

การออกแบบและการควบคุมแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสัจวัต



เรืออากาศเอกประสาทร วังษ์คำซ่าง

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1165-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN AND CONTROL OF A STEWART PLATFORM MANIPULATOR

Flt.Lt. Prasatporn Wongkamchang



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1165-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์                      การออกแบบและการควบคุมแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสัจวัต  
โดย    เรืออากาศเอก ประสาทพร วงษ์คำข้าง  
สาขาวิชา                                    วิศวกรรมเครื่องกล  
อาจารย์ที่ปรึกษา                          รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

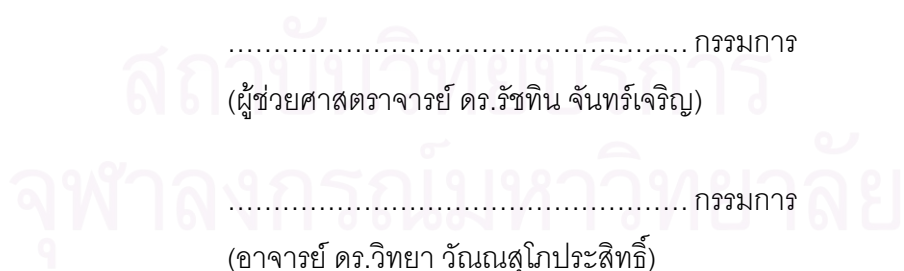
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)

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

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทรเจริญ)

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



เรืออากาศเอก ประสาทพร วงษ์คำข้าง : การออกแบบและการควบคุมแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วต (DESIGN AND CONTROL OF A STEWART PLATFORM MANIPULATOR)  
อาจารย์ที่ปรึกษา : รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 86 หน้า. ISBN 974-03-1165-2.

งานวิจัยนี้เป็นส่วนของการพัฒนาหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่มีโครงสร้างเป็นแบบขนาน รูปทรงของโครงสร้างนี้มีชื่อว่าโครงสร้างแบบสจ๊วต (Stewart platform) ซึ่งประกอบด้วยส่วนฐานและส่วนที่เคลื่อนที่ โดยทั้งสองส่วนมีลักษณะเป็นแผ่นรูป 6 เหลี่ยม และมีตัวขับเคลื่อนที่เคลื่อนที่แบบเชิงเส้นจำนวน 6 ชุดเชื่อมต่อกับส่วนฐานและส่วนที่เคลื่อนที่ ทำให้ส่วนที่เคลื่อนที่นี้สามารถเคลื่อนที่ได้ 6 องศาอิสระ (6 Degree of Freedom) ในการออกแบบโครงสร้างนั้นพิจารณาจากวิธีการวิเคราะห์วงรีของความเฉื่อย (Inertia Ellipsoid) การหาค่าตอบของสมการเคลื่อนที่แบบผกผัน (Inverse Kinematics) สามารถหาได้จากระบบสมการในรูปแบบปิด และการหาค่าตอบของสมการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้า (Forward Kinematics) สามารถหาได้โดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยใช้ระเบียบวิธีของนิวตัน-ราฟสัน ค่าความผิดพลาดมากที่สุดเกิดจากการทดสอบที่ความเร็ว 1 เมตร/วินาที คือมีค่าน้อยกว่า 6.8 มม. ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมานี้เกิดจากการหาค่าตอบของสมการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเป็นหลัก และเมื่อทดสอบโดยการลดความเร็วของการเคลื่อนที่จะทำให้ค่าความผิดพลาดลดลง จากผลการทดลองพิจารณาจากความเร็วและความผิดพลาดของการเคลื่อนที่นี้ได้ผลเป็นที่น่าพอใจ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....

ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2544.....

## 4170399121 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEY WORD: PARALLEL ROBOT / STEWART PLATFORM

FLT.LT. PRASATPORN WONGKAMCHANG : DESIGN AND CONTROL OF STEWART PLATFORM MANIPULATOR. THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF. VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D, 86 pp. ISBN 974-03-1165-2.

This research is to design and development of a parallel manipulator arm based on the Stewart platform. The configuration consists of a base frame and a motion frame. Both frames are hexagons. There are six linear actuators connecting both frames to form a six degree of freedom manipulator arm. The inertia ellipsoid will be applied for helping in analyzing and designing the suitable structure. The closed-form solution of the inverse kinematics and the numerical approximation of the forward kinematics, using the Newton-Raphson, are obtained. The maximum position error of the very fast motion, 1.0 m/sec, is less than 6.8 mm. The main error comes from the numerical approximation of the forward kinematics. For the slower motion, the error is much smaller. From the experimental results, the motion and accuracy obtained indicate the promising of the development.

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....Mechanical Engineering Student's signature.....

Field of study.....Mechanical Engineering Advisor's signature.....

Academic year....2001.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ. ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้คอยให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่มีประโยชน์ในการทำวิจัยครั้งนี้ พร้อมทั้งสนับสนุนทางด้านอุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัยมาด้วยดีโดยตลอด จนงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย ขอขอบคุณพี่และเพื่อข้าราชการโรงเรียนนายเรืออากาศที่ได้ให้คำแนะนำต่าง ๆ ที่มีประโยชน์ในการเรียนและการวิจัย และขอขอบใจ เพื่อน ๆ นิสิตปริญญาโทที่ได้ให้ข้อคิดเห็นและให้กำลังใจตลอดมา

ทำยนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ย่า บิดา มารดา และญาติ ที่คอยให้กำลังใจและสนับสนุนผู้วิจัยด้วยดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	2
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.6 ลำดับขั้นตอนในการวิจัย.....	2
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 หุ่นยนต์อุตสาหกรรม (Industrial Robot).....	3
2.2 ประเภทของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม.....	4
2.2.1 Cartesian Robot Manipulator.....	4
2.2.2 Cylindrical Robot Manipulator.....	4
2.2.3 Spherical Robot Manipulator.....	5
2.2.4 SCARA Robot Manipulator.....	5
2.2.5 Articulated Robot Manipulator.....	6
2.3 หุ่นยนต์แบบขนาน (Parallel Robot manipulator).....	7
2.3.1 หุ่นยนต์แบบขนานที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 3 DOF.....	7
2.3.2 หุ่นยนต์แบบขนานที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 6 DOF.....	8
2.4 แขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วต.....	8
2.5 การออกแบบแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วตที่ผ่านมา.....	9

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3. การออกแบบแขนกล.....	11
3.1 การออกแบบโครงสร้างของแขนกล.....	11
3.1.1 โครงสร้างแบบที่ 1.....	13
3.1.2 โครงสร้างแบบที่ 2.....	14
3.1.3 โครงสร้างแบบที่ 3.....	15
3.2 ทฤษฎีของการเคลื่อนที่ (Manipulability Ellipsoid).....	16
3.3 โครงสร้างของแขนกลแบบสจิวตจู่ฟ้า.....	18
4. จลศาสตร์ของแขนกล.....	21
4.1 สมการเคลื่อนที่แบบผกผัน (The Inverse Kinematics).....	21
4.2 สมการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า (The Forward Kinematics).....	25
5. การคำนวณพื้นที่การทำงานของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจิวต.....	27
5.1 การคำนวณเงื่อนไขของพื้นที่การทำงาน.....	27
5.1.1 เงื่อนไขประการที่ 1 ระยะการเคลื่อนที่ที่จำกัดของตัวขับ.....	28
5.1.2 เงื่อนไขประการที่ 2 มุมที่ข้อต่อสามารถเคลื่อนที่ได้สูงสุด.....	28
5.1.3 เงื่อนไขประการที่ 3 การชนกันระหว่างตัวขับแต่ละตัว.....	30
5.2 การคำนวณหาพื้นที่การทำงานของแขนกล.....	31
5.3 ขั้นตอนวิธีการค้นหาพื้นที่การทำงาน (Workspace Search Algorithm).....	31
5.3.1 วิธีการค้นหาด้วยระบบพิกัดจากแบบทรงกลม.....	32
5.4 ผลการทดสอบโปรแกรม.....	34
6. การควบคุม.....	37
6.1 การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่.....	37
6.2 การควบคุมเชิงสัดส่วน.....	40
6.3 การควบคุมแบบอินทิกรัล.....	41
6.4 การควบคุมแบบอนุพันธ์.....	41
6.5 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัลบวกกับแบบอนุพันธ์.....	42
7. การทดสอบแขนกลสจิวตจู่ฟ้า.....	43
7.1 การควบคุมตำแหน่งของตัวขับแต่ละตัว.....	45
7.1.1 ตำแหน่งที่ 1.....	45



## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
7.1.2 ตำแหน่งที่ 2.....	52
7.1.2 ตำแหน่งที่ 2.....	52
7.1.3 ตำแหน่งที่ 3.....	57
7.1.4 ตำแหน่งที่ 4.....	62
7.2 การทดสอบการเคลื่อนที่ของส่วนที่เคลื่อนที่ให้เคลื่อนที่ตามลักษณะที่กำหนด.....	67
7.2.1 การเคลื่อนที่เป็นวงกลม.....	67
7.2.2 การเคลื่อนที่เป็นรูปแปดเหลี่ยม.....	70
7.2.3 การทดลองเคลื่อนที่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส.....	73
8. สรุปผลการวิจัย.....	76
8.1 สรุปผลการวิจัย.....	76
8.2 ข้อเสนอแนะ.....	76
เอกสารอ้างอิง.....	78
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ข้อมูลของแขนกลสจ๊วตจุฬา.....	80
ภาคผนวก ข. ตัวอย่างการคำนวณหาทอร์กแรงของการเคลื่อนที่.....	82
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	86

## สารบัญตาราง

ตาราง.....	หน้า
ตารางที่ 7.1 ความยาวสุดท้ายของตัวขับแต่ละตัวเมื่อสั่งให้ปลายของแขนกลเคลื่อนที่ไปยังจุดที่ 1.....	45
ตารางที่ 7.2 ตำแหน่งของปลายแขนกลจริงที่คำนวณได้เมื่อสั่งให้เคลื่อนที่ไปยังจุดที่ 1.....	46
ตารางที่ 7.3 ความยาวสุดท้ายของตัวขับแต่ละตัวเมื่อสั่งให้ปลายของแขนกลเคลื่อนที่ไปยังจุดที่ 2.....	52
ตารางที่ 7.4 ตำแหน่งของปลายแขนกลจริงที่คำนวณได้เมื่อสั่งให้เคลื่อนที่ไปยังจุดที่ 2.....	53
ตารางที่ 7.5 ความยาวสุดท้ายของตัวขับแต่ละตัวเมื่อสั่งให้ปลายของแขนกลเคลื่อนที่ไปยังจุดที่ 3.....	57
ตารางที่ 7.6 ตำแหน่งของปลายแขนกลเมื่อสั่งให้เคลื่อนที่ไปยังจุดที่ 3.....	58
ตารางที่ 7.7 ความยาวสุดท้ายของตัวขับแต่ละตัวเมื่อสั่งให้ปลายของแขนกลเคลื่อนที่ไปยังจุดที่ 4.....	62
ตารางที่ 7.8 ตำแหน่งของปลายแขนกลเมื่อสั่งให้เคลื่อนที่ไปยังจุดที่ 4.....	63

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบหน้า.....	หน้า
2.1 Cartesian Robot Manipulator.....	4
2.2 Cylindrical Robot Manipulator.....	4
2.3 Spherical Robot Manipulator.....	5
2.4 SCARA Robot Manipulator.....	5
2.5 Articulated Robot Manipulator.....	6
2.6 หุ่นยนต์แบบขนานที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 3 DOF.....	7
2.7 หุ่นยนต์แบบขนานที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 6 DOF.....	8
2.8 Stewart Platform Manipulator.....	8
2.9 ส่วนข้อมือของแขนกลที่สร้างโดย GSFC.....	9
2.10 อุปกรณ์จำลองการบิน.....	10
3.1 แสดงตำแหน่งมุมและจุดทั้ง 6 จุดที่อยู่บนส่วนฐานและส่วนที่เคลื่อนที่.....	11
3.2 โครงสร้างของแขนกลแบบสจิวต์เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่ามุม $\theta_B$ และค่ามุม $\theta_p$ .....	12
3.3 รูปทรงอย่างง่ายของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจิวต์แบบที่ 1.....	13
3.4 แสดงตำแหน่งทั้ง 6 ตำแหน่งที่อยู่บนส่วนฐานและส่วนที่เคลื่อนที่ทั้ง 6 ตำแหน่ง.....	13
3.5 รูปทรงอย่างง่ายของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจิวต์แบบที่ 2.....	14
3.7 แสดงตำแหน่งทั้ง 6 ตำแหน่งที่อยู่บนส่วนฐานและส่วนที่เคลื่อนที่ทั้ง 6 ตำแหน่ง.....	14
3.8 รูปทรงอย่างง่ายของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจิวต์แบบที่ 3.....	15
3.9 แสดงตำแหน่งทั้ง 6 ตำแหน่งที่อยู่บนส่วนฐานและส่วนที่เคลื่อนที่ทั้ง 6 ตำแหน่ง.....	15
3.10 Force ellipsoid ของโครงสร้างแบบที่ 1.....	16
3.11 Force ellipsoid ของโครงสร้างแบบที่ 2.....	17
3.12 Force ellipsoid ของโครงสร้างแบบที่ 3.....	17
3.13 โครงสร้างที่ออกแบบอย่างคร่าวๆ.....	18
3.14 มอเตอร์ที่เคลื่อนที่แบบเชิงเส้น.....	19
3.15 ข้อต่อแบบ Universal joint ที่ประกอบอยู่กับส่วนฐาน.....	19
3.16 ข้อต่อแบบ Spherical joint ที่ประกอบอยู่กับส่วนเคลื่อนที่.....	20
3.17 โครงสร้างของแขนกลสจิวต์จุดฟ้าที่ประกอบเรียบร้อยสมบูรณ์.....	20
4.1 Frame assignment of the platforms.....	21
4.2 Vector diagram for the i-th actuator.....	23

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบหน้า.....	หน้า
5.1 แสดงระยะการเคลื่อนที่ของตัวขับ.....	28
5.2 แสดงมุมที่ข้อต่อเคลื่อนที่.....	29
5.3 แสดงเวกเตอร์ระหว่างตัวขับทั้งสองตัว.....	30
5.4 เวกเตอร์ของการค้นหาขอบเขตพื้นที่การทำงาน.....	31
5.5 ภาพแสดงการทำงานของโปรแกรม.....	33
5.6 ภาพด้านข้างของพื้นที่การทำงานของแขนกลแบบสจ๊วตที่ทิศทาง roll=0°, pitch=0°, yaw=0°.....	34
5.7 ภาพสามมิติของพื้นที่การทำงานของแขนกลแบบสจ๊วตที่ทิศทาง roll=0°, pitch=0°, yaw=0°.....	34
5.8 ภาพด้านบนของพื้นที่การทำงานของแขนกลแบบสจ๊วตที่ทิศทาง roll=0°, pitch=0°, yaw=0°.....	35
5.9 ภาพด้านข้างของพื้นที่การทำงานของแขนกลแบบสจ๊วตที่ทิศทาง roll=0°, pitch=20°, yaw=0°.....	35
5.10 ภาพสามมิติของพื้นที่การทำงานของแขนกลแบบสจ๊วตที่ทิศทาง roll=0°, pitch=20°, yaw=0°.....	36
5.11 ภาพด้านบนของพื้นที่การทำงานของแขนกลแบบสจ๊วตที่ทิศทาง roll=0°, pitch=20°, yaw=0°.....	36
6.1 Joint-Space Control Block Diagram.....	37
6.2 กราฟแสดงตำแหน่ง ความเร็วและความเร่งของ End-effector.....	38
6.3 การควบคุมมอเตอร์ของแขนกล.....	39
6.4 ระบบควบคุมที่อยู่ภายในตัวควบคุม LinMot 400AT.....	40
6.5 ระบบควบคุมป้อนกลับด้วยตัวควบคุมแบบ PID.....	42
7.1 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับตัวที่ 1 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังจุดที่ 1 ภายในเวลา 0.34 วินาที.....	46
7.2 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับตัวที่ 2 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังจุดที่ 1 ภายในเวลา 0.34 วินาที.....	47
7.3 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับตัวที่ 3 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังจุดที่ 1 ภายในเวลา 0.34 วินาที.....	48



## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบหน้า.....	หน้า
7.18 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับตัวที่ 6 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่กำหนดไปยังจุดที่ 3 ภายในเวลา 1.5 วินาที.....	61
7.19 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับตัวที่ 1 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังจุดที่ 4 ภายในเวลา 1.5 วินาที.....	64
7.20 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับตัวที่ 2 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังจุดที่ 4 ภายในเวลา 1.5 วินาที.....	64
7.21 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับตัวที่ 3 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังจุดที่ 4 ภายในเวลา 1.5 วินาที.....	65
7.22 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับตัวที่ 4 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังจุดที่ 4 ภายในเวลา 1.5 วินาที.....	65
7.23 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับตัวที่ 5 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังจุดที่ 4 ภายในเวลา 1.5 วินาที.....	66
7.24 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับตัวที่ 6 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังจุดที่ 4 ภายในเวลา 1.5 วินาที.....	66
7.25 แสดงตำแหน่งของจุดกึ่งกลางของแขนกลที่เคลื่อนที่เป็นวงกลม.....	67
7.26 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางเมื่อแขนกลเคลื่อนที่เป็นวงกลมภายในเวลา 1 วินาที.....	68
7.27 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางเมื่อแขนกลเคลื่อนที่เป็นวงกลมภายในเวลา 2 วินาที.....	68
7.28 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางเมื่อแขนกลเคลื่อนที่เป็นวงกลมภายในเวลา 4 วินาที.....	69
7.29 แสดงตำแหน่งของจุดกึ่งกลางของแขนกลที่เคลื่อนที่เป็นรูปแปดเหลี่ยม.....	70
7.30 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางเมื่อแขนกลเคลื่อนที่เป็นวงกลมภายในเวลา 2 วินาที.....	71
7.31 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางเมื่อแขนกลเคลื่อนที่เป็นวงกลมภายในเวลา 4 วินาที.....	71
7.32 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางเมื่อแขนกลเคลื่อนที่เป็นวงกลมภายในเวลา 8 วินาที.....	72

## สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพประกอบหน้า.....	หน้า
7.33 แสดงตำแหน่งของจุดกึ่งกลางของแกนกลที่เคลื่อนที่เป็นรูปสี่เหลี่ยม.....	73
7.34 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางเมื่อแกนกลเคลื่อนที่เป็นแปดเหลี่ยม ภายในเวลา 2 วินาที.....	74
7.35 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางเมื่อแกนกลเคลื่อนที่เป็นแปดเหลี่ยม ภายในเวลา 4 วินาที.....	74
7.36 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางเมื่อแกนกลเคลื่อนที่เป็นแปดเหลี่ยม ภายในเวลา 8 วินาที.....	75



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนากระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพนั้นเป็นปัจจัยหลักของการแข่งขันในอุตสาหกรรม ซึ่งการแข่งขันนี้เป็นตัวขับเคลื่อนให้เกิดการพัฒนาในด้านความเร็ว ความถูกต้อง และ ความสามารถของเครื่องจักรให้ทำงานได้หลายอย่าง จึงเป็นแรงบันดาลใจให้นักวิจัยได้ทำการพัฒนาและคิดค้นเครื่องจักรแบบใหม่ๆ ที่สามารถทำงานเลียนแบบการทำงานของมนุษย์ในรูปแบบต่าง ๆ กันในขณะเดียวกันยังคงรักษาความยืดหยุ่น (Flexibility) ในการทำงานของมนุษย์ ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาหุ่นยนต์มาใช้งานในอุตสาหกรรมดังที่เราสามารถพบเห็นในปัจจุบันนี้ และหุ่นยนต์ที่มีใช้ทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมนั้นส่วนมากจะมีโครงสร้างของแขนกลเป็นชนิดอนุกรม (Serial Robot Manipulator) ซึ่งมีโครงสร้างลักษณะนี้ปลายของแขนกลแต่ละส่วนนั้นจะเชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อ โครงสร้างของหุ่นยนต์อีกแบบหนึ่งที่เรียกว่าแขนกลชนิดข้อต่อขนาน (Parallel Robot Manipulator) ซึ่งกำลังได้รับความนิยมในเชิงงานวิจัยกันค่อนข้างกว้างขวางอยู่ขณะนี้ แขนกลแบบขนาน (Parallel Robot) นี้มีคุณสมบัติที่ได้เปรียบเมื่อเทียบกับแขนกลแบบอนุกรม (Serial Robot) คือมีโครงสร้างที่มีความแข็งแรงกว่า (High Stiffness) สามารถที่จะรับแรงและแรงบิดได้สูงกว่าเนื่องจากแรงนั้นจะกระจายไปบนตัวข้อต่อแต่ละตัวของหุ่นยนต์ และการเคลื่อนที่มีความถูกต้องแม่นยำมากกว่า จากข้อได้เปรียบดังกล่าวจึงได้มีการศึกษาค้นคว้าและพัฒนาให้หุ่นยนต์แบบขนานสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานมากยิ่งขึ้น

แขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจิวต์ (Stewart Platform Manipulator) นั้นเป็นหุ่นยนต์แบบขนานแบบหนึ่งซึ่งถูกนำเสนอครั้งแรกโดย D.Stewart ในปี ค.ศ.1965 เขาใช้โครงสร้างของแขนกลแบบนี้ในการพัฒนาโครงสร้างของเครื่องจำลองการบิน (Flight Simulator) ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 6 องศาอิสระ (Degree of freedom) ในปัจจุบันนี้ได้มีการนำเอาโครงสร้างแบบนี้มาพัฒนาเพื่อใช้ในงานลักษณะต่างๆกัน เช่น เครื่องกัดที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เครื่องจำลองการบิน เป็นต้น

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้เป็นการศึกษาวิธีการออกแบบ โครงสร้างของแขนกล (Mechanism) แบบขนาน (Parallel) และระบบการควบคุมการเคลื่อนที่ เพื่อนำมาพัฒนาและสร้างแขนกล Chula Parallel Manipulator เพื่อสำหรับใช้ในการวิจัยขั้นสูงต่อไป โครงสร้างของแขนกลแบบขนานที่จะสร้างขึ้นนี้จะมีลักษณะที่เรียกว่าโครงสร้างแบบสจิวต์ (Stewart Platform) ส่วนประกอบของแขนกลแบบสจิวต์นี้จะประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้ ส่วนฐานที่อยู่กับที่ (Base frame) และส่วนที่เคลื่อนที่ (End-effector หรือ Payload Platform) ซึ่งเชื่อมต่อกันด้วยตัวขับเคลื่อน (Actuator) ที่เคลื่อนที่เป็นเชิงเส้น (Linear actuator)



จำนวน 6 ชุด เพื่อที่จะทำหน้าที่ขับให้มีความยาวแตกต่างกันไปเพื่อให้ส่วนที่เป็น End-effector เคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งและทิศทางที่กำหนด

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ศึกษาและออกแบบสร้างแขนหุ่นยนต์แบบขนาน (Parallel Platform) ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 6 องศาอิสระ (6 Degree of Freedom, Position and Orientation)
- 2) ความเร็วในการเคลื่อนที่ที่กำหนดที่ปลายแขน (End-effector) สามารถเคลื่อนที่แบบเลื่อนตัว (Translation) ด้วยอัตราเร็ว 1 m/s และสามารถเคลื่อนที่โดยการหมุน (Rotation) ด้วยอัตราเร็ว 20°/s
- 3) ระบบควบคุมสามารถควบคุมให้ปลายของแขนกลเคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งและทิศทางที่กำหนดได้

### 1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับ

- 1) ได้แขนกลแบบสจิวต์ (Stewart Platform) ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 6 องศาอิสระ (Degree of Freedom)
- 2) เพื่อใช้ประโยชน์ในการพัฒนาระบบควบคุมอัตโนมัติขั้นสูงของแขนกลแบบสจิวต์ ต่อไปในอนาคต

### 1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

การทำงานเริ่มต้นจากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจิวต์ ที่ผ่านมาเพื่อหาข้อมูลที่เป็นประโยชน์ในการออกแบบ สร้างแบบจำลองของแขนกล ออกแบบชิ้นส่วนต่างๆ ของแขนกล พร้อมทั้งจัดหาอุปกรณ์ สร้างต้นแบบและแก้ไขเมื่อพบข้อผิดพลาด เขียนโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ และทดลองการทำงานของแขนกล

### 1.6 ลำดับขั้นตอนในการวิจัย

- 1) ศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจิวต์ที่ผ่านมา
- 2) ออกแบบชิ้นส่วนต่างๆ ของแขนกลอย่างคร่าวๆ พร้อมทั้งสร้างแบบจำลองของแขนกล
- 3) ออกแบบโครงสร้างโดยละเอียด สร้าง และเลือกชิ้นส่วนต่างๆ เพื่อประกอบเป็นแขนกล
- 4) ประกอบชิ้นงานขึ้นเป็นแขนกลและแก้ไขเมื่อพบข้อผิดพลาด
- 5) ออกแบบระบบควบคุมเบื้องต้นพร้อมทั้งทดสอบและแก้ไข

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 หุ่นยนต์อุตสาหกรรม (Industrial Robot)

หุ่นยนต์อุตสาหกรรม หมายถึง เครื่องจักรกลที่สามารถตั้งโปรแกรมได้หลายครั้งรวมทั้งสามารถปฏิบัติงานได้หลายหน้าที่ เช่น การเคลื่อนย้ายวัตถุ อุปกรณ์ เครื่องมือ โดยอาศัยการควบคุมลักษณะการเคลื่อนที่ของมันให้ทำงานได้หลายอย่างตามต้องการ จากความหมายดังกล่าวนี้ เราจะเห็นได้ว่าการที่หุ่นยนต์สามารถตั้งโปรแกรมได้หลายครั้งนั้นก็หมายความว่า มันสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงการทำงานได้ ถ้าหากเราเปลี่ยนแปลงโปรแกรมใหม่ โดยลักษณะของโปรแกรมที่เราเปลี่ยนแปลงนั้น จะขึ้นอยู่กับประเภทหรือลักษณะของงานที่เราต้องการให้หุ่นยนต์ทำงาน ส่วนประกอบหลักของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมนั้นมี 4 ส่วนคือ

- 1) โครงสร้างของหุ่นยนต์ ซึ่งประกอบไปด้วยแขน (link) ที่เป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงหลายส่วนมาเชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อ (joint) เป็นรูปทรงต่างๆ
- 2) ตัวขับ (actuators) มีหน้าที่ทำให้หุ่นยนต์นี้เคลื่อนที่ได้โดยการนำตัวขับนี้ไปติดตั้งตำแหน่งของข้อต่อ ตัวอย่างของตัวขับมีหลายชนิดเช่น มอเตอร์ไฟฟ้า ระบบไฮดรอลิก เป็นต้น
- 3) อุปกรณ์ตรวจจับ (sensor) มีหน้าที่วัดสถานะของหุ่นยนต์ขณะทำงาน เช่นตำแหน่งจุดปลายของแขนกล หรือบางครั้งก็ใช้วัดสถานะของสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ เป็นต้น
- 4) ระบบควบคุม (controller) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการควบคุมตัวขับของหุ่นยนต์ให้สามารถเคลื่อนที่ได้ตามที่เรากำหนดต้องการ

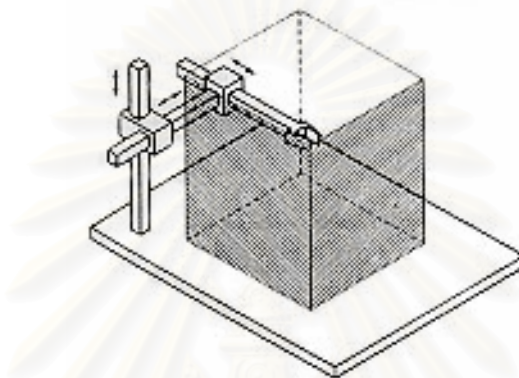
ในปัจจุบันนี้ระบบการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมได้มีการนำหุ่นยนต์อุตสาหกรรมมาใช้มากขึ้น ซึ่งลักษณะของงานที่เราให้หุ่นยนต์ทำงานในอุตสาหกรรมนั้นเช่น

- 1) งานเชื่อม
- 2) งานพ่นสี
- 3) งานประกอบชิ้นส่วน เช่น ในโรงงานประกอบรถยนต์
- 4) งานกัด เป็นต้น

## 2.2 ประเภทของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

ในปัจจุบันนี้มีการนำหุ่นยนต์อุตสาหกรรมมาใช้เป็นจำนวนมาก ซึ่งสามารถแบ่งได้ตามลักษณะของโครงสร้างของหุ่นยนต์ได้ 5 ประเภทคือหุ่นยนต์โครงสร้างคาร์ทีเซียน (Cartesian Robot) หุ่นยนต์โครงสร้างไซลินเดออร์ (Cylindrical Robot) หุ่นยนต์โครงสร้างทรงกลม (Spherical Robot) หุ่นยนต์แบบสการา (SCARA Robot) และ หุ่นยนต์ที่ข้อต่อเป็นแกนหมุน 6 ข้อต่อ (Articulated Robot) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

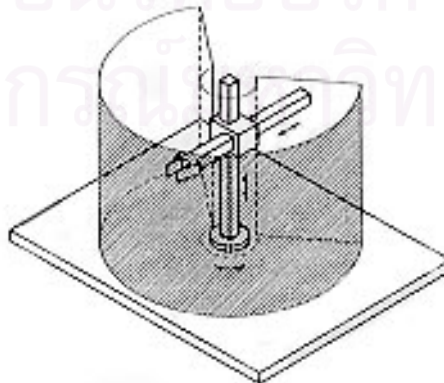
### 2.2.1 หุ่นยนต์โครงสร้างคาร์ทีเซียน (Cartesian Robot Manipulator)



รูปที่ 2.1 หุ่นยนต์โครงสร้างคาร์ทีเซียน

หุ่นยนต์แบบ หุ่นยนต์โครงสร้างคาร์ทีเซียนนี้ประกอบด้วยข้อต่อแบบเลื่อน (prismatic joint) จำนวน 3 อันซึ่งแกนของข้อต่อทั้งสามนี้จะตั้งฉากกันตามแนวแกน  $x, y, z$  จึงทำให้หุ่นยนต์ประเภทนี้มีโครงสร้างที่แข็งแรง และสร้างให้มีขนาดใหญ่ได้ เช่น เครื่องที่ใช้ในอุตสาหกรรมประกอบรถยนต์หรือเครื่องบิน ความถูกต้องแม่นยำของตำแหน่งของจุดปลายของแขนกลนั้นจะคงที่ทุกๆจุดในพื้นที่การทำงาน ซึ่งพื้นที่การทำงานนี้มีลักษณะเป็นปริมาตรทรงสี่เหลี่ยม

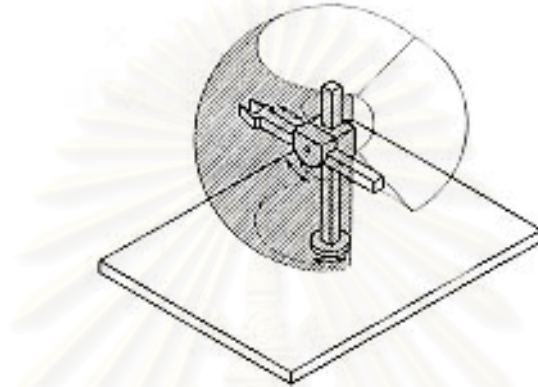
### 2.2.2 หุ่นยนต์โครงสร้างไซลินเดออร์ (Cylindrical Robot Manipulator)



รูปที่ 2.2 หุ่นยนต์โครงสร้างไซลินเดออร์

หุ่นยนต์แบบหุ่นยนต์โครงสร้างไฮลีนเดอร์ นี้จะต่างจากหุ่นยนต์โครงสร้างคาร์ทีเซียน ที่ข้อต่อแบบเลื่อนตัวแรกจะถูกเปลี่ยนเป็นข้อต่อแบบหมุน (revolute joint) เหมาะกับงานที่ลักษณะของพื้นที่ที่ทำงานอยู่ในระบบพิกัดทรงกระบอก ความถูกต้องแม่นยำของตำแหน่งของจุดปลายของแขนกลนั้นจะลดลงเมื่อส่วนที่เคลื่อนที่ในแนวระดับมีระยะชักมากขึ้น พื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ประเภทนี้มีรูปร่างเป็นส่วนของทรงกระบอก

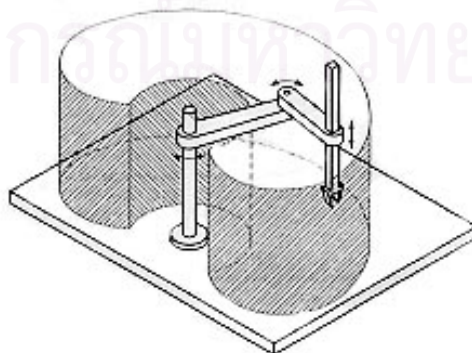
### 2.2.3 หุ่นยนต์โครงสร้างทรงกลม (Spherical Robot Manipulator)



รูปที่ 2.3 หุ่นยนต์โครงสร้างทรงกลม

หุ่นยนต์แบบหุ่นยนต์โครงสร้างทรงกลมนี้จะต่างจากหุ่นยนต์โครงสร้างไฮลีนเดอร์ ที่ข้อต่อในตำแหน่งที่สองที่เป็นข้อต่อแบบเลื่อนนั้นเปลี่ยนเป็นข้อต่อแบบหมุน เหมาะกับงานที่ลักษณะของพื้นที่ที่ทำงานอยู่ในระบบพิกัดทรงกลมส่วนประกอบของหุ่นยนต์จะมีโครงสร้างที่ซับซ้อนกว่าหุ่นยนต์ประเภทหุ่นยนต์โครงสร้างคาร์ทีเซียนและหุ่นยนต์โครงสร้างไฮลีนเดอร์ ความถูกต้องแม่นยำของตำแหน่งของจุดปลายของแขนกลนั้นจะลดลงเมื่อระยะชักในแนวรัศมีเพิ่มมากขึ้น พื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ประเภทนี้มีรูปร่างเป็นส่วนของทรงกลม

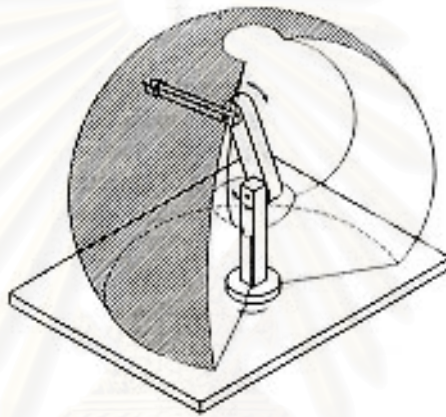
### 2.2.4 หุ่นยนต์แบบสการา (SCARA Robot Manipulator)



รูปที่ 2.4 หุ่นยนต์แบบสการา

หุ่นยนต์แบบหุ่นยนต์แบบสการา (SCARA Robot) นี้มีที่ข้อย่อมาจาก Selectively Compliant Assembly Robot Arm จะประกอบด้วยข้อต่อแบบหมุนจำนวน 2 อันและข้อต่อแบบเลื่อนจำนวน 1 อัน การวางตัวของข้อต่อนั้นมีลักษณะคือ แกนของการเคลื่อนที่ของข้อต่อทั้งสามนั้นจะขนานกัน ทำให้ปลายของแขนกลนี้สามารถเคลื่อนที่ไปได้ในระนาบ และข้อต่อแบบเลื่อนที่ติดอยู่กับปลายของแขนกลนี้จะทำให้ปลายของแขนกลนั้นสามารถเคลื่อนที่ในทิศตั้งฉากกับระนาบนี้ได้ ความถูกต้องแม่นยำของตำแหน่งของจุดปลายของแขนกลนั้นจะลดลงเมื่อระยะของจุดปลายของแขนกลกับแกนหมุนของข้อต่อที่ตำแหน่งฐานเพิ่มมากขึ้น

### 2.2.5 หุ่นยนต์ที่ข้อต่อเป็นแกนหมุน 6 ข้อต่อ (Articulated Robot Manipulator)



รูปที่ 2.5 หุ่นยนต์ที่ข้อต่อเป็นแกนหมุน 6 ข้อต่อ

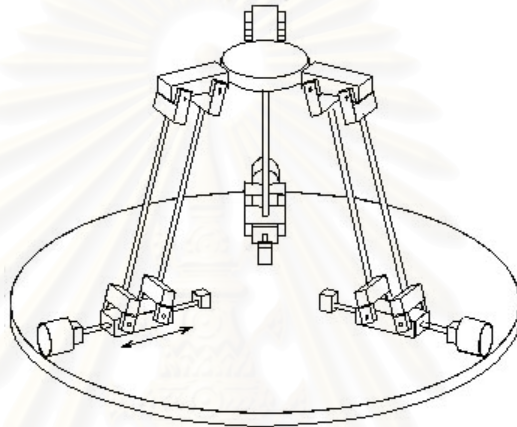
หุ่นยนต์ประเภทนี้จะประกอบด้วยข้อต่อแบบหมุนจำนวน 3 อัน โดยที่แกนของข้อต่อที่ตำแหน่งฐานนั้นจะตั้งฉากกับแกนของข้อต่ออีก 2 อันซึ่งแกนหมุนของข้อต่อทั้งสองอันนี้จะขนานกัน เนื่องจากโครงสร้างของหุ่นยนต์ประเภทนี้คล้ายกับแขนของมนุษย์ คือข้อต่อตำแหน่งที่สองนั้นทำหน้าที่คล้ายกับส่วนที่เป็นไหล่ และข้อต่อตำแหน่งที่สามนั้นจะทำหน้าที่คล้ายกับส่วนที่เป็นข้อศอก พื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ประเภทนี้มีรูปร่างเป็นส่วนของทรงกลม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 2.3 หุ่นยนต์แบบขนาน (Parallel Robot manipulator)

หุ่นยนต์แบบขนาน (Parallel Robot Manipulator) นั้นเป็นโครงสร้างแบบปิดที่ซึ่งปลายของแขนกล (End-effector) เชื่อมต่อกับฐานโดยมีตัวขับ (Actuator) ที่เคลื่อนที่ได้อิสระอย่างน้อย 2 อันและจำนวนองศาอิสระ (Degree of freedom) เท่ากับจำนวนของตัวขับที่เชื่อมติดกับฐานของตัวหุ่นยนต์ ในปัจจุบันนี้ได้มีการออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์แบบขนานนี้เพื่อนำมาใช้ในงานด้านต่างๆ เป็นจำนวนมาก ตัวอย่างโครงสร้างของหุ่นยนต์แบบขนานเช่น

#### 2.3.1 หุ่นยนต์แบบขนานที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 3 องศาอิสระ (Degree of freedom) โดย Herv J.M.

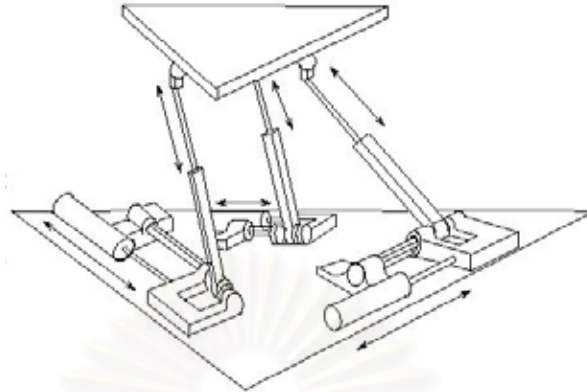


รูปที่ 2.6 หุ่นยนต์แบบขนานที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 3 องศาอิสระ

จากรูปเป็นหุ่นยนต์แบบขนานประกอบด้วยส่วนฐานกับส่วนที่เคลื่อนที่ที่เชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อแบบหมุน ที่ตำแหน่งฐานนั้นมีตัวขับที่ประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าจำนวน 3 ชุด แต่ละชุดต่อกับแกนหมุนของบอลสกรู (Ball screw) เพื่อเปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบหมุนเนื่องจากมอเตอร์ให้เป็นการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น ในการควบคุมตำแหน่งของส่วนที่เคลื่อนที่นั้นทำได้โดยการควบคุมการหมุนของมอเตอร์ ทำให้ส่วนที่เคลื่อนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 3 องศาอิสระ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 2.3.2 หุ่นยนต์แบบขนานที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 6 องศาอิสระ โดย Behi F.



รูปที่ 2.7 หุ่นยนต์แบบขนานที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 6 องศาอิสระ

จากรูปเป็นหุ่นยนต์แบบขนานที่ประกอบด้วยส่วนฐานที่มีการติดตั้งตัวขับเคลื่อนจำนวน 3 ชุด แต่ละชุดต่อกับปลายด้านหนึ่งของตัวขับเคลื่อนอีกตัวหนึ่งโดยที่ปลายอีกด้านหนึ่งของตัวขับเคลื่อนนี้ต่อกับแผ่นที่เป็นส่วนที่เคลื่อนที่ของแขนกล การควบคุมตำแหน่งของส่วนที่เคลื่อนที่นั้นทำได้โดยการควบคุมความยาวของตัวขับเคลื่อนทั้ง 6 ชุด ทำให้ส่วนที่เคลื่อนที่ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 6 องศาอิสระ

### 2.4 แขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วต

แขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วต (Stewart Platform Manipulator) นั้นเป็นหุ่นยนต์แบบขนานแบบหนึ่งซึ่งถูกนำเสนอครั้งแรกโดย D.Stewart ในปี ค.ศ.1965 เขาใช้ในการพัฒนาโครงสร้างของเครื่องจำลองการบิน (Flight Simulator) ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 6 องศาอิสระ (Degree of freedom) ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วต

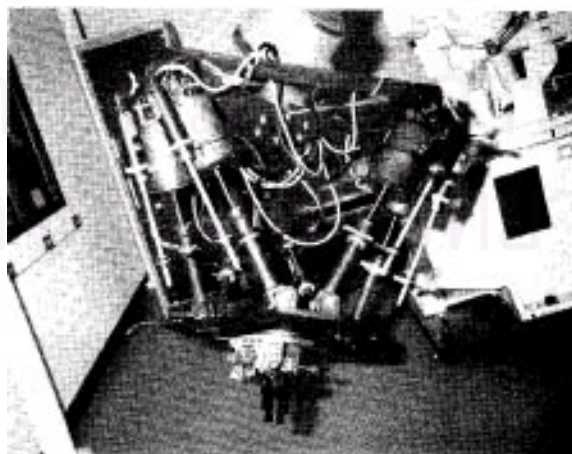
จากรูปที่ 2.8 แผ่นด้านบนนั้นจะเชื่อมติดกับส่วนที่เป็นฐานโดยตัวขับที่เคลื่อนที่แบบเชิงเส้นจำนวน 6 ชุด ที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกระทำได้โดยการควบคุมความยาวของตัวขับทั้ง 6 ชุดนี้ เพื่อให้ส่วนที่เคลื่อนที่สามารถเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งและทิศทางที่เราควบคุมได้

โครงสร้างของแขนกลแบบสจ๊วตนี้มีข้อดีที่เห็นได้เด่นชัด คือ มีอัตราส่วนระหว่างแรงที่มากกระทำกับส่วนที่เคลื่อนที่ต่อน้ำหนักทั้งหมดของโครงสร้างนั้นมีค่ามาก เนื่องจากแรงที่รับโดยส่วนที่เคลื่อนที่นั้นจะถูกรองรับด้วยตัวขับที่เคลื่อนที่แบบเลื่อน โดยแรงจะกระจายจะเกือบเท่าๆกันทั้ง 6 ตัว จึงทำให้โครงสร้างแบบนี้สามารถรับแรงได้มาก

## 2.5 การออกแบบแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วตที่ผ่านมา

แขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วตนั้นเป็นโครงสร้างที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง เนื่องจากความผิดพลาดของตัวขับแต่ละตัวนั้นจะไม่มีผลกระทบต่อความผิดพลาดของตัวขับตัวอื่นๆ และโครงสร้างของแขนกลนั้นมีความแข็งแรงเพราะมีการกระจายแรงไปยังตัวขับแต่ละตัว ถึงแม้ว่าพื้นที่การทำงานจะน้อยเมื่อเทียบกับแขนกลที่มีโครงสร้างแบบอนุกรม แต่มีข้อได้เปรียบในเรื่องของความถูกต้องแม่นยำในการควบคุมตำแหน่งของปลายแขนกล จึงได้มีการออกแบบและสร้างแขนกลที่มีโครงสร้างลักษณะนี้เพื่อนำมาใช้งานด้านต่างๆ การออกแบบนั้นจะมุ่งเน้นที่การออกแบบตัวขับที่มีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงได้มีการสร้างระบบขับเคลื่อนที่สามารถเปลี่ยนแปลงความยาวได้โดยสร้างขึ้นจากอุปกรณ์ต่างๆ เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า ระบบไฮดรอลิก ระบบนิวแมติก เป็นต้น

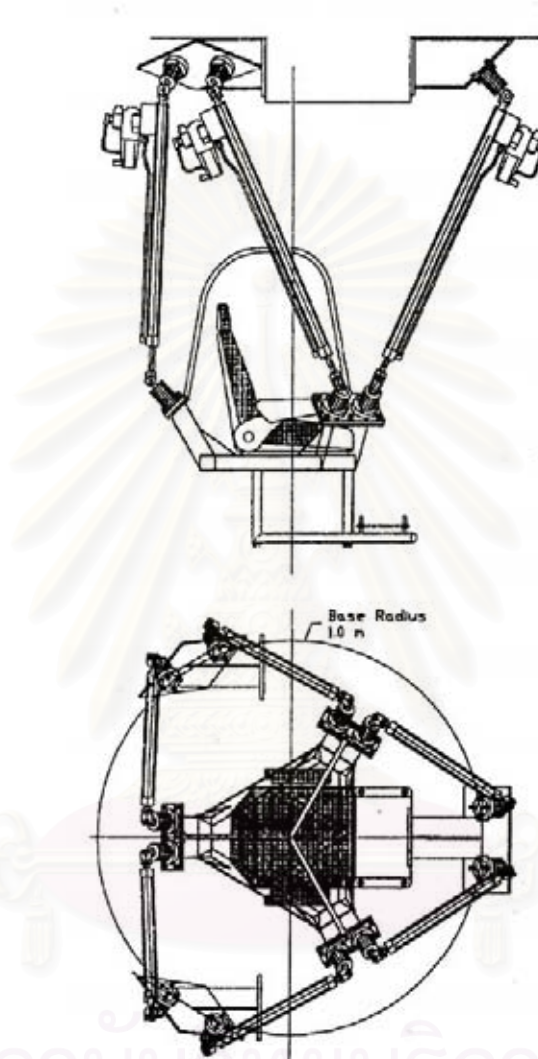
ส่วนของข้อมือของแขนกลที่สร้างขึ้นโดย Goddard Space Flight Center (GSFC) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 นั้นเป็นตัวอย่างของการออกแบบระบบขับเคลื่อนที่สร้างขึ้นโดยมีมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบนั้น ตัวขับแบบเชิงเส้นนั้นประกอบด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงกับบอลสกรู



รูปที่ 2.9 ส่วนข้อมือของแขนกลที่สร้างโดย GSFC



การออกแบบระบบขับเคลื่อนโดยใช้ระบบไฮดรอลิกนั้นมีข้อได้เปรียบด้านของกำลังหรือความสามารถรับน้ำหนักของส่วนที่เคลื่อนที่ของแขนกล และอัตราเร็วของตัวขับ ตัวอย่างของระบบขับเคลื่อนแบบนี้เช่น อุปกรณ์จำลองการบิน เป็นต้น



รูปที่ 2.10 อุปกรณ์จำลองการบิน

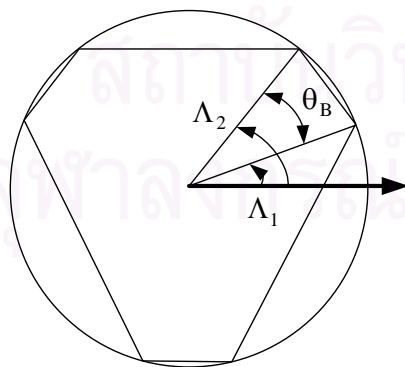
จากรูปที่ 2.10 นั้นเป็นอุปกรณ์จำลองการบินแบบที่นั่งเดี่ยวที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วต ตัวขับระบบไฮดรอลิกที่ติดตั้งเรียบร้อยแล้วจะทำให้ปลายของแขนกล (ส่วนเก้าอี้) สามารถเคลื่อนที่โดยมีความเร็วสูงสุด 1 เมตรต่อวินาที และสามารถเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเชิงมุมสูงสุดเท่ากับ 30 องศาต่อวินาที

### บทที่ 3

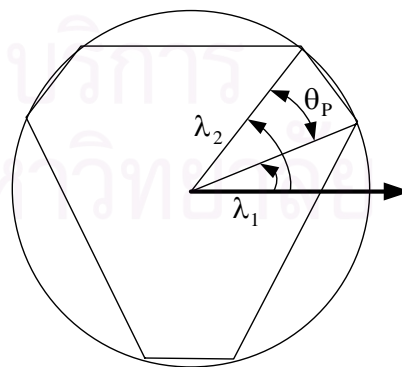
#### การออกแบบแขนกล

##### 3.1 การออกแบบโครงสร้างของแขนกล

ในการออกแบบแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วตนั้น ในตอนแรกจะทำการศึกษเกี่ยวกับโครงสร้างแขนกลแบบสจ๊วตแบบต่าง ๆ ซึ่งแบบที่จะทำการศึกษานั้นมี 3 แบบ โดยแต่ละแบบนี้จะมีรูปร่างที่แตกต่างกันตามมุมระหว่างเส้นตรงที่ลากผ่านจุดกึ่งกลางของส่วนฐานไปยังจุดต่างๆทั้ง 6 จุดที่อยู่บนส่วนฐาน ( $\theta_B$ ) และมุมระหว่างเส้นตรงที่ลากผ่านจุดกึ่งกลางของส่วนเคลื่อนที่ไปยังจุดต่างๆทั้ง 6 จุดที่อยู่บนส่วนเคลื่อนที่ ( $\theta_P$ ) ดังรูปที่ 3.1



ส่วนฐานรัศมีเท่ากับ  $r_B$



ส่วนฐานรัศมีเท่ากับ  $r_P$

รูปที่ 3.1 แสดงตำแหน่งมุมและจุดทั้ง 6 จุดที่อยู่บนส่วนฐานและส่วนที่เคลื่อนที่

กำหนดให้มุมระหว่างเส้นตรงที่ลากจากจุดกึ่งกลางของส่วนที่เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่มุมทั้ง 6 บนส่วนที่เคลื่อนที่  $PP_i$  กับแกน  $x_P$  เท่ากับ  $\lambda_i$  และมุมระหว่างเส้นตรงที่ลากจากจุดกึ่งกลางของส่วนฐานไปยังตำแหน่งที่มุมทั้ง 6 ที่อยู่บนส่วนฐาน  $BB_i$  กับ แกน  $x_B$  เท่ากับ  $\Lambda_i$  เมื่อ  $i=1,2,\dots,6$  จะได้ว่า

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

และ

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

กำหนดให้ตำแหน่งของจุดต่างๆ ทั้ง 6 จุดที่อยู่บนส่วนที่เคลื่อนที่  $P_i$  ดังแสดงในรูปที่ 3.1 บนระนาบ  $\{P\}$  เขียนแทนด้วย  ${}^P P_i = [p_{ix} \ p_{iy} \ p_{iz}]^T$  และตำแหน่งของจุดต่างๆ ทั้ง 6 จุดที่อยู่บนส่วนฐาน  $B_i$  ดังแสดงในรูปที่ 3.1 บนระนาบ  $\{B\}$  เขียนแทนด้วย  ${}^B B_i = [b_{ix} \ b_{iy} \ b_{iz}]^T$  ดังนั้นตำแหน่งของจุดทั้ง 6 ที่อยู่บนส่วนที่เคลื่อนที่มีค่าเท่ากับ

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

และตำแหน่งของจุดทั้ง 6 ที่อยู่บนส่วนฐานมีค่าเท่ากับ

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

เมื่อ  $r_P$  และ  $r_B$  คือรัศมีของส่วนที่เคลื่อนที่ (End-effector plate) และส่วนที่อยู่กับที่ (Base) ตามลำดับ

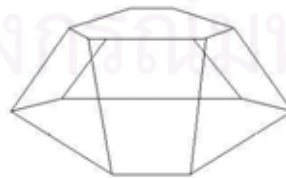
ในการออกแบบโครงสร้างนั้นจะทำการเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างแต่ละแบบที่มีค่ามุม  $\theta_B$  และ  $\theta_P$  แตกต่างกัน สำหรับโครงสร้างที่นำมาพิจารณานั้นมี 3 โครงสร้างซึ่งมีค่าของมุมต่างๆ ดังต่อไปนี้



โครงสร้างแบบที่ 1

$$\theta_B = 60^\circ$$

$$\theta_P = 60^\circ$$



โครงสร้างแบบที่ 2

$$\theta_B = 30^\circ$$

$$\theta_P = 30^\circ$$



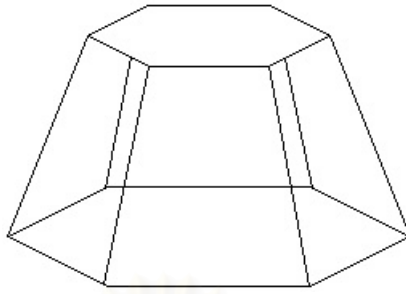
โครงสร้างแบบที่ 3

$$\theta_B = 30^\circ$$

$$\theta_P = 0^\circ$$

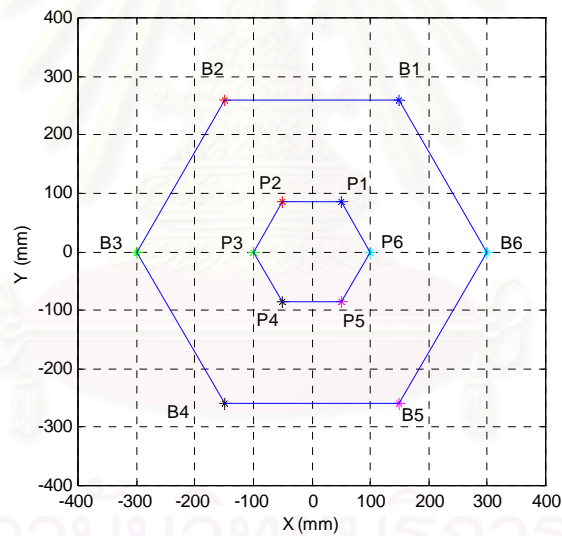
รูปที่ 3.2 โครงสร้างของแกนกลแบบสจ๊วตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่ามุม  $\theta_B$  และค่ามุม  $\theta_P$

### 3.1.1 โครงสร้างแบบที่ 1



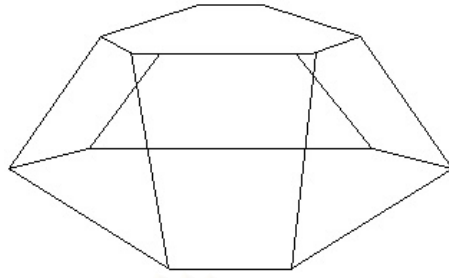
รูปที่ 3.3 รูปทรงอย่างง่ายของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสัจวัตแบบที่ 1

สำหรับโครงสร้างของแขนกลแบบสัจวัตแบบที่ 1 นี้ มีค่ามุม  $\theta_b = 60^\circ$  และค่ามุม  $\theta_p = 60^\circ$  เมื่อนำมาสร้างเป็นรูปทรงโดยกำหนดค่ารัศมีของส่วนฐานเท่ากับ 300 ม.ม. และรัศมีส่วนที่เคลื่อนที่เท่ากับ 100 ม.ม. จะได้ตำแหน่งที่จะนำมาติดตั้งตัวขับเคลื่อนเชิงเส้นได้ดังรูปที่ 3.4



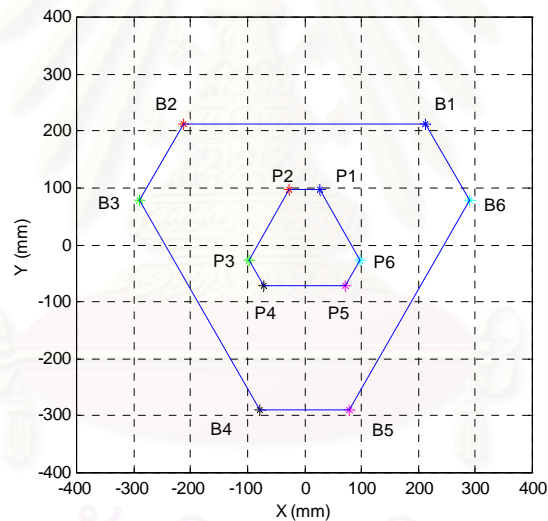
รูปที่ 3.4 แสดงตำแหน่งทั้ง 6 ตำแหน่งที่อยู่บนส่วนฐานและส่วนที่เคลื่อนที่ทั้ง 6 ตำแหน่ง

### 3.1.2 โครงสร้างแบบที่ 2



รูปที่ 3.5 รูปทรงอย่างง่ายของแกนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วตแบบที่ 2

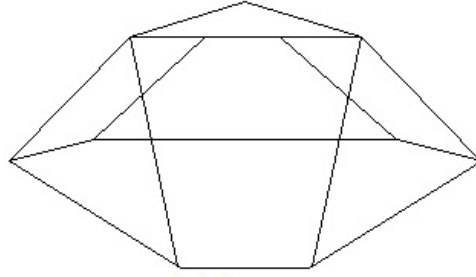
สำหรับโครงสร้างของแกนกลแบบสจ๊วตแบบที่ 2 นี้ มีค่ามุม  $\theta_b = 30^\circ$  และค่ามุม  $\theta_p = 30^\circ$  เมื่อนำมาสร้างเป็นรูปทรงโดยกำหนดค่ารัศมีของส่วนฐานเท่ากับ 300 ม.ม. และรัศมีส่วนที่เคลื่อนที่เท่ากับ 100 ม.ม. จะได้ตำแหน่งที่จะนำมาติดตั้งตัวขับเคลื่อนเชิงเส้นได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.7 แสดงตำแหน่งทั้ง 6 ตำแหน่งที่อยู่บนส่วนฐานและส่วนที่เคลื่อนที่ทั้ง 6 ตำแหน่ง

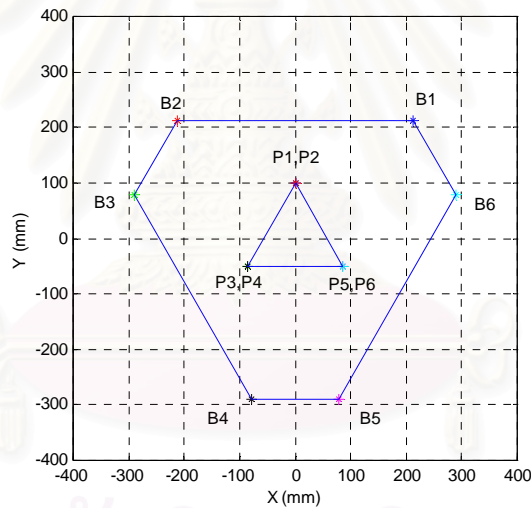
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.1.3 โครงสร้างแบบที่ 3



รูปที่ 3.8 รูปทรงอย่างง่ายของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วตแบบที่ 3

สำหรับโครงสร้างของแขนกลแบบสจ๊วตแบบที่ 3 นี้ มีค่ามุม  $\theta_B = 30^\circ$  และค่ามุม  $\theta_P = 0^\circ$  เมื่อนำมาสร้างเป็นรูปทรงโดยกำหนดค่ารัศมีของส่วนฐานเท่ากับ 300 มม. และรัศมีส่วนที่เคลื่อนที่เท่ากับ 100 มม. จะได้ตำแหน่งที่จะนำมาติดตั้งตัวขับเคลื่อนเชิงเส้นได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงตำแหน่งทั้ง 6 ตำแหน่งที่อยู่บนส่วนฐานและส่วนที่เคลื่อนที่ทั้ง 6 ตำแหน่ง

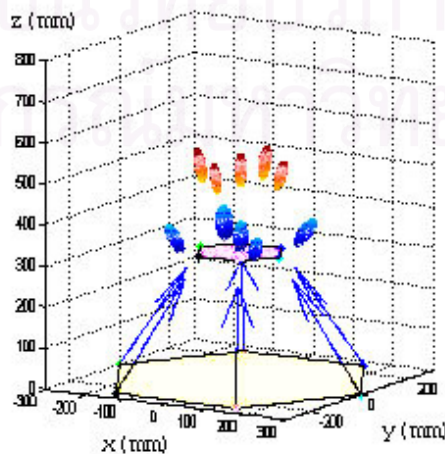
### 3.2 ทฤษฎีของการเคลื่อนที่ (Manipulability Ellipsoid)

ในการออกแบบโครงสร้างของแขนกลนั้นจะใช้ทฤษฎีของการเคลื่อนที่ หรือ Manipulability Ellipsoid ซึ่งเป็นการสร้างรูปทรงรีโดยแกนหลักคือค่าเวกเตอร์เจาะจงของเมตริกซ์ที่กำลังสนใจ การออกแบบจะทำการพิจารณา ณ จุดต่างๆ ในพื้นที่การทำงานของแขนกล โดยดูว่ารูปร่างของ Manipulability Ellipsoid นั้นมีลักษณะเป็นอย่างไร โครงสร้างของแขนหุ่นยนต์ที่ดีนั้นจะต้องพยายามทำให้รูปทรงรี ณ ตำแหน่งต่างๆ กันมีลักษณะใกล้เคียงทรงกลมมากที่สุด ซึ่งหมายความว่าแขนกลมีความสามารถในการถูกขับเคลื่อนที่แต่ละทิศทางไม่แตกต่างกันมากเกินไป

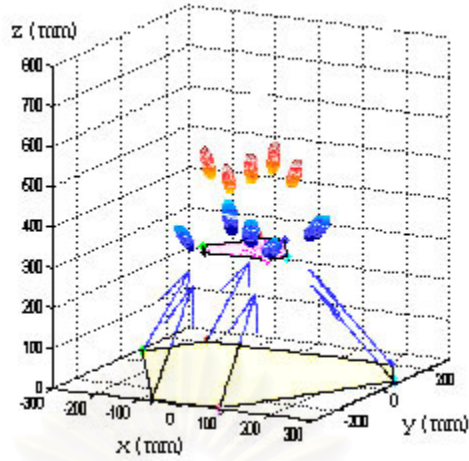
ในการศึกษานี้เกณฑ์การออกแบบโครงสร้างของแขนกลจะใช้ทฤษฎีของการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการบอกถึงประสิทธิภาพของแขนกลคือ Force Manipulability Ellipsoid นอกจากนี้ Force Manipulability Ellipsoid แล้วยังมีแบบอื่นอีกเช่น Velocity Manipulability Ellipsoid เป็นต้น

ทฤษฎีความเร็วของการเคลื่อนที่ (Velocity Manipulability Ellipsoid) หมายถึง ความสามารถในการเปลี่ยนตำแหน่งของปลายแขนกลไปยังตำแหน่งต่างๆ ภายในพื้นที่การทำงาน ซึ่งจะสัมพันธ์กับความเร็วของตัวขับเคลื่อนของแขนกล ความสัมพันธ์นี้จะแสดงได้ด้วยรูปทรงรีโดยความยาวของแกนหลักจะมีขนาดเท่ากับรากที่สองของค่าเจาะจง (Eigenvalue) และมีทิศทางไปตามเวกเตอร์เจาะจง (Eigenvector) ของเมตริกซ์  $J^{-1}(q)J^T(q)$  เมื่อ  $J(q)$  แทนเมตริกซ์จาโคเบียนของแขนกล

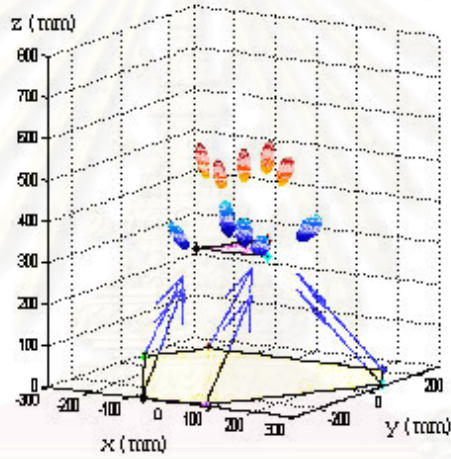
ทฤษฎีแรงของการเคลื่อนที่ (Force Manipulability Ellipsoid) หมายถึง ความสามารถในการรับแรงที่ปลายของแขนกลเนื่องมาจากการส่งถ่ายแรงจากกลุ่มของตัวขับเคลื่อนของแขนกล โดยความสัมพันธ์นี้แทนด้วยรูปทรงรีเช่นเดียวกับ Velocity manipulability ellipsoid แต่แตกต่างกันในส่วนของค่าเจาะจงและเวกเตอร์เจาะจงนั้นคำนวณจากเมตริกซ์  $J(q)J^{-1}(q)$  เมื่อ  $J(q)$  แทนเมตริกซ์จาโคเบียนของแขนกล รายละเอียดตามเอกสารอ้างอิงที่ [6] และการคำนวณรูปร่างของทฤษฎีนี้ รายละเอียดดูจากผนวก ข. จากการวิเคราะห์โครงสร้างของแขนกลแบบสจิวต์ ในการเลือกแบบที่จะสร้างนั้นพิจารณาจากโครงสร้าง 3 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 3.10-3.12



รูปที่ 3.10 Force ellipsoid ของโครงสร้างแบบที่ 1



รูปที่ 3.11 Force ellipsoid ของโครงสร้างแบบที่ 2



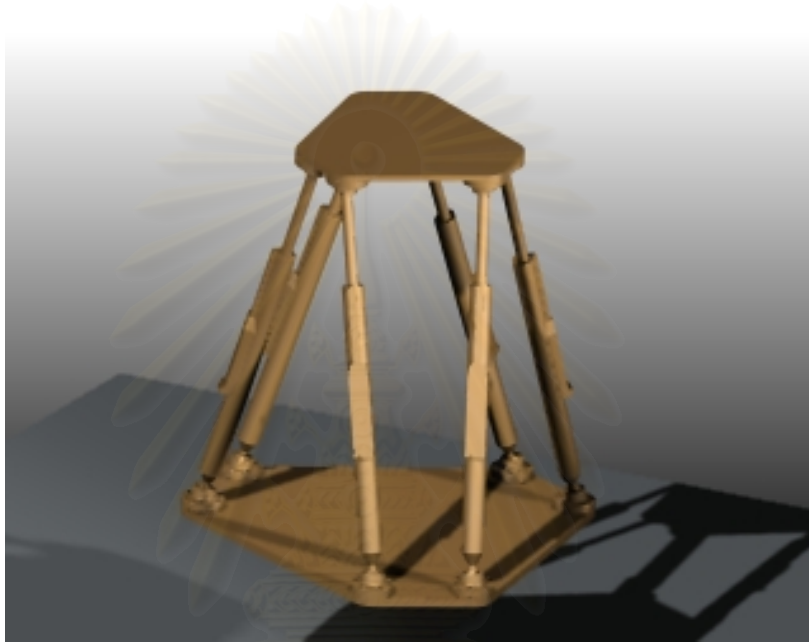
รูปที่ 3.12 Force ellipsoid ของโครงสร้างแบบที่ 3

จากรูปที่ 3.10-3.12 นั้นแสดงถึงรูปทรงรีของแรงของโครงสร้างทั้ง 3 แบบ จากการทดสอบจะเห็นได้ว่าแกนกลแบบที่ 2 และแบบที่ 3 นั้นมีรูปทรงรีของความเฉื่อยใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับทรงกลมมากกว่าแบบอื่น แต่อย่างไรก็ตามในการสร้างแกนกลตามโครงสร้างแบบที่ 3 นั้นค่อนข้างที่จะสร้างได้ลำบาก เนื่องจากส่วนที่เคลื่อนที่นั้นเป็นรูปสามเหลี่ยม ในการนำตัวขับทั้งสองตัวมาเชื่อมต่อกับส่วนนี้นั้นจะต้องออกแบบข้อต่อเป็นพิเศษ ดังนั้นในการพัฒนาแกนกลนี้เราจึงเลือกแบบที่ 2



### 3.3 โครงสร้างของแขนกลแบบสจ๊วตจตุรภาค (Chula Parallel Stewart Platform)

โครงสร้างของแขนกลแบบสจ๊วตที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้เป็นแบบที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3.13 ข้างล่างนี้ ทั้งนี้เนื่องจากว่าถ้าเราศึกษาในเรื่องของทฤษฎีของการเคลื่อนที่ (Inertia Ellipsoid) แล้ว เราจะพบว่าแบบที่สองนี้มีทฤษฎีของการเคลื่อนที่ที่เหมาะสม ซึ่งหมายความว่า การควบคุมเชิงพลศาสตร์นั้นในแบบที่ 2 นี้มีการกระจายความหน่วง (Inertia) หรือแรงที่ใช้ในการเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์นั้นมีขนาดใกล้เคียงกันในทิศทางการเคลื่อนที่ต่าง ๆ ที่แขนกลแบบสจ๊วตแบบนี้สามารถเคลื่อนที่ครอบคลุมได้



รูปที่ 3.13 โครงสร้างที่ออกแบบอย่างคร่าวๆ

เมื่อได้แบบของโครงสร้างเรียบร้อยแล้วต่อไปจะทำการเลือกตัวขับซึ่งเป็นแบบ prismatic คือเคลื่อนที่เป็นเชิงเส้นโดยตัวขับที่เลือกใช้นั้นเป็นมอเตอร์ที่มีการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น (Linear motor) ดังแสดงในรูปที่ 3.14 รายละเอียดของมอเตอร์ดูผนวก ก.



รูปที่ 3.14 มอเตอร์ที่เคลื่อนที่แบบเชิงเส้น

ในการยึดตัวขับทั้ง 6 ตัวนี้เข้ากับส่วนฐานและส่วนที่เคลื่อนที่ของแขนกลนั้นจะใช้ข้อต่อแบบ Universal joint จำนวน 6 อันยึดระหว่างส่วนฐานกับมอเตอร์ทั้ง 6 ตัวที่มุมทั้ง 6 ของส่วนฐาน ดังแสดงในรูปที่ 3.15 และใช้ข้อต่อแบบ Spherical joint ยึดกับส่วนที่เคลื่อนที่กับตัวขับทั้ง 6 ตัวที่มุมทั้ง 6 ของส่วนที่เคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.15 ข้อต่อแบบ Universal joint ที่ประกอบอยู่กับส่วนฐาน



รูปที่ 3.16 ข้อต่อแบบ Spherical joint ที่ประกอบอยู่กับส่วนเคลื่อนที่



รูปที่ 3.17 โครงสร้างของแขนกลสัจจุตจุฟ้าที่ประกอบเรียบร้อยสมบูรณ์

จากรูปที่ 3.17 แสดงถึงโครงสร้างของแขนกลสัจจุตจุฟ้า ซึ่งมีรัศมีของส่วนฐานเท่ากับ 30 ซม. และรัศมีของส่วนที่เคลื่อนที่เท่ากับ 10 ซม. รายละเอียดของแขนกลรายละเอียดตามแผนก ก.

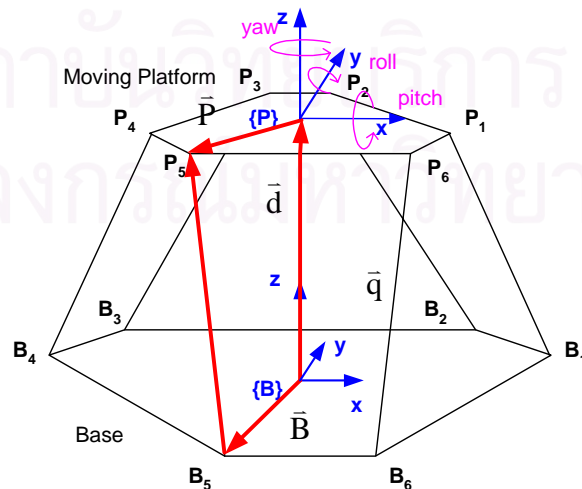
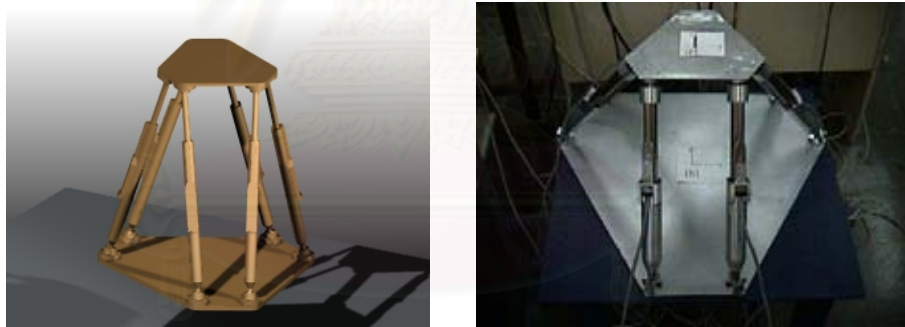
## บทที่ 4

### จลศาสตร์ของแขนกล

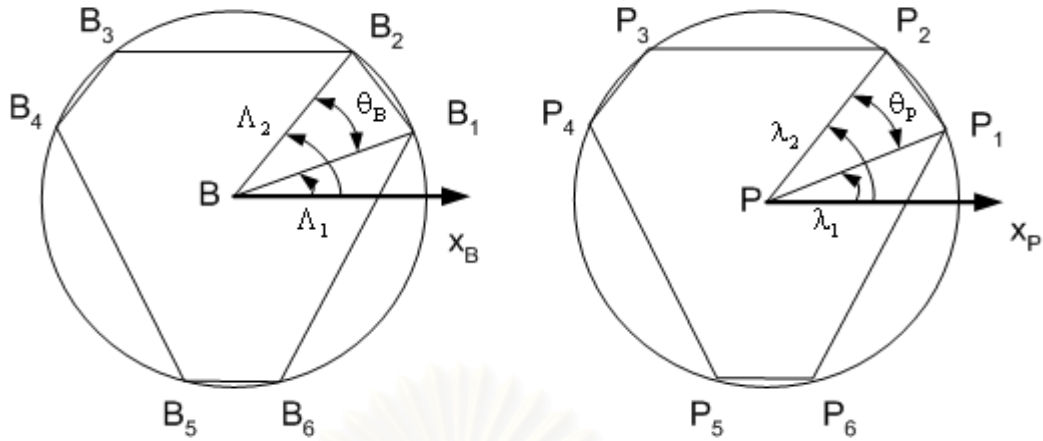
ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่นั้นแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ สมการการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า (Forward Kinematics) และ สมการเคลื่อนที่แบบผกผัน (Inverse Kinematics) การคำนวณเรื่อง Inverse Kinematics นั้นเป็นการคำนวณหาความยาวของตัวขับทั้ง 6 ตัว เมื่อเราทราบตำแหน่งจุดกึ่งกลางของส่วนที่เคลื่อนที่ เช่นเมื่อเราต้องการให้ส่วนที่เคลื่อนที่เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการเราจะต้องทราบว่าตัวขับแต่ละตัวนั้นจะต้องเคลื่อนที่ให้มีมีความยาวเท่าใด ส่วนการคำนวณเรื่อง Forward Kinematics นั้นเป็นการคำนวณหาตำแหน่งของจุดกึ่งกลางของส่วนที่เคลื่อนที่ เมื่อเราทราบว่าตัวขับแต่ละตัวนั้นมีความยาวเท่าใด การคำนวณเรื่อง Forward Kinematics นั้นไม่สามารถหาสมการออกมาได้โดยตรงดังนั้นจึงต้องใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขมาช่วยในการคำนวณ รายละเอียดของการวิเคราะห์การเคลื่อนที่นั้นมีดังนี้

#### 4.1 สมการเคลื่อนที่แบบผกผัน (The Inverse Kinematics)

เมื่อกำหนดตำแหน่งและทิศทางของจุดกึ่งกลางของปลายของแขนกลที่ต้องการ เราต้องการที่จะทราบว่าตัวขับเชิงเส้น (Linear actuators) แต่ละตัวนั้นว่าจะมีระยะเท่าใด เราสามารถหาได้ดังนี้



รูปที่ 4.1 Frame assignment of the platforms



รูปที่ 4.1 Frame assignment of the platforms (ต่อ)

จากรูปที่ 4.1 เป็นการกำหนดระนาบ {P} และ {B} แทนระนาบของส่วนที่เคลื่อนที่ (End-effector) และระนาบของส่วนฐาน (Base frame) ตามลำดับ ให้จุด P แทนจุดศูนย์กลางของระนาบ {P} ทิศของแกน  $z_p$  มีทิศทางออกจากระนาบ {P} กำหนดให้  $\theta_p$  แทนมุมระหว่างเส้นตรง  $PP_1$  กับเส้นตรง  $PP_2$  เช่นเดียวกันกับระนาบของส่วนที่เคลื่อนที่ ให้จุด B แทนจุดศูนย์กลางของระนาบ {B} ทิศของแกน  $z_b$  มีทิศทางออกจากระนาบ {B} กำหนดให้  $\theta_b$  แทนมุมระหว่าง  $BB_1$  กับ  $BB_2$

กำหนดให้มุมระหว่าง  $PP_i$  กับ  $x_p$  เท่ากับ  $\lambda_i$  และมุมระหว่าง  $BB_i$  กับ  $x_b$  เท่ากับ  $\Lambda_i$  เมื่อ  $i=1,2,\dots,6$  ซึ่งจะได้ว่า

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

และ

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

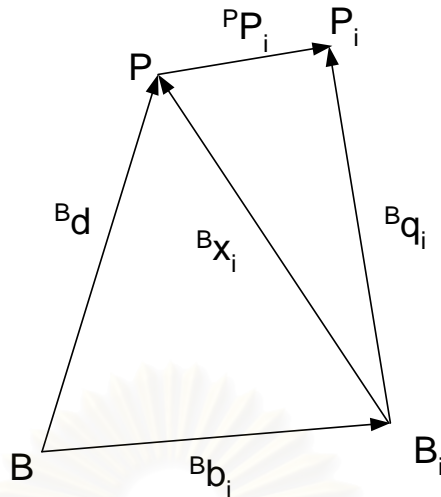
กำหนดให้ตำแหน่งของ  $P_i$  บนระนาบ {P} เขียนแทนด้วย  ${}^P P_i = [p_{ix} \ p_{iy} \ p_{iz}]^T$  และตำแหน่งของ  $B_i$  บนระนาบ {B} เขียนแทนด้วย  ${}^B B_i = [b_{ix} \ b_{iy} \ b_{iz}]^T$  ดังนั้นจะได้ว่า

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

และ

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

เมื่อ  $r_p$  และ  $r_B$  คือรัศมีของส่วนที่เคลื่อนที่ (End-effector) และส่วนที่อยู่กับที่ (Base) ตามลำดับ



รูปที่ 4.2 Vector diagram for the  $i$ -th actuator

จากรูปที่ 4.2 กำหนดตำแหน่งของจุดกึ่งกลางของส่วนที่เคลื่อนที่ที่เราต้องการบนระนาบ  $\{P\}$  โดยเทียบกับระนาบ  $\{B\}$  แทนด้วยเวกเตอร์  ${}^B d = [x \ y \ z]^T$  และแทนเวกเตอร์ของความยาวของตัวขับแต่ละตัวเทียบกับระนาบ  $\{B\}$  ด้วย  ${}^B q_i = [q_{ix} \ q_{iy} \ q_{iz}]^T$  ซึ่งคำนวณได้จาก

$${}^B q_i = {}^B x_i + {}^B P_i$$

เมื่อ

$${}^B x_i = {}^B d - {}^B b_i$$

$$= \begin{bmatrix} x - b_{ix} \\ y - b_{iy} \\ z - b_{iz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - b_{ix} \\ y - b_{iy} \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{x}_i \\ \bar{y}_i \\ \bar{z}_i \end{bmatrix}$$

และจาก

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

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

ความยาวของตัวชี้แต่ละตัวคำนวณได้จาก

$$l_i = \sqrt{q_{ix}^2 + q_{iy}^2 + q_{iz}^2}$$

หรือ

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

เมื่อแทนค่าต่างๆจะได้ว่า

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

เมื่อ  $x, y, z$  เป็นตำแหน่งอ้างอิงที่เราต้องการ ส่วนทิศทางที่ต้องการนั้นกำหนดโดย Roll ( $\alpha$ )-Pitch ( $\beta$ )-Yaw ( $\gamma$ ) angles นั่นคือ

$${}^B_P R = R_{RPY} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} r_{11} &= \cos \alpha \cos \beta \\ r_{12} &= \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma \\ r_{13} &= \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ r_{21} &= \sin \alpha \cos \beta \\ r_{22} &= \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma \\ r_{23} &= \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ r_{31} &= -\sin \beta \\ r_{32} &= \cos \beta \sin \gamma \\ r_{33} &= \cos \beta \cos \gamma \end{aligned}$$

หรือ

$${}^B_P R = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma \\ \sin \alpha \cos \beta & \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix}$$

#### 4.2 สมการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า (The Forward Kinematics)

เมื่อกำหนดความยาวของตัวข้อต่อแต่ละตัวคือ  $l_i$  เมื่อ  $i=1, 2, \dots, 6$  เราสามารถหาตำแหน่ง  $x, y, z$  และทิศทางคือมุม  $\alpha, \beta, \gamma$  โดยใช้หลักการของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method) หาคำตอบของระบบสมการไม่เชิงเส้น

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

จากหลักการดังกล่าวเราสามารถนำมาใช้หาตำแหน่งและทิศทางได้ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้ คือ

- 1) กำหนดค่าเริ่มต้น  $a = [x \ y \ z \ \alpha \ \beta \ \gamma]^T$
- 2) จากค่า  $\alpha, \beta, \gamma$  คำนวณ  $r_{ij}$  ของ  ${}^B_P R$
- 3) จากค่า  $x, y, z$  คำนวณค่า  $\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i$  และ  $u_i, v_i, w_i$  จากสมการ

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

และ

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

- 4) คำนวณค่า  $f_i(a)$  และ  $A_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial a_j}$  เมื่อ  $A_{ij}$  แทนจาโคเบียนเมตริกซ์ จากสมการ

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

จากสมการในขั้นตอนที่ 3) จะได้

$$\frac{\partial \bar{x}_i}{\partial x} = \frac{\partial \bar{y}_i}{\partial y} = \frac{\partial \bar{z}_i}{\partial z} = 1$$



$$\frac{\partial u_i}{\partial \alpha} = -v_i, \quad \frac{\partial u_i}{\partial \beta} = w_i \cos \alpha, \quad \frac{\partial u_i}{\partial \gamma} = p_{iy} r_{13}$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial \alpha} = u_i, \quad \frac{\partial v_i}{\partial \beta} = w_i \sin \alpha, \quad \frac{\partial v_i}{\partial \gamma} = p_{iy} r_{23}$$

$$\frac{\partial w_i}{\partial \alpha} = 0, \quad \frac{\partial w_i}{\partial \beta} = -(p_{ix} \cos \beta + p_{iy} \sin \beta \sin \gamma), \quad \frac{\partial w_i}{\partial \gamma} = p_{iy} r_{33}$$

แทนค่าหา  $A_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial a_j}$  เมื่อ

$$\frac{\partial f_i}{\partial a_1} = \frac{\partial f_i}{\partial x} = \frac{\partial f_i}{\partial \bar{x}_i} = 2(\bar{x}_i + u_i)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial a_2} = \frac{\partial f_i}{\partial y} = \frac{\partial f_i}{\partial \bar{y}_i} = 2(\bar{y}_i + v_i)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial a_3} = \frac{\partial f_i}{\partial z} = \frac{\partial f_i}{\partial \bar{z}_i} = 2(\bar{z}_i + w_i)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial a_4} = \frac{\partial f_i}{\partial \alpha} = 2(-\bar{x}_i v_i + \bar{y}_i u_i)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial a_5} = \frac{\partial f_i}{\partial \beta} = 2[(-\bar{x}_i \cos \alpha + \bar{y}_i \sin \alpha)w_i - (p_{ix} \cos \beta + p_{iy} \sin \beta \sin \gamma)\bar{z}_i]$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial a_6} = \frac{\partial f_i}{\partial \gamma} = 2p_{iy}(\bar{x}_i r_{13} + \bar{y}_i r_{23} + \bar{z}_i r_{33})$$

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

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

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

7) เลือก  $a^{new} = a + \delta a$  และทำซ้ำ จากขั้นตอนที่ 1-7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## การคำนวณพื้นที่การทำงานของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วต

ในช่วงระยะเวลาหลายสิบปีที่ผ่านมานักวิจัย (Gasselin 1990, Kumar 1992, Ji 1994, Luh et al 1996) ต่างก็พยายามศึกษาเกี่ยวกับพื้นที่การทำงานของแขนกลแบบสจ๊วต ซึ่งส่วนใหญ่ก็นักจะมุ่งศึกษาขอบเขตพื้นที่การทำงานอันเนื่องมาจากระยะการเคลื่อนที่ที่จำกัดของตัวข้อต่อแต่ละตัวหรือมุมที่ข้อต่อสามารถเคลื่อนที่ได้สูงสุด แต่ก็ยังมีเงื่อนไขอื่นๆอีกเช่น การชนกันระหว่างตัวข้อต่อแต่ละตัวในขณะที่เคลื่อนที่เป็นต้น

เมื่อสจ๊วตได้คิดค้นโครงสร้างที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 6 องศาอิสระ ในปี ค.ศ. 1965 แต่ยังไม่ได้มีการนำมาสร้างเพื่อใช้งานจนกระทั่งระบบควบคุมโดยคอมพิวเตอร์นั้นมีต้นทุนการผลิตลดลง แต่อย่างไรก็ตามในการนำโครงสร้างประเภทนี้มาใช้ในงานอุตสาหกรรมนั้นจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงลักษณะการทำงาน โดยเฉพาะเรื่องของพื้นที่การทำงานของแขนกลนั้นจะต้องมีความสัมพันธ์กับลักษณะของงาน ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับพื้นที่การทำงานของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วต

โดยปกติแล้วการหาพื้นที่การทำงานของแขนกลทั่วไปนั้น เราสามารถคำนวณหาได้โดยการหาตำแหน่งที่แขนกลเคลื่อนที่ได้ระยะมากที่สุด โดยระบุเป็นตำแหน่ง  $x, y$  และ  $z$  และพื้นที่การทำงานจะไม่เปลี่ยนแปลงยกเว้นจะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดของโครงสร้างของแขนกล แต่สำหรับแขนกลแบบสจ๊วตนั้นพื้นที่การทำงานจะเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนทิศทางของส่วนที่เคลื่อนที่ (Platform Orientation)

### 5.1 การคำนวณเงื่อนไขของพื้นที่การทำงาน

ในการคำนวณหาพื้นที่การทำงานของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วตนั้น จะมีเงื่อนไขต่างๆ ดังนี้

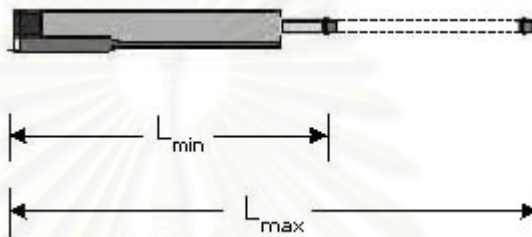
1. ระยะการเคลื่อนที่ที่จำกัดของตัวข้อต่อ หมายถึงความยาวที่สั้นที่สุดหรือความยาวที่ยาวที่สุดของตัวข้อต่อที่เคลื่อนที่แบบเชิงเส้นที่สามารถเคลื่อนที่ไปได้
2. มุมที่ข้อต่อสามารถเคลื่อนที่ได้สูงสุด หมายถึงค่ามุมสูงสุดที่ข้อต่อสามารถเคลื่อนที่ไปได้
3. การชนกันระหว่างตัวข้อต่อแต่ละตัว

ขั้นตอนการคำนวณหาพื้นที่การทำงานของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วตนั้น เราจะเริ่มจากการกำหนดค่าเริ่มต้นของจุดกึ่งกลางและทิศทางของส่วนที่เคลื่อนที่แล้วคำนวณหาความยาวของตัวข้อต่อแต่ละตัวและมุมที่ข้อต่อแต่ละตัวเคลื่อนที่ไปโดยใช้สมการ Inverse kinematics

### 5.1.1 เงื่อนไขประการที่ 1 ระยะเวลาเคลื่อนที่ที่จำกัดของตัวขับ

ระยะเวลาเคลื่อนที่ที่จำกัดของตัวขับของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วตนั้นเป็นตัวแปรหลักของพื้นที่การทำงานของแขนกล ในการคำนวณนั้นเราจะต้องกำหนดตำแหน่งและทิศทางของจุดกึ่งกลางของส่วนที่เคลื่อนที่เพื่อที่จะคำนวณหาความยาวของตัวขับแต่ละตัว โดยใช้สมการ Inverse kinematics แล้วนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับความยาวที่ตัวขับแต่ละตัวสามารถเคลื่อนที่ไปได้ นั่นคือเงื่อนไขจะเป็นจริงเมื่อ

$$L_{\min} < L_i < L_{\max}$$



รูปที่ 5.1 แสดงระยะเวลาเคลื่อนที่ของตัวขับ

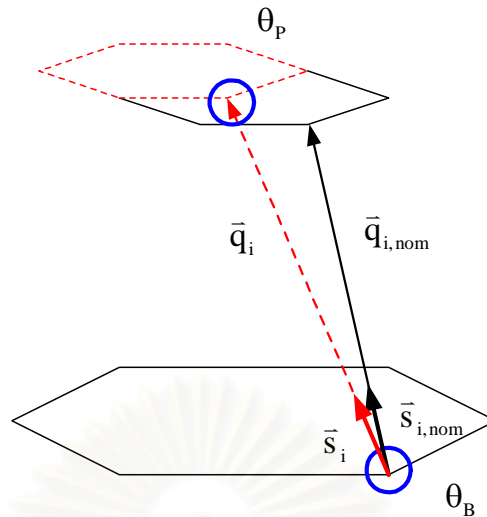
โดยค่า  $L_{\min}$  แทนค่าความยาวที่สั้นที่สุดของตัวขับแต่ละตัว

$L_{\max}$  แทนค่าความยาวที่ยาวที่สุดของตัวขับแต่ละตัว

$L_i$  แทนค่าความยาวของตัวขับแต่ละตัว เมื่อ  $i = 1 - 6$

### 5.1.2 เงื่อนไขประการที่ 2 มุมที่ข้อต่อสามารถเคลื่อนที่ได้สูงสุด

แขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจ๊วตนั้นจะมีข้อต่อทั้งหมด 12 ตัวที่ทำงานประกอบไปด้วยข้อต่อที่ยึดระหว่างส่วนส่วนฐานกับตัวขับจำนวน 6 ตัว เป็นข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซล (Universal joints) และข้อต่อที่ยึดระหว่างส่วนที่เคลื่อนที่กับตัวขับจำนวน 6 ตัว เป็นข้อต่อแบบทรงกลม (Spherical joint) ข้อต่อแต่ละตัวนั้นจะสามารถหมุนไปได้ในระยะมุมที่กำหนด เมื่อเรากำหนดให้จุดกึ่งกลางของแขนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งและทิศทางที่กำหนด เราควรพิจารณาด้วยว่ามุมที่ข้อต่อแต่ละตัวหมุนไปนั้นมีค่ามากเกินกว่าค่าที่ข้อต่อแต่ละตัวสามารถหมุนไปได้หรือไม่ การคำนวณค่าของมุมที่ข้อต่อแต่ละตัวเคลื่อนที่ไปนั้นมีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 5.2 แสดงมุมที่ข้อต่อเคลื่อนที่

กำหนดให้มุมที่ข้อต่อแต่ละตัวเคลื่อนที่นั้นคือมุมระหว่างเวกเตอร์ของตัวขับที่ตำแหน่งต่างๆ ( $\bar{q}_i$ ) เทียบกับเวกเตอร์ของตัวขับที่ตำแหน่งเริ่มต้น ( $\bar{q}_{i,nom}$ ) เราก็จะสามารถคำนวณหาค่าของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยได้โดย

$$\bar{s}_i = \frac{\bar{q}_i}{|\bar{q}_i|} \quad \text{และ} \quad \bar{s}_{i,nom} = \frac{\bar{q}_{i,nom}}{|\bar{q}_{i,nom}|} \quad \text{เมื่อ } i = 1-6$$

ขนาดของมุมของข้อต่อที่ตำแหน่งฐานสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\theta_{i,Base} = \cos^{-1}(\bar{s}_i \cdot \bar{s}_{i,nom}) \quad \text{เมื่อ } i = 1-6$$

และการคำนวณขนาดของมุมของข้อต่อที่ส่วนที่เคลื่อนที่นั้นเราจะต้องกำหนดเวกเตอร์  $\bar{s}_i$  ให้เทียบกับส่วนที่เคลื่อนที่และคำนวณได้จากสมการ

$${}^R\bar{s}_i = R_{\alpha\beta\gamma}\bar{s}_{i,nom}$$

$$\theta_{i,Platform} = \cos^{-1}(\bar{s}_i \cdot {}^R\bar{s}_{i,nom}) \quad \text{เมื่อ } i = 1-6$$

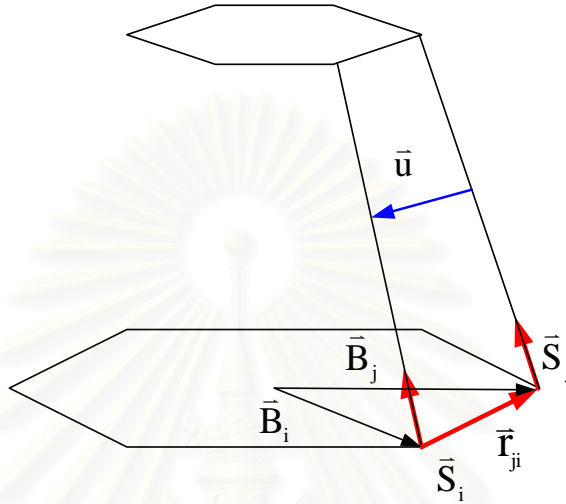
เมื่อคำนวณค่ามุมที่ข้อต่อทั้งหมดเคลื่อนที่ได้เรียบร้อยแล้วนั้น ก็จะนำค่าที่ได้ทั้งหมดมาเปรียบเทียบกับว่ามากกว่าค่ามุมที่ข้อต่อสามารถเคลื่อนที่ได้สูงสุดหรือไม่ จากสมการ

$$|\theta_{i,Platform}| < \theta_{i,MaxPlatform}$$

$$|\theta_{i,Base}| < \theta_{i,MaxBase} \quad \text{เมื่อ } i = 1-6$$

### 5.1.3 เงื่อนไขประการที่ 3 การชนกันระหว่างตัวขับแต่ละตัว

ในการหาว่าตัวขับทั้งสองตัวจะมีโอกาสชนกันเมื่อใดนั้นเราจะพิจารณาระยะทางตั้งฉากระหว่างเวกเตอร์ของตัวขับทั้งสองตัว ซึ่งจะต้องมีค่ามากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวขับแต่ละตัว การคำนวณหาระยะทางระหว่างตัวขับทั้งสองตัวมีวิธีการดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.3 แสดงเวกเตอร์ระหว่างตัวขับทั้งสองตัว

คำนวณหาค่าเวกเตอร์  $\vec{u}$  จากสมการ

$$\vec{u} = \frac{\vec{s}_i \times \vec{s}_j}{|\vec{s}_i \times \vec{s}_j|}$$

ระยะทางระหว่างตัวขับทั้งสองตัวนั้นหาได้จากสมการ

$$D_{i,j} = \vec{r}_{ji} \cdot \vec{u}$$

$$\text{เมื่อ } \vec{r}_{ji} = \vec{B}_j - \vec{B}_i$$

คำนวณหาค่าทั้งสามคู่คือ

$$D_{1,2}, D_{3,4}, D_{5,6}$$

โดยที่

$$\{D_{1,2}, D_{3,4}, D_{5,6}\} \geq D_{\min}$$

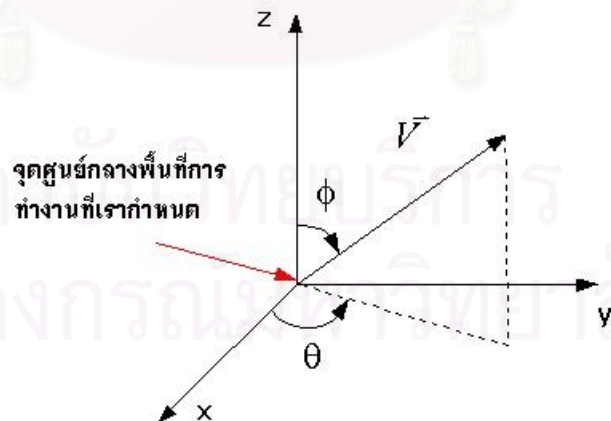
## 5.2 การคำนวณหาพื้นที่การทำงานของแขนกล

ในการคำนวณหาพื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ที่มีโครงสร้างแบบสัจวัตนั้นประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ 5 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) เขียนโปรแกรม testpost เพื่อใช้ตรวจสอบว่าตำแหน่งและทิศทางของจุดกึ่งกลางของส่วนที่เคลื่อนที่ของแขนกลที่เราต้องนั้นอยู่ภายในพื้นที่การทำงานหรือไม่ ถ้าจุดที่เรากำหนดอยู่ภายในพื้นที่ทำงาน โปรแกรมนี้จะส่งค่า “จริง” หรือ “1” กลับไปยังส่วนที่เรียกใช้ แต่ถ้าจุดที่เรากำหนดไม่ได้อยู่ภายในพื้นที่การทำงาน โปรแกรมนี้จะส่งค่า “เท็จ” หรือ “0” กลับไปยังส่วนที่เรียกใช้ด้วยเช่นเดียวกัน
- 2) กำหนดหาจุดกึ่งกลางของพื้นที่การทำงานโดยประมาณ เพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้นของการคำนวณ
- 3) กำหนดค่าความผิดพลาด ( $\pm \epsilon$ ) ของขอบเขตของพื้นที่การทำงาน
- 4) คำนวณหาพื้นที่การทำงาน
- 5) แสดงผลการคำนวณหาพื้นที่การทำงานของแขนกล

## 5.3 ขั้นตอนวิธีการค้นหาพื้นที่การทำงาน (Workspace Search Algorithm)

โปรแกรมการค้นหาพื้นที่การทำงานนี้จะคำนวณหาขอบเขตพื้นที่การทำงานของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสัจวัตเมื่อกำหนดทิศทางของส่วนเคลื่อนที่ของแขนกลให้คงที่โดยกำหนดให้เท่ากับ  $O_1 = \{\alpha_1, \beta_1, \gamma_1\}$  ในการเริ่มต้นนั้นจะต้องกำหนดจุดกึ่งกลางของพื้นที่การทำงานโดยประมาณซึ่งตำแหน่งนี้จะเป็นจุดกำเนิด (Origin) ของระบบพิกัดฉากแบบทรงกลม (Spherical coordinate) และเป็นจุดเริ่มต้นของเวกเตอร์การค้นหาพื้นที่การทำงาน  $\vec{V}$  เพื่อใช้ในการค้นหาขอบเขตพื้นที่การทำงานของแขนกล



รูปที่ 5.4 เวกเตอร์ของการค้นหาขอบเขตพื้นที่การทำงาน

จากรูปที่ 5.4 แสดงเวกเตอร์ของการค้นหาขอบเขตพื้นที่การทำงานของแขนกล เวกเตอร์  $\vec{V}$  นี้จะเคลื่อนที่เพื่อค้นหาตำแหน่งขอบเขตพื้นที่การทำงานโดยมีเงื่อนไขที่ขอบเขต คือ

$\text{testpost}(\rho, \theta, \phi, O_1) = \text{TRUE}$

$\text{testpost}(\rho + \varepsilon, \theta, \phi, O_1) = \text{FALSE}$

การคำนวณหาขอบเขตพื้นที่การทำงานของแขนกลนั้นทำได้โดยการหมุนเวกเตอร์  $\vec{V}$  นี้โดยเพิ่มขึ้นทีละช่วงเท่ากับ  $\Delta\theta$  และ  $\Delta\phi$  ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

### 5.3.1 วิธีการค้นหาด้วยระบบพิกัดจากแบบทรงกลม

$\theta = 0^\circ$

*while*  $\theta < 360^\circ$

$\phi = -90^\circ$

*while*  $\phi < 90^\circ$

หาความยาวรัศมี  $\rho$  ที่สอดคล้องกับเงื่อนไขขอบเขต

$\phi = \phi + \Delta\phi$

*end*

$\theta = \theta + \Delta\theta$

*end*

วิธีการค้นหาขอบเขตของพื้นที่การทำงานจะคำนวณหา รัศมี  $\rho$  ที่สอดคล้องกับขอบเขตขอบพื้นที่การทำงาน ซึ่งมีขั้นตอนในการค้นหาคือ

$\rho = \text{value outside of the workspace}$

$\Delta\rho = \frac{\rho}{2}$

*while*  $\Delta\rho > \varepsilon / 2$

*if*  $\text{testpost}(\theta, \phi, \rho, O_1) = \text{TRUE}$

$\rho = \rho + \Delta\rho$

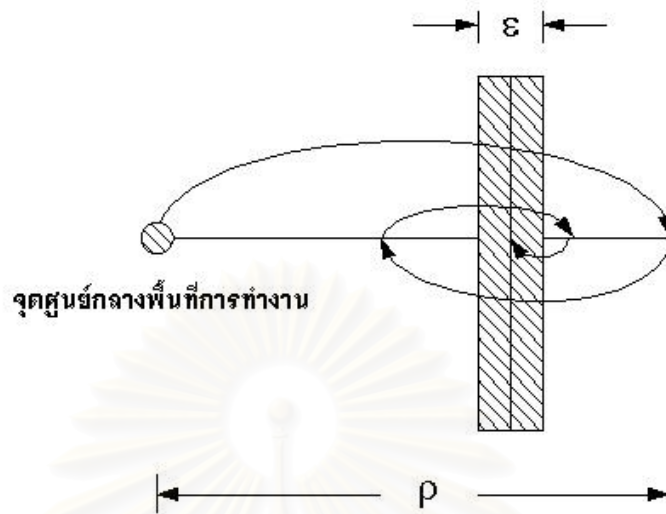
*otherwise*

$\rho = \rho - \Delta\rho$

$\Delta\rho = \frac{\Delta\rho}{2}$

*end*

เวกเตอร์จะเปลี่ยนค่า  $\rho$  จนกระทั่ง  $\Delta\rho \leq \frac{\varepsilon}{2}$  เมื่อ  $\varepsilon$  คือค่าความผิดพลาดที่เรากำหนด



รูปที่ 5.5 ภาพแสดงการทำงานของโปรแกรม

#### 5.4 ผลการทดสอบโปรแกรม

ในการทดสอบโปรแกรมนั้น โครงสร้างของแขนกลสัจจัตจุฬาฯ นี้มีเงื่อนไขทั้ง 3 ประการตามที่กล่าวมาดังนี้

ความยาวของตัวขับอยู่ในช่วง

$$360 \leq L \leq 560 \quad mm$$

มุมที่ข้อต่อของส่วนฐานสามารถเคลื่อนที่ได้สูงสุด

$$\theta_{MaxBase} = 90^\circ$$

มุมที่ข้อต่อของส่วนที่เคลื่อนที่สามารถเคลื่อนที่ได้สูงสุด

$$\theta_{MaxPlatform} = 20^\circ$$

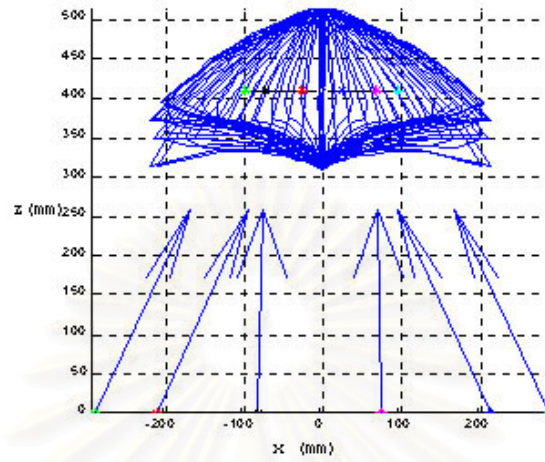
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวขับ

$$D_{min} = 30 \quad mm$$

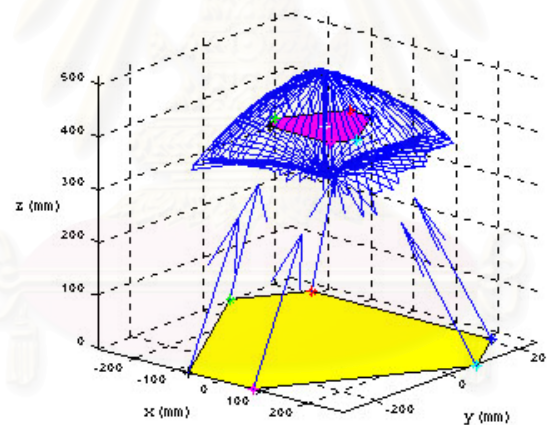
จากค่าของเงื่อนไขทั้งสามประการนี้ สามารถนำไปเขียนโปรแกรมเพื่อตรวจสอบว่าตำแหน่งที่กำหนดขึ้นมานั้นอยู่ในพื้นที่ที่ทำงานหรือไม่ได้ และในการคำนวณหาขอบเขตของพื้นที่ทำงานนั้น จะต้องกำหนดทิศทางของส่วนที่เคลื่อนที่ให้คงที่ด้วย



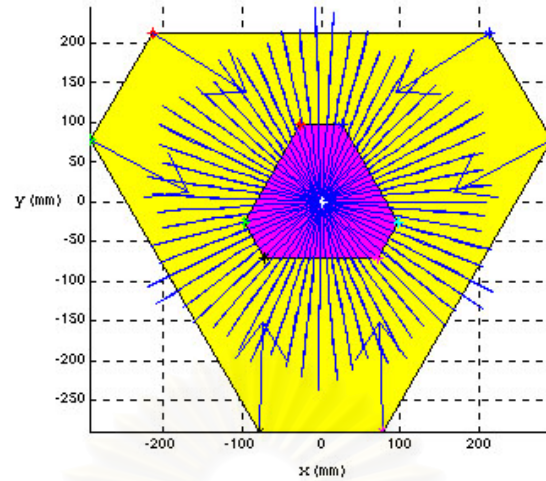
การทดสอบที่ตำแหน่งที่ให้ทิศทางของส่วนที่เคลื่อนที่คงที่โดยให้เท่ากับ  $\text{roll}=0^\circ$ ,  $\text{pitch}=0^\circ$ ,  $\text{yaw}=0^\circ$  ได้ผลการทดสอบดังรูป



รูปที่ 5.6 ภาพด้านข้างของพื้นที่การทำงานของแขนกลแบบสจ๊วตที่ทิศทาง  $\text{roll}=0^\circ$ ,  $\text{pitch}=0^\circ$ ,  $\text{yaw}=0^\circ$

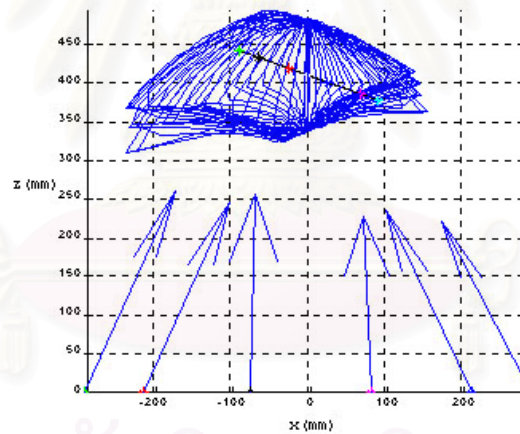


รูปที่ 5.7 ภาพสามมิติของพื้นที่การทำงานของแขนกลแบบสจ๊วตที่ทิศทาง  $\text{roll}=0^\circ$ ,  $\text{pitch}=0^\circ$ ,  $\text{yaw}=0^\circ$



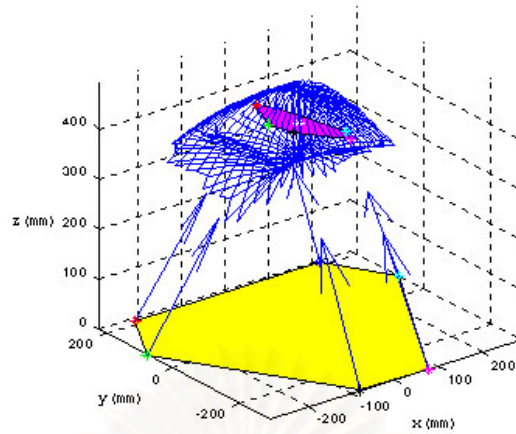
รูปที่ 5.8 ภาพด้านบนของพื้นที่การทำงานของแขนกลแบบสจ๊วตที่ทิศทาง  
 $roll=0^{\circ}$ ,  $pitch=0^{\circ}$ ,  $yaw=0^{\circ}$

การทดสอบโดยให้ทิศทางของส่วนที่เคลื่อนที่คงที่โดยให้เท่ากับ  $roll=0^{\circ}$ ,  $pitch=20^{\circ}$ ,  $yaw=0^{\circ}$   
 ได้ผลการทดสอบดังรูป

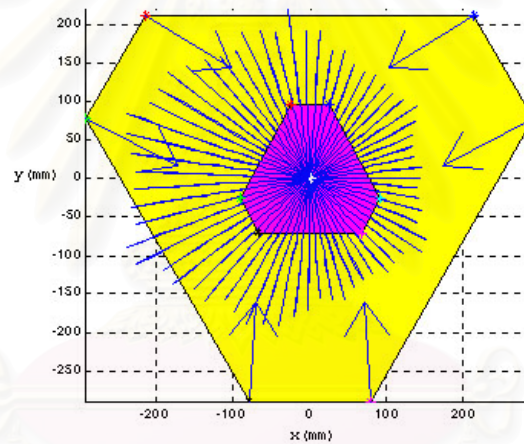


รูปที่ 5.9 ภาพด้านข้างของพื้นที่การทำงานของแขนกลแบบสจ๊วตที่ทิศทาง  
 $roll=0^{\circ}$ ,  $pitch=20^{\circ}$ ,  $yaw=0^{\circ}$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.10 ภาพสามมิติของพื้นที่การทำงานของแขนกลแบบสจ๊วตที่ทิศทาง  
 $roll=0^{\circ}$ ,  $pitch=20^{\circ}$ ,  $yaw=0^{\circ}$



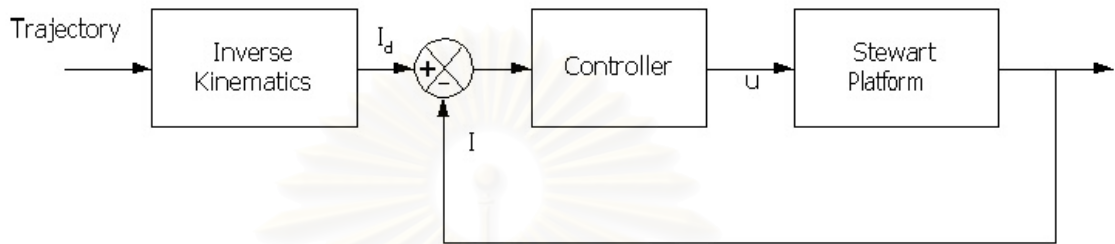
รูปที่ 5.11 ภาพด้านบนของพื้นที่การทำงานของแขนกลแบบสจ๊วตที่ทิศทาง  
 $roll=0^{\circ}$ ,  $pitch=20^{\circ}$ ,  $yaw=0^{\circ}$

จากรูปได้มีการทดสอบหาขอบเขตการทำงานของแขนกล จะสังเกตเห็นได้ว่าขอบเขตของพื้นที่การทำงานนั้นเปลี่ยนแปลงไปตามทิศทางของส่วนที่เคลื่อนที่ของแขนกล

## บทที่ 6

### การควบคุม

การควบคุมการทำงานของแขนกลที่มีโครงสร้างแบบสจิวต์มีรูปแบบดังนี้



รูปที่ 6.1 Joint-Space Control Block Diagram

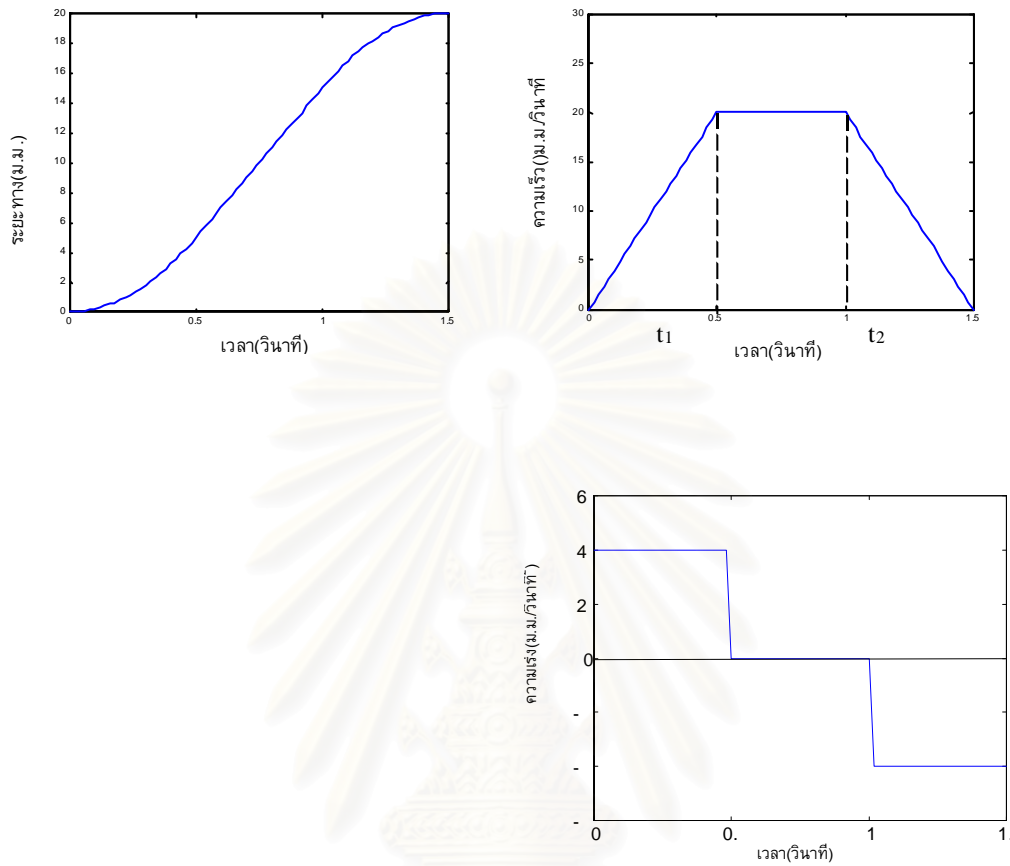
จากรูปที่ 6.1 เป็นการควบคุมอย่างง่าย และไม่ต้องใช้ Forward Kinematics ดังนั้นจึงไม่ต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีความเร็วสูงก็ใช้ควบคุมได้ จากรูปเราสามารถกำหนดเส้นทาง (Trajectory) ของจุดกึ่งกลางของ End-effector จุดต่างๆที่สร้างขึ้นมานี้เป็นจุดที่จุดกึ่งกลางของ End-effector เคลื่อนที่ผ่านการควบคุมทำโดยตัว Inverse Kinematics จะทำการแปลงจุดต่างๆบนเส้นทางแต่ละจุดเป็นความยาวของตัวขับเคลื่อน (Linear Actuator) แต่ละตัว ( $I_d$ ) จากนั้นตัวควบคุม (Controller) จะไปขับเคลื่อนตัวขับเคลื่อนทั้ง 6 ตัวให้ความยาวตามที่ต้องการ ก็จะทำให้แขนกลสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่เราต้องการได้

#### 6.1 การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่

การสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ (Trajectory Generation) ของแขนกลนั้นมีหลายวิธีการ ได้แก่ Cubic polynomials, Higher order polynomials, Linear function with parabolic blend ฯลฯ สำหรับการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ให้กับแขนกลแบบสจิวต์นั้น จะใช้วิธีการ Linear function with parabolic blend ซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้

##### Linear function with parabolic blend

ในการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่นั้นเราจะต้องกำหนดตำแหน่งที่เราต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่ไป โดยกำหนดค่าอัตราเร็วสูงสุดและอัตราเร่งสูงสุดในการเคลื่อนที่ของ End-effector รูปแบบของการเคลื่อนที่นั้นแสดงดังแสดงในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 กราฟแสดงตำแหน่ง ความเร็วและความเร่งของ End-effector

การสร้างเส้นทางนั้นเราต้องทราบเวลาของการเคลื่อนที่ในช่วงที่มีความเร่ง ( $t_1$ ) และเวลาของการเคลื่อนที่ในช่วงที่มีความหน่วง ( $t_2$ ) จากสมการ

$$t_1 = \frac{V_{\max}}{a_{\max}}$$

$$t_2 = \frac{x}{V_{\max}}$$

เมื่อ  $V_{\max}$  คือค่าความเร็วสูงสุด

$a_{\max}$  คือค่าความเร่งสูงสุด

$x$  คือตำแหน่งปลายที่เราต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่ไป

และจะได้ระยะเวลาของการเคลื่อนที่เท่ากับ

$$t_f = t_1 + t_2$$

การหาตำแหน่ง ความเร็วและความเร่งที่เวลาต่าง ๆ นั้นหาได้จากสมการ

$$x = ut + \frac{1}{2}at^2$$

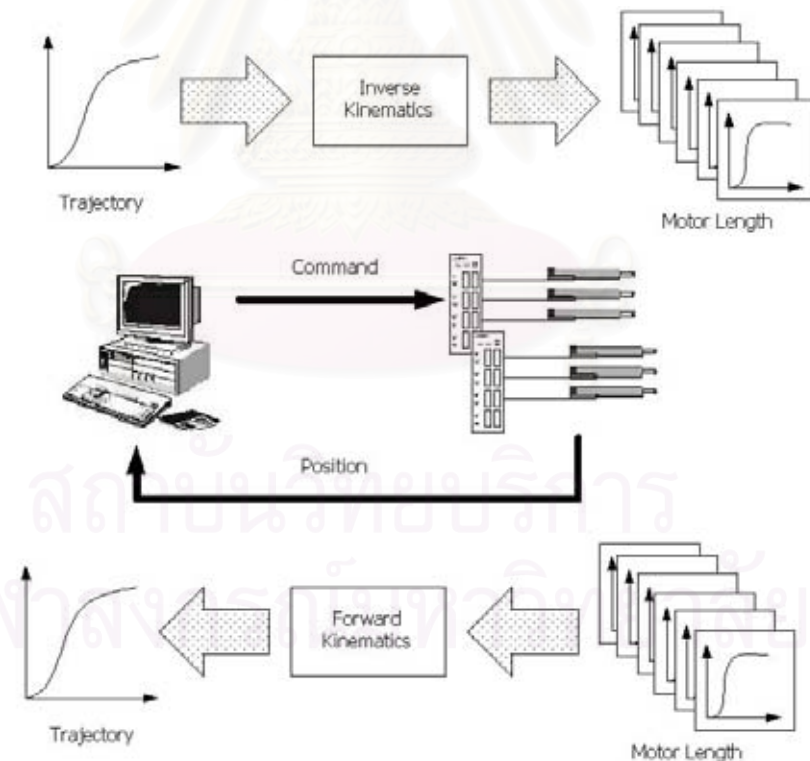
$$v = u + at$$

เมื่อได้จุดต่างๆตามที่ต้องการแล้วจะต้องคำนวณหาระยะที่ตัวขับแต่ละตัวจะต้องเคลื่อนที่ในช่วงเวลาหนึ่งๆ ด้วย Inverse Kinematics แล้วทำการโหลดข้อมูลเส้นทางการเคลื่อนที่ของตัวขับแบบเชิงเส้นทั้ง 6 ตัวด้วยโปรแกรมรับส่งข้อมูล เมื่อโหลดข้อมูลเส้นทางการเคลื่อนที่ของตัวขับทั้ง 6 ตัวเรียบร้อยแล้ว จึงทำการทดสอบด้วยการเขียนโปรแกรมสื่อสารกับตัวควบคุม LinMot E400AT โดยการใช้การสื่อสารแบบอนุกรมมาตรฐาน RS232 ซึ่งการสื่อสารกับตัวควบคุมนั้นจะใช้รหัสคำสั่ง ASCII ซึ่งมีคำสั่งต่างๆ เช่น

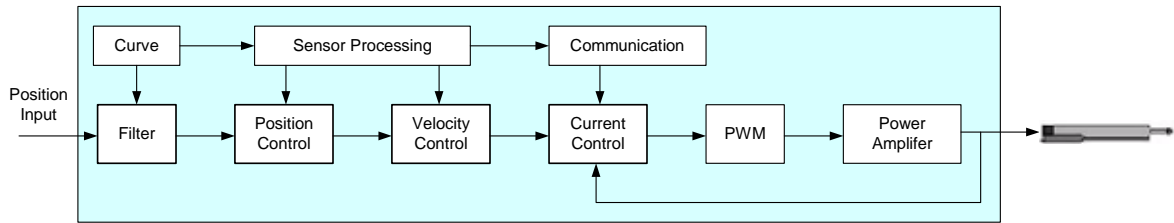
!GS1 เป็นการตรวจสอบว่าตัวควบคุมทำงานปกติหรือไม่

!IP100A เป็นการสั่งให้มอเตอร์ A เคลื่อนที่ไป 100 ช่วง โดย 1 ช่วงเท่ากับความยาว 19.53 ไมโครเมตร

!GPA เป็นการรับค่าตำแหน่งปัจจุบันจากมอเตอร์ A



รูปที่ 6.3 การควบคุมมอเตอร์ของแกนกล



รูปที่ 6.4 ระบบควบคุมที่อยู่ภายในตัวควบคุม LinMot 400AT

การควบคุมตำแหน่งของตัวควบคุมนั้นได้ใช้ตัวควบคุมที่อยู่ในชุดควบคุมมอเตอร์ ซึ่งเป็นการควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัลบวกกับแบบอนุพันธ์ (PID-control) มีหลักการดังนี้

### 6.2 การควบคุมเชิงสัดส่วน (Proportion control ,P-control)

การควบคุมระบบแบบป้อนกลับโดยใช้ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนนั้น สัญญาณควบคุม (u) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าสัญญาณความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากผลต่างระหว่างค่าสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตของระบบที่ทำการควบคุม

ความสัมพันธ์ระหว่างเอาต์พุตจากตัวควบคุมและสัญญาณผิดพลาดที่ส่งเข้าไปในระบบสามารถเขียนได้ดังนี้

$$u(t) = K_p e(t)$$

ถ้าเขียนอยู่ในรูปแบบผลการแปลงลาปลาซ จะได้ว่า

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p$$

เมื่อ  $K_p$  เป็นค่าอัตราขยายของตัวควบคุมนี้หรือเรียกว่าเกนสัดส่วน

### 6.3 การควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral control)

การควบคุมแบบอินทิกรัล นั้นมีรูปแบบของสมการดังนี้คือ

$$u(t) = \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt$$

หรือเขียนอยู่ในรูปแบบผลการแปลงลาปลาซ จะได้ว่า

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_p}{T_i s}$$

โดยที่  $T_i$  = ช่วงเวลาของการอินทิกรัล

จากรูปแบบของการควบคุมแบบอินทิกรัลนี้จะเห็นว่าสัญญาณควบคุม  $u(t)$  จะขึ้นอยู่กับค่าในอดีต (past value) ซึ่งมีประโยชน์คือจะลดค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว แต่จะทำให้ความมีเสถียรภาพของระบบลดน้อยลง

### 6.4 การควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative control)

การควบคุมแบบอนุพันธ์ นั้นมีรูปแบบของสมการคือ

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p T_d s$$

โดยที่ค่า  $T_d$  = ช่วงเวลาอนุพันธ์

การควบคุมเชิงอนุพันธ์นี้ส่วนมากและจะใช้ร่วมกับตัวควบคุมตัวอื่น เช่นใช้ร่วมกับการควบคุมเชิงสัดส่วน ซึ่งจะเรียกว่าการควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ (PD-control) ถ้าตัวควบคุมเชิงสัดส่วนใช้ร่วมกับอินทิกรัลหรือ (PI-control) และถ้าตัวควบคุมแบบสัดส่วนร่วมกับแบบอนุพันธ์ร่วมกับแบบอินทิกรัล เราจะเรียกว่าตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID-control)

ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์นี้จะช่วยให้เราปรับค่าความหน่วง (damping) ในระบบที่จะควบคุมให้มีค่ามากขึ้น นั่นคือจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น แต่อาจส่งผลกระทบต่อค่าความผิดพลาดในสถานะอยู่ตัวมีค่าไม่เป็นศูนย์ได้



## 6.5 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัลบวกกับแบบอนุพันธ์ (PID-control)

การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัลบวกกับแบบอนุพันธ์ มีรูปแบบของสมการ คือ

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

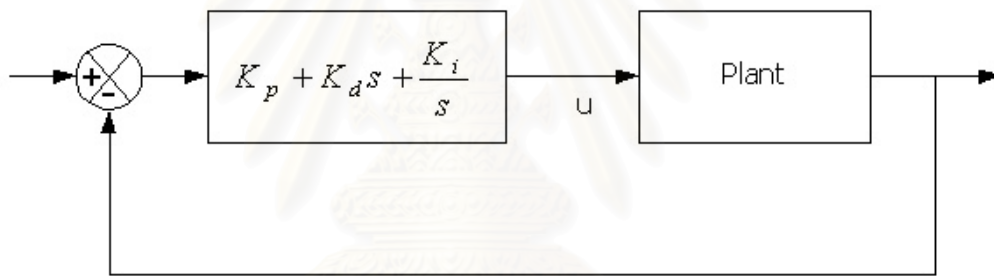
หรือเขียนในรูป

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

เมื่อ  $K_p$  = อัตราขยายเชิงสัดส่วน (proportional gain)

$K_i$  = อัตราขยายอินทิกรัล (integral gain)

$K_d$  = อัตราขยายอนุพันธ์ (derivative gain)



รูปที่ 6.5 ระบบควบคุมป้อนกลับด้วยตัวควบคุมแบบ PID

## บทที่ 7

### การทดสอบแขนกลอัจฉูฟ้า

ในการควบคุมตำแหน่งของตัวขับแต่ละตัวนั้น ในตอนเริ่มต้นแขนกลอยู่ที่ตำแหน่ง HOME โดยที่ตำแหน่ง Home นี้จะอยู่ที่ตำแหน่ง  $x = 0, y = 0, z = 310 \text{ mm}, \text{roll} = 0^\circ, \text{pitch} = 0^\circ, \text{yaw} = 0^\circ$  หรือแทนเป็นค่าพารามิเตอร์ในรูปแบบเวกเตอร์ได้คือ  $a = [0 \ 0 \ 310 \ 0 \ 0 \ 0]$  ที่ตำแหน่ง HOME นี้ตัวขับแต่ละตัวจะมีความยาวเท่ากับ 379.65 ม.ม. การควบคุมตำแหน่งทำได้โดยการกำหนดตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการของปลายแขนกล สร้างเส้นทางการเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่กำหนดแล้วใช้สมการ Inverse kinematics ที่คำนวณหาได้จากบทที่ 4 นำมาคำนวณหาระยะทางการเคลื่อนที่ของตัวขับ (Linear actuator) ทั้ง 6 ตัว แล้วบันทึกเส้นทางที่ได้นี้สำหรับนำไปใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงหรือสัญญาณควบคุมที่ตัวควบคุมต่อไป

ในการทดลองนั้นจะทำการทดสอบลักษณะการเคลื่อนที่ของส่วนที่เคลื่อนที่และความถูกต้องแม่นยำในการควบคุมการเคลื่อนที่ โดยเน้นที่การศึกษาทางด้าน Kinematics มากกว่า Kinetic การทดสอบทำได้โดยกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสุดท้ายของปลายแขนกลให้เคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งและทิศทางที่สร้างขึ้นที่มีอยู่ในรูปแบบของจุดหรือตำแหน่งของเส้นทางการเคลื่อนที่ โดยกำหนดค่าความเร็วและความเร่งของการเคลื่อนที่ ในการทดสอบนี้มี 2 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 จะทำการกำหนดตำแหน่งและทิศทางเคลื่อนที่ทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ทำการทดสอบในแต่ละตำแหน่ง ค่าตำแหน่งต่างๆ ตลอดระยะเวลาของการเคลื่อนที่นี้จะถูกเก็บไว้เป็นไฟล์ และสามารถนำมาคำนวณค่าความเร็วแต่ละช่วงโดยประมาณได้จากสมการ

$$v_{i+1} = \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t}$$

โดยค่า  $\Delta t = 0.02$  วินาที

จากการทดสอบแต่ละการทดลองจะนำค่าตำแหน่งต่างๆ ตลอดระยะเวลาของการเคลื่อนที่ของตัวขับแต่ละตัวมาเขียนกราฟเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง และคำนวณหาความเร็วโดยประมาณของตัวขับเทียบกับความเร็วอ้างอิงได้

ในการคำนวณหาค่าผิดพลาดของตัวขับแต่ละตัวจากการทดลองนั้น จะคำนวณหาค่าความผิดพลาดที่สภาวะคงตัว (Steady state error) คือจะนำค่าตำแหน่งของตัวขับที่เวลาสิ้นสุดการเคลื่อนที่แล้วนำผลจากการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ ในการทดลองแต่ละครั้งนั้นจะทำการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง และเก็บค่าตำแหน่งของตัวขับที่เวลาสิ้นสุดการเคลื่อนที่ นำค่าที่ได้จาก

การทดลองนี้มาคำนวณหาค่าความความยาวเฉลี่ยของตัวขับแต่ละตัว ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และคำนวณหาค่าความผิดพลาดของตัวขับแต่ละตัวจากสมการ

$$\text{ค่าความผิดพลาดของตัวขับ} = \text{ค่าความความยาวเฉลี่ยของตัวขับ} - \text{ค่าความความอ้างอิง}$$

ในการคำนวณหาตำแหน่งของจุดปลายของแขนกลนี้ จะนำค่าความยาวของตัวขับแต่ละตัวจากการทดสอบทั้ง 10 ครั้งนี้มาคำนวณโดยใช้สมการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้า จะได้ตำแหน่งและการเรียงตัวของจุดปลายแขนทั้งหมด 10 ตำแหน่ง นำค่าที่ได้นี้มาคำนวณหาค่าเฉลี่ย ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและคำนวณหาค่าความผิดพลาดได้ การทดลองในส่วนที่ 1 มีดังนี้

1.1) การทดลองให้แขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังตำแหน่ง  $x = 100$ ,  $y = 100$ ,  $z = 100$  mm,  $\text{roll} = 0^\circ$ ,  $\text{pitch} = 0^\circ$ ,  $\text{yaw} = 0^\circ$  ด้วยความเร็วสูงสุดเท่ากับ 0.5 เมตร/วินาที และความเร่งสูงสุดเท่ากับ 4.5 เมตร/วินาที<sup>2</sup>

1.2) การทดลองให้แขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังตำแหน่ง  $x = 50$ ,  $y = 50$ ,  $z = 50$  mm,  $\text{roll} = 0^\circ$ ,  $\text{pitch} = 0^\circ$ ,  $\text{yaw} = 0^\circ$  ด้วยความเร็วสูงสุดเท่ากับ 1.0 เมตร/วินาที และความเร่งสูงสุดเท่ากับ 20 เมตร/วินาที<sup>2</sup>

1.3) การทดลองให้แขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง  $x = 100$ ,  $y = 100$ ,  $z = 410$  mm,  $\text{roll} = 0^\circ$ ,  $\text{pitch} = 0^\circ$ ,  $\text{yaw} = 0^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $x = 100$ ,  $y = 100$ ,  $z = 410$  mm,  $\text{roll} = 20^\circ$ ,  $\text{pitch} = 20^\circ$ ,  $\text{yaw} = 20^\circ$  ด้วยความเร็วเชิงมุมสูงสุดเท่ากับ 20 องศา/วินาที

1.4) การทดลองให้แขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังตำแหน่ง  $x = 100$ ,  $y = 100$ ,  $z = 410$  mm,  $\text{roll} = 10^\circ$ ,  $\text{pitch} = 10^\circ$ ,  $\text{yaw} = 10^\circ$  ด้วยความเร็วสูงสุดเท่ากับ 0.1 เมตร/วินาที และความเร็วเชิงมุมสูงสุดเท่ากับ 10 องศา/วินาที

ส่วนที่ 2 เป็นการทดสอบการเคลื่อนที่ของส่วนที่เคลื่อนที่ให้เคลื่อนที่ตามลักษณะที่กำหนด และทำการเปลี่ยนความเร็วในการเคลื่อนที่เป็น 3 ระดับ ดังนี้

- 2.1) การเคลื่อนที่ของจุดกึ่งกลางของส่วนที่เคลื่อนที่มีลักษณะเป็นวงกลม
- 2.2) การเคลื่อนที่ของจุดกึ่งกลางของส่วนที่เคลื่อนที่มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยม
- 2.3) การเคลื่อนที่ของจุดกึ่งกลางของส่วนที่เคลื่อนที่มีลักษณะเป็นรูปแปดเหลี่ยม

การเขียนโปรแกรมการทดสอบแขนกลนั้นในตอนเริ่มต้นต้องปรับค่าของตัวบอกตำแหน่งที่บรรจุอยู่ภายในมอเตอร์ (Internal encoder) ให้มีค่าเป็นศูนย์แล้วจึงทำการสั่งงานให้มอเตอร์แต่ละตัวเริ่มเคลื่อนที่ ในขณะที่มอเตอร์แต่ละตัวกำลังเคลื่อนที่นั้นให้ทำการส่งสัญญาณไปที่มอเตอร์แต่ละตัวเพื่อรับค่าตำแหน่งของมอเตอร์ในเวลานั้น ๆ จากการทำการทดลองช่วงเวลาที่เหมาะสมในการรับค่าจากมอเตอร์แต่ละตัวจะใช้เวลาในการรับค่า 0.02 วินาที

## 7.1 การควบคุมตำแหน่งของตัวขับแต่ละตัว

### 7.1.1 ตำแหน่งที่ 1

ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังตำแหน่ง  $x = 100$ ,  $y = 100$ ,  $z = 410$  mm,  $roll = 0^\circ$ ,  $pitch = 0^\circ$ ,  $yaw = 0^\circ$  ด้วยความเร็วสูงสุดเท่ากับ 0.5 เมตร/วินาที และความเร่งสูงสุดเท่ากับ 4.5 เมตร/วินาที<sup>2</sup> นำค่าดังกล่าวและใช้สมการ Inverse kinematics คำนวณหาค่าความยาวของตัวขับแต่ละตัวได้ดังนี้คือ

ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	$\Delta L$
$L_1 = 379.65$ mm	$L_1 = 419.26$ mm	39.61
$L_2 = 379.65$ mm	$L_2 = 500.28$ mm	120.63
$L_3 = 379.65$ mm	$L_3 = 504.05$ mm	124.40
$L_4 = 379.65$ mm	$L_4 = 530.41$ mm	150.76
$L_5 = 379.65$ mm	$L_5 = 527.79$ mm	148.14
$L_6 = 379.65$ mm	$L_6 = 420.47$ mm	40.82

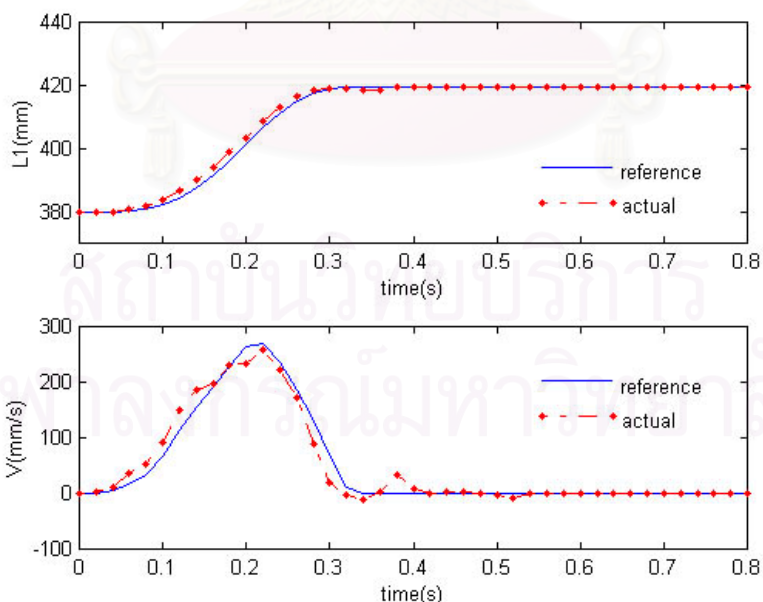
### ผลการทดลอง

ตารางที่ 7.1 ความยาวสุดท้ายของตัวขับแต่ละตัวเมื่อสั่งให้ปลายของแขนกลเคลื่อนที่ไปยังจุดที่ 1

ครั้งที่	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	L5 (mm)	L6 (mm)
1	419.27	500.30	504.05	530.45	527.78	420.48
2	419.29	500.26	504.07	530.41	527.78	420.48
3	419.27	500.26	504.09	530.41	527.76	420.48
4	419.27	500.26	504.07	530.39	527.78	420.48
5	419.27	500.26	504.07	530.39	527.78	420.48
6	419.27	500.28	504.07	530.41	527.80	420.48
7	419.27	500.28	504.07	530.39	527.78	420.46
8	419.27	500.26	504.07	530.41	527.80	420.46
9	419.27	500.28	504.07	530.41	527.78	420.48
10	419.27	500.28	504.07	530.41	527.78	420.48
เฉลี่ย	419.27	500.27	504.07	530.41	527.78	420.47
S.D.	0.006	0.014	0.009	0.017	0.011	0.008
ค่าผิดพลาด	0.01	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00

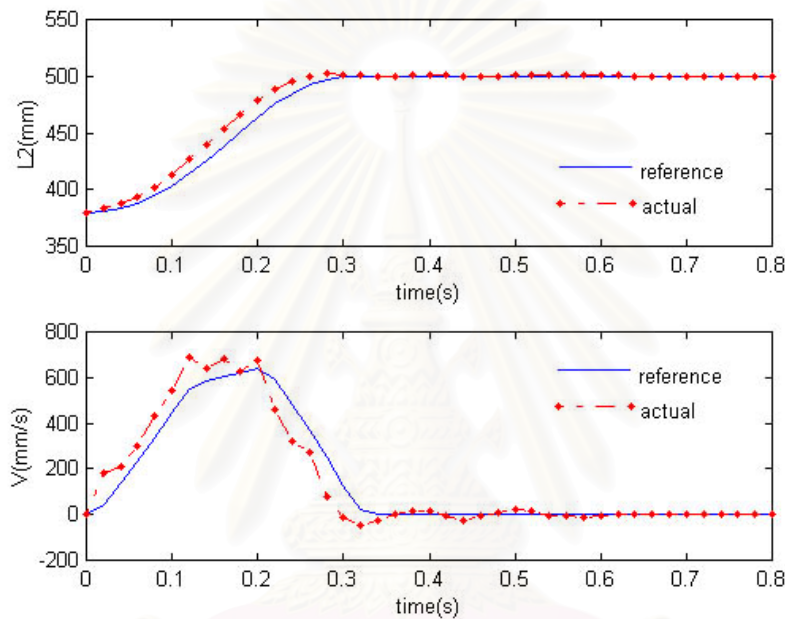
ตารางที่ 7.2 ตำแหน่งของปลายแขนกลจริงที่คำนวณได้เมื่อสั่งให้เคลื่อนที่ไปยังจุดที่ 1

ครั้งที่	x (ม.ม.)	y (ม.ม.)	z (ม.ม.)	Roll (องศา)	pitch (องศา)	Yaw (องศา)
1	99.97	100.02	410.01	0.00	0.00	0.00
2	99.95	99.96	410.02	0.00	0.00	0.00
3	99.96	99.92	410.03	0.00	0.00	0.00
4	99.98	99.94	410.01	0.00	0.00	0.00
5	99.98	99.94	410.01	0.00	0.00	0.00
6	100.00	99.98	410.01	0.00	0.00	0.00
7	100.01	99.96	410.00	0.00	0.00	0.00
8	99.99	99.99	410.00	0.00	0.00	0.00
9	99.99	99.96	410.01	0.00	0.00	0.00
10	99.99	99.96	410.01	0.00	0.00	0.00
เฉลี่ย	99.98	99.96	410.01	0.00	0.00	0.00
S.D.	0.02	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00
ความผิดพลาด	0.02	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00



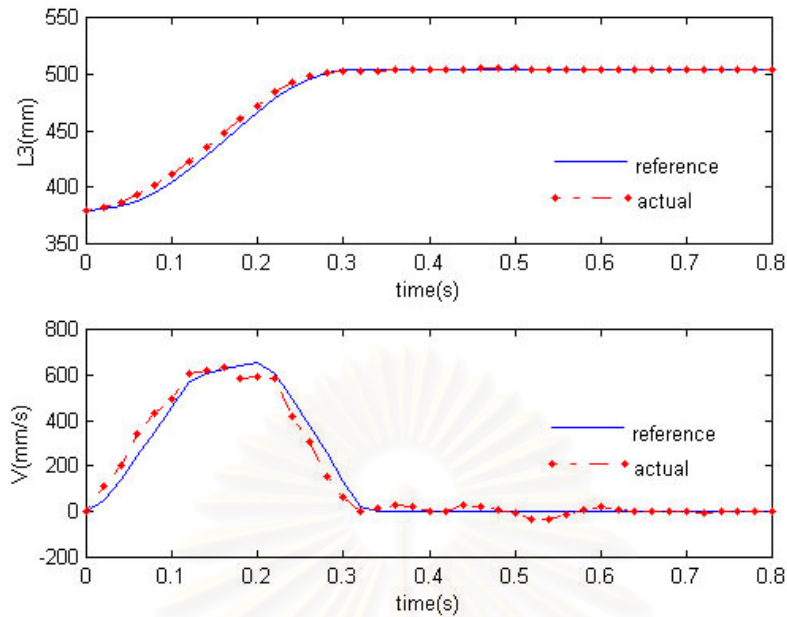
รูปที่ 7.1 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับเคลื่อนที่ 1 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังจุดที่ 1 ภายในเวลา 0.34 วินาที

ตัวขับตัวที่ 1 เคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังตำแหน่ง 419.26 ม.ม. ภายในระยะเวลา 0.34 วินาที ตำแหน่งสุดท้ายมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 419.27 ม.ม. ความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งอ้างอิงเท่ากับ 0.01 ม.ม. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.006 จากรูปที่ 7.1 จะเห็นว่าตำแหน่งของมอเตอร์ที่เวลาต่างๆ นั้นใกล้เคียงกับตำแหน่งอ้างอิงได้ดี พิจารณากราฟความเร็วจะเห็นว่าความเร็วของมอเตอร์นั้นติดตามเส้นความเร็วอ้างอิงได้ดีพอสมควร แต่อาจจะมี ความคลาดเคลื่อนของความเร็วอยู่บ้าง การแก้ไขนั้นสามารถพอจะปรับปรุงให้ดีขึ้นได้โดยปรับค่าเกนของตัวควบคุมแบบ PID ของตัวขับ หรืออาจจะต้องใช้ตัวควบคุมที่มีความสลับซับซ้อนมากขึ้น



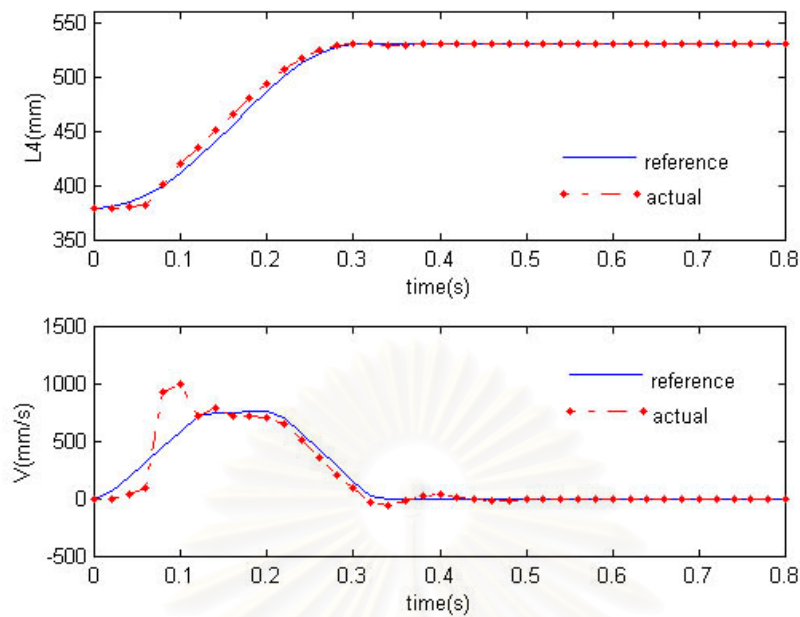
รูปที่ 7.2 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับตัวที่ 2 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังจุดที่ 1 ภายในเวลา 0.34 วินาที

ตัวขับตัวที่ 2 เคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังตำแหน่ง 500.28 ม.ม. ภายในระยะเวลา 0.34 วินาที ตำแหน่งสุดท้ายมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 500.27 ม.ม. ความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งอ้างอิงเท่ากับ 0.01 ม.ม. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.014 จากรูปที่ 7.2 จะเห็นว่าตำแหน่งของมอเตอร์ที่เวลาต่างๆ นั้นใกล้เคียงกับตำแหน่งอ้างอิง พิจารณากราฟความเร็วจะเห็นว่าความเร็วของมอเตอร์นั้นติดตามเส้นความเร็วอ้างอิงได้ไม่ดีนัก และมีความคลาดเคลื่อนของความเร็วค่อนข้างมากเกิดตลอดระยะเวลาของการเคลื่อนที่



รูปที่ 7.3 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับตัวที่ 3 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังจุดที่ 1 ภายในเวลา 0.34 วินาที

ตัวขับตัวที่ 3 เคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังตำแหน่ง 504.05 ม.ม. ภายในระยะเวลา 0.34 วินาที ตำแหน่งสุดท้ายมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 504.07 ม.ม. ความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งอ้างอิงเท่ากับ 0.02 ม.ม. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.009 จากรูปที่ 7.3 จะเห็นว่าตำแหน่งของมอเตอร์ที่เวลาต่างๆ นั้นมีค่าที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งอ้างอิงตลอดเวลา พิจารณากราฟความเร็วจะเห็นว่าความเร็วของมอเตอร์นั้นติดตามเส้นความเร็วอ้างอิงแต่มีการสั่นอยู่เล็กน้อยหลังจากที่มอเตอร์หยุดการเคลื่อนที่

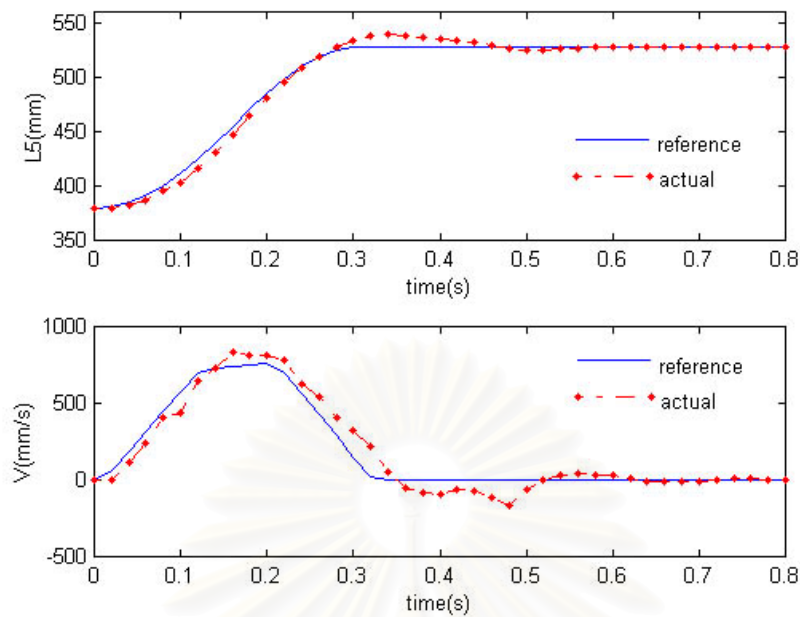


รูปที่ 7.4 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับตัวที่ 4 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังจุดที่ 1 ภายในเวลา 0.34 วินาที

ตัวขับตัวที่ 4 เคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังตำแหน่ง 530.41 ม.ม. ภายในระยะเวลา 0.34 วินาที ตำแหน่งสุดท้ายมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 530.41 ม.ม. ความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งอ้างอิงเท่ากับ 0.00 ม.ม. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.017 จากรูปที่ 7.4 จะเห็นว่าตำแหน่งของมอเตอร์ที่เวลาต่างๆ นั้นใกล้เคียงกับตำแหน่งอ้างอิงยกเว้นที่ตำแหน่งในเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ที่เวลา 0.1 วินาทีซึ่งอาจเกิดขึ้นจากมอเตอร์มีความฝืดอยู่เลยทำให้เกิดการกระตุกพิจารณากราฟความเร็วจะเห็นว่าความเร็วของมอเตอร์นั้นติดตามเส้นความเร็วอ้างอิงแต่มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นโดยมีสาเหตุมาจากการกระตุกของมอเตอร์ในช่วงเวลาเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากค่าความฝืดของข้อต่อของตัวขับที่ 4 ที่อาจจะมีค่าค่อนข้างมาก ณ ตำแหน่งเริ่มเคลื่อนที่นี้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

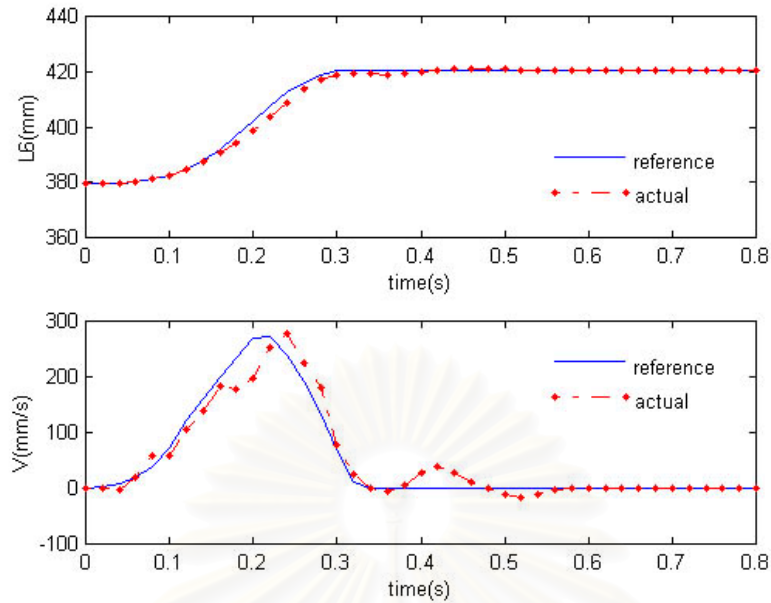




รูปที่ 7.5 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับตัวที่ 5 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังจุดที่ 1 ภายในเวลา 0.34 วินาที

ตัวขับตัวที่ 5 เคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังตำแหน่ง 527.79 ม.ม. ภายในระยะเวลา 0.34 วินาที ตำแหน่งสุดท้ายมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 527.78 ม.ม. ความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งอ้างอิงเท่ากับ 0.01 ม.ม. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.011 จากรูปที่ 7.5 จะเห็นว่าตำแหน่งของมอเตอร์ที่เวลาต่างๆ นั้นแตกต่างกับตำแหน่งอ้างอิงอยู่ตลอดเวลาแต่มีลักษณะลู่เข้าหาตำแหน่งอ้างอิงในช่วงท้ายของการเคลื่อนที่ พิจารณากราฟความเร็วจะเห็นว่าความเร็วของมอเตอร์นั้นติดตามเส้นความเร็วอ้างอิงได้ไม่ดีนัก แต่สามารถแก้ไขได้โดยการปรับเกนของตัวควบคุมแบบ PID

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 7.6 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวข้อต่อที่ 6 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังจุดที่ 1 ภายในเวลา 0.34 วินาที

ตัวข้อต่อที่ 6 เคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังตำแหน่ง 420.47 ม.ม. ภายในระยะเวลา 0.34 วินาที ตำแหน่งสุดท้ายมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 420.47 ม.ม. ความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งอ้างอิงเท่ากับ 0.00 ม.ม. ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.018 จากรูปที่ 7.6 จะเห็นว่าตำแหน่งของมอเตอร์ที่เวลาต่างๆ นั้นใกล้เคียงกับตำแหน่งอ้างอิงตลอดการเคลื่อนที่ พิจารณากราฟความเร็วจะเห็นว่าความเร็วของมอเตอร์นั้นติดตามเส้นความเร็วอ้างอิงแต่มีลักษณะกระเพื่อมอยู่ตลอดเวลา

จากการทดสอบการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ 1 นี้ เมื่อนำตำแหน่งสุดท้ายของตัวข้อต่อแต่ละตัวมาคำนวณโดยสมการ Forward kinematics เพื่อหาค่า  $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$  จะได้ค่าตามตารางที่ 17.2 ซึ่งเป็นตำแหน่งจุดกึ่งกลางของส่วนที่เคลื่อนที่ จากค่าต่างๆ จะเห็นว่าการเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังตำแหน่ง  $x = 100, y = 100, z = 410, \alpha = 0, \beta = 0, \gamma = 0$  ตำแหน่งสุดท้ายมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $x = 99.98, y = 99.96, z = 410.01, \alpha = 0, \beta = 0, \gamma = 0$

### 7.1.2 ตำแหน่งที่ 2

ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังตำแหน่ง  $x = 50$ ,  $y = 50$ ,  $z = 360$  mm,  $\text{roll} = 0^\circ$ ,  $\text{pitch} = 0^\circ$ ,  $\text{yaw} = 0^\circ$  ด้วยความเร็วสูงสุดเท่ากับ 1.0 เมตร/วินาที และความเร่งสูงสุดเท่ากับ 20 เมตร/วินาที<sup>2</sup> นำค่าดังกล่าวและใช้สมการ Inverse kinematics คำนวณหาค่าความยาวของตัวขับแต่ละตัวได้ดังนี้คือ

ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	$\Delta L$
$L_1 = 379.65$ mm	$L_1 = 390.46$ mm	10.81
$L_2 = 379.65$ mm	$L_2 = 435.56$ mm	55.91
$L_3 = 379.65$ mm	$L_3 = 437.73$ mm	58.08
$L_4 = 379.65$ mm	$L_4 = 453.04$ mm	73.39
$L_5 = 379.65$ mm	$L_5 = 451.50$ mm	71.85
$L_6 = 379.65$ mm	$L_6 = 391.11$ mm	11.46

### ผลการทดลอง

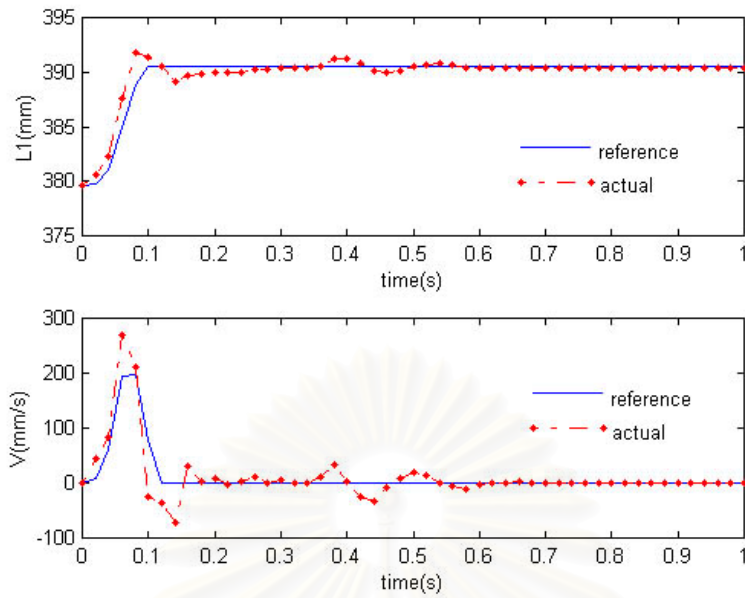
ตารางที่ 7.3 ความยาวสุดท้ายของตัวขับแต่ละตัวเมื่อสั่งให้ปลายของแขนกลเคลื่อนที่ไปยังจุดที่ 2

ครั้งที่	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	L5 (mm)	L6 (mm)
1	390.50	435.50	437.72	453.03	451.49	391.16
2	390.48	435.46	437.72	453.07	451.45	391.18
3	390.48	435.46	437.72	453.07	451.49	391.16
4	390.48	435.50	437.72	453.03	451.51	391.16
5	390.48	435.48	437.72	453.07	451.49	391.16
6	390.48	435.48	437.72	453.03	451.49	391.16
7	390.48	435.48	437.72	453.03	451.47	391.18
8	390.48	435.55	437.66	452.96	451.59	391.12
9	390.48	435.46	437.72	453.03	451.43	391.16
10	390.50	435.48	437.72	453.07	451.45	391.16
เฉลี่ย	390.48	435.48	437.72	453.04	451.49	391.16
S.D.	0.01	0.03	0.02	0.04	0.04	0.02
ค่าผิดพลาด	0.02	0.08	0.01	0.00	0.02	0.05

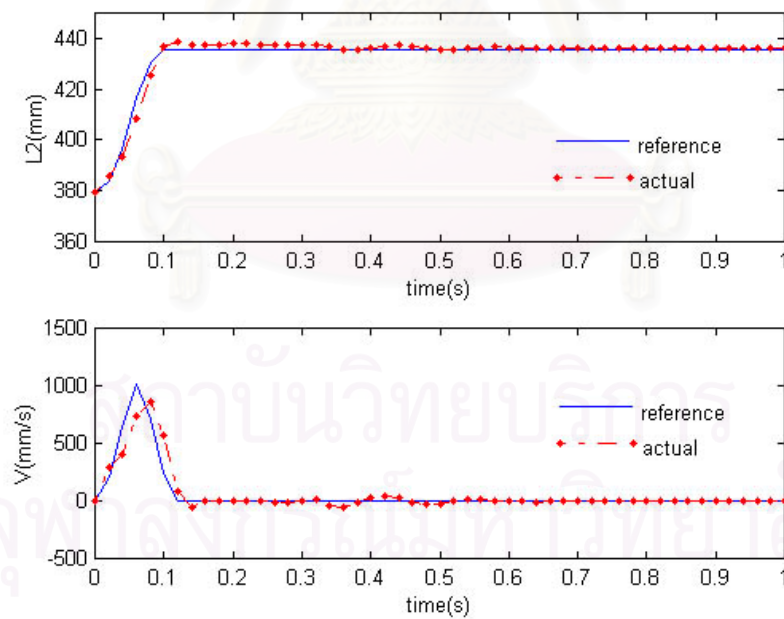
ตารางที่ 7.4 ตำแหน่งของปลายแขนกลจริงที่คำนวณได้เมื่อสั่งให้เคลื่อนที่ไปยังจุดที่ 2

ครั้งที่	X (ม.ม.)	y (ม.ม.)	z (ม.ม.)	row (องศา)	pitch (องศา)	Yaw (องศา)
1	49.90	49.95	360.02	0.00	0.00	0.00
2	49.81	49.92	360.03	0.00	0.00	0.00
3	49.85	49.96	360.02	0.00	0.00	0.00
4	49.93	49.96	360.02	0.00	0.00	0.00
5	49.87	49.97	360.02	0.00	0.00	0.00
6	49.89	49.94	360.02	0.00	0.00	0.00
7	49.88	49.91	360.02	0.00	0.00	0.00
8	50.07	50.07	359.97	0.00	0.00	0.00
9	49.83	49.89	360.01	0.00	0.00	0.00
10	49.82	49.95	360.03	0.00	0.00	0.00
เฉลี่ย	49.89	49.95	360.02	0.00	0.00	0.00
S.D	0.08	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00
ความผิดพลาด	0.11	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00

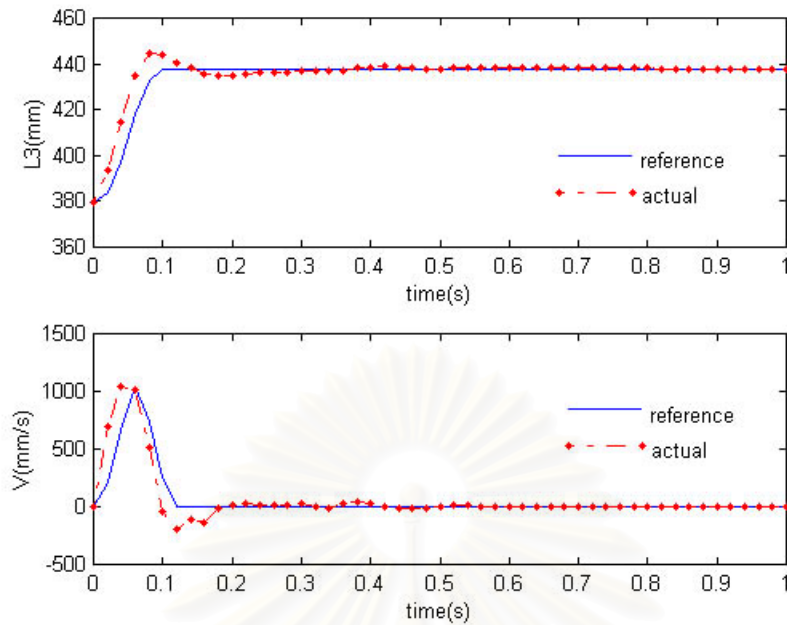
รูปที่ 7.7 – 7.12 เป็นกราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับต่างๆ เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังจุดปลายที่กำหนด โดยควบคุมความยาวของตัวขับเพื่อให้ตำแหน่งปลายแขนกลมีลักษณะการเคลื่อนที่ตามที่กำหนด เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากตำแหน่ง Home ไปยังตำแหน่ง  $x = 50 \text{ mm}$ ,  $y = 50 \text{ mm}$ ,  $z = 360 \text{ mm}$ ,  $\text{roll} = 0^\circ$ ,  $\text{pitch} = 0^\circ$ ,  $\text{yaw} = 0^\circ$  ด้วยความเร็วสูงสุดเท่ากับ 1 เมตร/วินาที และความเร่งสูงสุดเท่ากับ 20 เมตร/วินาที<sup>2</sup> ใช้เวลาประมาณ 0.11 วินาที การเคลื่อนที่จากตำแหน่ง Home ไปยังตำแหน่งที่ 2 ดังกล่าวนี้ มีลักษณะเหมือนกับการเคลื่อนที่ไปที่ตำแหน่ง 1 คือมีลักษณะเป็นการเคลื่อนที่แบบ Translation แต่ความเร็วและความเร่งสูงสุดของการเคลื่อนที่ที่กำหนดที่ตัวขับนั้นต่างกัน การเคลื่อนที่ไปที่ตำแหน่งที่สองนี้จะเพิ่มความเร็วและความเร่งเป็น 2 เท่าของความเร็วและความเร่งเดิม จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าใกล้เคียงกันกับการเคลื่อนที่ไปที่ตำแหน่ง 1 รวมทั้งค่าตำแหน่งที่คำนวณได้จาก Forward Kinematics ก็อยู่ในช่วงความผิดพลาดเดียวกัน ค่าความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่ยังคงเกิดจาก ผลกระทบเนื่องจาก Dynamic ของแขนกล ความผิดพลาดของข้อต่อต่าง ๆ ซึ่งมีค่าไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแขนกลที่กำลังเคลื่อนที่



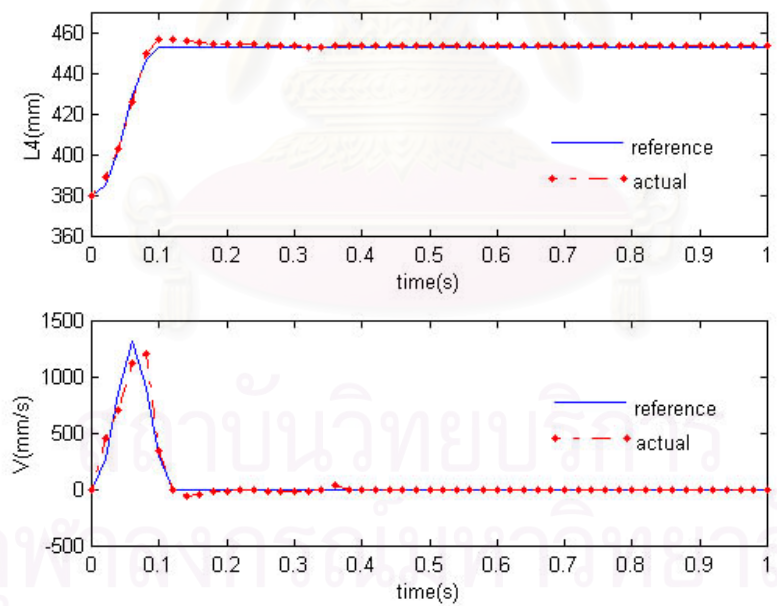
รูปที่ 7.7 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับตัวที่ 1 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังจุดที่ 2 ภายในเวลา 0.11 วินาที



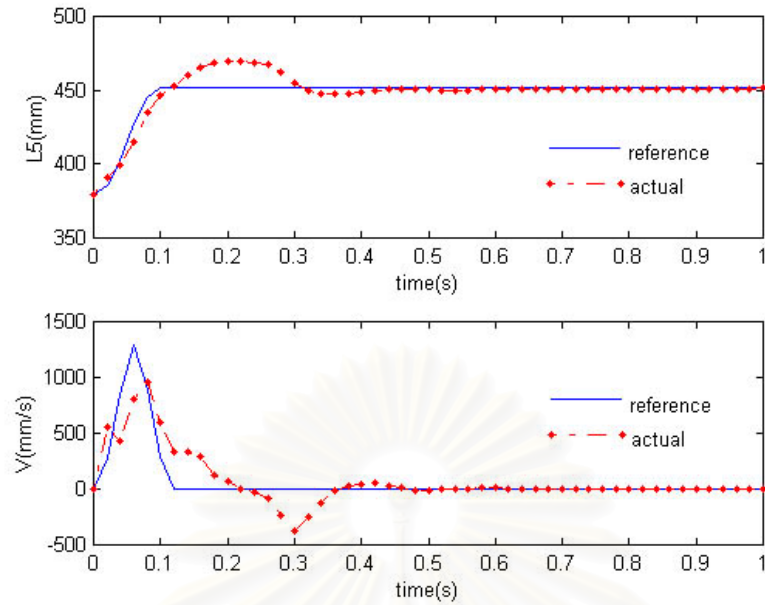
รูปที่ 7.8 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับตัวที่ 2 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังจุดที่ 2 ภายในเวลา 0.11 วินาที



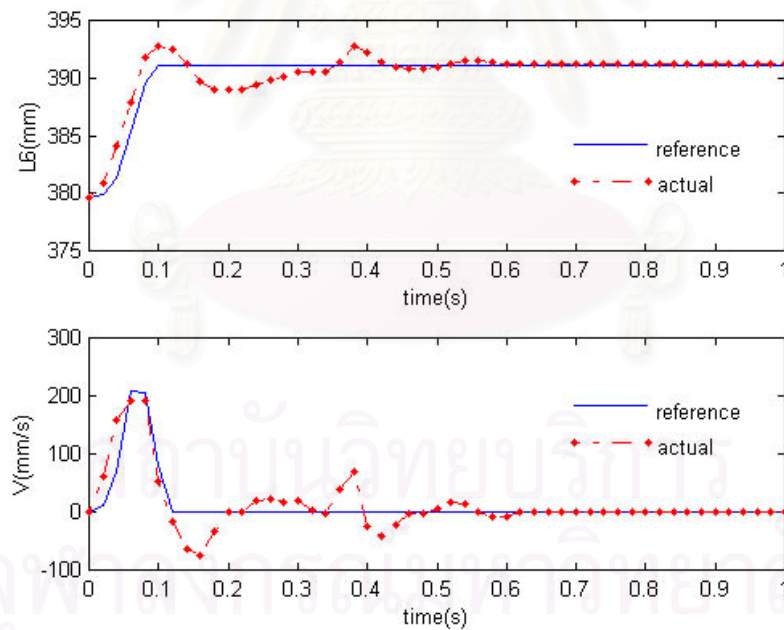
รูปที่ 7.9 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับตัวที่ 3 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังจุดที่ 2 ภายในเวลา 0.11 วินาที



รูปที่ 7.10 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับตัวที่ 4 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังจุดที่ 2 ภายในเวลา 0.11 วินาที



รูปที่ 7.11 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวข้อต่อที่ 5 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังจุดที่ 2 ภายในเวลา 0.11 วินาที



รูปที่ 7.12 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวข้อต่อที่ 6 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังจุดที่ 2 ภายในเวลา 0.11 วินาที

### 7.1.3 ตำแหน่งที่ 3

ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง  $x = 100$ ,  $y = 100$ ,  $z = 410$  mm,  $\text{roll} = 0^\circ$ ,  $\text{pitch} = 0^\circ$ ,  $\text{yaw} = 0^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $x = 100$ ,  $y = 100$ ,  $z = 410$  mm,  $\text{roll} = 20^\circ$ ,  $\text{pitch} = 20^\circ$ ,  $\text{yaw} = 20^\circ$  ด้วยความเร็วเชิงมุมสูงสุดเท่ากับ 20 องศา/วินาที

นำค่าดังกล่าวและใช้สมการ Inverse kinematics คำนวณหาค่าความยาวของตัวขับแต่ละตัวได้ดังนี้คือ

ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	$\Delta L$
$L_1 = 464.91$ mm	$L_1 = 493.87$ mm	28.96
$L_2 = 464.91$ mm	$L_2 = 498.15$ mm	33.27
$L_3 = 464.91$ mm	$L_3 = 500.64$ mm	35.73
$L_4 = 464.91$ mm	$L_4 = 459.27$ mm	-5.64
$L_5 = 464.91$ mm	$L_5 = 439.27$ mm	-25.64
$L_6 = 464.91$ mm	$L_6 = 424.82$ mm	-40.09

### ผลการทดลอง

ตารางที่ 7.5 ความยาวสุดท้ายของตัวขับแต่ละตัวเมื่อสั่งให้ปลายของแขนกลเคลื่อนที่ไปยังจุดที่ 3

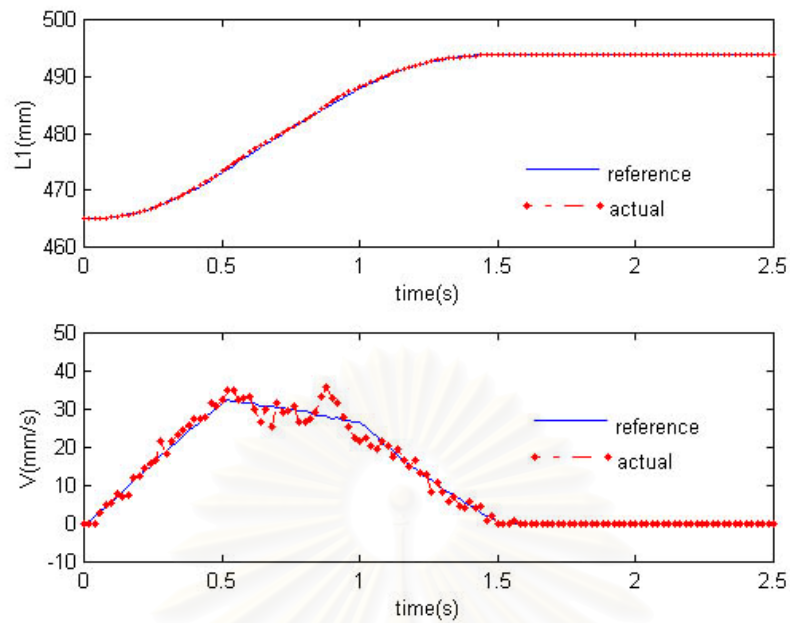
ครั้งที่	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	L5 (mm)	L6 (mm)
1	493.87	498.17	500.71	459.09	439.27	424.76
2	493.87	498.13	500.65	459.15	439.31	424.78
3	493.95	498.15	500.67	459.23	439.27	424.81
4	493.97	498.15	500.63	459.11	439.23	424.83
5	493.97	498.15	500.67	459.07	439.27	424.80
6	493.95	498.13	500.67	459.07	439.27	424.80
7	493.93	498.17	500.65	459.42	439.29	424.76
8	493.91	498.17	500.67	459.17	439.31	424.76
9	493.91	498.15	500.67	459.07	439.31	424.76
10	493.91	498.15	500.67	459.21	439.31	424.78
ค่าเฉลี่ย	493.93	498.15	500.67	459.16	439.28	424.78
S.D.	0.04	0.01	0.02	0.11	0.03	0.03
ค่าผิดพลาด	0.05	0.00	0.03	0.11	0.01	0.04



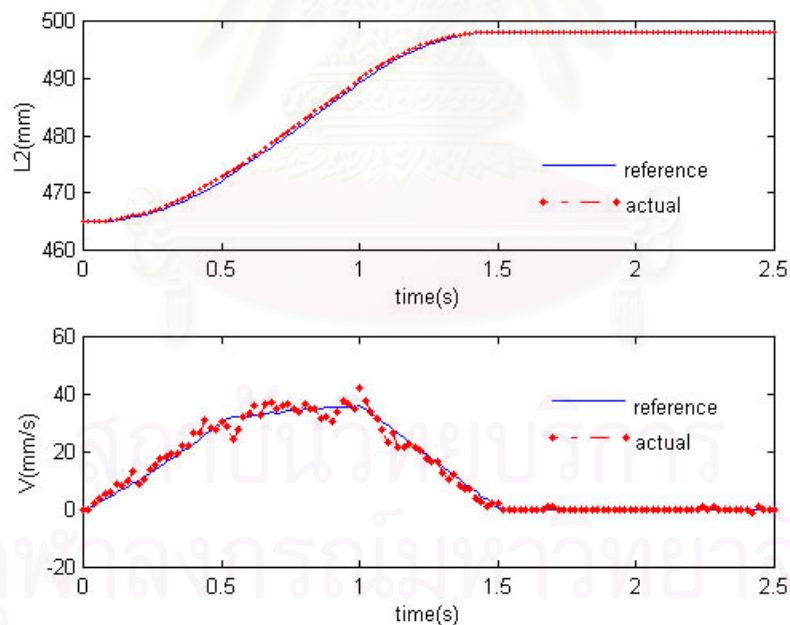
ตารางที่ 7.6 ตำแหน่งของปลายแขนกลเมื่อสั่งให้เคลื่อนที่ไปยังจุดที่ 3

ครั้งที่	x (mm)	y (mm)	z (mm)	row (องศา)	pitch (องศา)	yaw (องศา)
1	0.22	-0.17	409.96	20.08	19.94	19.99
2	0.13	-0.06	409.96	20.06	19.95	19.99
3	-0.06	-0.01	409.99	20.06	20.02	20.02
4	-0.03	-0.12	409.96	20.06	19.97	20.02
5	0.06	-0.15	409.96	20.11	19.95	20.01
6	0.07	-0.16	409.95	20.10	19.95	20.00
7	-0.20	0.25	410.01	20.03	20.10	20.07
8	0.10	-0.02	409.97	20.08	19.97	20.02
9	0.18	-0.11	409.95	20.10	19.93	20.00
10	0.04	0.00	409.98	20.07	19.99	20.01
เฉลี่ย	0.05	-0.05	409.97	20.07	19.98	20.01
S.D	0.12	0.12	0.02	0.02	0.05	0.02
ความผิดพลาด	0.05	0.05	0.03	0.07	0.02	0.01

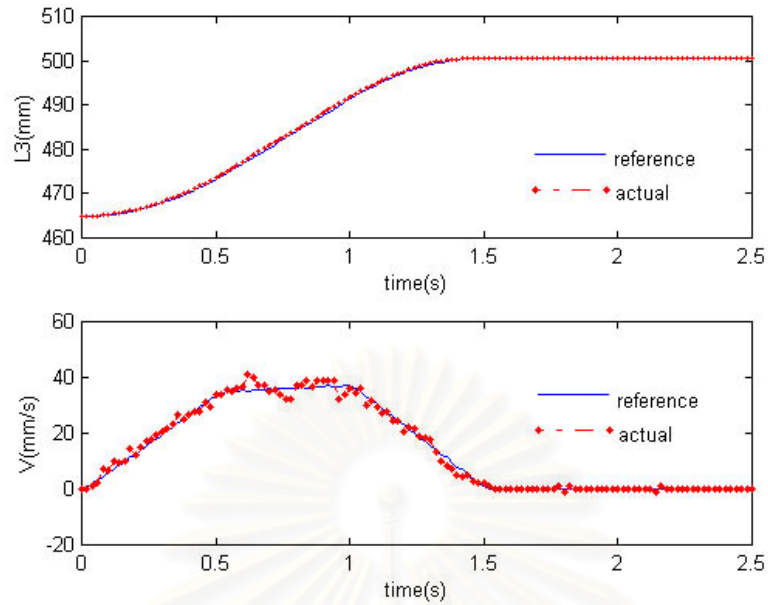
การเคลื่อนที่ในรูปแบบที่ 4 นี้เป็นการทดสอบการปรับ Orientation ของปลายแขนกล รูปที่ 7.13 – 7.18 นี้เป็นกราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับต่างๆ เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังจุดปลายที่กำหนด โดยควบคุมความยาวของตัวขับเพื่อให้ตำแหน่งปลายแขนกลมีลักษณะการเคลื่อนที่ตามที่กำหนด เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากตำแหน่ง  $x = 100$ ,  $y = 100$ ,  $z = 410$  mm,  $roll = 0^\circ$ ,  $pitch = 0^\circ$ ,  $yaw = 0^\circ$  ไปยังตำแหน่ง  $x = 100$ ,  $y = 100$ ,  $z = 410$  mm,  $roll = 20^\circ$ ,  $pitch = 20^\circ$ ,  $yaw = 20^\circ$  ด้วยความเร็วเชิงมุมสูงสุดเท่ากับ 20 องศา/วินาที และความเร็วเชิงมุมสูงสุดเท่ากับ 40 องศา/วินาที<sup>2</sup> ใช้เวลาประมาณ 1.5 วินาที ผลลัพธ์การเคลื่อนที่ที่ได้จากการทดลองมีลักษณะเช่นเดียวกันกับที่ผ่านมา ช่วงความผิดพลาดก็อยู่ในช่วงเดียวกัน



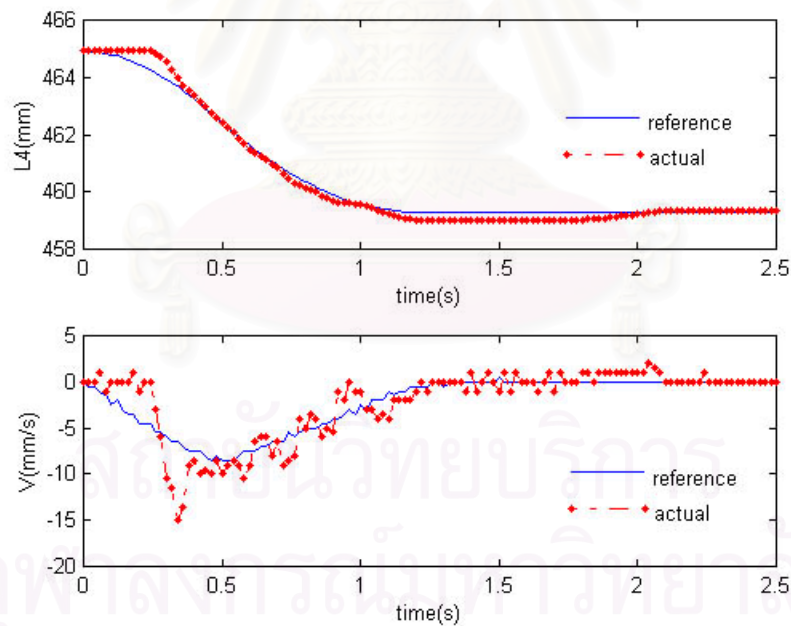
รูปที่ 7.13 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวข้อต่อที่ 1 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่กำหนดไปยังจุดที่ 3 ภายในเวลา 1.5 วินาที



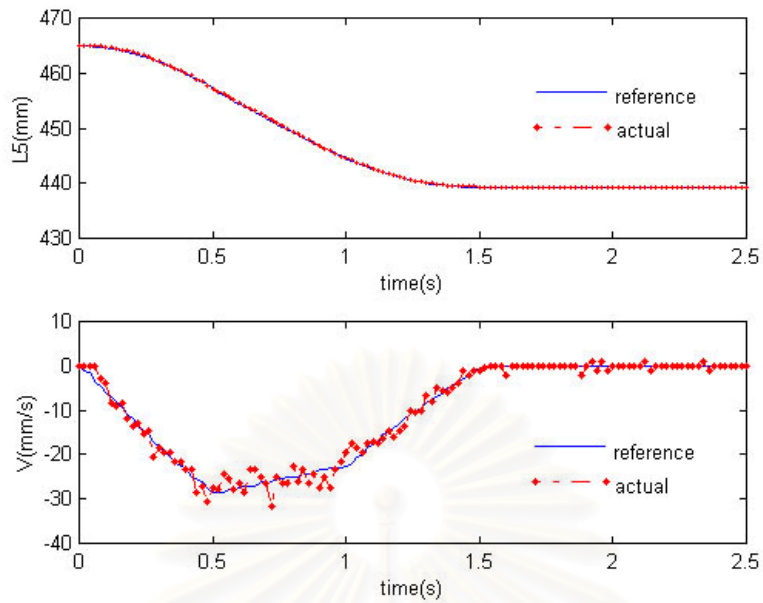
รูปที่ 7.14 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวข้อต่อที่ 2 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่กำหนดไปยังจุดที่ 3 ภายในเวลา 1.5 วินาที



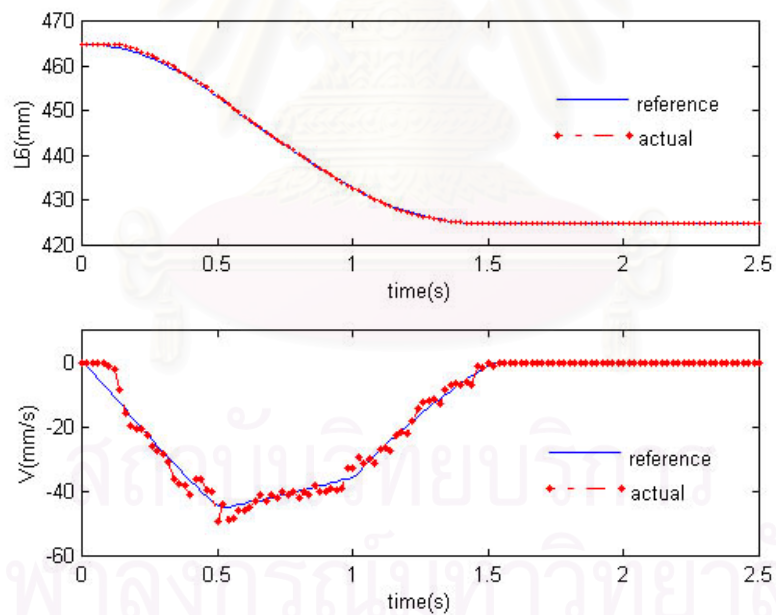
รูปที่ 7.15 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับเคลื่อนที่ 3 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่กำหนดไปยังจุดที่ 3 ภายในเวลา 1.5 วินาที



รูปที่ 7.16 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับเคลื่อนที่ 4 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่กำหนดไปยังจุดที่ 3 ภายในเวลา 1.5 วินาที



รูปที่ 7.17 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขั้วตัวที่ 5 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่กำหนดไปยังจุดที่ 3 ภายในเวลา 1.5 วินาที



รูปที่ 7.18 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขั้วตัวที่ 6 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่กำหนดไปยังจุดที่ 3 ภายในเวลา 1.5 วินาที

#### 7.1.4 ตำแหน่งที่ 4

ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังตำแหน่ง  $x = 100$ ,  $y = 100$ ,  $z = 410$  mm,  $\text{roll} = 10^\circ$ ,  $\text{pitch} = 10^\circ$ ,  $\text{yaw} = 10^\circ$  ด้วยความเร็วสูงสุดเท่ากับ 0.1 เมตร/วินาที และความเร็วเชิงมุม สูงสุดเท่ากับ 10 องศา/วินาที เมื่อนำค่าดังกล่าวมาแทนในสมการ Inverse kinematics สามารถคำนวณหาความยาวที่ตัวขับเคลื่อนที่ได้นี้คือ

ความยาวเริ่มต้น	ความยาวสุดท้าย	$\Delta L$
$L_1 = 379.65$ mm	$L_1 = 439.79$ mm	60.14
$L_2 = 379.65$ mm	$L_2 = 511.79$ mm	132.14
$L_3 = 379.65$ mm	$L_3 = 518.09$ mm	138.44
$L_4 = 379.65$ mm	$L_4 = 525.40$ mm	145.75
$L_5 = 379.65$ mm	$L_5 = 525.41$ mm	145.76
$L_6 = 379.65$ mm	$L_6 = 405.51$ mm	25.86

#### ผลการทดลอง

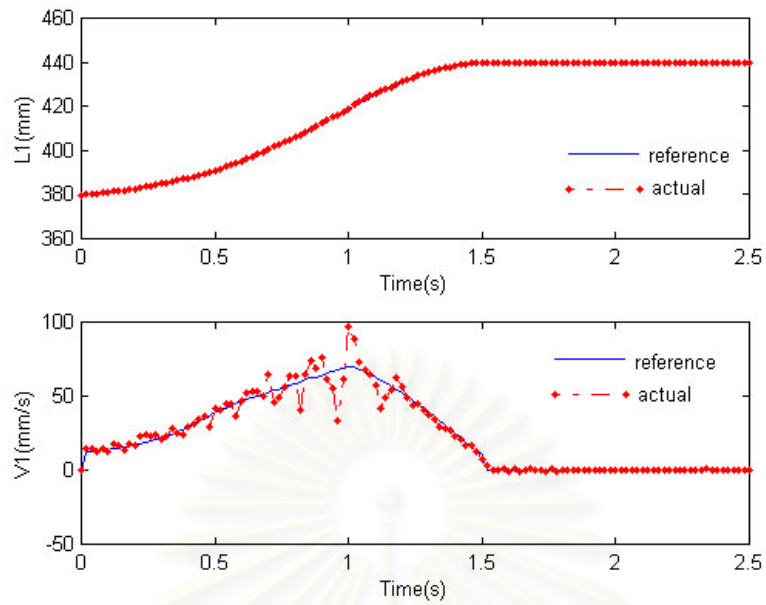
ตารางที่ 7.7 ความยาวสุดท้ายของตัวขับเคลื่อนแต่ละตัวเมื่อสั่งให้ปลายของแขนกลเคลื่อนที่ไปยังจุดที่ 4

ครั้งที่	L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	L5 (mm)	L6 (mm)
1	439.97	511.96	518.30	525.39	525.39	405.22
2	439.97	511.96	518.32	525.39	525.39	405.24
3	439.95	511.96	518.30	525.39	525.39	405.26
4	439.95	511.96	518.28	525.39	525.39	405.26
5	439.95	511.96	518.28	525.39	525.39	405.24
6	439.95	511.96	518.28	525.39	525.39	405.24
7	439.95	511.96	518.28	525.39	525.39	405.24
8	439.95	511.96	518.28	525.39	525.39	405.24
9	439.95	511.96	518.30	525.39	525.39	405.24
10	439.95	511.96	518.28	525.41	525.39	405.24
ค่าเฉลี่ย	439.95	511.96	518.29	525.39	525.39	405.25
S.D.	0.008	0.000	0.014	0.006	0.000	0.011
ค่าผิดพลาด	0.16	0.17	0.2	0.01	0.02	0.26

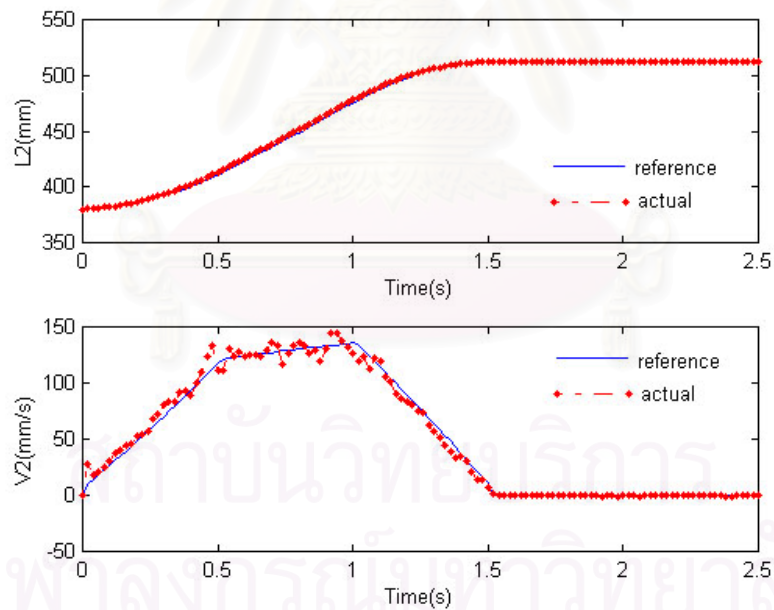
ตารางที่ 7.8 ตำแหน่งของปลายแขนกลเมื่อสั่งให้เคลื่อนที่ไปยังจุดที่ 4

ครั้งที่	x (ม.ม.)	y (ม.ม.)	Z (ม.ม.)	row (องศา)	pitch (องศา)	yaw (องศา)
1	103.58	100.24	413.86	11.00	10.59	10.91
2	103.58	100.21	413.88	11.00	10.59	10.90
3	103.59	100.20	413.87	11.00	10.59	10.90
4	103.58	100.23	413.86	11.00	10.59	10.90
5	103.59	100.24	413.85	11.00	10.59	10.91
6	103.59	100.24	413.85	11.00	10.59	10.91
7	103.59	100.24	413.85	11.00	10.59	10.91
8	103.59	100.24	413.85	11.00	10.59	10.91
9	103.60	100.22	413.86	11.00	10.59	10.90
10	103.57	100.26	413.86	11.00	10.59	10.90
เฉลี่ย	103.59	100.23	413.86	11.00	10.59	10.90
S.D	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00
ความผิดพลาด	3.59	0.23	3.86	1.00	0.59	0.90

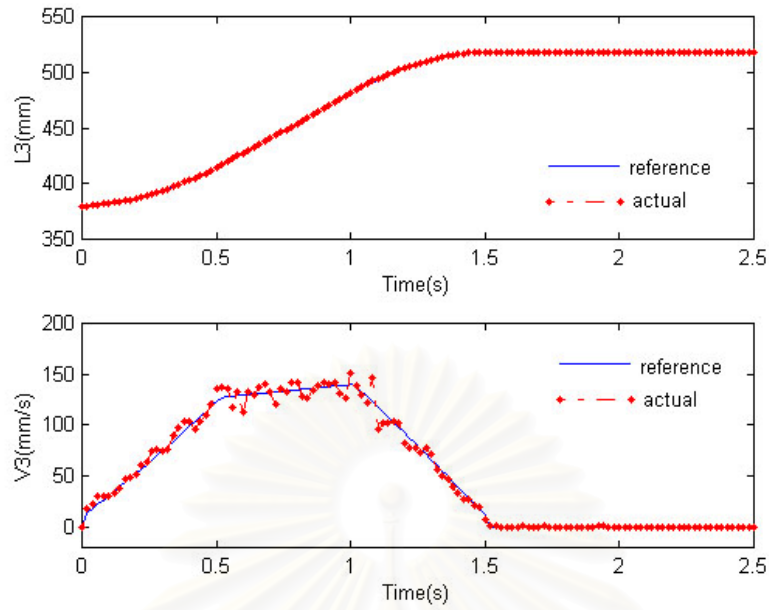
รูปที่ 7.19 - 7.24 เป็นกราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขับต่างๆ เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่ง HOME ไปยังจุดปลายที่กำหนด โดยควบคุมความยาวของตัวขับเพื่อให้ตำแหน่งปลายแขนกลมีลักษณะการเคลื่อนที่ตามที่กำหนด เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากตำแหน่ง Home ไปยังตำแหน่ง  $x = 100$ ,  $y = 100$ ,  $z = 410$  mm,  $roll = 10^\circ$ ,  $pitch = 10^\circ$ ,  $yaw = 10^\circ$  ใช้เวลาประมาณ 1.5 วินาที และผลลัพธ์ของลักษณะการเคลื่อนที่มีลักษณะใกล้เคียงกับการเคลื่อนที่ในแบบที่ 1 การเคลื่อนที่ไปตำแหน่งที่ 4 นี้มีการปรับ Orientation ของปลายแขนกลต่างจากตำแหน่ง Home โดยกำหนดที่มุมของ Roll, Pitch, และ Yaw ดังกล่าว ค่าความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่จะเกิดจาก ผลกระทบเนื่องจาก Dynamic ของแขนกล ความผิดพลาดของข้อต่อต่างๆ ซึ่งมีค่าไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของแขนกลที่กำลังเคลื่อนที่ การคำนวณหาตำแหน่งเมื่อทราบระยะการเคลื่อนที่ของตัวขับแต่ละตัว (Forward Kinematics) โดยใช้วิธีการของ Newton-Raphson นั้นก็อย่างจะมีค่าผิดพลาดในระดับหนึ่ง ซึ่งรวมถึงค่าความละเอียดของตัววัดความยาวที่เคลื่อนที่ของตัวขับแบบเชิงเส้น



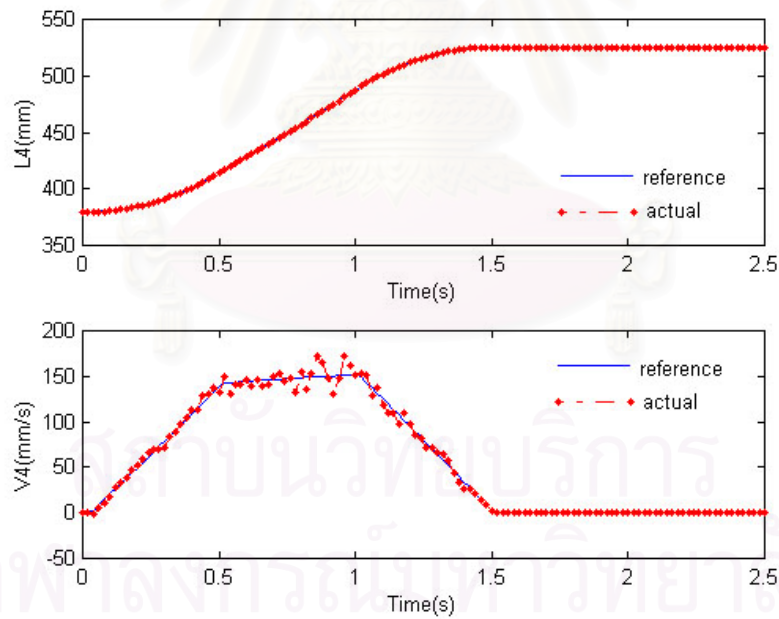
รูปที่ 7.19 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขั้วตัวที่ 1 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังจุดที่ 4 ภายในเวลา 1.5 วินาที



รูปที่ 7.20 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวขั้วตัวที่ 2 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังจุดที่ 4 ภายในเวลา 1.5 วินาที

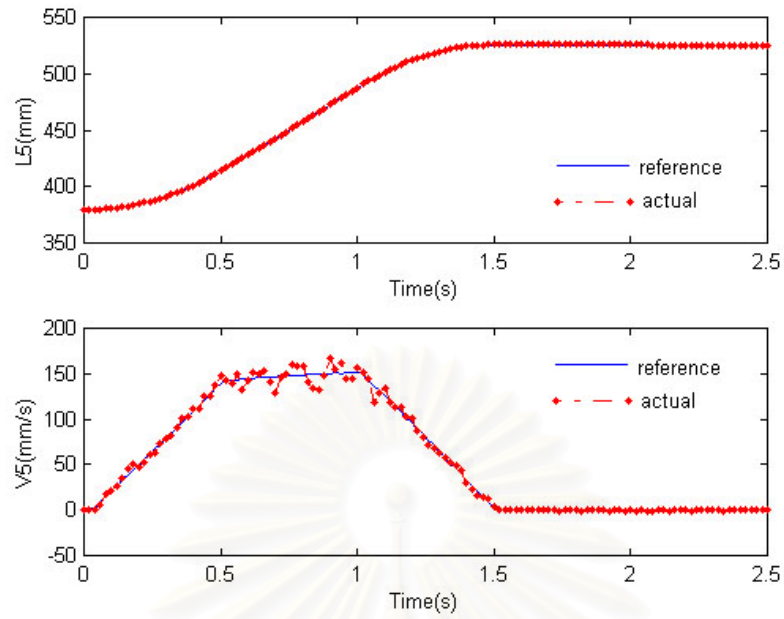


รูปที่ 7.21 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวข้อต่อที่ 3 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังจุดที่ 4 ภายในเวลา 1.5 วินาที

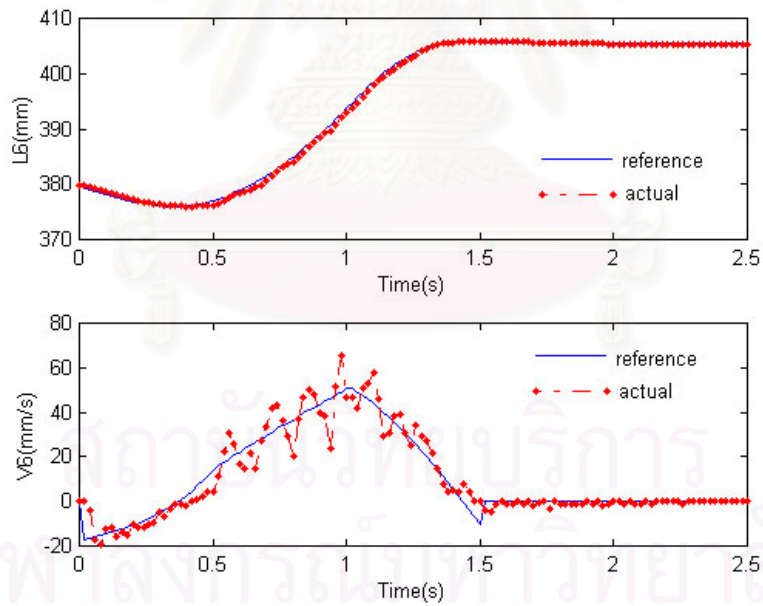


รูปที่ 7.22 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวข้อต่อที่ 4 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังจุดที่ 4 ภายในเวลา 1.5 วินาที





รูปที่ 7.23 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวข้อต่อที่ 5 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังจุดที่ 4 ภายในเวลา 1.5 วินาที



รูปที่ 7.24 กราฟแสดงตำแหน่งความเร็วของตัวข้อต่อที่ 6 เมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังจุดที่ 4 ภายในเวลา 1.5 วินาที

## 7.2 การทดสอบการเคลื่อนที่ของส่วนที่เคลื่อนที่ให้เคลื่อนที่ตามลักษณะที่กำหนด

### 7.2.1 การเคลื่อนที่เป็นวงกลม

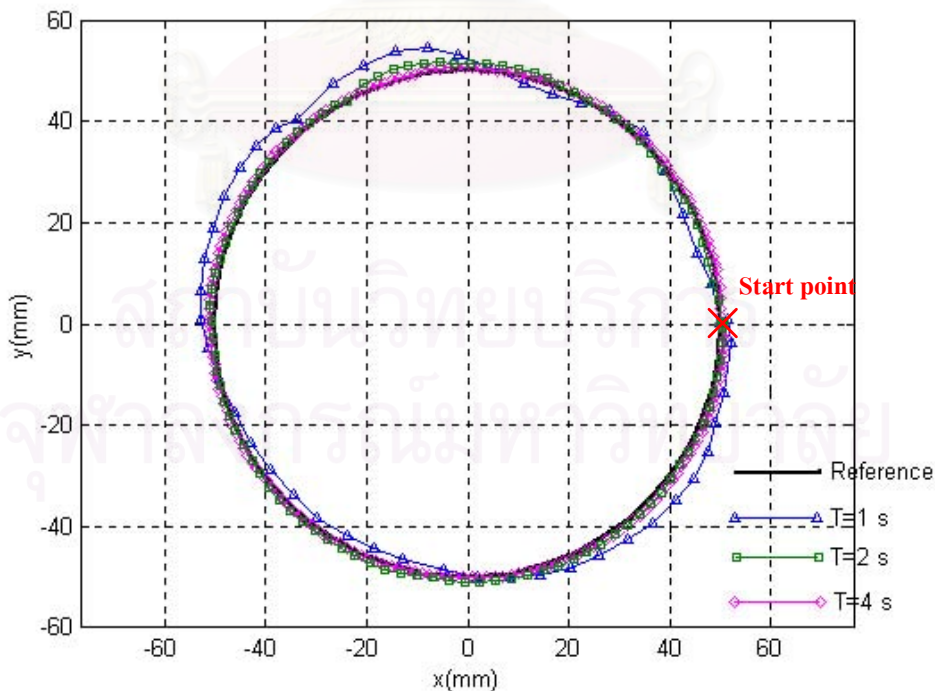
การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลสำหรับการทดลองนี้จะกำหนดให้แขนกลเคลื่อนที่เป็นวงกลมดังสมการพาราเมตริก (Parametric equation)

$$x = 50\cos(\omega t)$$

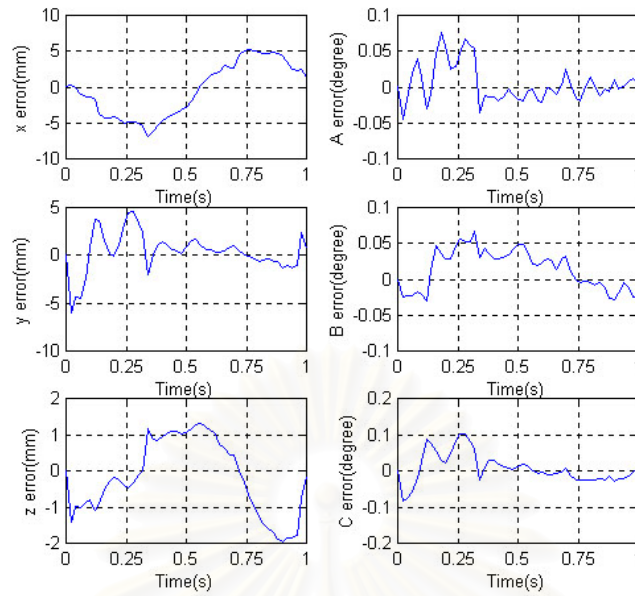
$$y = 50\sin(\omega t)$$

โดยรักษาระดับความสูงที่  $z = 410$  mm และมุมคงที่เท่ากับ  $\text{roll} = 0^\circ$ ,  $\text{pitch} = 0^\circ$ ,  $\text{yaw} = 0^\circ$  ตำแหน่งเริ่มต้นอยู่ที่  $x = 50$ ,  $y = 0$ ,  $z = 410$  mm,  $\text{roll} = 0^\circ$ ,  $\text{pitch} = 0^\circ$ ,  $\text{yaw} = 0^\circ$

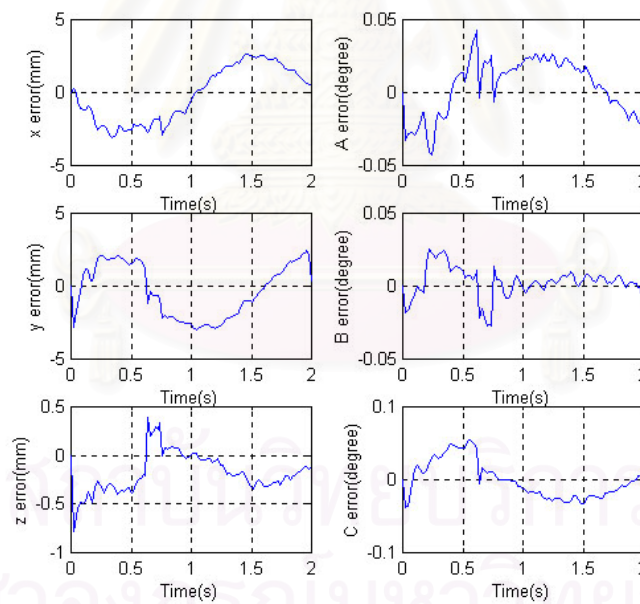
จากค่าระยะความยาวต่าง ๆ ที่คำนวณหาได้นี้ ต้องนำมาเข้าสมการพาราเมตริกข้างต้น โดยกำหนดช่วงเวลาการเคลื่อนที่ระหว่างตำแหน่งย่อย โดยที่เวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเคลื่อนที่  $T = N\Delta t$  เมื่อ  $N$  = จำนวนจุดที่ต้องการกำหนดในเส้นทางเดิน และ  $\Delta t$  คือระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ระหว่างจุดหรือตำแหน่งย่อย การทดลองนี้จะกำหนดให้เวลา  $T = 1, 2$  และ  $4$  วินาที ค่า  $\Delta t = 0.02$  วินาที เส้นทางเคลื่อนที่ที่เป็นวงกลมดังกล่าวจะถูกแบ่งออกแบ่งออกเป็นระยะย่อยที่ระยะ 6.283, 3.142 และ 1.571 ม.ม. ตามลำดับดังนั้นเมื่อประมาณค่าความเร็วของการเคลื่อนที่เป็นวงกลมจะได้ประมาณ 3.143, 1.571 และ 0.785 เมตรวินาที ตามลำดับ



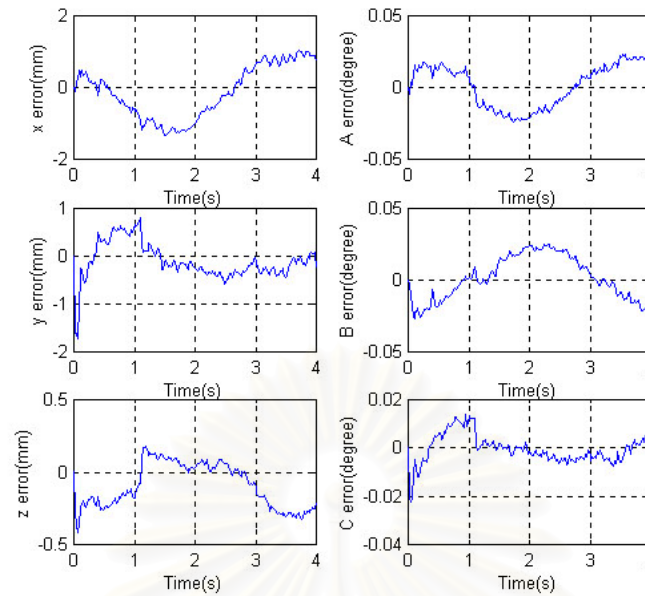
รูปที่ 7.25 แสดงตำแหน่งของจุดกึ่งกลางของแขนกลที่เคลื่อนที่เป็นวงกลม



รูปที่ 7.26 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางเมื่อแขนกลเคลื่อนที่เป็นวงกลม ภายในเวลา 1 วินาที



รูปที่ 7.27 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางเมื่อแขนกลเคลื่อนที่เป็นวงกลม ภายในเวลา 2 วินาที



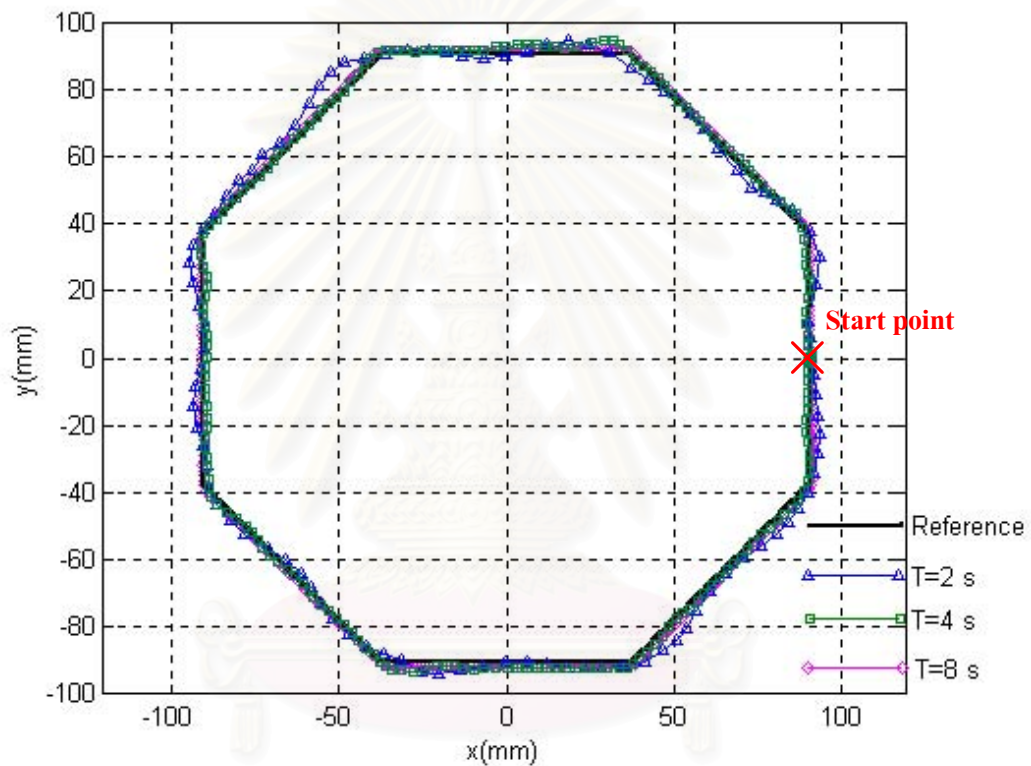
รูปที่ 7.28 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางเมื่อแขนกลเคลื่อนที่เป็นวงกลม ภายในเวลา 4 วินาที

จากรูปที่ 7.26-7.28 แสดงค่าผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางเมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้น ไปยังจุดปลาย ในลักษณะที่ทางเดินที่ปลายแขนกลเป็นวงกลม เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่กำหนดด้วยค่า  $T = 1, 2$  และ 4 วินาที ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดสูงสุดจากเส้นทางวงกลมจะมีค่าประมาณ 6.8 มิลลิเมตร

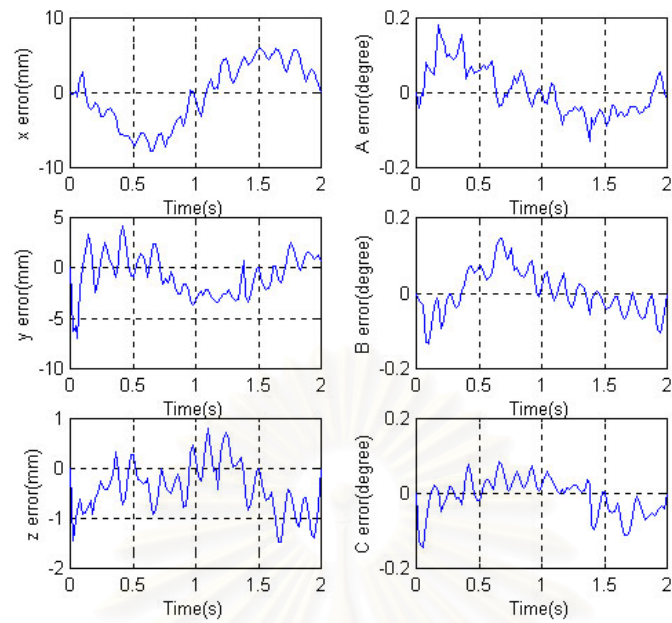
### 7.2.2 การเคลื่อนที่เป็นรูปแปดเหลี่ยม

การทดลองเคลื่อนที่เป็นรูปแปดเหลี่ยม ขนาด 75 mm โดยรักษาระดับความสูงที่  $z = 410$  mm และมุมคงที่เท่ากับ  $\text{roll} = 0^\circ$ ,  $\text{pitch} = 0^\circ$ ,  $\text{yaw} = 0^\circ$  ตำแหน่งเริ่มต้นอยู่ที่  $x = 90.5$ ,  $y = 0$ ,  $z = 410$  mm,  $\text{roll} = 0^\circ$ ,  $\text{pitch} = 0^\circ$ ,  $\text{yaw} = 0^\circ$

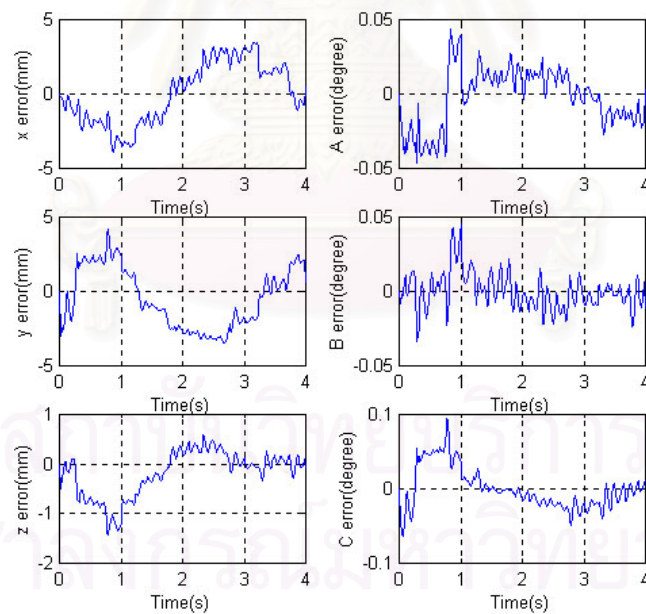
การทดลองนี้มีรูปแบบการทดลองคล้ายกับการทดลองการเคลื่อนที่เป็นวงกลม ช่วงเวลาในการเคลื่อนที่  $T = 2, 4$  และ 8 วินาที



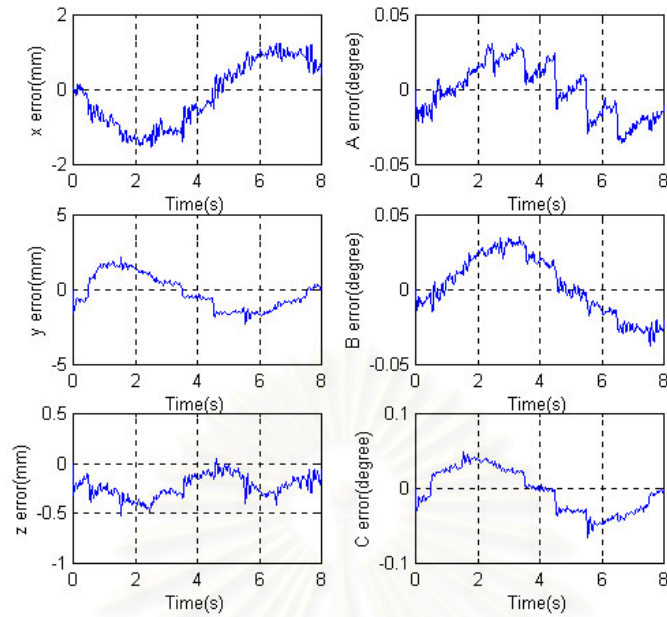
รูปที่ 7.29 แสดงตำแหน่งของจุดกึ่งกลางของแขนกลที่เคลื่อนที่เป็นรูปแปดเหลี่ยม



รูปที่ 7.30 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางเมื่อแขนกลเคลื่อนที่เป็นวงกลม ภายในเวลา 2 วินาที



รูปที่ 7.31 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางเมื่อแขนกลเคลื่อนที่เป็นแปดเหลี่ยม ภายในเวลา 4 วินาที



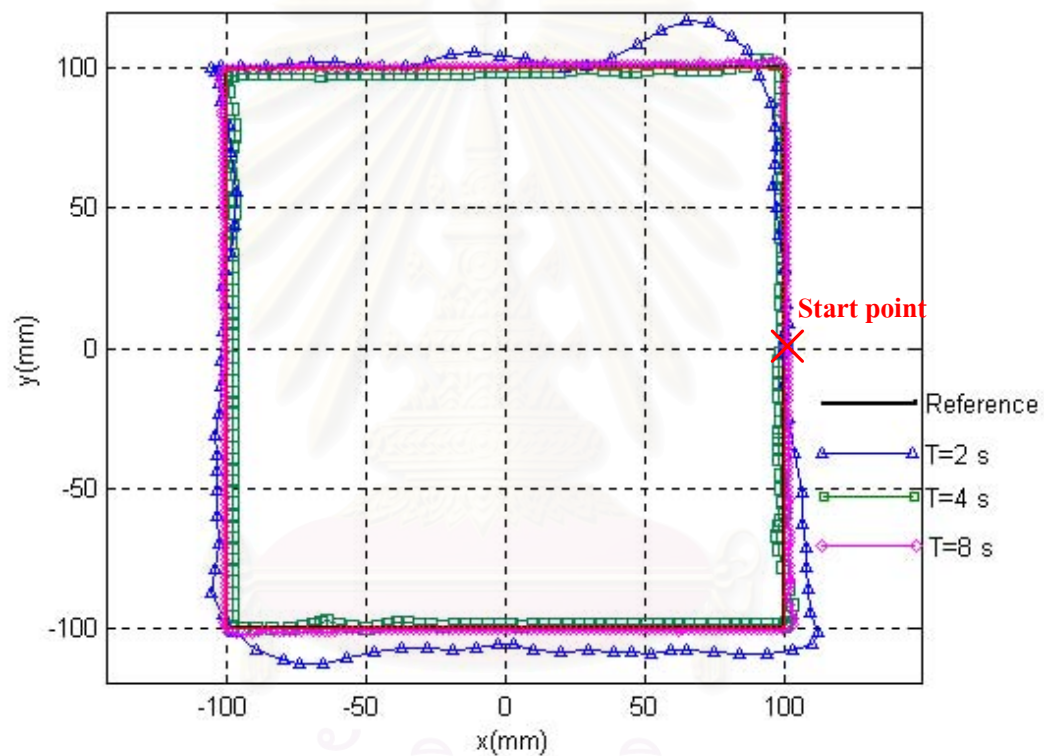
รูปที่ 7.32 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางเมื่อแขนกลเคลื่อนที่เป็นแปดเหลี่ยม ภายในเวลา 8 วินาที

จากรูปที่ 7.30-7.32 แสดงค่าผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางเมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้น ไปยังจุดปลาย ในลักษณะที่ทางเดินที่ปลายแขนกลเป็นรูปแปดเหลี่ยม เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่กำหนดด้วยค่า  $T = 2, 4$  และ 8 วินาที ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดสูงสุดจากเส้นทางจะมีค่าประมาณ 8.0 มิลลิเมตร

### 7.2.3 การทดลองเคลื่อนที่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส

การทดลองเคลื่อนที่เป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 100 ม.ม. โดยรักษาระดับความสูงที่  $z = 410$  mm และมุมคงที่เท่ากับ  $\text{roll} = 0^\circ$ ,  $\text{pitch} = 0^\circ$ ,  $\text{yaw} = 0^\circ$  ตำแหน่งเริ่มต้นอยู่ที่  $x = 100$ ,  $y = 0$ ,  $z = 410$  mm,  $\text{roll} = 0^\circ$ ,  $\text{pitch} = 0^\circ$ ,  $\text{yaw} = 0^\circ$

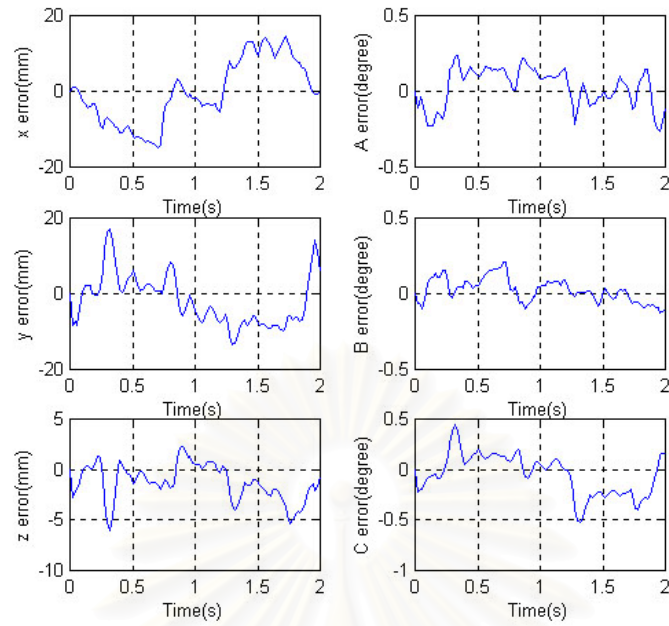
การทดลองให้จุดกึ่งกลางของปลายแขนกลเคลื่อนที่เป็นรูปสี่เหลี่ยมนี้ เหมือนกับการทดลองเคลื่อนที่ดังที่ผ่านมา และช่วงเวลาในการเคลื่อนที่  $T=2, 4$  และ 8 วินาที



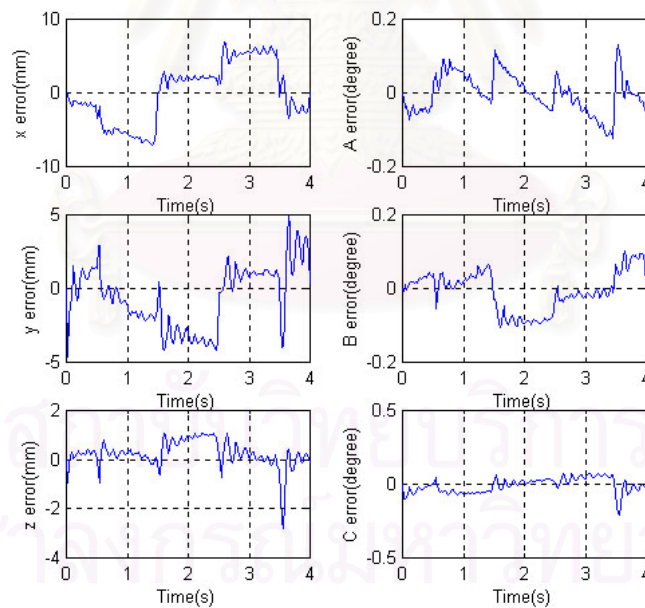
รูปที่ 7.33 แสดงตำแหน่งของจุดกึ่งกลางของแขนกลที่เคลื่อนที่เป็นรูปสี่เหลี่ยม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

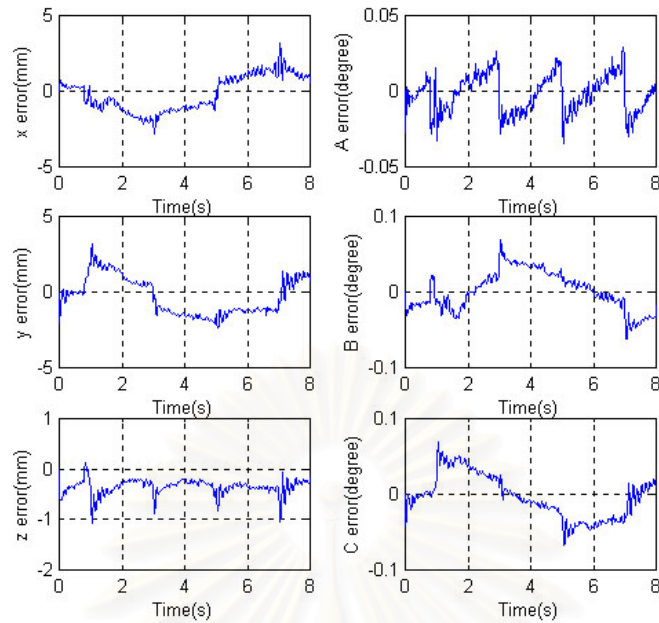




รูปที่ 7.34 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางเมื่อแขนกลเคลื่อนที่เป็นแปดเหลี่ยม ภายในเวลา 2 วินาที



รูปที่ 7.35 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางเมื่อแขนกลเคลื่อนที่เป็นแปดเหลี่ยม ภายในเวลา 4 วินาที



รูปที่ 7.36 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางเมื่อแขนกลเคลื่อนที่เป็นแปดเหลี่ยม ภายในเวลา 8 วินาที

จากรูปที่ 7.34-7.36 แสดงค่าผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางเมื่อแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้น ไปยังจุดปลาย ในลักษณะที่ทางเดินที่ปลายแขนกลเป็นรูปสี่เหลี่ยม เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่กำหนดด้วยค่า  $T = 2, 4$  และ 8 วินาที ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าความผิดพลาดสูงสุดจากเส้นทางจะมีค่าประมาณ 16.0 มิลลิเมตร

## บทที่ 8

### สรุปผลการวิจัย

#### 8.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบแขนกลที่มีโครงสร้างแบบขนานคือ มีโครงสร้างเป็นแบบปิดโดยรูปแบบของโครงสร้างนั้นเรียกว่า “โครงสร้างแบบสจ๊วต” ในการออกแบบนั้นจะคำนึงถึงการกระจายความหน่วงโดยการคำนวณหา Inertia Ellipsoid จากโครงสร้างที่มีรูปร่างต่างกัน 3 แบบ แล้วเลือกแบบที่เหมาะสม

จากการทดสอบโครงสร้างที่สร้างขึ้นนี้ ได้ทำการทดสอบ โดยใช้จุดกึ่งกลางของส่วนที่เคลื่อนที่ (Moving frame) เป็นตำแหน่งที่พิจารณา โดยกำหนดการเคลื่อนที่ของตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งต่างๆ 4 ตำแหน่งแล้วบันทึกค่าความยาวของตัวขับแต่ละตัว นำค่าที่ได้นี้มาคำนวณโดย Forward Kinematics จะได้ค่าตำแหน่ง (position) และการเรียงตัว (Orientation) ในช่วงเวลาของการเคลื่อนที่ ผลการคำนวณคือส่วนที่เคลื่อนที่ที่สามารถเคลื่อนที่แบบเลื่อนตัวด้วยความเร็วสูงสุดเท่ากับ 1.0 เมตรต่อวินาที และการเคลื่อนที่แบบหมุนด้วยความเร็วสูงสุดเท่ากับ 20 องศาต่อวินาทีได้ โดยมีความผิดพลาดของระยะการเคลื่อนที่ไม่เกิน 3.86 มิลลิเมตร ในระยะการเคลื่อนที่ 100 มิลลิเมตร และความผิดพลาดเชิงมุมสูงสุดไม่เกิน 1 องศา การทดสอบนี้เป็นการทดสอบที่มีความเร็วค่อนข้างสูง และค่าความผิดพลาดดังกล่าวนี้เป็นค่าความผิดพลาดรวม ซึ่งส่วนหนึ่งก็ขึ้นอยู่กับการประมาณค่าในส่วนของ Forward Kinematics โดยการใช้การประมาณค่าของนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method) ซึ่งในวิจัยต่อไปจะปรับปรุงส่วนของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ข้อตัวขับเคลื่อนให้ดียิ่งขึ้นและการปรับปรุงการหา Forward Kinematics

ในส่วนที่ 2 ที่เป็นการควบคุมการเคลื่อนที่ของจุดกึ่งกลางให้เคลื่อนที่ตามลักษณะที่กำหนดนั้น แขนกลสามารถเคลื่อนที่ตามลักษณะที่กำหนดได้ แต่จะมีค่าผิดพลาดมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วของการเคลื่อนที่ ซึ่งเป็นผลมาจากความเฉื่อยของตัวขับทั้ง 6 ชุด และการประมาณค่าในส่วนของ Forward Kinematics เช่นเดียวกัน

#### 8.2 ข้อเสนอแนะ

- การรับค่าจากตัวตรวจรู้ที่อยู่ภายในของมอเตอร์แบบเชิงเส้นนั้น ปัจจุบันใช้การรับส่งข้อมูลของตำแหน่งมอเตอร์ทั้ง 6 ชุดโดยการส่งคำสั่งจากคอมพิวเตอร์ผ่านสายเชื่อมต่อแบบ RS232 ไปยังชุดควบคุม เมื่อชุดควบคุมได้รับคำสั่งก็จะส่งค่าตำแหน่งของตัวขับกลับไปยังคอมพิวเตอร์ ทำเช่นนี้จนครบทั้ง 6 ตำแหน่ง จากวิธีดังกล่าวจะพบว่ามีปัญหาที่เกิดขึ้นคือค่าของตำแหน่งของตัวขับทั้ง 6 ชุดนี้จะคลาดเคลื่อนจากค่าจริง เนื่องจากการสูญเสียเวลาจากการส่งข้อมูลไปยังชุดควบคุมและรับค่าตำแหน่งจากชุดควบคุมกลับมายังคอมพิวเตอร์ ในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้สามารถทำได้โดยติดตั้งชุดวงจรนับจำนวน 6 ชุดให้กับมอเตอร์

แต่ละตัว และใช้การ์ดเชื่อมต่อชุดของวงจรนี้เข้ากับคอมพิวเตอร์ ก็จะสามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ได้

- การควบคุมมอเตอร์ทั้ง 6 ชุดนี้ใช้ตัวควบคุมแบบ PID ซึ่งเป็นตัวควบคุมที่อยู่ภายในของชุดควบคุม Linmot 400AT ในการเปลี่ยนรูปแบบของการควบคุมเป็นแบบอื่นนั้นไม่สามารถทำได้โดยตรง ดังนั้นถ้าหากต้องการจะเปลี่ยนรูปแบบของการควบคุมนั้นจะมีการดัดแปลงชุดควบคุมนี้หรือเปลี่ยนชุดควบคุมใหม่ทั้งหมด
- การทดลองที่ได้ผลการทดลองมานี้เป็นการบินที่ค่าตำแหน่งความยาวของมอเตอร์ทั้ง 6 ชุดที่เวลาต่างๆ ในช่วงของการเคลื่อนที่ แล้วนำค่าตำแหน่งเหล่านี้มาแก้สมการเพื่อเปลี่ยนเป็นค่าในพิกัดแบบคาร์ทีเซียนโดยใช้สมการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้า (Forward kinematics) เพื่อหาคำตอบ ในการแก้ปัญหานั้นจะใช้วิธีการเชิงตัวเลขโดยใช้ระเบียบวิธีของ Newton-Raphson method พบว่าเมื่อใช้วิธีการดังกล่าวนี้ไม่สามารถหาคำตอบได้อย่างถูกต้องเนื่องจากเป็นวิธีการประมาณค่า และเมื่อปรับค่าความผิดพลาดในโปรแกรมให้มีค่าน้อยลง การประมาณค่าแบบนี้จะไม่สามารถเข้าสู่คำตอบที่ต้องการได้ ดังนั้นในส่วนการคำนวณสมการเคลื่อนที่แบบไปข้างหน้าจึงควรจะมีการพัฒนาต่อไปเพื่อให้ได้คำตอบตามที่ต้องการ
- โครงสร้างของแขนกลในส่วนที่เป็นข้อต่อแบบทรงกลม (Spherical joint) นั้นเป็นโครงสร้างที่ยังไม่แข็งแรง เนื่องจากมีระยะ clearance ของข้อต่อ ดังนั้นควรมีการออกแบบโครงสร้างในส่วนนี้ใหม่

## รายการอ้างอิง

- [1] Walter F. Smith, Jackson and Tull, Charles C. Nguyen. Mechanical Analysis And Design Of A Six-Degree-Of-Freedom Robotic Wrist For Space Assembly. IEEE Journal of Robotics and Automotio,1991:177-181.
- [2] Charles C. Nguyen, Zhen-Lei Zhou, Sami S. Antrazi, Charles E. Campbell. Efficient Computation of Forward Kinematics and Jacobian Matrix of A Stewart Platform - Based Manipulator. IEEE Journal of Robotics and Automotion,1991:869-874.
- [3] Oren Masory, Jian Wang, and Hanqi Zhuang. On the Accuracy of A Stewart Platform-Part II Kinematics Calibration and Compensation. IEEE Journal of Robotics and Automotion,1993:725-731.
- [4] S.E. Salcudean, P.A. Drexel. A Six Degree-of-Freedom, Hydraulic, One Person Motion Simulator. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1994 2437-2443.
- [5] Lorenzo Sciavicco, Bruno Siciliano. Modeling and Control of Robot Manipulators. 1<sup>st</sup> edition. McGraw-Hill,1996
- [6] Kazuhiro Kosuge, Minoru Okuda. Input/Output Force Analysis of Stewart Platform Type of Manipulators. Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, 1993.
- [7] Joseph P. Conti, Charles M. Clinton. Workspace variation of a Hexapod Machine Tool. Technical Research Report. University of Maryland, 1997



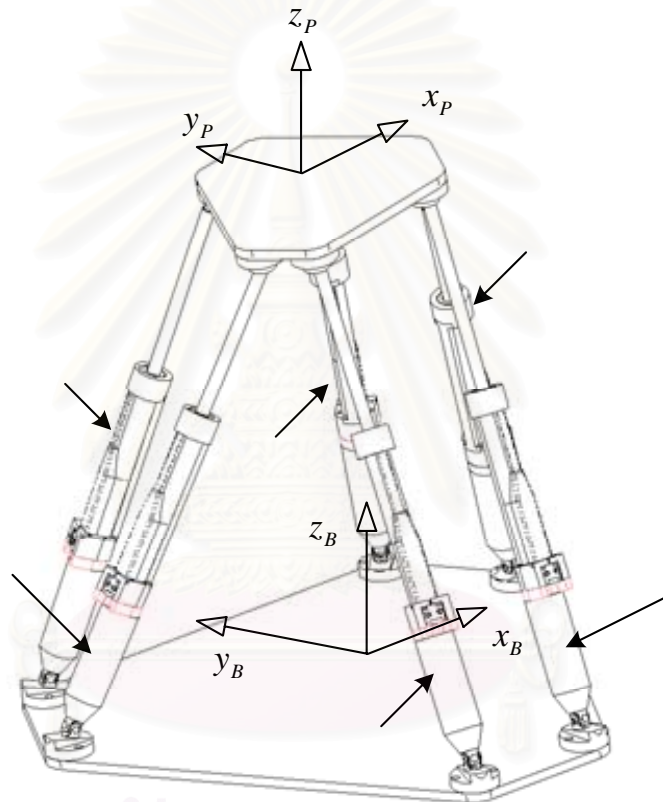
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ผนวก ก.

### ข้อมูลของแขนกลสจิวตจู่ฟ้า

แขนกลสจิวตจู่ฟ้าที่สร้างขึ้นมานี้ มีลักษณะโครงสร้างเป็นหุ่นยนต์แบบขนาน ซึ่งประกอบด้วย ส่วนฐานที่อยู่กับที่ และส่วนที่เคลื่อนที่ โดยมีตัวขับแบบเชิงเส้น 6 ชุดเชื่อมต่อกับส่วนฐานและส่วนที่เคลื่อนที่โดยตำแหน่งของตัวขับทั้ง 6 ชุดนี้แสดงดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 โครงสร้างของแขนกลสจิวตจู่ฟ้า

### ข้อมูลของแขนกล

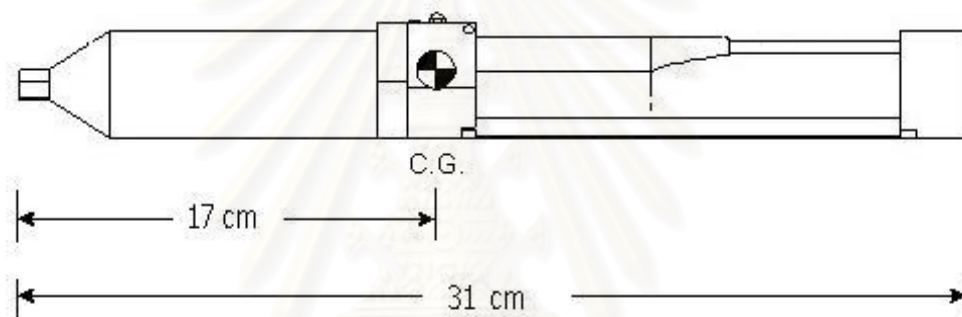
ส่วนฐานและส่วนที่เคลื่อนที่

- ส่วนฐานมีรูปทรงเป็นรูป 6 เหลี่ยม โดยมีรัศมีของส่วนฐานเท่ากับ 30 เซนติเมตร
- ส่วนเคลื่อนที่มีรูปทรงเป็นรูป 6 เหลี่ยม โดยมีรัศมีเท่ากับ 10 เซนติเมตร
- ส่วนเคลื่อนที่มีมวลเท่ากับ 0.38 กิโลกรัม

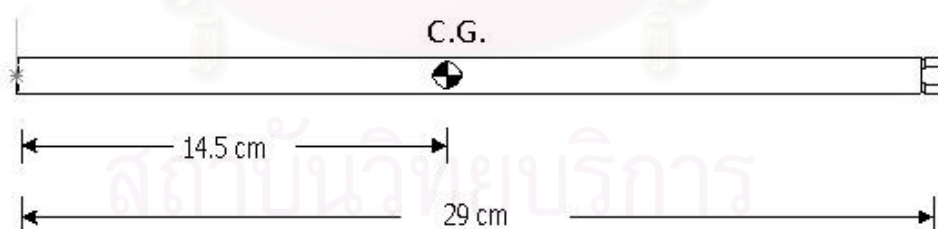
### ตัวขับแบบเชิงเส้น

แขนกลสจิวตจู่ฟ้า มีตัวขับแบบเชิงเส้นทั้งหมด 6 ชุดเป็นมอเตอร์รุ่น P01-23X80 ซึ่งมีความละเอียด 19.53 ไมครอน มอเตอร์นี้ประกอบด้วยส่วนที่อยู่นิ่ง (Stator) และส่วนที่เคลื่อนที่ (Slider) โครงสร้างของตัวขับมีลักษณะเช่นเดียวกับสตีปมอเตอร์คือเป็นมอเตอร์แบบ 2 เฟส รายละเอียดของตัวขับนี้แสดงดังรูปที่ ก.2-ก.3

มวลของส่วนที่อยู่นิ่งของมอเตอร์เท่ากับ	0.7	กิโลกรัม
มวลของส่วนที่เคลื่อนที่ของมอเตอร์เท่ากับ	0.22	กิโลกรัม



รูปที่ ก.2 รายละเอียดของส่วน Stator มอเตอร์แบบเชิงเส้น



รูปที่ ก.3 รายละเอียดของส่วน Slider มอเตอร์แบบเชิงเส้น



## ผนวก ข.

### ตัวอย่างการคำนวณหาทรงรีแรงของการเคลื่อนที่

ในการคำนวณหาทรงรีแรงของการเคลื่อนที่ ณ จุดใดๆ ภายในพื้นที่การทำงานนั้น ในขั้นต้นจะต้องกำหนดตำแหน่งและการเรียงตัวของจุดปลายของแกนกลคือค่า  $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$  ที่เราต้องการจะสร้างทรงรีแรงของการเคลื่อนที่ก่อน เมื่อกำหนดตำแหน่งของจุดปลายของแกนกลแล้วก็จะคำนวณหาเมตริกซ์ของจาโคเบียน ที่ตำแหน่งนั้นจากสมการ

$$\frac{\partial f_i}{\partial x} = \frac{\partial f_i}{\partial \bar{x}_i} = 2(\bar{x}_i + u_i)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial y} = \frac{\partial f_i}{\partial \bar{y}_i} = 2(\bar{y}_i + v_i)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial z} = \frac{\partial f_i}{\partial \bar{z}_i} = 2(\bar{z}_i + w_i)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial \alpha} = 2(-\bar{x}_i v_i + \bar{y}_i u_i)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial \beta} = 2[(-\bar{x}_i \cos \alpha + \bar{y}_i \sin \alpha)w_i - (p_{ix} \cos \beta + p_{iy} \sin \beta \sin \gamma)\bar{z}_i]$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial \gamma} = 2p_{iy}(\bar{x}_i r_{13} + \bar{y}_i r_{23} + \bar{z}_i r_{33})$$

เมื่อ  $i = 1, 2, \dots, 6$

เมื่อคำนวณหาเมตริกซ์ของจาโคเบียนแล้ว ต่อไปจะคำนวณหาเมตริกซ์ของจาโคเบียนปรับปรุงผกผัน (Invert Modified Jacobian matrix) จากสมการ

$$J_{mod}(m, n) = \frac{1}{2L_n} J(m, n) \quad \text{เมื่อ } n = 1, 2, \dots, 6$$

ขั้นตอนต่อไปจะทำการแยกคำนวณระหว่างแรงและโมเมนต์ที่มากระทำต่อปลายแกนกลโดยคำนวณจากสมการ

$$J_{mod} = \begin{bmatrix} A_T \\ A_R \end{bmatrix}$$

เมื่อ  $A_T$  และ  $A_R$  เป็นเมตริกซ์ขนาด  $3 \times 6$

คำนวณหาเมตริกซ์  $Q$  จากสมการ

$$Q = A_T' A_T$$

จะได้เมตริกซ์  $Q$  ที่มีขนาด  $3 \times 3$

กำหนดให้  $T$  แทนเวกเตอร์เจาะจง (Eigenvector) และ  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  แทนค่าเจาะจง (Eigenvalue) ของเมตริกซ์  $Q$  และคำนวณหาค่า  $A_{T1}$  และ  $A_{T2}$  จากสมการ

$$A_{T1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{\lambda_1}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{\lambda_2}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{\lambda_3}} \end{bmatrix}$$

$$A_{T2} = A_T T A_{T1}$$

คำนวณหาค่า  $J_F$  จากสมการ

$$J_F = J'_{mod}$$

โดยที่ค่า  $J_F$  นี้ประกอบด้วยแรงและโมเมนต์ เมื่อต้องการคำนวณแรงที่กระทำต่อปลายแขนกลแยกออกจากโมเมนต์ จะต้องคำนวณค่าเมตริกซ์ที่แยกออกจากกันได้ระหว่างแรงและโมเมนต์ คือ

$$J_F = \begin{bmatrix} J_{F,T} \\ J_{F,R} \end{bmatrix}$$

เมื่อ  $J_{F,T}$  และ  $J_{F,R}$  เป็นเมตริกซ์ขนาด  $3 \times 6$

คำนวณหาค่าเมตริกซ์  $J_T$  และเมตริกซ์  $F$  จากสมการ

$$J_T = J_{F,T} \times A_{T2}$$

$$F = J_T \times J_T'$$

จากเมตริกซ์  $F$  นี้สามารถนำไปสร้างเป็นทรงรีได้โดยค่าของแกนหลักทั้ง 3 นั้นมีขนาดเท่ากับค่าเจาะจง (Eigenvalue) และมีทิศทางของแกนหลักไปตามทิศทางของค่าเวกเตอร์เจาะจง (Eigenvector) ของเมตริกซ์

ตัวอย่างการคำนวณเช่นต้องการสร้างทรงรีแรงของการเคลื่อนที่ ที่ตำแหน่ง  $x = 0$ ,  $y = 0$ ,  $z = 410$  mm,  $\text{roll} = 0^\circ$ ,  $\text{pitch} = 0^\circ$ ,  $\text{yaw} = 0^\circ$

คำนวณค่าเมตริกซ์ของจาโคเบียนได้เท่ากับ

$$J = \begin{bmatrix} -373 & -231 & 820 & 30000 & -21223 & 79206 \\ 373 & -231 & 820 & -30000 & 21223 & 79206 \\ 386 & -207 & 820 & 30000 & 79206 & -21223 \\ 14 & 438 & 820 & -30000 & 57983 & -57983 \\ -14 & 438 & 820 & 30000 & -57983 & -57983 \\ -386 & -207 & 820 & -30000 & -79206 & -21223 \end{bmatrix}$$

ค่า  $L$  ที่ตำแหน่ง  $x = 0$ ,  $y = 0$ ,  $z = 410$  mm,  $\text{roll} = 0^\circ$ ,  $\text{pitch} = 0^\circ$ ,  $\text{yaw} = 0^\circ$  คำนวณจากสมการเคลื่อนที่แบบผกผัน จะได้

$$L = [464.91 \quad 464.91 \quad 464.91 \quad 464.91 \quad 464.91 \quad 464.91]$$

คำนวณค่า  $J_{mod}$  จะได้

$$J_{mod} = \begin{bmatrix} -0.4 & -0.249 & 0.882 & 32.265 & -22.825 & 85.185 \\ 0.4 & -0.249 & 0.882 & -32.265 & 22.825 & 85.185 \\ 0.416 & -0.223 & 0.882 & 32.265 & 85.185 & -22.825 \\ 0.015 & 0.471 & 0.882 & -32.265 & 62.36 & -62.36 \\ -0.015 & 0.471 & 0.882 & 32.265 & -62.36 & -62.36 \\ -0.416 & -0.223 & 0.882 & -32.265 & -85.185 & -22.825 \end{bmatrix}$$

และจะได้ค่าเมตริกซ์  $A_T$  เท่ากับ

$$A_T = \begin{bmatrix} -0.4 & -0.249 & 0.882 & 32.265 & -22.825 & 85.185 \\ 0.4 & -0.249 & 0.882 & -32.265 & 22.825 & 85.185 \\ 0.416 & -0.223 & 0.882 & 32.265 & 85.185 & -22.825 \end{bmatrix}$$

จากค่า  $A_T$  คำนวณหาค่าเมตริกซ์  $Q, T, A_{T1}, A_{T2}$  ได้ดังนี้

$$Q = \begin{bmatrix} 1.1031 & -0.8886 & -0.4979 \\ -0.8886 & 1.1031 & 0.0357 \\ -0.4979 & 0.0357 & 1.1031 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} -0.7122 & 0.0183 & -0.7017 \\ -0.6188 & -0.4883 & 0.6154 \\ -0.3314 & 0.8725 & 0.3591 \end{bmatrix}$$

$$A_{T1} = \begin{bmatrix} 3.172 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9655 & 0 \\ 0 & 0 & 10.684 \end{bmatrix}$$

$$A_{T2} = \begin{bmatrix} 0.0147 & -0.2628 & 0.9647 \\ -0.0801 & -0.962 & -0.2609 \\ -0.9965 & 0.0734 & 0.0353 \\ -0.007 & 0.0069 & -0.0034 \\ -0.0036 & 0.0036 & -0.002 \\ -0.0147 & -0.0062 & -0.0015 \end{bmatrix}$$

จากค่าเมตริกซ์ที่คำนวณมาได้นี้สามารถคำนวณค่าเมตริกซ์  $F$  ได้เท่ากับ

$$F = \begin{bmatrix} 0.4863 & -0.0902 & 0.3702 \\ -0.0902 & 0.1786 & -0.6439 \\ 0.3702 & -0.6439 & 2.3596 \end{bmatrix}$$

ซึ่งมีค่าเจาะจงและค่าเวกเตอร์เจาะจงคือ

$$\text{ค่าเจาะจง} = \begin{bmatrix} 0.0007 & 0 & 0 \\ 0 & 0.418 & 0 \\ 0 & 0 & 2.6039 \end{bmatrix}$$

$$\text{ค่าเวกเตอร์เจาะจง} = \begin{bmatrix} 0.0246 & -0.9839 & 0.177 \\ -0.9634 & -0.0706 & -0.2585 \\ -0.2669 & 0.1642 & 0.9496 \end{bmatrix}$$

และสามารถนำไปเขียนเป็นรูปทรงรีได้โดยจุดศูนย์กลางทรงรีจะอยู่ที่ตำแหน่ง  $x = 0, y = 0, z = 410$

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

เรืออากาศเอก ประสาทพร วงษ์คำซ่าง เกิดเมื่อวันที่ 16 พฤษภาคม 2516 ภูมิลำเนาอยู่ที่ จังหวัดมหาสารคาม สำเร็จการศึกษาจากโรงเรียนมัธยมสาธิตวัดพระศรีมหาธาตุ สถาบันราชภัฏพระนคร สำเร็จการศึกษาจากโรงเรียนเตรียมทหาร เป็นนักเรียนเตรียมทหารรุ่นที่ 33 หลังจากนั้นได้เข้ารับการศึกษาต่อในโรงเรียนนายเรืออากาศ เป็นนักเรียนนายเรืออากาศรุ่นที่ 40 และได้สำเร็จปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกลในปีการศึกษา 2539 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปี พ.ศ.2514



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย