

การออกแบบตัวควบคุมอย่างง่ายและต้นทุนต่ำสำหรับแขนกลอุตสาหกรรม



นายอานนท์ หม้อสุวรรณ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

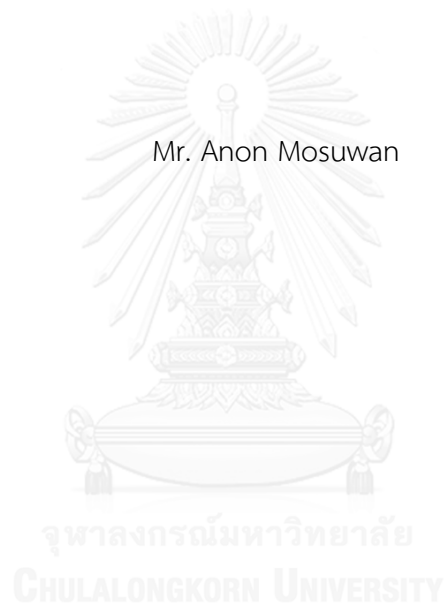
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2557

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN OF SIMPLIFIED AND LOW COST CONTROLLER FOR INDUSTRIAL ROBOT ARM

Mr. Anon Mosuwan



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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบตัวควบคุมอย่างง่ายและต้นทุนต่ำสำหรับ แขนกลอุตสาหกรรม
โดย	นายอานนท์ หม้อสุวรรณ
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันเฉลิม โปรา

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์มานพ วงศ์สายสุวรรณ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันเฉลิม โปรา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.วิษุวัตน์ ปลอดประดิษฐ์)

อานนท์ หม้อสุวรรณ : การออกแบบตัวควบคุมอย่างง่ายและต้นทุนต่ำสำหรับแขนกลอุตสาหกรรม (DESIGN OF SIMPLIFIED AND LOW COST CONTROLLER FOR INDUSTRIAL ROBOT ARM) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.วันเฉลิม โปรา, 89 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ 6 แกนอย่างง่ายและราคาถูก ซึ่งใช้ในการขับเคลื่อนแขนกลในแต่ละแกนจะถูกขับเคลื่อนด้วยลินเซอร์ไวเคอร์เชิงสปีดไฮดรอลิก ตัวควบคุมนี้ถูกออกแบบโดยบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F407 DISCOVERY และลง firmware NETMF บนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งทำให้สามารถพัฒนาด้วยภาษา C# ส่งผลให้ง่ายและใช้เวลาน้อยต่อการพัฒนา

วิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกเป็น 4 ส่วนโดยส่วนแรกจะกล่าวถึงการแก้สมการผกผันจลนศาสตร์ ส่วนที่สองจะกล่าวถึงการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่แสดงผลบนคอมพิวเตอร์และเชื่อมต่อกับชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ ส่วนที่สามจะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุม และส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงการพัฒนาส่วนฮาร์ดแวร์ในชุดควบคุมหุ่นยนต์และซอฟต์แวร์บนไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F407 DISCOVERY

ตัวควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ในวิทยานิพนธ์นี้เป็นตัวควบคุมหุ่นยนต์ที่ถูกสร้างขึ้นใหม่เพื่อใช้งานแทนตัวควบคุมแขนกลหุ่นยนต์แบบเดิมซึ่งมีข้อจำกัดในหลายประการด้วยกันเช่น ขนาดที่ใหญ่ น้ำหนักมาก การใช้งานยากลำบาก การติดตั้งไม่สะดวก และไม่สามารถติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลได้ โดยรวมแล้ว ตัวควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ตัวใหม่นี้มีคุณลักษณะที่ดีกว่าตัวควบคุมแขนกลหุ่นยนต์แบบเดิม ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตที่ดียิ่งขึ้นได้

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5570465521 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEYWORDS: ROBOTICS, KINEMATIC MODEL, ROBOT 3D MODEL, OPENTK,ROBOT 89 CONTROLLER

ANON MOSUWAN: DESIGN OF SIMPLIFIED AND LOW COST CONTROLLER FOR INDUSTRIAL ROBOT ARM. ADVISOR: ASST. PROF.WANCHALERM PORA, Ph.D., pp.

In this thesis present the design of simplified and low cost robot 6 axis controller. For driving the servo hydraulic valve of each joint arm robot. This controller is used microcontroller board STM32F4 DISCOVERY and installed firmware NETMF on microcontroller board. This controller is developed software by use C# language. That make sample and spend less time for developing.

There are 4 part in this work, First part is solving inverse kinematics. Second part is software development on computer for controlling and monitoring arm robot. Third part is controller design. The last part is hardware on controller and software design on microcontroller board STM32F4 DISCOVERY

This controller is building new controller for replace the old controller because old controller have several disadvantage for example the large size, too much weight, difficult to use, inconvenience to install and unable to communicate with computer for monitoring and controlling. Overall, the robot arm controller has better feature than the old robot arm controller. As a result, productivity has improved.

Department: Electrical Engineering      Student's Signature .....

Field of Study: Electrical Engineering      Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันเฉลิม โปรา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ และกำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์และงานวิจัยด้วยดีตลอดมา อีกทั้งยังคอยช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ ที่นอกเหนือจากงานวิจัยทำให้ได้เพิ่มพูนประสบการณ์ ความรู้ และโอกาสที่ดีในชีวิตเป็นอย่างมาก

ขอขอบคุณ ท่านอาจารย์ เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ ในห้องปฏิบัติการวิจัยการออกแบบและประยุกต์วงจรรวมทุกคนสำหรับความช่วยเหลือ (ESID Lab) คำแนะนำ และขอบคุณสำหรับมิตรภาพและความรู้สึกดี ๆ ที่มีให้กันมาโดยตลอด และขอขอบคุณพี่ บุญลื้ม อมเชย พนักงานบริษัท อุตสาหกรรมสแตนเลสเคหภัณฑ์ จำกัด ที่คอยช่วยเหลือ ดูแล และแนะนำเรื่องการพนสี แขนกลหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้ตั้งแรกเริ่มจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา อันเป็นที่เคารพรัก ที่คอยดูแลเอาใจใส่ และให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้าด้วยดีเสมอมาจนกระทั่งมีวิทยานิพนธ์เล่มนี้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 จลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า.....	4
2.1.1 Denavit-Hartenberg.....	4
2.1.2 The Homogeneous Transformation Matrix.....	7
2.2 จลนศาสตร์แบบกลับหลัง.....	8
2.3 การควบคุมพีไอดีแบบลูป-ปิด.....	9
2.3.1 การคำนวณในการควบคุมแบบพี(P Controller).....	10
2.3.2 การคำนวณในการควบคุมแบบไอ(I Controller).....	10
2.3.3 การคำนวณในการควบคุมแบบดี(D Controller).....	11
2.4 การควบคุมแบบทำซ้ำ.....	11

2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 Discovery กับ NETMF .....	14
2.6 OpenTK.....	14
บทที่ 3 การออกแบบสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ .....	15
3.1 การออกแบบจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า.....	15
3.2 การออกแบบจลนศาสตร์แบบกลับหลัง.....	21
3.3 การออกแบบฮาร์ดแวร์ .....	33
3.3.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์.....	34
3.3.2 การออกแบบการเปิดปิดระบบวาล์วไฮดรอลิก.....	35
3.3.3 การออกแบบติดต่อสื่อสารผ่านพอร์ทอนุกรม .....	35
3.3.4 การอ่านค่าอนาล็อกเพื่ออ่านค่ามุมมองของแขนกลหุ่นยนต์ .....	36
3.3.5 การส่งค่าอนาล็อกเพื่อขับเคลื่อนการเคลื่อนที่เชิงมุมของแขนกลหุ่นยนต์.....	41
3.4 การออกแบบซอฟต์แวร์ .....	45
3.4.1 ฟังก์ชันหลัก.....	45
3.4.2 ฟังก์ชันการจัดการกับ SPI.....	46
3.4.3 ฟังก์ชันการเชื่อมต่อพีไอดี .....	47
3.4.4 ฟังก์ชันการเพิ่ม-ลดค่าความเร็วของแขนกลหุ่นยนต์.....	48
3.4.5 ฟังก์ชันการอ่านค่าสัญญาณพัลส์จากเอ็นโคดเดอร์ .....	49
บทที่ 4 การออกแบบหน้าจอแสดงผลบนคอมพิวเตอร์.....	51
4.1 โหมดจำลองการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์.....	51
4.1.1 ส่วนควบคุมการหมุนแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ .....	52
4.1.2 ส่วนควบคุมตำแหน่ง ณ จุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์ .....	53
4.1.3 ส่วนในการแสดงแกนอ้างอิงแต่ละแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ .....	53
4.1.4 ส่วนแสดงมุมที่ส่วนปลายของแขนกลหุ่นยนต์.....	54



4.1.5 ส่วนที่ใช้ในการเลือกมุมมองของแกนกลหุ่นยนต์.....	54
4.1.6 ส่วนควบคุมการเคลื่อนที่การเลื่อนตำแหน่งระจุดปลายแบบปุ่มกด .....	55
4.1.7 ส่วนการอัพเดทข้อมูลไปที่ส่วนการทำงานแบบเป็นตารางขั้นตอน .....	56
4.1.8 ส่วนการเลือกโหมดการทำงาน .....	56
4.2 โหมดการทำงานร่วมกับชุดควบคุมแกนกลหุ่นยนต์ .....	56
4.2.1 ส่วนควบคุมการหมุนแกนข้อต่อของแกนกลหุ่นยนต์ .....	57
4.2.2 ส่วนควบคุมตำแหน่ง ณ จุดปลายของแกนกลหุ่นยนต์ .....	58
4.2.3 ส่วนติดต่อพอร์ตอนุกรม .....	59
4.2.4 ส่วนปุ่มหยุดการทำงานแบบฉุกเฉิน .....	60
4.2.5 ส่วนการอ่านค่าและควบคุมแรงดันไฟฟ้าอนาล็อก .....	60
4.2.6 ส่วนการปรับแต่งค่าพีไอดี.....	61
4.2.7 ส่วนการทำงานแบบเป็นตารางขั้นตอน.....	62
4.2.8 ส่วนการตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม .....	64
บทที่ 5 ผลการทดลอง .....	65
5.1 ผลการทดลองจลนศาสตร์แบบกลับหลังของแบบจำลองแกนกลหุ่นยนต์.....	65
5.2 ผลการทดลองจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าของชุดควบคุมแกนกลหุ่นยนต์ .....	69
5.3 ผลการทดลองจลนศาสตร์แบบกลับหลังของชุดควบคุมแกนกลหุ่นยนต์ .....	70
5.4 ผลการทดลองการทำงานร่วมกันของระบบควบคุมแบบพีไอดีและระบบควบคุมแบบทำซ้ำ .	71
บทที่ 6 ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ .....	76
6.1 สรุปผล .....	76
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	76
รายการอ้างอิง .....	77
ภาคผนวก ก คู่มือการใช้งานโปรแกรมบนหน้าจอแสดงผลของตัวควบคุมแกนกลหุ่นยนต์ .....	80

ญ

หน้า

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ ..... 95



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 Denavit-Hartenberg Parameters .....	16
ตารางที่ 3.2 สูตรการอ่านค่าอนาล็อกแล้วแปลงเป็นองศาของแขนกลหุ่นยนต์ .....	39
ตารางที่ 3.3 สูตรระดับแรงดันไฟฟ้าในจำนวน 12 บิตและทิศทางการเคลื่อนที่ .....	43
ตารางที่ 5.1 ค่าความผิดพลาดที่จุดปลายแขนกลหุ่นยนต์ในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ .....	67
ตารางที่ 5.2 ค่าความผิดพลาดที่จุดปลายแขนกลหุ่นยนต์ในหน่วยมิลลิเมตร .....	67
ตารางที่ 5.3 ค่าความผิดพลาดที่จุดปลายแขนกลหุ่นยนต์ในรูปแบบเปอร์เซ็นต์เมื่อปรับปรุง .....	68
ตารางที่ 5.4 ค่าความผิดพลาดที่จุดปลายแขนกลหุ่นยนต์ในหน่วยมิลลิเมตรเมื่อปรับปรุง .....	69
ตารางที่ 5.5 ค่าความผิดพลาดที่ของแต่ละแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อน .....	70
ตารางที่ 5.6 ค่าความผิดพลาดที่ของแต่ละแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ในรูปแบบองศา .....	70
ตารางที่ 5.7 ค่าความผิดพลาดที่ของแต่ละพิกัดจุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์ในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อน .....	71
ตารางที่ 5.8 ค่าความผิดพลาดที่ของแต่ละพิกัดจุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์ในหน่วยมิลลิเมตร .....	71

สารบัญรูป

	หน้า
รูปภาพที่ 1.1 โครงสร้างโดยรวมของระบบ.....	1
รูปภาพที่ 2.1 จลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า.....	4
รูปภาพที่ 2.2 ระบบพิกัดของข้อแขนและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง .....	4
รูปภาพที่ 2.3 จลนศาสตร์แบบกลับหลัง .....	8
รูปภาพที่ 2.4 กฎของโคไซน์.....	9
รูปภาพที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมพีไอดี .....	9
รูปภาพที่ 2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 Discovery กับ NETMF .....	11
รูปภาพที่ 2.7 การทำงานของกระบวนการเรียนรู้การควบคุมแบบทำซ้ำ.....	12
รูปภาพที่ 2.8 การทำงานของกระบวนการเรียนรู้การควบคุมแบบทำซ้ำแบบมุมมองใกล้.....	12
รูปภาพที่ 2.9 การลดลงของค่าผิดพลาดในการควบคุมแบบทำซ้ำ .....	13
รูปภาพที่ 2.10 การลดลงของค่าผิดพลาดในการควบคุมแบบมุมมองด้านขนาด.....	13
รูปภาพที่ 2.11 ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 Discovery กับ NETMF.....	14
รูปภาพที่ 2.12 OpenTK .....	14
รูปภาพที่ 3.1 โมเดลหุ่นยนต์และพารามิเตอร์.....	15
รูปภาพที่ 3.2 แกนอ้างอิงในข้อต่อต่างๆของแขนกลหุ่นยนต์ .....	16
รูปภาพที่ 3.3 การหาจุด $O_6$ จากจุด $O_7$ และแกนของแขนกลหุ่นยนต์ $I_7$ .....	22
รูปภาพที่ 3.4 ความสัมพันธ์ $O_4, O_5$ และ $O_6$ .....	23
รูปภาพที่ 3.5 ความสัมพันธ์ $r_{xy31}, r_{xyz31}$ .....	24
รูปภาพที่ 3.6 ความสัมพันธ์ $O_3, O_4$ และ $O_5$ .....	25
รูปภาพที่ 3.7 ความสัมพันธ์ $O_1, O_2$ และ $O_3$ .....	29
รูปภาพที่ 3.8 ความสัมพันธ์ $O_2, O_3$ และ $O_4$ .....	31
รูปภาพที่ 3.9 ลายแผ่นปริ้นวงจรรูปแบบ 2 มิติ.....	34
รูปภาพที่ 3.10 ลายแผ่นปริ้นวงจรรูปแบบ 3 มิติ.....	34
รูปภาพที่ 3.11 วงจรโซลิตสเททรีเลย์ .....	35

รูปภาพที่ 3.12 วงจรออปโตไอโซเรเตอร์ .....	35
รูปภาพที่ 3.13 วงจรติดต่อสื่อสารแบบพอร์ตอนุกรมแปลงเป็น USB .....	36
รูปภาพที่ 3.14 ไอซี ADS7844.....	37
รูปภาพที่ 3.15 ไอซี ADUM2401.....	37
รูปภาพที่ 3.16 ไอซี ADUM2400.....	38
รูปภาพที่ 3.17 แผนผังการอ่านค่าอนาล็อก.....	38
รูปภาพที่ 3.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอนาล็อกกับความยาว $l_p$ .....	39
รูปภาพที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\theta_2$ , $l_p$ และ $\theta_3$ .....	40
รูปภาพที่ 3.20 ไอซี DAC7615 .....	42
รูปภาพที่ 3.21 ไอซี XR2206 .....	42
รูปภาพที่ 3.22 ไอซี LM2902 .....	43
รูปภาพที่ 3.23 แผนผังการส่งค่าอนาล็อก .....	43
รูปภาพที่ 3.24 แผนผังแหล่งจ่ายพลังงาน .....	45
รูปภาพที่ 3.25 แผนผังการทำงานของฟิงซ์หลัก .....	46
รูปภาพที่ 3.26 แผนผังการทำงานของฟิงซ์การจัดการกับ SPI.....	47
รูปภาพที่ 3.27 แผนผังการทำงานของฟิงซ์การแชมปลั๊กไฟไอดี .....	48
รูปภาพที่ 3.28 รูปแบบการเพิ่มลดความเร็วของแกนกลหุ่นยนต์ .....	49
รูปภาพที่ 3.29 แผนผังการทำงานของฟิงซ์อ่านค่าสัญญาณพัลส์จากเอ็นโคเดอร์ .....	50
รูปภาพที่ 4.1 หน้าจอแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ในโหมดจำลองการทำงาน .....	51
รูปภาพที่ 4.2 ส่วนการควบคุมการหมุนในแต่ละแกนของแกนกลหุ่นยนต์.....	52
รูปภาพที่ 4.3 ส่วนการควบคุมตำแหน่ง ณ จุดปลายของแกนกลหุ่นยนต์.....	53
รูปภาพที่ 4.4 ส่วนในการแสดงแกนอ้างอิงแต่ละแกนข้อต่อของแกนกลหุ่นยนต์ .....	54
รูปภาพที่ 4.5 ส่วนแสดงมุมที่ส่วนปลายของแกนกลหุ่นยนต์.....	54
รูปภาพที่ 4.6 ส่วนที่ใช้ในการเลือกมุมมองของแกนกลหุ่นยนต์.....	55
รูปภาพที่ 4.7 ส่วนควบคุมการเคลื่อนที่การเลื่อนตำแหน่งระจุดปลายแบบปุ่มกด .....	55
รูปภาพที่ 4.8 ส่วนการอัปเดตข้อมูลไปที่ส่วนการทำงานแบบเป็นตารางขั้นตอน .....	56

รูปภาพที่ 4.9 ส่วนการเลือกโหมดการทำงาน .....	56
รูปภาพที่ 4.10 หน้าจอแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ในโหมดการทำงานร่วมกับชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ .....	57
รูปภาพที่ 4.11 ส่วนควบคุมการหมุนแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ในโหมดการทำงานร่วมกับชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์.....	58
รูปภาพที่ 4.12 ส่วนควบคุมตำแหน่ง ณ จุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์.....	59
รูปภาพที่ 4.13 ส่วนติดต่อพอร์ตอนุกรม.....	59
รูปภาพที่ 4.14 ส่วนปุ่มหยุดการทำงานแบบฉุกเฉิน.....	60
รูปภาพที่ 4.15 ส่วนการอ่านค่าและควบคุมแรงดันไฟฟ้าอนาล็อก.....	61
รูปภาพที่ 4.16 ส่วนการปรับแต่งค่าพีไอดี .....	62
รูปภาพที่ 4.17 ส่วนการทำงานแบบเป็นตารางขั้นตอน .....	63
รูปภาพที่ 4.18 ส่วนการตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม.....	64
รูปภาพที่ 5.1 การตรวจสอบจุดปลายแขนกลหุ่นยนต์ด้วยโปรแกรม Solid Work.....	66
รูปภาพที่ 5.2 การทดลองจลนศาสตร์แบบกลับหลังของโปรแกรมหน้าจอแสดงผล.....	66
รูปภาพที่ 5.3 การเปลี่ยนเทียบค่าความละเอียดของค่า Pi.....	68
รูปภาพที่ 5.4 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพีไอดีรวมตัวกับระบบควบคุมแบบทำซ้ำ.....	68
รูปภาพที่ 5.5 กราฟค่าผลลัพธ์ของระบบควบคุมพีไอดีแบบธรรมดาเทียบกับระบบควบคุมพีไอดีทำงานร่วมกับระบบควบคุมแบบทำซ้ำในคาบการทำงานที่ 4 .....	72
รูปภาพที่ 5.6 กราฟค่าผลลัพธ์ของระบบควบคุมพีไอดีแบบธรรมดาเทียบกับระบบควบคุมพีไอดีทำงานร่วมกับระบบควบคุมแบบทำซ้ำในคาบการทำงานที่ 10.....	73
รูปภาพที่ 5.7 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของระบบควบคุมแบบพีไอดีแบบธรรมดา.....	73
รูปภาพที่ 5.8 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของระบบควบคุมแบบพีไอดีทำงานร่วมกับระบบควบคุมแบบทำซ้ำ.....	74
รูปภาพที่ 5.9 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพีไอดีมุมมองด้านขนาด.....	74
รูปภาพที่ 5.10 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของระบบควบคุมแบบพีไอดีทำงานร่วมกับระบบควบคุมแบบทำซ้ำมุมมองด้านขนาด .....	75

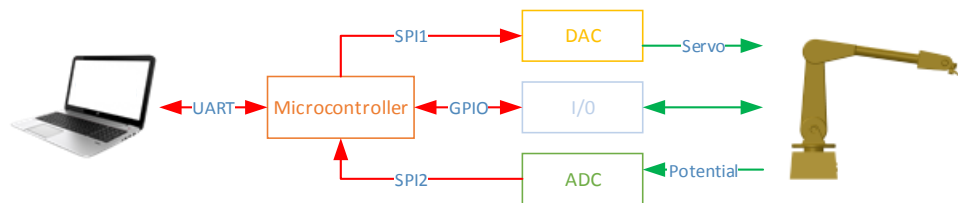
# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันหุ่นยนต์มีบทบาทสำคัญอย่างมากในกระบวนการผลิตเชิงอุตสาหกรรม เนื่องจากปริมาณประชากรที่เพิ่มมากขึ้น ทำให้มีความต้องการสินค้าอุปโภคบริโภคมากขึ้น โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ จำเป็นต้องเร่งกระบวนการผลิตให้ได้ปริมาณสินค้าที่มากขึ้นแต่ยังคงคุณภาพที่ดีเช่นเดิม ซึ่งหากใช้เพียงแรงงานคนในกระบวนการผลิตเพียงอย่างเดียว จะได้ผลิตภัณฑ์ไม่เพียงพอต่อความต้องการ มนุษย์จึงต้องการหาเครื่องทุ่นแรง ที่สามารถทำให้กระบวนการผลิต สามารถผลิตสินค้าได้มากขึ้นบรรลุตามเป้าหมายอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีงานบางชนิดที่แรงงานคนไม่สามารถทำได้/ทนได้ เช่นงานที่มีความแม่นยำระดับต่ำกว่ามิลลิเมตร งานที่ต้องใช้แรงมาก หรืองานที่อยู่ในภาวะที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ เป็นต้น

จากปัญหาดังกล่าวทำให้หุ่นยนต์เป็นทางเลือกที่ดีในการแก้ปัญหา เพราะหุ่นยนต์นั้นสามารถทำงานต่อเนื่องได้นาน และเร็วแรง และแม่นยำกว่าแรงงานคนปกติ การบังคับหุ่นยนต์ให้ทำงานได้ตามต้องการนั้น จะต้องมีชุดควบคุมประจำตัวหุ่นยนต์ ชุดควบคุมหุ่นยนต์มีราคาที่ยังค่อนข้างสูง และโดยส่วนใหญ่ทางบริษัทผู้ผลิตหุ่นยนต์มักจะไม่เปิดเผยถึงรายละเอียดทางเทคนิคของอุปกรณ์ภายใน ทำให้เมื่ออุปกรณ์ภายในชำรุดเสียหายเป็นการยากที่จะทำการซ่อมแซมแก้ไขหรือหาวัสดุมาทดแทน นอกจากนี้ตัวชุดควบคุมของหุ่นยนต์ส่วนใหญ่แล้วจะมีขนาดใหญ่ มีน้ำหนักมากเทอะทะ กินพื้นที่ในการใช้งานมาก ไม่เหมาะที่จะติดตั้งในชั้นวางเพราะ ขนาดและน้ำหนักที่มากเกินไปอาจทำให้ชั้นวางนั้นชำรุดเสียหายได้



รูปภาพที่ 1.1 โครงสร้างโดยรวมของระบบ

ตัวควบคุมหุ่นยนต์ในวิทยานิพนธ์เป็นตัวควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ที่มี 6 แขน ออกแบบมาให้ใช้งานง่ายและราคาถูก ในการขับเคลื่อนแขนกลในแต่ละแกน จะขับเคลื่อนด้วยลีนเซอร์โว

(Servo Valve) ของเครื่องสูบน้ำไฮดรอลิก (Hydraulic Pump) ตัวควบคุมนี้ถูกออกแบบให้มีบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F407 DISCOVERY [1] เป็นศูนย์สั่งการ ตัวบอร์ดได้ลง firmware NETMF[2] บนบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งทำให้สามารถพัฒนาด้วยภาษา C#[3] ส่งผลให้พัฒนาได้ง่ายและใช้เวลาน้อย ตัวควบคุมแขนกลหุ่นยนต์นี้ออกแบบมาให้สามารถติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ได้ผ่านทางช่องการสื่อสารอนุกรม (UART) บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะติดต่อกับ IC ADS7844 ซึ่งเป็น ตัวแปลงแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog-to-Digital Converter) เพื่ออ่านค่าตำแหน่งการเคลื่อนไหวในแต่ละแกนของแขนกลหุ่นยนต์ เพื่อคำนวณว่าต้องสั่งหุ่นยนต์ต่อไปอย่างไร เพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ต้องการ โดยสั่งผ่าน IC DAC7615 ซึ่งเป็นตัวแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (Digital-to-Analog Converter) งานส่วนที่เหลืออื่นๆ ได้แก่ส่วนสั่งงานลิ้นสเปรย์ (Spray Valve) ส่วนอ่านค่าลิมิตสวิตช์ (Limit Switch) และส่วนอ่านค่าตัวเข้ารหัสความเร็วสายพาน (Conveyor Encoder) เป็นต้น

ในวิทยานิพนธ์นี้วิจัยเกี่ยวกับการออกแบบและพัฒนาชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ 6 แกน ต้นทุนต่ำ โดยแขนกลหุ่นยนต์ที่จะทำการควบคุมนั้นทำหน้าที่พ่นสี แขนกลหุ่นยนต์มีชุดควบคุมอยู่แล้วแต่มีขนาดใหญ่ เทอะทะ มีอายุการใช้งานยาวนาน อะไหล่หายาก ชุดควบคุมชุดใหม่ได้พัฒนาถูกออกแบบให้มีขนาดเล็กกะทัดรัด ราคาถูก น้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายสะดวก ซ่อมแซมง่ายกว่าชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์แบบเดิม และสามารถติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์เพื่อทำการแสดงผลในรูปแบบโมเดลสามมิติบนจอคอมพิวเตอร์ได้อีกด้วย ซึ่งชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์แบบเก่าไม่สามารถทำได้ งานวิจัยนี้จึงเกิดขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งาน และสะดวกในการดูแลรักษา แทนตัวควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ชุดเดิม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ออกแบบ พัฒนาชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ 6 แกนที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา บำรุงรักษาง่าย และต้นทุนต่ำ
2. พัฒนาโปรแกรมที่จำลองการเคลื่อนที่ในซอฟต์แวร์และสามารถเฝ้ามองการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์บนระบบปฏิบัติการ Windows



### 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ออกแบบ พัฒนาชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ 6 แกนที่มีขนาดเล็ก ไม่เกิน 1x1x1 ลูกบาศก์ฟุต น้ำหนักเบา ไม่เกิน 15 กิโลกรัม ใช้อุปกรณ์ที่มีขายทั่วไป และต้นทุนไม่เกิน 17,000 บาท และสามารถใช้งานได้จริง
2. พัฒนาโปรแกรมที่จำลองการเคลื่อนที่ในซอฟต์แวร์และสามารถเฝ้ามองการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์บนระบบปฏิบัติการ Windows ที่สามารถส่งคำสั่งจากผู้ใช้งานไปยังแขนกลหุ่นยนต์ได้ ผ่านช่องทางการสื่อสารแบบ RS-232

### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาหลักการจลศาสตร์ของแขนกลหุ่นยนต์
2. ศึกษาโมเดลทางคณิตศาสตร์จลศาสตร์ของแขนกลหุ่นยนต์ 6 แกน บน MATLAB[4, 5]
3. วาดโมเดลสามมิติของแขนกลหุ่นยนต์ลงบน Solid Work
4. ศึกษาการเขียนโปรแกรมแสดงผลโมเดลสามมิติบนคอมพิวเตอร์
5. เขียนโปรแกรมควบคุมและแสดงผลเพื่อเชื่อมต่อกับชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ 6 แกน บนคอมพิวเตอร์
6. ศึกษาการพัฒนา STM32F4 DISCOVERY ด้วย NETMF เพื่อให้ง่ายต่อการพัฒนาซอฟต์แวร์บนไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยภาษา C# ด้วยโปรแกรม Visual Studio
7. ออกแบบวงจรชุดควบคุมชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ 6 แกน
8. ทดสอบการทำงานร่วมกันระหว่างโปรแกรมที่ใช้แสดงผลบนคอมพิวเตอร์และชุดควบคุมหุ่นยนต์
9. สรุปผลและเขียนรูปเล่มวิทยานิพนธ์

### 1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้โปรแกรมควบคุมและแสดงผลในรูปแบบโมเดลสามมิติของแขนกลหุ่นยนต์ 6 แกน
2. โปรแกรมควบคุมและแสดงผลนี้สามารถนำไปใช้เป็นสื่อการสอนให้เห็นถึงการเคลื่อนไหวของแขนกลหุ่นยนต์ได้
3. ได้ชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ 6 แกนในราคาถูกลงต่อการซ่อมแซมไปใช้ในงานจริงได้
4. สามารถนำแนวทางการพัฒนาชุดควบคุมไปใช้กับงานพัฒนาอื่นต่อได้

## บทที่ 2

### ความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานและหลักการที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบด้วย จลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า (Forward Kinematics) จลนศาสตร์แบบกลับหลัง (Inverse Kinematics) การควบคุมพีไอดีแบบลูปปิด (Closed-loop PID Control) การควบคุมแบบซ้ำ (Repetitive Control) บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 Discovery การพัฒนาโปรแกรมด้วย NETMF และ OpenTK

#### 2.1 จลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า

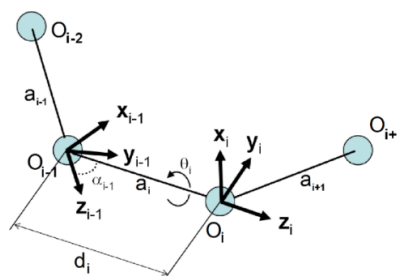


รูปภาพที่ 2.1 จลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า

หลักการของจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า คือการวิเคราะห์การเคลื่อนที่และทิศทางในส่วนปลายของตัวแขนกลหุ่นยนต์ เมื่อทราบค่ามุมการหมุนตามข้อต่อต่างๆ ของแขนกลหุ่นยนต์  $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$  ซึ่งเป็นการคำนวณตามลำดับจากข้อต่อในส่วนฐานไปยังข้อต่อที่บริเวณส่วนปลายของแขนกลหุ่นยนต์แล้ว ผลลัพธ์ที่ได้คือตำแหน่งของจุดปลาย (End Point) ในพิกัดคาร์ทีเซียน  $(X, Y, Z)$  และทิศทางของจุดปลาย (Orientation of End point) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้การหมุนแบบ RPY (Roll-Pitch-Yaw) ในตัวแปร  $(\alpha, \beta, \gamma)$

หลักการของจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าใช้การสมมุติแกนอ้างอิงตามวิธีของ Denavit-Hartenberg ดังรูปภาพที่ 2.1 และ เมทริกซ์การแปลงเอกพันธ์ (Homogeneous Transformation Matrix) ในการแก้ปัญหา

##### 2.1.1 Denavit-Hartenberg



รูปภาพที่ 2.2 ระบบพิกัดของข้อแขนและพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

พารามิเตอร์ใน Denavit-Hartenberg (DH-Parameters) ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ที่สำคัญอยู่ 4 พารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

1. Link length ( $a_i$ ) คือ ระยะทางความยาวตามแกน  $x_i$  จากจุด  $O_i$  ไปยังจุดที่ตัดกันของแกน  $x_i$  กับแกน  $z_{i-1}$
2. Link twist ( $\alpha_i$ ) คือ มุมระหว่างแกน  $z_{i-1}$  กับแกน  $x_i$  โดยวัดจากมุมที่หมุนรอบแกน  $x_i$
3. Link offset ( $d_i$ ) คือ ระยะทางความยาวตามแกน  $z_{i-1}$  จากจุด  $O_{i-1}$  ไปยังจุดที่ตัดกันของแกน  $x_i$  กับแกน  $z_{i-1}$
4. Joint angle ( $\theta_i$ ) คือ มุมระหว่างแกน  $x_{i-1}$  กับแกน  $x_i$  โดยวัดจากมุมที่หมุนรอบแกน  $z_{i-1}$

เมทริกซ์การแปลงเอกพจน์นั้นแสดงถึงตำแหน่ง ณ จุดปลายและทิศทางของแขนกลหุ่นยนต์ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้ว่า

$$H = T_n^0 = \begin{pmatrix} R_n^0 & O_n^0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

โดยที่เมทริกซ์ R คือ เมทริกซ์ที่แสดงในส่วนของทิศทาง

$$R_i = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) * \cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i) * \sin(\alpha_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) * \cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i) * \sin(\alpha_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

และเมทริกซ์  $O_i$  คือ เมทริกซ์ที่แสดงตำแหน่งในพิกัดคาร์ทีเซียน

$$O_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_i * \cos(\theta_i) \\ a_i * \sin(\theta_i) \\ d_i \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

เมื่อพิจารณาถึงข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ ต่างๆจะได้เมทริกซ์  $A_i$  ได้ว่า

$$A_i = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) * \cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i) * \sin(\alpha_i) & a_i * \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) * \cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i) * \sin(\alpha_i) & a_i * \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

ดังนั้นจึงสามารถเขียนสรุปสมการ The homogeneous transformation matrix รวมได้ดังนี้

$$H = T_n^0 = A_1 * A_2 * \dots * A_n \quad (2.5)$$

โดยขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์ใน Denavit-Hartenberg[6] นั้นโดยทั่วไปมีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดแกน อ้างอิง  $z_0, \dots, z_{n-1}$

ขั้นตอนที่ 2 สร้างฐานเฟรม โดยเริ่มจากฐานเฟรมที่แกนอ้างอิง  $z_0$  จากนั้นเลือกแกนอ้างอิง  $x_0$  และ แกนอ้างอิง  $y_0$  ตามความเหมาะสมโดยมากแล้วมักจะให้แกนอ้างอิง  $x_0$  ชี้ไปทางด้านหน้าของหุ่นยนต์ โดยแต่ละฐานเฟรม จะต้องมีความสัมพันธ์กันตามกฎมือขวา (Right Hand Rule) ส่วนแกน  $i$  ที่เหลือให้ดำเนินการตามขั้นตอนที่ 3 ถึง 5

ขั้นตอนที่ 3 กำหนดจุดอ้างอิง  $o_i$  โดยกำหนดเป็นจุดรวมของเส้นแนวฉากแกนอ้างอิง  $z_i$  และ  $z_{i-1}$  ตัดกันที่  $z_i$  โดยหากแกนอ้างอิง  $z_i$  ตัดกับ  $z_{i-1}$  ตัดกันกำหนดให้จุดตัดนั้นเป็นจุด  $o_i$  และหากแกนอ้างอิง  $z_i$  ตัดกับ  $z_{i-1}$  ขนานกันกำหนดให้จุด  $o_i$  เป็นจุดที่ตั้งได้ตามความเหมาะสมในแนวแกนอ้างอิง  $z_i$

ขั้นตอนที่ 4 สร้างแกนอ้างอิง  $x_i$  ตามจุดรวมของเส้นแนวฉากระหว่างแกนอ้างอิง  $z_{i-1}$  และ  $z_i$  ผ่านจุด  $o_i$  หรือในทิศทางเส้นแนวฉากถึงระนาบแกนอ้างอิง  $z_{i-1} - z_i$  ถ้า  $z_{i-1}$  และ  $z_i$  ตัดกัน

ขั้นตอนที่ 5 สร้างแกนอ้างอิง  $y_i$  ให้ครบตามกฎมือขวา

ขั้นตอนที่ 6 สร้างจุดและแกนอ้างอิงที่ปลายแขน  $o_n, x_n, y_n, z_n$

ขั้นตอนที่ 7 สร้างตารางพารามิเตอร์ Denavit-Hartenberg (DH-Parameters)  $a_i, d_i, \alpha_i, \theta_i$

ขั้นตอนที่ 8 ทำการจัดรูปใน The homogeneous transformation matrix  $A_i$

ขั้นตอนที่ 9 จากสมการ  $T_n^0 = A_1 \dots A_n$  นั้นจะบ่งบอกให้ทราบถึงค่าตำแหน่งและท่าทางของจุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์

### 2.1.2 The Homogeneous Transformation Matrix

เมทริกซ์การแปลงเอกพันธ์ (Homogeneous Transformation Matrix) คือการแปลงตำแหน่งในระบบพิกัดหนึ่งไปอีกระบบพิกัดหนึ่ง โดยส่วนใหญ่แล้วในจลศาสตร์หุ่นยนต์จะสนใจพิจารณาตัวแปรที่แสดงถึงตำแหน่งและท่าทางของหุ่นยนต์เป็นหลัก และการแปลงระหว่างระบบพิกัดยังอีกระบบพิกัดหนึ่ง การแปลงเอกพันธ์ (Homogeneous transformations) รวมการจัดการ การหมุนและการแปลงภายในหนึ่งการคูณเมทริกซ์

สมมติให้สองระบบพิกัดถูกกำหนดให้แต่ละแกนของแขนกลที่แกนของแขนกลหุ่นยนต์  $i-1$  และแกน  $i$  ตามลำดับ โดยระบบพิกัดแกนแขนกลหุ่นยนต์  $i-1$  เป็นระบบพิกัดอ้างอิงและระบบพิกัด  $i$  เป็นระบบพิกัดเคลื่อนที่เมื่อข้อต่อ  $i$  ถูกทำให้เคลื่อนที่ ใช้เมทริกซ์การแปลงเอกพันธ์  $H$  จุด  $P_i$  สามารถแสดงในระบบพิกัดแกนแขนกลหุ่นยนต์  $i$  ในเทอมของแกนแขนกลหุ่นยนต์  $i-1$  ได้ดังนี้

$$P_{i-1} = H_i^{i-1} P_i \quad (2.6)$$

โดยที่

$P_i$  คือ ตำแหน่งทางเวกเตอร์  $(x_i, y_i, z_i, 1)^T$  ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งของแขนกลหุ่นยนต์  $i$  ในระบบพิกัด

$P_{i-1}$  คือ ตำแหน่งทางเวกเตอร์  $(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1}, 1)^T$  ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งของแขนกลหุ่นยนต์  $i-1$  ในระบบพิกัด

$H_i^{i-1}$  คือ เมทริกซ์การแปลงเอกพันธ์ ซึ่งระบุตำแหน่งเฟรมระบบพิกัดลำดับที่  $i^{th}$  ซึ่งอิงกับระบบ พิกัดลำดับที่  $i-1^{th}$

โดย เมทริกซ์การแปลงเอกพันธ์ สามารถพิจารณาด้วยเมทริกซ์ย่อย 4 เมทริกซ์ดังนี้

$$H = \begin{bmatrix} R & \vec{T} \\ \vec{P} & s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotation} & \text{Translation} \\ \text{Perspective} & \text{ScaleFactor} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$R$  คือ เมทริกซ์  $3 \times 3$  ที่แสดงถึงลักษณะของการหมุน(ท่าทาง) โดยพื้นฐานในการหมุนเมทริกซ์  $R$  นั้นจะทำการหมุนด้วยมุม  $\alpha$  รอบแกน  $x$  แกน  $y$  และแกน  $z$  ดังนี้

$$R_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$R_{y,\alpha} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$R_{z,\alpha} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$\vec{T}$  คือเมทริกซ์เวกเตอร์แนวตั้ง  $3 \times 1$  ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ของการแปลงตำแหน่ง โดยพื้นฐานการแปลงเมทริกซ์เวกเตอร์  $\vec{T}$  นั้นจะแสดงการแปลงด้วยระยะทาง  $a$  ผ่านแกน  $x$  ระยะทาง  $b$  ผ่านแกน  $y$  ระยะทาง  $c$  ผ่านแกน  $z$

$$\vec{T}_{x,a} = \begin{bmatrix} a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \vec{T}_{y,b} = \begin{bmatrix} 0 \\ b \\ 0 \end{bmatrix}, \vec{T}_{z,c} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ c \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$\vec{P}$  คือเมทริกซ์เวกเตอร์แนวนอน  $1 \times 3$  และ สเกลาร์  $s$  เป็นมุมมองและค่าสเกล พารามิเตอร์ซึ่งโดยทั่วๆไปจะกำหนดให้  $\vec{P} = [0 \ 0 \ 0]$  และ  $s = 1$  เมื่อข้อต่อเป็นแบบหมุน

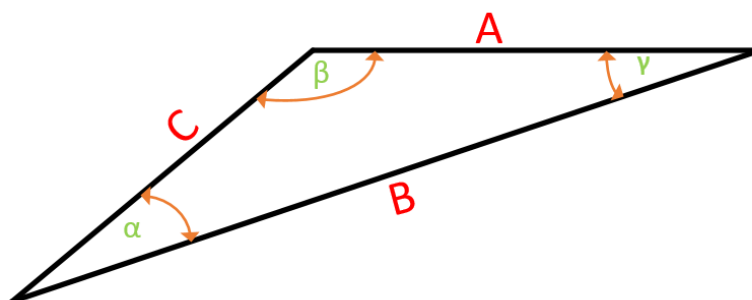
## 2.2 จลนศาสตร์แบบกลับหลัง



รูปภาพที่ 2.3 จลนศาสตร์แบบกลับหลัง

หลักการของจลนศาสตร์แบบกลับหลัง คือการวิเคราะห์เพื่อหาค่ามุมมองและการหมุนของข้อต่อต่างๆของแขนกลหุ่นยนต์ เมื่อทราบค่าจุดปลายพิกัด  $(X, Y, Z)$  และท่าทางของจุดปลายในตัวแปร  $(\alpha, \beta, \gamma)$  ซึ่งเป็นการคำนวณย้อนกลับจากส่วนปลายของแขนกลหุ่นยนต์มายังข้อต่อจุดหมุนต่างๆของแขนกลหุ่นยนต์  $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$  โดยใช้หลักการทาง เรขาคณิต

(Geometric) และ Transpose matrix ในการแก้ปัญหา โดยมากแล้วในทางเรขาคณิตจะใช้การวิเคราะห์สามเหลี่ยมร่วมกับกฎของโคไซน์ (Law of Cosines)



รูปภาพที่ 2.4 กฎของโคไซน์

โดยสามารถเขียนความสัมพันธ์ตามกฎของโคไซน์ได้ดังสมการนี้

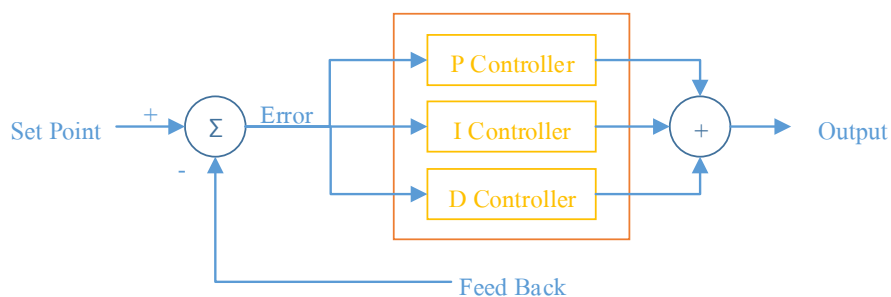
$$A^2 = B^2 + C^2 - 2BC \cos(\alpha) \quad (2.12)$$

$$B^2 = A^2 + C^2 - 2AC \cos(\beta) \quad (2.13)$$

$$C^2 = A^2 + B^2 - 2AB \cos(\gamma) \quad (2.14)$$

### 2.3 การควบคุมพีไอดีแบบลูป-ปิด

หลักการควบคุมแบบ PID Close loop control กำหนดให้ตัวควบคุมเปรียบเทียบค่าเป้าหมาย (Set Point) กับค่าป้อนกลับ (Feed Back) หากค่าเป้าหมายและค่าป้อนกลับไม่เท่ากันจะเกิดค่าความคลาดเคลื่อนหรือค่าความผิดพลาด (Error) ขึ้น ตัวควบคุมก็จะทำการคำนวณตามสมการ พีไอดี[7]



รูปภาพที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมพีไอดี

Error = Feed Back – Set Point ; ถ้า Actuator เป็น Direct Action

Error = Set Point – Feed Back ; ถ้า Actuator เป็น Reverse Action

การทำงานของกระบวนการ (Process) จะเป็นระบบควบคุมแบบต่อเนื่อง (Continuous-State Control-System) สมการที่ใช้จะประยุกต์มาจากสมการของอนุพันธ์พีไอดี

$$Output = K_p * Error + K_i * \int Error dt + K_d * \frac{dError}{dt} \quad (2.15)$$

จากนั้นทำแปลงสมการอนุพันธ์ให้อยู่ในรูปแบบที่ทำให้โปรแกรมคำนวณได้ซึ่งสามารถทำการแปลงได้ดังนี้

### 2.3.1 การคำนวณในการควบคุมแบบพี(P Controller)

จากพฤติกรรมการตอบสนองการควบคุมแบบ P จะเห็นได้ว่าเอาต์พุทเปลี่ยนแปลงตามค่าของค่าคลาดเคลื่อนเป็นสัดส่วนดังนั้นจะได้สมการ

$$P \text{ controller} = K_p * Error \quad (2.16)$$

โดยที่

$K_p$  = Proportion Gain

Error = ค่าที่คลาดเคลื่อน

### 2.3.2 การคำนวณในการควบคุมแบบไอ(I Controller)

จากพฤติกรรมการตอบสนองการควบคุมแบบ I จะเป็นการรวมค่าความผิดพลาดในอดีตมาเฉลี่ยกันดังนั้นสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$I \text{ controller} = K_i * I_{Error} \quad (2.17)$$

$$I_{Error} = I_{Error\_old} + (Error * dt) \quad (2.18)$$

โดยที่

$K_i$  = Integral Gain (Reset Time)

dt = ค่าคาบเวลาในการสุ่ม



### 2.3.3 การคำนวณในการควบคุมแบบดี(D Controller)

จากพฤติกรรมของการตอบสนองการควบคุมแบบ D จะเป็นการประมาณค่าอนุพันธ์จากความชันของค่าคลาดเคลื่อน ดังนั้นสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$D \text{ controller} = K_d * D_{Error} \quad (2.19)$$

$$D_{Error} = (Error - Error_{old}) / dt \quad (2.20)$$

โดยที่

$K_d$  = Derivative Gain

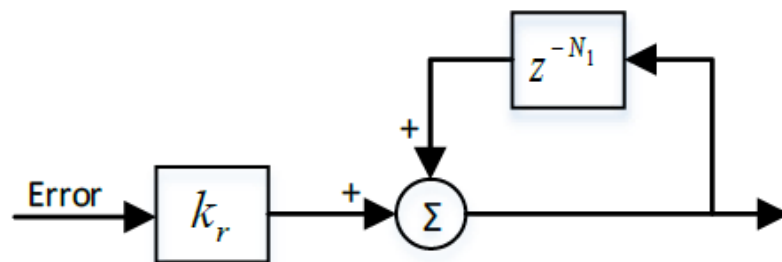
$Error_{old}$  = ค่าความผิดพลาดก่อนหน้า

ดังนั้นการควบคุมแบบ PID(Proportional Integral Derivative Controller) เป็นการรวมเอาการควบคุมทั้งสามแบบมารวมกันสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$PID \text{ controller} = K_p * Error + K_i * I_{Error} + K_d * D_{Error} \quad (2.21)$$

### 2.4 การควบคุมแบบทำซ้ำ

หลักการควบคุมแบบทำซ้ำ Repetitive Control[8-10] กำหนดให้ตัวควบคุมเปรียบเทียบค่าเป้าหมายกับค่าป้อนกลับ หากค่าเป้าหมายและค่าป้อนกลับ ไม่เท่ากันจะเกิดค่าความคลาดเคลื่อนหรือค่าความผิดพลาดขึ้น ตัวควบคุมจะทำการคำนวณตามสมการ Repetitive Control ทำให้ตัวควบคุมสามารถเรียนรู้ความผิดพลาดจากเมื่อรอบที่แล้วและปรับปรุงค่าของผลลัพธ์ให้ค่าผิดพลาดน้อยลงได้



รูปภาพที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมแบบทำซ้ำ

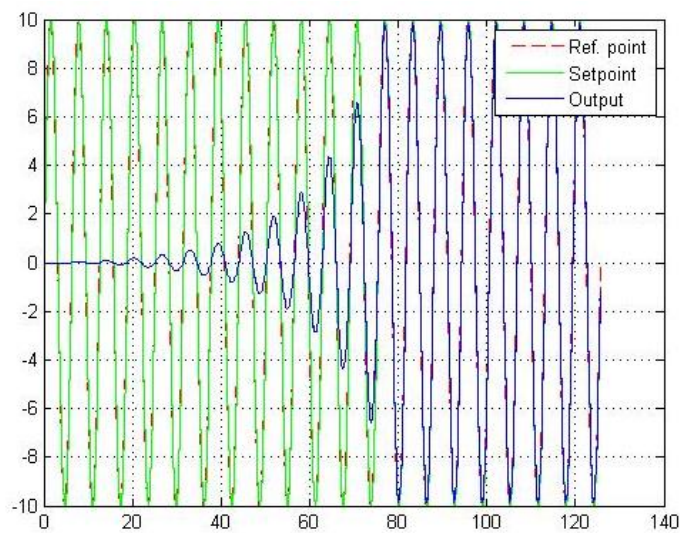
$$\text{RC controller} = K_r * \text{Error} + Z^{-N_1} \quad (2.22)$$

โดยที่

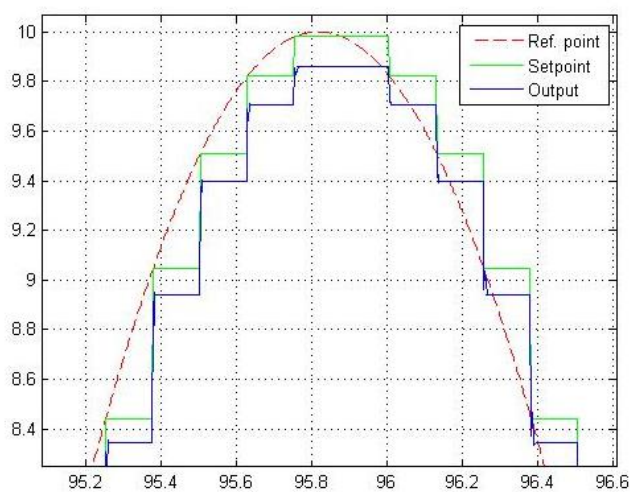
$K_r$  = Repetitive Gain

$Z^{-N_1}$  = ค่าผลลัพธ์ของ Repetitive Control ณ จุด ปัจจุบันเมื่อรอบที่แล้ว

เมื่อส่วนการควบคุมแบบทำซ้ำได้มีการเรียนรู้ค่าความผิดพลาด ณ จุดเดียวกับจุดปัจจุบันในรอบที่แล้วทำให้ตัวควบคุมเกิดการปรับปรุงผลลัพธ์ออกมาได้ดังรูปภาพที่ 2.7 และรูปภาพที่ 2.8

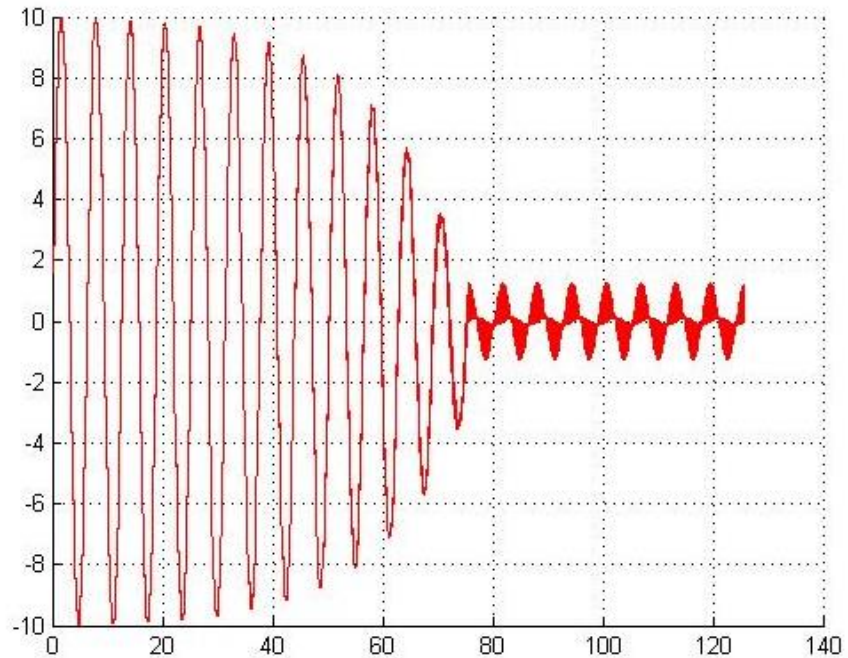


รูปภาพที่ 2.7 การทำงานของกระบวนการเรียนรู้การควบคุมแบบทำซ้ำ

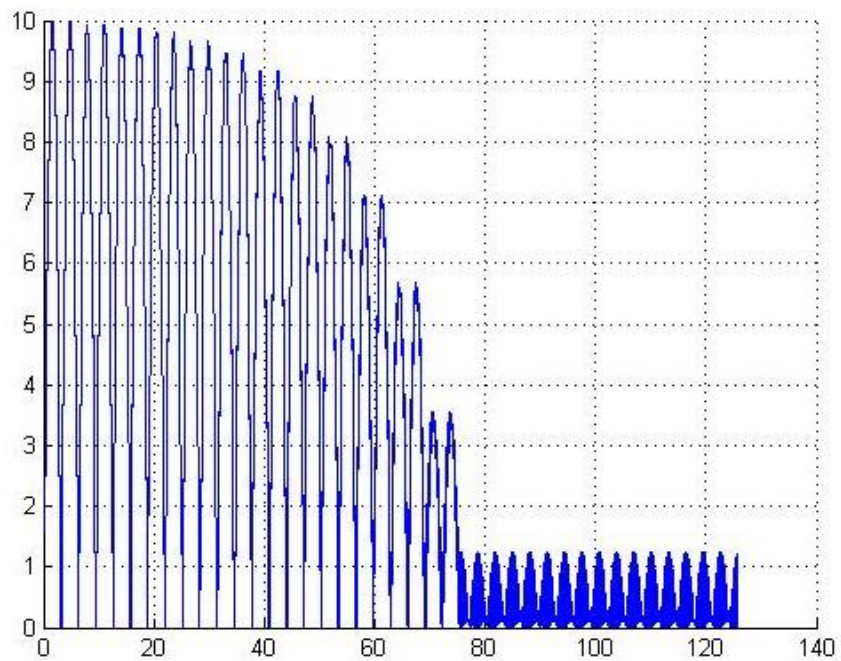


รูปภาพที่ 2.8 การทำงานของกระบวนการเรียนรู้การควบคุมแบบทำซ้ำแบบมุ่มมองใกล้

และเมื่อทำการสังเกตค่าความผิดพลาดในแต่ละรอบการทำงานของกระบวนการ  
ทำซ้ำทั้งหมดจะได้ดังรูปภาพที่ 2.9 และรูปภาพที่ 2.10

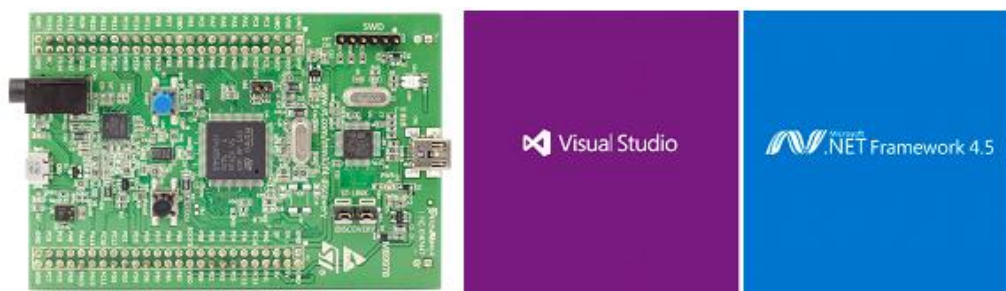


รูปภาพที่ 2.9 การลดลงของค่าผิดพลาดในการควบคุมแบบทำซ้ำ



รูปภาพที่ 2.10 การลดลงของค่าผิดพลาดในการควบคุมแบบมุมมองด้านขนาด

## 2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 Discovery กับ NETMF



รูปภาพที่ 2.11 ไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 Discovery กับ NETMF

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 สามารถถูกพัฒนาในด้านแอปพลิเคชันได้ด้วย .NET Micro Framework (NETMF) ซึ่งทำให้สามารถทดสอบและปรับใช้ตัวซอฟต์แวร์ได้ด้วยภาษา C# โดยโปรแกรม Microsoft Visual Studio ได้ และภายในตัวซอฟต์แวร์นั้นจะมีไลบรารีที่จะใช้ให้การเรียกใช้โมดูลที่เป็นฮาร์ดแวร์ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ง่ายขึ้นอีกด้วย อีกทั้งในตัวโปรแกรม Visual Studio นั้นจะมีส่วนที่คอยช่วยแก้ไขและแจ้งเตือนค่าหรือโค้ดที่เขียนผิดอย่างอัตโนมัติ รวมไปถึงส่วนที่คอยเพิ่มค่าหรือโค้ดที่เขียนที่ถูกต้องขึ้นมาช่วยด้วยอย่างอัตโนมัติเช่นกัน ทำให้ประหยัดเวลาและเพิ่มประสิทธิภาพในการพัฒนาด้านซอฟต์แวร์ได้มากขึ้น อีกทั้งยังช่วยให้ประหยัดทรัพยากรในการใช้พัฒนาซอฟต์แวร์ในงานวิจัยอีกด้วย เพราะในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Visual Studio ในการออกแบบโปรแกรมบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการดูการเคลื่อนไหวต่างๆของตัวแขนกลหุ่นยนต์ และใช้ในการรับคำสั่งจากผู้บังคับเพื่อสั่งการให้แขนกลหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในท่าและทิศทางต่างๆอีกด้วย

## 2.6 OpenTK



รูปภาพที่ 2.12 OpenTK

OpenTK[11] เครื่องมือขั้นสูงที่มีไลบรารีที่เป็นภาษา C# ขั้นต่ำที่รวมเอา OpenGL, OpenCL และ OpenAL เข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งจะเหมาะกับการสร้างเกมส์ แอปพลิเคชันทางวิทยาศาสตร์ และโปรเจคต่างๆที่ต้องการทำงานเกี่ยวโมเดลสามมิติ เสียง และฟังก์ชันต่างๆบนคอมพิวเตอร์

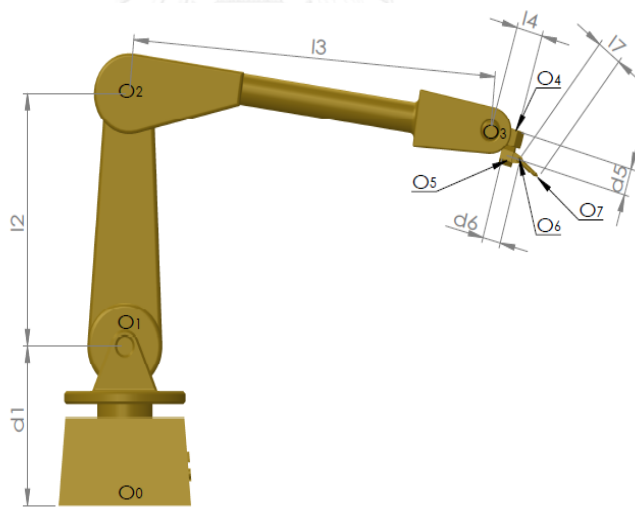
## บทที่ 3

### การออกแบบสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบสถาปัตยกรรมซอฟต์แวร์และฮาร์ดแวร์ของตัวควบคุมแขนกลหุ่นยนต์โดยอันดับแรกจะกล่าวถึงการแก้ไขจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า ลำดับสองต่อมาจะกล่าวถึงการแก้ไขจลนศาสตร์แบบกลับหลัง ลำดับสามจะกล่าวถึงการออกแบบฮาร์ดแวร์ และส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงการออกแบบในส่วนซอฟต์แวร์

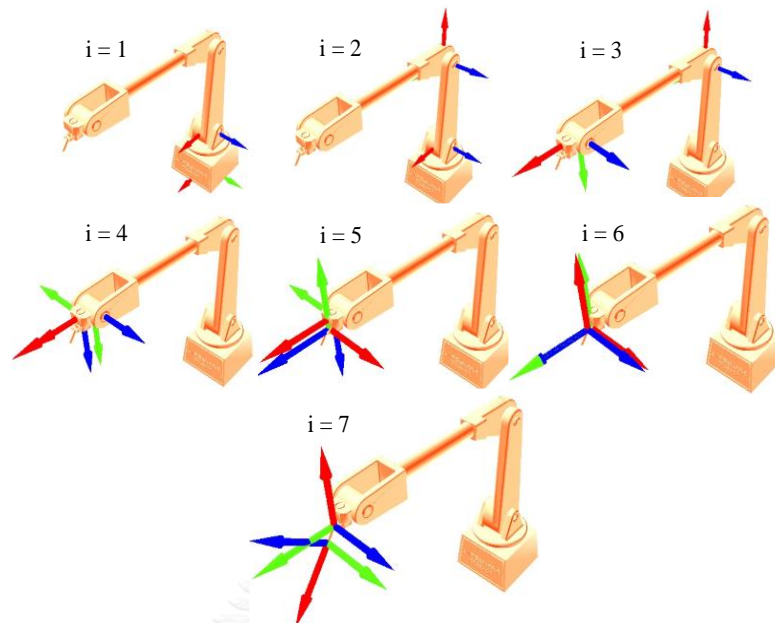
#### 3.1 การออกแบบจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า

ก่อนที่จะเริ่มวิเคราะห์จลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าของแขนกลหุ่นยนต์ จะต้องทำการออกแบบและกำหนดขนาดในส่วนข้อต่อทุกข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ รวมไปถึงจุดและพารามิเตอร์ต่างๆของแขนกลหุ่นยนต์ให้ชัดเจนเสียก่อน โดยสามารถดูภาพร่างแบบของแขนกลหุ่นยนต์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จากรูปภาพที่ 3.1



รูปภาพที่ 3.1 โมเดลหุ่นยนต์และพารามิเตอร์

หลังจากที่ได้ทำการร่างแบบเรียบร้อยแล้ว ในขั้นตอนนี้ต่อมาจะทำการตั้งแกนอ้างอิงตามจุดข้อต่อต่างๆของหุ่นยนต์เพื่อที่จะทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ใน Denavit-Hartenberg (DH-Parameters) ซึ่งรูปภาพที่ 3.2 จะแสดงถึงแกนอ้างอิงในข้อต่อต่างๆของแขนกลหุ่นยนต์



รูปภาพที่ 3.2 แกนอ้างอิงในข้อต่อต่างๆของแขนกลหุ่นยนต์

เมื่อตั้งแกนอ้างอิงที่จุดเชื่อมต่อต่างๆซึ่งในแขนกลหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้จะมีทั้งหมด 6 แกน ส่วนแกนที่ 7 นั้นจะแทนด้วยแกนของด้ามปืนที่มีไว้เพื่อใช้ในการพ่นสี โดยเมื่อวิเคราะห์ตามขั้นตอนการตั้งแกนอ้างอิงเพื่อหา DH-Parameters แล้วสามารถเขียนสรุปตารางได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 Denavit-Hartenberg Parameters

Axis	$l_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i^*$
1	0	$-90^\circ$	632	$\theta_1$
2	1000	$0^\circ$	0	$\theta_2 - 90^\circ$
3	1610	$0^\circ$	0	$\theta_3 + 90^\circ$
4	101.6	$-90^\circ$	0	$\theta_4$
5	0	$-90^\circ$	76	$\theta_5 - 90^\circ$
6	0	$90^\circ$	85	$\theta_6 + 90^\circ$
7	110	$90^\circ$	0	$0.3\pi$

หลังจากที่ได้ทำการวิเคราะห์จากแกนอ้างอิงต่างๆในรูปภาพที่ 3.2 และได้ตารางสรุป DH-Parameters ดังตารางที่ 3.1 แล้วต่อมานำข้อมูลที่ได้ใน DH-Parameters ของข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ในแต่ละข้อต่อมาใส่ลงในเมทริกซ์ที่ (3.1)

$$T_{o_i}^{o_{i-1}} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) * \cos(\alpha_i) & \sin(\theta_i) * \sin(\alpha_i) & l_i * \cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) * \cos(\alpha_i) & -\cos(\theta_i) * \sin(\alpha_i) & l_i * \sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

เมื่อนำค่าของ DH-Parameters ของแกนข้อต่อที่ 1,2,3,4,5,6,7 มาแทนลงในเมทริกซ์ที่ (3.1) จะได้ดังเมทริกซ์ที่ (3.2), (3.3), (3.4),(3.5),

(3.6),(3.7) และ (3.8) ดังต่อไปนี้

$$T_1^0 = \begin{pmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & c_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

$$T_2^1 = \begin{pmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & l_2 * c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & l_2 * s_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

$$T_3^2 = \begin{pmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & l_3 * c_3 \\ s_3 & c_3 & 0 & l_3 * s_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$$T_4^3 = \begin{pmatrix} c_4 & 0 & -s_4 & l_4 * c_4 \\ s_4 & 0 & c_4 & l_4 * s_4 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

$$T_5^4 = \begin{pmatrix} c_5 & 0 & -s_5 & 0 \\ s_5 & 0 & c_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

$$T_6^5 = \begin{pmatrix} c_6 & 0 & s_6 & 0 \\ s_6 & 0 & -c_6 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

$$T_7^6 = \begin{pmatrix} c_7 & 0 & s_6 & l_7 * c_7 \\ s_7 & 0 & -c_6 & l_7 * s_7 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

หลังจากนั้นนำเมทริกซ์ที่ (3.2), (3.3), (3.4),(3.5),

(3.6),(3.7) และ (3.8) มาทำการคูณกันดังเมทริกซ์ที่ (3.9) เพื่อหาเมทริกซ์ผลลัพธ์ (3.10)

$$T_7^0 = T_1^0 * T_2^1 * T_3^2 * T_4^3 * T_5^4 * T_6^5 * T_7^6 \quad (3.9)$$

(3.10)



$$T_7^0 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix}$$

โดยค่าผลลัพธ์ที่ได้  $a_{ij}$  ในแต่ละตำแหน่งของเมทริกซ์ที่ (3.10) ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} a_{11} = & c_7^*(c_6^*(s_1*s_5 + c_5^*(c_4^*(c_1^*c_2^*c_3 - c_1^*s_2^*s_3) - s_4^*(c_1^*c_2^*s_3 + c_1^*c_3^*s_2)))) \\ & + s_6^*(c_4^*(c_1^*c_2^*s_3 + c_1^*c_3^*s_2) + s_4^*(c_1^*c_2^*c_3 - c_1^*s_2^*s_3))) \\ & + s_7^*(c_5^*s_1 - s_5^*(c_4^*(c_1^*c_2^*c_3 - c_1^*s_2^*s_3) \\ & - s_4^*(c_1^*c_2^*s_3 + c_1^*c_3^*s_2))) \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} a_{12} = & s_6^*(s_1*s_5 + c_5^*(c_4^*(c_1^*c_2^*c_3 - c_1^*s_2^*s_3) - s_4^*(c_1^*c_2^*s_3 + c_1^*c_3^*s_2))) \\ & - c_6^*(c_4^*(c_1^*c_2^*s_3 + c_1^*c_3^*s_2) + s_4^*(c_1^*c_2^*c_3 - c_1^*s_2^*s_3)) \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} a_{13} = & s_7^*(c_6^*(s_1*s_5 + c_5^*(c_4^*(c_1^*c_2^*c_3 - c_1^*s_2^*s_3) \\ & - s_4^*(c_1^*c_2^*s_3 + c_1^*c_3^*s_2))) + s_6^*(c_4^*(c_1^*c_2^*s_3 + c_1^*c_3^*s_2) \\ & + s_4^*(c_1^*c_2^*s_3 - c_1^*s_2^*s_3))) - c_7^*(c_5^*s_1 - s_5^*(c_4^*(c_1^*c_2^*c_3 - c_1^*s_2^*s_3) \\ & - s_4^*(c_1^*c_2^*s_3 + c_1^*c_3^*s_2))) \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} a_{14} = & d_6^*(c_5^*s_1 - s_5^*(c_4^*(c_1^*c_2^*c_3 - c_1^*s_2^*s_3) - s_4^*(c_1^*c_2^*s_3 + c_1^*c_3^*s_2))) \\ & - d_5^*(c_4^*(c_1^*c_2^*s_3 + c_1^*c_3^*s_2) + s_4^*(c_1^*c_2^*c_3 - c_1^*s_2^*s_3)) \\ & + c_1^*c_2^*l_2 + c_7^*l_7^*(c_5^*s_1 - s_5^*(c_4^*(c_1^*c_2^*c_3 - c_1^*s_2^*s_3) \\ & - s_4^*(c_1^*c_2^*s_3 + c_1^*c_3^*s_2))) + c_4^*l_4^*(c_1^*c_2^*c_3 - c_1^*s_2^*s_3) \\ & + l_7^*s_7^*(c_6^*(s_1*s_5 + c_5^*(c_4^*(c_1^*c_2^*c_3 - c_1^*s_2^*s_3) \\ & - s_4^*(c_1^*c_2^*s_3 + c_1^*c_3^*s_2))) + s_6^*(c_4^*(c_1^*c_2^*s_3 + c_1^*c_3^*s_2) \\ & + s_4^*(c_1^*c_2^*c_3 - c_1^*s_2^*s_3))) - l_4^*s_4^*(c_1^*c_2^*s_3 + c_1^*c_3^*s_2) \\ & - c_1^*l_3^*s_2^*s_3 + c_1^*c_2^*c_3^*l_3 \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned}
a_{21} = & c_7^*(s_6^*(c_4^*(c_2^*s_1^*s_3 + c_3^*s_1^*s_2) + s_4^*(c_2^*c_3^*s_1 - s_1^*s_2^*s_3)) \\
& + c_6^*(c_5^*(c_4^*(c_2^*c_3^*s_1 - s_1^*s_2^*s_3) - s_4^*(c_2^*s_1^*s_3 + c_3^*s_1^*s_2)) - c_1^*s_5)) \\
& - s_7^*(c_1^*c_5 + s_5^*(c_4^*(c_2^*c_3^*s_1 - s_1^*s_2^*s_3) - s_4^*(c_2^*s_1^*s_3 + c_3^*s_1^*s_2)))
\end{aligned} \tag{3.15}$$

$$\begin{aligned}
a_{22} = & s_6^*(c_5^*(c_4^*(c_2^*c_3^*s_1 - s_1^*s_2^*s_3) - s_4^*(c_2^*s_1^*s_3 + c_3^*s_1^*s_2)) \\
& - c_1^*s_5) - c_6^*(c_4^*(c_2^*s_1^*s_3 + c_3^*s_1^*s_2) + s_4^*(c_2^*c_3^*s_1 - s_1^*s_2^*s_3))
\end{aligned} \tag{3.16}$$

$$\begin{aligned}
a_{23} = & c_7^*(c_1^*c_5 + s_5^*(c_4^*(c_2^*c_3^*s_1 - s_1^*s_2^*s_3) - s_4^*(c_2^*s_1^*s_3 + c_3^*s_1^*s_2))) \\
& + s_7^*(s_6^*(c_4^*(c_2^*s_1^*s_3 + c_3^*s_1^*s_2) + s_4^*(c_2^*c_3^*s_1 - s_1^*s_2^*s_3)) \\
& + c_6^*(c_5^*(c_4^*(c_2^*c_3^*s_1 - s_1^*s_2^*s_3) - s_4^*(c_2^*s_1^*s_3 + c_3^*s_1^*s_2)) - c_1^*s_5))
\end{aligned} \tag{3.17}$$

$$\begin{aligned}
a_{24} = & l_7^*s_7^*(s_6^*(c_4^*(c_2^*s_1^*s_3 + c_3^*s_1^*s_2) + s_4^*(c_2^*c_3^*s_1 - s_1^*s_2^*s_3)) \\
& + c_6^*(c_5^*(c_4^*(c_2^*c_3^*s_1 - s_1^*s_2^*s_3) - s_4^*(c_2^*s_1^*s_3 + c_3^*s_1^*s_2)) - c_1^*s_5)) \\
& - d_6^*(c_1^*c_5 + s_5^*(c_4^*(c_2^*c_3^*s_1 - s_1^*s_2^*s_3) - s_4^*(c_2^*s_1^*s_3 + c_3^*s_1^*s_2))) \\
& - d_5^*(c_4^*(c_2^*s_1^*s_3 + c_3^*s_1^*s_2) + s_4^*(c_2^*c_3^*s_1 - s_1^*s_2^*s_3)) + c_2^*l_2^*s_1 \\
& - c_7^*l_7^*(c_1^*c_5 + s_5^*(c_4^*(c_2^*c_3^*s_1 - s_1^*s_2^*s_3) - s_4^*(c_2^*s_1^*s_3 + c_3^*s_1^*s_2))) \\
& + c_4^*l_4^*(c_2^*c_3^*s_1 - s_1^*s_2^*s_3) - l_4^*s_4^*(c_2^*s_1^*s_3 + c_3^*s_1^*s_2) + c_2^*c_3^*l_3^*s_1 - l_3^*s_1^*s_2^*s_3
\end{aligned} \tag{3.18}$$

$$\begin{aligned}
a_{31} = & c_7^*(s_6^*(c_4^*(c_2^*c_3 - s_2^*s_3) - s_4^*(c_2^*s_3 + c_3^*s_2)) \\
& - c_5^*c_6^*(c_4^*(c_2^*s_3 + c_3^*s_2) + s_4^*(c_2^*c_3 - s_2^*s_3))) \\
& + s_5^*s_7^*(c_4^*(c_2^*s_3 + c_3^*s_2) + s_4^*(c_2^*c_3 - s_2^*s_3))
\end{aligned} \tag{3.19}$$

$$\begin{aligned}
a_{32} = & -c_6^*(c_4^*(c_2^*c_3 - s_2^*s_3) - s_4^*(c_2^*s_3 + c_3^*s_2)) \\
& - c_5^*s_6^*(c_4^*(c_2^*s_3 + c_3^*s_2) + s_4^*(c_2^*c_3 - s_2^*s_3))
\end{aligned} \tag{3.20}$$

$$\begin{aligned}
a_{33} = & s_7*(s_6*(c_4*(c_2*c_3 - s_2*s_3) - s_4*(c_2*s_3 + c_3*s_2)) \\
& - c_5*c_6*(c_4*(c_2*s_3 + c_3*s_2) + s_4*(c_2*c_3 - s_2*s_3))) \\
& - c_7*s_5*(c_4*(c_2*s_3 + c_3*s_2) + s_4*(c_2*c_3 - s_2*s_3))
\end{aligned} \tag{3.21}$$

$$\begin{aligned}
a_{34} = & d_1 - l_2*s_2 - d_5*(c_4*(c_2*c_3 - s_2*s_3) - s_4*(c_2*s_3 + c_3*s_2)) \\
& - l_4*s_4*(c_2*c_3 - s_2*s_3) - c_2*l_3*s_3 - c_3*l_3*s_2 + l_7*s_7*(s_6*(c_4*(c_2*c_3 - s_2*s_3) \\
& - s_4*(c_2*s_3 + c_3*s_2)) - c_5*c_6*(c_4*(c_2*s_3 + c_3*s_2) + s_4*(c_2*c_3 - s_2*s_3))) \\
& + d_6*s_5*(c_4*(c_2*s_3 + c_3*s_2) + s_4*(c_2*c_3 - s_2*s_3)) - c_4*l_4*(c_2*s_3 + c_3*s_2) \\
& + c_7*l_7*s_5*(c_4*(c_2*s_3 + c_3*s_2) + s_4*(c_2*c_3 - s_2*s_3))
\end{aligned} \tag{3.22}$$

$$a_{41} = a_{42} = a_{43} = 0 \tag{3.23}$$

$$a_{44} = 1 \tag{3.24}$$

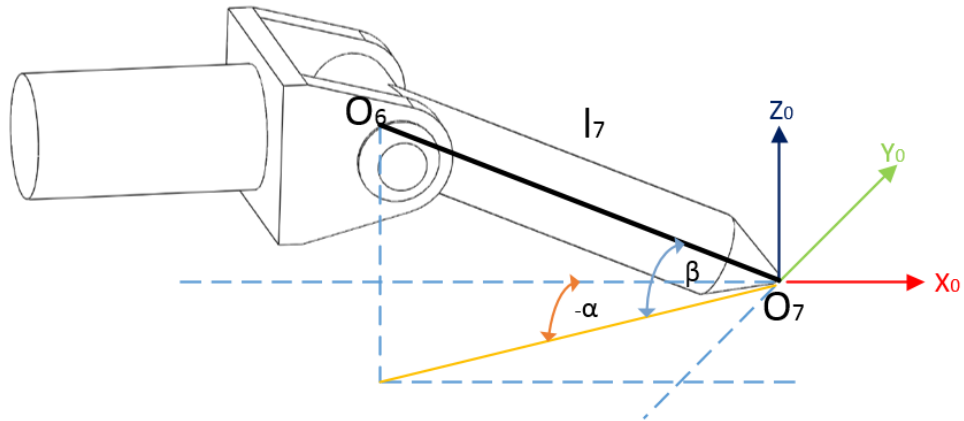
โดยกำหนดให้  $s_i$  คือ  $\sin(\theta_i)$  และ  $c_i$  คือ  $\cos(\theta_i)$  จากเมทริกซ์ที่ (3.10) ทำให้ทราบจุดปลายของแกนกลหุ่นยนต์ในระบบพิกัดตำแหน่ง  $(x, y, z)$  อยู่ที่  $(a_{14}, a_{24}, a_{34})$

### 3.2 การออกแบบจลนศาสตร์แบบกลับหลัง

ในส่วนการออกแบบจลนศาสตร์แบบกลับหลังของแกนกลหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้จะเริ่มจากการกำหนดค่าองศาของปลายกระบอกลูกปืนที่  $\theta_7$  โดยสามารถดูจากรายที่ 3.1 จึงสามารถกำหนดได้ดังสมการที่ (3.25)

$$\theta_7 = 0.3\pi \tag{3.25}$$

จากนั้นจึงทำการหาค่าพิกัดจุด  $O_6$  โดยตอนนี้จะสามารถกำหนดค่าตั้งต้นในพิกัดจุด  $O_7$ ,  $O_1$  และค่าองศา  $\alpha$ ,  $\beta$  และ  $\gamma$  จากจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าซึ่งสามารถดูความสัมพันธ์ของทั้งหมดนี้ได้ดังรูปภาพที่ 3.3



รูปภาพที่ 3.3 การหาจุด  $O_6$  จากจุด  $O_7$  และแกนของแขนกลหุ่นยนต์  $l_7$

จากความสัมพันธ์ในตารางที่ 3.1 สามารถเขียนสมการเพื่อหาพิกัดจุด  $O_6$  ได้ดังสมการที่ (3.26)[12] ดังนี้

$$O_6 = O_7 - \begin{pmatrix} l_7 \cos(\alpha) \cos(\beta) \\ l_7 \sin(\alpha) \cos(\beta) \\ -l_7 \sin(\beta) \end{pmatrix} \quad (3.26)$$

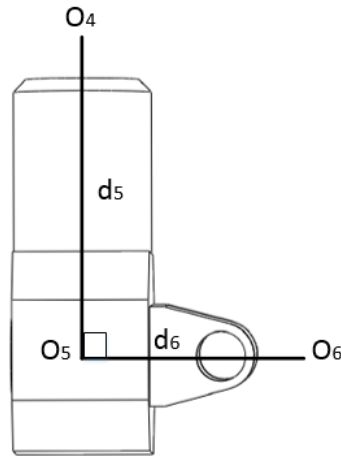
พิกัดจุด  $O_5$  นั้นสามารถเป็นไปได้หลายพิกัดจุดมากดังนั้นจึงทำการเลือกใช้  $O_5$  เดิม จากจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าเพื่อทำการหาพิกัดจุด  $O_5$  ใหม่ ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (3.27) ดังนี้

$$O_5 = O_{5old} + (O_{7new} - O_{7old}) \quad (3.27)$$

หลังจากที่ทราบค่า  $O_5$  แล้วดังนั้นจึงสามารถหา  $\theta_1$  ได้จากสมการที่ (3.28)

$$\theta_1 = \text{atan2}(y_5, x_5) \quad (3.28)$$

ต่อมาทำการหาค่าพิกัดจุด  $O_4$  โดยอาศัยจากความสัมพันธ์ของความสัมพันธ์  $O_4$ ,  $O_5$  และ  $O_6$  ได้จากรูปภาพที่ 3.4



รูปภาพที่ 3.4 ความสัมพันธ์  $O_4$ ,  $O_5$  และ  $O_6$

ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังที่เห็นในรูปภาพที่ 3.4 จะเห็นได้ว่าแกนข้อต่อหุ่นยนต์  $d_5$  และ  $d_6$  นั้นตั้งฉากกันเสมอจึงสามารถเขียนเป็นจากความสัมพันธ์นี้ได้ตั้งสมการที่ (3.29)

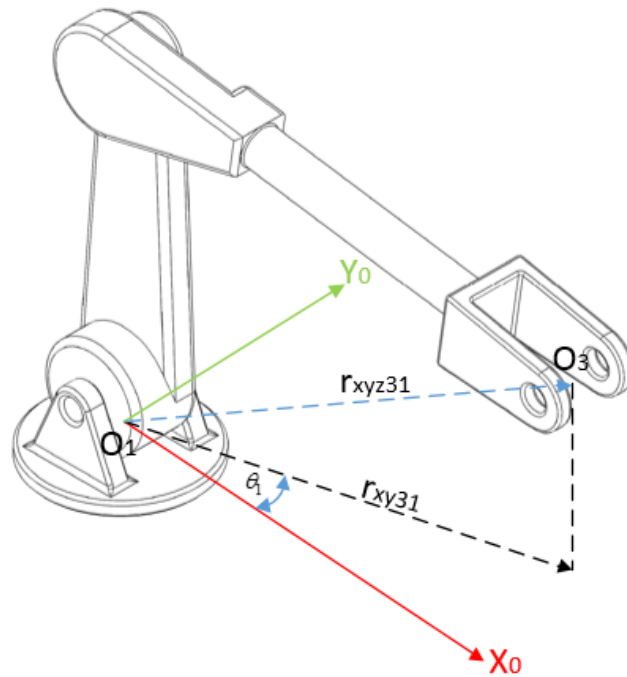
$$(x_6 - x_5)(x_4 - x_5) + (y_6 - y_5)(y_4 - y_5) + (z_6 - z_5)(z_4 - z_5) = 0 \quad (3.29)$$

เนื่องจากทราบค่า  $O_6$  และ  $O_5$  จากสมการที่ (3.26) และ (3.27) เพื่อความสะดวกจึงกำหนดให้  $c_1 = (x_6 - x_5)$ ,  $c_2 = (y_6 - y_5)$  และ  $c_3 = (z_6 - z_5)$  จึงสามารถเขียนใหม่ที่กระชับขึ้นได้ในสมการที่ (3.30) และ (3.31)

$$c_1(x_4 - x_5) + c_2(y_4 - y_5) + c_3(z_4 - z_5) = 0 \quad (3.30)$$

$$c_1x_4 + c_2y_4 + c_3z_4 = c_4 \quad (3.31)$$

โดยที่กำหนดให้  $c_4 = c_1x_5 + c_2y_5 + c_3z_5$  มาถึงขั้นตอนนี้เห็นได้ว่าจากสมการที่ (3.31) นั้นยังไม่สามารถหาค่าของพิกัดจุด  $O_4$  ได้จึงทำการพักสมการ (3.31) ไว้ก่อนแล้วทำการหาพิกัดจุด  $O_3$  ในขั้นตอนต่อมาซึ่งสามารถดูความสัมพันธ์ของพิกัดจุด  $O_3$  กับแกนข้อต่ออื่นในแขนกลหุ่นยนต์ได้ในรูปภาพที่ 3.5



รูปภาพที่ 3.5 ความสัมพันธ์  $r_{xy31}$ ,  $r_{xyz31}$

จากรูปภาพที่ 3.5 ทำให้สามารถเขียนความสัมพันธ์ต่างๆพิกัดแกน  $x$  และ  $y$  ของพิกัดจุด  $O_3$ ,  $O_4$  และ  $O_5$  ได้ดังสมการที่ (3.32), (3.33), (3.34), (3.35), (3.36) และ (3.37) ดังต่อไปนี้

$$x_3 = r_{xy31} \cos(\theta_1) \quad (3.32)$$

$$y_3 = r_{xy31} \sin(\theta_1) \quad (3.33)$$

$$x_4 = r_{xy41} \cos(\theta_1) \quad (3.34)$$

$$y_4 = r_{xy41} \sin(\theta_1) \quad (3.35)$$

$$x_5 = r_{xy51} \cos(\theta_1) \quad (3.36)$$

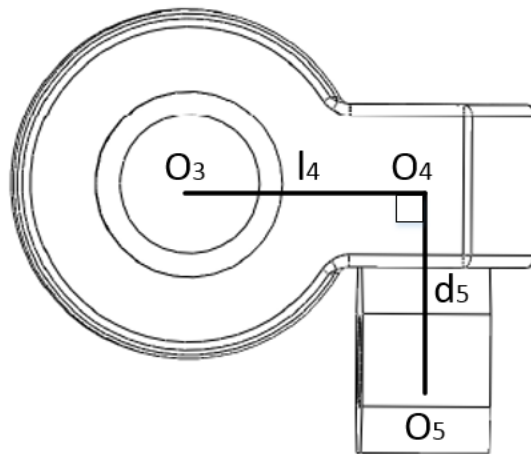
$$y_5 = r_{xy51} \sin(\theta_1) \quad (3.37)$$

นำสมการที่ (3.34) และสมการที่ (3.35) แทนลงในสมการที่ (3.31) จะได้สมการที่ (3.38) และสมการที่ (3.39)

$$r_{xy41}(c_1 \cos(\theta_1) + c_2 \sin(\theta_1)) + c_3 z_4 = c_4 \quad (3.38)$$

$$r_{xy41} = \frac{c_4 - c_3 z_4}{c_1 \cos(\theta_1) + c_2 \sin(\theta_1)} \quad (3.39)$$

ต่อมาพิจารณาความสัมพันธ์ของพิกัดจุด  $O_3, O_4$  และ  $O_5$  ได้จากรูปภาพที่ 3.6



รูปภาพที่ 3.6 ความสัมพันธ์  $O_3, O_4$  และ  $O_5$

ซึ่งจากความสัมพันธ์ดังที่เห็นในรูปภาพที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าแกนข้อต่อหุ่นยนต์  $l_4$  และ  $d_5$  นั้นตั้งฉากกันเสมอจึงสามารถเขียนเป็นจากความสัมพันธ์นี้ได้ดังสมการที่ (3.40)

$$(x_3 - x_4)(x_5 - x_4) + (y_3 - y_4)(y_5 - y_4) + (z_3 - z_4)(z_5 - z_4) = 0 \quad (3.40)$$

นำสมการที่ (3.32), (3.33), (3.34), (3.35), (3.36) และ (3.37) แทนค่าในสมการที่ (3.40) จะได้ดังสมการที่ (3.41), (3.42), (3.43) และ (3.44) ตามลำดับ

$$\cos^2(\theta_1)(r_{xy31} - r_{xy41})(r_{xy51} - r_{xy41}) + \sin^2(\theta_1)(r_{xy31} - r_{xy41})(r_{xy51} - r_{xy41}) + (z_3 - z_4)(z_5 - z_4) = 0 \quad (3.41)$$

$$(r_{xy31} - r_{xy41})(r_{xy51} - r_{xy41}) + (z_3 - z_4)(z_5 - z_4) = 0 \quad (3.42)$$

$$(r_{xy51} - r_{xy41})^2 + (z_5 - z_4)^2 = d_5^2 \quad (3.43)$$

$$(r_{xy41} - r_{xy31})^2 + (z_4 - z_3)^2 = l_4^2 \quad (3.44)$$

ต่อมาเมื่อทำการแทนค่าสมการที่ (3.39) ลงในสมการที่ (3.43) จะได้ตั้งสมการที่ (3.45), (3.46),

(3.47) และ (3.48) ตามลำดับ

$$\left(r_{xy51} - \frac{c_4 - c_3 z_4}{c_1 \cos(\theta_1) + c_2 \sin(\theta_1)}\right)^2 + (z_5 - z_4)^2 = d_5^2 \quad (3.45)$$

$$r_{xy51}^2 - 2r_{xy51} \left(\frac{c_4 - c_3 z_4}{c_1 \cos(\theta_1) + c_2 \sin(\theta_1)}\right) + \left(\frac{c_4 - c_3 z_4}{c_1 \cos(\theta_1) + c_2 \sin(\theta_1)}\right)^2 + z_5^2 - 2z_5 z_4 + z_4^2 = d_5^2 \quad (3.46)$$

$$\begin{aligned} r_{xy51}^2 - 2r_{xy51} \left(\frac{c_4 - c_3 z_4}{c_1 \cos(\theta_1) + c_2 \sin(\theta_1)}\right) + \frac{c_4^2}{(c_1 \cos(\theta_1) + c_2 \sin(\theta_1))^2} \\ - \frac{2c_4 c_3 z_4}{(c_1 \cos(\theta_1) + c_2 \sin(\theta_1))^2} + \frac{c_3^2 z_4^2}{(c_1 \cos(\theta_1) + c_2 \sin(\theta_1))^2} + z_5^2 - 2z_5 z_4 + z_4^2 = d_5^2 \end{aligned} \quad (3.47)$$

$$\begin{aligned} \left[ \frac{c_3^2}{(c_1 \cos(\theta_1) + c_2 \sin(\theta_1))^2} + 1 \right] z_4^2 + \left[ \frac{2r_{xy51} c_3}{c_1 \cos(\theta_1) + c_2 \sin(\theta_1)} - \frac{2c_4 c_3}{(c_1 \cos(\theta_1) + c_2 \sin(\theta_1))^2} - 2z_5 \right] z_4 \\ + \left( r_{xy51}^2 - \frac{2r_{xy51} c_4}{c_1 \cos(\theta_1) + c_2 \sin(\theta_1)} + \frac{c_4^2}{(c_1 \cos(\theta_1) + c_2 \sin(\theta_1))^2} + z_5^2 - d_5^2 \right) = 0 \end{aligned} \quad (3.48)$$

เมื่อกำหนดให้



$$u_1 = \left[ \frac{c_3^2}{(c_1 \cos(\theta_1) + c_2 \sin(\theta_1))^2} + 1 \right]$$

$$v_1 = \left[ \frac{2r_{xy51}c_3}{c_1 \cos(\theta_1) + c_2 \sin(\theta_1)} - \frac{2c_4c_3}{(c_1 \cos(\theta_1) + c_2 \sin(\theta_1))^2} - 2z_5 \right]$$

$$w_1 = \left[ r_{xy51}^2 - \frac{2r_{xy51}c_4}{c_1 \cos(\theta_1) + c_2 \sin(\theta_1)} + \frac{c_4^2}{(c_1 \cos(\theta_1) + c_2 \sin(\theta_1))^2} + z_5^2 - d_5^2 \right]$$

เมื่อแทนลงในสมการที่ (3.48) จะได้สมการที่ (3.49) และสามารถหาค่า  $z_4$  ได้ดัง  
ในสมการที่ (3.50)

$$u_1 z_4^2 + v_1 z_4 + w_1 = 0 \quad (3.49)$$

$$z_4 = \frac{-v_1 \pm \sqrt{v_1^2 - 4u_1 w_1}}{2u_1} \quad (3.50)$$

หลังจากสมการที่ (3.50) ทำให้สามารถหาพิกัดจุด  $O_4$  โดยแทนค่าของ  $z_4$  ใน  
สมการที่ (3.50) ลงในสมการที่ (3.39) ทำให้สามารถหาค่า  $r_{xy41}$  และต่อมาแทนค่า  $r_{xy41}$   
ลงในสมการที่ (3.34) และ (3.35) ซึ่งทำให้ทราบค่า  $x_4$  และ  $y_4$  จากนั้นพิจารณา  
สมการที่ (3.44) ต่อจะได้ตั้งสมการที่ (3.51)

$$r_{xy41}^2 - 2r_{xy41}r_{xy31} + r_{xy31}^2 + (z_4 - z_3)^2 = l_4^2 \quad (3.51)$$

ต่อมาทำการแทนค่าสมการที่ (3.42) ลงในสมการที่ (3.51) จะได้ตั้งสมการ  
ที่ (3.52), (3.53) และ (3.54) ตามลำดับ

$$r_{xy41}^2 - 2r_{xy41}r_{xy31} + r_{xy31}^2 + \left( \frac{(r_{xy31} - r_{xy41})(r_{xy51} - r_{xy41})}{(z_5 - z_4)} \right)^2 - l_4^2 = 0 \quad (3.52)$$

$$r_{xy31}^2 - 2r_{xy41}r_{xy31} + \left( \frac{(r_{xy31}^2 - 2r_{xy31}r_{xy41} + r_{xy41}^2)(r_{xy51} - r_{xy41})^2}{(z_5 - z_4)^2} \right) + r_{xy41}^2 - l_4^2 = 0 \quad (3.53)$$

$$r_{xy31}^2 \left( 1 + \frac{(r_{xy51} - r_{xy41})^2}{(z_5 - z_4)^2} \right) - 2r_{xy41}r_{xy31} \left( 1 + \frac{(r_{xy51} - r_{xy41})^2}{(z_5 - z_4)^2} \right) + r_{xy41}^2 \left( 1 + \frac{(r_{xy51} - r_{xy41})^2}{(z_5 - z_4)^2} \right) - l_4^2 = 0 \quad (3.54)$$

เมื่อกำหนดให้

$$u_2 = \left( 1 + \frac{(r_{xy51} - r_{xy41})^2}{(z_5 - z_4)^2} \right)$$

$$v_2 = -2r_{xy41} \left( 1 + \frac{(r_{xy51} - r_{xy41})^2}{(z_5 - z_4)^2} \right)$$

$$w_2 = r_{xy41}^2 \left( 1 + \frac{(r_{xy51} - r_{xy41})^2}{(z_5 - z_4)^2} \right) - l_4^2$$

สมการที่ (3.54) จึงกลายเป็นสมการที่ (3.55) และ

(3.56) ตามลำดับ

$$u_2 r_{xy31}^2 + v_2 r_{xy31} + w_2 = 0 \quad (3.55)$$

$$r_{xy31} = \frac{-v_2 \pm \sqrt{v_2^2 - 4u_2 w_2}}{2u_2} \quad (3.56)$$

และจากสมการที่ (3.42) ทำการจัดรูปใหม่จะได้ดังสมการที่ (3.57) และ (3.58) ตามลำดับ

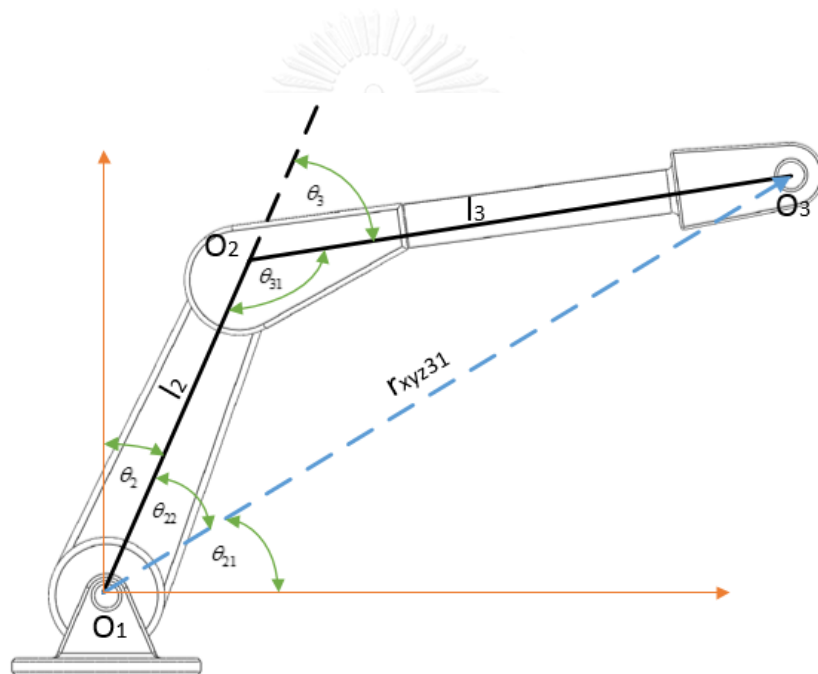
$$(z_3 - z_4)(z_5 - z_4) = -(r_{xy31} - r_{xy41})(r_{xy51} - r_{xy41})$$

(3.57)

$$z_3 = -\frac{(r_{xy31} - r_{xy41})(r_{xy51} - r_{xy41})}{(z_5 - z_4)} + z_4 \quad (3.58)$$

หลังจากสมการที่

(3.56) และ (3.58) ทำให้สามารถทราบค่าพิกัดจุด  $O_3$  ต่อมาจึงพิจารณาความสัมพันธ์  $O_1, O_2$  และ  $O_3$  ในรูปภาพที่ 3.7



รูปภาพที่ 3.7 ความสัมพันธ์  $O_1, O_2$  และ  $O_3$

เมื่อพิจารณารูปภาพที่ 3.7 จะเห็นได้ถึงความสัมพันธ์  $O_1, O_2$  และ  $O_3$  ทำให้สามารถหาค่า  $r_{xyz31}$  ได้จากสมการที่ (3.59)

$$r_{xyz31} = \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2 + (z_3 - z_1)^2} \quad (3.59)$$

จากกฎของโคไซน์นั้นทำให้สามารถพิจารณาหาค่าของ  $\theta_2$  ได้จากการพิจารณาสมการที่ (3.60), (3.61),

(3.62) และ

(3.63) ตามลำดับทำให้สามารถทราบค่า  $\theta_2$  ได้จากสมการที่ (3.64)

$$l_3^2 = l_2^2 + r_{xyz31}^2 - 2l_2 r_{xyz31} \cos(\theta_{22}) \quad (3.60)$$

$$\cos(\theta_{22}) = \frac{l_2^2 + r_{xyz31}^2 - l_3^2}{2l_2 r_{xyz31}} \quad (3.61)$$

$$\theta_{22} = \text{atan2}(\sqrt{1 - \cos^2(\theta_{22})}, \cos(\theta_{22})) \quad (3.62)$$

$$\theta_{21} = \text{atan2}(z_3 - z_1, \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2}) \quad (3.63)$$

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2} - \theta_{21} - \theta_{22} \quad (3.64)$$

ตอนนี้ทำให้สามารถหาค่าพิกัดจุด  $O_2$  จากสมการที่ (3.65)

$$O_2 = \begin{pmatrix} l_2 \sin(\theta_2) \cos(\theta_1) \\ l_2 \sin(\theta_2) \sin(\theta_1) \\ l_2 \cos(\theta_2) + d_1 \end{pmatrix} \quad (3.65)$$

จากกฎของโคไซน์นั้นทำให้สามารถพิจารณาหาค่าของ  $\theta_3$  ได้จากการพิจารณาสมการที่ (3.66), (3.67) และ

(3.68) ตามลำดับทำให้สามารถทราบค่า  $\theta_3$  ได้จากสมการที่ (3.69)

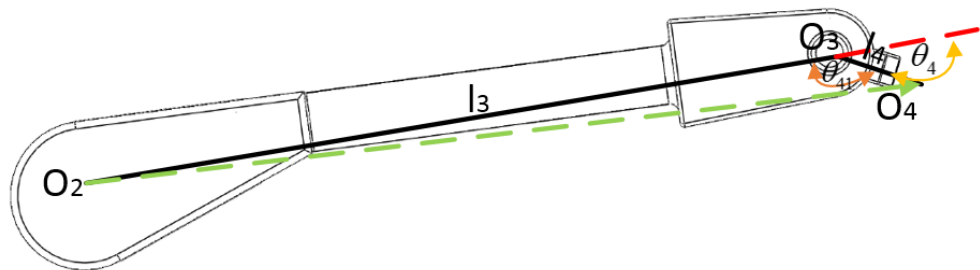
$$r_{xyz31}^2 = l_2^2 + l_3^2 - 2l_2l_3 \cos(\theta_{31}) \quad (3.66)$$

$$\cos(\theta_{31}) = \frac{l_2^2 + l_3^2 - r_{xyz31}^2}{2l_2l_3} \quad (3.67)$$

$$\theta_{31} = \text{atan2}(\sqrt{1 - \cos^2(\theta_{31})}, \cos(\theta_{31})) \quad (3.68)$$

$$\theta_3 = \pi - \theta_{31} \quad (3.69)$$

ต่อมาพิจารณารูปภาพที่ 3.8 ซึ่งจะเห็นได้ถึงความสัมพันธ์ระหว่าง  $O_2$ ,  $O_3$  และ  $O_4$



รูปภาพที่ 3.8 ความสัมพันธ์  $O_2$ ,  $O_3$  และ  $O_4$

จากการพิจารณารูปภาพที่ 3.8 ทำให้สามารถพิจารณาหาค่า  $\theta_4$  จากสมการที่ (3.70),(3.71),(3.72),(3.73) และ (3.74)

$$r_{xyz42} = \sqrt{(x_4 - x_2)^2 + (y_4 - y_2)^2 + (z_4 - z_2)^2} \quad (3.70)$$

$$r_{xyz42}^2 = l_3^2 + l_4^2 - 2l_3l_4 \cos(\theta_{41}) \quad (3.71)$$

$$\cos(\theta_{41}) = \frac{l_3^2 + l_4^2 - r_{xyz42}^2}{2l_3l_4} \quad (3.72)$$

$$\theta_{41} = \text{atan2}(\sqrt{1 - \cos^2(\theta_{41})}, \cos(\theta_{41})) \quad (3.73)$$

$$\theta_4 = \pi - \theta_{41} \quad (3.74)$$

ในส่วนต่อไปจะทำการพิจารณาหาค่า  $\theta_5$  และ  $\theta_6$  จาก  $R_7^5$  เมื่อ  $R_7^5 = (R_4^0)^T * R$  โดยที่เมทริกซ์  $R$  คือเมทริกซ์ที่แทนส่วนของท่าทางการหมุนที่ปลายแขนกลหุ่นยนต์โดยสามารถพิจารณารูปแบบของเมทริกซ์ได้จากเมทริกซ์ที่ (3.76) และสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ของท่าทางของข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์จากข้อต่อที่ 1 ถึง 4 ได้จากสมการที่ (3.76)

$$R = \begin{pmatrix} \cos(\alpha)\cos(\beta) & \cos(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma) - \sin(\alpha)\cos(\gamma) & \cos(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma) + \sin(\alpha)\sin(\gamma) \\ \sin(\alpha)\cos(\beta) & \sin(\alpha)\sin(\beta)\sin(\gamma) + \cos(\alpha)\cos(\gamma) & \sin(\alpha)\sin(\beta)\cos(\gamma) - \cos(\alpha)\sin(\gamma) \\ -\sin(\beta) & \cos(\beta)\sin(\gamma) & \cos(\beta)\cos(\gamma) \end{pmatrix} \quad (3.75)$$

$$R_4^0 = R_1^0 * R_2^1 * R_3^2 * R_4^3 \quad (3.76)$$

ต่อมาทำพิจารณาหาค่าเมทริกซ์  $R_1^0, R_2^1, R_3^2, R_4^3$  จากเมทริกซ์ที่ (3.77), (3.78), (3.79) และ (3.80) โดยใช้ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 3.1 และค่า  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$

$$R_1^0 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & -\cos(\alpha_1)\sin(\theta_1) & \sin(\alpha_1)\sin(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) & \cos(\alpha_1)\cos(\theta_1) & -\sin(\alpha_1)\cos(\theta_1) \\ 0 & \sin(\alpha_1) & \cos(\alpha_1) \end{pmatrix} \quad (3.77)$$

$$R_2^1 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_2) & -\cos(\alpha_2)\sin(\theta_2) & \sin(\alpha_2)\sin(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\alpha_2)\cos(\theta_2) & -\sin(\alpha_2)\cos(\theta_2) \\ 0 & \sin(\alpha_2) & \cos(\alpha_2) \end{pmatrix} \quad (3.78)$$

$$R_3^2 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_3) & -\cos(\alpha_3)\sin(\theta_3) & \sin(\alpha_3)\sin(\theta_3) \\ \sin(\theta_3) & \cos(\alpha_3)\cos(\theta_3) & -\sin(\alpha_3)\cos(\theta_3) \\ 0 & \sin(\alpha_3) & \cos(\alpha_3) \end{pmatrix} \quad (3.79)$$

$$R_4^3 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_4) & -\cos(\alpha_4)\sin(\theta_4) & \sin(\alpha_4)\sin(\theta_4) \\ \sin(\theta_4) & \cos(\alpha_4)\cos(\theta_4) & -\sin(\alpha_4)\cos(\theta_4) \\ 0 & \sin(\alpha_4) & \cos(\alpha_4) \end{pmatrix} \quad (3.80)$$

จากเมทริกซ์ที่ (3.77), (3.78), (3.79) และ (3.80) ทำให้สามารถหาค่า  $R$  และ  $R_4^0$  ในเมทริกซ์ที่

(3.75) และ (3.76) จึงทำให้สามารถหาค่า  $R_7^5$  ได้ ต่อมาจึงทำการพิจารณาเมทริกซ์

ที่

$$(3.81)$$

$$R_7^5 = \begin{pmatrix} \cos(\theta_5)\cos(\theta_6)\cos(\theta_7) - \sin(\theta_5)\sin(\theta_7) & \cos(\theta_5)\sin(\theta_6) & \cos(\theta_5)\cos(\theta_6)\sin(\theta_7) + \sin(\theta_5)\cos(\theta_7) \\ \sin(\theta_5)\cos(\theta_6)\cos(\theta_7) + \cos(\theta_5)\sin(\theta_7) & \sin(\theta_5)\sin(\theta_6) & \sin(\theta_5)\cos(\theta_6)\sin(\theta_7) - \cos(\theta_5)\cos(\theta_7) \\ -\sin(\theta_6)\cos(\theta_7) & \cos(\theta_6) & -\sin(\theta_6)\sin(\theta_7) \end{pmatrix} \quad (3.81)$$

เมื่อพิจารณาเมทริกซ์ที่

(3.81) ทำให้สามารถทราบค่าของ  $\theta_5$  และ  $\theta_6$  จากสมการที่ (3.82) และ (3.83) ตามลำดับ

$$\theta_3 = \text{atan2}(R_7^5(2, 2), R_7^5(1, 2)) + \frac{\pi}{2} \quad (3.82)$$

$$\theta_6 = \text{atan2}(\sqrt{1 - (R_7^5(3, 2))^2}, R_7^5(3, 2)) - \frac{\pi}{2} \quad (3.83)$$

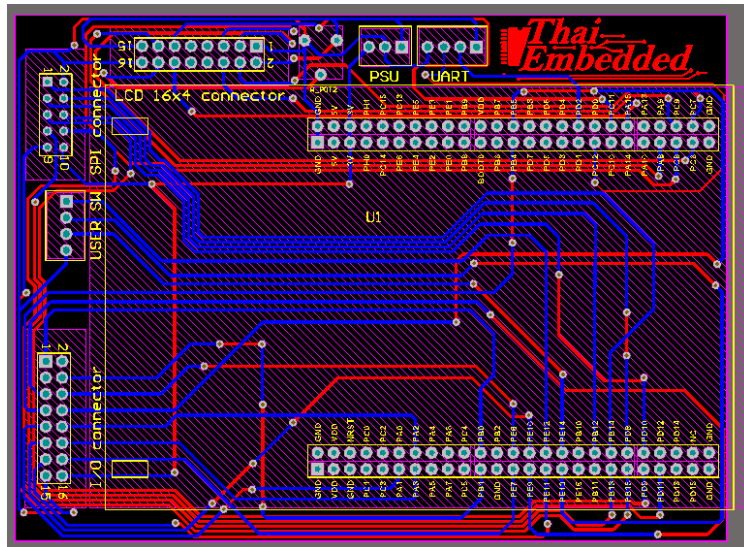
### 3.3 การออกแบบฮาร์ดแวร์

การออกแบบในส่วนของฮาร์ดแวร์ในงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็น 5 ส่วนใหญ่ๆ ได้แก่ ส่วนของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ส่วนการออกแบบการเปิดปิดระบบวาล์วไฮดรอลิก ส่วนการออกแบบติดต่อสื่อสารผ่านพอร์ทอนุกรม ส่วนของการอ่านค่าอนาล็อกเพื่ออ่านค่ามุมมองของแขนกลหุ่นยนต์ ส่วนของการส่งค่าอนาล็อกเพื่อขับเคลื่อนการเคลื่อนที่เชิงมุมของแขนกลหุ่นยนต์ และส่วนสุดท้ายแหล่งจ่ายพลังงาน

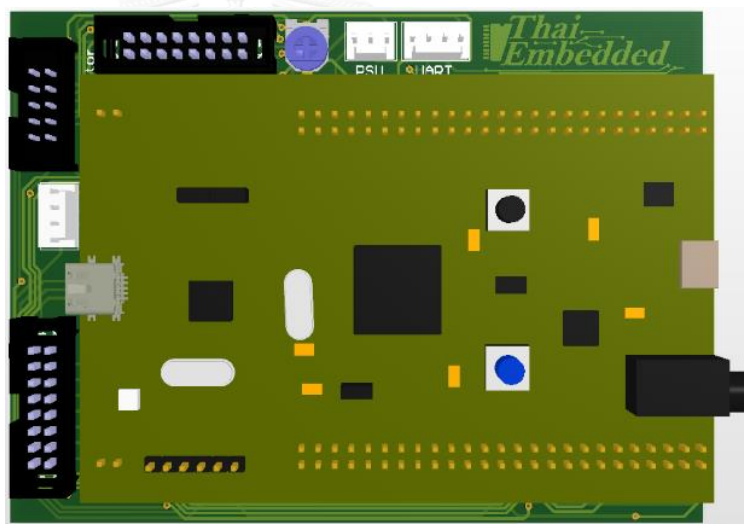
#### 3.3.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 Discovery แล้วทำการลงเฟิร์มแวร์ NETMF ซึ่งทำให้สามารถทดสอบและปรับใช้ตัวซอฟต์แวร์ได้ด้วยภาษา C# โดยโปรแกรม Microsoft Visual Studio ได้ และในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบลายวงจรเพื่อเชื่อมต่อกับแผงวงจรในส่วนอื่นๆ เช่น ส่วนอ่านค่าอนาล็อก การสั่งคำสั่งเปิดปิดแก่ระบบวาล์วไฮดรอลิก เป็นต้น





รูปภาพที่ 3.9 ลายแผ่นปริ้นวงจรในรูปแบบ 2 มิติ



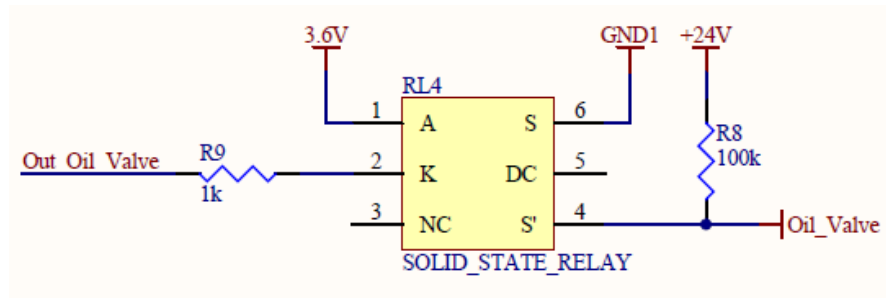
รูปภาพที่ 3.10 ลายแผ่นปริ้นวงจรในรูปแบบ 3 มิติ

จากรูปภาพที่ 3.9 และ รูปภาพที่ 3.10 เป็นลายวงจรที่ได้ออกแบบเพื่อใช้ในงานวิจัยนี้ บนลายวงจรจะมีคอนเน็กเตอร์ที่เป็นตัวเชื่อมต่อกับส่วนของวงจรควบคุมและอ่านค่าในส่วนต่างๆของแขนกลหุ่นยนต์ รวมไปถึงส่วนที่ติดต่อกับหน้าจอ LCD 16x4 ที่ใช้ในการแสดงสถานะต่างๆของชุดควบคุม และแหล่งจ่ายพลังงานอีกด้วย

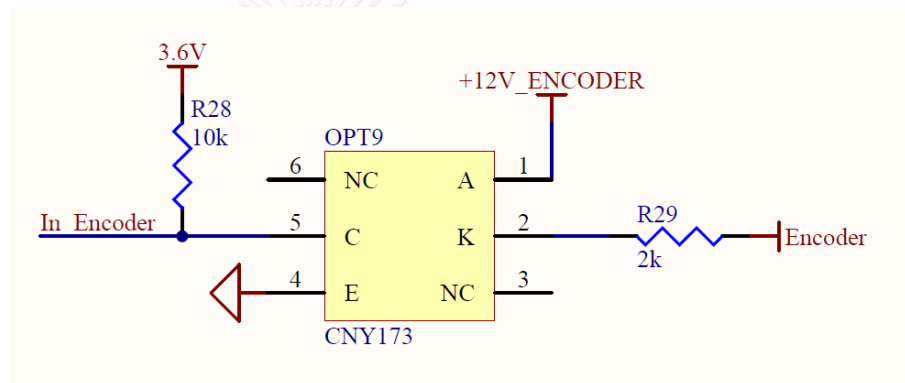
### 3.3.2 การออกแบบการเปิดปิดระบบวาล์วไฮดรอลิก

ในการออกแบบการเปิดปิดระบบวาล์วไฮดรอลิกในงานวิจัยนี้ ได้ออกแบบให้การสั่งการควบคุมโดยการแยกกราวด์ทางไฟฟ้าแยกออกจากกันโดยจะใช้ไอซีอ็อปโตไอโซเรเตอร์เมื่อต้องการสั่งการหรืออ่านค่าที่ระดับแรงดันไฟฟ้าต่ำ(น้อยกว่าหรือเท่ากับ 12 โวลต์)และโซ

ลิตสเตทรีเลย์เมื่อสั่งการที่ระดับแรงดันไฟฟ้าสูง(มากกว่าหรือเท่ากับ 24 โวลต์)เป็นตัวกลางในการแยก แต่จะใช้การส่งผ่านข้อมูลทางแสงแทน สามารถดูภาพวงจรทั้งสองได้จากรูปภาพที่ 3.11 และ รูปภาพที่ 3.12



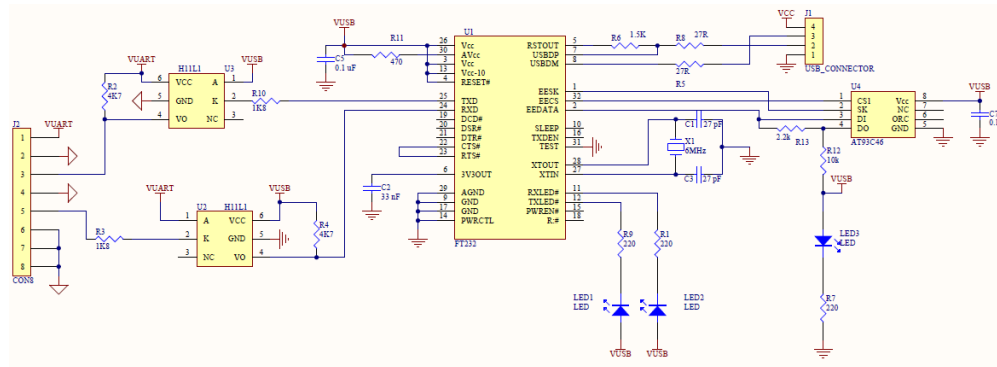
รูปภาพที่ 3.11 วงจรโซลิตสเตทรีเลย์



รูปภาพที่ 3.12 วงจรออปโตไอโซเรเตอร์

### 3.3.3 การออกแบบติดต่อสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรม

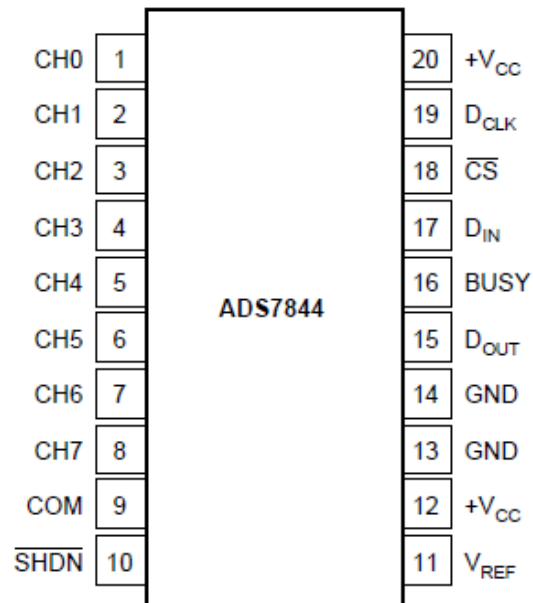
ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบการสื่อสารผ่านพอร์ตอนุกรมโดยกำหนดให้กราวด์ทางไฟฟ้าแยกออกจากกันเพื่อความปลอดภัยระหว่างที่ตัวควบคุมทำการติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ หน้าที่ของพอร์ตสื่อสารอนุกรมนี้จะทำหน้าที่คอยส่งค่าตำแหน่งเชิงมุมของแขนกลหุ่นยนต์กลับมาที่หน้าจคอมพิวเตอร์เพื่อให้โมเดลสามมิติที่โชว์บนหน้าจคอมพิวเตอร์นั้นเคลื่อนที่ตามกับค่าที่อ่านมาได้ และนอกจากนี้พอร์ตอนุกรมยังคอยรับค่าคำสั่งจากหน้าจคอมพิวเตอร์ เพื่อส่งชุดคำสั่งมาให้ที่ตัวควบคุมแขนกลหุ่นยนต์สั่งให้แขนกลหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปตามคำสั่งที่ผู้บังคับหุ่นยนต์นั้นสั่งการ อีกทั้งยังรับคำสั่งจากผู้ควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ให้สั่งเปิดปิดวาล์วไฮดรอลิกที่ตัวแขนกลหุ่นยนต์ ตลอดจนส่งค่าความเร็วของสายพานกลับมาให้คอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลอีกด้วย โดยพอร์ตอนุกรมนี้จะถูกแปลงเป็น USB เพื่อให้สามารถติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ได้สะดวกโดยใช้ไอซี FT232 ซึ่งสามารถดูลายวงจรได้ดังรูปภาพที่ 3.13



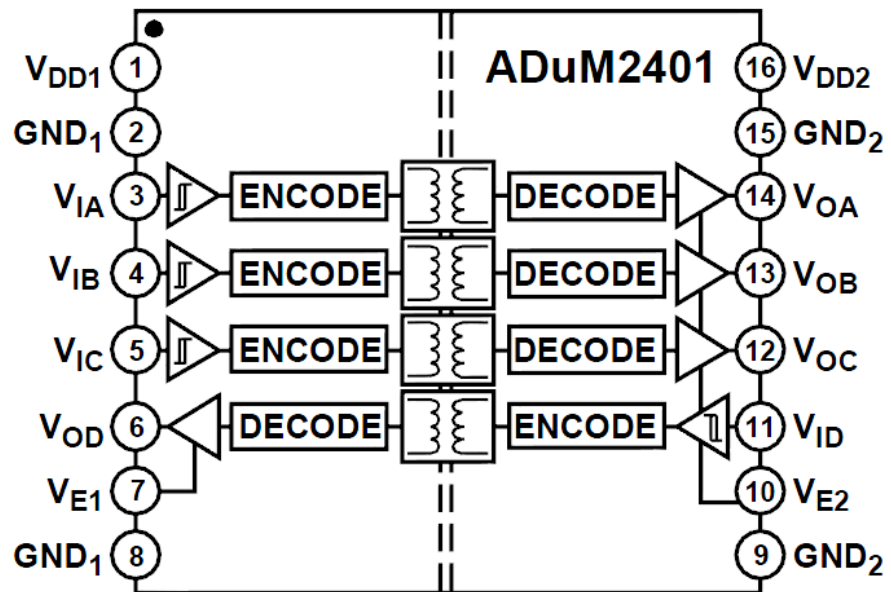
รูปภาพที่ 3.13 วงจรติดต่อสื่อสารแบบพอร์ตอนุกรมแปลงเป็น USB

### 3.3.4 การอ่านค่าอนาล็อกเพื่ออ่านค่ามุมมองขาของแขนกลหุ่นยนต์

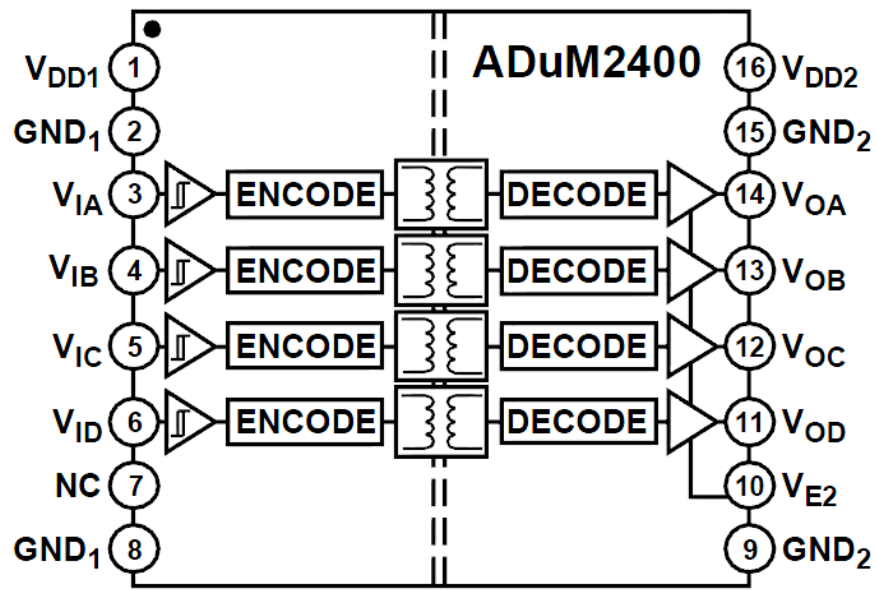
การออกแบบการอ่านค่าอนาล็อกเพื่ออ่านค่ามุมมองขาในงานวิจัยนี้จะใช้หลักการแยกกราวด์ทางไฟฟ้าแยกออกจากกันระหว่างชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์กับตัวแขนกลหุ่นยนต์ งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ไอซีเบอร์ ADS7844 ในรูปภาพที่ 3.14 ซึ่งเป็นไอซีที่สามารถอ่านค่าอนาล็อกได้มากถึง 8 ช่องซึ่งเพียงพอกับแขนกลหุ่นยนต์ที่มีแกนจุดหมุนที่ต้องการอ่านค่าอนาล็อกทั้งหมด 6 จุดหรือตามจำนวนแกนของแขนกลหุ่นยนต์นั่นเอง โดยเมื่ออ่านค่าอนาล็อกจากแขนกลหุ่นยนต์ได้แล้ว ไอซีเบอร์ ADS7844 จะส่งค่าผ่านทาง การติดต่อสื่อสารแบบ Serial Peripheral Interface (SPI) และส่งข้อมูลผ่านไอซี ADUM2401 ในรูปภาพที่ 3.15 เพื่อทำการแยกกราวด์ทางไฟฟ้าก่อนที่จะส่งข้อมูลจำนวนค่าอนาล็อกที่ถูกแปลงเป็นดิจิตอลจำนวน 12 บิตกลับมาให้ไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อทำการประมวลผลอีกครั้งหนึ่งในขณะเดียวกัน ไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะต้องส่งชุดคำสั่งเพื่อเลือกช่องที่จะทำการอ่านค่าอนาล็อกจากตัวแขนกลหุ่นยนต์ไปที่ไอซี ADS7844 เช่นกันโดยผ่านไอซี ADUM2400 ในรูปภาพที่ 3.16 เพื่อทำการแยกกราวด์ทางไฟฟ้าก่อนเช่นกัน สามารถดูแผนผังการอ่านค่าอนาล็อกได้จากรูปภาพที่ 3.17



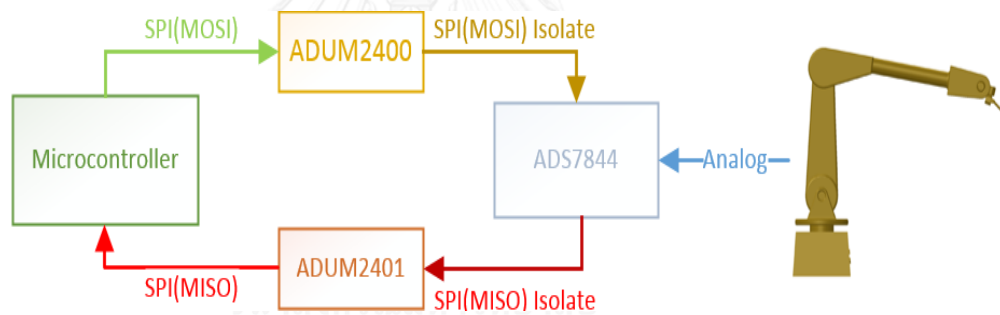
รูปภาพที่ 3.14 ไอซี ADS7844



รูปภาพที่ 3.15 ไอซี ADUM2401



รูปภาพที่ 3.16 ไอซี ADUM2400



รูปภาพที่ 3.17 แผนผังการอ่านค่าอนาล็อก

ซึ่งเมื่อทำการอ่านค่าอนาล็อกที่แปลงเป็นดิจิตอลจำนวน 12 บิตมาได้แล้วต่อมาจะทำการแปลงค่า 12 บิตนั้นให้กลายเป็นค่ามุมมองศา โดยสามารถสรุปการอ่านค่าอนาล็อกแล้วแปลงเป็นมุมมองศาต่างๆของแขนกลหุ่นยนต์ได้โดยใช้สมการเชิงเส้น (3.84) และสามารถสรุปการแปลงค่ามุมมองศาต่างได้ดัง

ตารางที่ 3.2

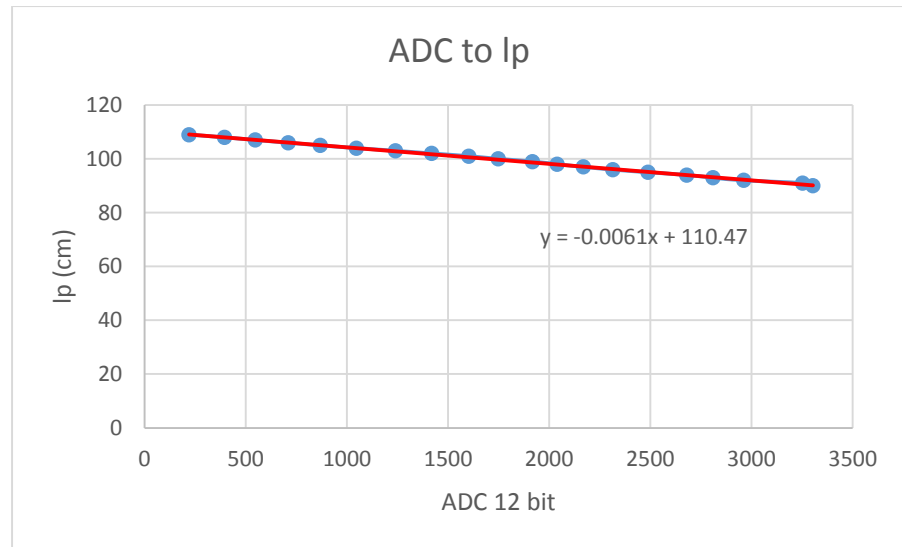
$$\theta_i = m_i(ADC)_i + c_i \tag{3.84}$$

ตารางที่ 3.2 สรุปการอ่านค่าอนาล็อกแล้วแปลงเป็นองศาของแขนกลหุ่นยนต์

$\theta_i$	$m_i$	$c_i$
1	$\frac{50}{(3875 - 1907)}$	-48.45020325032523
2	$\frac{-35 - 40}{(3862 - 310)}$	46.54560811
4	$\frac{105 - -105}{(3420 - 911)}$	-181.2495018
5	$\frac{-150 - 105}{(3250 - 810)}$	174.7131148
6	$\frac{-210 - 210}{(3137 - 783)}$	349.7026338

จาก

ตารางที่ 3.2 จะเห็นได้ว่า  $\theta_3$  นั้นไม่มีอยู่ในตาราง เนื่องจากการอ่านค่าอนาล็อกจากแขนกลหุ่นยนต์ในส่วนของมุม  $\theta_3$  นั้นไม่สามารถอ่านได้โดยตรงเพราะส่วนของตัวต้านทานปรับค่าได้ตามการหมุนไม่ได้มีการติดตั้งไว้แต่มีการติดตั้งไว้เป็นตัวต้านทานที่ปรับค่าความต้านทานตามระยะการหดย้ายี้ออก จึงทดสอบยี่ระยะแล้วทำการเก็บค่าบันทึกแล้วพล็อตเป็นกราฟได้ว่ารูปภาพที่ 3.18 แล้วทำการเพิ่มเส้นแนวโน้มเพื่อหาค่าการเชิงเส้นที่ใกล้เคียง

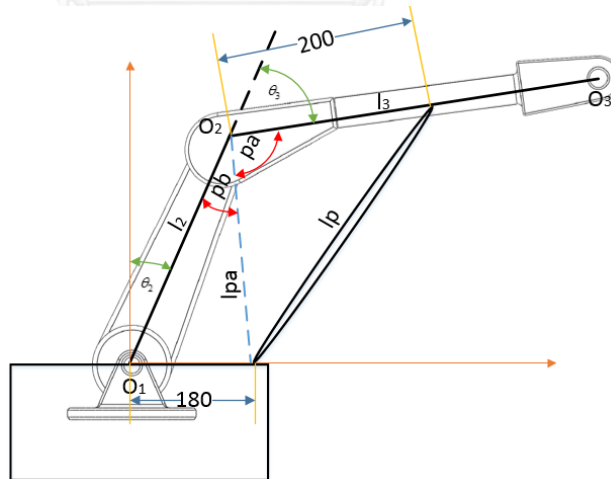


รูปภาพที่ 3.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอนาล็อกกับความยาว  $l_p$

โดยจากรูปภาพที่ 3.18 นั้น จะเห็นได้ว่าสมการเส้นแนวโน้มคือ

$$l_p = (-0.061 * ADC_3) + 1104.7 \quad (3.85)$$

จากนั้นสามารถพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง  $\theta_2$ ,  $l_p$  และ  $\theta_3$  ได้ดังรูปภาพที่ 3.19



รูปภาพที่ 3.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\theta_2$ ,  $l_p$  และ  $\theta_3$

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์จากรูปภาพที่ 3.19 แล้วจึงสามารถเขียนสมการจากความสัมพันธ์นี้ได้ดังสมการที่ (3.86)

$$l_{pa} = \sqrt{(1000 \cos(\theta_2) - 180)^2 + (1000 \sin(\theta_2))^2} \quad (3.86)$$

ต่อมาจึงทำการพิจารณาค่ามุมองศา  $p_a$  จะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$l_p^2 = l_{pa}^2 + 200^2 - 2(200)l_{pa} \cos(p_a) \quad (3.87)$$

$$\cos(p_a) = \frac{l_{pa}^2 + 200^2 - l_p^2}{400l_{pa}} \quad (3.88)$$

$$p_a = \text{atan2}(\sqrt{1 - \cos^2(p_a)}, \cos(p_a)) \quad (3.89)$$

จากนั้นจึงทำการพิจารณาค่ามุมองศา  $p_b$  จะได้ดังสมการต่อไปนี้

$$180^2 = 1000^2 + l_p^2 - 2(1000)l_{pa} \cos(p_b) \quad (3.90)$$

$$\cos(p_b) = \frac{1000^2 + l_p^2 - 180^2}{2000l_{pa}} \quad (3.91)$$

$$p_b = \text{atan2}(\sqrt{1 - \cos^2(p_b)}, \cos(p_b)) \quad (3.92)$$

จากตารางที่ 3.1 จะเห็น  $\theta_3$  ว่าเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\theta_3^* = \theta_3 + 90^\circ \quad (3.93)$$

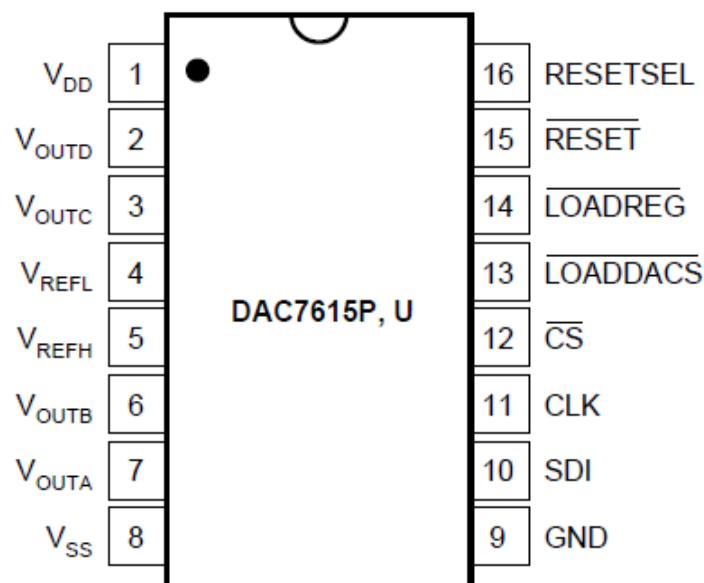
$$\theta_3 + 90^\circ = 180 - p_a - p_b \quad (3.94)$$

$$\theta_3 = 90 - p_a - p_b \quad (3.95)$$

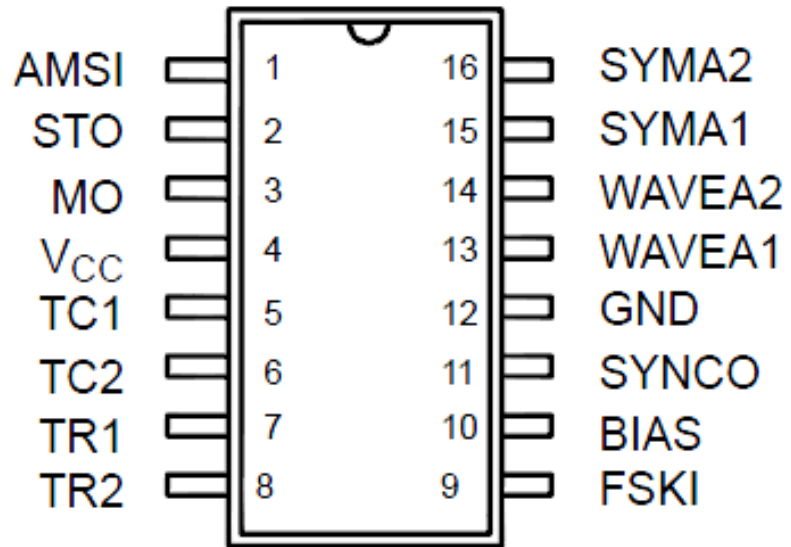


### 3.3.5 การส่งค่าอนาล็อกเพื่อขับเคลื่อนการเคลื่อนที่เชิงมุมของแขนกลหุ่นยนต์

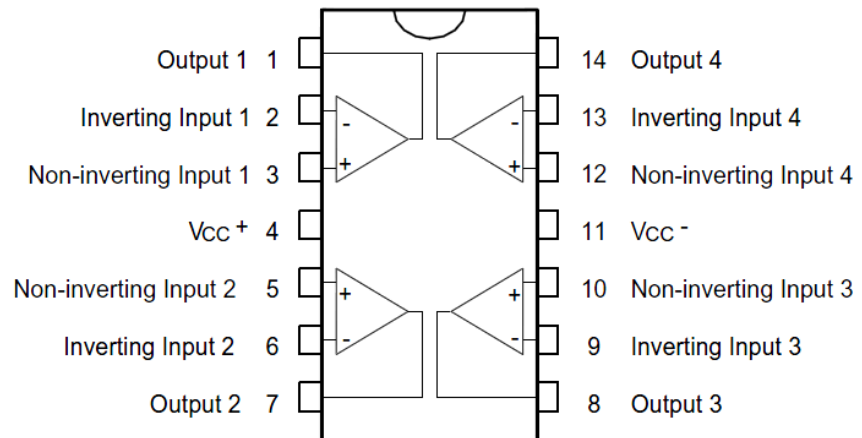
ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้นั้น จะใช้การส่งค่าสัญญาณไฟฟ้าที่เป็นอนาล็อกไซน์เวฟที่ถูกยกระดับสัญญาณโดยไฟฟ้ากระแสตรงออกไป เพื่อควบคุมวาล์วไฮดรอลิกให้ทำการขับเคลื่อนแขนกลหุ่นยนต์ในแต่ละแกนให้หมุนเคลื่อนที่โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ไอซี DAC7615 สามารถดูได้จากรูปภาพที่ 3.20 ซึ่งในการส่งค่าสัญญาณไฟฟ้าที่เป็นอนาล็อกออกไปนั้นจะสามารถติดต่อสื่อสารแบบ SPI เพื่อรับค่าคำสั่งจากไมโครคอนโทรลเลอร์ และก่อนที่จะส่งคำสั่งให้ไอซี DAC7615 นั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งชุดคำสั่งผ่านไอซี ADUM2400 เพื่อทำการแยกกราวด์ทางไฟฟ้าก่อนที่จะส่งข้อมูลที่เป็นจำนวนค่าข้อมูลอนาล็อกจำนวน 12 บิตไปสั่งงานให้ไอซี DAC7615 นั้นทำงาน ต่อมาจะให้ไอซีเบอร์ XR2206 ดูได้จาก รูปภาพที่ 3.21 ในการกำเนิดสัญญาณไซน์เวฟในความถี่ที่ประมาณ 162 เฮิร์ตซ์ ต่อมาจะนำสัญญาณอนาล็อกไฟฟ้ากระแสตรงจากไอซี DAC7615 มาร่วมกับสัญญาณไซน์เวฟจากไอซีเบอร์ XR2206 แล้วปรับอัตราขยายประมาณ 2.7 เท่า ด้วยออปแอมป์โดยใช้ไอซีเบอร์ LM2902 ดูได้จากรูปภาพที่ 3.22 ก่อนที่จะส่งไปควบคุมวาล์วไฮดรอลิกเพื่อควบคุมการหมุนในแต่ละแกนของแขนกลหุ่นยนต์ โดยสามารถดูแผนผังการส่งค่าอนาล็อกไปสั่งงานให้แขนกลหุ่นยนต์นั้นเคลื่อนที่ได้จาก รูปภาพที่ 3.23



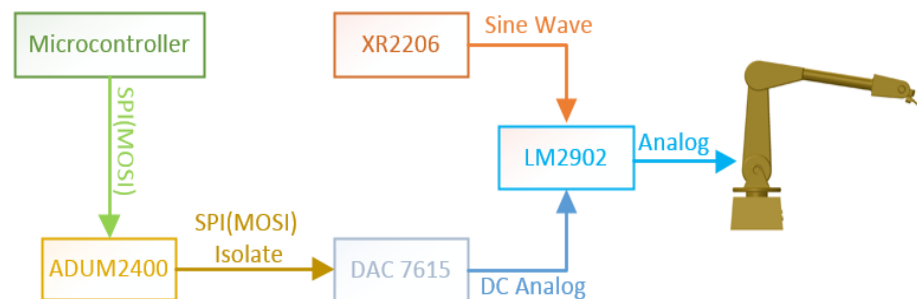
รูปภาพที่ 3.20 ไอซี DAC7615



รูปภาพที่ 3.21 ไอซี XR2206



รูปภาพที่ 3.22 ไอซี LM2902



รูปภาพที่ 3.23 แผนผังการส่งค่าอนาล็อก

การทำงานของวาล์วไฮดรอลิคนั้นจะมีค่าระดับแรงดันไฟฟ้าในระดับหนึ่งจึงจะเริ่มสามารถทำให้ข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์นั้นเริ่มหมุนไปตามทิศทางต่างๆโดยหากระดับแรงดันนั้นมากขึ้นก็จะส่งผลให้ข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์นั้นหมุนไปในทิศทางนั้นเร็วขึ้นโดยสามารถสรุปทิศทางและระดับแรงดันไฟฟ้าในจำนวน 12 บิตโดยมีมุมมองจากทางด้านหน้าของแขนกลหุ่นยนต์ได้ดังตารางที่ 3.3

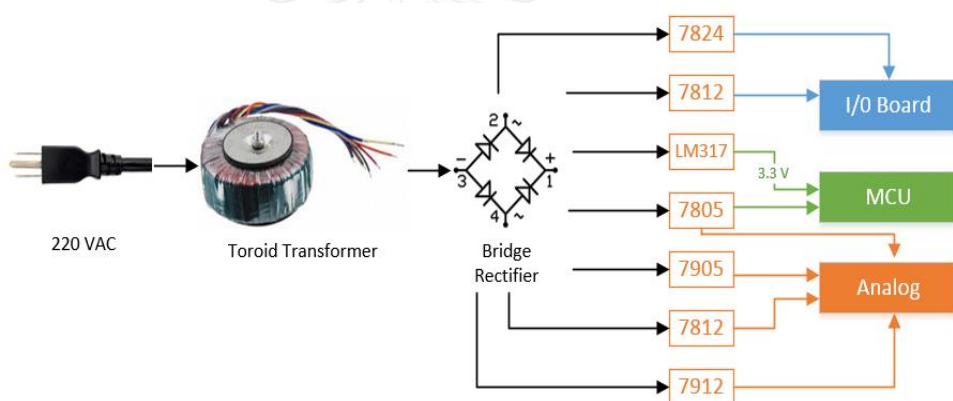
ตารางที่ 3.3 สรุประดับแรงดันไฟฟ้าในจำนวน 12 บิตและทิศทางการเคลื่อนที่

$\theta_i$	ทิศทาง	DAC 12 บิต
$\theta_1$	เริ่มหมุนทางซ้าย	2055
$\theta_1$	เริ่มหมุนทางขวา	2045
$\theta_1$	หยุดหมุน	2050
$\theta_2$	เริ่มก้มโค้งลง	2070
$\theta_2$	เริ่มเงยหน้าขึ้น	2055
$\theta_2$	หยุดหมุน	2065
$\theta_3$	เริ่มก้มโค้งลง	2010
$\theta_3$	เริ่มเงยหน้าขึ้น	2050
$\theta_3$	หยุดหมุน	2030
$\theta_4$	เริ่มก้มโค้งลง	2050
$\theta_4$	เริ่มเงยหน้าขึ้น	2078
$\theta_4$	หยุดหมุน	2064
$\theta_5$	เริ่มหมุนทางซ้าย	2040
$\theta_5$	เริ่มหมุนทางขวา	2030
$\theta_5$	หยุดหมุน	2045
$\theta_6$	เริ่มหมุนตามเข็มนาฬิกา	2038
$\theta_6$	เริ่มหมุนตามทวนเข็มนาฬิกา	2032
$\theta_6$	หยุดหมุน	2035

### 3.3.6 แหล่งจ่ายพลังงาน

ในการออกแบบแหล่งจ่ายพลังงานให้การชดเชยควบคุมแขนกลหุ่นยนต์นั้นจะเริ่มจากการรับพลังงานไฟฟ้ากระแสสลับ 220 VAC แล้วมาทำการลดระดับแรงดันไฟฟ้าลงผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าที่มีขดลวดลดระดับแรงดันหลายขดอย่างหม้อแปลงไฟฟ้าเทอร์รอยซึ่งทำการ

สามารถออกแบบแหล่งจ่ายพลังงานแบบแยกกราวด์ทางไฟฟ้าออกจากกันได้ทำให้เกิดความปลอดภัยกับคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการส่งคำสั่ง ตัวชุดแกนกลหุ่นยนต์ และตัวแกนกลหุ่นยนต์เอง หลังจากทีลดระดับแรงดันไฟฟ้าด้วยหม้อแปลงแล้วจึงทำการแปลงเป็นวงจรไฟฟ้ากระแสตรงด้วยวงจรเรียงกระแส (Bridge Rectifier) ก่อนที่จะส่งต่อให้ไอซีที่ทำหน้าที่ในการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าให้คงที่ (Regulator) อย่างตระกูล LM78xx หรือ LM79xx เพื่อควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางด้านบวกและทางด้านลบตามลำดับโดยที่ไอซี LM7824 และ LM7812 จะทำหน้าที่ควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าที่ 24 โวลต์ และ 12 โวลต์ตามลำดับเพื่อจ่ายให้แก่วงจรควบคุมการเปิดปิดระบบไฮดรอลิก ต่อมาใช้ไอซี LM317 และ LM7805 เพื่อควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าที่ 3.3 โวลต์ และ 5 โวลต์ตามลำดับก่อนส่งให้แก่วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์และในที่สุดท้ายใช้ไอซี LM7805, LM7905, LM7812, LM7912 เพื่อควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าที่ 5 โวลต์ -5 โวลต์ 12 โวลต์ และ -12 โวลต์ตามลำดับเพื่อส่งให้แก่วงจรอนาล็อก สามารถดูรูปแผนผังวงจรของแหล่งจ่ายพลังงานได้ในรูปภาพที่ 3.24



รูปภาพที่ 3.24 แผนผังแหล่งจ่ายพลังงาน

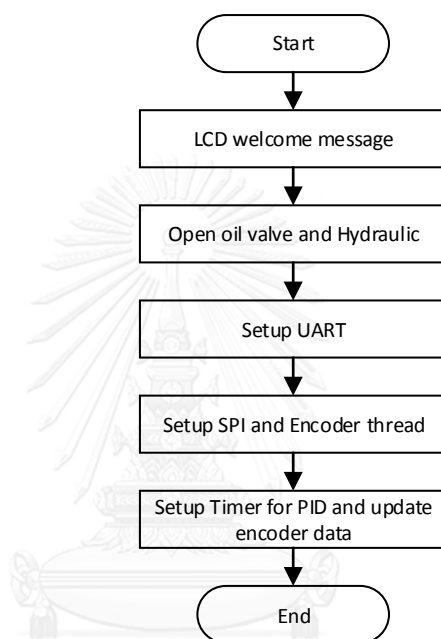
### 3.4 การออกแบบซอฟต์แวร์

ในส่วนการออกแบบซอฟต์แวร์ของชุดควบคุมแกนกลหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนดังนี้ ส่วนของฟังก์ชันหลัก (Main) ส่วนของด้านการจัดการกับ SPI ส่วนของการแซมปลิงพีไอดี (PID Sampling) และส่วนสุดท้ายส่วนของการอ่านค่าสัญญาณพัลส์จากเอ็นโคดเดอร์ (Pulse Encoder)

#### 3.4.1 ฟังก์ชันหลัก

การทำงานของฟังก์ชันหลักในงานวิจัยนี้จะเริ่มจากไมโครคอนโทรลเลอร์ส่งข้อความต้อนรับไปแสดงผลที่จอ LCD ต่อมาทำการสั่งให้วาล์วที่ควบคุมการทำงานของระบบไฮดรอลิกนั้นเปิดการทำงาน หลังจากนั้นทำการสั่งให้ระบบการติดต่อสื่อสาร UART นั้นทำงานเพื่อ

ติดต่อสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ ต่อมาจะทำการติดตั้งการทำงานให้กับการทำงานของส่วน SPI ในไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อทำการติดต่อสื่อสารกับแผงวงจรในส่วนที่เป็นอนาล็อกเพื่อให้สามารถอ่านค่าอนาล็อกจากแกนกลหุ่นยนต์และสั่งให้แกนกลหุ่นยนต์นั้นเคลื่อนที่ได้แล้วจึงทำการติดตั้งในส่วนของการอ่านค่าสัญญาณพัลส์จากเอ็นโคดเดอร์เพื่อหาความเร็วของวัตถุที่จะทำการพ่นสีเคลื่อนที่ตามสายพานและส่วนสุดท้ายทำการติดตั้งค่าฐานเวลาเพื่อทำการจับเวลาในการแชมป์ลิ่งค่าพีไอดีและอัปเดตค่าของสัญญาณพัลส์จากเอ็นโคดเดอร์โดยสามารถดูแผนผังการทำงานของฟังก์ชันหลักได้จากรูปภาพที่ 3.25

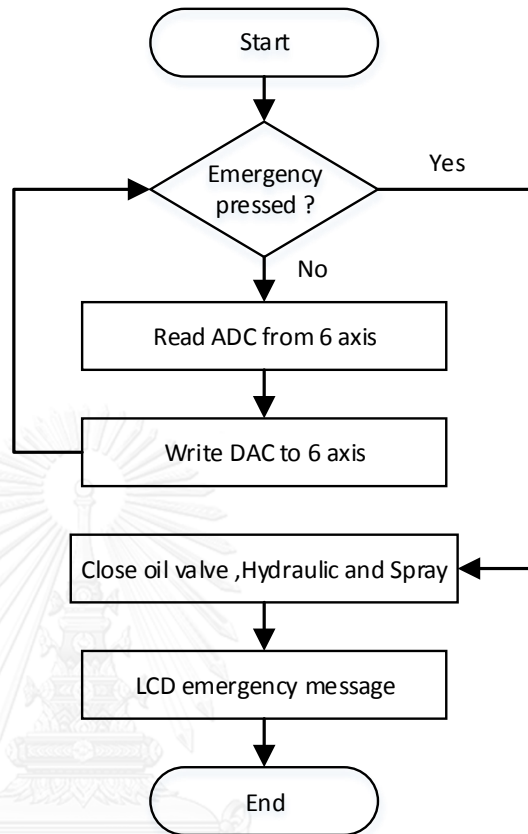


รูปภาพที่ 3.25 แผนผังการทำงานของฟังก์ชันหลัก

### 3.4.2 ฟังก์ชันการจัดการกับ SPI

การทำงานของฟังก์ชันการจัดการกับ SPI ในงานวิจัยนี้ จะเริ่มจากการตรวจสอบว่ามีการกดปุ่มฉุกเฉินหรือไม่ หากเกิดการกดปุ่มฉุกเฉินจะมีคำสั่งไปที่แผงวงจรควบคุมการเปิดปิดระบบวาล์วไฮดรอลิกเพื่อสั่งให้ปิดระบบการพ่นสีสเปรย์และปิดวาล์วไฮดรอลิกให้แกนกลหุ่นยนต์นั้นหยุดการทำงานต่อมาจะมีข้อความส่งไปแสดงผลที่หน้าจอ LCD ว่ามีการกดปุ่มฉุกเฉินแล้ว ในทางกลับกันหากไม่เกิดการกดปุ่มฉุกเฉินขึ้น ไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งชุดคำสั่งผ่านทางติดต่อสื่อสารแบบ SPI ไปที่แผงวงจรอนาล็อกเพื่ออ่านค่ามุมองศาการหมุนอนาล็อกจำนวน 12 บิตของแต่ละแกนของแกนกลหุ่นยนต์ เมื่อจัดการด้านการอ่านค่าอนาล็อกเรียบร้อยแล้วต่อมาไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งค่าดิจิทัลจำนวน 12 บิตผ่านทาง SPI อีกครั้งเพื่อให้แผงวงจรอนาล็อกแปลงค่าจากดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกเพื่อไปขับเคลื่อนวาล์วไฮดรอลิกที่ควบคุมการหมุนของแกนกลหุ่นยนต์ในแต่ละแกนให้เคลื่อนที่ไปในทิศทาง

ต่างๆ แล้วจะทำการบวกรวมแบบนี้ซ้ำเป็นลูปวนไปเรื่อยๆหากไม่มีการกดปุ่มฉุกเฉินเกิดขึ้นสามารถดูแผนผังการทำงานของฟังก์ชันการจัดการกับ SPI ได้จากรูปภาพที่ 3.26

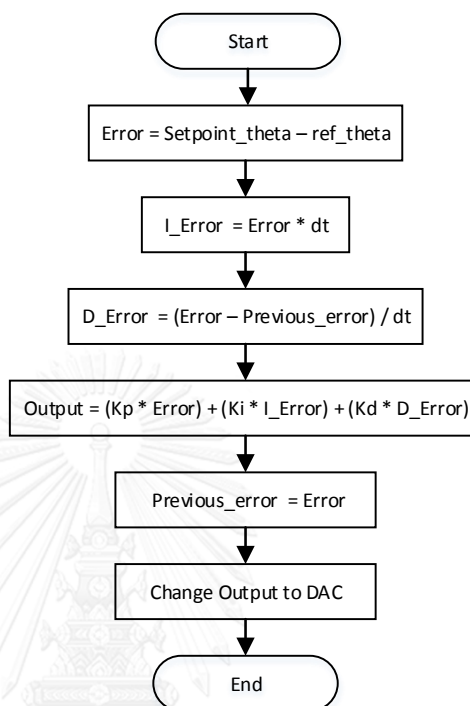


รูปภาพที่ 3.26 แผนผังการทำงานของฟังก์ชันการจัดการกับ SPI

### 3.4.3 ฟังก์ชันการแซมปลิ่งพีไอดี

ฟังก์ชันการทำงานของการแซมปลิ่งระบบควบคุมแบบลูปปิดพีไอดีในงานวิจัยนี้ จะมีหลักการทำงานดังนี้ เมื่อเกิดขัดจังหวะจากระบบฐานเวลาที่ตั้งไว้จะเข้าสู่กระบวนการจัดการในส่วนของการควบคุมระบบปิดพีไอดี เริ่มจากคำนวณค่าความผิดพลาด โดยการนำค่าที่ตั้งไว้ (Setpoint value) ไปลบกับค่าที่อ่านมาได้ (Reference value) ณ เวลาปัจจุบัน ต่อมาทำการหาค่าผิดพลาดไอ (I\_error) โดยการนำค่าผิดพลาดคูณกับค่าฐานเวลาในการแซมปลิ่ง (dt) หลังจากนั้นจึงทำการหาค่าผิดพลาดดี (D\_error) โดยการนำค่าผิดพลาด ณ ปัจจุบันลบด้วยค่าผิดพลาดก่อนหน้านี้ (Previous\_error) แล้วนำมาหารกับค่าฐานเวลาในการแซมปลิ่ง หลังจากนั้นทำการหาค่าเอาท์พุทโดยการนำค่าคงที่  $K_p$  คูณกับค่าความผิดพลาด แล้วนำมาบวกกับค่าคงที่  $K_i$  คูณกับค่าความผิดพลาดไอแล้วนำมาบวกกับค่าคงที่  $K_d$  คูณกับค่าความผิดพลาดดี แล้วนำไปบวกกับค่าที่ผลคูณทั้งหมด ต่อมาทำการเก็บค่าผิดพลาด ณ ปัจจุบันเก็บไว้ในตัวแปรค่าผิดพลาดก่อนหน้านี้ และในขั้นตอนสุดท้ายคือการเปลี่ยนค่า

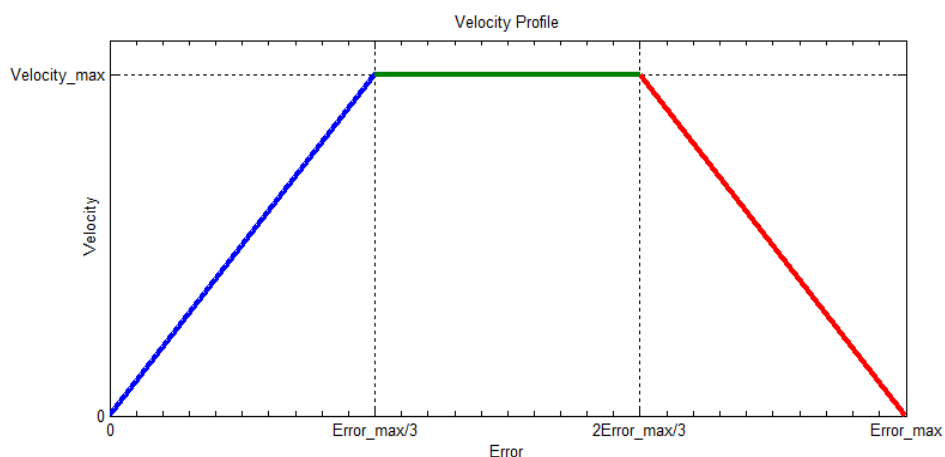
เอาท์พุทให้กลายเป็นค่าสัญญาณอนาล็อกจำนวน 12 บิตเพื่อส่งค่าออกไปควบคุมวาล์วไฮดรอลิกในแต่ละแกนของแขนกลหุ่นยนต์ สามารถดูแผนผังการทำงานของฟังก์ชันพีไอดีได้จากรูปภาพที่ 3.27



รูปภาพที่ 3.27 แผนผังการทำงานของฟังก์ชันการแซมปลิ่งพีไอดี

### 3.4.4 ฟังก์ชันการเพิ่ม-ลดค่าความเร็วของแขนกลหุ่นยนต์

ฟังก์ชันการเพิ่มลดค่าของแขนกลหุ่นยนต์แต่ละแกนในงานวิจัยนี้ จะเป็นการเพิ่มลดค่าความเร็วของแต่ละแกนของแขนกลหุ่นยนต์ในรูปแบบสี่เหลี่ยมคางหมู โดยจะพิจารณาจากค่าความผิดพลาดของตำแหน่งองศาของแต่ละแขนกลหุ่นยนต์ ซึ่งได้จากการพิจารณาค่าตำแหน่งองศาของแต่ละแขนกลหุ่นยนต์ที่ต้องการ นำมาลบด้วยค่าตำแหน่งองศาของแต่ละแขนกลหุ่นยนต์ ณ เวลาปัจจุบัน (Ref. Point) หลังจากนั้นจึงทำการพิจารณาโดยมีหลักการดังนี้ เมื่อค่าความผิดพลาดของตำแหน่งองศาของแต่ละแขนกลหุ่นยนต์ ณ เวลาปัจจุบัน แล้วมีค่าความผิดพลาดมากกว่าสองในสามของค่าความผิดพลาดสูงสุด ให้ทำการเพิ่มความเร็วและต่อมาเมื่อค่าความผิดพลาดน้อยกว่าสองในสามแต่มากกว่าหนึ่งในสามของค่าความผิดพลาดสูงสุด ให้สั่งการให้ความเร็วที่และเมื่อค่าความผิดพลาด ณ เวลาปัจจุบันน้อยกว่าหนึ่งในสามของค่าผิดพลาดสูงสุดให้สั่งการให้ลดความเร็วลงและหยุดเมื่อค่าความผิดพลาดเท่ากับศูนย์ โดยสามารถดูรูปแบบของการเพิ่มลดความเร็วโดยสรุปได้ดัง รูปภาพที่ 3.28

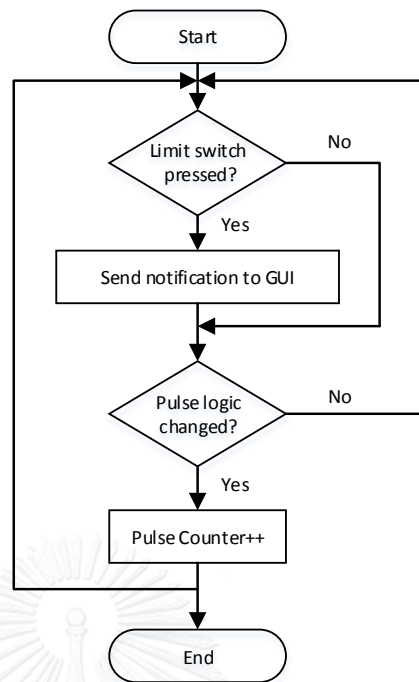


รูปภาพที่ 3.28 รูปแบบการเพิ่มลดความเร็วของแขนกลหุ่นยนต์

### 3.4.5 ฟังชันการอ่านค่าสัญญาณพัลส์จากเอ็นโคดเดอร์

ฟังชันการอ่านค่าสัญญาณพัลส์จากเอ็นโคดเดอร์ในงานวิจัยนี้ จะทำการอ่านค่าสัญญาณพัลส์จากเอ็นโคดเดอร์ที่ติดกับโซ่สายพานลำเลียงเพื่อวัดความเร็วของสายพานลำเลียงซึ่งกระบวนการทางซอฟต์แวร์นั้นจะเริ่มจาก ทำการตรวจสอบว่าวัตถุมีการกดที่ลิมิตสวิช (Limit Switch) หรือไม่ หากมีให้ส่งข้อความแจ้งเตือนไปที่หน้าจอแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ว่ามีวัตถุกำลังเคลื่อนที่มาแล้วให้แขนกลหุ่นยนต์นั้นเตรียมพร้อมในการพ่นสี แต่ถ้าหากไม่มีให้ข้ามไปในขั้นตอนต่อไป ต่อมาทำการตรวจสอบว่าสัญญาณพัลส์มีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ โดยหากสัญญาณพัลส์มีการเปลี่ยนแปลงนั้นแสดงว่าสายพานมีการเคลื่อนที่ ให้ทำการเพิ่มค่าเข้าไปในตัวแปรที่มีชื่อว่า counter แล้วจึงกลับไปเริ่มกระบวนการใหม่ แต่ถ้าสัญญาณพัลส์นั้นไม่มีการเปลี่ยนแปลง ให้กลับไปทำกระบวนการในตอนแรกใหม่ได้ในทันที โดยในฟังชันการทำงานของการทำงานของการอ่านค่าพัลส์จากเอ็นโคดเดอร์นี้ จะมีการขัดจังหวะจากฐานเวลาที่ได้ตั้งไว้ในฟังชันหลักเมื่อเกิดการขัดจังหวะขึ้น จะทำการอัปเดตค่าของตัวแปร counter ส่งให้ฟังชันการจัดการกับ SPI นั้นส่งข้อมูลมาให้กับหน้าจอคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงผลความเร็วของสายพานก่อนที่จะเคลียร์ค่าเป็นค่า 0 หรือเริ่มนับจำนวนสัญญาณพัลส์ใหม่อีกครั้งหนึ่ง โดยสามารถดูแผนผังการทำงานได้จากรูปภาพที่ 3.29





รูปภาพที่ 3.29 แผนผังการทำงานของฟังก์ชันอ่านค่าสัญญาณพัลส์จากเอ็นโคดเดอร์

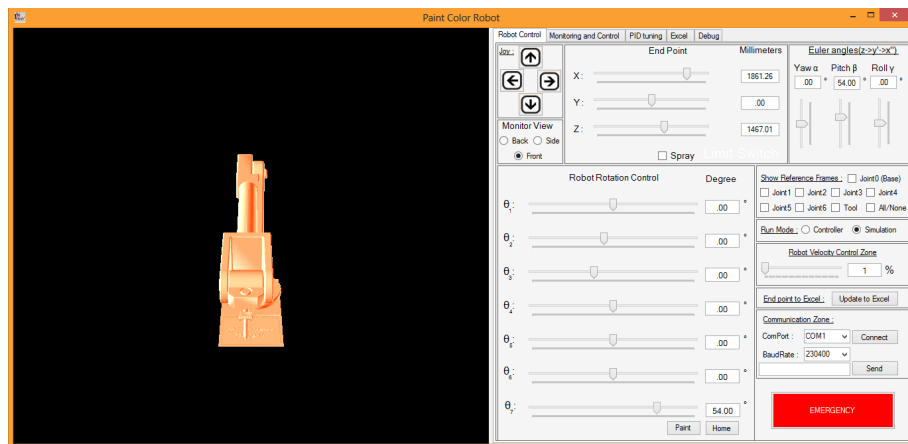
## บทที่ 4

### การออกแบบหน้าจอแสดงผลบนคอมพิวเตอร์

ในการออกแบบหน้าจอแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยนี้ ได้ออกแบบมาเพื่อให้ผู้ทำการควบคุมแขนกลหุ่นยนต์นั้นสามารถควบคุมการเคลื่อนไหวในแกนข้อต่อต่างๆของแขนกลหุ่นยนต์ได้ และสามารถสั่งงานให้แขนกลหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังจุดที่ต้องการได้อีกด้วย นอกจากนี้หน้าจอแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ออกแบบมาให้รองรับการทำงานด้วยกันสองโหมดด้วยกันคือ โหมดจำลองการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์ และโหมดการทำงานร่วมกับชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์

#### 4.1 โหมดจำลองการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์

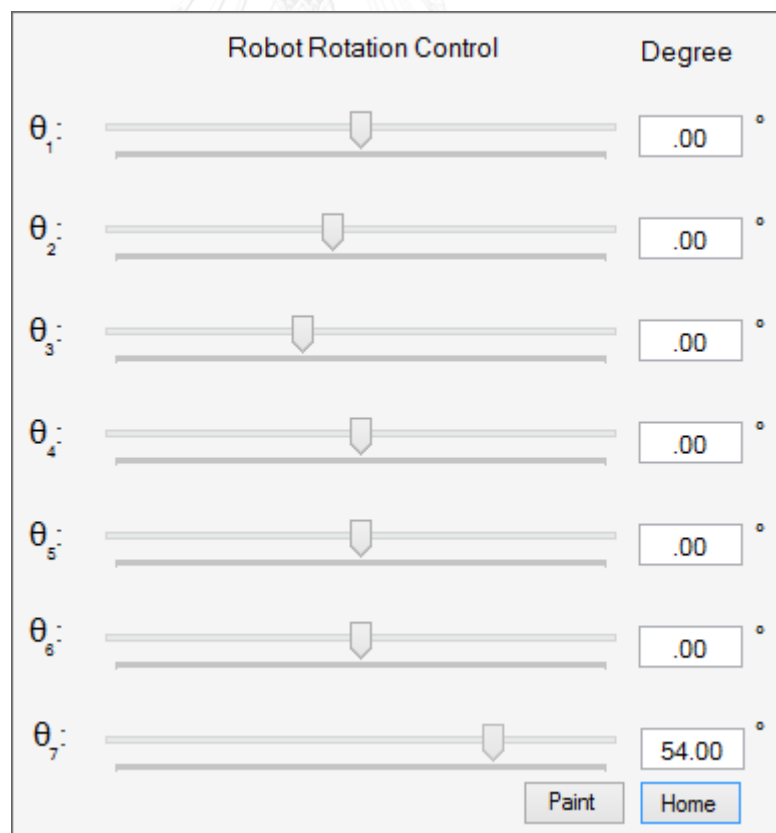
ในโหมดการทำงานของแบบจำลองการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์นั้นในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้มีหน้าต่างในการแสดงผลดังรูปภาพที่ 4.1 ซึ่งในหน้าจอแสดงผลบนคอมพิวเตอร์จะมีส่วนทางด้านซ้ายมือของหน้าจอแสดงผลที่แสดงแบบจำลองของแขนกลหุ่นยนต์ในรูปแบบสามมิติ นอกจากนี้หน้าจอแสดงผลยังมีส่วนประกอบไปด้วยหลายส่วนการทำงานอีกหลายส่วนด้วยกันได้แก่ ส่วนที่ใช้ในการควบคุมการหมุนของแกนข้อต่อแต่ละแกนของแขนกลหุ่นยนต์ ส่วนควบคุมตำแหน่ง ณ จุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์ ส่วนในการแสดงแกนอ้างอิงแต่ละแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ ส่วนแสดงมุมที่ส่วนปลายของแขนกลหุ่นยนต์ ส่วนที่ใช้ในการเลือกมุมมองของแขนกลหุ่นยนต์ ส่วนควบคุมการเคลื่อนที่การเคลื่อนตำแหน่งจะจุดปลายแบบปุ่มกด ส่วนการอัปเดตข้อมูลของตำแหน่ง ณ จุดปลายไปที่ส่วนการทำงานแบบเป็นตารางขั้นตอน และส่วนการเลือกโหมดการทำงานเป็นต้น



รูปภาพที่ 4.1 หน้าจอแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ในโหมดจำลองการทำงาน

#### 4.1.1 ส่วนควบคุมการหมุนแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์

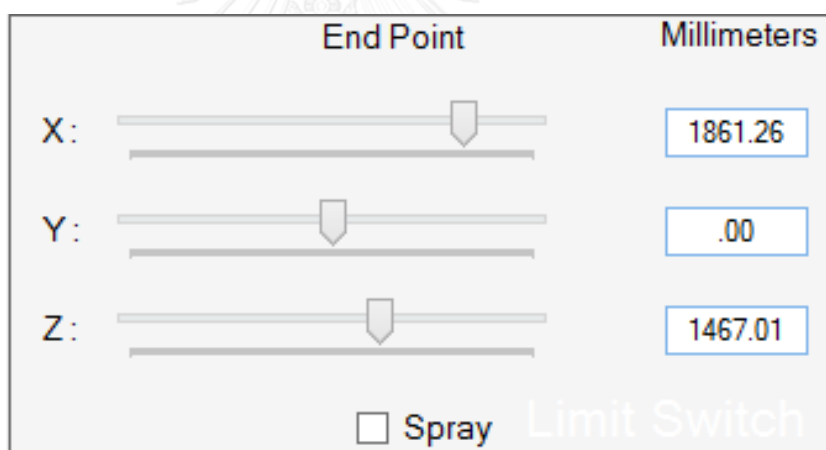
ในส่วนการควบคุมการหมุนแกนข้อต่อในแต่ละแกนของแขนกลหุ่นยนต์ในโหมดจำลองการทำงานนั้น ได้ออกแบบมาให้สามารถปรับค่ามุมต่างๆของแกนข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ในแต่ละแกนโดยการปรับเลื่อนที่แทรีคบาร์ โดยค่าของแทรีคบาร์นั้นจะแทนด้วยค่ามุมมองศาของแกนข้อต่อในแต่ละแกน โดยเมื่อปรับเลื่อนค่ามุมมองศาที่แทรีคบาร์แล้วโปรแกรมหน้าจอแสดงผลจะนำค่าองศาของแกนข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ที่ได้มาให้นำนั้นไปเข้าสู่กระบวนการจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าเพื่อนำค่าที่คำนวณได้นั้นไปแสดงในส่วนแสดงตำแหน่ง ณ จุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์ ต่อมาหลังจากที่เสร็จสิ้นกระบวนการของจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าแล้วจะเข้าสู่กระบวนการอัปเดตค่าองศาของแกนข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ ในแบบจำลองสามมิติให้เคลื่อนไหวไปตามค่าที่ได้รับจากการปรับเลื่อนนั่นเอง โดยสามารถดูส่วนควบคุมการหมุนแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ในโหมดจำลองการทำงานได้ดังรูปภาพที่ 4.2



รูปภาพที่ 4.2 ส่วนการควบคุมการหมุนในแต่ละแกนของแขนกลหุ่นยนต์

#### 4.1.2 ส่วนควบคุมตำแหน่ง ณ จุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์

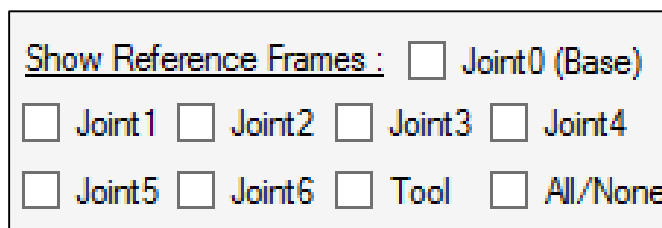
ในส่วนการควบคุมตำแหน่ง ณ จุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์ในโหมดจำลองการทำงานนั้น ได้ออกแบบมาเพื่อให้สามารถปรับเลื่อนค่าจุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง ณ จุดปลายที่ต้องการโดยการปรับเลื่อนที่แทรีคบาร์ เมื่อทำการปรับเลื่อนค่าของจุดปลายตามแกนตำแหน่งพิกัดอ้างอิงแล้ว หน้าจอแสดงผลจะนำค่าพิกัดจุดปลายเข้าสู่กระบวนการคำนวณจลนศาสตร์แบบกลับหลัง และเมื่อหน้าจอแสดงผลทำการคำนวณจลนศาสตร์แบบกลับหลังแล้ว ต่อมาจึงนำค่าผลลัพธ์ที่ได้มาให้กับกระบวนการคำนวณจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าเพื่อให้หน้าจอแสดงผลทำการปรับเลื่อนค่าแทรีคบาร์เพื่อแสดงค่าผลลัพธ์ หลังจากนั้นจึงส่งค่าองศาผลลัพธ์เพื่อทำการอัปเดตค่าองศาของแกนข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ ในแบบจำลองสามมิติให้เคลื่อนไหวไปตามค่าที่ได้รับจากการปรับเลื่อนนั่นเองซึ่งสามารถดูส่วนควบคุมตำแหน่ง ณ จุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์ในโหมดจำลองการทำงานได้ดังรูปภาพที่ 4.3



รูปภาพที่ 4.3 ส่วนการควบคุมตำแหน่ง ณ จุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์

#### 4.1.3 ส่วนในการแสดงแกนอ้างอิงแต่ละแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์

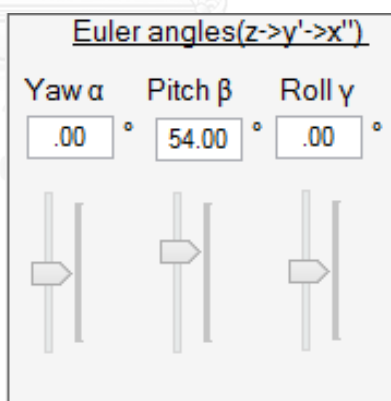
ในส่วนของการแสดงแกนอ้างอิงแต่ละแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ในโหมดจำลองการทำงานนั้น ได้ออกแบบมาให้สามารถเลือกแกนอ้างอิงในแต่ละแกนของแขนกลหุ่นยนต์ได้ โดยทำการคลิกเพื่อเพิ่มเครื่องหมายลูกกลมในกล่องเช็คบล็อกร และเมื่อทำการเพิ่มเครื่องหมายลูกกลมในกล่องเช็คบล็อกรเรียบร้อยแล้วหน้าจอแสดงผลจะทำการอัปเดตให้เพิ่มแกนอ้างอิงในแต่ละแกนที่ได้ทำการเลือกว่านั้น ทำให้แกนอ้างอิงนั้นปรากฏขึ้นมาที่แบบจำลองสามมิติของแขนกลหุ่นยนต์ซึ่งสามารถดูส่วนในการแสดงแกนอ้างอิงแต่ละแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ได้จากรูปภาพที่ 4.4



รูปภาพที่ 4.4 ส่วนในการแสดงแกนอ้างอิงแต่ละแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์

#### 4.1.4 ส่วนแสดงมุมที่ส่วนปลายของแขนกลหุ่นยนต์

ในส่วนแสดงมุมที่ส่วนปลายของแขนกลหุ่นยนต์ในโหมดจำลองการทำงานนั้น เป็นส่วนที่ออกแบบมาให้สามารถปรับเลื่อนแท่งปรับในแนวตั้ง เพื่อทำการปรับค่าองศาที่ส่วนปลายของแขนกลหุ่นยนต์ โดยในการออกแบบนี้จะออกแบบให้สามารถปรับได้ด้วยกันสามมุมคือมุม  $\alpha, \beta, \gamma$  และเมื่อทำการปรับมุมแล้วหน้าจอแสดงผลจะส่งค่าองศาที่ได้จากการปรับไปให้กับการคำนวณจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า หลังจากทีกระบวนการคำนวณจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าแล้วหน้าจอแสดงผลจะนำค่าผลลัพธ์องศาที่ได้ มาทำการปรับเลื่อนแท่งปรับในส่วนของการควบคุมการหมุนแกนข้อต่อในแต่ละแกนของแขนกลหุ่นยนต์ แล้วจึงทำการอัปเดตแบบจำลองสามมิติให้เคลื่อนไหวไปตามค่าที่ได้รับจากการปรับเลื่อนนั่นเองซึ่งสามารถดูส่วนแสดงมุมที่ส่วนปลายของแขนกลหุ่นยนต์ได้จากรูปภาพที่ 4.5

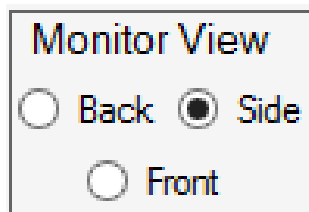


รูปภาพที่ 4.5 ส่วนแสดงมุมที่ส่วนปลายของแขนกลหุ่นยนต์

#### 4.1.5 ส่วนที่ใช้ในการเลือกมุมมองของแขนกลหุ่นยนต์

ส่วนที่ใช้ในการเลือกมุมมองของแขนกลหุ่นยนต์ในโหมดจำลองการทำงานนั้น เป็นส่วนที่ออกแบบมาให้สามารถเลือกมุมมองของแบบจำลองสามมิติของแขนกลหุ่นยนต์โดยการออกแบบเพื่องานวิจัยนี้ จะออกแบบมาให้สามารถเลือกได้สามมุมมองด้วยกันคือมุมมองทางด้านหลังของแขนกลหุ่นยนต์ มุมมองทางด้านข้างของแขนกลหุ่นยนต์ และสุดท้ายมุมมอง

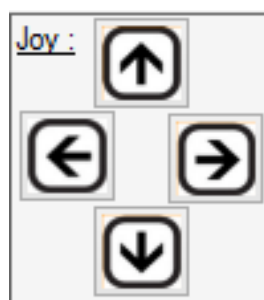
ทางด้านหน้าของแขนกลหุ่นยนต์ ซึ่งเมื่อทำการเลือกมุมมองแล้วหน้าจอแสดงผลจะส่งค่าไปทำการอัปเดตแบบจำลองสามมิติให้ปรับเปลี่ยนมุมมองไปยังมุมมองที่เลือกไว้โดยสามารถดูส่วนที่ใช้ในการเลือกมุมมองของแขนกลหุ่นยนต์ได้จากรูปภาพที่ 4.6



รูปภาพที่ 4.6 ส่วนที่ใช้ในการเลือกมุมมองของแขนกลหุ่นยนต์

#### 4.1.6 ส่วนควบคุมการเคลื่อนที่การเลื่อนตำแหน่งระจุดปลายแบบปุ่มกด

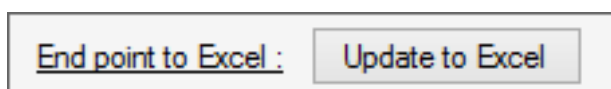
ในส่วนควบคุมการเคลื่อนที่การเลื่อนตำแหน่งระจุดปลายแบบปุ่มกดในโหมดแบบจำลองการทำงานนั้นจะมีส่วนในการทำงานคล้ายกับส่วนของส่วนการควบคุมตำแหน่ง ณ จุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์ เพียงแต่การทำงานในส่วนควบคุมการเคลื่อนที่การเลื่อนตำแหน่งระจุดปลายแบบปุ่มกดจะเปลี่ยนจากการปรับเลื่อนแทร์คบาร์เป็นการกดปุ่มแทน โดยมีข้อดีกว่าส่วนของส่วนการควบคุมตำแหน่ง ณ จุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์คือ การกดปุ่มนั้นจะมีการเพิ่มค่าของพิกัด ณ จุดปลายแขนกลหุ่นยนต์ที่ละเอียดและคงที่มากกว่าการปรับเลื่อนค่าที่แทร์คบาร์โดยในส่วนควบคุมการเคลื่อนที่การเลื่อนตำแหน่งระจุดปลายแบบปุ่มกดนี้ออกแบบมาให้สามารถทำการคลิกที่ปุ่มกดได้ด้วยกันทั้งหมดสี่ปุ่มกดด้วยกันดังรูปภาพที่ 4.7 โดยเมื่อคลิกที่ปุ่มลูกศรด้านบนจะทำให้แขนกลหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปด้านหน้า หากคลิกที่ปุ่มลูกศรด้านล่างจะทำให้แขนกลหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปถอยหลัง และหากคลิกปุ่มลูกศรด้านขวาจะทำให้แขนกลหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปทางด้านขวาโดยอ้างอิงมุมจากด้านหน้า และในทางตรงกันข้ามหากลูกศรด้านซ้ายจะทำให้แขนกลหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปทางด้านซ้ายโดยอ้างอิงมุมจากด้านหน้าเช่นกัน



รูปภาพที่ 4.7 ส่วนควบคุมการเคลื่อนที่การเลื่อนตำแหน่งระจุดปลายแบบปุ่มกด

#### 4.1.7 ส่วนการอัปเดตข้อมูลไปที่ส่วนการทำงานแบบเป็นตารางขั้นตอน

ในส่วนการอัปเดตข้อมูลของตำแหน่ง ณ จุดปลายไปที่ส่วนการทำงานแบบเป็นตารางขั้นตอนในแบบจำลองการทำงานในงานวิจัยนี้ มีหน้าที่ในการส่งค่าตำแหน่ง ณ จุดปลายของแกนกลหุ่นยนต์โดยสามารถทำการอัปเดตข้อมูลตำแหน่ง ณ จุดปลายได้โดยคลิกที่ปุ่ม Update to excel ข้อมูลจะส่งไปอัปเดตในตารางขั้นตอนการทำงานโดยทันที โดยที่ข้อมูลที่ถูกรกก่อน จะถูกจัดเรียงลงในตารางขั้นตอนการทำงานในอันดับแรกก่อน และจัดถูกจัดเรียงตามลำดับต่อมาเมื่อถูกกดอัปเดตเพิ่มในภายหลัง ซึ่งสามารถดูส่วนการอัปเดตข้อมูลของตำแหน่ง ณ จุดปลายไปที่ส่วนการทำงานแบบเป็นตารางขั้นตอนได้ดังรูปภาพที่ 4.8



รูปภาพที่ 4.8 ส่วนการอัปเดตข้อมูลไปที่ส่วนการทำงานแบบเป็นตารางขั้นตอน

#### 4.1.8 ส่วนการเลือกโหมดการทำงาน

ส่วนการเลือกโหมดการทำงานในงานวิจัยนี้ จะสามารถเลือกโหมดได้โดยการคลิกเลือกว่าจะให้หน้าจอแสดงผลบนคอมพิวเตอร์นั้นทำงานในโหมดจำลองการทำงานของแกนกลหุ่นยนต์ (Simulation) หรือจะให้ทำงานในโหมดการทำงานร่วมกับชุดควบคุมแกนกลหุ่นยนต์ (Controller) ซึ่งหากเรื่องโหมดการทำงานแบบทำงานร่วมกับชุดควบคุมแกนกลหุ่นยนต์จะต้องทำการเลือกพอร์ตอนุกรมด้วย เพื่อทำการติดต่อกับชุดควบคุมแกนกลหุ่นยนต์ โดยสามารถดูส่วนการเลือกโหมดการทำงานได้จากรูปภาพที่ 4.9

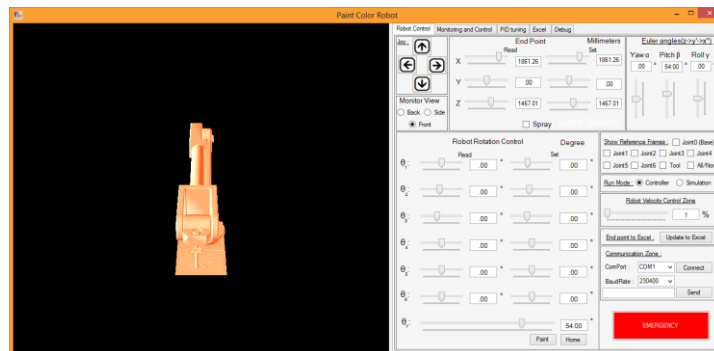


รูปภาพที่ 4.9 ส่วนการเลือกโหมดการทำงาน

#### 4.2 โหมดการทำงานร่วมกับชุดควบคุมแกนกลหุ่นยนต์

ในโหมดการทำงานแบบทำงานร่วมกับชุดควบคุมแกนกลหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้ ได้ออกแบบให้มีหน้าต่างในการแสดงผลทางหน้าจอคอมพิวเตอร์ดังรูปภาพที่ 4.10 ซึ่งในโหมดการทำงานร่วมกับชุดควบคุมแกนกลหุ่นยนต์นี้ ในหลายๆส่วนจะทำงานเหมือนกับโหมดจำลองการทำงานของแกนกลหุ่นยนต์ แต่จะมีส่วนที่เพิ่มเติมขึ้นมาจากเดิมอีกหลายส่วนด้วยกันดังนี้ ส่วนควบคุมการหมุนแกนข้อต่อของแกนกลหุ่นยนต์ ส่วนควบคุมตำแหน่ง ณ จุด

ปลายของแขนกลหุ่นยนต์ ส่วนติดต่อพอร์ตอนุกรม ส่วนปุ่มหยุดการทำงานแบบฉุกเฉิน ส่วนการอ่านค่าและควบคุมแรงดันไฟฟ้าอนาล็อก ส่วนการปรับแต่งค่าพีไอดี ส่วนการทำงานแบบเป็นตารางขั้นตอน และส่วนสุดท้ายคือส่วนการตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม (Debug) เป็นต้น โดยที่ทุกส่วนในโหมดการทำงานร่วมกับชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์นั้น จะทำการติดต่อสื่อสารกับชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ผ่านทางพอร์ตอนุกรม เพื่อทำการส่งข้อมูลและอ่านข้อมูลนั่นเอง

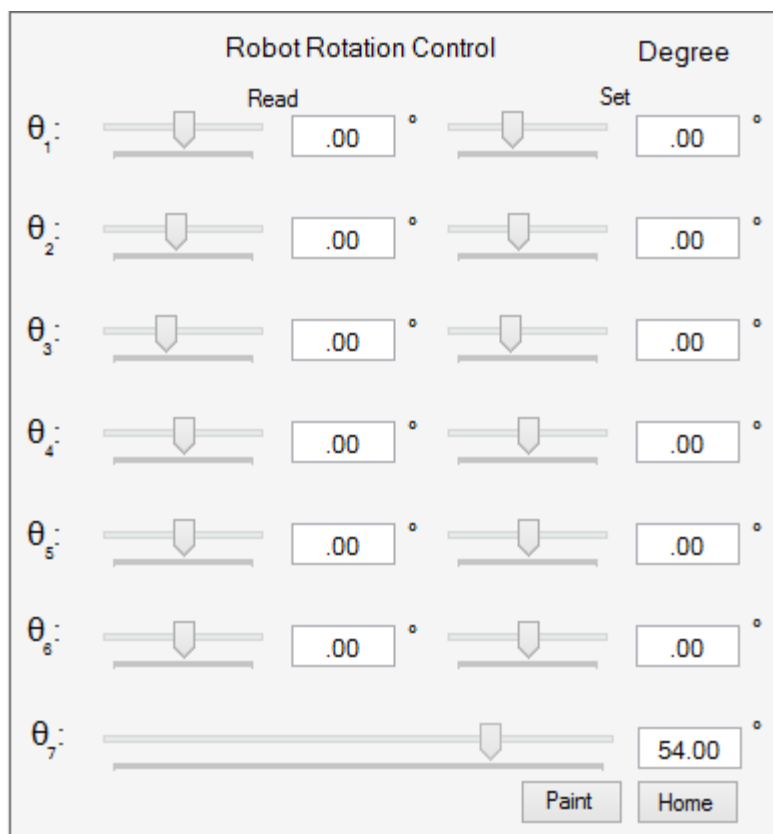


รูปภาพที่ 4.10 หน้าจอแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ในโหมดการทำงานร่วมกับชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์

#### 4.2.1 ส่วนควบคุมการหมุนแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์

ในส่วนควบคุมการหมุนแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ในโหมดการทำงานร่วมกับชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้ ได้ออกแบบมาให้สามารถส่งค่าองศาที่ต้องการให้แก่แต่ละแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ไปที่ชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ผ่านทางพอร์ตอนุกรม เพื่อสั่งงานให้แขนกลหุ่นยนต์นั้นหมุนไปยังองศาที่ต้องการ ซึ่งสามารถเลือกค่ามุมมองศาที่ต้องการได้ด้วยการปรับเลื่อนค่าองศาของแกนข้อต่อแขนกลแต่ละแกนด้วยแทรีคบาร์ และในขณะเดียวกันนั้น ชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ก็ทำการอ่านค่าองศาแต่ละแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ ณ เวลาปัจจุบันมาแสดงบนหน้าจอแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ผ่านทางพอร์ตอนุกรม ด้วยเช่นกันโดยสามารถดูส่วนควบคุมการหมุนแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ได้ในรูปภาพที่ 4.11



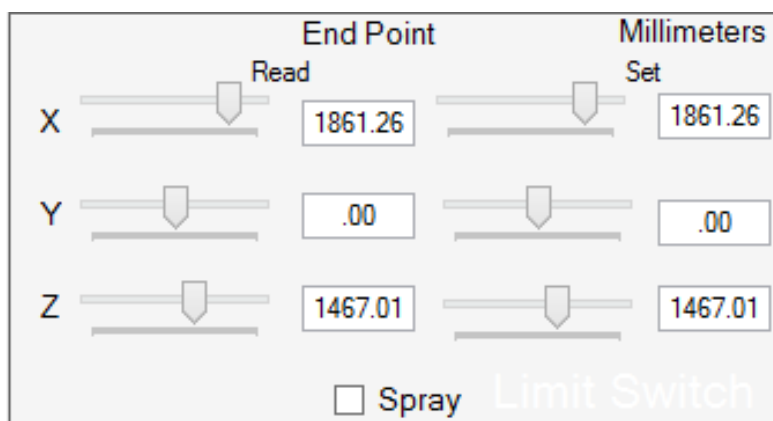


รูปภาพที่ 4.11 ส่วนควบคุมการหมุนแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ในโหมดการทำงานร่วมกับชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์

#### 4.2.2 ส่วนควบคุมตำแหน่ง ณ จุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์

ในส่วนควบคุมตำแหน่ง ณ จุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์ในโหมดการทำงานร่วมกับชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์นั้น ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบมาให้สามารถทำการส่งค่าตำแหน่ง ณ จุดปลายที่ต้องการของแขนกลหุ่นยนต์ได้ โดยการปรับเลื่อนแท็กรับค่า ซึ่งหลักการทำงานนั้นจะเหมือนในโหมดจำลองการทำงานของแขนกลหุ่นยนต์ทุกประการแต่จะเพิ่มในส่วนของการส่งข้อมูลออกไปที่พอร์ตอนุกรม หลังจากที่ได้ค่าผลลัพธ์จากระบบการคำนวณจลนศาสตร์แบบกลับหลังแล้ว และในขณะเดียวกันก็จะมี การอ่านค่าองศาต่างๆจากแขนกลหุ่นยนต์โดยชุดควบคุมหุ่นยนต์แล้วจะส่งค่ามาให้กับส่วนแสดงผลที่หน้าจอผ่านทางพอร์ตอนุกรมเช่นกัน หน้าจอแสดงผลจะนำค่าองศาของแต่ละแกนข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ที่ได้มาเข้าสู่ระบบการคำนวณจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าแล้วนำค่าผลลัพธ์ที่ได้มาแสดงในส่วนของส่วนควบคุมตำแหน่ง ณ จุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์อีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีหลักการเหมือนกับการทำงานโหมดจำลองการทำงานทุกประการเพียงแต่จะมีการนำข้อมูลที่คำนวณได้ หรืออ่านเข้า

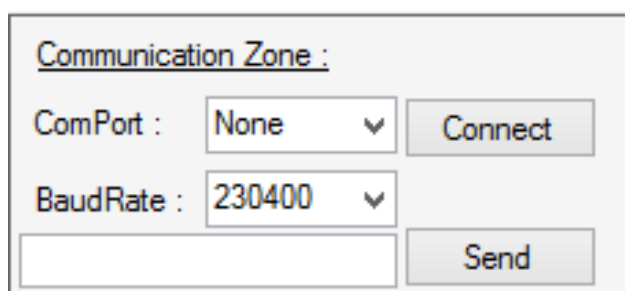
มาได้ผ่านพอร์ตอนุกรมเพื่อติดต่อกับชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์นั่นเองโดยสามารถดูส่วนควบคุมตำแหน่ง ณ จุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์ได้จากรูปภาพที่ 4.12



รูปภาพที่ 4.12 ส่วนควบคุมตำแหน่ง ณ จุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์

#### 4.2.3 ส่วนติดต่อพอร์ตอนุกรม

ส่วนติดต่อพอร์ตอนุกรมในงานวิจัยนี้ ได้ออกแบบมาให้สามารถเลือกพอร์ตอนุกรมที่โปรแกรมหน้าจอแสดงผลบนคอมพิวเตอร์นั้นตรวจสอบเจอ โดยผู้ควบคุมสามารถเลือกได้จากการคลิกที่กล่องรายการพอร์ตอนุกรม (List comport) และนอกจากนี้ก็สามารถเลือกความเร็วในการรับส่งข้อมูลของพอร์ตอนุกรม (Baud rate) ได้อีกด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกำหนดค่าความเร็วในการรับส่งข้อมูลของพอร์ตอนุกรมตั้งต้นไว้ที่ 230400 บิตต่อวินาที และในส่วนนี้จะมีปุ่มในการสร้างการเชื่อมต่อกับพอร์ตอนุกรมได้โดยการกดปุ่มทำการเชื่อมต่อคอมพอร์ต (Connect) หลังจากนั้นข้อความบนปุ่มเชื่อมต่อจะเปลี่ยนเป็นยกเลิกการเชื่อมต่อ (Disconnect) และในขณะเดียวกันก็สามารถยกเลิกการเชื่อมต่อได้เช่นกันที่ปุ่มเดิมโดยการคลิกยกเลิกการเชื่อมต่อได้ด้วยเช่นกันซึ่งสามารถดูหน้าต่างส่วนติดต่อพอร์ตอนุกรมได้จากรูปภาพที่ 4.13



รูปภาพที่ 4.13 ส่วนติดต่อพอร์ตอนุกรม

#### 4.2.4 ส่วนปุ่มหยุดการทำงานแบบฉุกเฉิน

ส่วนปุ่มหยุดการทำงานแบบฉุกเฉินในโหมดการทำงานร่วมกับชุดควบคุมหุ่นยนต์บนหน้าจอแสดงผลบนคอมพิวเตอร์นี้ ได้ทำการออกแบบมาเพื่อให้สามารถกดเพื่อส่งคำสั่งหยุดฉุกเฉินไปที่ชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ ผ่านพอร์ตอนุกรมเพื่อให้ชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ทำการปิดระบบควบคุมวาล์วไฮดรอลิกโดยทันที และเมื่อได้ทำการกดปุ่มฉุกเฉินแล้ว ปุ่มฉุกเฉินนั้นจะเปลี่ยนสีจากสีแดงเป็นสีเขียว นอกจากนี้ผู้ควบคุมสามารถกลับมาเปิดระบบให้สามารถทำงานได้อีกครั้ง โดยการกดปุ่มสีเขียวอีกครั้งเพื่อส่งคำสั่งไปที่ชุดควบคุมอีกครั้ง ให้ทำการเปิดระบบวาล์วไฮดรอลิก แล้วปุ่มกดฉุกเฉินจะกลับมาเป็นสีแดงอีกครั้งนั่นเอง ซึ่งสามารถดูส่วนปุ่มหยุดการทำงานแบบฉุกเฉินได้ดังรูปภาพที่ 4.14



รูปภาพที่ 4.14 ส่วนปุ่มหยุดการทำงานแบบฉุกเฉิน

#### 4.2.5 ส่วนการอ่านค่าและควบคุมแรงดันไฟฟ้าอานาล็อก

ส่วนการอ่านค่าและควบคุมแรงดันไฟฟ้าอานาล็อกในโหมดการทำงานร่วมกับชุดควบคุมหุ่นยนต์บนหน้าจอแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยนี้จะเป็นส่วนที่ช่วยให้ผู้ควบคุมเข้าถึงชุดข้อมูลที่เป็นดิจิตอลมากขึ้น ขยายความสามารถเข้าถึงข้อมูลที่ชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ได้ส่งมาได้โดยตรง โดยยังไม่ได้ผ่านการแปลงค่าให้เป็นค่ามุมมองศาใดๆของแต่ละแกน ข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ที่รับมาจากพอร์ตอนุกรมแล้วมาแสดงผลในส่วนของการรับค่าอานาล็อกที่ถูกแปลงเป็นดิจิตอลแล้ว ก่อนที่จะทำการแปลงค่าดิจิตอลที่อ่านเข้ามาได้ให้กลายเป็นองศาและแรงดันไฟฟ้าของแต่ละแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ต่อไป และในขณะเดียวกันก็ในส่วนการอ่านค่าและควบคุมแรงดันไฟฟ้าอานาล็อก ก็ยังสามารถปรับเพื่อส่งค่าที่เป็นดิจิตอลเพื่อส่งให้ชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ให้ควบคุมความเร็วและทิศทางในการหมุนเคลื่อนที่ในแต่ละแกนของแขนกลหุ่นยนต์ที่เป็นข้อมูลทางดิจิตอลโดยตรงโดยการปรับบาร์เลื่อนก่อนที่จะทำการแปลงค่าทางดิจิตอลนั้นให้เป็นองศาและแรงดันไฟฟ้าของแต่ละแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ในหน้าจอแสดงผลต่อไป นอกจากนี้ส่วนการอ่านค่าและควบคุมแรงดันไฟฟ้าอานาล็อกยังมีส่วนที่คอยบอกถึงความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุที่มาจับโซ่สายพานลำเลียงอีกด้วยโดยจะแสดงให้เห็นข้อมูลอยู่ด้วยกันสองแบบคือแบบความเร็วเชิง

เส้นหน่วยเป็น เมตรต่อวินาทีและแบบความเร็วรอบหน่วยเป็น รอบต่อวินาที ซึ่งสามารถดู ส่วนการอ่านค่าและควบคุมแรงดันไฟฟ้าอนาล็อกได้จากรูปภาพที่ 4.15

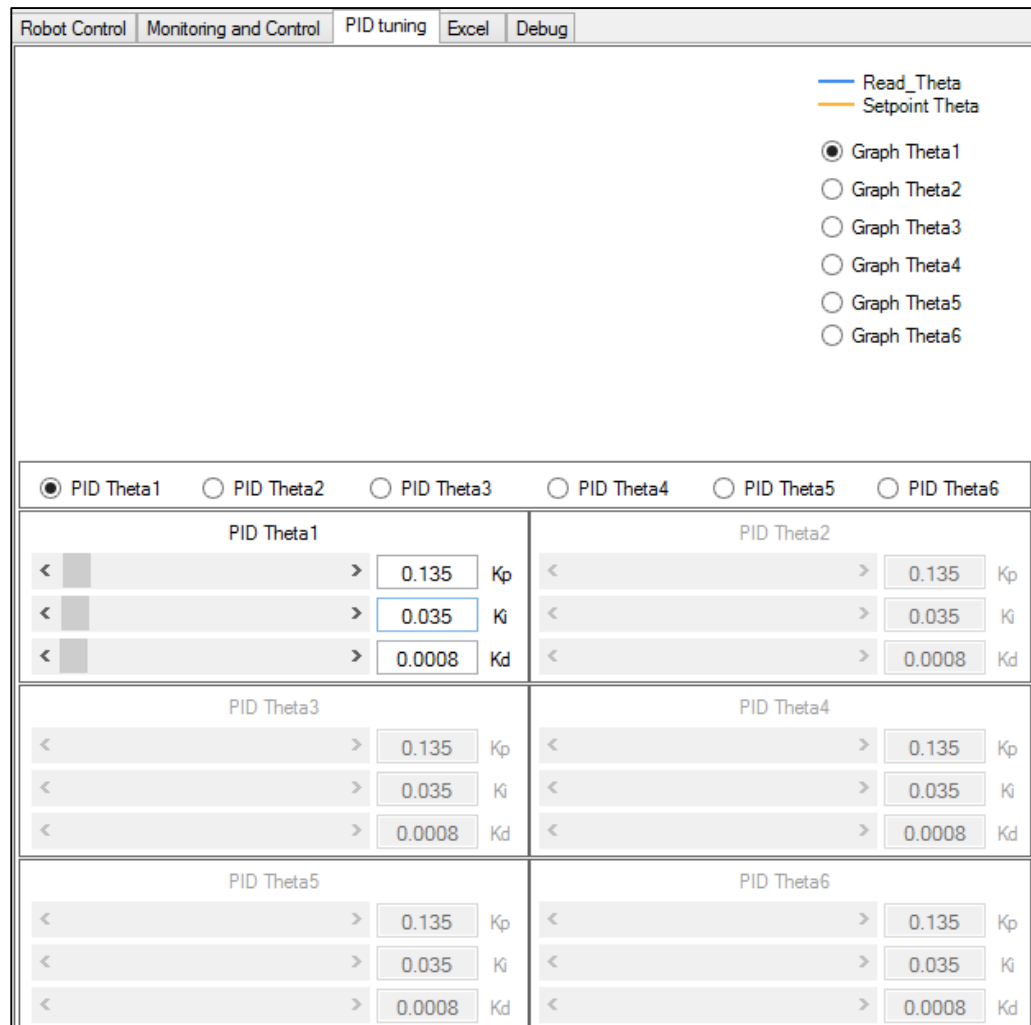
Robot Control		Monitoring and Control		PID tuning		Excel		Debug		
<b>ADC Input</b>					<b>Object Speed</b>					
	12 bit	Voltage	Degree	m/s		Hz				
$\theta_1$ :	<input type="text" value="0"/>	= <input type="text" value="0"/> v	<input type="text" value="0"/> °	<input type="text" value="0.000"/>		<input type="text" value="0"/>				
$\theta_2$ :	<input type="text" value="0"/>	= <input type="text" value="0"/> v	<input type="text" value="0"/> °							
$\theta_3$ :	<input type="text" value="0"/>	= <input type="text" value="0"/> v	<input type="text" value="0"/> °							
$\theta_4$ :	<input type="text" value="0"/>	= <input type="text" value="0"/> v	<input type="text" value="0"/> °							
$\theta_5$ :	<input type="text" value="0"/>	= <input type="text" value="0"/> v	<input type="text" value="0"/> °							
$\theta_6$ :	<input type="text" value="0"/>	= <input type="text" value="0"/> v	<input type="text" value="0"/> °							
					<b>Object Position (World Frame)</b>					
					Millimeters					
					X:	<input type="text" value="1861.25"/>				
					Y:	<input type="text" value="0"/>				
					Z:	<input type="text" value="1467.01"/>				
					<input type="checkbox"/> Object Target		<input type="button" value="Initial"/>			
					Object Panel: <input checked="" type="radio"/> YZ <input type="radio"/> XZ <input type="radio"/> XY					
<b>DAC Output</b>										
	12 bit	Voltage	$\omega$ (deg/s)							
$\theta_1$ :	<input type="text" value="2050"/>	= <input type="text" value=""/> v	<input type="text" value=""/>							
$\theta_2$ :	<input type="text" value="2070"/>	= <input type="text" value=""/> v	<input type="text" value=""/>							
$\theta_3$ :	<input type="text" value="2030"/>	= <input type="text" value=""/> v	<input type="text" value=""/>							
$\theta_4$ :	<input type="text" value="2064"/>	= <input type="text" value=""/> v	<input type="text" value=""/>							
$\theta_5$ :	<input type="text" value="2035"/>	= <input type="text" value=""/> v	<input type="text" value=""/>							
$\theta_6$ :	<input type="text" value="2035"/>	= <input type="text" value=""/> v	<input type="text" value=""/>							

รูปภาพที่ 4.15 ส่วนการอ่านค่าและควบคุมแรงดันไฟฟ้าอนาล็อก

#### 4.2.6 ส่วนการปรับแต่งค่าพีไอดี

ในส่วนการปรับแต่งค่าพีไอดีในงานวิจัยนี้นั้นจะมีส่วนที่ช่วยในการปรับแต่งค่าพีไอดี อยู่หลักๆด้วยกันสองส่วนคือ ในส่วนแรกส่วนที่ใช้ในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์พี พารามิเตอร์ไอ พารามิเตอร์ดี ซึ่งสามารถทำได้โดยการปรับเลื่อนที่บาร์เลื่อน ซึ่งพารามิเตอร์ พีไอดีนั้นจะถูกจำแนกอยู่เป็นส่วนตัวแยกกันตามแต่ละแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์นั่นเอง และในส่วนที่สองคือการพล็อตกราฟเพื่อดูค่าที่สามารถอ่านมาได้ในแต่ละแกนข้อต่อของ แขนกลหุ่นยนต์กับค่าที่ทำการตั้งหาไว้ว่ามีความผิดพลาดมากน้อยเพียงใดในรูปแบบของ

กราฟซึ่งสามารถทำการเลือกได้ว่าต้องการที่จะดูค่าความผิดพลาดของแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์แต่ละแกนได้เช่นกัน โดยสามารถดูส่วนการปรับแต่งค่าพีไอดีได้จากรูปภาพที่ 4.16

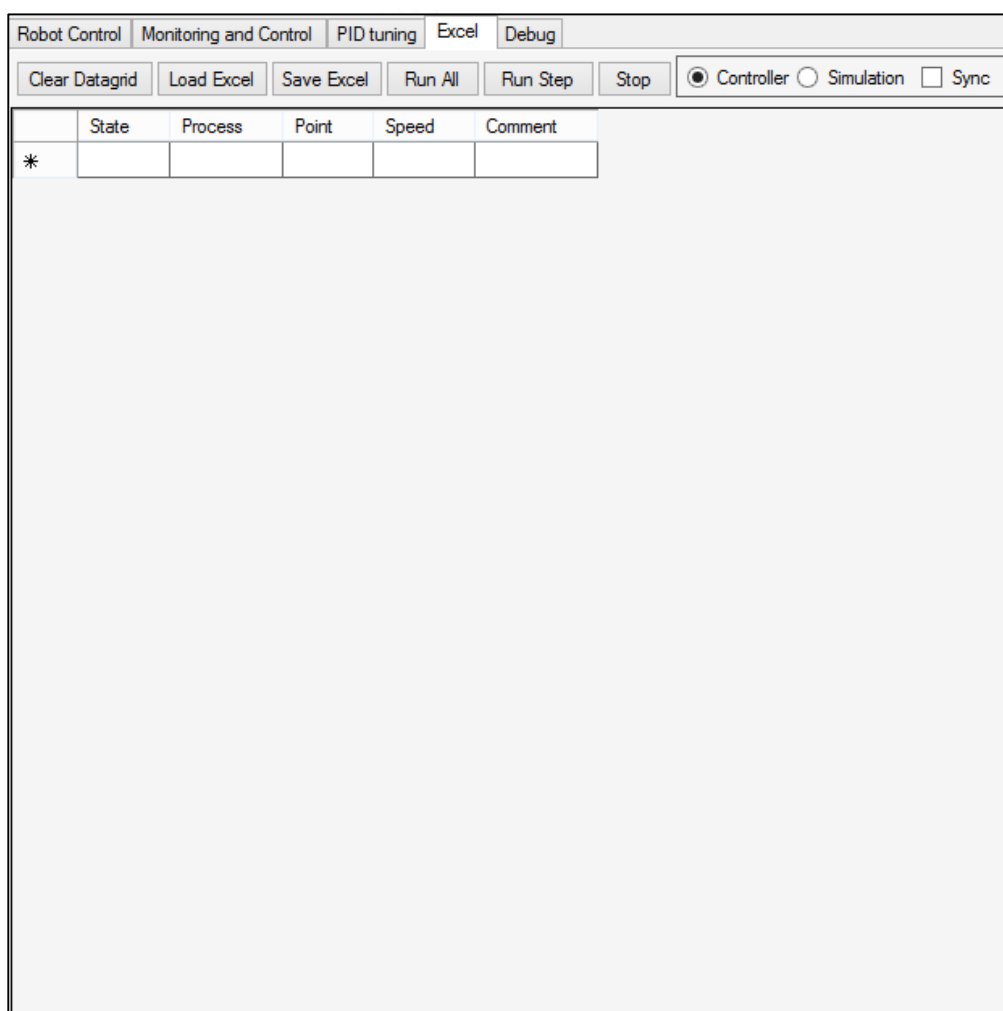


รูปภาพที่ 4.16 ส่วนการปรับแต่งค่าพีไอดี

#### 4.2.7 ส่วนการทำงานแบบเป็นตารางขั้นตอน

ในส่วนการทำงานแบบเป็นตารางขั้นตอนในโหมดการทำงานร่วมกับชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์นั้นได้ออกแบบมาให้รองรับการอ่านค่าการทำงานอย่างเป็นขั้นตอนจากโปรแกรม Microsoft Excel โดยสามารถที่จะทำการโหลดข้อมูลจากไฟล์ที่เป็นของ Microsoft Excel มาในตารางขั้นตอนการทำงานได้โดยการกดปุ่มโหลดข้อมูล (Load Excel) และในขณะเดียวกันก็สามารถที่จะทำการบันทึกค่าข้อมูลจากในตารางขั้นตอนการทำงานเป็นไฟล์ข้อมูลของ Microsoft Excel ได้ด้วยเช่นกันโดยการกดปุ่มบันทึกข้อมูล (Save Excel) โดยการใช้งานในส่วนการทำงานแบบเป็นตารางขั้นตอนนั้นจะแบ่งออกเป็นด้วยกันสอง

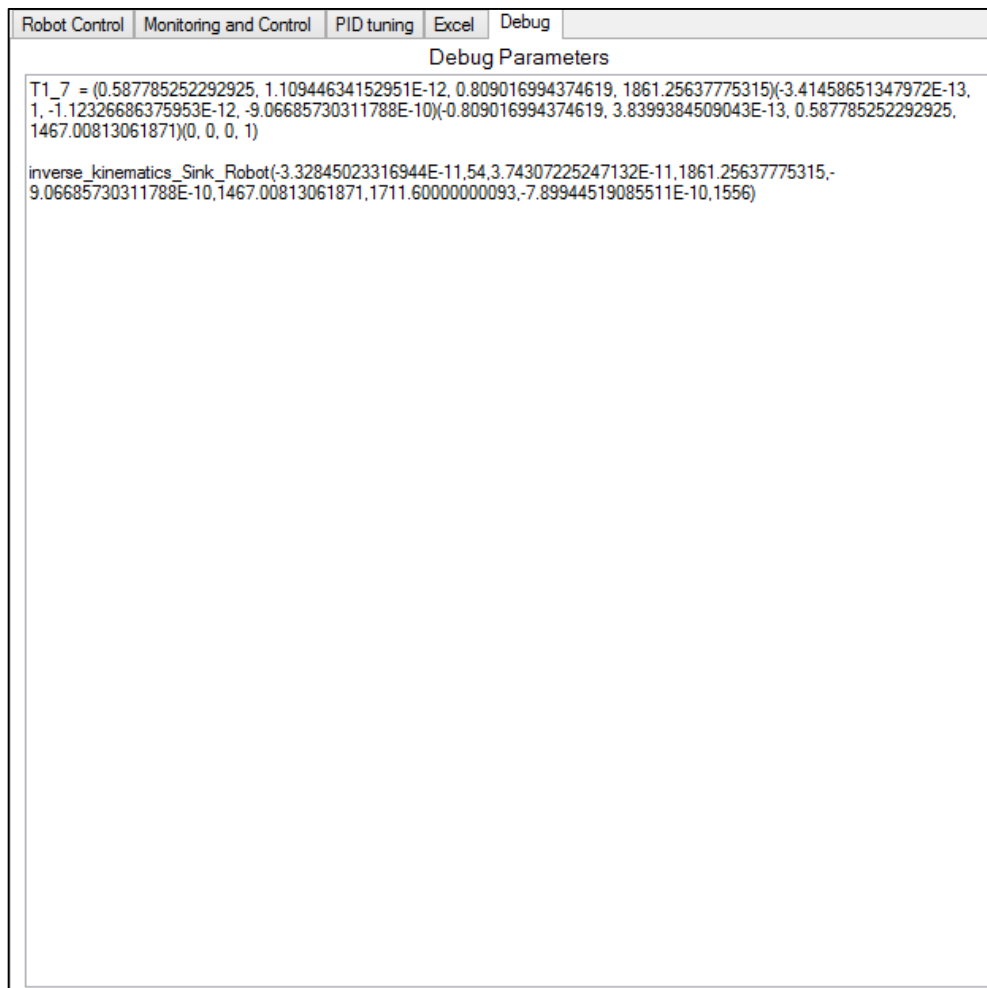
ด้วยกันคือ โดยส่วนแรกคือการทำงานแบบเป็นทีละขั้นตอนไม่ต่อเนื่อง กล่าวคือเมื่อทำตามขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งเสร็จแล้ว หากจะให้ทำตามขั้นตอนต่อไปจะต้องกดปุ่มทำต่ออีกครั้งหนึ่ง (Run Step) และในส่วนที่สองคือทำงานแบบเป็นทีละขั้นตอนต่อเนื่อง กล่าวคือเมื่อทำตามขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งเสร็จแล้วจะทำในขั้นตอนต่อไปในทันที ซึ่งสามารถทำได้โดยการกดที่ปุ่มทำขั้นตอนทั้งหมด (Run All) และในทั้งสองส่วนที่ได้กล่าวมานั้นสามารถหยุดการทำงานได้ทันทีระหว่างทำงานแต่ละขั้นตอนโดยการกดที่ปุ่มหยุดทำงาน (Stop) นอกจากนี้สามารถทำการล้างตารางขั้นตอนเพื่อเปลี่ยนแปลงตารางได้ใหม่ได้โดยการกดปุ่มล้างตาราง (Clear Datagrid) นั่นเองโดยสามารถดูหน้าตาของส่วนการทำงานแบบเป็นตารางขั้นตอนได้จากรูปภาพที่ 4.17



รูปภาพที่ 4.17 ส่วนการทำงานแบบเป็นตารางขั้นตอน

#### 4.2.8 ส่วนการตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม

ส่วนการตรวจสอบการทำงานของโปรแกรมนั้นเป็นส่วนที่ออกแบบมาเพื่อให้ผู้พัฒนานั้นสามารถตรวจสอบค่าต่างๆที่ทำงานอยู่เป็นเบื้องหลังของหน้าจอแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ เช่นส่วนขั้นตอนต่างๆในกระบวนการคำนวณแบบจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า และกระบวนการคำนวณแบบจลนศาสตร์แบบกลับหลังเป็นต้น ซึ่งสามารถดูหน้าต่างของส่วนการตรวจสอบการทำงานของโปรแกรมได้ดังรูปภาพที่ 4.18



รูปภาพที่ 4.18 ส่วนการตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม

## บทที่ 5

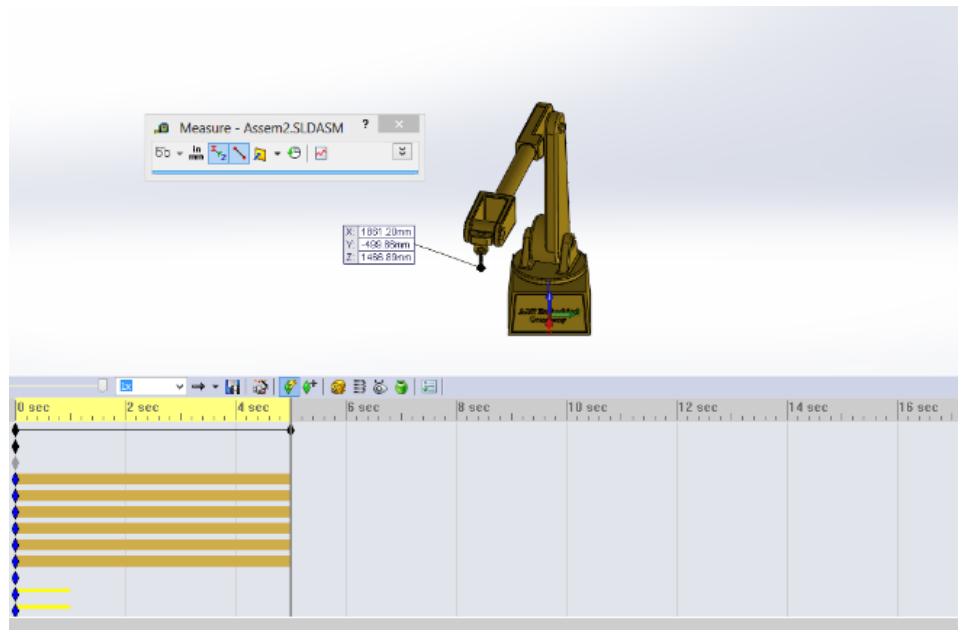
### ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการผลการทดลองของการคำนวณจลนศาสตร์แบบกลับหลังของของแบบจำลองแขนกลหุ่นยนต์บนโปรแกรมหน้าจอดีแสดงผลเทียบกับการวัดจุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์โดยตรงด้วยโปรแกรม Solid Work ผลการทดลองจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าของชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ ผลการทดลองจลนศาสตร์แบบกลับหลังของชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ และผลการทดลองการทำงานร่วมกันของระบบควบคุมแบบพีไอดี และระบบควบคุมแบบทำซ้ำ

#### 5.1 ผลการทดลองจลนศาสตร์แบบกลับหลังของแบบจำลองแขนกลหุ่นยนต์

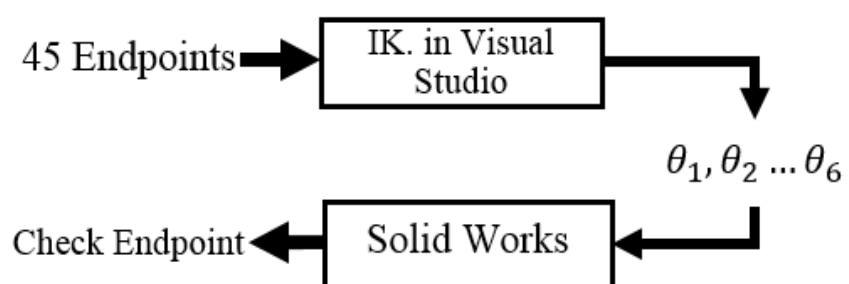
ในการทดลองของการคำนวณจลนศาสตร์แบบกลับหลังของโปรแกรมหน้าจอดีแสดงผลเทียบกับการวัดจุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์โดยตรงด้วยโปรแกรม Solid Work โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม Solid Work เนื่องจากได้มีการทดลองในส่วนของการคำนวณจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าของโปรแกรมหน้าจอดีแสดงผลเทียบกับการวัดจุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์โดยตรงด้วยโปรแกรม Solid Work แล้วพบว่าผลที่ได้คือ มีความถูกต้องตรงกันทั้งหมดหนึ่งร้อยเปอร์เซ็นต์จึงสามารถเชื่อถือได้ อีกทั้งยังใช้โปรแกรม Solid Work ในการออกแบบ แบบจำลองสามมิติของแขนกลหุ่นยนต์ที่ใช้ในโปรแกรมหน้าจอดีแสดงผลบนหน้าจอดีคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยนี้อีกด้วย ต่อมาจึงทำการทดลองของการคำนวณจลนศาสตร์แบบกลับหลัง โดยการสุ่มเลือกจุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์ทั้งหมด 45 จุด จากนั้นทำการส่งค่าจุดปลายให้กับกระบวนการคำนวณจลนศาสตร์แบบกลับหลังของโปรแกรมหน้าจอดีแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ ต่อมานำผลลัพธ์ของกระบวนการคำนวณจลนศาสตร์แบบกลับหลังซึ่งในที่นี้คือค่ามุมมองทั้ง 6 แกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ มาทำการตรวจสอบความแม่นยำในการคำนวณโดยโปรแกรม Solid Work สามารถดูได้จากรูปภาพที่ 5.1





รูปภาพที่ 5.1 การตรวจสอบจุดปลายแขนกลหุ่นยนต์ด้วยโปรแกรม Solid Work

โดยการสั่งให้แกนข้อต่อต่างๆของแบบจำลองสามมิติใน Solid Work เคลื่อนที่ไปตามมุมมองสามมิติที่ได้มาจากกระบวนการคำนวณจลนศาสตร์แบบกลับหลัง จากนั้นจึงทำการตรวจสอบเทียบกันระหว่างจุดปลายแขนกลหุ่นยนต์ที่ได้จากโปรแกรม Solid Work กับจุดปลายแขนกลหุ่นยนต์ อ้างอิงโดยสามารถดูสรุปกระบวนการทดลองได้จากรูปภาพที่ 5.2[13]



รูปภาพที่ 5.2 การทดลองจลนศาสตร์แบบกลับหลังของโปรแกรมหน้าจอสองผล

จากผลการทดลองทั้งหมด 45 จุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์ พบว่าในบางครั้งเกิดการผิดพลาดถึง 7 เปอร์เซ็นซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ 5.1 โดยที่ในตารางที่ 5.1 จะแสดงถึงค่าเปอร์เซ็นความผิดพลาดของพิกัดอ้างอิงแกน X,Y,Z ในส่วนของค่าเฉลี่ย ค่าสูงสุด ค่าต่ำสุด เป็นต้น

ตารางที่ 5.1 ค่าความผิดพลาดที่จุดปลายแกนหมุนยนต์ในรูปแบบเปอร์เซ็นต์

Error	End Point X	End Point Y	End Point Z
Average	0.048%	0.820%	0.041%
Maximum	0.156%	7.613%	0.167%
Minimum	0.002%	0.000%	0.003%

ในตารางที่ 5.1 นั้นจะสังเกตได้ว่าค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของแต่ละแกนพิกัดนั้นไม่มากนัก ส่วนค่าผิดพลาดมากที่สุดนั้นอยู่ในพิกัดอ้างอิงแกน Y เหตุผลเนื่องจากในการคำนวณค่าความผิดพลาดนั้นดูได้จากสมการที่ (5.1) ซึ่งจะเห็นได้ว่า ค่าที่วัดได้ (measure value) มีค่าน้อยมากหรือใกล้เคียงศูนย์มากเท่าใด จะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%error) มากขึ้นเท่านั้น นอกจากนี้จากตารางที่ 5.1 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของค่าความผิดพลาดในหน่วยของมิลลิเมตรได้ดังตารางที่ 5.2

$$\%error = \frac{|\text{real value} - \text{measure value}|}{|\text{real value}|} \quad (5.1)$$

ตารางที่ 5.2 ค่าความผิดพลาดที่จุดปลายแกนหมุนยนต์ในหน่วยมิลลิเมตร

Interesting Point	abs(Visual Studio – Solid works) mm.		
	X	Y	Z
Maximum	2.33	1.69	1.10
Minimum	0.03	0.00	0.02

ในตารางที่ 5.2 นั้นจะเห็นได้ว่าค่าผิดพลาดมากที่สุดจะอยู่ในพิกัดอ้างอิงแกน X และค่าผิดพลาดน้อยที่สุดจะอยู่ในพิกัดอ้างอิงแกน Y เนื่องจากในตารางที่ 5.2 จะเห็นได้ว่ามีค่าผิดพลาดมากถึง 2.33 มิลลิเมตรทำให้เกิดการหาวิธีที่จะทำให้สามารถลดค่าผิดพลาดนี้ลงให้ได้ ซึ่งจากการปรับปรุงในโครงสร้างโปรแกรมโดยการเพิ่มค่าความละเอียดให้กับค่าคงที่ Pi ซึ่งจากเดิมค่า Pi ในโปรแกรมที่ใช้ Library ของ OpenTK นั้นจะมีค่าเท่ากับ 3.14159274 (float type) เปลี่ยนเป็น 3.14159265358793 (double type) ซึ่งค่าที่เปลี่ยนไปนั้นเป็นค่าที่อ้างอิงค่า Pi จากโปรแกรม MatLab โดยสามารถดูการเปลี่ยนแปลงเทียบค่าความละเอียดได้จากรูปภาพที่ 5.3

Watch 1			>> pi
Name	Value	Type	
Log10E	0.4342945	float	ans =
Log2E	1.442695	float	
Pi	3.14159274	float	3.141592653589793
PiOver2	1.57079637	float	
PiOver3	1.04719758	float	
PiOver4	0.7853982	float	
PiOver6	0.5235988	float	
ThreePiOver2	4.712389	float	
TwoPi	6.28318548	float	

รูปภาพที่ 5.3 การเปลี่ยนเทียบค่าความละเอียดของค่า Pi

ซึ่งหลังจากที่ทำการเพิ่มค่าความละเอียดของค่าคงที่ Pi แล้วจึงทำการทดลอง จลนศาสตร์แบบกลับหลังของโปรแกรมหน้าจอแสดงผลอีกครั้งหนึ่ง จากผลการทดลอง ทั้งหมด 45 จุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์ พบว่าจากเดิมที่พบค่าความผิดพลาดในรูปแบบ เปอร์เซ็นต์นั้นจากเดิม 7.613 เปอร์เซ็นต์ เมื่อหลังจากทำการเพิ่มค่าความละเอียดของค่า Pi แล้วทำให้ลดลงเหลือ 4.187 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นค่าผิดพลาดมากที่สุดนั้นอยู่ในพิกัดอ้างอิงแกน Y ในจุดเดิมนั้นเอง ซึ่งสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ค่าความผิดพลาดที่จุดปลายแขนกลหุ่นยนต์ในรูปแบบเปอร์เซ็นต์เมื่อปรับปรุง

Error	End Point X	End Point Y	End Point Z
Average	0.013%	0.617%	0.022%
Maximum	0.063%	4.187%	0.091%
Minimum	0.001%	0.000%	0.000%

จากในตารางที่ 5.3 นั้นจะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ในทุกๆ พิกัดแกนอ้างอิง XYZ นั้นน้อยกว่าเดิมเมื่อเทียบกับค่าในตารางที่ 5.1 และค่าความผิดพลาด ที่จุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์ในรูปแบบเปอร์เซ็นต์ที่มากที่สุดตารางที่ 5.1 ในพิกัดอ้างอิง แกน Y จากเดิมที่ 7.163 เปอร์เซ็นต์เมื่อทำการเพิ่มค่าความละเอียดของค่า Pi ทำให้ลดลง เหลือ 4.187 เปอร์เซ็นต์ ในพิกัดอ้างอิงแกน X จากเดิมที่ 0.156 เปอร์เซ็นต์ลดลงเหลือ 0.063 เปอร์เซ็นต์และในพิกัดอ้างอิงแกน Z จากเดิมที่ 0.167 เปอร์เซ็นต์ลดลงเหลือ 0.091 เปอร์เซ็นต์

นอกจากนี้หากทำการพิจารณาค่าความผิดพลาดที่จุดปลายของแกนกลหุ่นยนต์ในหน่วยมิลลิเมตรแล้วจะสามารถเขียนเป็นตารางสรุปได้ดังตารางที่ 5.4

**ตารางที่ 5.4 ค่าความผิดพลาดที่จุดปลายแกนกลหุ่นยนต์ในหน่วยมิลลิเมตรเมื่อปรับปรุง**

Interesting Point	abs(Visual Studio – Solid works) mm.		
	X	Y	Z
Maximum	1.00	0.96	0.60
Minimum	0.02	0.00	0.00

จากในตารางที่ 5.4 นั้นจะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดที่จุดปลายของแกนกลหุ่นยนต์ในหน่วยมิลลิเมตรในทุกๆ พิกัดแกนนั่ง XYZ นั้นน้อยกว่าเดิมเมื่อเทียบกับค่าในตารางที่ 5.2 โดยหากพิจารณาค่าความผิดพลาดที่จุดปลายแกนกลหุ่นยนต์ในหน่วยมิลลิเมตรเมื่อปรับปรุงในพิกัดอ้างอิงแกน X จากเดิมที่ 2.33 มิลลิเมตรลดลงเหลือ 1.00 มิลลิเมตร ในพิกัดอ้างอิงแกน Y จากเดิมที่ 1.96 มิลลิเมตรลดลงเหลือ 0.96 มิลลิเมตรและในพิกัดอ้างอิงแกน Z จากเดิมที่ 1.10 มิลลิเมตรลดลงเหลือ 0.60 มิลลิเมตร

## 5.2 ผลการทดลองจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าของชุดควบคุมแกนกลหุ่นยนต์

ในการทดลองจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าของชุดควบคุมแกนกลหุ่นยนต์นั้น จะทำการทดสอบโดยป้อนค่าชุดองศาที่ต้องการทั้งหมด 45 ชุด โดยแต่ละชุดนั้นจะประกอบไปด้วยองศาที่ต้องการของแต่ละแกนข้อต่อของแกนกลหุ่นยนต์ เมื่อป้อนค่าองศาที่ต้องการทั้ง 45 ชุด แล้วทำการวัดค่าองศาป้อนกลับจากแต่ละแกนข้อต่อของแกนกลหุ่นยนต์ ซึ่งจากการวัดและเปรียบเทียบสามารถสรุปค่าผิดพลาดในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดเป็นตารางได้ดัง

ตารางที่ 5.5 และค่าความผิดพลาดสูงสุดต่ำสุดในหน่วยขององศาตั้ง

ตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.5 ค่าความผิดพลาดที่ของแต่ละแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ใน  
รูปแบบเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อน

Error	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$
Average	0.739%	0.985%	1.158%	2.576%	2.735%	1.814%
Maximum	2.174%	4.115%	6.383%	6.321%	6.231%	7.040%
Minimum	0.000%	0.000%	0.000%	1.575%	1.680%	0.200%

ตารางที่ 5.6 ค่าความผิดพลาดที่ของแต่ละแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ใน  
รูปแบบองศา

Error	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$
Maximum	0.02	0.10	0.18	0.50	0.40	0.88
Minimum	0.00	0.00	0.00	0.46	0.37	0.10

### 5.3 ผลการทดลองจลนศาสตร์แบบกลับหลังของชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์

ในการทดลองจลนศาสตร์แบบกลับหลังของชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์นั้น จะทำการทดสอบโดยป้อนค่าชุดพิกัดจุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์ ที่ต้องการทั้งหมด 45 ชุดพิกัดจุดปลาย โดยแต่ละชุดพิกัดจุดปลายนั้นจะประกอบพิกัดแกน x แกน y และแกน z ของแขนกลหุ่นยนต์ เมื่อป้อนพิกัดจุดปลายที่ต้องการทั้ง 45 ชุดพิกัดจุดแล้วทำการวัดค่าป้อนกลับพิกัดจุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์จากหน้าจอแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ ซึ่งจากการวัดและเปรียบเทียบสามารถสรุปค่าผิดพลาดในรูปแบบของเปอร์เซ็นต์ค่าความผิดพลาดเป็นตารางได้ดังตารางที่ 5.7 และค่าความผิดพลาดสูงสุดต่ำสุดในหน่วยขององศาตั้ง

## ตารางที่ 5.8

ตารางที่ 5.7 ค่าความผิดพลาดของแต่ละพิกัดจุดปลายของแกนกลหุ่นยนต์ใน  
รูปแบบเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อน

Error	X	Y	Z
Average	0.166%	1.053%	0.407%
Maximum	0.865%	5.400%	1.047%
Minimum	0.001%	0.052%	0.088%

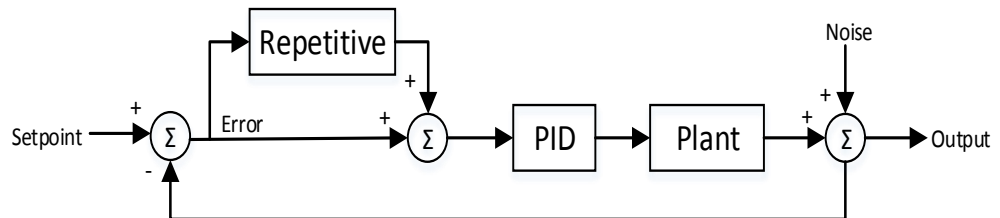
ตารางที่ 5.8 ค่าความผิดพลาดของแต่ละพิกัดจุดปลายของแกนกล  
หุ่นยนต์ในหน่วยมิลลิเมตร

Interesting Point	abs(Visual Studio – Solid works) mm.		
	X	Y	Z
Maximum	11.08	0.54	6.91
Minimum	0.01	0.26	1.81

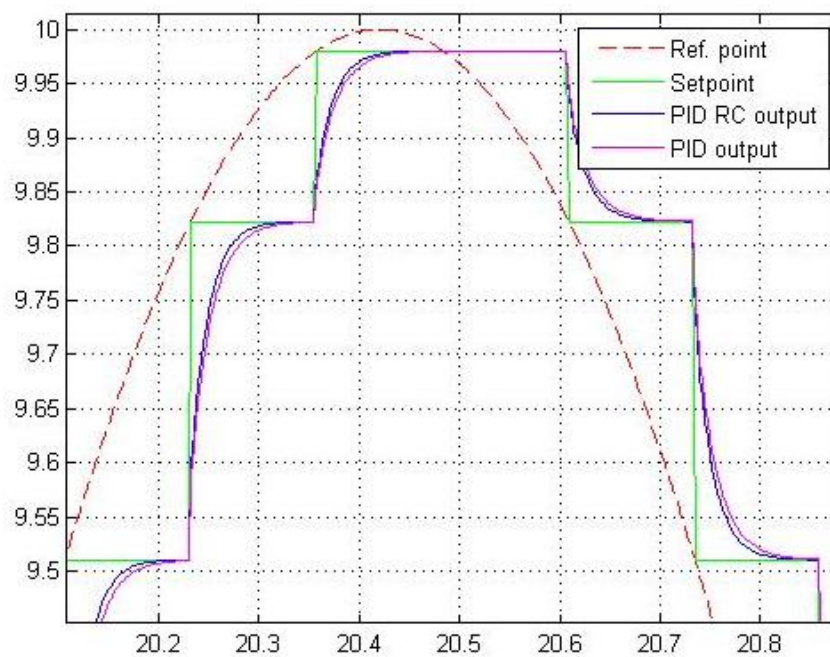
#### 5.4 ผลการทดลองการทำงานร่วมกันของระบบควบคุมแบบพีไอดีและระบบควบคุมแบบ ทำซ้ำ

ในการทดลองการทำงานร่วมกันของระบบควบคุมแบบพีไอดีและระบบควบคุมแบบ  
ทำซ้ำนั้น จะทำการเปรียบเทียบค่าผลลัพธ์และความผิดพลาดของการทำงานของระบบ  
ควบคุมแบบพีไอดีธรรมดาเทียบกับระบบควบคุมแบบพีไอดีรวมตัวกับระบบควบคุมแบบ

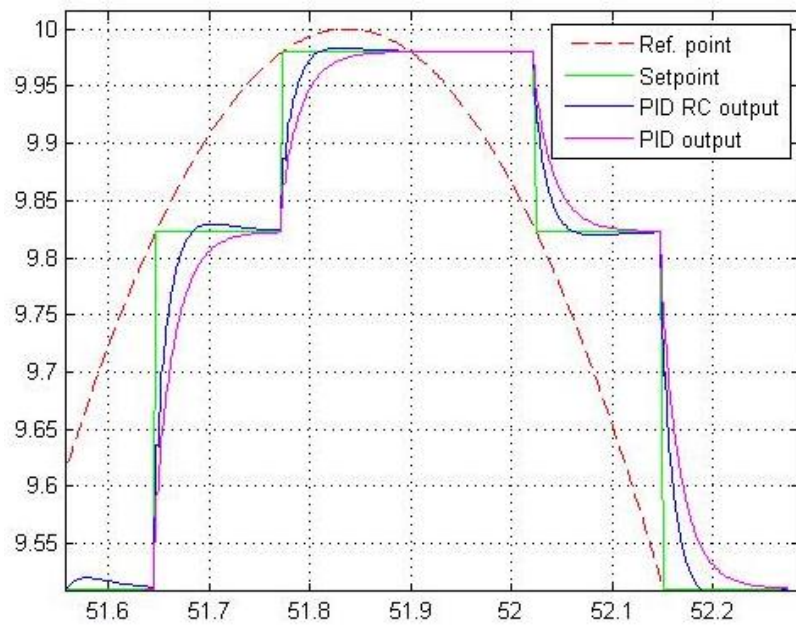
ทำซ้ำ โดยจะจำลองการทำงานของระบบควบคุมทั้งสองอย่างเป็นคาบเวลาทั้งหมด 20 คาบเวลา โดยการป้อนค่าเป้าหมายอ้างอิงกับสัญญาณไซน์ในรูปแบบสัญญาณขั้นบรรได (Step function) และนำผลลัพธ์ป้อนกลับที่ได้มาทำการหาค่าความผิดพลาด มาพล็อตเป็นกราฟ โดยผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบมีดังต่อไปนี้



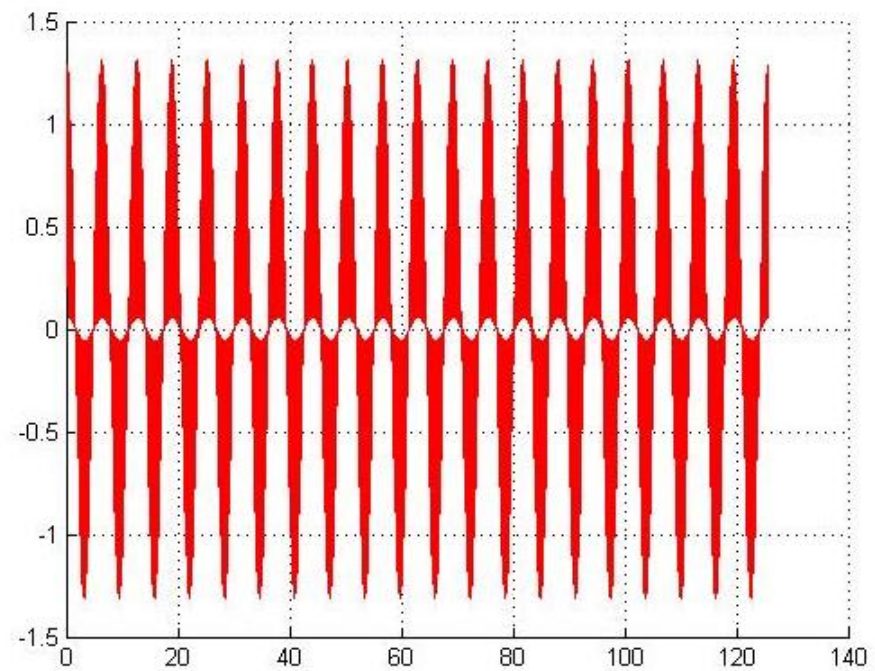
รูปภาพที่ 5.4 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพีไอดีรวมตัวกับระบบควบคุมแบบทำซ้ำ



รูปภาพที่ 5.5 กราฟค่าผลลัพธ์ของระบบควบคุมพีไอดีแบบธรรมดาเทียบกับระบบควบคุมพีไอดีทำงานร่วมกับระบบควบคุมแบบทำซ้ำในคาบการทำงานที่ 4

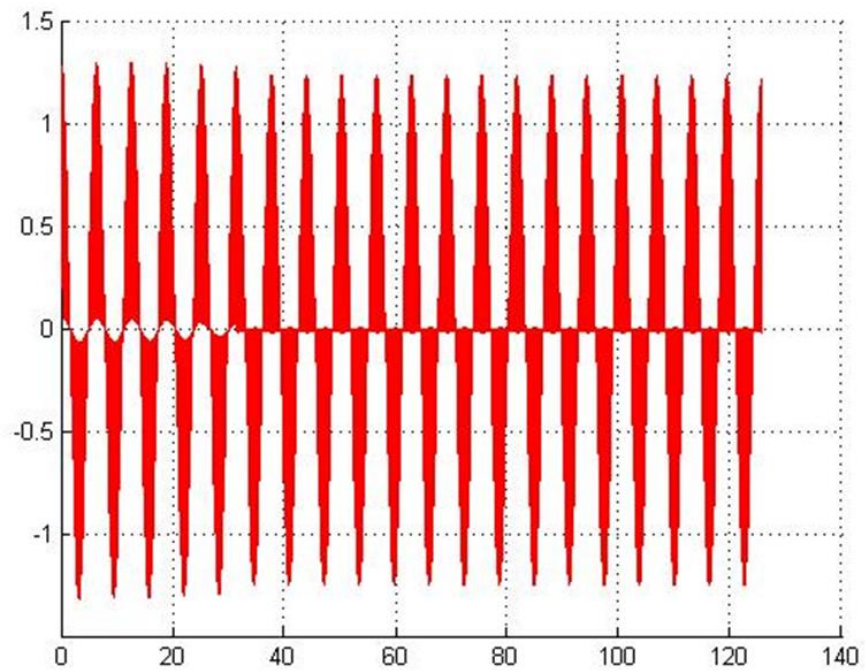


รูปภาพที่ 5.6 กราฟค่าผลลัพธ์ของระบบควบคุมพีไอดีแบบธรรมดาเทียบกับระบบควบคุมพีไอดีทำงานร่วมกับระบบควบคุมแบบทำซ้ำในคาบการทำงานที่ 10

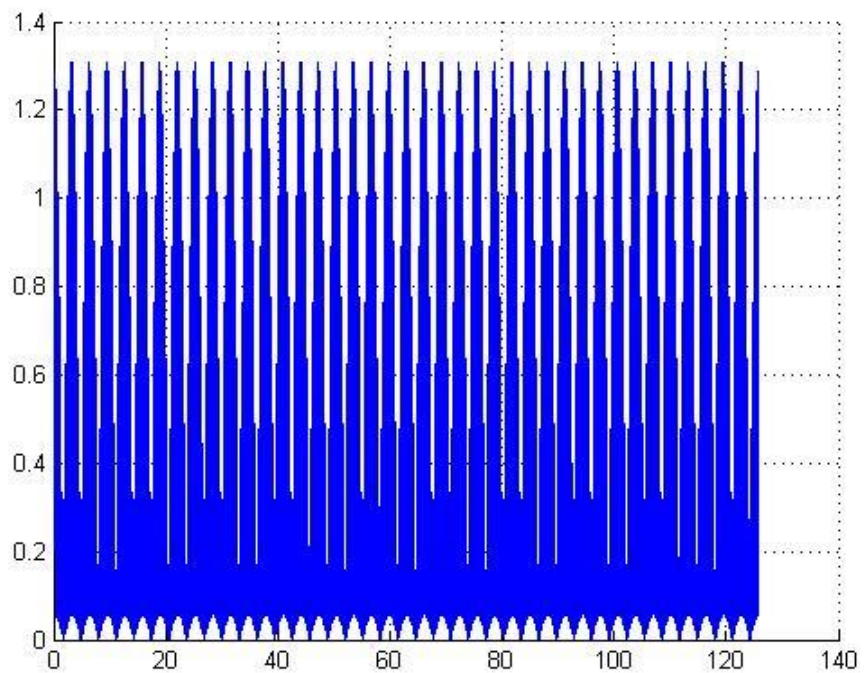


รูปภาพที่ 5.7 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของระบบควบคุมแบบพีไอดีแบบธรรมดา

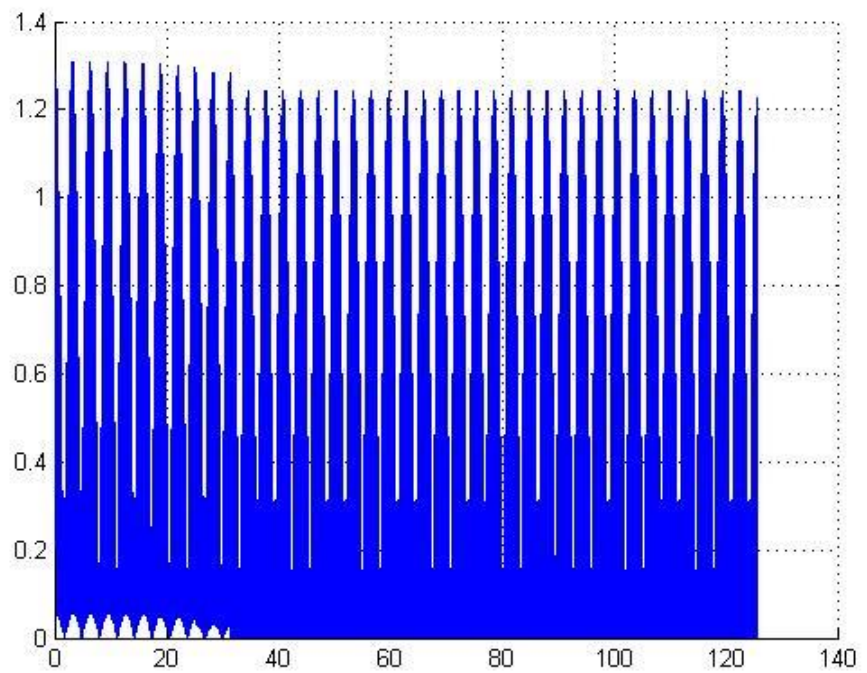




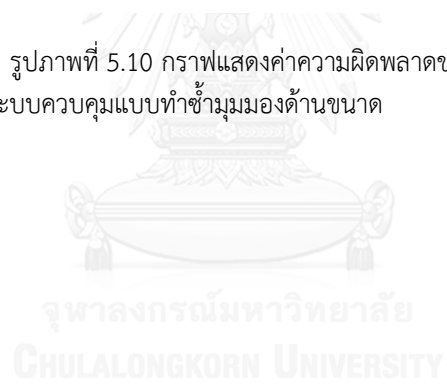
รูปภาพที่ 5.8 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของระบบควบคุมแบบพีไอดีที่ทำงานร่วมกับระบบควบคุมแบบทำซ้ำ



รูปภาพที่ 5.9 บล็อกไดอะแกรมระบบควบคุมแบบพีไอดีมุมมองด้านขนาด



รูปภาพที่ 5.10 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของระบบควบคุมแบบฟัซซี่ทำงานร่วมกับระบบควบคุมแบบทำซ้ำมุมมองด้านขนาด



## บทที่ 6

### ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงข้อสรุปและข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนางานวิจัยนี้ให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นในอนาคต

#### 6.1 สรุปผล

งานวิจัยนี้ วิจัยเกี่ยวกับการออกแบบตัวควบคุมอย่างง่ายและต้นทุนต่ำสำหรับแขนกลหุ่นยนต์ในงานอุตสาหกรรม โดยตัวควบคุมชุดนี้จะใช้เลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32F4 Discovery และทำการลง .NET Micro Framework (NETMF) ซึ่งทำให้สามารถทดสอบและปรับใช้ตัวซอฟต์แวร์ได้ด้วยภาษา C# ด้วยโปรแกรม Microsoft Visual Studio ได้ และนอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ยังได้ทำการสร้างหน้าจอสถาปัตยกรรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้เป็นส่วนในการตรวจสอบและสั่งงานจากผู้ควบคุมหุ่นยนต์ ซึ่งหน้าจอสถาปัตยกรรมคอมพิวเตอร์นั้นจะมีส่วนในการแสดงผลเป็นแบบจำลองสามมิติเพื่อบอกท่าทางการเคลื่อนไหวต่างๆของแขนกลหุ่นยนต์อีกด้วย จากการทดลองจลศาสตร์แบบไปข้างหน้าและแบบกลับหลังของของหน้าจอสถาปัตยกรรมคอมพิวเตอร์แล้ว ทำให้ทราบว่าจลศาสตร์แบบไปข้างหน้านั้นมีความถูกต้องแม่นยำและไม่มีความผิดพลาดในการคำนวณเลย ส่วนจลศาสตร์แบบกลับหลังนั้นพบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเพียง 1 มิลลิเมตร และเมื่อทำการทดสอบจากการใช้งานกับตัวชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์จริงพบว่าจลศาสตร์แบบไปข้างหน้านั้นมีความผิดพลาดมากที่สุดเพียง 0.88 องศาเท่านั้นส่วนการทดลองกับจลศาสตร์แบบกลับหลังนั้นมีค่าผิดพลาดมากที่สุดเพียง 11.08 มิลลิเมตร ซึ่งความผิดพลาดในปริมาณนี้เป็นค่าที่รับได้กับการใช้งานของแขนกลหุ่นยนต์ตัวนี้ และสามารถดูผลงานจากการใช้งานจริงทั้งหมดได้จาก [http://bit.ly/11JLf9y\[14\]](http://bit.ly/11JLf9y[14])

#### 6.2 ข้อเสนอแนะ

ชุดควบคุมแขนกลหุ่นยนต์นี้ควรจะมีตัวควบคุมระยะไกล(Remote) เพื่อคอยบังคับแขนกลหุ่นยนต์ที่ปลายแขนได้โดยไม่ต้องกลับมาบังคับที่หน้าจอสถาปัตยกรรมคอมพิวเตอร์หน้างานเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ชุดควบคุมนี้ทำการออกแบบโดยไม่ได้คำนึงถึงสัญญาณรบกวนต่างๆ ในการพัฒนาในอนาคตจึงควรทำการออกแบบตัวควบคุมแขนกลหุ่นยนต์นี้ เพื่อให้สามารถรับมือกับสัญญาณรบกวนภายนอกได้อีกด้วย

## รายการอ้างอิง

1. STMicroelectronics. *STM32F4DISCOVERY*. 2014; Available from: <http://www.st.com/web/catalog/tools/FM116/SC959/SS1532/PF252419?sc=internet/evalboard/product/252419.jsp>.
2. electronics, G. *.NET Micro Framework (NETMF)*. Available from: <https://www.ghielectronics.com/docs>.
3. Microsoft. *Visual C# resources*. 2014; Available from: <https://msdn.microsoft.com/en-us/vstudio/hh341490.aspx>.
4. Corke, P. *MATLAB Robotics Toolbox* 2011; Available from: [http://www.petercorke.com/Robotics\\_Toolbox.html](http://www.petercorke.com/Robotics_Toolbox.html).
5. รศ.ดร. มนัส สัจวรศิลป์, ว.ภ., คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์. 1 ed. 2543, บริษัท ดวงกลมสมัย จำกัด: สำนักพิมพ์ อินโฟเพรส. 508.
6. Mark W. Spong, S.H., M. Vidyasagar, *Robot Modeling and Control*. 2006: John Wiley & Sons, Inc.
7. Kongkaew, S., *Robot Arm controller Prototype Design*. 2008, Kasetsart University.
8. Zhang, J. *Repetitive Control: Theory and Application A brief Introduction*. 2011.
9. K. Zhou, a.D.W., *Digital Repetitive Controlled Three-Phase PWM Rectifier*, in *IEEE International Conference on Power Electronics*. 2003. p. 309-314.
10. S. Hara, Y.Y., T. Omata, and M. Nakano, *Repetitive control system: a new type servo system for periodical exogenous signals*, in *IEEE Trans. Auto. Control*. 1988. p. pp. 659–667.
11. Toolkit, T.O. *OpenTk*. Available from: <http://www.opentk.com/>.
12. Bejo, A., *A System on Chip Design of A 6-Axis Robotic Arm Controller Implemented on A Low-Cost FPGA*. 2008, Chulalongkorn University.
13. Anon Mosuwan, W.P., *A Comparison of Kinematics Calculation by Visual Studio OpenTK Library, with the Measurement Result of Solid Works*, in *ITC-*

*CSCC 2014 The 29th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications*. 2014: Phuket.

14. Channel, T.; Available from:

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLzg156ONmKl-XZ9-kT3R8LyOSRmczwM7A>.





ภาคผนวก

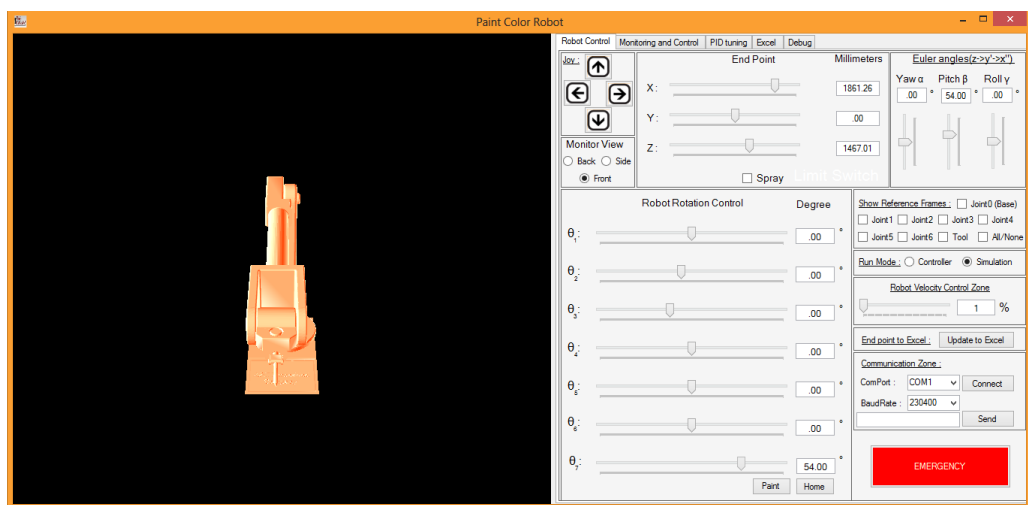
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ภาคผนวก ก

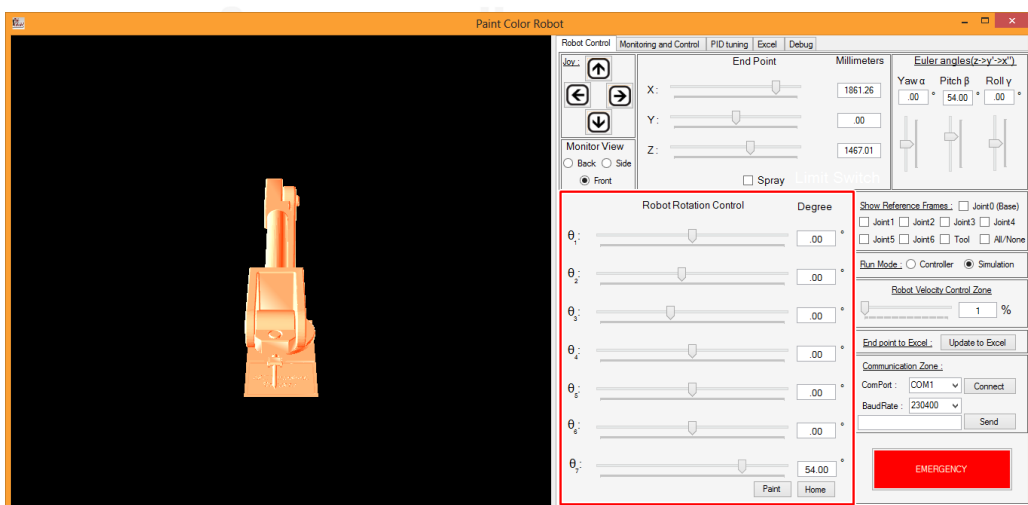
### คู่มือการใช้งานโปรแกรมบนหน้าจอแสดงผลของตัวควบคุมแขนกลหุ่นยนต์

#### วิธีใช้งานในโหมดจำลองการทำงาน

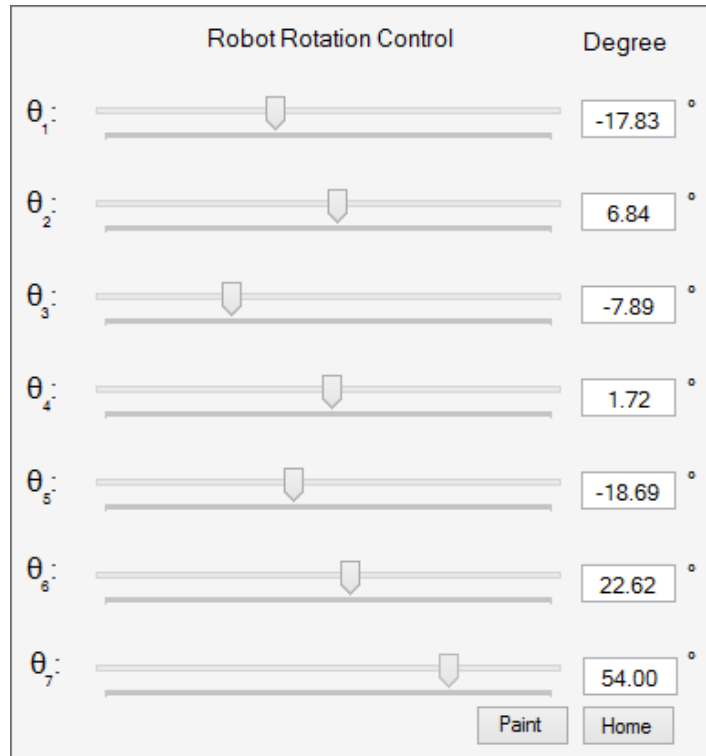
1. เมื่อเปิดโปรแกรมขึ้นมาจะพบกับหน้าต่างของหน้าจอแสดงผลดังนี้



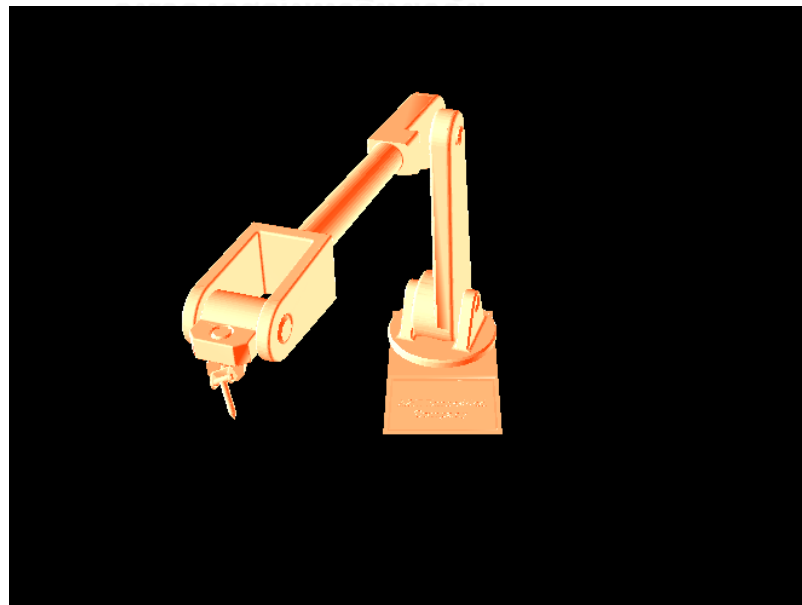
2. เมื่อต้องการเคลื่อนไหวแกนข้อต่อแต่ละแกนของแขนกลหุ่นยนต์ทำการปรับบาร์เลื่อนที่ Robot Rotation control



3. หลังจากที่ทำกาการปรับเลี่ยนบาร์เลี่ยนแล้วจะเห็นได้ว่าค่าองศาแต่ละแกนข้อต่อจะเปลี่ยนไปยกตัวอย่างเช่นภาพนี้

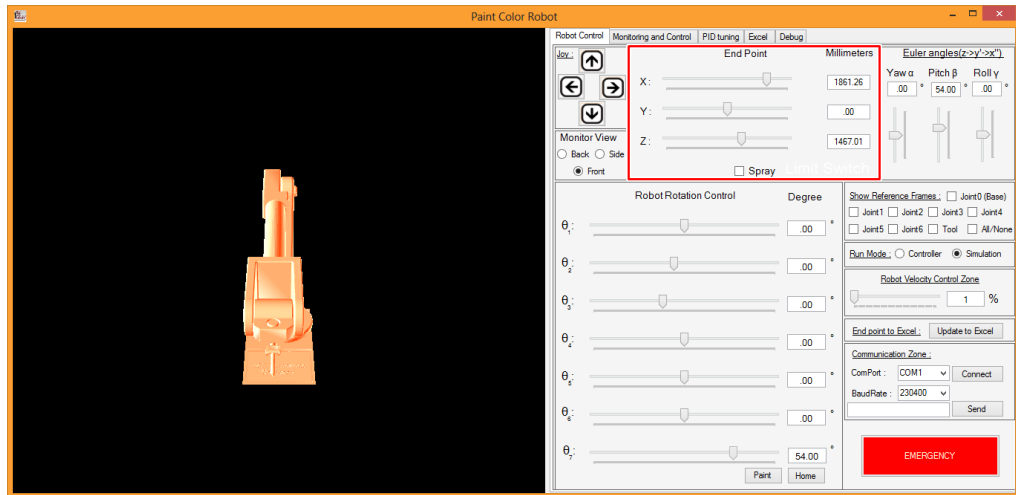


4. และในขณะเดียวกันแบบจำลองสามมิติ ก็จะถูกปรับเปลี่ยนไปตามองศาที่เปลี่ยนไปในแต่ละแกนข้อต่อด้วยอย่างเช่นภาพข้างล่างนี้

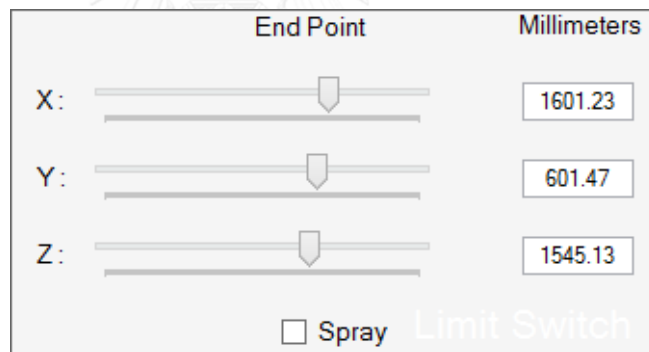




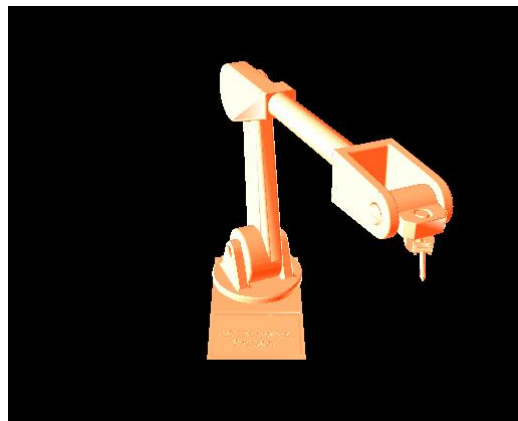
5. เมื่อต้องการเคลื่อนหัวที่จุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์ให้ทำการปรับบาร์เลื่อนที่ End Point



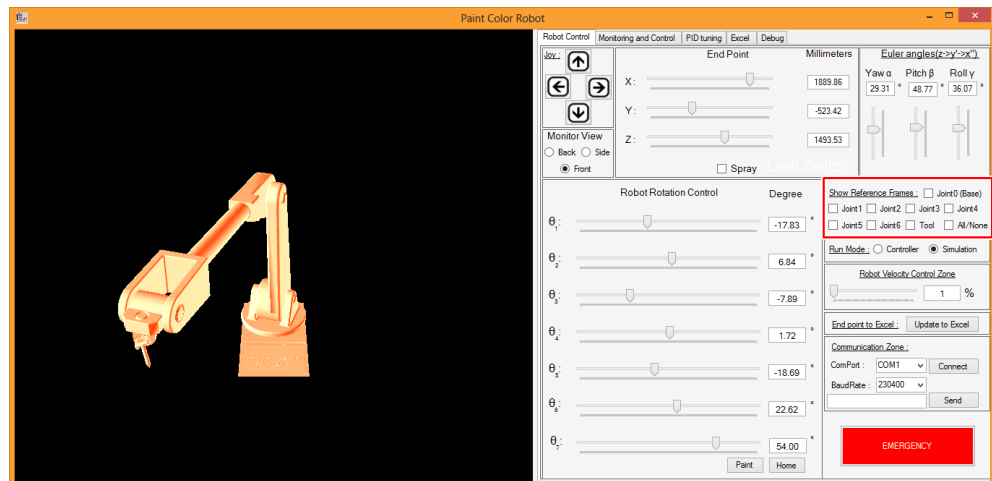
6. หลังจากที่ทำกรปรับบาร์เลื่อนแล้วจะเห็นได้ว่าค่าจุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์จะเปลี่ยนไปยกตัวอย่างเช่นภาพนี้



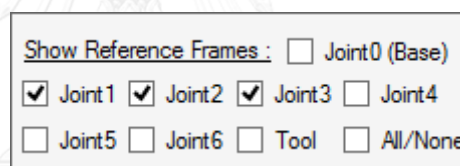
7. และในขณะเดียวกันแบบจำลองสามมิติ ก็จะไปปรับเปลี่ยนไปตามค่าจุดปลายที่เปลี่ยนไปเช่นกัน ตัวอย่างเช่นภาพข้างล่างนี้



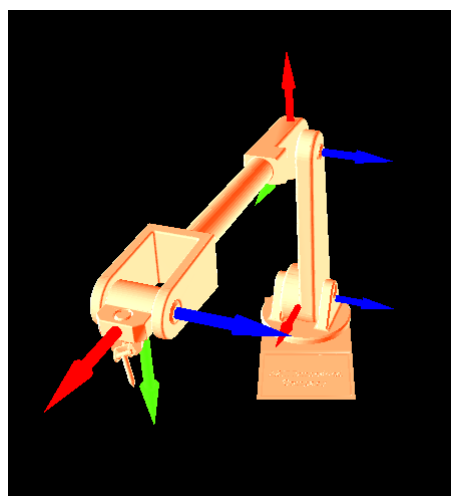
8. เมื่อต้องการให้หน้าจอแสดงผล แสดงแกนอ้างอิงของแต่ละแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ ให้ทำการปรับเลือกที่ Show Reference Frame



