อเข้ากับด้ามจับ (Handle)

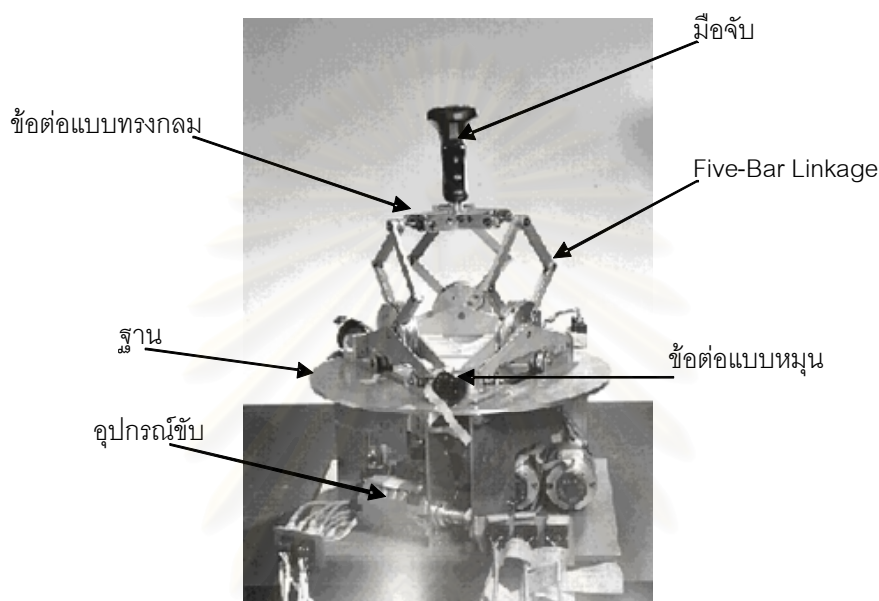
ด้วยข้อต่อที่เป็นแบบทรงกลม (Spherical Joint) และที่ฐานของ Five-Bar Linkage ทั้ง 3 ชุดนี้ต่อเข้ากับฐานของแขนกลด้วยข้อต่อที่เป็นแบบหมุนโดยทิศของแกนหมุนนั้นขนานกับ Five-Bar Linkage แต่ละอัน ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.3 จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่ามียูปรกรณ์ขับ 6 ตัวโดยแบ่งออกเป็น 3 ชุดโดยที่แต่ละชุดนั้นมียูปรกรณ์ขับ 2 ตัวติดตั้งอยู่ที่ฐานของ Five-Bar Linkage แต่ละอันทำให้แขนกลนำแบบนี้มีความเฉื่อยมากเนื่องจากยูปรกรณ์ขับแต่ละตัวต้องเคลื่อนที่ตาม Five-Bar Linkage ไปด้วยเมื่อแขนกลมีการเคลื่อนที่ และยูปรกรณ์ขับนี้ใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบฮาร์มอนิกทำให้ไม่มีแรงเฉื่อยเกิดขึ้นและระบบส่งผ่านกำลังแบบฮาร์มอนิกนี้มีอัตราทดรอบเท่ากับ 1 ต่อ 50 ทำให้ความสามารถในการขับเคลื่อนไม่ค่อนักเนื่องจากอัตราทดรอบที่มากเกินไป และมีการติดตั้งยูปรกรณ์รับรู้ตำแหน่ง (Position Sensor) เพิ่มจากเดิมที่มีอยู่แล้ว 6 ตัวขึ้นอีก 3 ตัวกลายเป็นทั้งหมด 9 ตัวเพื่อให้สามารถหาค่าตอบที่ตายตัวของสมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์



รูปที่ 2.3 Kaist Master [Woo, 1998]

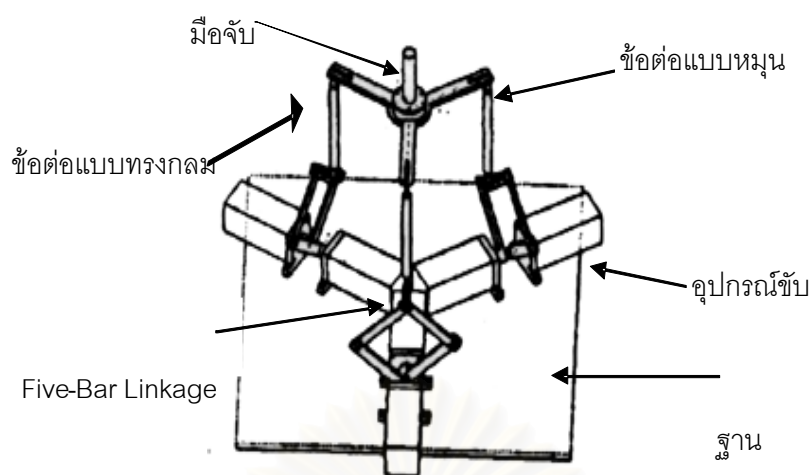
2.2.4 UCI Hand Controller หรือ 3 Pantograph linkages โดย Collins [1995] มีโครงสร้างเป็นแบบขนานที่มี 6 องศาอิสระ โดยนำโครงสร้างแบบ Five-Bar Linkage 3 ชุดมาวางห่างเท่าๆกันด้วยมุมที่มีขนาดเท่ากับ 120 องศาโดยที่ Five-Bar Linkage ทั้ง 3 ชุดนี้ต่อเข้ากับมือจับด้วยข้อต่อแบบทรงกลมและที่ฐานของ Five-Bar Linkage ทั้ง 3 ชุดนี้ต่อเข้ากับฐานของแขนกลโดยใช้ข้อต่อแบบหมุนโดยทิศของแกนหมุนขนานกับ Five-Bar Linkage แต่ละอันซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.4 จากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่ามียูปรกรณ์ขับ 6 ตัวโดยที่ Five-Bar Linkage แต่ละอันใช้ยูปรกรณ์ขับ 2 ตัว ยูปรกรณ์ขับแต่ละตัวใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบมู่เส่และเคเบิล (Tendon-Pulley) เป็น

หลักทำให้สามารถติดตั้งอุปกรณ์จับและอุปกรณ์วัดมุมไว้ที่ฐานของแขนกลได้ทั้งหมด ทำให้แขนกลนี้มีความเฉื่อยต่ำ แรงเสียดทานและแบลคเลซ (Backlash) ของอุปกรณ์ส่งผ่านกำลังมีค่าน้อย ส่วนการหาคำตอบที่ตายตัวของสมการพอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์แก้โดยการติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมเพิ่มขึ้นจากเดิมที่มีอยู่แล้ว 6 ตัวขึ้นอีก 3 ตัวกลายเป็นทั้งหมด 9 ตัวทำให้หาคำตอบที่ตายตัวของสมการพอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ได้



รูปที่ 2.4 UCI Hand Controller [Collins, 1995]

2.2.5 โครงสร้างแบบขนานที่มี 6 องศาอิสระ Yoon [2000] โดยนำโครงสร้างแบบ Five-Bar Linkage or Pantograph Linkage 3 ชุดมาวางห่างเท่าๆกันด้วยมุมที่มีขนาดเท่ากับ 120 องศาโดย Five-Bar Linkage ทั้ง 3 ต่อเข้ากับกันต่อโยงด้วยข้อต่อแบบทรงกลมและปลายกันต่อโยงทั้ง 3 ด้านต่อเข้ากับด้ามจับด้วยข้อต่อแบบหมุนโดยทิศของแกนหมุนขนานกับ Five-Bar Linkage แต่ละอัน ที่ฐานของ Five-Bar Linkage ทั้ง 3 อันนี้ต่อเข้ากับฐานของแขนกลโดยยึดอยู่กับที่ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.5 จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าอุปกรณ์จับ 6 ตัววางยึดอยู่บนฐานโดยที่อุปกรณ์จับ 2 ตัวจะใช้จับ Five-Bar Linkage 1 ชุด และอุปกรณ์จับนี้ใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบจับตรงเป็นหลัก ทำให้ความสามารถในการจับกลับค่อนข้างดีและมีแรงเสียดทานน้อยลง เนื่องจากว่าอุปกรณ์จับและอุปกรณ์วัดมุมวางยึดอยู่บนฐานของแขนกลทั้งหมดทำให้แขนกลนี้มีความเฉื่อยต่ำ ส่วนการหาคำตอบของสมการพอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์นั้นไม่สามารถหาคำตอบที่ตายตัวได้ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ในการหาคำตอบที่ตายตัวของสมการพอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์โดยใช้วิธีของ Newton-Raphson ในการหาคำตอบ



รูปที่ 2.5 Parallel Mechanism [Yoon, 2000]

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาได้ข้อสรุปว่าตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์จับของแขนกลส่วนใหญ่อยู่ที่ฐานของแขนกล โดยมีอุปกรณ์ส่งผ่านกำลังทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังจากอุปกรณ์จับซึ่งติดตั้งอยู่ที่ฐานไปสู่ข้อต่อของก้านโยงต่างๆของแขนกล โดยทำหน้าที่ขยายหรือลดแรงบิด เพิ่มหรือลด ความเร็วเชิงมุม และทำหน้าที่เปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบหมุนเป็นแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น ดังนั้นระบบส่งผ่านกำลังที่จะนำมาใช้เพื่อให้อุปกรณ์แอบติคมีน้ำหนักเบา ไม่มีความหลวมของชุดเฟืองและความเฉื่อยที่ต่ำลงนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ระบบส่งกำลังแบบสายพานและมู่เกิ้ล (Belt-and-Pulley system) เป็นระบบส่งผ่านกำลัง และจะติดตั้งอุปกรณ์จับไว้ที่ฐานของอุปกรณ์แอบติคเพื่อลดน้ำหนักและลดความเฉื่อยที่ปลายแขนของอุปกรณ์แอบติค รูปแบบโครงสร้างของแขนกลแอบติคส่วนใหญ่เป็นแบบโครงสร้างขนานเพื่อให้แขนกลแอบติคสามารถสร้างแรงโต้ตอบต่อผู้ควบคุมได้อย่างแม่นยำเนื่องจากแขนกลที่มีโครงสร้างแบบขนานจะมีความแข็งแรงกว่าแขนกลที่มีโครงสร้างแบบอนุกรม

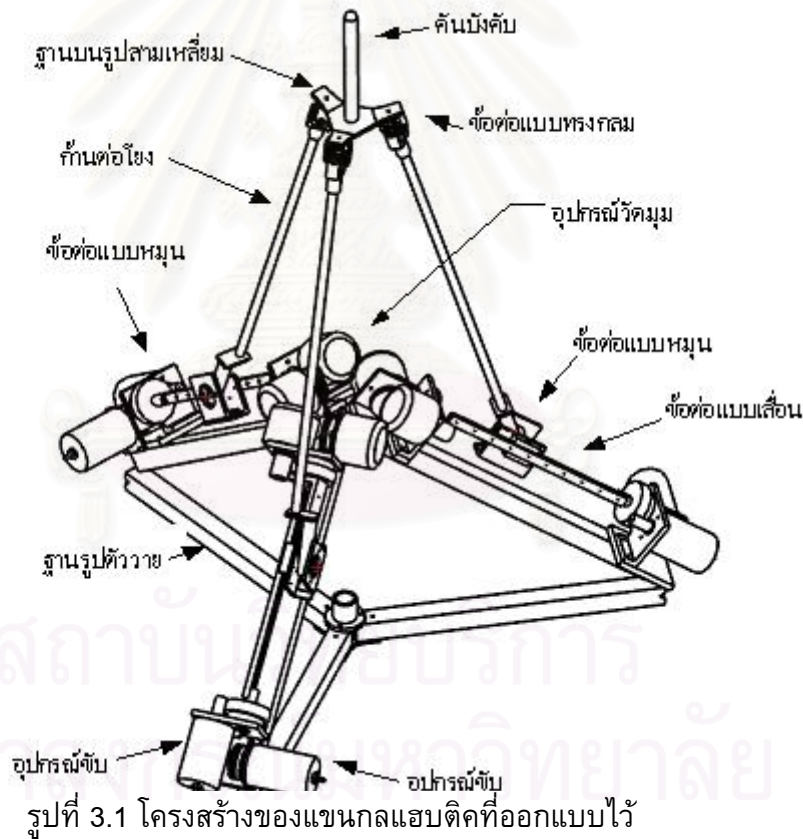
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การออกแบบแขนกลแฮบติด

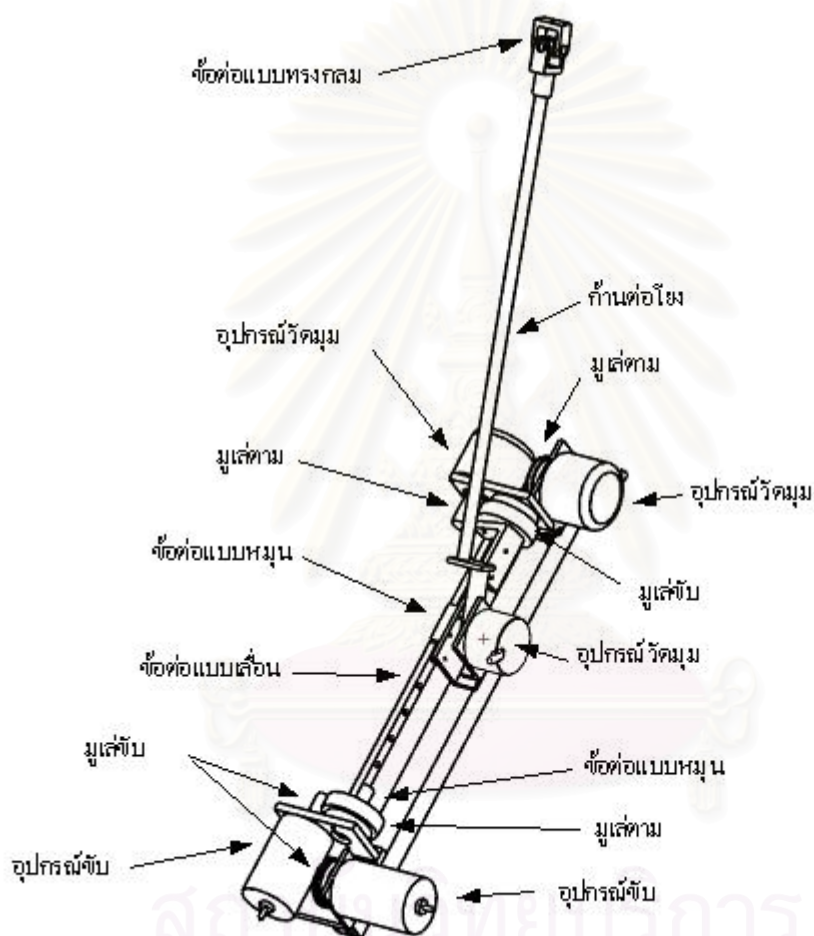
3.1 การออกแบบกลไกของแขนกลแฮบติด

จากลักษณะเฉพาะของแขนกลแฮบติดที่ได้ศึกษามาในบทที่ 2 สามารถนำมาออกแบบโครงสร้างของแขนกลแฮบติดที่มีโครงสร้างแบบขนานได้ดังรูปที่ 3.1 อุปกรณ์ขับเคลื่อนและอุปกรณ์ส่งผ่านกำลังถูกติดตั้งที่ฐานของแขนกลแฮบติด ระบบส่งผ่านกำลังที่ใช้เป็นระบบส่งผ่านกำลังแบบมู่เส่และเคเบิลทำให้สามารถติดตั้งอุปกรณ์ขับเคลื่อนที่ฐานได้ และไม่มี ความหลวมของระบบส่งผ่านกำลัง อัตราทดของระบบส่งผ่านกำลังมีค่าน้อยทำให้แขนกลแฮบติดมีความสามารถในการขับเคลื่อนกลับได้



จากรูปที่ 3.1 ที่ฐานล่างเป็นรูปตัววายซึ่งทำมุมกันมีขนาดเท่ากับ 120 องศา และมีรัศมีเท่ากับ 389 มิลลิเมตร โดยที่แต่ละด้านจะมีแขนกลด้านละหนึ่งแขนดังรูปที่ 3.2 แต่ละแขนจะมีอุปกรณ์ขับเคลื่อน 2 ตัวและติดตั้งอุปกรณ์ขับเคลื่อนไว้ 3 ตัว แขนกลทั้งสามจะถูกต่อเข้าด้วยกันที่แผ่นสามเหลี่ยมที่อยู่ด้านบนซึ่งสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้โดยมีรัศมีเท่ากับ 47 มิลลิเมตร แผ่นสามเหลี่ยมนี้มีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมด้านเท่า แขนกลทั้งสามนี้ต่อกับแผ่น

สามเหลี่ยมด้านบนด้วยข้อต่อแบบทรงกลม โดยที่แต่ละแขนมีความยาวเท่ากับ 380 มิลลิเมตร และประกอบไปด้วยข้อต่อแบบหมุน 2 ข้อต่อซึ่งแกนหมุนทั้งสองข้อต่อตัดกันแบบตั้งฉาก และข้อต่อแบบเลื่อน 1 ข้อต่อซึ่งแท่งสไลด์หรือแกนของข้อต่อแบบเลื่อนวางเอียงจากแนวระดับขึ้นไป 56.5 องศา โดยที่ข้อต่อแบบหมุน 1 ข้อต่อตั้งฉากกับแกนของข้อต่อแบบเลื่อนและข้อต่อแบบหมุนอีกอันจะขนานกับแกนของข้อต่อแบบเลื่อน การที่แกนของข้อต่อแบบเลื่อนวางเอียงจากแนวระดับขึ้นไป 30 องศาเพื่อให้ที่ปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคสามารถมีการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z ได้มากขึ้นและลดซิงกูลาริตีส์ (Singularity) ที่จะเกิดขึ้นด้วย

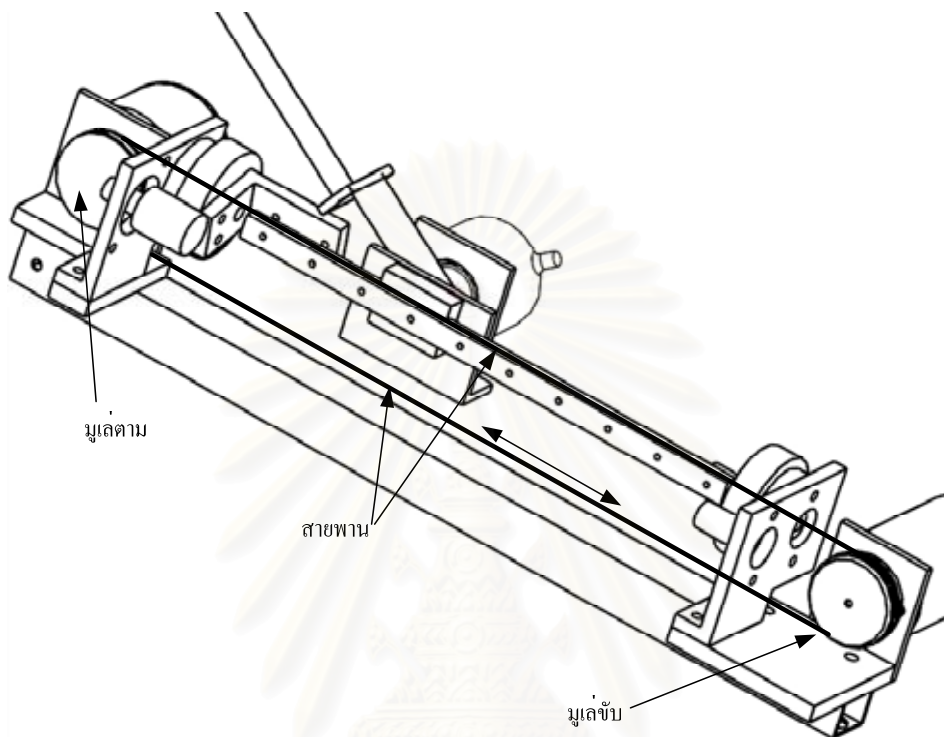


รูปที่ 3.2 โครงสร้างแขนแต่ละด้านของอุปกรณ์แฮบติค

3.3 รายละเอียดของอุปกรณ์แฮบติค

อุปกรณ์แฮบติคที่ออกแบบไว้สามารถแบ่งโครงสร้างออกเป็น 3 กลุ่มโดยแบ่งตามแขนที่มีลักษณะโครงสร้างเหมือนกันแต่ละแขนมีลักษณะดังรูปที่ 3.2 ซึ่งวางท่ามุมเท่ากันซึ่งมีขนาดเท่ากับ 120 องศาที่ฐานแผ่นล่าง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้โดยเรียงจากข้อต่อที่อยู่ล่างสุดขึ้นไปจนถึงข้อต่อบนสุด

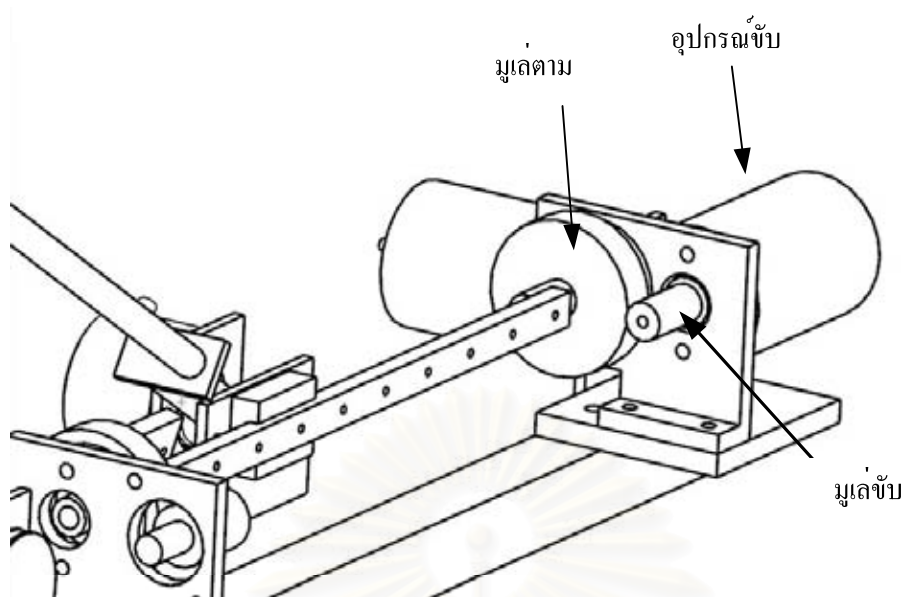
- ข้อต่อแบบเลื่อนที่แสดงในรูปที่ 3.3 ใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบมู่เล่และสายพานมู่เล่ขับเคลื่อนมีรัศมีเท่ากับ 10 มิลลิเมตรซึ่งติดตั้งบนเพลลาของมอเตอร์กระแสตรงและได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมไว้ที่เพลลาของมอเตอร์ซึ่งมีความละเอียดเท่ากับ 2500 พัลส์ต่อรอบ แต่ได้ทำการนับแบบคูณ 4 ทำให้ความละเอียดเพิ่มขึ้นเป็น 10000 พัลส์ต่อรอบ



รูปที่ 3.3 ข้อต่อแบบเลื่อนและระบบสายพานมู่เล่

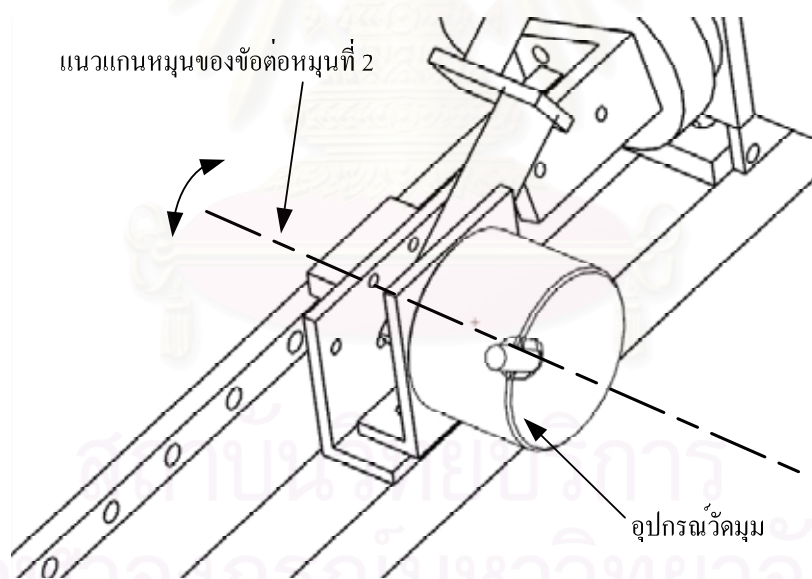
- ข้อต่อแบบหมุนตัวที่ 1 ดังรูปที่ 3.4 ใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบมู่เล่และสายพานโดยมู่เล่ขับเคลื่อนมีรัศมีเท่ากับ 10 มิลลิเมตรซึ่งติดตั้งบนเพลลาของมอเตอร์กระแสตรงและได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมไว้ซึ่งมีความละเอียดเท่ากับ 2500 พัลส์ต่อรอบ แต่ได้ทำการนับแบบคูณ 4 ทำให้ความละเอียดเพิ่มขึ้นเป็น 10000 พัลส์ต่อรอบ และมีมู่เล่ตามที่มีรัศมีเท่ากับ 50 มิลลิเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



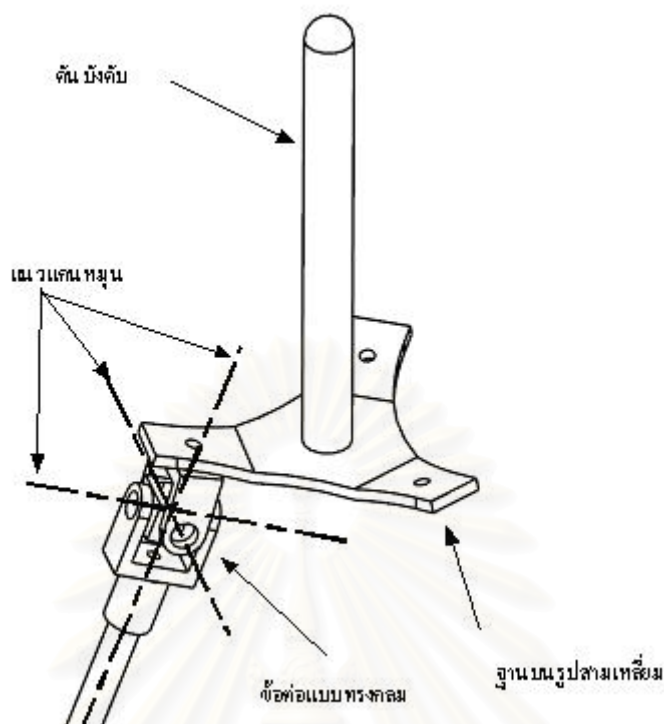
รูปที่ 3.4 รายละเอียดข้อต่อหมุนตัวที่ 1

- ข้อต่อแบบหมุนตัวที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ต่อตรงกับอุปกรณ์วัดมุมที่มีความละเอียดเท่ากับ 2500 พัลส์ต่อรอบ แต่ได้ทำการนับแบบคูณ 4 ทำให้ความละเอียดเพิ่มขึ้นเป็น 10000 พัลส์ต่อรอบ



รูปที่ 3.5 รายละเอียดของข้อต่อหมุนที่ 2

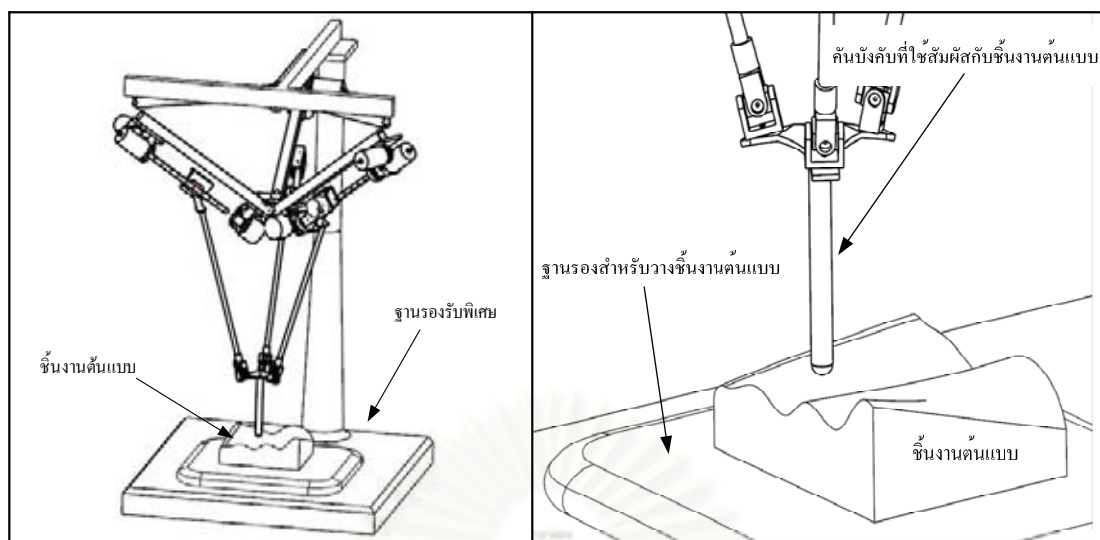
- ข้อต่อแบบทรงกลมดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งทำหน้าที่เชื่อมต่อกันระหว่างแขนกับฐานบนรูปสามเหลี่ยมซึ่งเคลื่อนที่ได้



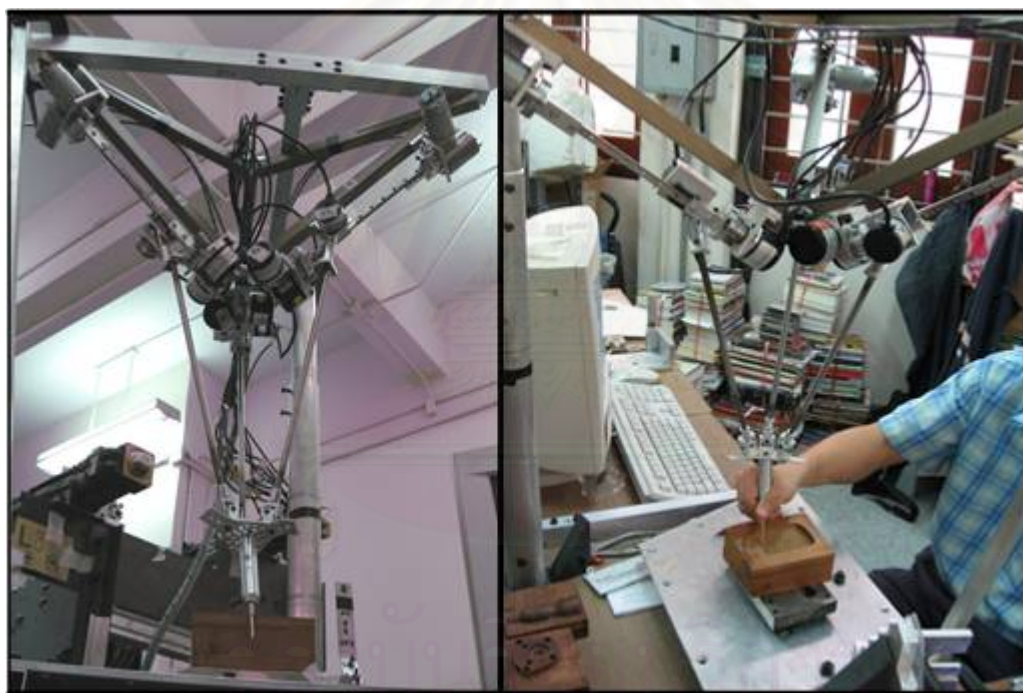
รูปที่ 3.6 รายละเอียดของข้อต่อทรงกลมที่ฐานบนรูปสามเหลี่ยมและคันบังคับ

- ข้อจำกัดในการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์แฮบติคมีดังนี้ สามารถเคลื่อนที่ได้สูงสุดทางด้านแกน X เท่ากับ 120 มิลลิเมตร แกน Y เท่ากับ 120 มิลลิเมตร และแกน Z เท่ากับ 300 มิลลิเมตร และต่ำสุดทางด้านแกน X เท่ากับ -120 มิลลิเมตร แกน Y เท่ากับ -120 มิลลิเมตร และแกน Z เท่ากับ 210 มิลลิเมตร

เมื่อนำแขนกลนี้มาประกอบกับฐานบนและฐานล่างจะได้แขนกลแฮบติคดังรูปที่ 3.1 แต่เนื่องจากในการใช้งานประเภทวัดพิคตของชิ้นงาน แขนกลแฮบติคจึงต้องถูกนำมาติดตั้งบนฐานรองรับพิเศษเพื่อให้แขนกลแฮบติคที่สร้างมีความเหมาะสมในการใช้งานการวัดพิคต โดยแขนกลแฮบติคจะถูกพลิกจากล่างขึ้นบนเป็นมุม 180 องศา ดังแสดงในรูป 3.7 รูปแสดงอุปกรณ์แฮบติคโดยละเอียดสามารถดูได้จากภาคผนวก ก



รูปที่ 3.7 โครงสร้างอุปกรณ์แฮบติคที่ออกแบบไว้



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์แฮบติคที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

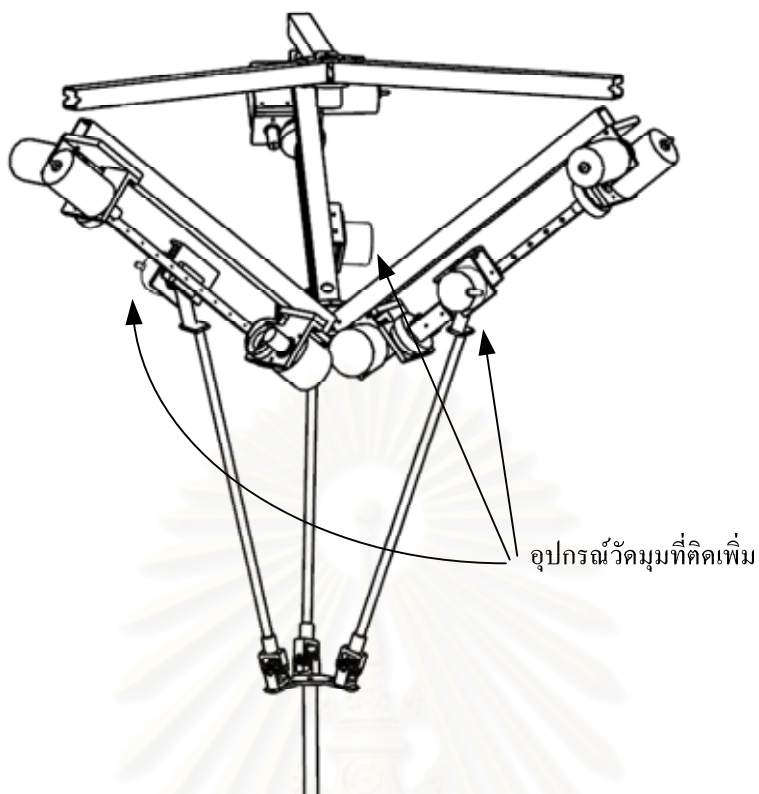
บทที่ 4

จลศาสตร์ของอุปกรณ์แฮบติค

ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแขนกลนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สมการพอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ และสมการอินเวิร์สคิเนแมติกส์ การคำนวณของสมการอินเวิร์สคิเนแมติกส์นั้นเป็นการหาตำแหน่งของอุปกรณ์วัดมุมทั้ง 9 ตัวเมื่อเราทราบตำแหน่งของปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคส่วนการคำนวณของสมการพอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์เป็นการหาตำแหน่งที่ปลายเมื่อเราทราบตำแหน่งของอุปกรณ์วัดมุมทั้ง 9 ตัว

4.1 สมการพอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์

จากรูปที่ 4.1 แกนสไลด์ที่ใช้ทำหน้าที่เป็นแนวแกนให้แก่ข้อต่อแบบเลื่อนซึ่งข้อต่อแบบเลื่อนจะเคลื่อนที่ไปตามแนวแกนนี้ซึ่งมีทั้งหมด 3 อันซึ่งวางอยู่บนฐานโดยวางห่างเท่าๆกันเป็นมุมขนาดเท่ากับ 120 องศาและวางเอียงจากแนวระดับขึ้นไป 30 องศาเพื่อให้มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z ได้มากขึ้น ส่วนข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซลจะสวมอยู่บนข้อต่อแบบเลื่อนโดยที่แนวแกนของข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซล และแนวแกนของข้อต่อแบบเลื่อนตัดกันที่จุดๆเดียวกัน ข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซลจะต่อกับก้านต่อโยง และปลายก้านต่อโยงอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับแผ่นบนที่ทำหน้าที่เคลื่อนที่และเป็นที่ยึดของด้ามจับด้วยข้อต่อแบบทรงกลม เนื่องจากการหาค่าตอบที่ตายตัวของสมการพอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบขนานปกติแล้วจะทำการหาได้ยากหรือไม่ก็มีหลายคำตอบหรือไม่ก็ต้องหาด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข เมื่อเทียบกับแขนกลที่มีโครงสร้างแบบอนุกรมซึ่งการหาด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขนี้ทำให้ไม่สามารถหาตำแหน่งที่ปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคแบบออนไลน์ได้ เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวให้อุปกรณ์แฮบติคสามารถหาค่าตอบแบบตายตัวของสมการพอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ Sangveraphunsiri, V. และ Ngojaruwong, T. [2004] ให้ได้จึงได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมเพิ่มขึ้นอีก 3 ตัวทำให้อุปกรณ์แฮบติคนี้มีอุปกรณ์วัดมุมทั้งหมดเป็น 9 ตัว และใช้อุปกรณ์ขับเคลื่อนหรือมอเตอร์กระแสตรงทั้งหมด 6 ตัวในการสร้างแรงบิดซึ่งอุปกรณ์ขับเคลื่อนทั้งหมดวางไว้อยู่ที่ฐานของอุปกรณ์แฮบติค



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของอุปกรณ์แฮบติด

ในการหาสมการพอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์จะขอหมุนอุปกรณ์แฮบติดกลับขึ้นมาในแนวตั้งก่อนเพื่อให้รูปถ่ายต่อการพิจารณาดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งกำหนดให้

$i = 1, 2, 3$ แทนลำดับของแขน

r_b แทนระยะจากจุดศูนย์กลางของฐานล่าง (จุดเริ่มต้นของ Coordinate Frame ที่ 0) ถึงจุดเริ่มต้นของ Coordinate Frame ที่ 1 ของแขนที่ i

d^i แทนระยะที่ขั้วต่อแบบเลื่อนเคลื่อนที่ของแขนที่ i

θ_1^i แทนความยาวของแขนที่ (แต่เนื่องจาก)

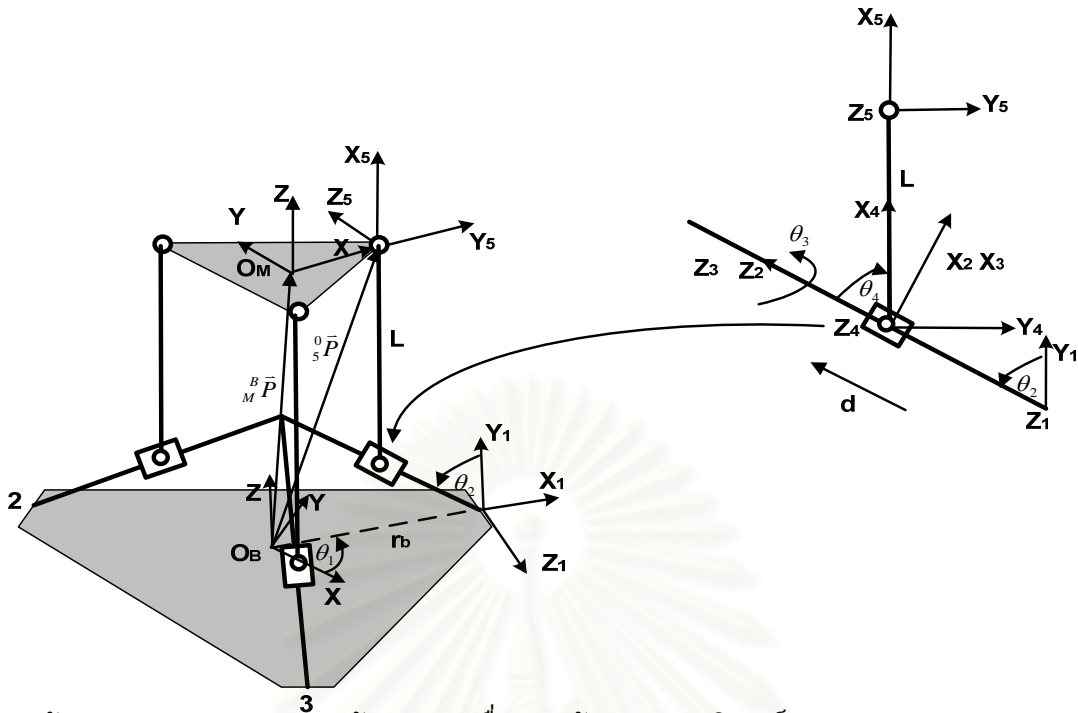
$$\theta_1^1 = 0^\circ \quad \theta_1^2 = 120^\circ \quad \theta_1^3 = 240^\circ$$

θ_2^i แทนมุมที่อยู่บน Coordinate Frame ที่ 1 ของแขนที่ i

$$\theta_2^1 = \theta_2^2 = \theta_2^3 = 60^\circ$$

$$c = \cos$$

$$s = \sin$$



- ข้อต่อทรงกลม □ ข้อต่อแบบเลื่อน + ข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซล

รูปที่ 4.2 Coordinate frame ที่กำหนดไว้บนโครงสร้าง

จากรูปที่ 4.2 จะแสดงให้เห็นว่าแต่ละ Coordinate frame ถูกวางอยู่อย่างไรโดยเริ่มด้วย เฟรมที่ 0 ซึ่งติดอยู่ที่จุดศูนย์กลางของฐานของอุปกรณ์แฮบติคเฟรมที่ 1 ซึ่งติดอยู่ที่ปลายของก้านโยง (ใช้ทำหน้าที่เป็นแนวแกนให้ข้อต่อแบบเลื่อนเคลื่อนที่ตามแนวแกนนี้) ด้านที่ติดกับฐาน เฟรมที่ 2 ซึ่งติดอยู่ที่ข้อต่อแบบเลื่อน ส่วนเฟรมที่ 3 และเฟรมที่ 4 จะติดอยู่ที่ข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซล เฟรมที่ 5 ซึ่งติดอยู่กับปลายของก้านโยง เพราะฉะนั้น Transformation matrix ของ Coordinate Frame ที่ j เทียบกับ Coordinate Frame ที่ $j+1$ ของแขนที่ i เป็นดังนี้ (เมื่อ $j = 0,1,2,3,4$ และให้ $0 = B$)

$${}^B T^i = \begin{bmatrix} c\theta_1^i & 0 & s\theta_1^i & r_b c\theta_1^i \\ s\theta_1^i & 0 & -c\theta_1^i & r_b s\theta_1^i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1 T^i = \begin{bmatrix} c\theta_2^i & 0 & -s\theta_2^i & -d^i s\theta_2^i \\ s\theta_2^i & 0 & c\theta_2^i & d^i c\theta_2^i \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2_3T^i = \begin{bmatrix} c\theta_3^i & -s\theta_3^i & 0 & 0 \\ s\theta_3^i & c\theta_3^i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3_4T^i = \begin{bmatrix} s\theta_4^i & c\theta_4^i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ c\theta_4^i & -s\theta_4^i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4_5T^i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

เพราะฉะนั้น Transformation matrix ของ Coordinate Frame ที่ 5 เมื่อเทียบกับ Coordinate Frame ที่ i ของแขนที่ i มีค่าเป็นดังนี้ ${}^B_5T^i = {}^B_1T^i {}^1_2T^i {}^2_3T^i {}^3_4T^i {}^4_5T^i$

$${}^B_5T^i = \begin{bmatrix} {}^B_5T^i_{1,1} & {}^B_5T^i_{1,2} & {}^B_5T^i_{1,3} & {}^B_5T^i_{1,4} \\ {}^B_5T^i_{2,1} & {}^B_5T^i_{2,2} & {}^B_5T^i_{2,3} & {}^B_5T^i_{2,4} \\ {}^B_5T^i_{3,1} & {}^B_5T^i_{3,2} & {}^B_5T^i_{3,3} & {}^B_5T^i_{3,4} \\ {}^B_5T^i_{4,1} & {}^B_5T^i_{4,2} & {}^B_5T^i_{4,3} & {}^B_5T^i_{4,4} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

เมื่อ

$${}^B_5T^i_{1,1} = (c\theta_1^i c\theta_2^i c\theta_3^i - s\theta_1^i s\theta_3^i) s\theta_4^i - c\theta_1^i s\theta_2^i c\theta_4^i$$

$${}^B_5T^i_{2,1} = (s\theta_1^i c\theta_2^i c\theta_3^i + c\theta_1^i s\theta_3^i) s\theta_4^i - s\theta_1^i s\theta_2^i c\theta_4^i$$

$${}^B_5T^i_{3,1} = s\theta_2^i c\theta_3^i s\theta_4^i + c\theta_2^i c\theta_4^i$$

$${}^B_5T^i_{4,1} = 0$$

$${}^B_5T^i_{1,2} = (c\theta_1^i c\theta_2^i c\theta_3^i - s\theta_1^i s\theta_3^i) c\theta_4^i + c\theta_1^i s\theta_2^i s\theta_4^i$$

$${}^B_5T^i_{2,2} = (s\theta_1^i c\theta_2^i c\theta_3^i + c\theta_1^i s\theta_3^i) c\theta_4^i + s\theta_1^i s\theta_2^i s\theta_4^i$$

$${}^B_5T^i_{3,2} = s\theta_2^i c\theta_3^i c\theta_4^i - c\theta_2^i s\theta_4^i$$

$${}^B_5T^i_{4,2} = 0$$

$${}^B T_{1,3}^i = -c\theta_1^i c\theta_2^i s\theta_3^i - s\theta_1^i c\theta_3^i$$

$${}^B T_{2,3}^i = -s\theta_1^i c\theta_2^i s\theta_3^i + c\theta_1^i c\theta_3^i$$

$${}^B T_{3,3}^i = -s\theta_2^i s\theta_3^i$$

$${}^B T_{4,3}^i = 0$$

$${}^B T_{1,4}^i = \left((c\theta_1^i c\theta_2^i c\theta_3^i - s\theta_1^i s\theta_3^i) s\theta_4^i - c\theta_1^i s\theta_2^i c\theta_4^i \right) L - d^i (c\theta_1^i s\theta_2^i) + r_b c\theta_1^i$$

$${}^B T_{2,4}^i = \left((s\theta_1^i c\theta_2^i c\theta_3^i + c\theta_1^i s\theta_3^i) s\theta_4^i - s\theta_1^i s\theta_2^i c\theta_4^i \right) L - d^i (s\theta_1^i s\theta_2^i) + r_b s\theta_1^i$$

$${}^B T_{3,4}^i = (s\theta_2^i c\theta_3^i s\theta_4^i + c\theta_2^i c\theta_4^i) L + d^i (c\theta_2^i)$$

$${}^B T_{4,4}^i = 1$$

เพราะฉะนั้นเวกเตอร์ตำแหน่ง (Position Vector) ของ Coordinate Frame ที่ 5 เมื่อเทียบกับ Coordinate Frame ที่ 0 ของแขนที่ i มีค่าเป็นดังนี้

$$\begin{bmatrix} {}^B \bar{P}^i \\ 1 \end{bmatrix} = {}^B T^i \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

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

เพราะฉะนั้น Transformation matrix ของฐานบน (จุดเริ่มต้นของ Coordinate Frame ที่) เมื่อเทียบกับฐานล่าง (จุดเริ่มต้นของ Coordinate Frame ที่) คือ

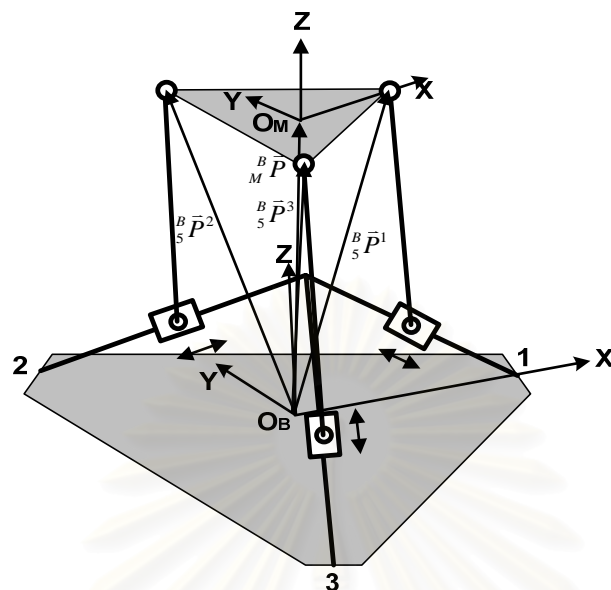
$${}^B T_M = \begin{bmatrix} \bar{n} & \bar{o} & \bar{a} & {}^B \bar{P} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

เมื่อเวกเตอร์ตำแหน่งของฐานบนเมื่อเทียบกับฐานล่างคือ

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

Orientation ของฐานบนเมื่อเทียบกับฐานล่างคือ

$$\bar{n} = \frac{{}^B\bar{P}^1 - {}^M\bar{P}}{|{}^B\bar{P}^1 - {}^M\bar{P}|}, \quad \bar{o} = \frac{{}^B\bar{P}^2 - {}^B\bar{P}^3}{|{}^B\bar{P}^2 - {}^B\bar{P}^3|}, \quad \bar{a} = \bar{n} \times \bar{o}$$



○ ข้อต่อทรงกลม □ ข้อต่อแบบเลื่อน + ข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซล

รูปที่ 4.3 ตำแหน่งของเวกเตอร์ของแต่ละแขน

4.2 สมการอินเวิร์สคิเนแมติกส์

เนื่องจากการหาคำตอบที่ตายตัวของสมการอินเวิร์สคิเนแมติกส์ Sangveraphunsiri, V. และ Ngaojaruwong, T. [2004] ของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบขนานซึ่งโดยปกติแล้วจะทำการหาได้ไม่ยากเมื่อเปรียบเทียบกับสมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบขนานซึ่งแสดงวิธีหาไว้ข้างล่างนี้ จากรูปที่ 4.4 กำหนดให้

$\bar{P} = [X \ Y \ Z]^T$ แทนเวกเตอร์จาก O_B (แทนจุดศูนย์กลางของฐานหรือจุดเริ่มต้นของ Coordinate Frame ที่ B) ถึง O_M (แทนจุดศูนย์กลางของฐานบนหรือจุดเริ่มต้นของ Coordinate Frame ที่ M)

$\bar{r}_m^i = [r_m c\theta_1^i \ r_m s\theta_1^i \ 0]^T$ แทนเวกเตอร์จากจุดศูนย์กลางของฐานบน (O_M) ถึงจุดศูนย์กลางของข้อต่อแบบทรงกลม (จุดเริ่มต้นของ Coordinate Frame ที่ 5) ของแขนที่ i

$\bar{r}_b^i = [r_b c\theta_1^i \ r_b s\theta_1^i \ 0]^T$ แทนเวกเตอร์จากจุดศูนย์กลางของฐานล่าง (O_B) ถึงจุดเริ่มต้นของ Coordinate Frame ที่ 1 ของแขนที่ i

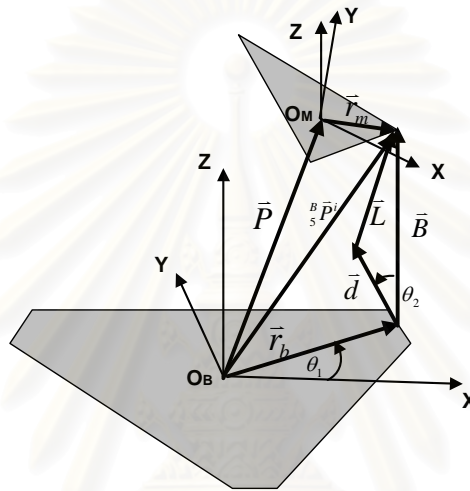
$$\bar{d}^i = [d_x^i \ d_y^i \ d_z^i]^T = d^i \bar{d}_u^i \text{ แทนเวกเตอร์ของข้อต่อแบบเลื่อนของแขนที่}$$

$$d^i = \begin{bmatrix} d^i & 0 & 0 \\ 0 & d^i & 0 \\ 0 & 0 & d^i \end{bmatrix} \text{ แทนระยะที่ข้อต่อแบบเลื่อนเคลื่อนที่ของแขนที่ } i$$

$$\bar{d}_u^i = [-c\theta_1^i s\theta_2^i \quad -s\theta_1^i s\theta_2^i \quad c\theta_2^i]^T \text{ แทนเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (Unit vector)}$$

ของ \bar{d}^i

$$\bar{L}^i = [L_x^i \quad L_y^i \quad L_z^i]^T \text{ แทนเวกเตอร์ของแขนที่ } i$$



รูปที่ 4.4 เวกเตอร์ที่กำหนดไว้บนโครงสร้าง

หา $\theta_3^i, \theta_4^i, d^i$ จากความสัมพันธ์ข้างล่างนี้

$$\bar{B}^i = \bar{P} + {}^B_M R \bar{r}_m^i - \bar{r}_b^i$$

จาก

$${}^B_5 \bar{P}^i = \bar{P} + {}^B_M R \bar{r}_m^i = {}^B_M T \bar{r}_m^i$$

ดังนั้น

$$\bar{B}^i = {}^B_M T \bar{r}_m^i - \bar{r}_b^i$$

เมื่อ

$${}^B_M R = [\bar{n} \quad \bar{o} \quad \bar{a}] = R_{RPY} \text{ แทน Orientation แบบ Roll-Pitch-Yaw}$$

$$R_{RPY} = \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix}$$

เมื่อ α แทน Roll angle, β แทน Pitch angle, γ แทน Yaw angle เพราะฉะนั้น \bar{B}^i เท่ากับ

$$\begin{bmatrix} \bar{B}_x^i \\ \bar{B}_y^i \\ \bar{B}_z^i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_x^i \\ B_y^i \\ B_z^i \\ 1 \end{bmatrix} = {}^B_m T \begin{bmatrix} r_m c \theta_1^i \\ r_m s \theta_1^i \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_b c \theta_1^i \\ r_b s \theta_1^i \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

เมื่อ ${}^B_m T$ เท่ากับสมการที่ (4.1) จะได้ B_x^i, B_y^i, B_z^i ดังนี้

$$B_x^i = ((c \theta_1^i c \theta_2^i c \theta_3^i - s \theta_1^i s \theta_3^i) s \theta_4^i - c \theta_1^i s \theta_2^i c \theta_4^i) L - d^i (c \theta_1^i s \theta_2^i) \quad (4.2)$$

$$B_y^i = ((s \theta_1^i c \theta_2^i c \theta_3^i + c \theta_1^i s \theta_3^i) s \theta_4^i - s \theta_1^i s \theta_2^i c \theta_4^i) L - d^i (s \theta_1^i s \theta_2^i) \quad (4.3)$$

$$B_z^i = (s \theta_2^i c \theta_3^i s \theta_4^i + c \theta_2^i c \theta_4^i) L + d^i (c \theta_2^i) \quad (4.4)$$

หา θ_3^i จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.2) ถึงสมการที่ (4.4) ได้ดังนี้

นำ $c \theta_2^i$ คูณสมการที่ (4.3) ทั้งสองข้างและนำ $s \theta_1^i s \theta_2^i$ คูณสมการที่ (4.4) ทั้งสองข้างได้ดังนี้

$$s \theta_1^i s \theta_2^i B_z^i = (s \theta_1^i (s \theta_2^i)^2 c \theta_3^i s \theta_4^i + s \theta_1^i s \theta_2^i c \theta_2^i c \theta_4^i) L + d^i (s \theta_1^i s \theta_2^i c \theta_2^i)$$

นำสองสมการข้างบนนี้มาบวกกันได้

$$s \theta_1^i s \theta_2^i B_z^i + c \theta_2^i B_y^i = (s \theta_1^i c \theta_3^i + c \theta_1^i c \theta_2^i s \theta_3^i) s \theta_4^i L$$

เพราะฉะนั้น $s \theta_4^i L$ เท่ากับ

$$s \theta_4^i L = \frac{s \theta_1^i s \theta_2^i B_z^i + c \theta_2^i B_y^i}{s \theta_1^i c \theta_3^i + c \theta_1^i c \theta_2^i s \theta_3^i}$$

นำ คูณสมการที่ (4.2) ทั้งสองข้างและนำไปคูณสมการที่ (4.4) ทั้งสองข้างได้ดังนี้

$$c \theta_1^i s \theta_2^i B_z^i = (c \theta_1^i (s \theta_2^i)^2 c \theta_3^i s \theta_4^i + c \theta_1^i s \theta_2^i c \theta_2^i c \theta_4^i) L + d^i (c \theta_1^i s \theta_2^i c \theta_2^i)$$

นำสองสมการข้างบนนี้มาบวกกันได้

$$c \theta_1^i s \theta_2^i B_z^i + c \theta_2^i B_x^i = (c \theta_1^i c \theta_3^i - s \theta_1^i c \theta_2^i s \theta_3^i) s \theta_4^i L$$

$$s\theta_4^i L = \frac{c\theta_1^i s\theta_2^i B_z^i + c\theta_2^i B_x^i}{c\theta_1^i c\theta_3^i - s\theta_1^i c\theta_2^i s\theta_3^i}$$

นำสมการที่ (4.5) มาเท่ากับสมการที่ (4.6) เพื่อหา θ_3^i ได้ดังนี้

$$\theta_3^i = \arctan\left(\frac{c\theta_1^i c\theta_2^i B_y^i - s\theta_1^i c\theta_2^i B_x^i}{c\theta_2^i s\theta_2^i B_z^i + (c\theta_2^i)^2 (c\theta_1^i B_x^i + s\theta_1^i B_y^i)}\right)$$

หา θ_4^i จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.2) ถึงสมการที่ (4.4) ได้ดังนี้

นำ $c\theta_1^i$ คูณสมการที่ (4.2) ทั้งสองข้างและนำ $s\theta_1^i$ คูณสมการที่ (4.3) ทั้งสองข้างได้ดังนี้

$$c\theta_1^i B_x^i = \left((c\theta_1^i)^2 c\theta_2^i c\theta_3^i - s\theta_1^i c\theta_1^i s\theta_3^i \right) s\theta_4^i - (c\theta_1^i)^2 s\theta_2^i c\theta_4^i L - d^i \left((c\theta_1^i)^2 s\theta_2^i \right)$$

$$s\theta_1^i B_y^i = \left((s\theta_1^i)^2 c\theta_2^i c\theta_3^i + s\theta_1^i c\theta_1^i s\theta_3^i \right) s\theta_4^i - (s\theta_1^i)^2 s\theta_2^i c\theta_4^i L - d^i \left((s\theta_1^i)^2 s\theta_2^i \right)$$

นำสองสมการข้างบนมาบวกกัน

$$c\theta_1^i B_x^i + s\theta_1^i B_y^i = (c\theta_2^i c\theta_3^i s\theta_4^i - s\theta_2^i c\theta_4^i) L - d^i (s\theta_2^i)$$

เอาไปคูณทั้งสองข้างของสมการข้างบน

$$c\theta_2^i (c\theta_1^i B_x^i + s\theta_1^i B_y^i) = \left((c\theta_2^i)^2 c\theta_3^i s\theta_4^i - s\theta_2^i c\theta_2^i c\theta_4^i \right) L - d^i (s\theta_2^i c\theta_2^i) \quad (4.7)$$

นำไปคูณสมการที่ (4.4) ทั้งสองข้างได้ดังนี้

$$s\theta_2^i B_z^i = \left((s\theta_2^i)^2 c\theta_3^i s\theta_4^i + s\theta_2^i c\theta_2^i c\theta_4^i \right) L + d^i (s\theta_2^i c\theta_2^i) \quad (4.8)$$

นำสมการที่ (4.7) มาบวกกับสมการที่ (4.8) ได้ดังนี้

$$s\theta_2^i B_z^i + c\theta_2^i (c\theta_1^i B_x^i + s\theta_1^i B_y^i) = c\theta_3^i s\theta_4^i L \quad (4.9)$$

เพราะฉะนั้นจากสมการที่ (4.9) หาได้เท่ากับ

$$\theta_4^i = \arcsin\left(\frac{s\theta_2^i B_z^i + c\theta_2^i (c\theta_1^i B_x^i + s\theta_1^i B_y^i)}{c\theta_3^i L}\right)$$

หา d^i จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.4)

$$B_z^i = (s\theta_2^i c\theta_3^i s\theta_4^i + c\theta_2^i c\theta_4^i) L + d^i (c\theta_2^i)$$

เพราะฉะนั้น d^i เท่ากับ

$$d^i = \frac{B_z^i - (s\theta_2^i c\theta_3^i s\theta_4^i + c\theta_2^i c\theta_4^i)L}{c\theta_2^i}$$

4.3 จาโคเบียน (Jacobian)

เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของแผ่นบน (Moving platform twist) กับความเร็วของแต่ละข้อต่อที่มีอุปกรณ์ขับเคลื่อน (Active joint) ซึ่งเขียนในรูปทั่วไปได้ดังนี้

$$Bt = A\dot{q}$$

เมื่อ

A, B แทนจาโคเบียนเมตริกซ์ของโครงสร้างแบบ Closed-Loop Chain หรือแบบขนาน

$$t = \begin{bmatrix} \omega \\ v \end{bmatrix} = [\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z \quad v_x \quad v_y \quad v_z]^T \quad \text{แทนความเร็วของแผ่นบนซึ่ง}$$

ประกอบด้วยความเร็วเชิงมุมและความเร็วเชิงเส้นของแผ่นบน

$$\dot{q} = [\dot{d}_1 \quad \dot{\theta}_{31} \quad \dot{d}_2 \quad \dot{\theta}_{32} \quad \dot{d}_3 \quad \dot{\theta}_{33}]^T \quad \text{แทนความเร็วของแต่ละข้อต่อที่มี}$$

อุปกรณ์ขับเคลื่อน

จากรูปที่ 4.5 ความเร็วที่จุด \vec{P}_j เป็นดังนี้

$$\vec{P}_j = \dot{d}_1 \vec{S}_{j1} + \dot{\theta}_3 \vec{S}_{j2} + \dot{\theta}_4 \vec{S}_{j3} \quad (4.10)$$

หรือ

$$\vec{P}_j = \vec{v} - \vec{\omega} \times \vec{r}_{mj} \quad (4.11)$$

เมื่อ

$$\vec{S}_{j1} = \vec{e}_j$$

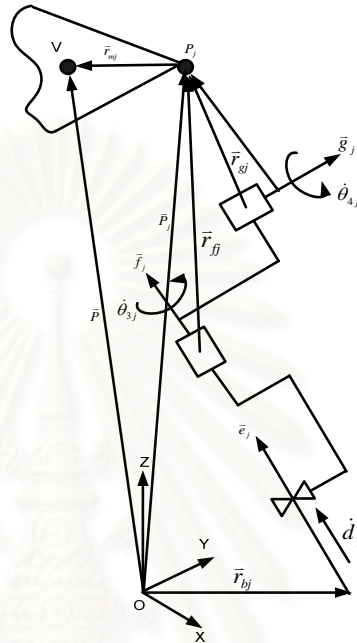
$$\vec{S}_{j2} = \vec{f}_j \times \vec{r}_{fj}$$

$$\vec{S}_{j2} = \vec{g}_j \times \vec{r}_{gj}$$

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

$$\bar{r}_{jj} = L \begin{bmatrix} (c_1 c_2 c_3 - s_1 s_3) s_4 - c_1 s_2 c_4 \\ (s_1 c_2 c_3 + c_1 s_3) s_4 - s_1 s_2 c_4 \\ s_2 c_3 s_4 + c_2 c_4 \end{bmatrix}$$

$$j = 1, 2, 3$$



รูปที่ 4.5 เวกเตอร์ที่ตำแหน่งต่างๆของขาที่ j

นำ $(\bar{S}_{j2} \times \bar{S}_{j3})$ ดอทแบบเวกเตอร์ทั้งสองข้างของสมการที่ (4.10) ได้ดังนี้

$$(\bar{S}_{j2} \times \bar{S}_{j3})^T \cdot \bar{P}_j = d (\bar{S}_{j2} \times \bar{S}_{j3})^T \cdot \bar{S}_{j1} \quad (4.12)$$

นำ $|\bar{S}_{j2} \times \bar{S}_{j3}|$ ทหารทั้งสองข้างของสมการที่ (4.12) ได้ดังนี้

$$\frac{(\bar{S}_{j2} \times \bar{S}_{j3})^T}{|\bar{S}_{j2} \times \bar{S}_{j3}|} \cdot \bar{P}_j = d \frac{(\bar{S}_{j2} \times \bar{S}_{j3})^T \cdot \bar{S}_{j1}}{|\bar{S}_{j2} \times \bar{S}_{j3}|} \quad (4.13)$$

กำหนดให้

$$J_j = [\bar{S}_{j1} \quad \bar{S}_{j2} \quad \bar{S}_{j3}] \text{ ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด } 3 \times 3$$

$$\Delta_j = \det(J_j) = (\bar{S}_{j1} \times \bar{S}_{j2})^T \cdot \bar{S}_{j3} \text{ แทนค่าต่างๆลงไปได้ผลลัพธ์ดังนี้}$$

$$\Delta_j = -s_{j4} c_{j4} L^2$$

$$a_{j1} = -c_{j4}$$

$$\bar{I}_j = \frac{\bar{S}_{j2} \times \bar{S}_{j3}}{|\bar{S}_{j2} \times \bar{S}_{j3}|} \quad \text{เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ขนานกับเวกเตอร์ } (\bar{S}_{j2} \times \bar{S}_{j3})$$

แทนค่าต่าง ๆ ลงไปได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\bar{I}_j = \begin{bmatrix} (s_1 s_3 - c_1 c_2 c_3) s_4 + c_1 s_2 c_4 \\ -(c_1 s_3 + s_1 c_2 c_3) s_4 + s_1 s_2 c_4 \\ -(s_2 c_3 s_4 + c_2 c_4) \end{bmatrix}_j$$

นำสมการที่ (4.11) และตัวแปรข้างบนนี้แทนในสมการที่ (4.13) ได้ดังนี้

$$a_{j1} \cdot \dot{d} = \bar{I}_j \cdot (\bar{v} - \bar{\omega} \times \bar{r}_{mj}) \quad (4.14)$$

กำหนดให้

$$b_{j1} = [(\bar{I}_j \times \bar{r}_{mj})^T \quad \bar{I}_j^T] \quad \text{ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด } 1 \times 6$$

เพราะฉะนั้นสมการที่ (4.14) ได้ดังนี้

$$a_{j1} \cdot \dot{d} = b_{j1} t \quad (4.15)$$

นำ $(\bar{S}_{j3} \times \bar{S}_{j1})$ ดอทแบบเวกเตอร์ทั้งสองข้างของสมการที่ (4.10) ได้ดังนี้

$$(\bar{S}_{j3} \times \bar{S}_{j1})^T \cdot \bar{P}_j = \dot{\theta}_{3j} (\bar{S}_{j3} \times \bar{S}_{j1})^T \cdot \bar{S}_{j2} \quad (4.16)$$

นำ $|\bar{S}_{j3} \times \bar{S}_{j1}|$ หารทั้งสองข้างของสมการที่ (4.16) ได้ดังนี้

$$\frac{(\bar{S}_{j3} \times \bar{S}_{j1})^T \cdot \bar{P}_j}{|\bar{S}_{j3} \times \bar{S}_{j1}|} = \dot{\theta}_{3j} \frac{(\bar{S}_{j3} \times \bar{S}_{j1})^T \cdot \bar{S}_{j2}}{|\bar{S}_{j3} \times \bar{S}_{j1}|} \quad (4.17)$$

กำหนดให้

$$a_{j2} = \frac{\Delta_j}{|\bar{S}_{j3} \times \bar{S}_{j1}|} \quad \text{ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด } 1 \times 1 \quad \text{แทนค่าต่าง ๆ ลงไปได้ผล ลัพธ์}$$

ดังนี้

$$\bar{M}_j = \frac{\bar{S}_{j3} \times \bar{S}_{j1}}{|\bar{S}_{j3} \times \bar{S}_{j1}|} \text{ ซึ่งเป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ขนานกับเวกเตอร์ } (\bar{S}_{j3} \times \bar{S}_{j1}) \text{ แทน}$$

ค่าต่างๆลงไปได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\bar{M}_j = \begin{bmatrix} c_1 c_2 s_3 + s_1 c_3 \\ s_1 c_2 s_3 - c_1 c_3 \\ s_2 s_3 \end{bmatrix}$$

นำสมการที่ (4.11) และตัวแปรข้างบนนี้แทนในสมการที่ (4.17) ได้ดังนี้

$$a_{j2} \cdot \dot{\theta}_{3j} = \bar{M}_j \cdot (\bar{v} - \bar{\omega} \times \bar{r}_{mj}) \quad (4.18)$$

กำหนดให้

$$b_{j2} = [(\bar{M}_j \times \bar{r}_{mj})^T \quad \bar{M}_j^T] \text{ ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด } 1 \times 6$$

เพราะฉะนั้นสมการที่ (4.18) ได้ดังนี้

$$a_{j2} \cdot \dot{\theta}_{3j} = b_{j2} t$$

เพราะฉะนั้นเมตริกซ์ A เท่ากับ

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

เนื่องจากเมตริกซ์ A เป็น diagonal ดังนั้น A^{-1} เท่ากับ

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} 1/a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/a_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/a_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/a_{32} \end{bmatrix}$$

และเมตริกซ์ B เท่ากับ

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

รูปแบบสมการที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำที่ตำแหน่งปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคกับแรงบิดที่ข้อต่อแต่ละข้อต่อนั้น สำหรับโครงสร้างแบบขนานนี้มีสมการของแรงที่ตรงกันข้ามกับแขนกลที่มีโครงสร้างแบบอนุกรมซึ่งมีสมการเป็นดังนี้

$$F = J^T \tau$$

เมื่อ

$F = [M_x \ M_y \ M_z \ F_x \ F_y \ F_z]^T$ แทนแรงที่กระทำ ที่ปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคซึ่งอยู่บนแผ่นบน

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

$J = A^{-1}B$ แทนจาโคเบียนเมตริกซ์

4.4 ซิงกูลาริตีส์ (Singularity)

ซิงกูลาริตีส์ สำหรับโครงสร้างแบบขนานนี้จะมีตำแหน่งที่จะเกิดขึ้นมากกว่าโครงสร้างแบบอนุกรมซึ่งเกิดขึ้นได้ 3 แบบคือ

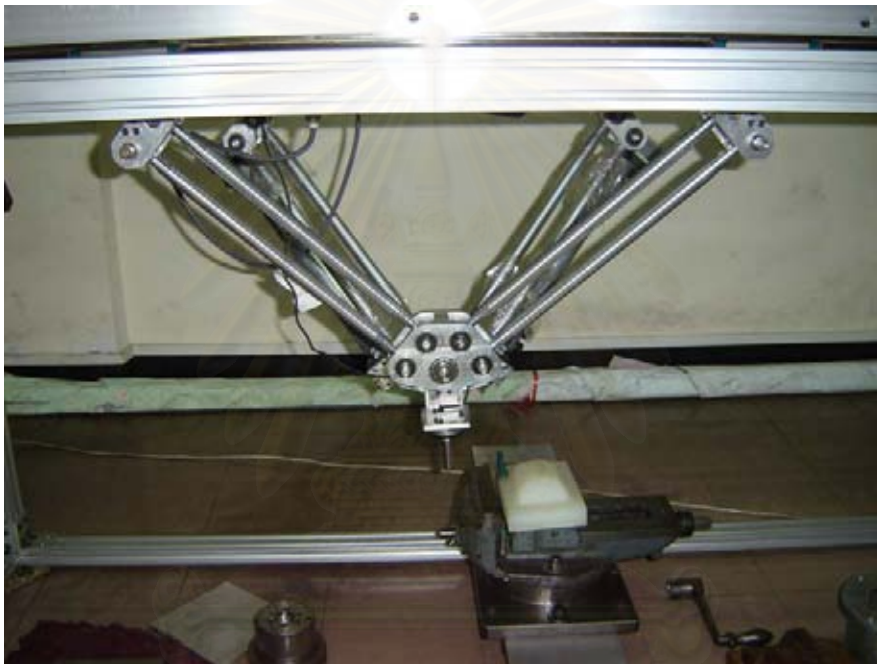
1. ซิงกูลาริตีส์ที่เกิดจากเมตริกซ์ A โดยหาได้จากดีเทอร์มิแนนท์ของเมตริกซ์ $A = 0$ หรือ $\det(A) = 0$
2. ซิงกูลาริตีส์ที่เกิดจากเมตริกซ์ B โดยหาได้จาก ดีเทอร์มิแนนท์ของเมตริกซ์ $B = 0$ หรือ $\det(B) = 0$
3. ซิงกูลาริตีส์ที่เกิดจากเมตริกซ์ $A^{-1}B$ โดยหาได้จาก ดีเทอร์มิแนนท์ของเมตริกซ์ $A^{-1}B = 0$ หรือ $\det(A^{-1}B) = 0$

บทที่ 5

แขนกลเคลื่อนที่ตามแบบขนานในตระกูลเอช 4

5.1 รูปแบบของแขนกลแบบขนานในตระกูลเอช 4

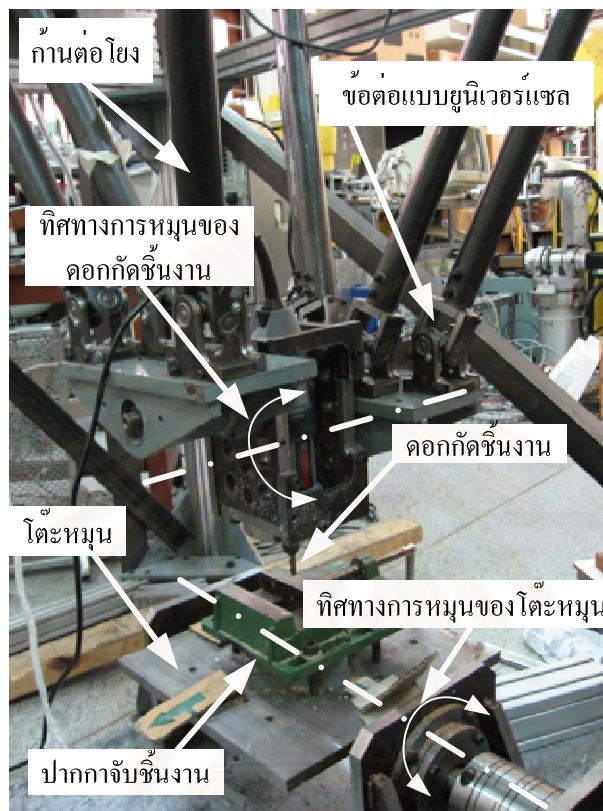
แขนกลเคลื่อนที่ตามแบบขนานในตระกูลเอช 4 ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกออกแบบและพัฒนาโดย Tantawiroon, N. [2003 2004 และ 2005] โดยในตอนแรกเป็นแขนกลแบบขนาน 4 องศาอิสระ วัสดุที่ใช้สร้างเป็นอลูมิเนียมทั้งหมดดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แขนกลแบบขนานในตระกูลเอช 4

เพื่อให้แขนกลแบบขนานในตระกูลเอช 4 มีความสามารถในการกัดเซาะชิ้นงานให้มีประสิทธิภาพนั้นจำเป็นต้องเพิ่มจำนวนองศาอิสระเป็น 5 องศาอิสระโดยองศาอิสระที่เพิ่มขึ้นมาจะทำหน้าที่เป็นโต๊ะหมุนซึ่งสามารถจับยึดชิ้นงานที่จะทำการกัดเซาะ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ทำการออกแบบและพัฒนาแขนกลแบบขนานในตระกูลเอช 4 ขึ้นมีลักษณะและรูปแบบดังรูปที่ 5.2 โครงสร้างของแขนกลที่พัฒนาจะเปลี่ยนมาใช้เหล็กเป็นวัสดุหลักจากเดิมที่ใช้อลูมิเนียม ทั้งนี้เพื่อเพิ่มความแข็งแรง ข้อต่อแบบหมุนที่ใช้มีการประกอบแบบสวมอัดเพื่อป้องกันความหลวมที่อาจจะเกิดขึ้นข้อต่อยูนิเวอร์แซล (Universal joint) ซึ่งมีสององศาอิสระดังรูปที่ 5.2 เป็นข้อต่อที่ใช้กับเพลลาขับของรถยนต์จึงมีความแข็งแรงและไม่มีความหลวม แขนกลของเดิมมีเพียง 4 องศาอิสระในงานวิจัยนี้จึงได้เพิ่มโต๊ะจับชิ้นงานที่สามารถหมุนได้ 90 องศา ควบคุมตำแหน่งด้วยเซอร์โวมอเตอร์ที่มีอุปกรณ์วัดมุมมีความละเอียด 10000 พัลส์ต่อรอบใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบฮาร์มอนิกที่มีอัตราทดเท่ากับ 1 ต่อ 100 ปากกาจับชิ้นงานสามารถจับชิ้นงานที่มีความกว้างสูงสุดได้

150 มิลลิเมตรทำให้แขนกลที่พัฒนานี้มีจำนวนองศาอิสระเท่ากับ 5 และแขนกลตามนี้สามารถจับยึดดอกกัตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ถึง 8 มิลลิเมตร ความเร็วรอบของดอกกัตชิ้นงานสามารถปรับได้ตั้งแต่ 0 ถึง 10000 รอบต่อนาที



รูปที่ 5.2 รายละเอียดของแขนกลแบบเอช 4 ที่ปรับปรุงใหม่

5.2 สมการอินเวอร์สคิเนแมติกส์

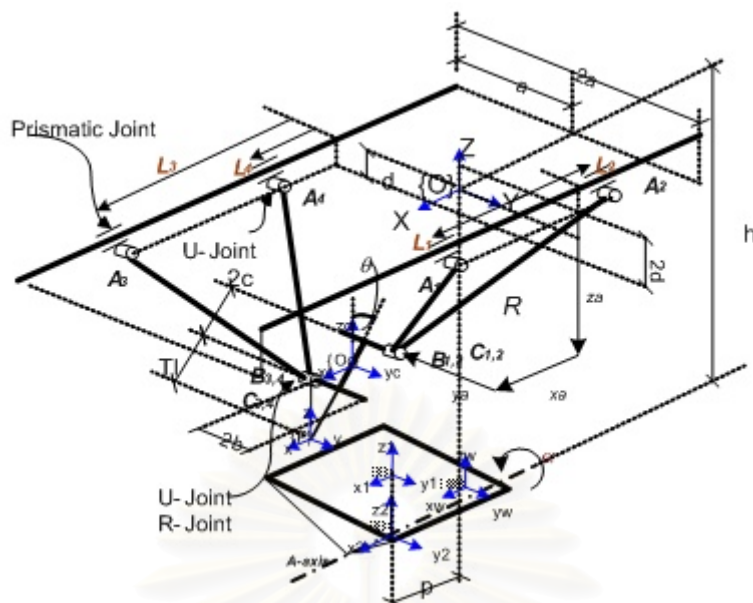
จากรูปที่ 5.3 B1, B2 และ C1 อยู่ที่จุดเดียวกันทำให้เวกเตอร์ $OcB1 = OcB2 - OcB3 = -OcB4$ ดังนั้นสมการอินเวอร์สคิเนแมติกส์หาได้ Sangveraphunsiri, V. และ Chooprasird, K. [2007]

$$l_1 = x_a \pm \sqrt{R^2 - y_a^2 - z_a^2}$$

และจากลักษณะของแขนกลตามที่ทำแบบทำให้สรุปได้ว่า

$$l_1 = x_a + \sqrt{R^2 - y_a^2 - z_a^2} \quad (5.1)$$

$$l_2 = x_a - \sqrt{R^2 - y_a^2 - z_a^2} \quad (5.2)$$



รูปที่ 5.3 รูปแบบการกำหนดตัวแปรและพารามิเตอร์ต่างๆของแขนกล

โดยที่ โดยที่ x_a คือตำแหน่งของจุด $B_{1,2}$ ที่สามเหลี่ยมที่เกิดจากก้านต่อโยง A_1B_1 และ A_2B_2 ดังแสดงในรูปที่ 5.3 และ 5.4 ซึ่งทำให้

$$x_a = x_c + c \times \sin(q) = x + (T_L + 2c) \times \sin(q) \quad (5.3)$$

$$y_a = y_c + b - a = y + b - a \quad (5.4)$$

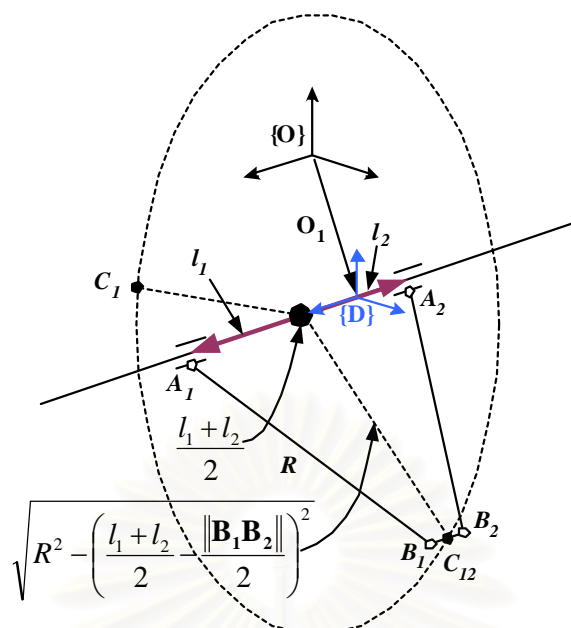
$$z_a = z_c + c \cdot \cos(\theta) - d = z + (T_L + 2c) \cdot \cos(\theta) - d \quad (5.5)$$

ในทำนองเดียวกันนี้กับก้านต่อโยงอีกสองก้านที่เหลือทำให้สรุปได้ว่า

$$l_3 = x_b + \sqrt{R^2 - y_b^2 - z_b^2} \quad (5.6)$$

$$l_4 = x_b - \sqrt{R^2 - y_b^2 - z_b^2} \quad (5.7)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.4 แนวการเคลื่อนที่ของจุด B

โดยที่ x_b คือตำแหน่งของจุด B3, 4 จากรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4 ประกอบ ทำให้สรุปได้ว่า

$$x_b = x_c - c \cdot \sin(\theta) = x + T_L \cdot \sin(\theta) \quad (5.8)$$

$$y_b = y_c - b + a = y - b + a \quad (5.9)$$

$$z_b = z_c - c \times \cos(\theta) + d = z + T_L \times \cos(\theta) + d \quad (5.10)$$

จากรูปที่ 5.5 ซึ่งแสดงการตั้งแกน (x_w, y_w, z_w) ซึ่งเป็นแกนของชิ้นงานกับแกนอ้างอิง (x, y, z) ซึ่งสามารถทำการย้ายแกนได้ดังนี้

$$\{O_w\} \xrightarrow{T} \{O_1\} \xrightarrow{T} \{O_2\} \xrightarrow{R} \{O_2\} \xrightarrow{T} \{O\}$$

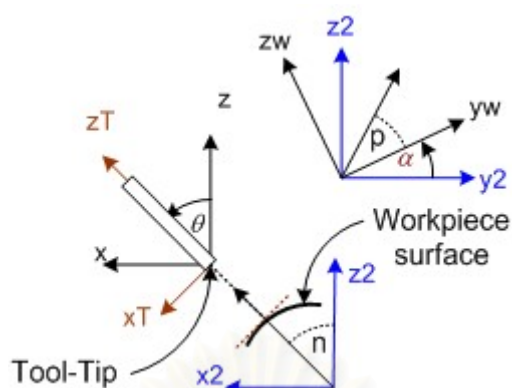
ทำให้ได้

$$X = x_w + x_{O_w}^{O_1} + p \quad (5.11)$$

$$Y = (y_w + y_{O_w}^{O_1}) \cdot \cos \alpha - (z_w + z_{O_1}^{O_2}) \cdot \sin \alpha \quad (5.12)$$

$$Z = (y_w + y_{O_w}^{O_1}) \cdot \sin \alpha + (z_w + z_{O_1}^{O_2}) \cdot \cos \alpha - h \quad (5.13)$$

โดยที่ $x_{O_w}^{O_1} y_{O_w}^{O_1} z_{O_w}^{O_1}$ คือแกนของ O_w เทียบกับ O_1 และ $z_{O_1}^{O_2}$ คือแกนของ O_1 เทียบกับ O_2 .



รูปที่ 5.6 การตั้งแกนของปลายแขนกลตาม

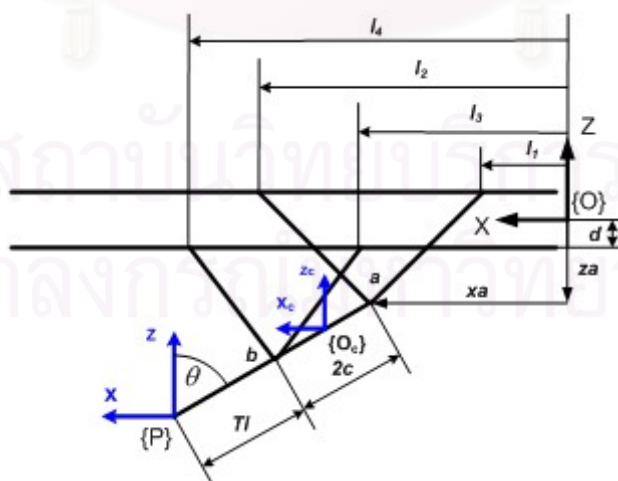
ทำให้สามารถหาค่าทิศทางของแขนกลตามได้ดังนี้

$$\alpha = \pm 90^\circ - \arctan\left(\frac{K_w}{J_w}\right) \quad (5.21)$$

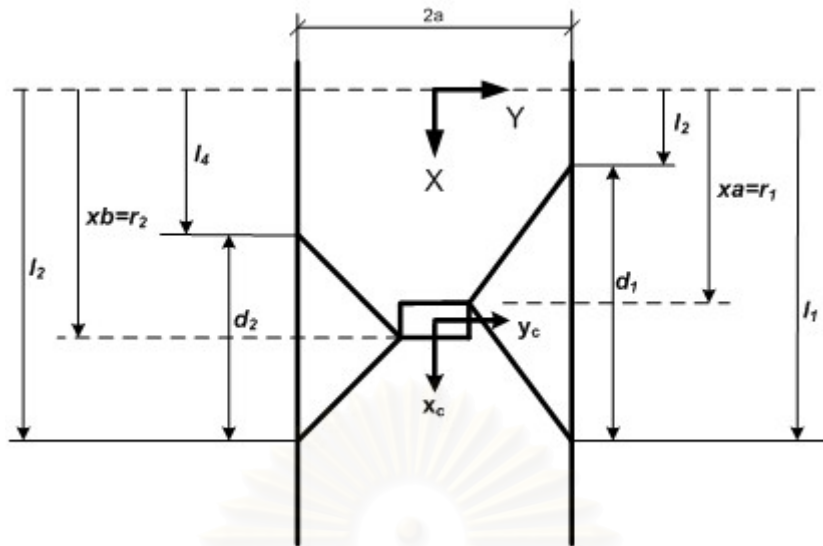
$$\theta = \arctan\left(\frac{I_w}{\sqrt{J_w^2 + K_w^2}}\right) \quad (5.22)$$

5.4 สมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์

ในทางกลับกันกำหนดข้อมูลของตำแหน่งที่ข้อต่อต่างๆของแขนกลตามมาให้เราสามารถหาสมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ Sangveraphunsiri, V. และ Chooprasird, K. [2007] ได้ดังนี้



รูปที่ 5.7 รูปร่างและการตั้งแกนเมื่อมองจากด้านข้างของแขนกลตาม



รูปที่ 5.8 รูปร่างและการตั้งแกนเมื่อมองจากด้านบนของแขนกลตาม

กำหนดให้ $r_1 = \frac{l_1 + l_2}{2}$, $r_2 = \frac{l_3 + l_4}{2}$, $d_1 = l_1 - l_2$, $d_2 = l_3 - l_4$

$$\cos\theta = \frac{\sqrt{4c^2 - (r_2 - r_1)^2}}{2c} \quad (5.23)$$

จากสมการที่ 5.1 สมการที่ 5.2 และสมการที่ 5.6 และสมการที่ 5.7 จะได้

$$(l_1 - x_a)^2 + (l_3 - x_b)^2 = 2R^2 - 2y_c^2 - 2(b-a)^2 - 2z_c^2 - 2(c \cdot \cos\theta - d)^2 \quad (5.24)$$

$$(l_2 - x_a)^2 - (l_4 - x_b)^2 = -4y_c(b-a) - 4z_c(c \cdot \cos\theta - d) \quad (5.25)$$

จากรูปที่ 5.7 กำหนดให้

$$(l_2 - x_a)^2 = (l_1 - x_a)^2 = \frac{d_1^2}{4} \quad (5.26)$$

$$(l_4 - x_b)^2 = (l_3 - x_b)^2 = \frac{d_2^2}{4} \quad (5.27)$$

ดังนั้นการเคลื่อนที่ในแนวแกน X สามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$x = \left(\frac{r_1 + r_2}{2} \right) - (c + T_L) \sin\theta \quad (5.28)$$

การเคลื่อนที่ในแนวแกน Y สามารถหาได้ดังนี้

$$y = y_c = \frac{d_1^2 - d_2^2 + 8z_c \left(\sqrt{4c^2 - (r_1 - r_2)^2} - 2d \right)}{16(a - b)} \quad (5.29)$$

จากสมการที่ 5.24 และ 5.25 สามารถหาสมการการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z ได้ดังนี้

$$z_c = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (5.30)$$

โดยที่

$$A = \frac{\left(\sqrt{4c^2 - (r_2 - r_1)^2} - 2d \right)^2}{2(a - b)^2} + 2$$

$$B = \frac{(d_1^2 - d_2^2) \left(\sqrt{4c^2 - (r_2 - r_1)^2} - 2d \right)}{8(a - b)^2}$$

$$C = \frac{(d_1^2 + d_2^2)}{4} - 2R^2 + 2(b - a)^2$$

$$+ \left(\frac{1}{2} \right) \cdot \left(\sqrt{4c^2 - (r_2 - r_1)^2} - 2d \right)^2 + \frac{(d_1^2 - d_2^2)^2}{128(a - b)^2}$$

ดังนั้น สมการการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z คือ

$$z = z_c - (c + T_L) \cos \theta \quad (5.31)$$

เนื่องจากชิ้นงานต้องถูกวางที่โต๊ะจับยึดชิ้นงานดังนั้นต้องหาสมการการเคลื่อนที่เทียบกับแกน ชิ้นงานที่วางอยู่บนโต๊ะโดยใช้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$\{O\} \xrightarrow{T} \{O_2\} \xrightarrow{R} \{O_2\} \xrightarrow{T} \{O_1\} \xrightarrow{T} \{O_w\}$$

ทำให้ได้

$$x_w = x + p + x_{O_1}^{O_w} \quad (5.32)$$

$$y_w = y \cdot \cos(\alpha) + (z + h) \cdot \sin(\alpha) + y_{O_1}^{O_w} \quad (5.33)$$

$$z_w = (z + h) \cdot \cos(\alpha) - y \cdot \sin(\alpha) + z_{O_1}^{O_w} \quad (5.34)$$

ทิศทางของปลายแขนกลตามหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$I_w = \pm \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\tan^2 \theta}}} \quad (5.35)$$

$$J_w = \pm \frac{1}{\left(\sqrt{1 + \tan^2 \theta}\right) \cdot \left(\sqrt{1 + \tan^2(90 - \alpha)}\right)} \quad (5.36)$$

$$K_w = \frac{\tan(90 - \alpha)}{\left(\sqrt{1 + \tan^2 \theta}\right) \cdot \left(\sqrt{1 + \tan^2(90 - \alpha)}\right)} \quad (5.37)$$



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

การควบคุม

ในบทนี้จะกล่าวถึงการควบคุมแขนกลตามให้สามารถเคลื่อนที่ตามแขนกลแฮบติคโดยอาศัยข้อมูลของตำแหน่งและทิศทางที่ได้จากแขนกลแฮบติคมาแปลงเป็นคำสั่งที่ใช้ควบคุมแขนกลตามให้เคลื่อนที่ตามคำสั่งที่ได้รับ เริ่มจากผู้ควบคุมจับคันบังคับแล้วบังคับให้ปลายคันบังคับสัมผัสไปบนพื้นผิวของชิ้นงานที่ต้องการขณะเดียวกันแขนกลแฮบติคก็จะทำการเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่ของปลายแขนที่สัมผัสบนพื้นผิวชิ้นงาน แล้วนำมาคำนวณหาค่าตำแหน่ง ทิศทางและความเร็วที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นคำสั่งการเคลื่อนที่ให้กับแขนกลตามเพื่อให้แขนกลตามเคลื่อนที่ตามคำสั่ง ตำแหน่ง ทิศทางและความเร็วดังกล่าว เมื่อแขนกลแฮบติคเคลื่อนที่ไปตามผิวของชิ้นงาน ตัวควบคุมที่แขนกลตามจะทำหน้าที่บังคับให้แขนกลตามเคลื่อนที่ตามแขนกลแฮบติคตลอดเวลาการทำงาน

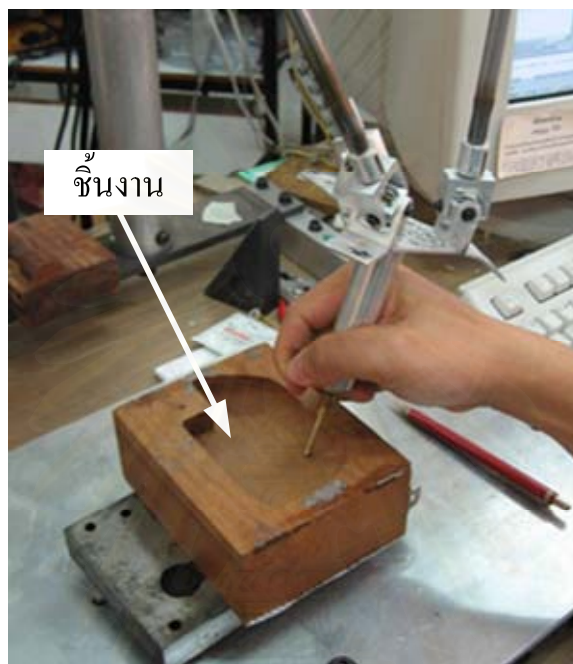
6.1 การบังคับและการควบคุมแขนกลแฮบติค

ในการใช้งานแขนกลแฮบติค ผู้บังคับแขนกลแฮบติคในงานวิจัยนี้ต้องเริ่มจากการตั้งตำแหน่งเริ่มต้นการใช้งานของแขนกลแฮบติคทุกครั้งเสมอ ตำแหน่งเริ่มต้นนี้คือตำแหน่งที่ปลายของคันบังคับมีค่าเท่ากับศูนย์ รูปที่ 6.1 แสดงการตั้งตำแหน่งเริ่มต้นการใช้งานของแขนกลแฮบติค อุปกรณ์สำหรับตั้งตำแหน่งเริ่มต้นทำจากอลูมิเนียม สามารถยกออกหลังจากตั้งตำแหน่งเริ่มต้นเสร็จ



รูปที่ 6.1 การตั้งตำแหน่งเริ่มต้นของคันบังคับ

จากนั้นนำชิ้นงานต้นแบบที่ต้องการทำซ้ำหรือต้องการจะสร้างขึ้นรูปใหม่มาวางบนฐานของแขนกลแฮบติค ดังแสดงในรูปที่ 6.2 ยึดชิ้นงานให้ติดแน่นกับฐาน เสร็จแล้วผู้ควบคุมก็เริ่มจับคัมบังคัมของแขนกลแฮบติคไปสัมผัสกับผิวของชิ้นงาน รายละเอียดแสดงในรูปที่ 6.2 ความเร็วในการเคลื่อนคัมบังคัมขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้ควบคุม แต่จากการทดสอบความเร็วในการเคลื่อนคัมบังคัมไม่ควรมีค่าเกิน 60 มิลลิเมตรต่อวินาที เพื่อไม่ให้แขนกลตามเคลื่อนที่ตามไม่ทัน



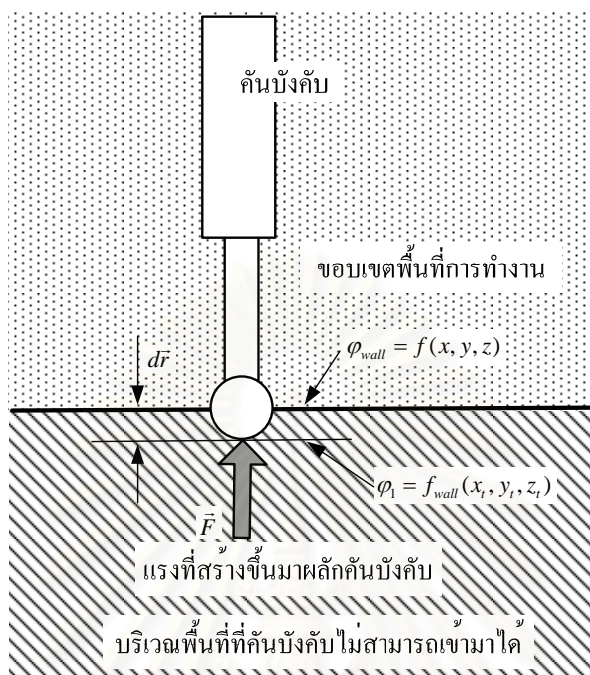
รูปที่ 6.2 การจับคัมบังคัมสัมผัสผิวของชิ้นงาน

การบังคัมแขนกลแฮบติคประกอบด้วย

- การบังคัมด้วยมือของผู้ควบคุมเพียงอย่างเดียว
- การบังคัมร่วมกันระหว่างมือของผู้ควบคุมกับระบบควบคุมแขนกลแฮบติค ระบบควบคุมของแขนกลแฮบติคที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยควบคุมต่าง ๆ ดังนี้ ส่วนที่ช่วยลดแรงเสียดทานที่ข้อต่อของแขนกลแฮบติค การสร้างเส้นทางเดินเสมือน (Virtual path) หรือการกำหนดขอบเขตพื้นที่การทำงาน Sangveraphunsiri และ Ngamvilakorn [2002] รูปแบบต่างๆ ที่ช่วยให้ผู้ควบคุมเคลื่อนคัมบังคัมได้สะดวกยิ่งขึ้นและช่วยในการบังคัมไม่ให้ผู้ควบคุมเคลื่อนคัมบังคัมเร็วกว่าที่กำหนด

หลักการกำหนดขอบเขตพื้นที่การทำงานหรือการสร้างทางเดินเสมือนที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จะมีลักษณะเป็นระนาบ เมื่อผู้ควบคุมเคลื่อนคัมบังคัมมาอยู่ในตำแหน่งเดียวกับ

ระนาบระบบควบคุมของแขนกลแอบติคจะสร้างแรงขึ้นมาจากมือของผู้ควบคุมบังคับไม่ให้เคลื่อนที่เลยระนาบดังกล่าวไป



รูปที่ 6.3 การกำหนดพื้นที่การทำงานของแขนกลแอบติค

แรงที่แสดงในรูปที่ 6.3 คือแรงที่สร้างขึ้นมาจากคั่นบังคับไม่ให้ออกนอกพื้นที่การทำงาน รูปแบบของแรงสามารถหาได้ดังสมการที่ 6.1

$$\vec{F} = (k_p dr)\vec{n} + (k_v v)\vec{n} \quad (6.1)$$

โดยที่

$$dr = \frac{d\phi |\nabla\phi|}{\nabla\phi \cdot \nabla\phi} \text{ คือระยะห่างระหว่างคั่นบังคับกับระนาบดังรูป}$$

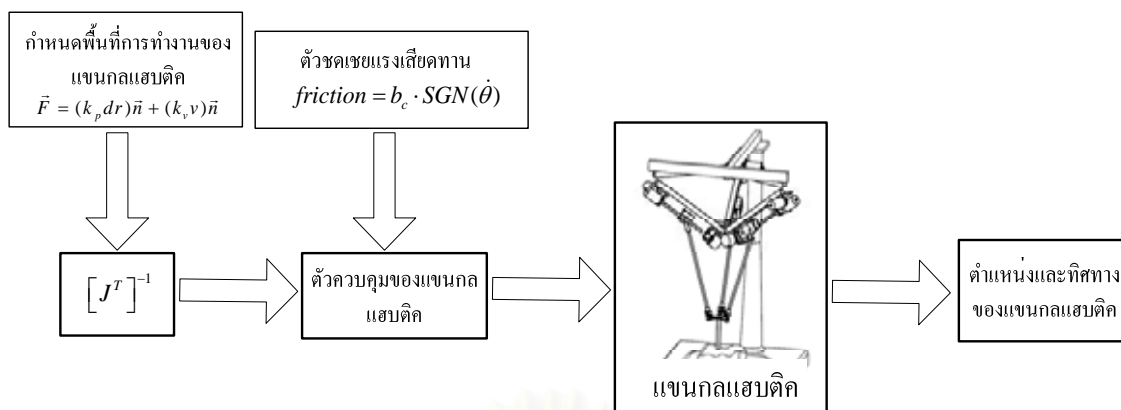
$$\vec{n} = \pm \frac{\nabla\phi}{|\nabla\phi|} \text{ คือเวกเตอร์ขนาดหนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับระนาบ}$$

$$\nabla\phi = i \frac{\partial\phi}{\partial x} + j \frac{\partial\phi}{\partial y} + k \frac{\partial\phi}{\partial z}$$

v คือความเร็วของคั่นบังคับ

k_p, k_v คือค่าเกนขยายขนาดแรงที่กระทำต่อคั่นบังคับ

เมื่อรวมการกำหนดพื้นที่การทำงานกับการลดแรงเสียดทานของแขนกลแอบติค เราสามารถเขียนเป็นรูปแบบการควบคุมได้ดังแสดงในรูปที่ 6.4



รูปที่ 6.4 รูปแบบการควบคุมแขนกลแฮบติก

6.2 การตั้งตำแหน่งเริ่มต้นของแขนกลตาม

แขนกลตามที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีโครงสร้างแบบขนานซึ่งประกอบด้วยข้อต่อแบบเลื่อนจำนวนสี่ชุดวางตัวในแนวขนานกัน ดังนั้นการตั้งตำแหน่งเริ่มต้นให้กับแขนกลตามจึงมีความสำคัญมาก ความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางของแขนกลตามที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับ การตั้งตำแหน่งเริ่มต้นนี้ เป็นสำคัญ ตำแหน่งเริ่มต้นของแขนกลตามกำหนดโดยมีระยะ $L_1, L_2, L_3, L_4, \theta_5$ ดังแสดงในรูปที่ 6.3 ซึ่งระยะต่างๆกำหนดโดยค่าต่อไปนี้

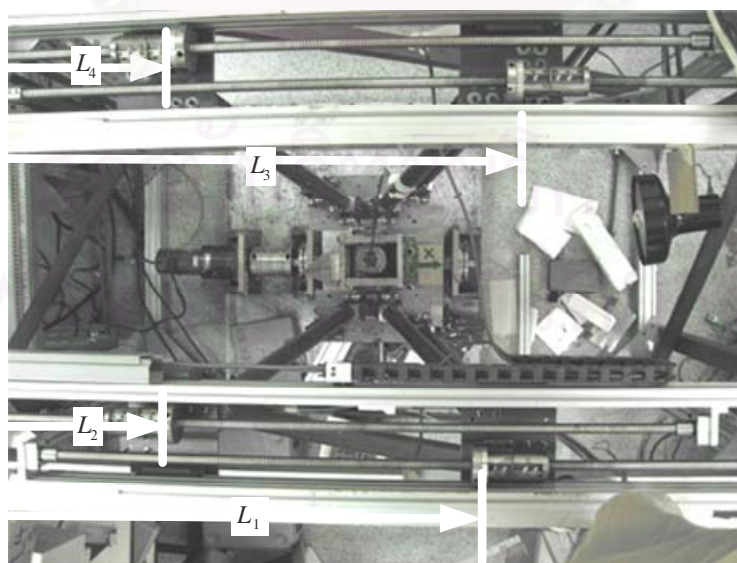
$$L_1 = 942mm$$

$$L_2 = 345mm$$

$$L_3 = 942mm$$

$$L_4 = 345mm$$

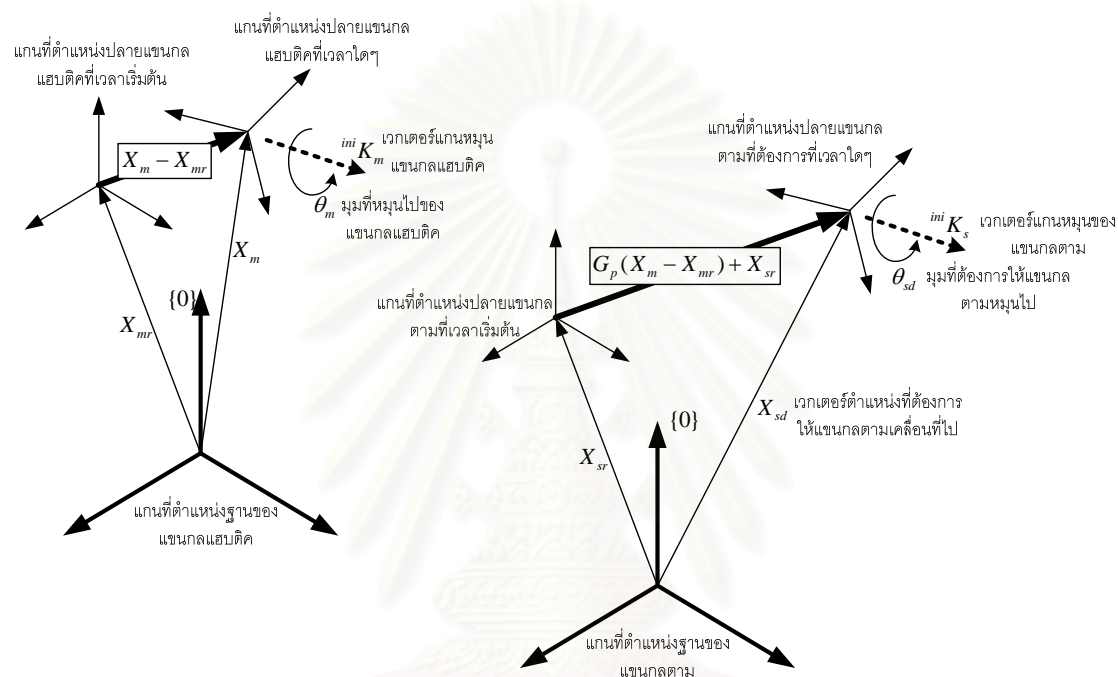
$$\theta_5 = 0$$



รูปที่ 6.5 ระยะการตั้งตำแหน่งเริ่มต้นของแขนกลเคลื่อนที่ตามเมื่อมองจากด้านบน

6.3 การหาตำแหน่งและทิศทางที่ใช้ควบคุมแขนกลตาม

เนื่องจากแขนกลแบบตึกและแขนกลตามมีลักษณะโครงสร้างที่แตกต่างกัน ดังนั้นการหาตำแหน่งที่ใช้ควบคุมแขนกลตามจึงไม่สามารถนำมาจากตำแหน่งที่ได้จากแขนกลแบบตึกได้โดยตรง ในกรณีที่ต้องการควบคุมตำแหน่งและทิศทางของแขนกลตามเพียงอย่างเดียวโดยไม่สนใจการควบคุมแรง Sangveraphunsiri และ Ngamvilaikorn [2005] ได้เสนอการหาตำแหน่งและทิศทางที่เหมาะสมสำหรับแขนกลตามไว้ดังนี้



รูปที่ 6.6 การหาตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการให้แขนกลตามเคลื่อนที่ไป

X_{sr} คือเวกเตอร์ตำแหน่งเริ่มต้นของแขนกลตาม

X_{mr} คือเวกเตอร์ตำแหน่งเริ่มต้นของแขนกลแบบตึก

X_{sd} คือเวกเตอร์ตำแหน่งของแขนกลตามที่ต้องการ

X_m คือเวกเตอร์ตำแหน่งของแขนกลแบบตึกที่เวลาใดๆ

ในตอนแรกที่ตำแหน่งปลายแขนกลของแขนกลทั้งสองอยู่หนึ่งและถูกกำหนดด้วยเวกเตอร์เริ่มต้นของแขนกล เมื่อแขนกลแบบตึกเคลื่อนที่ไปทำให้เกิดเวกเตอร์ตำแหน่งของแขนกลแบบตึกที่เวลาใดๆ X_m จากรูปที่ 6.6 ประกอบ นำผลต่างของเวกเตอร์ตำแหน่งทั้งสองไปบวกกับเวกเตอร์ตำแหน่งเริ่มต้นของแขนกลตามทำให้สามารถหาสมการสำหรับเวกเตอร์ตำแหน่งของแขนกลตามที่ต้องการได้ดังนี้

$$X_{sd} = G_p \cdot (X_m - X_{mr}) + X_{sr} \quad (6.1)$$

โดยที่ G_p คือค่าเกณฑ์ขยายของตำแหน่ง การใช้สมการที่ 6.1 ในการหาตำแหน่งของแขนกลตามที่ต้องการมีข้อดี กล่าวคือไม่จำเป็นต้องให้ตำแหน่งเริ่มต้นของแขนกลทั้งสองตรงกันทำให้สะดวกในการใช้งานจริงและยังสามารถให้แขนกลทั้งสองอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมกับการใช้งานของแขนกลนั้นๆในตอนเริ่มต้นอีกด้วย

ในส่วนของการหาเมตริกซ์กำหนดทิศทางที่เหมาะสมสำหรับแขนกลตามนั้นในงานวิจัยนี้ได้ปรับปรุงจากงานวิจัยเดิม Sangveraphunsiri และ Ngamvilaikorn [2005] ที่ทำได้ดังนี้ กำหนดให้

${}^0R_{sr}$ คือเมตริกซ์กำหนดทิศทางเริ่มต้นของแขนกลตามเมื่อเทียบกับเฟรมศูนย์ของแขนกลตาม

${}^0R_{sd}$ คือเมตริกซ์กำหนดทิศทางที่ต้องการของแขนกลตามเมื่อเทียบกับเฟรมศูนย์ของแขนกลตาม

${}^0R_{mr}$ คือเมตริกซ์กำหนดทิศทางเริ่มต้นของแขนกลแสบติดเมื่อเทียบกับเฟรมศูนย์ของแขนกลแสบติด

0R_m คือเมตริกซ์กำหนดทิศทางของแขนกลแสบติดที่เวลาใดๆเมื่อเทียบกับเฟรมศูนย์ของแขนกลแสบติด

ทิศทางของแขนกลแสบติดที่เวลาใดๆเมื่อเทียบกับเฟรมเริ่มต้นของแขนกลแสบติดสามารถเขียนได้ดังนี้

$${}^{ini}R_m = ({}^0R_{mr})^T {}^0R_m \quad (6.2)$$

โดยที่

$${}^{ini}R_m = \begin{bmatrix} rm_{11} & rm_{12} & rm_{13} \\ rm_{21} & rm_{22} & rm_{23} \\ rm_{31} & rm_{32} & rm_{33} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

มุมที่เกิดขึ้น θ_m Craig J [1989] สามารถหาได้จากสมการที่ 6.4 ดังนี้

$$\theta_m = a \cos \left(\frac{rm_{11} + rm_{22} + rm_{33} - 1}{2} \right) \quad (6.4)$$

แกนหมุน ${}^{ini}K_m$ สามารถหาได้จากสมการที่ 6.5 ดังนี้ ซึ่งแกนหมุนที่ได้จะใช้เป็นแกนหมุนสำหรับแขนกลตาม

$${}^{ini}K_m = \frac{1}{2 \sin \theta_m} \begin{bmatrix} rm_{32} - rm_{23} \\ rm_{13} - rm_{31} \\ rm_{21} - rm_{12} \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

แกนหมุนสำหรับแขนกลตาม ${}^{ini}K_s$ หาได้จากสมการที่ 6.6 ดังนี้

$${}^{ini}K_s = {}^0K_{sr} {}^0K_m {}^{ini}K_m \quad (6.6)$$

มุมสำหรับแขนกลตามหาได้จากสมการ 6.7

$$\theta_{sd} = G_\theta \cdot \theta_m \quad (6.7)$$

ทิศทางของแขนกลตามเมื่อเทียบกับเฟรมเริ่มต้น ${}^{ini}R_{sd}$ ของแขนกลตามสามารถหาได้ดังนี้

$${}^{ini}R_{sd} = \begin{bmatrix} k_x k_x v\theta_{sd} + c\theta_{sd} & k_x k_y v\theta_{sd} - k_z s\theta_{sd} & k_x k_z v\theta_{sd} + k_y s\theta_{sd} \\ k_x k_y v\theta_{sd} + k_z s\theta_{sd} & k_y k_y v\theta_{sd} + c\theta_{sd} & k_y k_z v\theta_{sd} - k_x s\theta_{sd} \\ k_x k_z v\theta_{sd} - k_y s\theta_{sd} & k_y k_z v\theta_{sd} + k_x s\theta_{sd} & k_z k_z v\theta_{sd} + c\theta_{sd} \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

โดยที่

$$k_x = \frac{rm_{32} - rm_{23}}{2 \sin \theta_m}, k_y = \frac{rm_{13} - rm_{31}}{2 \sin \theta_m}, k_z = \frac{rm_{21} - rm_{12}}{2 \sin \theta_m}, v\theta_{sd} = 1 - \cos \theta_{sd}$$

$$c\theta_{sd} = \cos \theta_{sd}, s\theta_{sd} = \sin \theta_{sd}$$

ดังนั้นทิศทางของแขนกลตามที่ต้องการเมื่อเทียบกับเฟรมศูนย์ของแขนกลตามสามารถหาได้ดังนี้

$${}^0R_{sd} = {}^0R_{sr} {}^{ini}R_{sd} \quad (6.9)$$

สมการที่ 6.1 และ 6.9 คือตำแหน่งและทิศทางของแขนกลตามที่ต้องการซึ่งสามารถนำไปใช้ควบคุมตำแหน่งและทิศทางของแขนกลตามให้เคลื่อนที่ตามคำสั่งการเคลื่อนที่ที่ได้รับจากแขนกลนำ ข้อดีของการหาทิศทางของแขนกลตามวิธีนี้คือสามารถนำไปใช้ในระบบควบคุมแรงโต้ตอบกลับที่อาศัยผลต่างของมุมระหว่างแขนกลนำและแขนกลตาม Jansen [1998] และ Yuan[1988].

6.4 อุปกรณ์และระบบควบคุมของแขนกลตาม

ระบบควบคุมที่ใช้ควบคุมตำแหน่งของแขนกลตามคือระบบควบคุมแบบพีไอดีซึ่งใช้ในกรณีที่ต้องการควบคุมตำแหน่งของแขนกลตามเพียงอย่างเดียว อุปกรณ์ที่ใช้รับค่ามุมจากอุปกรณ์วัดมุมและอุปกรณ์ที่ใช้ส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ขยายสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์คือ SENSORAY 626 ที่สามารถรับค่ามุมจากอุปกรณ์วัดมุมได้ 6 ตัว และสามารถส่งสัญญาณไปยังตัวขยายสัญญาณได้ถึง 4 ตัว ในงานวิจัยนี้ใช้ SENSORAY 626 จำนวน 3 ชุดซึ่งสามารถรับค่ามุมจากอุปกรณ์วัดมุมได้ถึง 18 ตัว และสามารถส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ขยาย

สัญญาณได้ถึง 12 ตัว ตำแหน่งที่ใช้ควบคุมแขนกลจะถูกคำนวณและส่งไปที่ตัวควบคุมตำแหน่งแบบพีไอดีทุกๆ 1 มิลลิวินาที หรืออัตราการเร็วในการสุ่ม (sampling frequency) เท่ากับ 1000 Hz รูปแบบของตัวควบคุมแสดงดังสมการ Craig [1986]

$$\tau = k_p(\theta_d - \theta) + k_d\dot{\theta} + k_i \int_0^t \theta dt + \tau_{fric} \quad (6.10)$$

โดยที่

τ แทนแรงบิดที่อุปกรณ์ขับของแต่ละข้อต่อ

θ_d แทนมุมที่ต้องการให้อุปกรณ์ขับหมุนไป

θ แทนมุมที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดมุมของแต่ละข้อต่อ

$\dot{\theta}$ แทนความเร็วเชิงมุมของแต่ละข้อต่อ

k_p แทน Proportional gain

k_d แทน Derivative gain

k_i แทน Integral gain

τ_{fric} แทน แรงบิดชดเชยเนื่องจากแรงเสียดทานที่ข้อต่อของแขนกลตาม

แรงบิดเนื่องจากแรงเสียดทาน τ_{fric} ประกอบด้วยแรงเสียดทานเนื่องจากความหนืด (Viscous friction) เป็นแรงเสียดทานที่มีขนาดและทิศทางขึ้นอยู่กับขนาดของความเร็วมีรูปแบบสมการดังนี้ $\tau_{viscous} = v \cdot \dot{\theta}$ และแรงเสียดทานคูลอมบ์ (Coulomb friction) เป็นแรงเสียดทานที่มีค่าคงที่และมีทิศทางขึ้นอยู่กับความเร็ว มีรูปแบบสมการดังนี้ $\tau_{coulomb} = c \cdot \text{sgn}(\dot{\theta})$ โดยที่ค่า c, v หาได้จากทดลอง ดังนั้นแรงบิดชดเชยเนื่องจากแรงเสียดทานสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\tau_{fric} = v \cdot \dot{\theta} + c \cdot \text{sgn}(\dot{\theta}) \quad (6.11)$$

6.5 การสร้างแรงโต้ตอบกลับของแขนกลแฮบติคที่มีต่อมือของผู้ควบคุม

การสร้างแรงโต้ตอบ (reflection force) ของแขนกลแฮบติคในปัจจุบันนี้มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี วิธีที่นิยมกันอย่างแพร่หลายนั้นต้องอาศัยอุปกรณ์วัดแรงมาใช้ในระบบควบคุมแรง Flemmer [1999] โดยที่อุปกรณ์วัดแรงจะถูกติดตั้งอยู่ที่แขนกลตามและบางครั้งอาจติดตั้งที่แขนกลแฮบติคด้วย เนื่องจากแขนกลตามในงานวิจัยนี้เป็นแขนกลที่ใช้สำหรับงานกัดเซาะ

ชิ้นงานดังนั้นอุปกรณ์วัดแรงที่เหมาะสมสำหรับแขนกลตามในงานวิจัยนี้จึงมีราคาสูงมากและต้องการการดูแลและบำรุงรักษาค่อนข้างมากจึงไม่เหมาะกับการใช้งานจริงในอุตสาหกรรม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกรูปแบบการควบคุมแรงที่ไม่ใช้อุปกรณ์วัดแรง Goertz [1954], Bejczy [1981] และ Jansen [1998] ได้นำเสนอการสร้างแรงสะท้อนกลับโดยไม่ใช้อุปกรณ์วัดแรงแต่ใช้ผลต่างของตำแหน่งและทิศทางปลายแขนกลระหว่างแขนกลทั้งสองมาเป็นตัวสร้างแรงโต้ตอบกลับ โดยในงานวิจัยนี้ใช้การควบคุมแบบ Bilateral Impedance Control Flemmer [1999] โดยเป็นการควบคุม Impedance ทั้งสองด้านคือด้านแขนกลนำและด้านแขนกลตาม ระบบควบคุม Bilateral Impedance Control สำหรับแขนกลแฮบติดมีดังนี้

$$\tau_h = J_h^T \left\{ \left[K_{ph} (x_s - x_h) + K_{vh} (\dot{x}_s - \dot{x}_h) \right] \right\} + \tau_{hgrav} \quad (6.12)$$

โดยที่

τ_h คือแรงบิดของมอเตอร์ที่แต่ละข้อต่อของแขนกลแฮบติด

J_h คือจาโคเบียนของแขนกลแฮบติด

K_{ph}, K_{vh} คือแทน Proportional gain และ velocity gain ตามลำดับ

τ_{hgrav} คือแรงบิดชดเชยเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

x_s, \dot{x}_s คือตำแหน่งและความเร็วที่ปลายแขนกลตาม

x_h, \dot{x}_h คือตำแหน่งและความเร็วที่ปลายแขนกลแฮบติด

ระบบควบคุม Bilateral Impedance Control สำหรับแขนกลตามมีดังนี้

$$\tau_s = J_s^T \left\{ \left[K_{ps} (x_h - x_s) + K_{vs} (\dot{x}_h - \dot{x}_s) \right] \right\} + \tau_{sgrav} \quad (6.13)$$

โดยที่

τ_s คือแรงบิดของมอเตอร์ที่แต่ละข้อต่อของแขนกลตาม

J_s คือจาโคเบียนของแขนกลตาม

K_{ps}, K_{vs} คือแทน Proportional gain และ velocity gain ตามลำดับ

τ_{sgrav} คือแรงบิดชดเชยเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

x_s, \dot{x}_s คือตำแหน่งและความเร็วที่ปลายแขนกลตาม

x_h, \dot{x}_h คือตำแหน่งและความเร็วที่ปลายแขนกลแฮบติด

ตำแหน่งของแขนกลตาม x_s และตำแหน่งของแขนกลแสบติด x_h ในสมการที่ 6.12 และ 6.13 นั้นเป็นเวกเตอร์ขนาด 6×1 ที่ประกอบด้วยข้อมูลของตำแหน่งในระบบพิกัดสามมิติ (x, y, z) และข้อมูลของทิศทาง ข้อมูลสามตัวแรกนั้นเป็นข้อมูลแบบเชิงเส้นซึ่งทำให้ผลต่างของ $x_s - x_h$ ในสมการที่ 6.12 และ 6.13 เป็นเชิงเส้นด้วย ส่วนข้อมูลสามตัวถัดไปซึ่งเป็นข้อมูลทิศทางโดยส่วนมากการระบุทิศทางของแขนกลจะใช้วิธีการระบุทิศทางแบบ X-Y-Z fixed angle (roll, pitch, yaw) หรือ Z-Y-Z euler angle ซึ่งการใช้ระบบทิศทางทั้งสองแบบที่กล่าวมานี้ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในสมการที่ 6.12 และ 6.13 เนื่องจากผลต่างของ $x_s - x_h$ ในส่วนของทิศทางในสมการทั้งสองไม่ถูกต้องกับทิศทางของ $x_s - x_h$ ที่ควรจะเป็น Jansen [1992] ดังนั้นในงานวิจัยนี้ใช้ระบบแกนแบบ equivalent angle-axis Craig [1989] มาเป็นตัวระบุทิศทางของแขนกล รายละเอียดได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 6.3 ซึ่งประกอบด้วยแกนหมุนและมุมที่หมุนไปผลต่าง $x_s - x_h$ ในส่วนของทิศทางซึ่งก็คือทิศทางของแขนกลตามเทียบกับแขนกลแสบติดสามารถหาได้ดังต่อไปนี้

$${}^h R_s = {}^h R_0 {}^0 R_s \quad (6.14)$$

จากสมการที่ 6.9 จะได้ ${}^h R_0 = {}^{sd} R_0$ ดังนั้น

$${}^h R_s = {}^{sd} R_0 {}^0 R_s \quad (6.15)$$

ทิศทาง ${}^h R_s$ ในสมการที่ 6.15 มีขนาดเท่ากับ 3×3 กำหนดให้มีสมาชิกดังต่อไปนี้

$${}^h R_s = \begin{bmatrix} rsh_{11} & rsh_{12} & rsh_{13} \\ rsh_{21} & rsh_{22} & rsh_{23} \\ rsh_{31} & rsh_{32} & rsh_{33} \end{bmatrix} \quad (6.16)$$

มุมที่หมุนไปของ ${}^h R_s$ หาได้จากสมการที่ 6.17

$$\theta_{sh} = a \cos \left(\frac{rsh_{11} + rsh_{22} + rsh_{33} - 1}{2} \right) \quad (6.17)$$

โดยมุมที่หมุนนี้จะหมุนรอบแกนที่หาจากสมการที่ 6.18

$$K_{sh} = \frac{1}{2 \sin \theta_{sh}} \begin{bmatrix} rsh_{32} - rsh_{23} \\ rsh_{13} - rsh_{31} \\ rsh_{21} - rsh_{12} \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

แต่เนื่องจากแกนหมุนนี้เทียบกับแกนที่อยู่ปลายแขนกลแสบติดแต่สมการที่ 6.12 และ 6.13 นั้นต้องเทียบกับเฟรมศูนย์ของแขนกลดังนั้นจึงต้องหาแกนหมุนเทียบกับเฟรมศูนย์ของแขนกลด้วยแกนหมุน K_{sh} เมื่อเทียบกับเฟรมศูนย์ของแขนกลแสบติด ${}^0 K_h$ คือ

$${}^0 K_h = {}^0_h R K_{sh} \quad (6.19)$$

แกนหมุนในสมการที่ 6.19 ก็คือเวกเตอร์ที่ใช้บอกทิศทางของการหมุนโดยที่ค่ามุมในสมการที่ 6.17 คือขนาดของการหมุน กำหนดให้

$${}^0 \begin{bmatrix} \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y \\ \Delta\theta_z \end{bmatrix}_h \text{ คือเวกเตอร์ของผลต่าง } x_s - x_h \text{ ในส่วนของทิศทาง}$$

ดังนั้น

$${}^0 \begin{bmatrix} \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y \\ \Delta\theta_z \end{bmatrix}_h = \theta_{sh} {}^0 K_h \quad (6.20)$$

สมการที่ 6.20 สามารถหาอัตราการเปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาได้ดังสมการ 6.21

$${}^0 \begin{bmatrix} \Delta\dot{\theta}_x \\ \Delta\dot{\theta}_y \\ \Delta\dot{\theta}_z \end{bmatrix}_h = \dot{\theta}_{sh} {}^0 K_h \quad (6.21)$$

ผลต่าง $x_s - x_h$ และ $\dot{x}_s - \dot{x}_h$ ในสมการที่ 6.12 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$x_s - x_h = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y \\ \Delta\theta_z \end{bmatrix}_h$$

$$\dot{x}_s - \dot{x}_h = \begin{bmatrix} \Delta\dot{x} \\ \Delta\dot{y} \\ \Delta\dot{z} \\ \Delta\dot{\theta}_x \\ \Delta\dot{\theta}_y \\ \Delta\dot{\theta}_z \end{bmatrix}_h$$

เขียนโดยย่อได้ดังนี้

$$x_s - x_h = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta\theta \end{bmatrix}_h \quad (6.22)$$

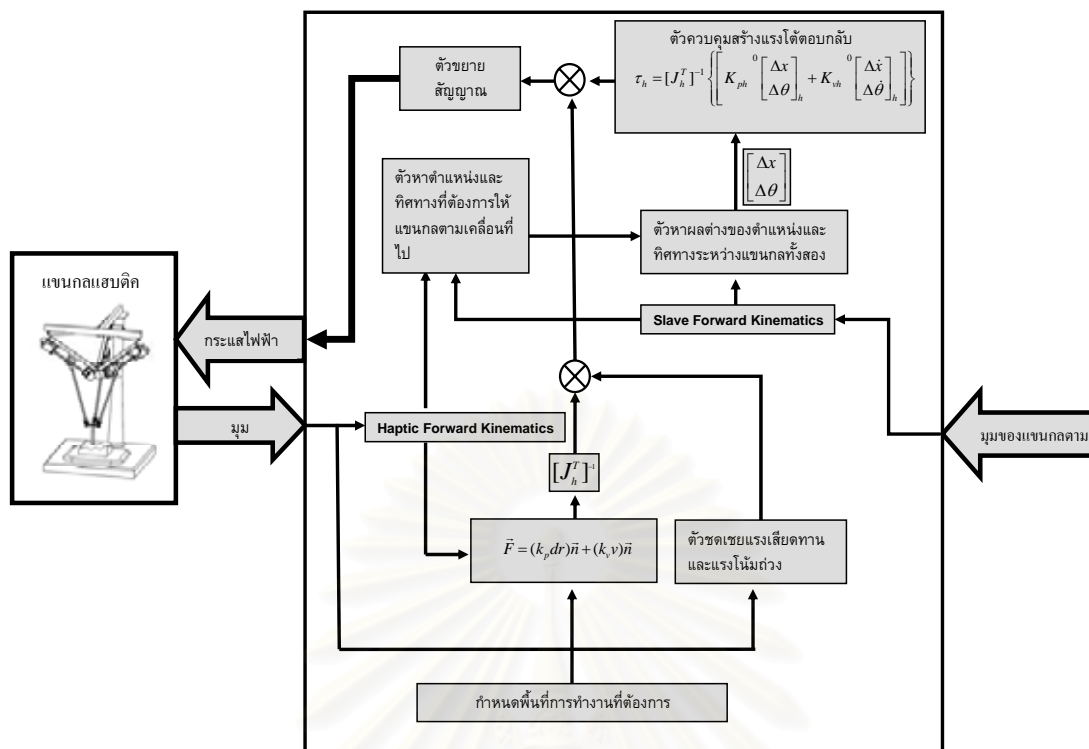
$$\dot{x}_s - \dot{x}_h = {}^0 \begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ \Delta \dot{\theta} \end{bmatrix}_h \quad (6.23)$$

แทนค่าสมการที่ 6.22 และ 6.23 ลงในสมการที่ 6.12 และ 6.13 จะได้แรงบิดที่มอเตอร์ของแขนกลแบบตืดและแรงบิดที่มอเตอร์ของแขนกลตามที่ต้องการตามสมการที่ 6.24 และ 6.25

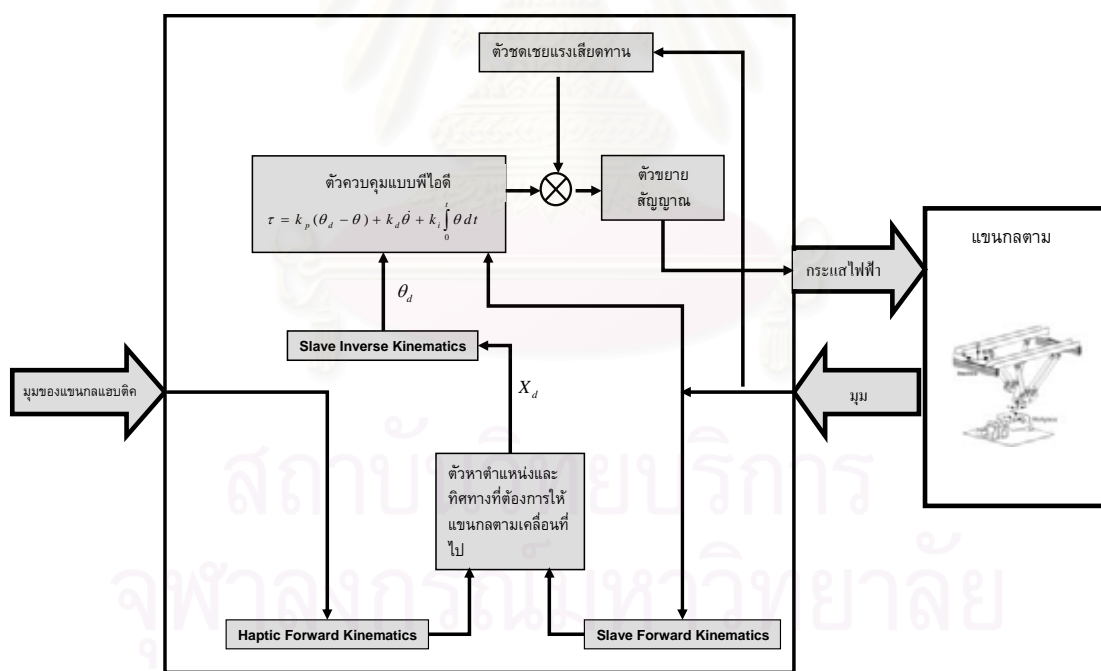
$$\tau_h = J_h^T \left\{ \begin{bmatrix} K_{ph} & {}^0 \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \theta \end{bmatrix}_h \\ K_{vh} & {}^0 \begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ \Delta \dot{\theta} \end{bmatrix}_h \end{bmatrix} \right\} + \tau_{hgrav} \quad (6.24)$$

$$\tau_s = -J_s^T \left\{ \begin{bmatrix} K_{ps} & {}^0 \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \theta \end{bmatrix}_h \\ K_{vs} & {}^0 \begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ \Delta \dot{\theta} \end{bmatrix}_h \end{bmatrix} \right\} + \tau_{sgrav} \quad (6.25)$$

สมการที่ 6.24 และ 6.25 สามารถนำไปใช้กับแขนกลแบบตืดและแขนกลตามโดยไม่ทำให้แขนกลแบบตืดและแขนกลตามขาดเสถียรภาพ Jansen [1992] ซึ่งวิธีการพิสูจน์เสถียรภาพจะไม่ขอกว่าในที่นี่ การเลือกค่า เกน K_{ph}, K_{ps} ในสมการที่ 6.24 และ 6.25 นั้นจะต้องเลือกให้ค่าเกนทั้งสองมีค่าสูงเข้าใกล้ค่าอนันต์ เพื่อให้แขนกลตามสามารถเคลื่อนที่ตามแขนกลแบบตืดได้อย่างถูกต้องขณะเดียวกันแรงที่แขนกลตามกระทำกับสิ่งแวดล้อมควรมีค่าตามแรงที่ผู้ควบคุมกระทำต่อแขนกลแบบตืด ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับแขนกลแบบตืดที่ถูกต้องกับแขนกลตามด้วยสปริงที่มีค่าความแข็งแรง stiffness ที่สูงมากแต่ในความเป็นจริงระบบควบคุมตามสมการที่ 6.24 และ 6.25 นั้นไม่สามารถปรับค่าเกนให้สูงมากจนเข้าใกล้ค่าอนันต์ได้ ดังนั้นการปรับค่าเกนในทางปฏิบัติจึงปรับค่าเกนให้สูงที่สุดเท่าที่จะทำได้โดยไม่ให้เกิด limit cycles ขึ้น Gelb [1968] และ Jansen [1990] แต่ในที่นี้เราทำการควบคุม Impedance เฉพาะทางด้านแขนกลนำ ส่วนทางด้านแขนกลตามนั้นเราจะควบคุมแบบ PID ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 6.4 ระบบควบคุมแขนกลแบบตืดโดยรวมแสดงดังรูปที่ 6.7 เริ่มจากระบบควบคุมรับค่ามุมจากแขนกลแบบตืดโดยส่งค่ามุมไปที่สมการ forward kinematics และตัวชดเชยแรงเสียดทาน ค่าที่ได้จากสมการ forward kinematics คือตำแหน่งและทิศทางที่ปลายแขนกลจากนั้นก็ส่งค่านี้ไปที่ตัวหาตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการต่อไป ค่ามุมจากแขนกลตามส่งไปที่สมการ forward kinematics ของแขนกลตาม ค่าที่คำนวณได้ส่งต่อไปที่ตัวหาผลต่างของตำแหน่งและทิศทางค่าที่ได้ส่งไปที่ตัวควบคุมสร้างแรงโต้ตอบกับรวมกับค่าที่ได้จากการกำหนดพื้นที่การทำงานทั้งหมดถูกส่งไปที่ตัวขยายสัญญาณ จากนั้นก็ส่งไปที่มอเตอร์ของแขนกลแบบตืดต่อไป ระบบควบคุมของแขนกลตามที่ได้กล่าวมาสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 6.8 ระบบควบคุมรับค่ามุมจากแขนกลตามและแขนกลแบบตืดจากซึ่งจะถูกส่งไปคำนวณหาตำแหน่งและทิศทางที่ปลายแขนกลของแขนกลทั้งสองตำแหน่งและทิศทางที่คำนวณได้ถูกส่งไปที่ตัวหาผล



รูปที่ 6.7 ระบบควบคุมแขนกลแฮบติค



รูปที่ 6.8 ระบบควบคุมแขนกลตาม

ตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการ ค่าที่ได้คือตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการให้แขนกลตามเคลื่อนที่ไป ค่าที่ได้นี้จะถูกส่งไปที่คำนวณหาค่ามุมที่มอเตอร์ต้องหมุนไป ค่ามุมที่ได้ก็จะถูกส่งไปที่ตัวควบคุมแบบพีไอดีซึ่งเมื่อรวมกับตัวชดเชยแรงเสียดทานแล้วก็จะส่งไปที่ตัวขยายสัญญาณ จากนั้นจึงส่งไปที่มอเตอร์ของแขนกลตามต่อไป

บทที่ 7

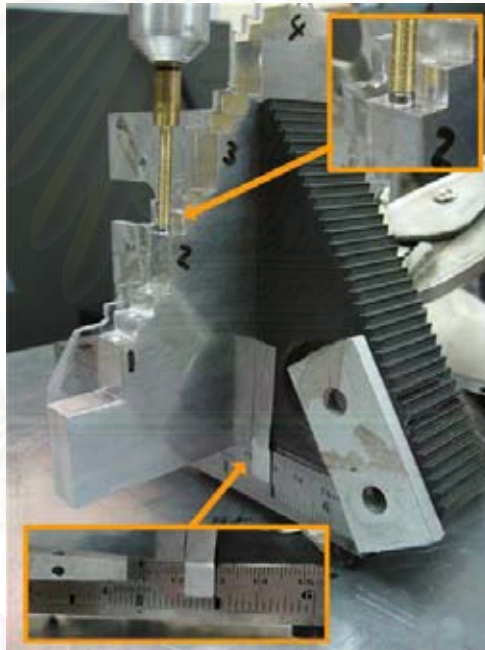
การทดสอบแขนกลแฮบติคและแขนกลตาม

7.1 การทดสอบแขนกลแฮบติค

การทดสอบแขนกลแฮบติคในงานวิจัยนี้จะเป็นการทดสอบความแม่นยำของแขนกลแฮบติคและการทดสอบการสร้างแรงโต้ตอบกับผู้ควบคุม

7.1.1 การทดสอบความแม่นยำของแขนกลแฮบติค

การทดสอบความแม่นยำของแขนกลแฮบติคผู้วิจัยได้ทำการสร้างอุปกรณ์สอบเทียบขึ้นเพื่อใช้ทดสอบความแม่นยำของแขนกลแฮบติค อุปกรณ์สอบเทียบมีลักษณะดังรูปที่ 7.1



รูปที่ 7.1 อุปกรณ์สอบเทียบ

อุปกรณ์สอบเทียบประกอบด้วยแผ่นอลูมิเนียมที่ถูกเจาะรูขนาด 2.5 มิลลิเมตรเพื่อให้คันทันบังคับที่มีลูกเหล็กทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 มิลลิเมตรติดอยู่ที่ปลายคันทันบังคับสามารถวางลงบนรูนี้ได้ตามรูปที่ 7.1 ประกอบด้วยรูแต่ละรูอยู่ห่างกันตามแนวแกน Z เป็นระยะทาง 240 มิลลิเมตร และห่างกันในแนวแกน y เป็นระยะทาง 150 มิลลิเมตร รวมทั้งหมดมี 6 รู อุปกรณ์สอบเทียบสามารถเลื่อนได้ในแนวแกน x โดยมีตัวบอกระยะทางในการทดสอบความแม่นยำของแขนกลแฮบติค อุปกรณ์สอบเทียบจะถูกกำหนดค่าในแนวแกน x เริ่มต้นที่ระยะ 30 มิลลิเมตรจากนั้นก็ให้นำคันทันบังคับมาวางที่ตำแหน่งรูที่ 1 แล้วทำการบันทึกค่า x, y และค่า z นำคันทันบังคับมาวางที่ตำแหน่งรูที่ 2 แล้วบันทึกค่า x, y และค่า z ทำเช่นนี้จนถึงรูที่ 6 ก็เลื่อนอุปกรณ์สอบเทียบใน

แนวแกน x ไปที่ระยะ 40 มิลลิเมตรจากนั้นนำคันทิ้งคัมมาวางที่ตำแหน่งรูที่ 1 ทำแบบเดียวกัน
นี้จนค่าในแนวแกน x เท่ากับ 100 มิลลิเมตรนำค่าที่บันทึกมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการ
คำนวณตามสมการการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้าเพื่อหาค่าความผิดพลาดโดยในการทดสอบ
ความแม่นยำอุปกรณ์สอบเทียบจะถูกนำไปวางบนฐานของแขนกลแฮบติค 4 จุดด้วยกันเพื่อให้
การทดสอบความแม่นยำครอบคลุมพื้นที่การทำงานของแขนกลแฮบติค

ตาราง 7.1 ผลการทดสอบความแม่นยำครั้งที่ 1 ของแขนกลแฮบติคกับอุปกรณ์สอบเทียบ

ขนาดของระยะทางที่หาจาก สมการการเคลื่อนที่แบบไป ข้างหน้า (มิลลิเมตร)	ขนาดของระยะทางที่ได้จาก อุปกรณ์สอบเทียบ (มิลลิเมตร)	ค่าความผิดพลาด (มิลลิเมตร)
33.9047	34.6554	-0.7507
66.9834	69.3108	-2.3274
113.0959	115.5378	-2.4419
127.4841	130.3418	-2.8577
143.3177	145.4510	-2.1332

ตาราง 7.2 ผลการทดสอบความแม่นยำครั้งที่ 2 ของแขนกลแฮบติคกับอุปกรณ์สอบเทียบ

ขนาดของระยะทางที่หาจาก สมการการเคลื่อนที่แบบไป ข้างหน้า (มิลลิเมตร)	ขนาดของระยะทางที่ได้จาก อุปกรณ์สอบเทียบ (มิลลิเมตร)	ค่าความผิดพลาด (มิลลิเมตร)
35.0540	34.6554	0.3986
70.8955	69.3108	1.5846
116.2538	115.5378	0.7159
128.4168	130.3418	-1.9250
144.0896	145.4510	-1.3613

ตาราง 7.3 ผลการทดสอบความแม่นยำครั้งที่ 3 ของแขนกลแฮบติดกับอุปกรณ์สอบเทียบ

ขนาดของระยะทางที่หาจาก สมการการเคลื่อนที่แบบไป ข้างหน้า (มิลลิเมตร)	ขนาดของระยะทางที่ได้จาก อุปกรณ์สอบเทียบ (มิลลิเมตร)	ค่าความผิดพลาด (มิลลิเมตร)
34.3647	34.6554	-0.2906
69.2726	69.3108	-0.0382
115.1264	115.5378	-0.4114
129.9504	130.3418	-0.3913
144.2508	145.4510	-1.200

ตาราง 7.4 ผลการทดสอบความแม่นยำครั้งที่ 4 ของแขนกลแฮบติดกับอุปกรณ์สอบเทียบ

ขนาดของระยะทางที่หาจาก สมการการเคลื่อนที่แบบไป ข้างหน้า (มิลลิเมตร)	ขนาดของระยะทางที่ได้จาก อุปกรณ์สอบเทียบ (มิลลิเมตร)	ค่าความผิดพลาด (มิลลิเมตร)
34.0682	34.6554	-0.5871
67.8585	69.3108	-1.4523
113.3901	115.5378	-2.1477
127.7647	130.3418	-2.5770
144.6117	145.4510	-0.8392

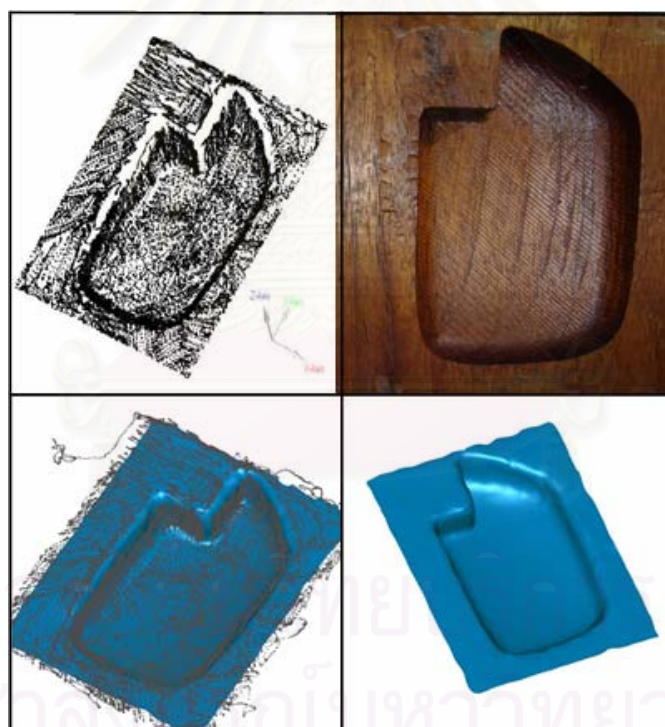
ค่าความแม่นยำโดยเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 1.131 มิลลิเมตร

หลังจากหาค่าความแม่นยำของแขนกลแฮบติดแล้วก็ได้การทดสอบการใช้งานจริงกับชิ้นงานจริงที่ต้องการ ที่ด้านปลายของคัมบังคัมมีลูกเหล็กทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 มิลลิเมตร ติดอยู่สาเหตุที่ต้องใช้ลูกเหล็กทรงกลมเพื่อให้การใช้งานแขนกลแฮบติดมีความสะดวกเนื่องจาก

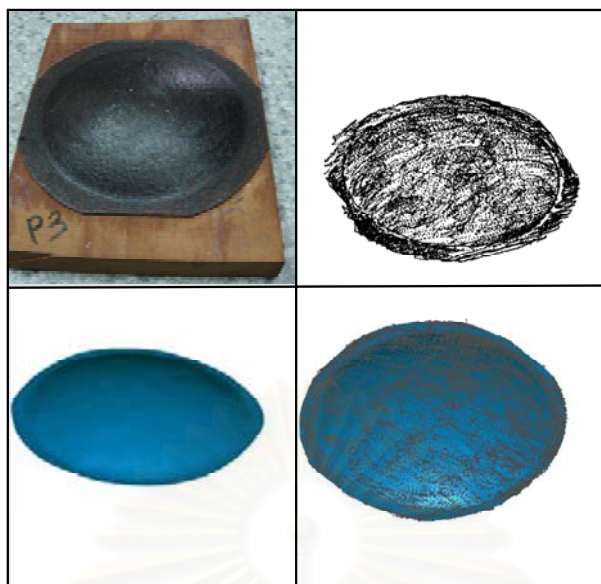
ผู้ควบคุมต้องลากคัตเตอร์บังคับไปบนพื้นผิวชิ้นงาน ลูกเหล็กทรงกลมช่วยลดแรงเสียดทานและไม่ทำ
ความเสียหายแก่พื้นผิวของชิ้นงานอีกด้วย



รูปที่ 7.2 ชิ้นงานแบบที่ 1 และวิธีการทดสอบ



รูปที่ 7.3 ตำแหน่งของจุดที่วัดได้โดยใช้เซนเซอร์แบบติดและพื้นผิวที่สร้างจากจุดที่วัดได้ของ
ชิ้นงานรูปสบู่

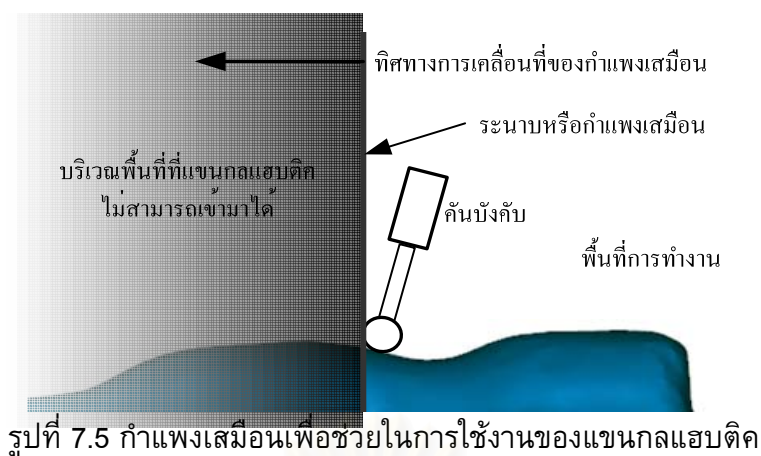


รูปที่ 7.4 ตำแหน่งของจุดที่วัดได้โดยใช้แกนกลแอบติกและพื้นผิวที่สร้างจากจุดที่วัดได้ของ
ชิ้นงานรูปทรงกลม

การทดสอบในรูปที่ 7.2 ผู้ควบคุมจะจับคั่นบังคับในลักษณะเหมือนการจับปากกาทั้งนี้การจับลักษณะนี้ผู้ควบคุมสามารถบังคับคั่นบังคับได้สะดวกและมีความแม่นยำมากกว่าการจับในลักษณะอื่น จากนั้นผู้ควบคุมนำคั่นบังคับไปสัมผัสกับผิวของชิ้นงานแบบที่ 1 โดยใช้แรงในการสัมผัสเพียงเล็กน้อยเพื่อลดความผิดพลาด การเก็บข้อมูลของจุดบนพื้นผิวนั้นแกนกลแอบติกจะเก็บข้อมูลทุกๆ 0.1 วินาที ข้อมูลจุดที่ได้จะถูกนำไปเข้าโปรแกรมจีโอเมจิกเพื่อแสดงผลและสร้างพื้นผิวจากข้อมูลจุดดังที่แสดงในรูปที่ 7.3 ในรูปที่ 7.4 เป็นผลการทดสอบกับชิ้นงานที่ 2 เป็นรูปครึ่งวงกลมแกนกลแอบติกเก็บข้อมูลจุดทุกๆ 0.05 วินาทีเพื่อเพิ่มจำนวนข้อมูลจุดให้มากขึ้น ข้อมูลจุดที่ได้นำไปเข้าโปรแกรมจีโอเมจิกเพื่อสร้างพื้นผิวจากข้อมูลจุด

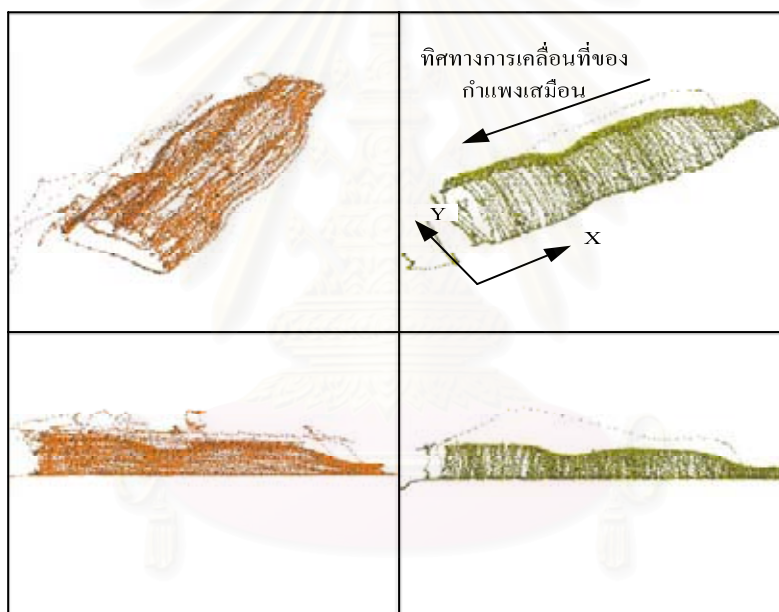
7.1.2 การทดสอบการสร้างแรงโต้ตอบของแกนกลแอบติก

การทดสอบจะเป็นการสร้างความสะดวกสบายในการใช้งานของแกนกลแอบติกโดยการควบคุมแรงที่แกนกลแอบติกที่กระทำต่อผู้ควบคุม เช่นการลดน้ำหนักของแกนกลแอบติก การลดแรงเสียดทานที่ข้อต่อของแกนกลแอบติกและการกำหนดพื้นที่การทำงาน ทั้งหมดนี้สามารถทำได้โดยใช้ตัวควบคุมของแกนกลแอบติกดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 6 ผลการทดสอบการลดน้ำหนัก และลดแรงเสียดทานของแกนกลแอบติกพบว่าผู้ควบคุมสามารถใช้งานแกนกลแอบติกได้ดีขึ้นเมื่อยล้าน้อยลงแกนกลแอบติกให้ความรู้สึกต่อผู้ควบคุมคล้ายกับผู้ควบคุมกำลังจับด้ามปากกาจริงๆ การทดสอบการกำหนดพื้นที่การทำงานให้กับแกนกลแอบติกในงานวิจัยนี้จะเป็นการกำหนดพื้นที่การทำงานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบังคับแกนกลแอบติก พื้นที่การทำงานในที่นี้จะป็นระนาบหรือกำแพงเสมือนที่ตำแหน่งของระนาบจะเลื่อนไปครั้งละ 0.25 มิลลิเมตรทุก 2 วินาทีตามแนวแกน X จากขวามือไปทางด้านซ้ายมือของชิ้นงานต้นแบบพื้นที่การทำงานจะอยู่ทางด้านขวามือของระนาบรายละเอียดดังรูปที่ 7.5



รูปที่ 7.5 กำแพงเสมือนเพื่อช่วยในการใช้งานของแขนกลแอบติด

การกำหนดพื้นที่ทำงานด้วยกำแพงเสมือนดังรูปที่ 7.5 นี้ทำให้ผู้ควบคุมสามารถควบคุมคันบังค้ำให้สัมผัสบนผิวของชิ้นงานพร้อมกับสัมผัสกับกำแพงเสมือนทำให้สามารถเคลื่อนคันบังค้ำเป็นเส้นตรงในแนวแกน Y ได้ดูรูปที่ 7.6 ประกอบ

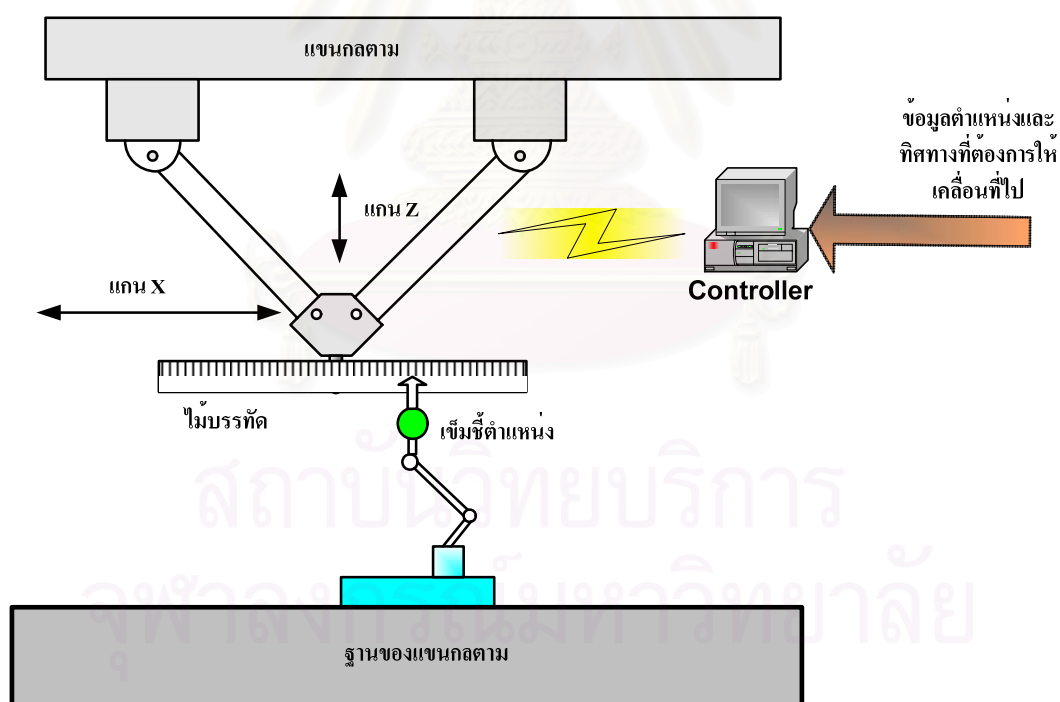


รูปที่ 7.6 ผลการทดสอบการใช้กำแพงเสมือนที่สร้างไว้ล่วงหน้าเพื่อช่วยในการทำงาน

ผลการทดสอบการใช้กำแพงเสมือนพบว่าสามารถทำให้ผู้ควบคุมบังค้ำให้คันบังค้ำสัมผัสบนผิวของชิ้นงานได้สะดวกมากยิ่งขึ้น คันบังค้ำหลุดออกจากผิวงานน้อยลงหรือในทางกลับกันคันบังค้ำสัมผัสกับผิวของชิ้นงานได้มากกว่าเมื่อไม่มีการใช้กำแพงเสมือน รูปที่ 7.6 ด้านซ้ายมือคือผลการทดสอบการใช้งานแขนกลแอบติดโดยไม่มีกำแพงเสมือนจะเห็นได้ว่ามีจุดที่ไม่ได้สัมผัสกับผิวของชิ้นงานที่เป็นรูปขวดเป็นจำนวนมากเมื่อเปรียบเทียบกับรูปด้านขวามือที่มีการกำหนดพื้นที่การทำงานด้วยกำแพงเสมือนที่เลื่อนจากขวามือไปทางซ้ายมือของชิ้นงานครั้งละ 0.25 มิลลิเมตรทุก ๆ 6 วินาที ซึ่งมีจุดที่ไม่ได้สัมผัสกับผิวของชิ้นงานน้อยกว่า

7.2 การทดสอบแขนกลแฮบติคและแขนกลตาม

การทดสอบแขนกลแฮบติคและแขนกลตาม จะเป็นการทดสอบความแม่นยำโดยรวมของทั้งระบบซึ่งประกอบด้วยแขนกลแฮบติค ระบบควบคุมแขนกลแฮบติค ระบบควบคุมแขนกลตาม และแขนกลตาม การทดสอบจะทำโดยผู้ควบคุมเคลื่อนคัมบังคัมของแขนกลแฮบติคไปยังตำแหน่งที่รู้ค่าตำแหน่งที่แน่นอนขณะเดียวกันแขนกลตามก็จะเคลื่อนที่ตามแขนกลแฮบติค ตำแหน่งที่แขนกลตามเคลื่อนที่ไปหาได้จากการวัดระยะที่ปลายแขนของแขนกลตามเทียบกับตำแหน่งเริ่มต้นของแขนกลตามดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 6 เรื่องการตั้งตำแหน่งเริ่มต้นของแขนกลตาม ในงานวิจัยนี้จะวัดตำแหน่งที่ปลายแขนของแขนกลตามด้วยไม้บรรทัดเหล็กโดยจะติดไม้บรรทัดเหล็กไว้ที่ปลายแขนกลตามในแนวแกน X, Y และ Z ที่ฐานของแขนกลตามติดตั้งเข็มชี้ตำแหน่งที่แขนกลเคลื่อนที่ไประยะเอียงดูรูปที่ 7.7 ประกอบ ที่แขนกลแฮบติคตำแหน่งที่แขนกลแฮบติคเคลื่อนที่ไปหาได้จากอุปกรณ์สอบเทียบดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 7.1 การทดสอบจะทดสอบทีละแกนโดยทดสอบความแม่นยำในแนวแกน X ก่อนและตามด้วยแนวแกน Y และ Z ตามลำดับ ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 7.5 ถึง 7.7



รูปที่ 7.7 การวัดตำแหน่งปลายแขนกลตาม

ตารางที่ 7.5 ผลการทดสอบความแม่นยำของแขนกลแฮบติกและแขนกลตามในแนวแกน X

ระยะทางของแขนกลแฮบติก ที่เคลื่อนที่ไป (มิลลิเมตร)	ระยะทางที่แขนกลตาม เคลื่อนที่ไป (มิลลิเมตร)	ค่าความผิดพลาด (มิลลิเมตร)
10	10.5	0.5
20	20.5	0.5
30	30.1	0.1
40	41.7	1.7
50	51.7	1.7
60	60.2	0.2
70	70.2	0.2
80	81.5	1.5
90	91.2	1.2
100	101.5	1.5
	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยใน แนวแกน X (มิลลิเมตร)	0.74

ตารางที่ 7.6 ผลการทดสอบความแม่นยำของแขนกลแฮบติกและแขนกลตามในแนวแกน Y

ระยะทางของแขนกลแฮบติก ที่เคลื่อนที่ไป (มิลลิเมตร)	ระยะทางที่แขนกลตาม เคลื่อนที่ไป (มิลลิเมตร)	ค่าความผิดพลาด (มิลลิเมตร)
10	9.0	1.0
20	19.0	1.0
30	29.5	0.5

40	39.0	1.0
50	49.0	1.0
60	58.6	1.4
70	68.6	1.4
80	80.5	0.5
90	88.5	1.5
100	99.5	0.5
	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยใน แนวแกน Y (มิลลิเมตร)	1.04

ตารางที่ 7.7 ผลการทดสอบความแม่นยำของแขนกลแฮบติกและแขนกลตามในแนวแกน Z

ระยะทางของแขนกลแฮบติก ที่เคลื่อนที่ไป (มิลลิเมตร)	ระยะทางที่แขนกลตาม เคลื่อนที่ไป (มิลลิเมตร)	ค่าความผิดพลาด (มิลลิเมตร)
10	10.1	0.1
20	20.2	0.1
30	30.2	0.2
40	40.5	0.5
50	50.5	0.5
	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยใน แนวแกน Z (มิลลิเมตร)	0.28

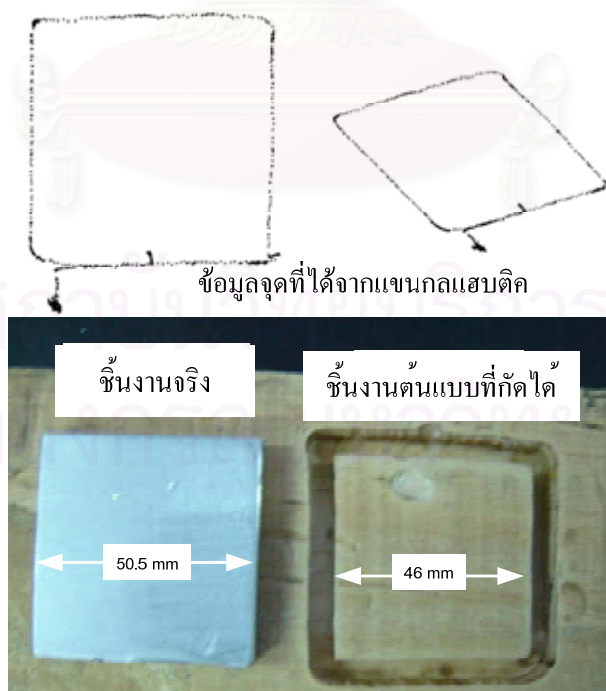
จากการทดสอบค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในแนวแกน X มีค่า 0.74 มิลลิเมตร ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในแนวแกน Y มีค่า 1.04 มิลลิเมตร ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในแนวแกน Z มีค่าเฉลี่ย 0.28 มิลลิเมตร

7.3 การทดสอบการกัดเซาะชิ้นงาน

การทดสอบการกัดเซาะชิ้นงานจะประกอบไปด้วยการนำชิ้นงานจริงที่ต้องการสร้างชิ้นงานต้นแบบมาวางบนฐานของแขนกลแอบติค ที่คั่นบังคับของแขนกลแอบติคมีลูกเหล็กทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 3.5 มิลลิเมตรติดอยู่ จากนั้นนำวัตถุที่ จะใช้ทำชิ้นงานต้นแบบมาวางบนฐานของแขนกลตาม วัตถุที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นไม้หรือโฟมเป็นหลัก จากนั้นผู้ควบคุมก็จับคั่นบังคับไปสัมผัสกับผิวของชิ้นงานจริงจนทั่ว แขนกลตามก็จะเคลื่อนที่กัดเซาะชิ้นงานต้นแบบออกมา ดอกกัดที่ใช้ในการกัดเซาะชิ้นงานต้นแบบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 6 มิลลิเมตร เพื่อเพิ่มความสะดวกสบายให้กับผู้ควบคุมแขนกลแอบติคในการทดสอบ แขนกลแอบติคจะถูกควบคุมเพื่อลดแรงเสียด ลดน้ำหนักและใช้กำแพงเสมือนดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 7.1.2 และในการวัดขนาดของชิ้นงานต้นแบบที่สร้างได้จะต้องนำขนาดของลูกเหล็กทรงกลมและขนาดของดอกกัดมาพิจารณาด้วย

7.3.1 ผลการทดสอบการกัดเซาะโดยใช้ชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยม

เป็นการทดสอบการสร้างชิ้นงานต้นแบบจากชิ้นงานจริงที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 50.5 มิลลิเมตรเมื่อชดเชยขนาดของลูกเหล็กทรงกลมและขนาดของดอกกัดแล้วชิ้นงานจริงจะมีขนาดเท่ากับ 48 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้ชิ้นงานทำต้นแบบคือไม้ ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 7.8 ขนาดของชิ้นงานต้นแบบรูปสี่เหลี่ยมที่กัดได้มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 46 มิลลิเมตรมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 2 มิลลิเมตร

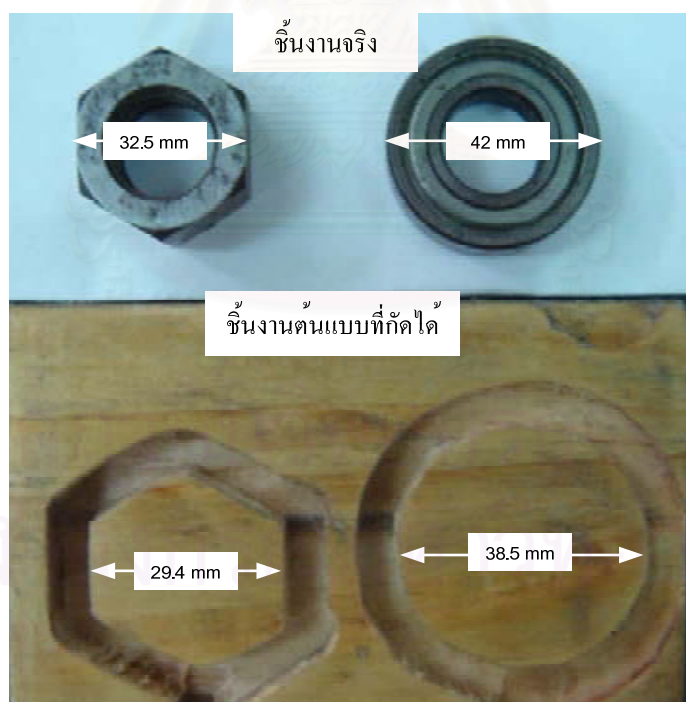


รูปที่ 7.8 รูปข้อมูลจุดจากชิ้นงานรูปสี่เหลี่ยมที่ได้จากแขนกลแอบติคและชิ้นงานต้นแบบที่กัดได้จากแขนกลตาม

7.3.2 ผลการทดสอบการกัดเซาะโดยใช้ชิ้นงานรูปหกเหลี่ยมและวงกลม

เป็นการทดสอบการสร้างชิ้นงานต้นแบบจากชิ้นงานจริงที่มีลักษณะเป็นรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 42 มิลลิเมตรเมื่อชดเชยขนาดของลูกเหล็กทรงกลมและขนาดของดอกกัดแล้วชิ้นงานจริงจะมีขนาดเท่ากับ 39.5 มิลลิเมตรและรูปหกเหลี่ยมขนาด 32.5 มิลลิเมตรเมื่อชดเชยขนาดของลูกเหล็กทรงกลมและขนาดของดอกกัดแล้วชิ้นงานจริงจะมีขนาดเท่ากับ 30 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้ทำชิ้นงานต้นแบบคือไม้ ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 7.9 ขนาดของชิ้นงานต้นแบบรูปวงกลมที่กัดได้มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 38.5 มิลลิเมตรมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ชิ้นงานต้นแบบรูปหกเหลี่ยมที่กัดได้มีค่าโดยเฉลี่ยเท่ากับ 29.4 มิลลิเมตรมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 0.6 มิลลิเมตร

ข้อมูลจุดที่ได้จากแขนกลแฮบติค

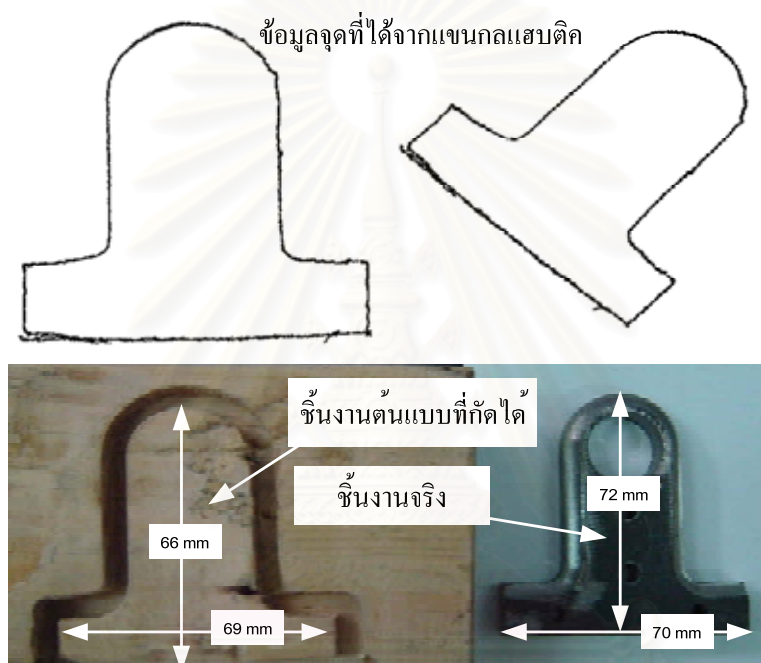


รูปที่ 7.9 รูปข้อมูลจุดจากชิ้นงานรูปหกเหลี่ยมและวงกลมที่ได้จากแขนกลแฮบติคและชิ้นงานต้นแบบที่กัดได้จากแขนกลตาม

7.3.3 ผลการทดสอบการกัดเซาะโดยใช้ชิ้นงานที่เป็นชิ้นส่วนข้อต่อแบบยูนิเวอร์

แซล

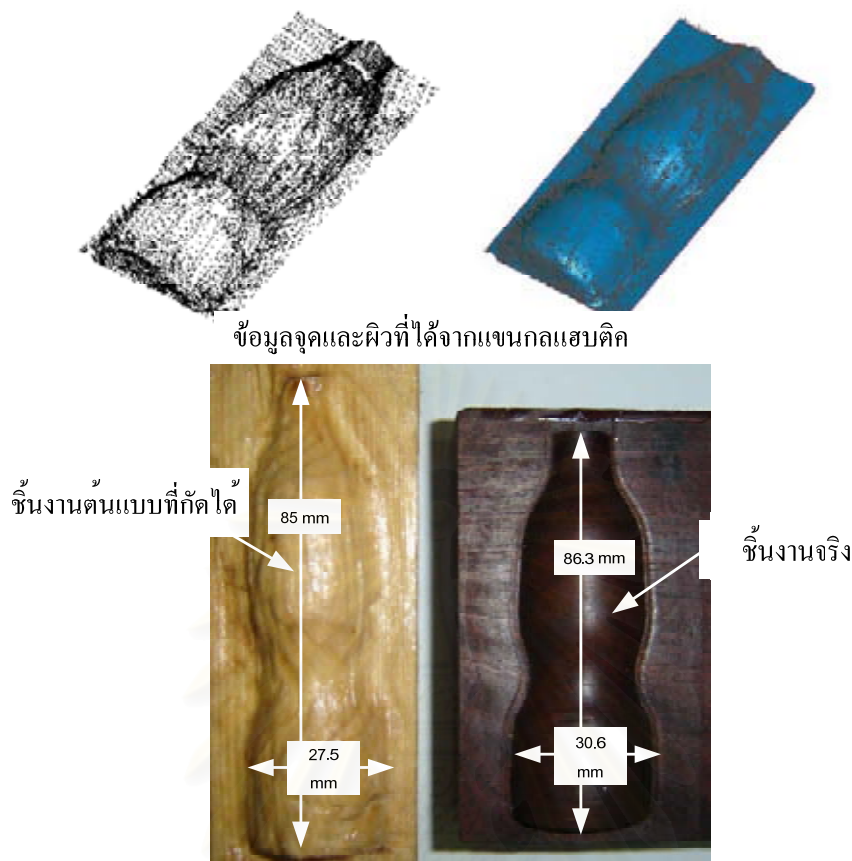
เป็นการทดสอบการสร้างชิ้นงานต้นแบบจากชิ้นงานจริงที่เป็นชิ้นส่วนข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซลเมื่อชดเชยขนาดของลูกเหล็กทรงกลมและขนาดของดอกกัดแล้วชิ้นงานจริงจะมีขนาดความสูงเท่ากับ 69.5 มิลลิเมตร ความกว้างเท่ากับ 67.5 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้ทำชิ้นงานต้นแบบคือไม้ ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 7.10 ขนาดของชิ้นงานต้นแบบที่กัดได้มีค่าความสูงโดยเฉลี่ยเท่ากับ 66 มิลลิเมตรมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 3.5 มิลลิเมตรค่าความกว้างโดยเฉลี่ยเท่ากับ 69 มิลลิเมตรมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร



รูปที่ 7.10 รูปข้อมูลจุดจากชิ้นงานที่เป็นชิ้นส่วนข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซลที่ได้จากแขนกลแฮบติค และชิ้นงานต้นแบบที่กัดได้จากแขนกลตาม

7.3.4 ผลการทดสอบการกัดเซาะโดยใช้ชิ้นงานรูปขวดนูน

เป็นการทดสอบการสร้างชิ้นงานต้นแบบจากชิ้นงานจริงที่มีลักษณะเป็นรูปขวดนูนเมื่อชดเชยขนาดของลูกเหล็กทรงกลมและขนาดของดอกกัดแล้วชิ้นงานจริงจะมีขนาดความสูงเท่ากับ 83.8 มิลลิเมตร ความกว้างเท่ากับ 28.1 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้ทำชิ้นงานต้นแบบคือไม้ ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 7.11 ขนาดของชิ้นงานต้นแบบที่กัดได้มีค่าความสูงโดยเฉลี่ยเท่ากับ 85 มิลลิเมตรมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 1.2 มิลลิเมตรค่าความกว้างโดยเฉลี่ยเท่ากับ 27.5 มิลลิเมตรมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 0.6 มิลลิเมตร



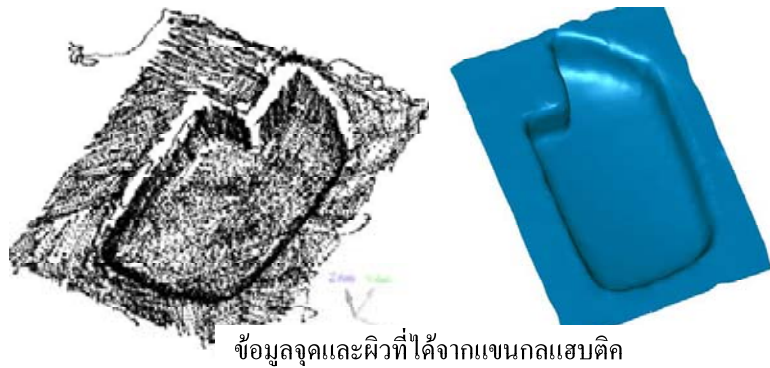
รูปที่ 7.11 รูปข้อมูลจุดจากชิ้นงานรูปขวดนูนที่ได้จากแขนกลแฮบติคและชิ้นงานต้นแบบที่กัดได้จากแขนกลตาม

7.3.5 ผลการทดสอบการกัดเซาะโดยใช้ชิ้นงานรูปสบู

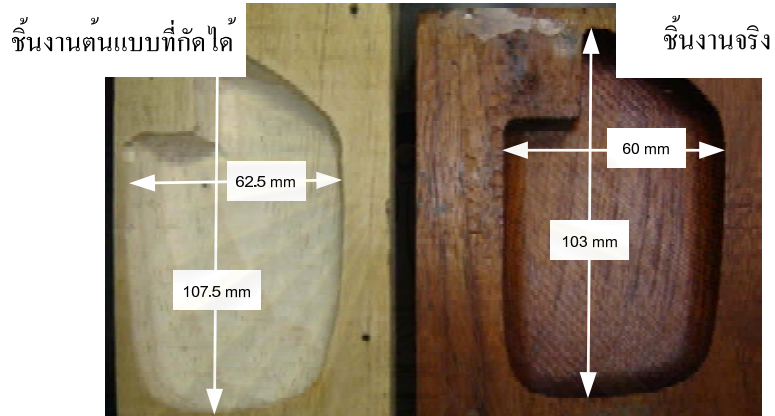
เป็นการทดสอบการสร้างชิ้นงานต้นแบบจากชิ้นงานจริงที่มีลักษณะเป็นรูปสบู่เมื่อชดเชยขนาดของลูกเหล็กทรงกลมและขนาดของดอกกัดแล้วชิ้นงานจริงจะมีขนาดความสูงเท่ากับ 105.5 มิลลิเมตร ความกว้างเท่ากับ 62.5 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้ทำชิ้นงานต้นแบบคือไม้ ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 7.12 ขนาดของชิ้นงานต้นแบบที่กัดได้มีค่าความสูงโดยเฉลี่ยเท่ากับ 107.5 มิลลิเมตรมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 2 มิลลิเมตรค่าความกว้างโดยเฉลี่ยเท่ากับ 62.5 มิลลิเมตรมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 0 มิลลิเมตร

7.3.6 ผลการทดสอบการกัดเซาะโดยใช้ชิ้นงานรูปก้นขวด

เป็นการทดสอบการสร้างชิ้นงานต้นแบบจากชิ้นงานจริงที่มีลักษณะเป็นรูปก้นขวดเมื่อชดเชยขนาดของลูกเหล็กทรงกลมและขนาดของดอกกัดแล้วชิ้นงานจริงจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 54 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้ทำชิ้นงานต้นแบบคือไม้ ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 7.13 ขนาดของชิ้นงานต้นแบบที่กัดได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยเท่ากับ 54.8 มิลลิเมตรมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร



ข้อมูลจุดและผิวที่ได้จากเซนกลแฮบติค

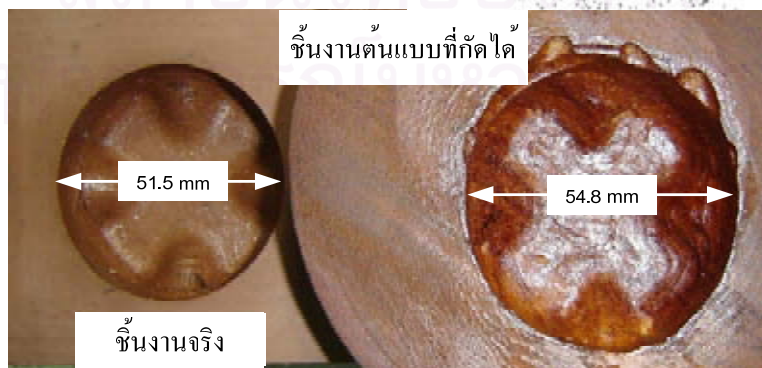
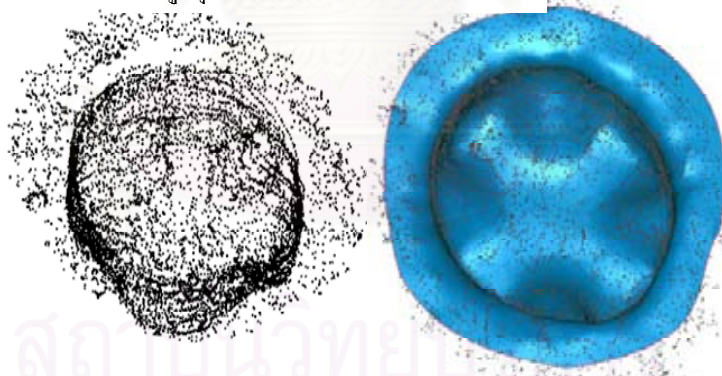


ชิ้นงานต้นแบบที่กัดได้

ชิ้นงานจริง

รูปที่ 7.12 รูปข้อมูลจุดจากชิ้นงานรูปสบู่นี้ที่ได้จากเซนกลแฮบติคและชิ้นงานต้นแบบที่กัดได้จาก
เซนกลตาม

ข้อมูลจุดและผิวที่ได้จากเซนกลแฮบติค



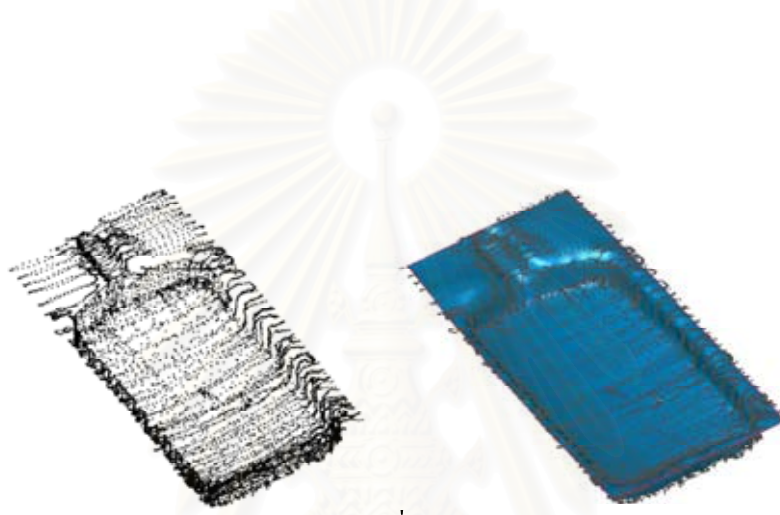
ชิ้นงานต้นแบบที่กัดได้

ชิ้นงานจริง

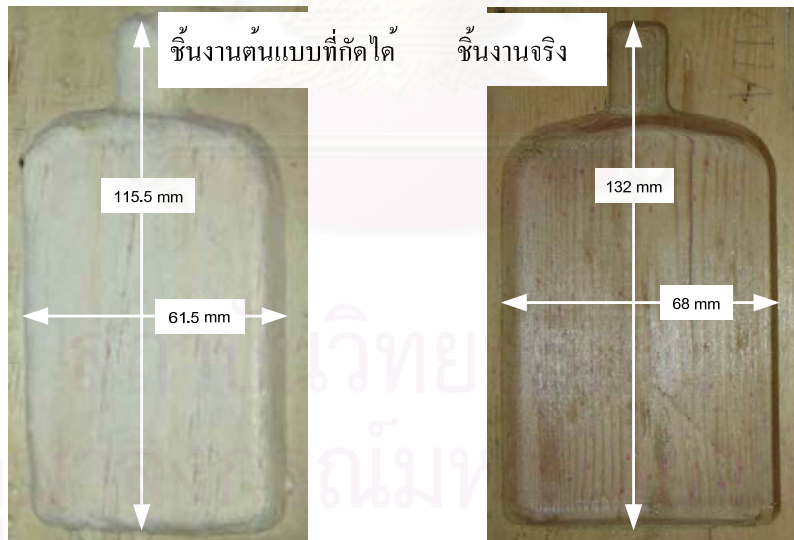
รูปที่ 7.13 รูปข้อมูลจุดจากชิ้นงานรูปกันขวดที่ได้จากเซนกลแฮบติคและชิ้นงานต้นแบบที่กัดได้
จากเซนกลตาม

7.3.7 ผลการทดสอบการกัดเซาะโดยใช้ชิ้นงานรูปขวดทรงแบน

เป็นการทดสอบการสร้างชิ้นงานต้นแบบจากชิ้นงานจริงที่มีลักษณะเป็นรูปขวดแบนเนื่องจากชิ้นงานที่ใช้มีขนาดใหญ่กว่าวัสดุที่จะใช้ทำชิ้นงานต้นแบบดังนั้นจึงได้ทำการลดขนาดของชิ้นงานจริงลง 15 เปอร์เซ็นต์และเมื่อชดเชยขนาดของลูกเหล็กทรงกลมและขนาดของดอกกัดแล้วชิ้นงานจริงจะมีขนาดความสูงเท่ากับ 114.3 มิลลิเมตร ความกว้างเท่ากับ 59.9 มิลลิเมตร วัสดุที่ใช้ทำชิ้นงานต้นแบบคือไม้ ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 7.14 ขนาดของชิ้นงานต้นแบบที่กัดได้มีค่าความสูงโดยเฉลี่ยเท่ากับ 115.5 มิลลิเมตรมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 1.2 มิลลิเมตรค่าความกว้างโดยเฉลี่ยเท่ากับ 61.5 มิลลิเมตรมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 1.6 มิลลิเมตร



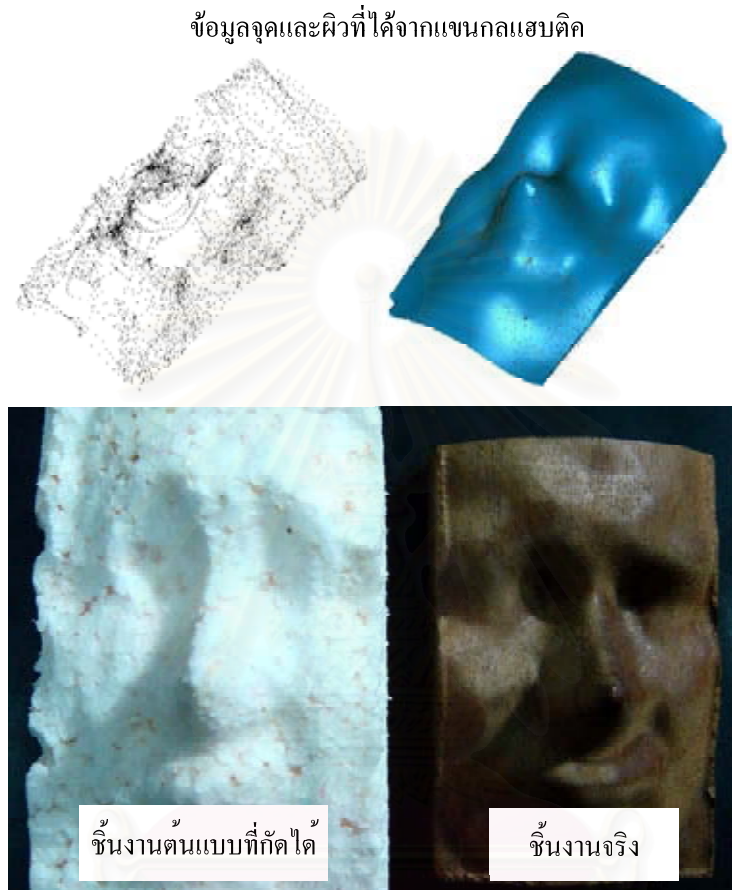
ข้อมูลจุดและผิวที่ได้จากเซนเซอร์แบบสเตอริโอ



รูปที่ 7.14 รูปข้อมูลจุดจากชิ้นงานรูปขวดแบนที่ได้จากเซนเซอร์แบบสเตอริโอและชิ้นงานต้นแบบที่กัดได้จากเซนเซอร์ตาม

7.3.8 ผลการทดสอบการกัดเซาะโดยใช้ชิ้นงานรูปหน้าคน

เป็นการทดสอบการสร้างชิ้นงานต้นแบบจากชิ้นงานจริงที่มีลักษณะเป็นรูปหน้าคน วัสดุที่ใช้ทำต้นแบบคือโฟม ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 7.15



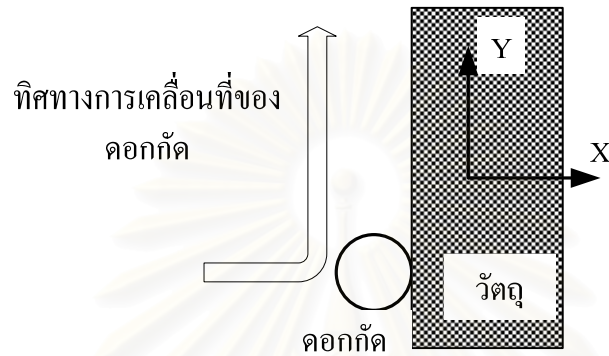
รูปที่ 7.15 รูปข้อมูลจุดจากชิ้นงานรูปหน้าคนที่ได้จากแขนกลแฮบติคและชิ้นงานต้นแบบที่กัดได้จากแขนกลตาม

7.4 การทดสอบการสร้างแรงโต้ตอบของแขนกลแฮบติคขณะที่แขนกลตามกัดเซาะชิ้นงาน

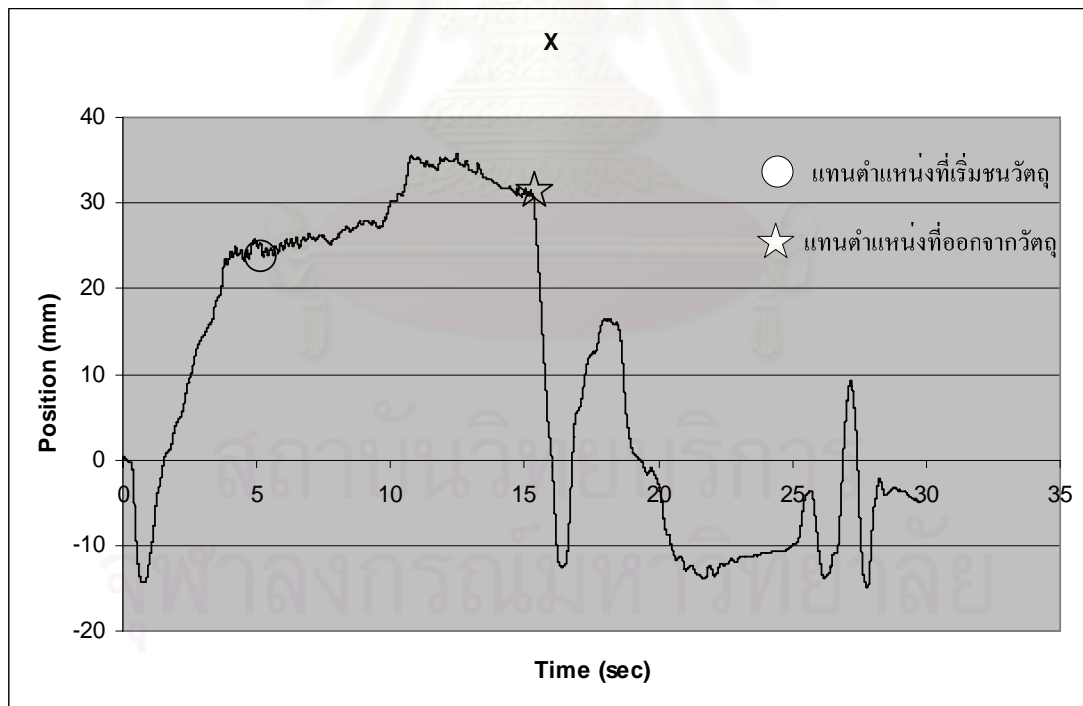
เป็นการทดสอบการสร้างแรงโต้ตอบของแขนกลแฮบติคที่กระทำต่อมือของผู้ควบคุมขณะที่มีการกัดเซาะชิ้นงานอยู่ แรงโต้ตอบที่สร้างขึ้นจะมาจากผลต่างของตำแหน่งปลายแขนของแขนกลทั้งสองรายละเอียดกล่าวไว้ในบทที่ 6 ในการทดสอบแขนกลตามจะกัดเซาะชิ้นงานที่เป็นพลาสติกหรือไม้เนื้อแข็งโดยผู้ควบคุมแขนกลแฮบติคจะบังคับแขนกลแฮบติคเพื่อให้แขนกลตามเคลื่อนที่ตามไปกัดชิ้นงาน และในระบบควบคุมแรงของแขนกลแฮบติคนั้นได้กำหนดให้สร้างแรงโต้ตอบกับมือผู้ควบคุมต่อเมื่อค่าความผิดพลาดของตำแหน่งระหว่างแขนกลทั้งสองมีค่ามากกว่า 2 มิลลิเมตร

7.4.1 การทดสอบแรงโต้ตอบกลับของแขนกลแฮบติกเมื่อแขนกลตามชนวัตถุ

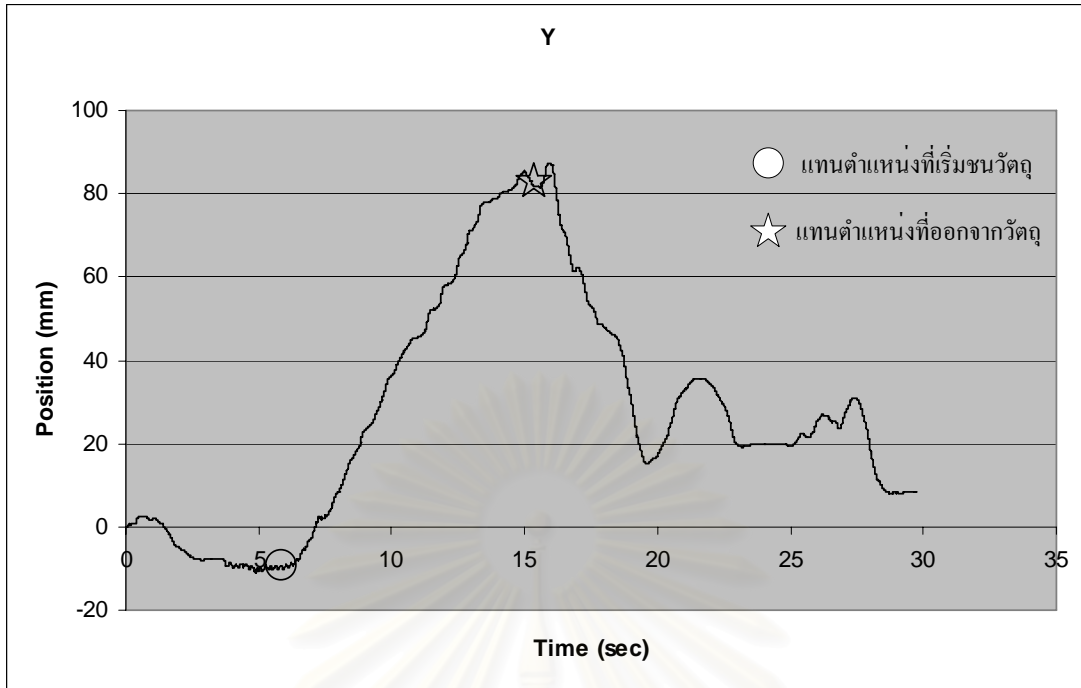
เป็นการทดสอบการสร้างแรงโต้ตอบของแขนกลแฮบติกที่กระทำกับมือของผู้ควบคุมเมื่อบังคับให้แขนกลตามเคลื่อนที่ไปชนวัตถุหรือชิ้นงาน ในการทดสอบจะแบ่งเป็นสองกรณีคือ กรณีแรกบังคับให้แขนกลตามชนวัตถุที่เป็นไม้เนื้อแข็งในทิศทาง X จากนั้นบังคับให้แขนกลตามไถลไปบนผิวของวัตถุตามแนวแกน Y จากรูปที่ 7.16 โดยดอกกัทที่ติดตั้งอยู่บนแขนกลตามจะเป็นส่วนที่ชนวัตถุ



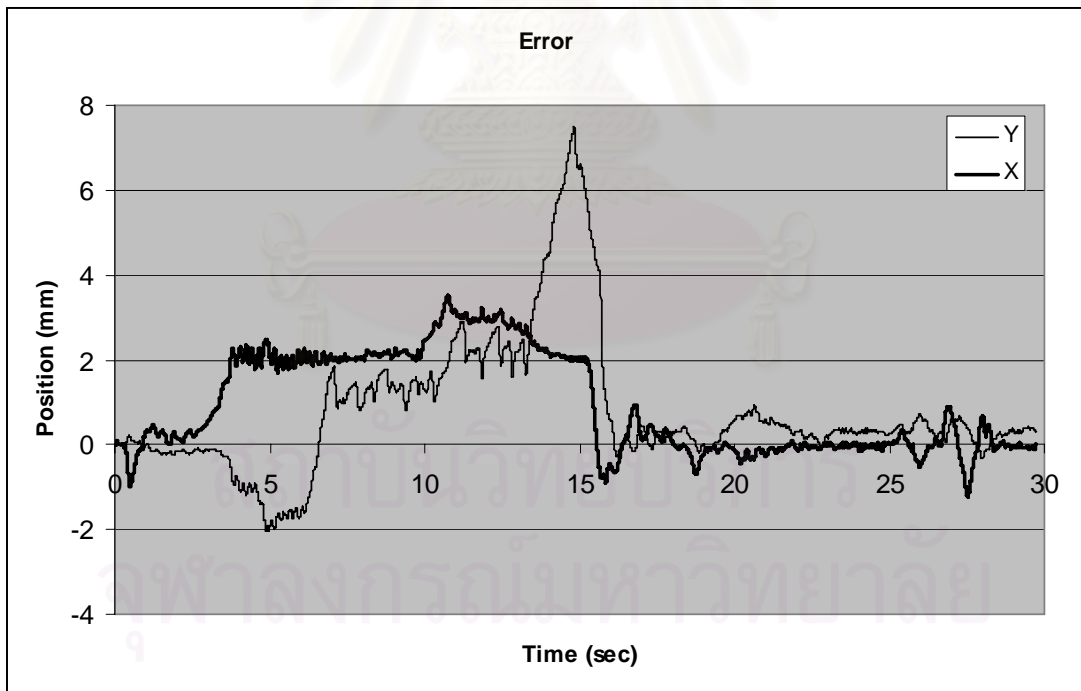
รูปที่ 7.16 การทดสอบแรงโต้ตอบเมื่อแขนกลตามชนวัตถุในแนวแกน X



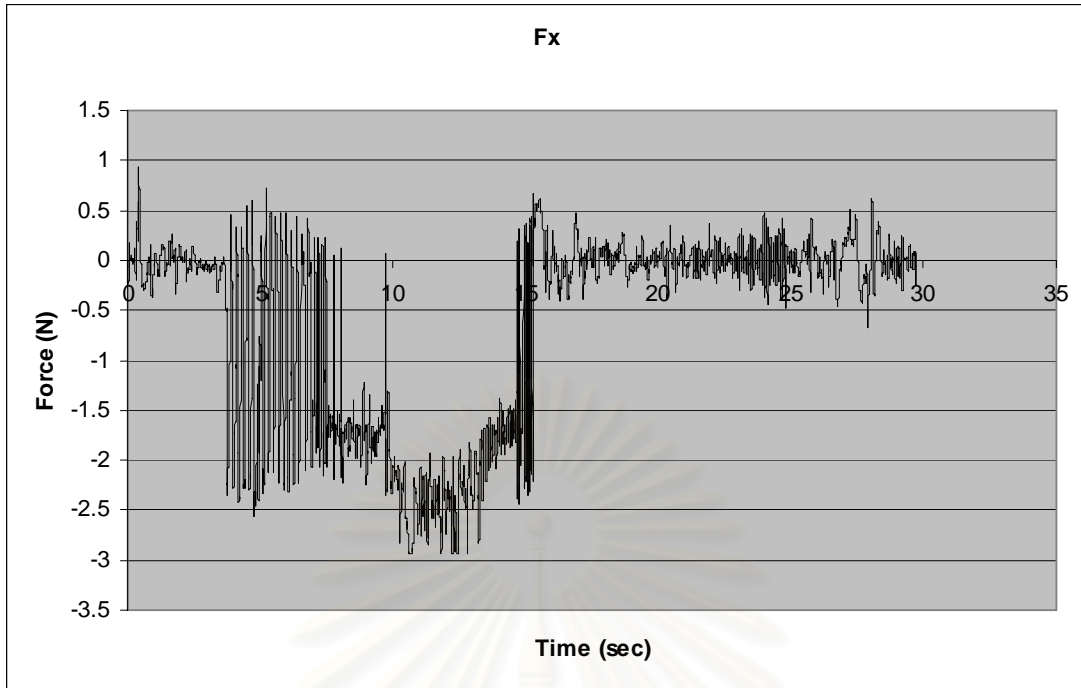
รูปที่ 7.17 กราฟตำแหน่งของแขนกลตามในแนวแกน X



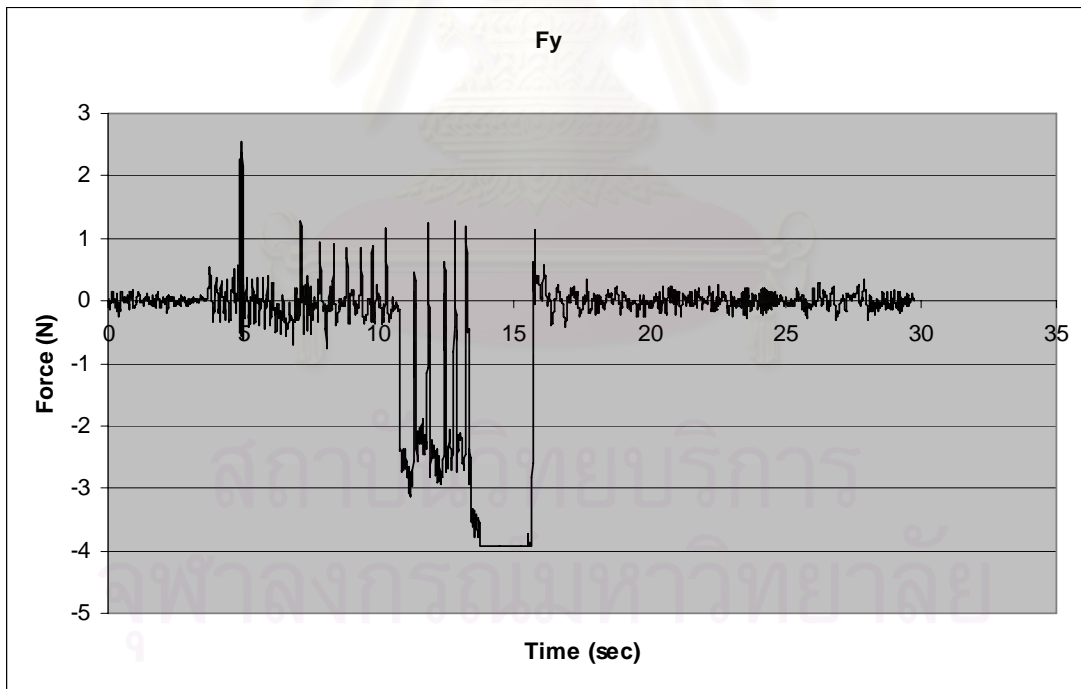
รูปที่ 7.18 กราฟตำแหน่งของแขนกลตามในแนวแกน Y



รูปที่ 7.19 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขนกลแฮบติคกับแขนกลตามในแนวแกน X และ Y



รูปที่ 7.20 แรงโต้ตอบที่แกนกลแสบตติคกระทำต่อมือผู้ควบคุมในแนวแกน X

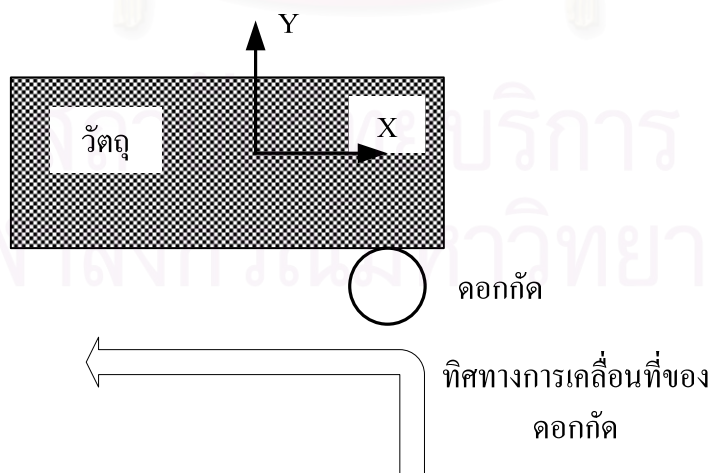


รูปที่ 7.21 แรงโต้ตอบที่แกนกลแสบตติคกระทำต่อมือผู้ควบคุมในแนวแกน Y

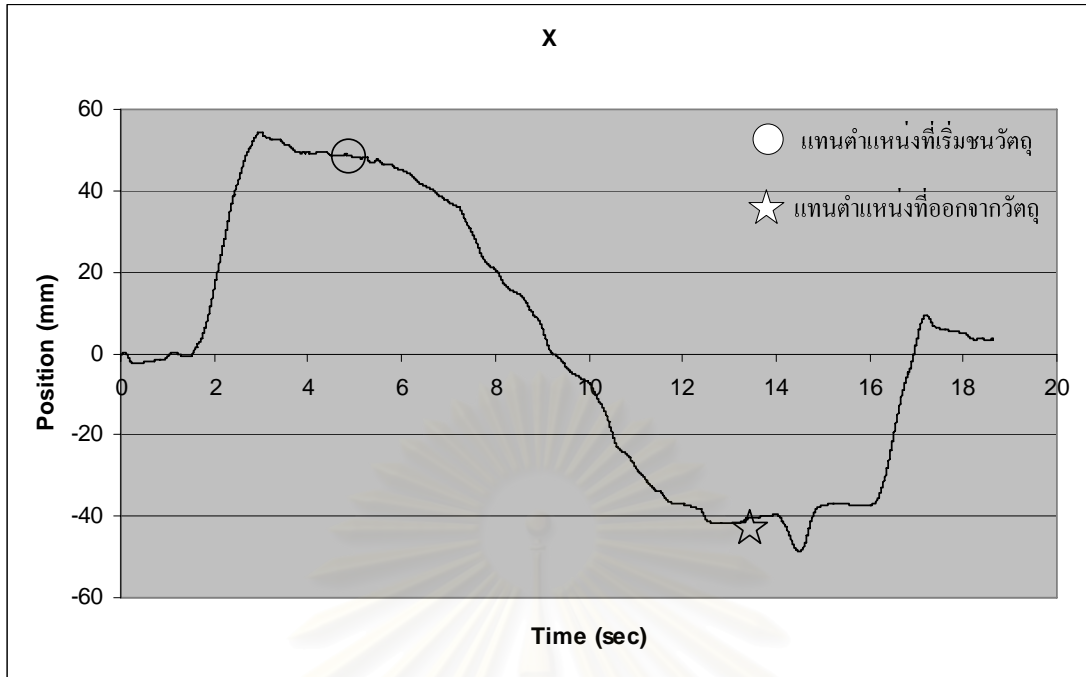
ในขณะที่บังคับให้แขนกลตามเคลื่อนที่โดยที่ยังไม่ชนกับวัตถุนั้นแขนกลตามสามารถเคลื่อนที่ตามแขนกลแสบตติคได้เป็นอย่างดีความผิดพลาดของตำแหน่งระหว่างแขนกลทั้งสองมีค่าไม่เกิน 0.5 มิลลิเมตรดูรูป 7.19 ประกอบ และแขนกลแสบตติคยังไม่สร้างแรงโต้ตอบ

กับมือผู้ควบคุมรูปที่ 7.20 และ 7.21 ประกอบ เมื่อดอกกั๊ดของแขนกลตามเคลื่อนไปชนวัตถุ โดยที่ตำแหน่งเริ่มชนอยู่ที่ 25.6 มิลลิเมตรในแนวแกน X รูปที่ 7.17 ประกอบ และ -5.8 มิลลิเมตรในแนวแกน Y รูปที่ 7.18 ประกอบจะเกิดความผิดพลาดของตำแหน่งระหว่างแขนกลทั้งสองมากขึ้นรูปที่ 7.19 ประกอบเนื่องจากแขนกลตามไม่สามารถเคลื่อนที่ไปในแนวแกน X ได้เพราะมีวัตถุขวางอยู่จนความผิดพลาดของตำแหน่งเพิ่มขึ้นมากกว่า 2 มิลลิเมตรทำให้แขนกลแฮบติคสร้างแรงโต้ตอบกับมือผู้ควบคุมในแนวแกน X ขึ้นทำให้ผู้ควบคุมรู้สึกได้ว่าแขนกลตามกำลังชนวัตถุ ขณะที่แรงโต้ตอบในแนวแกน Y มีค่าน้อยมากเนื่องจากความผิดพลาดในแนวแกน Y ยังมีค่าไม่เกิน 2 มิลลิเมตร จากนั้นผู้ควบคุมก็บังคับให้แขนกลตามเคลื่อนที่ในแนวแกน Y โดยยังคงรักษาแรงกดในแนวแกน X ไว้ ทำให้ตำแหน่งของแขนกลในแนวแกน X มีค่าคงที่โดยประมาณ ขณะที่ตำแหน่งแขนกลตามในแนวแกน Y มีค่ามากขึ้นรูปที่ 7.17 และ 7.18 ประกอบขณะที่เคลื่อนแขนกลตามไปในแนวแกน Y ที่ตำแหน่งในแนวแกน Y เท่ากับ 11 มิลลิเมตรหรือที่เวลา 11 วินาทีนั้นดอกกั๊ดของแขนกลตามได้เจาะเข้าไปในเนื้อไม้ของวัตถุทำให้แขนกลตามเคลื่อนที่ไปในทิศทาง Y ได้ยากขึ้นทำให้ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งระหว่างแขนกลทั้งสองในแนวแกน Y มีค่ามากกว่า 2 มิลลิเมตรทำให้แขนกลแฮบติคสร้างแรงโต้ตอบกับมือผู้ควบคุมรูปที่ 7.21 ประกอบทำให้ผู้ควบคุมเคลื่อนแขนกลแฮบติคได้ยากขึ้นเนื่องจากมีแรงกระทำกับมือของผู้ควบคุมทั้งแนวแกน X และ แกน Y จากนั้นผู้ควบคุมก็บังคับแขนกลตามให้เคลื่อนไปแนวแกน Y ต่อไปจนกระทั่งสิ้นสุดความยาวของวัตถุทำให้ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งระหว่างแขนกลทั้งสองมีค่าน้อยกว่า 2 มิลลิเมตรและแรงโต้ตอบที่แขนกลแฮบติคกระทำต่อมือผู้ควบคุมมีค่าเท่ากับศูนย์

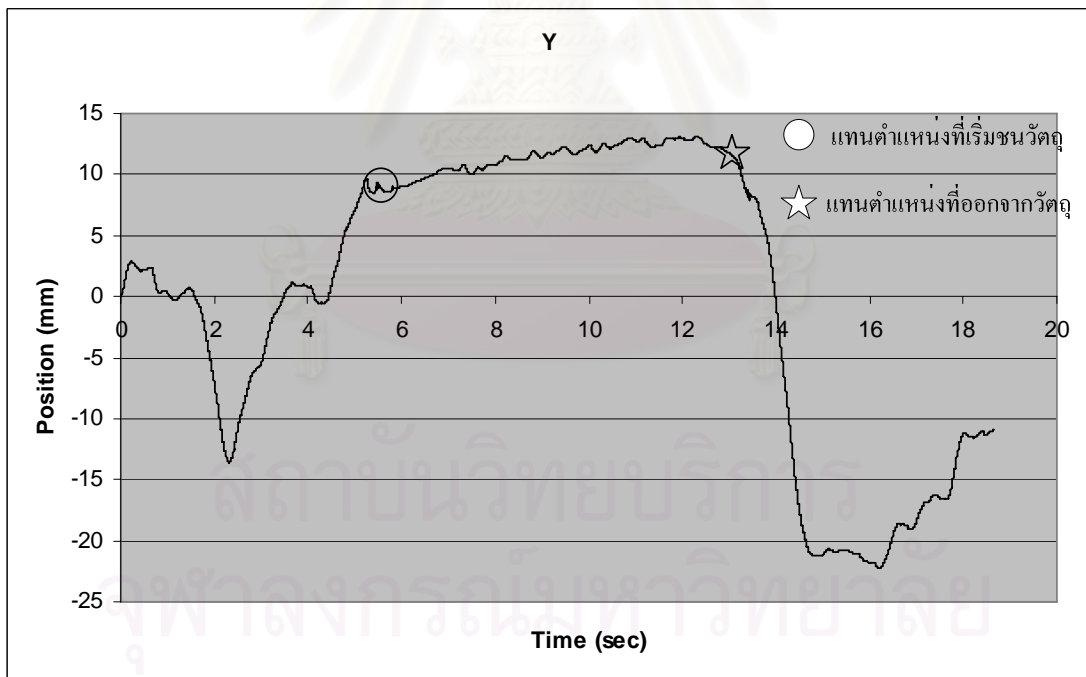
กรณีที่สองบังคับให้แขนกลตามชนวัตถุที่เป็นไม้เนื้อแข็งในทิศทาง Y จากนั้นบังคับให้แขนกลตามไถลไปบนผิวของวัตถุตามแนวแกน X รูปที่ 7.22 ประกอบโดยดอกกั๊ดที่ติดตั้งอยู่บนแขนกลตามจะเป็นส่วนที่ชนวัตถุ



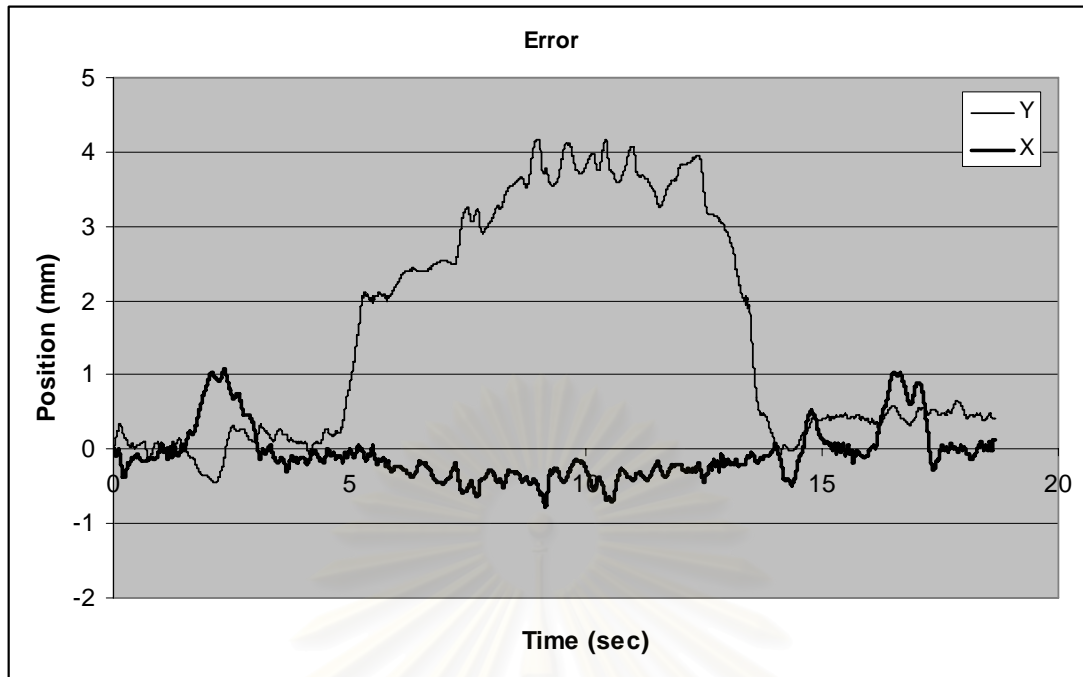
รูปที่ 7.22 การทดสอบแรงโต้ตอบเมื่อแขนกลตามชนวัตถุในแนวแกน Y



รูปที่ 7.23 กราฟตำแหน่งของแขนกลตามในแนวแกน X

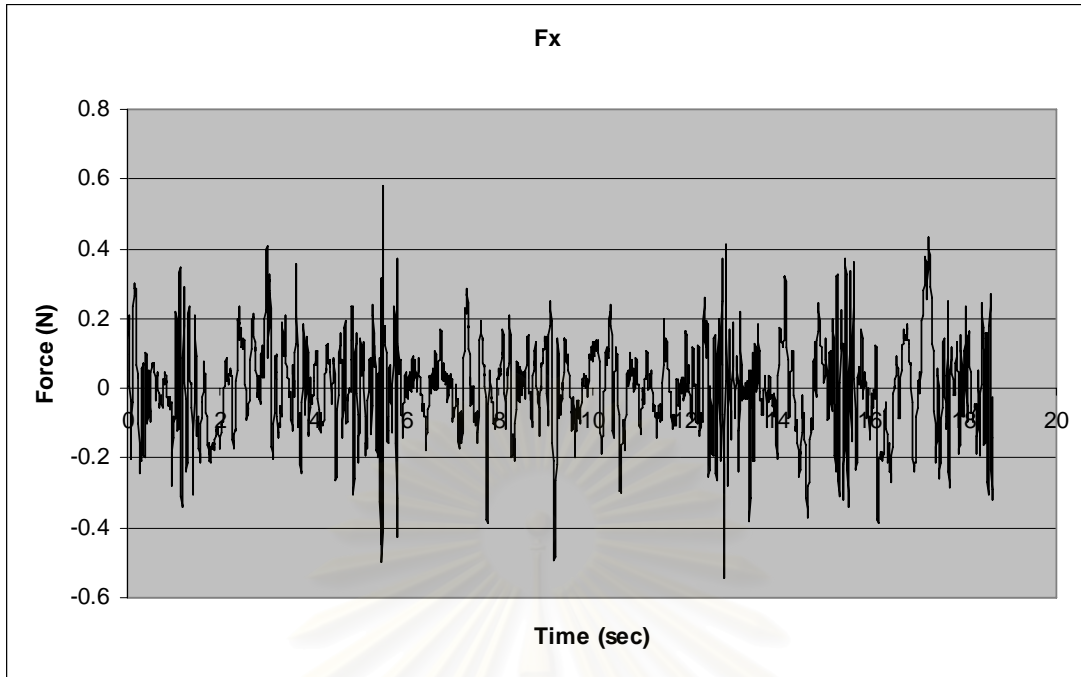


รูปที่ 7.24 กราฟตำแหน่งของแขนกลตามในแนวแกน Y

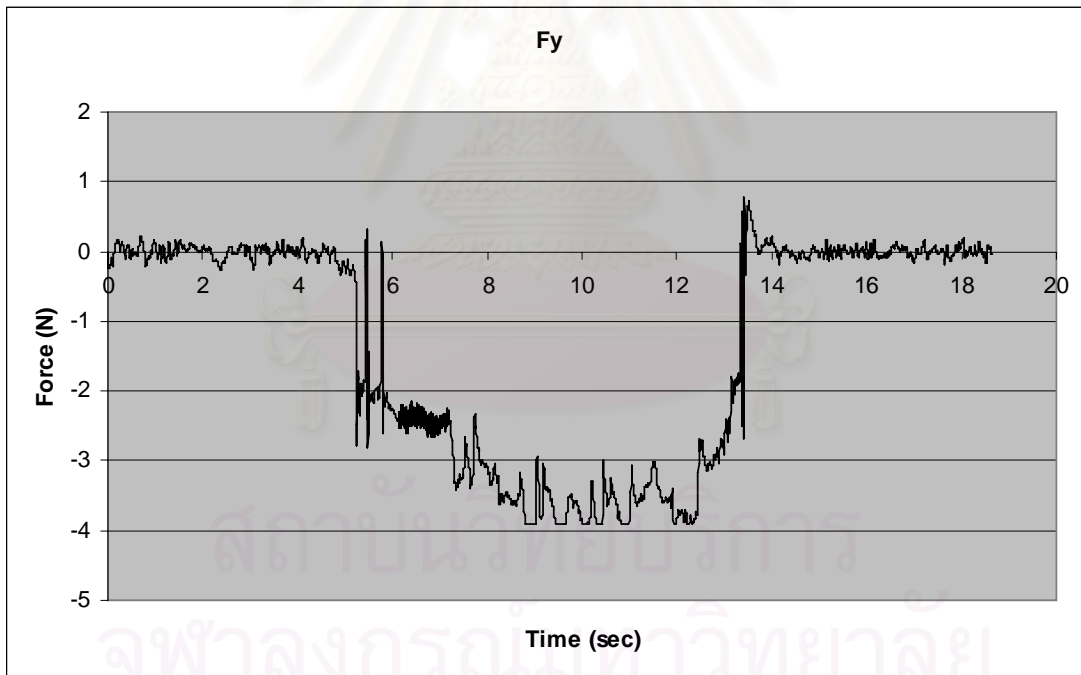


รูปที่ 7.25 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขนกลแฮบติคกับแขนกลตามในแนวแกน X และ Y

การทดสอบในขณะที่บังคับให้แขนกลตามเคลื่อนที่โดยที่ยังไม่ชนกับวัตถุนั้นแขนกลตามสามารถเคลื่อนที่ตามแขนกลแฮบติคได้เป็นอย่างดีความผิดพลาดของตำแหน่งระหว่างแขนกลทั้งสองมีค่าไม่เกิน 1 มิลลิเมตรรูป 7.25 ประกอบ และแขนกลแฮบติคยังไม่สร้างแรงโต้ตอบกับมือผู้ควบคุมรูปที่ 7.26 และ 7.27 ประกอบเมื่อดอกกััดของแขนกลตามเคลื่อนไปชนวัตถุโดยที่ตำแหน่งเริ่มชนอยู่ที่ 48.1 มิลลิเมตรในแนวแกน X รูปที่ 7.23 ประกอบและ 9.14 มิลลิเมตรในแนวแกน Y รูปที่ 7.24 ประกอบจะเกิดความผิดพลาดของตำแหน่งระหว่างแขนกลทั้งสองมากขึ้นรูปที่ 7.25 ประกอบเนื่องจากแขนกลตามไม่สามารถเคลื่อนที่ไปในแนวแกน Y ได้เพราะมีวัตถุขวางอยู่จนความผิดพลาดของตำแหน่งเพิ่มขึ้นมากกว่า 2 มิลลิเมตรทำให้แขนกลแฮบติคสร้างแรงโต้ตอบกับมือผู้ควบคุมในแนวแกน Y ขึ้นทำให้ผู้ควบคุมรู้สึกได้ว่าแขนกลตามกำลังชนวัตถุอยู่ ขณะที่แรงโต้ตอบในแนวแกน X มีค่าน้อยมากเนื่องจากความผิดพลาดในแนวแกน X ยังมีค่าไม่เกิน 2 มิลลิเมตร จากนั้นผู้ควบคุมบังคับให้แขนกลตามเคลื่อนที่ในแนวแกน X โดยยังคงรักษาแรงกดในแนวแกน Y ไว้ ทำให้ตำแหน่งของแขนกลในแนวแกน Y มีค่าคงที่โดยประมาณ ขณะที่ตำแหน่งแขนกลตามในแนวแกน X มีค่ามากขึ้นรูปที่ 7.23 และ 7.24 ประกอบจากนั้นผู้ควบคุมก็บังคับแขนกลตามให้เคลื่อนไปแนวแกน X ต่อไปจนกระทั่งสิ้นสุดความยาวของวัตถุทำให้ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งระหว่างแขนกลทั้งสองมีค่าน้อยกว่า 2 มิลลิเมตรและแรงโต้ตอบที่แขนกลแฮบติคกระทำต่อมือผู้ควบคุมมีค่าเท่ากับศูนย์



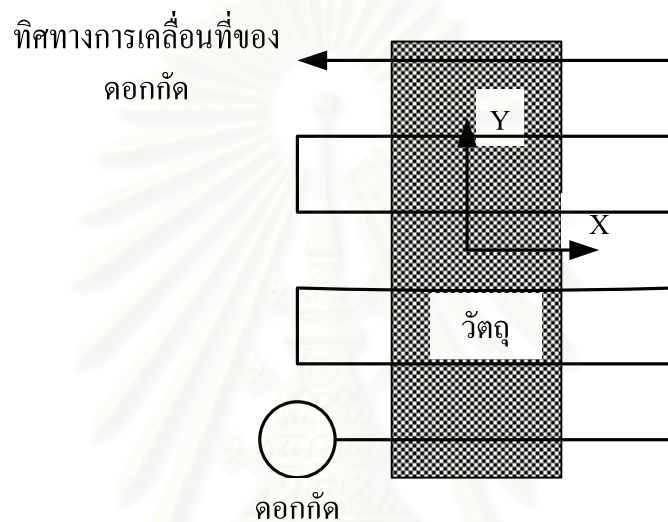
รูปที่ 7.26 แรงโต้ตอบที่แขนกลแฮบติคกระทำต่อมือผู้ควบคุมในแนวแกน X



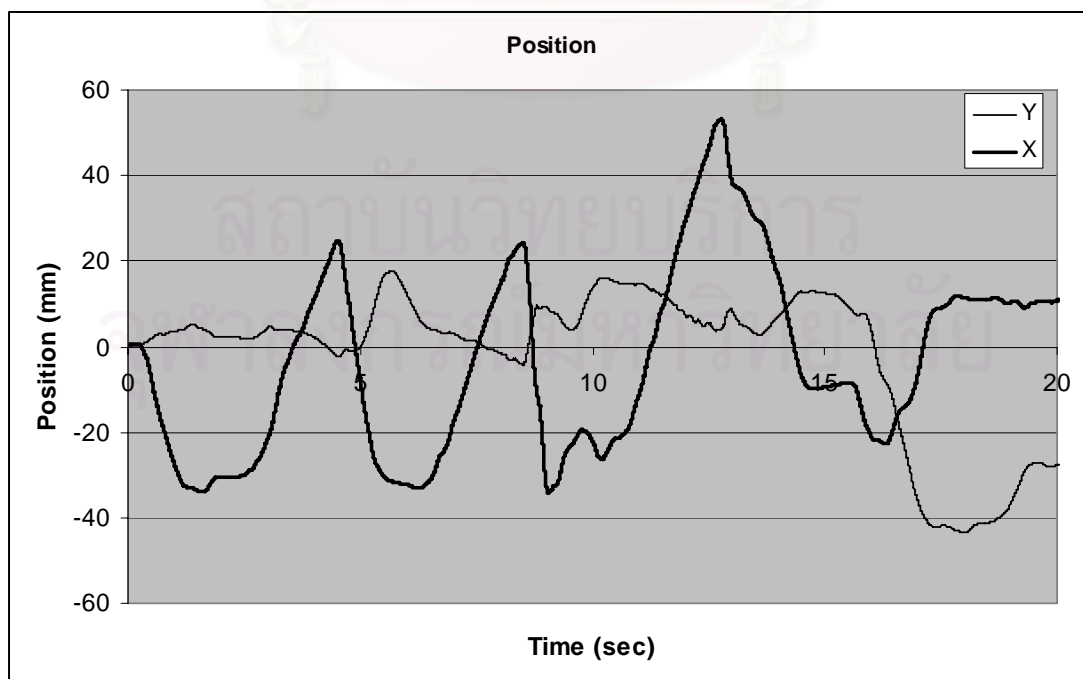
รูปที่ 7.27 แรงโต้ตอบที่แขนกลแฮบติคกระทำต่อมือผู้ควบคุมในแนวแกน Y

7.4.2 การทดสอบแรงโต้ตอบกลับของแขนกลแอสติกเมื่อแขนกลตามกั้ดเซาะ ชั้นงานในแนวแกน X

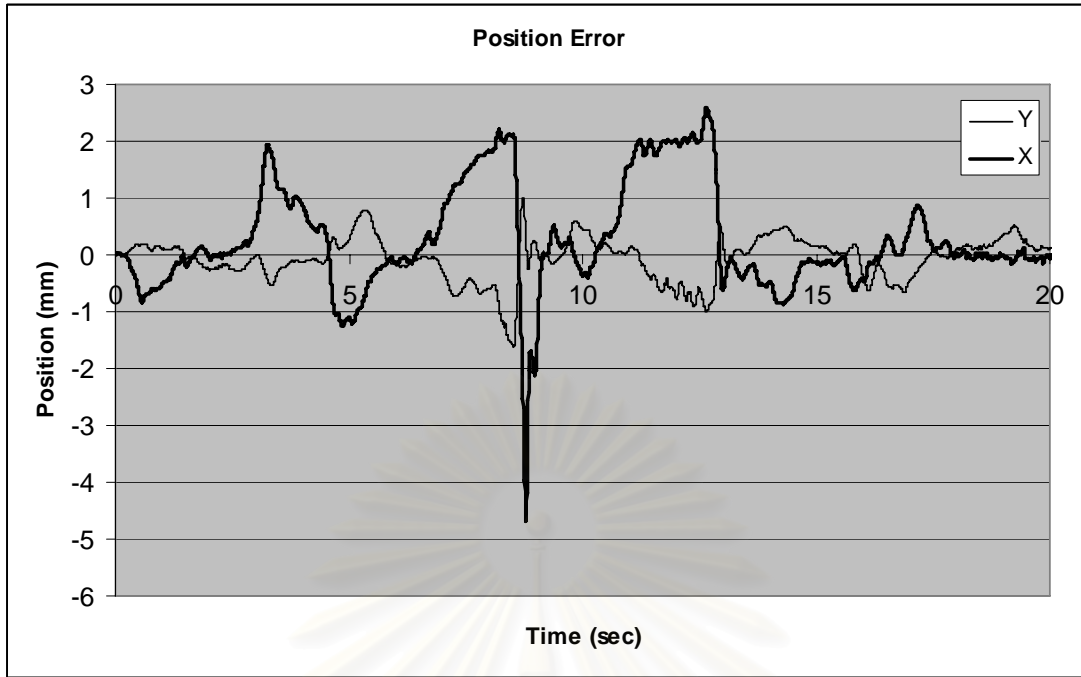
เป็นการทดสอบการสร้างแรงโต้ตอบของแขนกลแอสติกที่กระทำกับมือของผู้ควบคุมเมื่อบังคับให้แขนกลตามเคลื่อนที่ไปกั้ดเซาะชั้นงานที่เป็นพลาสติกโดยมีลักษณะเส้นทางเดินของดอกกั้ดดังรูปที่ 7.28 การทดสอบเริ่มด้วยผู้ควบคุมบังคับให้แขนกลตามเคลื่อนที่ไปกั้ดชั้นงานโดยกั้ดจากซ้ายมือไปทางขวามือของชั้นงานแล้วเคลื่อนกลับจากขวามือมาซ้ายมือ เคลื่อนที่ลักษณะนี้เป็นจำนวนสามรอบ



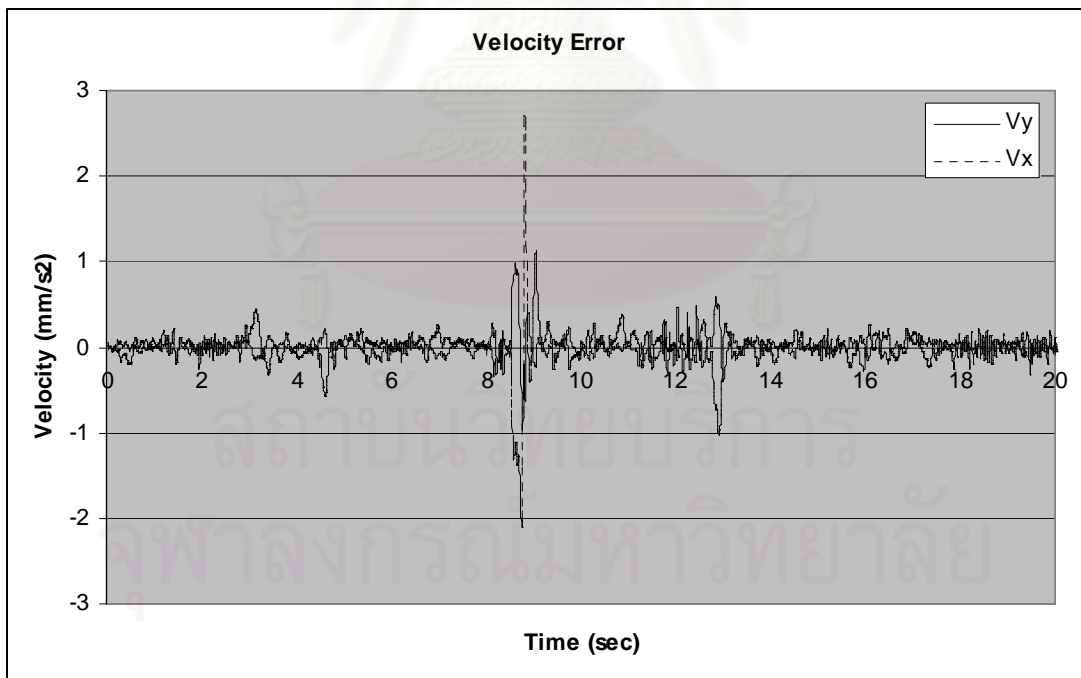
รูปที่ 7.28 เส้นทางเดินของดอกกั้ด



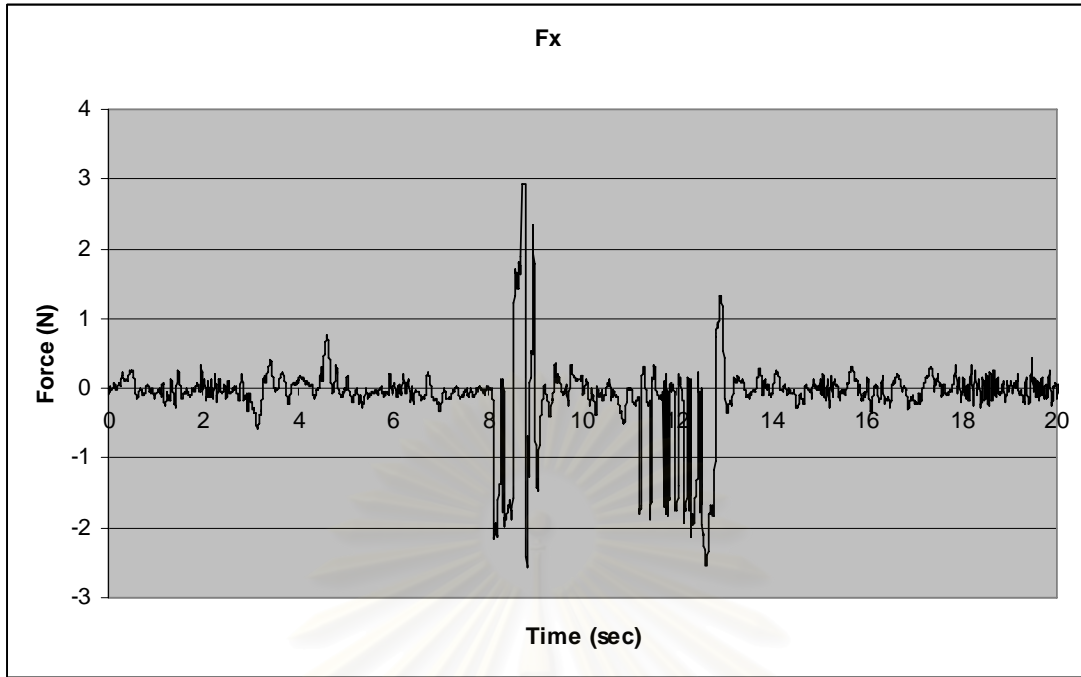
รูปที่ 7.29 ตำแหน่งของแขนกลตาม



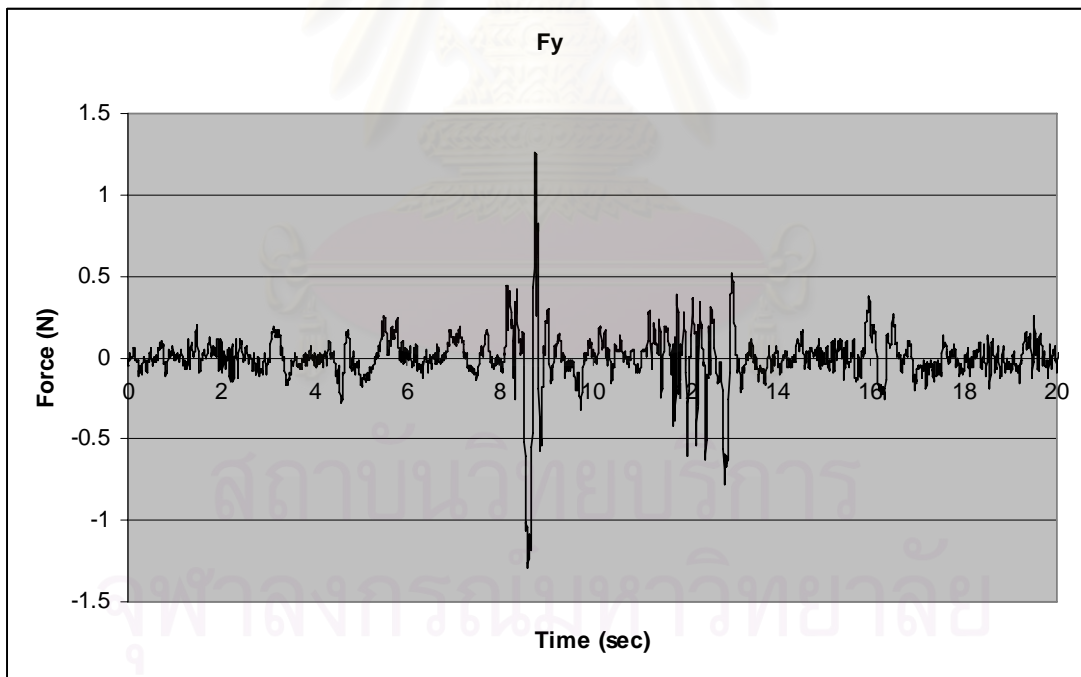
รูปที่ 7.30 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขนกลแฮบติคกับแขนกลตามในแนวแกน X และ Y



รูปที่ 7.31 ความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่ปลายแขนกลแฮบติคกับแขนกลตามในแนวแกน X และ Y



รูปที่ 7.32 แรงโต้ตอบที่แกนกลศาสตร์กระทำต่อมือผู้ควบคุมในแนวแกน X



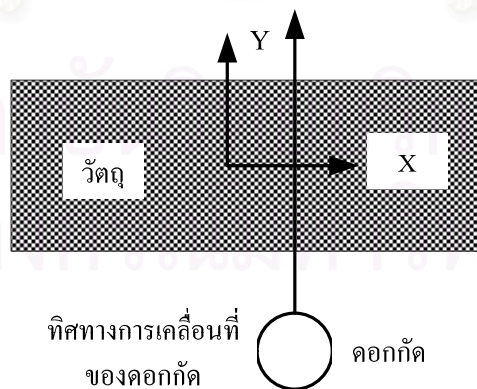
รูปที่ 7.33 แรงโต้ตอบที่แกนกลศาสตร์กระทำต่อมือผู้ควบคุมในแนวแกน Y

การทดสอบในรอบที่หนึ่งในขณะที่บังคับให้แขนกลตามเคลื่อนที่โดยที่ยังไม่กีดชิ้นงานนั้นแขนกลตามสามารถเคลื่อนที่ตามแกนกลศาสตร์ได้เป็นอย่างดีความผิดพลาดของตำแหน่งระหว่างแกนทั้งสองมีค่าไม่เกิน 1 มิลลิเมตรและความผิดพลาดของความเร็วมีค่าน้อยเช่นกันดังรูป 7.30 ประกอบทำให้แขนกลศาสตร์ยังไม่สร้างแรงโต้ตอบกับมือผู้ควบคุมดังรูปที่ 7.32 และ 7.33

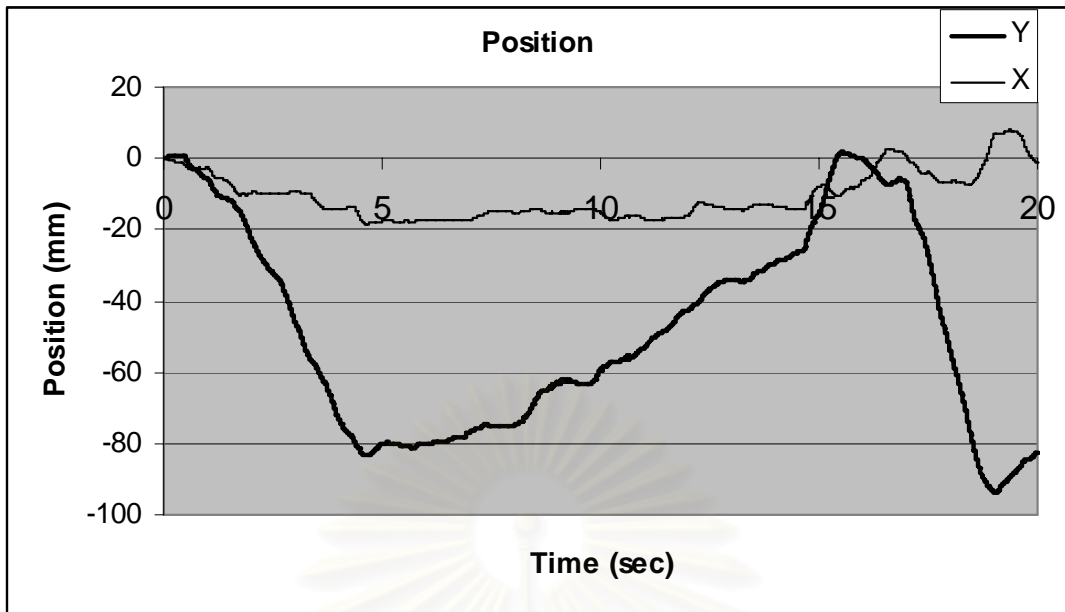
ประกอบเมื่อดอกกัทของแขนกลตามเคลื่อนเริ่มกัทขึ้นงานโดยที่ตำแหน่งเริ่มกัทอยู่ที่เวลา 2.5 วินาทีที่ความผิดพลาดของตำแหน่งระหว่างแขนกลทั้งสองจะสองมากขึ้นรูปที่ 7.30 ประกอบแต่ยังมีค่าไม่เกิน 2 มิลลิเมตรและค่าความผิดพลาดของความเร็วระหว่างแขนกลแสบติดกับแขนกลตามมีค่าประมาณ 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาทีกำลังสองทำให้แรงโต้ตอบที่แขนกลแสบติดกระทำต่อมือผู้ควบคุมมีค่าน้อยดูกราฟของแรงในรูปที่ 7.32 และ 7.33 รอบที่สองของการกัทในช่วงแรกผลของแรงโต้ตอบที่แขนกลแสบติดกระทำต่อมือผู้ควบคุมยังมีค่าน้อยจนกระทั่งช่วงท้ายของการกัทรอบที่สองที่เวลาวินาทีที่ 9 ผู้ควบคุมได้เคลื่อนแขนกลแสบติดให้เร็วขึ้นแบบทันทีทันใดขึ้นทำให้ความผิดพลาดของตำแหน่งมีค่ามากขึ้นทันทีและมีค่ามากกว่า 2 มิลลิเมตรค่าความผิดพลาดของความเร็วระหว่างแขนกลทั้งสองมีค่ามากขึ้นแบบทันทีทันใดเช่นกันโดยมีค่าเท่ากับ 2.75 มิลลิเมตรต่อวินาทีกำลังสองทำให้แรงที่แขนกลแสบติดกระทำกับมือผู้ควบคุมมีค่ามากขึ้นดังรูปที่ 7.32 และ 7.33 และเป็นแรงที่เกิดจากความผิดพลาดของตำแหน่งและความผิดพลาดของความเร็วและการกัทรอบที่สามผู้ควบคุมได้พยายามเคลื่อนแขนกลแสบติดให้เร็วขึ้นแบบต่อเนื่องทำให้ความผิดพลาดของตำแหน่งระหว่างแขนกลทั้งสองมีค่ามากกว่า 2 มิลลิเมตรแต่ความผิดพลาดของความเร็วมีค่าน้อย แรงที่แขนกลแสบติดกระทำต่อมือผู้ควบคุมจึงมาจากค่าความผิดพลาดของตำแหน่งเป็นส่วนใหญ่

7.4.3 การทดสอบแรงโต้ตอบกลับของแขนกลแสบติดเมื่อแขนกลตามกัทเซาะขึ้นงานในแนวแกน Y

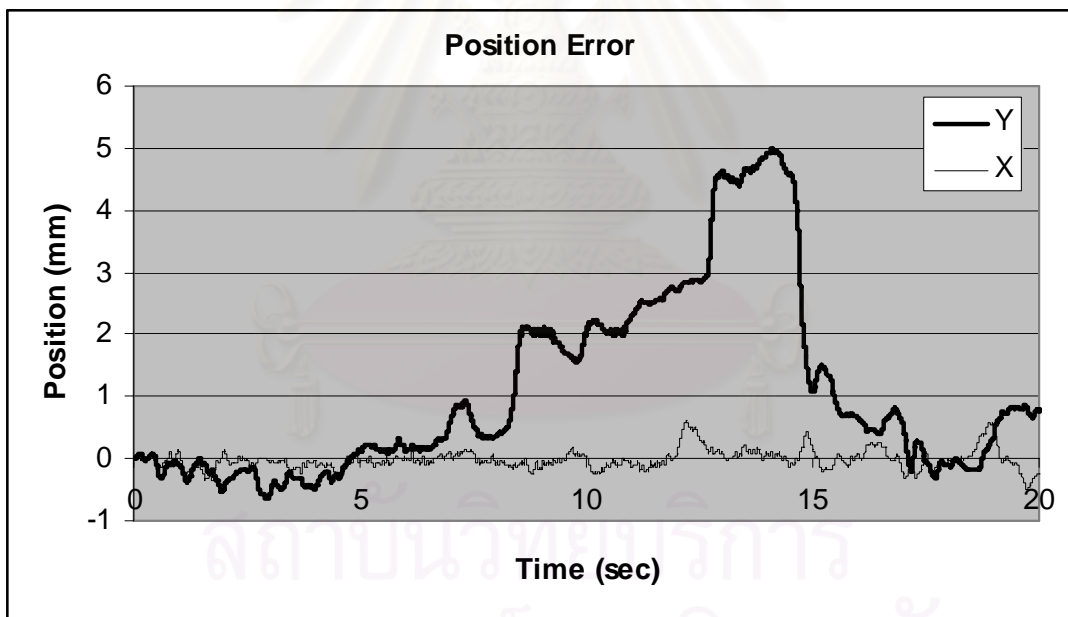
เป็นการทดสอบการสร้างแรงโต้ตอบของแขนกลแสบติดที่กระทำกับมือของผู้ควบคุมเมื่อบังคับให้แขนกลตามเคลื่อนที่ไปกัทเซาะขึ้นงานที่เป็นพลาสติกโดยมีลักษณะเส้นทางเดินของดอกกัทดังรูปที่ 7.34 การทดสอบเริ่มด้วยผู้ควบคุมบังคับให้แขนกลตามเคลื่อนที่ไปกัทขึ้นงานโดยกัทจากล่างขึ้นบนของขึ้นงานเป็นจำนวนหนึ่งรอบ



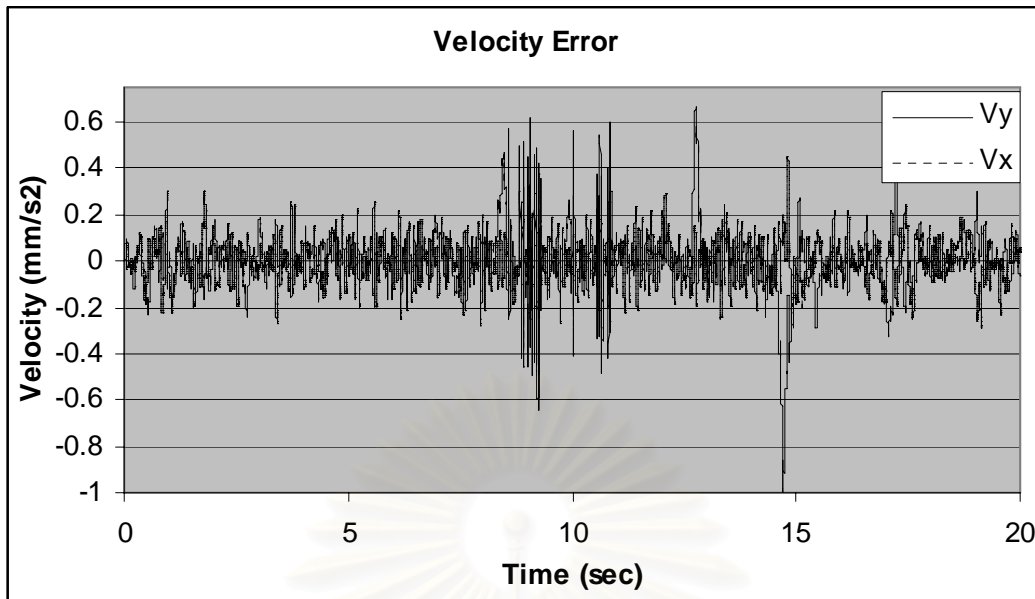
รูปที่ 7.34 เส้นทางเดินของดอกกัท



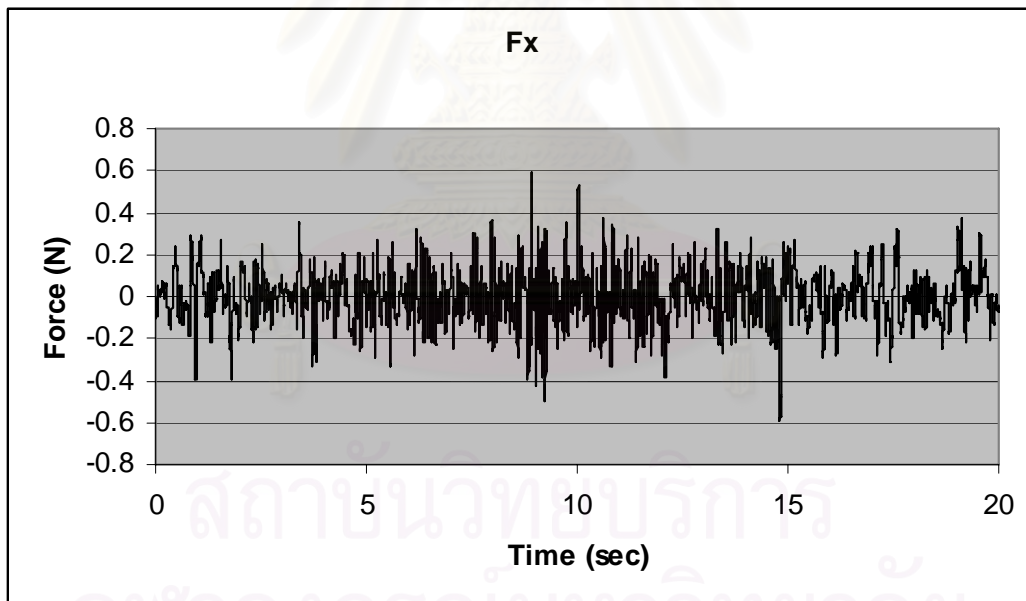
รูปที่ 7.35 ตำแหน่งของแขนกลตาม



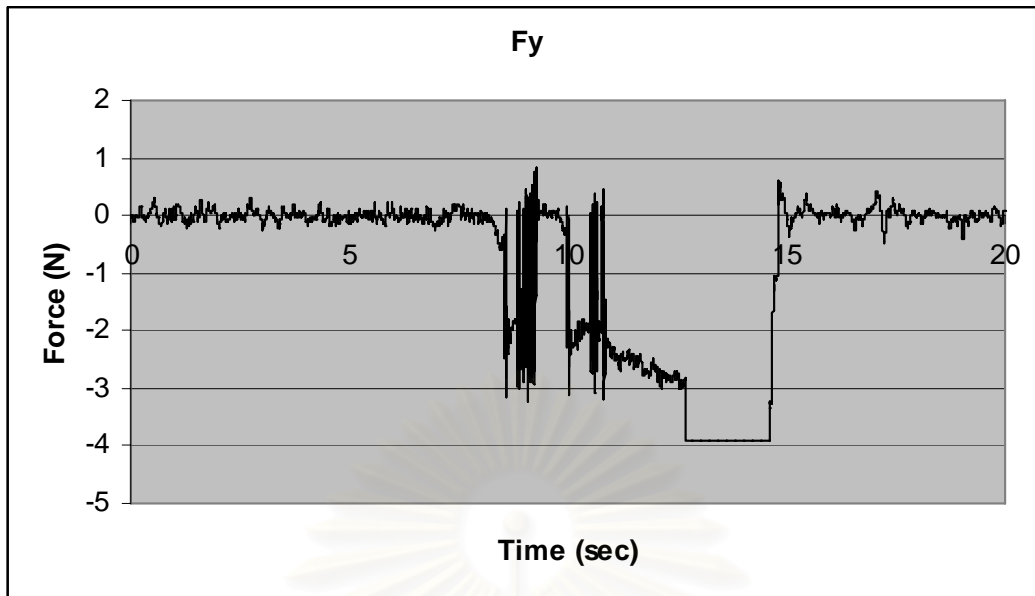
รูปที่ 7.36 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขนกลแฮบติคกับแขนกลตามในแนวแกน X และ Y



รูปที่ 7.37 ความคลาดเคลื่อนของความเร็วที่ปลายแขนกลแฮบติคกับแขนกลตามในแนวแกน X และ Y



รูปที่ 7.38 แรงโต้ตอบที่แขนกลแฮบติคกระทำต่อมือผู้ควบคุมในแนวแกน X



รูปที่ 7.39 แรงโต้ตอบที่แขนกลแสบตึกกระทำต่อมือผู้ควบคุมในแนวแกน X

การทดสอบขณะที่บังคับให้แขนกลตามเคลื่อนที่โดยที่ยังไม่กีดชิ้นงานนั้นแขนกลตามสามารถเคลื่อนที่ตามแขนกลแสบตึกได้เป็นอย่างดีความผิดพลาดของตำแหน่งระหว่างแขนกลทั้งสองมีค่าไม่เกิน 1 มิลลิเมตรและความผิดพลาดของความเร็วมีค่าน้อยเช่นกันดูรูป 7.30 และ 7.31 ทำให้แขนกลแสบตึกยังไม่สร้างแรงโต้ตอบกับมือผู้ควบคุมดูรูปที่ 7.32 และ 7.33 ประกอบเมื่อดอกกีดของแขนกลตามเริ่มกีดชิ้นงานโดยที่ตำแหน่งเริ่มกีดอยู่ที่เวลา 8.0 วินาทีความผิดพลาดของตำแหน่งระหว่างแขนกลทั้งสองจะสองมากขึ้นดูรูปที่ 7.30 ประกอบ และมีค่ามากกว่า 2 มิลลิเมตรและค่าความผิดพลาดของความเร็วระหว่างแขนกลแสบตึกกับแขนกลตามมีค่ามากขึ้นด้วยโดยมีค่าประมาณ 0.5 มิลลิเมตรต่อวินาทีกำลังสองทำให้แรงโต้ตอบที่แขนกลแสบตึกกระทำต่อมือผู้ควบคุมมีค่าดังรูปที่ 7.32 และ 7.33 โดยที่แรงในแนวแกน X มีค่าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับแรงในแนวแกน Y แรงในแนวแกน Y มีค่าเท่ากับ 3 นิวตันและในเวลา 9 วินาทีนั้นผู้ควบคุมได้ทดลองหยุดการเคลื่อนที่ของแขนกลตามทำให้ค่าความผิดพลาดของแขนกลแสบตึกและแขนกลตามมีค่าน้อยลงและต่ำกว่า 2 มิลลิเมตรทำให้แรงที่แขนกลแสบตึกกระทำต่อมือผู้ควบคุมในแนวแกน Y มีค่าน้อยลงดูรูปที่ 7.33 จากนั้นผู้ควบคุมก็บังคับให้แขนกลตามเคลื่อนที่ในแนวแกน Y เพื่อกีดชิ้นงานต่อและได้เพิ่มความเร็วของแขนกลตามให้มากขึ้นอย่างต่อเนื่องทำให้ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งระหว่างแขนกลแสบตึกและแขนกลตามมีค่ามากขึ้นแต่ค่าความผิดพลาดของความเร็วระหว่างแขนกลทั้งสองยังคงมีค่าประมาณ 0.5 แรงที่แขนกลแสบตึกในแนวแกน Y มีค่าประมาณ 2.6 นิวตัน ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งมีค่าเท่ากับ 5 มิลลิเมตรทำให้เกิดแรงที่แขนกลแสบตึกกระทำต่อมือผู้ควบคุมมีค่ามากจนกระทั่งผู้ควบคุมต้องลดความเร็วของแขนกลตามลงทำให้ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งระหว่างแขนกลทั้งสองมีค่าน้อยลงและแรงที่แขนกลแสบตึกกระทำต่อมือผู้ควบคุมมีค่าน้อยลงตามลำดับ

จากผลการทดสอบที่ผ่านมาพบว่าค่าความผิดพลาดของชิ้นงานต้นแบบกับชิ้นงานจริงนั้นมีค่ามากกว่าค่าความผิดพลาดที่ได้จากการทดสอบความแม่นยำโดยรวมของทั้งระบบดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 7.2 ทั้งนี้สาเหตุเกิดจาก

- ในการทดสอบความแม่นยำรวมของระบบนั้นการเคลื่อนที่ของแขนกลแฮบติคและแขนกลตามจะเคลื่อนที่ช้าและเคลื่อนที่เป็นระยะทางสั้นๆและการวัดค่าตำแหน่งของแขนกลทั้งสองนั้นก็วัดค่าขณะแขนกลหยุดนิ่ง ทำให้ค่าความผิดพลาดที่วัดได้มีค่าน้อย
- ขณะที่การทดสอบการกักเซาะชิ้นงานนั้นการเคลื่อนที่ของแขนกลแฮบติคและแขนกลตามนั้นจะเคลื่อนที่เร็วกว่ามาก และมีการเคลื่อนที่แบบกลับทิศทางแบบทันทีทันใดหลายครั้งทำให้เกิดโอเวอร์ชูทมาก
- โครงสร้างของแขนกลตามยังไม่แข็งแรงพอทำให้ไม่สามารถรับภาระจากการเคลื่อนที่ของแขนกลที่เคลื่อนที่กลับทิศทางอย่างรวดเร็วได้สังเกตได้ขณะที่แขนกลตามเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วหรือเคลื่อนที่แบบกลับทิศทางนั้นคานรับน้ำหนักของแขนกลตามมีการบิดตัวจนมองเห็นได้อย่างชัดเจน
- มอเตอร์ของแขนกลตามมีขนาดเล็กเกินไปทำให้มีแรงบิดไม่เพียงพอในการขับเคลื่อนแขนกลตามให้เคลื่อนตามแขนกลแฮบติคที่เคลื่อนที่เร็วได้ทัน
- การกักเซาะชิ้นงานบางชิ้นเป็นการกักเซาะแบบ 5 องศาอิสระความยาวของดอกกักจะมีผลต่อความผิดพลาดมากซึ่งในการติดตั้งดอกกักให้มีความยาวตามที่กำหนดยังทำได้ไม่ดีพอ

บทที่ 8

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างแขนกลแบบ 6 องศาอิสระเพื่อใช้ควบคุมแขนกลตามแบบขนานในตระกูล H-4 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

- ได้แขนกลแบบดิกที่มีน้ำหนักเบา แรงเสียดทานน้อย และความเฉื่อยต่ำ ทำให้ผู้ควบคุมแขนกลแบบดิกสามารถจับบังคับบังคับของแขนกลแบบดิกในลักษณะเหมือนกับการจับปากกาทำให้ผู้ควบคุมสามารถควบคุมแขนกลแบบดิกได้ดี มีความเหมาะสมกับงานที่ต้องการความละเอียดอ่อนและมีความเมื่อยล้าน้อยกว่าการจับแบบอื่น
- โครงสร้างของแขนกลแบบดิกที่สร้างขึ้นเป็นโครงสร้างแบบขนานจึงทำให้สามารถสร้างแรงกระทำต่อผู้ควบคุมได้เป็นอย่างดีโดยที่ใช้อุปกรณ์ขับเคลื่อนและก้านต่อโยงที่มีขนาดเล็กได้
- แขนกลแบบดิกที่สร้างขึ้นสามารถหาสมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์แบบตายตัวได้โดยการติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมเพิ่มเข้าไป 3 ตัว
- สามารถใช้แขนกลแบบดิกวัดขนาดของชิ้นงานต่างๆได้ ค่าความแม่นยำของแขนกลแบบดิกโดยเฉลี่ยมีค่า 1.131 มิลลิเมตร
- ได้แขนกลตามแบบขนานในตระกูล H-4 ที่มี 5 แกนโดยแกนที่ 5 เป็นโต๊ะสำหรับจับยึดชิ้นงาน สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- แขนกลตามสามารถกัดเซาะชิ้นงานได้เป็นอย่างดีโดยวัสดุที่ใช้ในการกัดเซาะคือไม้หรือโฟม ส่วนวัสดุชนิดอื่นที่เป็นโลหะยังไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เนื่องจากแขนกลตามยังไม่มีการหล่อเย็นขณะกัดเซาะชิ้นงาน
- แขนกลตามสามารถกัดเซาะชิ้นงานที่มีลักษณะเป็น under cut ได้เป็นอย่างดี ซึ่งเครื่องกัดเซาะแบบ 3 แกนโดยทั่วไปไม่สามารถทำได้

- ค่าความแม่นยำโดยรวมของแขนกลแฮบติค ระบบควบคุม และแขนกลตามมีค่าโดยเฉลี่ยในแนวแกน X เท่ากับ 0.74 มิลลิเมตร ในแนวแกน Y เท่ากับ 1.04 ในแนวแกน Z เท่ากับ 0.28 มิลลิเมตร

8.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากความแม่นยำของแขนกลแฮบติคและแขนกลตามมีความสำคัญมาก เพื่อเป็นการเพิ่มความแม่นยำให้กับแขนกลแฮบติค ผู้วิจัยจึงขอเสนอแนวทางในการปรับปรุง ดังนี้

- ทำการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแขนกลแฮบติคและแขนกลตามจากการวัดโดยตรงด้วยเครื่องมือที่แม่นยำ
- เปลี่ยนอุปกรณ์วัดมุมที่มีความละเอียดมากขึ้นเพื่อเพิ่มความแม่นยำกับแขนกลแฮบติค
- ศึกษาและออกแบบการตั้งตำแหน่งเริ่มต้นของแขนกลทั้งสองใหม่ให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น
- ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมที่ช่วยให้การบังคับแขนกลแฮบติคและแขนกลตามให้มีความสะดวกมากขึ้น
- ศึกษาแนวทางอื่นในการสร้างเส้นทางเดินให้แก่แขนกลตาม
- ออกแบบและพัฒนาาระบบแรงโต้ตอบกลับให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

รายการอ้างอิง

- Bejczy, A.K., Handlykken, M. 1981. Experimental Result with A Six Degree-of-Freedom Force Reflecting Hand Controller. Proc. Annual Conference on manual Control. UCLA, Los Angeles, Calif.
- Bruyninckx, H. 1998. Closed-Form Forward Position Kinematics for a $(3-1-1-1)^2$ Fully Parallel Manipulator. Proc. IEEE International Transactions on Robotics & Automation: 326-328.
- Sangveraphunsiri, V., Chooprasird, K. 2007. Design of a hybrid 5 DOF for H-4 parallel robot. The Second stage of BK2 Smart-Mecha Team. Kangwon National-Chulalongkorn University Joint Workshop.
- Collins, C.L., Long, G.L. 1995. The Singularity Analysis of an In-Parallel Hand Controller for Force-Reflected Teleoperation. Proc. IEEE International Transactions on Robotics & Automation: 661-669.
- Craig J.J. 1986. Introduction to Robotic, Mechanics and Control. 2nd Edition: Addison Wesley.
- Douglas, A. 1991. Hand Controller Design Requirement and Performance Issues Telerobotics. Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation.
- Fischer P., Danicl R. and Siva, K. V. 1990. Specification and design of input devices for teleoperation, Proc.IEEE conference on robotics and automation: 540-545.
- Flemmer, H. 1999. Analysis of Force Reflecting Control Methods for Teleoperators with Special Reference to Surgical Applications. Licentiate Thesis, Mechatronics Lab Department of Machine Design Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden.
- Goertz R., Thompson, R. 1954. Electronically controlled manipulator. Nucleonics:46-47.
- Gosselin C.M., Hamel, J. 1994. The agile eye: a high-performance three-degree-of-freedom camera-orienting device. Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation: 781-786.
- Jansen, J.F., Kress, R. L. and Babcock, S. M., 1992. Controller Design for a force Reflecting Teleoperator System With Kinematically Dissimilar Master and Slave. Journal of Dynamic system, Measurement, and Control.
- Ngamvilaikorn, T. 2002. Design and Development of a Master arm for Force-Reflecting system. Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, Chulalongkorn University, April 2002.

- Sangveraphunsiri, V., Ngamvilaikorn, T. 2002. Design and Development of a Six DOF Master-Slave Human Assisted Manipulator Arm. JSAE Annual Congress.Yokohama Japan.
- Sangveraphunsiri, V., Ngamvilaikorn, T. 2005. Design and Analysis of A 6-DOF Haptic Device for Teleoperation Using the Singular-free Parallel Mechanism. Thammasat International Journal of Science and Technology: 60-70.
- Sangveraphunsiri, V., Ngaojaruwong, T. 2004. Design and Analysis of A 6-DOF Haptic Device Using the Singular-free Parallel Mechanism. Proc. The Third AUN/SEED-NET FILEDWISE SEMINAR in Manufacturing and Material Processing. KualaLumpur Malaysia.
- Sangveraphunsiri, V., Ngaojaruwong, T. 2005. Robotics and Advanced Manufacturing Lab Department of Mechanical Engineering Chulalongkorn University The 19th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand.
- Tantawiroon, N. 2003. Novel Design of a 4DOF Parallel Robot. Proc. JSAE Annual Congress. No.61-03: 29-32.
- Tantawiroon, N. 2004. Novel Design and Analysis with Force Control of The H-4 Family Parallel Manipulator. Doctoral Dissertation. Chulalongkorn University Thailand.
- Tremblay, A., Baron, L. 1999. Geometrical Synthesis of Star-Like Topology Parallel Manipulators with a Genetic Algorithm. Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation. Detroit Michigan:2446-2451.
- Tsai, L. 1999. Robot Analysis The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. A Wiley-Interscience Publication.
- Woo, K.Y., Jin, B.D. and Kwon, D. 1998. A 6-DOF Force-Reflecting Hand Controller Using the Fivebar Parallel Mechanism. Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation. Leuven Belgium: 1597-1602.
- Woo, K.Y., Jin, B.D. and Kwon, D. 1999. Haptic Control of the Master Hand Controller for a Microsurgical Telerobot System. Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation.
- Yokokohji, Y., Yoshikawa, T. 1993. Design Guide of Master Arms Considering Operator Dynamics. Journal of Dynamic system, Measurement, and Control.
- Yoon, J., Ryu, J. 2000. Control and Evaluation of a New 6-DOF Haptic Device Using a Parallel Mechanism. Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems: 1125-1130.

Yuan., Joseph, S.C. 1988. Close-Loop Manipulator Control Using Quaternion. Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation: 434-440.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

อุปกรณ์ของแขนกล Haptic

มอเตอร์กระแสตรง (DC Motor)

เป็นมอเตอร์กระแสตรงสำหรับงานทั่วไป ขนาดเท่ากับ 25 วัตต์ สามารถรับกระแสต่อเนื่องได้ 2 แอมแปร์ โดยติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมที่เป็นแบบ Incremental Rotary Encoder และมีความละเอียดเท่ากับ 2500 พัลส์ต่อรอบไว้ที่ปลายอีกด้านหนึ่งของมอเตอร์



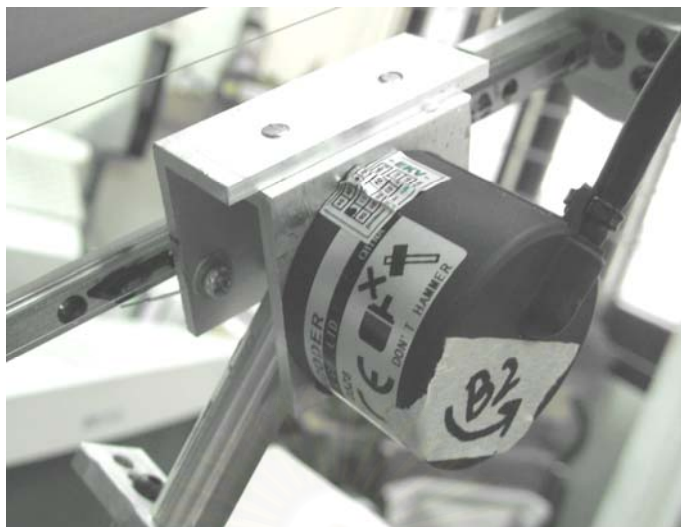
รูปที่ ก.1 แสดงมอเตอร์กระแสตรงของข้อหมุนที่ 1 และ ข้อต่อแบบเลื่อน

อุปกรณ์วัดมุม (Encoder)

ใช้ของยี่ห้อ Koyo รุ่น TRD-S2500VA ซึ่งเป็นแบบ Incremental Rotary Encoder โดยมีความละเอียดเท่ากับ 2500 พัลส์ต่อรอบ ซึ่งใช้ติดตั้งบน Passive Joint



รูปที่ ก.2 แสดงอุปกรณ์วัดมุม



รูปที่ ก.3 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมของข้อหมุนตัวที่ 2



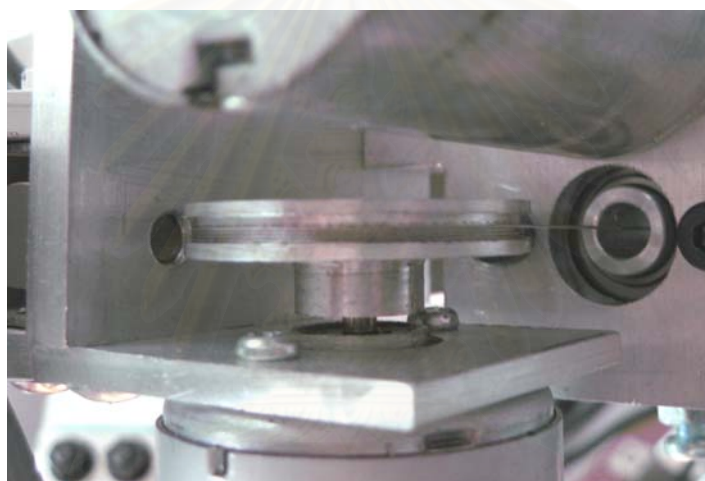
รูปที่ ก.4 แสดงตำแหน่งที่ติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมของข้อแบบเลื่อน

ระบบสายพานและมู่เล่

มู่เล่ที่ใช้เป็นมู่เล่ที่สร้างขึ้นเป็นพิเศษวัสดุที่ใช้ทำเป็นอลูมิเนียม ที่มู่เล่ตามมีจุดยึดสายพานเพื่อกันสายพานลื่น



รูปที่ ก.5 แสดงระบบสายพานและมู่เล่ของข้อหมุนตัวที่ 1



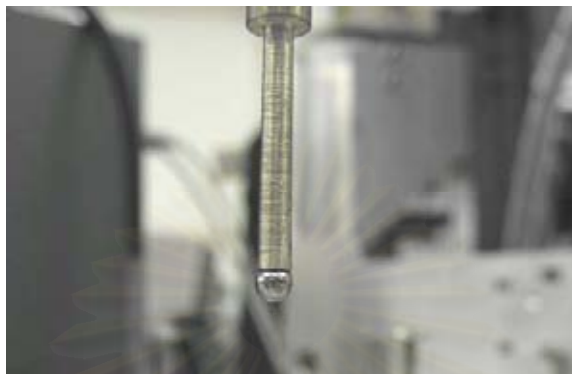
รูปที่ ก.6 แสดงระบบสายพานและมู่เล่ของข้อต่อแบบเลื่อน



รูปที่ ก.7 แสดงระบบมู่เล่สายพานของอุปกรณ์วัดมุมของข้อต่อแบบเลื่อน

คันทังคืบ

คันทังคืบที่ใช้ทำจากวัสดุสามชนิดด้วยกัน ตัวคันทังคืบซึ่งใช้วิธีจับแบบปากกาทำจากอลูมิเนียม ก้านทองเหลืองปรับความยาวสำหรับยึดทรงกลมเหล็กความเที่ยงตรงสูง ทรงกลมมีขนาด 3.5 มิลลิเมตร



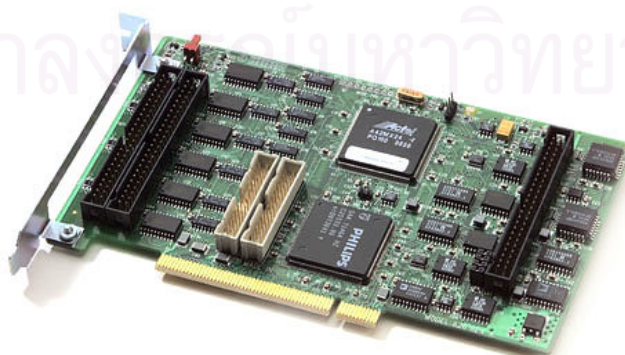
รูปที่ ก.8 แสดงรายละเอียดของคันทังคืบ



รูปที่ ก.9 แสดงวิธีการจับคันทังคืบ

การ์ดนับค่าอุปกรณ์วัดมุม (Counter Card)

ใช้ของยี่ห้อ Sensoray 626 ซึ่งสามารถต่อกับอุปกรณ์วัดมุมได้ทั้งหมด 6 ตัว สามารถส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ขยายสัญญาณได้ 4 ตัว



รูปที่ ก.10 แสดงการ์ดนับค่าอุปกรณ์วัดมุม

การ์ดแปลงสัญญาณจากดิจิทัลไปเป็นอนาลอก (D/A Output Card)

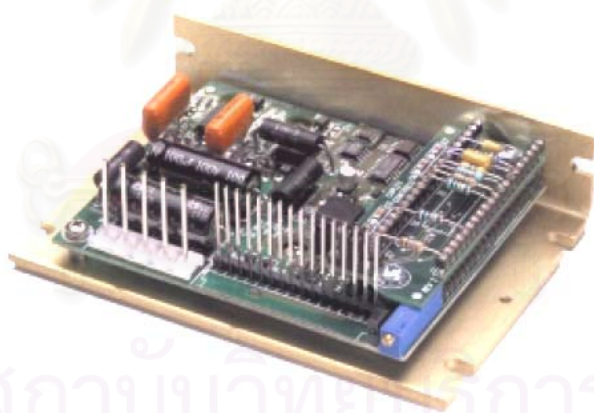
ใช้ของยี่ห้อ Adlink รุ่น PCI-6298V โดยที่สามารถส่งสัญญาณออกได้ 8 ช่อง และมีความละเอียดเท่ากับ 16 บิต



รูปที่ ก.11 แสดงการ์ดแปลงสัญญาณจากดิจิทัลไปเป็นอนาลอก

ชุดขยายกระแสขับมอเตอร์กระแสตรง (DC Servo Motor Drive Amplifier)

ใช้ของยี่ห้อ Copley Controls รุ่น 4122P โดยที่สามารถจ่ายกระแสต่อเนื่องได้ สูงสุด 10 แอมแปร์



รูปที่ ก.12 แสดงชุดขยายกระแสขับมอเตอร์กระแสตรง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายทวี งามวิไลกรเกิดเมื่อวันที่ 6 เมษายน ปีพ.ศ.2516 เป็นชาว กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์เมื่อปีพ.ศ.2536 หลังจากนั้นได้สำเร็จ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จากจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัยในปี 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย