

การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์แขนกล 6 องศาอิสระ  
SIX DEGREES OF FREEDOM ROBOT ARM

นวพัฒน์ จำเริญรักษ์  
พลิชัฐ ภูมิณี  
ศรัณย์ เงินมงคล

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์แขนกล 6 องศาอิสระ  
SIX DEGREES OF FREEDOM ROBOT ARM

นายพัฒน จำเริญรักษ์  
พลิษฐ์ ภู่มณี  
ศรัณย์ เงินมงคล

ปฏิญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

# SIX DEGREES OF FREEDOM ROBOT ARM

NAWAPAT JAMRENLAK  
PASIT POOMANEE  
SARAN NGOENMONGKHON

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2016

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การออกแบบและสร้างหุ่นยนต์แขนกล 6 องศาอิสระ  
Six degrees of freedom Robot Arm

ผู้จัดทำ

1. นาย นวพัฒน์ จำเริญรักษ์ รหัสประจำตัว 56010663
2. นาย พสิษฐ์ ภู่มณี รหัสประจำตัว 56010829
3. นาย ศรัณย์ เงินมงคล รหัสประจำตัว 56011179

  
อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ดร. เอกพจน์ ตันตราภิวัดน์)

การออกแบบและสร้างเครื่องพิมพ์ 3 มิติด้วยระบบแขนกล

นายวพัฒน์ จำเริญรักษ์ 5601066

นายพลิชฐ์ ภูมณี 56010829

นายศรัณย์ เงินมงคล 56011179

ดร. เอกพจน์ ตันตราภิวัดน์ อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2559

## บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้มีออกแบบและสร้างแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกล 6 แกนที่สามารถพัฒนาเป็นเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เพื่อเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่ของหัวฉีดพลาสติกให้มีความอิสระมากขึ้น พร้อมทั้งศึกษาและเขียนโปรแกรมควบคุมให้ง่ายต่อการใช้งาน โดยในส่วนต้นกำลังขับเคลื่อนได้เลือกใช้อาร์ซีเซอร์โวมอเตอร์เนื่องจากเป็นมอเตอร์ที่ควบคุมได้ง่าย ไม่ซับซ้อน ในด้านของส่วนประกอบทางกล ได้ออกแบบและสร้างแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกลด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และส่วนของการควบคุมได้มีการเขียนโปรแกรมที่ใช้วิเคราะห์และคำนวณการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แขนกลด้วยโปรแกรม MATLAB โดยในขั้นแรกโปรแกรมจะรับค่าตำแหน่งเป้าหมายเพื่อนำไปวิเคราะห์และประมวลผล จากนั้นโปรแกรมจะส่งข้อมูลที่คำนวณได้ไปยังส่วนควบคุม ขึ้นต่อมาส่วนควบคุมจะทำการควบคุมต้นกำลังในแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์แขนกล และหุ่นยนต์แขนกลจะทำการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายที่ได้ป้อนค่าไว้ในขั้นตอนแรก ผลจากการทดลองควบคุมหุ่นยนต์แขนกลให้เคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งที่เป้าหมายแบบเป็นช่วงๆ หรือแบบจุดต่อจุด พบว่าตำแหน่งที่ได้ผิดพลาดไปจากตำแหน่งที่ต้องการมากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนโดยทั่วไปของเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ที่ยอมรับได้ซึ่งเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนของเซ็นเซอร์ตรวจจับองศาการหมุนของอาร์ซีเซอร์โวมอเตอร์ และระบบควบคุมแบบเปิดทำให้ไม่สามารถป้อนค่ากลับเพื่อปรับแก้ตำแหน่งที่ผิดพลาดได้ การนำอาร์ซีเซอร์โวมอเตอร์มาใช้ในเครื่องพิมพ์ 3 มิติจึงไม่เหมาะสม

## Six degrees of freedom Robot Arm

Nawapat	Jamrenrak	56010663
Pasit	Poomanee	56010829
Saran	Ngoenmongkhon	56011179
Dr. Akapot Tantrapiwat		Advisor

Year 2559

### Abstract

This project is about creating and designing a prototype of 6-axis robotic arm with controlling system that can develop to be 3D printer to increase the motion performance of the injector head. This project use RC servo motors as the actuators because of their simple control. Mechanical structure has designed with Solidwork and formed with a 3D printer. The controller software was created by MATLAB for the movement of a robotic arm. Initially the program will receive the displacement of end effector for analyzing and processing. Then the program will transmit the calculated data to the controller. The next step, the controller will control the power unit in each joint of robot arm. And the robot arm will move to the target location. From the experiment, controlling the robot arm move to the target by point-to-point, the result shown that the error of position has more than the general acceptable error of the 3D printer. Because of error from rotational potentiometer of RC servo motor and the open-loop control system can't receive feedback error to adjust the position. In conclusion, the application of RC servo motor is not appropriate in 3D printer.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้ไม่อาจดำเนินการสำเร็จลุล่วงได้เลยหากปราศจากความช่วยเหลือจาก ดร.เอกพจน์ ตันตราภิวัดน์ และ รศ.ดร.จำลอง ปราบแก้ว ผู้ให้ความรู้ ความรัก ความเอาใจใส่แก่คณะผู้จัดทำ ผู้ซึ่งคอยแนะนำแนวทางในการดำเนินงาน ชี้นำหนทางดำเนินงานสู่ความสำเร็จ ผู้เป็นที่ปรึกษาอันน่าเคารพรัก จึงขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ และขอขอบคุณครูบาอาจารย์ทุกท่าน ผู้ให้ความรู้อบรมบ่มนิสัย ให้เป็นผู้มีความพร้อมในการดำรงชีวิต

ขอขอบคุณบริษัท EG Electromatik EG ผู้ให้ความสนับสนุนด้านเงินทุนในการดำเนินงาน ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับอาคารสถานที่ บุคลากร และอุปกรณ์ต่างๆ ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในสถาบัน ในความช่วยเหลือและกำลังใจที่ดีเสมอมา

และสุดท้าย ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาของคณะผู้จัดทำ ทั้งที่ยังมีชีวิตอยู่และล่วงลับไปแล้ว ผู้ให้กำเนิดและเลี้ยงดู อันเป็นบุญคุณที่หาที่สุดไม่ได้ คณะผู้จัดทำจึงขอระลึกถึงและกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายนวพัฒน์	จำเริญรักษ์
นายพลิชฐ์	ภูมณี
นายศรัณย์	เงินมงคล

# สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของงาน.....	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 หลักการพื้นฐานของหุ่นยนต์.....	3
2.1.1 ชนิดของหุ่นยนต์.....	3
2.1.1.1 การแบ่งแยกตามการใช้งาน.....	4
2.1.1.2 การแบ่งแยกตามการเคลื่อนที่.....	4
2.1.1.3 การแบ่งแยกตามลักษณะภายนอกของหุ่นยนต์.....	4
2.1.1.4 การแบ่งแยกตามลักษณะของอุปกรณ์ทำงานส่วนปลาย.....	7
2.2 ตำแหน่งและการกำหนดทิศทางของวัตถุแข็งเกร็ง.....	7
2.2.1 การอธิบายตำแหน่ง.....	8
2.2.2 การอธิบายการกำหนดทิศทาง.....	9
2.2.2.1 รูปแบบโคซายน์ทิศทาง.....	9
2.2.2.2 รูปแบบมุมออยเลอร์.....	10
2.2.3 สัญนิมเดนาวิท-ฮาร์เทนเบอร์ก.....	11
2.3 จลนศาสตร์.....	13

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1 จลนศาสตร์แปรผัน.....	14
2.3.2 จลนศาสตร์ผกผัน.....	14
2.4 การส่งข้อมูล.....	15
2.4.1 การส่งข้อมูลแบบขนาน.....	15
2.4.2 การส่งข้อมูลแบบอนุกรม.....	15
2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์.....	16
2.5.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino.....	16
2.6 เซอร์โวมอเตอร์.....	17
2.6.1 ประเภทของเซอร์โวมอเตอร์.....	17
2.6.1.1 เซอร์โวมอเตอร์ชนิดที่มีแปรงถ่าน.....	17
2.6.1.2 เซอร์โวมอเตอร์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน.....	18
2.6.2 โครงสร้างของเซอร์โวมอเตอร์.....	18
2.6.3 การควบคุมมอเตอร์โดยวิธีการปรับความกว้างของพัลส์.....	18
2.6.4 ระบบควบคุมตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์.....	19
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน.....</b>	<b>20</b>
3.1 การออกแบบกลไกของหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน.....	20
3.2 การออกแบบระบบควบคุม.....	26
3.2.1 GUI.....	27
3.2.2 การวิเคราะห์หาตำแหน่งของมุมข้อต่อ.....	28
3.2.3 การออกแบบระบบควบคุม.....	29
3.2.3.1 วงจรระบบควบคุมต้นกำลัง.....	30
3.2.3.2 การออกแบบโปรแกรมควบคุมเซอร์โวมอเตอร์.....	33
<b>บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง.....</b>	<b>34</b>
4.1 การทดลองด้านความแม่นยำ.....	34
4.2 การทดลองด้านความเที่ยงตรง.....	36

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	39
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	39
5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไขปัญหา.....	39
5.2.1 ปัญหาที่พบ.....	39
5.2.2 แนวทางแก้ไข.....	40
5.2.2.1 การแก้ไขด้านโครงสร้าง.....	40
5.2.2.2 การแก้ไขด้านต้นกำลัง.....	40
5.2.2.3 การแก้ไขด้านโปรแกรมควบคุม.....	40
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางพัฒนา.....	40
 บรรณานุกรม.....	 41
 ภาคผนวก.....	 42

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	หุ่นยนต์คาร์ทีเซียนที่มีพื้นที่การทำงานแบบลูกบาศก์.....5
2.2	หุ่นยนต์ที่มีพื้นที่การทำงานแบบทรงกลม.....5
2.3	หุ่นยนต์ที่มีพื้นที่การทำงานเป็นแบบทรงกระบอก.....5
2.4	ลักษณะพื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์สกร่า.....6
2.5	การทำงานของหุ่นยนต์อาทิวเลท.....6
2.6	ลักษณะของหุ่นยนต์เดลต้า.....7
2.7	ภาพแสดงเฟรมอ้างอิงคงที่และเฟรมเคลื่อนไหว.....8
2.8	ภาพแสดงลักษณะของตัวแปรตามสัญญาณ DH.....12
2.9	ภาพแสดงลักษณะแกนกลสองก้านต่อ.....13
2.10	แสดงกรณีคำตอบที่เป็นไปได้ของจลนศาสตร์ผกผัน.....14
2.11	การส่งข้อมูลแบบขนาน.....15
2.12	การส่งข้อมูลแบบอนุกรม.....16
2.13	ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3.....16
2.14	ตัวอย่างการต่อใช้งาน Arduino บนบอร์ด Shield สำเร็จรูป.....17
2.15	ประเภทของเซอร์โวมอเตอร์ตามคู่มืออ้างอิงฉบับภาษาเยอรมัน.....17
2.16	ส่วนประกอบพื้นฐานของเซอร์โวมอเตอร์.....18
2.17	ลักษณะสัญญาณ PWM ที่เปอร์เซ็นต์ Duty Cycle ที่ต่างกัน.....19
2.18	ระบบควบคุมเซอร์โวมอเตอร์แบบมีการป้อนค่ากลับเพื่อควบคุมตำแหน่ง.....19
3.1	รูปแบบโดยทั่วไปของหุ่นยนต์แกนกลเมื่อเทียบกับแขนมนุษย์.....20
3.2	แบบจำลองของอาร์ซีเซอร์โวมอเตอร์รุ่น ABRS-5314HTG.....21
3.3	แบบจำลองของส่วนฐานหมุนของหุ่นยนต์แกนกล 6 แกน.....21
3.4	แบบจำลองของส่วนข้อไหล่งอของหุ่นยนต์แกนกล 6 แกน.....22
3.5	แบบจำลองของส่วนแขนระหว่างข้อไหล่งอ.....22 และข้อศอกของหุ่นยนต์แกนกล 6 แกน
3.6	แบบจำลองของส่วนข้อไหล่งอของหุ่นยนต์แกนกล 6 แกน.....23
3.7	แบบจำลองของส่วนข้อมือหมุนของหุ่นยนต์แกนกล 6 แกน.....23
3.8	แบบจำลองของส่วนข้อมือองและที่ยึดจับหมุนของหุ่นยนต์แกนกล 6 แกน.....23

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
3.9 แบบจำลองของส่วนที่ยึดจับของหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน ขณะจับปากกา.....	24
3.10 ขนาดของแขนข้อต่อของหุ่นยนต์แขนกล 6 แกนในหน่วยมิลลิเมตร.....	24
3.11 แบบจำลองของหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน.....	25
3.12 หุ่นยนต์แขนกล 6 แกน.....	25
3.13 แผนผังหลักของระบบควบคุม.....	26
3.14 ภาพแสดงส่วนประกอบของ GUI.....	27
3.15 วงจรควบคุมอาร์ดีเซโอโมเตอร์.....	30
3.16 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega2560.....	30
3.17 สาย USB type B.....	31
3.18 Mega Sensor Shield ซึ่งเป็นอุปกรณ์เสริมของ Arduino.....	31
3.19 สายไฟของอาร์ดีเซโอโมเตอร์.....	32
3.20 แหล่งจ่ายพลังงาน.....	32
3.21 Flow Chart แสดงการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์.....	33
4.1 แผนผังการทดสอบประสิทธิภาพ.....	34
4.2 แผนภาพแสดงระยะที่คลาดเคลื่อนตามแนวแกน X Y และ Z.....	35
ในแต่ละครั้งที่ทำการทดลอง	
4.3 รูปแสดงผลของการเคลื่อนที่โดยมีค่าความละเอียดของการทำงานเท่ากับ 10 cm.....	36
4.4 รูปแสดงผลของการเคลื่อนที่โดยมีค่าความละเอียดของการทำงานเท่ากับ 5 cm.....	37
4.5 รูปแสดงผลของการเคลื่อนที่โดยมีค่าความละเอียดของการทำงานเท่ากับ 2.5 cm.....	37
4.6 รูปแสดงผลของการเคลื่อนที่โดยมีค่าความละเอียดของการทำงานเท่ากับ 1 cm.....	38
4.7 รูปแสดงผลของการเคลื่อนที่โดยมีค่าความละเอียดของการทำงานเท่ากับ 0.5 cm.....	38

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ตารางคุณสมบัติของหุ่นยนต์ที่ออกแบบ.....	20
3.2 ตารางแสดงตัวแปรข้อต่อและพารามิเตอร์ก้านต่อ.....	28
4.1 ตารางแสดงค่าตำแหน่งที่ถูกกำหนดกับค่าตำแหน่งที่วัดได้จริง.....	35

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในระบบอุตสาหกรรมของทุกวันนี้ ได้นำหุ่นยนต์เข้ามามีบทบาทสำคัญในการผลิตมากขึ้น จากอดีตระบบอุตสาหกรรมเป็นการนำเครื่องจักรที่อาศัยมนุษย์ควบคุม เข้ามาเพื่อเป็นเครื่องมือช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน ต่อมาได้พัฒนามาเป็นเครื่องจักรระบบกึ่งอัตโนมัติที่ใช้นุชย์เชื่อมต่อการทำงาน และในปัจจุบันการใช้หุ่นยนต์มีความสำคัญในระบบอุตสาหกรรมมากขึ้น ได้รับการพัฒนามาเป็นระบบอัตโนมัติ ทำให้โรงงานอุตสาหกรรมชั้นนำหลายแห่งได้เริ่มนำเครื่องจักรกลอัตโนมัติเข้ามาทำหน้าที่แทนมนุษย์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและประสิทธิผล เนื่องจากเครื่องจักรกลอัตโนมัติมีความแม่นยำ ความเที่ยงตรง มีประสิทธิภาพและสมรรถนะที่สูงกว่ามนุษย์ โดยหุ่นยนต์อุตสาหกรรมถือเป็นเครื่องจักรอัตโนมัติแบบเนกประสงค์ ที่สามารถปรับเปลี่ยนการทำงานได้หลากหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ทำงานส่วนปลาย หุ่นยนต์อุตสาหกรรมระบบอัตโนมัติที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด คือ หุ่นยนต์ชนิดหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน ที่มีองศาอิสระและขอบเขตการทำงานคล้ายแขนของมนุษย์ ในอุตสาหกรรมพลาสติกเป็นอุตสาหกรรมประเภทหนึ่ง ที่ต้องการความถูกต้อง แม่นยำในการผลิต การใช้หุ่นยนต์แขนกล 6 แกน มาเป็นเครื่องมือในการผลิต จะช่วยให้การผลิตมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ดังนั้นหากนำหัวฉีดพลาสติกมาเป็นอุปกรณ์ทำงานส่วนปลายร่วมกับหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน จะสามารถนำมาเป็นเครื่องพิมพ์ 3 มิติที่มีประสิทธิภาพสูงเกินกว่าเครื่องพิมพ์ 3 มิติในปัจจุบันได้

จึงเป็นเหตุผลสำคัญในการจัดทำโครงการนี้ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน พร้อมทั้งระบบควบคุม ที่สามารถพัฒนาต่อได้เป็นเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

ออกแบบและสร้างแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน พร้อมทั้งระบบควบคุม และทดสอบการเคลื่อนที่โดยการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งเป้าหมาย โดยหุ่นยนต์แขนกลสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กำหนดได้ด้วยค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งที่เทียบเท่าค่าความคลาดเคลื่อนของหัวฉีดเครื่องพิมพ์ 3 มิติ

### 1.3 ขอบเขตของงาน

1. ออกแบบและสร้างแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งที่อย่างน้อย 0.4 มิลลิเมตร

2. ใช้อาร์ซีเซอร์โวมอเตอร์เป็นต้นกำลังในการขับเคลื่อน และควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino due

3. ออกแบบระบบควบคุมหุ่นยนต์แขนกล 6 แกนด้วยโปรแกรม MATLAB
4. ทดสอบการเคลื่อนที่โดยการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งเป้าหมาย โดยให้หุ่นยนต์แขนกลเคลื่อนที่เป็นวิถีตรง

#### 1.4 ขั้นตอนการดำเนินโครงการ

1. ศึกษาทฤษฎีของหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน ทั้งด้านทฤษฎีการเคลื่อนที่ และระบบควบคุม
2. ค้นคว้าข้อมูลของอุปกรณ์ต้นกำลัง รวมทั้งวัสดุที่ใช้เป็นโครงสร้างของหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน
3. ทำการกำหนดคุณสมบัติโดยสังเขปเพื่อใช้เป็นหลักในการออกแบบ
4. ทำการออกแบบแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน ด้วยโปรแกรม Solidworks จากอุปกรณ์ที่จัดหาได้ โดยให้สอดคล้องกับกระบวนการขึ้นรูปของชิ้นส่วนนั้นๆ
5. ทำการขึ้นรูปชิ้นส่วนของแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน
6. ทำการประกอบแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน และทำการแก้ไขชิ้นส่วนที่ไม่ได้ขนาดตามต้องการ
7. ออกแบบและสร้างโปรแกรมควบคุม ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้สมการการเคลื่อนที่ที่ได้ศึกษามา
8. ทำการออกแบบ GUI ของโปรแกรมควบคุมให้สามารถทำงานและแสดงผลได้ตามต้องการ
9. ทำการเขียนโปรแกรมเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรมควบคุม (MATLAB) กับบอร์ดควบคุม (Arduino)
10. ทำการประกอบส่วนต้นกำลังเข้ากับระบบควบคุม และแหล่งพลังงาน
11. ทำการทดลองขับเคลื่อนต้นกำลังในแต่ละข้อต่อ ด้วยระบบควบคุม โดยการป้อนค่าตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งเป้าหมาย
12. ทำการบันทึกค่าองศา และตำแหน่งที่เกิดขึ้นจริงในการเคลื่อนที่ โดยทำซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ย
13. ทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง และเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้กับค่าความคลาดเคลื่อนที่กำหนดไว้ในจุดประสงค์
14. สรุปผลการดำเนินโครงการ วิเคราะห์ปัญหา จัดทำรายงานโครงการและนำเสนอโครงการ

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 หลักการพื้นฐานของหุ่นยนต์

เมื่อกล่าวถึงหุ่นยนต์คนส่วนใหญ่อาจคุ้นชินกับหุ่นยนต์ที่มีลักษณะคล้ายมนุษย์ มีการเคลื่อนไหวและความฉลาดใกล้เคียงกับมนุษย์เรา แต่ในความเป็นจริงแม้เทคโนโลยีในปัจจุบันจะถูกพัฒนาจนมีสมรรถนะสูงมาก ก็ยังไม่สามารถสร้างหุ่นยนต์ที่เทียบเท่ากับมนุษย์ได้ทั้งในด้านการเคลื่อนไหวและการคิดประมวลผล อย่างไรก็ตาม หุ่นยนต์เป็นเครื่องจักรกลที่มีประโยชน์ในการทำงานแทนมนุษย์ โดยเฉพาะในงานที่มนุษย์ทำไม่ได้หรือทำได้ไม่ดี เช่น งานสำรวจในพื้นที่คับแคบ งานสำรวจดาวเคราะห์ การประกอบชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดเล็ก เป็นต้น งานมนุษย์กระทำได้ แต่ไม่ยากทำ เช่นงานจำพวกที่มีการกระทำซ้ำไปมาทั้งวัน และงานที่เสี่ยงอันตราย จำพวกการทำงานในสภาพแวดล้อมที่สภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมกับสิ่งมีชีวิต เช่นสภาพแวดล้อมที่อุณหภูมิสูง มีสารเคมีเป็นพิษ เป็นต้น โดยเหตุนี้จึงสามารถให้คำจำกัดความอย่างง่ายกับหุ่นยนต์ว่าเป็น เครื่องจักรที่ทำงานแทนมนุษย์

โดยทางสถาบันหุ่นยนต์อเมริกา (RIA : Robotics Institute of America) ได้ให้นิยามอย่างเป็นทางการว่า “หุ่นยนต์ คือตัวจัดการ (manipulator) ที่ทำหน้าที่ได้หลากหลาย (multi-functional) และสามารถโปรแกรมใหม่ได้ (reprogrammable) ได้รับการออกแบบมาสำหรับเคลื่อนย้ายวัตถุ เครื่องมือหรืออุปกรณ์ต่างๆ โดยการเคลื่อนที่จะถูกโปรแกรมให้ทำงานหลากหลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ” ด้วยคำสำคัญในนิยามนี้คือ การทำหน้าที่ได้หลากหลาย และสามารถโปรแกรมใหม่ได้ ทำให้หุ่นยนต์มีความแตกต่างจากเครื่องจักรกลอัตโนมัติประเภทอื่นที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์เหมือนกัน เช่น เมื่อเทียบเครื่องกัดซีเอ็นซีกับหุ่นยนต์ เครื่องกัดซีเอ็นซีมีการทำงานจำกัดอยู่กับการกัดชิ้นงานในพิภักสามมิติ แต่หุ่นยนต์สามารถนำมาติดอุปกรณ์หัวกัด และเขียนโปรแกรมให้กัดชิ้นงานได้ หรือหากต้องการนำไปใช้งานเป็นตัวจับยึด ก็สามารถเปลี่ยนอุปกรณ์ทำงานส่วนปลายและเขียนโปรแกรมใหม่เท่านั้น

#### 2.1.1 ชนิดของหุ่นยนต์

หุ่นยนต์สามารถแบ่งแยกได้หลากหลายรูปแบบตามลักษณะเฉพาะของการทำงาน ได้แก่การแบ่งแยกตามการใช้งาน การแบ่งแยกตามการเคลื่อนที่ การแบ่งแยกตามการควบคุมการเคลื่อนที่ เป็นต้น

##### 2.1.1.1 การแบ่งแยกตามการใช้งาน

การแบ่งแยกตามการใช้งาน ได้แก่

1. หุ่นยนต์อุตสาหกรรม เป็นหุ่นยนต์ที่ถูกออกแบบมาให้มีความยืดหยุ่นในการทำงานสูง คือสามารถทำงานได้หลากหลาย และสามารถโปรแกรมใหม่ได้ โดยการทำงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจะเป็นการเลียนแบบการเคลื่อนที่ช่วงแขนของมนุษย์ จากนั้นจึงทำการติดตั้งอุปกรณ์ทำงานส่วนปลาย พร้อมทั้งโปรแกรมเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรม โดยส่วนใหญ่จะเป็นหุ่นยนต์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ (Fixed Robot) ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ จะเคลื่อนได้เฉพาะช่วงแขนเท่านั้น

2. หุ่นยนต์ที่ไม่ใช้ในงานอุตสาหกรรม เช่น หุ่นยนต์ที่ออกแบบไว้เพื่อศึกษา หุ่นยนต์ที่ใช้ในงานสำรวจ หุ่นยนต์กู้ภัย เป็นต้น

#### 2.1.1.2 แบ่งแยกตามการเคลื่อนที่

การแบ่งแยกตามการเคลื่อนที่ได้แก่

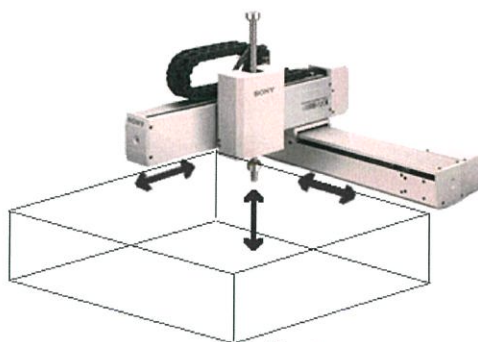
1. หุ่นยนต์ที่ติดตั้งอยู่กับที่ (Fixed Robot) เป็นหุ่นยนต์ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมโดยถูกติดตั้งไว้กับที่ ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ เช่นหุ่นยนต์ที่ใช้ในการจับชิ้นงาน หุ่นยนต์เชื่อมโลหะ เป็นต้น เนื่องจากทั่วไปหุ่นยนต์ประเภทนี้จะมีลักษณะโครงสร้างที่ใหญ่ มีน้ำหนักมาก และใช้พลังงานจากแหล่งจ่ายภายนอก จึงไม่เหมาะกับการเคลื่อนที่

2. หุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (Mobile Robot) เป็นหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่จากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งได้ตามโปรแกรมที่ป้อนให้ โดยหุ่นยนต์ประเภทนี้จะมีการออกแบบให้มีรูปร่างลักษณะต่างๆกันตามวัตถุประสงค์การใช้งาน เช่น หุ่นยนต์สำรวจ หุ่นยนต์กู้ภัย หุ่นยนต์กู้ระเบิด เป็นต้น หุ่นยนต์ประเภทนี้จะมีแหล่งจ่ายพลังงานติดตั้งอยู่ภายใน อีกทั้งยังออกแบบให้มีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา เพื่อให้ไม่เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่หรือการทำงานของหุ่นยนต์

#### 2.1.1.3 การแบ่งแยกตามลักษณะภายนอกของหุ่นยนต์

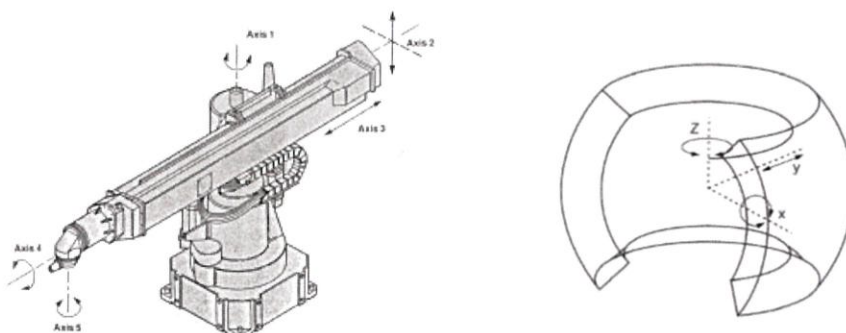
การแบ่งแยกตามลักษณะภายนอกของหุ่นยนต์ ได้แก่

1. หุ่นยนต์คาร์ทีเซียน หรือหุ่นยนต์แกนทรี (Cartesian or Gantry Robot) เป็นหุ่นยนต์ที่มีพื้นที่การทำงานในลักษณะลูกบาศก์ มีการเคลื่อนที่อยู่ 3 แกน คือแกน X แกน Y และแกน Z โดยเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงในแต่ละแกน อันเนื่องจากข้อต่อเป็นแบบเลื่อน (Prismatic) ทำให้ง่ายต่อการโปรแกรม มีความละเอียดและแม่นยำในการทำงานสูง ใช้ในงานหยิบจับชิ้นงาน ประกอบชิ้นงาน เครื่องซีเอ็นซี และเครื่องพิมพ์ 3 มิติ ดังแสดงในรูปที่ 2.1



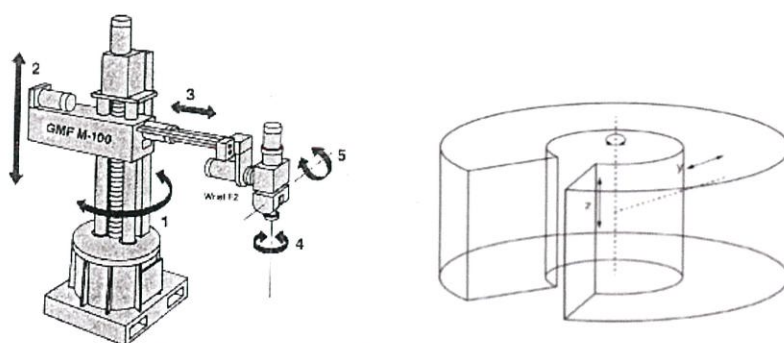
รูปที่ 2.1 หุ่นยนต์คาร์ทีเซียนที่มีพื้นที่การทำงานแบบลูกบาศก์

2. หุ่นยนต์ทรงกลมหรือหุ่นยนต์เชิงขั้ว (Spherical Robot or Polar Robot) เป็นหุ่นยนต์ที่มีข้อต่อ 2 ข้อต่อเป็นแบบหมุน (Revolute) และ 1 ข้อต่อเป็นแบบเลื่อน ด้วยแกนหมุน 2 แกนและแกนเลื่อน 1 แกน ทำให้หุ่นยนต์มีพื้นที่การทำงานเป็นลักษณะทรงกลม นิยมใช้ในงานจับยกหรือเคลื่อนย้ายสิ่งของ งานเชื่อมไฟฟ้า และงานเชื่อมแก๊ส ดังแสดงในรูป 2.2



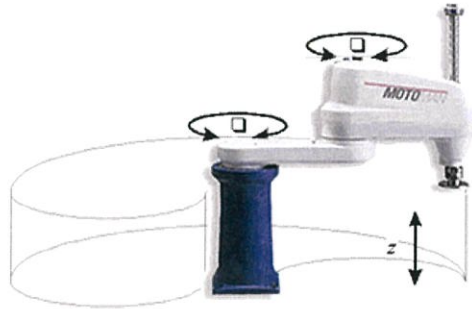
รูปที่ 2.2 หุ่นยนต์ที่มีพื้นที่การทำงานแบบทรงกลม

3. หุ่นยนต์ทรงกระบอก (Cylindrical Robot) เป็นหุ่นยนต์ที่มีข้อต่อ 2 ข้อต่อเป็นแบบเลื่อน และ 1 ข้อต่อเป็นแบบหมุน ทำให้หุ่นยนต์มีพื้นที่การทำงานเป็นลักษณะทรงกระบอก นิยมใช้ในงานประกอบชิ้นส่วนและงานเชื่อมจุด ดังแสดงในรูป 2.3



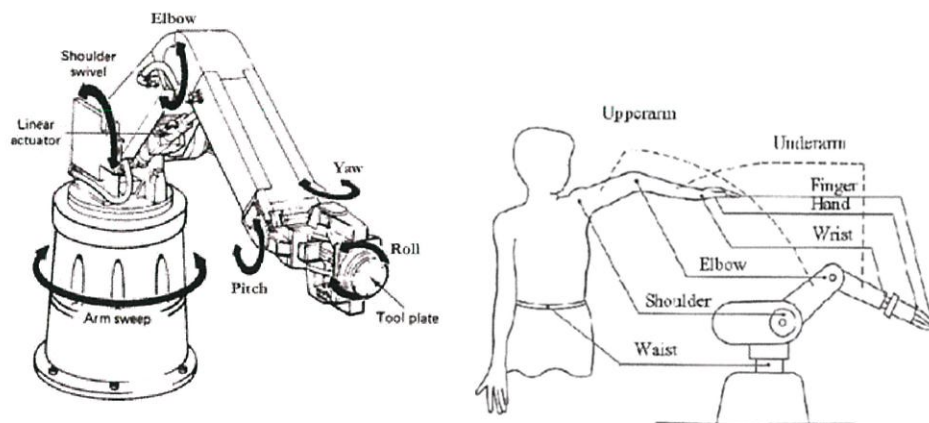
รูปที่ 2.3 หุ่นยนต์ที่มีพื้นที่การทำงานเป็นแบบทรงกระบอก

4. หุ่นยนต์สการ์ว (Scara Robot) เป็นหุ่นยนต์ที่มีแกนหมุนขนานกัน 2 แกน และมีแกนแบบเลื่อน 1 แกน ใช้ในงานหยิบจับและวางวัตถุ งานประกอบชิ้นส่วน และงานเครื่องมือกล ดังแสดงในรูป 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะพื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์สการ์ว

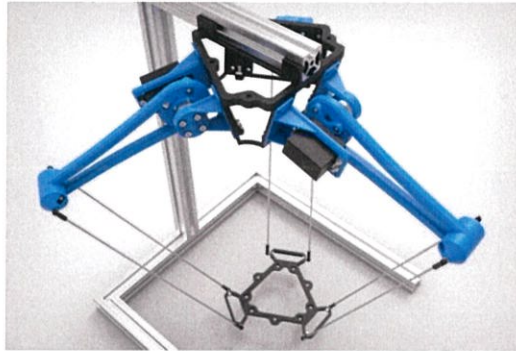
5. หุ่นยนต์อาร์ทิกิวเลทหรือหุ่นยนต์แขนกล (Articulate Robot or Robotic Arm) เป็นหุ่นยนต์ที่ประกอบด้วยข้อต่อแบบหมุน ลักษณะการทำงานจะคล้ายกับช่วงแขนของมนุษย์ มีพื้นที่การทำงานกว้าง สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงและไปทางด้านข้างของตัวหุ่นได้ นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเนื่องจากมีความแข็งแรงและความยืดหยุ่นที่สูง สามารถเข้าไปยังจุดต่างๆของชิ้นงานได้ดี ดังแสดงในรูป 2.5



รูปที่ 2.5 การทำงานของหุ่นยนต์อาร์ทิกิวเลท

6. หุ่นยนต์แบบโครงสร้างขนาน (Parallel Robot) เป็นหุ่นยนต์ที่ข้อต่อมีต้นกำลังขับเคลื่อนหลายตัวอยู่บริเวณฐาน และมีโครงสร้างข้อต่อจากต้นกำลังแต่ละตัวไปยังปลาย

แขนเป็นโครงสร้างแบบปิดเป็นวงรอบ ตัวอย่างหุ่นยนต์แบบโครงสร้างขนาน เช่น หุ่นยนต์เดลต้า (Delta Robot) ดังแสดงในรูป 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะของหุ่นยนต์เดลต้า

#### 2.1.1.4 การแบ่งแยกตามลักษณะของอุปกรณ์ทำงานส่วนปลาย

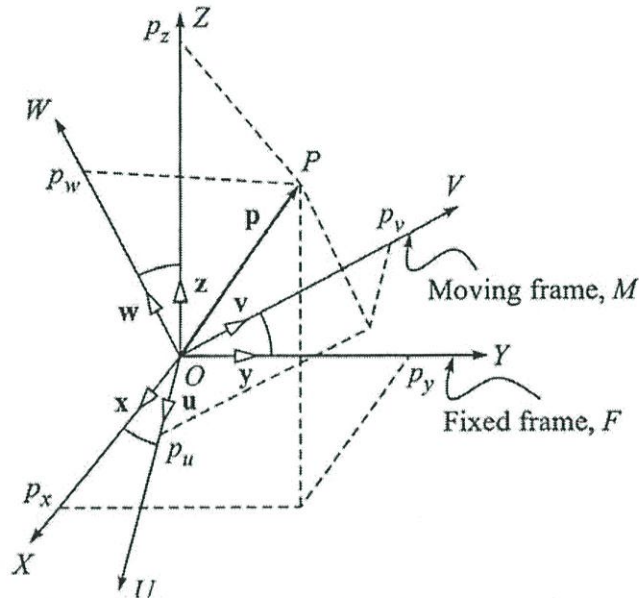
การแบ่งแยกตามลักษณะของอุปกรณ์ทำงานส่วนปลาย (End Effector) ซึ่งเป็นอุปกรณ์พิเศษติดตั้งอยู่ที่ส่วนปลายของหุ่นยนต์ เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถทำงานเฉพาะได้อย่างสมบูรณ์ โดยทั่วไปจะมีการติดตั้งอุปกรณ์ที่เหมาะสมสำหรับงานต่างๆ อยู่ 2 ชนิด ได้แก่ เครื่องมือ อาทิ ไขควง ประแจ หัวเชื่อมอาร์ก หัวพ่นสี ใบตัด ดอกเจาะ เป็นต้น และอีกชนิดคือ กริปเปอร์ (Gripper) เป็นอุปกรณ์สำหรับหยิบจับชิ้นงานเพื่อเคลื่อนย้ายจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง โดยมีทั้งแบบมือจับทางกล มือจับแบบสุญญากาศ และมือจับแบบแม่เหล็ก

## 2.2 ตำแหน่งและการกำหนดทิศทางของวัตถุแข็งเกร็ง

การเคลื่อนที่ของวัตถุแข็งเกร็งในพิกัดแกนคาร์ทีเซียนแบบ 3 มิติประกอบไปด้วยการเคลื่อนที่แบบเลื่อน ซึ่งถูกกำหนดโดยพิกัดคาร์ทีเซียน 3 แกน และการเคลื่อนที่แบบหมุน ซึ่งถูกกำหนดโดยพิกัดเชิงมุม 3 แกน รวมทั้งสิ้น 6 แกน ในการศึกษาทางด้านจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์ สิ่งที่ต้องพิจารณาเป็นสำคัญคือตำแหน่งและการกำหนดทิศทางของชิ้นส่วนต่างๆ โดยที่ชิ้นส่วนต่างๆ ของหุ่นยนต์นี้จะประกอบไปด้วยก้านต่อและชิ้นงานที่ประกอบเป็นโครงสร้างของหุ่นยนต์ ในการระบุตำแหน่งและการกำหนดทิศทางของชิ้นส่วน พิกัดอ้างอิงแบบคงที่หรือที่เรียกว่าเฟรมแบบคงที่ที่จะถูกกำหนด และระบบพิกัดคาร์ทีเซียนจะถูกกำหนดไว้ที่ชิ้นส่วนของหุ่นยนต์ที่มีการเคลื่อนไหว โดยพิกัดคาร์ทีเซียนนี้จะใช้อธิบายถึงตำแหน่งและทิศทางของชิ้นส่วนนั้นๆ

ตำแหน่งและการกำหนดทิศทางของวัตถุแข็งเกร็งเมื่อเทียบกับระบบพิกัดอ้างอิงสามารถอธิบายโดยใช้พารามิเตอร์ที่เป็นอิสระต่อกันทั้งหมด 6 พารามิเตอร์ กำหนดให้ ระบบพิกัด X-Y-Z เป็นแกนของเฟรมอ้างอิงคงที่ (fixed reference frame) และระบบพิกัด U-V-W ที่ถูกกำหนดไว้ที่ชิ้นส่วน

ของหุ่นยนต์ที่มีการเคลื่อนไหวจึงเป็นแกนของเฟรมเคลื่อนไหว (moving frame) เพราะฉะนั้นจะสามารถทราบตำแหน่งของวัตถุแข็งเกร็งได้ หากทราบตำแหน่งของเฟรมเคลื่อนไหวเมื่อเทียบกับเฟรมอ้างอิงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ภาพแสดงเฟรมอ้างอิงคงที่และเฟรมเคลื่อนไหว

### 2.2.1 การอธิบายตำแหน่ง

ตำแหน่งของจุดใดๆ ที่อยู่บนวัตถุแข็งเกร็งเมื่อพิจารณาเทียบกับเฟรมอ้างอิงที่จะสามารถอธิบายได้โดยใช้เวกเตอร์คาร์ทีเซียน 3 มิติ หรือในอีกลักษณะหนึ่งคือสามารถอธิบายอยู่บนค่าของเฟรมคงที่ คือ X, Y และ Z โดยตัวอย่างแสดงดังสมการ (2.1)

$$[p]_F = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

โดยที่  $p$  เป็นเวกเตอร์ตำแหน่งของจุด  $P$  ที่อ้างอิงบนเฟรมคงที่  $F$  ซึ่งถูกอธิบายด้วยเวกเตอร์  $p$  ที่ฉายบนเฟรมคงที่  $X, Y$  และ  $Z$  นั่นคือ  $p_x, p_y$  และ  $p_z$  ตามลำดับ และสามารถเขียนในอีกรูปแบบเป็นสมการ (2.2) ได้ว่า

$$p = p_x x + p_y y + p_z z \quad (2.2)$$

โดย  $x, y$  และ  $z$  ในที่นี้คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยบนแกน  $X, Y$  และ  $Z$  ของบนเฟรมคองที่  $F$  ตามลำดับ โดยเวกเตอร์หนึ่งหน่วยสามารถแสดงในสมการ (2.3) ได้ดังนี้

$$x = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, z = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

## 2.2.2 การอธิบายการกำหนดทิศทาง

### 2.2.2.1 รูปแบบโคชาน์ทิศทาง

ในการอธิบายถึงการกำหนดทิศทางหรือการหมุนของวัตถุแข็งเกร็งนั้น จะต้องพิจารณาถึงการเคลื่อนที่ของเฟรมเคลื่อนที่เร็วเทียบกับเฟรมคองที่ เมื่อกำหนดให้มีจุดคองที่หนึ่ง จุดคือจุดกำเนิดของเฟรมทั้งสอง สามารถอธิบายความสัมพันธ์ของเฟรมทั้งสองได้โดยสมการ (2.4)

$$\begin{aligned} u &= u_x x + u_y y + u_z z \\ v &= v_x x + v_y y + v_z z \\ w &= w_x x + w_y y + w_z z \end{aligned} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $u$  เวกเตอร์หนึ่งหน่วยบนแกน  $U$  ซึ่งถูกอธิบายด้วยเวกเตอร์  $u$  ที่ฉายลงบนเฟรมคองที่  $X, Y$  และ  $Z$  นั่นคือ  $u_x, u_y$  และ  $u_z$  ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันเวกเตอร์  $v$  และ  $w$  ก็สามารถอธิบายได้ในลักษณะนี้ และเมื่อเทียบความสัมพันธ์กับจุดใดๆบนวัตถุแข็งเกร็ง จะอธิบายได้เป็นได้ดังสมการ (2.5)

$$p = p_u u + p_v v + p_w w \quad (2.5)$$

เมื่อ  $p_u, p_v$  และ  $p_w$  คือเวกเตอร์  $p$  ที่ถูกฉายลงบนแกน  $U, V$  และ  $W$  ของเฟรมเคลื่อนที่เร็วตามลำดับ และเมื่อนำสมการ (2.4) มาแทนใน (2.5) จะได้สมการ (2.6)

$$p = (p_u u_x + p_v v_x + p_w w_x)x + (p_u u_y + p_v v_y + p_w w_y)y + (p_u u_z + p_v v_z + p_w w_z) \quad (2.6)$$

ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบสมการ (2.2) กับ (2.6) ได้สมการ (2.7)

$$\begin{aligned} p_x &= u_x x + v_x y + w_x z \\ p_y &= u_y x + v_y y + w_y z \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$p_z = u_x x + v_y y + w_z z$$

ซึ่งเขียนในรูปเมตริกได้ดังสมการ (2.8)

$$[p]_F = Q[p]_M \quad (2.8)$$

เมื่อ  $[p]_F$  และ  $[p]_M$  แสดงถึงเวกเตอร์  $p$  บนเฟรมคงที่  $F$  และบนเฟรมเคลื่อนที่  $M$  ตามลำดับและเมตริก  $Q$  คือเมตริกการหมุนหรือการเปลี่ยนตำแหน่งขนาด  $3 \times 3$  ที่ใช้ในการแปลงรูปของเวกเตอร์  $p$  จากเฟรมเคลื่อนที่  $M$  ไปอยู่บนเฟรมคงที่  $F$  สามารถอธิบายเป็นสมการ (2.9) ได้ดังนี้

$$[p]_F \equiv \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}, [p]_M \equiv \begin{bmatrix} p_u \\ p_v \\ p_w \end{bmatrix}, Q \equiv \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x \\ u_y & v_y & w_y \\ u_w & v_z & w_z \end{bmatrix}$$

$$[p]_F = \begin{bmatrix} u^T_x & v^T_x & w^T_x \\ u^T_y & v^T_y & w^T_y \\ u^T_z & v^T_z & w^T_z \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

### 2.2.2.2 รูปแบบมุมออยเลอร์

การกำหนดทิศทางโดยใช้รูปแบบมุมออยเลอร์นี้จะสร้างการกำหนดทิศทางจากการหมุนแกนพื้นฐานทั้งสามแกนเมื่อเทียบกับแกนของเฟรมปัจจุบัน รูปแบบ  $ZYZ$  ถูกเลือกมาใช้ในการแสดงรูปแบบมุมออยเลอร์ โดยมีลักษณะตามลำดับคือการหมุนคือ หมุนเฟรมคงที่  $F$  รอบแกน  $Z$  ด้วยมุม  $\emptyset$  จะได้เป็นเฟรม  $A$  จากนั้นจะหมุนอีกครั้งรอบแกน  $Y$  ซึ่งคือแกน  $Y'$  ของเฟรม  $A$  ด้วยมุม  $\theta$  จะได้เฟรม  $B$  และจะหมุนครั้งที่สามรอบแกน  $Z$  ซึ่งคือแกน  $Z''$  ของเฟรม  $B$  ด้วยมุม  $\phi$  และจะได้เฟรมสุดท้ายคือเฟรม  $M$

ซึ่งสามารถสรุปสมการการหมุนได้ดังสมการ (2.10) ถึง (2.14)

$$Q = Q_Z Q_Y Q_Z'' \quad (2.10)$$

$$Q_Z \equiv \begin{bmatrix} \cos \emptyset & -\sin \emptyset & 0 \\ \sin \emptyset & \cos \emptyset & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$Q_Y'' \equiv \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$Q_Z'' \equiv \begin{bmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$Q \equiv \begin{bmatrix} C\emptyset C\theta C\varphi - S\theta S\varphi & -C\emptyset C\theta S\varphi - S\emptyset C\varphi & C\emptyset S\theta \\ S\emptyset C\theta C\varphi + C\emptyset S\varphi & -S\emptyset C\theta S\varphi + C\emptyset C\varphi & S\emptyset S\theta \\ -S\theta C\varphi & S\theta S\emptyset & C\theta \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

โดยที่ C แทนค่า  $\cos$  และ S แทนค่า  $\sin$

### 2.2.3 สัญนิยมเดนาวิท-ฮาร์เทนเบอร์ก (Denavit-Hartenberg convention)

สัญนิยมเดนาวิท-ฮาร์เทนเบอร์ก หรือ สัญนิยม DH ถูกคิดขึ้นโดยนายจาคส์ เดนาวิท (Jacques Denavit) และนายริชาร์ด ฮาร์เทนเบอร์ก (Richard Hartenberg) โดยได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหากลศาสตร์อย่างเป็นระบบในรูปแบบของเมตริก ซึ่งมีกฎสำหรับวางตำแหน่งของเฟรมเพื่อใช้กับหุ่นยนต์แบบห่วงโซ่อนุกรมที่แต่ละข้อต่อมีเพียงหนึ่งองศาอิสระ โดยแกน Z จะอยู่แนวเดียวกับแกนหมุนสำหรับข้อต่อแบบหมุน หรืออยู่ในแนวเดียวกับการเคลื่อนที่สำหรับข้อต่อแนวเส้นตรง และแกน X ของแต่ละแกนอ้างอิงจะต้องมีแนวตั้งฉากและตัดกับแกน Z ของแกนอ้างอิงก่อนหน้า โดยเริ่มจากฐานเป็นเฟรมที่ 0 จนถึงเฟรมเครื่องมือ จะได้ความสัมพันธ์ในแต่ละคู่ตำแหน่งดังสมการ (2.15) (2.16) และ (2.17)

$$A_i = \text{Trot}_{z,\theta_i} \text{Transl}_{z,d_i} \text{Transl}_{x,a_i} \text{Trot}_{x,\alpha_i} \quad (2.15)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & 0 \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

โดย  $A_i$  คือ เมตริกเอกพันธ์บรรยายการเคลื่อนที่ของข้อต่อที่  $i$

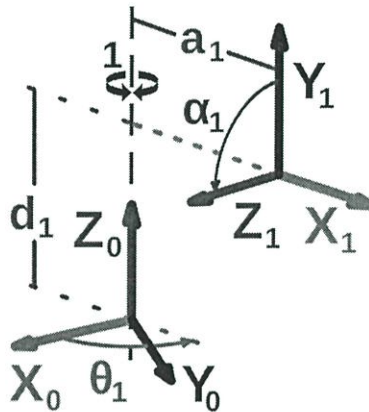
$\theta_i$  เรียกว่า มุมข้อต่อ (Joint Angle) คือ มุมระหว่างแกน  $x_{i-1}$  กับ  $x_i$  วัด

รอบแกน  $z_{i-1}$

$d_i$  เรียกว่า ค่าชดเชยของก้านต่อ (Link Offset) คือ ระยะจากจุด 0 ของแกน  $i - 1$  จนถึงจุดตัดระหว่างแกน  $x_i$  กับ  $z_{i-1}$  วัดตามแกน  $z_{i-1}$

$a_i$  เรียกว่า ความยาวก้านต่อ (Link Length) คือ ระยะจากจุด 0 ของแกน  $i$  จนถึงจุดตัดระหว่างแกน  $x_i$  กับ  $z_{i-1}$  วัดตามแกน  $x_i$

$\alpha_i$  เรียกว่า มุมบิดก้านต่อ (Link Twist) คือ มุมระหว่างแกน  $Z_{i-1}$  กับ  $Z_i$  วัดรอบแกน  $X_i$



รูปที่ 2.8 ภาพแสดงลักษณะของตัวแปรตามสัญนิยม DH

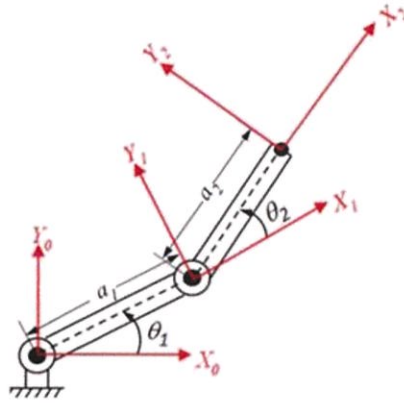
จากตัวแปรที่กล่าวมาข้างต้นนี้ จะมีเพียงหนึ่งตัวแปรสำหรับแต่ละรูปแบบข้อต่อเท่านั้นที่เป็นตัวแปรอิสระ ได้แก่ มุมของข้อต่อสำหรับข้อต่อแบบหมุน และค่าชดเชยของก้านต่อสำหรับข้อต่อแนวเส้นตรง และจะสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างเฟรมเครื่องมือกับเฟรมฐานได้โดยสมการ (2.18)

$${}^0T_2 = A_1 A_2 \cdots A_n \quad (2.18)$$

โดย  ${}^0T_n$  คือ เมตริกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเฟรมฐานกับแกนเฟรมเครื่องมือในลักษณะสมการ (2.18)

$$T = \begin{bmatrix} R & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

โดย  $R$  คือ เมตริกเชิงตั้งฉากขนาด  $3 \times 3$  ที่แสดงทิศทางของเฟรมเครื่องมือกับเฟรมฐาน  $d$  คือ เมตริกขนาด  $3 \times 1$  ที่บอกถึงตำแหน่งของเฟรมเครื่องมือเทียบกับเฟรมฐานตามพิกัดคาร์ทีเซียน



รูปที่ 2.9 ภาพแสดงลักษณะแขนกลสองก้านต่อ

ตัวอย่างดังแสดงในรูป 2.9 สมมุติให้ข้อต่อแบบหมุนจำนวนสองตัวที่มีค่าขดเขยข้อต่อและมุมบิดข้อต่อเท่ากับ 0 และมีค่าความยาวก้านต่อเป็น 5 และ 8 ตามลำดับ จะได้เป็นตามสมการที่ (2.19) และ (2.20) ตามลำดับ

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 5 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 5 \sin \theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 8 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 8 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

และเมื่อนำสมการที่ (2.20) และ (2.21) มาใส่ในสมการ (2.18) จะได้เมตริกแสดงความสัมพันธ์เป็นตามสมการ (2.22)

$${}^0T_2 = A_1 A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 + \theta_2 & -\sin \theta_1 + \theta_2 & 0 & 5 \cos \theta_1 + 8 \cos \theta_1 + \theta_2 \\ \sin \theta_1 + \theta_2 & \cos \theta_1 + \theta_2 & 0 & 5 \sin \theta_1 + 8 \sin \theta_1 + \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

## 2.3 จลนศาสตร์

เนื่องจากความสัมพันธ์ทิศทางและตำแหน่งของเฟรมเครื่องมือของหุ่นยนต์กับเฟรมฐานสามารถอธิบายได้จากตัวแปรแต่ละตัวของแต่ละข้อต่อ และมีตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียวของแต่ละข้อต่อ จึงสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ 2 รูปแบบ คือ จลนศาสตร์แปรผัน และจลนศาสตร์ผกผัน

### 2.3.1 จลนศาสตร์แปรผัน (Forward Kinematic)

ในการวิเคราะห์จลนศาสตร์แปรผันสำหรับตำแหน่งนั้น ตัวแปรอิสระและพารามิเตอร์ของก้านต่อและของข้อต่อจะต้องถูกกำหนดไว้ก่อนการวิเคราะห์ แล้วจึงถูกนำมาพิจารณาตามสมการของสัญญาณยอนาวิท-ฮาร์เทนเบอร์ก คำตอบที่ได้จะมีค่าเพียงค่าเดียวและอยู่ในรูปเมตริกแสดงความสัมพันธ์ของเฟรมเครื่องมือและเฟรมฐาน

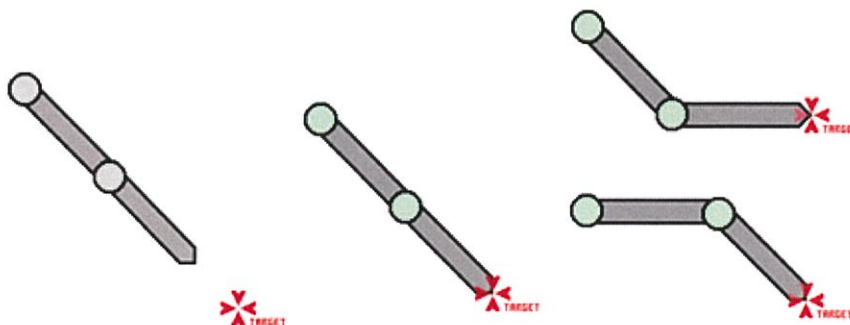
ตัวอย่างเช่น จากสมการ (2.22) ค่ามุมบิดข้อต่อมีค่าเป็น  $30^\circ$  และ  $90^\circ$  ตามลำดับ คำตอบที่ได้จะเป็นตามสมการ (2.23) และ (2.24)

$${}^0T_2 = \begin{bmatrix} \cos 30^\circ + 90^\circ & -\sin 30^\circ + 90^\circ & 0 & 5 \cos 30^\circ + 8 \cos 30^\circ + 90^\circ \\ \sin 30^\circ + 90^\circ & \cos 30^\circ + 90^\circ & 0 & 5 \sin 30^\circ + 8 \sin 30^\circ + 90^\circ \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$${}^0T_2 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0.33 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & 9.43 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

### 2.3.2 จลนศาสตร์ผกผัน (Inverse Kinematic)

ในส่วนของจลนศาสตร์ตำแหน่งผกผันนั้น จะเป็นการกระทำที่ตรงข้ามกับจลนศาสตร์แปรผัน นั่นคือ เมตริกความสัมพันธ์ระหว่างฐานกับตัวทำงานส่วนปลายจะถูกกำหนดไว้แล้วจึงนำไปหาตัวแปรของข้อต่อ โดยวิธีแก้ปัญหามีได้ 2 วิธี คือ วิธีทางพีชคณิตหรือเรขาคณิต วิธีนี้จะเป็นวิธีโดยทั่วไป แต่จะไม่สามารถให้ผลลัพธ์อยู่ในรูปแบบปิดสำหรับการทำงานหุ่นยนต์ทั่วไปได้ อีกวิธีหนึ่งคือวิธีการเชิงตัวเลขโดยการประมาณค่าลงในสมการ โดยคำตอบของจลนศาสตร์ผกผันจะเป็นไปได้ 3 กรณี คือ ไม่มีคำตอบ มีเพียงคำตอบเดียว และมีได้หลายคำตอบ



(ก) ไม่มีคำตอบ (ข) มีเพียงคำตอบเดียว (ค) มีได้หลายคำตอบ

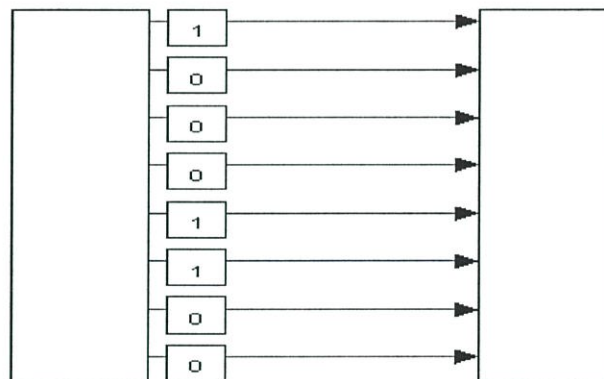
รูปที่ 2.10 แสดงกรณีคำตอบที่เป็นไปได้ของจลนศาสตร์ผกผัน

## 2.4 การส่งข้อมูล

การส่งข้อมูลอาจประกอบด้วยช่องทางสื่อสารตั้งแต่หนึ่งช่องทางขึ้นไป ซึ่งทำให้เกิดการส่งผ่านข้อมูลได้มากกว่าหนึ่งช่องทาง โดยแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบคือการส่งข้อมูลแบบขนาน และการส่งข้อมูลแบบอนุกรม

### 2.4.1 การส่งข้อมูลแบบขนาน

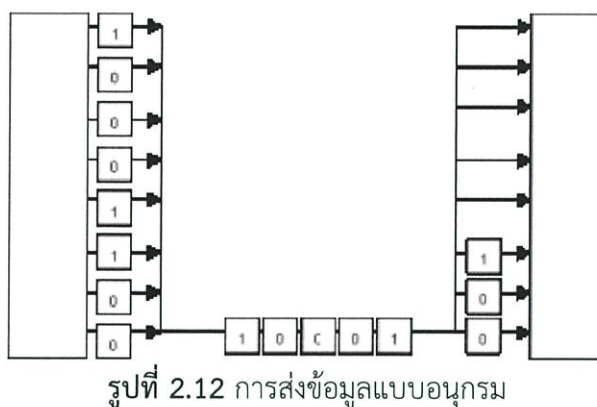
การส่งข้อมูลแบบขนาน (Parallel Transmission) เป็นรูปแบบการส่งข้อมูลทุกบิตผ่านไปตามช่องทางสื่อสาร โดยส่งไปตามช่องทางหลายๆ ช่องขนานกันไป ทำให้ทุกบิตจะถึงปลายทางพร้อมๆกัน โดยจำนวนช่องทางจะต้องมีเท่ากับจำนวนบิตที่ต้องการส่ง ดังนั้นการส่งตัวอักษรที่ประกอบด้วย 8 บิต จึงจำเป็นต้องใช้ช่องทางการสื่อสารถึง 8 ช่อง ส่วนมากจะใช้ในการส่งข้อมูลระยะใกล้ที่ต้องการความเร็วสูง เช่นการส่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ไปยังเครื่องพิมพ์ ดังแสดงในรูป 2.11



รูปที่ 2.11 การส่งข้อมูลแบบขนาน

### 2.4.2 การส่งข้อมูลแบบอนุกรม

การส่งข้อมูลแบบอนุกรม (Serial Transmission) เป็นรูปแบบการส่งข้อมูลทุกบิตผ่านไปตามช่องทางสื่อสาร โดยส่งเรียงลำดับกันไปทีละบิตในช่องทางสื่อสารเพียงช่องทางเดียว ตัวอักษรที่เข้ารหัสแบบ ASCII จะประกอบด้วยบิตจำนวน 8 บิตเรียงเป็นลำดับ ข้อมูลจะถูกส่งออกมาทีละบิตระหว่างต้นทาง ไปยังปลายทาง และปลายทางจะทำหน้าที่รวบรวมบิตเหล่านี้ทีละบิต จนครบ 8 บิตรวมเป็น 1 ตัวอักษร การส่งข้อมูลแบบนี้จะมีค่าใช้จ่ายจะถูกกว่าแบบขนาน แต่ก็ช้ากว่าแบบขนานเช่นกัน ดังแสดงในรูป 2.12



## 2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์

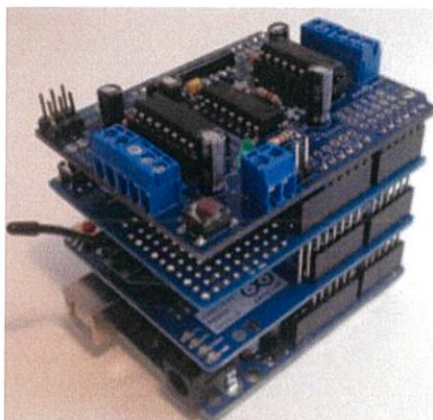
ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) คือ อุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก ซึ่งบรรจุความสามารถที่คล้ายคลึงกับระบบคอมพิวเตอร์ โดยในไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รวมเอาหน่วยประมวลผล หน่วยความจำ หน่วยรับ-ส่งข้อมูล ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน เป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย โดยผ่านการออกแบบวงจรให้เหมาะสมกับงานต่างๆ เช่นการเพิ่มวงจรตั้งเวลา วงจรตรวจจับ เพื่อใช้ควบคุมการทำงานบางอย่าง อาทิ เครื่องปรับอากาศ เครื่องซักผ้าแบบหยอดเหรียญ เป็นต้น

### 2.5.1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino

Arduino เป็นภาษาอิตาลี โดยเป็นชื่อโครงการพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ ในรูปแบบของ Open Source คือเป็นการออกแบบและพัฒนาที่เปิดให้บุคคลทั่วไปนำเอาระบบไปพัฒนาต่อได้ทั้งในด้าน Hardware และ Software โดย Arduino มีจุดเด่นในเรื่องความง่ายในการเรียนรู้และใช้งาน เฉพาะในด้าน Software ที่ใช้ในการควบคุมตัวบอร์ดมีลักษณะเป็นภาษา C++ ที่โปรแกรมเมอร์มีความคุ้นเคยในการใช้งาน ตัวบอร์ดสามารถนำ โมดูลมาต่อเพิ่ม ซึ่งทาง Arduino เรียกว่าเป็น shield เพื่อเพิ่มความสามารถเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.13 และรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno R3



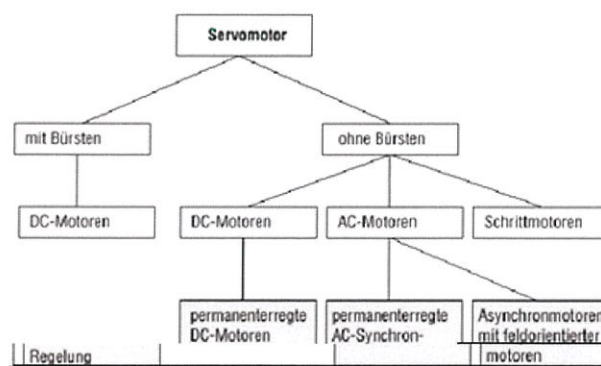
รูปที่ 2.14 ตัวอย่างการต่อใช้งาน Arduino บนบอร์ด Shield สำเร็จรูป

## 2.6 เซอร์โวมอเตอร์

เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) เป็นมอเตอร์ที่ถูกประกอบเข้ากับชุดเกียร์ทด ระบบควบคุมต่างๆ เข้าไว้ด้วยกัน ซึ่งตัวมอเตอร์จะมีการควบคุมตำแหน่งและความเร็วโดยอาศัยการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control) หรือการควบคุมแบบปิด (Closed-loop Control) เพื่อให้การควบคุมเป็นไปตามที่ต้องการ

### 2.6.1 ประเภทของเซอร์โวมอเตอร์

ในคู่มือเซอร์โวมอเตอร์ฉบับภาษาเยอรมัน ได้แบ่งประเภทของเซอร์โวมอเตอร์ออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ดังแสดงในรูป 2.15



รูปที่ 2.15 ประเภทของเซอร์โวมอเตอร์ตามคู่มืออ้างอิงฉบับภาษาเยอรมัน

#### 2.6.1.1 เซอร์โวมอเตอร์ชนิดที่มีแปรงถ่าน

ในภาษาเยอรมัน mit Bürsten แปลเป็นภาษาอังกฤษได้ว่า with Brushes หรือมีแปรงถ่านในภาษาไทย โดยเซอร์โวมอเตอร์ชนิดมีแปรงถ่านชนิดนี้เป็นมอเตอร์ที่มีสเตเตอร์

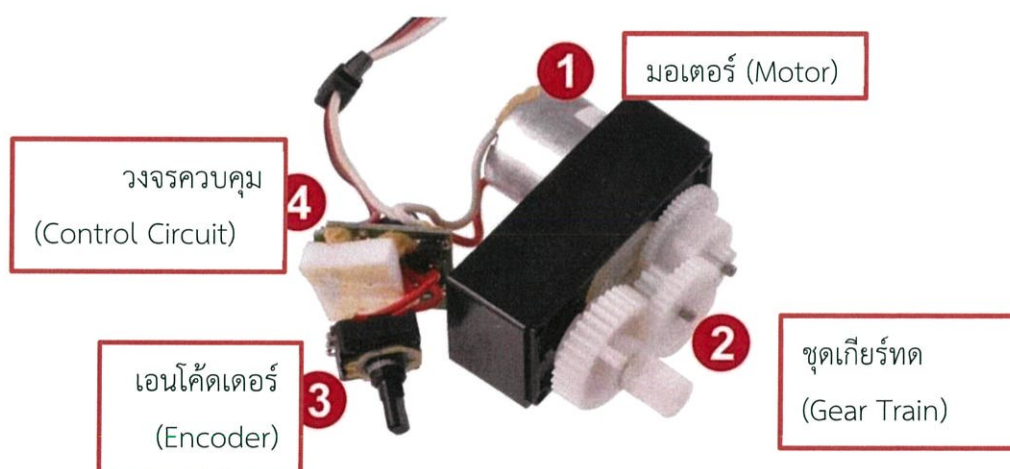
(Stator) เป็นแม่เหล็กถาวร ส่วนโรเตอร์ (Rotor) ยังใช้แปรงถ่านและคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) เรียงกระแสเข้าสู่ขดลวดอาเมเจอร์ เหมือนกับมอเตอร์กระแสตรงทั่วไป

### 2.6.1.2 เซอร์โวมอเตอร์ชนิดไม่มีแปรงถ่าน

ในภาษาเยอรมัน ohne Bürsten แปลเป็นภาษาอังกฤษได้ว่า Brushless หรือไม่มีแปรงถ่านในภาษาไทย เซอร์โวลูกุ่มนี้จะประกอบไปด้วยเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน (DC Brushless Servo Motor) เซอร์โวมอเตอร์กระแสสลับ (AC Servo) ซึ่งมีทั้งแบบซิงโครนัส เซอร์โว และอะซิงโครนัสเซอร์โว (คือการนำอินดักชั่นมอเตอร์มาใช้เป็นระบบขับเคลื่อนเซอร์โวมอเตอร์) และสเตปป์ิงมอเตอร์

### 2.6.2 โครงสร้างของเซอร์โวมอเตอร์

โดยทั่วไปโครงสร้างของเซอร์โวมอเตอร์จะมีส่วนประกอบพื้นฐานคือมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อน ชุดเกียร์ทดแรง เอนโค้ดเดอร์ป้อนค่ากลับ และวงจรควบคุมทำหน้าที่ประมวลผลและควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ ดังแสดงในรูป 2.16

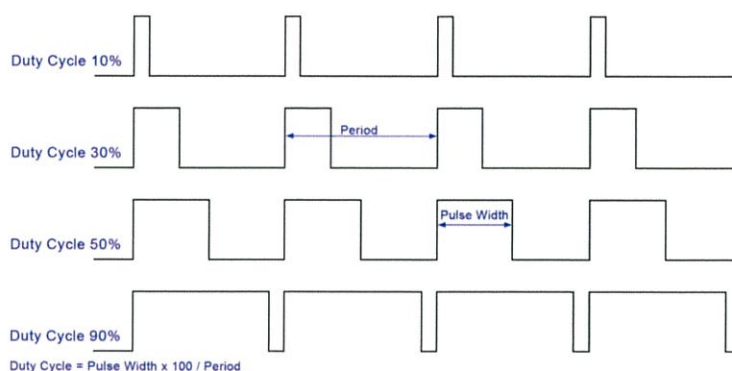


รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบพื้นฐานของเซอร์โวมอเตอร์

### 2.6.3 การควบคุมมอเตอร์โดยวิธีการปรับความกว้างของพัลส์

วิธีการปรับความกว้างของพัลส์ (PWM : Pulse Width Modulation) เป็นการควบคุมวงจรโดยการเขียนค่าแบบอนาล็อก (Analog) ด้วยพอร์ตดิจิตอลของไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยทั่วไปพอร์ตดิจิตอลจะส่งสัญญาณได้เพียง 2 สถานะ คือ ON และ OFF เท่านั้น PWM เป็นการทำให้พอร์ตดิจิตอลสามารถส่งสัญญาณได้มากกว่า ON หรือ OFF โดยวิธีการนั้นจะใช้การส่งสัญญาณ ON/OFF สลับกันไปมาด้วยคาบเวลาหนึ่งที่คงที่ โดยค่าที่ได้จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของสัญญาณในช่วงเวลาที่มีสถานะ ON กับช่วงเวลาที่ เป็น OFF โดยช่วงเวลาทั้งหมดที่สัญญาณมีสถานะเป็น ON จะ

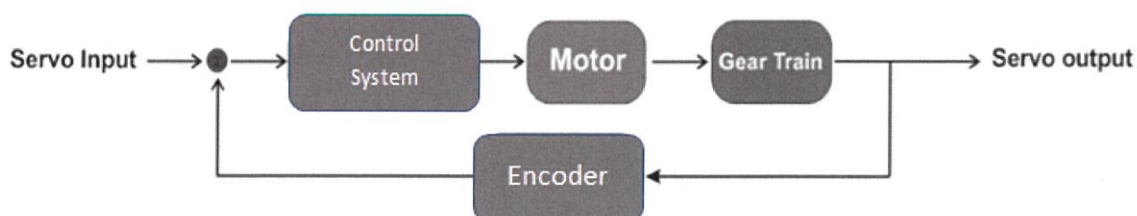
เรียกว่าเป็นความกว้างพัลส์ (Pulse Width) และอัตราส่วนของสัญญาณพัลส์ที่เทียบกับคาบเวลา (Period) ของพัลส์สัญญาณนั้นจะเรียกว่า Duty Cycle ดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ลักษณะสัญญาณ PWM ที่เปอร์เซ็นต์ Duty Cycle ที่ต่างกัน

#### 2.6.4 ระบบควบคุมตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์

ในการควบคุมตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์ เซอร์โวมอเตอร์จะรับสัญญาณ PWM ตั้งต้น จากไมโครคอนโทรลเลอร์ จากนั้นวงจรควบคุมจะนำสัญญาณที่รับมาถอดรหัสเป็นตำแหน่งของมอเตอร์ และส่งแรงดันไปขับเคลื่อนมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ถอดรหัสได้ จากนั้นจะมีเอนโค้ดเดอร์คอยป้อนค่ากลับโดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับตำแหน่งของมอเตอร์ โดยนำค่าที่ตรวจจับได้เข้ารหัสเป็นสัญญาณ PWM กลับไปเปรียบเทียบกับสัญญาณตั้งต้น ซึ่งมอเตอร์จะหยุดหมุนเมื่อสัญญาณที่เข้ารหัสจากค่าที่ตรวจจับได้นั้นมีค่าเท่ากับสัญญาณตั้งต้น จึงทำให้การควบคุมตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์มีความแม่นยำ ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ระบบควบคุมเซอร์โวมอเตอร์แบบมีการป้อนค่ากลับเพื่อควบคุมตำแหน่ง

## บทที่ 3

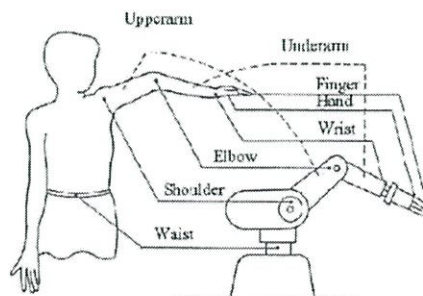
### วิธีดำเนินงาน

#### 3.1 การออกแบบกลไกของหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน

การออกแบบกลไกของหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน จะต้องมีการกำหนดขอบเขตการทำงานของแต่ละข้อต่อ โดยจะออกแบบให้มีพื้นที่การทำงานที่ครอบคลุมบริเวณรอบตัวหุ่นยนต์ โดยมีการอ้างอิงมาจากรูปแบบหุ่นยนต์แบบแขนข้อต่อ (Articulate Robot) ซึ่งใช้การเคลื่อนที่ข้อต่อหมุนในทุกข้อต่อ โดยหุ่นยนต์แขนกลนี้จะประกอบไปด้วยข้อต่อแบบหมุน 6 ข้อต่อ พร้อมทั้งแกนที่ใช้เชื่อมต่อกันระหว่างข้อต่อ ที่ส่วนปลายของข้อต่อสุดท้ายจะเป็นที่ยึดจับสำหรับติดตั้งภาระต่างๆ คุณสมบัติของหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน ได้ถูกออกแบบดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางคุณสมบัติของหุ่นยนต์ที่ออกแบบ

คุณสมบัติของหุ่นยนต์แขนกลที่ต้องการ	
จำนวนแกน	6 แกน + ที่ยึดจับ
ขอบเขตการเคลื่อนที่ของแกน	.
แกนที่ 1 : ฐานหมุน	+135° / -135°
แกนที่ 2 : ข้อไหล่	180°
แกนที่ 3 : ข้อศอก	+135° / -135°
แกนที่ 4 : ข้อมือหมุน	+135° / -135°
แกนที่ 5 : ข้อมืออง	+135° / -135°
แกนที่ 6 : ที่ยึดจับหมุน	+135° / -135°
โครงสร้างและการขึ้นรูป	-พลาสติก อะคริลิกแผ่น ขึ้นรูปด้วยเครื่องตัดเลเซอร์ -พลาสติก ABS ขึ้นรูปด้วย เครื่องพิมพ์ 3 มิติ



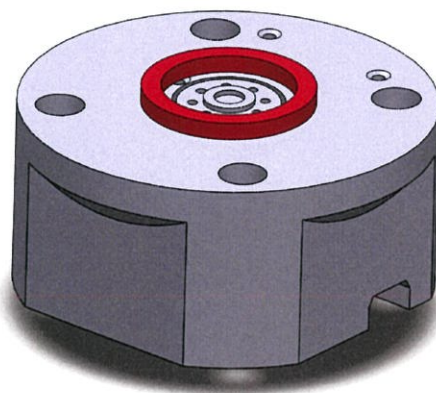
รูปที่ 3.1 รูปแบบโดยทั่วไปของหุ่นยนต์แขนกลเมื่อเทียบกับแขนมนุษย์

การกำหนดคุณสมบัติของหุ่นยนต์แขนกลนั้นต้องคำนึงถึงตัวต้นกำลังเป็นหลัก โดยต้นกำลังที่เลือกใช้คือ อาร์ซีเซอร์โวมอเตอร์ รุ่น ABRS-5314HTG ซึ่งเป็นเซอร์โวมอเตอร์กระแสตรงไร้แปรงถ่าน ที่มืองศาการทำงาน 280 องศา โดยหลักการออกแบบมีจุดประสงค์เพื่อเชื่อมต่อตัวต้นกำลังแต่ละตัวเข้าด้วยกัน และออกแบบให้มีชิ้นส่วนน้อยที่สุด



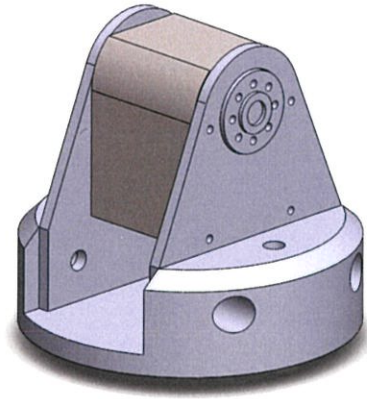
รูปที่ 3.2 แบบจำลองของอาร์ซีเซอร์โวมอเตอร์รุ่น ABRS-5314HTG

เนื่องจากอาร์ซีเซอร์โวมอเตอร์มีน้ำหนักที่เบาและมีเกียร์ทดในตัว ทำให้กลไกของหุ่นยนต์ไม่จำเป็นต้องสร้างส่วนทดกำลังเพิ่มเติม จึงสามารถส่งกำลังโดยตรงไปยังข้อต่อต่างๆได้เลย โดยการออกแบบจะเน้นความเรียบง่าย และรวดเร็ว ออกแบบโดยใช้หลักการเชื่อมความสัมพันธ์ระหว่าง 2 จุดเข้าด้วยกัน เช่น พื้นโต๊ะกับต้นกำลังตัวแรก ต้นกำลังตัวแรกกับต้นกำลังตัวที่สอง เป็นต้น ในหุ่นยนต์แขนกล 6 แกนนี้จะใช้พลาสติกอะคริลิกแผ่นที่ขึ้นรูปด้วยการตัดเลเซอร์เป็นหลัก โดยชิ้นส่วนที่จำเป็นต้องมีความซับซ้อน จะใช้พลาสติกABSแบบเส้นที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์3มิติ โดยชิ้นส่วนโครงสร้างของหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน ได้ถูกออกแบบดังแสดงในรูปที่ 3.3 ถึงรูปที่ 3.9



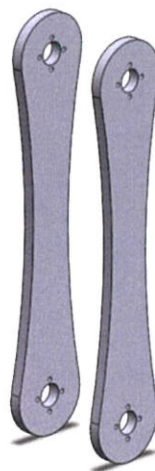
รูปที่ 3.3 แบบจำลองของส่วนฐานหมุนของหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน

ส่วนฐานเป็นชิ้นส่วนที่ต้องยึดติดกับโต๊ะงาน ออกแบบให้มีฐานที่ใหญ่พร้อมทั้งลูกปืนสัมผัสเพื่อรองรับน้ำหนักและลดการเสียดสีระหว่างข้อต่อ โดยจะติดตั้งอาร์ซีเซอร์โวมอเตอร์โดยตรงที่จุดหมุนของข้อหมุนแรก มีรูสำหรับยึดอาร์ซีเซอร์โวมอเตอร์ และรูสำหรับยึดกับโต๊ะงาน เนื่องจากในชิ้นส่วนนี้มีความซับซ้อนเพราะต้องยึดกับหลายอุปกรณ์ดังที่กล่าวมา ดังนั้นถึงใช้เครื่องพิมพ์ 3 มิติ ในการขึ้นรูปพลาสติก ABS ออกมาเป็นชิ้นส่วนนี้ และมีรูด้านข้างสำหรับเดินสายไฟให้อาร์ซีเซอร์โวมอเตอร์

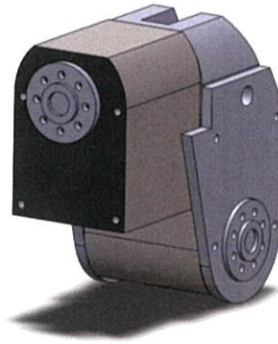


รูปที่ 3.4 แบบจำลองของส่วนข้อไหล่ของหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน

ส่วนข้อไหล่เป็นจุดที่มอเตอร์ที่ติดตั้งในข้อต่อนี้จะต้องรับภาระมากที่สุดจึงใช้พลาสติกอะคริลิกแบบแผ่นหนา 3 มิลลิเมตรเป็นโครงสร้างเข้ามาช่วยรับแรง เนื่องจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นของการพิมพ์ที่น้อย โดยจะให้ส่วนฐานของข้อต่อขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เพื่อแยกการประกอบกับมอเตอร์ในส่วนฐานหมุน

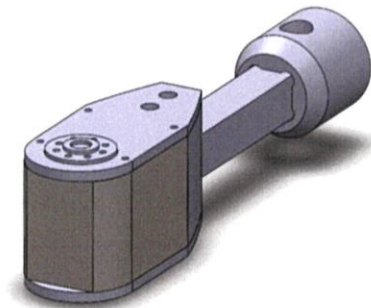


รูปที่ 3.5 แบบจำลองของส่วนแขนระหว่างข้อไหล่และข้อศอกของหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน

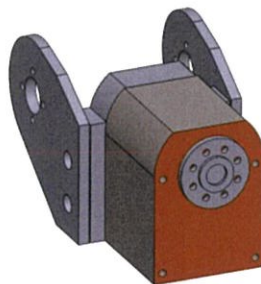


รูปที่ 3.6 แบบจำลองของส่วนข้อไหล่ของหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน

ส่วนแขนระหว่างข้อไหล่และข้อศอกจะใช้พลาสติกอะคริลิกหนา 5 มิลลิเมตรเป็นโครงสร้างวางขนานกันเพื่อช่วยกันรับภาระ และส่วนข้อไหล่จะมีการยึดกันของอาร์ซีเซอร์โวมอเตอร์ 2 ตัว โดยจะใช้พลาสติกอะคริลิกหนา 3 มิลลิเมตรร่วมกับพลาสติกABSที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ และมีช่องสำหรับเดินสายไฟเข้าอาร์ซีเซอร์โวมอเตอร์



รูปที่ 3.7 แบบจำลองของส่วนข้อมือหมุนของหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน



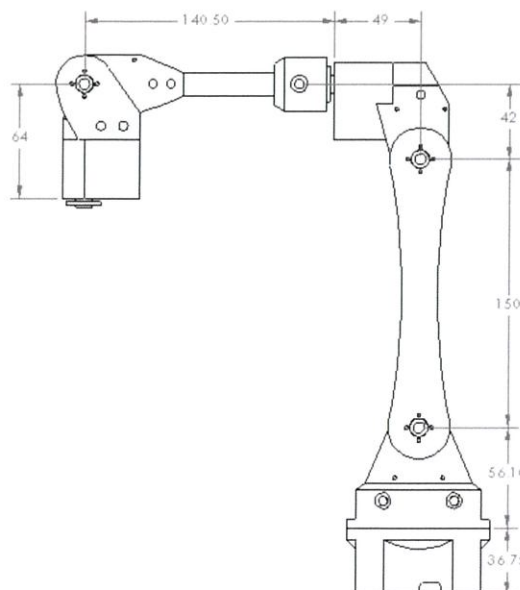
รูปที่ 3.8 แบบจำลองของส่วนข้อมือและที่ยึดจับหมุนของหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน

ในส่วนของข้อมือหมุน ข้อมือองและที่ยึดจับหมุนจะใช้พลาสติกอะคริลิกหนา 3 มิลลิเมตร ร่วมกับพลาสติกABSที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องพิมพ์ 3 มิติ โดยนำชิ้นที่ขึ้นรูปจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติเข้ามาช่วยในการประกอบในกรณีที่มีการประกอบมากกว่า 2 มิติ ซึ่งวัสดุอะคริลิกแผ่นสามารถทำได้ยาก

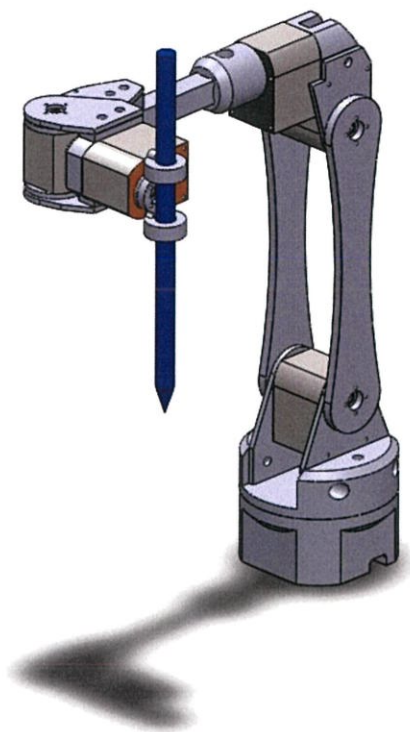


รูปที่ 3.9 แบบจำลองของส่วนที่ยึดจับของหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน ขณะจับปากกา

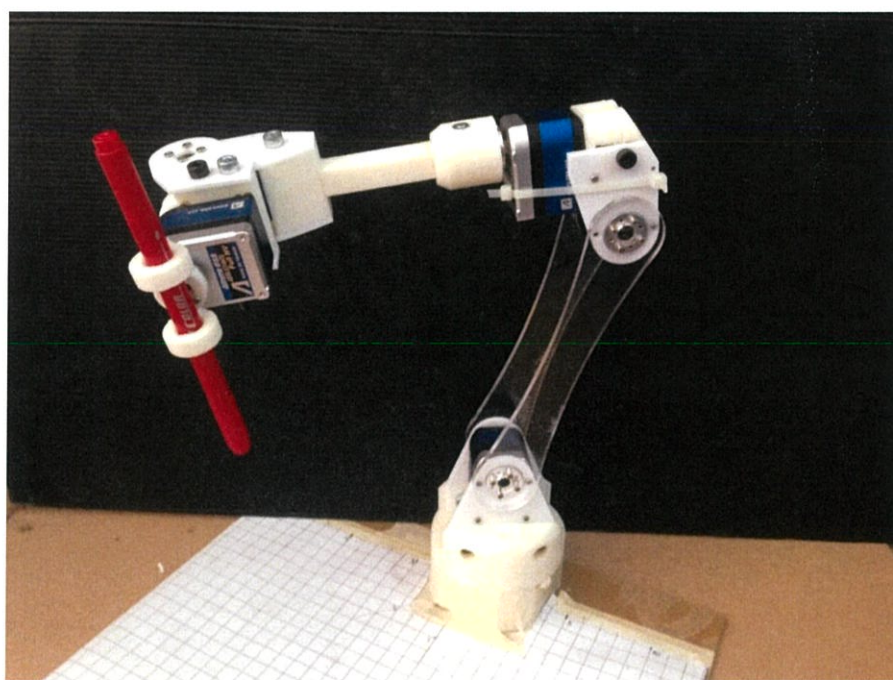
โดยในการยึดชิ้นส่วนพลาสติกอะคริลิกแผ่นจากเครื่องตัดเลเซอร์และพลาสติกABSจากเครื่องพิมพ์ 3 มิติ เข้ากันกับอาร์ซีเซอร์โวมอเตอร์จะใช้ชนิดขนาด M2 ซึ่งเป็นขนาดรูชนิดที่มีบนอาร์ซีเซอร์โวมอเตอร์ และใช้ชนิด M5 ในการยึดระหว่างชิ้นส่วนด้วยกันเอง เมื่อนำชิ้นส่วนมาประกอบเข้าด้วยกัน จะได้หุ่นยนต์แขนกล 6 แกนดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยจะเป็นแบบจำลองที่แสดงเพียงการประกอบของชิ้นส่วนและตัวต้นกำลัง ไม่ได้แสดงในส่วนของตัวยึดต่างๆที่ใช้ยึดชิ้นส่วนโครงสร้างของแขนกล 6 แกน



รูปที่ 3.10 ขนาดของแขนข้อต่อของหุ่นยนต์แขนกล 6 แกนในหน่วยมิลลิเมตร



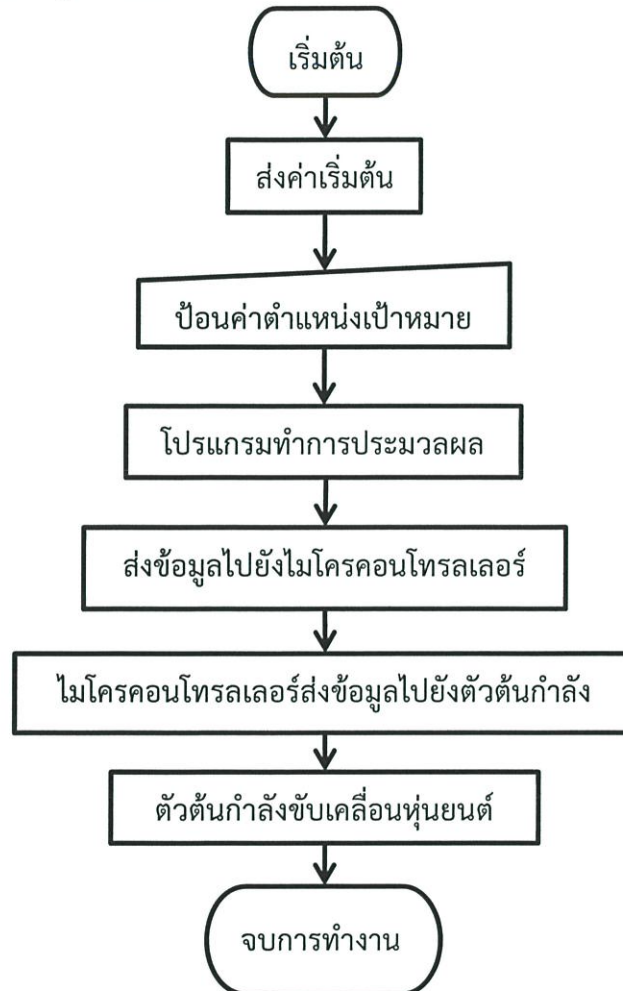
รูปที่ 3.11 แบบจำลองของหุ่นยนต์แขนกล 6 แกน



รูปที่ 3.12 หุ่นยนต์แขนกล 6 แกน

### 3.2 การออกแบบระบบควบคุม

ในการออกแบบระบบควบคุม สิ่งที่ต้องการคือความสามารถในการวิเคราะห์และคำนวณผลของตำแหน่งของการเคลื่อนที่ และสามารถส่งข้อมูลที่ถูกส่งไปควบคุมหุ่นยนต์แขนกลได้ ซึ่งสามารถอธิบายระบบควบคุมได้ดังรูปที่ 3.13

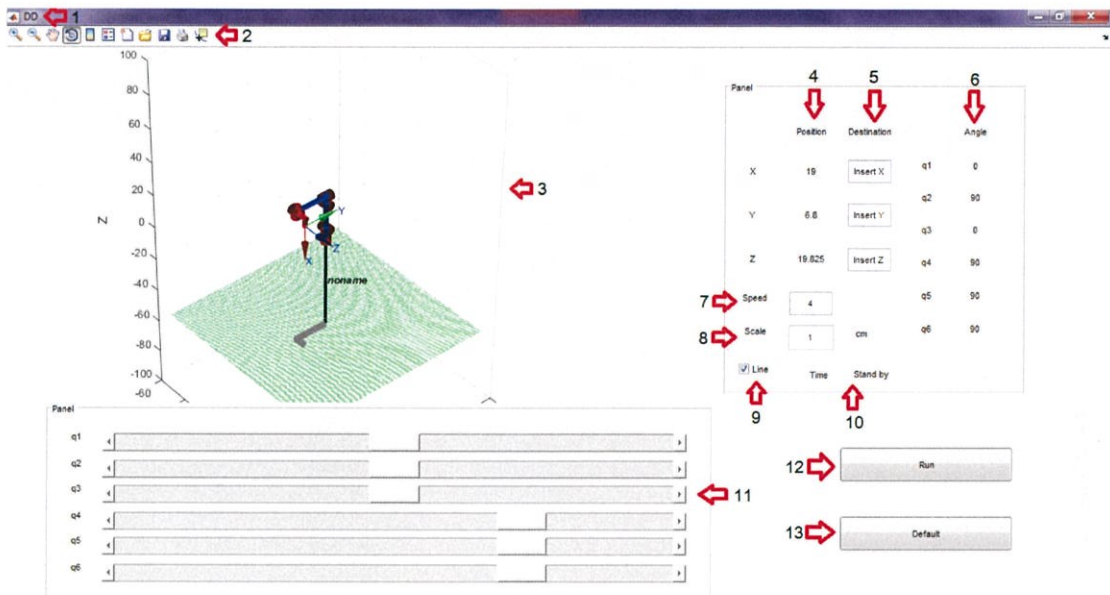


รูปที่ 3.13 แผนผังหลักของระบบควบคุม

โดยมีหลักการทำงานคือ เมื่อทำการเปิดโปรแกรม โปรแกรมจะทำการส่งค่าเริ่มต้นให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อตั้งค่าให้กับตัวต้นกำลังแต่ตัวขับเคลื่อนหุ่นยนต์แขนกลไปยังตำแหน่งเริ่มต้น จากนั้นผู้ใช้จะทำการป้อนข้อมูลผ่านทาง GUI (Graphical User Interface) เพื่อเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์และคำนวณผลด้วยโปรแกรม MATLAB แล้วจึงส่งข้อมูลที่ได้ออกไปให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เพื่อทำการแปลงข้อมูลเป็นสัญญาณเข้าสู่ตัวต้นกำลังแต่ละตัว สุดท้ายตัวต้นกำลังจะทำการขับเคลื่อนหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ

### 3.2.1 GUI (Graphical User Interface)

GUI คือส่วนที่ผู้ใช้งานโต้ตอบกับคอมพิวเตอร์ด้วยภาพหรือสัญลักษณ์นอกเหนือจากข้อความ GUI ในโครงการนี้ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB โดยเชื่อมต่อการรับค่า-ส่งค่าและการวิเคราะห์และคำนวณผลเข้ากับฟังก์ชันเบื้องหลังบนโปรแกรม MATLAB จากนั้นจึงนำแบบจำลองของหุ่นยนต์แขนกลมาแสดงพร้อมตัวแปรอื่นๆที่ได้จากการวิเคราะห์คำนวณมาแสดงบน GUI โดยสามารถอธิบายส่วนประกอบต่างๆของ GUI ได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ภาพแสดงส่วนประกอบของ GUI

หมายเลข 1 ส่วนแสดงชื่อของ GUI

หมายเลข 2 แถบเครื่องมือ

หมายเลข 3 ส่วนแสดงผลกราฟิก

หมายเลข 4 กล่องบริเวณแสดงผลตำแหน่งหุ่นยนต์แขนกลปัจจุบัน

หมายเลข 5 กล่องรับค่าตำแหน่งเป้าหมายของการเคลื่อนที่

หมายเลข 6 กล่องแสดงค่าของมุมข้อต่อแต่ละตำแหน่งของหุ่นยนต์แขนกลปัจจุบัน

หมายเลข 7 กล่องรับค่าความเร็วในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แขนกล

หมายเลข 8 กล่องรับค่าความละเอียดของการเคลื่อนที่

หมายเลข 9 กล่องเปิด/ปิดการสร้างเส้นบนส่วนแสดงผลกราฟิก

หมายเลข 10 กล่องแสดงเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากตำแหน่งปัจจุบันถึงเป้าหมาย

หมายเลข 11 แถบเลื่อนปรับเปลี่ยนและแสดงค่าของมุมข้อต่อแต่ละข้อต่อ

หมายเลข 12 ปุ่มเริ่มการทำงาน

หมายเลข 13 ปุ่มปรับตำแหน่งหุ่นยนต์แขนกลสู่ตำแหน่งเริ่มต้น

### 3.2.2 การวิเคราะห์หาตำแหน่งของมุมข้อต่อ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์แขนกลจะถูกจำลองจากโครงสร้างของหุ่นยนต์แขนกลจริงที่ประกอบด้วย 6 ข้อต่ออิสระต่อกัน โดยอาศัยหลักการเชื่อมต่อทุกตัวเพื่อที่จะใช้หาเมตริกที่ใช้แทนความสัมพันธ์ของข้อต่อต่างๆที่เชื่อมต่อกัน ซึ่งเมตริกนี้จะใช้หาสมการจลนศาสตร์แปรผัน(Forward Kinematics) และจลนศาสตร์ผกผัน (Inverse Kinematics) โดยใช้หลักการของสัญญาณนิยมนิวทอน-ฮาร์เทนเบิร์ก (Denavit-Hartenberg convention) ซึ่งเมตริกที่ได้จะอธิบายถึงคุณสมบัติในการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์โดยจะต้องหาค่าตัวแปรต่างๆที่วัดได้จากหุ่นยนต์แขนกลจริงแล้วนำมาคำนวณในสมการของสัญญาณนิยมนิวทอน-ฮาร์เทนเบิร์ก ดังแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงตัวแปรข้อต่อและพารามิเตอร์ก้านต่อ

Link ก้านต่อ	d ค่าชดเชยของก้านต่อ	a ความยาวก้านต่อ	$\alpha$ (degree) มุมบิดก้านต่อ	$\theta$ (degree) มุมข้อต่อ
1	5.625	0	90	$\theta_1$
2	0	15	0	$\theta_2$
3	0	4.2	90	$\theta_3$
4	19	0	90	$\theta_4$
5	0	0	-90	$\theta_5$
6	6.8	5	0	$\theta_6$

จากตัวแปรนิวทอน-ฮาร์เทนเบิร์กของหุ่นยนต์แขนกลในตารางที่ 3.2 สามารถเขียนเมตริกความสัมพันธ์ได้ตามสมการ (3.1) ถึง (3.6)

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 5.625 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 15 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 15 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & \sin \theta_3 & 4.2 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & 0 & -\cos \theta_3 & 4.2 \sin \theta_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & \sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & -\cos \theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 19 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & -\sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & \cos \theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 6.8 \cos \theta_6 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 6.8 \sin \theta_6 \\ 0 & 0 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

จากสมการที่กล่าวมา จะสามารถคำนวณให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของส่วนแกนและส่วนข้อมือของหุ่นยนต์แขนกลได้ดังสมการ (3.7) และ (3.8) ตามลำดับ

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} c_1c_2c_3 - c_1c_2s_3 & s_1 & c_1c_2s_3 + c_1s_2c_3 & 4.2(c_1c_2c_3 - c_1c_2s_3) + 15c_1c_2 \\ s_1c_2c_3 - s_1s_2s_3 & -c_1 & s_1c_2s_3 + s_1s_2c_3 & 4.2(s_1c_2c_3 - s_1s_2s_3) + 15s_1c_2 \\ s_{23} & 0 & -c_{23} & 4.2s_{23} + 15s_2 + 5.625 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$${}^4T_6 = \begin{bmatrix} c_4c_5c_6 - s_4s_6 & -c_4c_5c_6 - s_4c_6 & -c_4s_5 & 6.8(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - 5c_4c_5 \\ s_4c_5c_6 + c_4c_6 & -s_4c_5s_6 + c_4c_6 & -s_4s_5 & 6.8(s_4c_5c_6 - c_4c_6) - 5s_4s_5 \\ s_5c_6 & -s_5s_6 & c_5 & 6.8s_5c_6 + 5c_5 + 19 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

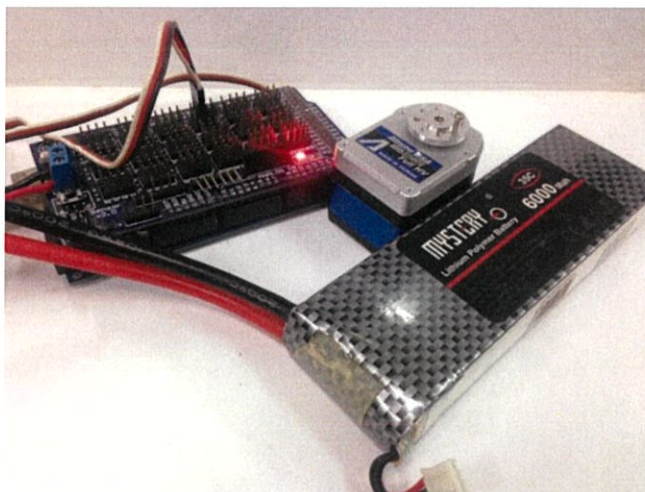
จากสมการจะเห็นได้ว่า เมื่อการคำนวณความสัมพันธ์มีจำนวนข้อต่อและก้านต่อมากขึ้น ความซับซ้อนในการคำนวณจะมีมากตามไปด้วย ในปัจจุบันการคำนวณความสัมพันธ์ดังกล่าวจะถูกคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์เป็นหลัก และโปรแกรม MATLAB มีฟังก์ชันที่สามารถคำนวณความสัมพันธ์ดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม จึงได้เลือกใช้ MATLAB ในการทำโครงการนี้

### 3.2.3 การออกแบบระบบควบคุม

การออกแบบระบบควบคุมจะมีหลักการทำงานคือ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะเป็นตัวควบคุมต้นกำลัง ซึ่งในที่นี้คืออาร์ชีเซอร์โวมอเตอร์ โดยรับคำสั่งจากคอมพิวเตอร์มาแปลงเป็นสัญญาณ PWM ส่งไปยังอาร์ชีเซอร์โวมอเตอร์แต่ละตัว จากนั้นอาร์ชีเซอร์โวมอเตอร์จะรับสัญญาณตั้งต้น PWM มาถอดรหัสเพื่อแปลงเป็นตำแหน่งของมอเตอร์ โดยมีเอนโค้ดเดอร์ตรวจจับตำแหน่งปัจจุบันเข้ารหัสและนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณตั้งต้น

### 3.2.3.1 วงจรระบบควบคุมต้นกำลัง

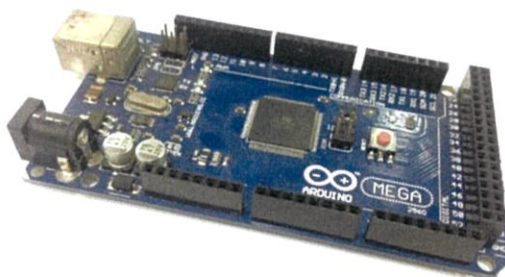
หลักการการทำงานของวงจรคือ ส่งข้อมูลที่ถูกรับเข้ารหัสเป็นสัญญาณ PWM ผ่านขาสัญญาณ 6 7 8 9 10 และ 11 ซึ่งเป็นขาสัญญาณของ Arduino Mega2560 R3 ที่สามารถสร้างสัญญาณ PWM ส่งไปยังอาร์ซีเซอโรมอเตอร์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 วงจรควบคุมอาร์ซีเซอโรมอเตอร์

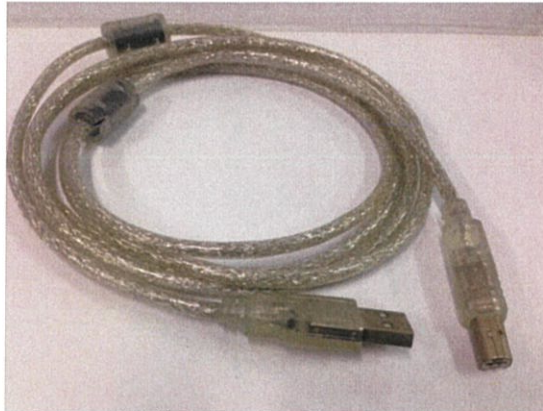
ประกอบไปด้วย

Arduino Mega2560 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีชิปไอซีไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ ATmega2560 ถูกออกแบบมาสำหรับงานที่ต้องการใช้พอร์ตอินพุต-เอาต์พุตจำนวนมาก เช่นงานที่ต้องควบคุมอาร์ซีเซอโรมอเตอร์หลายๆตัว อีกทั้งยังมีหน่วยความจำมากกว่า Arduino Uno ทำให้สามารถเขียนโค้ดโปรแกรมเข้าไปได้มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.16



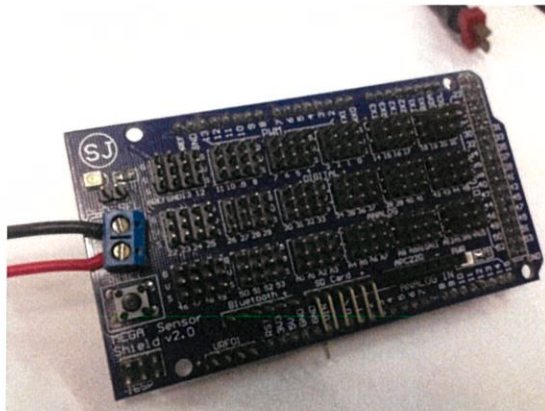
รูปที่ 3.16 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega2560

สายUSB type B ทำหน้าที่ส่งข้อมูลแบบอนุกรมจากคอมพิวเตอร์ไปยัง Arduino ดังแสดงในรูปที่ 3.17



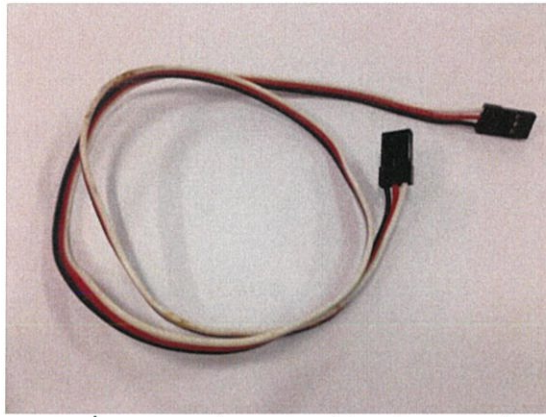
รูปที่ 3.17 สาย USB type B

Mega Sensor Shield เป็นอุปกรณ์เสริมของ Arduino ทำหน้าที่ขยายขาของบอร์ดสำหรับการต่อพ่วงกับ Sensor หรืออุปกรณ์อื่นๆ ได้ง่ายขึ้น เนื่องจากได้รวบรวมขาไฟเลี้ยง ขากราว และขาสัญญาณไว้ด้วยกัน ภายใน 3 ขา ดังแสดงในรูปที่ 3.18



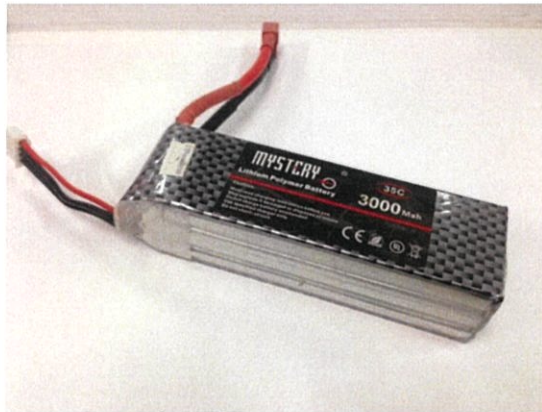
รูปที่ 3.18 Mega Sensor Shield ซึ่งเป็นอุปกรณ์เสริมของ Arduino

สายไฟของอาร์ซีเซอร์โวมอเตอร์ เป็นสายที่เชื่อมต่อกับ ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ ประกอบไปด้วยสายไฟ 3 เส้น คือ สายไฟเลี้ยง สายกราวด์ และสายสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 สายไฟของอาร์ดีซีเอโอโมเตอร์

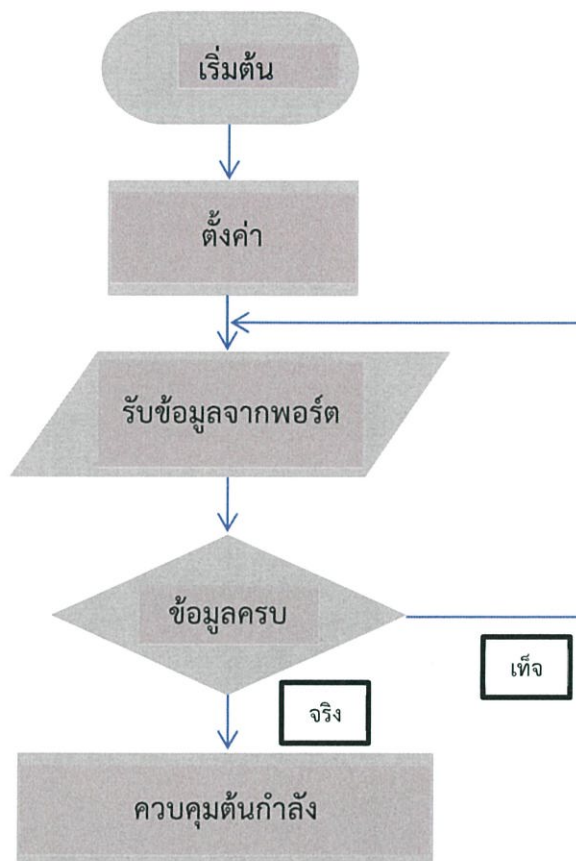
แหล่งจ่ายพลังงาน ทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้ขับเคลื่อนต้นกำลัง ดัง  
แสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 แหล่งจ่ายพลังงาน

### 3.2.3.2 การออกแบบโปรแกรมควบคุมเซอร์โวมอเตอร์

กระบวนการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถอธิบายได้ด้วย Flow Chart ดังแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แผนผังแสดงการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์

หลักการทำงานคือ เมื่อเปิดการทำงานไมโครคอนโทรลเลอร์ จะเริ่มต้นด้วยการตั้งค่าตำแหน่งเริ่มต้นของอาร์ซีเซอร์โวมอเตอร์ตามที่โปรแกรมไว้ หลังจากนั้นจะรอรับข้อมูลจากพอร์ตโดยการสื่อสารแบบอนุกรม เมื่อมีข้อมูลเข้ามาจะรับค่าจนครบตามที่ส่งมา ไมโครคอนโทรลเลอร์จึงจะเข้ารหัสเป็นสัญญาณ PWM เพื่อส่งไปควบคุมอาร์ซีเซอร์โวมอเตอร์

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของตัวหุ่นยนต์แขนกลที่ออกแบบ ทั้งในด้านความแม่นยำและด้านความเที่ยงตรง ด้วยการกำหนดตำแหน่งเป้าหมายและเปรียบเทียบค่าตำแหน่งที่เคลื่อนที่ได้จริงจากการวัด โดยแบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วน คือ การทดลองด้านความแม่นยำ และการทดลองด้านความเที่ยงตรง



รูปที่ 4.1 แผนผังการทดสอบประสิทธิภาพ

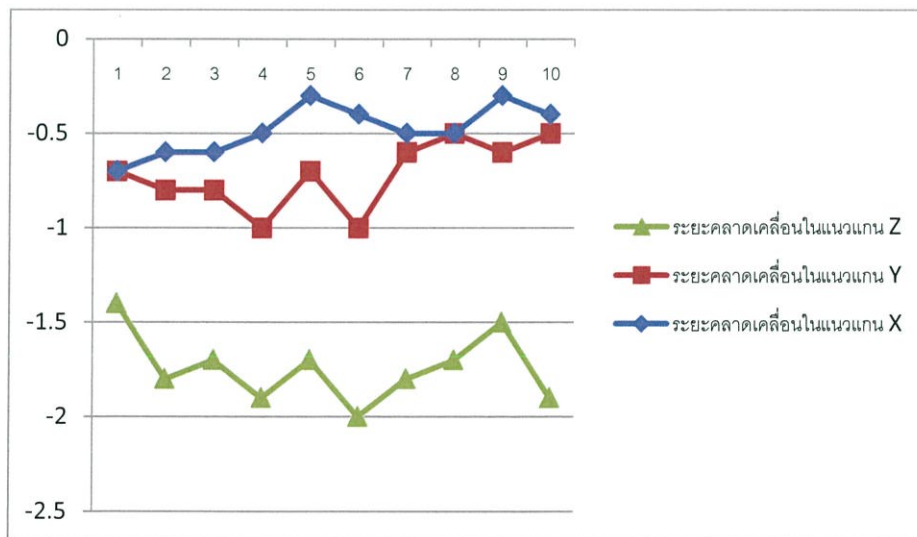
#### 4.1 การทดลองด้านความแม่นยำ

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อทดสอบความสามารถในการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายได้ถูกต้อง โดยมีวิธีการทดลองคือ

1. ทำการติดตั้งหุ่นยนต์แขนกล ติดตั้งกระดาษกราฟบนระนาบแนวระดับและแนวตั้งฉาก และทำการติดตั้งเลเซอร์ซีพีเข้าจำนวนสองตัวให้ตั้งฉากกันเป็นอุปกรณ์ทำงานส่วนปลาย
2. ทำการกำหนดตำแหน่งแขนอยู่ในตำแหน่งเริ่มต้นของการทดลอง
3. กำหนดตำแหน่งเป้าหมายบนปริภูมิ 3 มิติ
4. ส่งค่าตำแหน่งบนปริภูมิ 3 มิติไปยังหุ่นยนต์แขนกลเพื่อทำการเคลื่อนที่
5. บันทึกค่าตำแหน่งที่วัดได้จากเลเซอร์ซีพีบนกระดาษกราฟ แล้วเปรียบเทียบกับค่าตำแหน่งที่ถูกกำหนด
6. ทำการทดลองซ้ำ โดยกำหนดตำแหน่งเป้าหมายที่แตกต่างกันจนครบ 10 ตำแหน่ง โดยได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่าตำแหน่งที่ถูกกำหนดกับค่าตำแหน่งที่วัดได้จริง

การทดสอบ ครั้งที่	ตำแหน่งเป้าหมาย (cm)			ตำแหน่งที่วัดได้ (cm)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	10	10	10	9.3	9.3	8.6
2	11	10	9	10.4	9.2	7.2
3	12	10	8	11.4	9.2	6.3
4	13	10	7	12.5	9	5.1
5	14	10	6	13.7	9.3	4.3
6	15	10	5	14.6	9	3
7	16	10	4	15.5	9.4	2.2
8	17	10	3	16.5	9.5	1.3
9	18	10	2	17.7	9.4	0.5
10	19	10	1	18.6	9.5	-0.9



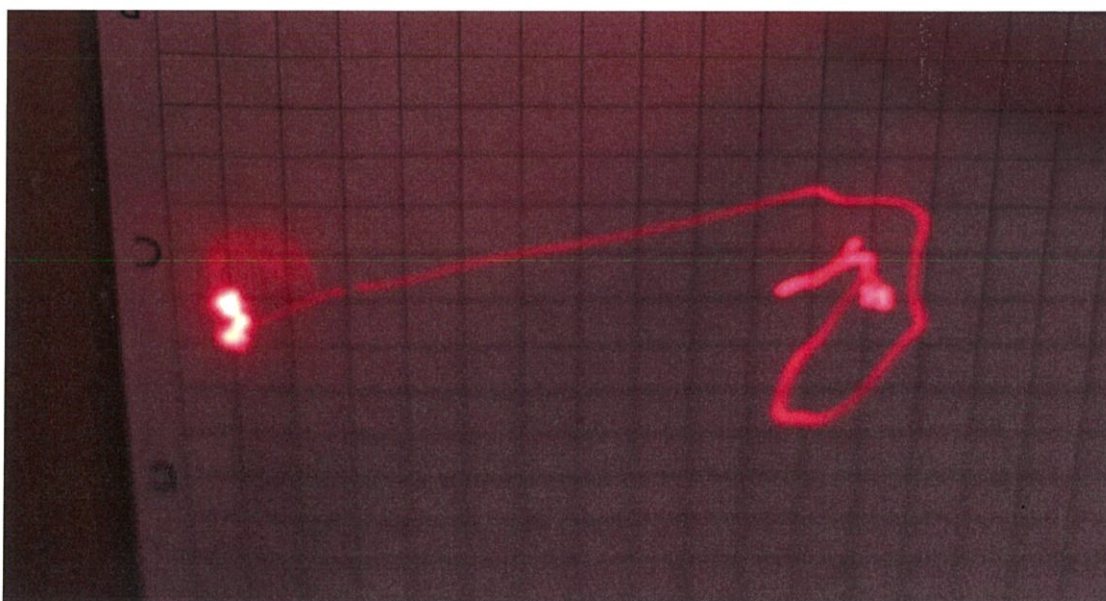
รูปที่ 4.2 แผนภาพแสดงระยะที่คลาดเคลื่อนตามแนวแกน X Y และ Z ในแต่ละครั้งที่ทำการทดลอง

## 4.2 การทดลองด้านความเที่ยงตรง

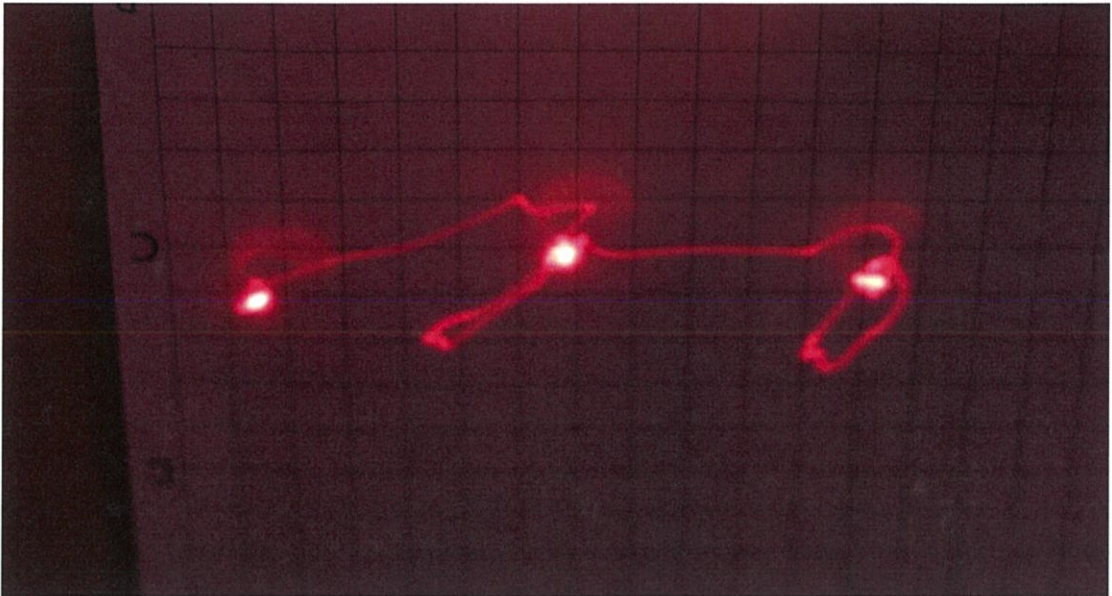
การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อทดสอบการเกาะกลุ่มของการเคลื่อนที่ เมื่อมีการกำหนดความละเอียดของการเคลื่อนที่ต่างกัน มีวิธีการทดลองคือ

1. ทำการติดตั้งหุ่นยนต์แขนกล ติดตั้งกระดาษกราฟบนระนาบแนวระดับ และทำการติดตั้งเลเซอร์ชี้เป้าเป็นอุปกรณ์ทำงานส่วนปลาย
2. ทำการติดตั้งกล้องถ่ายภาพโดยปรับค่าความเร็วชัตเตอร์ต่ำ เพื่อทำการบันทึกผล
3. ทำการกำหนดตำแหน่งแขนอยู่ในตำแหน่งเริ่มต้นของการทดลอง
4. กำหนดตำแหน่งเป้าหมายที่มีระยะห่าง 10 cm ตามแนวแกน Y โดยระยะในแนวแกน X คงที่
5. กำหนดค่าความละเอียดของการทำงานในโปรแกรมให้มีค่าเท่ากับ 10 cm
6. เริ่มการบันทึกภาพ แล้วเริ่มการทำงานของหุ่นยนต์แขนกล
7. ทำการทดลองซ้ำ กำหนดค่าความละเอียดของการทำงานในโปรแกรมให้มีค่าเป็น 5, 2.5, 1 และ 0.5 cm ตามลำดับ

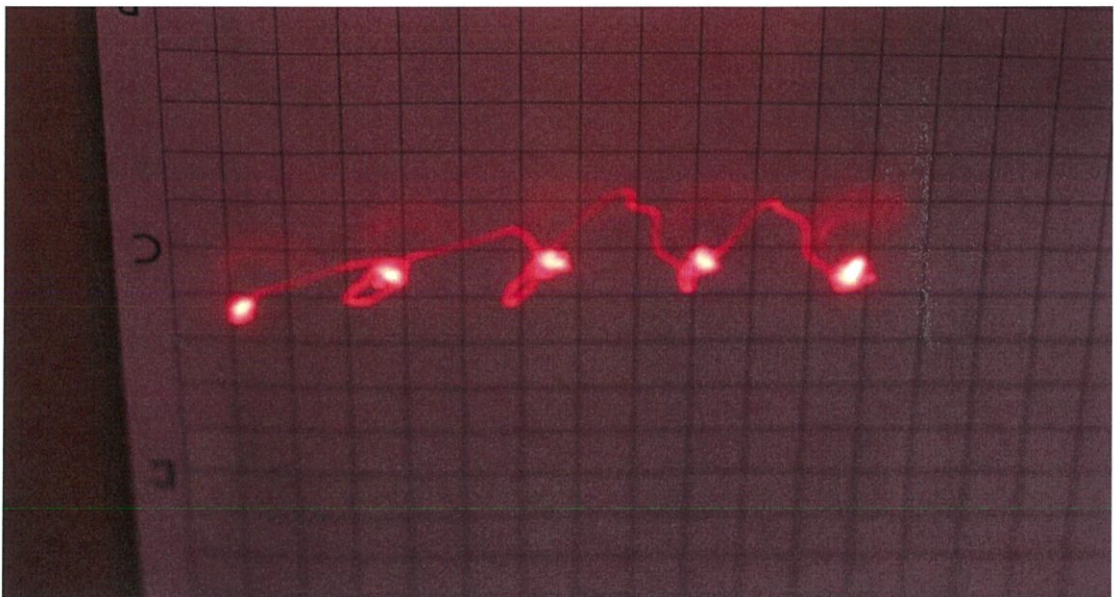
โดยได้ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.3 ถึง รูปที่ 4.7



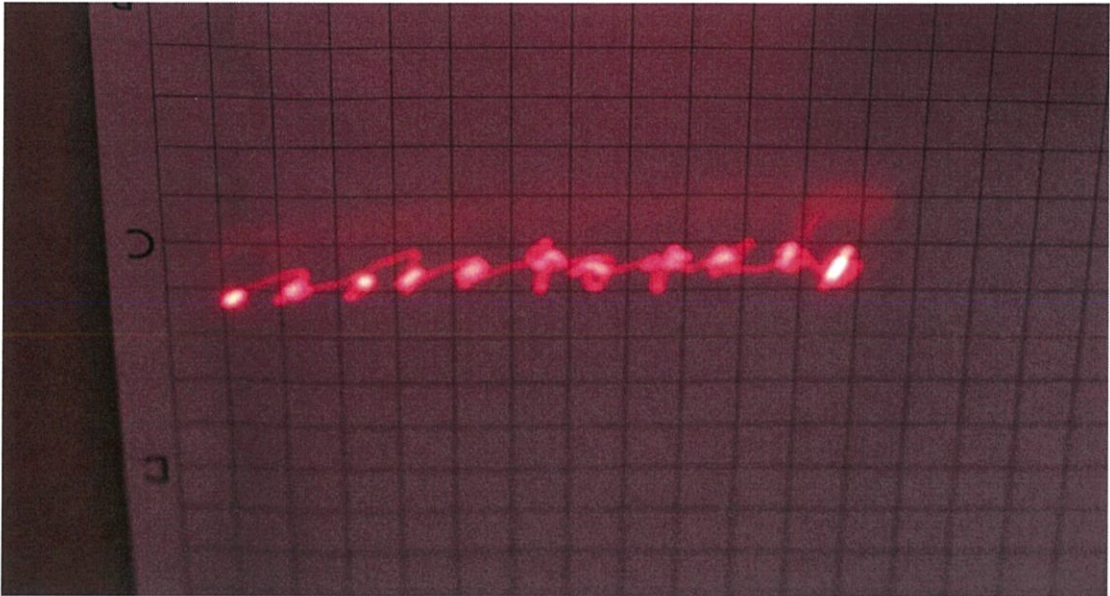
รูปที่ 4.3 รูปแสดงผลของการเคลื่อนที่โดยมีค่าความละเอียดของการทำงานเท่ากับ 10 cm



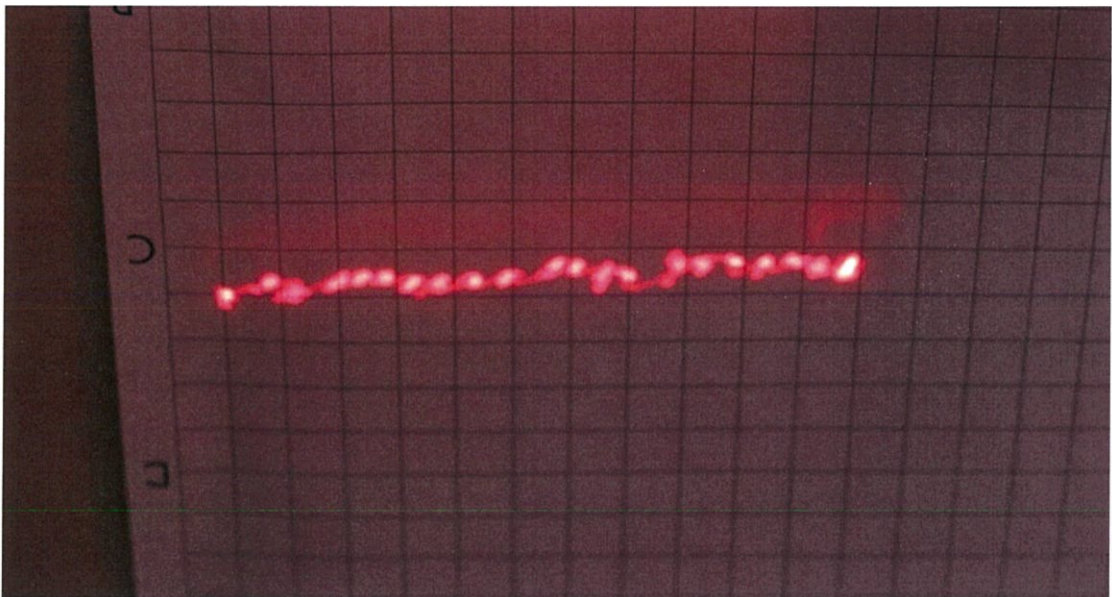
รูปที่ 4.4 รูปแสดงผลของการเคลื่อนที่โดยมีค่าความละเอียดของการทำงานเท่ากับ 5 cm



รูปที่ 4.5 รูปแสดงผลของการเคลื่อนที่โดยมีค่าความละเอียดของการทำงานเท่ากับ 2.5 cm



รูปที่ 4.6 รูปแสดงผลของการเคลื่อนที่โดยมีค่าความละเอียดของการทำงานเท่ากับ 1 cm



รูปที่ 4.7 รูปแสดงผลของการเคลื่อนที่โดยมีค่าความละเอียดของการทำงานเท่ากับ 0.5 cm

## บทที่ 5

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองควบคุมการเคลื่อนที่แบบสามมิติอย่างง่ายเพื่อทดสอบความแม่นยำของตำแหน่งพบว่ามีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตามแนวแกน  $X = -0.48$  cm ตามแนวแกน  $Y = -0.72$  cm และตามแนวแกน  $Z = -1.74$  cm และการทดลองควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวระนาบเป็นเส้นตรงเพื่อทดสอบความเที่ยงตรงของตำแหน่งและความแม่นยำของแนววิถี สามารถสรุปผลได้ว่าการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แขนกลมีความเที่ยงตรงสูง แต่มีความแม่นยำต่ำ และการกำหนดจำนวนจุดย่อยส่งผลกับความแม่นยำของวิถีของการเคลื่อนที่ให้มีความแม่นยำสูงขึ้น

#### 5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไขปัญหา

##### 5.2.1 ปัญหาที่พบ

หุ่นยนต์แขนกลที่ออกแบบและสร้างขึ้นนั้น เป็นแบบจำลองของหุ่นยนต์แขนกลที่ใช้จริงในอุตสาหกรรมซึ่งมีความสามารถในการรองรับแรงไม่มาก อีกทั้งยังเป็นเพียงตัวต้นแบบที่ยังไม่ได้รับการพัฒนา จึงมีข้อจำกัดบางประการซึ่งส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการเคลื่อนที่ จากการวิเคราะห์สาเหตุเบื้องต้นพบว่า ในด้านของส่วนประกอบทางกล วัสดุที่ใช้เป็นแผ่นอะคริลิก และพลาสติกซึ่งสามารถรองรับแรงได้น้อย ทำให้เกิดการโค้งงอในบางชิ้นส่วน และในด้านของตัวต้นกำลังที่ใช้คืออาร์ซีเซอร์โวมอเตอร์แบบที่ใช้ Potentiometer เป็นเซนเซอร์ในการตรวจสอบค่าตำแหน่ง จาก Datasheet พบว่าอุปกรณ์นี้มีค่าความคลาดเคลื่อนมากถึง 20 เปอร์เซ็นต์ เป็นผลให้ตำแหน่งของมอเตอร์ที่ได้มีความคลาดเคลื่อนออกไป และส่วนสุดท้ายเป็นผลมาจากตัวโปรแกรมควบคุมที่มีเพียงการคำนวณจลนศาสตร์ตำแหน่งเพียงอย่างเดียว ทำให้ไม่สามารถควบคุมความเร็วและความเร่งของหุ่นยนต์แขนกลได้

## 5.2.2 แนวทางแก้ไข

### 5.2.2.1 การแก้ไขด้านโครงสร้าง

ควรเปลี่ยนโครงสร้างให้มีความแข็งแรงและมีน้ำหนักเบาโดยอาจเลือกใช้เป็น อะลูมิเนียม ซึ่งจะความสามารถในการรองรับแรงและความทนทานที่มากกว่าแผ่นพลาสติกและ อะคริลิก

### 5.2.2.2 การแก้ไขด้านต้นกำลัง

อาร์ซีเซอร์โวมอเตอร์เป็นที่ใช้ Potentiometer เป็นเซนเซอร์ในการตรวจจับตำแหน่งที่มีความคลาดเคลื่อนสูง จึงควรใช้เซอร์โวมอเตอร์ที่มีเซอร์เซอร์ตรวจจับตำแหน่งที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น เช่น เซอร์โวมอเตอร์ที่ใช้ Absolute encoder เป็นเซนเซอร์ที่ให้ข้อมูลตำแหน่งละเอียด สามารถตรวจจับตำแหน่งได้แม่นยำด้วยหลักการออฟติคอลล

### 5.2.2.3 การแก้ไขด้านโปรแกรมควบคุม

โปรแกรมควบคุมที่ใช้เป็นการคำนวณเพียงจลนศาสตร์ตำแหน่งเพียงอย่างเดียว จึงควรเพิ่มโปรแกรมการคำนวณจลนศาสตร์ความเร็วและความเร่ง เพิ่มประสิทธิภาพของหุ่นยนต์แขน กล

## 5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

หุ่นยนต์แขนกลประเภทอาทิกิวเลท ยังสามารถปรับปรุงและพัฒนาต่อยอดไปได้อีก โดยการติดตั้งอุปกรณ์ทำงานส่วนปลายให้สามารถใช้งานใช้งานอื่นๆได้หลากหลาย อาทิเช่น งานเจาะ งานกัด งานเชื่อม งานพันสี โดยการตั้งโปรแกรมให้ทำงานแบบอัตโนมัติ และในอนาคตหากสามารถพัฒนา หุ่นยนต์แขนกลให้มีความคลาดเคลื่อนเทียบเท่าหรือน้อยกว่า 0.4 mm ก็จะสามารถนำหุ่นยนต์แขน กลมาเป็นเครื่องพิมพ์ 3มิติ โดยการติดตั้งหัวฉีดพลาสติกเป็นอุปกรณ์ทำงานส่วนปลายได้

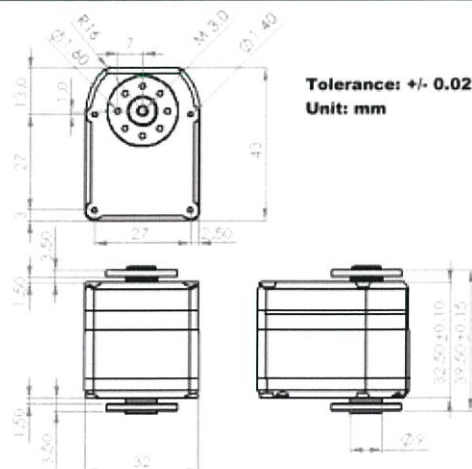
## บรรณานุกรม

- [1] วโรตม ตูจันดา. การวิเคราะห์และควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2559
- [2] บุญธรรม ภัทราจารุกุล, หุ่นยนต์อุตสาหกรรม, พิมพ์ครั้งที่ 1, บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, 2555
- [3] เอกชัย มะการ, เรียนรู้ เข้าใจ ใช้งาน ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ด้วย Arduino, พิมพ์ครั้งที่ 1, บริษัท อีทีที จำกัด, 2552
- [4] Peter F. Ryff. ELECTRIC MACHINERY. USA. PRENTICE-HALL, Inc. 1994.
- [5] Prof. Peter Corke. “Robotic Toolbox.” [Online]. Available :  
<http://petercorke.com/wordpress/>. 2017.
- [6] Tdhobby. “RC SERVO MOTOR.” [Online]. Available :  
[http://www.tdhobby.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=89:understand-rc-servo&catid=43&Itemid=79](http://www.tdhobby.com/index.php?option=com_content&view=article&id=89:understand-rc-servo&catid=43&Itemid=79). 2013.

ภาคผนวก  
DATA SHEET

**ABRS-5314HTG+Full HV / Advance Robot Brushless Digital High Voltage****Servo+HS+TG(Ultra High Toque)**

Control System	Positive PWM control 1500 usec Neutral	
Operating Voltage Range	<b>7.4V ~ 12V (Support 2S ~ 3S LI-Poly)</b>	
Operating Temperature Range	-20C° ~ +90C° (-4°F ~ 194°F)	
Test Voltage:	<b>Stall Torque</b>	<b>Motion Speed</b>
At 7.4V	25.1kg/cm , 348oz/in	0.18sec / 60 deg at no load
At 8.3V	32.4kg/cm , 466oz/in	0.16sec / 60 deg at no load
At 12V	53.1kg/cm , 708oz/in	0.14sec / 60 deg at no load
Idle Current	2mA at stopped	2mA at stopped
Running Current	330mA at no load	480mA at no load
Stall Current	5700mA	6500mA
Dead band width	2.1 usec	2.1 usec
Travel Degree	<b>280 degree / 0.9us ~ 2.1us PWM</b>	
Direction	Re-clock wise/ Pulse Travel 1500 to 2000 usec	
Motor Type	<b>Japan Brushless motor</b>	
Potentiometer Type	FSE11-4 Slider/indirect drive	
Amplifier Type	<b>6A Treble Power MOS-FET</b>	
Dimensions	43 x 32 x 32.5 mm/ 1.69 x 1.25 x 1.28 inch	
Weight:	81grams / 2.82oz without splined horn	
Ball Bearing	Dual / M10x6	
Gear Material	<b>Stainless Steel Gears</b>	
Horn Gear Spline	Metal 25 Tooth (External diameter: 5.9mm)	
Connector Wire Length	300mm (9.85inch)	
Connector Wire Stand Counter	60EA	
Connector Wire Gauge	22AWG	
Wire Info (Black)	- Negative	
Wire Info (Red)	+ Positive	
Wire Info (White)	S Single	



Version: 1.1

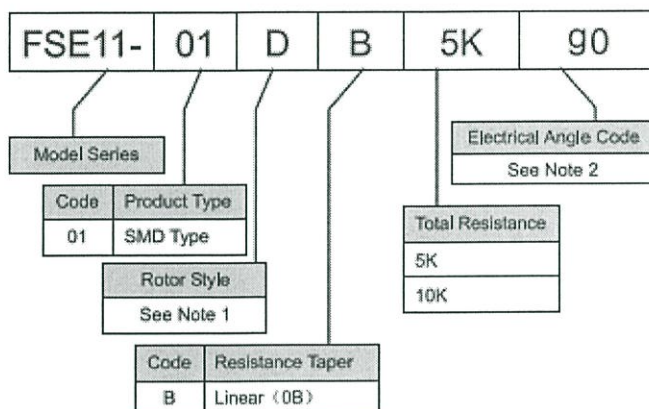
Update: 2014/4/25



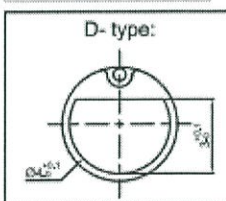
# FSE11 Series Rotary Position Sensor



## HOW TO ORDER



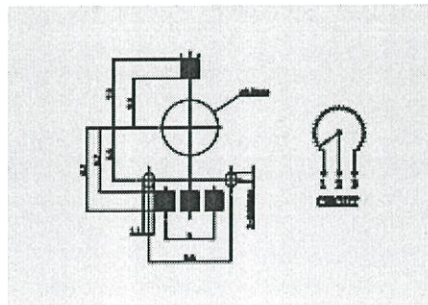
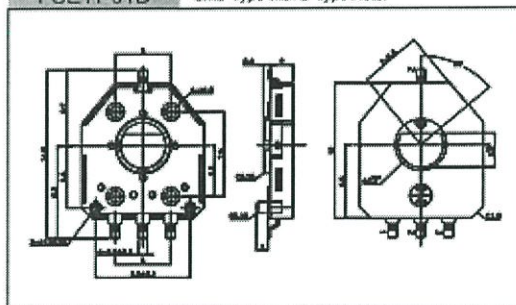
### Note 1: Rotor style



### Note 2: Code of Electrical Angle

Code	D0	F0	F5	G0	J0	L5	P0	W0	b0	g0	h3	r1
Angle	60°	80°	85°	90°	120°	145°	180°	250°	300°	320°	333°	341°
Linearity	±5%			±3%			±2%					

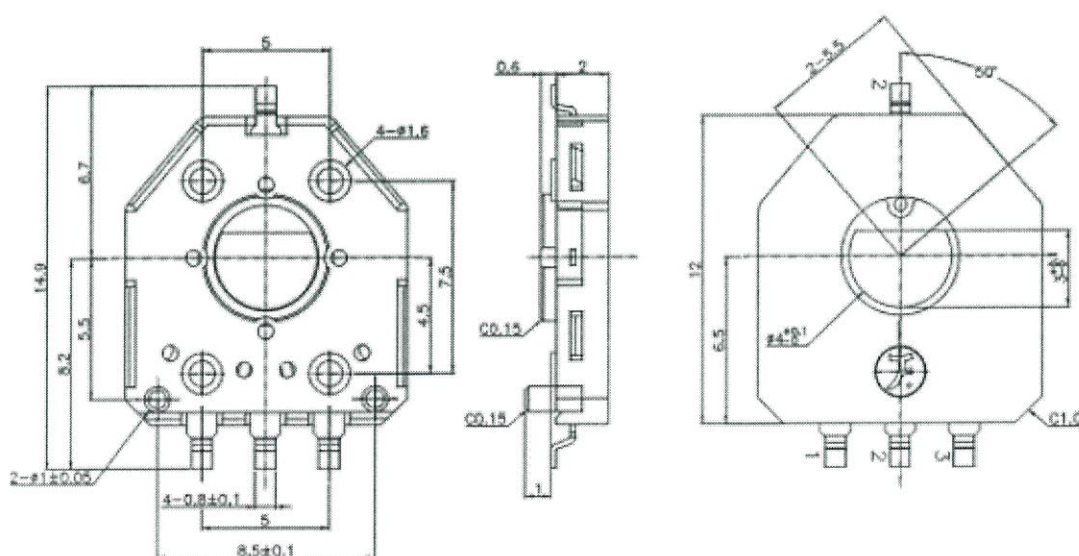
FSE11-01D SMD Type with D Type Rotor



Sensor



Electrical characteristics	
Resistance Range	1K~100K
Total Resistance Tolerance	±20%
Taper Style	B taper
Power Rated	0.1W
Linearity	± 2%
Rotational Noise	Less than 80mv
T.C.R	±500ppm /°C
Mechanical characteristics	
Effective electrical Angle	333± 3°
Rotational Torque	0~30gf.cm
Push-pull Strength of Shaft	Over 1.0kgf for 10 seconds min
Total Rotational Angle	360° (Endless)
Environmental characteristics	
Storage Temperature	-40°C to + 120°C
Operating Temperature	-40°C to + 70°C
Life Cycles	1,000,000 Cycles Min
Dry Heat	120 ±3°C .250±8H ΔTR:± 20%,Linearity:± 2%
Cold	-40± 3°C, 168±4H ΔTR±20 %,Linearity:± 2%
Humidity	60± 2°C, 90~95RH, 250±8H ΔTR:± 20 %,Linearity:± 2%
Temperature Cycles	-40.C~+120°C, 5cycles ΔTR:±20 %,Linearity:±2%



# Technical Specification

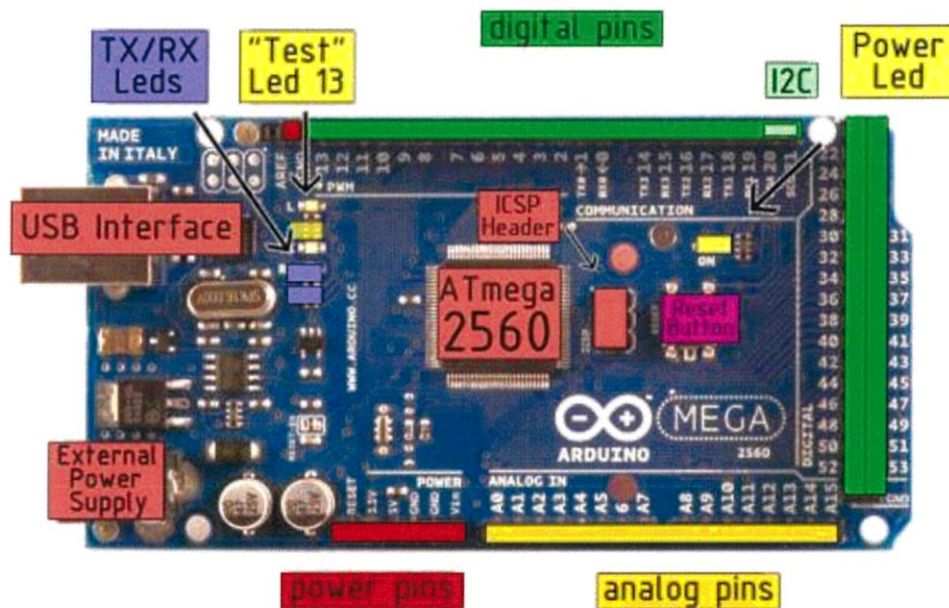


EAGLE files: [arduino-mega2560-reference-design.zip](#)\_Schematic: [arduino-mega2560-schematic.pdf](#)

## Summary

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 14 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

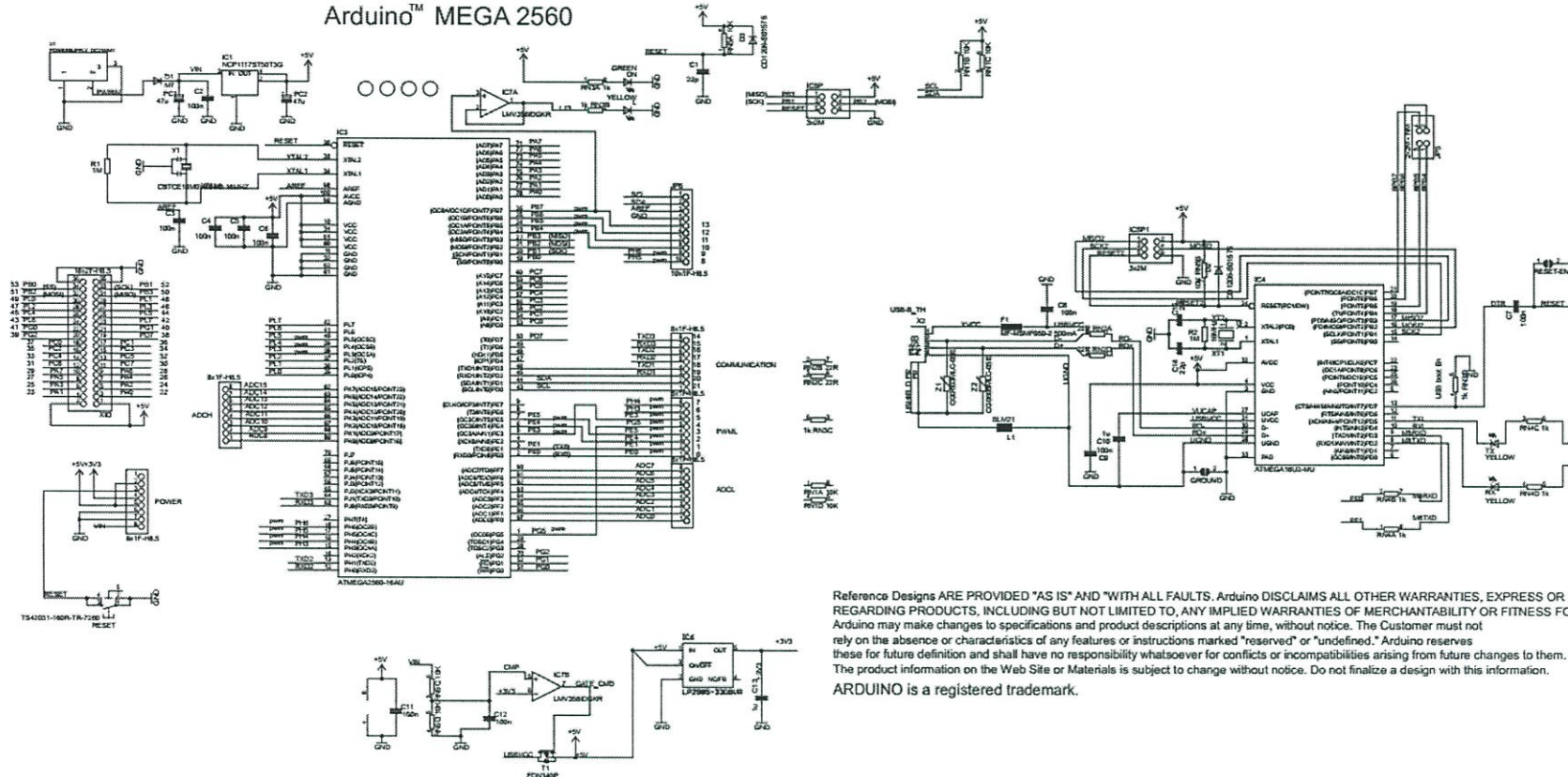
## the board



radiospares RADIONICS



# Arduino™ MEGA 2560



Reference Designs ARE PROVIDED "AS IS" AND "WITH ALL FAULTS." Arduino DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Arduino may make changes to specifications and product descriptions at any time, without notice. The Customer must not rely on the absence or characteristics of any features or instructions marked "reserved" or "undefined." Arduino reserves these for future definition and shall have no responsibility whatsoever for conflicts or incompatibilities arising from future changes to them. The product information on the Web Site or Materials is subject to change without notice. Do not finalize a design with this information. ARDUINO is a registered trademark.

