

การออกแบบและพัฒนาวัสดุเทอร์อาร์มสำหรับระบบสะท้อนแสง



นายทวี งามวิไลกร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

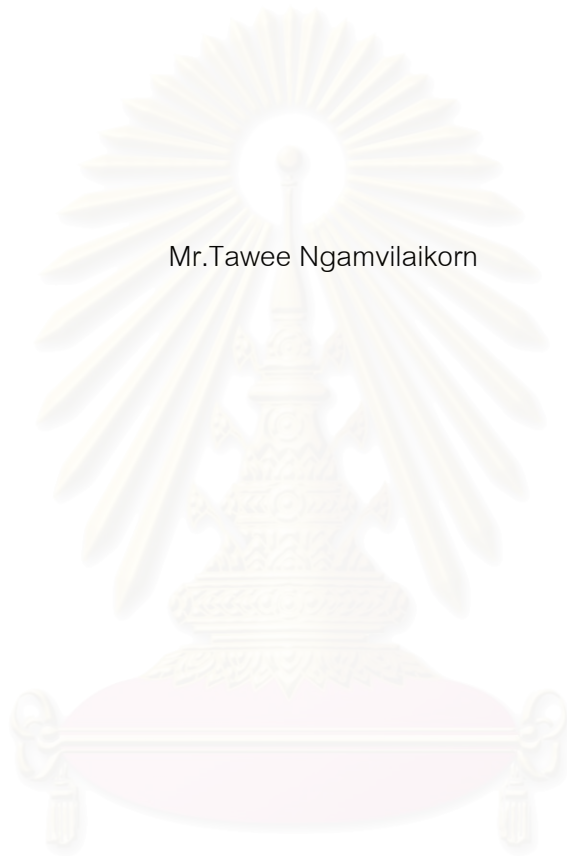
ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1162-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Design and Development of a Master arm for Force-Reflecting system

Mr.Tawee Ngamvilaikorn



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
For the degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1162-8

นายทวี งามวิไลกร : การออกแบบและพัฒนามาสเตอร์อาร์มสำหรับระบบสะท้อนแรง.

(Design and Development of a Master arm for Force-Reflecting system)

อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 86 หน้า. ISBN 974-03-1162-8.

วิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงการออกแบบและพัฒนาระบบแขนกลที่มีการเคลื่อนในลักษณะแบบนำและตามโดยมีองศาอิสระของการเคลื่อนที่เท่ากับหก โดยแขนกลนำและแขนกลตามไม่จำเป็นต้องมีรูปร่างเหมือนกัน แขนกลที่ทำงานในลักษณะตามหรือ Slave คือแขนกลจุฬา 3 ที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้มีความเร็วในการเคลื่อนที่สูง และโครงสร้างของแกนที่สองและสามมีลักษณะเป็นแบบ Five-bar linkage ส่วนแขนกลที่ทำหน้าที่เป็นแขนกลนำหรือ Master นั้นพัฒนาขึ้นโดยใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบมู่เล่และเคเบิลหรือ Tendon-Pulley train เป็นหลัก เพื่อให้แขนกลเคลื่อนที่นำมีค่าความเฉื่อยต่ำ มีแรงเสียดทานน้อย และมีค่าแบคแลชต่ำหรือไม่มีเลย

การคำนวณหาค่าสั่งที่จะสั่งตัวแขนกลตามนั้นทำได้โดยการหาตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกลนำ จากสมการ Forward Kinematics และจากตำแหน่งดังกล่าวก็นำมาหาตำแหน่งที่จะสั่งการเคลื่อนที่ของแขนกลตามโดยใช้สมการ Inverse Kinematics ของแขนกลนำและแขนกลตาม ตำแหน่งปลายของแขนกลตามสามารถหาได้จากสมการ Forward Kinematics ของแขนกลตาม ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลตามคือการควบคุมแบบพีไอดี

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแขนกลนำหรือ Master นั้นสามารถบังคับให้แขนกลตามเคลื่อนที่ตามได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยค่าความผิดพลาดทั้งตำแหน่งและทิศทางนั้นขึ้นอยู่กับค่า G_p ที่ใช้เป็นตัวเกณฑ์ขยายนัยความผิดพลาดของแขนกลนำและแขนกลตามที่ใช้ในการหาเส้นทางเดินของแขนกลตาม

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2544 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4170319021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

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

TAWEE NGAMVILAIKORN : DESIGN AND DEVELOPMENT OF A MASTER ARM FOR FORCE-REFLECTING SYSTEM.

THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D, 86 pp.

ISBN 974-03-1162-8.

This paper describes the design and development of a 6 Degree of Freedom Master-Slave Manipulator Arm. The configuration of the master arm and the slave arm can be differenced. The Chula III manipulator developed by our laboratory is used as the slave arm. The Chula III is a high-speed manipulator arm with Five-bar linkage for the 2nd and 3rd links. We develop a 6 DOF master arm which consists of a Tendon-Pulley train system. The benefit of the Tendon-Pulley train are low inertia, low friction and almost zero backlash.

The position of the master arm evaluated from the forward kinematics is used for calculating, by using the inverse kinematics of the slave, the reference commands for commanding the slave arm. And the positions of the end-tip position of the slave arm can be evaluated from the forward kinematics. The PID Control is used for controlling the system.

The experimental results shown that the operator, by operating the master arm, can control the slave arm very effective. The accuracy of positions and orientations will depends on the G_p , used for the path generation, which is the gain for amplifying the error signals of the master and slave.

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

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

Academic year2001..... Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้คอยให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆที่มีประโยชน์ในการทำวิจัยครั้งนี้ พร้อมทั้งคอยสนับสนุนทางด้านอุปกรณ์และสถานที่ในการทำวิจัยมาด้วยดีโดยตลอด จนงานสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่ได้ให้ทุนอุดหนุนการวิจัย และขอใจเฟื้อนๆที่สนับสนุนประนีญญาโทด้วยกันที่ได้ให้ข้อคิดเห็นและกำลังใจตลอดมา

ทำยนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญ	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 การดำเนินงานของวิทยานิพนธ์	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแขนกลนำ	3
2.1 ความรู้เบื้องต้นของแขนกลนำ	3
2.2 งานวิจัยแขนกลนำที่ผ่านมา	6
2.2.1 แขนกลนำ Generalized Master Controller	6
2.2.2 แขนกลนำ JPL Hand Controller	7
2.2.3 แขนกลนำของ KAIST MASTER 1	8
2.3 ระบบส่งผ่านกำลัง	8
2.3.1 การเปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบหมุน (Rotary-to-Rotary Motion Conversion)	9
2.3.2 การเปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบหมุนเป็นแบบเชิงเส้น (Rotary-to-Linear Motion Conversion)	13
2.3.3 ระบบส่งผ่านกำลังแบบ tendon และ มู่เต้ (Tendon-Pulley train)	17

3. การออกแบบแขนกลนำ	19
3.1 การออกแบบระบบมู่เล่และสายพาน	19
3.2 การออกแบบกลไกของแขนกลนำ	25
3.3 รายละเอียดของแขนกลนำ	27
4. ข้อมูลของแขนกลตาม	32
4.1 ปรับปรุงข้อมือของแขนกลจุฬา 3	32
4.2 อุปกรณ์จับยึด	34
4.3 คินแมติกส์ของแขนกลจุฬา 3	36
4.3.1 Forward kinematics	36
4.3.2 Inverse kinematics	36
4.4 Workspace ของแขนกลจุฬา 3	38
5. ข้อมูลของแขนกลนำ	39
5.1 รูปร่าง การตั้งแกน	39
5.2 จลศาสตร์ของแขนกลนำ	40
5.2.1 Forward kinematics	40
5.2.2 Inverse-kinematic	41
5.2.3 Jacobian	43
5.3 Workspace ของแขนกลนำ	45
6. การควบคุม	46
6.1 เส้นทางเดินของแขนกลตาม	46
6.1.1 การคำนวณหาตำแหน่งที่ต้องการของแขนกลตาม	47
6.1.2 การคำนวณทิศทางที่ต้องการของแขนกลตาม	49
6.2 การควบคุมแขนกลนำให้มีสภาพง่ายแก่การบังคับ	51
6.2.1 การลดผลของน้ำหนักที่มีต่อผู้ควบคุมของแขนกลนำ	52
6.2.2 การลดผลของแรงเสียดทานที่มีต่อผู้ควบคุมของแขนกลนำ	53
6.2.3 การหน่วงการเคลื่อนที่ของแขนกลนำ	53
6.2.4 การกำหนดพื้นที่การทำงานของแขนกลนำ	54
6.3 การควบคุมแขนกล	56
7. การทดสอบแขนกลเคลื่อนที่นำและตาม	57
7.1 วิธีการทดสอบ	57

สารบัญ (ต่อ)

7.2 ผลการทดสอบการบังคับให้แกนกลตามเคลื่อนตามแกนกลนำอย่างอิสระ	58
7.2.1 การทดสอบที่ค่า $G_p = 0.5$	58
7.2.2 การทดสอบที่ค่า G_p เท่ากับ 1.0	60
7.2.3 การทดสอบในกรณีที่มี G_p เท่ากับ 2.0	63
7.2.4 การทดสอบในกรณีที่มี G_p เท่ากับ 3.0	67
7.2.5 บังคับให้แกนกลตามยกวัตถุที่มีน้ำหนัก 2.0 กิโลกรัม โดยค่า G_p เท่ากับ 3.0	69
7.3 การบังคับแกนกลตามให้เคลื่อนตามแกนกลนำซึ่งมีการกำหนดพื้นที่การทำงานของแกนกลนำ	73
7.3.1 การทดสอบโดยกำหนดพื้นที่การทำงานอยู่ใน ทรงกระบอกบนเฟรมศูนย์ของแกนกลตามที่มี จุดศูนย์กลางอยู่ที่ $Y=-10$ และ $Z=155$ รัศมี ขนาด 20 มิลลิเมตรแกนของทรงกระบอกขนาน กับแกน X	73
7.3.2 การทดสอบโดยกำหนดพื้นที่การทำงานอยู่บน ระนาบ $Z = 160$ มิลลิเมตรและอยู่ในวงกลมรัศมี ขนาด 80 มิลลิเมตรจุดศูนย์กลางอยู่ที่ $X = 370$ $Y = -20$ มิลลิเมตรบนเฟรมศูนย์ของแกนกลตาม	76
8. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	79
8.1 สรุปผลการวิจัย	79
8.2 ข้อเสนอแนะ	80
รายการอ้างอิง	81
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก อุปกรณ์ของแกนกลนำ	83
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	86

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
5.1 พารามิเตอร์ตามวิธีของ Denavit-Hartenberg	40
6.1 ค่ามุมกึ่งกลางของแขนกลนำและแขนกลตาม	47
8.1 การทดสอบให้แขนกลตามเคลื่อนตามแขนกลนำอย่างอิสระทั้งตำแหน่งและทิศทาง	79
8.2 การทดสอบให้ให้แขนกลตามเคลื่อนที่ไปหียิบยกวัตถุหนัก 2.0 กิโลกรัม	79



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 แขนกลที่นำ Generalized Master Controller.....	6
2.2 แขนกลนำ JPL Hand Controller.....	7
2.3 แขนกลนำ KAIST MASTER 1	8
2.4 แสดงรูปด้านหน้าของขบวนเฟือง.....	10
2.5. ภาพแสดงรายละเอียดของเฟืองแบบฮาร์โมนิก	11
2.6 ภาพแสดงการทำงานของเฟืองแบบฮาร์โมนิก.....	11
2.7 ระบบส่งผ่านกำลังแบบมูเล่และสายพาน.....	12
2.8 ระบบส่งผ่านกำลังแบบมูเล่และสายพานที่มีการป้องกันการลื่นไถล.....	12
2.9 ภาพแสดงระบบส่งกำลังแบบ ระบบส่งผ่านกำลังแบบเกลียว (Lead screws)	14
2.10 ภาพแสดงระบบส่งผ่านกำลังแบบ Rack-and-pinion	15
2.11 ภาพแสดงระบบส่งผ่านกำลังแบบ Belt and pulley driving a linear load	15
2.12 ภาพแสดงระบบส่งผ่านกำลังแบบ Slider cranks.....	16
2.13 ภาพแสดงระบบส่งผ่านกำลังแบบ Cams.....	16
2.14 ภาพแสดงระบบส่งผ่านกำลังแบบ Closed-loop tendon drives	17
2.15 ภาพแสดงระบบส่งผ่านกำลังแบบ Open-ended tendon drives	18
3.1 ระบบสายพานและมูเล่	19
3.2 แสดงระบบสายพานและมูเล่โดยที่ระนาบของมูเล่ทั้งสองไม่ได้อยู่บนระนาบเดียวกัน	20
3.3 แสดงมูเล่ขับและมูเล่ตามที่มีระยะห่างไม่คงที่ มุมระหว่างระนาบของมูเล่ทั้งสองมี ค่าไม่คงที่.....	20
3.4 แสดงมูเล่ขับและมูเล่ตามที่มีระยะห่างไม่คงที่ ระนาบของมูเล่ขับและมูเล่ตามขนานกัน	21
3.5 แสดงมูเล่ขับและมูเล่ตามที่มีระยะห่างคงที่ ระนาบของมูเล่ขับและมูเล่ตามไม่ขนานกัน	21
3.6 แสดงการจัดแนวแนวของสายพานเพื่อกันสายพานหลุดออกจากมูเล่.....	22
3.7 แขนกลนำที่ได้ออกแบบไว้ในขั้นต้น	22
3.8 แสดงหลักการของระบบส่งผ่านกำลังที่สามารถส่งผ่านกำลังขณะที่ระยะห่างระหว่าง มูเล่ขับและมูเล่ตามมีค่าไม่คงที่และระนาบของมูเล่ทั้งสองไม่ขนานกัน	22

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
3.9 แสดงแบบจำลองการจัดแนวของมู่เล่และสายพานในตำแหน่งที่ข้อยึดที่ยังไม่มีการบิดตัว.....	24
3.10 แสดงแบบจำลองการจัดแนวของมู่เล่และสายพานในตำแหน่งที่ข้อยึดถูกบิดเป็นมุมต่างๆ.....	24
3.11 แขนกลนำที่ได้ออกแบบไว้ในขั้นต้น.....	24
3.12 แบบจำลองข้อต่อเลื่อนที่จะนำมาใช้กับแขนกลนำ.....	27
3.13 แสดงส่วนประกอบและการเรียกชื่อก้านต่อโยงของแขนกลนำ.....	29
3.14 แสดงขนาดของแขนกลนำ.....	30
3.15 แขนกลนำที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว.....	31
3.16 แขนกลนำในส่วนข้อข้อมือ.....	31
4.1 แขนกลจุฬา 3.....	32
4.2 การตั้งแกนหมุนทั้ง 6 แกนและการเรียกชื่อแกนต่างๆของแขนกลจุฬา 3.....	33
4.3 ข้อต่อที่ 4, 5, 6 ที่ได้รับการแก้ไขแล้ว.....	33
4.4 ระบบนิวเมติกที่ใช้ในอุปกรณ์จับยึด.....	34
4.5 Workspace ของแขนกลจุฬา 3.....	38
5.1 การตั้งแกนของแขนกลนำ.....	39
5.2 แสดง Workspace ของแขนกลนำ.....	45
6.1 การหาตำแหน่งที่ต้องการของแขนกลตาม.....	48
6.2 แสดงทิศทางที่ปลายแขนกลนำและตามตำแหน่งเริ่มแรก.....	49
6.3 แสดงเฟรมที่ 7 ของแขนกลตาม.....	51
6.4 แสดงรายละเอียดด้านข้างของแขนกลนำ.....	52
6.5 กราฟแสดงแรงเสียดทานกับความเร็วเชิงมุมที่ข้อต่อของแขนกลนำ.....	53
6.6 แสดงการกำหนดพื้นที่การทำงานของแขนกลนำ.....	54
6.7 แสดงตำแหน่งของคั่นบังคับขณะอยู่ที่ตำแหน่งนอกพื้นที่ทำงาน.....	55
6.8 รูปแบบการควบคุมของแขนกลตาม.....	56
7.1. กราฟแสดงตำแหน่งที่ปลายแขนกลที่ได้จริงตามกับตำแหน่งแขนกลที่ต้องการเมื่อ G_p เท่ากับ 0.5.....	58

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
7.2 กราฟแสดงทิศทางการที่ปลายแขนของแขนกลตามที่ได้จริงเมื่อ G_p เท่ากับ 0.5	59
7.3 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดที่ตำแหน่งปลายแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 0.5	59
7.4 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (roll angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 0.5	59
7.5 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (pitch angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 0.5	60
7.6 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (yaw angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 0.5	60
7.7 กราฟแสดงตำแหน่งที่ปลายแขนกลที่ได้จริงตามกับตำแหน่งแขนกลที่ต้องการเมื่อ G_p เท่ากับ 1.0	61
7.8 กราฟแสดงทิศทางการที่ปลายแขนของแขนกลตามที่ได้จริงเมื่อ G_p เท่ากับ 1.0	62
7.9 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดที่ตำแหน่งปลายแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 1.0	62
7.10 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (roll angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 1.0	62
7.11 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (pitch angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 1.0	63
7.12 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (yaw angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 1.0	63
7.13 กราฟแสดงตำแหน่งที่ปลายแขนกลที่ได้จริงตามกับตำแหน่งแขนกลที่ต้องการเมื่อ G_p เท่ากับ 2.0	64
7.14 กราฟแสดงทิศทางการที่ปลายแขนของแขนกลตามที่ได้จริงเมื่อ G_p เท่ากับ 2.0	65
7.15 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดที่ตำแหน่งปลายแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 2.0	65
7.16 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (roll angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 2.0	65
7.17 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (pitch angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 2.0	66

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
7.18 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (yaw angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 2.0	66
7.19 กราฟแสดงตำแหน่งที่ปลายแขนกลที่ได้จริงตามกับตำแหน่งแขนกลที่ต้องการเมื่อ G_p เท่ากับ 3.0	67
7.20 กราฟแสดงทิศทางที่ปลายแขนของแขนกลตามที่ได้จริงเมื่อ G_p เท่ากับ 3.0	68
7.21 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดที่ตำแหน่งปลายแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 3.0	68
7.22 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (roll angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 3.0	68
7.23 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (pitch angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 3.0	69
7.24 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (yaw angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 3.0	69
7.25 กราฟแสดงตำแหน่งที่ปลายแขนกลที่ได้จริงตามกับตำแหน่งแขนกลที่ต้องการเมื่อ G_p เท่ากับ 3.0 และมีน้ำหนัก 2 กิโลกรัมอยู่ที่ปลายแขนกลตาม	70
7.26 กราฟแสดงทิศทางที่ปลายแขนของแขนกลตามที่ได้จริงเมื่อ G_p เท่ากับ 3.0 และมีน้ำหนัก 2 กิโลกรัมอยู่ที่ปลายแขนกลตาม	71
7.27 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดที่ตำแหน่งปลายแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 3.0 และมีน้ำหนัก 2 กิโลกรัมอยู่ที่ปลายแขนกลตาม	71
7.28 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (roll angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 3.0 และมีน้ำหนัก 2 กิโลกรัมอยู่ที่ปลายแขนกลตาม	72
7.29 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (pitch angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 3.0 และมีน้ำหนัก 2 กิโลกรัมอยู่ที่ปลายแขนกลตาม	72
7.29 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (yaw angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 3.0 และมีน้ำหนัก 2 กิโลกรัมอยู่ที่ปลายแขนกลตาม	72
7.31 กราฟแสดงตำแหน่งของแขนกลนำที่ได้จริงกับขอบเขตพื้นที่การทำงานทรงกระบอกรัศมี 20 มิลลิเมตร	73
7.32 แสดงระยะห่างระหว่างคั่นบังคับของแขนกลนำกับขอบเขตพื้นที่การทำงาน	74

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
7.33 กราฟแสดงตำแหน่งของแกนกลตามที่ได้จริงกับขอบเขตพื้นที่การทำงานทรง กระบอกรัศมี 20 มิลลิเมตร	74
7.34 กราฟแสดงตำแหน่งที่ปลายแกนกลตามกับตำแหน่งคั่นบังคับของแกนกลนำ	75
7.35 แสดงระยะห่างระหว่างคั่นบังคับของแกนกลตามกับขอบเขตพื้นที่การทำงาน	75
7.36 กราฟแสดงตำแหน่งคั่นบังคับของแกนกลนำ ตำแหน่งที่ปลายแกนกลตามและ ขอบเขตพื้นที่การทำงาน	76
7.37 กราฟแสดงระยะที่คั่นบังคับของแกนกลนำเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตพื้นที่การ ทำงานวงกลมรัศมี 80 มิลลิเมตร	77
7.38 กราฟแสดงระยะที่คั่นบังคับของแกนกลนำเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตพื้นที่การ ทำงานระนาบ $Z=160$ มิลลิเมตร	77
7.39 กราฟแสดงระยะที่ปลายแกนกลตามเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตพื้นที่การทำงาน วงกลมรัศมี 80 มิลลิเมตร	77
7.40 กราฟแสดงระยะที่ปลายแกนกลตามเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตพื้นที่การทำงาน ระนาบ $Z=160$ มิลลิเมตร	78
ก.1 เซอร์โวมอเตอร์กระแสตรงรุ่น U825-002E	83
ก.2 เซอร์โวมอเตอร์กระแสตรงรุ่น E-586	83
ก.3 ชุดขยายกระแสเป็นของ Copley Controls Corp รุ่น 4122P	84
ก.4 วงจรถอดรหัสขนาด 12 บิต	84
ก.5 การ์ดแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาลอก	85
ก.6 การ์ดรับส่งสัญญาณแบบดิจิตอล	85

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์

หุ่นยนต์ประเภทแขนกลนำและแขนกลตาม (Master-Slave Manipulator Arm) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานที่ต้องอาศัยทักษะความชำนาญของมนุษย์ แต่มนุษย์ไม่สามารถเข้าไปปฏิบัติงานนั้นได้โดยตรงทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสภาพแวดล้อมในสถานที่ปฏิบัติงานไม่เหมาะสมหรือเป็นอันตรายต่อมนุษย์ เช่นในการสำรวจใต้ทะเลที่มีความลึกมากๆหรืองานหยิบวัตถุมีพิษ

หุ่นยนต์ประเภทแขนกลนำและแขนกลตาม (Master-Slave Manipulator Arm) ที่ผ่านมานั้น แขนกลนำ (Master arm) และแขนกลตาม (Slave arm) จะมีรูปร่างที่คล้ายกันทำให้แขนกลนำมีขนาดใหญ่ทำให้ผู้ควบคุมออกแรงมากในการบังคับแขนกลนำให้เคลื่อนที่ไป และไม่สามารถนำแขนกลนำไปใช้ควบคุมแขนกลตามที่มีรูปร่างแตกต่างได้ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการออกแบบและพัฒนาแขนกลนำที่มีรูปร่างแตกต่างกันขึ้นเพื่อให้การควบคุมนั้นมีประสิทธิภาพมากขึ้นและทำให้สามารถออกแบบแขนกลนำและแขนกลตามแยกอิสระจากกันได้โดยออกแบบแขนกลนำให้เหมาะสมกับผู้ควบคุมขณะเดียวกันก็สามารถออกแบบแขนกลตามให้เหมาะสมกับสภาพของงานที่จะนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้จึงขอเสนอการออกแบบแขนกลนำแบบ 6 องศาอิสระที่มีลักษณะโครงสร้างของแขนกลนำแตกต่างจากแขนกลตามโดยแขนกลตามที่ใช้คือแขนกลजूฟ้า 3 ที่มีลักษณะโครงสร้างของแขนกลเป็นโครงสร้างขนาน มีจำนวนองศาอิสระเท่ากับ 6

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษา ออกแบบ และสร้างแขนกลนำชนิด 6 องศาอิสระ (6 degree of freedom) เพื่อใช้ในการควบคุมแขนกลजूฟ้า 3 ที่ใช้เป็นแขนกลตาม
2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ถึงการควบคุมตำแหน่งและทิศทางของแขนกลตามให้สามารถเคลื่อนที่ตามแขนกลนำได้
3. สามารถให้แขนกลนำสร้างแรงโต้ตอบกับผู้ควบคุมได้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. แขนกลนำสามารถบังคับให้แขนกลตามเคลื่อนที่ตามได้อย่างถูกต้องทั้งตำแหน่งและทิศทาง
2. ความผิดพลาดทางตำแหน่งที่ข้อมือ (wrist point) ของแขนกลตามเมื่อเทียบกับตำแหน่งที่ข้อมือของแขนกลนำมีค่าไม่เกิน 5 มิลลิเมตร
3. ความผิดพลาดของทิศทางที่ปลายแขนกลตาม (end-effector) เมื่อเทียบกับที่ปลายแขนกลนำมีค่าไม่เกิน 5 องศา
4. แขนกลนำสามารถสร้างแรงโต้ตอบกับผู้ควบคุมได้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบโครงสร้างและหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
3. สร้างและประกอบรวมทั้งปรับปรุงแก้ไข
4. ออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติ
5. ทดสอบ วิเคราะห์ แก้ไข

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ชุดแขนกลนำชนิด 6 องศาอิสระ (6 degree of freedom) ที่มีความคล่องตัวสูง
2. สามารถใช้แขนกลนำนี้เป็นพื้นฐานในการพัฒนาระบบควบคุมขั้นสูงต่อไป

บทที่ 2

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับแขนกลนำ

2.1 ความรู้เบื้องต้นของแขนแขนกลนำ

การพัฒนาหุ่นยนต์ประเภทแขนกลนำและแขนกลตาม (Master-Slave Manipulator Arm) ที่ผ่านมานั้นส่วนมากแล้วแขนกลนำ (Master Arm) จะมีรูปแบบหรือโครงสร้างหลักคล้ายกับแขนกลตามแต่อาจจะมีขนาดต่างกัน ทั้งนี้เพื่อให้การออกแบบควบคุมทั้งแขนกลนำและแขนกลตามทำได้ง่ายและสะดวก โดยการควบคุมแขนกลตามจะใช้การควบคุมแบบข้อต่อถึงข้อต่อ (Joint to Joint Control) คือการนำตำแหน่งมุมที่วัดได้ตรงข้อต่อต่างๆของแขนกลนำเพื่อส่งไปควบคุมแขนกลตามโดยตรง การควบคุมแบบนี้จะมีข้อจำกัดคือ ถ้าต้องการความแม่นยำสูงแขนกลนำจะต้องมีขนาดใหญ่หรือมีขนาดใกล้เคียงกับแขนกลตาม ดังนั้นผู้ควบคุมต้องออกแรงค่อนข้างมากในการเคลื่อนแขนกลนำเป็นพื้นที่กว้างทำให้เกิดความเมื่อยล้าในการควบคุมได้ ขณะเดียวกันถ้าใช้แขนกลนำที่มีขนาดเล็กซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาความเมื่อยล้าของผู้ควบคุมได้ แต่ทำให้การควบคุมแขนกลตามขาดความแม่นยำไป

การพัฒนาระบบดังกล่าวในปัจจุบันแขนกลนำจะมีรูปแบบหรือโครงสร้างหลักที่แตกต่างจากแขนกลตาม แขนกลตามและแขนกลนำสามารถออกแบบแยกจากกันได้กล่าวคือ สามารถออกแบบแขนกลนำเพื่อให้มีโครงสร้างหรือรูปแบบที่เหมาะสมกับผู้ควบคุม ในขณะที่แขนกลตามจะถูกออกแบบมีลักษณะเหมาะสมกับการใช้งานในรูปแบบต่างๆ ได้ จากงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปลักษณะเฉพาะที่จำเป็นสำหรับการออกแบบรูปแบบหรือโครงสร้างแขนกลนำได้ดังนี้

- ความสามารถในการขับเคลื่อนกลับ (Back-drive-ability) แขนกลนำต้องมีความสามารถในการขับเคลื่อนกลับ (Back drive) ซึ่งมีความสำคัญมากในระบบควบคุมในกรณีที่ใช้ค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งของแขนกลนำและแขนกลตามมาควบคุมแรงสำหรับตอบสนองต่อผู้ควบคุมที่แขนกลนำ ข้อจำกัดสำหรับการออกแบบเพื่อให้แขนกลมีความสามารถในการขับเคลื่อนกลับนั้นชุดเฟืองทดสำหรับส่งผ่านกำลังจะต้องมีอัตราทดไม่สูงเกินไป เพื่อให้ผู้ควบคุมไม่จำเป็นต้องออกแรงขับเคลื่อนกลับมากเกินไป หรือต้องไม่ต่ำจนเกินไปเพื่อให้สามารถเลือกใช้มอเตอร์ที่มีกำลังขับไม่สูงเกินไป
- ปริมาตรหรือบริเวณการทำงาน (Volume of operation) ปริมาตรการทำงานของแขนกลนำควรมีขนาดที่เหมาะสมกล่าวคือไม่มากหรือน้อยจนเกินไป ในกรณีที่มีพื้นที่การทำงานจำกัด เช่น ในเรือดำน้ำหรือในสถานีอวกาศ แขนกลนำควรออกแบบให้มีพื้นที่

ทำงานน้อยเพื่อให้เหมาะกับพื้นที่ที่มีอยู่อย่างจำกัด การออกแบบเพื่อให้แขนกลนำทำงานได้ในพื้นที่ทำงานที่จำกัดนั้น แขนกลนำจะมีขนาดไม่ใหญ่นักเพื่อให้ผู้ควบคุมสามารถควบคุมแขนกลนำได้อย่างสะดวก ออกแรงน้อย ตรงกันข้ามกับแขนกลนำที่มีครอบคลุมพื้นที่ทำงานใหญ่ ตัวแขนก็จำเป็นต้องใหญ่ตามทำให้ผู้ควบคุมทำงานได้ลำบาก แต่การควบคุมจะมีความแม่นยำมากกว่าแขนกลนำที่มีขนาดเล็ก

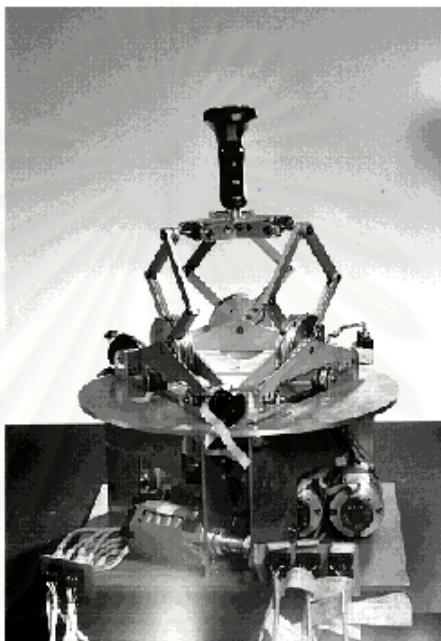
- ความหวนของชุดเฟืองทด (Backlash) ความหวนของชุดเฟืองทดสำหรับส่งผ่านกำลังต้องมีค่าน้อยหรือไม่มีเลย แขนกลนำโดยทั่วไปจะใช้ชุดเฟืองทรรอบ (Gear Train) ส่งผ่านกำลังจากอุปกรณ์ขับ (Motor) สู่ก้านต่อโยงของแขนกลนำ ความหวนของชุดเฟืองจะทำให้เฟืองขับซึ่งติดอยู่ที่เพลลาของอุปกรณ์ขับกระแทกกับเฟืองตามทีติดอยู่กับก้านต่อโยงของแขนกลส่งผลให้เกิดแรงกระแทกที่มือของผู้ควบคุม และเนื่องจากอุปกรณ์วัดตำแหน่งมุมก้านต่อโยงของแขนกลนำจะติดอยู่ที่อุปกรณ์ขับดังนั้นความหวนของชุดเฟืองจะทำให้การวัดตำแหน่งมุมก้านต่อโยงของแขนกลไม่ถูกต้อง
- ความเฉื่อยของแขนกล (Inertial effects) ในการใช้งานแขนกลนำนั้น ก้านต่อโยงแต่ละก้านของแขนกลนำจะเคลื่อนที่ไปตามการบังคับของผู้ควบคุม ก้านต่อโยงที่มีความเฉื่อยมากผู้ควบคุมต้องออกแรงมากเพื่อบังคับให้แขนกลนำเคลื่อนที่ ทำให้ผู้ควบคุมเกิดความเมื่อยล้าและในการสร้างแรงตอบสนองต่อผู้ควบคุมของแขนกลนำ แขนกลนำที่มีความเฉื่อยมากจะทำให้แรงตอบสนองที่ผู้ควบคุมได้รับไม่ถูกต้องตามความเป็นจริง ทั้งนี้เนื่องจากแรงตอบสนองที่แขนกลนำสร้างขึ้นส่วนหนึ่งจะหายไปเพราะผลของความเฉื่อยของแขนกล
- น้ำหนักถ่วงสมดุล (Arm gravitational balance) ความสมดุลสถิตของแขนกลนำมีความสำคัญมากเนื่องจากผู้ควบคุมต้องรับน้ำหนักที่ไม่สมดุลของแขนกลนำขณะควบคุมทำให้ผู้ควบคุมเกิดความเมื่อยล้าได้ การทำให้แขนกลนำสมดุลนั้น สามารถทำได้โดยใช้วิธีสมดุลทางกลหรือใช้วิธีการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์ที่ข้อต่อของแขนกล วิธีสมดุลทางกลทำได้โดยการใส่น้ำหนักถ่วงให้กับก้านต่อโยงที่ไม่สมดุลหรือใช้สปริงดึงแทนการถ่วงน้ำหนักแต่วิธีสมดุลทางกลจะเพิ่มน้ำหนักและความเฉื่อยให้แขนกลนำ ขณะที่วิธีควบคุมกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์เพื่อสร้างสมดุลนั้นจะสิ้นเปลืองพลังงานเนื่องจากต้องจ่ายกระแสไฟฟ้าให้มอเตอร์เพื่อสร้างแรงบิดตรงข้อต่อของแขนกลในทิศทางที่ทำให้เกิดสมดุล

- ความสามารถในการเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ (Dexterity) ในการใช้งานแขนกลนำผู้ควบคุมจะจับที่คั่นบังคับหรือก้านต่อโยงสุดท้ายของแขนกลนำให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งและทิศทางที่ผู้ควบคุมต้องการภายในบริเวณการทำงานของแขนกลนำ นั้นหมายความว่าคั่นบังคับหรือก้านต่อโยงสุดท้ายของแขนกลนำต้องสามารถในการเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระตามความต้องการของผู้ควบคุมเพื่อให้สามารถใช้งานระบบแขนกลนำแขนกลตามได้อย่างมีประสิทธิภาพ แขนกลนำที่มีความสามารถในการเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระต้องมีองศาอิสระเท่ากับ 6 โดย 3 แกนแรกของแขนกลนำจะทำหน้าที่กำหนดตำแหน่ง ส่วน 3 แกนหลังจะทำหน้าที่กำหนดทิศทาง
- ความแข็งแรง (Stiffness) ชิ้นส่วนต่างๆของแขนกลนำเช่น ก้านต่อโยง อุปกรณ์ส่งผ่านกำลังและข้อต่อควรมีความแข็งแรงเพียงพอ ในกรณีที่ผู้ควบคุมบังคับให้แขนกลตามเคลื่อนที่ไปกระทบกำแพง แขนกลนำจะสร้างแรงตอบสนองต่อผู้ควบคุม เพื่อให้ผู้ควบคุมรู้สึกว่กระทบกำแพงเช่นเดียวกับแขนกลตามดังนั้นแขนกลนำต้องมีโครงสร้างแข็งแรงเพียงพอที่จะทำให้เกิดความรู้สึกเช่นนั้น แขนกลนำที่มีโครงสร้างไม่แข็งแรงจะทำให้แรงตอบสนองต่อผู้ควบคุมที่แขนกลนำมีค่าผิดไปจากความเป็นจริงและทำให้เกิดความผิดพลาดในการควบคุมตำแหน่งและทิศทางของแขนกลตามเนื่องจากการโก่งงอของโครงสร้างแขนกลนำ
- แรงเสียดทาน (Friction) แรงเสียดทานที่ชุดเฟืองส่งกำลังและข้อต่อของแขนกลนำควรมีค่าน้อย เพื่อให้ผู้ควบคุมไม่ต้องออกแรงบังคับแขนกลนำมากเกินไป แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อแรงตอบสนองต่อผู้ควบคุมที่แขนกลนำสร้างขึ้นเนื่องจากแรงบิดที่มอเตอร์สร้างขึ้นตรงข้อต่อของแขนกลนำเพื่อสร้างแรงตอบสนองต่อผู้ควบคุมส่วนหนึ่งจะต้องนำไปชดเชยกับแรงเสียดทานที่มีอยู่ ทำให้แรงตอบสนองต่อผู้ควบคุมที่ผู้ควบคุมได้รับมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริง

2.2 งานวิจัยแขนกลนำที่ผ่านมา

ในการออกแบบสร้างแขนกลนำเพื่อให้ได้ลักษณะเฉพาะที่จำเป็นตามที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจำเป็นต้องศึกษางานวิจัยที่ได้ทำมาก่อนหน้านี้เพื่อนำมาใช้พิจารณาในการออกแบบสร้างแขนกลนำต่อไป

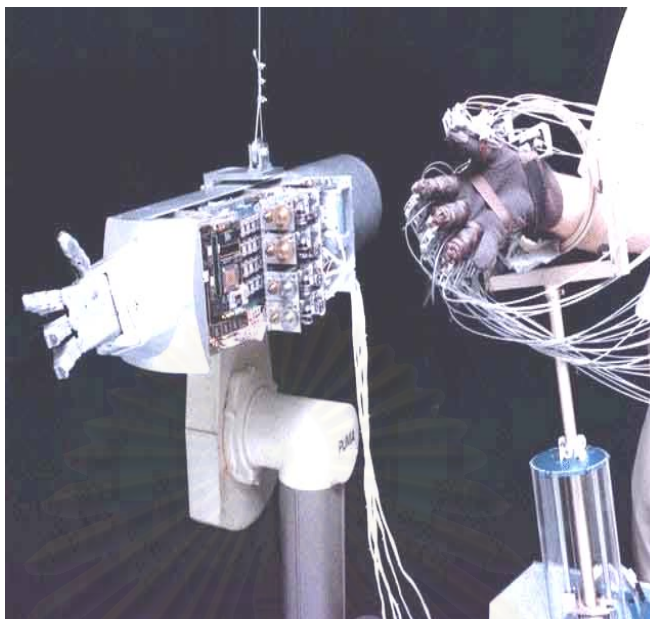
2.2.1 แขนกลนำ Generalized Master Controller



รูปที่ 2.1 แขนกลนำ Generalized Master Controller

ในรูปที่ 2.1 แสดงลักษณะโครงสร้างของแขนกลนำ Generalized Master Controller ซึ่งเป็นแขนกลนำแบบ 6 องศาอิสระมีจำนวนอุปกรณ์ขับเคลื่อน (Motor) 6 ตัวและมีอุปกรณ์วัดมุม (Encoder) 9 ตัวเพื่อใช้หาสมการ Forward kinematics รูปแบบหรือโครงสร้างหลักของแขนกลเป็นกลไกขนานจำนวนสามชุดควางท่ามุม 120 องศา แขนกลนำนี้ใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบมู่เล่และเคเบิล (Tendon-Pulley) เป็นหลักทำให้สามารถติดตั้งอุปกรณ์ขับเคลื่อนและอุปกรณ์วัดมุมที่ฐานของแขนกลได้ทั้งหมดและทำให้แรงเสียดทานและแบดกเลขของอุปกรณ์ส่งผ่านกำลังมีน้อย ข้อดีของแขนกลชุดนี้คือ โครงสร้างของแขนกลมีความแข็งแรงมากเนื่องจากโครงสร้างของแขนกลเป็นโครงสร้างขนาน ขนาดโดยรวมของแขนกลมีขนาดเล็กแต่ให้พื้นที่การทำงานมาก อุปกรณ์ขับเคลื่อนที่ฐานทั้งหมดทำให้แขนกลนำมีความยืดหยุ่น อีกทั้งสามารถเพิ่มขนาดของอุปกรณ์ขับเคลื่อนให้ใหญ่เพียงพอกับความต้องการได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความยืดหยุ่นของแขนกล ข้อเสียของแขนกลชุดนี้คือ มีจุด Singularity หลายจุดในบริเวณการทำงานของแขนกลและไม่สามารถหาสมการ Forward kinematics แบบโครสฟอรัมได้ถ้าไม่ติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมเพิ่ม

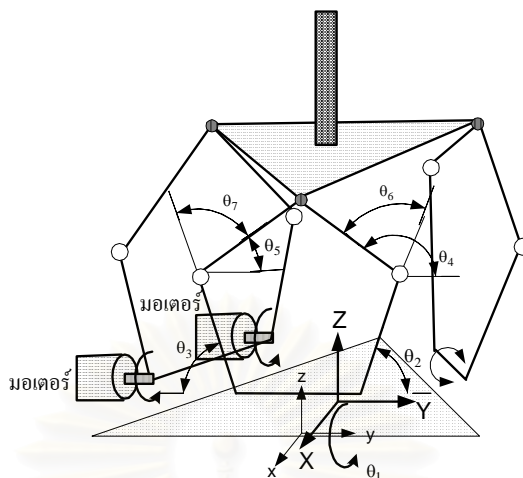
2.2.2 แขนกลนำ JPL Hand Controller



รูปที่ 2.2 แขนกลนำ JPL Hand Controller

ในรูปที่ 2.2 แสดงลักษณะโครงสร้างของแขนกลนำ JPL Hand Controller เป็นแขนกลนำแบบ 6 องศาอิสระมีจำนวนอุปกรณ์ขับเคลื่อน (Motor) 6 ตัว มีจำนวนอุปกรณ์วัดมุม (Encoder) เท่ากับจำนวนอุปกรณ์ขับเคลื่อน รูปแบบหรือโครงสร้างหลักของกลไกเป็น serial mechanism ข้อต่อที่ 1 และ 2 เป็นข้อต่อหมุนสามารถหมุนได้ 180 องศา ข้อต่อที่ 3 เป็นข้อต่อเลื่อน ข้อต่อที่ 4 ถึงข้อต่อที่ 6 เป็นข้อต่อหมุนโดยมีลักษณะการจัดวางแบบ Z-Y-X Euler angle ใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบมู่เล่และเคเบิล (Tendon-Pulley) เป็นหลักทำให้สามารถติดตั้งอุปกรณ์ขับเคลื่อนและอุปกรณ์วัดมุมที่ฐานของแขนกลได้และทำให้แรงเสียดทานน้อยและแบลกลเลขที่อุปกรณ์ส่งผ่านกำลังมีน้อย ข้อดีของแขนกลชุดนี้คือ เป็นแขนกลที่ให้พื้นที่การทำงานมาก อุปกรณ์ขับเคลื่อนติดตั้งที่ฐานทั้งหมดทำให้แขนกลมีความเฉื่อยต่ำ โครงสร้างของแขนกลมีน้ำหนักเบา มีความสามารถในการขับเคลื่อนกลับและหาสมการ Inverse kinematics ได้ง่าย ข้อเสียของแขนกลชุดนี้คือ โครงสร้างของแขนกลมีความแข็งแรงน้อยเมื่อเทียบกับแขนกลที่มีโครงสร้างแบบขนานและแขนกลนำมีขนาดใหญ่ทำให้ใช้พื้นที่ในการติดตั้งมาก

2.2.3 แขนกลนำของ KAIST MASTER 1



รูปที่ 2.3 แขนกลนำ KAIST MASTER 1

ในรูปที่ 2.2 แสดงลักษณะโครงสร้างของแขนกลนำ KAIST MASTER 1 เป็นแขนกลนำแบบ 6 องศาอิสระมีจำนวนอุปกรณ์ขับเคลื่อน (Motor) 6 ตัวมีจำนวนอุปกรณ์วัดมุม (Encoder) 9 ตัวเพื่อใช้หาสมการ Forward kinematics รูปแบบหลักของกลไกเป็นกลไกขนานจำนวนสามชุดวางทำมุม 120 องศา ใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบฮาร์มอนิกทำให้ไม่มีแบลคเลซมีอัตราทดรอบเท่ากับ 1 ต่อ 50 อุปกรณ์ขับเคลื่อนที่ติดตั้งที่ก้านต่อโยงแต่ละก้านของแขนกลทำให้แขนกลนำแบบนี้มีความเฉื่อยมากกว่าแขนกลนำ Generalized Master Controller เนื่องจากมอเตอร์ต้องเคลื่อนที่ตามก้านต่อโยงของแขนกล ข้อดีของแขนกลชุดนี้คือ มีความแข็งแรงมากเนื่องจากโครงสร้างของแขนกลเป็นโครงสร้างขนาน ขนาดของแขนกลมีขนาดเล็กแต่ให้พื้นที่การทำงานมาก ข้อเสียของแขนกลชุดนี้คือ มีจุด Singularity หลายจุดในพื้นที่การทำงานของแขนกล ไม่สามารถหาสมการ Inverse kinematics แบบโครสฟอर्मได้ถ้าไม่ติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมเพิ่ม มีแรงเสียดทานที่อุปกรณ์ส่งผ่านกำลังมากและความสามารถในการขับเคลื่อนไม่ดีเนื่องจากใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบฮาร์มอนิกที่มีอัตราทดรอบ 1 ต่อ 50

2.3 ระบบส่งผ่านกำลัง

จากการศึกษางานวิจัยแขนกลนำที่ผ่านมาได้ข้อสรุปว่าตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ขับเคลื่อน (Motor) ของแขนกลนำต้องอยู่ที่ฐานหรืออยู่ที่ก้านต่อโยงที่ 1 ของแขนกลนำเป็นอย่างมากโดยมีอุปกรณ์ส่งผ่านกำลังทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังจากอุปกรณ์ขับเคลื่อนที่ติดตั้งอยู่ที่ฐานสู่ก้านต่อโยงต่างๆของ แขนกลนำ ดังนั้นถ้าสามารถหาอุปกรณ์ขับเคลื่อนที่สามารถส่งผ่านกำลังในรูปแบบดังกล่าวได้ จะทำให้สามารถ

ออกแบบและสร้างแขนกลนำที่มีน้ำหนักเบา มีความเฉื่อยต่ำได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำการศึกษาระบบส่งผ่านกำลังเพื่อนำมาใช้ในการออกแบบระบบส่งผ่านกำลังของแขนกลนำต่อไป

ข้อต่อของแขนกลโดยมากแล้วจะเป็นข้อต่อหมุน (Revolute joint) หรือข้อต่อเลื่อน (Prismatic joint) อุปกรณ์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนข้อต่อประกอบด้วย อุปกรณ์ขับ (Motor) และ อุปกรณ์ส่งผ่านกำลัง อุปกรณ์ส่งผ่านกำลังในที่นี้ทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังจากอุปกรณ์ขับไปสู่ข้อต่อของก้านต่อโยงต่างๆ โดยทำหน้าที่ขยายแรงบิดหรือลดแรงบิด เพิ่มความเร็วเชิงมุมหรือลดความเร็วเชิงมุม ทำหน้าที่เปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบหมุนเป็นการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น ในที่นี้ อุปกรณ์ส่งผ่านกำลังคือชิ้นส่วนทุกๆชิ้นที่ใช้ในการส่งผ่านกำลัง โดยเริ่มจากอุปกรณ์ขับไปจนถึงข้อต่อของก้านต่อโยง

2.3.1 การเปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบหมุน (Rotary-to-Rotary Motion Conversion)

การส่งผ่านกำลังแบบการเปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบหมุน (Rotary-to-Rotary Conversion) ได้แก่ ขบวนเฟือง (Gear Train), เฟืองแบบฮาร์มอนิก (Harmonic Drives) สายพานและมู่เล่ (Belt and Pulleys)

- ขบวนเฟือง (Gear Train)

รูปที่ 2.4 แสดงรูปด้านหน้าของขบวนเฟือง เฟืองตัวบนมีรัศมี r_1 มีจำนวนฟันเฟือง N_1 เฟืองตัวล่างมีรัศมี r_2 มีจำนวนฟันเฟือง N_2 ที่เพลาทั้งสองมีแรงบิดมากกระทำและหมุนไปเป็นมุม θ ดังรูป เนื่องจากเฟืองสองตัวที่จะขบกันได้ นั้นฟันเฟืองแต่ละฟันของทั้งสองเฟืองต้องมีลักษณะเหมือนกันดังนั้น

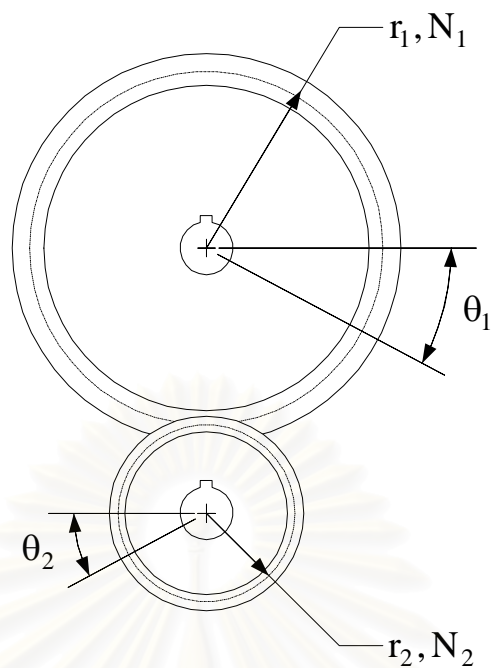
$$\frac{N_1}{r_1} = \frac{N_2}{r_2}$$

สำหรับเฟืองในอุดมคติ ไม่มีการสูญเสียพลังงาน ดังนั้น

$$T_1\theta_1 = T_2\theta_2 \quad \text{โดยที่ } T \text{ คือแรงบิดที่เฟือง}$$

เนื่องจากความยาวส่วนโค้งที่เคลื่อนที่ระหว่างเฟืองทั้งสองมีค่าเท่ากัน ดังนั้น

$$r_1\theta_1 = r_2\theta_2$$



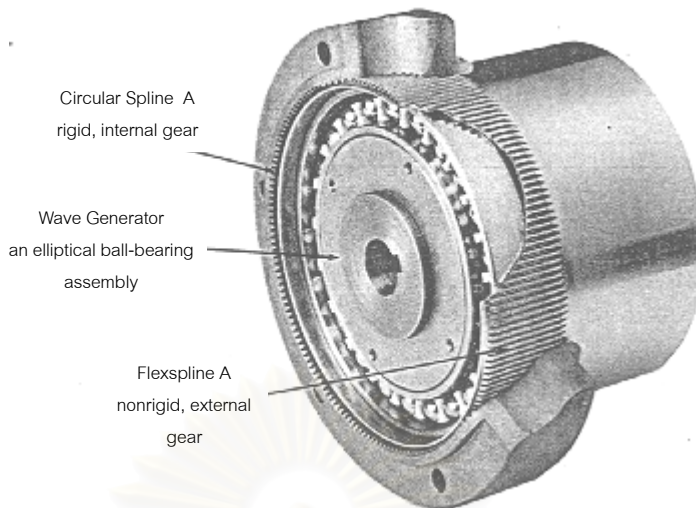
รูปที่ 2.4 แสดงรูปด้านหน้าของขบวนเฟือง

- เฟืองแบบฮาร์มอนิก (Harmonic Drives)

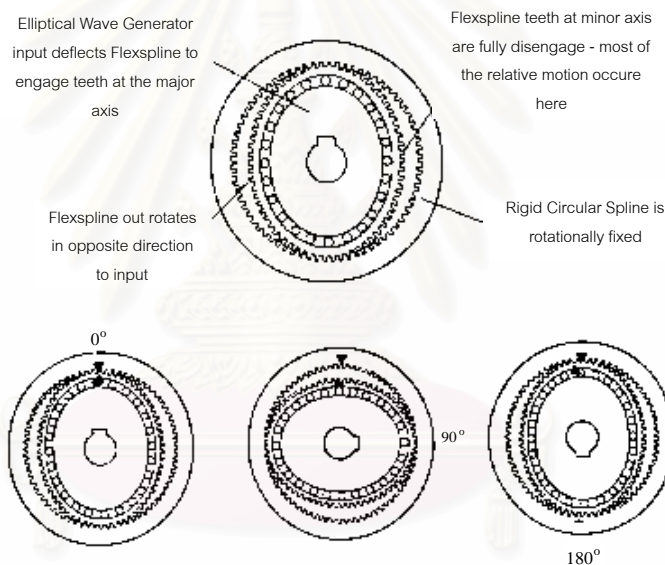
เฟืองแบบฮาร์มอนิกมีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนด้วยกันดังนี้

1. Circular Spline เป็นวงแหวนแข็งที่มีฟันเฟืองอยู่ด้านในดูรูปที่ 2.5 ประกอบสามารถยึดอยู่กับที่หรือหมุนได้
2. Wave Generator ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นวงรีแข็งและบอลแบร์ริง (Ball bearing) ดูรูปที่ 2.5 ประกอบในรูปวงรีแข็งสามารถต่อกับเพลาขับของอุปกรณ์ขับ
3. Flex Spline เป็นส่วนประกอบที่สามารถยืดหยุ่นได้โดยมีฟันเฟืองอยู่ด้านนอก จำนวนฟันเฟืองของ Flex Spline จะน้อยกว่าจำนวนฟันเฟืองของ Circular Spline ประมาณ 2 ฟัน Flex Spline สามารถยึดอยู่กับที่หรือหมุนได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 ภาพแสดงรายละเอียดของ Harmonic Drives



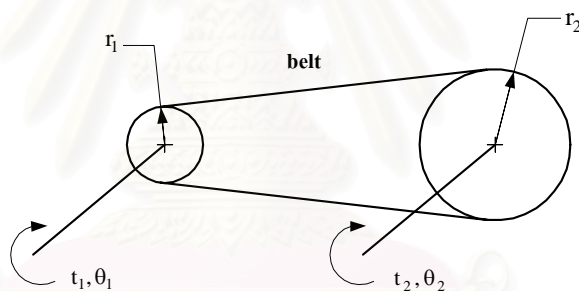
รูปที่ 2.6 ภาพแสดงการทำงาน Harmonic Drives

เพราะว่าจำนวนฟันเฟืองของ Flex Spline น้อยกว่าจำนวนฟันเฟืองของ Circular Spline อยู่ 2 ฟันและฟันเฟืองทั้งสองจะขบกันอยู่ตลอดเวลาทำให้ขณะที่ Wave Generator หมุนไปหนึ่งรอบจะทำให้ Flex Spline หมุนไปสองฟันเฟืองเมื่อเทียบกับ Circular Spline โดยที่ Circular Spline ถูกยึดอยู่กับที่ การหมุนของ Flex Spline สามารถอธิบายได้โดยพิจารณาการหมุนของ Wave Generator ที่ทำให้ Flex Spline หมุนไป 1 ฟันเฟืองเมื่อเทียบกับ Circular Spline ที่ถูกยึดอยู่กับที่โดยพิจารณารูปที่ 2.6 ประกอบ เริ่มจากตำแหน่งของแกนหลักของ Wave Generator อยู่ที่มุม 0 ดังรูปและตำแหน่งที่เฟืองขบกันอยู่ที่ตำแหน่งที่มีลูกศรชี้ เมื่อแกนหลักของ

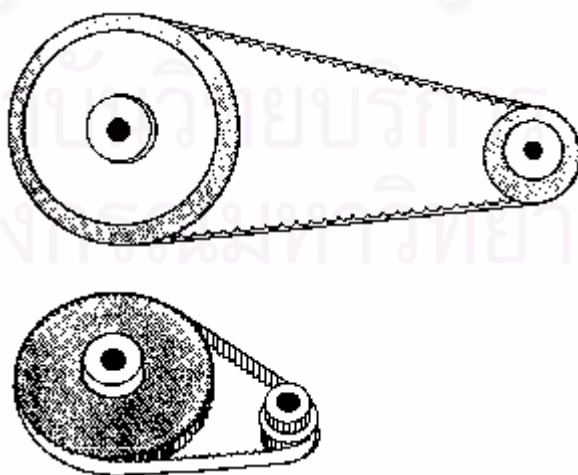
Wave Generator หมุนไป 90 องศาตำแหน่งฟันเฟืองตรงลูกศรก็จะไม่ขบกันและจะกลับมายขบที่ตำแหน่งใกล้ๆตำแหน่งฟันเฟืองตรงลูกศรเมื่อแกนหลักของ Wave Generator เมื่อหมุนไป 180 องศาตั้งรูป เมื่อหมุนแกนหลักของ Wave Generator ไปอีก 180 องศาจะทำให้ตำแหน่งเฟืองที่ขบอยู่ห่างจากเฟืองตรงลูกศร 2 ฟันเฟือง

- สายพานและมูเล่ (Belt-and-Pulley system)

รูปที่ 2.7 แสดงระบบมูเล่และสายพานในอุดมคติ การวิเคราะห์ระบบสายพานและมูเล่จะคล้ายคลึงกับระบบขบวนเฟือง ตามรูปที่ 2.7 ทิศทางการหมุนของมูเล่ทั้งสองเป็นทิศเดียวกัน หน้าที่ของระบบมูเล่และสายพานกับขบวนเฟืองจะเหมือนกันแต่ระบบมูเล่และสายพานสามารถส่งผ่านกำลังที่ระยะห่างระหว่างเพลลาขับและเพลลาตามมีค่ามากๆได้โดยไม่ต้องอาศัยเฟืองหลายๆตัวเหมือนการใช้ขบวนเฟือง รูปที่ 2.8 แสดงระบบมูเล่และสายพานโดยที่สายพานและมูเล่มีฟันเพื่อป้องกันการลื่นไถลระหว่างมูเล่และสายพาน



รูปที่ 2.7 ระบบส่งผ่านกำลังแบบมูเล่และสายพาน



รูปที่ 2.8 ระบบส่งผ่านกำลังแบบมูเล่และสายพานที่มีการป้องกันการลื่นไถล

2.3.2 การเปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบหมุนเป็นแบบเชิงเส้น (Rotary-to-Linear Motion Conversion)

การเปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบหมุนเป็นแบบเชิงเส้น (Rotary-to-Linear Motion Conversion) คือเปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบหมุน และแรงบิด ไปเป็นการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นและแรงตามแนวแกน รูปแบบการเปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบหมุนเป็นแบบเชิงเส้นมีอยู่สองลักษณะคือ

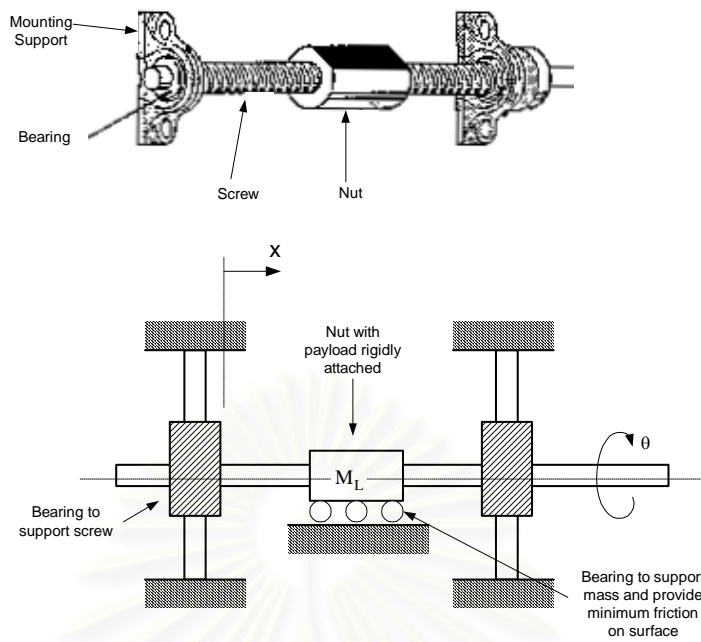
1. ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่แบบหมุนและการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นเป็นแบบเชิงเส้น ได้แก่ ระบบส่งผ่านกำลังแบบเกลียว (Lead screws) และระบบส่งผ่านกำลังแบบแลคและพีเนียน (Rack-and-pinion system) เป็นต้น
2. ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่แบบหมุนและการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นเป็นแบบไม่เชิงเส้น ได้แก่ ระบบส่งผ่านกำลังแบบข้อเหวี่ยง (Slider cranks) และระบบส่งผ่านกำลังแบบแคม (Cams) เป็นต้น

- ระบบส่งผ่านกำลังแบบเกลียว (Lead screws)

เป็นระบบส่งผ่านกำลังที่ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่แบบหมุนและการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นเป็นแบบเชิงเส้น รูปที่ 2.9 แสดงระบบส่งผ่านกำลังแบบเกลียว (Lead screws) ซึ่งประกอบไปด้วยแท่งเกลียว (screw) และน็อต (nut) โดยปลายทั้งสองข้างของแท่งเกลียวถูกยึดแต่สามารถหมุนรอบแกนได้ขณะที่แท่งเกลียวหมุน น็อต (nut) ที่ถูกยึดไว้ไม่ให้หมุนรอบแกนจะเคลื่อนที่ไปตามแกนของแท่งเกลียว ในรูปน็อตจะมีส่วนที่รองรับน้ำหนักของภาระ (load) เพื่อไม่ให้แกนของแท่งเกลียวองความสัมพันธ์ของมุม (θ) ของแท่งเกลียวกับการเคลื่อนที่เชิงเส้น (x) ของน็อตแสดงดังสมการ

$$\theta = Px$$

โดยที่ P คือ ระยะ pitch ของแท่งเกลียว (screw)



รูปที่ 2.9 ภาพแสดงระบบส่งกำลังแบบ ระบบส่งผ่านกำลังแบบเกลียว (Lead screws)

- ระบบส่งผ่านกำลังแบบแลคและพีเนียน (Rack-and-pinion system)

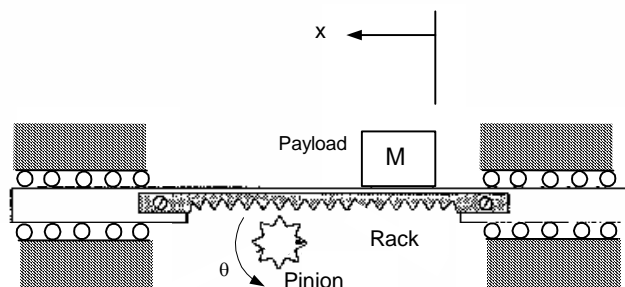
เป็นระบบส่งผ่านกำลังที่ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่แบบหมุนและการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นเป็นแบบเชิงเส้น รูปที่ 2.10 แสดงระบบส่งผ่านกำลังแบบแลคและพีเนียน (Rack-and-pinion system) เฟืองขับ (pinion) คือเฟืองขนาดเล็กติดอยู่ที่เพลาของอุปกรณ์ขับ (Motor) แท่งเฟือง (rack) คือแท่งที่ด้านหนึ่งเป็นพื้นเฟืองและสามารถเลื่อนไปตามแนวแกนได้ เมื่อนำเฟืองขับและแท่งเฟืองมาประกอบกันทำให้สามารถเปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบหมุนเป็นการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นได้โดยการหมุนเฟืองขับจากนั้นพื้นเฟืองของเฟืองขับจะดันพื้นเฟืองของแท่งเฟืองให้เคลื่อนที่ไป สมการการเคลื่อนที่ของระบบส่งผ่านกำลังแบบแลคและพีเนียนคือ

$$x = 2\pi r\theta$$

โดยที่ x คือระยะที่แท่งเฟือง (Rack) เคลื่อนที่ไป

r คือรัศมี pitch ของเฟืองขับ (pinion)

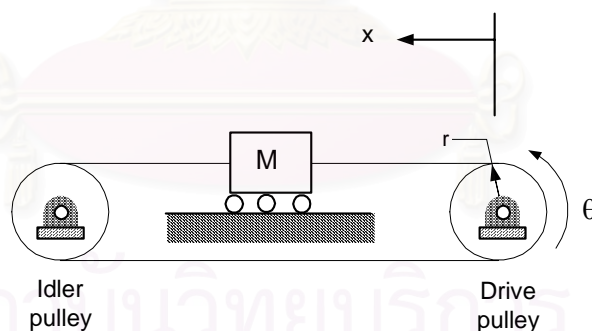
θ คือมุมที่เฟืองขับหมุนไป



รูปที่ 2.10 ภาพแสดงระบบส่งผ่านกำลังแบบ rack-and-pinion

- ระบบส่งผ่านกำลังแบบสายพานและมู่เล่ขับโหดแบบเชิงเส้น (Belt and pulley driving a linear load)

เป็นระบบส่งผ่านกำลังที่ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่แบบหมุนและการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นเป็นแบบเชิงเส้น โดยมีรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 2.11 ประกอบไปด้วยมู่เล่สองตัวตัวหนึ่งจะเป็นมู่เล่ขับ (Drive pulley) และต่อกับเพลาของอุปกรณ์ขับ (Motor) มู่เล่อีกตัวจะเป็นมู่เล่ตาม (Idler pulley) ที่ไม่ได้ต่อกับอุปกรณ์ขับใดๆ เมื่อ มู่เล่ขับหมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา มู่เล่ขับจะส่งแรงโดยตรงไปตามสายพานเพื่อดึงให้ภาระ (load) เคลื่อนที่ ในทางกลับกันถ้าหมุนมู่เล่ขับในทิศทางตามเข็มนาฬิกา มู่เล่ขับต้องอาศัยมู่เล่ตามในการส่งแรงดึงมาที่ภาระ ระยะทางที่ภาระ M เคลื่อนที่ไปเท่ากับความยาวส่วนโค้งของที่มู่เล่ขับที่หมุนไป

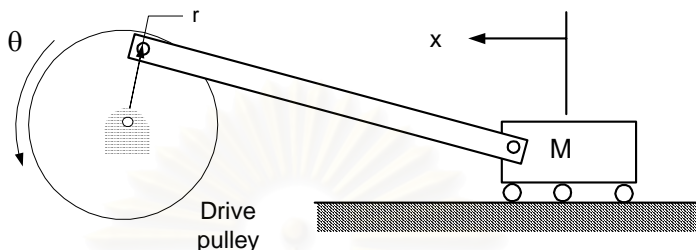


รูปที่ 2.11 ภาพแสดงระบบส่งผ่านกำลังแบบ Belt and pulley driving a linear load

- ระบบส่งผ่านกำลังแบบข้อเหวี่ยง (Slider cranks)

เป็นระบบส่งผ่านกำลังที่ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่แบบหมุนและการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นเป็นแบบไม่เชิงเส้น รูปที่ 2.12 แสดงระบบส่งผ่านกำลังแบบข้อเหวี่ยง (Slider cranks) ประกอบไปด้วย ข้อเหวี่ยง (crank driving) และข้อต่อเลื่อน (linear stage) ข้อเหวี่ยงเป็นล้อที่หมุนรอบแกนที่ผ่านจุดศูนย์กลางของล้อและมีก้านต่อโยง (rod) ต่อกับล้อโดยใช้ข้อต่อหมุน (revolute joint) ปลายอีกข้างของก้านต่อ

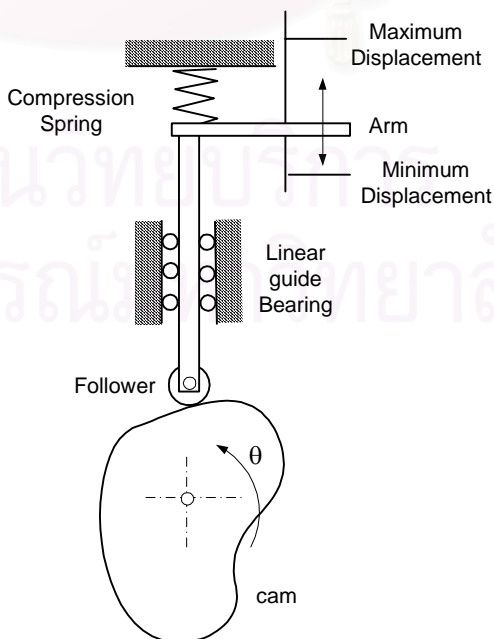
โยงต่อกับข้อต่อเลื่อนซึ่งข้อต่อเลื่อนนี้สามารถเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงที่กำหนดไว้เท่านั้น ระยะที่เคลื่อนที่ไปของข้อต่อเลื่อนเมื่อข้อเหวี่ยงหมุนไป 180 องศาเท่ากับ ความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลางของข้อเหวี่ยงหรือ $2r$ ดังรูป



รูปที่ 2.12 ภาพแสดงระบบส่งผ่านกำลังแบบ Slider cranks

- ระบบส่งผ่านกำลังแบบแคม (Cams)

แคม (cam) เป็นอุปกรณ์ส่งผ่านกำลังอีกชนิดที่ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่แบบหมุนด้านอินพุตและการเคลื่อนที่เชิงเส้นด้านเอาต์พุตเป็นแบบไม่เชิงเส้น แคมจะมีรูปร่างที่ทำให้ตัวตาม (follower) เคลื่อนที่ในแนวเส้นตามต้องการ ตามรูปที่ 2.13 แคมจะต่อกับอุปกรณ์ขับเคลื่อน มอเตอร์ เมื่อมอเตอร์หมุนแคมก็จะหมุนตามโดยแคมจะไปดันให้ตัวตามเคลื่อนที่ขึ้น ส่วนการเคลื่อนที่ลงของตัวตามต้องอาศัยสปริงดึงลง สปริงยังทำให้ตัวตามสัมผัสกับแคมอยู่ตลอดเวลาอีกด้วย



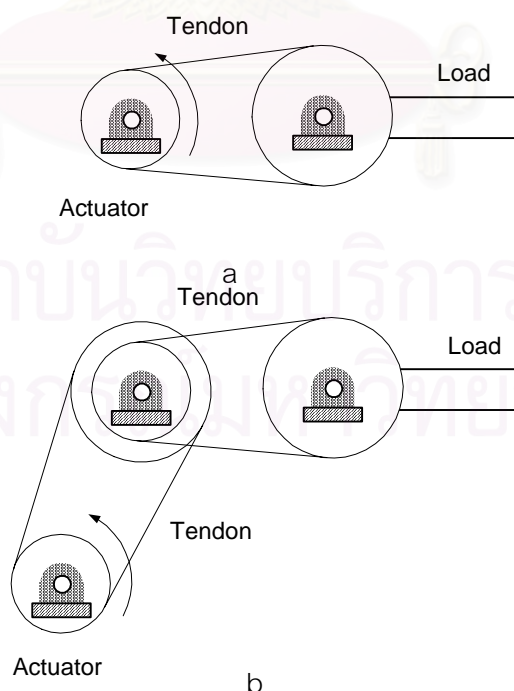
รูปที่ 2.13 ภาพแสดงระบบส่งผ่านกำลังแบบ Cams

2.3.3 ระบบส่งผ่านกำลังแบบเทนดอนและมู่เล่ (Tendon-Pulley train)

ระบบส่งผ่านกำลังแบบเทนดอนและมู่เล่ (Tendon-pulley train) สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทคือ ระบบส่งผ่านกำลังเทนดอนและมู่เล่แบบปิด (closed-loop tendon drives) และระบบส่งผ่านกำลังเทนดอนและมู่เล่แบบเปิด (open-ended tendon drives)

- ระบบส่งผ่านกำลังเทนดอนและมู่เล่แบบปิด (Closed-loop tendon drives)

