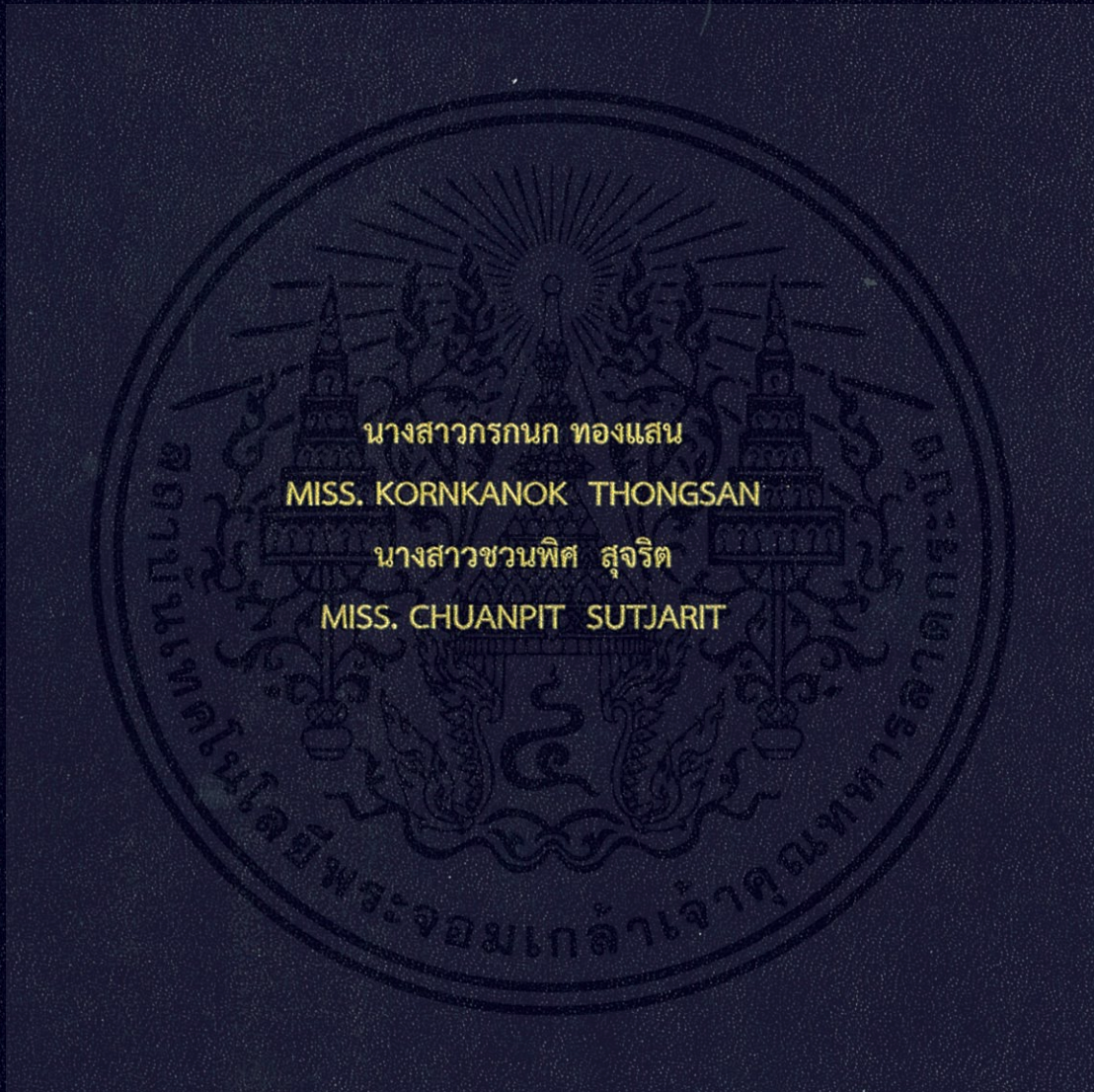


การออกแบบหุ่นยนต์ 6 แกน เฉพาะส่วน 3 แกนล่าง
DESIGN AND SIMULATION
OF AN INDUSTRIAL ROBOT 'S UPPER ARM



นางสาวกรรณก ทองแสน

MISS. KORNKANOK THONGSAN

นางสาวชวนพิศ สุจริต

MISS. CHUANPIT SUTJARIT

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

การออกแบบหุ่นยนต์ 6 แกน เฉพาะส่วน 3 แกนล่าง
DESIGN AND SIMULATION
OF AN INDUSTRIAL ROBOT'S UPPER ARM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ปีการศึกษา 2557

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN AND SIMULATION
OF AN INDUSTRIAL ROBOT'S UPPER ARM



MISS KORNKANOK THONGSAN
MISS CHUANPIT SUTJARIT

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์

การออกแบบหุ่นยนต์ 6 แกน เฉพาะส่วน 3 แกนล่าง
DESIGN AND SIMULATION OF AN INDUSTRIAL ROBOT'S
UPPER ARM


นักศึกษา

นางสาวกรรณก ทองแสน รหัสประจำตัว 54010023
นางสาวชวนพิศ สุจริต รหัสประจำตัว 54010289

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์



(ดร.พลชัย โชติปรายนกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การออกแบบหุ่นยนต์ 6 แกน เฉพาะส่วน 3 แกนล่าง
นักศึกษา	นางสาวกรรณก ทองแสน นางสาวชนพิศ สุจริต
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ดร.พลชัย โชติปราชญกุล

บทคัดย่อ

การจัดทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบ โครงสร้าง ส่วนประกอบ และรูปแบบการทำงาน ของหุ่นยนต์ชนิด Articulated Arm (Revolute) หรือ แขนกล โดยเฉพาะส่วนสามแกนล่าง การออกแบบแขนกลโดยใช้โปรแกรม Solidworks® ในการออกแบบนี้จะประกอบด้วย 3 แกนหมุนซึ่งแต่ละแกนจะมีชุดขับเคลื่อนชนิดเฟืองวงแหวน (Planetary Gear Set) และเซอร์โวมอเตอร์ รุ่น Omron R88M-G40030H-S AC servo motor ประกอบกันในโครงแขนกล (Links) ที่ออกแบบและนำทั้ง 3 ชุดมาต่ออนุกรมกัน รวมไปถึงการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลดังกล่าวโดยใช้โปรแกรม MATLAB® โดยให้ MATLAB® ประมวลผลข้อมูลในเมตริกซ์แสดงลักษณะการเคลื่อนที่บนพิกัดสามมิติ และคำนวณค่าความปลอดภัยในการออกแบบการรองรับภาระงานของหุ่นยนต์ (Pay Load) ที่มอเตอร์ต้องมีค่าแรงบิดมากเกินไปต่อการยกภาระงานนั้นให้เคลื่อนที่ในความเร็วที่กำหนดไว้ โดยผลที่ได้จะระบุถึงประสิทธิภาพการรับน้ำหนักในแต่ละท่าทางการเคลื่อนที่ของแขนกลในส่วนสามแกนล่างภายในพื้นที่การทำงานที่เป็นไปได้ทั้งหมด ผลที่ได้จากการทดลองให้ค่าความปลอดภัยที่น้อยสุดมีค่าเท่ากับ 1.1958 ซึ่งมากกว่า 1 แสดงว่าแบบหุ่นยนต์ในส่วนสามแกนล่างที่ออกแบบสามารถทำงานได้ตามที่กำหนดไว้และมีค่าเผื่อสำหรับภาระงานอีก 19.58 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Design and Simulation of An Industrial Robot's Upper Arm
Student	Miss Kornkanok Thongsan Miss Chuanpit Sutjarit
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 presents a design and simulation of an industrial robot especially upper arm. Using of endurance industrial robots replacing human workers will increase productivity and enlarge occupational health and safety. Many human workers are assigned for pick-and-place task thus our group proposed to design a human-arm-size articulated robot which can be replaced human workers in this job. First, joints and links are designed on Solidworks®. Each joint consists of a planetary gear set and a servo motor and calculations of joint capability are presented. Virtual model of the designed robot is created on Matlab® to simulate the motion of the robot which kinematics and dynamics of the robot are included. To verify the design, simulation tests are conducted to find out the safety factor of the joint capacity which are the difference between motor torque and load torque. Result of testing has shown that the designed robot can carry 2 kilogram load according to the design requirement and the minimum safety factor of payload is at 19.5 percent allowance.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ ความอนุเคราะห์จากอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการทุกท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดร.พลชัย โชติปรายนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ สำหรับการให้โอกาสในการศึกษา รวมทั้งความรู้ แนวคิดที่ดี คำแนะนำ ความช่วยเหลือและความเอาใจใส่ในทุกๆด้าน ตลอดเวลาที่ผ่านมา

ดร.เชาวลิต หามนตรี กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับความช่วยเหลือ และคำแนะนำที่ดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่มีได้เอื้อนาม ณ ที่นี้
ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ขอบคุณเพื่อนๆและรุ่นน้องทุกคนทุกคนสำหรับความช่วยเหลือและคอยเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา

นางสาวกรรณก ทองแสน
นางสาวชนพิศ สุจริต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช

บทที่ 1	บทนำ	
1.1	ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2	วัตถุประสงค์	1
1.3	ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์.....	2
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2

บทที่ 2	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1	หุ่นยนต์อุตสาหกรรม.....	3
2.1.1	นิยามของหุ่นยนต์.....	4
2.1.2	โครงสร้างพื้นฐานของหุ่นยนต์.....	4
2.1.3	ส่วนประกอบของหุ่นยนต์.....	5
2.1.4	ทิศทางของมือจับ.....	6
2.1.5	ลักษณะการทำงานของจุดต่อ.....	7
2.1.6	การแบ่งชนิดของหุ่นยนต์.....	7
2.2	ส่วนประกอบในการขับเคลื่อน.....	13
2.3	ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์.....	18
2.3.1	จลศาสตร์เกี่ยวกับตำแหน่งของแขนกล.....	34
2.3.2	การถ่ายทอดตำแหน่งโดยตรง.....	35
2.3.3	การเคลื่อนที่ของแขนกลแบบจาโคเบียน.....	36
2.4	การศึกษาทางกลศาสตร์ของหุ่นยนต์.....	39
2.4.1	สถิตยศาสตร์.....	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 พลศาสตร์ของหุ่นยนต์.....	39
2.5 ความรู้เบื้องต้น MATLAB	40
2.5.1 ไฟล์สคริปต์	40
2.5.2 ไฟล์ฟังก์ชัน	40
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน	
3.1 การดำเนินงาน	42
3.2 ศึกษาหุ่นยนต์อุตสาหกรรม	43
3.3 การออกแบบโครงสร้าง.....	43
3.4 มอเตอร์และระบบเฟืองทด	44
3.5 แบบแสดงรายละเอียดของแต่ละชิ้นส่วน.....	48
3.6 แบบจำลองของหุ่นยนต์บน MATLAB	51
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	
4.1 ผลการออกแบบหุ่นยนต์หกแกน	54
4.2 ผลจากการวิเคราะห์ความสามารถในการรับภาระงาน	54
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงาน	
เอกสารอ้างอิง.....	58
ภาคผนวก ก	ผก1
ภาคผนวก ข	ผข1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ลักษณะการทำงานของจุดต่อ	7
ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของ Cartesian Robot	8
ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของ Cylindrical Robot	9
ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของ Spherical Robot	10
ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของ SCARA Robot	11
ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของ Articulated Arm	12
ตารางที่ 4.1 ค่าเปอร์เซ็นต์ Safety Factor ของทั้ง 3 ข้อต่อ	56
ตารางที่ 5.1 สรุปคุณสมบัติของหุ่นยนต์	57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ส่วนต่างๆ ของหุ่นยนต์เปรียบเทียบกับสรีระของมนุษย์	5
รูปที่ 2.2 ข้อต่อต่างๆภายในหุ่นยนต์.....	5
รูปที่ 2.3 มุมการหมุน Yaw, Pitch, Roll (YPR).....	6
รูปที่ 2.4 รูปและการเคลื่อนที่ของ Cartesian Robot	8
รูปที่ 2.5 รูปและการเคลื่อนที่ของ Cylindrical Robot	9
รูปที่ 2.6 รูปและการเคลื่อนที่ของ Spherical Robot	10
รูปที่ 2.7 รูปและการเคลื่อนที่ของ SCARA Robot	11
รูปที่ 2.8 รูปและการเคลื่อนที่ของ Articulated Arm	12
รูปที่ 2.9 เฟืองตรง (spur gear)	13
รูปที่ 2.10 เฟืองวงแหวน (Internal Gear)	14
รูปที่ 2.11 มอเตอร์เซอร์โว	15
รูปที่ 2.12 ภาพตัดบอลแบร์ริง	16
รูปที่ 2.13 ภาพตัดโรลเลอร์แบร์ริง	17
รูปที่ 2.14 บอลทรัสต์แบร์ริง	17
รูปที่ 2.15 โรลเลอร์ทรัสต์แบร์ริง	17
รูปที่ 2.16 ภาพตัดเทปเปอร์โรลเลอร์ทรัสต์แบร์ริง	18
รูปที่ 2.17 บริเวณตำแหน่งระบบพิกัดฉากแบบ 2 มิติ และตำแหน่งวัตถุของระบบพิกัดฉากแบบ 3 มิติ	19
รูปที่ 2.18 ระบบพิกัดประสานฉากแบบ 3 มิติ แสดงด้วยคอมพิวเตอร์กราฟิก.....	19
รูปที่ 2.18 ระบบพิกัดประสานฉากแบบ 3 มิติ แสดงด้วยคอมพิวเตอร์กราฟิก.....	19
รูปที่ 2.19 เฟรมพิกัดฉากแสดงด้วยกฎของมือขวา (ก) ทิศทางของแกน x กับ z (ข) ทิศทางของแกน y กับ z	20
รูปที่ 2.20 แสดงตำแหน่งชิ้นงาน	21
รูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัด 2 ระบบ	21
รูปที่ 2.22 การย้ายตำแหน่งแบบ 6 มุมอิสระ ในระบบ 3 มิติตามกฎมือขวา	22
รูปที่ 2.23 ผลการเปลี่ยนตัวแปรของเมตริกซ์ที่ทำให้เกิดการแปลง.....	24
รูปที่ 2.24 การหมุนและการพลิกกลับ.....	25

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.25 (ก) แสดงการหมุน (ข) แสดงการเลื่อนเชิงเส้น.....	25
รูปที่ 2.26 ผลการหมุนและการเลื่อนเชิงเส้นของสมการการแปลง.....	29
รูปที่ 2.27 การแปลงระบบแกนจากขวาไปซ้ายสัมพันธ์กับเฟรมอ้างอิง.....	29
รูปที่ 2.28 (ก) การเคลื่อนที่ลักษณะเชิงเส้นโดยตรง (ข) แสดง $Trans(x,a) Rot(y,45^\circ)$	32
รูปที่ 2.29 การแปลงระบบแกนจากซ้ายไปขวาสัมพันธ์กับเฟรมอ้างอิงใหม่.....	32
รูปที่ 2.30 แสดงการเปลี่ยนตำแหน่งของการเคลื่อนย้ายชิ้นงาน.....	33
รูปที่ 2.31 แขนกล 6 ลิงค์แปลงตำแหน่งด้วยกราฟ.....	35
รูปที่ 2.32 เวกเตอร์แสดงการเคลื่อนที่แบบดิฟเฟอเรนเชียลของแขนกล type 1 two link.....	36
รูปที่ 2.33 จาโคเบียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับความเร็วเชิงเส้น.....	38
รูปที่ 3.1 ภาพขั้นตอนการปฏิบัติงาน.....	42
รูปที่ 3.2 หุ่นยนต์อุตสาหกรรมหกแกน.....	43
รูปที่ 3.3 การออกแบบหุ่นยนต์หกแกนเฉพาะส่วนสามแกนล่าง.....	43
รูปที่ 3.4 มอเตอร์ รุ่น Omron R88M-G40030H-S AC servo motor.....	44
รูปที่ 3.5 ทิศทางการเคลื่อนที่ของเฟือง.....	45
รูปที่ 3.6 เฟืองวงแหวน Internal Gear.....	45
รูปที่ 3.7 เฟืองตัวขับของข้อต่อที่ 1.....	46
รูปที่ 3.8 เฟืองตัวขับของข้อต่อที่ 2 และ 3.....	47
รูปที่ 3.9 ส่วนฐานและข้อต่อที่ 1 ของหุ่นยนต์.....	48
รูปที่ 3.10 ส่วนหัวไหล่และข้อต่อที่ 2 ของหุ่นยนต์.....	49
รูปที่ 3.11 ส่วนแขนของหุ่นยนต์.....	50
รูปที่ 3.12 แสดงแบบหุ่นยนต์ Articulated Arm.....	51
รูปที่ 3.13 CAD file ของหุ่นยนต์.....	52
รูปที่ 3.14 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม Matlab®.....	52
รูปที่ 4.1 แสดงผลของการออกแบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรมทั้งหกแกน.....	54
รูปที่ 4.2 แสดงพื้นที่การใช้งานที่เป็นไปได้ของแบบแขนกลเฉพาะส่วนสามแกนล่าง.....	55
รูปที่ 4.3 แสดงพื้นที่การใช้งานที่เป็นไปได้ของแบบแขนกลทั้งหกแกน.....	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติกำลังกลายเป็นอนาคตของอุตสาหกรรม เนื่องจากมีการนำมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยถูกนำมาใช้ในกระบวนการผลิต แทนแรงงานมนุษย์ซึ่งกำลังขาดแคลนและค่าแรงที่ปรับตัวสูงขึ้น หุ่นยนต์ที่ควบคุมโดยระบบอัตโนมัติจะช่วยเพิ่มความเร็วในการทำงานมีประสิทธิภาพและความแม่นยำในการทำงานสูงกว่าการทำงานของมนุษย์ ลดความเมื่อยล้า เพิ่มความปลอดภัยของมนุษย์ในการเข้าถึงกระบวนการการผลิต ตลอดจนสามารถควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ให้มีความสม่ำเสมอเป็นมาตรฐาน ทำให้โรงงานต่าง ๆ นำหุ่นยนต์อุตสาหกรรมมาใช้ในการผลิตมากขึ้น

หุ่นยนต์อุตสาหกรรมมีหลายชนิด ซึ่งโครงการนี้ให้ความสนใจในการศึกษาออกแบบ หุ่นยนต์ชนิด Articulated Arm เฉพาะส่วนสามแกนล่าง รูปแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะคล้ายกับแขนคน ซึ่งจะประกอบด้วยช่วงไหล่ แขนท่อนบน หุ่นยนต์ชนิดนี้มีบทบาทในอุตสาหกรรมที่เราพบเห็นโดยทั่วไป เช่น โรงงานผลิตและประกอบรถยนต์ งานเชื่อมอุตสาหกรรม งานประกอบเครื่องจักร งานในโรงงานผลิตเหล็ก เป็นต้น

การผลิตหุ่นยนต์อุตสาหกรรมในประเทศไทยยังไม่เป็นที่แพร่หลาย โดยมากจะเป็นการสร้างหุ่นยนต์ต้นแบบ ยังไม่มีการสร้างหุ่นยนต์ในเชิงพาณิชย์เหมือนดังต่างประเทศ เนื่องจากขาดความรู้และบุคลากร จึงมีจุดประสงค์เพื่อสร้างองค์ความรู้ในการออกแบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรม พัฒนาขึ้นส่วนรูปแบบใหม่ นำทักษะความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบหุ่นยนต์ รวมถึงการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่ออกแบบโดยโปรแกรม Matlab®

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษารูปแบบและการทำงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม
2. เพื่อศึกษาเกี่ยวกับหลักการโครงสร้าง และส่วนประกอบต่างๆของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม
3. เพื่อออกแบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรม
4. เพื่อศึกษาระบบวิธีการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่

เอกสารนี้... 5. เพื่อนำแขนกลที่สร้างขึ้นมาใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาทางการศึกษาและการวิจัยต่อไปในอนาคต

1.3 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. ออกแบบหุ่นยนต์หกแกนเฉพาะส่วนสามแกนล่าง โดยใช้โปรแกรม Solidwork®
2. จำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยใช้ โปรแกรม Matlab®
3. ทำการศึกษาและวิเคราะห์ความสามารถของแขนกลที่ออกแบบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ต้นแบบแขนกล ที่สามารถนำไปสร้างได้
2. ได้รูปแบบระบบการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่
3. สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการศึกษาพัฒนาหุ่นยนต์ในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

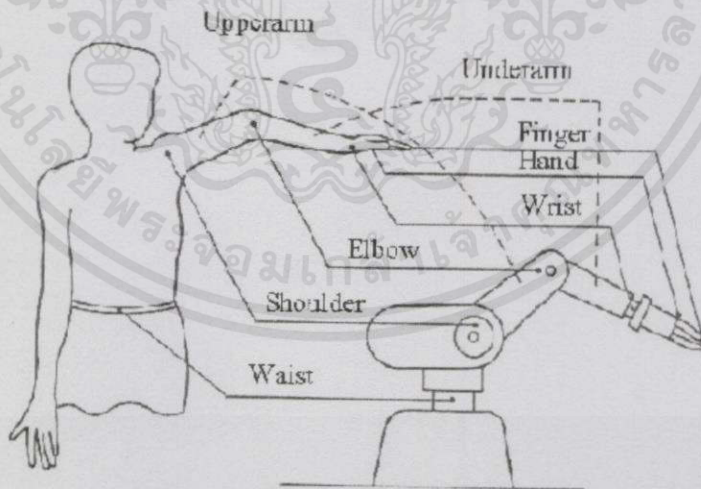
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หุ่นยนต์อุตสาหกรรม (Industrial Robot) (สภาวิศวกร,2553)

ในอนาคตหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจะเข้ามามีบทบาทในอุตสาหกรรมมากขึ้น โดยจะทำงานแทนมนุษย์ในงานต่างๆ โดยปราศจากข้อผิดพลาด มักใช้ในงานที่เป็นอันตราย ในสภาพแวดล้อมที่ไม่ดี เช่น ในงานพ่นสี งานที่เกี่ยวข้องกับสารเคมี งานที่ต้องการใช้ทักษะความชำนาญ งานที่ต้องการคุณภาพมาตรฐานเดียวกัน อีกทั้งยังสามารถเขียนโปรแกรมการทำงานของหุ่นยนต์ได้อย่างเอนกประสงค์ การเขียนโปรแกรมเพียงหนึ่งครั้ง หุ่นยนต์สามารถทำงานนั้นซ้ำๆ ได้เป็นระยะเวลานาน ทำให้เทคนิคทางการผลิต การจัดการสามารถคาดการณ์ได้

หุ่นยนต์อุตสาหกรรมถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง เช่น ในอุปกรณ์ขนถ่ายวัสดุ งานทาสี งานเชื่อม งานตรวจสอบ และงานประกอบ ข้อดีของการนำหุ่นยนต์อุตสาหกรรมมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิต คือ มีความยืดหยุ่นสูง มีผลผลิตเพิ่มขึ้น ผลผลิตมีคุณภาพที่ดีขึ้น และปรับปรุงคุณภาพชีวิตของมนุษย์ จากการทำงานที่อันตราย



รูปที่ 2.1 ส่วนต่างๆ ของหุ่นยนต์เปรียบเทียบกับสรีระของมนุษย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 นิยามของหุ่นยนต์

หุ่นยนต์ หรือ Robot จากพจนานุกรม Merriam-Webster ได้ให้ความหมายดังนี้ “Robot: (n) 1 a: a machine looks like a human being and performs various complex acts (as walking or talking) of a human being; also : a similar but frictional machine whose lack of capacity for human emotions is often emphasized or b : an efficient insensitive person who functions automatically performs complicated often repetitive tasks 3 : a mechanism guided by automatic controls”

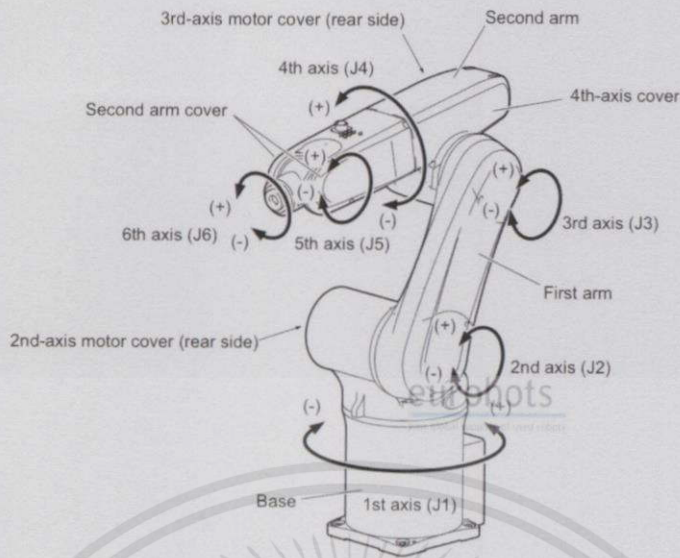
คำจำกัดความของหุ่นยนต์ตามมาตรฐาน ISO 8373 คือ “An automatically controlled, reprogrammable, multipurpose, manipulator programmable in three or more axes which may be either fixed in place or mobile for use in industrial automation application” ซึ่งหมายถึงหุ่นยนต์อุตสาหกรรมคือตัวกระทำ (manipulator) ที่ถูกควบคุมแบบอัตโนมัติ และสามารถโปรแกรมให้ปฏิบัติงานประยุกต์ในอุตสาหกรรมอัตโนมัติที่หลากหลายได้ โดยการเคลื่อนที่ในปริภูมิสามแกน หรือมากกว่า แกนอ้างอิงนี้อาจจะเคลื่อนที่ได้หรือไม่เคลื่อนที่ก็ได้

อีกความหมายหนึ่งตามคำจำกัดความ (The Robotics International Division of the Society of Manufacturing Engineers, 2013) คือ “A reprogrammable multi-functional manipulator designed to move material, parts, tools, or specialized devices through variable programmed motions for the performance of variety of tasks” หมายถึงเครื่องมือกลที่ทำหน้าที่เคลื่อนย้ายวัสดุ ชิ้นส่วน เครื่องมือ หรือเครื่องมือพิเศษอื่นๆ และสามารถเปลี่ยนแปลงลำดับขั้นตอนการเคลื่อนไหวสำหรับการทำงานที่ต่างชนิดกันได้

2.1.2 โครงสร้างพื้นฐานของหุ่นยนต์

แขนกลทำงานเหมือนกับแขนของมนุษย์เราโดยแขนของแขนกลจะทำด้วยวัตถุแข็งที่ต่อเข้ากันโดยจุดต่อที่ยึดหยุ่นได้ จุดต่อต่างๆทำงานเหมือนกับแขนของมนุษย์สามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงไปในทิศทางต่างๆได้ จุดต่อต่างๆเมื่อเทียบกับส่วนแขนของมนุษย์ คือ ไหล่ (Shoulder) ข้อศอก (Elbow) และข้อมือ (Wrist) ส่วนปลายสุดนั้นมีหน้าที่สำหรับจับชิ้นส่วนที่เรียกว่า มือจับ (Gripper or hand) มือจับจะทำหน้าที่ 2 ลักษณะคือ จับ (Close) และปล่อย (Open) มืออยู่ด้วยกัน 2 นิ้วหรืออาจมากกว่านี้ ในอนาคตแขนกลในงานอุตสาหกรรมจะมีบทบาทมากจะทำหน้าที่แทนคน เช่น ในระบบควบคุมอัตโนมัติ การวิเคราะห์ แยกแยะสิ่งของ ดังนั้นส่วนของแขนกลจะต้องมีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพ ขับเคลื่อนด้วยเทคโนโลยีใหม่ๆ รูปทรงสวยงาม และการเคลื่อนไหวสะดวกคล่องแคล่ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ข้อต่อต่างๆภายในหุ่นยนต์

2.1.3 ส่วนประกอบของหุ่นยนต์

ในหุ่นยนต์นั้นจะประกอบไปด้วยส่วนประกอบหลายส่วน ดังต่อไปนี้

- Manipulator หรือ rover เป็นส่วนประกอบหลักของหุ่นยนต์ ประกอบด้วยชิ้นส่วน (Links) ข้อต่อ (Joints) และโครงสร้างของตัวหุ่นยนต์
- End effector เป็นส่วนปลายสุดท้ายต่อกับข้อต่อส่วนสุดท้ายของแขนกล โดยปกติจะใช้หยิบจับวัตถุ หรือทำงานเฉพาะทาง เช่น ที่ติดตั้งเครื่องเชื่อม หรือเครื่องพ่นสี โดยปกติการควบคุมโดยใช้ชุดควบคุม PLC (Programmable logic controller)
- ชุดขับ (Actuators) เปรียบเสมือนกล้ามเนื้อ หรือชุดขับเคลื่อนของหุ่นยนต์ รูปแบบที่ใช้โดยทั่วไป ได้แก่ มอเตอร์ กระจบอกกลม กระจบอกไฮดรอลิก
- เซนเซอร์ (Sensors) คือ อุปกรณ์หยั่งวัด เพื่อใช้วัดข้อมูลของหุ่นยนต์ในการรับรู้สภาพแวดล้อม เช่น ชุดควบคุมต้องการที่จะทราบตำแหน่งของชิ้นส่วนของแขน ว่าอยู่ที่ ตำแหน่งใด เทียบกับมนุษย์ที่สามารถหยั่งรู้ว่าแขนหรือขาของเราอยู่ที่ใดแม้ในที่มืด เพราะชุดเครื่องมือวัดย้อนกลับของมนุษย์อยู่ในกล้ามเนื้อ แล้วส่งข้อมูลผ่านระบบประสาทไปยังสมองโดยสมองรับรู้ได้ว่าขณะนี้แขนและขาอยู่ที่ใด หลักการเหมือนในหุ่นยนต์ โดยชุดเครื่องมือวัดป้อนกลับ (Feedback sensors) ส่งข้อมูลจากแต่ละข้อต่อไปยังชุดควบคุมต่อไป
- ชุดควบคุม (Processor and controller) คล้ายสมองในมนุษย์โดยได้รับข้อมูลจากเซนเซอร์ และสั่งการไปยังชุดขับ (Actuators) เพื่อให้เคลื่อนที่ตามที่ได้ตั้งโปรแกรมไว้
- โปรแกรม (Software) แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม โดยกลุ่มแรกเป็นระบบปฏิบัติการพื้นฐาน (Operating systems) กลุ่มที่ 2 เป็นการโปรแกรมของหุ่นยนต์ (Robotic software) ซึ่งทำ

การคำนวณการเคลื่อนที่ของข้อต่อจากสมการจลนศาสตร์ จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งต่อไปยังชุดควบคุม และกลุ่มที่ 3 เป็นโปรแกรมควบคุมที่ใช้งานเฉพาะทาง เช่น ระบบวิทัศน์ (Vision systems) เป็นต้น

- แหล่งพลังงาน (Power supply) เป็นส่วนสำคัญที่จ่ายพลังงานไปชุดควบคุม และ Manipulator แบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ แหล่งจ่ายไฟฟ้า และแหล่งจ่ายพลังงานในการขับเคลื่อน เช่น ในหุ่นยนต์ที่ใช้ระบบนิวแมติกส์ จะต้องมีแหล่งจ่ายลมอัด เป็นต้น

2.1.4 ทิศทางของมือจับ (Tool Orientation)

ปกติแขนกลจะมีแกนหลักอยู่ 3 แกน ใช้ควบคุมทิศทางตำแหน่งงาน ส่วนแกนที่เพิ่มขึ้นจะอยู่ที่ปลายของแขนกลเรียกว่ามือจับ (Wrist) ใช้กำหนดทิศทางตำแหน่งงาน (Tool Orientation) การทำงานเหมือนการทำงานของมนุษย์ การทำงานเชื่อมโยงลักษณะ 3 มุมอิสระต่อกันดังรูป เรียกมุมทั้ง 3 ว่า Yaw, Pitch, Roll (YPR)

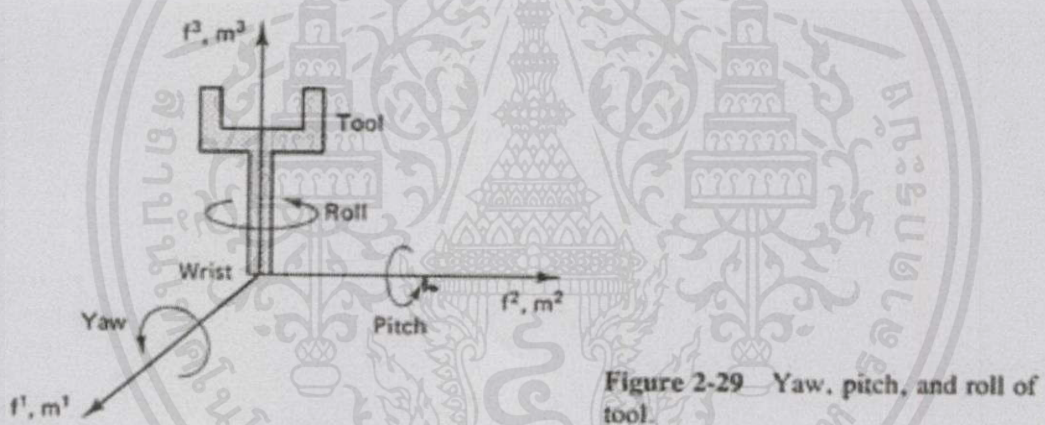


Figure 2-29 Yaw, pitch, and roll of tool.



รูปที่ 2.3 แสดงมุมการหมุน Yaw, Pitch, Roll (YPR)

ถ้าพิจารณาข้อมือมนุษย์เรา จะได้ว่ามุมที่เกิดจากการหมุนข้อมือเมื่อ Roll หมุนทั้งแกนการบิดข้อมือขึ้นลง ตามแนวฝ่ามือเรียกว่า Pitch มุมที่เกิดจากการบิดข้อมือไปด้านข้าง ซ้าย-ขวา เรียกว่า Yaw

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 ลักษณะการทำงานของจุดต่อ

ตารางที่ 2.1 แสดงลักษณะการทำงานของจุดต่อ

Type	Notation	Symbol	Description
ลักษณะหมุนรอบๆ (Revolute)	R		หมุนรอบๆแกน (Rotary motion about an axis)
ลักษณะทรงเหลี่ยม (Prismatic)	P		เคลื่อนที่แนวเชิงเส้นตามแกน (Linear motion along an axis)

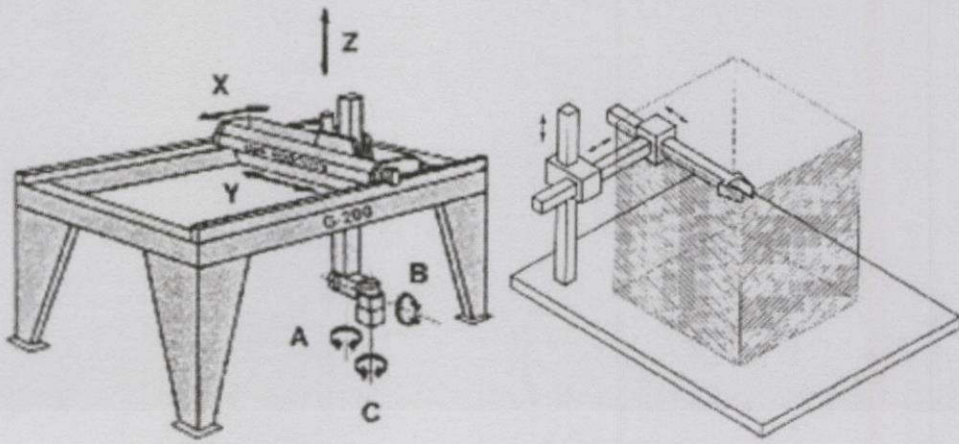
2.1.6 การแบ่งชนิดของหุ่นยนต์

การแบ่งประเภทของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมนั้น สามารถแบ่งได้หลายแบบขึ้นอยู่กับเงื่อนไขการพิจารณา ซึ่งอาจจะแบ่งได้ตามรูปแบบการเคลื่อนที่ ลักษณะการทำงาน หรือรูปทรงของพื้นที่การทำงาน หากจะกล่าวถึงประเภทที่แบ่งตามลักษณะการทำงาน หุ่นยนต์อุตสาหกรรมมักจะนำไปใช้ในงานเชื่อม งานทาสี งานประกอบ Pick and place (เช่น งานบรรจุหีบห่อ) งานตรวจสอบผลิตภัณฑ์ โดยปกติมนุษย์สามารถทำงานได้ทุกประเภท แต่ตามธรรมชาติการทำงานมีความเมื่อยล้า ต้องมีการพักผ่อน หุ่นยนต์จึงได้นำมาใช้แทนแรงงานมนุษย์ โดยปราศจากความเมื่อยล้า มีความรวดเร็วและแม่นยำมากกว่ามนุษย์ด้วย การแบ่งชนิดของหุ่นยนต์ต่อไปนี้จะแบ่งตามลักษณะรูปทรงของพื้นที่การทำงาน (Envelope Geometric)

1. หุ่นยนต์คาร์ทีเซียน (Cartesian Robot or Gantry Robot)

แกนทั้ง 3 ของหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่เป็นแบบเชิงเส้น (Prismatic) ถ้าโครงสร้างมีลักษณะคล้าย Overhead Crane จะเรียกว่าเป็นหุ่นยนต์ชนิด Gantry แต่ถ้าหุ่นยนต์ไม่มีขาตั้งหรือขาเป็นแบบอื่นเรียกว่า ชนิด Cartesian

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 แสดงรูปและการเคลื่อนที่ของ Cartesian Robot

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของ Cartesian Robot

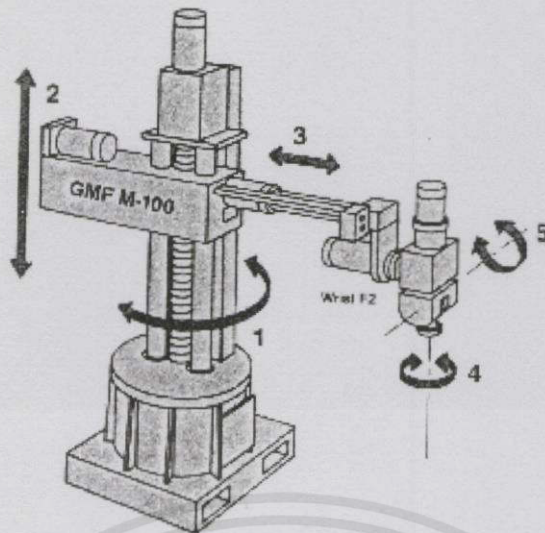
ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> - เคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรงทั้ง 3 มิติ - การเคลื่อนที่สามารถทำความเข้าใจง่าย - มีส่วนประกอบต่างๆ - โครงสร้างแข็งแรงตลอดการเคลื่อนที่ 	<ul style="list-style-type: none"> - ต้องการพื้นที่ติดตั้งมาก - บริเวณที่หุ่นยนต์เข้าไปทำงานได้ จะเล็กกว่าขนาดของตัวหุ่นยนต์ - ไม่สามารถเข้าถึงวัตถุจากทิศทางข้างใต้ได้ - แขนแบบเชิงเส้นจะ Seal เพื่อป้องกันฝุ่นและของเหลวได้ยาก

เนื่องจากโครงสร้างของ Cartesian Robot มีความแข็งแรงตลอดแนวการเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงเหมาะกับการเคลื่อนย้ายของหนักๆ หรือเรียกว่างาน Pick and Place เช่น ใช้โหลดชิ้นงานเข้าเครื่องจักร (Machine loading), ใช้จัดเก็บชิ้นงาน (Stacking) นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในงานประกอบ (Assembly) ที่ไม่ต้องการเข้าถึงในลักษณะที่มีมุมมน เช่น ประกอบอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และงานทดสอบต่างๆ

2. หุ่นยนต์ระบบพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical Robot)

หุ่นยนต์ประเภทนี้จะมีแกนที่ 2 (ไหล่) และแกนที่ 3 (ข้อศอก) เป็นแบบ Prismatic ส่วนแกนที่ 1 (เอว) จะเป็นแบบหมุน (Revolute) ทำให้การเคลื่อนที่ได้พื้นที่การทำงานเป็นรูปทรงกระบอก ดังรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 รูปและการเคลื่อนที่ของ Cylindrical Robot

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของ Cylindrical Robot

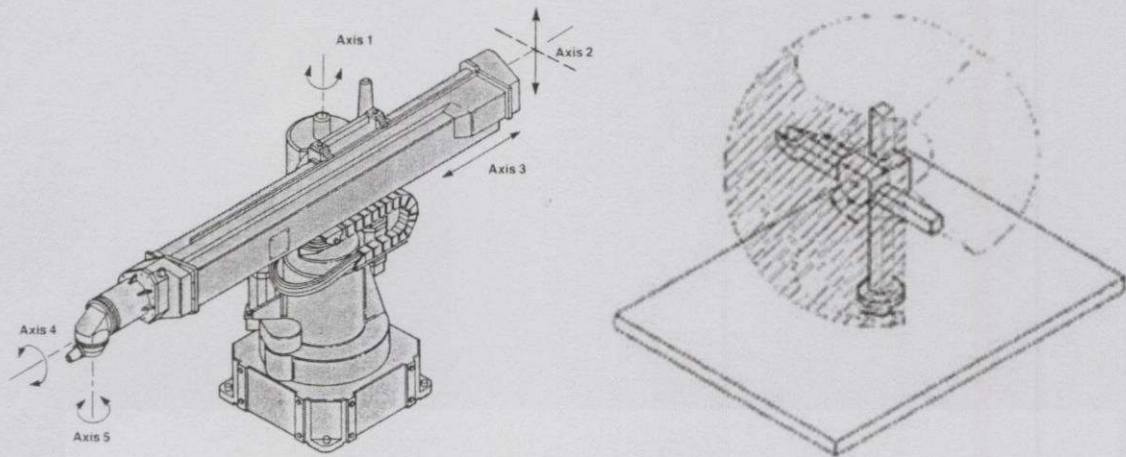
ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> - มีส่วนประกอบไม่ซับซ้อน - การเคลื่อนที่สามารถเข้าใจได้ง่าย - สามารถเข้าถึงเครื่องจักรที่มีการเปิด-ปิด หรือเข้าไปในบริเวณที่เป็นช่องหรือโพรงได้ง่าย (Loading) เช่น การโหลดชิ้นงานเข้าเครื่อง CNC 	<ul style="list-style-type: none"> - มีพื้นที่ทำงานจำกัด - แกนที่เป็นเชิงเส้นมีความยุ่งยากในการ seal เพื่อป้องกันฝุ่นและของเหลว

Cylindrical Robot โดยทั่วไปจะใช้ในการหยิบยกชิ้นงาน (Pick and Place) หรือป้อนชิ้นงานเข้าเครื่องจักรเพราะสามารถเคลื่อนที่เข้าออกบริเวณที่เป็นช่องโพรงเล็กๆ ได้สะดวก

3. Spherical Robot (Polar)

หุ่นยนต์ระบบพิกัดทรงกลม (Spherical Robot) มีสองแกนที่เคลื่อนในลักษณะการหมุน (Revolute Joint) คือแกนที่ 1 (เอว) และแกนที่ 2 (ไหล่) ส่วนแกนที่ 3 (ข้อศอก) จะเป็นลักษณะของการเคลื่อนที่แนวเส้นตรง ดังรูป ซึ่งทำให้ได้พื้นที่การทำงานเป็นรูปทรงกลม ดังรูปที่ 2.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แสดงรูปและการเคลื่อนที่ของ Spherical Robot

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของ Spherical Robot

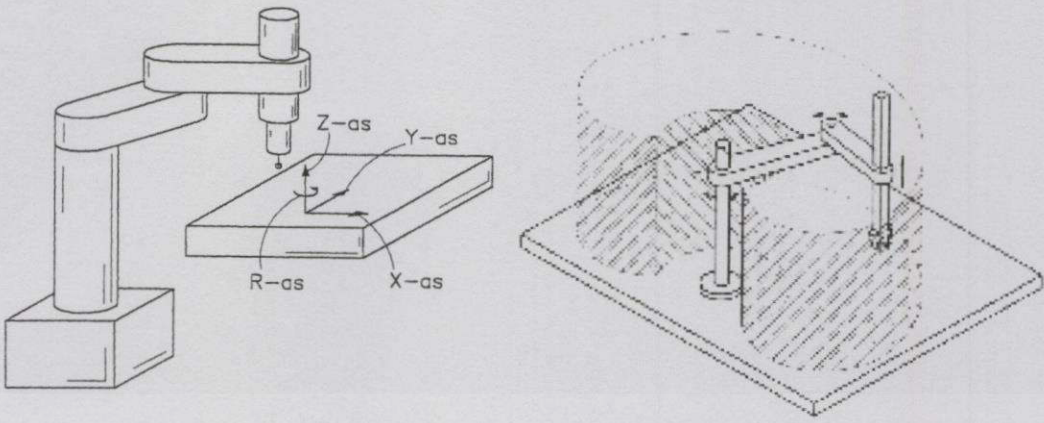
ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> - มีปริมาตรการทำงานมากขึ้น เนื่องจากการหมุนของแกนที่ 2 (ใหญ่) - สามารถที่จะก้มลงมาจับชิ้นงานบนพื้นได้สะดวก 	<ul style="list-style-type: none"> - มีระบบพิกัด (Coordinate) และส่วนประกอบที่ซับซ้อน - การเคลื่อนที่และระบบควบคุมมีความซับซ้อนขึ้น

โดย Spherical Robot ใช้ในงานที่มีการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (Vertical) เพียงเล็กน้อย เช่น การโหลตชิ้นงานเข้าออกจากเครื่องปั๊ม (Press) หรืออาจจะใช้งานเชื่อมจุด (Spot welding)

4. หุ่นยนต์แบบสการ่า (Selective Compliance Assembly Robot Arm; SCARA)

จะมีลักษณะแกนที่ 1 (เอว) และแกนที่ 3 (ข้อศอก) หมุนรอบแกนแนวตั้ง ส่วนแกนที่ 2 จะเป็นลักษณะการเคลื่อนที่ขึ้นลง (Prismatic) ดังรูป 2.7 ทำให้ได้พื้นที่การทำงาน หุ่นยนต์ SCARA จะเคลื่อนที่ได้รวดเร็วในแนวระนาบ และความแม่นยำสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงรูปและการเคลื่อนที่ของ SCARA Robot

ตารางที่ 2.5 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของ SCARA Robot

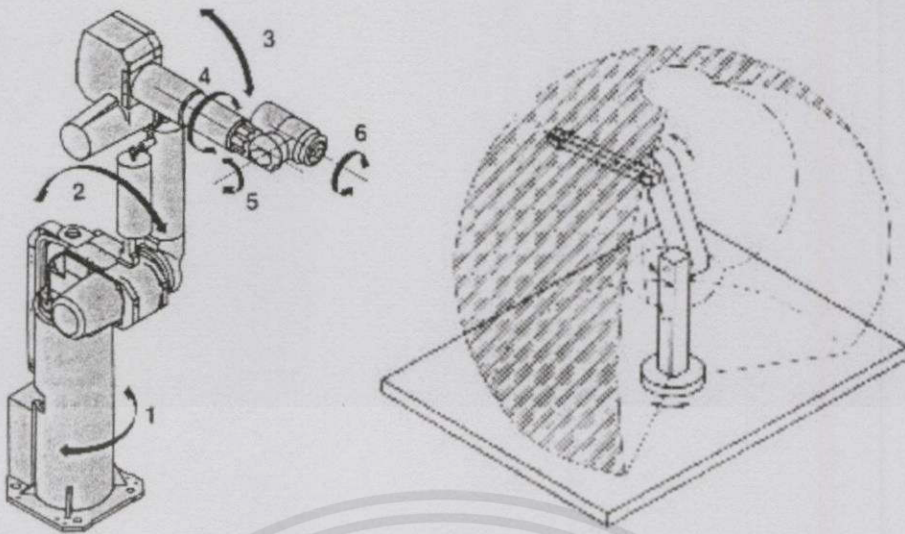
ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> - มีความแม่นยำสูง - สามารถเคลื่อนที่ในแนวระนาบ และขึ้นลงได้รวดเร็ว 	<ul style="list-style-type: none"> - มีพื้นที่ทำงานจำกัด - ไม่สามารถหมุน (rotation) ในลักษณะมุมต่างๆได้ - สามารถยกน้ำหนัก (Payload) ได้ไม่มากนัก

การประยุกต์การนำไปใช้งาน เนื่องจากการเคลื่อนที่ในแนวระนาบและขึ้นลงได้รวดเร็วจึงเหมาะกับงานประกอบชิ้นส่วนทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการความรวดเร็ว และการเคลื่อนที่ไม่ต้องการการหมุนมากนัก แต่จะไม่เหมาะกับงานประกอบชิ้นส่วนทางกล (Mechanical part) ซึ่งส่วนใหญ่การประกอบจะอาศัยการหมุน (Rotation) ในลักษณะมุมต่างๆ นอกจากนี้ SCARA Robot ยังเหมาะกับงานตรวจสอบ (Inspection) งานบรรจุภัณฑ์ (Packaging)

5. หุ่นยนต์แบบอาร์ทิกูเลท (Articulated Arm)

แกนการเคลื่อนที่ของ Articulated Arm จะเป็นแบบข้อต่อหมุน (Revolute Joint) ทั้งหมด รูปแบบการเคลื่อนที่จะคล้ายกับแขนคน ซึ่งจะประกอบด้วยช่วงเอว ท่อนแขนบน ท่อนแขนล่าง ข้อมือ การเคลื่อนที่ทำให้ได้พื้นที่การทำงาน ดังรูปที่ 2.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงรูปและการเคลื่อนที่ของ Articulated Arm

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของ Articulated Arm

ข้อดี	ข้อเสีย
<ul style="list-style-type: none"> - เนื่องจากทุกแกนจะเคลื่อนที่ในลักษณะของการหมุน ทำให้มีความยืดหยุ่นสูงในการเข้าไปยังจุดต่างๆ - บริเวณข้อต่อ (Joint) สามารถ Seal เพื่อป้องกันฝุ่น ความชื้นหรือน้ำได้ง่าย - มีพื้นที่การทำงานมาก - สามารถเข้าถึงชิ้นงานทั้งจากด้านบน ด้านล่าง - เหมาะกับการใช้มอเตอร์ไฟฟ้า เป็นชุดขับเคลื่อน 	<ul style="list-style-type: none"> - มีระบบพิกัด (Coordinate) ที่ซับซ้อน - การเคลื่อนที่และระบบควบคุมทำความเข้าใจได้ยากขึ้น - ควบคุมให้เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง (Linear) ได้ยาก - โครงสร้างไม่มั่นคงตลอดช่วงการเคลื่อนที่ เพราะบริเวณพื้นที่การทำงาน (Work envelope) ปลายแขนจะมีการสั่น ทำให้ความแม่นยำลดลง

การประยุกต์การนำไปใช้งาน หุ่นยนต์ชนิดนี้สามารถใช้งานได้กว้างขวาง เพราะสามารถเข้าถึงตำแหน่งต่างๆได้ดี เช่น งานเชื่อม Spot Welding, Path Welding, งานยกของ, งานตัด, งานทากาว, งานที่มีการเคลื่อนที่ยากๆเช่น งานพันสี งาน Sealing ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 ส่วนประกอบในการขับเคลื่อน (จรัส บุญยธรรมา, พิสิษฐ์ราชมงคล)

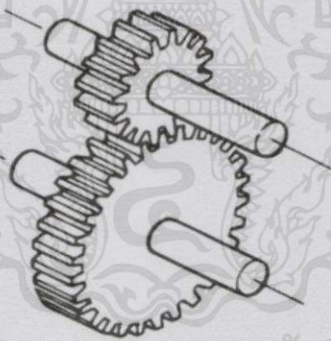
2.2.1 เฟือง (gear)

เป็นชิ้นส่วนเครื่องกลที่มีรูปร่างเป็นจานแบนรูปวงกลม ตรงขอบมีลักษณะเป็นแฉก (เรียกว่า ฟันเฟือง) ซึ่งสามารถนำไปประกบกับเฟืองอีกตัวหนึ่ง ทำให้เมื่อเฟืองตัวแรกหมุน เฟืองตัวที่สองจะหมุนในทิศทางตรงกันข้าม เกิดเป็นระบบส่งกำลังขึ้น โดยความเร็วรอบของเฟืองที่สองจะขึ้นกับอัตราส่วนจำนวนฟันเฟืองของตัวแรกเทียบกับตัวที่สอง ซึ่งอัตราส่วนนี้สามารถปรับให้เกิดเป็นความได้เปรียบเชิงกลได้ จึงถือเป็นเครื่องกลอย่างง่ายชนิดหนึ่ง

ด้วยคุณลักษณะนี้ เฟือง สามารถนำมาใช้ส่งผ่านแรงหมุน ปรับความเร็ว, แรงหมุน และทิศทางการหมุนในเครื่องจักรได้ โดยระบบเฟืองหรือระบบส่งกำลังนี้ มีความสามารถคล้ายคลึงกับระบบสายพาน แต่จะดีกว่าตรงที่ระบบเฟืองจะไม่สูญเสียพลังงานไปกับการยืดหดและการลื่นไถลของสายพาน

2.2.1.1 เฟืองตรง (Spur Gears)

เฟืองตรง (Spur gear) ดังรูปที่ 2 เป็นเฟืองที่มีใช้งานกันมากที่สุดในบรรดาเฟืองชนิดต่าง ๆ จะมีลักษณะเฉพาะคือฟันของเฟืองจะเป็นแนวขนานไปกับรูเพลลา โดยเฟืองตรงเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเฟืองขนานกับเพลลา (Parallel-shaft Gear)



รูปที่ 2.9 แสดงรูปเฟืองตรง (spur gear)

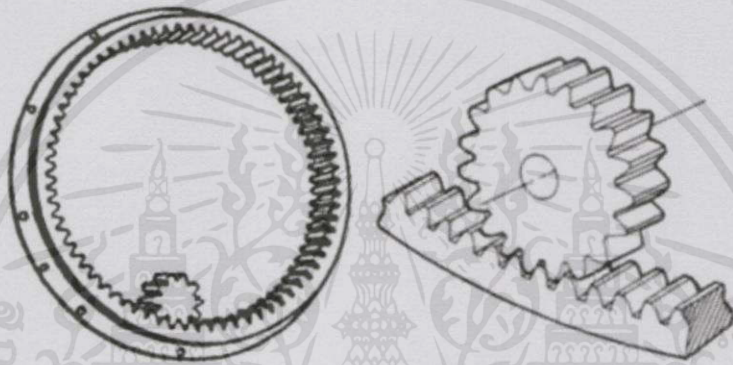
เฟืองตรงเป็นเฟืองที่มีโครงสร้างง่ายและไม่สลับซับซ้อน โดยถ้าเฟืองตรงสองตัวขบกันเราเรียกว่าเฟืองพีเนียน (Pinion Gears) โดยทั่วไปแล้วเฟืองตรงที่ใช้ส่งกำลังแต่ละคู่หนึ่งจะมีขนาดของฟันเฟืองหรือโมดูล (Module, m) เท่า ๆ กัน หมุนด้วยความเร็วเชิงเส้นที่เท่ากันแต่การได้เปรียบเชิงกลที่เกิดขึ้นจะเกิดจากจำนวนฟันที่ต่างกัน (อัตราทด, Ratio) ของเฟืองแต่ละตัว เฟืองตรงส่วนมากจะนำมาใช้ในระบบส่งกำลัง (Transmission Component)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครู ใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.2 เฟืองวงแหวน (Internal Gear, Ring Gear)

เฟืองวงแหวนเป็นเฟืองตรงอีกชนิดหนึ่งซึ่งมีลักษณะเหมือนกับเฟืองตรง แต่ฟันเฟืองจะอยู่ด้านในของวงกลมต้องใช้คู่กับเฟืองขนาดเล็กกว่าที่ขบอยู่ด้านในดังรูปที่ 6 เฟืองวงแหวนจะใช้งานในลักษณะที่ต้องการให้เฟืองขับและเฟืองตามทำงานหรือหมุนในทิศทางเดียวกัน

สำหรับอัตราทดนั้นสามารถออกแบบให้มากหรือน้อยได้โดยขึ้นอยู่กับขนาดของเฟืองตัวนอก (Ring) และเฟืองตัวใน (Pinion) ดังรูปที่ 6 โดยที่ถ้าหากเฟืองตัวในเล็กกว่าเฟืองตัวนอกมากอัตราทดก็จะมากและถ้าหากเฟืองตัวในมีขนาดใกล้เคียงกับเฟืองตัวนอกอัตราทดก็จะน้อย โดยปกติของเฟืองวงแหวนแล้วเฟืองตัวเล็ก (Pinion Gear) ที่อยู่ด้านในจะทำหน้าที่เป็นตัวขับ



รูปที่ 2.10 เฟืองวงแหวน (Internal Gear)

2.2.1.3 เฟืองทด

สำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าที่หมุนด้วยความเร็วสูงบางครั้งอาจสูงถึงหลายพันรอบต่อนาทีจำเป็นต้องใช้ระบบเฟืองทดเข้ามาเสริมเพื่อเพิ่มแรงบิด (Torque) และลดความเร็วของการทำงานลง จึงทำให้เกิดปัญหาตามมาในเรื่องของต้นทุน จำนวนชิ้นส่วนที่เพิ่มขึ้น ระยะคลอนของเฟือง (Backlash) และ ภาวะในการขับเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการต้านทานการหมุนของตัวเฟืองเอง แต่อย่างไรก็ตามการใช้เฟืองทดทำให้ระบบทำงานได้ละเอียดขึ้น โดยการเพิ่มความละเอียดขององศาการหมุน

2.2.2 มอเตอร์เซอร์โว (Servo Motor)

การพัฒนามอเตอร์ให้มีแรงบิดสูงโดยไม่ต้องลดความเร็ว สามารถทำได้โดยเพิ่มกระแสที่ขดลวดเหนี่ยวนำของโรเตอร์หรือสเตเตอร์ ในกรณีเช่นนี้มอเตอร์จะหมุนที่ความเร็วเดิมและค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าต้านกลับยังคงเท่าเดิม แต่กระแสที่เพิ่มเข้าไปนั้นทำให้กระแสสุทธิที่ขับมอเตอร์เพิ่มขึ้น จึงได้แรงบิดเพิ่มขึ้น ความเร็วและแรงบิดสามารถปรับได้ตามการเปลี่ยนค่ากระแสหรือค่าความต่างศักย์ที่ขึ้นกับกระแสการรักษาสมดุลระหว่างความเร็วและแรงบิดนี้เป็นหลักการของระบบมอเตอร์เซอร์โว

มอเตอร์เซอร์โว คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับ มอเตอร์ไฟฟ้าแบบไม่มีแปรงถ่าน หรือแม้กระทั่งมอเตอร์สเตปเปอร์ ที่นำสัญญาณป้อนกลับจากตัวมอเตอร์ไปควบคุมการหมุน เพื่อให้ได้ตามความเร็วที่ต้องการ (ซึ่งสัมพันธ์กับแรงบิดด้วย) สัญญาณตอบกลับในมอเตอร์เซอร์โวถูกส่งไปยังวงจรควบคุมเพื่อนำมาคำนวณตำแหน่งและความเร็ว หากความเร็วต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ ในกรณีมีภาระซับซ้อนมาก กระแสจะถูกเพิ่มจนกระทั่งได้ความเร็วที่ต้องการ แต่ถ้าความเร็วมอเตอร์มีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ กระแสก็จะถูกลดลง ในบางกรณีที่ต้องการควบคุมตำแหน่ง จะมีการนำสัญญาณบอกตำแหน่งมาใช้ โดยวงจรควบคุมจะหยุดการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ เมื่อมอเตอร์หมุนไปยังตำแหน่งหรือมุมที่กำหนดไว้ ดังแผนภาพการทำงานของมอเตอร์เซอร์โว



รูปที่ 2.11 มอเตอร์เซอร์โว

2.2.3 ตลับลูกปืน (Bearing) (จรัส บุญยธรรมา, พิสิทธ์ราชมงคล)

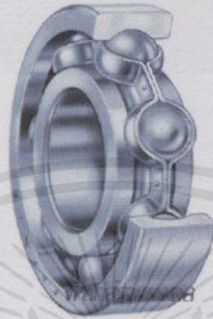
แนวคิดพื้นฐานทางฟิสิกส์ของลูกปืนมีอยู่ว่า การหมุนนั้นง่ายกว่าการเลื่อน ล้อที่เราเห็นกันอยู่ทุกวันนี้ คือ แบริ่งขนาดใหญ่ ถ้าหาไม้กระดานมาสักแผ่นหนึ่ง แล้วให้คนลาก มันจะเคลื่อนที่ได้ยากกว่า ถ้าติดล้อไว้ด้วย เพราะว่าการเคลื่อนที่แบบเลื่อน ต้องเผชิญกับ ความเสียดทานที่เพิ่มขึ้น ระหว่างพื้นที่ของมวลสองก้อนที่เสียดสีกัน ถ้าพื้นที่มาก ความขรุขระที่ทำให้เกิดแรงเสียดทานก็ยิ่งมาก แต่ถ้าเป็นการเคลื่อนที่แบบกลิ้ง พื้นที่สัมผัสน้อย ความขรุขระที่ทำให้เกิดแรงเสียดทานก็ยิ่งน้อย แรงเสียดทานจะลดลงอย่างมาก

ตลับลูกปืนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้รองรับการหมุนของเพลลา โดยตลับลูกปืนมีหน้าที่ถ่ายทอดแรงที่เกิดขึ้นจากเพลลาไปสู่ฐานเครื่องยนต์ และลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส ทำให้ช่วยเพิ่มสมรรถนะของเครื่องจักรกลต่างๆ ลดการสึกหรอ แต่ตลับลูกปืนมักจะเสื่อมสภาพเร็วเนื่องจากตลับลูกปืนถือว่าเป็นจุดวิกฤตของเครื่องมือกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้ประโยชน์ภายในเท่านั้น มีอยู่ภายใต้เงื่อนไขของเอกสาร
ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของลูกปืนมีหลายชนิด ขึ้นอยู่กับการออกแบบ และใช้งาน เช่น บอลแบร์ริง โรลเลอร์แบร์ริง บอลทรัสต์แบร์ริง โรลเลอร์ทรัสต์แบร์ริง และเทปเปอร์โรลเลอร์ทรัสต์แบร์ริง

1. บอลแบร์ริงเป็นแบร์ริงที่นิยมใช้กันมากที่สุด ตั้งแต่ร่องเท้าสเก็ท จนถึง ฮาร์ดดิสก์ บอลแบร์ริงสามารถรับแรงได้ทั้งสองแนว แต่เป็นแรงที่มีขนาดไม่มากนัก



รูปที่ 2.12 ภาพตัดบอลแบร์ริง

แรงถูกส่งผ่านจากวงนอก ไปวงใน โดยมีลูกบอลเป็นตัวกลางกึ่งอยู่ จุดสัมผัสของลูกบอลระหว่าง วงนอกและในเป็นจุดเล็กๆ จึงช่วยให้การหมุน เรียบ และลื่น อย่างไรก็ตามถ้ารับแรงมากๆ ทำให้ลูกบอลบิดตัวได้

2. โรลเลอร์แบร์ริง นิยมใช้สำหรับออกแบบสายพานลำเลียง ที่ต้องรับแรงในแนวรัศมีมากเป็นพิเศษ ดังนั้นแบร์ริง แบบนี้ ส่วนที่กลิ้งจึงเป็นรูปทรงกระบอก จุดสัมผัสระหว่างวงนอก และวงใน เป็นเส้นไม่ใช่จุด ทำให้สามารถรับน้ำหนักในแนวรัศมีได้มากกว่า บอลแบร์ริง อย่างไรก็ตาม โรลเลอร์แบร์ริงไม่ได้ ออกแบบมาเพื่อรับน้ำหนักในแนวแกน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น" อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่เอกสารของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.13 ภาพตัดโรลเลอร์แบร์ริง

3. บอลทรีสต์แบร์ริง นิยมใช้กับแก้อีหมุน หรือโตะหมุน เป็นต้น ไม่สามารถรับแรงในแนวรัศมีได้



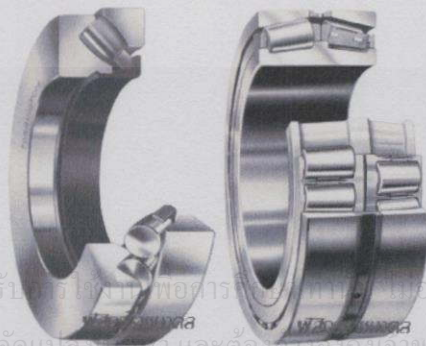
รูปที่ 2.14 บอลทรีสต์แบร์ริง

4. โรลเลอร์ทรีสต์แบร์ริง ใช้สำหรับ รับแรงในแนวแกนที่มีขนาดมากๆ



รูปที่ 2.15 โรลเลอร์ทรีสต์แบร์ริง

5. เทปเปอร์โรลเลอร์ทรีสต์แบร์ริงใช้สำหรับรับแรงในแนวแกน และ รัศมีที่มีขนาดมากๆ เช่น กระจดล้อของรถยนต์ เป็นต้น



รูปที่ 2.16 เทปเปอร์โรลเลอร์ทรีสต์แบร์ริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะทางวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแบบลงเนื้อหา และต้องขออนุญาตเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ (พื้นฐานหุ่นยนต์อุตสาหกรรม,2551)

กลศาสตร์การเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ คือ การศึกษาการเคลื่อนไหว โดยวิเคราะห์จากตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่กำหนดให้แขนกลแต่ละส่วนมีความสัมพันธ์กับแต่ละเมตริกซ์ที่มีลักษณะเฉพาะและเชื่อมโยงไปสู่ข้อต่างๆ เรียกอีกอย่างว่ากลศาสตร์การเคลื่อนไหวโดยตรง มีการคำนวณตำแหน่งของจุดต่างๆในการทำงานของหุ่นยนต์การหาสมการเพื่ออธิบายการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ซึ่งเกิดจากความสัมพันธ์กันของการเคลื่อนที่ขององค์ประกอบต่างๆ ประกอบด้วย แขนหุ่น(Link) และจุดหมุน(Joint) แตกต่างกันไปตามโครงสร้างของหุ่นยนต์ จลนศาสตร์ หรือที่เรียกว่า Kinematics เป็นการศึกษาการเคลื่อนที่ที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่ง ความเร็วและความเร่งของวัตถุ จลนศาสตร์สำหรับหุ่นยนต์นั้นมีการพิจารณาอยู่ 2 กรณีด้วยกัน คือ Forward Kinematics คือการวิเคราะห์การเคลื่อนที่และทิศทางของตัวทำงานส่วนปลายเมื่อทราบค่าตำแหน่งข้อต่อของหุ่นยนต์ซึ่งเป็นการคำนวณตามลำดับจากข้อต่อไปยังส่วนปลายของแขนหุ่นยนต์ (End-effector) Inverse Kinematics คือ การวิเคราะห์หาตำแหน่งข้อต่อต่างๆของหุ่นยนต์เมื่อรู้ค่าตำแหน่งและทิศทางของตัวทำงานส่วนปลาย(ตำแหน่งเป้าหมาย) ซึ่งเป็นการคำนวณย้อนกลับจากตัวทำงานส่วนปลายมายังข้อต่อต่างๆ

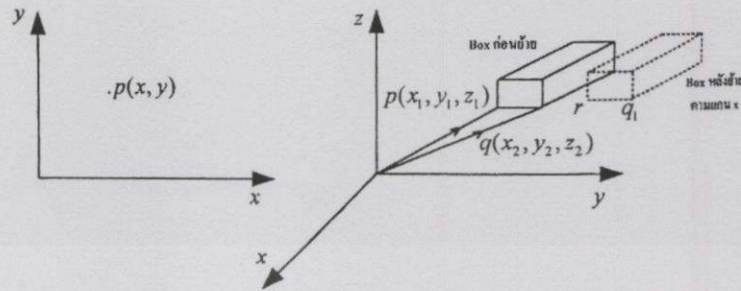
Forward Kinematics นั้น เป็นการคำนวณหาตำแหน่งและทิศทางของมือหุ่นยนต์จากค่าของมุมข้อต่อและขนาดของลิงคซึ่งเป็นการแทนค่าตัวแปร (มุมข้อต่อ) เพื่อหาตำแหน่งของหุ่นยนต์ ในทางกลับกัน Inverse Kinematics เป็นการคำนวณย้อนกลับ จากการระบุตำแหน่งและทิศทางของมือหุ่นยนต์ที่ต้องการแล้วหาความมุมของทุกข้อต่อที่ต้องหมุนไป สำหรับการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจากการออกแบบจะใช้วิธี Forward Kinematics ซึ่งมีพื้นฐานดังต่อไปนี้

การที่จะให้แขนกลเคลื่อนที่ย้ายวัตถุไปยังตำแหน่งใดๆ นั้น สามารถกระทำได้หลายลักษณะเช่น มีการหมุนชิ้นงาน หรือเคลื่อนย้ายด้วยสายพานลำเลียง ดังนั้นตำแหน่งของชิ้นงานที่จะนำไปวางจะต้องสัมพันธ์กับตำแหน่งที่ตั้งแขนกล โดยตำแหน่งมือจับจะต้องสัมพันธ์กับฐานของแขนกล และตำแหน่งมือจับจะต้องสัมพันธ์กับตำแหน่งของชิ้นงาน การวางตำแหน่งชิ้นงานและทิศทางการเคลื่อนย้ายจะต้องมีการวางแผนและกำหนดไว้ กำหนดทิศทางและตำแหน่งทางเลขาคณิต และพิกัดเฟรมทางเวกเตอร์ ดังนั้นตำแหน่งของชิ้นงานและทิศทางการเคลื่อนย้ายของมือจับจึงต้องใช้เวกเตอร์กำหนด เพราะเวกเตอร์บอกทั้งขนาดและทิศทางซึ่งจำเป็นต้องศึกษาข้อกำหนดของเวกเตอร์เพื่อใช้ประกอบการศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนย้ายของแขนกล เวกเตอร์จะช่วยอธิบายรายละเอียดตำแหน่งและทิศทางอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

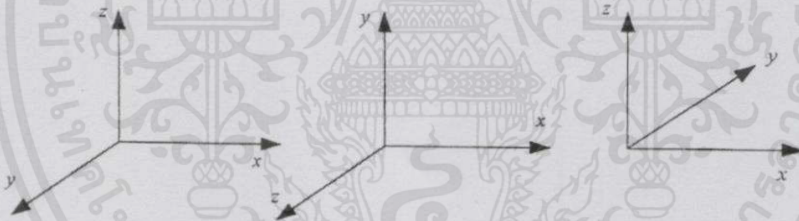
2.3.1 พิกัดฉากหรือพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate)

ตำแหน่งของวัตถุสามารถอธิบายได้ด้วยระบบพิกัดฉาก แบบ 2 มิติ และ 3 มิติดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 บริเวณตำแหน่งระบบพิกัดฉากแบบ 2 มิติ และตำแหน่งวัตถุของระบบพิกัดฉากแบบ 3 มิติ

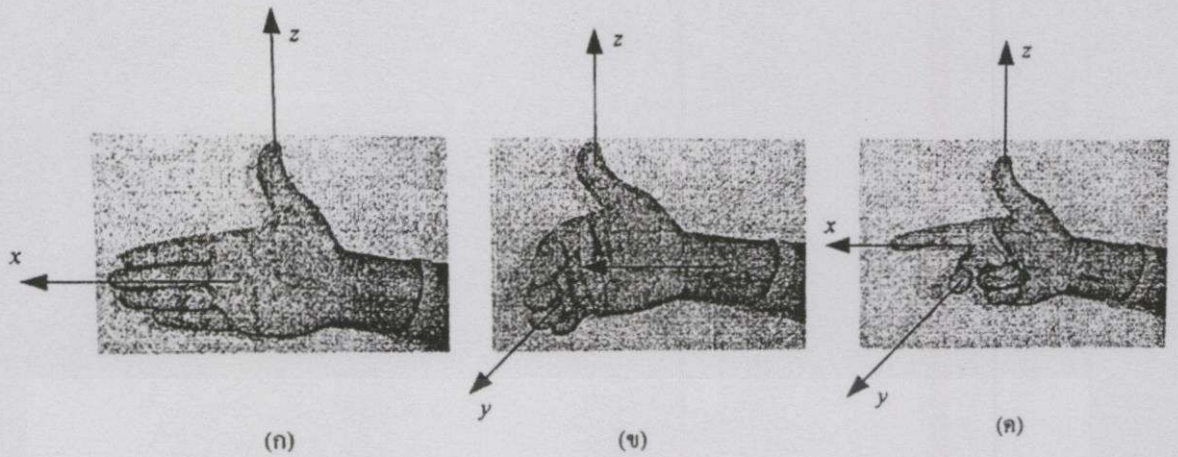
ในระบบแกนกลจะใช้ระบบพิกัดฉาก แบบ 3 มิติ ช่วยอธิบายตำแหน่งของวัตถุ เพราะตำแหน่งการเคลื่อนย้ายของแกนกล ระบบระนาบ 2 มิติ ไม่สามารถอธิบายในแนวลึกได้ แต่แกนหมุนของแกนระบบ 3 มิติ นั้นมีปัญหาเกี่ยวกับการแสดงภาพด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งคอมพิวเตอร์กราฟิก (Computer graphics) จะให้ผลแบบ 2 มิติ



รูปที่ 2.18 ระบบพิกัดประสานฉากแบบ 3 มิติ แสดงด้วยคอมพิวเตอร์กราฟิก

ในระบบแกนกลได้กำหนดระบบพิกัดแบบ 3 มิติ ดังรูปที่ 2.19 โดยกำหนดให้แกนทั้ง 3 ตั้งฉากซึ่งกันและกันใช้หลักการกฎของมือขวา

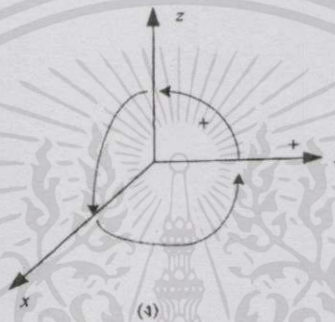
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

(ค)



(ง)

รูปที่ 2.19 เฟรมพิกัดฉากแสดงด้วยกฎของมือขวา (ก) ทิศทางของแกน x กับ z (ข) ทิศทางของแกน y กับ z (ค) แสดงกฎมือขวาที่ทิศทางแกน x,y,z (ง) เฟรมพิกัดฉากทิศทาง x,y,z

จากรูปที่ 2.17 สามารถอธิบายตำแหน่งของวัตถุ ซึ่งสัมพันธ์กับจุดกำเนิด (origin) ระบบพิกัดประสานฉาก (x_1, y_1, z_1) หรือจุดเวกเตอร์ (p) ดังรูปที่ 2.21 สามารถกำหนดตำแหน่งของเวกเตอร์ 8 จุดมุมกล่องดังรูป $p(x_1, y_1, z_1)$ และ $q(x_1, y_1, z_1)$ เวกเตอร์ทั้ง 8 ที่ชี้มุมกล่องก็จะเปลี่ยนตำแหน่งไปด้วยเป็นตำแหน่งใหม่ การย้ายหรือการเปลี่ยนตำแหน่งของเวกเตอร์นั้นจะเกิดเวกเตอร์เพิ่มขึ้นไป $r - p$ กล่องย้ายจากจุด q ไปยัง q_1 ดังนั้นจะได้ว่า

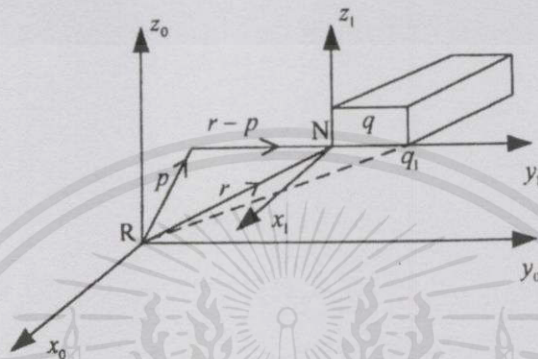
$$q_1 = q + (r-p) \quad (2.1)$$

ถ้าจำนวนวัตถุมากขึ้นหรือใหญ่ขึ้นจำนวนเวกเตอร์ก็จะมาก การคำนวณก็จะไม่ใช่เวลาที่เพิ่มขึ้น เพื่อลดความยุ่งยากก็จะกำหนดตำแหน่งใหม่ของวัตถุด้วยแกนใหม่ แต่ยังคงอยู่ในของข่ายของพิกัดอ้างอิง (x_0, y_0, z_0) กำหนดพิกัดใหม่ด้วย (x, y, z) ดังรูป 2.20 จุดกำเนิดที่อยู่มุมของกล่อง ดังนั้นเมื่อกล่องย้ายตำแหน่งสามารถคำนวณได้ด้วยเวกเตอร์ p และ r เทียบเฟรมอ้างอิงเดิม

$$r = p + (r-p) \quad (2.2)$$

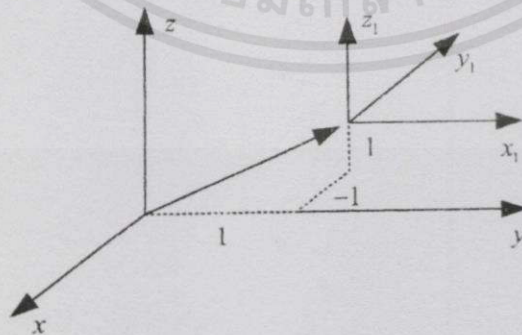
$$q_1 = r + q \quad (2.3)$$

หรือ ${}^R q_1 = {}^R r + {}^R q$ (R คือเฟรมอ้างอิง)



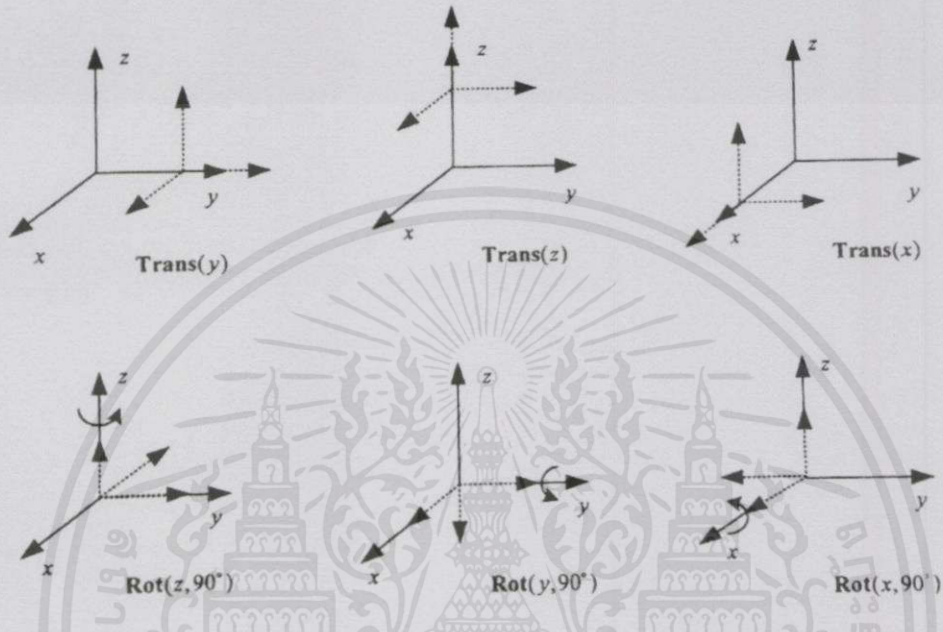
รูปที่ 2.20 แสดงตำแหน่งชิ้นงาน

ปัญหาของการคำนวณเกี่ยวกับการเคลื่อนย้ายวัตถุไปตามแนวแกนต่างๆ น้อยลงเมื่อใช้วิธีกำหนดแกนใหม่ให้กับวัตถุตั้งที่กล่าวมาแล้ว แต่สิ่งที่น่าสนใจก็คือ วัตถุมิได้เคลื่อนที่ขนานกับแกนระนาบอ้างอิงเพียงอย่างเดียว หรือแกนที่กำหนดใหม่ไม่ได้ขนานกับแกนอ้างอิง เมื่อวัตถุมีการหมุนและเปลี่ยนแปลงทิศทางดังรูปที่ 2.21 ตัวอย่างเฟรมที่กำหนดใหม่นั้นมีการหมุนและย้ายตำแหน่ง โดยหมุนรอบแกน z ไป 90 องศา ย้ายตำแหน่งขนานกับแกน x ขนาด 1 หน่วย และขนานกับแกน y ขนาด 1 หน่วย เคลื่อนที่ตามแนวแกน z ขนาด 1 หน่วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามรูปที่ 2.21 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัด 2 ระบบ การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นวัตถุสามารถเคลื่อนที่โดยการย้ายตำแหน่ง และการหมุนในระบบพิกัดที่ตำแหน่งใดๆ ก็ได้ โดยวัตถุสามารถหมุนและย้ายตำแหน่งไปใน 6 มุม อิสระต่อกัน คือ วัตถุสามารถย้ายตำแหน่ง 3 มุมคือ ย้ายตำแหน่งตามทิศทางแกน x ตามทิศทางแกน y ตามทิศทางแกน z และสามารถหมุนได้อีก 3 คือรอบ แกน x รอบแกน y และรอบแกน z แสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การย้ายตำแหน่งแบบ 6 มุมอิสระ ในระบบ 3 มิติตามกฎมือขวา

2.3.2 การเปลี่ยนตำแหน่งในระบบ 2 มิติ (Two dimensional transformation)

การเคลื่อนย้ายเชิงวัตถุไปยังตำแหน่งใดๆ ก็จะมีอยู่ในระบบขอบข่ายของเฟรมอ้างอิงในระบบที่ 2 มิตินั้นของเขตหรือจุดทำงานของเวกเตอร์กำหนดด้วย 2 องค์ประกอบด้วยกันคือ $p(x,y)$ ถ้าองค์ประกอบ ทั้ง 2 ถูกคูณด้วยเมตริกซ์ (2x2) หรือเมตริกซ์ที่ใช้ในการแปลงตำแหน่งก็จะเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งใหม่ในระบบแกนจาก $p(x,y)$ ไปเป็น $p(x_1,y_1)$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & c \\ b & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (ax+cy) \\ (bx+dy) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็น [a] สาร [c] ปรุงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
เมื่อให้ [b] [d] คือเมตริกซ์การแปลง(transformation matrix) ขนาด 2x2
ไม่ว่ากรณีใดๆ จึงสิ้นเชิงห้ามมิให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่ในเมตริกซ์สามารถหาค่าได้มากมาย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ต้องการ แต่ในคอมพิวเตอร์กราฟิก เมื่อให้การแสดงผลอย่างรวดเร็วในสมการที่ 2.4 นั้นจัดให้อยู่ในรูปเวกเตอร์แนวอนและทรานสโพสเมตริกซ์จะได้สมการที่ 2.5

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & c \\ b & d \end{bmatrix} = [(ax+cy)(bx+dy)] \quad (2.5)$$

ซึ่งให้ผลของ x, y ยังคงเดิม

จากสมการที่ 2.5 ถ้าให้ $a=d=1$ ถ้าให้ $c=b=0$ เมตริกซ์จะถูกลดเป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์ ดังนั้นก็จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งหรือตำแหน่งก็จะไม่ให้เกิดขึ้น

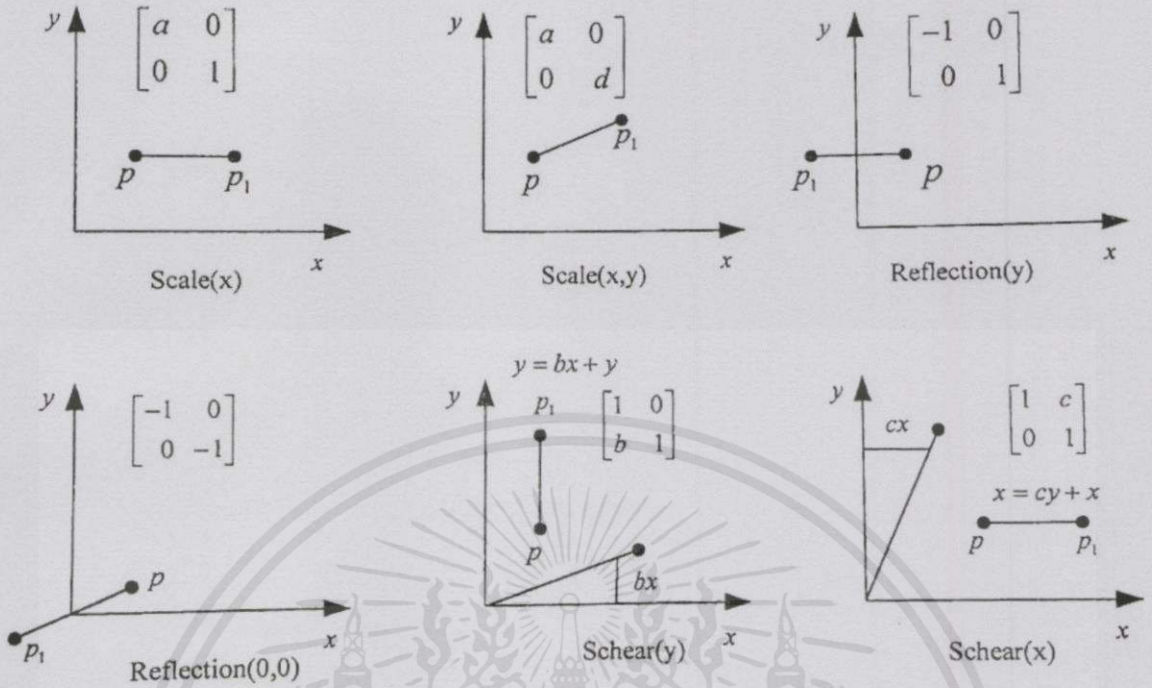
$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

อย่างไรก็ตามถ้าให้ $d=1, c=b=0$ และ a เป็นสเกลในการเปลี่ยนตำแหน่งตามแนวแกน x โดยที่ $x_1=ax, y_1=y$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ax \\ y \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

ดังนั้นจึงได้แสดงการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งดังรูปที่ 2.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 ผลการเปลี่ยนตัวแปรของเมตริกซ์ที่ทำให้เกิดการแปลง

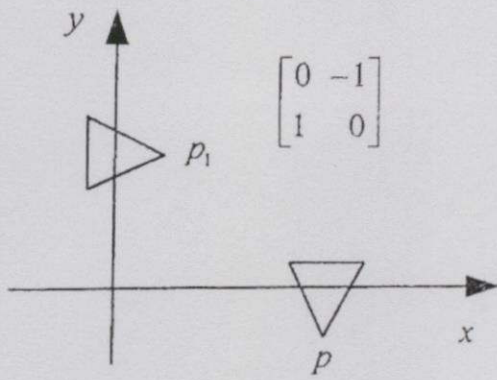
เมตริกซ์ 2x2 สามารถอธิบายเกี่ยวกับการหมุนเวกเตอร์ได้ดังรูปที่ 2.23 สามเหลี่ยมมุมขึ้นด้านบนรอบแกน ทิศทางทวนเข็มนาฬิกามุม 90 องศาจากจุดเดิมตั้งนั้นสามเหลี่ยมก็จะถูกแปลงขึ้นด้านบน ดังรูปจะได้ค่าของ x_1 และ y_1 ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -y \\ x \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

