



การจำลองภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลสองแกน
The simulation of planar robot arm with
two revolute joints

นายวุฒิชัย นิระโทษะ รหัส 51380873
นายชาญชัย ขนุนเงิน รหัส 51383478
นายณัฐพงษ์ มังกร รหัส 51383485

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่รับ..... 0 ก.ค. 2555
เลขทะเบียน..... 15998608
เลขเรียกหนังสือ..... ผร.
มหาวิทยาลัยนเรศวร ๒๘๕ ๑

๒๕๕๔

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปีการศึกษา 2554



ใบรับรองปริญญาโท

ชื่อหัวข้อโครงการ	การจำลองภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลสองแกน		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายวุฒิชัย	นิระโทษะ	รหัส 51380873
	นายชาญชัย	ขนุนเงิน	รหัส 51383478
	นายณัฐพงษ์	มังกร	รหัส 51383485
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์ สุรัตน์ ปัญญาแก้ว		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	2554		

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครพนม อนุมัติให้ปริญญาโทฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต วิศวกรรมเครื่องกล

ผู้สอน.....ที่ปรึกษาโครงการ
(อาจารย์ สุรัตน์ ปัญญาแก้ว)

.....กรรมการ
(ดร.นินนาท ราชประดิษฐ์)

.....กรรมการ
(ดร.อนันต์ชัย อยู่แก้ว)

ชื่อหัวข้อโครงการ	การจำลองภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลสองแกน		
ผู้ดำเนินโครงการ	นายวุฒิชัย	นิระโทษะ	รหัส 51380873
	นายชาญชัย	ขนุนเงิน	รหัส 51383478
	นายณัฐพงษ์	มังกร	รหัส 51383485
ที่ปรึกษาโครงการ	อาจารย์สุรัตน์ ปัญญาแก้ว		
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ภาควิชา	วิศวกรรมเครื่องกล		
ปีการศึกษา	2554		

บทคัดย่อ

ในโครงการนี้ได้นำเสนอการพัฒนาโปรแกรมการจำลองภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์ของแขนกลสองแกนแบบ Revolute-Arm ในรูปแบบของภาพกราฟฟิกรคอมพิวเตอร์สองมิติโดยใช้การควบคุมแบบพีไอดีด้วยโปรแกรม Simmechanics จะแทนระบบทางกลด้วย Block Diagram ที่เชื่อมต่อกันทำให้ง่ายต่อการใช้งาน นอกจากนี้โปรแกรม Simmechanics ยังมี visualization tools และสามารถแสดงผลเป็นภาพเคลื่อนไหว ดังนั้นจึงทำให้ง่ายต่อการเข้าใจและการวิเคราะห์ผล



Project title The simulation of planar robot arm with two revolute joints

Name	Mr. Wutthichai	Nirathosa	ID. 51380873
	Mr. Chanchai	Khanunngin	ID. 51383478
	Mr. Nattapong	Mungkorn	ID. 51383485

Project advisor Mr. Surat Panyakaew

Major Mechanical Engineering

Department Mechanical Engineering

Academic year 2011

Abstract

The purpose of this project is to develop simulation of a planar robot arm with two revolute joints using PID-control with simmechanics. The researcher uses simmechanics program to simulate Real Time Control in Mechanical Systems. simmechanics program is one of the important programs which are located in Matlab/Simulink. According to simmechanics program, Real Time Control in Mechanical Systems can be replaced by connecting Block diagram. In addition to simmechanics program, there are visualization tools which can show the result into animation. So, this program is easy to understand and analyze.

กิตติกรรมประกาศ
(Acknowledgement)

โครงการฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล โดยมุ่งเน้นในเรื่องการจำลองภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลสองแกน

ซึ่งจากการดำเนินงานพบว่าโครงการเรื่องการศึกษาการจำลองภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลสองแกนนี้สำเร็จได้ด้วยดี เพราะการดูแลเอาใจใส่และความช่วยเหลือเป็นอย่างดี จากท่านอาจารย์สุรัตน์ ปัญญาแก้ว ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา และคณะกรรมการทุกท่านที่ช่วยกรุณาให้คำแนะนำ ในเรื่องการเตรียมตัวตอบคำถามรวมทั้งให้ข้อคิดต่างๆ ตลอดจนให้ความเอาใจใส่ในการตรวจสอบแก้ไขและปรับปรุงข้อบกพร่องต่างๆด้วยดีมาตลอด ผู้ดำเนินงานจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ทุกภาควิชา รวมทั้งภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือแนะนำ ท้ายสุดนี้ผู้ดำเนินโครงการขอกราบขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่สนับสนุนให้กำลังใจและความเป็นห่วงเป็นใยแก่ผู้ดำเนินโครงการอย่างดียิ่งจนสำเร็จการศึกษาไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้ดำเนินโครงการ

นายวุฒิชัย	นิระโทษะ	รหัส 51380873
นายชาญชัย	ขนุนเงิน	รหัส 51383478
นายณัฐพงษ์	มังกร	รหัส 51383485

สารบัญ

	หน้าที่
ใบรับรองปริญญาโท.....	ก
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	1
1.5 ระยะเวลาและแผนการดำเนินงาน.....	2
1.6 สถานที่ปฏิบัติงาน.....	2
1.7 อุปกรณ์ที่ใช้.....	2
1.8 งบประมาณ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	3
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของแขนกล.....	3
2.2 สรีระของแขนกล.....	3
2.3 ทฤษฎีจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์.....	3
2.4 ส่วนประกอบของแขนกล.....	4
2.5 การควบคุมโดยการคำนวณแรงบิด (Computed - TorqControl).....	5
2.6 การควบคุมโดยการป้อนกลับเพื่อลดการเชื่อมต่อแบบไม่เชิงเส้น.....	7
2.7 การวางแผนการเคลื่อนที่ (Trajectory planning).....	8
บทที่ 3 วิธีดำเนินโครงการ.....	16
3.1 การหาสมการฟอร์เวอร์คิเนเมติกส์.....	16
3.2 สร้างภาพจำลองในโปรแกรม Simmechanic.....	17
3.3 ระบบชุดควบคุม(PID Control).....	25

สารบัญ(ต่อ)

	หน้าที่
บทที่ 4 ผลการดำเนินโครงการ.....	42
ตัวอย่างภาพกราฟฟิคสองมิติการทดลองภาพการเคลื่อนที่ของแขนกลที่มุมต่างๆ	
ตัวอย่างที่ 1.....	42
ตัวอย่างที่ 2.....	44
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินโครงการและข้อเสนอแนะ.....	46
5.1สรุปผลการดำเนินโครงการ.....	46
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	46
เอกสารอ้างอิง.....	47
ประวัติผู้จัดทำ.....	48



สารบัญรูปภาพ

	หน้าที่
รูปที่ 2-1 รูปลักษณะตำแหน่งของ x และ y.....	4
รูปที่ 2-2ระบบควบคุมแขนกลแบบอิงแบบจำลอง.....	6
รูปที่ 2-3ระบบควบคุมที่มีส่วนอิงแบบจำลองอยู่นอกวงเซอร์โว.....	6
รูปที่ 2-4เส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกล.....	8
รูปที่ 2-5การเคลื่อนที่ของแขนกลแบบแบ่งจุด.....	9
รูปที่ 2-6เส้นทางหลายทางเลือกสำหรับจุดหนึ่งจุด.....	10
รูปที่ 2-7กราฟแสดงตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง.....	11
รูปที่ 2-8เส้นทางแบบเส้นตรง.....	13
รูปที่ 2-9เส้นทางแบบตรงผสมกับพาราโบลา.....	13
รูปที่ 3-1แขนกลเชื่อมโยงเคลื่อนที่ในระนาบ x-y.....	16
รูปที่ 3-2แสดงการเลือก Block Machine Enviroment.....	18
รูปที่ 3-3แสดงการตั้งค่า Block Machine Enviroment.....	18
รูปที่ 3-4แสดงการเลือก Block Ground.....	19
รูปที่ 3-5แสดงการตั้งค่า Block Ground.....	19
รูปที่ 3-6แสดงการเลือก Revolute 1.....	20
รูปที่ 3-7แสดงการตั้งค่า Revolute 1.....	20
รูปที่ 3-8แสดงการเลือก Block Body.....	21
รูปที่ 3-9แสดงการตั้งค่า Block Body.....	21
รูปที่ 3-10แสดงการเลือก Block Revolute 2.....	22
รูปที่ 3-11แสดงการตั้งค่า Block Revolute 2.....	22
รูปที่ 3-12แสดงการเลือก Block Body 2.....	23
รูปที่ 3-13แสดงการตั้งค่า Block Body 2.....	23
รูปที่ 3-14การแสดงผล Block Diagram ของก้านทั้งสอง.....	24
รูปที่ 3-15แสดง Model ของก้านทั้งสอง.....	24
รูปที่ 3-16แผนภาพการควบคุมของแขนกล 2 แกน.....	25
รูปที่ 3-17แสดงการเลือก Block Joint Sensor และ Joint Actuator.....	26
รูปที่ 3-18แสดงการเชื่อมต่อสัญญาณของ Joint Sensor และ Joint Actuatorกับ Revolute1....	26
รูปที่ 3-19แสดงการตั้งค่าของ Block Joint Sensor.....	27
รูปที่ 3-20แสดงการเชื่อมต่อสัญญาณของ Scope ที่ Joint Sensor.....	27
รูปที่ 3-21แสดงการเลือก Block Step.....	28
รูปที่ 3-22แสดงการเลือก Block Derivative และ integrator.....	28
รูปที่ 3-23แสดงการเลือก Block Gain และ Sum.....	29
รูปที่ 3-24แสดงการใส่เครื่องหมายใน Block Sum.....	29

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

หน้าที่

รูปที่ 3-25แสดงการใส่เครื่องหมายใน Block Sum 1.....	30
รูปที่ 3-26แสดงชุด Control PID 1.....	30
รูปที่ 3-27แสดงการตั้งค่าใน Block Gain 1,2และ3.....	31
รูปที่ 3-28แสดงการตั้งค่าใน Block Intrgrator 1.....	32
รูปที่ 3-29แสดงการตั้งค่าใน Block Derivative 1.....	32
รูปที่ 3-30แสดงชุด Control PID เข้ากับ Joint Actuator.....	33
รูปที่ 3-31แสดงการเลือก Block Joint Sensor และ Joint Actuator.....	33
รูปที่ 3-32แสดงการเชื่อมสัญญาณของ Joint Sensor 2 และ Joint Actuator 2 กับ Revolute 2..	34
รูปที่ 3-33แสดงการเชื่อมต่อ Scope 2 ที่ Joint Sensor 2.....	34
รูปที่ 3-34แสดงการเลือก Block Step.....	35
รูปที่ 3-35แสดงการเลือก Block Integrator และ Derivative.....	35
รูปที่ 3-36แสดงการเลือก Block Gain และ Sum.....	36
รูปที่ 3-37แสดงการใส่เครื่องหมายใน Block Sum.....	36
รูปที่ 3-38แสดงการใช้เครื่องหมายใน Block Sum.....	37
รูปที่ 3-39แสดงชุด Control PID 2.....	37
รูปที่ 3-40แสดงการตั้งค่า Gain 4,5และ 6.....	38
รูปที่ 3-41แสดงการตั้งค่าใน Block Integrator 2.....	39
รูปที่ 3-42แสดงการตั้งค่าใน Block Derivative 2.....	39
รูปที่ 3-43แสดง Block Daigram ของแขนกลสมบูรณ์.....	40
รูปที่ 3-44แสดงการตั้งค่าของ Block Step 1.....	40
รูปที่ 3-45แสดงการตั้งค่าของ Block Step 2.....	41
รูปที่ 3-46ภาพกราฟฟีกสองมิติแสดงการเคลื่อนที่ของแขนกลที่ป้อนค่าที่ Step Function.....	41
รูปที่ 4-1ภาพกราฟฟีกสองมิติ.....	42
รูปที่ 4-2 กราฟแสดงการตอบสนองของ θ_1	43
รูปที่ 4-3 กราฟแสดงการตอบสนองของ θ_2	43
รูปที่ 4-4 ภาพกราฟฟีกสองมิติ.....	44
รูปที่ 4-5 กราฟแสดงการตอบสนองของ θ_1	45
รูปที่ 4-6 กราฟแสดงการตอบสนองของ θ_2	45

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

แขนกลเป็นหุ่นยนต์ชนิดหนึ่งที่น่าสนใจนำมาใช้งานในวงการอุตสาหกรรมการผลิต ได้ถูกนำมาใช้แทนแรงงานมนุษย์ในงานที่ต้องทำอย่างต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง, งานที่ต้องทำซ้ำๆกันตลอดเวลา, งานที่เป็นอันตราย, งานที่หนักและยากเกินที่มนุษย์จะทำไหว ปกติมนุษย์ก็สามารถทำงานได้ทุกอย่างแต่ข้อจำกัดของมนุษย์นั้นไม่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องยาวนานจะเกิดความเหน็ดเหนื่อยเมื่อล้าจึงต้องมีการพักผ่อน เมื่อคนทำงานในที่อันตรายเช่นงานเกี่ยวกับสารเคมีที่มีพิษ ถ้าป้องกันไม่ดีก็เกิดผลกระทบต่อสุขภาพ เมื่อเป็นข้อจำกัดอย่างนี้หุ่นยนต์ก็จะเข้ามามีบทบาทในการทำงานดังกล่าว และข้อดีของการที่มีหุ่นยนต์ทำงานแทนคนนั้นนอกจากที่กล่าวไว้ข้างต้นแล้ว ประสิทธิภาพการทำงานก็จะดีขึ้น, มีความแม่นยำ, สามารถทำการผลิตได้โดยไม่ต้องพัก, จำนวนชิ้นงานที่ทำก็มากขึ้นและสามารถทำงานได้โดยไม่มีวันหยุด

ในโครงการนี้ได้นำเสนอการพัฒนาโปรแกรมการจำลองภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์ของแขนกลสองแกนแบบ Revolute-Arm ในรูปแบบของภาพกราฟิกคอมพิวเตอร์สองมิติ โดยใช้การควบคุมแบบพีไอดีด้วยโปรแกรม MATLAB, Simulink, SimMechanics

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อพัฒนาโปรแกรมในการจำลองภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลสองแกนแบบ Revolute-Arm ในรูปแบบของภาพกราฟิกคอมพิวเตอร์สองมิติ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 แขนกลเป็นแบบเคลื่อนที่เชิงมุมทั้งสองแกน
- 1.3.2 ไม่คิดแรงเสียดทานของระบบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้โปรแกรมการจำลองภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ทางพลศาสตร์ของแขนกลสองแกนแบบ Revolute-Arm ในรูปแบบของภาพกราฟิกคอมพิวเตอร์สองมิติ
- 1.4.2 ได้รับความรู้จากการศึกษาการใช้โปรแกรม MATLAB, Simulink, SimMechanics

1.5 ระยะเวลาและแผนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลา									
	2554					2555				
	ม.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ด.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูล	←			→						
2. สร้างแบบจำลอง				←	→					
3. รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 1						←	→			
4. ทดสอบโปรแกรม							←	→		
5. เก็บรวบรวมข้อมูล							←	→		
6. รายงานความก้าวหน้าครั้งที่ 2								←	→	
7. จัดทำเอกสารและส่งเล่มโครงการ								←	→	

1.6 สถานที่ปฏิบัติงาน

อาคารปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล

1.7 อุปกรณ์ที่ใช้

1.7.1 โปรแกรม MATLAB, Simulink, SimMechanics

1.7.2 โปรแกรมควบคุมแบบ PID

1.7.3 คอมพิวเตอร์

1.8 งบประมาณ

งบประมาณของโครงการ รวมทั้งสิ้น 2,500 บาท

1.8.1 หมวดค่าใช้สอย

คู่มือ วิธีการใช้โปรแกรม

1,000 บาท

1.8.2 หมวดค่าวัสดุ

กระดาษ, จัดทำเอกสารและรูปเล่ม

1,500 บาท

รวมเป็นเงินทั้งสิ้น

2,500 บาท

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของแขนกล

แขนกลถูกออกแบบให้เคลื่อนที่โดยการเลียนแบบการเคลื่อนไหวของมนุษย์เพื่อให้สามารถทำงานแทนมนุษย์ได้โดยผ่านการควบคุมจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์อีกทีหนึ่งแขนกลประเภทแขนกล (Robot Arm) นั้นใช้ในการเชื่อมงานพันสีงานทึบห้องงานจับวางตามตำแหน่งและงานประกอบผลิตภัณฑ์ที่ผลิตอยู่ทุกวันนี้เช่น การวางตำแหน่งของตัวไอซิลิงบนแผ่นวงจร หรือการประกอบชิ้นส่วนรถยนต์ ซึ่งปัจจุบันบางส่วนของงานหรือทั้งหมดของกระบวนการทำโดยแขนกลทั้งสิ้นองค์ประกอบของระบบแขนกลที่ดูซับซ้อนสามารถแบ่งออกได้อย่างชัดเจนได้เป็น 3 กลุ่ม

2.1.1 ฮาร์ดแวร์

2.1.2 คอมพิวเตอร์หรือคอนโทรลเลอร์

2.1.3 โปรแกรมควบคุม

แขนกล (Manipulator) คือข้อต่อที่ต่อกันเป็นอนุกรมเพื่อทำงานเหมือนสิ่งเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระหรือเปรียบได้กับแขนของมนุษย์โดยมีมอเตอร์เป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อ

2.2 สรีระของแขนกล

องค์ประกอบพื้นฐานที่ครอบคลุมการเคลื่อนที่ของแขนกลคือการออกแบบของรูปร่างและความซับซ้อนของโปรแกรมควบคุมแขนกลถูกออกแบบมาให้มีรูปแบบและขนาดต่างๆมากมายและโปรแกรมควบคุมเป็นส่วนทำให้เกิดผลสูงสุดกับความต้องการในแต่ละลักษณะเฉพาะของแขนกล ในสภาพแวดล้อม 3 มิติของเราในทุกวันนี้มีวิธีอื่นหลากหลายที่จะออกแบบแขนกลให้ขยับไปถึงยังทุกจุดในขอบเขตการทำงานของตัวเอง ด้วยต้องมีมอเตอร์ 1 ตัวต่อหนึ่งองศาอิสระ (Degree of Freedom) อย่างน้อยที่สุดต้องมีมอเตอร์ 3 ตัวเพื่อการทำงานในตำแหน่งสามมิติ (ระนาบของแกน X, Y และ Z) และอีก 3 ตัวเพื่อการหมุนมือ (ROLL PITCH และ YAW)

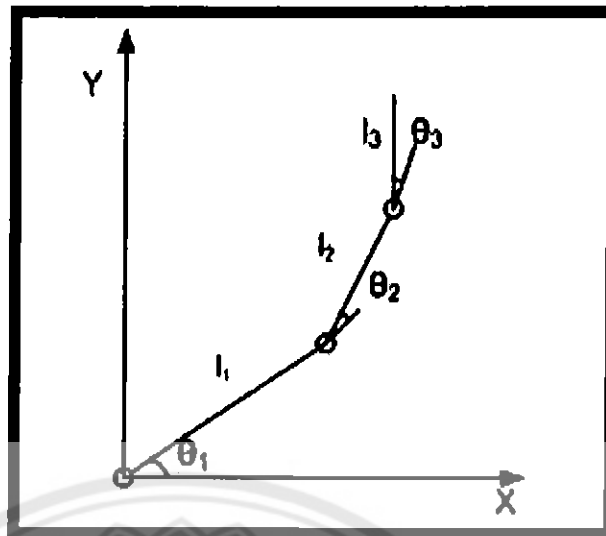
2.3 ทฤษฎีจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์

จลนศาสตร์หรือที่เรียกว่าคิเนเมติกส์ (Kinematics) เป็นการศึกษาการเคลื่อนที่ที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของวัตถุ จลนศาสตร์สำหรับหุ่นยนต์ในโครงการนี้จะพิจารณากรณีฟอว์เวิร์ดคิเนเมติกส์ (Forward Kinematics) คือ การวิเคราะห์การเคลื่อนที่และทิศทางของตัวทำงานส่วนปลาย เมื่อทราบค่าตำแหน่งข้อต่อของหุ่นยนต์ ซึ่งเป็นการคำนวณตามลำดับจากข้อต่อไปยังส่วนปลายของแขนหุ่นยนต์ จากรูปด้านล่าง ซึ่งสามารถเขียนสมการการเคลื่อนที่แบบ Forward Kinematics ได้ดังนี้

$$x = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (2-1)$$

$$y = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + l_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (2-2)$$

$$\phi = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (2-3)$$



รูปที่ 2-1 รูปลักษณะตำแหน่งของ x และ y
ที่มา [Int. J. of Computers, Communications & Control หน้า 228]

2.4 ส่วนประกอบของแขนกล

Manipulator หรือ Rover เป็นส่วนประกอบหลักของแขนกลประกอบด้วยชิ้นส่วน (Links) ข้อต่อ (Joints) และโครงสร้างของตัวแขนกล

2.4.1 End Effectors เป็นส่วนสุดท้ายต่อกับข้อต่อส่วนสุดท้ายของแขนกลโดยปกติใช้หยิบจับวัตถุหรือทำงานเฉพาะทางเช่นแบบที่ติดตั้งเครื่องเชื่อมหรือเครื่องพ่นสีโดยปกติการควบคุมโดยใช้ชุดควบคุม PLC (Programmable Logic Controller)

2.4.2 Actuators ชุดขับเคลื่อนเหมือนแบบโครงสร้างหรือชุดขับเคลื่อนของแขนกลรูปแบบที่ใช้โดยทั่วไปได้แก่มอเตอร์, กระจบบอล, และกระจบบอลไฮดรอลิก

2.4.3 Sensors อุปกรณ์ตรวจวัดค่าโดยแปลงค่าทางกายภาพให้เป็นแบบค่าสามารถตรวจวัดได้เช่นแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้วัดข้อมูลของแขนกลในการรับรู้สภาพแวดล้อมเช่นชุดควบคุมที่ต้องการจะทราบตำแหน่งของชิ้นส่วนของแขนกลว่าอยู่ ณ ตำแหน่งใดแม้ว่าจะอยู่ในที่ลับเพราะชุดตรวจวัดของเราอยู่ในโครงสร้างและมีการส่งค่ากลับมาอย่างสมองตลอดเวลาหลักการเหมือนแขนกลโดยใช้ชุดเครื่องมือวัดป้อนกลับ (Feedback Sensors) ส่งข้อมูลจากแต่ละข้อต่อไปยังชุดควบคุมต่อไป

2.4.4 Processor and Controller ชุดควบคุมคล้ายๆกับสมองของมนุษย์โดยได้รับข้อมูลจากเซนเซอร์และสั่งการไปยังชุดขับเคลื่อน (Actuators) เพื่อให้เคลื่อนที่ได้ตั้งโปรแกรมไว้

2.4.5 Software โปรแกรมแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มโดยกลุ่มแรกเป็นระบบปฏิบัติการพื้นฐานของ (Operating Systems) กลุ่มที่ 2 เป็นโปรแกรมของแขนกล (Robotic Software) ซึ่งจะทำการคำนวณการเคลื่อนที่ของข้อต่อจากสมการจลนศาสตร์จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งต่อไปยังชุดควบคุมและกลุ่มที่ 3 เป็นโปรแกรมที่มีการควบคุมเฉพาะทาง

2.4.6 Power Supply แหล่งจ่ายพลังงานเป็นส่วนสำคัญที่จ่ายกำลังงานให้ไปยังชุดควบคุมและ Manipulator แบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆได้แก่แหล่งจ่ายไฟฟ้าและแหล่งจ่ายพลังงานในการขับเคลื่อนเช่นในแขนกลระบบนิวเมติกส์ต้องมีแหล่งจ่ายลมอัดเป็นต้น

2.5 การควบคุมโดยการคำนวณแรงบิด (Computed-Torque Control)

สมการพลวัตสำหรับอธิบายการเคลื่อนที่ของแขนแขนกลที่มีข้อต่อหมุนจะอยู่ในรูปของ

$$\tau(t) = D(q(t)), \ddot{q}(t) + h(q(t), \dot{q}(t)) + c(q(t)) \quad (2-4)$$

โดยที่ $D(q)$ คือเมทริกซ์สมมาตรเกี่ยวกับความเร่งเชิงความเฉื่อย (Inertial Acceleration Related Matrix) ขนาด $n \times n$ และ $h(q, \dot{q})$ คือเวกเตอร์แรงคอริโอลิสและแรงหนีศูนย์กลาง (Coriolis and Centrifugal Force Vector) ขนาด $n \times 1$ และ C คือเวกเตอร์จากแรงโน้มถ่วง (Gravity Loading Force Vector) สมาชิกแต่ละตัวของเมทริกซ์ D และเวกเตอร์ C จะเป็นฟังก์ชันของมุมหมุนของข้อต่อ (q) ในขณะที่สมาชิกแต่ละตัวของเวกเตอร์ $h(q, \dot{q})$ จะเป็นฟังก์ชันของทั้งมุมหมุน

ปัญหาของการควบคุมระบบซึ่งมีความซับซ้อนอย่างเช่นระบบแขนกลจะสามารถทำได้โดยการคำนวณค่าแรงบิดได้ดังนี้ โดยกำหนดให้

$$\tau = \alpha \tau' + \beta \quad (2-5)$$

โดย t เป็นเวกเตอร์ของแรงบิดขนาด $n \times 1$ เลือกให้

$$\begin{aligned} \alpha &= D(q) \\ \beta &= h(q, \dot{q}) + c(q) \end{aligned} \quad (2-6)$$

โดยการใช้กฎของเซอร์โว (Servo Law) จะได้

$$\tau' = \ddot{q}_d + K_v \dot{E} + K_p E \quad (2-7)$$

โดยที่

$$E = q_d - q \quad (2-8)$$

จากสมการ (2-4) ถึง (2-7) เห็นได้ว่าระบบควบคุมแบบปิด (Closed Loop Control Systems) มีสมการค่าความคลาดเคลื่อน (Error Equation) ที่อยู่ในรูปของ

$$\ddot{E} + K_v \dot{E} + K_p E = 0 \quad (2-9)$$

สังเกตได้ว่าสมการค่าความคลาดเคลื่อนนี้เป็นสมการเวกเตอร์ที่ไม่มีลักษณะการเชื่อมต่อ (De-couple) ถ้าเมทริกซ์ K_v และ K_p เป็นเมทริกซ์ทแยงมุม (Diagonal Matrix) สมการที่ (2-9) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\ddot{e}_i + K_{vi} \dot{e}_i + K_{pi} e_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2-10)$$

นั่นคือออกแบบตัวควบคุมให้มีอัตราขยายคงที่ถึงแม้ว่าโพลจะมีการเปลี่ยนตำแหน่งและให้การเปลี่ยนตำแหน่งของโพลก็จะเป็นไปในลักษณะที่ทำให้โพลอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมเสมอในทางตรงกันข้าม การออกแบบตัวควบคุมที่มีอัตราขยายที่แปรผันได้ (Variable Gain) ก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งจะทำให้ ตำแหน่งโพลก็ยังคงอยู่ที่ตำแหน่งเดิม ถึงแม้ว่าโครงสร้างของแขนกลจะเปลี่ยนไป

2.6 การควบคุมโดยการป้อนกลับเพื่อลดการเชื่อมต่อแบบไม่เชิงเส้น

จากสมการการเคลื่อนที่ของแขนกลตามสมการที่ (2-12) หรือ

$$D(q), \ddot{q}(t) + h(q, \dot{q}) + c(q) = u(t) \quad (2-12)$$

โดยที่ $u(t)$ คือเวกเตอร์แรงบิดขนาด $n \times 1$ เนื่องจากเมทริกซ์ $D(q)$ มีคุณสมบัติไม่เป็นเอกฐาน (Non-Singular) ไม่ว่าแขนกลจะมีโครงสร้างเช่นไรสมการที่ (2-12) จะสามารถถูกทำให้ลักษณะการเชื่อมต่อหายไป และทำให้สมการกลายเป็นเซตของสมการอนุพันธ์อันดับที่ 2 เชิงเส้นซึ่งส่งผลให้สามารถควบคุมแต่ละข้อของแขนกลแยกจากกันได้ การจำกัดลักษณะการเชื่อมต่อกันนี้สามารถทำได้โดยใช้สัญญาณควบคุม

$u(t)$ ซึ่งอยู่ในรูปของ

$$u(t) = h(q, \dot{q}) + c(q) - D(q) \begin{bmatrix} a_{11}q_1(t) + a_{01}q_1(t) - l_1 u_{ref}^1(t) \\ a_{1n}q_n(t) + a_{0n}q_n(t) - l_n u_{ref}^n(t) \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

โดยที่ a_i และ l_i เป็นค่าสเกลาร์ เมื่อใช้สัญญาณควบคุมแบบนี้จะได้ว่า

$$\begin{aligned} D(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + c(q) &= u(t) \\ &= h(q, \dot{q}) + c(q) - D(q) \begin{bmatrix} a_{11}q_1(t) + a_{01}q_1(t) - l_1 u_{ref}^1(t) \\ a_{1n}q_n(t) + a_{0n}q_n(t) - l_n u_{ref}^n(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-14)$$

ซึ่งนำไปสู่

$$D(q) \begin{bmatrix} \ddot{q}_1(t) + a_{11}q_1(t) + a_{01}q_1(t) - l_1 u_{ref}^1(t) \\ \ddot{q}_n(t) + a_{1n}q_n(t) + a_{0n}q_n(t) - l_n u_{ref}^n(t) \end{bmatrix} = 0 \quad (2-15)$$

และเนื่องจากเมทริกซ์ $D(q)$ มีคุณสมบัติไม่เป็นเอกฐานสมการที่ (2-15) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\ddot{q}_i(t) + \alpha_{1i}q_i(t) + \alpha_{0i}q_i(t) = \lambda_i u_{ref}^i(t), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2-16)$$

ซึ่งสมการที่ (2-16) นี้มีลักษณะเป็นระบบเชิงเส้นอันดับที่ 2 แบบไม่เชื่อมต่อ (Decoupled Second Order Linear System)

2.7 การวางแผนการเคลื่อนที่ (Trajectory planning)

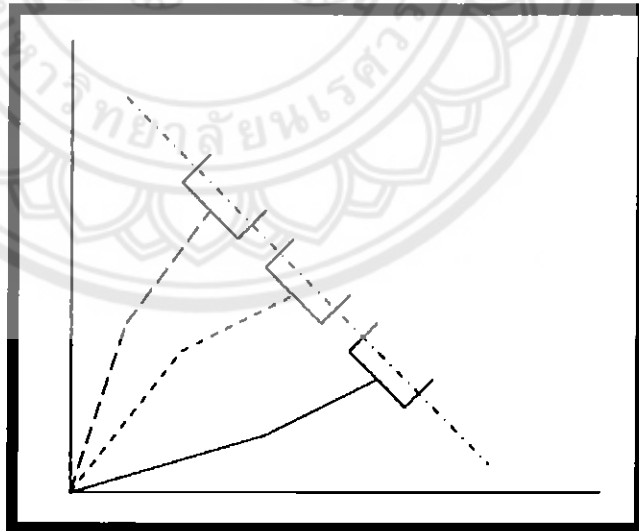
คือการวางแผนให้แขนกลเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นไปยังจุดสิ้นสุดโดยทำการควบคุมผ่านโดยโปรแกรมและในระหว่างการเคลื่อนที่นั้นแขนกลต้องหลบหลีกสิ่งกีดขวางและเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่วางแผนไว้

ส่วนทราเจกทอรี (Trajectory) หมายถึง ประวัติของเวลาของตำแหน่งการเคลื่อนที่หรือความเร็วและความเร่งของแต่ละองศาอิสระ (Degree of Freedom: DOF) รวมถึงมนุษย์ผู้ควบคุมที่เข้ามาเกี่ยวข้องกับแขนกลเพื่อสั่งงานให้แขนกลเดินทางไปตามเส้นทางที่กำหนดเพื่อจ่ายต่อการสั่งงานของมนุษย์ผู้ควบคุมจำเป็นต้องเขียนแสดงในฟังก์ชันของเวลาเพื่อบ่งบอกถึงงานต้องการและมักบ่งบอกถึงแผนการเคลื่อนที่ในรูปแบบต่างๆที่ต้องการ จากนั้นปล่อยให้ระบบทำการคิดค้นหาในรายละเอียด

ยกตัวอย่างเช่นผู้ใช้งานอาจจะบอกจุดหรือตำแหน่งที่ต้องการและการหมุนของแขนกลนั้น ส่วนระบบที่เหลือจะทำการวิเคราะห์เองในการจัดวางอย่างไรให้ได้ตามระยะเวลา ความเร็ว หรือตัวแปรอื่นๆที่กำหนด

การนำเสนอแผนการเคลื่อนที่ในคอมพิวเตอร์ ภายหลังจากการวางแผนสุดท้ายในการสร้างแผนการเคลื่อนที่ที่จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาการทำงาน (Run Time) โดยทั่วไปการคำนวณ ตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่ง จะเกิดขึ้นพร้อมๆกัน ในการคำนวณค่าต่างๆเรียกว่าอัตราการปรับค่า(Path Update Rate) โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 20-200Hz

คำว่าเส้นทาง (Path) หมายถึง ลำดับการเคลื่อนที่ของแขนกลเป็นไปตามขั้นที่กำหนด โดยไม่คำนึงถึงระยะเวลา เช่น แขนกลเคลื่อนที่จากจุด A ไปยังจุด B และไปยัง จุด C ลำดับขั้นของการเคลื่อนที่ที่จะเรียกว่า “เส้นทาง” หรือ Path ส่วนทราเจกทอรีนั้นมักจะคำนึงถึงระยะเวลาในแต่ละเส้นทางที่เคลื่อนที่



รูปที่ 2-4 เส้นทางเคลื่อนที่ของแขนกล

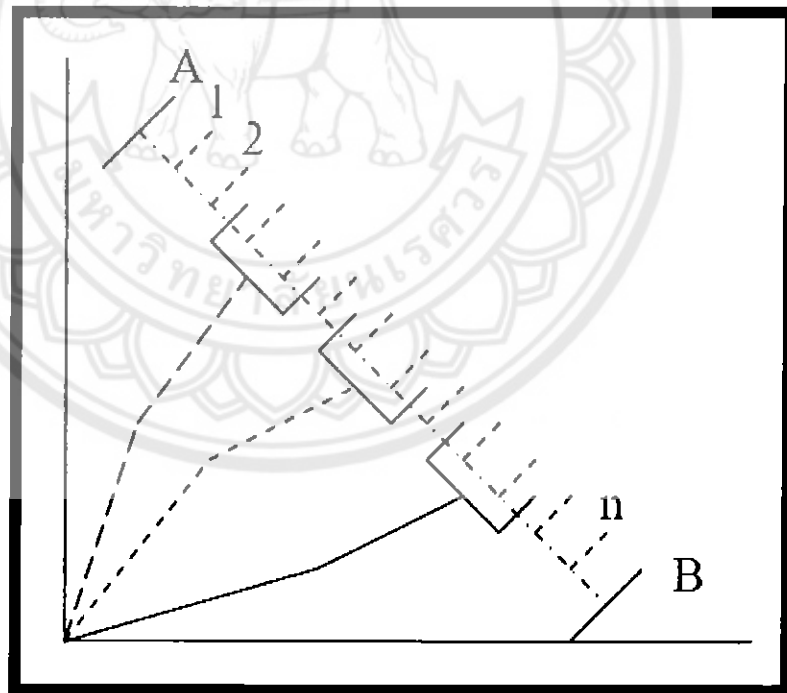
ภาพที่ 2-4 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลโดยในกรณีของเส้นทางนั้นไม่คำนึงถึงว่าแขนกลนั้นเคลื่อนที่ไปถึงจุด B และ C ที่เวลาเท่าใดแต่ในกรณีของทราเจกทอรีจะพิจารณาถึง

ความเร็วและความเร่งของแขนกลนั้นเคลื่อนที่ไปยังจุด B และ C ในเวลาที่ต่างทำให้เกิดทราเจกทอรีที่แตกต่างกัน ซึ่งจะอธิบายถึงความเร็วและความเร่งของแขนกลอีกด้วย

ในมิติแบบข้อต่อและมิติแบบแขนกล คาร์ทีเซียน การพิจารณาแขนกลที่ปลายแขนกลอยู่ ณ ตำแหน่ง A ในระนาบสามมิติ ถูกสั่งให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง B สามารถที่จะคำนวณโดยใช้ จลนศาสตร์ผกผันเพื่อหาระยะการเคลื่อนที่ของมุมในแต่ละข้อต่อและเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ซึ่งระยะเคลื่อนที่ของมุมในแต่ละข้อต่อจะนำไปใช้ในการควบคุมเพื่อควบคุมแขนกล

การเคลื่อนที่ของแขนกลโดยการใช้ค่าระยะเคลื่อนที่ของมุมในแต่ละข้อต่อนี้เรียกว่า มิติแบบ ข้อต่อ (Joint-Space) ถึงแม้ว่าแขนกลสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการแต่การเคลื่อนที่ ระหว่างจุดเริ่มต้นกับจุดปลายนั้นไม่สามารถพิจารณาได้

ในกรณีที่สองถ้าลากเส้นตรงระหว่างจุด A และจุด B และการควบคุมแขนกลให้เคลื่อนที่จาก จุด A ไปจุด B แต่ในกรณีนี้ต้องบังคับให้แขนกลเคลื่อนที่ไปตามแนวเส้นตรงที่ลากระหว่างจุดสองจุด นั้นด้วยวิธีแบ่งเส้นตรงนั้นออกเป็นส่วนๆเท่าๆกันแล้วให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังที่ละจุดย่อยๆเหล่านั้นที่ จุดเริ่มจากจุด A ไปยังจุด 0 ไปยังจุด 1 ไปยังจุด 2 และไปจนถึงจุด B โดยการเคลื่อนที่ไปยังแต่ละจุด นั้นใช้วิธีจลนศาสตร์ผกผันคล้ายกับข้างต้น จะสังเกตว่าวิธีนี้ทราบถึงสถานะของหุ่นยนต์ในขณะที่ เคลื่อนที่จากจุด A ไปยังจุด B ตลอดเวลาลำดับการเคลื่อนที่วิธีนี้เรียกว่ามิติแบบคาร์ทีเซียน (Cartesian Space) โดยใช้การคำนวณมิติแบบข้อต่อประกอบในการเคลื่อนที่ไปยังจุดแบ่งแต่ละ ส่วนย่อย ดังภาพที่ 2-5

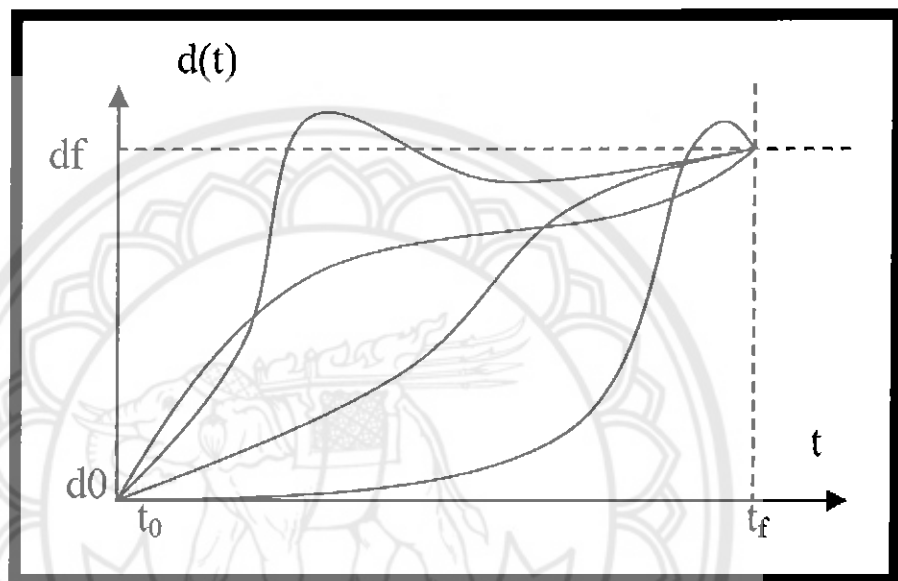


รูปที่ 2-5 การเคลื่อนที่ของแขนกลแบบแบ่งจุด

แผนการเคลื่อนที่แบบคาร์ทีเซียนอาจจะเป็นที่เข้าใจง่ายเพราะแผนการเคลื่อนที่ที่อยู่ในพิกัด คาร์ทีเซียน แต่อย่างไรก็ตาม ซึ่งเป็นกรณีที่แขนกลไม่สามารถเคลื่อนที่ไปได้หรือเกินขอบเขตที่สามารถ

เคลื่อนที่ไปถึงหรืออาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของมุมอย่างกะทันหันในการเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง

ในการคำนวณเส้นทางเดินของแขนกล (Space Trajectories) โดยพิจารณาในภาพของมุมของการเคลื่อนที่โดยใช้ฟังก์ชันโพลีโนเมียลกำลังสาม พิจารณาการเคลื่อนที่ของแขนกลจากตำแหน่งเริ่มต้นที่เวลา t_0 ไปตำแหน่งสุดท้ายที่เวลา t_f แล้วใช้จลนศาสตร์ผกผันคำนวณหามุมที่ตรงกันกับตำแหน่งและการเคลื่อนที่ที่ต้องการโดยตำแหน่งที่เริ่มต้นของแขนกลจะทราบค่าในรูปของตำแหน่งเริ่มต้นคือฟังก์ชันแต่ละข้อต่อเริ่มต้นเวลา t_0 และเวลาสุดท้าย t_f ดังตามภาพที่ 2-6



รูปที่ 2-6 เส้นทางหลายทางเลือกสำหรับจุดหนึ่งจุด

ในฟังก์ชันที่ราบเรียบ (Smooth Function) ต้องทราบค่าอย่างน้อย 4 เงื่อนไขของ $q(t)$ โดย 2 เงื่อนไขมาจากค่าเริ่มต้นและค่าสุดท้าย

$$q(0) = q_0, q(t_f) = q(f) \quad (2-17)$$

ส่วนอีก 2 เงื่อนไขมาจากกรณีฟังก์ชันนั้นต่อเนื่อง (Continuous)

$$\dot{q}(0) = \dot{q}_0, \dot{q}(t_f) = \dot{q}(f) \quad (2-18)$$

จากเงื่อนไขทั้ง 4 นั้นสามารถนำมาวิเคราะห์ที่ได้โพลีโนเมียลดีกรีสาม (Third Degree Polynomials) หรือ Cubic ซึ่งมีรูปดังสมการ (2-19)

$$q_t = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (2-19)$$

ส่วนความเร็ว (Velocity) และความเร่ง (Acceleration) ในสมการ (2-20) และสมการ (2-21) ตามลำดับ

$$\dot{q}_t = a_1 t + 2a_2 t + 3a_3 t^2 \quad (2-20)$$

$$\ddot{q}_t = 2a_2 + 6a_3 t \quad (2-21)$$

สามารถได้มาซึ่ง 4 สมการ 4 ตัวแปรตาม (2-22) ถึง (2-25)

$$q_0 = a_0 \quad (2-22)$$

$$q_f = a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 \quad (2-23)$$

$$0 = a_0 \quad (2-24)$$

$$0 = a_1 + a_2 t_f + a_3 t_f^2 \quad (2-25)$$

หาผลลัพธ์สมการที่ (2-22) ถึง (2-25) ได้ว่า

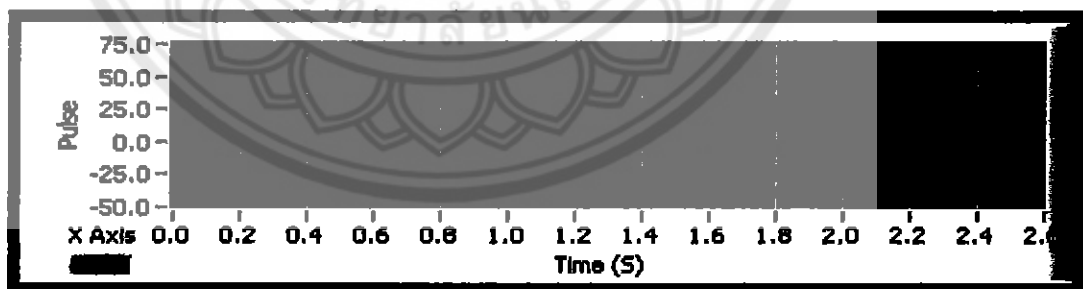
$$a_0 = q_0 \quad (2-26)$$

$$a_1 = 0 \quad (2-27)$$

$$a_2 = \frac{3}{t_f^2} (q_f - q_0) \quad (2-28)$$

$$a_3 = \frac{3}{t_f^3} (q_f - q_0) \quad (2-29)$$

สามารถใช้สมการ (2-26) ถึง (2-27) คำนวณหาค่าตอบของโพลีโนเมียลดีกรีสามซึ่งระหว่างจุดเริ่มต้นใดกับจุดสุดท้ายในกรณีของการเริ่มและจุดสุดท้ายมีความเร็วเป็นศูนย์



รูปที่ 2-7กราฟแสดงตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง

อีกวิธีหนึ่งคือวิธีโพลีโนเมียลกำลังสามผ่านจุดโดยจากที่ผ่านมาได้ศึกษาถึงการเคลื่อนที่พิจารณาโดยระบุช่วงเวลาที่ต้องการและจุดหมายที่ต้องการโดยทั่วไปเราต้องการให้เส้นทางการเคลื่อนที่นั้นผ่านจุดระหว่างกลาง (Intermediate) วิธีโพลีโนเมียลกำลังสามผ่านจุด(Cubic Polynomials for A Part with Via Points) การเคลื่อนที่ผ่านจุดระหว่างกลางนั้นจะเคลื่อนที่ไปอย่างต่อเนื่องไม่มีการหยุด (Without Stopping)

ดังนั้นต้องคำนวณหาสมการที่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับ (Constraints) โดยเงื่อนไขบังคับที่ได้มาดังนี้

$$\dot{q}(0) = \dot{q}_0 \quad (2-30)$$

$$\dot{q}(t_f) = \dot{q}(f) \quad (2-31)$$

นั่นคือต้องทราบความเร็วของข้อต่อที่จุดเริ่มต้น $q(0)$ และความเร็วของข้อต่อจุดที่ต้องการเคลื่อนที่ไป (Velocities at the via points) $q(t_f)$ และสมการที่ (2-32) ถึง (2-35) ที่อธิบายโพลีโนเมียลดีกรีสาม คือ

$$q_0 = a_0 \quad (2-32)$$

$$q_f = a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 \quad (2-33)$$

$$\dot{q}_0 = a_1 \quad (2-34)$$

$$\dot{q}_f = a_1 + 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2 \quad (2-35)$$

แก้สมการที่ (2-32) ถึง (2-35) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ a_0, a_1, a_2, a_3 ได้ว่า

$$a_0 = q_0 \quad (2-36)$$

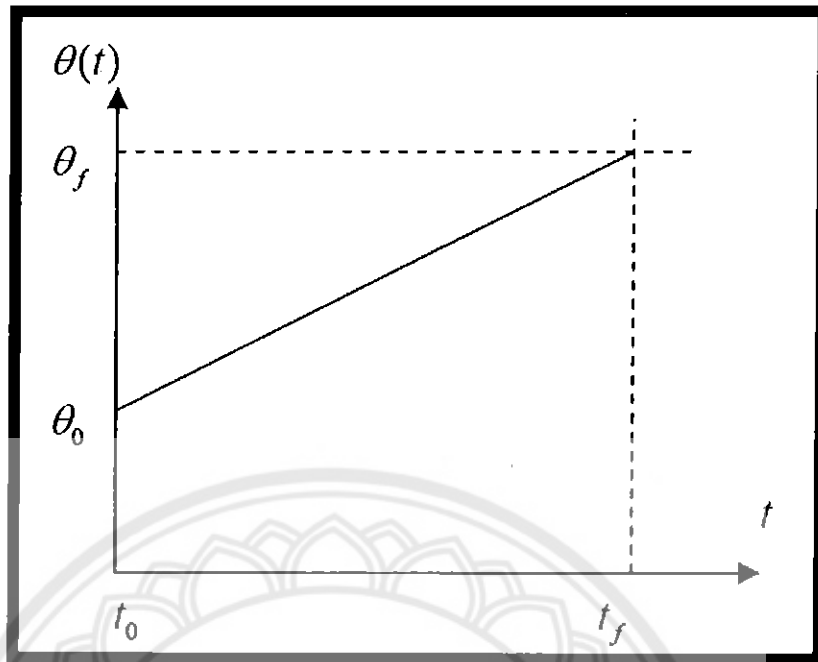
$$a_1 = \dot{q}_0 \quad (2-37)$$

$$a_2 = \frac{3}{t_f^2} (q_f - q_0) - \frac{2}{t_f} \dot{q}_0 - \frac{1}{t_f} \dot{q}_f \quad (2-38)$$

$$a_3 = \frac{3}{t_f^3} (q_f - q_0) + \frac{1}{t_f^2} (\dot{q}_f + \dot{q}_0) \quad (2-39)$$

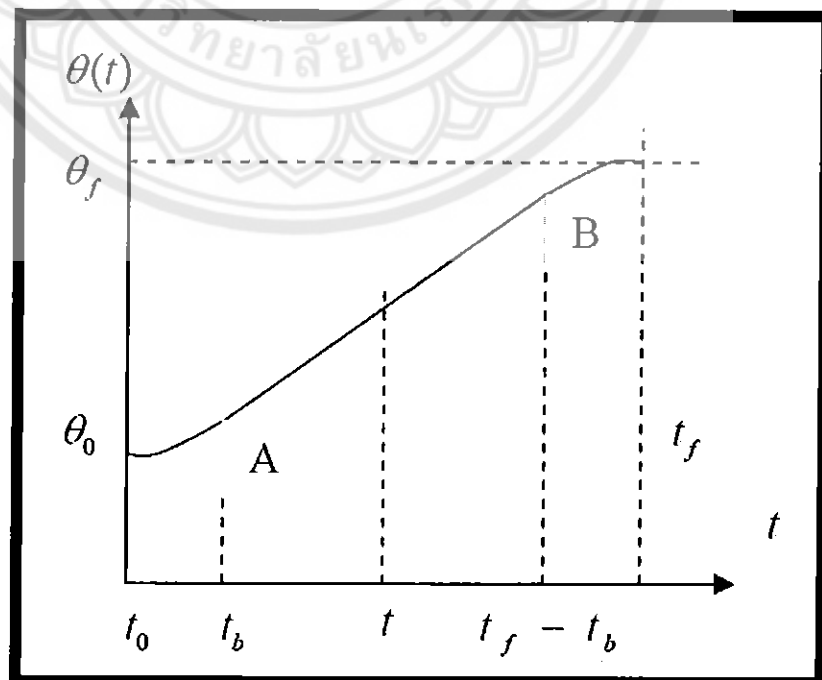
ใช้สมการที่ (2-36) ถึง (2-39) คำนวณหาโพลีโนเมียลดีกรีสามที่เชื่อมต่อระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายที่ทราบค่าความเร็วของข้อต่อ ณ จุดเริ่มต้น (Initial Velocities) $q(0)$ และความเร็วสุดท้าย (Final Velocities) q_f

วิธีเส้นตรงที่ปลายเป็นพาราโบลา (Method of Linear Segments with Parabolic Blends) เป็นวิธีที่ใช้ในการคำนวณหาเส้นทางการเคลื่อนที่ คือเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง (Linear) คือการใช้การเทียบค่า (Interpolation) จากจุดเริ่มต้นไปจุดสุดท้ายเป็นเส้นตรงที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่และความเร่งเป็นศูนย์ซึ่งหมายถึงความเร่งที่จุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายต้องเป็นค่าอนันต์ (Infinite) เพื่อที่จะทำให้เกิดค่าความเร็วที่จุดปลายทั้งสองข้างอย่างทันที่ดังภาพที่ 2-8



รูปที่ 2-8 เส้นทางแบบเส้นตรง

ในหัวข้อนี้เราพิจารณาการเคลื่อนที่ของข้อต่อ (Motion of Each Joint) เป็นแบบเส้นตรง แต่ไม่ได้หมายความว่าจุดปลายของแขนกลเคลื่อนที่เป็นแนวของเส้นตรงการเคลื่อนที่ของข้อต่อเป็นแบบเส้นตรงมีข้อบกพร่องที่จุดปลายทั้งสองคือค่าความเร่งเข้าสู่อนันต์ อันทำให้เกิดผลเสียหายต่ออุปกรณ์ของแขนกลเพื่อป้องกันค่าความเร่งเข้าสู่ค่าอนันต์จึงนำกราฟพาราโบลามารวมเข้าที่ปลายทั้งสองข้างดังภาพที่ 2-9



รูปที่ 2-9 เส้นทางแบบตรงผสมกับพาราโบล

ในการนำกราฟพาราโบลามาเพิ่มที่ปลายทั้งสองข้างโดยประมาณว่าช่วงระยะเวลาเท่ากัน นั้นคือ มีค่าความเร่งคงที่ในค่าเดียวกันสมมติว่า ณ จุดเริ่มต้นค่าตำแหน่งของมุมเป็น q_0 ที่เวลา $t_0 = 0$ และจุดสุดท้ายค่าตำแหน่งของมุมเป็น q_f ที่เวลา t_f สามารถเขียนสมการพาราโบลา คือ

$$q(t) = c_0 + c_1 t + \frac{1}{2} c_2 t^2 \quad (2-40)$$

$$\dot{q}(t) = c_1 + c_2 t \quad (2-41)$$

$$\ddot{q}(t) = c_2 \quad (2-42)$$

พบว่าค่าความเร่งคงที่และค่าความเร็วต่อเนื่อง ณ จุด A และ B แทนค่าที่เงื่อนไขที่ปลายทั้งสองข้าง (Boundary Conditions)

$$q(t=0) = q_0 + c_0 \quad (2-43)$$

$$\dot{q}(t=0) = 0 + c_1 \quad (2-44)$$

$$\ddot{q}(t) = c_2 \quad (2-45)$$

จะได้ค่าคงที่

$$c_0 = q_0 \quad (2-46)$$

$$c_1 = 0 \quad (2-47)$$

$$c_2 = \ddot{q} \quad (2-48)$$

ทำให้สมการพาราโบลายู่ในรูปของ

$$q(t) = q_0 + \frac{1}{2} c_2 t^2 \quad (2-49)$$

$$\dot{q}(t) = c_2 t \quad (2-50)$$

$$\ddot{q}(t) = c_2 \quad (2-51)$$

โดยในช่วงของเส้นตรง ค่าความเร็วคงที่ขึ้นอยู่กับชุดข้อถ้าให้ค่าความเร่งคงที่เป็น ω แทนค่าหาสมการในช่วง A และ B ได้ว่า

$$q_A = q_0 + \frac{1}{2} c_2 t_b^2 \quad (2-52)$$

$$\dot{q}_A = c_2 t_b = \omega \quad (2-53)$$

$$q_B = q_A + \omega((t_f - t_b) - t_b) + (t_f - 2t_b) \quad (2-54)$$

$$\dot{q}_B = \dot{q}_A = \omega \quad (2-55)$$

$$q_f = q_f + (q_A - q_0) \quad (2-56)$$

$$\dot{q} = 0 \quad (2-57)$$

โดยในช่วงเวลา t_b คำนวณได้จาก

$$c_2 = \frac{\omega}{t_b} \quad (2-58)$$

$$q_f = q_0 + c_2 t_b^2 + \omega(t_f - 2t_b) \quad (2-59)$$

$$q_f = q_0 + \frac{\omega}{t_b} t_b^2 + \omega(t_f - 2t_b) \quad (2-60)$$

$$t_b = \frac{q_0 - q_f - \omega t_f}{\omega} \quad (2-61)$$

และค่าความเร็วเชิงมุมสูงสุด

$$\omega_{\max} = \frac{2(q_f - q_0)}{t_f} \quad (2-62)$$

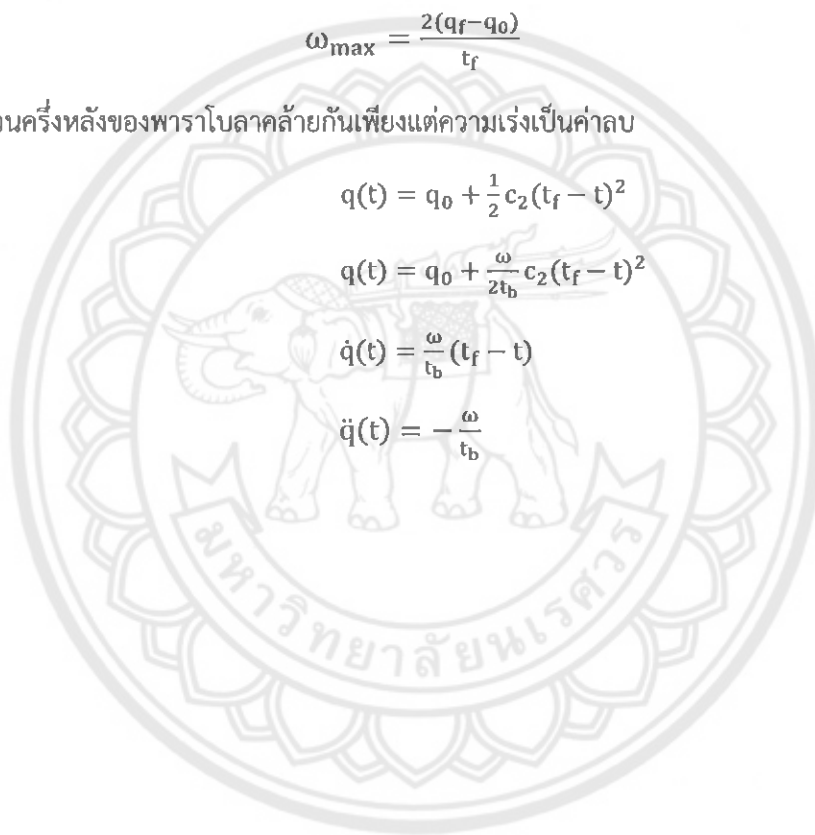
ส่วนครึ่งหลังของพาราโบลาคล้ายกันเพียงแต่ความเร่งเป็นค่าลบ

$$q(t) = q_0 + \frac{1}{2} c_2 (t_f - t)^2 \quad (2-63)$$

$$q(t) = q_0 + \frac{\omega}{2t_b} c_2 (t_f - t)^2 \quad (2-64)$$

$$\dot{q}(t) = \frac{\omega}{t_b} (t_f - t) \quad (2-65)$$

$$\ddot{q}(t) = -\frac{\omega}{t_b} \quad (2-66)$$



บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

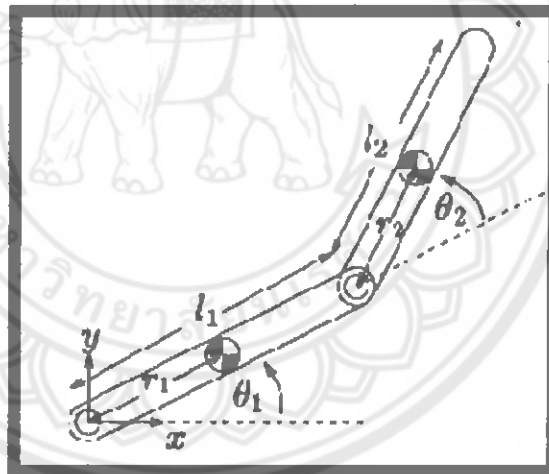
เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงสมการฟอร์เวอร์คิเนเมติกส์(Forward Kinematics)ระบบควบคุมของแขนกลและการสร้างแบบจำลองทาง Simmechanics โดรนแขนกลที่ใช้ศึกษาโครงงานนี้จะเป็นแบบ 2 ดีกรีอิสระและกำหนดให้เคลื่อนที่อยู่ในแนวราบ

3.1 การหาสมการฟอร์เวอร์คิเนเมติกส์

รูปแขนกล 2 แกนที่ใช้ศึกษาในโครงงานนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3-1 โดยอาศัยกฎทางเลขาคณิตซึ่งจะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างการจัดเชิงมุมและการจัดเชิงเส้นได้ดังนี้

$$x = f_1(\theta_1, \theta_2) = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 \quad (3-1)$$

$$y = f_2(\theta_1, \theta_2) = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 \quad (3-2)$$



รูปที่ 3-1 แขนกลเชื่อมโยงเคลื่อนที่ในระนาบ x-y

3.2 สร้างภาพจำลองในโปรแกรม Simmechanic

ในการสร้างภาพแขนกลนั้นจะต้องมีการคำนวณหาโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกลและพิกัดของแขนกลวิธีการทำมีดังต่อไปนี้

แขนกล Body 1 มวล m มีค่า 1Kg กว้าง 0.06 m ยาว 1 m

กำหนดพิกัดจุดใน world ดังนี้

$$CG = (0.5, 0, 0)$$

$$CS1 = (0, 0, 0)$$

$$CS2 = (0, 0, 0)$$

$$CS3 = (0, 0.03, 0)$$

$$CS4 = (0, -0.03, 0)$$

$$CS5 = (1, 0.03, 0)$$

$$CS6 = (1, -0.03, 0)$$

โมเมนต์ความเฉื่อย I_{xx} มีค่า $6 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

$$I_{yy} = I_{zz} \text{ มีค่า } 0.0833 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

แขนกล Body 2 มวล m มีค่า 1Kg กว้าง 0.06 m ยาว 1 m

กำหนดพิกัดจุดใน world ดังนี้

$$CG = (1.5, 0, 0)$$

$$CS1 = (1, 0, 0)$$

$$CS2 = (2, 0, 0)$$

$$CS3 = (1, 0.03, 0)$$

$$CS4 = (1, -0.03, 0)$$

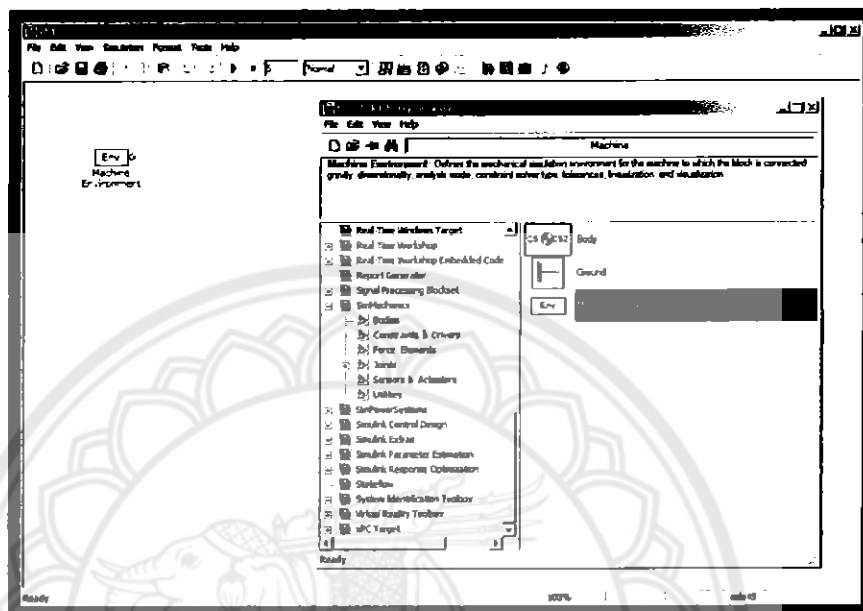
$$CS5 = (2, 0.03, 0)$$

$$CS6 = (2, -0.03, 0)$$

โมเมนต์ความเฉื่อย I_{xx} มีค่า $6 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

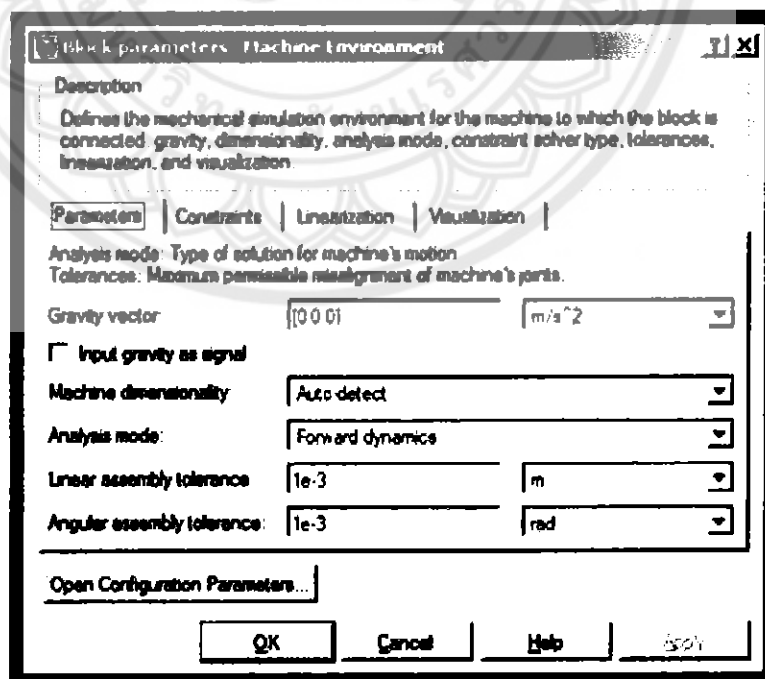
$$I_{yy} = I_{zz} \text{ มีค่า } 0.0833 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

การสร้างภาพจำลองในโปรแกรม Simmechanicจะต้องอาศัย Block Diagramเพื่อใช้ในการสร้าง model แบบจำลองระบบวัตถุหลายชิ้น ซึ่งในที่นี่จะทำการสร้างแบบจำลอง ดังนี้
 อุปกรณ์ Simulink Library Browser >> Simmechanic >> Bodies >> Machine Environment



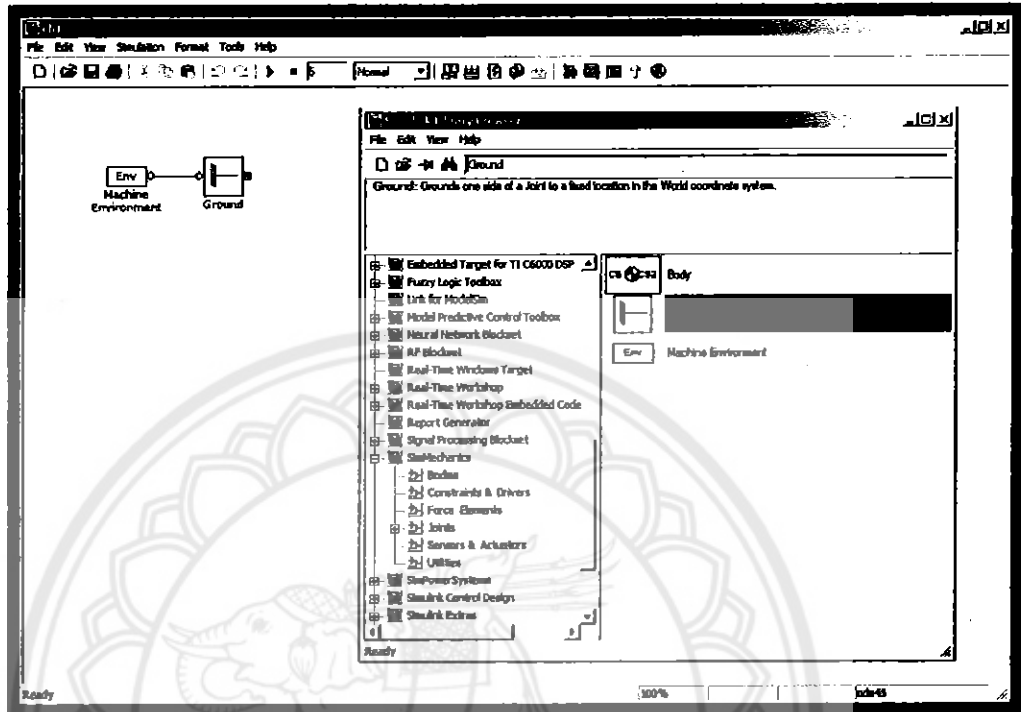
รูปที่3-2แสดงการเลือก Block Machine Environment

ทำการตั้งค่าสภาพแวดล้อมใน block machine environment



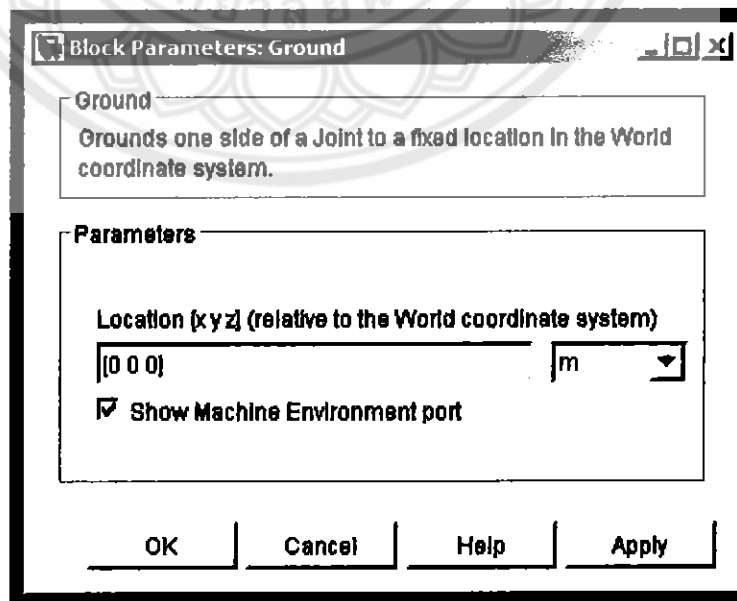
รูปที่3-3แสดงการตั้งค่า Block Machine Environment

จากนั้นไปที่ Simulink Library Browser >> Simmechanic >> Bodies >> Ground
และทำการเชื่อมต่อ Ground กับ Machine Environment



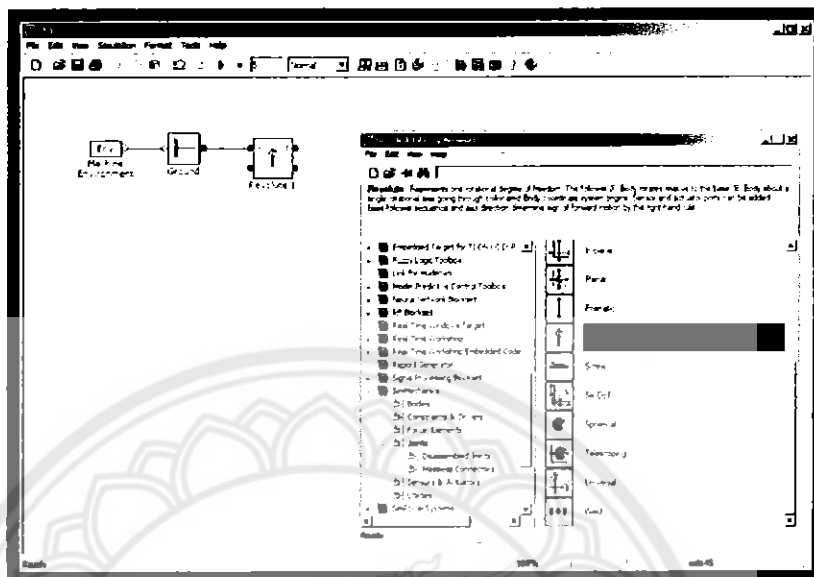
รูปที่ 3-4 แสดงการเลือก Block Ground

ทำการตั้งค่า ground โดยใช้พิกัด [0 0 0] เป็น ground ของ model และเลือก show machine environment port เพื่อให้ block แสดงจุดเชื่อมต่อระหว่าง machine environment กับ ground block



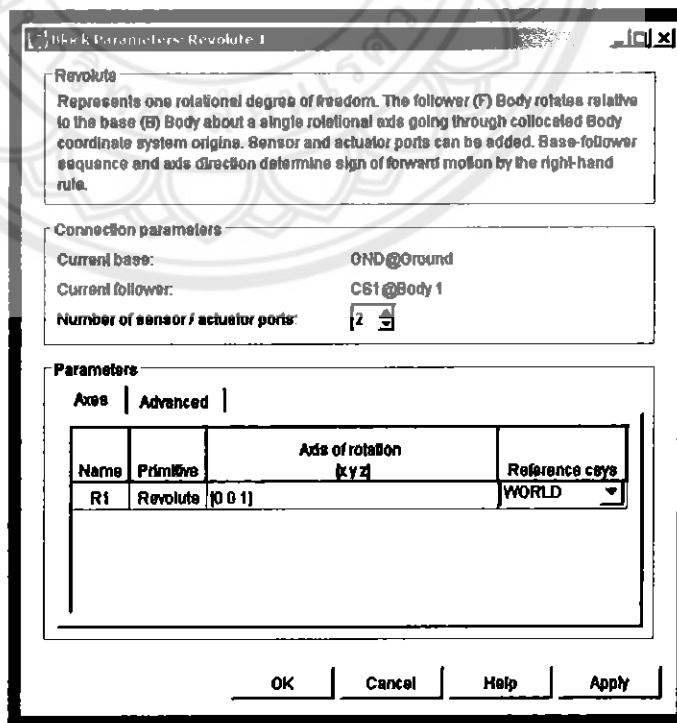
รูปที่ 3-5 แสดงการตั้งค่า Block Ground

จากนั้นไปที่ Simulink Library Browser >>Simmechanic>>Joints >> Revolute (1)
 ทำการเชื่อมต่อ Revolute 1 กับ Ground



รูปที่ 3-6 แสดงการเลือก Revolute 1

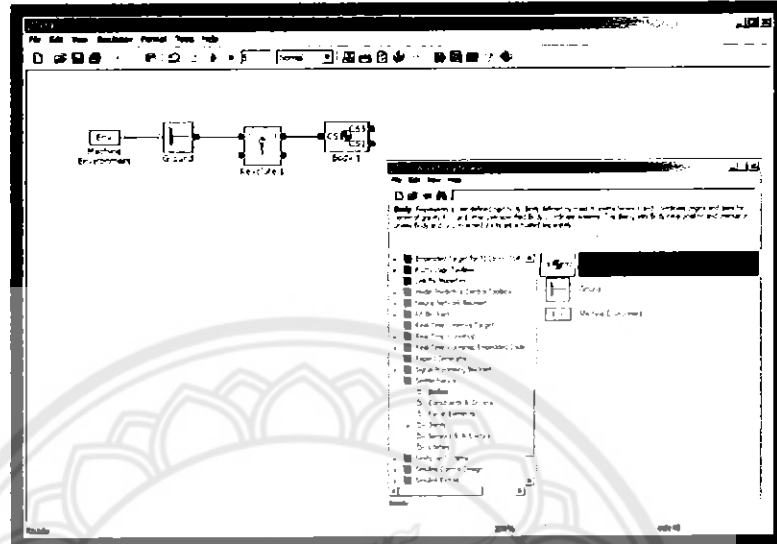
และตั้งค่าใน Block Parameters : Revolute 1 โดยกำหนด ports ขึ้นมา 2 port ใน number of sensor/ actuator ports และทำการตั้งค่า axis of action [x y z] ซึ่งเป็นการกำหนดลักษณะการเคลื่อนที่ของแกนกลให้อยู่ในแนวแกน x โดยกำหนด เป็น [0 0 1] และใช้กรอบอ้างอิงเทียบกับ world



รูปที่ 3-7 แสดงการตั้งค่า Revolute 1

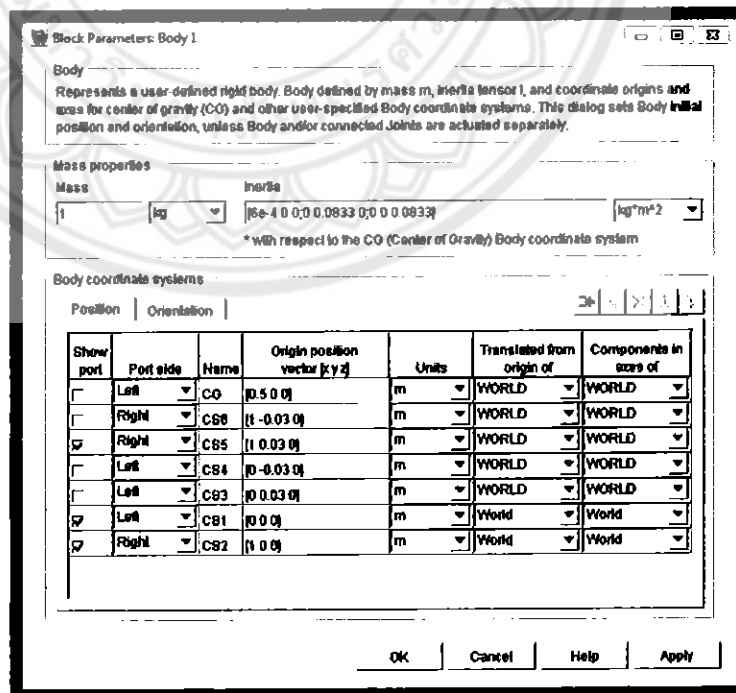
จากนั้นไปที่ Simulink Library Browser >>Simmechanic>> Bodies >> Body (1)

ทำการเชื่อมต่อ Body 1 กับ Revolute 1



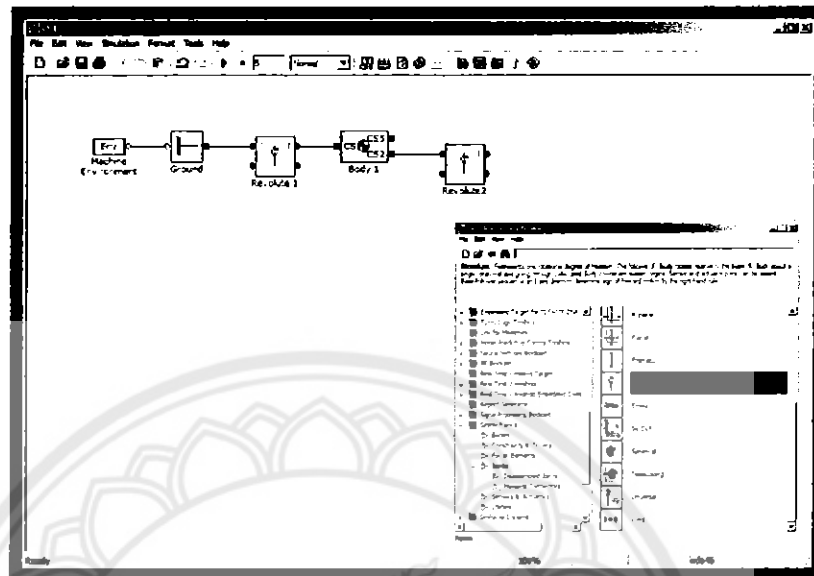
รูปที่3-8แสดงการเลือก Block Body

ทำการตั้งค่าของ Body 1 เพื่อกำหนดลักษณะของ Block Parameters เพื่อให้ได้ลักษณะของแขนกลที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยม 2 มิติ โดยต้องกำหนดคุณสมบัติของแขนกลที่จำเป็นคือ มวล โมเมนต์ความเฉื่อย และพิกัดจุด CS1-CS6 รวมจุดCG ของแขนกล จากหัวข้อ3.1 นำค่ามาใส่ใน Block ของ Body 1 ทำการเลือก show port cs1,cs2และcs5 เพื่อให้ block แสดงport ออกมา



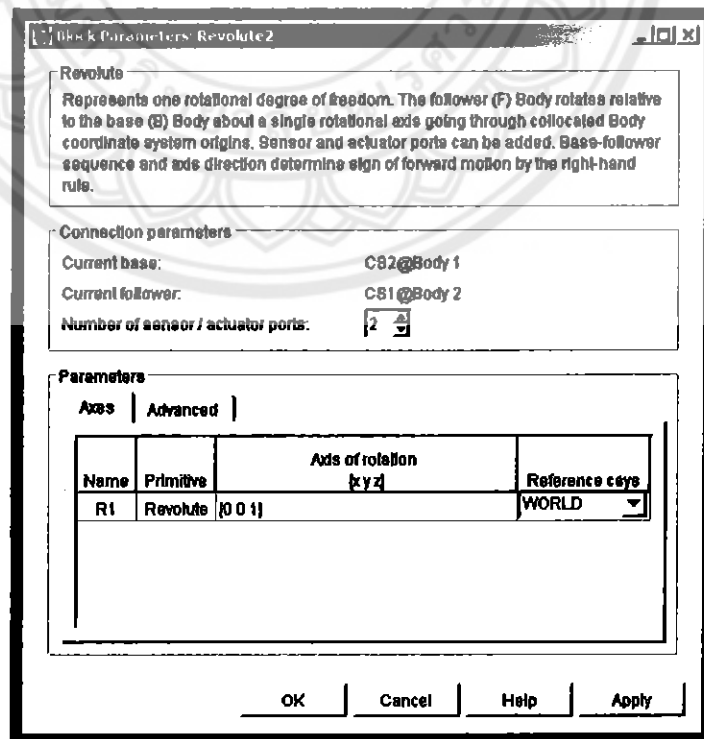
รูปที่3-9แสดงการตั้งค่า Block Body

จากนั้นทำการเชื่อมต่อ Revolute 2 กับ Body 1 โดย
ไปที่คำสั่ง Simulink Library Browser >> Simmechanic >> Joints >> Revolute (2)



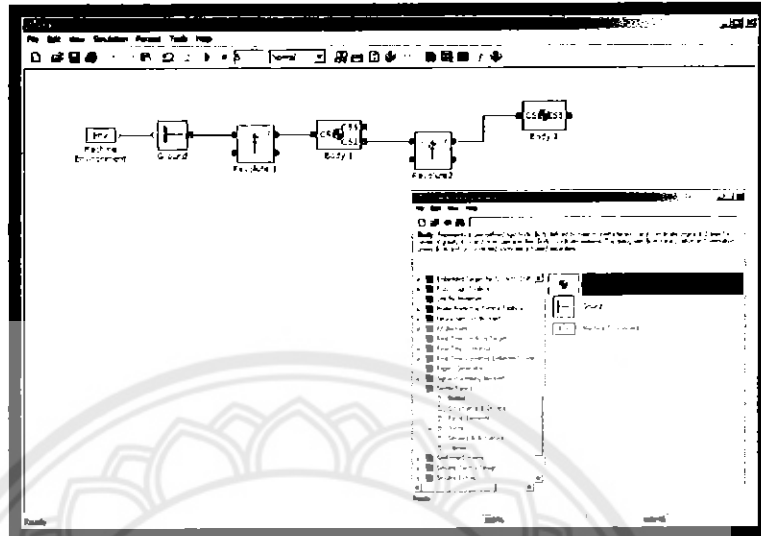
รูปที่3-10แสดงการเลือก Block Revolute 2

และทำการตั้งค่าใน Block Parameters : Revolute 2 โดยกำหนด ports ขึ้นมา 2 port
ใน number of sensor/ actuator ports และทำการตั้งค่า axis of action [x y z] ซึ่งเป็นการ
กำหนดลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลให้อยู่ในแนวแกน x โดยกำหนด เป็น [0 0 1] และใช้กรอบ
อ้างอิงเทียบกับ world



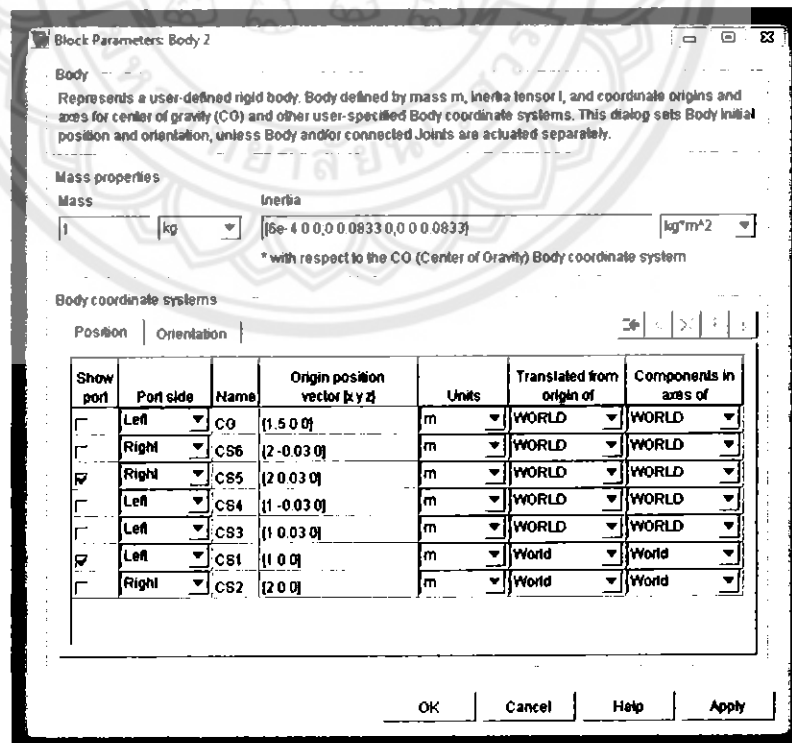
รูปที่3-11แสดงการตั้ง BlockRevolute 2

เชื่อมต่อ Body 2 เข้ากับ Revolute 2 โดย
เลือกที่คำสั่ง Simulink Library Browser >> Simmechanic >> Bodies >> Body (2)



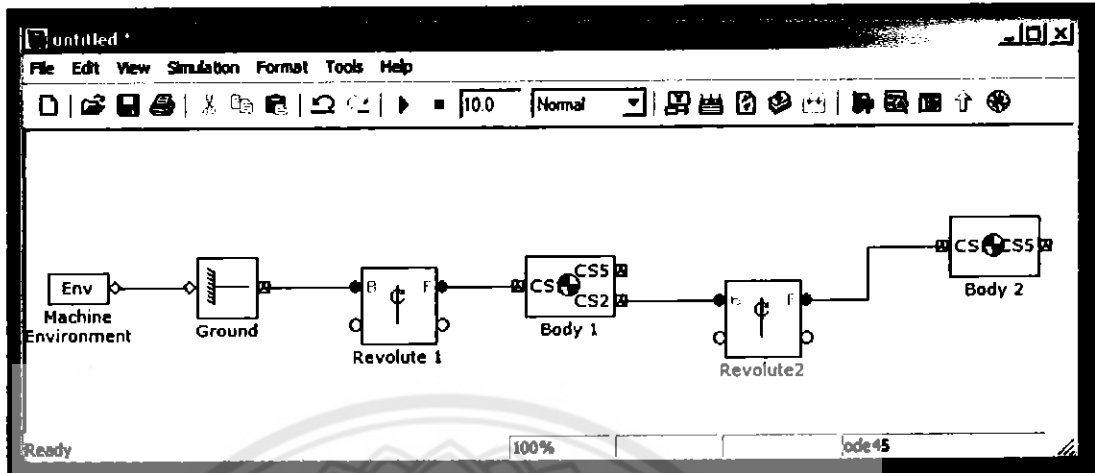
รูปที่ 3-12 แสดงการเลือก Block Body 2

ทำการตั้งค่าของ Body 2 เพื่อกำหนดลักษณะของ Block Parameters เพื่อให้ได้ลักษณะของแขนกลที่มีลักษณะเป็นเหลี่ยม 2 มิติ โดยต้องกำหนดคุณสมบัติของแขนกลที่จำเป็นคือ มวล โมเมนต์ความเฉื่อย และพิกัดจุด CS1-CS6 รวมจุด CG ของแขนกล จากหัวข้อ 3.2 นำค่ามาใส่ใน Block ของ Body 2 ทำการเลือก show port cs1 และ cs5 เพื่อให้ block แสดง port ออกมา



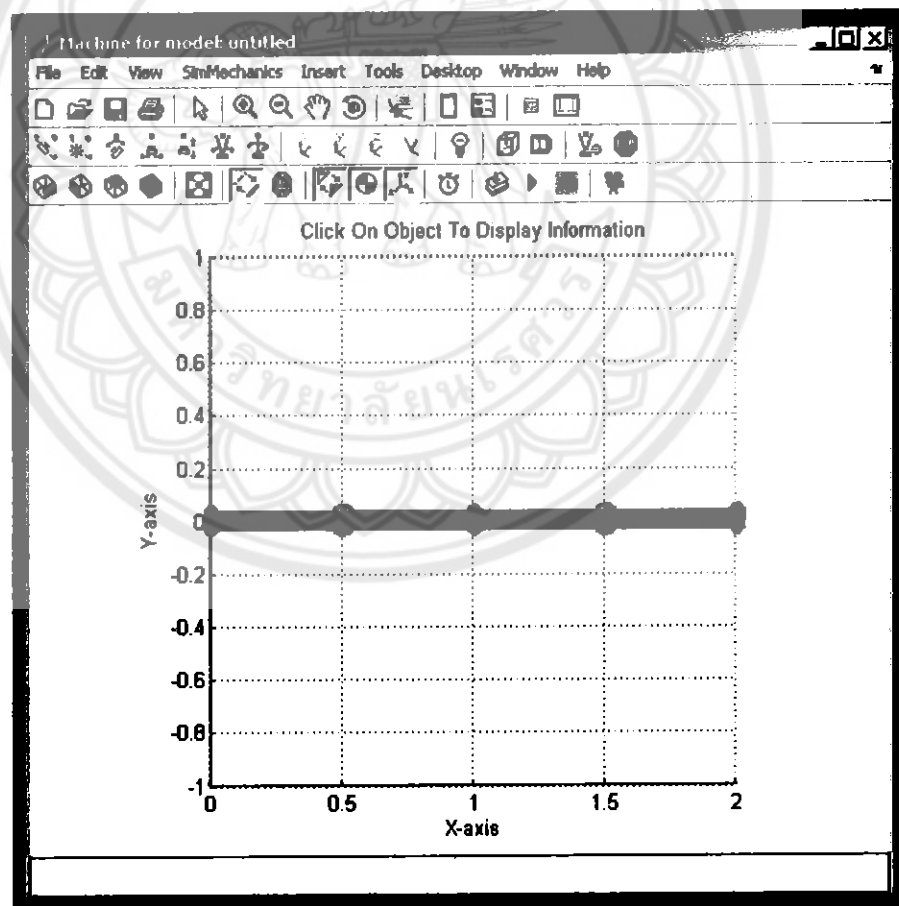
รูปที่ 3-13 แสดงการตั้งค่า Block Body 2

แสดง Block Diagram ของก้านทั้งสอง



รูปที่3-14การแสดง Block Diagram ของก้านทั้งสอง

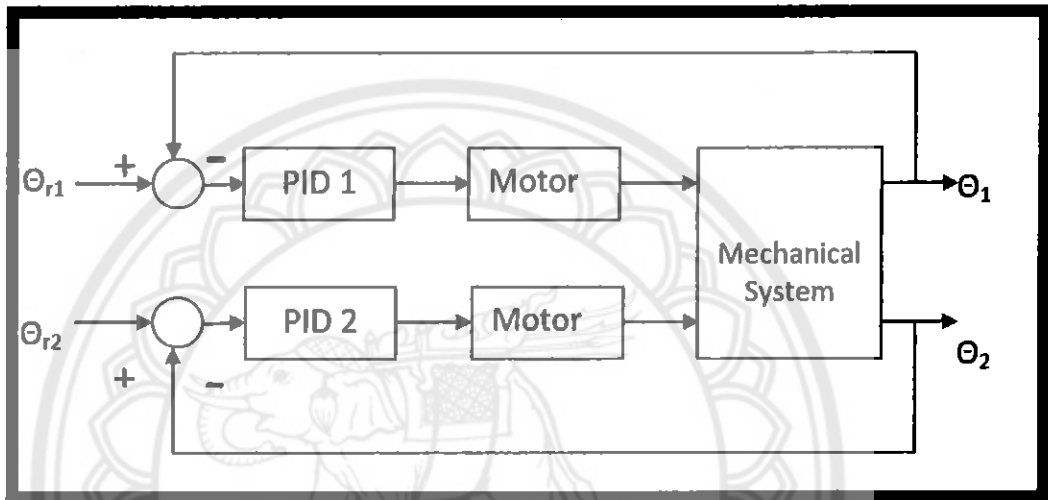
จะได้ Model ของแกนกลอกมาดังต่อไปนี้



รูปที่3-15แสดง Model ของก้านทั้งสอง

3.3 ระบบชุดควบคุม (PID Control)

การเคลื่อนที่ของแขนกลนั้นจะถูกควบคุมโดย PID Control ตามที่แสดงในแผนภาพด้านล่าง จากรูปจะเห็นว่าการทำงานของระบบควบคุมนี้เป็นวงจรรูป กล่าวคือ ตำแหน่งมุมของแขนกลจะถูกตรวจวัดและถูกป้อนกลับมาเปรียบเทียบกับ Input ที่ตั้งไว้แล้วได้สัญญาณ error ออกมา จากนั้นสัญญาณ error นี้ก็จะถูกส่งไปที่ PID Control เพื่อประมวลผลแล้วส่งสัญญาณไปปรับแก้ไขตำแหน่งมุมที่มอเตอร์ จากนั้นตำแหน่งมุมก็จะถูกตรวจวัดและถูกป้อนกลับไปใหม่วนเวียนไปเช่นนี้เรื่อยๆ จนกว่าจะได้ตำแหน่งมุมตามที่ตั้งไว้



รูปที่ 3-16 แผนภาพการควบคุมของแขนกล 2 แกน

16 ๑๑ ๘๖ ๐ ๘

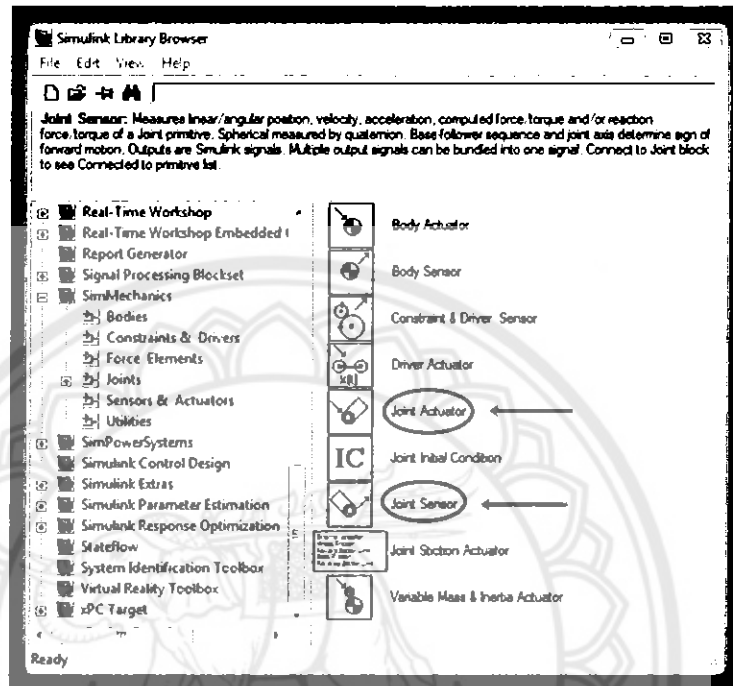
นร.

๖ ๘๖ ๐ ๑

๒๕๖๔

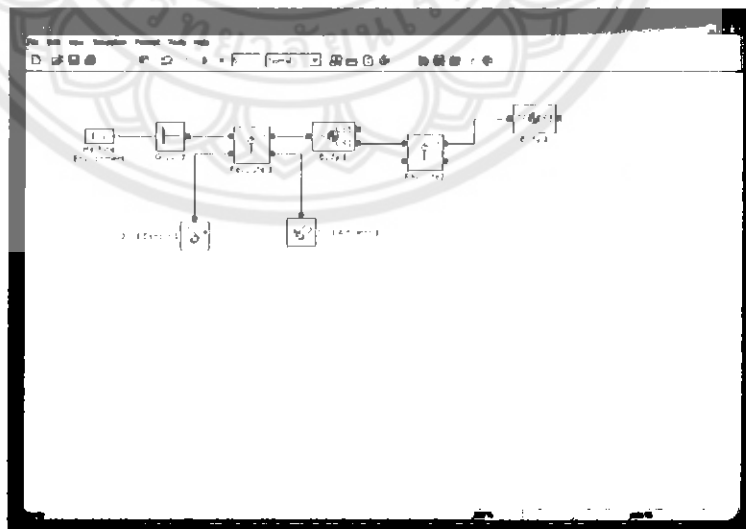
หลังจากสร้างรูปแฉกแล้วขั้นตอนต่อไปเป็นการสร้างชุดควบคุมPID ของการเคลื่อนที่ของ
แฉกทั้งสองแฉก ดังนี้

เลือกที่คำสั่ง Simulink Library Browser >> SimMechanics >> Sensors & Actuators
>> Joint Sensor 1 and Joint Actuator 1



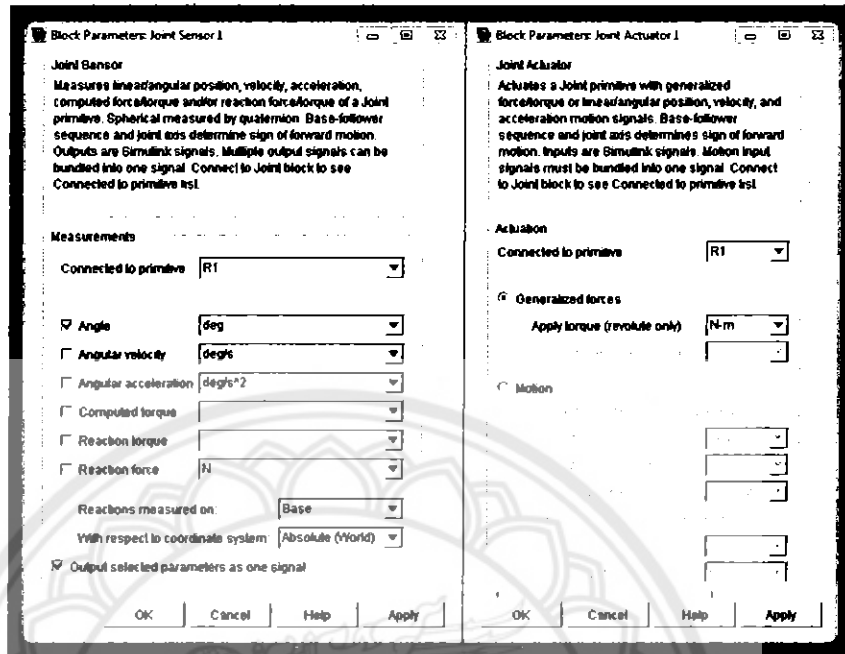
รูปที่3-17 แสดงการเลือก Block Joint Sensor และ Joint Actuator

ทำการเชื่อมต่อสัญญาณของ Joint Sensor และ Joint Actuator เข้ากับ Revolute 1



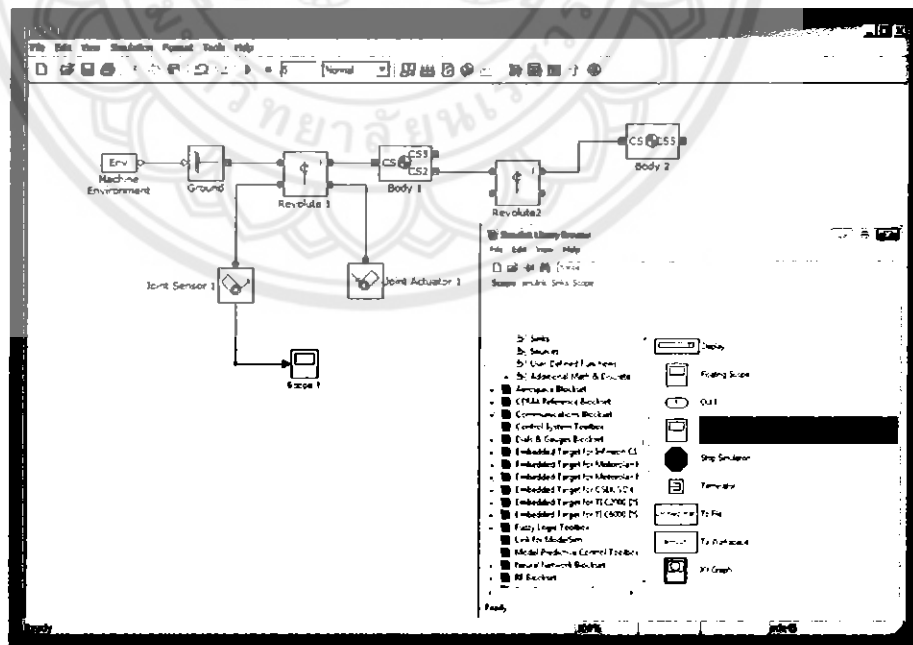
รูปที่3-18 แสดงการเชื่อมต่อสัญญาณของ Joint Sensor และ Joint Actuator กับ Revolute 1

ทำการตั้งค่า Block Joint Sensor 1 โดยการเลือก Angle และ Generalized forces



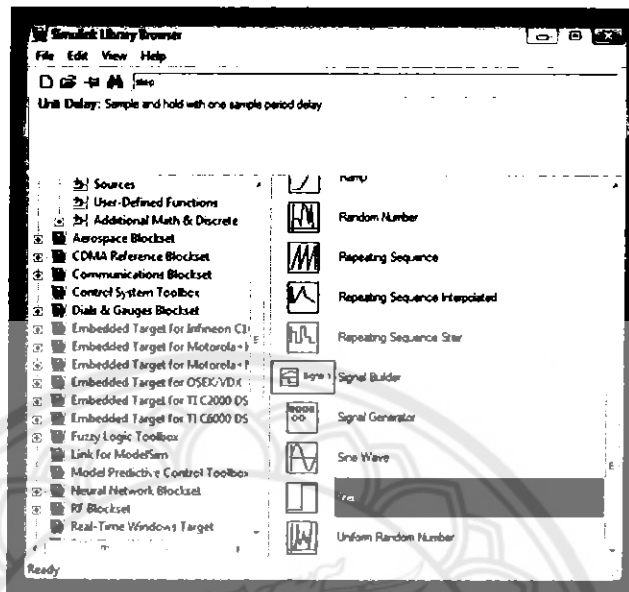
รูปที่3-19แสดงการตั้งค่าของ Block Joint Sensor

เลือกที่คำสั่ง Simulink Library Browser >> Simulink >> Commonly Used Blocks >> Scope 1 การเชื่อมต่อกราฟแสดงผลการเคลื่อนที่ของแขนกล Scope 1 เข้ากับ Joint Sensor 1 ดังรูปที่ 3.20



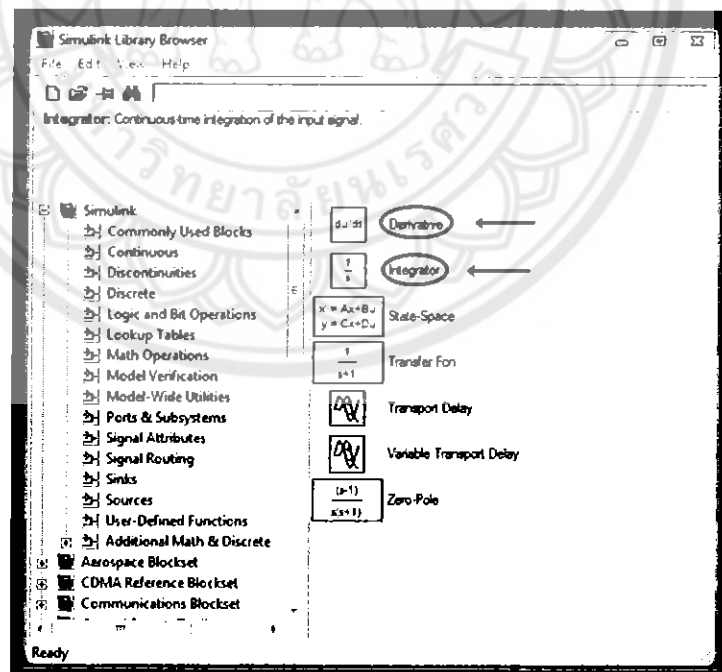
รูปที่3-20แสดงการเชื่อมต่อสัญญาณของ Scope ที่ Joint Sensor

ทำการสร้างชุดอุปกรณ์ควบคุม PID ของ Body 1 โดย
เลือกที่คำสั่ง Simulink Library Browser >> Simulink >> Sources >> Step 1



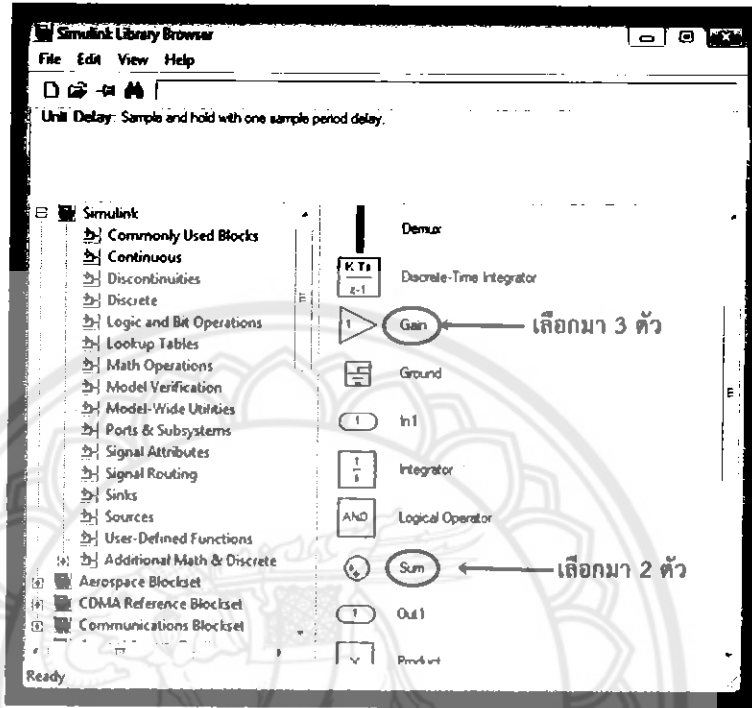
รูปที่ 3-21 แสดงการเลือก Block Step

จากนั้นไปที่ Simulink Library Browser >> Simulink >> Continuous >> Derivative
1 and Integrator 1



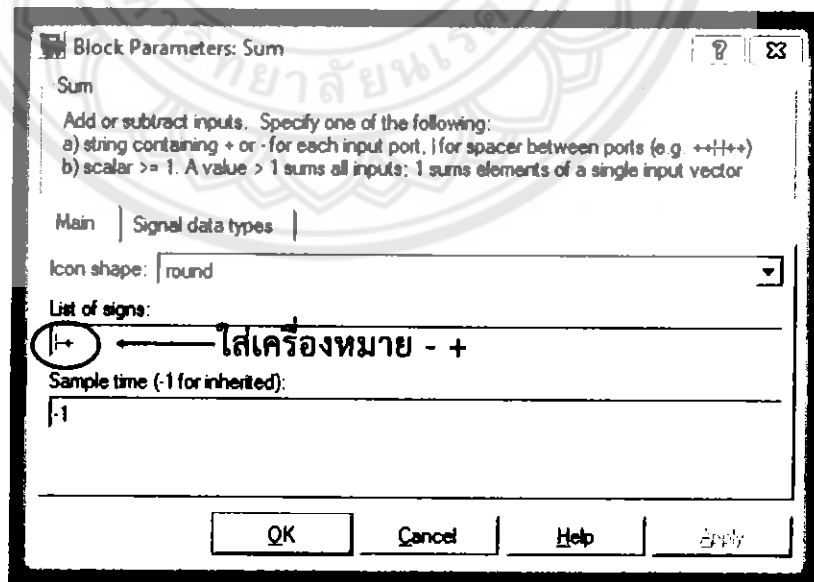
รูปที่ 3-22 แสดงการเลือก Block Derivative และ Integrator

ทำการรวมสัญญาณโดยเลือกที่คำสั่ง Simulink Library Browser >> Simulink >> Commonly Used Blocks >> Gain and Sum โดยทำการเลือก Gain จำนวน 3 ตัว และเลือก Sum จำนวน 2 ตัว

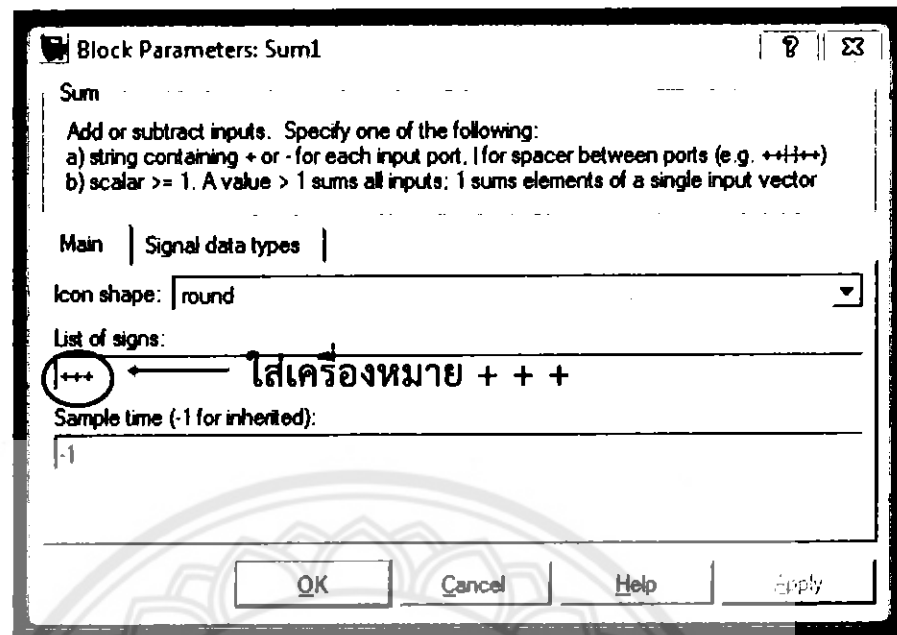


รูปที่ 3-23 แสดงการเลือก Block Gain และ Sum

ทำการตั้งค่า Block Parameters : Sum ดังภาพที่ 3-24 และ ภาพที่ 3-25

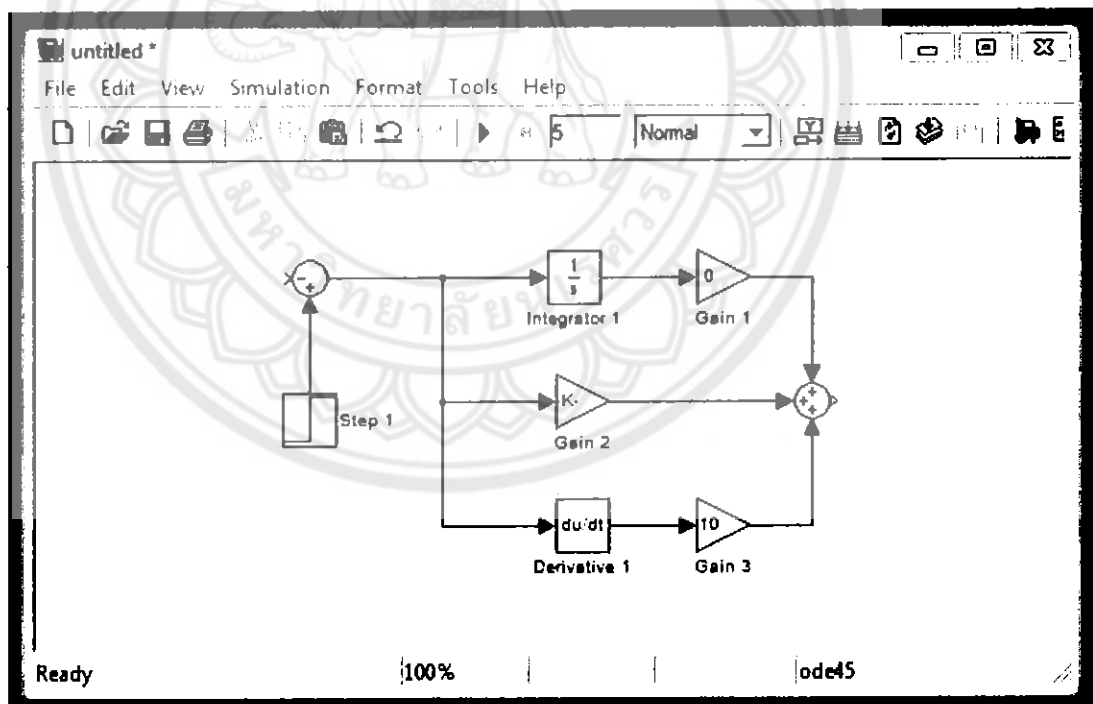


รูปที่ 3-24 แสดงการใส่เครื่องหมายใน Block Sum



รูปที่3-25แสดงการใส่เครื่องหมายใน Block Sum 1

เชื่อมต่อวงจรชุดควบคุม Body1 โดยการแสดงชุด Control PID 1



รูปที่3-26แสดงชุด Control PID 1

ตั้งค่า Gain 1-2-3 , Integrator 1 และ Derivative 1 ดังภาพที่ 3-27, 3-28 และ 3-29

The image shows three sequential screenshots of the 'Block Parameters: Gain' dialog box. Each dialog box has a title bar with a question mark icon and a close icon. The main content area includes a description of gain types, tabs for 'Main', 'Signal data types', and 'Parameter data types', and input fields for 'Gain', 'Multiplication', and 'Sample time'. At the bottom of each dialog are buttons for 'OK', 'Cancel', 'Help', and 'Apply'.

Block Parameters: Gain 1
 Gain
 Element-wise gain ($y = K \cdot u$) or matrix gain ($y = K \cdot u$ or $y = u \cdot K$).
 Main | Signal data types | Parameter data types |
 Gain: 0
 Multiplication: Element-wise ($K \cdot u$)
 Sample time (-1 for inherited): -1

Block Parameters: Gain 2
 Gain
 Element-wise gain ($y = K \cdot u$) or matrix gain ($y = K \cdot u$ or $y = u \cdot K$).
 Main | Signal data types | Parameter data types |
 Gain: 5500
 Multiplication: Element-wise ($K \cdot u$)
 Sample time (-1 for inherited): -1

Block Parameters: Gain 3
 Gain
 Element-wise gain ($y = K \cdot u$) or matrix gain ($y = K \cdot u$ or $y = u \cdot K$).
 Main | Signal data types | Parameter data types |
 Gain: 20
 Multiplication: Element-wise ($K \cdot u$)
 Sample time (-1 for inherited): -1

รูปที่ 3-27 แสดงการตั้งค่าใน Block Gain 1, 2 และ 3

Block Parameters: Integrator 1 ? || ☒

Integrator
Continuous-time integration of the input signal.

Parameters

External reset:

Initial condition source:

Initial condition:

Limit output

Upper saturation limit:

Lower saturation limit:

Show saturation port

Show state port

Absolute tolerance:

Enable zero crossing detection

รูปที่3-28แสดงการตั้งค่าใน Block Integrator 1

Block Parameters: Derivative 1 ? || ☒

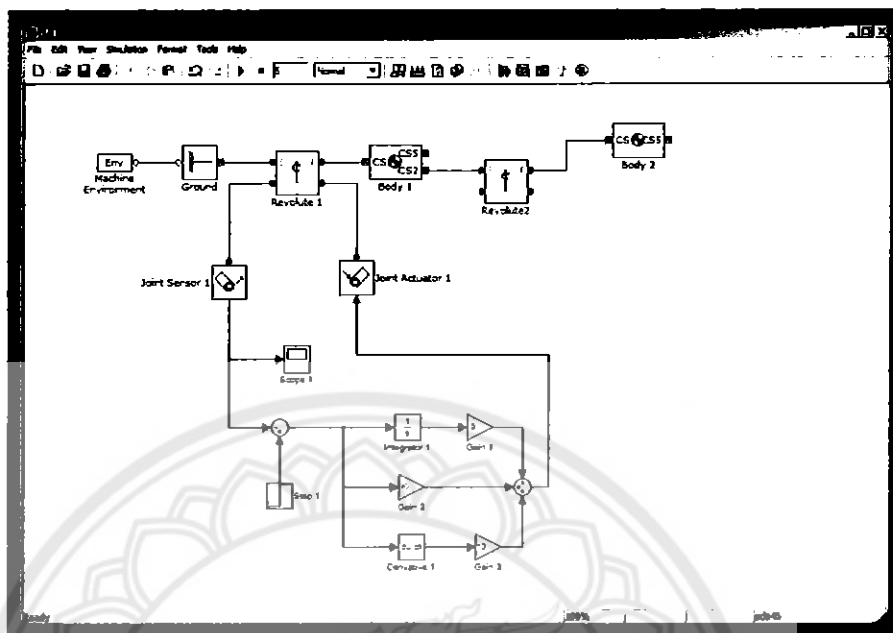
Derivative
Numerical derivative: du/dt .

Parameters

Linearization Time Constant $s/(Ns + 1)$:

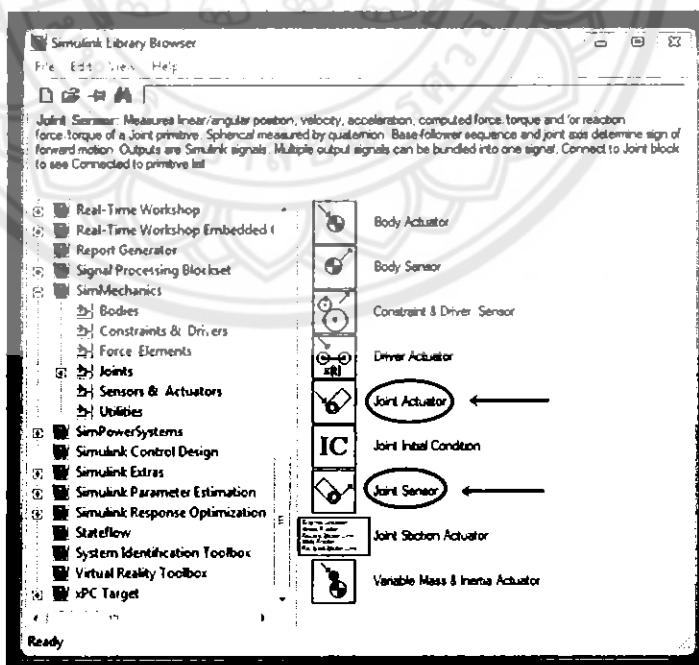
รูปที่3-29แสดงการตั้งค่าใน Block Derivative 1

ทำการเชื่อมต่อชุดควบคุม Body1 เข้ากับวงจรตั้งภาพ



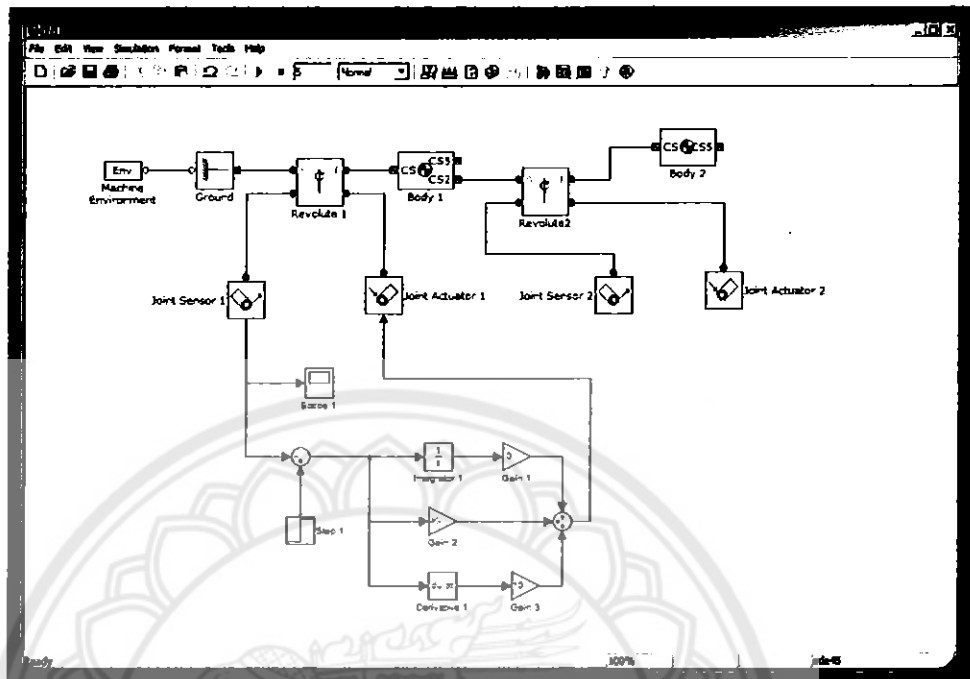
รูปที่3-30แสดงชุด Control PID เข้ากับ Joint Actuator

ทำการสร้างชุด Control PID 2 ใน Revolute 2 ขั้นตอนการทำเหมือนกับ Revolute 1 โดยเลือกที่คำสั่ง Simulink Library Browser >> SimMechanics >> Sensors & Actuators >> Joint Sensor 2 and Joint Actuator 2



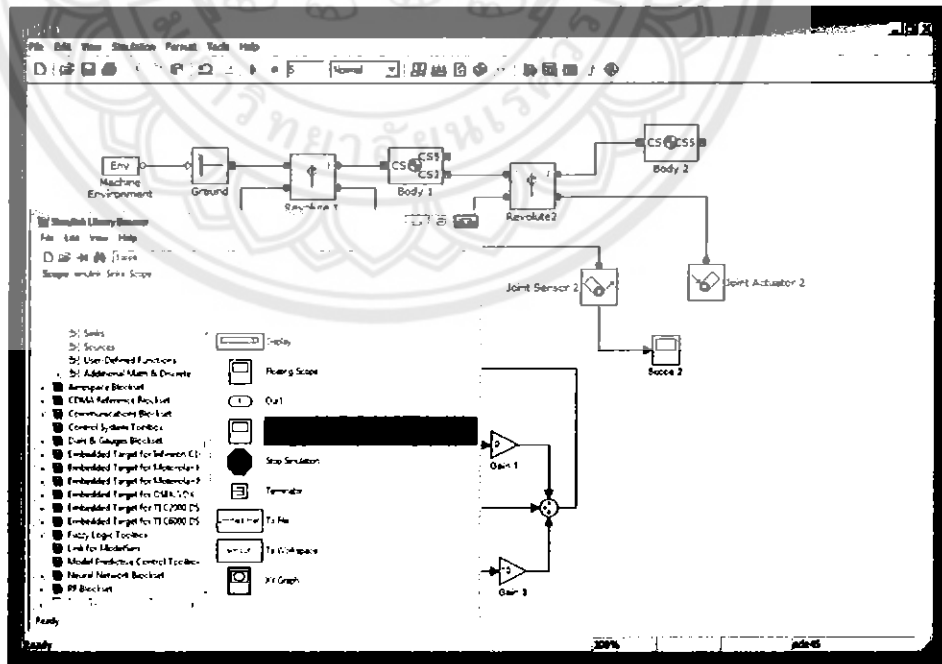
รูปที่3-31แสดงการเลือก Block Joint Sensor และ Joint Actuator

เชื่อมต่อสัญญาณของ Joint Sensor 2 และ Joint Actuator 2 กับ Revolute 2



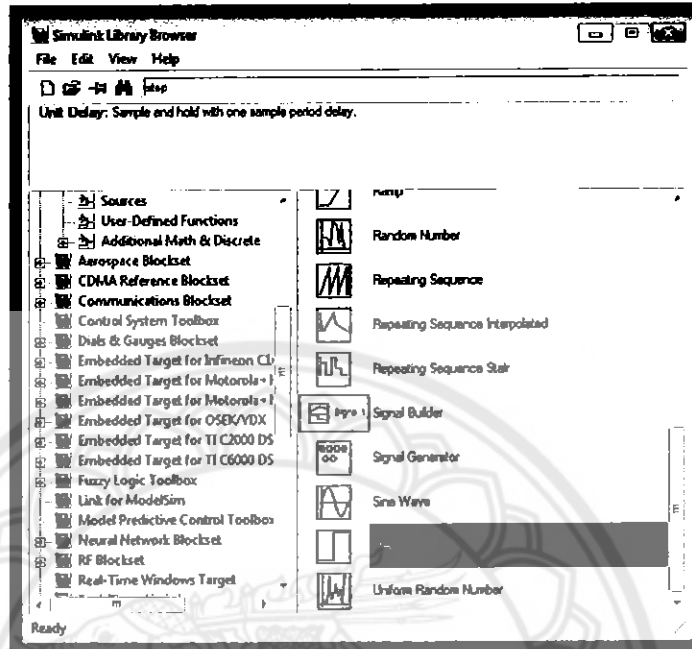
รูปที่3-32แสดงการเชื่อมสัญญาณของ Joint Sensor 2 และ Joint Actuator 2 กับ Revolute 2

ไปที่คำสั่ง Simulink Library Browser >> Simulink >> Commonly Used Blocks >> Scope 2 ทำการเชื่อมต่อกราฟสัญญาณ Scope 2 เข้ากับ Joint Sensor 2 ดังภาพที่ 3.33



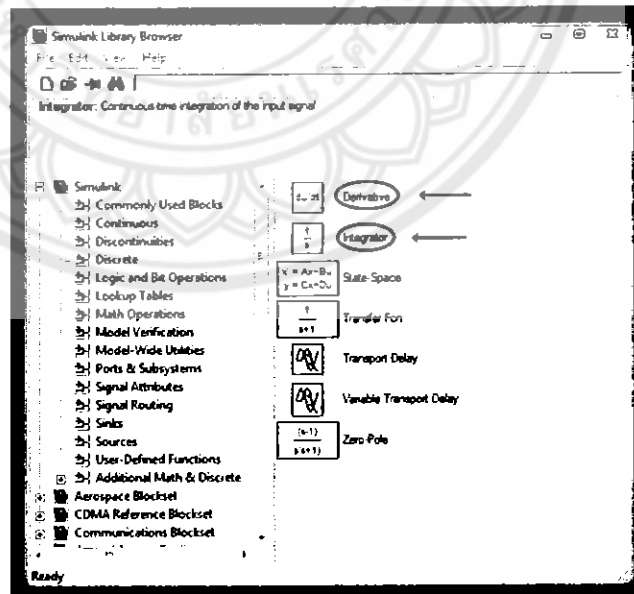
รูปที่3-33แสดงการเชื่อมต่อ Scope 2 ที่ Joint Sensor 2

ทำการสร้างชุดอุปกรณ์ควบคุม Body 2 โดย
ไปที่ Simulink Library Browser >> Simulink >> Sources >> Step 2



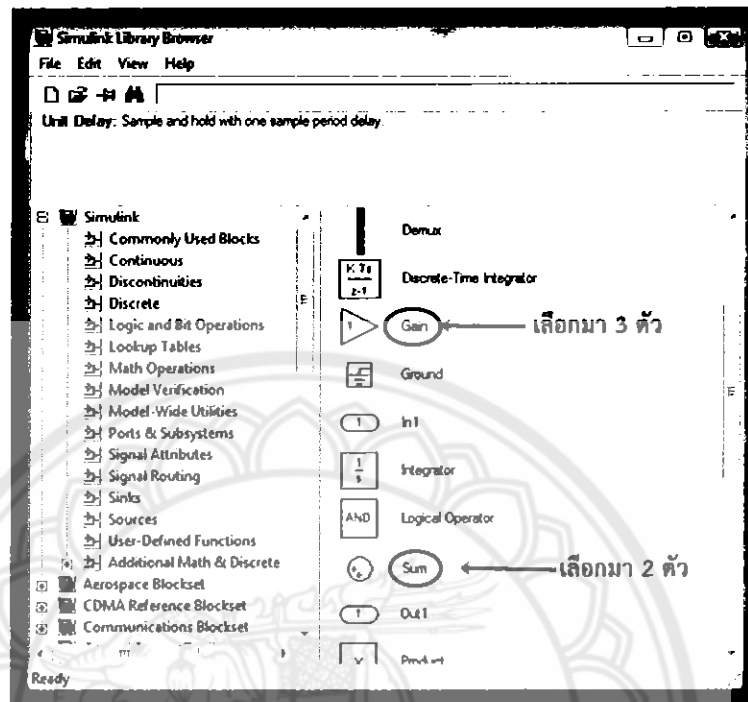
รูปที่ 3-34 แสดงการเลือก Block Step

ไปที่ Simulink Library Browser >> Simulink >> Continuous >> Derivative 2 and
Integrator 2



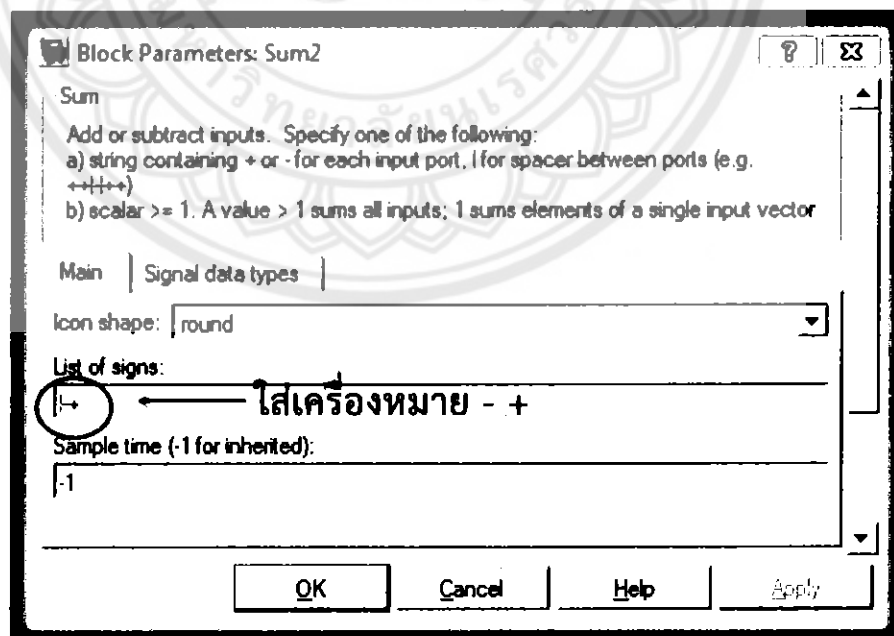
รูปที่ 3-35 แสดงการเลือก Block Integrator และ Derivative

ไปที่ Simulink Library Browser >> Simulink >> Commonly Used Blocks >> Gain and Sum โดยทำการเลือก Gain จำนวน 3 ตัว และเลือก Sum จำนวน 2 ตัว

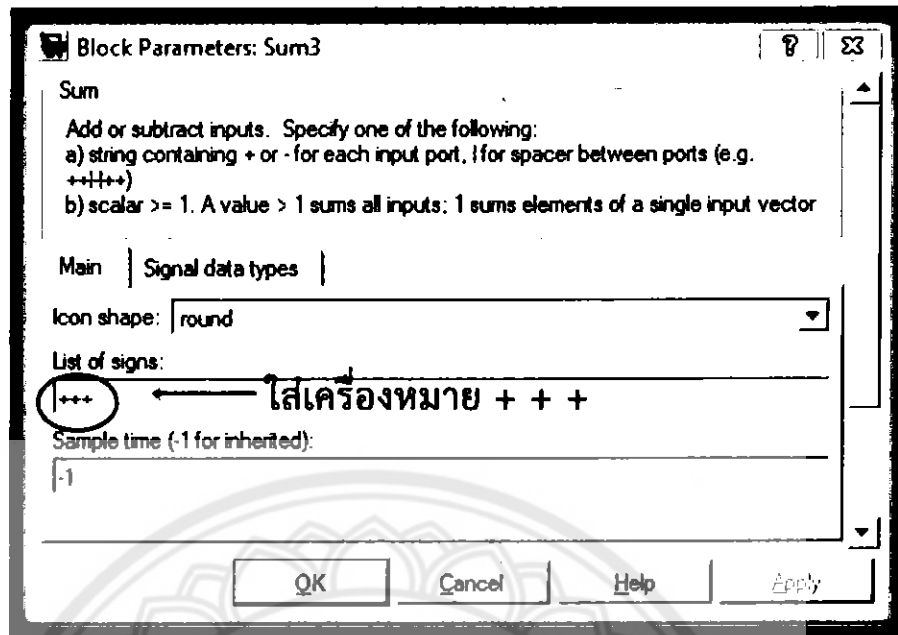


รูปที่ 3-36 แสดงการเลือก Block Gain และ Sum

ทำการตั้งค่า Block Parameters : Sum ดังรูปที่ 3-37 และ รูปที่ 3-38

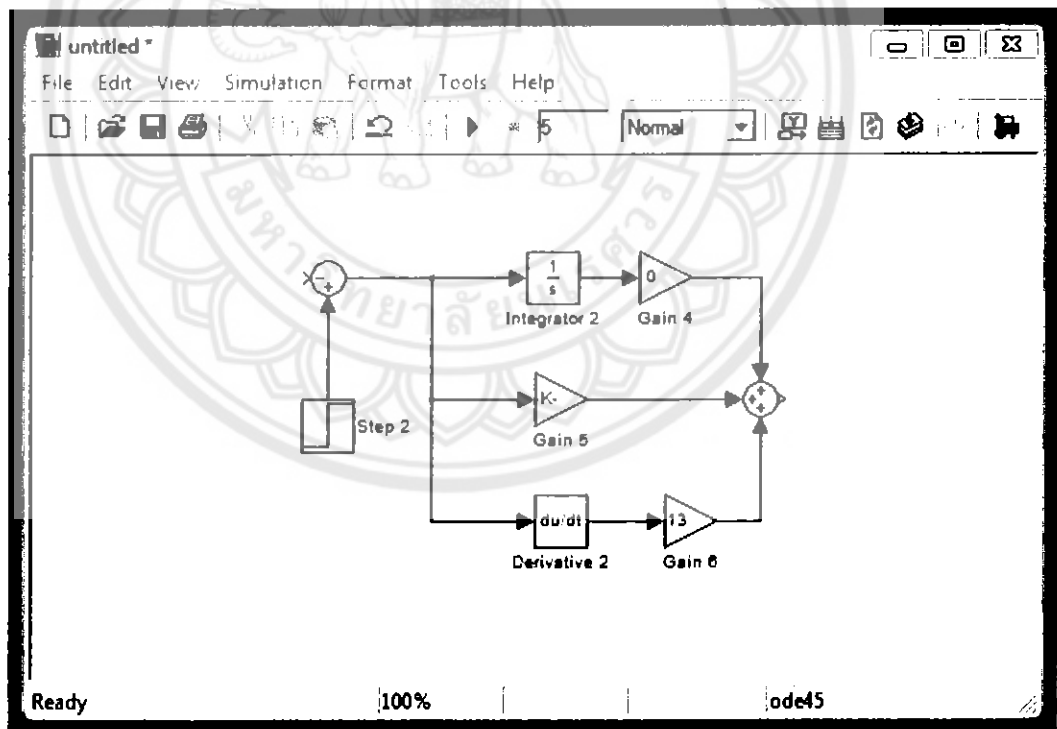


รูปที่ 3-37 แสดงการใส่เครื่องหมายใน Block Sum



รูปที่3-38แสดงการใช้เครื่องหมายใน Block Sum

เชื่อมต่อดวงจรชุดควบคุม Body 2 และเป็นการแสดงชุด PID 2



รูปที่3-39แสดงชุด Control PID 2

ตั้งค่า Gain 4-5-6 , Integrator 2 และ Derivative 2 ดังภาพที่ 3-40, 3-41และ 3-42

Block Parameters: Gain 4

Gain
Element-wise gain ($y = K \cdot u$) or matrix gain ($y = K \cdot u$ or $y = u \cdot K$)

Main | Signal data types | Parameter data types

Gain:
0

Multiplication: Element-wise ($K \cdot u$)

Sample time (-1 for inherited):
-1

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: Gain 5

Gain
Element-wise gain ($y = K \cdot u$) or matrix gain ($y = K \cdot u$ or $y = u \cdot K$)

Main | Signal data types | Parameter data types

Gain:
5500

Multiplication: Element-wise ($K \cdot u$)

Sample time (-1 for inherited):
-1

OK Cancel Help Apply

Block Parameters: Gain 6

Gain
Element-wise gain ($y = K \cdot u$) or matrix gain ($y = K \cdot u$ or $y = u \cdot K$)

Main | Signal data types | Parameter data types

Gain:
20

Multiplication: Element-wise ($K \cdot u$)

Sample time (-1 for inherited):
-1

OK Cancel Help Apply

รูปที่ 3-40 แสดงการตั้งค่า Gain 4, 5 และ 6

Block Parameters: Integrator 2 ? || Σ

Integrator
Continuous-time integration of the input signal.

Parameters

External reset:

Initial condition source:

Initial condition:

Limit output

Upper saturation limit:

Lower saturation limit:

Show saturation port

Show state port

Absolute tolerance:

Enable zero crossing detection

รูปที่3-41แสดงการตั้งค่าใน Block Integrator 2

Block Parameters: Derivative 2 ? || Σ

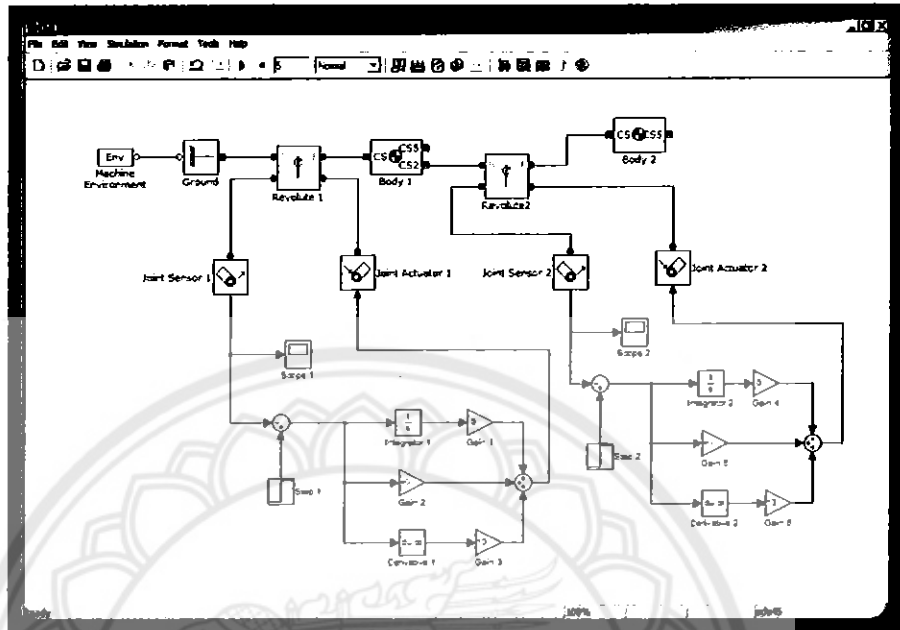
Derivative
Numerical derivative: du/dt .

Parameters

Linearization Time Constant $s/(Ns + 1)$:

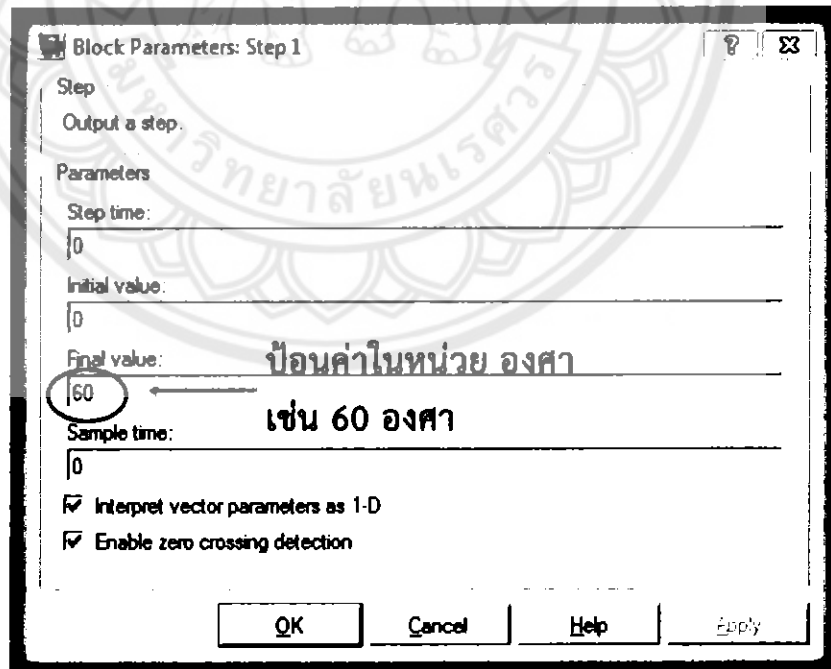
รูปที่3-42แสดงการตั้งค่าใน Block Derivative 2

ทำการเชื่อมต่อชุดควบคุม Body2 เข้ากับวงจรจะได้แบบฟอร์มวงจรควบคุมแขนกลสองแกนที่สมบูรณ์ ดังภาพ



รูปที่3-43แสดง Block Diagram ของแขนกลสมบูรณ์

ป้อนค่าที่ Step 1 และ Step 2 เพื่อสังเกตการณ์เคลื่อนที่ของแขนกลทั้ง 2 แกน



รูปที่3-44แสดงการตั้งค่าของ Block Step 1

Block Parameters: Step 2 [?] [X]

Step

Output a step.

Parameters

Step time: 0

Initial value: 0

Final value: **ป้อนค่าในหน่วย องศา**

130 ← **เช่น 30 องศา**

Sample time: 0

Interpret vector parameters as 1-D

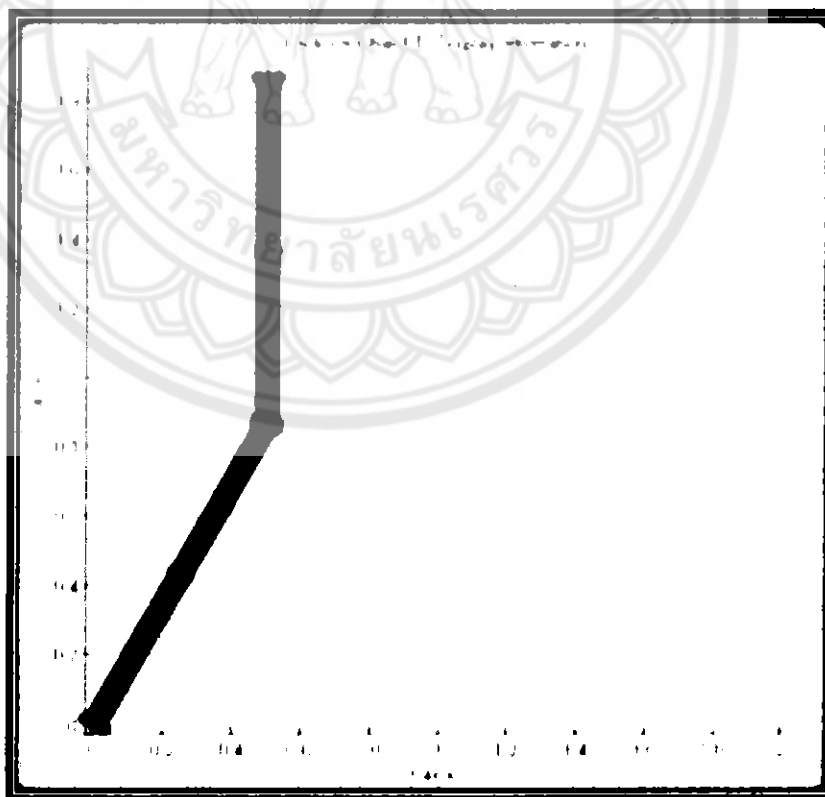
Enable zero crossing detection

OK Cancel Help Apply

รูปที่3-45แสดงการตั้งค่าของ Block Step 2

หลังจากที่ได้ป้อนค่าที่ Step 1 และ Step 2 จะได้ภาพจำลองลักษณะแขนกลแสดงออกมา

ดังนี้

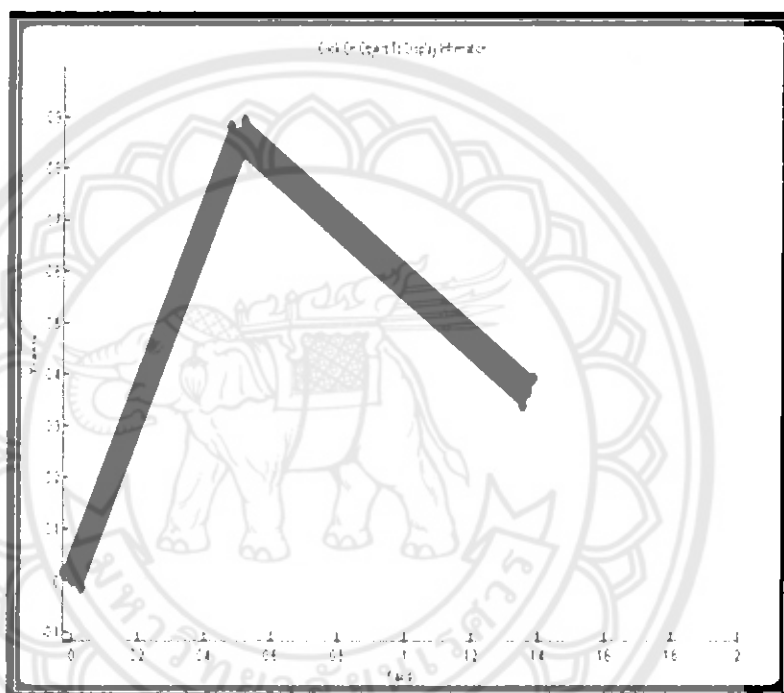


รูปที่3-46ภาพกราฟฟิคสองมิติแสดงการเคลื่อนที่ของแขนกลที่ป้อนค่าที่ Step function

บทที่ 4 ผลการดำเนินโครงการ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองของแขนกลใน Simmechanics และสมรรถนะของระบบควบคุมโดยจะทำการทดสอบดังนี้

ตัวอย่างที่ 1 สั่งการให้ link 1 เคลื่อนที่ไปตำแหน่งมุม 60 ($\theta_1=60$) และ link 2 เคลื่อนที่ไปตำแหน่งมุม -90 ($\theta_2 = -90$)



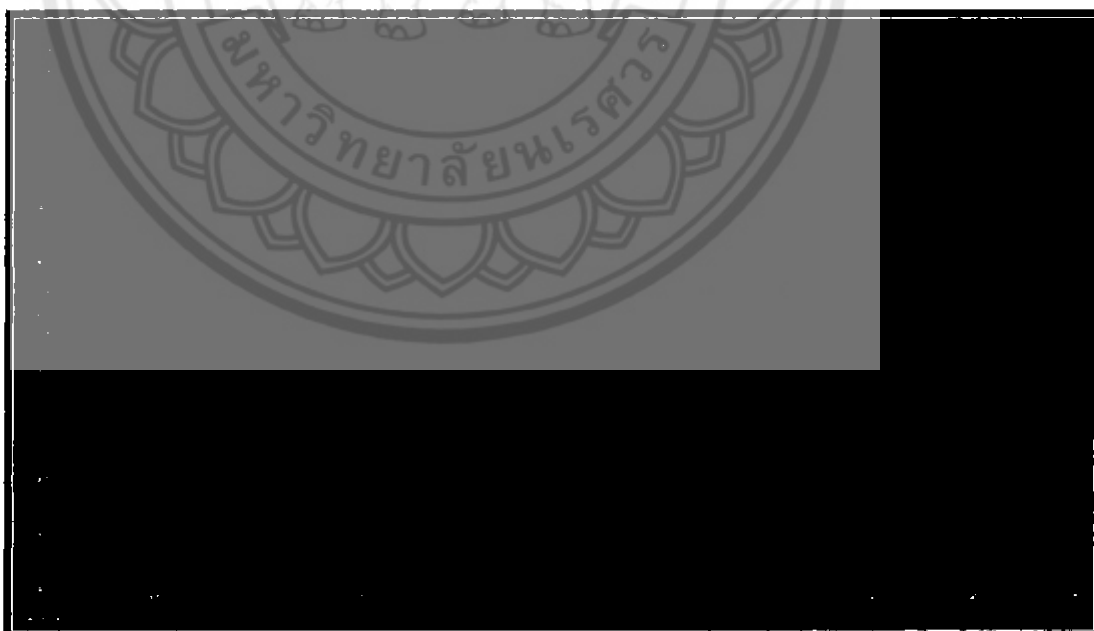
รูปที่ 4-1 ภาพกราฟพิกสองมิติ

จากกราฟจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ของแขนกลคู่เข้าสู่มุม $\theta_1 = 60$ องศา ตาม Input ที่ตั้งไว้



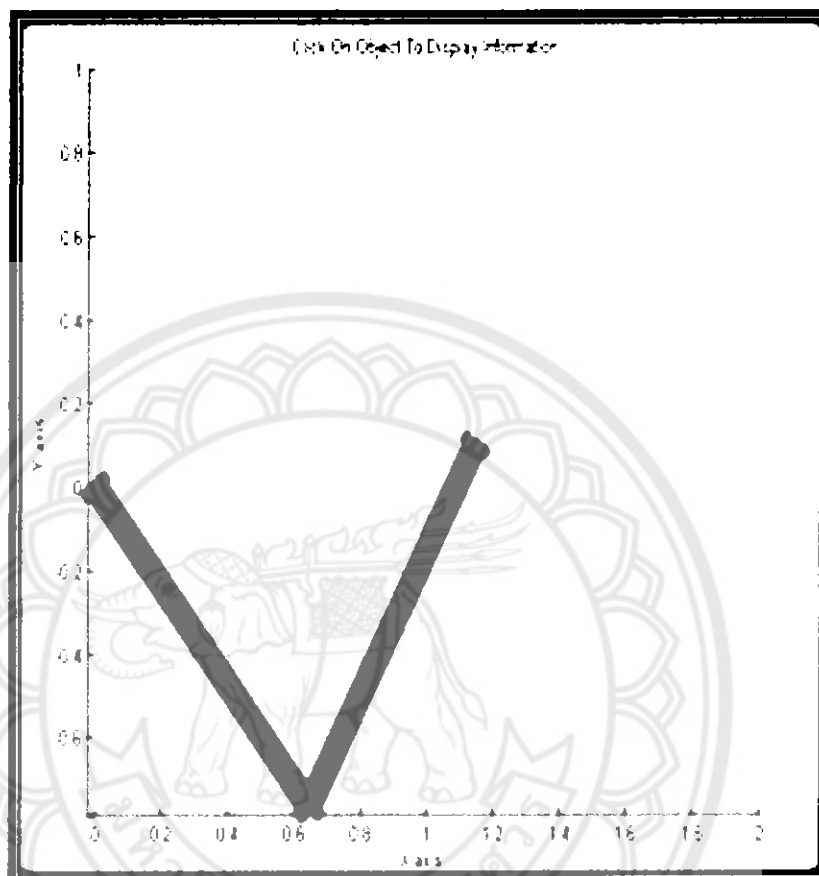
รูปที่ 4-2 กราฟแสดงการตอบสนองของ θ_1

จากกราฟจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ของแขนกลคู่เข้าสู่มุม $\theta_2 = -90$ องศา ตาม Input ที่ตั้งไว้



รูปที่ 4-3 กราฟแสดงการตอบสนองของ θ_2

ตัวอย่างที่ 2 สั่งการให้ link 1 เคลื่อนที่ไปตำแหน่งมุม -50 ($\theta_1 = -50$) และ link 2 เคลื่อนที่ไปตำแหน่งมุม 110 ($\theta_2 = 110$)



รูปที่ 4-4 ภาพกราฟฟิกลูกสองมิติ

จากกราฟจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ของแขนกลคู่เข้าสู่มุม $\theta_1 = -50$ องศา ตาม Input ที่ตั้งไว้



รูปที่ 4-5 กราฟแสดงการตอบสนองของ θ_1

จากกราฟจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ของแขนกลคู่เข้าสู่มุม $\theta_2 = 110$ องศา ตาม Input ที่ตั้งไว้



รูปที่ 4-6 กราฟแสดงการตอบสนองของ θ_2

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินโครงการและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ

จากตัวอย่างการทดลองในบทที่ 4 จะเห็นได้ว่าภาพจำลองของแขนกลใน simmechanics ที่ได้ออกมานั้นง่ายต่อการทำความเข้าใจทั้งนี้เนื่องจากว่าโปรแกรม simmechanics สามารถแสดงออกมาเป็นภาพเคลื่อนไหวได้ นอกจากนี้การสั่งการให้แขนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งมุมและการปรับค่า Gain ของ PID ที่ต้องการก็สามารถทำได้ง่ายด้วยเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากว่าโปรแกรม simmechanics นั้นจะติดต่อกับผู้ใช้แบบกราฟฟิก

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบ Inward kinematics เพื่อควบคุมส่วนปลายของแขนกลให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้
2. ควรมีการศึกษา การป้อนค่าต่างๆของแขนกล เช่น นำสมการไปเขียน Blog แล้วป้อนค่าInput ลงใน Blog ของสมการ
3. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยนำความรู้ใน Matlab โดยเฉพาะในส่วนของโปรแกรม Simmechanics และ Simmulink ไปประยุกต์ใช้จริงกับชิ้นงานเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด
4. ควรสร้างแขนกลจริงขึ้นมาเพื่อตรวจสอบผลที่ได้จากการจำลองภาพการเคลื่อนที่ของแขนกลสองแกน

เอกสารอ้างอิง

- [1] William J. Palm III. (2010). **System Dynamics**. (2ndED). New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- [2] James B. DABNEY , THOMAS L. HARMAN . **Mastering SIMULINK**
- [3] John F. Gardner .**Simulation Of Machines**
- [4] User' Guide .**SimMechanics TM**
- [5] Visualization and Import Guide . **SimMechanics TM**