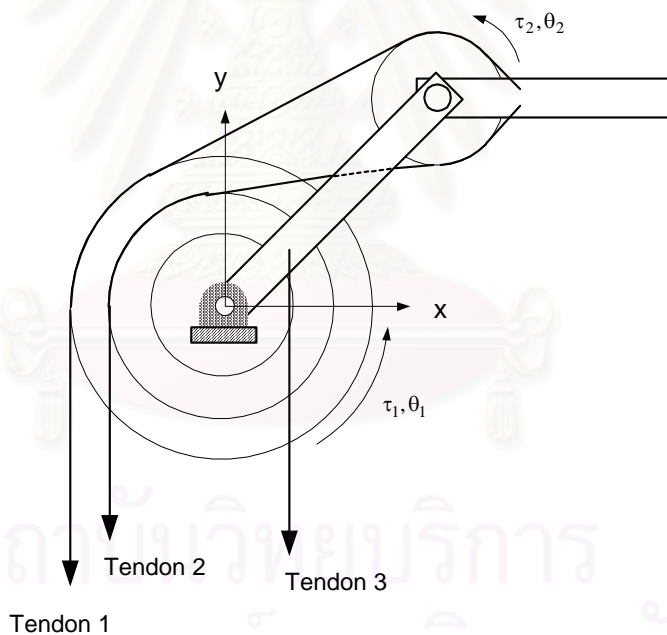
ระบบส่งผ่านกำลังเทนดอนและมู่เล่แบบปิดเป็นระบบส่งผ่านกำลังที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม ลักษณะเฉพาะของระบบส่งผ่านกำลังชนิดนี้คือ อุปกรณ์ขับ 1 ตัวสามารถขับมู่เล่ตามให้หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกาได้ทำให้จำนวนของอุปกรณ์ขับเท่ากับจำนวนของศาอิสระของแขนกล รูป 2.14a แสดงอุปกรณ์ขับ (Motor) ขับก้านตอโยงผ่านเทนดอนโดยไม่มีมู่เล่พัก (Idle pulley) รูปที่ 2.14b แสดงอุปกรณ์ขับขับก้านตอโยงผ่านเทนดอนโดยมีมู่เล่พักซึ่งมู่เล่พักทำหน้าที่รับแรงบิดจากมู่เล่ขับและส่งแรงบิดต่อไปยังมู่เล่ตัวถัดไป ความสามารถในการส่งผ่านกำลังของระบบส่งผ่านกำลังชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานของมู่เล่และเทนดอนเป็นหลักโดยแรงเสียดทานนี้จะขึ้นกับแรงตึงของเทนดอนและค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของมู่เล่และเทนดอน ในทางกลับกันแรงตึงของเทนดอนจะไปเพิ่มแรงเสียดทานตรงจุดหมุนต่างๆได้ เช่น แบริ่ง ข้อต่อหมุน



รูปที่ 2.14 ภาพแสดงระบบส่งผ่านกำลังแบบ closed-loop tendon drives

- ระบบส่งผ่านกำลัง tendon และ มุ่เล่แบบเปิด (Open-Ended Tendon Drives)

ระบบส่งผ่านกำลัง tendon และ มุ่เล่แบบเปิดมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจากระบบส่งผ่านกำลัง tendon และ มุ่เล่แบบปิดดังนี้ ในการขับมุ่เล่ตามหนึ่งตัวให้หมุนในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาหรือตามเข็มนาฬิกาที่ค่าต้องอาศัยอุปกรณ์ขับจำนวนสองตัว ดังรูปที่ 2.15 ซึ่งแสดงลักษณะการส่งผ่านกำลัง tendon และ มุ่เล่แบบเปิด (Open-Ended Tendon) เนื่องจากมุ่เล่จะดึง tendon ในทิศทางที่จะสร้างแรงดึงใน tendon เท่านั้น แต่จะไม่สามารถขับมุ่เล่ตามในทิศทางที่จะสร้างแรงกดใน tendon ได้ ให้ n คือจำนวนองศาอิสระของแขนกลและ m คือจำนวน tendon ที่ใช้ดึง ในการควบคุมแขนกลที่มีจำนวนองศาอิสระเท่ากับ n นั้นจำนวน tendon ที่ใช้ดึงจะต้องมากกว่าจำนวนองศาอิสระเพื่อให้สามารถควบคุมการเคลื่อนไหวของแขนกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในกรณีที่จำนวนองศาอิสระมากกว่าจำนวน tendon ที่ใช้ดึงนั้นการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลจะต้องใช้แรงดึงจากสปริงมาช่วยในการควบคุมเพื่อให้แขนกลสามารถเคลื่อนที่กลับได้



รูปที่ 2.15 ภาพแสดงระบบส่งผ่านกำลังแบบ open-ended tendon drives

บทที่ 3

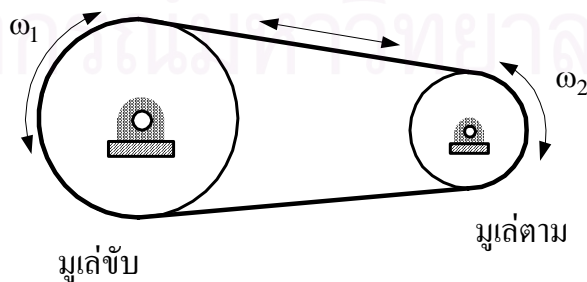
การออกแบบแขนกลนำ

3.1 การออกแบบระบบมู่เล่และสายพาน

จากลักษณะเฉพาะของแขนกลนำและระบบส่งผ่านกำลังที่ได้ศึกษาในบทที่ 2 สามารถสรุปเป็นหลักการเบื้องต้นในการออกแบบแขนกลนำได้ดังนี้

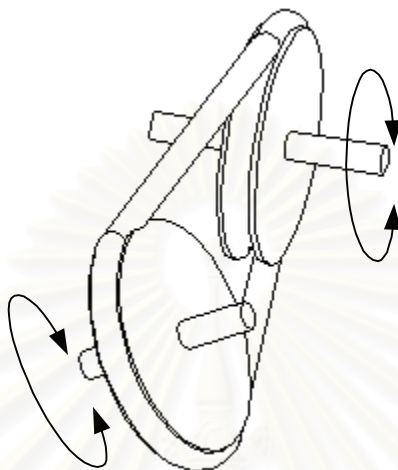
- ต้องการให้อุปกรณ์ขับ (Actuator) อุปกรณ์วัดมุม (Sensor) และอุปกรณ์ส่งผ่านกำลัง (Gear box) ติดตั้งที่ฐานของแขนกลนำซึ่งอุปกรณ์ขับของแขนกลโดยทั่วไปจะติดตั้งที่ข้อต่อของแต่ละก้านต่อโยง (Link) ทำให้มีความเฉื่อยมากและทำให้น้ำหนักที่ปลายแขนกลมีค่ามากอีกด้วย
- ต้องการลดความหลวม (backlash) ของระบบส่งผ่านกำลังให้มีค่าน้อยที่สุดหรือไม่มีเลยและระบบส่งผ่านกำลังต้องมีอัตราทดไม่มากจนเกินไป
- แขนกลนำต้องมีองศาอิสระเท่ากับ 6

จากหลักการเบื้องต้นดังกล่าวว่าปัญหาหลักของการออกแบบแขนกลนำอยู่ที่ มีระบบส่งผ่านกำลังแบบใดบ้างที่สามารถส่งผ่านกำลังจากอุปกรณ์ขับสู่ก้านต่อโยงต่างๆของแขนกลนำได้ โดยที่อุปกรณ์ขับติดตั้งอยู่ที่ฐานหรือติดตั้งที่ก้านต่อโยงที่ 1 ของแขนกล จากการศึกษาพบว่าระบบส่งผ่านกำลังที่เหมาะสมคือ ระบบสายพานและมู่เล่หรือระบบเทนดอนและมู่เล่แต่ทั้งนี้จะต้องมีการออกแบบการจัดวางแนวของสายพานที่เหมาะสมเพื่อให้ระบบส่งผ่านกำลังมู่เล่เทนดอนสามารถส่งผ่านกำลังในลักษณะดังกล่าวได้ ระบบส่งผ่านกำลังแบบสายพานและมู่เล่โดยทั่วไปนี้มีหลักการดังรูปที่ 3.1



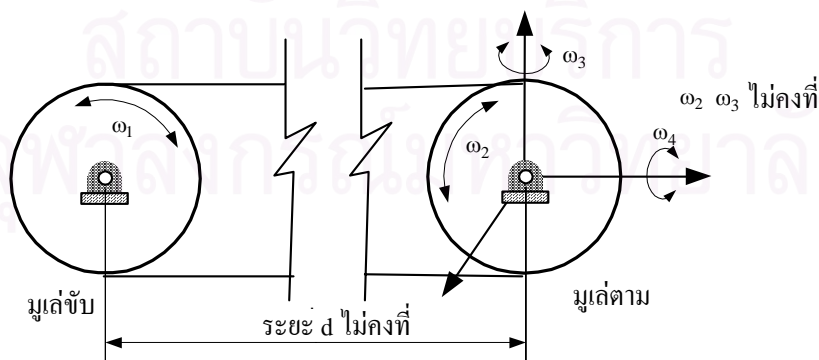
รูปที่ 3.1 ระบบสายพานและมู่เล่

ระบบสายพานและมู่เล่ที่แสดงในรูปที่ 3.1 นั้นเป็นระบบส่งผ่านกำลังที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไปซึ่งสามารถส่งผ่านกำลังได้โดยที่มู่เล่ทั้งสองอยู่ห่างกันมากได้ ข้อจำกัดของระบบส่งผ่านกำลังแบบนี้คือไม่สามารถส่งผ่านกำลังในขณะที่มู่ระหว่างระนาบของมู่เล่ทั้งสองมีค่าเปลี่ยนแปลงได้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงระบบสายพานและมู่เล่โดยที่ระนาบของมู่เล่ทั้งสองไม่ได้อยู่บนระนาบเดียวกัน

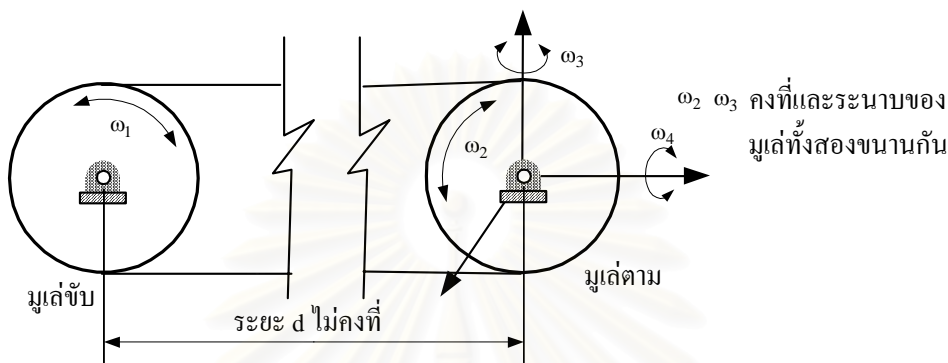
ลักษณะของระบบส่งผ่านกำลังแบบสายพานและมู่เล่ที่ต้องการคือต้องสามารถส่งผ่านกำลังได้โดยที่ระยะห่างระหว่างมู่เล่ขับและมู่เล่ตามมีค่าไม่คงที่และระนาบของมู่เล่ทั้งสองไม่ขนานกัน รูปที่ 3.3 แสดงระยะห่างระหว่างมู่เล่ขับและมู่เล่ตาม (d) มีค่าไม่คงที่และระนาบของมู่เล่ทั้งสองไม่ขนานกัน ในรูปมู่เล่ขับหมุนด้วยความเร็วเชิงมุม ω_1 โดยที่แกนหมุนของมู่เล่ขับยึดอยู่กับที่ ขณะที่มู่เล่ตามหมุนรอบแกนสามแกนด้วยความเร็วเชิงมุม $\omega_2, \omega_3,$ และ ω_4 ตามลำดับ



รูปที่ 3.3 แสดงมู่เล่ขับและมู่เล่ตามที่มีระยะห่างไม่คงที่ มู่ระหว่างระนาบของมู่เล่ทั้งสองมีค่าไม่คงที่

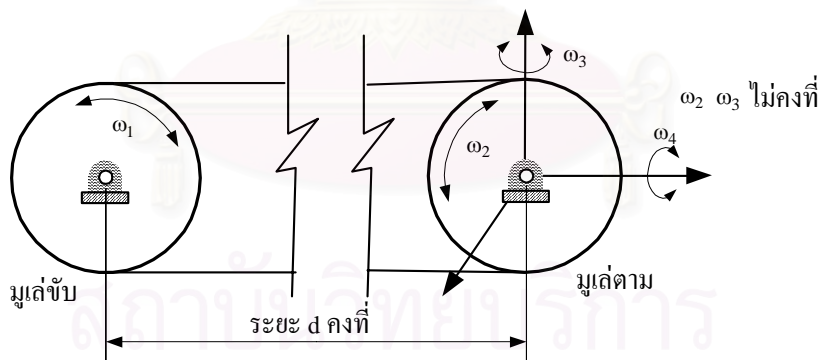
งานวิจัยนี้จึงแบ่งลักษณะการส่งผ่านกำลังด้วยสายพานและมูเล่ออกเป็นสองแบบเพื่อให้การออกแบระบบส่งผ่านกำลังง่ายขึ้นดังนี้

- ระยะห่างระหว่างมูเล่ขับและมูเล่ตามมีค่าไม่คงที่ ะนาบของมูเล่ขับและมูเล่ตามขนานกันดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงมูเล่ขับและมูเล่ตามที่มีระยะห่างไม่คงที่ ะนาบของมูเล่ขับและมูเล่ตามขนานกัน

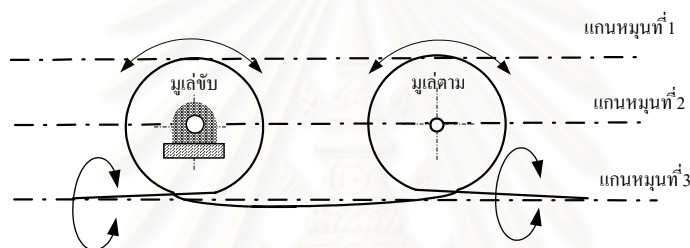
- ระยะห่างระหว่างมูเล่ขับและมูเล่ตามมีค่าคงที่ ะนาบของมูเล่ขับและมูเล่ตามไม่ขนานกันดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงมูเล่ขับและมูเล่ตามที่มีระยะห่างคงที่ ะนาบของมูเล่ขับและมูเล่ตามไม่ขนานกัน

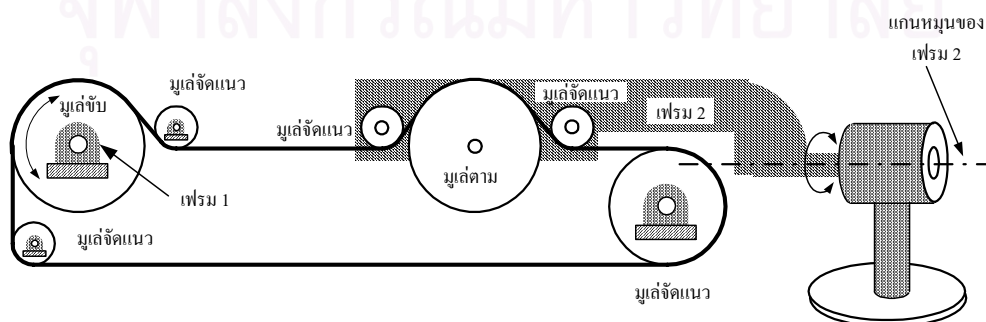
ระบบส่งกำลังทั้งสองแบบที่กล่าวมานี้เมื่อนำมารวมกันหรือนำมาประกอบเข้าด้วยกันแล้วจะเป็นระบบส่งผ่านกำลังที่มีลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 3.3 ได้ซึ่งเป็นระบบส่งผ่านกำลังที่ต้องการเนื่องจากระบบส่งผ่านกำลังโดยทั่วไปที่ได้ศึกษามาในบทที่ 2 นั้นระบบส่งผ่านกำลังแบบสายพานและมูเล่ขับโหลดแบบเชิงเส้น (Belt and pulley driving a linear load) ระบบส่งผ่านกำลังแบบแลคและพีเนียน (Rack and pinion) และระบบส่งผ่านกำลังแบบเทนดอนและมูเล่

(Tendon-pulley-train) สามารถนำมาใช้ส่งผ่านกำลังในลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 3.4 ได้ แต่ไม่มีระบบส่งผ่านกำลังที่สามารถส่งผ่านกำลังในลักษณะดังรูปที่ 3.3 หรือ 3.5 ได้ ในงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบระบบส่งผ่านกำลังที่สามารถส่งผ่านกำลังในลักษณะดังที่แสดงในรูปที่ 3.5 เพื่อที่จะได้นำมาประกอบเข้ากับระบบส่งผ่านกำลังแบบเทนดอนและมูเล่ (Tendon-pulley-Train) หรือระบบส่งผ่านกำลังแบบแลคและพีเนียน (Rack and pinion) หลักการออกแบบมีดังนี้ พิจารณารูปที่ 3.6 สายพานของมูเล่ขับและมูเล่ตามพาดผ่านมูเล่ทั้งสองในแนวสัมผัสกับมูเล่ ถ้าบิดมูเล่ตามรอบแกนหมุนที่ 1 หรือแกนหมุนที่ 2 ที่ละน้อยจะพบว่าสายพานจะเริ่มตึงขึ้นและสายพานจะเริ่มหลุดออกจากมูเล่เมื่อบิดเพิ่มขึ้นไปอีกแรงตึงก็จะเพิ่มขึ้นอีก เมื่อบิดไปจนถึงค่าๆหนึ่งจะทำให้สายพานหลุดออกจากมูเล่ทั้งสอง แต่ถ้าบิดมูเล่ตามรอบแกนหมุนที่ 3 ที่ละน้อยจะพบว่าแรงตึงในสายพานจะไม่เพิ่มขึ้นหรือลดลงและสายพานก็ยังไม่หลุดออกจากมูเล่



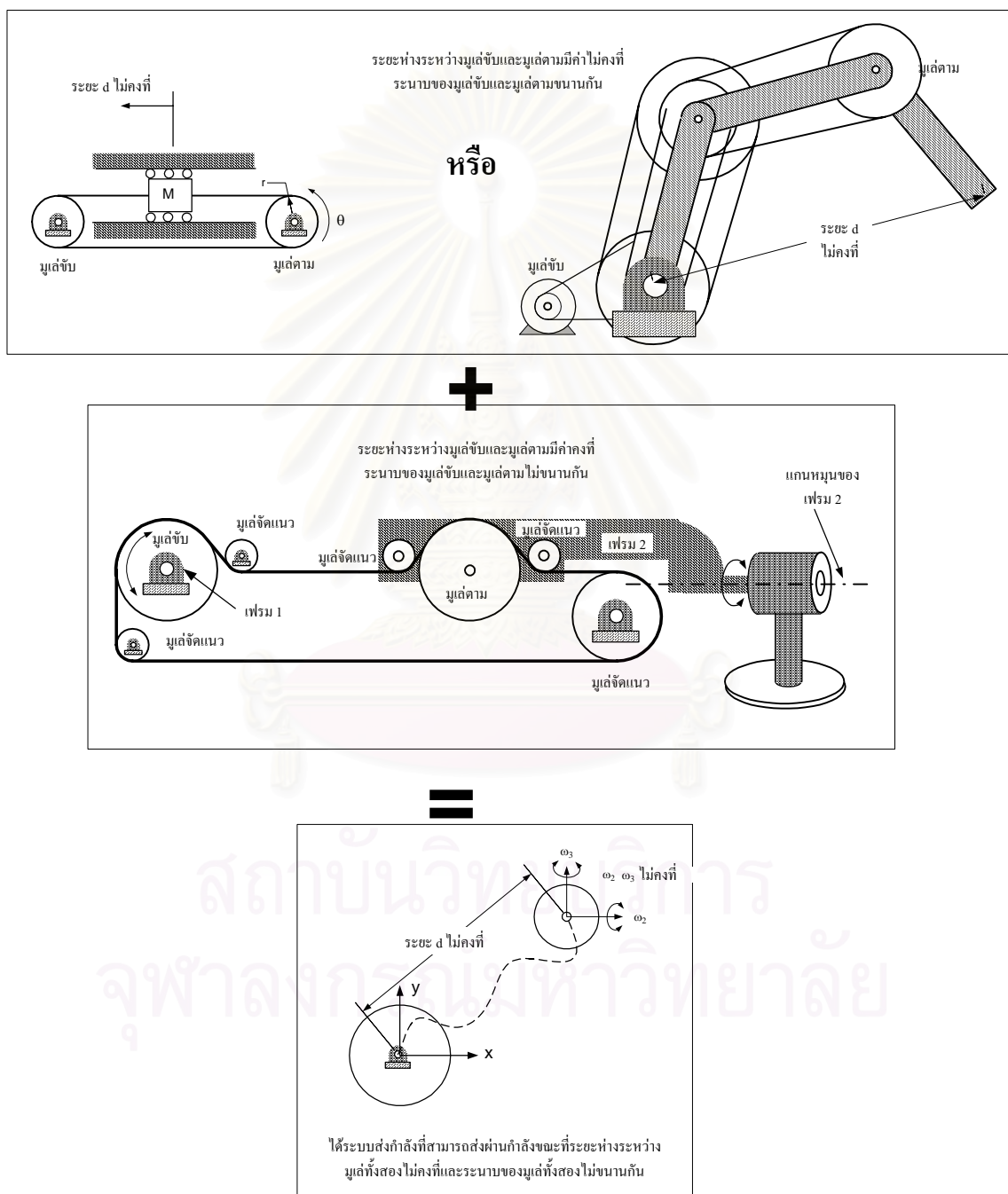
รูปที่ 3.6 แสดงการจัดแนวแนวของสายพานเพื่อกันสายพานหลุดออกจากมูเล่

สำหรับระบบมูเล่และสายพานที่สามารถใช้งานในขณะที่ระนาบของมูเล่ทั้งสองไม่ได้อยู่ในระนาบเดียวกันเมื่อนำหลักการที่แสดงในรูปที่ 3.6 มาใช้แสดงดังรูปที่ 3.7 มูเล่ขับหมุนรอบแกนเฟรม 1 ซึ่งถูกยึดอยู่กับที่ มูเล่ตามหมุนรอบแกนเฟรม 2 โดยเฟรม 2 สามารถหมุนรอบแกนหมุนของเฟรม 2 ได้ จากรูปที่ 3.7 เราสามารถหมุนเฟรม 2 รอบแกนหมุนของเฟรม 2 และให้มูเล่ขับส่งผ่านกำลังไปยังมูเล่ตามได้ในเวลาเดียวกัน โดยสายพานยังไม่หลุดออกจากมูเล่ ขณะเดียวกันความตึงของสายพานก็มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง



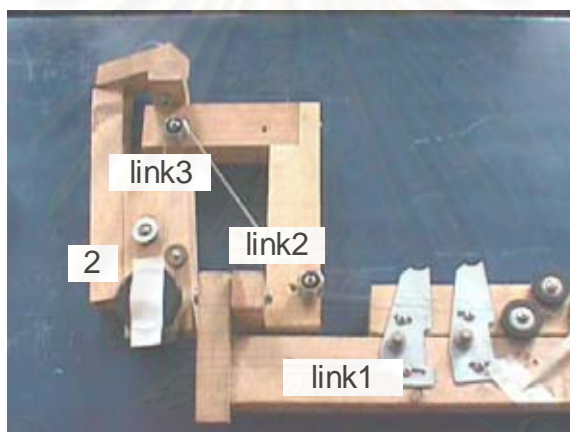
รูปที่ 3.7 แสดงการจัดแนวของสายพานเมื่อไม่ให้สายพานหลุดออกจากมูเล่

เมื่อนำระบบส่งผ่านกำลังที่แสดงในรูปที่ 3.7 ซึ่งมูเล่ขับและมูเล่ตามที่มีระยะห่างคงที่ ระยะเวลาของมูเล่ขับและมูเล่ตามไม่ยาวนานกันมารวมกับระบบส่งผ่านกำลังแบบ Belt and pulley driving a linear load ซึ่งมูเล่ขับและมูเล่ตามที่มีระยะห่างไม่คงที่ที่ระยะห่างระหว่างมูเล่ทั้งสองยาวนานกัน จะได้ระบบส่งผ่านกำลังที่สามารถส่งผ่านกำลังได้ขณะที่ระยะห่างระหว่างมูเล่ขับมูเล่ตามไม่คงที่และระยะเวลาของมูเล่ทั้งสองไม่ยาวนานกันดังรูปที่ 3.8

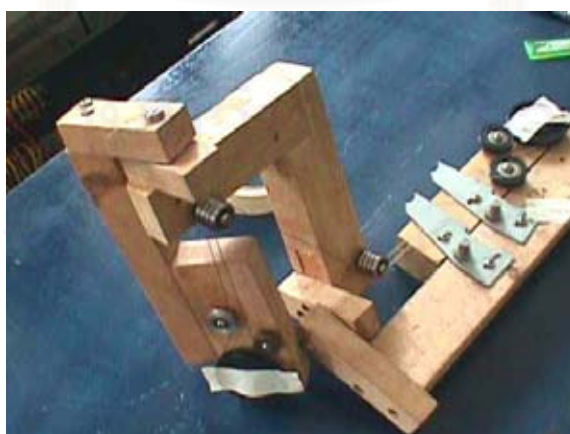


รูปที่ 3.8 แสดงหลักการของระบบส่งผ่านกำลังที่สามารถส่งผ่านกำลังขณะที่ระยะห่างระหว่างมูเล่ขับและมูเล่ตามมีค่าไม่คงที่และระยะเวลาของมูเล่ทั้งสองไม่ยาวนานกัน

เพื่อให้แน่ใจว่าระบบมู่เล่และสายพานดังกล่าวสามารถทำงานได้จึงได้สร้างแบบจำลองขึ้นเพื่อทดสอบ ในการสร้างแบบจำลองนั้นจะพิจารณาจากขั้นตอนสุดท้ายของแขนกลนำซึ่งในที่นี้คือก้านต่อโยงที่ 6 เป็นหลักเนื่องจากก้านต่อโยงที่ 6 นี้อยู่ไกลที่สุดดังนั้นถ้าสามารถออกแบบระบบมู่เล่และสายพานที่ส่งผ่านกำลังจากก้านต่อโยงที่ 1 ไปยังก้านต่อโยงที่ 6 ได้ ระบบมู่เล่และสายพานสำหรับขั้นตอนที่เหลือก็จะมีปัญหา แบบจำลองในที่แสดงในรูป 3.8 นี้สร้างจากไม้ซึ่งเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายและสามารถนำมาสร้างได้ง่าย ส่วนมู่เล่ที่ใช้ทดสอบได้ใช้มู่เล่มือสองที่หาซื้อจากร้านขายโลหะทั่วไปแบบจำลองประกอบไปด้วยก้านต่อโยง 3 ก้าน มีข้อยึด 2 ข้อ ข้อยึดที่ 1 และ 2 สามารถบิดไปมาได้ก้านต่อโยงที่ 1 จะมีมู่เล่ที่ 1 และมู่เล่จัดแนวติดอยู่ ก้านต่อโยงที่ 3 จะมีมู่เล่ที่ 2 และมู่เล่จัดแนวติดอยู่เช่นกันส่วนก้านต่อโยงที่ 2 จะมีแค่มู่เล่จัดแนวติดอยู่เท่านั้น



รูปที่ 3.9 แสดงแบบจำลองการจัดแนวของมู่เล่และสายพานในตำแหน่งที่ข้อยึดที่ยังไม่มีการบิดตัว



รูปที่ 3.10 แสดงแบบจำลองการจัดแนวของมู่เล่และสายพานในตำแหน่งที่ข้อยึดถูกบิดเป็นมุมต่างๆ

แถบสีขาวที่อยู่ในรูปที่ 3.9 และ 3.10 คือเครื่องหมายแสดงตำแหน่งมุมของมู่เล่ทั้งสอง ในการทดสอบแบบจำลองแบ่งเป็น

- บิดข้อต่อของแบบจำลองไปมาโดยขณะบิดนั้นยึดมู่เล่ที่ 2 ไว้ไม่ให้หมุนแล้วสังเกตมู่เล่ที่ 1 ว่าหมุนหรือไม่
- บิดข้อต่อทั้งสองเป็นมุมค่าหนึ่งหลังจากนั้นบิดมู่เล่ที่ 1 ไปเป็นมุมๆหนึ่งแล้วสังเกตว่ามู่เล่ที่ 2 บิดเป็นมุมเท่ากับมู่เล่ที่ 1 หรือไม่

ผลการทดสอบปรากฏว่า เมื่อบิดข้อต่อต่างๆไปมาขณะที่มู่เล่ที่ 2 ยึดไว้ไม่ให้หมุนนั้น มู่เล่ที่ 1 ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของมุม ขณะที่ตั้งมุมที่ข้อต่อเป็นมุมต่างๆหลังจากนั้นทำการบิดมู่เล่ที่ 1 ไปเป็นมุมค่าต่างๆมู่เล่ที่ 2 ก็บิดไปเป็นมุมเท่ากับมู่เล่ที่ 1 จากผลการทดสอบที่ได้สามารถสรุปได้ว่าระบบส่งผ่านกำลังที่ออกแบบไว้สามารถนำไปใช้งานได้จริง

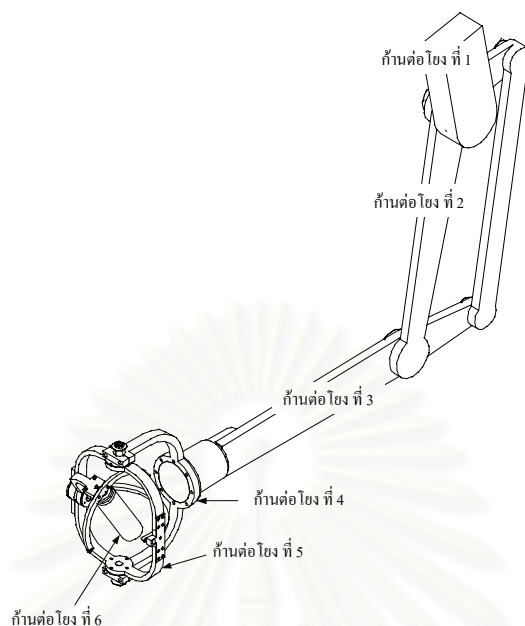
3.2 การออกแบบกลไกของแขนกลนำ

จากระบบมู่เล่และสายพานที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อที่แล้วสามารถนำมาแก้ไขตำแหน่งของมู่เล่จัดแนวเพื่อให้เหมาะสมกับลักษณะของแขนกลนำ

แขนกลนำที่ได้ออกแบบไว้ในตอนแรกแสดงดังรูปที่ 3.11 ซึ่งรูปแบบหลักของแขนกลเป็นกลไก 5 ข้อยึด (Five-bar-link-mechanism) สำหรับ 3 ข้อยึดแรก ส่วน 3 ข้อยึดหลังเป็นแบบ Z-Y-X Euler angle โดยใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบมู่เล่และสายพานทั้งหมด ผู้ควบคุมสามารถควบคุมแขนกลนำโดยใช้มือจับที่คั่นบังคับของแขนกลดังรูป

ข้อดีของแขนกลนำลักษณะนี้คือ

- เนื่องจากมีโครงสร้างแบบกลไก 5 ข้อยึด (Five-bar-link-mechanism) อุปกรณ์ขับเคลื่อน (Motor) อุปกรณ์ตรวจรู้ของข้อต่อ 3 ข้อแรกสามารถติดตั้งที่ฐานได้โดยไม่ต้องใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบมู่เล่และสายพาน
- ข้อต่อส่วนใหญ่เป็นแบบข้อต่อหมุน (revolute joint) สามารถสร้างได้ง่าย
- มีสมการการเคลื่อนที่ (Kinematics) ที่สามารถหาในรูปของโครสฟอร์ม (Close form)



รูปที่ 3.11 แขนกลนำที่ได้ออกแบบไว้ในขั้นต้น

ข้อเสียของแขนกลนำลักษณะนี้คือ

- การติดตั้งระบบส่งผ่านกำลังกับแขนกลนำที่แสดงในรูปทำได้ยากเนื่องจากต้องอาศัยไอดีลพูลเลย์หรือพูลเลย์พัก (idle pulley) มากในการพักสายพาน อีกทั้งไอดีลพูลเลย์ต้องจัดเรียงตัวในแนวเดียวกันทำให้การจัดแนวสายพานให้อยู่ชิดกันนั้นทำได้ยาก

จากข้อเสียดังกล่าวจึงได้ทำการออกแบบแขนกลนำขึ้นใหม่โดยการนำข้อต่อเลื่อนมาใช้กับข้อต่อที่ 3 ทำให้ไม่ต้องใช้ไอดีลพูลเลย์ (idle pulley) ทำให้สามารถจัดแนวการวางตัวของสายพานได้ง่าย สมการการเคลื่อนที่สามารถหาในรูปโครสฟอร์มได้แต่ข้อเสียของแขนกลลักษณะนี้คือ

- ข้อต่อเลื่อนสร้างและประกอบยากกว่าข้อต่อหมุน
- ข้อต่อเลื่อนราคาแพงกว่าข้อต่อหมุน
- ข้อต่อเลื่อนที่มีขายทั่วไปนำมาใช้กับแขนกลนำได้ยากเนื่องจากข้อต่อเลื่อนที่แขนกลนำต้องการนั้นจะต้องมีช่องสำหรับให้สายพานรอดผ่าน
- ข้อต่อเลื่อนส่วนใหญ่จะขายเป็นชุด ประกอบด้วยตัวยึดลูกปืนแบบเลื่อนและเพลาลื่นซึ่งเพลาลื่นทำจากโลหะที่มีความแข็งแรงมีน้ำหนักมากเป็นเพลาดัน ไม่

เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นส่วนประกอบของแขนกลนำ (แขนกลนำต้องมีน้ำหนักเบา)

ด้วยเหตุนี้จึงต้องสร้างข้อต่อเลื่อนเพื่อแขนกลนำโดยเฉพาะข้อต่อเลื่อนที่สร้างขึ้นประกอบด้วย

- ตลับลูกปืนซึ่งหาซื้อได้ทั่วไป
- ท่ออลูมิเนียมกลมวง
- โครงยึดตลับลูกปืน

เนื่องจากการสร้างข้อต่อเลื่อนขึ้นมาใหม่จึงมีความจำเป็นที่ต้องสร้างแบบจำลองเพื่อทดสอบ ดังรูป 3.12 จากการทดสอบกับแบบจำลองพบว่าข้อต่อเลื่อนที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานได้ดีและมีราคาถูกลงกว่าทั้งยังสามารถใช้กับท่ออลูมิเนียมกลมวงขนาดต่างๆได้อีกด้วย



รูปที่ 3.12 แบบจำลองข้อต่อเลื่อนที่จะนำมาใช้กับแขนกลนำ

3.3 รายละเอียดของแขนกลนำ

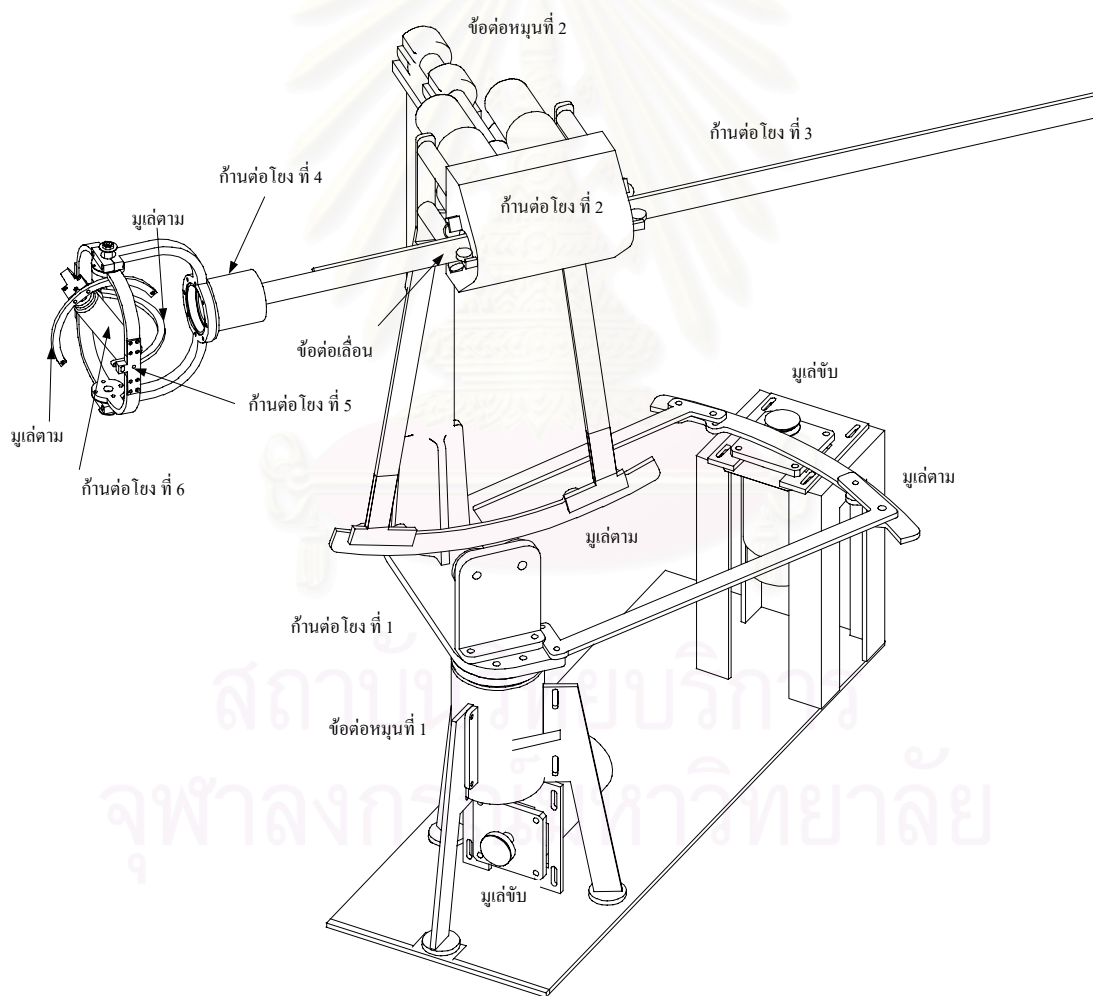
จากระบบส่งผ่านกำลังที่ได้ออกแบบ แบบจำลองระบบส่งผ่านกำลังที่ได้ทำการทดสอบ และแบบจำลองของข้อต่อเลื่อนได้นำไปสู่การออกแบบและสร้างแขนกลนำที่มี 6 แขน มีจำนวน ก้านต่อโยงทั้งหมด 7 ก้านดังรูปที่ 3.13 ข้อต่อที่ 1 และ 2 เป็นข้อต่อหมุน ข้อต่อที่ 3 เป็นข้อต่อเลื่อน ข้อต่อที่ 4 ถึง 6 เป็นข้อต่อหมุน แขนทั้ง 3 ของข้อต่อที่ 4 ถึง 6 ตัดกันแบบ Z-Y-Z Euler

angle ก้านต่อโยง 4 อันแรกทำหน้าที่กำหนดตำแหน่งของแขนกลนำก้านต่อโยง 3 อันหลังทำหน้าที่กำหนดทิศทาง รายละเอียดของแขนกลนำมีดังนี้

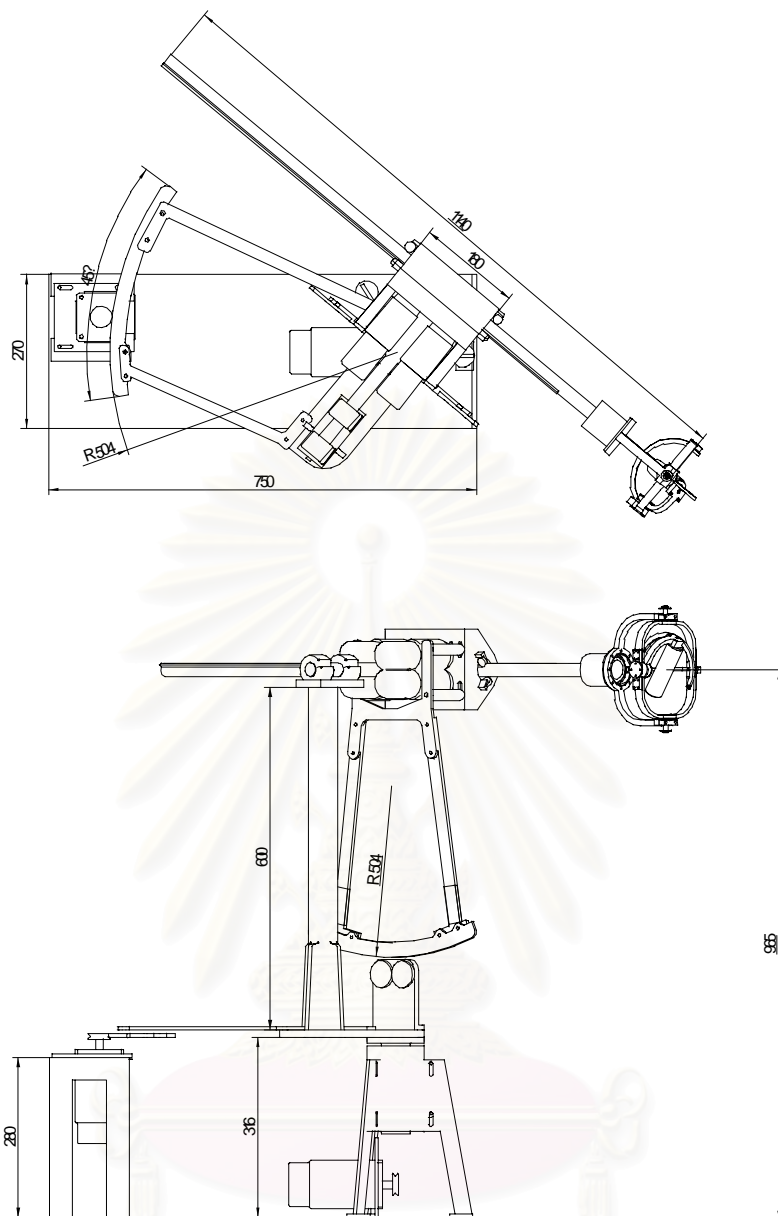
- ข้อต่อที่ 1 เป็นข้อต่อแบบข้อต่อหมุน ใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบมูเล่และเคเบิล (ดูรูปที่ 2.8) ประกอบด้วยมูเล่ขับ มูเล่ตามและเคเบิลชนิดเหนียวพิเศษ รัศมีมูเล่ตามเท่ากับ 50 เซ็นติเมตร รัศมีมูเล่ขับเท่ากับ 1 เซ็นติเมตร มูเล่ขับติดตั้งบนเพลลาของมอเตอร์ขนาด 250 วัตต์ซึ่งมีอุปกรณ์วัดมุมที่มีความละเอียด 1024 พัลส์ต่อรอบ มุมใช้งานของข้อต่อที่ 1 คือ -15 องศาถึง 15 องศา รายละเอียดของมูเล่ขับมูเล่ตามของข้อต่อที่ 1 ดูรูปที่ 3.13
- ข้อต่อที่ 2 เป็นข้อต่อแบบข้อต่อหมุน ใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบมูเล่และเคเบิล (ดูรูปที่ 2.8) ประกอบด้วยมูเล่ขับ มูเล่ตามและเคเบิลชนิดเหนียวพิเศษ รัศมีมูเล่ตามเท่ากับ 50 เซ็นติเมตร รัศมีมูเล่ขับเท่ากับ 1 เซ็นติเมตร มูเล่ขับติดตั้งบนเพลลาของมอเตอร์ขนาด 250 วัตต์ซึ่งมีอุปกรณ์วัดมุมที่มีความละเอียด 1024 พัลส์ต่อรอบ มุมใช้งานของข้อต่อที่ 2 คือ 75 องศาถึง 105 องศา รายละเอียดของมูเล่ขับมูเล่ตามของข้อต่อที่ 2 ดูรูปที่ 3.13
- ข้อต่อที่ 3 เป็นข้อต่อแบบข้อต่อเลื่อนที่ได้ออกแบบไว้ ใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบสายพานและมูเล่ขับโหดแบบเชิงเส้น (Belt and pulley driving a linear load) (ดูรูปที่ 2.11) ประกอบด้วยมูเล่ขับ ท่อลูมิเนียมกลวง และเคเบิลชนิดเหนียวพิเศษ รัศมีของมูเล่ขับเท่ากับ 1.5 เซ็นติเมตร มูเล่ขับถูกติดตั้งบนมอเตอร์ขนาด 90 วัตต์ซึ่งมีอุปกรณ์วัดมุมที่มีความละเอียด 2500 พัลส์ต่อรอบ ระยะชักของข้อต่อที่ 3 คือ 150 มิลลิเมตร รายละเอียดของมูเล่ขับมูเล่ตามของข้อต่อที่ 3 ดูรูปที่ 3.13 และ 3.15
- ข้อต่อที่ 4 เป็นข้อต่อแบบข้อต่อหมุนใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบมูเล่และเคเบิลตามแบบที่ได้ออกแบบไว้ (ดูรูปที่ 3.7) ประกอบด้วยมูเล่ขับ มูเล่ตามและเคเบิลชนิดเหนียวพิเศษ รัศมีมูเล่ตามเท่ากับ 11 เซ็นติเมตร รัศมีมูเล่ตามเท่ากับ 1.5 เซ็นติเมตร มูเล่ขับติดตั้งบนมอเตอร์ขนาด 90 วัตต์ซึ่งมีอุปกรณ์วัดมุมที่มีความละเอียด 330 พัลส์ต่อรอบ มุมใช้งานของข้อต่อที่ 4 คือ -90 องศาถึง 90 องศา รายละเอียดของมูเล่ขับมูเล่ตามของข้อต่อที่ 4 ดูรูปที่ 3.13 และ 3.16
- ข้อต่อที่ 5 เป็นข้อต่อแบบข้อต่อหมุนใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบมูเล่และเคเบิลตามแบบที่ได้ออกแบบไว้ (ดูรูปที่ 3.7) ประกอบด้วยมูเล่ขับ มูเล่ตามและเคเบิลชนิดเหนียวพิเศษ รัศมีมูเล่ตามเท่ากับ 7 เซ็นติเมตร รัศมีมูเล่ตามเท่ากับ 1.5 เซ็นติเมตร มูเล่ขับติดตั้งบนมอเตอร์ขนาด 90 วัตต์ซึ่งมีอุปกรณ์วัดมุมที่มีความละเอียด 330 พัลส์ต่อรอบ มุมใช้งาน

ของข้อต่อที่ 5 คือ -90 องศาถึง 90 องศา รายละเอียดของมูเล่ขับมูเล่ตามของข้อต่อที่ 5 ดูรูปที่ 3.13 และ 3.16

- ข้อต่อที่ 6 เป็นข้อต่อแบบข้อต่อหมุนใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบมูเล่และเคเบิลตามแบบที่ได้ออกแบบไว้ (ดูรูปที่ 3.7) ประกอบด้วยมูเล่ขับ มูเล่ตามและเคเบิลชนิดเหนียวพิเศษ รัศมีมูเล่ตามเท่ากับ 7 เซ็นติเมตร รัศมีมูเล่ตามเท่ากับ 1.5 เซ็นติเมตร มูเล่ขับติดตั้งบนมอเตอร์ขนาด 90 วัตต์ซึ่งมีอุปกรณ์วัดมุมที่มีความละเอียด 1500 พัลส์ต่อรอบ มุมใช้งานของข้อต่อที่ 6 คือ -90 องศาถึง 90 องศา รายละเอียดของมูเล่ขับมูเล่ตามของข้อต่อที่ 6 ดูรูปที่ 3.13 และ 3.16

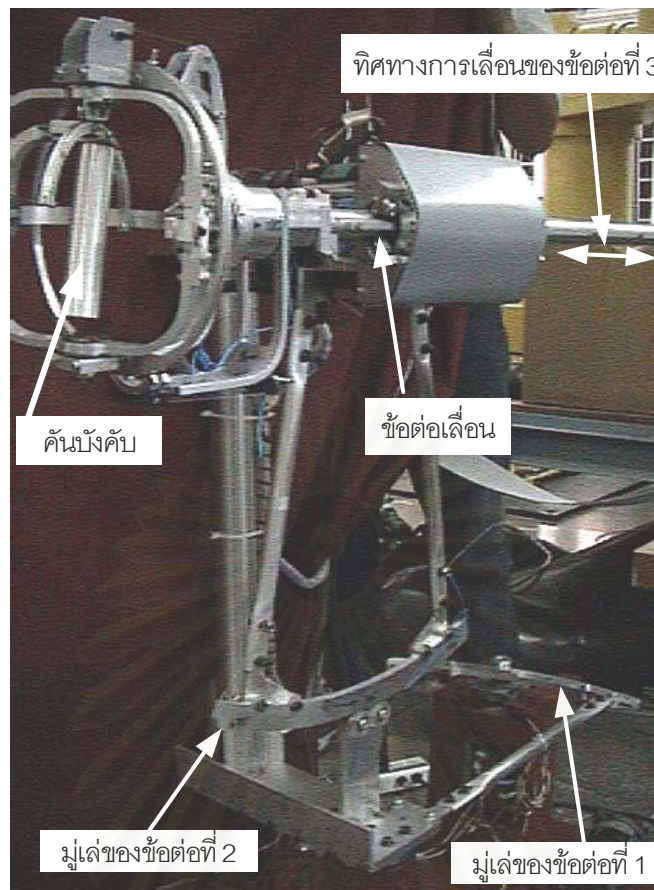


รูปที่ 3.13 แสดงส่วนประกอบและการเรียกชื่อก้านต่อโยงของแขนกลนำ

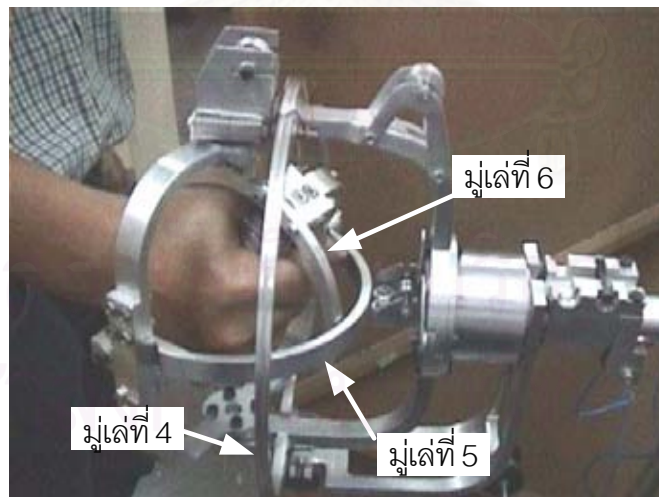


รูปที่ 3.14 แสดงขนาดของแขนกลนำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.15 แขนกลนำที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว

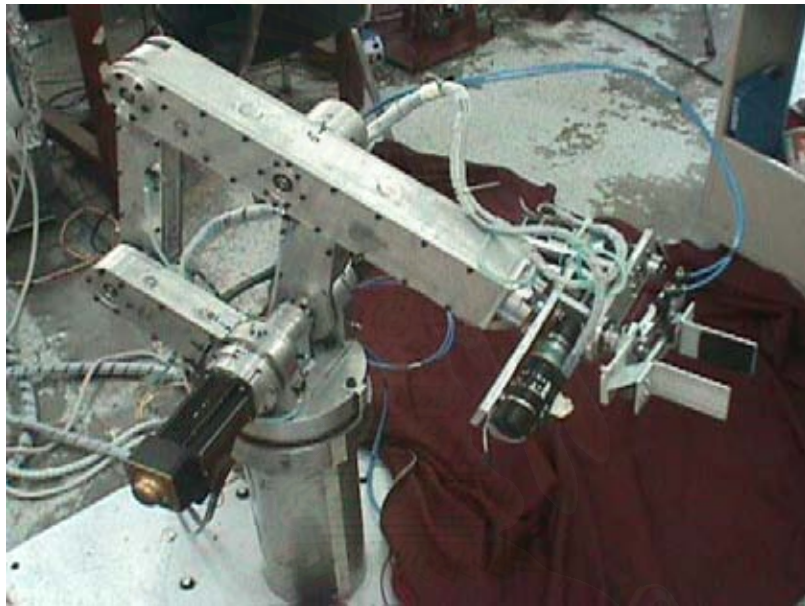


รูปที่ 3.16 แขนกลนำในส่วนของข้อมือ

บทที่ 4

ข้อมูลของแขนกลตาม

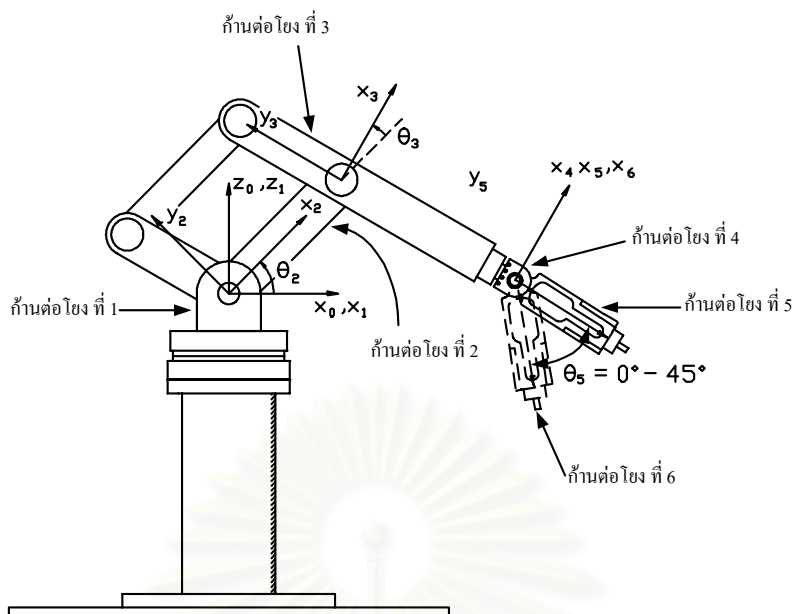
แขนกลตามที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ต้องเป็นแขนกลที่มีจำนวนองศาอิสระมากกว่าหรือเท่ากับ 6 ขึ้นไปในที่นี้ใช้แขนกลที่ทำงานด้วยความเร็วสูง (Chula 3) เป็นแขนกลตาม ซึ่งเป็นแขนกลที่ออกแบบสร้างขึ้นมาเพื่อให้สามารถทำงานด้วยความเร็วสูงรูปแบบหลักของแขนกลจุฬา 3 นั้นเป็นกลไก 5 ข้อยึด (Five-bar-link-mechanism) วางตัวขับเคลื่อนแบบขนานดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แขนกลจุฬา 3

4.1 ปรับปรุงข้อมือของแขนกลจุฬา 3

ข้อมือของแขนกลจุฬา 3 ที่มีอยู่เดิมนั้นเป็นแบบ Z-Y-Z Euler angle ข้อมือลักษณะนี้เหมาะสมในการใช้งานที่มุมของก้านต่อโยงที่ 5 อยู่ระหว่าง 0 ถึง 180 องศาแต่เนื่องจากข้อมือเดิมของแขนกลจุฬา 3 นั้นใช้งานได้เพียง 0 ถึง 45 องศาเท่านั้น ที่ตำแหน่งมุม 0 เป็นมุมเอกฐานไม่สามารถใช้งานได้ ดูรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การตั้งแกนหมุนทั้ง 6 แกนและการเรียกชื่อแกนต่างๆของแขนกลจุฬา 3

สาเหตุที่ก้านต่อโยงที่ 5 หมุนได้เพียง 45 องศา นั้นมาจากอุปกรณ์ขับเคลื่อนของก้านต่อโยงที่ 5 ไปจัดการหมุนกับข้อต่อของก้านต่อโยงที่ 4 ที่มีมุม 45 องศา ด้วยเหตุนี้จึงได้ทำการแก้ไขปรับปรุงข้อมือของแขนกลจุฬา 3 ใหม่เพื่อให้สามารถใช้งานได้ดีขึ้น การแก้ไขทำโดยการย้ายตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ขับเคลื่อนของก้านต่อโยงที่ 5 และอุปกรณ์ขับเคลื่อนของก้านต่อโยงที่ 6 ข้อมือที่ได้รับการแก้ไขแล้วแสดงดังรูปที่ 4.3 หลังจากแก้ไขแล้วทำให้ก้านต่อโยงที่ 5 สามารถมีมุมใช้งานระหว่าง 0-100 องศา



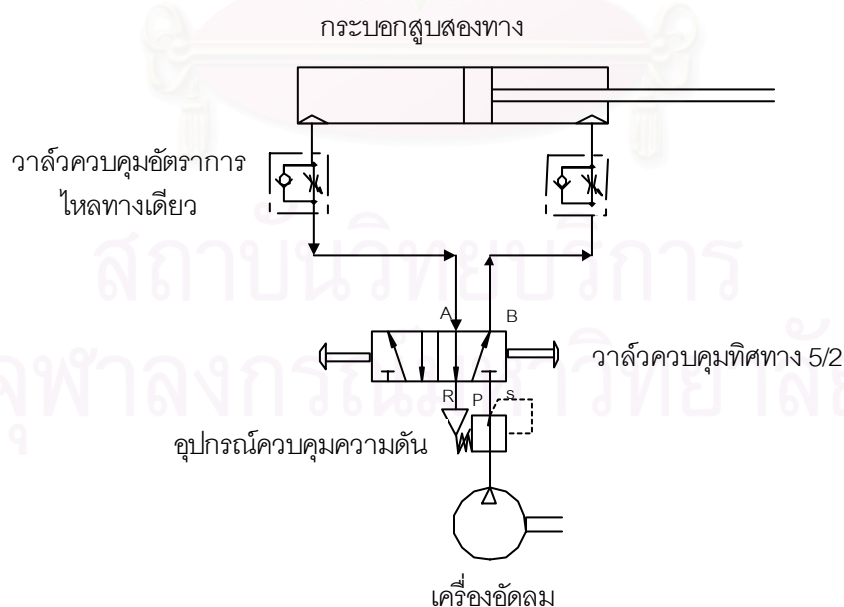
รูปที่ 4.3 ข้อต่อที่ 4, 5 และ 6 ที่ได้รับการแก้ไขแล้ว

4.2 อุปกรณ์จับยึด (Gripper)

การใช้งานแขนกลนำแขนกลตามนั้นส่วนมากจะใช้กับงานหยิบจับสิ่งของในสถานที่ที่ไม่ปลอดภัย แขนกลตามจำเป็นต้องมีอุปกรณ์จับยึดเพื่อให้สามารถจับยึดชิ้นงานได้ เนื่องจากแขนกลจุฬา 3 ไม่มีอุปกรณ์จับยึดจึงได้สร้างอุปกรณ์จับยึดสำหรับแขนกลจุฬา 3 ขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบการควบคุมของแขนกลนำและแขนกลตามว่ามีประสิทธิภาพเพียงใด อุปกรณ์จับยึดที่สร้างขึ้นประกอบไปด้วย

- อุปกรณ์ทำงานของระบบนิวเมติก
- อุปกรณ์ควบคุมการทำงานระบบนิวเมติก
- ส่วนของตัวจับยึดใช้อลูมิเนียมเป็นวัสดุ

สาเหตุที่ใช้อุปกรณ์จับเป็นระบบนิวเมติกแทนที่จะใช้มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงเพราะว่าในการจับยึดสิ่งของนั้นส่วนมากจะเป็นการจับยึดที่ใช้เวลานานถ้าใช้มอเตอร์เป็นอุปกรณ์จับจะต้องมีตัวควบคุมกระแสเช่นนั้นอาจทำให้อุปกรณ์จับเสียหายได้เนื่องจากกินกระแสเกินพิกัดด้วยเหตุนี้จึงตัดสินใจใช้ระบบนิวเมติกเป็นอุปกรณ์จับ



รูปที่ 4.4 ระบบนิวเมติกที่ใช้ในอุปกรณ์จับยึด

ระบบนิวเมติกที่ใช้ประกอบด้วย

- กระบอกสูบแบบสองทาง (Double acting cylinder) กระบอกสูบแบบสองทางจะใช้ลมดันเข้าทำให้ก้านสูบเคลื่อนที่เข้าและออกทั้งสองทาง แรงที่ได้จากกระบอกสูบชนิดนี้จะมากกว่ากระบอกสูบแบบทางเดียวเพราะมีแรงสปริงเป็นตัวต้านทาน จึงเหมาะกับงานทุกประเภทที่ต้องการการเคลื่อนที่ในลักษณะที่เป็นแนวเส้นตรง
- วาล์วควบคุม 5 ทาง 2 ตำแหน่ง (Directional control valve) วาล์วควบคุมทิศทางการไหลของลมอัดมีหน้าที่เลือกทิศทางการไหลของลมอัดให้ไปตามทิศที่ต้องการ ทั้งนี้เพื่อให้อุปกรณ์ทำงาน เช่น กระบอกสูบ มอเตอร์ลม สามารถทำงานและเคลื่อนที่ในทิศทางที่ถูกต้องตามความต้องการ โดยใช้หลักการเปิดปิดลมอัดจากรูลมอัดหนึ่งไปยังรูลมอัดอีกรูหนึ่ง
- วาล์วควบคุมอัตราการไหลของลมทางเดียว (One way flow control valve) วาล์วชนิดนี้สามารถควบคุมอัตราการไหลของแรงดันลมได้เพียงทิศทางเดียว ดังนั้นจึงเป็นวาล์วที่ควบคุมความเร็วของกระบอกสูบตอนเคลื่อนที่เข้าออกได้อย่างอิสระ
- เครื่องอัดลม (Compressor) เครื่องอัดลมจะทำหน้าที่ผลิตให้ได้ความดันตามที่ต้องการ จากนั้นจะส่งลมที่มีความดันเหล่านี้ไปตามท่อไปยังอุปกรณ์ต่างๆ
- อุปกรณ์ควบคุมความดัน (Pressure regulator) ทำหน้าที่รักษาความดันใช้งานให้คงที่โดยไม่เปลี่ยนแปลงไปตามความดันของลมอัดและรักษาปริมาณลมอัดในการใช้งานให้คงที่

การทำงานของวงจร

สภาวะปกติ (ดูรูปที่ 4.4 ประกอบ) แรงดันลมจากรู P จะไหลผ่านรู B เข้าไปยังเข้าไปยังห้องสูบส่วนหัวหรือด้านขวามือดันให้ลูกสูบเคลื่อนที่เข้า ส่วนลมจากห้องสูบส่วนท้ายหรือด้านซ้ายมือจะระบายออกสู่อากาศผ่านรู A ไปยังรู R

สภาวะะสั่งงาน เมื่อกดวาล์ว 5/2 แรงดันลมจากรู P จะเปลี่ยนทิศทางการไหล คือแรงดันลมจากรู P จะไหลผ่านรู A เข้าไปดันให้ลูกสูบเคลื่อนที่ออก ส่วนลมจากห้องสูบด้านขวามือจะระบายออกสู่อากาศผ่านรู B ไปยังรู S

4.3 คิเนแมติกส์ของแขนกลจุฬา 3

คิเนแมติกส์ประกอบไปด้วย Forward kinematics และ Inverse kinematics โดยที่ Forward kinematics เป็นการหาตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนเมื่อกำหนดค่ามุมของแต่ละ Joint มาให้ ส่วน Inverse kinematics ก็คือการหาค่ามุมของแต่ละ Joint เมื่อต้องการให้ปลายแขนกล อยู่ในตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการ

4.3.1 Forward kinematics

ตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลจุฬา 3 ที่สัมพันธ์กับค่ามุมต่างๆที่ข้อต่อ เขียนอยู่ในรูป Transformation matrix ของปลายแขนเทียบกับ แกนนิ่ง (0) ได้ดังสมการ (4.3.1)

$${}^0_T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3.1)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} r_{11} &= c_1[c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_{23}s_5c_6] + s_1[s_4c_5c_6 + c_4s_6] \\ r_{12} &= c_1[-c_{23}(c_4c_5s_6 + s_4c_6) + s_{23}s_5s_6] - s_1[s_4c_5s_6 - c_4c_6] \\ r_{13} &= c_1[c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5] + s_1s_4s_5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r_{21} &= s_1[c_{23}(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_{23}s_5c_6] - c_1[s_4c_5c_6 + c_4s_6] \\ r_{22} &= s_1[-c_{23}(c_4c_5s_6 + s_4c_6) + s_{23}s_5s_6] + c_1[s_4c_5s_6 - c_4c_6] \\ r_{23} &= s_1[c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5] - c_1s_4s_5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r_{31} &= s_{23}[c_4c_5c_6 - s_4s_6] + c_{23}s_5c_6 \\ r_{32} &= -s_{23}[c_4c_5s_6 + s_4c_6] - c_{23}s_5s_6 \\ r_{33} &= s_{23}c_4s_5 - c_{23}c_5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_x &= c_1[l_5s_{23} + l_2c_2] + r_{13}l_6 \\ p_y &= s_1[l_5s_{23} + l_2c_2] + r_{23}l_6 \\ p_z &= l_2s_2 - l_5c_{23} + r_{33}l_6 \end{aligned}$$

เมื่อ p_x, p_y, p_z แทนตำแหน่งของปลายแขนที่อยู่ห่างจากเฟรม 0 ในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ

และ $\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$ เป็น Rotation matrix ของเฟรมที่ปลายแขน (T) เทียบกับเฟรม 0

หมายเหตุ	สัญลักษณ์	s_i แทน $\sin(\theta_i)$
		c_i แทน $\cos(\theta_i)$
	และ	s_{ij} แทน $\sin(\theta_i + \theta_j)$
		c_{ij} แทน $\cos(\theta_i + \theta_j)$

4.3.2 Inverse kinematics

เมื่อต้องการให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งและทิศทางที่กำหนด จำเป็นจะต้องทราบมุมของแต่ละข้อต่อของแขนกลที่จะทำให้แขนกลอยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ โดยนำค่า p_x, p_y, p_z (ตำแหน่ง) และ $r_{11}, r_{12}, \dots, r_{33}$ (ทิศทาง) ที่ต้องการมาคำนวณหาค่ามุม θ ต่างๆ ที่สัมพันธ์กับตำแหน่งและทิศทางนั้นๆ ค่ามุม θ ต่างๆ ที่สัมพันธ์กับตำแหน่งและทิศทางของแขนกล จุฬาลงกรณ์ 3 เป็นไปตามสมการที่ (4.3.2) ถึง (4.3.7)

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{p_y - r_{23}l_6}{p_x - r_{13}l_6}\right) \quad (4.3.2)$$

$$\theta_3 = \arctan\left(\frac{s_3}{c_3}\right) \quad (4.3.3)$$

เมื่อ

$$s_3 = \frac{-l_2^2 - l_5^2 + (p_x - r_{13}l_6)^2 + (p_y - r_{23}l_6)^2 + (p_z - r_{33}l_6)^2}{2l_2l_5}$$

$$c_3 = \sqrt{1 - s_3^2}$$

$$\theta_2 = -\theta_3 + \arctan\left(\frac{s_{23}}{c_{23}}\right) \quad (4.3.4)$$

เมื่อ

$$s_{23} = \frac{l_2c_3(p_z - r_{33}l_6) + [(l_2s_3 + l_5)(c_1(p_x - r_{13}l_6) + s_1(p_y - r_{23}l_6))]}{(p_z - r_{33}l_6)^2 + [c_1(p_x - r_{13}l_6) + s_1(p_y - r_{23}l_6)]^2}$$

$$c_{23} = \frac{l_2c_3[c_1(p_x - r_{13}l_6) + s_1(p_y - r_{23}l_6)] - (p_z - r_{33}l_6)(l_2s_3 + l_5)}{(p_z - r_{33}l_6)^2 + [c_1(p_x - r_{13}l_6) + s_1(p_y - r_{23}l_6)]^2}$$

$$\theta_4 = \arctan\left(\frac{r_{13}s_1 - r_{23}c_1}{r_{13}c_{23}c_1 + r_{23}c_{23}s_1 + r_{33}s_{23}}\right) ; \theta_5 \neq 0 \quad (4.3.5)$$

ขณะที่ θ_5 เป็นศูนย์ จะเกิดเงื่อนไข Singularity ขึ้น คือแกนที่ 4 กับแกนที่ 6 จะซ้อนกัน การหมุนของสองแกนนี้จึงให้ผลในแนวเดียวกัน ดังนั้น เพื่อความสะดวก จึงเลือกให้แกนที่ 4 หนึ่งอยู่

กับที่ แล้วหมุนแกนที่ 6 แทน อนึ่ง การตรวจสอบว่าเงื่อนไข Singularity จะเกิดขึ้นเมื่อไร ทำได้โดยตรวจสอบจากค่าของพจน์ตัวตั้งและพจน์ตัวหารของ $\arctan(\cdot)$ ในสมการ (4.3.5) โดยจะมีค่าเข้าใกล้ 0 ทั้งสองพจน์

$$\theta_5 = \arctan\left(\frac{s_5}{c_5}\right) \quad (4.3.6)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} s_5 &= r_{13}[s_1s_4 + c_1c_4c_{23}] + r_{23}[s_1c_4c_{23} - c_1s_4] + r_{33}[c_4s_{23}] \\ c_5 &= r_{13}[c_1s_{23}] + r_{23}[s_1s_{23}] - r_{33}[c_{23}] \end{aligned}$$

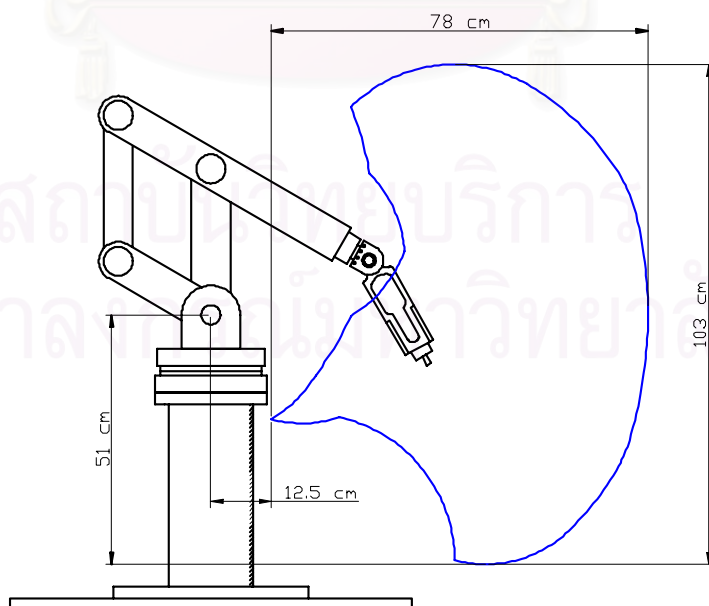
$$\theta_6 = \arctan\left(\frac{s_6}{c_6}\right) \quad (4.3.7)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} s_6 &= r_{11}[s_1c_4 - c_1s_4c_{23}] - r_{21}[c_1c_4 + s_1s_4c_{23}] - r_{31}[s_4s_{23}] \\ c_6 &= r_{11}[s_1s_4c_5 + c_1(c_4c_5c_{23} - s_5s_{23})] + r_{21}[s_1c_4c_5c_{23} - c_1s_4c_5 - s_1s_5s_{23}] + r_{31}[c_4c_5s_{23} + s_5c_{23}] \end{aligned}$$

4.4 Workspace ของแขนกลจู่ฟ้า 3

การเคลื่อนที่ของปลายแขนของแขนกลจู่ฟ้า 3 เคลื่อนที่ได้เป็นพื้นที่ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งวัฏระยะเคลื่อนที่ตามแนวตั้งได้สูงสุด 103 cm โดยจุดต่ำสุดที่เคลื่อนได้อยู่ต่ำกว่าเฟรม 0 เป็นระยะ 51 cm และวัฏระยะเคลื่อนที่ตามแนวราบได้สูงสุด 78 cm โดยจุดที่ชิดที่สุด อยู่ห่างจากเฟรม 0 เป็นระยะ 12.5 cm ดังแสดงในรูปที่ 4.5



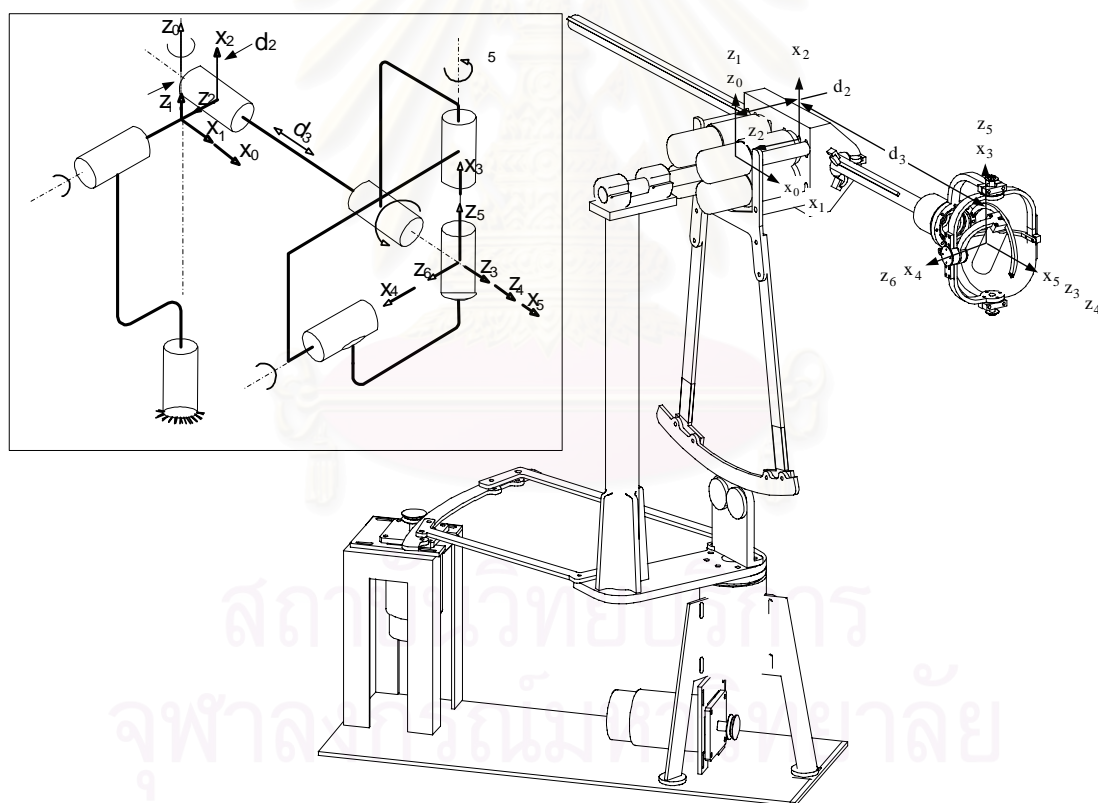
รูปที่ 4.5 Workspace ของแขนกลจู่ฟ้า 3

บทที่ 5

ข้อมูลของแขนกลนำ

5.1 รูปร่าง การตั้งแกน

แขนกลนำถูกสร้างขึ้นให้มีลักษณะโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยก้านต่อโยง 7 ก้านต่อโยง ข้อต่อ 6 ข้อต่อ ประกอบด้วยข้อต่อหมุน (Revolute joint) และข้อต่อเลื่อน (Prismatic joint) ข้อต่อข้อต่อที่ 3 เป็นข้อต่อเลื่อนส่วนข้อต่อที่เหลือเป็นข้อต่อหมุน การตั้งแกนของแขนกลนำแสดงดังรูปที่ 5.1 ค่าพารามิเตอร์ตามวิธีของ Denavit-Hartenberg แสดงในตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การตั้งแกนของแขนกลนำ

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0°	0	0	θ_1
2	90°	0	$-d_2$	θ_2
3	90°	0	d_3	0
4	0	0	0	θ_4
5	90°	0	0	θ_5
6	90°	0	0	θ_6

ตารางที่ 5.1 พารามิเตอร์ตามวิธีของ Denavit-Hartenberg

5.2 จลศาสตร์ของแขนกลนำ

ในการควบคุมแขนกลตามให้เคลื่อนที่ตามแขนกลนำนั้นเราจำเป็นต้องทราบตำแหน่งและทิศทางที่ปลายแขนของแขนกลนำเพื่อจะนำตำแหน่งและทิศทางนั้นไปใช้ควบคุมแขนกลตามให้เคลื่อนที่ตาม จลศาสตร์ (Kinematics) ประกอบไปด้วย

- Forward Kinematics หรือสมการการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเป็นสมการที่ใช้หาตำแหน่งและทิศทางที่ปลายแขนเมื่อกำหนดตำแหน่งข้อต่อภายในแขนกล
- Inverse Kinematics หรือสมการการเคลื่อนที่ถอยหลังเป็นสมการที่ใช้หาตำแหน่งข้อต่อของแขนกลเมื่อกำหนดตำแหน่งและทิศทางที่ปลายแขน

5.2.1 Forward kinematics

ตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลนำที่สัมพันธ์กับค่ามุมต่างๆที่ข้อต่อเขียนในรูปเมตริกแปลง (Transformation matrix) ของปลายแขนหรือก้านต่อโยงที่ 6 เทียบกับเฟรม 0 ได้ดังสมการ

$${}^0_6\mathbf{T} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.2.1)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} r_{11} &= c_1[c_2(c_4c_5c_6 + s_4s_6) + s_2s_5c_6] + s_1[s_4c_5c_6 - c_4s_6] \\ r_{12} &= -c_1[c_2(c_4c_5s_6 - s_4c_6) + s_2s_5s_6] - s_1[s_4c_5c_6 + c_4s_6] \\ r_{13} &= s_2[c_4c_5c_6 + s_4s_6] - c_2s_5c_6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r_{21} &= s_1[c_2(c_4c_5c_6 + s_4s_6) + s_2s_5c_6] - c_1[s_4c_5c_6 - c_4s_6] \\ r_{22} &= -s_1[c_2(c_4c_5s_6 - s_4c_6) + s_2s_5s_6] + c_1[s_4c_5c_6 + c_4s_6] \\ r_{23} &= s_1[c_2c_4s_5 - s_2c_5] - c_1s_4s_5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r_{31} &= s_2[c_4c_5c_6 + s_4s_6] - c_2s_5c_6 \\ r_{32} &= -s_2[c_4c_5s_6 - s_4c_6] + c_2s_5s_6 \\ r_{33} &= s_2c_4s_5 - c_2c_5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_x &= d_3c_1s_2 - d_2s_1 \\ p_y &= d_3s_1s_2 + d_2c_1 \\ p_z &= -d_3c_2 \end{aligned}$$

เมื่อ p_x, p_y, p_z แทนตำแหน่งของปลายแขนที่อยู่ห่างจากเฟรม 0 ในแนวแกน x, y และ z ตามลำดับ

และ $\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$ เป็น Rotation matrix ของเฟรมที่ปลายแขน (T) เทียบกับเฟรม 0

หมายเหตุ สัญลักษณ์ s_i แทน $\sin(\theta_i)$
 c_i แทน $\cos(\theta_i)$
 และ s_{ij} แทน $\sin(\theta_i + \theta_j)$
 c_{ij} แทน $\cos(\theta_i + \theta_j)$

5.2.2 Inverse kinematics

เมื่อต้องการให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งและทิศทางที่กำหนด จำเป็นจะต้องทราบมุมของแต่ละข้อต่อ มุม θ ต่างๆที่สัมพันธ์กับตำแหน่งและทิศทางที่กำหนดหาได้จากสมการที่ (5.2.2) ถึง (5.2.7)

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} + \arctan\left(\frac{p_z}{\sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}}\right) \quad (5.2.2)$$

$$d_3 = \frac{-p_z}{\cos(\theta_2)} \quad (5.2.3)$$

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{p_y d_3 \sin(\theta_2) - d_2 p_x}{p_x d_3 \sin(\theta_2) + d_2 p_y}\right) \quad (5.2.4)$$

$$\theta_4 = \arctan\left(\frac{s_4}{c_4}\right) \quad (5.2.5)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} s_4 &= r_{13} \sin(\theta_1) - r_{23} \cos(\theta_1) \\ c_4 &= r_{13} \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) + r_{23} \sin(\theta_1) \cos(\theta_1) + r_{33} \sin(\theta_2) \end{aligned}$$

$$\theta_6 = \arctan\left(\frac{s_6}{c_6}\right) \quad (5.2.6)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} s_6 &= -r_{12} \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) - r_{22} \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) + r_{32} \cos(\theta_2) \\ c_6 &= r_{11} \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) + r_{21} \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) - r_{31} \cos(\theta_2) \end{aligned}$$

$$\theta_5 = \arctan\left(\frac{s_5}{c_5}\right) \quad (5.2.7)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} s_5 &= -r_{13} \sin(\theta_1) + r_{23} \cos(\theta_1) \\ c_5 &= \sin(\theta_4)(r_{13} \cos(\theta_1) \sin(\theta_2) + r_{23} \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) - r_{33} \cos(\theta_2)) \end{aligned}$$

ขณะที่ θ_5 เป็นศูนย์จะเกิดเงื่อนไข Singularity ขึ้น คือแกนที่ 4 กับ แกนที่ 6 จะซ้อนกัน การหมุนของสองแกนนี้จึงให้ผลในแนวเดียวกัน ดังนั้น การตรวจสอบว่าเงื่อนไข Singularity จะเกิดขึ้นเมื่อไร ทำได้โดยตรวจสอบจากค่าของพจน์ตัวตั้งและพจน์ตัวหารของ $\arctan(\cdot)$ ในสมการ (5.2.5) โดยจะมีค่าเข้าใกล้ 0 ทั้งสองพจน์

$$\theta_5 = \arctan\left(\frac{s_5}{c_5}\right) \quad (5.2.8)$$

เมื่อ

$$\begin{aligned} s_5 &= r_{13}[s_1 s_4 + c_1 c_4 c_{23}] + r_{23}[s_1 c_4 c_{23} - c_1 s_4] + r_{33}[c_4 s_{23}] \\ c_5 &= r_{13}[c_1 s_{23}] + r_{23}[s_1 s_{23}] - r_{33}[c_{23}] \end{aligned}$$

$$\theta_6 = \arctan\left(\frac{s_6}{c_6}\right) \quad (5.2.9)$$

เมื่อ

$$s_6 = r_{11}[s_1c_4 - c_1s_4c_{23}] - r_{21}[c_1c_4 + s_1s_4c_{23}] - r_{31}[s_4s_{23}]$$

$$c_6 = r_{11}[s_1s_4c_5 + c_1(c_4c_5c_{23} - s_5s_{23})] + r_{21}[s_1c_4c_5c_{23} - c_1s_4c_5 - s_1s_5s_{23}] + r_{31}[c_4c_5s_{23} + s_5c_{23}]$$

ในความเป็นจริงแล้วแกนกลนำที่ได้ออกแบบมาจะไม่มีโอกาสที่มุมของก้านต่อโยงที่ 5 (θ_5) จะมีค่าเป็นศูนย์ได้เพราะได้ออกแบบกันไม่ให้มุมนี้เป็น 0 หรือ 180 องศาไว้

5.2.3 Jacobian

ในกรณีที่ต้องการควบคุมแรงที่ตำแหน่งปลายแกนกลนำนั้นเราจำเป็นต้องทราบแรงบิดที่แต่ละข้อต่อของแกนกลนำที่ทำให้เกิดแรงที่ปลายแกนกลนำ การคำนวณหาแรงบิดที่ข้อต่อแต่ละข้อต่อนั้นต้องอาศัย Jacobian ตามสมการที่ 5.2.10

$${}^6\mathbf{J}(\theta) = \begin{bmatrix} j_{11} & j_{12} & j_{13} & 0 & 0 & 0 \\ j_{21} & j_{22} & j_{23} & 0 & 0 & 0 \\ j_{31} & j_{32} & j_{33} & 0 & 0 & 0 \\ j_{41} & j_{42} & 0 & j_{44} & j_{45} & 0 \\ j_{51} & j_{52} & 0 & j_{54} & j_{55} & 0 \\ j_{61} & j_{62} & 0 & j_{64} & 0 & j_{66} \end{bmatrix} \quad (5.2.10)$$

โดยที่

$$j_{11} = (c_5s_4s_2c_6 - s_2s_6c_4)d_3 - (c_2c_4c_5c_6 + s_2s_5c_6 + s_4s_6c_2)d_2$$

$$j_{12} = (s_4s_6 - c_4c_5c_6)d_3$$

$$j_{13} = (s_2c_5 - c_2c_4s_5)d_2$$

$$j_{21} = -(s_2s_4s_6c_5 + s_2c_4c_6)d_3 + (c_2c_4c_5s_6 + s_2s_5s_6 - c_2c_6s_4)d_2$$

$$j_{22} = (c_4c_5s_6 - c_6s_4)d_3$$

$$j_{23} = (s_2s_4s_5 - c_4s_5)d_3$$

$$j_{31} = (s_2c_5 - c_2c_4s_5)d_2$$

$$j_{32} = -s_5$$

$$j_{33} = -c_5$$

$$\begin{aligned}
j_{41} &= (c_4 c_5 c_6 s_2 - c_2 c_6 s_5 + s_2 s_4 s_6) \\
j_{42} &= s_4 c_5 c_6 - c_4 s_6 \\
j_{43} &= s_5 c_6 \\
j_{45} &= s_6 \\
j_{51} &= (-c_4 c_5 s_6 s_2 + c_2 s_6 s_5 + s_2 s_4 c_6) \\
j_{52} &= -s_4 s_6 c_5 - c_4 c_6 \\
j_{54} &= -s_5 s_6 \\
j_{55} &= c_6 \\
j_{61} &= s_2 c_4 s_5 + c_2 c_5 \\
j_{62} &= s_4 s_5 \\
j_{64} &= -c_5 \\
j_{66} &= 1
\end{aligned}$$

โดยที่ s_i, c_i แทน $\sin(\theta_i), \cos(\theta_i)$ ตามลำดับ

รูปแบบสมการที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ปลายแขนในที่นี้คือก้านต่อโยงที่ 6 กับความเร็วเชิงมุมของก้านต่อโยงต่างแสดงดังสมการที่ 5.2.11

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = {}^6\mathbf{J}(\theta) \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_5 \\ \dot{\theta}_6 \end{bmatrix} \quad (5.2.11)$$

$\dot{\theta}$ คือความเร็วเชิงมุมของก้านต่อโยงต่างๆ

v, ω คือความเร็วเชิงเส้นและความเร็วเชิงมุมของแขนกลที่ตำแหน่งปลายแขน

รูปแบบสมการที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่มากกระทำที่ปลายแขนกลนำกับแรงบิดที่ข้อต่อแต่ละข้อหาได้จากสมการที่ 5.2.12

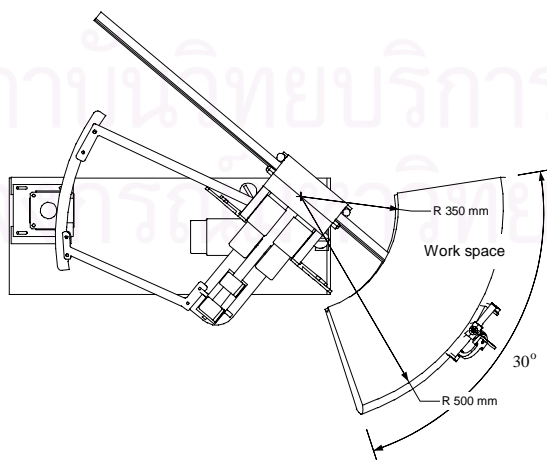
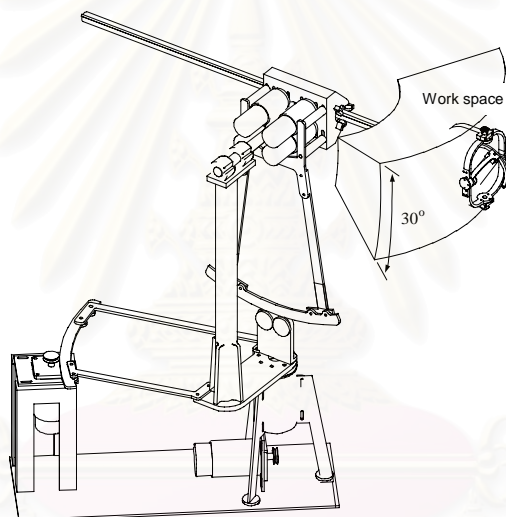
$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{bmatrix} = {}^6\mathbf{J}(\theta)^T \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \\ m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (5.2.12)$$

τ คือแรงบิดที่ข้อต่อของแต่ละก้านต่อโยง

f, m คือแรงและโมเมนต์ภายนอกที่มากระทำที่ปลายแขนกลนำ ทิศทางของแรงและโมเมนต์คิดเทียบกับเฟรมสุดท้ายในที่นี้คือเฟรม 6

5.3 Workspace ของแขนกลนำ

การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลนำเคลื่อนที่ได้เป็นปริมาตรดังแสดงในรูปที่ 5.2 ซึ่งปลายแขนกลนำจะเคลื่อนที่อยู่ภายในส่วนของทรงกลมสองอันที่มีจุดศูนย์กลางร่วมกัน รัศมีวงนอกมีขนาด 500 มิลลิเมตร รัศมีวงในมีขนาด 350 มิลลิเมตรขนาดของพื้นที่ทำงานสามารถปรับให้มีขนาดมากขึ้นหรือน้อยลงได้ มุมใช้งานของแขนกลนำเมื่อมองจากด้านบนและด้านข้างของแขนกลนำมีค่า 30 องศา



รูปที่ 5.2 แสดง Workspace ของแขนกลนำ

บทที่ 6

การควบคุม

ในบทนี้จะกล่าวถึงการควบคุมแขนกลตามให้สามารถเคลื่อนที่ตามแขนกลนำโดยอาศัยข้อมูลของตำแหน่งและทิศทางที่ได้จากแขนกลนำมาแปลงเป็นคำสั่งที่ใช้ควบคุมแขนกลตามให้เคลื่อนที่ตามคำสั่งที่ได้รับ เนื่องจากในการควบคุมแขนกลโดยทั่วไปนั้นจะต้องอาศัยเส้นทางเดินของแขนกล รูปแบบเส้นทางเดินที่ใช้โดยทั่วไปได้แก่ Cubic Polynomial [6] และแบบเส้นตรงที่เชื่อมต่อกันด้วยเส้นโค้งแบบ Parabola เส้นทางเดินของแขนกลเหล่านี้ได้ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้าแล้ว เส้นทางเดินของแขนกลประกอบไปด้วย

1. เส้นทางเดินของตำแหน่ง รูปแบบของสมการได้แก่

$$L(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3$$

2. เส้นทางเดินของความเร็ว รูปแบบของสมการได้แก่

$$\dot{L}(t) = a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2$$

3. เส้นทางเดินของความเร่ง รูปแบบของสมการได้แก่

$$\ddot{L}(t) = 2a_2 + 6a_3t$$

แขนกลทั่วไปจะใช้สมการข้างต้นในการสร้างเส้นทางเดินของแขนกลเพื่อใช้เป็นคำสั่งอ้างอิงสำหรับระบบควบคุมแขนกล แต่สำหรับระบบควบคุมของแขนกลนำและแขนกลตามไม่สามารถสร้างเส้นทางเดินตามสมการเหล่านี้ได้ นอกจากนี้เส้นทางเดินของแขนกลจะต้องหาในเวลาจริง กล่าวคือไม่สามารถสร้างเส้นทางเดินล่วงหน้าได้ ดังนั้นเส้นทางเดินของแขนกลนำที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จะหาจากตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลที่คำนวณได้จากแขนกลนำโดยตรง ในการควบคุมการทำงานของแขนกลนำและแขนกลตามแบ่งเป็นสามส่วนดังนี้

1. การหาเส้นทางเดินของแขนกลตามโดยคำนวณหาได้จากข้อมูลตำแหน่งของแขนกลนำ
2. การควบคุมแขนกลนำเพื่อให้มีสภาพง่ายแก่การบังคับ
3. การควบคุมแขนกลตามเพื่อให้มีการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกับแขนกลนำให้มากที่สุด

6.1 เส้นทางเดินของแขนกลตาม

เนื่องจากรูปแบบหลักหรือโครงสร้างของแขนกลนำและแขนกลตามไม่เหมือนกัน ในการใช้งานแขนกลนำและแขนกลตามนั้นตำแหน่งปลายแขนเริ่มแรกของแขนกลทั้งสองควรอยู่ในตำแหน่งที่ทำให้มุมที่ข้อต่อของแต่ละข้อของก้านต่อโยงเป็นมุมกึ่งกลาง ตัวอย่างเช่น มุมใช้งานของข้อต่อที่ 1 ของแขนกลนำมีค่าระหว่าง -90 ถึง 90 ดังนั้นมุมกึ่งกลางของข้อต่อที่ 1 คือ 0 องศา

สาเหตุที่ตำแหน่งเริ่มแรกต้องกำหนดเช่นนี้เพื่อให้แขนกลทั้งสองมีพื้นที่ใช้งานที่เหมาะสม ค่ามุมกึ่งกลางของแขนกลทั้งสองที่ใช้ในวิทยานิพนธ์แสดงดังตารางที่ 6.1

ค่ามุมกึ่งกลาง	แขนกลนำ (องศา)	แขนกลตาม (องศา)
θ_1	0	0
θ_2	90	90
d_3, θ_3	425 มิลลิเมตร	22.5
θ_4	90	0
θ_5	90	-45
θ_6	90	0

ตารางที่ 6.1 ค่ามุมกึ่งกลางของแขนกลนำและแขนกลตาม

6.1.1. การคำนวณหาตำแหน่งที่ต้องการของแขนกลตาม

จากตำแหน่งเริ่มแรกของแขนกลทั้งสองจะพบว่าตำแหน่งที่ปลายแขนของแขนกลทั้งสองมีค่าไม่เท่ากัน ตำแหน่งเริ่มแรกของแขนกลนำคือ

$$P_x = 425 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$P_y = 10 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$P_z = 0 \text{ มิลลิเมตร}$$

และตำแหน่งเริ่มแรกของแขนกลตามคือ

$$P_x = 357 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$P_y = 0 \text{ มิลลิเมตร}$$

$$P_z = 182 \text{ มิลลิเมตร}$$

ดังนั้นถ้าให้ตำแหน่งเริ่มต้นของแขนกลนำและแขนกลตามเป็นตำแหน่งเดียวกันนั้นอาจทำให้แขนกลทั้งสองเสียพื้นที่การทำงานไป เพื่อให้การควบคุมตำแหน่งของแขนกลนำและแขนกลตามมีประสิทธิภาพจึงจำเป็นต้องสร้างตำแหน่งที่ใช้ควบคุมตำแหน่งที่ปลายแขนของแขนกลตามขึ้นมา โดยเฉพาะซึ่งมีหลักการดังนี้ ในตอนเริ่มต้นแขนกลทั้งสองถูกจัดวางก้านต่อโยงให้อยู่ในตำแหน่งมุมกึ่งกลางโดยตำแหน่งที่ปลายแขนกลต่างๆของแขนกลทั้งสองกำหนดได้ดังนี้

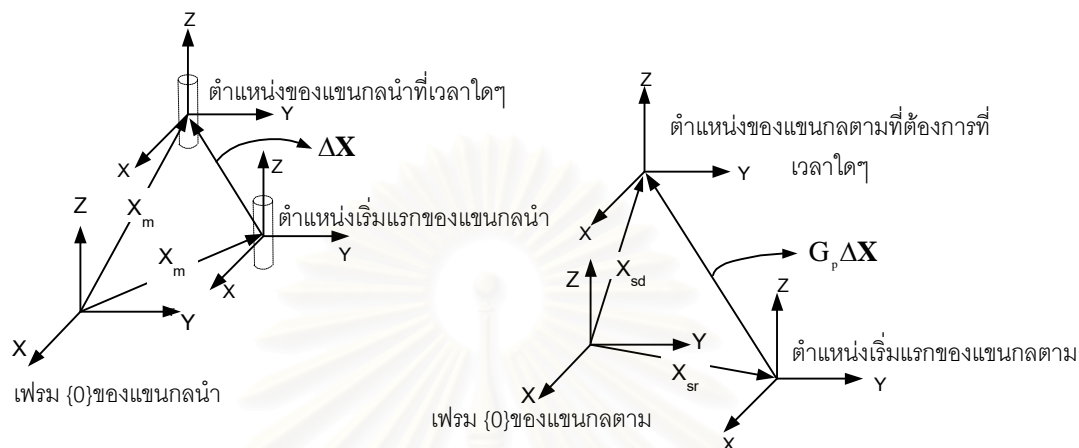
\mathbf{X}_{sr} คือตำแหน่งเริ่มแรกของแขนกลตาม

\mathbf{X}_{mr} คือตำแหน่งเริ่มแรกของแขนกลนำ

\mathbf{X}_{sd} คือตำแหน่งของแขนกลตามที่ต้องการที่เวลาใดๆ

\mathbf{X}_m คือตำแหน่งของแขนกลนำที่เวลาใดๆ

\mathbf{X}_{md} คือตำแหน่งของแขนกลนำที่ต้องการที่เวลาใดๆ



รูปที่ 6.1 การหาตำแหน่งที่ต้องการของแขนกลตาม

ตำแหน่งของแขนกลนำที่เวลาใดๆเกิดจากผู้ควบคุมเคลื่อนคันทันบังคับของแขนกลนำไปในตำแหน่งที่ผู้ควบคุมต้องการ ดังนั้นตำแหน่งของแขนกลนำที่ต้องการที่เวลาใดๆหาจากสมการดังต่อไปนี้

$$\mathbf{X}_{md} = \mathbf{X}_{sr} + \Delta\mathbf{X} \quad (6.1)$$

$\Delta\mathbf{X}$ คือผลต่างระหว่างตำแหน่งของแขนกลนำที่เวลาใดๆกับตำแหน่งเริ่มแรกของแขนกลนำ (ดูรูปที่ 6.1 ประกอบ)

$$\Delta\mathbf{X} = \mathbf{X}_m - \mathbf{X}_{mr} \quad (6.2)$$

เพื่อให้สามารถขยายขนาดของตำแหน่งของแขนกลนำที่ต้องการที่เวลาใดๆ สมการ 6.1 จึงต้องมีค่าเกนเพื่อใช้เป็นตัวขยายตำแหน่งดังนี้

$$\mathbf{X}_{md} = \mathbf{X}_{sr} + G_p \Delta\mathbf{X} \quad (6.3)$$

G_p คือค่าเกนขยายตำแหน่ง
ดังนั้น ตำแหน่งของแขนกลตามที่ต้องการที่เวลาใดๆคือ

$$\mathbf{X}_{sd} = \mathbf{X}_{md} \quad (6.4)$$

ค่า G_p นั้นทำให้แขนกลตามซึ่งปกติมีพื้นที่ทำงานมากกว่าพื้นที่ทำงานของแขนกลนำสามารถขยายพื้นที่ทำงานได้มากขึ้น

6.1.2 ทิศทางการเคลื่อนที่ที่ต้องการของแขนกลตาม

ในกรณีของทิศทางการเคลื่อนที่ของแขนกลตามนั้นก็เช่นเดียวกับตำแหน่งของแขนกลนำ กล่าวคือทิศทางเริ่มต้นของแขนกลนำและแขนกลตามอาจมีค่าไม่เท่ากันดังรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 แสดงทิศทางที่ปลายแขนกลนำและตามตำแหน่งเริ่มแรก

ในการควบคุมทิศทางที่ตำแหน่งปลายแขนกลตามสามารถทำได้โดยสร้างทิศทางที่ใช้ควบคุมเฉพาะ โดยหาจากทิศทางที่ได้จากแขนกลนำสำหรับนำมาใช้ควบคุมทิศทางที่ปลายแขนกลตาม กำหนดให้

- \mathbf{R}_{mr} ทิศทางเริ่มแรกของแขนกลนำ
- \mathbf{R}_m ทิศทางของแขนกลนำที่เวลาใดๆ
- \mathbf{R}_{md} ทิศทางที่ต้องการของแขนกลนำที่เวลาใดๆ
- \mathbf{R}_{sr} ทิศทางเริ่มแรกของแขนกลตาม
- \mathbf{R}_{sd} ทิศทางที่ต้องการของแขนกลตามที่เวลาใดๆ

ทิศทางของแขนกลนำที่ต้องการหาไม่สามารถหาได้จากสมการ

$$\mathbf{R}_{md} = \mathbf{R}_{sr} + \Delta\mathbf{R} \quad (6.5)$$

โดยที่

$\Delta\mathbf{R} = \mathbf{R}_m - \mathbf{R}_{mr}$ คือผลต่างของทิศทางระหว่างทิศทางเริ่มแรกของแขนกลนำกับทิศทางที่เวลาใดๆ

เนื่องจาก \mathbf{R} เป็นเมตริกขนาด 3 คูณ 3 ดังนั้น $\Delta\mathbf{R}$ ไม่สามารถหาจากเอาสมาชิกแต่ละตัวมาลบกันได้ในที่นี้ได้ทำการหาในรูปแบบ Z-Y-Z Euler Angles จากเมตริก \mathbf{R}_{mr} และเมตริก \mathbf{R}_m ดังนี้

กำหนด

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

มุมในรูปแบบ Z-Y-Z Euler Angles [6] ประกอบด้วย α, β, γ ของเมตริก \mathbf{R} หาได้จากสมการที่ 6.6

ถ้า $\sin(\beta) \neq 0$ แล้ว

$$\begin{aligned} \beta &= \arctan\left(\frac{\sqrt{r_{13}^2 + r_{32}^2}}{r_{33}}\right) \\ \alpha &= \arctan\left(\frac{r_{23}/\sin(\beta)}{r_{13}/\sin(\beta)}\right) \\ \gamma &= \arctan\left(\frac{r_{32}/\sin(\beta)}{-r_{31}/\sin(\beta)}\right) \end{aligned} \quad (6.6)$$

กำหนด

$\alpha_{mr}, \beta_{mr}, \gamma_{mr}$ คือมุมในรูปแบบ Z-Y-Z Euler Angles ของเมตริก \mathbf{R}_{mr}

$\alpha_m, \beta_m, \gamma_m$ คือมุมในรูปแบบ Z-Y-Z Euler Angles ของเมตริก \mathbf{R}_m

$\alpha_{sr}, \beta_{sr}, \gamma_{sr}$ คือมุมในรูปแบบ Z-Y-Z Euler Angles ของเมตริก \mathbf{R}_{sr}

$\alpha_{md}, \beta_{md}, \gamma_{md}$ คือมุมในรูปแบบ Z-Y-Z Euler Angles ของเมตริก \mathbf{R}_{md}

$\Delta\theta$ คือผลต่างระหว่างมุมในรูปแบบ Z-Y-Z Euler Angles ของเมตริก \mathbf{R}_{mr} กับมุมในรูปแบบ Z-Y-Z Euler Angles ของเมตริก \mathbf{R}_m หรือ

$$\Delta\theta = \begin{bmatrix} \alpha_m - \alpha_{mr} \\ \beta_m - \beta_{mr} \\ \gamma_m - \gamma_{mr} \end{bmatrix}$$

ดังนั้นมุมในรูปแบบ Z-Y-Z Euler Angles ของเมตริก \mathbf{R}_{md} หาได้จาก

$$\begin{bmatrix} \alpha_{md} \\ \beta_{md} \\ \gamma_{md} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{sr} \\ \beta_{sr} \\ \gamma_{sr} \end{bmatrix} + \mathbf{G}_r \Delta\theta \quad (6.7)$$

โดยที่ G_r คือค่าเกณฑ์ขยายทิศทาง

จากนั้นนำค่ามุมที่ได้มาคำนวณหาเมตริก \mathbf{R}_{md} ตามสมการที่ 6.8

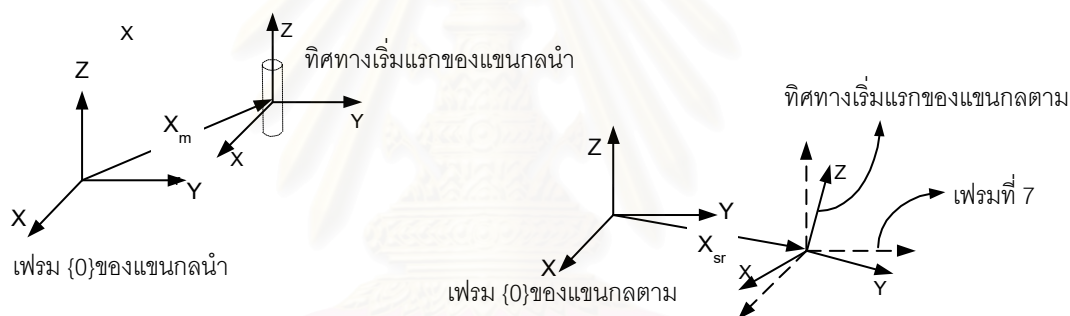
$$\mathbf{R}_{md} = \begin{bmatrix} c\alpha c\beta c\gamma - s\alpha s\gamma & -c\alpha c\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta \\ s\alpha c\beta c\gamma - c\alpha s\gamma & -s\alpha c\beta s\gamma - c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta \\ -s\beta c\gamma & s\beta s\gamma & c\beta \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

โดยที่ $c\alpha, s\alpha$ แทน $\cos(\alpha_{md}), \sin(\alpha_{md})$ ตามลำดับ ตัวอื่นๆ ก็เช่นเดียวกัน

สุดท้ายให้

$$\mathbf{R}_{sd} = \mathbf{R}_{md} \quad (6.9)$$

อีกวิธีในการสร้างทิศทางที่ต้องการของแกนกลตาม คือการเพิ่มเฟรมที่ 7 สำหรับแกนกลตามดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 แสดงเฟรมที่ 7 ของแกนกลตาม

เนื่องจากรู้ค่ามุมเริ่มแรกของแกนกลนำและแกนกลตามดังนั้นเราจึงสามารถสร้างเฟรมที่ 7 ที่มีทิศทางเดียวกับทิศทางเริ่มแรกของแกนกลนำได้

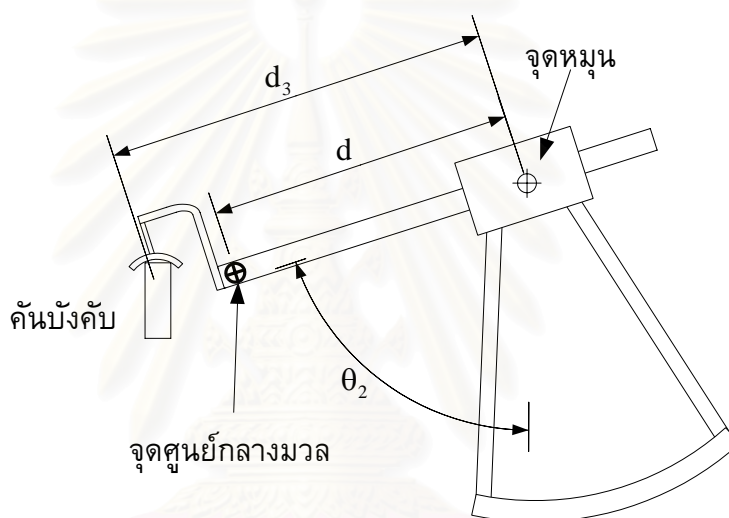
6.2 การควบคุมแกนกลนำให้มีสภาพง่ายแก่การบังคับ

เนื่องจากน้ำหนักและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นของแกนกลนำทำให้ผู้ควบคุมเกิดความเมื่อยล้าซึ่งอาจส่งผลต่อการบังคับแกนกลนำของผู้ควบคุมได้หรือในกรณีที่ต้องการบังคับให้แกนกลตามทำงานในพื้นที่ที่กำหนดซึ่งในกรณีหลังถ้าไม่มีการควบคุมแกนกลนำแล้วจะทำให้การบังคับแกนกลตามทำงานในพื้นที่ที่กำหนดได้ยาก

6.2.1 การลดผลของน้ำหนักที่มีต่อผู้ควบคุมของแขนกลนำ

เพื่อลดผลของน้ำหนักของแขนกลนำที่ส่งผลต่อผู้ควบคุมจึงได้ทำการออกแบบตัวควบคุมเพื่อลดผลกระทบดังกล่าว ตัวควบคุมนี้จะส่งกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณไปที่มอเตอร์ที่ข้อต่อของแขนกลเพื่อสร้างแรงบิดออกมาต้านทานน้ำหนักที่ไม่สมดุลของแขนกลนำ กล่าวคือมอเตอร์ที่ข้อต่อต่างๆจะเป็นตัวรับน้ำหนักที่ไม่สมดุลของแขนกลนำแทนผู้ควบคุม รูปแบบของแขนกลนำที่สร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 6.4 รูปแบบของสมการแรงบิดที่เกิดจากน้ำหนักที่ปลายแขนกลนำคือ

$$\tau = m \cdot g \cdot d \cdot \sin(\theta_2) \quad (6.10)$$



รูปที่ 6.4 แสดงรายละเอียดด้านข้างของแขนกลนำ

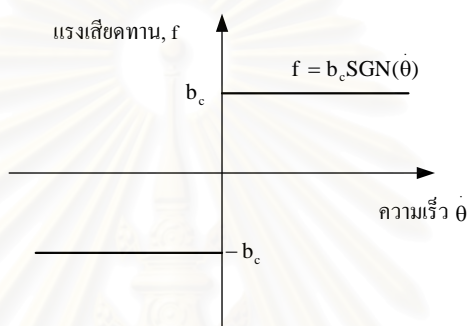
โดยที่ m คือมวลรวมของก้านต่อโยงที่ 3 ถึง 6 ส่วนของมวลของมอเตอร์และส่วนประกอบอื่นๆที่หมุนรอบจุดหมุนมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับมวลรวมของก้านต่อโยงที่ 3 ถึง 6 เนื่องจากระยะ d นั้นแปรผันตามระยะ d_3 ซึ่งเป็นค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์วัดมุมดังนั้นสมการที่ 6.10 สามารถเขียนใหม่ได้

$$\tau = k \cdot d_3 \cdot \sin(\theta_2) \quad (6.11)$$

ค่าคงที่ k ของสมการที่ 6.11 หาจากการทดลองจริงโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าไปที่มอเตอร์ของข้อต่อที่สองจนกระทั่งทำให้มุม θ_2 เท่ากับ 90° จากนั้นนำแรงบิดที่ได้จากสมการส่งไปที่ตัวขยายสัญญาณแล้วส่งเข้ามอเตอร์ต่อไป

6.2.2 การลดผลของแรงเสียดทานที่มีต่อผู้ควบคุมของแขนกลนำ

เนื่องจากที่ข้อต่อของแขนกลนำมีแรงเสียดทานทำให้ผู้ควบคุมต้องออกแรงมากในการเคลื่อนคั่นบังคับของแขนกลนำด้วยเหตุนี้จึงได้ทำการลดผลของแรงเสียดทานดังกล่าวโดยจ่ายกระแสไฟฟ้าจำนวนหนึ่งไปที่มอเตอร์ ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์เป็นไปตามสมการแรงเสียดทานที่ข้อต่อ รูปแบบของแรงเสียดทานที่ใช้กับข้อต่อของแขนกลนำแสดงดังรูปที่ 6.5 ขนาดของแรงเสียดทานในแต่ละข้อต่อหาจากการทดลองจริงโดยการทดลองจ่ายกระแสไฟฟ้าจนทำให้แขนกลนำเริ่มเคลื่อนที่



รูปที่ 6.5 กราฟแสดงแรงเสียดทานกับความเร็วเชิงมุมที่ข้อต่อของแขนกลนำ

6.2.3 การหน่วงการเคลื่อนที่ของแขนกลนำ

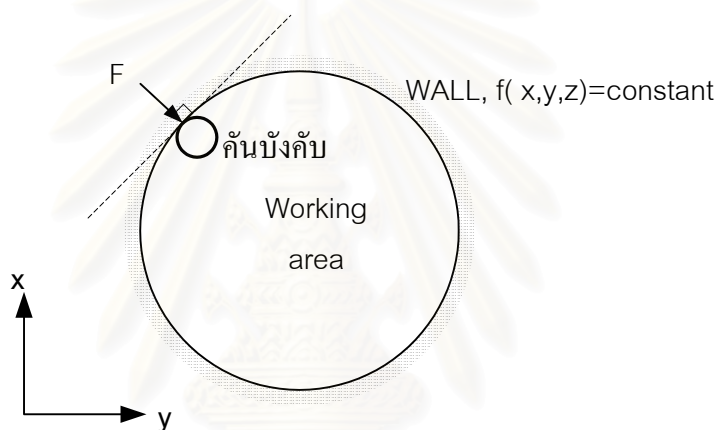
เพื่อให้ผู้ควบคุมสามารถบังคับคั่นบังคับของแขนกลนำให้เคลื่อนที่ไปอย่างราบเรียบและแม่นยำมากขึ้น จึงได้ทำการหน่วงการเคลื่อนที่ของคั่นบังคับของแขนกลนำเมื่อมีการเคลื่อนที่เร็วเกินไป แรงหน่วงนี้คือแรงต้านการเคลื่อนที่ของมือผู้ควบคุมที่แขนกลนำสร้างขึ้น โดยแรงหน่วงนี้เป็นแรงที่เกิดจากการกำหนดรูปแบบของแรงตามสมการที่ 6.12 ซึ่งเทียบกับเฟรมศูนย์ของแขนกลนำแรงหน่วงนี้จะมากขึ้นตามความเร็วของมือผู้ควบคุม กล่าวคือผู้ควบคุมเคลื่อนคั่นบังคับของแขนกลนำเร็วมากขึ้นเท่าใดแขนกลนำก็จะสร้างแรงต้านมือของผู้ควบคุมมากขึ้นเช่นกัน จากแรงที่คำนวณได้นำมาแปลงเป็นแรงบิดที่มอเตอร์ต้องสร้างขึ้นมาเพื่อให้เกิดแรงกระทำที่มือของผู้ควบคุม

$$\mathbf{f}_d = k_d \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

โดยที่ v_x, v_y, v_z คือความเร็วตามแนวแกน x, y, z ของคั่นบังคับ

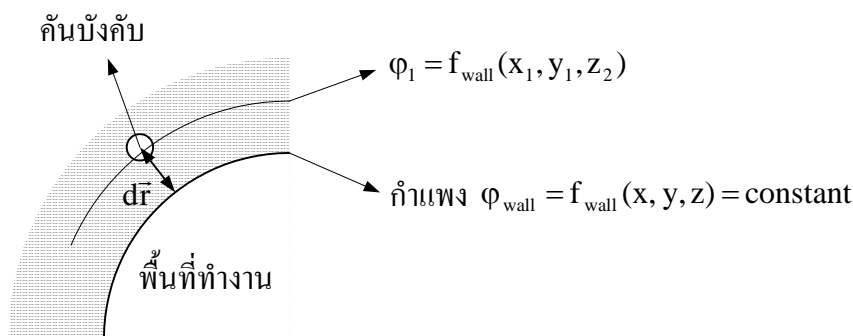
6.2.4 การกำหนดพื้นที่การทำงานของแขนกลนำ

ในการบังคับให้แขนกลตามทำงานในบริเวณแคบ ๆ หรือในบริเวณที่กำหนดขึ้นโดยอาศัยเพียงการควบคุมของผู้ควบคุมบังคับแขนกลนำเพื่อให้แขนกลตามเคลื่อนที่ในบริเวณดังกล่าว นั้น พบว่าต้องอาศัยทักษะของผู้ควบคุมมาก แต่ถ้าเราสามารถบังคับหรือควบคุมให้แขนกลนำเคลื่อนที่ในบริเวณที่กำหนดโดยใช้ตัวควบคุมที่จำกัดขอบเขตการเคลื่อนที่แล้วจะทำให้ผู้ควบคุมสามารถควบคุมแขนกลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดพื้นที่การทำงานขึ้นที่แขนกลนำโดยผู้ควบคุมสามารถบังคับแขนกลนำให้เคลื่อนที่ในพื้นที่ทำงานที่กำหนดโดยผู้บังคับไม่สามารถบังคับให้แขนกลนำเคลื่อนที่ออกนอกพื้นที่ทำงานที่กำหนดได้



รูปที่ 6.6 แสดงการกำหนดพื้นที่การทำงานของแขนกลนำ

รูปที่ 6.6 แสดงพื้นที่การทำงานที่เป็นวงกลม ผู้ควบคุมสามารถบังคับแขนกลนำให้เคลื่อนที่อย่างอิสระภายในวงกลมแต่ไม่สามารถบังคับให้ออกนอกวงกลมได้เปรียบเสมือนวงกลมคือกำแพงที่ล้อมรอบคั่นบังคับของแขนกลนำทำให้ไม่สามารถเคลื่อนคั่นบังคับออกนอกวงกลมได้ ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดรูปแบบของกำแพงหรือขอบเขตการเคลื่อนที่เป็นแรง F ที่มีทิศทางตั้งฉากกับพื้นผิวของกำแพงดังแสดงในรูปที่ 6.6 และ 6.7 ขนาดของแรงมีค่าเท่ากับศูนย์เมื่อคั่นบังคับอยู่ในวงกลม เมื่อคั่นบังคับเคลื่อนมาชนกำแพงหรือขอบเขตที่กำหนดก็จะมีแรง F กระทำต่อคั่นบังคับในทิศทางตั้งฉากกับกำแพงตรงจุดที่คั่นบังคับชนกำแพงเพื่อไม่ให้คั่นบังคับเคลื่อนที่ออกนอกกำแพง สมการของแรง F คือ



รูปที่ 6.7 แสดงตำแหน่งของคั่นบังคับขณะอยู่ที่ตำแหน่งนอกพื้นที่ทำงาน

$$F = (K_1 dr) \vec{n} + (K_2 V) \vec{n} \quad (6.13)$$

โดยที่ $dr = \frac{d\phi |\nabla\phi|}{\nabla\phi \cdot \nabla\phi}$ คือระยะห่างระหว่างคั่นบังคับกับกำแพงดังรูป

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

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

V คือความเร็วของคั่นบังคับ

K_1, K_2 คือค่าเกณฑ์ขนาดของแรงที่กระทำต่อคั่นบังคับ

เมื่อแทนค่า dr และ \vec{n} ลงในสมการ 6.13 จะได้

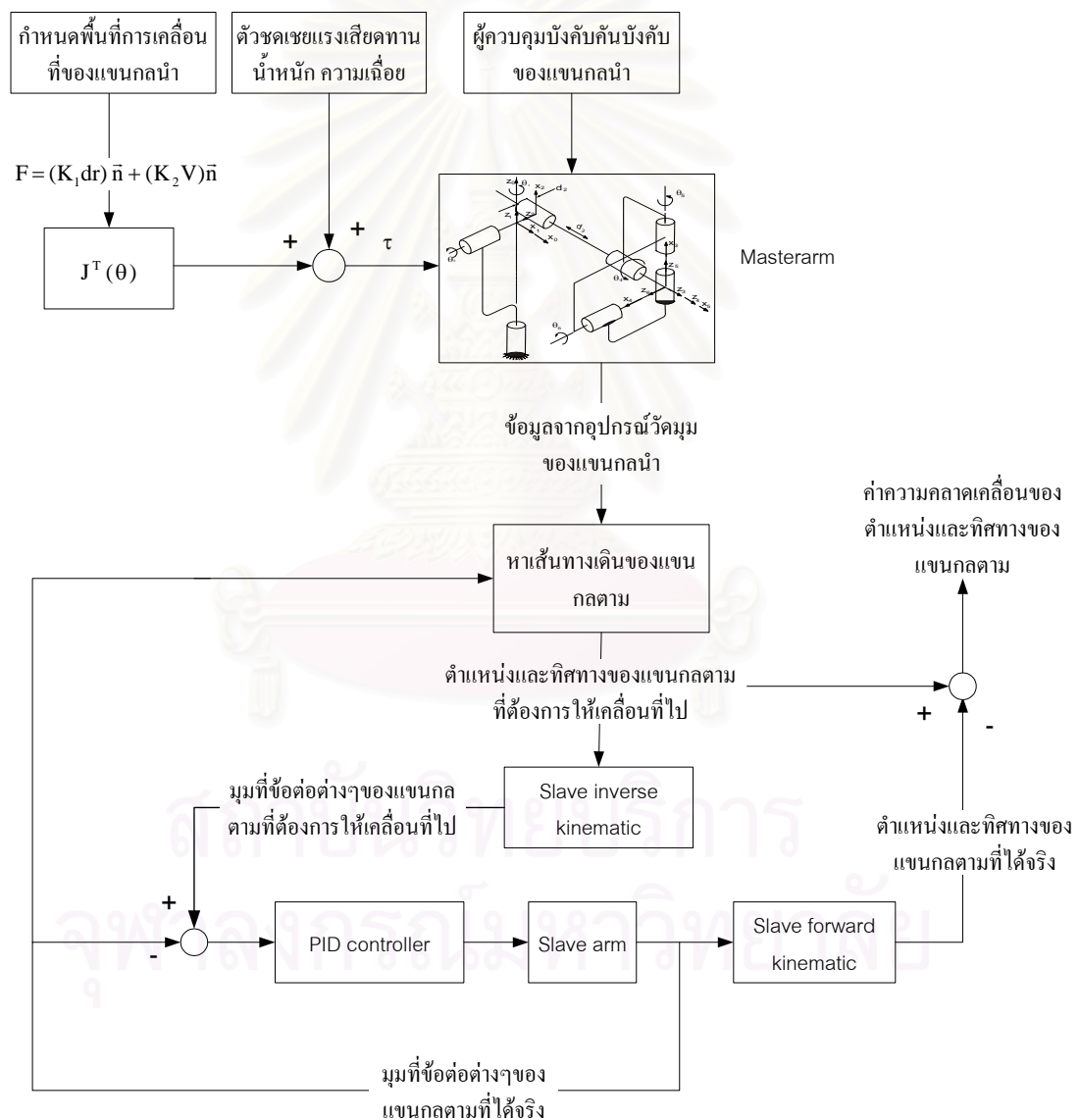
$$F = \frac{K_1 d\phi}{|\nabla\phi|^2} \nabla\phi + K_2 V \frac{\nabla\phi}{|\nabla\phi|} \quad (6.14)$$

$$\begin{aligned} \text{โดยที่} \quad d\phi &= f_{\text{wall}}(x_1, y_1, z_1) - f_{\text{wall}}(x, y, z) \\ &= f_{\text{wall}}(x_1, y_1, z_1) - \phi_{\text{wall}} \\ &= f_{\text{wall}}(x_1, y_1, z_1) - \text{const} \end{aligned}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

6.3 การควบคุมแขนกล

รูปแบบการควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยเป็นแสดงไว้ในรูปที่ 6.8 เริ่มจากผู้ควบคุมบังคับให้แขนกลนำเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ต้องการโดยมีการกำหนดพื้นที่การทำงานหรือกำหนดขอบเขตการเคลื่อนที่ให้กับแขนกลนำจากนั้นนำข้อมูลตำแหน่งมุมที่วัดได้จากแขนกลนำไปคำนวณหาเส้นทางเดินของแขนกลตามร่วมกับข้อมูลตำแหน่งมุมของแขนกลตาม จากเส้นทางเดินของแขนกลตามที่ได้ซึ่งอยู่ในรูปของตำแหน่งและทิศทางนำไปคำนวณหาตำแหน่งมุมที่ข้อต่อต่าง ๆ แล้วใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงส่งไปที่ตัวควบคุมแบบ พี ไอ ดี ของแขนกลตามต่อไป



รูปที่ 6.8 รูปแบบการควบคุมของแขนกลตาม

บทที่ 7

การทดสอบแขนกลเคลื่อนที่นำและตาม

7.1 วิธีการทดสอบ

การทดสอบแขนกลนำและตามในงานวิจัยนี้เพื่อให้แขนกลนำและตามเป็นไปตามขอบเขตที่ได้กำหนดไว้คือ

1. แขนกลนำสามารถบังคับให้แขนกลตามเคลื่อนที่ตามได้อย่างถูกต้องทั้งตำแหน่งและทิศทาง
2. ความผิดพลาดของตำแหน่งที่ข้อมือ (wrist point) ของแขนกลตามเมื่อเทียบกับตำแหน่งที่ข้อมือของแขนกลนำมีค่าไม่เกิน 5 มิลลิเมตร
3. ความผิดพลาดของทิศทางที่ปลายแขนกลตาม (end-effector) เมื่อเทียบกับที่ปลายแขนกลนำมีค่าไม่เกิน 5 องศา
4. แขนกลนำสามารถสร้างแรงโต้ตอบกับผู้ควบคุมได้

ในการทดสอบได้แบ่งออกเป็นส่วนต่างๆดังนี้

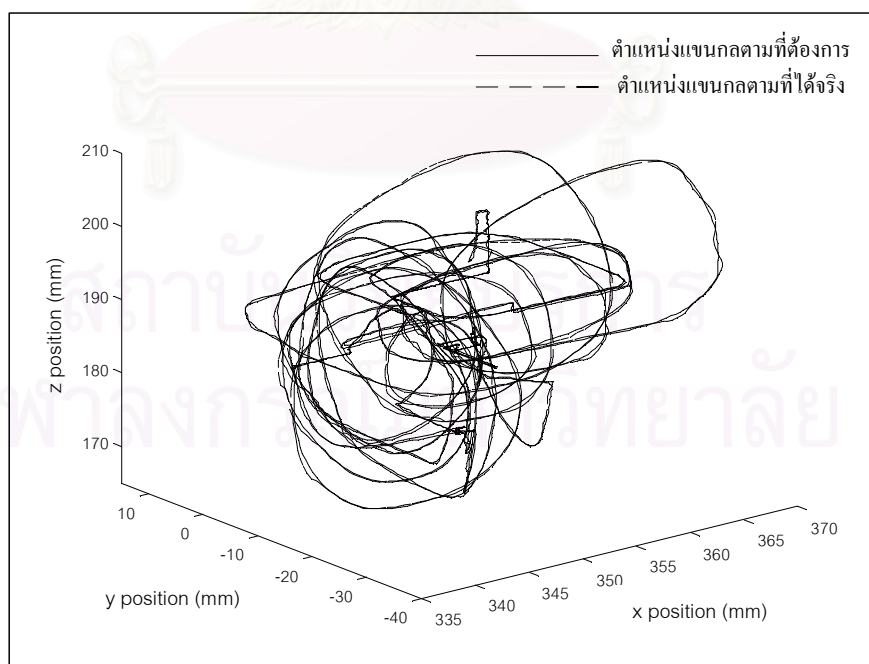
1. การบังคับให้แขนกลตามเคลื่อนที่ตามแขนกลนำอย่างอิสระและปรับสภาพแขนกลนำให้ง่ายแก่การบังคับของผู้ควบคุมได้แก่ การชดเชยน้ำหนักของแขนกลนำ การชดเชยแรงเสียดทาน และการหน่วงการเคลื่อนที่ของแขนกลนำเพื่อลดการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วที่อาจเกิดจากผู้ควบคุม
 - โดยกำหนดค่าขยาย G_p 4 ค่าคือ 0.5 , 1.0, 2.0 และ 3.0 โดย G_p เท่ากับ 0.5 จะทำให้แขนกลตามเคลื่อนที่ช้ากว่าแขนกลนำ 0.5 เท่า G_p เท่ากับ 1, 2 และ 3 จะทำให้แขนกลตามเคลื่อนที่เร็วกว่าแขนกลนำ 1, 2 และ 3 เท่าตามลำดับ
 - บังคับให้แขนกลตามยกวัตถุที่มีน้ำหนัก 2.0 กิโลกรัมโดยค่า G_p เท่ากับ 3.0
2. การบังคับแขนกลตามให้เคลื่อนที่ตามแขนกลนำที่มีการกำหนดพื้นที่การทำงานของแขนกลนำ ผู้ควบคุมสามารถบังคับแขนกลนำให้เคลื่อนที่ได้เฉพาะในพื้นที่การทำงานที่กำหนดเท่านั้น พื้นที่การทำงานได้แก่
 - พื้นที่การทำงานภายในทรงกระบอกรัศมี 20 มิลลิเมตร
 - พื้นที่การทำงานบนระนาบ $Z = 160$ และอยู่ในวงกลมรัศมีขนาด 40 มิลลิเมตร
 ทุกพื้นที่การทำงานกำหนดให้ G_p มีค่าเท่ากับ 1

ทุกการทดสอบจะเป็นการหาค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางที่เกิดขึ้นที่ปลายแขนกลตามกับตำแหน่งและทิศทางที่ใช้สั่งให้แขนกลตามเคลื่อนที่ ตำแหน่งและทิศทางที่ใช้สั่งนี้ได้จากการนำข้อมูลตำแหน่งและทิศทางของแขนกลนำและแขนกลตามมาคำนวณ วิธีหาตำแหน่งและทิศทางที่ใช้สั่งให้แขนกลตามเคลื่อนที่ได้จากบทที่ 6 ตำแหน่งที่ปลายแขนกลตามหาจากการนำข้อมูลที่ข้อต่อของแขนกลตามมาคำนวณหาตำแหน่งที่ปลายแขนกลตาม ข้อมูลที่ข้อต่อของแขนกลนำและตามได้จากอุปกรณ์วัดมุม วิธีการคำนวณหาตำแหน่งปลายแขนกลตามได้จากบทที่ 4

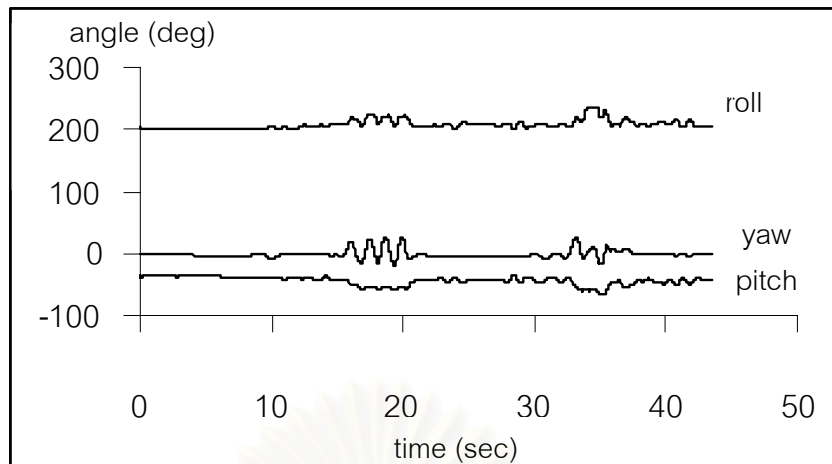
7.2 ผลการทดสอบการบังคับให้แขนกลตามเคลื่อนตามแขนกลนำอย่างอิสระ

7.2.1 การทดสอบที่ค่า $G_p = 0.5$

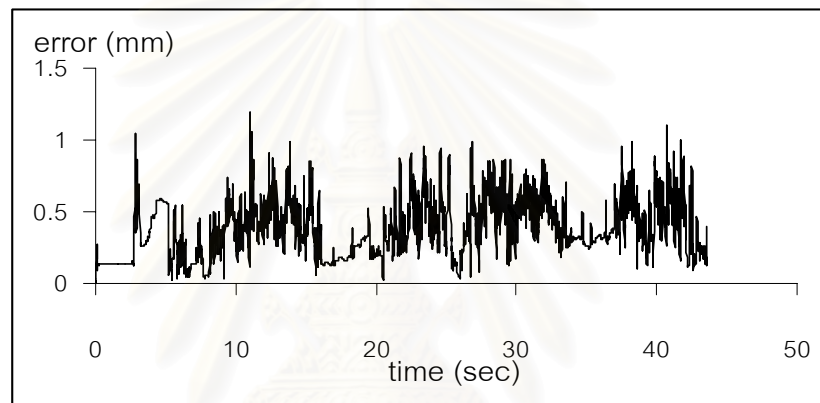
การทดสอบที่ค่า G_p เท่ากับ 0.5 จะเริ่มทดสอบจากผู้ควบคุมบังคับคั้งคั้งของแขนกลนำเคลื่อนที่ไปอย่างอิสระทั้งตำแหน่งและทิศทางเพื่อดูเคลื่อนที่ตามของแขนกลตามจากนั้นแขนกลนำจะมายุคหนึ่งอยู่ที่ตำแหน่งสุดท้ายเพื่อดูค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและทิศทางของแขนกลตามในช่วงสภาวะคงตัว ค่า G_p เท่ากับ 0.5 จะทำหน้าที่ลดขนาดของตำแหน่งและทิศทางที่ใช้สั่งให้แขนกลตามเคลื่อนที่ลง 0.5 เท่า ผลการทดสอบพบว่าแขนกลนำสามารถบังคับให้แขนกลตามเคลื่อนที่ตามได้เป็นอย่างดีทั้งตำแหน่งและทิศทาง ผลการทดสอบแสดงดังกราฟในรูปที่ 7.1 ซึ่งแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลตามกับตำแหน่งที่สั่งให้เคลื่อนที่โดยแขนกลนำ รูปที่ 7.2 แสดงผลการทดสอบทิศทางของแขนกลตามโดยแสดงเป็นค่ามุม roll, pitch และ yaw ตามลำดับ



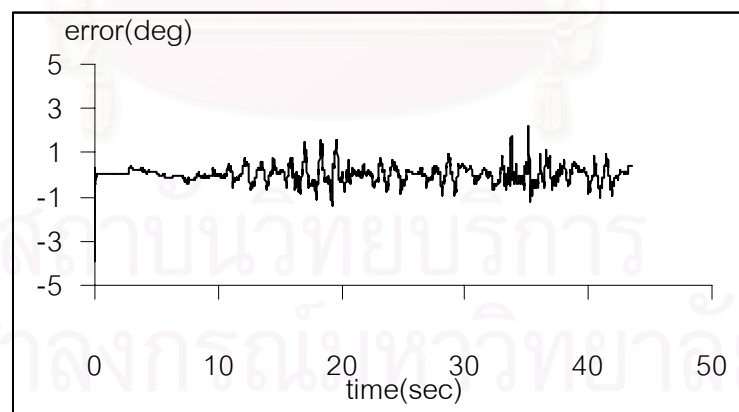
รูปที่ 7.1 กราฟแสดงตำแหน่งที่ปลายแขนกลที่ได้จริงตามกับตำแหน่งแขนกลที่ต้องการเมื่อ G_p เท่ากับ 0.5



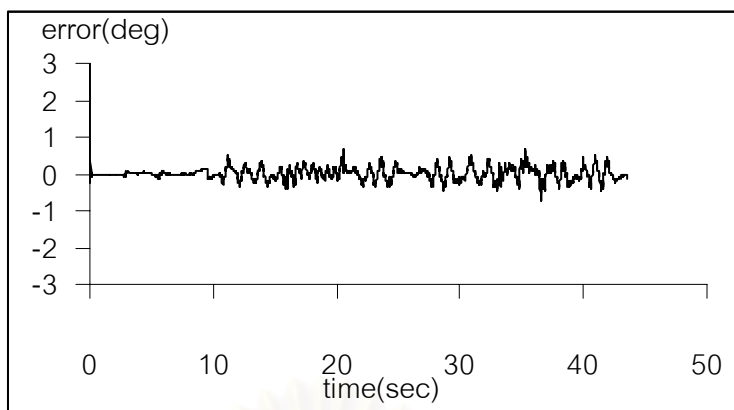
รูปที่ 7.2 กราฟแสดงทิศทางที่เปลี่ยนแปลงของแกนกลตามที่ได้จริงเมื่อ G_p เท่ากับ 0.5



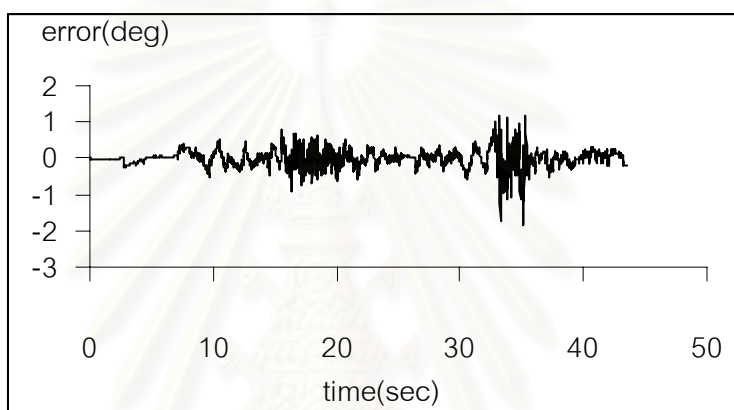
รูปที่ 7.3 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดที่ตำแหน่งปลายแกนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 0.5



รูปที่ 7.4 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (roll angle) ของแกนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 0.5



รูปที่ 7.5 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (pitch angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 0.5



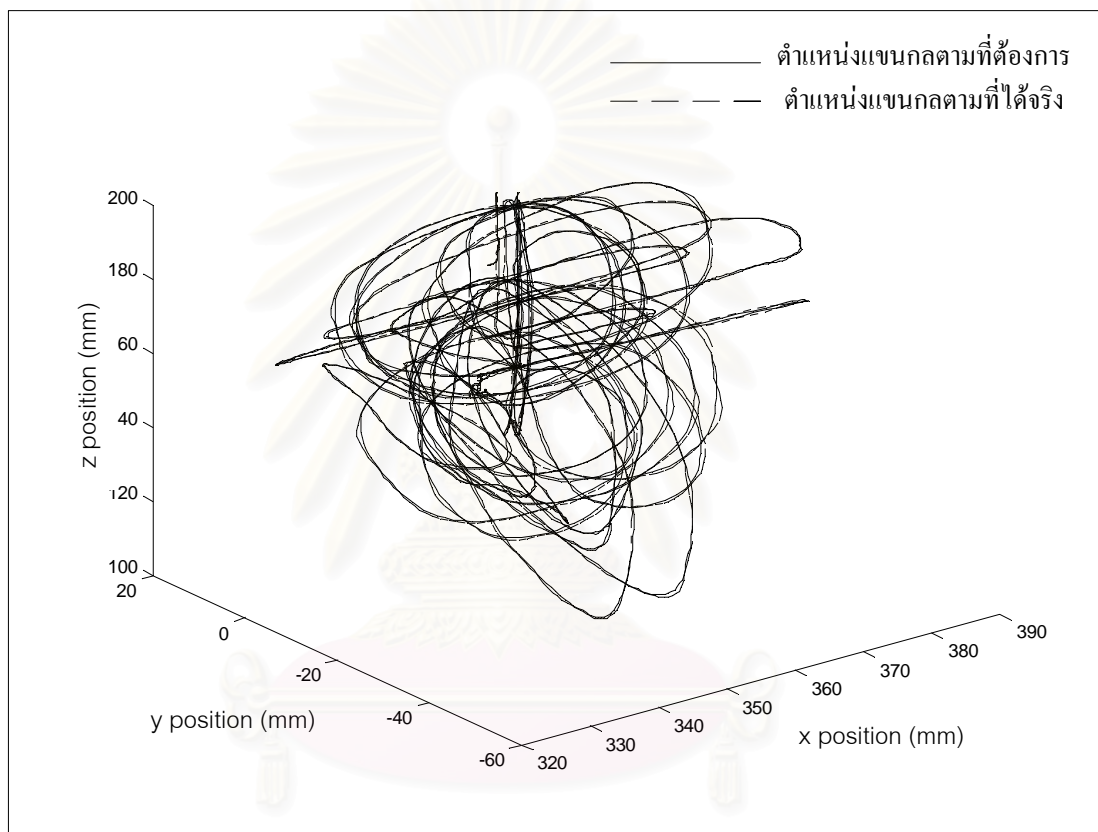
รูปที่ 7.6 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (yaw angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 0.5

กราฟในรูปที่ 7.3 แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่ปลายแขนกลตามกับตำแหน่งที่ต้องการ พบว่าค่าความผิดพลาดที่ได้มีค่าไม่เกิน 1.19 มิลลิเมตรค่าความผิดพลาดเมื่อแขนกลนำเคลื่อนมาอยู่ในตำแหน่งสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 0.14 มิลลิเมตร รูปที่ 7.4 ถึง 7.6 แสดงค่าความผิดพลาดของทิศทางของแขนกลตามโดยค่าความผิดพลาดของมุม roll, pitch และ yaw มีค่าไม่เกิน 2.20, 0.70 และ 1.85 องศาตามลำดับ ค่าความผิดพลาดของมุม roll, pitch และ yaw เมื่อแขนกลนำเคลื่อนมาอยู่ในตำแหน่งสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 0.39, -0.11 และ -0.18 องศาตามลำดับ

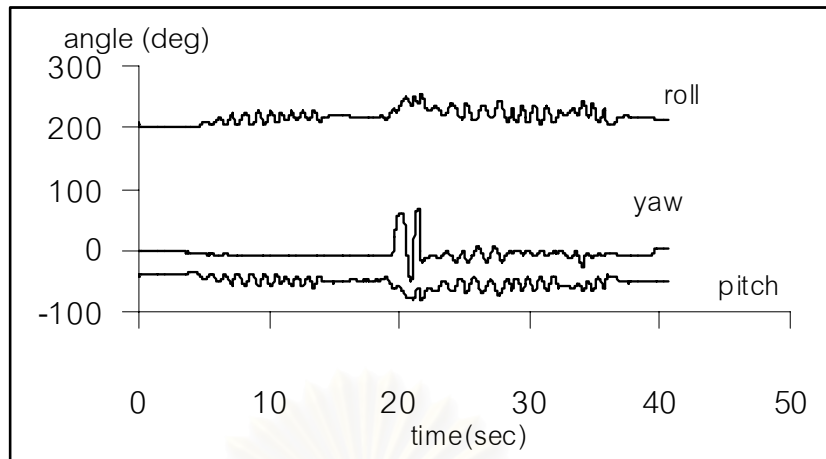
7.2.2 การทดสอบที่ค่า G_p เท่ากับ 1.0

การทดสอบที่ค่า G_p เท่ากับ 1.0 นั้นจะทำการทดสอบคล้ายกับการทดสอบที่ค่า G_p เท่ากับ 0.5 โดยพยายามควบคุมคัมบังคัมของแขนกลนำมีความเร็วใกล้เคียงกับการควบคุมคัมบังคัมที่ค่า G_p เท่ากับ 0.5 ผลการทดสอบพบว่าแขนกลนำสามารถบังคับให้แขนกลตามเคลื่อนที่ตามได้เป็นอย่างดีทั้งตำแหน่งและทิศทาง ผลการทดสอบแสดงดังกราฟในรูปที่ 7.7 ซึ่งแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลตามกับตำแหน่งที่สั่งให้เคลื่อนที่โดยแขนกลนำ รูปที่ 7.8 แสดงผลการทดสอบทิศทางของแขนกลตามโดยแสดงเป็นค่ามุม roll, pitch และ yaw ตามลำดับ รูปที่ 7.9 แสดงค่า

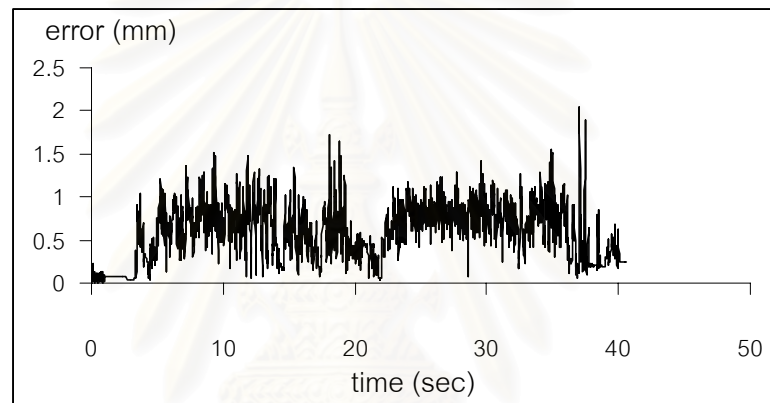
ความผิดพลาดของตำแหน่งที่ปลายแขนกลตามกับตำแหน่งที่ต้องการพบว่าค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ได้มีค่าไม่เกิน 2.11 มิลลิเมตรซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความผิดพลาดสูงสุดในกรณีที่ G_p เท่ากับ 0.5 ทั้งนี้เนื่องมาจากค่า G_p ที่มากกว่าทำให้แขนกลตามในกรณีนี้เคลื่อนที่เร็วกว่าในกรณีแรก ขณะที่แขนกลนำในทั้งสองกรณีเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่ใกล้เคียงกัน ค่าความผิดพลาดเมื่อแขนกลนำเคลื่อนมาอยู่ในตำแหน่งสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 0.23 มิลลิเมตร



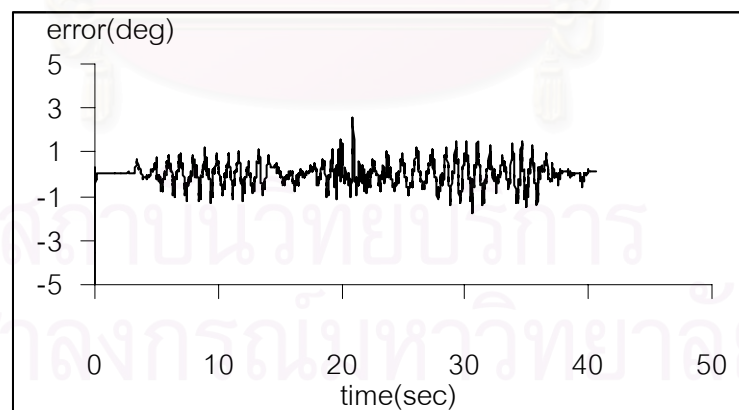
รูปที่ 7.7 กราฟแสดงตำแหน่งที่ปลายแขนกลที่ได้จริงตามกับตำแหน่งแขนกลที่ต้องการเมื่อ G_p เท่ากับ 1.0



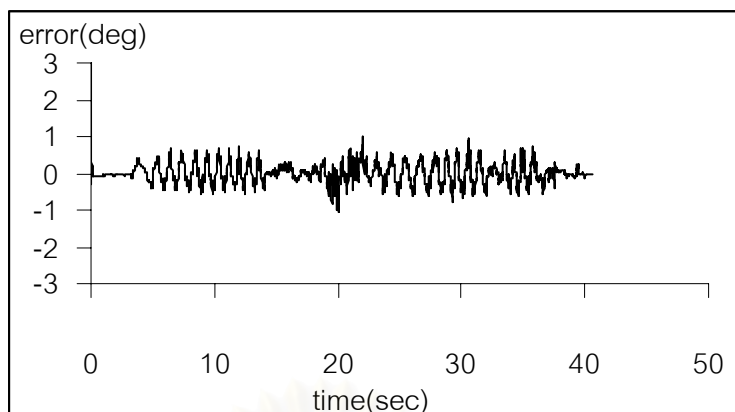
รูปที่ 7.8 กราฟแสดงทิศทางที่ปลายแขนของแขนกลตามที่ได้จริงเมื่อ G_p เท่ากับ 1.0



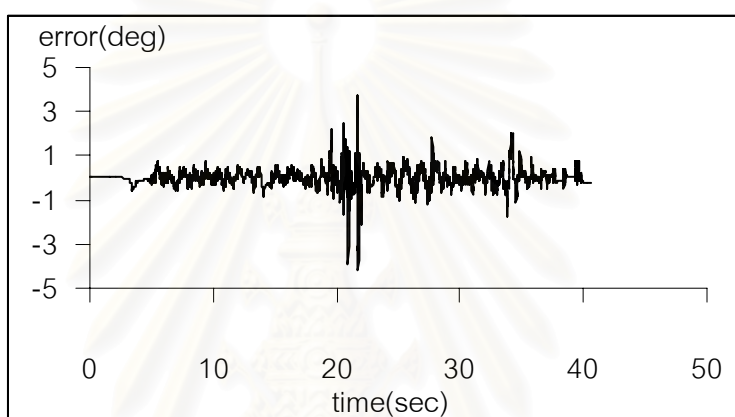
รูปที่ 7.9 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดที่ตำแหน่งปลายแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 1.0



รูปที่ 7.10 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (roll angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 1.0



รูปที่ 7.11 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (pitch angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 1.0



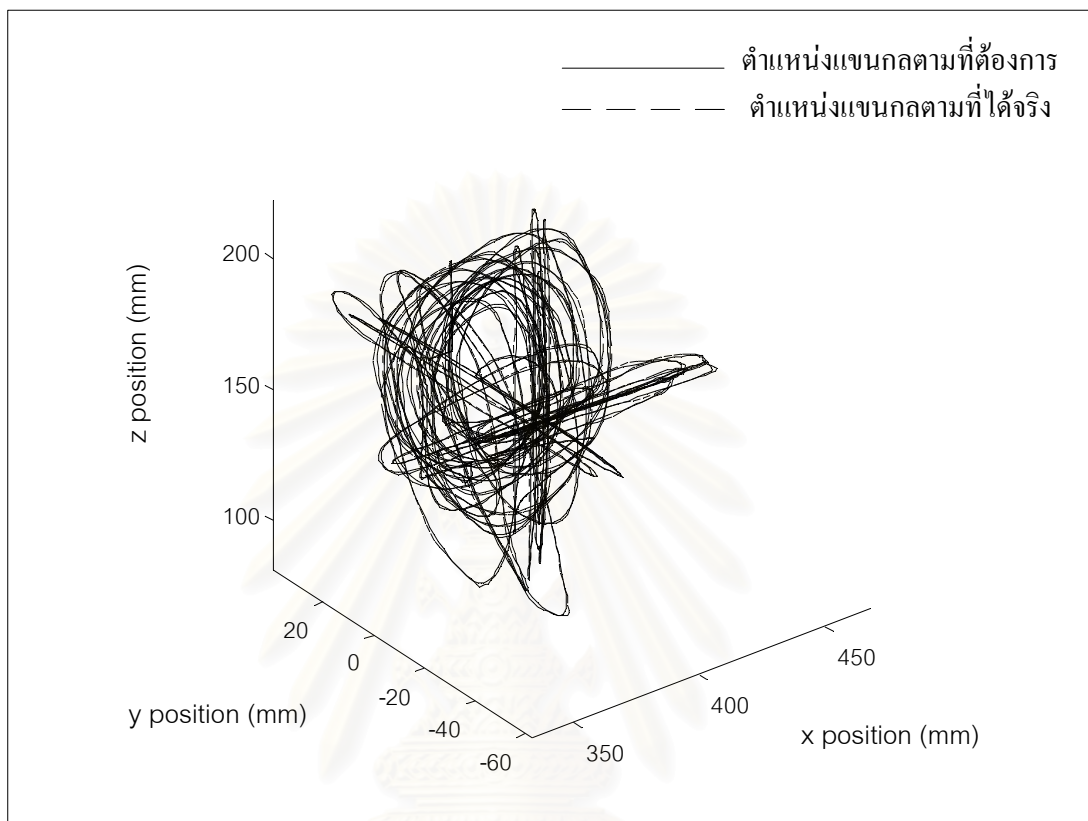
รูปที่ 7.12 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (yaw angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 1.0

กราฟในรูปที่ 7.10 ถึง 7.12 แสดงค่าความผิดพลาดของทิศทางของแขนกลตามโดยค่าความผิดพลาดของมุม roll, pitch และ yaw มีค่าไม่เกิน 2.20, 0.70 และ 1.85 องศาตามลำดับ ค่าความผิดพลาดของมุม roll, pitch และ yaw เมื่อแขนกลนำเคลื่อนมาอยู่ในตำแหน่งสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 0.39, -0.19 และ -0.18 องศาตามลำดับ

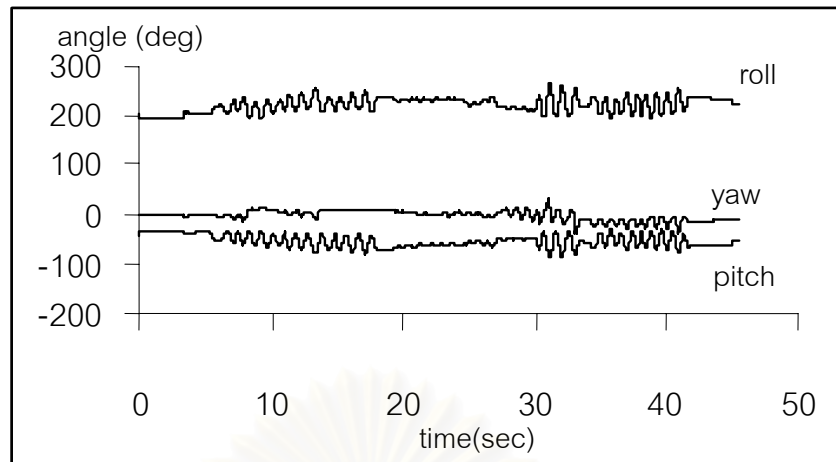
7.2.3 การทดสอบในกรณีที่มี G_p เท่ากับ 2.0

การทดสอบที่ค่า G_p เท่ากับ 2.0 นั้นจะทำการทดสอบคล้ายกับการทดสอบที่ค่า G_p ทั้งสองครั้งที่ผ่านมา ผลการทดสอบพบว่าแขนกลนำสามารถบังคับให้แขนกลตามเคลื่อนที่ตามได้เป็นอย่างดีทั้งตำแหน่งและทิศทาง ผลการทดสอบแสดงดังกราฟในรูปที่ 7.13 ซึ่งแสดงลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลตามกับตำแหน่งที่สั่งให้เคลื่อนที่โดยแขนกลนำ รูปที่ 7.14 แสดงผลการทดสอบทิศทางของแขนกลตามโดยแสดงเป็นค่ามุม roll, pitch และ yaw ตามลำดับ รูปที่ 7.15 แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่ปลายแขนกลตามกับตำแหน่งที่ต้องการพบว่าค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ได้มีค่าเท่ากับ 3.12 มิลลิเมตรซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความผิดพลาดสูงสุดในกรณีที่ G_p เท่ากับ 0.5 และ 1.0 ทั้งนี้เนื่องมาจากค่า G_p ที่มากกว่าทำให้แขนกลตามต้องเคลื่อนที่เร็วขึ้น

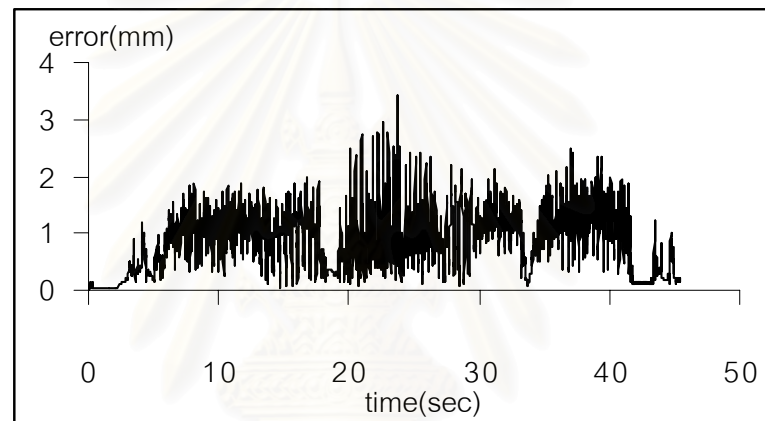
ประกอบกับในการทดลองครั้งนี้ผู้ควบคุมได้เคลื่อนคันบังคับของแขนกลนำอย่างรวดเร็วในบางช่วง เป็นผลให้ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งเพิ่มมากขึ้น ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งเมื่อแขนกลนำเคลื่อนมาอยู่ในตำแหน่งสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 0.22 มิลลิเมตร



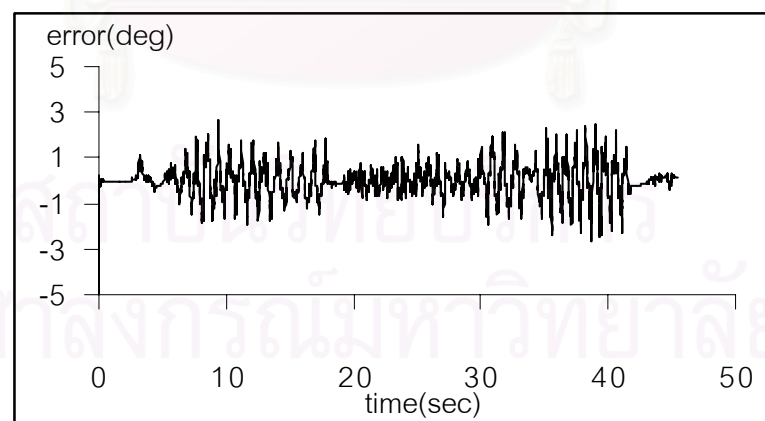
รูปที่ 7.13 กราฟแสดงตำแหน่งที่ปลายแขนกลที่ได้จริงตามกับตำแหน่งแขนกลที่ต้องการเมื่อ C_p เท่ากับ 2.0



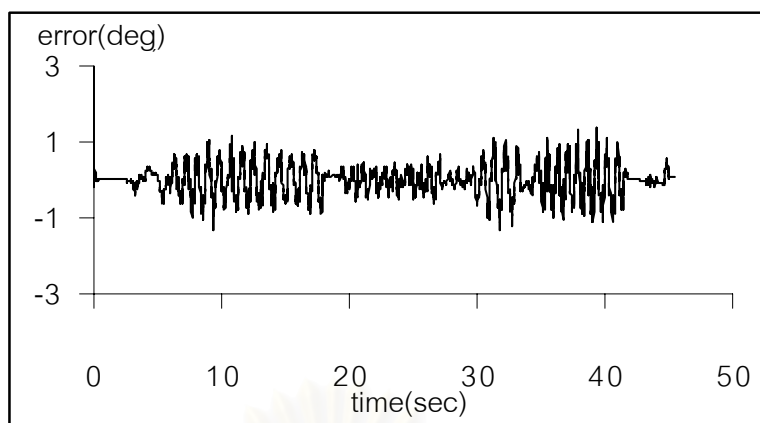
รูปที่ 7.14 กราฟแสดงทิศทางที่ปลายแขนของแขนกลตามที่ได้จริงเมื่อ G_p เท่ากับ 2.0



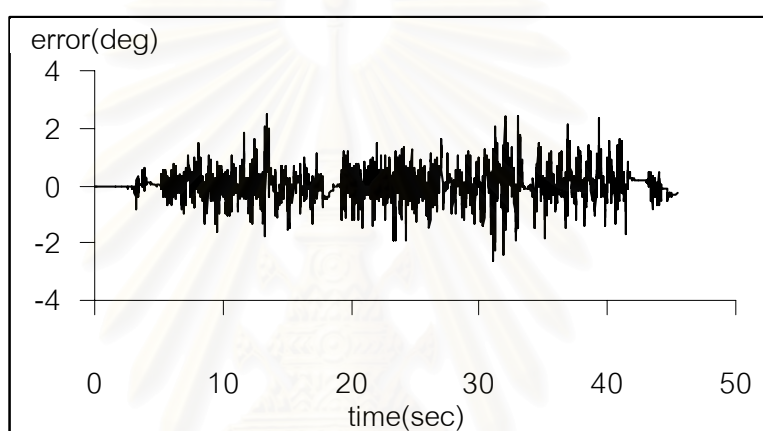
รูปที่ 7.15 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดที่ตำแหน่งปลายแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 2.0



รูปที่ 7.16 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (roll angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 2.0



รูปที่ 7.17 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (pitch angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 2.0

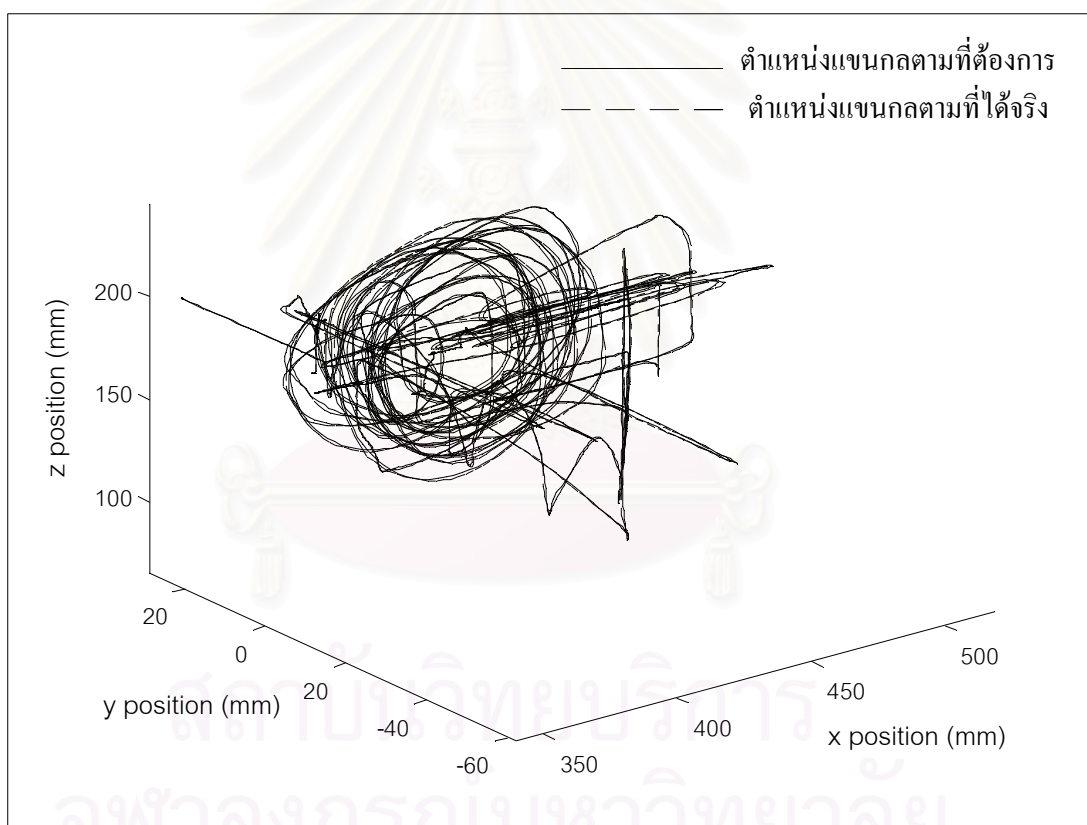


รูปที่ 7.18 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (yaw angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 2.0

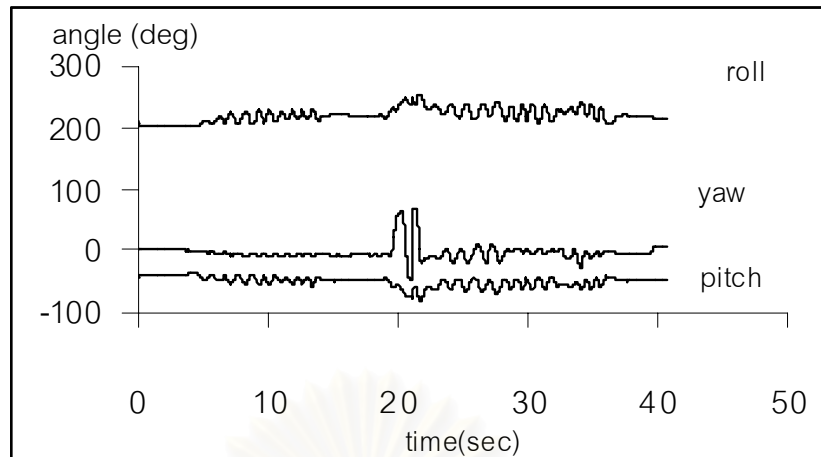
กราฟในรูปที่ 7.16 ถึง 7.18 แสดงค่าความผิดพลาดของทิศทางของแขนกลตามโดยค่าความผิดพลาดของมุม roll, pitch และ yaw มีค่าไม่เกิน 2.70, 1.38 และ 2.51 องศาตามลำดับ ค่าความผิดพลาดของมุม roll, pitch และ yaw เมื่อแขนกลนำเคลื่อนมาอยู่ในตำแหน่งสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 0.15, -0.08 และ -0.28 องศาตามลำดับ ค่าความผิดพลาดสูงสุดของทิศทางที่ได้มีค่ามากกว่าค่าความผิดพลาดสูงสุดของทิศทางในกรณีนี้ที่ G_p เท่ากับ 0.5 และ 1.0 เนื่องจากค่า G_p ที่มากขึ้นและในการทดสอบบางช่วงผู้ควบคุมได้เพิ่มความเร็วคั่นบังคับของแขนกลนำทำให้แขนกลตามต้องเคลื่อนที่ตามอย่างรวดเร็วเป็นผลให้ค่าความผิดพลาดของทิศทางมีค่าเพิ่มขึ้น

7.2.4 การทดสอบในกรณีที G_p เท่ากับ 3.0

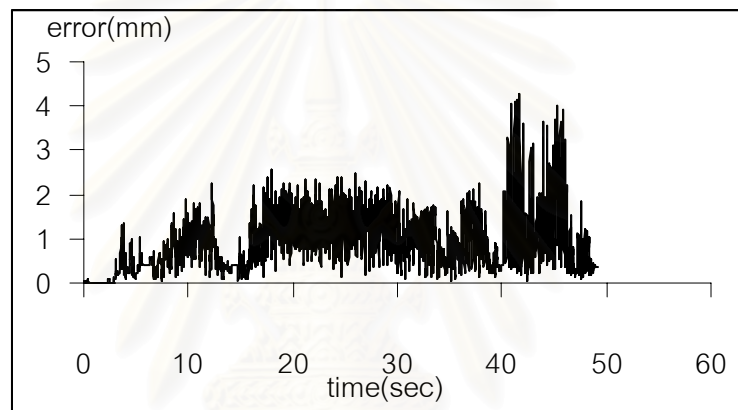
การทดสอบที่ค่า G_p เท่ากับ 3.0 แขนกลตามจะเคลื่อนที่เร็วกว่าทุกกรณีที่ผ่านมาและผู้ควบคุมได้เคลื่อนคั่นบังคับของแขนกลนำอย่างรวดเร็วในช่วงท้ายเป็นผลให้ความคลาดเคลื่อนโดยเฉลี่ยของตำแหน่งในช่วงดังกล่าวมีค่ามากส่วนช่วงความเร็วในการบังคับปกติ ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าแตกต่างกับค่าความคลาดเคลื่อนในกรณี G_p อื่นๆไม่มากซึ่งสามารถดูได้จากกราฟรูปที่ 7.19 และรูปที่ 7.21 ค่าความผิดพลาดสูงสุดของตำแหน่งที่ได้มีค่าไม่เกิน 2.23 มิลลิเมตรในช่วงการบังคับปกติ ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าความผิดพลาดสูงสุดในกรณีที G_p เท่ากับ 2.0 ช่วงการบังคับเร็ว ค่าความผิดพลาดมีค่าสูงสุดเท่ากับ 4.23 ความผิดพลาดของตำแหน่งเมื่อแขนกลนำเคลื่อนมาอยู่ในตำแหน่งสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 0.34 มิลลิเมตร รูปที่ 7.20 แสดงผลการทดสอบทิศทางของแขนกลตามโดยแสดงเป็นค่ามุม roll, pitch และ yaw ตามลำดับ



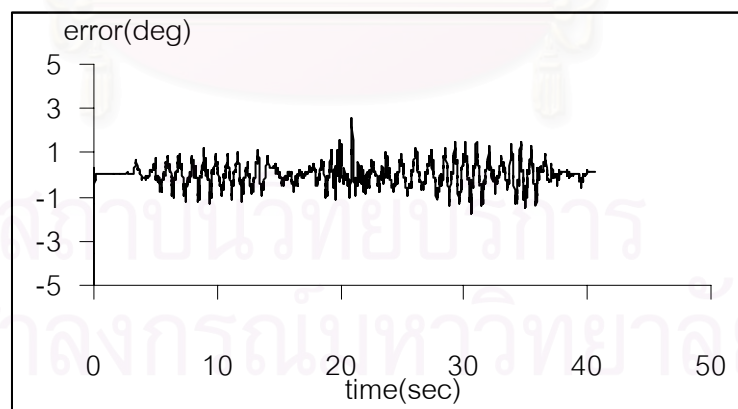
รูปที่ 7.19 กราฟแสดงตำแหน่งที่ปลายแขนกลที่ได้จริงตามกับตำแหน่งแขนกลที่ต้องการเมื่อ G_p เท่ากับ 3.0



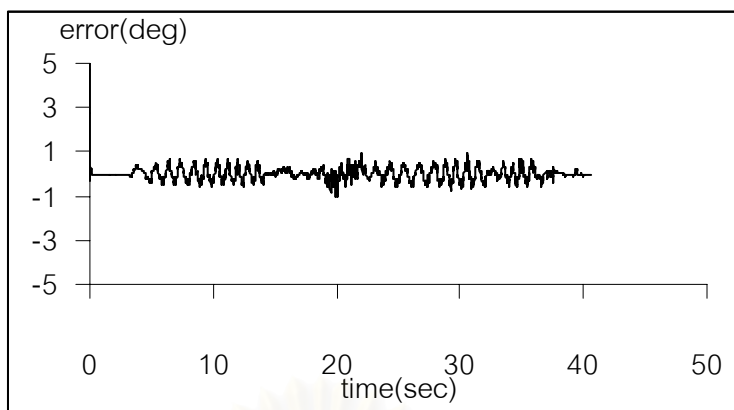
รูปที่ 7.20 กราฟแสดงทิศทางที่ปลายแขนของแขนกลตามที่ได้จริงเมื่อ G_p เท่ากับ 3.0



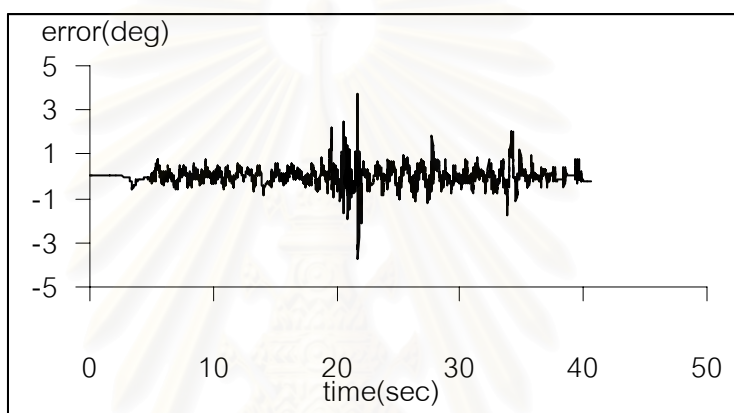
รูปที่ 7.21 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดที่ตำแหน่งปลายแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 3.0



รูปที่ 7.22 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (roll angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 3.0



รูปที่ 7.23 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (pitch angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 3.0



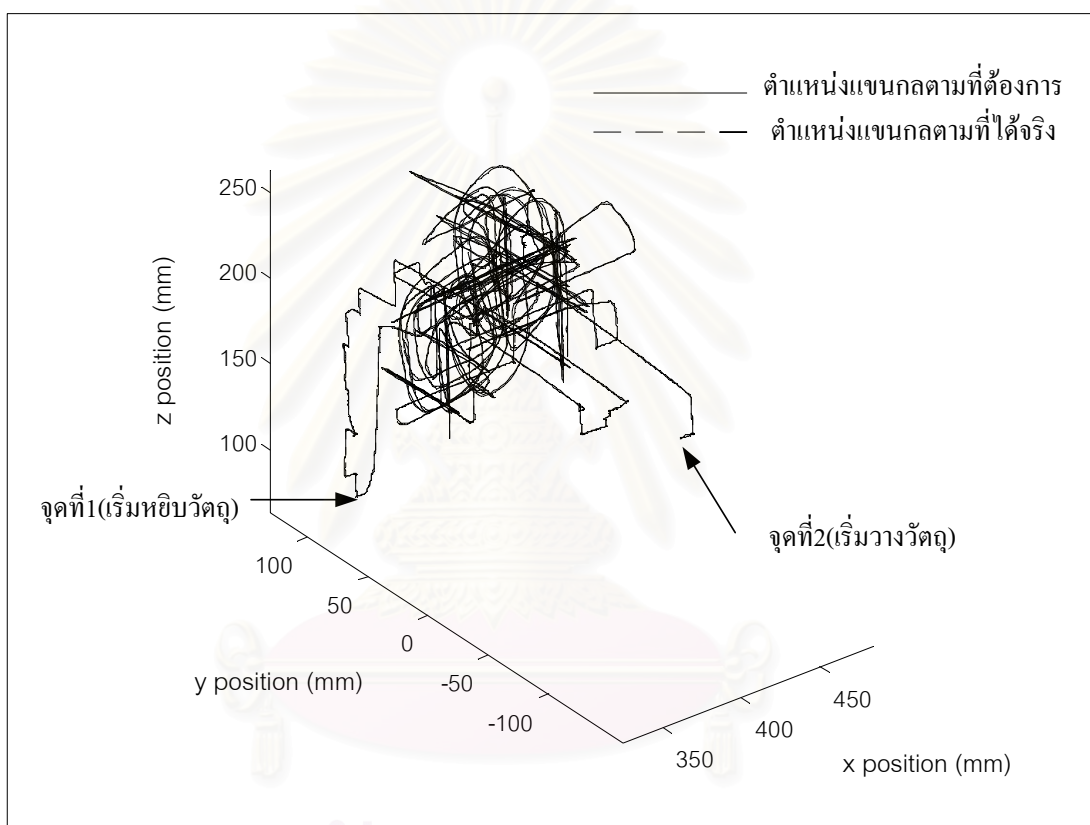
รูปที่ 7.24 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (yaw angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 3.0

กราฟในรูปที่ 7.22 ถึง 7.24 แสดงค่าความผิดพลาดของทิศทางของแขนกลตามโดยค่าความผิดพลาดของมุม roll, pitch และ yaw มีค่าไม่เกิน 2.5, 1.71 และ 2.61 องศาตามลำดับค่าความผิดพลาดของมุม roll, pitch และ yaw เมื่อแขนกลนำเคลื่อนมาอยู่ในตำแหน่งสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 0.02, -0.05 และ 0.11 องศาตามลำดับ ค่าความผิดพลาดสูงสุดของทิศทางที่ได้มีค่ามากกว่าค่าความผิดพลาดสูงสุดของทิศทางในกรณีที่ G_p เท่ากับ 2.0 ไม่มากนัก

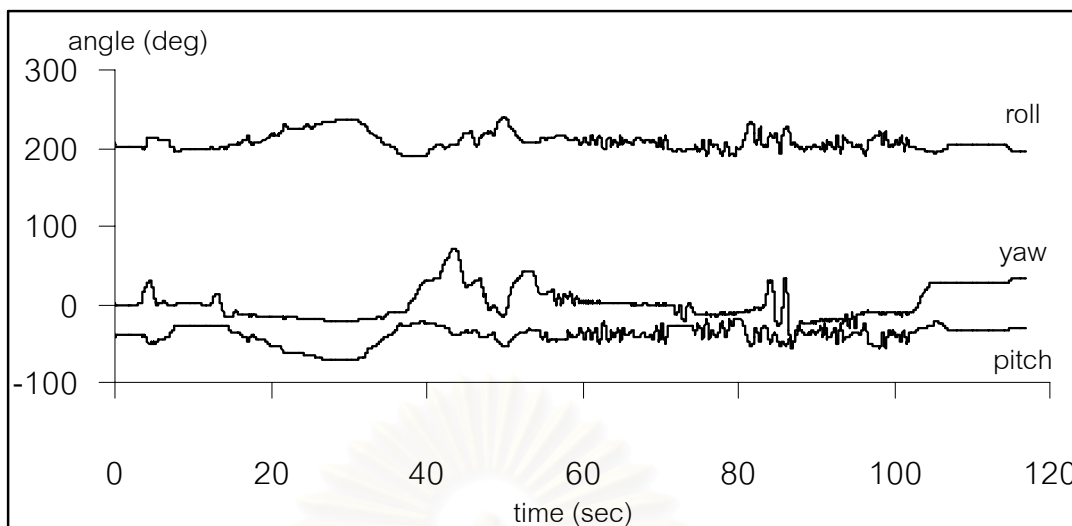
7.2.5 บังคับให้แขนกลตามยกวัตถุที่มีน้ำหนัก 2.0 กิโลกรัมโดยค่า G_p เท่ากับ 3.0

การทดสอบเริ่มจากผู้ควบคุมบังคับคันบังคับของแขนกลนำเพื่อให้แขนกลตามเคลื่อนที่ไปหยิบวัตถุที่มีน้ำหนัก 2 กิโลกรัมซึ่งวางอยู่ที่จุดที่หนึ่งแล้วนำไปวางยังจุดที่สองโดยที่จุดที่หนึ่งและจุดที่สองเป็นจุดที่ไม่มีการกำหนดตำแหน่งบนเฟรมศูนย์ของแขนกลตามที่แน่นอน และในระหว่างที่แขนกลหยิบวัตถุจะมีการบังคับให้แขนกลตามเคลื่อนที่ไปมาอย่างรวดเร็วเพื่อทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่ตามของแขนกลตาม ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ตามของแขนกลตามแสดงดังรูปที่ 7.25 เส้นทึบที่แสดงเป็นตำแหน่งที่ได้จากแขนกลนำเพื่อใช้สั่งให้แขนกลตามเคลื่อนที่ตาม เส้นประเป็นตำแหน่งของแขนกลตามที่ได้จริง แขนกลตามสามารถเคลื่อนที่ตามได้เป็น

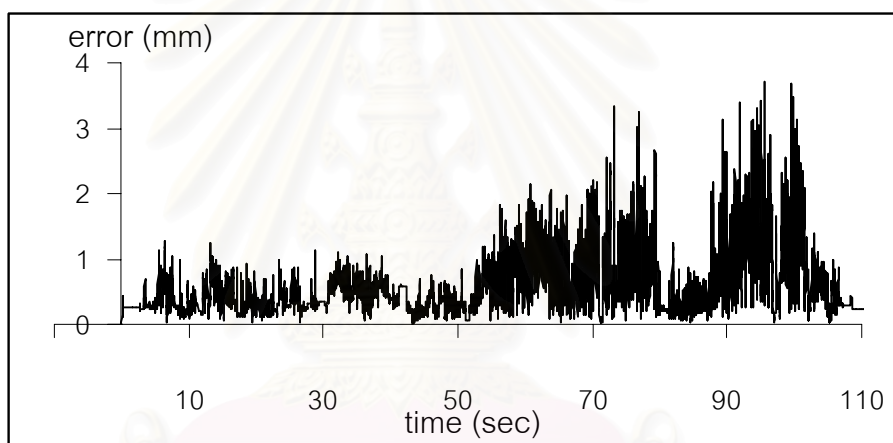
อย่างดี รูปที่ 7.26 แสดงทิศทางที่ได้จริงของแขนกลตามโดยแสดงเป็นมุม roll, pitch, yaw ความผิดพลาดของตำแหน่งของแขนกลตามที่ได้เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่มีการหิยวัตถุมีค่าใกล้เคียงกัน ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งแสดงดังกราฟรูปที่ 7.27 ช่วงเวลาที่ 50 ถึง 100 วินาทีค่าความผิดพลาดมีค่ามากเนื่องจากช่วงเวลาดังกล่าวผู้ควบคุมได้เคลื่อนคันบังคับของแขนกลนำอย่างรวดเร็วทำให้แขนกลตามเคลื่อนที่ตามอย่างรวดเร็วเป็นผลให้ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งมีค่ามากขึ้นค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ได้มีค่าเท่ากับ 3.65 มิลลิเมตรค่าความผิดพลาดเมื่อแขนกลเคลื่อนมาอยู่ในตำแหน่งสุดท้ายหรือจุดที่ 2 ก่อนวางวัตถุมีค่าเท่ากับ 0.23 มิลลิเมตร



รูปที่ 7.25 กราฟแสดงตำแหน่งที่ปลายแขนกลที่ได้จริงตามกับตำแหน่งแขนกลที่ต้องการเมื่อ G_c เท่ากับ 3.0 และมีน้ำหนัก 2 กิโลกรัมอยู่ที่ปลายแขนกลตาม

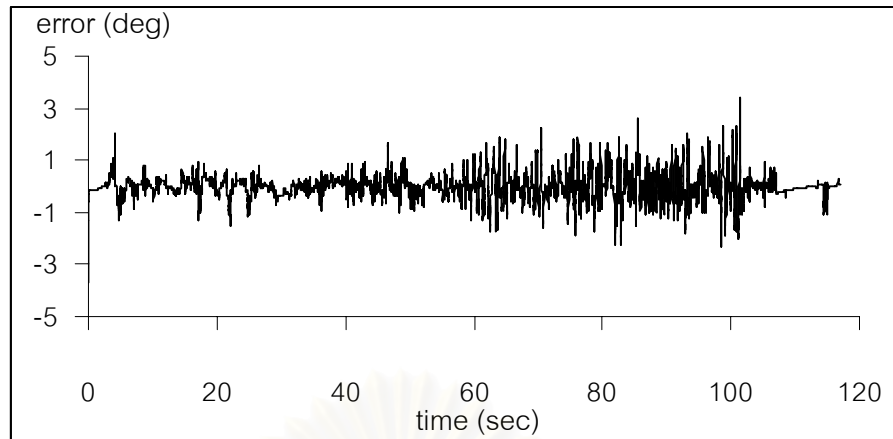


รูปที่ 7.26 กราฟแสดงทิศทางที่ปลายแขนของแขนกลตามที่ได้จริงเมื่อ G_p เท่ากับ 3.0 และมีน้ำหนัก 2 กิโลกรัมอยู่ที่ปลายแขนกลตาม

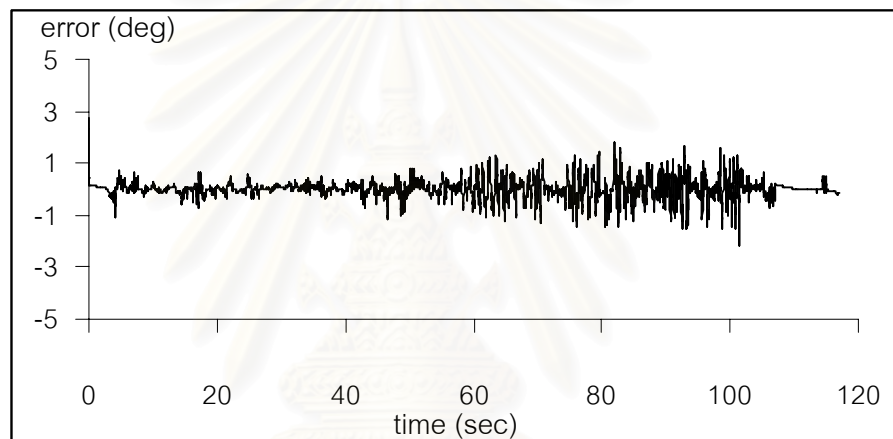


รูปที่ 7.27 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดที่ตำแหน่งปลายแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 3.0 และมีน้ำหนัก 2 กิโลกรัมอยู่ที่ปลายแขนกลตาม

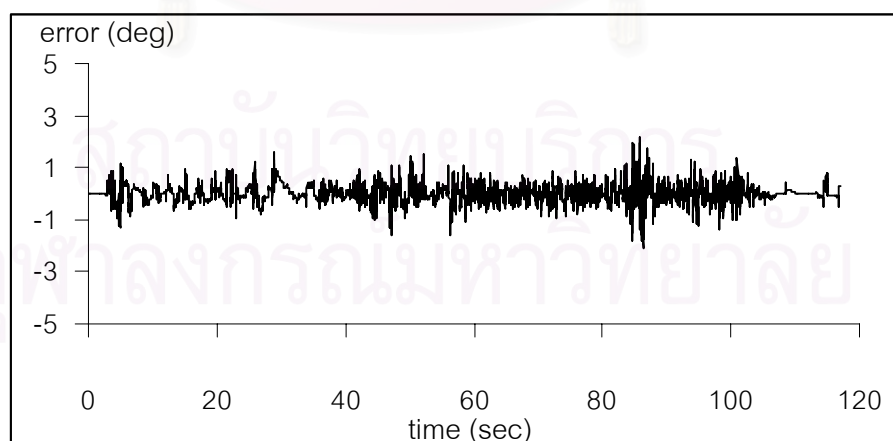
กราฟในรูปที่ 7.28 ถึง 7.30 แสดงค่าความผิดพลาดของทิศทางของแขนกลตามโดยค่าความผิดพลาดของมุม roll, pitch และ yaw มีค่าไม่เกิน 3.21, 1.98 และ 1.89 องศาตามลำดับ ค่าความผิดพลาดของมุม roll, pitch และ yaw เมื่อแขนกลนำเคลื่อนมาอยู่ในตำแหน่งสุดท้ายมีค่าเท่ากับ 0.03, -0.07 และ 0.23 องศาตามลำดับ



รูปที่ 7.28 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (roll angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 3.0 และมีน้ำหนัก 2 กิโลกรัมอยู่ที่ปลายแขนกลตาม



รูปที่ 7.29 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (pitch angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 3.0 และมีน้ำหนัก 2 กิโลกรัมอยู่ที่ปลายแขนกลตาม

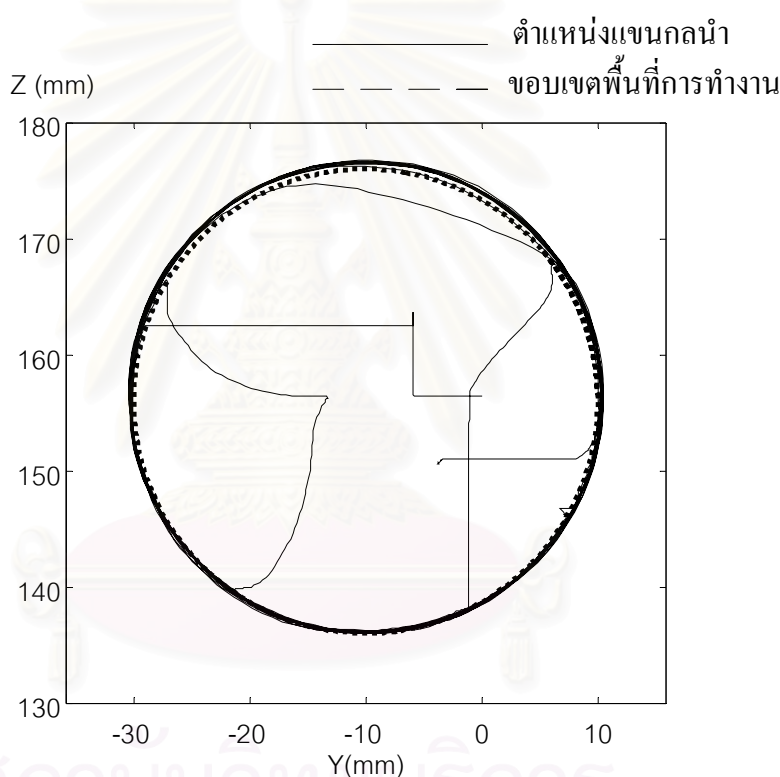


รูปที่ 7.30 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของทิศทาง (yaw angle) ของแขนกลตามเมื่อ G_p เท่ากับ 3.0 และมีน้ำหนัก 2 กิโลกรัมอยู่ที่ปลายแขนกลตาม

7.3 การบังคับแกนกลตามให้เคลื่อนตามแกนกลนำซึ่งมีการกำหนดพื้นที่การทำงานของแกนกลนำ

7.3.1 การทดสอบโดยกำหนดพื้นที่การทำงานอยู่ในทรงกระบอกบนเฟรมศูนย์ของแกนกลตามที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ $Y = -10$ และ $Z = 155$ รัศมีขนาด 20 มิลลิเมตรแกนของทรงกระบอกขนานกับแกน X

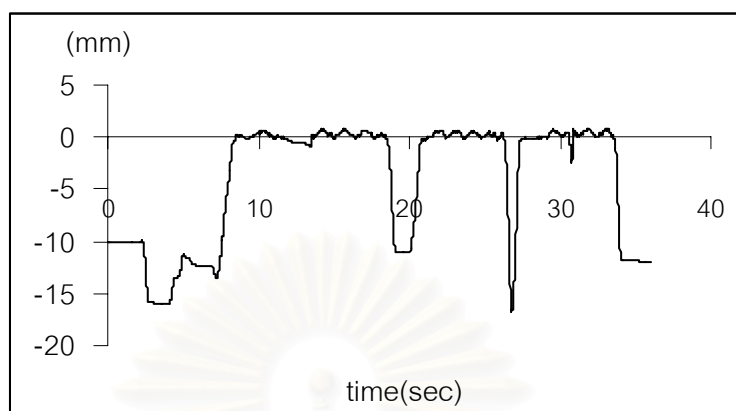
ผู้ควบคุมจะบังคับให้แกนกลนำเคลื่อนที่ไปมาอย่างอิสระได้ในพื้นที่การทำงานที่กำหนดไว้โดยไม่สามารถบังคับให้ออกนอกพื้นที่การทำงานที่กำหนดได้ขณะเดียวกันแกนกลตามก็จะเคลื่อนที่ตามการเคลื่อนที่ของแกนกลนำ



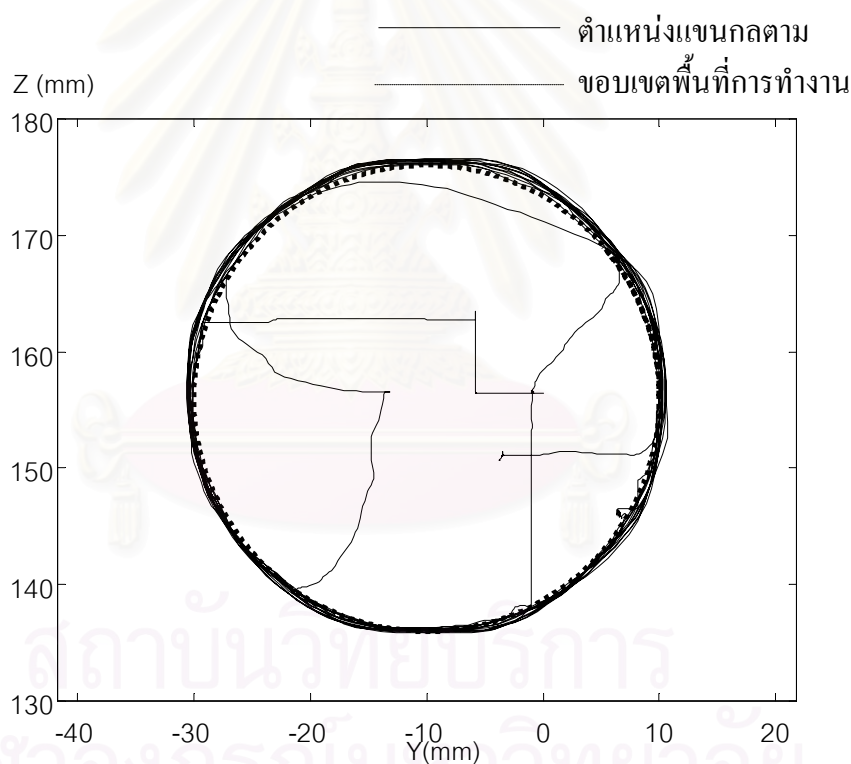
รูปที่ 7.31 กราฟแสดงตำแหน่งของแกนกลนำที่ได้จริงกับขอบเขตพื้นที่การทำงานทรงกระบอกรัศมี 20 มิลลิเมตร

ผลการทดสอบการควบคุมแกนกลนำให้อยู่ในพื้นที่การทำงานที่กำหนดแสดงดังกราฟรูปที่ 7.31 ซึ่งแสดงเป็นแบบสองมิติในระนาบ Y-Z พบว่าผู้ควบคุมสามารถเคลื่อนคั่นบังคับของแกนกลนำได้ภายในทรงกระบอกที่กำหนดได้เป็นอย่างดีโดยที่คั่นบังคับเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตที่กำหนดเพียงเล็กน้อยซึ่งดูได้จากระยะห่างระหว่างตำแหน่งคั่นบังคับของแกนกลนำกับขอบเขตพื้นที่การทำงานดังกราฟรูปที่ 7.32 ค่าบวกของแกนในแนวตั้งหมายถึงคั่นบังคับเคลื่อนที่ออกนอกพื้นที่การทำงาน

ทำงานค่าลบของแกนในแนวตั้งหมายถึงคันทังค้ำเคลื่อนที่อยู่ในพื้นที่การทำงาน ระยะที่คันทังค้ำของแขนกลนำออกนอกขอบเขตพื้นที่การทำงานมากที่สุดเท่ากับ 0.64 มิลลิเมตร



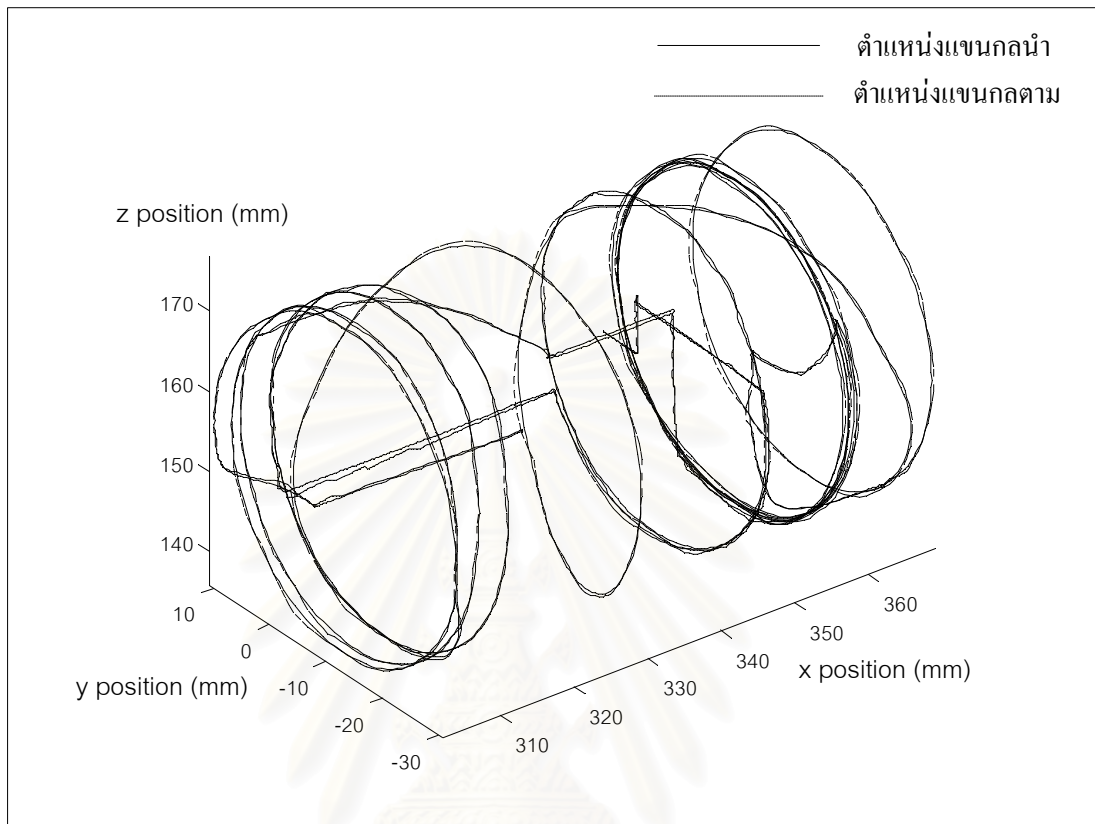
รูปที่ 7.32 แสดงระยะห่างระหว่างคันทังค้ำของแขนกลนำกับขอบเขตพื้นที่การทำงาน



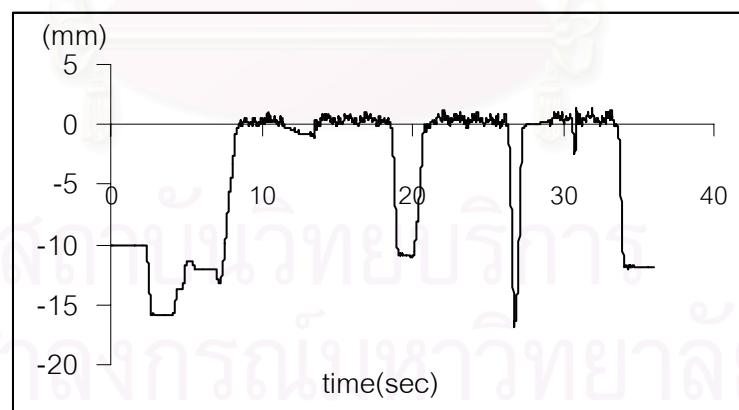
รูปที่ 7.33 กราฟแสดงตำแหน่งของแขนกลตามที่ได้จริงกับขอบเขตพื้นที่การทำงานทรงกระบอกรัศมี 20 มิลลิเมตร

ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนกลตามตามการเคลื่อนที่ของแขนกลนำพบว่าแขนกลตามสามารถเคลื่อนที่ตามแขนกลนำได้เป็นอย่างดีสามารถเคลื่อนที่ภายในขอบเขตพื้นที่การทำงานได้ โดยมีการเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตเพียงเล็กน้อยอยู่ได้ซึ่งดูได้จากกราฟรูปที่ 7.33 ซึ่งแสดงเป็นแบบสองมิติในระนาบ Y-Z กราฟรูปที่ 7.34 แสดงตำแหน่งของแขนกลตามกับตำแหน่งของแขนกลนำแบบสามมิติซึ่งแขนกลตามสามารถเคลื่อนที่ตามแขนกลนำได้เป็นอย่างดี ระยะที่แขนกลตาม

เคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตพื้นที่การทำงานดูได้จากกราฟรูปที่ 7.35 ระยะที่แขนกลตามเคลื่อนที่ออกมามากที่สุดเท่ากับ 1.3 มิลลิเมตร



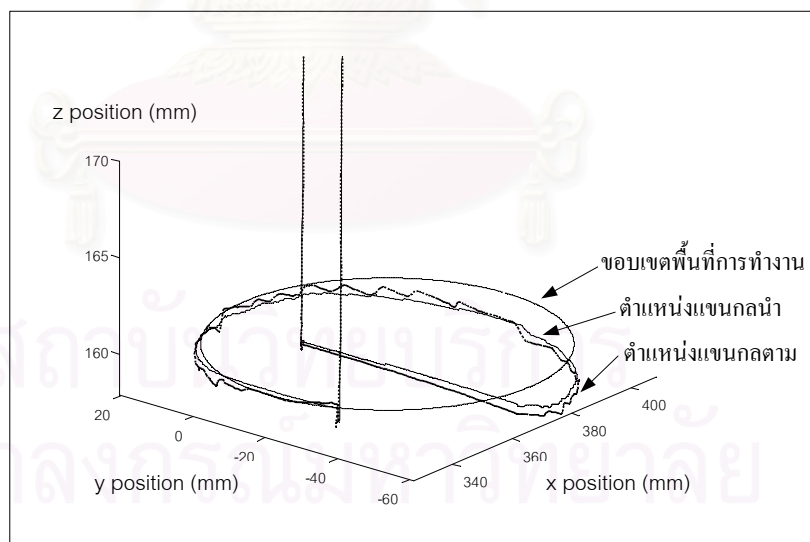
รูปที่ 7.34 กราฟแสดงตำแหน่งที่ปลายแขนกลตามกับตำแหน่งคั่นบังคับของแขนกลนำ



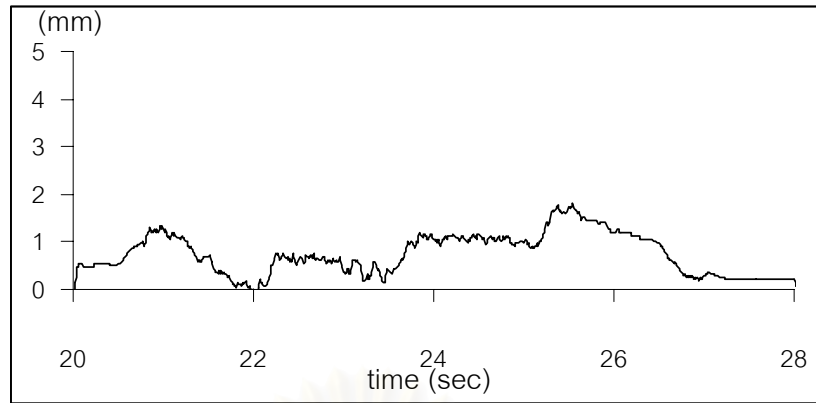
รูปที่ 7.35 แสดงระยะห่างระหว่างคั่นบังคับของแขนกลตามกับขอบเขตพื้นที่การทำงาน

7.3.2 การทดสอบโดยกำหนดพื้นที่การทำงานอยู่บนระนาบ $Z = 160$ มิลลิเมตรและอยู่ในวงกลมรัศมีขนาด 80 มิลลิเมตรจุดศูนย์กลางอยู่ที่ $X = 370$, $Y = -20$ มิลลิเมตรบนเฟรมศูนย์ของแขนกลตาม

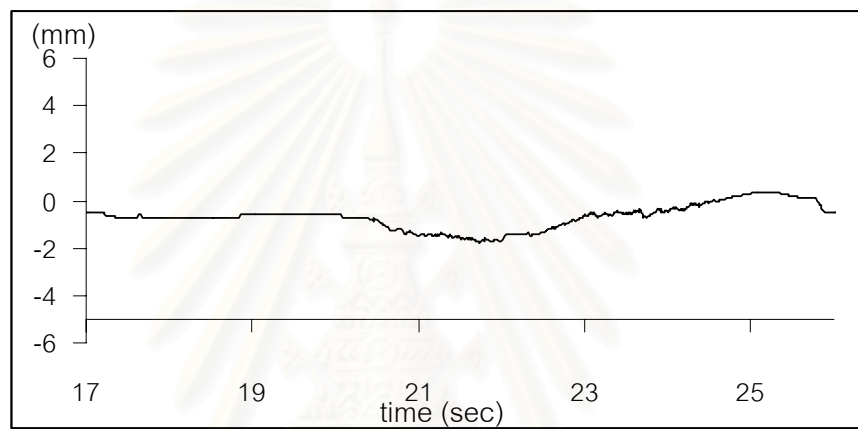
ผู้ควบคุมจะบังคับให้แขนกลนำเคลื่อนที่ไปมาอย่างอิสระได้ในพื้นที่การทำงานที่กำหนดไว้โดยไม่สามารถบังคับให้ออกนอกพื้นที่การทำงานที่กำหนดได้ขณะเดียวกันแขนกลตามก็จะเคลื่อนที่ตามการเคลื่อนที่ของแขนกลนำ ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนกลนำและแขนกลตามกับขอบเขตพื้นที่การทำงานแสดงดังกราฟรูปที่ 7.36 แขนกลนำและแขนกลตามสามารถเคลื่อนที่อยู่ในขอบเขตพื้นที่การทำงานที่กำหนดได้เป็นอย่างดี กราฟรูปที่ 7.37 แสดงระยะทางที่คั่นบังคับของแขนกลนำเคลื่อนที่ออกนอกวงกลมรัศมีขนาด 80 มิลลิเมตรระยะที่เคลื่อนที่ออกมามากที่สุดเท่ากับ 1.8 มิลลิเมตร กราฟรูปที่ 7.38 แสดงระยะทางที่แขนกลนำเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตระนาบ $Z = 160$ ระยะที่เคลื่อนที่ออกมาที่สุดเท่ากับ 1.7 มิลลิเมตรค่าลบของแกนในแนวตั้งของกราฟรูปที่ 7.38 หมายถึงคั่นบังคับเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตระนาบ $Z = 160$ กราฟรูปที่ 7.39 แสดงระยะทางที่ปลายแขนกลตามเคลื่อนที่ออกนอกวงกลมรัศมีขนาด 80 มิลลิเมตรระยะที่เคลื่อนที่ออกมามากที่สุดเท่ากับ 1.86 มิลลิเมตรกราฟรูปที่ 7.40 แสดงระยะทางที่แขนกลตามเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตระนาบ $Z = 160$ ระยะที่เคลื่อนที่ออกมาที่สุดเท่ากับ 2.11 มิลลิเมตรค่าลบของแกนในแนวตั้งของกราฟรูปที่ 7.40 หมายถึงคั่นบังคับเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตระนาบ $Z = 160$



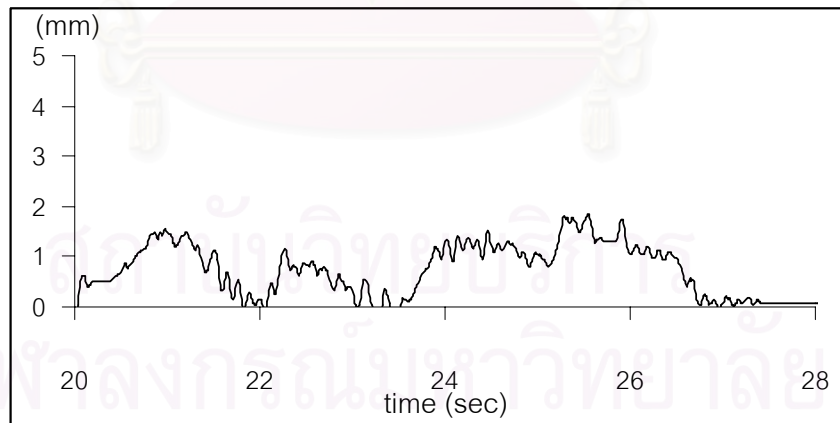
รูปที่ 7.36 กราฟแสดงตำแหน่งคั่นบังคับของแขนกลนำ ตำแหน่งที่ปลายแขนกลตามและขอบเขตพื้นที่การทำงาน



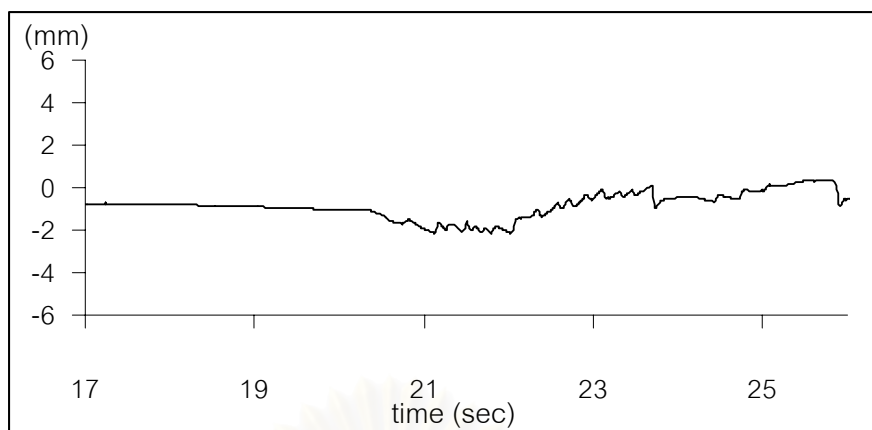
รูปที่ 7.37 กราฟแสดงระยะที่คั่นบังคับของแขนกลนำเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตพื้นที่การทำงานวงกลมรัศมี 80 มิลลิเมตร



รูปที่ 7.38 กราฟแสดงระยะที่คั่นบังคับของแขนกลนำเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตพื้นที่การทำงานระนาบ $Z = 160$ มิลลิเมตร



รูปที่ 7.39 กราฟแสดงระยะที่ปลายแขนกลตามเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตพื้นที่การทำงานวงกลมรัศมี 80 มิลลิเมตร



รูปที่ 7.40 กราฟแสดงระยะที่ปลายแขนกลตามเคลื่อนที่ออกนอกขอบเขตพื้นที่การทำงานระนาบ $Z = 160$ มิลลิเมตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 8

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

8.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างแขนกลนำแบบ 6 องศาอิสระเพื่อใช้ควบคุมแขนกลตามหรือแขนกลจุฬา 3 แขนกลนำที่สร้างขึ้นใช้ระบบส่งผ่านกำลังแบบมู่เล่และเคเบิลเป็นหลักทำให้แขนกลนำที่สร้างขึ้นมีน้ำหนักเบาและมีค่าความเฉื่อยต่ำมีแรงเสียดทานน้อยและไม่มีแบลคเคซ แขนกลนำสามารถควบคุมให้แขนกลตามเคลื่อนที่ตามได้เป็นอย่างดีทั้งตำแหน่งและทิศทางโดยสามารถสรุปได้ดังนี้

- การทดสอบโดยให้แขนกลตามเคลื่อนที่ตามแขนกลนำอย่างอิสระที่ค่า G_p ต่างๆ

G_p	ค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง (มิลลิเมตร)	ค่าความผิดพลาดของทิศทาง (องศา)		
		Roll	Pitch	Yaw
0.5	0.14	0.39	-0.11	-0.18
1.0	0.23	0.21	-0.21	-0.15
2.0	0.22	0.15	-0.08	-0.28
3.0	0.34	0.24	-0.05	0.11

ตารางที่ 8.1 ผลการทดสอบให้แขนกลตามเคลื่อนที่ตามแขนกลนำอย่างอิสระทั้งตำแหน่งและทิศทาง

- การทดสอบให้แขนกลตามยกวัตถุที่มีน้ำหนัก 2.0 กิโลกรัมโดยค่า G_p เท่ากับ 3.0

G_p	ค่าความผิดพลาดของตำแหน่ง (มิลลิเมตร)	ค่าความผิดพลาดของทิศทาง (องศา)		
		Roll	Pitch	Yaw
3.0	0.23	0.03	-0.07	0.23

ตารางที่ 8.2 ผลการทดสอบให้แขนกลตามเคลื่อนที่ไปหยิบวัตถุหนัก 2.0 กิโลกรัม

- การทดสอบโดยกำหนดพื้นที่การทำงานอยู่ในทรงกระบอกที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ $Y = -10$ และ $Z = 155$ รัศมีขนาด 20 มิลลิเมตรแกนของทรงกระบอกขนานกับแกน X
ระยะที่แขนกลนำเคลื่อนออกนอกผิวทรงกระบอกมากที่สุด 0.64 มิลลิเมตร
ระยะที่แขนกลตามเคลื่อนออกนอกผิวทรงกระบอกมากที่สุด 1.35 มิลลิเมตร
- การทดสอบโดยกำหนดพื้นที่การทำงานอยู่บนระนาบ $z = 160$ มิลลิเมตรและอยู่ในวงกลมรัศมีขนาด 80 มิลลิเมตรจุดศูนย์กลางอยู่ที่ $x = 370, y = -20$ มิลลิเมตร
ระยะที่แขนกลนำเคลื่อนออกนอกวงกลมมากที่สุด 1.80 มิลลิเมตร
ระยะที่แขนกลตามเคลื่อนออกนอกวงกลมมากที่สุด 1.86 มิลลิเมตร
ระยะที่แขนกลนำเคลื่อนออกนอกระนาบ $Z = 160$ มากที่สุดเท่ากับ 1.70 มิลลิเมตร
ระยะที่แขนกลตามเคลื่อนออกนอกระนาบ $Z = 160$ มากที่สุดเท่ากับ 2.11 มิลลิเมตร

8.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดลองการควบคุมแขนกลนำและแขนกลตามพบปัญหาที่ต้องทำการแก้ไขดังนี้

- เพิ่มจำนวนช่องสัญญาณสำหรับการ์ดรับส่งสัญญาณแบบดิจิตอลและการ์ดสำหรับอุปกรณ์วัดแรงเนื่องจากคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมแขนกลตามมีช่องสัญญาณไม่เพียงพอทำให้ไม่สามารถใช้อุปกรณ์วัดมุมที่มีความละเอียดสูงๆได้และไม่สามารถใช้อุปกรณ์วัดแรงได้
- เปลี่ยนอุปกรณ์วัดมุมให้มีความละเอียดมากขึ้น ในการคำนวณหาค่าความเร็วของแขนกลนำมีความผิดพลาดมากในช่วงความเร็วต่ำทำให้ไม่สามารถเพิ่มค่าแกนของตัวควบคุมแขนกลนำได้มากเป็นเหตุให้แขนกลนำเคลื่อนที่ออกนอกพื้นที่การทำงานได้มาก
- ติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงให้กับแขนกลนำและแขนกลตามเพื่อให้สามารถควบคุมแรงที่แขนกลนำกระทำโต้ตอบกับผู้ควบคุมได้อย่างถูกต้องมากขึ้น
- เพิ่มความแข็งแรงของแขนกลนำ

รายการอ้างอิง

1. Gregory L.Long and Curtis L. Collins. A Pantograph linkage Parallel Platform Master Hand Controller. Proceeding of the 1992 IEEE.
2. Paul A.Millman and J.Edward Colgate. Design of four degree-of-freedom force-reflecting manipulandum with a specified force/torque workspace.Proceeding of the 1991 IEEE.
3. Nobuto Matsuhira,Makoto Asakura, Hiroyuki Bamba and Michihiro Uenohara. Development of an Advanced Master-Slave Manipulator Using a Pantograph Master Arm and a Redundant Slave Arm. Proceeding of the 1993 IEEE.
4. J.F. jansen, R. L. Kress and S. M. Babcock. Controller Design for a force Reflecting Teleoperator System With Kinematically Dissimilar Master and Slave.
5. Paul S. Schenker, Antal K. Bejczy, Won S. Kim, Sukhan Lee.Adanced man-machine interfaces and control architecture for dexterous teleoperation.
6. Craig J.J. Introduction to Robotic, Mechanics and Control, 2nd edition : Addison Wesley Publishing Company, Inc.,1989.
7. K V Siva . Specification and Design of Input Devices for Teleoperation. Proceeding of the 1990 IEEE.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

อุปกรณ์ของแขนกลนำ

แขนกลนำประกอบด้วยอุปกรณ์หลักๆดังนี้

1. มอเตอร์เซอร์โวโร้ตอร์กระแสตรง (DC Servo Motor) สำหรับข้อต่อที่ 1 และ 2

แขนกลนำใช้มอเตอร์เซอร์โวโร้ตอร์กระแสตรง 2 ตัวเพื่อขับข้อต่อที่ 1 และ 2 โดยเป็นมอเตอร์ของ SANYO DENKI รุ่น U825-002E พร้อมอุปกรณ์วัดมุมที่มีความละเอียด 2500 พัลส์ต่อรอบ รูปของเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรงดังกล่าวแสดงดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 เซอร์โวมอเตอร์กระแสตรงรุ่น U825-002E

2. มอเตอร์เซอร์โวโร้ตอร์กระแสตรง (DC Servo Motor) สำหรับข้อต่อที่ 3, 4, 5 และ 6

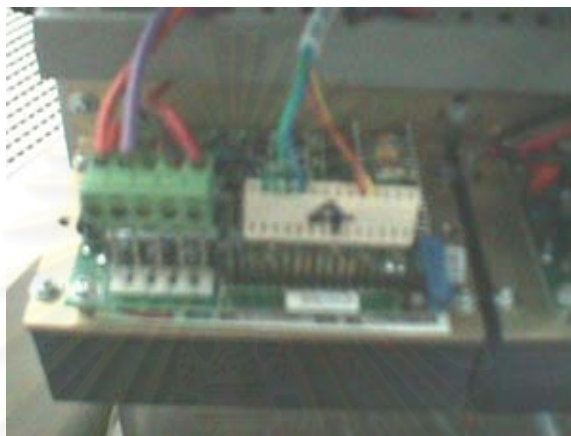
ข้อต่อที่ 3, 4, 5 และ 6 ใช้มอเตอร์กระแสตรงของ Electro-Crafti รุ่น E-586 โดยติดตั้งอุปกรณ์วัดมุมแยกต่างหาก อุปกรณ์วัดมุมสำหรับข้อต่อที่ 3, 4, 5 และ 6 มีความละเอียด 2500, 330, 1500 และ 330 พัลส์ต่อรอบ ตามลำดับรูปของเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรงดังกล่าวแสดงดังรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.2 เซอร์โวมอเตอร์กระแสตรงรุ่น E-586

3. ชุดขยายกระแสขับมอเตอร์กระแสตรง (DC Servo Motor Drive Amplifier) และตัวจ่ายกำลังกระแสตรง (DC power supply)

แขนกลนำใช้ชุดขยายกระแสเพื่อใช้ขับมอเตอร์ 6 ตัวชุดขยายกระแสเป็นของ Copley Controls Corp รุ่น 4122P ดังรูปที่ ก.3 สามารถจ่ายกระแสต่อเนื่องได้ 10 แอมแปร์ สูงสุด 20 แอมแปร์ที่ 2 วินาที 80 โวลต์ ตัวจ่ายกำลังเป็นของ Spectrum จ่ายกระแสสูงสุดได้ 20 แอมแปร์ที่ 30 โวลต์



รูปที่ ก.3 ชุดขยายกระแสเป็นของ Copley Controls Corp รุ่น 4122P

4. วงจรถอดรหัส (Decoder Circuit)

วงจรถอดรหัสทำหน้าที่รับสัญญาณจากอุปกรณ์วัดมุม ใช้ไอซี 74LS74 เพื่อตรวจหาทิศทางการหมุนของมอเตอร์และใช้ไอซี 74LS193 จำนวน 3 ตัวเพื่อให้ได้ความละเอียด 12 บิตรูปวงจรถอดรหัสแสดงดังรูป ก.4



รูปที่ ก.4 วงจรถอดรหัสขนาด 12 บิต

7. การ์ดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก (six Channel D/A Output Card)

การ์ดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอกที่ใช้เป็นของ DATA TRANSLATION รุ่น DT28158

ความละเอียด12บิต สามารถส่งสัญญาณออกได้ 8 ช่องสัญญาณ ดังรูปที่ ก.5



รูปที่ 5 การ์ดแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาลอก

8. การ์ดรับส่งสัญญาณแบบดิจิทัล

การ์ดรับส่งสัญญาณแบบดิจิทัลที่ใช้เป็นของ บริษัท อีทีที จำกัด รุ่น ET-PC 8255 การ์ดนี้จะทำ

หน้าที่รับสัญญาณจากวงจรถอดรหัสเพื่อส่งเข้าคอมพิวเตอร์ รูปวงจรถอดรหัสแสดงดังรูปที่ ก.6



รูปที่ 6 การ์ดรับส่งสัญญาณแบบดิจิทัล

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายทวี งามวิไลกร เกิดเมื่อวันที่ 6 เมษายน ปีพ.ศ. 2516 เป็นชาวกรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนอรรณพวิทย์ เมื่อสำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่หกได้สอบเข้าศึกษาต่อชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนราชวินิตบางแก้ว หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และได้สำเร็จปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกลในปีการศึกษา 2536 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีพ.ศ. 2541



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย