



รายงานฉบับสมบูรณ์

การศึกษาออกแบบ และสร้างอุปกรณ์ส่วนแขนของหุ่นยนต์
โดยเลียนแบบการเคลื่อนที่ในส่วนแขนของมนุษย์

A STUDY ON THE DESIGN AND CONSTRUCTION
OF THE ROBOTIC ARM DEVICE IMITATES MOVEMENT IN THE HUMAN ARM

ชื่อหัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส สัจวรศิลป์

คณะผู้ร่วมโครงการ

ว่าที่ ร.ต.พิชิตพล โชติกุลนันท์

วิทยาลัยวิศวกรรมชีวการแพทย์ มหาวิทยาลัยรังสิต

ได้รับทุนสนับสนุนกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัย

สถาบันวิจัย มหาวิทยาลัยรังสิต

เดือน กันยายน ปี 2562 ที่ส่งรายงาน

ชื่อโครงการภาษาไทย	การศึกษาออกแบบ และสร้างอุปกรณ์ส่วนแขนของหุ่นยนต์โดยเลียนแบบการเคลื่อนที่ในส่วนแขนของมนุษย์
ชื่อหัวหน้าโครงการ	รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส สังวรศิลป์
คณะผู้ร่วมโครงการ	ว่าที่ร้อยตรีพิชิตพล โชติกุลนันท์
หน่วยงาน	วิทยาลัยชีวการแพทย์ มหาวิทยาลัยรังสิต
ปีที่ส่งรายงาน	2562

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบหุ่นยนต์แขนกลโดยเลียนแบบการเคลื่อนที่เสมือนมนุษย์ โดยอาศัยหลักการวิทยาศาสตร์การแพทย์ อิเล็กทรอนิกส์ และระบบควบคุม ผลการจัดทำโครงการสามารถออกแบบหุ่นยนต์แขนกลนั้น ประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 5 ส่วน คือ 1) ระบบสมองกลฝังตัวประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno 2) ส่วนควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ประมวลผลด้วย Matlab 3) ส่วนขับเคลื่อนมอเตอร์ประกอบด้วยบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์กระแสตรงแบบ H-Bridge 4) ระบบแขนหุ่นยนต์ และ 5) ส่วนการประมวลผลระบบควบคุมหุ่นยนต์ โดยการควบคุมหุ่นยนต์นั้นสามารถกำหนดการเคลื่อนที่ โดยการให้ Step input และแบบ Trajectory Control

โดยในงานวิจัยนี้ได้แสดงวิธีการประมาณค่าของสมการระบบหุ่นยนต์ ในแต่ละแกนซึ่งมีผลเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการประมาณจากระบบจริง อีกทั้งในการควบคุมโดยการประมาณเส้นทางการเคลื่อนที่จะมีการใช้ Step input และ Trajectory Control ผลการทดสอบการเคลื่อนที่นั้นการใช้ Trajectory Control จะมีค่า RMS Error ที่น้อยกว่า สำหรับข้อเสนอแนะที่สำคัญ การพัฒนาระบบต่อไปจะต้องใช้ตัวควบคุมระบบที่ซับซ้อนมาช่วยประมวลผล จะทำให้ค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่มีค่าลดลง

คำสำคัญ หุ่นยนต์แขนกล, Trajectory Control, เส้นทางการเคลื่อนที่

Title	A Study on The Design and Construction of A Robotic Arm Device That Imitates Movements of The Human Arm
Name of Head of Project	Assoc. Prof. Dr. Manus Sangworasilp
Name of Co-Ordinator	Acting Sub LT. Phichitphon Chotikunnan
Department	College of Biomedical Engineering, Rangsit University
Year	2019

ABSTRACT

This objective of this project was to design a robotic arm device that imitates movements of the human arm. This project is based on the principles of medical science, electronics, and control systems. The design and construction consisted of 5 main parts: 1) the embedded system using microcontroller Arduino Uno, 2) signal processing with Matlab, 3) motor driver circuits with DC motors and H-bridge board, 4) mechanical robot arm system, and 5) the control system using step input and trajectory control.

In this research, equations for estimating robot positioning, in each axis, were compared with the resulting position of the actual system. In addition, to control the motion path, step input and trajectory control were used. The results of motion testing indicate that using trajectory control produces greater accuracy, having a lower RMS error value. This provides a suggestion for further development of robot arm control systems, which will advance controllers designed for this process. Ultimately, this control system reduces movement-related error, which is desirable for a number of applications.

Keywords Robot Arm, Trajectory Control, Movement path

กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำโครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยความอนุเคราะห์และคำแนะนำจากบุคคลหลายท่านดังต่อไปนี้ ขอขอบคุณผู้อุปการะทุนสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้ และข้าพเจ้าขอขอบคุณ สถาบันวิจัย มหาวิทยาลัยรังสิต ที่ให้การสนับสนุนทุนในการทำวิจัยในครั้งนี้ ตลอดจนคณะกรรมการ ท่านผู้ทรงคุณวุฒิให้คำปรึกษา และคำแนะนำ เพื่อแนวทางแก้ไขปัญหาดังกล่าว ตลอดช่วงเวลาการทำวิจัย ตลอดจนทั้งคณาจารย์ และวิทยาลัยวิศวกรรมชีวการแพทย์ทุกท่าน และผู้ที่ให้สนับสนุนข้าพเจ้าขอขอบคุณที่ได้ช่วยเหลือให้คำปรึกษาตลอดจนแนวทางการทำวิจัยของโครงการนี้จนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำโครงการ



สารบัญ

		หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย		ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		ข
กิตติกรรมประกาศ		ค
สารบัญ		ง
สารบัญตาราง		ช
สารบัญรูป		ซ
บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
	1.3 สมมติฐานการทำโครงการ	2
	1.4 กรอบแนวคิดการทำโครงการ	3
	1.5 ขอบเขตของโครงการ	2
	1.6 ข้อกำหนด	3
	1.7 ขั้นตอนการศึกษา	4
	1.8 คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา	5
บทที่ 2	ทบทวนเอกสาร	6
	2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
	2.1.1 ทฤษฎีด้านหุ่นยนต์อุตสาหกรรม	6
	2.1.1.1 ลักษณะโครงสร้างของหุ่นยนต์	7
	2.1.1.2 อุปกรณ์ให้กำลังขับเคลื่อนของหุ่นยนต์	10
	2.1.1.3 ระบบควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรม	10
	2.1.1.4 ลักษณะการทำงานของแขนหุ่นยนต์	11
	2.1.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับวงจรระบบควบคุมหุ่นยนต์	15
	2.1.2.1 ระบบควบคุมวงจร	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.1.3 การควบคุมแบบเรียนรู้ซ้ำ	17
บทที่ 3	
อุปกรณ์และวิธีการจัดทำโครงการงาน	21
3.1 การออกแบบโครงสร้างฮาร์ดแวร์ และการออกแบบชุดควบคุมระบบ	21
3.1.1 ภาคการออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์แขนกลขนาดเล็ก	21
3.1.2 ระบบเซอร์โวมอเตอร์ 3 ชุด	23
3.1.2.1 การเลือกใช้มอเตอร์	23
3.1.2.2 บอร์ดขับมอเตอร์กระแสตรง	24
3.1.2.3 ตัวถอดรหัส	25
3.1.3 ระบบแขนจับหุ่นยนต์	26
3.2 การออกแบบระบบควบคุมหุ่นยนต์แขนกล	26
3.2.1 ระบบควบคุม PID ในการออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์	27
3.2.2 ระบบควบคุม ILC ในการทำงานร่วมกับระบบเดิม	28
3.3 กระบวนการวิธีการทดสอบระบบ	30
3.4. กระบวนการวิธีการทดสอบการจำลองโครงการงาน	30
3.4.1 การทดสอบการจำลองโครงการงาน	30
3.4.1.1 วัตถุประสงค์ในการทดลอง	30
3.4.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบระบบ	30
3.4.1.3 วิธีการทดลอง	30
3.4.2 การทดสอบการทำงานของโปรแกรมเพื่อทำการควบคุมหุ่นยนต์	31
บทที่ 4	
ผลการดำเนินงาน	37
4.1 ผลการจัดทำแขนกลของหุ่นยนต์ต้นแบบหุ่นยนต์	37
4.2 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ โดยวิธีการเคลื่อนที่แบบ Step Input	39
4.3 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ โดยวิธีการเคลื่อนที่แบบ Smooth Function	42
4.4 ผลการทดลองโดยใช้การควบคุมแบบ PID Control ร่วมกับการควบคุมแบบ ILC	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.1 ผลการทดสอบระบบในแกนมอเตอร์ A	43
4.4.2 ผลการทดสอบระบบในแกนมอเตอร์ B	47
4.4.3 ผลการทดสอบระบบในแกนมอเตอร์ C	51
4.4.4 สรุปผลการทดสอบระบบในมอเตอร์แต่ละแกน	55
บทที่ 5	
สรุปผลและวิจารณ์ผลการจัดทำโครงการ	56
5.1 สรุปผลการจัดทำโครงการ	56
5.2 ผลการจัดทำการอภิปรายโครงการ	57
5.3 ข้อเสนอแนะ	57
บรรณานุกรม	58
ประวัติผู้ทำโครงการ	59



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตารางเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้าง Link ของหุ่นยนต์และ แขนของมนุษย์	13
2.2 ชื่อเรียกและหน้าที่ของแต่ละ Joint และเปรียบเทียบกับแขนของมนุษย์	14
3.1 ตารางแสดงค่าผลการทดสอบ Step Input แขนของหุ่นยนต์	32
3.2 ตารางแสดงค่าเส้นทางการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ A โดยกำหนดให้เป็นไปตามสมการที่ 3.1	33
3.3 ตารางแสดงค่าเส้นทางการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ B โดยกำหนดให้เป็นไปตามสมการที่ 3.1	33
3.4 ตารางแสดงค่าเส้นทางการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ C โดยกำหนดให้เป็นไปตามสมการที่ 3.1	34
4.1 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่โครงสร้างหุ่นยนต์	38
4.2 แสดงตัวอย่างภาพตารางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในค่า Step Input	39
4.3 แสดงตัวอย่างตารางที่ใช้กำหนดค่าเกณฑ์การเรียนรู้ของระบบ ILC ในมอเตอร์ A, B และ C	43
4.4 แสดงผลการทดสอบค่า RMS Error ในแกน A ที่ดีที่สุด	46
4.5 แสดงผลการเปรียบเทียบ RMS Error ในแกน B	50
4.6 แสดงผลการเปรียบเทียบ RMS Error ในแกน C	54
4.7 แสดงผลสรุปการเปรียบเทียบค่า RMS Error ในแต่ละแกน	55

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การสอบเทียบการทำงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมโดยบริษัทผู้ผลิต	6
2.2 การสอนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมให้ทำงานเชื่อมโดยสั่งงานผ่านแป้นสอน	7
2.3 โครงสร้างคาร์ทีเซียน	8
2.4 โครงสร้างทรงกระบอก	8
2.5 โครงสร้างเชิงขั้ว	9
2.6 โครงสร้างมนุษย์	9
2.7 รูปแสดงการทำงานของแขนหุ่นยนต์	11
2.8 รูปแสดงการเปรียบเทียบแขนมนุษย์ และแขนหุ่นยนต์	11
2.9 แสดงโครงสร้างของ Link หรือท่อนแขนของตัวหุ่นยนต์	12
2.10 ข้อต่อหรือ Joint ของหุ่นยนต์และชื่อเรียก	13
2.11 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมแบบ PID	15
2.12 การทำงานของการควบคุมแบบเรียนรู้ซ้ำ	17
3.1 แสดงจุดหมุนต่างๆของแขนหุ่นยนต์จำลอง	22
3.2 แสดงการทำงาน จุดหมุนต่างๆของแขนหุ่นยนต์จำลอง	22
3.3 แสดงมอเตอร์ เบอร์ LX44WG	23
3.4 แสดงรายละเอียดคุณสมบัติของมอเตอร์ LX44WG	23
3.5 บอร์ดขับมอเตอร์กระแสตรง	24
3.6 ตัวถอดรหัสที่ใช้ในการประมาณค่ามุมของหุ่นยนต์	25
3.7 แสดงการทำงานของแขนหุ่นยนต์จำลอง	25
3.8 แสดงการทำงานของแขนหุ่นยนต์จำลอง	26
3.9 บล็อกไดอะแกรมของระบบหุ่นยนต์แขนกล	27
3.10 แสดงวิธีการออกแบบตัวควบคุมระบบโดยใช้ตัวควบคุม PID	27
3.11 แสดงวิธีการควบคุมระบบโดยใช้ ILC แบบ Serial	28
3.12 แสดงวิธีการควบคุมระบบโดยใช้ โปรแกรม Simulink	29

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 แสดง โปรแกรมจำลองที่ใช้ในการกำหนดค่า Initial ของระบบ	30
3.14 แสดง โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมแบบ Trajectory Control ของระบบ	35
3.15 แสดง ตัวอย่าง Sup System ใน โปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมแบบ Trajectory Control ของระบบ	36
4.1 แสดง โครงสร้างการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์	37
4.2 แสดง ค่า RMS Error ของหุ่นยนต์เมื่อใช้วิธีการควบคุม PID Control เพียงอย่างเดียว	42
4.3 แสดง ค่า RMS Error ของแกน A	44
4.4 แสดง ผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.10 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน A	44
4.5 แสดง ผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.25 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน A	45
4.6 แสดง ผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.50 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน A	45
4.7 แสดง ผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.75 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน A	45
4.8 แสดง ผลการทดสอบค่า RMS Error ที่ต่ำสุด ในแต่ละ Gain ของแกน A	46
4.9 แสดง ผลการเปรียบเทียบในระยะเวลาที่เกิดความผิดพลาดของแกน A	47
4.10 การเคลื่อนที่ของระบบแบบ Smoot Function แกน B	47
4.11 แสดง ผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.10 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน B	48
4.12 แสดง ผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.25 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน B	48
4.13 แสดง ผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.50 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน B	49
4.14 แสดง ผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.75 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน B	49
4.15 แสดง ผลการทดสอบค่า RMS Error ที่ต่ำสุด ในแต่ละ Gain ของแกน B	50
4.16 แสดง ผลการเปรียบเทียบในระยะเวลาที่เกิดความผิดพลาดของแกน B	51
4.17 การเคลื่อนที่ของระบบแบบ Smoot Function แกน C	51
4.18 แสดง ผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.10 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน C	52
4.19 แสดง ผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.25 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน C	52
4.20 แสดง ผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.50 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน C	53
4.21 แสดง ผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.75 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน C	53
4.22 แสดง ผลการทดสอบค่า RMS Error ที่ต่ำสุด ในแต่ละ Gain ของแกน C	54

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่

4.23 แสดงผลการเปรียบเทียบในระยะเวลาที่เกิดความผิดพลาดของแกน C

55



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันหุ่นยนต์ได้เข้ามามีบทบาทในการดำเนินชีวิตประจำวันของมนุษย์มากยิ่งขึ้น เทคโนโลยีหุ่นยนต์เป็นที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง และเป็นไปอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะเห็นได้จากการนำหุ่นยนต์มาใช้งานเพื่อช่วยผ่อนแรงของมนุษย์ หรือปฏิบัติงานในส่วนพื้นที่เสี่ยงภัย หรือมีอันตรายที่เกินขอบเขต ความสามารถของมนุษย์ที่จะสามารถปฏิบัติงานได้ เช่น การพัฒนาหุ่นยนต์เพื่อใช้ในงานวิจัยและสำรวจ ให้หุ่นยนต์สามารถทนต่อสภาพแวดล้อม และสามารถทำการควบคุมหุ่นยนต์ไปยังพื้นที่เป้าหมาย อาทิ งานช่วยเหลือผู้ประสบภัยงานลาดตระเวนเก็บกู้ระเบิด หรือแม้กระทั่งหุ่นยนต์ที่ใช้ทำงานแทนมนุษย์ เพื่ออำนวยความสะดวกสบายภายในบ้าน หรืองานอุตสาหกรรมที่ใช้หุ่นยนต์ทดแทนแรงงานทางด้านสารเคมีให้แรงงานมีความปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

การแบ่งประเภทของหุ่นยนต์สามารถแบ่งได้ตามความสามารถในการเคลื่อนหุ่นยนต์ ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ 1. หุ่นยนต์ที่ติดตั้งยึดติดอยู่กับพื้นที่ไม่มีล้อ และขาในการเคลื่อนที่ย้ายพิกัดของตัวหุ่นยนต์เอง ได้แก่ แขนกลของหุ่นยนต์ที่ใช้ในงานด้านอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น งานด้านอุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ที่ใช้หุ่นยนต์แขนกลในการประกอบอะไหล่ งานในด้านการแพทย์ที่มีหุ่นยนต์แขนกลมาช่วยในการผ่าตัด โดยหุ่นยนต์ประเภทนี้จะมีลักษณะ โครงสร้างที่มีขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักมาก สามารถเคลื่อนไหวได้จากแหล่งจ่ายพลังงานภายนอก และมีการกำหนดขอบเขตพื้นที่เคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ 2. หุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระมีล้อ และขาในการเคลื่อนไหว เป็นหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนย้ายตัวเองจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งได้อย่างอิสระ หรือมีการเคลื่อนที่ไปมาในสถานที่ต่าง ๆ เช่น หุ่นยนต์ที่ใช้ในการสำรวจดวงจันทร์ขององค์การนาซ่า หุ่นยนต์สำรวจหรือหุ่นยนต์ที่ใช้ในการขนถ่ายสินค้า เป็นต้น

เนื่องจากหุ่นยนต์ที่ใช้ เมื่อมีการกำหนดการเคลื่อนที่ จะมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นภายในระบบ เช่น การเคลื่อนที่การประกอบชิ้นงาน ที่จะทำให้การเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปยังตำแหน่งหนึ่ง ในการเคลื่อนที่แบบซ้ำ ๆ ตำแหน่งเดิมในแต่ละรอบนี้ พบว่าในทางปฏิบัติจะเกิดความผิดพลาดขึ้นและมีค่าซ้ำ ค่าเดิมหรือใกล้เคียงค่าเดิมเสมอ ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นใ้การ ใช้ระบบควบคุมการเรียนรู้แบบทำซ้ำมาทำการ

ประยุกต์ใช้ในแขนงหุ่นยนต์ผู้ช่วย ให้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง โดยใช้กระบวนการเรียนรู้แบบทำซ้ำมาปรับปรุงให้เกิดการทำงานซ้ำ ๆ ได้อย่างถูกต้อง

ดังนั้นทางคณะวิจัย จึงทำการศึกษาออกแบบ และสร้างอุปกรณ์ส่วนแขนของหุ่นยนต์โดยเลียนแบบการเคลื่อนไหวในส่วนแขนมนุษย์ โดยหุ่นยนต์มีหน้าที่ดังนี้ ตำแหน่งไหล่ในการยกขึ้นลง ตำแหน่งในการกวาดแขนซ้ายขวา ข้อศอกในการพับเข้าและออก โดยจะออกแบบคล้ายแขนมนุษย์ ใช้วิธีการควบคุมการเรียนรู้แบบทำซ้ำ เพื่อให้ใกล้เคียงแขนมนุษย์โดยเกิดการทำซ้ำ ให้มีความผิดพลาดน้อยที่สุด

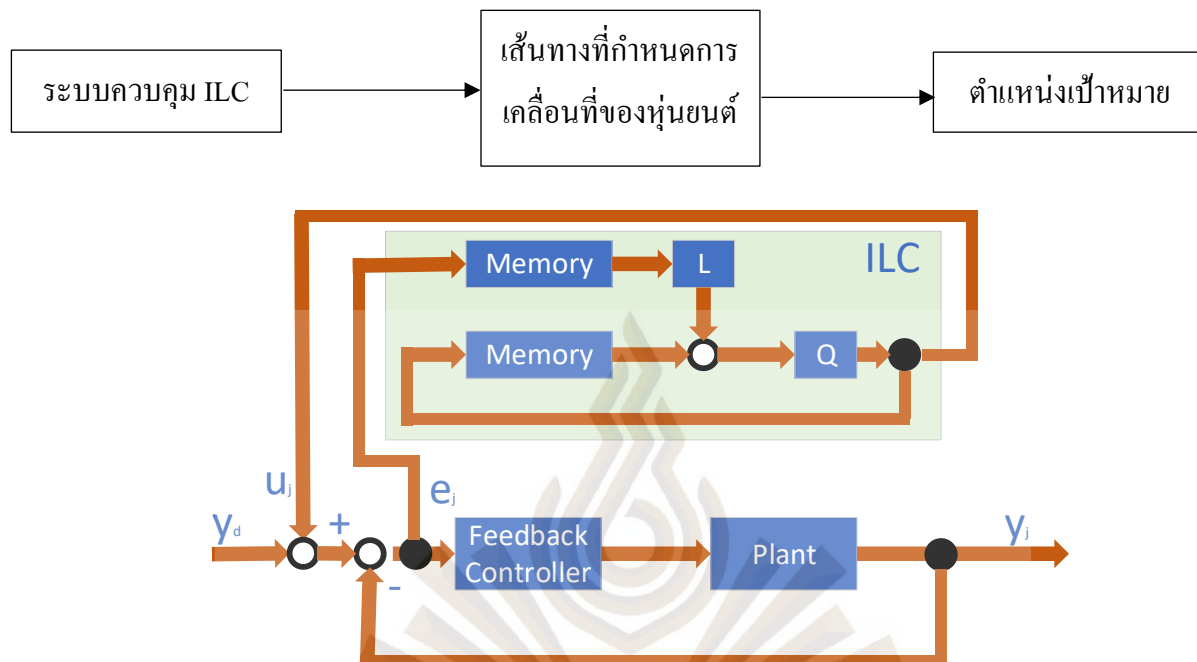
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษากลไกการเคลื่อนไหวร่างกายในส่วนของแขนมนุษย์
- 1.2.2 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบอุปกรณ์ส่วนแขนของหุ่นยนต์ โดยเลียนแบบการเคลื่อนที่ในส่วนแขนของมนุษย์
- 1.2.3 เพื่อออกแบบเครื่องต้นแบบอุปกรณ์ส่วนแขนของหุ่นยนต์ ให้เลียนแบบการเคลื่อนที่ในส่วนแขนของมนุษย์
- 1.2.4 เพื่อศึกษาวิธีออกแบบระบบการควบคุมให้เกิดการทำซ้ำได้ โดยมีความผิดพลาดน้อยลงจากเดิม
- 1.2.5 เพื่อสร้างต้นแบบอุปกรณ์ส่วนแขนของหุ่นยนต์ โดยเลียนแบบการเคลื่อนที่ในส่วนแขนของมนุษย์

1.3 สมมติฐานการทำโครงการ

- 1.3.1 ระบบควบคุม ILC มาร่วมทำงานกับระบบควบคุมเดิม PID จะสามารถช่วยลดความผิดพลาดจากการทำซ้ำได้
- 1.3.2 ระบบควบคุม ILC หากให้ค่าอัตราขยายหรือค่า Gain ที่ไม่เหมาะสมจะทำให้ระบบไม่เสถียรภาพได้

1.4 กรอบแนวคิดการทำโครงการ



1.5 ขอบเขตของโครงการ

1.4.1 สร้างหุ่นยนต์ต้นแบบอุปกรณ์ส่วนแขน โดยเทียบเคียงการเคลื่อนที่แขนของมนุษย์

1.4.2 โปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ใช้โปรแกรม Simulink ของ Matlab

1.6 ข้อกำหนด

1.5.1 ข้อกำหนดทั่วไป


1.5.1.1 การควบคุมแขนของหุ่นยนต์เปรียบเสมือนการเคลื่อนไหวของแขนมนุษย์

1.5.1.2 เคลื่อนไหวโดยใช้ระบบ Iterative Learning Control เป็นตัวควบคุมการทำงานการเรียนรู้แบบซ้ำของระบบ

1.5.2 ข้อกำหนดเฉพาะ

1.5.2.1 แขนของหุ่นยนต์ประกอบด้วยมอเตอร์ LX44WG ทั้งหมด 3 ตัว และมีแกนหรือแขนของหุ่นยนต์ทั้งหมด 4 แกน

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

กิจกรรม และ ผลงานที่คาดว่าจะสำเร็จ	งวดที่ 1 (เดือนที่ 1-3)	งวดที่ 2 (เดือนที่ 4-6)	งวดที่ 3 (เดือนที่ 7-9)	งวดที่ 4 (เดือนที่ 10-12)	ผู้รับผิดชอบ
1. ศึกษาเก็บข้อมูลปัญหาในการใช้ เครื่องช่วยเดิน					รศ.ดร.มนัส ผศ.ยุทธนา อ.พิชิตพล
2. ออกแบบชิ้นงานเครื่องช่วย เดิน					
3. ออกแบบโปรแกรมควบคุม ออกแบบวงจรไฟฟ้า ควบคุมระบบ					รศ.ดร.มนัส ผศ.ยุทธนา อ.พิชิตพล
4. ดำเนินการแหล่งจัดซื้อ อุปกรณ์ประกอบชิ้นงาน					
5. ดำเนินการประกอบชิ้นงาน และทำการทดสอบการใช้ งานในเบื้องต้น					รศ.ดร.มนัส ผศ.ยุทธนา อ.พิชิตพล
6. สรุปผลการดำเนินงาน ออกแบบเครื่องช่วยเดิน					

1.7 คำจำกัดความที่ใช้ในการศึกษา

1.7.1 ระบบควบคุม PID (PID Control System) เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามระบบการควบคุม

1.7.2 ระบบควบคุม ILC (Iterative Learning Control) เป็นระบบวิธีการเรียนรู้แบบทำซ้ำไปซ้ำมาให้เกิดความผิดพลาดน้อยที่สุดในการทำงาน



บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ทฤษฎีด้านหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

ในปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมการผลิต มีการแข่งขันมากเพิ่มขึ้น มีการเพิ่มของกลุ่มแข่งในภูมิภาค และประเทศคู่แข่งทางการผลิตที่มีความพร้อมของค่าจ้างหรือแรงงาน สร้างผลกระทบต่อผู้รับจ้างผลิตของไทย ทั้งด้านต้นทุน คุณภาพ และความสามารถในการผลิต ซึ่งทำให้รูปแบบการผลิตที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันนี้ มีความจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนไป เพื่อเพิ่มความสามารถการแข่งขันกับคู่แข่งในระดับโลกได้มากยิ่งขึ้น

ในปัจจุบันระบบการผลิตแบบอัตโนมัติได้มีการพัฒนาเพิ่มประสิทธิภาพ และมีราคาของผู้ประกอบการขนาดกลางและเล็กสามารถเข้าถึงและใช้งานได้ และมีการทำงานมากมายหลายด้าน ด้านต้นทุน คุณภาพ การอัปเดต การซ่อมบำรุง การใช้พลังงาน ตัวบุคลากรผู้ใช้งาน ทำให้ผู้ใช้งาน เกิดความยากในการตัดสินใจเลือกใช้ และกังวลต่อประสิทธิภาพ หรืออาจพิจารณาที่ราคาต่ออย่างเดี๋ยวจึงกลายเป็นอุปสรรคในการแข่งขัน

การทำงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน 2017) ประกอบด้วย 2 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ ระบบทางกลของหุ่นยนต์ และระบบควบคุมหุ่นยนต์ ระบบทางกล หมายถึง ส่วนที่เป็นโครงสร้าง และส่วนที่ให้กำลังขับเคลื่อนหุ่นยนต์ ส่วน ระบบควบคุม ประกอบด้วย ระบบบังคับการทำงานหุ่นยนต์ ระบบป้อนข้อมูลกลับ ตลอดจนการสอนหุ่นยนต์ให้ทำงานตามชุดคำสั่ง



รูปที่ 2.1 การสอบเทียบการทำงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมโดยบริษัทผู้ผลิต

(ที่มา: <http://saranukromthai.or.th>)

ระบบทางกลของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่สำคัญมี 3 ประการ คือ ลักษณะโครงสร้างของหุ่นยนต์ อุปกรณ์ให้กำลังขับเคลื่อนหุ่นยนต์ และมือหุ่นยนต์



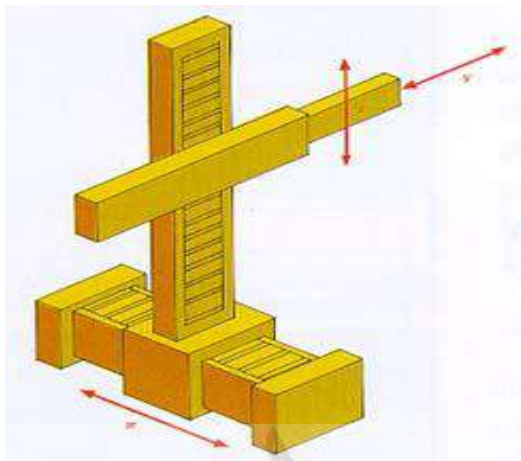
รูปที่ 2.2 การสอนหุ่นยนต์อุตสาหกรรมให้ทำงานเชื่อม โดยสั่งงานผ่านแป้นสอน (ผู้ที่นั่งเป็นผู้ถือแป้น)

(ที่มา: <http://saranukromthai.or.th>)

2.1.1.1 ลักษณะโครงสร้างของหุ่นยนต์

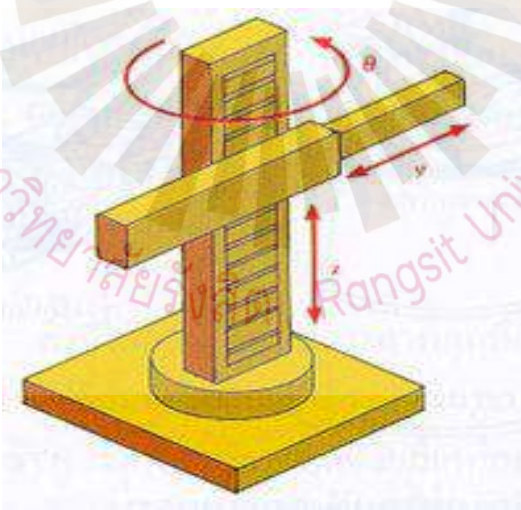
เนื่องจากหุ่นยนต์อุตสาหกรรมได้รับการออกแบบสร้างขึ้นมา เพื่อทำหน้าที่แทนคน ดังนั้น ลักษณะการออกแบบจึงมักจะเป็นส่วนบนของลำตัวมนุษย์ ประกอบด้วยหัวไหล่ แขน และมือ โดยปกติแล้ว มักออกแบบเป็นแขนเดียว ในบางแบบได้ออกแบบให้แขนเคลื่อนที่อยู่บนทางเลื่อนได้ อาจจำแนกโครงสร้างของหุ่นยนต์ได้ 4 แบบ คือ

- 1) โครงสร้างคาร์ทีเซียน หรือฉาก (Cartesian Or Rectangular) เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ที่วางไว้ตั้งฉากซึ่งกันและกัน 3 ส่วน ซึ่งทำให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังจุดที่ต้องการได้ โครงสร้างคาร์ทีเซียนหรือโครงสร้างฉาก การเคลื่อนที่ของแกนการทำงานทั้งสามแกน จะตั้งฉากกัน ให้เห็นถึงหุ่นยนต์ระบบลมในงานเจาะ



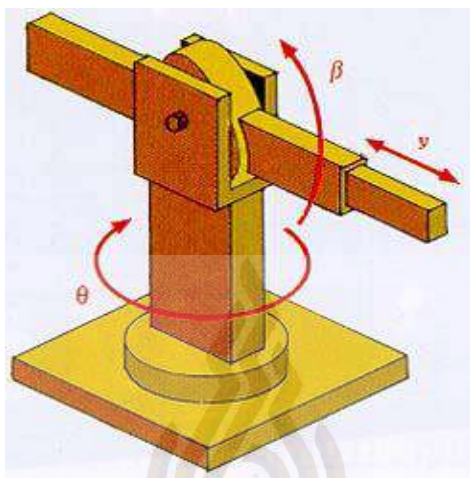
รูปที่ 2.3 โครงสร้างคาร์ทีเซียน
(ที่มา: <http://saranukromthai.or.th>)

- 2) โครงสร้างทรงกระบอก (Cylindrical) มีแกนเกาะกับแกนกลาง ซึ่งเป็นหลัก แขนนั้นสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงหมุนรอบแกน และสามารถบิดและหดได้ โครงสร้างทรงกระบอกซึ่งสามารถหมุนแขนได้รอบตัว แขนสามารถยืดและหดได้ตามแนวแกนเสาที่รองรับ แขนสามารถขึ้นลงได้ตามระดับความต้องการ



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทรงกระบอก
(ที่มา: <http://saranukromthai.or.th>)

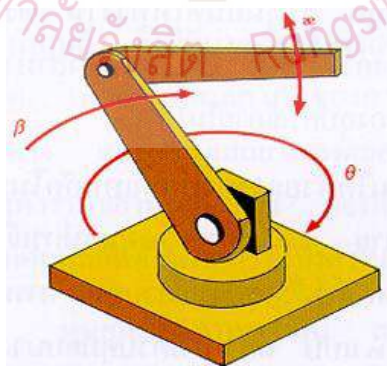
- 3) โครงสร้างเชิงขั้ว (Polar) มีลำตัวที่บิดได้ มีแขนที่หมุนและยืดหดได้ โครงสร้างเชิงขั้ว มีลำตัวที่บิดได้ มีแขนที่หมุนและยืดหดได้



รูปที่ 2.5 โครงสร้างเชิงขั้ว

(ที่มา: <http://saranukromthai.or.th>)

- 4) โครงสร้างมนุษย์ (Antropomorphic) เป็นโครงสร้างที่เลียนแบบโครงสร้างของมนุษย์ ในหุ่นยนต์อุตสาหกรรม มีลักษณะเป็นส่วนบนของลำตัวมนุษย์ ประกอบด้วยหัวไหล่ แขน ท่อนบน แขนท่อนล่าง ข้อมือและมือ โครงสร้างมนุษย์ และลักษณะการเคลื่อนที่ด้วยระบบไฮดรอลิก และระบบเซอร์โวมอเตอร์กระแสดตรง



รูปที่ 2.6 โครงสร้างมนุษย์

(ที่มา: <http://saranukromthai.or.th>)

2.1.1.2 อุปกรณ์ให้กำลังขับเคลื่อนของหุ่นยนต์

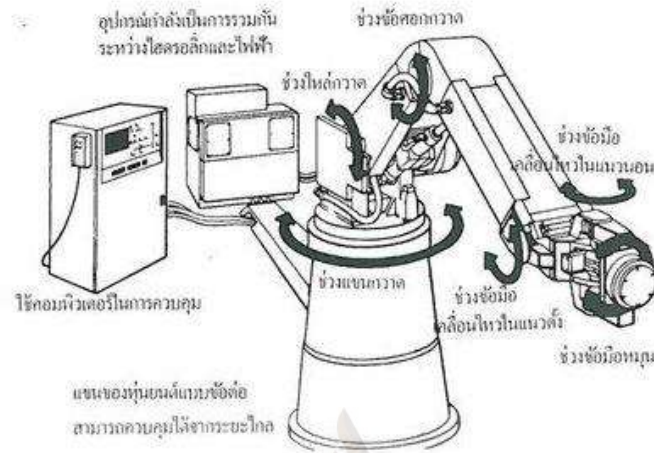
อุปกรณ์ให้กำลังขับเคลื่อนหุ่นยนต์อยู่ 3 ชนิด คือ มอเตอร์กระแสไฟตรง นิวแมติก และไฮดรอลิก

- 1) มอเตอร์กระแสไฟตรง คือ อุปกรณ์ขับเคลื่อนหมุนรอบตัวเองได้ ด้วยพลังงานจากกระแสไฟตรง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ได้สะดวก ง่ายต่อการควบคุม และตำแหน่งแม่นยำ ปัญหาสำคัญคือ มีกำลังจำกัด และมีปัญหาในการนำหุ่นยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยไฟฟ้าไปใช้ในบริเวณที่มีวัตถุไวไฟ เช่น งานพ่นสี เป็นต้น
- 2) นิวแมติก เป็นระบบที่ขับเคลื่อนทางตรง ทางโค้งหรือหมุนได้ ด้วยแรงอัดของลม เป็นอุปกรณ์ที่ราคาถูก และยุ่งยากน้อยที่สุด ปัญหาที่สำคัญอยู่ที่การควบคุมความเร็ว และตำแหน่ง
- 3) ไฮดรอลิก เป็นระบบที่ขับเคลื่อนด้วยแรงอัดของน้ำมัน เป็นอุปกรณ์ที่ราคาแพง ให้กำลังสูง มีอุปกรณ์อยู่หลายแบบ สามารถเลือกใช้เหมาะสมกับงานได้ เช่น การเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง หรือแบบหมุน เป็นต้น ระบบการควบคุมมักใช้ไฟฟ้า แต่เนื่องจากใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าน้อย และใช้กำลังไฟฟ้าต่ำมาก จึงสามารถใช้หุ่นยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยระบบไฮดรอลิกกับบริเวณที่วัตถุไวไฟได้

มือหุ่นยนต์จะยึดติดกับส่วนของหุ่นยนต์ที่เป็นข้อมือ (Wrist) ซึ่งสามารถหมุนได้อย่างอิสระ 3 แนวแกน คือ แกนบิดในระนาบที่ตั้งฉากกับปลายแขน แกนงยขึ้นลงจะหมุนในระนาบที่ตั้งฉากกับพื้น และแกนส่ายจะหมุนในระนาบที่ขนานกับแกน อย่างไรก็ตามลักษณะการใช้งาน ส่วนใหญ่จะทำงานเพียง 2 ทิศทางเท่านั้น เช่น หุ่นยนต์ที่ใช้ในงานเชื่อม ในลักษณะที่สมมาตร จะให้ความอิสระของข้อมือเพียง 2 แกนเท่านั้น อย่างไรก็ตามในกรณีงานที่ค่อนข้างยุ่งยาก อาจใช้ถึง 3 แกน โดยจะต้องสร้างให้มีความมั่นคง และมีน้ำหนักน้อยที่สุด

2.1.1.3 ระบบควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

ระบบควบคุมเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของหุ่นยนต์ ทำหน้าที่เป็นสมองเก็บข้อมูล สั่งหุ่นยนต์ให้ทำงาน ตรวจสอบ และควบคุมตำแหน่งการทำงาน ในบางเครื่องสามารถตรวจสอบความผิดปกติของอุปกรณ์ภายในได้

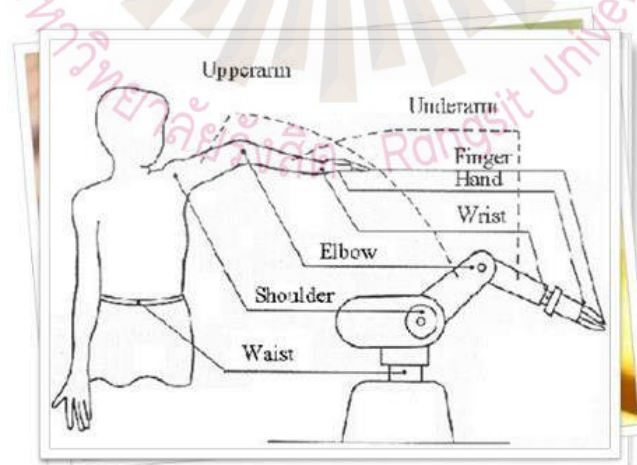


รูปที่ 2.7 รูปแสดงการทำงานของแขนหุ่นยนต์

(ที่มา: <http://saranukromthai.or.th>)

2.1.1.4 ลักษณะการทำงานของแขนหุ่นยนต์

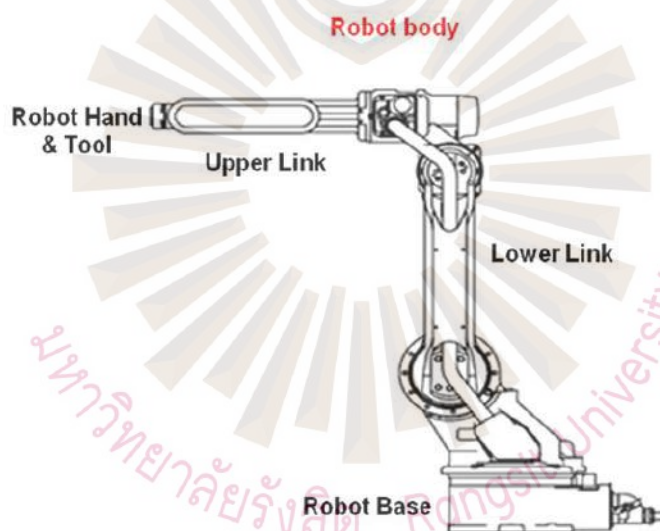
การทำงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจะเลียนแบบร่างกายของมนุษย์ โดยจะเลียนแบบเฉพาะส่วนของร่างกายที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเท่านั้น นั่นคือช่วงแขนของมนุษย์ ดังนั้น บางคนอาจจะได้ยินคำว่า “แขนกล” ซึ่งก็หมายถึงหุ่นยนต์อุตสาหกรรม การทำงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเปรียบเทียบกับแขนมนุษย์ (AppliCAD, 2016) แสดงดังรูป



รูปที่ 2.8 รูปแสดงการเปรียบเทียบแขนมนุษย์ และแขนหุ่นยนต์

(ที่มา: <http://saranukromthai.or.th>)

- 1) Link & Joint (MM Thailand, 2017) เป็น โครงสร้างหลักของตัวหุ่นยนต์ ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะ เป็นส่วนที่เราต้องทำการโปรแกรมให้หุ่นยนต์เกิดการเคลื่อนที่และจะทำงานสัมพันธ์กันตาม โปรแกรมที่ User กำหนดไว้
- 2) Link คือ โครงสร้างของหุ่นยนต์ที่เป็นท่อนแขน มีหน้าที่ในการเข้าสู่พื้นที่การทำงาน โดยความ ยาวของ Link จะเป็นตัวบ่งบอกสมรรถนะของตัวหุ่นยนต์ และความสามารถในการเข้าสู่พื้นที่ การทำงานด้วย หุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิด Articulate Robot จะมี Link อยู่จำนวน 2 Link ดังนี้
- 3) Link ท่อนบน หรือ Upper Link เป็นส่วนของท่อนแขนบนสำหรับเข้าสู่พื้นที่การทำงาน และ เป็นส่วนที่เชื่อมต่อกับข้อมือ Robot Hand สำหรับติดตั้ง Robot Tool
- 4) Link ท่อนล่าง หรือ Lower Link เป็นส่วนของท่อนแขนที่ทำหน้าที่ในการรับน้ำหนักทั้งหมดที่ เกิดขึ้นของตัวหุ่นทั้งหมดเป็นส่วนที่รองรับน้ำหนักของแขนท่อนบนและเชื่อมต่ออยู่กับฐาน Base ของหุ่นยนต์



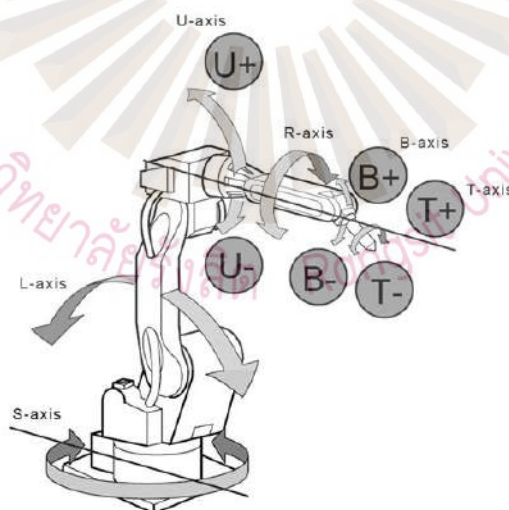
รูปที่ 2.9 แสดง โครงสร้างของ Link หรือท่อนแขนของตัวหุ่นยนต์
(ที่มา: <https://www.mmthailand.com>)

ตามที่ทราบกันในเรื่องต้นแล้วว่าหุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิด Articulate Robot นั้น ถูกออกแบบมาให้มี ลักษณะคล้ายกับแขนของมนุษย์ ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจเกี่ยวกับเรื่องของ Link ทั้ง 2 ส่วน จึงขอ เปรียบเทียบกับแขนของมนุษย์ตามตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้าง Link ของหุ่นยนต์และ แขนของมนุษย์

หุ่นยนต์	แขนมนุษย์
1. ฐานหุ่นยนต์ (Robot Base)	1. ส่วนของเอว
2. แขนท่อนล่าง (Lower Link)	2. ส่วนของท่อนแขนตั้งแต่หัวไหล่ถึงข้อศอก
3. แขนท่อนบน (Upper Link)	3. ส่วนของท่อนแขนตั้งแต่ข้อศอกถึงข้อมือ
4. มือหุ่นยนต์ (Robot Hand)	4. ส่วนตั้งแต่ข้อมือถึงกลางฝ่ามือ
5. เครื่องมือ (Robot Tools)	5. นิ้วมือ

Joint คือ โครงสร้างของหุ่นยนต์ส่วนที่เป็นข้อต่อที่ทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อระหว่าง Link ของตัวหุ่นยนต์และยังทำหน้าที่ในการเคลื่อนที่ของตัวหุ่นยนต์ให้สามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆ ที่เราต้องการ กล่าวคือ การที่เราทำการโปรแกรมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ ก็คือ การโปรแกรมการทำงานของ Joint หรือข้อต่อทั้งหมดของหุ่นยนต์ นั่นหมายความว่า ส่วนของ Joint คือ ส่วนที่ทำการติดตั้ง Servo Motor ไว้ นั่นเอง โดยปกติแล้ว หุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิด Articulate Robot จะมีข้อต่อ หรือ Joint ทั้งหมด 6 Joint หรือบางครั้งคนที่อยู่ในวงการการควบคุมหุ่นยนต์ มักเรียกว่าหุ่นยนต์ 6 แกน (6 Axis)



รูปที่ 2.10 ข้อต่อหรือ Joint ของหุ่นยนต์และชื่อเรียก

(ที่มา: <https://www.mmthailand.com>)

จากรูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นถึงข้อต่อหรือ Joint ของหุ่นยนต์ซึ่งมีอยู่ด้วยกันทั้งหมด 6 Joint ด้วยกัน โดยมีชื่อเรียกและหน้าที่ของแต่ละ Joint และเปรียบเทียบกับแขนของมนุษย์ได้ตามตารางที่ 2.2

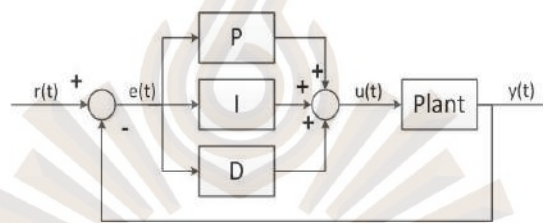
ตารางที่ 2.2 ชื่อเรียกและหน้าที่ของแต่ละ Joint และเปรียบเทียบกับแขนของมนุษย์

หุ่นยนต์			เทียบเคียงความหมายกับ มนุษย์
Axis or Joint No.	Name	Description	
Joint 1	S	Rotation of the complete manipulator	ส่วนเอว
Axis 2 or Joint 2	L	Forward and reverse movement the lower arm.	ส่วนหัวไหล่
Axis 3 or Joint 3	U	Vertical movement of the upper arm.	ส่วนข้อศอก
Axis 4 or Joint 4	R	Rotation of the complete wrist center.	ส่วนหมุนแขนท่อนบน จนถึงข้อมือ
Axis 5 or Joint 5	B	Bending of wrist around the wrist center.	ส่วนข้อมือ
Axis 6 or Joint 6	T	Rotation of mounting flange (turn disc)	ส่วนหมุนข้อมือ

หุ่นยนต์ หรือ ไรบอต (Robot) คือเครื่องจักรกลชนิดหนึ่งที่มีลักษณะ โครงสร้างและรูปร่างแตกต่างกัน หุ่นยนต์ในแต่ละประเภทจะมีหน้าที่การทำงานในด้านต่าง ๆ ตามการควบคุมโดยตรงของมนุษย์ การควบคุมระบบต่าง ๆ ในการสั่งงานระหว่างหุ่นยนต์และมนุษย์ สามารถทำได้โดยทางอ้อมและอัตโนมัติ โดยทั่วไป หุ่นยนต์ถูกสร้างขึ้นเพื่อสำหรับงานที่มีความยากลำบากเช่น งานสำรวจในพื้นที่บริเวณแคบหรืองานสำรวจดวงจันทร์ดาวเคราะห์ที่ไม่มีสิ่งมีชีวิต ปัจจุบันเทคโนโลยีของหุ่นยนต์เจริญก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว เริ่มเข้ามามีบทบาทกับชีวิตของมนุษย์ในด้านต่าง ๆ เช่น ด้านอุตสาหกรรมการผลิต แตกต่างจากเมื่อก่อนที่หุ่นยนต์มักถูกนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ ปัจจุบันมีการนำหุ่นยนต์มาใช้งานมากขึ้น เช่น หุ่นยนต์ที่ใช้ในทางการแพทย์ หุ่นยนต์สำหรับงานสำรวจ หุ่นยนต์ที่ใช้งานในอวกาศ หรือแม้แต่หุ่นยนต์ที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อเป็นเครื่องเล่นของมนุษย์ จนกระทั่งในปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาให้หุ่นยนต์นั้นมีลักษณะที่คล้ายมนุษย์ เพื่อให้อาศัยอยู่ร่วมกับมนุษย์ ให้ได้ในชีวิตประจำวัน

2.1.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับวงจรรระบบควบคุมหุ่นยนต์

ระบบควบคุม PID (PID Control System) ระบบควบคุมสามารถแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ตามลักษณะการทำงานได้เป็น 2 แบบคือ ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด (Open-loop Control Systems) และระบบควบคุมแบบวงรอบปิด (Closed-loop Control Systems) หรือระบบควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งในปัจจุบันการออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติมีการพัฒนาเทคนิค และวิธีใหม่เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมอย่างต่อเนื่อง การควบคุมแบบสัดส่วนปริพันธ์ แบบอนุพันธ์ (Proportional–Integral–Derivative Controller) หรือเรียกว่าตัวควบคุมแบบ PID ดังรูปที่ 2.11 เป็นวิธีการออกแบบระบบควบคุมที่ยังคงเห็นได้ชัดเจนว่าเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางมากที่สุดในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมีโครงสร้างที่ง่าย การออกแบบไม่ซับซ้อน แต่ให้ประสิทธิภาพที่เหมาะสมในหลากหลายงานควบคุม



รูปที่ 2.11 แผนภาพบล็อกของระบบควบคุมแบบ PID

การควบคุมแบบ PID ใช้สัญญาณความผิดพลาด $e(t)$ ในการสร้างการทำงานของพจน์ ควบคุมแบบ P, I และ D สมการคณิตศาสตร์ที่ใช้อธิบายการควบคุมแบบ PID บนโดเมนเวลา คือ

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.1)$$

เมื่อ $u(t)$ คือ สัญญาณควบคุมป้อนเข้ากระบวนการ, $e(t)$ คือ สัญญาณความผิดพลาด ซึ่งได้จากการเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณเข้าอ้างอิง $r(t)$ และสัญญาณออก $y(t)$, $n(t)$ คือสัญญาณรบกวนจากการวัด ของกระบวนการฟังก์ชันถ่ายโอนซึ่งใช้อธิบายการควบคุมแบบ PID รูปแบบขนาน (Parallel form) คือ

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.2)$$

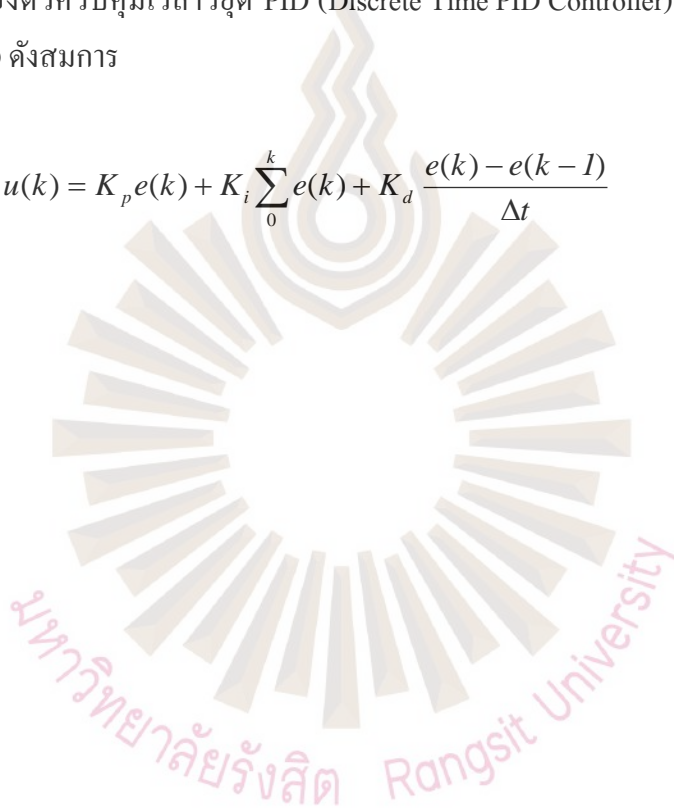
2.1.2.1 ระบบควบคุมวงจร

ระบบควบคุมวงจรแบบพีไอดี มีตัวควบคุมย่อย 3 ตัว คือ

- 1) ตัวควบคุมแบบสัดส่วนหรือตัวควบคุมพี (Proportional term)
- 2) ตัวควบคุมแบบปริพันธ์หรือตัวควบคุมไอ (Integral term)
- 3) ตัวควบคุมแบบปริพันธ์หรือตัวควบคุมดี (Derivative term)

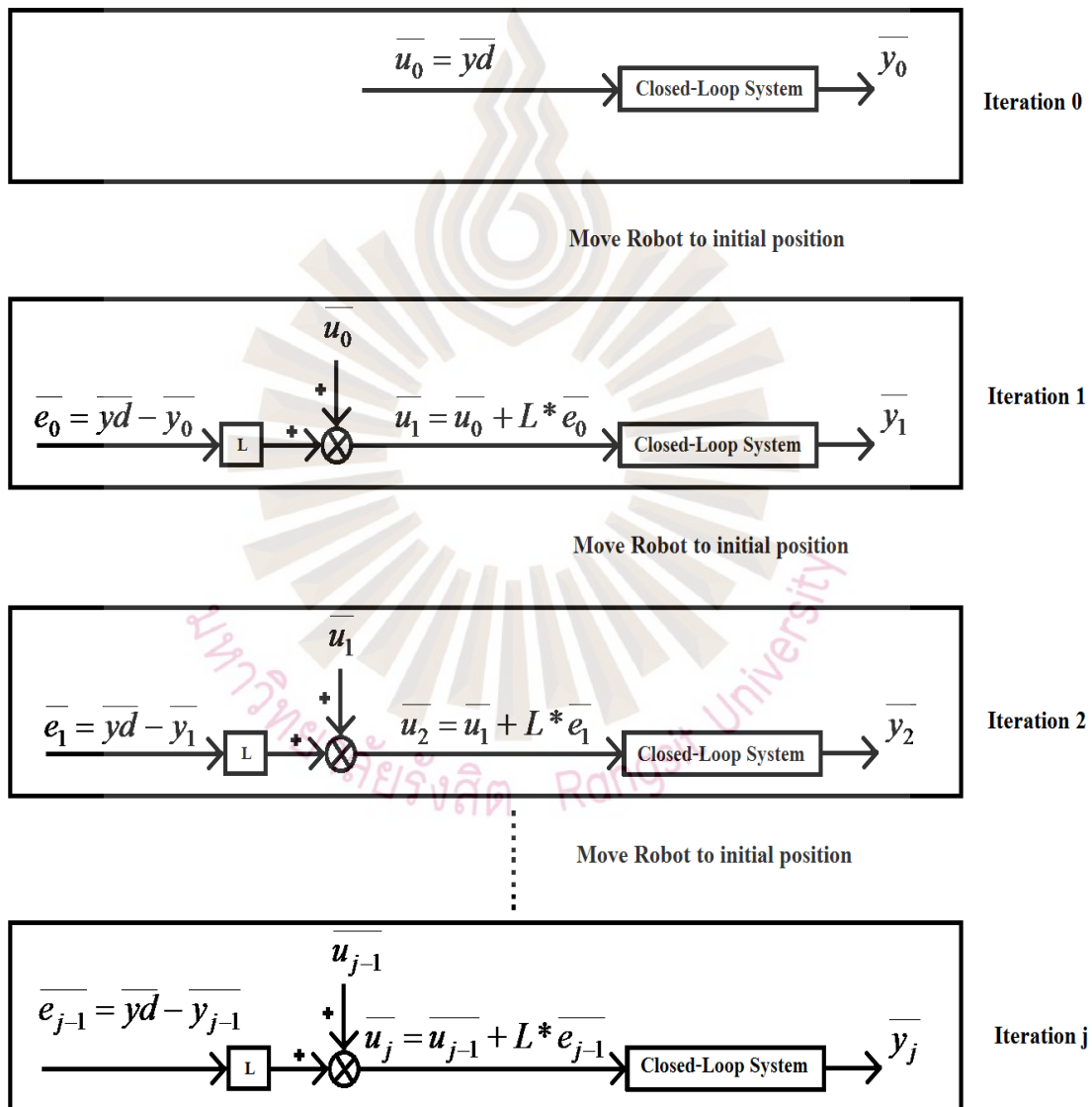
สำหรับทฤษฎี PID Controller นั้นอยู่ในรูปของ Continuous Time PID Controller ซึ่งหากมีความประสงค์ที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมระบบของไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller, MCU) แล้วจะต้องทำให้อยู่ในรูปของตัวควบคุมเวลาวิยุติ PID (Discrete Time PID Controller) โดยสามารถอ้างอิงจากทฤษฎีของตัวควบคุม PID ดังสมการ

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_0^k e(k) + K_d \frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta t} \quad (2.3)$$



2.2.3 การควบคุมแบบเรียนรู้ซ้ำ (Iterative Learning Control)

Iterative Learning Control (Longman, R.W., 2000) เป็นการควบคุมระบบที่อาศัยการทำซ้ำ โดยจะนำค่าความผิดพลาดจากการทำงานรอบก่อนมาปรับปรุงด้วยตัวควบคุมแบบเรียนรู้ซ้ำ และจะได้เป็น Control Input สำหรับรอบการทำงานถัดไป จึงทำให้ค่าความผิดพลาดนั้นลดลงเมื่อรอบการทำงานสูงขึ้น แต่การควบคุมแบบนี้จะต้องกำหนดให้เครื่องจักรหรือหุ่นยนต์ที่ควบคุมนั้นกลับไปอยู่ที่จุด Initial Position ก่อนที่จะป้อนเป็น Control Input สำหรับรอบการทำงานถัดไปเสมอ ซึ่งหลักการทำงานของ การควบคุมแบบเรียนรู้ซ้ำแสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การทำงานของการควบคุมแบบเรียนรู้ซ้ำ

จากรูปที่ 2.16

\bar{u}_j คือ $u_j(0)$ ถึง $u_j(p)$ ซึ่งก็คือสัญญาณ Control Input ที่จ่ายให้กับ Closed-Loop System

j คือ ตัวเลขที่ระบุรอบการทำงาน

p คือ จำนวน Time Step ทั้งหมดใน รอบการทำงาน

\bar{y}_d คือ $y_d(0)$ ถึง $y_d(p)$ ซึ่งก็คือ Desire Output Trajectory ที่ต้องการให้หุ่นยนต์เคลื่อนได้ไป

\bar{y}_j คือ $y_j(0)$ ถึง $y_j(p)$ ซึ่งก็คือสัญญาณ Output ที่ได้จาก Position Encoder

\bar{e}_{j-1} คือ $e_{j-1}(0)$ ถึง $e_{j-1}(p)$ ซึ่งก็คือค่าความผิดพลาดของรอบการทำงานก่อนหน้าซึ่งหาได้จาก $\bar{y}_d - \bar{y}_{j-1}$

L คือ Matrix แห่งการเรียนรู้ หรือ Iterative Learning Controller

หลักการการทำงานของ Iterative Learning Controller นั้น ในการทำงานในรอบการทำงานที่ 0 นั้น จะกำหนดให้ $\bar{u}_0 = \bar{y}_d$ แล้วจ่าย \bar{u}_0 ให้กับ Closed-Loop System ก็จะได้ \bar{y}_0 มา และจะหาค่าความผิดพลาด \bar{e}_0 จาก $\bar{y}_d - \bar{y}_0$ และจะสร้างสัญญาณ Control Input Trajectory \bar{u}_1 สำหรับจ่ายให้กับ Closed-Loop System ของรอบการทำงานที่ 1 หรือการทำซ้ำครั้งที่ 1 โดยสร้างจากการนำ $\bar{u}_0 + \bar{e}_0 * L$ แล้วจ่าย \bar{u}_1 ให้กับ Closed-Loop System ก็จะได้ \bar{y}_1 มา และทำอย่างนี้ต่อไปเรื่อย ๆ แล้วค่าความผิดพลาดจะลดลงเรื่อยๆเมื่อรอบการทำงานหรือทำซ้ำเพิ่มขึ้น โดยหลักการทำงานที่กล่าวมานั้นสามารถอธิบายในรูปแบบสมการดังสมการ

$$\begin{aligned}\bar{u}_{j+1} &= \bar{u}_j + L * \bar{e}_j \\ \bar{u}_j &= \bar{u}_{j-1} + L * \bar{e}_{j-1}\end{aligned}\tag{2.4}$$

ซึ่งนั่นก็คือค่าความผิดพลาดในรอบที่ $j-1$ จะส่งผลกับค่าความผิดพลาดในรอบที่ j โดยสามารถอธิบายในรูปแบบสมการได้ดังสมการ

$$\begin{aligned}
\bar{e}_j &= \bar{y}d - \bar{y}_j \\
\bar{e}_j &= \bar{y}d - P^* \bar{u}_j \\
\bar{e}_j &= \bar{y}d - P^* [\bar{u}_{j-1} + L^* \bar{e}_{j-1}] \\
\bar{e}_j &= \bar{y}d - P^* \bar{u}_{j-1} - P^* L^* \bar{e}_{j-1} \\
\bar{e}_j &= \bar{y}d - \bar{y}_{j-1} - P^* L^* \bar{e}_{j-1} \\
\bar{e}_j &= \bar{e}_{j-1} - P^* L^* \bar{e}_{j-1} \\
\bar{e}_j &= (I - P^* L)^* \bar{e}_{j-1}
\end{aligned} \tag{2.5}$$

โดย I คือ Identity Matrix ซึ่งมีขนาด p แถว p หลัก ซึ่ง p คือจำนวน Time Step ใน 1 รอบการทำงาน

P คือ Matrix ที่แทนระบบ หรือ Transfer Function ของ Closed-Loop System นั้นเอง ซึ่งสามารถหาได้จากสมการ

$$P = \begin{bmatrix} CB & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ CA^{p-1}B & CA^{p-2}B & \cdots & CB \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

ซึ่ง A, B และ C คือ Matrix ของ Transfer Function ในรูปแบบ State-Space ของ Closed-Loop System ดังสมการ

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad k = 0, 1, 2, \dots, p-1 \tag{2.7}$$

$$y(k) = Cx(k) \quad k = 1, 2, 3, \dots, p \tag{2.8}$$

จากสมการ สรุปได้ว่า การจะออกแบบ L -Matrix ให้เหมาะสมกับระบบนั้นหรือนั่นก็คือทำให้ระบบมีเสถียรภาพหรือทำให้ความผิดพลาดของระบบเข้าสู่ศูนย์นั้น จะต้องออกแบบ L -Matrix ให้ค่า Eigen value ทุกๆค่าของ $(I - P^* L)$ มีค่าน้อยกว่าหนึ่งซึ่งอธิบายในรูปแบบสมการได้ดังสมการ

$$\max_i |\lambda_i(I - P^* L)| < 1 \tag{2.9}$$

λ_i คือ Eigen value ตัวที่ i ของ $(I - P^*L)$

และค่าความผิดพลาดจะลดลงอย่างต่อเนื่องทุกครั้งที่มีการทำซ้ำ (Monotonic Decay) ก็ต่อเมื่อค่า Singular Value ที่มากที่สุดของ $(I - P^*L)$ จะต้องมีค่าน้อยกว่าหนึ่งซึ่งอธิบายในรูปแบบสมการได้ดังสมการ

$$\max_i \sigma_i(I - P^*L) < 1 \quad (2.10)$$

σ_i คือ Singular value ตัวที่ i ของ $(I - P^*L)$



บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการจัดทำโครงการ

ในบทที่ 3 นี้จะอธิบายรายละเอียดการออกแบบอุปกรณ์ และสร้างหุ่นยนต์ต้นแบบ ทั้งด้านโครงสร้างทางกล ระบบอิเล็กทรอนิกส์ การออกแบบระบบควบคุม และโปรแกรมสำหรับการสั่งงานหุ่นยนต์ โดยสามารถแยกหัวข้อต่าง ๆ เป็นหัวข้อย่อยได้ดังต่อไปนี้

3.1 การออกแบบโครงสร้างฮาร์ดแวร์ และการออกแบบชุดควบคุมระบบ

3.1.1 ภาคการออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์แกนกลขนาดเล็ก

3.1.2 ระบบเซอร์โวมอเตอร์ 3 ชุด

3.1.3 ระบบแขนจับหุ่นยนต์

3.2 การออกแบบระบบควบคุมหุ่นยนต์แกนกล

3.2.1 ระบบควบคุม PID ในการออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์

3.2.2 ระบบควบคุม ILC ในการทำงานร่วมกับระบบเดิม

3.3 กระบวนการวิธีการทดสอบระบบ

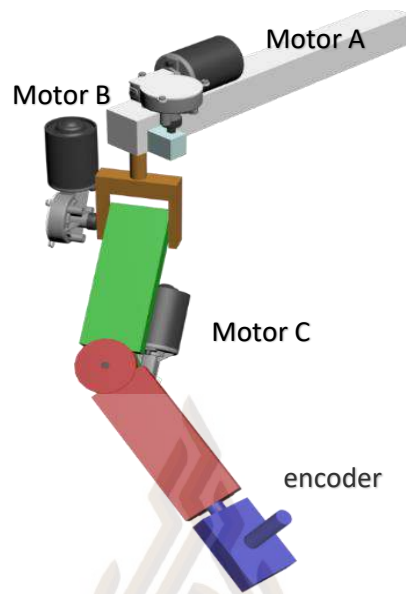
ซึ่งหลังจากการอภิปรายรายละเอียดในหัวข้อการออกแบบระบบทั้งหมดแล้ว จะกำหนดเงื่อนไขการทดสอบระบบของหุ่นยนต์ทั้งหมด 4 การทดสอบ โดยได้แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1 การออกแบบโครงสร้างฮาร์ดแวร์ และการออกแบบชุดควบคุมระบบ

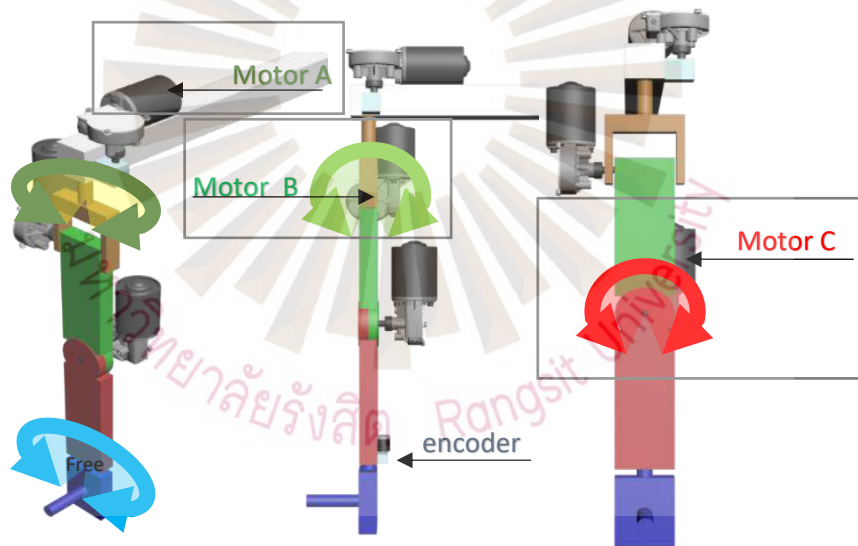
การออกแบบโครงสร้างฮาร์ดแวร์ การควบคุมระบบ การควบคุมกระแสที่ไหลผ่านมอเตอร์ และวงจรที่ใช้ในการออกแบบแขนหุ่นยนต์ ได้แสดงเนื้อหาต่าง ๆ เช่นการเลือกใช้อุปกรณ์ชุดเกียร์ และมอเตอร์สำหรับการออกแบบแขนหุ่นยนต์

3.1.1 ภาคการออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์แกนกลขนาดเล็ก

ออกแบบโปรแกรมโดยใช้โปรแกรม CATIA ในการออกแบบอุปกรณ์ส่วนแขนของหุ่นยนต์ ในโครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นการออกแบบจำลองการสร้างอุปกรณ์เพื่อจำลองการเคลื่อนที่แขนของมนุษย์ตามลักษณะการเคลื่อนไหวตามสรีระของมนุษย์ โดยออกแบบระบบการเคลื่อนที่ทั้งหมด 4 แขน ดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วย 1) ตำแหน่งไหล่ในการยกขึ้นลง 2) ตำแหน่งไหล่ในการกวาดซ้ายขวา 3) ข้อศอกในการพับเข้าและพับออก 4) มือจับที่สามารถบิดมือเข้าและบิดมือออก ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 แสดงจุดหมุนต่างๆของแขนหุ่นยนต์จำลอง



รูปที่ 3.2 แสดงการทำงาน จุดหมุนต่างๆของแขนหุ่นยนต์จำลอง

3.1.2 การออกแบบชุดเซอร์โวมอเตอร์

การออกแบบชุดควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ในโครงงานวิจัยนี้ เพื่อทำการควบคุมตำแหน่งมุมการหมุนของหุ่นยนต์โดยได้ทำการออกแบบโดยมีองค์ประกอบชิ้นงานด้วยกันทั้งหมด 3 ส่วน คือ

3.1.2.1 การเลือกใช้มอเตอร์

การเลือกใช้มอเตอร์ในโครงงานนี้ใช้ เบอร์ LX44WG ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ใช้แรงดันไฟฟ้า 12V จำนวน 3 ตัว ใช้เพื่อเคลื่อนที่โครงสร้างแขนของหุ่นยนต์ มีขนาดแรงบิด 200 Kg.cm (Max Load) ที่ความเร็วรอบ 5 RPM มีน้ำหนัก 0.95 kg แสดงรายละเอียดคุณสมบัติของมอเตอร์ LX44WG ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.3 แสดงมอเตอร์ เบอร์ LX44WG

LX44WG蜗轮蜗杆减速电机 (参数)										
型号	额定电压 Rated volt (V)	减速比 Pedution ratid	空载转速 No-load speed (rpm)	空载电流 No-load currend (A)	额定转速 Rate speed (rpm)	额定电流 Rate currend (A)	额定转矩 Rate torque (Kg. cm)	堵转转矩 Stall torque (Kg. cm)	堵转电流 Stall currend (A)	重量 (KG)
LX44WG	12	1/862	5	0.4	3.5	3.5	200	/	6	0.95

รูปที่ 3.4 แสดงรายละเอียดคุณสมบัติของมอเตอร์ LX44WG

3.1.2.2 บอร์ดขับมอเตอร์กระแสตรง

การเลือกใช้บอร์ดขับมอเตอร์ตรงในโครงการนี้ ใช้บอร์ดขับมอเตอร์กระแสตรงรุ่น IRF3205 H-Bridge Power MOSFET 10-30 VDC ดังรูปที่ 3.5 และสามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ 40 A โดยมีรายละเอียดดังนี้
รายละเอียดทางเทคนิค

Output: Single Motor Driver

Motor DC Supply 12-24 V 40 A (Max)

Full-Complementary Power MOSFET Driver with ultra-fast reverse recovery protection diodes

Input:

Full Opto-isolated input interface signal

5V 8 mA TTL-Level

Drive Mode: independently with

ON-OFF Control

Direction Control

Speed Control (PWM Drives)

PWM Frequency: 400 Hz-1,000 Hz (800 Hz Recommend)



รูปที่ 3.5 บอร์ดขับมอเตอร์กระแสตรงรุ่น IRF3205 H-Bridge Power MOSFET 10-30 VDC

(ที่มา: <http://www.micontechlab.com>)

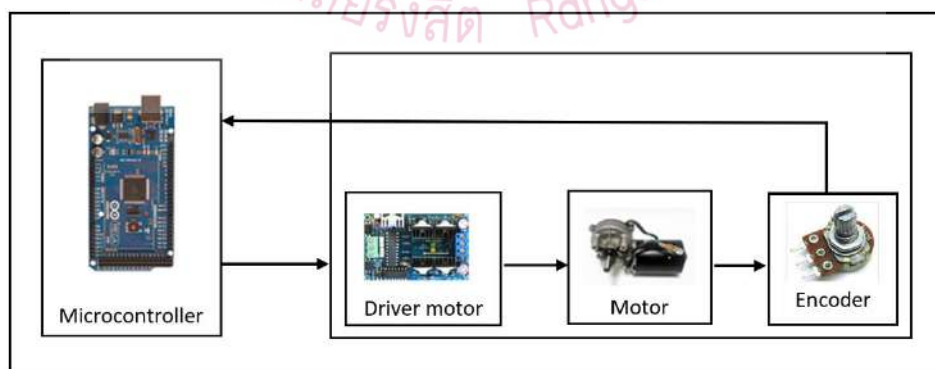
3.1.2.3 ตัวถอดรหัส

ในการตรวจสอบสัญญาณป้อนกลับของหุ่นยนต์ในการเคลื่อนที่ในทิศทางต่างๆ ในโครงงานนี้ได้ใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ จำนวน 3 ตัว เป็นตัวถอดรหัส ซึ่งเมื่อมีการหมุนของตัวถอดรหัส ตัวถอดรหัสจะทำการส่งค่าแรงดันไฟฟ้ากลับไปที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์ และไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งค่าที่ได้ทั้งหมดเข้าสู่คอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถประมาณค่ามุมที่เกิดขึ้นภายในระบบได้โดยตัวถอดรหัสนี้ได้แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ตัวถอดรหัสที่ใช้ในการประมาณค่ามุมของหุ่นยนต์

โดยอุปกรณ์ทั้งหมดที่ได้กล่าวมาจะสามารถแสดงการทำงานร่วมกันได้ ดังรูปที่ 3.7 โดยการเคลื่อนที่ประกอบด้วยจำนวนมอเตอร์ทั้งหมด 3 ตัว อ้างอิงจากรูปที่ 3.1 ประกอบด้วยมอเตอร์ A, B และ C โดยมอเตอร์ A เป็นตัวควบคุมจุดหมุนเสมือนที่ตำแหน่งไหล่ในการกวาดซ้ายขวา มอเตอร์ B ควบคุมตำแหน่งเสมือนไหล่ในการยกขึ้นลง และมอเตอร์ C เป็นเสมือนข้อศอกในการพับเข้า และพับออก โดยการควบคุมจะรับค่าสัญญาณ PWM จากไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งงานไปที่ ตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ และตัวขับเคลื่อนมอเตอร์จะทำการแรงดันไฟฟ้าไปที่มอเตอร์ในตำแหน่งต่าง ๆ เมื่อมอเตอร์ในแกนต่างๆที่มีการควบคุมทำการหมุน ตัวถอดรหัสจะเป็นตัวตรวจสอบมุมที่เคลื่อนที่ได้แล้วส่งสัญญาณแรงดันไฟฟ้าป้อนกลับไปที่ไม่โครคอนโทรลเลอร์ เพื่อระบุตำแหน่งต่าง ๆ ของหุ่นยนต์ให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ต่อไป



รูปที่ 3.7 แสดงการทำงานของแขนหุ่นยนต์จำลอง

3.1.3 ระบบแขนจับหุ่นยนต์

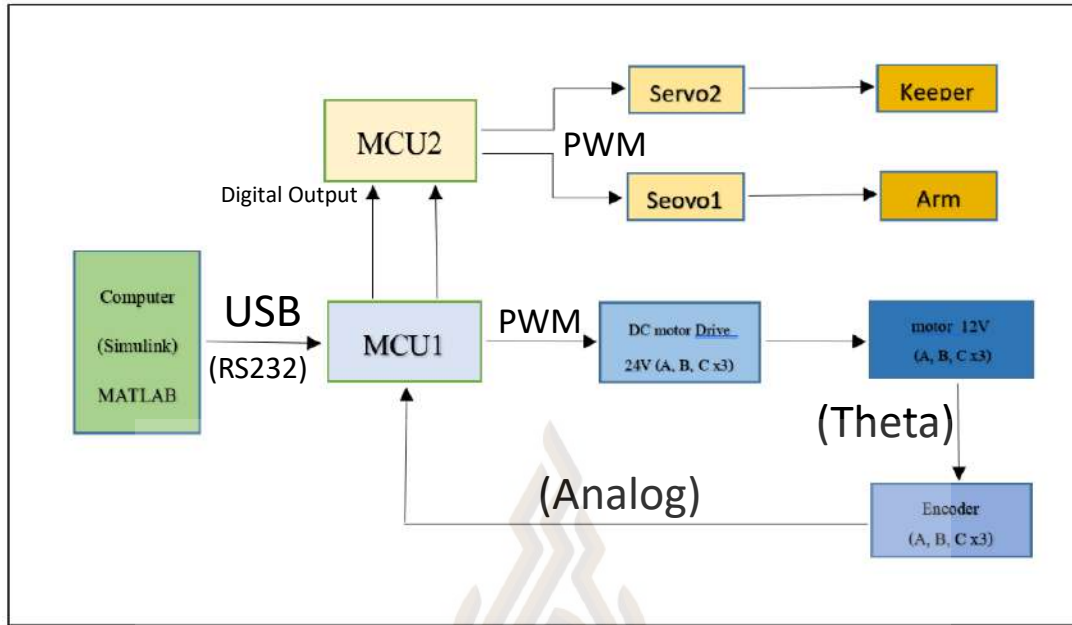
ในการเลือกอุปกรณ์ชุดควบคุมการหยิบจับสิ่งของในโครงการเป็น มือจับโลหะรุ่น Metal Robotic Arm Gripper with Optional Servo MG995 MG996R โดยมีมอเตอร์เซอร์โวมอเตอร์จำนวน 2 ตัว เป็นตัวควบคุมการหยิบจับชิ้นงาน และบิดตัวแขนของหุ่นยนต์โดยรับคำสั่งสัญญาณการสั่งงานจากไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO ในการสั่งงานตัวมอเตอร์ให้ทำการเคลื่อนที่ได้ยังโปรแกรมที่ต้องการ ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 แสดงการทำงานของแขนหุ่นยนต์จำลอง

3.2 การออกแบบระบบควบคุมหุ่นยนต์แขนกล

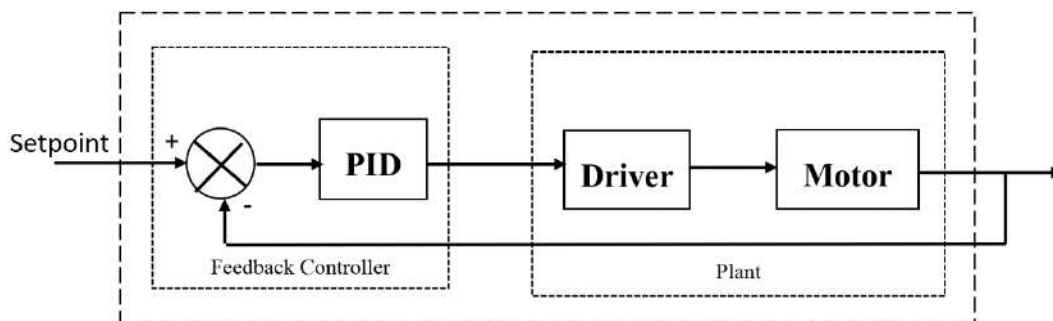
ในการออกแบบระบบควบคุมการทำงานของระบบ การสั่งงานของหุ่นยนต์จะสั่งงานผ่านโปรแกรม MATLAB โดยใช้ Simulink ภายในโปรแกรมมีระบบควบคุม PID เป็นตัวควบคุมระบบแขนหุ่นยนต์ ๑ แบบระบบปิด โดยส่งข้อมูลผ่านพอร์ต USB ในการสั่งงานจะมีรูปแบบการส่งผ่านข้อมูลมาตรฐานการสื่อสารข้อมูลแบบ RS232 ซึ่งในโปรแกรม Simulink นี้จะเป็นตัวกำหนดการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ หลังจากทีโปรแกรมได้ถูกสั่งการ คอมพิวเตอร์จะทำการประมวลผลของข้อมูล ไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ ตัวที่ 1 ซึ่งเป็นตัวประมวลผลหลักในการสั่งงานหุ่นยนต์ โดยไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวที่ 1 นี้ จะทำการควบคุม การเคลื่อนที่แขนของหุ่นยนต์ ในแกน A, B, C และสั่งงานการหมุนบิดแขน รวมทั้งการหยิบจับสิ่งของของหุ่นยนต์ ๑ โดยการควบคุมการเคลื่อนที่แขนของหุ่นยนต์ในแกน A, B และ C นั้นระบบจะมีการตรวจจับมุมของการเคลื่อนที่ผ่านตัวถอดรหัส และจะคำสั่งสัญญาณแบบอนาล็อกกลับมาที่ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผลเป็นมุมที่ทำการเคลื่อนที่อีกครั้งหนึ่งก่อนจะส่งค่าข้อมูลทั้งหมดไปให้กับคอมพิวเตอร์ สำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวที่ 2 จะเป็นตัวประมวลผลรอง ที่จะรับคำสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวที่ 1 ในการควบคุมระบบเซอร์โวมอเตอร์ในการหมุนบิดแขน หรือหยิบจับชิ้นงาน ดังที่แสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 บล็อกไดอะแกรมของระบบหุ่นยนต์แขนกล

3.2.1 ระบบควบคุม PID ในการออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์

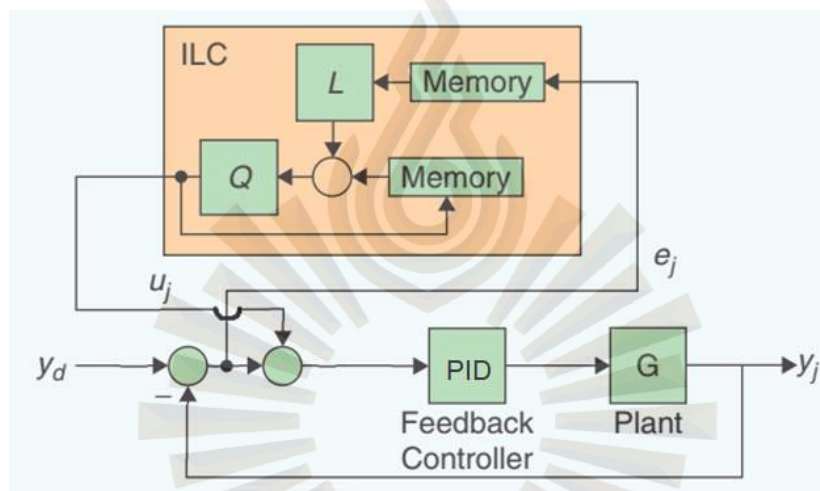
ในการออกแบบระบบควบคุมแบบ PID นั้นในโครงการนี้ได้เลือกใช้เฉพาะส่วนการควบคุมแบบสัดส่วน โดยได้แสดงวิธีการออกแบบการควบคุมโดยการกำหนดค่าเส้นทางเคลื่อนที่ (Setpoint) แล้วทำการประมาณค่าผ่านตัวควบคุมแบบสัดส่วน เพื่อประมาณค่า PWM ไปยังไดร์มอเตอร์เพื่อทำการหมุนมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์เกิดการเคลื่อนที่ระบบ จะทำการถอดรหัสมุมที่เกิดขึ้นการเคลื่อนที่ในแกนต่างๆของหุ่นยนต์เพื่อนำประมาณค่าความผิดพลาดแล้วทำการชดเชยค่าเพื่อทำการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ต่อไป ดังรูปที่ 3.10 และได้แสดงค่าเกนที่ใช้ในแต่ละแกน โดยกำหนดค่าเกนของมอเตอร์ที่ควบคุมแกน A มีค่า $K_p = 12$, ค่าเกนของมอเตอร์ที่ควบคุมแกน B มีค่า $K_p = 10$ และ ค่าเกนของมอเตอร์ที่ควบคุมแกน C มีค่า $K_p = 8.2$



รูปที่ 3.10 แสดงวิธีการออกแบบตัวควบคุมระบบโดยใช้ตัวควบคุม PID

3.2.2 ระบบควบคุม ILC ในการทำงานร่วมกับระบบเดิม

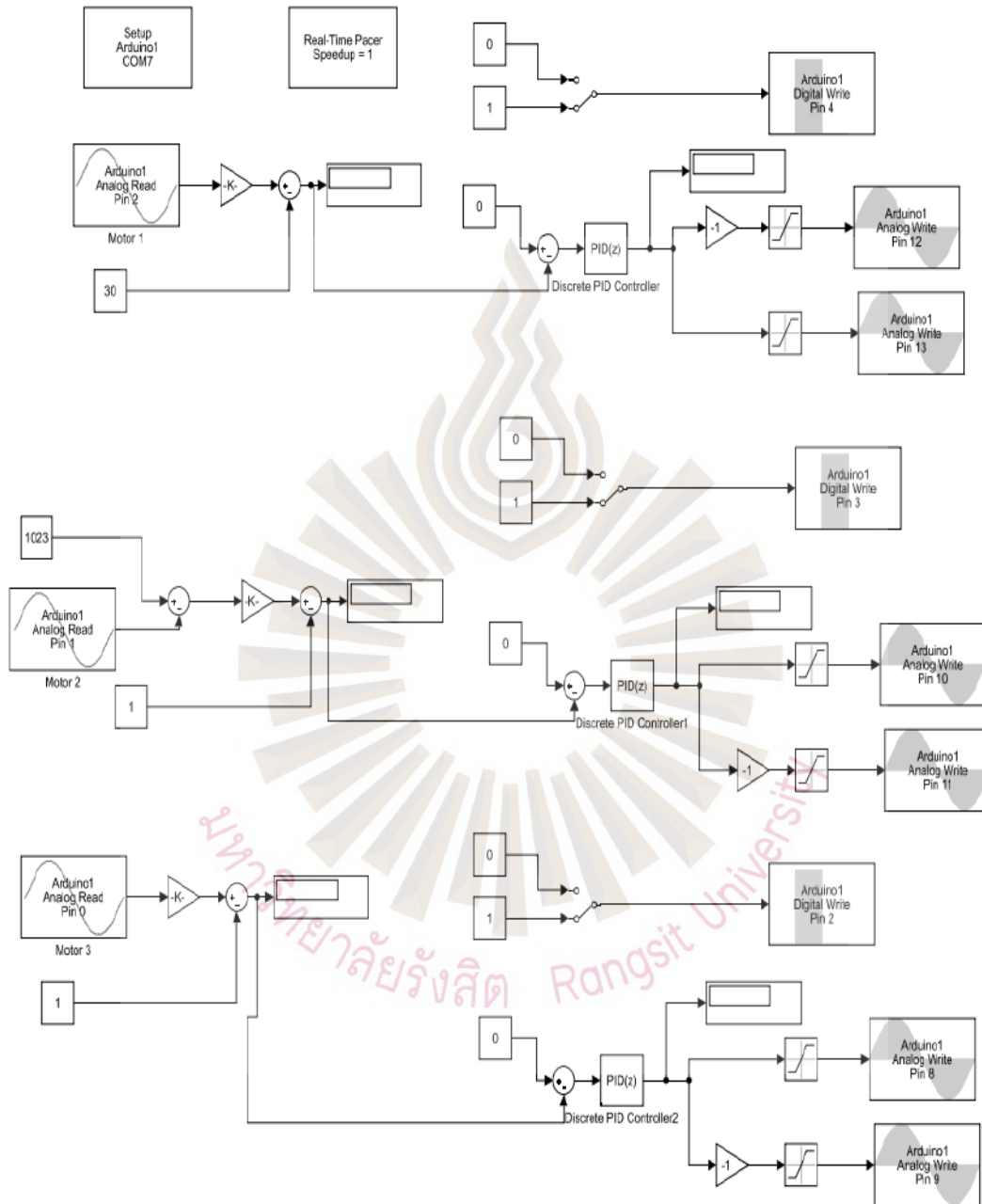
โดยการควบคุมแบบ PID ที่กล่าวมาข้างต้นเมื่อระบบทำการควบคุมการเคลื่อนที่เสร็จสิ้นใน 1 รอบการทำงาน หุ่นยนต์นั้นจะมีความผิดพลาดในแต่ละช่วงเวลาคงที่ หรือใกล้เคียงค่าเดิมเสมอในรอบถัดไปหากมีการสั่งงานการเคลื่อนที่แบบเดิม การใช้ระบบควบคุมแบบทำซ้ำ จะเป็นการช่วยลดการทำงานที่ผิดพลาดในระบบ โดยการประมาณค่าความผิดพลาดจากระบบเดิมมาทำการปรับเปลี่ยนสัญญาณควบคุมอินพุตใหม่ โดยการทำงานการควบคุมแบบทำซ้ำนี้จะใช้ควบคู่กับการทำงานที่ได้ออกแบบระบบควบคุมแบบ PID ดังที่แสดงใน รูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงวิธีการควบคุมระบบโดยใช้ ILC แบบ Serial

สำหรับวิธีการควบคุมระบบโดยใช้ ILC แบบ Serial มาช่วยปรับปรุงระบบเดิม โดยการเก็บค่าความผิดพลาดของระบบในรอบก่อนหน้า แล้วทำการประมาณค่าใหม่ให้กับการทำงานซ้ำในรอบถัดไปซึ่งจะทำการปรับปรุงค่าที่ใช้งานที่ดีที่สุด แล้วทำการเลือกค่าที่ดีที่สุดมาใช้เป็นสัญญาณ ควบคุม U_j

โดยการออกแบบโปรแกรม Simulink นั้นได้กำหนดบล็อกการควบคุมในจุดเชื่อมต่อสัญญาณต่างๆได้แสดงในรูปที่ 3.12 ก่อนที่จะทำการยุบบล็อกของระบบให้มีขนาดเล็ก ดังที่ได้แสดงในรูปอื่นๆต่อไป



รูปที่ 3.12 แสดงวิธีการควบคุมระบบโดยใช้ โปรแกรม Simulink

3.3 กระบวนการวิธีการทดสอบระบบ

วิธีการทดสอบโครงการเรื่องการประยุกต์ใช้การควบคุมการเรียนรู้แบบทำซ้ำในแขนหุ่นยนต์ผู้ช่วย ได้แบ่งการทดสอบเป็น 2 ขั้นตอนคือการทดสอบการเคลื่อนที่แบบ Step Input และ การเคลื่อนที่แบบ Smoot Function

3.4.1 การทดสอบการจำลองโครงการ

3.4.1.1 วัตถุประสงค์ในการทดลอง

เพื่อทดสอบระบบ Closed loop System ที่ออกแบบในการเคลื่อนที่แบบ Trajectory Control โดยการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ แบบ Step Input และ Smoot Function ในการประมาณค่าวิธีการเคลื่อนที่แขนของหุ่นยนต์

3.4.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบระบบ

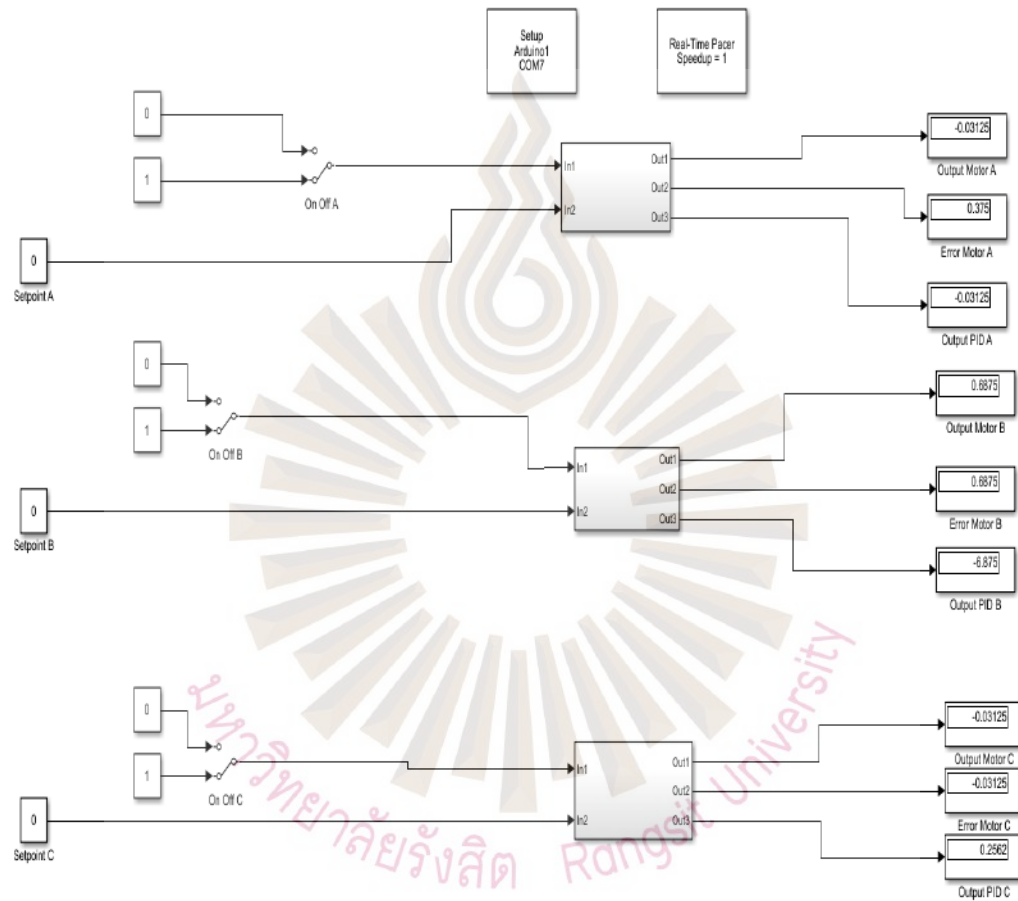
- | | |
|--------------------------|-------|
| 1) ชุดหุ่นยนต์แขนกล | 1 ชุด |
| 2) ชุดระบบควบคุมหุ่นยนต์ | 1 ชุด |
| 3) ชุดควบคุมระบบ มอเตอร์ | 3 ชุด |
| 4) คอมพิวเตอร์ | |

3.4.1.3 วิธีการทดลอง

- 1) ออกแบบ โปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ตั้งไว้ที่ 0 องศา โดยทำงานผ่าน โปรแกรม Simulink
- 2) ทำการกำหนดค่าเส้นการเคลื่อนที่ของระบบแขนของหุ่นยนต์
- 3) โดยกำหนดการเคลื่อนที่แบบ Step Input และใช้สมการของระบบในแต่ละแกน
- 4) กำหนดการเดินทางของระบบ โดยใช้เส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เทียบกับเวลา
- 5) เก็บข้อมูลที่ Sampling Time 0.055 ms ประเมินค่าใน MATLAB โดยจะได้ค่าสมการของระบบ
- 6) นำเส้นทางการเคลื่อนที่ Step Input ที่กำหนด มาใส่ในโปรแกรมของ Trajectory Control
- 7) เก็บข้อมูลการเคลื่อนที่เพื่อหา Smoot Function ซึ่งจะช่วยลดค่า RMS Error
- 8) ทำการทดสอบและบันทึกผลการเคลื่อนที่แต่ละแกน แกนละ 15 รอบการเคลื่อนที่
- 9) กำหนดค่า Gain ที่ใช้ในการทดสอบในแต่ละแกนแต่ละรอบ 0.1, 0.25, 0.50, 0.75
- 10) นำข้อมูลที่จัดเก็บมาใส่ใน โปรแกรมของ Trajectory Control ILC เพื่อดูค่าที่ดีที่สุดของแต่ละแกนในแต่ละรอบการเคลื่อนที่
- 11) เก็บข้อมูลการเคลื่อนที่ที่ได้จากระบบจริง

3.4.2 การทดสอบการทำงานของโปรแกรมเพื่อทำการควบคุมหุ่นยนต์

3.4.2.1 โปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์เริ่มต้นต้องกำหนดพิกัดให้อยู่ในตำแหน่งที่ค่า Initial ของระบบ โดยต้องกำหนดให้หุ่นยนต์กลับไปจุดตั้งต้น ที่พิกัดแกน A มีค่าเท่ากับ 0 องศา, B มีค่าเท่ากับ 0 องศา และ C มีค่าเท่ากับ 0 องศา โดยให้ใช้โปรแกรม Initial เพื่อทำการควบคุมมุมให้ไปยังจุดที่กำหนด โดยสามารถสั่งงานผ่านโปรแกรม Simulink เบื้องต้นที่แสดงได้ในรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงโปรแกรมจำลองที่ใช้ในการกำหนดค่า Initial ของระบบ

3.4.2.2 กำหนดการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยสามารถกำหนดได้ 2 ลักษณะคือแบบ Step Input และ Smoot Function ซึ่งในการหาค่าจะใช้การกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่แบบ Step Input ดังตารางที่ 3.1 แล้วใช้สมการของระบบในแต่ละแกน โดยเวลาเก็บข้อมูลที่ Sampling Time 0.055 ms

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงค่าผลการทดสอบ Step Input แขนงของหุ่นยนต์

Step	Setpoint A (Theta)	Setpoint B (Theta)	Setpoint C (Theta)
0	0	0	0
1	40	0	0
2	40	80	0
3	40	80	60
4	60	80	60
5	60	60	60
6	20	60	60
7	20	80	60
8	0	80	60
9	0	0	60
10	0	0	0

3.4.2.3 กำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่แบบ Smoot Function ใช้เวลาเก็บข้อมูลที่ Sampling Time 0.055 ms โดยนำค่าที่ทำการกำหนดใน Step Input จากตารางที่ 3.1 นำมากำหนด เส้นทางการเคลื่อนที่โดยการประมาณค่าจากสมการ Smoot Function ได้จาก $S(x) = \frac{1}{1+e^x}$ โดยได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

$$S(x) = X + \frac{Y + X}{1 + e^{(-2(t-5))}} \quad (3.1)$$

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงค่าเส้นทางการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ A โดยกำหนดให้เป็นไปตามสมการที่ 3.1

Step	A axis		
	X	Y	Time(s)
1	0	0	T=0-2.5
2	0	140	T=2.5-7.5
3	140	140	T=7.5-32.5
4	140	20	T=32.5-37.5
5	20	20	T=35.5-50.5
6	115	0	T=50.5-55.5
7	0	0	T=55.5-60

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงค่าเส้นทางการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ B โดยกำหนดให้เป็นไปตามสมการที่ 3.1

Step	B axis		
	X	Y	Time(s)
1	0	0	T=0-7.5
2	0	-60	T=7.5-13.5
3	60	60	T=13.5-17.5
4	60	65	T=17.5-23.5
5	65	55	T=23.5-28.5
6	55	55	T=13.5-17.5

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงค่าเส้นทางการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ B โดยกำหนดให้เป็นไปตามสมการที่ 3.1 (ต่อ)

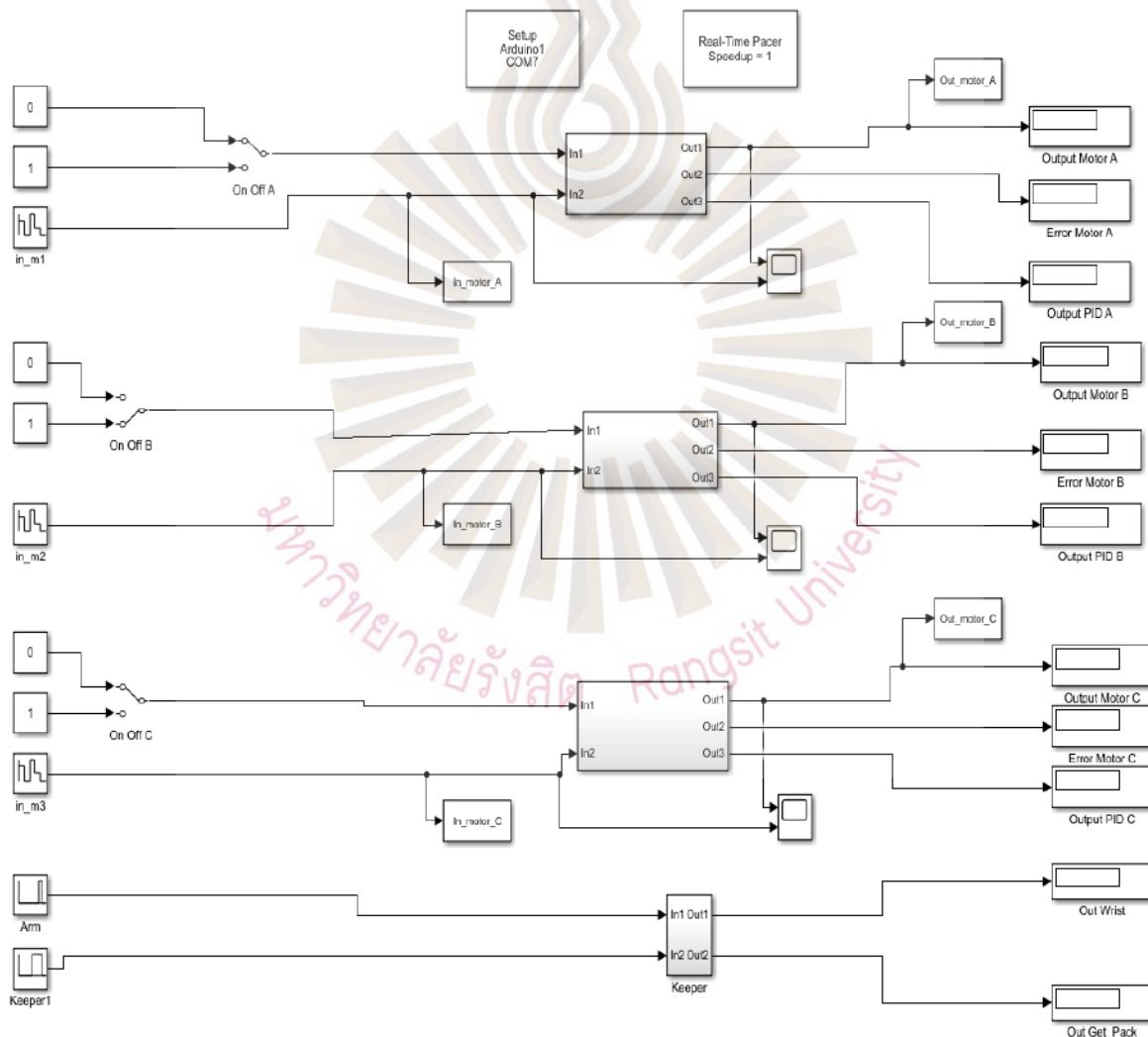
Step	B axis		
	X	Y	Time(s)
7	55	70	T=23.5-28.5
8	70	70	T=28.5-40.5
9	70	90	T=40.5-45.5
10	90	70	T=45.5-50.5
11	70	0	T=50.5-55.5
12	0	0	T=55.0-60.0

ตารางที่ 3.4 ตารางแสดงค่าเส้นทางการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ C โดยกำหนดให้เป็นไปตามสมการที่ 3.1

Step	C axis		
	X	Y	Time(s)
1	70	70	T=0-12.5
2	70	100	T=12.5-13.5
3	100	100	T=13.5-37.5
4	100	120	T=37.5-43.5
5	120	120	T=43.5-50.5
6	120	-70	T=50.5-55.5
7	70	70	T=55.5-60

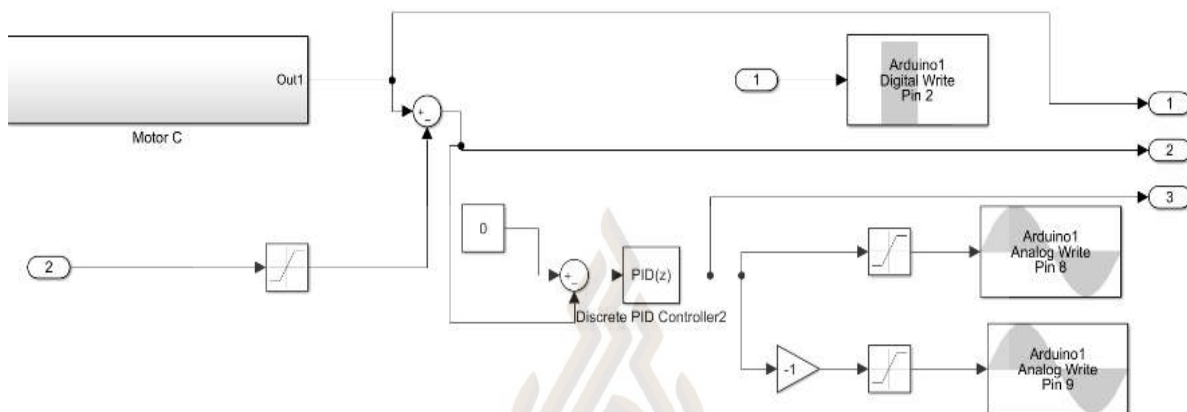
3.4.2.4 กำหนดการทดสอบการเคลื่อนที่แบบ Step Input และใช้สมการของระบบประมาณค่าในแต่ละแกน ที่พิกัดแกน A, B, C ให้สามารถเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่กำหนดโดยใช้ค่าจากตารางที่ 3.1 เป็นตารางที่ใช้ในการทดสอบระบบ โดยใส่ค่าพารามิเตอร์ของแกน A ที่ in_m1, แกน B ที่ in_m2 และแกน C ที่ in_m3 ดังที่แสดงในรูปที่ 3.14

3.4.2.5 กำหนดการทดสอบการเคลื่อนที่แบบ Smoot Function และใช้สมการของระบบประมาณค่าในแต่ละแกน ที่พิกัดแกน A, B, C ให้สามารถเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่กำหนดโดยใช้ค่าจากตารางที่ 3.2 เป็นตารางที่ใช้ในการทดสอบระบบ โดยใส่ค่าพารามิเตอร์ของแกน A ที่ in_m1, แกน B ที่ in_m2 และแกน C ที่ in_m3 ดังที่แสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แสดงโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมแบบ Trajectory Control ของระบบ

โดยแต่ละ Sub System ในรูปที่ 3.14 นั้นได้ทำการยุบบล็อกไดอะแกรมจากรูปที่ 3.12 มาเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน ดังที่ได้แสดงตัวอย่าง โดยการใส่ข้อมูลเพื่อใช้ในการควบคุม จะใส่ in_m1, in_m2, in_m3, Arm และ Keeper1 เพื่อแสดงการเคลื่อนไหวของแขนหุ่นยนต์ได้ตามที่กำหนด ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 แสดงตัวอย่าง Sup System ในโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมแบบ Trajectory Control ของระบบ

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

ในบทที่ 4 นี้จะอธิบายรายละเอียดผลการออกแบบอุปกรณ์ และสร้างหุ่นยนต์ต้นแบบ การควบคุมหุ่นยนต์โดยใช้วิธีแบบ PID และแบบ ILC ร่วมกับ PID โดยได้แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการจัดทำแขนกลของหุ่นยนต์ต้นแบบหุ่นยนต์





ผลการจัดทำโครงการการศึกษาและการออกแบบ โครงสร้างหุ่นยนต์ ดังรูปที่ 3.1 ได้ออกแบบชิ้นงานโดยใช้เหล็กกล่องขนาด 25.4 x 25.4 x 2 mm และประกอบชิ้นงานตามแบบที่ได้ออกแบบขึ้น โดยได้แสดงหุ่นยนต์ต้นแบบ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงโครงสร้างการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์

โดยกำหนดให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ตามคุณลักษณะดังนี้ มอเตอร์ A เป็นตัวควบคุมจุดหมุนที่เสมือนตำแหน่งไหล่ในการกวาดซ้ายขวา มอเตอร์ B ควบคุมตำแหน่งเสมือนไหล่ในการยกขึ้นลง และมอเตอร์ C ควบคุมเสมือนข้อศอกในการพับเข้าและพับออก ดังที่แสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้เสมือนแขนของมนุษย์ โดยได้แสดงรายละเอียดในการทดลองต่อไปในหัวข้อที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 แสดงตำแหน่งการเคลื่อนที่โครงสร้างหุ่นยนต์

หุ่นยนต์	มอเตอร์	ตำแหน่งในการเคลื่อนที่
	 C	ควบคุมเสมือนข้อศอกในการพับเข้าและพับออก
	 B	ควบคุมเสมือนตำแหน่งไหล่ในการยกขึ้นลง
	 A	เป็นตัวควบคุมจุดหมุนที่เสมือนตำแหน่งไหล่ในการกวาดซ้ายขวา

4.2 ผลการทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แขนกล โดยวิธีการเคลื่อนที่แบบ Step Input

ในการทดสอบระบบการเคลื่อนที่แบบ Step Input นั้น ได้กำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ดังตารางที่ 3.1 เพื่อทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แขนกล ว่าสามารถไปยังเส้นทางเป้าหมายที่กำหนดได้หรือไม่ โดยผลการทดสอบระบบนั้น หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายที่กำหนดได้ โดยได้แสดงลักษณะท่าทางการเคลื่อนที่ไหวของหุ่นยนต์ดังตารางที่ 4.2 โดยแสดงให้เห็นมุมของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในพิกัด ที่ได้กำหนดไว้ในตารางที่ 3.1 โดยใช้โปรแกรมในรูปแบบที่ 3.13 โดยได้แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.2 แสดงตัวอย่างภาพตารางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในค่า Step Input

Step	Setpoint A	Setpoint B	Setpoint C	ภาพประกอบแสดงการ เคลื่อนที่ของหุ่นยนต์	แสดงการทำงานแกนจุด หมุนของแขนหุ่นยนต์
0	0	0	0		ทุกๆแกนตั้งค่า 0 ในระบบ ตามที่กำหนด
1	40	0	0		มอเตอร์ A เป็นตั้งค่าที่ 40 Theta ควบคุมจุดหมุนที่ ตำแหน่งไหล่
2	40	80	0		มอเตอร์ B เป็นตั้งค่าที่ 80 Theta ควบคุมตำแหน่งไหล่ ในการเคลื่อนที่ลง

ตารางที่ 4.2 แสดงตัวอย่างภาพตารางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในค่า Step Input (ต่อ)

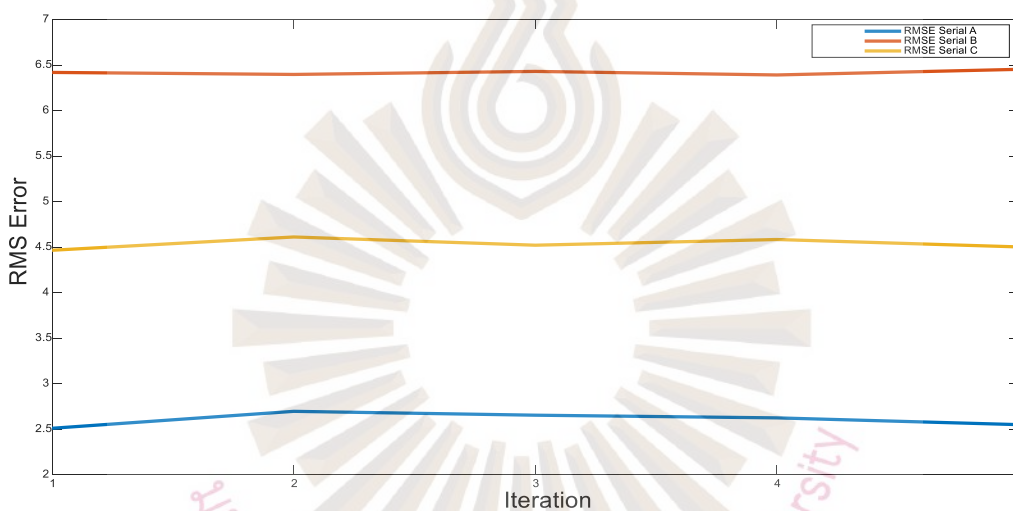
Step	Setpoint A	Setpoint B	Setpoint C	ภาพประกอบแสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์	แสดงการทำงานแกนจุดหมุนของแขนหุ่นยนต์
3	40	80	60		มอเตอร์ C เป็นตั้งค่าที่ 60 Theta ควบคุมข้อศอกในการพับเข้า
4	60	80	60		มอเตอร์ A เป็นตั้งค่าที่ 60 Theta ควบคุมจุดหมุนที่ตำแหน่งไหล่ให้หมุนเข้า
5	60	60	60		มอเตอร์ B เป็นตั้งค่าที่ 60 Theta ควบคุมตำแหน่งไหล่ในการเคลื่อนที่ขึ้น
6	20	60	60		มอเตอร์ A เป็นตั้งค่าที่ 20 Theta ควบคุมจุดหมุนที่ตำแหน่งไหล่ให้หมุนออก

ตารางที่ 4.2 แสดงตัวอย่างภาพตารางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในค่า Step Input (ต่อ)

Step	Setpoint A	Setpoint B	Setpoint C	ภาพประกอบแสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์	แสดงการทำงานแกนจุดหมุนของแขนหุ่นยนต์
7	20	80	60		มอเตอร์ B เป็นตั้งค่าที่ 80 Theta ควบคุมตำแหน่งไหล่ ในการเคลื่อนที่ลง
8	0	80	60		มอเตอร์ A เป็นตั้งค่าที่ 0 Theta ควบคุมจุดหมุนที่ ตำแหน่งไหล่ให้หมุนออก
9	0	0	60		มอเตอร์ B เป็นตั้งค่าที่ 0 Theta ควบคุมตำแหน่งไหล่ ในการเคลื่อนที่ขึ้น
10	0	0	0		มอเตอร์ C เป็นตั้งค่าที่ 0 Theta ควบคุมข้อศอกใน การพับออก

4.3 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แขนกล โดยวิธีการเคลื่อนที่แบบ Smooth Function โดยใช้การควบคุมแบบ PID Control เพียงตัวควบคุมเดียว เป็นตัวควบคุมหุ่นยนต์แขนกลในการเคลื่อนที่

ในการออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่แบบ Smooth Function นั้นเป็นวิธีช่วยให้หุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่ได้ อย่างราบเรียบมากขึ้น โดยการควบคุมหุ่นยนต์ที่ทำการควบคุมแบบ PID Control เพียงอย่างเดียวดังเช่นรูปที่ 3.10 และใช้วิธีการเคลื่อนที่แบบตารางที่ 3.2 แล้วทำการเคลื่อนที่แบบทำซ้ำในเส้นทางการเคลื่อนที่เดิม จำนวน 5 รอบ พบว่าเมื่อทำการจำลองระบบเส้นทางการเคลื่อนที่เสร็จสิ้นในแต่ละรอบแล้วทำการตรวจสอบค่า RMS Error ที่เกิดขึ้นจากการทำงานในแต่ละรอบพบว่า หุ่นยนต์มีค่า RMS Error ที่มีค่าใกล้เคียงค่าเดิมเสมอ ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งบ่งบอกได้ว่า หุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่ที่ผิดพลาดซ้ำๆเหมือนเดิมเสมอ



รูปที่ 4.2 แสดงค่า RMS Error ของหุ่นยนต์เมื่อใช้วิธีการควบคุม PID Control เพียงอย่างเดียว

4.4 ผลการทดลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แขนกล โดยวิธีการเคลื่อนที่แบบ Smooth Function โดยใช้การควบคุมแบบ PID Control ร่วมกับการควบคุมแบบ ILC เป็นตัวควบคุมหุ่นยนต์แขนกลในการเคลื่อนที่

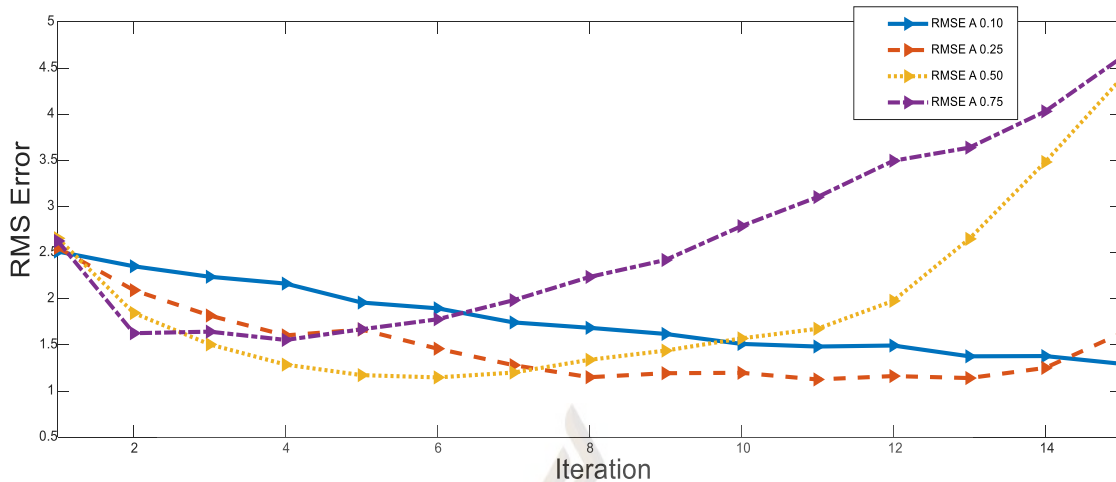
ในการออกแบบการทดสอบ และบันทึกผลการเคลื่อนที่ในการทดลองนี้ โดยกำหนดค่าเกณฑ์การเรียนรู้แบบคงที่จำนวน 4 ค่าโดยมีค่าเป็น 0.1, 0.25, 0.50 และ 0.75 ตามลำดับ กำหนดการทดสอบระบบในแต่ละครั้ง โดยกำหนดให้มีการทำซ้ำของระบบจำนวน 15 รอบ ซึ่งได้แสดงค่าเกณฑ์การเรียนรู้ ดังตารางที่ 4.3 เพื่อทำศึกษาพฤติกรรมการเรียนรู้ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงระบบ เมื่อระบบมีค่าเกณฑ์การเรียนรู้ที่ไม่เท่ากัน

ตารางที่ 4.3 แสดงตัวอย่างตารางที่ใช้กำหนดค่าเกณฑ์การเรียนรู้ของระบบ ILC ในมอเตอร์ A, B และ C

เกณฑ์การเคลื่อนที่	เกณฑ์การเรียนรู้ของระบบ ILC			
	การทดลองครั้งที่			
	1	2	3	4
Motor A	0.10	0.25	0.50	0.75
Motor B	0.10	0.25	0.50	0.75
Motor C	0.10	0.25	0.50	0.75

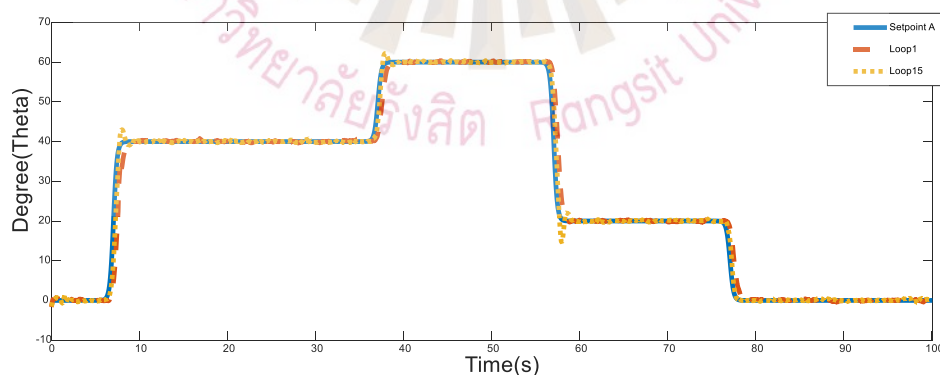
4.4.1 ผลการทดสอบระบบในแกนมอเตอร์ A

ในการทดสอบระบบของแกนมอเตอร์ A ที่เกิดขึ้นแต่ละแกนพบว่าเกณฑ์การเรียนรู้ของระบบที่มีค่าเกณฑ์การเรียนรู้ต่ำ ระบบจะค่อย ๆ มีการปรับเปลี่ยนเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบและมีค่า RMS Error ที่ค่อย ๆ ลดลงดังรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าค่าเกณฑ์การเรียนรู้ที่ 0.10 จะมีพฤติกรรมของระบบที่ได้ค่า RMS Error ที่ค่อย ๆ ลดลง และหากกำหนดค่าเกณฑ์การเรียนรู้ที่สูงขึ้น เช่น 0.25 จะมีพฤติกรรมของระบบที่ได้ค่า RMS Error ที่ค่อย ๆ ลดลงเร็วกว่าค่าเกณฑ์ที่ 0.10 แต่หากระบบมีการกำหนดค่าเกณฑ์การเรียนรู้ที่มีค่าสูง เช่น ค่าเกณฑ์ที่ 0.50 และ 0.75 ระบบจะมีค่า RMS Error ที่ลดลงอย่างรวดเร็ว และด้วยการลดลงอย่างรวดเร็วทำให้ระบบอาจมีการประมาณค่าที่ผิดพลาดส่งผลให้ระบบนั้นอาจเป็นระบบที่ไม่เสถียรภาพได้

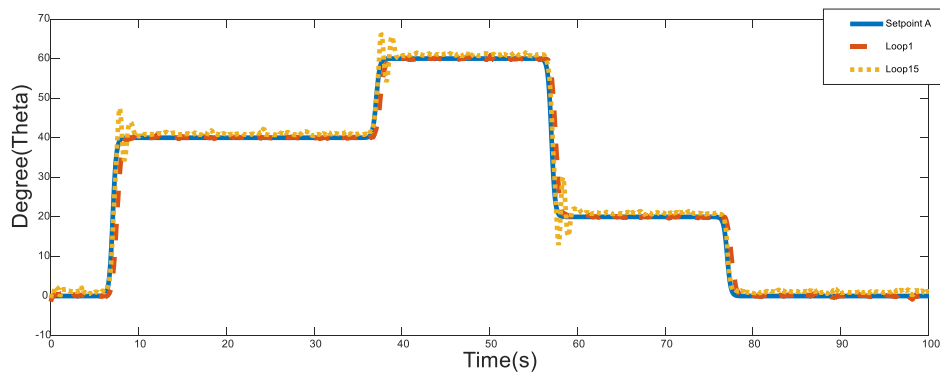


รูปที่ 4.3 แสดงค่า RMS Error ของแกน A

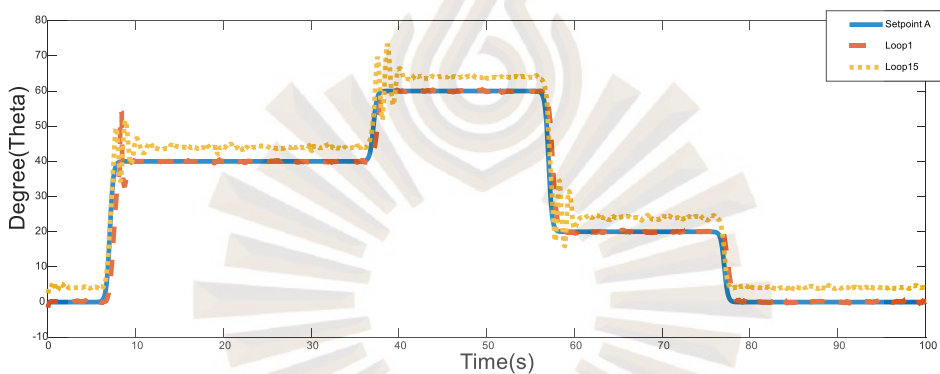
โดยผลการทดสอบระบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่กำหนดค่าเกณฑ์การเรียนรู้ไม่เท่ากันจำนวนครั้งละ 15 รอบ เมื่อทำการพิจารณารอบที่ 1 เปรียบเทียบกับรอบที่ 15 จะสามารถพิจารณาพฤติกรรมของระบบที่ไม่เหมือนกันได้ในรูปที่ 4.4 – 4.7 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ระบบในการใช้ค่าเกณฑ์ที่มีค่าน้อย ผลการเคลื่อนที่ของระบบนั้นจะสามารถในการเรียนรู้ที่ดี และลอกเลียนแบบเส้น Setpoint ของระบบได้ดีดังรูปที่ 4.4 พบว่าค่าพฤติกรรมของระบบที่ได้มีค่าใกล้เคียงเส้น Setpoint มากกว่า เส้นที่ประมาณค่าได้ในรอบที่ 1 ในขณะที่รูปที่ 4.3 - 4.7 ระบบมีค่าเกณฑ์การเรียนรู้ที่สูง ทำให้รอบที่ 15 ระบบมีค่าสะสมความผิดพลาดมากเกินไปทำให้ระบบที่ทำการเรียนรู้เป็นระบบที่ไม่เสถียรภาพ



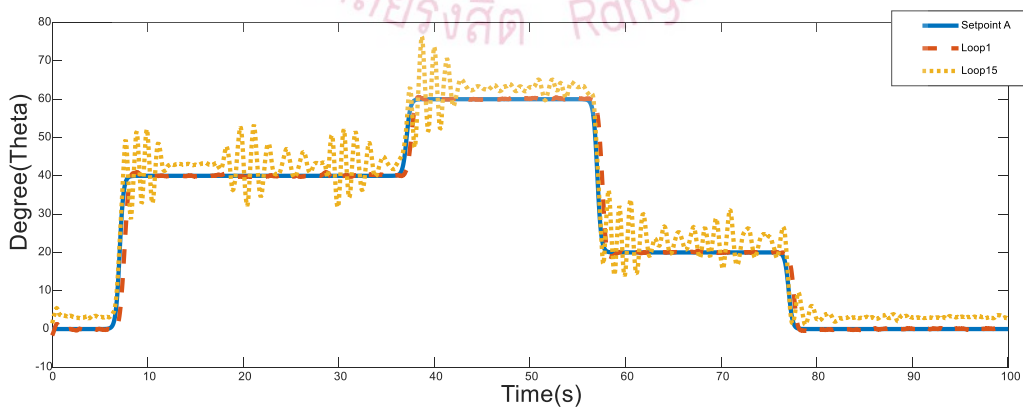
รูปที่ 4.4 แสดงผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.10 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน A



รูปที่ 4.5 แสดงผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.25 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน A



รูปที่ 4.6 แสดงผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.50 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน A

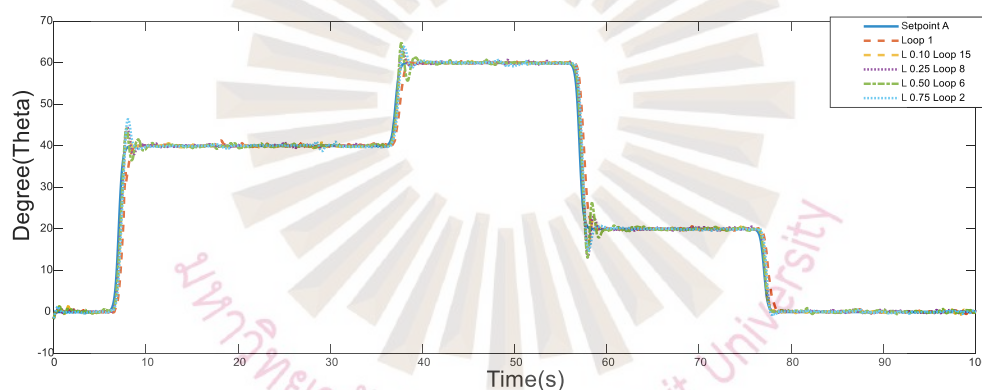


รูปที่ 4.7 แสดงผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.75 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน A

จากรูปที่ 4.3 สามารถอ่านผลการประมาณค่าความผิดพลาดของระบบโดยสามารถกำหนดค่าประมาณการเรียนรู้ที่ดีที่สุด ในแต่ละเกณฑ์การเรียนรู้ได้โดยการอ่านค่า RMS Error ในแต่ละค่าโดยได้สรุปผลได้ดังตารางที่ 4.4 โดยสามารถแสดงพฤติกรรมของระบบได้ดังรูปที่ 4.8

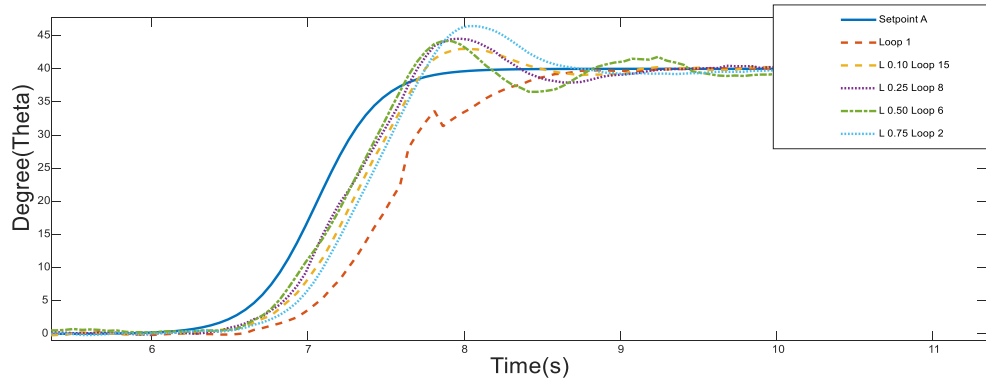
ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดสอบค่า RMS Error ในแกน A ที่ดีที่สุด

	Gain	First Iteration		Best Iteration	
		Loop	RMS Error	Loop	RMS Error
แกน A	0.10	1	2.50	15	1.30
	0.25	1	2.55	8	1.22
	0.50	1	2.65	6	1.20
	0.75	1	2.63	2	1.56



รูปที่ 4.8 แสดงผลการทดสอบค่า RMS Error ที่ต่ำสุด ในแต่ละ Gain ของแกน A

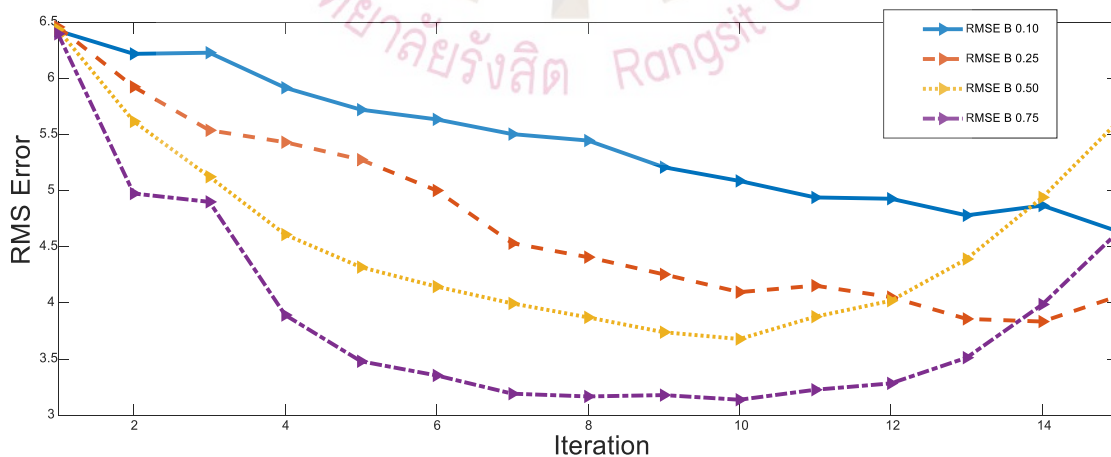
จากรูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของค่าเกณฑ์การเรียนรู้ที่ดีที่สุดพบว่าในแกน A นั้นค่าเกณฑ์ที่ดีที่สุดมีค่าอยู่ที่ 0.1 ในรอบที่ 15 โดยระบบจะมีค่า Risetime ที่ดีกว่ารอบที่ 1 และได้ค่า RMS Error ที่มีค่าน้อยกว่ารอบที่ 1 อีกทั้ง เมื่อพิจารณาค่า Overshoot และ Undershoot ในค่าเกณฑ์ 0.1 จะมีค่าที่น้อยกว่าค่าเกณฑ์อื่นๆของระบบ



รูปที่ 4.9 แสดงผลการเปรียบเทียบในระยะเวลาที่เกิดความผิดพลาดของแกน A

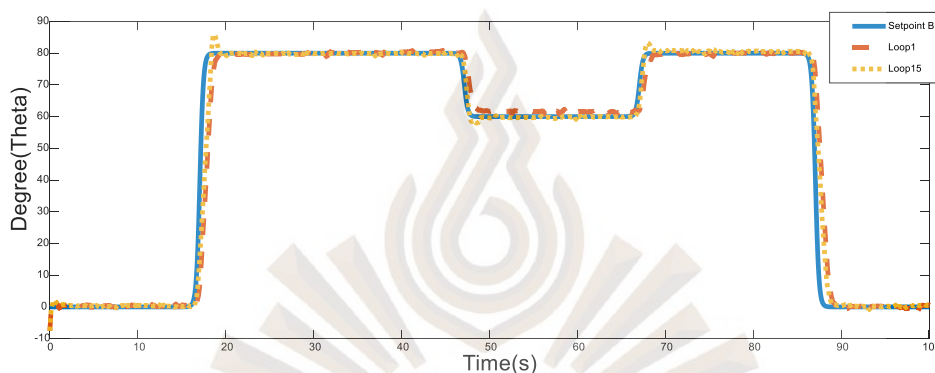
4.4.2 ผลการทดสอบระบบในแกนมอเตอร์ B

ในการทดสอบระบบของแกนมอเตอร์ B ที่เกิดขึ้นแต่ละแกนพบว่าการเรียนรู้ของระบบ มีพฤติกรรมของระบบที่มีแนวโน้มเหมือนกับแกนของมอเตอร์ A โดยเกณฑ์การเรียนรู้ที่มีค่าเกณฑ์การเรียนรู้ต่ำ ระบบจะค่อย ๆ มีการปรับเปลี่ยนเส้นทางการเคลื่อนของระบบและมีค่า RMS Error ที่ค่อย ๆ ลดลงดังรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าค่าเกณฑ์การเรียนรู้ที่ 0.10 จะมีพฤติกรรมของระบบที่ได้ค่า RMS Error ที่ค่อย ๆ ลดลง และหากกำหนดค่าเกณฑ์การเรียนรู้ที่สูงขึ้น เช่น 0.25 จะมีพฤติกรรมของระบบที่ได้ค่า RMS Error ที่ค่อย ๆ ลดลง เร็วกว่าค่าเกณฑ์ที่ 0.10 แต่หากระบบมีการกำหนดค่าเกณฑ์การเรียนรู้ที่มีค่าสูง เช่นค่าเกณฑ์ที่ 0.50 และ 0.75 ระบบจะมีค่า RMS Error ที่ลดลงอย่างรวดเร็ว และด้วยการลดลงอย่างรวดเร็วทำให้ระบบอาจมีการประมาณค่าที่ผิดพลาดส่งผลให้ระบบนั้นอาจเป็นระบบที่ไม่เสถียรภาพได้

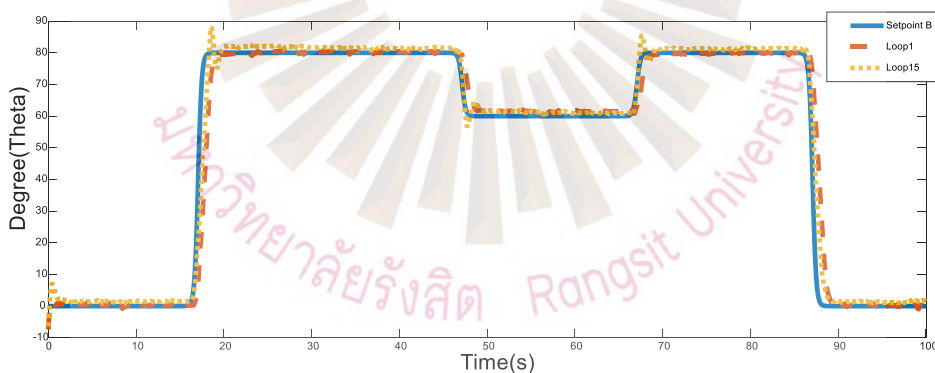


รูปที่ 4.10 การเคลื่อนที่ของระบบแบบ Smoot Function แกน B

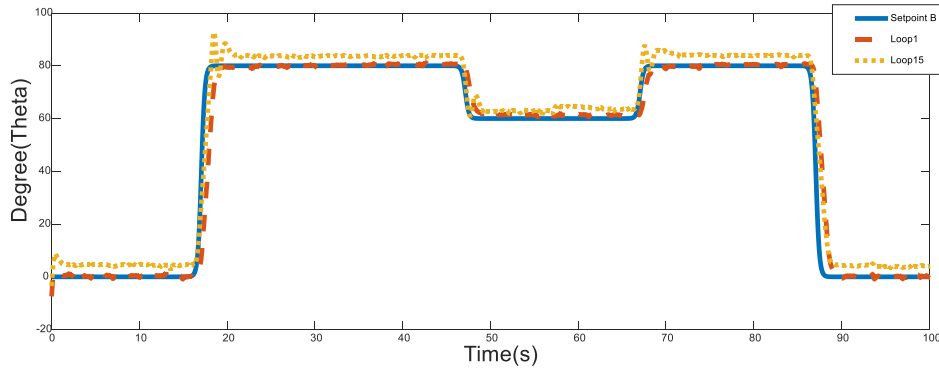
โดยผลการทดสอบระบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่กำหนดค่าเกณฑ์การเรียนรู้ไม่เท่ากันจำนวนครั้งละ 15 รอบ เมื่อทำการพิจารณารอบที่ 1 เปรียบเทียบกับรอบที่ 15 จะสามารถพิจารณาพฤติกรรมของระบบที่ไม่เหมือนกันได้ในรูปที่ 4.11 – 4.14 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ระบบในการใช้ค่าเกณฑ์ที่มีค่าน้อย ผลการเคลื่อนที่ของระบบนั้นจะสามารถในการเรียนรู้ที่ดี และลอกเลียนแบบเส้น Setpoint ของระบบได้ดีดังรูปที่ 4.11 พบว่าค่าพฤติกรรมของระบบที่ได้มีค่าใกล้เคียงเส้น Setpoint มากกว่า เส้นที่ประมาณค่าได้ในรอบที่ 1 ในขณะที่รูปที่ 4.12 - 4.14 ระบบมีค่าเกณฑ์การเรียนรู้ที่สูง ทำให้รอบที่ 15 ระบบมีค่าสะสมความผิดพลาดมากเกินไปทำให้ระบบที่ทำการเรียนรู้เป็นระบบที่ไม่เสถียรภาพ



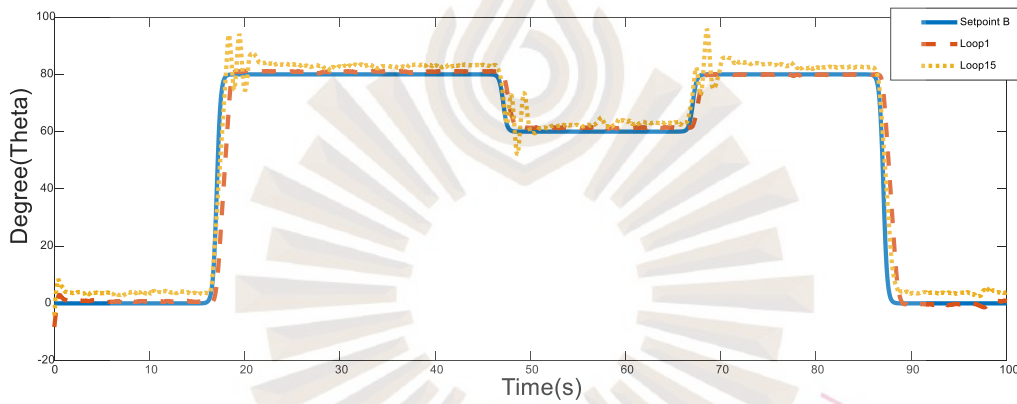
รูปที่ 4.11 แสดงผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.10 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน B



รูปที่ 4.12 แสดงผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.25 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน B



รูปที่ 4.13 แสดงผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.50 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน B

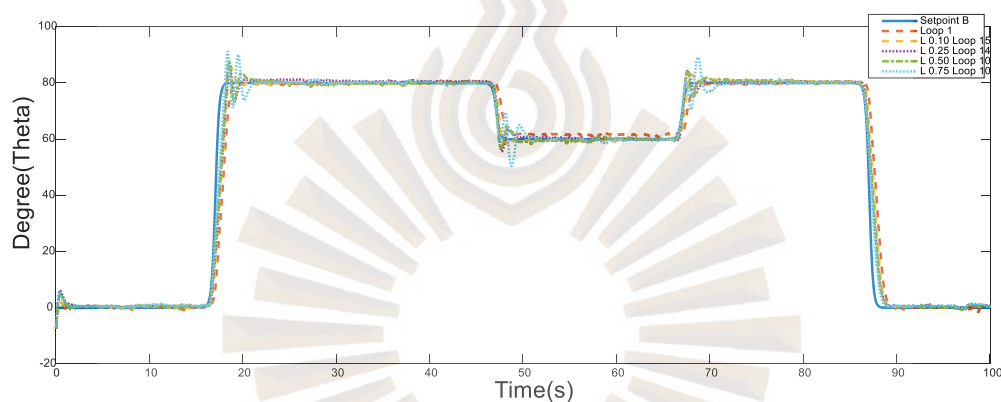


รูปที่ 4.14 แสดงผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.75 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน B

จากรูปที่ 4.10 สามารถอ่านผลการประมาณค่าความผิดพลาดของระบบโดยสามารถกำหนดค่าประมาณการเรียนรู้ที่ดีที่สุด ในแต่ละแกนการเรียนรู้ได้โดยการอ่านค่า RMS Error ในแต่ละค่าโดยได้สรุปผลได้ดังตารางที่ 4.5 โดยสามารถแสดงพฤติกรรมของระบบได้ดังรูปที่ 4.15

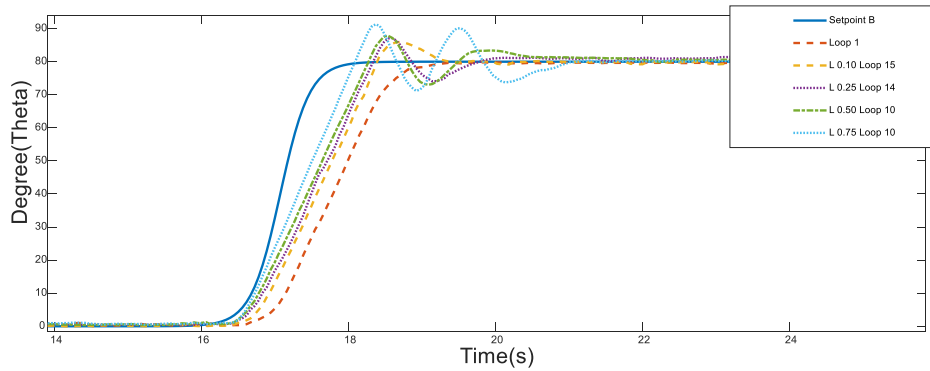
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการเปรียบเทียบ RMS Error ในแกน B

แกน B	Gain	First Iteration		Best Iteration	
		Loop	RMS Error	Loop	RMS Error
	0.10	1	6.42	15	4.60
	0.25	1	6.46	14	3.90
	0.50	1	6.44	10	3.80
	0.75	1	2.40	10	3.10



รูปที่ 4.15 แสดงผลการทดสอบค่า RMS Error ที่ต่ำสุด ในแต่ละ Gain ของแกน B

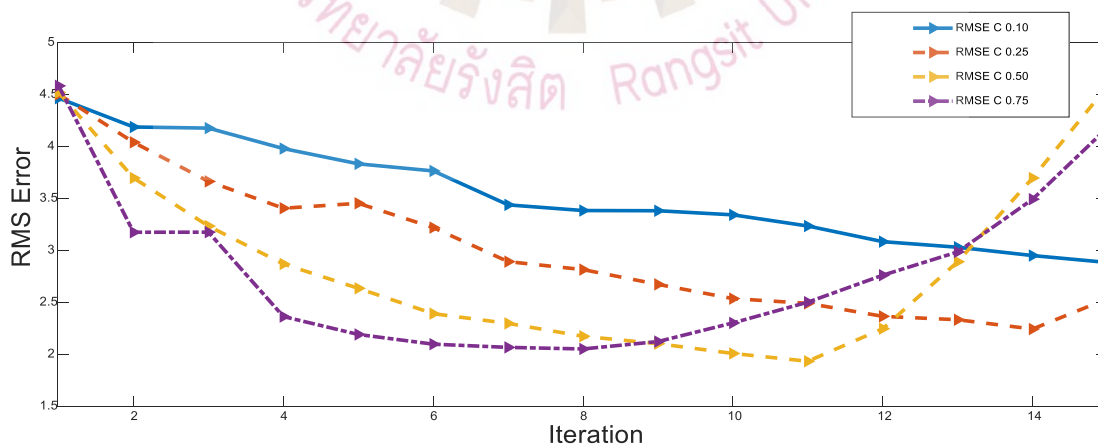
จากรูปที่ 4.15 และ 4.16 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของค่าแกนการเรียนรู้ที่ดีที่สุดพบกว่าในแกน B นั้นค่าแกนที่ดีที่สุดมีค่าอยู่ที่ 0.1 ในรอบที่ 15 โดยระบบจะมีค่า Risetime ที่ดีกว่ารอบที่ 1 และได้ค่า RMS Error ที่มีค่าน้อยกว่ารอบที่ 1 อีกทั้ง เมื่อพิจารณาค่า Overshoot และ Undershoot ในค่าแกนที่ 0.1 จะมีค่าน้อยกว่าค่าแกนอื่นๆของระบบ ซึ่งผลการทดสอบระบบนั้นจะมีลักษณะที่เหมือนกันกับมอเตอร์ A



รูปที่ 4.16 แสดงผลการเปรียบเทียบในระยะเวลาที่เกิดความผิดพลาดของแกน B

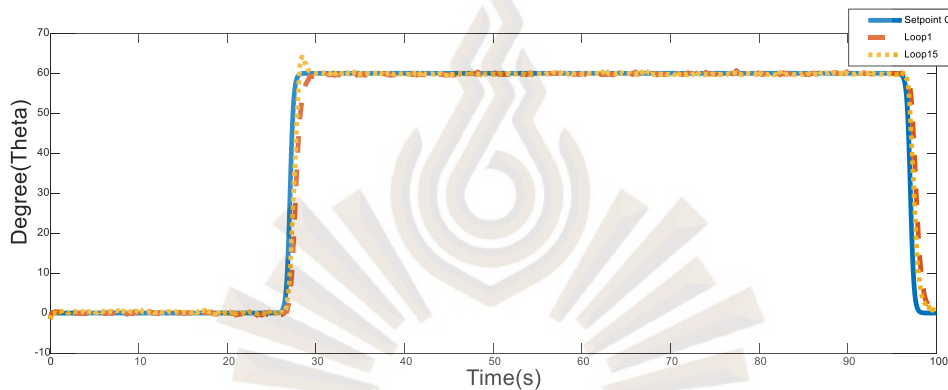
4.4.3 ผลการทดสอบระบบในแกนมอเตอร์ C

ในการทดสอบระบบของแกนมอเตอร์ C ที่เกิดขึ้นแต่ละแกนพบว่าการเรียนรู้ของระบบ มีพฤติกรรมของระบบที่มีแนวโน้มเหมือนกับแกนของมอเตอร์ A และ B โดยเกณฑ์การเรียนรู้ที่มีค่าเกณฑ์การเรียนรู้ต่ำ ระบบจะค่อย ๆ มีการปรับเปลี่ยนเส้นทางการเคลื่อนของระบบและมีค่า RMS Error ที่ค่อย ๆ ลดลงดังรูปที่ 4.17 แสดงให้เห็นว่าค่าเกณฑ์การเรียนรู้ที่ 0.10 จะมีพฤติกรรมของระบบที่ได้ค่า RMS Error ที่ค่อย ๆ ลดลง และหากกำหนดค่าเกณฑ์การเรียนรู้ที่สูงขึ้น เช่น 0.25 จะมีพฤติกรรมของระบบที่ได้ค่า RMS Error ที่ค่อย ๆ ลดลง เร็วกว่าค่าเกณฑ์ที่ 0.10 แต่หากระบบมีการกำหนดค่าเกณฑ์การเรียนรู้ที่มีค่าสูง เช่น ค่าเกณฑ์ที่ 0.50 และ 0.75 ระบบจะมีค่า RMS Error ที่ลดลงอย่างรวดเร็ว และด้วยการลดลงอย่างรวดเร็วทำให้ระบบอาจมีการประมาณค่าที่ผิดพลาดส่งผลให้ระบบนั้นอาจเป็นระบบที่ไม่เสถียรภาพได้

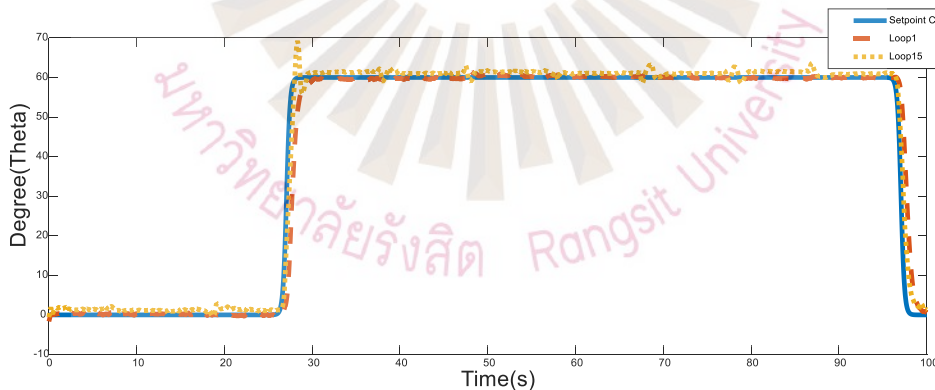


รูปที่ 4.17 การเคลื่อนที่ของระบบแบบ Smoot Function แกน C

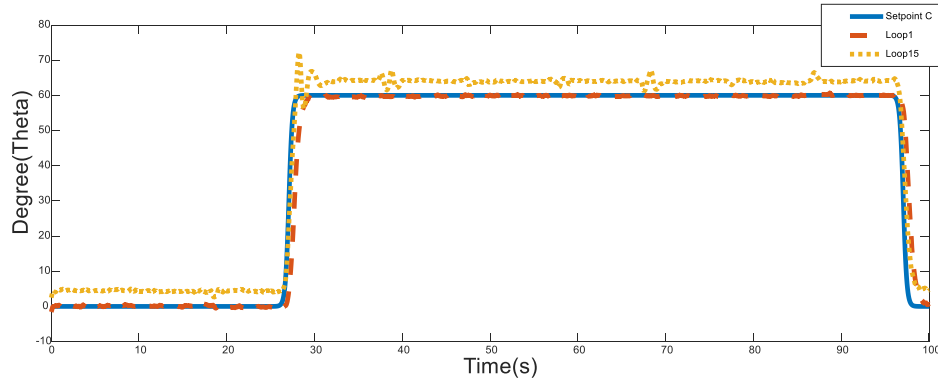
โดยผลการทดสอบระบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่กำหนดค่าเกณฑ์การเรียนรู้ไม่เท่ากันจำนวนครั้งละ 15 รอบ เมื่อทำการพิจารณารอบที่ 1 เปรียบเทียบกับรอบที่ 15 จะสามารถพิจารณาพฤติกรรมของระบบที่ไม่เหมือนกันได้ในรูปที่ 4.18 – 4.21 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ระบบในการใช้ค่าเกณฑ์ที่มีค่าน้อย ผลการเคลื่อนที่ของระบบนั้นจะสามารถในการเรียนรู้ที่ดี และลอกเลียนแบบเส้น Setpoint ของระบบได้ดีดังรูปที่ 4.18 พบว่าค่าพฤติกรรมของระบบที่ได้มีค่าใกล้เคียงเส้น Setpoint มากกว่า เส้นที่ประมาณค่าได้ในรอบที่ 1 ในขณะที่รูปที่ 4.19 - 4.21 ระบบมีค่าเกณฑ์การเรียนรู้ที่สูง ทำให้รอบที่ 15 ระบบมีค่าสะสมความผิดพลาดมากเกินไปทำให้ระบบที่ทำการเรียนรู้เป็นระบบที่ไม่เสถียรภาพ



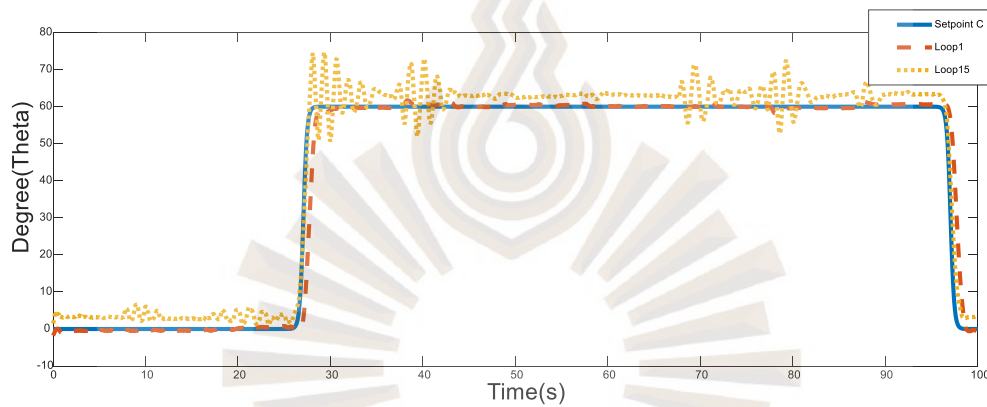
รูปที่ 4.18 แสดงผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.10 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน C



รูปที่ 4.19 แสดงผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.25 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน C



รูปที่ 4.20 แสดงผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.50 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน C

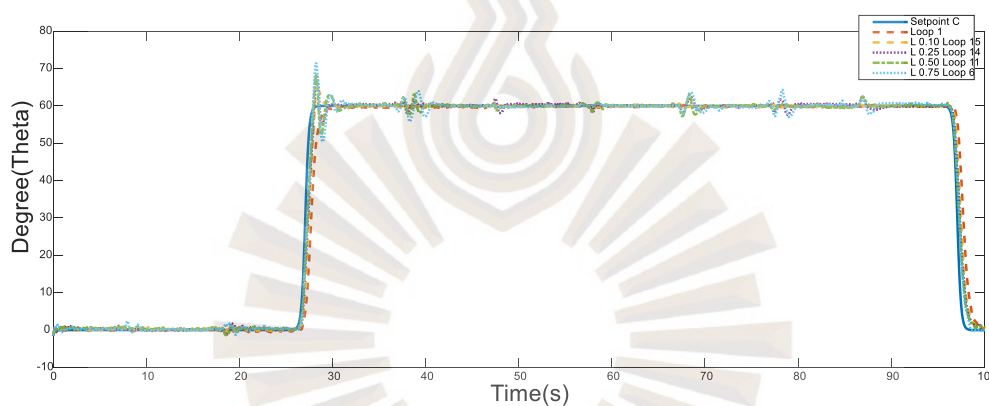


รูปที่ 4.21 แสดงผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ Gain 0.75 ในรอบที่ 1 และรอบที่ 15 ของแกน C

จากรูปที่ 4.17 สามารถอ่านผลการประมาณค่าความผิดพลาดของระบบโดยสามารถกำหนดค่าประมาณการเรียนรู้ที่ดีที่สุด ในแต่ละแกนการเรียนรู้ได้โดยการอ่านค่า RMS Error ในแต่ละค่าโดยได้สรุปผลได้ดังตารางที่ 4.6 โดยสามารถแสดงพฤติกรรมของระบบได้ดังรูปที่ 4.21

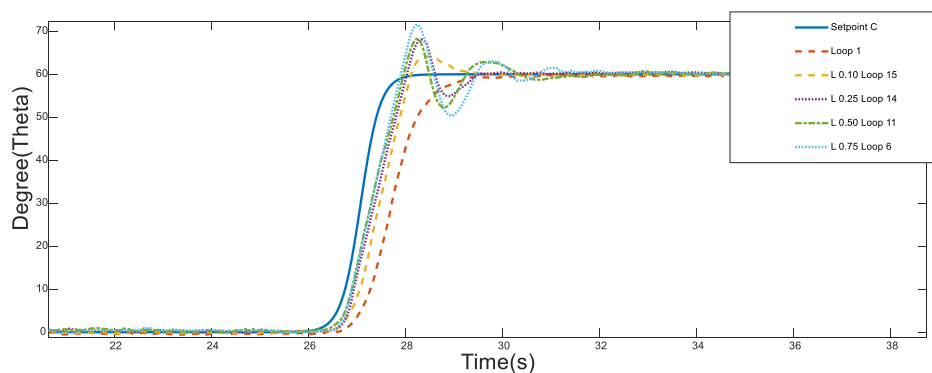
ตารางที่ 4.6 แสดงผลการเปรียบเทียบ RMS Error ในแกน C

แกน C	Gain	First Iteration		Best Iteration	
		Loop	RMS Error	Loop	RMS Error
	0.10	1	4.47	15	2.90
	0.25	1	4.50	14	2.30
	0.50	1	4.52	11	1.90
	0.75	1	4.59	6	2.10



รูปที่ 4.22 แสดงผลการทดสอบค่า RMS Error ที่ต่ำสุด ในแต่ละ Gain ของแกน C

จากรูปที่ 4.22 และ 4.23 แสดงค่าการเคลื่อนที่ของค่าแกนการเรียนรู้ที่ดีที่สุดพบกว่าในแกน C นั้นค่าแกนที่ดีที่สุดมีค่าอยู่ที่ 0.1 ในรอบที่ 15 โดยระบบจะมีค่า Risetime ที่ดีกว่ารอบที่ 1 และได้ค่า RMS Error ที่มีค่าน้อยกว่ารอบที่ 1 อีกทั้ง เมื่อพิจารณาค่า Overshoot และ Undershoot ในค่าเกนที่ 0.1 จะมีค่าที่น้อยกว่าค่าเกนอื่นๆของระบบ ซึ่งผลการทดสอบระบบนั้นจะมีลักษณะที่เหมือนกันกับมอเตอร์ A และ B



รูปที่ 4.23 แสดงผลการเปรียบเทียบในระยะเวลาที่เกิดความผิดพลาดของแกน C

4.4.4 สรุปผลการทดสอบระบบในมอเตอร์แต่ละแกน

ในการทดสอบระบบนั้น การใช้ ILC สามารถช่วยลดค่าความผิดพลาดจากการเคลื่อนที่ได้และช่วยปรับปรุงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ให้มีเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ใกล้เคียงกับค่า Setpoint มากขึ้น โดยการเลือกเส้นทางการเคลื่อนที่นั้นในการพิจารณาจะต้องนำค่าเส้นทางการเคลื่อนที่มาทำการพิจารณาเทียบค่าผลที่ได้ของพฤติกรรมระบบแล้วทำการตัดสินใจในการเลือกใช้งาน โดยสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.7 ซึ่งจะพบว่าค่าที่นำมาใช้งานจะมีการกำหนดค่าเกนการเรียนรู้ที่ 0.10 ในรอบที่ 15 ทั้ง 3 แกน ถึงแม้ว่าค่า RMS Error ในค่าเกนอื่นๆจะมีค่าน้อยกว่าก็ตาม แต่ก็ไม่สามารถนำค่าที่ประมาณค่าได้มาใช้งานเนื่องจากเมื่อพิจารณาภาพรวมแล้วระบบ ยังไม่สมบูรณ์พอที่จะนำมาใช้งานเนื่องจาก มีค่า Overshoot และ Undershoot มากเกินไปนั่นเอง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพิจารณาระบบที่นำไปใช้งานร่วมด้วย

ตารางที่ 4.7 แสดงผลสรุปการเปรียบเทียบค่า RMS Error ในแต่ละแกน

แกนการเคลื่อนที่	Gain	First Iteration		Best Iteration	
		Loop	RMS Error	Loop	RMS Error
แกน A	0.10	1	2.5	15	1.30
แกน B	0.10	1	6.42	15	4.60
แกน C	0.10	1	4.47	15	2.90

บทที่ 5

สรุปผลและวิจารณ์ผลการจัดทำโครงการ

5.1 สรุปผลการจัดทำโครงการ

โครงการนี้มีจุดประสงค์เพื่อการออกแบบ การประยุกต์ใช้การควบคุมการเรียนรู้แบบทำซ้ำในแขนของหุ่นยนต์ผู้ช่วย และได้มีการเขียนโปรแกรมระบบการควบคุมหุ่นยนต์ โดยหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ดังเช่นควบคุมการกวาดแขนซ้ายขวา การเคลื่อนพับแขนเข้าและออก การเคลื่อนที่ยกแขนขึ้นลง และยังสามารถเคลื่อนที่ไปหยิบจับสิ่งของที่กำหนดได้ ในออกแบบระบบการเคลื่อนที่ทั้งหมดมี 4 จุดหมุน โดยการออกแบบแกนกลของหุ่นยนต์ เพื่อจำลองการเคลื่อนที่แขนตามลักษณะการเคลื่อนไหวสรีระของแขนมนุษย์

ซึ่งผลการทำโครงการสามารถออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์ผู้ช่วยมีคุณลักษณะดังนี้

5.1.1 หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ตามพิกัด ที่ผู้ใช้งานกำหนดทิศทางเคลื่อนที่ได้

5.1.2 หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ได้ ตามคำสั่งที่ระบบกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ตามเวลาได้

5.1.3 หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ เสมือนสรีระแขนของมนุษย์ ดังเช่นตำแหน่งไหล่ในการยกขึ้นลงของแขนหุ่นยนต์ ตำแหน่งไหล่ในการเคลื่อนที่กวาดซ้ายขวา ตำแหน่งข้อศอกในการพับเข้าและออก และตำแหน่งมือในการหยิบจับสิ่งของ เป็นต้น

5.1.4 ในการปรับปรุงการควบคุมโดยใช้ ILC มาควบคุมระบบสามารถชดเชยค่าความผิดพลาด และช่วยปรับปรุงให้ระบบมีเสถียรภาพขึ้น

5.2 ผลการจัดทำกรอภัยโครงการ

จากการทำโครงการการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์การประยุกต์ใช้การควบคุมการเรียนรู้แบบทำซ้ำในแขนของหุ่นยนต์ผู้ช่วย มีประเด็นที่นำมาอภิปรายและสรุปผลดังนี้

5.2.1 ในการออกแบบโครงสร้างได้เลือกใช้ระบบการควบคุมแบบ ILC มาช่วยปรับปรุงระบบทำให้ระบบมีเสถียรภาพในการควบคุมระบบตามคำสั่งที่กำหนดมากขึ้น โดยหุ่นยนต์มีค่าความผิดพลาดที่น้อยลง

5.2.2 ในการออกแบบโครงสร้างได้เลือกใช้ระบบการควบคุมแบบ ILC มาช่วยปรับปรุงระบบ การเลือกค่า Gain การเรียนรู้ที่ไม่เหมาะสมมาทำการเรียนรู้จะส่งผลให้ระบบอาจไม่เสถียรภาพในการควบคุมได้

5.2.3 ในการเลือกการใช้ Control Input ที่ดีที่สุดของระบบการควบคุมแบบ ILC จะต้องเลือกจากการพิจารณาผลการตอบสนองของระบบที่เกิดขึ้น ซึ่งในโครงการใช้ค่า Gain 0.1 ที่ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ แล้วมาทำการเปรียบเทียบกับกับค่า Gain 0.25, 0.50 และ 0.75 โดยพิจารณาค่า Risetime, Settlingtime, Overshoot และ Undershoot ของระบบ นอกจากการพิจารณาเพียงค่า RMS Error เพียงอย่างเดียว

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการอภิปรายผลการจัดทำโครงการสามารถปรับปรุงและพัฒนาโครงการได้ดังนี้

5.3.1 อนาคตควรเพิ่มเซ็นเซอร์ตรวจจับสิ่งกีดขวางเพื่อเช็คการเคลื่อนที่ และยับยั้งสิ่งกีดขวางในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

5.3.2 พัฒนารูปร่างของหุ่นยนต์ให้มีการเคลื่อนที่ได้ เพื่อให้สามารถยับยั้งสิ่งของที่ไม่ได้อยู่ในพิกัดที่กำหนด

5.3.3 พัฒนาโครงสร้างของหุ่นยนต์ให้แม่นยำในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ต้องเลือกใช้มอเตอร์ที่ไม่มีช่องว่างของเฟือง และปรับปรุงให้มีความสวยงามมากยิ่งขึ้น

5.3.4 พัฒนาระบบควบคุม ILC ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นจะนำตัวควบคุมอื่นมาร่วมใช้งานในการประมาณค่าของระบบ ซึ่งจะทำให้ระบบเป็นระบบที่มีเสถียรภาพตลอดทุกการเรียนรู้

บรรณานุกรม

1. สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, พระราชประสงค์ในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว
2. พงศกร รูปใหญ่ และ เบญจมาศ พนมรัตน์รักษ์ ใ้ได้ออกแบบงานวิจัยชื่อ “การลดระยะผิดพลาดจากการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แกนกล SEIKO D-TRAN RT3200 โดยใ้ใช้การควบคุมแบบทำซ้ำที่ปรับปรุงใหม่’ วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2561.
3. พูนทรัพย์ คุ่มวงษ์และคณะ. การศึกษาการออกแบบและสร้างระบบควบคุมการเคลื่อนไหวกของแกนกลปริญญานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยรังสิต, 2557.
4. Longman, R.W., 2000, “Iterative learning control and repetitive control for engineering practice ”, **International Journal of Control**, Vol. 73, No. 10, pp. 930-954.



ประวัติคณะผู้วิจัยและที่ปรึกษาโครงการวิจัย

ประวัติหัวหน้าโครงการวิจัย

1. ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย) รองศาสตราจารย์ ดร.มนัส สังวรศิลป์
ชื่อ-นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Associate Professor Dr. Manas Sangvorasil
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 3100201178609
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมชีวการแพทย์
4. หน่วยงานและที่อยู่ติดต่อ

หน่วยงานต้นสังกัด คณะวิศวกรรมชีวการแพทย์ มหาวิทยาลัยรังสิต
สถานที่ติดต่อ คณะวิศวกรรมชีวการแพทย์ มหาวิทยาลัยรังสิต
เลขที่ 52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถ.พหลโยธิน ต.หลักหก อ.เมือง จ.ปทุมธานี 12000
โทรศัพท์ 02 - 9972200 ต่อ 1452
โทรสาร 02 - 9972200 ต่อ 1408
โทรศัพท์เคลื่อนที่ 089 - 6993569
E-mail: ksamanas@gmail.com

5. ประวัติการศึกษาต้องระบุสถาบันการศึกษา สาขาวิชาและปีที่จบการศึกษา

คุณวุฒิ วุฒิ D.Eng. สาขา ไฟฟ้าสื่อสาร สถาบัน Tokai U., Japan

ชื่อคุณวุฒิ	ชื่อสถาบันการศึกษา	เมื่อ พ.ศ.
วศ.บ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2516
วศ.ม	มหาวิทยาลัยโตไก ประเทศญี่ปุ่น	2520
วศ.ด	มหาวิทยาลัยโตไก ประเทศญี่ปุ่น	2534

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)

สาขาความชำนาญ Digital Signal Processing, Digital Image Processing Especially Image Reconstruction form Projection, Bio-medical Image Processing, Bio-medical Instrumentation

7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ

7.1 หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการ

2559, "Ultrasonic Sensor Using Surface Plasmons Resonance," มหาวิทยาลัยรังสิต

7.2 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อผลงาน ปีที่ตีพิมพ์ การเผยแพร่ ปลายแหล่งทุนย้อนหลังไม่เกิน 5

ปี

7.2.1. K. Sepsirisuk, T. Rungsawang and M. Sangvorasil, "Fast Volume Rendering for Medical Image using Shear-Warp Transformation.", Proceeding of the 1st International Conference on Mechatronics (ICOM'01), Vol. 2, Malaysia, 2001. pp. 427-423.

7.2.2. K. Sepsirisuk and M. Sangworasil, "Fast Volume Rendering for Medical Image using Shear-Warp Factorization.", The 3rd Bio-Systems Symposium and Workshop, Chiang Mai University, 2001. pp. 118.

7.2.3. ชนาภรณ์ รัตนเมธาวิ, เกษมสุข เสพศิริสุข, ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์ และมนัส สัจจวรศิลป์, "การเพิ่มความเร็วในการสร้างภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์ด้วยการแปลงระยะทางสองทิศทาง", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 24 (EECON-24) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2544. หน้า 369-372.

7.2.4. วรเทพ ไพบูลย์รัตนกร, เกษมสุข เสพศิริสุข, สุรพันธุ์ เอื้อไพบูลย์ และ มนัส สัจจวรศิลป์, "อัลกอริทึมสำหรับสร้างภาพเชิงปริมาตรทางการแพทย์", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 22 (EECON-22) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, พ.ศ. 2542. หน้า 369-372.

(I have published 58 international conference papers as of January 2016)

7.3 งานวิจัยที่กำลังทำ

7.3.1 การประมวลผลภาพทางการแพทย์ การส่งภาพทางการแพทย์ และการสร้างภาพ 3 มิติของอวัยวะในร่างกาย

7.3.2 ระบบกายภาพสัมผัส(Haptic Control system) สำหรับการผ่าตัดทางไกล



2. ชื่อ-นามสกุล (ภาษาไทย) ว่าที่ ร.ต.พิชิตพล โชติกุลนันท์
ชื่อ-นามสกุล (ภาษาอังกฤษ) Acting Sub LT.Phichitphon Chotikunnan
2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน 1129900047611
3. ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์ประจำคณะวิศวกรรมชีวการแพทย์
4. หน่วยงานและที่อยู่ติดต่อ
หน่วยงานต้นสังกัด คณะวิศวกรรมชีวการแพทย์ มหาวิทยาลัยรังสิต
สถานที่ติดต่อ คณะวิศวกรรมชีวการแพทย์ มหาวิทยาลัยรังสิต
เลขที่ 52/347 หมู่บ้านเมืองเอก ถ.พหลโยธิน ต.หลักหก อ.เมือง จ.ปทุมธานี 12000
โทรศัพท์ 029972200 ต่อ 1011
โทรสาร 029972200 ต่อ 1408
โทรศัพท์เคลื่อนที่ 089 -0050669
E-mail: Opor_pupa@hotmail.com
5. ประวัติการศึกษาต่อระดับสถาบันการศึกษา สาขาวิชาและปีที่จบการศึกษา
คุณวุฒิ 2558 วศ.ม. วิศวกรรมไฟฟ้า (วศ.ระบบควบคุม และเครื่องมือวัด)
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
2554 วศ.บ. วิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา)
สาขาความชำนาญ หุ่นยนต์ ระบบฝังตัว ระบบควบคุม
7. ประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการบริหารงานวิจัยทั้งภายในและภายนอกประเทศ
7.1 หัวหน้าโครงการวิจัย : ชื่อโครงการ การศึกษาออกแบบและสร้างอุปกรณ์ช่วยเดินฟื้นฟูการหัดเดินอัจฉริยะอัตโนมัติ
7.2 งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว : ชื่อผลงาน ปีที่ตีพิมพ์ การเผยแพร่ งบประมาณย้อนหลังไม่เกิน 5 ปี
2012-2015 [Team Member], “Development of A Train Driving Simulator using Virtual Reality,” Rail Way Transportation, National Research Council of Thailand, Thailand, 2014-2015.
2555 [คณะทำงาน], “พัฒนาเครื่องผลิตมะขามแก้ว,” สำนักงานปลัดกระทรวงวิทยาศาสตร์
2556 [คณะทำงาน], “เครื่องเลื่อยกระดูกสำหรับการวินิจฉัยทางพยาธิวิทยา,” มหาวิทยาลัยรังสิต
2556 [หัวหน้าโครงการ], “การศึกษาออกแบบและสร้างอุปกรณ์ช่วยเดินฟื้นฟูการหัดเดินอัจฉริยะอัตโนมัติ,” มหาวิทยาลัยรังสิต