

การพัฒนาาระบบลำเลียงสินค้าของหุ่นยนต์เพื่อช่วยเหลือผู้พิการทาง
สายตาในการเลือกซื้อสินค้าในซูเปอร์มาเก็ต

DEVELOPMENT OF THE MANIPULATION SYSTEM FOR
A PROTOTYPED SHOPPING ROBOT



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การพัฒนาระบบลำเลียงสินค้าของหุ่นยนต์เพื่อช่วยเหลือผู้พิการทาง
สายตาในการเลือกซื้อสินค้าในซูเปอร์มาเก็ต

DEVELOPMENT OF THE MANIPULATION SYSTEM FOR
A PROTOTYPED SHOPPING ROBOT



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF THE MANIPULATION SYSTEM FOR
A PROTOTYPED SHOPPING ROBOT



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนาระบบลำเลียงสินค้าของหุ่นยนต์เพื่อช่วยเหลือผู้พิการทางสายตาในการ
เลือกซื้อสินค้าในซูเปอร์มาเก็ต

DEVELOPMENT OF THE MANIPULATION SYSTEM FOR A PROTOTYPED
SHOPPING ROBOT

ผู้จัดทำ

นายชาญณรงค์ ชิตทนนท์ 53010353

นายพงศกร วรจาร์พงศ์ 53011022



(ดร.รัชณี กุลยานนท์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาระบบลำเลียงสินค้าของหุ่นยนต์เพื่อช่วยเหลือผู้พิการทาง
สายตาในการเลือกซื้อสินค้าในซูเปอร์มาเก็ต

โดย

นายชาญณรงค์ ชิตทนนท์ 53010353

นายพงศกร วรจารุพงศ์ 53011022

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร.รัชณี

กุลยานนท์

ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอนวัตกรรมการออกแบบหุ่นยนต์ สำหรับการเลือกซื้อ
สินค้าเพื่อช่วยผู้บริโภคที่เป็นผู้พิการในซูเปอร์มาเก็ต จุดมุ่งหมายของโครงการนี้คือ การให้คนที่
มีความพิการได้มีความสะดวกในการเลือกซื้อสินค้าในชีวิตประจำวัน เพื่อเพิ่มคุณภาพชีวิตของพวกเขา
การออกแบบหุ่นยนต์นี้จะใช้แผ่นโลหะซึ่งทำหน้าที่เสมือนนิ้วมือของมนุษย์ ที่จะเกี่ยวสินค้าออกจาก
ชั้นวางสินค้า และใส่ลงในตะกร้าสินค้าอย่างปลอดภัย โดยแขนกลจะถูกขับเคลื่อนโดยเซอร์โวมอเตอร์
ห้าตัว มีกลไกการตรวจสอบวัตถุที่สามารถทำได้ โดยใช้เซนเซอร์อินฟราเรด ระบบโดยรวมได้รับการ
ออกแบบและควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ อาดูโน่ และเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขน
กลจะถูกคำนวณโดยใช้จลนศาสตร์ทางตรง และผกผันของแขนกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DEVELOPMENT OF THE MANIPULATION SYSTEM FOR A PROTOTYPED SHOPPING ROBOT

By

Mr. Channarong Chittanon 53010353

Mr. Pongsakorn Worajarupon 53011022

Advisor

Dr. Rutchanee Gullayanon

Academic Year 2013

ABSTRACT

This thesis presents an innovative robot manipulator design for a shopping robot to assist disability shoppers in supermarkets. The aim for this project is to provide people with disabilities the convenience of shopping in everyday life in order to increase their living quality. This manipulator design utilizes a metal blade which acts a human finger to knock products off display shelves and into a shopping basket secured on the shopping robot. The manipulator is driven by five servo motors. The object detection mechanism is accomplished using infrared sensors. The overall system is designed and controlled using an Arduino microcontroller. The manipulation path is calculated using the robot's forward and inverse kinematics.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ประสบความสำเร็จลุล่วงได้ดี ที่ให้คำแนะนำ คำปรึกษา ความช่วยเหลือ เป็นอย่างดีจาก ดร.รัชณี กุลยานนท์ ซึ่งเป็นอาจารย์ควบคุมปริญญาานิพนธ์ ผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้ง และขอกราบขอบพระคุณท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาวิชาตั้งแต่เริ่มเข้ารับการศึกา เพื่อนำความรู้ที่ได้มาประยุกต์ใช้ในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณพี่ๆ ทุกท่านและเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษา ตลอดจนสถาบันที่เอื้อเพื่อสถานที่ในการทำงาน ช่วยเหลือในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ของผู้จัดทำ ผู้มีพระคุณสูงสุด ผู้ให้โอกาสในการศึกษา ตลอดจนให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือด้านต่างๆ ทั้งด้านทุนทรัพย์ และเป็นกำลังใจในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้จัดทำหวังเป็นอย่างยิ่งว่าปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจ และหากเกิดข้อผิดพลาดประการใด ทางคณะผู้จัดทำต้องขออภัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

ผู้จัดทำ

ชาญณรงค์

พงศกร

ชิตทนนท์

วรจรรพงค์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VI
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน	1
1.3 ขอบเขตของโครงงาน	2
1.4 รายละเอียดของปริญญานิพนธ์	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 จลนศาสตร์ของแขนกล (Kinematics)	3
2.1.1 จลนศาสตร์ทางตรงของแขนกล (Forward Kinematics of Manipulator)	3
2.1.2 จลนศาสตร์ผกผันของแขนกล (Inverse Kinematics of Manipulator)	9
2.2 Trajectory Planning	14
2.2.1 Second-Order Polynomials	14
2.3 Motion Control	15
2.3.1 Joint-space Control	15
2.3.2 Task-space Control	16
บทที่ 3 หลักการออกแบบ	17
3.1 การออกแบบโครงสร้างของแขนกล	17
3.1.1 ชิ้นส่วนของแขนกลตอนที่ 1	17
3.1.2 ชิ้นส่วนของแขนกลตอนที่ 2	18
3.1.3 ชิ้นส่วนของแขนกลตอนที่ 3	20
3.1.4 ฐานของแขนกล	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1.5 ตัวเชื่อมต่อ	23
3.1.6 ชั้นส่วนรองรับการเคลื่อนไหวที่บริเวณข้อต่อ	24
3.2 การออกแบบและควบคุมแขนกล	25
3.3 การประกอบโครงสร้างแขนกล	31
3.4 ขั้นตอนการทำงานของแขนกล	36
3.5 ขั้นตอนการศึกษาและจัดทำโครงงาน	37
บทที่ 4 การทดลอง	38
4.1 การทดลองความแม่นยำของแขนกล	38
4.2 การทดลองกวักสินค้าของกล	40
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	45
5.1 สรุปผลการทดลอง	45
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข	45
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการค้นคว้าพัฒนา	46
เอกสารอ้างอิง	47
ภาคผนวก	48

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แกนหมุนของสองข้อต่อบนเฟรมที่อยู่ติดกัน	4
2.2 การกำหนดเวกเตอร์แกนและจุดกำเนิดให้กับเฟรมทั้งสอง	5
2.3 แผนผังข้อต่อของแขนกล PUMA 560	6
2.4 รูปแบบต่างๆ ของแขนกล	10
2.5 การประยุกต์ใช้แขนกล	11
2.6 แขนกลที่มีสามข้อต่อพร้อมเฟรมที่กำหนดให้แต่ละท่อนแขน	11
2.7 ไดอะแกรมรูปแบบการทำงานของ Joint-space Control	15
2.8 ไดอะแกรมรูปแบบการทำงานของ Task-space Control	16
3.1 รูปแบบโครงสร้างของแขนกลที่ออกแบบในโปรแกรม SolidWorks	17
3.2 ชั้นส่วนของแขนกลท่อนที่ 1 ด้านซ้าย	18
3.3 ชั้นส่วนของแขนกลท่อนที่ 1 ด้านขวา	18
3.4 ชั้นส่วนของแขนกลท่อนที่ 2 ด้านซ้าย	19
3.5 ชั้นส่วนของแขนกลท่อนที่ 2 ด้านขวา	19
3.6 ชั้นส่วนของแขนกลท่อนที่ 3 ด้านซ้าย	20
3.7 ชั้นส่วนของแขนกลท่อนที่ 3 ด้านขวา	20
3.8 ตัวเชื่อมต่อของแขนท่อนที่ 3 ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกวักสินค้า	21
3.9 ชั้นส่วนในการยึดติดอุปกรณ์เสริม	21
3.10 ชั้นส่วนฐานที่เชื่อมต่อกับเสาปรับระดับ	22
3.11 ชั้นส่วนที่ใช้ติดตั้งเซอร์โวมอเตอร์	22
3.12 ตัวเชื่อมต่อชั้นส่วนแขนกลท่อนที่ 1	23
3.13 ตัวเชื่อมต่อชั้นส่วนแขนกลท่อนที่ 2	23
3.14 ส่วนรองรับแขนท่อนที่ 1 กับ 2	24
3.15 ส่วนรองรับแขนท่อนที่ 2 กับ 3	24
3.16 เซอร์โวมอเตอร์ SG-5010	25
3.17 การเชื่อมต่อเซอร์โวมอเตอร์กับคอนโทรลเลอร์	26
3.18 เซนเซอร์ตรวจจับระยะทางชนิดอินฟาเรด รุ่น TCRT 5000	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.19 การเชื่อมต่อของเซนเซอร์ตรวจวัดระยะทางชนิดอินฟราเรด รุ่น TCRT 5000	27
3.20 บอร์ดควบคุม Arduino Board ชนิด Mega 2560 R3	28
3.21 โลโก้ของโปรแกรมอาดูโน่	29
3.22 โลโก้ของโปรแกรมแมทแล็บ	30
3.23 ส่วนประกอบทั้งหมดของแขนกล	31
3.24 ส่วนของแขนกลตอนที่ 1 ถูกยึดติดกับเซอร์โวมอเตอร์ที่ติดตั้งอยู่ที่ฐาน	32
3.25 ตัวเชื่อมต่อขึ้นซ้ายและขวาของแขนท่อน 1	32
3.26 จุดเชื่อมต่อของแขนท่อนที่ 1 และท่อนที่ 2	33
3.27 ส่วนของแขนท่อนที่ 2	33
3.28 ส่วนของแขนท่อนที่ 3 ที่เชื่อมต่อกับแขนท่อนที่ 2	34
3.29 ส่วนของแขนท่อนที่ 3 (ส่วนที่ใช้กั๊กสินค้า)	34
3.30 จุดที่แขนกลเชื่อมต่อกับเสาปรับระดับความสูง	35
3.31 ลำดับการทำงาน (Flow Chart) ของแขนกล	36
4.1 ทดสอบการจ่ายค่ามุมให้กับเซอร์โวมอเตอร์	38
4.2 ติดตั้งแขนกลเข้ากับเสาปรับระดับ	39
4.3 การทดลองการกั๊กสินค้า	41

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 พารามิเตอร์ของแขนกล PUMA 560	6
2.2 พารามิเตอร์ D-H ของแขนกล	11
3.1 แสดงขั้นตอนการจัดทำโครงการ	37
4.1 ผลการทดลองความแม่นยำของเซอร์โวมอเตอร์	38
4.2 ผลการทดลองความแม่นยำของแขนกล	40
4.3 ผลการทดลองการกวักสินค้าของแขนกล	42



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีได้มีความก้าวหน้าไปอย่างมาก แต่ในเทคโนโลยีเหล่านั้นใช้เพื่ออำนวยความสะดวกแก่คนส่วนมาก แต่สำหรับคนส่วนน้อยอย่างผู้พิการต่างๆ นั้นไม่สามารถใช้เทคโนโลยีเหล่านั้นได้ เพราะฉะนั้นแล้ว จึงทำให้เกิดความตระหนักถึงการพัฒนาเทคโนโลยีเพื่ออำนวยความสะดวกแก่ผู้พิการเหล่านั้น ให้มีวิถีความเป็นอยู่ในชีวิตที่ดีขึ้น และเป็นการช่วยเหลือเพื่อนมนุษย์ด้วยกันอีกด้วย ซึ่งประเด็นที่เล็งเห็นถึงความสำคัญคือ การจับจ่ายซื้อของในชีวิตประจำวัน เป็นกิจกรรมที่มีความจำเป็นต่อการดำรงชีวิต ผู้พิการเหล่านั้นจะอย่างไรเมื่อไม่สามารถมองเห็นสิ่งของที่ต้องการได้ แม้จะใช้การสัมผัสด้วยมือ หรือการดมกลิ่นนั้นเป็นเรื่องที่ถูกใช้ในการจำแนกสิ่งของเป็นธรรมดาอยู่แล้วนั้น ไม่สามารถจำแนกสิ่งของบางประเภทได้ เช่น นมกล่อง กล่องน้ำผลไม้ หรือผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ออกแบบให้มีรูปลักษณะที่ไม่สามารถพิสูจน์ลักษณะต่างๆ ด้วยการสัมผัส ดมกลิ่น ชิมรสได้ ดังนั้นแล้วจึงทำให้มีความคิดที่จะสร้างอุปกรณ์ที่จะช่วยในการซื้อของต่างๆ สำหรับผู้พิการ โดยการออกแบบรถเข็นซื้อของอัตโนมัติ โดยที่จะมีส่วนที่เป็นแขนกลในการหยิบสิ่งของในแบบต่างๆ เพื่ออำนวยความสะดวกแก่ผู้พิการโดยทั่วไป

เนื่องจากผู้พิการไม่สามารถดำรงชีวิตประจำวันได้เหมือนกับบุคคลธรรมดาทั่วไป อันเนื่องมาจากการสูญเสียอวัยวะหรือการมองเห็น ไม่ว่าจะเกิดจากอุบัติเหตุหรือสาเหตุทางพันธุกรรมที่ติดตัวมาตั้งแต่เกิด เราจึงตัดสินใจที่จะสร้างหุ่นยนต์เพื่อช่วยเหลือผู้พิการในการซื้อสินค้าในซูเปอร์ - มาเก็ต (Pickit Bot) ขึ้นมาเพื่อช่วยเหลือผู้พิการในการหยิบจับซื้อสินค้าได้อย่างถูกต้อง

1.2 วัตถุประสงค์ในการทำโครงการ

1. สร้างแขนกลเพื่ออำนวยความสะดวกให้กับผู้พิการในการซื้อสินค้าในซูเปอร์มาเก็ต
2. แขนกลสามารถนำสินค้าลงจากชั้นวางสินค้าได้โดยไม่ทำให้สินค้าเสียหาย
3. แขนกลสามารถครอบคลุมการหยิบจับสินค้าได้ทั้ง 4 ลักษณะ ซึ่งก็คือ กล่อง ขวด ถุงฐานกว้าง และห่อ โดยอยู่ในช่วงน้ำหนักไม่เกิน 1.5 กิโลกรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของโครงการ

จากการศึกษาประเภทของแขนกลที่มีการวิจัยและพัฒนาในปัจจุบันทำให้เราทราบว่า แขนกลในปัจจุบันมีความหลากหลายในด้านการทำงานและการใช้งาน การที่จะเลือกแขนกลที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในโครงการนี้ จึงต้องมีการศึกษาแขนกลแต่ละแบบอย่างละเอียดเพื่อให้ทราบถึงจุดดีและจุดด้อยของแขนกลแต่ละแบบ ซึ่งหลังจากการศึกษานั้นได้ทำการเลือกแขนกลที่มีความเหมาะสมกับโครงการนี้มาสามแบบคือ แขนกลที่มีหัวหมุนกวาดสินค้าพร้อมถาดรองรับ (Feeder) แขนกลที่มีหัวหนีบจับสินค้า (Gripper) และแขนกลที่มีหัวดูดสินค้าแบบสุญญากาศ (Vacuum) โดยเหตุผลที่เลือกแขนกลทั้งสามแบบนี้ เพราะสามารถออกแบบสร้างและพัฒนาได้ง่าย ใช้อุปกรณ์ส่วนควบน้อย และใช้ต้นทุนในการสร้างและพัฒนาไม่สูงจนเกินไป หลังจากได้แนวทางในการเลือกใช้แขนกลแล้ว จะต้องมีการดัดแปลงออกแบบให้แขนกลสามารถใช้ได้ในโครงการนี้ได้ กล่าวคือแขนกลที่ได้เลือกใช้ทั้งสามแบบข้างต้นนั้นส่วนใหญ่มีการใช้กันในงานอุตสาหกรรม แต่ในโครงการนี้จะนำแขนกลมาใช้ในซูเปอร์마켓 ดังนั้นจึงต้องทำการดัดแปลงดังกล่าวเพื่อให้แขนกลสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ในสภาพแวดล้อมของซูเปอร์마켓

1.4 รายละเอียดของปริญญาานิพนธ์

เนื้อหาที่จะกล่าวในรายงานฉบับนี้ประกอบด้วย

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาของโครงการ วัตถุประสงค์ของโครงการ ขั้นตอนการศึกษาและการจัดทำโครงการ พร้อมทั้งรายละเอียดของรายงานแต่ละบท

บทที่ 2 ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการจัดทำโครงการ ได้แก่ จลนศาสตร์ของแขนกล (Kinematics) Trajectory Planning และ Motion Control

บทที่ 3 หลักการออกแบบ โดยใช้โปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks) เป็นการนำเสนอการประกอบโครงสร้างของระบบ รวมถึงแนวคิดในการออกแบบระบบ

บทที่ 4 การทดลอง เป็นส่วนการทดสอบองค์ประกอบในระบบ ที่ติดตั้งทั้งหมด

บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป โดยจะสรุปผลการดำเนินงาน ปัญหาที่เกิดขึ้น และแนวทางการปรับปรุงพัฒนาโครงการนี้ต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและความรู้ที่เกี่ยวข้อง

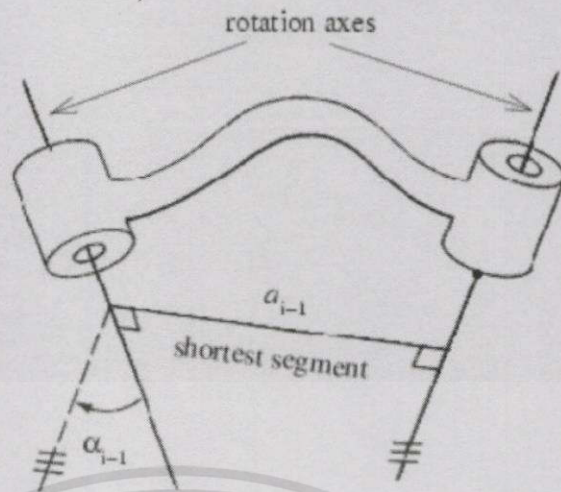
2.1 จลนศาสตร์ของแขนกล (Kinematics)

2.1.1 จลนศาสตร์ทางตรงของแขนกล (Forward Kinematics of Manipulator)

จลนศาสตร์ที่สนใจเกี่ยวกับการเรียงตัว ตำแหน่ง ทิศทาง และการเปลี่ยนแปลงของสิ่งต่างๆ เหล่านี้ของโครงสร้างโดยไม่คำนึงถึงแรงต้นเหตุ จลนศาสตร์ทางตรงของแขนกลว่าด้วยการคำนวณตำแหน่งในพิกัดที่ถือว่าหยุดนิ่งของจุดบนแขนกลที่กำหนดให้ ตัวอย่างในหัวข้อก่อนได้แสดงการคำนวณดังกล่าวในสองมิติ ในหัวข้อนี้เราจะศึกษาจลนศาสตร์ทางตรงของแขนกลในกรณีสามมิติ หลักการคำนวณยังคงเหมือนในกรณีสองมิติ หากแต่เราจะเสนอวิธีการจัดระบบตัวแปรต่างๆ อย่างมีระเบียบ ทั้งนี้เพื่อการคำนวณจะทำได้อย่างมีระบบไม่สับสน

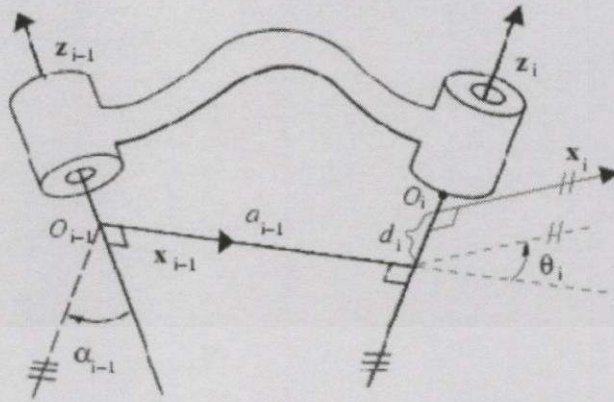
หลักการก็คือเรามีท่อนแขนที่เรียงต่อกันจากฐานซึ่งนับเป็นท่อนที่ 0 ไปจนถึงปลายแขนท่อนที่ n ให้ F_i เป็นเฟรมของท่อนแขนที่ i อันประกอบไปด้วยจุดกำเนิด O_i และเวกเตอร์แกน x_i, y_i, z_i เราสามารถคำนวณเช่นเดียวกันกับกรณีสองมิติได้ว่าจุด P ที่มีพิกัดเป็น p_n ในเฟรม F_n จะมีพิกัดในเฟรม F_0 เป็น $p_0 = T_{0,n}p_n$ โดยที่ $T_{0,n} = T_{0,1}T_{1,2} \dots T_{n-1,n}$ ดังนั้นสิ่งที่เราต้องสนใจก็คือการหา $T_{i-1,i}$ ขอเริ่มด้วยวิธีการกำหนดจุดกำเนิดและเวกเตอร์แกนให้กับเฟรมต่างๆ

รูปที่ 2.1 แสดงข้อต่อที่อยู่ติดกัน สองข้อต่อนี้ต้องอยู่บนเฟรมที่ติดกันด้วย สมมติว่าข้อต่อทางซ้ายอยู่ในเฟรม F_{i-1} และข้อต่อทางขวาอยู่ในเฟรม F_i พิจารณาเส้นตรงสองเส้นที่ลากผ่านแกนหมุนของข้อต่อทั้งสอง หากสองเส้นตรงนี้ไม่ขนานกันและไม่ตัดกัน เราสามารถหาส่วนของเส้นตรงที่สั้นที่สุดที่เชื่อมเส้นตรงที่ผ่านแกนนี้ได้แน่นอนว่าส่วนของเส้นตรงนี้ต้องอยู่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับเส้นตรงที่ผ่านแกนทั้งสอง ในรูปที่ 2.1 ระยะห่างที่สั้นที่สุดนี้ก็คือ a_{i-1} และมุมระหว่างภาพฉายในทิศทางของเส้นตรงที่สั้นที่สุดของเส้นตรงที่ผ่านแกนทั้งสองเท่ากับ α_{i-1} (มุมนี้ก็คือมุมน้อยที่สุดที่เส้นตรงที่ผ่านแกนต้องบิดเพื่อมาขนานกัน)



รูปที่ 2.1 แกนหมุนของสองข้อต่อบนเฟรมที่อยู่ติดกัน

ในรูปที่ 2.2 ให้ L_{i-1} คือเส้นสั้นสุดที่เชื่อมระหว่างแกนหมุนของข้อต่อทางซ้ายกับแกนหมุนของข้อต่อทางขวา กำหนดให้จุดกำเนิดของเฟรม F_{i-1} อยู่ที่ O_{i-1} ซึ่งก็คือจุดตัดระหว่างแกนหมุนของข้อต่อทางซ้ายกับ L_{i-1} นอกจากนี้เรายังกำหนดให้เวกเตอร์แกน z_{i-1} เป็นเวกเตอร์ที่ขนานกับแกนหมุนของข้อต่อซ้าย และเวกเตอร์แกน x_{i-1} เป็นเวกเตอร์ที่ขนานกับ L_{i-1} โดยชี้จากแกนหมุนของข้อต่อซ้ายไปยังแกนหมุนของข้อต่อขวา ในทำนองเดียวกันเราให้ L_i เป็นเส้นสั้นสุดที่เชื่อมระหว่างแกนหมุนของข้อต่อทางขวากับแกนหมุนของข้อต่อที่อยู่ถัดไป (ไม่ได้แสดงในรูป) กำหนดให้จุด O_i เป็นจุดกำเนิดของเฟรม F_i โดยจุดนี้เป็นจุดตัดระหว่างแกนหมุนของข้อต่อทางขวากับ L_i เรากำหนดให้เวกเตอร์แกน z_i เป็นเวกเตอร์ขนานกับแกนหมุนของข้อต่อทางขวาและเวกเตอร์แกน x_i เป็นเวกเตอร์ขนานกับ L_i โดยชี้จากแกนหมุนของข้อต่อทางขวาไปยังแกนหมุนของข้อต่อถัดไป ถึงจุดนี้เราได้กำหนดจุดกำเนิดและเวกเตอร์แกนให้กับเฟรม F_{i-1} และ F_i เรียบร้อยแล้ว (y_{i-1} และ y_i หาได้จากการใช้กฎมือขวากับเวกเตอร์แกนที่กำหนดไปแล้ว) จึงไม่ยากที่จะหาการแปลง $T_{i-1,i}$ ที่ต้องการ วิธีทำก็คือเราต้องหาการเคลื่อนที่ซึ่งทำให้เฟรม F_{i-1} มาอยู่ทับกับเฟรม F_i จากรูปที่ 2.2 จะเห็นว่าสิ่งที่เราต้องทำก็คือหมุนเฟรม F_{i-1} รอบแกน x_{i-1} เป็นมุม α_{i-1} จากนั้นเลื่อนเฟรมที่ได้ตามแกน x_{i-1} เป็นระยะทาง a_{i-1} ถึงตรงจุดนี้แกน z_{i-1} จะอยู่ทับกับแกน z_i แต่เวกเตอร์แกน x_{i-1} กับ x_i จะยังไม่ขนานกัน รวมทั้ง O_{i-1} และ O_i ก็ยังห่างกันเป็นระยะ d_i นั่นก็คือเราจะต้องหมุน F_{i-1} ต่อ รอบแกน z_{i-1} เป็นมุม θ และเลื่อน F_{i-1} ไปตามแกน z_{i-1} เป็นระยะ d_i โดยสรุปเราเขียนเป็นสูตรได้คือ



รูปที่ 2.2 การกำหนดเวกเตอร์แกนและจุดกำเนิดให้กับเฟรมทั้งสอง

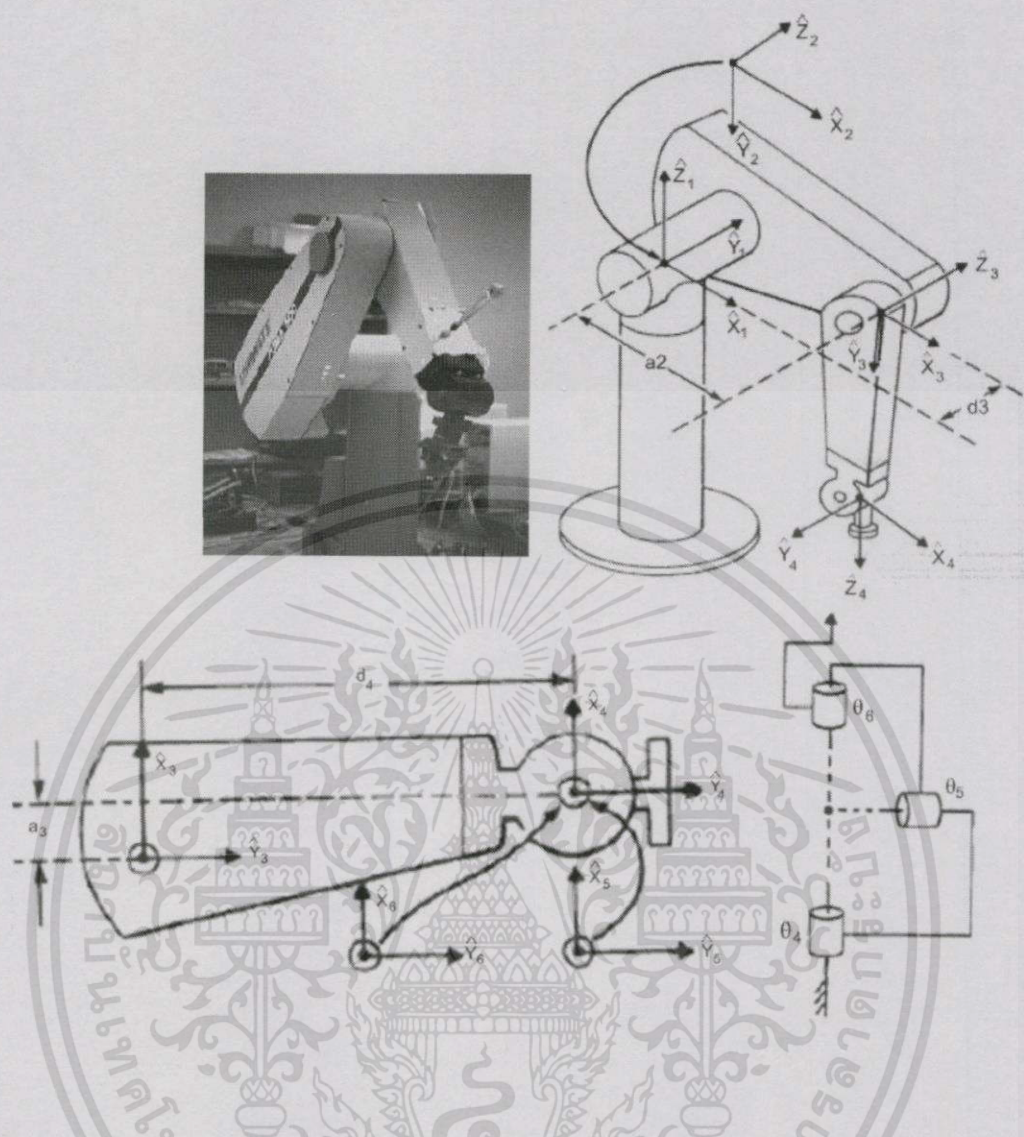
$$T_{i-1,i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i-1} & \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & 0 & \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & 0 & 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

จะเห็นว่าขั้นตอนการหา $T_{0,n} = T_{0,1} T_{1,2} \dots T_{n-1,n}$ เริ่มได้จากการพิจารณาท่อนแขนที่ 0 ไปจนถึงท่อนแขนที่ n แล้วพยายามกำหนดเฟรมของแต่ละท่อนแขน โดยเริ่มจากการกำหนดแกน z_i ของแต่ละท่อนแขน i (หากเป็นข้อต่อแบบหมุน เรากำหนดให้แกนนี้ผ่านแกนหมุน) จากนั้นกำหนดจุดกำเนิด O_i และแกน x_i จากส่วนของเส้นตรงสั้นที่สุด ที่เชื่อมระหว่าง z_i และ z_{i+1} (L_i) เมื่อเฟรมถูกกำหนดแล้วค่าของ $a_{i-1}, \alpha_{i-1}, d_i, \theta_i$ สำหรับ $i = 1, 2, \dots, n$ ที่ต้องการก็สามารถคำนวณได้ง่าย

ลองพิจารณาการคำนวณที่กล่าวไปแล้วกับแขนกลจริง รูปที่ 2.3 แสดงแผนผังของข้อต่อของแขนกล PUMA 560 แขนกลรุ่นนี้เป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท unimation ที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก มีระดับแกนหมุนเสรีเท่ากับหกแกน สามข้อต่อแรกจากฐานควบคุมการเคลื่อนที่แบบหยาบ และสามข้อต่อปลายเป็นตัวหลักในการควบคุมทิศทางของอุปกรณ์ที่ติดอยู่ที่ปลายแขน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แผนผังข้อต่อของแขนกล PUMA 560

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของแขนกล PUMA 560

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	$-\pi/2$	0	0	θ_2
3	0	a_2	d_3	θ_3
4	$-\pi/2$	a_3	d_4	θ_4
5	$\pi/2$	0	0	θ_5
6	$-\pi/2$	0	0	θ_6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขียนได้ว่า

$$T_{0,1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$T_{1,2} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$T_{2,3} = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & a_2 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$T_{3,4} = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ -\sin \theta_4 & -\cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$T_{4,5} = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$T_{5,6} = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_6 & -\cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งในที่สุดเราจะจะได้

$$T_{0,6} = T_{0,1}T_{1,2}T_{2,3}T_{3,4}T_{4,5}T_{5,6} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

โดยที่

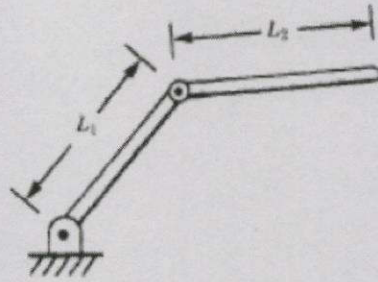
$$\begin{aligned} r_{11} &= \cos \theta_1 [\cos(\theta_2 + \theta_3)(\cos \theta_4 \cos \theta_5 \cos \theta_6 - \sin \theta_4 \sin \theta_6) - \sin(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_5 \cos \theta_6] + \\ &\quad \sin \theta_1 [\sin \theta_4 \cos \theta_5 \cos \theta_6 + \cos \theta_4 \sin \theta_6] \\ r_{21} &= \sin \theta_1 [\cos(\theta_2 + \theta_3)(\cos \theta_4 \cos \theta_5 \cos \theta_6 - \sin \theta_4 \sin \theta_6) - \sin(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_5 \cos \theta_6] - \\ &\quad \cos \theta_1 [\sin \theta_4 \cos \theta_5 \cos \theta_6 + \cos \theta_4 \sin \theta_6] \\ r_{31} &= -\sin(\theta_2 + \theta_3)(\cos \theta_4 \cos \theta_5 \cos \theta_6 - \sin \theta_4 \sin \theta_6) - \cos(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_5 \cos \theta_6 \\ r_{12} &= \cos \theta_1 [\cos(\theta_2 + \theta_3)(-\cos \theta_4 \cos \theta_5 \cos \theta_6 - \sin \theta_4 \cos \theta_6) + \sin(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_5 \sin \theta_6] + \\ &\quad \sin \theta_1 [\cos \theta_4 \cos \theta_6 - \sin \theta_4 \cos \theta_5 \sin \theta_6] \\ r_{22} &= \sin \theta_1 [\cos(\theta_2 + \theta_3)(-\cos \theta_4 \cos \theta_5 \cos \theta_6 - \sin \theta_4 \cos \theta_6) + \sin(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_5 \sin \theta_6] - \\ &\quad \cos \theta_1 [\cos \theta_4 \cos \theta_6 - \sin \theta_4 \cos \theta_5 \sin \theta_6] \\ r_{32} &= -\sin(\theta_2 + \theta_3)(-\cos \theta_4 \cos \theta_5 \sin \theta_6 - \sin \theta_4 \cos \theta_6) + \cos(\theta_2 + \theta_3) \sin \theta_5 \sin \theta_6 \\ r_{13} &= -\cos \theta_1 (\cos(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 \sin \theta_5 + \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_5) - \sin \theta_1 \sin \theta_4 \sin \theta_5 \\ r_{23} &= -\sin \theta_1 (\cos(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 \sin \theta_5 + \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_5) - \cos \theta_1 \sin \theta_4 \sin \theta_5 \\ r_{33} &= \sin(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_4 \sin \theta_5 - \cos(\theta_2 + \theta_3) \cos \theta_5 \\ p_x &= \cos \theta_1 [a_2 \cos \theta_2 + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) - d_4 \sin(\theta_2 + \theta_3)] - d_3 \sin \theta_1 \\ p_y &= \sin \theta_1 [a_2 \cos \theta_2 + a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) - d_4 \sin(\theta_2 + \theta_3)] + d_3 \cos \theta_1 \\ p_z &= -a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) - a_2 \sin \theta_2 - d_4 \cos(\theta_2 + \theta_3) \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 จลนศาสตร์ผกผันของแขนกล (Inverse Kinematics of Manipulator)

แขนกลส่วนใหญ่จะมาพร้อมกับอุปกรณ์ที่เรียกว่าแป้นสอน (Teach Pendant) เราสามารถสั่งงานให้แขนกลเคลื่อนไปอยู่ในลักษณะที่ต้องการ โดยการปรับพารามิเตอร์ของข้อต่อจากแป้นสอนจนแขนกลอยู่ในลักษณะที่พอใจ แล้วให้แป้นสอนจดจำพารามิเตอร์ของข้อต่อเหล่านี้ไว้ ในภายหลังกหากเราต้องการให้แขนกลไปอยู่ในลักษณะเดิมอีก เราก็เพียงแต่ใช้แป้นสอนสั่งงานให้แขนกลเคลื่อนที่ไปยังจุดที่ได้จำไว้แล้ว แต่จะเห็นได้ว่าการสั่งงานในลักษณะนี้เราต้องทำงานในปริภูมิของพารามิเตอร์ของข้อต่อ ซึ่งไม่สะดวกโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ต้องการระบุพิกัดคาร์ทีเซียนและทิศทางของปลายแขน ในหัวข้อนี้เราจะศึกษาการคำนวณที่ตรงข้ามกับจลนศาสตร์ทางตรงของแขนกล นั่นก็คือเมื่อกำหนดพิกัดคาร์ทีเซียนและทิศทางในเฟรมที่หยุดนิ่งของปลายแขนให้ เราต้องการคำนวณพารามิเตอร์ของข้อต่อที่ทำให้ปลายแขนเรียงตัวในลักษณะที่กำหนด เราเรียกการคำนวณในลักษณะนี้ว่าการคำนวณจลนศาสตร์ผกผันของแขนกล

การคำนวณจลนศาสตร์ผกผันของแขนกลต้องคำนึงถึงสองเรื่องหลัก เรื่องแรกคือว่าพารามิเตอร์ของข้อต่อที่ต้องการอาจไม่มี เรื่องที่สองคือพารามิเตอร์คำตอบที่เป็นไปได้ อาจมีหลายชุด รูปที่ 2.4 (ก) แสดงแขนกลที่มีข้อต่อแบบหมุนสองข้อต่อโดยท่อนแขนทั้งสองที่แสดงในรูปมีความยาวเป็น L_1 และ L_2 จะเห็นได้ว่าไม่มีพารามิเตอร์ของข้อต่อที่ทำให้ปลายแขนอยู่ห่างจุดหมุนที่ฐานเกิน $L_1 + L_2$ ไปได้ และหากกำหนดให้จุดปลายแขนอยู่ห่างจากจุดหมุนที่ฐานน้อยกว่า $L_1 + L_2$ หากแต่ละข้อต่อสามารถหมุนได้ครบรอบก็จะได้ว่ามีพารามิเตอร์คำตอบอย่างมากสองชุด ในรูปที่ 2.4 (ข) แสดงสองชุดของพารามิเตอร์ข้อต่อที่เป็นคำตอบสำหรับตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนที่กำหนดให้ การมีพารามิเตอร์คำตอบมากกว่าหนึ่งชุด ถึงแม้จะทำให้ขั้นตอนการหาคำตอบอาจยุ่งยากกว่าการมีคำตอบเดียว แต่คุณสมบัตินี้ทำให้เราสามารถเลือกชุดพารามิเตอร์ข้อต่อที่เหมาะสมกับงานเป้าหมาย เช่น เราอาจเลือกใช้ชุดพารามิเตอร์ที่อ้อมหลบสิ่งกีดขวาง แขนกลที่ใช้งานจริง เช่น PUMA 560 ก็ได้ถูกออกแบบให้มีหลายชุดคำตอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ค) แขนกลมีสี่ชุดคำตอบที่ให้ตำแหน่งและทิศทางเดียวกันของปลายแขน



(ก) แขนกลแบบสองข้อต่อ



(ข) แขนกลแบบสามข้อต่อ

(ค) แขนกลรุ่น PUMA 560 ที่ปลายแขนตำแหน่งและทิศทางเดียวกัน

รูปที่ 2.4 รูปแบบต่างๆ ของแขนกล

ขอยกตัวอย่างการคำนวณจลนศาสตร์ผกผันเพื่อให้เกิดความเข้าใจในขั้นตอนการหาพารามิเตอร์ค่าตอบ พิจารณาแขนกลที่มีสามข้อต่อในรูปที่ 2.5 พร้อมพารามิเตอร์ D-H ที่เกี่ยวข้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การประยุกต์ใช้แขนกล

รูปที่ 2.6 แขนกลที่มีสามข้อต่อพร้อมเฟรมที่กำหนดให้แต่ละท่อนแขน

ตารางที่ 2.2 พารามิเตอร์ D-H ของแขนกล

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	0	l_1	0	θ_2
3	0	l_2	0	θ_3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเฟรมที่กำหนดกับแต่ละท่อนแขนดังแสดงในรูปที่ 2.6 และพารามิเตอร์ D-H ที่เกี่ยวข้องในตารางที่ 2.2 เราสามารถเขียนเมทริกซ์การแปลงจากพิกัดในเฟรม 3 ไปยังพิกัดในเฟรม 0 ได้คือ

$$T_{0,3} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & -\sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & 0 & l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) & 0 & l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

แต่สำหรับการคำนวณจลนศาสตร์ผกผันเราจะรับข้อมูลตำแหน่งและทิศทางของเฟรม 3 ซึ่งก็คือเมทริกซ์การแปลง

$$T_{0,3} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 & x \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

เป้าหมายของเราคือต้องหา θ_1 , θ_2 และ θ_3 ที่ทำให้เมทริกซ์การแปลงทั้งสองในสมการ (2.10) และสมการ (2.11) ที่กล่าวมาเท่ากัน ซึ่งนั่นก็คือทำให้

$$\cos \phi = \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (2.12)$$

$$\sin \phi = \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \quad (2.13)$$

$$x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.14)$$

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2.15)$$

เรายกกำลังสองของสมการ (2.14) และสมการ (2.15) แล้วนำมาบวกกันและใช้คุณสมบัติ

$$\cos(\theta_1 + \theta_2) = \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \sin \theta_1 \sin \theta_2 \quad (2.16)$$

และ
$$\sin(\theta_1 + \theta_2) = \sin \theta_1 \cos \theta_2 + \cos \theta_1 \sin \theta_2 \quad (2.17)$$

$$x^2 + y^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \theta_2 \quad (2.18)$$

ซึ่งก็คือ

$$\cos \theta_2 = \frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แน่นอนว่าจะหาค่า θ_2 ได้ก็ต่อเมื่อค่าของพจน์ทางขวาของสมการ (2.19) มีค่าระหว่าง -1 และ 1 ซึ่งถ้าค่าดังกล่าวอยู่นอกช่วงนี้ก็แสดงว่าแกนกลนี้ไม่สามารถไปยังตำแหน่งและทิศทางที่กำหนดได้ เราหาค่า θ_2 ได้จากการหาค่า

$$\sin \theta_2 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \theta} \quad (2.20)$$

และใช้ค่า $\sin \theta_2$ ที่ได้ในสูตร

$$\theta_2 = \text{atan2}(\sin \theta_2, \cos \theta_2) \quad (2.21)$$

เครื่องหมายบวกและลบที่เลือกได้ในสมการ (2.20) แสดงถึงการมีพารามิเตอร์คำตอบมากกว่าหนึ่ง ซึ่งเมื่อเราได้ค่า θ_1 เราก็ก็นำค่า θ_1 ได้จากการแทนค่า θ_2 ที่ได้ลงในสมการ (2.14) และสมการ (2.15) แล้วจัดรูปด้วยคุณสมบัติทางตรีโกณมิติ ผลที่ได้คือ

$$x = k_1 \cos \theta_1 - k_2 \sin \theta_1 \quad (2.22)$$

$$y = k_1 \sin \theta_1 + k_2 \cos \theta_1 \quad (2.23)$$

โดยที่ค่าคงตัว k_1, k_2 หาได้จาก $k_1 = l_1 + l_2 \cos \theta_2$ และ $k_2 = l_2 \sin \theta_2$ แต่เพื่อความสะดวกในการแก้สมการ (2.22) และสมการ (2.23) เราเปลี่ยนวิธีเขียน k_1, k_2 โดยกำหนดให้ $r = \sqrt{k_1^2 + k_2^2}$ และ $\gamma = \text{atan2}\left(\frac{k_2}{r}, \frac{k_1}{r}\right)$ ซึ่งนั่นก็คือ

$$k_1 = r \cos \gamma \quad (2.24)$$

$$k_2 = r \sin \gamma \quad (2.25)$$

เราจึงเขียนสมการ (2.22) และสมการ (2.23) ใหม่ได้เป็น

$$x/r = \cos \gamma \cos \theta_1 - \sin \gamma \sin \theta_1 = \cos(\gamma + \theta_1) \quad (2.26)$$

$$y/r = \cos \gamma \sin \theta_1 + \sin \gamma \cos \theta_1 = \sin(\gamma + \theta_1) \quad (2.27)$$

จึงได้ว่า $\gamma + \theta_1 = \text{atan2}\left(\frac{y}{r}, \frac{x}{r}\right)$ ซึ่งนั่นก็คือ $\theta_1 = \text{atan2}\left(\frac{y}{r}, \frac{x}{r}\right) - \text{atan2}\left(\frac{k_2}{r}, \frac{k_1}{r}\right)$ และเมื่อเรารู้ค่า θ_1 และ θ_2 แล้ว เราจึงหาค่าของ θ_3 ได้จากสมการ (2.12) และสมการ (2.13)

2.2 Trajectory Planning

ในการควบคุมจัดการสิ่งต่างๆ ตามแบบ Space Controllers เมื่อเกิดการเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันสิ่งนั้นๆ ก็จะถูกปรับไปตามตำแหน่งที่ควรจะเป็นทันที ไม่ว่าจะเป็นมุมของข้อต่อ, ความเร็ว หรือความเร่งตาม Command Torque ที่สั่งการ ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อมอเตอร์หรือตัว Manipulator ได้ ต้องมีการตั้งค่าที่รัดกุมทั้งนี้เพื่อป้องกันจากเงื่อนไขต่างๆ ที่ก่อให้เกิดอันตรายได้ เราจึงต้องนำทฤษฎีของการออกแบบการเคลื่อนที่ของ Path Planning มาใช้ในการออกแบบการเคลื่อนที่ของแขนกล โดยจะใช้ Second-order Polynomials for Straight Lines (Point to Point Motion) และ Interpolating Polynomial for Curvatures

2.2.1 Second-order Polynomials

Second-order Polynomials ถูกเลือกมาใช้ในการสร้าง End-effector Trajectories ของเส้นตรงต่างๆ ในพื้นที่การทำงานของแขนกล ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบจุดต่อจุด (Point to Point) สมมุติการเริ่มต้นในลักษณะของ Trajectory คือมีเพียงผู้ใช้ที่สามารถตั้งค่าตำแหน่งเริ่มต้น และตำแหน่งสุดท้ายใน Workspace สำหรับให้ Manipulator เคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นไปยังจุดสุดท้าย End-effector Path ที่ต้องการจะเกิดขึ้นต่อเมื่อมั่นใจแล้วว่า ความเร็วเริ่มต้น ความเร็ว และความเร่งเป็นไปด้วยความราบรื่น จนเส้นทางการเคลื่อนที่สิ้นสุดในช่วงเวลา T ที่กำหนด

ให้ $p(t)$, $\dot{p}(t)$ และ $\ddot{p}(t)$ เป็น 3×1 เมตริก นำเสนอ x , y และ z เป็นส่วนประกอบของตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของ End-effector ใน Workspace ในช่วงเวลาที่กำหนดมาให้ t ซึ่งรูปแบบทั่วไปของ ตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของ End-effector เป็นดังนี้

$$p(t) = a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (2.28)$$

$$\dot{p}(t) = 2a_2 t + a_1 \quad (2.29)$$

$$\ddot{p}(t) = 2a_2 \quad (2.30)$$

สัมประสิทธิ์ a_1 a_2 คือ 3×1 เมตริก สัมประสิทธิ์สำหรับ Polynomials โดยตั้งค่าสมการเงื่อนไข Boundary เพื่อให้มีค่าความเร็วเริ่มต้น ความเร็วสุดท้าย และความเร่ง เป็นไปตามสมการเงื่อนไข Boundary ดังนี้

$$p(0) = p_{start}$$

$$\dot{p}(0) = 0$$

$$\ddot{p}(0) = 0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$p(T) = p_{stop}$$

$$\dot{p}(T) = 0$$

$$\ddot{p}(T) = 0$$

p_{start} และ p_{stop} คือ 3×1 เมตริก จะบ่งชี้ถึงจุดเริ่มต้นและสุดสิ้นสุดของ End-effector สำหรับส่วน Straight Line ที่ให้มา โดยคำนวณจากสมการ สัมประสิทธิ์ของ Polynomials สามารถถูกคำนวณได้ดังนี้

$$a_0 = p_{start}$$

$$a_1 = \dot{p}_{start} = 0$$

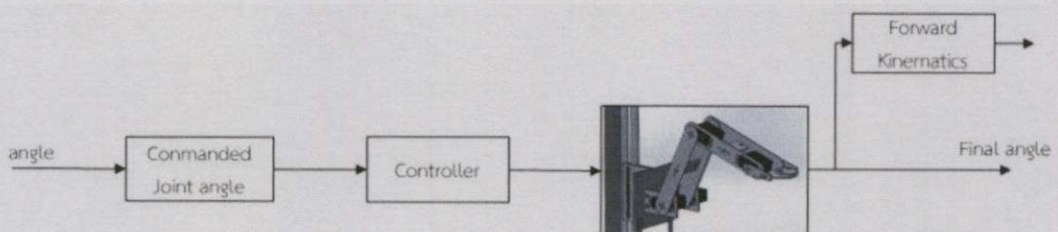
$$a_2 = \frac{\ddot{p}_{start}}{2} = 0$$

ดังนั้นแต่ละส่วนของ Straight Line End-effector Path ที่ต้องการสามารถถูกสร้าง โดยใช้ Second-order Polynomial ตามที่กล่าวถึงในสมการข้างต้น ในการสร้าง Curvature Trajectories Path ที่ต้องการโดยปกติแล้วจะถูกอธิบายในทอมนอนกรมของจุดระหว่างเส้นโค้งที่ Manipulator เคลื่อนตาม นอกจากนี้ความเร็วเริ่มต้นที่ข้อต่อ และความเร็วยังต้องการทำให้มั่นใจว่า End-effector จะวิ่งผ่านจุดบนเส้นโค้ง ด้วยความเร็วและความเร่งที่ต่อเนื่อง ในส่วนที่ถัดไปนี้ คือแบบที่สองของ Path Planning Scheme ถูกนำเสนอในรูปของ Curvature Type Path

2.3 Motion Control

2.3.1 Joint-space Control

การควบคุมแบบ Joint-space เป็นการควบคุมโดยคำนึงถึงมุมของข้อต่อต่างๆของแขนกลเป็นหลัก โดยในการเคลื่อนที่จะทำการใส่ค่ามุมต่างๆ ของแขนกลที่ต้องการให้แขนกลแต่ละข้อต่อทำตามผู้ใช้ต้องการ



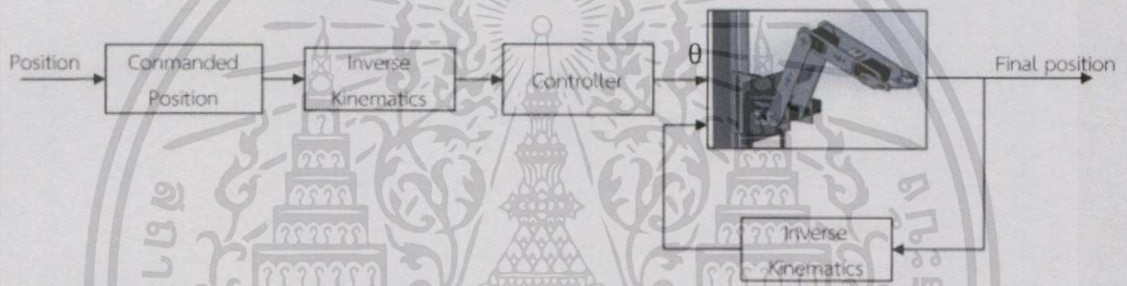
รูปที่ 2.7 โดอะแกรมรูปแบบการทำงานของ Joint-space Control

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.7 จะเห็นว่า เมื่อเราป้อนค่ามุม (Angle) ที่เราต้องการเข้าไป ค่าของมุมอื่นๆ จะถูกส่งไปยังตัว Controller เพื่อสร้างสัญญาณไปควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ที่แขนกลเพื่อให้หมุนไปยังมุมที่เราต้องการ โดยค่ามุมสุดท้ายนั้นจะสามารถบอกถึงตำแหน่งสุดท้ายของปลายแขนกลได้ด้วยทฤษฎี Forward Kinematics

2.3.1 Task-space Control

การควบคุมแบบ Task-space เป็นการควบคุมโดยเน้นไปที่ตำแหน่งของแขนกลเป็นหลัก โดยผู้ใช้จะส่งคำสั่งเป็นตำแหน่งที่ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่ไป โดยตัวคอนโทรลเลอร์จะทำการรับค่าตำแหน่งของแขนกล และทำการคำนวณออกมาเป็นชุดคำสั่งเพื่อสั่งงานแขนกลให้เคลื่อนที่ไปยังจุดที่ต้องการ



รูปที่ 2.8 ไดอะแกรมรูปแบบการทำงานของ Task-space Control

จากรูปที่ 2.8 เป็นการป้อนค่าตำแหน่งที่ต้องการให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่ไป โดยระบบจะนำค่าตำแหน่งที่ป้อนเข้าไบนั้นไปคำนวณมุมที่ต้องหมุนไปของเซอร์โวมอเตอร์โดยใช้ทฤษฎี Inverse Kinematics จากนั้นจะส่งค่ามุมที่ได้ไปยังตัว Controller ละส่งสัญญาณไปควบคุมแขนกลต่อไป โดยมีการป้อนกลับมุมสุดท้ายกลับมาเปรียบเทียบกับมุมที่ตัว Controller สั่งการออกไป

บทที่ 3

หลักการออกแบบ

3.1 การออกแบบโครงสร้างของแขนกล

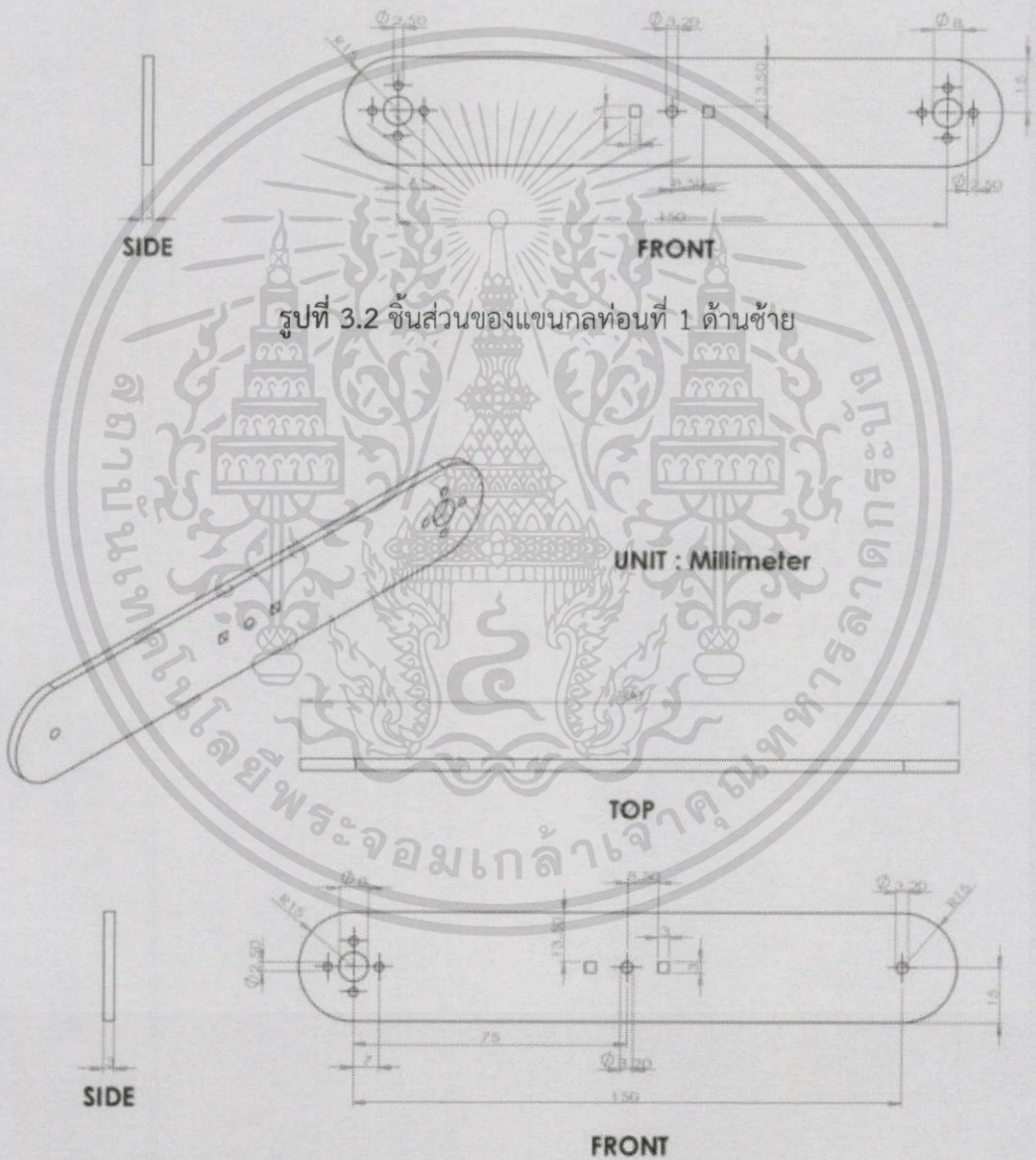
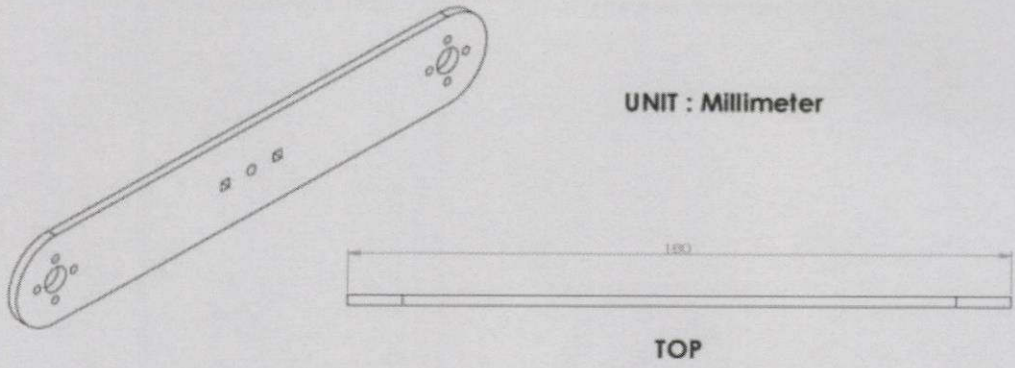
การออกแบบแขนกลได้เลือกใช้วัสดุการสร้างเป็นอลูมิเนียมความหนา 3 มิลลิเมตร เนื่องจากอลูมิเนียมมีน้ำหนักเบาแต่มีความแข็งแรงสูง โดยได้ทำการออกแบบโดยใช้โปรแกรมโซลิดเวิร์ค (SolidWorks) โดยออกแบบเป็นชิ้นส่วนแยกกันประกอบด้วย ชิ้นส่วนแขนท่อนที่ 1 ชิ้นส่วนแขนท่อนที่ 2 ชิ้นส่วนแขนท่อนที่ 3 (ส่วนที่ใช้ก๊วกสินค้า) และตัวฐานสำหรับยึดติดแขนกล



รูปที่ 3.1 รูปแบบโครงสร้างของแขนกลที่ออกแบบในโปรแกรม SolidWorks

3.1.1 ชิ้นส่วนของแขนกลท่อนที่ 1 ปลายทั้งสองด้านของชิ้นด้านซ้ายมีการเจาะรูเพื่อยึดชิ้นส่วนเข้ากับเซอร์โวมอเตอร์แบบ SG-5010 ส่วนชิ้นด้านขวาเจาะรูยึดเซอร์โวมอเตอร์แบบ SG-5010 เพียงด้านเดียวคือด้านที่จะติดกับฐาน (เซอร์โวมอเตอร์ยึดติดอยู่กับฐานของแขนกล) ส่วนอีกด้านเป็นรูสำหรับเชื่อมต่อกับชิ้นส่วนแขนท่อนที่ 2 และบริเวณกึ่งกลางของชิ้นด้านซ้ายและด้านขวาจะเจาะรูสำหรับขึ้นเชื่อมต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

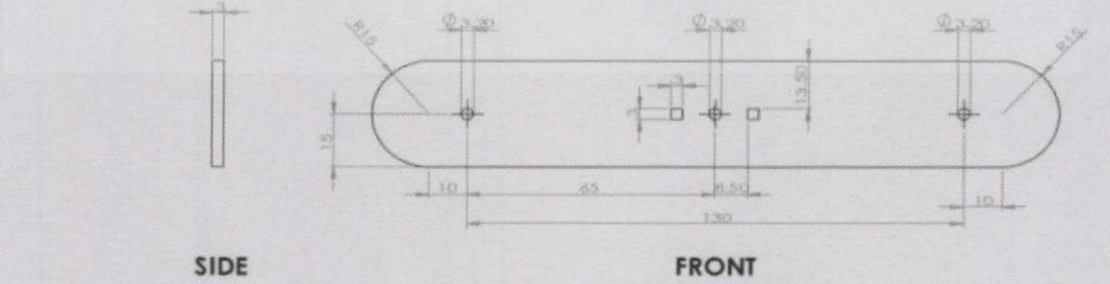
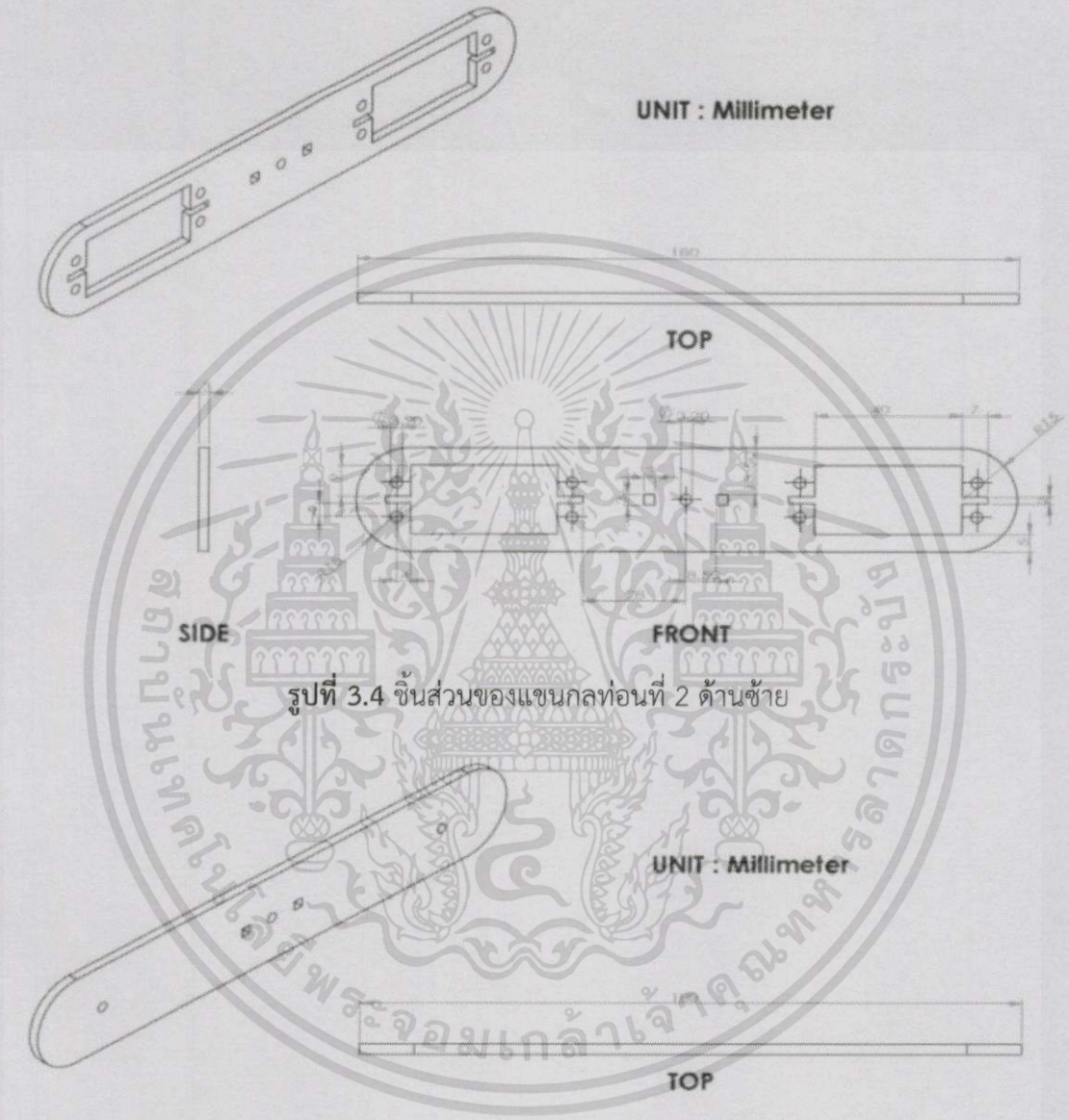


รูปที่ 3.2 ชิ้นส่วนของแกนกลท่อนที่ 1 ด้านซ้าย

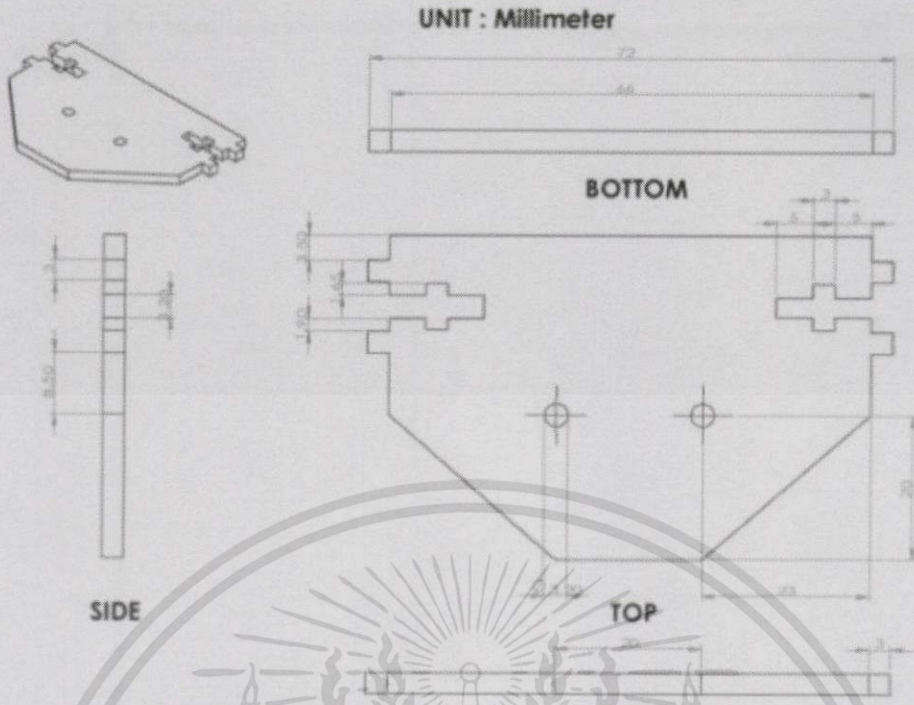
รูปที่ 3.3 ชิ้นส่วนของแกนกลท่อนที่ 1 ด้านขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

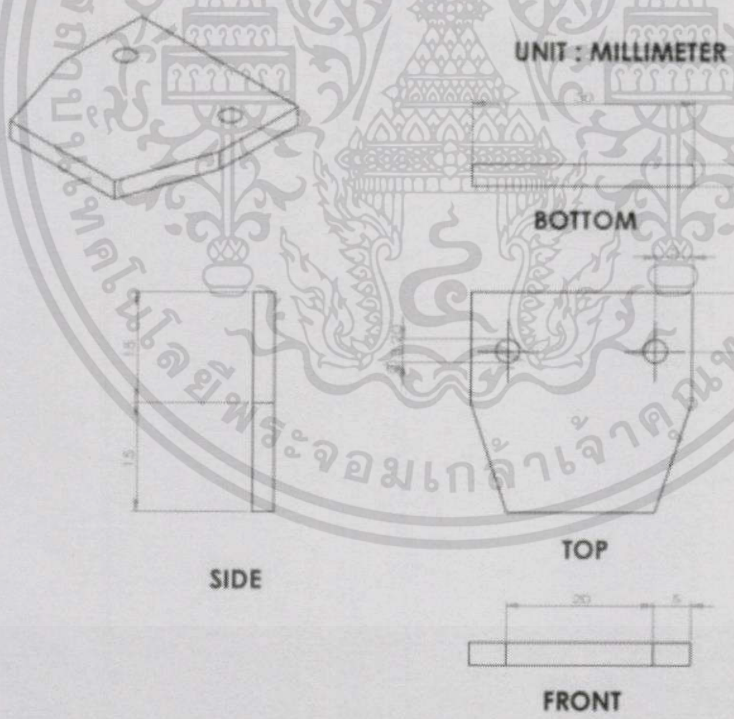
3.1.2 ชั้นส่วนของแขนกลท่อนที่ 2 ชั้นด้านซ้ายที่ปลายทั้งสองด้านจะมีเพียงรูสำหรับเชื่อมต่อกับชั้นส่วนท่อนที่ 1 และ 3 เท่านั้น ในส่วนของชั้นด้านขวาจะมีการเจาะช่องสำหรับติดตั้งเซอร์โวมอเตอร์แบบ SG-5010 จำนวน 2 ช่องด้วยกัน และบริเวณกึ่งกลางก็จะเป็นรูสำหรับยึดติดกับจุดเชื่อมต่อของทั้ง 2 ชั้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



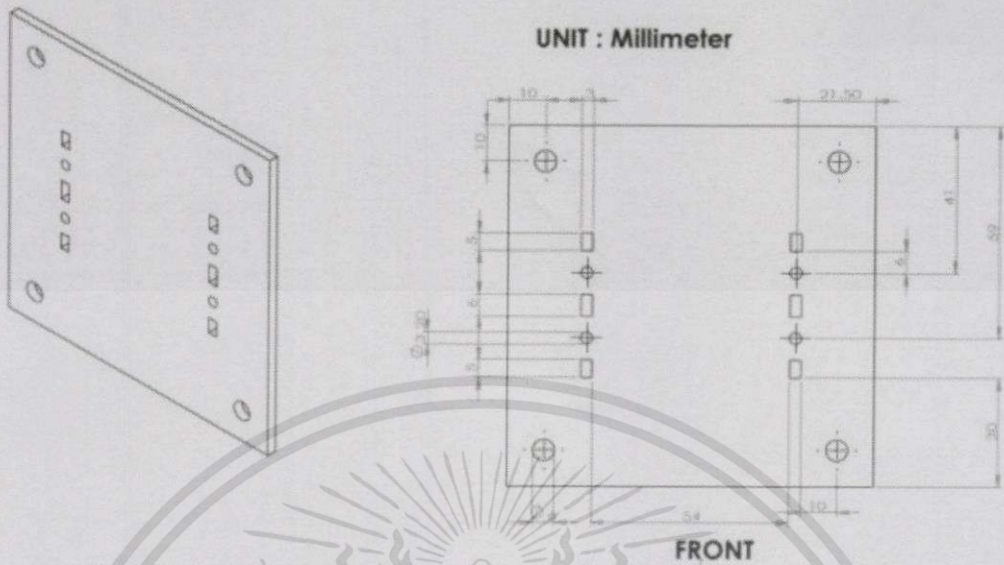
รูปที่ 3.8 ตัวเชื่อมต่อของแขนท่อนที่ 3 ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกักสินค้า



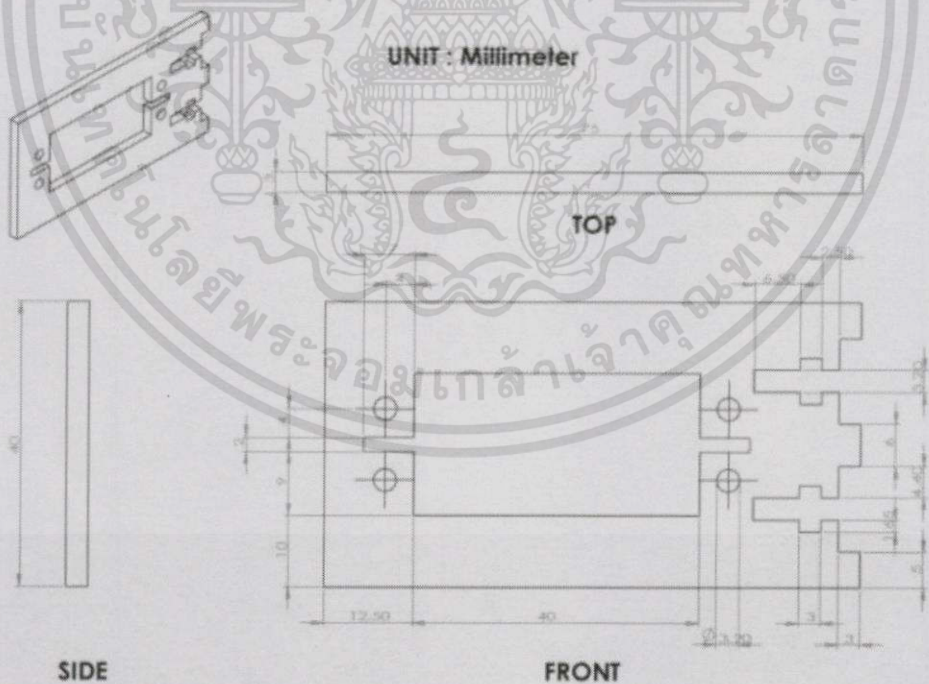
รูปที่ 3.9 ชั้นส่วนในการยึดติดอุปกรณ์เสริม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 ฐานของแขนกล แบ่งเป็น 2 ชั้นส่วนได้แก่ ส่วนพื้นที่ใช้เชื่อมต่อกับเสาปรับระดับ ความสูงและส่วนที่ใช้ติดตั้งเซอร์โวมอเตอร์แบบ SG-5010 จำนวน 2 ชั้น



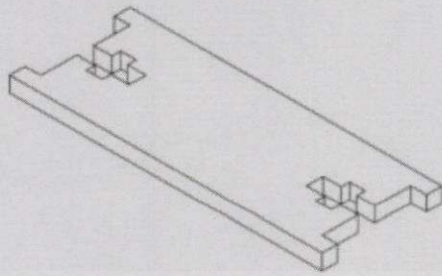
รูปที่ 3.10 ชั้นส่วนฐานที่เชื่อมต่อกับเสาปรับระดับ



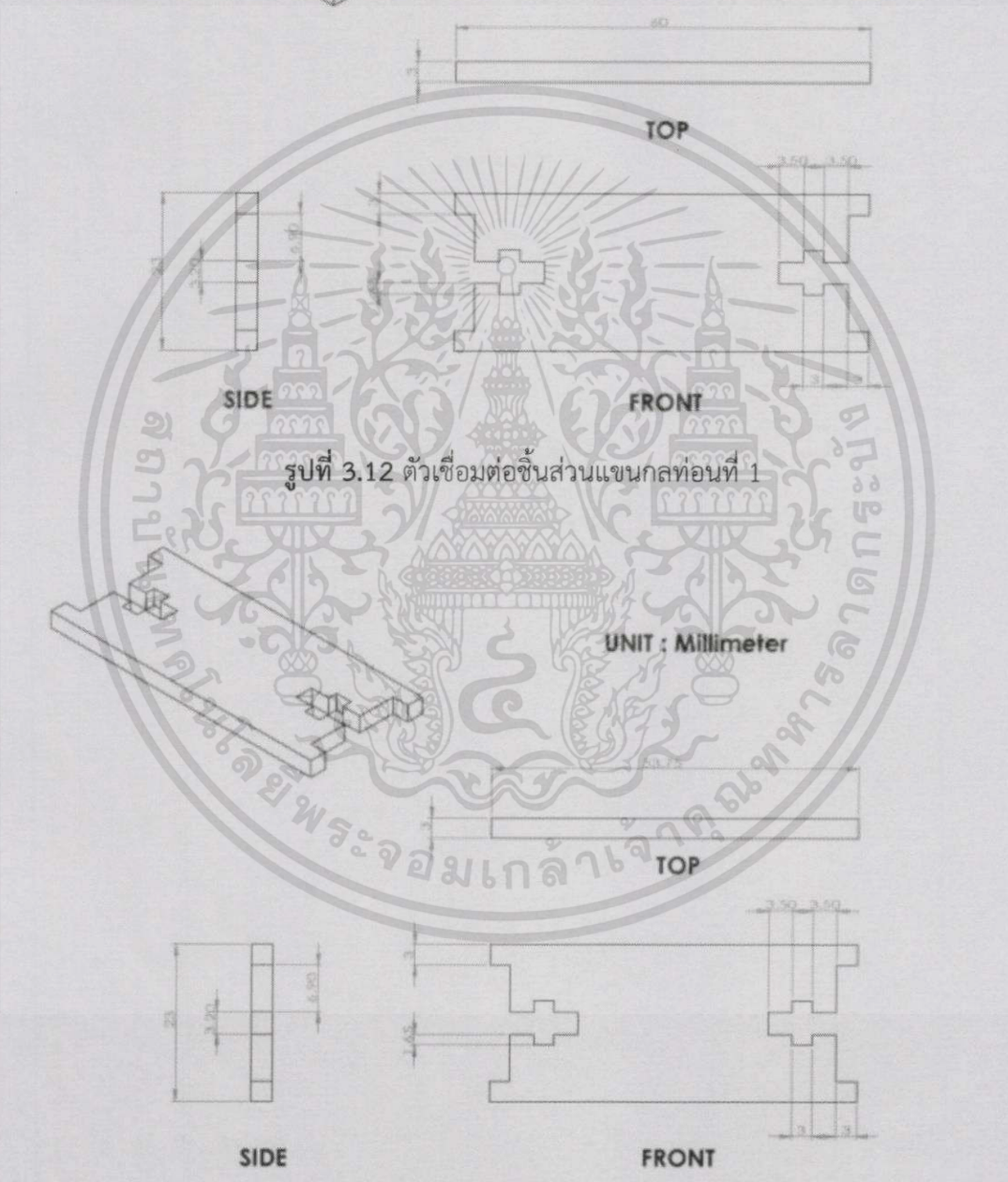
รูปที่ 3.11 ชั้นส่วนที่ใช้ติดตั้งเซอร์โวมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 ตัวเชื่อมต่อ ใช้ในการเชื่อมต่อชิ้นส่วนด้านซ้ายและด้านขวาของชิ้นส่วนแขนท่อนที่ 1 และ 2 เข้าด้วยกัน



UNIT : Millimeter



รูปที่ 3.12 ตัวเชื่อมต่อชิ้นส่วนแขนกลท่อนที่ 1

รูปที่ 3.13 ตัวเชื่อมต่อชิ้นส่วนแขนกลท่อนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6 ชั้นส่วนรองรับการเคลื่อนไหวที่บริเวณข้อต่อ ใช้รองรับการหมุนขณะที่แกนกลเคลื่อนที่ระหว่างชั้นส่วนตอนที่ 1 กับ 2 และระหว่างชั้นส่วนตอนที่ 2 กับ 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบและควบคุมแขนกล

ในการที่แขนกลจะทำงานได้อย่างถูกต้องและแม่นยำนั้นขึ้นอยู่กับตัวเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) ที่มีหน้าที่ทำให้ชิ้นส่วนต่างๆ ของแขนกลขยับและเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ต้องการได้ ในโครงการนี้ได้เลือกใช้เซอร์โวมอเตอร์ เพราะมีการเคลื่อนที่ที่แม่นยำต่างจาก Induction Motor ทั่วไป มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว ย่านการควบคุมกว้าง และความเร็วยกเว้นในการหมุนคงที่ ทั้งนี้เซอร์โวมอเตอร์มีการทำงานคือ ใช้สัญญาณพัลส์ โดยภายในเซอร์โวมอเตอร์จะประกอบไปด้วย มอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรง, ชุดเกียร์ และชุดควบคุม โดยจะประกอบกันไว้อยู่ภายในโมดูลเดียวกันหรือภายในกล่องพลาสติกเดียวกัน โครงสร้างภายในของเซอร์โวมอเตอร์จะประกอบด้วย ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้ (Variable Resistor) ที่ทำหน้าที่ตรวจสอบตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ และตัวต้านทานนี้จะถูกยึดติดกับแกนหมุนของมอเตอร์ ซึ่งทำให้สามารถควบคุมให้มอเตอร์หมุนไปตำแหน่งองศาที่ต้องการได้ แต่เซอร์โวมอเตอร์นี้จะหมุนได้แค่ประมาณ 180 องศาหรือครึ่งรอบ แต่จะไม่สามารถหมุนเป็นวงรอบได้ เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดกับตัวต้านทานปรับค่าได้ โดยมอเตอร์ชนิดนี้จะมีสายต่อใช้งานทั้งหมดเพียง 3 เส้นเท่านั้น คือ เส้นสีแดง จะเป็นสายไฟเลี้ยงโดยสามารถต่อแรงดันอยู่ระหว่าง 4 ถึง 6 โวลต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของมอเตอร์แต่ละตัว, เส้นสีน้ำตาล จะเป็นสายกราวด์ และเส้นสีส้ม จะเป็นสายสัญญาณที่ใช้ควบคุมตำแหน่งแกนของเซอร์โวมอเตอร์ โดยสัญญาณที่ใช้ควบคุมนี้จะเป็นสัญญาณแบบพัลส์วidthมอดูเลชั่น (Pulse Width Modulation) ข้อดีของมอเตอร์ชนิดนี้คือจะมีขนาดเล็กน้ำหนักเบา, ให้แรงบิดสูง, กินพลังงานน้อย และสามารถควบคุมด้วยแรงดันลอจิกที่เป็น TTL ได้ โดยตรงไม่จำเป็นต้องต่อวงจรขับ (Driver) อื่นๆ เพราะมอเตอร์ชนิดนี้จะมีวงจรควบคุมบรรจุไว้ภายในอยู่แล้ว สำหรับในโครงการนี้เลือกใช้เซอร์โวมอเตอร์แบบ SG-5010 ซึ่งสามารถยกน้ำหนักได้ 4.0 kg/cm โดยหมุนไป 60 องศาใช้เวลา 0.2 sec. (ที่แรงดัน 4.8 v) และรับน้ำหนัก 6.0 kg/cm โดยหมุนไป 60 องศาใช้เวลา 0.16 sec. (ที่แรงดัน 6.0 v)



รูปที่ 3.16 แสดงเซอร์โวมอเตอร์ SG-5010

การเชื่อมต่อเซอร์โวมอเตอร์กับบอร์ดควบคุมมีการต่อวงจรหลังอยู่สามจุดดังนี้

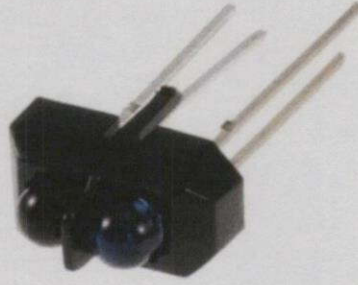
1. ไฟเลี้ยง +5V (เส้นสีแดง)
2. ขาต่อลงกราวด์ (เส้นสีดำ)
3. ขารับสัญญาณจากบอร์ดควบคุมหรือตัวคอนโทรลเลอร์ (เส้นสีเหลือง)



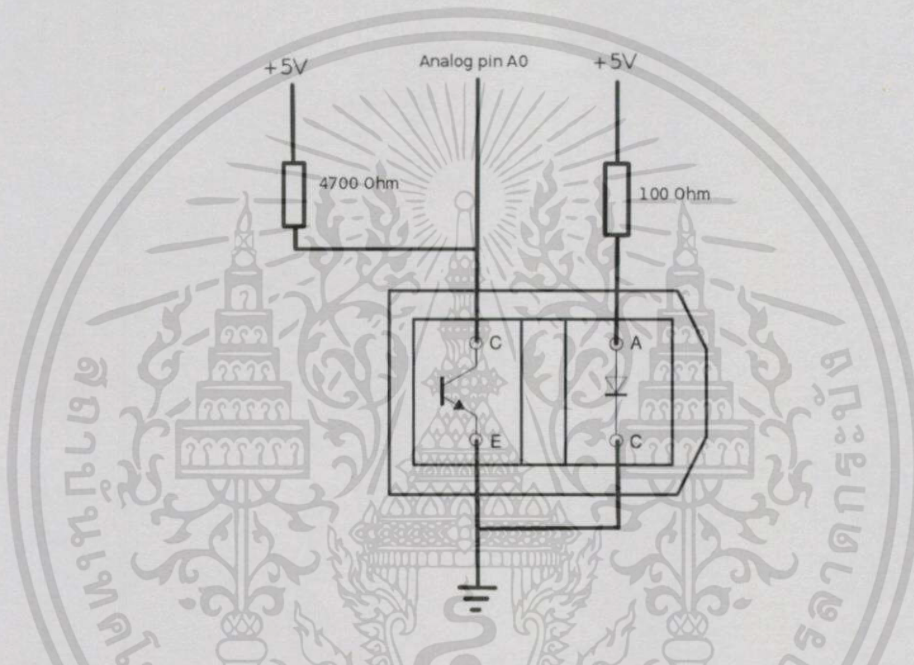
รูปที่ 3.17 แสดงการเชื่อมต่อเซอร์โวมอเตอร์กับคอนโทรลเลอร์

อุปกรณ์อีกหนึ่งชนิดที่จะนำมาใช้ทำงานร่วมกับเซอร์โวมอเตอร์ ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวส่งเริ่มการกักลินค่าคือ เซนเซอร์ตรวจจับระยะทางชนิดอินฟราเรด โดยจะอาศัยหลักการของการสะท้อนของแสงอินฟราเรด ซึ่งเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่าแสงสีแดงลงไป ดังนั้นจึงไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยสายตาของมนุษย์ กล่าวคือ ใช้อุปกรณ์ส่งแสงเป็นแหล่งกำเนิดปล่อยแสงออกไป และเมื่อแสงกระทบกับวัตถุด้านหน้า ก็จะสะท้อนแสงกลับมาเข้าที่ตัวรับแสง ส่วนอัตราของการสะท้อนกลับนั้น ขึ้นอยู่กับสี และสภาพความมัน ของวัตถุที่สะท้อน เช่น สีดำ จะมีอัตราการสะท้อนกลับน้อยกว่าสีขาว หรือสภาพพื้นผิวที่มีความราบเรียบ เป็นมันวาว จะสามารถสะท้อนแสงได้ดีกว่าพื้นผิวที่มีลักษณะด้านและขรุขระ เป็นต้น

โดยเลือกใช้เซนเซอร์ตรวจจับระยะทางชนิดอินฟราเรด รุ่น TCRT 5000 ซึ่งเป็นเซนเซอร์ชนิด Phototransistor มีขนาดเล็กเพียง 10.2 x 5.8 x 7 มิลลิเมตร มีย่านการตรวจจับที่ระยะ 0.2 ถึง 15 มิลลิเมตร และใช้แสงอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่น 950 นาโนเมตร อีกทั้งยังไม่ตัวปกป้องการรบกวนจากแสงภายนอกด้วย



รูปที่ 3.18 แสดงเซนเซอร์ตรวจวัดระยะทางชนิดอินฟาเรด รุ่น TCRT 5000

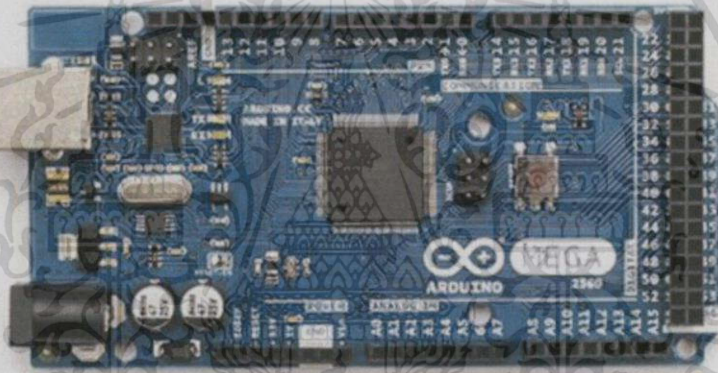


รูปที่ 3.19 แสดงการเชื่อมต่อของเซนเซอร์ตรวจวัดระยะทางชนิดอินฟาเรด รุ่น TCRT 5000

แต่เซอร์โวมอเตอร์และเซนเซอร์จะทำงานร่วมกันไม่ได้เลย ถ้าไม่มีตัวควบคุมในโครงงานนี้ เลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino โดย Arduino เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิดเอวีอาร์ ซึ่งเป็น Platform ของ I/O บอร์ดอย่างง่าย ๆ ที่มี I/O ชั้นพื้นฐานเพียงพอกับการใช้งานและตัวบอร์ดจะมาพร้อมกับชุดคำสั่งที่ใช้ควบคุม Port I/O ไม่ว่าจะเป็น Port Digital, Port Analog, PWM และ Serial Port โดย Arduino นั้นเป็นเครื่องมือที่จะช่วยให้คอมพิวเตอร์สามารถรับและส่งสัญญาณไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไป ตัว Arduino Board ออกแบบจากไมโครคอมพิวเตอร์ชิปเดียว, และมีโปรแกรมพัฒนาสำหรับเขียนโปรแกรมให้บอร์ดทำงาน ดังนั้น Arduino สามารถประยุกต์ทำเครื่องใช้งานอัจฉริยะที่มีการรับสัญญาณจากสวิทช์หรือเซนเซอร์และควบคุม หลอดไฟ, มอเตอร์, หรืออุปกรณ์อื่นๆ หรืองานที่ต้องติดต่อกับโปรแกรมบนเครื่องคอมพิวเตอร์พีซีได้อีกด้วย เพราะสามารถทำงานได้ทั้งบนวินโดวส์ (Windows) ลินุกซ์ (Linux) และแมคอินทอช (Macintosh OSX) โดยภาษาในการเขียนโปรแกรมลงบนอาดูโน่นั้น จะใช้ภาษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C++ ซึ่งเป็นรูปแบบของโปรแกรมภาษาซีประยุกต์แบบหนึ่ง ที่มีโครงสร้างของตัวภาษาโดยรวมใกล้เคียงกันกับภาษาซีมาตรฐาน (ANSI-C) เพียงแต่ได้มีการปรับปรุงรูปแบบในการเขียนโปรแกรม บางส่วนที่ผิดเพี้ยนไปจาก ANSI-C เล็กน้อย เพื่อช่วยลดความยุ่งยากในการเขียนโปรแกรมและให้ ผู้เขียนโปรแกรมสามารถเขียนโปรแกรมได้ง่ายและสะดวกมากขึ้น ในโครงงานนี้มีการใช้เซอร์โว มอเตอร์ทั้งหมด 4 ตัว ดังนั้นจึงเลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น Mega 2560 R3 ซึ่งเป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด AVR ที่ออกแบบมาสำหรับงานที่ต้องใช้ I/O จำนวนมากๆ เช่น งานที่ต้องการรับสัญญาณจาก Sensor หรือควบคุมมอเตอร์ Servo หลายๆ ตัวซึ่ง Pin I/O ของบอร์ด Arduino บางชนิดไม่สามารถรองรับได้ รวมถึงบอร์ด Mega 2560 R3 ยังมีหน่วยความจำแบบ Flash ทำให้สามารถเขียนโค้ดโปรแกรมเข้าไปได้มากกว่า ในความเร็วของ MCU ที่เท่ากัน ซึ่ง Arduino Mega 2560 R3 ใช้ CPU เบอร์ ATmega2560 ขนาด 54 ขาสำหรับดิจิตอลอินพุต (มีขาที่รองรับการทำงานของ Pulse Width Modulation (PWM) จำนวน 14 ขา) และ 16 ขาสำหรับแอนะล็อกอินพุต โดยมีความถี่ในการประมวลผล 16 MHz



รูปที่ 3.20 แสดงบอร์ดควบคุม Arduino Board ชนิด Mega 2560 R3

ซึ่งข้อมูลของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น Mega 2560 R3 มีดังนี้

- หน่วยความจำแบบ Flash ขนาด 256 กิโลไบต์ (8 กิโลไบต์สำหรับ Boot Loader)
- หน่วยความจำแบบ SRAM ขนาด 8 กิโลไบต์
- หน่วยความจำข้อมูลแบบ EEPROM ขนาด 4 กิโลไบต์
- Operating Voltage 5 V
- Input Voltage 7-12 V
- รองรับการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ด้วย USB

จุดเชื่อมต่อการใช้งานของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น Mega 2560 R3

- จุดต่อการใช้งานดังรูปที่ 2.5 ประกอบด้วย
- Vin คือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายเข้าไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino รุ่น Mega 2560 R3 เมื่อใช้แหล่งพลังงานจากภายนอก
- GND คือจุดเชื่อมต่อกราวด์
- 5V คือแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตขนาด 5V
- 3.3V คือแรงดันไฟฟ้า 3.3V กระแสไฟฟ้าสูงสุด 50mA
- IOREF คือพอร์ตที่จะอ้างอิงแรงดันไฟฟ้ากับการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ว่าจะทำงานที่แรงดันไฟฟ้าขนาด 5V หรือ 3.3V
- มี 54 ขาดิจิตัล คือหมายเลข 0 ถึง 13 สามารถใช้เป็นสัญญาณ PWM เอาต์พุตได้ โดยใช้ฟังก์ชัน PinMode(), digitalWrite() และ digitalRead() โดยแต่ละขาจะทำงานที่แรงดันไฟฟ้า 5V และแต่ละขาจะรับหรือให้กระแสไฟฟ้าสูงสุด 40mA
- มี 16 ขาแอนะล็อกอินพุต คือ หมายเลข A0 ถึง A15

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์จะถูกโปรแกรมโดยใช้โปรแกรมอาดูโน่ (Arduino) โปรแกรมอาดูโน่ เป็นซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อการเขียนโปรแกรมลงบนบอร์ดอาดูโน่ ซึ่งจะสามารถดาวน์โหลดได้ที่ <http://arduino.cc/en/Main/Software>



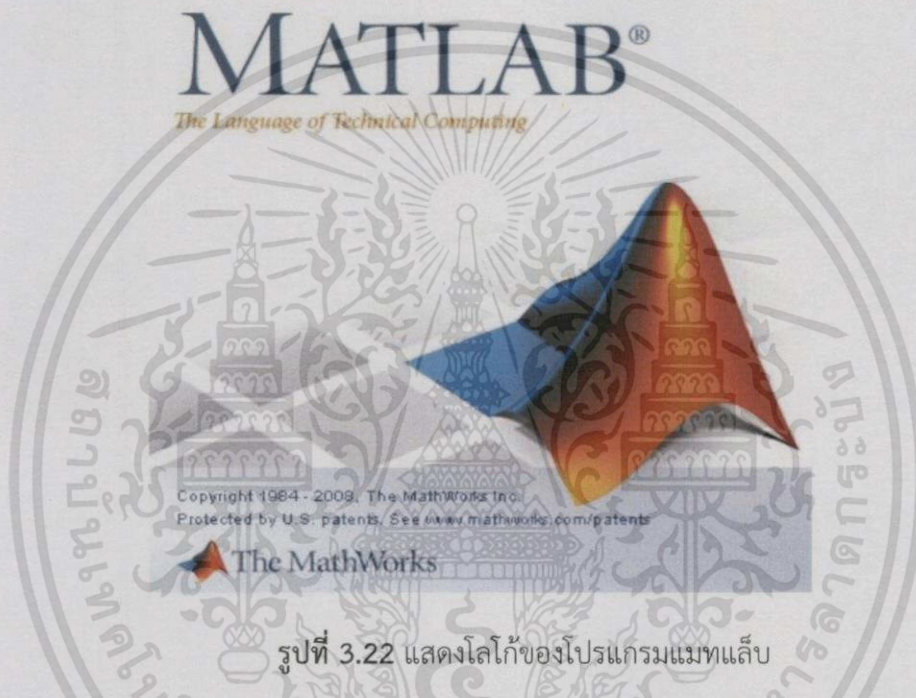
รูปที่ 3.21 แสดงโลโก้ของโปรแกรมอาดูโน่

โดยจะสามารถรองรับได้ทั้งระบบปฏิบัติการวินโดวส์ (Windows) ลินุกซ์ (Linux) และแมคอินทอช (Macintosh OSX) ซึ่งตัวภาษาของอาดูโน่ เป็นการนำเอาโอเพ่นซอร์ซโปรเจกต์ชื่อ Wiring มาพัฒนาต่อ ภายในชุดพัฒนาของอาดูโน่จะมีไลบรารีฟังก์ชันภาษาซีสำหรับติดต่อกับฮาร์ดแวร์จำนวนมากไว้ให้ ทำให้สามารถเขียนโปรแกรมสั่งงานอุปกรณ์ต่างๆ ได้ง่าย โดยไม่จำเป็นต้องศึกษาลงไปในรายละเอียดมากนัก

ส่วนข้อมูลค่าตัวแปรต่างๆ ที่จะนำไปใส่ในโปรแกรมอาดูโน่ นั้น ได้มาจากการคำนวณโดยโปรแกรม Matlab โปรแกรมแมทแลป (Matlab) เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ระดับสูง ที่มาพร้อมด้วยสภาพแวดล้อมการทำงานเชิงโต้ตอบ (คล้ายเครื่องคิดเลข) ซึ่งสามารถคำนวณคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้อย่างรวดเร็วมากกว่าภาษาคอมพิวเตอร์สมัยก่อน เช่น ภาษา C, C++ หรือ Fortran, Matlab เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ระดับสูงที่ใช้สำหรับคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical Computing : อธิบายด้านล่าง) แสดงผลกราฟฟิก และเขียนแอฟพลิเคชัน ทำให้เราสามารถคำนวณผลลัพธ์ พัฒนาอัลกอริทึม สร้างแบบจำลอง และแอฟพลิเคชันได้ง่ายและรวดเร็วมาก ภายในตัวโปรแกรม Matlab ประกอบด้วยภาษาคอมพิวเตอร์ ทูลบ็อกซ์ (Toolbox กลุ่มฟังก์ชันสำเร็จรูปในแต่ละสาขาวิชา) และฟังก์ชันพื้นฐานจำนวนมาก ทำให้การวิเคราะห์ทำได้หลากหลายวิธี พร้อมกับคำตอบที่รวดเร็วกว่าโปรแกรมตารางคำนวณ (Spreadsheet) หรือภาษาคอมพิวเตอร์สมัยก่อน เช่น C, C++, Fortran, Java และอื่นๆ



รูปที่ 3.22 แสดงโลโก้ของโปรแกรมแมทแล็บ

คุณสามารถนำ Matlab ไปประยุกต์ใช้งานได้หลายสาขามาก ทั้งการประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) การสื่อสาร (Communication) การประมวลผลภาพและวิดีโอ (Image and Video Processing) ระบบควบคุม (Control System) การวัดและควบคุม (Instruments and Control) การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ (Economic) การคำนวณทางชีววิทยา (Biology) และอื่นๆ มีนักวิทยาศาสตร์และวิศวกรหลายล้านคนทั้งในแวดวงการศึกษาและอุตสาหกรรมที่ใช้ Matlab ในการคำนวณเชิงตัวเลข

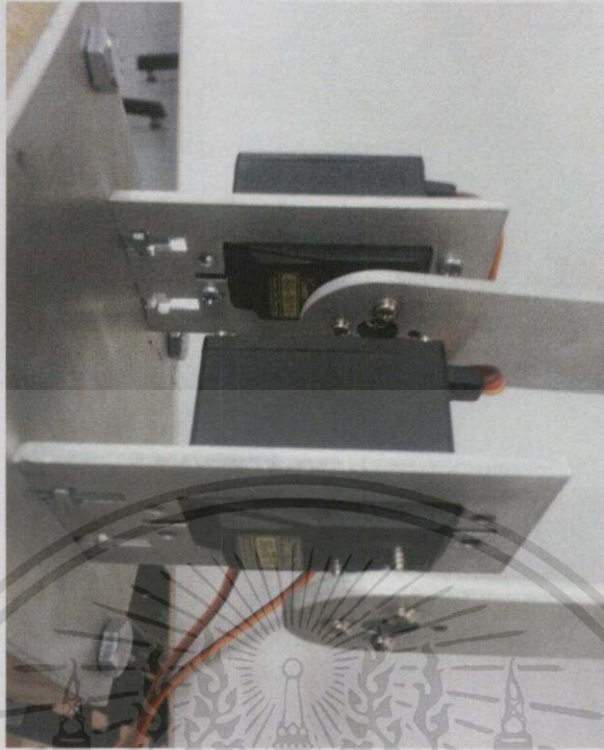
3.3 การประกอบโครงสร้างแขนกล

จากการออกแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks ในช่วงต้นแล้วนั้น ขั้นตอนต่อไปคือการสร้างชิ้นส่วนต่างๆ ของแขนกลขึ้นมาเพื่อประกอบให้เป็นแขนกลที่สมบูรณ์ โดยชิ้นส่วนต่างๆ ของแขนกลจะแสดงดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 แสดงส่วนประกอบทั้งหมดของแขนกล

ชิ้นส่วนฐานของแขนกลที่ใช้เชื่อมต่อกับเสาปรับระดับความสูง โดยในรูปที่ 3.24 ได้ทำการติดตั้งเซอร์โวมอเตอร์จำนวน 2 ตัวเรียบร้อยแล้ว



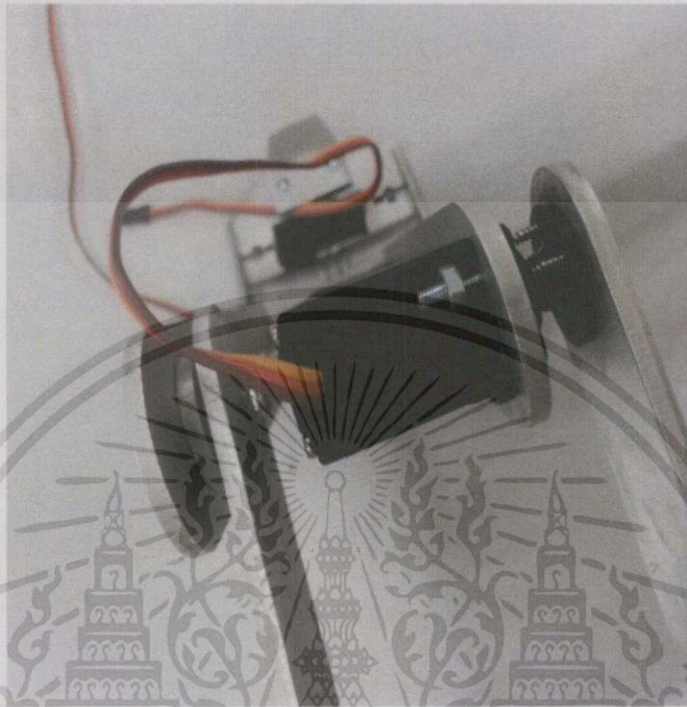
รูปที่ 3.24 ส่วนของแขนกลตอนที่ 1 ถูกยึดติดกับเซอร์โวมอเตอร์ที่ติดตั้งอยู่พื้นฐาน การเชื่อมชิ้นส่วนแขนด้านซ้ายและด้านขวานั้นทำได้โดยใช้ตัวเชื่อมต่อที่ออกแบบมาไว้แล้ว



รูปที่ 3.25 ตัวเชื่อมต่อชิ้นซ้ายและขวาของแขนท่อน 1

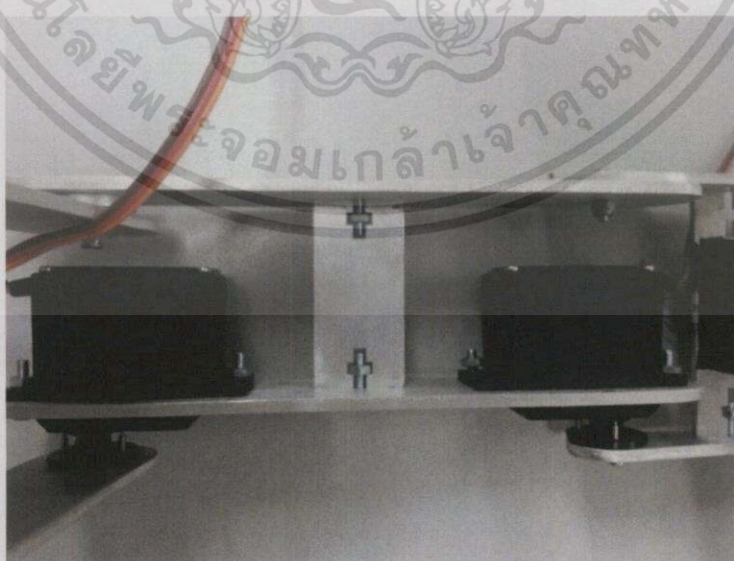
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 3.26 แสดงจุดเชื่อมต่อของแขนท่อนที่ 1 และท่อนที่ 2 โดยมีการรองแหวนรองรับ เพื่อให้การเคลื่อนที่เป็นไปอย่างราบรื่น



รูปที่ 3.26 จุดเชื่อมต่อของแขนท่อนที่ 1 และท่อนที่ 2

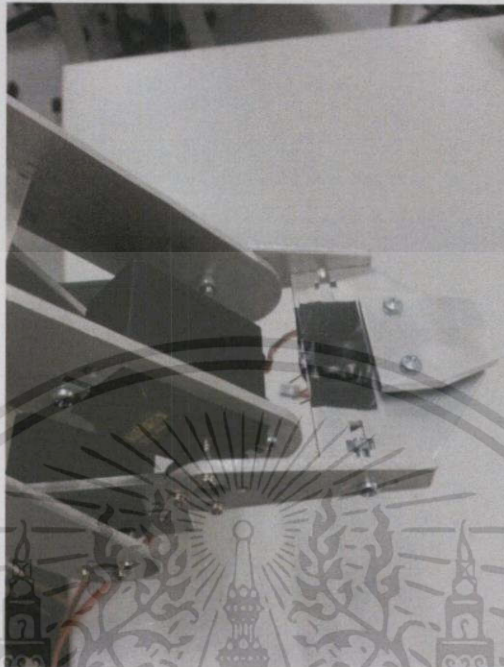
ในส่วนของแขนกลท่อนที่ 2 ใช้ตัวเชื่อมต่อเชื่อมแขนส่วนซ้ายและส่วนขวาเข้าด้วยกัน และจะมีเซอร์โวมอเตอร์อยู่จำนวน 2 ตัว ซึ่งตำแหน่งการติดตั้งดูได้ดังรูปที่ 3.27



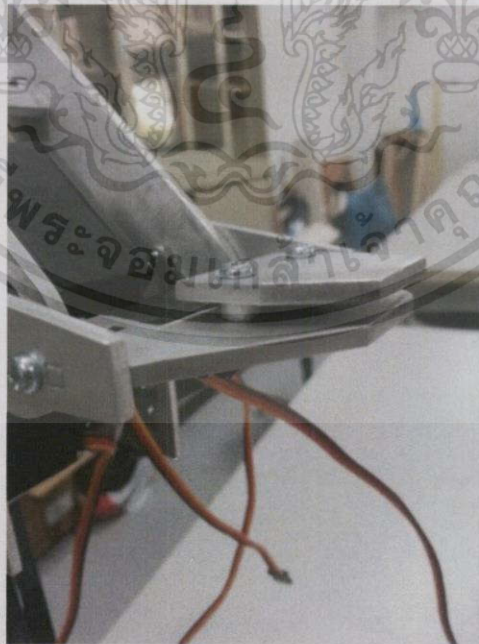
รูปที่ 3.27 ส่วนของแขนท่อนที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แขนกลตอนที่ 3 จะไม่มีเซอร์โวมอเตอร์อยู่ แต่จะใช้เซอร์โวมอเตอร์ที่อยู่ที่แขนตอนที่ 2 ในการเคลื่อนไหว ซึ่งการประกอบนั้นดูได้จากรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 ส่วนของแขนตอนที่ 3 ที่เชื่อมต่อกับแขนตอนที่ 2 ส่วนปลายของแขนตอนที่ 3 ที่ใช้ในการกวักสินค้า และเชื่อมต่ออุปกรณ์เสริมอื่นๆ



รูปที่ 3.29 ส่วนของแขนตอนที่ 3 (ส่วนที่ใช้กวักสินค้า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการยึดส่วนฐานของแขนกลเข้ากับเสาปรับระดับความสูงนั้น แสดงดังรูปที่ 3.30

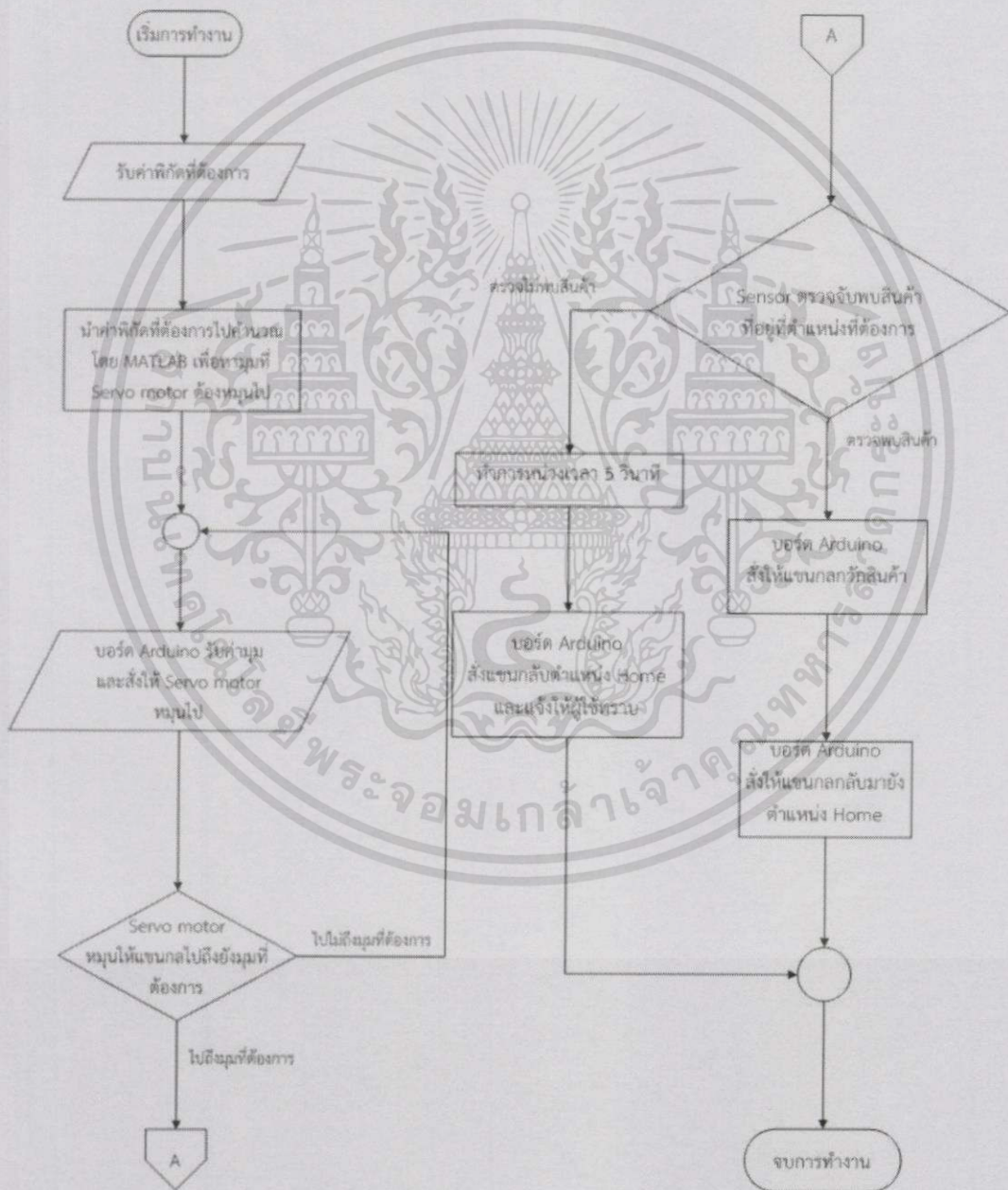


รูปที่ 3.30 จุดที่แขนกลเชื่อมต่อกับเสาปรับระดับความสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 ขั้นตอนการทำงานของแขนกล

การทำงานเริ่มจากการรับค่าพิกัดที่ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่ไป นำพิกัดไปคำนวณโดยใช้ทฤษฎี Inverse Kinematics ในโปรแกรม Matlab เพื่อหามุมที่เซอร์โวมอเตอร์ต้องหมุนไป ซึ่งบอร์ด Arduino จะทำหน้าที่รับค่ามุมจากโปรแกรม Matlab จะสร้างสัญญาณไปควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ให้หมุนไป เมื่อถึงยังตำแหน่งที่ต้องการแล้วเซ็นเซอร์แสงจะตรวจสอบว่าที่จุดนั้นมีสินค้าอยู่หรือไม่ ถ้ามีก็จะสั่งให้แขนกลทำการกวักสินค้าลงมาจากชั้นวาง ถ้าไม่มีสินค้าก็จะแจ้งให้ผู้ใช้ทราบ หลังจากแขนกลก็จะกลับมาอยู่ที่ตำแหน่งเริ่มต้น (Home)



รูปที่ 3.31 แสดงลำดับการทำงาน (Flow Chart) ของแขนกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ขั้นตอนการศึกษาและจัดทำโครงการ

สำหรับโครงการนี้ ได้ทำการศึกษาแขนงรูปแบบต่างๆ ทำให้ได้เลือกแขนงกลมา 3 รูปแบบ คือ แขนงกลกวักสินค้า (Feeder) แขนงระบบสุญญากาศดูดจับสินค้า (Vacuum) และแขนงกลหยิบจับสินค้า (Gripper) จากนั้นได้ทำการศึกษาข้อดีและข้อเสีย ตลอดจนสร้างต้นแบบของแขนงกล จากการศึกษาและทดลองพบว่า แขนงระบบสุญญากาศนั้นระบบมีขนาดใหญ่และใช้พลังงานมาก และแขนงกลแบบหยิบจับสินค้านั้นมีข้อจำกัดในการหยิบสินค้าจากชั้นวาง จึงได้ทำการเลือกแขนงกลกวักสินค้า ซึ่งมีระบบขนาดเล็ก ใช้พลังงานต่ำ และควบคุมได้ง่าย มาพัฒนาให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของโครงการนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการจัดทำโครงการ

หัวข้อ	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
	56	56	56	56	56	56	56	56	57	57
1. ศึกษาค้นคว้าข้อมูลเกี่ยวกับแขนงกลประเภทต่างๆ	↔									
2. ออกแบบแขนงกลต้นแบบ 1			↔							
3. ทดลองและปรับปรุงแก้ไขแขนงกลต้นแบบ 1				↔						
4. ออกแบบแขนงกลต้นแบบ 2					↔					
5. สร้างชิ้นงานแขนงกล 2 และทำการประกอบ						↔				
6. ทดลองแขนงกล 2							↔			
7. ปรับปรุงแก้ไขแขนงกล 2								↔		
8. ทำรูปเล่มรายงาน									↔	

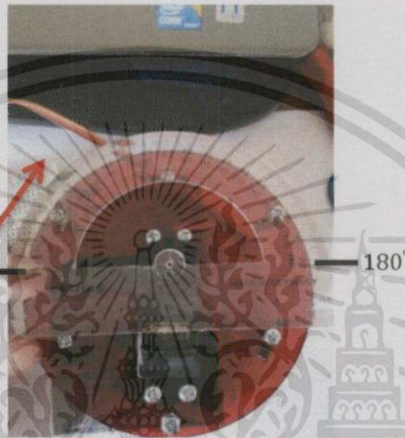
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

4.1 การทดลองความแม่นยำของแขนกล

4.1.1 การทดลองหาค่าความผิดพลาดการเคลื่อนที่ของเซอร์โวมอเตอร์ โดยนำเซอร์โวมอเตอร์มาสั่งการเคลื่อนที่ด้วยโปรแกรม Arduino ทีละ 10 องศา จากซ้ายไปขวา และบันทึกค่าที่ได้



รูปที่ 4.1 ทดสอบการจ่ายค่ามุมให้กับเซอร์โวมอเตอร์

ผลการทดลอง

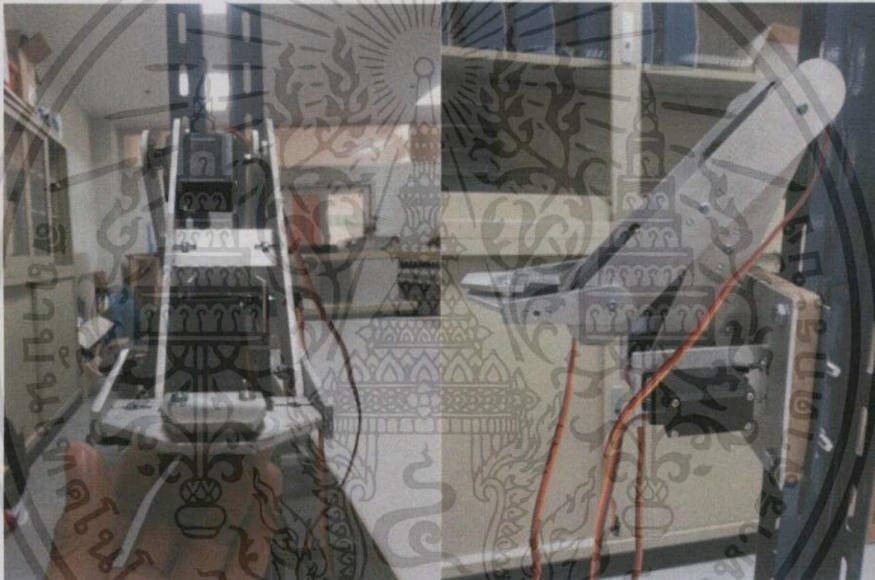
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองความแม่นยำของเซอร์โวมอเตอร์

มุมที่ต้องการ (องศา)	มุมที่ได้ (องศา)		มุมที่ต้องการ (องศา)	มุมที่ได้จริง (องศา)	
	มุมจริง	Error		มุมจริง	Error
0	0	0	100	104	+4
10	12	+2	110	113	+3
20	24	+4	120	121	+1
30	35	+5	130	131	+1
40	46	+6	140	144	+4
50	54	+4	150	150	0
60	64	+4	160	160	0
70	74	+4	170	172	+2
80	84	+4	180	185	+5
90	95	+5			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การทดลองค่าความผิดพลาดการเคลื่อนที่ของแขนกล ทำการทดลองโดยกำหนดค่า x และ y และทำการคำนวณค่ามุมของแขนกลออกมา และสั่งให้แขนกลเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมาย โดยวัดแกน x และ y ที่ได้จากการทดลอง โดยแกน x คือระยะห่างในแนวตั้ง และแกน y คือระยะห่างในแนวนอน มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

ทำการติดแขนกลเข้ากับตัวเสาปรับระดับเพื่อทำการทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนกล โดยใช้คอมพิวเตอร์ป้อนคำสั่งความสูงของสินค้าไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 2560 เพื่อควบคุมการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์ของแขนกลทั้ง 4 ตัว ซึ่งการติดตั้งแขนกลเข้ากับเสาปรับระดับแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ติดตั้งแขนกลเข้ากับเสาปรับระดับ

ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองความแม่นยำของแขนกล

ตำแหน่งที่ต้องการ		ตำแหน่งที่ได้จริง			
x (cm)	y (cm)	x (cm)	x Error (cm)	y (cm)	y Error (cm)
10	10	8	-2	7	-3
10	15	8	-2	10	-5
10	20	10	0	16	-4
15	10	12	-3	5	-5
15	15	14.5	-0.5	10	-5
15	20	17	+2	15	-5
20	10	19	-1	5	-5
20	15	20	0	10	-5
20	20	24	+4	16	-4

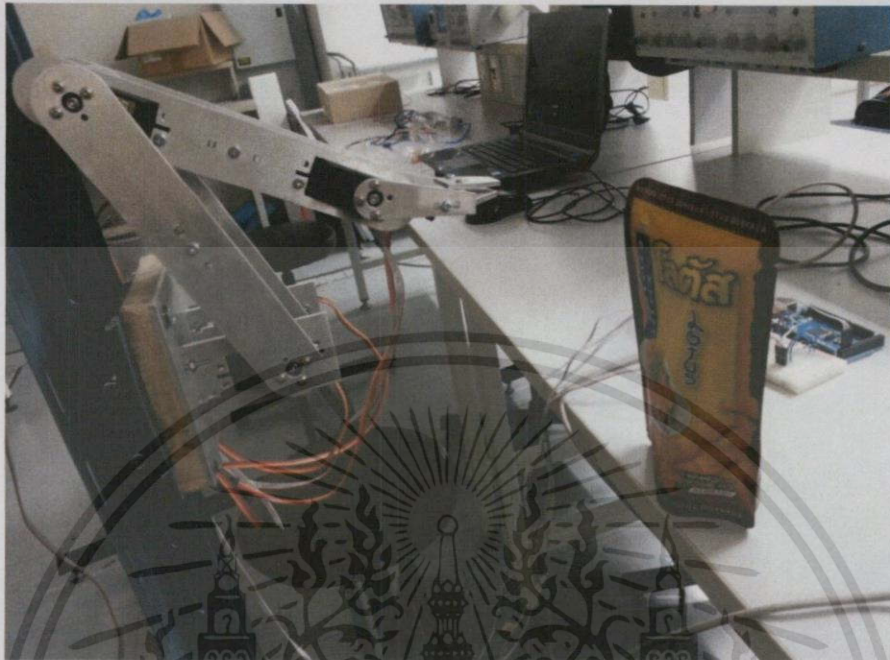
จากการทดลอง 4.1.1 จะพบว่าเซอร์โวมอเตอร์นั้นมีความผิดพลาดเกิดขึ้น เนื่องจากมุมที่ทำการโปรแกรมเข้าไปนั้นมีค่าหนึ่ง แต่ตัวของเซอร์โวมอเตอร์ไม่สามารถทำงานได้ตามค่าองศาที่ทำการโปรแกรมเข้าไปได้ ทำให้เมื่อประกอบขึ้นรูปเป็นแขนกลแล้วจะพบว่าเมื่อทดสอบความแม่นยำของแขนกลก็จะเกิดความผิดพลาดเช่นเดียวกันดังตารางที่ 4.2 ในการทดลองที่ 4.1.2 จะเห็นว่าจากความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับเซอร์โวมอเตอร์ จะทำให้เกิดค่าความผิดพลาดขึ้นเมื่อสั่งงานแขนกลในทิศทางต่างๆ เช่นเดียวกัน

4.2 การทดลองกวักสินค้าของกล

ทำโดยนำแขนกลไปติดกับฐานที่ความสูงของชั้นวางของ โดยตัวแขนห่างจากชั้นวางของเท่ากับ 20 เซนติเมตร และสั่งงานให้แขนกลทำงานกวักสินค้าลงจากชั้นวางของ

โดยก่อนที่จะให้แขนกลนั้นทำการนำสินค้าที่ต้องการลงจากชั้นวางของ ต้องทำการปรับระดับของแขนกลให้อยู่ในระดับของชั้นวางของนั้นๆ เสียก่อน โดยแขนกลจะต้องอยู่สูงจากพื้นชั้นวางของชั้นนั้นๆ 20 เซนติเมตร จากนั้นป้อนคำสั่งผ่านคอมพิวเตอร์ไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino MEGA 2560 เพื่อไปควบคุมให้เซอร์โวมอเตอร์ทั้ง 4 ตัวเคลื่อนแขนกลไปยังเป้าหมายคือสินค้าบนชั้นวาง เมื่อแขนกลเข้าใกล้สินค้ามากขึ้นจนเซนเซอร์แสง TCRT 5000 ที่ติดตั้งอยู่ด้านใต้ของส่วนปลาย

แขนกลตรวจจับได้ และส่วนปลายของแขนกลก็จะทำการกวักเอาสินค้าที่ต้องการตกลงมาจากชั้นวางของ



รูปที่ 4.3 การทดลองการกวักสินค้า





การทดลองแบ่งออกเป็นสองแบบคือ

ผลครั้งที่ 1-5 วัตถุจะวางที่เดิม และมีลักษณะเดิมตลอด โดยจะทำการวัดระยะห่างจากแขนกลให้คงที่ และให้จุดกึ่งกลางของสินค้าตรงกับปลายหัวกวักสินค้า

ผลครั้งที่ 6-10 วัตถุจะถูกนำออกแล้ววางเข้าไปใหม่ โดยการกะด้วยสายตาทำให้ลักษณะการวางเปลี่ยนไป เช่น ในกรณีที่มีการเติมสินค้าด้วยพนักงาน ซึ่งอาจจะวางสินค้าไม่ตรงตามที่ต้องการ




ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองการกวักสินค้าของแขนกล

		Test										
		วัดดูวางโดยการวัดตำแหน่ง					วัดดูวางด้วยการประมาณทางสายตา					
Times		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
ห่อ	 สูง : 20 cm หนัก : 72 กรัม	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	X	✓	✓
	 สูง : 18 cm หนัก : 120 กรัม	✓	✓	✓	✓	✓		✓	X	✓	✓	✓
ถุงฐานกว้าง	 สูง : 19 cm หนัก : 400 กรัม	✓	✓	X	✓	✓		X	✓	✓	✓	✓
	 สูง : 27 cm หนัก : 150 กรัม	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองการกวักสินค้าของแขนกล(ต่อ)

ขวด  สูง : 26 cm หนัก : 180 กรัม	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
 สูง : 21 cm หนัก : 500 กรัม	✓	✓	✓	✓	✓		X	✓	✓	X	✓
กล่อง  สูง : 14 cm หนัก : 300 กรัม	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓
 สูง : 23 cm หนัก : 330 กรัม	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓

*หมายเหตุ น้ำหนักของสินค้าต้องไม่เกิน 1.5 กิโลกรัม

จากการทดลองสามารถบอกได้ว่าความแม่นยำของแขนกลในการกวักสิ่งของต่างๆ นั้นเป็นตามดังนี้

ชนิดแบบห่อ ความสามารถในการกวักสินค้าของแขนกลอยู่ที่ 100% เมื่อวางอยู่ในตำแหน่งที่กำหนด และ 80% ที่การวางด้วยการกระประมาณด้วยสายตา ซึ่งอาจเกิดจากของด้านบนของถุงนั้นมีลักษณะแบน และเล็กทำให้เมื่อวางสินค้าด้วยสายตา จะทำให้แขนกลกวักโดนสินค้า แต่จะโดนส่วนที่เป็นตัวถุงที่ลื่น และมนทำให้ไม่สามารถกวักให้ตกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดถุงฐานกว้าง ความสามารถในการร่วกสินค้าของแขนกลอยู่ที่ 90% เมื่อวางอยู่ในตำแหน่งที่กำหนด และ 80% ที่การวางด้วยการกะประมาณด้วยสายตา เนื่องจากลักษณะของถุงที่ขอบด้านบนจะค่อนข้างบาง ทำให้เมื่อทำการร่วกสินค้า น้ำหนักจะถูกถ่วงลงด้านล่างของถุง ซึ่งมีลักษณะคล้ายตุ๊กตาล้มลุก และจะเป็นปัญหามากขึ้นถ้าวัสดุที่ใช้ทำสินค้ามีความแข็งน้อย เช่น ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดผ้าชนิดเติม ที่วัสดุทำมาจากพลาสติกบางที่นิ่มและไม่คงตัว และที่ฐานมีน้ำหนักมาก ทำให้เมื่อทำการร่วกสินค้า น้ำหนักของถุงจะต้านแรงร่วก และทำให้เมื่อดึงแขนกลับ พลาสติกตรงส่วนปลายจะงอ ทำให้ไม่สามารถร่วกให้ตักได้ในบางครั้ง แต่ในวัสดุที่แข็ง เช่น กระดาษ จะสามารถร่วกให้ตักได้ตามปกติ

ในลักษณะของขวด ความสามารถในการร่วกสินค้าของแขนกลอยู่ที่ 100% เมื่อวางอยู่ในตำแหน่งที่กำหนด และ 80% ที่การวางด้วยการกะประมาณด้วยสายตา ในส่วนของขวดซึ่งส่วนปลายบนมีขนาดเล็ก ทำให้เมื่อสินค้าถูกวางผิดลักษณะจะทำให้เซนเซอร์ตรวจจับไม่เจอในบางครั้ง แต่ในรูปแบบทรงกระบอกจะมีขนาดหัวและท้ายเท่ากัน เมื่อวางตำแหน่งคลาดเคลื่อนไป เซนเซอร์จะยังสามารถตรวจจับได้ แต่สินค้านั้นก็ต้องไม่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กเกินไปเช่นกัน

ในลักษณะของกล่อง ความสามารถในการร่วกสินค้าของแขนกลอยู่ที่ 100% เมื่อวางอยู่ในตำแหน่งที่กำหนด และ 100% ที่การวางด้วยการกะประมาณด้วยสายตา เนื่องจากกล่องด้านบนไม่มีการออกแบบให้เพรียว แต่จะมีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ และเท่ากันกับฐาน

บทที่ 5

บทวิจารณ์และสรุป

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสรุปได้ว่าในแนวแกน x จะมีความผิดพลาดเกิดขึ้น โดยค่าจะแกว่งไม่แน่นอน และแกน y จะเกิดค่าความผิดพลาดขึ้น แต่ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจะมีค่าที่ค่อนข้างคงที่ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า การให้ฐานของแขนกลอยู่กับที่และคำนวณความสูงของสินค้าเพื่อทำการรอกนั้นจะมีความผิดพลาดค่อนข้างมาก จึงควรให้แขนกลทำงานที่จุดเดียว หรือทำงานที่ค่าความสูงเดียว และเปลี่ยนไปใช้การเคลื่อนที่ในแนวแกน y ซึ่งจะเป็นงานในส่วนหนึ่งของเฟสสองอีกทีหนึ่ง

จากการทดลองการรอกสินค้าจะพบว่าความสามารถในการรอกสินค้านั้น ในแบบแรกที่ทำให้สินค้าอยู่ในลักษณะตามที่ต้องการ การรอกจะประสบผลสำเร็จเท่ากับ 97.5% โดยชนิดถุงฐานกว้าง เนื่องจากลักษณะของถุงที่ขอบด้านบนจะค่อนข้างบาง ทำให้เมื่อทำการรอกสินค้า น้ำหนักจะถูกถ่วงลงด้านฐานของถุง ซึ่งมีลักษณะคล้ายตุ๊กตาล้มลุก และจะเป็นปัญหามากขึ้นถ้าวัสดุที่ใช้ทำสินค้ามีความแข็งน้อย เช่น ผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดผ้าชนิดเติม ที่วัสดุทำมาจากพลาสติก และที่ฐานมีน้ำหนักมาก ทำให้เมื่อทำการรอกสินค้า น้ำหนักของถุงจะต้านแรงรอกและ ทำให้เมื่อดึงแขนกลับพลาสติกตรงส่วนปลายจะงอ ทำให้ไม่สามารถรอกให้ตกได้ในบางครั้ง และในผลการทดลองที่วางสินค้าโดยใช้การกะประมาณ จะให้ผลความสำเร็จลดลงอยู่ที่ ประมาณ 87.5% โดยเฉพาะในลักษณะของขวด ซึ่งส่วนปลายบนมีขนาดเล็ก ทำให้เมื่อสินค้าถูกวางผิดลักษณะจะทำให้เซนเซอร์ตรวจจับไม่เจอในบางครั้ง แต่ผลโดยรวมแล้วความเที่ยงตรงของแขนกลอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ

5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

1. การทำงานแบบ Open-loop ไม่สามารถบ่งบอกได้ว่า ณ ที่จุดปลายของแขนกลที่เคลื่อนที่ไปมีสินค้าอยู่หรือไม่ แก้ไขโดยการติดตั้งเซนเซอร์เพื่อตรวจจับการคงอยู่ของสินค้าที่ปลายด้านล่างของแขนกล เพื่อที่จะสามารถแบ่งกรณีความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ ว่าเป็นที่ตัวแขนกล หรือชั้นวางสินค้าที่ไม่ได้รับการเติมสินค้าลงไป

2. ชั้นส่วนทางกลของตัวมอเตอร์มีความผิดพลาด ทำให้แขนกลไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ไปยังจุดที่ต้องการได้ แก้ไขโดยการทดสอบและเลือกค่าองศาของตัวมอเตอร์ที่มีความผิดพลาดน้อยที่สุด และการปรับแก้ในโปรแกรมเพื่อเพิ่ม หรือลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การตรวจจับตำแหน่งของแขนกลเมื่อทำการเคลื่อนที่ไปอยู่ในจุดที่ต้องการ และการตรวจสอบการคงอยู่ของสินค้าที่ปลายแขนกวักสินค้า นั้น ยังไม่เพียงพอต่อการตรวจสอบว่ามีสินค้าอยู่จริงหรือไม่ เนื่องจากการเกิดค่าความผิดพลาดทางกลของเซอร์โวมอเตอร์ ทำให้เกิดความผิดพลาดคลาดเคลื่อนกับจุดที่เป็นเป้าหมาย และประกอบกับระยะทำการของเซนเซอร์ตรวจจับที่ค่อนข้างสั้น ทำให้เซนเซอร์จะตรวจไม่พบวัตถุแม้ว่าวัตถุนั้นจะมีอยู่บนชั้นวางของก็ตาม แก้ไขโดยการติดตั้งเซนเซอร์เพิ่มอีกหนึ่งตัวเพื่อทำการตรวจวัดระยะระหว่างปลายแขนกับวัตถุ ซึ่งอาจจะเป็นกล้องวัดระยะทางวัตถุ เพื่อตรวจสอบว่าที่จุดสุดท้ายที่แขนกลได้เคลื่อนที่ไปนั้น อยู่ในลักษณะที่ถูกต้องหรือไม่ เกิดความผิดพลาดแบบใด เช่น ตัวปลายแขนอาจจะเลยวัตถุ หรือปลายแขนอาจจะไปไม่ถึงวัตถุ สูงหรือต่ำกว่าวัตถุมากเกินไป ซึ่งเหตุเหล่านี้จะทำให้เซนเซอร์ตรวจจับสินค้าที่ปลายแขนไม่สามารถตรวจจับได้ จากนั้นจึงส่งข้อมูลเข้าสู่ตัวควบคุม เพื่อดำเนินการปรับตำแหน่งของแขนกลต่อไปต่อไป

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการค้นคว้าพัฒนา

จากข้อสรุปข้างต้นและการแก้ไขจะพบว่า เมื่อตัวแขนกลมีค่าความผิดพลาดทางกลของมอเตอร์ ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการไปถึงจุดสุดท้ายที่ต้องการ แต่มีการทำซ้ำที่ดี ดังนั้นควรจะใช้ข้อดีของการทำซ้ำให้เป็นประโยชน์ โดยให้แขนกลทำงานที่ความสูงเดียวในการกวักสินค้า แต่ทำการปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนโดยอาศัยการเคลื่อนที่ของฐานแขนกลตามแนวตั้ง เพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนตามแนวแกน y ที่ค่อนข้างคงที่มากกว่าตามแนวแกน x ดังนั้นในการทำงานต่อไปคือการปรับแต่ตัวฐานของแขนกลให้มีความสามารถในการเคลื่อนขึ้นลง เพื่อที่จะปรับความสูงของแขนกลให้สามารถกวักของที่มีความสูงแตกต่างกัน และทั้งสินค้าที่อยู่ในชั้นต่างกันได้ และทำถาดรองรับ หรือสิ่งที่ใช้รับสินค้า ที่มีความยืดหยุ่นในการรับสินค้าที่ต่างระดับ หรือในที่ที่มีความสูงมาก เพื่อลดความเสียหายที่มีผลต่อสินค้านั้นๆ และติดตั้งเซนเซอร์เพื่อตรวจสอบในกรณีที่ไม่สามารถกวักสินค้านั้นๆ ให้ตกลงมาได้ เพื่อที่จะให้ดำเนินการปรับพารามิเตอร์เพื่อกวักสินค้านั้นใหม่ หรือแจ้งสัญญาณให้ผู้ใช้งานสามารถรับรู้ได้

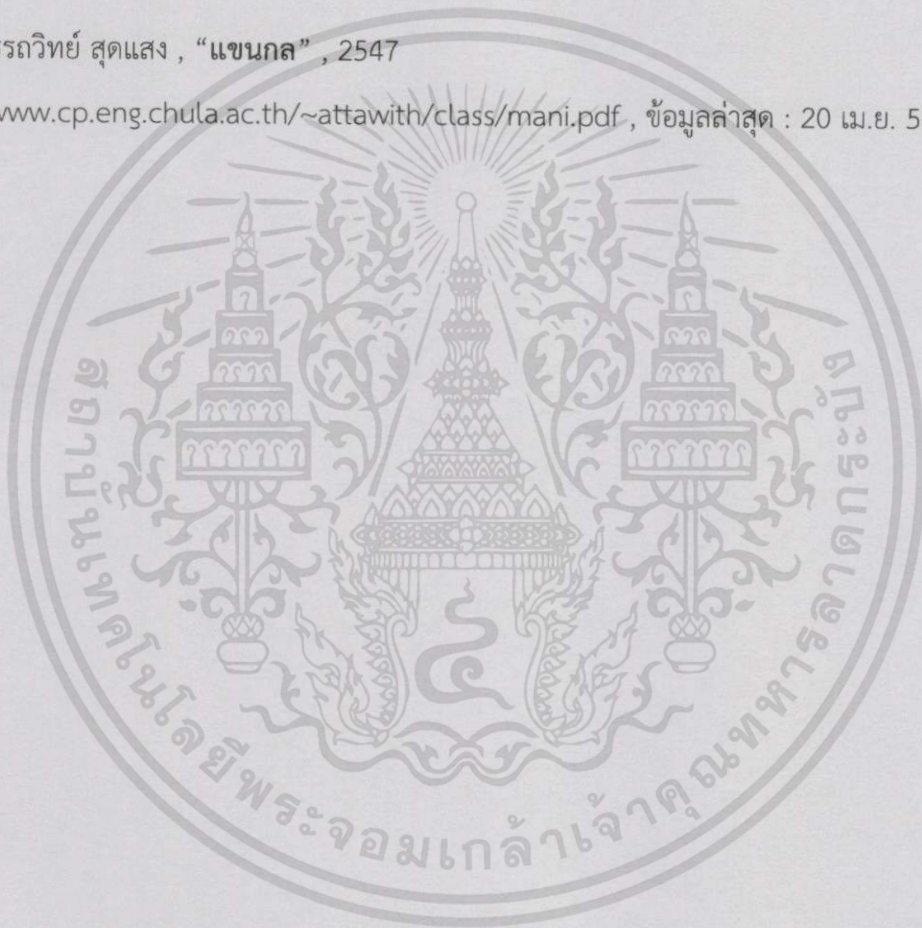
เอกสารอ้างอิง

- [1] Jong-Hwan Kim, Eric T Matson, Hyun Myung, Peter Xu, “Robot Intelligence Technology and Applications 2012: An Edition of the Presented Papers from the 1st International Conference on Robot Intelligence Technology and Applications” , 2555

books.google.co.th/books?isbn=3642373747 , ข้อมูลล่าสุด : 20 เม.ย. 57

- [2] อรรถวิทย์ สุดแสง , “แขนกล” , 2547

www.cp.eng.chula.ac.th/~attawith/class/mani.pdf , ข้อมูลล่าสุด : 20 เม.ย. 57

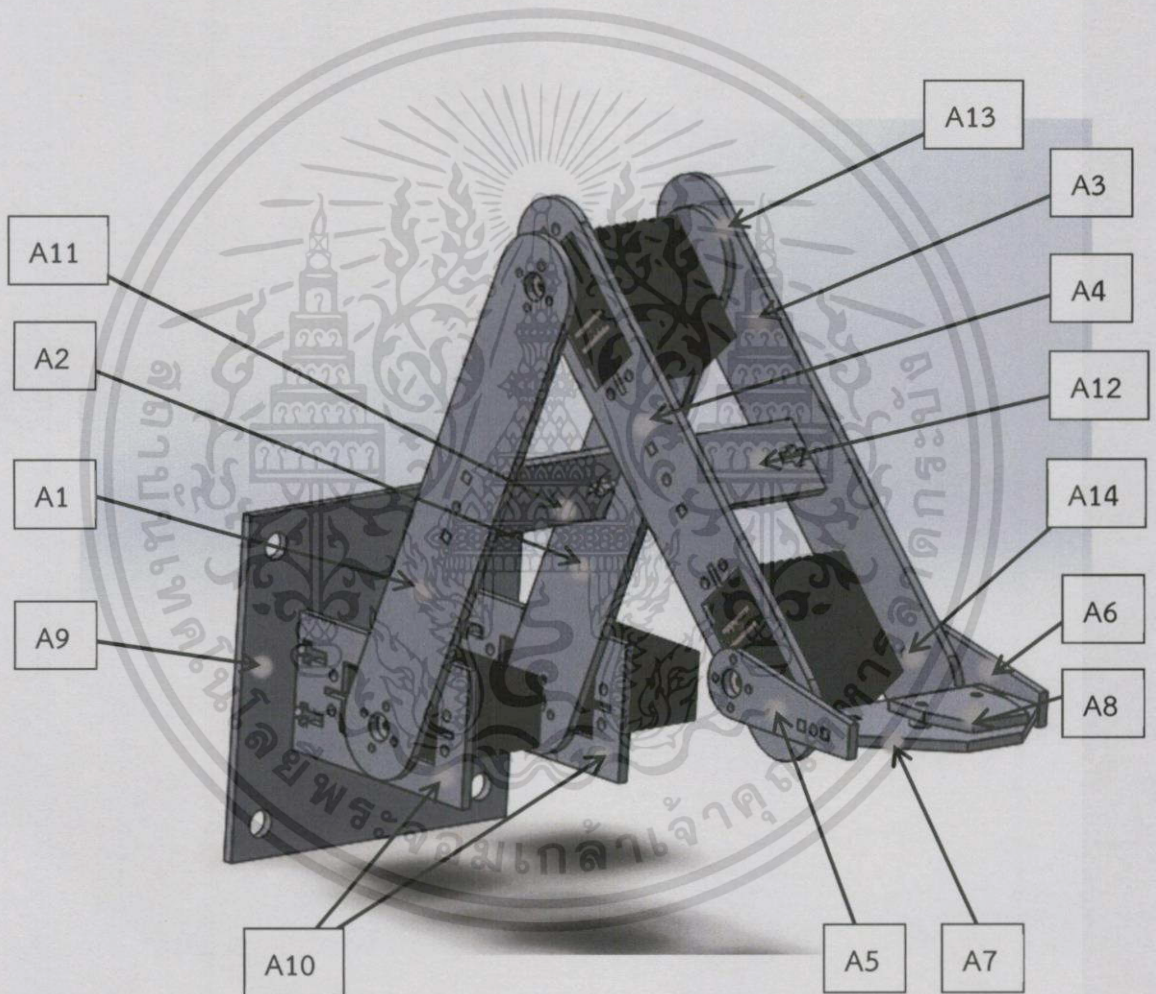




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

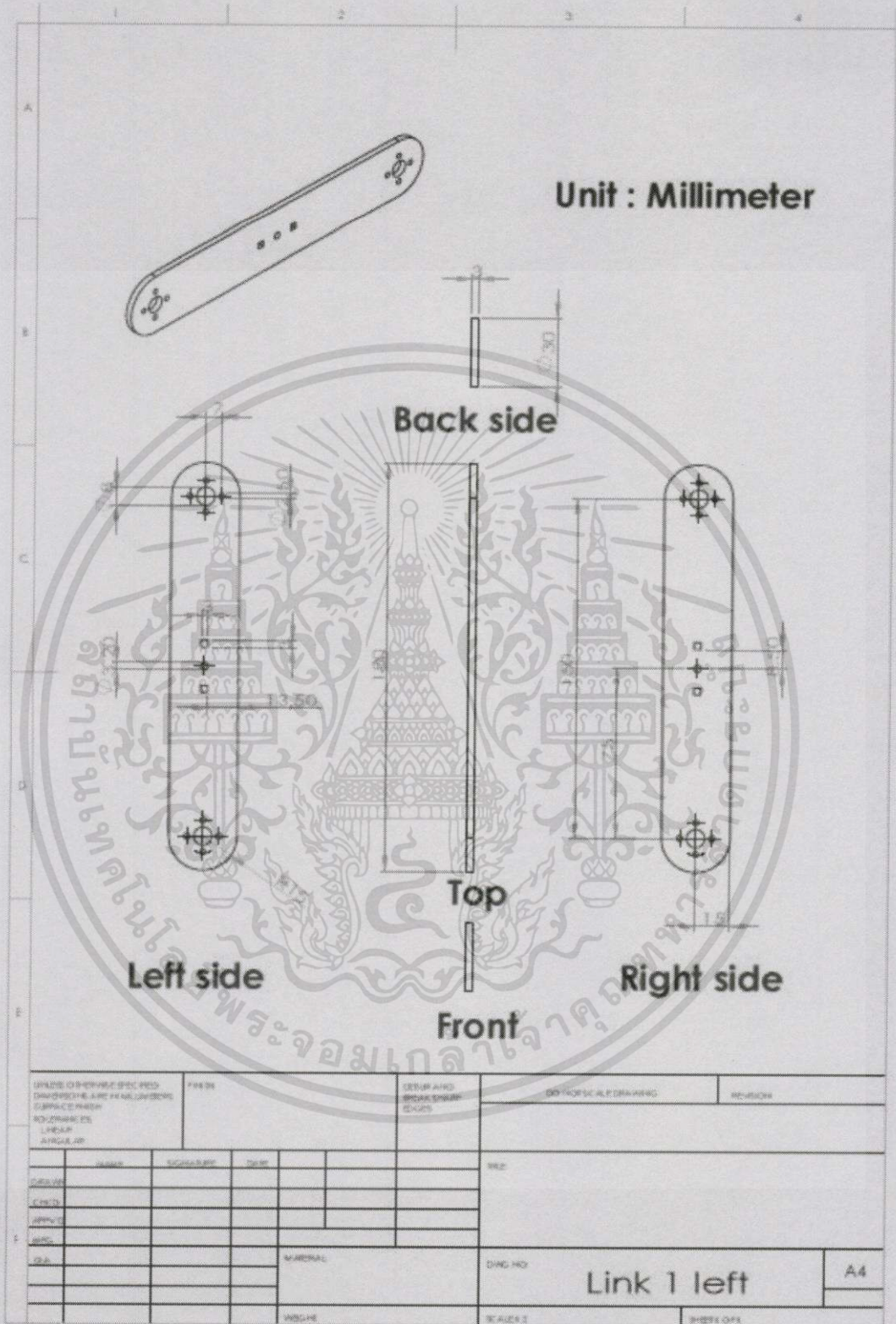
ภาคผนวก

แบบแปลนของแขนกล



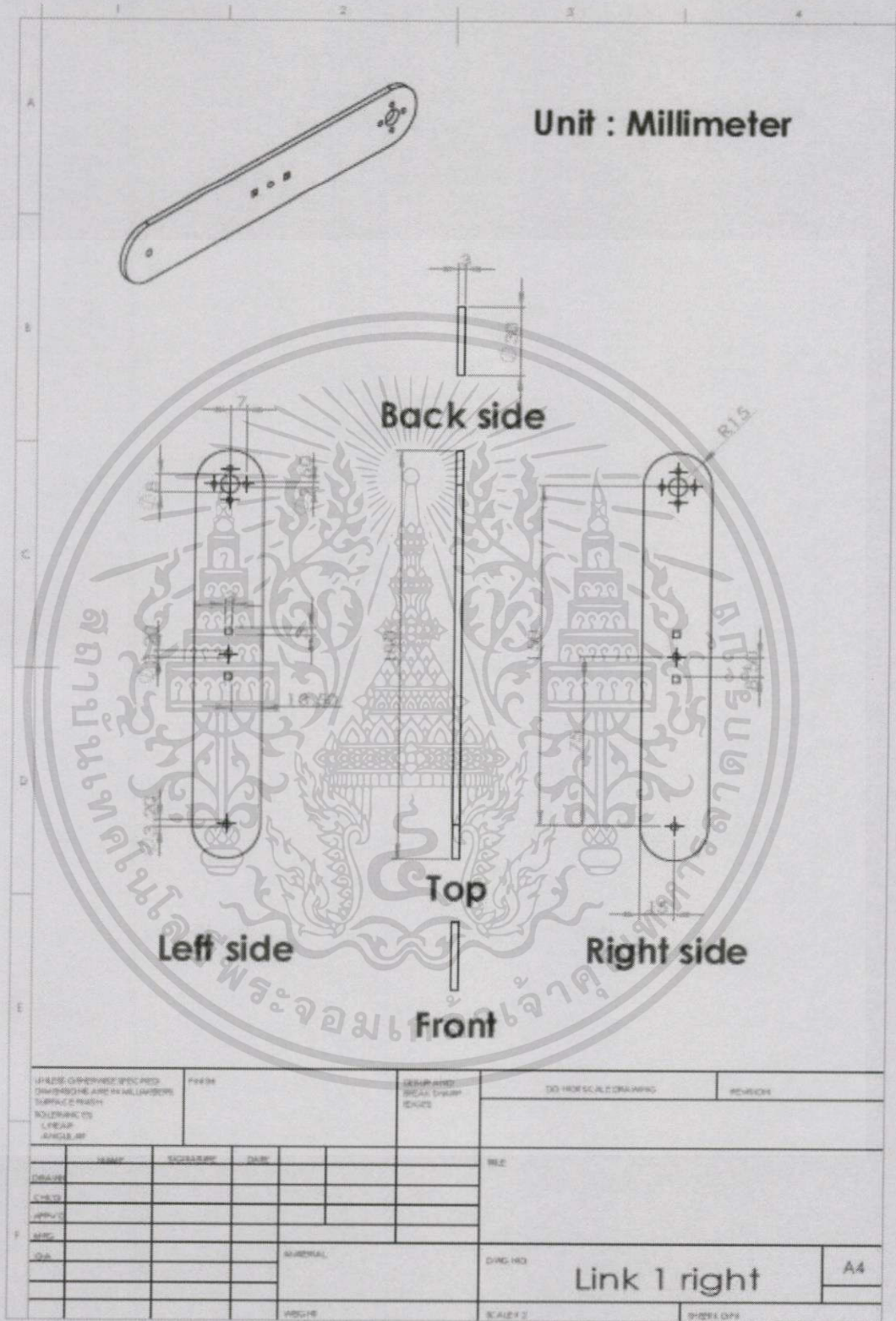
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นส่วน A1



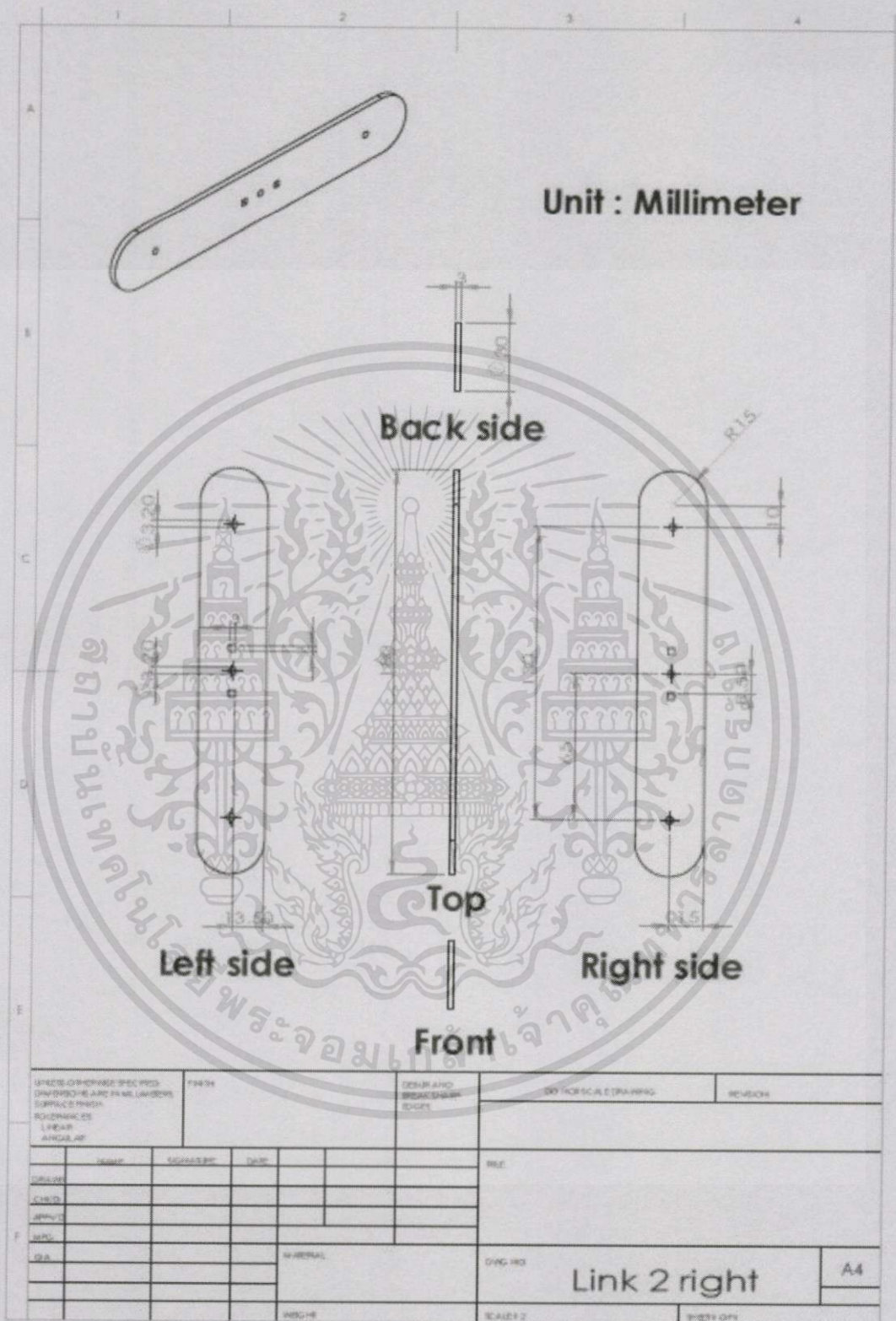
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นส่วน A2



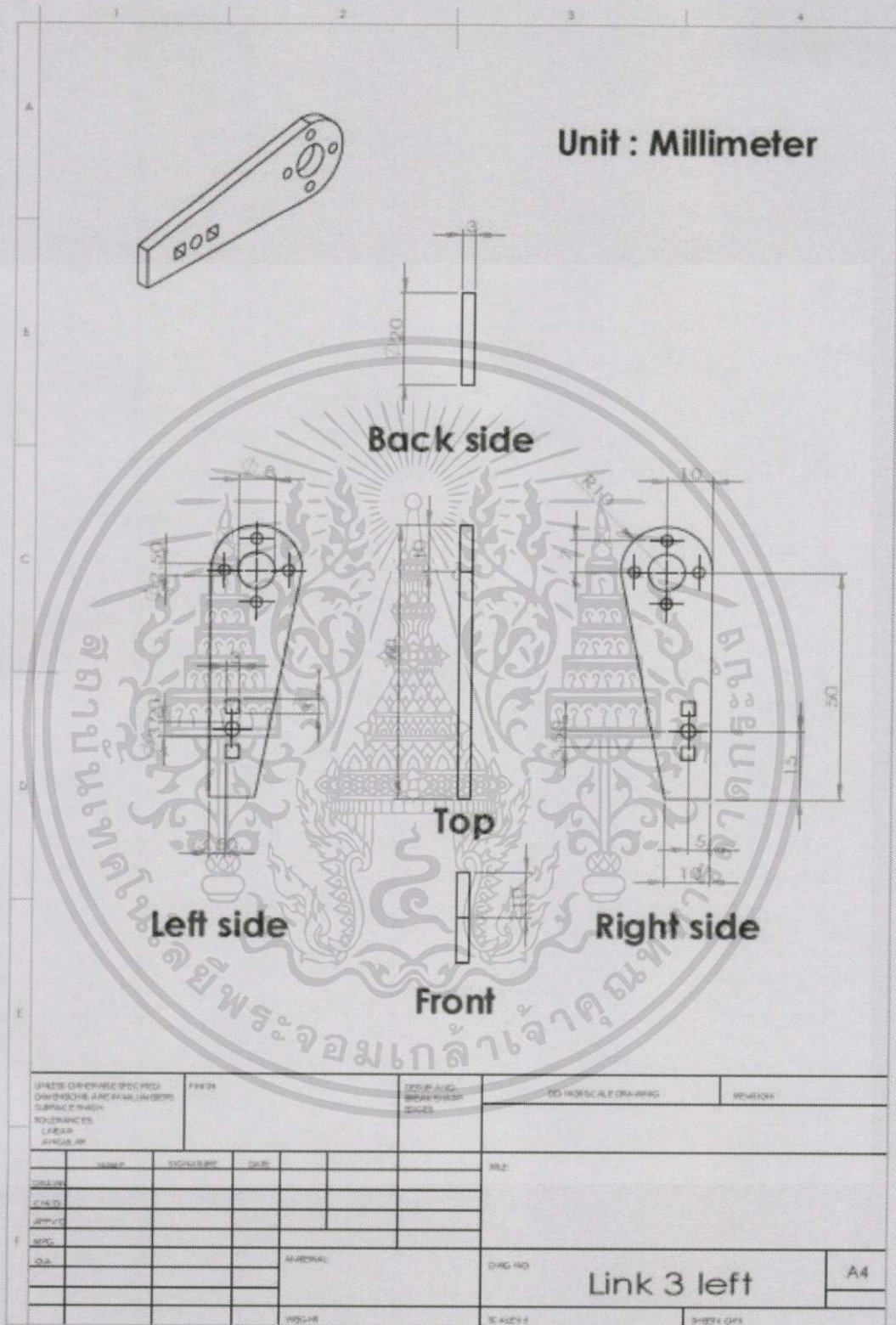
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นส่วน A3



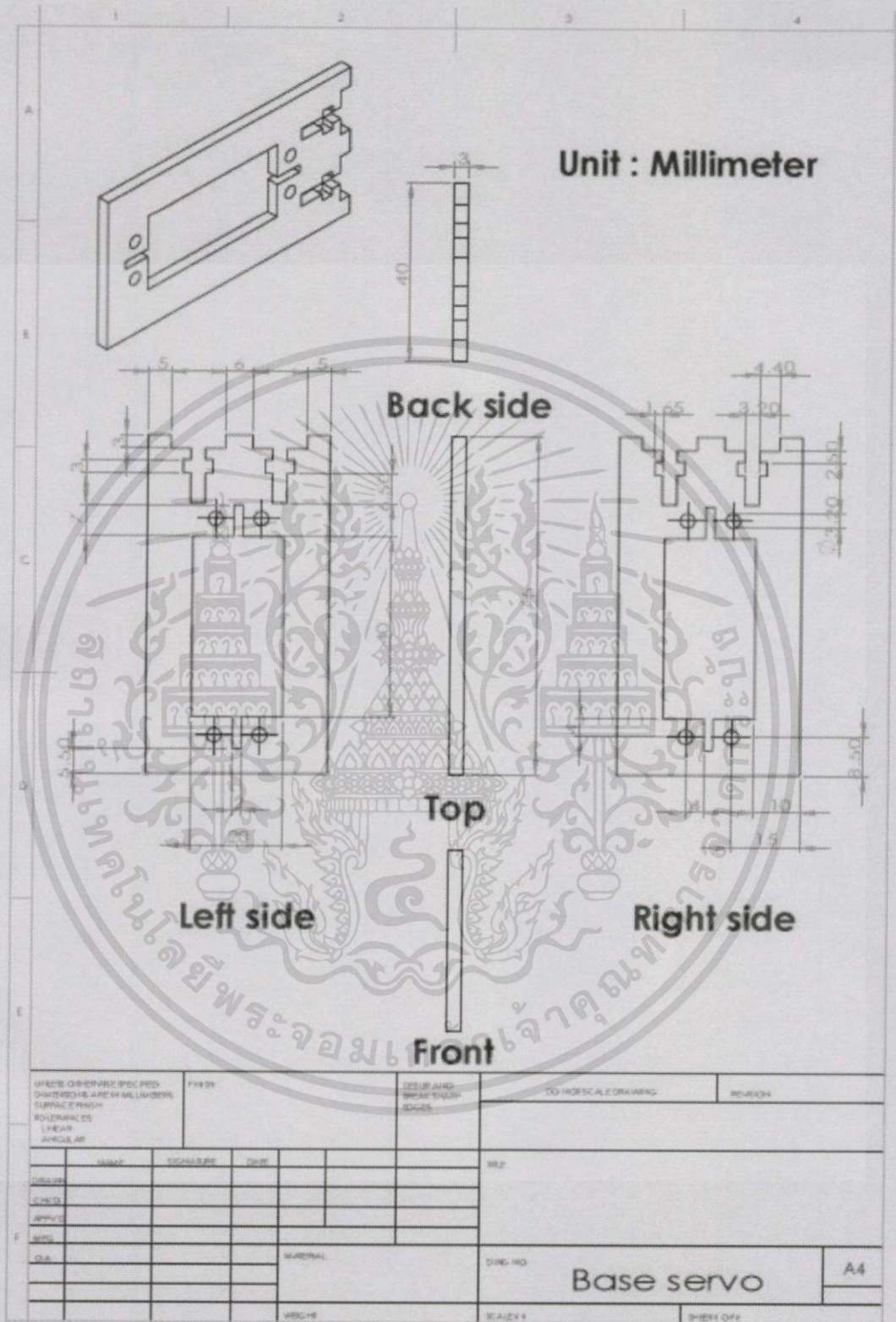
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นส่วน A5



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นส่วน A10

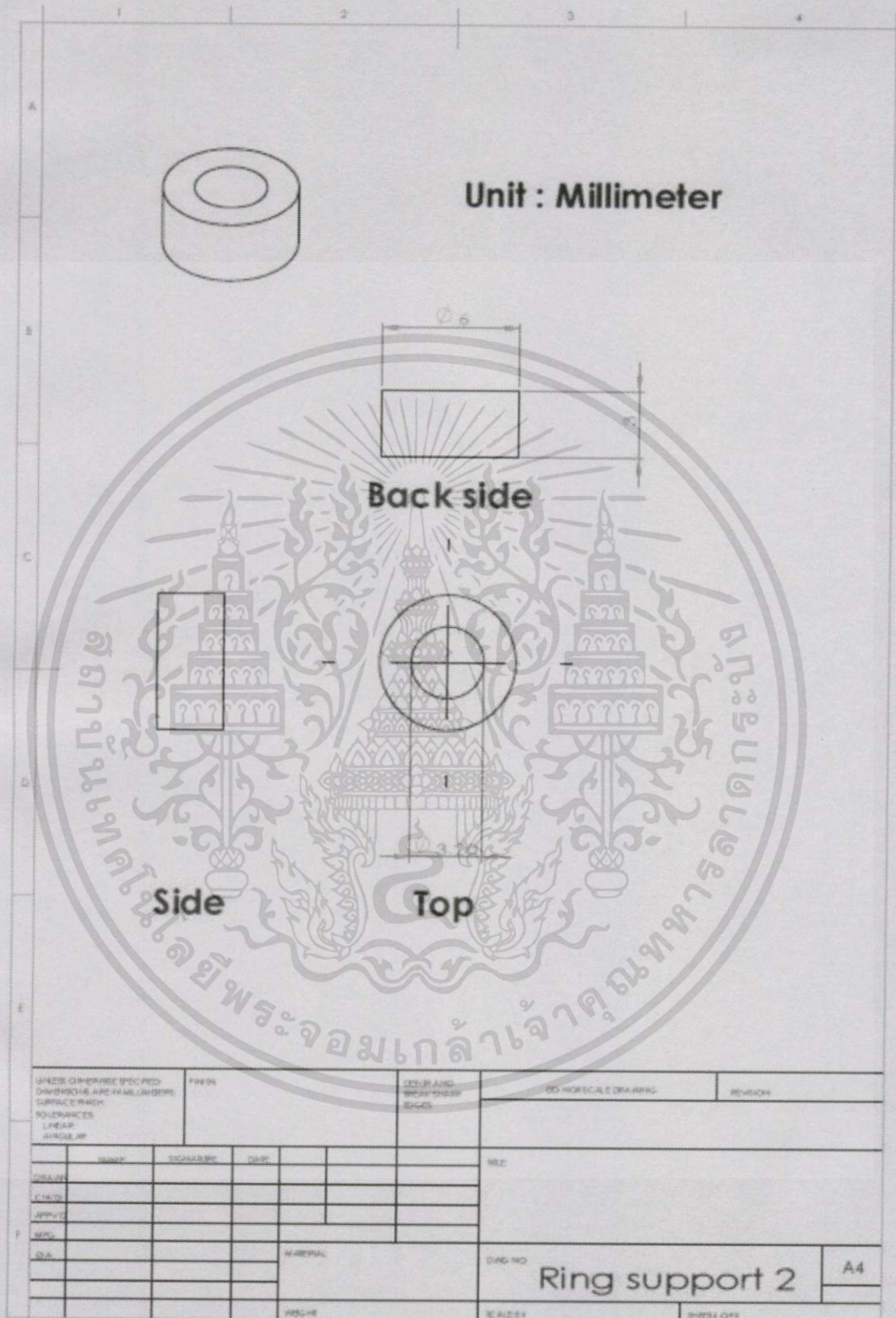


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นส่วน A13

1		2		3		4	
A							
						Unit : Millimeter	
B							
C							
D							
E							
F							
G							
H							
I							
J							
K							
L							
M							
N							
O							
P							
Q							
R							
S							
T							
U							
V							
W							
X							
Y							
Z							
AA							
AB							
AC							
AD							
AE							
AF							
AG							
AH							
AI							
AJ							
AK							
AL							
AM							
AN							
AO							
AP							
AQ							
AR							
AS							
AT							
AU							
AV							
AW							
AX							
AY							
AZ							
BA							
BB							
BC							
BD							
BE							
BF							
BG							
BH							
BI							
BJ							
BK							
BL							
BM							
BN							
BO							
BP							
BQ							
BR							
BS							
BT							
BU							
BV							
BW							
BX							
BY							
BZ							
CA							
CB							
CC							
CD							
CE							
CF							
CG							
CH							
CI							
CJ							
CK							
CL							
CM							
CN							
CO							
CP							
CQ							
CR							
CS							
CT							
CU							
CV							
CW							
CX							
CY							
CZ							
DA							
DB							
DC							
DD							
DE							
DF							
DG							
DH							
DI							
DJ							
DK							
DL							
DM							
DN							
DO							
DP							
DQ							
DR							
DS							
DT							
DU							
DV							
DW							
DX							
DY							
DZ							
EA							
EB							
EC							
ED							
EE							
EF							
EG							
EH							
EI							
EJ							
EK							
EL							
EM							
EN							
EO							
EP							
EQ							
ER							
ES							
ET							
EU							
EV							
EW							
EX							
EY							
EZ							
FA							
FB							
FC							
FD							
FE							
FF							
FG							
FH							
FI							
FJ							
FK							
FL							
FM							
FN							
FO							
FP							
FQ							
FR							
FS							
FT							
FU							
FV							
FW							
FX							
FY							
FZ							
GA							
GB							
GC							
GD							
GE							
GF							
GG							
GH							
GI							
GJ							
GK							
GL							
GM							
GN							
GO							
GP							
GQ							
GR							
GS							
GT							
GU							
GV							
GW							
GX							
GY							
GZ							
HA							
HB							
HC							
HD							
HE							
HF							
HG							
HH							
HI							
HJ							
HK							
HL							
HM							
HN							
HO							
HP							
HQ							
HR							
HS							
HT							
HU							
HV							
HW							
HX							
HY							
HZ							
IA							
IB							
IC							
ID							
IE							
IF							
IG							
IH							
II							
IJ							
IK							
IL							
IM							
IN							
IO							
IP							
IQ							
IR							
IS							
IT							
IU							
IV							
IW							
IX							
IY							
IZ							
JA							
JB							
JC							
JD							
JE							
JF							
JG							
JH							
JI							
JJ							
JK							
JL							
JM							
JN							
JO							
JP							
JQ							
JR							
JS							
JT							
JU							
JV							
JW							
JX							
JY							
JZ							
KA							
KB							
KC							
KD							
KE							
KF							
KG							
KH							
KI							
KJ							
KK							

ชิ้นส่วน A14



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้