

การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์แฮบติคที่มี 6 องศาอิสระโดยใช้โครงสร้างแบบขนาน



นายธนุพงษ์ เเงจรวงศ์

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

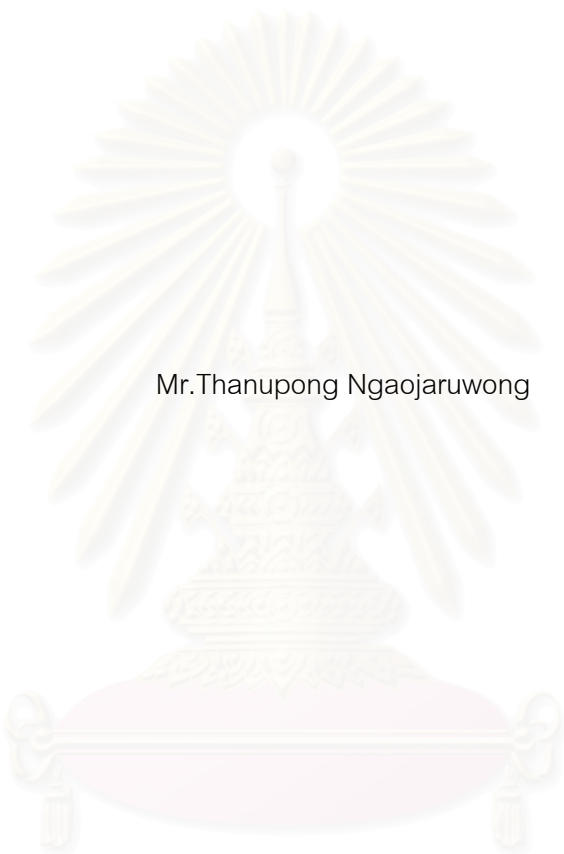
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4295-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A 6-DOF HAPTIC DEVICE USING THE  
PARALLEL MECHANISM



Mr.Thanupong Ngaojaruwong

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-4295-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์แฮบติคที่มี 6 องศาอิสระโดยใช้  
โครงสร้างแบบขนาน  
โดย                              นายธนุพงษ์ เกจากรวงศ์  
สาขาวิชา                      วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษา              รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ)

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

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)

..... กรรมการ  
(อาจารย์ ดร.วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์)

นายธนุพงษ์ เเงาจารย์วงศ์ : การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์แฮบติคที่มี 6 องศาอิสระโดยใช้  
โครงสร้างแบบขนาน (DESIGN AND DEVELOPMENT OF A 6-DOF HAPTIC DEVICE  
USING THE PARALLEL MECHANISM) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 69  
หน้า. ISBN 974-17-4295-9

วิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์แฮบติคที่มีการเคลื่อนที่ได้ทั้งหมด 6  
องศาอิสระ ในงานวิจัยนี้ได้ให้อุปกรณ์แฮบติคทำหน้าที่เป็นแขนกลนำและให้แขนกลสจ๊วตทำหน้าที่  
เป็นแขนกลตามซึ่งมีโครงสร้างแบบเดียวกับอุปกรณ์แฮบติคคือโครงสร้างแบบขนาน ส่วนอุปกรณ์  
แฮบติคที่สร้างขึ้นใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบมู่เล่และสายพานเป็นหลัก เพื่อให้แขนกลเคลื่อนที่ด้วย  
ความเฉื่อยที่ต่ำ มีแรงเสียดทานน้อย และมีค่าแบคแลชที่ต่ำ การคำนวณหาตำแหน่งที่ปลายแขน  
ของอุปกรณ์แฮบติคหาจากสมการการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้า (Forward Kinematics) โดยคำตอบ  
ที่ได้เป็นแบบคำตอบเดียวเนื่องจากได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมเพิ่มขึ้นอีก 3 ตัว แล้วนำตำแหน่งที่  
ปลายแขนกลนำส่งไปให้แขนกลตาม แขนกลตามก็จะทำการแปลงตำแหน่งนี้ไปเป็นตำแหน่งของ  
อุปกรณ์ขับเคลื่อนแต่ละตัวด้วยสมการการเคลื่อนที่แบบผกผัน (Inverse Kinematics) ผลการทดลองแสดง  
ให้เห็นว่าอุปกรณ์แฮบติคสามารถบังคับให้แขนกลสจ๊วตเคลื่อนที่ตามได้อย่างถูกต้องทั้งตำแหน่ง  
และทิศทาง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2546.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

# # 4370332221 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: HAPTIC/ MASTER-SLAVE MANIPULATOR/ FORCE-REFLECTING

THANUPONG NGAOJARUWONG : DESIGN AND DEVELOPMENT OF A 6-DOF  
HAPTIC DEVICE USING THE PARALLEL MECHANISM. THESIS ADVISOR :  
ASSOC. PROF. VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, PhD, 69 pp. ISBN 974-17-4295-9

This thesis describes the design and development of a 6 degrees of freedom Haptic device. In the research, the Haptic device functions as master arm and Stewart platform as slave arm with the same structure as the Haptic device, e.g. parallel mechanism. The Haptic device was invented, using pulley and belt in order to have arm that move with low inertia, friction force, and backlash. The position at the end-effector of the Haptic device was calculated by Forward Kinematics equation. The closed-form solution of the Forward Kinematics was obtained by installing 3 more redundant encoders. The position of the end-effector of master arm send to slave arm, slave arm will transform this position to be the position of each motor with Inverse Kinematics equation. The result of this research shows that Haptic device can control Stewart platform accurately in both position and orientation.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....วิศวกรรมเครื่องกล..... Student's signature.....

Field of study.....วิศวกรรมเครื่องกล..... Advisor's signature.....

Academic year.....2003..... Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ. ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้คอยให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ที่มีประโยชน์ในการทำวิจัยครั้งนี้ พร้อมทั้งคอยสนับสนุนทางด้านอุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัย มาด้วยดีโดยตลอด จนงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ และขอขอบคุณโครงการวิจัยร่วมภาครัฐและเอกชนที่สนับสนุนทางการเงินแก่งานวิจัยนี้ และขอขอบใจเพื่อนๆ พี่น้องๆ นิสิตปริญญาโทด้วยกันที่ได้ให้ข้อคิดเห็นและกำลังใจตลอดมา

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และขอขอบใจน้องสาวน้องชาย ที่คอยให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิทยานิพนธ์.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
2. ความรู้เบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ความรู้เบื้องต้นของอุปกรณ์แฮบติคและโครงสร้างแบบขนาน.....	3
2.2 งานวิจัยอุปกรณ์แฮบติคและโครงสร้างแบบขนานที่ผ่านมา.....	5
3. การออกแบบอุปกรณ์แฮบติค.....	10
3.1 การออกแบบระบบสายพานและมู่เฒ่.....	10
3.2 การออกแบบกลไกของอุปกรณ์แฮบติค.....	11
3.3 รายละเอียดของอุปกรณ์แฮบติค.....	14
4. จลศาสตร์ของอุปกรณ์แฮบติค.....	16
4.1 สมการการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้า.....	16
4.2 สมการการเคลื่อนที่แบบผกผัน.....	21
4.3 จาคอเบียน (Jacobian).....	25
4.4 Singularity.....	29
5. จลศาสตร์ของแขนกลสจ๊วต.....	31

## สารบัญ (ต่อ)

5.1	สมการการเคลื่อนที่แบบผกผัน.....	33
5.2	สมการการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้า.....	37
6.	ระบบควบคุม.....	40
6.1	การควบคุมตำแหน่ง.....	41
6.2	การควบคุมเกี่ยวกับแรง.....	42
6.3	การควบคุมอุปกรณ์แฮบติค.....	46
7.	การทดสอบอุปกรณ์แฮบติค.....	48
7.1	วิธีการทดลอง.....	48
7.2	ผลการทดลองการบังคับให้แขนกลสจ๊วตเคลื่อนที่ตามอุปกรณ์แฮบติคอย่างอิสระ.....	49
7.3	ผลการทดลองการบังคับให้อุปกรณ์แฮบติคเคลื่อนที่ภายในพื้นที่ที่กำหนด.....	57
8.	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	62
8.1	สรุปผลการวิจัย.....	62
8.2	ข้อเสนอแนะ.....	63
	รายการอ้างอิง.....	64
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก อุปกรณ์ของอุปกรณ์แฮบติค.....	66
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	69



## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
7.1 ความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งที่กำหนดกับตำแหน่งที่วัดได้จริงที่มากที่สุดที่เกิดขึ้นของ อุปกรณ์รับแบบเชิงเส้นแต่ละตัวของแขนกลสจ๊วต.....	56
8.1 ความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งที่กำหนดกับตำแหน่งที่วัดได้จริงที่มากที่สุดที่เกิดขึ้นของ อุปกรณ์รับแบบเชิงเส้นแต่ละตัวของแขนกลสจ๊วต.....	62



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 Y-Star Parallel Manipulator.....	5
2.2 Agile eye.....	6
2.3 Kaist Master.....	7
2.4 UCI Hand Controller.....	8
2.5 Parallel Mechanism.....	9
3.1 ระบบสายพานและมู่เล่.....	10
3.2 ระบบสายพานและมู่เล่ที่ระนาบของมู่เล่ทั้งสองไม่ได้อยู่บนระนาบเดียวกัน.....	11
3.3 โครงสร้างของอุปกรณ์แฮบติคที่ออกแบบไว้.....	11
3.4 โครงสร้างฐานของอุปกรณ์แฮบติค.....	12
3.5 โครงสร้างแขนแต่ละด้านของอุปกรณ์แฮบติค.....	13
3.6 โครงสร้างอุปกรณ์แฮบติคที่ออกแบบไว้.....	15
3.7 โครงสร้างอุปกรณ์แฮบติคที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว.....	15
4.1 โครงสร้างของอุปกรณ์แฮบติค.....	17
4.2 Coordinate frame ที่กำหนดไว้บนโครงสร้าง.....	18
4.3 ตำแหน่งของเวคเตอร์ของแต่ละแขน.....	21
4.4 เวคเตอร์ที่กำหนดไว้บนโครงสร้าง.....	22
4.5 เวคเตอร์ที่ตำแหน่งต่างๆของขาที่ $j$ .....	26
5.1 แขนกลสจ๊วต.....	31
5.2 ตำแหน่งของอุปกรณ์ขับเคลื่อนแต่ละตัวของแขนกลสจ๊วต.....	32
5.3 รายละเอียดของส่วน Stator ของอุปกรณ์ขับเคลื่อน.....	33
5.4 รายละเอียดของส่วน Slider ของอุปกรณ์ขับเคลื่อน.....	33
5.5 เวคเตอร์ที่กำหนดไว้บนแขนกลสจ๊วต.....	34
5.6 เวคเตอร์ของแต่ละอุปกรณ์ขับเคลื่อน.....	35
6.1 การเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์แฮบติคกับแขนกลสจ๊วต.....	40
6.2 ปัญหาการตามกันของข้อมูล.....	41
6.3 ข้อต่อที่มีผลกระทบต่อน้ำหนักที่ปลายแขนกล.....	43
6.4 กำแพงเสมือน.....	45
6.5 รูปแบบของการควบแขนกลทั้งสอง.....	47

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
6.6 โปรแกรมที่ใช้ควบคุมอุปกรณ์แฮบติค.....	47
7.1 วิธีการทดลองที่ 7.1.2.....	49
7.2 เส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคในสามมิติ.....	50
7.3 ทิศทางการหมุนรอบแกน X ที่ปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติค.....	50
7.4 ทิศทางการหมุนรอบแกน Y ที่ปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติค.....	51
7.5 ทิศทางการหมุนรอบแกน Z ที่ปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติค.....	51
7.6 วิธีการหาค่าความผิดพลาดของการทดลองแบบที่ 7.1.1.....	52
7.7 ค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งที่กำหนดกับตำแหน่งที่วัดได้จริงของอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นตัวที่ 1 ของแขนกลอัจฉริยะ.....	53
7.8 ค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งที่กำหนดกับตำแหน่งที่วัดได้จริงของอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นตัวที่ 2 ของแขนกลอัจฉริยะ.....	54
7.9 ค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งที่กำหนดกับตำแหน่งที่วัดได้จริงของอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นตัวที่ 3 ของแขนกลอัจฉริยะ.....	54
7.10 ค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งที่กำหนดกับตำแหน่งที่วัดได้จริงของอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นตัวที่ 4 ของแขนกลอัจฉริยะ.....	55
7.11 ค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งที่กำหนดกับตำแหน่งที่วัดได้จริงของอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นตัวที่ 5 ของแขนกลอัจฉริยะ.....	55
7.12 ค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งที่กำหนดกับตำแหน่งที่วัดได้จริงของอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นตัวที่ 6 ของแขนกลอัจฉริยะ.....	56
7.13 เส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคในสามมิติ.....	57
7.14 วิธีการหาระยะทางที่เคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมือนในแนวรัศมีของการทดลองแบบที่ 7.1.2.....	58
7.15 เส้นทางการเคลื่อนที่กับขอบเขตของกำแพงเสมือนบนระนาบ XY.....	59
7.16 ระยะทางการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมือน.....	59
7.17 แรงผลักดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมือน.....	60
7.18 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมือนและแรงผลักดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมือน.....	60

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

7.19 ทิศทางและขนาดของแรงผลักรู้ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพง  
เสมือน..... 61



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

ปัจจุบันการใช้งานภาพจำลองเสมือนจริง (Virtual Reality: VR) ถูกนำไปใช้งานในด้านต่างๆ มากขึ้น เช่น งานด้านการแพทย์ งานทางด้าน Teleoperation และงานทางด้านการอบรมการ ฝึกเครื่องบิน ดังนั้นภาพจำลองเสมือนจริง (VR) จึงถูกนำไปเป็นพื้นฐานของ 3 เทคนิคหลักคือ ทางด้านวิทัศน์ (Vision) หรืองานด้านคอมพิวเตอร์กราฟฟิก ทางด้านแรงหรือแฮบติคและทางด้าน เสียง

โครงสร้างแบบขนาน (Parallel Mechanism) ถูกนำมาใช้งานด้านแฮบติคมากขึ้น เนื่องจากคุณลักษณะของอุปกรณ์แฮบติคที่ต้องการคือ มีการเคลื่อนที่หรือการตอบสนองที่เร็ว มีความแม่นยำ มีบริเวณที่ทำงานมาก มีความกะทัดรัด มีความเฉื่อยต่ำ มีความเสียดทานน้อย และมีโครงสร้างที่แข็งแรง แต่โครงสร้างแบบขนานนั้นก็ยังมีข้อเสียอยู่ที่มีบริเวณที่ทำงานน้อย มี Singularity มาก และความยากในการหาสมการการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้า (Forward Kinematics) เนื่องจากสมการที่ได้เป็นสมการแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) เมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบอนุกรม (Serial Mechanism)

การพัฒนาในปัจจุบันได้มีการคิดค้นวิธีการทางคณิตศาสตร์ต่างๆ เพื่อหาสมการการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้าจนทำให้คำตอบมีน้อยลง แต่ก็ยังคงไม่มีรูปแบบคำตอบที่ตายตัว (Closed Form Solution) และได้พยายามออกแบบโครงสร้างแบบขนานแบบต่างๆ หรือมีการเพิ่ม อุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor) เพื่อทำสมการการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้าหาคำตอบที่ตายตัวได้ รวมทั้งเพิ่มบริเวณที่ทำงานให้มากขึ้น และลด Singularity ลง

วิทยานิพนธ์นี้จึงขอเสนอ การออกแบบ และสร้างอุปกรณ์แฮบติคที่มี 6 องศาอิสระ (Degree Of Freedom: DOF) เพื่อใช้ในการควบคุม Stewart Platform

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษา ออกแบบ และสร้างอุปกรณ์แฮบติคที่มี 6 องศาอิสระเพื่อใช้ในการควบคุม แขนกลสจิวต์ (Stewart Platform)

2. เพื่อศึกษา และวิเคราะห์การควบคุมตำแหน่งและทิศทางของแขนกลตาม (Slave Arm) ให้สามารถเคลื่อนที่ตามอุปกรณ์แฮบติคซึ่งทำหน้าที่เป็นแขนกลนำ (Master Arm)
3. เพื่อศึกษาการสร้างแรงโต้ตอบระหว่างอุปกรณ์แฮบติคกับผู้ควบคุม

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. อุปกรณ์แฮบติคสามารถบังคับให้แขนกลตามเคลื่อนที่ได้ถูกต้องทั้งตำแหน่งและทิศทาง
2. ศึกษาจลศาสตร์ (Kinematics) ของอุปกรณ์แฮบติคที่สร้างขึ้น
3. ศึกษาเกี่ยวกับการสร้างแรงโต้ตอบของอุปกรณ์แฮบติคที่มีต่อผู้ควบคุม

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิทยานิพนธ์

1. ศึกษา และรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้ในการออกแบบอุปกรณ์แฮบติคจากรายงานการวิจัย วารสาร และหนังสือต่างๆที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบโครงสร้าง และหาแบบจำลองการเคลื่อนที่ (Kinematics Model) ของอุปกรณ์แฮบติคที่จะสร้างขึ้น
3. สร้าง และประกอบชิ้นงานรวมทั้งแก้ไขข้อผิดพลาดเมื่อพบ
4. ออกแบบระบบควบคุม
5. ทดสอบ วิเคราะห์ แก้ไข และสรุปผล

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้ชุดอุปกรณ์แฮบติค ที่มี 6 องศาอิสระ
2. สามารถใช้อุปกรณ์แฮบติคนี้เป็นพื้นฐานในการพัฒนาระบบควบคุมขั้นสูงต่อไป

## บทที่ 2

### ความรู้เบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้เบื้องต้นของอุปกรณ์แอสติคและโครงสร้างแบบขนาน

แอสติคเป็นคำที่มาจากภาษากรีกซึ่งแปลว่ามือ แต่เมื่อนำมาใช้กับงานทางด้านการควบคุมก็จะหมายถึง Sense of touch ซึ่งก็คืออุปกรณ์ที่สัมผัสแล้วทำให้เกิดความรู้สึกเช่น เมื่อนำมือไปผลักผนังเราก็จะรู้สึกเสมือนว่ามีแรงผลักจากผนังมาผลักมือเรา หรืออีกตัวอย่างหนึ่งเมื่อนำมือไปจับของร้อนเราก็จะรู้สึกว่ามือเราอุ่นด้วย เป็นต้น

การพัฒนาระบบดังกล่าวในปัจจุบันจะมีรูปแบบหรือโครงสร้างหลักที่แตกต่างไปจากแขนกลในอุตสาหกรรมคือต้องออกแบบให้แขนกลเหมาะสมกับผู้ควบคุมซึ่งจะกล่าวต่อไป ในขณะที่แขนกลในอุตสาหกรรมจะถูกออกแบบให้แขนกลมีลักษณะเหมาะสมกับประเภทของงานที่จะนำแขนกลไปใช้ ดังนั้นจากงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปลักษณะเฉพาะที่จำเป็นสำหรับการออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์แอสติคได้ดังนี้

2.1.1 ความสามารถในการขับเคลื่อนกลับ (Back-drive-ability) คือต้องมีความสามารถในการขับเคลื่อนกลับ (Back drive) ซึ่งมีความสำคัญมากในระบบควบคุมในกรณีที่ใช้ในงานที่จะต้องมีการนำเรื่องของแรงมาใช้ในการตอบสนองกับผู้ควบคุม ยกตัวอย่างเช่น สมมุติว่าอุปกรณ์ของเราใช้เฟืองเป็นระบบส่งผ่านกำลัง ถ้าเราใช้เฟืองที่มีอัตราทดที่สูงก็จะทำให้ผู้ควบคุมต้องออกแรงผลึกมากหรือขับเคลื่อนสูงเพื่อที่จะทำให้อุปกรณ์มีการขับเคลื่อน แต่ถ้าเราใช้เฟืองที่มีอัตราทดต่ำเกินไปก็จะเกิดปัญหาอื่นคือต้องเลือกใช้มอเตอร์ที่มีกำลังขับเคลื่อนและต้องเลือกหาอุปกรณ์วัดมุม (Encoder) ที่มีความละเอียดเพิ่มขึ้นเพื่อที่จะได้มีการตอบสนองของแรงที่ดีขึ้น ดังนั้นควรที่จะเลือกใช้อัตราทดที่เหมาะสมเพื่อที่จะได้มีการตอบสนองที่ดีกับผู้ควบคุม

2.1.2 ปริมาตรหรือบริเวณการทำงาน (Volume of operation) คือบริเวณการทำงานควรมีขนาดที่เหมาะสมกับการใช้งานและพื้นที่ที่จะใช้งาน เช่นไม่มากจนเกินไปจนทำให้นำไปใช้งานในบริเวณที่มีพื้นที่จำกัดไม่ได้และทำให้ผู้ควบคุมเกิดความรู้สึกเมื่อยแขน แต่ถ้ามีบริเวณการทำงานที่น้อยเกินไปก็จะทำให้ควบคุมความแม่นยำได้ไม่ค่อยดี และ



เนื่องจากโครงสร้างที่จะออกแบบเป็นโครงสร้างแบบขนานดังนั้นบริเวณการทำงานที่ได้จะมีน้อยเมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบขนาน ดังนั้นถ้าต้องการให้มีบริเวณพื้นที่ที่ใช้ทำงานที่เยอะต้องออกแบบให้โครงสร้างแบบขนานมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น

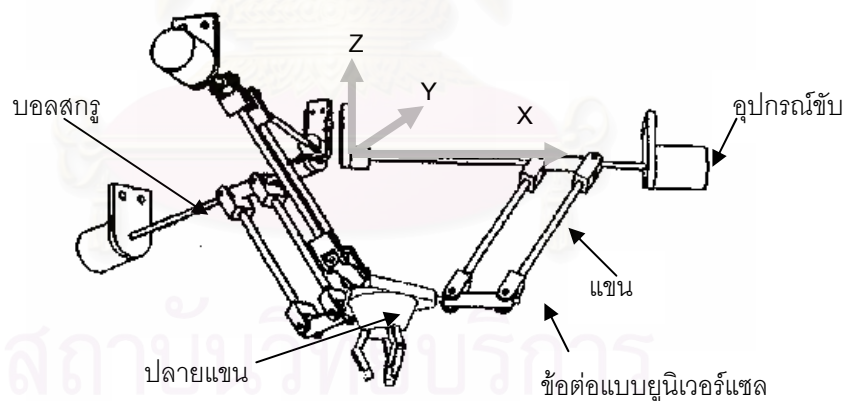
- 2.1.3 ความหวมของชุดเฟืองทด (Backlash) คือความหวมของชุดเฟืองทดซึ่งใช้เป็นระบบส่งกำลังซึ่งส่งกำลังจากมอเตอร์ไปยังก้านต่อโยงของแขนกล ความหวมของชุดเฟืองทดซึ่งทำให้มีผลกระทบคือทำให้เกิดแรงกระแทกที่มือของผู้ควบคุมได้ และทำให้อุปกรณ์วัดมุมมีการวัดค่ามุมที่ผิดพลาดเนื่องจากความหวมของชุดเฟือง
- 2.1.4 ความเฉื่อยของแขนกล (inertia) ในการใช้งานแขนกลก้านต่อโยงแต่ละก้านจะมีการเคลื่อนที่ไปตามการบังคับของผู้ควบคุม ดังนั้นก้านต่อโยงที่มีความเฉื่อยมากจะทำให้ผู้ควบคุมต้องออกแรงมากเพื่อที่จะบังคับให้แขนกลเคลื่อนที่ ทำให้ผู้ควบคุมนั้นเกิดความรู้สึกเมื่อยล้า และในการสร้างแรงตอบสนองที่มีต่อผู้ควบคุมแขนกล แขนกลที่มีความเฉื่อยมากจะทำให้แรงตอบสนองที่เกิดขึ้นกับผู้ควบคุมไม่ถูกต้องตามความเป็นจริง ทั้งนี้เนื่องจากว่าแรงตอบสนองที่แขนกลสร้างขึ้นส่วนหนึ่งจะหายไปเนื่องจากผลของความเฉื่อยที่แขนกลสร้างขึ้นมา
- 2.1.5 ความแข็งแรง (Stiffness) ขึ้นในส่วนต่างๆของอุปกรณ์แบริดจ์เช่น ก้านต่อโยง อุปกรณ์ส่งผ่านกำลัง และข้อต่อควรมีความแข็งแรงเพียงพอ ในกรณีที่อุปกรณ์แบริดจ์สร้างแรงตอบสนองให้แก่ผู้ควบคุมถ้าอุปกรณ์แบริดจ์ไม่มีความแข็งแรงที่เพียงพอจะทำให้แรงตอบสนองที่มีต่อผู้ควบคุมมีค่าผิดพลาดไปจากความเป็นจริงและยังทำให้เกิดความผิดพลาดในการควบคุมตำแหน่งและทิศทางของอุปกรณ์แบริดจ์ได้อีกด้วย
- 2.1.6 แรงเสียดทาน (Friction) คือแรงเสียดทานที่ระบบส่งผ่านกำลังและข้อต่อต่างๆของอุปกรณ์แบริดจ์ควรมีค่าน้อย เพื่อให้ผู้ควบคุมจะได้ไม่ต้องออกแรงบังคับให้อุปกรณ์แบริดจ์เกิดการเคลื่อนที่มากจนเกินไป แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อแรงตอบสนองที่อุปกรณ์แบริดจ์สร้างขึ้นซึ่งมีผลต่อผู้ควบคุม เนื่องจากแรงบิดที่อุปกรณ์ขับเคลื่อนหรือมอเตอร์สร้างขึ้นเพื่อนำไปสร้างแรงตอบสนองให้แก่ผู้ควบคุม ส่วนหนึ่งจะต้องถูกนำไปชดเชยให้กับแรงเสียดทานที่มีอยู่ ดังนั้นทำให้แรงตอบสนองที่มีต่อผู้ควบคุมจึงมีค่าผิดไปจากความเป็นจริง



## 2.2 งานวิจัยอุปกรณ์แสบติดและโครงสร้างแบบขนานที่ผ่านมา

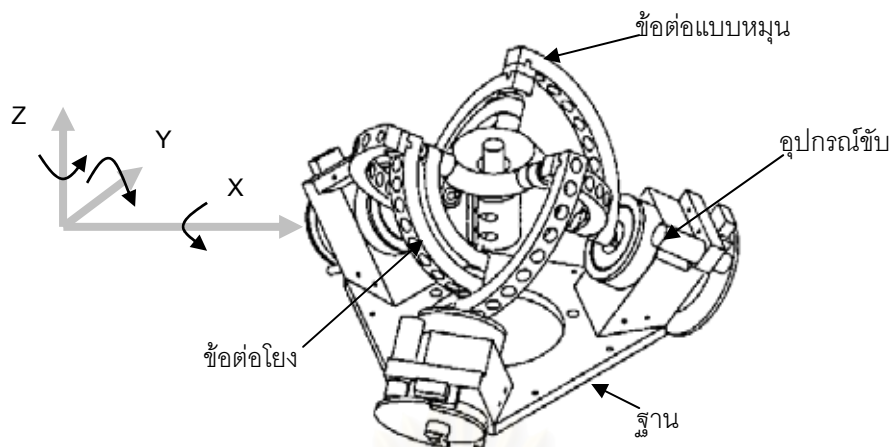
ในการออกแบบสร้างแขนกลเพื่อให้ได้ลักษณะเฉพาะที่จำเป็นตามที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษางานวิจัยที่ได้ทำมาก่อนหน้านี้เพื่อนำมาใช้พิจารณาในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์แสบติดซึ่งเท่าที่ได้ศึกษามาจะกล่าวเฉพาะงานวิจัยที่น่าสนใจซึ่งมีดังต่อไปนี้

2.2.1 Y-Star Parallel Manipulator [1] ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบขนานที่มี 3 องศาอิสระ คือมีเฉพาะการเคลื่อนที่ในแนวแกน X-Y-Z (Translation) เท่านั้น โดยที่แต่ละขาร่างห่างเท่าๆกันด้วยมุมที่มีขนาดเท่ากับ 120 องศา โดยมีอุปกรณ์ขับ (Actuator) 3 ตัวขับผ่านระบบส่งผ่านกำลังที่เป็นแบบบอลสกรู (Ball Screw) เพื่อไปขับแขนทั้ง 3 แขนอันซึ่งเป็นแบบ Four-Bar Linkage โดยที่แขนทั้ง 3 แขนอันนี้ต่อเข้ากับระบบส่งผ่านกำลังที่เป็นแบบบอลสกรูด้วยข้อต่อที่เป็นแบบยูนิเวอร์แซล (Universal Joint) และปลายอีกด้านหนึ่งของแขนทั้ง 3 อันนี้ต่อเข้ากับ แผ่นที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (Moving Plate) หรือปลายแขน (End-Effector) ด้วยข้อต่อที่เป็นแบบยูนิเวอร์แซล (Universal Joint) ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 Y-Star Parallel Manipulator

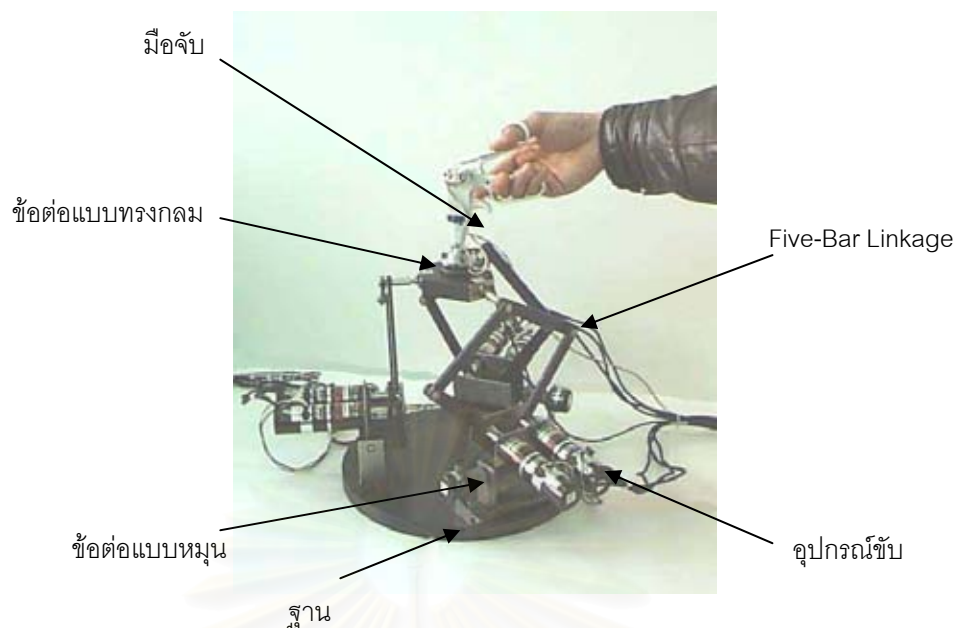
2.2.2 Agile eye [2] ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบ Spherical Parallel Manipulator ซึ่งมี 3 องศาอิสระคือมีเฉพาะการหมุนรอบแนวแกน X-Y-Z or Roll-Pitch-Yaw (Orientation) เท่านั้น ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 Agile eye

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าทุกก้านต่อโยง (Link) มีรูมากมายซึ่งสาเหตุที่ต้องรูมากก็เพื่อเป็นการลดน้ำหนักของก้านต่อโยงลงซึ่งจะมีผลโดยตรงทำให้ความเฉื่อยมีค่าลดลง ซึ่งแต่ละก้านต่อโยงจะต่อด้วยข้อต่อซึ่งเป็นแบบหมุน (Revolute Joint) และแนวแกนหมุนของข้อต่อทุกข้อต่อจะเกิดการตัดกันที่จุดๆเดียวกันซึ่งเรียกว่าจุดศูนย์กลางของการหมุน (Center of Rotation) ซึ่งจุดนี้ยังเป็นจุดศูนย์กลางของการหมุนของอุปกรณ์นี้ด้วยและที่ฐานมีอุปกรณ์จับ 3 ตัวซึ่งวางห่างเท่าๆกันด้วยมุมที่มีขนาดเท่ากับ 120 องศา

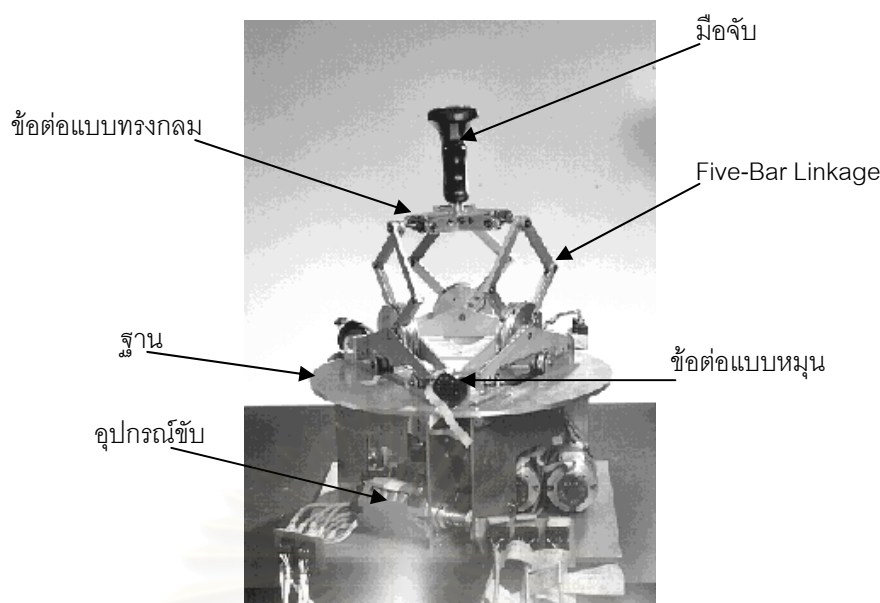
2.2.3 Kaist Master [3] ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบขนานที่มี 6 องศาอิสระโดยนำโครงสร้างแบบ Five-Bar Linkage 3 ชุดมาวางห่างเท่าๆกันด้วยมุมที่มีขนาดเท่ากับ 120 องศาโดย Five-Bar Linkage ทั้ง 3 ชุดนี้ต่อเข้ากับด้ามจับ (Handle) ด้วยข้อต่อที่เป็นแบบทรงกลม (Spherical Joint) และที่ฐานของ Five-Bar Linkage ทั้ง 3 ชุดนี้ต่อเข้ากับฐานของแขนกลด้วยข้อต่อที่เป็นแบบหมุนโดยทิศของแกนหมุนนั้นขนานกับ Five-Bar Linkage แต่ละอันซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 Kaist Master

จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่ามีอุปกรณ์ขับเคลื่อน 6 ตัวโดยแบ่งออกเป็น 3 ชุดโดยที่แต่ละชุดนั้นมีอุปกรณ์ขับเคลื่อน 2 ตัวซึ่งติดตั้งอยู่ที่ฐานของ Five-Bar Linkage แต่ละอันทำให้แขนกลนำแบบนี้มีความเฉื่อยมากเนื่องจากอุปกรณ์ขับเคลื่อนแต่ละตัวต้องเคลื่อนที่ตาม Five-Bar Linkage ไปด้วยเมื่อแขนกลมีการเคลื่อนที่ และอุปกรณ์ขับเคลื่อนนี้ใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบฮาร์มอนิกทำให้ไม่มีแบลกลเลขเกิดขึ้นและระบบส่งผ่านกำลังแบบฮาร์มอนิกนี้มีอัตราทดรอบเท่ากับ 1 ต่อ 50 ทำให้ความสามารถในการขับเคลื่อนไม่ค่อยดีนักเนื่องจากอัตราทดรอบที่มากไป และมีการติดตั้งอุปกรณ์รับรู้ตำแหน่ง (Position Sensor) เพิ่มจากเดิมที่มีอยู่แล้ว 6 ตัวขึ้นอีก 3 ตัวกลายเป็นทั้งหมด 9 ตัวเพื่อให้สามารถหาคำตอบที่ตายตัวของสมการการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้าได้

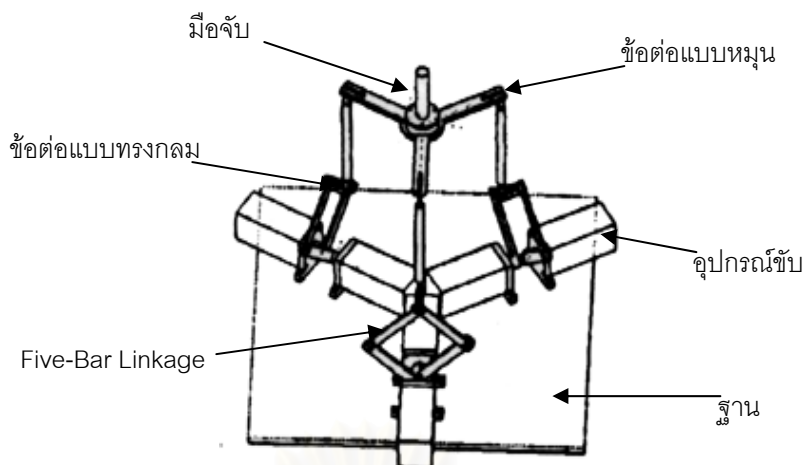
2.2.4 UCI Hand Controller or 3 Pantograph linkages [4] ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบขนานที่มี 6 องศาอิสระ โดยนำโครงสร้างแบบ Five-Bar Linkage 3 ชุดมาวางห่างเท่าๆกันด้วยมุมที่มีขนาดเท่ากับ 120 องศาโดยที่ Five-Bar Linkage ทั้ง 3 ชุดนี้ต่อเข้ากับมือจับด้วยข้อต่อแบบทรงกลมและที่ฐานของ Five-Bar Linkage ทั้ง 3 ชุดนี้ต่อเข้ากับฐานของแขนกลโดยใช้ข้อต่อแบบหมุนโดยทิศของแกนหมุนขนานกับ Five-Bar Linkage แต่ละอันซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 UCI Hand Controller

จากรูปที่ 2.4 จะเห็นว่ามีอุปกรณ์ขับเคลื่อน 6 ตัวโดยที่ Five-Bar Linkage แต่ละอันใช้ อุปกรณ์ขับเคลื่อน 2 ตัวซึ่งอุปกรณ์ขับเคลื่อนแต่ละตัวใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบมู่เล่และเคเบิล (Tendon-Pulley) เป็นหลักทำให้สามารถติดตั้งอุปกรณ์ขับเคลื่อนและอุปกรณ์วัดมุมไว้ที่ ฐานของแขนกลได้ทั้งหมดทำให้แขนกลนี้มีความเฉื่อยต่ำ และทำให้แรงเสียดทาน และแบลคเลซ (Backlash) ของอุปกรณ์ส่งผ่านกำลังมีค่าน้อย ส่วนการหาคำตอบที่ ตายตัวของ Forward Kinematics แก้โดยการติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมเพิ่มขึ้นจากเดิมที่มี อยู่แล้ว 6 ตัวขึ้นอีก 3 ตัวกลายเป็นทั้งหมด 9 ตัวทำให้ได้คำตอบที่ตายตัวของสมการ การเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้าได้

2.2.5 โครงสร้างแบบขนานที่มี 6 องศาอิสระ [5] โดยนำโครงสร้างแบบ Five-Bar Linkage or Pantograph Linkage 3 ชุดมาวางห่างเท่าๆกันด้วยมุมที่มีขนาดเท่ากับ 120 องศาโดย Five-Bar Linkage ทั้ง 3 ต่อเข้ากับก้านต่อโยงด้วยข้อต่อแบบทรงกลม และปลายก้านต่อโยงทั้ง 3 ด้านต่อเข้ากับด้ามจับด้วยข้อต่อแบบหมุนโดยทิศของแกน หมุนขนานกับ Five-Bar Linkage แต่ละอัน และที่ฐานของ Five-Bar Linkage ทั้ง 3 อันนี้ต่อเข้ากับฐานของแขนกลโดยยึดอยู่กับที่ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 Parallel Mechanism

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่ามียูปรกรณ์จับ 6 ตัววางยึดอยู่บนฐานโดยที่อุปกรณ์จับ 2 ตัวจะใช้จับ Five-Bar Linkage 1 ชุด และอุปกรณ์จับนี้ใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบขับตรงเป็นหลักคือไม่มีการทดเลยดังนั้นทำให้ความสามารถในการขับเคลื่อนข้างดีและมีแรงเสียดทานน้อยลง เนื่องจากว่าอุปกรณ์จับและอุปกรณ์วัดมุมวางยึดอยู่บนฐานของแกนกลทั้งหมดทำให้แกนกลนี้มีความเฉื่อยต่ำ ส่วนการหาค่าตอบของสมการการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้านั้นไม่สามารถหาค่าตอบที่ตายตัวได้ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ในการหาค่าตอบที่ตายตัวของสมการการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้าซึ่งใช้วิธีของ Newton-Raphson ในการหาค่าตอบ

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาได้ข้อสรุปว่าตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์จับของแกนกลส่วนใหญ่อยู่ที่ฐานของแกนกล โดยมีอุปกรณ์ส่งผ่านกำลังทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังจากอุปกรณ์จับซึ่งติดตั้งอยู่ที่ฐานไปสู่ข้อต่อของก้านโยงต่างๆของแกนกล โดยทำหน้าที่ขยายหรือลดแรงบิด เพิ่มหรือลด ความเร็วเชิงมุม และทำหน้าที่เปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบหมุนเป็นแบบเคลื่อนที่เชิงเส้น ดังนั้นระบบส่งผ่านกำลังที่จะนำมาใช้เพื่อให้อุปกรณ์แฮบติคมีน้ำหนักเบา ไม่มีความหลวมของชุดเฟืองและความเฉื่อยที่ต่ำลงจึงเลือกใช้ระบบส่งกำลังแบบสายพานและมู่เฒ่า (Belt-and-Pulley system) เป็นระบบส่งผ่านกำลัง และจะติดตั้งอุปกรณ์จับไว้ที่ฐานของอุปกรณ์แฮบติคเพื่อลดน้ำหนักและลดความเฉื่อยที่ปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคให้ต่ำลง

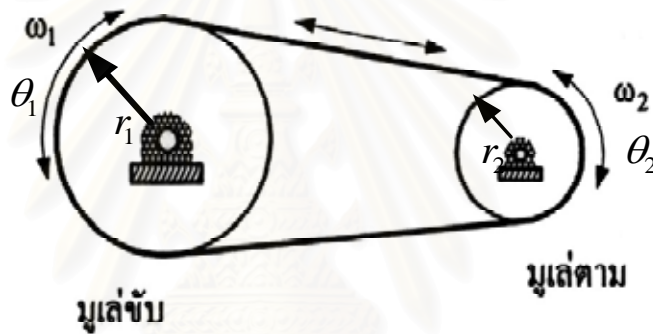


### บทที่ 3

## การออกแบบอุปกรณ์แฮบติค

### 3.1 การออกแบบระบบสายพานและมู่เล่

ระบบส่งผ่านกำลังแบบนี้ทำให้เราไม่จำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ขับไว้ที่ข้อต่อแต่ละอันแต่เราสามารถย้ายไปติดตั้งที่ฐานของอุปกรณ์แฮบติคได้ซึ่งจะทำให้ความเฉื่อยและน้ำหนักที่ปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคลดลงได้มาก ระบบส่งผ่านกำลังแบบสายพานและมู่เล่โดยทั่วไปนั้นมีหลักการซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบสายพานและมู่เล่

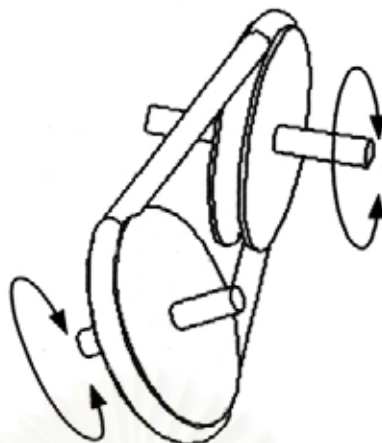
เนื่องจากความยาวส่วนโค้งที่เคลื่อนที่ระหว่างมู่เล่มีค่าเท่ากันดังนั้น

$$r_1 \theta_1 = r_2 \theta_2$$

และแรงตึงในสายพานเท่ากับ

$$\frac{T_1}{r_1} = \frac{T_2}{r_2}$$

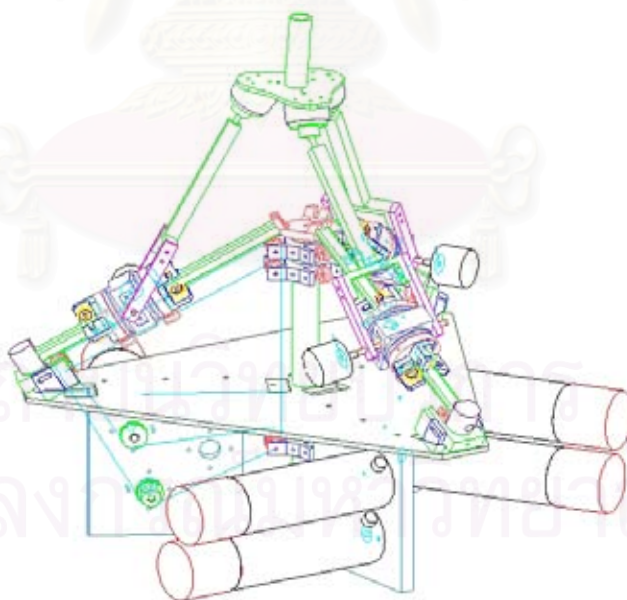
ระบบนี้สามารถส่งผ่านกำลังได้โดยที่มู่เล่ทั้งสองอยู่ห่างกันมากได้ ข้อจำกัดของระบบนี้คือไม่สามารถส่งผ่านกำลังในขณะที่มุมระหว่างระนาบของมู่เล่ทั้งสองมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ระบบสายพานและมู่เล่ที่ระนาบของมู่เล่ทั้งสองไม่ได้อยู่บนระนาบเดียวกัน

### 3.2 การออกแบบกลไกของอุปกรณ์แฮบติค

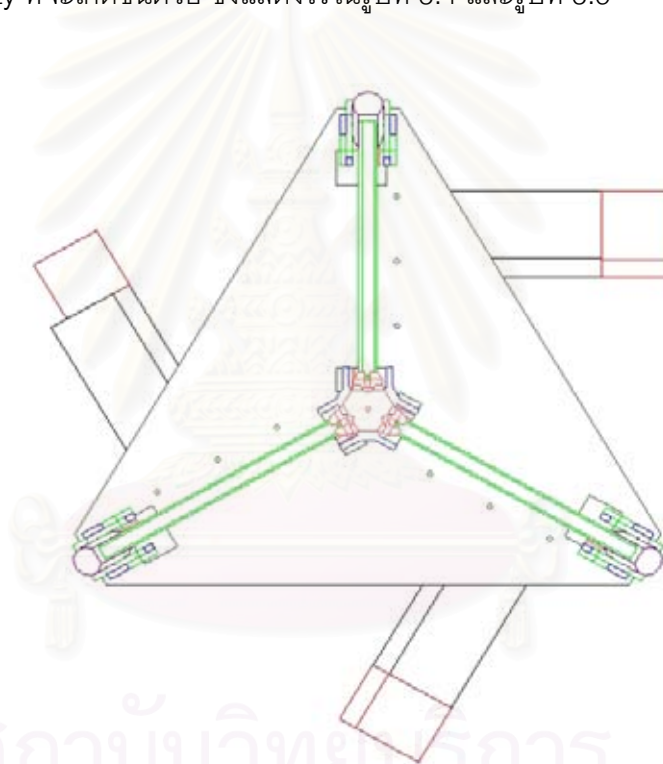
จากระบบมู่เล่และสายพานสามารถนำมาแก้ไขตำแหน่งของอุปกรณ์ขับให้สามารถนำไปวางไว้ที่ฐานได้ทั้งหมด ดังนั้นอุปกรณ์แฮบติคที่ได้ออกแบบไว้จึงเป็นไปดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของอุปกรณ์แฮบติคที่ออกแบบไว้

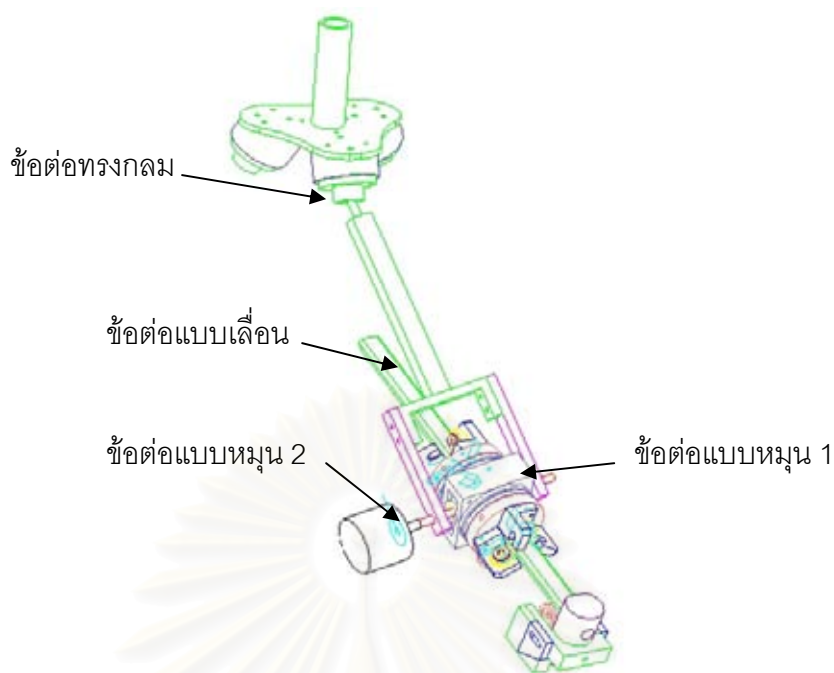
จากรูปที่ 3.3 ที่ฐานล่างจะมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าซึ่งทำมุมกันมีขนาดเท่ากับ 120 องศาและมีรัศมีเท่ากับ 242.4 มิลลิเมตร โดยที่แต่ละด้านจะมีแกนกลด้านละ 1 แขนและแต่

ละแขนจะมีติดตั้งอุปกรณ์รับไว้แขนละ 2 ตัวและติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมไว้แขนละ 3 ตัว แล้วนำแต่ละแขนมารวมกันที่แผ่นสามเหลี่ยมที่อยู่ด้านบนซึ่งทำหน้าที่เคลื่อนที่ไปมาได้ซึ่งมีรัศมีเท่ากับ 47 มิลลิเมตรซึ่งแผ่นสามเหลี่ยมนี้มีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมด้านเท่าเหมือนกับแผ่นที่ฐานล่างและแขนนี้ต่อกับแผ่นบนด้วยข้อต่อแบบทรงกลม โดยที่แต่ละแขนมีความยาวเท่ากับ 220 มิลลิเมตร และประกอบไปด้วยข้อต่อแบบหมุน 2 ข้อต่อซึ่งแกนหมุนทั้งสองข้อต่อตัดกันแบบตั้งฉาก ส่วนข้อต่อแบบเลื่อน 1 ข้อต่อซึ่งแท่งสไลด์หรือแกนของข้อต่อแบบเลื่อนวางเอียงจากแนวระดับขึ้นไป 30 องศา โดยที่ข้อต่อแบบหมุน 1 ข้อต่อตั้งฉากกับแกนของข้อต่อแบบเลื่อนและข้อต่อแบบหมุนอีกอันจะขนานกับแกนของข้อต่อแบบเลื่อน การที่แกนของข้อต่อแบบเลื่อนวางเอียงจากแนวระดับขึ้นไป 30 องศาเพื่อให้ที่ปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคสามารถมีการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z ได้มากขึ้นและลด Singularity ที่จะเกิดขึ้นด้วย ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 โครงสร้างฐานของอุปกรณ์แฮบติค





รูปที่ 3.5 โครงสร้างแขนแต่ละด้านของอุปกรณ์แฮบติค

ข้อดีของอุปกรณ์แฮบติคลักษณะนี้คือ

1. มีค่าความเฉื่อยน้อยและน้ำหนักเบาเนื่องจากอุปกรณ์จับทุกตัววางอยู่ที่ฐานและโครงสร้างส่วนที่ต้องมีการเคลื่อนที่มาจากอลูมิเนียม
2. ไม่มีแบลคแดชเนื่องจากอุปกรณ์แฮบติคนี้ใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบสายพานและมู่เล่
3. มีสมรรถการเคลื่อนที่ที่สามารถหาคำตอบแบบตายตัวได้ทั้งสมรรถการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้าและสมรรถการเคลื่อนที่แบบผกผัน

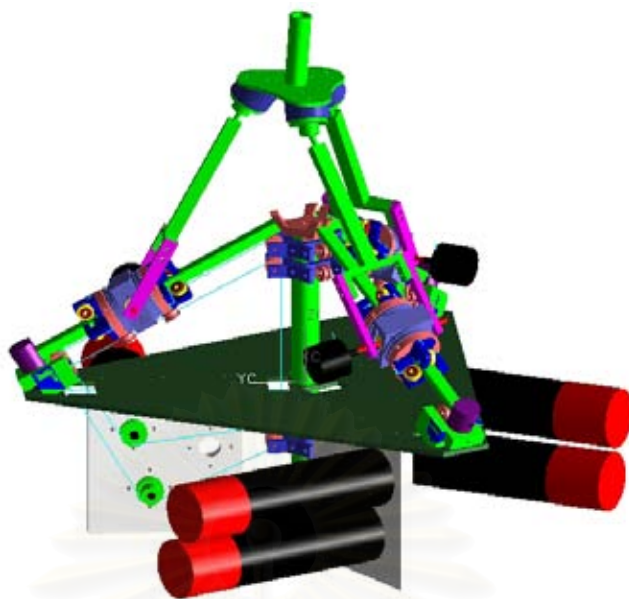
ข้อเสียของอุปกรณ์แฮบติคลักษณะนี้คือ

1. เนื่องจากการเดินสายพานนี้มีการซ้อนทับหรือพ่วงกัน (Coupling) จึงทำให้การคำนวณและการออกแบบโครงสร้างมีความซับซ้อนมากขึ้น
2. ข้อต่อแบบเลื่อนที่สร้างขึ้นนี้เกิดแรงเสียดทานมากเนื่องจากตลับลูกปืน (Bearing) ต้องกดลงบนแกนของข้อต่อแบบเลื่อนให้แน่นเพื่อไม่ให้ข้อต่อแบบเลื่อนนั้นเกิดการหมุนรอบแกนของข้อต่อแบบเลื่อนได้

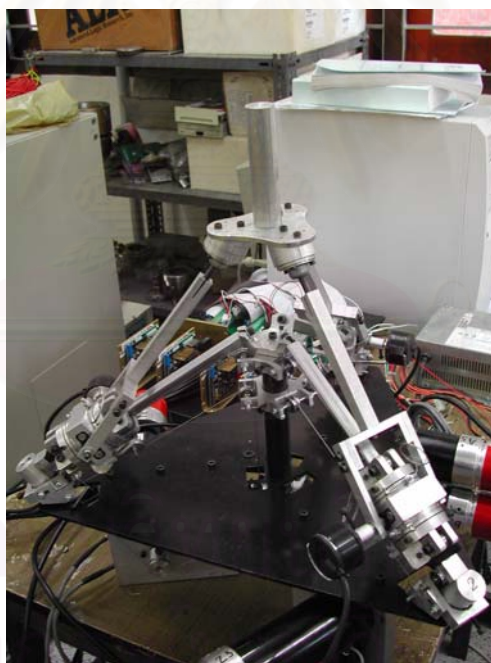
### 3.3 รายละเอียดของอุปกรณ์แฮบติค

อุปกรณ์แฮบติคซึ่งแบ่งโครงสร้างออกเป็น 3 กลุ่มโดยแบ่งตามแขนที่มีหน้าตาเหมือนกัน ซึ่งแต่ละแขนมีลักษณะดังรูปที่ 3.5 ซึ่งวางท่ามุมเท่าๆกันมีขนาดเท่ากับ 120 องศาที่ฐานแผ่นล่าง ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 3.4 โดยที่มีรายละเอียดดังต่อไปนี้โดยเรียงจากข้อต่อที่อยู่ล่างสุดขึ้นไปจนถึงข้อต่อบนสุด

- 3.3.1 ข้อต่อแบบเลื่อน ใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบมู่เล่และสายพานโดยมู่เล่ขับมีรัศมีเท่ากับ 10 มิลลิเมตรซึ่งติดตั้งบนเพลลาของมอเตอร์กระแสตรงและได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมไว้ที่เพลลาของมอเตอร์ซึ่งมีความละเอียดเท่ากับ 5000 พัลส์ต่อรอบ แต่ได้ทำการนับแบบคูณ 4 ทำให้ความละเอียดเพิ่มขึ้นเป็น 20000 พัลส์ต่อรอบ
- 3.3.2 ข้อต่อแบบหมุนตัวที่ 1 ใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบมู่เล่และสายพานโดยมู่เล่ขับมีรัศมีเท่ากับ 10 มิลลิเมตรซึ่งติดตั้งบนเพลลาของมอเตอร์กระแสตรงและได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมไว้ที่เพลลาของมอเตอร์ซึ่งมีความละเอียดเท่ากับ 5000 พัลส์ต่อรอบ แต่ได้ทำการนับแบบคูณ 4 ทำให้ความละเอียดเพิ่มขึ้นเป็น 20000 พัลส์ต่อรอบ และมีมู่เล่ตามที่มีรัศมีเท่ากับ 50 มิลลิเมตร
- 3.3.3 ข้อต่อแบบหมุนตัวที่ 2 ซึ่งต่อตรงกับอุปกรณ์วัดมุมที่มีความละเอียดเท่ากับ 2500 พัลส์ต่อรอบ แต่ได้ทำการนับแบบคูณ 4 ทำให้ความละเอียดเพิ่มขึ้นเป็น 10000 พัลส์ต่อรอบ
- 3.3.4 ข้อต่อแบบทรงกลม ซึ่งทำหน้าที่เป็นต่อกันระหว่างแขนกับแผ่นบนซึ่งเคลื่อนที่ได้
- 3.3.5 ข้อจำกัดในการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์แฮบติคคือสามารถเคลื่อนที่ได้สูงสุดทางด้านแกน 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



รูปที่ 3.6 โครงสร้างอุปกรณ์แฮบติคที่ออกแบบไว้



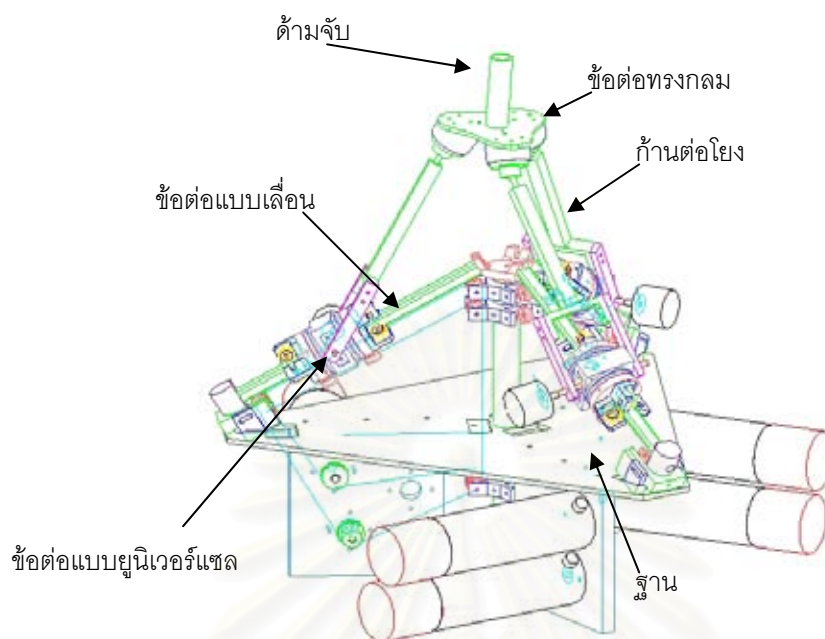
รูปที่ 3.7 โครงสร้างอุปกรณ์แฮบติคที่สร้างเสร็จสมบูรณ์แล้ว

## จลศาสตร์ของอุปกรณ์แสบตึก

ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่นั้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ สมการการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้า และสมการการเคลื่อนที่แบบผกผัน การคำนวณของสมการการเคลื่อนที่แบบผกผันนั้นเป็นการหาตำแหน่งของอุปกรณ์วัดมุมทั้ง 9 ตัวเมื่อเราทราบตำแหน่งของปลายแขนของอุปกรณ์แสบตึกส่วนการคำนวณของสมการการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้าเป็นการหาตำแหน่งที่ปลายเมื่อเราทราบตำแหน่งของอุปกรณ์วัดมุมทั้ง 9 ตัว

### 4.1 สมการการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้า

จากรูปที่ 4.1 ซึ่งแสดงอยู่ข้างล่างจะเห็นแกนสไลด์ที่ใช้ทำหน้าที่เป็นแนวแกนให้แก่ข้อต่อแบบเลื่อนซึ่งข้อต่อแบบเลื่อนจะเคลื่อนที่ไปตามแนวแกนนี้ซึ่งมีทั้งหมด 3 อันซึ่งวางอยู่บนฐานโดยวางห่างเท่าๆกันเป็นมุมขนาดเท่ากับ 120 องศาและวางเอียงจากแนวระดับขึ้นไป 30 องศาเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ในแนวแกน Z ได้มากขึ้นและลด Singularity ที่จะเกิดขึ้นด้วย ส่วนข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซลจะสวมอยู่บนข้อต่อแบบเลื่อนโดยที่แนวแกนของข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซล และแนวแกนของข้อต่อแบบเลื่อนตัดกันที่จุดๆเดียวกัน ข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซลจะต่อกับก้านต่อโยง และปลายก้านต่อโยงอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับแผ่นบนที่ทำหน้าที่เคลื่อนที่และเป็นที่ยาวของด้ามจับด้วยข้อต่อแบบทรงกลม เนื่องจากการหาค่าตอบที่ตายตัวของสมการการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้าของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบขนานปกติแล้วจะทำการหาได้ยากหรือไม่ก็มีหลายคำตอบหรือไม่ก็ต้องหาด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Method) เมื่อเทียบกับแขนกลที่มีโครงสร้างแบบอนุกรมซึ่งการหาด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขนี้ทำให้ไม่สามารถหาตำแหน่งที่ปลายแขนของอุปกรณ์แสบตึกแบบออนไลน์ได้ เพื่อที่จะแก้ปัญหาดังกล่าวให้อุปกรณ์แสบตึกสามารถหาค่าตอบแบบตายตัวของสมการการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้าให้ได้จึงได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมเพิ่มขึ้นอีก 3 ตัวทำให้อุปกรณ์แสบตึกนี้มีอุปกรณ์วัดมุมทั้งหมดเป็น 9 ตัว และใช้อุปกรณ์จับแบบหมุนหรือมอเตอร์กระแสตรงทั้งหมด 6 ตัวในการสร้างแรงบิดซึ่งอุปกรณ์จับทั้งหมดวางไว้อยู่ที่ฐานของอุปกรณ์แสบตึก



รูปที่ 4.1 โครงสร้างของอุปกรณ์แฮบติค

จากรูปที่ 4.2 ซึ่งอยู่ข้างล่างนี้กำหนดให้

$i = 1, 2, 3$  แทนลำดับของแขน

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

$d^i$  แทนระยะที่ข้อต่อแบบเลื่อนเคลื่อนที่ของแขนที่  $i$

$L^i$  แทนความยาวของแขนที่  $i$  (แต่เนื่องจาก  $L^1 = L^2 = L^3 = L$ )

$\theta_1^i$  แทนมุมที่อยู่บน Coordinate Frame ที่ 1 ของแขนที่  $i$

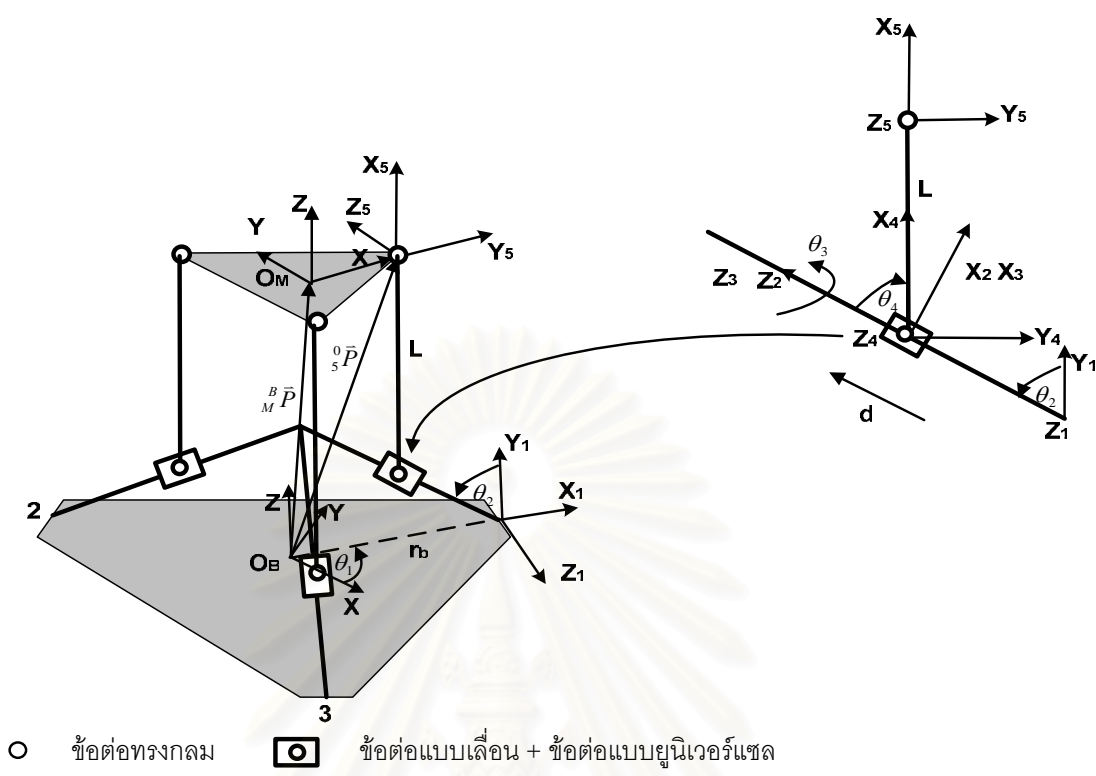
$$\theta_1^1 = 0^\circ, \quad \theta_1^2 = 120^\circ, \quad \theta_1^3 = 240^\circ$$

$\theta_2^i$  แทนมุมที่อยู่บน Coordinate Frame ที่ 2 ของแขนที่  $i$

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

$c = \cos$

$s = \sin$



รูปที่ 4.2 Coordinate frame ที่กำหนดไว้บนโครงสร้าง

จากรูปที่ 4.2 จะแสดงให้เห็นว่าแต่ละ Coordinate frame ถูกวางอยู่อย่างไรโดยเริ่มด้วยเฟรมที่  $B$  ซึ่งติดอยู่ที่จุดศูนย์กลางของฐานของอุปกรณ์แฮบติคเฟรมที่ 1 ซึ่งติดอยู่ที่ปลายของก้านโยง (ที่ใช้ทำหน้าที่เป็นแนวแกนให้ข้อต่อแบบเลื่อนเคลื่อนที่ตามแนวแกนนี้) ด้านที่ติดกับฐานเฟรมที่ 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  $0 = B$ )

$${}^B_1T^i = \begin{bmatrix} c\theta_1^i & 0 & s\theta_1^i & r_b c\theta_1^i \\ s\theta_1^i & 0 & -c\theta_1^i & r_b s\theta_1^i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



$${}^1_2T^i = \begin{bmatrix} c\theta_2^i & 0 & -s\theta_2^i & -d^i s\theta_2^i \\ s\theta_2^i & 0 & c\theta_2^i & d^i c\theta_2^i \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

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

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

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

เพราะฉะนั้น Transformation matrix ของ Coordinate Frame ที่ 5 เมื่อเทียบกับ Coordinate Frame ที่ B ของแขนที่ i มีค่าเป็นดังนี้

$${}^B_5T^i = {}^B_1T^i \times {}^1_2T^i \times {}^2_3T^i \times {}^3_4T^i \times {}^4_5T^i$$

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned}
{}^B_5T_{2,2}^i &= (s\theta_1^i c\theta_2^i c\theta_3^i + c\theta_1^i s\theta_3^i) c\theta_4^i + s\theta_1^i s\theta_2^i s\theta_4^i \\
{}^B_5T_{3,2}^i &= s\theta_2^i c\theta_3^i c\theta_4^i - c\theta_2^i s\theta_4^i \\
{}^B_5T_{4,2}^i &= 0 \\
{}^B_5T_{1,3}^i &= -c\theta_1^i c\theta_2^i s\theta_3^i - s\theta_1^i c\theta_3^i \\
{}^B_5T_{2,3}^i &= -s\theta_1^i c\theta_2^i s\theta_3^i + c\theta_1^i c\theta_3^i \\
{}^B_5T_{3,3}^i &= -s\theta_2^i s\theta_3^i \\
{}^B_5T_{4,3}^i &= 0 \\
{}^B_5T_{1,4}^i &= ((c\theta_1^i c\theta_2^i c\theta_3^i - s\theta_1^i s\theta_3^i) s\theta_4^i - c\theta_1^i s\theta_2^i c\theta_4^i) L - d^i (c\theta_1^i s\theta_2^i) + r_b c\theta_1^i \\
{}^B_5T_{2,4}^i &= ((s\theta_1^i c\theta_2^i c\theta_3^i + c\theta_1^i s\theta_3^i) s\theta_4^i - s\theta_1^i s\theta_2^i c\theta_4^i) L - d^i (s\theta_1^i s\theta_2^i) + r_b s\theta_1^i \\
{}^B_5T_{3,4}^i &= (s\theta_2^i c\theta_3^i s\theta_4^i + c\theta_2^i c\theta_4^i) L + d^i (c\theta_2^i) \\
{}^B_5T_{4,4}^i &= 1
\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} {}^B_5\bar{P}^i \\ 1 \end{bmatrix} &= {}^B_5T^i \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\
\begin{bmatrix} {}^B_5\bar{P}^i \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} ((c\theta_1^i c\theta_2^i c\theta_3^i - s\theta_1^i s\theta_3^i) s\theta_4^i - c\theta_1^i s\theta_2^i c\theta_4^i) L - d^i (c\theta_1^i s\theta_2^i) + r_b c\theta_1^i \\ ((s\theta_1^i c\theta_2^i c\theta_3^i + c\theta_1^i s\theta_3^i) s\theta_4^i - s\theta_1^i s\theta_2^i c\theta_4^i) L - d^i (s\theta_1^i s\theta_2^i) + r_b s\theta_1^i \\ (s\theta_2^i c\theta_3^i s\theta_4^i + c\theta_2^i c\theta_4^i) L + d^i (c\theta_2^i) \\ 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

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

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

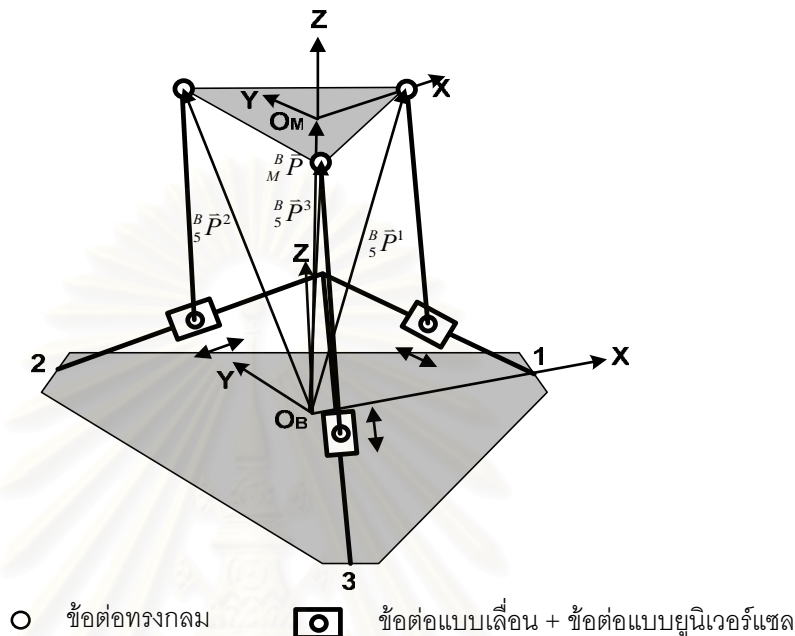
เมื่อ เวกเตอร์ตำแหน่งของฐานบนเมื่อเทียบกับฐานล่างคือ

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



Orientation ของฐานบนเมื่อเทียบกับฐานล่างคือ

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



รูปที่ 4.3 ตำแหน่งของเวกเตอร์ของแต่ละแขน

#### 4.2 สมการการเคลื่อนที่แบบผกผัน

เนื่องจากการหาคำตอบที่ตายตัวของสมการการเคลื่อนที่แบบผกผันของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบขนานปกติแล้วจะทำการหาได้ไม่ยากนักเมื่อเทียบกับการหาคำตอบที่ตายตัวของสมการการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้าของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบขนานซึ่งแสดงวิธีหาไว้ข้างล่างนี้

จากรูปที่ 4.4 กำหนดให้

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

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

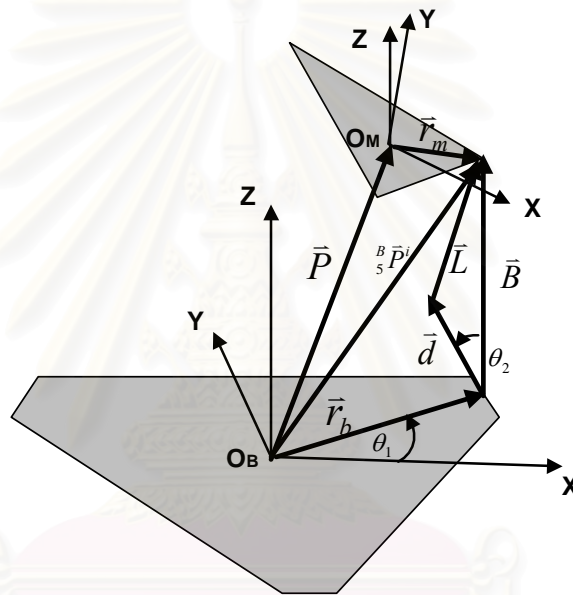
$\vec{r}_b^i = [r_b c\theta_1^i \quad r_b s\theta_1^i \quad 0]^T$  แทนเวกเตอร์จากจุดศูนย์กลางของฐานล่าง ( $O_B$ ) ถึงจุดเริ่มต้นของ Coordinate Frame ที่ 1 ของแขนที่  $i$

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

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

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

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



รูปที่ 4.4 เวกเตอร์ที่กำหนดไว้บนโครงสร้าง

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

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

จาก  ${}^B_5 \vec{P}^i = \vec{P} + {}^B_M R \vec{r}_m^i = {}^B_M T \vec{r}_m^i$  ดังนั้น

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

เมื่อ  ${}^B_M R = [\vec{n} \quad \vec{o} \quad \vec{a}] = R_{RPY}$  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  $\alpha$  แทน Roll angle,  $\beta$  แทน Pitch angle,  $\gamma$  แทน Yaw angle

เพราะฉะนั้น  $\bar{B}^i$  เท่ากับ

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

เมื่อ  ${}^B T_m$  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  $\theta_3^i$  จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.2) ถึงสมการที่ (4.4) ได้ดังนี้

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

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

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

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

$$s\theta_4^i L = \frac{s\theta_1^i s\theta_2^i B_z^i + c\theta_2^i B_y^i}{s\theta_1^i c\theta_3^i + c\theta_1^i c\theta_2^i s\theta_3^i} \quad (4.5)$$

นำ  $c\theta_2^i$  คูณสมการที่ (4.2) ทั้งสองข้าง และนำ  $c\theta_1^i s\theta_2^i$  คูณสมการที่ (4.4) ทั้งสองข้างได้ดังนี้

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

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

นำสองสมการข้างบนนี้มาบวกกันได้

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

เพราะฉะนั้น  $s\theta_4^i L$  เท่ากับ

$$s\theta_4^i L = \frac{c\theta_1^i s\theta_2^i B_z^i + c\theta_2^i B_x^i}{c\theta_1^i c\theta_3^i - s\theta_1^i c\theta_2^i s\theta_3^i} \quad (4.6)$$

นำสมการที่ (4.5) มาเท่ากับสมการที่ (4.6) เพื่อหา  $\theta_3^i$  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  $\theta_4^i$  จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.2) ถึงสมการที่ (4.4) ได้ดังนี้

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

$$\begin{aligned} c\theta_1^i B_x^i &= \left( (c\theta_1^i)^2 c\theta_2^i c\theta_3^i - s\theta_1^i c\theta_2^i s\theta_3^i \right) s\theta_4^i - (c\theta_1^i)^2 s\theta_2^i c\theta_4^i L - d^i \left( (c\theta_1^i)^2 s\theta_2^i \right) \\ s\theta_1^i B_y^i &= \left( (s\theta_1^i)^2 c\theta_2^i c\theta_3^i + s\theta_1^i c\theta_2^i s\theta_3^i \right) s\theta_4^i - (s\theta_1^i)^2 s\theta_2^i c\theta_4^i L - d^i \left( (s\theta_1^i)^2 s\theta_2^i \right) \end{aligned}$$

นำสองสมการข้างบนมาบวกกัน

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

เอา  $c\theta_2^i$  คูณทั้งสองข้างของสมการข้างบน

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

นำ  $s\theta_2^i$  คูณสมการที่ (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) หา  $\theta_4^i$  ได้เท่ากับ

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

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) กับความเร็วของแต่ละข้อต่อที่มีอุปกรณ์ขับเคลื่อนอยู่ (Active joint) ซึ่งเขียนในรูปทั่วไปได้ดังนี้

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

เมื่อ  $A, B$  แทนจาโคเบียนเมตริกซ์ของโครงสร้างแบบ Closed-Loop Chain หรือแบบขนาน

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

ความเร็วเชิงมุมและความเร็วเชิงเส้นของแผ่นบน

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

จากรูปที่ 4.5 ความเร็วที่จุด  $\vec{P}_j$  เป็นดังนี้

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

หรือ

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

เมื่อ  $\vec{S}_{j1} = \vec{e}_j$

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

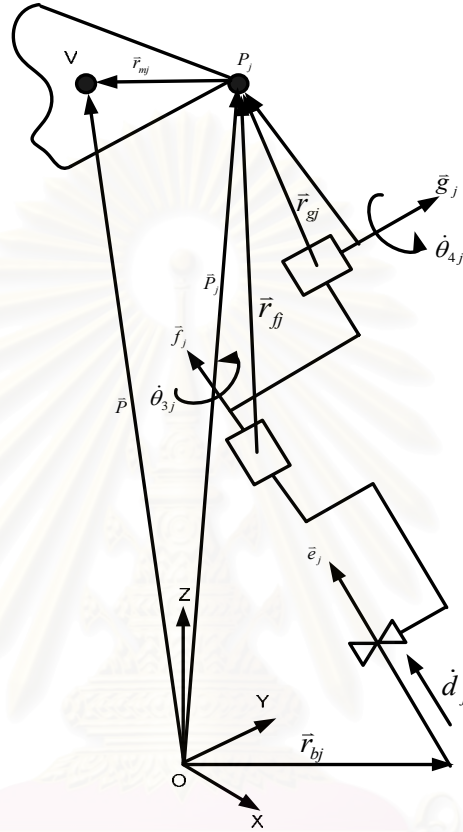
$$\vec{S}_{j2} = \vec{g}_j \times \vec{r}_{gj}$$

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

$$\vec{r}_{fj} = \vec{r}_{gj} = \vec{P}_j - {}^B\vec{P}_j = \vec{P}_j - {}^B\vec{P}_j$$

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

$$j = 1, 2, 3$$



รูปที่ 4.5 เวกเตอร์ที่ตำแหน่งต่างๆของขาที่ j

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

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

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

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

กำหนดให้

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

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

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

$a_{j1} = \frac{\Delta_j}{|\bar{S}_{j2} \times \bar{S}_{j3}|}$  ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด 1x1 แทนค่าต่างๆลงไปได้ผลลัพธ์ดังนี้

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

$\bar{I}_j = \frac{\bar{S}_{j2} \times \bar{S}_{j3}}{|\bar{S}_{j2} \times \bar{S}_{j3}|}$  ซึ่งเป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ขนานกับเวกเตอร์  $(\bar{S}_{j2} \times \bar{S}_{j3})$  แทนค่าต่างๆลงไป

ได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$\bar{I}_j = \begin{bmatrix} (s_1s_3 - c_1c_2c_3)s_4 + c_1s_2c_4 \\ -(c_1s_3 + s_1c_2c_3)s_4 + s_1s_2c_4 \\ -(s_2c_3s_4 + c_2c_4) \end{bmatrix}_j$$

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  $b_{j1} = [(\bar{I}_j \times \bar{r}_{mj})^T \quad \bar{I}_j^T]$  ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด 1x6

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

$$a_{j2} = \frac{\Delta_j}{|\bar{S}_{j3} \times \bar{S}_{j1}|} \text{ ซึ่งเป็นเมตริกซ์ขนาด } 1 \times 1 \text{ แทนค่าต่างๆลงไปได้ผลลัพธ์ดังนี้}$$

$$a_{j2} = -s_{j4}L$$

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

ได้ผลลัพธ์ดังนี้

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

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

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

รูปแบบสมการที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำที่ตำแหน่งปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคกับแรงบิดที่ข้อต่อแต่ละข้อต่อนั้นสำหรับโครงสร้างแบบขนานนี้มีสมการของแรงที่ตรงกันข้ามกับแขนกลที่มีโครงสร้างแบบอนุกรมซึ่งมีสมการเป็นดังนี้

$$F = J^T \tau$$

เมื่อ  $F = [M_x \ M_y \ M_z \ F_x \ F_y \ F_z]^T$  แทนแรงที่กระทำที่ปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคซึ่งอยู่บนแผ่นบน

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

$J = A^{-1}B$  แทนจาโคเบียนเมตริกซ์

#### 4.4 Singularity

Singularity สำหรับโครงสร้างแบบขนานนี้ซึ่งจะมีตำแหน่งที่จะเกิดขึ้นมากกว่าโครงสร้างแบบอนุกรมซึ่งเกิดขึ้นได้ 3 แบบคือ

1. Singularity ที่เกิดจากเมตริกซ์  $A$  โดยหาได้จากดีเทอร์มิแนนท์ของเมตริกซ์  $A = 0$  หรือ  $\det(A) = 0$

2. Singularity ที่เกิดจากเมตริกซ์  $B$  โดยหาได้จากดีเทอร์มิแนนท์ของเมตริกซ์  $B = 0$  หรือ  $\det(B) = 0$
3. Singularity ที่เกิดจากเมตริกซ์  $A^{-1}B$  โดยหาได้จากดีเทอร์มิแนนท์ของเมตริกซ์  $A^{-1}B = 0$  หรือ  $\det(A^{-1}B) = 0$

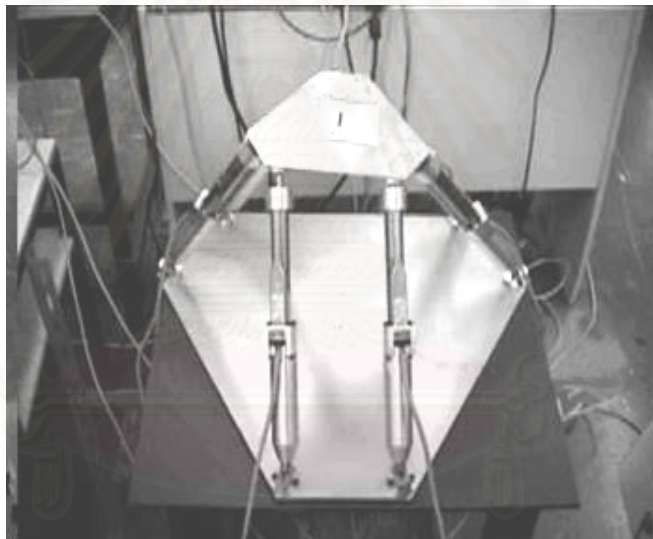


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

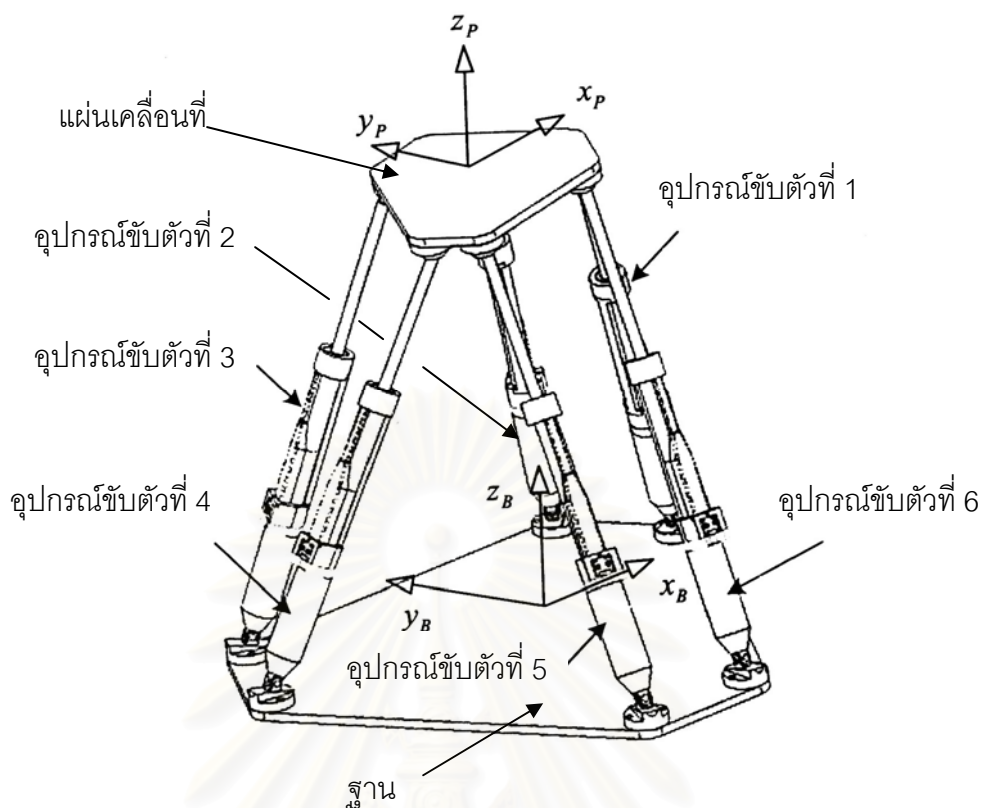
### จลศาสตร์ของแขนกลสจ๊วต

แขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วต (Stewart Platform Manipulator) เป็นหุ่นยนต์แบบขนานแบบหนึ่งซึ่งถูกสร้างครั้งแรกโดย D.Stewart ในปี ค.ศ.1965 เขาใช้ในการพัฒนาโครงสร้างของเครื่องจำลองการบิน (Flight Simulator) ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 6 องศาอิสระซึ่งมีลักษณะแสดงไว้ดังรูปที่ 5.1 โดยที่แผ่นบนจะเชื่อมติดกับส่วนที่เป็นฐานโดยอุปกรณ์ขับเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น (Linear motor) จำนวน 6 ชุดที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกระทำโดยการควบคุมความยาวของอุปกรณ์ขับเคลื่อนทั้ง 6 ชุดนี้เพื่อให้ส่วนที่เคลื่อนที่สามารถเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งและทิศทางที่ผู้ควบคุมต้องการได้



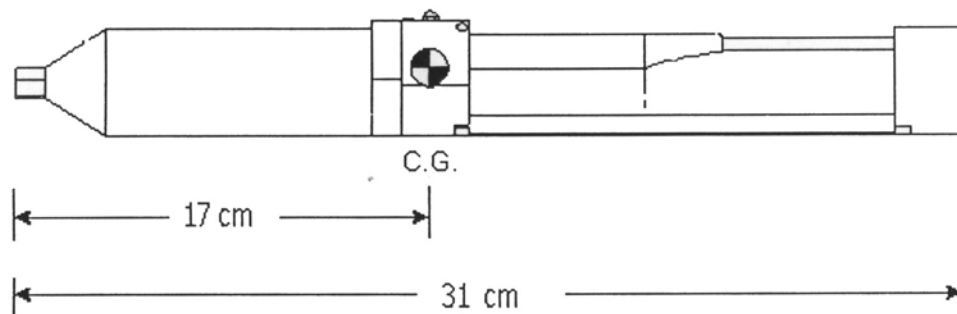
รูปที่ 5.1 แขนกลสจ๊วต

โครงสร้างของแขนกลแบบสจ๊วตนี้มีข้อดีที่เห็นได้เด่นชัดคือ มีอัตราส่วนระหว่างแรงที่มากระทำกับส่วนที่เคลื่อนที่ต่อน้ำหนักทั้งหมดของโครงสร้างนั้นมีค่ามาก เนื่องจากแรงที่รับโดยส่วนที่เคลื่อนที่นั้นถูกรองรับด้วยอุปกรณ์ขับเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นโดยที่แรงจะกระจายเกือบเท่าๆกันทั้ง 6 ตัวจึงทำให้โครงสร้างแบบนี้สามารถรับแรงได้มาก

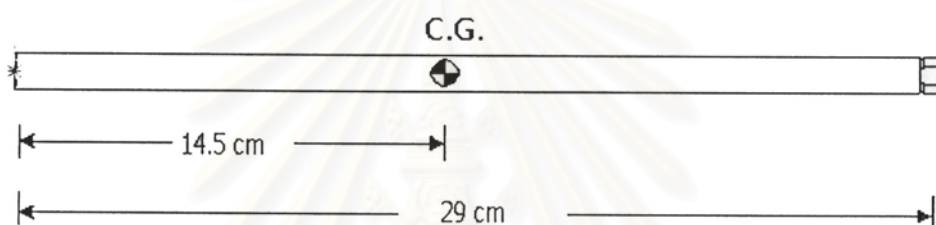


รูปที่ 5.2 ตำแหน่งของอุปกรณ์ขับเคลื่อนแต่ละตัวของแขนกลสจิวัด

จากรูปที่ 5.2 เป็นการแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งของอุปกรณ์ขับเคลื่อนแต่ละตัวซึ่งวางอยู่บนฐานรูปทรงหกเหลี่ยมโดยมีรัศมีของส่วนฐานเท่ากับ 30 เซนติเมตร และเชื่อมกับแผ่นเคลื่อนที่รูปทรงหกเหลี่ยมเช่นกันโดยมีรัศมีเท่ากับ 10 เซนติเมตร และมีมวลเท่ากับ 0.38 กิโลกรัม อุปกรณ์ขับเคลื่อนแต่ละตัวเป็นแบบเชิงเส้นซึ่งมีความละเอียดเท่ากับ 19.53 ไมครอนหมายความว่าเมื่อส่วนที่เคลื่อนที่ (Slider) เคลื่อนที่ไป 1 สเต็ป ที่ปลายของส่วนที่เคลื่อนที่จะเคลื่อนที่ไปได้ระยะทางเท่ากับ 19.53 ไมครอนเมตร อุปกรณ์ขับเคลื่อนนี้ประกอบด้วยส่วนที่อยู่นิ่ง (Stator) ซึ่งมีมวลเท่ากับ 0.7 กิโลกรัมและส่วนที่เคลื่อนที่ซึ่งมีมวลเท่ากับ 0.22 กิโลกรัม โครงสร้างของตัวขับเคลื่อนมีลักษณะเช่นเดียวกับสเต็ปมอเตอร์คือเป็นมอเตอร์แบบ 2 เฟส ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 5.3 และรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.3 รายละเอียดของส่วน Stator ของอุปกรณ์ขับ

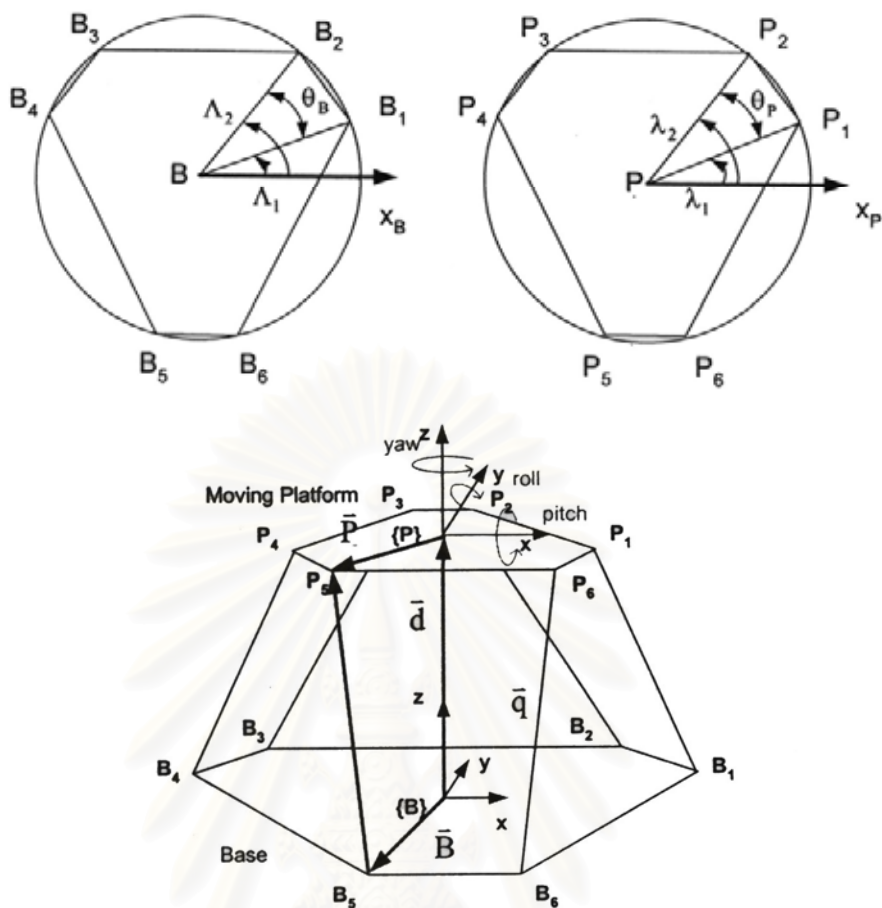


รูปที่ 5.4 รายละเอียดของส่วน Slider ของอุปกรณ์ขับ

แกนกลที่ใช้ต่อกับอุปกรณ์แฮบติคที่สร้างในครั้งนี้เป็นแกนกลสจ๊วตที่มีโครงสร้างเป็นแบบขนานเหมือนกัน และมีจำนวนขององศาอิสระเท่ากับ 6 องศาอิสระเหมือนกัน เนื่องจากสมการการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้าเป็นแบบไม่สามารถหาคำตอบที่ตายตัวได้ ดังนั้นจึงต้องหาคำตอบด้วยวิธีเชิงตัวเลขและทำให้ไม่สามารถหาคำตอบแบบออนไลน์ได้และคำตอบที่ได้มีหลายค่าด้วยซึ่งขึ้นอยู่กับค่าเริ่มต้นของคำตอบ ส่วนสมการการเคลื่อนที่แบบผกผันนั้นสามารถหาคำตอบที่ตายตัวได้ ดังนั้นจึงไม่มีปัญหาในการหาคำตอบแบบออนไลน์

### 5.1 สมการการเคลื่อนที่แบบผกผัน

เมื่อทราบตำแหน่งและทิศทางของจุดกึ่งกลางที่ปลายแขนของแกนกลสจ๊วต ดังนั้นถ้าต้องการหาระยะยึดของอุปกรณ์ขับแต่ละตัวว่าจะมีระยะยึดเท่าใดโดยหาได้จากสมการการเคลื่อนที่แบบผกผัน โดยหาได้ดังนี้



รูปที่ 5.5 เวกเตอร์ที่กำหนดไว้บนแขนกลสจิวัด

จากรูปที่ 5.5 ซึ่งอยู่ข้างบนนี้กำหนดให้

{P} แทนระนาบของส่วนที่เคลื่อนที่หรือปลายแขน (End-effector)

{B} แทนระนาบของส่วนฐาน (Base frame)

P แทนจุดศูนย์กลางของระนาบ {P} ทิศของแกน  $Z_p$  มีทิศทางพุ่งออกจากระนาบ {P}

$\theta_p$  แทนมุมระหว่างเส้นตรง  $PP_1$  กับเส้นตรง  $PP_2$  บนระนาบของส่วนที่เคลื่อนที่

B แทนจุดศูนย์กลางของระนาบ {B} ทิศของแกน  $Z_B$  มีทิศทางพุ่งออกจากระนาบ {B}

$\theta_B$  แทนมุมระหว่างเส้นตรง  $BB_1$  กับเส้นตรง  $BB_2$  บนระนาบของส่วนฐาน

$\lambda_i$  แทนมุมระหว่าง  $PP_i$  กับ  $X_p$

$\Lambda_i$  แทนมุมระหว่าง  $BB_i$  กับ  $X_B$  ซึ่งจะได้ว่า

$$\Lambda_i = 60i^\circ - \frac{\theta_B}{2}, \lambda_i = 60i^\circ - \frac{\theta_P}{2} \quad \text{เมื่อ } i = 1,3,5$$

และ

$$\Lambda_i = \Lambda_{i-1} + \theta_B, \quad \lambda_i = \lambda_{i-1} + \theta_P \quad \text{เมื่อ } i = 2, 4, 6$$

${}^P P_i = [p_{ix} \quad p_{iy} \quad p_{iz}]^T$  แทนตำแหน่งของ  $P_i$  บนระนาบ  $\{P\}$  ดังนั้นจะได้ว่า

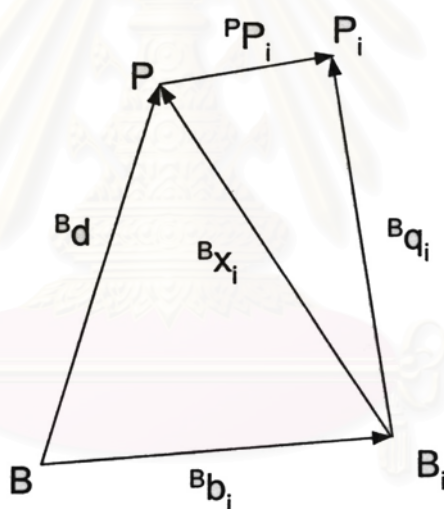
$${}^P P_i = [r_P \cos(\lambda_i) \quad r_P \sin(\lambda_i) \quad 0]^T$$

${}^B B_i = [b_{ix} \quad b_{iy} \quad b_{iz}]^T$  แทนตำแหน่งของ  $B_i$  บนระนาบ  $\{B\}$  ดังนั้นจะได้ว่า

$${}^B B_i = [r_B \cos(\Lambda_i) \quad r_B \sin(\Lambda_i) \quad 0]^T$$

$r_P$  แทนรัศมีของส่วนที่เคลื่อนที่ซึ่งเท่ากับ 10 เซนติเมตร

$r_B$  แทนรัศมีของฐานซึ่งเท่ากับ 30 เซนติเมตร



รูปที่ 5.6 เวกเตอร์ของแต่ละอุปกรณ์

จากรูปที่ 5.6 ซึ่งอยู่ข้างบนนี้กำหนดให้

${}^B d = [x \quad y \quad z]^T$  แทนเวกเตอร์ของตำแหน่งจุดกึ่งกลางของส่วนที่เคลื่อนที่ที่เราต้องการบนระนาบ  $\{P\}$  โดยเทียบกับระนาบ  $\{B\}$

${}^B q_i = [q_{ix} \quad q_{iy} \quad q_{iz}]^T$  แทนเวกเตอร์ของความยาวของตัวข้อต่อแต่ละตัวเทียบกับระนาบ  $\{B\}$  ซึ่งคำนวณได้จาก

$${}^B q_i = {}^B x_i + {}^B P_i \quad (5.1)$$



เมื่อ  ${}^B x_i = {}^B d - {}^B b_i$  (5.2)

$${}^B x_i = \begin{bmatrix} x - b_{ix} \\ y - b_{iy} \\ z - b_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - b_{ix} \\ y - b_{iy} \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{x}_i \\ \bar{y}_i \\ \bar{z}_i \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

และจาก

$${}^B P_i = {}^B R^P P_i \quad (5.4)$$

$${}^B P_i = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{ix} \\ p_{iy} \\ p_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

เมื่อ  $r_{ij}$  แทนสมาชิกตัวแถวที่  $i$  และหลักที่  $j$  ตามลำดับ

ความยาวของอุปกรณ์ขึ้นแต่ละตัวคำนวณได้จาก

$$l_i = \sqrt{q_{ix}^2 + q_{iy}^2 + q_{iz}^2} \quad (5.6)$$

นำสมการที่ (5.1) ถึงสมการที่ (5.5) ลงในสมการที่ (5.6) จะได้

$$l_i = \sqrt{(\bar{x}_i - u_i)^2 + (\bar{y}_i - v_i)^2 + (\bar{z}_i - w_i)^2} \quad (5.7)$$

กระจายเทอมต่างๆในสมการที่ (5.7) ได้ดังนี้

$$l_i^2 = x^2 + y^2 + z^2 + r_p^2 + r_B^2 + 2(r_{11}p_{ix} + r_{12}p_{iy})(x - b_{ix}) + 2(r_{21}p_{ix} + r_{22}p_{iy})(y - b_{iy}) + 2(r_{31}p_{ix} + r_{32}p_{iy})z - 2(xb_{ix} + yb_{iy}) \quad (5.8)$$

เมื่อ  $x, y, z$  แทนตำแหน่งอ้างอิงที่เราต้องการ

$R_{RPTY}$  แทนทิศทาง **Roll**( $\alpha$ )**Pitch**( $\beta$ )**Yaw**( $\gamma$ ) $R_{RPTY}$  ที่ต้องการกำหนด

$${}^B P R = R_{RPTY} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

เมื่อ  $r_{11} = \cos(\alpha) \cos(\beta)$

$$r_{12} = \cos(\alpha) \sin(\beta) \sin(\gamma) - \sin(\alpha) \cos(\gamma)$$

$$r_{13} = \cos(\alpha) \sin(\beta) \cos(\gamma) + \sin(\alpha) \sin(\gamma)$$

$$\begin{aligned}
r_{21} &= \sin(\alpha) \cos(\beta) \\
r_{22} &= \sin(\alpha) \sin(\beta) \sin(\gamma) + \cos(\alpha) \cos(\gamma) \\
r_{23} &= \sin(\alpha) \sin(\beta) \cos(\gamma) - \cos(\alpha) \sin(\gamma) \\
r_{31} &= -\sin(\beta) \\
r_{32} &= \cos(\beta) \sin(\gamma) \\
r_{33} &= \cos(\beta) \cos(\gamma)
\end{aligned}$$

## 5.2 สมการการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้า

เมื่อทราบความยาวของอุปกรณ์ข้อต่อแต่ละตัว ( $i$ , เมื่อ  $i = 1, 2, \dots, 6$ ) ก็สามารถหาตำแหน่งของ  $x, y, z$  และทิศทางของมุม  $\alpha, \beta, \gamma$  ที่ปลายแขนหรือส่วนที่เคลื่อนที่ หาโดยใช้หลักการของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method) ในการหาคำตอบของระบบสมการไม่เชิงเส้นโดยหาจากสมการที่ (5.8) โดยย้ายข้างให้เท่ากับศูนย์กลายเป็นดังสมการข้างล่างนี้

$$\begin{aligned}
&x^2 + y^2 + z^2 + r_p^2 + r_B^2 + 2(r_{11}p_{ix} + r_{12}p_{iy})(x - b_{ix}) \\
&+ 2(r_{21}p_{ix} + r_{22}p_{iy})(y - b_{iy}) + 2(r_{31}p_{ix} + r_{32}p_{iy})z - 2(xb_{ix} + yb_{iy}) - l_i^2 = 0
\end{aligned} \quad (5.9)$$

จากหลักการของนิวตัน-ราฟสัน สามารถนำมาใช้หาตำแหน่งและทิศทางของส่วนที่เคลื่อนที่ได้ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้คือ

5.2.1 กำหนดค่าเริ่มต้น  $a = [x \ y \ z \ \alpha \ \beta \ \gamma]^T$

5.2.2 จากค่า  $\alpha, \beta, \gamma$  คำนวณ  $r_{ij}$  ของ  ${}^B_p R$  ในสมการที่ (5.9)

5.2.3 จากค่า  $x, y, z$  คำนวณค่า  $\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i$  และ  $u_i, v_i, w_i$  จากสมการ

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_i \\ \bar{y}_i \\ \bar{z}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - b_{ix} \\ y - b_{iy} \\ z \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

และ

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11}p_{ix} + r_{12}p_{iy} \\ r_{21}p_{ix} + r_{22}p_{iy} \\ r_{31}p_{ix} + r_{32}p_{iy} \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

5.2.4 คำนวณค่า  $f_i(a)$  และ  $A_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial a_j}$  เมื่อ  $A_{ij}$  แทนจาโคเบียนเมตริกซ์ โดยที่

$f_i(a)$  เท่ากับ

$$f_i(a) = (\bar{x}_i - u_i)^2 + (\bar{y}_i - v_i)^2 + (\bar{z}_i - w_i)^2 - l_i^2 = 0 \quad (5.12)$$

หาค่า Partial different จากสมการที่ (5.10) และสมการที่ (5.11) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{x}_i}{\partial x} &= \frac{\partial \bar{y}_i}{\partial y} = \frac{\partial \bar{z}_i}{\partial z} = 1 \\ \frac{\partial u_i}{\partial \alpha} &= -v_i, \quad \frac{\partial u_i}{\partial \beta} = w_i \cos(\alpha), \quad \frac{\partial u_i}{\partial \gamma} = p_{iy} r_{13} \\ \frac{\partial v_i}{\partial \alpha} &= u_i, \quad \frac{\partial v_i}{\partial \beta} = w_i \sin(\alpha), \quad \frac{\partial v_i}{\partial \gamma} = p_{iy} r_{23} \\ \frac{\partial w_i}{\partial \alpha} &= 0, \quad \frac{\partial w_i}{\partial \beta} = -(p_{ix} \cos(\beta) + p_{iy} \sin(\beta) \sin(\gamma)), \quad \frac{\partial w_i}{\partial \gamma} = p_{iy} r_{33} \end{aligned} \quad (5.13)$$

แทนค่าจากสมการที่ (5.13) ลงใน  $A_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial a_j}$  จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_i}{\partial a_1} &= \frac{\partial f_i}{\partial x} = \frac{\partial f_i}{\partial \bar{x}_i} = 2(\bar{x}_i + u_i) \\ \frac{\partial f_i}{\partial a_2} &= \frac{\partial f_i}{\partial y} = \frac{\partial f_i}{\partial \bar{y}_i} = 2(\bar{y}_i + v_i) \\ \frac{\partial f_i}{\partial a_3} &= \frac{\partial f_i}{\partial z} = \frac{\partial f_i}{\partial \bar{z}_i} = 2(\bar{z}_i + w_i) \\ \frac{\partial f_i}{\partial a_4} &= \frac{\partial f_i}{\partial \alpha} = 2(-\bar{x}_i v_i + \bar{y}_i u_i) \\ \frac{\partial f_i}{\partial a_5} &= \frac{\partial f_i}{\partial \beta} = 2[(-\bar{x}_i \cos(\alpha) + \bar{y}_i \sin(\alpha) w_i) - (p_{ix} \cos(\beta) + p_{iy} \sin(\beta) \sin(\gamma)) \bar{z}_i] \\ \frac{\partial f_i}{\partial a_6} &= \frac{\partial f_i}{\partial \gamma} = 2 p_{iy} (\bar{x}_i r_{13} + \bar{y}_i r_{23} + \bar{z}_i r_{33}) \end{aligned}$$

5.2.5 คำนวณ  $B_i = -f_i(a)$  เมื่อ  $i = 1, 2, \dots, 6$

ถ้า  $\sum_{j=1}^6 |B_j| < tolerance$  จะได้  $a$  คือคำตอบ

เมื่อ  $tolerance$  แทนค่าผิดพลาดที่ยอมรับได้

5.2.6 แก้สมการ  $\sum_{j=1}^6 A_{ij} \delta a_j = B_i$  สำหรับ  $\delta a_j$  เมื่อ  $i = 1, 2, \dots, 6$

ถ้า  $\sum_{j=1}^6 \delta a_j < tolerance$  จะได้  $a$  คือคำตอบ

5.2.7 ถ้ายังไม่ได้คำตอบให้เลือก  $a^{new} = a + \delta a$  ใหม่และทำซ้ำจากขั้นตอนที่ 5.2.1-

5.2.7



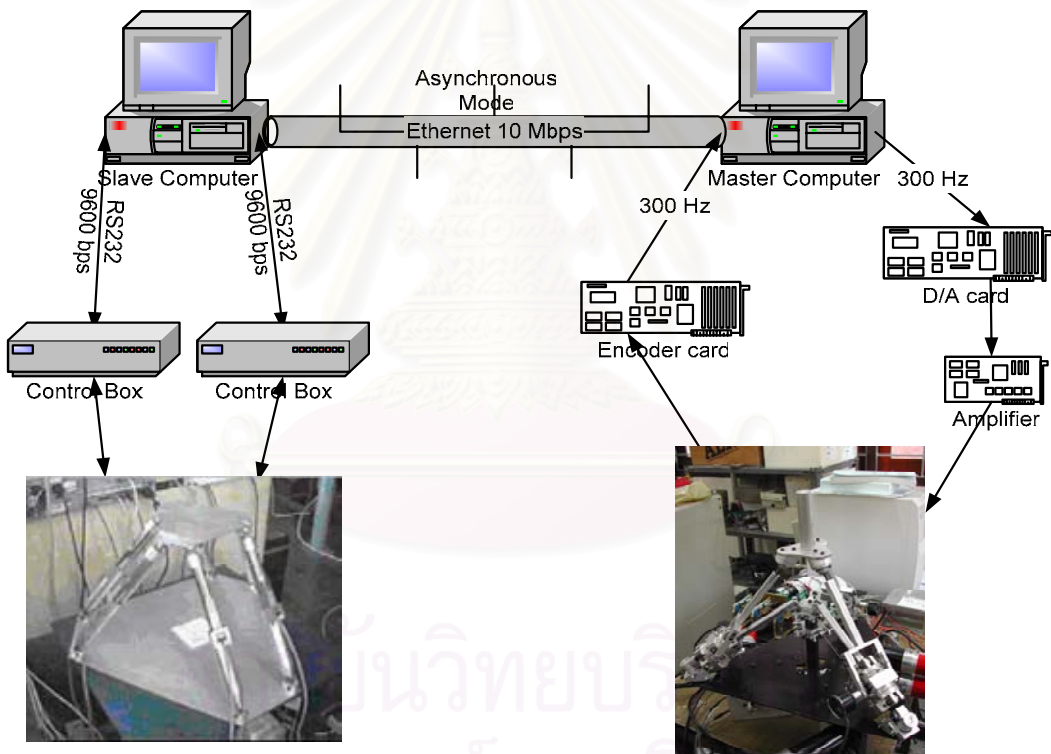
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 6

### ระบบควบคุม

ในบทนี้จะกล่าวถึงการควบคุมแขนกลสจ๊วตให้สามารถเคลื่อนที่ตามอุปกรณ์แฮบติคโดยอาศัยข้อมูลของตำแหน่งและทิศทางที่ได้จากปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคมาแปลงเป็นคำสั่งให้แขนกลสจ๊วตเคลื่อนที่ตามอุปกรณ์แฮบติคซึ่งมีลักษณะการต่อดังรูปที่ 6.1 โดยที่ใช้ระบบควบคุม 2 แบบคือ

- 1 การควบคุมตำแหน่ง (Position Control)
- 2 การควบคุมเกี่ยวกับแรง (Force Control)

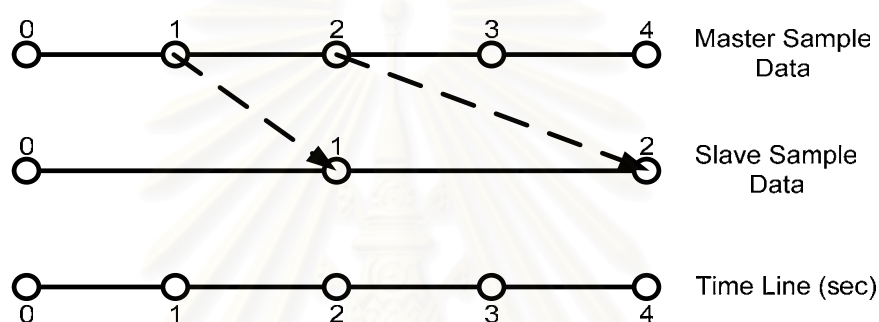


รูปที่ 6.1 การเชื่อมต่อกันระหว่างอุปกรณ์แฮบติคกับแขนกลสจ๊วต

โดยการส่งข้อมูลเป็นแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous) คือจะทำการส่งให้ก็ต่อเมื่อแขนกลสจ๊วตมีการร้องขอข้อมูลโดยข้อมูลที่ส่งจะไปให้เป็นข้อมูลของตำแหน่งที่ปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติค ณ เวลาที่ถูกร้องขอซึ่งมีข้อดีดังต่อไปนี้

- 1 ทำให้การเริ่มต้นทำงานของแขนกลทั้งสองไม่จำเป็นต้องเริ่มต้นทำงานที่เวลาเดียวกัน

- 2 ทำให้ไม่มีปัญหาการตามกัน (lack) ของข้อมูล คือข้อมูลที่แขนกลสจ๊วตรับข้อมูลไปเป็นข้อมูลของตำแหน่งปัจจุบันที่อุปกรณ์แฮบติคอยู่ ณ ขณะนั้น ทำให้แขนกลทั้งสองไม่จำเป็นต้องมี Sample frequency ที่เท่ากัน สมมุติว่าแขนกลนำมี Sample frequency เท่ากับ 1 เฮิร์ตซ์ และแขนกลตามมี Sample frequency เท่ากับ 0.5 เฮิร์ตซ์ ในกรณีที่เริ่มต้นทำงานพร้อมกันซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 6.2 ในขณะที่วินาทีที่ 2 แขนกลตามจะได้ข้อมูลที่ 1 ของแขนกลนำซึ่งเป็นข้อมูล ณ วินาทีที่ 1 พอวินาทีที่ 4 แขนกลตามก็จะได้ข้อมูลที่ 2 ของแขนกลนำซึ่งเป็นข้อมูล ณ วินาทีที่ 2 ซึ่งจะทำให้แขนกลตามเคลื่อนที่ช้ากว่าแขนกลนำไปเรื่อยๆ



รูปที่ 6.2 ปัญหาการตามกันของข้อมูล

ดังนั้นจะเห็นว่าแขนกลทั้งสองมีอิสระจากกันผลดีคือทำให้ผลกระทบเนื่องจากการตามกันของข้อมูลขึ้นอยู่กับสายที่ใช้ต่อระหว่างแขนกลทั้งสองเข้าด้วยกันและประสิทธิภาพของการควบคุมของอุปกรณ์แฮบติคและแขนกลสจ๊วตซึ่งก็คือ คอมพิวเตอร์และการ์ดที่ใช้ในการควบคุม และมีข้อดีอีกข้อหนึ่งคือสามารถต่อฟวงแขนกลตามได้มากกว่า 1 ตัว

## 6.1 การควบคุมตำแหน่ง

เนื่องจากรูปแบบหลักหรือโครงสร้างหลักของแขนกลทั้งสองไม่เหมือนกันดังนั้นในการใช้งานควรจะให้ตำแหน่งเริ่มต้นที่ปลายแขนกลทั้งสองควรอยู่ที่กึ่งกลางเพื่อที่จะได้มีพื้นที่การใช้งานที่เพียงพอดังนั้นตำแหน่งเริ่มแรกของแขนกลทั้งสองเป็นดังนี้

6.1.1 สำหรับอุปกรณ์แฮบติคตำแหน่งเริ่มแรกคือ

$$P_x = 0 \text{ มิลลิเมตร, } Roll = 0 \text{ องศา}$$

$$P_y = 0 \text{ มิลลิเมตร, } Pitch = 0 \text{ องศา}$$

$$P_z = 267 \text{ มิลลิเมตร, } Yaw = 0 \text{ องศา}$$

6.1.2 สำหรับแกนกลสจีวิตตำแหน่งเริ่มแรกคือ

$$P_x = 0 \text{ มิลลิเมตร, } Roll = 0 \text{ องศา}$$

$$P_y = 0 \text{ มิลลิเมตร, } Pitch = 0 \text{ องศา}$$

$$P_z = 310 \text{ มิลลิเมตร, } Yaw = 0 \text{ องศา}$$

ตำแหน่งที่ปลายแกนของอุปกรณ์แฮบติคที่ส่งไปให้แกนกลสจีวิตคือค่าตำแหน่งที่ปลายแกนของอุปกรณ์แฮบติค ณ เวลาที่ถูกแกนกลสจีวิตร้องขอด้วยตำแหน่งเริ่มต้นที่ปลายแกนของอุปกรณ์แฮบติคซึ่งแสดงไว้ข้างบนนี้ ดังนั้นตำแหน่งที่ปลายแกนของแกนกลสจีวิตคือ

$$Pslave'_o = Pslave_o + Pmaster'_o \quad (6.1)$$

เมื่อ

$$Pmaster'_o = Pmaster_i - Pmaster_o$$

$Pmaster'_o$  แทนค่าตำแหน่งที่ปลายแกนของอุปกรณ์แฮบติคที่ส่งไปให้แกนกลสจีวิต

$Pmaster_i$  แทนค่าตำแหน่งที่ปลายแกนของอุปกรณ์แฮบติค ณ เวลาที่อุปกรณ์แฮบติคถูกแกนกลสจีวิตร้องขอ

$Pmaster_o$  แทนค่าตำแหน่งเริ่มต้นที่ปลายแกนของอุปกรณ์แฮบติค

ดังนั้นเมื่อแกนกลสจีวิตทราบตำแหน่งที่ปลายแกนที่จะต้องเคลื่อนที่ไปก็นำค่าที่ได้จากสมการที่ (6.1) นี้แทนลงไปในการเคลื่อนที่แบบผกผันก็จะรู้ตำแหน่งของอุปกรณ์ขับเคลื่อนแต่ละตัวว่าจะต้องเคลื่อนที่ไปเท่าใดและในทิศทางไหน ดังนั้นตำแหน่งที่ปลายแกนของแกนกลสจีวิตและอุปกรณ์แฮบติคก็จะมีค่าเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน

## 6.2 การควบคุมเกี่ยวกับแรง

เนื่องจากน้ำหนักและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบนอุปกรณ์แฮบติคนี้ทำให้ผู้ควบคุมเกิดความเมื่อยล้าในขณะที่ปฏิบัติงานได้ดังนั้นจึงได้ทำการลดผลกระทบดังกล่าวด้วยการควบคุมปริมาณการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ขับเคลื่อนแต่ละตัวโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



### 6.2.1 ผลกระทบเนื่องจากน้ำหนักที่มีผลกระทบต่อการควบคุม

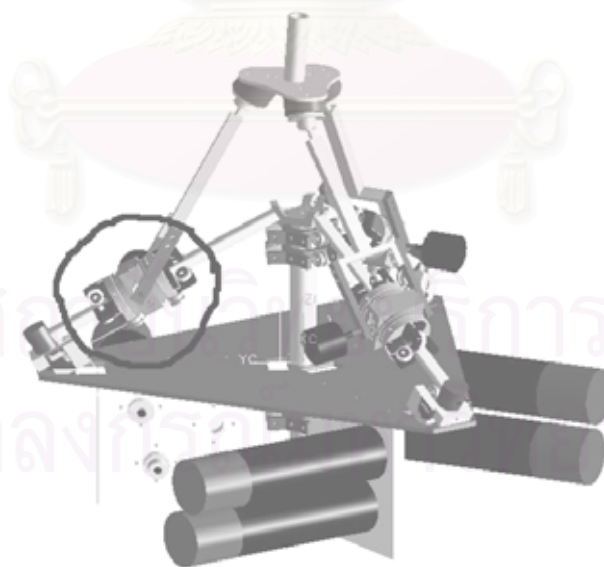
จากโครงสร้างในรูปที่ 6.3 จะเห็นว่าที่ตำแหน่งของข้อต่อนี้ (ซึ่งถูกวงไว้ในรูปที่ 6.3) ซึ่งวางห่างกันเป็นมุมเท่าๆกันเท่ากับ 120 องศา มีผลกระทบต่อน้ำหนักที่ปลายแขนกล (ที่ด้ามจับ) มากกว่าส่วนอื่นๆ เนื่องจากข้อต่อนี้มีน้ำหนักมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักที่ปลายแขนกล ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการชดเชยด้วยการป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังอุปกรณ์ขับเคลื่อนที่ทำหน้าที่ควบคุมข้อต่อนี้ ซึ่งก็คือมอเตอร์ที่ควบคุมการเคลื่อนที่แบบเลื่อนซึ่งมีทั้งหมด 3 ตัวหรือด้านละ 1 ตัว ซึ่งกำหนดให้มีค่าเป็นค่าคงที่โดยหาได้จากการทดลองจริงจนทำให้ปลายแขนกลอยู่นิ่งกับที่โดยไม่เคลื่อนที่ขึ้นหรือลงถ้าเคลื่อนที่ขึ้นเท่ากับว่ามีแรงบิดที่มอเตอร์มากกว่าน้ำหนักของปลายแขนกลหรือถ้าเคลื่อนที่ลงก็แสดงว่าแรงบิดที่มอเตอร์ยังมีค่าน้อยกว่าน้ำหนักที่ปลายแขนกล ดังนั้นจึงแทนสมการแรงบิดที่เกิดจากน้ำหนักของปลายแขนกลเป็นดังนี้

$$\tau_{weight} = C \quad (6.2)$$

เมื่อ

$\tau_{weight}$  แทนแรงบิดของมอเตอร์ที่ควบคุมการเคลื่อนที่แบบเลื่อนที่มีผลกระทบต่อน้ำหนักที่ปลายแขนกล

$C$  แทนค่าคงที่ของมอเตอร์ที่ควบคุมการเคลื่อนที่แบบเลื่อน



รูปที่ 6.3 ข้อต่อที่มีผลกระทบต่อน้ำหนักที่ปลายแขนกล

### 6.2.2 ผลกระทบเนื่องจากแรงเสียดทานที่มีผลกระทบต่อการควบคุม

เนื่องจากที่ข้อต่อแต่ละข้อต่อของแขนกลมีแรงเสียดทานซึ่งในที่นี้คิดเฉพาะแรงเสียดทานแบบคงตัว (Static) คือแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นก่อนที่จะเริ่มมีการเคลื่อนที่ซึ่งมีค่าเป็นค่าคงที่ ค่านี้หาโดยการทดลองด้วยป้อนกระแสไฟฟ้าจ่ายให้กับอุปกรณ์ขับเคลื่อนที่ควบคุมแต่ละข้อต่อจนทำให้แขนกลเริ่มเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงได้สมการแรงบิดที่เกิดจากแรงเสียดทานที่มีผลกระทบกับปลายแขนกลเป็นดังนี้

$$\tau_{fric} = C(\text{Sgn}(\dot{\theta})) \quad (6.3)$$

เมื่อ

$\tau_{fric}$  แทนแรงบิดของมอเตอร์ที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อที่มีผลต่อแรงเสียดทาน

$C$  แทนค่าคงที่ของมอเตอร์ที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อ

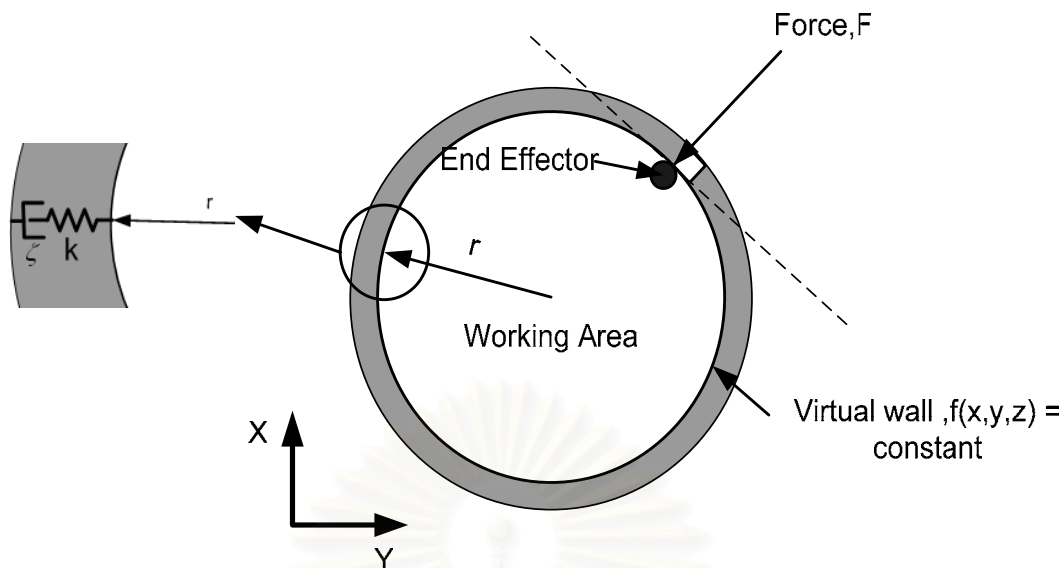
$\dot{\theta}$  แทนความเร็วของมอเตอร์ที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อโดยคิดเฉพาะทิศทาง

### 6.2.3 การกำหนดพื้นที่การทำงานของอุปกรณ์แฮบติค

ในการบังคับให้แขนกลสจ๊วตทำงานในบริเวณแคบๆ หรือในบริเวณที่กำหนดขึ้นโดยอาศัยเพียงการควบคุมของผู้ควบคุมบังคับอุปกรณ์แฮบติคเพื่อให้แขนกลสจ๊วตเคลื่อนที่ในบริเวณดังกล่าว นั้นพบว่าต้องอาศัยทักษะของผู้ควบคุมมากแต่ถ้าบังคับหรือควบคุมให้อุปกรณ์แฮบติคเคลื่อนที่ในบริเวณที่กำหนดโดยใช้ตัวควบคุมที่จำกัดขอบเขตของการเคลื่อนที่แล้วจะทำให้ผู้ควบคุมสามารถควบคุมแขนกลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างกำแพงเสมือน (Virtual wall) ขึ้นเพื่อให้อุปกรณ์แฮบติคเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระอยู่ในพื้นที่ที่จำกัดและไม่สามารถเคลื่อนที่ออกจากกำแพงเสมือนนี้ได้ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 6.4

จากรูปที่ 6.4 จะเห็นว่าจะต้องทำการหาแรง (Force,  $F$ ) ที่ทำหน้าที่เป็นเสมือนกำแพงโดยมีทิศทางตั้งฉากกับกำแพงเสมือนที่กำหนดขึ้นซึ่งกำแพงเสมือนนี้ถูกแทนด้วยสปริง ( $k$ , Spring) และความหนืด ( $\zeta$ , Damper) โดยที่แรง  $F$  จะทำหน้าที่ผลักดันปลายแขนกลของอุปกรณ์แฮบติคไม่ให้ออกนอกพื้นที่ทำงาน (Working area) แต่เมื่อปลายแขนกลของอุปกรณ์แฮบติคอยู่ในพื้นที่ทำงานก็จะมีแรง  $F$  หรือแรง  $F$  เท่ากับศูนย์ ดังนั้นสมการของกำแพงเสมือนซึ่งเป็นฟังก์ชันของ  $X, Y, Z$  คือ

$$f_{wall} = f(x, y, z)$$



รูปที่ 6.4 กำแพงเสมือน

แรงที่กระทำกับผนังเสมือนนั้นมีทิศทางเดียวกับทิศทางตั้งฉากกับผนังที่จุดๆนั้น (Normal Vector) ซึ่งหาได้จาก Gradient ของสมการของกำแพงเสมือน ดังนั้น Gradient ของ  $f_{wall}$  เป็นดังนี้

$$\nabla f_{wall} = \frac{\partial f_{wall}}{\partial x} \bar{i} + \frac{\partial f_{wall}}{\partial y} \bar{j} + \frac{\partial f_{wall}}{\partial z} \bar{k}$$

แต่เราสนใจเฉพาะทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของแรงที่กระทำตั้งฉากกับกำแพงเสมือนเท่ากับ

$$\bar{f}_{\perp wall} = \frac{\nabla f_{wall}}{|\nabla f_{wall}|}$$

เพราะฉะนั้นแรงที่กระทำตั้งฉากกับกำแพงเสมือนคือ

$$F = (K_1 |\Delta r| + K_2 V_r) \bar{f}_{\perp wall} \tag{6.4}$$

เมื่อ

$K_1$  แทนค่าเกณฑ์สำหรับระยะขจัด

$\Delta r$  แทนระยะที่เกินกำแพงเสมือนในทิศตั้งฉากกับกำแพงเสมือน

$K_2$  แทนค่าเกณฑ์สำหรับความเร็วของคั่นบังคับ

$V_r$  แทนความเร็วของคั่นบังคับในทิศตั้งฉากกับกำแพงเสมือน

ซึ่งเทอมแรกของสมการที่ (6.4) เปรียบเสมือนค่าสปริง  $k = K_1 |\Delta r|$

ส่วนเทอมที่สองของสมการที่ (6.4) เปรียบเสมือนค่าความหนืด  $\zeta = K_2 V_r$

ดังนั้นแรงบิดที่จะต้องให้แก่อุปกรณ์ขับแต่ละตัวคือ

$$\tau = [J^T]^{-1} F \quad (6.5)$$

เมื่อ

$F$  แทนแรงที่กระทำต้งฉากกับกำแพงเสมือนซึ่งหาได้จากสมการที่ (6.4)

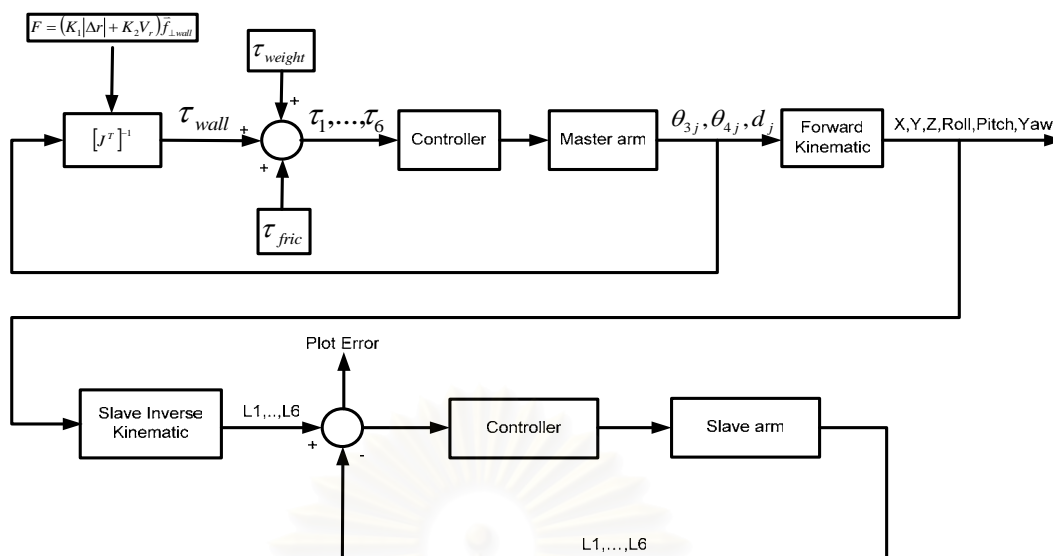
$J$  แทนจาโคเบียนซึ่งหาได้จากบทที่ 4 ในหัวข้อที่ 4.3

### 6.3 การควบคุมอุปกรณ์แสบติค

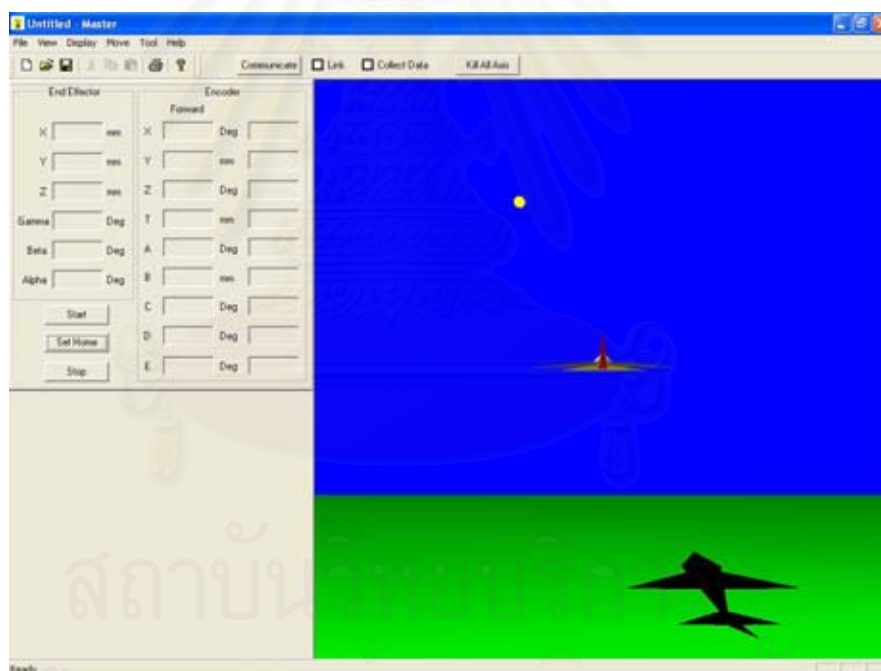
รูปแบบการควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยเป็นดังรูปที่ 6.5 เริ่มต้นด้วยการให้ผู้ควบคุมบังคับ อุปกรณ์แสบติคให้เคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ต้องการโดยมีการกำหนดพื้นที่การทำงานหรือกำหนดขอบเขตของการเคลื่อนที่ให้กับอุปกรณ์แสบติคจากนั้นนำข้อมูลตำแหน่งที่อ่านมาจากอุปกรณ์วัด มุมไปคำนวณหาค่าต่างๆดังต่อไปนี้

1. หาแรงบิดของมอเตอร์แต่ละตัวด้วยสมการที่ (6.5) เพื่อนำไปใช้ขับอุปกรณ์ขับของอุปกรณ์ แสบติคเพื่อให้ได้แรงที่มากกระทำที่ปลายแขนของอุปกรณ์แสบติคตามต้องการ
2. หาดำแหน่งที่ปลายแขนของอุปกรณ์แสบติคโดยนำค่าตำแหน่งที่อ่านได้จากอุปกรณ์วัดมุม ไปแทนในสมการการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้าของอุปกรณ์แสบติคแล้วนำค่าตำแหน่งที่ ปลายแขนของอุปกรณ์แสบติคส่งไปยังแขนกลสจีวิต แขนกลสจีวิตก็จะแปลงค่าตำแหน่งที่ ปลายแขนไปเป็นตำแหน่งของอุปกรณ์วัดตำแหน่งแปลงโดยนำค่าตำแหน่งที่ปลายแขนที่ รับมาจากอุปกรณ์แสบติคไปแทนค่าลงในสมการการเคลื่อนที่แบบผกผันของแขน กลสจีวิต ก็จะได้ค่าตำแหน่งของอุปกรณ์วัดตำแหน่งว่าจะต้องเคลื่อนที่ไปเท่าใด เมื่อได้ค่า ดังกล่าวก็จะส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ควบคุมของแขนกลสจีวิตให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง ที่ต้องการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.5 รูปแบบของการควบคุมแขนกลทั้งสอง



รูปที่ 6.6 โปรแกรมที่ใช้ควบคุมอุปกรณ์แฮบติด

## บทที่ 7

### การทดสอบอุปกรณ์แสบตึก

#### 7.1 วิธีการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้ทำการตั้งค่ามากที่สุดของ Sample frequency เท่าที่จะเป็นไปได้ซึ่งมีค่าดังต่อไปนี้คือ อุปกรณ์แสบตึกตั้งไว้ที่ 300 เฮิร์ตซ์ ส่วนแกนกลสจีวิตตั้งไว้ที่ 20 เฮิร์ตซ์ เนื่องจากแกนกลสจีวิตมีค่า Sample frequency ต่ำดังนั้นในขณะที่ทำการทดลองจึงจำเป็นต้องทำ บังคับการเคลื่อนที่ของปลายแกนของอุปกรณ์แสบตึกให้ช้าลงเนื่องมาจากค่า Sample frequency ที่ต่ำถ้าเกิดผู้ควบคุมเคลื่อนที่เร็วจนเกินไปจะทำให้แกนกลสจีวิตมีการเคลื่อนที่ที่ไม่ราบรื่นมากขึ้น

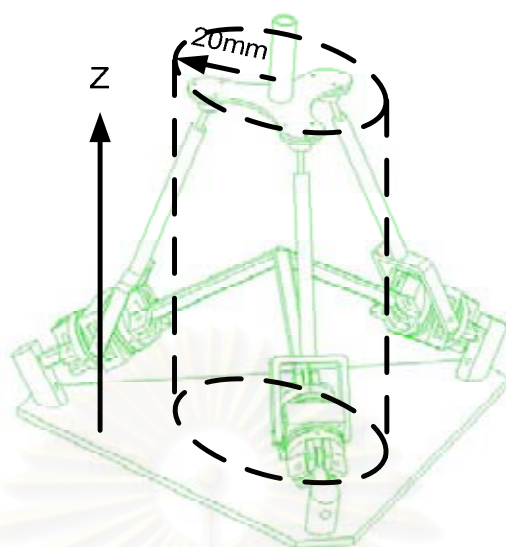
การทดลองได้แบบออกเป็น 2 การทดลองดังต่อไปนี้

7.1.1 การบังคับให้แกนกลสจีวิตเคลื่อนที่ตามอุปกรณ์แสบตึกอย่างอิสระและได้ทำการปรับสภาวะของอุปกรณ์แสบตึกให้ง่ายต่อการบังคับด้วยการชดเชยน้ำหนักและชดเชยแรงเสียดทานของแกนกลนำ โดยที่การทดลองเป็นการทดลองแบบหนึ่งต่อหนึ่งคือเมื่อปลายแกนของอุปกรณ์แสบตึกเคลื่อนที่ไปหนึ่งหน่วยปลายแกนกลสจีวิตซึ่งเป็นแกนกลตามก็จะเคลื่อนที่ไปหนึ่งหน่วยเช่นกัน

7.1.2 การบังคับให้อุปกรณ์แสบตึกเคลื่อนที่ภายในพื้นที่ที่กำหนด โดยที่พื้นที่ที่กำหนดอยู่ภายในทรงกระบอกรัศมี 20 มิลลิเมตรและแกนของทรงกระบอกอยู่ในทิศทางเดียวกันกับทิศทาง Z ของอุปกรณ์แสบตึกซึ่งมีทิศพุ่งขึ้นออกจากฐานของอุปกรณ์แสบตึกและแกนของทรงกระบอกจะพาดผ่านตำแหน่งกึ่งกลางของฐานล่างซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 7.1

สำหรับการทดลองที่ 7.1.1 จะเป็นการหาค่าความผิดพลาดของระยะยี่ดระหว่างตำแหน่งที่กำหนดกับตำแหน่งที่วัดได้จริงของอุปกรณ์ขับเคลื่อนแบบเชิงเส้นแทนเนื่องจากสมการการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้าของแกนกลสจีวิตไม่สามารถหาค่าตอบที่ตายตัวได้ เพราะฉะนั้นจึงไม่สามารถทำการเปรียบเทียบค่าตำแหน่งและทิศทางที่ปลายแกนระหว่างอุปกรณ์แสบตึกและแกนกลสจีวิตได้ จึงใช้การหาค่าความผิดพลาดของระยะยี่ดระหว่างตำแหน่งที่กำหนดกับตำแหน่งที่วัดได้จริงของอุปกรณ์ขับเคลื่อนแบบเชิงเส้นแทน ส่วนการทดลองที่ 7.1.2 เป็นการหาค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางที่เกิดขึ้นที่ปลายแกนของอุปกรณ์แสบตึกโดยค่าความผิดพลาดจะดูจากการเคลื่อนที่ของปลายแกนของอุปกรณ์แสบตึกว่าเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมือนไปเท่าใด



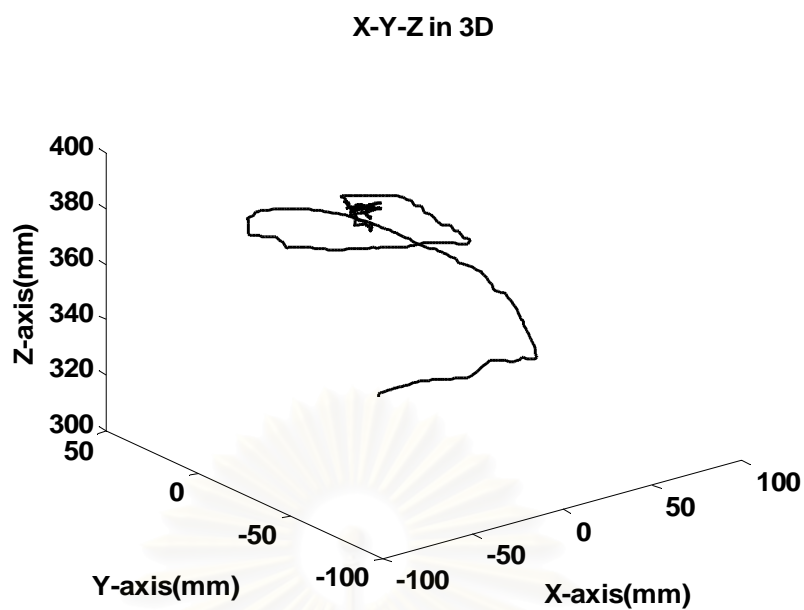


รูปที่ 7.1 วิธีการทดลองที่ 7.1.2

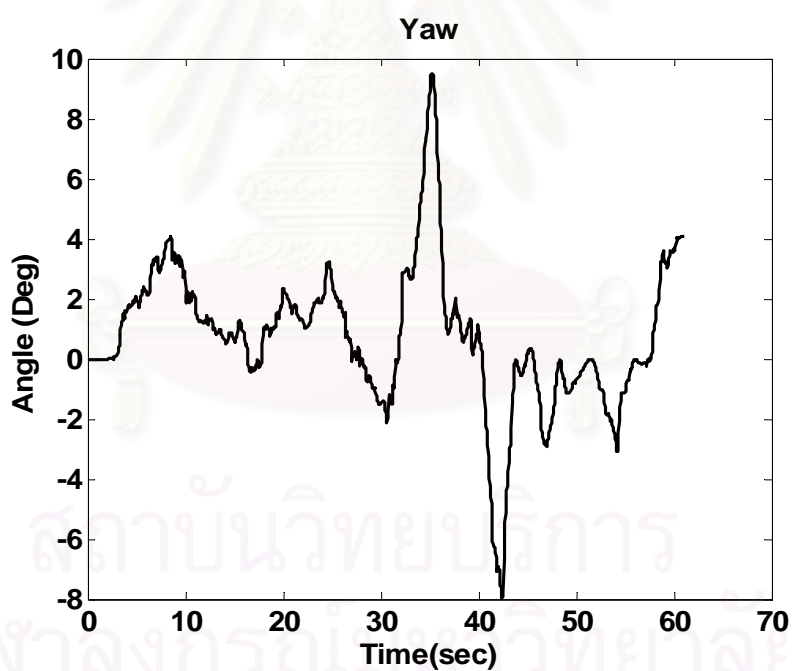
## 7.2 ผลการทดลองการบังคับให้แขนกลสจ๊วตเคลื่อนที่ตามอุปกรณ์แฮบติคอย่างอิสระ

การทดลองนี้เป็นการทดลองแบบหนึ่งต่อหนึ่งคือเมื่อปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคเคลื่อนที่ไปหนึ่งหน่วยปลายแขนกลสจ๊วตซึ่งเป็นแขนกลตามก็จะเคลื่อนที่ไปหนึ่งหน่วยเช่นกัน เริ่มต้นการทดลองด้วยการให้ผู้ควบคุมบังคับตำแหน่งของอุปกรณ์แฮบติคให้เคลื่อนที่ไปอย่างอิสระ ทั้งตำแหน่งและทิศทางเพื่อดูการเคลื่อนที่ของแขนกลสจ๊วตว่าเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันกับ อุปกรณ์แฮบติคหรือไม่และทำการพล็อตกราฟแสดงเส้นทางของตำแหน่งและทิศทางที่ปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคซึ่งเคลื่อนที่ดังกราฟรูปที่ 7.2 ถึงกราฟรูปที่ 7.5 โดยที่กราฟรูปที่ 7.2 แสดงตำแหน่งที่ปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคส่วนกราฟรูปที่ 7.3 ถึงกราฟรูปที่ 7.5 แสดงทิศทางที่ปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคดังกราฟข้างล่างนี้

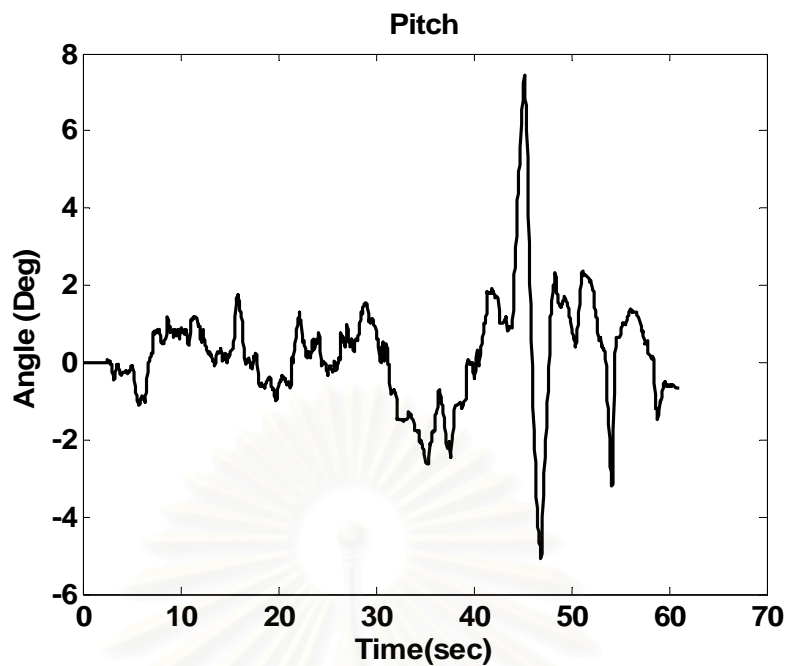




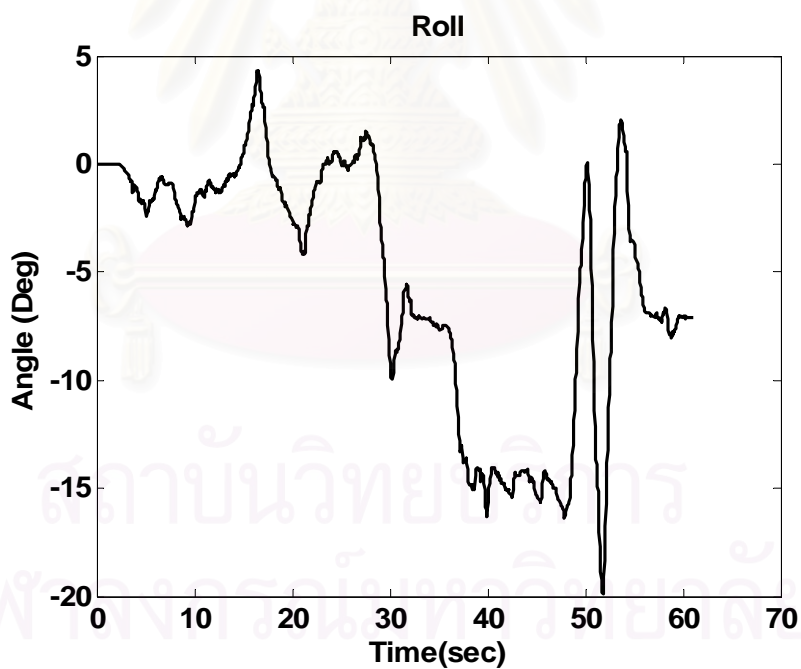
รูปที่ 7.2 เส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคในสามมิติ



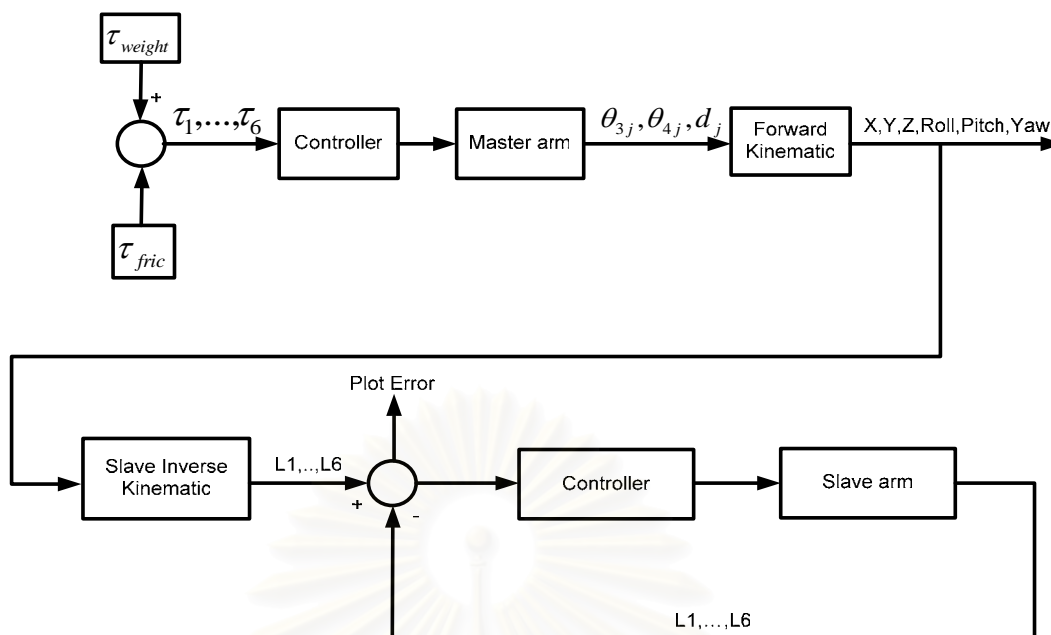
รูปที่ 7.3 ทิศทางการหมุนรอบแกน X ที่ปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติค



รูปที่ 7.4 ทิศทางการหมุนรอบแกน Y ที่ปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติด



รูปที่ 7.5 ทิศทางการหมุนรอบแกน Z ที่ปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติด



รูปที่ 7.6 วิธีการหาค่าความผิดพลาดของการทดลองแบบที่ 7.1.1

รูปที่ 7.6 แสดงวิธีการหาค่าความผิดพลาดของอุปกรณ์ข้อต่อทั้ง 6 ตัวของแขนกลสองข้อต่อโดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการเคลื่อนที่ปลายแขนของอุปกรณ์แบบติด
2. นำค่าตำแหน่งของแต่ละอุปกรณ์ข้อต่อที่ได้มาจากอุปกรณ์วัดตำแหน่งมาแทนลงในสมการการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้าของอุปกรณ์แบบติดก็จะได้ค่าตำแหน่งที่ปลายแขนของอุปกรณ์แบบติด
3. ส่งค่าตำแหน่งที่ปลายแขนของอุปกรณ์แบบติดไปให้แขนกลสองข้อต่อเมื่อแขนกลสองข้อต่อร้องขอ
4. เมื่อแขนกลสองข้อต่อได้รับตำแหน่งที่ปลายแขนของอุปกรณ์แบบติดก็ทำการแปลงตำแหน่งดังกล่าวไปเป็นตำแหน่งที่ปลายแขนของแขนกลสองข้อต่อ
5. นำค่าตำแหน่งที่ปลายแขนของแขนกลสองข้อต่อที่ได้ไปแทนในสมการการเคลื่อนที่แบบผกผันของแขนกลสองข้อต่อก็จะได้ตำแหน่งที่ต้องเคลื่อนที่ไปของอุปกรณ์ข้อต่อ
6. นำค่าตำแหน่งดังกล่าวส่งให้กับอุปกรณ์ควบคุมเพื่อไปสั่งให้อุปกรณ์ข้อต่อเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งดังกล่าว
7. เมื่ออุปกรณ์ข้อต่อเคลื่อนที่ไปถึงตำแหน่งดังกล่าวก็ทำการอ่านค่าจากอุปกรณ์วัดตำแหน่งแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าตำแหน่งที่ส่งไปให้กับอุปกรณ์ควบคุม

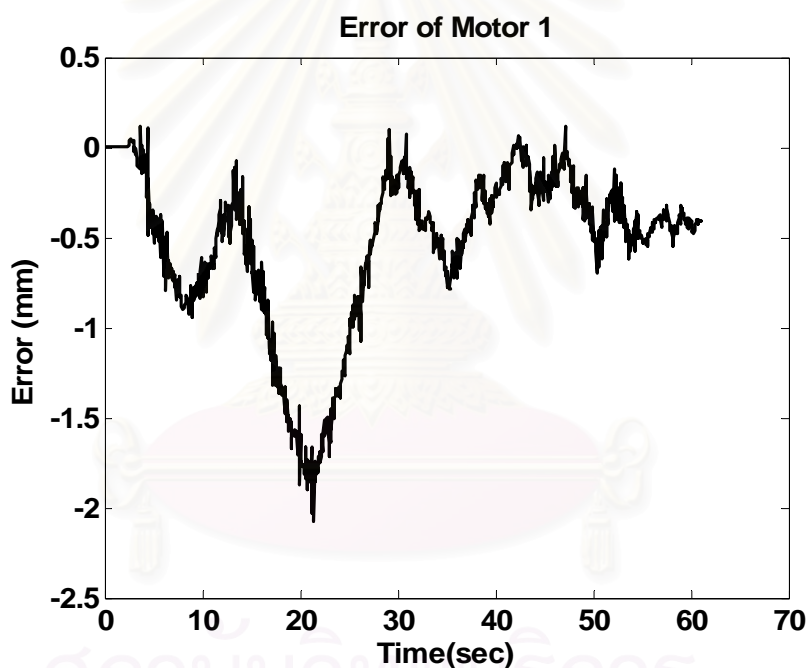
เนื่องจากอุปกรณ์ขับของแขนกลสจ๊วตเป็นแบบเชิงเส้นดังนั้นค่าความผิดพลาดจึงมีหน่วยเป็นความยาวโดยหาได้จากสมการข้างล่างนี้

$$err = Pos_{desire} - Pos_{real}$$

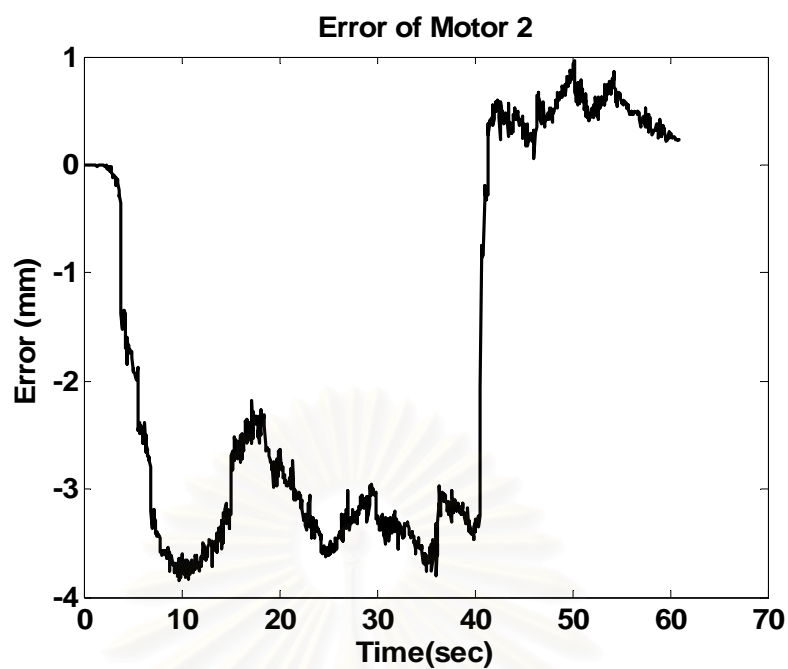
เมื่อ  $Pos_{desire}$  แทนตำแหน่งที่ต้องเคลื่อนที่ไปของอุปกรณ์ขับ

$Pos_{real}$  แทนตำแหน่งที่เคลื่อนที่ไปจริงของอุปกรณ์ขับ

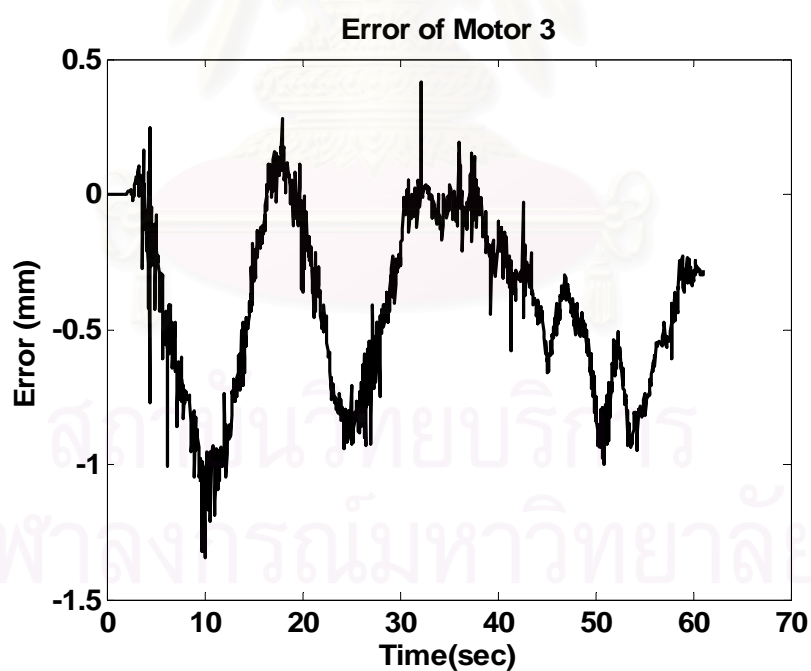
กราฟรูปที่ 7.7 ถึงกราฟรูปที่ 7.12 เป็นการแสดงค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งที่กำหนดกับตำแหน่งที่วัดได้จริงของอุปกรณ์ขับแบบเชิงเส้นทั้ง 6 ตัวของแขนกลสจ๊วตแสดงไว้ดังกราฟข้างล่างนี้



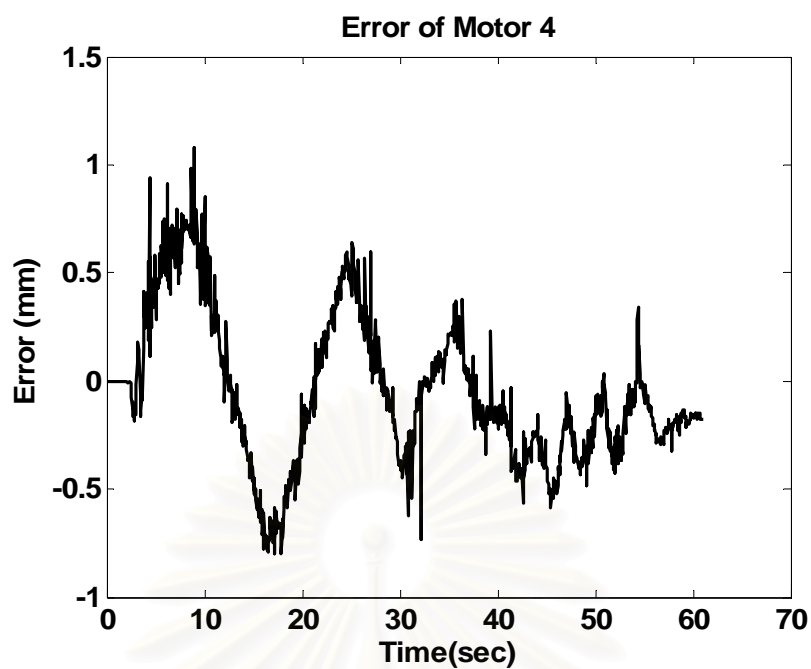
รูปที่ 7.7 ค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งที่กำหนดกับตำแหน่งที่วัดได้จริงของอุปกรณ์ขับแบบเชิงเส้นตัวที่ 1 ของแขนกลสจ๊วต



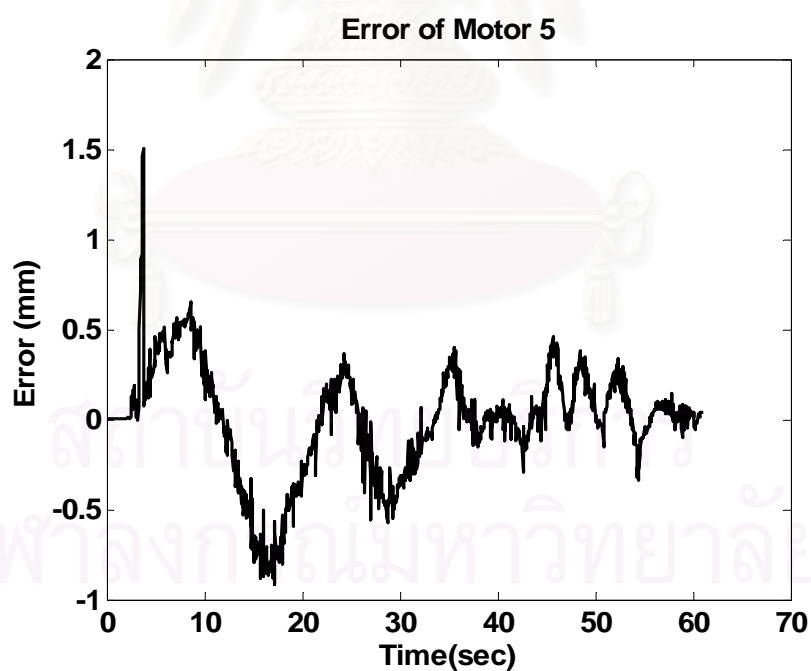
รูปที่ 7.8 ค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งที่กำหนดกับตำแหน่งที่วัดได้จริงของอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นตัวที่ 2 ของแขนกลอัจฉริยะ



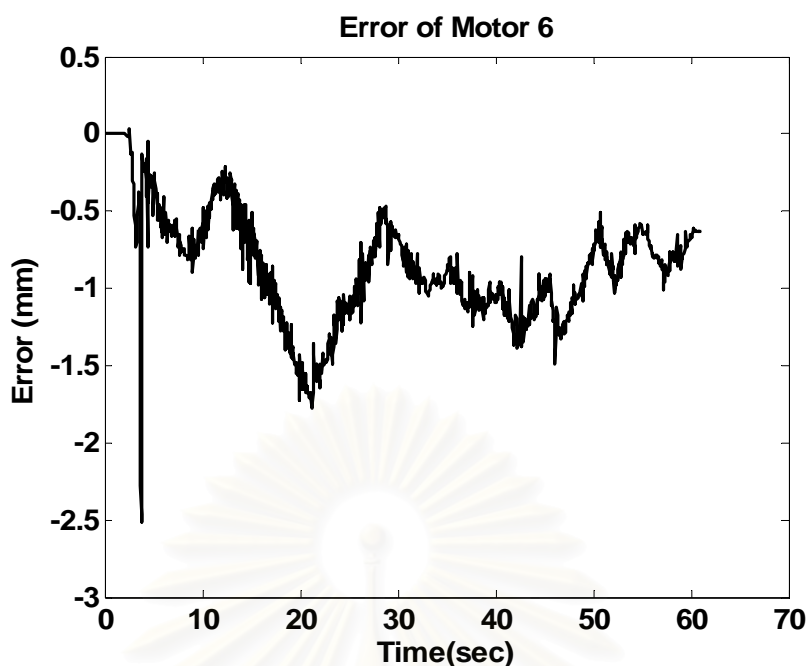
รูปที่ 7.9 ค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งที่กำหนดกับตำแหน่งที่วัดได้จริงของอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นตัวที่ 3 ของแขนกลอัจฉริยะ



รูปที่ 7.10 ค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งที่กำหนดกับตำแหน่งที่วัดได้จริงของอุปกรณ์ขับเคลื่อนแบบ  
เชิงเส้นตัวที่ 4 ของแขนกลอัจฉริยะ



รูปที่ 7.11 ค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งที่กำหนดกับตำแหน่งที่วัดได้จริงของอุปกรณ์ขับเคลื่อนแบบ  
เชิงเส้นตัวที่ 5 ของแขนกลอัจฉริยะ



รูปที่ 7.12 ค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งที่กำหนดกับตำแหน่งที่วัดได้จริงของอุปกรณ์ขับเคลื่อนแบบเชิงเส้นตัวที่ 6 ของแขนกลสจ๊วต

จากกราฟในกราฟรูปที่ 7.7 ถึงกราฟรูปที่ 7.12 แสดงให้เห็นถึงค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งที่กำหนดกับตำแหน่งที่วัดได้จริงที่เกิดขึ้นในขณะทดลองของอุปกรณ์ขับเคลื่อนแบบเชิงเส้นแต่ละตัวซึ่งมีค่ามากที่สุดเป็นดังตารางที่ 7.1 ค่ามากที่สุดของทุกอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นของแขนกลสจ๊วตคือ 3.85 มิลลิเมตร

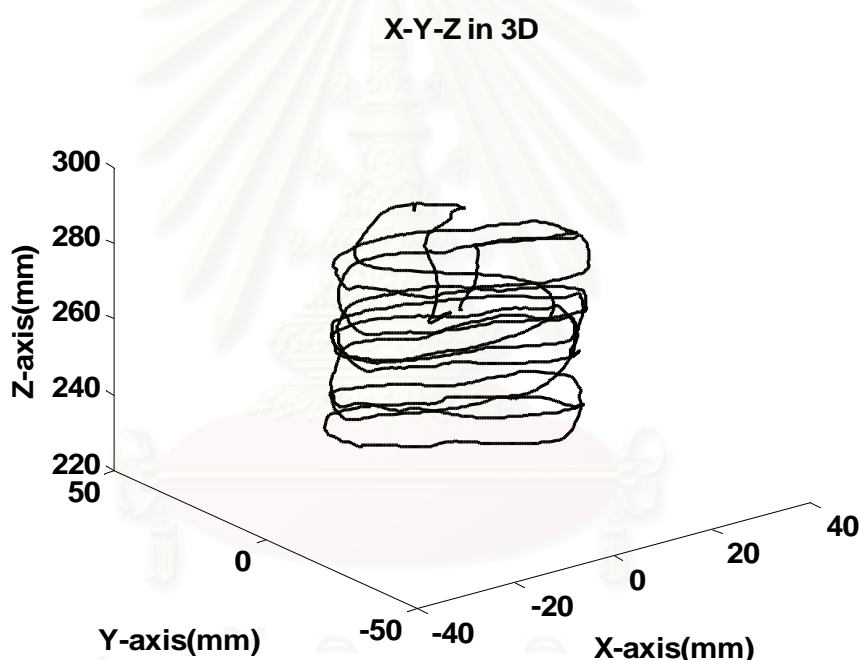
ตารางที่ 7.1 ความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งที่กำหนดกับตำแหน่งที่วัดได้จริงที่มากที่สุดที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์ขับเคลื่อนเชิงเส้นแต่ละตัวของแขนกลสจ๊วต

อุปกรณ์ขับเคลื่อนตัวที่	ค่าความผิดพลาด (มิลลิเมตร)
1	2.07
2	3.85
3	1.34
4	1.08
5	1.51
6	2.52



### 7.3 ผลการทดลองการบังคับให้อุปกรณ์แสบติคเคลื่อนที่ภายในพื้นที่ที่กำหนด

การทดลองนี้จะกำหนดพื้นที่การทำงานเป็นรูปทรงกระบอกบนเฟรมศูนย์ซึ่งที่วางอยู่ที่ฐานล่างของอุปกรณ์แสบติคที่มีจุดศูนย์กลางของทรงกระบอกเป็นตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งกึ่งกลางของฐานของอุปกรณ์แสบติคและทรงกระบอกมีขนาดของรัศมีเท่ากับ 20 มิลลิเมตรและแกนของทรงกระบอกขนานกับแกน Z ของเฟรมศูนย์ซึ่งแสดงไว้ดังรูปที่ 7.1 ผู้ควบคุมจะบังคับปลายแขนของอุปกรณ์แสบติคให้เคลื่อนที่ไปมาอย่างอิสระได้เฉพาะในพื้นที่ที่กำหนดเท่านั้นโดยไม่สามารถบังคับให้ปลายแขนของอุปกรณ์แสบติคเคลื่อนที่ออกนอกพื้นที่ที่กำหนดได้ การกราฟรูปที่ 7.13 แสดงเส้นทางของตำแหน่งและทิศทางที่ปลายแขนของอุปกรณ์แสบติคดังกราฟข้างล่างนี้



รูปที่ 7.13 เส้นทางเคลื่อนที่ของปลายแขนของอุปกรณ์แสบติคในสามมิติ

วิธีการหาระยะทางที่เคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมือนในแนวรัศมีของอุปกรณ์แสบติคซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 7.14 โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการเคลื่อนที่ปลายแขนของอุปกรณ์แสบติค
2. นำค่าตำแหน่งของแต่ละอุปกรณ์จับอุปกรณ์ซึ่งได้มาจากอุปกรณ์วัดตำแหน่งมาแทนลงในสมการการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้าของอุปกรณ์แสบติคก็จะได้ค่าตำแหน่งที่ปลายแขนของอุปกรณ์แสบติค

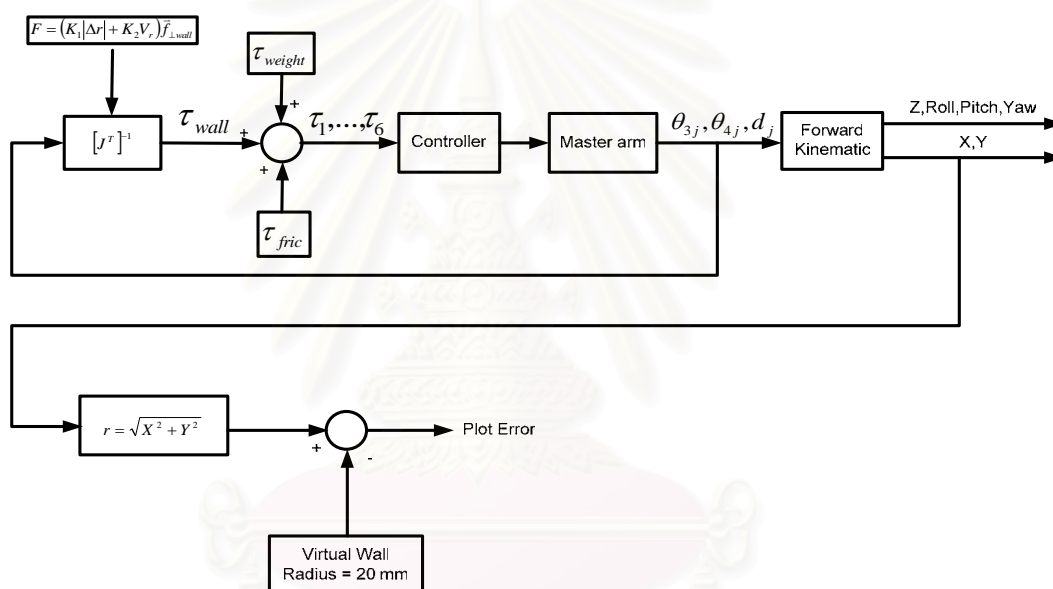
3. นำค่าตำแหน่งที่ปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคเฉพาะ  $X, Y$  มาทำการคำนวณหาค่ารัศมี
4. นำค่ารัศมีที่ได้มาเปรียบเทียบกับรัศมีของกำแพงเสมือนซึ่งมีค่าเท่ากับ 20 มิลลิเมตร

ดังนั้นระยะทางที่เคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมือนในแนวรัศมีของอุปกรณ์แฮบติคหาได้จากสมการข้างล่างนี้

$$err = Rad_{real} - Rad_{wall}$$

เมื่อ  $Rad_{real}$  แทนตำแหน่งที่ปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคในแนวรัศมี

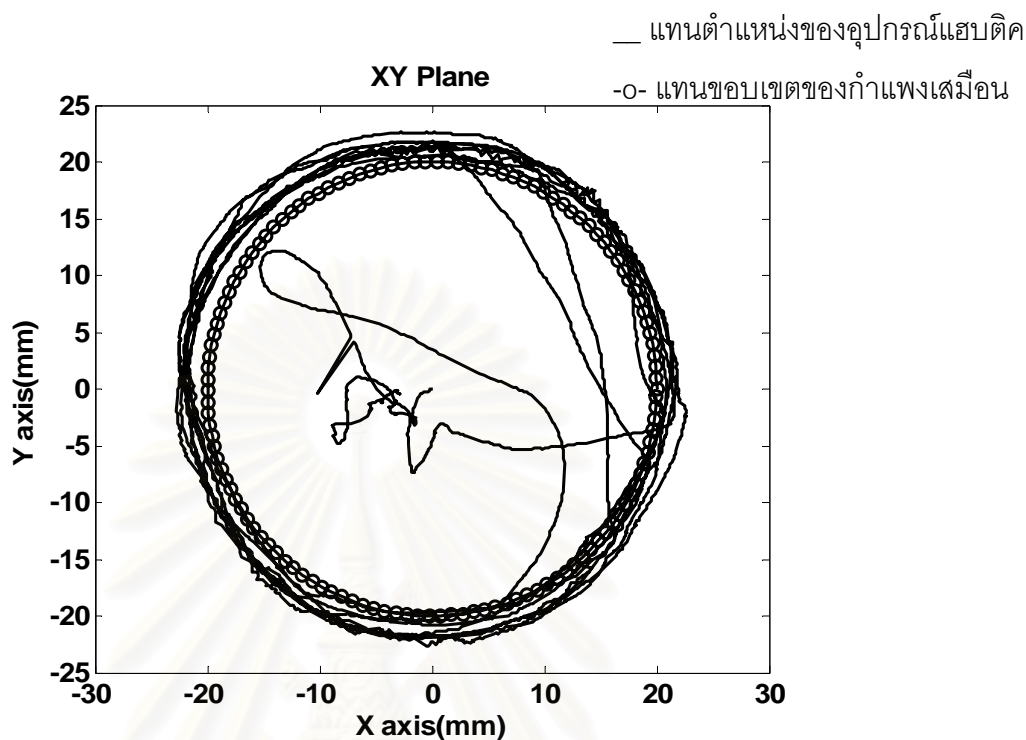
$Rad_{wall}$  แทนรัศมีของกำแพงเสมือนซึ่งมีค่าเท่ากับ 20 มิลลิเมตร



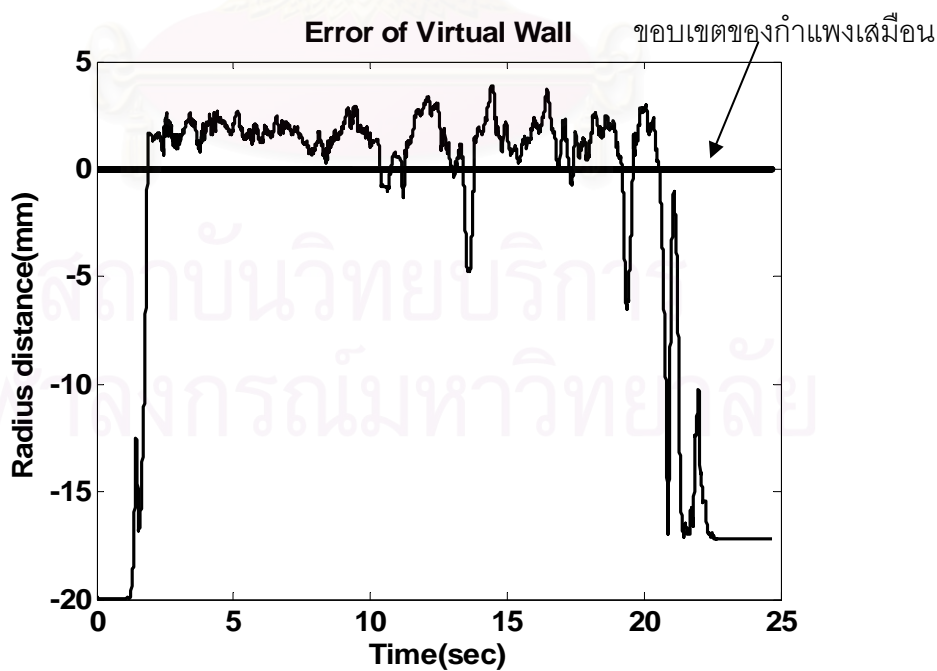
รูปที่ 7.14 วิธีการหาระยะทางที่เคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมือนในแนวรัศมีของการทดลองแบบที่ 7.1.2

ในกราฟรูปที่ 7.15 ถึงกราฟรูปที่ 7.16 เป็นการแสดงระยะทางที่ปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมือนในแนวรัศมีโดยที่กำแพงเสมือนมีรัศมีขนาดเท่ากับ 20 มิลลิเมตร และกราฟรูปที่ 7.17 เป็นการแสดงแรงผลักดันที่เกิดขึ้นที่ปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคเมื่อมีการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมือน ส่วนกราฟรูปที่ 7.18 เป็นการรวมกราฟรูปที่ 7.16 และกราฟรูปที่ 7.17 เข้าด้วยกันเพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่เคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมือนและแรงผลักดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของ

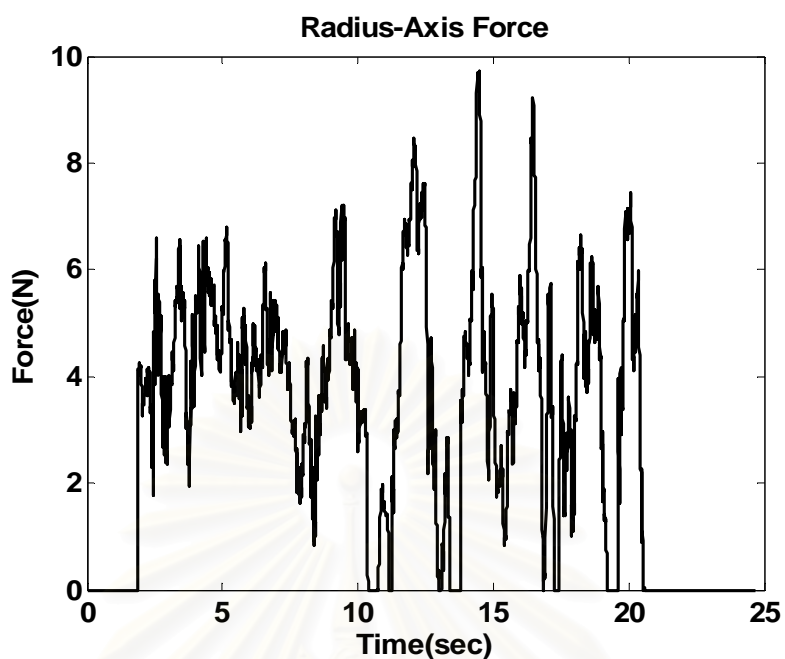
กำแพงเสมือน และกราฟรูปที่ 7.19 เป็นการแสดงทิศทางและขนาดของแรงผลักดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมือนดังกราฟข้างล่างนี้



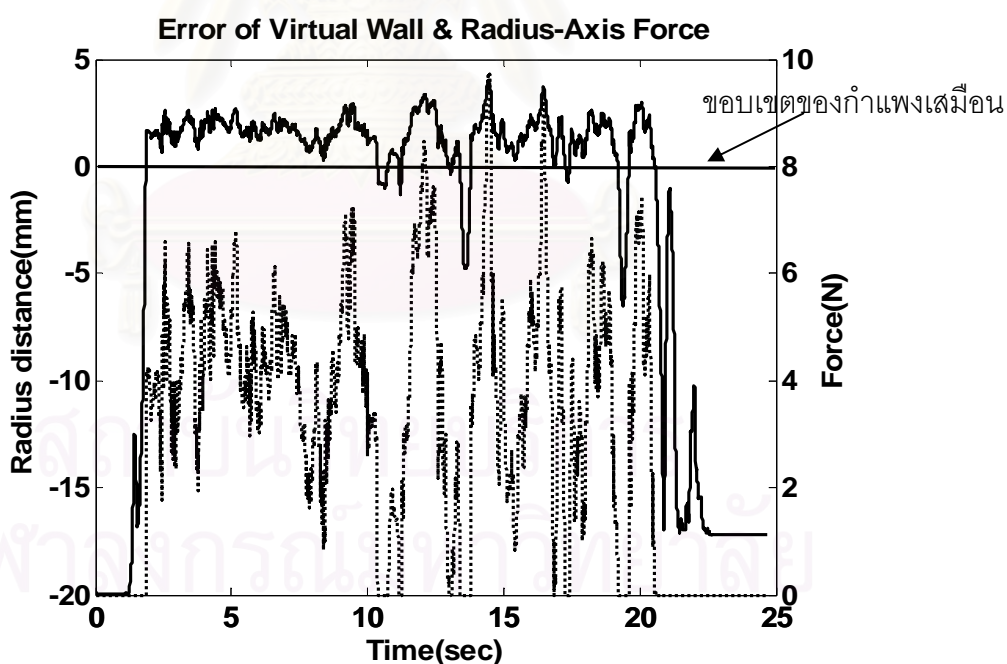
รูปที่ 7.15 เส้นทางการเคลื่อนที่ที่ทับขอบเขตของกำแพงเสมือนบนระนาบ XY



รูปที่ 7.16 ระยะเวลาการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมือน



รูปที่ 7.17 แรงผลักดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมือน

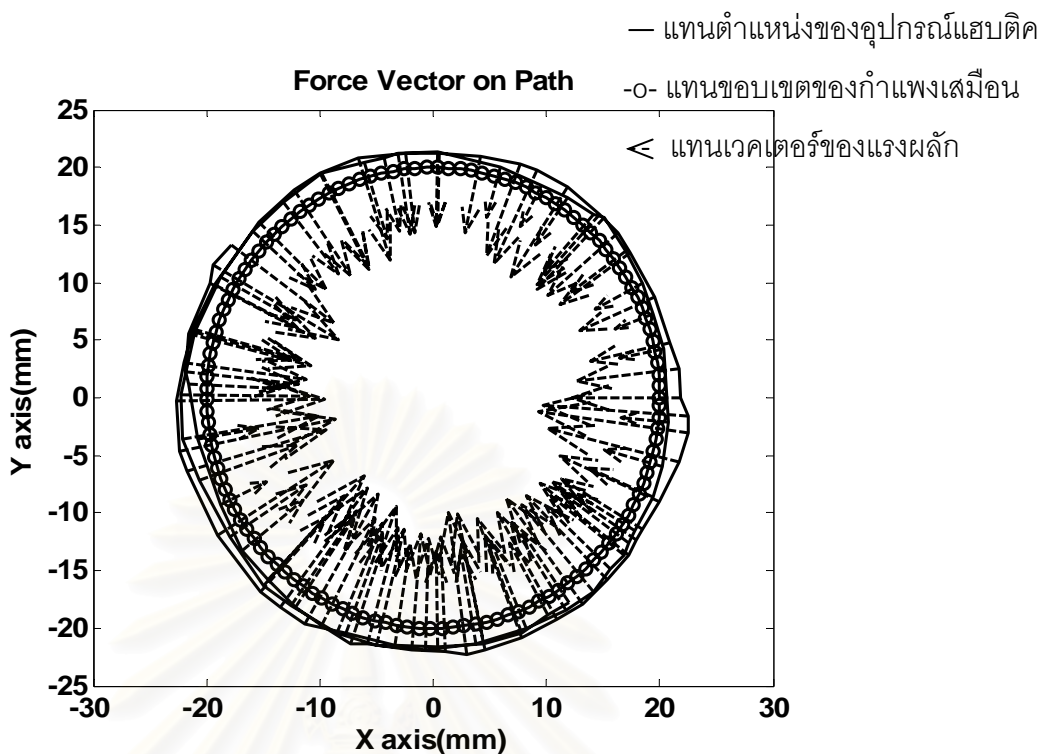


— แทนระยะทางการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมือน

... แทนแรงผลักดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมือน

รูปที่ 7.18 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมือนและ

แรงผลักดันที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมือน



รูปที่ 7.19 ทิศทางและขนาดของแรงผลัคที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมีอน

ผลการทดลองการควบคุมอุปกรณ์แฮบติคให้อยู่ในพื้นที่ที่กำหนดดังแสดงในกราฟรูปที่ 7.15 และกราฟรูปที่ 7.16 จะเห็นว่าระยะที่ปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมีอนในแนวรัศมีซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 23.89 มิลลิเมตร ซึ่งเคลื่อนที่เลยออกมาจากขอบของกำแพงเสมีอนเท่ากับ 3.89 มิลลิเมตร ส่วนกราฟรูปที่ 7.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมีอนและแรงผลัคที่เกิดขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมีอนจะเห็นว่าเมื่อปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมีอนมากก็จะมีแรงผลัคที่มากขึ้นด้วยและในทางตรงกันข้ามถ้าปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมีอนน้อยก็จะมีแรงผลัคที่น้อยลงตาม และกราฟรูปที่ 7.19 แสดงให้เห็นทั้งทิศทางและขนาดของแรงผลัคที่เกิดขึ้นจะเห็นว่าทิศทางของแรงผลัคจะตั้งฉากกับกำแพงเสมีอนและจะเห็นว่าเมื่อมีการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตของกำแพงเสมีอนมากก็จะมีแรงผลัคมากขึ้นด้วย ในขณะที่กำลังทดสอบเมื่อผู้ทดสอบได้เคลื่อนที่ปลายแขนของอุปกรณ์แฮบติคไปรอบๆ จะรู้สึกเหมือนมีกำแพงลักษณะทรงกระบอกและเมื่อพยายามผลัคปลายแขนออกนอกขอบเขตกำแพงเสมีอนก็จะรู้สึกเหมือนมีแรงผลัคกลับมา

## บทที่ 8

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 8.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างอุปกรณ์แฮบติคที่มี 6 องศาอิสระเพื่อใช้ควบคุมแขนกลสจ๊วตซึ่งทำหน้าที่เป็นแขนกลตาม อุปกรณ์แฮบติคที่สร้างขึ้นมานี้ใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบมู่เล่และสายพานเป็นหลักทำให้สามารถย้ายตำแหน่งของอุปกรณ์ขั้วมาไว้ที่ฐานได้ทั้งหมดจึงทำให้ความเฉื่อยและน้ำหนักลดลงและไม่มีแบลคเลข จากการทดลองในบทที่ 7 หัวข้อที่ 7.2 โดยให้อุปกรณ์แฮบติคควบคุมแขนกลสจ๊วตให้เคลื่อนที่ตามได้โดยสามารถสรุปได้ดังตารางข้างล่างนี้

ตารางที่ 8.1 ความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งที่กำหนดกับตำแหน่งที่วัดได้จริงที่มากที่สุดที่เกิดขึ้นของอุปกรณ์ขั้วแบบเชิงเส้นแต่ละตัวของแขนกลสจ๊วต

อุปกรณ์ขั้วตัวที่	ค่าความผิดพลาด (มิลลิเมตร)
1	2.07
2	3.85
3	1.34
4	1.08
5	1.51
6	2.52

จากการทดลองในบทที่ 7 หัวข้อที่ 7.3 โดยกำหนดพื้นที่การทำงานให้อยู่ภายในทรงกระบอกที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งกึ่งกลางของฐานล่างและมีขนาดของรัศมีของทรงกระบอกเท่ากับ 20 มิลลิเมตรและแกนของทรงกระบอกขนานกับแกน Z ของเฟรมศูนย์ซึ่งอยู่ที่ฐานล่าง จะเห็นว่าระยะที่คั่นบังคับเคลื่อนที่ออกนอกกำแพงเสมือนในแนวรัศมีซึ่งมีค่าสูงสุดเท่ากับ 3.89 มิลลิเมตร



## 8.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดลองการควบคุมอุปกรณ์แยกติคและแขนกลสจ๊วตพบปัญหาที่ต้องทำการแก้ไขดังต่อไปนี้

- 8.2.1 ควรเปลี่ยนการ์ดที่ใช้รับค่าอุปกรณ์วัดตำแหน่งเนื่องจากว่าใช้อุปกรณ์วัดมุมถึง 9 ตัวจึงทำให้สามารถมี Sample frequency ได้แค่ 300 เฮิร์ตซ ซึ่งน้อยเกินไปและการทดลองเรื่องแรงผลัฟท์ที่ได้ไม่ค่อยดีนักคือระยะที่คั่นบังคับเคลื่อนที่ออกนอกกำแพงเสมือนในแนวรัศมียังมีค่าสูงอยู่ และการนี้ยังใช้ได้เฉพาะบน Platform ที่ระบบปฏิบัติการเป็นตระกูลวินโดวส์ NT ดังนั้นจึงไม่สามารถควบคุมแบบ Real-time ได้
- 8.2.2 ควรเปลี่ยนคอนโทรลเลอร์ของแขนกลสจ๊วตเนื่องจากคอนโทรลเลอร์ของแขนกลสจ๊วตที่ใช้เป็นแขนกลตามไม่สามารถทำงานที่ Sample frequency สูงๆได้ในโหมดที่มีการเคลื่อนที่แบบ Point to Point ซึ่ง Sample frequency มีค่าได้สูงสุดที่ 20 เฮิร์ตซ ซึ่งถ้ามากกว่านี้จะทำให้แขนกลสจ๊วตมีปัญหาบัฟเฟอร์ที่ตัวคอนโทรลเลอร์มากเกินไปทำให้หยุดการเคลื่อนที่ไปชั่วระยะแล้วจึงค่อยเคลื่อนที่ต่อ
- 8.2.3 ควรเปลี่ยนคอนโทรลเลอร์ของแขนกลสจ๊วตเนื่องจากคอนโทรลเลอร์ของแขนกลสจ๊วตที่ใช้เป็นแขนกลตามต่อผ่านคอมพิวเตอร์ด้วยพอร์ตคอม1 และคอม2 (RS-232) ซึ่งการส่งข้อมูลผ่านพอร์ตดังกล่าวนี้จะมีความเร็วในการส่งที่จำกัดจึงทำให้ไม่สามารถส่งผ่านข้อมูลได้รวดเร็วพอ



## รายการอ้างอิง

- [1] Alain Tremblay and Luc Baron. Geometrical Synthesis of Star-Like Topology Parallel Manipulators with a Genetic Algorithm. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Detroit, Michigan, May 1999, pp. 2446-2451.
- [2] Clement M. Gosselin and Jean-Francois Hamel. The agile eye: a high-performance three-degree-of-freedom camera-orienting device. Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics & Automation, 1994, pp. 781-786.
- [3] Ki Young Woo, Byoung Dae Jin and Dong-Soo Kwon. A 6-DOF Force-Reflecting Hand Controller Using the Fivebar Parallel Mechanism. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Leuven, Belgium, May 1998, pp. 1597-1602.
- [4] Curtis L. Collins and Gregory L. Long. The Singularity Analysis of an In-Parallel Hand Controller for Force-Reflected Teleoperation. Proceedings of the 1995 IEEE International Transactions on Robotics & Automation, VOL. 11, NO. 5, October 1995, pp. 661-669.
- [5] Jungwon Yoon and Jeha Ryu. Control and Evaluation of a New 6-DOF Haptic Device Using a Parallel Mechanism. Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2000, pp. 1125-1130.
- [6] Herman Bruyninckx. Closed-Form Forward Position Kinematics for a  $(3-1-1-1)^2$  Fully Parallel Manipulator. Proceedings of the 1998 IEEE International Transactions on Robotics & Automation, VOL. 14, NO. 2, April 1998, pp. 326-328.
- [7] Lung-Wen Tsai. Robot Analysis The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. A Wiley-Interscience Publication, 1999.
- [8] John J. Craig. Introduction to Robotics Mechanics and Control. Silma, Inc, 1955.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

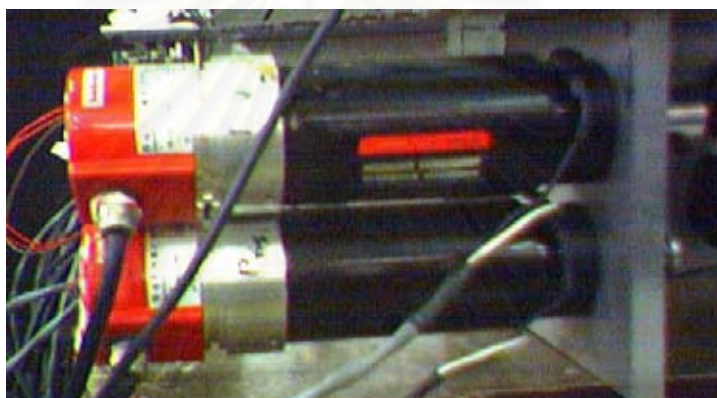
## ภาคผนวก ก

### อุปกรณ์ของอุปกรณ์ Haptic

อุปกรณ์ Haptic ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักๆดังต่อไปนี้

#### 1. เซอร์โวมอเตอร์กระแสตรง (DC Servo Motor)

ใช้ของยี่ห้อ Electro Craft รุ่น E 543 ขนาดเท่ากับ 100 วัตต์ โดยติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมที่เป็นแบบ Incremental Rotary Encoder และมีความละเอียดเท่ากับ 5000 พัลส์ต่อรอบ



รูปที่ ก.1 แสดงเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรง

#### 2. อุปกรณ์วัดมุม (Encoder)

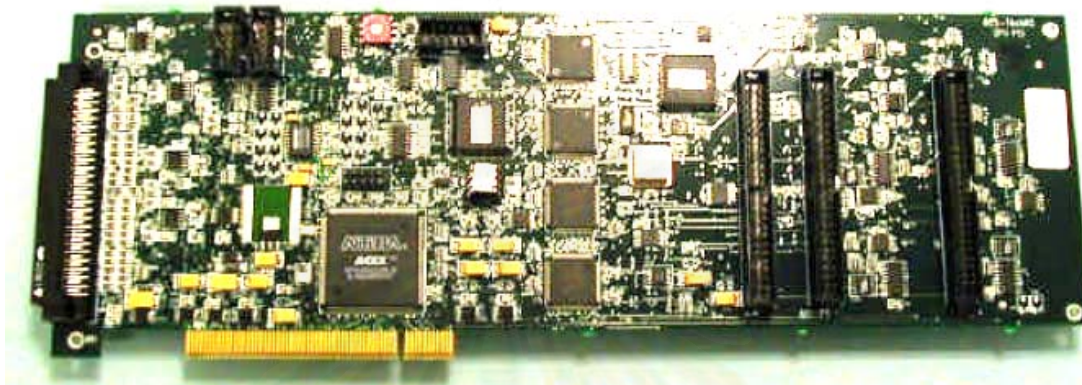
ใช้ของยี่ห้อ Koyo รุ่น TRD-S2500VA ซึ่งเป็นแบบ Incremental Rotary Encoder โดยมีความละเอียดเท่ากับ 2500 พัลส์ต่อรอบ ซึ่งใช้ติดตั้งบน Passive Joint



รูปที่ ก.2 แสดงอุปกรณ์วัดมุม

### 3. การ์ดนับค่าอุปกรณ์วัดมุม (Counter Card)

ใช้ของยี่ห้อ ACS Tech80 รุ่น SPiPCI-E8 ซึ่งสามารถต่อกับอุปกรณ์วัดมุมได้ทั้งหมด 8 ตัว และมีช่องอินพุตเอาต์พุต (IO) 16 บิต อีก 1 ช่อง โดยแบ่งเป็นอินพุต 8 บิตและเอาต์พุต 8 บิต



รูปที่ ก.3 แสดงการ์ดนับค่าอุปกรณ์วัดมุม

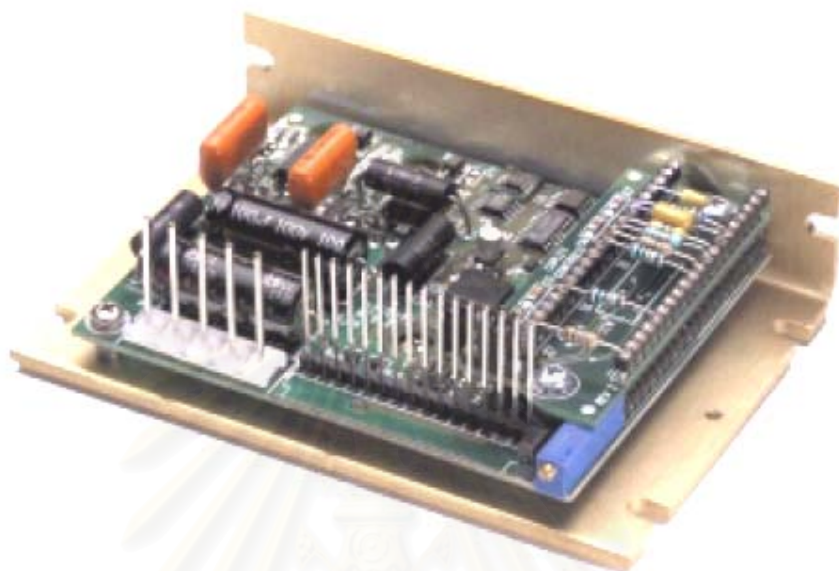
### 4. การ์ดแปลงสัญญาณจากดิจิทัลไปเป็นอนาลอก (D/A Output Card)

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



รูปที่ ก.4 แสดงการ์ดแปลงสัญญาณจากดิจิทัลไปเป็นอนาลอก

5. ชุดขยายกระแสขับมอเตอร์กระแสตรง (DC Servo Motor Drive Amplifier)  
ใช้ของยี่ห้อ Copley Controls รุ่น 4122P โดยที่สามารถจ่ายกระแสต่อเนื่องได้สูงสุด 10 แอมแปร์



รูปที่ ก.5 แสดงชุดขยายกระแสขับมอเตอร์กระแสตรง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธนพงษ์ เเงาจรวงศ์ เกิดเมื่อวันที่ 19 มิถุนายน 2519 เป็นชาวจังหวัดสตูล เข้าศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนอนุบาลสตูล เมื่อสำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 6 ได้สอบเข้าศึกษาต่อในระดับชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนสตูลวิทยา หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาในคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และได้สำเร็จปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิตสาขาวิศวกรรมเครื่องกลในปีการศึกษา 2540 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทในคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2543



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย