

การออกแบบตัวควบคุมแบบคอมพิวเตอร์สำหรับแขนกล
แบบ 3 ข้อต่อบนระนาบ

COMPUTED TORQUE DESIGN FOR 3 - LINK PLANAR ROBOT

ชนาธิป วงศ์ประเมษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การออกแบบตัวควบคุมแบบคอมพิวทอร์คสำหรับแขนกล
แบบ 3 ข้อต่อบนระนาบ

ชนาธิป วงศ์ปรเมษฐ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบตัวควบคุมแบบคอมพิวเตอร์สำหรับแขนกล แบบ 3
ข้อต่อบนระนาบ

ชื่อ - นามสกุล

Computed Torque Design For 3 Link Planar Robot

สาขาวิชา

นายชนาธิป วงศ์ประเมษฐ์

อาจารย์ที่ปรึกษา

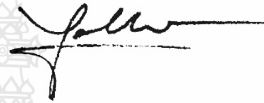
วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา

อาจารย์มนูศักดิ์ จานทอง, Dr.-Ing.

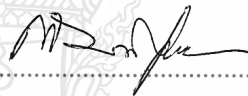
2555

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ

(อาจารย์พัฒนา ปราโมทย์, Ph.D.)



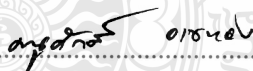
..... กรรมการ

(อาจารย์เกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย, Ph.D.)



..... กรรมการ

(อาจารย์ปรัชญา เปรมปราณีรัตน์, Ph.D.)



..... กรรมการ

(อาจารย์มนูศักดิ์ จานทอง, Dr.-Ing.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหมาย ผิวสอาด, Ph.D.)

วันที่ 19 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2556

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบตัวควบคุมแบบคอมพิวทอร์คสำหรับแขนกลแบบ 3 ข้อต่อบนระนาบ
ชื่อนักศึกษา	นายชนาธิป วงศ์ปรเมษฐ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์มนูศักดิ์ จานทอง, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบคอมพิวทอร์คสำหรับแขนกลแบบ 3 ข้อต่อบนระนาบโดยใช้แขนกลอุตสาหกรรมของ ESHED ROBOTEC รุ่น SCORBOT ER VII ซึ่งเป็นแขนกลที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าและชุดอัตราทดเกียร์ ในการเคลื่อนที่ของแขนกล โดยมีเอ็น โค้ดเดอร์ ในการวัดตำแหน่งของการเคลื่อนที่ของแขนกล

โดยการศึกษาการเคลื่อนที่ของแขนกลโดยใช้สมการลากรองจ์ช่วยในการคำนวณเพื่อสร้างแบบจำลองและออกแบบตัวควบคุมและใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB/Simulink ในการทดสอบตัวควบคุมที่ออกแบบไว้ ได้กำหนดรูปแบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็น 2 แบบ คือ 1. แบบต่อเนื่องด้วย Trajectory แบบ COSINE Curve 2. แบบจุดต่อจุดด้วย Trajectory แบบ cubic polynomial ในการทดลองจริงกับแขนกลได้ใช้ Real time window target ของโปรแกรม MATLAB/Simulink

ผลการทดลองกับโปรแกรม MATLAB/Simulink ในการทดลองแบบที่ 1 ระบบได้ติดตามเส้นอ้างอิงโดยมีการแกว่งของสัญญาณประมาณ ± 0.00003 เรเดียน และการทดลองแบบที่ 2 พบว่าการเคลื่อนที่จากจุดสู่จุดเป็นไปตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ แต่มีความคลาดเคลื่อนเมื่ออยู่ในสภาวะคงตัวอยู่ที่ ± 0.0015 เรเดียน และ ส่วนการทดลองจริงกับแขนกลในการทดลองแบบที่ 1 พบว่าระบบสามารถติดตามเส้นอ้างอิงได้ดี โดยมีการแกว่งของสัญญาณที่ ± 0.013 เรเดียน ส่วนการทดลองแบบที่ 2 ระบบมีความคลาดเคลื่อนเมื่ออยู่ในสภาวะคงตัวอยู่ที่ ± 0.0025 เรเดียน

คำสำคัญ: แขนกล ตัวควบคุมแบบคอมพิวทอร์ค ระบบควบคุมการเคลื่อนที่ตามเส้นทางกำหนด

Thesis Title	Computed Torque Design for 3-link Planar Robot
Name - Surname	Mr. Chanatip Vongpraramate
Program	Mechanical Engineering
Thesis Advisor	Mr. Manusak Janthong, Dr.-Ing.
Academic Year	2012

ABSTRACT

This thesis presents a design of computed torque control for the planar 3-joint robotic arm from ESHED ROBOTEC model SCORBOT ER VII, in which its motion is driven by both the electric motors and the gear sets, and its position is measured by the encoders.

To study the robotic arm motion, Lagrange equation is used to derive the mathematical model and the controller design is implemented by MATLAB/Simulink. In experiments, two types of robotic arm motion are defined as; 1. Continuous motion trajectory using COSINE-curve, and 2. Point-to-point trajectory using the cubical polynomial. For physical experiment, the robotic arm is controlled by Real Time Window Target in MATLAB/Simulink.

From the simulation experiments with MATLAB/Simulink, the first result shows that the arm can track the reference curve with an error of ± 0.00003 radian in the periodic oscillation. The second result, the arm can successfully move from point-to-point and reach the target and the steady-state error of arm angle is ± 0.0015 radian. For physical experiments, in the first experiment, the robotic arm can track the reference curve with an error of ± 0.013 radian and in the second experiment, the steady-state error of arm angle is ± 0.0025 radian.

Keywords: robotic arm, computed torque control, trajectory motion control

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ดร.มนูศักดิ์ จานทอง ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำปรึกษาในการทำวิจัย แนวทางการแก้ปัญหา เทคนิคการปรับแต่งเพื่อให้ผลการวิจัยเป็นไปตามเป้าหมายที่ได้ตั้งไว้ รวมทั้งข้อคิดต่างๆ ในการทำวิจัย และได้ให้เครื่องมืออุปกรณ์ในการทำวิจัยในครั้งนี้ พร้อมทั้งดูแลและสอบถามถึงความก้าวหน้าของวิทยานิพนธ์ ทำให้ผู้เขียนทำงานได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.พิพัฒน์ ปราโมทย์ ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์ และอาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิจากมหาวิทยาลัยมหิดล ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย ที่ได้ให้คำแนะนำเพิ่มเติม พร้อมทั้งข้อเสนอแนะ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและบุคลากรที่เกี่ยวข้องทุกท่าน รวมถึงมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์เครื่องมือในการทำวิจัย พร้อมทั้งยังอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้เขียนได้ทำวิจัยได้อย่างราบรื่น

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่คอยให้การสนับสนุนในการศึกษา ให้กำลังใจ รวมทั้งกระตุ้นให้การทำวิจัยสำเร็จลงได้ด้วยดี ตลอดจนคณะอาจารย์ พี่ๆ ที่เรียนปริญญาโท ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษา เป็นกำลังใจ และคอยสนับสนุน ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์

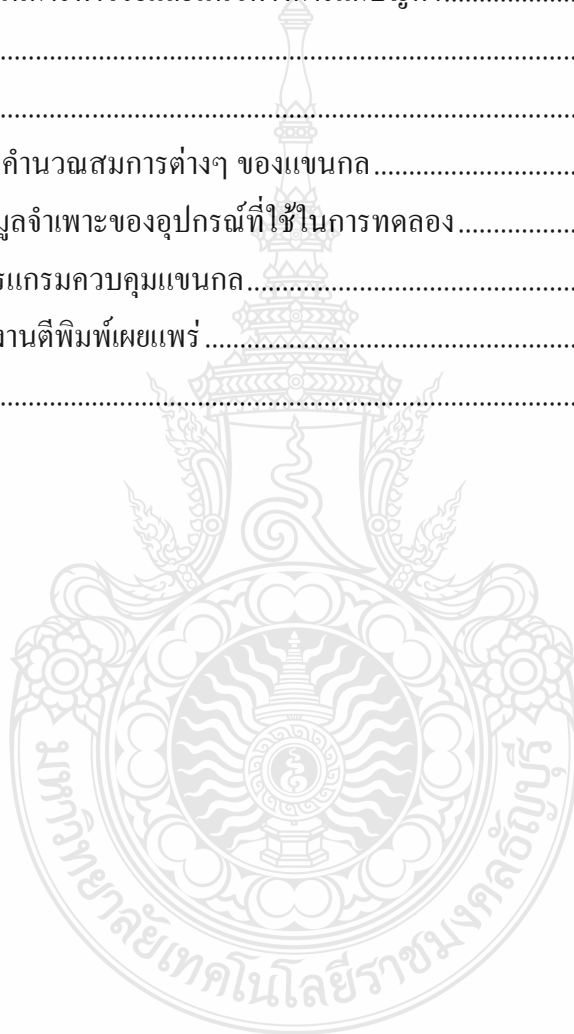
ชนาธิป วงศ์ปรเมษฐ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 นิยามของหุ่นยนต์.....	3
2.2 การแบ่งประเภทของหุ่นยนต์.....	5
2.3 จลศาสตร์เกี่ยวกับตำแหน่งของแขนกล.....	14
2.4 จาโคเบียน.....	16
2.5 พลศาสตร์.....	16
2.6 คอมพิวเตอร์คอนโทรล.....	19
2.7 โครงสร้างของระบบ.....	20
2.8 การควบคุม.....	27
2.9 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	29
3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 ศึกษาข้อมูลและโครงสร้างของหุ่นยนต์.....	32
3.2 สมการ Trajectory Generator.....	42
4 ผลการทดลอง	
4.1 การทดลองกับแบบจำลอง.....	45

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.2 การทดลองจริงกับแขนกล	49
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	60
5.2 ปัญหาที่พบในการทำวิจัยและแนวทางการแก้ปัญหา.....	61
รายการอ้างอิง.....	62
ภาคผนวก.....	64
ภาคผนวก ก การคำนวณสมการต่างๆ ของแขนกล.....	65
ภาคผนวก ข ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	81
ภาคผนวก ค โปรแกรมควบคุมแขนกล.....	94
ภาคผนวก ง ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่.....	106
ประวัติผู้เขียน.....	122



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ลักษณะการทำงานของจุดต่อจุด	8
2.2	รายละเอียดของชุดขับเคลื่อน	22
2.3	องศาการหมุนในแต่ละแกนของหุ่นยนต์	23
2.4	ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์.....	24
3.1	DH-Table พารามิเตอร์ของหุ่นยนต์	33
3.2	ค่า Trajectory Generator (หน่วยเป็น องศา).....	43
4.1	ค่า Trajectory Generator (หน่วยเป็น องศา).....	47



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	การทำงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเปรียบเทียบกับแขนมนุษย์ 6
2.2	Cartesian Robot 9
2.3	Cylindrical Robot 10
2.4	Spherical Robot 11
2.5	SCARA Robot 12
2.6	Articulated Arm 13
2.7	Denavit-Hartenberg Parameters 15
2.8	บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมแบบคอมพิวทอร์ค 20
2.9	แขนกล SCORBOT ER VII 21
2.10	แกนและข้อต่อของแขนกล 21
2.11	พื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ 23
2.12	ระบบขับเคลื่อน 24
2.13	ชุดขับเคลื่อนและตำแหน่งมอเตอร์ไฟฟ้า 25
2.14	มอเตอร์และตำแหน่งเอ็นโค้ดเดอร์ 26
2.15	เอ็นโค้ดเดอร์ดิส และการส่งสัญญาณพัลส์ 26
2.16	ลิมิตสวิทช์และการวางลิมิตสวิทช์ในหุ่นยนต์ SCORBOT ER VII 27
2.17	การเชื่อมต่อคอมพิวทอร์คกับแขนกล 28
2.18	การ์ด DAQ NI PCI-6221 28
2.19	มอเตอร์ไครว์ Accelus รุ่น ASP – 090 – 09 29
2.20	การควบคุมโดยใช้สัญญาณป้อนกลับแบบความเร่ง 29
2.21	โครงสร้างของแบบปรับตัวได้ 30
2.22	การควบคุมแบบไม่เชิงเส้น 31
3.1	แกนหมุนของหุ่นยนต์ 32
3.2	จุดกำเนิดในแต่ละแกน 33
3.3	สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ในรูปของ Block Diagram 38
3.4	โมเดลการออกแบบตัวควบคุมแบบคอมพิวทอร์ค 39
3.5	ค่า Manipulator Inertia Matrix, $M(q)$ ในรูปของ Block Diagram 39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
3.6	ค่า Velocity Coupling Vector, $C(q, \dot{q})$ และค่า Vector of Gravitational Forces, $G(q)$ ในรูปของ Block Diagram.....	40
3.7	ค่า Trajectory Generation	41
3.8	ชุดรับส่งสัญญาณ.....	41
3.9	ลักษณะการทำงานของเส้นพาร์ต	42
3.10	ค่า Trajectory Generator ของแต่ละลิงค์	43
4.1	ผลตอบสนองและค่าเป้าหมายของแขนกล	45
4.2	ส่วนขยายของผลตอบสนองและค่าเป้าหมายของแขนกล.....	45
4.3	ผลการทดลองเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว.....	46
4.4	การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของแขนกล.....	47
4.5	การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 1	48
4.6	การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 2	48
4.7	การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 3	49
4.8	แสดงการเริ่มต้นเคลื่อนที่ของแขนกล	50
4.9	การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 1	50
4.10	การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 2	51
4.11	การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 3	51
4.12	การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 1	52
4.13	การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 2	53
4.14	การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 3	53
4.15	การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 1	54
4.16	การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 2	55
4.17	การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 3	55
4.18	การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 1	56
4.19	การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 2	57
4.20	การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 3	58
4.21	การรักษาสถานะของแขนกล	59

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันและอนาคต แขนกลได้เข้ามามีบทบาทมากขึ้นในอุตสาหกรรมในด้านต่างๆ เพื่อใช้ทดแทนแรงงานของมนุษย์ เนื่องจากมนุษย์มีขีดความสามารถและข้อจำกัดในการทำงาน เช่น งานที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี หรืออาจก่อให้เกิดโรคร้ายแรง งานที่มีความเสี่ยงสูง และอันตราย เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วแขนกลได้ถูกนำมาใช้งานด้านสายการผลิตเป็นจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมการประกอบรถยนต์ อุตสาหกรรมการประกอบแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ งานเชื่อมโลหะ หรือแม่แต่งานพ่นสี เป็นต้น ซึ่งประเทศที่มีการผลิตและส่งออกแขนกลเหล่านี้มิได้เปิดเผยองค์ความรู้ในด้านการผลิตและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับแขนกล รวมทั้งข้อจำกัดในตัวควบคุมและโปรแกรมควบคุมแขนกล ทำให้แขนกลที่มีอยู่ในประเทศ เมื่อเกิดเหตุขัดข้องจะต้องเรียกบริษัทผู้ผลิตมาทำการซ่อมบำรุง โดยระยะเวลาในการรอซ่อมบำรุงกินระยะเวลานาน ทำให้เกิดความสูญเสียแก่โรงงานอุตสาหกรรมนั้นๆ ด้วยเหตุผลเหล่านี้ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความจำเป็นในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ โดยผู้วิจัยได้ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่โดยจะศึกษาที่องศาการเคลื่อนที่ในแต่ละลิงค์ของแขนกล เพื่อใช้ทดแทนตัวควบคุมและโปรแกรมการควบคุม

การศึกษานี้จะทำการศึกษากฎการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล โดยได้ออกแบบตัวควบคุมแบบคอมพิวเตอร์ เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล ในการทำวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นทางเลือกให้กับโรงงานอุตสาหกรรมที่ประสบกับปัญหาดังกล่าวหรือบุคคลทั่วไปที่ต้องการพัฒนาโปรแกรมการควบคุมไว้ใช้งานทั่วไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษากฎการคำนวณหาสมการจลศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward Kinematics) และสมการการเคลื่อนที่แบบพลวัต (Dynamics) โดยใช้รูปทรงแบบก้านเรียว (Slender Rod) ของแขนกล 3 แกน

1.2.2 เพื่อศึกษาตัวควบคุมแบบคอมพิวเตอร์ (Computed Torque) ของแขนกลอุตสาหกรรม ทั้งแบบจำลองและแขนกลจริง

1.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อใช้รูปทรงแบบก้านเรียว (Slender Rod) ในการหาสมการของแขนกลอุตสาหกรรม รุ่น SCORBOT ER VII

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1.3.1 ใช้แขนกลอุตสาหกรรมของบริษัท ESHED ROBOTEC รุ่น SCORBOT-ER VII

1.3.2 ทหสมการจลศาสตร์ไปข้างหน้า Forward Kinematics และ สมการการเคลื่อนที่ Dynamics ของแขนกลอุตสาหกรรม โดยกำหนดให้แขนกลมีองศาอิสระเท่ากับ 3 แบบ Planar Robot

1.3.3 ออกแบบตัวควบคุมแบบคอมพิวทอร์ค และทดสอบตัวควบคุมด้วย โปรแกรม MATLAB/Simulink

1.3.4 ทดลองตัวควบคุมที่ออกแบบกับแขนกล SCORBOT-ER VII ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นฐานความรู้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายแขนของแขนกลอุตสาหกรรม เพื่อใช้ในการสนับสนุนและแก้ปัญหาของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ รวมทั้งรู้ถึงระบบ โครงสร้าง ตัวตรวจรับสัญญาณและการอินเตอร์เฟสของแขนกลอุตสาหกรรม

1.4.2 พัฒนาทักษะในการออกแบบตัวควบคุมและการเชื่อมโยงอุปกรณ์ในการควบคุมที่ใช้กับแขนกลอุตสาหกรรม

1.4.3 ผู้วิจัยคาดหวังว่า งานวิจัยนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและนำเทคโนโลยีนี้ไปปรับปรุงเพื่อให้แขนกลอุตสาหกรรมมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแขนกลอุตสาหกรรม ที่ใช้ในการคำนวณ โครงสร้าง ระบบควบคุม รวมทั้งงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

2.1 นิยามของหุ่นยนต์ (Robotics Definition) [1]

ในสมัยก่อนหุ่นยนต์เป็นเพียงจินตนาการของมนุษย์ ที่มีความต้องการได้สิ่งใดสิ่งหนึ่งเข้ามาช่วยในการผ่อนแรงจากงานที่ทำ หรือช่วยในการปฏิบัติงานที่ยากลำบากเกินขอบเขตความสามารถ และจากจินตนาการได้กลายเป็นแรงบันดาลใจให้มนุษย์ คิดประดิษฐ์สร้างสรรค์หุ่นยนต์ขึ้นมา จนกลายเป็นหุ่นยนต์ (Robot) ในปัจจุบัน

คำว่า “Robot” มาจากคำว่า “Robota” ในภาษาเช็ก ซึ่งแปลโดยตรงว่า “การทำงานเสมือนทาส” ถือกำเนิดขึ้นจากละครเวทีเรื่อง “Rassum’s Universal Robots” ในปี ค.ศ. 1920 ซึ่งเป็นบทประพันธ์ของ คาร์ล ชาเปก (Karel Capek) เนื้อหาของละครเวทีมีความเกี่ยวข้องกับจินตนาการของมนุษย์ ในการใฝ่หาสิ่งใดมาช่วยในการปฏิบัติงาน การประดิษฐ์คิดค้นสร้างหุ่นยนต์จึงถือกำเนิดขึ้นเพื่อเป็นเสมือนทาสคอยรับใช้มนุษย์ การใช้ชีวิตร่วมกันระหว่างหุ่นยนต์และมนุษย์ดำเนินต่อไป จนกระทั่งหุ่นยนต์เกิดมีความคิดเช่นเดียวกันมนุษย์ การถูกกดขี่ข่มเหงเช่นทาสจากมนุษย์ทำให้หุ่นยนต์เกิดการต่อต้านไม่ยอมเป็นเบี้ยล่างอีก ซึ่งละครเวทีเรื่องนี้โด่งดังมากจนทำให้คำว่า Robot เป็นที่รู้จักทั่วโลก

ในปี ค.ศ. 1942 คำว่า Robot ได้กลายมาเป็นจุดสนใจของคนทั่วโลกเมื่อ ไอแซค อสิมอฟ นักเขียนนวนิยายแนววิทยาศาสตร์ได้เขียนนวนิยายสั้นเรื่อง Runaround ซึ่งได้ปรากฏคำว่า Robot ในนิยายเรื่องนี้ และต่อมาได้นำมารวบรวมไว้ในนิยายวิทยาศาสตร์เรื่อง I-Robot ทำให้นักวิทยาศาสตร์ได้ทำความรู้จักกับคำว่า Robot เป็นครั้งแรกจากนวนิยายเรื่องนี้ หุ่นยนต์จึงกลายเป็นจุดสนใจและเป็นแนวคิดและจินตนาการของนักวิทยาศาสตร์ ในการคิดค้นและประดิษฐ์หุ่นยนต์ในอนาคต

สมัยโบราณการดูเวลาจะใช้ นาฬิกาแดด เป็นเครื่องบ่งชี้เวลาแต่สามารถใช้ได้เพียงแค่เวลากลางวันเท่านั้น นาฬิกาทรายจะใช้บอกเวลาในเวลากลางคืน จึงได้มีการคิดค้นและประดิษฐ์เครื่องจักรกลสำหรับบอกเวลาให้แก่มนุษย์คือ นาฬิกาน้ำ (Clepsydra) โดย Ctesibius of Alexandria นักฟิสิกส์ชาวกรีกในปี 250 ก่อนคริสตกาล นาฬิกาน้ำนี้ใช้บอกเวลาแทนมนุษย์ที่แต่เดิมต้องบอกเวลาจากนาฬิกาแดดและนาฬิกาทราย โดยใช้พลังงานจากการไหลของน้ำ เป็นตัวผลักดันให้กลไกของ

นาฬิกาทำงาน และถือเป็นเครื่องจักรเครื่องแรกที่มีมนุษย์สร้างขึ้นเพื่อใช้สำหรับทำงานแทนมนุษย์ และเมื่อมนุษย์ได้รู้จักและเรียนรู้เกี่ยวกับไฟฟ้า ความคิดสร้างสรรค์ในการควบคุมเครื่องจักรโดยไม่ต้องใช้กระแสไฟฟ้าก็เริ่มขึ้น Nikola Tesla เป็นบุคคลแรกที่สามารถใช้คลื่นวิทยุในการควบคุมหุ่นยนต์เรือขนาดเล็กในกรุงนิวยอร์ก ในปี ค.ศ. 1898 ภายในงานแสดงผลงานทางด้านไฟฟ้า

ปี ค.ศ. 1940 - 1950 หุ่นยนต์ชื่อ Alsie The Tortoise ได้ถือกำเนิดขึ้นโดย Grey Walter หุ่นยนต์รูปเต่าสร้างจากมอเตอร์ไฟฟ้านำมาประกอบเป็นเครื่องจักร สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยล้อทั้ง 3 ต่อมาหุ่นยนต์ชื่อ Shakey ได้ถูกสร้างขึ้นให้สามารถเคลื่อนที่ได้เช่นเดียวกับ Alsie The Tortoise โดย Stanford Research Institute: SRI แต่มีความสามารถเหนือกว่าคือมีความคิดเป็นของตนเองโดยที่ Shakey จะมีสัญญาณเซนเซอร์เป็นเครื่องบอกสัญญาณในการเคลื่อนที่ไปมา ซึ่งนอกเหนือจากหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ไปมาด้วยล้อแล้ว ในปี ค.ศ. 1960 หุ่นยนต์ที่ชื่อ General Electric Walking Truck ที่สามารถเดินได้ด้วยขาที่ถือกำเนิดขึ้น มีขนาดโครงสร้างใหญ่โตและหนักถึง 3,000 ปอนด์ สามารถก้าวเดินไปด้านหน้าด้วยขาทั้ง 4 ข้างด้วยความเร็ว 4 ไมล์/ชั่วโมง โดยการใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมการเคลื่อนไหวของขา General Electric Walk Truck ได้รับการพัฒนาโครงสร้างและศักยภาพโดยวิศวกรประจำบริษัท General Electric ชื่อ Ralph Moser

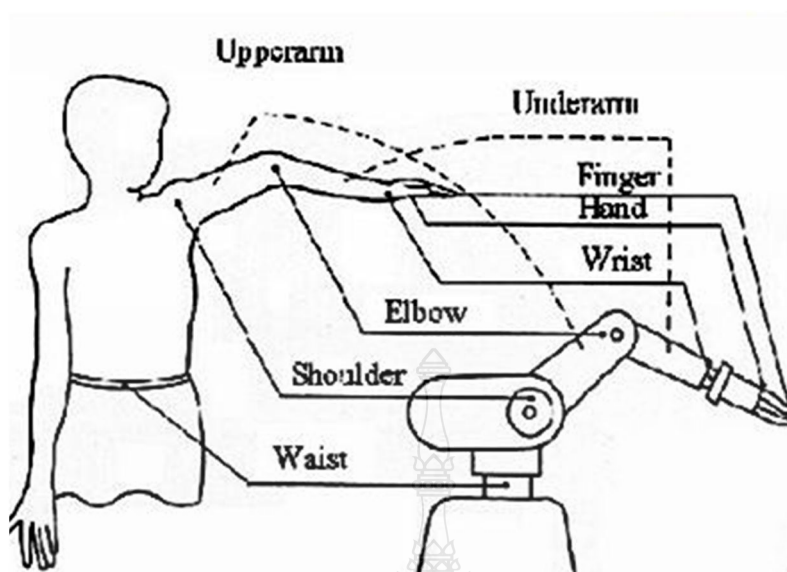
ภายหลังจากที่หุ่นยนต์เริ่มเป็นที่รู้จักไปทั่วโลก หุ่นยนต์เริ่มเข้ามามีบทบาทความสำคัญในด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กับชีวิตของมนุษย์ โรงงานอุตสาหกรรมเริ่มมีความคิดใช้หุ่นยนต์แทนแรงงานมนุษย์เดิม โดยหุ่นยนต์ด้านอุตสาหกรรมตัวแรกที่ชื่อ Unimates ได้ถือกำเนิดขึ้นในปี ค.ศ. 1950 - 1960 โดย George Devol และ Joe Engleberger ซึ่งต่อมา Joe ได้แยกตัวออกมาจาก George โดยเปิดบริษัทสร้างหุ่นยนต์ในชื่อของ Unimation ซึ่งต่อมาผลงานในด้านหุ่นยนต์ของ Joe ได้รับสมญานามว่า “บิดาแห่งหุ่นยนต์ด้านอุตสาหกรรม”

ความหมายของ “หุ่นยนต์” โดยหลักทางวิชาการของสถาบันหุ่นยนต์อเมริกา (The Robot of America 1997) ได้ให้ความหมายของคำว่าหุ่นยนต์ไว้ดังนี้ หุ่นยนต์คือ เครื่องจักรใช้งานแทนมนุษย์ ที่ออกแบบให้สามารถตั้งลำดับการทำงาน การใช้งานได้หลากหลายหน้าที่ ใช้เคลื่อนย้ายวัสดุอุปกรณ์ ส่วนประกอบต่างๆ เครื่องมือหรืออุปกรณ์พิเศษ ตลอดจนการเคลื่อนที่ได้ที่หลากหลาย ตามที่ตั้งลำดับการทำงาน เพื่อสำหรับใช้ในงานหลากหลายประเภท นิยามโดยตรงของคำว่า หุ่นยนต์ตามหลักทางวิชาการของสถาบันหุ่นยนต์อเมริกา ก็คือเครื่องจักรกลทุกชนิดที่สามารถปฏิบัติงานแทนมนุษย์ได้ทุกประเภท ทั้งทางตรงและทางอ้อม รวมทั้งในงานที่เสี่ยงอันตรายโดยที่มนุษย์ไม่สามารถปฏิบัติงานได้ ตลอดจนการทำงานที่เป็นอัตโนมัติโดยตนเองหรือถูกควบคุมโดยมนุษย์ และสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบการทำงานได้หลากหลาย

2.2 การแบ่งประเภทของหุ่นยนต์ (Industrial Robot Type) [2]

ในยุคเริ่มต้นของการส่งเสริมอุตสาหกรรมในประเทศไทยจะเห็นได้ว่ามีโรงงานต่างๆ เข้ามาตั้งฐานผลิตในเมืองไทยจำนวนมากทำให้เกิดนิคมอุตสาหกรรมขึ้นหลายแห่ง ทั้งนี้เนื่องจากรัฐบาลมีนโยบายส่งเสริมอุตสาหกรรมที่ชัดเจน ค่าแรงงานถูก ลดรายจ่ายเนื่องจากภาษีการนำเข้าของสินค้า และวัตถุดิบบางตัว แต่ ณ ปัจจุบันนี้ค่าแรงบ้านเราสูงขึ้นและสูงกว่าประเทศเพื่อนบ้าน เช่น จีน เวียดนาม อินโดนีเซีย ฯลฯ ในขณะที่คุณภาพแรงงานไม่ได้มาตรฐาน ขาดความรู้และทักษะจึงทำให้หลายบริษัทได้ย้ายฐานการผลิตไปยังประเทศที่มีค่าแรงงานถูกกว่า และอีกหลายบริษัทที่พยายามปรับตัวเอง โดยมีการนำเทคโนโลยีระบบอัตโนมัติ (Automation Technology) เข้ามาใช้งาน เพื่อให้สินค้าสามารถแข่งขันในตลาดโลกได้ทั้งในเรื่องราคา และคุณภาพ โดยเฉพาะในเรื่องคุณภาพ ปัจจุบันโรงงานที่ผลิตสินค้าส่งออกหรือส่งให้กับลูกค้าที่เป็นบริษัทของต่างประเทศมักจะประสบปัญหาในเรื่องคุณภาพ มีทั้ง ผลิตสินค้าไม่ได้มาตรฐานตามที่ลูกค้ากำหนด หรือ ผลิตสินค้าไม่ทันตามกำหนดเวลา อาจเนื่องจากการเปลี่ยนรุ่นผลิตภัณฑ์อยู่บ่อยๆ ต้องใช้เวลาในการ Set up ปัจจุบันจึงมีการนำเทคโนโลยีต่างๆ เข้ามาใช้ หนึ่งในเทคโนโลยีที่มีความยืดหยุ่นสูง ได้แก่ หุ่นยนต์อุตสาหกรรม เนื่องจากการเปลี่ยนการทำงานสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนโปรแกรม นอกจากนี้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสม่ำเสมอเป็นมาตรฐานเดียวกัน

การทำงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจะเลียนแบบร่างกายของมนุษย์โดยจะเลียนแบบเฉพาะส่วนของร่างกายที่จะนำไปใช้ประโยชน์ ในอุตสาหกรรมเท่านั้น นั่นคือช่วงแขนของมนุษย์ ดังนั้น บางคนอาจจะได้ยินคำว่า แขนกล ซึ่งก็หมายถึงหุ่นยนต์อุตสาหกรรม การทำงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเปรียบเทียบกับแขนมนุษย์ แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 การทำงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเปรียบเทียบกับแขนมนุษย์ [2]

อนุวัฒน์ บำรุงกิจ [3] โครงสร้างของหุ่นยนต์ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนสำคัญ คือ ส่วนลำตัว (Body) แขน (Arm) และส่วนข้อมือ (Wrist) โดยมากแล้วส่วนลำตัวและแขนจะมีระดับขั้นความเสรี 3 ระดับ และในส่วนข้อมือจะมีระดับขั้นของความเสรีอยู่ 2-3 ระดับ ที่ปลายของข้อมือจะเป็นวัตถุซึ่งมีความสัมพันธ์กับงานที่หุ่นยนต์ต้องทำ เช่น วัตถุอาจจะเป็นชิ้นงานที่ต้องการส่งเข้าเครื่องจักรหรืออาจจะเป็นเครื่องมือที่หุ่นยนต์ต้องใช้กระบวนการผลิตบางอย่าง เป็นต้น ส่วนลำตัวและแขนของหุ่นยนต์จะใช้ในการจัดตำแหน่งที่ถูกต้องของวัตถุ และส่วนข้อมือของหุ่นยนต์จะใช้สำหรับจัดทิศทางการวางตัวที่เหมาะสมให้แก่วัตถุ ส่วนลำตัวและแขนของหุ่นยนต์จะต้องสามารถเคลื่อนวัตถุได้ทั้งสามทิศทางดังต่อไปนี้คือ

- 1) การเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (การเคลื่อนที่ในแนวแกน z)
- 2) การเคลื่อนที่ในแนวรัศมี (เข้า ออก หรือการเคลื่อนที่ในแนวแกน y)
- 3) การเคลื่อนที่จากซ้ายไปขวา (การเคลื่อนที่ในแนวแกน x)

การที่จะทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ในลักษณะข้างต้นได้มีหลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของข้อต่อที่ใช้ในการสร้างลำตัวและแขนของหุ่นยนต์ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไปเพื่อที่จะทำให้เกิดการจัดทิศทางที่เหมาะสมของวัตถุ

ส่วนประกอบของหุ่นยนต์

- 1) Actuator เป็นอุปกรณ์ หรือชุดขับเคลื่อนเพื่อให้แขนกล หรือหุ่นยนต์เคลื่อนไหว ได้แก่มอเตอร์ กระจบอกสูบ เป็นต้น
- 2) Manipulators เป็นส่วนประกอบเพื่อช่วยเรื่องของระยะทางเคลื่อนที่ซึ่งประกอบด้วย แขน (Links) และข้อต่อ (Joints)
- 3) End Effectors เป็นส่วนท้ายสุดของแขนกลไว้ใช้ในการทำงานต่างๆ เช่น หยิบจับ สิ่งของ กัด กลึง เชื่อม ช่างงาน เป็นต้น
- 4) Sensor เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบตำแหน่ง หรือข้อมูลที่ใช้ตรวจวัด
- 5) Power Supply เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ต่างๆ ของแขนกล ไม่ว่าจะเป็นกระแสไฟฟ้า หรือว่าลมที่ใช้ควบคุมกระจบอกสูบ
- 6) Controller เปรียบเสมือนสมองของมนุษย์ ที่ใช้สำหรับควบคุมระบบต่างๆ ให้ทำงานเป็นไปตามต้องการ โดยสั่งการไปยังชุดขับเคลื่อน
- 7) Program เป็นการกำหนดขั้นตอนต่างๆ ของระบบ

2.2.1 การแบ่งชนิดของหุ่นยนต์

โดยทั่วไปการแบ่งชนิดของหุ่นยนต์จะแบ่งตามลักษณะได้ 3 ลักษณะด้วยกันคือ 1) ลักษณะการเคลื่อนที่ (Drive Technologies) 2) ลักษณะรูปทรงของที่ทำ (Envelop Geometries) 3) ลักษณะของการควบคุมการเคลื่อนที่ (Motion Control Method) ดังนี้

1) ลักษณะการเคลื่อนที่ (Drive Technologies)



การขับเคลื่อนแขนกลขึ้นอยู่กับพลังงานที่จะขับเคลื่อน โดยทั่วไปที่ใช้กันมากคือ การขับเคลื่อนโดยใช้พลังงานไฟฟ้า ไฮโดรลิกส์ และนิวเมติก โดยที่ใช้งานมากที่สุดและได้รับความนิยมทั้งในด้านการดูแลรักษา การใช้งาน การควบคุม คือใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อน ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ชนิดควบคุมตำแหน่ง (DC Servo Motor) หรือมอเตอร์แบบสเต็ป (DC Stepping Motor) แต่อย่างไรก็ตามงานที่ต้องการใช้แรงมากหรือมีโหลดหนักๆ ก็ยังมีความจำเป็นที่ต้องใช้การขับเคลื่อนด้วยไฮโดรลิก รวมทั้งบริเวณการทำงานที่ใช้การขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าหรือไฮโดรลิก ก็ยังมีความจำเป็นในบางงานที่ต้องใช้ระบบนิวเมติก เข้ามาช่วย เช่น การเปิดปิดมือจับ (Gripper)

2) ลักษณะรูปทรงของงาน (Work Envelop Geometries)

ส่วนประกอบของแขนกลที่เรียกว่ามือจับนั้น จะยึดติดกับข้อมือ (Wrist) แขนจะทำงานลักษณะรอบวงจำกัด ตำแหน่งที่จะจับนั้นอยู่ในลักษณะ 3 มิติ ซึ่งข้อมือจะถ่ายโอนตำแหน่งมาจากจุด

ต่อทั้ง 3 จุด ของแขนกล จุดแรกเรียกว่า แกนหลัก (Major Axes) จะไปหาดำแหน่งที่จะจับเมื่อเทียบกับ
 แขนของมนุษย์ก็คือส่วนไหล่ (Sholder) ส่วนจุดต่อรองลงไป (Minor Axes) จะไปหาดำแหน่งที่
 แน่นอนจุดนี้ก็คือ ส่วนของข้อศอกนั่นเอง (Elbow) ส่วนจุดสุดท้ายก็คือข้อมือ (Wrist) ก็คือตำแหน่งที่
 แน่นอน การทำงานของจุดต่อต่างๆ จะเรียงลำดับกันทำให้แขนกลทำงานได้ 3 มิติ อย่างไรก็ตามการ
 ทำงานของจุดต่อแขนกลที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม ขึ้นพื้นฐานแบ่งการทำงานออกเป็น 2 แบบด้วยกัน
 ดังตารางที่ 2.1

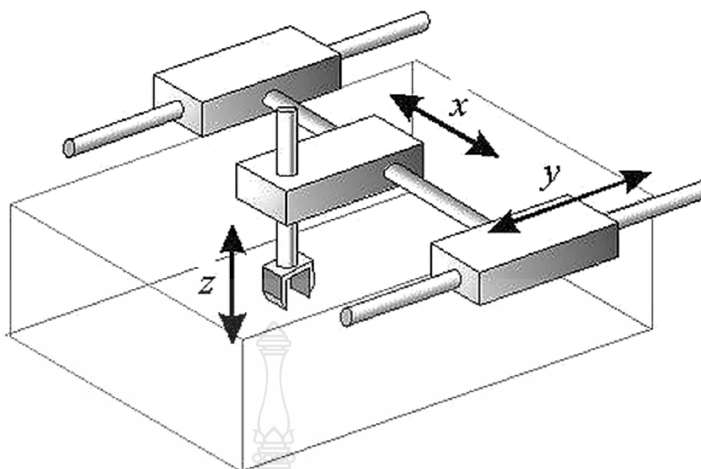
ตารางที่ 2.1 ลักษณะการทำงานของจุดต่อ (Type of Robot Joint)

Type	Notation	Symbol	Description
Revolute	R		Rotary Motion About an Axis
Prismatic	P		Linear Motion Along an Axis

จากตารางสามารถแบ่งชนิดของหุ่นยนต์แขนกลตามลักษณะการเคลื่อนที่ในแนวเชิงเส้น
 และในการเคลื่อนที่แบบหมุน ได้ดังนี้

1. Cartesian (Gantry) Robot

แกนทั้ง 3 ของหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่เป็นแบบเชิงเส้น (Prismatic) โครงสร้างมีลักษณะ
 คล้าย Overhead Crane จะเรียกว่าเป็นหุ่นยนต์ชนิด Gantry แต่ถ้าหุ่นยนต์ไม่มีขาตั้งหรือขาเป็นแบบอื่น
 เรียกว่า ชนิด Cartesian



ภาพที่ 2.2 Cartesian Robot [4]

ข้อดี

- 1) เคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรงทั้ง 3 มิติ
- 2) การเคลื่อนที่สามารถทำความเข้าใจง่าย
- 3) มีส่วนประกอบง่ายๆ
- 4) โครงสร้างแข็งแรงตลอดการเคลื่อนที่

ข้อเสีย

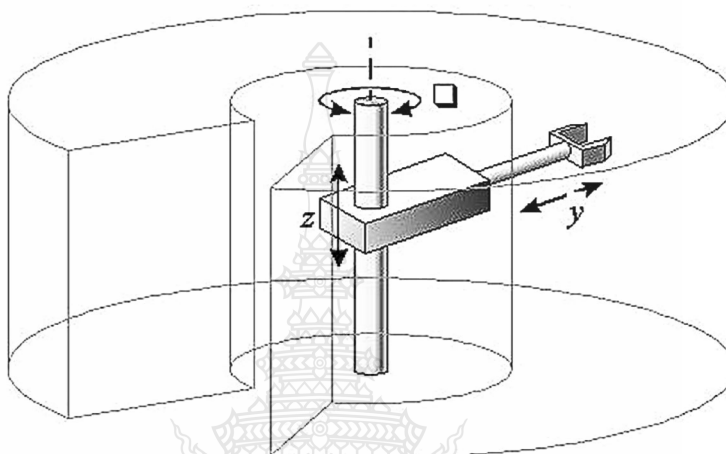
- 1) ต้องการพื้นที่ติดตั้งมาก
- 2) บริเวณที่หุ่นยนต์เข้าไปทำงานได้ จะเล็กกว่าขนาดของตัวหุ่นยนต์
- 3) ไม่สามารถเข้าถึงวัตถุจากทิศทางข้างใต้ได้
- 4) แกนแบบเชิงเส้นจะ Seal เพื่อป้องกันฝุ่นและของเหลวได้ยาก

การประยุกต์ใช้งาน

เนื่องจาก โครงสร้างมีความแข็งแรงตลอดแนวการเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงเหมาะกับงานเคลื่อนย้ายของหนักๆ หรือเรียกว่างาน Pick-and-Place เช่น ใช้โหลดชิ้นงานเข้าเครื่องจักร (Machine Loading) ใช้จัดเก็บชิ้นงาน (Stacking) นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในงานประกอบ (Assembly) ที่ไม่ต้องการเข้าถึงในลักษณะที่มีมุมหมุน เช่น ประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และงาน Test ต่างๆ

2. Cylindrical Robot

หุ่นยนต์ประเภทนี้จะมีแกนที่ 2 (ไหล่) และแกนที่ 3 (ข้อศอก) เป็นแบบ Prismatic ส่วนแกนที่ 1 (เอว) จะเป็นแบบหมุน (Revolute) ทำให้การเคลื่อนที่ได้พื้นที่การทำงานเป็นรูปทรงกระบอก ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 Cylindrical Robot [4]

ข้อดี

- 1) มีส่วนประกอบไม่ซับซ้อน
- 2) การเคลื่อนที่สามารถเข้าใจได้ง่าย
- 3) สามารถเข้าถึงเครื่องจักรที่มีการเปิด-ปิด หรือเข้าไปในบริเวณที่เป็นช่องหรือโพรงได้ง่าย (Loading) เช่น การโหลดชิ้นงานเข้าเครื่อง CNC

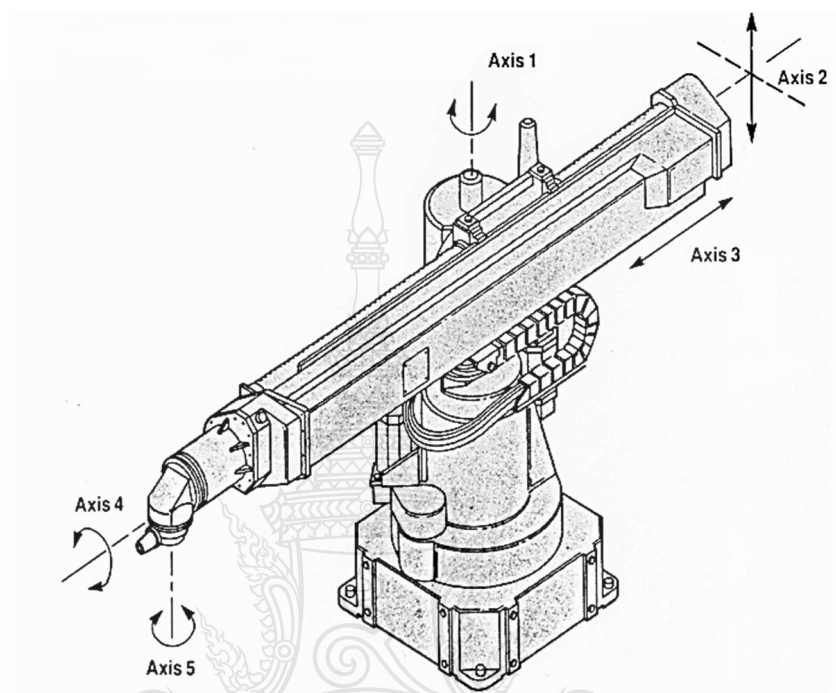
ข้อเสีย

- 1) มีพื้นที่ทำงานจำกัด
 - 2) แกนที่เป็นเชิงเส้นมีความยุ่งยากในการ Seal เพื่อป้องกันฝุ่นและของเหลว
- การประยุกต์ใช้งาน

โดยทั่วไปจะใช้ในการหยิบยกชิ้นงาน (Pick-and-Place) หรือป้อนชิ้นงานเข้าเครื่องจักร เพราะสามารถเคลื่อนที่เข้าออกบริเวณที่เป็นช่องโพรงเล็กๆ ได้สะดวก

3. Spherical Robot (Polar)

มีสองแกนที่เคลื่อนในลักษณะการหมุน (Revolute Joint) คือแกนที่ 1 (เอว) และแกนที่ 2 (ไหล่) ส่วนแกนที่ 3 (ข้อศอก) จะเป็นลักษณะของการเคลื่อนที่แนวเส้นตรง ดังภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 Spherical Robot [2]

ข้อดี

- 1) มีปริมาตรการทำงานมากขึ้นเนื่องจากการหมุนของแกนที่ 2 (ไหล่)
- 2) สามารถที่จะก้มลงมาจับชิ้นงานบนพื้นได้สะดวก

ข้อเสีย

- 1) มีระบบพิกัด (Coordinate) และส่วนประกอบ ที่ซับซ้อน
- 2) การเคลื่อนที่และระบบควบคุมมีความซับซ้อนขึ้น

การประยุกต์ใช้งาน

ใช้ในงานที่มีการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (Vertical) เพียงเล็กน้อย เช่น การโหลดชิ้นงานเข้าออก จากเครื่องปั๊ม (Press) หรืออาจจะใช้งานเชื่อมจุด (Spot Welding)

4. SCARA Robot

หุ่นยนต์ SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) มีลักษณะแกนที่ 1 (เอว) และแกนที่ 3 (ข้อศอก) หมุนรอบแกนแนวตั้ง และแกนที่ 2 จะเป็นลักษณะการเคลื่อนที่ขึ้นลง (Prismatic) ดังรูป หุ่นยนต์ SCARA จะเคลื่อนที่ได้รวดเร็วในแนวระนาบ และมีความแม่นยำสูง



ภาพที่ 2.5 SCARA Robot [5]

ข้อดี

- 1) สามารถเคลื่อนที่ในแนวระนาบ และขึ้นลงได้รวดเร็ว
- 2) มีความแม่นยำสูง

ข้อเสีย

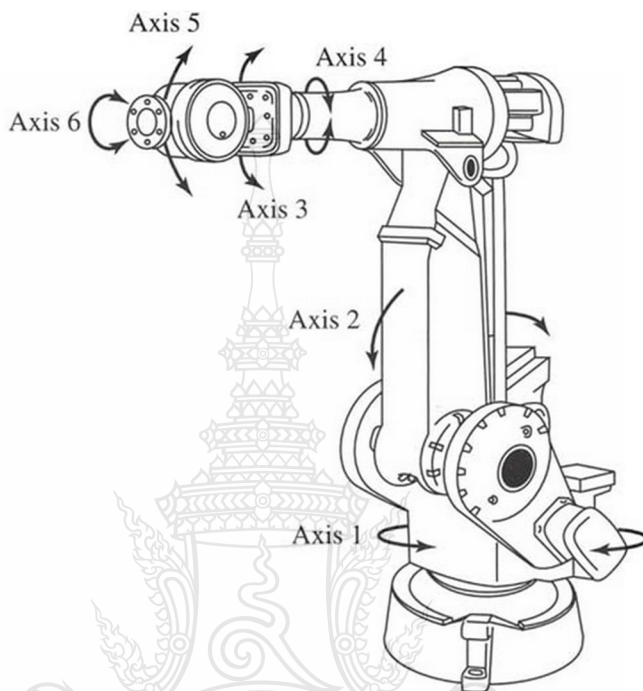
- 1) มีพื้นที่ทำงานจำกัด
- 2) ไม่สามารถหมุน (Rotation) ในลักษณะมุมต่างๆ ได้
- 3) สามารถยกน้ำหนัก (Payload) ได้ไม่มากนัก

การประยุกต์ใช้งาน

เนื่องจากการเคลื่อนที่ในแนวระนาบและขึ้นลงได้รวดเร็ว จึงเหมาะกับงานประกอบชิ้นส่วนทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งต้องการความรวดเร็วและการเคลื่อนที่ที่ไม่ต้องการการหมุนมากนัก แต่จะไม่เหมาะกับงานประกอบชิ้นส่วนทางกล (Mechanical Part) ซึ่งส่วนใหญ่การประกอบจะอาศัยการหมุน (Rotation) ในลักษณะมุมต่างๆ นอกจากนี้ SCARA Robot ยังเหมาะกับงานตรวจสอบ (Inspection) งานบรรจุภัณฑ์ (Packaging)

5. Articulated Arm (Revolute)

ทุกแกนการเคลื่อนที่จะเป็นแบบหมุน (Revolute) รูปแบบการเคลื่อนที่จะคล้ายกับแขนคน ซึ่งจะประกอบด้วยช่วงเอว ท่อนแขนบน ท่อนแขนล่าง ข้อมือ การเคลื่อนที่ทำให้ได้พื้นที่การทำงาน ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 Articulated Arm [6]

ข้อดี

1) เนื่องจากทุกแกนจะเคลื่อนที่ในลักษณะ ของการหมุนทำให้มีความยืดหยุ่นสูงในการเข้าไปยังจุดต่างๆ

2) บริเวณข้อต่อ (Joint) สามารถ Seal เพื่อป้องกันฝุ่น ความชื้น หรือน้ำ ได้ง่าย

3) มีพื้นที่การทำงานมาก

4) สามารถเข้าถึงชิ้นงานทั้งจากด้านบน ด้านล่าง

5) เหมาะกับการใช้มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นชุดขับเคลื่อน

ข้อเสีย

1) มีระบบพิกัด (Coordinate) ที่ซับซ้อน

2) การเคลื่อนที่และระบบควบคุมทำความเข้าใจได้ยากขึ้น

3) ควบคุมให้เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง (Linear) ได้ยาก

4) โครงสร้างไม่มั่นคงตลอดช่วงการเคลื่อนที่ เพราะบริเวณขอบ Work Envelope ปลายแขนจะมีการสั่น ทำให้ความแม่นยำลดลง

การประยุกต์ใช้งาน

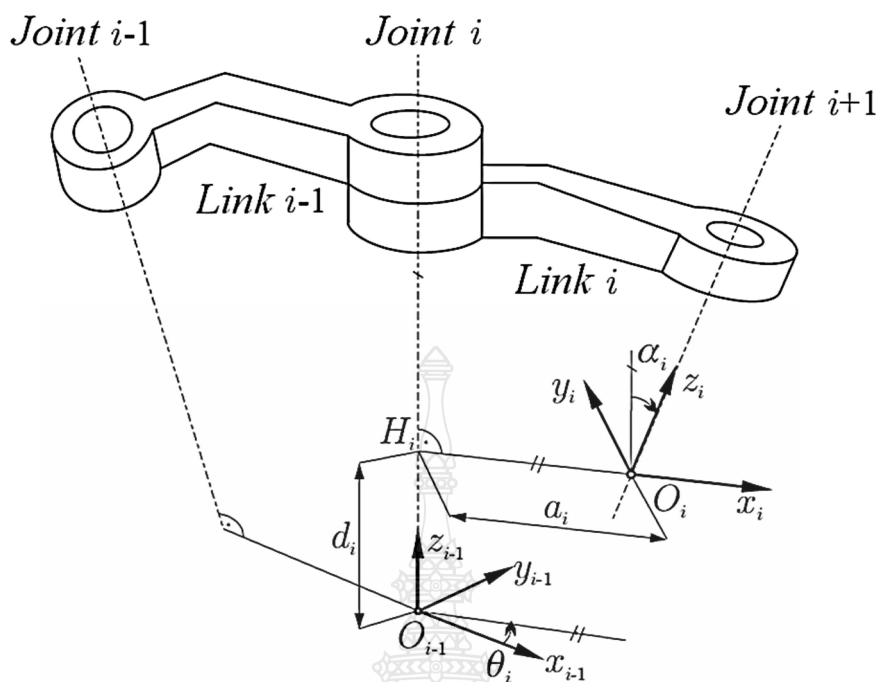
หุ่นยนต์ชนิดนี้สามารถใช้งานได้กว้างขวางเพราะ สามารถเข้าถึงตำแหน่งต่างๆ ได้ดี เช่น งานเชื่อม งานเชื่อมจุด งานยกของ งานตัด งานทากาว งานที่มีการเคลื่อนที่ยากๆ เช่น งานพ่นสี งานสี ฯลฯ

2.2.2 แบ่งตามวิธีการควบคุมการเคลื่อนที่ (Motion Control)

การแบ่งแยกชนิดของแขนกลแบบนี้เป็นการแบ่งชนิดของแขนกลด้วยวิธีการควบคุมการเคลื่อนที่ พื้นฐานการเคลื่อนที่แบ่งได้ 2 แบบ ด้วยกันคือ แบบที่ 1 เป็นการควบคุมการเคลื่อนที่แบบจุดต่อจุด (Point to Point Method) จะเป็นการเรียงลำดับให้พื้นที่งานเป็นจุด แบบที่ 2 เป็นการควบคุมการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง (Continuous Path Motion, Controlled Path Motion) ผู้ส่วนปลายสุดของแขนกลเคลื่อนที่ลักษณะ 3 มิติ ควบคุมความเร็วและทิศทางได้

2.3 จลศาสตร์เกี่ยวกับตำแหน่งของแขนกล (Kinematics Manipulator Position)

จลศาสตร์ (Kinematics) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของข้อแขนกล (Link of Manipulator) ในการวิเคราะห์จลศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward Kinematics) ของแขนกล จะเป็นการกำหนดค่าพารามิเตอร์ โดยใช้ Denavit-Hartenberg Homogeneous Transformation Matrices (D - H Parameters) ที่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างแกน z_i และแกน x_i ดังภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 Denavit-Hartenberg Parameters [7]

การหาค่าตัวแปรต่างๆ ในการวิเคราะห์ฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์

a_i แทนระยะระหว่างแกน z_{i-1} และแกน z_i โดยคิดระยะระหว่าง H_i และ O_i
 d_i แทนระยะระหว่างแกน x_{i-1} และแกน x_i โดยคิดระยะระหว่าง H_i และ O_{i-1}
 α_i แทนมุมรอบแกน x_i วัดจากแกน z_{i-1}
 θ_i แทนมุมรอบแกน z_{i-1} ถึงแกน a_i
 จากรูปจะได้ Transformation Matrix

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots$

โดยกำหนดให้ c_i คือ $\cos \theta_i$ และ s_i คือ $\sin \theta_i$

$$c_{ij} = c_i c_j - s_i s_j = \cos(\theta_i + \theta_j) \quad \text{และ} \quad s_{ij} = s_i c_j + c_i s_j = \sin(\theta_i + \theta_j)$$

จากสมการที่ 2.1 จะได้เมตริกซ์การหมุน (Rotation Matrix) และเวกเตอร์การเคลื่อนที่ (Translation Matrix)

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \text{Rotation}_{(3 \times 3)} & \text{Translation}_{(3 \times 1)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)} \quad (2.2)$$

2.4 จาโคเบียน (Jacobian)

จาโคเบียน (Jacobian) คือ เมตริกซ์ที่ใช้ในการแปลงความเร็วของแต่ละข้อต่อ (Joint Space) ให้เปลี่ยนเป็นความเร็วในการเคลื่อนที่ใน เวิร์กสเปซ (Work Space)

$$\dot{x} = J\dot{q} \quad (2.3)$$

แทนค่า

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

กำหนดให้ $\bar{z}_0 = [0 \ 0 \ 1]^T$

$$\bar{z}_{i-1} = {}^{01}R^{12}R \dots {}^{i-3,i-2}R {}^{i-2,i-1}R \bar{z}_0 \quad (2.5)$$

2.5 พลศาสตร์ (Dynamics)

เป็นการศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงตัน ซึ่งมีความจำเป็นต้องทราบค่าคุณสมบัติของวัตถุนั้น เช่น มวล (Mass) โมเมนต์แรงเฉื่อย (Moment of Inertia) เพื่อนำมาใช้คำนวณหาแรง (Force) แรงบิด (Torque) หรือ โมเมนต์ (Moment)

ในการศึกษาทางพลศาสตร์ นิยมใช้กัน 2 วิธี คือ

- 1) แบบลากรองจ์ (Lagrange's Equations)
- 2) แบบนิวตัน-ออยเลอร์ (Newton-Euler)

2.5.1 สมการลากรองจ์ (Lagrange's Equations)

สมการลากรองจ์ของการเคลื่อนที่ที่เป็นวิธีการที่ใช้ในการหาสมการการจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทางกลศาสตร์ โดยที่สมการลากรองจ์ของการเคลื่อนที่ที่สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (2.6)$$

โดยที่ L, q_i, Q_i คือ Lagrangian Function, Generalized Coordinates หรือ State Variables และ Generalized Forces ตามลำดับ และ Lagrangian Function เป็นผลต่างระหว่างพลังงานจลน์กับพลังงานศักย์ คือ

$$L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - V(q) \quad (2.7)$$

โดยที่ T และ V เป็นพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของระบบตามลำดับ นอกจากนี้ Generalized Force Q_i ประกอบไปด้วยแรงทั้งหมดที่กระทำต่อระบบในทิศทางของ i -th Generalized Coordinate ได้แก่

- 1) External Forces
- 2) Forces Due to Friction

Generalized Force Q_i สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Q_i = \sum_{j=1}^N \vec{F}_j \frac{\partial \vec{r}_j}{\partial q_i} \quad (2.8)$$

โดยที่ N, \vec{F}, \vec{r} คือ จำนวนอนุภาคหรือวัตถุแตร่งในระบบ เวกเตอร์ของแรงที่กระทำต่ออนุภาคหรือวัตถุแตร่งในระบบ และเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคหรือวัตถุแตร่งในระบบ ตามลำดับ สมการการเคลื่อนที่ (Dynamic equations) ของแขนกล ซึ่งเขียนอยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

$$Q = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + F(\dot{q}) + G(q) \quad (2.9)$$

ในกรณีที่ไม่คิดค่าความเสียดทาน

$$Q = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) \quad (2.10)$$

โดยที่

- q คือ เวกเตอร์ของ Generalized Joint Coordinates
- \dot{q} คือ เวกเตอร์ของ Joint Velocities
- \ddot{q} คือ เวกเตอร์ของ Joint Acceleration
- M คือ เมทริกซ์สมมาตร ของ Joint-Space Inertia
- C คือ ค่าความเร่ง Coriolis และ Centripetal Effects
- F คือ ค่าความเสียดทาน Viscous และ Coulomb Friction
- G คือ ค่าเนื่องจากน้ำหนักของหุ่นยนต์
- Q คือ เวกเตอร์ของ Generalized Force

เมื่อ

$$Q = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Manipulator Inertia Matrix

$$M(q) = \sum_{i=0}^n \left[m_i \left(J_T^{(s_i)} \right)^T J_T^{(s_i)} + \left(J_R^{(s_i)} \right)^T {}^{0i}R_{(i)} J_i^{(s)} {}^{0i}R^T J_R^{(s_i)} \right] \quad (2.12)$$

Velocity Coupling Vector

$$C_{(q, \dot{q})} = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n C_{i, jk(q)} \dot{q}_j \dot{q}_k \quad (2.13)$$

$$C_{i, jk}(q) = \frac{\partial M_{ij}(q)}{\partial q_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{jk}(q)}{\partial q_i}$$

Vector of Gravitational Forces

$$G(q) = \frac{\partial U(q)}{\partial q_i} = \frac{\partial \left(-\sum_{i=1}^n M_i \bar{g}_{(0)} \bar{r}_{Si} \right)}{\partial q_i} \quad (2.14)$$

2.6 คอมพิวเตอร์คอนโทรล (Computed Torque Control) [8]

จะเป็นการศึกษาทางพลศาสตร์ อีกคุณลักษณะหนึ่งของแขนกล ที่ประกอบไปด้วยฟังก์ชันแบบไม่เชิงเส้น ในตำแหน่งของ Joint และความเร็วต่างๆ โดยกฎการควบคุมแบบคอมพิวเตอร์สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการ ดังนี้

$$\tau = M \left[\ddot{q}_d + k_d (\dot{q}_d - \dot{q}) + k_p (q_d - q) \right] + C + G \quad (2.15)$$

จากสมการที่ 2.10 และสมการที่ 2.15 เพื่อหาค่าความผิดพลาดให้กับระบบจะได้

$$(\ddot{q}_d - \ddot{q}) + k_d (\dot{q}_d - \dot{q}) + k_p (q_d - q) = 0 \quad (2.16)$$

โดยที่

$$e = (q_d - q)$$

$$\dot{e} = (\dot{q}_d - \dot{q})$$

$$\ddot{e} = (\ddot{q}_d - \ddot{q})$$

จากสมการที่ 2.16 แทนค่าจะได้

$$\ddot{e} + k_d \dot{e} + k_p e = 0 \quad (2.17)$$

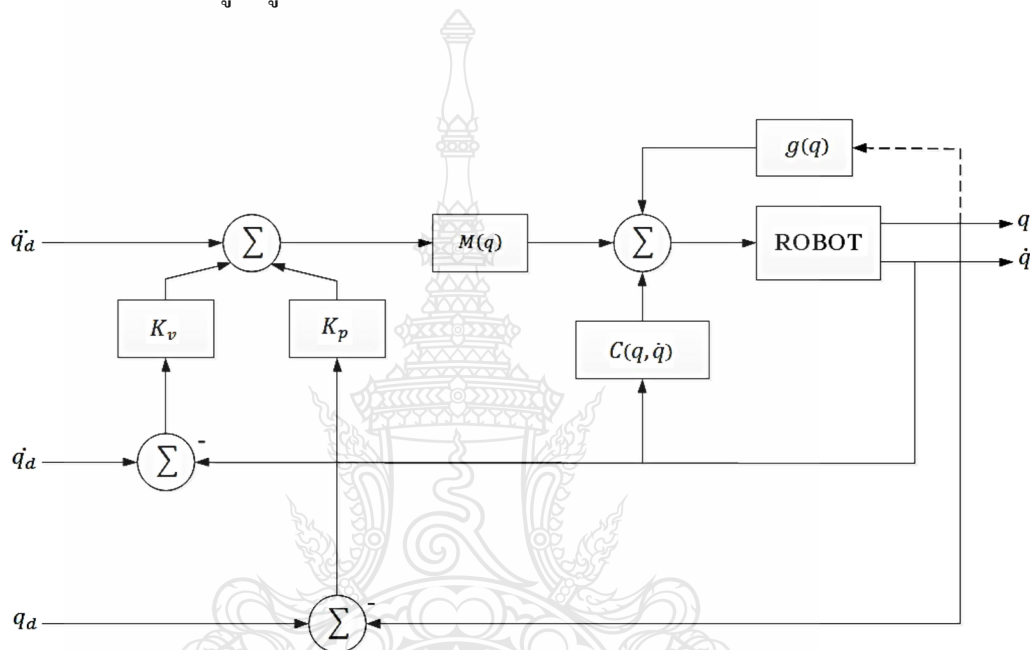
โดยค่า k_d, k_p ที่ใส่เข้าไปในระบบจะเป็นการควบคุมแบบ PD Type จะใช้วิธี Pole Placement โดยกำหนดให้ระบบมีผลตอบสนองที่ต้องการ ดังสมการที่ 2.18

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_n \dot{x} + \omega_n^2 x = 0 \quad (2.18)$$

กำหนด $\zeta = 1$ เพื่อให้ผลตอบสนองของระบบเป็นแบบ Critically Damp System ดังนั้นระบบที่ต้องการสามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\ddot{x} + 2\omega_n \dot{x} + \omega_n^2 x = 0 \quad (2.19)$$

โดยจะเขียนให้อยู่ในรูปของบล็อกไดอะแกรมได้ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 บล็อกไดอะแกรมตัวควบคุมแบบคอมพิวทอร์ค

2.7 โครงสร้างของระบบ

จะเป็นการอธิบายถึงโครงสร้างหุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดลองและอุปกรณ์ต่างๆ ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เพื่อให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ได้แก่

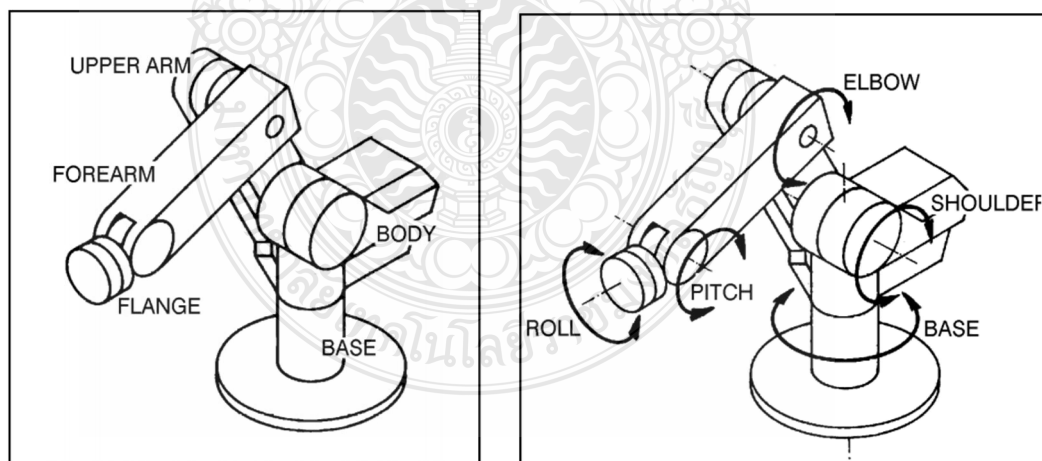
2.7.1 หุ่นยนต์อุตสาหกรรม (แขนกล) [9]

หุ่นยนต์ที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้เป็นหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่ไม่มีชุดควบคุมการเคลื่อนที่ หุ่นยนต์ตัวนี้เป็นของบริษัท ESHED ROBOTEC รุ่น SCORBOT-ER VII ดังแสดงในภาพที่ 2.9 SCORBOT ER VII เป็นแขนกลที่มี 5 DOF โดยโครงสร้างเป็นแบบ Articulated Configuration Robot ใช้ดีซีมอเตอร์ขนาด 12 VDC เป็นตัวขับเคลื่อน มีเกียร์ Harmonic และมีระบบสายพานเป็นชุดในการทดรอบการหมุนของมอเตอร์ แขนกลสามารถรับน้ำหนักที่ปลายแขนได้สูงสุดไม่เกิน 2 kg ตัวแขนกล

มีน้ำหนักรวม 30 kg ในภาพที่ 2.10 จะแสดงให้เห็นว่าในตัวหุ่นยนต์มีระบบภายในของแขนกลอย่างไร



ภาพที่ 2.9 แขนกล SCORBOT ER VII



ภาพที่ 2.10 แกนและข้อต่อของแขนกล [9]

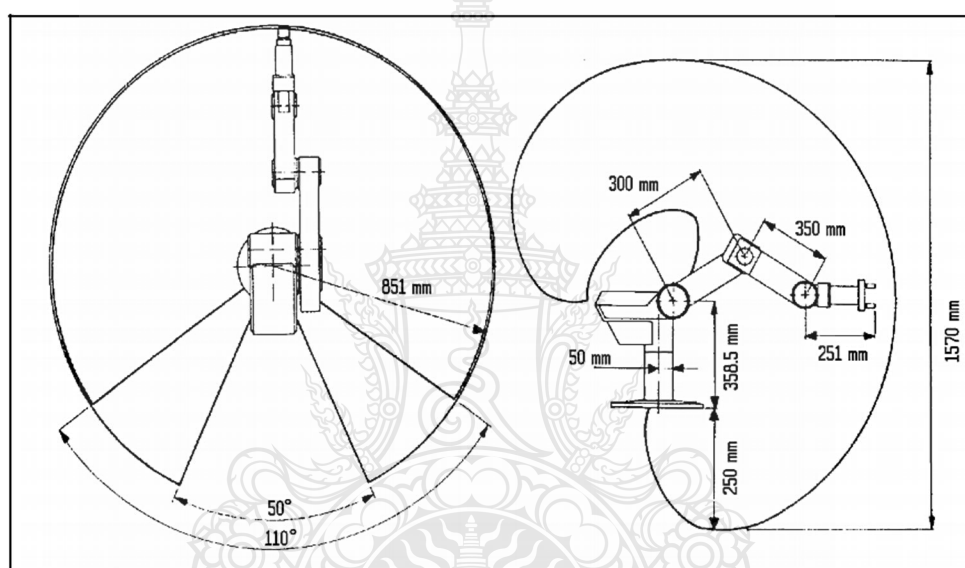
ตารางที่ 2.2 รายละเอียดของชุดขับเคลื่อน [7]

แกนที่	รายละเอียด
1	<p>ดีซีมอเตอร์ 12 โวลต์ Pittman-9434G697</p> <p>เอนโคเดอร์ HP-HEDS-5500-K11 (Incremental Encoder)</p> <p>ความละเอียด 96 pulse/rev</p> <p>เกียร์ทด ชนิด Harmonic gear มีอัตราทด 1:160</p> <p>ชุดสายพาน Timing belt อัตราทดรอบ 1:3</p>
2	<p>ดีซีมอเตอร์ 12 โวลต์ Pittman-9434G697</p> <p>เอนโคเดอร์ HP-HEDS-5500-K11 (Incremental Encoder)</p> <p>ความละเอียด 96 pulse/rev</p> <p>เกียร์ทด ชนิด Harmonic gear มีอัตราทด 1:160</p> <p>ชุดสายพาน Timing belt อัตราทดรอบ 1:3</p>
3	<p>ดีซีมอเตอร์ 12 โวลต์ Pittman-9434G697</p> <p>เอนโคเดอร์ HP-HEDS-5500-K11 (Incremental Encoder)</p> <p>ความละเอียด 96 pulse/rev</p> <p>เกียร์ทด ชนิด Harmonic gear มีอัตราทด 1:160</p> <p>ชุดสายพาน Timing belt อัตราทดรอบ 1:3</p>
4	<p>ดีซีมอเตอร์ 12 โวลต์ Pittman-9413G698</p> <p>เอนโคเดอร์ HP-HEDS-5500-K11 (Incremental Encoder)</p> <p>ความละเอียด 96 pulse/rev</p> <p>เกียร์ทด ชนิด Harmonic gear มีอัตราทด 1:100</p> <p>ชุดสายพาน Timing belt อัตราทดรอบ 1:3</p>
5	<p>ดีซีมอเตอร์ 12 โวลต์ Pittman-9413G698</p> <p>เอนโคเดอร์ HP-HEDS-5500-K11 (Incremental Encoder)</p> <p>ความละเอียด 96 pulse/rev</p> <p>เกียร์ทด ชนิด Harmonic gear มีอัตราทด 1:100</p>

โดยตัวหุ่นยนต์มีพื้นที่การทำงาน (Work Envelope) ตามความยาวของแต่ละแกนและหมุนได้ตามองศาในแต่ละจุดเชื่อมต่อ โดยตารางที่ 2.3 และภาพที่ 2.11

ตารางที่ 2.3 องศาการหมุนในแต่ละแกนของหุ่นยนต์ [9]

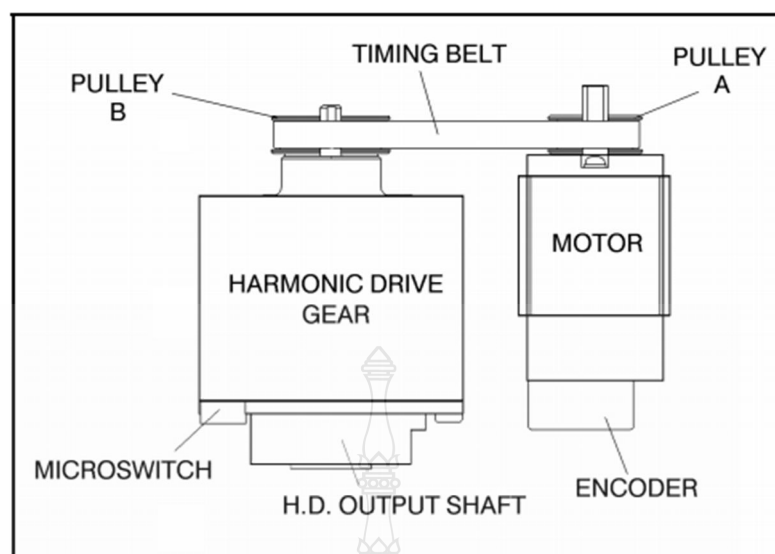
Axis Movement	Maximum Degrees
Axis 1 : Base rotation	250°, 310° user programmable
Axis 2 : shoulder rotation	170°
Axis 3 : Elbow rotation	225°
Axis 4 : Wrist pitch	180°
Axis 5 : Wrist roll	360°



ภาพที่ 2.11 พื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ [9]

2.7.2 ระบบขับเคลื่อน

ระบบขับเคลื่อนของหุ่นยนต์ SCORBOT ER VII ใช้มอเตอร์ไฟฟ้า 12 VDC ชนิดของมอเตอร์เป็นแบบ Brush-Commutator เป็นตัวขับเคลื่อน โดยมี Harmonic Drive Gears และ พูลเลย์ (Pulleys) เป็นการทดรอบของมอเตอร์โดยมีสายพาน (Timing Belts) เป็นตัวส่งถ่ายกำลังงาน ดังภาพที่ 2.12 โดยมอเตอร์ไฟฟ้ามีค่าประสิทธิภาพ ดังตารางที่ 2.4

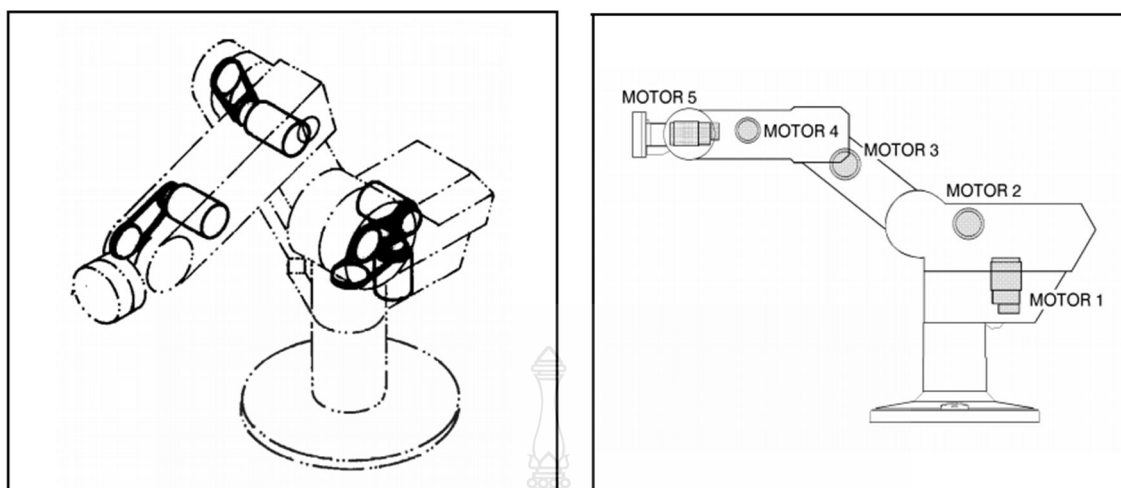


ภาพที่ 2.12 ระบบขับเคลื่อน [9]

ตารางที่ 2.4 ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ [9]

Motor Specifications	Motor Axes 1, 2, 3	Motor Axes 4, 5
Motor Constant	$3.01 \text{ oz} \cdot \text{in}/\sqrt{W}$	$1.94 \text{ oz} \cdot \text{in}/\sqrt{W}$
Peak Torque (Stall)	$41.3 \text{ oz} \cdot \text{in}$	$15.6 \text{ oz} \cdot \text{in}$
No Load Speed	6151 rpm	5592 rpm
Motor Friction Torque	$0.60 \text{ oz} \cdot \text{in}$	$0.50 \text{ oz} \cdot \text{in}$
Motor Weight	10.1 oz	8.98 oz

ลักษณะการวางของมอเตอร์และชุดขับเคลื่อนจะแยกออกเป็น 2 ลักษณะ ลักษณะที่ 1 โดยแกนที่ 1-4 จะมีมอเตอร์ไฟฟ้าและชุด Harmonic Drive Gears ส่วนลักษณะที่ 2 แกนที่ 5 จะมีเฉพาะมอเตอร์ไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 2.13



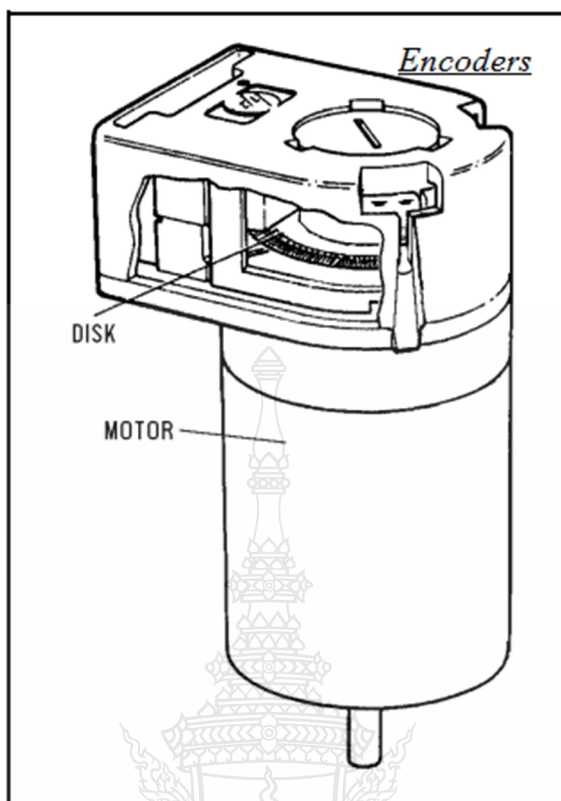
ภาพที่ 2.13 ชุดขับเคลื่อนและตำแหน่งมอเตอร์ไฟฟ้า [9]

2.7.3 ตำแหน่งและขีดจำกัดของแขนกล

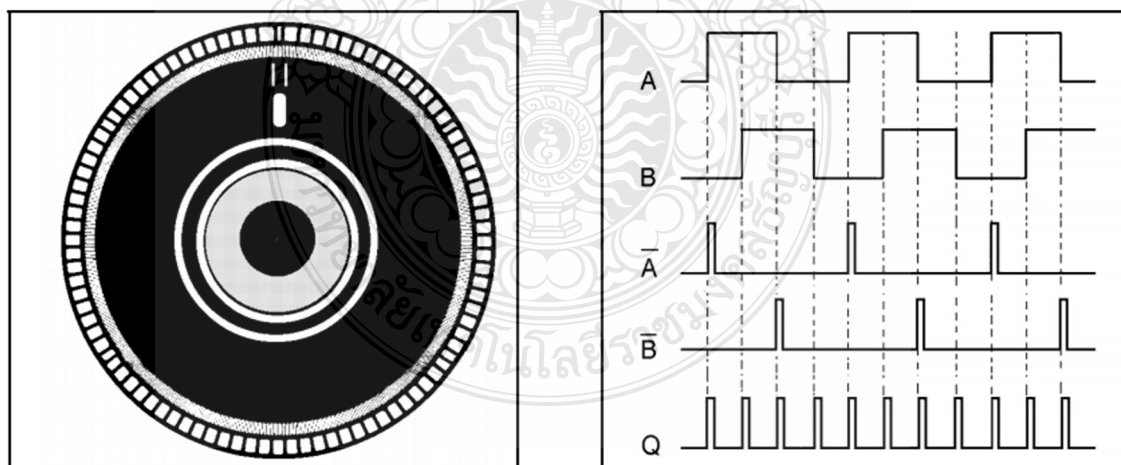
ในหุ่นยนต์อุตสาหกรรม หุ่น SCORBOT ER VII จะมีการบอกตำแหน่งของแขนกลและขีดจำกัดการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ โดยการบอกตำแหน่งจะใช้ เอ็นโค้ดเดอร์ (Encoder) และการจำกัดการเคลื่อนที่จะใช้ ลิมิท สวิตช์ (Limit Switches)

1) เอ็นโค้ดเดอร์ (Encoders)

เอ็นโค้ดเดอร์ เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดรูปแบบหนึ่ง ซึ่งมีความสำคัญมากใช้ในการวัดมุมเพลลาของมอเตอร์ เอ็นโค้ดเดอร์ ประกอบด้วย งานหมุน และอุปกรณ์ตรวจวัด โดยงานหมุนจะมีช่องเล็กๆ เมื่อเพลลาของมอเตอร์หมุนจะทำให้งานหมุนไปตัดลำแสงของอุปกรณ์ตรวจวัด ทำให้ชุดรับแสงมีการรับสัญญาณเป็นช่วงๆ จึงทำให้สัญญาณที่ได้มีลักษณะเป็นพัลส์ ซึ่งสัญญาณพัลส์ที่ได้จะแปรผันตรงกับงานหมุนของเพลลาของมอเตอร์ ซึ่งมีอยู่ 2 ชนิด คือ 1) เอ็นโค้ดเดอร์ อินคริเมนต์ (Incremental Encoder) โดยทั่วไปเรียกว่าเอ็นโค้ดเดอร์แบบโรตารี (Rotary Encoder) เป็นเอ็นโค้ดเดอร์แสดงความเร็วสัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณแบบดิจิตอล (Digital) ง่ายต่อการแปรผล 2) เอ็นโค้ดเดอร์แบบสัมบูรณ์ (Absolute Encoder) หรือโดยทั่วไปเรียกว่า โปเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer) โดยทั่วไปแล้วการทำงานคล้ายกับเอ็นโค้ดเดอร์แบบโรตารี แต่สัญญาณที่ได้จะเป็นเลขฐานสอง (Binary) การใช้งานจะยากกว่าเอ็นโค้ดเดอร์แบบโรตารี แต่เอ็นโค้ดเดอร์ชนิดนี้จะให้ความเที่ยงตรงและสามารถบอกได้ทุกตำแหน่งของการเคลื่อนที่ ดังแสดงในภาพที่ 2.14 และภาพที่ 2.15



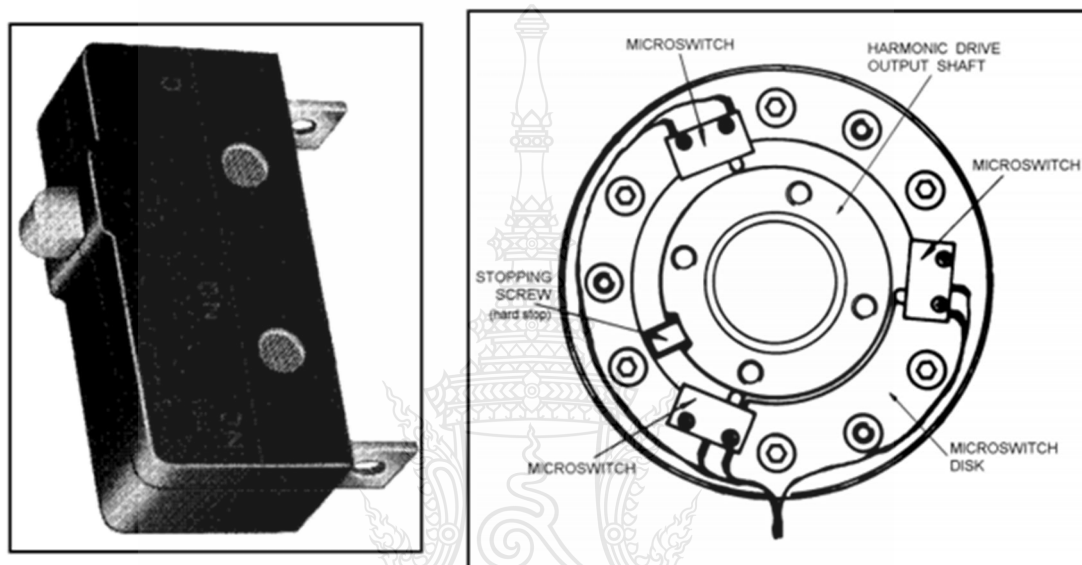
ภาพที่ 2.14 มอเตอร์และตำแหน่งเอ็นโค้ดเดอร์ [9]



ภาพที่ 2.15 เอ็นโค้ดเดอร์ดิส และการส่งสัญญาณพัลส์ [9]

2) ลิมิตสวิตช์ (Limit Switches)

เป็นสวิตช์ที่จำกัดระยะทาง การทำงานจะอาศัยแรงจากภายนอกมากระทำเช่น วางของทับที่ปุ่มกดหรือลูกเบี้ยวมาชนที่ปุ่มกด และเป็นผลทำให้หน้าสัมผัสที่ต่ออยู่กับก้านชน เปิด-ปิด ตามจังหวะของการชน ลักษณะของลิมิตสวิตช์และการวางลิมิตสวิตช์ในหุ่นยนต์ SCORBOT ER VII ดังแสดงในภาพที่ 2.16

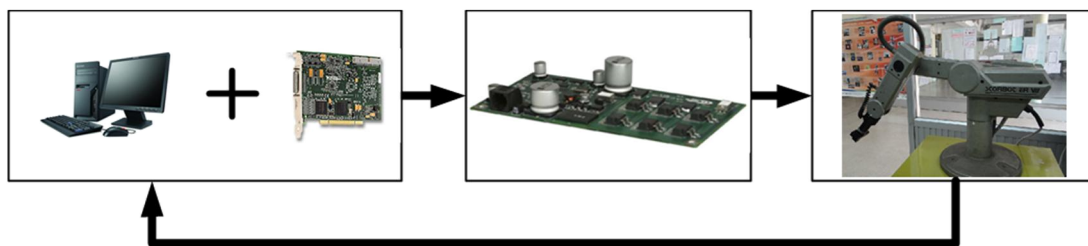


ภาพที่ 2.16 ลิมิตสวิตช์และการวางลิมิตสวิตช์ในหุ่นยนต์ SCORBOT ER VII [20]

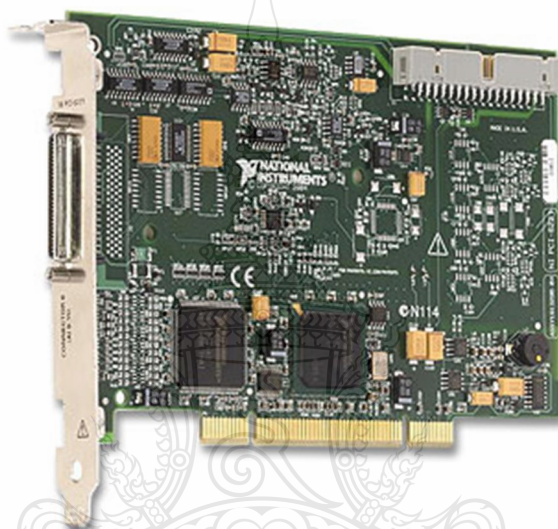
2.8 การควบคุม (Controller)

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ใช้การควบคุมหุ่นยนต์แบบ ควบคุมแรงบิด (Computed Torque) โดยมี ส่วนประกอบของการควบคุม 3 ส่วน อันได้แก่ คอมพิวเตอร์ ชุดขับเคลื่อนเซอร์โวมอเตอร์ และแขนกลอุตสาหกรรม (SCORBOT ER VII) โดยการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์กับหุ่นยนต์จะใช้ DAQ Card เป็นตัวเชื่อมต่อ เพื่อส่งคำสั่งควบคุมหุ่นยนต์

ในส่วนการเชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ไปยังหุ่นยนต์กับคอมพิวเตอร์ จะมี DAQ Card [13] ใช้สำหรับทำหน้าที่เก็บข้อมูลและแปลงสัญญาณทั้ง Analog (I/O), Digital (I/O), Timing (I/O) และ Trigger โดยมีการแปลงสัญญาณจากดิจิทัลเป็นอนาล็อกหรืออนาล็อกเป็นดิจิทัล เก็บข้อมูลสัญญาณทางไฟฟ้าและเซนเซอร์ซึ่งรับสัญญาณจากอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง แล้วนำไปประมวลผล ดังในภาพที่ 2.17 และภาพที่ 2.18 แสดงรูปการ์ด DAQ Card NI PCI-6221



ภาพที่ 2.17 การเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับแขนกล



ภาพที่ 2.18 การ์ด DAQ NI PCI-6221 [10]

มอเตอร์ไครว์ [11] ผลิตโดย Copley Controls Corp. รุ่น ASP-090-09 ใช้ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ โดยจะรับสัญญาณการควบคุมมาจากคอมพิวเตอร์ และมอเตอร์ไครว์จะควบคุมการจ่ายสัญญาณไฟฟ้าเข้าสู่มอเตอร์ พร้อมทั้งรับสัญญาณเอ็นโค้ดเดอร์ที่ต่อกับตัวมอเตอร์และสัญญาณดิจิทัลจากลิมิตสวิทช์ จากนั้นส่งสัญญาณเอ็นโค้ดเดอร์ที่ได้เข้าสู่คอมพิวเตอร์

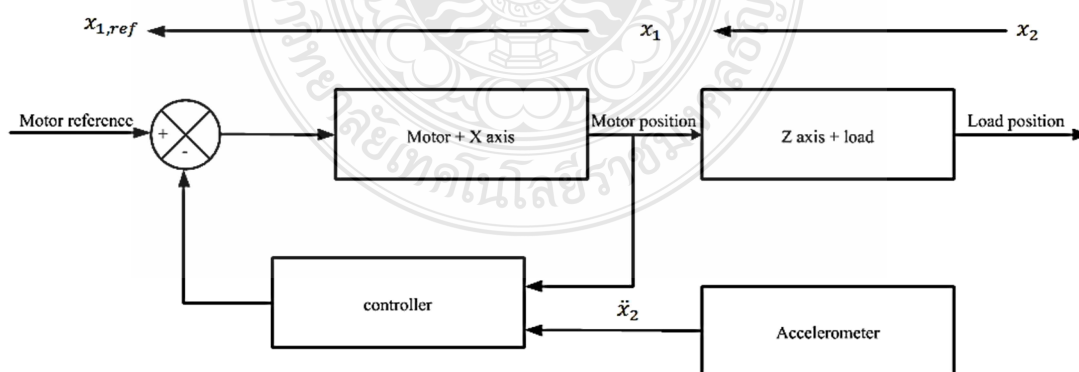


ภาพที่ 2.19 มอเตอร์ไครว์ Accelus รุ่น ASP – 090 – 09 [11]

2.9 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

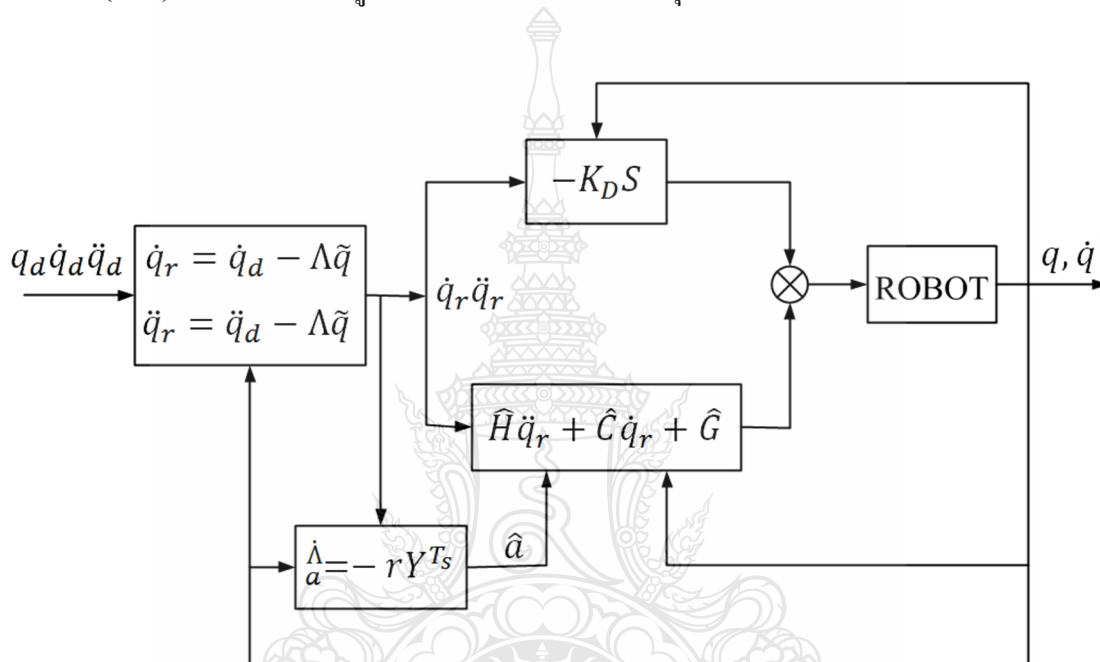
ในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมและการควบคุม ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นมูลพื้นฐานในการทำวิจัย โดยรวบรวมและเรียบเรียงสาระสำคัญไว้ดังต่อไปนี้

Dumetz E. และคณะ [12] ได้ใช้สัญญาณป้อนกลับแบบความเร่ง (Acceleration Feedback) เข้ามาประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์ที่มีการยึดหุ่นตัว แทนการวัดสัญญาณตำแหน่งและความเร็วจากตัวตรวจรู้ตำแหน่งและความเร็ว โดยใช้ตรวจรู้ความเร่งในการวัดตำแหน่งของมอเตอร์และแกนกลางของหุ่นยนต์แทน ซึ่งสัญญาณความเร่งที่ถูกวัดจากการตรวจรู้ความเร่งนี้จะนำมาใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบพีดี



ภาพที่ 2.20 การควบคุมโดยใช้สัญญาณป้อนกลับแบบความเร่ง

Slotine J. และคณะ [13] ได้นำเสนอตัวควบคุมแบบปรับตัว (Adaptive Controller) เพื่อที่จะควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่เร็วไคร์คโคฟ 2 DOF โดยที่พารามิเตอร์ทางพลศาสตร์ไม่ทราบค่าและได้เปรียบเทียบผลการทดลองกับตัวควบคุมแบบพีดี (PD Controller) และตัวควบคุมคำนวณทอร์ก (Computed-Torque Controller) แสดงให้เห็นว่าควบคุมแบบปรับตัวสามารถติดตามเส้นทาง (Path) การเคลื่อนที่ได้ถูกต้องกว่าแบบพีดีและควบคุมคำนวณทอร์ก



ภาพที่ 2.21 โครงสร้างของแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control)

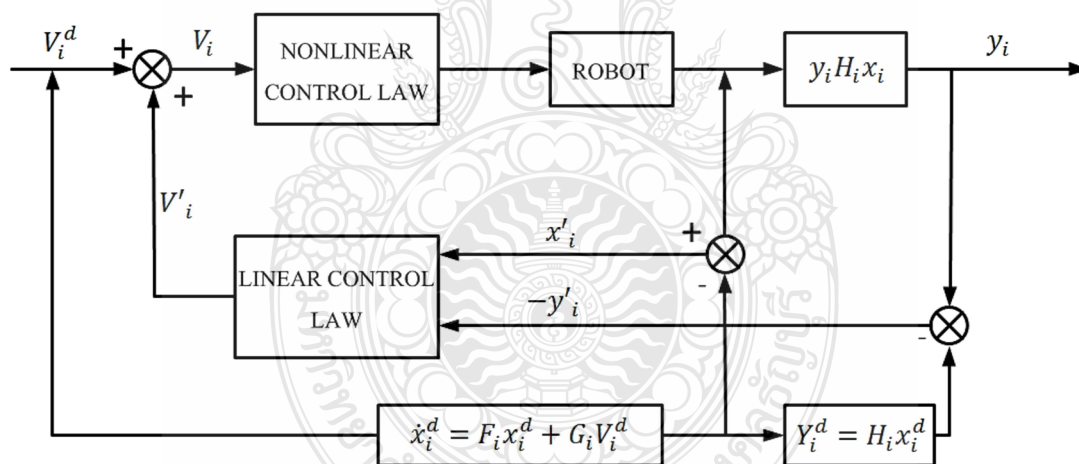
Dessant L. และคณะ [14] ได้เสนอตัวควบคุมปรับตัวแบบโดยตรง (Direct Adaptive Controller) สำหรับหุ่นยนต์แบบสกาล่า (SCARA-Type) ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ซึ่งใช้มอเตอร์แบบขับตรง (Direct Drive Motor) เป็นตัวต้นกำลัง ซึ่งตัวควบคุมปรับตัวนี้จะถูกใช้ในการปรับค่าตัวควบคุมแบบพีดี (PD Regulator) และตัวชดเชยแบบล้าหน้า (Feedforward Compensator) โดยที่ตัวชดเชยแบบล้าหน้าจะถูกปรับตัวโดยกฎของการปรับตัว ก็จะทำให้ค่าผิดพลาดของตำแหน่ง (Steady - State Position Error) มีค่าเป็นศูนย์ ในส่วนของฮาร์ดแวร์นั้นก็ได้ใช้ดีเอสพี (DSP) เป็นตัวประมวลผลแบบเวลาจริง

Barbosa F. [15] ได้นำเสนอการควบคุมตำแหน่งของแขนกล โดยใช้ Optimal Control ซึ่งได้ใช้หลักการของ Pontryagin Maximum เข้ามาช่วย และได้ทำการวิเคราะห์ถึงความเสถียรภาพ (Global

Asymptotic Stability) ของการควบคุมโดยใช้หลักการ Lyapunov's Direct และ Lasalle's Invariance และได้ทำการทดลองกับแขนกลที่สร้างขึ้นมาเองโดยทดลองเปรียบเทียบตัวควบคุมนี้กับตัวควบคุมแบบพีดี ซึ่งผลปรากฏว่าตัวควบคุมใหม่นี้ให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วกว่าและค่าความผิดพลาดในสถานะคงตัวก็น้อยกว่าเช่นกัน

Vashisth H. และคณะ [16] ได้ใช้หลักการของฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logic) มาช่วยควบคุมหุ่นยนต์แบบ PUMA 560 โดยใช้เครื่องมือที่เป็นซอฟต์แวร์ของบริษัท แอปทรอนิกส์ (Aptronix, Inc.) ผ่านคอมพิวเตอร์ในการควบคุม

Kuo C. และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาหาตัวควบคุมที่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลได้รวดเร็วและแม่นยำ โดยได้ใช้ Nonlinear Robust Control Scheme เป็นตัวควบคุมในงานวิจัย ซึ่งตัวควบคุมนี้ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ ก็คือ ส่วนที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ในส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้นจะถูกนำมาใช้สำหรับการ Decouple และ Stabilize แขนกล ส่วนที่เป็นเชิงเส้นนั้นก็นำเอาทฤษฎีของ Robust Servomechanism มากำจัดผลกระทบของความผิดพลาดและสัญญาณรบกวนต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้ทำการทดลองตัวควบคุมนี้กับหุ่นยนต์แบบสกล่าที่มี 2 ข้อต่อ



ภาพที่ 2.22 การควบคุมแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Robust Control Scheme)

บทที่ 3

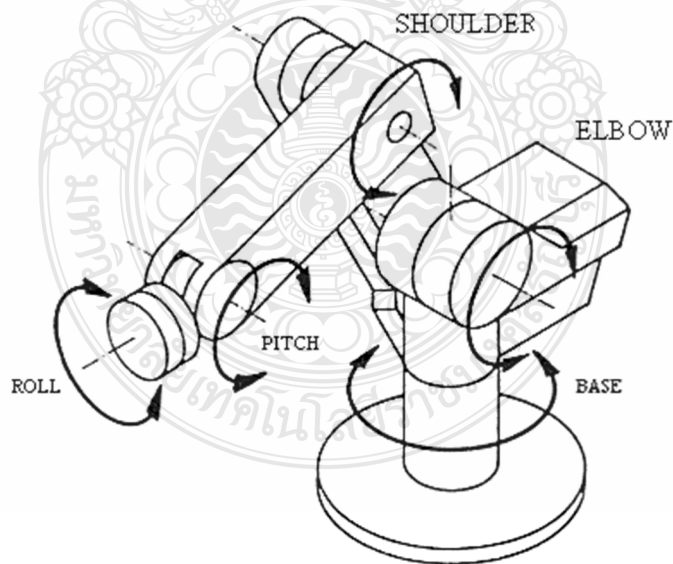
วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้วางกรอบของงานวิจัย เพื่อกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของงานวิจัย โดยได้ดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ศึกษาข้อมูลโครงสร้างของหุ่นยนต์
2. ออกแบบโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์
3. ปรับแก้ และเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่หุ่นยนต์
4. วิเคราะห์ผลการทดลอง
5. สรุปผลการทดลอง

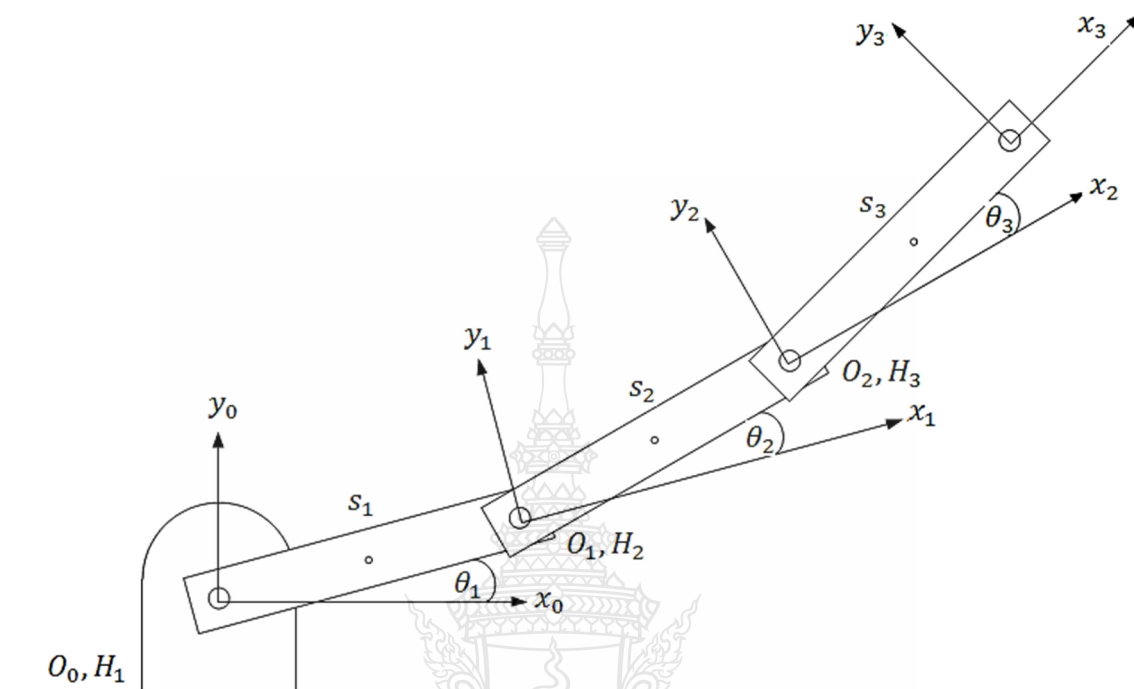
3.1 ศึกษาข้อมูลและโครงสร้างของหุ่นยนต์

จลนศาสตร์ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้ เป็นหุ่นยนต์ที่มีแกนหมุนทั้งหมด 5 แกน ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แกนหมุนของหุ่นยนต์

3.1.1 จลนศาสตร์ตรง (Direct Kinematics)



ภาพที่ 3.2 จุดกำเนิดในแต่ละแกน

ในงานวิจัยเล่มนี้ได้ใช้รูปทรงแบบก้านเรียว (Slender Rod) โดยอ้างอิงกับแขนกล SCORBOT ER VII ในลิงค์ที่ 2 ลิงค์ที่ 3 และลิงค์ที่ 4 จากภาพที่ 3.1 โดยได้ตั้งแกนสมมุติเพื่อหาค่า Denavit-Hartenberg (D-H Transformation Matrix) ดังแสดงในภาพที่ 3.2 ค่า DH-Table ของหุ่นยนต์จะหาได้จากภาพที่ 2.7 Denavit-Hartenberg Parameters ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 DH-Table พารามิเตอร์ของหุ่นยนต์

Link i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	l_1	0	0	θ_1
2	l_2	0	0	θ_2
3	l_3	0	0	θ_3

จลนศาสตร์ตรงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.1 และ 2.2 โดยที่เมตริกซ์ T ถูกเรียกว่า Transformation Matrix จากสมการข้างต้น ทำให้สามารถหาจลนศาสตร์ตรงในแต่ละแกนได้ดังนี้

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & l_1 c_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & l_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$T_2^0 = \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 & l_1 c_1 + l_2 c_{12} \\ s_{12} & c_{12} & 0 & l_1 s_1 + l_2 s_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$T_3^0 = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & l_1 c_1 + l_2 c_{12} + l_3 c_{123} \\ s_{123} & c_{123} & 0 & l_1 s_1 + l_2 s_{12} + l_3 s_{123} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

3.1.2 การเคลื่อนที่แบบพลศาสตร์ (Dynamics)

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดลอง โดยทั่วไปแล้วจะใช้สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดังสมการที่ 2.15 สำหรับงานวิจัยเล่มนี้จะใช้สมการที่ 2.16 ในการคำนวณหาการเคลื่อนที่โดยในกรณีไม่คิดค่าความเสียดทาน

แทนค่าในสมการจะได้

$$M(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q}) + G(q) = Q = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

ค่า Manipulator Inertia Matrix, $M(q)$

$$M_{11} = \frac{1}{3}m_1l_1^2 + m_2(l_1^2 + l_1l_2c_2 + \frac{1}{3}l_2^2) + m_3(l_1^2 + l_2^2 + \frac{1}{3}l_3^2 + 2l_1l_2c_2 + l_1l_3c_{23} + l_2l_3c_3)$$

$$M_{12} = m_2(\frac{1}{2}l_1l_2c_2 + \frac{1}{3}l_2^2) + m_3(l_2^2 + \frac{1}{3}l_3^2 + l_2l_3c_3 + l_1l_2c_2 + \frac{1}{2}l_1l_3c_{23})$$

$$M_{13} = m_3(\frac{1}{3}l_3^2 + \frac{1}{2}l_1l_3c_{23} + \frac{1}{2}l_2l_3c_3)$$

$$M_{21} = m_2(\frac{1}{2}l_1l_2c_2 + \frac{1}{3}l_2^2) + m_3(l_2^2 + \frac{1}{3}l_3^2 + l_2l_3c_3 + \frac{1}{2}l_1l_3c_{23} + l_1l_2c_2)$$

$$M_{22} = \frac{1}{3}m_2l_2^2 + m_3(\frac{1}{3}l_3^2 + l_2^2 + l_2l_3c_3)$$

$$M_{23} = m_3(\frac{1}{3}l_3^2 + \frac{1}{2}l_2l_3c_3)$$

$$M_{31} = m_3(\frac{1}{3}l_3^2 + \frac{1}{2}l_1l_3c_{23} + \frac{1}{2}l_2l_3c_3)$$

$$M_{32} = m_3(\frac{1}{3}l_3^2 + \frac{1}{2}l_2l_3c_3)$$

$$M_{33} = \frac{1}{3}m_3l_3^2$$

ค่า Velocity Coupling Vector, $C(q, \dot{q})$

$$\begin{aligned} C_1 = & [-m_2l_1l_2s_2 - 2m_3l_1l_2s_2 - m_3l_1l_3s_{23}] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + [-m_3l_1l_3s_{23} - m_3l_2l_3s_3] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 \\ & + \left[-\frac{1}{2}m_2l_1l_2s_2 - m_3l_1l_2s_2 - \frac{1}{2}m_3l_1l_3s_{23} \right] \dot{\theta}_2^2 + [-m_3l_1l_3s_{23} - m_3l_2l_3s_3] \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \\ & + \left[-\frac{1}{2}m_3l_1l_3s_{23} - \frac{1}{2}m_3l_2l_3s_3 \right] \dot{\theta}_3^2 \end{aligned}$$

$$C_2 = \left[\frac{1}{2}m_2l_1l_2s_2 + m_3l_1l_2s_2 + \frac{1}{2}m_3l_1l_3s_{23} \right] \dot{\theta}_1^2 + [-m_3l_2l_3s_3] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + [-m_3l_2l_3s_3] \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + [-m_3l_2l_3s_3] \dot{\theta}_3^2$$

$$C_3 = \left[\frac{1}{2}m_3l_1l_3s_{23} + \frac{1}{2}m_3l_2l_3s_3 \right] \dot{\theta}_1^2 + [m_3l_2l_3s_3] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \left[-\frac{1}{2}m_3l_2l_3s_3 \right] \dot{\theta}_3^2$$

ค่า Vector of Gravitational Forces, $G(q)$

$$G_1 = + \left[\left(\frac{m_1}{2} + m_2 + m_3 \right) l_1 c_1 + \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) l_2 c_{12} + \frac{m_3}{2} l_3 c_{123} \right] g$$

$$G_2 = + \left[\left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) l_2 c_{12} + \frac{m_3}{2} l_3 c_{123} \right] g$$

$$G_3 = + \frac{m_3}{2} l_3 g c_{123}$$

สมการการเคลื่อนที่ของแขนกล

$$\tau_1 = \left[\frac{1}{3} m_1 l_1^2 + m_2 (l_1^2 + l_1 l_2 c_2 + \frac{1}{3} l_2^2) + m_3 (l_1^2 + l_2^2 + \frac{1}{3} l_3^2 + 2l_1 l_2 c_2 + l_1 l_3 c_{23} + l_2 l_3 c_3) \right] \ddot{\theta}_1$$

$$+ \left[m_2 \left(\frac{1}{2} l_1 l_2 c_2 + \frac{1}{3} l_2^2 \right) + m_3 \left(l_2^2 + \frac{1}{3} l_3^2 + l_2 l_3 c_3 + l_1 l_2 c_2 + \frac{1}{2} l_1 l_3 c_{23} \right) \right] \ddot{\theta}_2$$

$$+ \left[m_3 \left(\frac{1}{3} l_3^2 + \frac{1}{2} l_1 l_3 c_{23} + \frac{1}{2} l_2 l_3 c_3 \right) \right] \ddot{\theta}_3$$

$$+ [-m_2 l_1 l_2 s_2 - 2m_3 l_1 l_2 s_2 - m_3 l_1 l_3 s_{23}] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + [-m_3 l_1 l_3 s_{23} - m_3 l_2 l_3 s_3] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3$$

$$+ \left[-\frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 s_2 - m_3 l_1 l_2 s_2 - \frac{1}{2} m_3 l_1 l_3 s_{23} \right] \dot{\theta}_2^2 + [-m_3 l_1 l_3 s_{23} - m_3 l_2 l_3 s_3] \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3$$

$$+ \left[-\frac{1}{2} m_3 l_1 l_3 s_{23} - \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 s_3 \right] \dot{\theta}_3^2$$

$$+ \left[\left(\frac{m_1}{2} + m_2 + m_3 \right) l_1 c_1 + \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) l_2 c_{12} + \frac{m_3}{2} l_3 c_{123} \right] g$$

$$\tau_2 = \left[m_2 \left(\frac{1}{2} l_1 l_2 c_2 + \frac{1}{3} l_2^2 \right) + m_3 \left(l_2^2 + \frac{1}{3} l_3^2 + l_2 l_3 c_3 + \frac{1}{2} l_1 l_3 c_{23} + l_1 l_2 c_2 \right) \right] \ddot{\theta}_1$$

$$+ \left[\frac{1}{3} m_2 l_2^2 + m_3 \left(\frac{1}{3} l_3^2 + l_2^2 + l_2 l_3 c_3 \right) \right] \ddot{\theta}_2 + \left[m_3 \left(\frac{1}{3} l_3^2 + \frac{1}{2} l_2 l_3 c_3 \right) \right] \ddot{\theta}_3$$

$$+ \left[\frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 s_2 + m_3 l_1 l_2 s_2 + \frac{1}{2} m_3 l_1 l_3 s_{23} \right] \dot{\theta}_1^2 + [-m_3 l_2 l_3 s_3] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + [-m_3 l_2 l_3 s_3] \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + [-m_3 l_2 l_3 s_3] \dot{\theta}_3^2$$

$$+ \left[\left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) l_2 c_{12} + \frac{m_3}{2} l_3 c_{123} \right] g$$

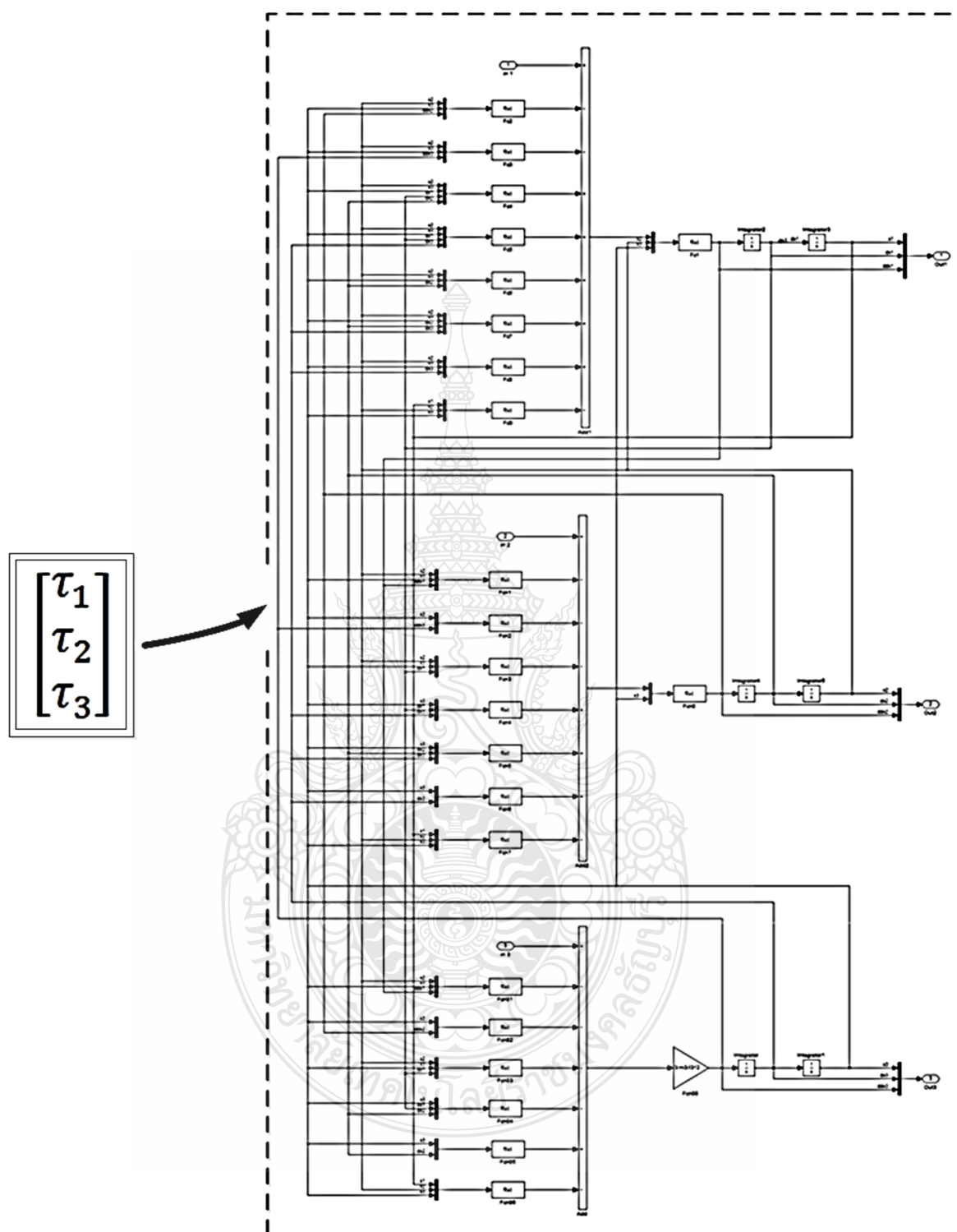
$$\begin{aligned} \tau_3 = & \left[m_3 \left(\frac{1}{3} l_3^2 + \frac{1}{2} l_1 l_3 c_{23} + \frac{1}{2} l_2 l_3 c_3 \right) \right] \ddot{\theta}_1 + \left[m_3 \left(\frac{1}{3} l_3^2 + \frac{1}{2} l_2 l_3 c_3 \right) \right] \ddot{\theta}_2 + \left[\frac{1}{3} m_3 l_3^2 \right] \ddot{\theta}_3 \\ & + \left[\frac{1}{2} m_3 l_1 l_3 s_{23} + \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 s_3 \right] \dot{\theta}_1^2 + [m_3 l_2 l_3 s_3] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \left[-\frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 s_3 \right] \dot{\theta}_2^2 + \frac{m_3}{2} l_3 g c_{123} \end{aligned}$$

ในส่วนการคำนวณทั้งหมดได้แสดงไว้ยังภาคผนวก ก

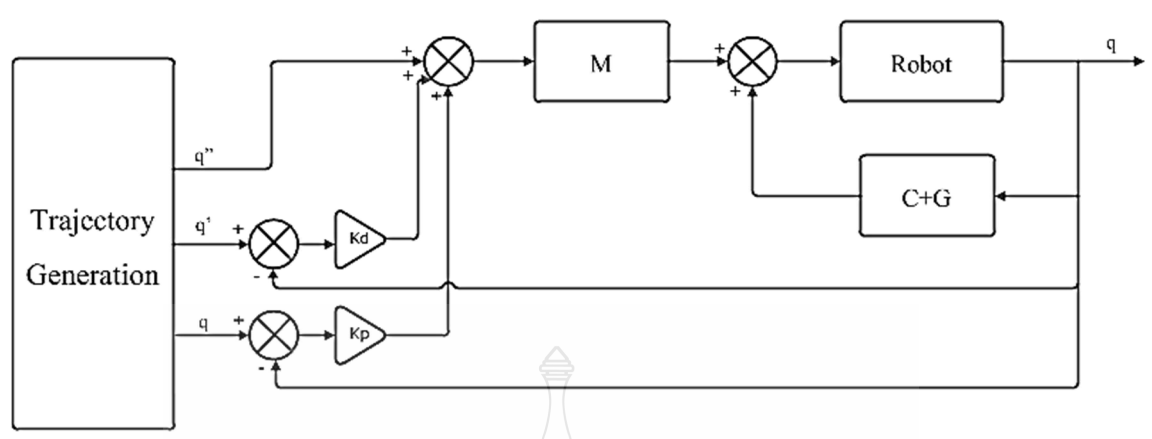
เมื่อได้สมการการเคลื่อนที่ของแขนกล ทำการตรวจเช็คความถูกต้องของสมการโดยทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยการแปลงสมการการเคลื่อนที่ให้อยู่ในรูปของ Block Diagram ดังภาพที่ 3.3 เมื่อตรวจเช็คความถูกต้อง จึงทำการออกแบบตัวควบคุมแบบคอมพิวเทอร์ค ดังภาพที่ 3.4 – 3.6

ในส่วนรายละเอียดของโปรแกรมได้แสดงในภาคผนวก ค

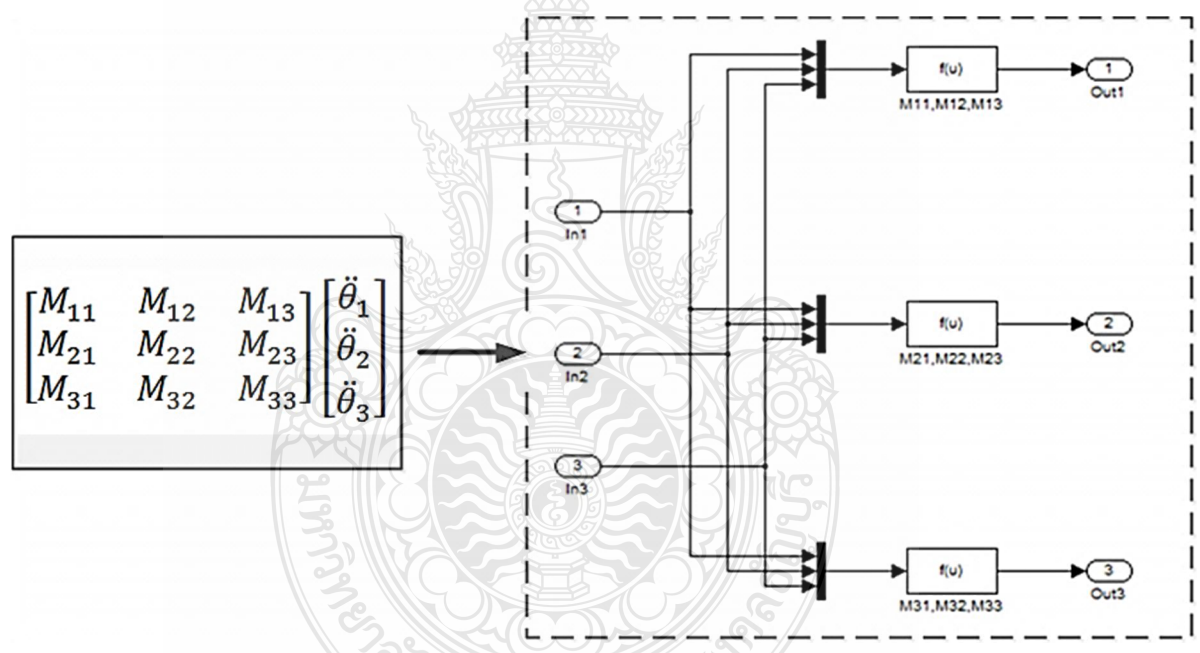




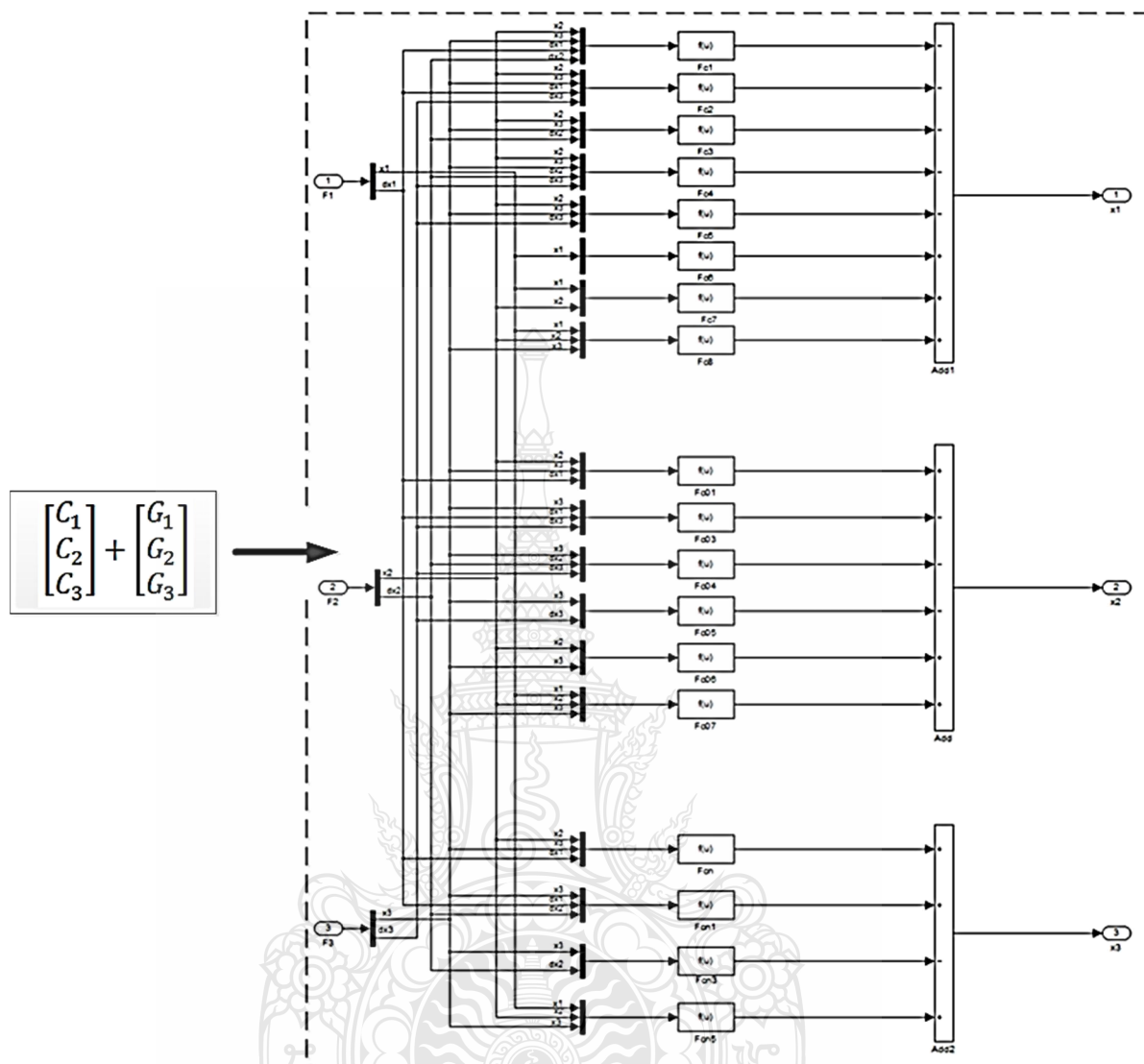
ภาพที่ 3.3 สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ในรูปของ Block Diagram



ภาพที่ 3.4 โมเดลการออกแบบตัวควบคุมแบบคอมพิวทอร์ค

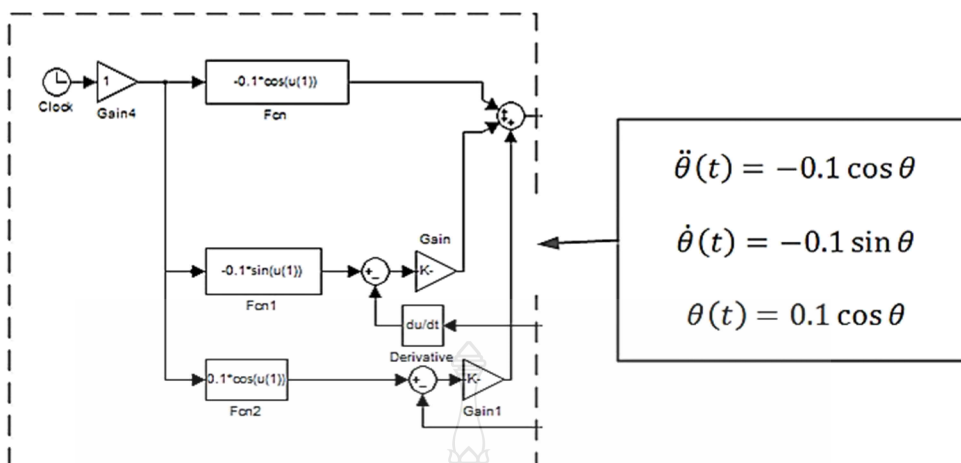


ภาพที่ 3.5 ค่า Manipulator Inertia Matrix, $M(q)$ ในรูปของ Block Diagram

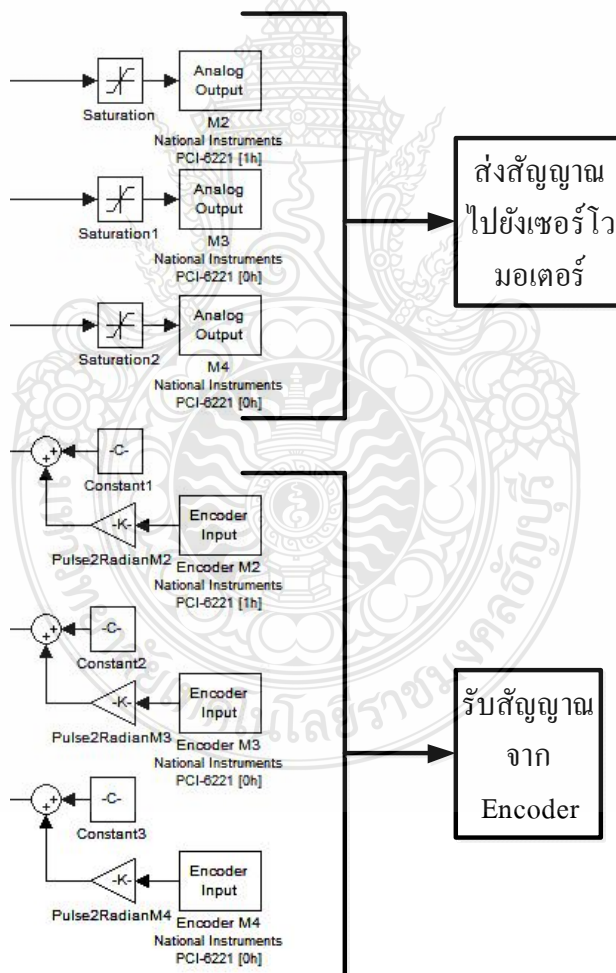


ภาพที่ 3.6 ค่า Velocity Coupling Vector, $C(q, \dot{q})$ และค่า Vector of Gravitational Forces, $G(q)$
 ในรูปของ Block Diagram

ในส่วนโปรแกรมการควบคุมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการทดลองจริงกับแขนกลอุตสาหกรรม ในการทดลองเส้นโค้งคอส ได้ใช้ค่า Trajectory Generator ค่าเดียวกันดังภาพที่ 3.7 ในภาพที่ 3.8 แสดงการรับ-ส่งสัญญาณในส่วนของโปรแกรมการควบคุมจริงของแขนกลอุตสาหกรรม



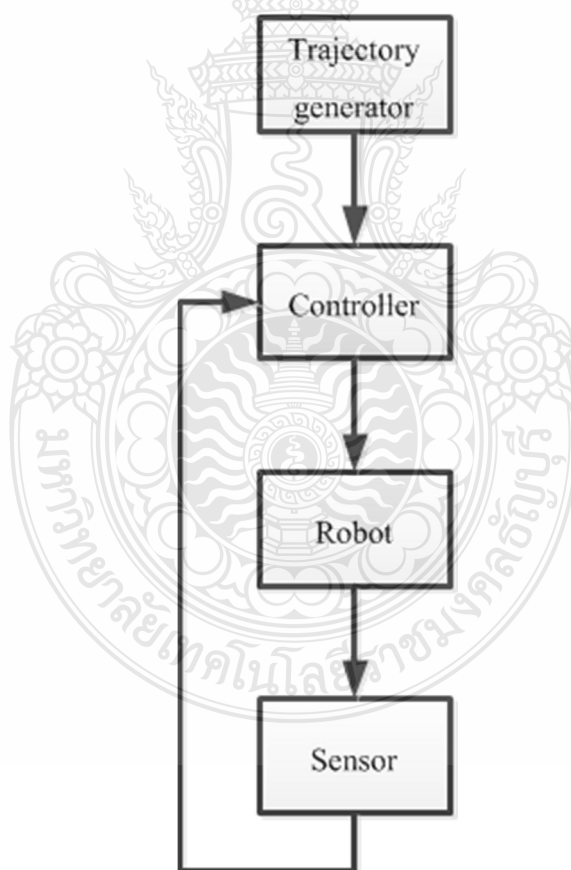
ภาพที่ 3.7 ค่า Trajectory Generation



ภาพที่ 3.8 ชุดรับส่งสัญญาณ

3.2 สมการ Trajectory Generator

ในการกำหนดการเคลื่อนที่ของแขนกล ได้ใช้ลักษณะการเคลื่อนที่จากจุดต่อจุด (Point to Point) ด้วย Trajectory Generator แบบ Cubical Polynomial เพื่อกำหนดการเคลื่อนที่ของแขนกล โดยมีลักษณะโพลินอมิการทำงานดังภาพที่ 3.9 ในตารางที่ 3.2 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณใส่ให้กับระบบ เพื่อให้แขนกลเคลื่อนที่ไปยังค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้คือ ให้แขนกลทั้ง 3 ลังค์เคลื่อนที่จากมุม 0 องศาหรือที่ 0 เรเดียน โดยลึงค์ที่ 1 เคลื่อนที่ในมุม 45 องศา หรือมุม 0.785 เรเดียน ลึงค์ที่ 2 เคลื่อนที่ในมุม -30 องศา หรือมุม -0.523 เรเดียน ลึงค์ที่ 3 เคลื่อนที่ในมุม 20 องศา หรือมุม 0.349 เรเดียน โดยในการเคลื่อนที่ของแขนกลใช้ระยะเวลา 2 วินาที และให้แขนกลอยู่ในสภาวะคงที่ ในส่วนการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ก

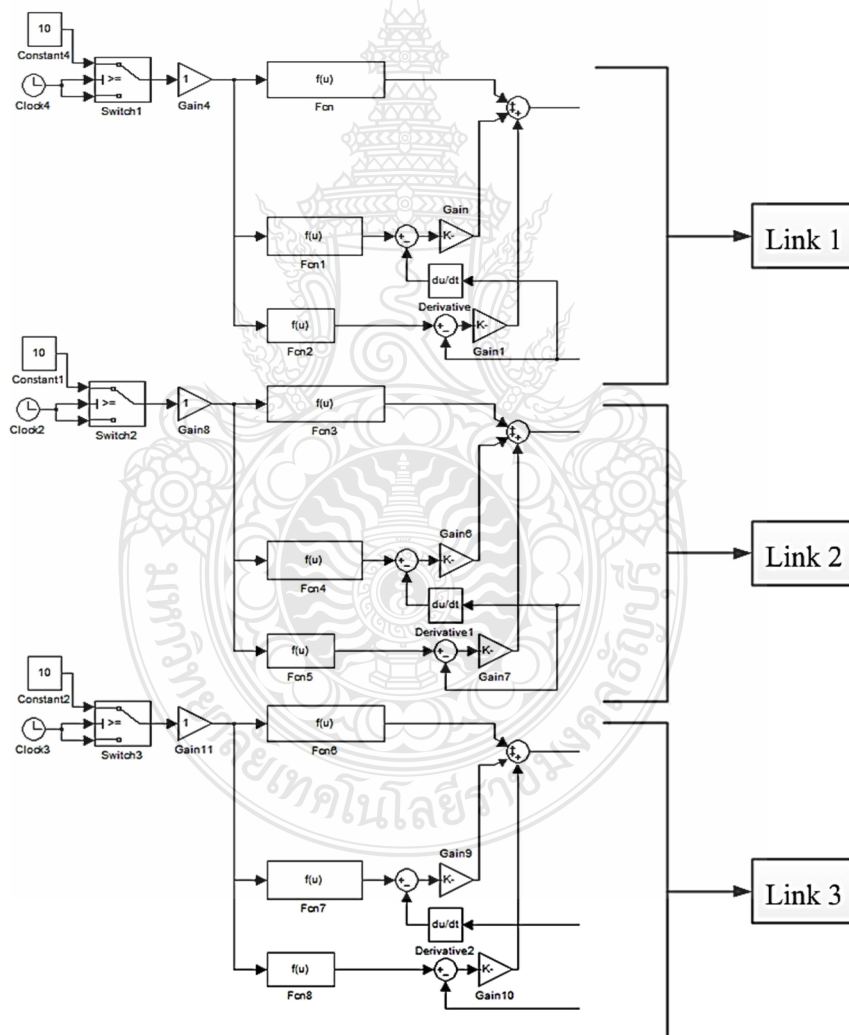


ภาพที่ 3.9 ลักษณะการทำงานของเส้นพาร์ท

ตารางที่ 3.2 ค่า Trajectory Generator (หน่วยเป็นองศา)

	Link 1	Link 2	Link 3
$\theta(t)$	$33.75t^2 - 11.25t^3$	$-22.5t^2 + 7.5t^3$	$15t^2 - 5t^3$
$\dot{\theta}(t)$	$67.5t - 33.75t^2$	$-45t + 22.5t^2$	$30t - 15t^2$
$\ddot{\theta}(t)$	$67.5 - 67.5t$	$-45 + 45t$	$30 - 30t$

ในส่วนโปรแกรมการควบคุมได้ทำการแยกค่า Trajectory Generator ของแต่ละลิงค์เพื่อ กำหนดเป้าหมายในการเคลื่อนที่ให้แตกต่างกันออกไปดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 ค่า Trajectory Generator ของแต่ละลิงค์

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้ จะกล่าวถึง ผลการทดลอง การทำงานของระบบควบคุม แขนกลแบบ 3 ข้อต่อบน ระบายด้วยการจำลองการทำงาน และการควบคุมจริงกับแขนกลอุตสาหกรรม โดยได้แบ่งการทดลอง ออกเป็น 2 ส่วน คือ

1) การทดลองกับแบบจำลอง (Simulation Experiments)

1. จำลองการเคลื่อนที่เมื่อกำหนดให้แขนกลเคลื่อนที่ต่อเนื่องด้วย Trajectory Generator แบบ COSINE Curve

2. จำลองการเคลื่อนที่เมื่อกำหนดให้แขนกลเคลื่อนที่จากจุดต่อจุด (Point to Point) ด้วย Trajectory Generator แบบ Cubical Polynomial

2) การทดลองจริงกับแขนกล (Physical Experiments)

1. ทดลองการเคลื่อนที่เมื่อกำหนดให้แขนกลเคลื่อนที่ต่อเนื่องด้วย Trajectory Generator แบบ COSINE Curve

2. ทดลองการเคลื่อนที่เมื่อกำหนดให้แขนกลเคลื่อนที่จากจุดต่อจุด (Point to Point) ด้วย Trajectory Generator แบบ Cubical Polynomial

สำหรับจุดมุ่งหมายของการจำลองการทำงานในส่วนที่หนึ่งของแขนกล เพื่อศึกษาการทำงาน ของระบบควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ รวมถึงผลตอบสนองที่เกิดกับระบบควบคุม ในส่วน จุดมุ่งหมายที่สองของการทดลองเพื่อทดสอบการทำงานจริงของระบบควบคุมแขนกลที่ได้ออกแบบ ไว้

ในการทดลองทั้ง 2 ส่วนได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ของแขนกลดังนี้

มวลของลิงค์ที่ 1 เท่ากับ 19.24 กิโลกรัม ความยาวของลิงค์ที่ 1 เท่ากับ 0.3 เมตร

มวลของลิงค์ที่ 2 เท่ากับ 4.02 กิโลกรัม ความยาวของลิงค์ที่ 2 เท่ากับ 0.25 เมตร

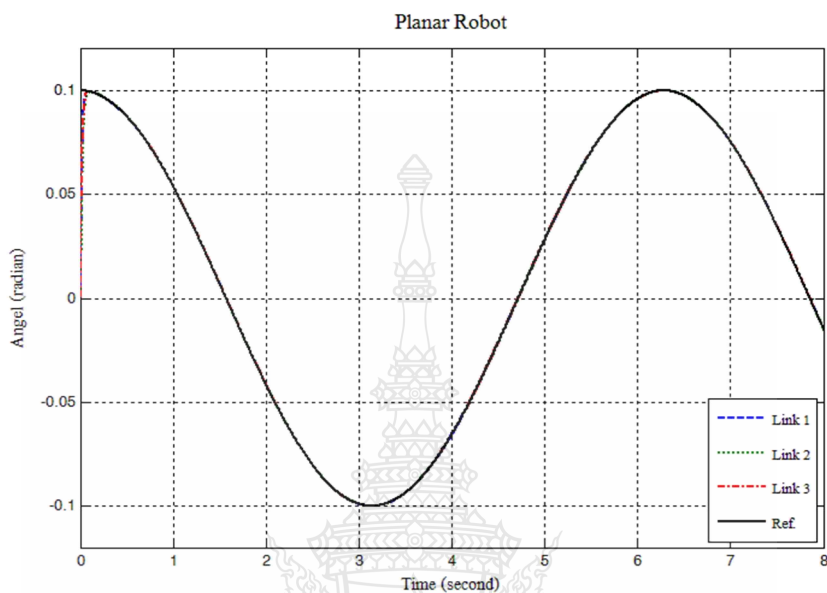
มวลของลิงค์ที่ 3 เท่ากับ 3.2 กิโลกรัม ความยาวของลิงค์ที่ 3 เท่ากับ 0.25 เมตร

ค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลกเท่ากับ 9.81 m/s^2

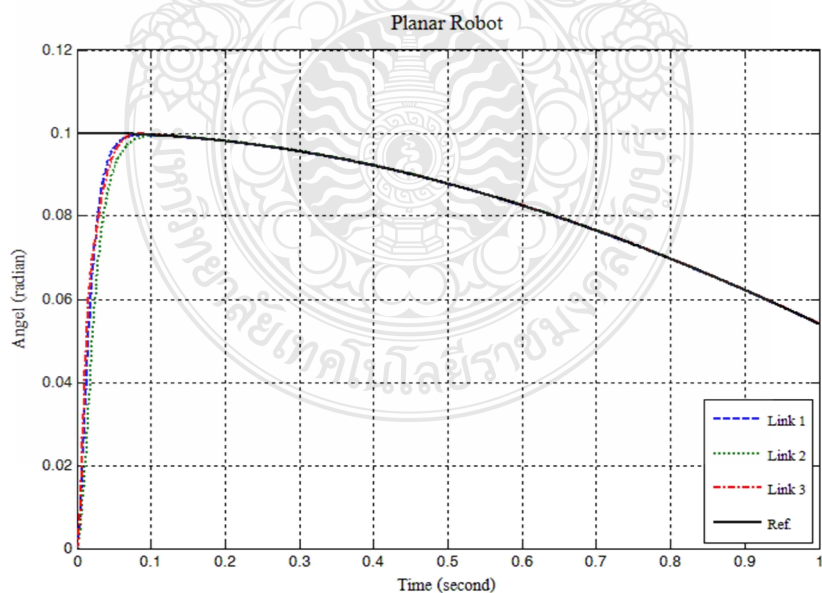
4.1 การทดลองกับแบบจำลอง (Simulation Experiments)

4.1.1 จำลองการเคลื่อนที่เมื่อกำหนดให้แขนกลเคลื่อนที่ต่อเนื่องด้วย Trajectory Generator แบบ COSINE Curve เพื่อทดสอบผลตอบสนองของระบบด้วยการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม

MATLAB/Simulink โดยกำหนดค่า $\omega_n = 100$ หรือ $k_d = 200$ และ $k_p = 10000$ ทั้ง 3 ลิงค์ ผลการทดลองได้แสดงในภาพที่ 4.1 – 4.2

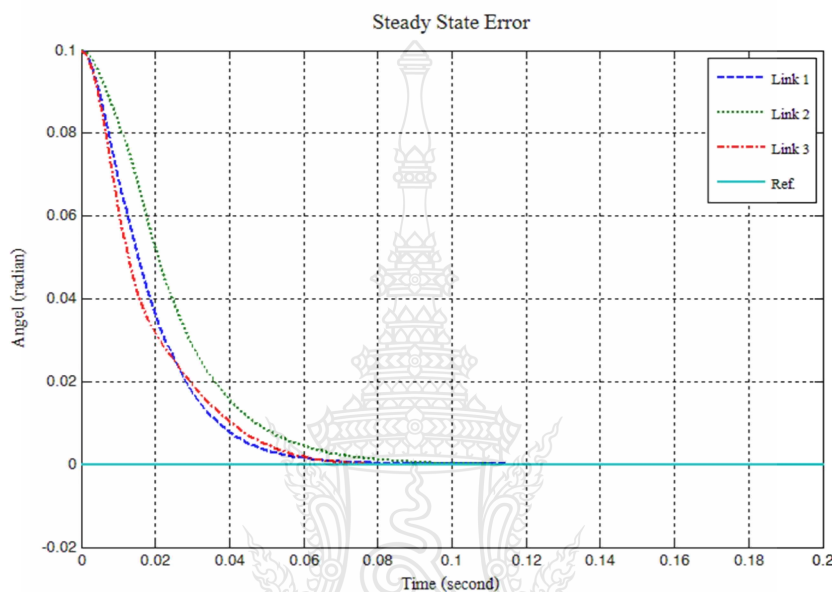


ภาพที่ 4.1 ผลตอบสนองและค่าเป้าหมายของแขนกล



ภาพที่ 4.2 ส่วนขยายของผลตอบสนองและค่าเป้าหมายของแขนกล

เมื่อพิจารณาจากกราฟในภาพที่ 4.1 – 4.2 ซึ่งเป็นกราฟแสดงผลตอบสนองและค่าเป้าหมายของแขนกลในรูปแบบของเส้น โคไซน์ (COSINE Curve) โดยได้ตั้งค่าให้มืออยู่ในช่วง 0.1 ถึง -0.1 เรเดียน จะเห็นได้ว่าแขนกลทั้ง 3 ลิ้งค์ เคลื่อนที่จาก 0 เรเดียน ไปยังเส้นอ้างอิง (Ref.) ที่เวลาประมาณ 0.1 วินาที โดยได้ติดตามเส้นอ้างอิงและรักษาเสถียรภาพของระบบ



ภาพที่ 4.3 ผลการทดลองเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

พิจารณาจากกราฟในภาพที่ 4.3 ระบบได้ใช้ระยะเวลาประมาณ 0.12 วินาที ระบบจึงเข้าสู่ค่าเป้าหมายและรักษาเสถียรภาพของระบบ และได้ทำการตรวจเช็คค่าความผิดพลาดในช่วงสภาวะคงตัว พบว่ามีการแกว่งของระบบเล็กน้อย โดยลิ่งค์ที่ 1 ที่ประมาณ $\pm 4 \times 10^{-5}$ เรเดียน ลิ่งค์ที่ 2 ที่ประมาณ $\pm 14 \times 10^{-5}$ เรเดียน ลิ่งค์ที่ 3 ที่ประมาณ $\pm 1 \times 10^{-5}$ เรเดียน

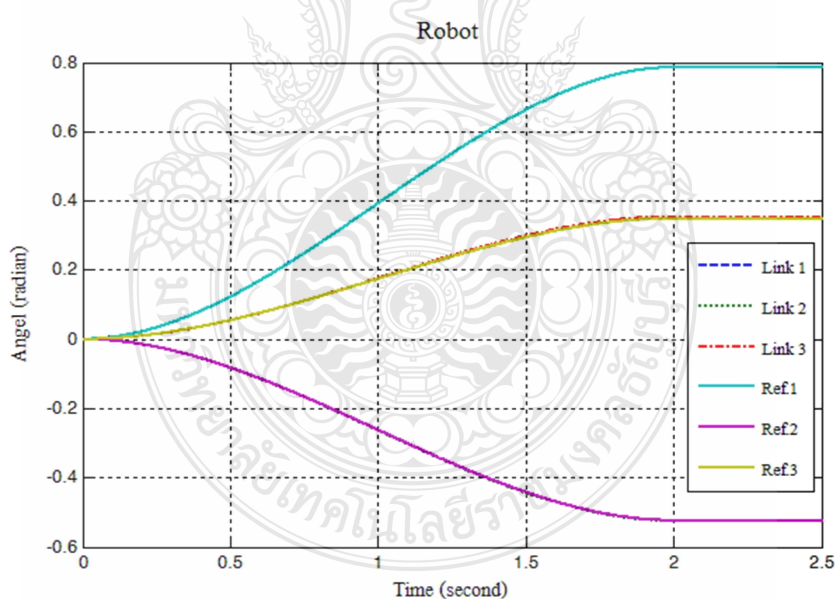
4.1.2 จำลองการเคลื่อนที่เมื่อกำหนดให้แขนกลเคลื่อนที่จากจุดต่อจุด (Point to Point) ด้วย Trajectory Generator แบบ Cubical Polynomial เพื่อทดสอบผลตอบสนองของระบบด้วยการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink โดยในการจำลองการทำงานของแขนกลนั้น ได้กำหนดการเคลื่อนที่เริ่มต้นของแขนกลทั้ง 3 ลิ่งค์ไว้ที่ 0 องศา หรือ 0 เรเดียน แล้วจึงให้แขนกลทั้ง 3 ลิ่งค์เคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายที่ตั้งไว้คือ ลิ่งค์ที่ 1 เคลื่อนที่ไป 45 องศา หรือ 0.785 เรเดียน ลิ่งค์ที่ 2 เคลื่อนที่ไป -30 องศา หรือ -0.523 และลิ่งค์ที่ 3 เคลื่อนที่ไป 20 องศา หรือ 0.349 เรเดียน ภายในระยะเวลา 2 วินาที เมื่อได้ข้อกำหนดในการเคลื่อนที่จึงนำไปคำนวณหา Trajectory Generator เพื่อ

ใส่เข้าไปยังระบบดังตารางที่ 4.1 โดยกำหนดค่า $\omega_n = 100$ หรือ $k_d = 200$ และ $k_p = 10000$ ทั้ง 3 ลิ้งค์ ผลการทดลองได้แสดงในภาพที่ 4.4 – 4.7

ตารางที่ 4.1 ค่า Trajectory Generator (หน่วยเป็น องศา)

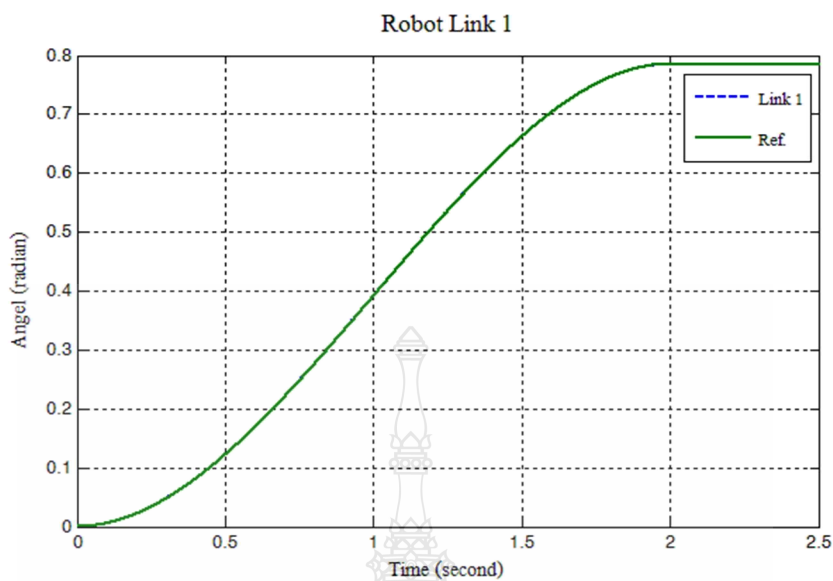
	Link 1	Link 2	Link 3
$\theta(t)$	$33.75t^2 - 11.25t^3$	$-22.5t^2 + 7.5t^3$	$15t^2 - 5t^3$
$\dot{\theta}(t)$	$67.5t - 33.75t^2$	$-45t + 22.5t^2$	$30t - 15t^2$
$\ddot{\theta}(t)$	$67.5 - 67.5t$	$-45 + 45t$	$30 - 30t$

ทดลองผลตอบสนองของการเคลื่อนที่ โดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink ในการทดลองครั้งนี้ได้นำค่า Trajectory Generator จากตารางที่ได้คำนวณมาใส่ยัง Mathematical Model เพื่อกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกล และให้คงสถานะไว้ ณ ตำแหน่งดังกล่าว ดังแสดงในภาพที่ 4.4 - 4.7



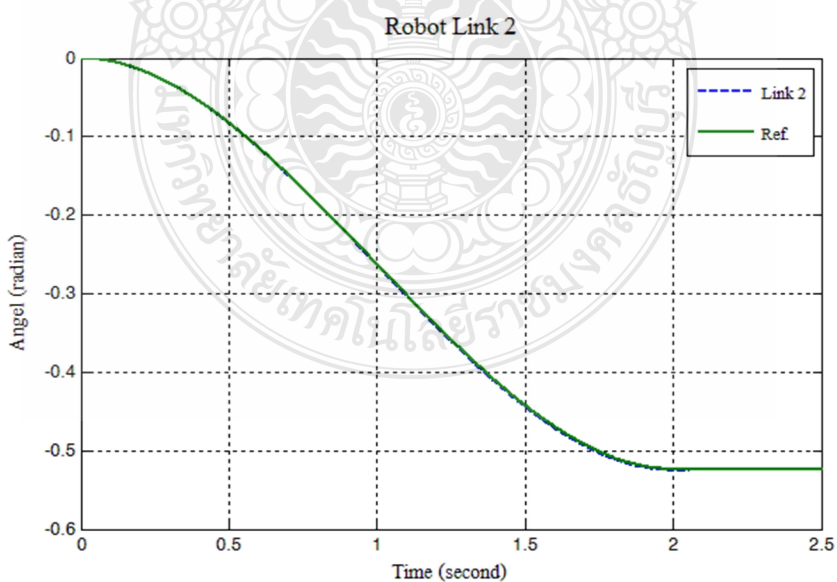
ภาพที่ 4.4 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของแขนกล

พิจารณากราฟจากภาพที่ 4.4 จะเห็นว่า การเคลื่อนที่ของแขนกลทั้ง 3 ลิ้งค์ เคลื่อนที่ไปตามเป้าหมายที่กำหนด เมื่อถึงระยะเวลาที่กำหนดไว้ 2 วินาที แขนกลได้คงสถานะของตัวเอง



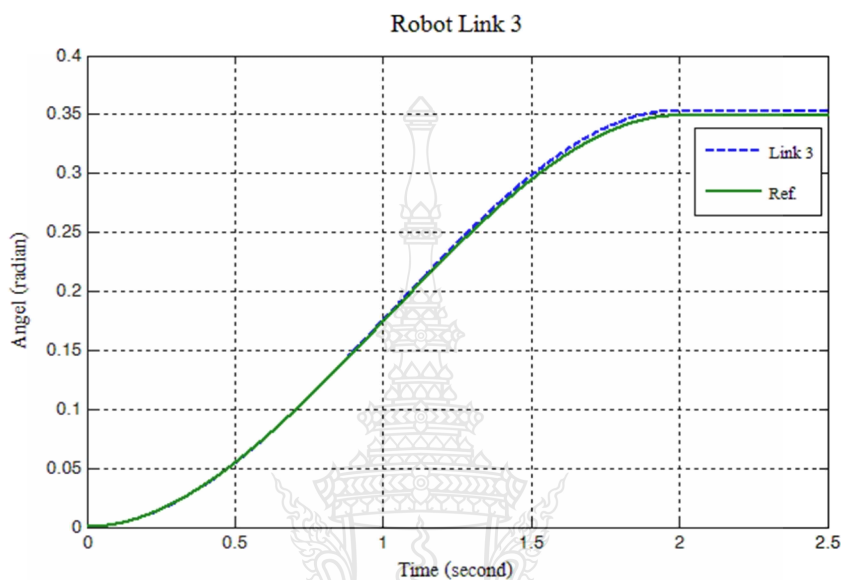
ภาพที่ 4.5 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 1

พิจารณากราฟจากภาพที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าระบบเคลื่อนที่จาก 0 เรเดียน ไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ที่ 0.785 เรเดียน หรือเท่ากับ 45 องศา ในระยะเวลา 2 วินาที และคงสถานะของตัวเองไว้ได้ โดยมีค่าความผิดพลาดเมื่ออยู่ในสภาวะคงตัวที่ 0.00002 เรเดียน



ภาพที่ 4.6 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 2

พิจารณารูปจากภาพที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าระบบเคลื่อนที่จาก 0 เรเดียน ไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ที่ - 0.523 เรเดียน หรือเท่ากับ - 45 องศา ในระยะเวลา 2 วินาที และคงสถานะของตัวเองไว้ได้ โดยมีค่าความผิดพลาดเมื่ออยู่ในสภาวะคงตัวที่ 0.00012 เรเดียน



ภาพที่ 4.7 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 3

พิจารณารูปจากภาพที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าระบบเคลื่อนที่จาก 0 เรเดียน ไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ที่ 0.349 เรเดียน หรือเท่ากับ 20 องศา ในระยะเวลา 2 วินาที และคงสถานะของตัวเองไว้ได้ โดยมีค่าความผิดพลาดเมื่ออยู่ในสภาวะคงตัวที่ 0.004 เรเดียน

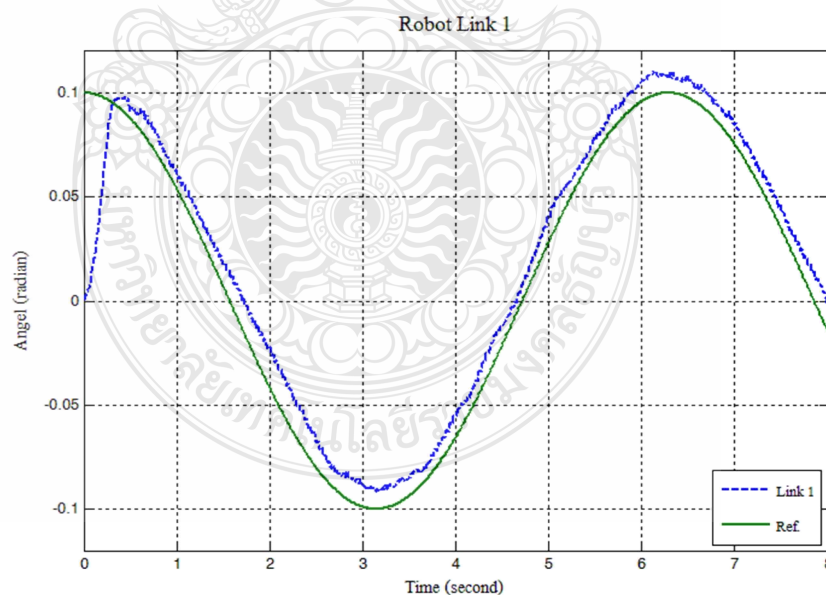
4.2 การทดลองจริงกับแขนกล (Physical Experiments)

4.2.1 ทดลองการเคลื่อนที่เมื่อกำหนดให้แขนกลเคลื่อนที่ต่อเนื่องด้วย Trajectory Generator แบบ COSINE Curve ในส่วนการทดลองนี้ได้นำ Block Diagram ของชุดควบคุมที่ได้จากการจำลองการทำงาน (Mathematical Model) มาทำการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ผ่าน DAQ Card และชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ (Motor Drive) ในส่วนการทดลองจริงกับแขนกลนั้น ทางผู้วิจัยได้ใช้ลักษณะรูปทรงแบบก้านเรียวย มาทำการหาสมการต่างๆ ของแขนกลซึ่งรูปทรงดังกล่าวกับรูปทรงของแขนกล SCORBOT ER VII จะมีลักษณะที่แตกต่างกัน ทำให้ต้องมีการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของแขนกล เพื่อให้ใกล้เคียงกับแขนกลที่ใช้ในการทดลอง โดยผู้วิจัยได้ใช้การปรับแต่งค่าน้ำหนักของแขนกล โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อย้ายจุด

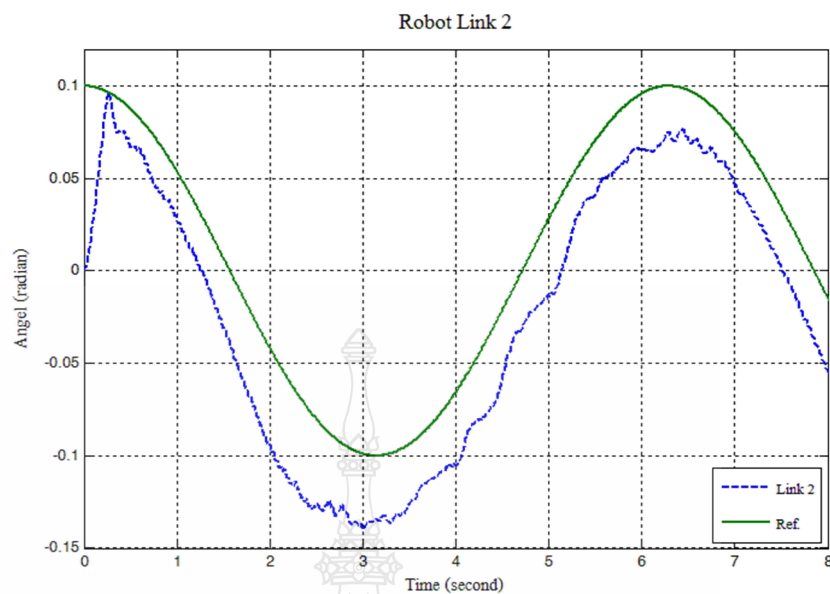
ศูนย์กลางมวลของแขนกลในแต่ละลิงค์ ในการทดลองได้กำหนดจุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ของแขนกลที่ 0 เรเดียน ทั้ง 3 ลิงค์ ดังภาพที่ 4.8 ผลการทดลองเริ่มต้น โดยยังไม่เปลี่ยนค่าน้ำหนักของแขนกล จะแสดงในภาพที่ 4.9 – 4.12 โดยกำหนดค่า $\omega_n = 100$ หรือ $k_d = 200$ และ $k_p = 10000$ ทั้ง 3 ลิงค์



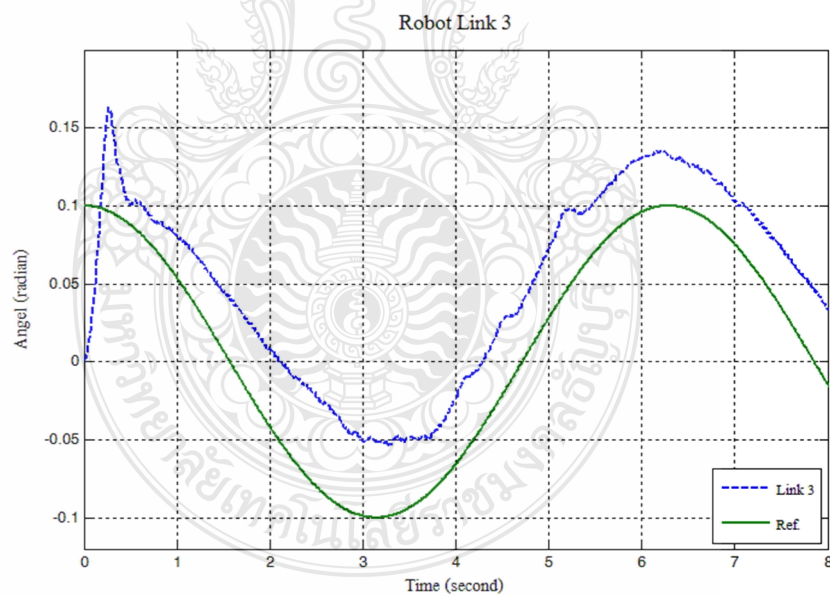
ภาพที่ 4.8 แสดงการเริ่มต้นเคลื่อนที่ของแขนกล



ภาพที่ 4.9 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 1



ภาพที่ 4.10 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 2

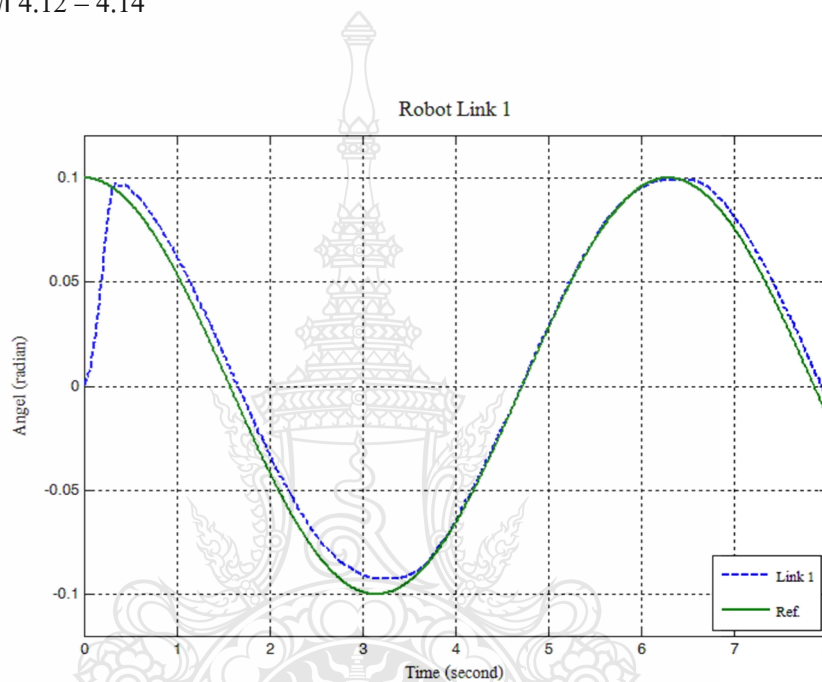


ภาพที่ 4.11 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 3

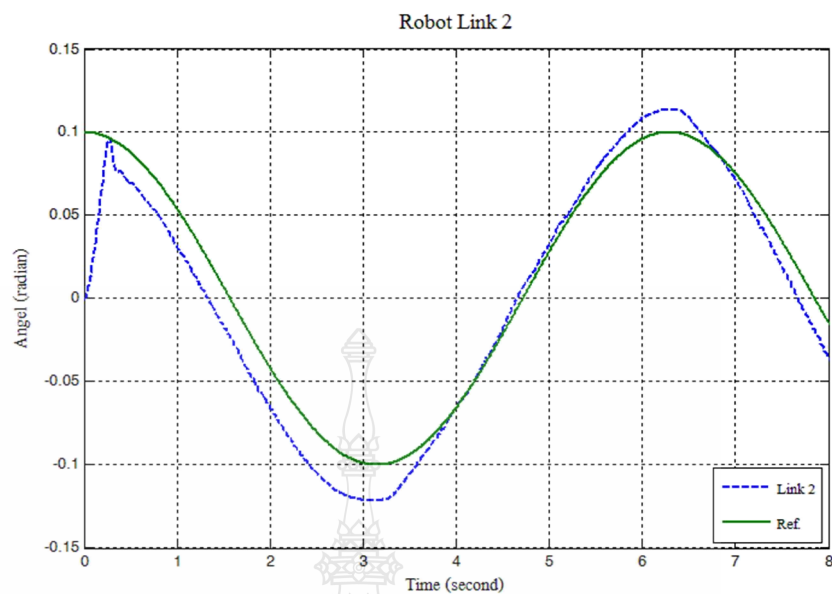
จากกราฟในภาพที่ 4.9 – 4.11 ได้ใช้ค่าน้ำหนักเท่ากับแบบจำลอง จะพบว่าแขนกลมีความคลาดเคลื่อนที่มากเนื่องจากรูปทรงที่ใช้ในการคำนวณหาสมการต่างๆ โดยลิงค์ที่ 1 มีความคาด

เคลื่อน 0.01 เรเดียน ลิงค์ที่ 2 มีความคาบเคลื่อน 0.04 เรเดียน และลิงค์ที่ 3 มีความคาบเคลื่อน 0.05 เรเดียน และในระบบจะเห็นว่ามี การสั่นของแขนกลตลอดช่วงการทำงาน

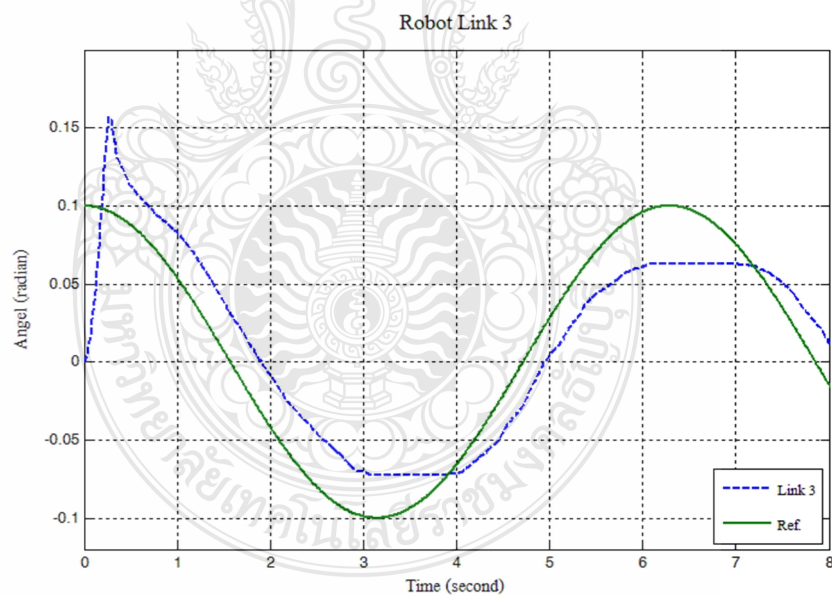
เมื่อทำการปรับเปลี่ยนน้ำหนักของแขนกลทั้ง 3 ลิงค์ โดยในลิงค์ที่ 1 จากน้ำหนัก 19.24 กิโลกรัม ไปเป็น 1.48 กิโลกรัม ลิงค์ที่ 2 จากน้ำหนัก 4.02 กิโลกรัม ไปเป็น 0.309 กิโลกรัม และลิงค์ที่ 3 จากน้ำหนัก 3.2 กิโลกรัม ไปเป็น 0.246 กิโลกรัม โดยค่า $\omega_n = 100$ หรือ $k_d = 200$, $k_p = 10000$ ทั้ง 3 ลิงค์ ดังภาพที่ 4.12 – 4.14



ภาพที่ 4.12 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 1



ภาพที่ 4.13 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 2

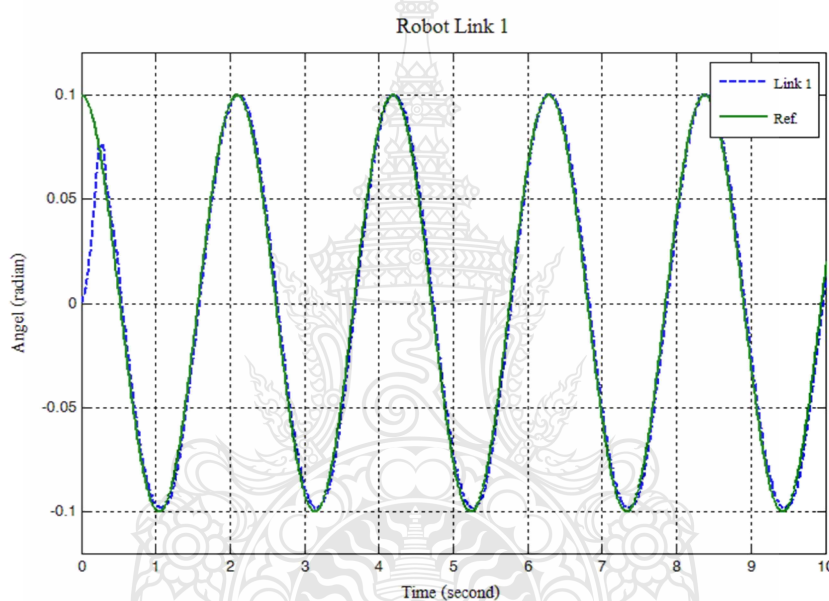


ภาพที่ 4.14 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 3

จากกราฟในภาพที่ 4.12 – 4.14 ได้ปรับเปลี่ยนน้ำหนักของแกนกล แต่ยังใช้ค่า k_d, k_p เท่าเดิม จะพบว่าแกนกลมีความคลาดเคลื่อนที่น้อยลง โดยลิงค์ที่ 1 มีความคลาดเคลื่อน 0.006 เรเดียน ลิงค์

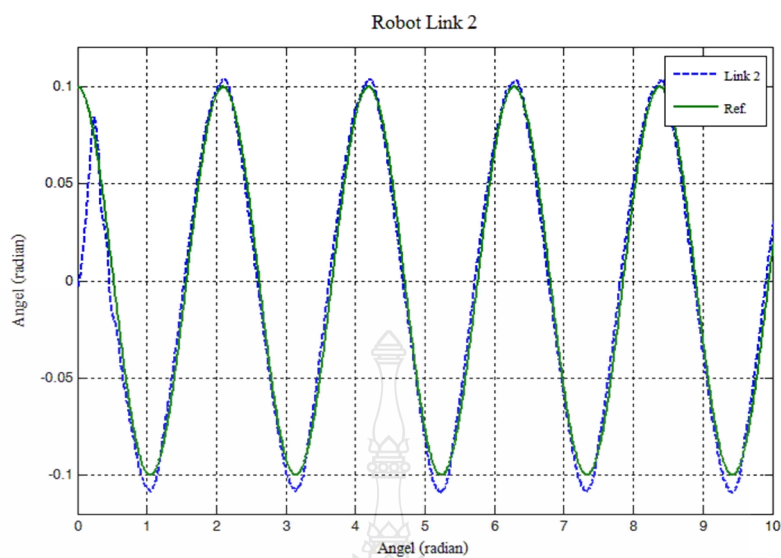
ที่ 2 มีความคลาดเคลื่อน 0.024 เรเดียน และลิงค์ที่ 3 มีความคลาดเคลื่อน 0.04 เรเดียน ในช่วงการทำงานของแขนกลนั้นมีการติดตามเส้นอ้างอิงที่ดีขึ้น และในระบบจะเห็นการสั่นของแขนกลลดลงทุกช่วงการทำงาน

ในส่วนการทดลองนี้จะใช้การปรับเปลี่ยนค่าน้ำหนักของแขนกลและ ปรับค่า k_d, k_p ของระบบเพื่อให้ผลตอบสนองของระบบรวดเร็วขึ้น โดยในลิงค์ที่ 1 จากน้ำหนัก 19.24 กิโลกรัม ไปเป็น 1.48 กิโลกรัม ลิงค์ที่ 2 จากน้ำหนัก 4.02 กิโลกรัม ไปเป็น 0.309 กิโลกรัม และลิงค์ที่ 3 จากน้ำหนัก 3.2 กิโลกรัม ไปเป็น 0.246 กิโลกรัม ผลการทดลองจะแสดงในภาพที่ 4.15 – 4.17



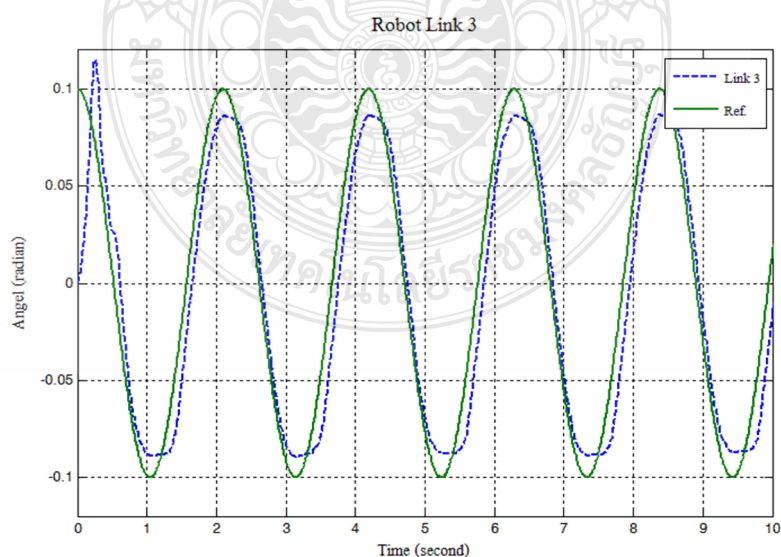
ภาพที่ 4.15 ผลการทดลองและค่าเป้าหมายของ Link 1

พิจารณากราฟในภาพที่ 4.15 โดยปรับค่า k_d, k_p ของระบบ ให้ค่า $k_d = 440$ และค่า $k_p = 48400$ จากกราฟจะเห็นว่ามีความคลาดเคลื่อนของระบบเล็กน้อยในช่วงต่ำสุดและสูงสุดของเส้นโค้งคอสที่ประมาณ 0.002 เรเดียน ในช่วงการทำงานของแขนกลนั้นมีการติดตามเส้นอ้างอิงที่ดี และในระบบจะเห็นการสั่นของแขนกลเล็กน้อยทุกช่วงการทำงาน



ภาพที่ 4.16 ผลการทดลองและค่าเป้าหมายของ Link 2

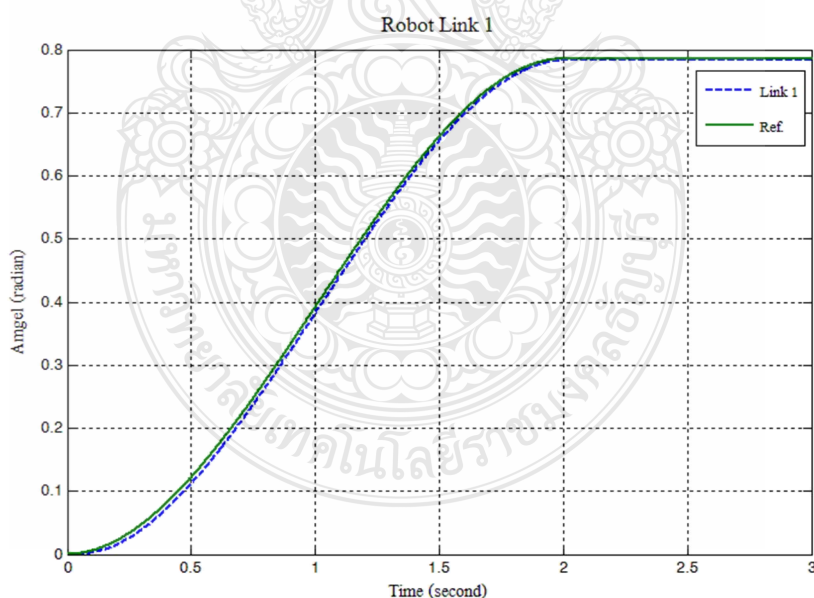
พิจารณารูปในภาพที่ 4.16 โดยปรับค่า k_d, k_p ของระบบ ให้ค่า $k_d = 440$ และค่า $k_p = 48400$ จากกราฟจะเห็นว่ามีความคลาดเคลื่อนของระบบเล็กน้อยในช่วงต่ำสุดและสูงสุดของเส้น โค้งคอสที่ประมาณ 0.008 เรเดียน ในช่วงการทำงานของแกนกลนั้นมีการติดตามเส้นอ้างอิงที่ดี และในระบบจะเห็นการสั่นของแกนกลเล็กน้อยทุกช่วงการทำงาน



ภาพที่ 4.17 ผลการทดลองและค่าเป้าหมายของ Link 3

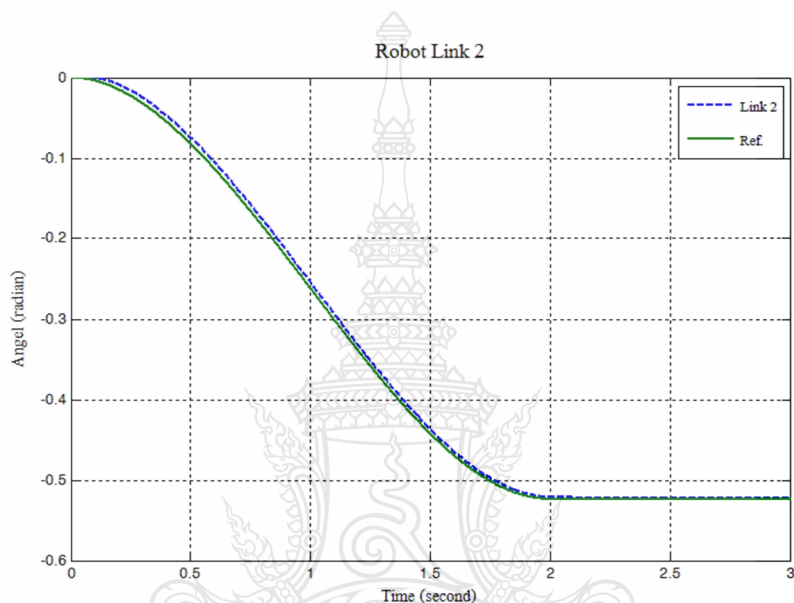
พิจารณากราฟในภาพที่ 4.17 โดยปรับค่า k_d, k_p ของระบบ ให้ค่า $k_d = 440$ และค่า $k_p = 48400$ จากกราฟจะเห็นว่ามีความคลาดเคลื่อนของระบบเล็กน้อยในช่วงต่ำสุดและสูงสุดของเส้นโค้ง คอสที่ประมาณ 0.013 เรเดียน ในช่วงการทำงานของแขนกลนั้นมีการติดตามเส้นอ้างอิงและหลุดจากเส้นอ้างอิงบ้างเล็กน้อย แต่ก็ยังสามารถติดตามเส้นอ้างอิงได้ ในระบบจะเห็นการสั่นของแขนกลเล็กน้อยทุกช่วงการทำงาน

4.2.2 ทดลองการเคลื่อนที่เมื่อกำหนดให้แขนกลเคลื่อนที่จากจุดต่อจุด (Point to Point) ด้วย Trajectory Generator แบบ Cubical Polynomial ในส่วนการทดลองนี้ได้นำ Block Diagram ที่ได้ทำการจำลองการทำงาน (Mathematical Model) มาทำการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ผ่าน DAQ Card และชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ (Motor Drive) โดยกำหนดจุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ของแขนกลที่ 0 เรเดียน ดังภาพที่ 4.8 ในส่วนการทดลองนี้ได้ปรับเปลี่ยนค่าน้ำหนักของแขนกลและปรับค่า k_d, k_p ของระบบเพื่อให้ผลตอบสนองของระบบรวดเร็วขึ้น โดยในลิ่งค์ที่ 1 จากน้ำหนัก 19.24 กิโลกรัม ไปเป็น 1.48 กิโลกรัม ลิ่งค์ที่ 2 จากน้ำหนัก 4.02 กิโลกรัม ไปเป็น 0.309 กิโลกรัม และลิ่งค์ที่ 3 จากน้ำหนัก 3.2 กิโลกรัม ไปเป็น 0.246 กิโลกรัม ในส่วนค่า Trajectory Generator เพื่อกำหนดการเคลื่อนที่ของแขนกลได้นำค่าจากตารางที่ 4.1 มาใช้ในการทดลอง ผลการทดลองจะแสดงในภาพที่ 4.18 – 4.20



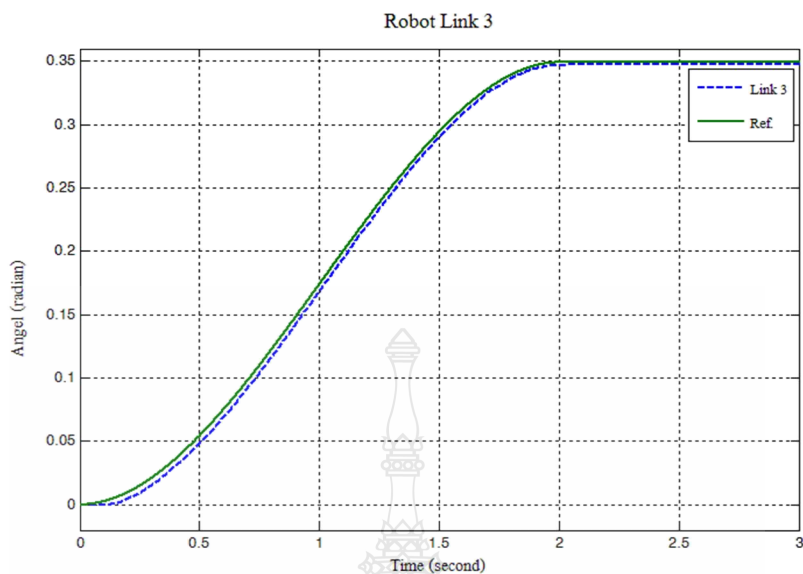
ภาพที่ 4.18 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 1

พิจารณารูปในภาพที่ 4.18 โดยปรับค่า k_d, k_p ของระบบ ให้ค่า $k_d = 560$ และค่า $k_p = 78400$ จากกราฟจะเห็นว่าแขนกลได้เคลื่อนที่จาก 0 เรเดียน ไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้คือ 0.785 เรเดียน หรือ 45 องศา โดยระบบมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยที่ประมาณ 0.0025 เรเดียน ในช่วงการทำงานของแขนกลนั้นมีการติดตามเส้นอ้างอิงได้ดี และคงสถานะของระบบไว้ได้ ในระบบจะเห็นการสั่นของแขนกลเล็กน้อย



ภาพที่ 4.19 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 2

พิจารณารูปในภาพที่ 4.19 โดยปรับค่า k_d, k_p ของระบบ ให้ค่า $k_d = 1260$ และค่า $k_p = 396900$ จากกราฟจะเห็นว่าแขนกลได้เคลื่อนที่จาก 0 เรเดียน ไปยังตำแหน่งที่ -0.523 เรเดียน หรือ -30 องศา โดยระบบมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยที่ประมาณ 0.0016 เรเดียน ในช่วงการทำงานของแขนกลนั้นมีการติดตามเส้นอ้างอิงได้ดี และคงสถานะของระบบไว้ได้ ในระบบจะเห็นการสั่นของแขนกลเล็กน้อย



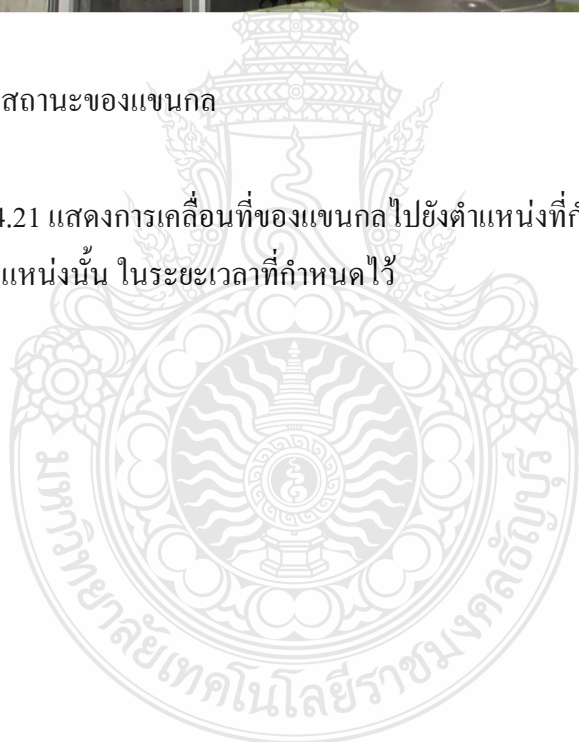
ภาพที่ 4.20 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 3

พิจารณากราฟในภาพที่ 4.20 โดยปรับค่า k_d, k_p ของระบบ ให้ค่า $k_d = 1800$ และค่า $k_p = 810000$ จากกราฟจะเห็นว่าแขนกลได้เคลื่อนที่จาก 0 เรเดียน ไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้คือ 0.349 เรเดียน หรือ 20 องศา โดยระบบมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยที่ประมาณ 0.0015 เรเดียน ในช่วงการทำงานของแขนกลนั้นมีการติดตามเส้นอ้างอิงได้ดี และคงสถานะของระบบไว้ได้ ในระบบจะเห็นการสั่นของแขนกลเล็กน้อย



ภาพที่ 4.21 การรักษาสถานะของแขนกล

จากภาพที่ 4.21 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนกลไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ และคงสถานะของตัวมันเองไว้ ณ ตำแหน่งนั้น ในระยะเวลาที่กำหนดไว้



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอระบบควบคุม แบบคอมพิวเตอร์ (Computed Torque) เพื่อใช้ในการควบคุมแขนกลอุตสาหกรรมของบริษัท ESHED ROBOTEC รุ่น SCORBOT ER VII ซึ่งเป็นแขนกลอุตสาหกรรมที่มี 5 องศาอิสระ ในการทดลองได้กำหนดให้แขนกลอุตสาหกรรมมี 3 องศาอิสระ เป็นแบบ Planar Robot โดยในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลนั้น เป็นพื้นฐานของการควบคุม ซึ่งมีวัตถุประสงค์ เพื่อให้แขนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งหรือในลักษณะที่ต้องการ ในการควบคุมแขนกลนั้น มีหลายรูปแบบ หนึ่งในรูปแบบที่เลือกใช้คือ การควบคุมแบบคอมพิวเตอร์ (Computed Torque Control) ในการควบคุมแบบนี้จะเป็นการควบคุมในลักษณะของ พลศาสตร์ (Dynamics) โดยโครงสร้างการควบคุมจะเป็นโครงสร้างที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจ และมีประสิทธิภาพในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น เนื่องจากภายในตัวควบคุมมีฟังก์ชันการปรับจูน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ผลตอบสนองดีขึ้น และลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ในส่วนของการตรวจวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกลได้ใช้ เอ็นโคเดอร์ (Encoder) ซึ่งติดตั้งที่ด้านท้ายของเซอร์โวมอเตอร์ในแต่ละตัว

การทดลองได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1) การทดลองกับแบบจำลอง (Simulation Experiments) และ 2) การทดลองจริงกับแขนกล (Physical Experiments) โดยการทดลองทั้ง 2 ส่วน ได้แบ่งการทดลองเป็นแบบ 2 ส่วนย่อย คือ 1. การทดลองเมื่อกำหนดให้แขนกลเคลื่อนที่ต่อเนื่องด้วย Trajectory Generator แบบ COSINE Curve โดยในส่วนที่ 2. การทดลองเมื่อกำหนดให้แขนกลเคลื่อนที่จากจุดต่อจุด (Point to Point) ด้วย Trajectory Generator แบบ Cubical Polynomial โดยที่การทดลองมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของระบบ ผลตอบสนองของระบบ ผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อใช้รูปทรงแบบก้านเรียวยาว (Slender Rod) ลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกล และระบบควบคุมของแขนกลที่ได้ออกแบบ

จากผลการทดลองการทำงานของระบบควบคุมแขนกลที่ได้ออกแบบในส่วนของการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าระบบควบคุมใช้ระยะเวลาในการเคลื่อนที่เพื่อเข้าสู่ค่าเป้าหมาย และรักษาภาวะสมดุลของทั้ง 2 ส่วนของการทดลองเป็นไปตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ เมื่อพิจารณาในส่วนของการทดลองจริง พบว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการใช้รูปทรงแบบก้านเรียวยาว (Slender Rod) มาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมของแขนกล เกิดความคลาดเคลื่อนในระบบที่มาก ผลตอบสนองของ

ระบบที่ช้า และในระบบมีการสั่นที่รุนแรง โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้เสนอ การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของแขนกล ที่ทำให้เกิดผลกระทบกับแขนกลน้อยที่สุดคือ การปรับเปลี่ยนน้ำหนักของแขนกลในแต่ละลิงค์ โดยในการปรับเปลี่ยนน้ำหนักของแขนกลนั้น จะช่วยให้จุดศูนย์กลางมวลของแขนกลที่ได้ออกแบบไว้เข้าใกล้กับแขนกลที่ใช้ในการทดลอง ในส่วนของผลที่เกิดขึ้นกับการควบคุมแขนกล จะเห็นได้ว่าระบบได้ลดค่าความคลาดเคลื่อน มีผลตอบสนองที่ดีขึ้น และการสั่นของแขนกลมีเล็กน้อย และยังสามารถปรับจูนค่า k_d, k_p ของระบบ เพื่อให้ความคลาดเคลื่อนลดลง ผลตอบสนองที่ดียิ่งขึ้น ผลการทดลองจริงทั้ง 2 ส่วนจะพบว่าแขนกลได้เคลื่อนที่ไปยังเป้าหมาย และรักษาสถานะสมดุลเป็นไปตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ โดยเกิดค่าความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย

5.2 ปัญหาที่พบในการทำวิจัยและแนวทางการแก้ปัญหา

5.2.1 ปัญหาด้านโครงสร้างของแขนกลในลิงค์ที่ 1 เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของแขนกลที่ได้ทำการตรวจวัดมีความคลาดเคลื่อนอยู่ 2 ส่วน คือ 1. น้ำหนักของแขนกลได้มีการถ่วงตุ้มน้ำหนักที่ด้านท้ายของแขนกลเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของแขนกล และ 2. ความยาวในส่วนด้านท้ายของแขนกลได้มีความยาวเพิ่มขึ้นมาเพื่อใช้สำหรับถ่วงน้ำหนักของแขนกล

5.2.2 ปัญหาด้านโครงสร้างของแขนกลในลิงค์ที่ 3 เนื่องจากลิงค์ที่ 3 มีน้ำหนักที่อยู่ใกล้กับข้อต่อ ทำให้การตรวจวัดมีความคลาดเคลื่อน

5.2.3 ปัญหาด้านการควบคุม เนื่องจากเมื่อทำการปรับค่า k_d, k_p ให้มากเกินไปที่ระบบจะรับได้ จะเกิดการสั่นของแขนกลในแต่ละลิงค์

5.2.4 ปัญหาด้านชิ้นส่วนและอุปกรณ์ของแขนกล เนื่องจากแขนกลที่ใช้ในการทดลองเกิดระยะคลอน (Backlash) เล็กน้อยจึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนกับระบบ

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ในการควบคุมจริงของแขนกล โดยใช้รูปทรงแบบก้านเรียว และวิธีการเปลี่ยนน้ำหนักของแขนกลนั้น ควรใช้สำหรับแขนกลบนระนาบ (Planar Robot) เพราะวิธีการนี้จะช่วยลดระยะเวลาในการออกแบบตัวควบคุม และยังสามารถตัดค่าพารามิเตอร์บางตัวของแขนกลได้ ทำให้การออกแบบและทดสอบตัวควบคุมแบบอื่นๆ มีความรวดเร็วขึ้น

5.3.2 แนวทางในการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน และลดข้อจำกัดในการเคลื่อนที่ของแขนกลควรที่จะเพิ่มจำนวนข้อต่อ และเพิ่มลักษณะการเคลื่อนของแขนกลให้มีจำนวนมากขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] หุ่นยนต์ (Online), Available: <http://th.wikipedia.org>, (3 January 2012).
- [2] ภกวัตต์ รักศรี, หุ่นยนต์อุตสาหกรรม ประเภทต่างๆ (Online), Available: <http://www.coe.or.th>, (3 January 2012).
- [3] อนุวัฒน์ บำรุงกิจ, การออกแบบและสร้างแขนกลสองแขนกึ่งรถยนต์ที่ควบคุมโดยใช้หลักการเคลื่อนที่มุมมวลที่สุด, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, พ.ศ. 2553
- [4] **Robots** (Online), Available: <http://www.pe.tut.fi/akp/English/robots.html>, (20 February 2012).
- [5] **Robotics** (Online), Available: <http://news.thomasnet.com/news/robotics/80>, (20 February 2012).
- [6] **Jointed Spherical (Articulated Arm) Robots** (Online), Available: http://www.industrial-electricity.com/7_Jointed_Spherical.html, (20 February 2012).
- [7] มนุศักดิ์ จานทอง, การพัฒนาตัวควบคุมตำแหน่งสำหรับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเก่า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, พ.ศ. 2552
- [8] Kelly, R. Santibanz, V. & Loria, A., **Control of Robotic Manipulators in Joint Space**, 1st ed., Springer-Verlag London, 2005
- [9] **User Manual SCORBOT ER VII**, Intelitek Inc., Manchester, 2003
- [10] **NI PCI-6221** (Online), Available: <http://www.ni.com> (14 January 2012).
- [11] **Accelus & Junus** (Online), Available: <http://www.copleycontrols.com> (3 January 2012).
- [12] Dumetz, E. Dieulot, J. Y. Barre, P. J. Colas, F. & Delplace, T., Control of an Industrial Robot using Acceleration Feedback, **Intelligent and Robot System**, vol.46, no. 2, Jun., 2006
- [13] Slotine, J. E. & Li, W., Adaptive Manipulator Control: A Case Study, **IEEE Transaction on Automatic Control**, vol. 33, no. 11, Nov., 1988
- [14] Dessant, L. A., Saad, M., Hebert, B. & AI-Haddad, K., An adaptive controller for a direct-drive SCARA-robot, **IEEE Trans.on Industrial Electronics**, vol. 39, no. 2, 1992
- [15] Barbosa, F. & Reyes, F., Optimal Position Control for Robot Manipulators, Proc. **IEEE Int. Midwest Symposium on Circuit and System**, vol. 3, Dec., 2003

- [16] Vashisth, H. & Woo, P. Y., Application of fuzzy logic to robotic control, Proc. **IEEE Int. Control, on Industrial Electronics**, Control and Instrumentation, Nov., 1996
- [17] Kuo, C. Y. & Wang T., Robust Position Control of Robotic Manipulator in Cartesian Coordinates, **IEEE Trans. on Robotics and Automation**, vol. 7, no. 5, Oct., 1991
- [18] Craig, J. J., **Introduction to Robotics**, Addison-Wesley, 2nd ed., 1991
- [19] Sciavicco, L. & Siciliano, B., **Modelling and Control of Robot Manipulator**, Springer-Verlag London, 2nd ed., 2000
- [20] Lung-wen tsai, **Robot analysis**, John wiley & Sons, inc. United States of America, 1999
- [21] Man Zhihong, **Robotics**, Prentice Hall Singapore, 2nd ed., 2005



ภาคผนวก

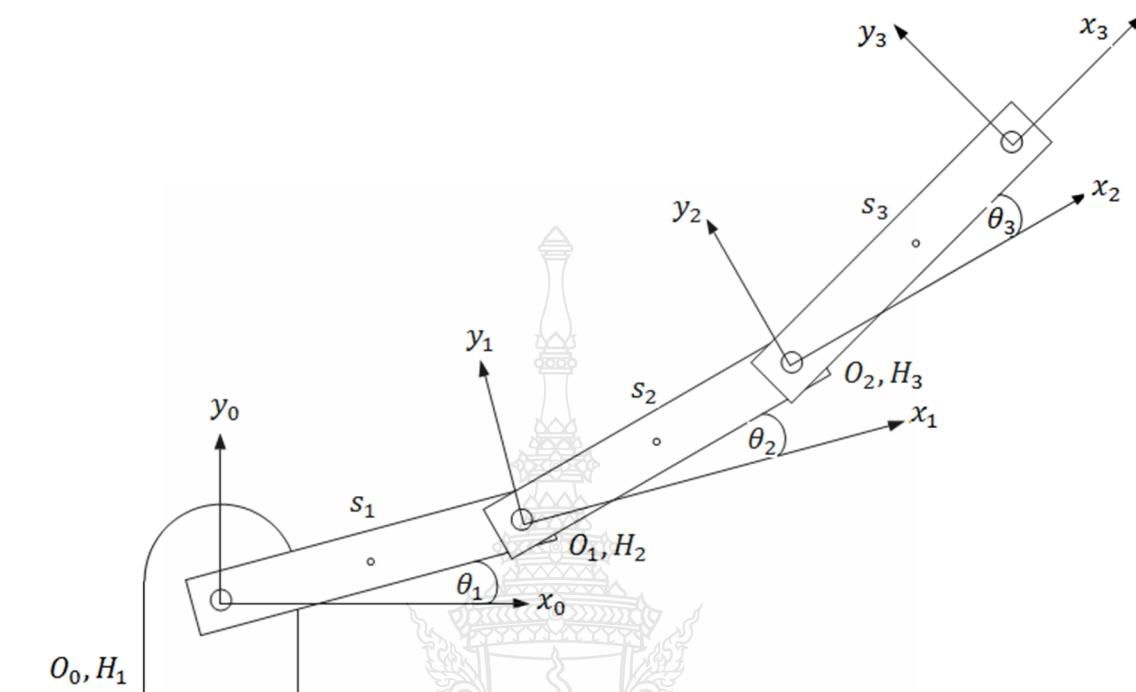




ภาคผนวก ก

การคำนวณสมการต่างๆ ของแขนกล

ก.1 การคำนวณสมการการเคลื่อนที่ของแขนกล (Dynamics)



ภาพที่ ก.1 แขนกลและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

กำหนดให้

Link 1 มีมวล m_1 ยาว l_1

Link 2 มีมวล m_2 ยาว l_2

Link 3 มีมวล m_3 ยาว l_3

ทำการหา Dynamics Model ของแขนกล

$$M(q)\ddot{\theta} = c(q, \dot{q}) + G(q) = Q$$

โดยที่

q คือ Joint Variables ในที่นี้คือ $[\theta_1 \theta_2 \theta_3]^T$

Q คือ Joint Torques : $[\tau_1 \tau_2 \tau_3]^T$

ตารางที่ ก.1 DH-Table และ Transformation Matrix

Link i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	l_1	0	0	θ_1
2	l_2	0	0	θ_2
3	l_3	0	0	θ_3

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & l_1 c_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & l_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2^0 = \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 & l_1 c_1 + l_2 c_{12} \\ s_{12} & c_{12} & 0 & l_1 s_1 + l_2 s_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3^0 = \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 & l_1 c_1 + l_2 c_{12} + l_3 c_{123} \\ s_{123} & c_{123} & 0 & l_1 s_1 + l_2 s_{12} + l_3 s_{123} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

หา Jacobain สำหรับจุด s_1, s_2 และ s_3 จาก

$$J_{s1} = \begin{bmatrix} J_{p1} \\ J_{o1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_0 \times {}_{(0)}\vec{r}_{0,s1} & 0 & 0 \\ \bar{Z}_0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ โดยที่ } \bar{Z}_0 = [0 \ 0 \ 1]^T$$

$$\text{และ } {}_{(0)}\vec{r}_{0,s1} = {}_{(0)}\vec{r}_{s1} = \begin{bmatrix} l_1/2 & l_1/2 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$J_{s1} = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 / 2 & 0 & 0 \\ -l_1 c_1 / 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$J_{s2} = \begin{bmatrix} J_{p2} \\ J_{02} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_0 \times {}_{(0)}\bar{r}_{0,s2} & \bar{Z}_1 \times {}_{(0)}\bar{r}_{1,s2} & 0 \\ \bar{Z}_0 & \bar{Z}_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{โดยที่ } \bar{Z}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ และ } \bar{Z}_1 = {}^{01}R\bar{Z}_0 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\therefore \bar{Z}_1 = [0 \ 0 \ 1]^T$$

$$\text{และถ้า } {}_{(0)}\bar{r}_{1,s2} = {}^{01}R_{{}_{(1)}\bar{r}_{s2}} = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_2 c_2 / 2 \\ l_2 s_2 / 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}_{(0)}\bar{r}_{1,s2} = \begin{bmatrix} l_2 c_{12} / 2 \\ l_2 s_{12} / 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{ส่วน } {}_{(0)}\bar{r}_{0,s2} = {}_{(0)}\bar{r}_1 + {}^{01}R_{{}_{(1)}\bar{r}_{s2}}$$

$${}_{(0)}\bar{r}_{0,s2} = \begin{bmatrix} l_1 c_1 \\ l_1 s_1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_2 c_{12} / 2 \\ l_2 s_{12} / 2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 c_1 + l_2 c_{12} / 2 \\ l_1 s_1 + l_2 s_{12} / 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\therefore J_{s2} = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 - l_2 s_{12} / 2 & -l_2 s_{12} / 2 & 0 \\ l_1 c_1 + l_2 c_{12} / 2 & l_2 c_{12} / 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$J_{s3} = \begin{bmatrix} J_{p3} \\ J_{03} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_0 \times {}^{(0)}\bar{r}_{0,s3} & \bar{Z}_1 \times {}^{(0)}\bar{r}_{1,s3} & \bar{Z}_2 \times {}^{(0)}\bar{r}_{2,s3} \\ \bar{Z}_0 & \bar{Z}_1 & \bar{Z}_2 \end{bmatrix}$$

$$\text{โดยที่ } \bar{Z}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \bar{Z}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ และ } \bar{Z}_2 = {}^{02}R\bar{Z}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{และค่า } {}^{(0)}\bar{r}_{2,s3} = {}^{02}R {}^{(2)}\bar{r}_{s3} = \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 \\ s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_3 c_3 / 2 \\ l_3 s_3 / 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}^{(0)}\bar{r}_{2,s3} = \begin{bmatrix} l_3 c_{123} \\ l_3 s_{123} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{ส่วน } {}^{(0)}\bar{r}_{1,s3} = {}^{01}R {}^{(1)}\bar{r}_{s3}$$

$${}^{(1)}\bar{r}_{s3} = {}^{(1)}\bar{r}_2 + {}^{12}R {}^{(2)}\bar{r}_3$$

$${}_{(1)}\bar{r}_{s3} = \begin{bmatrix} l_2c_2 + l_3c_{23} / 2 \\ l_2s_2 + l_3s_{23} / 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}_{(0)}\bar{r}_{1,s3} = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_2c_2 + l_3c_{23} / 2 \\ l_2s_2 + l_3s_{23} / 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$${}_{(0)}\bar{r}_{1,s3} = \begin{bmatrix} l_2c_{12} + l_3c_{123} / 2 \\ l_2s_{12} + l_3s_{123} / 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{หา } {}_{(0)}\bar{r}_{0,s3} = \begin{bmatrix} l_1c_1 + l_2c_{12} + l_3c_{123} / 2 \\ l_1s_1 + l_2s_{12} + l_3s_{123} / 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\therefore J_{s3} = \begin{bmatrix} -l_1s_1 - l_2s_{12} - l_3s_{123} / 2 & -l_2s_{12} - l_3s_{123} / 2 & -l_3s_{123} / 2 \\ l_1c_1 + l_2c_{12} + l_3c_{123} / 2 & l_2c_{12} + l_3c_{123} / 2 & l_3c_{123} / 2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

หา ${}_{(0)}I_i^{(s)}$ ของแต่ละ Link ${}_{(0)}I_1^{(s)}$, ${}_{(0)}I_2^{(s)}$ และ ${}_{(0)}I_3^{(s)}$

โดยที่ ${}_{(0)}I_1^{(s)} = {}^{01}R_{{}_{(1)}}I_1^{(s)}{}^{01}R^T$

$$\text{และค่า } {}_{(1)}I_1^{(s)} = \frac{1}{12} m_1 l_1^2 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\therefore {}_{(0)}I_1^{(s)} = \frac{1}{12} m_1 l_1^2 \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 \\ -s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}_{(0)}I_2^{(s)} = {}^{02}R_{(2)} I^{(s)} {}^{02}R^T$$

และ ${}_{(0)}I_2^{(s)} = {}^{02}R_{(2)} I^{(s)} {}^{02}R^T$

$${}_{(2)}I^{(s)} = \frac{1}{12} m_2 l_2^2 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}_{(0)}I_2^{(s)} = \frac{1}{12} m_2 l_2^2 \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 \\ s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}_{(0)}I_2^{(s)} = \frac{1}{12} m_2 l_2^2 \begin{bmatrix} s_{12}^2 & -c_{12}s_{12} & 0 \\ -c_{12}s_{12} & c_{12}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}_{(0)}I_3^{(s)} = {}^{03}R_{(3)} I^{(s)} {}^{03}R^T$$

และถ้า ${}_{(3)}I^{(s)} = \frac{1}{12} m_3 l_3^2 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

$${}_{(0)}I_3^{(s)} = \frac{1}{12} m_3 l_3^2 \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 \\ s_{123} & c_{123} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{123} & s_{123} & 0 \\ -s_{123} & c_{123} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}_{(0)}I_3^{(s)} = \frac{1}{12} m_3 l_3^2 \begin{bmatrix} s_{123}^2 & -c_{123} s_{123} & 0 \\ -c_{123} s_{123} & c_{123}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

คำนวณหาค่า Manipulator Inertia Matrix, $M(q)$ ของสมการ Dynamic Model

$$M(q) = \sum_{i=1}^3 \left[m_i J_{pi}^T J_{pi} + J_{0i}^T {}_{(0)}I_i^{(s)} J_{0i} \right]$$

$$M(q) = \left[m_1 J_{p1}^T J_{p1} + J_{01}^T {}_{(0)}I_1^{(s)} J_{01} \right] + \left[m_2 J_{p2}^T J_{p2} + J_{02}^T {}_{(0)}I_2^{(s)} J_{02} \right] + \left[m_3 J_{p3}^T J_{p3} + J_{03}^T {}_{(0)}I_3^{(s)} J_{03} \right]$$

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix}$$

** ตัวช่วยในการแก้สมการ

$$c_1 c_{12} + s_1 s_{12} = c_2$$

$$c_1 c_{123} + s_1 s_{123} = c_{23}$$

$$c_{12} c_{123} + s_{12} s_{123} = c_3$$

$$M_{11} = \frac{1}{3} m_1 l_1^2 + m_2 (l_1^2 + l_1 l_2 c_2 + \frac{1}{3} l_2^2) + m_3 (l_1^2 + l_2^2 + \frac{1}{3} l_3^2 + 2l_1 l_2 c_2 + l_1 l_3 c_{23} + l_2 l_3 c_3)$$

$$M_{12} = m_2 (\frac{1}{2} l_1 l_2 c_2 + \frac{1}{3} l_2^2) + m_3 (l_2^2 + \frac{1}{3} l_3^2 + l_2 l_3 c_3 + l_1 l_2 c_2 + \frac{1}{2} l_1 l_3 c_{23})$$

$$M_{13} = m_3 (\frac{1}{3} l_3^2 + \frac{1}{2} l_1 l_3 c_{23} + \frac{1}{2} l_2 l_3 c_3)$$

$$M_{21} = m_2 (\frac{1}{2} l_1 l_2 c_2 + \frac{1}{3} l_2^2) + m_3 (l_2^2 + \frac{1}{3} l_3^2 + l_2 l_3 c_3 + \frac{1}{2} l_1 l_3 c_{23} + l_1 l_2 c_2)$$

$$M_{22} = \frac{1}{3} m_2 l_2^2 + m_3 (\frac{1}{3} l_3^2 + l_2^2 + l_2 l_3 c_3)$$

$$M_{23} = m_3 (\frac{1}{3} l_3^2 + \frac{1}{2} l_2 l_3 c_3)$$

$$M_{31} = m_3 \left(\frac{1}{3} l_3^2 + \frac{1}{2} l_1 l_3 c_{23} + \frac{1}{2} l_2 l_3 c_3 \right)$$

$$M_{32} = m_3 \left(\frac{1}{3} l_3^2 + \frac{1}{2} l_2 l_3 c_3 \right)$$

$$M_{33} = \frac{1}{3} m_3 l_3^2$$

หาค่า Velocity Coupling Vector, $C(q, \dot{q})$ จาก

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} \text{ โดยที่}$$

$$C_1 = \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^2 \left(\frac{\partial M_{1j}}{\partial q_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{jk}}{\partial q_1} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k$$

$$\begin{aligned} C_1 = & \left(\frac{\partial M_{11}}{\partial \theta_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{11}}{\partial \theta_1} \right) \dot{\theta}_1^2 + \left(\frac{\partial M_{11}}{\partial \theta_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{12}}{\partial \theta_1} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \left(\frac{\partial M_{11}}{\partial \theta_3} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{13}}{\partial \theta_1} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 \\ & + \left(\frac{\partial M_{12}}{\partial \theta_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{21}}{\partial \theta_1} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \left(\frac{\partial M_{12}}{\partial \theta_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{22}}{\partial \theta_1} \right) \dot{\theta}_2^2 + \left(\frac{\partial M_{12}}{\partial \theta_3} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{23}}{\partial \theta_1} \right) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \\ & + \left(\frac{\partial M_{13}}{\partial \theta_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{31}}{\partial \theta_1} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \left(\frac{\partial M_{13}}{\partial \theta_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{32}}{\partial \theta_1} \right) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \left(\frac{\partial M_{13}}{\partial \theta_3} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{33}}{\partial \theta_1} \right) \dot{\theta}_3^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_1 = & [-m_2 l_1 l_2 s_2 - 2m_3 l_1 l_2 s_2 - m_3 l_1 l_3 s_{23}] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + [-m_3 l_1 l_3 s_{23} - m_3 l_2 l_3 s_3] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 \\ & + \left[-\frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 s_2 - m_3 l_1 l_2 s_2 - \frac{1}{2} m_3 l_1 l_3 s_{23} \right] \dot{\theta}_2^2 + [-m_3 l_1 l_3 s_{23} - m_3 l_2 l_3 s_3] \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \\ & + \left[-\frac{1}{2} m_3 l_1 l_3 s_{23} - \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 s_3 \right] \dot{\theta}_3^2 \end{aligned}$$

$$C_2 = \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 \left(\frac{\partial M_{2j}}{\partial q_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{jk}}{\partial q_2} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k$$

$$\begin{aligned} C_2 = & \left(\frac{\partial M_{21}}{\partial \theta_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{11}}{\partial \theta_2} \right) \dot{\theta}_1^2 + \left(\frac{\partial M_{21}}{\partial \theta_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{12}}{\partial \theta_2} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \left(\frac{\partial M_{21}}{\partial \theta_3} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{13}}{\partial \theta_2} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 \\ & + \left(\frac{\partial M_{22}}{\partial \theta_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{21}}{\partial \theta_2} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \left(\frac{\partial M_{22}}{\partial \theta_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{22}}{\partial \theta_2} \right) \dot{\theta}_2^2 + \left(\frac{\partial M_{22}}{\partial \theta_3} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{23}}{\partial \theta_2} \right) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \\ & + \left(\frac{\partial M_{23}}{\partial \theta_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{31}}{\partial \theta_2} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \left(\frac{\partial M_{23}}{\partial \theta_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{32}}{\partial \theta_2} \right) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \left(\frac{\partial M_{23}}{\partial \theta_3} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{33}}{\partial \theta_2} \right) \dot{\theta}_3^2 \end{aligned}$$

$$C_2 = \left[\frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 s_2 + m_3 l_1 l_2 s_2 + \frac{1}{2} m_3 l_1 l_3 s_{23} \right] \dot{\theta}_1^2 + [-m_3 l_2 l_3 s_3] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + [-m_3 l_2 l_3 s_3] \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + [-m_3 l_2 l_3 s_3] \dot{\theta}_3^2$$

$$C_3 = \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^2 \left(\frac{\partial M_{3j}}{\partial q_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{jk}}{\partial q_3} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k$$

$$\begin{aligned} C_3 = & \left(\frac{\partial M_{31}}{\partial \theta_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{11}}{\partial \theta_3} \right) \dot{\theta}_1^2 + \left(\frac{\partial M_{31}}{\partial \theta_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{12}}{\partial \theta_3} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \left(\frac{\partial M_{31}}{\partial \theta_3} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{13}}{\partial \theta_3} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 \\ & + \left(\frac{\partial M_{32}}{\partial \theta_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{21}}{\partial \theta_3} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \left(\frac{\partial M_{32}}{\partial \theta_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{22}}{\partial \theta_3} \right) \dot{\theta}_2^2 + \left(\frac{\partial M_{32}}{\partial \theta_3} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{23}}{\partial \theta_3} \right) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \\ & + \left(\frac{\partial M_{33}}{\partial \theta_1} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{31}}{\partial \theta_3} \right) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + \left(\frac{\partial M_{33}}{\partial \theta_2} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{32}}{\partial \theta_3} \right) \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + \left(\frac{\partial M_{33}}{\partial \theta_3} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{33}}{\partial \theta_3} \right) \dot{\theta}_3^2 \end{aligned}$$

$$C_3 = \left[\frac{1}{2} m_3 l_1 l_3 s_{23} + \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 s_3 \right] \dot{\theta}_1^2 + [m_3 l_2 l_3 s_3] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \left[-\frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 s_3 \right] \dot{\theta}_2^2$$

หาค่า Vector of Gravitational Forces, $G(q)$ จาก

$$G(q) = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} \text{ โดยที่}$$

$$G_1 = \frac{\partial u(q)}{\partial \theta_1}, G_2 = \frac{\partial u(q)}{\partial \theta_2}, G_3 = \frac{\partial u(q)}{\partial \theta_3}$$

$$\text{และ } u(q) = -\sum_{i=1}^3 m_i \bar{g}^T {}_{(0)}\bar{r}_{si}$$

$$\text{โดยที่ } \bar{g}^T = [0 \quad -g \quad 0]$$

$$\therefore u(q) = -m_1 \bar{g}^T {}_{(0)}\bar{r}_{s1} - m_2 \bar{g}^T {}_{(0)}\bar{r}_{s2} - m_3 \bar{g}^T {}_{(0)}\bar{r}_{s3}$$

$$\begin{aligned} u(q) &= -m_1 [0 \quad -g \quad 0] \begin{bmatrix} l_1 c_1 / 2 \\ l_1 s_1 / 2 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &\quad -m_2 [0 \quad -g \quad 0] \begin{bmatrix} l_1 c_1 + l_2 c_{12} / 2 \\ l_1 s_1 + l_2 s_{12} / 2 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &\quad -m_3 [0 \quad -g \quad 0] \begin{bmatrix} l_1 c_1 + l_2 c_{12} + l_3 c_{123} / 2 \\ l_1 s_1 + l_2 s_{12} + l_3 s_{123} / 2 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= +m_1 g l_1 s_1 / 2 + m_2 g l_1 s_1 + m_2 g l_2 s_{12} / 2 + m_3 g l_1 s_1 + m_3 g l_2 s_{12} + m_3 g l_3 s_{123} / 2 \end{aligned}$$

$$u(q) = +\left(\frac{m_1}{2} + m_2 + m_3\right) g l_1 s_1 + \left(\frac{m_2}{2} + m_3\right) g l_2 s_{12} + \frac{m_3}{2} g l_3 s_{123}$$

$$G_1 = \frac{\partial}{\partial \theta_1} \left[\left(\frac{m_1}{2} + m_2 + m_3\right) l_1 s_1 + \left(\frac{m_2}{2} + m_3\right) l_2 s_{12} + \frac{m_3}{2} l_3 s_{123} \right] g$$

$$G_1 = + \left[\left(\frac{m_1}{2} + m_2 + m_3\right) l_1 c_1 + \left(\frac{m_2}{2} + m_3\right) l_2 c_{12} + \frac{m_3}{2} l_3 c_{123} \right] g$$

$$G_2 = + \frac{\partial}{\partial \theta_2} \left[\left(\frac{m_1}{2} + m_2 + m_3 \right) l_1 s_1 + \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) l_2 s_{12} + \frac{m_3}{2} l_3 s_{123} \right] g$$

$$G_2 = + \left[\left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) l_2 c_{12} + \frac{m_3}{2} l_3 c_{123} \right] g$$

$$G_3 = + \frac{\partial}{\partial \theta_3} \left[\left(\frac{m_1}{2} + m_2 + m_3 \right) l_1 s_1 + \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) l_2 s_{12} + \frac{m_3}{2} l_3 s_{123} \right] g$$

$$G_3 = + \frac{m_3}{2} l_3 g c_{123}$$

∴ ถ้า Dynamic Model ของแขนกลนี้คือ

$$M(q)\ddot{q} + c(q, \dot{q}) + G(q) = Q = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
\tau_1 = & \left[\frac{1}{3} m_1 l_1^2 + m_2 (l_1^2 + l_1 l_2 c_2 + \frac{1}{3} l_2^2) + m_3 (l_1^2 + l_2^2 + \frac{1}{3} l_3^2 + 2 l_1 l_2 c_2 + l_1 l_3 c_{23} + l_2 l_3 c_3) \right] \ddot{\theta}_1 \\
& + \left[m_2 (\frac{1}{2} l_1 l_2 c_2 + \frac{1}{3} l_2^2) + m_3 (l_2^2 + \frac{1}{3} l_3^2 + l_2 l_3 c_3 + l_1 l_2 c_2 + \frac{1}{2} l_1 l_3 c_{23}) \right] \ddot{\theta}_2 \\
& + \left[m_3 (\frac{1}{3} l_3^2 + \frac{1}{2} l_1 l_3 c_{23} + \frac{1}{2} l_2 l_3 c_3) \right] \ddot{\theta}_3 \\
& + [-m_2 l_1 l_2 s_2 - 2 m_3 l_1 l_2 s_2 - m_3 l_1 l_3 s_{23}] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + [-m_3 l_1 l_3 s_{23} - m_3 l_2 l_3 s_3] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 \\
& + \left[-\frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 s_2 - m_3 l_1 l_2 s_2 - \frac{1}{2} m_3 l_1 l_3 s_{23} \right] \dot{\theta}_2^2 + [-m_3 l_1 l_3 s_{23} - m_3 l_2 l_3 s_3] \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 \\
& + \left[-\frac{1}{2} m_3 l_1 l_3 s_{23} - \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 s_3 \right] \dot{\theta}_3^2 \\
& + \left[\left(\frac{m_1}{2} + m_2 + m_3 \right) l_1 c_1 + \left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) l_2 c_{12} + \frac{m_3}{2} l_3 c_{123} \right] g \\
\tau_2 = & \left[m_2 (\frac{1}{2} l_1 l_2 c_2 + \frac{1}{3} l_2^2) + m_3 (l_2^2 + \frac{1}{3} l_3^2 + l_2 l_3 c_3 + \frac{1}{2} l_1 l_3 c_{23} + l_1 l_2 c_2) \right] \ddot{\theta}_1 \\
& + \left[\frac{1}{3} m_2 l_2^2 + m_3 (\frac{1}{3} l_3^2 + l_2^2 + l_2 l_3 c_3) \right] \ddot{\theta}_2 + \left[m_3 (\frac{1}{3} l_3^2 + \frac{1}{2} l_2 l_3 c_3) \right] \ddot{\theta}_3 \\
& + \left[\frac{1}{2} m_2 l_1 l_2 s_2 + m_3 l_1 l_2 s_2 + \frac{1}{2} m_3 l_1 l_3 s_{23} \right] \dot{\theta}_1^2 + [-m_3 l_2 l_3 s_3] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_3 + [-m_3 l_2 l_3 s_3] \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3 + [-m_3 l_2 l_3 s_3] \dot{\theta}_3^2 \\
& + \left[\left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) l_2 c_{12} + \frac{m_3}{2} l_3 c_{123} \right] g \\
\tau_3 = & \left[m_3 (\frac{1}{3} l_3^2 + \frac{1}{2} l_1 l_3 c_{23} + \frac{1}{2} l_2 l_3 c_3) \right] \ddot{\theta}_1 + \left[m_3 (\frac{1}{3} l_3^2 + \frac{1}{2} l_2 l_3 c_3) \right] \ddot{\theta}_2 + \left[\frac{1}{3} m_3 l_3^2 \right] \ddot{\theta}_3 \\
& + \left[\frac{1}{2} m_3 l_1 l_3 s_{23} + \frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 s_3 \right] \dot{\theta}_1^2 + [m_3 l_2 l_3 s_3] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \left[-\frac{1}{2} m_3 l_2 l_3 s_3 \right] \dot{\theta}_2^2 + \frac{m_3}{2} l_3 g c_{123}
\end{aligned}$$

ก.2 การคำนวณ Trajectory generation

การคำนวณนี้เพื่อใช้ในการควบคุมแบบ Point to Point กำหนดให้แขนกลทั้ง 3 ลิงค์ เริ่มเคลื่อนที่จากมุม 0 องศา โดยในลิงค์ที่ 1 เคลื่อนที่ไปที่มุม 45 องศา ลิงค์ที่ 2 เคลื่อนที่ไปที่มุม -30 องศา ลิงค์ที่ 3 เคลื่อนที่ไปที่มุม 20 องศา

โดยในการเคลื่อนที่จะต้องไปยังตำแหน่งที่วางไว้ในระยะเวลา 2 วินาที และให้แขนกลอยู่ในสภาวะคงที่ตลอดเวลาจะได้

$$\begin{array}{l}
 \text{Link 1} \quad \theta_i = 0 \quad \theta_f = 45^\circ \quad \dot{\theta}_i = 0 \quad \dot{\theta}_f = 0 \quad t_i = 0 \quad t_f = 2 \\
 \text{Link 2} \quad \theta_i = 0 \quad \theta_f = -30^\circ \quad \dot{\theta}_i = 0 \quad \dot{\theta}_f = 0 \quad t_i = 0 \quad t_f = 2 \\
 \text{Link 3} \quad \theta_i = 0 \quad \theta_f = 20^\circ \quad \dot{\theta}_i = 0 \quad \dot{\theta}_f = 0 \quad t_i = 0 \quad t_f = 2
 \end{array}$$

สมการ Cubical Polynomial

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$$

ตารางที่ ก.2 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ Cubical Polynomial

	Link 1	Link 2	Link 3
a_0	0	0	0
a_1	0	0	0
a_2	33.75	-22.5	15
a_3	-11.25	7.5	-5

ตารางที่ ก.3 ค่า Trajectory Generator (หน่วยเป็นองศา)

	Link 1	Link 2	Link 3
$\theta(t)$	$33.75t^2 - 11.25t^3$	$-22.5t^2 + 7.5t^3$	$15t^2 - 5t^3$
$\dot{\theta}(t)$	$67.5t - 33.75t^2$	$-45t + 22.5t^2$	$30t - 15t^2$
$\ddot{\theta}(t)$	$67.5 - 67.5t$	$-45 + 45t$	$30 - 30t$

ก.3 วิธีการเลือกค่า k_d, k_p ของระบบ

จากสมการ Dynamics (สมการที่ ก.1)

$$Q = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \quad (\text{ก.1})$$

และสมการ Computed Torque Law (สมการที่ ก.2)

$$\tau = M[\ddot{q}_d + k_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + k_p(q_d - q)] + C + G \quad (\text{ก.2})$$

นำสมการที่ ก.2 แทนลงในสมการที่ ก.1 จะได้ และจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$(\ddot{q}_d - \ddot{q}) + k_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + k_p(q_d - q) = 0 \quad (\text{ก.3})$$

กำหนดให้

$$\begin{aligned} e &= (q_d - q) \\ \dot{e} &= (\dot{q}_d - \dot{q}) \\ \ddot{e} &= (\ddot{q}_d - \ddot{q}) \end{aligned} \quad (\text{ก.4})$$

นำสมการที่ ก.4 แทนลงใน สมการที่ ก.3 ได้เป็น

$$\ddot{e} + k_d\dot{e} + k_p e = 0 \quad (\text{ก.5})$$

โดยค่า k_d, k_p ที่ใส่เข้าไปในระบบจะใช้วิธี Pole Placement

โดยกำหนดให้ระบบมีผลตอบสนอง

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = 0 \quad (\text{ก.6})$$

ให้ $\xi = 1$ เพื่อทำให้ผลตอบสนองของระบบเป็นแบบ Critically Damp System

$$\ddot{x} + 2\omega_n \dot{x} + \omega_n^2 x = 0 \quad (\text{ก.7})$$

จากการเทียบโพลระหว่างสมการที่ ก.5 กับสมการที่ ก.7 จะได้ความสัมพันธ์ของค่า k_d, k_p คือ

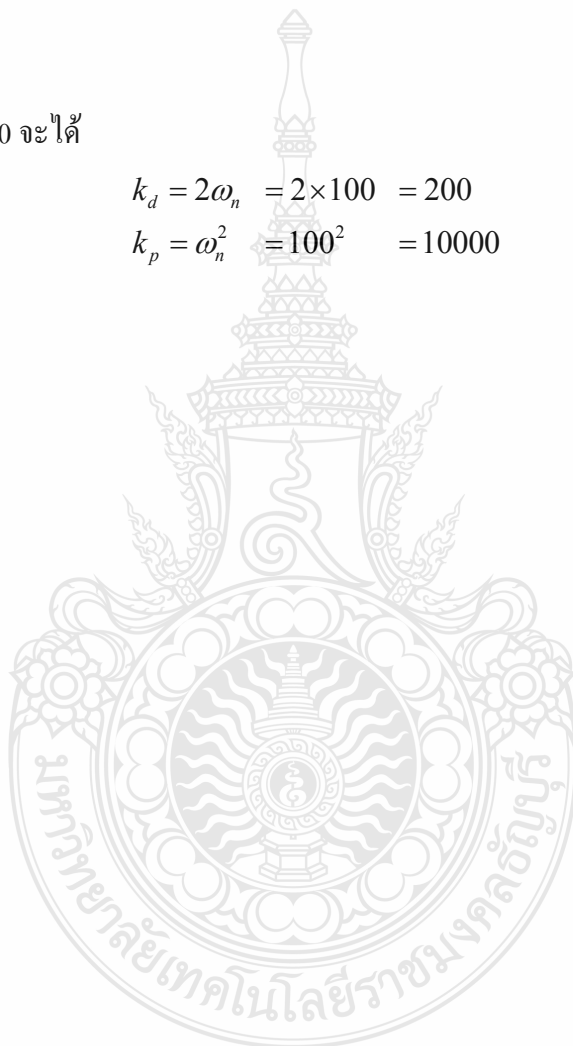
$$k_d = 2\omega_n, k_p = \omega_n^2 \quad (\text{ก.8})$$

ตัวอย่าง

แทนค่า ω_n เท่ากับ 100 จะได้

$$k_d = 2\omega_n = 2 \times 100 = 200$$

$$k_p = \omega_n^2 = 100^2 = 10000$$





ภาคผนวก ข

ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลจำเพาะของชุดขับเซอร์โวมอเตอร์

GENERAL SPECIFICATIONS

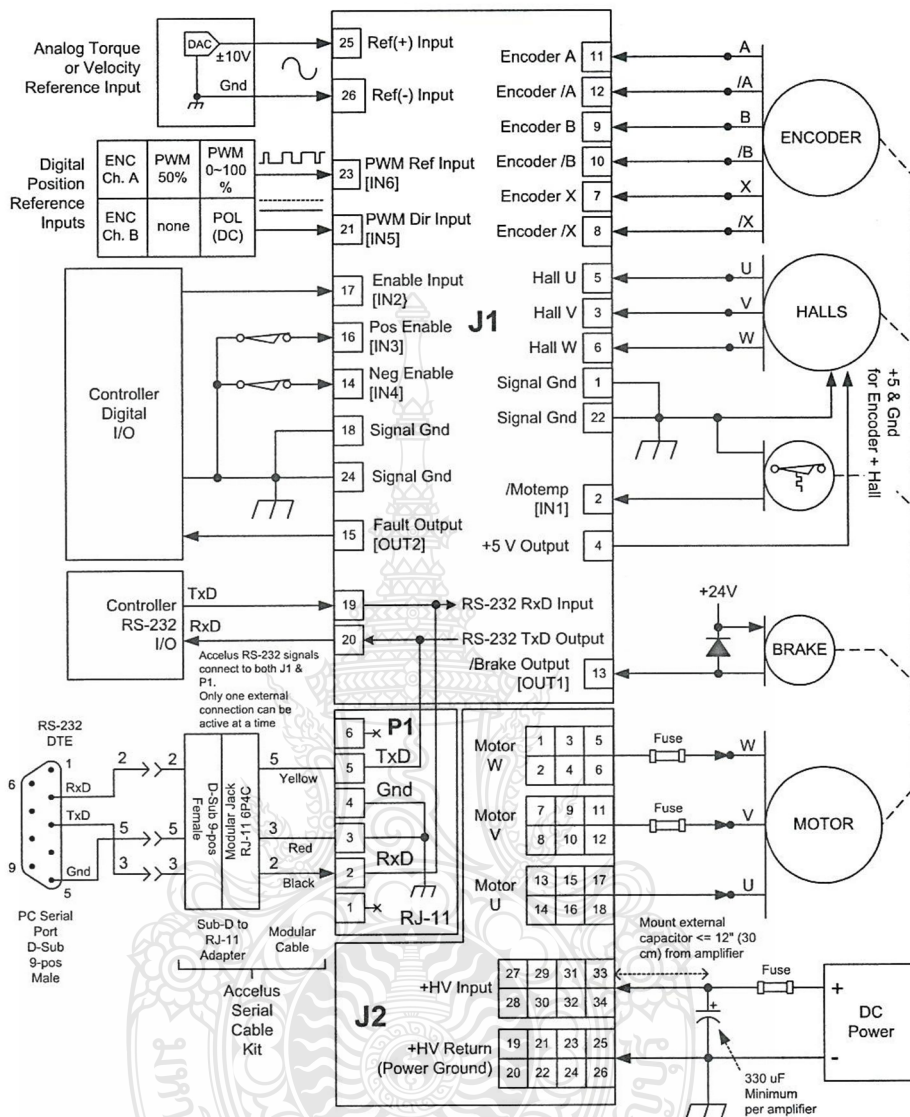
Test conditions: Load = 1mH in series with 1 Ohm. Ambient temperature = 25 deg. C.

MODEL	ASC-055-18	ASC-090-09	
OUTPUT POWER			
Peak Current	18 (12.73)	9 (6.36)	Amps DC (Amps ACrms)
Peak time	1	1	Sec
Continuous current	6 (4.24)	3 (2.12)	Amps DC (Amps ACrms)
INPUT POWER			
HV _{min} ~HV _{max}	20~55	20~90	VDC, Transformer-isolated
	20	10	ADC (1 sec) peak input current
	6.7	3.3	ADC continuous current
PWM OUTPUTS			
Type	3-phase MOSFET inverter, 20 kHz center-weighted PWM, space-vector modulation		
PWM ripple frequency	40 kHz		
COMMUTATION & CONTROL			
Current loop update rate	20 kHz (50 us period)		
Commutation	Sinusoidal, field-oriented control of DC brushless motor		
Phase Initialization	Amplifier initializes in trapezoidal commutation until a Hall transition occurs, then switches to sinusoidal commutation with phase-correction at each Hall signal transition.		
BANDWIDTH			
Current loop, small signal	3 kHz, bandwidth varies with tuning & load inductance		
HV Compensation	HV _{min} to HV _{max} Changes in HV do not affect bandwidth		
REFERENCE INPUTS			
Analog torque & velocity reference	+/-10VDC, 12 bit resolution		Differential (J1-25, 26)
Input impedance	66kΩ		Ohm between Ref(+), Ref(-)
Digital torque & velocity reference (Note 1)	/PWM, /Polarity (Note 1)		PWM = 0~100%, Polarity = 1/0 (J1-21,23) or PWM = 50% +/-50%, no polarity signal required
Digital position reference (Note 1)	Pulse & Direction CW & CCW A & B Quadrature Encoder		Single-ended digital inputs with 100ns RC filters Maximum pulse or encoder line frequency 1MHz when driven from active-output controllers.
CONTROL INPUTS (NOTE 1)			
/Enable [IN2]	Amplifier enable. Active level programmable. 10kΩ pull-up to +5V		
/PosEnable [IN3]	Positive direction limit switch. Active level programmable. 10kΩ pull-up to +5V		
/NegEnable [IN4]	Negative direction limit switch. Active level programmable. 10kΩ pull-up to +5V		
/Motemp [IN1]	Motor overtemperature sensor input. Active level programmable. 10kΩ pull-up to +5V		
All inputs	Disables amplifier when motor over-temperature occurs. Logic threshold = +2.5V. Maximum input voltage = 32VDC.		
SERIAL DATA INPUT			
RS-232	RxD, TxD, Gnd in 6-position, 4-contact RJ-11 type modular connector, and on pc board connector J1. Full-duplex, serial communication port for amplifier setup and control, 9600 to 115200 baud		
MOTOR CONNECTIONS			
Phase U, V, W	Amplifier outputs to Wye or delta connected brushless motors		
Hall U, V, W	Digital Hall signals		
Encoder A, /A, B, /B, (X,/X)	Quadrature encoder signals (X or Index signal not required). 5MHz maximum line frequency (20Mcounts/sec).		
/Motemp, /Brake	See Control Inputs (above) and Digital Outputs (below) for details		
STATUS INDICATORS			
Amp Status	Bicolor LED. Amplifier status indicated by color, and blinking or non-blinking condition as follows: Green/Slow-Blinking = Amp OK, will run when enabled Green/Fast-Blinking = Amp enabled but positive or negative limit switch inputs are active Green/Solid = Amp OK and motor will move when commanded (Amp enabled) Red/Solid = Transient fault condition: Over or under voltage, motor over-temperature, or phasing error (current position > 60° electrical from Hall angle) Red/Blinking = Latching fault condition: output or internal short circuit, amplifier over-temperature, position-mode following error.		
DIGITAL OUTPUTS (NOTE 1)			
Fault [OUT1]	Current-sinking MOSFET open-drain output with 1kΩ pullup to +5V through diode, 1A sink max, 30V max. Normally ON (LO). Output turns OFF (HI) when amplifier fault occurs		
/Brake [OUT2]	Current-sinking MOSFET to actuate motor brake. ON when amplifier enabled and operating OFF when amp disabled. ON-state sinks current from motor brake connected to external voltage source such as +24VDC. Current-flow releases brake. External flyback diode required with inductive loads.		
PROTECTIONS			
HV Overvoltage	+HV > Max HV	Amplifier outputs turn off until +HV < Max HV (See Input Power for Max HV)	
HV Undervoltage	+HV < 20VDC	Amplifier outputs turn off until +HV > 20 VDC	
Amplifier over temperature	PC Board > 90° C.	Amplifier latches OFF until Enable input cycled, power off-on, or Reset (Note 1)	
Short circuits	Output to output, output to ground, internal PWM bridge faults		
I ² T Current limiting	Programmable: continuous current, peak current, peak time		
Motor over temperature	Amplifier shuts down when motor over-temperature switch changes digital input (Note 1)		
MOUNTING & COOLING			
Thermal resistance	3.4 °C/W	PC board to ambient, convection-cooled, 90° mounting	
Amplifier internal resistance	0.8 °C/W	PC board to ambient, fan-cooled, 300 linear ft/min.	

NOTES

1. Digital inputs [IN1], [IN3], [IN4], [IN5], and [IN6] & outputs [OUT1] & [OUT2] have alternate functions (programmable). Default functions are shown here.

AMPLIFIER CONNECTIONS



- Notes
1. The functions of input signals on J1-2, 14, 16, 21, & 23 are programmable. Default functions are shown.
 2. The functions of output signals on J1-13 & 15 are programmable. Default functions are shown.

ภาพที่ ข.1 แสดงจุดต่อของอุปกรณ์

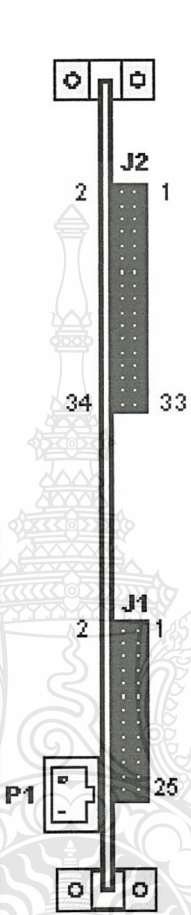
AMPLIFIER CONNECTORS

J1 = 26 position, DIL, 0.100" grid, male, .025" square pins
 J2 = 34 position, DIL, 0.100" grid, male, .025" square pins
 P1 = 6 position, 6 contact RJ-45 socket, AMP 555077-1

PC BOARD MATING CONNECTORS

J1 = 26 position, DIL, 0.100" grid, female receptacle
 Samtec SSW-113-01-S-D-LL, or equivalent
 J2 = 34 position, DIL, 0.100" grid, female receptacle
 Samtec SSW-117-01-S-D-LL, or equivalent

CAUTION!
 J2 connections are made to *groups* of pins for current-sharing. All pins in a group must be connected when laying out pc boards.
 Do not connect to single pins for signals in this group. This will exceed current rating of individual pins.



PIN		J2 SIGNAL
2	1	Motor Phase W
4	3	
6	5	
8	7	Motor Phase V
10	9	
12	11	
14	13	Motor Phase U
16	15	
18	17	
20	19	+HV Return (Power Ground)
22	21	
24	23	
26	25	+HV Input
28	27	
30	29	
32	31	
34	33	

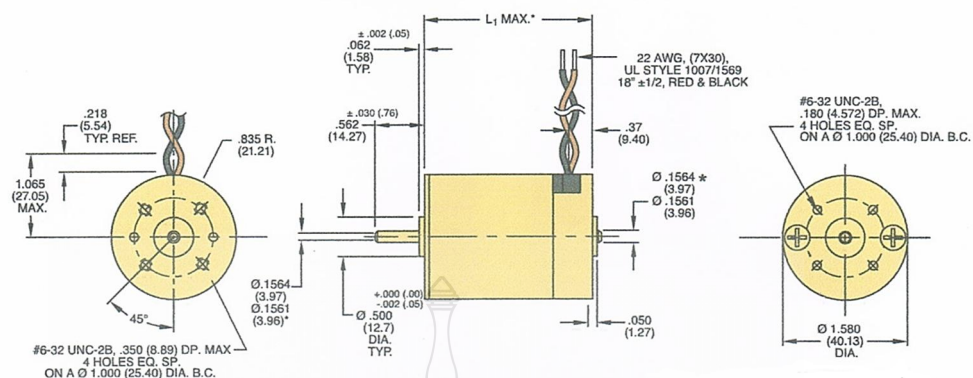
J1 SIGNAL	PIN
Motor Temp Sensor Input [IN1]	2
+5V @ 200 mA Output	4
Motor Hall W	6
Encoder /X (/Index)	8
Encoder /B	10
Encoder /A	12
Neg Enable Input [IN4]	14
Pos Enable Input [IN3]	16
Signal Ground	18
RS-232 TxD Output	20
Signal Ground	22
Signal Ground	24
+/-10V Ref Input	26

PIN	J1 SIGNAL
1	Signal Ground
3	Motor Hall V
5	Motor Hall U
7	Encoder X (Index)
9	Encoder B
11	Encoder A
13	[OUT2] Motor Brake Output
15	[OUT1] Fault Output
17	[IN2] Enable Input
19	RS-232 RxD Input
21	[IN5] Direction Input
23	[IN6] PWM Ref Input
25	+/-10V Ref Input

Notes
 1. The functions of input signals on J1-2, 14, 16, 21, & 23 are programmable. Default functions are shown.
 2. The functions of output signals on J1-13 & 15 are programmable. Default functions are shown.

ภาพที่ ข.2 แสดงจุดต่อของอุปกรณ์

Series 9000 LO-COG® Brush Commutated DC Motors



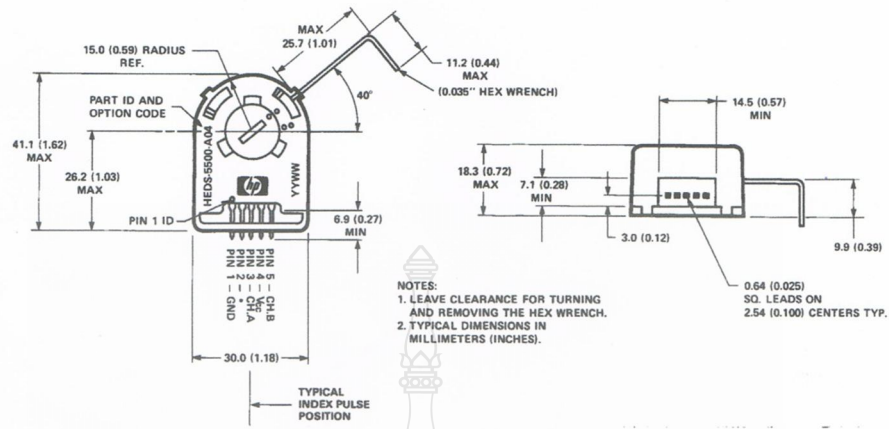
ภาพที่ ข.3 มอเตอร์ไฟฟ้า

ตารางที่ ข.2 แสดงข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์

	หน่วย	GM9434	GM9413
Motor Inertia	Kg.cm^2	0.04166	0.02754
Peak Torque	N.m	0.2916	0.1102
Continuous Torque	N.m	0.0431	0.0161
Velocity Limit	rpm.	6151	5592
Torque Constant	N.m/Apk	0.0365	0.0395
Back emf Constant	V/krpm	3.82	4.14
Resistance	Ohms	2.96	8.33
Inductance	mH	2.51	6.17

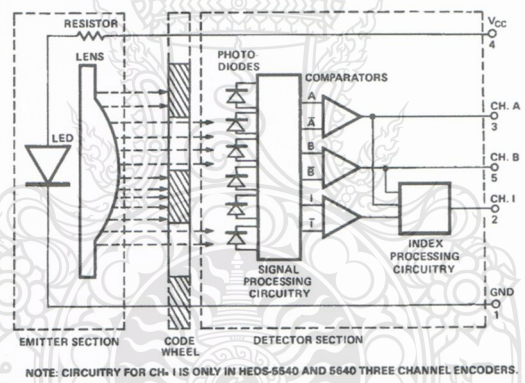
Package Dimensions

HEDS-5500/5540, HEDM-5500



*Note: For the HEDS-5500 and HEDM-5500, Pin #2 is a No Connect. For the HEDS-5540, Pin #2 is CH. I, the index output.

Block Diagram



ภาพที่ ข.4 ข้อมูลจำเพาะ Encoder hp Heds-5500

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลจำเพาะ Encoder hp Heds-5500

Recommended Operating Conditions

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Units	Notes
Temperature HEDS Series	T_A	-40		100	°C	
Temperature HEDM Series	T_A	-40		70	°C	non-condensing atmosphere
Supply Voltage	V_{CC}	4.5	5.0	5.5	Volts	Ripple < 100 mV _{p-p}
Load Capacitance	C_L			100	pF	2.7 k Ω pull-up
Count Frequency	f			100	kHz	Velocity (rpm) x N/60
Shaft Perpendicularity Plus Axial Play (HEDS Series)				± 0.25 (± 0.010)	mm (in.)	6.9 mm (0.27 in.) from mounting surface
Shaft Eccentricity Plus Radial Play (HEDS Series)				0.04 (0.0015)	mm (in.) TIR	6.9 mm (0.27 in.) from mounting surface
Shaft Perpendicularity Plus Axial Play (HEDM Series)				± 0.175 (± 0.007)	mm (in.)	6.9 mm (0.27 in.) from mounting surface
Shaft Eccentricity Plus Radial Play (HEDM Series)				0.04 (0.0015)	mm (in.) TIR	6.9 mm (0.27 in.) from mounting surface

Note: The module performance is guaranteed to 100 kHz but can operate at higher frequencies. 2.7 k Ω pull-up resistors required for HEDS-5540 and 5640.

Encoding Characteristics

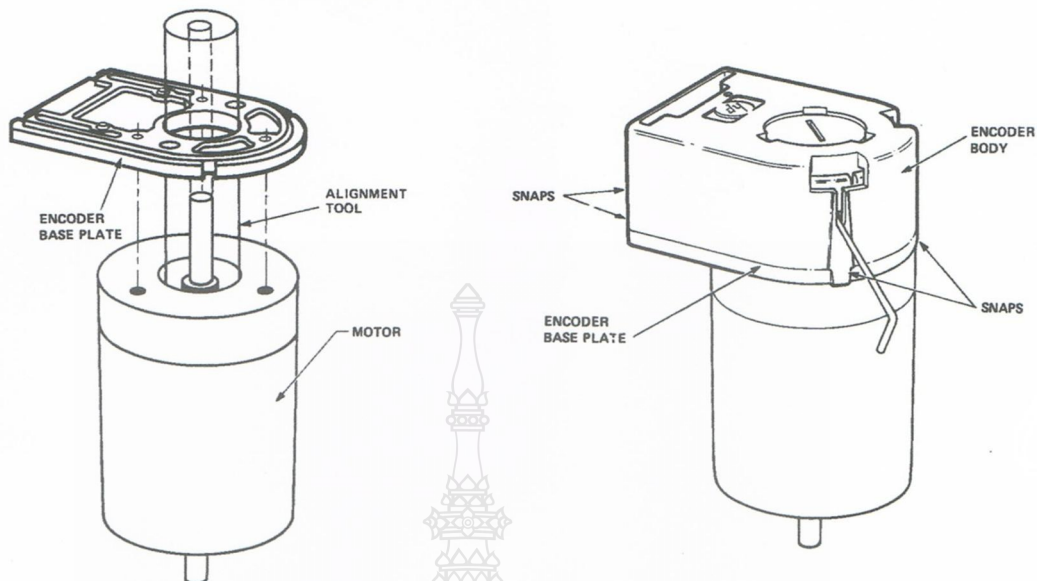
Encoding Characteristics over Recommended Operating Range and Recommended Mounting Tolerances unless otherwise specified. Values are for the worst error over the full rotation.

Part No.	Description	Sym.	Min.	Typ.*	Max.	Units
HEDS-5500 HEDS-5600 (Two Channel)	Pulse Width Error	ΔP		7	45	°e
	Logic State Width Error	ΔS		5	45	°e
	Phase Error	$\Delta \phi$		2	20	°e
	Position Error	$\Delta \Theta$		10	40	min. of arc
	Cycle Error	ΔC		3	5.5	°e
HEDM-5500 HEDM-5600 (Two Channel)	Pulse Width Error	ΔP		10	45	°e
	Logic State Width Error	ΔS		10	45	°e
	Phase Error	$\Delta \phi$		2	15	°e
	Position Error	$\Delta \Theta$		10	40	min. of arc
	Cycle Error	ΔC		3	7.5	°e
HEDS-5540 HEDS-5640 (Three Channel)	Pulse Width Error	ΔP		5	35	°e
	Logic State Width Error	ΔS		5	35	°e
	Phase Error	$\Delta \phi$		2	15	°e
	Position Error	$\Delta \Theta$		10	40	min. of arc
	Cycle Error	ΔC		3	5.5	°e
	Index Pulse Width	P_O	55	90	125	°e
	CH. I rise after CH. A or CH. B fall	-25°C to +100°C -40°C to +100°C	t_1 t_1	10 -300	100 100	250 250
CH. I fall after CH. B or CH. A rise	-25°C to +100°C -40°C to +100°C	t_2 t_2	70 70	150 150	300 1000	ns ns

Note: See Mechanical Characteristics for mounting tolerances.

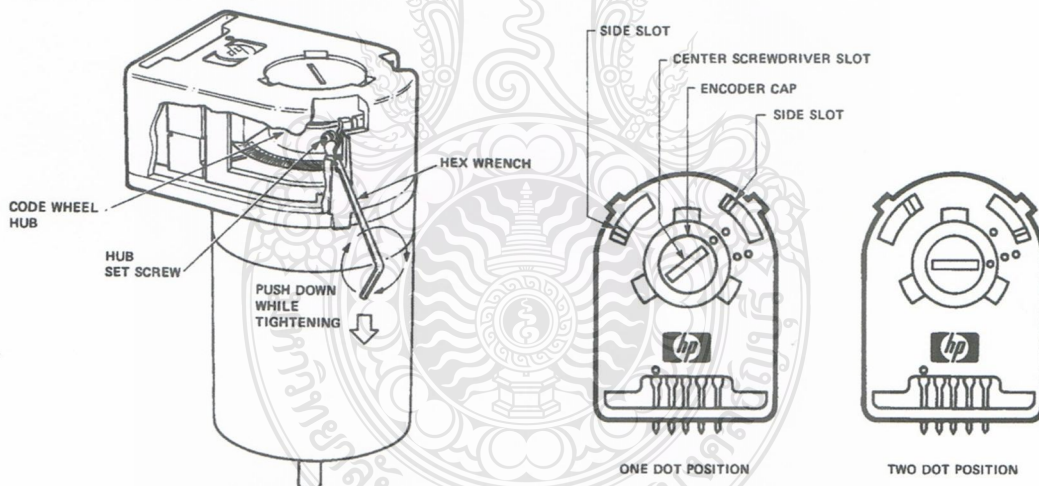
*Typical values specified at $V_{CC} = 5.0$ V and 25°C.

Encoder Mounting and Assembly



1. For HEDS-5500 and 5600: Mount encoder base plate onto motor. Tighten screws. Go on to step 2. 2. Snap encoder body onto base plate locking all 4 snaps.

1a. For HEDS-5540, 5640 and HEDM-5500, 5600: Slip alignment tool onto motor shaft. With alignment tool in place, mount encoder baseplate onto motor as shown above. Tighten screws. Remove alignment tool.



3a. Push the hex wrench into the body of the encoder to ensure that it is properly seated into the code wheel hub set screws. Then apply a downward force on the end of the hex wrench. This sets the code wheel gap by levering the code wheel hub to its upper position.

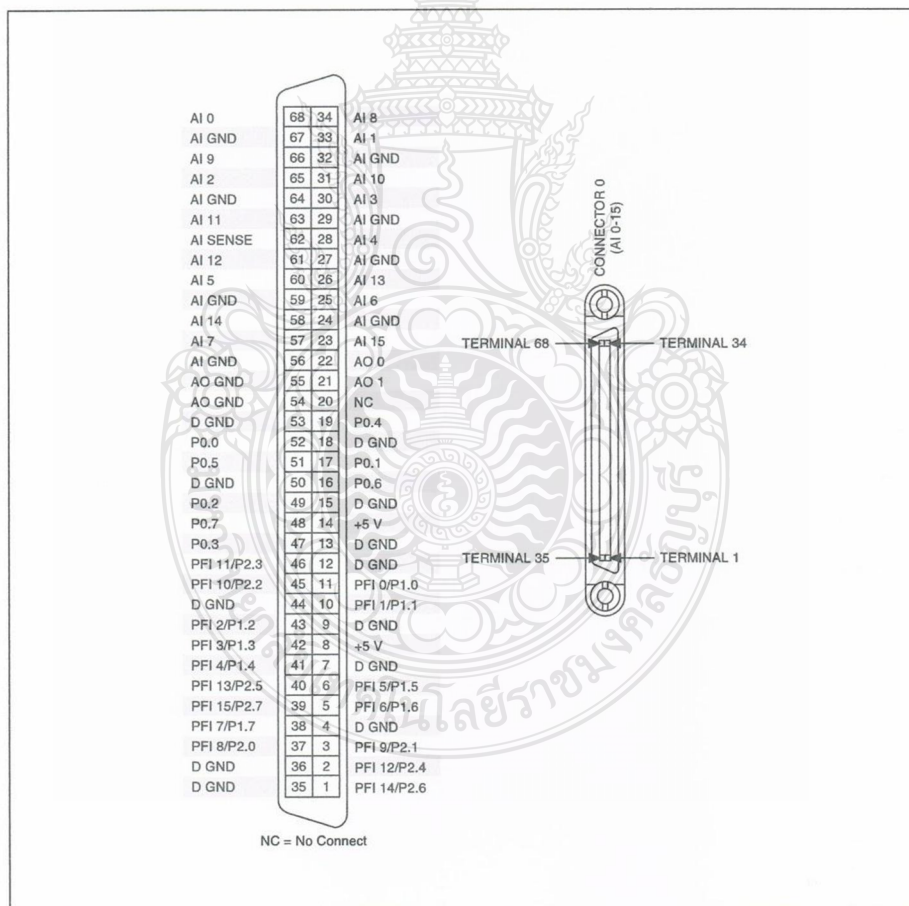
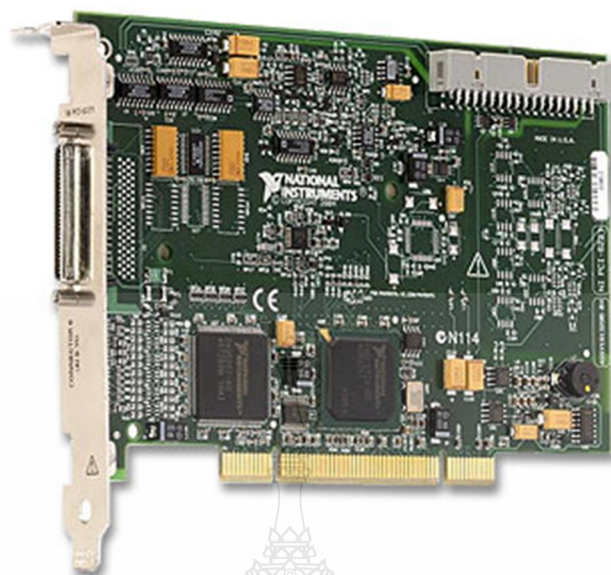
3b. While continuing to apply a downward force, rotate the hex wrench in the clockwise direction until the hub set screw is tight against the motor shaft. The hub set screw attaches the code wheel to the motor's shaft.

3c. Remove the hex wrench by pulling it straight out of the encoder body.

4. Use the center screwdriver slot, or either of the two side slots, to rotate the encoder cap dot clockwise from the one dot position to the two dot position. Do not rotate the encoder cap counterclockwise beyond the one dot position.

The encoder is ready for use!

ภาพที่ ข.5 ภาพประกอบเอ็นโค้ดเดอร์และมอเตอร์ไคร้



ภาพที่ ข.6 ข้อมูลจำเพาะ DAQ card NI PCI 6221

ตารางที่ ข.4 แสดงข้อมูลจำเพาะของ DAQ card NI PCI 6221

Product Name	PCI-6232
Product Family	Multifunction Data Acquisition
Part Number	PCI
Part Number	779617-01
Operating System/Target	Windows , Real – Time
LabVIEW RT Support	Yes
DAQ Product Family	M Series
Measurement Type	Digital , Frequency , Quadrature encoder , Voltage
Isolation Type	Bank Isolation
RoHS Compliant	Yes
Analog Input	
Channels	16 , 8
Single-Ended Channels	16
Differential Channels	8
Resolution	16 bits
Sample Rate	250 kS/s
Max Voltage	10 V
Maximum Voltage Range	-10 V , 10 V
Maximum Voltage Range Accuracy	3.1 mV
Maximum Voltage Range Sensitivity	97.6 μ V
Maximum Voltage Range	-0.2 V , 0.2 V
Maximum Voltage Range Accuracy	112 μ V
Maximum Voltage Range Sensitivity	5.2 μ V
Number of Ranges	4
Simultaneous Sampling	No
On-Board Memory	4095 samples
Analog Output	

ตารางที่ ข.4 แสดงข้อมูลจำเพาะของ DAQ card NI PCI 6221(ต่อ)

Channels	2
Resolution	16 bits
Max Voltage	10 V
Maximum Voltage Range	-10 V , 10 V
Maximum Voltage Range Accuracy	3.23 μ V
Maximum Voltage Range	-10 V , 10 V
Maximum Voltage Range Accuracy	3.23 μ V
Update Rate	500 kS/s
Current Drive Single	5 mA
Current Drive All	10 mA
Digital I/O	
Bidirectional Channels	0
Input-Only Channels	6
Output-Only Channels	4
Number of Channels	0 , 6 , 4
Timing	Software
Logic Levels	24 V
Input Current Flow	Sinking , Sourcing
Output Current Flow	Sourcing
Programmable Input Filters	Yes
Supports Programmable Power-Up States?	Yes
Current Drive Single	350 mA
Current Drive All	400 mA
Watchdog Timer	No
Supports Handshaking I/O	No
Supports Pattern I/O	No
Maximum Input Range	0 V , 30 V
Maximum Output Range	0 V , 30 V

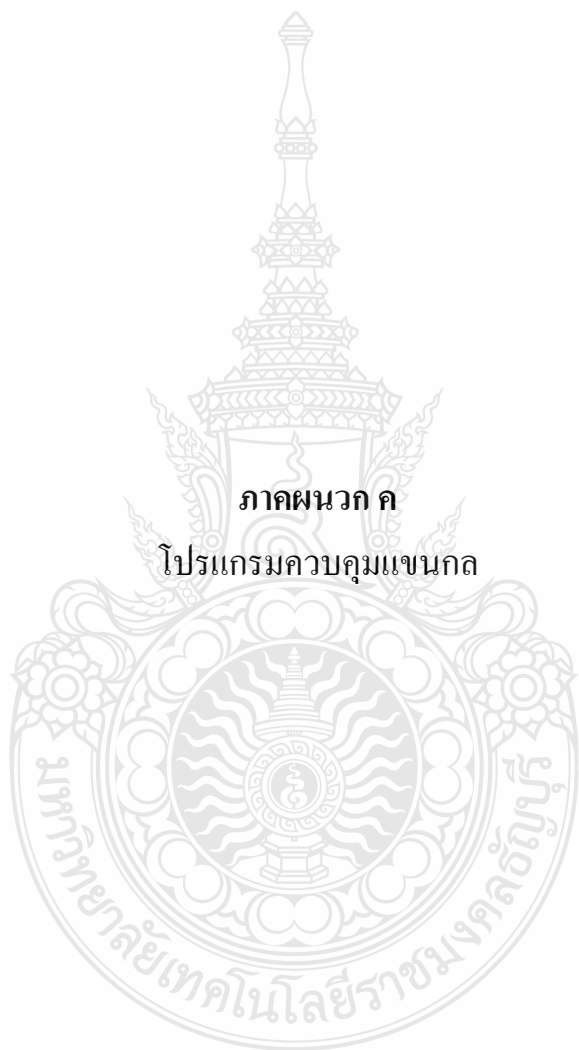
ตารางที่ ข.4 แสดงข้อมูลจำเพาะของ DAQ card NI PCI 6221(ต่อ)

Counter/Timers	
Counters	2
Number of DMA Channels	4
Buffered Operations	Yes
Debouncing/Glitch Removal	Yes
GPS Synchronization	No
Maximum Range	0 V , 30 V
Max Source Frequency	80 MHz
Minimum Input Pulse Width	12.5 ns
Pulse Generation	Yes
Resolution	32 bits
Timebase Stability	50 ppm
Logic Levels	24 V
Physical Specifications	
Length	15.5 cm
Width	9.7 cm
I/O Connector	37-pin D-Sub
Timing/Triggering/Synchronization	
Triggering	Digital
Synchronization Bus (RTSI)	Yes

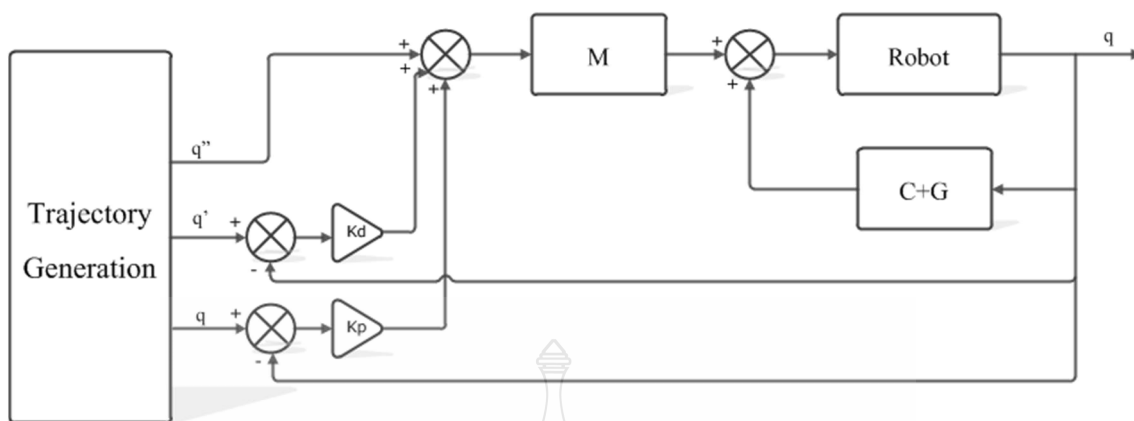
ตารางที่ ข.5 น้ำหนักของแขนกลอุตสาหกรรม SCORBOT ER VII

	จำนวน (ชิ้น)	น้ำหนัก (kg)/ชิ้น
1. ฟาซังลิงค์ที่ 1	2	1.47
2. ฟาซังลิงค์ที่ 2	2	0.76
3. ตั๋วถ่วงน้ำหนัก	1	12.6
4. มอเตอร์ไคร้	4	1.8
5. เกียร์ทด	3	0.7
6. ลิงค์ที่ 3	1	3.08

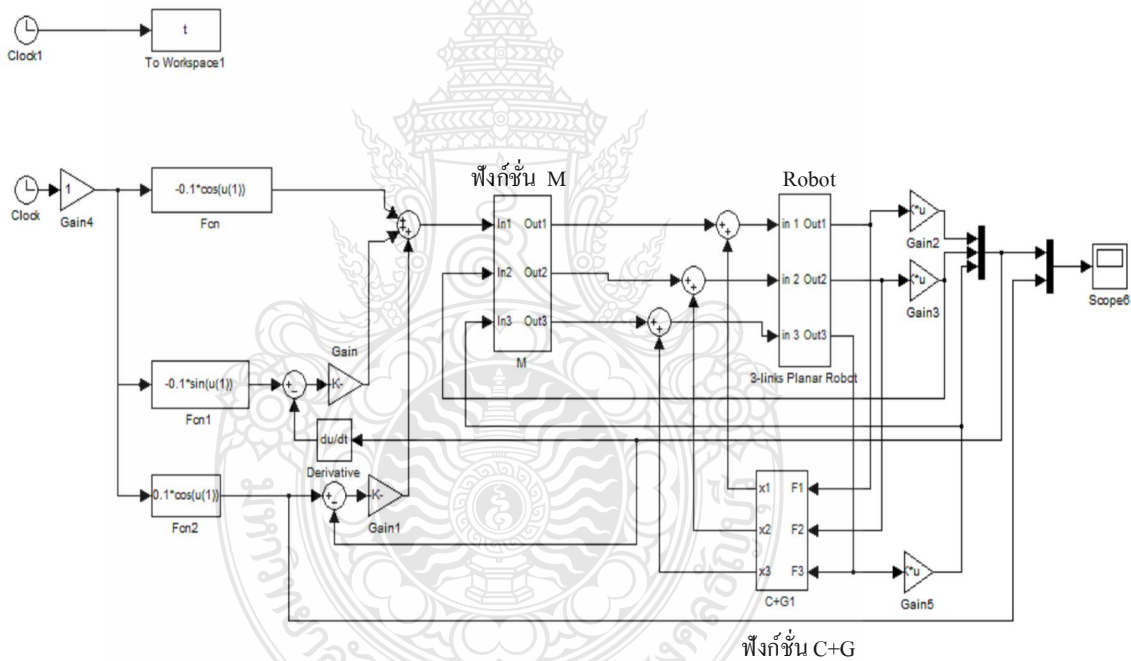




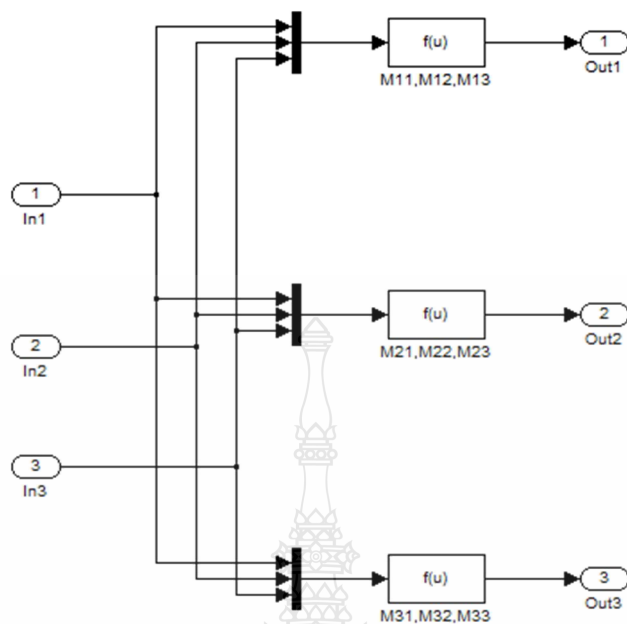
ภาคผนวก ค
โปรแกรมควบคุมแขนกล



ภาพที่ ค.1 โมเดลการควบคุมแบบคอมพิวเทอร์ค สำหรับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

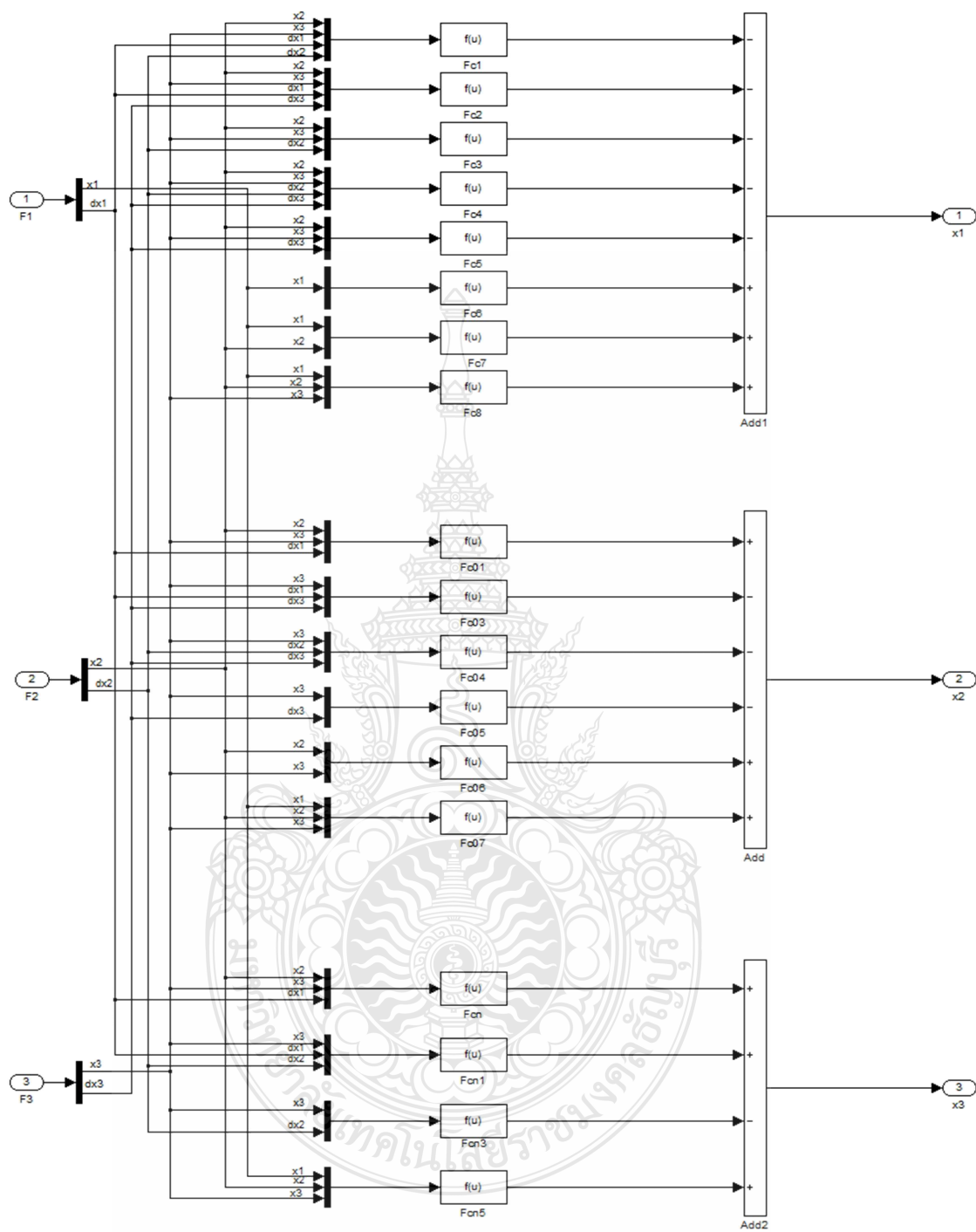


ภาพที่ ค.2 โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการทดลองตัวควบคุมแบบคอมพิวเทอร์ค

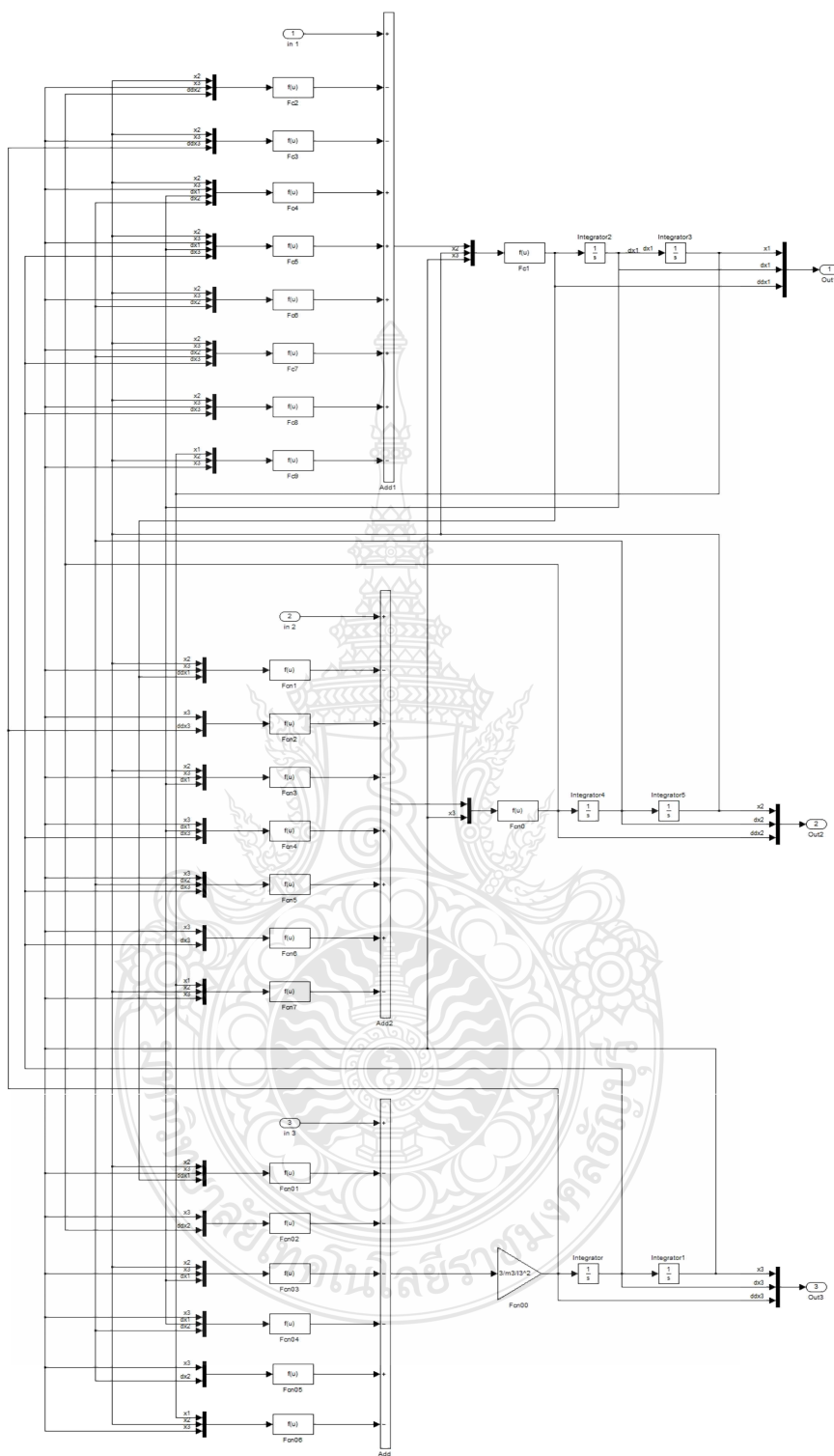


ภาพที่ ค.3 โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการทดลองตัวควบคุมแบบคอมพิวทอร์ค ในชุดฟังก์ชัน M

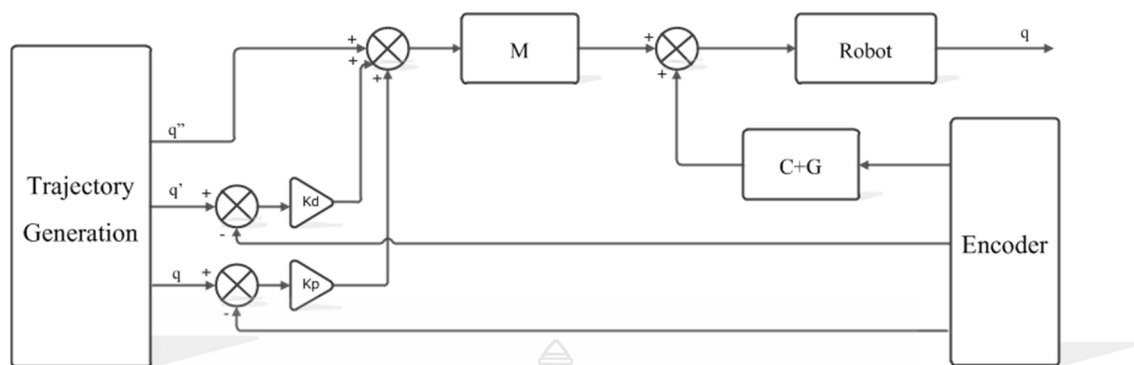




ภาพที่ ค.4 โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการทดลองตัว
ควบคุมแบบคอมพิวเทอร์ค ในชุดฟังก์ชัน C+G



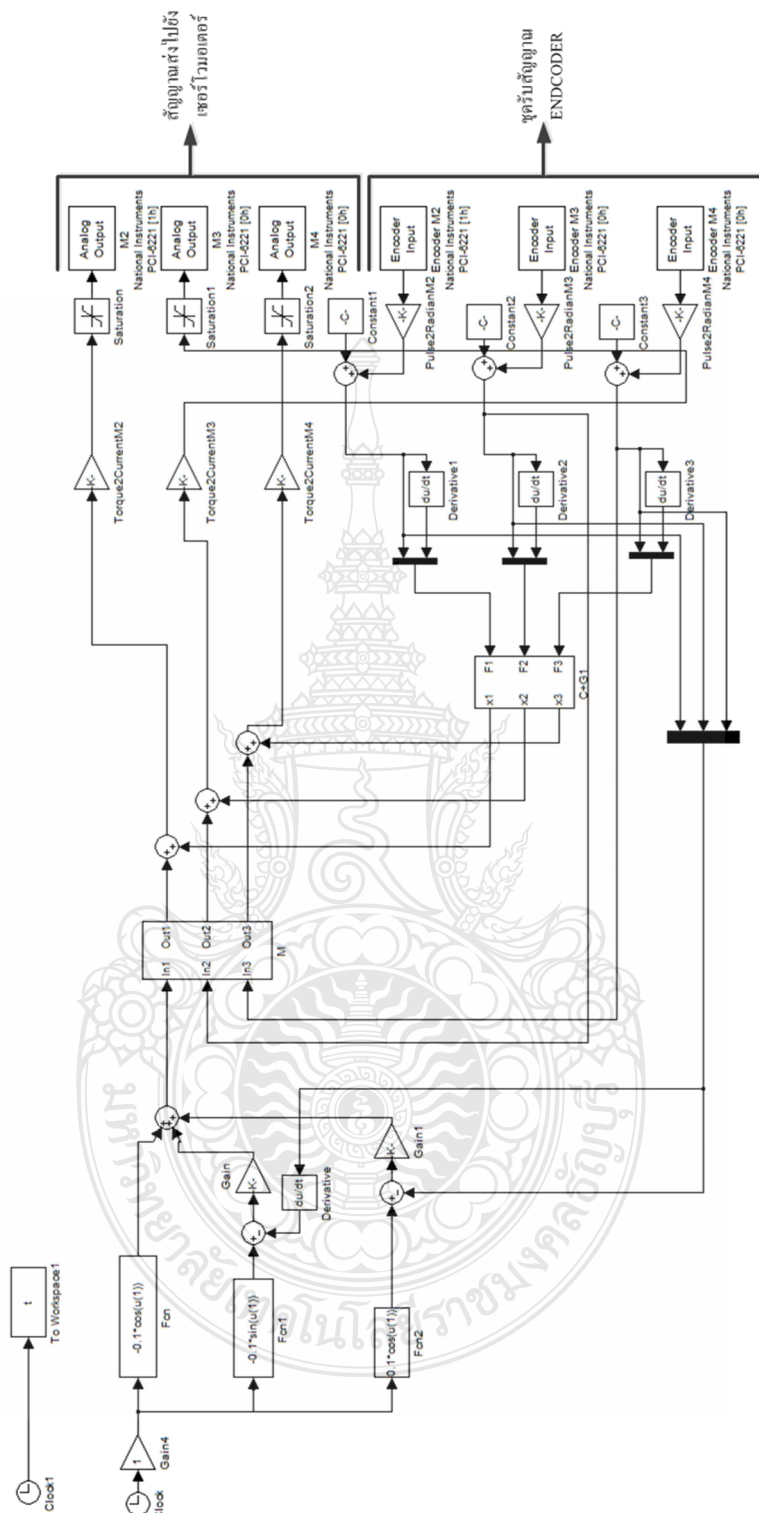
ภาพที่ ค.5 โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการทดลองตัวควบคุมแบบคอมพิวเทอร์ค ในชุด ROBOT



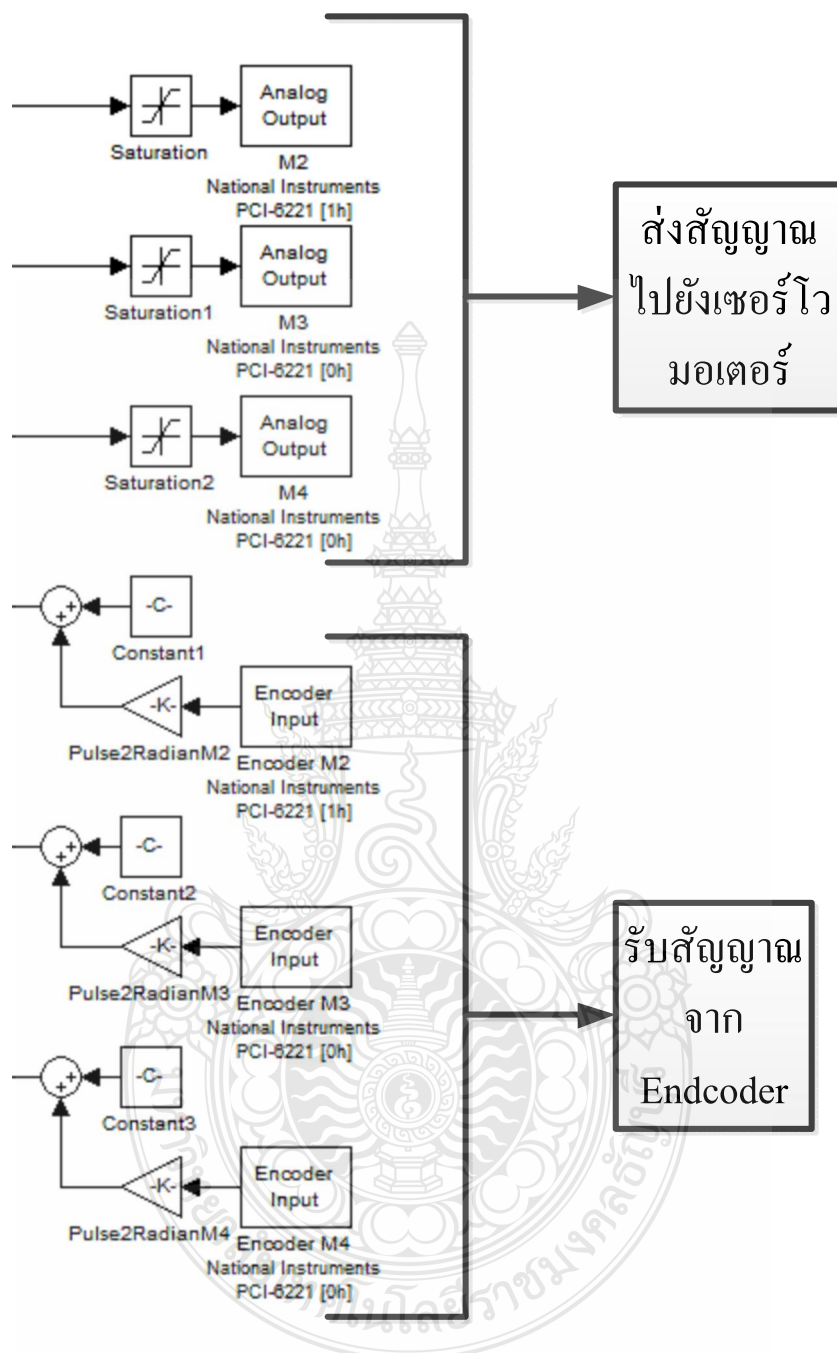
ภาพที่ ค.6 โมเดลการควบคุมแบบคอมพิวทอร์ค สำหรับ หุ่นยนต์อุตสาหกรรม

ในส่วนของฟังก์ชัน M และ $C+G$ ได้ในภาคผนวก ค. ในภาพที่ ค.3 และภาพที่ ค.4 ตามลำดับ

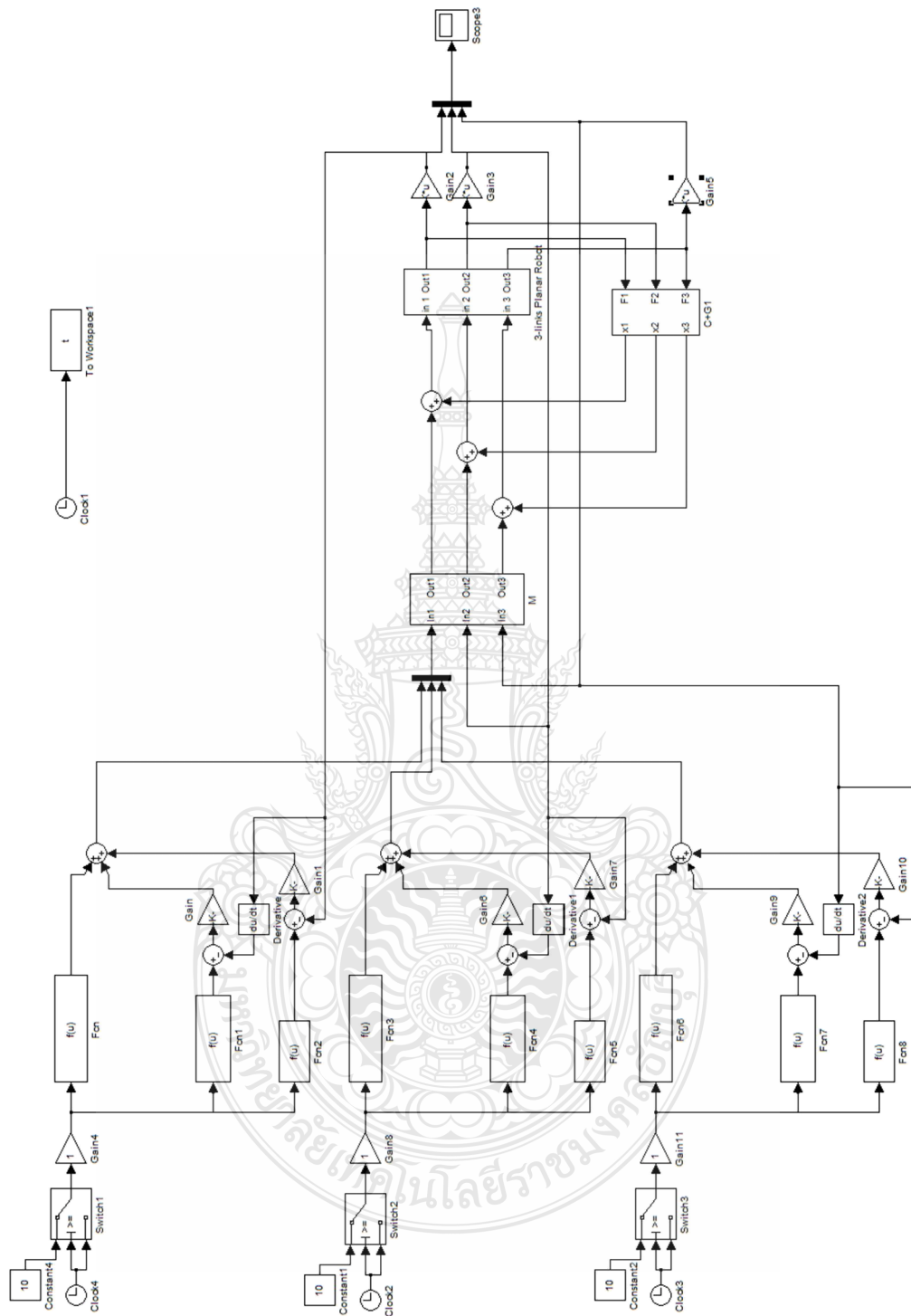




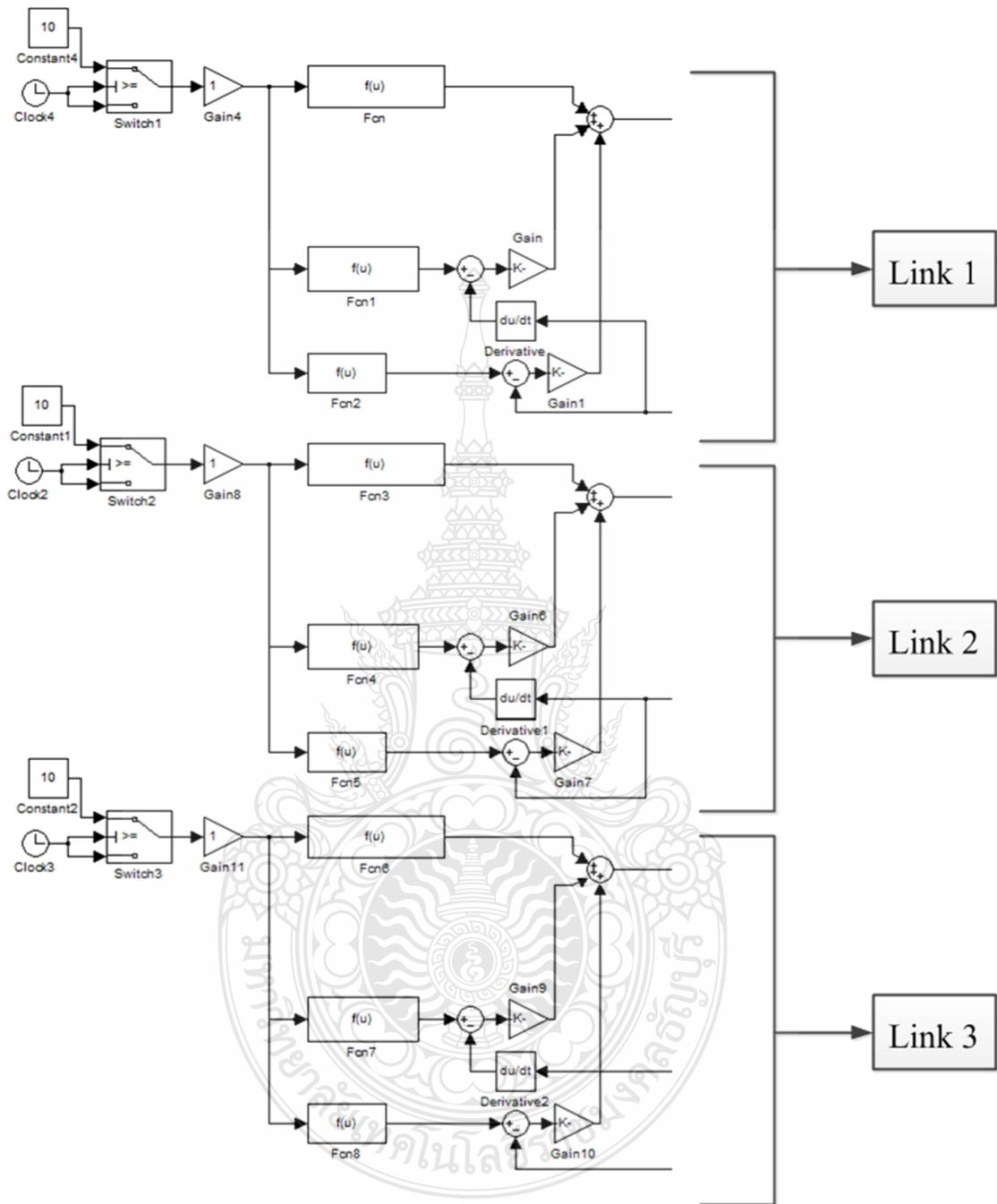
ภาพที่ ค.7 โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับ หุ่นยนต์อุตสาหกรรม ในการทดลองตัวควบคุมแบบคอมพิวทอร์ค



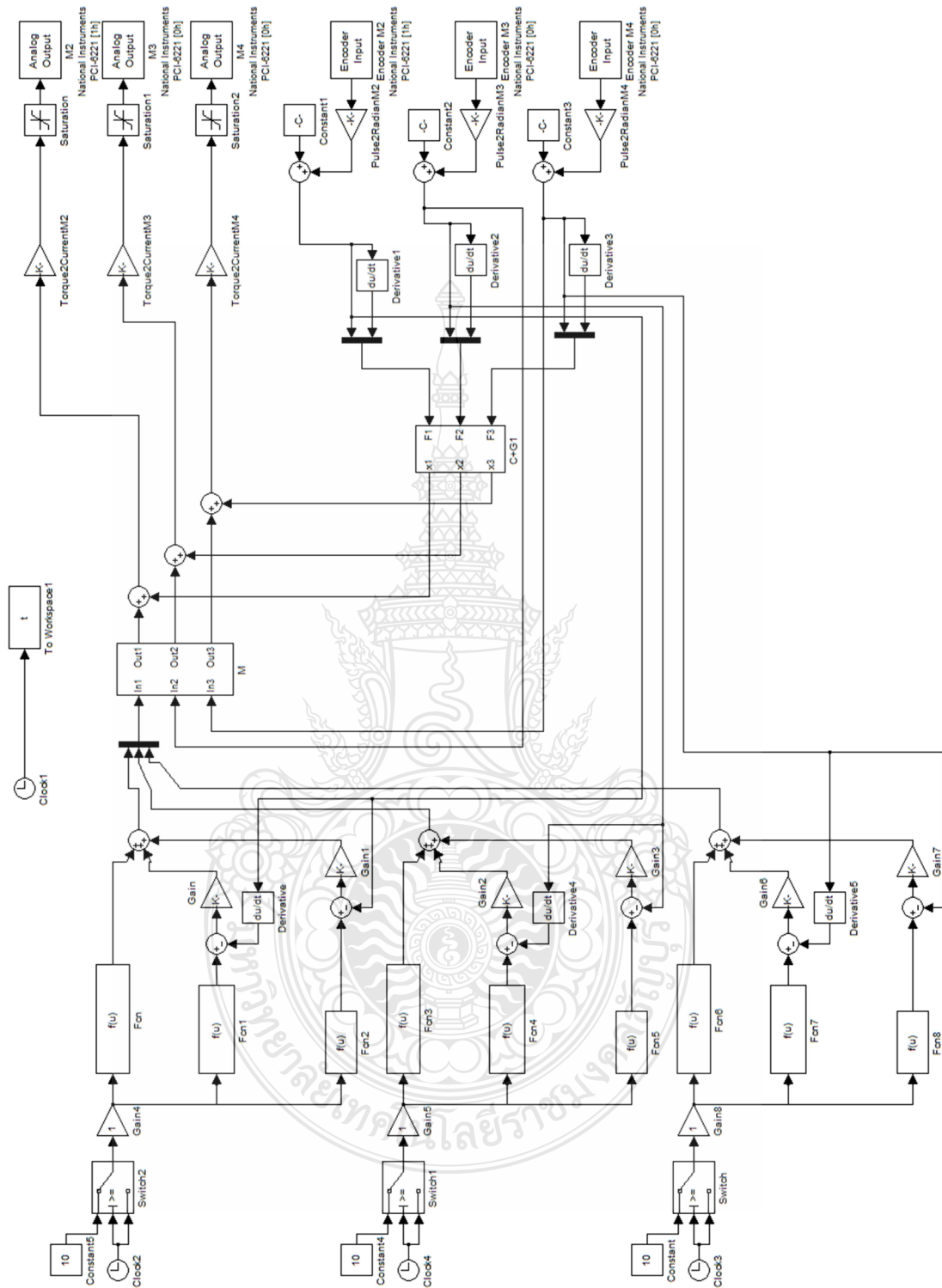
ภาพที่ ค.8 โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับ หุ่นยนต์อุตสาหกรรม ในการทดลองตัวควบคุมแบบคอมพิวทอร์ค ในส่วนรับ-ส่งสัญญาณ



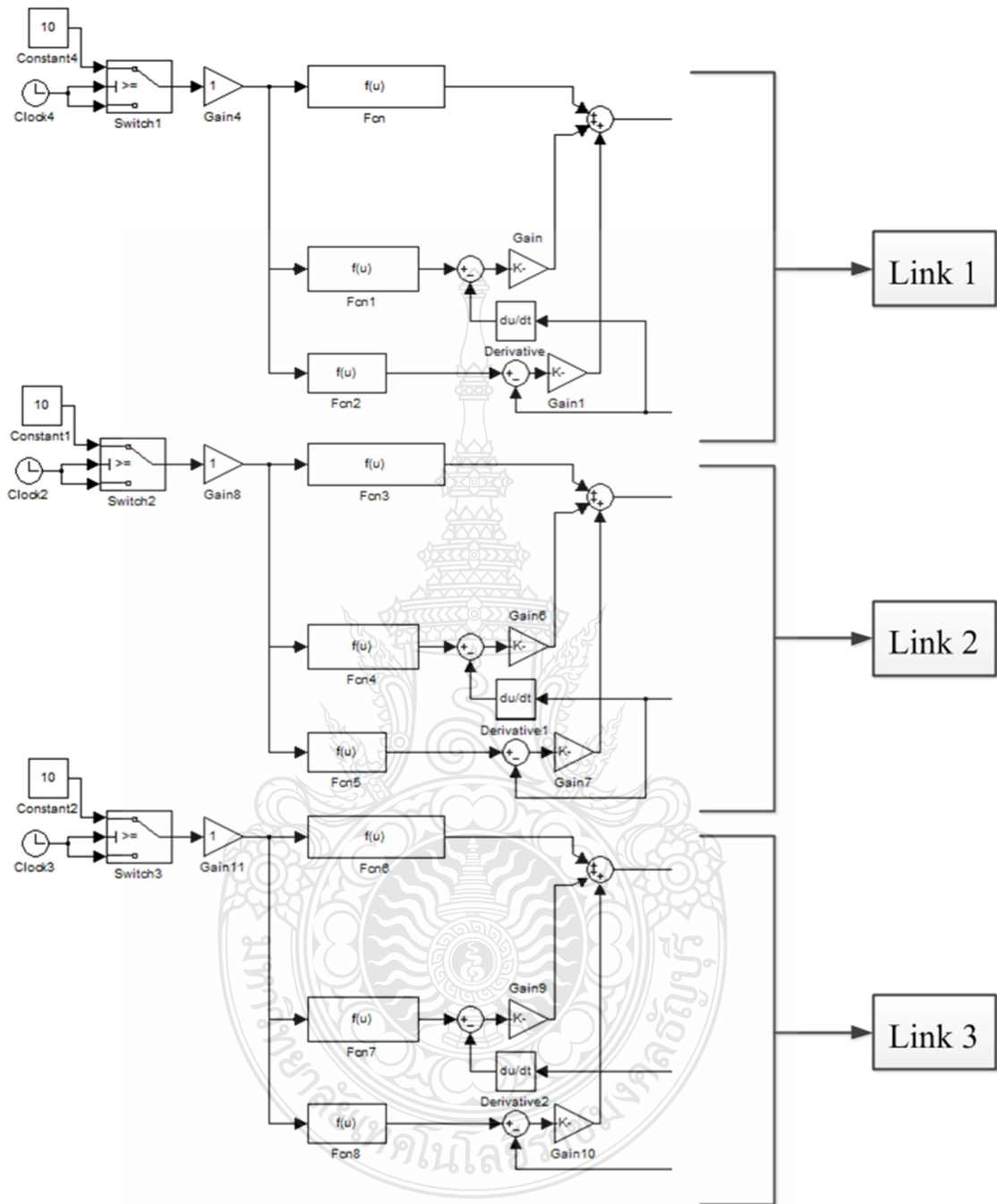
ภาพที่ ค.9 โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการทดลองการเคลื่อนที่ (Trajectory Planning)



ภาพที่ ค.10 โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการทดลองการเคลื่อนที่ (Trajectory Planning) ในส่วนเส้นพาร์ทและการรักษาเสถียรภาพ

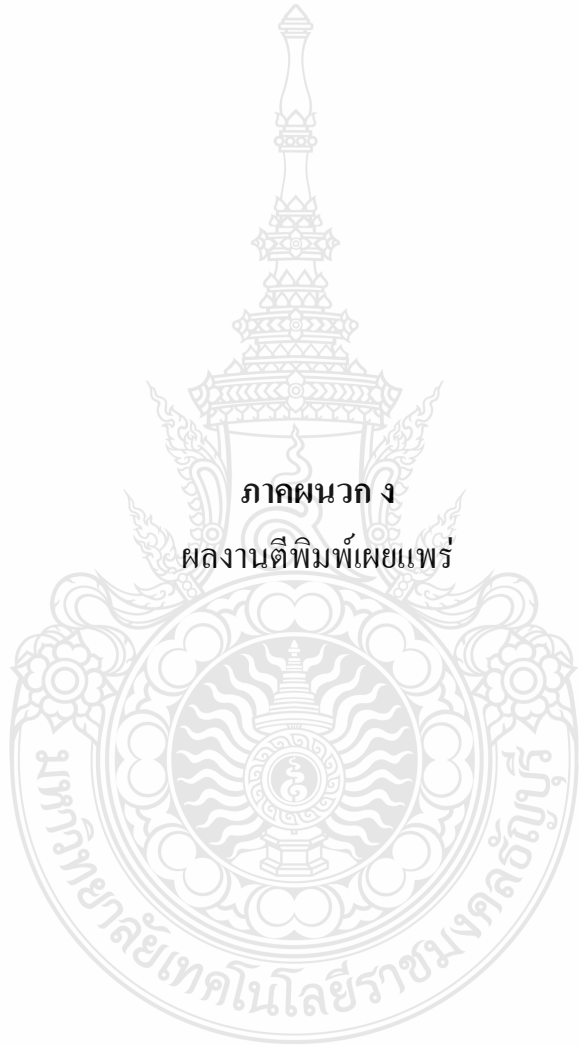


ภาพที่ ค.11 โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับ แบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ในการทดลองการเคลื่อนที่ (Trajectory Planning)



ภาพที่ ค.12 โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับ แบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ในการทดลองการเคลื่อนที่ (Trajectory Planning) ในส่วนเส้นพาร์ทและการรักษาเสถียรภาพ

ภาคผนวก ง
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่





28th National Graduate Research Conference
“Advancing Knowledge through Graduate Research”

Assumption University of Thailand
 Suvarnabhumi campus
 28 - 29 June 2013

www.28ngrconference.au.edu



Organized by

The Council of Deans of Thailand's Graduate Schools in cooperation with
 Assumption University of Thailand

สภาคณะผู้บริหารบัณฑิตศึกษาแห่งประเทศไทย (สคท) ร่วมกับ มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ





**การประชุมเสนอผลงานวิจัย
ระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 28**
28th National Graduate Research Conference

28 - 29 มิถุนายน 2556
ณ หอประชุมนานาชาติ John XXIII มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ วิทยาเขตสุวรรณภูมิ

รายนามคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและพิจารณาผลงานวิจัย

ระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 28

มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ

ดร. กิตติ โพธิกิตติ

ดร. กิติกร ดาวพิเศษ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรยุทธ ศรีวรกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นันทพันธ์ ชินล้ำประเสริฐ

ดร. เชิดพงษ์ ศรีบุญเรือง

ดร. สงบ ลัทธนิษ

รองศาสตราจารย์ ดร. ชิตาภา เกตวัลห์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรพันธ์ แดงเดช

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติพันธ์ เตชะกิตติโรจน์

รองศาสตราจารย์พรชัย สุนทรพันธ์

ดร. เชิดชัย เขียวธีรกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ลินจง นง โรจน์ประเสริฐ

Dr. Ismail Ali Siad

ดร. ทองดี กิจบุญชู

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกียรติสิน ประสงค์สุกาญจน์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริอร ไข่มุกพิรัตน์

ดร. ชาญชัย อธิจิตสกุล

Dr. Ioan Voicu

ดร. อภิชาติ อินทรวินิชญ์

Dr. John Arthur Barnes

Dr. Adarsh Batra

Dr. Perla Rizalina M. Tayko, Ph.D.

ดร. อุดมศักดิ์ โสภณกิจ

ดร. ชนินทร์ จิตตวิริยานุกุล

ดร. วิศรุต ปาริยะประเสริฐ

Dr. Jean-Marc Marcel Dautrey

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตติภา งามเกริกโชติ

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ดร. ภิญโญ รัตนพันธ์

รองศาสตราจารย์ สุเมธ แก่นมณี

ดร. อัจริยะ อุปการะกุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัชพงษ์ ตั้งมณี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร

สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

รองศาสตราจารย์ ดร. เรืองศักดิ์ แก้วธรรมใจ

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

รองศาสตราจารย์ ดร. วิรัช สงวนวงศ์วาน

รองศาสตราจารย์ ดร. พูลศักดิ์ แสงสันต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

รองศาสตราจารย์ ดร. พนารัตน์ ปานมณี

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

รองศาสตราจารย์ ดร. จงกลบดินทร์ แสงอาสภวิริยะ



Oral Presentation

Code	Thesis Topic	Name
28011	Factors Affecting the Willingness to Buy Renewable Energy: A Case Study of Thai Students and English Program Staff Members at Five Major Universities in Bangkok, Thailand	Kamyar Jenab
28013	“The Hero’s Journey” in Harry Potter	Mullika Pongcharoen
28015	Computed Torque Control for 2-Link Planar Robot	Chanatip Vongpraramat
28016	Development of a Compressor Machine for an Organic Fertilizer with a Lower Energy Applied Method	Rompruck Permgeattisak
28018	An Empirical Investigation of the Determinants of Behavioral Intentions toward Counterfeit Luxury-Brand Handbags: The Case of Handbags Consumers in Bangkok, Thailand	Wipawan Udomsant
28021	Predictors of the Use of Personal Protective Equipments among Nurses Exposed to Antineoplastic Drugs	Kriangkrai Phukjit
28024	Problems with Verbal Communication between Tribes and Staff Service Providers of the Administration District, Amphur Pang Mapha, Mea Hong Son Province, Thailand	Nongkran Lengthai
28026	2-(4-Acetoxyphenyl)-2-Chloro-N-methyl-Ethylammonium Chloride Reduces the Production of MIP-1b in Dengue Virus-infected HepG2 Cells	Aroonroong Suttitheptumrong
28028	Situation Problems and Guidance for Debt Collection of Mobile Phone Service Providers	Pipat Buranaklas
28029	Factors Influencing Mainland Chinese Tourist Behavior Intention to Revisit Bangkok, Thailand	LiLi Liu
28031	Predictors of Personal Protective Equipment Use among Garbage Collectors in the Municipality of Chon Buri	Nongyao Pitaksuriyarat
28032	Molecular Detection of Bee Pathogens and Bacteria in the Guts of Thai <i>Apis cerana</i> Honeybees	Pawonrut Nonthapa
28033	A Flow Cytometric Analysis of B Cell Profile in Healthy and Periodontal Disease Tissues	Warattaya Rattanathammatada
28035	Logistics Efficiency Measurement of Distribution for Vehicle Lubricant Manufacturers in Thailand	Piyaprach Thitiviroon
28036	Pasting Properties of Tapioca Starch with and without Hydroxypropyl Methylcellulose	Duenchay Tunnarut
28037	Factors Influencing the Effectiveness of the Strategic Management of Head Nurses at the Central Hospital of Public Health in Inspection Regions 6 and 7	Kanittha Kwanchuay
28039	An Analysis of a Group Exercise Program to Promote Balance Performance for Elderly with Diabetic Peripheral Neuropathy	Rapeepun Thungtak
28040	Impacts of the Relationship Benefits of Four Types of Customer Trust: A Case Study of Central Department Store and The Mall Department Store in Bangkok, Thailand	Taywin Wongvisutthikul
28041	Developing a Geographic Information Dataset for 3D Route	Kraiwit Chuwilai



28th National Graduate Research Conference,
Assumption University of Thailand, 28-29 June 2013

Computed Torque Control for 2-Link Planar Robot

Chanatip Vongpraramat,^{1*} Manusak Janthong¹

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand

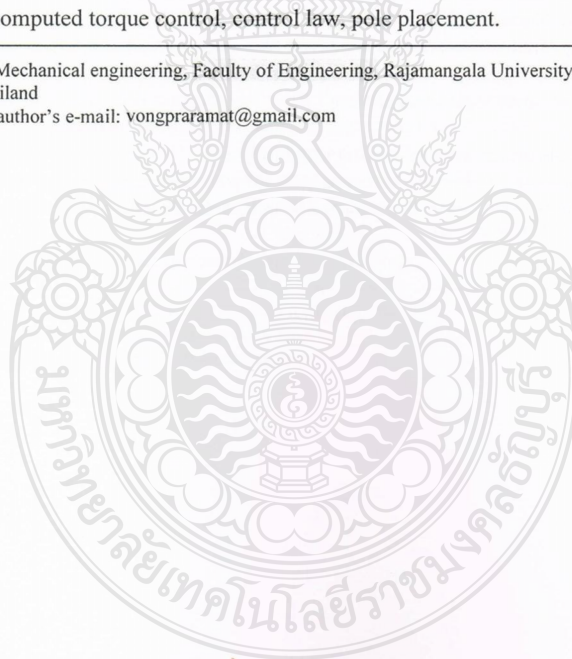
Abstract

The objective of this research is to determine a mathematical model of a robot arm in order to design a computed torque controller to control its motion. A 2-link planar robot arm was studied to find its forward kinematics and dynamic equations and design the computed torque controller. The control law is $\tau = C + G + M[\ddot{q}_d + k_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + k_p(q_d - q)]$, where k_d and k_p are control gains for adjusting the system response of the robot arm. The pole placement method was used for calculating both control gains k_d and k_p . The MATLAB/Simulink was implemented to simulate the robot arm and test the designed controller, meant to control the robot arm by tracking the desired path as sine curve. The experiment shows that the designed controller can control the motion of the robot arm with 2 s. of its settling time and steady state error $\pm 0.2 \times 10^{-3}$ radian.

Keywords: Computed torque control, control law, pole placement.

¹Department of Mechanical engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand

*Corresponding author's e-mail: vongpraramat@gmail.com



การควบคุมแบบคอมพิวทอร์คสำหรับแขนกลแบบ 2 ข้อต่อบนระนาบ

Computed Torque Control for 2-Link Planar Robot

ชนาธิป วงศ์ปรเมษฐ์^{1*} และมนูศักดิ์ จานทอง¹

Chanatip Vongpraramat,^{1*} and Manusak Janthong¹

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand

E-mail: vongpraramat@gmail.com โทร. 084-6562564

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกล เพื่อทดลองตัวควบคุมแบบคอมพิวทอร์ค โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้แขนกลแบบ 2 ข้อต่อบนระนาบ (2-Link planar robot) มาทำการศึกษาและวิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ของแขนกล และออกแบบตัวควบคุมแบบคอมพิวทอร์ค โดยใช้กฎการควบคุม $\tau = C + G + M[\ddot{q}_d + k_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + k_p(q_d - q)]$ ซึ่งมีค่า k_d และ k_p เป็นค่าเกณฑ์ที่ใช้ปรับผลตอบสนองของการเคลื่อนที่ของแขนกล โดยใช้วิธีวางโพล (Pole placement) ในการเลือกค่า งานวิจัยนี้ได้ทำแบบจำลองของแขนกลและทดสอบตัวควบคุมบนซอฟต์แวร์ MATLAB/Simulink โดยกำหนดให้แขนกลเคลื่อนที่ตามเส้นวิถีไซน์ (sine curve) จากผลการทดลองเพื่อหาค่า ω_n จะได้เท่ากับ 8 และค่า $k_d = 16$ ค่า $k_p = 64$ โดยที่ระบบมีค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวเท่ากับ $\pm 0.97 \times 10^{-4}$ เรเดียน ในส่วนผลกระทบเมื่อความยาวของแขนกลเปลี่ยนแปลงจะพบว่าความยาวมีผลต่อการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล ซึ่งทำให้เกิดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว

คำสำคัญ คอมพิวทอร์ค, กฎการควบคุม, วิธีวางโพล

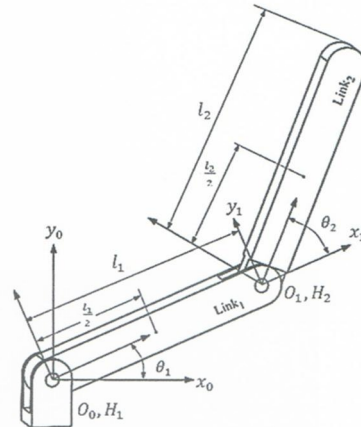
Abstract

The objective of this research is to determine a mathematical model of a robot arm in order to design a computed torque controller to control its motion. A 2-link planar robot arm was studied to find its forward kinematics and dynamic equations and design the computed torque controller. The control law is $\tau = C + G + M[\ddot{q}_d + k_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + k_p(q_d - q)]$, where k_d and k_p are control gains for adjusting the system response of robot arm. The pole placement method was used for calculating both control gains k_d and k_p . The MATLAB/Simulink was implemented to simulate the robot arm and test the designed controller, meant to control the robot arm by tracking the desired path as sine curve. The experiment shows that the designed controller can control the motion of the robot arm with 2 s. of its setting time and steady state error $\pm 0.97 \times 10^{-4}$ radian.

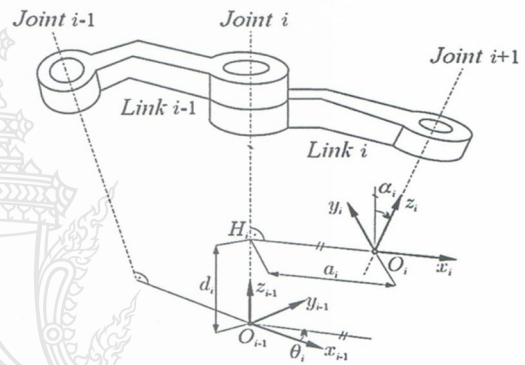
Keywords : computed torque control, control law, pole placement

บทนำ

ในปัจจุบันหุ่นยนต์อุตสาหกรรมได้มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมการผลิต เช่น งานที่ต้องการความแม่นยำ สภาพะวะที่มีความเสี่ยงต่อมนุษย์ หรือมีข้อจำกัดที่มนุษย์ไม่สามารถปฏิบัติงานในด้านนั้นๆ ได้ เช่น ความอ่อนล้า สภาพะวะจิตใจ งานที่เกี่ยวข้องกับสารกัมมันตภาพรังสีหรือสารเคมี เป็นต้น จากข้อจำกัดข้างต้นทำให้มีแนวคิดในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลอย่างง่าย โดยใช้แขนกลแบบ 2 ข้อต่อบนระนาบ (2-Link planar robot) ในการสร้างแบบจำลองเพื่อเป็นต้นแบบในการพัฒนา และเพิ่มประสิทธิภาพให้กับแขนกลต่อไป โดยได้ทำการศึกษาหาสมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ และสมการการเคลื่อนที่ของแขนกล เพื่อใช้ในการควบคุมแขนกลแบบคอมพิวเตอร์ โดยได้ศึกษางานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้อง [6] ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์ทางคิเนแมติกส์และไดนามิกส์ ของแขนกล และการทดสอบการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกล โดยใช้โปรแกรม visual c++ และโปรแกรม Solidwork Cosmos Motion ในการทดสอบความถูกต้องของสมการต่างๆ [5] ได้กล่าวถึงการควบคุมการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมที่สุดของแขนกล เพื่อให้แขนกลเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดโดยใช้เวลาน้อยที่สุด โดยการเคลื่อนที่นี้จะใช้การควบคุมแบบพีไอดี



รูปที่ 1 Panar robot 2 link



รูปที่ 2 Denavit-Hartenberg Parameters

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของ Denavit-Hartenberg

Link i	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	l_1	0	0	θ_1
2	l_2	0	0	θ_2

วิธีการศึกษา

1. สมการฟอร์เวิร์ดคิเนแมติกส์ (Forward kinematics)

ใช้การตั้งแกนสมมุติลงบนแขนกลแบบ Planar robot 2 link ดังในรูปที่ 1 ในการตั้งแกนของแขนกลจะสามารถหาค่าพารามิเตอร์ของ Denavit-Hartenberg ได้ดังตารางที่ 1 โดยที่ค่าพารามิเตอร์สามารถกำหนดได้จากรูปที่ 2 ดังนี้

แทนค่า Transformation matrix ของหุ่นยนต์ตั้งสมการที่ 1

$$T_{i-1}^i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

โดยกำหนดให้ c_i คือ $\cos \theta_i$ และ s_i คือ $\sin \theta_i$

โดยที่ $c_{ij} = c_i c_j - s_i s_j = \cos(\theta_i + \theta_j)$

และ $s_{ij} = s_i c_j + c_i s_j = \sin(\theta_i + \theta_j)$

จะได้

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & l_1 c_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & l_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & l_2 c_{12} \\ s_2 & c_2 & 0 & l_2 s_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

และ

$$T_2^0 = \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 & l_1 c_1 + l_2 c_{12} \\ s_{12} & c_{12} & 0 & l_1 s_1 + l_2 s_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2. สมการการเคลื่อนที่ (dynamics)

สมการการเคลื่อนที่ของแขนกล เป็นการศึกษา การเคลื่อนที่ของแขนกล ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูป สมการ ดังนี้

$$Q = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + F(\dot{q}) + G(q) \quad (2)$$

ในกรณีนี้จะไม่คิดค่าความเสียดทานในข้อต่อของหุ่นยนต์

$$Q = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) \quad (3)$$

โดยที่

q คือ เวกเตอร์ของ Generalized joint coordinates

\dot{q} คือ เวกเตอร์ของ Joint velocities

\ddot{q} คือ เวกเตอร์ของ Joint acceleration

M คือ เมทริกซ์สมมาตร ของ Joint-space inertia

C คือ ค่าความเร่ง Coriolis และ Centripetal effects

F คือ ค่าความเสียดทาน Viscous และ Coulomb friction

G คือ ค่าเนื่องจากน้ำหนักของหุ่นยนต์

Q คือ เวกเตอร์ของ Generalized force

เมื่อ

$$Q = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

จากสมการข้างต้นจะได้

$$\begin{aligned} \tau_1 = & \left(\frac{1}{3}m_1 l_1^2 + m_2 (l_1^2 + l_1 l_2 c_2 + \frac{1}{3}l_2^2) \right) \ddot{\theta}_1 \\ & + m_2 \left(\frac{1}{2}l_1 l_2 c_2 + \frac{1}{3}l_2^2 \right) \ddot{\theta}_2 \\ & - m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - \frac{1}{2}m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_2^2 \\ & + \left(\frac{m_1}{2} + m_2 \right) g l_1 c_1 + m_2 g \frac{l_2}{2} c_{12} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \tau_2 = & \frac{1}{3}m_2 l_2^2 \ddot{\theta}_2 + \frac{1}{2}m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_1^2 \\ & + m_2 \left(\frac{1}{2}l_1 l_2 c_2 + \frac{1}{3}l_2^2 \right) \ddot{\theta}_1 \\ & + m_2 g \frac{l_2}{2} c_{12} \end{aligned} \quad (6)$$

3. การควบคุมแบบคอมพิวทอร์ด (computed torque control)

เป็นการควบคุมแรงบิดของแขนกล โดยมี ความสัมพันธ์ระหว่างสมการการเคลื่อนที่ของแขนกลกับ ตัวควบคุม Computed torque control ดังสมการที่ 7 และมี โมเดลการควบคุมของระบบดังรูปที่ 3

$$\begin{aligned} M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) &= \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \\ &= C + G + M[(\ddot{q}_d) + k_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + k_p(q_d - q)] \end{aligned} \quad (7)$$

จะได้

$$(\ddot{q}_d - \ddot{q}) + k_d(\dot{q}_d - \dot{q}) + k_p(q_d - q) = 0$$

เมื่อ

$$\ddot{e} + k_d \dot{e} + k_p e = 0 \quad (8)$$

โดยที่

$$e = q_d - q$$

$$\dot{e} = \dot{q}_d - \dot{q}$$

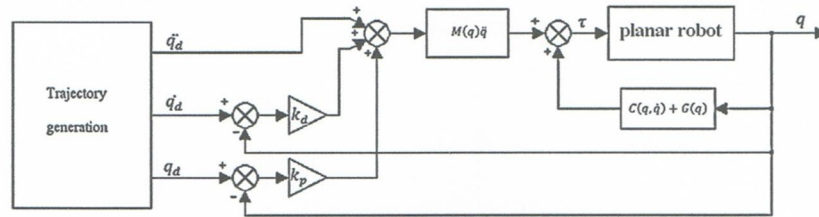
$$\ddot{e} = \ddot{q}_d - \ddot{q}$$

โดยค่า

$$\begin{aligned} M(q)\ddot{q} = & \begin{bmatrix} \frac{1}{3}m_1 l_1^2 + m_2 (l_1^2 + l_1 l_2 c_2 + \frac{1}{3}l_2^2) & m_2 (\frac{1}{2}l_1 l_2 c_2 + \frac{1}{3}l_2^2) \\ m_2 (\frac{1}{2}l_1 l_2 c_2 + \frac{1}{3}l_2^2) & \frac{1}{3}m_2 l_2^2 \end{bmatrix} \ddot{q} \end{aligned} \quad (9)$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} -m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - \frac{1}{2}m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_2^2 \\ \frac{1}{2}m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_1^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} (\frac{m_1}{2} + m_2) g l_1 c_1 + m_2 g \frac{l_2}{2} c_{12} \\ m_2 g \frac{l_2}{2} c_{12} \end{bmatrix} \quad (11)$$



รูปที่ 3 โมเดลการควบคุมแบบคอมพิวทอร์ค

ในการหาค่า k_d และ k_p ใช้วิธี Pole placement โดยกำหนดสมการระบบที่มีผลตอบสนองที่ต้องการ ดังนี้

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = 0 \quad (12)$$

กำหนด $\zeta = 1$ เพื่อให้ทำให้ผลตอบสนองของระบบเป็นแบบ Critically-damped system ดังนั้นสมการที่ 12 เขียนได้ใหม่คือ

$$\ddot{x} + 2\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = 0 \quad (13)$$

โดยค่า ω_n คือค่าคงที่ สำหรับปรับจูน เพื่อให้ระบบที่มีผลตอบสนองที่ต้องการ ดังนั้น $k_d = 2\omega_n$ และ $k_p = \omega_n^2$ เช่น แทนค่า ω_n เท่ากับ 3 จะได้ค่า $k_d = 6$, $k_p = 9$ เพื่อใส่ไปในระบบ

การทดลอง

การทดลองนี้ ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) เพื่อทดสอบหาผลตอบสนองของสมการการเคลื่อนที่ และทดสอบระบบควบคุมแบบคอมพิวทอร์ค โดยได้ทำการทดลองลงบนซอฟต์แวร์ MATLAB/Simulink โดยกำหนดเส้นวิถีการเคลื่อนที่ของปลายแขนเป็นเส้นโค้งไซน์ (sine curve) ดังสมการ $q_d(t) = A \sin(t)$ ได้กำหนดค่า A

เท่ากับ 0.1 โดยภายในซอฟต์แวร์ได้ทำการเขียนแบบจำลองและตัวควบคุมดังรูปที่ 4

กำหนดค่าพารามิเตอร์ภายในของแขนกล

มวลของ link 1 เท่ากับ 16 kg.

มวลของ link 2 เท่ากับ 10 kg.

ความยาว link 1 เท่ากับ 0.43 m.

ความยาว link 2 เท่ากับ 0.40 m.

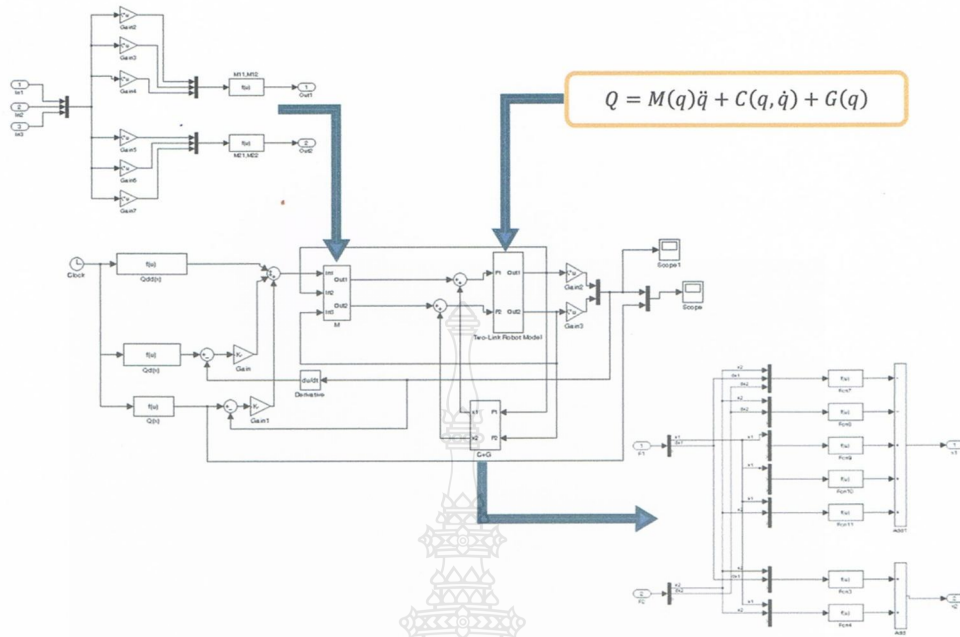
การศึกษาวิจัย

ในการศึกษาวิจัยได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1.

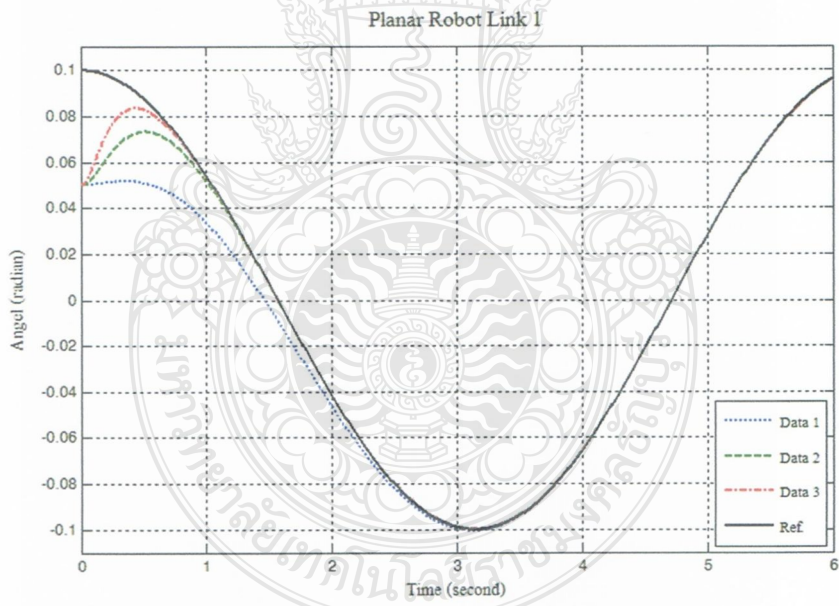
การทดลองเลือกค่า ω_n เพื่อใช้ในการหาค่า k_d, k_p และ 2. การทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของแขนกลเมื่อความยาวของแขนกลเปลี่ยนแปลง

1. การทดลองเลือกค่า ω_n เพื่อใช้ในการหาค่า

k_d, k_p ในการทดลองนี้ได้ตั้งค่าเป้าหมายให้กับแขนกล โดยให้มีการเคลื่อนที่ตามเส้นแนววิถีโค้งไซน์ (sine curve) จากนั้นเลือกค่า ω_n ให้กับระบบ จึงทำการเปรียบเทียบผลตอบสนอง โดยใช้ค่า ω_n จำนวน 3 ค่า คือ 2, 5 และ 8 โดยที่ทั้ง 2 สิ่งนี้จะใช้ค่า ω_n เหมือนกัน โดยผลการทดลองจะแสดงในรูปกราฟ ดังรูปที่ 5-6



รูปที่ 4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และตัวควบคุมแบบคอมพิวเทอร์ค



รูปที่ 5 ผลตอบสนองของ Link 1

กำหนดให้

Data 1 มีค่า $\omega_n = 2$ จะได้ค่า $k_d = 4$ ค่า $k_p = 4$

Data 2 มีค่า $\omega_n = 5$ จะได้ค่า $k_d = 10$ ค่า $k_p = 25$

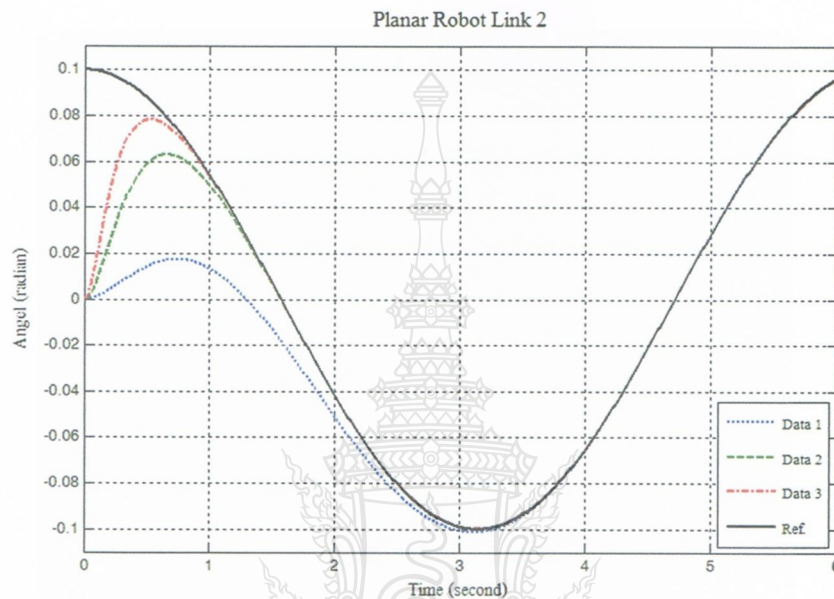
Data 3 มีค่า $\omega_n = 8$ จะได้ค่า $k_d = 16$ ค่า $k_p = 64$

ω_n เท่ากับ 5 จะมีความผิดพลาดอยู่ในช่วง $\pm 1.5 \times 10^{-4}$

radian และค่า ω_n เท่ากับ 8 จะมีความผิดพลาดอยู่ในช่วง

$\pm 0.97 \times 10^{-4}$ radian จากการทดลองจึงสรุปได้ว่าค่า ω_n

เท่ากับ 8 มีผลตอบสนองที่เร็วที่สุดและมีค่าความผิด



รูปที่ 6 ผลตอบสนองของ Link 2

จากกราฟในรูปที่ 5 จะสังเกตเห็นว่าเส้น Data 1 ใช้เวลาประมาณ 3 วินาที จึงจะเข้าสู่เส้นอ้างอิง ในส่วนของเส้น Data 2 ใช้เวลาประมาณ 1.5 วินาที จึงจะเข้าสู่เส้นอ้างอิง และในเส้น Data 3 ใช้เวลาประมาณ 1 วินาที จึงจะเข้าสู่เส้นอ้างอิง

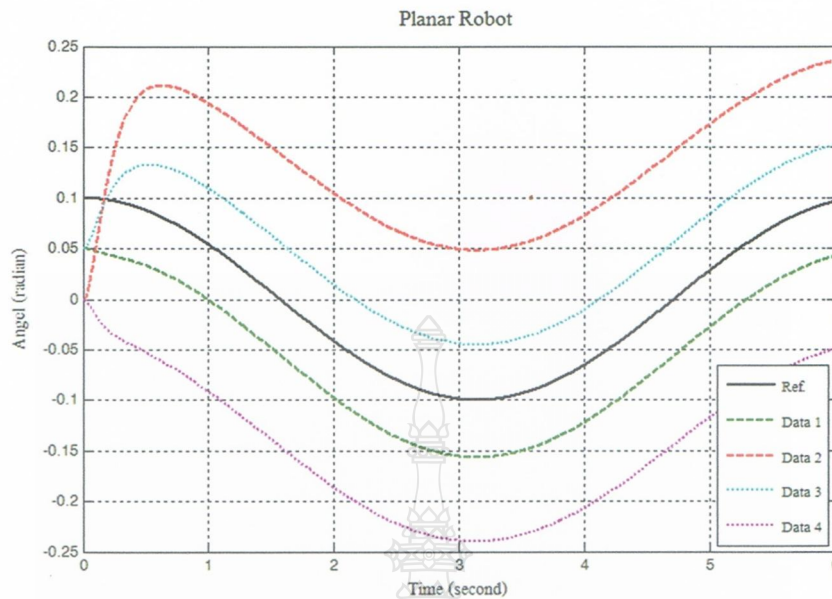
จากกราฟในรูปที่ 6 เส้น Data 1 ใช้เวลาประมาณ 4 วินาที จึงจะเข้าสู่เส้นอ้างอิง โดยที่เส้น Data 2 ใช้เวลาประมาณ 2 วินาที จึงจะเข้าสู่เส้นอ้างอิงและในเส้น Data 3 ใช้เวลาประมาณ 1 วินาที จึงจะเข้าสู่เส้นอ้างอิง

เมื่อทำการเช็คค่าความผิดพลาดเมื่ออยู่ในสภาวะคงตัว (steady state error) จะพบว่า ค่า ω_n เท่ากับ 2 จะมีความผิดพลาดอยู่ในช่วง $\pm 3 \times 10^{-4}$ radian และค่า

พลาตเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวน้อยที่สุดจึงทำการเลือก ω_n เท่ากับ 8

2. การทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของแกนกลเมื่อความยาวของแกนกลมีการเปลี่ยนแปลง

ในการศึกษาวิจัยนี้ ยังคงใช้ตัวควบคุมแบบเดิม และเลือกใช้ค่า ω_n ที่มีผลตอบสนองดีที่สุดมาใช้ในการทดลองโดยค่า ω_n ที่เลือกใช้คือ 8 จะได้ค่า $k_d = 16$ ค่า $k_p = 64$ กำหนดให้ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป โดยปรับเพิ่ม - ลด ความยาวในลิ้งค์ 1 เท่านั้น ได้ใช้ความยาวที่ 0.03 m. ในการปรับเพิ่ม - ลด



รูปที่ 7 ผลการทดลองเมื่อความยาวในลิงค์ 1 เปลี่ยนแปลง

จากกราฟในรูปที่ 7 เส้น Data 1 จะเป็นความยาวที่เพิ่มขึ้นของลิงค์ 1 จะมีค่าคลาดเคลื่อนที่ -0.06 radian เส้น Data 2 จะเป็นความยาวที่เพิ่มขึ้นของลิงค์ 2 จะมีค่าคลาดเคลื่อนที่ 0.14 radian เส้น Data 3 จะเป็นความยาวที่ลดลงของลิงค์ 1 จะมีค่าคลาดเคลื่อนที่ 0.06 radian และในเส้น Data 4 จะเป็นความยาวที่ลดลงของลิงค์ที่ 2 จะมีค่าคลาดเคลื่อนที่ -0.14 radian

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองโดยการทำให้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในซอฟต์แวร์ MATLAB/Simulink โดยใช้ตัวควบคุมแบบคอมพิวทอร์คที่ได้ออกแบบไว้ ในการทดลองได้กำหนดการเคลื่อนที่ตามเส้นแนววิถีโค้งไซน์ (sine curve) การทดลองแรกจะเป็นการเลือกค่า ω_n ให้กับระบบเพื่อให้ผลตอบสนองเป็นไปตามความต้องการ โดยค่า ω_n ที่เลือกมี 3 ค่าคือ 2, 5, 8 rad/s ในการ

ทดลองได้ค่าที่ทำให้ผลตอบสนองดีที่สุดคือ ω_n เท่ากับ 8 ซึ่งทำให้ได้ค่า $k_d = 16$ และค่า $k_p = 64$ โดยระบบมีความผิดพลาดอยู่ในช่วงสภาวะคงตัวเท่ากับ $\pm 0.97 \times 10^{-4}$ radian จะเห็นได้ว่าเมื่อค่า ω_n เพิ่มขึ้นระบบจะมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น ในส่วนการทดลองที่สองได้ทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของแขนกลในลิงค์ที่ 1 เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้น โดยใช้ค่า k_d และ k_p ของการทดลองแรก คือ $k_d = 16$ และค่า $k_p = 64$ ผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อความยาวของแขนกลในลิงค์ที่ 1 มีการเปลี่ยนแปลงไปจากความยาวเดิมที่ได้ออกแบบไว้ในชุดควบคุม จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของแขนกลทั้ง 2 ลิงค์ โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนของแขนกลในลิงค์ 2 จะมีค่ามากกว่าลิงค์ที่ 1 เนื่องจากในลิงค์ 2 จะต้องนำความยาวในลิงค์ 1 เข้ามารวมด้วย แต่ลักษณะการเคลื่อนที่ตามเส้นแนววิถีโค้งที่ได้กำหนดไว้ยังคงเคลื่อนที่ได้เหมือนเดิม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Man Zhihong, 2005. **Robotics**. 2nded. Singapore: Prentice Hall.
- [2] Lung-wen tsai, 1999. **Robot analysis**. United States of America: John wiley & Sons., inc.
- [3] Sciavicco, L. & Siciliano, B., 2000. **Modelling and Control of Robot Manipulator**. 2nded. London: Springer-Verlag.
- [4] James B. Dabney and Thomas L. Harman, 2004. **Masterring Simulink**. United States of America: John wiley & Sons., inc.
- [5] ชนกฤต ภัทรเกษวิทย์ สิ้นชัย ชินวรรัตน์ และ ศิริพรรณ ธงชัย. 2550. การควบคุมการเคลื่อนที่เหมาะสมที่สุดแบบ ฟีดแบ็คแบบกล. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21
- [6] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ ณัฐศร พรหมเพชร. 2551. การวิเคราะห์ทางคิเนแมติกส์และไดนามิกส์ของแขนกล PA10-7C. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22



Assumption University of Thailand
The Council of the Deans of Thailand's Graduate Schools

Certificate

This is to certify that
Chanatip Yongpraramat

has participated and presented a paper at the
 28th National Graduate Research Conference held on the 28th – 29th of June 2013
 at Assumption University of Thailand

K. Phothisitt
Kitti Phothisitti, Ph. D.
 Dean, Graduate Studies
 Assumption University

T. Siwicharn
Asst. Prof. Theathanick Siwicharn, Ph. D.
 President of the Council of the
 Graduate Studies Administrators of Thailand

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล	นายชนาธิป วงศ์ปรเมษฐ์
วัน เดือน ปีเกิด	24 กุมภาพันธ์ 2528
ที่อยู่	239/16 หมู่ที่ 4 ตำบลในเมือง อำเภอเมือง จังหวัดชัยภูมิ 36000
การศึกษา	
พ.ศ. 2546	สำเร็จการศึกษาระดับใบประกอบวิชาชีพ (ปวช.) สาขาช่างยนต์ จากวิทยาลัยเทคนิคชัยภูมิ
พ.ศ. 2548	สำเร็จการศึกษาระดับใบประกอบวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.) สาขาเทคนิคยานยนต์ จากวิทยาลัยเทคนิคชัยภูมิ
พ.ศ. 2551	สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ประสบการณ์ทำงาน	
พ.ศ. 2553 - 2554	รับราชการทหาร ณ กองบัญชาการมณฑลทหารบกที่ 21 ค่ายสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา