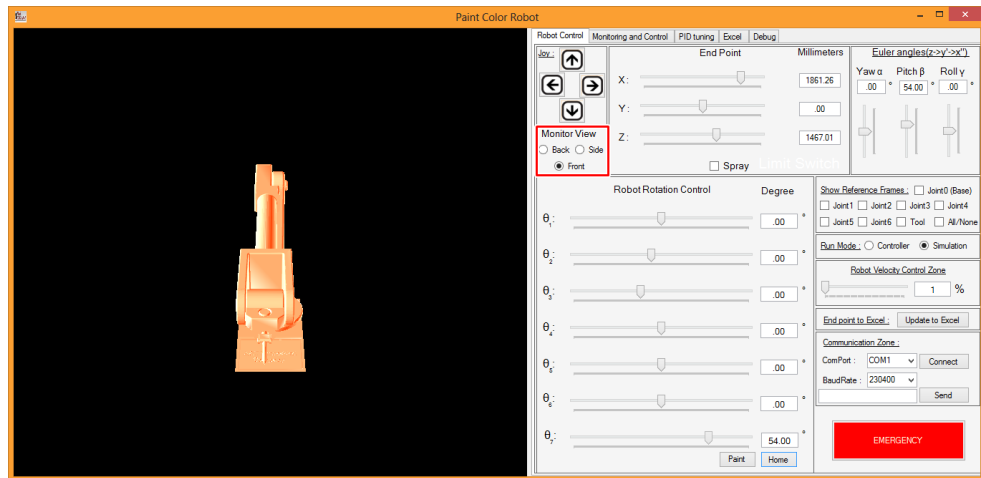
9. หลังจากที่ทำกรปรับเลือกแล้วจะเห็นได้ว่าจะมีเครื่องหมายถูกขึ้นที่แต่ละแกนที่ต้องการแสดงแกนอ้างอิง ยกตัวอย่างเช่นภาพนี้



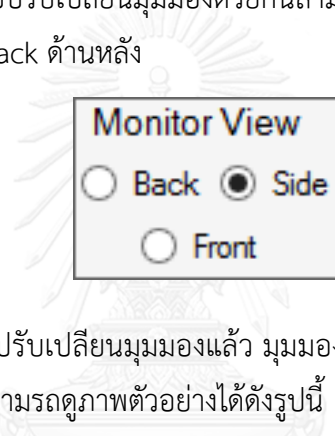
10. และในขณะที่เดียวกันแบบจำลองสามมิติ ก็จะปรับเปลี่ยนไปตามที่ได้เลือกไว้ว่าต้องการแสดงแกนอ้างอิงแกนไหน อย่างเช่นภาพข้างล่างนี้



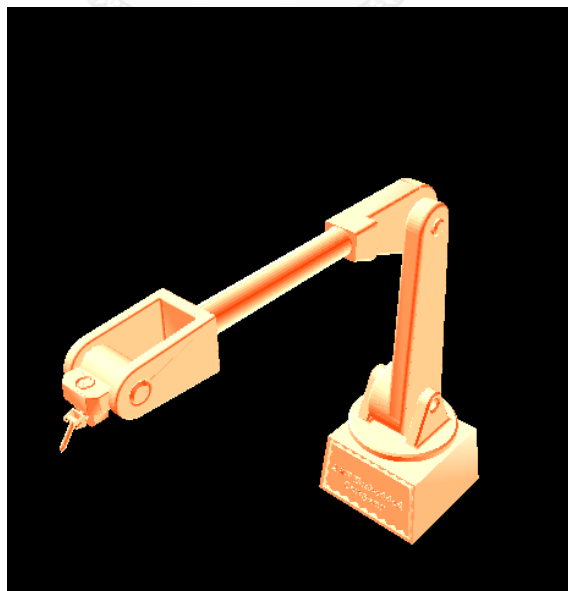
11. เมื่อต้องการปรับเปลี่ยนมุมมองของแบบจำลองสามมิติสามารถทำได้โดยการเลือกปรับมุมมองที่ Monitor View



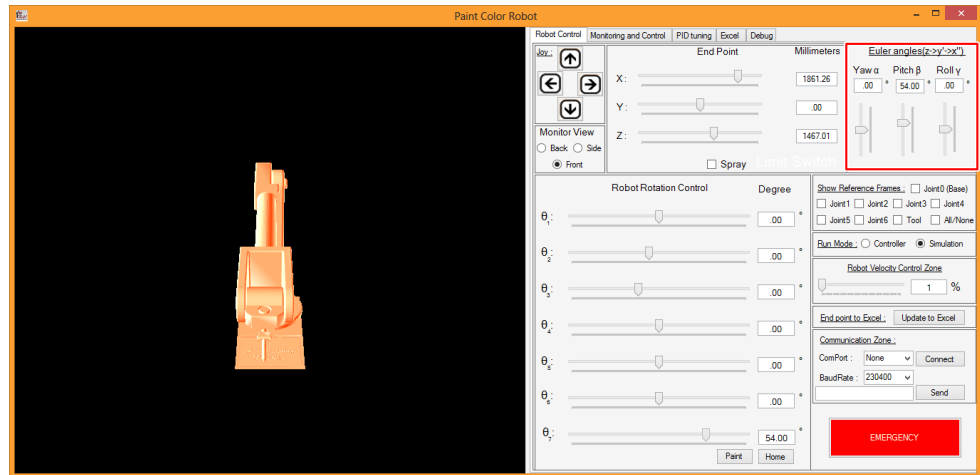
12. ทำการคลิกเลือกเพื่อปรับเปลี่ยนมุมมองด้วยกันสามมุมมองด้วยกันคือ “Front” ด้านหน้า, “Side” ด้านข้าง, Back ด้านหลัง



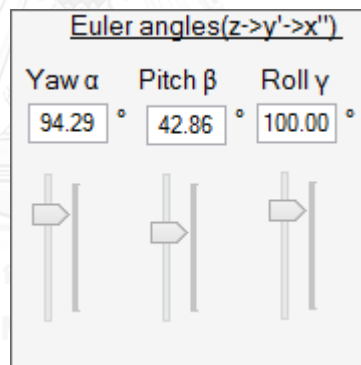
13. เมื่อทำการคลิกเพื่อปรับเปลี่ยนมุมมองแล้ว มุมมองของแบบจำลองสามมิติก็จะเปลี่ยนไปด้วยเช่นกัน โดยสามารถดูภาพตัวอย่างได้ดังรูปนี้



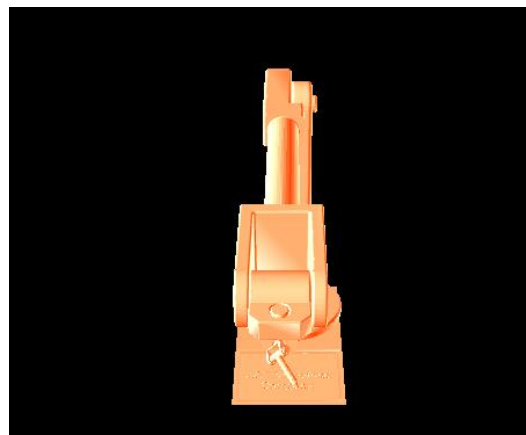
14. เมื่อต้องการปรับเปลี่ยนมุมของปลายแขนกลหุ่นยนต์สามารถทำได้โดยการปรับบาร์เลื่อนที่ Euler angles



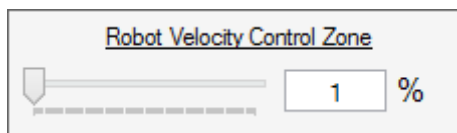
15. หลังจากที่ทำกรปรับเลี่ยนบาร์เลื่อนแล้วจะเห็นได้ว่าค่าของมุมจุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์จะเปลี่ยนไปยกตัวอย่างเช่นภาพนี้



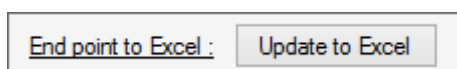
16. และในขณะที่เดียวกันแบบจำลองสามมิติ ก็ะปรับเปลี่ยนไปตามค่าของมุมจุดปลายที่เปลี่ยนไปเช่นกัน ตัวอย่างเช่นภาพข้างล่างนี้



17. เมื่อต้องการปรับความเร็วในการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์สามารถปรับความเร็วได้ที่บาร์เลื่อนที่ Robot Velocity Control Zone ดังภาพ

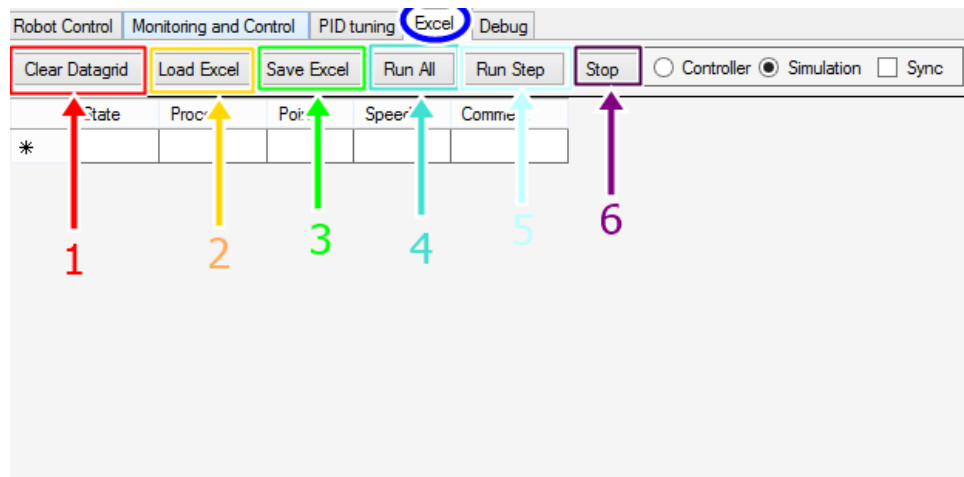


18. เมื่อต้องการอัปเดตค่าที่จุดปลายของแขนกลหุ่นยนต์ ณ ปัจจุบันสามารถทำได้ด้วยการคลิกที่ปุ่ม Update to Excel



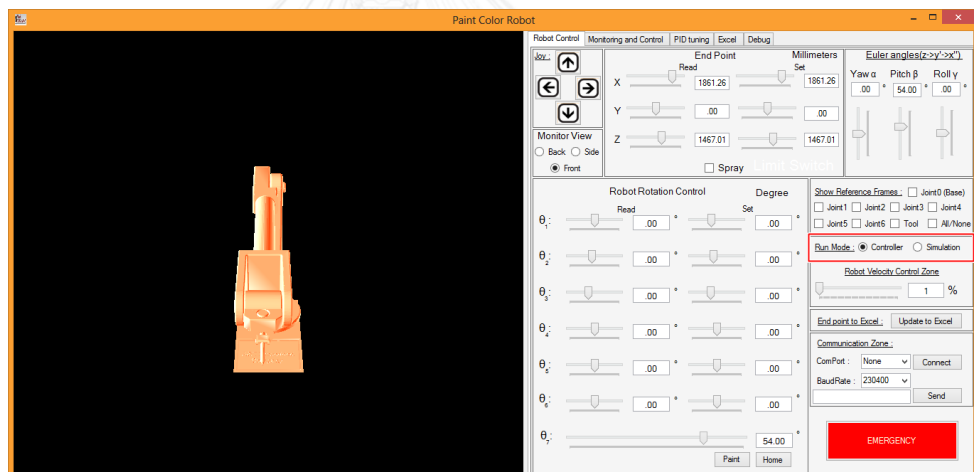
19. เมื่อต้องการทำงานอย่างเป็นขั้นตอนสามารถทำได้โดยการคลิกที่แท็บด้านบนเลือกที่ Excel โดยในส่วนการทำงานอย่างเป็นขั้นตอนนั้นจะประกอบไปด้วยปุ่มทั้งหมด 6 ปุ่มด้วยกันดังนี้

- ปุ่ม Clear Datagrid เป็นปุ่มที่เอาไว้ทำการลบข้อมูลทั้งหมดในตารางเพื่อเริ่มต้นตารางใหม่
- ปุ่ม Load Excel เป็นปุ่มที่เอาไว้เพื่อการนำ file excel ขั้นตอนการทำงานที่ได้เขียนไว้มาใส่ในตารางของโปรแกรม
- ปุ่ม Save Excel เป็นปุ่มที่เอาไว้เพื่อการบันทึกขั้นตอนตารางการทำงานที่ได้เขียนไว้ในตารางโปรแกรมในรูปแบบ file excel
- ปุ่ม Run All เป็นปุ่มที่เอาไว้เพื่อทำการทำงานตามคำสั่งที่เขียนไว้ในตารางการทำงานทั้งหมด
- ปุ่ม Run Step เป็นปุ่มที่เอาไว้เพื่อทำการทำงานตามคำสั่งที่เขียนไว้ในตารางการทำงานที่ละขั้นตอน
- ปุ่ม Stop เป็นปุ่มที่เอาไว้เพื่อหยุดทำการทำงานตามคำสั่งที่เขียนไว้ในตารางการทำงานทั้งหมด



### วิธีใช้งานในโหมดติดต่อกับตัวควบคุม

- เมื่อต้องการให้หน้าจอแสดงผลทำการติดต่อกับตัวควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ เมื่อเปิดโปรแกรมมาให้ไปที่ Run Mode



- ทำการเลือกโหมดการทำงานเป็น Controller

Run Mode :  Controller  Simulation

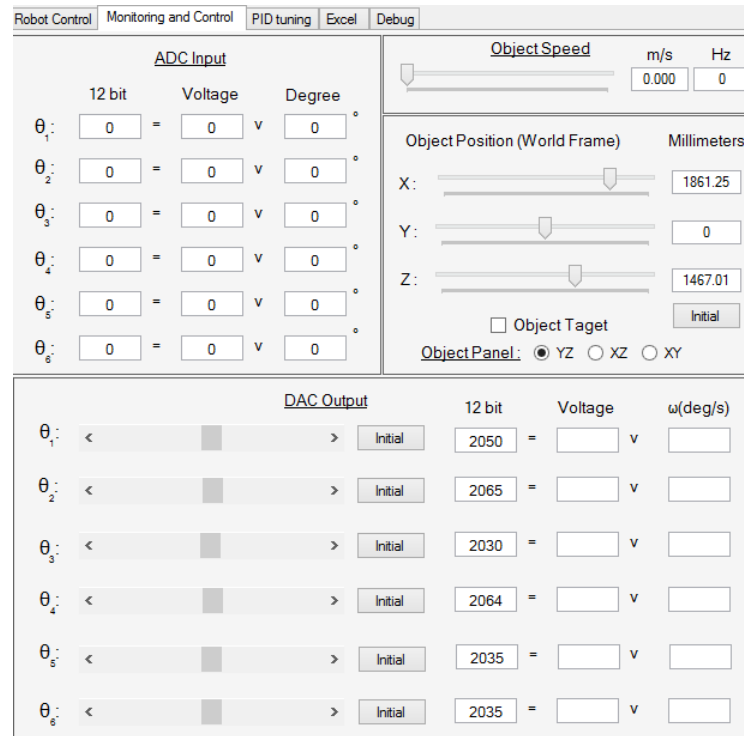
- เลือกทำการติดต่อสื่อสารกับตัวควบคุมแขนกลผ่านทางช่องสื่อสารอนุกรม

Communication Zone :

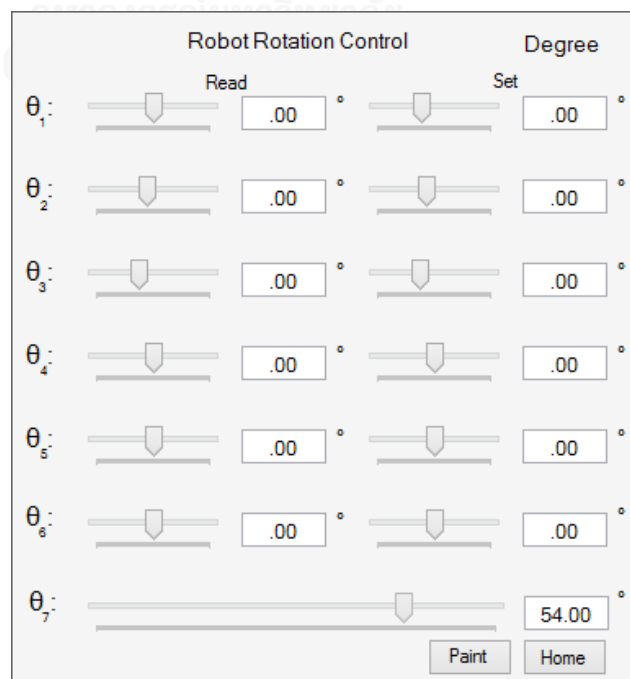
ComPort : COM1

BaudRate : 230400

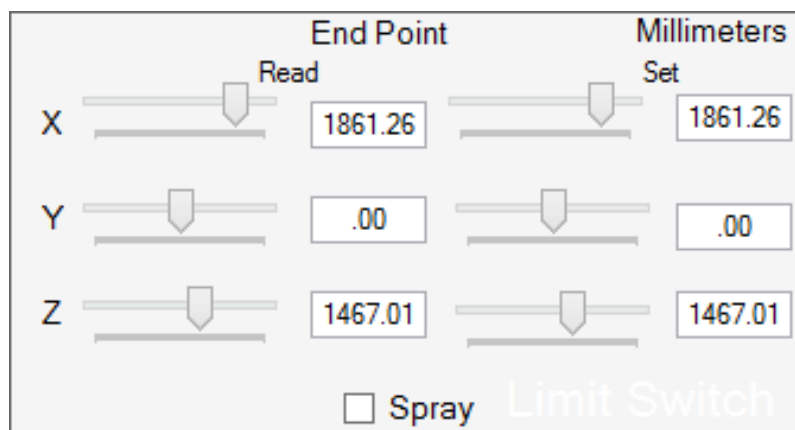
4. เมื่อต้องการสั่งให้แขนกลหุ่นยนต์แต่ละแกนเคลื่อนที่หรือต้องการดูการอ่านค่าแรงดันของข้อต่อแต่ละข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ให้ไปที่แท็บ Robot Rotation Control



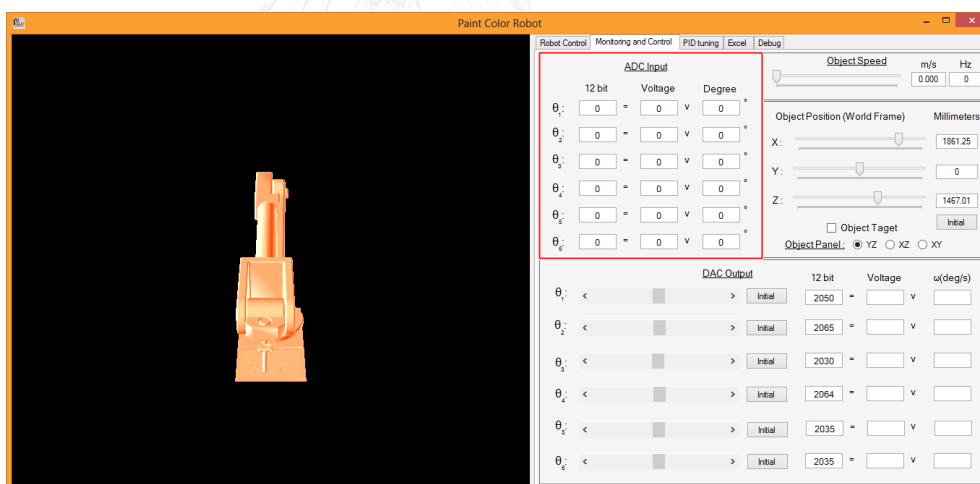
5. แล้วทำการปรับเลื่อนบาร์เลื่อนของแต่ละแกนข้อต่อที่บริเวณบาร์เลื่อน Set นอกจากนี้สามารถอ่านค่า มุมองศาของแต่ละแกนข้อต่อได้จากส่วน Read



6. เมื่อต้องการสั่งให้แขนกลหุ่นยนต์เคลื่อนที่จุดปลายที่ต้องการ ให้ไปที่ End Point แล้วทำการปรับเลื่อนบาร์เลื่อนของแต่ละแกนจุดปลายอ้างอิงที่บริเวณบาร์เลื่อน Set นอกจากนี้สามารถสั่งให้แขนกลหุ่นยนต์ทำการพ่นสเปรย์ได้ด้วยการเลือกที่ช่อง Spray



7. เมื่อต้องการอ่านค่ามุมมองของแต่ละแกนอ้างอิงของแขนกลหุ่นยนต์ให้ไปที่แท็บ Monitoring and Control แล้วไปที่ส่วนของ ADC Input

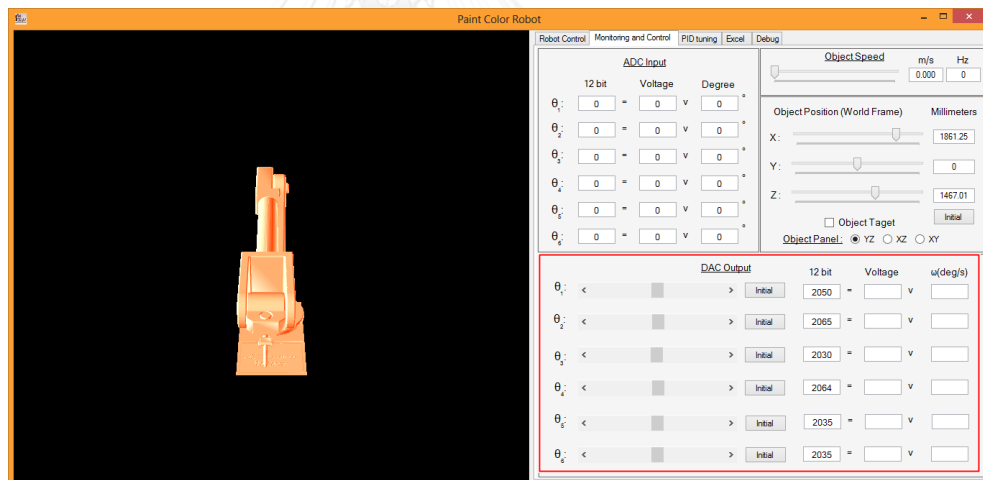


8. ให้สังเกตค่าที่เป็นระดับ 12 bit หรือ Voltage และมุมที่ถูกแปลงเป็นองศาที่ Degree ของแต่ละองศาของแขนกลหุ่นยนต์



ADC Input				
	12 bit	=	Voltage	Degree
$\theta_1$ :	0	=	0 v	0°
$\theta_2$ :	0	=	0 v	0°
$\theta_3$ :	0	=	0 v	0°
$\theta_4$ :	0	=	0 v	0°
$\theta_5$ :	0	=	0 v	0°
$\theta_6$ :	0	=	0 v	0°

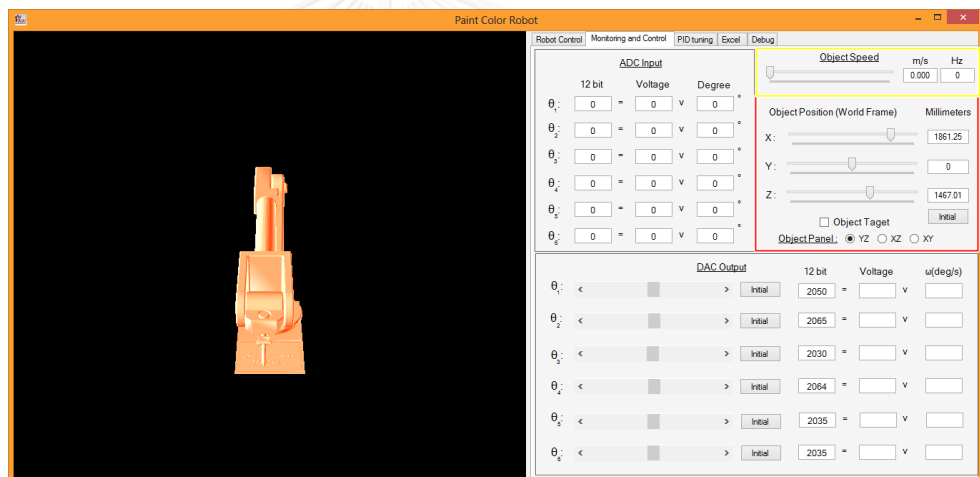
9. เมื่อต้องการสั่งงานในระดับ 12 bit ให้แต่ละแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ให้ไปที่ DAC OutPut



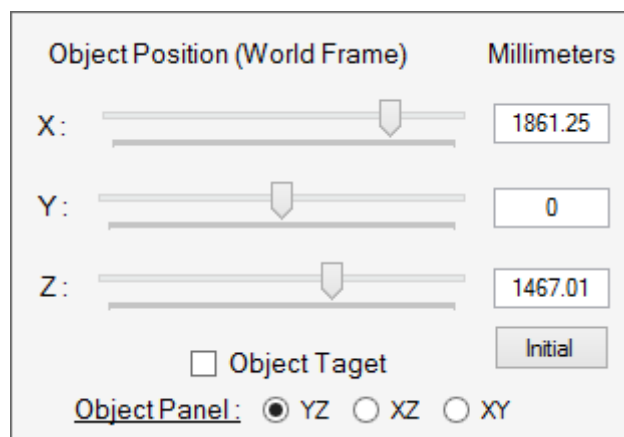
10. ให้สังเกตดูค่าที่เป็นระดับ 12 bit หรือ Voltage ที่จะสั่งงานในแต่ละแกน ซึ่งสามารถปรับได้ที่บาร์เลื่อน และความเร็วของเชิงมุมเป็นองศาต่อวินาทีของแต่ละองศาของแขนกลหุ่นยนต์

		DAC Output		12 bit	Voltage	$\omega$ (deg/s)
$\theta_1$	< [Slider] >	Initial	2050	=	[ ] v	[ ]
$\theta_2$	< [Slider] >	Initial	2065	=	[ ] v	[ ]
$\theta_3$	< [Slider] >	Initial	2030	=	[ ] v	[ ]
$\theta_4$	< [Slider] >	Initial	2064	=	[ ] v	[ ]
$\theta_5$	< [Slider] >	Initial	2035	=	[ ] v	[ ]
$\theta_6$	< [Slider] >	Initial	2035	=	[ ] v	[ ]

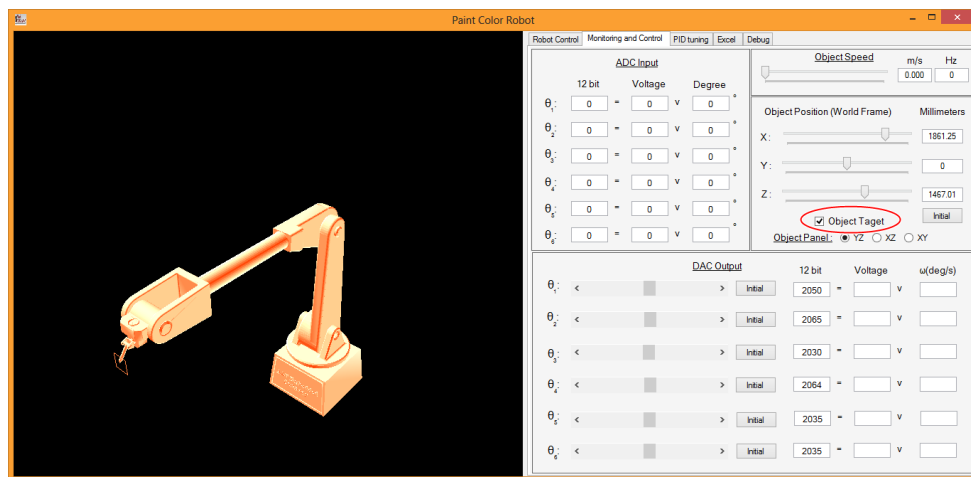
11. เมื่อต้องการทราบค่าของตำแหน่งเป้าและต้องการทราบค่าความเร็วที่เคลื่อนที่ของเป้าให้ดูที่ส่วน Object Speed กับ Object Position



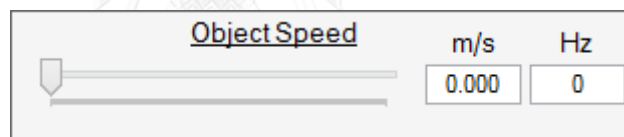
12. ในส่วนตำแหน่งของเป้านั้นจะสามารถดูได้ที่ Object Position ซึ่งจะบอกเป็นตำแหน่งในหน่วยมิลลิเมตรและจะมีการอัปเดตค่าตำแหน่งทุกๆ 1 วินาที เมื่อเป้านั้นเคลื่อนที่



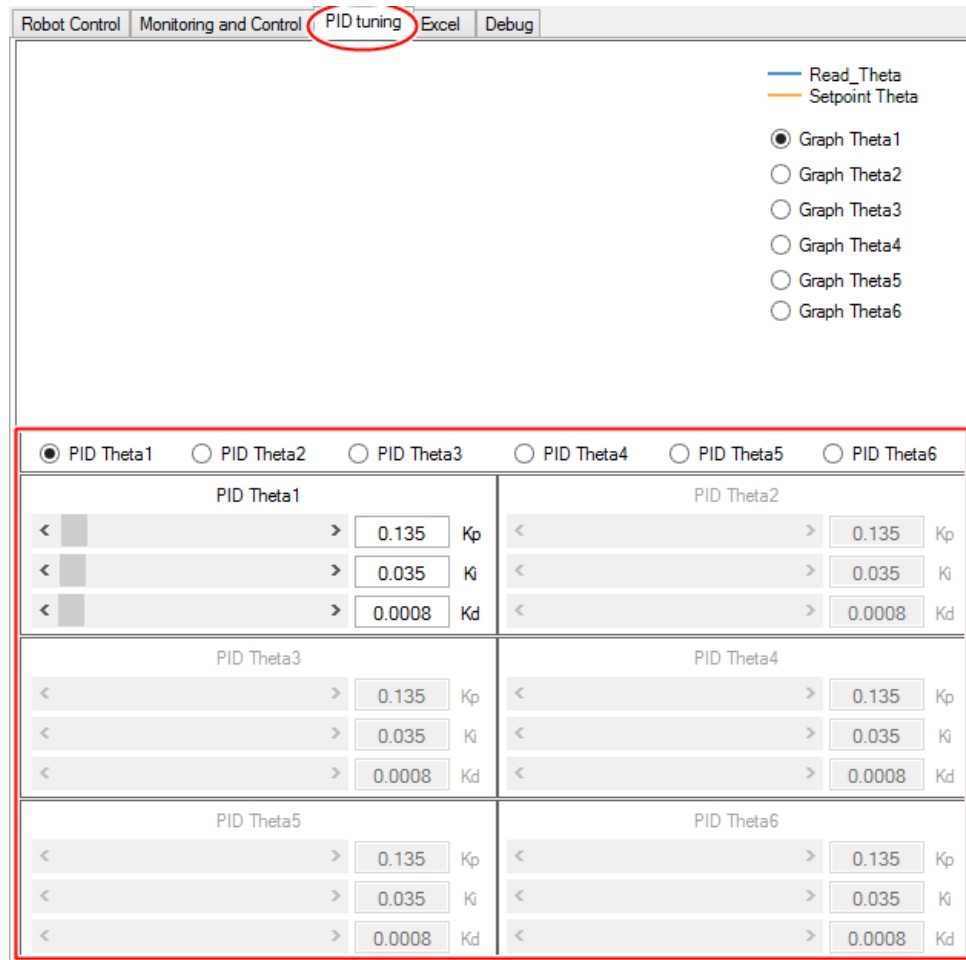
13. นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มเป้าในแบบจำลองสามมิติของแขนกลหุ่นยนต์ได้อีกด้วย โดยการเลือกที่ Object Target



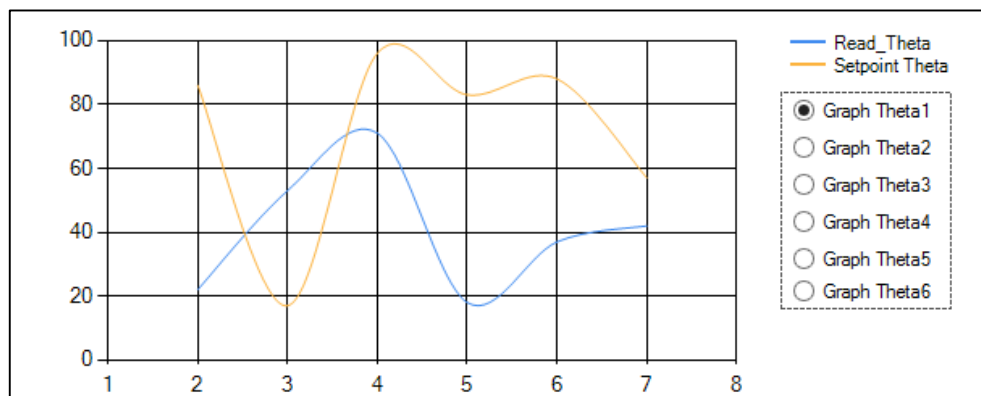
14. ในส่วนความเร็วในการเคลื่อนที่ของเป้านั้นจะสามารถดูได้ที่ Object Speed ซึ่งจะบอกเป็นความเร็วในหน่วยในเมตรต่อวินาที แบะความถี่ของจำนวนพัลส์ที่นับได้จากเอ็นค็อดเดอร์ในหน่วยเฮิร์ตซ์ ซึ่งจะมีการอัปเดตค่าความเร็วทุกๆ 1 วินาที เมื่อเป้านั้นเคลื่อนที่



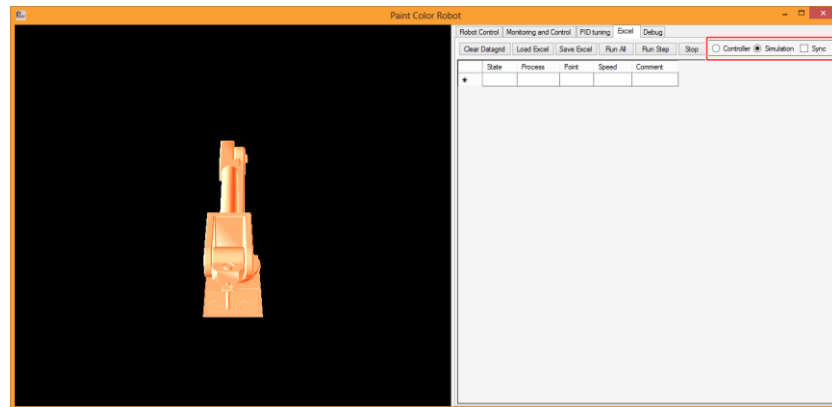
15. เมื่อต้องการทำการจูนค่า PID ของตัวควบคุมแขนกลหุ่นยนต์ให้ไปที่แท็บ PID tuning ในแท็บนี้จะสามารถปรับค่าพารามิเตอร์ Kp Ki Kd ของแต่ละแกนข้อต่อของแขนกลหุ่นยนต์ได้ด้วยการปรับบาร์เลื่อน



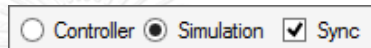
16. และสามารถดูผลลัพธ์จากการจูนค่า  $K_p$   $K_i$   $K_d$  แบบทันทีได้จากกราฟ ซึ่งสามารถทำการเลือกได้ว่าจะทำการดูกราฟของแกนข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์แกนที่ต้องการ



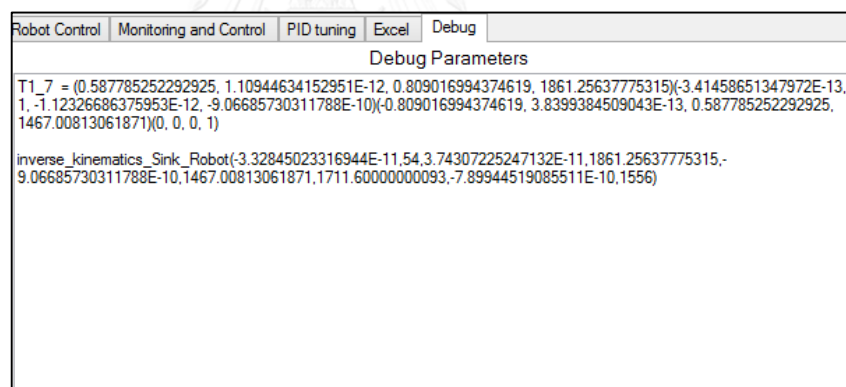
17. ในส่วนการทำงานอย่างเป็นขั้นตอน(แท็บ Datagrid)นั้นจะเหมือนกับการทำงานในโหมดจำลองการทำงานของตัวควบคุมเช่นกันทั้งหมดแต่จะมีส่วนที่สามารถกดเพื่อเข้าสู่การทำงานในความเร็วที่สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของเป้า



18. การสั่งให้แขนกลหุ่นยนต์ทำงานให้สัมพันธ์กับความเร็วสายพานหรือเป้านั้นสามารถทำได้ โดยการคลิกที่ Sync



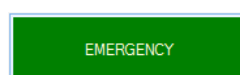
19. เมื่อต้องการอ่านค่าในส่วนการคำนวณในแต่ละส่วนการทำงานของหน้าจอแสดงผล สามารถดูได้ส่วน Debug



20. เมื่อต้องการสั่งให้แขนกลหุ่นยนต์หยุดการสามารถทำได้โดยการกดที่ปุ่ม Emergency เมื่อ แขนกลหุ่นยนต์ทำงานหยุดปุ่ม Emergency จะเปลี่ยนจากสีแดงเป็นสีเขียว



21. เมื่อต้องการสั่งให้แขนกลหุ่นยนต์นั้นกลับมาทำงานอีกครั้งหนึ่ง สามารถทำได้โดยการกดที่ปุ่ม Emergency เมื่อแขนกลหุ่นยนต์กลับมาทำงาน Emergency จะเปลี่ยนจากสีเขียว เป็นสีแดง



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอานนท์ หม้อสุวรรณ เกิดเมื่อวันที่ 18 มกราคม พ.ศ. 2533 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาหลักสูตรหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ จากภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2554 ต่อมาได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า แขนงวิชาการออกแบบและประยุกต์วงจรรวม ที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2555

