

แบบจำลองทางพลศาสตร์ของแขนกลที่มีความยืดหยุ่นตัวที่ใช้ในงานระยะเอี่ยมไกล



นายเด่นชัย วรเดชจำเริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DYNAMIC MODEL OF A LONG-REACH FLEXIBLE MANIPULATOR ARM



Mr. Denchai Woradechjumroen

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

Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

520188

หัวข้อวิทยานิพนธ์

แบบจำลองทางพลศาสตร์ของแขนกลที่มีความยืดหยุ่นตัวที่ใช้ในงาน  
ระยะเอี่ยมไกล

โดย

นายเด่นชัย วรเดชจำเริญ

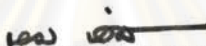
สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

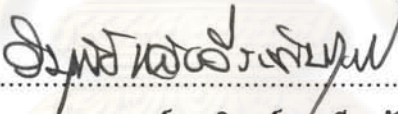
รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

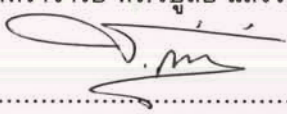
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิตศึกษา


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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันท์เจริญ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ)

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

ศูนย์วิทยุโทรทัศนวิทยา  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เด่นชัย วรเดชจำเริญ :แบบจำลองทางพลศาสตร์ของแขนกลที่มีความยืดหยุ่นตัวที่ใช้ในงานระยะเอื้อมไกล (Dynamic Model of a Long-Reach Flexible Manipulator Arm)  
อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก :รศ. ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 60 หน้า.

งานวิจัยนี้กล่าวถึงการหาแบบจำลองทางพลศาสตร์ของแขนกลที่มี 2 ก้านต่อโยงแบบยืดหยุ่น โดยแบบจำลองที่หาได้ใช้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบระบบควบคุมที่เวลาจริง แขนกลที่ออกแบบสำหรับงานระยะเอื้อมไกล โดยก้านต่อโยงของแขนกลมีโครงสร้างแบบ five-bar linkage มีตัวขับเป็นมอเตอร์กระแสตรงอยู่ที่ฐานเพื่อไม่ให้โหลดของมอเตอร์ส่งผลต่อการขับเคลื่อนก้านต่อโยง หลักการหาแบบจำลองพลศาสตร์ยึดจากหลักความจริงที่ว่าอุปกรณ์ตัววัดความเร่งติดอยู่ที่ปลายของก้านต่อโยงที่มีความยืดหยุ่นตัว และหาได้จากสมการลากรองจ์ จากสมมติฐานของงานวิจัยนี้สามารถลดรูปแบบจำลองทางพลศาสตร์ที่มีความซับซ้อนให้เป็นแบบจำลองของก้านต่อโยงที่ยึดติดกับมวลในลักษณะของสปริงได้ และสามารถนำไปเขียนในรูปของสมการสแตต โดยรูปแบบของโครงสร้าง five-bar linkage ในงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าก้านต่อโยงที่ 1 ที่ยึดติดกับมอเตอร์จะเป็นลักษณะเกร็งเมื่อเทียบกับก้านต่อโยงที่ 4 ที่มีความยาวมากกว่า จากผลของการ simulation แบบจำลองลดรูปที่หาได้แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองดังกล่าวสามารถนำไปใช้สำหรับการออกแบบระบบควบคุม ณ เวลาจริงได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมเครื่องกล.....  
ปีการศึกษา.....2552.....

ลายมือชื่อผู้คิด.....  
ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

## 4870664021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS : FLEXIBLE MANIPULATOR / DYNAMIC MODEL

DENCHAI WORADECHJUMROEN: DYNAMIC MODEL OF A LONG-REACH  
FLEXIBLE MANIPULATOR ARM. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. VIBOON  
SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D., 60 pp.

This research work is to find the dynamic model of a manipulator arm with two flexible links. The derived model is intent to use as a mathematical model of real-time controller design. The manipulator is designed so that it is suitable for long reach tasks. The links are formed using a five-bar linkage. The actuators, direct-drive DC motor, are located at the base of the manipulator so that the loads, due to the weight of the motors, do not affect the driving torque of the motors. The dynamic model is derived base on the fact that the accelerometers are attached to the tips of the elastic link. The dynamic model is derived using Lagrange equation method. With assumptions purposed in this work, the very complication dynamic model is reduced to a mass-spring linked model. The reduced dynamic model can be described in state equation. And for our configuration, using five-bar linkage, it is shown that one of the flexible links, link 1 attached to a motor, is rigid compare to the long reach linkage, link 4 in our configuration. From the results of simulation based on the derived dynamic model, it is shown that the derived model is proper for use as the model for designing of real-time controllers.

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department : Mechanical Engineering Student's Signature *Denchai*

Field of Study : Mechanical Engineering Advisor's Signature *Viboon*

Academic Year : 2009

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่ให้โอกาสและส่งเสริมให้ได้รับการศึกษามาจนถึงปัจจุบัน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้กรุณาสละเวลาเพื่อให้คำปรึกษาและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยครั้งนี้ พร้อมทั้งจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้มาด้วยดีโดยตลอด ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโทและเอกทุกท่านที่สนับสนุนการวิจัยเสมอมา



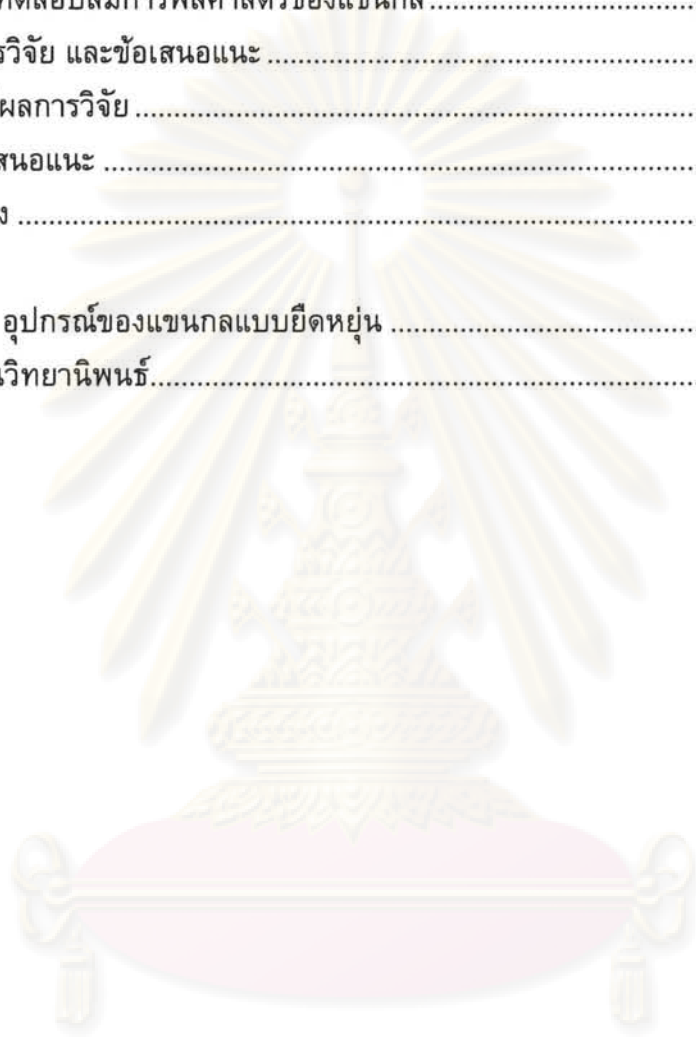
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ช
สารบัญตาราง .....	ฅ
สารบัญภาพ .....	ญ
บทที่	
1. บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์ .....	2
1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ.....	3
2. ความรู้เบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 ความรู้เบื้องต้นของแขนงกลแบบยืดหยุ่น.....	4
2.2 งานวิจัยของแขนงกลแบบยืดหยุ่นที่ผ่านมา.....	5
3. การออกแบบแขนงกลแบบยืดหยุ่น .....	8
3.1 การออกแบบแขนงกลแบบยืดหยุ่น.....	8
3.2 ส่วนประกอบของแขนงกลแบบยืดหยุ่น.....	10
4. สมการทางพลศาสตร์ของแขนงกลแบบยืดหยุ่น.....	16
4.1 สมมติฐานของแขนงกลแบบยืดหยุ่น.....	16
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนรูป (deformation).....	17
4.3 สมการการเคลื่อนที่ของ Tip lumped masses .....	19
4.4 สมการทางพลศาสตร์ของแขนงกลแบบยืดหยุ่น .....	20
4.4.1 พลังงานจลน์.....	20
4.4.2 พลังงานศักย์ .....	20
4.4.3 สมการการเคลื่อนที่ของแขนงกล .....	21
4.5 สมการปริภูมิสแตต (state space equation).....	22
5. ระบบควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์แบบขับเคลื่อน .....	26
5.1 หลักการพื้นฐานของระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ .....	26
5.2 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ .....	27
5.3 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัลบวกกับแบบอนุพันธ์.....	29
5.4 การประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ .....	30

บทที่	หน้า
6. การทดสอบแขนกลแบบยืดหยุ่น.....	33
6.1 การทดสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมอเตอร์.....	33
6.2 การหาค่าความถี่ธรรมชาติจากการทดลอง.....	38
6.3 การทดสอบสมการพลศาสตร์ของแขนกล.....	45
7. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	51
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	51
7.2 ข้อเสนอแนะ.....	53
รายการอ้างอิง.....	54
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก อุปกรณ์ของแขนกลแบบยืดหยุ่น.....	56
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	60



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตาราง 6.1 การทดลองที่ 6.1 การทดสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมอเตอร์.....34  
ตาราง 6.2 การทดลองที่ 6.2 การหาค่าความถี่ธรรมชาติของแขนกลจากการทดลอง.....38



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.1	แขนกลแบบยึดหุ่นที่มี 3 องศาอิสระแบบใหม่.....	5
รูปที่ 2.2	แขนกลขนาดใหญ่และยึดหุ่น (RALF).....	6
รูปที่ 2.3	แขนกลแบบหุ่นตัว 2 ก้านต่อโยงที่มี 3 องศาอิสระ.....	7
รูปที่ 3.1	โครงสร้างของแขนกลแบบยึดหุ่นที่ออกแบบไว้.....	8
รูปที่ 3.2	รูปแบบของแขนกลที่มีมุมระหว่าง link 3 กับ link 4 น้อยที่สุดที่ทำให้ link ทั้ง 2 ไม่ชนกัน.....	9
รูปที่ 3.3	รูปแบบของแขนกลที่มีมุมระหว่าง link 3 กับ link 4 มากที่สุดที่ทำให้ link ทั้ง 2 ไม่ชนกัน.....	10
รูปที่ 3.4	รูปแบบของปลายแขนกล.....	10
รูปที่ 3.5	รูปแบบของกลไก Five-bar linkage ขณะที่ไม่มีการเคลื่อนที่.....	11
รูปที่ 3.6	การหมุนมอเตอร์แกนที่ 1 ของกลไก Five-bar linkage.....	11
รูปที่ 3.7	การหมุนมอเตอร์แกนที่ 2 ของกลไก Five-bar linkage.....	12
รูปที่ 3.8	รูปแบบของข้อต่อแบบที่ 1.....	13
รูปที่ 3.9	รูปแบบของข้อต่อแบบที่ 2 และ 3.....	13
รูปที่ 3.10	รูปแบบของข้อต่อแบบที่ 2 และ 3 ขณะที่มีการติดตั้ง link 3 และ link 4.....	14
รูปที่ 3.11	รูปแบบของหน้าแปลนอลูมิเนียมที่ใช้ยึดกับมอเตอร์ตัวที่ 1.....	14
รูปที่ 3.12	แขนกลในงานวิจัยที่สร้างเสร็จสมบูรณ์.....	15
รูปที่ 4.1	ภาพประกอบสมมติฐานของหัวข้อ 4.1.....	16
รูปที่ 4.2	การตั้งเฟรมและกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆของแขนกล.....	17
รูปที่ 5.1	แผนภาพบล็อกแสดงระบบควบคุมแบบปิด.....	27
รูปที่ 5.2	Block Diagram สำหรับการควบคุมด้วย PD-control.....	28
รูปที่ 5.3	Block Diagram สำหรับการควบคุมด้วย PID-control.....	29
รูปที่ 5.4	หน้าจอของโปรแกรม Motionlink Software.....	30
รูปที่ 5.5	การเลือกรุ่นของมอเตอร์ในโปรแกรม.....	31
รูปที่ 5.6	การเลือกค่าเกน Kp และ Kd.....	32
รูปที่ 6.1	การเคลื่อนที่มุมของมอเตอร์ที่ 1 30 องศา.....	35
รูปที่ 6.2	การเคลื่อนที่มุมของมอเตอร์ที่ 2 30 องศา.....	36
รูปที่ 6.3	การเคลื่อนที่มุมของมอเตอร์ที่ 2 50 องศา.....	37
รูปที่ 6.4	การเคลื่อนที่มุมของมอเตอร์ที่ 1 50 องศา มอเตอร์ที่ 2 50 องศา.....	37
รูปที่ 6.5	โหมดเซฟของความเร่งในแนวแกน X ของปลายแขนตามการทดลองที่ 6.2.1.....	41
รูปที่ 6.6	โหมดเซฟของความเร่งในแนวแกน Y ของปลายแขนตามการทดลองที่ 6.2.1.....	41
รูปที่ 6.7	โหมดเซฟของความเร่งในแนวแกน X ของปลายแขนตามการทดลองที่ 6.2.2.....	42
รูปที่ 6.8	โหมดเซฟของความเร่งในแนวแกน Y ของปลายแขนตามการทดลองที่ 6.2.2.....	42

รูปที่ 6.9 โหมดเซฟของความเร่งในแนวแกน X ของปลายแขนตามการทดลองที่ 6.2.3 .....	43
รูปที่ 6.10 โหมดเซฟของความเร่งในแนวแกน Y ของปลายแขนตามการทดลองที่ 6.2.3 .....	43
รูปที่ 6.11 โหมดเซฟของความเร่งในแนวแกน X ของปลายแขนตามการทดลองที่ 6.2.4.....	44
รูปที่ 6.12 โหมดเซฟของความเร่งในแนวแกน Y ของปลายแขนตามการทดลองที่ 6.2.4 .....	44
รูปที่ 6.13 Block Diagram สำหรับการทดสอบสมการทางพลศาสตร์.....	45
รูปที่ 6.14 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ที่ 1 ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณที่ได้ จากการ simulation .....	47
รูปที่ 6.15 ค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่มอเตอร์ที่ 1 .....	47
รูปที่ 6.16 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ที่ 2 ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณที่ได้ จากการ simulation .....	48
รูปที่ 6.17 ค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่มอเตอร์ที่ 2.....	48
รูปที่ 6.18 ค่า displacement deformation ของก้านต่อโยงที่ 1 ถูกขับโดยมอเตอร์ที่ 1.....	49
รูปที่ 6.19 ค่าความผิดพลาด displacement deformation ของก้านต่อโยงที่ 1 ถูกขับโดย มอเตอร์ที่ 1 .....	49
รูปที่ 6.20 ค่า displacement deformation ของก้านต่อโยงที่ 4 ถูกขับโดยมอเตอร์ที่ 2.....	50
รูปที่ 6.21 ค่าความผิดพลาด displacement deformation ของก้านต่อโยงที่ 4 ถูกขับโดย มอเตอร์ที่ 2.....	50
ก.1 มอเตอร์แบบขับตรงที่แกนมอเตอร์ที่ 1 .....	56
ก.2 อุปกรณ์วัดค่าความเร่งยี่ห้อ PCB รุ่น 353A.....	57
ก.3 อุปกรณ์วัดค่าความเร่งยี่ห้อ PCB รุ่น 348A.....	57
ก.4 ชุดขยายสัญญาณไฟฟ้าของอุปกรณ์วัดความเร่ง PCB.....	57
ก.5 ชุดขยายสัญญาณไฟฟ้าของอุปกรณ์วัดความเร่ง KISTLER.....	58
ก.6 การ์ดนับค่าของอุปกรณ์วัดมุม.....	58
ก.7 ชุดขยายกระแสเพื่อขับมอเตอร์แบบขับตรง.....	59



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันแขนหุ่นยนต์มีบทบาทสำคัญในงานหลายประเภท ทั้งในงานอุตสาหกรรม งานด้านวิทยาศาสตร์ และด้านการแพทย์ เนื่องจากหุ่นยนต์มีความสามารถทำงานที่มนุษย์ไม่สามารถทำได้ เช่น งานที่ต้องใช้ความแม่นยำสูง งานที่ต้องใช้แรงมาก และกระบวนการที่ทำซ้ำๆกันเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการออกแบบวิจัยและพัฒนาหุ่นยนต์ในลักษณะเฉพาะที่เหมาะสมกับงานแต่ละประเภทจึงมีออกมามากมาย

เนื่องจากแขนกลที่มีการใช้อยู่ในอุตสาหกรรมส่วนใหญ่เป็นแบบแขนเกร็ง ซึ่งรูปแบบของการเคลื่อนที่จะทำให้ระบบการตรวจวัดและการควบคุมสามารถทำได้ง่าย แต่ในทางกลับกัน ในลักษณะของโครงสร้างแบบนี้ก็จะทำให้หุ่นยนต์มีน้ำหนักที่มากและมีตัวขับที่ขนาดใหญ่ รวมไปถึงไม่สามารถหลีกเลี่ยงการสั่นสะเทือนทางกลเนื่องจากการเคลื่อนที่ได้ เช่น แขนหุ่นยนต์ที่ใช้ในอวกาศที่จะต้องมีขนาดของแขนค่อนข้างยาว หรือแขนหุ่นยนต์ที่ออกแบบสำหรับการทำงานที่ต้องมีการเอื้อมไประยะไกลจะต้องมีแขนใดแขนหนึ่งมีลักษณะยืดหยุ่น (flexible link) ในปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาแขนกลที่ใช้งานในอุตสาหกรรม ซึ่งทำจากวัสดุที่มีความอ่อนตัวและยืดหยุ่นมาใช้แทนแขนกลที่ทำจากวัสดุแข็งเกร็งมากขึ้น ซึ่งมีข้อดีคือพลังงานที่ใช้ในการขับเคลื่อนลดลงมาก เนื่องจากแขนกลยืดหยุ่นจะมีน้ำหนักที่เบากว่าแขนเกร็ง รวมไปถึงสามารถแก้ปัญหาจากการสั่นสะเทือนได้ แต่อย่างไรก็ตาม การควบคุมตำแหน่งปลายของแขนกลแบบยืดหยุ่นทำได้ยากกว่าเนื่องจากจะเกิดการแกว่งตัวที่ตำแหน่งปลายแขน และ รูปแบบของสมการการเคลื่อนที่ค่อนข้างที่จะซับซ้อน โดยจะมีบางเทอมที่มีรูปแบบไม่เป็นเชิงเส้น รวมถึงสมการมีอันดับที่สูง ดังนั้นการนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้ามาพิจารณาจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งซึ่งในทางปฏิบัติการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากหุ่นยนต์ที่มีความยืดหยุ่นค่อนข้างที่จะมีความซับซ้อนเนื่องมาจากจะต้องคำนึงถึงทฤษฎีเกี่ยวกับความยืดหยุ่นด้วย ฉะนั้นการออกแบบโครงสร้างของตัวหุ่นยนต์เองก็มีส่วนช่วยให้ความซับซ้อนของสมการลดลงได้ด้วย

จากปัญหาข้างต้น ทำให้ผู้วิจัยเชื่อว่าสมการทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์แบบยืดหยุ่นมีความสำคัญ และเป็นตัวแปรนำไปสู่ความถูกต้องในการควบคุมหุ่นยนต์ รวมถึง สามารถลดปัญหาความซับซ้อนของการควบคุมเบื้องต้นได้ โดยในงานวิจัยนี้จะทำการหาสมการทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ แบบยืดหยุ่นที่ใช้ในงานระยะเอื้อมไกล โดยใช้สมการพลังงานในการ

หา แต่จะทำการลดตัวแปรบางตัวออกเพื่อให้ได้สมการที่ถูกต้องและง่ายต่อการนำไปใช้ในการควบคุมต่อไป

### 1.2. วัตถุประสงค์

- 1) ออกแบบและสร้างแขนหุ่นยนต์แขนหนึ่งยาวและมีความยืดหยุ่นที่ใช้สำหรับทำงานที่มีการเอื้อมไกล
- 2) หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมแขนหุ่นยนต์ที่สร้างขึ้น

### 1.3. ขอบเขต

- 1) ออกแบบและสร้างแขนหุ่นยนต์ที่มีระยะเอื้อมไกลและมีความยืดหยุ่น
- 2) หาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลที่มีความยืดหยุ่นตัว
- 3) ทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

### 1.4. ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์

- 1) ศึกษาและวิเคราะห์ผลการวิจัยที่มีผ่านมาเพื่อเป็นประโยชน์ในการออกแบบแขนกล
- 2) ออกแบบลักษณะกลไกของแขนกล สร้างแบบจำลองอย่างง่าย และวิเคราะห์กลไกที่ออกแบบ
- 3) ทำการจำลองระบบด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อศึกษากลไกที่ได้ออกแบบไว้เพื่อใช้ในการหาค่าจริงของระบบ
- 4) ออกแบบ สร้าง และเลือกชิ้นส่วนต่างๆเพื่อประกอบเป็นแขนกล พร้อมแก้ไขข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้
- 5) ศึกษาวิธีการหาค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์
- 6) ทำการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของแขนกลยืดหยุ่น
- 7) เปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่ได้กับค่าจริง
- 8) ทดสอบการเคลื่อนที่อย่างง่ายเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หาได้
- 9) ทดสอบระบบโดยรวม และสรุปผล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### 1.5. ประโยชน์ที่จะได้รับ

- 1) สามารถหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลยืดหยุ่นที่สามารถใช้งานจริงได้
- 2) แบบพื้นฐานของการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์ยืดหยุ่นที่สามารถใช้งานจริงได้ (particle flexible arm)
- 3) เป็นพื้นฐานสำหรับพัฒนาระบบควบคุมขั้นสูง
- 4) ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาสามารถประยุกต์ใช้กับแขนกลที่มีความยืดหยุ่นแบบอื่นได้



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ความรู้เบื้องต้นของหุ่นยนต์แบบยืดหยุ่น

การพัฒนาหุ่นยนต์แบบยืดหยุ่นในงานอุตสาหกรรมมีจุดประสงค์เพื่อต้องการการลดขนาดของลิงค์ที่ใช้ในการขับเคลื่อน และการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ ทำให้ต้องเคลื่อนที่ด้วยความเร็วรอบต่ำโดยรวมถึงการสั่นที่เกิดขึ้นขณะทำงานที่ความถี่สูงๆ ข้อมูลเหล่านี้เป็นเหตุผลหลักทำให้ทำให้เกิดการพัฒนางานวิจัยในด้านนี้มากขึ้น โดยที่การออกแบบของหุ่นยนต์ในลักษณะนี้ ขึ้นอยู่กับลักษณะงานในการใช้เป็นสำคัญดังนั้นในงานวิจัยที่ผ่านมาสามารถสรุปลักษณะที่จำเป็นสำหรับหุ่นยนต์แบบยืดหยุ่นในงานอุตสาหกรรมได้ดังนี้

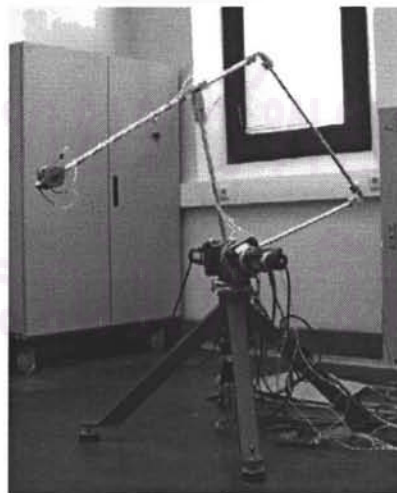
- 2.1.1 ปริมาตรหรือบริเวณการทำงาน (workspace) บริเวณการทำงานควรมีความเหมาะสมกับลักษณะการทำงานเนื่องจากการที่ต้องการลดขนาดของลิงค์ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ ดังนั้นมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนจำเป็นต้องอยู่ที่ฐานของหุ่นยนต์ รูปแบบของหุ่นยนต์ที่ออกแบบจึงจำเป็นต้องเป็นโครงสร้างแบบขนานทำให้ปริมาตรของการทำงานจะน้อยเมื่อเทียบกับโครงสร้างแบบอนุกรม ด้วยข้อจำกัดดังกล่าว ถ้าต้องการให้มีบริเวณพื้นที่ที่ใช้ทำงานที่มากจำเป็นต้องออกแบบให้โครงสร้างแบบขนานมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นด้วย
- 2.1.2 ความหลวมของชุดเฟืองทด (Backlash) คือความหลวมของชุดเฟืองทดที่มักจะเกิดขึ้นในระบบส่งผ่านกำลังหรือชุดเฟืองทดที่ต่อระหว่างแกนมอเตอร์กับก้านต่อโยงของแขนกล ความหลวมของชุดเฟืองทรมีผลต่อความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์วัดมุมของมอเตอร์ ซึ่งจะก่อให้เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นในชุดควบคุม และยังมีผลต่อความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการวัดค่าของโหมดเซฟ รวมถึงระยะการโค้งงอของแขนกล มุมที่เปลี่ยนแปลงจากการสั่นสะเทือน
- 2.1.3 ในการควบคุมแขนที่มีความยืดหยุ่นตัว จะต้องพยายามทำให้มวลของก้านต่อโยงมีผลต่อแรงหรือโมเมนต์ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ก้านต่อโยงให้มีค่าน้อยที่สุดหรือทำให้ค่าความเฉื่อยนี้ให้มีค่าน้อยเมื่อก้านต่อโยงถูกขับ ในขณะที่เดียวกันก็ยังคงต้องการคงความแข็งแรงไว้ในระดับหนึ่ง จึงเลือกก้านต่อโยงที่มีหน้าตัดกลวงเป็นรูปร่างกลม (tubular cross section)

- 2.1.4 แรงเสียดทาน (Friction) แรงเสียดทานที่ข้อต่อต่างๆของแขนกลควรออกแบบให้มีค่าน้อย เนื่องจากค่าความเสียดทานที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อความถูกต้องของสมการการเคลื่อนที่ และยังส่งผลต่อไปยังความซับซ้อนที่จะเกิดขึ้นกับระบบควบคุมของแขนกลแบบยึดหุ่นอีกด้วย

## 2.2 งานวิจัยของแขนกลแบบยึดหุ่นที่ผ่านมา

ในการออกแบบสร้างแขนกลเพื่อให้ได้ลักษณะเฉพาะที่จำเป็นตามที่กล่าวมาข้างต้น จำเป็นต้องศึกษางานวิจัยที่ได้ทำมาก่อนหน้านี้เพื่อนำมาใช้พิจารณาในการออกแบบและสร้างแขนกลแบบยึดหุ่น โดยจะกล่าวเฉพาะงานวิจัยที่น่าสนใจซึ่งมีดังต่อไปนี้

- 2.2.1 แขนกลแบบยึดหุ่นที่มี 3 องศาอิสระแบบใหม่ โดย J.A. Somolinos, V. Feliu, L. Sanchez [7] เป็นโครงสร้างแบบอนุกรมที่มี 3 องศาอิสระคือมีการเคลื่อนที่ในแนวแกน X-Y-Z โดยมีการนำโครงสร้างแบบ Five-Bar Linkage มาใช้ในการขับเคลื่อนแขนกล โดยมีมอเตอร์แกนที่ 1 และ 2 อยู่ที่ฐาน ส่วนมอเตอร์ที่ 3 จะอยู่ที่แกนของมอเตอร์ตัวที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 2.1 แขนกลชนิดนี้มีปริมาตรในการทำงานเป็นทรงกลม และรูปแบบของก้านต่อโยงแต่ละก้านจะใช้จะมีหน้าตัดเป็นแบบรูปวงกลมกลวง แนวคิดในการสร้างและออกแบบแขนกลนี้เป็นการย่อขนาดแขนกลขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงเพื่อให้แขนกลมีขนาดเล็กและมีความยืดหยุ่นตัวและใช้เป็นต้นแบบของการควบคุมแขนขนาดใหญ่ได้ในอนาคต ข้อดีของแขนกลชุดนี้คือ ก้านต่อโยงจะมีขนาดเล็ก เนื่องจากการที่มอเตอร์อยู่ที่ฐานของแขนกล และจากการที่ความยาวของแต่ละก้านต่อโยงได้มาจากการทดลองทำให้การเคลื่อนที่ของทั้ง 3 องศาอิสระทำงานไม่ขึ้นต่อกัน ข้อเสียของแขนกลชุดนี้คือ มีปริมาตรในการทำงานที่น้อย



รูปที่ 2.1 แขนกลแบบยึดหุ่นที่มี 3 องศาอิสระแบบใหม่ [7]

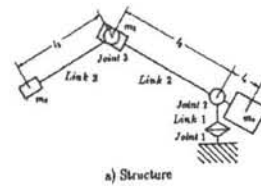


2.2.2 แขนกลขนาดใหญ่และยืดหยุ่น (RALF) โดย Wayne Book, Klaus Obergfell [5] เป็นการผสมระหว่างโครงสร้างแบบขนานที่มี 2 องศาอิสระคือมีการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ X-Y โดยใช้กระบอกลูกสูบแบบไฮดรอลิกขับในแนวเส้นตรง มีกระบอกลูกสูบตัวใหญ่อยู่ที่ฐานสำหรับขับเคลื่อนทั้งโครงสร้าง และมีกระบอกลูกสูบตัวที่ 2 ที่มีขนาดเล็กขับเคลื่อนปลายแขน (End-Effector) โดยการนำโครงสร้างแบบ Five-Bar Linkage มาประยุกต์ใช้ซึ่งตั้งอยู่บนแกนของกระบอกลูกสูบตัวที่ 1 ข้อดีของแขนกลชุดนี้คือ โครงสร้างของแขนกลมีความแข็งแรงมากเนื่องมาจากการที่ใช้กลไก Five-Bar Linkage ในการขับเคลื่อนปลายแขนกล และมีปริมาตรการทำงานที่มาก ข้อเสียของแขนกลชุดนี้คือ มีขนาดโครงสร้างที่ใหญ่มาก โดยถ้าจะใช้มอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่



รูปที่ 2.2 แขนกลขนาดใหญ่และยืดหยุ่น (RALF) [5]

2.2.3 แขนกลแบบหุ่นตัว 2 ก้านต่อโยงที่มี 3 องศาอิสระโดย Tsuneo Yoshikawa, Hiroki Murakami, Koh Hosoda [6] เป็นโครงสร้างแบบอนุกรมที่มี 3 องศาอิสระคือมีการเคลื่อนที่ในแนวแกน X-Y-Z ในลักษณะของแขนกลแบบเกร็งทั่วไปเพียงแต่ลดขนาดของก้านต่อโยง และเพิ่มมวลหนึ่งก้อนเพื่อเป็นตัวรักษาสมดุลของระบบ ข้อดีของแขนกลชุดนี้คือ กลไกมีความไม่ซับซ้อนทำให้สามารถหา forward kinematics ได้ง่าย ข้อเสียของแขนกลชุดนี้คือ มอเตอร์ไม่ได้อยู่ที่ฐานทำให้ต้องใส่มวลเพื่อถ่วงน้ำหนักของแขนกลและถ้าต้องการเพิ่มปริมาตรการทำงานจำเป็นที่จะต้องเพิ่มขนาดของแขนกลให้ใหญ่ขึ้นตาม



b) Overview  
Fig.1 3-DOF flexible arm

### รูปที่ 2.3 แขนกลแบบหุ่นตัว 2 ก้านต่อโยงที่มี 3 องศาอิสระ [6]

จากการศึกษาข้อดีและข้อเสียของงานวิจัยที่ผ่านมาได้ข้อสรุปว่าตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ขับเคลื่อนของแขนกลส่วนใหญ่จะพยายามให้อยู่ที่ฐานให้มากที่สุดเพื่อลดขนาดของก้านต่อโยง และโครงสร้างของแขนกล โดยจะมีการนำ โครงสร้างแบบ Five-Bar Linkage มาช่วยในการขับเคลื่อนปลายแขน (End-Effector) โดยทำหน้าที่ในการส่งผ่านแรงจากอุปกรณ์ขับเคลื่อนที่ฐานไปยังปลายแขน ฉะนั้นแขนกลที่จะทำการออกแบบจะออกแบบให้ตัวขับเคลื่อนอยู่ที่ฐาน โดยจะลดขนาดของก้านต่อโยงได้ และจะทำการลดโมเมนต์ความเฉื่อยโดยการใช้ก้านต่อโยงที่มีหน้าตัดกลวงเป็นรูปวงกลม รวมถึงลดปัญหาที่เกิดจากความหลวมของชุดเฟืองทด (Backlash) โดยเลือกใช้ตัวขับเคลื่อนที่ไม่มีชุดเฟืองทด และมีอุปกรณ์ตัววัดมุมภายในตัว ดังนั้นโครงสร้างที่ออกมาจะเป็นโครงสร้างแบบขนานจึงมีปริมาตรในการทำงานน้อยจึงต้องมีการเพิ่มความยาวที่ก้านต่อโยงของแขนกล

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

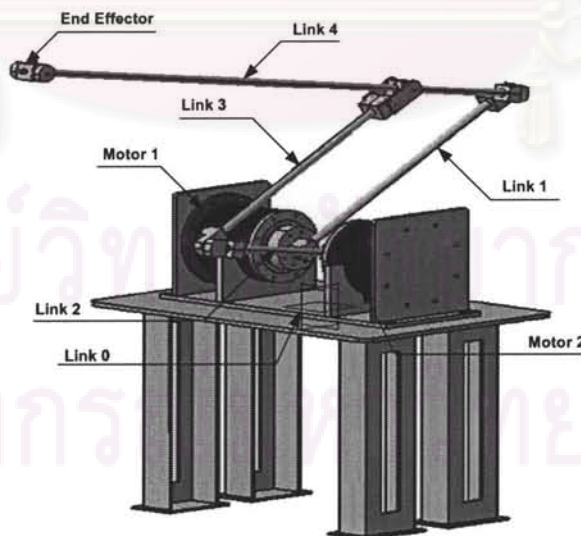


## บทที่ 3

### การออกแบบแขนกลแบบยึดหย่อน

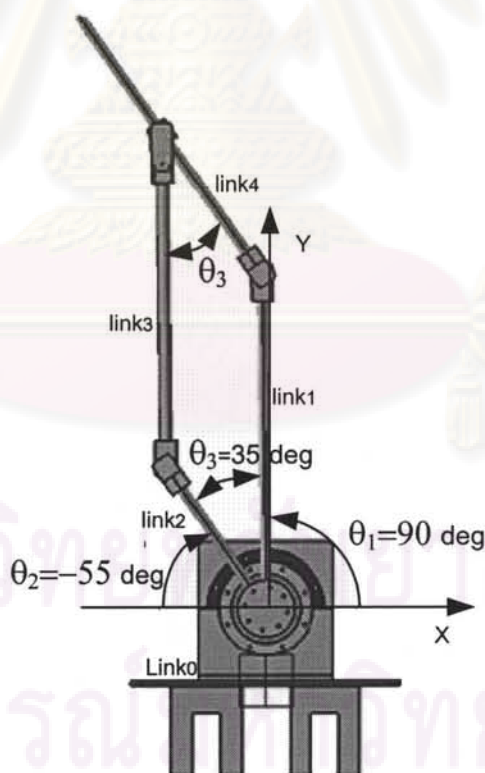
#### 3.1 การออกแบบแขนกลแบบยึดหย่อน

จากลักษณะเฉพาะของแขนกลแบบยึดหย่อนที่ได้ศึกษามาในบทที่ 2 สามารถนำมาออกแบบโครงสร้างของแขนกลแบบยึดหย่อนที่ใช้ในระยะเอื้อมไกลโดยมีโครงสร้างแบบขนานได้ ดังรูปที่ 3.1 อุปกรณ์ขับเคลื่อนและ อุปกรณ์วัดมุมจะถูกติดตั้งไว้ที่ฐานของแขนกลเพื่อลดขนาด และ น้ำหนักของก้านต่อโยงที่ใช้ในการขับปลายแขนกล โดยสามารถลดความหลวมของชุดเฟืองจากการเลือกใช้มอเตอร์แบบขับตรง (Direct Drive Motor) แทนมอเตอร์ชนิดใช้เฟืองทดเป็นตัวขับเคลื่อนแบบทั่วไป การเลือกใช้มอเตอร์แบบขับตรงนี้แทนที่จะใช้มอเตอร์แบบมีชุดเฟืองทด ชุดเฟืองทดที่ใช้ในแขนกลทั่วไปส่วนใหญ่จะเป็นชุดเฟืองทดที่อัตราการทดความเร็วค่อนข้างสูง ค่าอัตราทดความเร็วที่สูงนี้จะดูดซับแรงที่เกิดจากการสั่นเทือนของแขนกลในขณะที่เคลื่อนที่ ทำให้การรับรู้แรงในส่วนนี้จึงมีน้อย ดังนั้นการควบคุมจึงต้องขึ้นอยู่กับชุดอุปกรณ์วัดตำแหน่งที่ปลายแขนเป็นหลัก การใช้มอเตอร์แบบขับตรงนี้เนื่องจากไม่มีชุดเฟืองทด ดังนั้นแรงที่เกิดจากการสั่นสะเทือนของแขนยึดหย่อนจะส่งผลกระทบต่อโดยตรงที่มอเตอร์ ทำให้สามารถใช้ข้อมูลนี้ช่วยในการออกแบบระบบควบคุมที่มีความหลากหลายมากขึ้น แต่การออกแบบข้อต่อสำหรับติดตั้งชุดมอเตอร์แบบขับตรงก็มีความสลับซับซ้อนมากขึ้นตามไปด้วย ในงานวิจัยนี้จะไม่ครอบคลุมถึงการออกแบบข้อต่อที่มีประสิทธิภาพสำหรับใช้กับการขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์แบบขับตรง

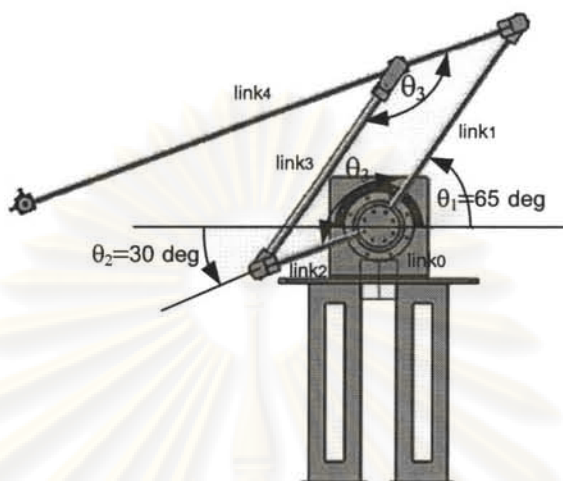


รูปที่ 3.1 โครงสร้างของแขนกลแบบยึดหย่อนที่ออกแบบไว้

จากรูปที่ 3.1 ฐานของแขนกลชุดนี้แสดงตำแหน่งของก้านต่อโยงที่ 0 มอเตอร์แบบ ขับตรงจะตั้งอยู่ที่ทั้ง 2 ฝั่งของฐาน มอเตอร์ตัวที่ 1 ทำหน้าที่ขับเคลื่อนก้านต่อโยงที่ 1 ส่วนมอเตอร์ตัวที่ 2 ทำหน้าที่ขับเคลื่อนก้านต่อโยงที่ 2 โดยผ่านกลไกแบบ Five-bar linkage เพื่อส่งแรงผ่านก้านต่อโยงที่ 3 ซึ่งก้านต่อโยงที่ 2 และ 4 จะเคลื่อนที่ขนานกัน ในทำนองเดียวกันก้านต่อโยงที่ 1 และ 3 จะเคลื่อนที่ขนานกันด้วย โดยที่ก้านต่อโยงที่ 1 และ ก้านต่อโยงที่ 3 ยาว 62 เซนติเมตร ก้านต่อโยงที่ 2 ยาว 32 เซนติเมตร และก้านต่อโยงที่ 4 ยาว 132 เซนติเมตร จากโครงสร้างแบบขนาน ทำให้สามารถหาช่วงของมุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ รูปที่ 3.2 และ 3.3 แสดงโครงสร้างของ กลไกแบบ Five-bar linkage ที่ใช้ในแขนกลแบบยืดหยุ่นที่พัฒนาขึ้น โดยกำหนดให้  $\theta_3$  คือมุมที่ วัดระหว่างก้านต่อโยงที่ 1 กับ 2 หรือมุมที่วัดระหว่างก้านต่อโยงที่ 3 กับ 4 โดยที่ความสัมพันธ์ ของมุมสำหรับกรณี  $\theta_3 \leq 90^\circ$  คือ  $\theta_3 = \|\theta_1\| - \|\theta_2\| = 35^\circ$  เป็นค่ามุมน้อยที่สุดที่จะป้องกันไม่ให้เกิดการชนกันระหว่างก้านต่อโยงที่ 3 และ 4 และจะเห็นพบว่ามุมที่ข้อต่อที่หนึ่งจะมีค่า  $0 \leq \theta_1 \leq 90$  ในทำนองเดียวกันจากรูปที่ 3.3 ทำการหาค่ามุมมากที่สุดของ  $\theta_3$  โดยมีเงื่อนไข เหมือนรูปที่ 3.3 สำหรับกรณี  $\theta_3 \geq 90^\circ$  จะได้  $\theta_3 = 180 - \|\theta_1\| - \|\theta_2\| = 145^\circ$  คือค่ามุมมากที่สุดที่ ก้านต่อโยงจะไม่เกิดการชนกัน โดยที่มุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ตัวที่ 2 จะมีช่วงของการ เคลื่อนที่คือ  $-35 \leq \theta_2 \leq 55$



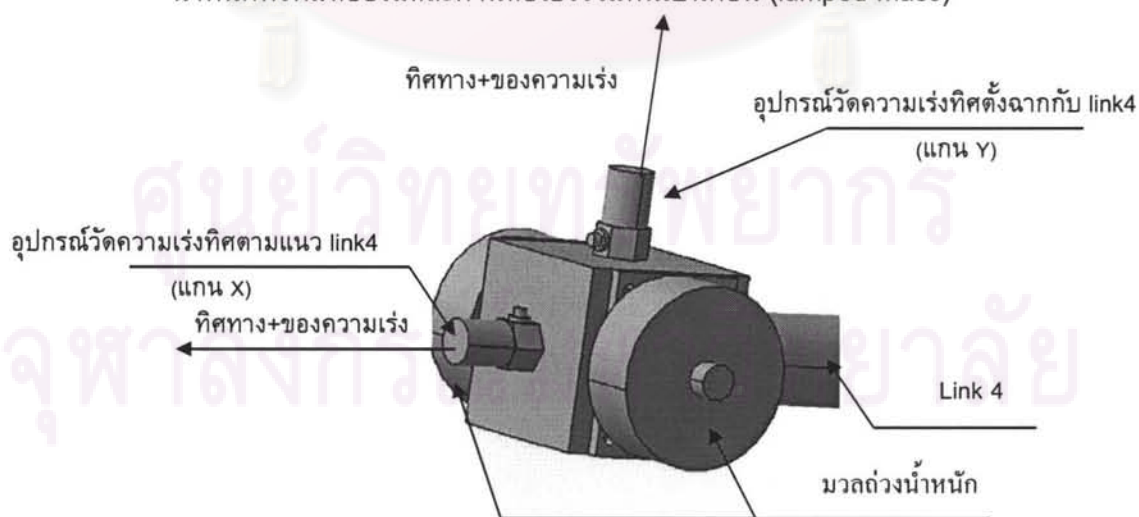
รูปที่ 3.2 รูปแบบของแขนกลที่มีมุมระหว่าง link 3 กับ link 4 น้อยที่สุดที่ทำให้ link ทั้ง 2 ไม่ชนกัน



รูปที่ 3.3 รูปแบบของแขนกลที่มีมุมระหว่าง link 3 กับ link 4 มากที่สุดที่ทำให้ link ทั้ง 2 ไม่ชนกัน

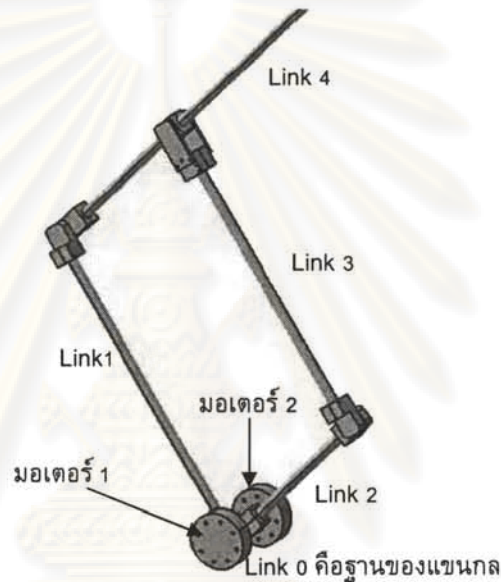
### 3.2 ส่วนประกอบของแขนกลแบบยึดหยุด

- ปลายแขนกล (End-Effector) แสดงดังรูปที่ 3.4 เป็นรูปแบบของปลายแขนกลที่ใช้ยึดติดกับอุปกรณ์วัดความเร่ง 2 ตัว โดยตัวที่ 1 วัดความเร่งในแนวแกนก้านต่อโยงที่ 4 (แกน X) ส่วนอีกตัววัดความเร่งในแนวตั้งฉากกับก้านต่อโยงที่ 4 (แกน Y) และทิศทางที่พุ่งออกจากอุปกรณ์วัดความเร่งเป็นบวก หรือตามแนวหัวลูกศรที่แสดงในรูป ขณะที่ด้านข้างของปลายแขนออกแบบไว้สำหรับใส่มวลเพื่อถ่วงน้ำหนักที่ปลายแขนเพื่อให้น้ำหนักทั้งหมดของแต่ละก้านต่อโยงรวมกันเป็นก้อน (lumped mass)

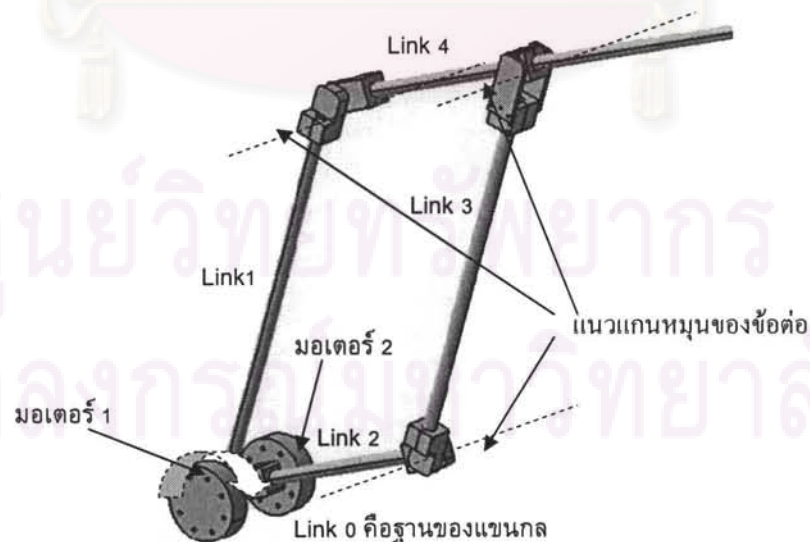


รูปที่ 3.4 รูปแบบของปลายแขนกล

- รายละเอียดของกลไกแบบ Five-bar linkage แสดงดังรูปที่ 3.5 ลักษณะของการเลือกใช้งานกลไกชนิดนี้เพื่อทำให้มอเตอร์ทั้ง 2 ทำงานแบบไม่ขึ้นต่อกัน หรือให้มีผลน้อยที่สุดในกรณีที่การสร้างแขนมีความผิดพลาดอยู่บ้าง กล่าวคือ ถ้าให้มอเตอร์ตัวที่ 1 หมุนรอบแกนดังรูปที่ 3.6 จะพบว่าก้านต่อโยงที่ 1 กับ 3 จะเคลื่อนที่ขนานกัน โดยที่ก้านต่อโยงที่ 2 ที่ยึดติดกับมอเตอร์ที่ 2 จะไม่เคลื่อนที่ ในทำนองเดียวกันถ้าให้มอเตอร์ที่ 2 ทำงานหมุนรอบแกนดังรูปที่ 3.7 จะพบว่าก้านต่อโยงที่ 2 และ 4 จะหมุนรอบแกนด้วยมุมที่เท่ากันหรือเคลื่อนที่ขนานกันโดยก้านต่อโยงที่ 1 ที่ติดกับมอเตอร์ที่ 1 จะไม่เคลื่อนที่

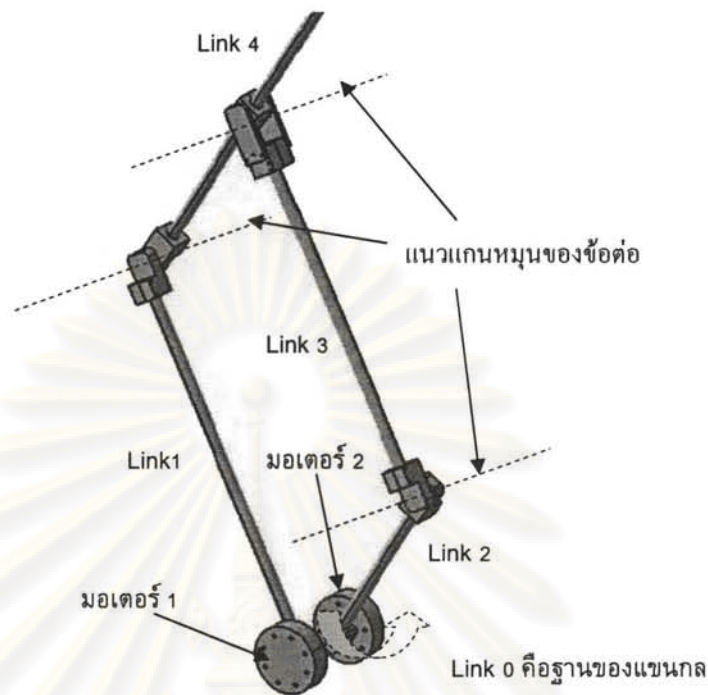


รูปที่ 3.5 รูปแบบของกลไก Five-bar linkage ขณะที่ไม่มีการเคลื่อนที่



รูปที่ 3.6 การหมุนมอเตอร์แกนที่ 1 ของกลไก Five-bar linkage

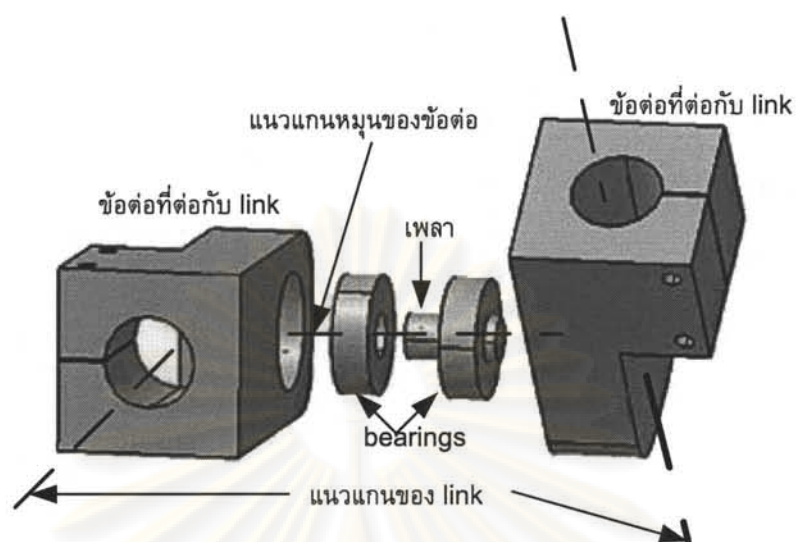




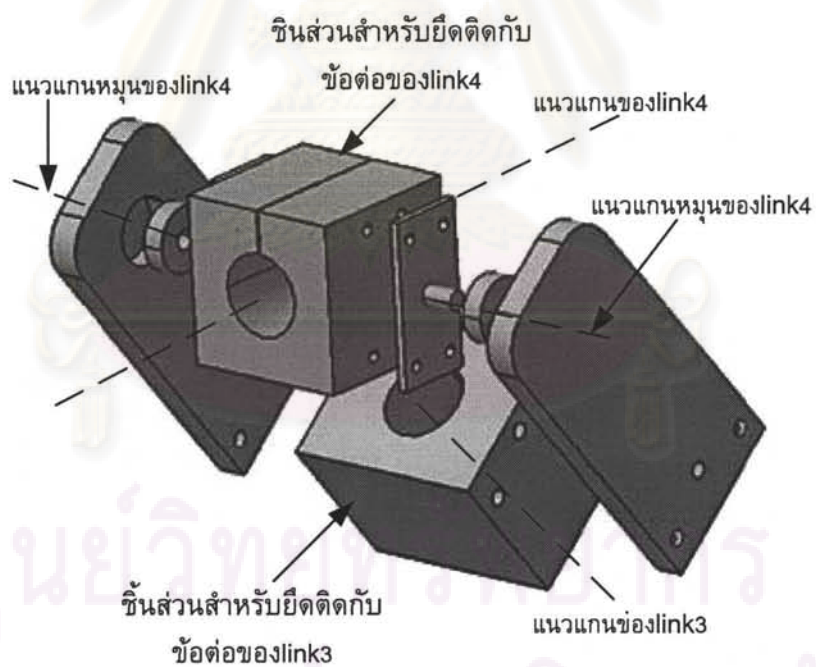
รูปที่ 3.7 การหมุนมอเตอร์แกนที่ 2 ของกลไก Five-bar linkage

- รายละเอียดของการออกแบบข้อต่อที่ใช้สำหรับแขนกลชุดนี้จะมีอยู่ 3 แบบด้วยกัน ในแบบแรก ดังรูปที่ 3.8 จะเป็นข้อต่อที่ใช้สำหรับเชื่อมโยงการหมุนระหว่างกันต่อโยงที่ 1 กับกันต่อโยงที่ 4 และการหมุนระหว่างกันต่อโยงที่ 2 กับกันต่อโยงที่ 3 โดยลักษณะของข้อต่อชนิดนี้จะประกอบด้วยลูกปืน และแกนเพลานาขนาดเล็กไว้สำหรับเป็นแกนในของแกนหมุนระหว่างกันต่อโยง โดยข้อต่อที่ต่อกับกันต่อโยงจะทำการอัดกันต่อโยงเข้าไปตามแนวแกนของข้อต่อดังรูป จากนั้นจะใช้สลักเกลียวในการขันล็อคที่ข้อต่อให้แน่นเพื่อป้องกันการเกิด slip ระหว่างกันต่อโยงกับข้อต่อ ส่วนของข้อต่อแบบที่ 2 และ 3 แสดงดังรูปที่ 3.9 และรูปที่ 3.10 ข้อต่อแบบที่ 2 สำหรับกันต่อโยงที่ 3 ส่วนข้อต่อแบบที่ 3 สำหรับกันต่อโยงที่ 4 โดยจะต้องนำข้อต่อแบบที่ 2 และ 3 มาต่อเข้าด้วยกันเพื่อให้เกิดแนวแกนหมุนระหว่างกันต่อโยงที่ 3 และกันต่อโยงที่ 4 อันที่จริงลักษณะของข้อต่อแบบที่ 2 และ 3 มีลักษณะการทำงานเหมือนกับแบบที่ 1 แต่มีรูปแบบหรือลักษณะที่แตกต่างกันเนื่องจากแนวแกนของกันต่อโยงที่ 4 และกันต่อโยงที่ 3 ตัดกันทำให้ไม่สามารถใช้ข้อต่อแบบที่ 1 ได้

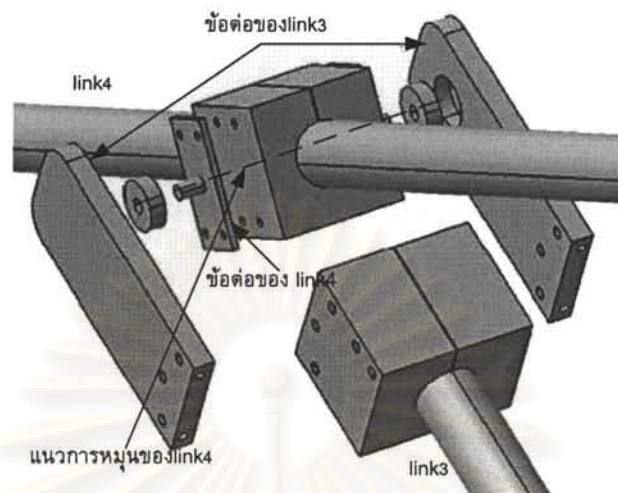




รูปที่ 3.8 รูปแบบของข้อต่อแบบที่ 1

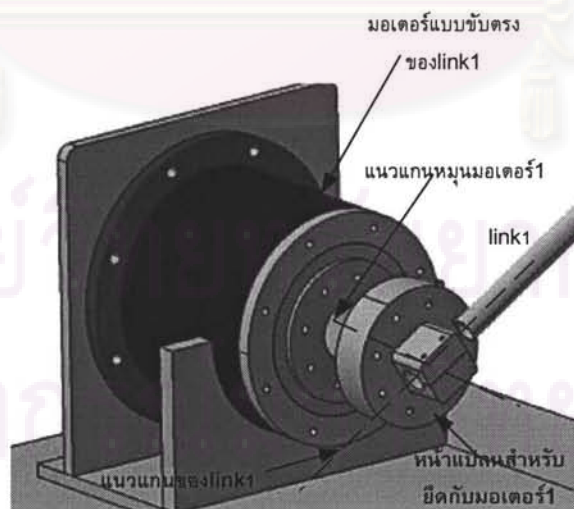


รูปที่ 3.9 รูปแบบของข้อต่อแบบที่ 2 และ 3

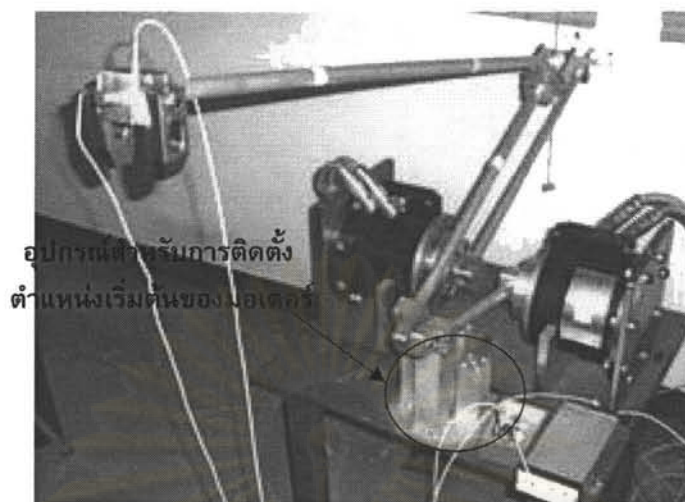


รูปที่ 3.10 รูปแบบของข้อต่อแบบที่ 2 และ 3 ขณะที่มีการติดตั้ง link 3 และ link 4

- รายละเอียดของชิ้นส่วนหน้าแปลนอลูมิเนียมสำหรับยึดหน้าแปลนของมอเตอร์ แสดงดังรูปที่ 3.11 เป็นส่วนประกอบของมอเตอร์ตัวที่ 1 เนื่องจากมอเตอร์ที่ใช้เป็นแบบขับเคลื่อนโดยไม่อาศัยเฟืองทด ทำให้รูปแบบของมอเตอร์ชนิดนี้จะไม่มีส่วนเฟืองทดที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ทั่วไป แต่จะมีลักษณะเป็นหน้าแปลนวงกลมเป็นชิ้นเดียวกับเพลลาของมอเตอร์ จึงต้องออกแบบให้ชิ้นส่วนมี 1 ด้านเป็นลักษณะของหน้าแปลนมีรูยึดที่เป็นแนวเดียวกับของมอเตอร์ ส่วนอีกด้านจะเป็นส่วนสำหรับใช้กันต่อโยงสวมและล็อกในลักษณะเดียวกับข้อต่อแบบที่ 1 ในส่วนของมอเตอร์ที่ 2 ก็จะใช้ชิ้นส่วนแบบเดียวกันกับมอเตอร์ที่ 1



รูปที่ 3.11 รูปแบบของหน้าแปลนอลูมิเนียมที่ใช้ยึดกับมอเตอร์ตัวที่ 1



รูปที่ 3.12 แขนกลในงานวิจัยที่สร้างเสร็จสมบูรณ์

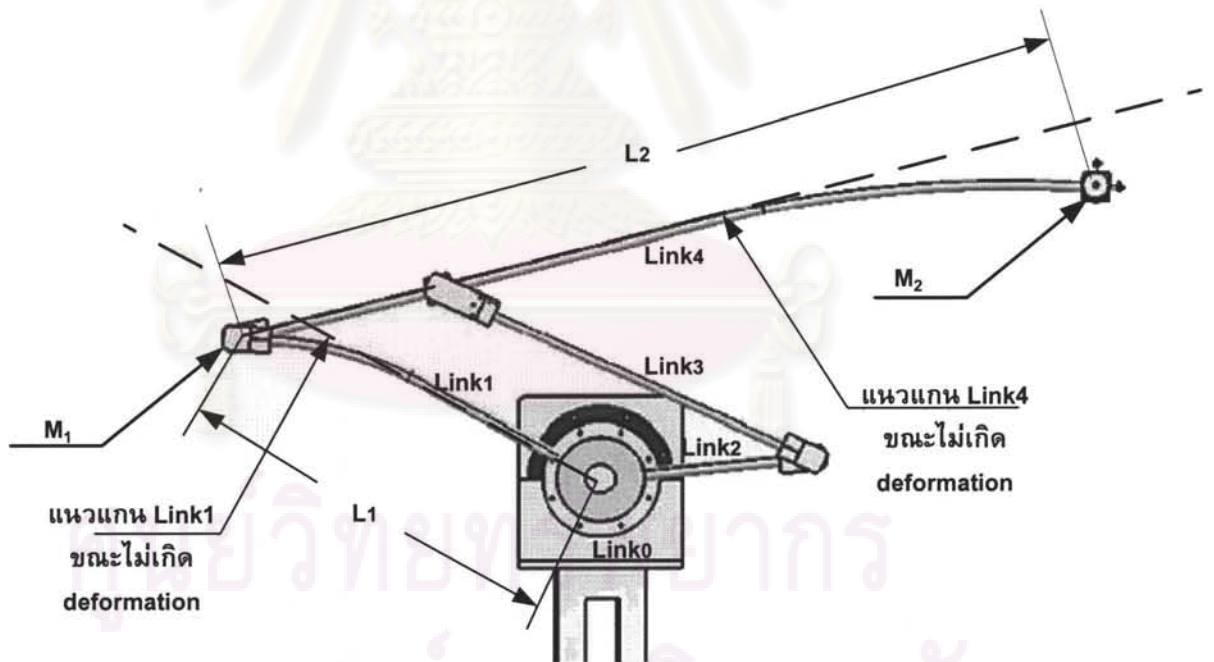
- จากลักษณะของชิ้นส่วนและกลไกของแขนกลแบบยึดหุ่นชุดนี้ จะมีลักษณะคล้ายกับแขนกลแบบยึดหุ่นดังรูปที่ 2.3 เพียงแต่ย้ายมอเตอร์มาอยู่ที่ฐานและนำกลไกแบบ Five-bar linkage มาเป็นตัวส่งแรงขับเคลื่อนของมอเตอร์ไปยังปลายแขนกล เนื่องจากมอเตอร์แบบขับเคลื่อนไม่มีเฟืองทด ทำให้ในขณะที่ยังไม่ได้ป้อนสัญญาณอินพุตให้กับมอเตอร์จะพบว่ามอเตอร์แบบขับเคลื่อนไม่มีแรงเสียดทานจากเฟืองทดเหมือนมอเตอร์แบบอื่น ๆ หรือมอเตอร์ที่มีชุดเฟืองทดที่มีอัตราทดรอบสูง ดังนั้นจึงต้องทำการสร้างอุปกรณ์สำหรับการตั้งตำแหน่งเริ่มต้นเบื้องต้นเพื่อใช้ในการตั้งแขนกลดังรูปที่ 3.12 และหลังจากที่มีการป้อนสัญญาณอินพุตให้กับมอเตอร์ เพื่อช่วยชดเชยแรงเนื่องจากความโน้มถ่วงโลก (gravity force) ในช่วงของการเริ่มเคลื่อนที่
- โดยสรุปแล้วแขนกลชุดนี้มีข้อดีคือมี workspace ในการทำงานที่กว้าง มีขนาดไม่ใหญ่นักเกินไป และมอเตอร์ขับเคลื่อนทั้งหมดอยู่ที่ฐานของแขนกล ก้านต่อโยงได้ออกแบบให้มีการลดโมเมนต์ความเฉื่อย เนื่องจากน้ำหนักของมอเตอร์ที่หายไป รวมไปถึงการใช้มอเตอร์แบบขับเคลื่อนทำให้ก้านต่อโยงรับแรงขับเคลื่อนได้โดยตรงมีผลดีต่อการศึกษาการสั่นสะเทือนมากกว่าการใช้มอเตอร์แบบเฟืองทด แต่มีข้อเสียจากผลของมอเตอร์แบบขับเคลื่อนทำให้ในการเคลื่อนย้ายตำแหน่งแขนกลจะเกิดการสั่นสะเทือนมากกว่าการใช้มอเตอร์แบบมีเฟืองทด ดังนั้นสมการทางพลศาสตร์ รวมไปถึงระบบควบคุมของแขนกลชุดนี้จะซับซ้อนกว่าแขนกลแบบมีเฟืองทด เพราะต้องคำนึงถึงการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นกับแขนกลด้วย

สมการทางพลศาสตร์ของแขนกลแบบยืดหยุ่น

4.1 สมมติฐานของแขนกลแบบยืดหยุ่น

พิจารณาแขนกลแบบยืดหยุ่นตามรูปที่ 4.1 โดยสมมติให้ก้านต่อโยงที่ 1 และ 4 เป็นก้านต่อโยงที่มีความยืดหยุ่นแต่ก้านมีความยาวเท่ากับ 62 cm และ 132 cm ตามลำดับ มีมวล  $M_1$  และ มวล  $M_2$  เป็นมวลแบบก้อนรวม (Lumped mass) ที่แต่ละปลายของก้านต่อโยงที่ 1 และก้านต่อโยงที่ 4 ตามลำดับ โดยที่มอเตอร์ที่ใช้ในการขับเป็นแบบขับตรง (Direct Drive Motor) การหาสมการของแขนกลที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นตามสมมติฐานดังนี้

1. พิจารณา มวล  $M_1$  และ มวล  $M_2$  เป็นแบบ point mass
2. ไม่พิจารณาน้ำหนักของก้านต่อโยงที่ 1 และ 4 เมื่อเทียบกับน้ำหนักของมวล  $M_1$  และ มวล  $M_2$
3. ไม่พิจารณาความเสียหายของมอเตอร์ และข้อต่อของก้านต่อโยง



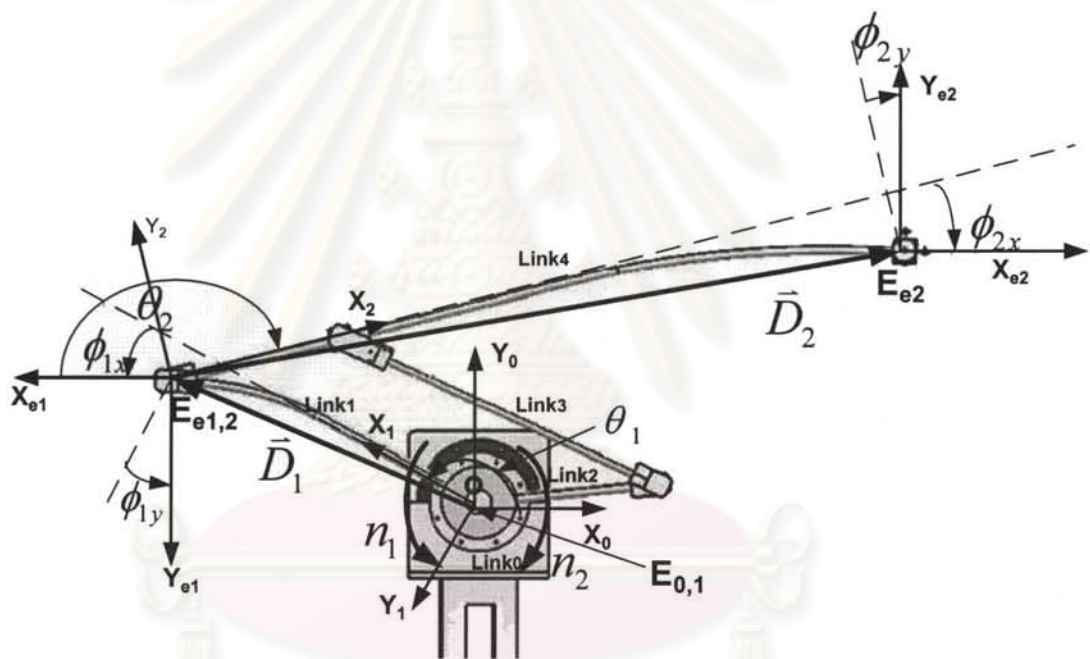
รูปที่ 4.1 ภาพประกอบสมมติฐานของหัวข้อ 4.1



#### 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง แรง (Force) กับ การเปลี่ยนรูป (Deformation)

การหาสมการพลศาสตร์ของแขนกลแบบหุ่นตัวนี้ ได้มีการศึกษากันมาอย่างกว้างขวาง ส่วนใหญ่จะใช้วิธีการสมมติโหมดของการสั่นหรือ assumed mode เพื่อช่วยในการกำหนดตำแหน่งหรือกำหนดพิกัดของแขนกล แต่ในงานวิจัยนี้จะใช้การกำหนดพิกัดต่างออกไป โดยกำหนดแล้วว่าจะวัดการยืดหยุ่นของแขนกลโดยใช้อุปกรณ์ตัววัดที่ติดตั้งอยู่ที่ปลายแขนของ ก้านต่อโยงที่ 4 ดังนั้นระบบพิกัดก็จะแตกต่างกันกับวิธีการของ assumed mode

สมมติให้เวกเตอร์  $\bar{D}_i$  และเวกเตอร์  $\bar{\phi}_i$  แสดง Displacement deformation และ Angular deformation ขณะที่  $E_i$  แทนเฟรมของแขนกลที่ไม่เกิดการเปลี่ยนรูป และ  $E_{ei}$  แทนเฟรมของแขนกลที่เกิดการเปลี่ยนรูป โดยจะได้ค่าการเปลี่ยนรูปของเฟรม  $E_{ei}$  เทียบกับเฟรม  $E_i$  ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การตั้งเฟรมและกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆของแขนกล

สามารถเขียนเวกเตอร์ที่กำหนดตำแหน่งปลายแขนของแขนหุ่นยนต์แบบยืดหยุ่นตัวของแต่ละ ก้านต่อโยงได้ดังนี้

$$\bar{D}_i \triangleq [l_i + \delta_{ix} \quad \delta_{iy}] \quad (i=1,2), \quad (4.1)$$

$$\bar{\phi}_i \triangleq [\phi_{ix} \quad \phi_{iy}] \quad (i=1,2), \quad (4.2)$$



ซึ่ง  $l_i$  แทนความยาวของก้านต่อโยงตามแนวแกนของเฟรมที่  $i$ ,  $\delta_i$  แทนการเปลี่ยนรูปของความยาว และ  $\phi_i$  แทนการเปลี่ยนรูปของมุมโดยใช้สมการของสปริงจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเปลี่ยนรูป

$$\text{ดังนี้} \quad \begin{bmatrix} f_i \\ n_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{i1} & K_{i3} \\ K_{i3}^T & K_{i2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_i \\ \phi_i \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

โดย  $f_i$  แทนแรง และ  $n_i$  แทนโมเมนต์ของก้านต่อโยงที่  $i$  เทียบกับเฟรม  $E_i$  และ  $K_{ij}$  คือค่า stiffness ของก้านต่อโยง ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

$$K_{i1} = \text{diag} \left[ A_i E_i / l_i, 12E_i I_i / l_i^3, 12E_i I_i / l_i^3 \right] \\ \triangleq \text{diag} [K_{ia}, K_{ib}, K_{ib}],$$

$$K_{i2} = \text{diag} \left[ G_i \hat{I}_i / l_i, 4E_i I_i / l_i, 4E_i I_i / l_i \right] \\ \triangleq \text{diag} [K_{ic}, K_{id}, K_{id}],$$

$$K_{i3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -6E_i I_i / l_i^2 \\ 0 & 6E_i I_i / l_i^2 & 0 \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{ie} \\ 0 & -K_{ie} & 0 \end{bmatrix},$$

$E_i$  คือ Young's modulus ของก้านต่อโยงที่  $i$  ( $\text{N/m}^2$ )

$G_i$  คือ modulus of transverse of elasticity ของก้านต่อโยงที่  $i$  ( $\text{N/m}^2$ )

$A_i$  คือ cross-sectional area ของก้านต่อโยงที่  $i$  ( $\text{m}^2$ )

$l_i$  คือ ความยาวของก้านต่อโยงที่  $i$  ( $\text{m}$ )

$I_i$  คือ area moment of inertia ของก้านต่อโยงที่  $i$  ( $\text{m}^4$ )

$\hat{I}_i$  คือ polar moment of inertia of area ของก้านต่อโยงที่  $i$  ( $\text{m}^4$ )

จากสมมติฐานข้างต้นนำไปสู่การพิจารณาการตั้งเฟรมของแขนกลโดยจะพิจารณาเฟรมที่มีความยืดหยุ่นเพิ่มด้วย รูปที่ 4.2 ให้จุด O เป็นจุดศูนย์กลางของเฟรมที่ฐานเพื่อที่จะอธิบายความยืดหยุ่นของการต่อโยงที่ 1 และ 2 จะทำการเพิ่มเฟรมของความยืดหยุ่น  $E_{e1}$  โดยที่เฟรมนี้จะอยู่กับก้านต่อโยงที่  $i$  และมีทิศเดียวกับเฟรม  $E_i$  เมื่อไม่มีระยะโก่งตัวของก้านต่อโยงเกิดขึ้นโดยจะได้ Rotation Matrix ดังนี้

$${}^0R_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^{e1}R_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

จากการไม่พิจารณาเทอมดีกรี 2 จะได้ rotation matrix ของ  ${}^1R_{e1}$  คือ

$${}^1R_{e1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \phi_{1y} \\ 0 & 1 & -\phi_{1x} \\ -\phi_{1y} & \phi_{1x} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

ดังนั้นสมการ rotation matrix จาก เฟรม 0 ถึง เฟรม 2 คือ

$${}^0T_1 = {}^0R_1, \quad (4.6)$$

$${}^0T_2 = {}^0R_1 {}^1R_{e1} {}^e1R_2 \quad (4.7)$$

### 4.3 สมการการเคลื่อนที่ของ Tip Lumped Masses

จากรูปที่ 4.2 จะได้สมการเวกเตอร์แสดงตำแหน่งของมวลที่ปลายแขนกลเทียบกับเฟรม  $E_0$  คือ  $\vec{r}_i$  ( $i=1,2$ ),  $\vec{r}_i = \sum_{j=1}^i {}^0T_j \vec{D}_j$  (4.8)

จากสมการที่ (4.8) ทำการหาอนุพันธ์เทียบกับเวลาจะได้สมการความเร็ว และความเร่งดังนี้

$$\dot{\vec{r}}_i = \sum_{j=1}^i \left\{ \left( \sum_{k=1}^2 U_{jk} \dot{\theta}_k + U_j^* \right) \vec{D}_j + {}^0T_j \dot{\vec{D}}_j \right\}, \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\vec{r}}_i = \sum_{j=1}^i \left\{ \left[ \sum_{k=1}^2 \left( \sum_{l=j}^2 U_{jkl} \dot{\theta}_k \dot{\theta}_l + 2U_{jk}^* \dot{\theta}_k + U_{jk} \ddot{\theta}_k \right) + U_j^{**} \right] \vec{D}_j \right. \\ \left. + 2 \left( \sum_{k=j}^2 U_{jk} \dot{\theta}_k + U_j^* \right) \dot{\vec{D}}_j + {}^0T_j \ddot{\vec{D}}_j \right\}, \end{aligned} \quad (4.10)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} U_{jk} &= \frac{\partial}{\partial \theta_k} {}^0T_j, \\ U_{jkl} &= \frac{\partial}{\partial \theta_l} U_{jk}, \\ U_1^* &= 0, \quad U_2^* = {}^0R_1 \left( \frac{d}{dt} {}^1R_{e1} \right) {}^e1R_2, \\ U_1^{**} &= 0, \quad U_2^{**} = {}^0R_1 \left( \frac{d^2}{dt^2} {}^1R_{e1} \right) {}^e1R_2, \\ U_{1k}^* &= 0, \quad U_{2k}^* = \frac{\partial}{\partial \theta_k} U_2^*, \end{aligned} \quad (4.11)$$

ซึ่งตัว subscript ตัวแรก  $j$  ของ  $U_j$  แสดงว่า  $U_j$  เป็นอนุพันธ์ของเมตริกซ์  ${}^0T_j$ , subscript ตัวที่ 2 และ 3 ( $k$  และ  $l$ ) แทนอนุพันธ์เมื่อเทียบกับ  $\theta_k$  และ  $\theta_l$  ตามลำดับ และ superscript  $*$  แทนอนุพันธ์ของ  ${}^1R_{c_i}$  เทียบกับเวลา

#### 4.4 สมการทางพลศาสตร์ของแขนกลแบบยืดหยุ่น (Dynamics model of Flexible Manipulator Arm)

##### 4.4.1 พลังงานจลน์ (Kinetic Energy)

จากสมมติฐานหัวข้อที่ 4.1 จะได้สมการพลังงานจลน์ทั้งหมด (total kinetic energy) ของแขนกลประกอบไปด้วย พลังงานจลน์จาก lumped mass และพลังงานจากการหมุน (rotational energy) ของมอเตอร์ โดยให้  $E_{ki}$  แทนพลังงานจลน์ของก้านต่อโยงที่  $i$

$$E_{k1} = \frac{1}{2} m_1 \dot{\vec{r}}_1^T \dot{\vec{r}}_1 + \frac{1}{2} I_{m1} \dot{\theta}_1^2, \quad (4.12)$$

$$E_{k2} = \frac{1}{2} m_2 \dot{\vec{r}}_2^T \dot{\vec{r}}_2 + \frac{1}{2} I_{m2} \dot{\theta}_2^2, \quad (4.13)$$

ซึ่ง  $I_{mi}$  แทน rotational inertia ของมอเตอร์ที่  $i$

จะได้พลังงานจลน์ทั้งหมดคือ 
$$E_k = \sum_{i=1}^2 E_{ki} \quad (4.14)$$

##### 4.4.2 พลังงานศักย์ (Potential Energy)

จากสมการที่ (4.3) พลังงานศักย์ของการยืดหยุ่น (potential of elasticity) ของก้าน

ต่อโยงที่  $i$ ,  $E_{pi}$  ( $i = 1, 2$ ) คือ 
$$E_{pi} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \delta_i^T & \phi_i^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{i1} & K_{i3} \\ K_{i3}^T & K_{i2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_i \\ \phi_i \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

และ พลังงานศักย์เนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (potential energy from gravity),  $E_{pg}$ , คือ

$$E_{pg} = m_1 \bar{g}^T \vec{r}_1 + m_2 \bar{g}^T \vec{r}_2, \quad (4.16)$$

ซึ่ง  $\bar{g} = [0 \ 0 \ g_0]^T$ ,  $g_0$  คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

ดังนั้น พลังงานศักย์รวมคือ 
$$V = \sum_{i=1}^2 E_{pi} + E_{pg} \quad (4.17)$$

#### 4.4.3 สมการการเคลื่อนที่ของแขนกล (Equation of motion of the Robot)

โดยนิยามของสมการของลากรองจ์ (Lagrange Equations) เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของระบบทางกล การอธิบายการเคลื่อนที่โดยใช้วิธีนี้จะอธิบายในรูปของพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ ดังนั้นในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยวิธีการของลากรองจ์นี้จะต้องหาพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของระบบทางกลนี้ก่อน และจะสามารถหา Lagrangian จากสมการ  $L = E_K - V$  (4.18) และเมื่อได้พลังงานทั้งสองแล้วก็จะสามารถคำนวณหาพลศาสตร์ของระบบทางกลนี้ได้จากสมการของลากรองจ์คือ

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} = \tau_i \quad (i = 1, 2), \quad (4.19)$$

โดยให้ joint displacements  $\theta_i$  ( $i = 1, 2$ ) เป็น generalized coordinate และ  $\tau_i$  คือทอร์กของมอเตอร์ที่ส่งผ่าน joint จากสมการที่ (4.9) ถึง (4.18) แทนค่าในสมการที่ (4.19) จะได้สมการ

$$\tau_i = \sum_{j=1}^2 \{m_j (\ddot{r}_j + \bar{g})^T (\sum_{k=1}^j U_{ki} \bar{D}_k)\} + I_{mi} \ddot{\theta}_i, \quad (4.20)$$

สมการของลากรองจ์ (Lagrange Equations) โดยให้ displacement deformation  $\delta_i$  ( $i = 1, 2$ ) และ angular deformation  $\phi_i$  ( $i = 1, 2$ ) เป็น generalized coordinate จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\delta}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \delta_i} = 0, \quad (4.21)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \phi_i} = 0, \quad (4.22)$$

ในทำนองเดียวกับการได้มาของสมการที่ (4.20) จะได้ สมการการเคลื่อนที่ในรูปของค่า deformation ดังนี้

$$m_1 {}^0T_1^T (\ddot{r}_2 + \bar{g}) + m_1 {}^0T_1^T (\ddot{r}_1 + \bar{g}) + K_{11} \delta_1 + K_{13} \phi_1 = 0, \quad (4.23)$$

$$m_2 {}^0T_2^T (\ddot{r}_2 + \bar{g}) + K_{21} \delta_2 + K_{23} \phi_2 = 0, \quad (4.24)$$

$$m_2 V_2^T (\ddot{r}_2 + \bar{g}) + K_{13}^T \delta_1 + K_{12} \phi_1 = 0, \quad (4.25)$$



$$K_{23}^T \delta_2 + K_{22} \phi_2 = 0, \quad (4.26)$$

$$\text{โดย } V_2 = \frac{\partial}{\partial \dot{\phi}_1} (U_2^* D_2) \quad (4.27)$$

จากสมมติฐานของหัวข้อที่ 4.1 ที่พิจารณามวล  $M_1$  และ มวล  $M_2$  เป็นแบบ point mass จะทำให้สามารถหาค่า  $\phi_1$  ในรูปฟังก์ชันของ  $\theta_1$  และ  $\delta_1$  จากสมการที่ (4.20) และ (4.23) ถึง (4.27) ได้ ดังนี้ จากสมการที่ (4.27) ,  $\phi_2 = -K_{22}^{-1} K_{23}^T \delta_2$  มีหน่วยเป็น radian (4.28) จากสมการที่ (4.23) ถึง (4.27) จะได้ค่า  $\phi_1$  คือ

$$\phi_1 = K_{12}^{-1} V_2^T \theta_2 (K_{21} - K_{23} K_{22}^{-1} K_{23}^T) \delta_2 - K_{12}^{-1} K_{13}^T \delta_1 \quad \text{มีหน่วยเป็น radian} \quad (4.29)$$

โดยการนำสมการที่ (4.28) และ (4.29) หาคอนุพันธ์เทียบกับเวลาจะได้พารามิเตอร์  $\dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2$  นำไปแทนในสมการที่ (4.20), (4.23) และ (4.24) ดังนั้นจะได้สมการการเคลื่อนที่ (Equation of Motion) ที่ไม่ขึ้นกับพารามิเตอร์  $\phi$  ซึ่งเป็นรูปแบบของสมการการเคลื่อนที่ที่แสดงลักษณะของแขนกลแบบยืดหยุ่นในงานวิจัยนี้และสามารถจะนำไปใช้ต่อในการควบคุมค่าพารามิเตอร์  $\delta_i$  ให้ปลายแขนกลมีการสั่นเกิดขึ้นน้อยที่สุด การแทนค่าดังกล่าว สมการจะค่อนข้างยาวมากและมีความซับซ้อนพอสมควร ฉะนั้นในการจัดรูปของสมการนี้ในรูปของ state equation เพื่อใช้สำหรับออกแบบระบบควบคุมปลายแขนกลจะทำได้ยาก ดังนั้นจึงต้องมีการตั้งสมมติฐานเพิ่มเติมเพื่อตัดบางส่วนของสมการที่จะไม่พิจารณาออกไป และการลดทอนสมการจากสมมติฐานสามารถทำได้จากการลดทอนสมการที่ (4.9) และสมการที่ (4.10) เพื่อง่ายต่อการนำไปใช้ควบคุมต่อไป

#### 4.5 สมการปริภูมิสแตต (State-Space Equation)

เนื่องด้วยเหตุผลจากหัวข้อที่แล้วสมการมีความสลับซับซ้อนค่อนข้างมาก และไม่เหมาะสำหรับใช้ในการออกแบบระบบควบคุม เพื่อให้สมการทางพลศาสตร์ (Dynamic equation) มีความซับซ้อนน้อยลงง่ายต่อการหาสมการปริภูมิสแตต (state space equation) และเหมาะสมสำหรับใช้ในการออกแบบระบบควบคุม ผู้วิจัยได้ทำการเพิ่มสมมติฐานดังนี้

1. สมการที่ได้มีวัตถุประสงค์ที่จะต้องการควบคุมการสั่นบริเวณจุดปลายที่ต้องการเท่านั้น ดังนั้นจึงสมมติว่าไม่พิจารณาเทอมของค่าเวกเตอร์ความเร่งที่เกิดจาก Coriolis และ Centripetal force
2. กำหนดให้ก้านต่อโยงไม่เกิดการเปลี่ยนรูปตามแนวแกนของก้านต่อโยง ( $\delta_x = 0$ )

3. ถ้าระหว่างการเคลื่อนที่ ระยะการเคลื่อนที่เกิดจากการสั่นมีค่าน้อย ดังนั้นจึงไม่พิจารณาเทอมของค่า  $\phi$  และ  $\delta$  ยกเว้นถ้าเป็นเทอมที่เกิดจากสมการของสปริง จากสมมติฐานจะได้สามารถลดทอนสมการความเร่ง (4.10) ได้ดังนี้

$$\ddot{r}_1 = U_{11}\ddot{D}_1\ddot{\theta}_1 + {}^0T_1\ddot{\delta}_1, \quad (4.30)$$

$$\ddot{r}_2 = (U_{11}\ddot{D}_1 + \bar{U}_{21}\ddot{D}_2)\ddot{\theta}_1 + U_{22}\ddot{D}_2\ddot{\theta}_2 + V_2\ddot{\phi}_2 + {}^0\bar{T}_2\ddot{\delta}_2, \quad (4.31)$$

โดยที่  $\ddot{D}_1 = [l_1 \ 0 \ 0]^T$ ,  $\ddot{D}_2 = [l_2 \ 0 \ 0]^T$ ,

$${}^0\bar{T}_2 = {}^0R_1 {}^1R_2, \quad \bar{U}_{21} = \frac{\partial}{\partial \theta_1} {}^0\bar{T}_2$$

$$\xi = [\theta_1 \ \theta_2 \ \delta_{1y} \ \delta_{2y}]^T, \quad u = [\tau_1 \ \tau_2]^T,$$

แทนค่าสมการที่ (4.30) และสมการที่ (4.31) ในสมการที่ (4.20), (4.23) และ (4.24) ดังนั้นจะได้สมการการเคลื่อนที่ที่มีความซับซ้อนน้อยลงคือ

$$[M]\ddot{\xi} + [F]\dot{\xi} + [G_v]\xi = [D]u, \quad (4.32)$$

โดย

$$M = \begin{bmatrix} m_1 l_1^2 + m_2(L_s^2 + L_c^2) + I_{m1} & m_2 l_2 (l_2 + l_1 \cos \theta_2) \\ m_2 l_2 (l_2 + l_1 \cos \theta_2) & m_2 l_2^2 + I_{m2} \\ m_1 l_1 + m_2 (l_1 + l_2 \cos \theta_2) & m_2 l_2 \cos \theta_2 \\ m_2 (l_2 + l_1 \cos \theta_2) & m_2 l_2 \end{bmatrix}$$

$$\left. \begin{array}{l} m_2 l_2 + m_2 l_2 + m_2 l_2 \{ \cos \theta_2 - K_{v1} (l_2 + l_1 \cos \theta_2) \} \\ m_2 l_2 (\cos \theta_2 - l_2 K_{v1}) \\ m_1 + m_2 + m_2 l_2 K_{v1} \cos \theta_2 \\ m_2 (\cos \theta_2 - l_2 K_{v1}) \end{array} \right\} \begin{array}{l} m_2 (l_2 + l_1 \cos \theta_2) (1 + K_{v2} l_2^2) \\ m_2 l_2 (1 + K_{v2} l_2^2) \\ m_2 \cos \theta_2 (1 + K_{v2} l_2^2) \\ m_2 (1 + K_{v2} l_2^2) \end{array} \right]$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{1b} - \frac{K_{1e}^2}{K_{1d}} \frac{K_{1e}}{K_{1d}} & (K_{2b} - \frac{K_{2e}^2}{K_{2d}})l_2 \\ 0 & 0 & 0 & K_{2b} - \frac{K_{2e}^2}{K_{2d}} \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} m_1 l_1 \cos \theta_2 \\ m_2 l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ (m_1 + m_2) \cos \theta_1 \\ m_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} g_0,$$

และ  $L_c = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2), \quad L_s = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2),$

$$K_{h1} = \frac{K_{1e}}{K_{1d}} \cos \theta_2, \quad K_{h2} = (K_{2b} - \frac{K_{2e}^2}{K_{2d}}) (\frac{\sin^2 \theta_2}{K_{1c}} + \frac{\cos^2 \theta_2}{K_{1d}}),$$

$$K_{v1} = \frac{K_{1e}}{K_{1d}}, \quad K_{v2} = (K_{2b} - \frac{K_{2e}^2}{K_{2d}}) / K_{1d}$$

จากสมการที่ (4.32) ทำการแปลงเป็นสมการปริภูมิสแตต (state space equation) โดยกำหนดค่าตัวแปรปริภูมิ (state variables) ใหม่ดังนี้

$$\text{ให้ } x = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \delta_{1y} \quad \delta_{2y} \quad \dot{\theta}_1 \quad \dot{\theta}_2 \quad \dot{\delta}_{1y} \quad \dot{\delta}_{2y}]^T, \quad u = [\tau_1 \quad \tau_2]^T,$$

สมการปริภูมิสแตต (state-space equation) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & E_4 \\ -M^{-1}F & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}D \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ -M^{-1}G \end{bmatrix}, \quad (4.33)$$

$E_i$  แทน unit matrix  $i \times i$

พิจารณาค่าชดเชยแรงโน้มถ่วงในสมการที่ (4.33) จะได้อินพุตค่าใหม่คือ

$$u' = u + \begin{bmatrix} m_1 l_1 \cos \theta_2 + m_2 L_c \\ m_2 l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} g_0 \quad (4.34)$$

พิจารณาเทอมที่ 3 และ 4 ของ G สามารถตั้งค่าอ้างอิงหรือค่าที่ต้องการ (desired values) ของ  $\delta_{1y}$  และ  $\delta_{2y}$  คือ  $\delta_{1yd}$  และ  $\delta_{2yd}$  ให้มีค่า deformation ในแนวแกนของแกนที่ต้องการเมื่อแขนมีการยืดหรือหดได้ ดังนี้

$$\delta_{1yd} = -\frac{m_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) l_1^2 l_2 g_0}{2E_1 I_1} - \frac{(m_1 + m_2) \cos \theta_1 l_1^3 g_0}{3E_1 I_1} \quad (4.35)$$

$$\delta_{2yd} = -\frac{m_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) l_2^3 g_0}{3E_2 I_2} \quad (4.36)$$



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 5

### ระบบควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์แบบขับเคลื่อน

#### 5.1 หลักการพื้นฐานของระบบควบคุมอัตโนมัติ

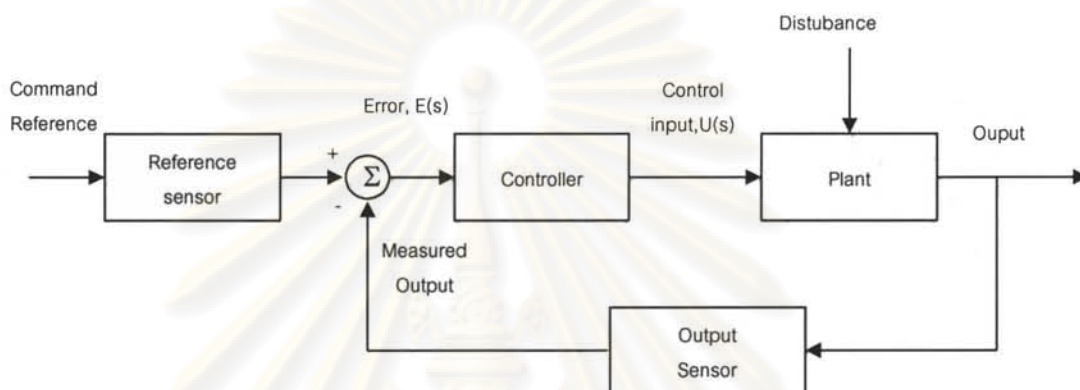
เป้าหมายของแขนกลแบบยืดหยุ่น คือการควบคุมตำแหน่งปลายของแขนกลให้มีการสั่นน้อยที่สุด ดังนั้นในเบื้องต้นจึงต้องมีระบบควบคุมสำหรับการควบคุมตำแหน่งของตัวขับเคลื่อนเพื่อใช้ขับเคลื่อนต่อโยงให้เคลื่อนที่ไปตามมุมอ้างอิงที่ต้องการ ดังนั้นจึงต้องมีระบบควบคุมทั้งตำแหน่งและความเร็วโดยใช้ระบบควบคุมที่เรียกว่า Feedback Control หรือระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ (Automatic Control)

ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ จะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมการทำงานของระบบพลศาสตร์ โดยระบบควบคุมแบบอัตโนมัติจะมีส่วนที่ทำการเปรียบเทียบสัญญาณที่วัดค่าตัวแปรสถานะหรือ State variables จริงของระบบด้วยตัวตรวจรู้ (sensor) แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าตัวแปรที่ต้องการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ค่าความแตกต่างนี้จะถูกใช้สำหรับสร้างสัญญาณควบคุมซึ่งจะสามารถลดการเปลี่ยนแปลงหรือความผิดพลาดลงไปได้ เพื่อให้มีค่าเป็นศูนย์หรือเป็นค่าตัวเลขที่มีขนาดเล็ก การกระทำของระบบควบคุมอัตโนมัติที่สร้างสัญญาณควบคุม (Control signal) เรียกว่ากิริยาควบคุม (Control Action)

ในหัวข้อนี้จะมาพิจารณาถึงการใช้งานของกิริยาควบคุม (Control Action) ที่เหมาะสมสำหรับควบคุมการทำงานตัวขับเคลื่อนของแขนกลแบบยืดหยุ่น โดยจะใช้ตัวควบคุมที่ใช้ในระบบควบคุมในโรงงานอุตสาหกรรม ตัวควบคุมที่ใช้กับแขนกลนี้จะเป็นตัวควบคุมแบบพีดี (PD, Proportional plus Derivative) หรืออาจจะมีส่วนของอินทิกรัลเข้ามาช่วยด้วย โดยที่ตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional action, P) จะช่วยให้การตอบสนองเร็วขึ้น ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative action, D) จะช่วยเพิ่มค่าอัตราส่วนการหน่วงให้กับระบบทำให้มีค่าโอเวอร์ชูตน้อยลงระบบจะทำงานราบเรียบขึ้น และตัวกิริยาแบบอินทิกรัล (Integral action, I) จะช่วยลดค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวได้ (steady state error) การเข้าใจบทบาทของตัวควบคุมแบบต่าง ๆ เพื่อนำมาลดผลกระทบที่เกิดขึ้นเนื่องจากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบมีการเปลี่ยนแปลงในขณะทำงานในสภาวะแตกต่างกัน

รูปที่ 5.1 เป็นรูปแผนภาพบล็อกแสดงระบบควบคุมแบบปิด สัญญาณคำสั่งอ้างอิง (Command Reference) จะถูกเปลี่ยนด้วยระบบตรวจรู้อ้างอิง (Reference sensor) เพื่อเปลี่ยนแปลงให้สัญญาณคำสั่งอ้างอิงดังกล่าวมีลักษณะหรือพูดให้ง่ายก็คือมีหน่วยเดียวกับ

สัญญาณที่ออกจากระบบตรวจรู้ขาออก (Output sensor) เพื่อต้องการเปรียบเทียบกัน เมื่อเปรียบเทียบกันแล้ว จะได้สัญญาณผิดพลาด (Error Signal) สัญญาณผิดพลาดนี้จะถูกส่งเข้าไปยังระบบควบคุม (Controller) เพื่อสร้างสัญญาณควบคุม (Control Input) และสัญญาณที่ออกจากตัวควบคุมจะใช้เป็นสัญญาณควบคุมที่จะส่งเข้าไปยังระบบที่ต้องการควบคุม (Plant) โดยตัวควบคุมหรือ Controller จะมีบทบาทมากกับลักษณะตอบสนองของสัญญาณเอาต์พุตที่ต้องการ ตัวควบคุมมาตรฐานมีด้วยกันหลายประเภทซึ่งจะทำการศึกษาย่างละเอียดต่อไป



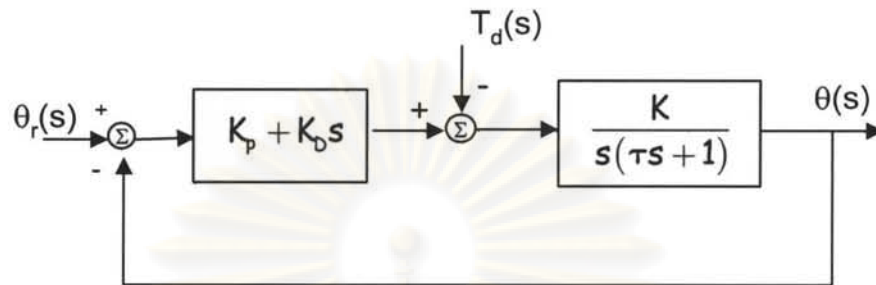
รูปที่ 5.1 แผนภาพบล็อกแสดงระบบควบคุมแบบปิด

ในทางปฏิบัติแล้วการกำหนดลักษณะเฉพาะสำหรับออกแบบระบบควบคุมมีรายละเอียดมากกว่านี้ เช่นอาจจะต้องกำหนดความกว้างแถบ (bandwidth) ที่ทำให้ระบบมีความปลอดภัย ความปลอดภัยในที่นี้หมายถึงระบบปลอดภัยจากการที่ระบบจะไม่มีเสถียรภาพหรือไม่มีความสมดุล ไม่สามารถรู้ได้แน่ชัดเลยเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ของระบบ ว่ามีค่าถูกต้องแม่นยำหรือมีความแน่นอนเท่าไรตามค่าที่ใช้ในสมการจำลองการทำงานของระบบ ระบบควบคุมหรือตัวควบคุม (Controller) ชนิดต่าง ๆ หรือที่มีรูปแบบต่างกัน (เช่นตัวควบคุมแบบ P, PD, PID เป็นต้น) ก็สามารถออกแบบให้ระบบรวมมีความไว (sensitivity) มากน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์แตกต่างกันออกไป ดังนั้นการออกแบบบางครั้งอาจจะต้องครอบคลุมถึงความไว (sensitivity) ของระบบควบคุมต่อการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์ของระบบด้วย เพื่อให้ระบบควบคุมโดยรวมมีความปลอดภัยเมื่อค่าพารามิเตอร์ของระบบเปลี่ยนแปลงในขณะที่ระบบกำลังทำงาน

## 5.2 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ (PD-control) กับการควบคุมตำแหน่งมุมของตัวขับ

ให้หัวข้อนี้จะทำการศึกษารูปแบบจำลองทางคณิตในรูปของ Block Diagram เพื่อให้การออกแบบตัวควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ในการขับเคลื่อน การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับ

แบบอนุพันธ์ (PD-control) นี้จะไม่นิยมใช้ควบคุมระบบที่มีอันดับหนึ่ง การควบคุมตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์โดยใช้การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับอนุพันธ์นั้นแสดงไว้ในแผนภาพบล็อกข้างล่างดังนี่คือ



รูปที่ 5.2 Block Diagram สำหรับการควบคุมด้วย PD-control

จากแผนภาพบล็อกข้างต้น สามารถเขียนสมการฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี่คือ

$$\frac{\theta(s)}{\theta_r(s)} = \frac{K(K_p + K_d s)}{\tau s^2 + (1 + KK_d)s + KK_p} \quad (5.1)$$

และ

$$\frac{\theta(s)}{T_d(s)} = -\frac{K}{\tau s^2 + (1 + KK_d)s + KK_p} \quad (5.2)$$

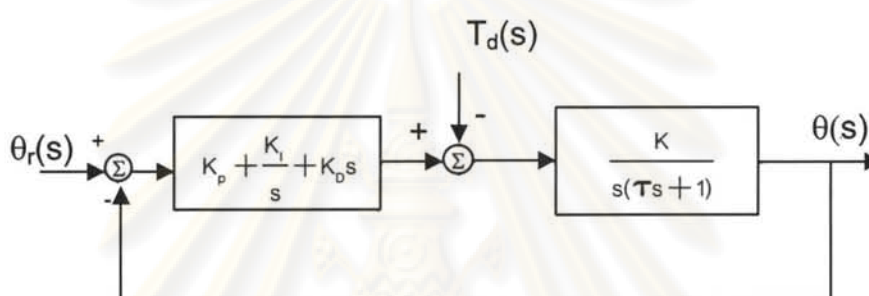
ค่าความเร็วในสถานะอยู่ตัวเนื่องมาจากสัญญาณอินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วยจะมีค่าเป็น 1 ซึ่งก็หมายความว่าค่าผิดพลาดของตำแหน่งการหมุนในสถานะอยู่ตัว (Steady state position error) มีค่าเป็นศูนย์ ส่วนค่าผิดพลาดของตำแหน่งในสถานะอยู่ตัวเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงกะทันหันจะมีค่าน้อยลง เมื่อค่าอัตราขยายของตัวควบคุมเชิงสัดส่วนมีค่ามาก ซึ่งเป็นลักษณะเช่นเดียวกับการควบคุมที่ใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนอย่างเดียว และจะพบว่าระบบจะมีเสถียรภาพถ้าอัตราขยาย  $K_p$  และ  $K_D$  มีค่าเป็นบวก ค่าอัตราส่วนการหน่วงสามารถหาได้ดังนี่คือ

$$\xi = \frac{1 + KK_d}{2\sqrt{\tau KK_p}} \quad (5.3)$$



### 5.3 การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัลบวกกับแบบอนุพันธ์ (PID-control) กับ การควบคุมตำแหน่งมุมของแกนหมุนของมอเตอร์

การควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัลและตัวควบคุมแบบอนุพันธ์เป็นตัวควบคุมพีไอดี (PID-control) ตัวควบคุมพีดีที่ใช้ควบคุมมอเตอร์ซึ่งมีอันดับสองข้างต้นจะเห็นว่า สามารถปรับปรุงการตอบสนองช่วง Transient ได้โดยเฉพาะเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วย แต่ถ้าสัญญาณอินพุตเป็นสัญญาณเรมปีแล้วค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวก็ยังคงมีอยู่ ทำให้ยังไม่สามารถบรรลุการออกแบบที่สมบูรณ์ ในหัวข้อนี้จะศึกษาตัวควบคุมแบบพีไอดีในการควบคุมตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ ซึ่งแสดงไว้ในแผนภาพบล็อกข้างล่างนี้



รูปที่ 5.3 Block Diagram สำหรับการควบคุมด้วย PID-control

จากแผนภาพบล็อกข้างต้น สามารถเขียนสมการฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังนี้คือ

$$\frac{\theta(s)}{\theta_r(s)} = \frac{K(K_D s^2 + K_p s + K_i)}{\tau s^3 + (1 + K K_D) s^2 + K K_p s + K K_i} \quad (5.4)$$

และ

$$\frac{\theta(s)}{T_d(s)} = -\frac{Ks}{\tau s^3 + (1 + K K_D) s^2 + K K_p s + K K_i} \quad (5.5)$$

ซึ่งค่าผิดพลาดในสถานะอยู่ตัว (Steady state error) อันเนื่องมาจากสัญญาณอินพุตที่เป็นฟังก์ชันขั้นหนึ่งหน่วยจะเป็นศูนย์เนื่องมาจากมีตัวควบคุมแบบอินทิกรัล ระบบนี้จะมีเสถียรภาพเมื่อค่าอัตราขยาย  $K_p$ ,  $K_i$  และ  $K_D$  มีค่าเป็นบวกและ

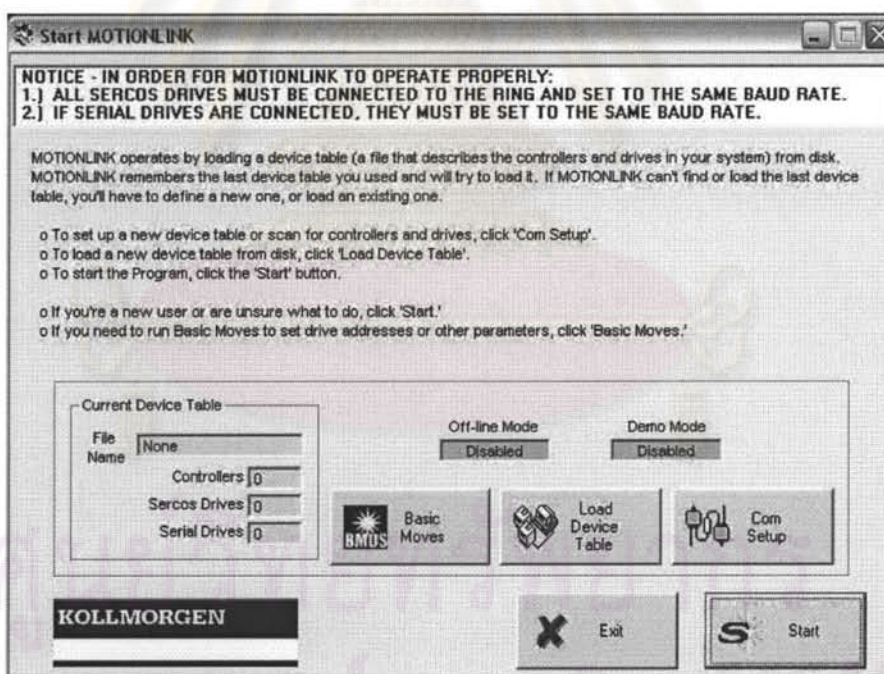
$$(1 + K K_D) K K_p - \tau K K_i > 0 \quad (5.6)$$

ซึ่งค่าอัตราขยาย  $K_D$  ที่อยู่ในระบบควบคุมจะช่วยทำให้สมการข้างต้นเป็นไปได้โดยง่าย



#### 5.4 การประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเพื่อควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์

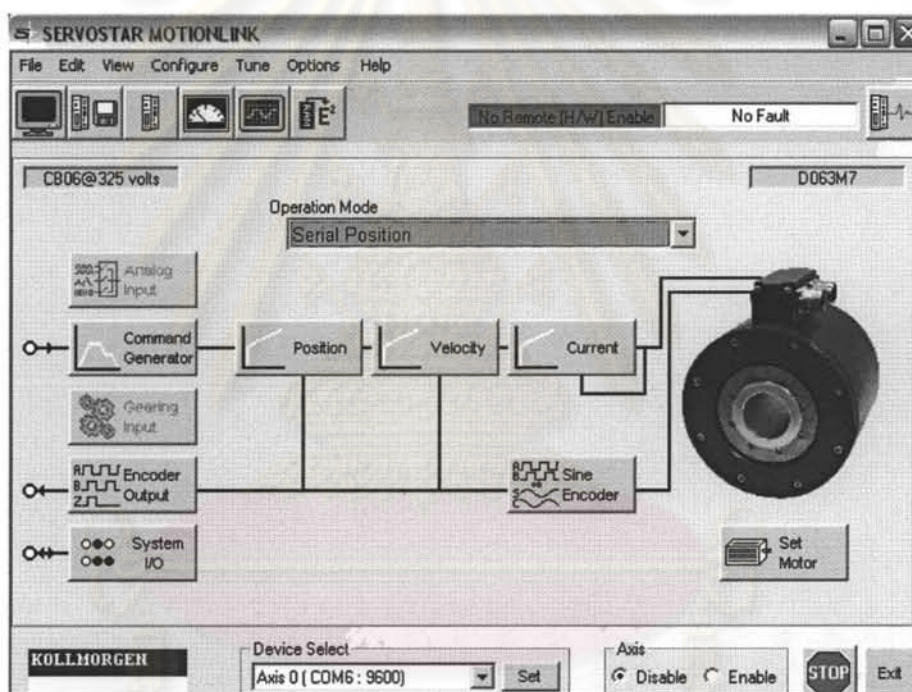
จากหลักการการควบคุมที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะถูกนำไปใช้ในการเลือกค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมมอเตอร์แบบขับตรงด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป (Motionlink Software) ซึ่งมีรูปแบบตามรูปที่ 5.3 โปรแกรมสำเร็จรูปดังกล่าวนี้มีส่วนของการควบคุมการเคลื่อนที่โดยใช้ตัวควบคุมแบบ พีไอดี (PID controller) การควบคุมนี้จะเน้นการควบคุมตำแหน่งของการหมุนเป็นหลัก แต่ในการควบคุมที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมแขนกลที่มีความยืดหยุ่นนั้น ไม่ใช่เฉพาะการควบคุมตำแหน่งและความเร็วของการหมุนเท่านั้น ยังมีค่าตัวแปรปรภูมิอื่นอีก (state variable) ที่ต้องการการควบคุม เช่นการสั่นของก้านต่อโยงที่ไม่สามารถใช้ตัวควบคุมแบบนี้มาควบคุมได้ แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้จะเน้นเรื่องการหาแบบพลศาสตร์ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการออกแบบตัวควบคุมต่อไป การใช้ตัวควบคุมแบบพีไอดีนี้เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของข้อต่อโดยใช้มอเตอร์ขับแบบตรงก็เพื่อให้สามารถสร้างความเข้าใจมากขึ้นถึงผลกระทบของการสั่นของก้านต่อโยงที่ส่งผลไปที่ตัวมอเตอร์แบบขับตรง และเพื่อเป็นการสร้างความมั่นใจในความถูกต้องในระดับหนึ่งเกี่ยวกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หามาได้นี้ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หามาได้นี้ใช้สำหรับการออกแบบตัวควบคุมขั้นสูงต่อไป



รูปที่ 5.4 หน้าจอของโปรแกรม Motionlink Software

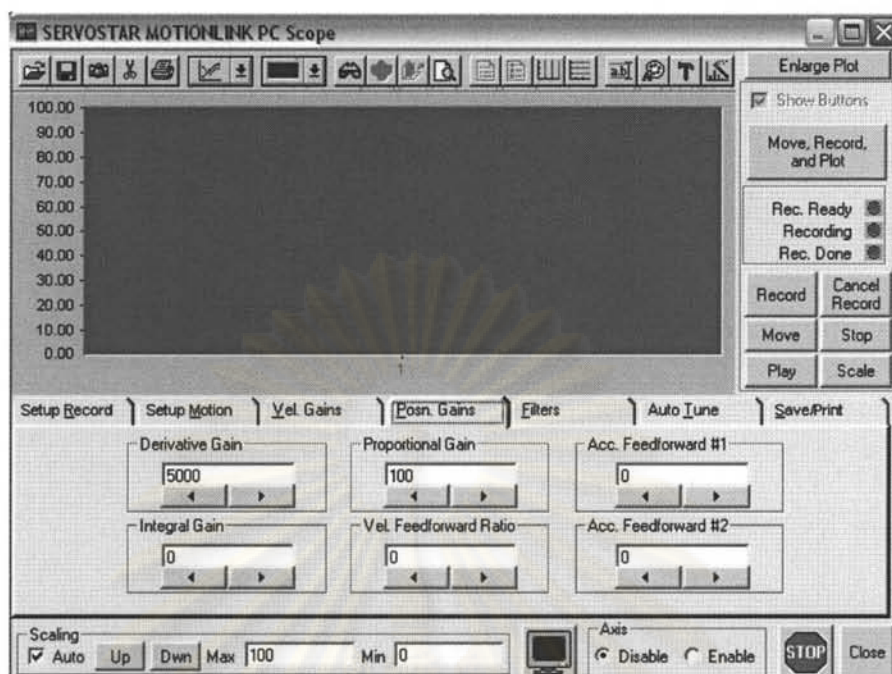
โปรแกรมสำเร็จรูปที่มากับมอเตอร์ขับแบบตรงนี้ มีหลักการทำงานแบบ realtime และทำการส่งค่าของข้อมูลผ่านช่องสัญญาณ RS 232 ของคอมพิวเตอร์ โดยจะต้องทำการเลือกรุ่นของมอเตอร์ในโปรแกรมให้ตรงตามมอเตอร์ที่เลือกใช้จริงดังแสดงในรูปที่ 5.5 ซึ่งมอเตอร์ที่เลือกใช้

เป็น DDR 063M7 ของ KOLLMORGEN หลังจากนั้นเลือกโปรแกรมเป็นการควบคุมตำแหน่ง โดยใช้หลักการข้างต้น ผู้วิจัยเลือกใช้ระบบควบคุมแบบ PD-Control ในการควบคุมแต่ละแกนของมอเตอร์ ทำการเลือกค่า  $K_p$  และ  $K_D$  โดยกำหนดเลือกค่า  $K_p$  ก่อน และทำการวัดมุมด้วย Simulink ของ Matlab พิจารณาค่าความถูกต้องเมื่อได้ค่ามุมที่ต้องการ เลือกค่า  $K_D$  เพื่อลดการสั่นของปลายแขนกลให้เหลือน้อยที่สุด หลังจากนั้นทำการป้อนค่า  $K_p$  และ  $K_D$  ที่เลือกไว้ดังรูปที่ 5.5 โดยที่ แกนมอเตอร์ที่ 1 เลือกค่า  $K_p=100$  และ  $K_D=3000$  ส่วนแกนที่ 2 เลือกค่า  $K_p=100$  และ  $K_D= 5000$  รูปที่ 5.6 เป็นหน้าต่าง scope ที่ใช้แสดงผลของการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อ โดยสามารถปรับเปลี่ยนค่าเกณฑ์โดยการเลื่อนบาร์ของค่าตัวแกนของตัวควบคุมได้ ซึ่งการเลือกค่าดังกล่าวจะถูกนำไปใช้สำหรับการทดลองแขนกลแบบยึดหุ่นในบอทถัดไป



รูปที่ 5.5 การเลือกรุ่นของมอเตอร์ในโปรแกรม

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.6 การเลือกค่าเกน  $K_p$  และ  $K_D$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 6

### การทดสอบแขนกลแบบยืดหยุ่น

#### 6.1 การทดสอบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมอเตอร์

ในบทที่ 4 ได้แสดงวิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลแบบยืดหยุ่น โดยรูปแบบของสมการพลศาสตร์สามารถเขียนอยู่ในรูปแบบของปริภูมิสแตต (State space description) แบบจำลองดังกล่าวนี้มีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นแบบจำลองเพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมที่อิงแบบจำลองทางพลศาสตร์อีกทีหนึ่ง (Model-based controller) แบบจำลองดังกล่าวนี้มีการลดทอนที่บางท่อนที่มีผลกระทบต่อการเคลื่อนที่น้อยเช่น ทอม Coriolis และ Centripetal เนื่องจากทั้งสองทอมนี้จะขึ้นอยู่กับความเร็วของการเคลื่อนที่ค่อนข้างมาก แต่ในการควบคุมแขนกลยืดหยุ่นนั้นโดยปกติการเคลื่อนที่จะไม่เร็วมาก ซึ่งการควบคุมของแขนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมก็มีการสมมติแบบนี้เช่นเดียวกัน นอกจากนั้นทอมที่มีตัวแปรของการสั่นเช่น  $\delta_y$  และ  $\delta_x$  เนื่องจากขนาดจะมีค่าเล็ก ดังนั้นทอมที่มีตัวแปรดังกล่าวจึงมีค่าน้อยตามไปด้วยโดยเฉพาะทอมที่มีตัวแปรดังกล่าวคุณกัน แต่ในกรณีที่มีตัวแปรดังกล่าวมีทอมของค่า stiffness ของแขนปรากฏอยู่ด้วยนั้น จะยังคงไว้ เนื่องจากค่า stiffness ของแขนหรือก้านต่อโยงนั้นจะมีค่าค่อนข้างสูงจึงไม่สามารถละทิ้งได้

การทดสอบการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ในงานวิจัยนี้เพื่อต้องการดูว่าผลกระทบของการสั่นสะเทือนที่ส่งผลกับแขนกลขณะที่มีการเคลื่อนที่จะมีลักษณะเป็นอย่างไรตามเงื่อนไขของสมมติฐานในหัวข้อที่ 4.6 หรือที่กล่าวข้างต้น เนื่องจากในการควบคุมตำแหน่งของการหมุนมอเตอร์ของแขนกลแบบยืดหยุ่นโดยใช้ตัวควบคุมเฉพาะที่แกนหมุนของมอเตอร์แบบขั้วตรง โดยไม่ได้ครอบคลุมผลอันเนื่องมาจากการสั่นของก้านต่อโยง อาจจะทำให้ตำแหน่งของข้อต่อที่ควบคุมอยู่นั้นมีความแม่นยำน้อยลง โดยเฉพาะถ้าก้านต่อโยงมีการสั่นค่อนข้างมาก สมมติฐานที่กล่าวข้างต้นนั้นอาจจะไม่เป็นจริง สมการระบบพลศาสตร์ดังกล่าวก็อาจจะไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้ในการออกแบบระบบควบคุม ดังนั้นในการทดลองแรกนี้ จะศึกษาว่าผลของการสั่นหรือการไหวของก้านต่อโยงจะมีผลมากน้อยแค่ไหน โดยที่การเคลื่อนที่ที่ปลายแขนกลจะทำให้มีการสั่นของก้านต่อโยง แรงสั่นของก้านต่อโยงนี้จะมีผลต่อความแม่นยำของการควบคุมการเคลื่อนที่ของข้อต่อโดยใช้ตัวควบคุมแบบพีดีเฉพาะที่ข้อต่อ โดยเฉพาะเมื่อมอเตอร์ที่ใช้เป็นมอเตอร์แบบขั้วตรง ผลกระทบนี้จะเห็นชัดขึ้น ถ้าผลกระทบนี้มีค่าไม่มาก สมมติฐานที่เราตั้งขึ้นก็จะเป็นจริงมากขึ้นด้วย ดังนั้นในการทดลองที่ 6.1 จึงเป็นการควบคุมตำแหน่งโดยใช้การควบคุมแบบ PD-control เพื่อคุมตำแหน่งการหมุนเบื้องต้นและมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้



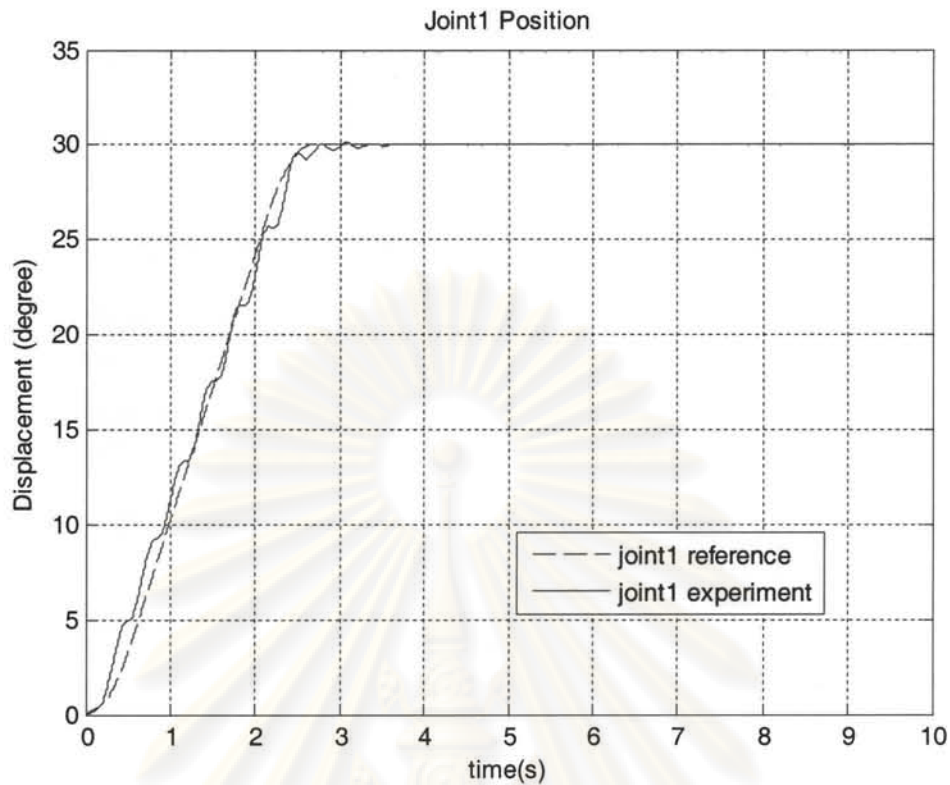
1. เลือกค่าเกน  $K_p$  และ  $K_d$  จากโปรแกรมสำเร็จรูป
2. ป้อนสัญญาณอ้างอิงจากโปรแกรมสำเร็จรูปตามตารางทดลองที่ 6.1
3. ทำการรับค่าสัญญาณจากอุปกรณ์วัดมุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
4. นำค่าจากสัญญาณของอุปกรณ์วัดมุมมาเปรียบเทียบกับค่าสัญญาณอ้างอิง

ตารางที่ 6.1 การทดลองที่ 6.1 การทดลองตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมอเตอร์

การทดลอง	มอเตอร์ 1 (องศา)	มอเตอร์ 2 (องศา)	ความเร็ว (rpm)	น้ำหนัก (kg)
6.1.1	30	0	(1,0)	0.5
6.1.2	0	30	(0,1)	0.5
6.1.3	0	50	(0,1)	0.5
6.1.4	50	50	(1,1)	0.5

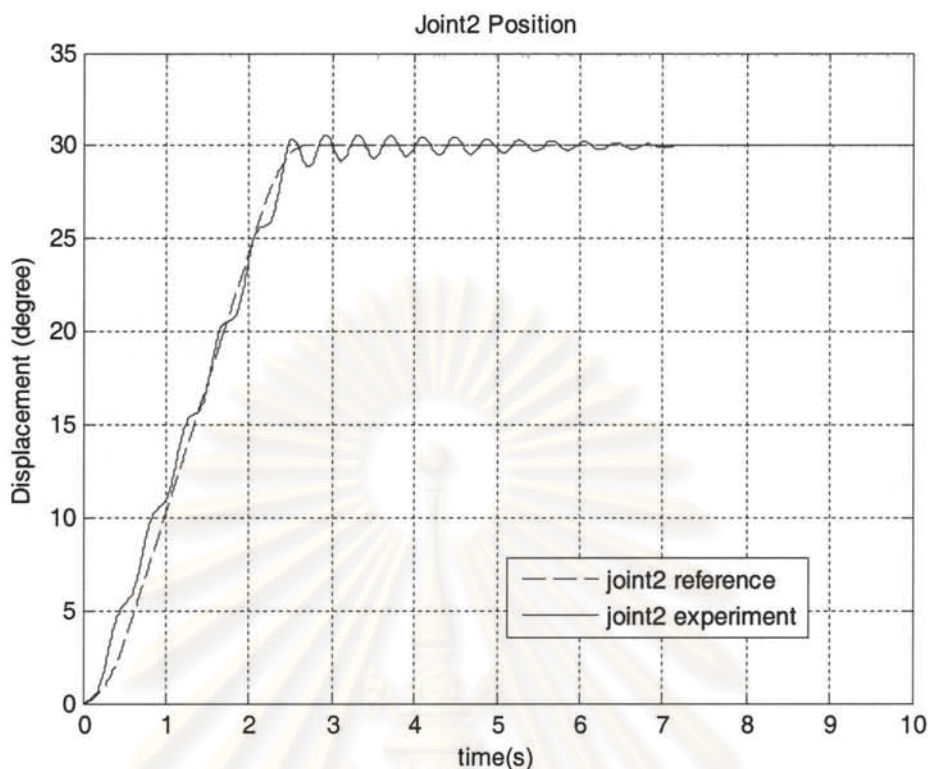
6.1.1 การทดลองที่ 6.1.1 เลือกค่าเกน  $K_p = 100$  และ  $K_d = 3000$  และป้อนสัญญาณอ้างอิงของตัวควบคุมมอเตอร์ที่ 1 มีมุมการเคลื่อนที่ 30 องศา และป้อนสัญญาณลือคการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ที่ 2 ให้หยุดนิ่งกับที่ ทำการทดลองดังกล่าว 10 วินาที ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 6.1

ผลการทดสอบพบว่า การควบคุมแบบ PD-control โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปที่มากับมอเตอร์แบบขับเคลื่อนตรง โปรแกรมดังกล่าวสามารถใช้ในการควบคุมตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ตัวที่ 1 ได้ เมื่อทำการควบคุมมอเตอร์ตัวที่หนึ่งโดยใช้ค่าเกนที่หามาได้จากบทที่ 5 จะเห็นว่าสามารถควบคุมตำแหน่งมุมหมุนของแกนมอเตอร์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 6.1 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบระหว่างสัญญาณคำสั่ง และสัญญาณที่วัดได้จากการควบคุม โดยเป็นการทดลองที่ 6.1.1 ตามตารางที่ 6.1 จากรูปที่ 6.1 จะเห็นว่าสัญญาณตำแหน่งที่วัดได้นั้นมีลักษณะที่เกิดจากผลกระทบของการสั่นของก้านต่อโยงให้เห็น แต่ไม่มากนัก แต่จะลดลงเมื่อหยุดการเคลื่อนที่ของข้อต่อของมอเตอร์ตัวที่ 1 และจะลดลงจนเป็นศูนย์ ซึ่งทำให้เห็นว่าผลกระทบของการสั่นของก้านต่อโยงนี้อยู่ในวิสัยที่สามารถควบคุมได้ด้วยตัวควบคุมที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะใช้ตัวควบคุมแบบ State variable feedback แบบ Optimal regulator ได้ ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ครอบคลุมการออกแบบตัวควบคุมขั้นสูงนี้



รูปที่ 6.1 การเคลื่อนที่มุมของมอเตอร์ที่ 1 30 องศา

6.1.2 การทดลองที่ 6.1.2 ตามตารางที่ 6.1 เป็นการควบคุมมอเตอร์ตัวที่ 2 ซึ่งมีวิธีการทดลองเช่นเดียวกับมอเตอร์ตัวที่ 1 เลือกค่าเกน  $K_p = 100$  และ  $K_d = 5000$  และป้อนสัญญาณอ้างอิงของมอเตอร์ตัวที่ 2 ให้เคลื่อนที่เป็นมุม 30 องศา และป้อนสัญญาณลอคการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ตัวที่ 1 ให้หยุดนิ่งกับที่ ทำการทดลองดังกล่าว 10 วินาที ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.2 ผลการทดสอบพบว่า การควบคุมแบบ PD-control โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสามารถใช้ในการคุมตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ตัวที่ 2 ได้ โดยมีลักษณะคล้ายกับการทดลองที่ 6.1.1 โดยจะเห็นว่าสัญญาณตำแหน่งที่วัดได้นั้นมีลักษณะที่เกิดจากผลกระทบของการสั่นของก้านต่อโยงให้เห็น แต่ไม่มากนัก แต่มากกว่าการทดลองของมอเตอร์ตัวที่ 1 ทั้งนี้เนื่องจากมอเตอร์ตัวที่ 2 นี้ขับเคลื่อนโดยที่ต่อเข้ากับตรงกับก้านต่อโยงที่ 4 ซึ่งมีความยาวมากที่สุดและมีความไหวมากที่สุดเช่นกัน ความไวนั้นจะส่งผ่านจุดหมุนที่ต่อระหว่างก้านต่อโยงที่ 3 และก้านต่อโยงที่ 4 จะได้ผลของการไหวของก้านต่อโยงที่ 4 ที่ไปปรากฏที่มอเตอร์ตัวที่ 2 เมื่อมอเตอร์ตัวที่ 2 นี้หยุดหมุน ผลกระทบอันเนื่องมาจากการสั่นของก้านต่อโยงที่ 4 นี้จะลดลงเรื่อยจนหยุดสั่น ถึงแม้ว่าผลการสั่นสะเทือนนี้จะมีค่ามากกว่าในกรณีของมอเตอร์ตัวที่ 1 แต่ก็เชื่อว่าผลกระทบของการสั่นของก้านต่อโยงนี้อยู่ในวิสัยที่สามารถควบคุมได้ด้วยตัวควบคุมที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น



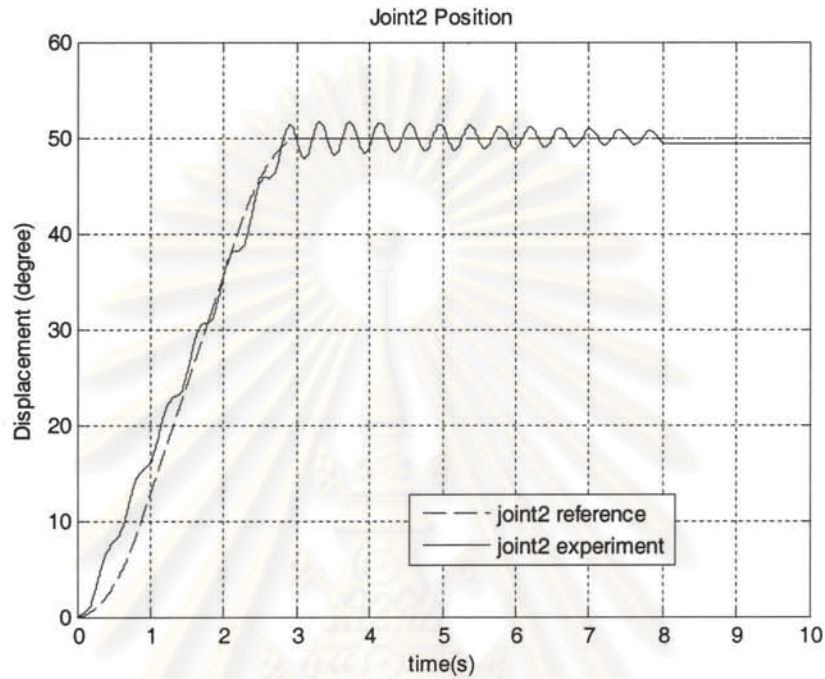
รูปที่ 6.2 การเคลื่อนที่มุมของมอเตอร์ที่ 2 30 องศา

6.1.3 การทดลองที่ 6.1.3 ตามตารางที่ 6.1 เลือกค่าเกน  $K_p = 100$  และ  $K_d = 5000$  และป้อนสัญญาณอ้างอิงของมอเตอร์ที่ 2 ให้เคลื่อนที่เป็นมุมมากขึ้นเพื่อดูผลกระทบของการสั่งของก้านต่อโยงที่ 4 โดยสั่งให้มอเตอร์ตัวที่ 2 เคลื่อนที่เป็นมุม 50 องศา และป้อนสัญญาณลอคการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ที่ 1 ให้หยุดนิ่งกับที่ ทำการทดลองดังกล่าว 10 วินาที ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 6.3 ผลการทดสอบพบว่าจะได้ผลคล้ายกับการทดลองที่ 6.1.2 แต่จะพบว่าจะเกิดการสั่นที่มากกว่าเนื่องจากมุมในการเคลื่อนที่ที่มากกว่าขึ้นกว่าเดิม ผลกระทบอันเนื่องมาจากการสั่งของก้านต่อโยงนี้ 4 นี้จะลดลงเรื่อยจนหยุดสั่น ถึงแม้ว่าผลการสั่งสะท้อนนี้จะมีค่ามากกว่าเนื่องจากเคลื่อนที่ไกลกว่า แต่ก็เชื่อว่าผลกระทบของการสั่งของก้านต่อโยงนี้อยู่ในวิสัยที่สามารถควบคุมได้ด้วยตัวควบคุมที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

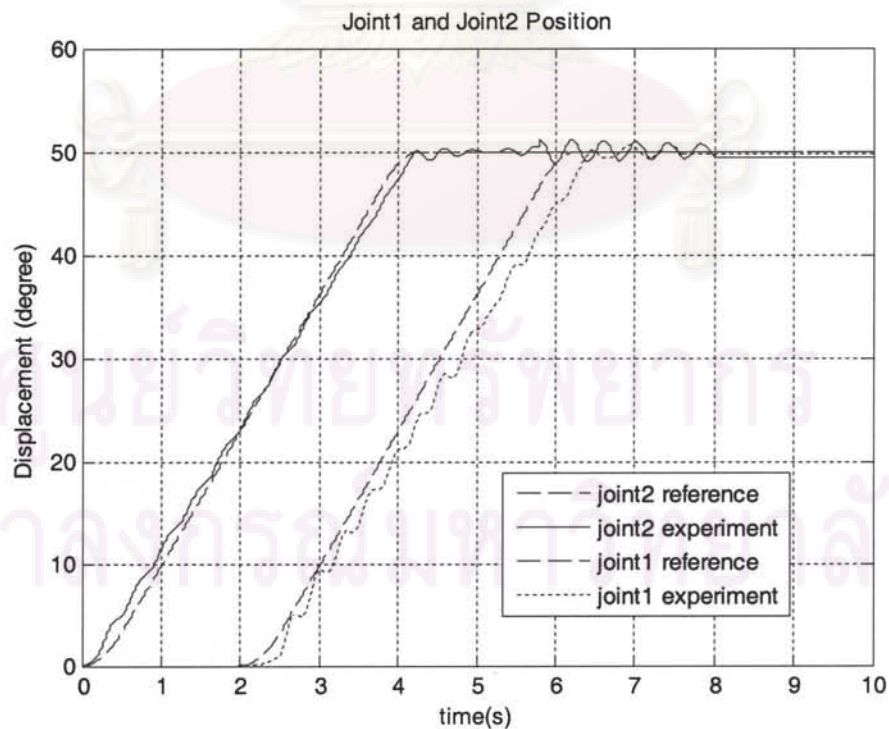
6.1.4 การทดลองที่ 6.1.4 ตามตารางที่ 6.1 โดยควบคุมมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวให้เคลื่อนที่พร้อมกันเพื่อดูผลกระทบอันเนื่องมาจากการสั่งของก้านโยงของแขนหุ่นยนต์แบบยึดหยุ่นที่พัฒนาขึ้นนี้ โดยมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวนี้จะถูกควบคุมให้เคลื่อนที่เป็นมุม 50 องศาเท่ากัน เลือกค่าเกน  $K_p = 100$  และ  $K_d = 4000$  สำหรับมอเตอร์ตัวที่ 2 และ  $K_p = 100$  และ  $K_d = 5000$  สำหรับมอเตอร์ตัวที่ 1 ทำการทดลองดังกล่าวเป็นเวลา 10 วินาที ได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 6.4 ผลการทดสอบพบว่า การควบคุมแบบ PD-control โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสามารถใช้ในการควบคุมมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวได้โดยที่ในการสั่งป้อนสัญญาณของมอเตอร์ที่ 1 จะล่าช้ากว่าการป้อนสัญญาณของมอเตอร์ที่ 2 อยู่ประมาณ 2 วินาที อันเป็นผลเนื่องจาก delay ระหว่างการส่งคำสั่ง



ผ่านข้อต่อสัญญาณ RS-232 ผลกระทบอันเนื่องมาจากการสั่นของก้านต่อโยงของแขนกลจะลดลงเรื่อยจนหยุดสั่น ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการทดลองก่อนหน้านี้ จากผลการทดลองดังกล่าวนี้จึงเชื่อว่า ผลกระทบของการสั่นของก้านต่อโยงนี้อยู่ในวิสัยที่สามารถควบคุมได้ด้วยตัวควบคุมที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น



รูปที่ 6.3 การเคลื่อนที่มุมของมอเตอร์ที่ 2 50 องศา



รูปที่ 6.4 การเคลื่อนที่มุมของมอเตอร์ที่ 1 50 องศา มอเตอร์ที่ 2 50 องศา



## 6.2 การหาค่าความถี่ธรรมชาติของแขนกลจากการทดลอง

จากการทดลองในหัวข้อที่ 6.1 จะพบว่าเมื่อสัญญาณมอเตอร์เริ่มเข้าสู่สถานะอยู่ตัว จะพบว่าการสั่นของสัญญาณมุมของมอเตอร์เกิดขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากการสั่นของก้านต่อโยงที่ 1 และก้านต่อโยงที่ 4 ดังนั้นการสั่นของปลายแขนกลขณะที่มอเตอร์เริ่มหยุดนิ่งสามารถนำมาศึกษาหาค่าความถี่ธรรมชาติของแขนกลจากการทดลอง การควบคุมแขนกลที่มีความหยุนตัวนั้น ส่วนใหญ่จะใช้การจำลองการเคลื่อนที่โดยวิธีการ assumed mode ด้วยวิธีการดังกล่าว จำเป็นจะต้องหาค่า natural frequency เพื่อมาใช้ในการหาค่า mode shape ของการไหวของก้านต่อโยงที่ mode ที่กำลังสนใจจาก mode shape นี้สามารถนำใช้ร่วมกับสัญญาณที่วัดจาก strain gauge ที่ติดตั้งอยู่ที่ก้านต่อโยงเพื่อประเมินหาค่าตำแหน่งของการเปลี่ยนรูปไปจาก rigid mode ได้ แต่ในงานวิจัยนี้ไม่ได้ใช้วิธีการ assumed mode ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ความถี่จึงไม่จำเป็นในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แต่การหาค่าความถี่ก็จะมีประโยชน์ทางอ้อมเช่น ในการออกแบบควบคุมแถบกว้างความถี่ (Bandwidth) มีความสำคัญเช่นกันในการกำหนดความเร็วของระบบตัวควบคุมที่ต้องเร็วพอในการควบคุมการสั่นของก้านต่อโยงได้ และนอกจากนี้ สำหรับงานวิจัยนี้ยังช่วยให้ดูความคงเส้นคงวาของระบบ sensor และตัวควบคุมขั้นต้นด้วย การทดลองหาความถี่ธรรมชาตินี้ทำได้ โดยการสั่งให้มอเตอร์เคลื่อนที่ตามหัวข้อที่ 6.1 ของตารางที่ 6.1 ได้โดยมีขั้นตอนในการทดลองดังนี้

1. สั่งสัญญาณอ้างอิงจากโปรแกรมสำเร็จรูปตามเงื่อนไขของตารางที่ 6.2
2. ทำการรับค่าสัญญาณจากอุปกรณ์วัดมุม และค่าสัญญาณความเร่งที่ติดอยู่ที่ปลายของแขนกลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยอุปกรณ์วัดความเร่งในแนวตามก้านต่อโยงที่ 4 เป็นการวัดความเร่งในแนวแกน X และ อุปกรณ์วัดความเร่งในทิศตั้งฉากกับก้านต่อโยงที่ 4 เป็นการวัดความเร่งในแนวแกน Y ตามรูปที่ 3.2
3. นำค่าสัญญาณความเร่งตามข้อ 2 ในช่วงที่มอเตอร์เริ่มเข้าสู่สถานะอยู่ตัวมาทำการหา FFT (fast fourier transform) ด้วยโปรแกรมโปรแกรมคอมพิวเตอร์
4. นำค่าสัญญาณที่แปลงเป็น FFT มาทำการพิจารณาหาค่าความถี่ธรรมชาติใน frequency response

ตารางที่ 6.2 การทดลองที่ 6.2 การหาค่าความถี่ธรรมชาติของแขนกลจากการทดลอง

การทดลอง	มอเตอร์ 1 (องศา)	มอเตอร์ 2 (องศา)	ความเร็ว (rpm)	น้ำหนัก (kg)
6.2.1	30	0	(2,0)	1.0
6.2.2	0	30	(0,2)	1.0
6.2.3	0	50	(0,2)	1.0
6.2.4	50	50	(1,1)	0.5

6.2.1 การทดลองที่ 6.2.1 เลือกค่าเกณฑ์  $K_p = 100$  และ  $K_d = 4000$  สำหรับการป้อนสัญญาณอ้างอิงของมอเตอร์ที่ 1 ให้เคลื่อนที่เป็นมุม 30 องศา นำค่าของสัญญาณความเร่งที่วัดได้จาก accelerometer ที่ตั้งอยู่ที่ปลายของก้านต่อโยงที่ 4 มาทำการหา FFT (Fast Fourier Transform) และพิจารณาในรูปแบบของ frequency response ผลการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 6.6 และ 6.7 ดังนี้ รูปที่ 6.6 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติของแนวแกน X ของโหมดเซฟที่ 1 อยู่ที่ประมาณ 14 Hz และโหมดเซฟที่ 2 อยู่ที่ประมาณ 28 Hz รูปที่ 6.7 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติของแนวแกน Y ของโหมดเซฟที่ 1 อยู่ที่ประมาณ 14 Hz และโหมดเซฟที่ 2 อยู่ที่ประมาณ 28 Hz แขนหุ่นยนต์แบบยึดหุ่นที่พัฒนาขึ้นนี้ มีก้านต่อโยงที่มีความหยุนตัวอยู่ 2 ก้านต่อคือก้านต่อโยงที่ 1 และก้านต่อโยงที่ 4 และเนื่องจาก accelerometer ที่ใช้วัดความเร่งนั้นติดตั้งอยู่ที่ปลายแขนของก้านต่อโยงที่ 4 ในการทดลองที่ 6.2.1 เคลื่อนที่เฉพาะแกนหมุนของมอเตอร์ตัวที่ 1 ส่วนมอเตอร์ตัวที่ 2 หยุดนิ่ง ดังนั้นก้านต่อโยงที่ 4 จะเป็นตัวเคลื่อนที่ ค่าความถี่ธรรมชาติที่หาได้นั้นจึงเป็นค่าความถี่ธรรมชาติของก้านต่อโยงที่ 4

6.2.2 การทดลองที่ 6.2.2 เลือกค่าเกณฑ์  $K_p = 100$  และ  $K_d = 5000$  สำหรับการป้อนสัญญาณอ้างอิงของมอเตอร์ที่ 2 ให้เคลื่อนที่เป็นมุม 30 องศา นำค่าของสัญญาณความเร่งมาทำการหา FFT และพิจารณาในรูปแบบของ frequency response ผลการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 6.8 และ 6.9 ดังนี้ รูปที่ 6.8 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติของแนวแกน X ของโหมดเซฟที่ 1 อยู่ที่ประมาณ 14 Hz และโหมดเซฟที่ 2 อยู่ที่ประมาณ 28 Hz รูปที่ 6.9 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติของแนวแกน Y ของโหมดเซฟที่ 1 อยู่ที่ประมาณ 14 Hz และโหมดเซฟที่ 2 อยู่ที่ประมาณ 28 Hz ได้ความถี่เท่ากับในการทดลองที่ 6.2.1 ในการทดลองครั้งนี้ ก้านต่อโยงที่ 1 และก้านต่อโยงที่ 4 เคลื่อนที่ทั้งคู่ ซึ่งทั้งคู่ถูกสมมติฐานให้เป็นการต่อโยงที่มีความหยุนตัว ความถี่ธรรมชาติที่หามาได้นี้มีค่าเท่ากับในการทดลองที่ 6.2.1 ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าค่าความถี่ดังกล่าวเป็นของก้านต่อโยงที่ 4 ซึ่งเป็นก้านต่อโยงที่ยาวที่สุด ส่วนค่าความถี่ธรรมชาติของก้านต่อโยงที่ 1 นั้นอาจจะมียค่าสูงกว่านี้ หรืออาจจะมียค่าพลังงานความไหวที่น้อยมาก

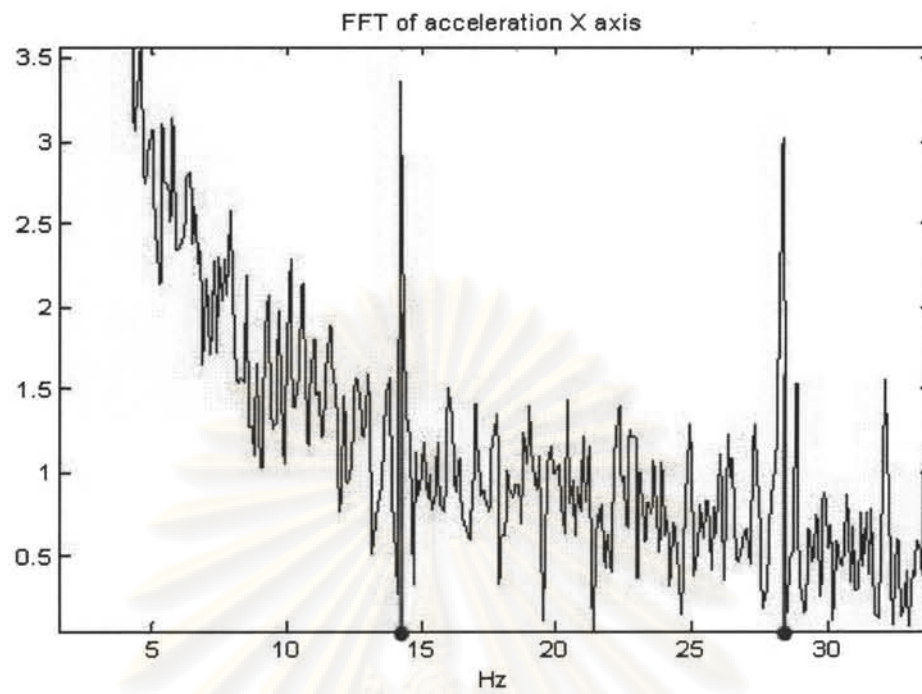
6.2.3 การทดลองที่ 6.2.3 เลือกค่าเกณฑ์  $K_p = 100$  และ  $K_d = 5000$  สำหรับการป้อนสัญญาณอ้างอิงของมอเตอร์ที่ 2 ให้เคลื่อนที่เป็นมุม 50 องศา นำค่าของสัญญาณความเร่งมาทำการหา FFT และพิจารณาในรูปแบบของ frequency response ผลการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 6.10 และ 6.11 ดังนี้ รูปที่ 6.10 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติของแนวแกน X ของโหมดเซฟที่ 1 อยู่ที่ประมาณ 14 Hz และโหมดเซฟที่ 2 อยู่ที่ประมาณ 28 Hz รูปที่ 6.11 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติของแนวแกน Y ของโหมดเซฟที่ 1 อยู่ที่ประมาณ 14 Hz และโหมดเซฟที่ 2 อยู่ที่ประมาณ 28 Hz จากเหตุผลที่กล่าวมาแล้วในการทดลองก่อนหน้านี้ สามารถสรุปได้ว่าความถี่ธรรมชาติดังกล่าวเป็นของก้านต่อโยงที่ 4



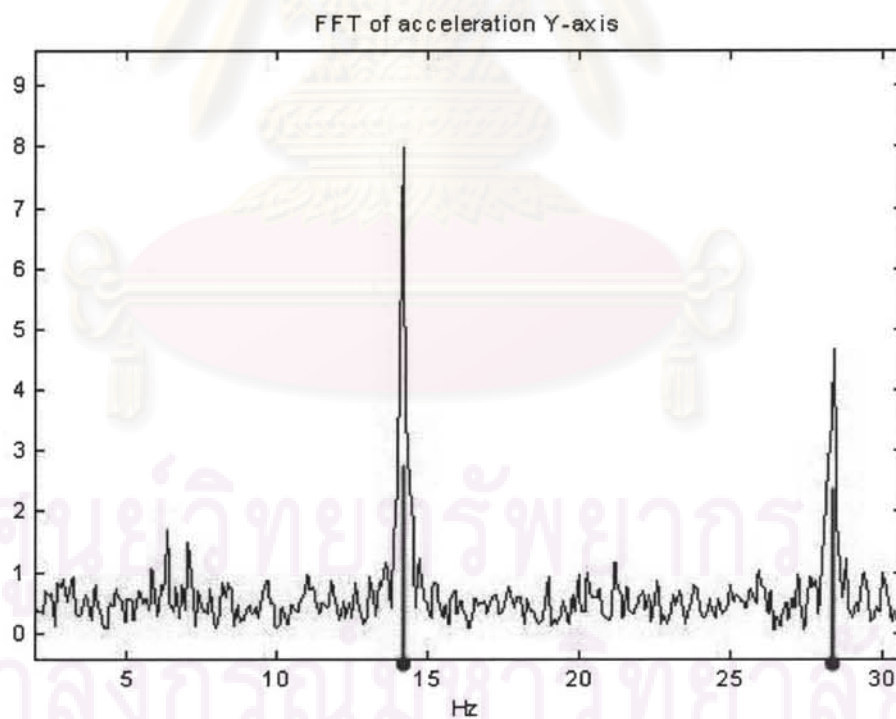
6.2.4 การทดลองที่ 6.2.4 เป็นการควบคุมมอเตอร์ทั้ง 2 ตัวให้เคลื่อนที่พร้อมกันเพื่อ ดูผลกระทบอันเนื่องมาจากการสั้นของก้านโยงของแขนหุ่นยนต์แบบยึดหุ่นที่พัฒนาขึ้นนี้ โดย มอเตอร์ทั้ง 2 ตัวนี้จะถูกควบคุมให้เคลื่อนที่เป็นมุม 50 องศาเท่ากัน เลือกค่าเกน  $K_p = 100$  และ  $K_d = 4000$  สำหรับมอเตอร์ตัวที่ 2 และ เลือกค่าเกน  $K_p = 100$  และ  $K_d = 5000$  สำหรับมอเตอร์ ตัวที่ 1 นำค่าของสัญญาณความเร่งมาทำการหา FFT และพิจารณาในรูปแบบของ frequency response ผลการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 6.12 และ 6.13 ดังนี้ รูปที่ 6.12 แสดงค่าความถี่ ธรรมชาติของแนวแกน X ของโหมดเซฟที่ 1 อยู่ที่ประมาณ 14 Hz และโหมดเซฟที่ 2 อยู่ที่ ประมาณ 28 Hz รูปที่ 6.13 แสดงค่าความถี่ธรรมชาติของแนวแกน Y ของโหมดเซฟที่ 1 อยู่ที่ ประมาณ 14 Hz และโหมดเซฟที่ 2 อยู่ที่ประมาณ 28 Hz จากผลของการทดลองนี้ ทำให้แน่ใจ มากยิ่งขึ้นว่าค่าความถี่ธรรมชาติ 2 mode แรกของก้านต่อโยงที่ 4 มีค่าเท่ากับ 14 Hz และ 28 Hz ส่วนของก้านต่อโยงที่ 1 นั้นจะสูงกว่าค่าความถี่ที่หาได้ดังกล่าวนี

ผลการทดสอบการทดลองที่ 6.2 สรุปได้ว่าการเคลื่อนที่มอเตอร์ในหลายๆการ เคลื่อนที่เพื่อตรวจสอบดูค่าความสม่ำเสมอของความถี่ธรรมชาติของแขนกลแบบยึดหุ่นว่ามีค่า ไกลเคียงกันอย่างไร โดยสรุปได้ว่าแขนกลแบบยึดหุ่นชุดนี้สามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติได้ 2 ความถี่อยู่ที่ประมาณ 14 Hz และ 28 Hz และจากผลของการทดลอง ทำให้มั่นใจว่าค่าความถี่ ธรรมชาติ 2 mode แรกของก้านต่อโยงที่ 4 นั้นมีค่าเท่ากับ 14 Hz และ 28 Hz ส่วนของก้านต่อ โยงที่ 1 นั้นจะสูงกว่าค่าความถี่ที่หาได้ดังกล่าวนี

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

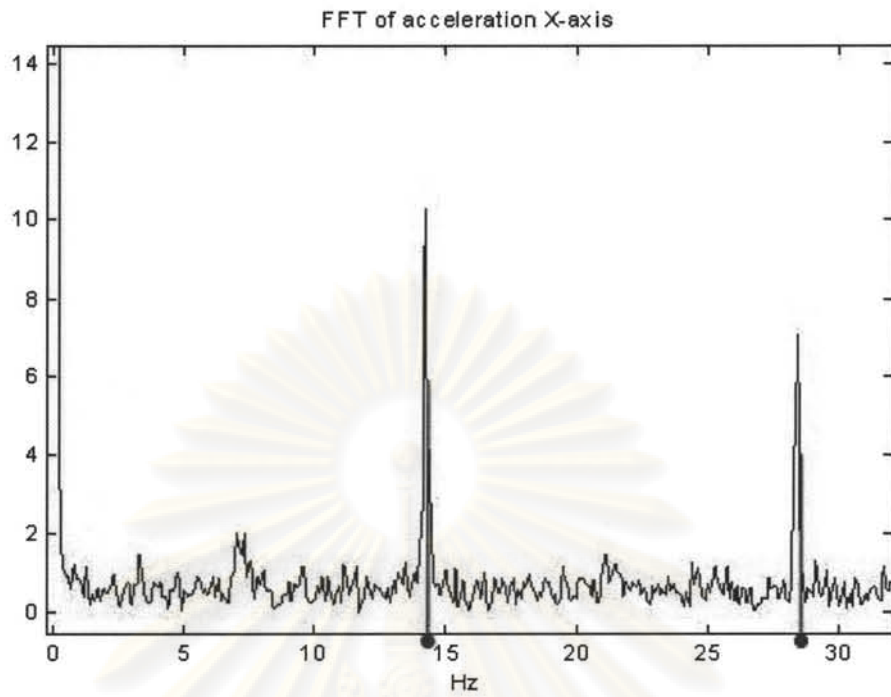


รูปที่ 6.5 โหมดเซฟของความเร่งในแนวแกน X ของปลายแขนตามการทดลองที่ 6.2.1

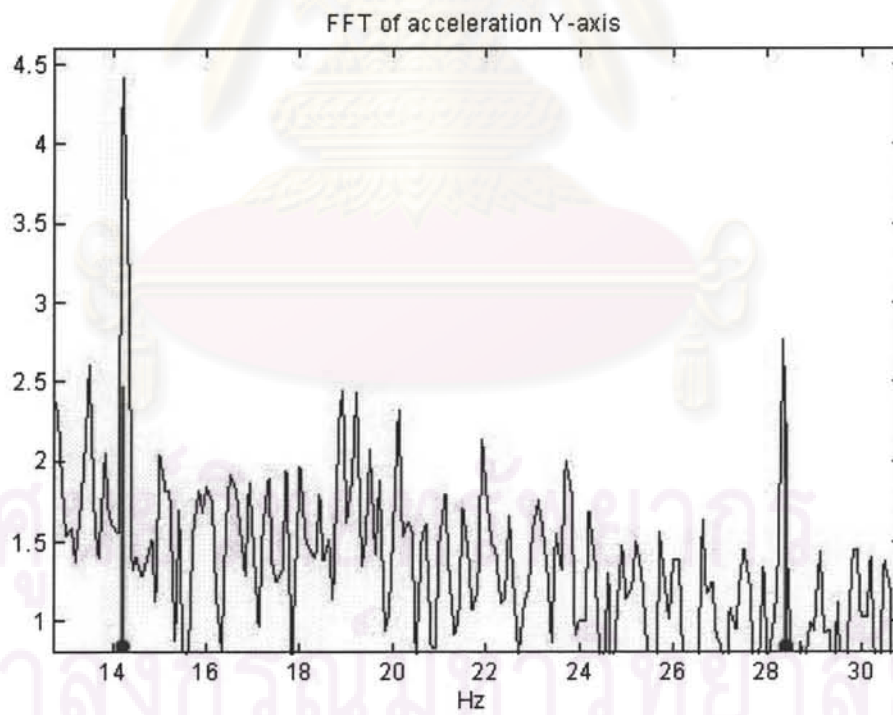


รูปที่ 6.6 โหมดเซฟของความเร่งในแนวแกน Y ของปลายแขนตามการทดลองที่ 6.2.1

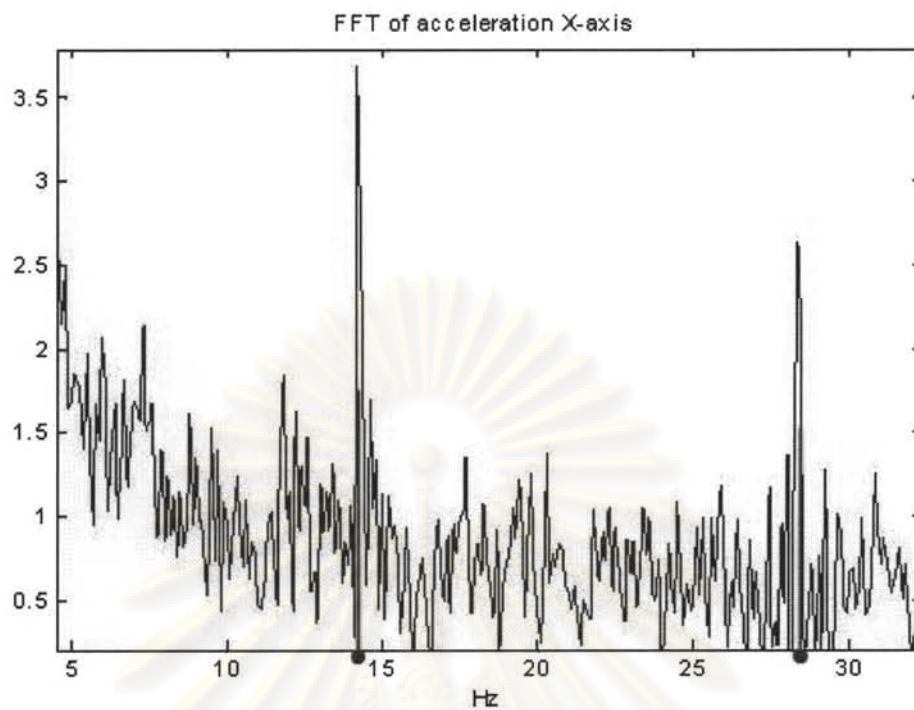




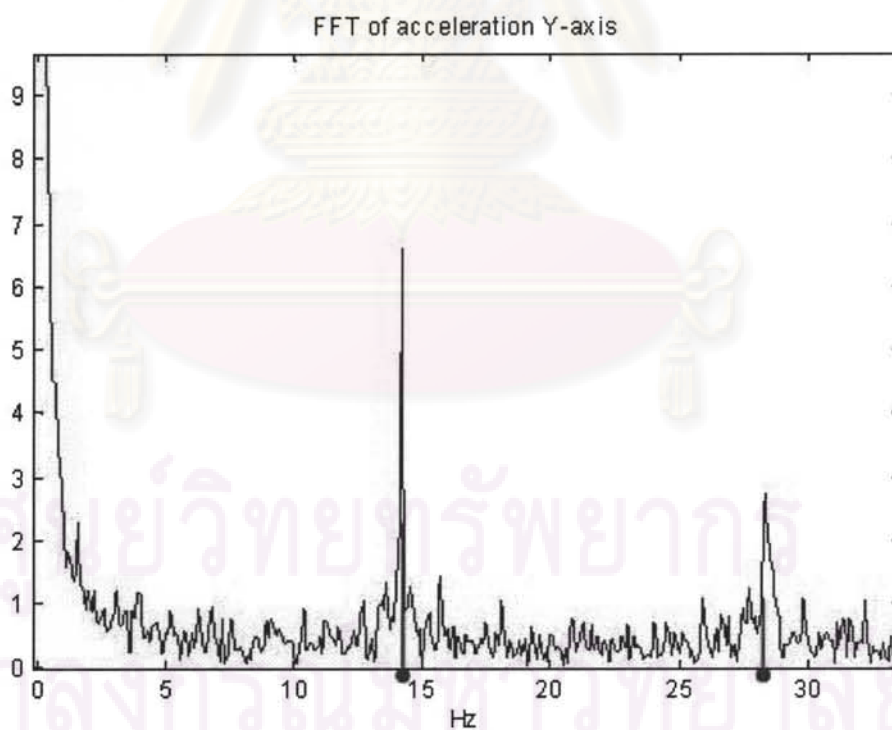
รูปที่ 6.7 โหมดเซฟของความเร่งในแนวแกน X ของปลายแขนตามการทดลองที่ 6.2.2



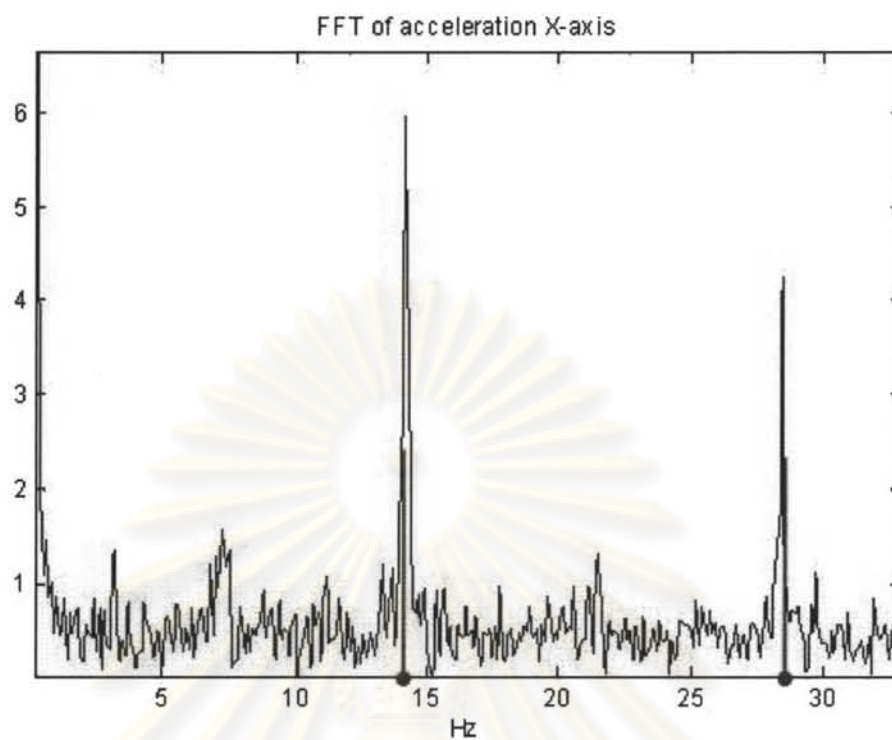
รูปที่ 6.8 โหมดเซฟของความเร่งในแนวแกน Y ของปลายแขนตามการทดลองที่ 6.2.2



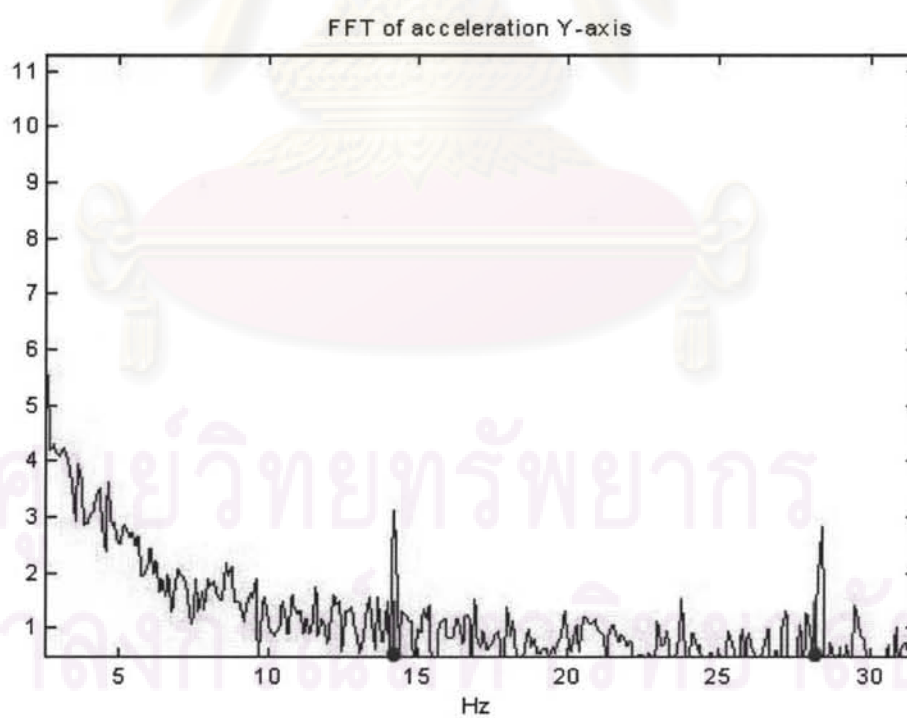
รูปที่ 6.9 โหมดเซฟของความเร่งในแนวแกน X ของปลายแขนตามการทดลองที่ 6.2.3



รูปที่ 6.10 โหมดเซฟของความเร่งในแนวแกน Y ของปลายแขนตามการทดลองที่ 6.2.3



รูปที่ 6.11 โหมดเซฟของความเร่งในแนวแกน X ของปลายแขนตามการทดลองที่ 6.2.4

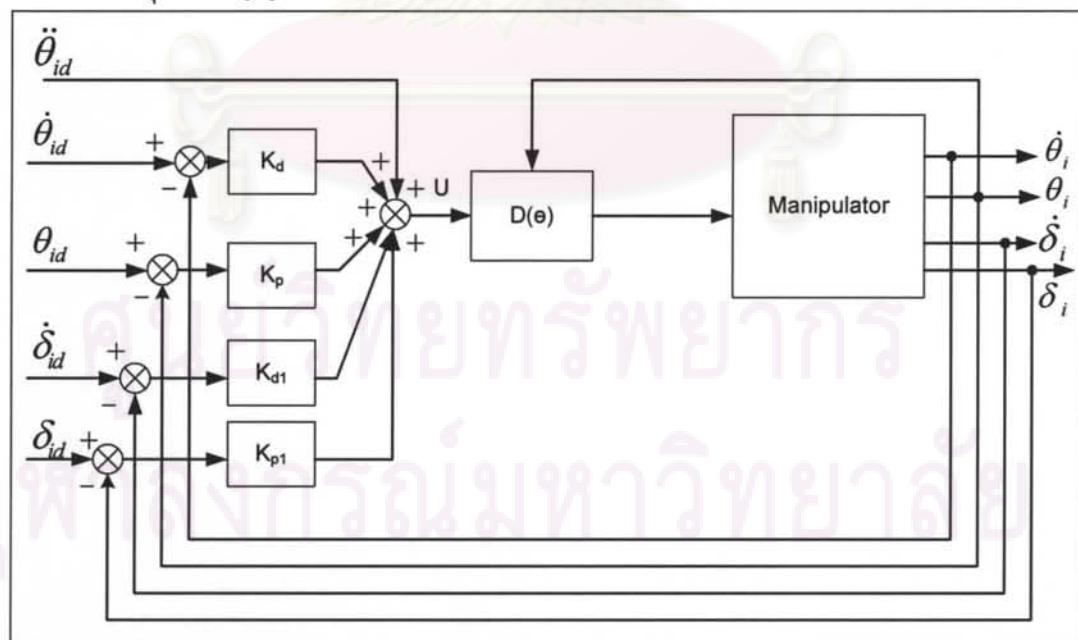


รูปที่ 6.12 โหมดเซฟของความเร่งในแนวแกน Y ของปลายแขนตามการทดลองที่ 6.2.4

### 6.3 การทดสอบสมการทางพลศาสตร์ของแขนกล

ในการทดลองที่ 6.3 นี้เป็นการทดลองเพื่อสำหรับตรวจสอบความถูกต้องของสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หามาได้จากบทที่ 4 ความถูกต้องที่กล่าวถึงนี้เพียงพอกับการสามารถนำมาใช้เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้สำหรับการออกแบบระบบควบคุมของแขนกลแบบหยึดหยุ่นโดยใช้ accelerometer เป็นอุปกรณ์ตรวจรู้ (sensor) ที่ติดตั้งไว้ที่ปลายก้านต่อโยงที่ 4 สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หาได้จะอยู่ในรูปของสมการปริภูมิสถานะ การทดลองนี้จะเป็นการนำสมการปริภูมิสถานะ (4.33) และสมการ (4.34) ถึงสมการ (4.36) มาทำการ simulation ในคอมพิวเตอร์เพื่อทดสอบแบบจำลองทางพลศาสตร์ที่หามาได้จากสมมติฐานในหัวข้อที่ 4.6 ว่ามีความถูกต้องในระดับหนึ่งโดยการใช้ระบบควบคุมแบบ PD-control ในการควบคุมตำแหน่งข้อต่อหรือแกนหมุนของมอเตอร์ และตำแหน่งของปลายแขนกลตามรูปที่ 6.14 โดยที่สมมติว่าสามารถวัดค่าของตัวแปรได้ทุกตัวแปรสแตต (state variable) โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. นำสมการปริภูมิสถานะ (4.33) มาเขียนในโปรแกรมแกรมคอมพิวเตอร์
2. ใส่สัญญาณอ้างอิงของตัวแปรสแตต  $x = [\theta_1 \ \theta_2 \ \delta_{1y} \ \delta_{2y} \ \dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\delta}_{1y} \ \dot{\delta}_{2y}]^T$
3. เลือกค่าเกน  $K_p$   $K_d$   $K_{p1}$  และ  $K_{d1}$  และนำไป implement ตาม block diagram รูปที่ 6.14 สำหรับระบบควบคุมตัวแปรสแตตชุดที่  $i$ , ( $i=1,2$ ) ตามลำดับ
4. ทำการ plot กราฟเปรียบเทียบค่าสัญญาณของสแตตระหว่างสัญญาณอ้างอิงของระบบควบคุมกับสัญญาณที่ได้จากการ simulation ด้วยคอมพิวเตอร์



รูปที่ 6.13 Block Diagram สำหรับการทดสอบสมการทางพลศาสตร์



โดยผลการทดลองมีดังนี้

รูปที่ 6.13 เป็นรูปแผนภูมิบล็อกแสดงระบบควบคุม โดยมีสัญญาณอ้างอิงคือ  $\theta_{id}$ ,  $\dot{\theta}_{id}$ ,  $\ddot{\theta}_{id}$ ,  $\delta_{id}$ , และ  $\dot{\delta}_{id}$  ที่ต้องการระบบที่ต้องการควบคุมติดตามสัญญาณอ้างอิงนี้ การออกแบบค่าเกนในระบบควบคุมนี้มีลักษณะคล้ายกับการควบคุมแบบ state variable feedback โดยต้องการ regulate ค่าความผิดพลาดจากสัญญาณอ้างอิงนี้ให้มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่สถานะอยู่ตัว การเลือกค่าเกนของตัวควบคุมทำได้โดยเราจะให้น้ำหนักที่ตัวควบคุมตำแหน่งของแกนหมุนมอเตอร์มากที่สุด ค่าเกนดังกล่าวจึงมีค่าค่อนข้างสูงและเราจะใช้ค่าเกนที่เคยใช้ในตัวควบคุมที่ดีในการทดลองก่อนหน้านี้มาใช้เป็นหลัก ส่วนค่าเกนสำหรับตัวแปรอื่นนั้นสามารถหาได้โดยวิธีการคาดเดาได้ เนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่ได้ทำการหาตัวควบคุมที่ดีที่สุด แต่เพียงต้องการทดสอบระบบพลศาสตร์ที่ประมาณได้ว่าเป็นไปได้หรือไม่ได้ในการนำมาใช้เป็นแบบจำลองสำหรับการออกแบบตัวควบคุมขั้นสูงต่อไป จึงใช้ตัวควบคุมที่พอใช้ได้เท่านั้นมาทดสอบ

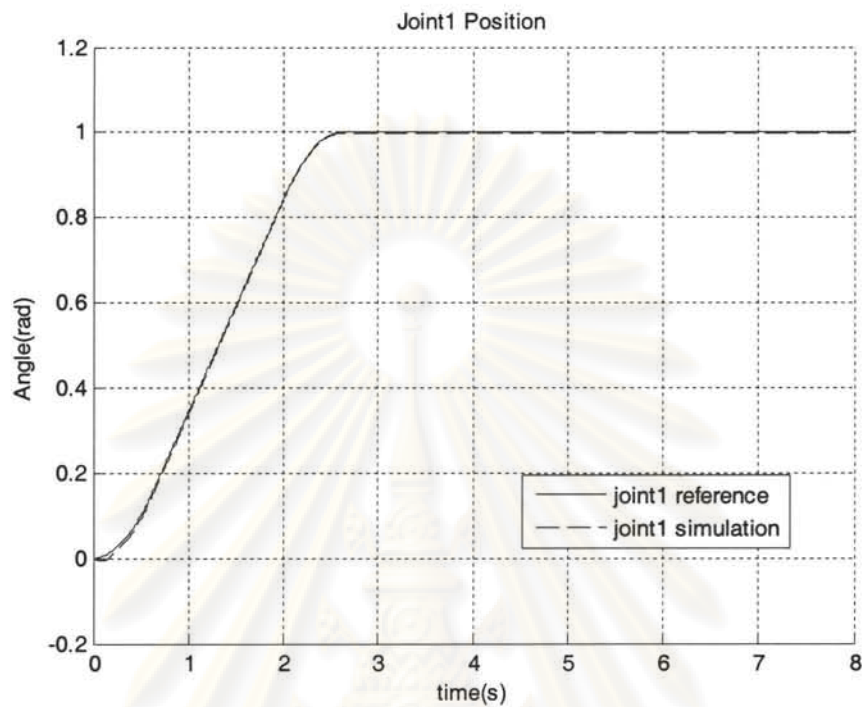
จากรูปที่ 6.14 แสดงผลของการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงที่ใส่ให้ระบบกับสัญญาณการขับเคลื่อนตัวที่ 1 ที่ได้จากการ simulation โดยเลือกค่าเกน  $K_p = 5750$  และค่าเกน  $K_d = 200$  จากการทำการจำลองการทำงานสามารถหาค่าความผิดพลาดระหว่างทั้ง 2 สัญญาณได้ดังแสดงในรูปที่ 6.15 ซึ่งจะเห็นว่าค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวหรือค่า steady state error มีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.0025 องศา ซึ่งเป็นค่าที่ไม่สูงมาก และทำให้มั่นใจในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในระดับหนึ่ง

จากรูปที่ 6.16 แสดงผลของการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงที่ใส่ให้ระบบกับสัญญาณการขับเคลื่อนตัวที่ 2 ที่ได้จากการ simulation โดยเลือกค่าเกน  $K_p = 800$  และค่าเกน  $K_d = 2$  จากการทำการจำลองเราสามารถหาค่าความผิดพลาดระหว่างทั้ง 2 สัญญาณได้ดังแสดงในรูปที่ 6.17 ซึ่งจะเห็นว่าค่าความผิดพลาดที่สถานะอยู่ตัวหรือค่า steady state error มีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.0018 องศา

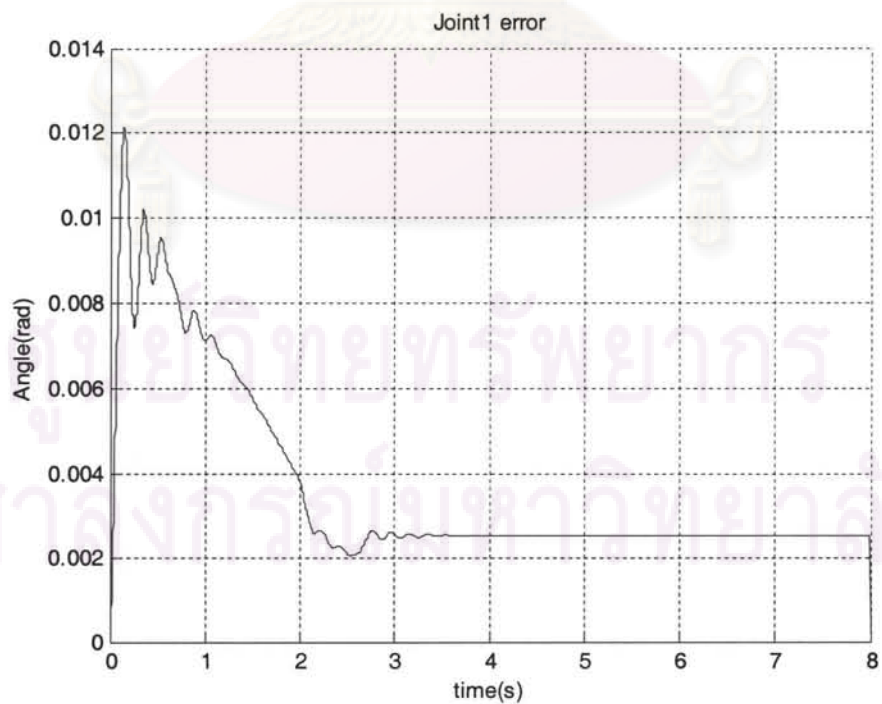
ในทำนองเดียวกัน จากรูปที่ 6.18 แสดงค่าสัญญาณ  $\delta_{1y}$  (displacement deformation) จากการเลือกค่าเกน  $K_{p1} = 0.1$  และค่าเกน  $K_{d1} = 10$  โดยมีค่าสัญญาณของความผิดพลาดที่หาได้จากการทำการจำลองดังรูปที่ 6.19 และจะพบค่าสัญญาณความผิดพลาดของ  $\delta_{1y}$  จะเข้าสู่ค่าศูนย์ที่ประมาณ 3.5 วินาที

และจากรูปที่ 6.20 แสดงค่าสัญญาณ  $\delta_{2y}$  (displacement deformation) จากการเลือกค่าเกน  $K_{p1} = 1$  และค่าเกน  $K_{d1} = 0$  โดยมีค่าสัญญาณของความผิดพลาดดังรูปที่ 6.21 พบว่าค่าสัญญาณความผิดพลาดของ  $\delta_{2y}$  จะเข้าสู่ค่าศูนย์ที่ประมาณ 4 วินาทีและจะมีการสั่นมากกว่าก้านต่อโยงที่ 1 เนื่องจากการต่อโยงที่ 4 มีขนาดที่ยาวกว่า และจากที่สรุปในการทดลองในหัวข้อที่แล้ว เราได้สรุปว่าความสั่นไหวเกิดจากก้านข้อต่อที่ 4 มากกว่าก้านข้อต่อที่ 1 ซึ่งในการจำลองการทำงานนี้ก็ได้อผลเช่นเดียวกันกับการทดลองจริงที่ใช้หาค่าความถี่ธรรมชาติของแขนหุ่นยนต์แบบยืดหยุ่นนี้

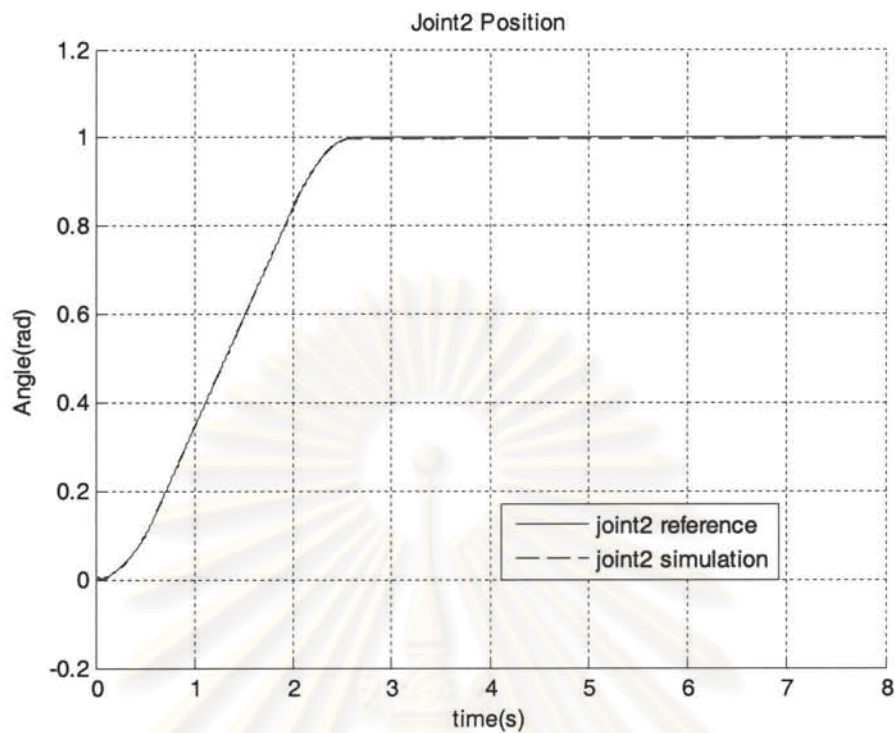
ดังนั้น จากผลการทดลองที่กล่าวมาข้างต้น พอจะสรุปได้ว่าสมการพลศาสตร์ที่เป็นสมการลดรูปที่หาได้จากบทที่ 4 มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมขั้นสูงต่อไป



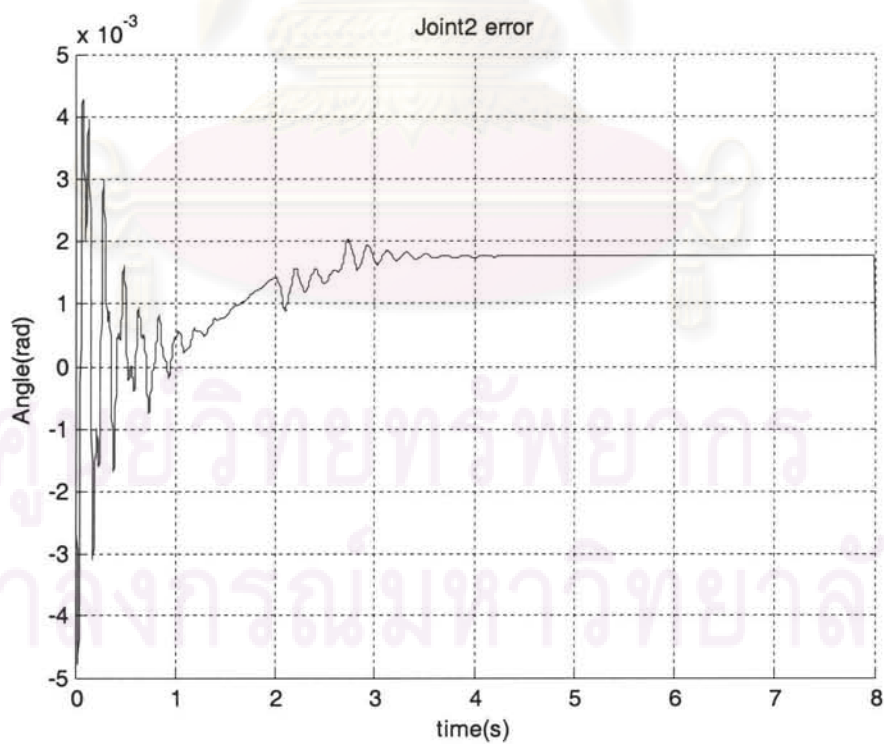
รูปที่ 6.14 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ที่ 1 ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณที่ได้จากการ simulation



รูปที่ 6.15 ค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่มอเตอร์ที่ 1

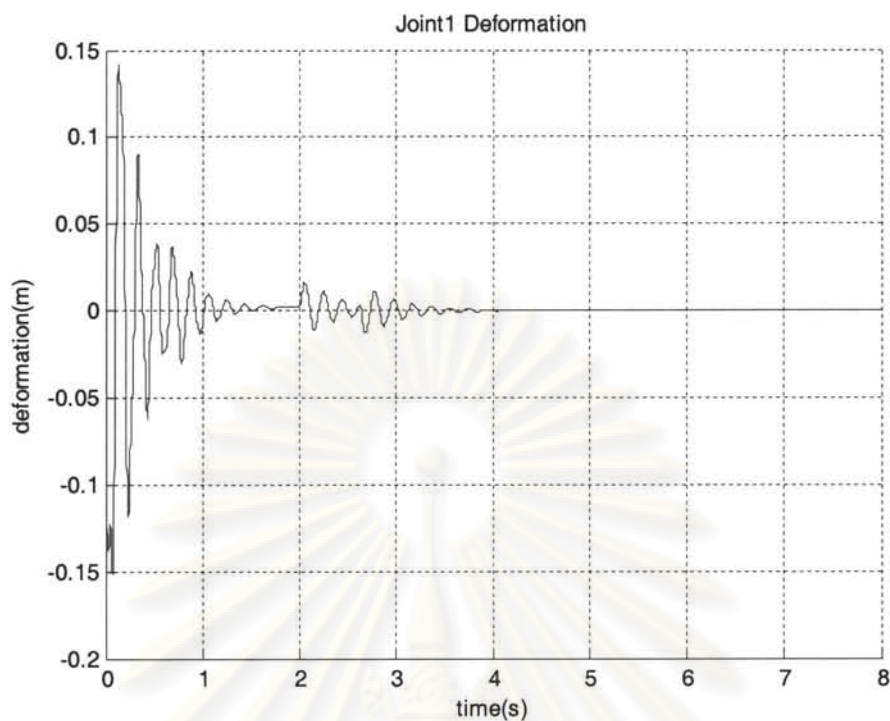


รูปที่ 6.16 เปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ที่ 2 ระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณที่ได้จากการ simulation

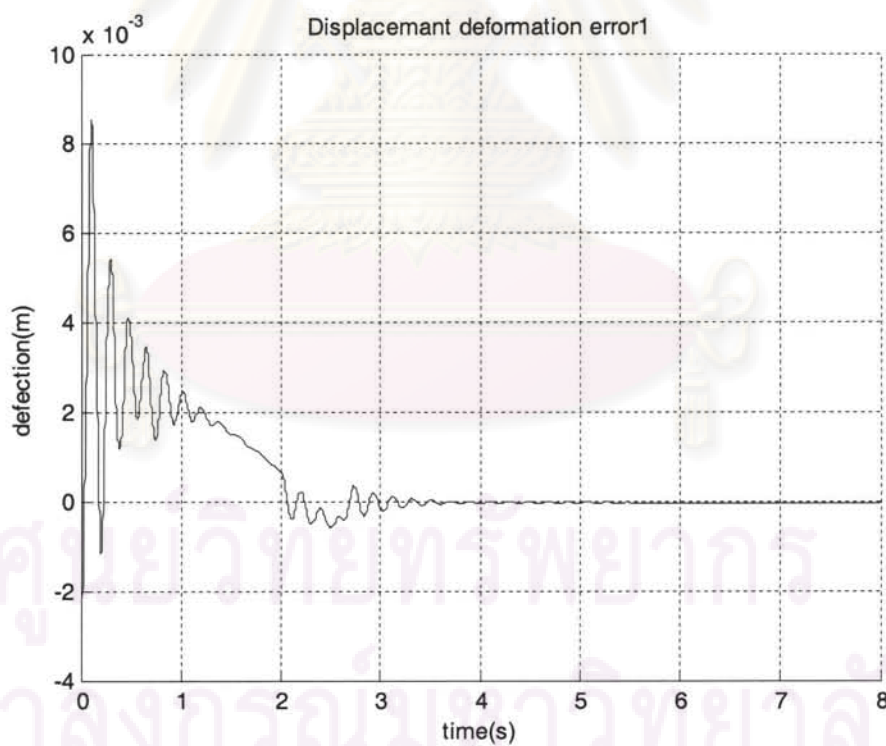


รูปที่ 6.17 ค่าความผิดพลาดของการเคลื่อนที่มอเตอร์ที่ 2



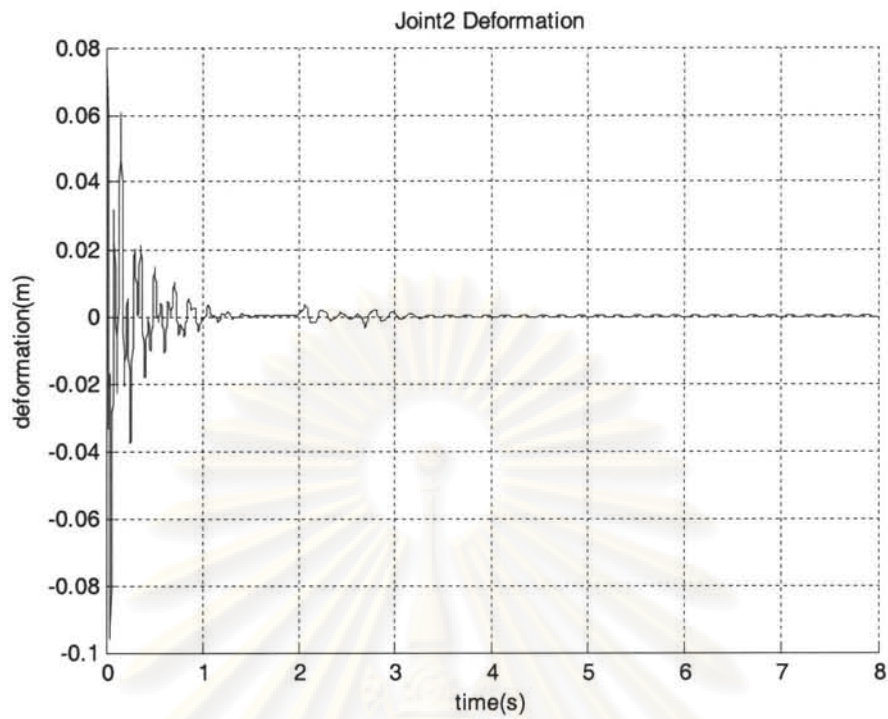


รูปที่ 6.18 ค่า displacement deformation ของก้านต่อโยงที่ 1 ถูกขับโดยมอเตอร์ที่ 1

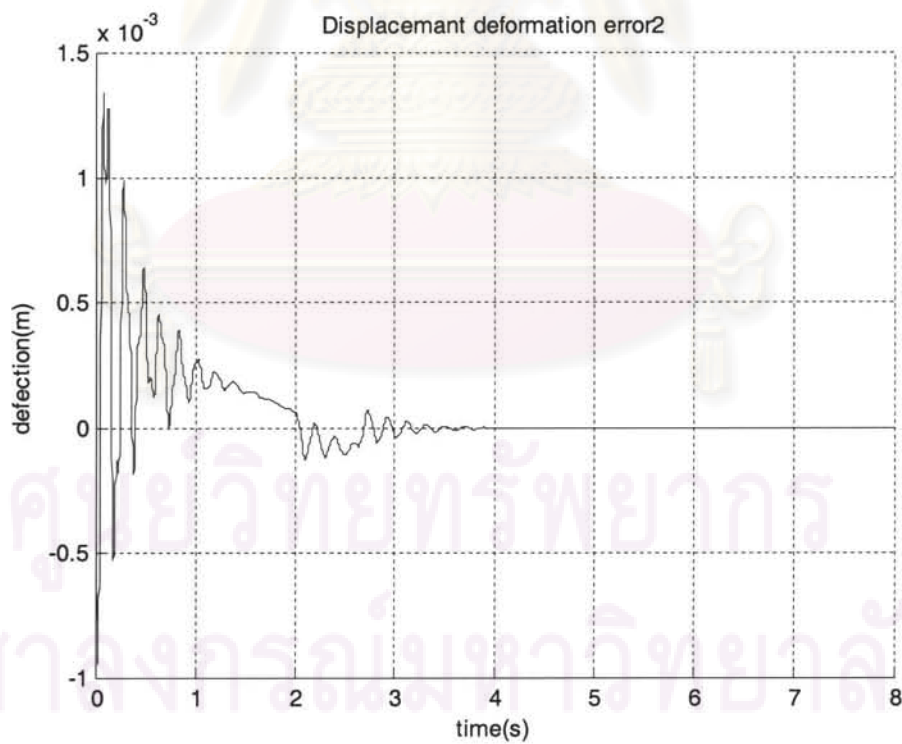


รูปที่ 6.19 ค่าความผิดพลาด displacement deformation ของก้านต่อโยงที่ 1 ถูกขับโดยมอเตอร์ที่ 1





รูปที่ 6.20 ค่า displacement deformation ของก้านต่อโยงที่ 4 ถูกขับโดยมอเตอร์ที่ 2



รูปที่ 6.21 ค่าความผิดพลาด displacement deformation ของก้านต่อโยงที่ 4 ถูกขับโดยมอเตอร์ที่ 2

## บทที่ 7

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 7.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างแขนกลแบบยึดหยุ่นที่มีการเคลื่อนที่ใน 2 ทิศทาง ในระบบแนวตั้ง เพื่อให้สามารถใช้งานระยะเอื้อมไกล แขนกลดังกล่าวจะมีความยืดหยุ่น 2 ก้านต่อโยงคือก้านต่อโยงที่ 1 และก้านต่อโยงที่ 4 โดยที่ก้านต่อโยงที่ 4 จะเป็นก้านต่อโยงที่ยาวที่สุด แขนกลที่สร้างขึ้นมีโครงสร้างในการขับเคลื่อนเป็นกลไกแบบ five bar-linkage และมีมอเตอร์แบบขับเคลื่อน 2 ตัวจะติดตั้งอยู่ที่ฐานของแขนกล มอเตอร์ขับเคลื่อนตัวที่ 1 จะขับเคลื่อนก้านต่อโยงที่ 4 โดยขับเคลื่อนผ่านก้านต่อโยงที่ 3 และมอเตอร์ขับเคลื่อนตัวที่ 2 จะขับเคลื่อนก้านต่อโยงที่ 4 โดยขับเคลื่อนผ่านก้านต่อโยงที่ 1 ในงานวิจัยนี้จะหาสมการทางพลศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบยึดหยุ่นนี้เพื่อสำหรับการออกแบบระบบควบคุมขั้นสูงต่อไป โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้จะใช้ระบบแกนพิกัดที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่ง (accelerometer) ที่ปลายแขนของก้านต่อโยงที่ 4 สมการพลศาสตร์ที่ได้นั้นสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการปริภูมิสถานะ (State variable description) มีการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องหรือความเหมาะสมของสมการพลศาสตร์ที่หามาได้ เพื่อใช้สำหรับการออกแบบระบบควบคุมขั้นสูงแบบอื่นต่อไป จากผลของการทดลองสามารถสรุปผลได้ ดังนี้

- การทดลองตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมอเตอร์โดยโปรแกรมสำเร็จรูปที่มาพร้อมกับมอเตอร์ขับเคลื่อน เป็นการทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์แบบยึดหยุ่นที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ สำหรับงานวิจัยนี้การทดลองดังกล่าวก็เพื่อต้องการดูผลกระทบของการสั่นสะเทือนที่ส่งผลกระทบต่อแขนกลขณะที่มีการเคลื่อนที่จะมีลักษณะเป็นไปตามเงื่อนไขของสมมติฐานหรือไม่ เนื่องจากในการควบคุมตำแหน่งของการหมุนมอเตอร์ของแขนกลแบบยึดหยุ่นโดยใช้ตัวควบคุมเฉพาะที่แกนหมุนของมอเตอร์แบบขับเคลื่อน โดยตัวควบคุมดังกล่าวไม่ได้ครอบคลุมผลกระทบอันเนื่องมาจากการสั่นของก้านต่อโยง ทำให้ตำแหน่งของข้อต่อที่ควบคุมอยู่นั้นมีความแม่นยำน้อยลงซึ่งเป็นผลกระทบจากก้านต่อโยงมีการสั่นและส่งแรงมายังแกนมอเตอร์ขับเคลื่อน โดยที่การเคลื่อนที่ที่ปลายแขนกลจะทำให้มีการสั่นของก้านต่อโยง แรงสั่นของก้านต่อโยงนี้จะมีผลต่อความแม่นยำของการควบคุมการเคลื่อนที่ของข้อต่อ โดยเฉพาะเมื่อมอเตอร์ที่ใช้เป็นมอเตอร์แบบขับเคลื่อน ผลกระทบนี้จะเห็นชัดขึ้น ในการทดลองเลือกการควบคุมตำแหน่งโดยใช้การควบคุมแบบ PD-control เพื่อควบคุมตำแหน่งการหมุนเบื้องต้น ผลการทดสอบพบว่า การควบคุมแบบ PD-control โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสามารถใช้ในการควบคุมมอเตอร์ทั้ง 2 ตัว

ได้ โดยผลกระทบอันเนื่องมาจากการสั่นของก้านต่อโยงของแขนกลจะลดลงเรื่อยๆจนหยุดสั่น ดังนั้นผลกระทบของการสั่นของก้านต่อโยงนี้อยู่ในวิสัยที่สามารถควบคุมได้ด้วยตัวควบคุมที่สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

- การทดลองหาค่าความถี่ธรรมชาติจากการทดลองเป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของค่าความถี่ธรรมชาติของแขนกล จากการทดลองในข้อแรกจะพบการสั่นของสัญญาณมุมของมอเตอร์ที่เกิดขึ้นเป็นผลเนื่องมาจากการสั่นของก้านต่อโยงที่ 1 และก้านต่อโยงที่ 4 ดังนั้นการสั่นของปลายแขนกลขณะที่มอเตอร์เริ่มหยุดนิ่งสามารถนำมาศึกษาหาค่าความถี่ธรรมชาติของแขนกลจากการทดลอง โดยให้มอเตอร์ทั้ง 2 เคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งต่างๆ นำค่าสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดความเร่งที่ปลายแขนขณะที่มอเตอร์เริ่มหยุดนิ่งมาทำการพิจารณาหาค่าความถี่ธรรมชาติของก้านต่อโยงที่ 1 และก้านต่อโยงที่ 4 ในรูปแบบของ frequency response ทั้งในแนวแกน X และ Y โดยจากผลของการทดลองพบว่าในการเคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งต่างๆสรุปได้ว่าแขนกลแบบยืดหยุ่นชนิดนี้สามารถหาค่าความถี่ธรรมชาติได้ 2 ความถี่อยู่ที่ประมาณ 14 Hz และ 28 Hz และเป็นค่าความถี่ธรรมชาติ 2 mode แรกของก้านต่อโยงที่ 4 ส่วนของก้านต่อโยงที่ 1 จะสูงกว่าค่าความถี่ที่หาได้ดังกล่าวนี้ ดังนั้นอาจจะสรุปได้ว่าในช่วงความถี่ที่ครอบคลุมก้านต่อโยงของแขนหุ่นยนต์แบบยืดหยุ่นนี้จะมีเฉพาะก้านต่อโยงที่ 4 เท่านั้นที่มีการสั่น
- การทดสอบสมการพลศาสตร์ด้วยการ simulation เป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่หามาได้จากบทที่ 4 โดยการนำสมการปริภูมิสแตต จากบทที่ 4 มาทำการ simulation ในคอมพิวเตอร์ และมีเงื่อนไขว่าสามารถวัดค่าตัวแปรได้ทุกตัวแปรสแตต เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางพลศาสตร์ที่หามาได้จากสมมติฐานโดยการใช้ระบบควบคุมแบบ PD-control ในการควบคุมตำแหน่งข้อต่อหรือแกนหมุนของมอเตอร์และตำแหน่งของปลายแขนกล จากผลการทดลองพบว่าก้านต่อโยงที่ 4 จะมีการสั่นมากกว่าก้านต่อโยงที่ 1 เนื่องจากขนาดที่ยาวกว่า และพบว่าระบบควบคุมแบบ PD-control ที่เลือกใช้ในการควบคุมสามารถควบคุมตำแหน่งของปลายแขนกลได้ โดยค่าสัญญาณความผิดพลาดของ  $\delta_{1,y}$  และ  $\delta_{2,y}$  จะเข้าสู่ค่าศูนย์ จึงสรุปได้ว่าสมการพลศาสตร์ที่เป็นสมการลดรูปที่หาได้จากบทที่ 4 มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมขั้นสูงต่อไป



## 7.2 ข้อเสนอแนะ

ในการทดลองแขนกลแบบยืดหยุ่นจะพบปัญหาที่ต้องทำการแก้ไขดังนี้

- จากการทดลองจะพบว่าในระหว่างที่มอเตอร์มีการเคลื่อนที่จะพบแรงเสียดทานเกิดขึ้นที่ข้อต่อระหว่างก้านต่อโยงต่างๆ ดังนั้นควรทำการศึกษา และออกแบบเพื่อปรับปรุงข้อต่อของก้านต่อโยงเพื่อลดผลกระทบของแรงเสียดทาน รวมถึงออกแบบแก้ไขอุปกรณ์การตั้งตำแหน่งเริ่มต้นของแขนกลเพื่อให้มุมในการเคลื่อนที่มีความถูกต้องสำหรับสมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ (Forward Kinematics) มากยิ่งขึ้น
- ควรทำการหาวิธีการสอบเทียบค่า (calibration) ของอุปกรณ์ขยายสัญญาณวัดความเร่ง รวมไปถึงอุปกรณ์ตรวจรู้ความเร่งด้วย
- ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมแบบ real time ที่ช่วยในการควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ และรับค่าสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจรู้ความเร่งเพื่อลดปัญหาที่เกิดจาก time delay
- ในการวัดค่าของสเตตต่างๆในการทดลองไม่สามารถวัดค่าได้หมด ดังนั้นในการควบคุมแขนกลแบบยืดหยุ่นอาจจะต้องมีการใช้ estimator เป็นตัวประมาณค่าสัญญาณที่ไม่สามารถวัดได้จริง และระบบควบคุมที่เหมาะสมควรจะเป็น optimal regulator จะมีความเหมาะสมกว่าระบบควบคุมแบบอื่นๆ
- จากการทดสอบหาความถี่ธรรมชาติของแขนกลแบบยืดหยุ่นที่พัฒนาขึ้นนี้ ก้านต่อโยงที่ 1 ไหวน้อยและไม่มีผลกระทบกับระบบในช่วงความถี่ที่สนใจ ดังนั้น สำหรับแขนหุ่นยนต์ดังกล่าวนี้ อาจจะกล่าวได้ว่ามีเฉพาะก้านต่อโยงที่ 4 เท่านั้นที่สั้น และสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในรูปปริภูมิสเตตที่หามาได้นี้ลำดับจะลดลงไปอีก เนื่องจากไม่ต้องพิจารณา  $\delta y_1$  และ  $\delta \dot{y}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- [1] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, การควบคุมระบบพลศาสตร์, พิมพ์ครั้งที่ 2, สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545
- [2] เดช พุทธเจริญทอง, การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์ Bangkok software Technology House, 2541
- [3] นายจิรพงศ์ วชิรธนาภรณ์, การหาค่าพารามิเตอร์ของแขนกลความเร็วสูงแบบออนไลน์, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544
- [4] นายพลั้งรัฐ ธนการพาณิชย์, การออกแบบแขนกลที่ทำงานด้วยความเร็วสูง, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542

### ภาษาอังกฤษ

- [5] Wayne Book ,Practical Models for Practical Flexible Arms, Georgia Institute of Techonology
- [6] Tsuneo Yoshikawa, Hiroki Murakami, Koh Hosoda, Modeling and control of a three degree of freedom manipulator with two flexible links , Division of applied systems science, Faculty of engineering, Kyoto University
- [7] J.A. Somolinos, V. Feliu, L. Sanchez, Design, dynamic modeling and experimental validation of a new three-degree-of-freedom flexible arm , Dept. of integrated electrical, electronic and automation, UCLM, Campus University, Spain
- [8] Lorenzo Sciavicco and Bruno Siciliano, 1996, Modeling and Control of Robot Manipulators, Int.Edition

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### อุปกรณ์ของแขนกลแบบยึดหย่อน

#### มอเตอร์แบบขับตรง (Direct Drive motor)

เป็นมอเตอร์กระแสตรง 1 เฟส 220 V ความเร็วรอบ 500 rpm สามารถจ่ายทอร์กได้สูงสุด 305 N-m ยี่ห้อ Kollmorgen รุ่น DDR D063M เป็นชนิดไม่มีเฟืองทดเป็นการขับตรงและมีอุปกรณ์วัดมุมที่เป็นแบบ Incremental Rotary Encoder อยู่ในตัว และมีความละเอียดเท่ากับ 2,097,152 พัลส์ต่อรอบอยู่ในตัวของมอเตอร์



รูปที่ ก.1 มอเตอร์แบบขับตรงที่แกนมอเตอร์ที่ 1

#### อุปกรณ์วัดความเร่ง (Accelerometer)

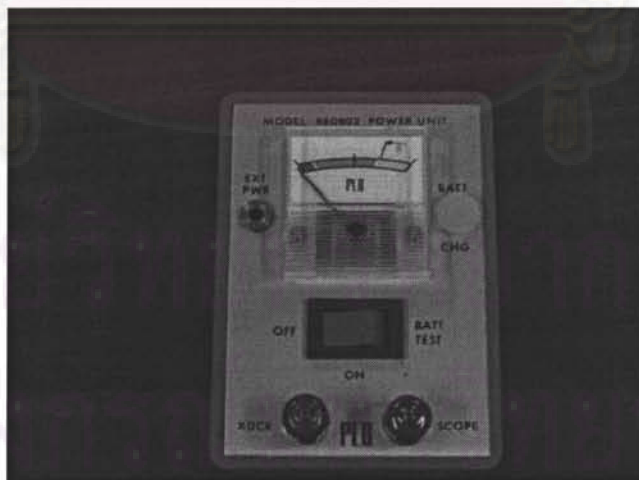
เป็นอุปกรณ์ใช้วัดความเร่งโดยติดตั้งที่ปลายแขนกลในแนวแกน X และ แกน Y สัญญาณที่ถูกวัดออกมาจะต้องถูกขยายด้วยชุดตัวขยายสัญญาณ (Power Unit) ในอัตราส่วน 1:1 โดยในการทดลองมีใช้ 2 รุ่นคือ PCB 348A, range -5 ถึง 5 V, resolution 0.001 g และ PCB 353A, range -5 ถึง 5 V, resolution 0.005g ซึ่งจะมีทิศของการวัดเป็นบวกในทิศพุ่งออกจากอุปกรณ์



รูปที่ ก.2 อุปกรณ์วัดค่าความแรงยี่ห้อ PCB รุ่น 353A

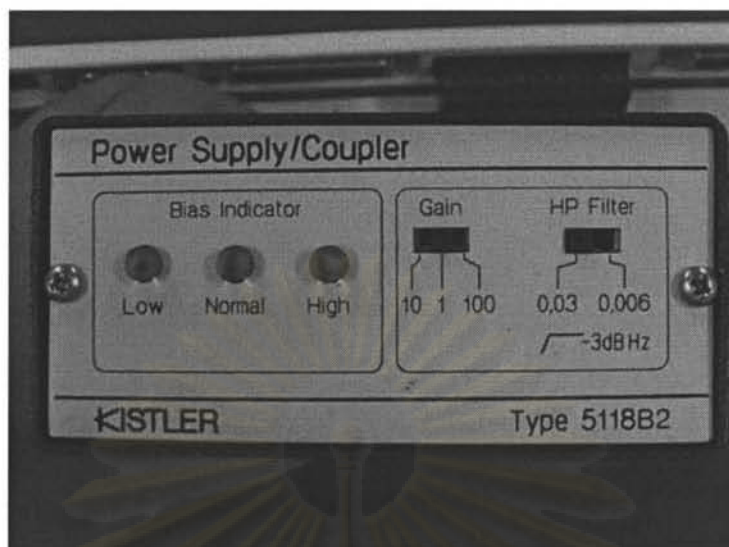


รูปที่ ก.3 อุปกรณ์วัดค่าความแรงยี่ห้อ PCB รุ่น 348A



รูปที่ ก.4 ชุดขยายสัญญาณไฟฟ้าของอุปกรณ์วัดความแรง PCB

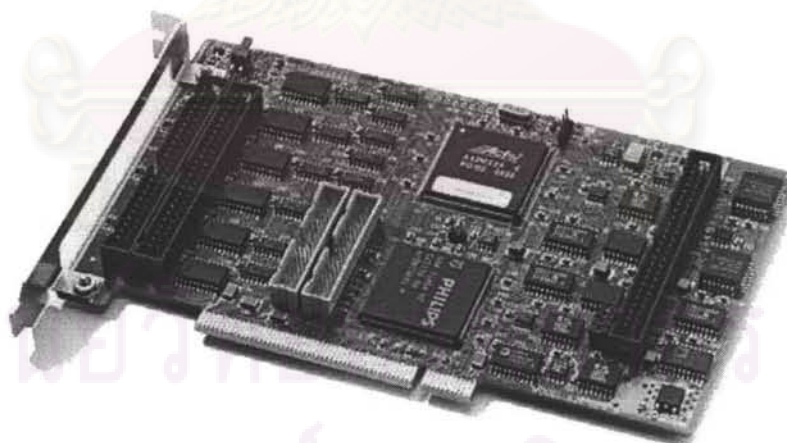




รูปที่ ก.5 ชุดขยายสัญญาณไฟฟ้าของอุปกรณ์วัดความเร่ง KISTLER

#### การ์ดนับค่าอุปกรณ์วัดมุม (Counter Card)

ใช้ของยี่ห้อ Sensoray 626 ซึ่งสามารถต่อกับอุปกรณ์วัดมุมได้ทั้งหมด 6 ตัว สามารถส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ขยายสัญญาณได้ 4 ตัว และช่องรับสัญญาณ A/D 15 ช่องสัญญาณ



รูปที่ ก.6 การนับค่าของอุปกรณ์วัดมุม

### ชุดขยายกระแสขับเคลื่อนมอเตอร์แบบขับเคลื่อน (DDR Drive Amplifier)

ใช้ของยี่ห้อ KOLLMORGEN รุ่น SERVOSTAR CB006 สามารถรับสัญญาณจากอุปกรณ์วัดมุมออกมาแบบเทียบเท่า 8192 พัลส์ต่อรอบ



รูปที่ ก.7 ชุดขยายกระแสเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์แบบขับเคลื่อน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเด่นชัย วรเดชจำเริญเกิดเมื่อวันที่ 13 กุมภาพันธ์ ปี พ.ศ.2526 เป็นชาวกรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาต่อชั้นประถมศึกษาที่โรงเรียนวิชัยวิทยา เมื่อสำเร็จการศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่หกได้สอบเข้าศึกษาต่อที่โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และได้สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลในปีการศึกษา 2548 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีพ.ศ. 2548



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย