

การออกแบบตัวควบคุมแบบคอมพิวเตอร์ค้ำหัวรับแขนกล
แบบ 3 ข้อต่อบนระนาบ

COMPUTED TORQUE DESIGN FOR 3 - LINK PLANAR ROBOT



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิกรรมศาสตร์ สาขาวิชางणฑล
คณะวิกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลชั้นนำ
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลชั้นนำ

การออกแบบตัวควบคุมแบบคอมพิวเตอร์ค้ำหัวรับแขนกล
แบบ 3 ข้อต่อหน่วยงาน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิกรรมศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาวิกรรมเครื่องกล
คณะวิกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบตัวควบคุมแบบคอมพิวทอร์คสำหรับแขนกล แบบ 3
ข้อต่อบนระนาบ

Computed Torque Design For 3 Link Planar Robot

ชื่อ - นามสกุล

นายชนากิจ วงศ์ประเมิน

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์มนูศักดิ์ งานทอง, Dr.-Ing.

ปีการศึกษา

2555

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการ

(อาจารย์พิพัฒน์ ปราโมทย์, Ph.D.)

กรรมการ

(อาจารย์เกียรติศักดิ์ ศรีตรัษฎาชัย, Ph.D.)

กรรมการ

(อาจารย์ปรัชญา เปรมปรานีรัชต์, Ph.D.)

กรรมการ

(อาจารย์มนูศักดิ์ งานทอง, Dr.-Ing.)

คณะกรรมการศาสตราจารย์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหมาย ผิวสถาด, Ph.D.)

วันที่ 19 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2556

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบตัวควบคุมแบบคอมพิวทอร์ค้ำหัวรับแขนกลแบบ 3 ข้อต่อบนระบบ
ชื่อนักศึกษา	นายชนาธิป วงศ์ประเมษฐ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์มนูศักดิ์ งานทอง, Dr.-Ing.
ปีการศึกษา	2555

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบคอมพิวทอร์ค้ำหัวรับแขนกลแบบ 3 ข้อต่อบนระบบ โดยใช้แขนกลอุตสาหกรรมของ ESHED ROBOTEC รุ่น SCORBOT ER VII ซึ่งเป็นแขนกลที่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าและชุดอัตราทดเกียร์ในการเคลื่อนที่ของแขนกล โดยมีอินโค้ดเดอร์ในการวัดตำแหน่งของการเคลื่อนที่ของแขนกล

โดยการศึกษาการเคลื่อนที่ของแขนกลโดยใช้สมการลากของช่วยในการคำนวณเพื่อสร้างแบบจำลองและออกแบบตัวควบคุมและใช้ซอฟแวร์ MATLAB/Simulink ในการทดสอบตัวควบคุมที่ออกแบบไว้ ได้กำหนดครูปแบบการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเป็น 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 ระบบได้ดีตามเส้นอ้างอิง โดยมีการแก่วงของสัญญาณประมาณ ± 0.00003 เรเดียน และการทดลองแบบที่ 2 พบร่วงการเคลื่อนที่จากจุดสู่จุดเป็นไปตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ แต่มีความคลาดเคลื่อนเมื่ออุ่นที่ ± 0.0015 เเรเดียน และ ส่วนการทดลองจริงกับแขนกลในการทดลองแบบที่ 1 พบร่วงระบบสามารถติดตามเส้นอ้างอิงได้ดี โดยมีการแก่วงของสัญญาณที่ ± 0.013 เเรเดียน ส่วนการทดลองแบบที่ 2 ระบบมีความคลาดเคลื่อนเมื่ออุ่นที่ ± 0.0025 เเรเดียน

คำสำคัญ: แขนกล ตัวควบคุมแบบคอมพิวทอร์ 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 ผู้เขียนขอรับขอบพระคุณ ดร.มนูสักดิ์ งานทอง ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำปรึกษาในการทำวิจัย แนวทางการแก้ปัญหา เทคนิคการปรับแต่งเพื่อให้ผลการวิจัยเป็นไปตามเป้าหมายที่ได้ตั้งไว้ รวมทั้งข้อคิดถ่างๆ ในการทำวิจัย และได้ให้เครื่องมืออุปกรณ์ในการทำวิจัยในครั้งนี้ พร้อมทั้งดูแลและสอบถามถึงความก้าวหน้าของวิทยานิพนธ์ ทำให้ผู้เขียนทำงานได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.พิพัฒน์ ปราโมทย์ ดร.ประชญา เพรอมปราณีรัชต์ และอาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิจากมหาวิทยาลัยหิ惦 ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีตรະกุลชัย ที่ได้ให้คำแนะนำเพิ่มเติม พร้อมทั้งข้อเสนอแนะ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชาศิลกรรมเครื่องกลและบุคลากรที่เกี่ยวข้องทุกท่าน รวมถึงมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลชัญบุรี ที่ได้อีกเพื่ออุปกรณ์เครื่องมือในการทำวิจัย พร้อมทั้งยังอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้เขียนได้ทำวิจัยได้อย่างราบรื่น

สุดท้ายขอรับขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่เคยให้การสนับสนุนในการศึกษา ให้กำลังใจ รวมทั้งกระตุ้นให้การทำวิจัยสำเร็จลงได้ด้วยดี ตลอดจนคณะอาจารย์ พี่ๆ ที่เรียน ปริญญาโท ในภาควิชาศิลกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่เคยให้คำปรึกษา เป็นกำลังใจ และเคยสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์

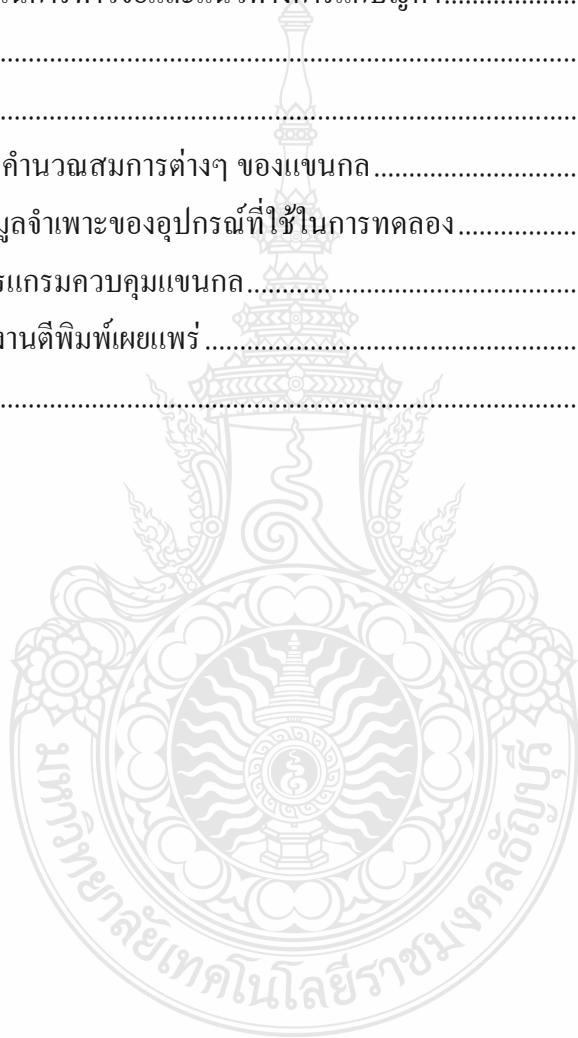
ชนาธิป วงศ์permey

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	๑
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	๑
กิตติกรรมประกาศ	๑
สารบัญ.....	๙
สารบัญตาราง.....	๙
สารบัญภาพ.....	๙
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 จาโคเมียน	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 การทดลองจริงกับแบบกล	49
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	60
5.2 ปัญหาที่พบในการทำวิจัยและแนวทางการแก้ปัญหา.....	61
รายการอ้างอิง.....	62
ภาคผนวก.....	64
ภาคผนวก ก การคำนวณสมการต่างๆ ของแบบกล.....	65
ภาคผนวก ข ข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	81
ภาคผนวก ค โปรแกรมความคุ้ม嫌แบบกล.....	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 การทำงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเบริ่งเทียบกับแบบมนุษย์	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 บล็อกไ/doะแกรมตัวควบคุมแบบคอมพิวทอร์ค	20
2.9 แบบกล SCORBOT ER VII	21
2.10 แกนและข้อต่อของแบบกล	21
2.11 พื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์	23
2.12 ระบบขับเคลื่อน	24
2.13 ชุดขับเคลื่อนและตำแหน่งมอเตอร์ไฟฟ้า.....	25
2.14 มอเตอร์และตำแหน่งเอ็นโคเดอร์	26
2.15 เอ็นโคเดอร์ดิส และ การส่งสัญญาณพลัส	26
2.16 ลิมิตสวิทช์และการวางแผนลิมิตสวิทช์ในหุ่นยนต์ SCORBOT ER VII	27
2.17 การเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับแบบกล	28
2.18 การ์ด DAQ NI PCI-6221	28
2.19 มอเตอร์ไ/drive 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 ลักษณะการทำงานของเส้นพาร์ท	42
3.10 ค่า Trajectory Generator ของแต่ละลิ้งค์	43
4.1 ผลตอบสนองและค่าเป้าหมายของแขนกล	45
4.2 ส่วนขยายของผลตอบสนองและค่าเป้าหมายของแขนกล.....	45
4.3 ผลการทดลองเมื่อระบบเข้าสู่สภาพวงจรตัว.....	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 แขนกล ได้เข้ามายึดทบทวนมากขึ้น ในอุตสาหกรรมในด้านต่างๆ เพื่อใช้ทดแทนแรงงานของมนุษย์ เนื่องจากมนุษย์มีข้อจำกัดในการทำงาน เช่น งานที่เกี่ยวกับสารเคมี หรืออาจก่อให้เกิดโรคร้ายแรง งานที่มีความเสี่ยงสูง และอันตราย เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วแขนกล ได้ถูกนำมาใช้งานด้านสายการผลิตเป็นจำนวนมาก ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมการประกอบรถยนต์ อุตสาหกรรมการประกอบแผ่นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ งานเชื่อมโลหะ หรือแม้แต่งานพ่นสี เป็นต้น ซึ่งประเทศไทยมีการผลิตและส่งออกแขนกลเหล่านี้มีได้เปิดเผยองค์ความรู้ในด้านการผลิตและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับแขนกล รวมทั้งข้อจำกัดในตัวควบคุมและโปรแกรมควบคุมแขนกล ทำให้แขนกลที่มีอยู่ในประเทศไทย เมื่อเกิดเหตุขัดข้องจะต้องเรียกบริษัทผู้ผลิตมาทำการซ่อมบำรุง โดยระยะเวลาในการรอซ่อมบำรุงกินระยะเวลานาน ทำให้เกิดความสูญเสียแก่โรงงานอุตสาหกรรมนั้นๆ ด้วยเหตุผลเหล่านี้ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความจำเป็นในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ โดยผู้วิจัยได้ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่โดยจะศึกษาที่องศาสตร์การเคลื่อนที่ในแต่ละลักษณะของแขนกล เพื่อใช้ทดแทนตัวควบคุมและโปรแกรมการควบคุม

การศึกษานี้จะทำการศึกษาการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล โดยได้ออกแบบตัวควบคุมแบบคอมพิวเตอร์ เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล ในการทำวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นทางเลือกให้กับโรงงานอุตสาหกรรมที่ประสบกับปัญหาดังกล่าวหรือบุคคลทั่วไปที่ต้องการพัฒนาโปรแกรมการควบคุมไว้ใช้งานทั่วไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษาการคำนวณหาสมการจลดาสตร์ไปข้างหน้า (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 หาสมการกลศาสตร์ไปข้างหน้า Forward Kinematics และ สมการการเคลื่อนที่ Dynamics ของแขนกลอุตสาหกรรม โดยกำหนดให้แขนกลมีองศาอิสระเท่ากับ 3 แบบ Planar Robot
- 1.3.3 ออกแบบตัวควบคุมแบบคอมพิวเตอร์ และทดสอบตัวควบคุมด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink
- 1.3.4 ทดลองตัวควบคุมที่ออกแบบกับแขนกล SCORBOT-ER VII ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 เป็นฐานความรู้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายแขนของแขนกลอุตสาหกรรม เพื่อที่ใช้ในการสนับสนุนและแก้ปัญหาของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ รวมทั้งรักษาสภาวะ โครงสร้าง ตัวตรวจรับสัญญาณและการอินเตอร์เฟสของแขนกลอุตสาหกรรม
- 1.4.2 พัฒนาทักษะในการออกแบบตัวควบคุมและการเขียนโปรแกรมในการควบคุมที่ใช้กับแขนกลอุตสาหกรรม
- 1.4.3 ผู้วิจัยคาดหมายว่า งานวิจัยนี้จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาและนำเทคโนโลยีไปปรับปรุงเพื่อให้แขนกลอุตสาหกรรมมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับแบบกลอุตสาหกรรม ที่ใช้ในการคำนวณ โครงการสร้างระบบควบคุม รวมทั้งงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง

2.1 นิยามของหุ่นยนต์ (Robotics Definition) [1]

ในสมัยก่อนหุ่นยนต์เป็นเพียงจินตนาการของมนุษย์ ที่มีความต้องการได้สิ่งใดสิ่งหนึ่งเข้ามาช่วยในการผ่อนแรงจากการที่ทำ หรือช่วยในการปฏิบัติงานที่ยากลำบากเกินขอบเขตความสามารถ และจากจินตนาการได้กลายเป็นแรงบันดาลใจให้มนุษย์คิดประดิษฐ์สร้างสรรค์หุ่นยนต์ขึ้นมา จนกลายเป็นหุ่นยนต์ (Robot) ในปัจจุบัน

คำว่า “Robot” มาจากคำว่า “Robota” ในภาษาเช็ก ซึ่งแปลโดยตรงว่า “การทำงานเสมือนทาง” ถือกำเนิดขึ้นจากครเรฟท์เรื่อง “Rassum's Universal Robots” ในปี ค.ศ. 1920 ซึ่งเป็นบทประพันธ์ของ カラล คาเพก (Karel Capek) เนื้อหาของครเรฟท์มีความเกี่ยวพันกับจินตนาการของมนุษย์ ในการไฟหางานให้มาช่วยในการปฏิบัติงาน การประดิษฐ์คิดค้นสร้างหุ่นยนต์ซึ่งถือกำเนิดขึ้นเพื่อเป็นเสมือนทาสคอยรับใช้มนุษย์ การใช้ชีวิตร่วมกันระหว่างหุ่นยนต์และมนุษย์ดำเนินต่อไปจนกระทั่งหุ่นยนต์เกิดมีความคิด เช่นเดียวกับมนุษย์ การถูกกดขี่บ่มเหงา เช่นทักษะจากมนุษย์ทำให้หุ่นยนต์เกิดการต่อต้านไม่ยอมเป็นเปี้ยล่างอึก ซึ่งครเรฟท์เรื่องนี้ โด่งดังมากจนทำให้คำว่า Robot เป็นที่รู้จักทั่วโลก

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

สมัยโบราณการคูเวลาจะใช้นาฬิกาแಡด เป็นเครื่องบ่งชี้เวลาแต่สามารถใช้ได้เพียงแค่เวลากลางวันเท่านั้น นาฬิกาทรายจะใช้บอกเวลาในเวลากลางคืน จึงได้มีการคิดค้นและประดิษฐ์เครื่องจักรกลสำหรับบอกเวลาให้แก่มนุษย์คือ นาฬิกาน้ำ (Clepsydra) โดย Ctesibius of Alexandria นักฟิสิกส์ชาวกรีกในปี 250 ก่อนคริสต์กาล นาฬิกาน้ำนี้ใช้บอกเวลาแทนมนุษย์ที่แต่เดิมต้องบอกเวลาจากนาฬิกาแಡดและนาฬิกาทราย โดยใช้พลังงานจากการไหหล่องน้ำ เป็นตัวผลักทำให้กลไกของ

นาพิกาน้ำทำงาน และถือเป็นเครื่องจักรเครื่องแรกที่มีนุ่ย์สร้างขึ้นเพื่อใช้สำหรับทำงานแทนมนุษย์ และเมื่อมนุษย์ได้รู้จักและเรียนรู้เกี่ยวกับไฟฟ้า ความคิดสร้างสรรค์ในการควบคุมเครื่องจักร โดยไม่ต้องใช้กระแสไฟฟ้าก็เริ่มขึ้น Nikola Tesla เป็นบุคคลแรกที่สามารถใช้กลไกวิทยุในการควบคุมหุ่นยนต์เรือขนาดเล็กในกรุงนิวยอร์ก ในปี ค.ศ. 1898 ภายในงานแสดงผลงานทางด้านไฟฟ้า

ปี ค.ศ. 1940 - 1950 หุ่นยนต์ชื่อ Alsie The Tortoise ได้ถือกำเนิดขึ้นโดย Grey Walter หุ่นยนต์รูปเต่าสร้างจากมอเตอร์ไฟฟ้านำมาประกอบเป็นเครื่องจักร สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยล้อทั้ง 3 ต่อมาหุ่นยนต์ชื่อ Shakey ได้ถูกสร้างขึ้นให้สามารถเคลื่อนที่ได้ เช่นเดียวกับ Alsie The Tortoise โดย Standford Research Institute: SRI แต่มีความสามารถเหนือกว่าคือ มีความคิดเป็นของตนเอง โดยที่ Shakey จะมีสัญญาณเซนเซอร์เป็นเครื่องบอกสัญญาณในการเคลื่อนที่ไปมา ซึ่งบอกเหนือจากหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ไปมาด้วยล้อแล้ว ในปี ค.ศ. 1960 หุ่นยนต์ที่ชื่อ General Electric Walking Truck ที่สามารถเดินได้ด้วยขา ก็ถือกำเนิดขึ้น มีขนาดโครงสร้างใหญ่โตและหนักถึง 3,000 ปอนด์ สามารถก้าวเดินไปด้านหน้าด้วยขาทั้ง 4 ข้าง ด้วยความเร็ว 4 ไมล์/ชั่วโมง โดยการใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุม การเคลื่อนไหวของ它 General Electric Walk Truck ได้รับการพัฒนาโครงสร้างและศักยภาพโดย วิศวกรประจำบริษัท General Electric ชื่อ Ralph Moser

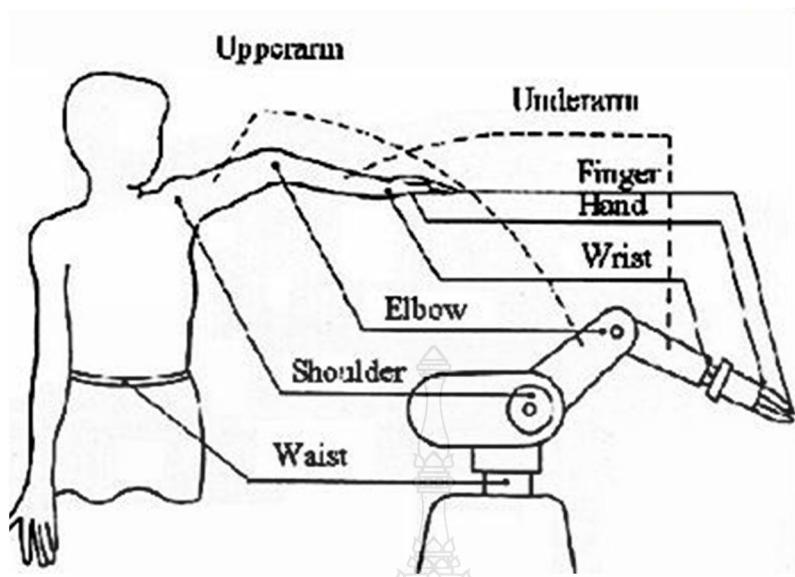
ภายหลังจากที่หุ่นยนต์เริ่มเป็นที่รู้จักไปทั่วโลก หุ่นยนต์เริ่มเข้ามามีบทบาทความสำคัญในด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้องสัมพันธ์กับชีวิตของมนุษย์ โรงงานอุตสาหกรรมเริ่มมีความคิดใช้หุ่นยนต์แทนแรงงานมนุษย์เดิม โดยหุ่นยนต์ด้านอุตสาหกรรมตัวแรกที่ชื่อ Unimates ได้ถือกำเนิดขึ้นในปี ค.ศ. 1950 - 1960 โดย George Devol และ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

ความหมายของ “หุ่นยนต์” โดยหลักทางวิชาการของสถาบันหุ่นยนต์อเมริกา (The Robot of America 1997) ได้ให้ความหมายของคำว่าหุ่นยนต์ไว้ดังนี้ หุ่นยนต์คือ เครื่องจักรใช้งานแทนมนุษย์ ที่ออกแบบให้สามารถตั้งค่าดับการทำงาน การใช้งานได้หลากหลายหน้าที่ ใช้เคลื่อนย้ายวัสดุอุปกรณ์ ส่วนประกอบต่างๆ เครื่องมือหรืออุปกรณ์พิเศษ ตลอดจนการเคลื่อนที่ได้หลากหลาย ตามที่ตั้งค่าดับการทำงาน เพื่อสำหรับใช้ในงานหลากหลายประเภท นิยามโดยตรงของคำว่า หุ่นยนต์ตามหลักทางวิชาการของสถาบันหุ่นยนต์อเมริกา ก็คือเครื่องจักรกลทุกชนิดที่สามารถปฏิบัติงานแทนมนุษย์ได้ทุกประเภท ทั้งทางตรงและทางอ้อม รวมทั้งในงานที่เสียงอันตราย โดยที่มนุษย์ไม่สามารถปฏิบัติงานได้ ตลอดจนการทำงานที่เป็นอัตโนมัติโดยตนเองหรือถูกควบคุมโดยมนุษย์ และสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบการทำงานได้หลากหลาย

2.2 การแบ่งประเภทของหุ่นยนต์ (Industrial Robot Type) [2]

ในยุคเริ่มต้นของการส่งเสริมอุตสาหกรรมในประเทศไทยจะเห็นได้ว่ามีโรงงานต่างๆ เข้ามาตั้งฐานผลิตในเมืองไทยจำนวนมากทำให้เกิดนิคมอุตสาหกรรมขึ้นหลายแห่ง ทั้งนี้เนื่องจากธุรกิจมีนิยามส่งเสริมอุตสาหกรรมที่ชัดเจน ค่าแรงงานถูก ลดรายจ่ายเนื่องจากภัยการนำเข้าของสินค้า และวัตถุคุณภาพดี แต่ ปัจจุบันนี้ค่าแรงขึ้นและสูงกว่าประเทศเพื่อนบ้าน เช่น จีน เวียดนาม อินโดนีเซีย ฯลฯ ในขณะเดียวกันคุณภาพแรงงานไม่ได้มาตรฐาน ขาดความรู้และทักษะที่ทำให้หลายคนต้องหางานใหม่ โดยมีการนำเทคโนโลยีระบบอัตโนมัติ (Automation Technology) เข้ามาใช้งาน เพื่อให้สินค้าสามารถแข่งขันในตลาดโลกได้ทั้งในเรื่องราคา และคุณภาพ โดยเฉพาะในเรื่องคุณภาพ ปัจจุบันโรงงานที่ผลิตสินค้าส่งออกหรือส่งให้กับลูกค้าที่เป็นบริษัทของต่างประเทศมักจะประสบปัญหาในเรื่องคุณภาพ มีทั้ง ผลิตสินค้าไม่ได้มาตรฐานตามที่ลูกค้ากำหนด หรือ ผลิตสินค้าไม่ทันตามกำหนดเวลา อาจเนื่องจากมีการเปลี่ยนรุ่นผลิตภัณฑ์อยู่บ่อยๆ ต้องใช้เวลาในการ Set up ปัจจุบันจึงมีการนำเทคโนโลยีต่างๆ เข้ามาใช้ หนึ่งในเทคโนโลยีที่มีความยืดหยุ่นสูง ได้แก่ หุ่นยนต์อุตสาหกรรม เนื่องจากการเปลี่ยนการทำงานสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนโปรแกรม นอกจากรobotics คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสม่ำเสมอเป็นมาตรฐานเดียวกัน

การทำงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจะเลียนแบบร่างกายของมนุษย์โดยจะเลียนแบบ เลขพาราส่วนของร่างกายที่จะนำໄไปใช้ประโยชน์ ในอุตสาหกรรมเท่านั้น นั่นคือช่วงแขนของมนุษย์ ดังนั้น บางคราวอาจจะได้ยินคำว่าแขนกล ซึ่งก็หมายถึงหุ่นยนต์อุตสาหกรรม การทำงานของหุ่นยนต์ อุตสาหกรรมเปรียบเทียบกับแขนมนุษย์ แสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 การทำงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเปรียบเทียบกับแขนมนุษย์ [2]

อนุวัตัน บำรุงกิจ [3] โครงการสร้างของหุ่นยนต์ สามารถแบ่งออกเป็น 3 ส่วนสำคัญ คือ ส่วนลำตัว (Body) แขน (Arm) และส่วนข้อมือ (Wrist) โดยมากแล้วส่วนลำตัวและแขนจะมีระดับขั้นความเร็ว 3 ระดับ และในส่วนข้อมือจะมีระดับขั้นของความเร็วอยู่ 2-3 ระดับ ที่ปลายของข้อมือจะเป็นวัตถุซึ่งมีความสัมพันธ์กับงานที่หุ่นยนต์ต้องทำ เช่น วัตถุอาจเป็นชิ้นงานที่ต้องการส่งเข้าเครื่องจักรหรืออาจจะเป็นเครื่องมือที่หุ่นยนต์ต้องใช้กระบวนการผลิตบางอย่าง เป็นต้น ส่วนลำตัวและแขนของหุ่นยนต์จะใช้ในการจัดตำแหน่งที่ถูกต้องของวัตถุ และส่วนข้อมือของหุ่นยนต์จะใช้สำหรับจัดทิศทางการวางตัวที่เหมาะสมให้แก่วัตถุ ส่วนลำตัวและแขนของหุ่นยนต์จะต้องสามารถเคลื่อนไหวได้ทั้งสามทิศทางดังต่อไปนี้คือ

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

การที่จะทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ในลักษณะข้างตันได้มีหลายวิธี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของข้อต่อที่ใช้ในการสร้างลำตัวและแขนของหุ่นยนต์ ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดต่อไปเพื่อที่จะทำให้เกิดการจัดทิศทางที่เหมาะสมของวัตถุ

ส่วนประกอบของหุ่นยนต์

- 1) Actuator เป็นอุปกรณ์ หรือชุดขับเคลื่อนเพื่อให้แขนกล หรือหุ่นยนต์เคลื่อนไหว ได้แก่ โมเตอร์ ระบบออกสูบ เป็นต้น
- 2) Manipulators เป็นส่วนประกอบเพื่อช่วยเรื่องของระยะทางเคลื่อนที่ซึ่งประกอบด้วย แขน (Links) และข้อต่อ (Joints)
- 3) End Effectors เป็นส่วนท้ายสุดของแขนกล ไว้ใช้ในการทำงานต่างๆ เช่น หยิบจับ สิ่งของ กัด กลึง เชื่อม ขึ้นงาน เป็นต้น
- 4) Sensor เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบตำแหน่ง หรือข้อมูลที่ใช้ตรวจวัด
- 5) Power Supply เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ต่างๆ ของแขนกล ไม่ว่าจะเป็น กระแสไฟฟ้า หรือวัลว์ที่ควบคุมระบบออกสูบ
- 6) Controller เปรียบเสมือนสมองของมนุษย์ ที่ใช้สำหรับควบคุมระบบต่างๆ ให้ทำงาน เป็นไปตามต้องการ โดยสั่งการไปยังชุดขับเคลื่อน
- 7) Program เป็นการกำหนดขั้นตอนต่างๆ ของระบบ

2.2.1 การแบ่งชนิดของหุ่นยนต์

โดยทั่วไปการแบ่งชนิดของหุ่นยนต์จะแบ่งตามลักษณะ ได้ 3 ลักษณะด้วยกันคือ 1) ลักษณะ การเคลื่อนที่ (Drive Technologies) 2) ลักษณะรูปทรงของที่ทำ (Envelop Geometries) 3) ลักษณะของ การควบคุมการเคลื่อนที่ (Motion Control Method) ดังนี้

1) ลักษณะการเคลื่อนที่ (Drive Technologies)

การขับเคลื่อนแขนกลขึ้นอยู่กับพลังงานที่จะขับเคลื่อน โดยทั่วไปที่ใช้กันมากคือ การ ขับเคลื่อนโดยใช้พลังงานไฟฟ้า ไฮโตรลิกส์ และนิวเมติก โดยที่ใช้งานมากที่สุดและได้รับความนิยม ทั้งในด้านการศูนย์แลรักษา การใช้งาน การควบคุม คือใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อน ขับเคลื่อนด้วย โมเตอร์ชนิดควบคุมตำแหน่ง (DC Servo Motor) หรือโมเตอร์แบบสเต็ป (DC Stepping Motor) แต่ อย่างไรก็ตามงานที่ต้องการใช้แรงมากหรือมีโหลดหนักๆ ก็ยังมีความจำเป็นที่ต้องใช้การขับเคลื่อน ด้วยไฮโตรลิก รวมทั้งบริเวณการทำงานที่ใช้การขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าหรือไฮโตรลิก ก็ยังมีความจำเป็น ในขั้นตอนที่ต้องใช้ระบบนิวเมติก เข้ามาช่วย เช่น การเปิดปิดมือจับ (Gripper)

2) ลักษณะรูปทรงของงาน (Work Envelop Geometries)

ส่วนประกอบของแขนกลที่เรียกว่ามือจับนั้น จะมีคติดกับข้อมือ (Wrist) แขนจะทำงาน ลักษณะรูปทรงจำกัด ตำแหน่งที่จะจับนั้นอยู่ในลักษณะ 3 มิติ ซึ่งข้อมือจะถ่ายโอนตำแหน่งมาจากจุด

ต่อทั้ง 3 จุด ของแขนกล จุดแรกเรียกว่า แกนหลัก (Major Axes) จะไปทางตัวแน่นที่จะจับเมื่อเทียบกับ แขนของมนุษย์ก็คือส่วนไหล่ (Shoulder) ส่วนจุดต่อรองลงไป (Minor Axes) จะไปทางตัวแน่นที่ แน่นอนจุดนี้ก็คือ ส่วนของข้อศอกนั้นเอง (Elbow) ส่วนจุดสุดท้ายก็คือข้อมือ (Wrist) ก็คือตัวแน่นที่ แน่นอน การทำงานของจุดต่อต่างๆ จะเรียงลำดับกันทำให้แขนกลทำงานได้ 3 มิติ อย่างไรก็ตามการ ทำงานของจุดต่อแขนกลที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม ขึ้นพื้นฐานแบ่งการทำงานออกเป็น 2 แบบด้วยกัน ดังตารางที่ 2.1

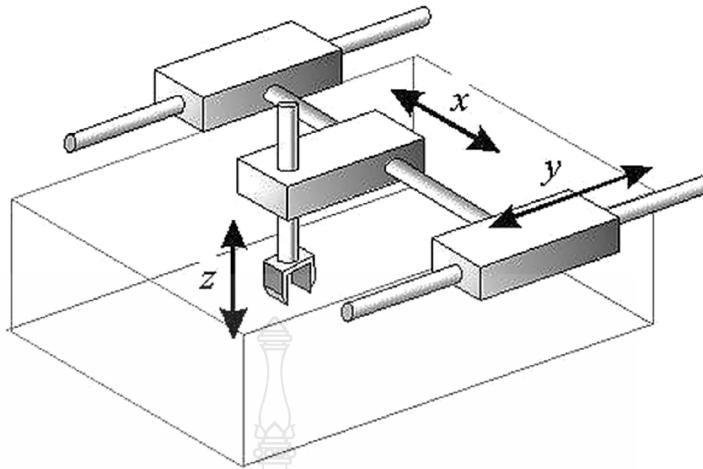
ตารางที่ 2.1 ลักษณะการทำงานของจุดต่อ (Type of Robot Joint)

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

แขนทั้ง 3 ของหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่เป็นแบบเชิงเส้น (Prismatic) โครงสร้างมีลักษณะ คล้าย Overhead Crane จะเรียกว่าเป็นหุ่นยนต์ชนิด Gantry แต่สำหรับหุ่นยนต์ไม่มีขาตั้งหรือขาเป็นแบบอื่น เรียกว่า ชนิด Cartesian



ภาพที่ 2.2 Cartesian Robot [4]

ข้อดี

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

ข้อเสีย

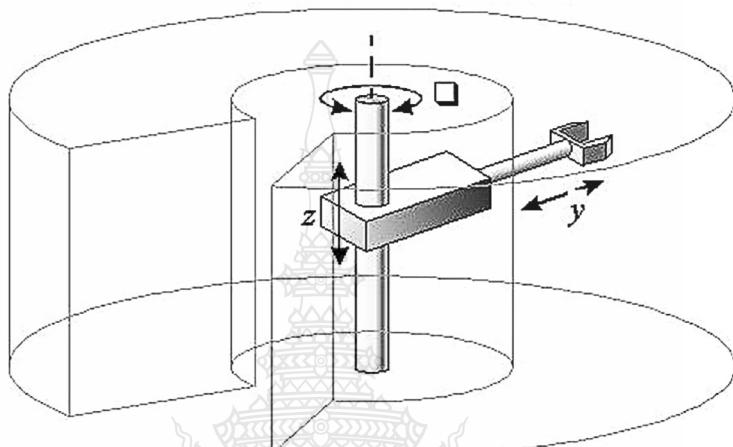
- 1) ต้องการพื้นที่ติดตั้งมาก
- 2) บริเวณที่หุ่นยนต์เข้าไปทำงานได้ จะเล็กกว่าขนาดของตัวหุ่นยนต์
- 3) ไม่สามารถเข้าถึงวัสดุจากทิศทางข้างได้
- 4) แกนแบบเชิงเส้นจะ Seal เพื่อป้องกันฝุ่นและของเหลวได้ยาก

การประยุกต์ใช้งาน

เนื่องจากโครงสร้างมีความแข็งแรงตลอดแนวการเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงเหมาะสมกับงานเคลื่อนย้ายของหนักๆ หรือเรียกว่างาน Pick-and-Place เช่น ใช้โหลดชิ้นงานเข้าเครื่องจกร (Machine Loading) ใช้จัดเก็บชิ้นงาน (Stacking) นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในงานประกอบ (Assembly) ที่ไม่ต้องการเข้าถึงในลักษณะที่มีมุมหมุน เช่น ประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และงาน Test ต่างๆ

2. Cylindrical Robot

หุ่นยนต์ประเภทนี้จะมีแกนที่ 2 (ไอล์) และแกนที่ 3 (ข้อศอก) เป็นแบบ Prismatic ส่วนแกนที่ 1 (เอว) จะเป็นแบบหมุน (Revolute) ทำให้การเคลื่อนที่ได้พื้นที่การทำงานเป็นรูปทรงกรวยออกดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 Cylindrical Robot [4]

ข้อดี

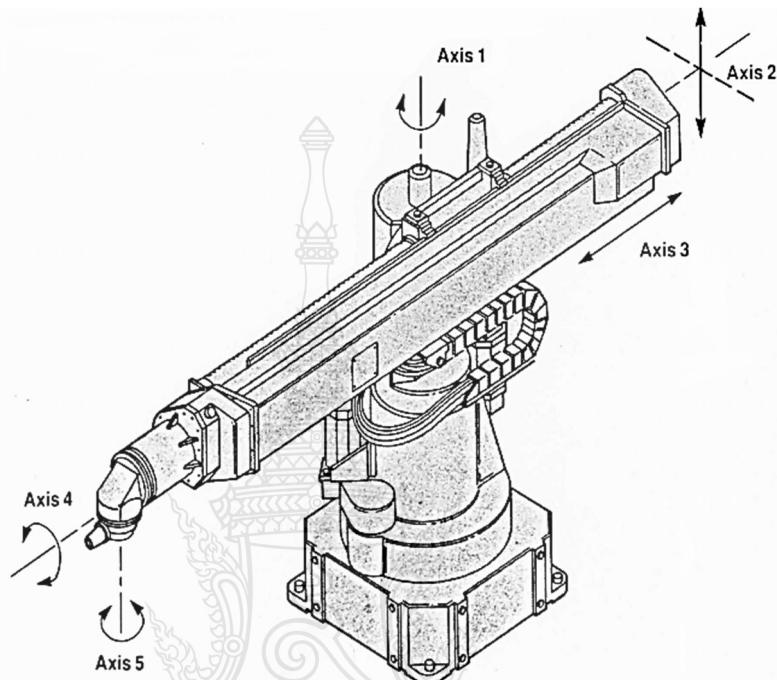
- 1) มีส่วนประกอบไม่ซับซ้อน
- 2) การเคลื่อนที่สามารถเข้าใจได้ง่าย
- 3) สามารถเข้าถึงเครื่องจักรที่มีการเปิด-ปิด หรือเข้าไปในบริเวณที่เป็นช่องหรือโพรงได้ง่าย (Loading) เช่น การโหลดชิ้นงานเข้าเครื่อง CNC

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) และส่วนประกอบที่ซับซ้อน
- 2) การเคลื่อนที่และระบบควบคุมมีความซับซ้อนขึ้น

การประยุกต์ใช้งาน

ใช้งานที่มีการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (Vertical) เพียงเล็กน้อย เช่น การโหลดชิ้นงานเข้าออกจากเครื่องปั๊ม (Press) หรืออาจใช้งานเชื่อมจุด (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 และขึ้นลง ได้รวดเร็ว
- 2) มีความแม่นยำสูง

ข้อเสีย

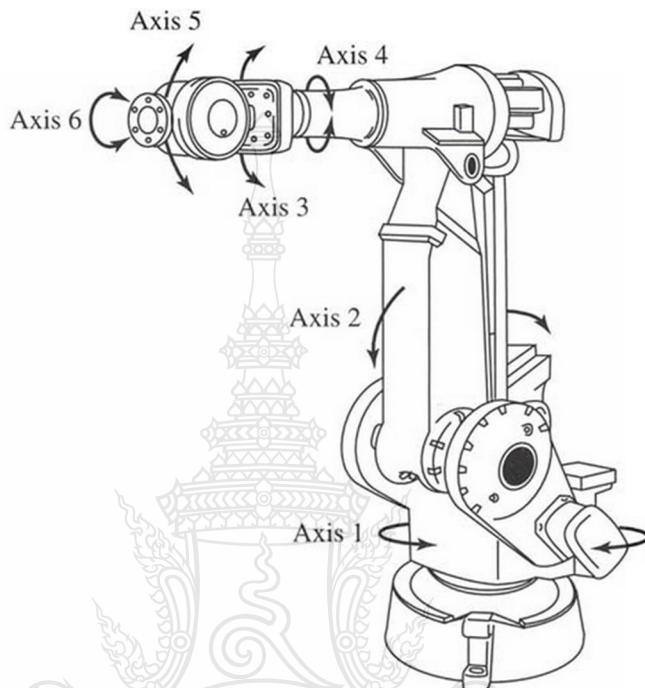
- 1) มีพื้นที่ทำงานจำกัด
- 2) ไม่สามารถหมุน (Rotation) ในลักษณะมุมต่างๆ ได้
- 3) สามารถยกน้ำหนัก (Payload) ได้ไม่มากนัก

การประยุกต์ใช้งาน

เนื่องจากการเคลื่อนที่ในแนวระนาบและขึ้นลง ได้รวดเร็ว จึงเหมาะสมกับงานประกอบชิ้นส่วนทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งต้องการความรวดเร็วและการเคลื่อนที่ที่ไม่ต้องการการหมุนมากนัก แต่จะไม่เหมาะสมกับงานประกอบชิ้นส่วนทางกล (Mechanical Part) ซึ่งส่วนใหญ่การประกอบจะอาศัยการหมุน (Rotation) ในลักษณะมุมต่างๆ นอกจากนี้ SCARA Robot ยังเหมาะสมกับงานตรวจสอบ (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) เนื่องจากทุกแกนจะเคลื่อนที่ในลักษณะของการหมุนทำให้มีความยืดหยุ่นสูงในการเข้าไปปั้งจุด ต่างๆ
- 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) โครงสร้างไม่มีน้ำหนักตลอดช่วงการเคลื่อนที่ เพราะบริเวณขอบ Work Envelope ปลายแขนจะมีการสั่น ทำให้ความแม่นยำลดลง

การประยุกต์ใช้งาน

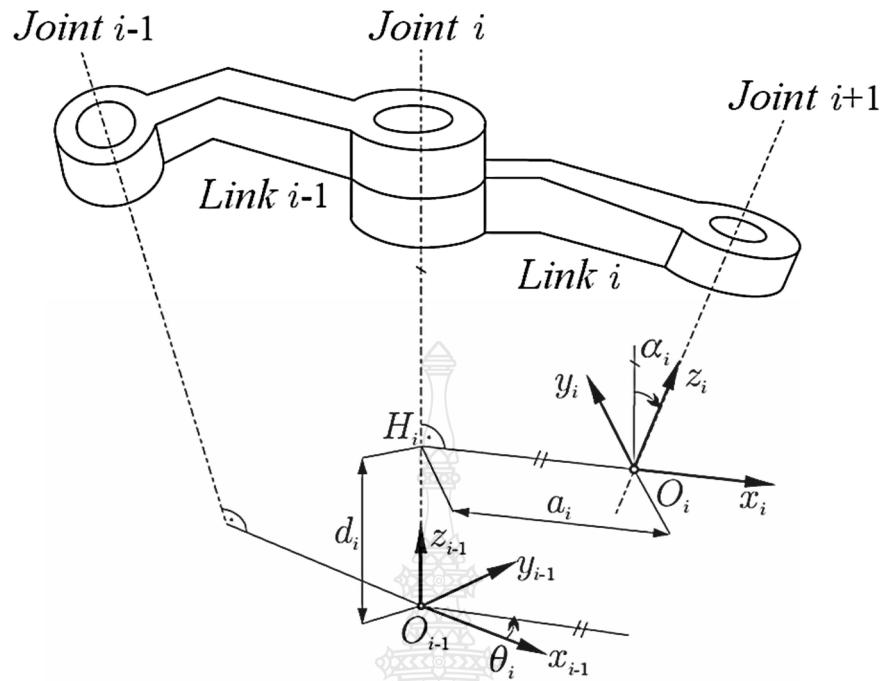
หุ่นยนต์ชนิดนี้สามารถใช้งานได้กว้างขวาง เพราะ สามารถเข้าถึงตำแหน่งต่างๆ ได้ดี เช่น งานเชื่อม งานเชื่อมจุด งานยกของ งานตัด งานพากาว งานที่มีการเคลื่อนที่ยากๆ เช่น งานพ่นสี งานซีล ฯลฯ

2.2.2 แบ่งตามวิธีการควบคุมการเคลื่อนที่ (Motion Control)

การแบ่งแยกชนิดของแขนกลแบบนี้ เป็นการแบ่งชนิดของแขนกลด้วยวิธีการควบคุมการเคลื่อนที่ พื้นฐานการเคลื่อนที่แบ่งได้ 2 แบบ ด้วยกันคือ แบบที่ 1 เป็นการควบคุมการเคลื่อนที่แบบจุดต่อจุด (Point to Point Method) จะเป็นการเรียงลำดับให้พื้นที่งานเป็นจุด แบบที่ 2 เป็นการควบคุมการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง (Continuos Path Motion, Controlled Path Motion) สรุปว่าปลายสุดของแขนกลเคลื่อนที่ลักษณะ 3 มิติ ควบคุมความเร็วและทิศทางได้

2.3 จลดาสตร์เกี่ยวกับตำแหน่งของแขนกล (Kinematics Manipulator Position)

จลดาสตร์ (Kinematics) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของข้อแขนกล (Link of Manipulator) ในการวิเคราะห์จลดาสตร์ไปข้างหน้า (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 ในการวิเคราะห์ฟอร์เวิร์สกินแมติกส์

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 $\sin \theta_i$

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

จากสมการที่ 2.1 จะได้ เมตริกซ์การหมุน (Rotation Matrix) และเวกเตอร์การเคลื่อนที่ (Translation Matrix)

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

2.4 จาโคเบียน (Jacobian)

จาโคเบียน (Jacobian) คือ เมตริกที่ใช้ในการแปลงความเร็วของแต่ละข้อต่อ (Joint Space) ให้เปลี่ยนเป็นความเร็วในการเคลื่อนที่ใน เวิร์คสเปซ (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 $\bar{z}_0 = [0 \ 0 \ 1]^T$

$$\bar{z}_{i-1} = {}^0 R {}^1 R {}^1 {}^2 R \dots {}^{i-3} {}^{i-2} R {}^{i-2} {}^{i-1} R \bar{z}_0 \quad (2.5)$$

2.5 พลศาสตร์ (Dynamics)

เป็นการศึกษาการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงตัน ซึ่งมีความจำเป็นต้องทราบค่าคุณสมบัติของวัตถุนั้น เช่น มวล (Mass) โมเมนต์เรียงเฉื่อย (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 สมการลากของ (Lagrange's Equations)

สมการลากของของการเคลื่อนที่เป็นวิธีการที่ถูกใช้ในการหาสมการการจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทางกลศาสตร์ โดยที่สมการลากของและการเคลื่อนที่สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการได้ดังนี้

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

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

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

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

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

Generalized Force Q_i สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

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

โดยที่ N, \bar{F}, \bar{r} คือ จำนวนอนุภาคหรือวัตถุแกร่งในระบบ เวกเตอร์ของแรงที่กระทำต่ออนุภาคหรือวัตถุแกร่งในระบบ และเวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคหรือวัตถุแกร่งในระบบ 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 ค่านี่องจากน้ำหนักของหุ้นยนต์
- Q คือ เวกเตอร์ของ Generalized Force

เมื่อ

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

Manipulator Inertia Matrix

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

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

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

2.6 คอมพิวทอร์ค คอนโทรล (Computed Torque Control) [8]

จะเป็นการศึกษาทางพลศาสตร์ อีกครั้งลักษณะหนึ่งของแขนกล ที่ประกอบไปด้วยฟังชันแบบไม่เชิงเส้น ในตำแหน่งของ Joint และความเร็วต่างๆ โดยกฎการควบคุมแบบคอมพิวทอร์ค สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการ 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

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

โดยที่

$$e = (q_d - q)$$

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

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

จากสมการที่ 2.16 แทนค่าจะได้

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

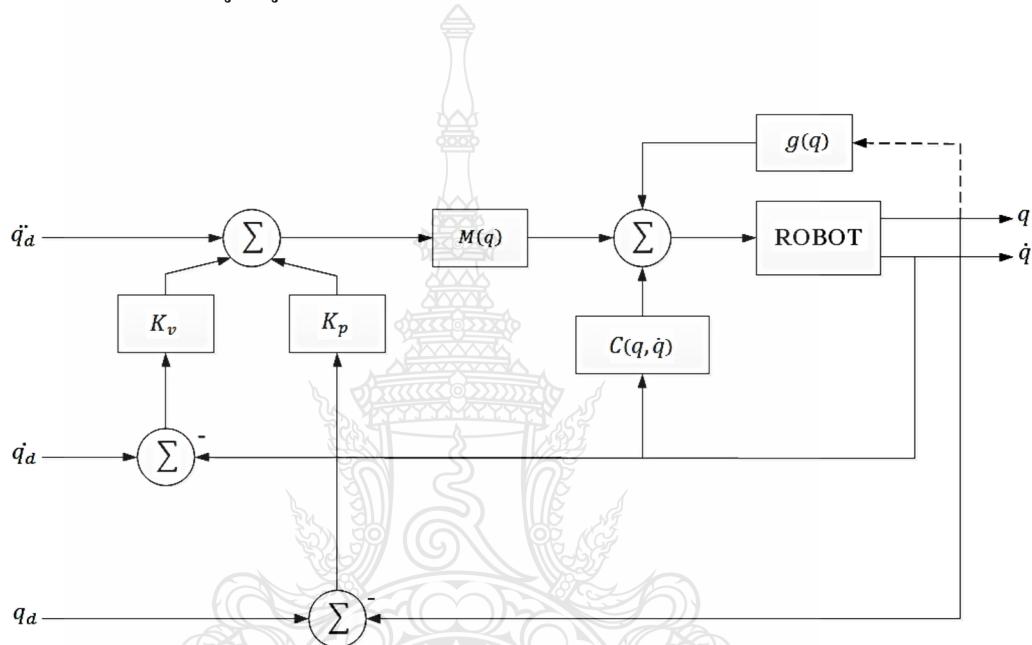
โดยค่า k_d, k_p ที่ใส่เข้าไปในระบบจะเป็นการควบคุมแบบ PD Type จะใช้วิธี Pole Placement โดยกำหนดให้ระบบมีผลตอบสนองที่ต้องการ ดังสมการที่ 2.18

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

กำหนด $\xi = 1$ เพื่อทำให้ผลตอบสนองของระบบเป็นแบบ Critically Damp System ดังนั้น ระบบที่ต้องการสามารถเขียนได้ใหม่เป็น

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

โดยจะเขียนให้อยู่ในรูปของบล็อกไซด์แกรม ได้ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 บล็อกไซด์แกรมตัวควบคุมแบบคอมพิวเตอร์

2.7 โครงสร้างของระบบ

จะเป็นการอธิบายถึงโครงสร้างหุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดลองและอุปกรณ์ต่างๆ ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เพื่อให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ได้แก่

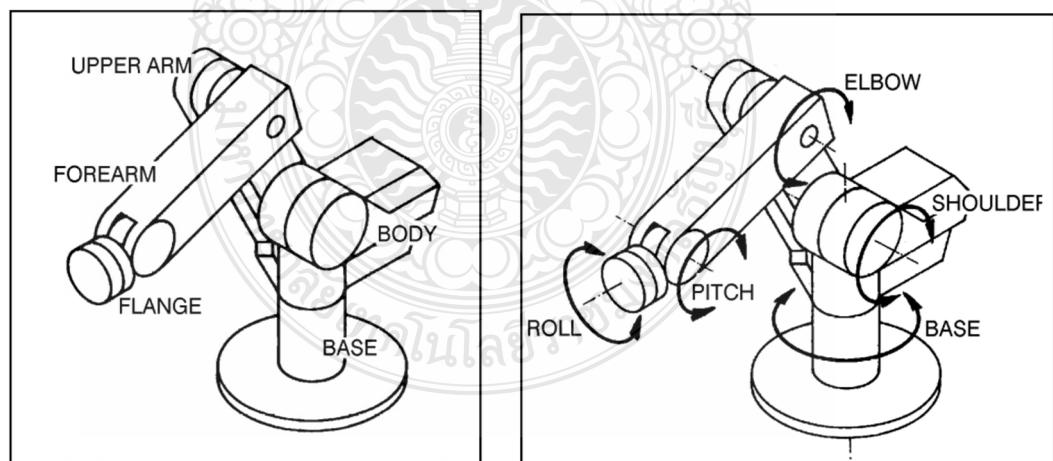
2.7.1 หุ่นยนต์อุตสาหกรรม (แขนกล) [9]

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

มีน้ำหนักรวม 30 kg ในภาพที่ 2.10 จะแสดงให้เห็นว่าในตัวหุ่นยนต์มีระบบภายในของแขนกลอย่างไร



ภาพที่ 2.9 แขนกล SCORBOT ER VII



ภาพที่ 2.10 แกนและข้อต่อของแขนกล [9]

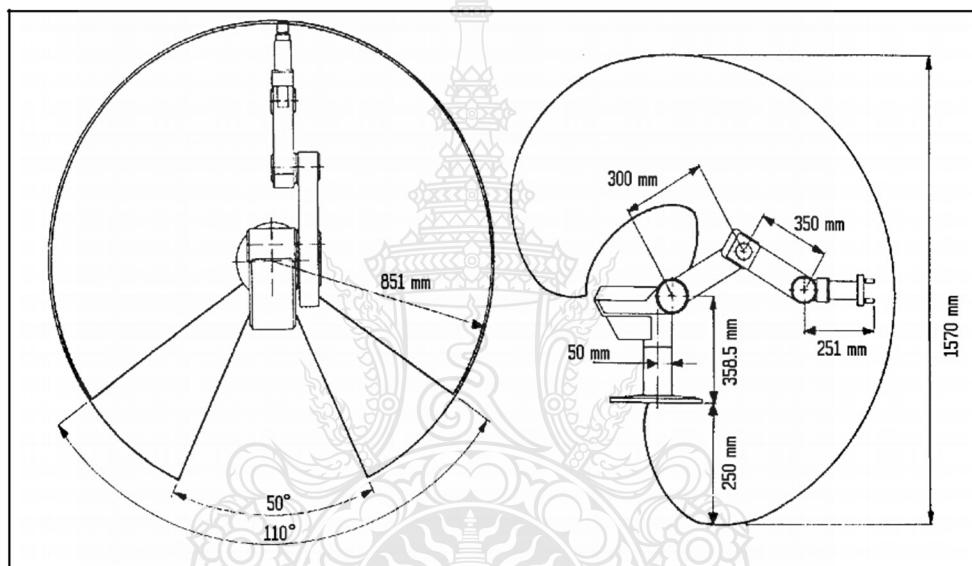
ตารางที่ 2.2 รายละเอียดของชุดขับเคลื่อน [7]

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

โดยตัวหุ่นยนต์มีพื้นที่การทำงาน (Work Envelope) ตามความยาวของแต่ละแกนและหมุนได้ตามองศาในแต่ละจุดเชื่อมต่อ โดยตารางที่ 2.3 และภาพที่ 2.11

ตารางที่ 2.3 องศาการหมุนในแต่ละแกนของหุ่นยนต์ [9]

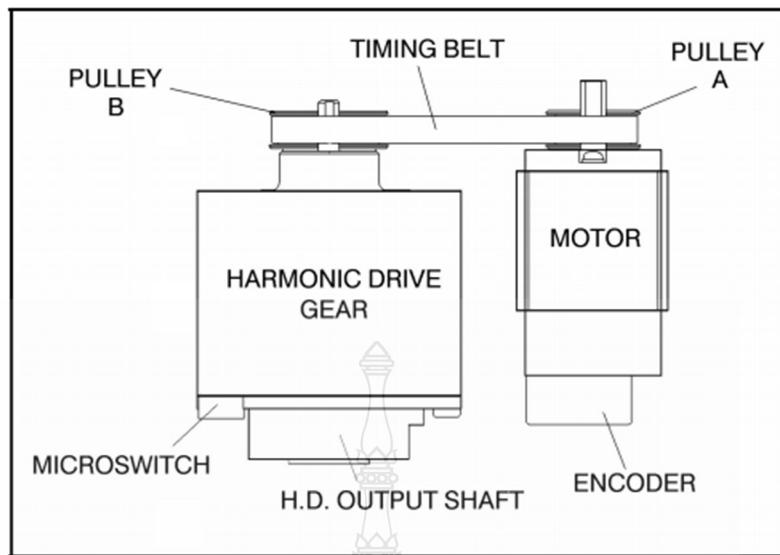
Axis Movement	Maximum Degrees
Axis 1 : Base rotation	250° , 310° user programmable
Axis 2 : shoulder rotation	170°
Axis 3 : Elbow rotation	225°
Axis 4 : Wrist pitch	180°
Axis 5 : Wrist roll	360°



ภาพที่ 2.11 พื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ [9]

2.7.2 ระบบขับเคลื่อน

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

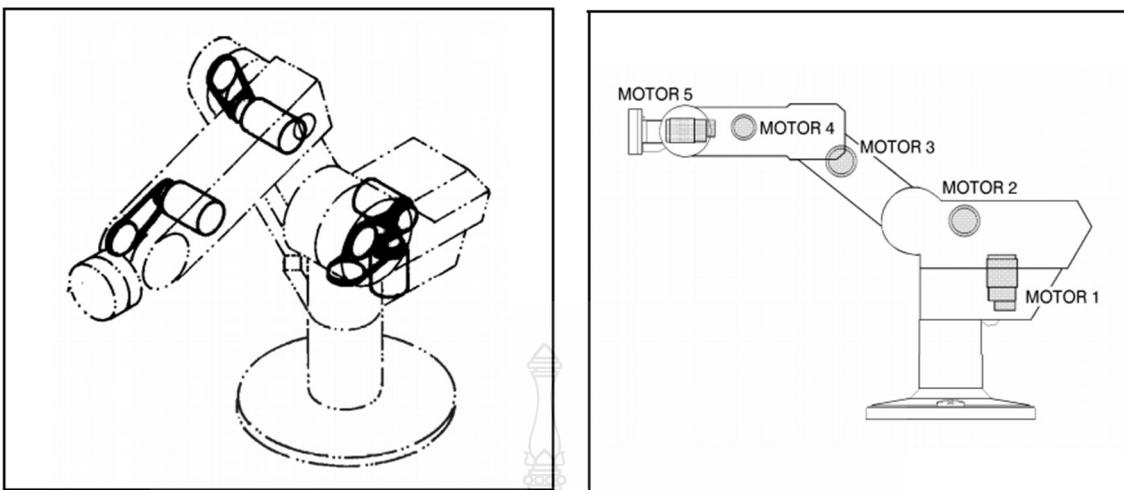


ภาพที่ 2.12 ระบบขับเคลื่อน [9]

ตารางที่ 2.4 ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ [9]

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

ลักษณะการวางแผนของมอเตอร์และชุดขับเคลื่อนจะแยกออกเป็น 2 ลักษณะ ลักษณะที่ 1 โดย แกนที่ 1-4 จะมีมอเตอร์ไฟฟ้าและชุด Harmonic Drive Gears ส่วนลักษณะที่ 2 แกนที่ 5 จะมีเฉพาะ มอเตอร์ไฟฟ้า ดังแสดงในภาพที่ 2.13



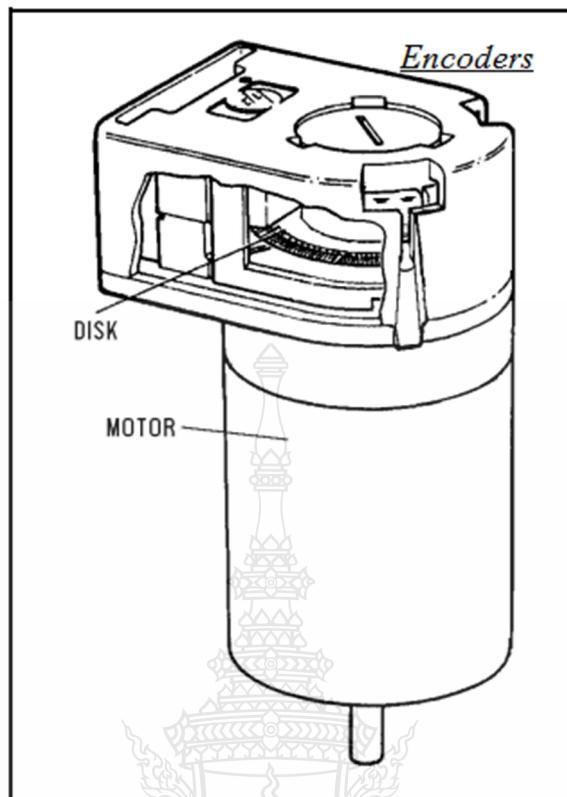
ภาพที่ 2.13 ชุดขับเคลื่อนและตำแหน่งมอเตอร์ไฟฟ้า [9]

2.7.3 ตำแหน่งและปีกจำกัดของแขนกล

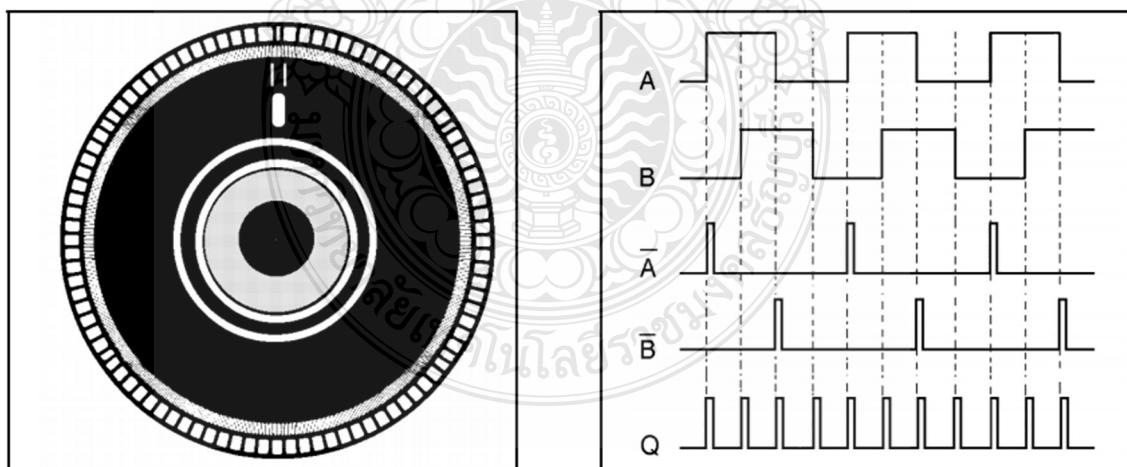
ในหุ่นยนต์อุตสาหกรรม หุ่น SCORBOT ER VII จะมีการบอกตำแหน่งของแขนกลและปีกจำกัดการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ โดยการบอกตำแหน่งจะใช้ เอ็นโคเดอร์ (Encoder) และการจำกัดการเคลื่อนที่จะใช้ ลิมิต สวิทช์ (Limit Switches)

1) เอ็นโคเดอร์ (Encoders)

เอ็นโคเดอร์ เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดรูปแบบหนึ่ง ซึ่งมีความสำคัญมากใช้ในการวัดมุมเพลาของมอเตอร์ เอ็นโคเดอร์ ประกอบด้วย ajan mun และอุปกรณ์ตรวจวัด โดยajan mun จะมีช่องเล็กๆ เมื่อเพลากองมอเตอร์หมุนจะทำให้ajan mun ไปตัดดำเนลงของอุปกรณ์ตรวจวัด ทำให้ชุดรับแสงมีการรับสัญญาณเป็นช่วงๆ จึงทำให้สัญญาณที่ได้มีลักษณะเป็นพัลส์ ซึ่งสัญญาณพัลส์ที่ได้จะแปรผันตรงกับการหมุนของเพลากองมอเตอร์ ซึ่งมีอยู่ 2 ชนิด คือ 1) เอ็นโคเดอร์ อินคริเมนต์ (Incremental Encoder) โดยทั่วไปเรียกว่า เอ็นโคเดอร์แบบ โรตารี (Rotary Encoder) เป็นเอ็นโคเดอร์แสดงความเร็ว สัญญาณที่ได้จะเป็นสัญญาณแบบดิจิตอล (Digital) ง่ายต่อการแปรผล 2) เอ็นโคเดอร์แบบสัมบูรณ์ (Absolute Encoder) หรือโดยทั่วไปเรียกว่า โพเทนชิโอมิเตอร์ (Potentiometer) โดยทั่วไปแล้วการทำงานคล้ายกับเอ็นโคเดอร์แบบ โรตารี แต่สัญญาณที่ได้จะเป็นเลขฐานสอง (Binary) การใช้งานจะยากกว่าเอ็นโคเดอร์แบบ โรตารี แต่เอ็นโคเดอร์ชนิดนี้จะให้ความเที่ยงตรงและสามารถบอกได้ทุกตำแหน่งของการเคลื่อนที่ ดังแสดงในภาพที่ 2.14 และภาพที่ 2.15



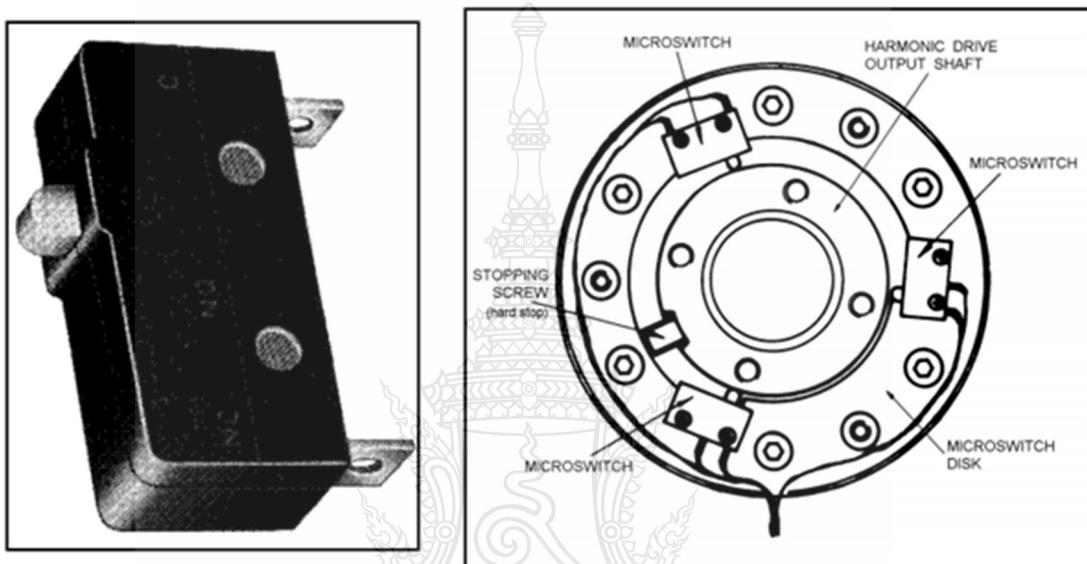
ภาพที่ 2.14 มอเตอร์และตัวแหน่งอีนโค้ดเดอร์ [9]



ภาพที่ 2.15 เอ็นโค้ดเดอร์ดิส และ การส่งสัญญาณพัลส์ [9]

2) ลิมิตสวิทช์ (Limit Switches)

เป็นสวิทช์ที่จำกัดระยะทาง การทำงานจะอาศัยแรงจากภายนอกกระทำ เช่น วางแผนทันที ปุ่มกดหรือลูกเบี้ยวมาชนที่ปุ่มกด และเป็นผลทำให้หน้าสัมผัสที่ต่ออยู่กับก้านชน เปิด-ปิด ตามจังหวะของการชน ลักษณะของลิมิตสวิทช์และการวางแผนลิมิตสวิทช์ในหุ่นยนต์ SCORBOT ER VII ดังแสดงในภาพที่ 2.16

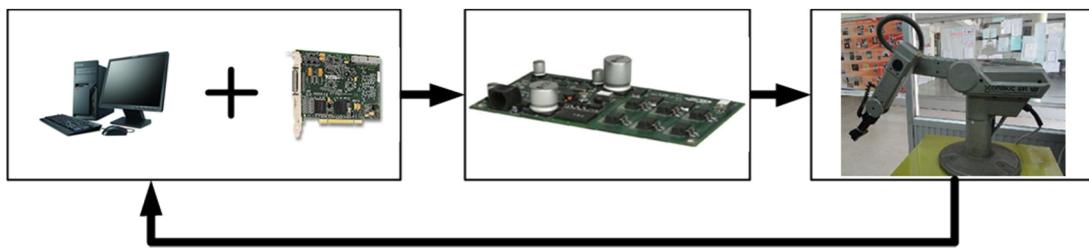


ภาพที่ 2.16 ลิมิตสวิทช์และการวางแผนลิมิตสวิทช์ในหุ่นยนต์ SCORBOT ER VII [20]

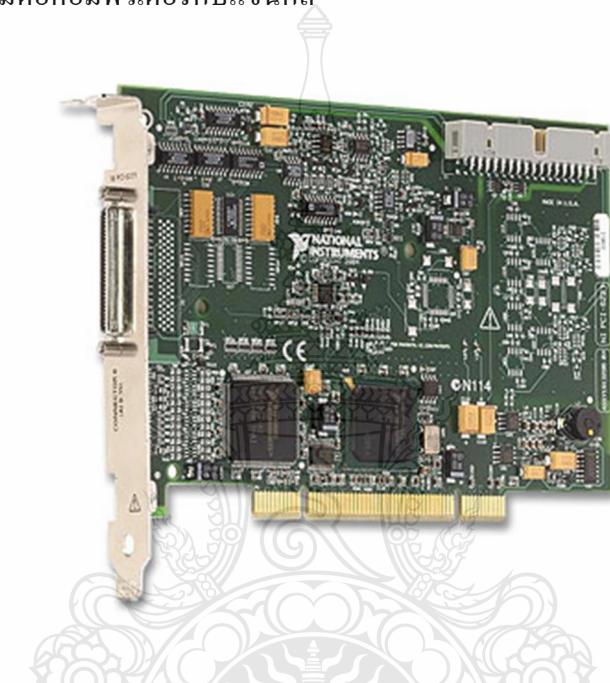
2.8 การควบคุม (Controller)

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ใช้การควบคุมหุ่นยนต์แบบ ควบคุมแรงบิด (Computed Torque) โดยมีส่วนประกอบของการควบคุม 3 ส่วน อันได้แก่ คอมพิวเตอร์ ชุดขับเซอร์โวมอเตอร์ และแขนกล อุตสาหกรรม (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 โดยมีการแปลงสัญญาณจากดิจิตอลเป็นอนาล็อกหรืออนาคตเป็นดิจิตอล เก็บข้อมูลสัญญาณทางไฟฟ้าและเซนเซอร์ซึ่งรับสัญญาณจากอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง แล้วนำไปประมวลผล ดังในภาพที่ 2.17 และภาพที่ 2.18 แสดงรูปการ์ด DAQ Card NI PCI-6221



ภาพที่ 2.17 การเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับแขนกล



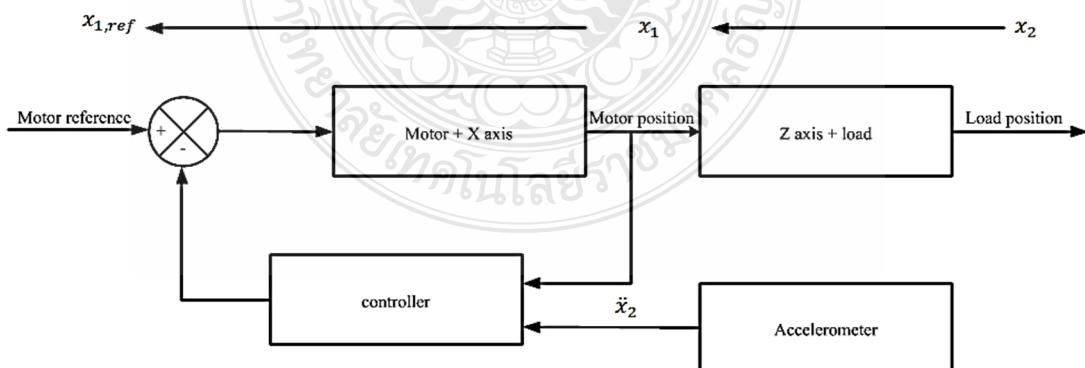


ภาพที่ 2.19 มอเตอร์ไดร์ Accelus รุ่น ASP – 090 – 09 [11]

2.9 วัสดุกรรมที่เกี่ยวข้อง

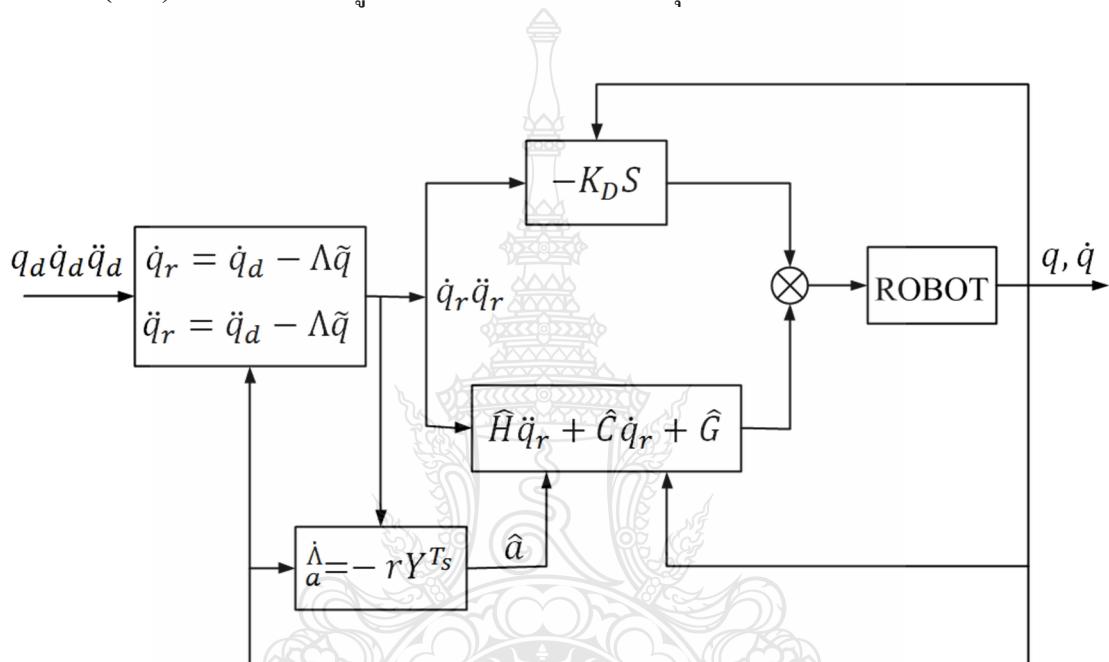
ในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมและการควบคุม ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อใช้เป็นมูลพื้นฐานในการทำวิจัย โดยรวมรวมและเรียบเรียงสาระสำคัญไว้ดังต่อไปนี้

Dumetz E. และคณะ [12] ได้ใช้สัญญาณป้อนกลับแบบความเร่ง (Acceleration Feedback) เข้ามาประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์ที่มีการยึดหยุ่นตัว แทนการวัดสัญญาณตำแหน่งและความเร็วจากตัวตรวจรู้ตำแหน่งและความเร็ว โดยใช้ตรวจรู้ความเร่งในการวัดตำแหน่งของมอเตอร์และแขนกลของหุ่นยนต์แทน ซึ่งสัญญาณความเร่งที่ถูกวัดจากการตรวจรู้ความเร่งนี้ก็จะนำมาใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบพีดี



ภาพที่ 2.20 การควบคุมโดยใช้สัญญาณป้อนกลับแบบความเร่ง

Slotine J. และคณะ [13] ได้นำเสนอตัวควบคุมแบบปรับตัว (Adaptive Controller) เพื่อที่จะควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่เร็วได้เร็ว ได้รีบได้ 2 DOF โดยที่พารามิเตอร์ทางพลศาสตร์ไม่ทราบค่าและได้เปรียบเทียบผลการทดลองกับตัวควบคุมแบบพีดี (PD Controller) และตัวควบคุมคำนวณทอร์ค (Computed-Torque Controller) แสดงให้เห็นว่าควบคุมแบบปรับตัวสามารถลดความล่าช้าได้ตามเส้นทาง (Path) การเคลื่อนที่ได้ถูกต้องกว่าแบบพีดีและควบคุมคำนวณทอร์ค



ภาพที่ 2.21 โครงสร้างของแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control)

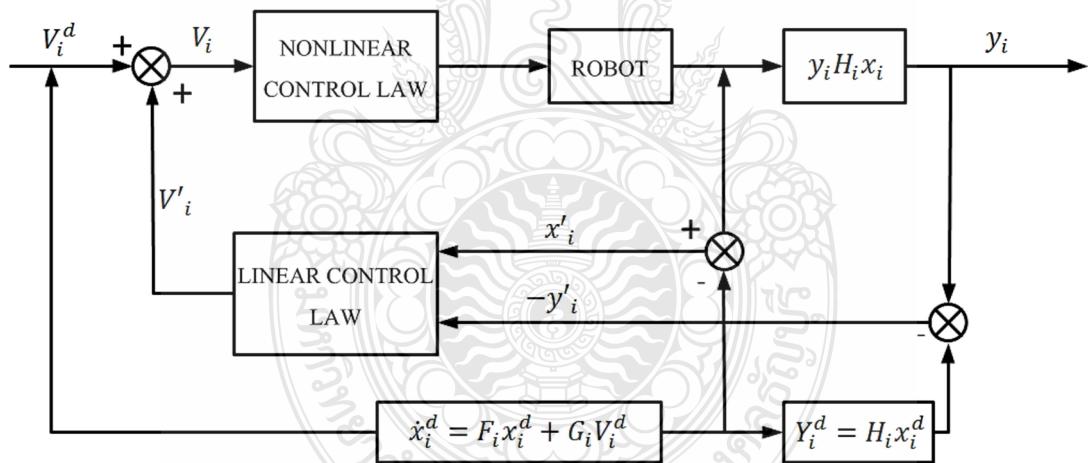
Dessant L. และคณะ [14] ได้เสนอตัวควบคุมปรับตัวแบบโดยตรง (Direct Adaptive Controller) สำหรับหุ่นยนต์แบบสกาล่า (SCARA-Type) ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ซึ่งใช้มอเตอร์แบบขับตรง (Direct Drive Motor) เป็นตัวดันกำลัง ซึ่งตัวควบคุมปรับตัวนี้จะถูกใช้ในการปรับค่าตัวควบคุมแบบพีดี (PD Regulator) และตัวชดเชยแบบล้าหน้า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

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

Asymptotic Stability) ของการควบคุม โดยใช้หลักการ Lyapunov's Direct และ Lasalle's Invariance และได้ทำการทดลองกับแขนกลที่สร้างขึ้นมาเอง โดยทดลองเปรียบเทียบตัวควบคุมนี้กับตัวควบคุมแบบพีดี ซึ่งผลปรากฏว่าตัวควบคุมใหม่นี้ให้ผลตอบสนองที่รวดเร็วกว่าและค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวก็น้อยกว่าเช่นกัน

Vashisth H. และคณะ [16] ได้ใช้หลักการของฟลัชซิลจิก (Fuzzy Logic) มาช่วยควบคุมหุ่นยนต์แบบ PUMA 560 โดยใช้เครื่องมือที่เป็นซอฟแวร์ของบริษัท ออฟตรอนิกส์ (Aptronix, Inc.) ผ่านคอมพิวเตอร์ในการควบคุม

Kuo C. และคณะ [17] ได้ทำการศึกษาหาตัวควบคุมที่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลได้รวดเร็วและแม่นยำ โดยได้ใช้ Nonlinear Robust Control Scheme เป็นตัวควบคุมในงานวิจัย ซึ่งตัวควบคุมนี้ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลักๆ ก็คือ ส่วนที่เป็นเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้น ในส่วนที่ไม่เป็นเชิงเส้นนี้จะถูกนำมาใช้สำหรับการ Decouple และ Stabilize แขนกล ส่วนที่เป็นเชิงเส้นนี้ก็นำเอาทฤษฎีของ Robust Servomechanism มาจำกัดผลกระทบของความผิดพลาดและสัญญาณรบกวนต่างๆ ที่เกิดขึ้น ได้ทำการทดลองตัวควบคุมนี้กับหุ่นยนต์แบบสถาลาที่มี 2 ข้อต่อ



ภาพที่ 2.22 การควบคุมแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Robust Control Scheme)

บทที่ 3

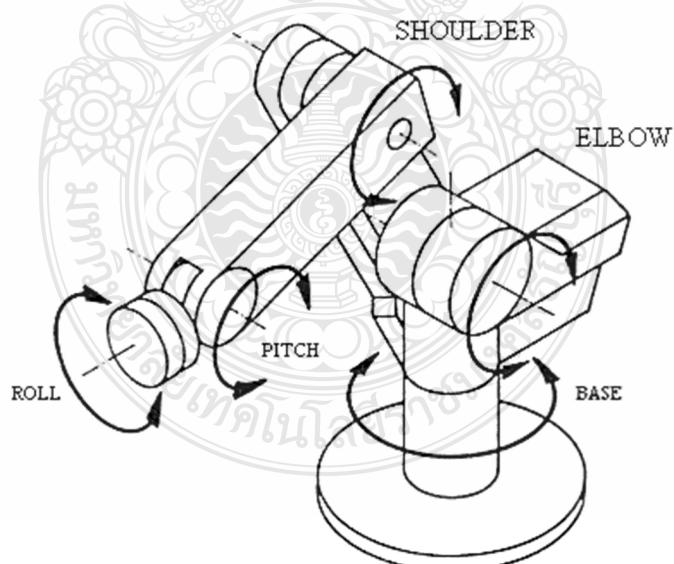
วิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้วางกรอบของงานวิจัย เพื่อกำหนดเป้าหมายและขอบเขตของงานวิจัย โดยได้ดำเนินการวิจัยตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ศึกษาข้อมูลโครงการสร้างของหุ่นยนต์
- ออกแบบโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์
- ปรับแก้ และเพิ่มประสิทธิภาพให้แก่หุ่นยนต์
- วิเคราะห์ผลการทดลอง
- สรุปผลการทดลอง

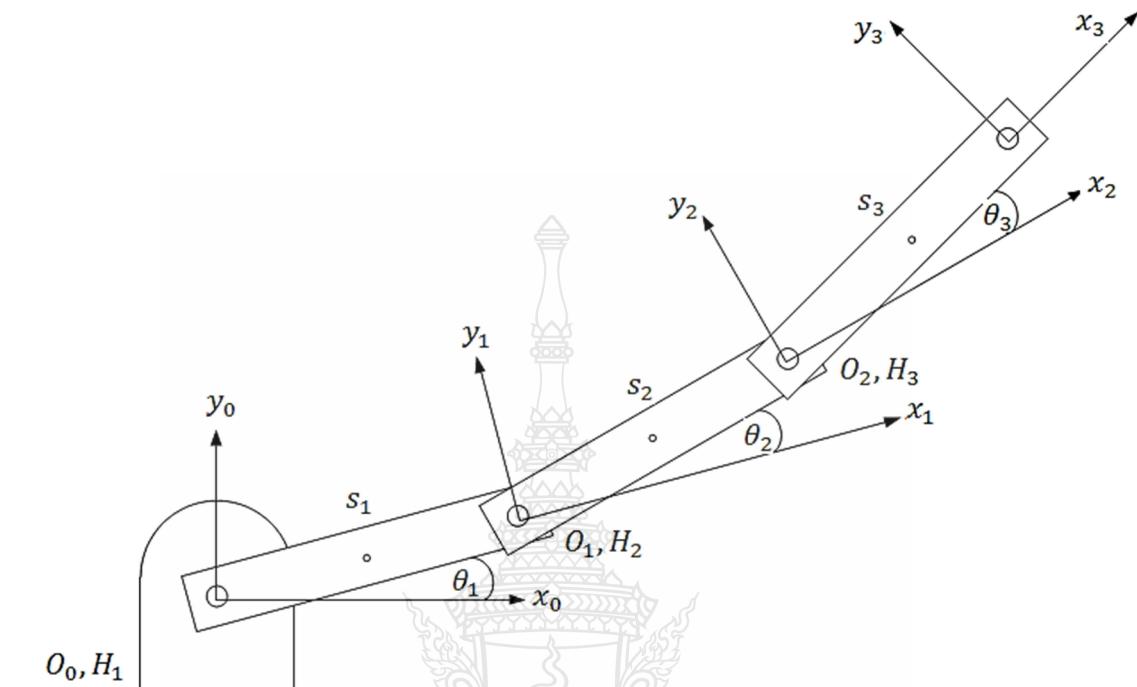
3.1 ศึกษาข้อมูลและโครงการสร้างของหุ่นยนต์

จนถึงปัจจุบัน หุ่นยนต์ที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้ เป็นหุ่นยนต์ที่มีแกนหมุนทั้งหมด 5 แกน ดังแสดงในภาพที่ 3.1



ภาพที่ 3.1 แกนหมุนของหุ่นยนต์

3.1.1 จลนศาสตร์ตรง (Direct Kinematics)



ภาพที่ 3.2 จุดกำเนิดในแต่ละเกณ

ในงานวิจัยเล่มนี้ได้ใช้รูปทรงแบบก้านเรียว (Slender Rod) โดยอ้างอิงกับแบบกล SCORBOT ER VII ในลิ้งค์ที่ 2 ลิ้งค์ที่ 3 และลิ้งค์ที่ 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 ทำให้สามารถหาจลนศาสตร์ตรงในแต่ละเกณได้ดังนี้

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

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

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

3.1.2 การเคลื่อนที่แบบพลศาสตร์ (Dynamics)

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่ใช้ในการทดลอง โดยทั่วไปแล้วจะใช้สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ดังสมการที่ 2.15 สำหรับงานวิจัยเล่มนี้จะใช้สมการที่ 2.16 ในการคำนวณหาการเคลื่อนที่โดยในกรณีไม่คิดค่าความเสียดทาน

แทนค่าในสมการจะได้

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

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

Manipulator Inertia Matrix, $M(q)$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

សមារារការគេតីនឹងរបស់ក្នុង

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

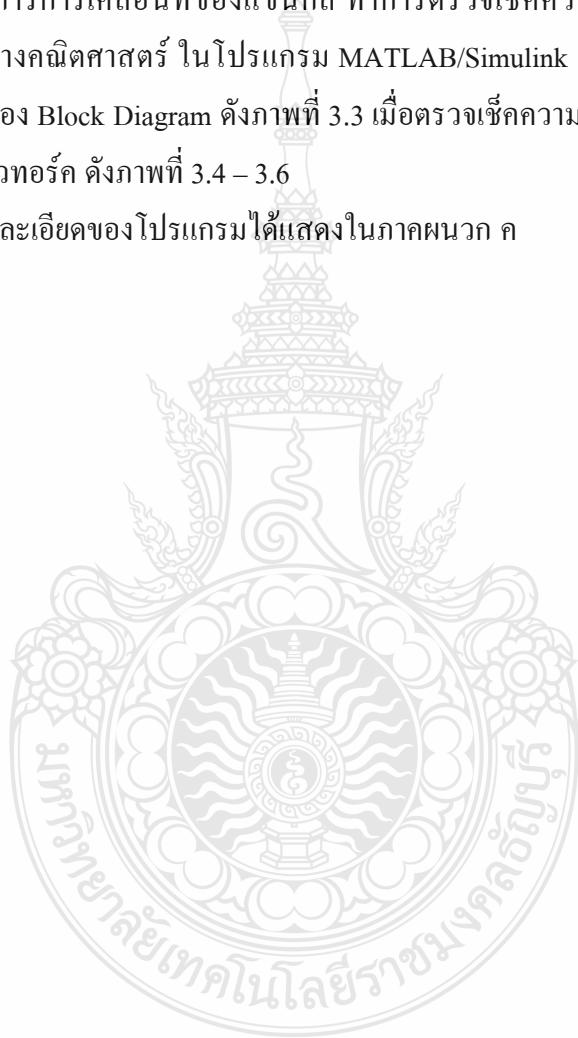
$$+ \left[\left(\frac{m_2}{2} + m_3 \right) l_2 c_{12} + \frac{m_3}{2} l_3 c_{123} \right] g$$

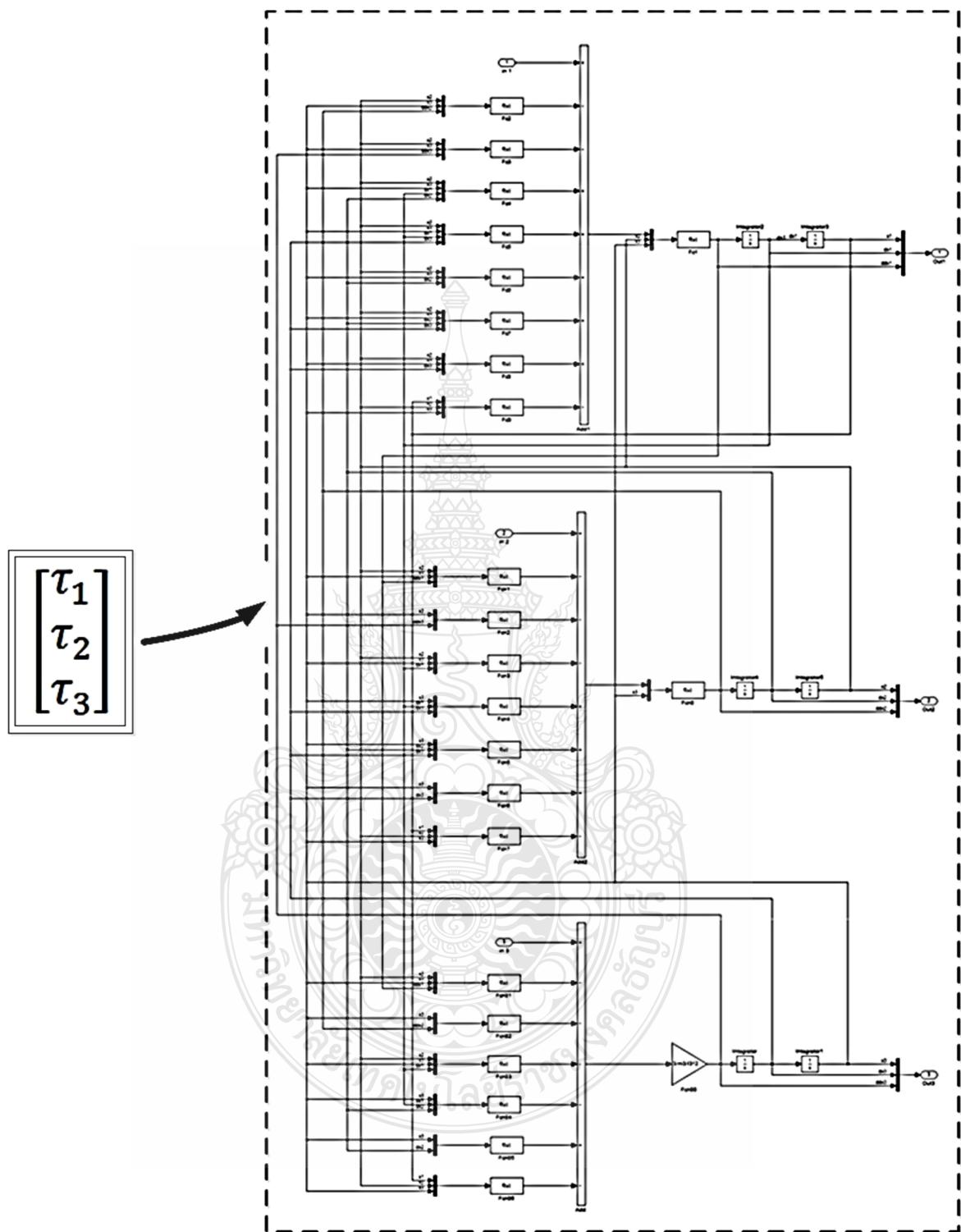
$$\begin{aligned}\tau_3 = & \left[m_3 \left(\frac{1}{3} l_3^2 + \frac{1}{2} l_1 l_3 c_{23} + \frac{1}{2} l_2 l_3 c_3 \right) \right] \ddot{\theta}_1 + \left[m_3 \left(\frac{1}{3} l_3^2 + \frac{1}{2} l_2 l_3 c_3 \right) \right] \ddot{\theta}_2 + \left[\frac{1}{3} m_3 l_3^2 \right] \ddot{\theta}_3 \\ &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

ในส่วนการคำนวณทั้งหมดได้แสดงไว้ข้างภาคผนวก ก

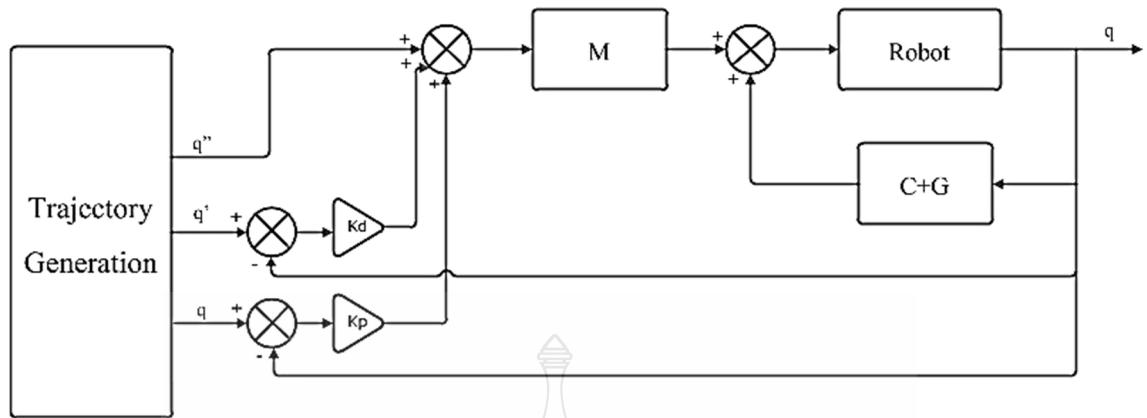
เมื่อได้สมการการเคลื่อนที่ของแขนกล ทำการตรวจเช็คความถูกต้องของสมการโดยทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในโปรแกรม MATLAB/Simulink โดยการแปลงสมการการเคลื่อนที่ให้อยู่ในรูปของ Block Diagram ดังภาพที่ 3.3 เมื่อตรวจเช็คความถูกต้อง จึงทำการออกแบบตัวควบคุมแบบคอมพิวเตอร์ ดังภาพที่ 3.4 – 3.6

ในส่วนรายละเอียดของโปรแกรมได้แสดงในภาคผนวก ก

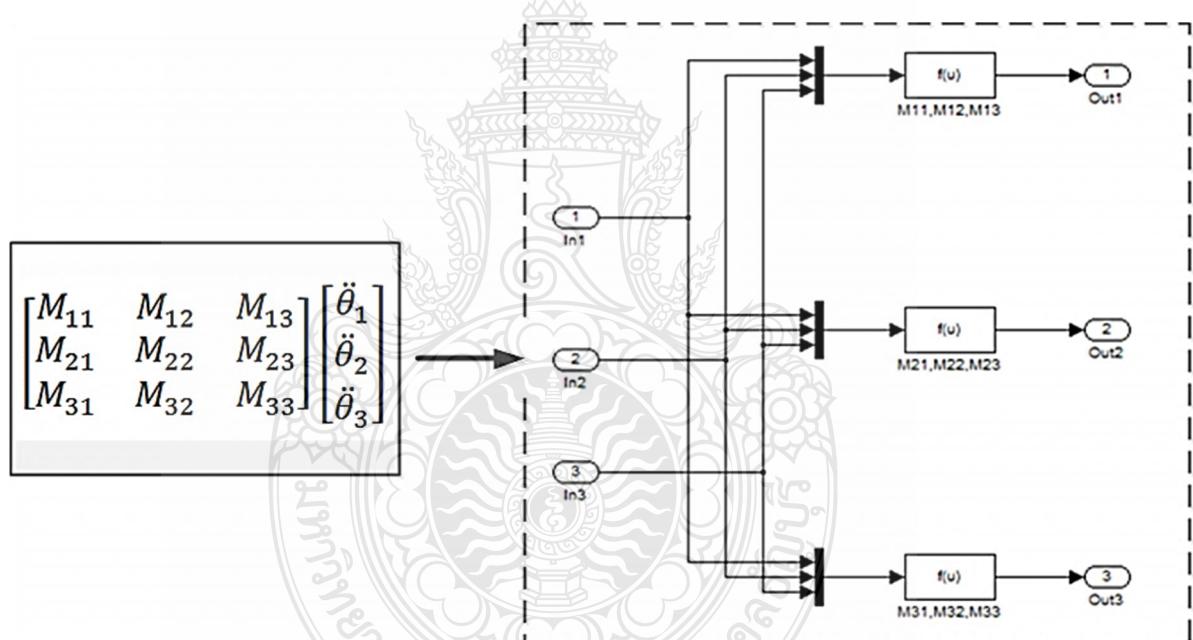




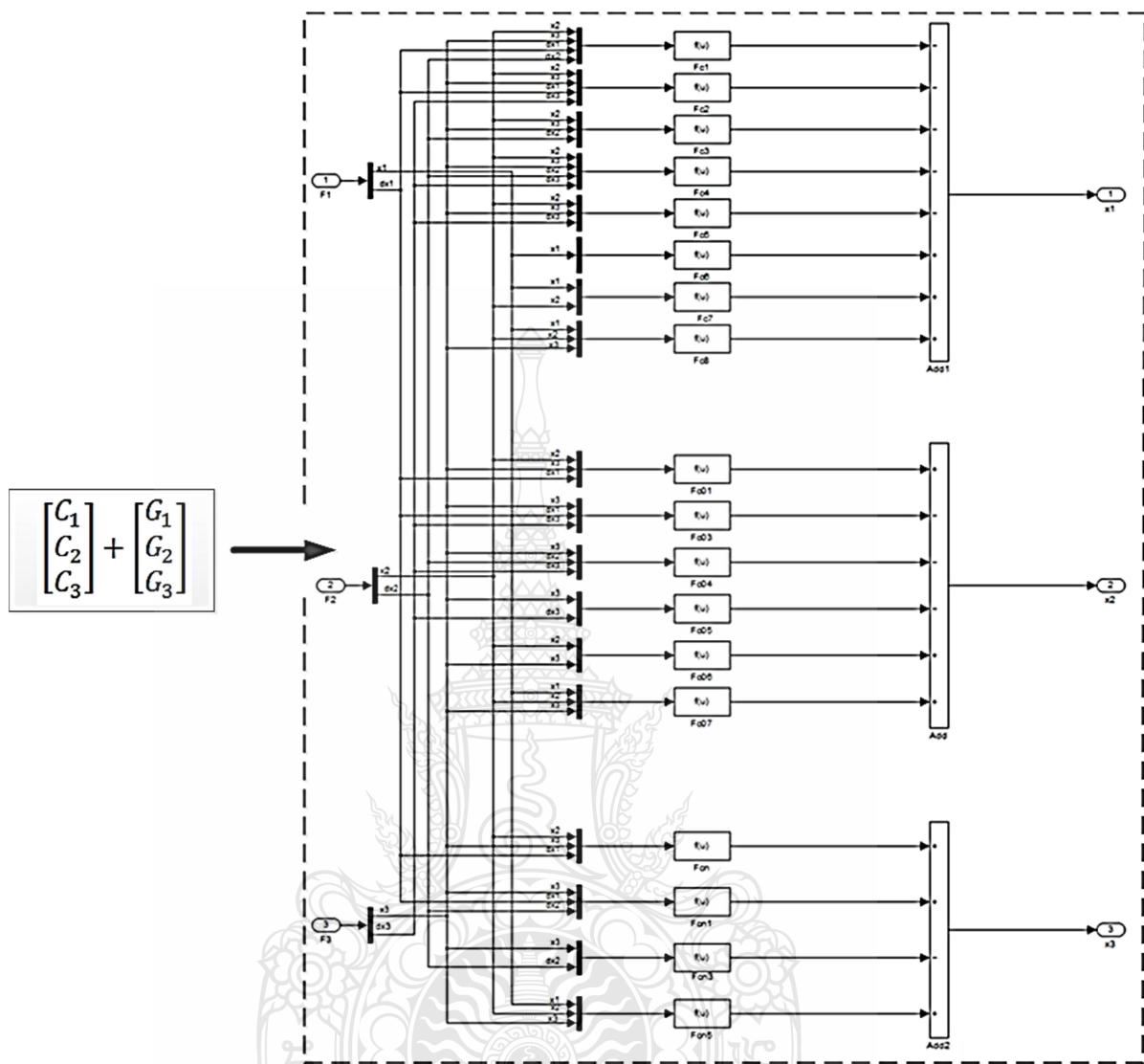
ภาพที่ 3.3 สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ในรูปของ Block Diagram



ภาพที่ 3.4 โนมส์เดลการออกแบบตัวควบคุมแบบคอมพิวเตอร์

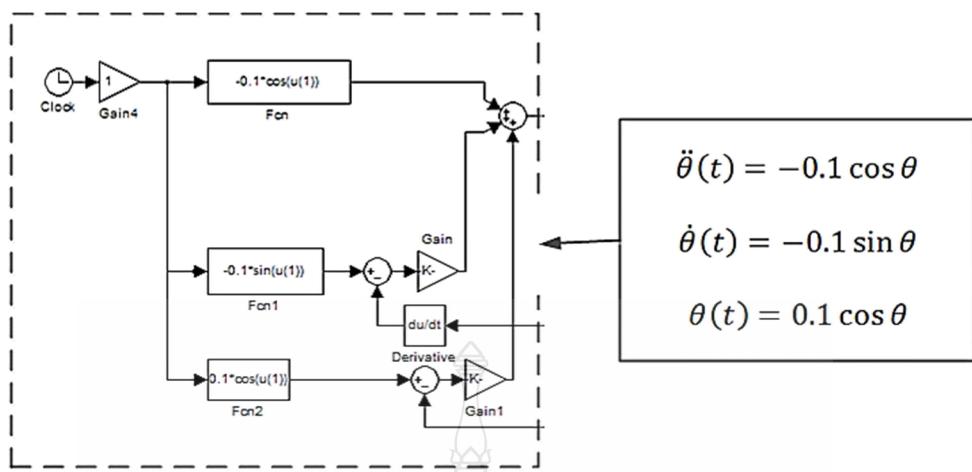


ภาพที่ 3.5 ค่า Manipulator Inertia Matrix, $M(q)$ ในรูปของ Block Diagram

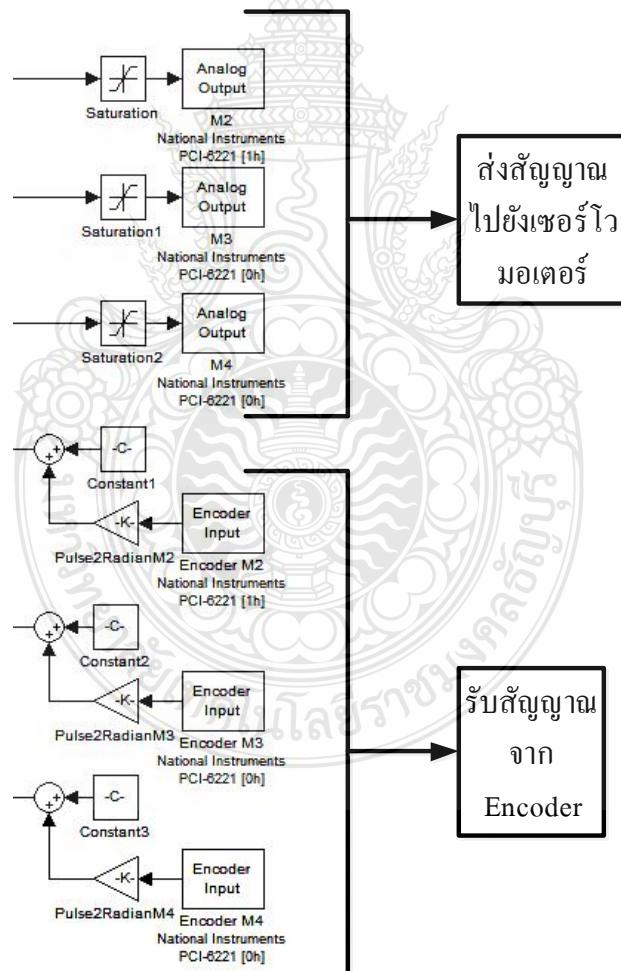


ภาพที่ 3.6 ค่า Velocity Coupling Vector, $C(q, \dot{q})$ และค่า Vector of Gravitational Forces, $G(q)$
ในรูปของ Block Diagram

ในส่วนโปรแกรมการควบคุมของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการทดลองจริงกับแขน
กลอุตสาหกรรม ในการทดลองเส้นโค้งคอส ได้ใช้ค่า Trajectory Generator ค่าเดียวกันดังภาพที่ 3.7
ในภาพที่ 3.8 แสดงการรับ-ส่งสัญญาณในส่วนของโปรแกรมการควบคุมจริงของแขนกล
อุตสาหกรรม



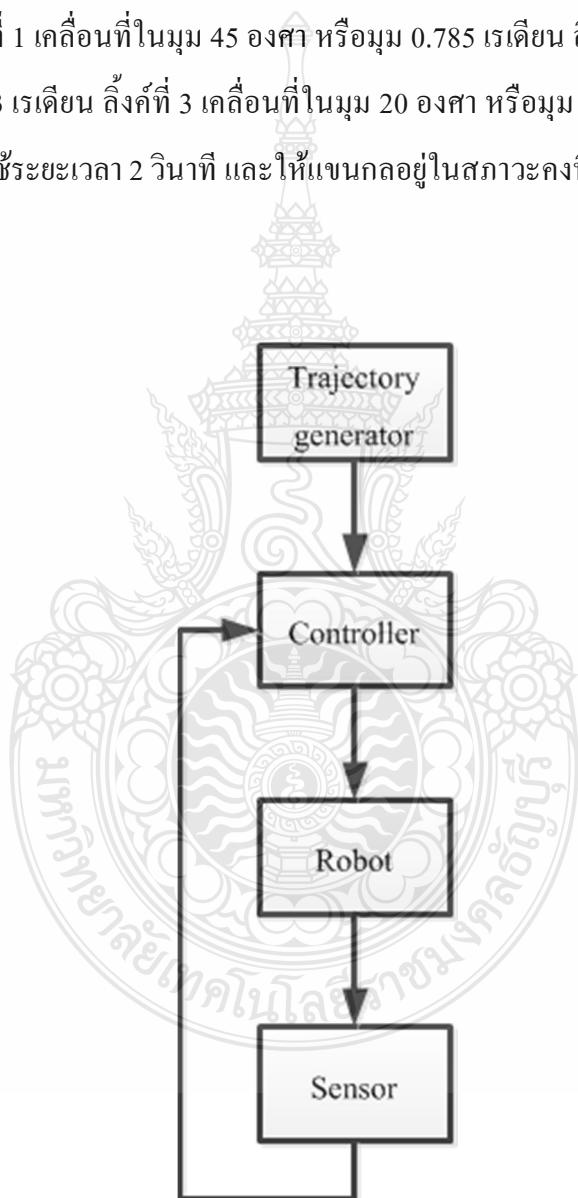
ภาพที่ 3.7 ค่า Trajectory Generation



ภาพที่ 3.8 ชุดรับส่งสัญญาณ

3.2 สมการ Trajectory Generator

ในการกำหนดการเคลื่อนที่ของแขนกล ได้ใช้ลักษณะการเคลื่อนที่จากจุดต่อจุด (Point to Point) ด้วย Trajectory Generator แบบ Cubical Polynomial เพื่อกำหนดการเคลื่อนที่ของแขนกล โดยมีลักษณะฟูชาต์การทำงานดังภาพที่ 3.9 ในตารางที่ 3.2 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณใส่ให้กับระบบเพื่อให้แขนกลเคลื่อนที่ไปยังค่าเป้าหมายที่ตั้งไว้คือ ให้แขนกลทิ้ง 3 ลิ๊งค์เคลื่อนที่จากมุม 0 องศาหรือที่ 0 เรเดียน โดยลิ๊งค์ที่ 1 เคลื่อนที่ในมุม 45 องศา หรือมุม 0.785 เรเดียน ลิ๊งค์ที่ 2 เคลื่อนที่ในมุม -30 องศา หรือมุม -0.523 เรเดียน ลิ๊งค์ที่ 3 เคลื่อนที่ในมุม 20 องศา หรือมุม 0.349 เเรเดียน โดยในการเคลื่อนที่ของแขนกลใช้ระยะเวลา 2 วินาที และให้แขนกลอยู่ในสภาพะวงที่ ในส่วนการคำนวณอยู่ในภาคผนวก ก

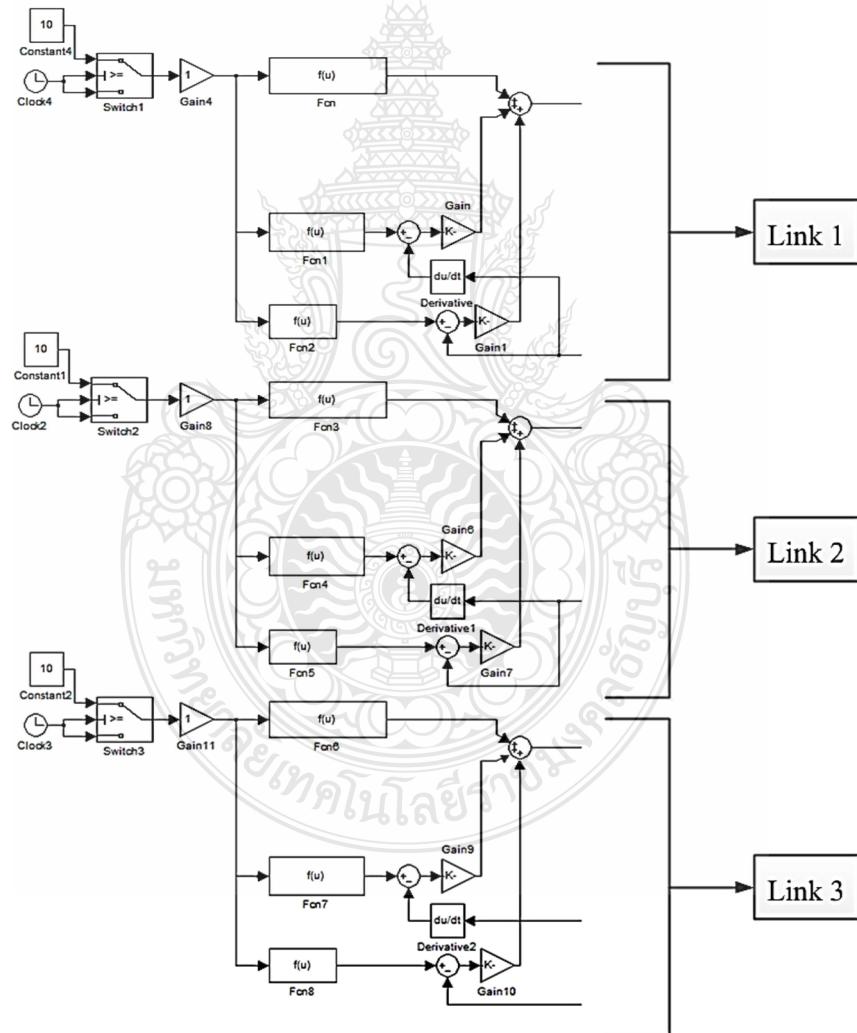


ภาพที่ 3.9 ลักษณะการทำงานของแขนพาร์ท

ตารางที่ 3.2 ค่า Trajectory Generator (หน่วยเป็นองศา)

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

ในส่วนโปรแกรมการควบคุมได้ทำการแยกค่า Trajectory Generator ของแต่ละลิ้งค์เพื่อกำหนดเป้าหมายในการเคลื่อนที่ให้แตกต่างกันออกไปดังภาพที่ 3.10



ภาพที่ 3.10 ค่า Trajectory Generator ของแต่ละลิ้งค์

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้ จะกล่าวถึง ผลการทดลอง การทำงานของระบบควบคุม แบบกลไกแบบ 3 ข้อต่อบน ฐานการจำลองการทำงาน และการควบคุมจริงกับแบบกลไกสากลธรรม โดยได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ

1) การทดลองกับแบบจำลอง (Simulation Experiments)

1. จำลองการเคลื่อนที่เมื่อกำหนดให้แบบกลไกเคลื่อนที่ต่อเนื่องด้วย Trajectory Generator แบบ COSINE Curve

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

2) การทดลองจริงกับแบบกล (Physical Experiments)

1. ทดลองการเคลื่อนที่เมื่อกำหนดให้แบบกลเคลื่อนที่ต่อเนื่องด้วย Trajectory Generator แบบ COSINE Curve

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

สำหรับจุดมุ่งหมายของการจำลองการทำงานในส่วนที่หนึ่งของแบบกล เพื่อศึกษาการ ทำงานของระบบควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ รวมถึงผลตอบสนองที่เกิดกับระบบควบคุม ในส่วน จุดมุ่งหมายที่สองของการทดลองเพื่อทดสอบการทำงานจริงของระบบควบคุมแบบกลที่ได้ออกแบบ ไว้

ในการทดลองทั้ง 2 ส่วน ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ของแบบกลดังนี้

มวลของลิ้งค์ที่ 1 เท่ากับ 19.24 กิโลกรัม ความยาวของลิ้งค์ที่ 1 เท่ากับ 0.3 เมตร

มวลของลิ้งค์ที่ 2 เท่ากับ 4.02 กิโลกรัม ความยาวของลิ้งค์ที่ 2 เท่ากับ 0.25 เมตร

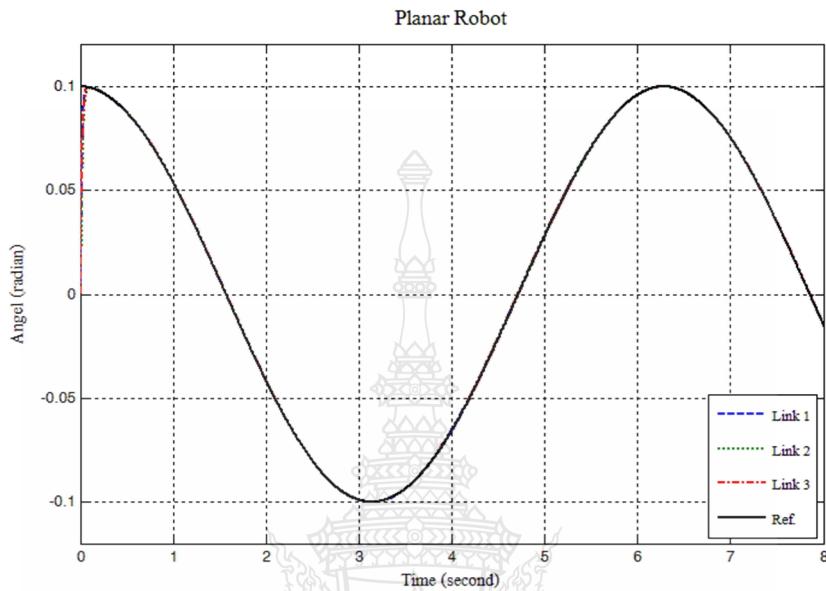
มวลของลิ้งค์ที่ 3 เท่ากับ 3.2 กิโลกรัม ความยาวของลิ้งค์ที่ 3 เท่ากับ 0.25 เมตร

ค่าความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลกเท่ากับ 9.81 m/s^2

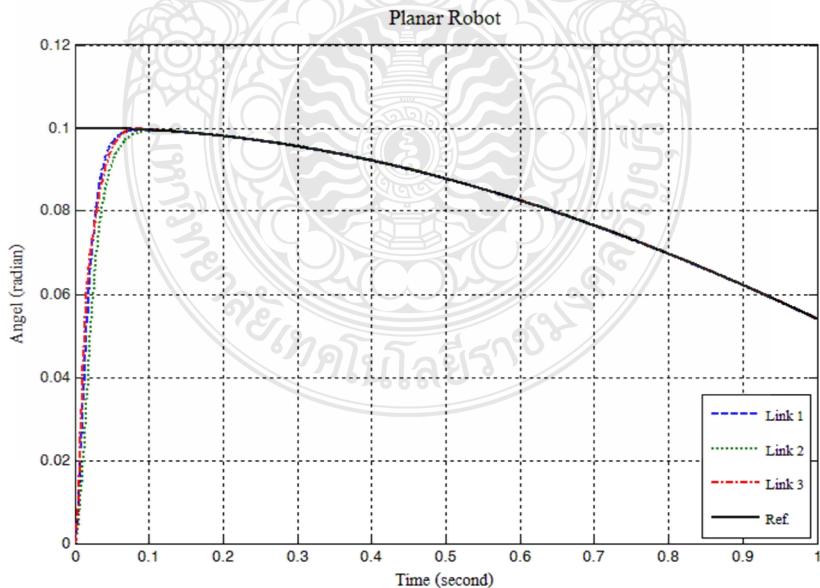
4.1 การทดลองกับแบบจำลอง (Simulation Experiments)

4.1.1 จำลองการเคลื่อนที่เมื่อกำหนดให้แบบกลเคลื่อนที่ต่อเนื่องด้วย Trajectory Generator แบบ COSINE Curve เพื่อทดสอบผลตอบสนองของระบบด้วยการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม

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

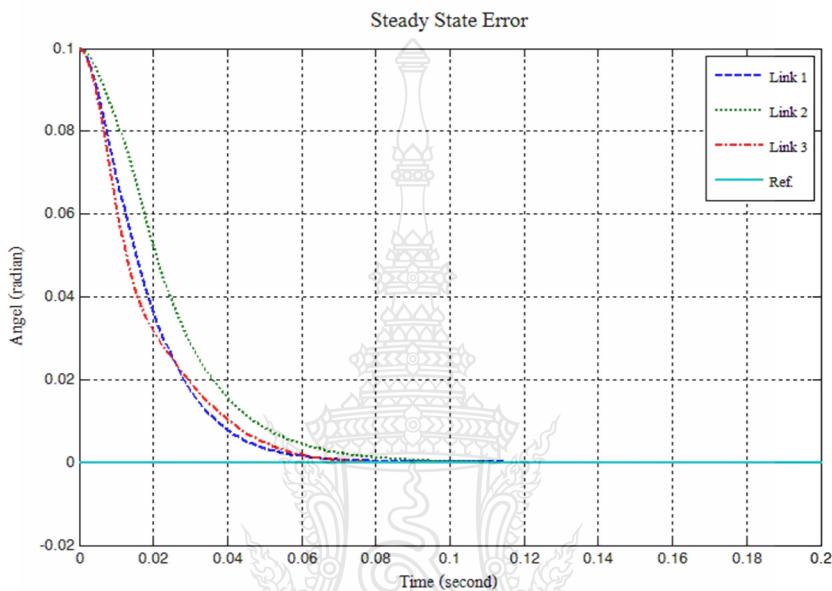


ภาพที่ 4.1 ผลตอบสนองและค่าเป้าหมายของแขนกล



ภาพที่ 4.2 ส่วนขยายของผลตอบสนองและค่าเป้าหมายของแขนกล

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



ภาพที่ 4.3 ผลการทดลองเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงตัว

พิจารณากราฟในภาพที่ 4.3 ระบบได้ใช้ระยะเวลาประมาณ 0.12 วินาที ระบบจึงเข้าสู่ค่าเป้าหมายและรักษาเสถียรภาพของระบบ และได้ทำการตรวจเช็คค่าความผิดพลาดในช่วงสภาวะคงตัว พนบว่ามีการแก่วงของระบบเล็กน้อย โดยลิ้งค์ที่ 1 ที่ประมาณ $\pm 4 \times 10^{-5}$ เรเดียน ลิ้งค์ที่ 2 ที่ประมาณ $\pm 14 \times 10^{-5}$ เเรเดียน ลิ้งค์ที่ 3 ที่ประมาณ $\pm 1 \times 10^{-5}$ เเรเดียน

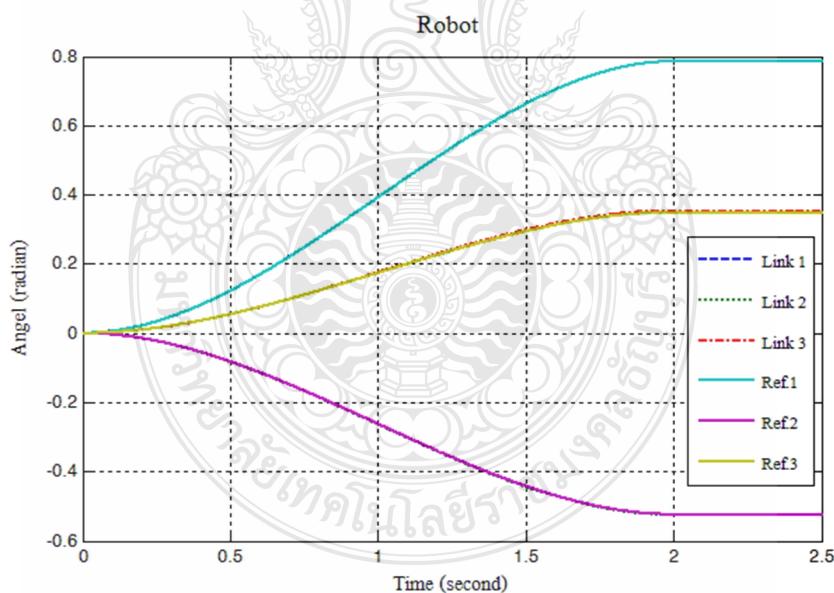
4.1.2 จำลองการเคลื่อนที่เมื่อกำหนดให้แขนกลเคลื่อนที่จากจุดต่อจุด (Point to Point) ด้วย Trajectory Generator แบบ Cubical Polynomial เพื่อทดสอบผลตอบสนองของระบบด้วยการจำลองการทำงานโดยใช้โปรแกรม MATLAB/Simulink โดยในการจำลองการทำงานของแขนกลนั้น ได้กำหนดการเคลื่อนที่เริ่มต้นของแขนกลทั้ง 3 ลิ้งค์ไว้ที่ 0 องศา หรือ 0 เเรเดียน แล้วจึงให้แขนกลทั้ง 3 ลิ้งค์เคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายที่ตั้งไว้คือ ลิ้งค์ที่ 1 เคลื่อนที่ไป 45 องศา หรือ 0.785 เเรเดียน ลิ้งค์ที่ 2 เคลื่อนที่ไป -30 องศา หรือ -0.523 และลิ้งค์ที่ 3 เคลื่อนที่ไป 20 องศา หรือ 0.349 เเรเดียน ภายในระยะเวลา 2 วินาที เมื่อได้ข้อกำหนดในการเคลื่อนที่จึงนำไปคำนวณหาค่า 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)

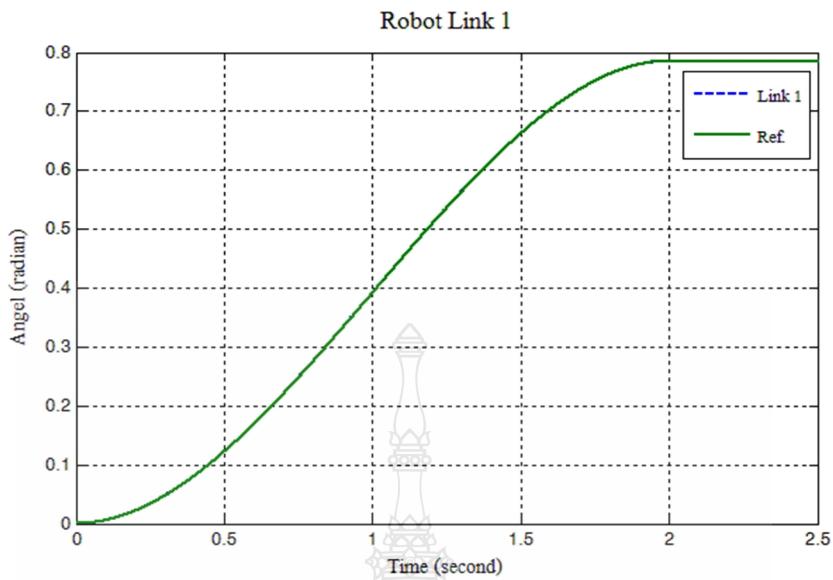
	Link 1	Link 2	Link 3
$\theta(t)$	$33.75t^2 - 11.25t^3$	$-22.5t^2 + 7.5t^3$	$15t^2 - 5t^3$
$\dot{\theta}(t)$	$67.5t - 33.75t^2$	$-45t + 22.5t^2$	$30t - 15t^2$
$\ddot{\theta}(t)$	$67.5 - 67.5t$	$-45 + 45t$	$30 - 30t$

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



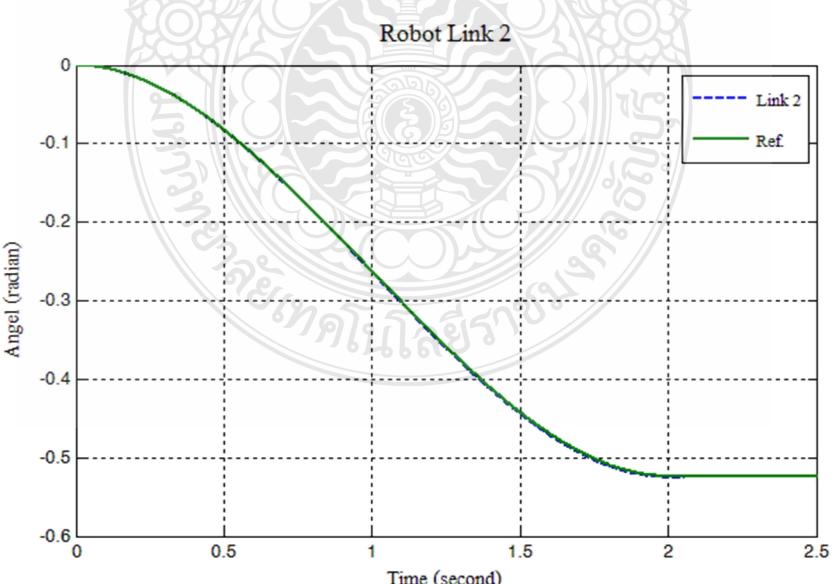
ภาพที่ 4.4 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของแขนกล

พิจารณากราฟจากภาพที่ 4.4 จะเห็นว่าการเคลื่อนที่ของแขนกลทั้ง 3 ลิ้งค์ เคลื่อนที่ไปตาม เป้าหมายที่กำหนด เมื่อถึงระยะเวลาที่กำหนดไว้ 2 วินาที แขนกลได้คงสถานะของตัวมันเอง



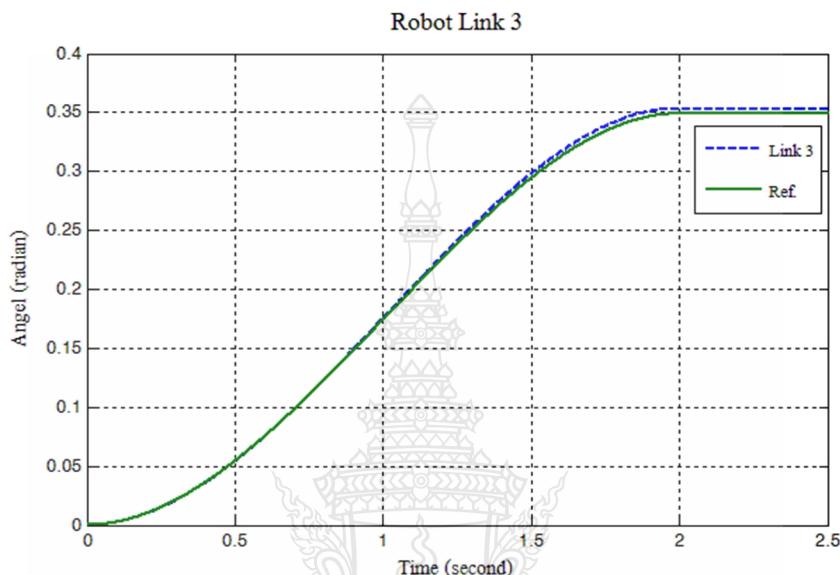
ภาพที่ 4.5 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 1

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



ภาพที่ 4.6 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 2

พิจารณากราฟจากภาพที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าระบบเคลื่อนที่จาก 0 เรเดียน ไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ที่ -0.523 เรเดียน หรือเท่ากับ -45 องศา ในระยะเวลา 2 วินาที และคงสถานะของตัวมันเอง ไว้ได้ โดยมีค่าความผิดพลาดเมื่ออยู่ในสภาวะคงตัวที่ 0.00012 เรเดียน



ภาพที่ 4.7 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 3

พิจารณากราฟจากภาพที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าระบบเคลื่อนที่จาก 0 เรเดียน ไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ที่ 0.349 เรเดียน หรือเท่ากับ 20 องศา ในระยะเวลา 2 วินาที และคงสถานะของตัวมันเองไว้ได้ โดยมีค่าความผิดพลาดเมื่ออยู่ในสภาวะคงตัวที่ 0.004 เรเดียน

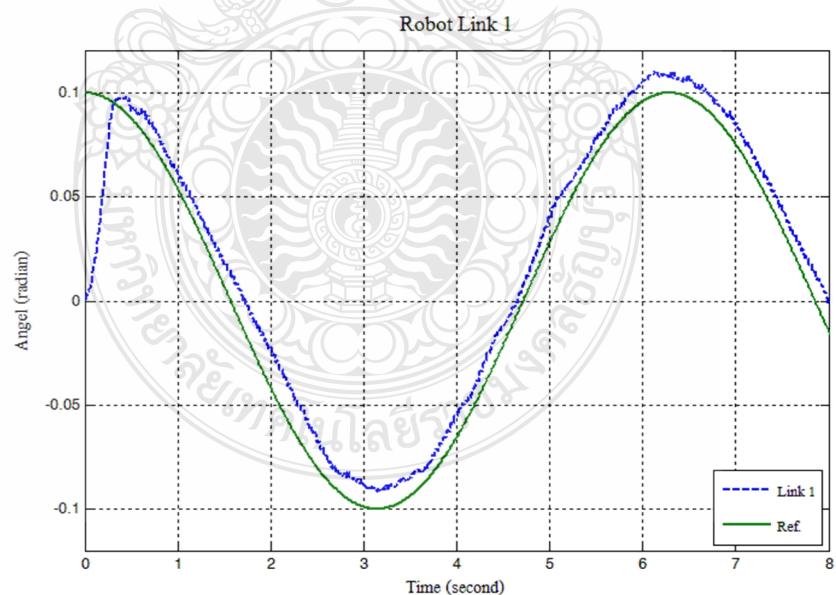
4.2 การทดลองจริงกับแขนกล (Physical Experiments)

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

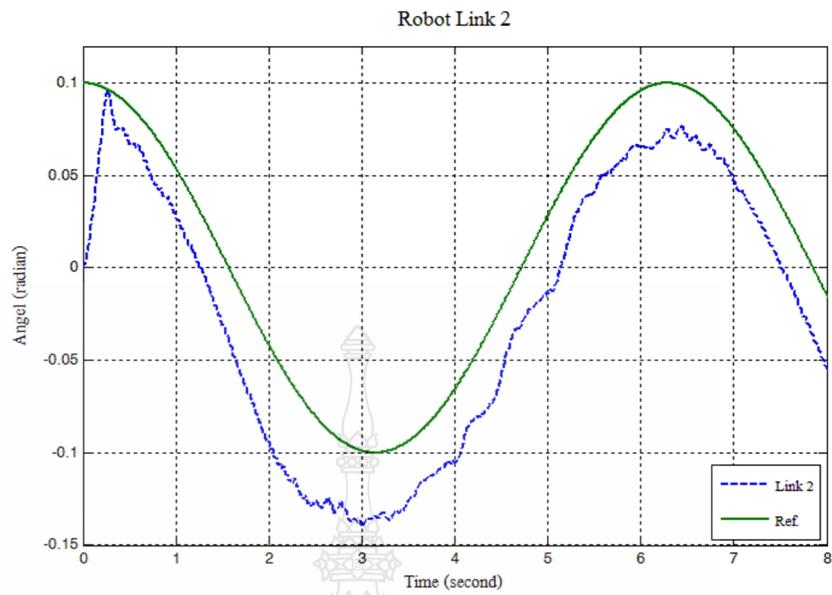
ศูนย์กลางมวลของแขนกลในแต่ละลิ้งค์ ในการทดลองได้กำหนดจุดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ของแขนกลที่ 0 เรเดียน ทั้ง 3 ลิ้งค์ ดังภาพที่ 4.8 ผลการทดลองเริ่มต้นโดยยังไม่เปลี่ยนค่าหนักของแขนกล จะแสดงในภาพที่ 4.9 – 4.12 โดยกำหนดค่า $\omega_n = 100$ หรือ $k_d = 200$ และ $k_p = 10000$ ทั้ง 3 ลิ้งค์



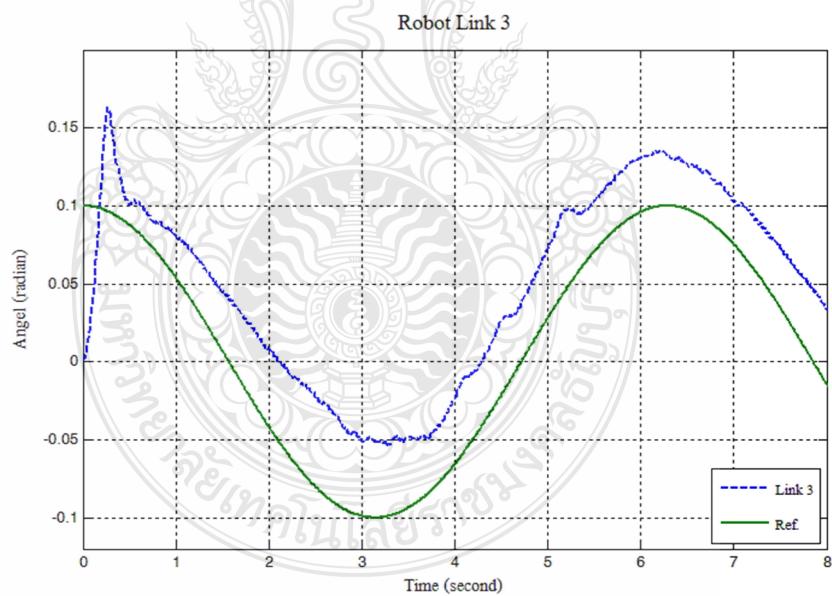
ภาพที่ 4.8 แสดงการเริ่มต้นเคลื่อนที่ของแขนกล



ภาพที่ 4.9 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 1



ภาพที่ 4.10 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 2

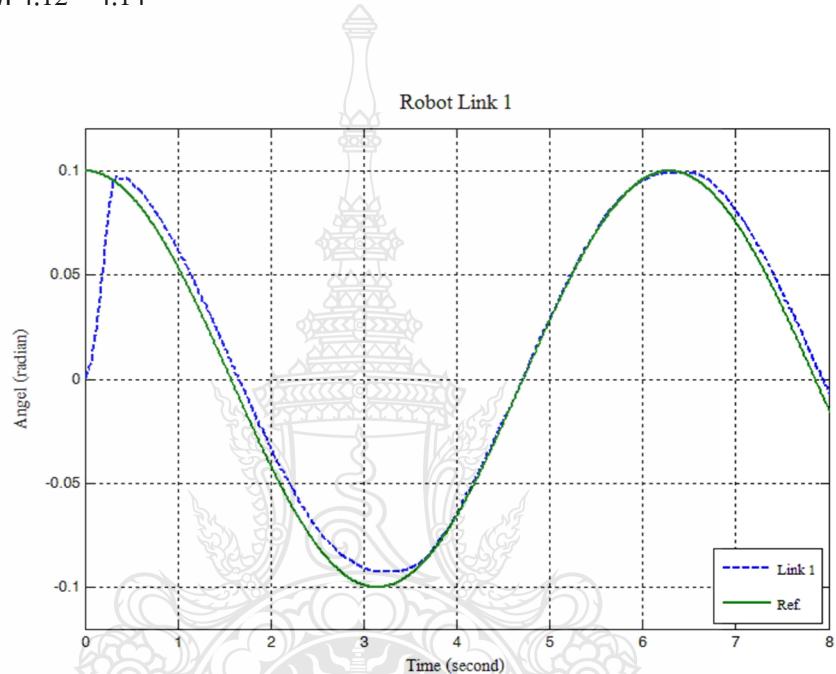


ภาพที่ 4.11 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 3

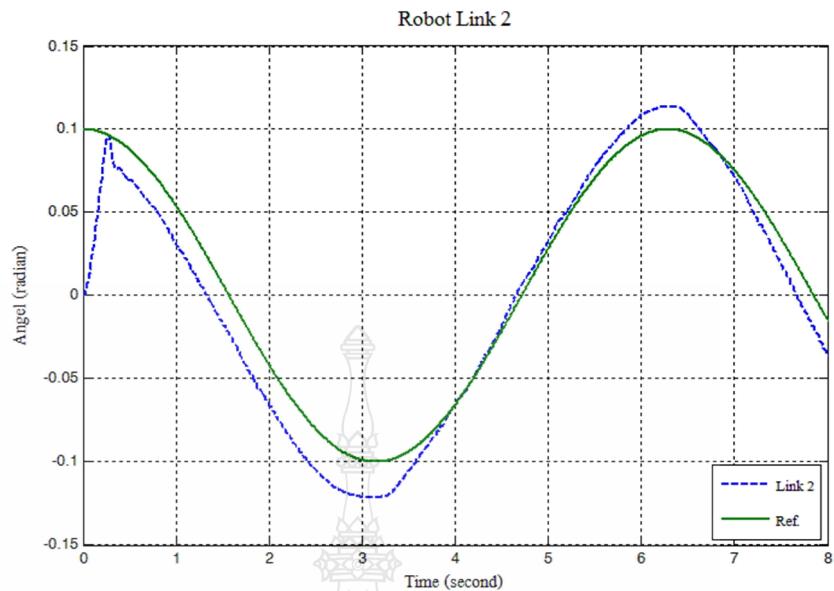
จากกราฟในภาพที่ 4.9 – 4.11 ได้ใช้ค่า \bar{n} หนักเท่ากับแบบจำลอง จะพบว่าแขนกลมีความคลาดเคลื่อนที่มากเนื่องจากรูปทรงที่ใช้ในการคำนวณหาสมการต่างๆ โดยลิ้งค์ที่ 1 มีความคาด

เคลื่อน 0.01 เรเดียน ลิ้งค์ที่ 2 มีความคาดเคลื่อน 0.04 เรเดียน และลิ้งค์ที่ 3 มีความคาดเคลื่อน 0.05 เรเดียน และในระบบจะเห็นว่ามีการสั่นของแขนกลตลอดช่วงการทำงาน

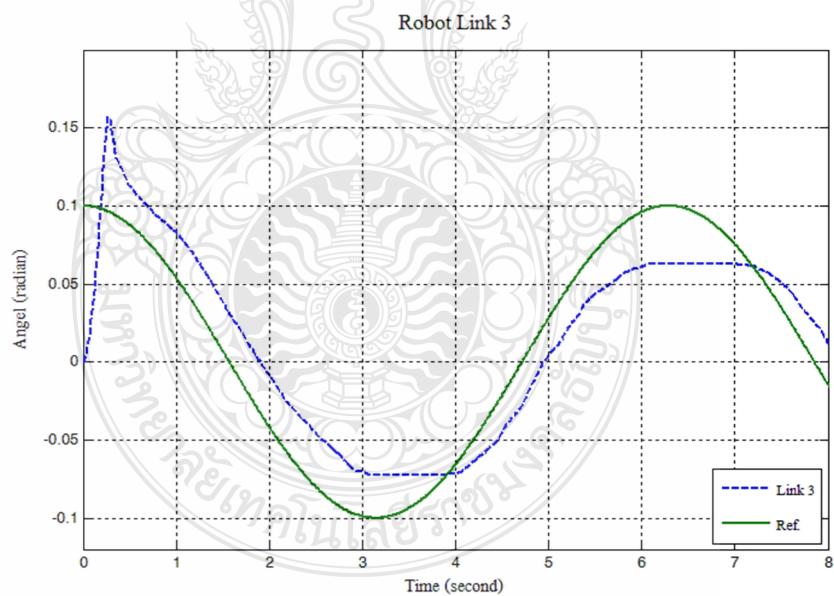
เมื่อทำการปรับเปลี่ยนนำหนักของแขนกลทั้ง 3 ลิ้งค์ โดยในลิ้งค์ที่ 1 จากนำหนัก 19.24 กิโลกรัม ไปเป็น 1.48 กิโลกรัม ลิ้งค์ที่ 2 จากนำหนัก 4.02 กิโลกรัม ไปเป็น 0.309 กิโลกรัม และลิ้งค์ที่ 3 จากนำหนัก 3.2 กิโลกรัม ไปเป็น 0.246 กิโลกรัม โดยค่า $\omega_n = 100$ หรือ $k_d = 200$, $k_p = 10000$ ทั้ง 3 ลิ้ง ดังภาพที่ 4.12 – 4.14



ภาพที่ 4.12 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 1



ภาพที่ 4.13 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 2

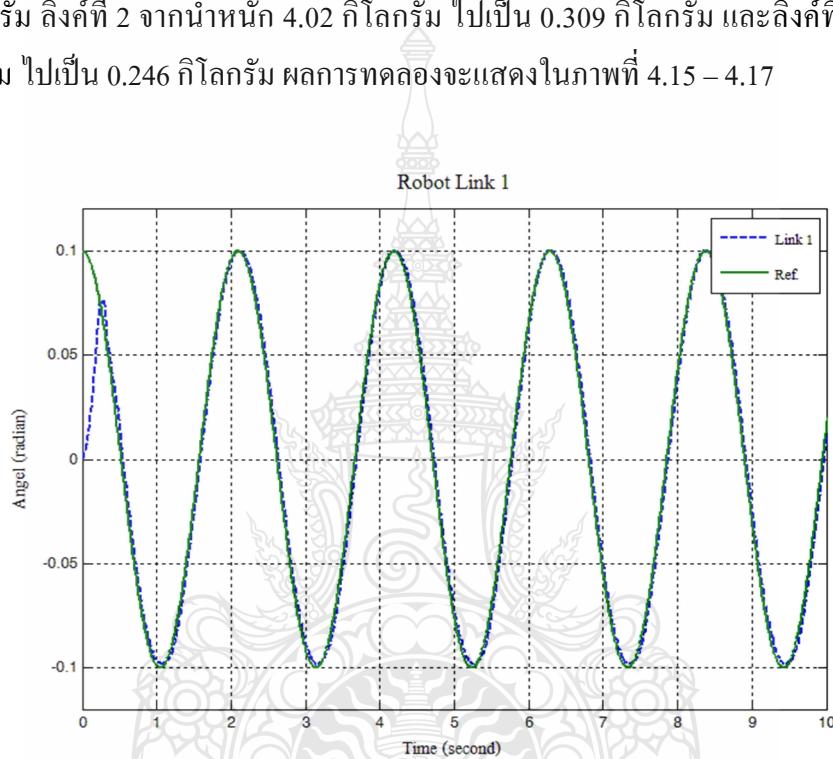


ภาพที่ 4.14 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 3

จากราฟในภาพที่ 4.12 – 4.14 ได้ปรับเปลี่ยนน้ำหนักของแขนกล แต่ยังใช้ค่า k_d, k_p เท่าเดิม จะพบว่าแขนกลมีความคลาดเคลื่อนที่น้อยลง โดยลิงค์ที่ 1 มีความคลาดเคลื่อน 0.006 เรเดียน ลิงค์

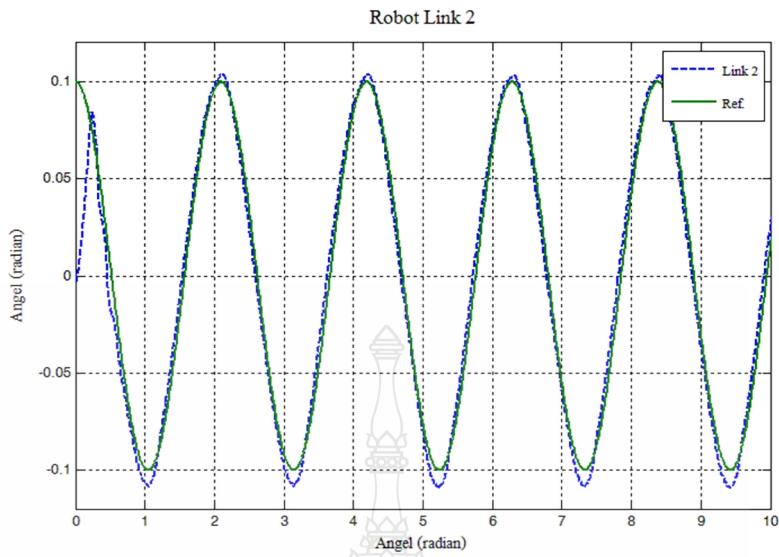
ที่ 2 มีความคาดเคลื่อน 0.024 เรเดียน และลิ้งค์ที่ 3 มีความคาดเคลื่อน 0.04 เรเดียน ในช่วงการทำงานของแขนกลนั้นมีการติดตามเส้นอ้างอิงที่ดีขึ้น และในระบบจะเห็นการสั่นของแขนกลลดลงทุกช่วงการทำงาน

ในส่วนการทดลองนี้จะใช้การปรับเปลี่ยนค่าน้ำหนักของแขนกลและ ปรับค่า k_d, k_p ของระบบเพื่อให้ผลตอบสนองของระบบรวดเร็วขึ้น โดยในลิ้งค์ที่ 1 จากน้ำหนัก 19.24 กิโลกรัม ไปเป็น 1.48 กิโลกรัม ลิ้งค์ที่ 2 จากน้ำหนัก 4.02 กิโลกรัม ไปเป็น 0.309 กิโลกรัม และลิ้งค์ที่ 3 จากน้ำหนัก 3.2 กิโลกรัม ไปเป็น 0.246 กิโลกรัม ผลการทดลองจะแสดงในภาพที่ 4.15 – 4.17



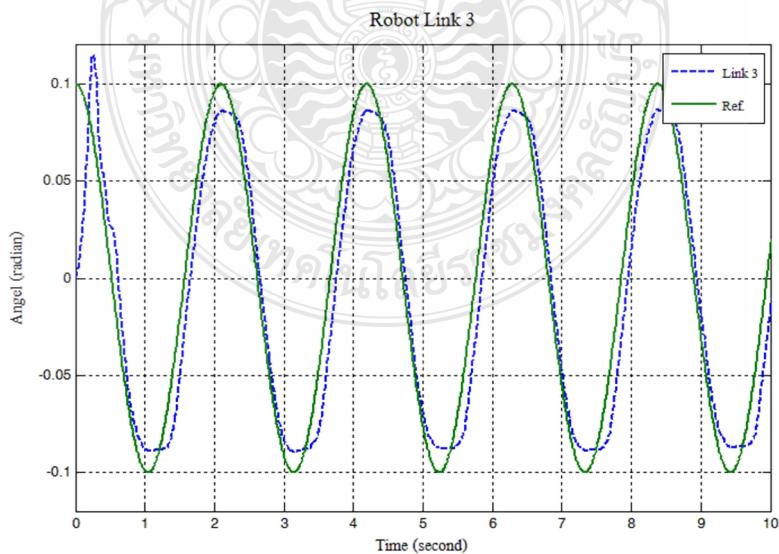
ภาพที่ 4.15 ผลการทดลองและค่าเป้าหมายของ Link 1

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



ภาพที่ 4.16 ผลการทดลองและค่าเป้าหมายของ Link 2

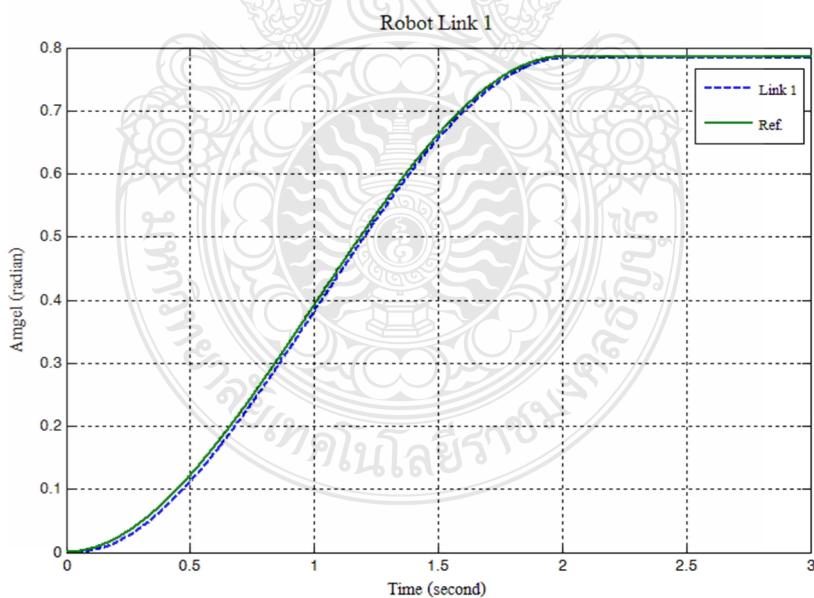
พิจารณากราฟในภาพที่ 4.16 โดยปรับค่า k_d, k_p ของระบบ ให้ค่า $k_d = 440$ และค่า $k_p = 48400$ จากกราฟจะเห็นว่ามีความคลาดเคลื่อนของระบบเล็กน้อยในช่วงต่ำสุดและสูงสุดของเส้นโค้ง คือสัมประสิทธิ์ 0.008 เรเดียน ในช่วงการทำงานของแขนกลนั้นมีการติดตามเส้นอ้างอิงที่ดี และในระบบจะเห็นการสั่นของแขนกลเล็กน้อยทุกช่วงการทำงาน



ภาพที่ 4.17 ผลการทดลองและค่าเป้าหมายของ Link 3

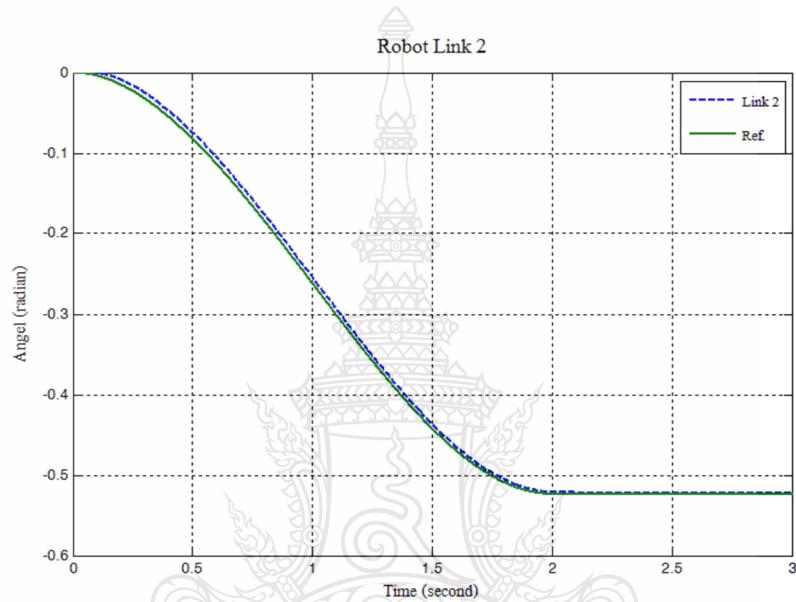
พิจารณากราฟในภาพที่ 4.17 โดยปรับค่า k_d, k_p ของระบบ ให้ค่า $k_d = 440$ และค่า $k_p = 48400$ จากกราฟจะเห็นว่ามีความคลาดเคลื่อนของระบบเล็กน้อยในช่วงต่ำสุดและสูงสุดของเส้นโค้ง ค่าสัมประสิทธิ์ 0.013 เรเดียน ในช่วงการทำงานของแขนกลนั้นมีการติดตามเส้นอ้างอิงและหลุดจากเส้นอ้างอิงบ้างเล็กน้อย แต่ก็ยังสามารถติดตามเส้นอ้างอิงได้ ในระบบจะเห็นการสั่นของแขนกล เล็กน้อยทุกช่วงการทำงาน

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



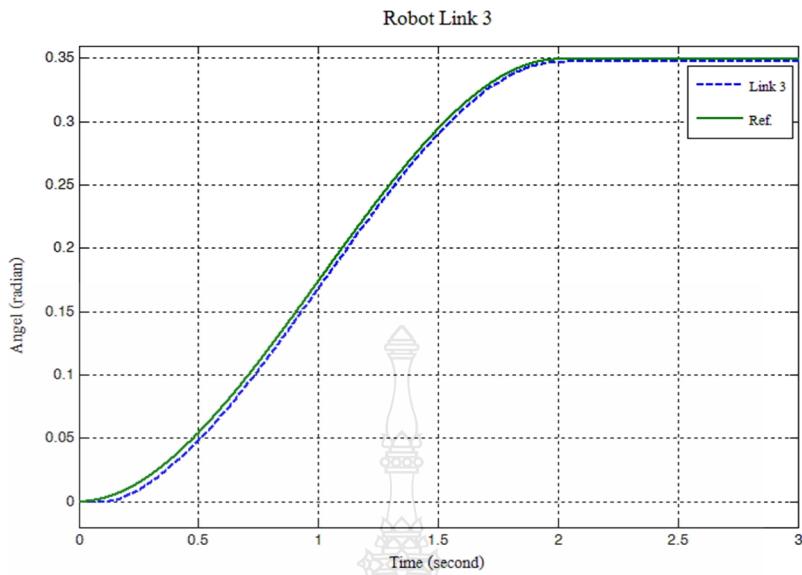
ภาพที่ 4.18 การเคลื่อนที่และรักษาสถานะของ Link 1

พิจารณากราฟในภาพที่ 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

พิจารณากราฟในภาพที่ 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 $k_p = 810000$ จากราฟจะเห็นว่าแนวกลไกเคลื่อนที่จาก 0 เรเดียน ไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้คือ 0.349 เรเดียน หรือ 20 องศา โดยระบบมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อยที่ประมาณ 0.0015 เรเดียน ในช่วงการทำงานของแนวกลไก มีการติดตามเส้นอ้างอิงได้ดี และคงสถานะของระบบไว้ได้ ในระบบจะเห็นการถ่ายทอดของแนวกลไกเล็กน้อย



ภาพที่ 4.21 การรักษาสถานะของแขนกล

จากภาพที่ 4.21 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนกลไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ และคงสถานะของตัวมันเองไว้ ณ ตำแหน่งนั้น ในระยะเวลาที่กำหนดไว้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอระบบควบคุมแบบคอมพิวทอร์ (Computed Torque) เพื่อใช้ในการควบคุมแขนกลอุตสาหกรรมของบริษัท ESHED ROBOTEC รุ่น SCORBOT ER VII ซึ่งเป็นแขนกลอุตสาหกรรมที่มี 5 องศาอิสระ ในการทดลอง ได้กำหนดให้แขนกลอุตสาหกรรมมี 3 องศาอิสระ เป็นแบบ Planar Robot โดยในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลนั้น เป็นพื้นฐานของการควบคุม ซึ่งมีวัตถุประสงค์ เพื่อให้แขนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งหรือในลักษณะที่ต้องการ ในการควบคุมแขนกลนั้น มีหลายรูปแบบ หนึ่งในรูปแบบที่เลือกใช้คือ การควบคุมแบบคอมพิวทอร์ (Computed Torque Control) ในการควบคุมแบบนี้จะเป็นการควบคุมในลักษณะของ พลศาสตร์ (Dynamics) โดยโครงสร้างการควบคุมจะเป็นโครงสร้างที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจ และมีประสิทธิภาพในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น เนื่องจากภายในตัวควบคุมมีฟังก์ชันการปรับจูน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้ผลตอบสนองดีขึ้น และลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น ในส่วนของการตรวจวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกลได้ใช้ อินโคเดอร์ (Endcoder) ซึ่งติดอยู่ที่ด้านท้ายของเซอร์โวมอเตอร์ในแต่ละตัว

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 โดยที่การทดลองมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระบบควบคุม ผลตอบสนองของระบบ ผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อใช้รูปทรงแบบก้านเรียว (Slender Rod) ลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกล และระบบควบคุมของแขนกล ที่ได้ออกแบบ

จากการทดลองการทำงานของระบบควบคุมแขนกลที่ได้ออกแบบในส่วนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าระบบควบคุมใช้ระยะเวลาในการเคลื่อนที่เพื่อเข้าสู่ค่าเป้าหมาย และรักษาสภาวะสมดุลของทั้ง 2 ส่วนของการทดลองเป็นไปตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ เมื่อพิจารณาในส่วนของการทดลองจริง พบว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการใช้รูปทรงแบบก้านเรียว (Slender Rod) มาใช้ในการออกแบบตัวควบคุมของแขนกล เกิดความคลาดเคลื่อนในระบบที่มาก ผลผลตอบสนองของ

ระบบที่ช้า และในระบบมีการสั่นที่รุนแรง โดยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ได้เสนอ การปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของแบบกล ที่ทำให้เกิดผลกระทบกับแบบกลน้อยที่สุดคือ การปรับเปลี่ยนน้ำหนักของแบบกลในแต่ละลิงค์ โดยในการปรับเปลี่ยนน้ำหนักของแบบกลนั้น จะช่วยให้จุดศูนย์กลางมวลของแบบกลที่ได้ออกแบบไว้เข้าใกล้กับแบบกลที่ใช้ในการทดลอง ในส่วนของผลที่เกิดขึ้นกับการควบคุมแบบกล จะเห็นได้ว่าระบบได้ลดค่าความคลาดเคลื่อน มีผลตอบสนองที่ดีขึ้น และการสั่นของแบบกลมีเล็กน้อย และยังสามารถปรับจูนค่า k_d, k_p ของระบบ เพื่อให้ความคลาดเคลื่อนลดลง ผลตอบสนองที่ดียิ่งขึ้น ผลการทดลองจริงทั้ง 2 ส่วนจะพบว่าแบบกล ได้เคลื่อนที่ไปปังเปาหมาย และรักษาสภาวะสมดุลเป็นไปตามเป้าหมายที่ตั้งไว้ โดยเกิดค่าความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย

5.2 ปัญหาที่พบในการทำวิจัยและแนวทางการแก้ปัญหา

5.2.1 ปัญหาด้านโครงสร้างของแบบกลในลิงค์ที่ 1 เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ของแบบกลที่ได้ทำ การตรวจวัดมีความคลาดเคลื่อนอยู่ 2 ส่วน คือ 1. น้ำหนักของแบบกล ได้มีการถ่วงดูมั่น้ำหนักที่ด้านท้ายของแบบกลเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของแบบกล และ 2. ความยาวในส่วนด้านท้ายของแบบกล ได้มีความยาวเพิ่มขึ้นมาเพื่อใช้สำหรับถ่วงน้ำหนักของแบบกล

5.2.2 ปัญหาด้านโครงสร้างของแบบกลในลิงค์ที่ 3 เนื่องจากลิงค์ที่ 3 มีน้ำหนักที่อยู่ใกล้กันข้อต่อทำให้การตรวจวัดมีความคลาดเคลื่อน

5.2.3 ปัญหาด้านการควบคุม เนื่องจากเมื่อทำการปรับค่า k_d, k_p ให้มากเกินกว่าที่ระบบจะรับได้ จะเกิดการสั่นของแบบกลในแต่ละลิงค์

5.2.4 ปัญหาด้านชิ้นส่วนและอุปกรณ์ของแบบกล เนื่องจากแบบกลที่ใช้ในการทดลองเกิดระยะคลอน (Backlash) เล็กน้อยซึ่งทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนกับระบบ

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ในการควบคุมจริงของแบบกลโดยใช้รูปทรงแบบทั่วเรียว และวิธีการเปลี่ยนน้ำหนักของแบบกลนั้น ควรใช้สำหรับแบบกลบนระนาบ (Planar Robot) เพราะวิธีการนี้จะช่วยลดระยะเวลาในการออกแบบตัวควบคุม และยังสามารถตัดค่าพารามิเตอร์บางตัวของแบบกลได้ ทำให้การออกแบบ และทดสอบตัวควบคุมแบบอื่นๆ มีความรวดเร็วขึ้น

5.3.2 แนวทางในการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน และลดข้อจำกัดในการเคลื่อนที่ของแบบกลควรเพิ่มจำนวนข้อต่อ และเพิ่มลักษณะการเคลื่อนของแบบกลให้มีจำนวนมากขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] หุ่นยนต์ (Online), Available: <http://th.wikipedia.org>, (3 January 2012).
- [2] ภาควิชา รักศรี, หุ่นยนต์อุตสาหกรรม ประเภทต่างๆ (Online), Available: <http://www.coe.or.th>, (3 January 2012).
- [3] อนุวัฒน์ บำรุงกิจ, การออกแบบและสร้างแขนกลสองแขนกันรotonต์ที่ควบคุมโดยใช้หลักการเคลื่อนที่นูนวนลดที่สุด, วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยศรีนครินทร์, 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] มนูษก็ งานทอง, การพัฒนาตัวควบคุมตำแหน่งสำหรับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเก่า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลชั้นนำ, 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. & Al-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. **IEEEInt. 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 Instrumentarion, 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



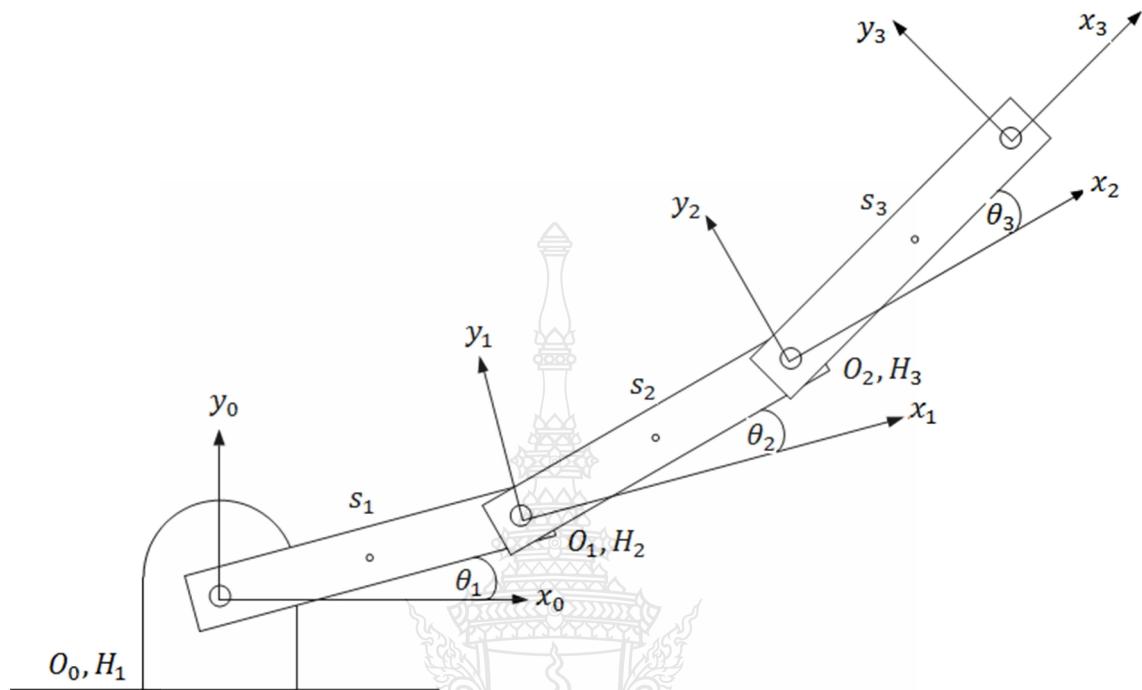


ภักดี

การคำนวณสมการต่างๆ ของเบนกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

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 หาก

$$J_{s1} = \begin{bmatrix} J_{p1} \\ J_{01} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_0 \times {}_{(0)}\vec{r}_{0,s1} & 0 & 0 \\ \bar{Z}_0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ โดยที่ } \bar{Z}_0 = [0 \ 0 \ 1]^T$$

$$\text{และ } {}_{(0)}\vec{r}_{0,s1} = {}_{(0)}\vec{r}_{s1} = \left[\frac{l_1}{2} c_1 \quad \frac{l_1}{2} s_1 \quad 0 \right]^T$$

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

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

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

$$\therefore \bar{Z}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ด้วย ${}^{(0)}\vec{r}_{1,s3} = {}^{01}R {}^{(1)}\vec{r}_{s3}$

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

$$(1) \vec{R}_{s3} = \begin{bmatrix} l_2 c_2 + l_3 c_{23} / 2 \\ l_2 s_2 + l_3 s_{23} / 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$(0) \vec{R}_{1,s3} = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_2 c_2 + l_3 c_{23} / 2 \\ l_2 s_2 + l_3 s_{23} / 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$(0) \vec{R}_{1,s3} = \begin{bmatrix} l_2 c_{12} + l_3 c_{123} / 2 \\ l_2 s_{12} + l_3 c_{123} / 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{မြ} (0) \vec{R}_{0,s3} = \begin{bmatrix} l_1 c_1 + l_2 c_{12} + l_3 c_{123} / 2 \\ l_1 s_1 + l_2 s_{12} + l_3 s_{123} / 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\therefore J_{s3} = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 - l_2 s_{12} - l_3 s_{123} / 2 & -l_2 s_{12} - l_3 s_{123} / 2 & -l_3 s_{123} / 2 \\ l_1 c_1 + l_2 c_{12} + l_3 c_{123} / 2 & l_2 c_{12} + l_3 c_{123} / 2 & l_3 c_{123} / 2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

မြ (0) $I_i^{(s)}$ မျှန်တဲ့လဲ Link (0) $I_1^{(s)}$; (0) $I_2^{(s)}$ မျှန်တဲ့လဲ (0) $I_3^{(s)}$

$$\tilde{\text{ဒုဂ္ဗာ}} (0) I_1^{(s)} = {}^0 R {}^1 R I^{(s)} {}^0 R {}^T$$

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

$$\therefore {}_{(0)}I_1^{(s)} = \frac{1}{12}m_1l_1^2 \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 \\ -s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

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

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

$${}_{(2)}I^{(s)} = \frac{1}{12}m_2l_2^2 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}_{(0)}I_2^{(s)} = \frac{1}{12}m_2l_2^2 \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 \\ s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}_{(0)}I_2^{(s)} = \frac{1}{12}m_2l_2^2 \begin{bmatrix} s_{12}^2 & -c_{12}s_{12} & 0 \\ -c_{12}s_{12} & c_{12}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

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

类似 ${}_{(3)}I^{(s)} = \frac{1}{12}m_3l_3^2 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

$${}_{(0)}I_3^{(s)} = \frac{1}{12}m_3l_3^2 \begin{bmatrix} c_{123} & -s_{123} & 0 \\ s_{123} & c_{123} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{123} & s_{123} & 0 \\ -s_{123} & c_{123} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}_{(0)}I_3^{(s)} = \frac{1}{12}m_3l_3^2 \begin{bmatrix} s_{123}^2 & -c_{123}s_{123} & 0 \\ -c_{123}s_{123} & c_{123}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

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

$$c_1c_{12} + s_1s_{12} = c_2$$

$$c_1c_{13} + s_1s_{13} = c_{23}$$

$$c_{12}c_{13} + s_{12}s_{13} = c_3$$

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

$$M_{12} = m_2(\frac{1}{2}l_1l_2c_2 + \frac{1}{3}l_2^2) + m_3(l_2^2 + \frac{1}{3}l_3^2 + l_2l_3c_{23} + l_1l_2c_2 + \frac{1}{2}l_1l_3c_{23})$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ພາຄ້າ Vector of Gravitational Forces, $G(q)$ ຈາກ

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

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

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

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

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

$$u(q) = -m_1 [0 \quad -g \quad 0] \begin{bmatrix} l_1 c_1 / 2 \\ l_1 s_1 / 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$-m_2 [0 \quad -g \quad 0] \begin{bmatrix} l_1 c_1 + l_2 c_{12} / 2 \\ l_1 s_1 + l_2 s_{12} / 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$-m_3 [0 \quad -g \quad 0] \begin{bmatrix} l_1 c_1 + l_2 c_{12} + l_3 c_{123} / 2 \\ l_1 s_1 + l_2 s_{12} + l_3 s_{123} / 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$= +m_1 g l_1 s_1 / 2 + m_2 g l_1 s_1 + m_2 g l_2 s_{12} / 2 + m_3 g l_1 s_1 + m_3 g l_2 s_{12} + m_3 g l_3 s_{123} / 2$$

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

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

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

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

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

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

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

∴ គោលនឹងការណ៍ស្តីពី Dynamic Model ទូទៅនេះ

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

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

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

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

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

ก.2 การคำนวณ Trajectory generation

การคำนวณนี้เพื่อใช้การควบคุมแบบ Point to Point กำหนดให้แขนกลทั้ง 3 ลิ้งค์ เริ่มเคลื่อนที่จากมุม 0 องศา โดยในลิ้งค์ที่ 1 เคลื่อนที่ไปที่มุม 45 องศา ลิ้งค์ที่ 2 เคลื่อนที่ไปที่มุม -30 องศา ลิ้งค์ที่ 3 เคลื่อนที่ไปที่มุม 20 องศา

โดยในการเคลื่อนที่จะต้องไปยังตำแหน่งที่วางไว้ในระยะเวลา 2 วินาที และให้แขนกลอยู่ในสภาพวงที่ตลอดเวลาจะได้

$$\text{Link 1} \quad \theta_i = 0 \quad \theta_f = 45^\circ \quad \dot{\theta}_i = 0 \quad \dot{\theta}_f = 0 \quad t_i = 0 \quad t_f = 2$$

$$\text{Link 2} \quad \theta_i = 0 \quad \theta_f = -30^\circ \quad \dot{\theta}_i = 0 \quad \dot{\theta}_f = 0 \quad t_i = 0 \quad t_f = 2$$

$$\text{Link 3} \quad \theta_i = 0 \quad \theta_f = 20^\circ \quad \dot{\theta}_i = 0 \quad \dot{\theta}_f = 0 \quad t_i = 0 \quad t_f = 2$$

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 และขั้นตอนสมการใหม่จะได้

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

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 ที่ได้เข้าไปในระบบจะใช้วิธี Pole Placement

โดยกำหนดให้ระบบมีผลตอบสนอง

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

ให้ $\xi = 1$ เพื่อทำให้ผลตอบสนองของระบบเป็นแบบ Critically Damp System

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

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

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

ตัวอย่าง

แทนค่า ω_n เท่ากับ 100 จะได้

$$\begin{aligned} k_d &= 2\omega_n = 2 \times 100 = 200 \\ k_p &= \omega_n^2 = 100^2 = 10000 \end{aligned}$$



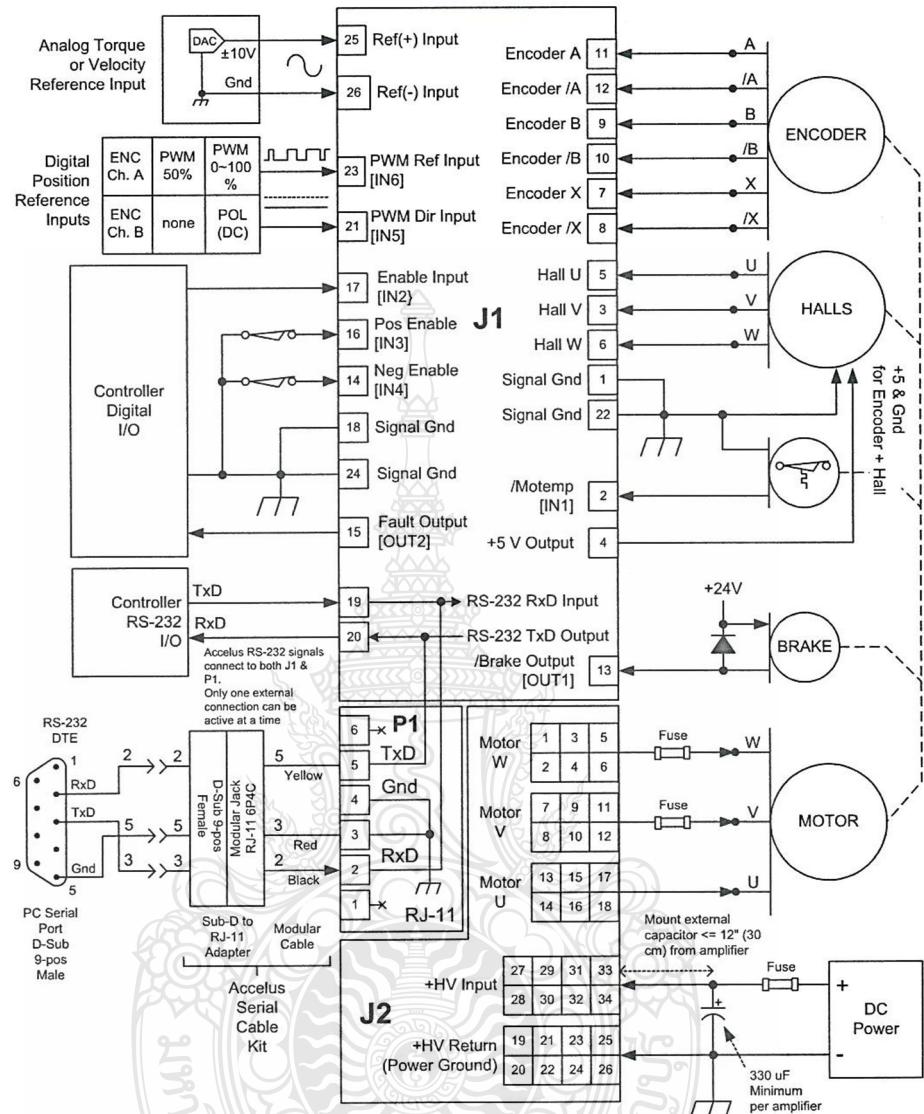
ภาคผนวก ๑

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 6.7	20~90 10 3.3	VDC, Transformer-isolated ADC (1 sec) peak input current 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 +5Vs		
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). 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 _T 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 0.8 °C/W	PC board to ambient, convection-cooled, 90° mounting PC board to ambient, fan-cooled, 300 linear ft/min.	
Amplifier internal resistance			
NOTES	1. Digital inputs [IN1], [IN3], [IN4], [IN5], and [IN6] & outputs [OUT1] & [OUT2] have alternate functions (programmable). Default functions are shown here.		

AMPLIFIER CONNECTIONS



ภาพที่ ๖.๑ 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

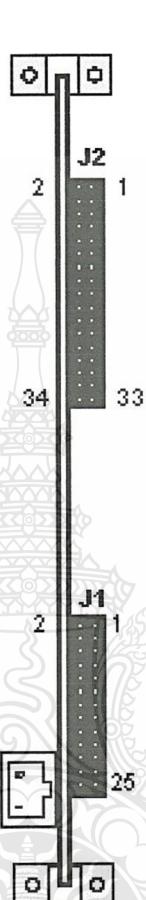
PC BOARD MATING CONNECTORS

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!

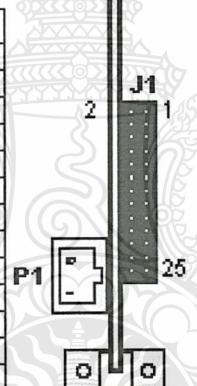
J2 connections are made to *groups* of pins for current-sharing. All pins in a group must be connected when laying out pc boards.

Do not connect to single pins for signals in this group. This will exceed current rating of individual pins.



PIN	J2 SIGNAL
2	Motor Phase W
4	
6	
8	
10	Motor Phase V
12	
14	
16	
18	Motor Phase U
20	
22	
24	
26	+HV Return (Power Ground)
28	+HV Input
30	
32	
34	

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



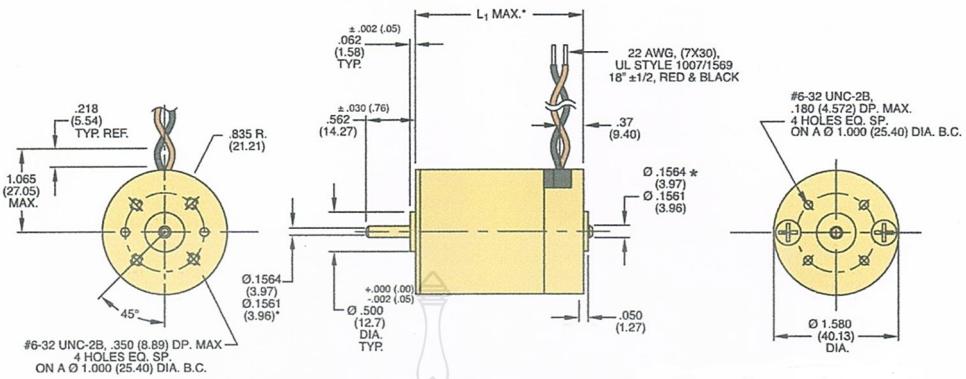
PIN	J1 SIGNAL
1	Signal Ground
3	Motor Hall V
5	Motor Hall U
7	Encoder X (Index)
9	Encoder B
11	Encoder A
13	[OUT2] Motor Brake Output
15	[OUT1] Fault Output
17	[IN2] Enable Input
19	RS-232 RxD Input
21	[IN5] Direction Input
23	[IN6] PWM Ref Input
25	+/-10V Ref Input

Notes

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



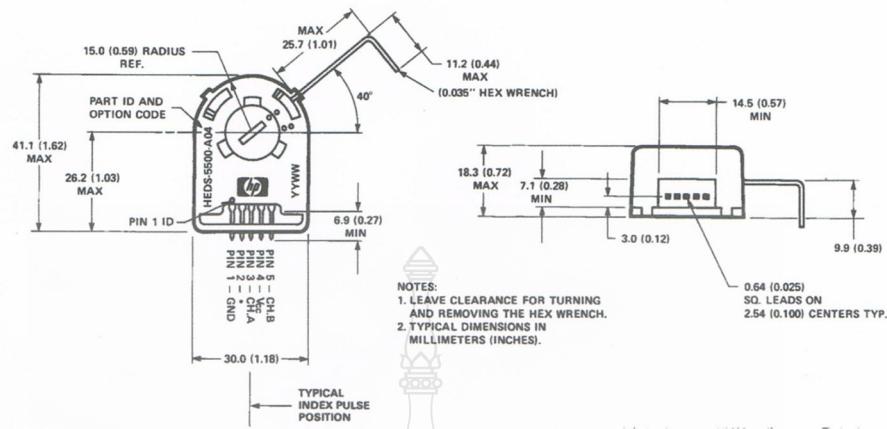
ภาพที่ ๖.๓ มอเตอร์ไฟฟ้า

ตารางที่ ๖.๒ 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

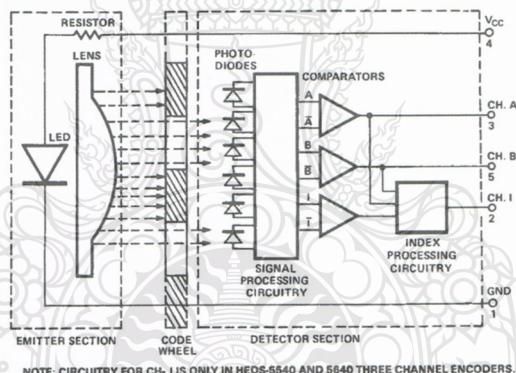
Package Dimensions

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 ๔ 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 kΩ 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 kΩ pull-up resistors required for HEDS-5540 and 5640.

Encoding Characteristics

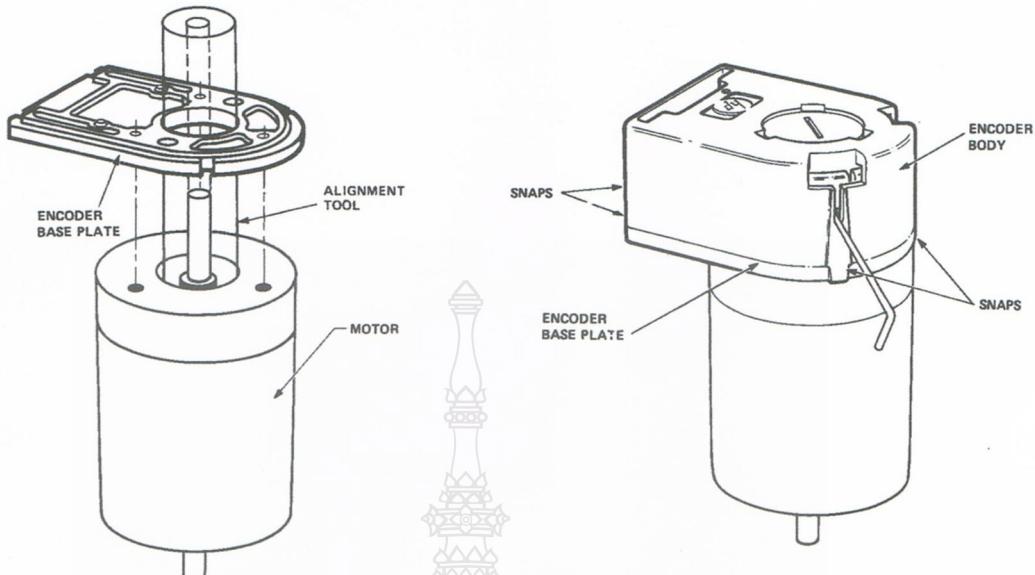
Encoding Characteristics over Recommended Operating Range and Recommended Mounting Tolerances unless otherwise specified. Values are for the worst error over the full rotation.

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		Δφ		2	20	°e
	Position Error		Δθ		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		Δφ		2	15	°e
	Position Error		Δθ		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		Δφ		2	15	°e
	Position Error		Δθ		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	t ₁	10	100	250		ns
	-25°C to +100°C -40°C to +100°C	t ₁	-300	100	250		ns
	CH. I fall after CH. B or CH. A rise	t ₂	70	150	300		ns
	-25°C to +100°C -40°C to +100°C	t ₂	70	150	1000		ns

Note: See Mechanical Characteristics for mounting tolerances.

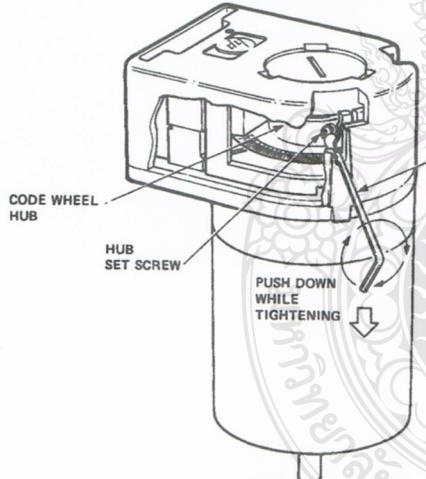
*Typical values specified at V_{CC} = 5.0 V and 25°C.

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.

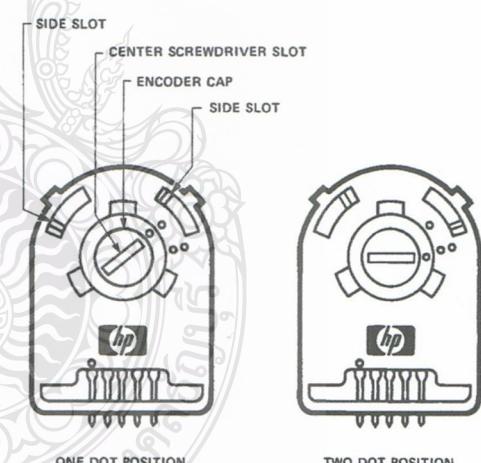
1a. For HEDS-5540, 5640 and HEDM-5500, 5600: Slip alignment tool onto motor shaft. With alignment tool in place, mount encoder baseplate onto motor as shown above. Tighten screws. Remove alignment tool.



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.

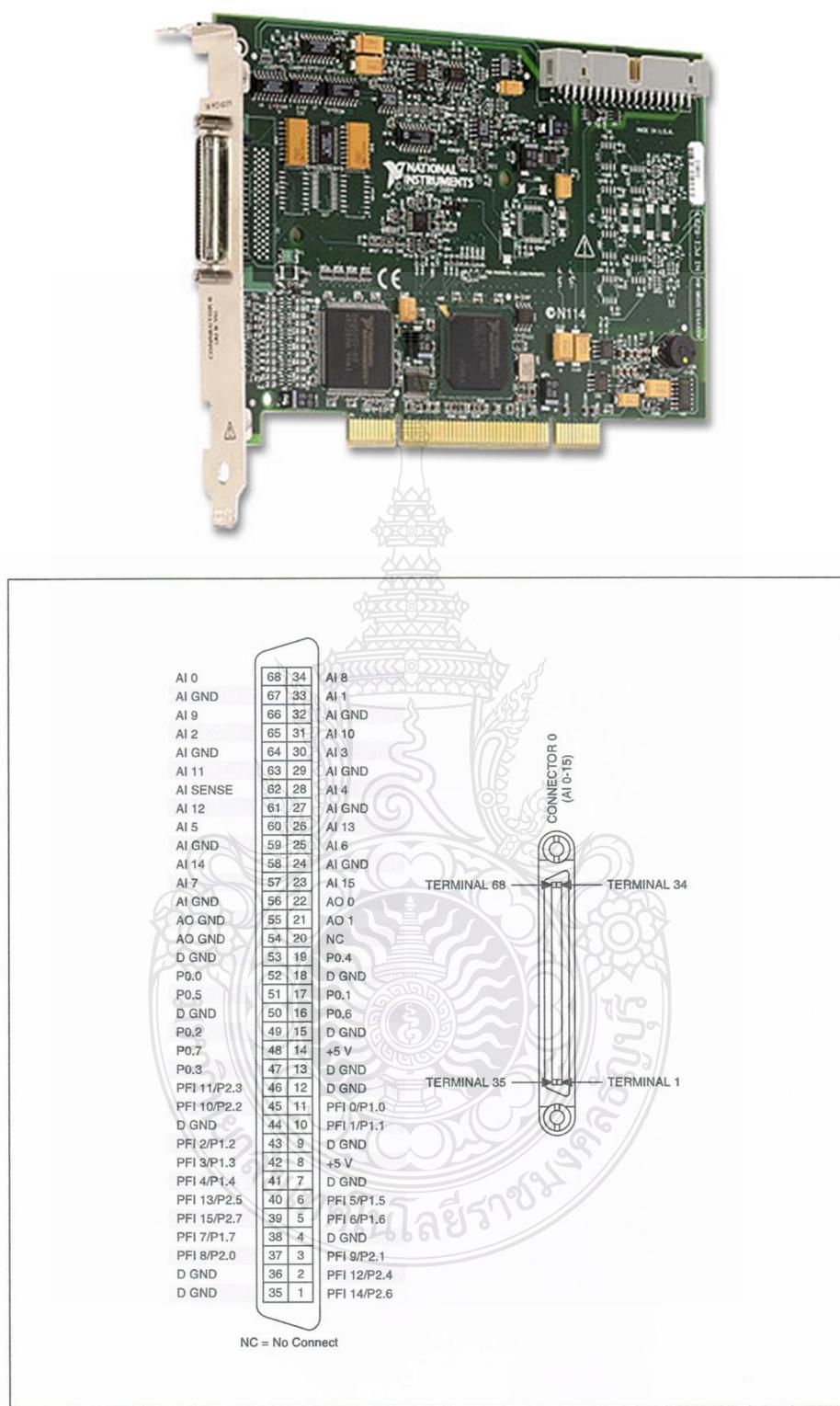
3b. While continuing to apply a downward force, rotate the hex wrench in the clockwise direction until the hub set screw is tight against the motor shaft. The hub set screw attaches the code wheel to the motor's shaft.

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 ๖.๖ ข้อมูลจำเพาะ DAQ card NI PCI 6221

ตารางที่ ๔.๔ 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 ๔.๔ 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 ๔.๔ แสดงข้อมูลจำเพาะของ DAQ card NI PCI 6221(ต่อ)

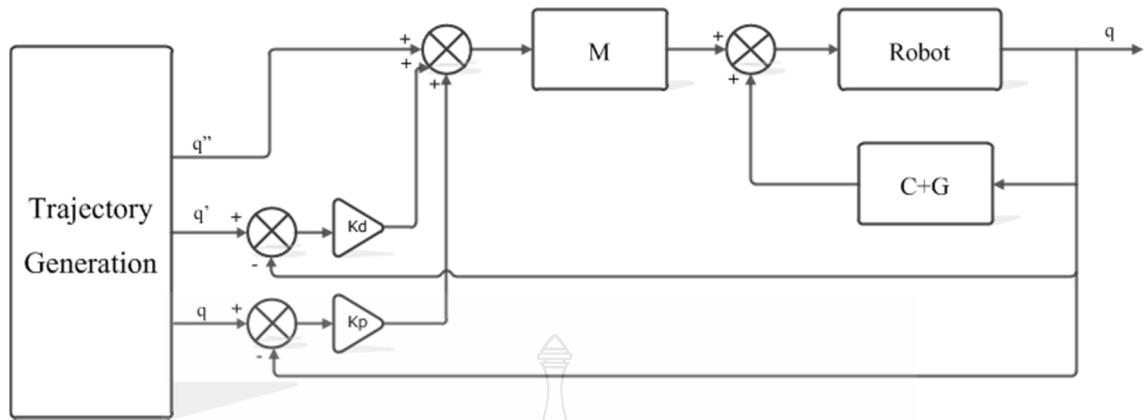
Counter/Timers	
Counters	2
Number of DMA Channels	4
Buffered Operations	Yes
Debouncing/Glitch Removal	Yes
GPS Synchronization	No
Maximum Range	0 V , 30 V
Max Source Frequency	80 MHz
Minimum Input Pulse Width	12.5 ns
Pulse Generation	Yes
Resolution	32 bits
Timebase Stability	50 ppm
Logic Levels	24 V
Physical 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

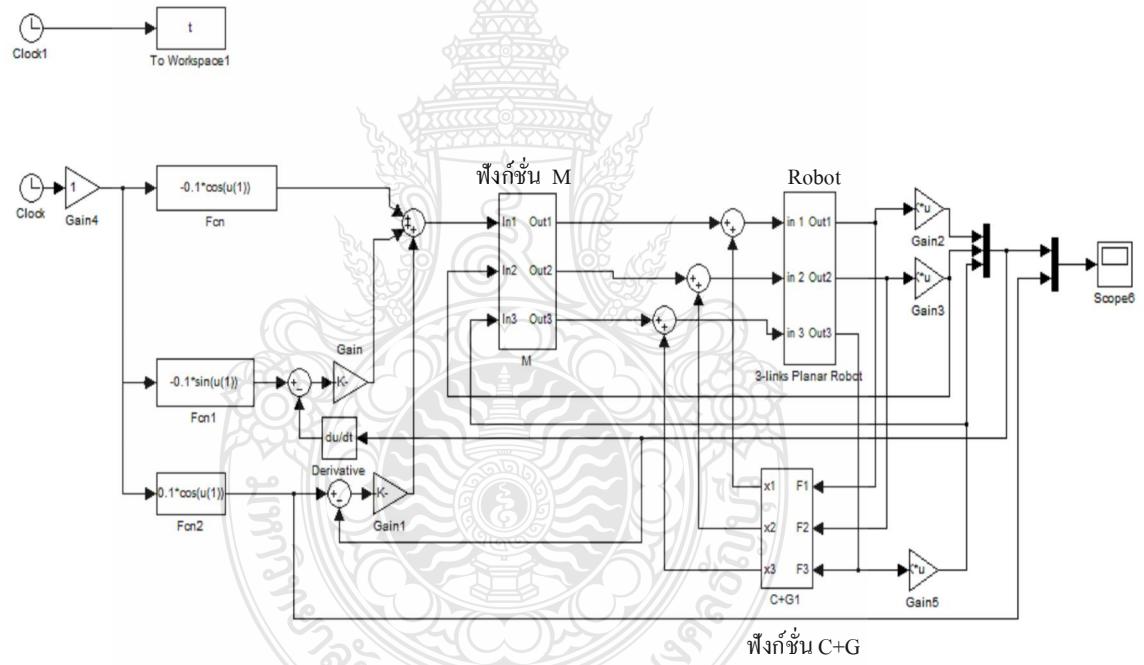
	จำนวน (ชิ้น)	น้ำหนัก (kg)/ชิ้น
1. ฝาข้างลิ้งค์ที่ 1	2	1.47
2. ฝาข้างลิ้งค์ที่ 2	2	0.76
3. ตู้มคล่วงน้ำหนัก	1	12.6
4. มอเตอร์ไ/dr	4	1.8
5. เกียร์ทด	3	0.7
6. ลิ้งค์ที่ 3	1	3.08



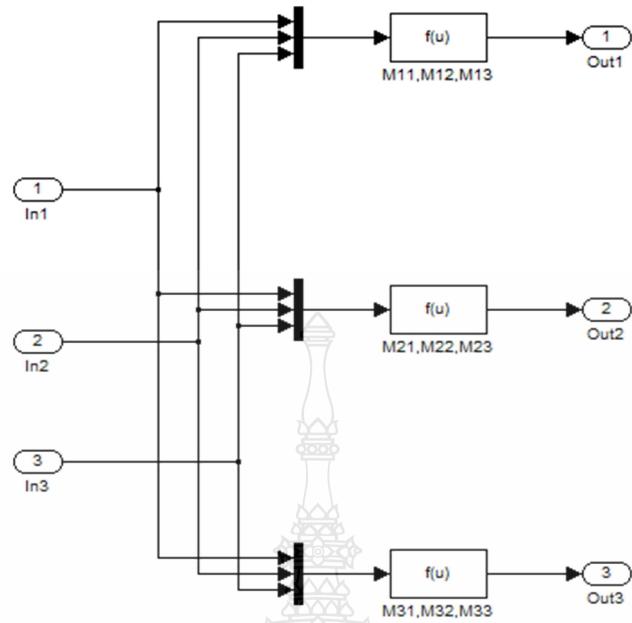




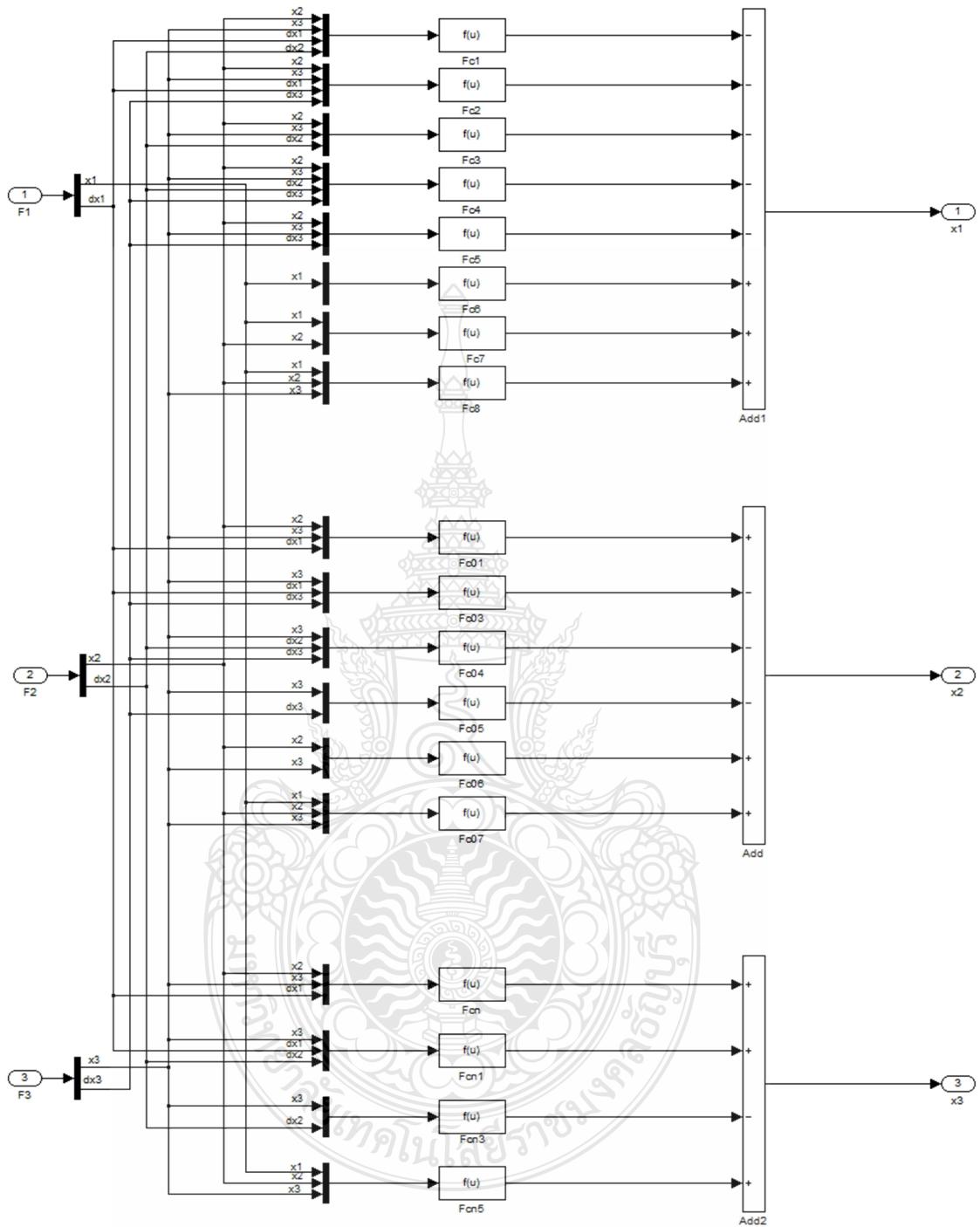
ภาพที่ ค.1 โหมดการควบคุมแบบคอมพิวเตอร์ สำหรับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์



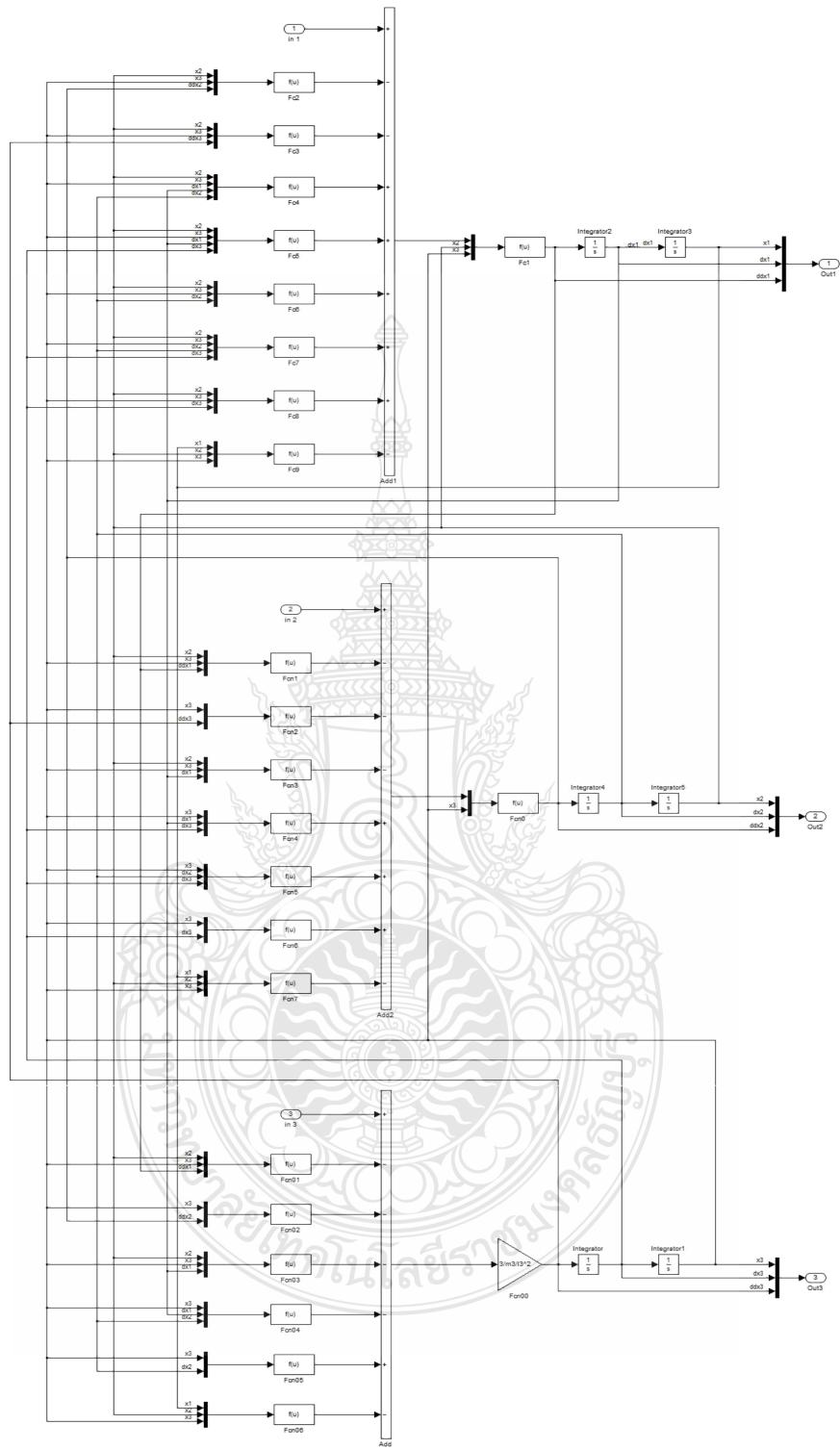
ภาพที่ ค.2 โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการทดลองตัวควบคุมแบบคอมพิวเตอร์



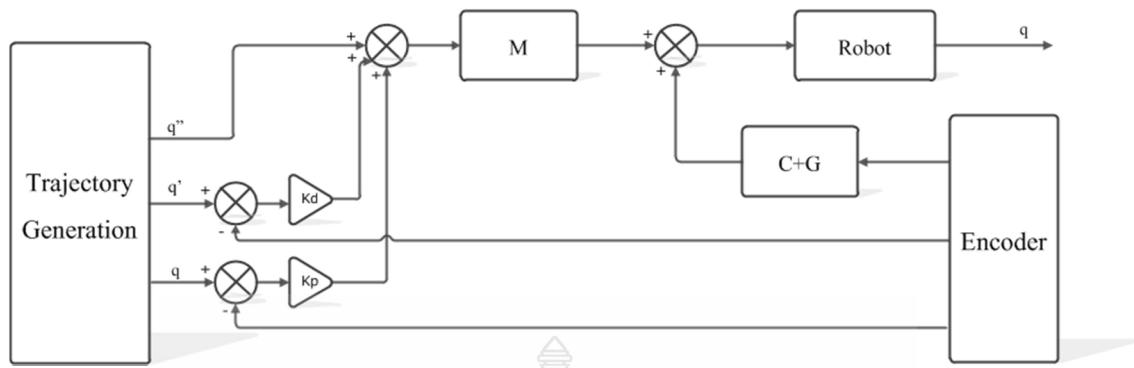
ภาพที่ ค.3 โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการทดลองตัวควบคุมแบบคอมพิวเตอร์ ในชุดฟังก์ชัน M



ภาพที่ ค.4 โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ในการทดลองตัวควบคุมแบบคอมพิวเตอร์ ในชุดฟังก์ชัน C+G

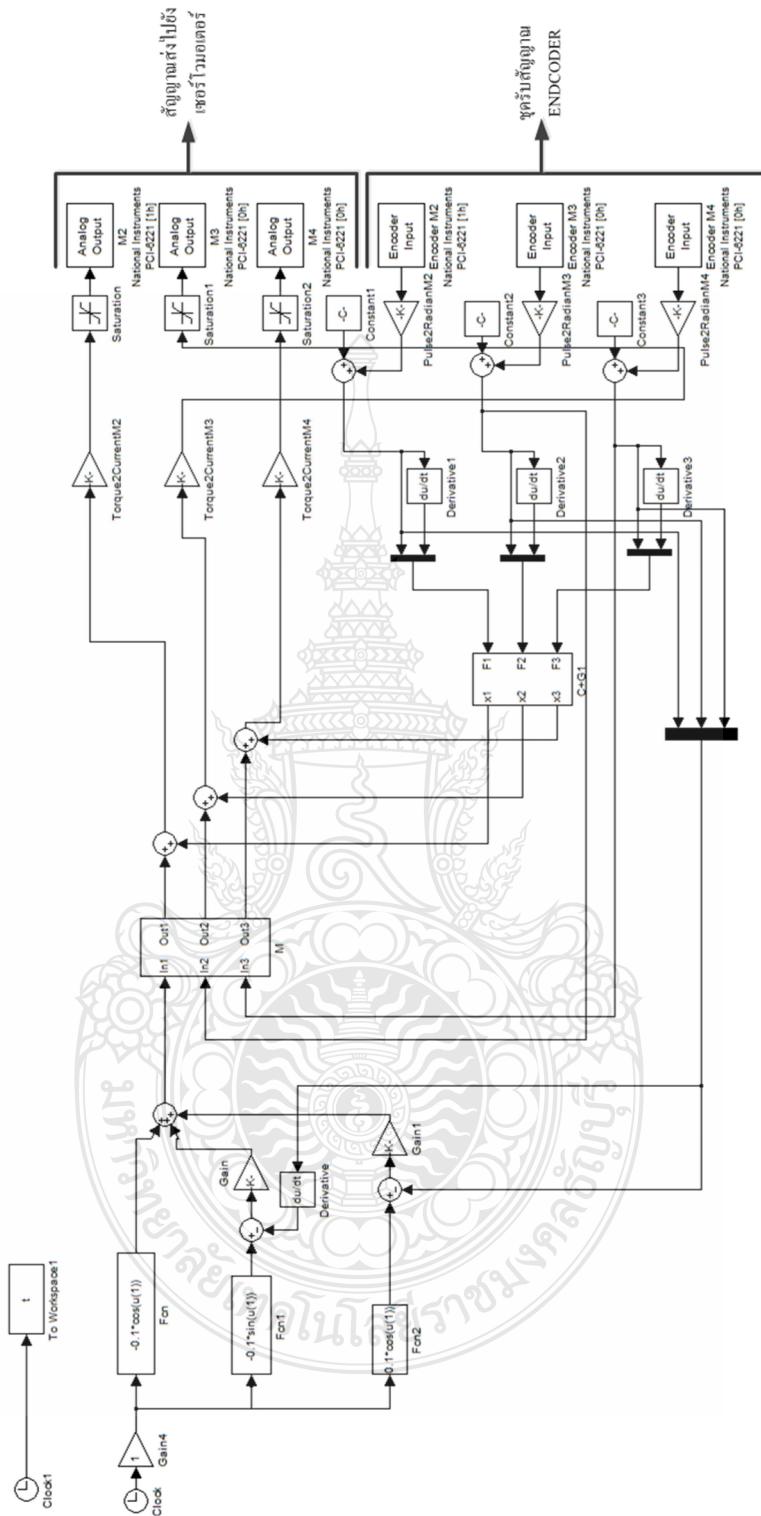


ภาพที่ ค.5 โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการทดลองตัวควบคุมแบบคอมพิวเตอร์ ในชุด ROBOT

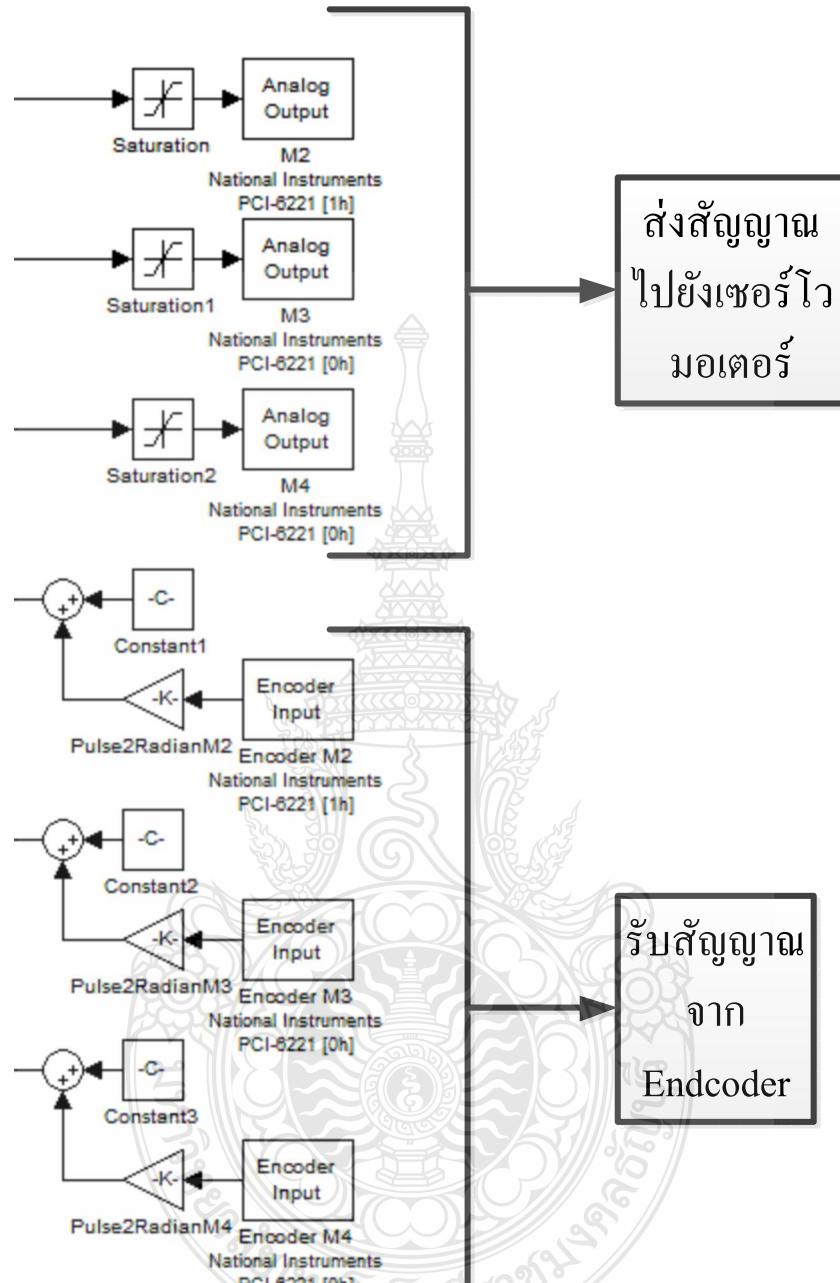


ภาพที่ ก.6 โฉมเดลการควบคุมแบบคอมพิวทอร์ค สำหรับ หุ่นยนต์อุตสาหกรรม

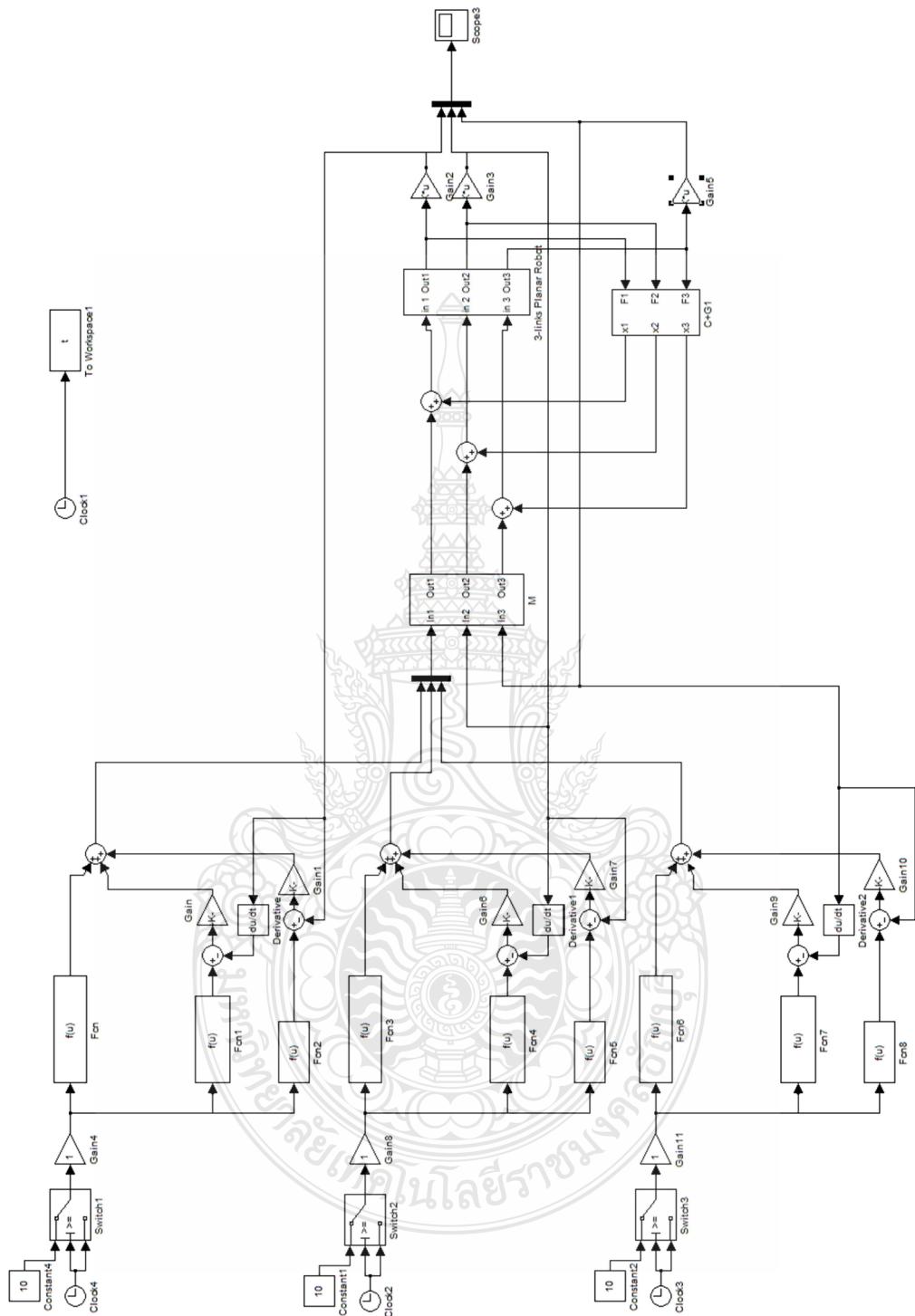
ในส่วนของฟังชั่น M และ C+G ดูได้ในภาคผนวก ก. ในภาพที่ ก.3 และภาพที่ ก.4 ตามลำดับ



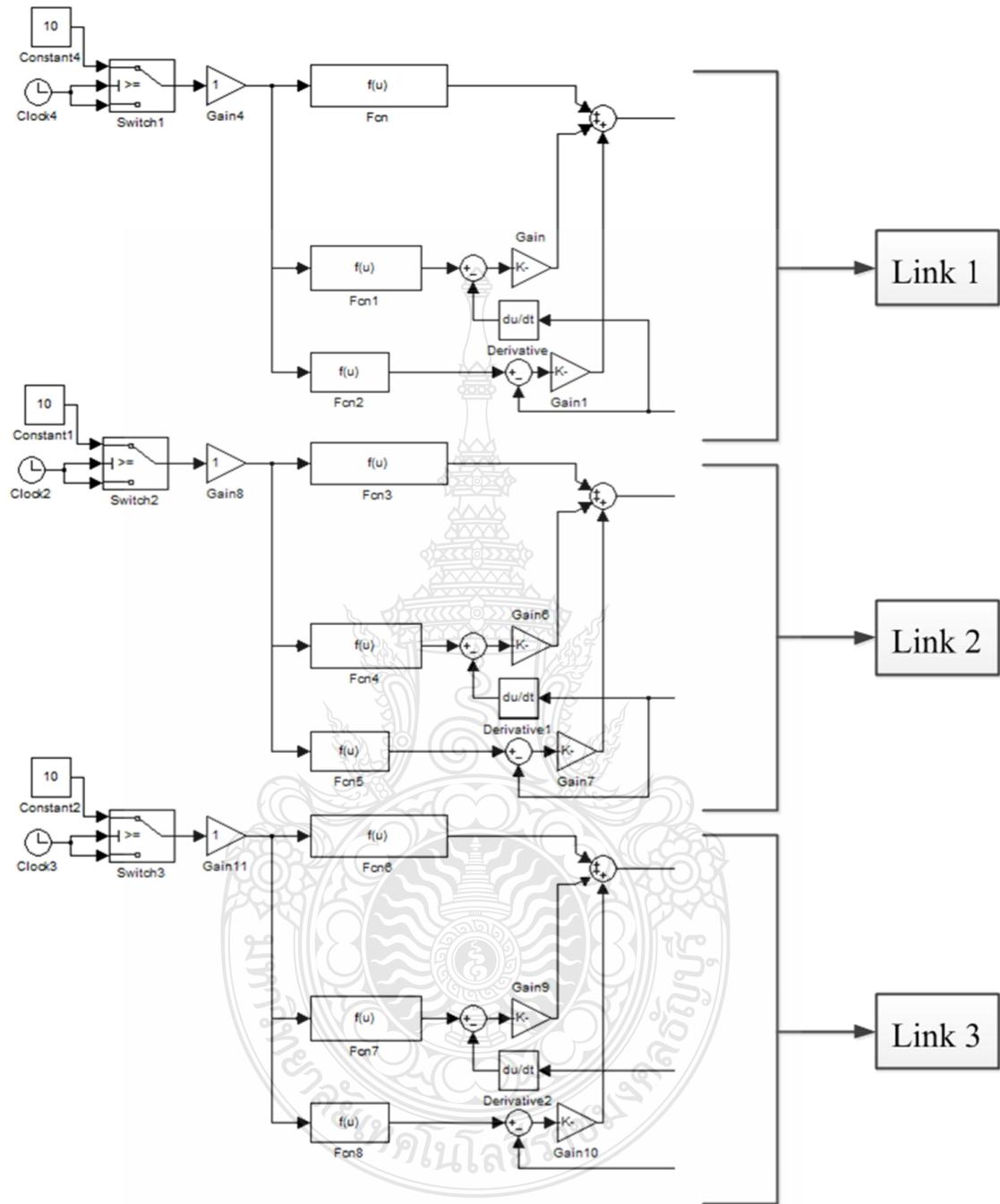
ภาพที่ ค.7 โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับ หุ่นยนต์อุตสาหกรรม ในการทดลองตัวควบคุมแบบคอมพิวเตอร์



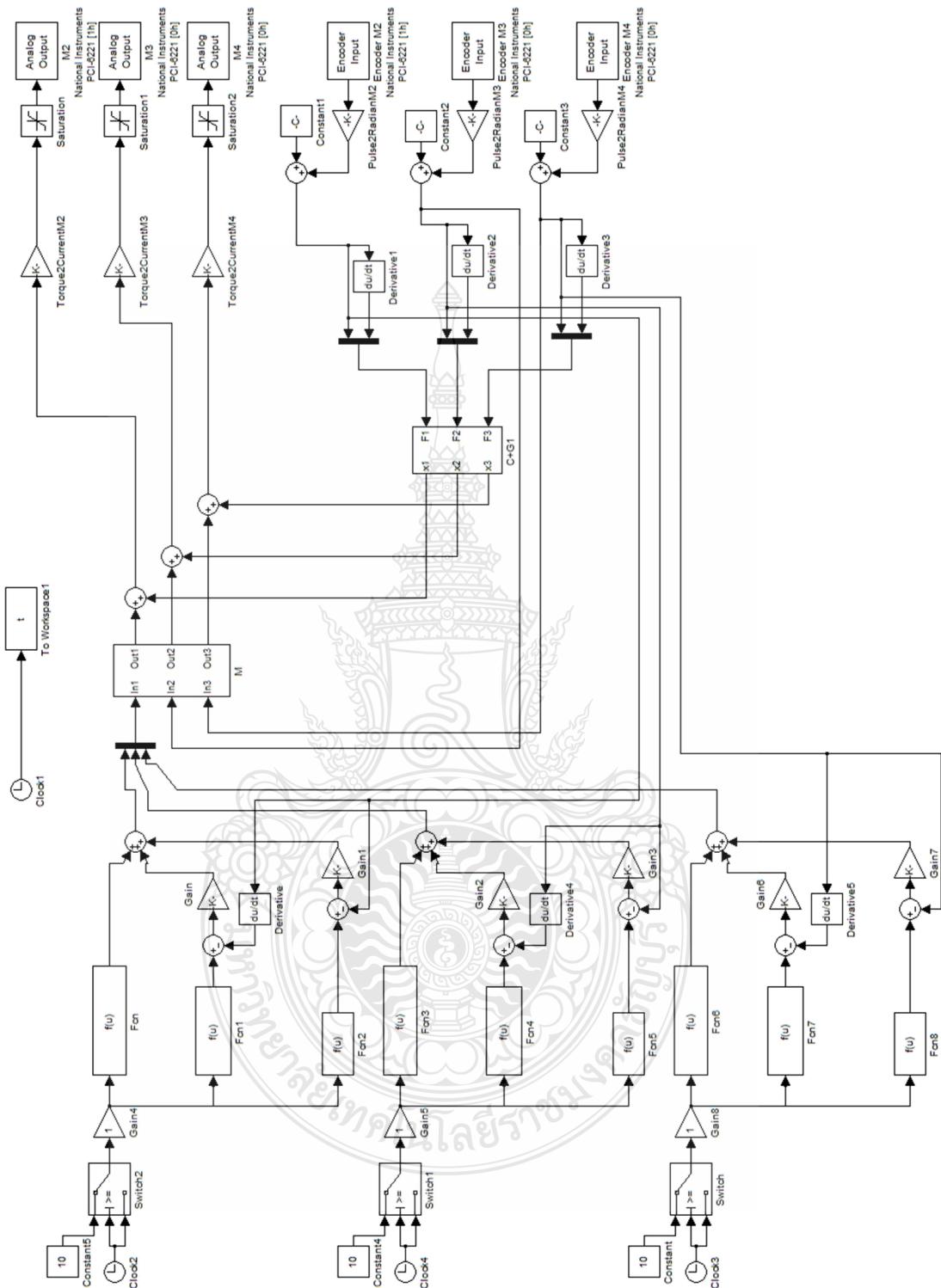
ภาพที่ ค.8 โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับ หุ่นยนต์อุตสาหกรรม ในการทดลองตัวควบคุม
แบบคอมพิวเตอร์ ในส่วนรับ-ส่งสัญญาณ



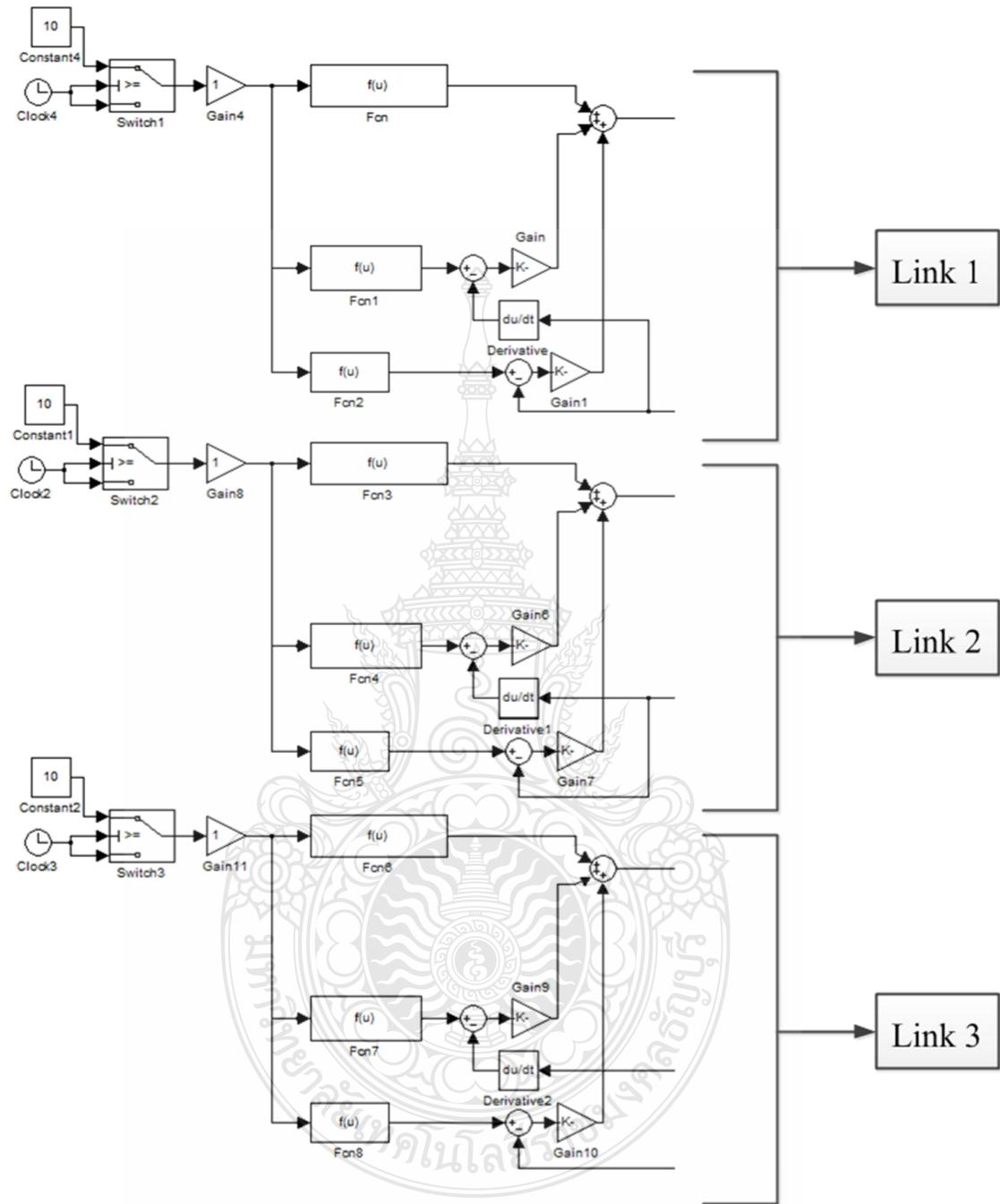
ภาพที่ ค.9 โปรแกรม MATLAB/Simulink สำหรับ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในการทดลองการเคลื่อนที่ (Trajectory Planning)



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



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



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



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
 สถาบันบัณฑิตศึกษาแห่งประเทศไทย (ศบก) ร่วมกับ มหาวิทยาลัยธุรกิจศรีปทุม

ABAC
 GRADUATE SCHOOL
of BUSINESS

การประชุมเสนอผลงานวิจัย
ระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 28
28th National Graduate Research Conference

28 – 29 มิถุนายน 2556
ณ หอประชุมนานาชาติ John XXIII มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ วิทยาเขตสุวรรณภูมิ

รายงานคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิตรวจและพิจารณาผลงานวิจัย

ระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 28

มหาวิทยาลัยอัสสัมชัญ

ดร. กิตติ โพธิกิตติ

ดร. กิติกร ดาวพิเศษ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรยุทธ ศรีวรกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นันทพันธ์ ชินคำประเสริฐ

ดร. เชิดพงษ์ ศรีบุญเรือง

ดร. สงบ ลักษณะ

รองศาสตราจารย์ ดร. ชิตาภา เกตวัลห์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิรพันธ์ แคงเดช

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กิตติพันธ์ เตชะกิตติโภจน์

รองศาสตราจารย์พรชัย สุนทรพันธ์

ดร. เชิดชัย เชี่ยวชีรกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ลินจง ฉาง ໂຮຈັນປະເສຣີສູ

Dr. Ismail Ali Siad

ดร. ทองดี กิจบุญชู

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เกรียงสิน ประสงค์สุกานุจัน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริอร ไชยภรัตน์

ดร. ชาญชัย อธิจิตสกุล

Dr. Ioan Voicu

ดร. อภิชาติ อินทร์วิศิษฐ์

Dr. John Arthur Barnes

Dr. Adarsh Batra

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

ดร. อุdemศักดิ์ โสภณกิจ

ดร. ชนินทร์ จิตติวิทยานุกูล

ดร. วิศรุต ปาริยะประเสริฐ

Dr. Jean-Marc Marcel Dautrey

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตติภา งามเกริกโขติ

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ดร. กิญญา รัตนพันธุ์

รองศาสตราจารย์ สุเมธ แก่นมณี

ดร. อัจฉริยะ อุปการะกุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัชพงษ์ ตั้งมณี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยเชษฐ์ สาบวิจตร

สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

รองศาสตราจารย์ ดร. เรืองศักดิ์ แก้วธรรมใจ

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

รองศาสตราจารย์ ดร. วิรัช สงวนวงศ์วาน

รองศาสตราจารย์ ดร. พูลศักดิ์ แสงสันต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองศาสตราจารย์ ดร. พนารัตน์ ปานมณี

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

รองศาสตราจารย์ ดร. คงกลับดินทร์ แสงอาสวาริยะ

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-Acetoxyphynyl)-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 Rattanathammata
28035	Logistics Efficiency Measurement of Distribution for Vehicle Lubricant Manufacturers in Thailand	Piyapraph 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	Kanitha 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 Wongvisuthikul
28041	Developing a Geographic Information Dataset for 3D Route	Kraiut 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 $\tau = C + G + M[\ddot{q}_d + k_d(q_d - \dot{q}) + k_p(q_d - q)]$, 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

การควบคุมแบบคอมพิวทอร์ค้ำหัวแบบแขนกลแบบ 2 ข้อต่อบนระนาบ

Computed Torque Control for 2-Link Planar Robot

ชนกันติป วงศ์ประเมษฐ์^{1*} และมนูษักษ์ จันทอง¹

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

คำสำคัญ คอมพิวทอร์, กฎการควบคุม, วิธีวางโพล

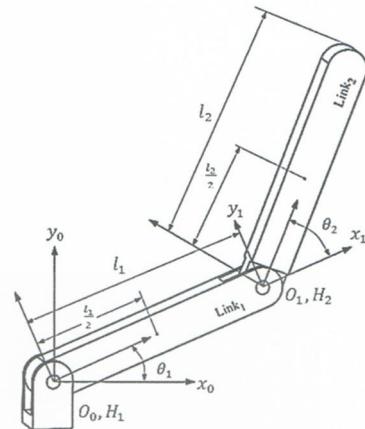
Abstract

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

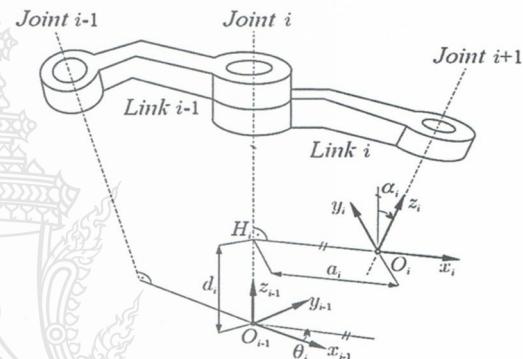
Keywords : computed torque control, control law, pole placement

บทนำ

ในปัจจุบันทุนยนต์อุตสาหกรรมได้มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมการผลิต เช่น งานที่ต้องการความแม่นยำ สะดวกที่มีความเสี่ยงต่อมนุษย์ หรือมีข้อจำกัดที่มนุษย์ไม่สามารถปฏิบัติงานในด้านนั้นๆ ได้ เช่น ความอ่อนส้า สะดวกจิตใจ งานที่เกี่ยวข้องกับสารภัยมันค่าพรังสีหรือสารเคมี เป็นต้น จากข้อจำกัดข้างต้นทำให้มีแนวคิดในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลอย่างง่าย โดยใช้แขนกลแบบ 2 ข้อต่อหนึ่งระบบ (2-Link planar robot) ในการสร้างแบบจำลองเพื่อเป็นต้นแบบในการพัฒนา และเพิ่มประสิทธิภาพให้กับแขนกลต่อไป โดยได้ทำการศึกษาสมการฟอร์เวิร์ด kinematics และสมการการเคลื่อนที่ของแขนกล เพื่อใช้ในการควบคุมแขนกลแบบคอมพิวเตอร์ โดยได้ศึกษางานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้อง [6] ได้กล่าวถึงการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์และไนโตริกส์ ของแขนกล และการทดสอบการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกล โดยใช้โปรแกรม visual c++ และโปรแกรม Solidwork Cosmos Motion ในการทดสอบความถูกต้องของสมการต่างๆ [5] ได้กล่าวถึงการควบคุมการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมที่สุดของแขนกล เพื่อให้แขนกลเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนด โดยใช้เวลาข้อมูลที่สุดโดยการเคลื่อนที่จะใช้การควบคุมแบบพื้นที่



รูปที่ 1 Planar robot 2 link



รูปที่ 2 Denavit-Hartenberg Parameters

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ของ Denavit-Hartenberg

Link <i>i</i>	<i>a_i</i>	<i>α_i</i>	<i>d_i</i>	<i>θ_i</i>
1	<i>l₁</i>	0	0	<i>θ₁</i>
2	<i>l₂</i>	0	0	<i>θ₂</i>

วิธีการศึกษา

1. สมการฟอร์เวิร์ด kinematics (Forward kinematics)

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

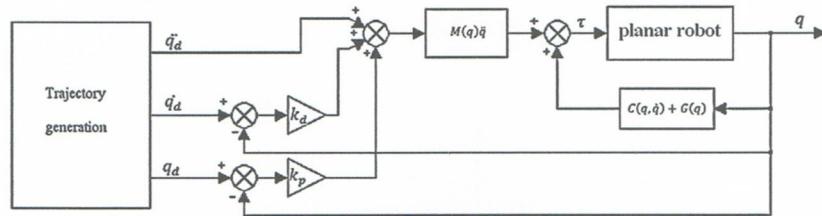
แทนค่า Transformation matrix ของทุนยนต์ดังสมการที่ 1

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

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



รูปที่ 3 โมเดลการควบคุมแบบคอมพิวเตอร์

ในการหาค่า k_d และ k_p ใช้วิธี Pole placement โดยกำหนดสมการระบบที่มีผลตอบสนองที่ต้องการ ดังนี้

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

กำหนด $z = 1$ เพื่อที่ทำให้ผลตอบสนองของระบบเป็นแบบ Critically-damped system ดังนั้นสมการที่ 12 เป็น

ได้ใหม่คือ

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

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

การทดสอบ

การทดสอบนี้ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) เพื่อทดสอบผลตอบสนองของสมการการเคลื่อนที่ และทดสอบระบบควบคุมแบบคอมพิวเตอร์ โดยได้ทำการทดลองที่ความสัมภาระต่ำ ($\mu = 0.1$) ให้กับ link 1 และ link 2 ที่มีความยาว $l_1 = 0.43$ m และ $l_2 = 0.40$ m ตามลำดับ ผลของการทดสอบแสดงในรูปที่ 5-6

เท่ากับ 0.1 โดยภายในซอฟแวร์ได้ทำการเขียนแบบจำลองและตัวควบคุมดังรูปที่ 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.

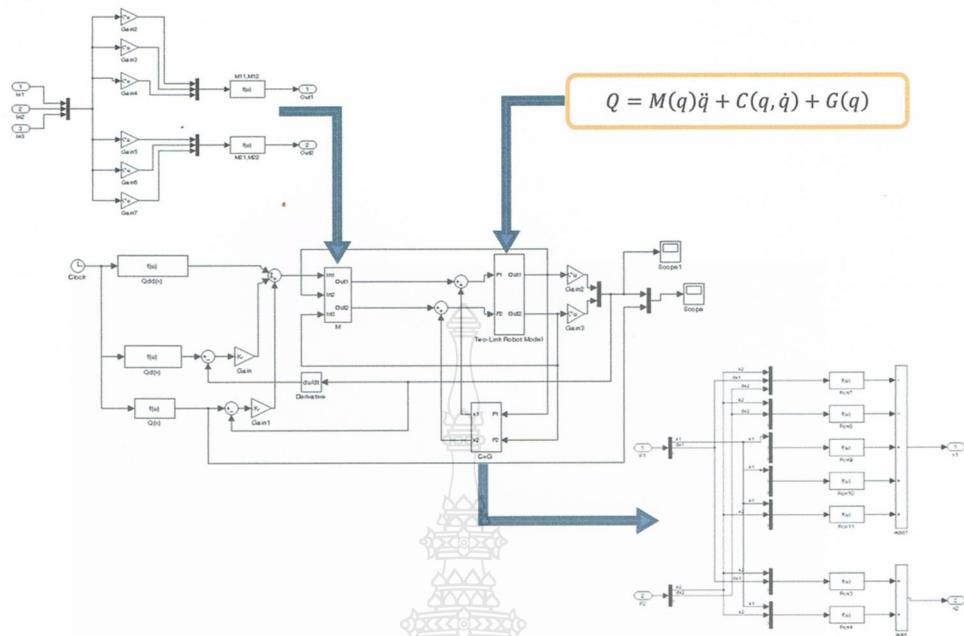
การศึกษาวิจัย

ในการศึกษาวิจัยได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ 1.

การทดลองเดือดค่า ω_n เพื่อใช้ในการหาค่า k_d, k_p และ

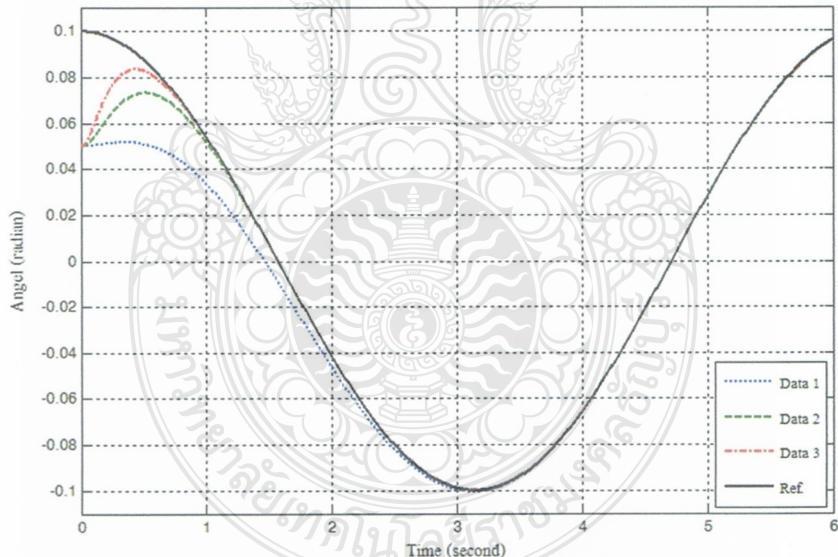
2. การทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของแขนกลเมื่อความยาวของแขนกลเปลี่ยนแปลง

1. การทดลองเลือดค่า ω_n เพื่อใช้ในการหาค่า k_d, k_p ใน การทดลองนี้ได้ตั้งค่าเป้าหมายให้กับแขนกล โดยให้มีการเคลื่อนที่ตามเส้นแนวนิวเคลียร์ (sine curve) จากนั้นเลือกค่า ω_n ให้กับระบบ จึงทำการเปรียบเทียบผลตอบสนอง โดยใช้ค่า ω_n จำนวน 3 ค่า คือ 2, 5 และ 8 โดยทั้ง 2 ถึงจะใช้ค่า ω_n เมื่อกัน โดยผลการทดลองจะแสดงในรูปกราฟ ดังรูปที่ 5-6



รูปที่ 4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และตัวควบคุมแบบคอมพิวเตอร์

Planar Robot Link 1



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 $k_p = 25$

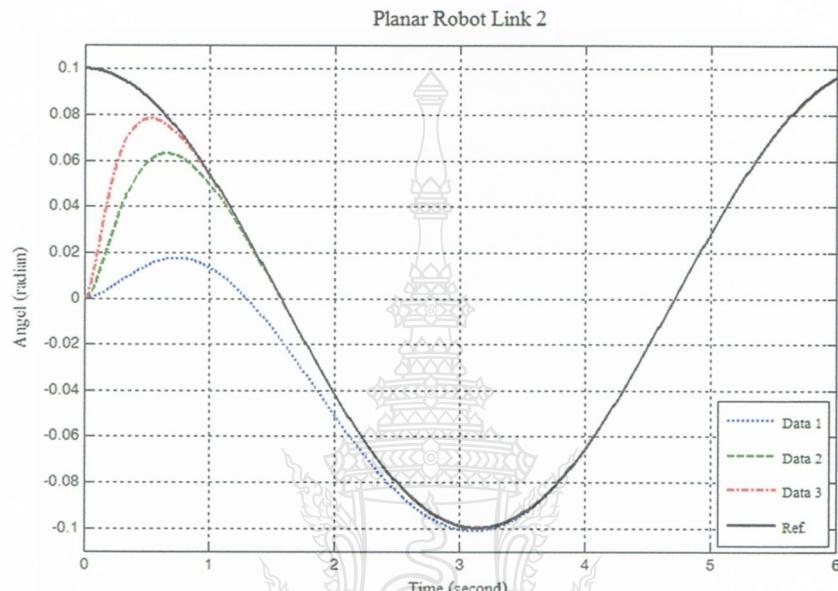
Data 3 มีค่า $\omega_n = 8$ จะได้ค่า $k_d = 16$ ค่า $k_p = 64$

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

จากราฟในรูปที่ 5 จะสังเกตได้ว่า เส้น Data

1 ใช้เวลาประมาณ 3 วินาที จึงจะเข้าสู่เส้นอ้างอิง ในส่วน

ของเส้น Data 2 ใช้เวลาประมาณ 1.5 วินาที จึงจะเข้าสู่

เส้นอ้างอิง และในเส้น Data 3 ใช้เวลาประมาณ 1 วินาที จึงเข้าสู่เส้นอ้างอิง

จากราฟในรูปที่ 6 เส้น Data 1 ใช้เวลา

ประมาณ 4 วินาที จึงจะเข้าสู่เส้นอ้างอิง โดยที่เส้น Data

2 ใช้เวลาประมาณ 2 วินาที จึงจะเข้าสู่เส้นอ้างอิงและใน เส้น Data 3 ใช้เวลาประมาณ 1 วินาที จึงเข้าสู่เส้นอ้างอิง

เมื่อทำการเช็คค่าความผิดพลาดเมื่ออยู่ใน

สภาวะคงตัว (steady state error) จะพบว่า ค่า ω_n เท่ากับ

2 จะมีความผิดพลาดอยู่ในช่วง $\pm 3 \times 10^{-4}$ radian และค่า

พลาดเมื่อเข้าสู่สภาวะคงตัวน้อยที่สุดจึงทำการเลือก ω_n

เท่ากับ 8

2. การทดลองเพื่อศึกษาผลกระบวนการขั้นตอน

เมื่อความยาวของแขนกลมีการเปลี่ยนแปลง

ในการศึกษาวิจัยนี้ ยังคงใช้ตัวควบคุมแบบเดิม

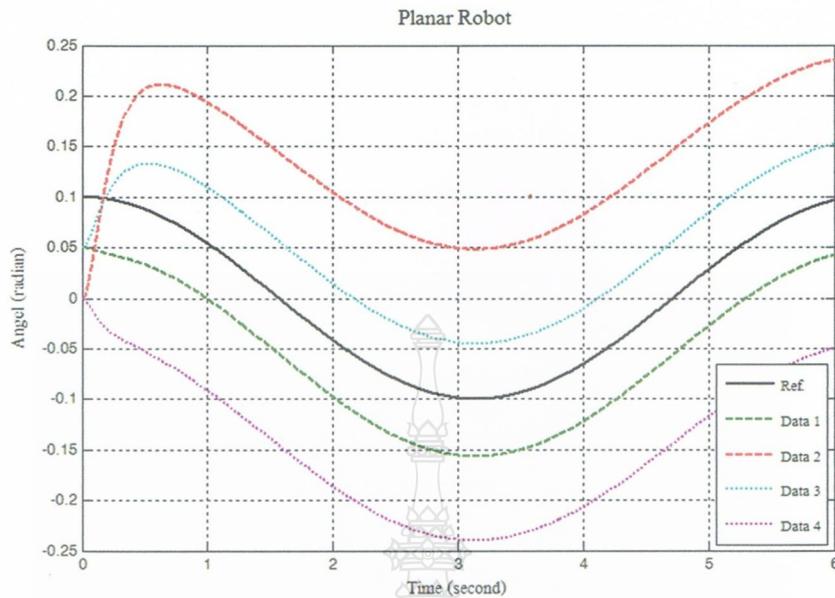
และเลือกใช้ค่า ω_n ที่มีผลตอบสนองดีที่สุดมาใช้ในการ

ทดลองโดยค่า ω_n ที่เลือกไว้คือ 8 จะได้ค่า $k_d = 16$ ค่า

$k_p = 64$ กำหนดให้ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป โดยปรับ

เพิ่ม - ลด ความยาวในลิ้งค์ 1 เท่านั้น ได้ใช้ความยาวที่

0.03 m. ในการปรับเพิ่ม - ลด



รูปที่ 7 ผลการทดลองเมื่อความยาวในลิ้งค์ 1 เปลี่ยนแปลง

จากราฟในรูปที่ 7 เส้น Data 1 จะเป็นความยาวที่เพิ่มขึ้นของลิ้งค์ 1 จะมีค่าคลาดเคลื่อนที่ -0.06 radian เส้น Data 2 จะเป็นความยาวที่เพิ่มขึ้นของลิ้งค์ 2 จะมีค่าคลาดเคลื่อนที่ 0.14 radian เส้น Data 3 จะเป็นความยาวที่ลดลงของลิ้งค์ 1 จะมีค่าคลาดเคลื่อนที่ 0.06 radian และในเส้น Data 4 จะเป็นความยาวที่ลดลงของลิ้งค์ 2 จะมีค่าคลาดเคลื่อนที่ -0.14 radian

สรุปผลการทดลอง

จากการทดลอง โดยการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในซอฟแวร์ MATLAB/Simulink โดยใช้ตัวควบคุมแบบคอมพิวเตอร์ที่ได้ออกแบบไว้ในการทดลอง ได้กำหนดการเคลื่อนที่ตามเส้นแนววิถีโค้งซายน์ (sine curve) การทดลองแรกจะเป็นการเลือกค่า ω_n ให้กับระบบเพื่อให้ผลตอบสนองเป็นไปตามความต้องการ โดยค่า ω_n ที่เลือกมี 3 ค่าคือ $2, 5, 8 \text{ rad/s}$ ในการ

ทดลองได้ค่าที่ให้ผลตอบสนองคือสุดคือ ω_n เท่ากับ 8 ซึ่งทำให้ได้ค่า $k_d = 16$ และค่า $k_p = 64$ โดยระบบมีความผิดพลาดอยู่ในช่วงสภาวะคงตัวเท่ากับ $\pm 0.97 \times 10^{-4}$ radian จะเห็นได้ว่าเมื่อค่า ω_n เพิ่มขึ้นระบบจะมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น ในส่วนการทดลองที่สองได้ทำการเปลี่ยนแปลงความยาวของแขนกลในลิ้งค์ 1 เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้น โดยได้ใช้ค่า k_d และ k_p ของการทดลองแรก คือ $k_d = 16$ และค่า $k_p = 64$ ผลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อความยาวของแขนกลในลิ้งค์ 1 มีการเปลี่ยนแปลงไปจากความยาวเดิมที่ได้ออกแบบไว้ในชุดควบคุม จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของแขนกลทั้ง 2 ลิ้งค์ โดยที่ค่าความคลาดเคลื่อนของแขนกลในลิ้งค์ 2 จะมีค่ามากกว่าลิ้งค์ 1 เนื่องจากในลิ้งค์ 2 จะต้องนำความยาวในลิ้งค์ 1 เข้ามาร่วมด้วย แต่ถ้ายกเว้นการเคลื่อนที่ตามเส้นแนววิถีโค้งที่ได้กำหนดไว้ยังคงเคลื่อนที่ได้เหมือนเดิม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Man Zhihong, 2005. **Robotics.** 2nd ed. Singapore: Prentice Hall.
- [2] Lung-wen tsai, 1999. **Robot analysis.** United States of America: John wiley & Sons., inc.
- [3] Sciacicco, L. & Siciliano, B., 2000. **Modelling and Control of Robot Manipulator.** 2nd ed. London: Springer-Verlag.
- [4] James B. Dabney and Thomas L. Harman, 2004. **Masterring Simulink.** United States of America: John wiley & Sons., inc.
- [5] ชนกฤต ภัทรเกย์วิทัย ถินชัย ชินวรรัตน์ และ ศิริพรรดา ชงชัย. 2550. การควบคุมการเคลื่อนที่เหมาะสมที่สุดแบบพีไอดีแบบกล. การประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 21
- [6] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ ณัฐศร พรหมเพ็ชร. 2551. การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์และไนโามิกส์ของแบบกล PA10-7C. การประชุมวิชาการเครือข่าย วิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22

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



Certificate

This is to certify that

Chanatip Vongpraramat

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

T. Siriwoharn

Asst. Prof. Theerathanick Siriwoharn, Ph.D.
President of the Council of the
Graduate Studies Administrators of Thailand

K. Phothikitti
Kitti Phothikitti, Ph.D.
Dean, Graduate Studies
Assumption University

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – นามสกุล

นายชนาธิป วงศ์ประเมษฐ์

วัน เดือน ปีเกิด

24 กุมภาพันธ์ 2528

ที่อยู่

239/16 หมู่ที่ 4 ตำบลในเมือง อำเภอเมือง
จังหวัดชัยภูมิ 36000

การศึกษา

พ.ศ. 2546

สำเร็จการศึกษาระดับใบประกอบวิชาชีพ (ปวช.) สาขาว่างยนต์
จากวิทยาลัยเทคนิคชัยภูมิ

พ.ศ. 2548

สำเร็จการศึกษาระดับใบประกอบวิชาชีพชั้นสูง (ปวส.)
สาขาวิศวกรรมคานยนต์ จากวิทยาลัยเทคนิคชัยภูมิ

พ.ศ. 2551

สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลชั้นนำ

ประสบการณ์ทำงาน

พ.ศ. 2553 - 2554

รับราชการทหาร ณ กองบัญชาการมณฑลทหารบกที่ 21 ค่ายสุวนารี
จังหวัดนครราชสีมา

