

การออกแบบและจำลองหุ่นยนต์ 6 แกน เฉพาะส่วน 3 แกนบน  
DESIGN AND SIMULATION OF INDUSTRIAL ROBOT'S  
LOWER ARM

นางสาวเพ็ญพักตร์ สุขทวี  
MS.PENPAK SUKKAWEE  
นางสาวสุพรรณษา ไตรโสสม  
MS.SUPANSA TRAISOM

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

การออกแบบและจำลองหุ่นยนต์ 6 แกน เฉพาะส่วน 3 แกนบน

DESIGN AND SIMULATION OF INDUSTRIAL ROBOT'S  
LOWER ARM

นางสาวเพ็ญพักตร์ สุขกวี

MS.PENPAK SUKKAWEE

นางสาวสุพรรณษา ไตรโสม

MS.SUPANSA TRAISOM

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

DESIGN AND SIMULATION OF INDUSTRIAL ROBOT'S  
LOWER ARM

MS.PENPAK SUKKAWEE

MS.SUPANSA TRAISOM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2014

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท

การออกแบบและจำลองหุ่นยนต์ 6 แกน เฉพาะส่วน 3 แกนบน  
DESIGN AND SIMULATION OF INDUSTRIAL ROBOT'S  
LOWER ARM

นักศึกษา

นางสาวเพ็ญพักตร์ สุขกวี รหัสประจำตัว 54010959  
นางสาวสุพรรณษา ไตรโสม รหัสประจำตัว 54011406

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท



(ดร. พลชัย โชติปราชญ์กุล)

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การออกแบบและจำลองหุ่นยนต์ 6 แขน เฉพาะส่วน 3 แขนบน
นักศึกษา	นางสาวเพ็ญพักตร์ สุขกวี นางสาวสุพรรณษา ไตรโสม
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ดร. พลชัย โชติปราชญกุล

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ โครงสร้าง ส่วนประกอบ และ รูปแบบการทำงาน ของหุ่นยนต์ชนิด Articulated Arm (Revolute) หรือ แขนกล โดยเฉพาะส่วนสามแกนบน การออกแบบแขนกลโดยใช้โปรแกรม Solidworks® ในการออกแบบแขนกลจะประกอบด้วย 3 แขนหมุนซึ่งแต่ละแกนจะมีชุดขับเคลื่อนชนิดเฟืองวงแหวน (Planetary Gear Set), เฟืองบีเวล (Bevel Gear) และ เซอร์โวมอเตอร์ รุ่น Faulhaber Moteren 2342L012CR, M124-2002 134 ประกอบกันในโครงแขนกล (Links) ที่ออกแบบและนำทั้ง 3 ชุดมาต่ออนุกรมกัน โดยกำหนดขนาดความสูงหุ่นยนต์ไว้ที่ 1.2 เมตร และ น้ำหนักยกที่ 2 กิโลกรัม รวมไปถึงจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลดังกล่าวโดยใช้โปรแกรม MATLAB® โดยใช้ MATLAB® ประมวลผลข้อมูลในเมตริกซ์แสดงลักษณะการเคลื่อนที่บนพิกัดสามมิติ และคำนวณค่าความปลอดภัยในการออกแบบการรองรับภาระงานของหุ่นยนต์ (Pay Load) ที่มอเตอร์จะต้องมีค่าแรงบิดมากเกินพอต่อการยกภาระงานนั้นให้เคลื่อนที่ในความเร็วที่กำหนดไว้ โดยผลที่ได้จะระบุถึงประสิทธิภาพการรับน้ำหนักในแต่ละท่าทางการเคลื่อนที่ของแขนกลภายในพื้นที่การทำงานที่เป็นไปได้ทั้งหมดผลที่ได้จากการทดลองให้ค่าความปลอดภัยที่น้อยสุดตามต้องการ

Thesis Title	Design and Simulation of Industrial Robot's Lower Arm
Student	MS. Penpak Sukkawee MS. Supansa Traisom
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Academic Year	2014
Thesis Advisor	Dr. Pholchai Chotiprayanakul

### ABSTRACT

This thesis proposes to present a design of an Articulated Robot Arm especially in lower arm part. Solidworks® is used to drafting the robot's assembly drawing. The robot has 3 axes revolute joints and each joint of the robot consists of a gear set and a servo motor. Gear sets are designed as planetary gear for the twist-arm joint and differential gear (combination of bevel gears) for the wrist joint of the robot. Servo Motors are the Faulhaber Moteren model 2342L012CR. Links are design to join these joints together as a serial chain linkage. The robot is expected at 1.2 meters height, and 2 kilogram payload. Simulation of the designed robot using MATLAB® is created to imitate the movement of the robot arm. The virtual model of the robot is used to present the 3D workspace of the robot and analyze force-torque in every joint. The result of the simulation shows safety factor of the robot lifting capability or payload that is sufficient to hold the desired payload.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การออกแบบและจำลองหุ่นยนต์ 6 แกน เฉพาะส่วน 3 แกนบนฉบับนี้สำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดีเพราะได้รับการสนับสนุนและคำแนะนำของอาจารย์ทุกท่านเป็นอย่างดีตลอดมา ตั้งแต่เริ่มต้นจนปริญญาานิพนธ์นี้สำเร็จ กลุ่มผู้จัดทำโครงการขอขอบคุณบุคคลต่างๆดังต่อไปนี้

ดร.พลชัย โขติปรายนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ผู้จัดทำโครงการขอกราบขอบพระคุณ เป็นอย่างสูง สำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ สำหรับความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือและความเอาใจใส่ในทุกๆด้านตลอดเวลาที่ผ่านมา

ผศ.ดร.วิภู หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ผู้จัดทำโครงการขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับคำแนะนำดี ๆ และขอบคุณที่ให้ความช่วยเหลือทุก ๆด้านเสมอมา

ผศ.ดร.สรรพลสิทธิ์ ลิ่มนรรัตน์ ผู้จัดทำโครงการขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับบรรยากาศดี ๆ ที่มอบให้ทุกที่ทุกเวลา

รศ.ดร.สิทธิพร พิมพ์สกุล ผู้จัดทำโครงการขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับคำแนะนำดี ๆ ที่มอบให้ตลอดระยะเวลาในการศึกษาปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

ดร.ชาวลิต หามนตรี ผู้จัดทำโครงการขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับความรู้ คำแนะนำดี ๆ และความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านที่อาจารย์มอบให้เสมอมา

ขอขอบคุณอาจารย์ท่านอื่น ๆ ที่มีได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ที่มีได้ เป็นเพียงแต่สถานศึกษาที่ให้แต่ทักษะทางด้านวิชาการ แต่ยังเป็นเสมือนบ้านหลังที่สองของพวกเราอีกด้วย

ขอขอบคุณพ่อ แม่ พี่ น้องญาติสนิท และมิตรสหาย เป็นอย่างสูง ในการให้โอกาสด้านการศึกษา ให้ กำลังใจ และความช่วยเหลือทุกประการตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณหนังสือทุกเล่มที่ให้ในการศึกษาข้อมูลในการค้นคว้าในการทำปริญญาานิพนธ์ และแหล่งความรู้ทุกแหล่งอันทรงคุณค่าสำหรับทำโครงการนี้

นางสาวเพ็ญพัทธ์ สุขทวี

นางสาวสุพรรณษา ไตรโสม

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
<b>บทที่ 1    บทนำ</b>	
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงงาน.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2    ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 ที่มาและประวัติศาสตร์ของหุ่นยนต์.....	3
2.2 ประเภทของหุ่นยนต์.....	4
2.3 องค์ประกอบของหุ่นยนต์.....	5
2.4 พื้นฐานทางคณิตศาสตร์ในการศึกษาวิชาหุ่นยนต์.....	9
2.5 กลศาสตร์การเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์.....	11
2.6 การวิเคราะห์ด้านแรง.....	19
2.7 สถิตยศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Statics).....	21
2.8 พลศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Dynamics).....	23
<b>บทที่ 3    การออกแบบและวิธีการดำเนินงาน</b>	
3.1 ศึกษารูปแบบการทำงานและโครงสร้างหุ่นยนต์.....	28

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2 เขียนแบบโดยโปรแกรม SolidWorks®.....	28
3.3 การเขียนแบบเพื่อแสดงรายละเอียดของแต่ละชิ้นส่วน.....	33
3.4 เขียนโปรแกรม MATLAB® เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์.....	34
<b>บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน</b>	
4.1 ผลจากการออกแบบแขนกล.....	36
4.2 ผลจากการวิเคราะห์ความสามารถในการรับภาระงาน.....	39
<b>บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน</b>	
5.1 สรุปผล.....	42
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	43
เอกสารอ้างอิง.....	44
ภาคผนวก ก.....	ผก1
ภาคผนวก ข.....	ผข1

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 5.1 สรุปผลคุณสมบัติของแขนกลเฉพาะส่วนสามแกนบน.....	42

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1	แขนหุ่นยนต์แบบพับและปริภูมิการทำงาน.....	4
รูปที่ 2.2	แผนภาพแนวคิดของหุ่นยนต์ที่มีโครงสร้างแบบโซ่เปิด.....	5
รูปที่ 2.3	ก้านต่อและข้อต่อทั่วไป.....	6
รูปที่ 2.4	สัญลักษณ์ข้อต่ออย่างง่ายของหุ่นยนต์.....	7
รูปที่ 2.5	แผนภาพจลนศาสตร์ของข้อมือแบบทรงกลมที่มีจำนวนองศาเสรีเท่ากับ3.....	7
รูปที่ 2.6	ตัวจับแบบง่ายของหุ่นยนต์บริการ (service robot) PR2 ที่พัฒนาขึ้น โดยบริษัทวิลโลว์ การาจ(Willlow Garage).....	8
รูปที่ 2.7	ความสัมพันธ์ของระบบพิกัด 3 แบบ.....	9
รูปที่ 2.8	ระบบพิกัดคาร์ทีเซียนในระบบสามมิติ.....	10
รูปที่ 2.9	การบอกปริมาณเวกเตอร์.....	11
รูปที่ 2.10	ตำแหน่งของจุด P.....	13
รูปที่ 2.11	axis rotation about Z axis.....	14
รูปที่ 2.12	แรงและโมเมนต์ของก้านต่อ (link) i.....	20
รูปที่ 3.1	DC servo motor.....	29
รูปที่ 3.2	แบบเฟืองชนิดวงแหวนสำหรับข้อต่อที่ 4.....	31
รูปที่ 3.3	แบบเฟืองชนิดปีเวลสำหรับข้อต่อที่ 5 และ 6.....	33
รูปที่ 3.4	Lower Arm Part.....	34
รูปที่ 3.5	การจำลองหุ่นยนต์.....	35
รูปที่ 4.1	Design of 6-axis Industrial Robot.....	36
รูปที่ 4.2	Designing of 6-axis Industrial Robot (Lower Arm Part).....	37
รูปที่ 4.3	โครงสร้างด้านในแขนกลและตำแหน่งขององค์ประกอบของแขนกลต่างๆ.....	38
รูปที่ 4.4	Workspace of 6 Axis Robot Arm.....	39
รูปที่ 4.5	Safety Factor of Joint 4.....	40
รูปที่ 4.6	Safety Factor of Joint 5.....	40

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.7 Safety Factor of Joint 6.....	41

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญของโครงการ

ทั้งปัจจุบันและในอนาคตพบว่าหุ่นยนต์มีบทบาทในด้านอุตสาหกรรมมากขึ้นทำให้มีการนำเทคโนโลยีของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเข้ามาใช้ จึงได้กระบวนการทำงานและผลิตภัณฑ์ที่มีความสม่ำเสมอเป็นมาตรฐานเดียวกัน การทำงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจะเลียนแบบร่างกายมนุษย์ เฉพาะส่วนของร่างกายที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเท่านั้น คือช่วงแขนมนุษย์ หรือที่เรียกว่า “แขนกล” ซึ่งก็คือหุ่นยนต์อุตสาหกรรม โดยจะทำงานแทนมนุษย์ในงานต่างๆ โดยงานที่มีการนำแขนกลมาใช้งานหลากหลายมากที่สุด คือ งานประกอบและขนย้ายสิ่งของ โดยมุ่งเน้นการทำงานต่างๆแทนมนุษย์ตามความเหมาะสมและตามความต้องการในกระบวนการผลิต ด้วยเหตุผลนี้จึงได้มีการศึกษาแขนกล 6 แกน เฉพาะส่วน 3 แกนบน (Lower Arm) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการเข้าถึงชิ้นงานในมุมที่ต่างกันไปของตำแหน่งการวางตัวของชิ้นงานทำให้การใช้งานได้หลากหลาย เพื่อเป็นแบบอย่างในการพัฒนาแขนกลด้วยสัดส่วนมาตรฐานใกล้เคียงมนุษย์โดยมีการ Simulation เพื่อจำลองการเคลื่อนที่และการเคลื่อนไหวไปยังตำแหน่งที่ได้โปรแกรมไว้

### 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาหลักโครงสร้าง หลักการทำงาน และ ส่วนประกอบต่างๆของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 6 แกน เฉพาะส่วน 3 แกนบน (Lower Arm) ที่เป็นการหมุนข้อมือในทิศทางต่างกัน
2. เพื่อศึกษาการเขียนโปรแกรมการสั่งงานและควบคุมการเคลื่อนไหวเพื่อนำไปใช้เขียนคำสั่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 6 แกน เฉพาะส่วน 3 แกนบน (Lower Arm)

### 1.3 ขอบเขตของโครงการ

1. ศึกษาและออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 6 แกน เฉพาะส่วน 3 แกนบน (Lower Arm) ด้วยการใช้โปรแกรม Solidworks®
2. ลักษณะโครงสร้างหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 6 แกน เฉพาะส่วน 3 แกนบน (Lower Arm) มีสัดส่วนที่อ้างอิงตามมนุษย์และเป็นมาตรฐานในงานสายงานอุตสาหกรรม

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับต้นแบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 6 แกน เฉพาะแกนส่วน 3 แกนบน (Lower Arm) ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม
2. ได้ระบบคำสั่งที่สามารถควบคุมตำแหน่งการหมุนข้อมือโดยเซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ
3. ได้รับต้นแบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 6 แกน เฉพาะแกนส่วน 3 แกนบน (Lower Arm)
4. สามารถนำแบบหุ่นยนต์ที่ออกแบบไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาทางด้านการศึกษาและการวิจัยระบบควบคุมหุ่นยนต์ต่อไปในอนาคต

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ที่มาและประวัติศาสตร์ของหุ่นยนต์ (ผศ.ดร.พฤทธิกร สมิตไมตรี:2551)

คำว่า หุ่นยนต์ หรือ robot ถูกใช้ครั้งแรกโดยนักเขียนบทละครชาวเช็กชื่อ คาร์ล คาปาก (Karel Capak) มีชีวิตอยู่ในช่วงปี ค.ศ.1890-1938 เขาใช้คำว่า robot ซึ่งเป็นภาษาเช็ก เพื่อนเรียกแรงงานหรือทาส และเริ่มเป็นที่รู้จักจากละครเรื่อง Rossum's Universal Robots (R.U.R) จัดแสดง ณ กรุงปราก ประเทศเช็กโกสโลวาเกีย เมื่อปี ค.ศ. 1921 คำว่า "robotics" ถูกใช้ครั้งแรกในเรื่องสั้นชื่อ Runaround เมื่อปี ค.ศ. 1942 โดย ไอแซค อสิมอฟ (Isaac Asimov) หลังสงครามโลกครั้งที่ 2 นักประดิษฐ์และนักบริหารธุรกิจชื่อ จอร์จ ซี ดีโวล (George C. Devol) และวิศวกรชื่อ โจเซฟ เอฟ เอ็นเจลเบอร์เกอร์ (Joseph F. Engelberger) ได้พูดคุยถึงงานเขียนของไอแซค อสิมอฟ แล้วทั้งสองได้สร้างหุ่นยนต์ที่ทำงานได้จริงและประสบความสำเร็จ โจเซฟ เอฟ เอ็นเจลเบอร์เกอร์ จึงก่อตั้งบริษัทผลิตหุ่นยนต์ และจอร์จ ซี ดีโวล ได้จดสิทธิบัตร โดยให้ชื่อหุ่นยนต์ตัวแรกว่า "Unimate" ซึ่งทำให้ โจเซฟ เอฟ เอ็นเจลเบอร์เกอร์ ได้รับฉายาว่า บิดาของวิทยาการหุ่นยนต์ (Father of Robotics) หุ่นยนต์ตัวแรกถูกใช้กับเครื่องหล่อเหล็กแบบฉีดอัด โดยหุ่นยนต์ Unimate ทำหน้าที่ดึงเหล็กหล่อออกจากเครื่องหล่อและเชื่อมจุดต่างๆ เพื่อประกอบเป็นรูปร่าง ซึ่งงานเหล่านี้เป็นอันตรายต่อคน ต่อมาหุ่นยนต์ได้รับความไว้วางใจในการทำงานและสามารถลดค่าใช้จ่ายในการจ้างงานลงได้ ทำให้อุตสาหกรรมขยายตัว และ หุ่นยนต์ถูกพัฒนาจนสามารถทำงานอย่างอื่นได้อีกมากมาย

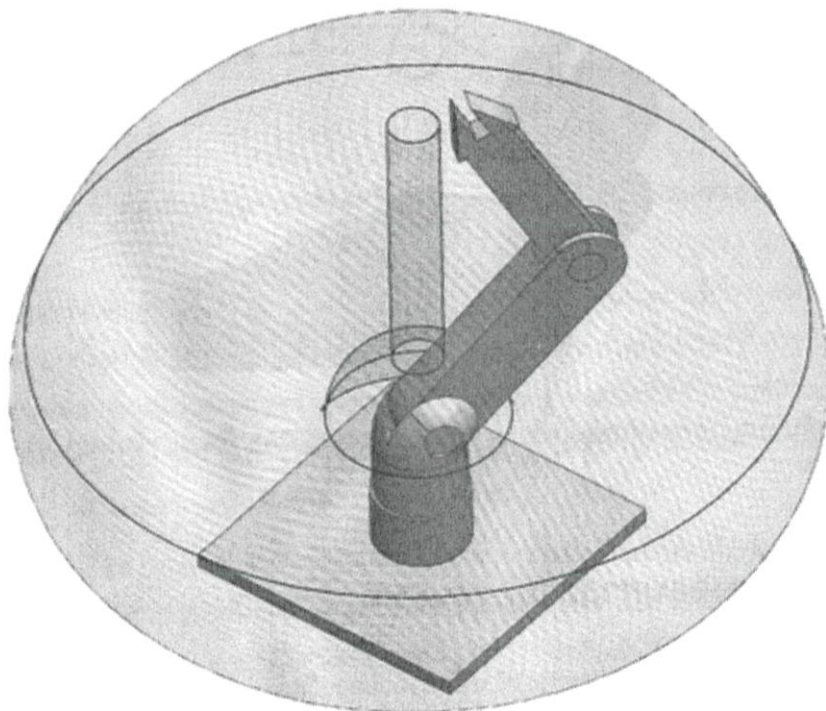
หุ่นยนต์อุตสาหกรรม (industrial robot) หรือ แขนกลอุตสาหกรรม ได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ทั้งทางด้านโปรแกรม การควบคุม กลไก และระบบขับเคลื่อน ซึ่งเพิ่มขีดความสามารถในการทำงานให้กับอุตสาหกรรมสมัยใหม่ หุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่ใช้งานปัจจุบันได้ปฏิบัติรูปแบบการทำงานอุตสาหกรรมไป หุ่นยนต์เหล่านี้ต่างจากหุ่นยนต์คล้ายมนุษย์ มันทำงานได้โดยมีเพียงแค่คอมพิวเตอร์ควบคุมแขนกลและมือจับ แต่ก็มีประโยชน์อย่างมากกับงานอุตสาหกรรม หุ่นยนต์สามารถช่วยการทำงานของมนุษย์ โดยคนงานไม่ต้องทำงานหนักที่สกปรก น่าเบื่อ และอันตราย ถึงแม้ว่าหุ่นยนต์จะเป็นสาเหตุหนึ่งของการว่างงาน แต่หุ่นยนต์ก็สร้างตำแหน่งงานใหม่ขึ้นด้วย เช่น ช่างเทคนิคหุ่นยนต์ วิศวกร นักเขียนโปรแกรมและผู้ควบคุม ประโยชน์ของหุ่นยนต์ยังรวมถึงการพัฒนาการควบคุมคุณภาพสินค้า หุ่นยนต์

อุตสาหกรรมนั้นสามารถทำงานได้ทั้งวันทั้งคืนโดยไม่ลดสมรรถนะลง ทำให้บริษัทมีอัตราการผลิตที่สูงขึ้น และสามารถลดราคาของสินค้าลงได้ จากประโยชน์ที่กล่าวมานี้ ทำให้ประเทศที่ใช้หุ่นยนต์อุตสาหกรรมในการผลิตมีข้อได้เปรียบทางเศรษฐกิจในตลาดโลก

หลังจากกลางทศวรรษที่ 90 การพัฒนาของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเริ่มลดลง แต่ยังคงมีการพัฒนาด้านปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligent) ให้กับหุ่นยนต์อย่างต่อเนื่อง และหุ่นยนต์ถูกนำมาใช้งานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น ลักษณะของหุ่นยนต์มีหลากหลายขึ้น เราจึงได้เห็น หุ่นยนต์ที่มีลักษณะคล้ายหรือเลียนแบบมนุษย์ สัตว์ หรือ รูปร่างอื่นๆ ที่มีการทำงานซับซ้อนมากกว่าหุ่นยนต์อุตสาหกรรมในยุคแรก และมีแนวโน้มที่เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น เช่น หุ่นยนต์ดูดฝุ่น

## 2.2 ประเภทของหุ่นยนต์ (พงศ์แสน พัททกษัวัชระ:2557)

หุ่นยนต์สามารถสร้างขึ้นมาด้วยการจัดเรียงของข้อต่ออย่างง่ายและก้านต่อในรูปแบบต่างๆ ทว่ากลับมีโครงสร้างทางจลศาสตร์เพียงไม่กี่รูปแบบที่ถูกนำมาใช้จริงในทางปฏิบัติ ทั้งนี้ก็ด้วยเหตุผลต่างๆ เช่น ความยากง่ายในการจัดสร้าง หรือสมบัติทางพลศาสตร์ที่พึงประสงค์ โครงสร้างทางจลศาสตร์ที่นิยมใช้ในแขนหุ่นยนต์และประเภทที่ผู้จัดทำเลือกเป็นจุดเริ่มต้นในการสร้างคือ ประเภทแขนแบบพับ (articulated arm)

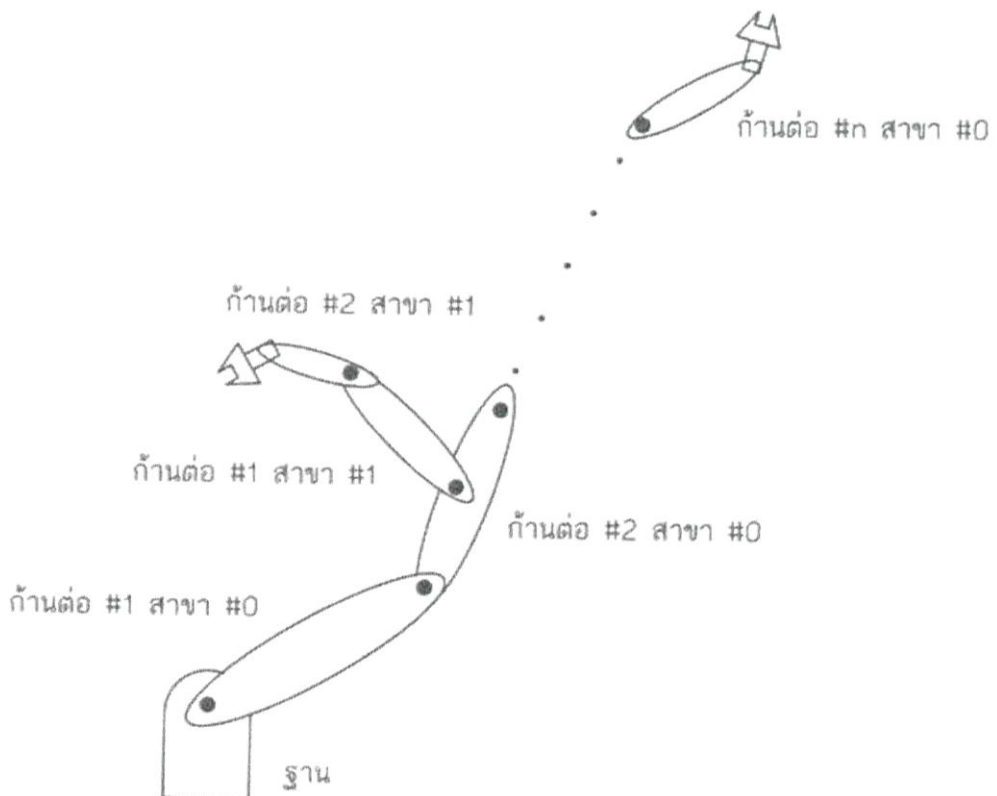


รูปที่ 2.1 แขนหุ่นยนต์แบบพับและปฏิกิริยาการทำงาน

แขนแบบพับ (articulated arm) รูปที่ 2.1 คือรูปแคด (CAD) ของแขนหุ่นยนต์แบบพับ ซึ่งเป็นแขนที่มีรูปร่างคล้ายแขนมนุษย์ (anthropomorphic arm) กล่าวคือ ก้านต่อในโครงสร้างมีการเคลื่อนไหวคร่าวๆ ดังเช่น ลำตัว (body) แขนส่วนบน (upper arm) และแขนส่วนล่าง (forearm) ของมนุษย์และข้อต่อในโครงสร้าง ทำหน้าที่คร่าวๆ ดังเช่น เอว(waist) หัวไหล่(shoulder) และข้อศอก (elbow) ของมนุษย์ จากรูปที่ 2.1 แขนแบบพับนี้มีแกนข้อต่อของหัวไหล่และข้อศอกที่ขนานกัน และตั้งฉากกับแกนข้อต่อของเอว โครงสร้างนี้มีจุดเด่นที่ปริภูมิทำงานมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับขนาดของแขน

### 2.3 องค์ประกอบของหุ่นยนต์ (พงค์แสน พิทักษ์วัชร:2557)

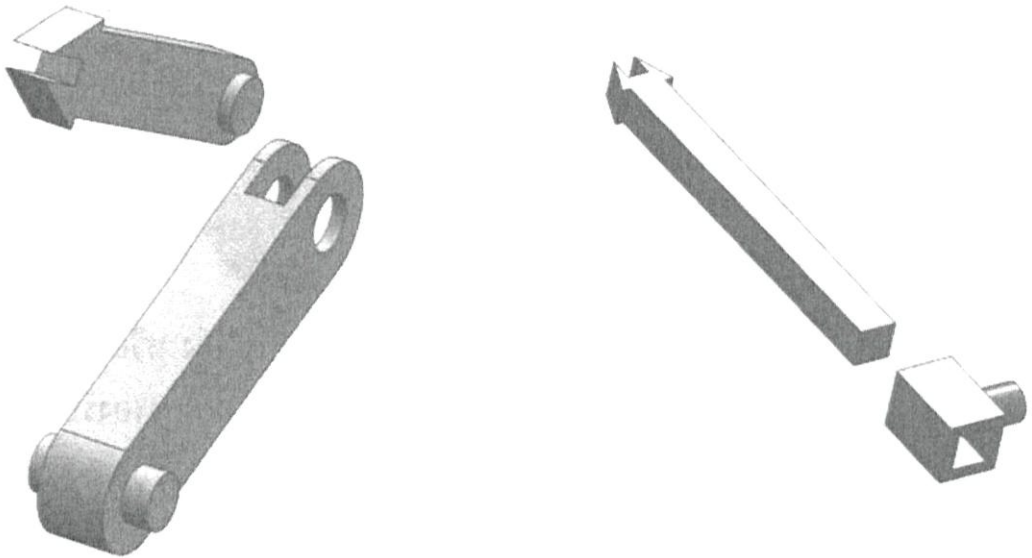
หุ่นยนต์มีโครงสร้างหลักทางกล อันประกอบขึ้นจากการต่อกันของก้านต่อ (link) ต่างๆ ด้วยข้อต่อ (joint) จากส่วนฐาน (base) ซึ่งอาจไม่อยู่หนึ่งกับที่ เรียงลำดับไปจนถึงส่วนปลายแขน (end effector) ลักษณะการต่อกันของก้านต่อเช่นนี้จะทำให้มีเส้นทางที่เชื่อมระหว่างจุด 2 จุดใดๆ บนโครงสร้างเพียงเส้นทางเดียว ซึ่งเรียกว่าโครงสร้างแบบโซ่เปิด ดังแสดงด้วยแผนภาพแนวคิดในรูปที่ 2.2 โครงสร้างเช่นนี้พบได้ทั่วไป เช่น แขนหรือขาของสิ่งมีชีวิต ต่อไปนี้จะขอกกล่าวถึงองค์ประกอบที่สำคัญของหุ่นยนต์



รูปที่ 2.2 แผนภาพแนวคิดของหุ่นยนต์ที่มีโครงสร้างแบบโซ่เปิด

### 2.3.1 ก้านต่อ (Link)

เป็นชิ้นส่วนสำคัญที่ประกอบขึ้นเป็นตัวหุ่นยนต์ โดยส่วนมากก้านต่อมักทำจากวัสดุที่แข็งแรง ดังนั้น ในการวิเคราะห์เบื้องต้นจึงนิยมสมมติให้ก้านต่อเป็นวัตถุแข็งเกร็ง ก้านต่ออาจมีรูปทรงที่แตกต่างกันไปตามการออกแบบและการใช้สอย แต่ก้านต่อทุกชิ้นจะต้องมีส่วนที่ใช้เชื่อมต่อกับก้านต่อชิ้นอื่นๆอย่างน้อย 1 จุด ดังแสดงในรูปที่ 2.3 อนึ่งก้านต่อ 2 ชิ้นที่มีการเชื่อมต่อกันจริงในทางกายภาพ แต่มิได้มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ (relative motion) กันเลย อาจถือเป็นก้านต่อชิ้นเดียวกันได้



(a) ก้านต่อและข้อต่อแบบเชิงมุม

(b) ก้านต่อและข้อต่อแบบเชิงเส้น

รูปที่ 2.3 ก้านต่อและข้อต่อทั่วไป

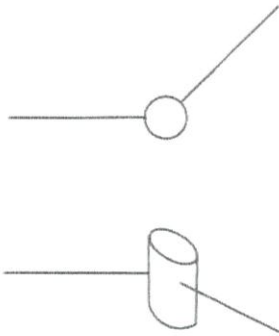
### 2.3.2 ข้อต่อ (Joint)

เกิดจากการประสานก้านต่อตั้งแต่ 2 ชิ้นเข้าด้วยกัน โดยอาจมีชิ้นส่วนเสริม เช่น เพลา หรือบุชชิง (bushing) ช่วยในการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ ในมุมมองของจลนศาสตร์ ข้อต่อเป็นชิ้นส่วนที่จำกัดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของก้านต่อ หากไม่มีข้อต่อเลย ก้านต่อ 2 ชิ้นจะไม่ถูกจำกัดการเคลื่อนที่ และสามารถเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของก้านต่อ หากไม่มีข้อต่อเลย ก้านต่อ 2 ชิ้นจะไม่ถูกจำกัดการเคลื่อนที่ และสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ในอีกด้านหนึ่งข้อต่ออาจจะจำกัดการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของก้านต่ออย่างสมบูรณ์ เช่น ข้อต่อจากการเชื่อมก้านต่อเข้าด้วยกัน ข้อต่อที่มักพบทั่วไปในหุ่นยนต์มักเป็นข้อต่ออย่างง่าย (simple joint) ซึ่งเป็นข้อต่อที่จำกัดจำนวนองศาเสรีของการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ จาก 6 ลดลงเหลือ 1 (single degree of freedom)

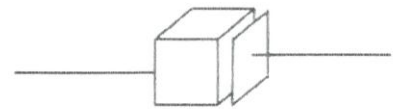
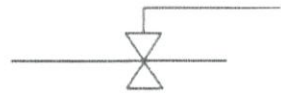
ในบรรดาข้อต่ออย่างง่าย ข้อต่อแบบเชิงมุม (revolute joint ย่อด้วยตัวอักษร R) และข้อต่อแบบเชิงเส้น (prismatic joint ย่อด้วยอักษร P) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 เป็นข้อต่อที่มีการใช้งานมากที่สุด

ตามลำดับเนื่องด้วยความง่ายในการออกแบบและจัดสร้าง สัญลักษณ์ของข้อต่อทั้ง 2 ชนิดที่นิยมใช้ในแผนภาพกลศาสตร์ของโครงสร้างหุ่นยนต์ ถูกแสดงในรูป 2.4

หุ่นยนต์ทั่วไปมักจะติดตั้งตัวขับที่ข้อต่อ เนื่องจากเป็นจุดที่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของก้านต่อได้สะดวกที่สุด หากเป็นข้อต่อแบบเชิงมุม ก้านต่อจะหมุนสัมพัทธ์รอบแกนข้อต่อ (joint axis) ที่ทับกัน(coincide) กับแนวเพลลา และแกนของเพลลามอเตอร์ ในกรณีของข้อต่อแบบเชิงเส้น ก้านต่อจะเคลื่อนที่เชิงเส้นตามแนวแกนข้อต่อที่ทับกับแนวบูชชิง และแกนของตัวขับเชิงเส้น สำหรับหุ่นยนต์ที่มีโครงสร้างแบบโซ่เปิดนั้น จำนวนองศาเสรีของหุ่นยนต์จะเท่ากับผลรวมของจำนวนองศาเสรีทุกๆข้อต่อ ดังนั้นหุ่นยนต์ที่ได้รับการออกแบบให้ทำงานต่างๆไปจึงควรมีจำนวนองศาเสรีขั้นต่ำเท่ากับ 6 โดยแบ่งเป็นส่วนของการเคลื่อนที่เชิงเส้นเท่ากับ 3 และการเคลื่อนที่เชิงมุมเท่ากับ 3

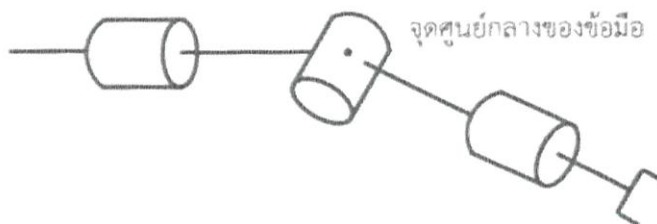


(a) สัญลักษณ์ของข้อต่อแบบเชิงมุม



(b) สัญลักษณ์ของข้อต่อแบบเชิงเส้น

รูปที่ 2.4 สัญลักษณ์ข้อต่ออย่างง่ายของหุ่นยนต์



รูปที่ 2.5 แผนภาพกลศาสตร์ของข้อมือแบบทรงกลมที่มีจำนวนองศาเสรีเท่ากับ 3

### 2.3.3 ฐาน (Base)

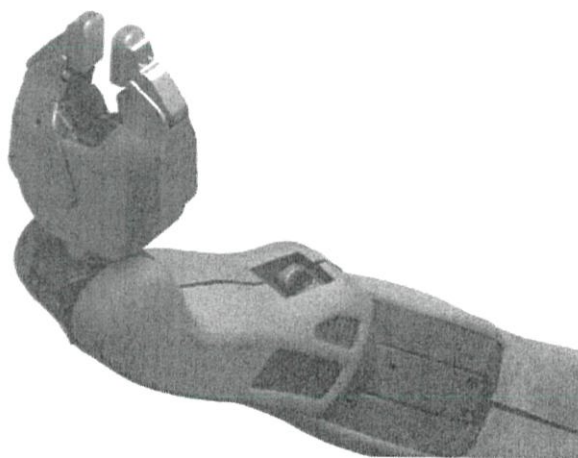
เป็นส่วนที่ติดกับพื้น (ground) ซึ่งมักจะเคลื่อนไหวน้อย เช่น พื้นห้อง หรืออาจจะเคลื่อนไหวได้ เช่น ฐานของหุ่นยนต์ชนิดเคลื่อนที่ได้ (mobile robot) ฐานเป็นส่วนที่จะต้องรองรับแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงภายนอกและแรงพลศาสตร์ของหุ่นยนต์ ดังนั้น ฐานจะต้องได้รับการออกแบบให้มีความแข็งแรงอย่างพอเพียง นอกจากนี้แล้วฐานยังมีความสำคัญในฐานะที่มักถูกใช้เป็นตำแหน่งของเฟรมอ้างอิง (reference frame, base frame) อีกด้วย

### 2.3.4 ข้อมือ (Wrist)

เป็นส่วนของโครงสร้างที่ประกอบขึ้นมาจากก้านต่อและข้อต่อ ที่มักให้การเคลื่อนที่สัมพัทธ์แบบ ดังแสดงด้วยแผนภาพจลนศาสตร์ในรูปที่ 2.5 ข้อมือมักได้รับการติดตั้ง ณ ปลายของแขนส่วนล่าง (forearm) ก่อนถึงส่วนปลายแขน ข้อมือที่มีการเคลื่อนที่สัมพัทธ์แบบหมุนรอบจุดร่วม จะมีแกนข้อต่อทำงาน (effective joint axis) ตัดกัน ณ จุดร่วมนั้น โครงสร้างเช่นนี้ช่วยให้ทำการวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์ได้ง่ายขึ้น กล่าวโดยย่อคือจะทำให้การวิเคราะห์ตำแหน่ง (position) และการหมุน (orientation) ของส่วนปลายแขนนั้น แยกจากกัน (decouple) ได้ ส่งผลให้สามารถหาผลเฉลยปิด (closed-form solution) ของปัญหาจลนศาสตร์ผกผันได้

### 2.3.5 ส่วนปลายแขน (End-Effector)

เป็นส่วนที่มักติดตั้งถัดจากข้อมือ เพื่อใช้ทำงานที่ต้องการ ส่วนปลายแขนมีหลายรูปแบบ ขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่ทำ ส่วนปลายแขนแบบที่ง่ายที่สุดได้แก่ตัวจับ (gripper) ที่มีจำนวนองศาเสรีเท่ากับ 1 สำหรับการเปิดและปิดเพื่อจับวัตถุที่ต้องการ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 โดยทั่วไปแล้วหุ่นยนต์มักถูกออกแบบให้สามารถเปลี่ยนส่วนปลายแขน เพื่อการทำงานที่หลากหลาย มือหุ่นยนต์ (hand) ที่ประกอบไปด้วยนิ้วและฝ่ามือ



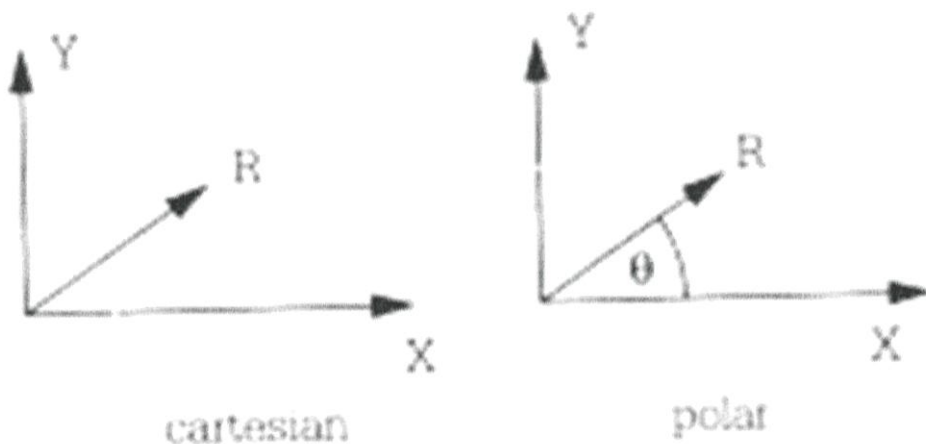
รูปที่ 2.6 ตัวจับแบบง่ายของหุ่นยนต์บริการ (service robot) PR2 ที่พัฒนาขึ้นโดยบริษัทวิลโลว์ การ์ราจ(Willow Garage)

## 2.4 พื้นฐานทางคณิตศาสตร์ในการศึกษาวิชาหุ่นยนต์ (ผศ.ดร.สถาพร ลักษณะเจริญ:2548)

พื้นฐานทางคณิตศาสตร์เป็นสิ่งจำเป็นในการศึกษาวิชาหุ่นยนต์ ความรู้เบื้องต้นในระบบเวกเตอร์ ในบทนี้จะอธิบายถึงระบบพิกัด (coordinate systems) ระบบเวกเตอร์ (vector) ทบทวนคุณสมบัติของเวกเตอร์ และการหาคำตอบของสมการเวกเตอร์บนระนาบสองมิติ และระนาบสามมิติ และได้สอดแทรกเทคนิคที่สามารถประยุกต์ใช้เมตริกซ์ในการคำนวณระบบเวกเตอร์ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อไป

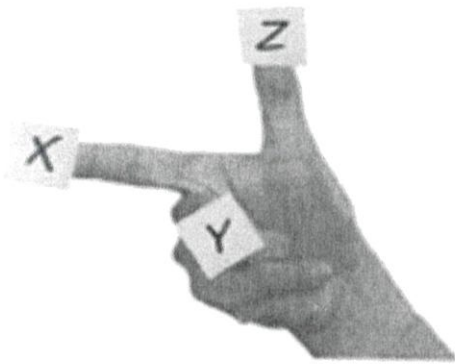
### 2.4.1 ระบบพิกัด (coordinate systems)

หัวข้อนี้จะอธิบายถึงระบบพิกัด ที่จำเป็นในการศึกษาวิชาหุ่นยนต์ ระบบพิกัดพื้นฐานที่ใช้กับระบบหุ่นยนต์มีอยู่ 2 ประเภท คือ ระบบพิกัดแบบคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate) และ ระบบพิกัดแบบเชิงขั้ว (polar coordinate)

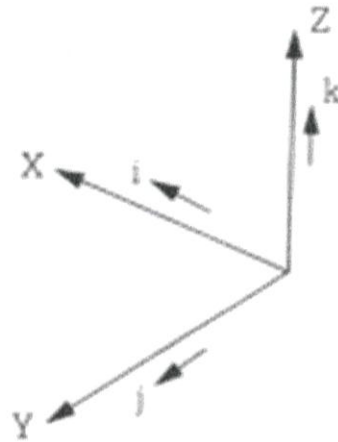


รูปที่ 2.7 ระบบพิกัดแบบคาร์ทีเซียนและแบบเชิงขั้ว

ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate) คือ ระบบพิกัดที่ใช้กันทั่วไป ประกอบด้วย 3 แกน คือ แกน x แกน y บนระนาบหรือถ้าเป็นระบบสามมิติ (3D) ก็จะประกอบด้วย แกน x,y และ z ใช้สัญลักษณ์คือ (x,y) และ (x,y,z) ทิศทางของแกนทั้งสามนั้นต้องตั้งฉากกันและกัน และเป็นไปตามทิศทางของกฎมือขวา (right hand rule) โดยตั้งแกน x ที่นิ้วชี้โดยที่ปลายชี้ออกเป็นบวก แล้ววางแกน y ที่นิ้วกลาง ก็จะได้แกน z อยู่ในนิ้วโป้ง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8



(ก) ทิศทางของกฎมือขวา



(ข) ทิศทางของแกน 3 แกน X, Y, Z

รูปที่ 2.8 ระบบพิกัดคาร์ทีเซียนในระบบสามมิติ

ซึ่งถ้ากำหนดทิศทางของแกน 2 แกน ก็สามารถหาทิศทางของแกนที่ 3 ได้โดยใช้กฎมือขวา โดยที่  $i$  เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ทิศทางตามแกน  $x$ ,  $j$  เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ทิศทางตามแนวแกน  $y$  และ  $k$  เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ทิศทางตามแกน  $z$

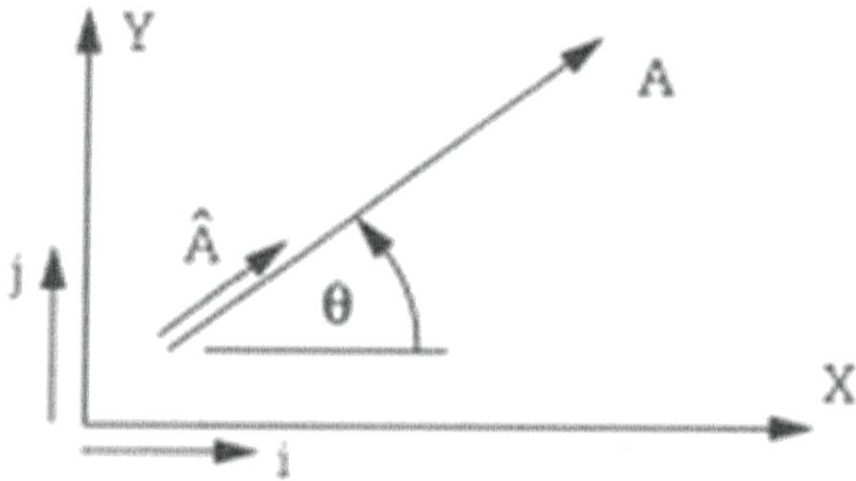
ระบบพิกัดเชิงขั้ว (polar coordinate) คือระบบพิกัดที่ประกอบด้วยตัวแปรสองตัว คือ แนวนอร์ศมี ( $r$ ) และมุมที่แนวนอร์ศมีทำมุมกับแนวระนาบ ( $\theta$ ) สัญลักษณ์ที่ใช้คือ  $(r, \theta)$  ซึ่งระบบพิกัดนี้สามารถที่จะอ้างอิงถึงระบบพิกัดแบบคาร์ทีเซียน โดยจัดให้อยู่ในรูปของ

$$x = r \cos \theta \quad (2.1)$$

$$y = r \sin \theta \quad (2.2)$$

### 2.4.2 เวกเตอร์ (vectors)

เวกเตอร์ คือ ปริมาณทางคณิตศาสตร์ที่มีขนาด (magnitude) และทิศทาง (directions) ซึ่งการบ่งบอกปริมาณเวกเตอร์มีวิธีการบอกได้หลายรูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การบอกปริมาณเวกเตอร์

$i$  คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector) ในทิศทางตามแกน X

$j$  คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วย ในทิศทางตามแกน Y

$k$  คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วย ในทิศทางตามแกน Z

เวกเตอร์บนระนาบสามมิติ (Three Dimensional Vector) สามารถเขียนได้เป็น

$$A = A_x i + A_y j + A_z k \quad (2.3)$$

ขณะเดียวกันสามารถเขียนให้อยู่ในรูปเมตริกซ์ (Column Matrix) ได้

$$A = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

หรือในรูปของทรานสโพท (Transpose) ได้

$$A = [A_x \ A_y \ A_z]^T \quad (2.5)$$

## 2.5 กลศาสตร์การเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ (ผศ.ดร.สถาพร ลักษณะเจริญ:2548)

กลศาสตร์การเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ หรือ kinematics ของหุ่นยนต์ คือ การศึกษาการเคลื่อนไหว โดยวิเคราะห์จากตำแหน่งของหุ่นยนต์ ซึ่งจะคำนวณโดยปราศจากแรงที่ทำให้เกิดการเคลื่อนไหว การกำหนดให้แขนกลแต่ละส่วนมีความสัมพันธ์กับแต่ละเมตริกซ์มีลักษณะเฉพาะและเชื่อมโยงไปสู่ข้อต่อต่างๆที่ได้รับผลกระทบ เรียกอีกอย่างว่ากลศาสตร์การเคลื่อนไหวโดยตรง มีการคำนวณตำแหน่งของจุดต่างๆ ในการทำงานของหุ่นยนต์

การหาสมการเพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ซึ่งเกิดจาก ความสัมพันธ์กันของการเคลื่อนที่ขององค์ประกอบต่างๆ อันประกอบด้วยแกน(link) และจุดหมุน(joint) ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามโครงสร้างของหุ่นยนต์แต่ละตัว ซึ่งการอธิบายที่สะดวกและเข้าใจง่ายก็คือการอธิบายในรูปของ matrix ที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า Transformation matrix ซึ่งอาศัยพื้นฐานทางตรีโกณมิติต่างๆ แต่ต้องมีความเข้าใจในเรื่องระบบพิกัดค่อนข้างมาก สำหรับการวิเคราะห์กลศาสตร์การเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ มีพื้นฐานดังต่อไปนี้

### 2.5.1 เมตริกซ์การเลื่อนตำแหน่ง (Translation Matrix)

การบอกตำแหน่งโดนทั่วไปมักจะบอกโดยอ้างอิงกับสิ่งอื่น เช่น ถ้ามีคำถามว่า สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนืออยู่ที่ไหน? อาจได้คำตอบว่าอยู่ใกล้แม่น้ำเจ้าพระยา หรืออยู่ใกล้เชิงสะพานพระราม 7 เป็นต้น สังเกตว่าการบอกตำแหน่งของสถานที่มักจะใช้อ้างอิงกับสิ่งที่ยึดติดอยู่กับที่ เช่น สะพาน หรือแม่น้ำ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับวิชาหุ่นยนต์ สิ่งที่ยึดติดอยู่กับที่นั่นก็คือ แกนอ้างอิง (reference frame) นั่นเอง และคำว่า ใกล้แม่น้ำ หรือเชิงสะพาน อาจหมายถึงระยะทางโดยประมาณ ซึ่งคือการบอกตำแหน่งในทางหุ่นยนต์นั่นเอง

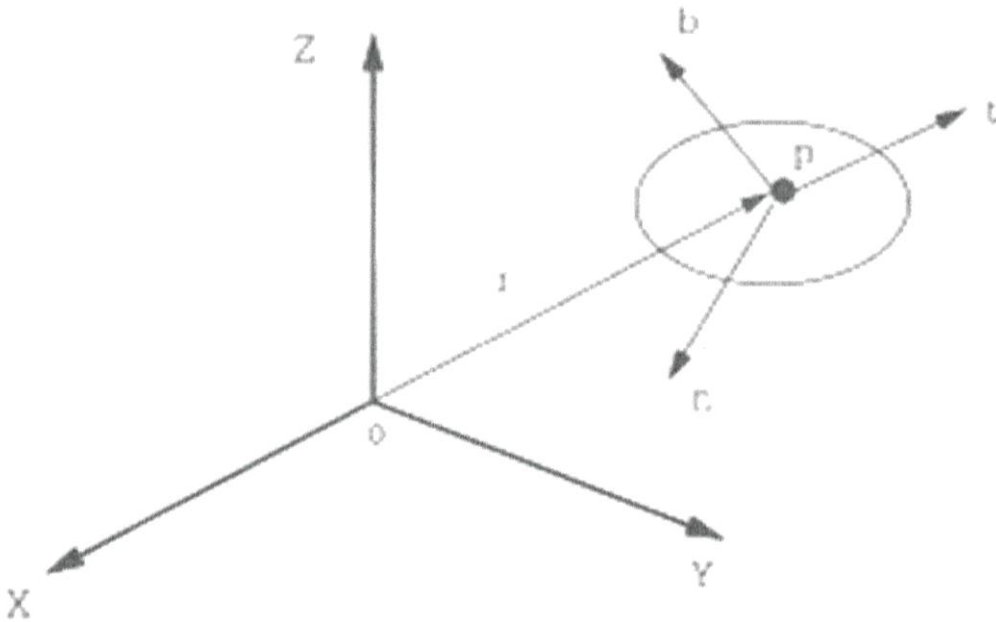
การสั่งงานของหุ่นยนต์ หรือแขนกลให้เคลื่อนที่ไปตำแหน่งที่ต้องการเป็นการยาก เพราะหุ่นยนต์ไม่สามารถรับรู้สภาพแวดล้อมได้ดีเท่ากับมนุษย์ ตัวอย่างเช่น ถ้าเราต้องการให้เพื่อนหยิบหนังสือที่วางอยู่บนโต๊ะ เพื่อนคนนั้นสามารถที่จะใช้สายตามองไปที่หนังสือที่อยู่บนโต๊ะ แล้วหยิบหนังสือมาให้ได้ ในกรณีนี้เพื่อนคนนั้นสายตาปกติ ยกตัวอย่างการเล่นละครพื้นบ้านของไทย ซึ่งคาดว่าผู้อ่านคงเคยมีประสบการณ์มาบ้างในการเล่นปิดตาตีหม้อ (หม้อดิน) เริ่มต้นโดยผู้เล่นจะมองตำแหน่งของหม้อเอาไว้จากนั้นผู้เล่นจะถูกปิดตาไม่ให้มองเห็นและในมือถือไม้ การเล่นจะชนะต่อเมื่อผู้เล่นเดินไปตีหม้อให้แตก โดยใช้เวลานับน้อยที่สุด เมื่อเริ่มการเล่นผู้เล่นใดที่สามารถจำตำแหน่งการวางของหม้อได้จะได้เปรียบและอาจเป็นผู้ชนะ

จากตัวอย่างการเล่นพื้นบ้านของไทย นำมาอธิบายได้ถึงแม้ว่าผู้เล่นจะมองไม่เห็น แต่ถ้าสามารถบอกตำแหน่ง ก็สามารถเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายได้เช่นกัน ทำนองเดียวกันในหุ่นยนต์หรือแขนกลจะต้องมีการกำหนดจุดพิกัด (coordinates) เพื่อที่แขนกลนั้นจะรู้ถึงตำแหน่งของวัตถุนั้นโดยต้องมีการกำหนดแกนอ้างอิงขึ้นด้วย

ในที่นี้จะใช้การบอกพิกัดแบบคาร์ทีเซียน หรือแกน  $x,y,z$  โดยทิศทางของแกน  $z$  มีนิยามจากกฎมือขวา กรณีหนังสือที่วางอยู่บนโต๊ะ ถ้าเราแถมสี่ ๓ จุดหนึ่งบนหนังสือเพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงแล้วเรียกจุด

นั่นว่า จุด p เราสามารถบอกได้ว่าหนังสือเล่มนี้อยู่ที่ตำแหน่งสัมพันธ์กับแกนอ้างอิง ซึ่งอาจจะวางจุดศูนย์กลางของแกนอ้างอิงไว้ที่มุมหนึ่งของโต๊ะ เราสามารถแสดงพิกัดของจุด p ได้ว่า  $P = (x,y,z)$  หรือเขียนเป็นคอลัมน์เวกเตอร์ (column vector) มีขนาด  $3 \times 1$  โดยจุด p แสดงถึงจุดบนวัตถุ (body-fixed point) ดังรูปที่ 2.10 และ r คือเวกเตอร์ตำแหน่ง (position vector) จากจุด O ถึง p

$$r = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.6)$$



รูปที่ 2.10 ตำแหน่งของจุด P

ในสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะใช้ในรูปแบบเมทริกซ์ขนาด  $4 \times 4$  เรียกว่า Translation Matrix ที่เป็นเมตริกสำหรับการเคลื่อนย้ายแกนอ้างอิงตำแหน่ง ไปในทิศทาง X,Y,Z ที่ระบุลงไปเมตริก

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

### 2.5.2 เมตริกซ์การหมุน

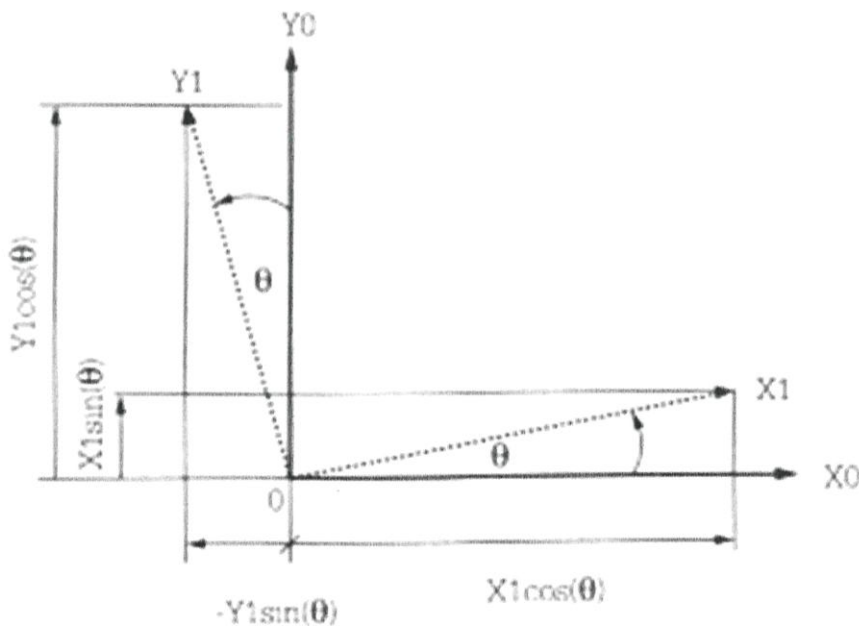
การบอกสถานะของวัตถุแข็งเกร็งนั้นใช้การบอกตำแหน่งอย่างเดียวนั้นไม่เพียงพอ ต้องมีตัวแปรเพิ่มเพื่อบ่งบอก ถึงสถานะของวัตถุนั้น เช่น กรณีของหนังสือต้องบอกได้ว่าหนังสือนั้น วางอยู่ลักษณะใด เช่นวางตั้งหรือวางนอน ซึ่งตัวแปรนี้ก็คือ การหมุน (orientation)

เมตริกซ์การหมุน (rotation matrix ) สัญลักษณ์ R เป็นตัวแปรที่ใช้ระบุว่าวัตถุนั้นมีการหมุนเปลี่ยนไปจากแกนอ้างอิงเท่าใด แสดงได้ด้วยเวกเตอร์หนึ่งหน่วย 3 ทิศทางคือ เวกเตอร์ n,t,b ดังแสดงบนจุด p ในรูปที่ 2.10 โดยที่ n,t,b เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย ดังแสดงในสมการ (2.8)

$$R = \begin{bmatrix} n_x & t_x & b_x \\ n_y & t_y & b_y \\ n_z & t_z & b_z \end{bmatrix}_{(3 \times 3)} \quad (2.8)$$

เมตริกซ์การหมุน R แสดงถึงการหมุนของวัตถุแข็งเกร็ง สัมพันธ์กับแกนอ้างอิงที่ติดอยู่กับที่ (fixed coordinate) สังเกตว่าในคอลัมน์เวกเตอร์ของเมตริกซ์การหมุน R ประกอบด้วย เวกเตอร์ n,t,b ซึ่งตั้งฉากซึ่งกันและกัน (perpendicular)

ลำดับต่อไปคือการหาเมตริกซ์การหมุนตามรอบแกน Z สังเกตจากรูป 11 แกนอ้างอิงที่ 1 หมุนไปจากแกนอ้างอิงที่ 0 รอบแกน Z เป็นมุม  $\theta$



รูปที่ 2.11 axis rotation about Z axis

จาก algebra สามารถแสดงเวกเตอร์ในแกนอ้างอิงที่ 1 นำเสนอในแกนอ้างอิงที่ 0 ได้ว่า

$$x_0 = \cos(\theta) x_1 - \sin(\theta) y_1 \quad (2.9)$$

$$y_0 = \sin(\theta) x_1 + \cos(\theta) y_1 \quad (2.10)$$

$$z_0 = z_1 \quad (2.11)$$

สมการข้างบนอยู่ในรูปของเวกเตอร์ได้  $X_0 = R_z(\theta)X_1$

สามารถแยกเมตริกซ์การหมุนในแกน z ได้ตามสมการ (2.12)

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{(3 \times 3)} \quad (2.12)$$

ทำนองเดียวกันเราสามารถหาเมตริกซ์การหมุนรอบแกน X และ Y ได้เช่นเดียวกัน ดังสมการ (2.13) และสมการ (2.14) ตามลำดับ

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}_{(3 \times 3)} \quad (2.13)$$

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix}_{(3 \times 3)} \quad (2.14)$$

เมตริกซ์การหมุน (Rotation Matrix) ที่ใช้ในการเขียนสมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ มีขนาดเมตริกซ์ 4x4

$$\text{เมตริกซ์การหมุนในแกน } x \text{ มุม } \alpha \quad R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \left| \begin{array}{l} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{array} \right. \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & \\ 0 & 0 & 0 & \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\text{เมตริกซ์การหมุนในแกน } y \text{ มุม } \beta \quad R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & -\sin(\beta) & \left| \begin{array}{l} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{array} \right. \\ 0 & 1 & 0 & \\ \sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) & \\ 0 & 0 & 0 & \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\text{เมตริกซ์การหมุนในแกน } z \text{ มุม } \theta \quad R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 & \left| \begin{array}{l} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{array} \right. \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & \\ 0 & 0 & 1 & \\ 0 & 0 & 0 & \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

### 2.5.3 เมตริกซ์การแปรรูป (Transformation Matrix)

ในการออกแบบหุ่นยนต์ ต้องมีการกำหนดโครงสร้างในแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์ และในแต่่วัตถุของหน่วยงาน ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเป็นแนวคิดพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองการเขียนโปรแกรมของหุ่นยนต์ ซึ่งจะมีส่วยช่วยดังนี้

- คำนวณที่ตั้ง ตำแหน่ง และการกำหนดทิศทางของหุ่นยนต์
- อธิบายตำแหน่งและการกำหนดทิศทางของหุ่นยนต์
- ระบุเส้นทางการเคลื่อนที่และความเร็วของ End-effector ของหุ่นยนต์ สำหรับงานที่ต้องการ
- อธิบายและควบคุมแรง เมื่อหุ่นยนต์มีการตอบสนองกับสภาพแวดล้อม

ในวิชาการหุ่นยนต์นั้น จุดสนใจจุดหนึ่งโดยทั่วไป คือ ตำแหน่งของวัตถุในระนาบสามมิติ เมตริกซ์การหมุน ซึ่งบอกถึงการหมุนของวัตถุในสามมิติ และเพิ่มการบอกตำแหน่งพิกัดเข้าไป 1 คอลัมน์ จะได้เมตริกซ์ใหม่เรียกว่า transformation matrix โดยเป็นเมตริกซ์มีขนาด  $4 \times 4$  มีลักษณะดังสมการ (2.18)

$$T_{NA} = \begin{bmatrix} \text{Rotation}_{(3 \times 3)} & \text{Translation}_{(3 \times 1)} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & \vdots & P \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

โดย N คือแกนอ้างอิงเริ่มต้น และ A คือ แกนอ้างอิงสุดท้าย เช่น วัตถุมีการหมุนรอบแกน  $X_0$  เป็นมุม  $\theta$  และเลื่อนไปยังตำแหน่ง (1,1,0) ที่ตำแหน่งของแกนอ้างอิงที่ 1 สามารถเขียนแสดงได้ดังนี้

$$T_{01} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

ในทำนองเดียวกัน transformation operators นี้มีคุณสมบัติคล้ายกับเมตริกซ์การหมุน คือ สามารถนำมาเรียงต่อกัน สำหรับ กรณีที่มีการเคลื่อนย้ายวัตถุในหลายๆแกนอ้างอิง เช่น

$$T_{03} = T_{01}T_{12}T_{23} \quad (2.20)$$

ดังสมการ (2.20) แสดงถึง  $T_{03}$  สามารถอ้างอิงจากแกนอ้างอิงที่ 1 ไปยังแกนอ้างอิงที่ 2 และแกนอ้างอิงที่ 3 เช่นเดียวกัน ในการคำนวณหาแกนอ้างอิงจากแกนที่ 1 ไปยังแกนอ้างอิงที่ 2 ได้คือ

$$T_{02} = T_{01}T_{12} \quad (2.21)$$

แต่อย่างไรก็ตาม การหาอินเวอร์ส (inverse) ของ T นั้นไม่เหมือนกับเมตริกซ์การหมุน เพราะ transformation operator ไม่มีคุณสมบัติออร์โธนอร์มัล (ortho-normal) สูตรการคำนวณหาอินเวอร์สของ T ดังสมการ (2.22)

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} R^T & \vdots & -R^T P \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 1 \end{bmatrix}_{(4 \times 4)} \quad (2.22)$$

## 2.5.4 ฟอเวิร์ด ไคเนติก (Forward Kinematics)

Forward Kinematics เป็นการวิเคราะห์หาตำแหน่งหัวจับของหุ่นยนต์ ซึ่งคำนวณจาก coordinate ในจุดเชื่อมต่อต่างๆ โดยอาศัยตำแหน่งเชิงมุม (angular positions) และตำแหน่งเชิงเส้น (translation positions) ของจุดเชื่อมต่อ เพื่อให้ได้ Transformation matrix เพื่อแปลง Robot coordinate ไปสู่ Cartesian coordinate ซึ่งเป็นพิกัดที่สะดวกในการสั่งงาน การคำนวณหาตำแหน่งที่

ปลายของแขนกล (End Effectors) โดยคำนวณจากสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์คำตอบที่ออกมาอยู่ในรูปของจุด (X,Y,Z) หรือระบบค่าที่เขียน โดยต้องทราบตัวแปรที่ข้อต่อของแต่ละข้อต่อ (Joint Variables) กรณีข้อต่อแบบหมุนตัวแปรที่ต้องทราบค่าคือ มุม ซึ่งค่าที่ทราบในแต่ละข้อต่อนำไปคำนวณหาค่าพิกัดที่ปลายของแขนกล

Forward Function เป็นการใช้สมการของการเคลื่อนไหวคำนวณตำแหน่งของ End Effectors จากค่าตำแหน่งของข้อต่อนั้นๆ

$$\text{Forward Function} \quad {}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 {}^6T_7 \quad (2.23)$$

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & \sin(\Theta) & 0 \\ -\sin(\Theta) & \cos(\Theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 180 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & 0 & -\sin(\Theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\Theta) & 0 & \cos(\Theta) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -137 \\ 0 \\ 190 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & 0 & -\sin(\Theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\Theta) & 0 & \cos(\Theta) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 345 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & \sin(\Theta) & 0 \\ -\sin(\Theta) & \cos(\Theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 275 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & 0 & -\sin(\Theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\Theta) & 0 & \cos(\Theta) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 345 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} \cos(\Theta) & \sin(\Theta) & 0 & 0 \\ -\sin(\Theta) & \cos(\Theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 85 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$${}^6T_7 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

จากสมการที่ (2.24) (2.25) (2.26) คือสมการสำหรับ สำหรับช่วงหุ่นยนต์สามแกนล่าง และ (2.27) (2.28) (2.29) (2.30) คือสมการสำหรับช่วงหุ่นยนต์สามแกนบน

### 2.5.5 เมตริกซ์จาโคเบียน (Jacobian matrix)

เมตริกซ์จาโคเบียนสามารถบ่งบอกถึงลักษณะการเคลื่อนไหวยุ่หุ่นยนต์ได้ คือเครื่องมือที่ใช้สำหรับในการคำนวณย้อนกลับทางจากตำแหน่งในแกน X,Y,Z (Cartesian Space) ไปเป็นตำแหน่งมุมของข้อต่อหุ่นยนต์ (Joint Space) Jacobian เป็นความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่ในช่วงแคบๆที่เปลี่ยนไปตามรอบเวลาของการประมวลผล สำหรับระบบนี้แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนไหวยุ่ของหุ่นยนต์ไปในทิศทางเชิงเส้น สามารถเปลี่ยนไปเป็นการเคลื่อนไหวยุ่ของค่ามุมของทุกข้อต่อของหุ่นยนต์ ( $\Delta\theta$ )ความแตกต่างของ  $\Delta\theta$  (joint angle) จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของ end-effector ในเชิงเส้น และสามารถคำนวณความเร็วเชิงเส้นจากอัตราเร็วเชิงมุม รวมทั้งยังสามารถเปลี่ยนแรงเป็นแรงบิดสำหรับคำนวณทางด้านแรง

$$J = \begin{bmatrix} Z_{i-1} \times {}^{i-1}P_6 \\ \\ \\ Z_{i-1} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

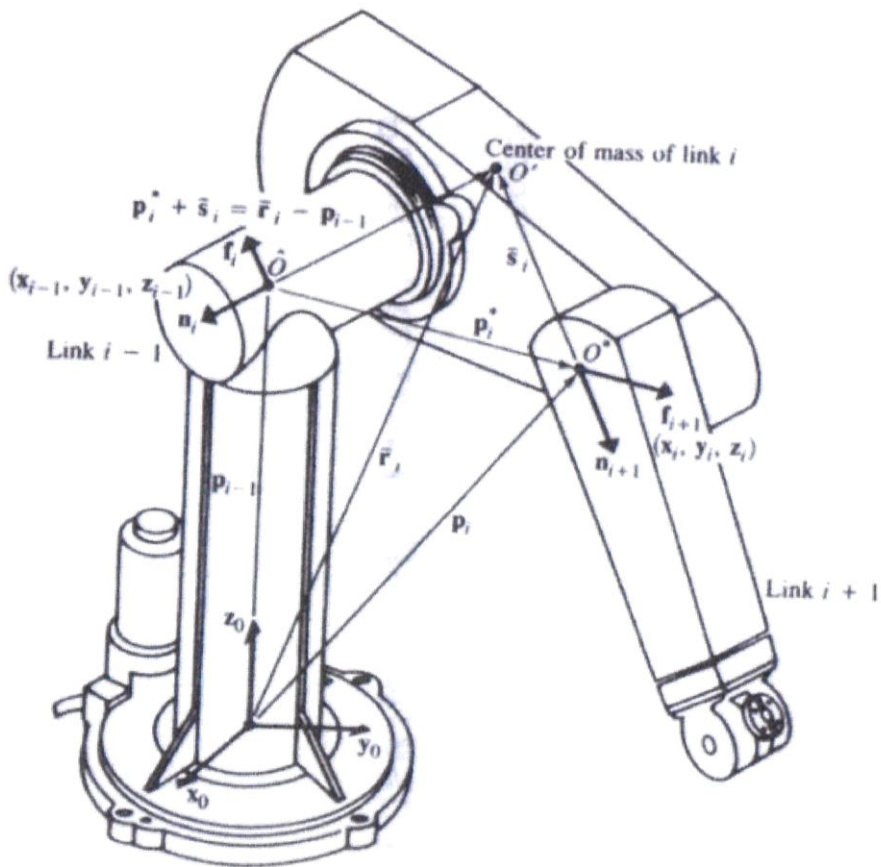
$$J = \begin{bmatrix} Z_0 \times {}^0P_6 & Z_1 \times {}^1P_6 & \dots & Z_5 \times {}^5P_6 \\ Z_0 & Z_1 & & Z_5 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$\begin{array}{cccc} {}^0P_6 = {}^0T_6(1:3,4) & {}^3P_6 = {}^3T_6(1:3,4) & Z_0 = {}^0T_6(1:3,3) & Z_3 = {}^3T_6(1:3,3) \\ {}^1P_6 = {}^1T_6(1:3,4) & {}^4P_6 = {}^4T_6(1:3,4) & Z_1 = {}^1T_6(1:3,2) & Z_4 = {}^4T_6(1:3,2) \\ {}^2P_6 = {}^2T_6(1:3,4) & {}^5P_6 = {}^5T_6(1:3,4) & Z_2 = {}^2T_6(1:3,2) & Z_5 = {}^5T_6(1:3,3) \end{array} \quad (2.33)$$

เมทริกซ์จาโคเบียน ผกผันมีบทบาทสำคัญในการควบคุมหุ่นยนต์ ซึ่งการคำนวณค่าผกผันอาจไม่สามารถกระทำได้อย่างตรงไปตรงมาเสมอไป ด้วยการประยุกต์ใช้หลักการของงานเสมือน จะสามารถแสดงได้ว่า เมทริกซ์สลับเปลี่ยนของจาโคเบียนเป็นตัวกำหนดการส่งจากแรงปฏิกิริยา ณ ส่วนปลายแขนไปยังทอร์ค ณ ข้อต่อเมื่อหุ่นยนต์อยู่ในสภาวะสมดุล

## 2.6 การวิเคราะห์ทางด้านแรง (Fu, Gonzalez, and Lee:1987)

ความสัมพันธ์ ระยะทาง (Length), จุดศูนย์กลางมวล (Center of Mass) และ โมเมนต์ของแรง (Moment of Link  $i$ )



รูปที่ 2.13 แรงและโมเมนต์ของก้านต่อ (link)  $i$

ศูนย์กลางมวลของชิ้นส่วนก้านต่อและข้อต่อแต่ละชิ้นส่วนมีความสัมพันธ์กับเวกเตอร์ซึ่งเชื่อมโยงทิศทางของแรงได้ดังสมการความสัมพันธ์นี้

$$\bar{r}_{i-p_{i-1}} = p_i^* + \bar{s}_i \quad (2.34)$$

$\bar{r}_i$  = พิกัดตำแหน่งศูนย์กลางมวลของก้านต่อ (link) i จากจุดกำเนิดกรอบอ้างอิง

$\bar{s}_i$  = พิกัดตำแหน่งศูนย์กลางมวลของก้านต่อ (link) i จากจุดกำเนิดระบบพิกัด  $(x_i, y_i, z_i)$

$p_i^*$  = พิกัดตำแหน่งจุดกำเนิดของระบบพิกัด i ถึง ระบบพิกัด i-1

จากความสัมพันธ์สมการข้างต้น สามารถเขียนสมการแสดงได้ดังนี้

$$(CG_{m/0} = (P_m + CG_i) - P_i) \quad (2.35)$$

$$L_{m/i} = (CG_{m/0} - P_i) \quad (2.36)$$

$P_m$  = เวกเตอร์ตำแหน่ง (position vector) จาก forward function ของก้านต่อ (link) m ที่ถูกรับแรง

$P_n$  = เวกเตอร์ตำแหน่ง (position vector) จาก forward function ของก้านต่อ (link) i ที่ทำหน้าที่รับแรง

$CG_{m/0}$  = เวกเตอร์ตำแหน่งศูนย์กลางมวล m เทียบกับจุดกำเนิดของระบบพิกัด  $(x_0, y_0, z_0)$

$CM_n$  = จุดศูนย์กลางมวลก้านต่อ (link) i

$L_{m/i}$  = เวกเตอร์แสดงระยะทางจุดศูนย์กลางมวล m เทียบ i

ความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นนี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณแรงที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของโครงสร้างหุ่นยนต์ต่อไป

## 2.7 สถิตยศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Statics)

สถิตยศาสตร์(Statics)เป็นการวิเคราะห์และคำนวณองค์ประกอบต่างๆของหุ่นยนต์เมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล คิดในกรณีที่หุ่นยนต์นั้นหยุดนิ่ง ไม่มีการเคลื่อนที่หรือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ผลรวมแรง (force)และแรงบิด(torque)จากภายนอกเป็นศูนย์ จากสภาวะสมดุลดังกล่าวในโครงสร้างหุ่นยนต์รอบๆจุดศูนย์กลางมวลจะเกิดแรงบิดขึ้นที่ข้อเนื่องจากมีการขับเคลื่อนและมีแรงโน้มถ่วงมากกระทำไม่ให้เกิดแรงบิด ได้ดังสมการ(2.37)

$$T_{im} = M_{im} = L_{m/i} \times m_m g \quad (2.37)$$

โดยที่  $T_{im} = M_{im}$  =แรงของก้านต่อ (link) ที่ i รับแรงของก้านต่อ (link) ที่ m

$m_m$  = น้ำหนักของชิ้นส่วนก้านต่อ (link) m ที่ถูกรับแรง

$$g = \text{เมทริกซ์ค่าความเร่งโน้มถ่วงโลก} \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix}, |g| = 9.8062 \text{ m/s}^2$$

แรงที่ข้อต่อ (joint) นั้นๆสามารถรับรับน้ำหนักหุ่นยนต์ จะมีค่าเท่ากับผลรวมโมเมนต์ของแรง ดังสมการ

$$T_{\text{moment}(i)} = \sum_i^m T_{i,m} \quad (2.38)$$

แสดงสมการแรงที่ข้อต่อ (joint) ที่ 1 สามารถรับรับน้ำหนักหุ่นยนต์ ( $T_{\text{moment}(1)}$ )

$$\begin{aligned} T_{12} &= L_{2/1} \times m_2 g & T_{13} &= L_{3/1} \times m_3 g \\ T_{14} &= L_{4/1} \times m_4 g & T_{15} &= L_{5/1} \times m_5 g \\ T_{16} &= L_{6/1} \times m_6 g & T_{17} &= L_{7/1} \times m_7 g \\ T_{18} &= L_{8/1} \times m_8 g \\ T_{\text{moment}(1)} &= T_{12} + T_{13} + T_{14} + T_{15} + T_{16} + T_{17} + T_{18} \end{aligned}$$

แสดงสมการแรงที่ข้อต่อ (joint) ที่ 2 สามารถรับรับน้ำหนักหุ่นยนต์ ( $T_{\text{moment}(2)}$ )

$$\begin{aligned} T_{23} &= L_{3/2} \times m_3 g & T_{24} &= L_{4/2} \times m_4 g \\ T_{25} &= L_{5/2} \times m_5 g & T_{26} &= L_{6/2} \times m_6 g \\ T_{27} &= L_{7/2} \times m_7 g & T_{28} &= L_{8/2} \times m_8 g \\ T_{\text{moment}(2)} &= T_{23} + T_{24} + T_{25} + T_{26} + T_{27} + T_{28} \end{aligned}$$

แสดงสมการแรงที่ข้อต่อ (joint) ที่ 3 สามารถรับรับน้ำหนักหุ่นยนต์ ( $T_{\text{moment}(3)}$ )

$$\begin{aligned} T_{34} &= L_{4/3} \times m_4 g & T_{35} &= L_{5/3} \times m_5 g \\ T_{36} &= L_{6/3} \times m_6 g & T_{37} &= L_{7/3} \times m_7 g \\ T_{38} &= L_{8/3} \times m_8 g \\ T_{\text{moment}(3)} &= T_{34} + T_{35} + T_{36} + T_{37} + T_{38} \end{aligned}$$

แสดงสมการแรงที่ข้อต่อ (joint) ที่ 4 สามารถรับรับน้ำหนักหุ่นยนต์ ( $T_{\text{moment}(4)}$ )

$$\begin{aligned} T_{45} &= L_{5/4} \times m_5 g & T_{46} &= L_{6/4} \times m_6 g \\ T_{47} &= L_{7/4} \times m_7 g & T_{48} &= L_{8/4} \times m_8 g \\ T_{\text{moment}(4)} &= T_{45} + T_{46} + T_{47} + T_{48} \end{aligned}$$

แสดงสมการแรงที่ข้อต่อ (joint) ที่ 5 สามารถรับรับน้ำหนักหุ่นยนต์ ( $T_{\text{moment}(5)}$ )

$$T_{56} = L_{6/5} \times m_6 g \quad T_{57} = L_{7/5} \times m_7 g$$

$$T_{58} = L_{8/5} \times m_8 g$$

$$T_{\text{moment}(5)} = T_{56} + T_{57} + T_{58}$$

แสดงสมการแรงที่ข้อต่อ (joint) ที่ 6 สามารถรับน้ำหนักหุ่นยนต์ ( $T_{\text{moment}(6)}$ )

$$T_{67} = L_{7/6} \times m_7 g \quad T_{68} = L_{8/6} \times m_8 g$$

$$T_{\text{moment}(6)} = T_{67} + T_{68}$$

## 2.8 พลศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Dynamics) (สุทิน ชาญณรงค์:2537)

พลศาสตร์จะพิจารณา มวล ความเร่ง แรงบิด โมเมนต์แรงเฉื่อย และความเร่งเชิงมุม ภายใต้ความสัมพันธ์แรงภายนอกที่มากระทำต่อหุ่นยนต์ เพื่อคำนวณหาแรงบิดที่เพียงพอที่จะทำให้ข้อต่อหรือแขนกลนั้นเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วและความเร่งที่ต้องการ ได้แก่ แรงเหวี่ยงหรือแรงหนีศูนย์กลางและแรงจากโมเมนต์ความเฉื่อยมวล

เมื่อหุ่นยนต์มีความเร่งในการเคลื่อนที่ จะเกิดแรงเหวี่ยงหรือแรงหนีศูนย์กลางสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการโดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$f(\omega_i) \tag{2.39}$$

โดยที่  $\omega_i$  = ค่าความเร็วหุ่นยนต์ของแต่ละข้อต่อ (joint) หรือ ก้านต่อ (link)  
จากสมการของนิวตัน สมการแสดงแรงหนีศูนย์กลาง

$$f = \frac{mv^2}{r} \tag{2.40}$$

โดยที่ ความสัมพันธ์ความเร็วเชิงเส้นกับความเร็วในการหมุน เป็นดังนี้

$$v = \omega r \tag{2.41}$$

จากสมการข้างต้น

$$f = m\omega^2 r \tag{2.42}$$

จากสมการ แรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นที่ข้อต่อ (joint)หรือก้านต่อ (link) จากแรงหนีศูนย์กลางเมื่อเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเชิงมุม แสดงดังสมการ

$$T=rx\dot{\theta}^2 \quad (2.43)$$

และ

$$T=m(\omega r)^2 \quad (2.44)$$

จัดรูปสมการ แรงเหวี่ยง ได้

$$TC_{im}=m_m(\omega_i L_{m/i})^2 \quad (2.45)$$

$TC_{im}$  = แรงเหวี่ยงที่ก้านต่อ (link) ที่ i รับแรงก้านต่อ (link) ที่ m

$m_m$  = น้ำหนักของชิ้นส่วนก้านต่อ (link) m ที่ถูกรับแรง

$\omega_i$  = ความเร็วหุนยนต์ของแต่ละข้อต่อ (joint) หรือ ก้านต่อ (link)

$L_{m/i}$ =เวกเตอร์แสดงระยะทางจุดศูนย์กลางมวล m เทียบ i

ดังนั้น จะได้สมการ แรงเหวี่ยงของก้านต่อ(link)นั้นๆ เท่ากับ ผลรวมของแรงเหวี่ยงย่อยที่รับแรง

$$T_{centrifugal(i)} = \sum_i^m TC_{im} \quad (2.46)$$

แสดงสมการแรงที่ข้อต่อ (joint) ที่ 1 สามารถรับน้ำหนักหุนยนต์ ( $T_{centrifugal(1)}$ )

$$\begin{aligned} TC_{12}=m_2(\omega_1 \times L_{2/1})^2 & \quad TC_{13}=m_3(\omega_1 \times L_{3/1})^2 \\ TC_{14}=m_4(\omega_1 \times L_{4/1})^2 & \quad TC_{15}=m_5(\omega_1 \times L_{5/1})^2 \\ TC_{16}=m_6(\omega_1 \times L_{6/1})^2 & \quad TC_{17}=m_7(\omega_1 \times L_{7/1})^2 \\ T_{centrifugal(1)}=T_{12}+T_{13}+T_{14}+T_{15}+T_{16}+T_{17} \end{aligned}$$

แสดงสมการแรงที่ข้อต่อ (joint) ที่ 2 สามารถรับน้ำหนักหุนยนต์ ( $T_{centrifugal(2)}$ )

$$TC_{23}=m_3(\omega_2 \times L_{3/2})^2 \quad TC_{24}=m_4(\omega_2 \times L_{4/2})^2$$

$$TC_{25} = m_5 (\omega_2 \times L_{5/2})^2 \quad TC_{26} = m_6 (\omega_2 \times L_{6/2})^2$$

$$TC_{27} = m_7 (\omega_2 \times L_{7/2})^2$$

$$T_{\text{centrifugal}(2)} = T_{23} + T_{24} + T_{25} + T_{26} + T_{27}$$

แสดงสมการแรงที่ข้อต่อ (joint) ที่ 3 สามารถรับรับน้ำหนักหุ่นยนต์ (  $T_{\text{centrifugal}(3)}$  )

$$TC_{34} = m_4 (\omega_3 \times L_{4/3})^2 \quad TC_{35} = m_5 (\omega_3 \times L_{5/3})^2$$

$$TC_{36} = m_6 (\omega_3 \times L_{6/3})^2 \quad TC_{37} = m_7 (\omega_3 \times L_{7/3})^2$$

$$T_{\text{centrifugal}(3)} = T_{34} + T_{35} + T_{36} + T_{37}$$

แสดงสมการแรงที่ข้อต่อ (joint) ที่ 4 สามารถรับรับน้ำหนักหุ่นยนต์ (  $T_{\text{centrifugal}(4)}$  )

$$TC_{45} = m_5 (\omega_4 \times L_{5/4})^2 \quad TC_{46} = m_6 (\omega_4 \times L_{6/4})^2$$

$$TC_{47} = m_7 (\omega_4 \times L_{7/4})^2$$

$$T_{\text{centrifugal}(4)} = T_{45} + T_{46} + T_{47}$$

แสดงสมการแรงที่ข้อต่อ (joint) ที่ 5 สามารถรับรับน้ำหนักหุ่นยนต์ (  $T_{\text{centrifugal}(5)}$  )

$$TC_{56} = m_6 (\omega_5 \times L_{6/5})^2 \quad TC_{57} = m_7 (\omega_5 \times L_{7/5})^2$$

$$T_{\text{centrifugal}(5)} = T_{56} + T_{57}$$

แสดงสมการแรงที่ข้อต่อ (joint) ที่ 6 สามารถรับรับน้ำหนักหุ่นยนต์ (  $T_{\text{centrifugal}(6)}$  )

$$TC_{67} = m_7 (\omega_6 \times L_{7/6})^2$$

$$T_{\text{centrifugal}(6)} = T_{67}$$

แรงจากโมเมนต์ความเฉื่อยมวลมีความสัมพันธ์ดังนี้ แรงจากโมเมนต์  $P = mv$  จากความเร็วเชิงมุม  $v = \omega r$  สามารถหา แรงจากโมเมนต์ความเฉื่อยมวลของข้อต่อ(joint) ได้ดังสมการ

$$T_{\text{inertia}(im)} = m_m \omega_{n(i)} |L_{m/i}| \quad (2.47)$$

$T_{\text{inertia}(im)}$  = แรงบิดที่ข้อต่อ (joint)  $i$  รับแรงข้อต่อ (joint)  $m$

$\omega_{n(i)}$  = ความเร็วเชิงมุมของข้อต่อ (joint)  $i$

$L_{m/i}$  = เวกเตอร์แสดงระยะทางจุดศูนย์กลางมวล  $m$  เทียบ  $i$

$m_m$  = น้ำหนักของชิ้นส่วนก้านต่อ (link)  $m$  ที่ถูกรับแรง

ดังนั้น จะได้สมการ แรงบิดของข้อต่อ(joint) นั้นๆ เท่ากับผลรวมของแรงบิดย่อยที่รับแรง

$$T_{inertia(i)} = \sum_i^m T_{im} \quad (2.48)$$

แสดงสมการแรงที่ข้อต่อ (joint) ที่ 1 สามารถรับรับน้ำหนักหุ่นยนต์ ( $T_{inertia(1)}$ )

$$\begin{aligned} T_{12} &= m_2 \omega_1 |L_{2/1}| & T_{13} &= m_3 \omega_1 |L_{3/1}| \\ T_{14} &= m_4 \omega_1 |L_{4/1}| & T_{15} &= m_5 \omega_1 |L_{5/1}| \\ T_{16} &= m_6 \omega_1 |L_{6/1}| & T_{17} &= m_7 \omega_1 |L_{7/1}| \\ T_{inertia(1)} &= T_{12} + T_{13} + T_{14} + T_{15} + T_{16} + T_{17} \end{aligned}$$

แสดงสมการแรงที่ข้อต่อ (joint) ที่ 2 สามารถรับรับน้ำหนักหุ่นยนต์ ( $T_{inertia(2)}$ )

$$\begin{aligned} T_{23} &= m_3 \omega_2 |L_{3/2}| & T_{24} &= m_4 \omega_2 |L_{4/2}| \\ T_{25} &= m_5 \omega_2 |L_{5/2}| & T_{26} &= m_6 \omega_2 |L_{6/2}| \\ T_{27} &= m_7 \omega_2 |L_{7/2}| \\ T_{inertia(2)} &= T_{23} + T_{24} + T_{25} + T_{26} + T_{27} \end{aligned}$$

แสดงสมการแรงที่ข้อต่อ (joint) ที่ 3 สามารถรับรับน้ำหนักหุ่นยนต์ ( $T_{inertia(3)}$ )

$$\begin{aligned} T_{34} &= m_4 \omega_3 |L_{4/3}| & T_{35} &= m_5 \omega_3 |L_{5/3}| \\ T_{36} &= m_6 \omega_3 |L_{6/3}| & T_{37} &= m_7 \omega_3 |L_{7/3}| \\ T_{inertia(3)} &= T_{34} + T_{35} + T_{36} + T_{37} \end{aligned}$$

แสดงสมการแรงที่ข้อต่อ (joint) ที่ 4 สามารถรับรับน้ำหนักหุ่นยนต์ ( $T_{inertia(4)}$ )

$$\begin{aligned} T_{45} &= m_5 \omega_4 |L_{5/4}| & T_{46} &= m_6 \omega_4 |L_{6/4}| \\ T_{47} &= m_7 \omega_4 |L_{7/4}| \\ T_{inertia(4)} &= T_{45} + T_{46} + T_{47} \end{aligned}$$

แสดงสมการแรงที่ข้อต่อ (joint) ที่ 5 สามารถรับรับน้ำหนักหุ่นยนต์ ( $T_{inertia(5)}$ )

$$\begin{aligned} \tau_{56} &= m_6 \omega_5^2 |L_{6/5}| & \tau_{57} &= m_7 \omega_5^2 |L_{7/5}| \\ T_{inertia(5)} &= \tau_{56} + \tau_{57} \end{aligned}$$

แสดงสมการแรงที่ข้อต่อ (joint) ที่ 6 สามารถรับน้ำหนักหุ่นยนต์ ( $T_{inertia(6)}$ )

$$\begin{aligned} \tau_{67} &= m_7 \omega_6^2 |L_{7/6}| \\ T_{inertia(6)} &= \tau_{67} \end{aligned}$$

จากสมการที่กล่าวมาข้างต้นทั้งหมด สามารถคำนวณแรงทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับข้อต่อ(joint) ได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} T_1 &= T_{static(1)} + T_{centrifugal(1)} + T_{inertia(1)} & T_4 &= T_{static(4)} + T_{centrifugal(4)} + T_{inertia(4)} \\ T_2 &= T_{static(2)} + T_{centrifugal(2)} + T_{inertia(2)} & T_5 &= T_{static(5)} + T_{centrifugal(5)} + T_{inertia(5)} \\ T_3 &= T_{static(3)} + T_{centrifugal(3)} + T_{inertia(3)} & T_6 &= T_{static(6)} + T_{centrifugal(6)} + T_{inertia(6)} \end{aligned} \quad (2.49)$$

แรงจากการคำนวณข้างต้นนี้จะถูกนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองการเขียนโปรแกรมของหุ่นยนต์ (Simulation) ด้วยการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของปลาย end-effector แต่ละท่าทางของหุ่นยนต์กับค่าความปลอดภัย (safety factor) ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกแสดงออกมาในรูปแบบของการทำงานหรือการเข้าถึงกับพื้นที่การทำงาน (workspace)

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

การออกแบบและสร้างโปรแกรมจำลองการทำงานของแขนกล มีขั้นตอนที่สำคัญคือ ศึกษาข้อมูลหุ่นยนต์อุตสาหกรรมชนิดแกนหมุน (Articulate Arm) เฉพาะสามแกนบนของแขนกลและจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลพร้อมทั้งหาพื้นที่การทำงานที่เป็นไปได้ทั้งหมด

#### 3.1 ศึกษารูปแบบการทำงานและโครงสร้างหุ่นยนต์

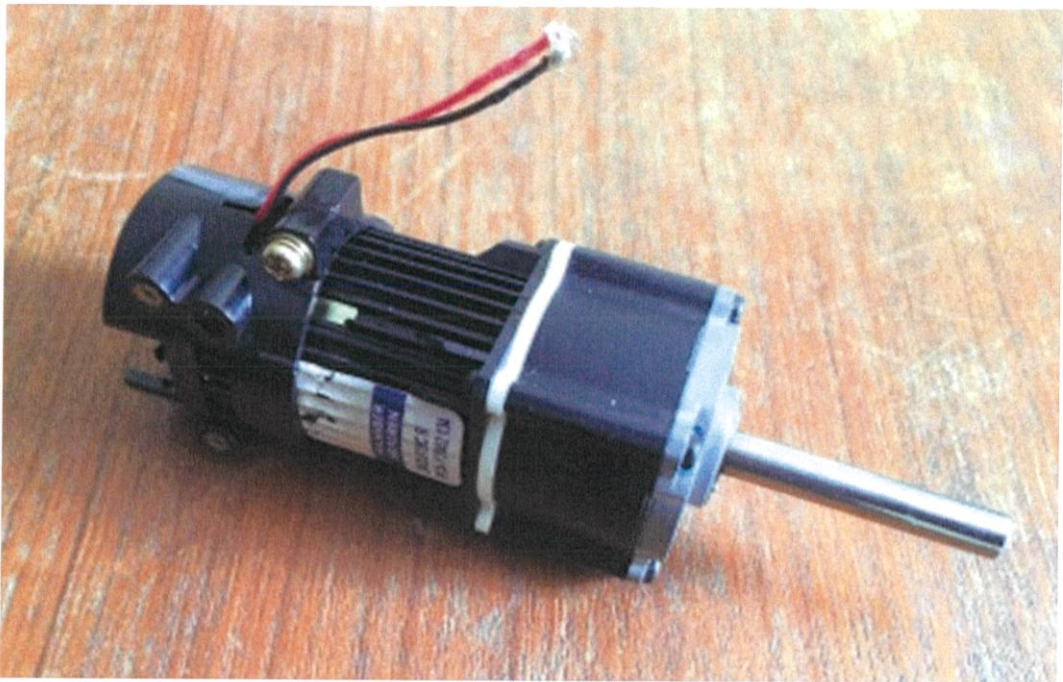
สำรวจรูปแบบของหุ่นยนต์ชนิด 6 แกน ที่มีการใช้งานทั่วไปในท้องตลาด และศึกษาหลักการทำงานของ

หุ่นยนต์รวมถึงศึกษาโครงสร้างเชิงกลของหุ่นยนต์ ซึ่งมีส่วนประกอบต่างๆที่สามารถทำให้หุ่นยนต์ทำงานได้ ส่วนประกอบดังกล่าวถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ โครงสร้างในการขับเคลื่อน และโครงสร้างในการออกแบบรูปร่างของหุ่นยนต์

#### 3.2 เขียนแบบโดยโปรแกรม SolidWorks®

ข้อกำหนดเบื้องต้นสำหรับการออกแบบให้หุ่นเฉพาะสามแกนบนมีความยาว 0.4 เมตร สามารถยกของที่มีน้ำหนัก 2 กรัม ที่ระยะห่างจากหัวจับ 0.1 เมตร และ หมุนไปด้วยความเร็ว 90 องศาต่อวินาที (15 รอบต่อนาที) ทำให้เกิด Requirement Torque =  $2 \times 0.1 \times 9.8 = 1.96$  นิวตันเมตร ซึ่งหมายถึงแรงในการยกวัตถุที่แขนกลต้องการ และจากนั้นนำค่าแรงบิดที่ต้องการไปหามอเตอร์และอัตราทดของเฟืองที่รองรับความต้องการนี้

ผลที่ได้คือเลือก มอเตอร์ Faulhaber Moteren 2342L012CR, M124-2002 134 ที่ความเร็วรอบ 150 รอบ/นาที และ แรงบิดเท่ากับ 0.096 นิวตัน และจากความเร็วรอบมอเตอร์



รูปที่3.1 DC servo motor

ต่อมาจะคำนวณหาอัตราทดเกียร์ของแต่ละข้อต่อดังนี้

จาก

Torque (requirement) = 1.96 นิวตันเมตร

Torque (motor) = 0.096 นิวตันเมตร

จะได้

อัตราทดเกียร์  $\leq 1 : (1.96/0.096)$

$\leq 1 : 20$  (ค่าที่รับได้มากที่สุด)

กล่าวได้ว่าอัตราทดเกียร์ของแต่ละข้อต่อคือ 1 : 20

ต่อมาจะคำนวณหาอัตราทดเกียร์และจำนวนฟันของเกียร์ โดยที่จะพิจารณาที่แต่ละข้อต่อ ซึ่งหุ่นที่พิจารณาจะมี 3 ข้อต่อคือ ข้อต่อที่4 ข้อต่อที่5 และข้อต่อที่6 ได้ดังนี้

ที่ข้อต่อที่ 4 จะใช้ Planetary gear ซึ่งจะสามารถหา อัตราทดเกียร์ จำนวนฟันของเกียร์ และเส้นผ่านศูนย์กลางของเกียร์ ได้ดังนี้

จาก

Torque (requirement) = 1.96 นิวตันเมตร

Torque (motor) = 0.096 นิวตันเมตร

ดังนั้น

อัตราทดเกียร์ =  $0.096 / 1.96 = 1:20$  (ค่าที่รับได้มากที่สุด)

เราเลือกใช้ Planetary Gear 2 ชั้น เพราะฉะนั้น เราจะแบ่งอัตราทดเกียร์ แต่ละเกียร์เป็น 1:6

$$\text{อัตราทดเกียร์} = \frac{1}{6} \times \frac{1}{6} = \frac{1}{36}$$

ดังนั้น 1:36 มีค่าน้อยกว่า 1:30 (ค่าที่เราได้ตั้งไว้) นั่นหมายความว่า เราสามารถใช้อัตราทดเกียร์ 1:36 และ  
ได้ความเร็วที่ข้อต่อ 4 = 25 องศาต่อวินาที

จากที่ได้อัตราทดเกียร์แล้ว จึงสามารถคำนวณเพื่อหาจำนวนฟันของเกียร์และเส้นผ่านศูนย์กลางของเกียร์  
ได้ โดยใช้สูตร (3.1) (3.2)

$$\text{gear ratio} = \frac{\text{teeth in driver}}{\text{teeth in follower}} \quad (3.1)$$

$$\text{Module} = \frac{\text{reference diameter}}{\text{number of teeth}} \quad (3.2)$$

กำหนด

Gear Module = 1

อัตราทดเกียร์ = 1:36

เกียร์มี 2 ชั้น จึงได้อัตราทดเกียร์ของแต่ละชั้นเท่ากับ 1:6

เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวขับ = 20 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลาง = 50 มิลลิเมตร

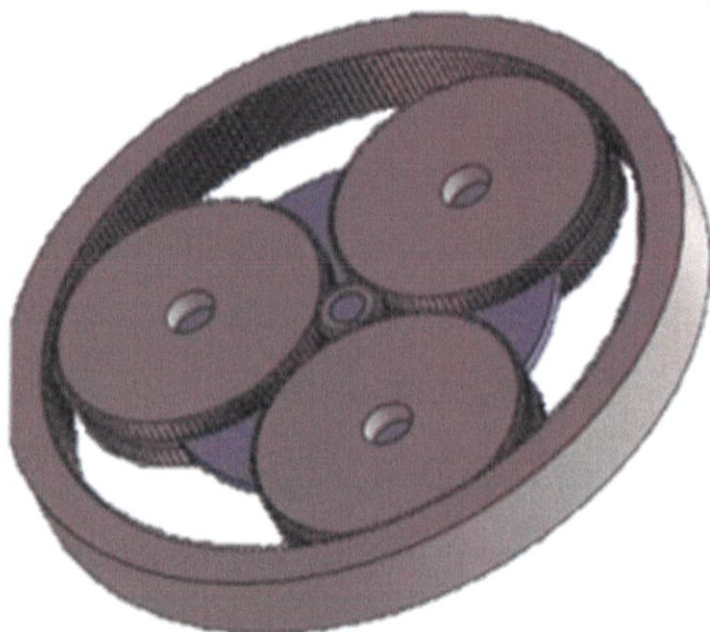
จากการคำนวณโดยใช้สูตรที่ (3.1) และ สูตรที่ (3.2) จะได้

จำนวนฟันของตัวตาม = 120 ฟัน

เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวตาม = 120 มิลลิเมตร

จำนวนฟันของตัวขับ = 20 ฟัน  
 เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวขับ = 20 มิลลิเมตร

จำนวนฟัน = 50 ฟัน  
 เส้นผ่านศูนย์กลาง = 50 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 แบบเฟืองชนิดวงแหวนสำหรับข้อต่อที่ 4

ที่ข้อต่อที่ 5 และ 6 จะใช้ Bevel gear ซึ่งจะสามารถหา อัตราทดเกียร์ จำนวนฟันของเกียร์ และเส้นผ่านศูนย์กลางของเกียร์ ได้ดังนี้

จาก

Torque (requirement) = 1.96 นิวตันเมตร

Torque (motor) = 0.096 นิวตันเมตร

ดังนั้น

อัตราทดเกียร์ =  $0.096 \times 2 / 1.96 = 1:10$  (ค่าที่รับได้มากที่สุด)

จากที่ 1:15 มีค่าน้อยกว่า 1:10 (ค่าที่เราได้ตั้งไว้) นั้นหมายถึงว่า เราสามารถใช้อัตราทดเกียร์ 1:15 ได้ โดยที่จะใช้

$$\text{อัตราทดเกียร์} = \frac{1}{5} \times \frac{1}{3}$$

โดยที่ 1/5 เป็นอัตราทดเกียร์ของ Bevel gear

1/3 เป็นอัตราทดเกียร์ของ Timing Belt

ความเร็วที่ข้อต่อ 5,6 = 60 องศาต่อวินาที

จากที่ได้อัตราทดเกียร์แล้ว จึงสามารถคำนวณเพื่อหาจำนวนฟันของเกียร์และเส้นผ่านศูนย์กลางของเกียร์ได้ โดยใช้สูตร (3.1) (3.2)

กำหนด

Gear Module = 1

อัตราทดเกียร์ = 1:5

เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวขับ = 20 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลาง = 100 มิลลิเมตร

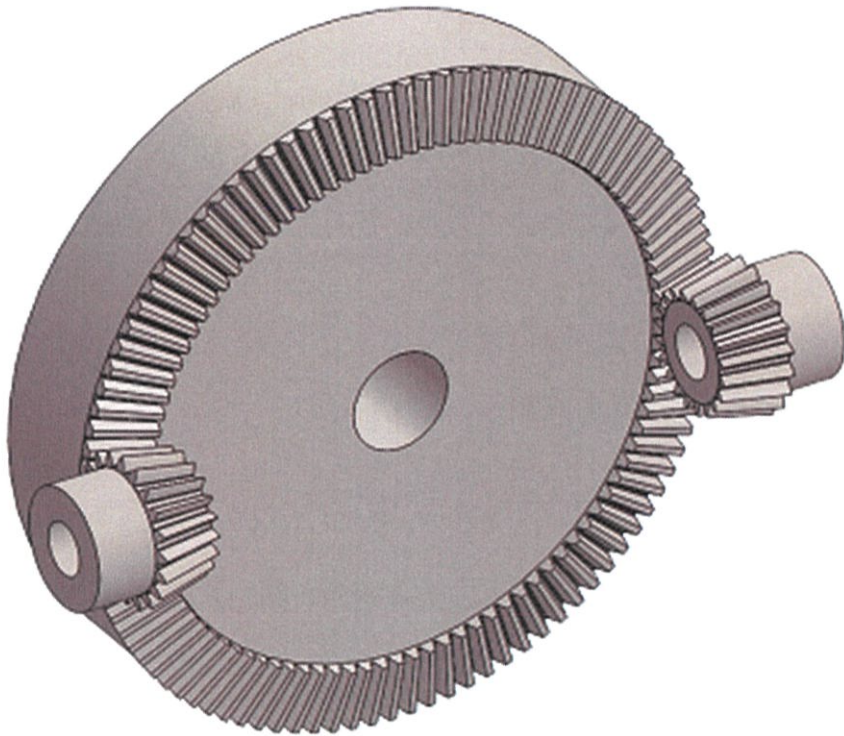
จากการคำนวณโดยใช้สูตรที่ (3.1) และ สูตรที่ (3.2) จะได้

จำนวนฟันของตัวขับ = 20 ฟัน

เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวขับ = 20 มิลลิเมตร

จำนวนฟันของตัวตาม = 100 ฟัน

เส้นผ่านศูนย์กลางของตัวตาม = 100 มิลลิเมตร

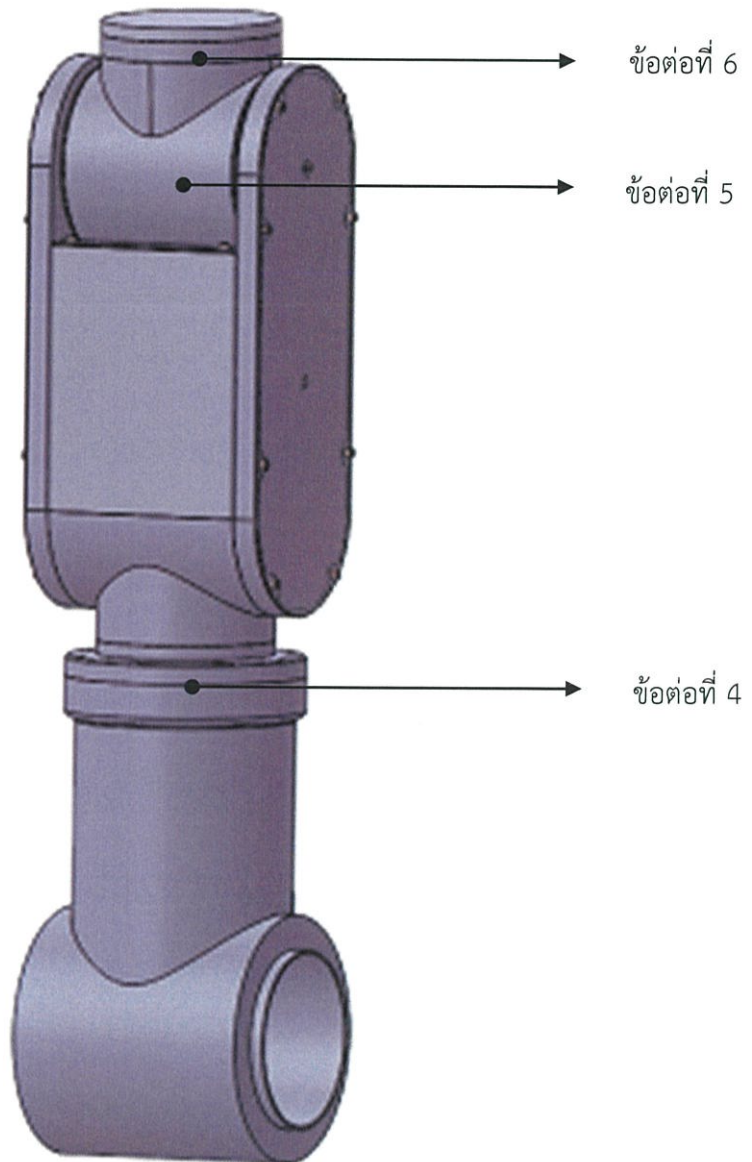


รูปที่ 3.3 แบบเฟืองชนิดปีเวลสำหรับข้อต่อที่ 5 และ 6

ซึ่งจากการคำนวณจึงเลือกใช้เฟืองชนิดวงแหวนสำหรับข้อต่อที่ 4 เป็นชุดเฟือง 2 ชั้นที่อัตราทด 1:36 (ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1:30) จะทำให้หุ่นยนต์มีความเร็ว 25 องศาต่อวินาที ข้อต่อที่ 5 และ 6 เป็นเฟือง Bevel gear ให้อัตราทดที่ 1:15 โดยที่ 1/5 เป็นของ Bevel gear และ 1/3 เป็นของ Timing Belt (ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 1:10) ให้ความเร็วการหมุนที่ 60 องศาต่อวินาที

### 3.3 การเขียนแบบเพื่อแสดงรายละเอียดของแต่ละชิ้นส่วน

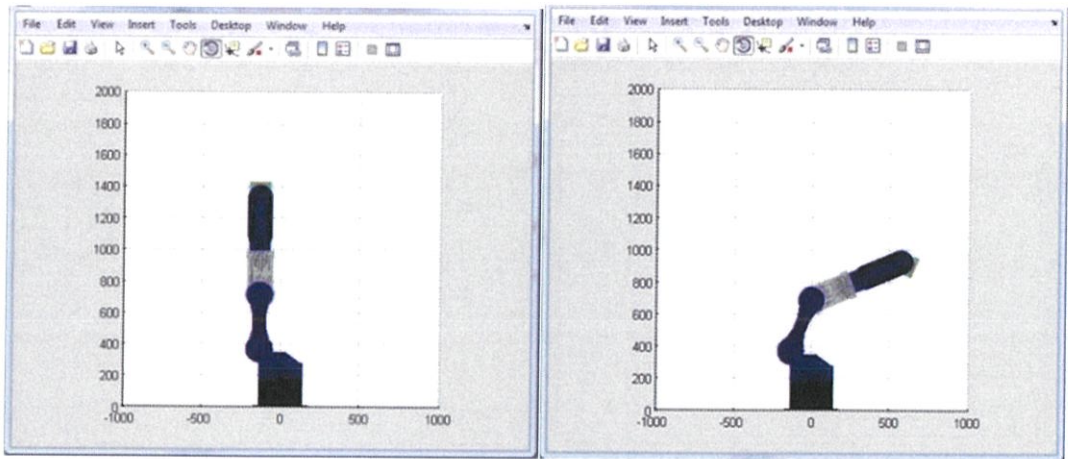
เมื่อเลือกขนาดของ Planetary gear และ Bevel gear ได้แล้ว จึงออกแบบให้หุ่นเฉพาะสามแกน บนมีโดยกำหนดความยาว 0.4 เมตร ประเมินผลชิ้นงานที่ได้ออกแบบสร้างขึ้น โดยการทดสอบค่ามวลของ ชิ้นส่วนด้วยโปรแกรม SolidWorks® ใช้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุหลักในการผลิต ซึ่งโปรแกรม Solidworks® ได้ให้น้ำหนักของแกนกลส่วนสามแกนบนเท่ากับ 13.27 กิโลกรัม โดยแบบรายละเอียดทั้งหมดสามารถดูได้ที่ภาคผนวก ข.



รูปที่ 3.4 Lower Arm Part

### 3.4 เขียนโปรแกรม MATLAB® เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

เขียนโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ โดยเริ่มจากการนำเมตริกที่ประกอบไปด้วยขนาดของ หุ่นยนต์ได้มาจาก Stl File นำมาเขียนฟังก์ชันกลศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward Function) เป็นการคำนวณหาตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลจากค่าของมุมข้อต่อและขนาดของก้านซึ่งเป็นการแทนค่าตัวแปร (มุมข้อต่อ) เพื่อหาตำแหน่งปลายของหุ่นยนต์ โดยแบบโปรแกรมทั้งหมดสามารถดูได้ที่ภาคผนวก ก.



รูปที่3.5 การจำลองหุ่นยนต์

เขียนฟังก์ชันการหาแรงบิด จากทฤษฎีแรงบิดคือแรงคูณกับระยะทาง ในที่นี้จะพิจารณาทีละข้อต่อที่เปรียบเทียบระยะทางจากข้อต่อแรกไปยังทุกทุกข้อต่อ เมื่อโปรแกรม MATLAB® ประมวลผลจะได้เวกเตอร์ของแรงบิดข้อต่อหาแรงบิดของแต่ละก้านในสามแกนล่าง ที่เคลื่อนที่ไปที่ละ 8 องศา จะได้ข้อมูลทั้งหมด 91,125 ข้อมูล ซึ่งแต่ละชุดข้อมูลจะประกอบด้วยแรงบิด และค่ามุมของแต่ละก้าน นำข้อมูลแรงบิดของแต่ละท่าทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เพื่อหาค่าความปลอดภัย (Safety Factor) เมื่อเทียบแรงบิดของมอเตอร์ พร้อมก็นำค่าพิคัดของแต่ละแกนผ่านการดำเนินการของ forward function แล้วนำไปวาดกราฟทรงรีของแรงในการดำเนินการ เปรียบเทียบค่าความปลอดภัยของแรงบิดกับตำแหน่งของปลายแขนกลดังสมการ 3.3

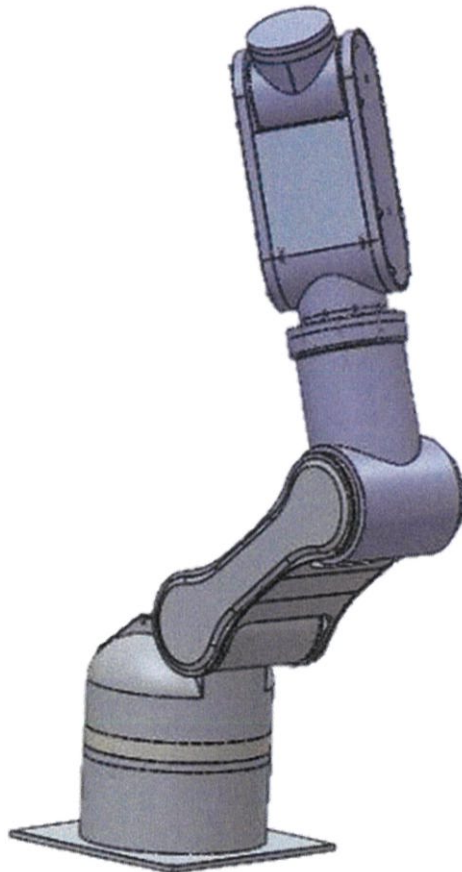
$$\text{Safety Factor} = 1 + \frac{T_{\text{motor}} - \min\{T_1, T_2, T_3\}}{T_{\text{motor}}} \quad (3.3)$$

## บทที่ 4

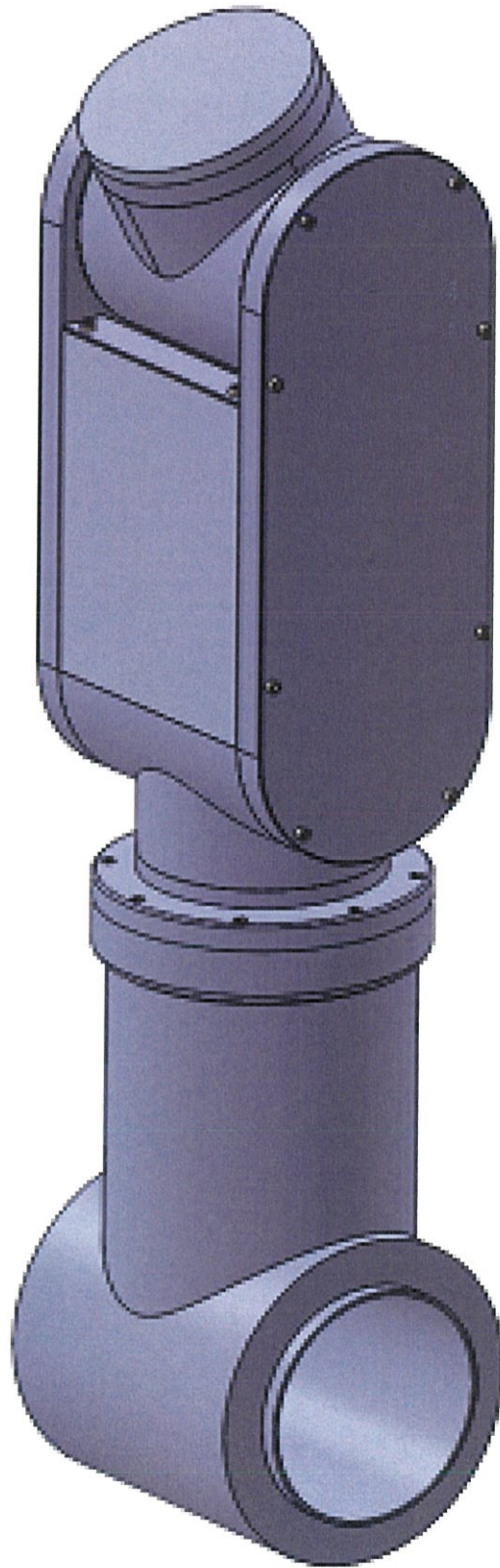
### ผลการดำเนินงาน

#### 4.1 ผลจากการออกแบบแขนกล

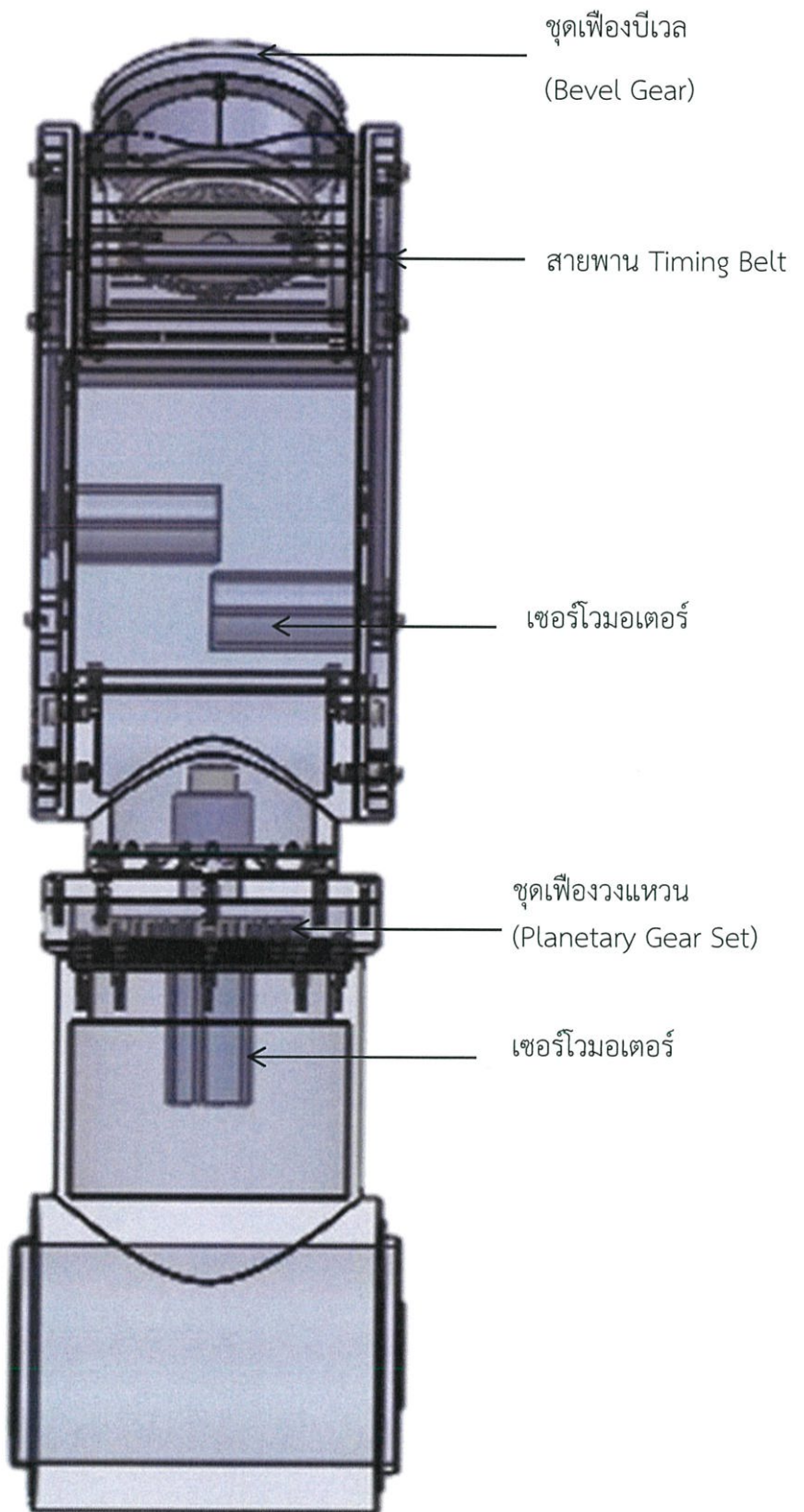
การออกแบบแขนกลโดยใช้โปรแกรม Solidworks® ประกอบด้วย 3 แกนหมุน ซึ่งเริ่มตั้งแต่แกนที่ 4 (Joint4) ที่ใช้ชุดขับเคลื่อนชนิดเฟืองวงแหวน (Planetary Gear Set) โดยมีทิศทางการหมุนรอบแกน Z ต่อด้วยแกนที่ 5 (Joint5) มีชุดเฟืองบีเวล (Bevel Gear) ทำงานร่วมกับสายพาน Timing Belt โดยมีทิศทางการหมุนรอบแกน Y และในแกนที่ 6 หมุนรอบแกน Z ในแกนที่ 6 และแต่ละแกนมีเซอร์โวมอเตอร์รุ่น Faulhaber Moteren 2342L012CR, M124-2002 134 ประกอบกันในโครงแขนกล (Links) ที่ออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถึง รูปที่ 4.3



รูปที่ 4.1 Design of 6-axis Industrial Robot



รูปที่ 4.2 Designing of 6-axis Industrial Robot (Lower Arm Part)



รูปที่ 4.3 โครงสร้างด้านในแกนกลและตำแหน่งขององค์ประกอบของแกนกลต่างๆ

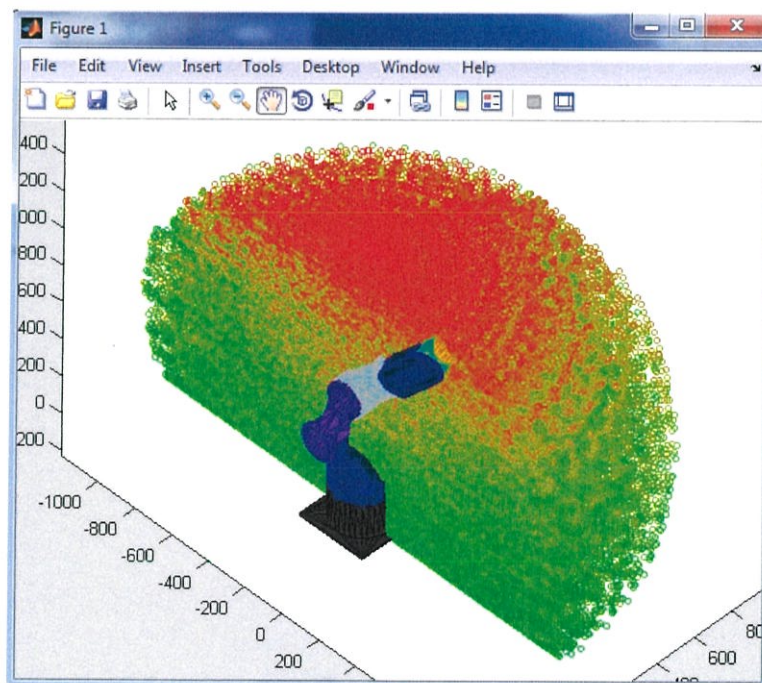
#### 4.2 ผลจากการวิเคราะห์ความสามารถในการรับภาระงาน

จำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลดังกล่าวโดยใช้โปรแกรม MATLAB® โดยให้ MATLAB® ประมวลผลข้อมูลในเมตริกซ์แสดงลักษณะการเคลื่อนที่บนพิกัดสามมิติ และคำนวณค่าความปลอดภัยในการออกแบบการรองรับภาระงานของหุ่นยนต์ (Pay Load) ที่มอเตอร์ต้องมีค่าแรงบิดมากเกินพอต่อการยกภาระงานนั้นให้เคลื่อนที่ในความเร็วที่กำหนดไว้โดยผลที่ได้จะระบุถึงประสิทธิภาพการรับน้ำหนักในแต่ละท่าทางการเคลื่อนที่ของแขนกลภายในพื้นที่การทำงานที่เป็นไปได้ทั้งหมดผลที่ได้จากการทดลองให้ค่าความปลอดภัยที่น้อยสุดตามต้องการ มีค่าเท่ากับ 1.0

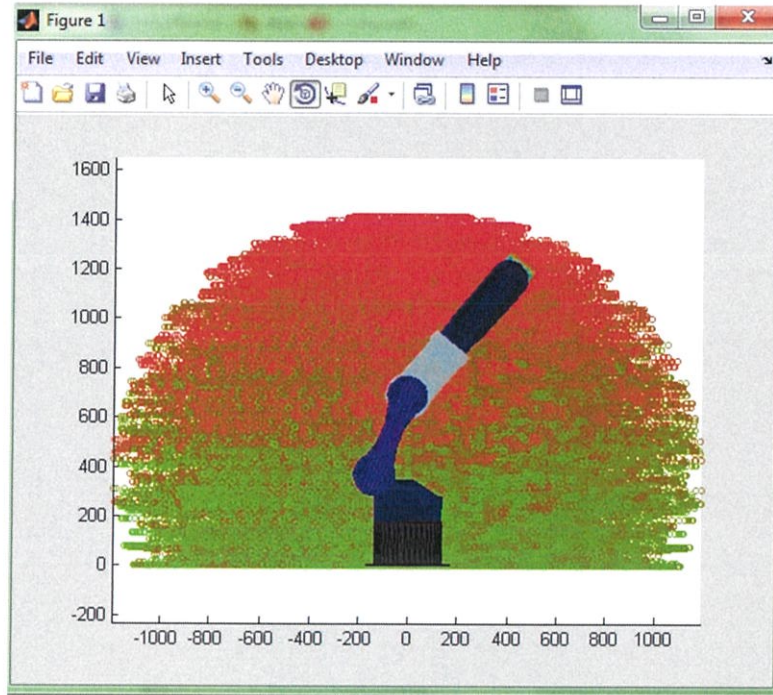
$$\text{ค่าความปลอดภัย(Safety Factor)} = 1 + \frac{T_{\text{motor}} - \min\{T_1, T_2, T_3\}}{T_{\text{motor}}} \quad (4.1)$$

ความสามารถของการเคลื่อนที่ในแต่ละทิศทางที่แตกต่างกันนี้สามารถอธิบายในเชิงปริมาณได้ด้วยการจำลองพื้นที่การทำงานของหุ่น หุ่นยนต์ที่สามารถหยิบ จับ เคลื่อนย้าย มีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งของได้ในพื้นที่การทำงาน (workspace) ของมัน แต่ไม่สามารถทำงานนอกพื้นที่การทำงานได้ รูปที่ 4.4 ถึง 4.7 แสดงภาพของพื้นที่การทำงานที่เห็นเป็นรูปทรงกลมรี (ภาพที่แสดงเป็นการตัดส่วนพื้นที่การทำงานออกมาเพียงครึ่งซ้ายของหุ่น) พร้อมกันนี้สีของพื้นที่การทำงานจะลงสีไล่ระดับระหว่างเขียวกับแดง โดยสีเขียวเป็นตำแหน่งที่ค่า Safety Factor มากกว่า 1.0 มาก และ จะเปลี่ยนเป็นสีผสมแดงเมื่อ Safety Factor เข้าใกล้ 1.0

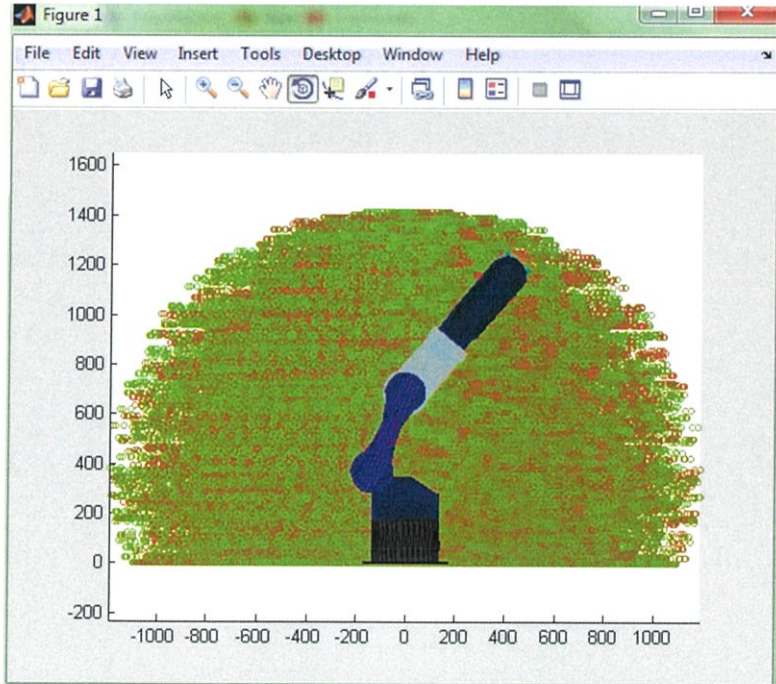
ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลทั้ง6แกน



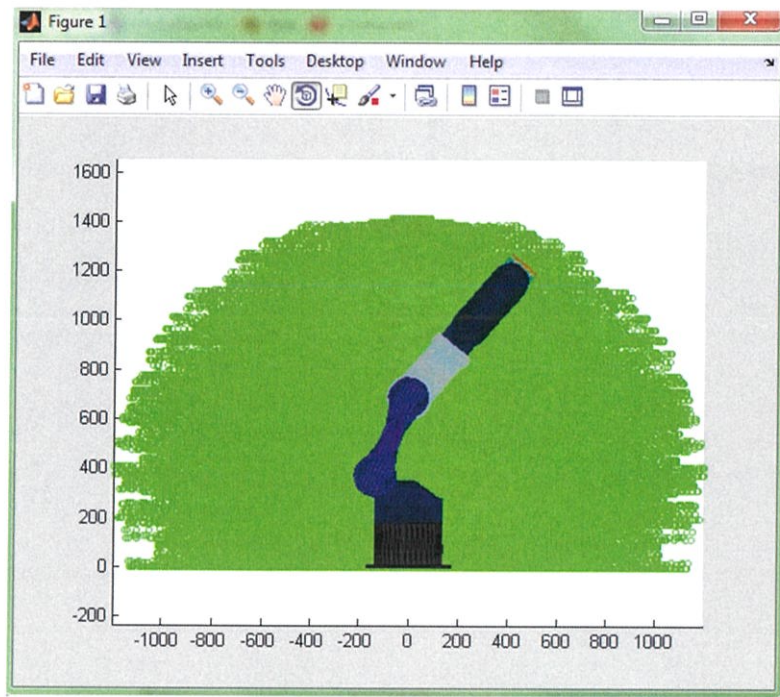
รูปที่ 4.4 Workspace of 6 Axis Robot Arm



รูปที่ 4.5 Safety Factor of Joint 4



รูปที่ 4.6 Safety Factor of Joint 5



รูปที่ 4.7 แสดง Safety Factor of Joint 6

## บทที่ 5

### สรุปผลและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

#### 5.1 สรุปผล

จากการออกแบบโครงสร้าง ส่วนประกอบ และ รูปแบบการทำงาน ของหุ่นยนต์ชนิด Articulated Arm (Revolute) หรือ แขนกล โดยเฉพาะส่วนสามแกนบน แบบหุ่นยนต์ที่ออกแบบ สามารถรับภาระงานที่กำหนดไว้ได้ น้ำหนักยกที่ 2 กิโลกรัม โดยมีระยะห่างจากปลาย end-effector 10 มิลลิเมตร มีความยาวของแขนกล 400 มิลลิเมตร น้ำหนักของแบบแขนกลเฉพาะสามแกนบนเท่ากับ 13.59 กิโลกรัม จากน้ำหนักหุ่นยนต์ทั้งตัว 40.43 กิโลกรัม มีความเร็วรอบแกนหมุนที่ 4 เท่ากับ 25 องศาต่อรอบ ความเร็วรอบแกนหมุนที่ 5 และ 6 เท่ากับ 60 องศาต่อรอบ และมีค่าความปลอดภัย (Safety factor) แกนที่ 4, 5 และ 6 มีค่าเท่ากับ 1.00, 1.172 และ 1.931 ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 สรุปผลคุณสมบัติของแขนกลเฉพาะส่วนสามแกนบน

Safety factor of Robot	Upper Arm Part	Joint4	Z axis	1.00
		Joint5	y axis	1.172
		Joint6	z axis	1.931
Max speed envelope (degree per round)	Lower Arm Part	Joint4	z axis	25
		Joint5	y axis	60
		Joint6	z axis	60
Motor (round per minute)	Lower Arm Part			150
Height (millimeter)				400
Wight (kilogram)				40.43
Wight of lower arm part (kilogram)				13.59
Payload (kilogram)				2
Distance from end-effector (millimeter)				100

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

การออกแบบสามารถเปลี่ยนลักษณะโครงสร้างหรือส่วนประกอบต่างๆได้ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการทำงานของหุ่นยนต์ตามที่ต้องการ ซึ่งการออกแบบแขนกลครั้งนี้เป็นแบบแรก ทำให้ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลในบทที่ 4 ภาพของพื้นที่การทำงานที่(workspace) และ ค่าความปลอดภัย (Safety Factor) ต่ำสุดของทั้งหมด มีค่าเท่ากับ 1.00 ซึ่งยืนยันว่าแบบหุ่นยนต์ที่ออกแบบสามารถรับภาระงานพอเพียงที่กำหนดไว้ได้แต่จะไม่สามารถรับแรงส่วนเกินเพิ่มเติมได้ ข้อเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของมอเตอร์ของแกนหมุนที่ 4 ด้วยสามารถทำได้โดยเพิ่มอัตราทดของแกนหมุนที่ 4 เป็นการปรับลดความเร็วรอบลงจะทำให้แขนกลสามารถรับน้ำหนักที่ปลายได้มากขึ้น หรือ สามารถเปลี่ยนมอเตอร์ที่มีกำลังมากขึ้นทำให้ค่าความปลอดภัยมากขึ้นเช่นกันและไม่ต้องเปลี่ยนรูปลักษณะโครงสร้างที่ออกแบบเนื่องจากช่องใส่มอเตอร์ยังมีช่องว่างมากพอ

## เอกสารอ้างอิง

- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศ์แสน พิทักษ์วัชร. (2557). พื้นฐานของหุ่นยนต์ กลศาสตร์ของหุ่นยนต์แบบอนุกรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พฤทธิกร สมิตไมตรี, 2551. วิทยาการหุ่นยนต์และเทคโนโลยี Robotics and Technology. สงขลา: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สถาพร ลักษณะเจริญ, 2548. วิศวกรรมหุ่นยนต์ Robotics Engineering. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น)
- สุทิน ชาญณรงค์, 2537. การศึกษาจลนศาสตร์ พลศาสตร์และการควบคุมหุ่นยนต์แบบกลไก 6 องศาความอิสระ. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- Fu, Gonzalez, and Lee, 1987. Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence. Singapore: Chong Moh Offset Printing Pte Ltd

ภาคผนวก ก

## คำสั่งที่ใช้ในโปรแกรม Matlab®

### คำสั่ง (Function ) ใช้ในการวาดรูปร่างโครงสร้างหุ่นยนต์ (position)

#### “DrawRobot”

```
clf
hold on
axis equal
axis ([-1000 1000 -1000 1000 0 1600])
view(45,45)
grid on
camlight
lighting phong

Robot.p1=patch('Vertices',Robot.A1X(:,1:3),'Faces',Robot.A1F,'FaceColor',[0.7,0.7,0.7],'EdgeColor',
',[0.65,0.65,0.7]);
Robot.p2=patch('Vertices',Robot.A2X(:,1:3),'Faces',Robot.A2F,'FaceColor',[0.7,0.7,0.7],'EdgeColor',
',[0.65,0.65,0.7]);
Robot.p3=patch('Vertices',Robot.A3X(:,1:3),'Faces',Robot.A3F,'FaceColor',[0.7,0.7,0.7],'EdgeColor',
',[0.65,0.65,0.7]);
Robot.p4=patch('Vertices',Robot.A4X(:,1:3),'Faces',Robot.A4F,'FaceColor',[0.7,0.7,0.7],'EdgeColor',
',[0.65,0.65,0.7]);
Robot.p5=patch('Vertices',Robot.A5X(:,1:3),'Faces',Robot.A5F,'FaceColor',[0.7,0.7,0.7],'EdgeColor',
',[0.65,0.65,0.7]);
Robot.p6=patch('Vertices',Robot.A6X(:,1:3),'Faces',Robot.A6F,'FaceColor',[0.7,0.7,0.7],'EdgeColor',
',[0.65,0.65,0.7]);
Robot.p7=patch('Vertices',Robot.A7X(:,1:3),'Faces',Robot.A7F,'FaceColor',[0.7,0.7,0.7],'EdgeColor',
',[0.65,0.65,0.7]);

set(Robot.p1,'FaceColor',[.1,.1,.1],'EdgeColor',[.0,.0,.0]);
set(Robot.p2,'FaceColor',[.0,.15,.20],'EdgeColor',[.0,.05,.5]);
```

```

set(Robot.p3,'FaceColor',[.5,.03,.9],'EdgeColor',[.0,.01,.5]);
set(Robot.p4,'FaceColor',[.33,.7,.7],'EdgeColor',[.6,.6,.6]);
set(Robot.p5,'FaceColor',[.0,.15,.2],'EdgeColor',[.0,.05,.5]);
set(Robot.p6,'FaceColor',[1,.5,.1],'EdgeColor',[.0,.7,.5]);
set(Robot.p7,'FaceColor',[.8,.7,.0],'EdgeColor',[.7,.4,.0]);

```

```
drawnow
```

### คำสั่ง (Function) ใช้ในการแสดงหมุน (Rotation)

“RM”

```
function Mx=RM(q,a)
```

```
if a==1;
```

```

Mx=[1    0    0    0;   %x
    0   cos(q) -sin(q) 0;
    0   sin(q)  cos(q) 0;
    0    0    0    1];

```

```
end
```

```
if a==2;
```

```

Mx=[cos(q) 0    sin(q) 0;   %y
    0    1    0    0;
   -sin(q) 0    cos(q) 0;
    0    0    0    1];

```

```
end
```

```
if a==3;
```

```

Mx=[cos(q) -sin(q) 0    0;   %z
    sin(q)  cos(q) 0    0;
    0    0    1    0;
    0    0    0    1];

```

```
end
```

คำสั่ง (Function ) ใช้ในการบอกตำแหน่งและทิศทางของหุ่นยนต์ (Translation)

“RT”

```
function Mx=RT(qx,qy,qz)
Mx=[1    0    0    qx; %T
    0    1    0    qy;
    0    0    1    qz;
    0    0    0    1];
End
```

คำสั่ง (Function ) ใช้ในการคำนวณตำแหน่ง (position)

“fw”

```
function ot=fw(q)

Robot.B0 = RT(0,0,0);
Robot.B1 = Robot.B0*RT(0,0,180)*RM(q(1),3);
Robot.B2 = Robot.B1*RT(-137,0,190)*RM(q(2),2);
Robot.B3 = Robot.B2*RT(0,0,345)*RM(q(3),2);
Robot.B4 = Robot.B3*RT(0,0,275)*RM(q(4),3);
Robot.B5 = Robot.B4*RT(0,0,345)*RM(q(5),2);
Robot.B6 = Robot.B5*RT(0,0,85)*RM(q(6),3);
Robot.B7 = Robot.B6*RT(0,0,10);
ot=Robot.B7(1:3,4) ;
```

คำสั่ง (Function ) ใช้ในการคำนวณค่าความปลอดภัย (Safety Factor)

SF

```
function op=SF(T)
```

```
SF1=(365-T(1))/365;  
SF2=(456.25-T(2))/456.25;  
SF3=(456.25-T(3))/456.25;  
SF4=(3.456-T(4))/3.456;  
SF5=(2.88-T(5))/2.88;  
SF6=(2.88-T(6))/2.88;  
SF=[SF1 SF2 SF3 SF4 SF5 SF6];  
op=(min(SF));
```

### คำสั่งใช้ในการจำลองหรือวาดหุ่นยนต์ ในโปรแกรม

#### **“PartRobot”**

```
clear all;  
clc;  
load T1.txt  
load T2.txt  
load T3.txt  
load T4.txt  
load T5.txt  
load T6.txt  
load T7.txt  
  
Robot.A1=T1;  
Robot.A2=T2;  
Robot.A3=T3;  
Robot.A4=T4;  
Robot.A5=T5;  
Robot.A6=T6;  
Robot.A7=T7;  
%%Robot.toolF=toolF;
```

```
clear T1 T2 T3 T4 T5 T6 T7
```

```
Robot.A1F=zeros(480/3,3);  
Robot.A1F(:,1)=1:3:(480)-2;  
Robot.A1F(:,2)=2:3:(480)-1;  
Robot.A1F(:,3)=3:3:(480);
```

```
Robot.A2F=zeros(2442/3,3);  
Robot.A2F(:,1)=1:3:(2442)-2;  
Robot.A2F(:,2)=2:3:(2442)-1;  
Robot.A2F(:,3)=3:3:(2442);
```

```
Robot.A3F=zeros(2400/3,3);  
Robot.A3F(:,1)=1:3:(2400)-2;  
Robot.A3F(:,2)=2:3:(2400)-1;  
Robot.A3F(:,3)=3:3:(2400);
```

```
Robot.A4F=zeros(1884/3,3);  
Robot.A4F(:,1)=1:3:(1884)-2;  
Robot.A4F(:,2)=2:3:(1884)-1;  
Robot.A4F(:,3)=3:3:(1884);
```

```
Robot.A5F=zeros(1200/3,3);  
Robot.A5F(:,1)=1:3:(1200)-2;  
Robot.A5F(:,2)=2:3:(1200)-1;  
Robot.A5F(:,3)=3:3:(1200);
```

```
Robot.A6F=zeros(1620/3,3);  
Robot.A6F(:,1)=1:3:(1620)-2;
```

```
Robot.A6F(:,2)=2:3:(1620)-1;
```

```
Robot.A6F(:,3)=3:3:(1620);
```

```
Robot.A7F=zeros(492/3,3);
```

```
Robot.A7F(:,1)=1:3:(492)-2;
```

```
Robot.A7F(:,2)=2:3:(492)-1;
```

```
Robot.A7F(:,3)=3:3:(492);
```

```
Robot.A1=(RT(-170,-170,0)*[Robot.A1 ones(480,1)]');;
```

```
Robot.A2=(RT(-213,-137,-180)*[Robot.A2 ones(2442,1)]');;
```

```
Robot.A3=(RT(-85,-119,-370)*[Robot.A3 ones(2400,1)]');;
```

```
Robot.A4=(RT(-87.5,-100,-87.5)*[Robot.A4 ones(1884,1)]');;
```

```
Robot.A5=(RT(-75,-94,-275)*[Robot.A5 ones(1200,1)]');;
```

```
Robot.A6=(RT(-65,-75,-621)*[Robot.A6 ones(1620,1)]');;
```

```
Robot.A7=(RT(-62.5,-62.5,-705)*[Robot.A7 ones(492,1)]');;
```

```
hold on
```

```
grid on
```

```
axis equal
```

```
view (45,45)
```

```
axis ([-1000 1000 -1000 1000 -200 1000])
```

```
Robot.p1=patch('Vertices',Robot.A1(:,1:3),'Faces',Robot.A1F,'FaceColor',[.1,.1,.1],'EdgeColor',[0,.0,.0]);
```

```
Robot.p2=patch('Vertices',Robot.A2(:,1:3),'Faces',Robot.A2F,'FaceColor',[0,.15,.20],'EdgeColor',[0,.05,.5]);
```

```
Robot.p3=patch('Vertices',Robot.A3(:,1:3),'Faces',Robot.A3F,'FaceColor',[.5,.03,.9],'EdgeColor',[0,.01,.5]);
```

```
Robot.p4=patch('Vertices',Robot.A4(:,1:3),'Faces',Robot.A4F,'FaceColor',[.33,.7,.7],'EdgeColor',[.6,.6,.6]);
```

```
Robot.p5=patch('Vertices',Robot.A5(:,1:3),'Faces',Robot.A5F,'FaceColor',[.0,.15,.2],'EdgeColor',[.0,.05,.5]);
```

```
Robot.p6=patch('Vertices',Robot.A6(:,1:3),'Faces',Robot.A6F,'FaceColor',[.9,.5,.1],'EdgeColor',[.0,.03,.5]);
```

```
Robot.p7=patch('Vertices',Robot.A7(:,1:3),'Faces',Robot.A7F,'FaceColor',[.8,.7,.0],'EdgeColor',[.7,.4,.0]);
```

### คำสั่งใช้ในการสร้างแบบจำลองหุ่นยนต์ทั้งหมดรวมถึงคำนวณแรงและตำแหน่งของหุ่นยนต์

#### “CodeRobot”

```
%% initial
```

```
clear all ;
```

```
clc ;
```

```
load PartRobot
```

```
k=0;
```

```
kk=0;
```

```
data=zeros(1166400,12);
```

```
P=[500 500 1000 0 0 0];
```

```
q=[0 0 0 0 0 0];
```

```
dq=[0 0 0 0 0 0];
```

```
dp=[0 0 0 0 0 0];
```

```
CG1=[-104.97,241.58,296.82]/1000;
```

```
CG2=[-163.03,239.7,515.76]/1000;
```

```
CG3=[-241.94,241.67,766.21]/1000;
```

```
CG4=[-242.2,239.66,1027.7]/1000;
```

```
CG5=[-241.63,241.48,1398.87]/1000;
```

```
CG6=[-241.34,241.47,1602.68]/1000;
```

```
CG7=[-241.38,241.47,1681.42]/1000;
```

```
m2=10528.86/1000;
m3=3535.49/1000;
m4=7044.81/1000;
m5=2825.90/1000;
m6=3326.74/1000;
m7=399.26/1000;
m8=2;
```

```
W1=[0 0 3.142];
W2=[0 2.512 0];
W3=[0 2.512 0];
W4=[0 0 0.436];
W5=[0 1.047 0];
W6=[0 0 1.047];
tic;
```

```
for q1=0:pi/22.5:2*pi-.001
    for q2=0:pi/22.5:2*pi-.001
        for q3=0:pi/22.5:2*pi-.001
            for q4=0:pi/12:2*pi-.001
                for q5=0:pi/12:2*pi-.001
```

```
q=[q1 q2 q3 q4 q5 0];
    q=q+dq;
```

```
Robot.B0 = RT(0,0,0);
Robot.B1 = Robot.B0*RT(0,0,180)*RM(q(1),3);
Robot.B2 = Robot.B1*RT(-137,0,190)*RM(q(2),2);
Robot.B3 = Robot.B2*RT(0,0,345)*RM(q(3),2);
Robot.B4 = Robot.B3*RT(0,0,275)*RM(q(4),3);
```

```

Robot.B5 = Robot.B4*RT(0,0,345)*RM(q(5),2);
Robot.B6 = Robot.B5*RT(0,0,85)*RM(q(6),3);
Robot.B7 = Robot.B6*RT(0,0,10);

```

```

W1P=((Robot.B1(1:3,1:3))*W1)';
W2P=((Robot.B2(1:3,1:3))*W2)';
W3P=((Robot.B3(1:3,1:3))*W3)';
W4P=((Robot.B4(1:3,1:3))*W4)';
W5P=((Robot.B5(1:3,1:3))*W5)';
W6P=((Robot.B6(1:3,1:3))*W6)';

```

```
%% Transformation
```

```

Robot.A1X = (Robot.B0*Robot.A1)' ;
Robot.A2X = (Robot.B1*Robot.A2)';
Robot.A3X = (Robot.B2*Robot.A3)' ;
Robot.A4X = (Robot.B3*Robot.A4)';
Robot.A5X = (Robot.B4*Robot.A5)' ;
Robot.A6X = (Robot.B5*Robot.A6)';
Robot.A7X = (Robot.B6*Robot.A7)' ;

```

```
%% Jacobian
```

```

Robot.J=zeros(6,6);
Robot.J(:,1)=[cross(Robot.B1(1:3,3),Robot.B7(1:3,4)-Robot.B1(1:3,4));Robot.B1(1:3,3)];
Robot.J(:,2)=[cross(Robot.B2(1:3,2),Robot.B7(1:3,4)-Robot.B2(1:3,4));Robot.B2(1:3,2)];
Robot.J(:,3)=[cross(Robot.B3(1:3,2),Robot.B7(1:3,4)-Robot.B3(1:3,4));Robot.B3(1:3,2)];
Robot.J(:,4)=[cross(Robot.B4(1:3,3),Robot.B7(1:3,4)-Robot.B4(1:3,4));Robot.B4(1:3,3)];
Robot.J(:,5)=[cross(Robot.B5(1:3,2),Robot.B7(1:3,4)-Robot.B5(1:3,4));Robot.B5(1:3,2)];
Robot.J(:,6)=[cross(Robot.B6(1:3,3),Robot.B7(1:3,4)-Robot.B6(1:3,4));Robot.B6(1:3,3)];

```

```
% dp=(P-[Robot.B7(1:3,4)' [0 0 0]])/100;
```

```
dq=(inv(Robot.J)*dp');
```

```
% joint 1
```

```
T12=cross((Robot.B1(1:3,4)/1000)+(CG2')-(Robot.B1(1:3,4)/1000),m2*[0 0 -9.8 ]);
```

```
T13=cross((Robot.B2(1:3,4)/1000)+(CG3')-(Robot.B1(1:3,4)/1000),m3*[0 0 -9.8 ]);
```

```
T14=cross((Robot.B3(1:3,4)/1000)+(CG4')-(Robot.B1(1:3,4)/1000),m4*[0 0 -9.8 ]);
```

```
T15=cross((Robot.B4(1:3,4)/1000)+(CG5')-(Robot.B1(1:3,4)/1000),m5*[0 0 -9.8 ]);
```

```
T16=cross((Robot.B5(1:3,4)/1000)+(CG6')-(Robot.B1(1:3,4)/1000),m6*[0 0 -9.8 ]);
```

```
T17=cross((Robot.B6(1:3,4)/1000)+(CG7')-(Robot.B1(1:3,4)/1000),m7*[0 0 -9.8 ]);
```

```
T18=cross(((Robot.B7(1:3,4)/1000)-(Robot.B1(1:3,4)/1000)),m8*[0 0 -9.8 ]);
```

```
T12C=m2*(cross(W1,(Robot.B1(1:3,4)/1000)+(CG2')-(Robot.B1(1:3,4)/1000))).^2;
```

```
T13C=m3*(cross(W1,(Robot.B2(1:3,4)/1000)+(CG3')-(Robot.B1(1:3,4)/1000))).^2;
```

```
T14C=m4*(cross(W1,(Robot.B3(1:3,4)/1000)+(CG4')-(Robot.B1(1:3,4)/1000))).^2;
```

```
T15C=m5*(cross(W1,(Robot.B4(1:3,4)/1000)+(CG5')-(Robot.B1(1:3,4)/1000))).^2;
```

```
T16C=m6*(cross(W1,(Robot.B5(1:3,4)/1000)+(CG6')-(Robot.B1(1:3,4)/1000))).^2;
```

```
T17C=m7*(cross(W1,(Robot.B6(1:3,4)/1000)+(CG7')-(Robot.B1(1:3,4)/1000))).^2;
```

```
T12l=m2*W1P*norm((Robot.B1(1:3,4)/1000)+(CG2')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));
```

```
T13l=m3*W1P*norm((Robot.B2(1:3,4)/1000)+(CG3')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));
```

```
T14l=m4*W1P*norm((Robot.B3(1:3,4)/1000)+(CG4')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));
```

```
T15l=m5*W1P*norm((Robot.B4(1:3,4)/1000)+(CG5')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));
```

```
T16l=m6*W1P*norm((Robot.B5(1:3,4)/1000)+(CG6')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));
```

```
T17l=m7*W1P*norm((Robot.B6(1:3,4)/1000)+(CG7')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));
```

```
T1=T12+T13+T14+T15+T16+T17+T18+T12C+T13C+T14C+T15C+T16C+T17C+T12l+T13l+T14l+  
T15l+T16l+T17l;
```

```
% joint2
```

```
T23=cross((Robot.B2(1:3,4)/1000)+(CG3')-(Robot.B2(1:3,4)/1000),m3*[0 0 -9.8 ]);
```

```

T24=cross((Robot.B3(1:3,4)/1000)+(CG4')-(Robot.B2(1:3,4)/1000),m4*[0 0 -9.8 ]);
T25=cross((Robot.B4(1:3,4)/1000)+(CG5')-(Robot.B2(1:3,4)/1000),m5*[0 0 -9.8 ]);
T26=cross((Robot.B5(1:3,4)/1000)+(CG6')-(Robot.B2(1:3,4)/1000),m6*[0 0 -9.8 ]);
T27=cross((Robot.B6(1:3,4)/1000)+(CG7')-(Robot.B2(1:3,4)/1000),m7*[0 0 -9.8 ]);
T28=((Robot.B7(1:3,4)/1000)-Robot.B2(1:3,4)/1000)';

```

```

T23C=m3*(cross(W2,(Robot.B2(1:3,4)/1000)+(CG3')-(Robot.B1(1:3,4)/1000))).^2;
T24C=m4*(cross(W2,(Robot.B3(1:3,4)/1000)+(CG4')-(Robot.B1(1:3,4)/1000))).^2;
T25C=m5*(cross(W2,(Robot.B4(1:3,4)/1000)+(CG5')-(Robot.B1(1:3,4)/1000))).^2;
T26C=m6*(cross(W2,(Robot.B5(1:3,4)/1000)+(CG6')-(Robot.B1(1:3,4)/1000))).^2;
T27C=m7*(cross(W2,(Robot.B6(1:3,4)/1000)+(CG7')-(Robot.B1(1:3,4)/1000))).^2;

```

```

T23l=m3*W1P*norm((Robot.B2(1:3,4)/1000)+(CG3')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));
T24l=m4*W1P*norm((Robot.B3(1:3,4)/1000)+(CG4')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));
T25l=m5*W1P*norm((Robot.B4(1:3,4)/1000)+(CG5')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));
T26l=m6*W1P*norm((Robot.B5(1:3,4)/1000)+(CG6')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));
T27l=m7*W1P*norm((Robot.B6(1:3,4)/1000)+(CG7')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));

```

```

T2=T23+T24+T25+T26+T27+T28+T23C+T24C+T25C+T26C+T27C+T23l+T24l+T25l+T26l+T27l;

```

```

% joint3

```

```

T34=cross((Robot.B3(1:3,4)/1000)+(CG4')-(Robot.B3(1:3,4)/1000),m4*[0 0 -9.8 ]);
T35=cross((Robot.B4(1:3,4)/1000)+(CG5')-(Robot.B3(1:3,4)/1000),m5*[0 0 -9.8 ]);
T36=cross((Robot.B5(1:3,4)/1000)+(CG6')-(Robot.B3(1:3,4)/1000),m6*[0 0 -9.8 ]);
T37=cross((Robot.B6(1:3,4)/1000)+(CG7')-(Robot.B3(1:3,4)/1000),m7*[0 0 -9.8 ]);
T38=((Robot.B7(1:3,4)/1000)-Robot.B3(1:3,4)/1000)';

```

```

T34C=m4*(cross(W3,(Robot.B3(1:3,4)/1000)+(CG4')-(Robot.B1(1:3,4)/1000))).^2;
T35C=m5*(cross(W3,(Robot.B4(1:3,4)/1000)+(CG5')-(Robot.B1(1:3,4)/1000))).^2;
T36C=m6*(cross(W3,(Robot.B5(1:3,4)/1000)+(CG6')-(Robot.B1(1:3,4)/1000))).^2;

```

T37C=m7\*(cross(W3,(Robot.B6(1:3,4)/1000)+(CG7')-(Robot.B1(1:3,4)/1000))).^2;

T34I=m4\*W1P\*norm((Robot.B3(1:3,4)/1000)+(CG4')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));

T35I=m5\*W1P\*norm((Robot.B4(1:3,4)/1000)+(CG5')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));

T36I=m6\*W1P\*norm((Robot.B5(1:3,4)/1000)+(CG6')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));

T37I=m7\*W1P\*norm((Robot.B6(1:3,4)/1000)+(CG7')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));

T3=T34+T35+T36+T37+T38+T34C++T35C+T36C+T37C+T34I++T35I+T36I+T37I;

% joint4

T45=cross((Robot.B4(1:3,4)/1000)+(CG5')-(Robot.B4(1:3,4)/1000),m5\*[0 0 -9.8 ]);

T46=cross((Robot.B5(1:3,4)/1000)+(CG6')-(Robot.B4(1:3,4)/1000),m6\*[0 0 -9.8 ]);

T47=cross((Robot.B6(1:3,4)/1000)+(CG7')-(Robot.B4(1:3,4)/1000),m7\*[0 0 -9.8 ]);

T48=((Robot.B7(1:3,4)/1000)-Robot.B4(1:3,4)/1000)';

T45C=m5\*(cross(W4,(Robot.B4(1:3,4)/1000)+(CG5')-(Robot.B1(1:3,4)/1000))).^2;

T46C=m6\*(cross(W4,(Robot.B5(1:3,4)/1000)+(CG6')-(Robot.B1(1:3,4)/1000))).^2;

T47C=m7\*(cross(W4,(Robot.B6(1:3,4)/1000)+(CG7')-(Robot.B1(1:3,4)/1000))).^2;

T45I=m5\*W1P\*norm((Robot.B4(1:3,4)/1000)+(CG5')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));

T46I=m6\*W1P\*norm((Robot.B5(1:3,4)/1000)+(CG6')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));

T47I=m7\*W1P\*norm((Robot.B6(1:3,4)/1000)+(CG7')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));

T4=T45+T46+T47+T48+T45C+T46C+T47C+T45I+T46I+T47I;

% joint5

T56=cross((Robot.B5(1:3,4)/1000)+(CG6')-(Robot.B5(1:3,4)/1000),m6\*[0 0 -9.8 ]);

T57=cross((Robot.B6(1:3,4)/1000)+(CG7')-(Robot.B5(1:3,4)/1000),m7\*[0 0 -9.8 ]);

T58=((Robot.B7(1:3,4)/1000)-Robot.B5(1:3,4)/1000)';

```
T56C=m6*(cross(W5,(Robot.B5(1:3,4)/1000)+(CG6')-(Robot.B1(1:3,4)/1000))).^2;
```

```
T57C=m7*(cross(W5,(Robot.B6(1:3,4)/1000)+(CG7')-(Robot.B1(1:3,4)/1000))).^2;
```

```
T56l=m6*W1P*norm((Robot.B5(1:3,4)/1000)+(CG6')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));
```

```
T57l=m7*W1P*norm((Robot.B6(1:3,4)/1000)+(CG7')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));
```

```
T5=T56+T57+T58+T56C+T57C+T56l+T57l;
```

```
% joint6
```

```
T67=cross((Robot.B6(1:3,4)/1000)+(CG7')-(Robot.B6(1:3,4)/1000),m7*[0 0 -9.8 ]);
```

```
T68=((Robot.B7(1:3,4)/1000)-Robot.B6(1:3,4)/1000)';
```

```
T67C=m7*(cross(W6,(Robot.B6(1:3,4)/1000)+(CG7')-(Robot.B1(1:3,4)/1000))).^2;
```

```
T67l=m7*W1P*norm((Robot.B6(1:3,4)/1000)+(CG7')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));
```

```
T6=T67+T68+T67C+T67l;
```

```
% adjust
```

```
T1P=(Robot.B1(1:3,1:3))*T1';
```

```
T2P=(Robot.B2(1:3,1:3))*T2';
```

```
T3P=(Robot.B3(1:3,1:3))*T3';
```

```
T4P=(Robot.B4(1:3,1:3))*T4';
```

```
T5P=(Robot.B5(1:3,1:3))*T5';
```

```
T6P=(Robot.B6(1:3,1:3))*T6';
```

```
DrawRobot
```

```
% data=[data ; [q T1P(3) T2P(2) T3P(2) T4P(3) T5P(2) T6P(3)]];
```

```
k=k+1;
```

```
data(k,:)= [q T1P(3) T2P(2) T3P(2) T4P(3) T5P(2) T6P(3)];
```

```
end
```

```
end
```

```

        end
    end
    toc
    tic;
    kk=kk+1
    save (['testData' num2str(kk) '.mat'],data);
    k=0;
end

```

### คำสั่งใช้ในการคำนวณหาตำแหน่ง (Position)

**“position”**

```

clear all ;
clc ;
load PartRobot
load testData27
output = zeros(1166400,3);
for i=1:1166400
    q=data(i,1:6) ;
    output(i,:)=fw(q) ;
end

```

### คำสั่งใช้ในการคำนวณค่าความปลอดภัย (Safety Factor) ของแต่ละข้อต่อหุ่นยนต์(Joint)

**“Safety factor”**

```

clear all;
clc;
load testData45
outSF=zeros(1166400,1);

```

```

for i=1:1166400
T=data(i,7:12);
T(1)=data(i,7);
T(2)=data(i,8);
T(3)=data(i,9);
T(4)=data(i,10);
T(5)=data(i,11);
T(6)=data(i,12);
outSF(i,:)=SF(T);
end

```

คำสั่งใช้ในการแสดงความสัมพันธ์ค่าความปลอดภัย (Safety Factor)กับตำแหน่ง(position)ของปลาย

end-effector

“safetyplot”

```
clear all ;
```

```
clc;
```

```
clf
```

```
hold on
```

```
axis equal
```

```
axis ([-1300 1300 -1300 1300 0 1600])
```

```
colormap hot
```

```
view(45,45)
```

```
samp=randsample(1:1166400,5000)';
```

```
load position1 ;
```

```
load safetyfactor1 ;
```

```
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
```

```

scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a1=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a1>0;
y=a1<0 ;
b=a1(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a1(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a1(:,4) a1(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a1(:,4) a1(:,4) o])
load position2 ;
load safetyfactor2 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a2=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a2>0;
y=a2<0 ;
b=a2(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a2(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a2(:,4) a2(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a2(:,4) a2(:,4) o])

load position3 ;
load safetyfactor3 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a3=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];

```

```

x=a3>0;
y=a3<0 ;
b=a3(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a3(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a3(:,4) a3(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a3(:,4) a3(:,4) o])

```

```

load position4 ;
load safetyfactor4 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])

```

```

a4=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];

```

```

x=a4>0;
y=a4<0 ;
b=a4(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a4(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a4(:,4) a4(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a4(:,4) a4(:,4) o])

```

```

load position5 ;
load safetyfactor5 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])

```

```

a5=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];

```

```

x=a5>0;
y=a5<0 ;

```

```

b=a5(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a5(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a5(:,4) a5(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a5(:,4) a5(:,4) o])

load position6 ;
load safetyfactor6 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a6=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a6>0;
y=a6<0 ;
b=a6(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a6(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a6(:,4) a6(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a6(:,4) a6(:,4) o])

load position7 ;
load safetyfactor7 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a7=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a7>0;
y=a7<0 ;
b=a7(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a7(:,1:3).*y(:,1:3);

```

```

o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a7(:,4) a7(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a7(:,4) a7(:,4) o])

load position8 ;
load safetyfactor8 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a8=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a8>0;
y=a8<0 ;
b=a8(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a8(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a8(:,4) a8(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a8(:,4) a8(:,4) o])

load position9 ;
load safetyfactor9 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a9=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a9>0;
y=a9<0 ;
b=a9(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a9(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a9(:,4) a9(:,4) o])

```

```

scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a9(:,4) a9(:,4) o])

load position10 ;
load safetyfactor10 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a10=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a10>0;
y=a10<0 ;
b=a10(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a10(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a10(:,4) a10(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a10(:,4) a10(:,4) o])

load position11 ;
load safetyfactor11 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a11=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a11>0;
y=a11<0 ;
b=a11(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a11(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a11(:,4) a11(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a11(:,4) a11(:,4) o])

```

```

load position12 ;
load safetyfactor12 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a12=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a12>0;
y=a12<0 ;
b=a12(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a12(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a12(:,4) a12(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a12(:,4) a12(:,4) o])

```

```

load position13 ;
load safetyfactor13 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a13=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a13>0;
y=a13<0 ;
b=a13(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a13(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a13(:,4) a13(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a13(:,4) a13(:,4) o])

```

```

load position14 ;
load safetyfactor14 ;

```

```

outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
% a14=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a14>0;
y=a14<0 ;
b=a14(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a14(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a14(:,4) a14(:,4) o]) % scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-
a14(:,4) a14(:,4) o])

load position15 ;
load safetyfactor15 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a15=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a15>0;
y=a15<0 ;
b=a15(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a15(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a15(:,4) a15(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a15(:,4) a15(:,4) o])

load position16 ;
load safetyfactor16 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;

```

```
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
```

```
a16=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
```

```
x=a16>0;
```

```
y=a16<0 ;
```

```
b=a16(:,1:3).*x(:,1:3);
```

```
c=a16(:,1:3).*y(:,1:3); o=zeros(5000,1);
```

```
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a16(:,4) a16(:,4) o])
```

```
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a16(:,4) a16(:,4) o])
```

```
load position17 ;
```

```
load safetyfactor17 ;
```

```
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
```

```
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
```

```
a17=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
```

```
x=a17>0;
```

```
y=a17<0 ;
```

```
b=a17(:,1:3).*x(:,1:3);
```

```
c=a17(:,1:3).*y(:,1:3);
```

```
o=zeros(5000,1);
```

```
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a17(:,4) a17(:,4) o])
```

```
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a17(:,4) a17(:,4) o])
```

```
load position18 ;
```

```
load safetyfactor18 ;
```

```
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
```

```
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
```

```
a18=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
```

```

x=a18>0;
y=a18<0 ;
b=a18(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a18(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a18(:,4) a18(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a18(:,4) a18(:,4) o])

```

```

load position19 ;
load safetyfactor19 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a19=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a19>0;
y=a19<0 ;
b=a19(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a19(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a19(:,4) a19(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a19(:,4) a19(:,4) o])

```

```

load position20 ;
load safetyfactor20 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a20=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a20>0;
y=a20<0 ;

```

```

b=a20(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a20(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a20(:,4) a20(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a20(:,4) a20(:,4) o])

```

```

load position21 ;
load safetyfactor21 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a21=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a21>0;
y=a21<0 ;
b=a21(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a21(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a21(:,4) a21(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a21(:,4) a21(:,4) o])
load position22 ;
load safetyfactor22 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a22=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a22>0;
y=a22<0 ;
b=a22(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a22(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);

```

```
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a22(:,4) a22(:,4) o])
```

```
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a22(:,4) a22(:,4) o])
```

```
load position23 ;
```

```
load safetyfactor23 ;
```

```
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
```

```
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)  
outSF(samp)])
```

```
a23=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
```

```
x=a23>0;
```

```
y=a23<0 ;
```

```
b=a23(:,1:3).*x(:,1:3);
```

```
c=a23(:,1:3).*y(:,1:3);
```

```
o=zeros(5000,1);
```

```
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a23(:,4) a23(:,4) o])
```

```
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a23(:,4) a23(:,4) o])
```

```
load position24 ;
```

```
load safetyfactor24 ;
```

```
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
```

```
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)  
outSF(samp)])
```

```
a24=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
```

```
x=a24>0;
```

```
y=a24<0 ;
```

```
b=a24(:,1:3).*x(:,1:3);
```

```
c=a24(:,1:3).*y(:,1:3);
```

```
o=zeros(5000,1);
```

```
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a24(:,4) a24(:,4) o])
```

```
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a24(:,4) a24(:,4) o])
```

```

load position25 ;
load safetyfactor25 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a25=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a25>0;
y=a25<0 ;
b=a25(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a25(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a25(:,4) a25(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a25(:,4) a25(:,4) o])

```

```

load position26 ;
load safetyfactor26 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a26=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a26>0;
y=a26<0 ;
b=a26(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a26(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a26(:,4) a26(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a26(:,4) a26(:,4) o])

```

```

load position27 ;
load safetyfactor27 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a27=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a27>0;
y=a27<0 ;
b=a27(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a27(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a27(:,4) a27(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a27(:,4) a27(:,4) o])

```

```

load position28 ;
load safetyfactor28 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a28=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a28>0;
y=a28<0 ;
b=a28(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a28(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a28(:,4) a28(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a28(:,4) a28(:,4) o])

```

```

load position29 ;
load safetyfactor29 ;

```

```

outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a29=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a29>0;
y=a29<0 ;
b=a29(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a29(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a29(:,4) a29(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a29(:,4) a29(:,4) o])

```

```

load position30 ;
load safetyfactor30 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a30=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a30>0;
y=a30<0 ;
b=a30(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a30(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a30(:,4) a30(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a30(:,4) a30(:,4) o])

```

```

load position31 ;
load safetyfactor31 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;

```

```
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
```

```
a31=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
```

```
x=a31>0;
```

```
y=a31<0 ;
```

```
b=a31(:,1:3).*x(:,1:3);
```

```
c=a31(:,1:3).*y(:,1:3);
```

```
o=zeros(5000,1);
```

```
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a31(:,4) a31(:,4) o])
```

```
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a31(:,4) a31(:,4) o])
```

```
load position32 ;
```

```
load safetyfactor32 ;
```

```
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
```

```
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
```

```
a32=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
```

```
x=a32>0;
```

```
y=a32<0 ;
```

```
b=a32(:,1:3).*x(:,1:3);
```

```
c=a32(:,1:3).*y(:,1:3);
```

```
o=zeros(5000,1);
```

```
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a32(:,4) a32(:,4) o])
```

```
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a32(:,4) a32(:,4) o])
```

```
load position33 ;
```

```
load safetyfactor33 ;
```

```
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
```

```
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
```

```

a33=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a33>0;
y=a33<0 ;
b=a33(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a33(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a33(:,4) a33(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a33(:,4) a33(:,4) o])

load position34 ;
load safetyfactor34 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a34=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a34>0;
y=a34<0 ;
b=a34(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a34(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a34(:,4) a34(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a34(:,4) a34(:,4) o])

load position35 ;
load safetyfactor35 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a35=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a35>0;

```

```

y=a35<0 ;
b=a35(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a35(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a35(:,4) a35(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a35(:,4) a35(:,4) o])

```

```

load position36 ;
load safetyfactor36 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a36=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a36>0;
y=a36<0 ;
b=a36(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a36(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a36(:,4) a36(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a36(:,4) a36(:,4) o])

```

```

load position37 ;
load safetyfactor37 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a37=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a37>0;
y=a37<0 ;
b=a37(:,1:3).*x(:,1:3);

```

```

c=a37(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a37(:,4) a37(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a37(:,4) a37(:,4) o])

load position38 ;
load safetyfactor38 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a38=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a38>0;
y=a38<0 ;
b=a38(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a38(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a38(:,4) a38(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a38(:,4) a38(:,4) o])

load position39 ;
load safetyfactor39 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a39=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a39>0;
y=a39<0 ;
b=a39(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a39(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);

```

```
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a39(:,4) a39(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a39(:,4) a39(:,4) o])
```

```
load position40 ;
load safetyfactor40 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a40=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a40>0;
y=a40<0 ;
b=a40(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a40(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a40(:,4) a40(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a40(:,4) a40(:,4) o])
```

```
load position41 ;
load safetyfactor41 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a41=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a41>0;
y=a41<0 ;
b=a41(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a41(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a41(:,4) a41(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a41(:,4) a41(:,4) o])
```

```

load position42 ;
load safetyfactor42 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a42=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a42>0;
y=a42<0 ;
b=a42(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a42(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a42(:,4) a42(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a42(:,4) a42(:,4) o])

```

```

load position43 ;
load safetyfactor43 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a43=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a43>0;
y=a43<0 ;
b=a43(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a43(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a43(:,4) a43(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a43(:,4) a43(:,4) o])

```

```

load position44 ;
load safetyfactor44 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a44=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a44>0;
y=a44<0 ;
b=a44(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a44(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a44(:,4) a44(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a44(:,4) a44(:,4) o])

load position45 ;
load safetyfactor45 ;
outSF=(outSF+12.1935)*0.07;
scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp) outSF(samp)
outSF(samp)])
a45=[ output(samp,1) output(samp,2) output(samp,3) outSF(samp)];
x=a45>0;
y=a45<0 ;
b=a45(:,1:3).*x(:,1:3);
c=a45(:,1:3).*y(:,1:3);
o=zeros(5000,1);
scatter3(b(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a45(:,4) a45(:,4) o])
scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a45(:,4) a45(:,4) o])

load PartRobotPlotSF
q=[0 0 0 0 0 0];

```

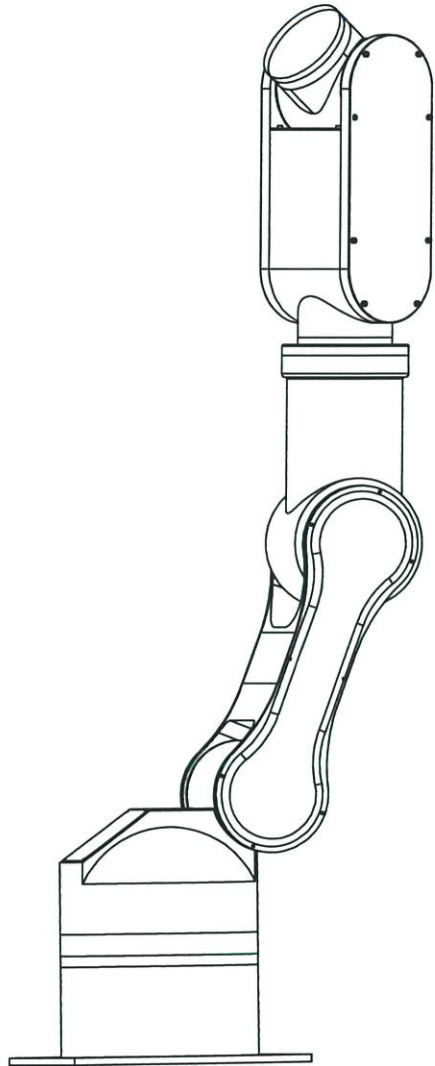
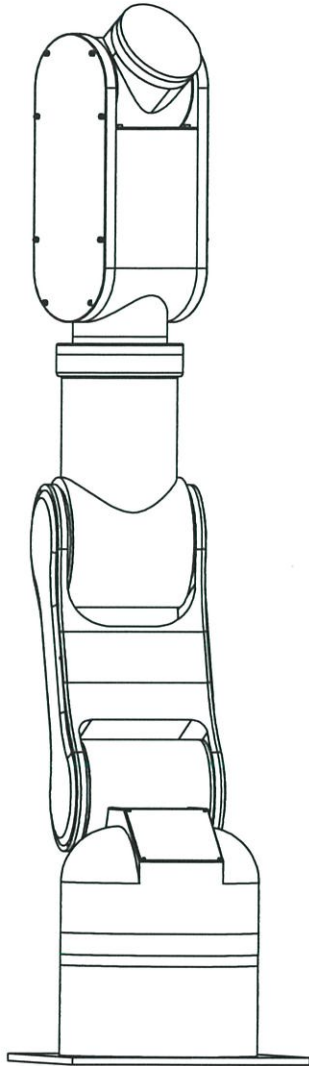
```
Robot.B0 = RT(0,0,0);
Robot.B1 = Robot.B0*RT(0,0,180)*RM(q(1),3);
Robot.B2 = Robot.B1*RT(-137,0,190)*RM(q(2),2);
Robot.B3 = Robot.B2*RT(0,0,345)*RM(q(3),2);
Robot.B4 = Robot.B3*RT(0,0,275)*RM(q(4),3);
Robot.B5 = Robot.B4*RT(0,0,345)*RM(q(5),2);
Robot.B6 = Robot.B5*RT(0,0,85)*RM(q(6),3);
Robot.B7 = Robot.B6*RT(0,0,10);
```

```
%% Transformation
```

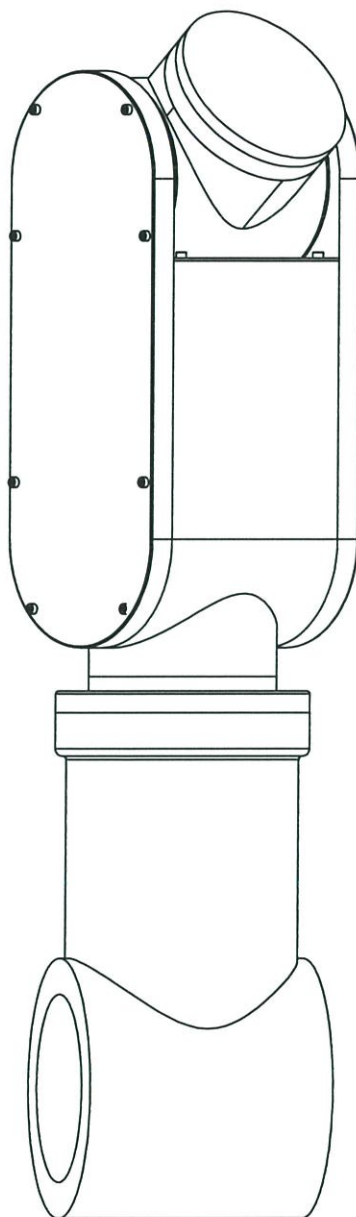
```
Robot.A1X = (Robot.B0*Robot.A1)';
Robot.A2X = (Robot.B1*Robot.A2)';
Robot.A3X = (Robot.B2*Robot.A3)';
Robot.A4X = (Robot.B3*Robot.A4)';
Robot.A5X = (Robot.B4*Robot.A5)';
Robot.A6X = (Robot.B5*Robot.A6)';
Robot.A7X = (Robot.B6*Robot.A7)';
```

```
DrawRobot
```

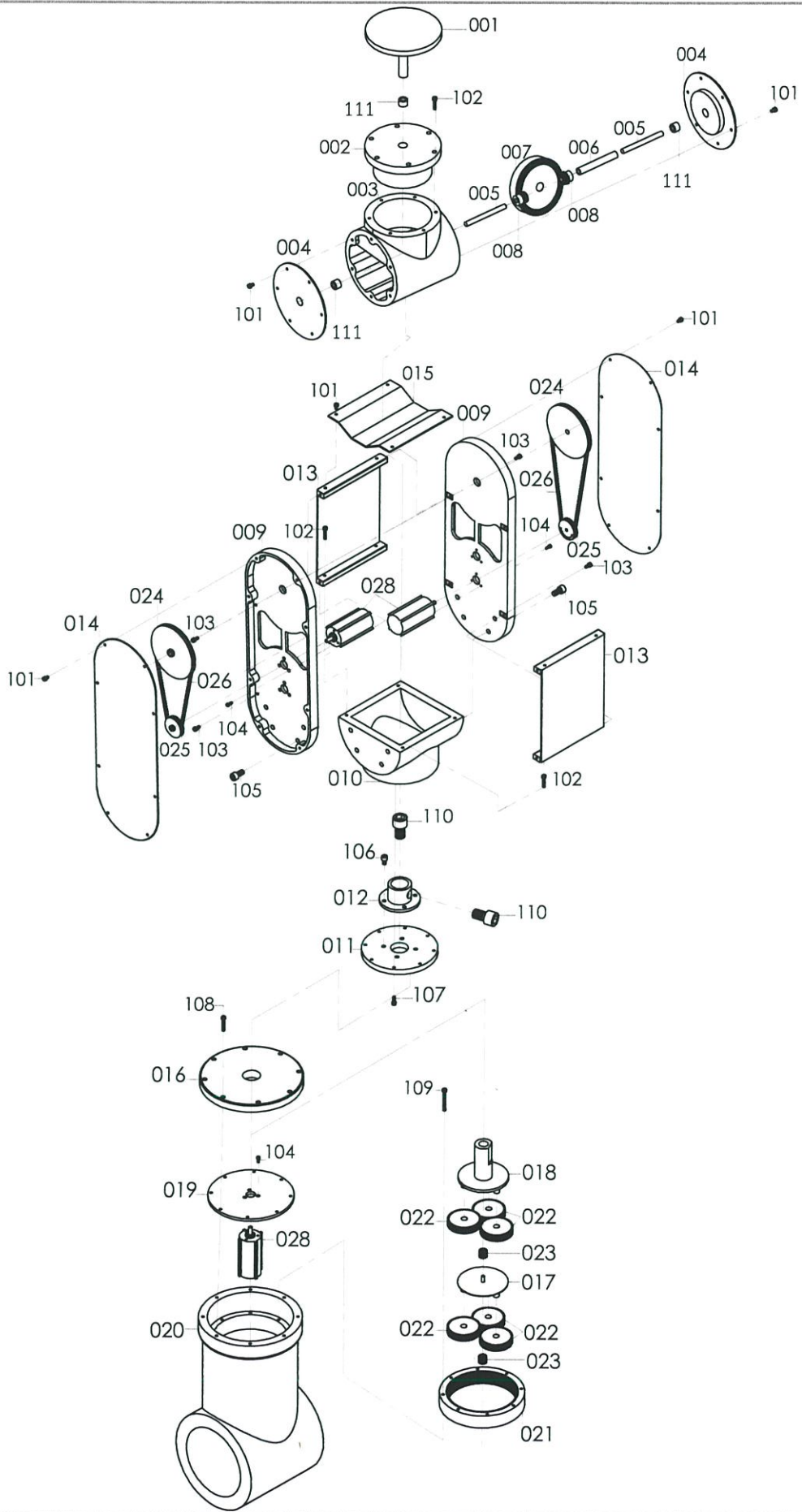
ภาคผนวก ข



Part name	Assem	Sheet 1/43	Scale 1:10
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Penpak Sukkawee	
	Design	Supansa Traisom	
	Approve	Polchai Chotiprayanakul	



Part name	Assem2-3-fullend-lower	Sheet 2/43	Scale 1:5
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Penpak Sukkawee	
	Design	Supansa Traisom	
	Approve	Polchai Chotiprayanakul	

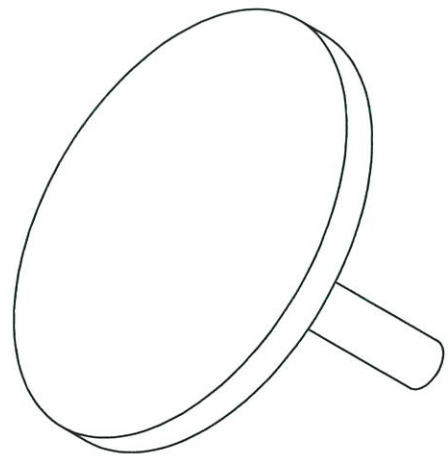
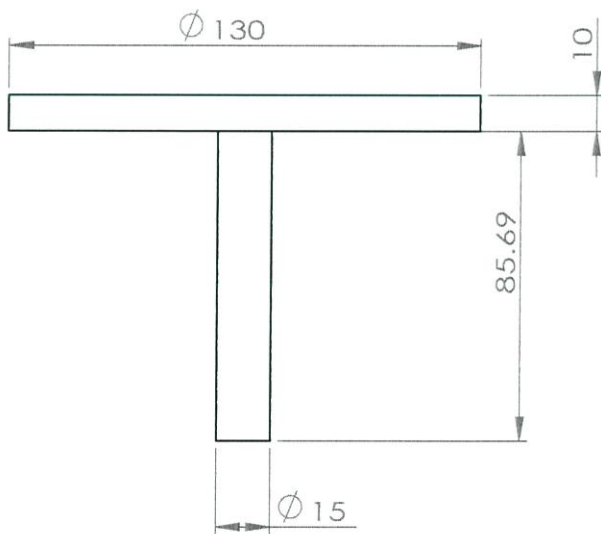
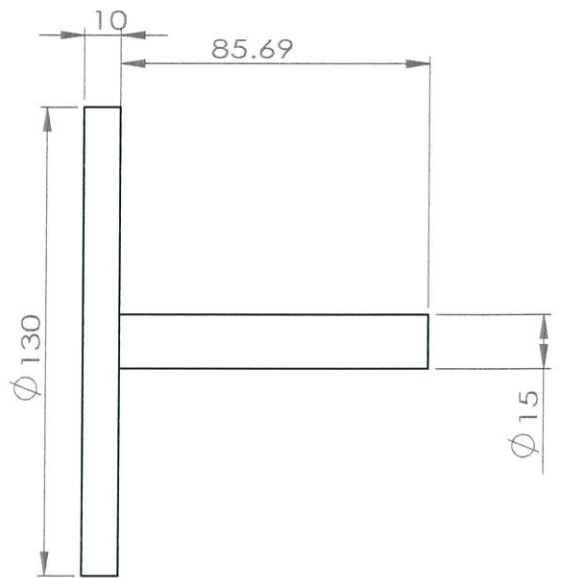
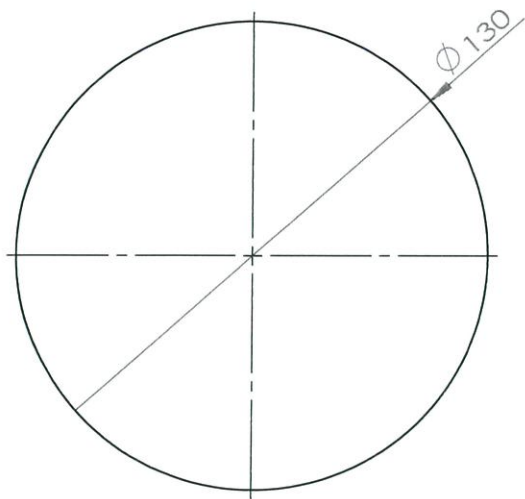


Part name	All Assembly	Sheet 3/43	Scale 1:10
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Penpak Sukkawe	
	Design	Supansa Traisom	
	Approve	Polchai Chotiprayanakul	

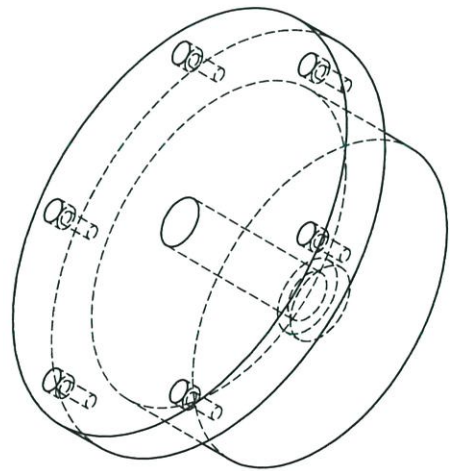
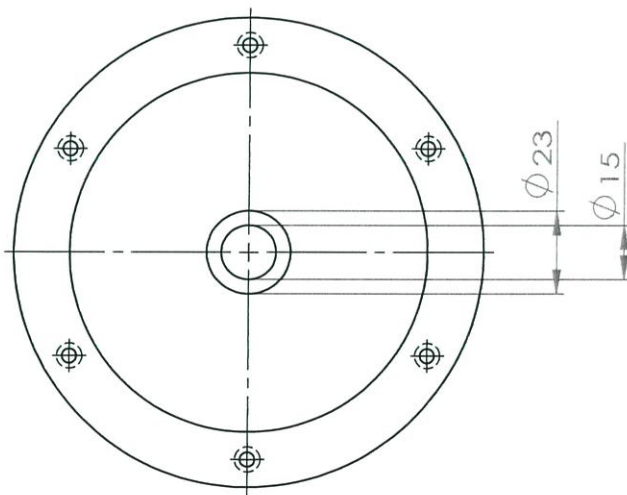
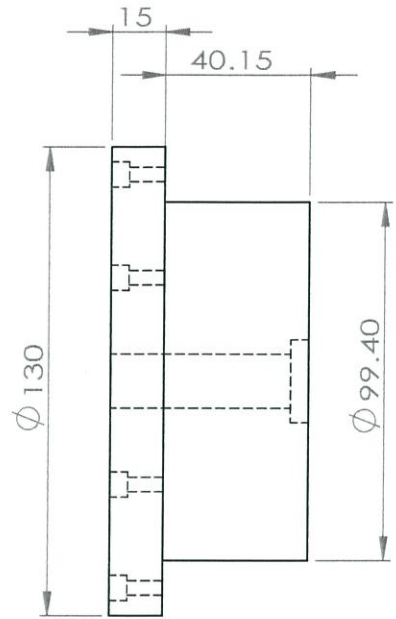
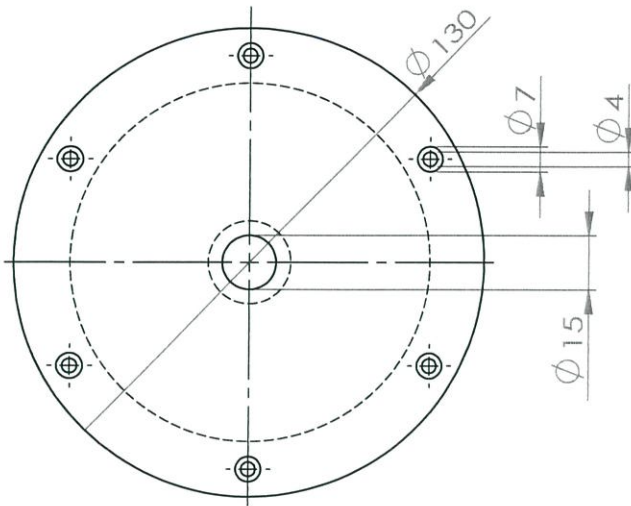
Part List

Number	Name	Pieces
001	close-End	1
002	Cover-endpart	1
003	Cover-End1	1
004	Part End1-2	1
005	axle-dia8mm	2
006	Ring	1
007	straight bevel gear_iso	1
008	straight bevel pinion_iso	2
009	Bevel-new-Arm-Sure	2
010	b-new	1
011	End-b	1
012	End-b-Gear	1
013	Part-arm-close-side	2
014	Part-newClose6	2
015	now	1
016	part2	1
017	bridge-Part(1)2pieces	1
018	bridge-Part	1
019	JOINT-CIRCLE	1
020	LinkJoint	1
021	internal spar gear_iso_44	1
022	gearDATA-pinion	2
023	gearDATA	6
024	pulleybevel-timing	2
025	pulleymotor-timing	2
026	Belt2-1^How-Assemfinal-1	1
027	Belt4-1^How-Assemfinal-1	1
028	motor	3
101	socket head cap screw M4L10	38
102	socket head cap screw M4L24	10
103	socket head cap screw M4L12	8
104	socket head cap screw M3L11	9
105	socket head cap screw M8L24	8
106	socket head cap screw M6L16	4
107	socket head cap screw M4L16	8
108	socket head cap screw M4L29	8
109	socket head cap screw M4L44	8
110	socket head cap screw M16L41	2
111	Bearing-part-end-1-2	3

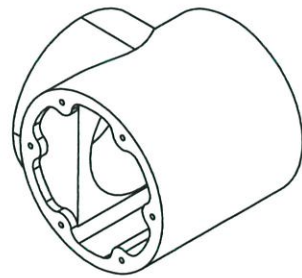
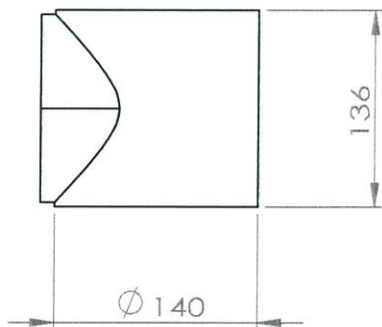
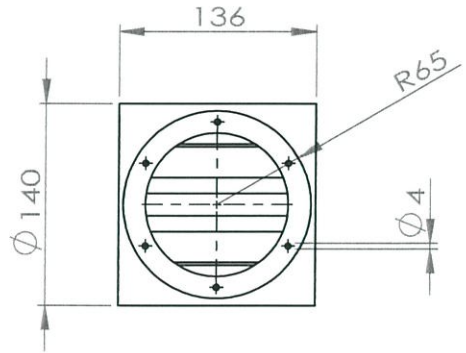
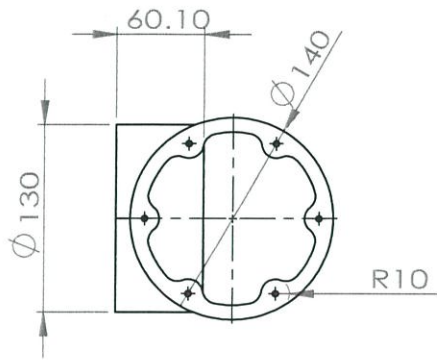
Part name	All Assembly	Sheet 4/43	Scale 1:10
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Penpak Sukkawee	
	Design	Supansa Traisom	
	Approve	Polchai Chotiprayanakul	



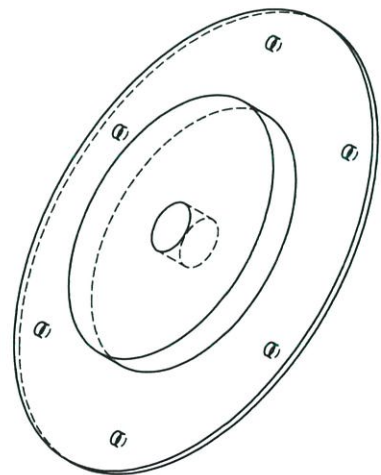
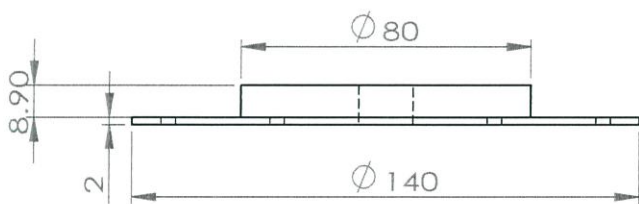
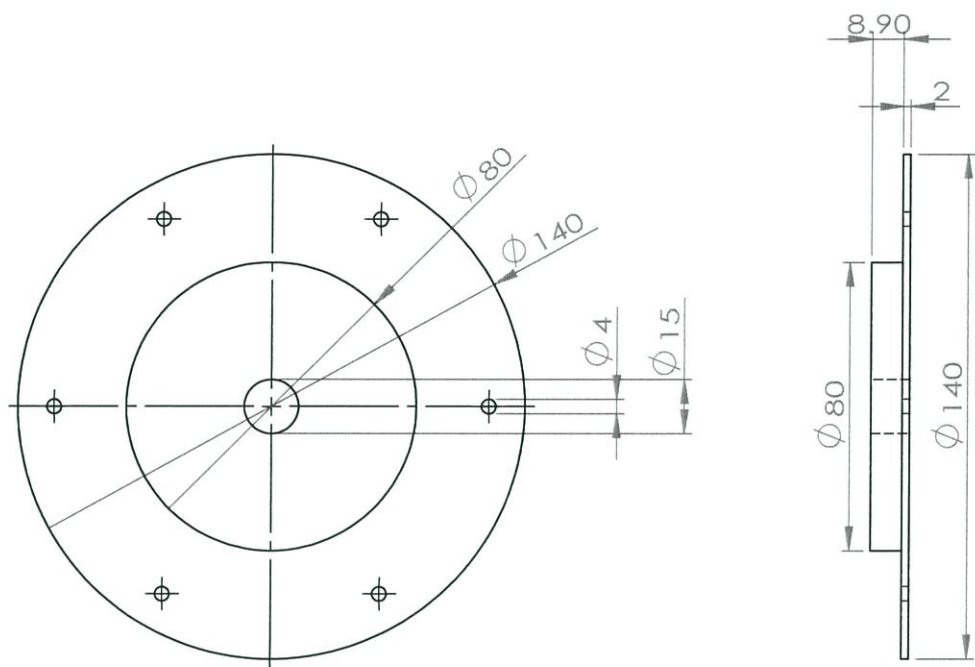
Part name	close-End	Part No.	001	Scale
Material	Aluminium	Sheet 5/43		1:2
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Penpak Sukkawee		
	Design	Supansa Traisom		
	Approve	Polchai Chotiprayanakul		



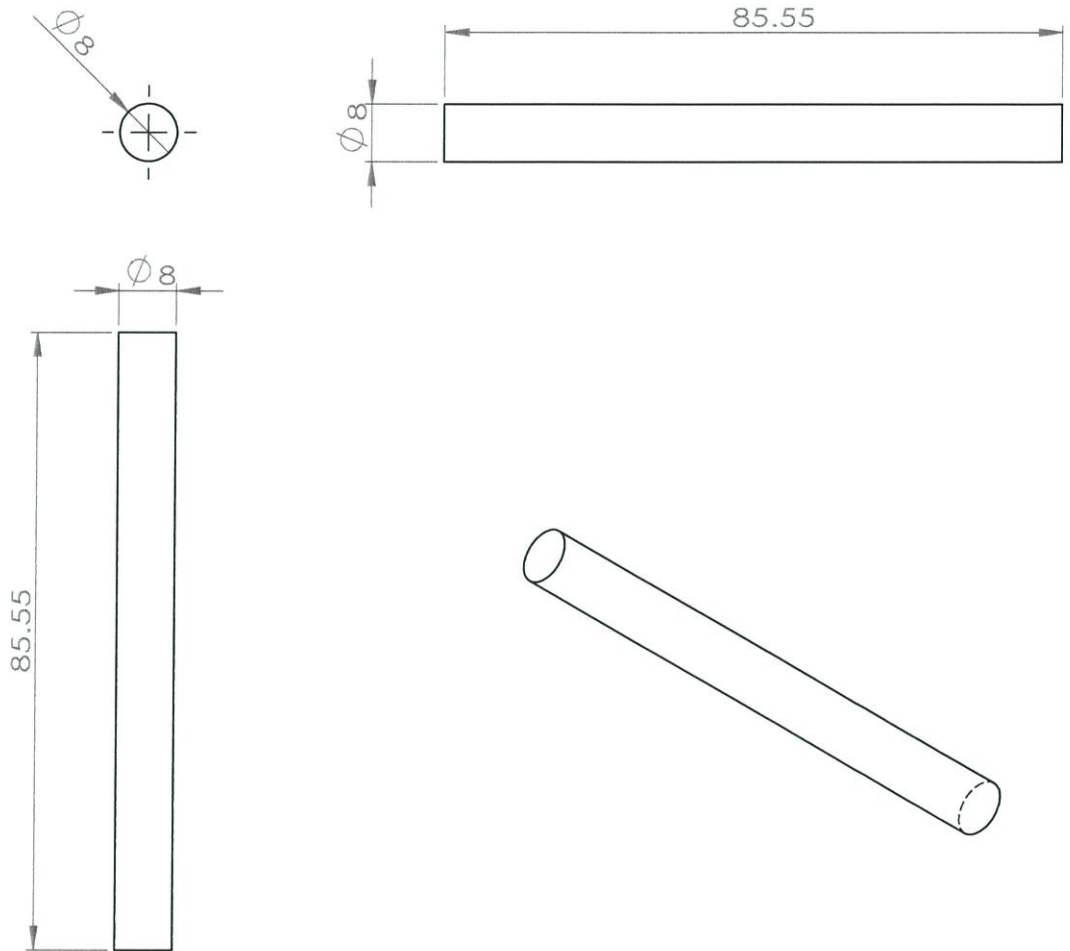
Part name	Cover-endpart	Part No.	002	Scale 1:2
Material	Aluminium	Sheet 6/43		
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



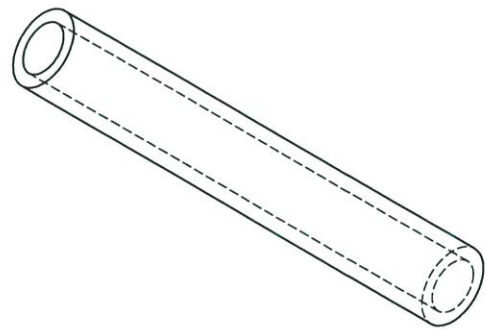
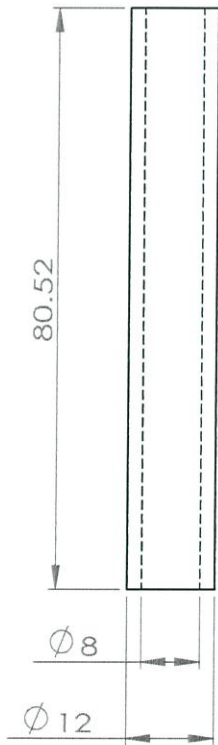
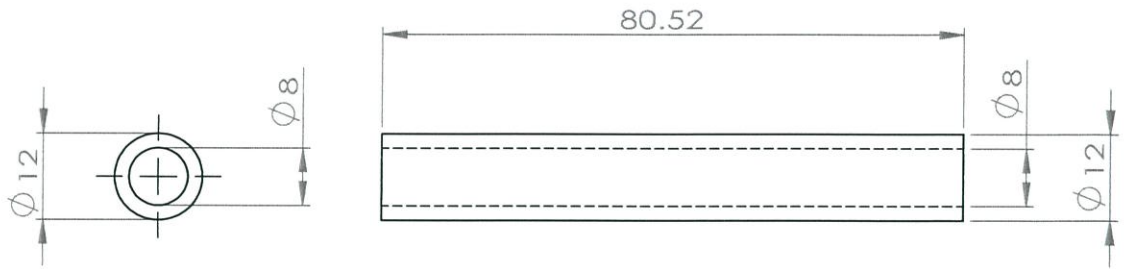
Part name	Cover-End1	Part No.	003	Scale
Material	Aluminium	Sheet	7/43	1:5
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



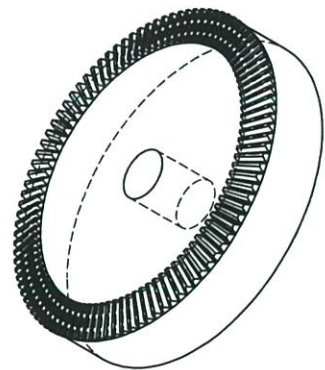
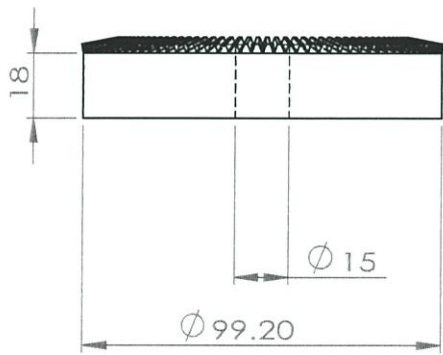
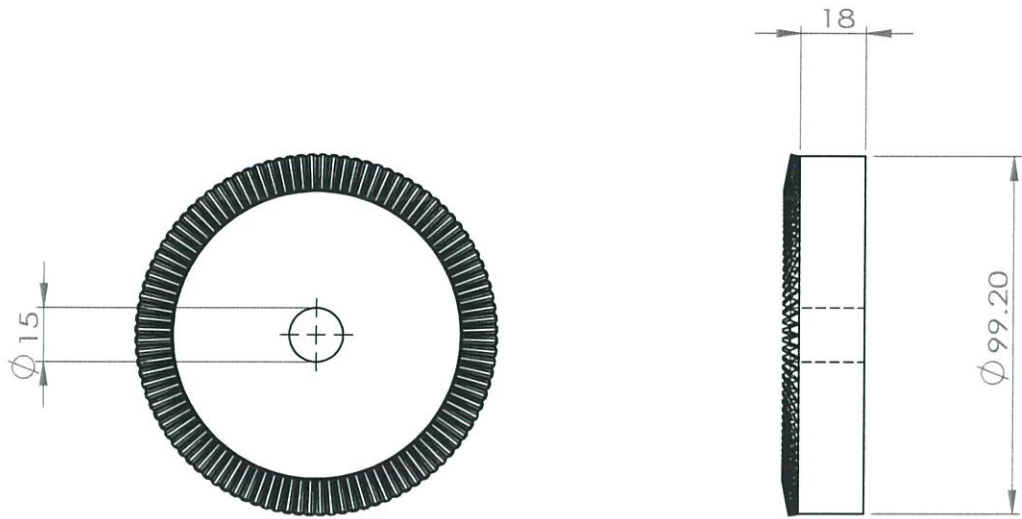
Part name	Part End1-2	Part No.	004	Scale
Material	Aluminium	Sheet 8/43		1:2
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



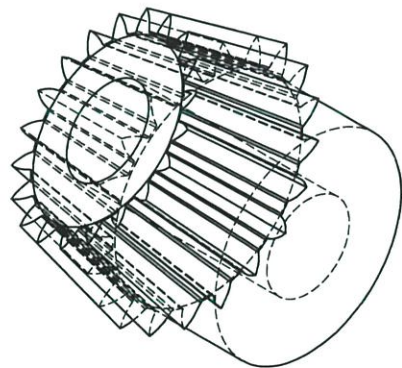
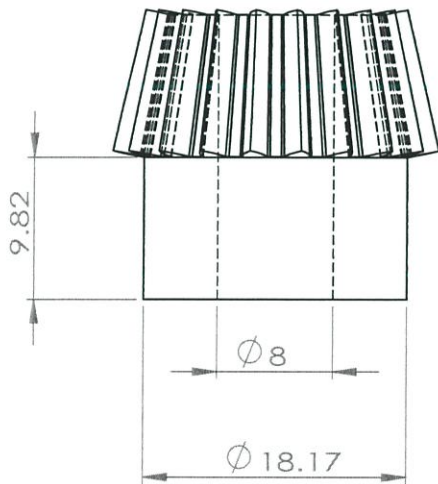
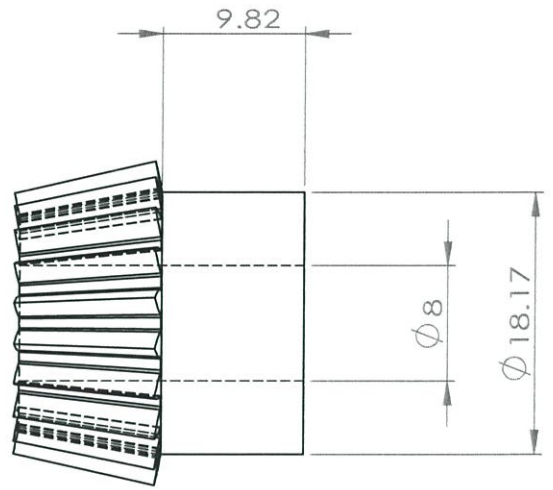
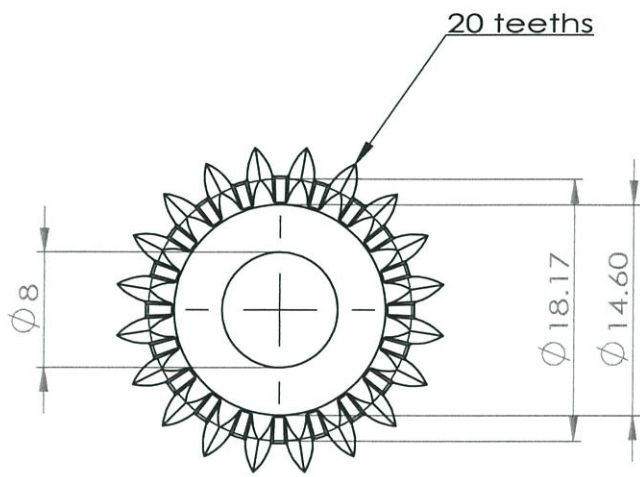
Part name	axle-dia8mm	Part No.	005	Scale
Material	Aluminium	Sheet 9/43		1:1
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



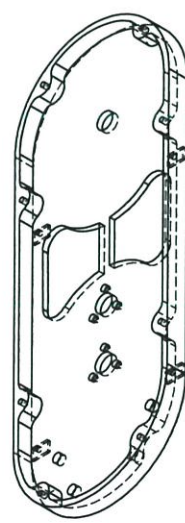
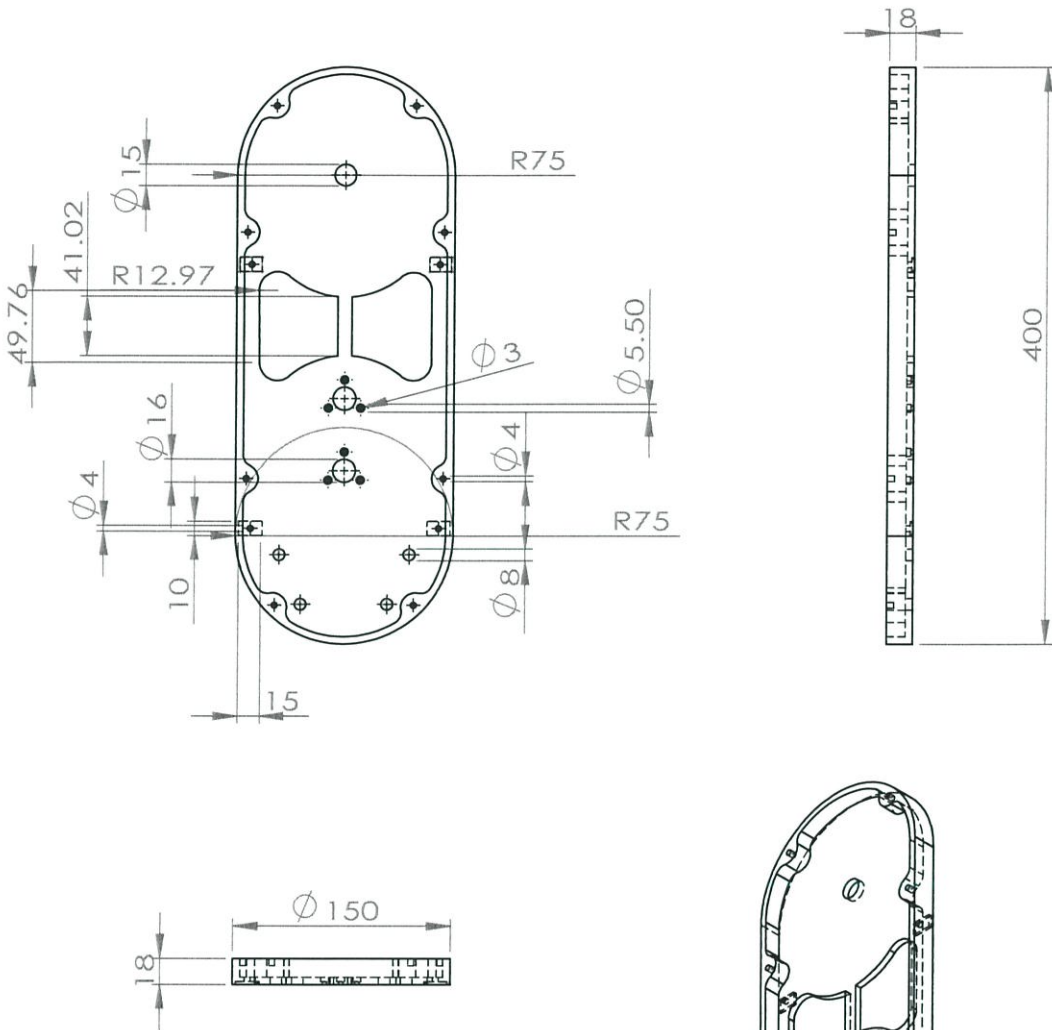
Part name	Ring	Part No.	006	Scale
Material	Aluminium	Sheet 10/43		1:1
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



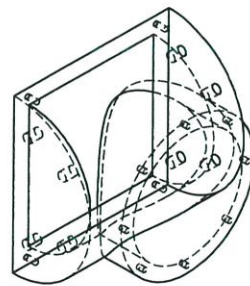
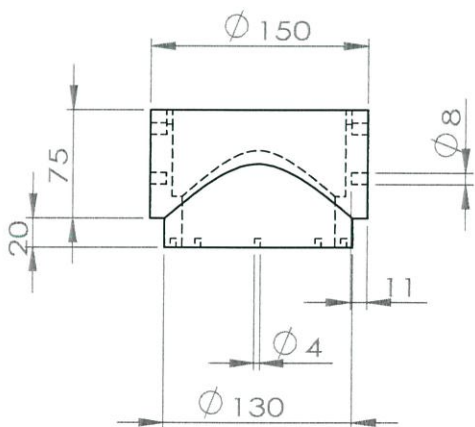
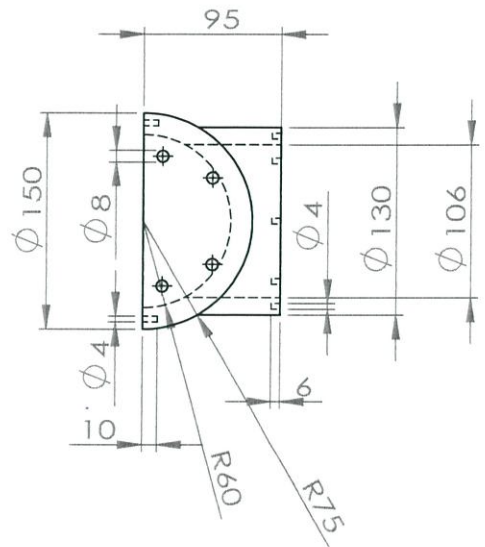
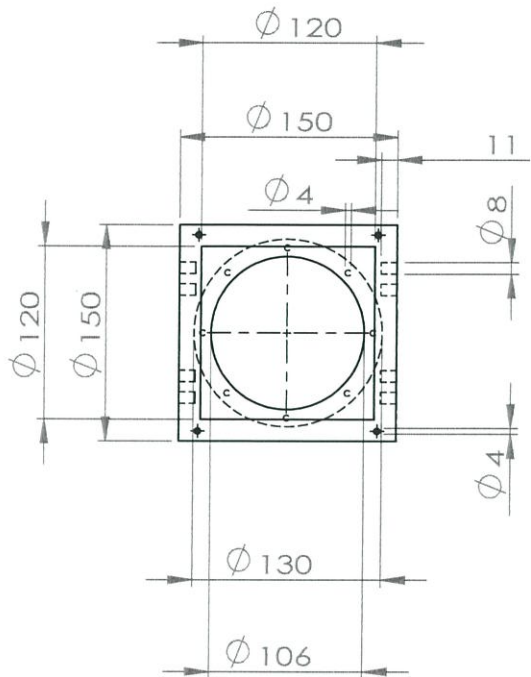
Part name	straight bevel gear	Part No.	007	Scale 1:2
Material	Aluminium	Sheet 11/43		
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



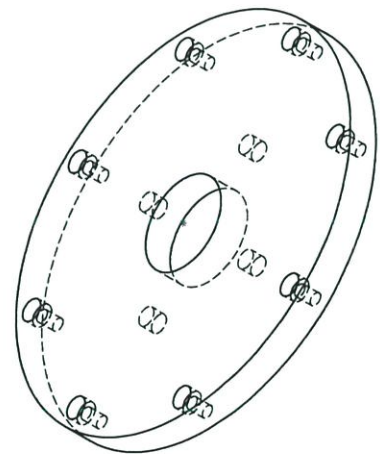
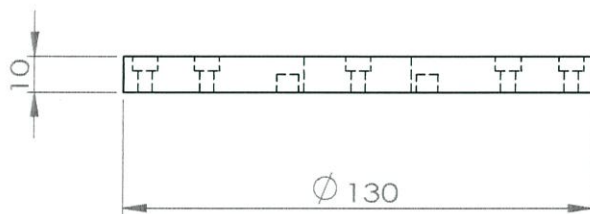
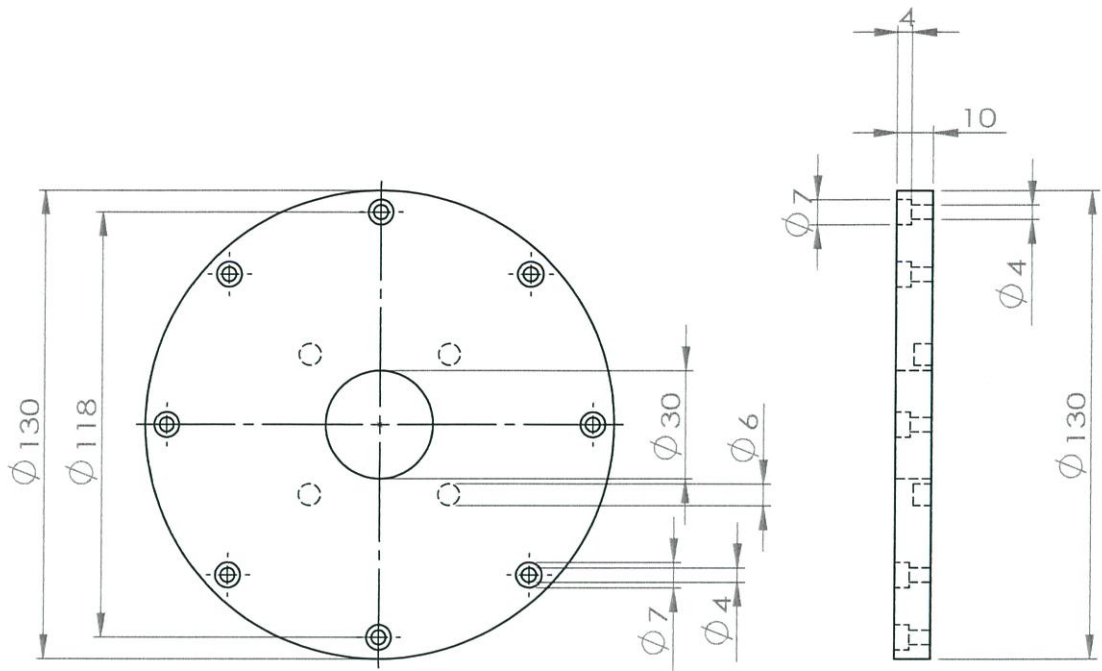
Part name	straight bevel pinion_iso	Part No.	008	Scale 2:1
Material	Aluminium	Sheet 12/43		
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



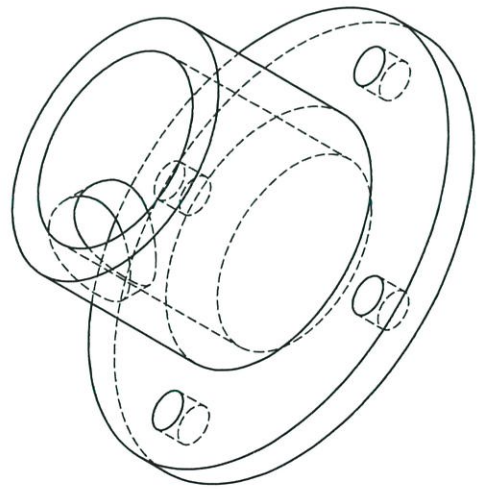
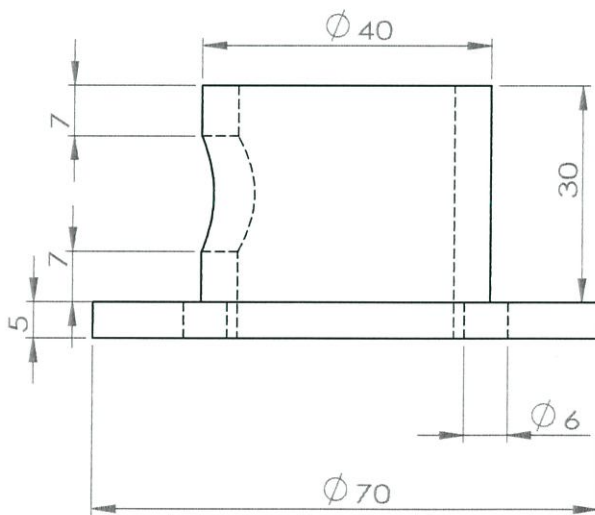
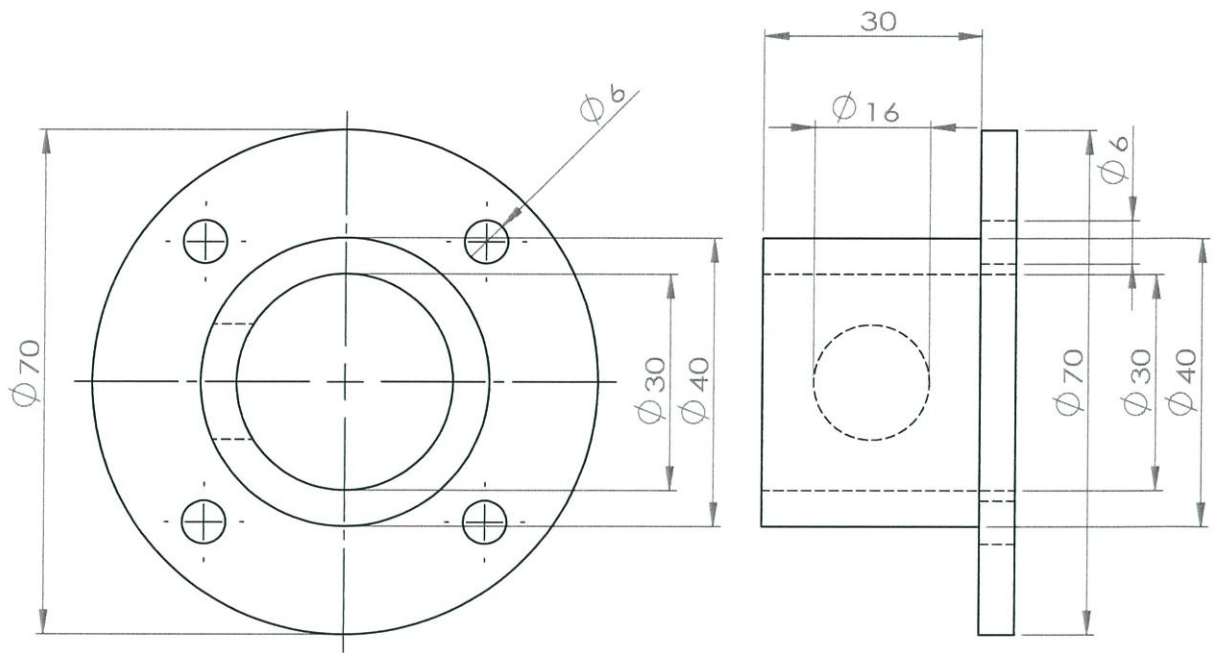
Part name	Part-new-Arm-Sure	Part No.	009	Scale
Material	Aluminium	Sheet	13/43	1:5
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Penpak Sukkawee		
	Design	Supansa Traisom		
	Approve	Polchai Chotiprayanakul		



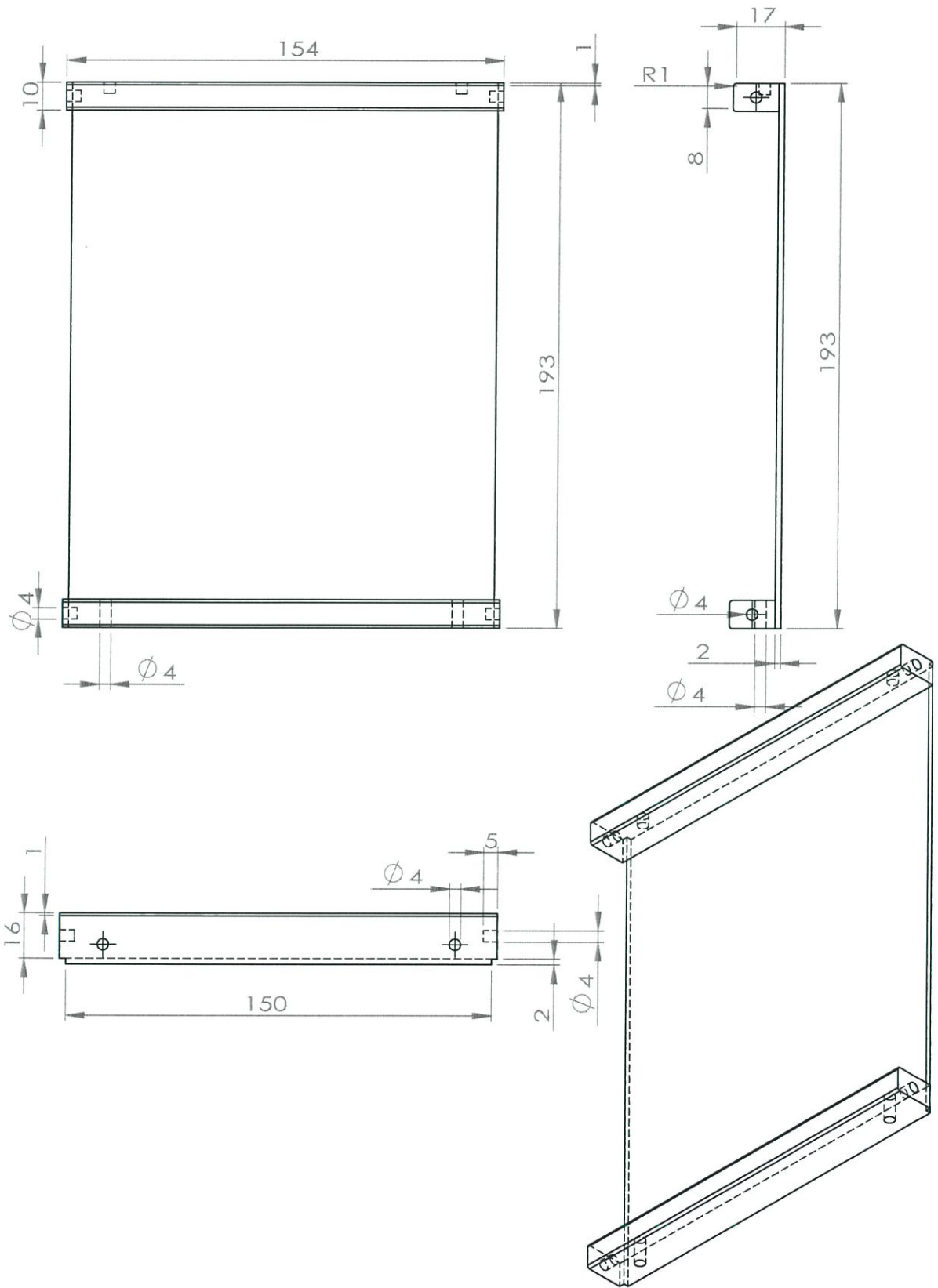
Part name	b-new	Part No.	010	Scale
Material	Aluminium	Sheet	14/43	1:5
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Penpak Sukkawee		
	Design	Supansa Traisom		
	Approve	Polchai Chotiprayanakul		



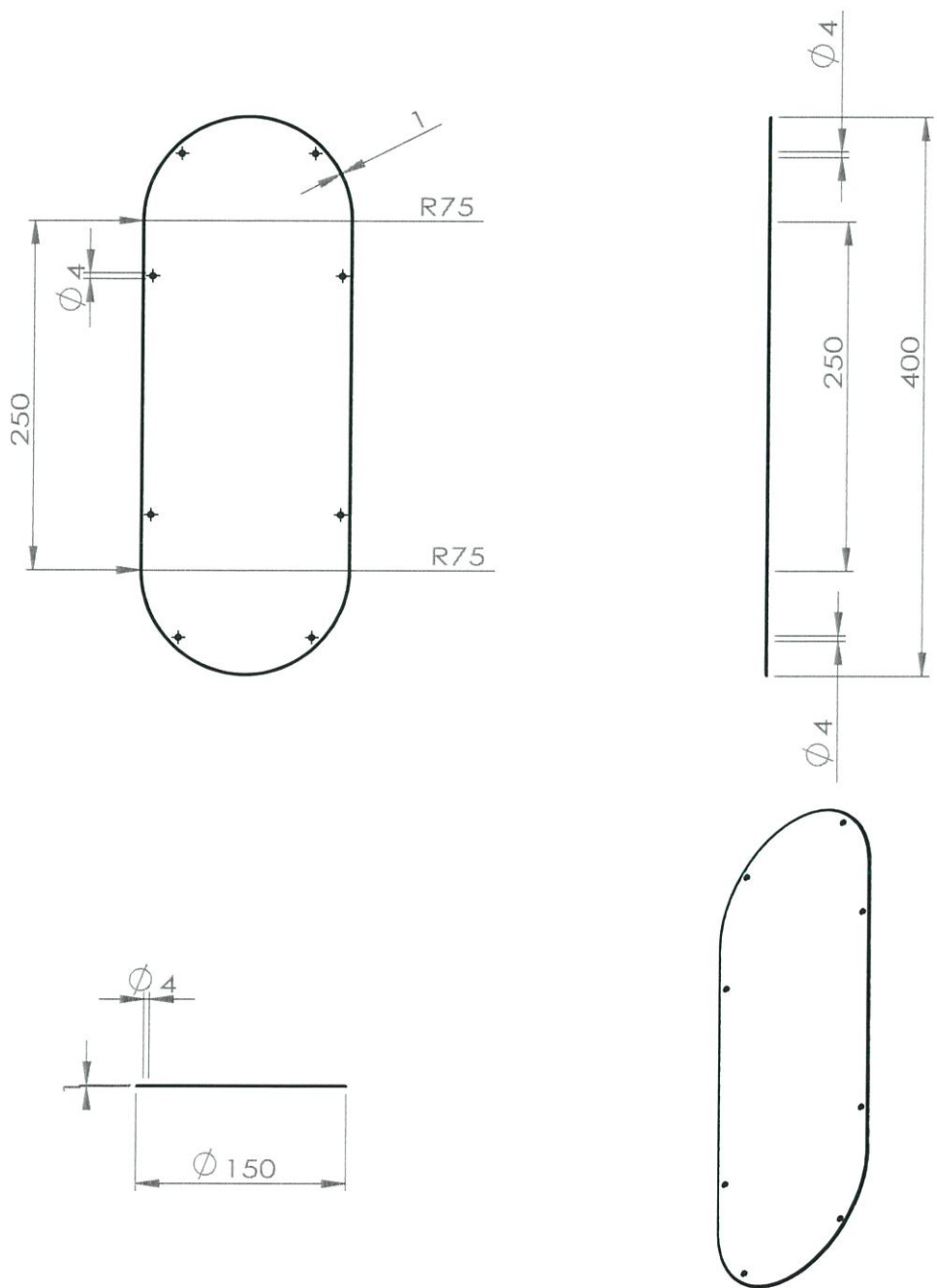
Part name	End-b	Part No.	011	Scale
Material	Aluminium	Sheet 15/43		1:2
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



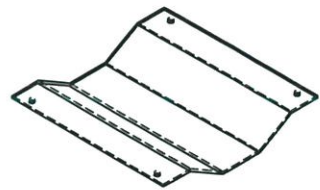
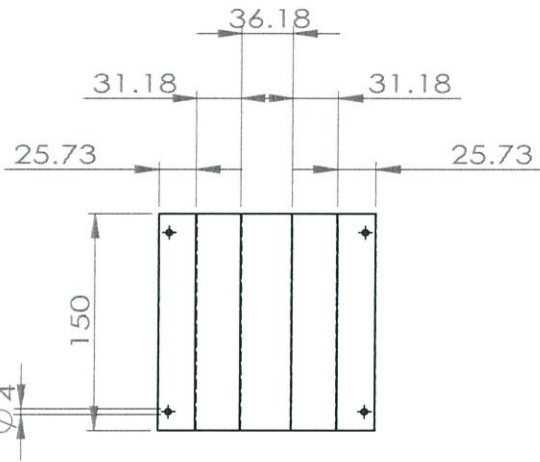
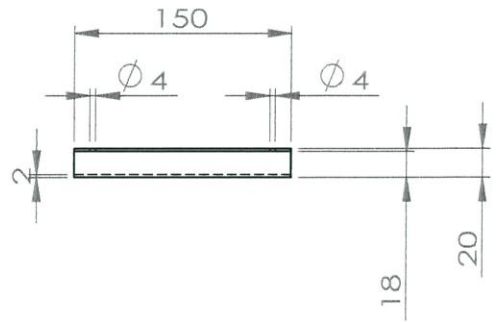
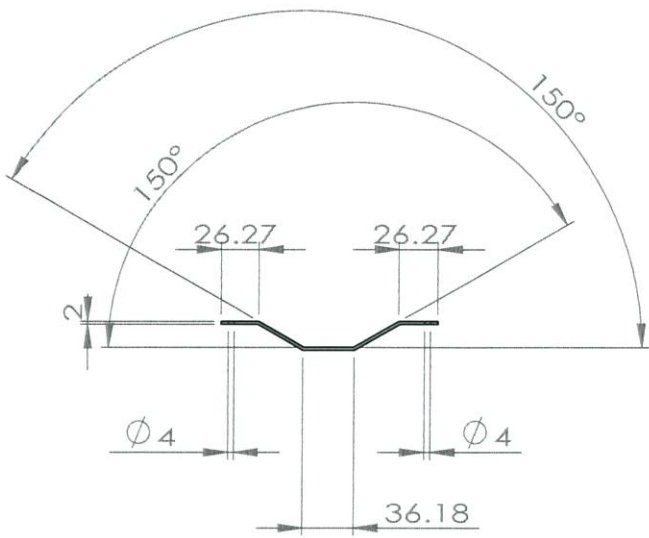
Part name	End-b-Gear	Part No.	012	Scale
Material	Aluminium	Sheet 16/43		1:1
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Penpak Sukkawee		
	Design	Supansa Traisom		
	Approve	Polchai Chotiprayanakul		



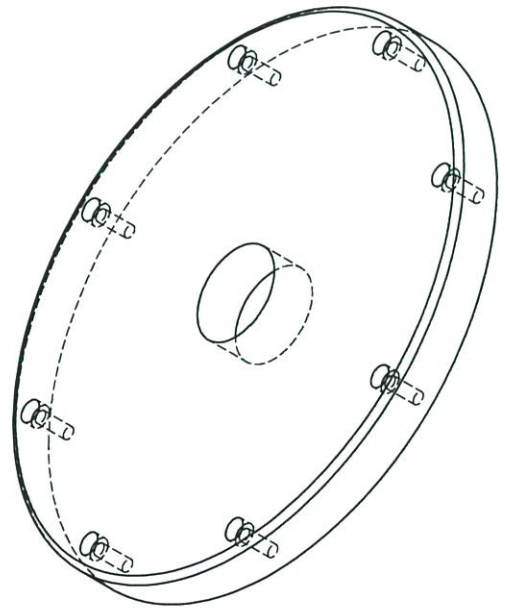
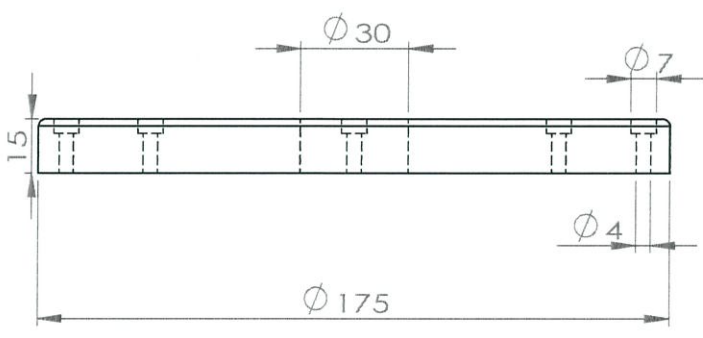
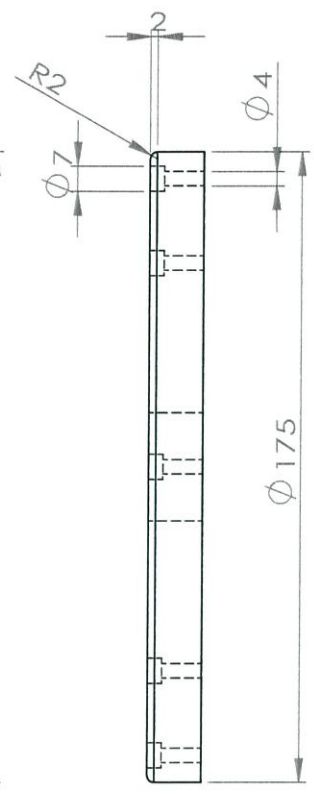
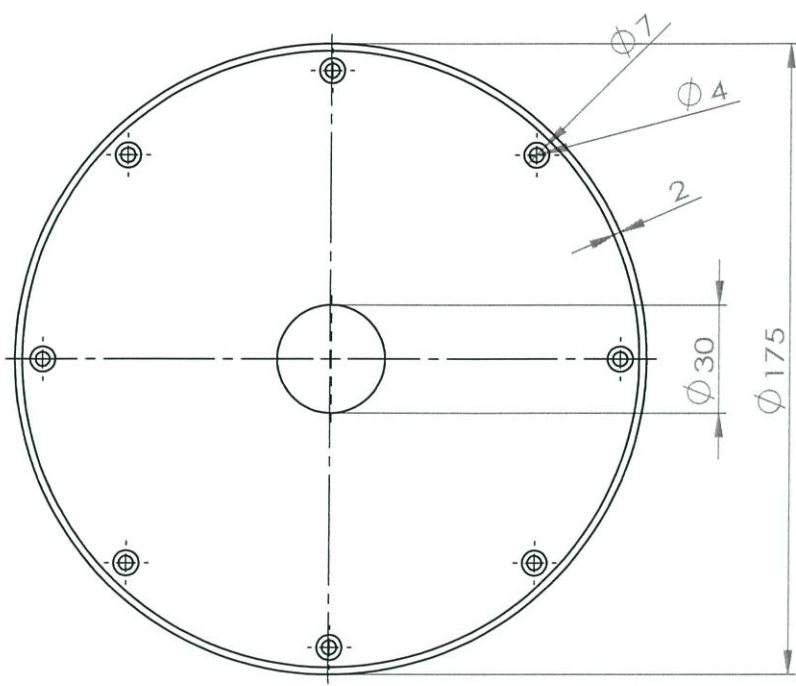
Part name	Part-arm-close-side	Part No.	013	Scale
Material	Aluminium	Sheet	17/43	1:2
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Penpak Sukkawee		
	Design	Supansa Traisom		
	Approve	Polchai Chotiprayanakul		



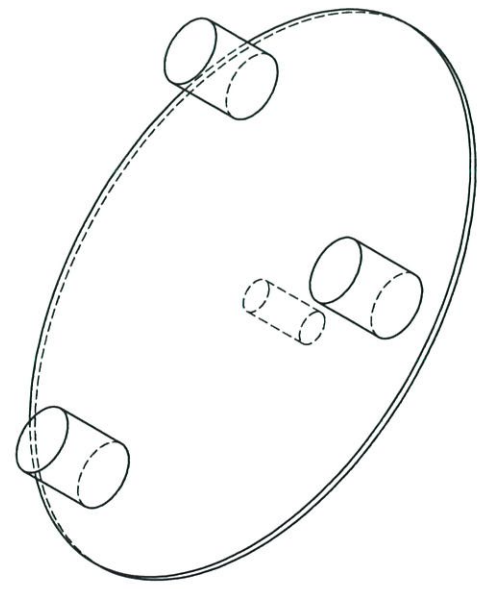
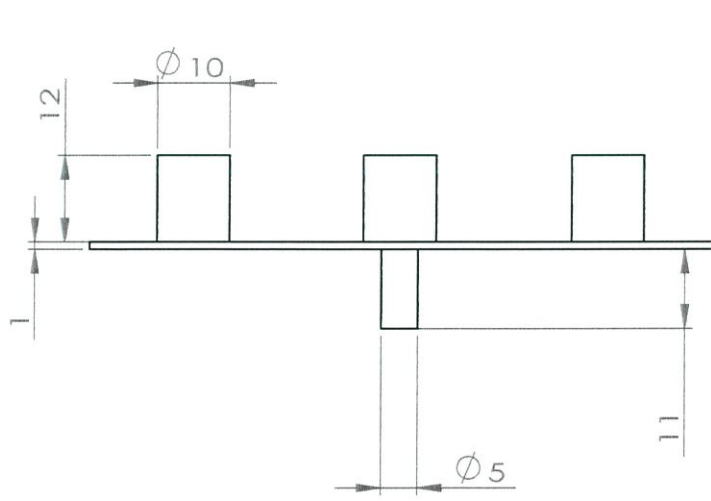
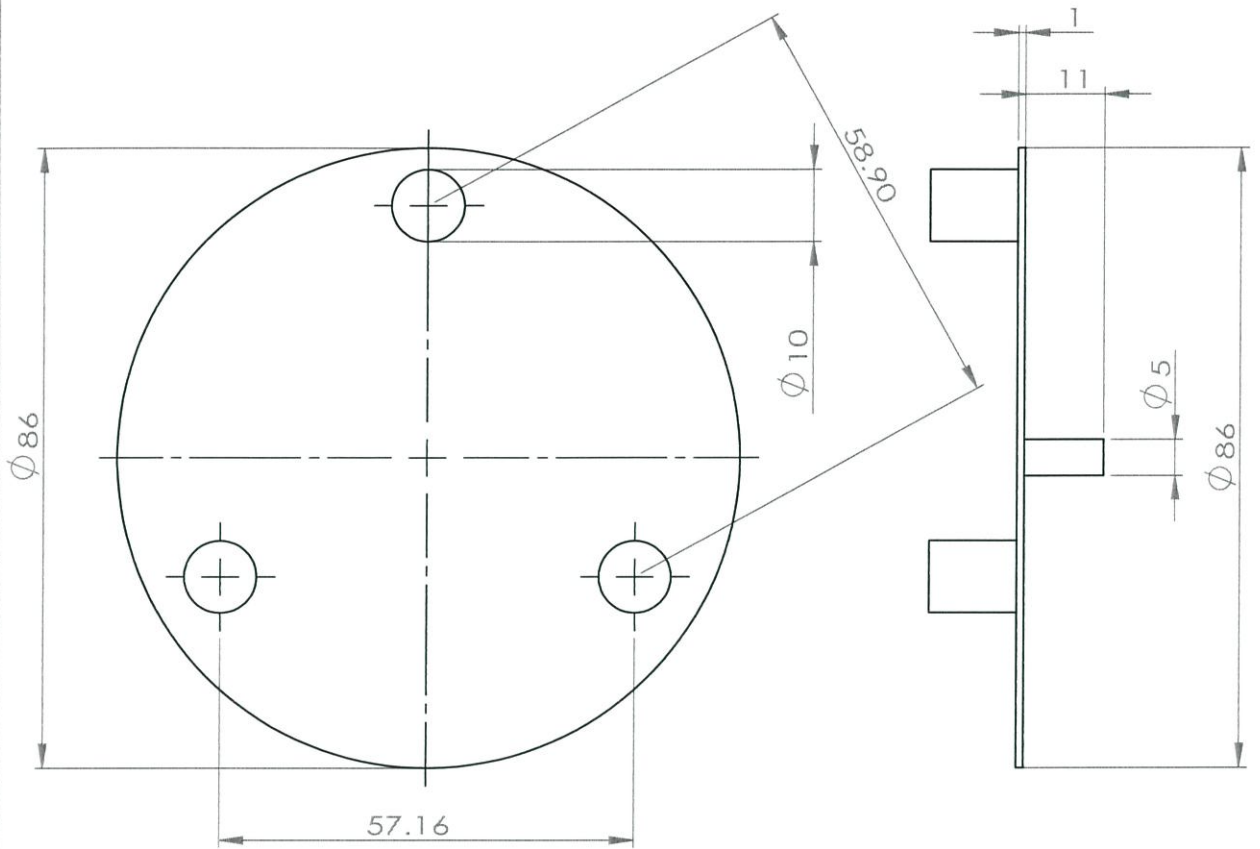
Part name	Part-newClose6	Part No.	014	Scale 1:5
Material	Aluminium	Sheet 18/43		
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



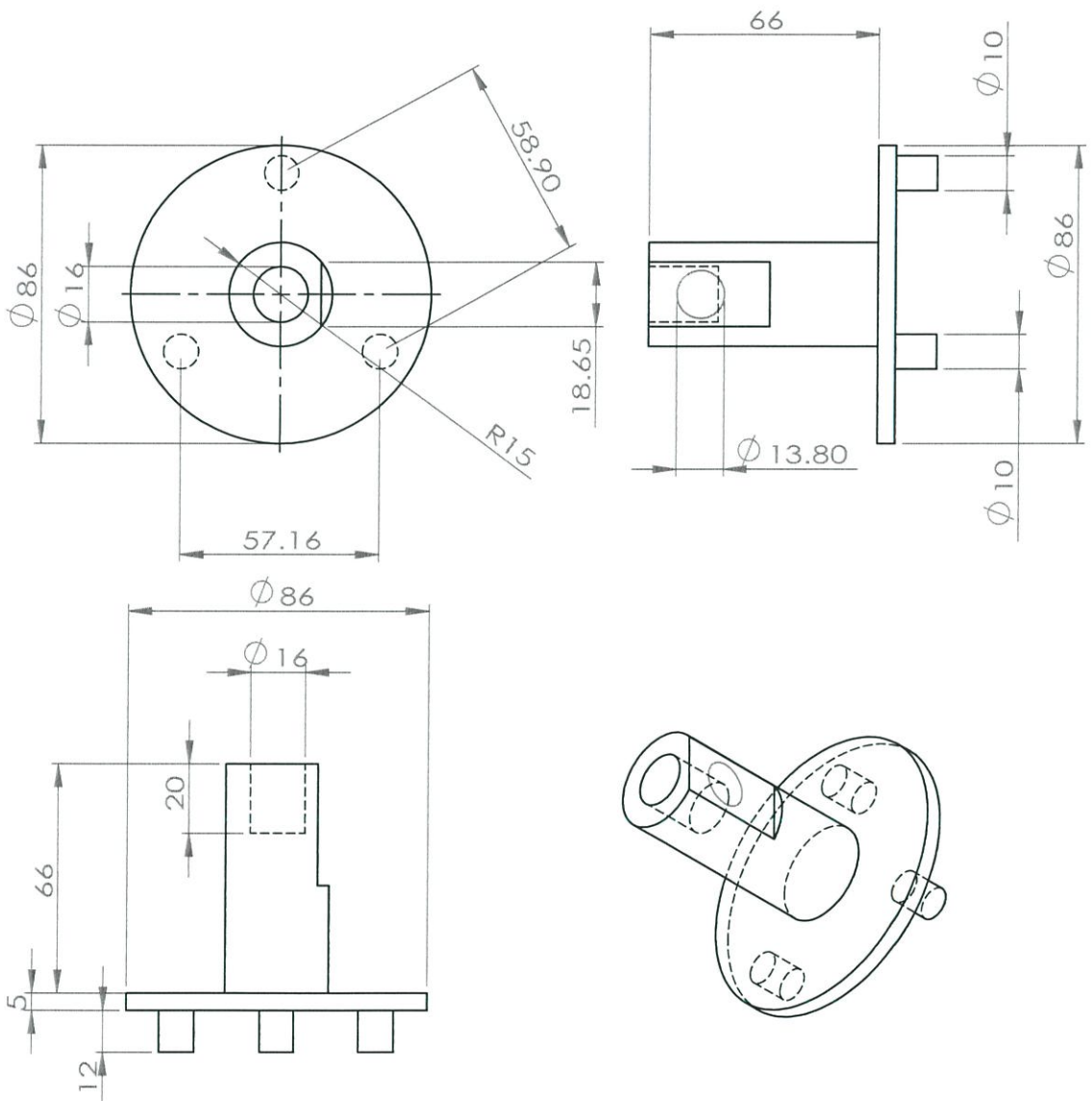
Part name	now	Part No.	015	Scale
Material	Aluminium	Sheet	19/43	1:5
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Penpak Sukkawee		
	Design	Supansa Traisom		
	Approve	Polchai Chotiprayanakul		



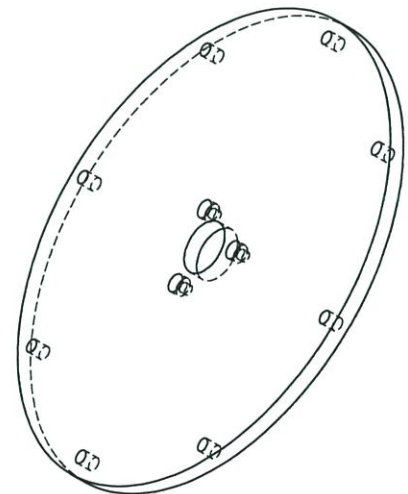
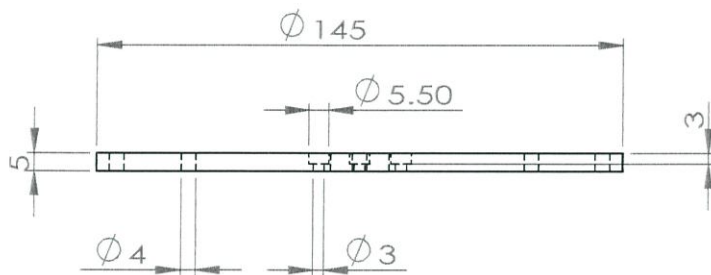
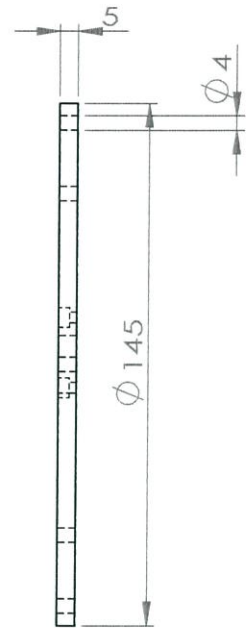
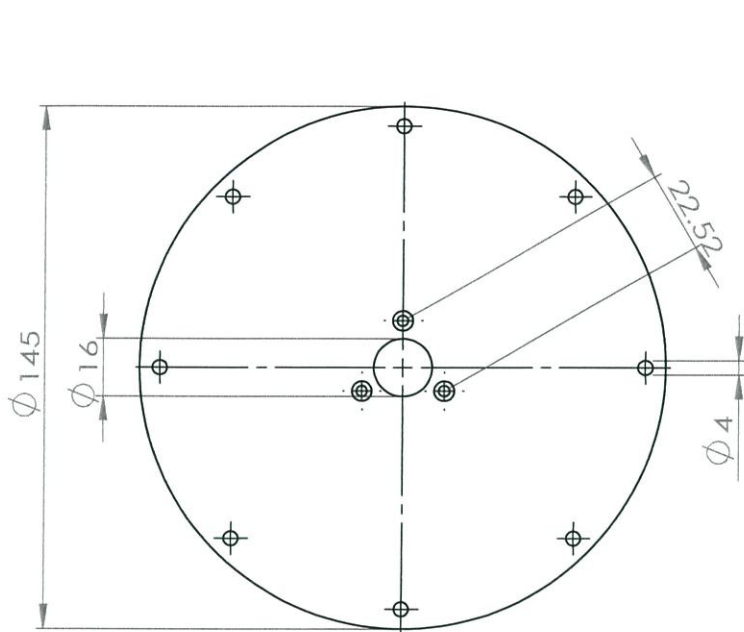
Part name	Part2	Part No.	016	Scale
Material	Aluminium	Sheet	20/43	1:2
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Penpak Sukkawee		
	Design	Supansa Traisom		
	Approve	Polchai Chotiprayanakul		



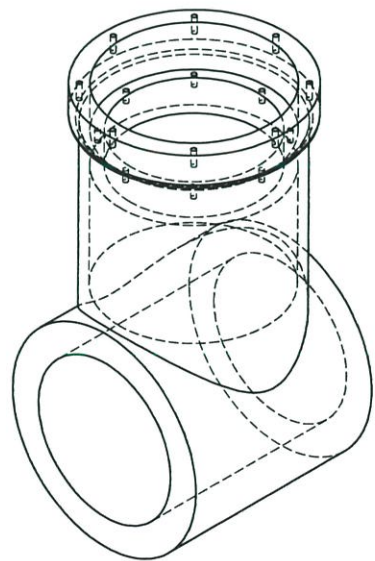
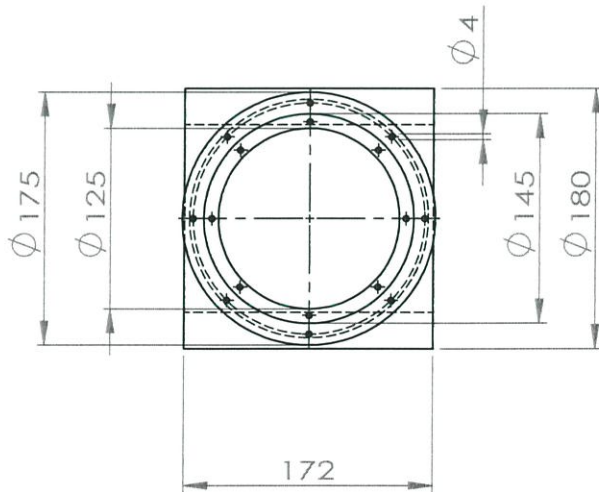
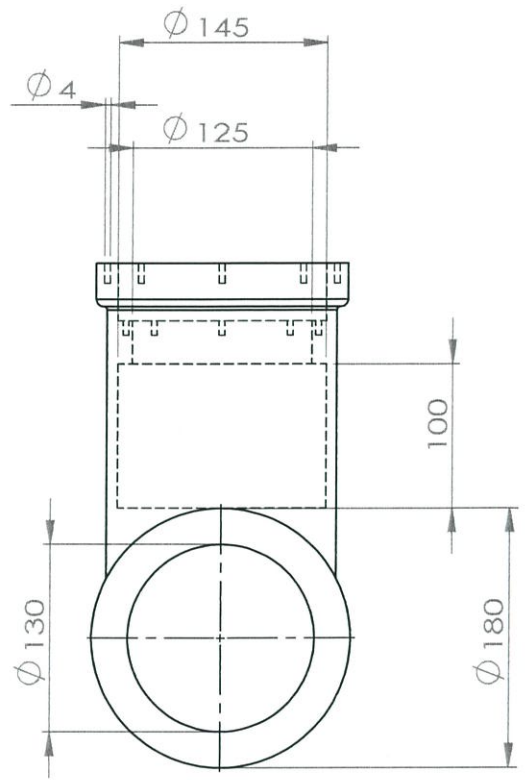
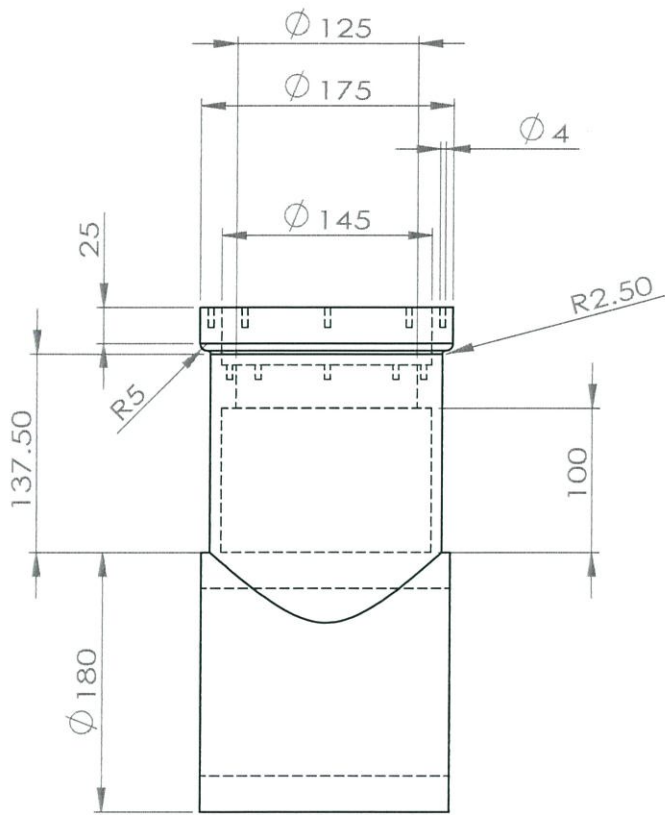
Part name	bridge-Part(1)2pieces	Part No.	017	Scale
Material	Aluminium	Sheet	21/43	1:1
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Penpak Sukkawee		
	Design	Supansa Traisom		
	Approve	Polchai Chotiprayanakul		



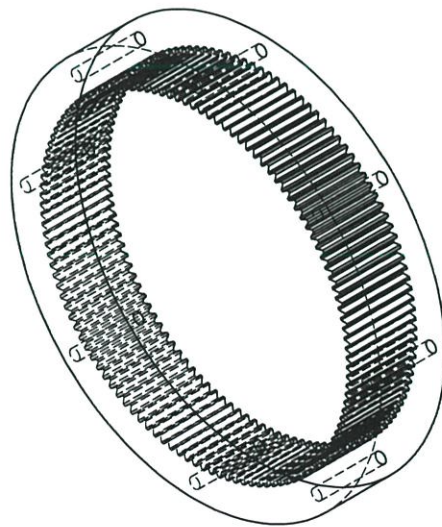
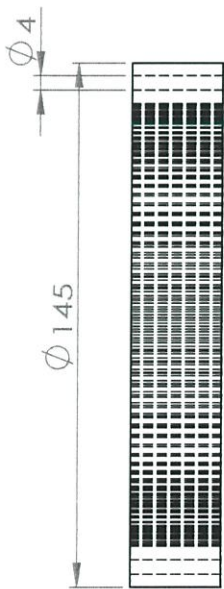
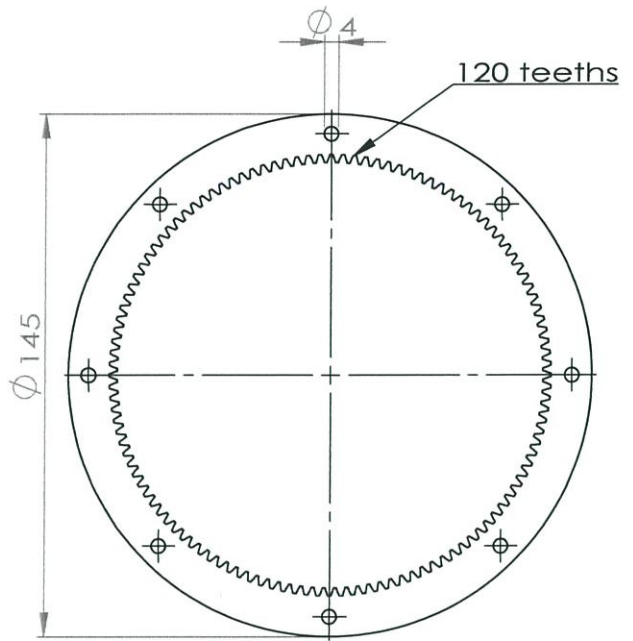
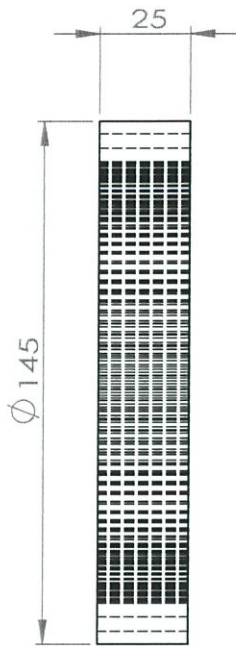
Part name	brige-Part	Part No.	018	Scale
Material	Aluminium	Sheet	22/43	1:2
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



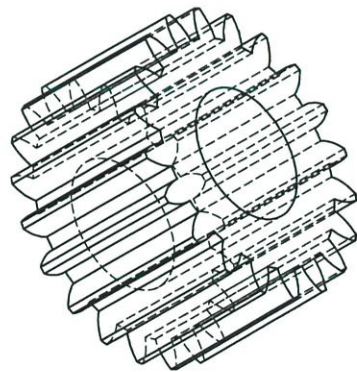
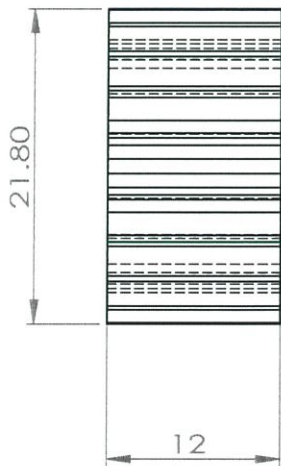
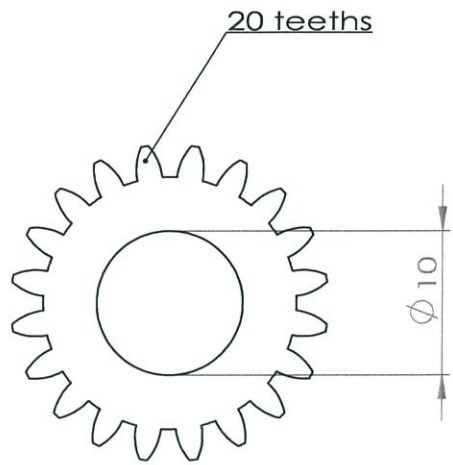
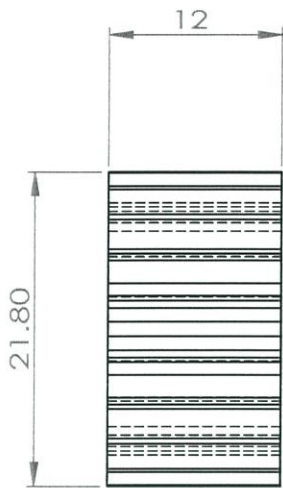
Part name	JOINT-CIRCLE	Part No.	019	Scale
Material	Aluminium	Sheet	23/43	1:2
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



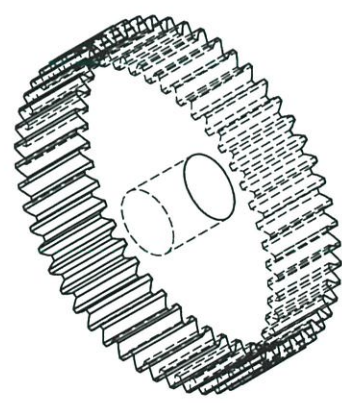
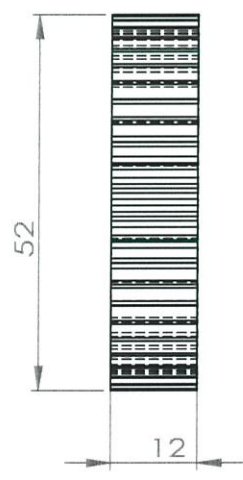
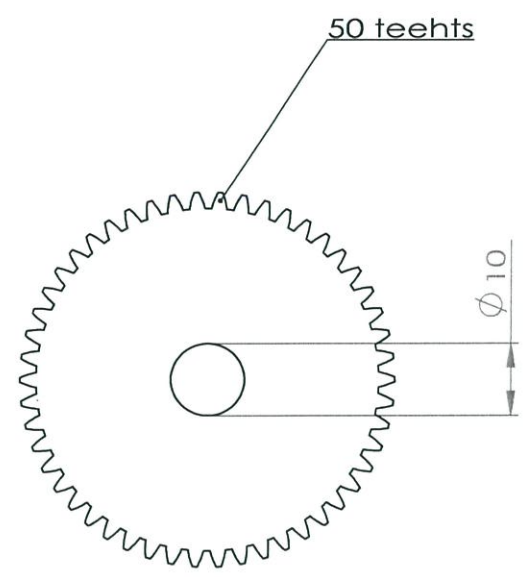
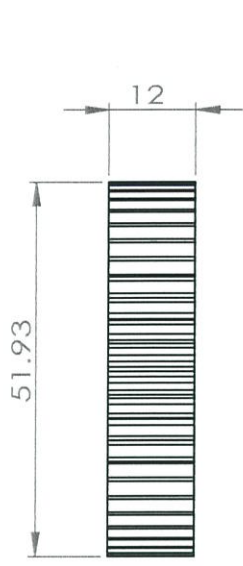
Part name	LinkJoint	Part No.	020	Scale
Material	Aluminium	Sheet	24/43	1:5
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Penpak Sukkawe		
	Design	Supansa Traisom		
	Approve	Polchai Chotiprayanakul		



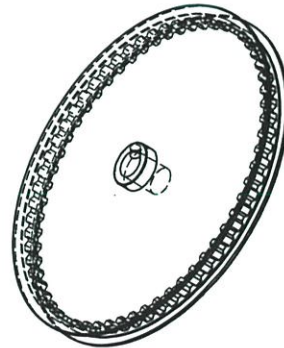
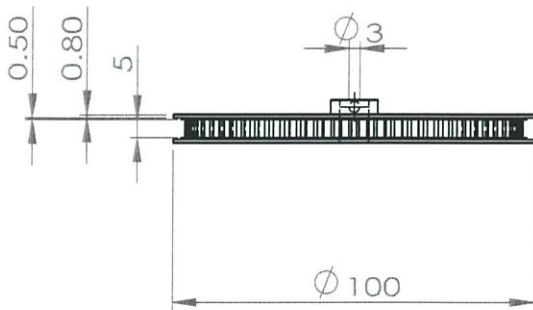
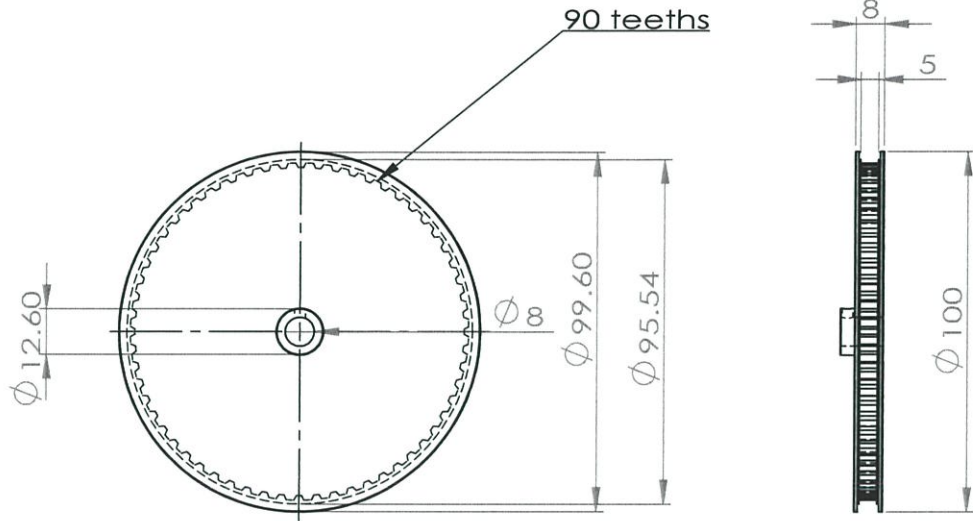
Part name	internal spur gear_iso_44	Part No.	021	Scale
Material	Aluminium	Sheet	25/43	1:2
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Penpak Sukkawee		
	Design	Supansa Traisom		
	Approve	Polchai Chotiprayanakul		



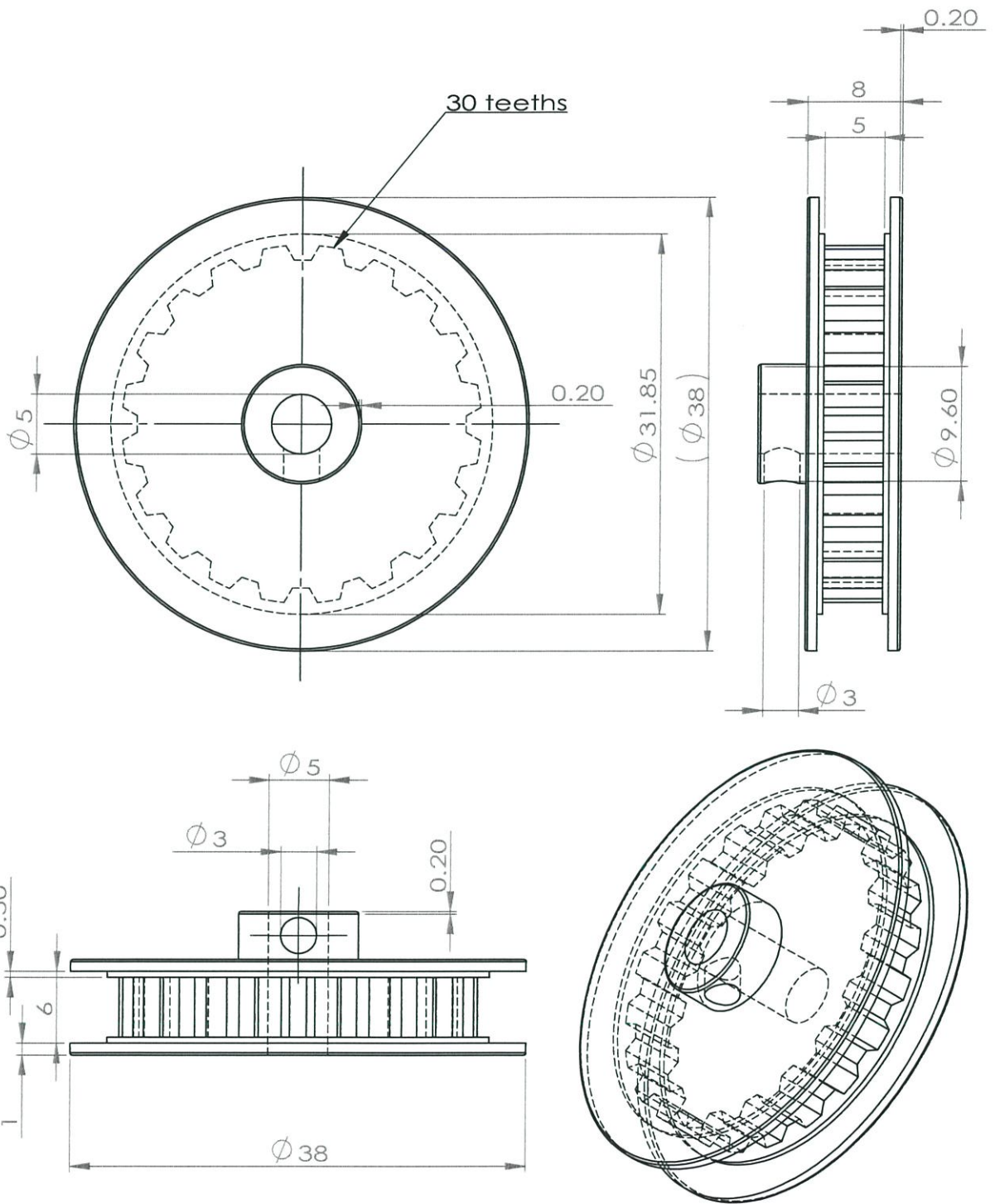
Part name	gearDATA-pinion	Part No.	022	Scale
Material	Aluminium	Sheet	26/43	2:1
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



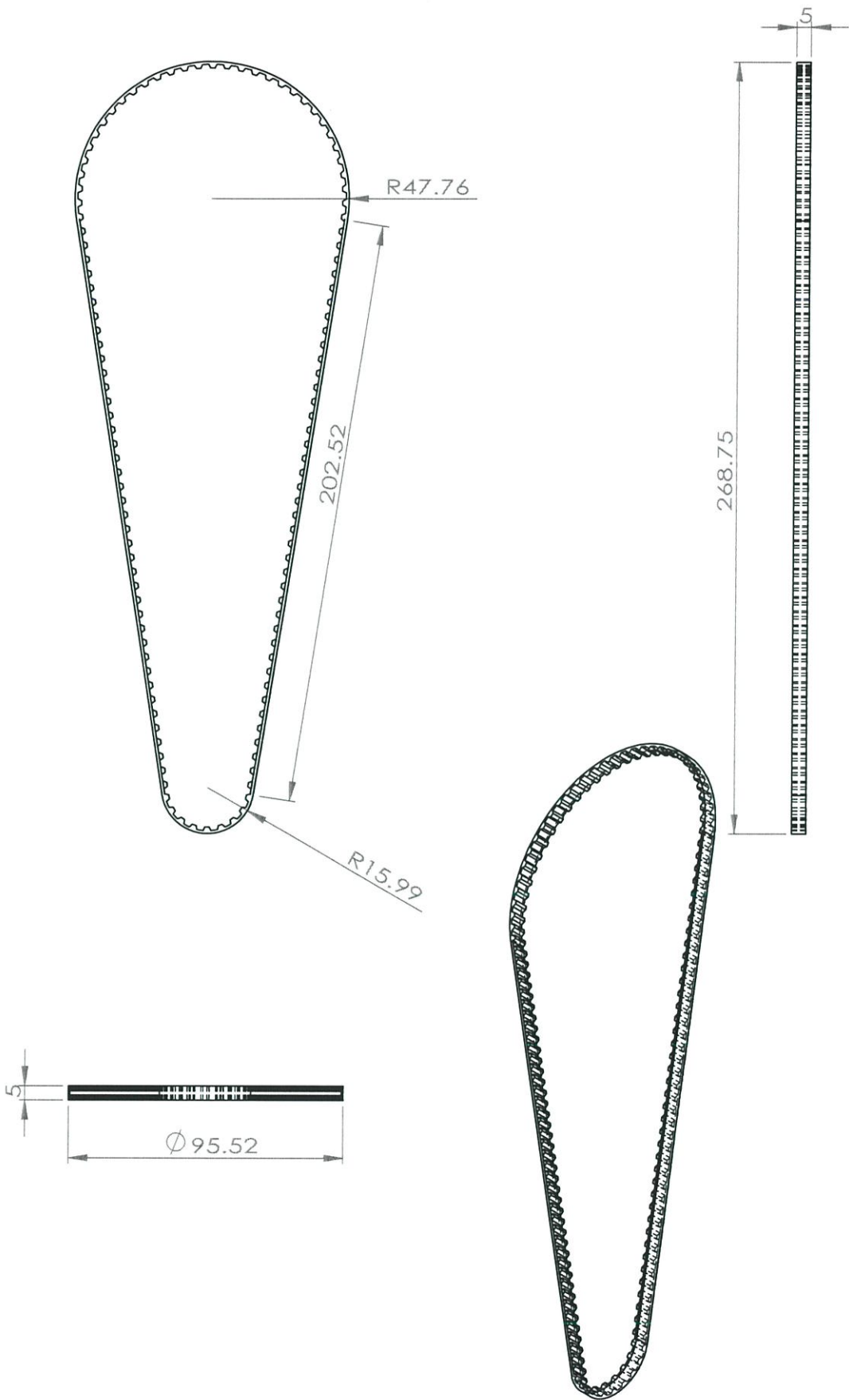
Part name	gearDATA	Part No.	023	Scale 1:1
Material	Aluminium	Sheet 27/43		
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



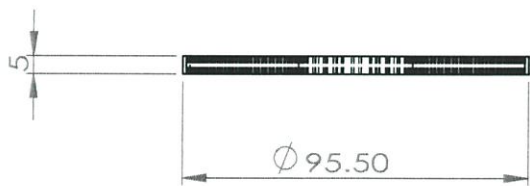
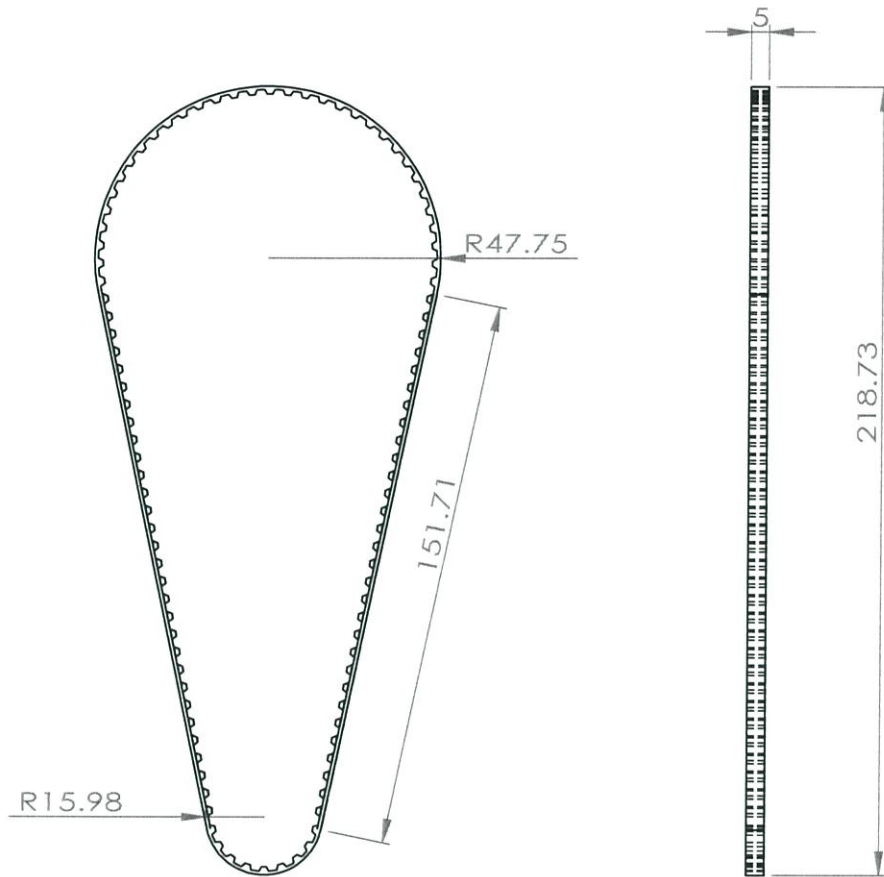
Part name	Pulleybevel-timing	Part No.	024	Scale 1:2
Material	Aluminium	Sheet 28/43		
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



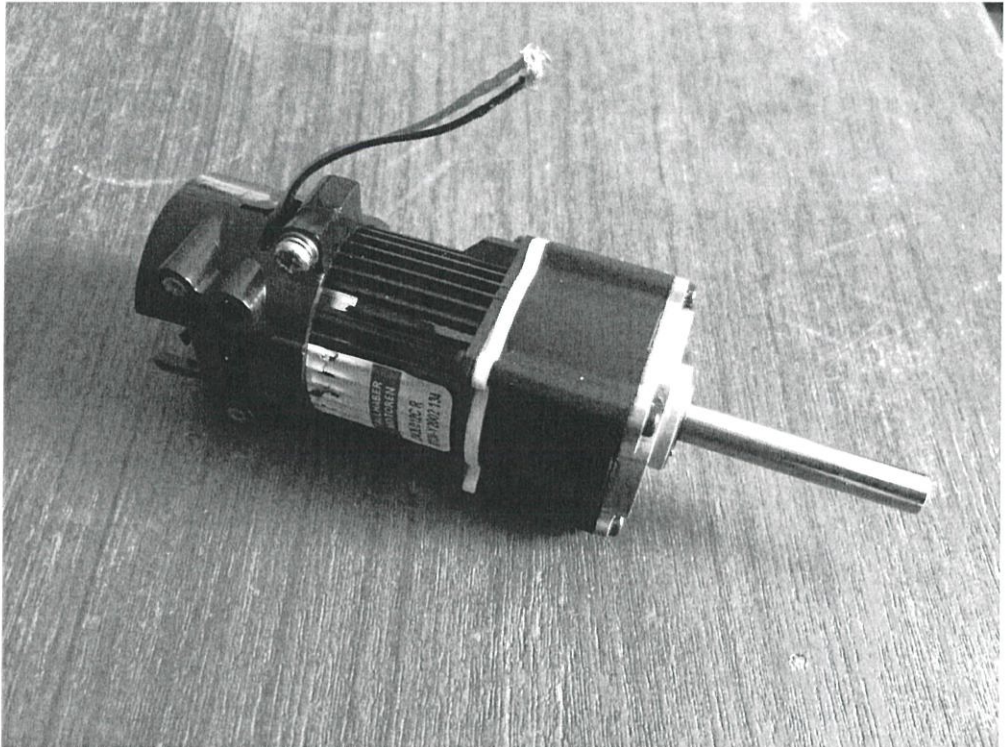
Part name	Pulley motor-timing	Part No.	025	Scale 2:1
Material	Aluminium	Sheet 29/43		
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawe	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



Part name	Belt2-1^How-Assemfinal-1	Part No.	026	Scale 1:2
Material	Aluminium	Sheet 30/43		
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawe	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



Part name	Belt4-1^Hoe-Assemfinal1-1	Part No.	027	Scale 1:2
Material	Aluminium	Sheet 31/43		
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	

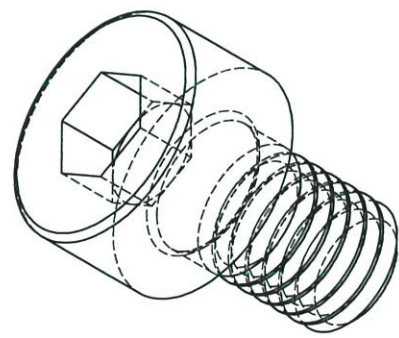
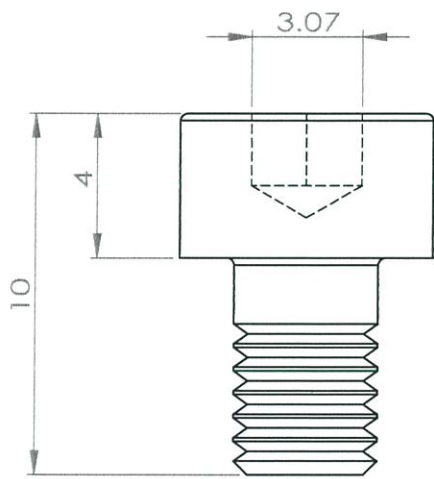
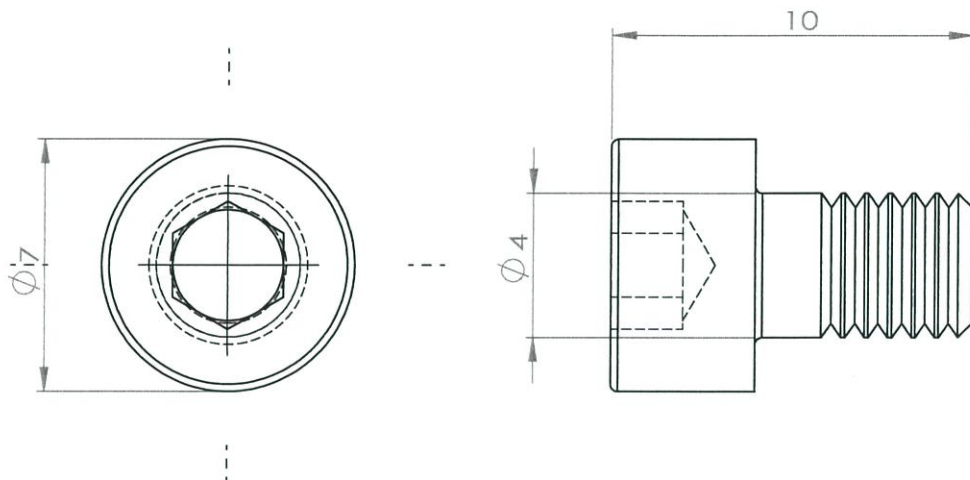


Servo Motor

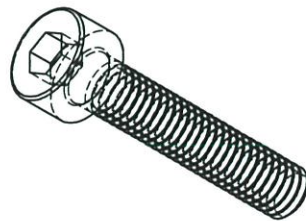
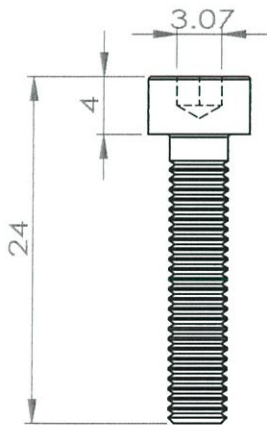
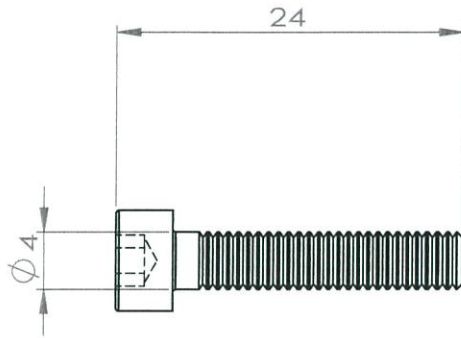
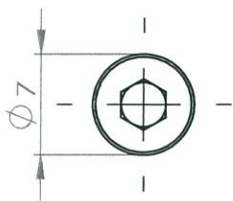
Brand : Faulhaber Moteren 2342L012CR, M124-2002 134

Specification : Speed 150 rpm

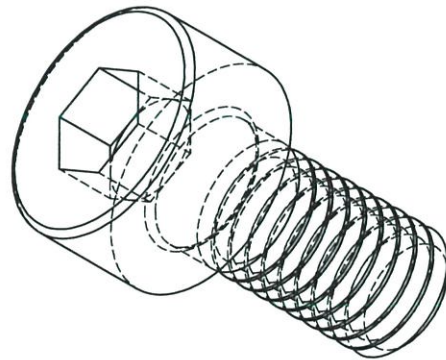
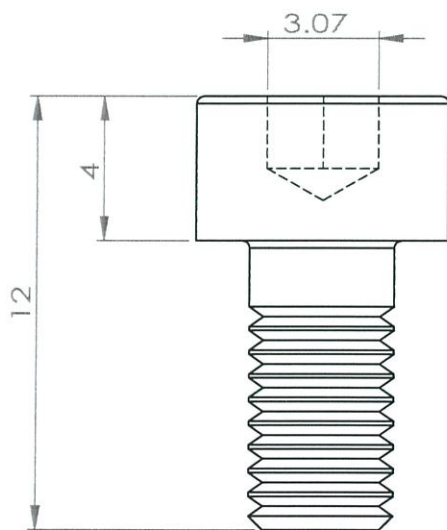
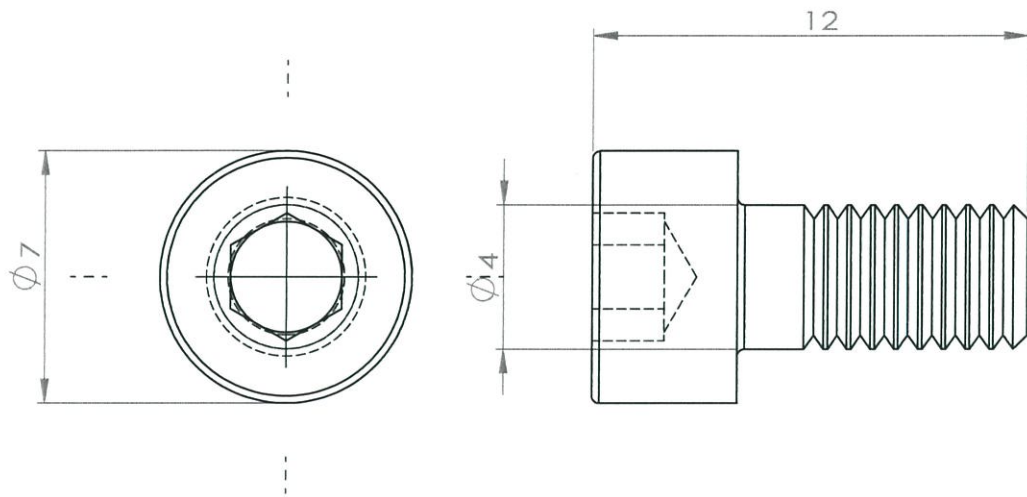
Part name	motor	Part No.	028	Scale
Material	Aluminium	Sheet 32/43		1:2
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



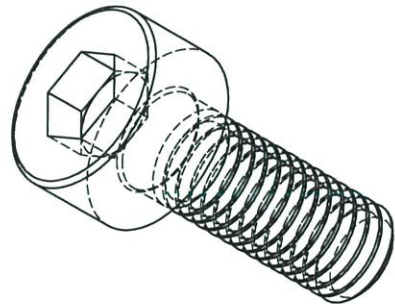
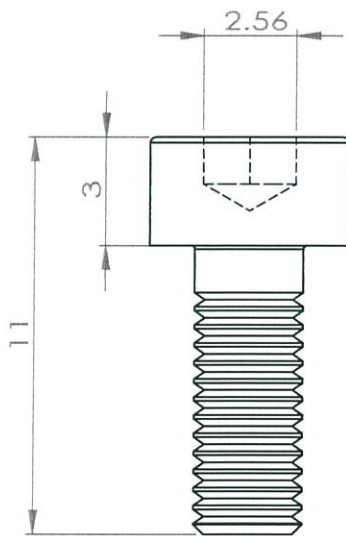
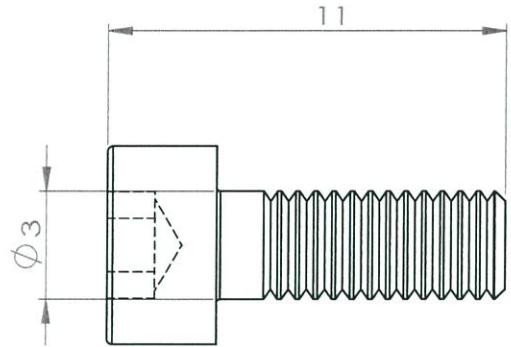
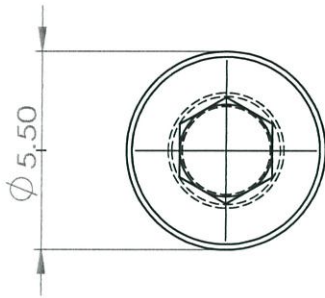
Part name	socket head cap screwM4L10	Part No.	101	Scale 5:1
Material	Aluminium	Sheet 33/43		
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang	Design	Penpak Sukkawe		
	Design	Supansa Traisom		
	Approve	Polchai Chotiprayanakul		



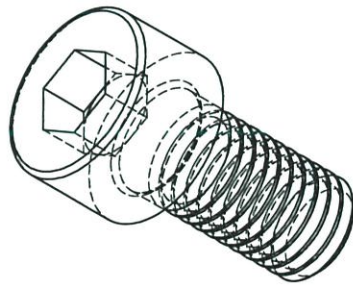
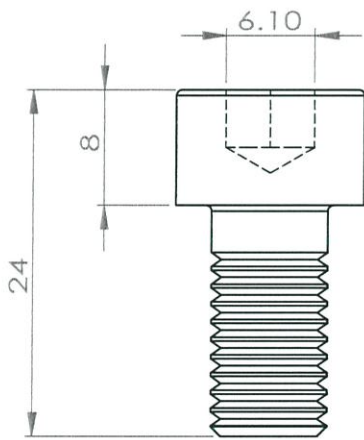
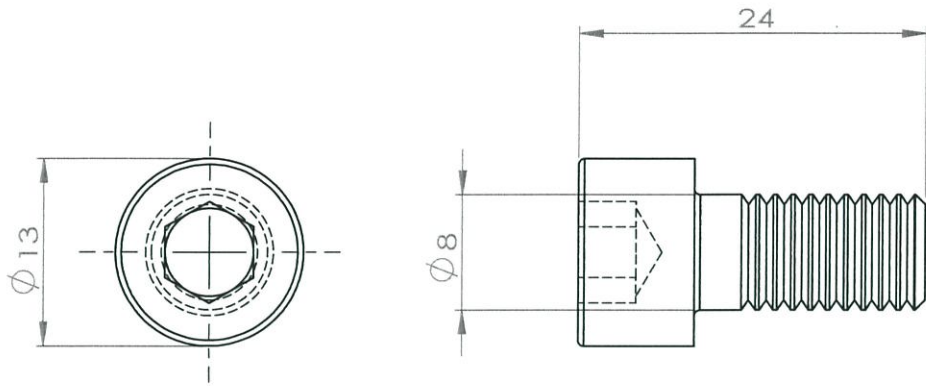
Part name	socket head cap screwM4L24	Part No.	102	Scale 2:1
Material	Aluminium	Sheet 34/43		
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



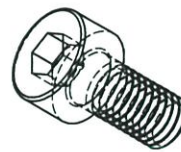
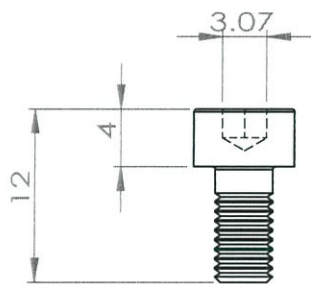
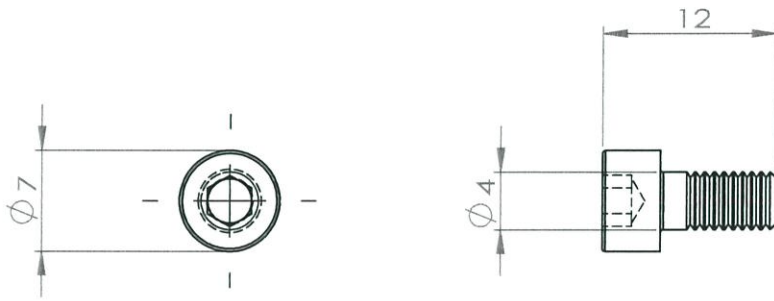
Part name	socket head cap screwM4L12	Part No.	103	Scale 5:1
Material	Aluminium	Sheet 35/43		
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



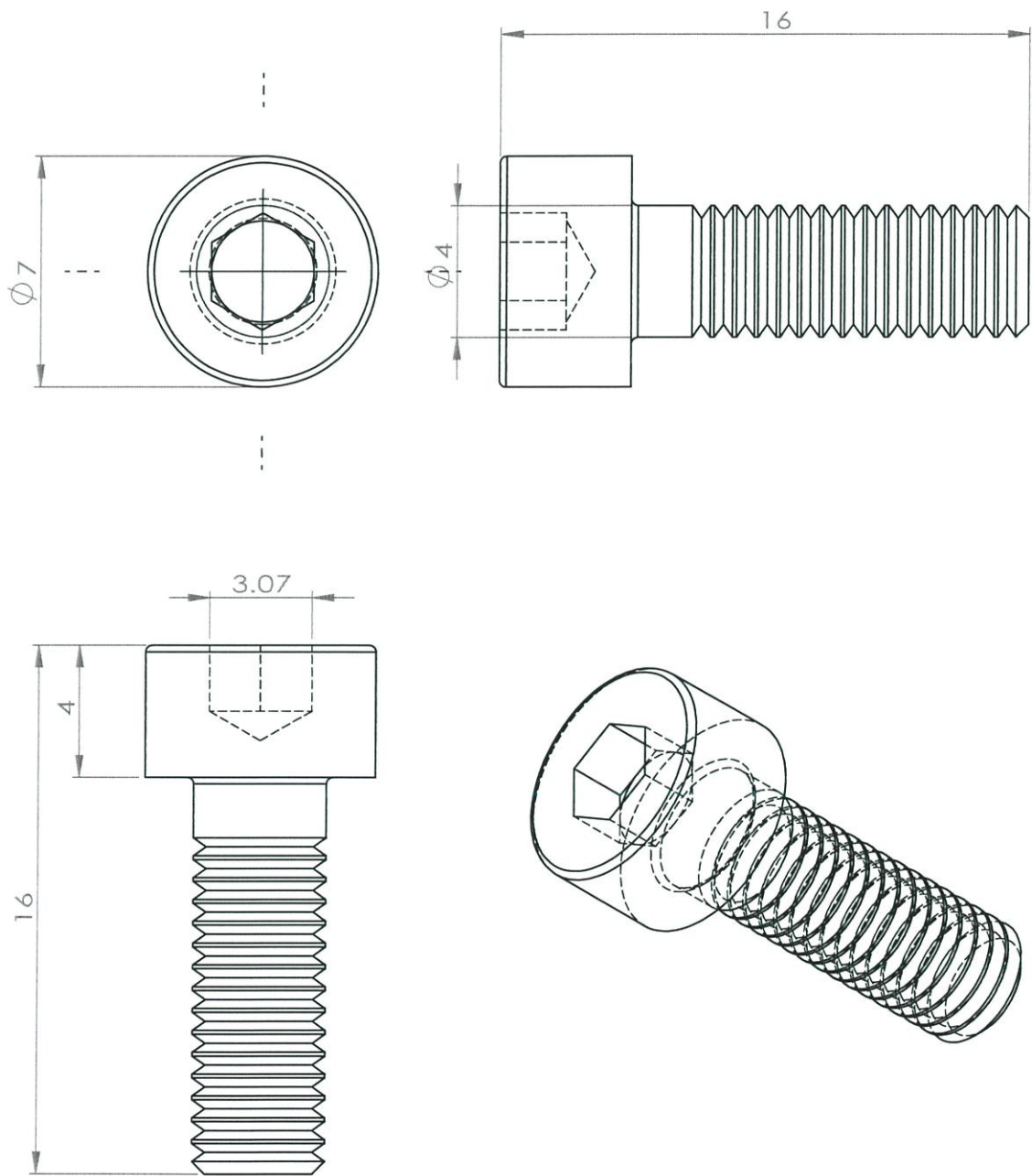
Part name	socket head cap screwM3L11	Part No.	104	Scale 5:1
Material	Aluminium	Sheet	36/43	
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



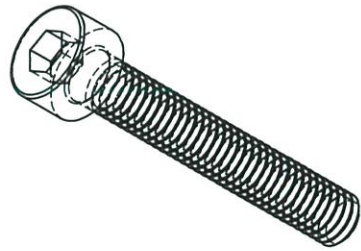
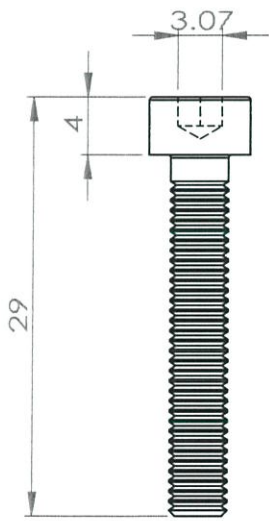
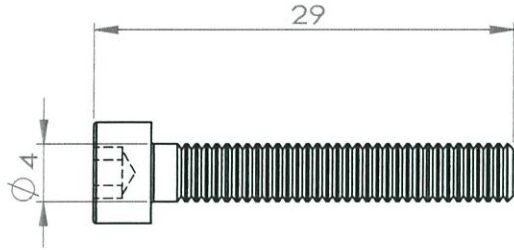
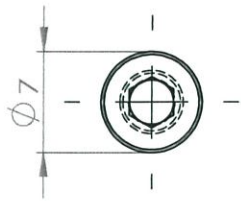
Part name	socket head cap screwM8L24	Part No.	105	Scale 2:1
Material	Aluminium	Sheet 37/43		
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



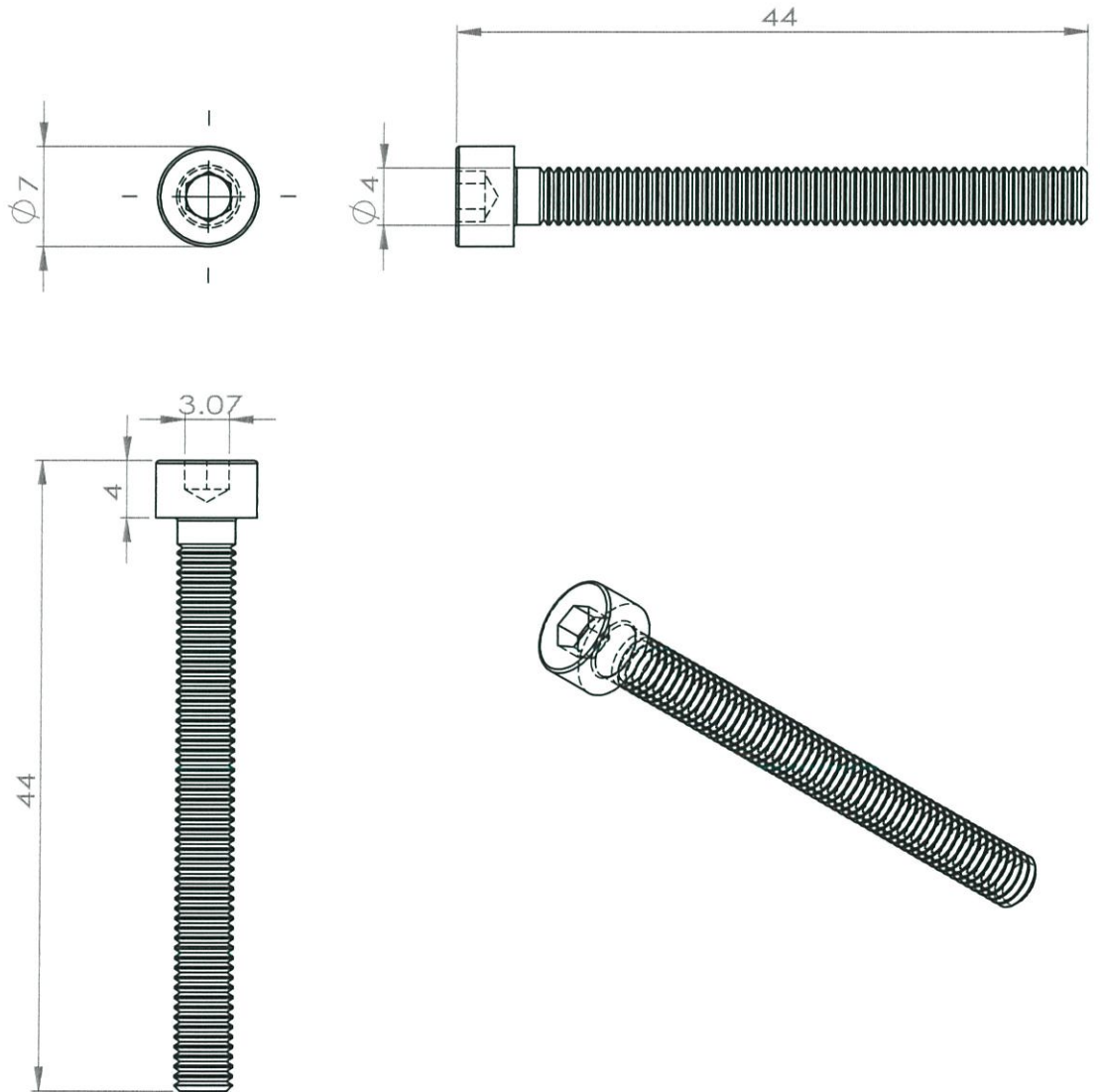
Part name	socket head cap screw M6L16	Part No.	106	Scale 2:1
Material	Aluminium	Sheet 38/43		
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



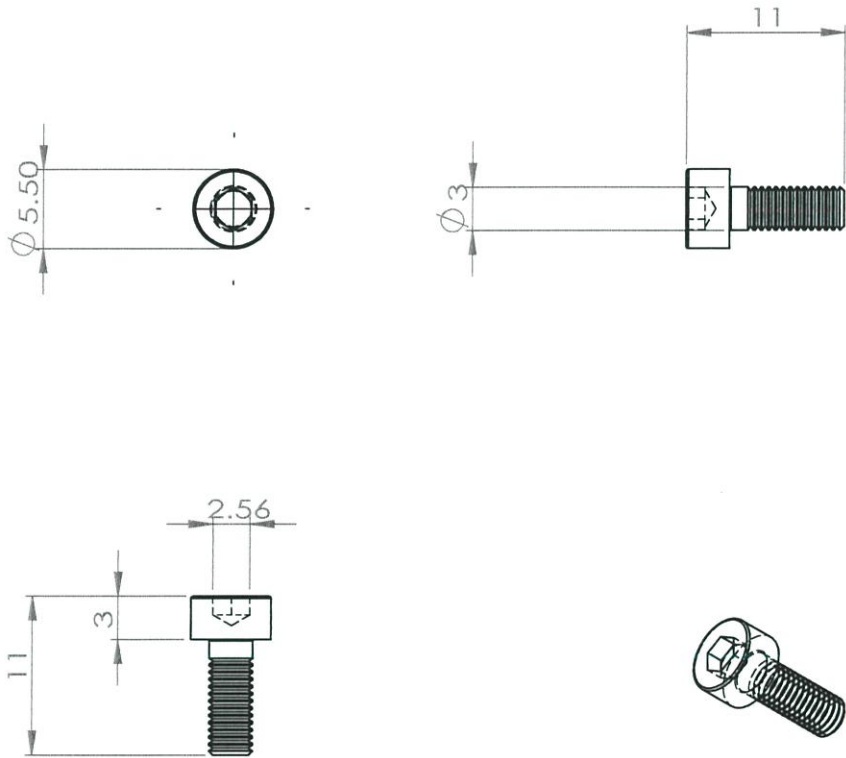
Part name	socket head cap screw M4L16	Part No.	107	Scale
Material	Aluminium	Sheet 39/43		
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



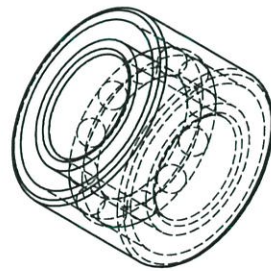
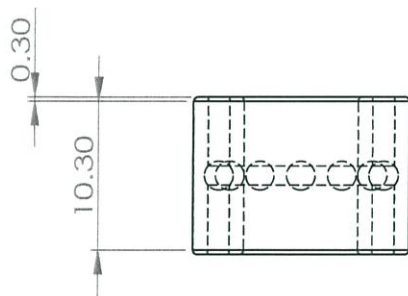
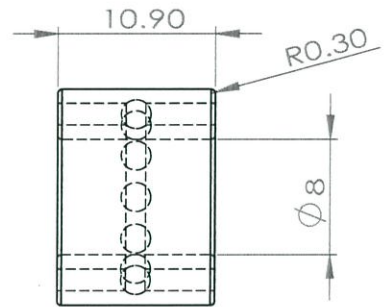
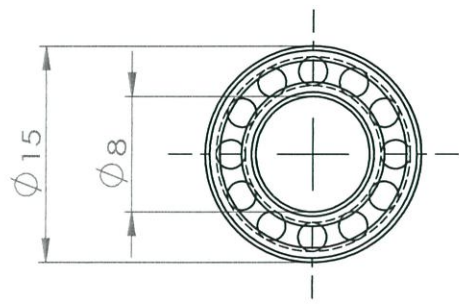
Part name	socket head cap screwM4L29	Part No.	108	Scale 2:1
Material	Aluminium	Sheet 40/43		
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanukul	



Part name	socket head cap screw M4x44	Part No.	109	Scale 2:1
Material	Aluminium	Sheet 41/43		
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



Part name	socket head cap screwM16L41	Part No.	110	Scale 2:1
Material	Aluminium	Sheet 42/43		
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	



Part name	Bearing-part-end-1-2	Part No.	111	Scale 2:1
Material	Aluminium	Sheet 43/43		
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang		Design	Penpak Sukkawee	
		Design	Supansa Traisom	
		Approve	Polchai Chotiprayanakul	