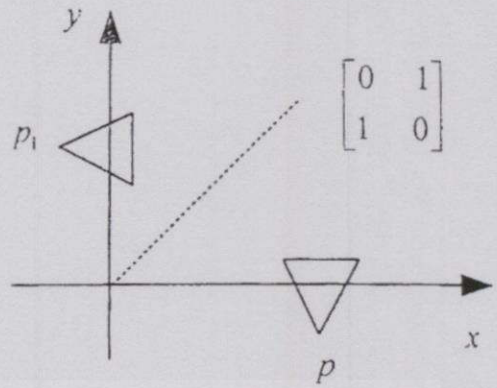
$$\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

เมื่อ $\phi=90^\circ$ ดังนั้น $\begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix}$ คือ 2x2 เมตริกซ์ใช้สำหรับการคูณเวกเตอร์เพื่อให้เกิดผลของการหมุนรอบๆจุดกำเนิด (Origin)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Rotation about(0,0)



Reflection about $y = x$

รูปที่ 2.24 การหมุนและการพลิกกลับ

ถ้าตำแหน่งทั้งหมดในเมตริกซ์ เป็นลักษณะสัดส่วนซึ่งกันและกันก็ จะไม่มีการหมุนเกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะสะท้อนกลับดังรูปที่ 2.24 เมตริกซ์ 2×2 จะทำให้เกิดการหมุนของเวกเตอร์ สามารถหาตำแหน่งการหมุนของเวกเตอร์ได้ดังรูปที่ 2.25 เวกเตอร์ p ที่มุม α เทียบกับแกน x หมุนรอบจุด Origin จากรูปเวกเตอร์อยู่ที่ p เท่ากับ ϕ สามารถหาจุด p_1 ได้ด้วย



Rotation

Translation

(ก)

(ข)

รูปที่ 2.25 (ก) แสดงการหมุน (ข) แสดงการเลื่อนเชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}x_1 &= l\cos(\alpha+\phi) \\ &= l\cos(\alpha)\cos(\phi) - l\sin(\alpha)\sin(\phi)\end{aligned}\quad (2.10)$$

$$\begin{aligned}x &= l\cos(\alpha) \\ \text{แต่ } y &= l\sin(\alpha) \\ \text{ดังนั้น } x_1 &= x\cos(\phi) - y\sin(\phi)\end{aligned}\quad (2.11)$$

$$\begin{aligned}y_1 &= l\sin(\alpha+\phi) \\ &= l\sin(\alpha)\cos(\phi) + l\cos(\alpha)\sin(\phi) \\ &= y\cos(\phi) + x\sin(\phi)\end{aligned}\quad (2.12)$$

เขียนในรูปของการหมุนได้ว่า

$$\begin{bmatrix}x_1 \\ y_1\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ \sin(\phi) & \cos(\phi)\end{bmatrix} \begin{bmatrix}x \\ y\end{bmatrix}\quad (2.13)$$

การเปลี่ยนตำแหน่งหรือการเปลี่ยนแปลงขนาดระยะทางไม่เกิดขึ้นในเมตริกซ์ 2x2 ดังนั้นเพื่อให้สามารถแปลงเกิดขึ้นจึงต้องเพิ่มองค์ประกอบของเมตริกซ์ เพื่อให้เกิดการแปลงระยะทางโดยใช้เมตริกซ์ 2x3 ดังนั้นองค์ประกอบของเวกเตอร์ p จะมีค่า $p[x_1 \ y_1 \ z_1]^T$ ระบบแกนจะเป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน (homogeneous coordinate) อย่างไรก็ตามเมตริกซ์ที่จะทำให้เกิดการหมุนและแปลงตำแหน่งขนาด 2x3 นั้นไม่เป็นเมตริกซ์จัตุรัสไม่สามารถหาค่าอินเวอร์สได้ จึงต้องเพิ่มองค์ประกอบที่ 3 เข้าไปในแถวเพื่อให้เป็นเมตริกซ์จัตุรัสดังสมการ

$$\begin{bmatrix}x_1 \\ y_1 \\ 1\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\cos(\phi) & -\sin(\phi) & m \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & n \\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \begin{bmatrix}x \\ y \\ 1\end{bmatrix}\quad (2.14)$$

m, n เป็นค่าที่ทำให้เกิดการแปลงระยะในแนวแกน x และ y จากสมการ (2.14) ถ้าให้ ϕ เท่ากับ ศูนย์ จุด p ก็จะย้ายไปอยู่ที่ p_1 เป็นการ translation อย่างเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ลงสู่สาธารณะอย่างอื่นอีกแล้ว เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix}x_1 \\ y_1 \\ 1\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\cos(0) & -\sin(0) & m \\ \sin(0) & \cos(0) & n \\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \begin{bmatrix}x \\ y \\ 1\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & m \\ 0 & 1 & n \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$x_1 = x + m \quad (2.15)$$

$$y_1 = y + n \quad (2.16)$$

2.3.3 เมตริกซ์ที่ทำให้เกิดการแปลงในระบบ 3 มิติ (Three dimensional transformation matrices)

ในระบบแกนกลางตำแหน่งทิศทางของการเคลื่อนย้ายขนานหรือตำแหน่งของวัตถุจะมองในรูป 3 มิติสามารถแปลงตำแหน่งลักษณะย้ายจุดหนึ่ง (translation) และแปลงตำแหน่งในลักษณะหมุน (rotation) ดังนั้นในระบบ 3 มิติเมตริกซ์ที่ทำให้เกิดการย้ายจุดและได้ถูกพัฒนามาจากระบบ 2 มิติ โดยการเพิ่มแถวและคอลัมน์ เข้าไปในเมตริกซ์ขนาด 4x4 ซึ่งเป็นเมตริกซ์ที่ทำให้เกิดการแปลงในลักษณะ 3 มิติ ดังสมการที่ (2.17)

$$T = \begin{bmatrix} 3 & * & 3 \\ * & 3 & 1 \\ 1 & * & 3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{rotation} & \text{translation} \\ & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

องค์ประกอบที่ทำให้เกิดการแปลงระยะทางในระบบ 3 มิติ มี 3 องค์ประกอบด้วยกันคือเวกเตอร์ $p_x i + p_y j + p_z k$

$$\text{Trans}(p_x, p_y, p_z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

การหมุนจะมีองค์ประกอบเพิ่มขึ้น เพราะมีความเป็นไปได้ที่จะทำให้เกิดการหมุนบนแกนใดแกนหนึ่งใน 3 แกนนี้ การหมุนกำหนดอยู่ในเฟรมที่เชื่อมโยงกับงานทางกล แลแยกการหมุนออกเป็นส่วนๆ จัดให้มีการเรียงลำดับ การหมุนในระบบแกน มี 3 แบบของการเปลี่ยนตำแหน่งในลักษณะการหมุนโดยการเลือกให้หมุนบนแกน x,y และ z และทำมุมกับแกนด้วยมุม ϕ ไม่ว่าจะฉีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คิดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Rot}(x,\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$\text{Rot}(y,\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & 0 & \sin(\phi) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\phi) & 0 & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$\text{Rot}(z,\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

การแปลงลักษณะย้ายตำแหน่ง และการแปลงลักษณะการหมุน สามารถที่จะรวมเข้าด้วยกัน ได้ด้วยการคูณเมตริกซ์ของทั้ง 2 แบบ เข้าด้วยกัน ซึ่งย้ายตำแหน่งไม่ไปกระทบกับการหมุน

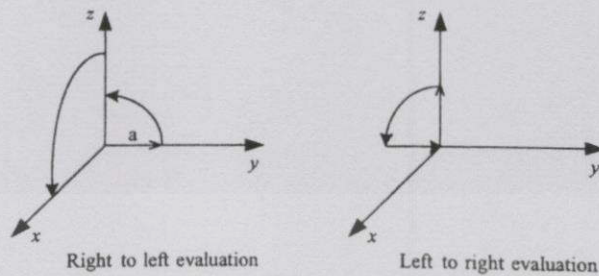
$$\begin{aligned} \text{Trans}(p_x, p_y, p_z) \text{Rot}(z, \phi) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 & p_x \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.22)$$

การรวมกันของตัวแปลงทั้ง 2 ระบบ สามารถอธิบายลักษณะตำแหน่งของการแปลงได้แบบอนุกรมหรือเรียงลำดับกัน โดยให้จุดเริ่มตัวที่กำหนดของแกน (origin) ดังรูปที่ 2.25 การแปลงเริ่มต้นที่จุดศูนย์ (origin) ของแกน ย้ายไปตามทิศทางแกน y หมุนรอบแกน x ย้ายตำแหน่งไปตามทิศทางแกน z สุดท้ายหมุนรอบแกน y สามารถอธิบายลักษณะการแปลงด้วยสมการว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามทำซ้ำและเผยแพร่ข้อมูลของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_H = \text{Rot}(y, 90^\circ) \text{Trans}(z, a) \text{Rot}(x, 90^\circ) \text{Trans}(y, a) \quad (2.23)$$

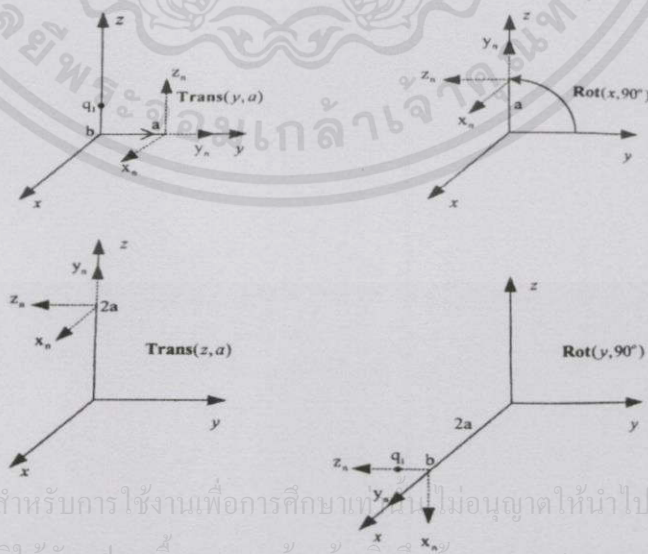
การทำงานของสมการการแปลงสมการเกิดขึ้นจากขวาไปซ้าย ดังรูปที่ และในทางกลับกันถ้าให้การแปลงเกิดจากขวาไปซ้าย การทำงานจะตรงกันข้ามกับการหมุนของตำแหน่งแรกก็ไม่แสดงให้เห็นเพราะตำแหน่งแรก เปลี่ยนตำแหน่งของจุดเวกเตอร์ไม่ได้เปลี่ยนขนาดและทิศทาง



รูปที่ 2.26 ผลการหมุนและการเลื่อนเชิงเส้นของสมการการแปลง

2.3.4 พิกัดของเฟรม (Coordinate Frames)

จากสมการที่ 2.23 สามารถอธิบายเฟรมของตำแหน่งแกนบริเวณจุดกำเนิด เฟรมของระบบพิกัดได้มีการย้ายตำแหน่งใหม่ ดังรูปที่ 2.26 โดยเฟรมใหม่นี้ ย้ายตำแหน่งจากจุดเริ่มต้นขนาด a หน่วย ไปทิศทางตามแกน y $Trans(y,a)$ หมุนทำมุม 90 องศา กับแกน x , $Rot(x,90^\circ)$ ย้ายตำแหน่งไปตามแกน z ขนาด a หน่วย $Trans(z,a)$ และหมุนทำมุม 90 องศา กับแกน y , $Rot(y, 90^\circ)$ การแปลงเกิดขึ้นก่อนที่จะเกิดการคูณกันของเมตริกซ์ (pre multiplied) การแปลงลักษณะย้ายตำแหน่งและการแปลงลักษณะการหมุนกำหนดให้ระบบแกน x,y,z เดิมเป็นเฟรมอ้างอิง ตำแหน่งสุดท้ายของการแปลงจะให้บริเวณเฟรมตำแหน่งใหม่เกิดจากผลคูณของเมตริกซ์นั่นเอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะในรูปแบบใดก็ตาม อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.27 การแปลงระบบแกนจากขวาไปซ้ายสัมพันธ์กับเฟรมอ้างอิง

$${}^R T_H = \text{Rot}(y, 90^\circ) \text{Trans}(z, a) \text{Rot}(x, 90^\circ) \text{Trans}(y, a)$$

$$\begin{aligned}
 &= \begin{bmatrix} \cos(90) & 0 & \sin(90) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(90) & 0 & \cos(90) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 2a \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 2a \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

(2.24)

จากตัวอย่าง มุมที่เลือกในการคำนวณ (90 องศา) ง่ายต่อการอธิบายด้วยเมตริกซ์ สุดท้ายได้ผลดังนี้ เมื่อพิจารณาที่เฟรมใหม่พบว่าแกน x ใหม่ จะอยู่ที่ทิศทางตรงกันข้ามกับแกน z อ้างอิง แกน y ใหม่ จะอยู่ที่ทิศทางตรงกันข้ามกับแกน x อ้างอิง แกน z ใหม่จะอยู่ที่ทิศทางตรงกันข้ามกับแกน y อ้างอิง และพบว่าจุดกำเนิดของเฟรมใหม่เทียบจุดกำเนิดเฟรมอ้างอิงเกิดการแปลงแบบย้ายตำแหน่งมีขนาด 2a ไปตามทิศทางของแกน x ของเฟรมอ้างอิง

ดังนั้น ผลของการแปลงเมตริกซ์นั้นได้จากการแปลงจุดกำเนิดของเฟรมอ้างอิงไปยังจุดกำเนิดเฟรมใหม่ สามารถอธิบายตำแหน่งที่อยู่ของเฟรมใหม่ได้ โดยการเทียบกับเฟรมอ้างอิง

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 2a \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 2a \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

อีกประการหนึ่งการแปลงเฟรมใหม่ สามารถแปลงไปที่ตำแหน่งใดก็ได้ กำหนดให้เฟรมใหม่นี้เป็นเฟรมอ้างอิง เราสามารถคำนวณที่อยู่ของตำแหน่งใหม่โดยวิธีก่อนการคูณเวกเตอร์ (pre multiplied) ของเมตริกซ์ ตัวอย่าง จุด ${}^Nq_1 = (0,0,b)$ อยู่รอบแกนอันใหม่ ${}^Rq_1 = (2a,-b,0)$ จะพบค่าหลังจากการแปลงต้องอยู่ในเฟรมอ้างอิง

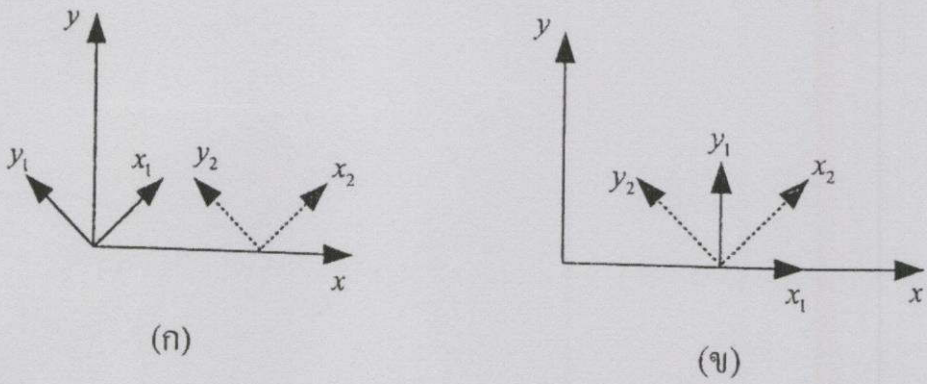
$${}^Rq_1 = {}^R T_N {}^Nq_1 = {}^R T_N Nq = {}^R T_N ({}^R T_{Nold})^{-1} Rq$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 2a \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & b \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 2a \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 2a \\ 0 & 0 & -1 & -b \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

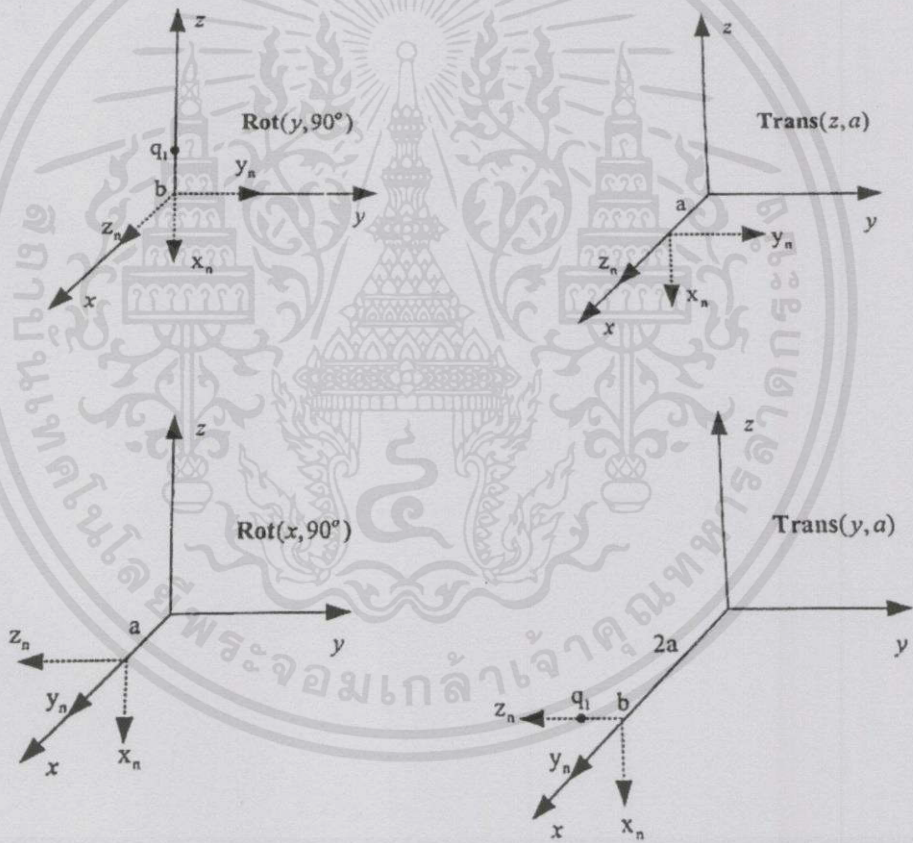
ผลการแปลงจะพบว่าบริเวณตำแหน่งยังไม่มี การเปลี่ยนรูปทรง อย่างไรก็ตามภาพที่เห็นอยู่นั้น การแปลงที่อยู่ของ q_0 ซึ่งอยู่บนเฟรมอ้างอิงไปอยู่ที่ q_1 บนเฟรมอ้างอิงใหม่ที่เป็นเช่นนี้เพราะจุดกำเนิดอยู่ที่เฟรมอ้างอิงใหม่ และเมตริกซ์ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงนั้นเมตริกซ์เอกลักษณ์ (identity matrix)

2.3.5 ความสัมพันธ์ของการแปลง (Relative Transformations)

จากการที่ได้แยกแยะการแปลงตำแหน่งของแขนกลแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การย้ายจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่ง (Translate) และการหมุน (Rotation) ทั้งสองแบบนี้จะต้องพาดพิงกับเฟรมอ้างอิง (reference frame) การแปลงตั้งแต่ตัวคุณตัวแรกขวามือ (Pre multiplied) แปลงไปทางซ้ายมือยึดเฟรมอ้างอิงเป็นหลักจะได้ค่าที่ถูกต้อง แต่ในทางตรงกันข้าม ถ้าเริ่มตั้งแต่ตัวคุณหลังสุดซ้ายมือ (Post multiplied) แปลงไปทางขวามือโดยยึดเฟรมอ้างอิงเป็นหลักจะได้ค่าที่ไม่ถูกต้องอย่างไรก็ตามการแปลงจากซ้ายไปขวา ถ้าใช้เฟรมอ้างอิงใหม่เป็นหลักตลอดแต่ละขั้นตอน ก็ได้ผลที่ถูกต้องเหมือนกันทุกประการ ดังนั้นโดยทั่วไปจะเลือก 2 วิธีที่ใช้ในการแปลงตำแหน่งของแขนกลจากสมการแปลงคือ การแปลงจากขวาไปซ้าย (Right to left) จะยึดเฟรมอ้างอิงเป็นหลักเริ่มตั้งแต่ตัวคุณตัวแรกขวามือ (pre multiplied) และการแปลงซ้ายไปขวา (Left to right) จะยึดเฟรมอ้างอิงใหม่เป็นหลัก เริ่มตั้งแต่ตัวคุณหลังสุดที่อยู่ซ้ายมือ (Post multiplied) รูปที่ 2.27 แสดงความแตกต่างของการแปลงทั้ง 2 วิธี ในที่นี้ยกตัวอย่างระบบแกนแบบ 2 มิติ (Two dimensional) รูปที่ 2.27 (ก) มีการหมุนทำมุม 45 องศา กับแกน y หรือแกนระนาบ x และมีการย้ายจุดขนาด a หน่วย ไปตามแกน x สมการได้กำหนดให้ $\text{Trans}(x,a) \text{Rot}(y,45^\circ)$ ขนาดของ a หน่วย ไปตามแกน x จะให้เฟรมอ้างอิงเป็นหลัก รูปที่ 2.27 (ข) ใช้วิธีที่สอง แปลงจากซ้ายไปขวาย้ายตำแหน่งขนาด a หน่วย ไปตามแกน x หมุน 45 องศา กับแกน y ในที่นี้ใช้เฟรมใหม่เป็นแกนอ้างอิง



รูปที่ 2.28 (ก) การเคลื่อนที่ที่ลักษณะเชิงเส้นโดยตรง (ข) แสดง $\text{Trans}(x,a) \text{Rot}(y,45^\circ)$



รูปที่ 2.29 การแปลงระบบแกนจากซ้ายไปขวาสัมพันธ์กับเฟรมอ้างอิงใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.23 แสดงการแปลงจากซ้ายไปขวา (Post multiplication) ดังรูปที่ 2.28 เฟรมใหม่เป็นแกนอ้างอิง เริ่มต้นหมุนรอบแกน y ใหม่ ย้ายตำแหน่งขนาด a หน่วย ไปตามแกน y ใหม่ สุดท้ายได้ผลลัพธ์เหมือนกับการแปลงจากขวาไปซ้าย (Pre multiplication)

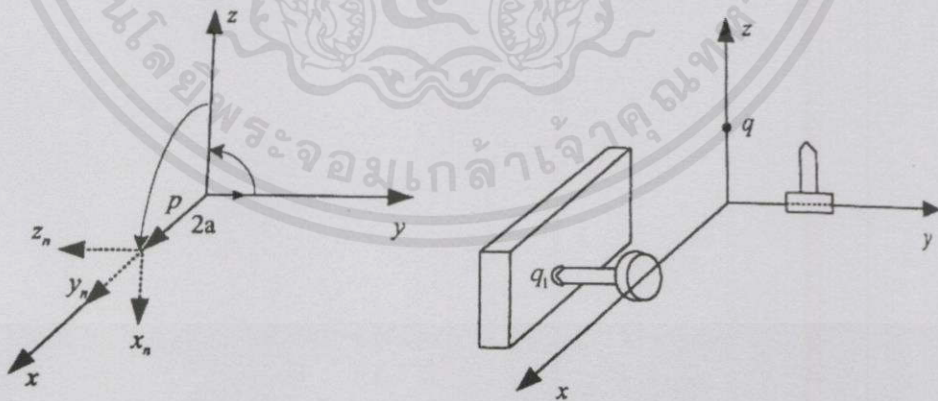
2.3.6 การเปลี่ยนตำแหน่งโดยทั่วไป (General transformation)

การเปลี่ยนนั้นจะอยู่ในรูปของจำนวนครั้งของการแปลงและทิศทาง

- การเปลี่ยนรูปเฟรมหนึ่งไปสู่อีกเฟรมหนึ่ง
- ลักษณะการเปลี่ยนรูปร่างที่เฟรมใหม่ อยู่ในเทอมของเฟรมอ้างอิง
- ลักษณะการเคลื่อนย้าย จากบริเวณหนึ่งในที่นี้คือ เฟรมอ้างอิงไปสู่อีกบริเวณหนึ่ง หรือเฟรมใหม่นั้นเอง
- การคำนวณตำแหน่งของวัตถุ ที่พาดพิงจากเฟรมอ้างอิง จะได้ว่า

$${}^R T_N N_q = R_q \quad (2.27)$$

${}^R T_N$ การแปลงจากเฟรมใหม่ที่พาดพิงเฟรมอ้างอิง การแปลงเกิดขึ้นบนเฟรมอ้างอิง (Reference frame, R) ไปสู่เฟรมใหม่ (New frame, N) หรือที่รู้จักทั่วไปว่าการแปลงรูปไปข้างหน้า (Forward transform) ถ้า ${}^N q_1$ คือตำแหน่งบนเฟรมใหม่ ${}^R q_1$ คือตำแหน่งเดียวกันกับเฟรมใหม่แต่อยู่บนเฟรมอ้างอิง ดูรูปที่ 2.29 ประกอบ ได้พบวก่อนที่จะเกิดการแปลงรูปนั้นตำแหน่ง ${}^R q_1$ และ ${}^N q_1$ ตำแหน่งเดียวกัน ดังที่ตำแหน่งเฟรมใหม่ ${}^R q_1$ มาจาก ${}^R q_1$ ที่พาดพิงกับเฟรมอ้างอิง



รูปที่ 2.30 แสดงการเปลี่ยนตำแหน่งของการเคลื่อนย้ายชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะพบว่าเมตริกซ์ที่ทำให้เกิดการแปลงรูป ประกอบด้วยกลุ่มเวกเตอร์ 4 กลุ่มด้วยกัน 3 กลุ่มแรก สำหรับบอกตำแหน่งทิศทางของเฟรมใหม่ ส่วนกลุ่มที่ 4 สำหรับบอกบริเวณที่อยู่ของจุดกำเนิดของเฟรมใหม่ ทิศทางแกนอธิบายในรูปยูนิตเวกเตอร์ x, y และ z ส่วนตำแหน่งของแกนบอกด้วยเวกเตอร์ p สามารถคำนวณองค์ประกอบต่างๆจากการเปลี่ยนรูปของเมตริกซ์ได้ด้วยสมการเมตริกซ์ที่ทำให้เกิดการแปลงโดยทั่วไป (The general transformation matrix, ${}^R T_N$)

$${}^R T_N = \begin{bmatrix} x_x & y_x & z_x & p_x \\ x_y & y_y & z_y & p_y \\ x_z & y_z & z_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$p = p_x i + p_y j + p_z k \quad \text{บริเวณจุดกำเนิดของเฟรมใหม่ (Location of the origin of the frame)} \quad (2.29)$$

$$x = x_x i + x_y j + x_z k \quad \text{ทิศทางตามแกน x ของเฟรมใหม่ (Direction of x axis of the new frame)} \quad (2.30)$$

$$y = y_x i + y_y j + y_z k \quad \text{ทิศทางตามแกน y ของเฟรมใหม่ (Direction of y axis of the new frame)} \quad (2.31)$$

$$z = z_x i + z_y j + z_z k \quad \text{ทิศทางตามแกน z ของเฟรมใหม่ (Direction of z axis of the new frame)} \quad (2.32)$$

เวกเตอร์ x, y และ z ใช้กฎมือขวา $x = y \times z$ คือเวกเตอร์ cross product

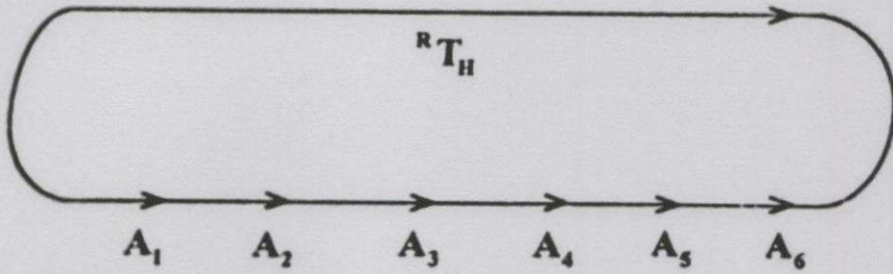
2.3.7 จลศาสตร์เกี่ยวกับตำแหน่งของแขนกล (Kinematics Manipulator Position)

จลศาสตร์ (Kinematics) คือ ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่งของข้อแขนกล (Link of manipulator) Manipulator ในที่นี้ คือ มือนิ้วหรือขาของแขนกลนั่นเอง ในเนื้อหาที่กล่าวในบทนี้ก็คือ การประยุกต์คณิตศาสตร์มาช่วยอธิบายความสัมพันธ์ ตำแหน่งการทำงานของแขนกลการแปลงตำแหน่ง (${}^R T_N$) ระหว่างเฟรมแขนที่มีอยู่ (Hand frame) กับเฟรมที่อยู่ของฐานแขนกล (Base frame) โดยตำแหน่งที่อยู่ของมือจับนั้นจะอ้างอิงกับฐานที่อยู่ของแขนกล การที่แขนกลเชื่อมโยงเข้าหากันในลักษณะอนุกรม (Series link manipulator) โดยเชื่อมระหว่างมือจับและฐานของแขนกลโดยข้อของแขนกลแต่ละช่วงนั้น จะถูกต่อเชื่อมเข้าหากัน ด้วยอุปกรณ์การต่อ (Actuated joint) เฟรมจะติดกับข้อต่อของแต่ละช่วงความสัมพันธ์กันระหว่างข้อต่อทั้งสอง สามารถอธิบายให้เป็นอันหนึ่งอันเดียวได้ด้วย Matrix A โดยเมตริกซ์ A ตัวแรกหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อต่อกับแขนกล ส่วน เมตริกซ์ A ตัวสุดท้าย อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างข้อต่อกับฐานมือจับของแขนกลเรียงลำดับลักษณะนี้เรียกว่าการถ่ายทอดไปข้างหน้า (Forward kinematics transformation) อธิบายได้ด้วยสมการที่ มาจากการแปลงด้วยกราฟลักษณะวงรอบปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และ n-1 อย่างอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$${}^R T_N = {}^R T_1 \quad {}^R T_2 \dots \quad {}^R T_{n-1} \quad T_n = A_1 A_2 \dots A_{n-1} A_n \quad (2.33)$$



รูปที่ 2.31 แขนกล 6 ลิงค์แปลงตำแหน่งด้วยกราฟ

การวิเคราะห์ถ่ายเทตำแหน่งของมือจับแขนกลได้แบ่งปัญหาออกเป็น 2 ปัญหาด้วยกัน คือ การถ่ายเทโดยตรง (Direct kinematics) และการถ่ายเทแบบกลับ (Inverse kinematics) การถ่ายเทโดยตรงนั้นได้รวมอยู่ในสมการของการแปลงรูปไปข้างหน้า (Forward transformation equation) โดยตำแหน่งที่อยู่ของมือจับในเทอมของมุม และการเคลื่อนที่ระหว่างข้อต่อ ซึ่งมุมและการเคลื่อนที่ระหว่างข้อต่อนั้นเรียกว่า แกนสัมพันธ์ (Joint coordinate) และทำให้ข้อต่อเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงได้ ส่วนบริเวณที่ว่ามีมือจับอธิบายด้วยระบบแกนพิกัดฉาก (Cartesian coordinate) ส่วนการถ่ายเทแบบกลับนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยสมการการแปลงรูปแบบกลับ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อต่อของแขนกล จากบริเวณที่วางของมือจับนั้น การถ่ายเทโดยตรงของแขนกลนั้นเป็นการนำไปสู่ตำแหน่งต่างๆ ส่วนการถ่ายเทแบบกลับ จะมีปัญหายุ่งยากกว่าเพราะแขนกลบางอย่างนั้น ไม่อำนวยความสะดวกการถ่ายเทกลับ อย่างไรก็ตาม การบังคับให้แขนกลลักษณะถ่ายเทกลับก็ยังมีใช้งานอยู่ การควบคุมแขนกลก็ยุ่งยากในบริเวณที่ใช้พิกัดฉาก วิธีการหาค่าถ่ายเทกลับของแขนกล ได้มาจากการถ่ายเทโดยตรงและจะทำการตรวจสอบก่อนที่จะทำการถ่ายเทโดยตรง ดังนั้นจึงต้องพัฒนาข้อต่อและจุดต่อของแขนกลและเพื่อสะดวกต่อการควบคุม

2.3.8 การถ่ายเทตำแหน่งโดยตรง (Direct kinematics)

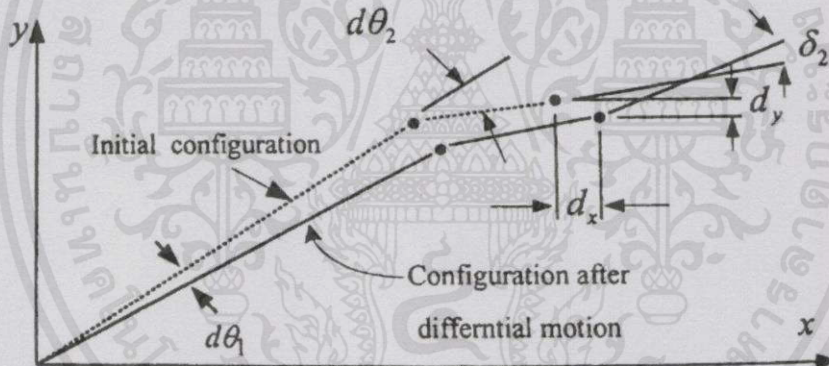
จากเนื้อหาที่ได้ศึกษามาแล้วนั้นสามารถคำนวณการแปลงให้เป็นอันหนึ่งอันเดียวกัน โดยกำหนดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในเทอมของมิติจุดต่อ (Joint space) ซึ่งจะให้สมบูรณ์ขึ้นนั้นการวิเคราะห์การเคลื่อนย้ายตำแหน่งของแขนกลนั้นในเทอมของจุดต่อจะต้องสัมพันธ์กับเทอมของคาร์ทีเซียนในการเคลื่อนที่แบบจุดต่อแขนกลจะอยู่ในฟังก์ชันของตัวแปรจุดต่อในแต่ละจุดแต่ในมิติคาร์ทีเซียน (Cartesian space) แขนกลจะแปลงอยู่ในรูปฟังก์ชันของตัวแปรตำแหน่ง และการพลิกกลับบริเวณมือจับ การถ่ายเทตำแหน่งโดยตรง (Indirect kinematics) จะอธิบายตัวแปรแบบสัมพันธ์ (Joint variable) ในเทอมของระบบแกนพิกัดฉากตำแหน่ง และมุมที่มือจับบริเวณตำแหน่งของมือจับในระบบพิกัดฉากได้อธิบายด้วยสมการการแปลงรูปทั่วไป โดยตำแหน่งและการพลิกด้วยข้อต่อมือจับ ในระบบการเคลื่อนที่แบบ

สัมพัทธ์ ได้อธิบายการแปลงตำแหน่งของแขนกลและการพลิกกลับของมือจับ ในเทอมของระบบแกนพิกัดฉาก ดังนั้นรูปแบบการถ่ายทอดตำแหน่งของมือจับ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$R_{T_H} = \begin{bmatrix} x & y & z & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_x & y_x & z_x & p_x \\ x_y & y_y & z_y & p_y \\ x_z & y_z & z_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

2.3.9 การเคลื่อนที่ของแขนกลแบบจาโคเบียน (The Manipulator Jacobian)

จาโคเบียน (Jacobian) คือ เมตริกซ์ผลต่าง ในกรณีแขนกลเคลื่อนที่ โดยผลต่างจะเปลี่ยนบริเวณการทำงานของมือจับ โดยผลต่างเปลี่ยนในรูปตัวแปรของจุดต่อแสดงดังรูปที่ 2.31 การแสดงผลต่างบริเวณมือจับในระบบแขนกลจะอธิบายด้วยเวกเตอร์ผลต่าง หลักการเดียวกันกับการแสดงผลของมือจับในระบบแกนสัมพันธ์ (Joint coordinate) ก็สามารถอธิบายด้วยเวกเตอร์ผลต่างการเคลื่อนที่ที่เวกเตอร์มีองค์ประกอบ 6 องค์ประกอบสำหรับแขนกล 6 จุดต่อ



รูปที่ 2.32 เวกเตอร์แสดงการเคลื่อนที่แบบดิฟเฟอเรนเชียลเรเนเซียนของแขนกล type 1 two link

$$D = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ \delta z \end{bmatrix} = J D_q = J \begin{bmatrix} d\theta_1 \\ d\theta_2 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

$$D_q = [dq_1 \quad dq_2 \quad dq_3 \quad dq_4 \quad dq_5 \quad dq_6]^T \quad (2.36)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ dq_n ผลต่างของกรสมุน ($d\theta_n$) หรือผลต่างของระบบที่แปลง ที่จุดต่อสำหรับแขนกลชนิด 6 จุดต่อ มี 2 เวกเตอร์ที่สัมพันธ์กันขนาด 6×6 เมตริกซ์ของผลต่าง (Differential) เรียกว่า manipulator jacobian J

$$D = JD_q = (J_1, J_2, J_3, J_4, J_5, J_6) D_q \quad (2.37)$$

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dx_1 & dx_2 & dx_3 & dx_4 & dx_5 & dx_6 \\ dy_1 & dy_2 & dy_3 & dy_4 & dy_5 & dy_6 \\ dz_1 & dz_2 & dz_3 & dz_4 & dz_5 & dz_6 \\ \delta x_1 & \delta x_2 & \delta x_3 & \delta x_4 & \delta x_5 & \delta x_6 \\ \delta y_1 & \delta y_2 & \delta y_3 & \delta y_4 & \delta y_5 & \delta y_6 \\ \delta z_1 & \delta z_2 & \delta z_3 & \delta z_4 & \delta z_5 & \delta z_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dq_1 \\ dq_2 \\ dq_3 \\ dq_4 \\ dq_5 \\ dq_6 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

$$= \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & J_{34} & J_{35} & J_{36} \\ J_{41} & J_{42} & J_{43} & J_{44} & J_{45} & J_{46} \\ J_{51} & J_{52} & J_{53} & J_{54} & J_{55} & J_{56} \\ J_{61} & J_{62} & J_{63} & J_{64} & J_{65} & J_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dq_1 \\ dq_2 \\ dq_3 \\ dq_4 \\ dq_5 \\ dq_6 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

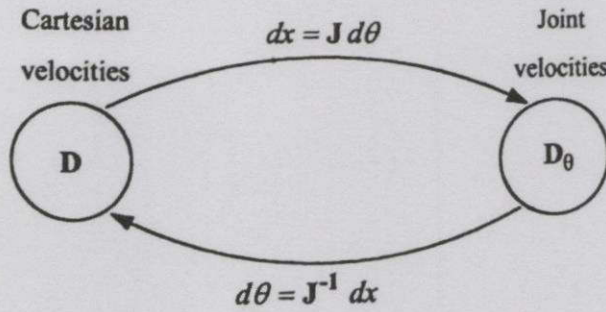
$$\text{เมื่อ } dx = dx_1 dq_1 + dx_2 dq_2 + dx_3 dq_3 + dx_4 dq_4 + dx_5 dq_5 + dx_6 dq_6 \quad (2.40)$$

คือองค์ประกอบของ x ของผลต่างการเคลื่อนที่ที่ (ฝ่ามือ) ในฟังก์ชันผลต่างการเคลื่อนที่ของจุดต่อ
 δy = องค์ประกอบ y ของมุมการเคลื่อนที่ฝ่ามือ ในฟังก์ชันผลต่างการเคลื่อนที่ของจุดต่อ

$dx_1 = J_{11} = \frac{\partial x}{\partial q_1}$ คือ ค่าพาเชิลดิริเวทีฟ (Partial derivative) ขององค์ประกอบ x ตรงตำแหน่งฝ่ามือ พาดพิงกับตัวแปรจุดต่อที่ 6

จาโคเบียนมือกล (Manipulator jacobian) สัมพันธ์กับความเร็วของจุดต่อใน joint space ไปยังความเร็วของฝ่ามือใน Catesian space ส่วนค่า Inverse jacobian สัมพันธ์กับความเร็วของฝ่ามือใน Catesian space ไปยังความเร็วของจุดต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.33 จาโคเบียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงมุมกับความเร็วเชิงเส้น

ดังนั้น $D_q = J^{-1} D$

จำนวนแถว (Row) ของจาโคเบียนถูกกำหนดขึ้นโดยจำนวนมุมอิสระในมิติคาร์ทีเซียนที่ต้องการการทำงานด้วยการหมุน ถูกกำหนดโดยการเคลื่อนไหวของมือ และถูกบังคับด้วยงานการบังคับด้วยงานจะมีผลต่อมุมบางมุม ที่ไม่มีความจำเป็นหรือเกิดค่าเหลือเฟือ ถ้ายังมีความจำเป็นอยู่ ค่ามุมอิสระที่เหลือเพื่ออยู่นี้สามารถทำให้ออกไปทางซ้ายของ จาโคเบียน โดยการทำให้เป็นกำลังสอง เช่นในการควบคุมหัวเชื่อม (Arc welding torch) จะใช้ 5 มุมอิสระในการทำงาน เพราะตัวเชื่อมมีความสมมาตรเส้นกลางพอดี ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นที่จะควบคุมในส่วน Roll จำนวนคอลัมน์ของจาโคเบียนถูกกำหนดโดยจำนวนจุดต่อของแขนกล มุมในการเคลื่อนไหวอยู่ใน Joint space ถ้าจำนวนคอลัมน์มากกว่าจำนวนแถวแกนจะเกินค่าเหลือเฟือ เมื่อมุมที่เคลื่อนไหวแขนกลมากกว่ามุมอิสระในความต้องการของงาน ดังนั้นเราต้องคูณด้วยค่าอินเวอร์ส เพื่อลบส่วนความเหลือเฟือเราสามารถทำให้ดีขึ้นเพื่อหลีกเลี่ยงการชนกัน หรือจุดต่อบางจุดถูกล็อก ไปทำการผลิตกำลังสองจาโคเบียน สำหรับแขนกลส่วนมาก ไม่มีการยกกำลังสอง ไม่มีการยกกำลังสองจาโคเบียนภายใต้ค่าอินเวอร์ส ไม่มีการยกกำลังสองจาโคเบียน เรากำหนดให้บางรูปแบบมีการปลอมการอินเวอร์ส $(J^T)^{-1}$ มุมอิสระทั้ง 6 มุมของแขนกลจะมีรูปการยกกำลังสองจาโคเบียนแต่อินเวอร์สเมตริกซ์ 6×6 โดยทั่วไปไม่นำมาปฏิบัติกัน ผลของวิธีการคำนวณจาโคเบียนและอินเวอร์สมีความสำคัญ เพราะองค์ประกอบของจาโคเบียนขึ้นอยู่กับรูปร่างของแขนกล ดังนั้นจะต้องมีการคำนวณอยู่เสมอ เมื่อกำลังควบคุมความเร่ง จากสมการดังกล่าวไม่สามารถกำหนดกรอบแกนอ้างอิงสำหรับจาโคเบียน ตัวอย่างที่กล่าวมานั้น จาโคเบียนถูกคำนวณพาดพิงกับเฟรมต่างๆไป (World coordinate frame) อย่างไรก็ตามโดยทั่วไป เพื่อง่ายต่อการคำนวณจาโคเบียนก็จะให้พาดพิงกับกรอบที่ปลายมือจับแขนกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การศึกษาทางกลศาสตร์ของหุ่นยนต์ (ฟิสิกส์พื้นฐานกลศาสตร์, 2548)

2.4.1 สถิตยศาสตร์ (Statics)

เป็นการวิเคราะห์และคำนวณองค์ประกอบต่างๆของหุ่นยนต์เมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล คิดในกรณีที่หุ่นยนต์นั้นหยุดนิ่ง ไม่มีการเคลื่อนที่หรือเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ ผลรวมแรง (Force) และแรงบิด (Torque) จากภายนอกเป็นศูนย์ จากสภาวะสมดุลดังกล่าวในโครงสร้างหุ่นยนต์รอบๆจุดศูนย์กลางมวลจะเกิดแรงบิดขึ้นที่ข้อเนื่องจากมีการขับเคลื่อนและมีแรงโน้มถ่วงมากระทำไม่ให้เกิดแรงบิด ได้ดังสมการ

$$T_{static(i)} = r_{m/i} \times m_m g \quad (2.41)$$

โดยที่

$T_{static(i)}$ = แรงบิดที่ข้อต่อ (Joint) i รับน้ำหนักก้านต่อ (Link)

g = เมตริกซ์ค่าความเร่งโน้มถ่วงโลก = 9.8062 m/s^2

m = น้ำหนักของชิ้นส่วนก้านต่อ (Link) m ที่ข้อต่อ i รับแรง

2.4.2 พลศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Dynamics)

พิจารณา มวล ความเร่ง แรงบิด โมเมนต์แรงเฉื่อย และความเร่งเชิงมุม ภายใต้ความสัมพันธ์แรงภายนอกที่มากระทำต่อหุ่นยนต์ เพื่อคำนวณหาแรงบิดที่เพียงพอที่จะทำให้ข้อต่อหรือแขนกลนั้นเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วและความเร่งที่ต้องการ

แรงเหวี่ยงหรือแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) เมื่อหุ่นยนต์มีความเร่งในการเคลื่อนที่ จะเกิดแรงเหวี่ยงหรือแรงหนีศูนย์กลางสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการโดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$T_{centrifugal(i)} = m(\omega_i r_{m/i})^2 \quad (2.42)$$

โดยที่

$T_{centrifugal(i)}$ = แรงเหวี่ยงที่ข้อต่อ (joint) i

m = น้ำหนักของก้านต่อ (link) ที่ ข้อต่อ (joint) i รับแรง

ω_i = ความเร็วเชิงมุม หุ่นยนต์ของข้อต่อ (joint) i

$r_{m/i}$ = เวกเตอร์ระยะทางจุดศูนย์กลางมวล m เทียบ i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงจากโมเมนต์ความเฉื่อยมวล จากความเร็วเชิงมุม $v = \omega r$ สามารถหาแรงจากโมเมนต์ความเฉื่อยมวลของข้อต่อ (Joint) ได้ดังสมการ

$$T_{\text{initial of mass}(i)} = P = m\omega_i r_{m/i} \quad (2.43)$$

โดยที่

$T_{\text{initial of mass}(i)}$ = แรงบิดจากโมเมนต์ความเฉื่อยมวลและความเร่งเชิงมุม (Joint) i

ω_i = ความเร็วเชิงมุม หุนยนต์ของข้อต่อ (Joint) i

$r_{m/i}$ = เวกเตอร์ระยะทางจุดศูนย์กลางมวล m เทียบ i

m = น้ำหนักของก้านต่อ (Link) ที่ ข้อต่อ (Joint) i รับแรง

2.5 ความรู้เบื้องต้น MATLAB® (การใช้งานโปรแกรม Matlab® เบื้องต้น, 2549)

MATLAB® เป็นโปรแกรมที่ออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับการคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยเฉพาะสำหรับงานทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ โครงสร้างพื้นฐานการคำนวณของโปรแกรม MATLAB® จะอยู่ในรูปของเมทริกซ์ ซึ่งก็เป็นที่มาของชื่อโปรแกรมด้วย กล่าวคือ MATLAB® เป็นคำย่อของคำสองคำในภาษาอังกฤษคือ MATrix LABoratory

2.5.1 ไฟล์สคริปต์

ไฟล์สคริปต์เป็นการรวมชุดคำสั่งที่ต้องการให้ MATLAB® ทำงาน โดยบรรจุลงในไฟล์เดียว เพื่อให้ความสะดวกในกรณีที่ต้องการทำการคำนวณบางอย่างที่ประกอบด้วยชุดคำสั่งจำนวนมาก หรือต้องการป้อนข้อมูลจำนวนมากลงในเมทริกซ์ ไฟล์สคริปต์จึงเป็นทางออกที่ดีสำหรับหลีกเลี่ยงปัญหาความผิดพลาดที่อาจจะเกิดขึ้นในระหว่างการพิมพ์ข้อมูลหรือคำสั่ง เพราะเราสามารถตรวจสอบความถูกต้องและแก้ไขได้อย่างละเอียดโดยใช้โปรแกรม editor ทั่วไป ก่อนที่จะสั่งให้ MATLAB® ทำตามที่ต้องการ เนื่องจากการทำงานของไฟล์สคริปต์เทียบเท่ากับการป้อนคำสั่งผ่านโปรแกรม MATLAB® โดยตรงตามปกติที่ละคำสั่งเหมือนที่ผ่านมา ดังนั้นตัวแปรที่อยู่ในไฟล์สคริปต์จึงถูกพิจารณาว่าเป็นตัวแปรโกลบอล (Global variable) ซึ่งหมายความว่าถ้าตัวแปรบางส่วนในหน้าต่างคำสั่ง MATLAB® ก่อนหน้าการเรียกใช้ไฟล์สคริปต์ไปมีชื่อซ้ำกันกับตัวแปรในไฟล์สคริปต์แล้ว ค่าของตัวแปรเหล่านั้นจะถูกเปลี่ยนไปตามคำสั่งที่อยู่ในไฟล์สคริปต์ด้วย

2.5.2 ไฟล์ฟังก์ชัน

การใช้งานไฟล์สคริปต์นั้นให้ความสะดวกและจัดว่าเป็นประโยชน์อย่างมากแก่การเขียนโปรแกรมชุดคำสั่งที่มีภาพกิจไม่มากนัก และผู้ใช้งานส่วนใหญ่ก็มักจะได้ใช้งานไฟล์สคริปต์เป็นหลักอยู่แล้ว อย่างไรก็ตาม MATLAB® ยังได้สร้างไฟล์ M-file อีกลักษณะหนึ่งที่เรียกว่า ไฟล์ฟังก์ชันขึ้น เพื่อให้ให้นักเขียน

โปรแกรมทั้งหลายได้มีโอกาสในการพัฒนาฟังก์ชันรูปแบบใหม่ที่ตรงตามความต้องการการใช้งานของตนเองได้ และที่สำคัญคือฟังก์ชันที่เกิดขึ้นใหม่เหล่านี้มีสถานะเทียบเท่ากับฟังก์ชันมาตรฐานอื่นๆ ของ MATLAB® ไฟล์ประเภทนี้เองที่ทำให้โปรแกรม MATLAB® สามารถขยายขีดความสามารถในการคำนวณรูปแบบใหม่ๆ หลากหลายสาขาวิชาออกมาอย่างต่อเนื่อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 การดำเนินงาน

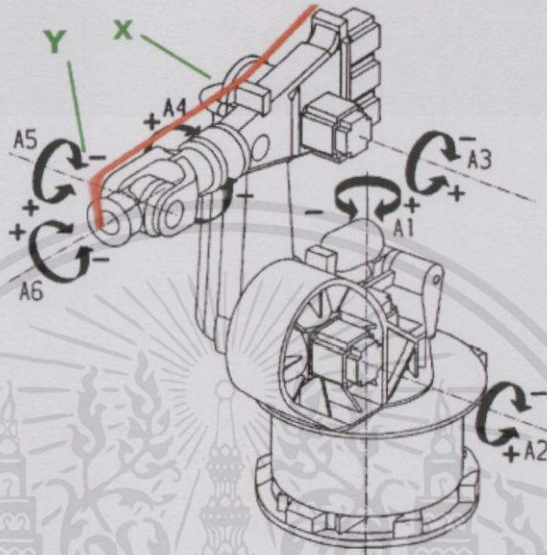
การออกแบบและจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกล มีขั้นตอนที่สำคัญคือ ศึกษาและออกแบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ออกแบบเฟืองให้เหมาะสมกับหุ่นยนต์และเซอร์โวมอเตอร์ การเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการปฏิบัติงาน
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ศึกษาหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

ศึกษาหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่ออกแบบเป็นหุ่นยนต์ชนิด Articulated arm ประกอบไปด้วย 6 แกน ในส่วนนี้จะทำการออกแบบสามแกนล่าง บังคับจุดหมุนที่ 1,2 และ 3 รวมทั้งศึกษาชิ้นส่วนภายใน เพื่ออง มอเตอร์ และลูกปืน



รูปที่ 3.2 หุ่นยนต์อุตสาหกรรม 6 แกน

3.3 การออกแบบโครงสร้าง

แบบร่างแรกพร้อมกำหนดขนาดของหุ่นยนต์ในส่วน 3 แกนล่างของหุ่นยนต์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.3 การออกแบบหุ่นยนต์หกแกนเฉพาะส่วน 3 แกนล่าง
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีที่คิดเปลี่ยนแปลงและต้องขออนุญาตทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อกำหนดเบื้องต้นสำหรับการออกแบบให้ขนาดน้ำหนักหุ่นยนต์รวมภาระงานที่หุ่นต้องไม่มากกว่า 30 กิโลกรัมและมีความสูง 1.2 เมตร และ หมุนไปด้วยความเร็ว 90 องศาต่อวินาที (15 รอบต่อ นาที) ทำให้เกิด Requirement Torque = $30 \times 1.2 \times 9.8 = 352.8$ นิวตันเมตร ซึ่งหมายถึงแรงในการยกวัตถุที่แขนกลต้องการ และจากนั้นนำค่าแรงบิดที่ต้องการไปหามอเตอร์และอัตราทดของเฟืองที่รองรับความต้องการนี้

3.4 มอเตอร์และระบบเฟืองทด

ผลที่ได้คือเลือก มอเตอร์ รุ่น Omron R88M-G40030H-S AC servo motor ที่ความเร็วรอบ 3.000 รอบต่อนาที และ แรงบิดเท่ากับ 3.65 นิวตันเมตร



รูปที่ 3.4 มอเตอร์ รุ่น Omron R88M-G40030H-S AC servo motor

3.4.1 ชุดเฟืองสำหรับข้อต่อที่ 1

จากอัตราทดเกียร์ที่ต้องลดความเร็วรอบเท่ากับความเร็วในการหมุนของแขนหารด้วยความเร็วรอบของมอเตอร์ดังนั้นได้ อัตราทดของชุดเกียร์เป็น

$$\text{Gear ratio} \geq \frac{15}{3000}$$

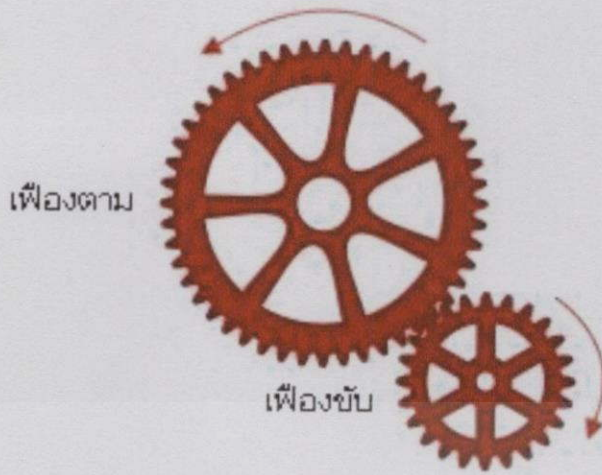
หรือเท่ากับ

$$\text{Gear ratio} \geq \frac{1}{200}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ (3.1) การค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{โมดูล} = \frac{\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง}}{\text{จำนวนฟัน}} \quad (3.2)$$



รูปที่ 3.5 ทิศทางการเคลื่อนที่ของเฟือง

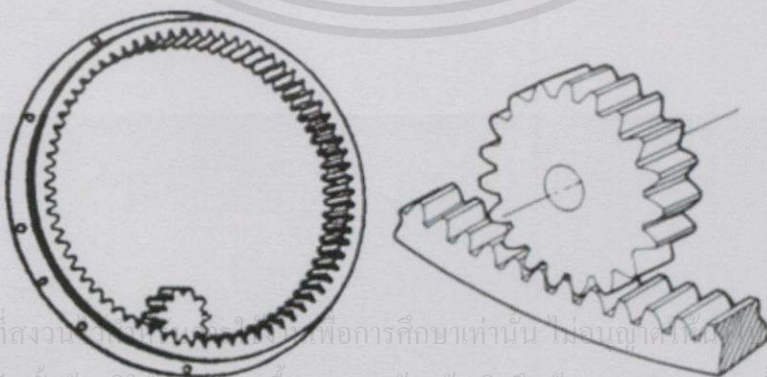
ซึ่งจากอัตราทดนี้จะให้แรงบิดที่ขั้วต่อจากมอเตอร์รุ่นดังกล่าวเท่ากับ $100 \times 3.65 = 365$ นิวตันเมตร ซึ่งมากกว่าค่าที่ต้องการที่ 352.8 นิวตันเมตร

โดยเมื่อคิดอัตราทดเกียร์จากอัตราขยายแรงบิดของมอเตอร์เท่ากับ แรงบิดของมอเตอร์ 3.65 นิวตันเมตรหารด้วย แรงบิดที่ต้องการที่ 352.8 นิวตันเมตร ดังนั้นจะได้อัตราทดเกียร์ต้องน้อยกว่า

$$\left(\frac{352.8}{3.65} \right)$$

$$\text{Gear ratio} \leq \frac{1}{96.65}$$

ดังนั้นเราสามารถเลือกใช้ระบบเกียร์ที่มีอัตราทดได้ตั้งแต่ 1:96.65 ถึง 1:200 ซึ่งเมื่ออัตราทดยิ่งลดทำให้แรงที่สามารถยกได้เพิ่มขึ้นไปด้วยจนถ้าต่ำกว่า 1:200 จะทำให้หุ่นไม่สามารถหมุนช้ากว่าความเร็วที่กำหนด



รูปที่ 3.6 เฟืองวงแหวน Internal Gear

กำหนดให้ อัตราทดเกียร์เป็น 1 : 100 และ เกียร์โมดูลเท่ากับ 1

$$\text{Gear ratio} = \frac{1}{100}$$

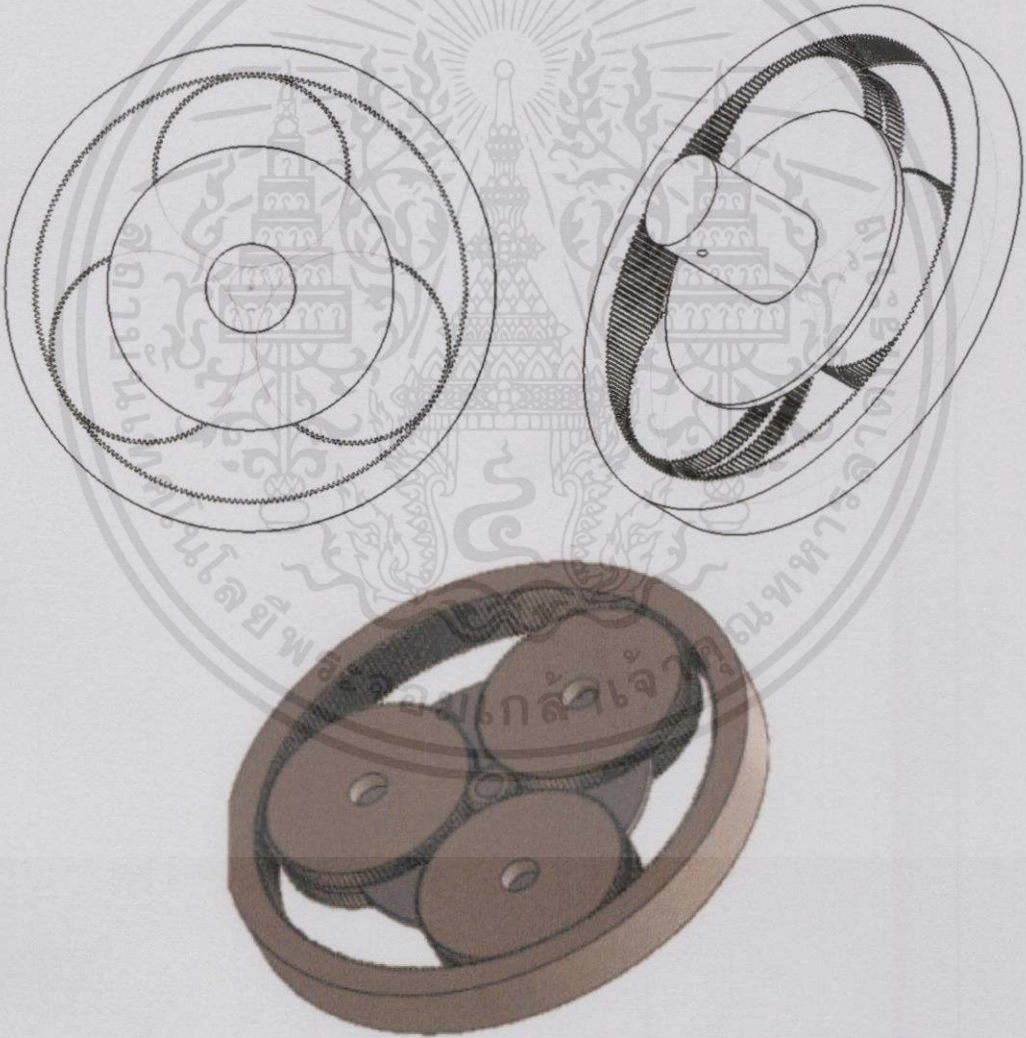
ออกแบบเป็นเฟืองสองชั้นได้ $\frac{1}{10} \times \frac{1}{10}$

จำนวนฟันตัวขับ = 24 ฟัน, เส้นผ่านศูนย์กลางเฟืองตัวขับ = 24 มิลลิเมตร

ดังนั้น จำนวนฟันตัวตาม = 240 ฟัน, เส้นผ่านศูนย์กลางเฟืองตัวตาม = 240 มิลลิเมตร

ความเร็วของข้อต่อที่ 1

$$\frac{3000}{100 \times 60} = 0.5 \text{ รอบต่อวินาที}$$
$$0.5 \times 360 = 180 \text{ องศาต่อวินาที}$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกหนึ่งห้ามมิให้คัดลอกไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.7 เฟืองตัวขับของข้อต่อที่ 1

3.4.2 ชุดเฟืองสำหรับข้อต่อที่ 2 และ 3

กำหนดให้ อัตราทดเกียร์ 1 : 125 และ เกียร์โมดูลเท่ากับ 1

$$\text{Gear ratio} = \frac{1}{125}$$

โดยกำหนดให้เป็นเฟืองสามชั้น $\frac{1}{5} \times \frac{1}{5} \times \frac{1}{5}$

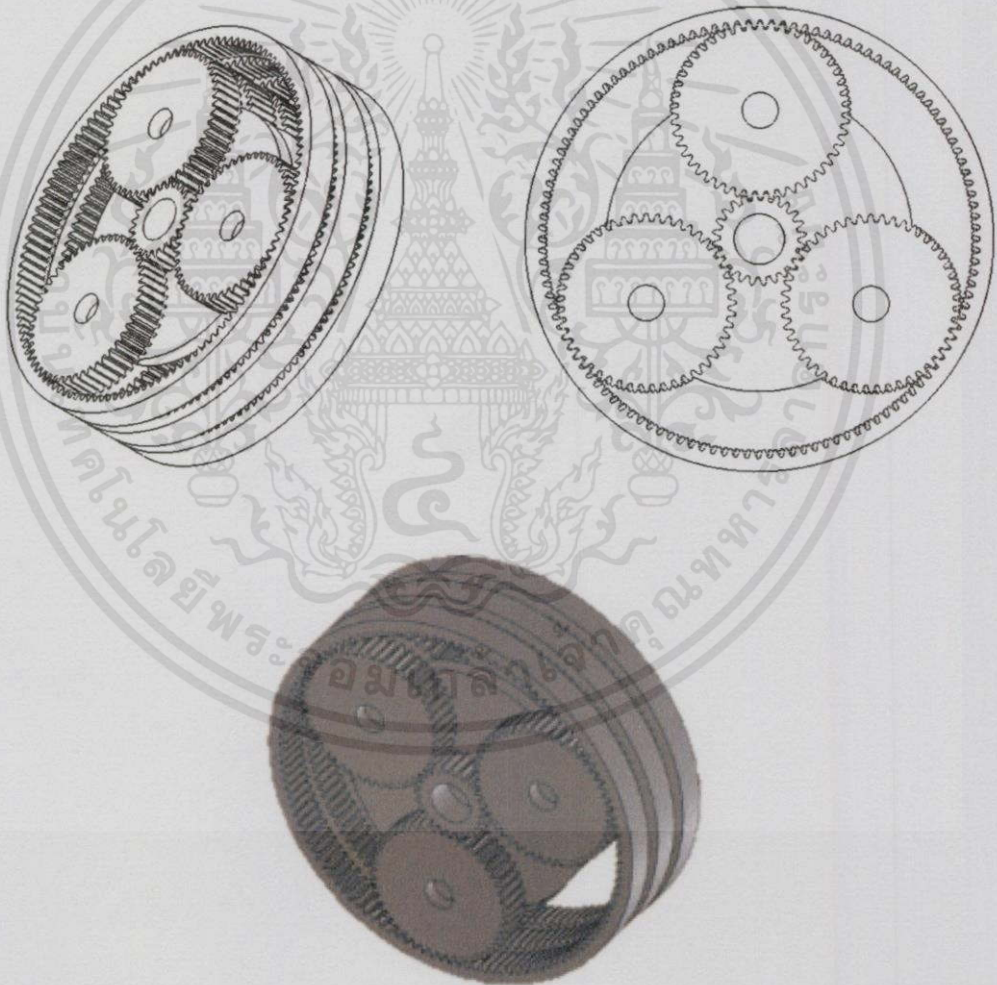
จำนวนฟันตัวขับ = 24 ฟัน, เส้นผ่านศูนย์กลางเฟืองตัวขับ = 24 มิลลิเมตร

ดังนั้น จำนวนฟันตัวตาม = 120 ฟัน, เส้นผ่านศูนย์กลางเฟืองตัวตาม = 120 มิลลิเมตร

ความเร็วของข้อต่อที่ 2 และ 3

$$\frac{3000}{125 \times 60} = 0.4 \text{ รอบ/วินาที}$$

$$0.4 \times 360 = 144 \text{ องศา/วินาที}$$

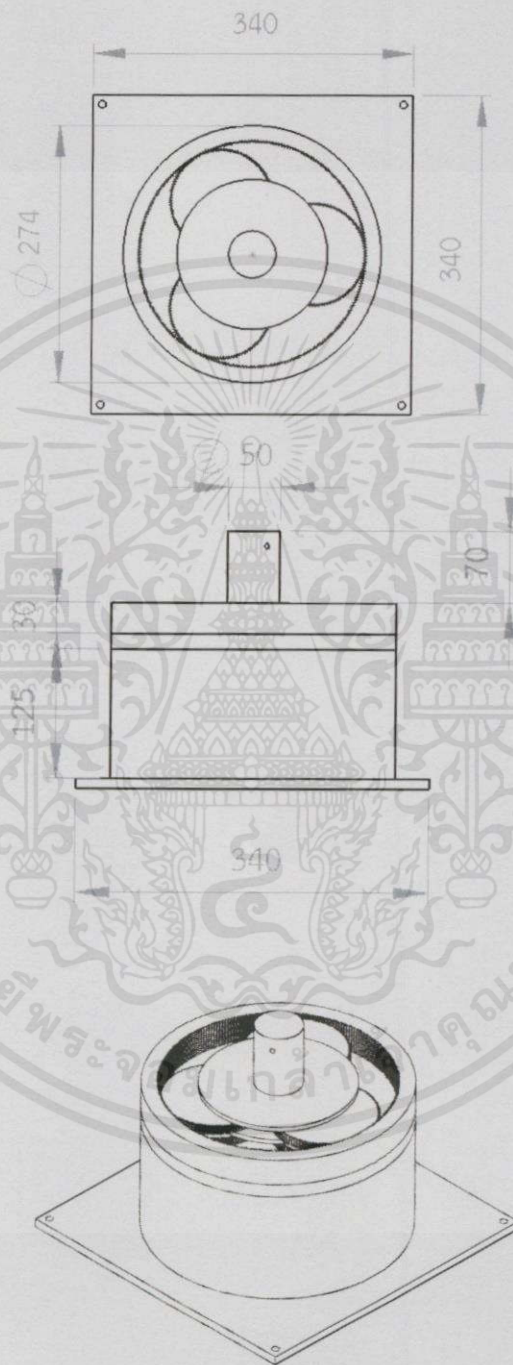


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.8 เฟืองตัวขับของข้อต่อที่ 2 และ 3 โปรดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 แบบแสดงรายละเอียดของแต่ละชิ้นส่วน

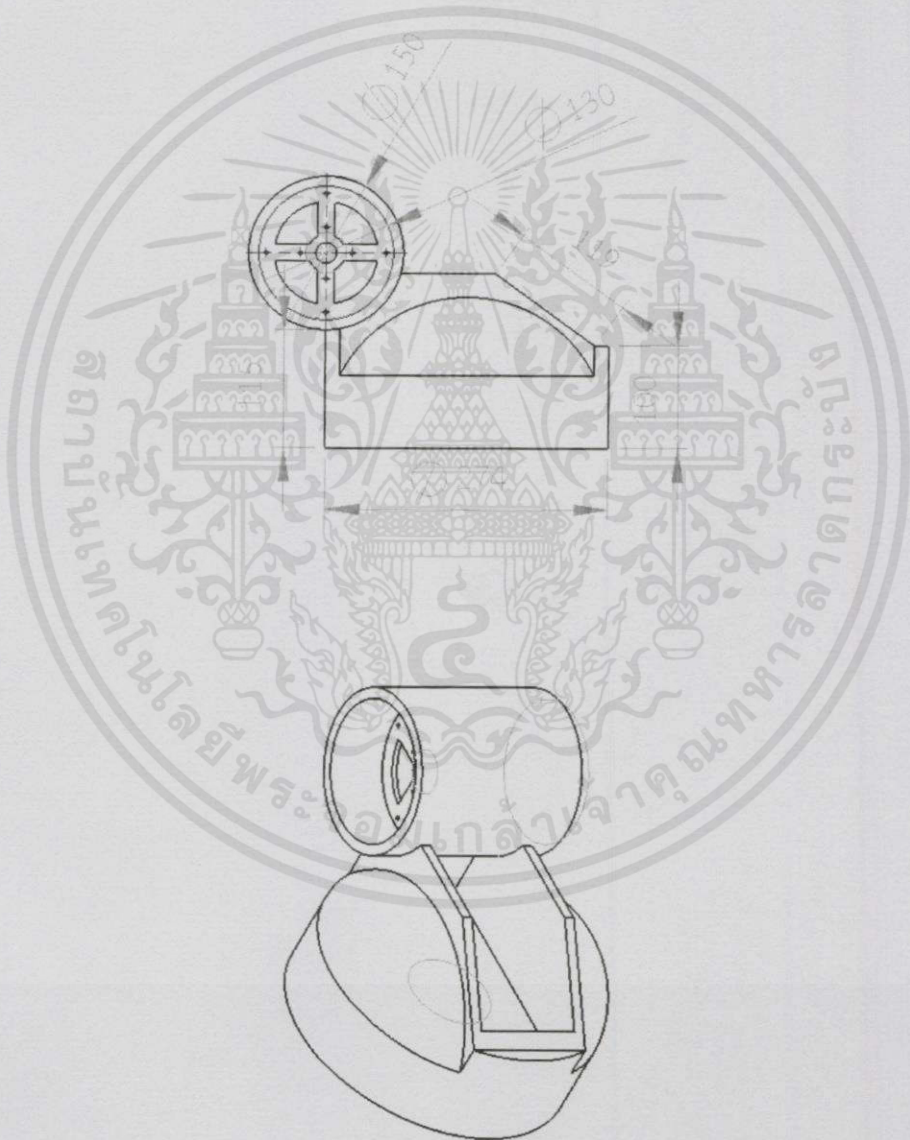
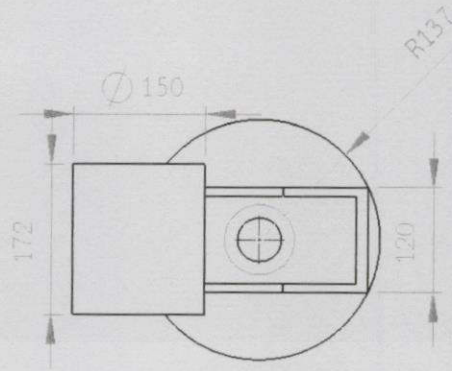
หลังจากที่ได้มอเตอร์และระบบชุดเฟืองทั้งหมด ได้นำขนาดของมอเตอร์และชุดเฟืองมาทำการออกแบบตัวเสื้อของข้อต่อและตัวของแขนที่ต่อระหว่างข้อต่อดังต่อไปนี้

3.5.1 ข้อต่อที่ 1



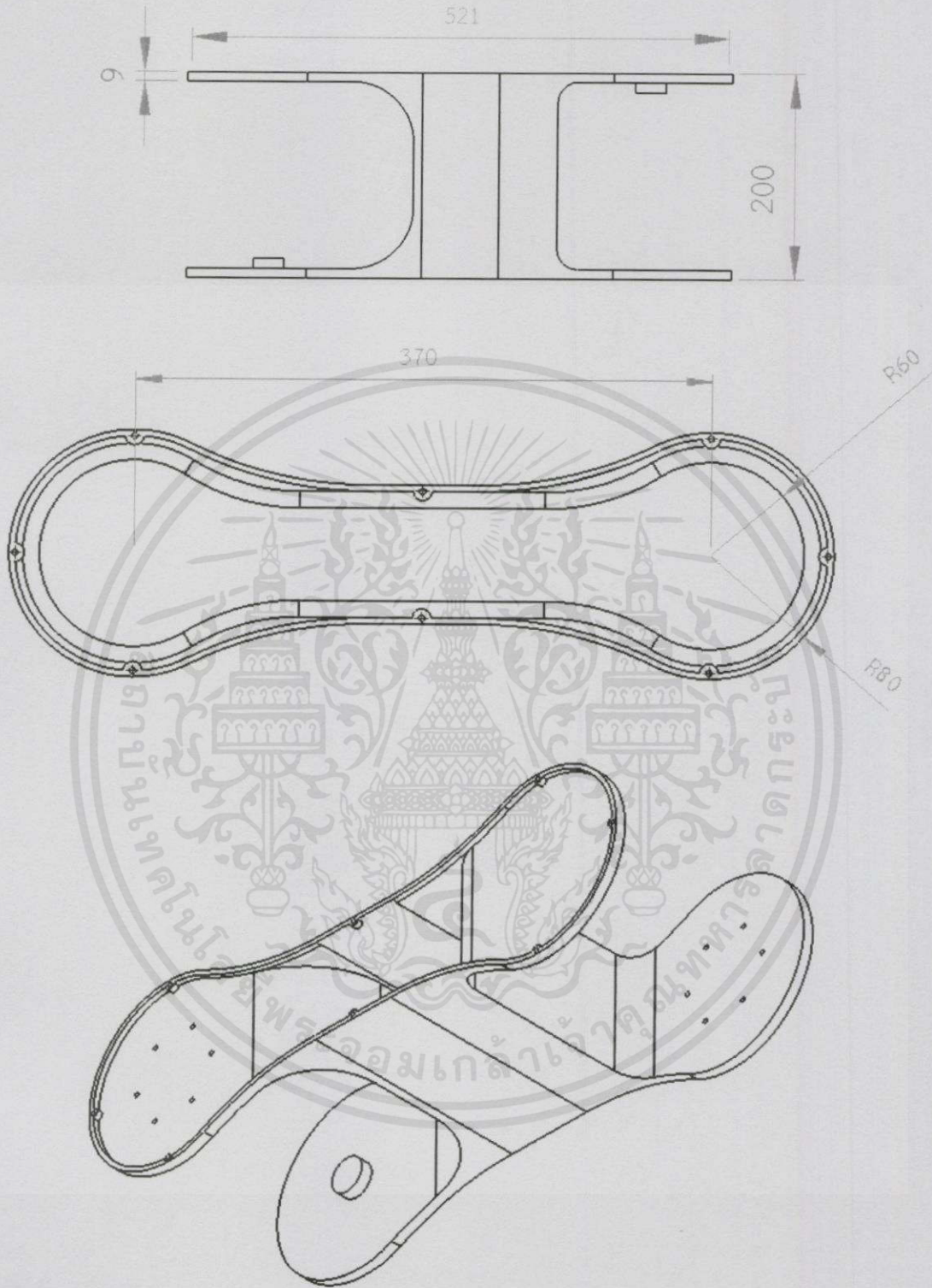
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.9 ส่วนฐานและต่อที่ 1 ของหุ่นยนต์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 ข้อต่อที่ 2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.10 ส่วนหัวโหลและต่อที่ 2 ของหุ่นยนต์
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีการดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

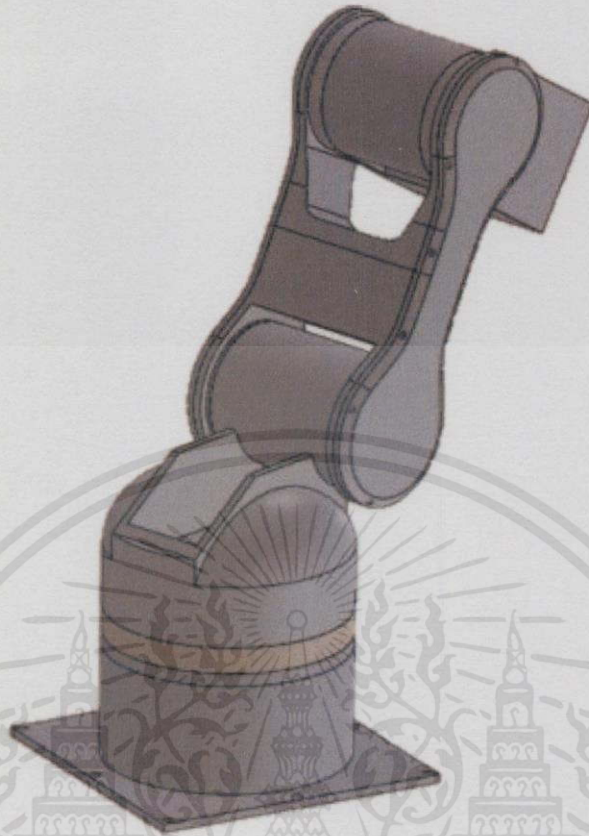
3.5.3 ข้อต่อที่ 3



รูปที่ 3.11 ส่วนแขนของหุ่นยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4 แบบประกอบของทั้ง 3 แกน



รูปที่ 3.12 แสดงแบบหุ่นยนต์ Articulated Arm

กำหนดให้ใช้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุหลักในการผลิต ซึ่งโปรแกรม Solidwork ได้ให้น้ำหนักของแขนกลดังนี้

ส่วนฐาน = 12.77 กิโลกรัม

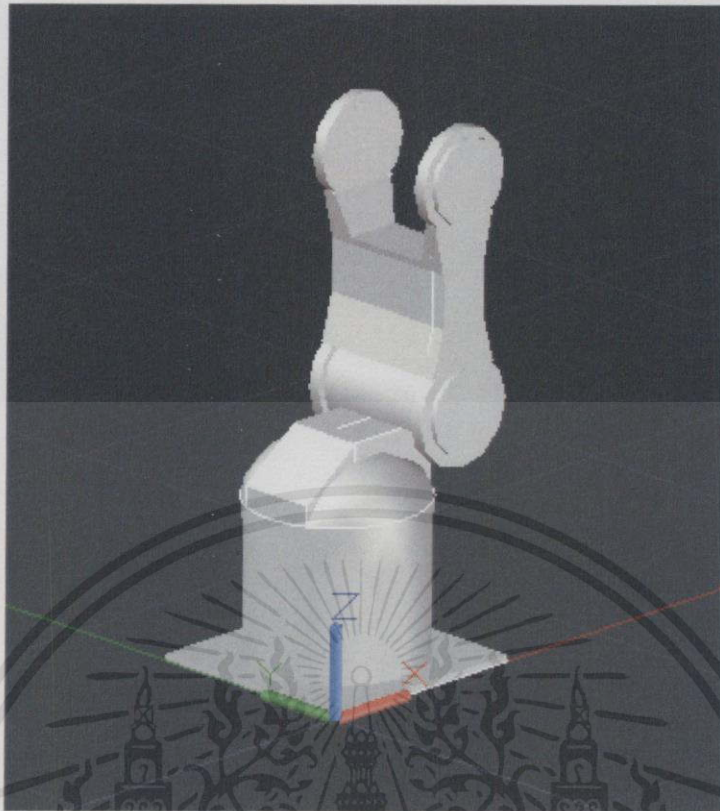
ส่วนหัวไหล่ = 10.52 กิโลกรัม

ส่วนแขนกลาง = 3.53 กิโลกรัม

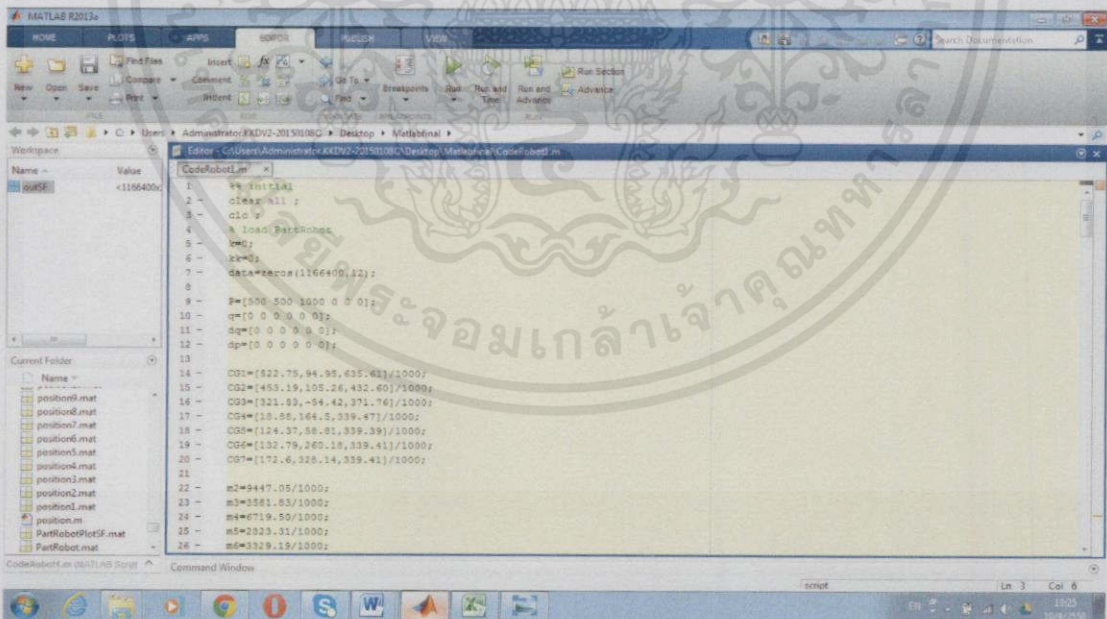
โดยรวมน้ำหนักของมอเตอร์และชุดเฟืองแล้ว

3.6 แบบจำลองของหุ่นยนต์บน MATLAB

เขียนโปรแกรมจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ โดยเริ่มจากการนำเมตริกซ์ที่ประกอบไปด้วยขนาดของ หุ่นยนต์ได้มาจาก Stl File นำมาเขียนฟังก์ชันกลศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward Function) เป็นการคำนวณหาตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกลจากค่าของมุมข้อต่อและขนาดของก้านซึ่งเป็นค่าแทนค่าตัวแปร (มุมข้อต่อ) เพื่อหาตำแหน่งปลายของหุ่นยนต์นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 CAD file ของหุ่นยนต์



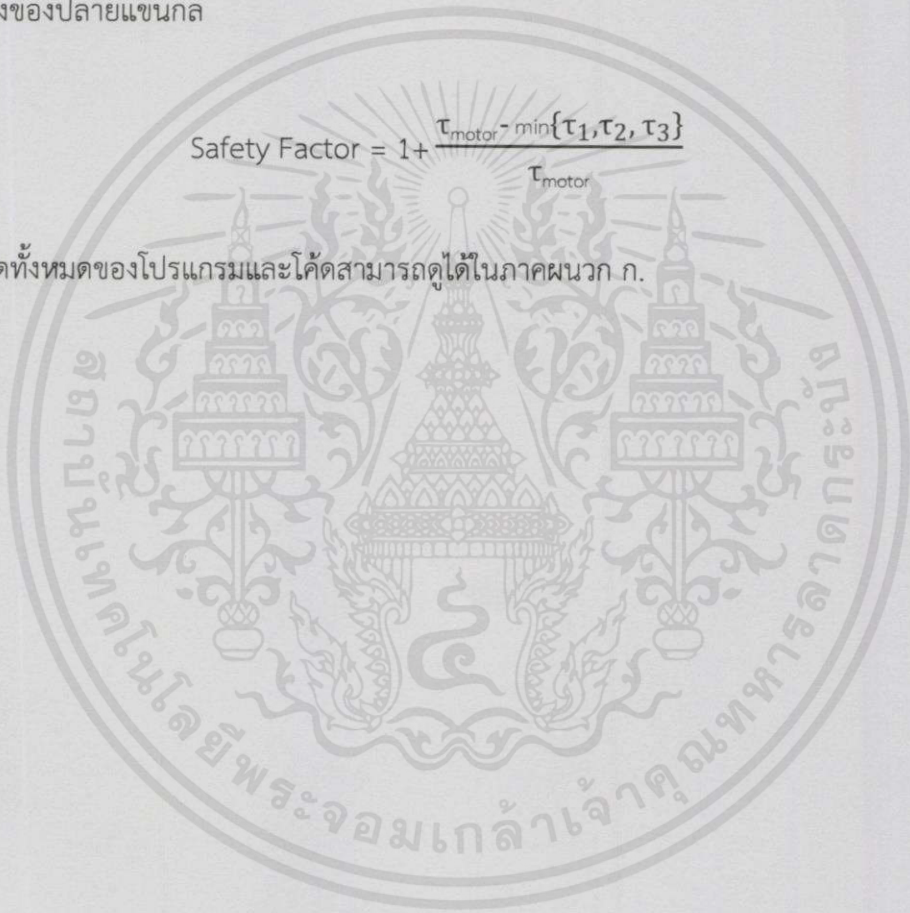
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้รูปที่ 3.14 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม Matlab® ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เขียนฟังก์ชันการหาแรงบิด จากทฤษฎีแรงบิดคือแรงคูณกับระยะทาง ในที่นี้จะพิจารณาที่ละข้อต่อ ที่เปรียบเทียบระยะทางจากข้อต่อแรกไปยังทุกข้อต่อ เมื่อโปรแกรม Matlab® ประมวลผลจะได้เวกเตอร์ของแรงบิดข้อต่อ หาแรงบิดของแต่ละก้านในสามแกนกลาง ที่เคลื่อนที่ไปที่ละ 8 องศา และ 15 องศาในสามแกนบน จะได้ข้อมูลทั้งหมด 52,488,000 ข้อมูล ซึ่งแต่ละชุดข้อมูลจะประกอบด้วยแรงบิดและค่ามุมของแต่ละก้าน

นำข้อมูลแรงบิดของแต่ละท่าทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เพื่อหาค่าความปลอดภัย (Safety Factor) เมื่อเทียบแรงบิดของมอเตอร์ พร้อมกับนำค่าพิคัดของแต่ละแกนผ่านการดำเนินการของ forward function แล้วนำไปวาดกราฟทรงรีของแรงในการดำเนินการ เปรียบเทียบค่าความปลอดภัยของแรงบิดกับตำแหน่งของปลายแขนกล

$$\text{Safety Factor} = 1 + \frac{\tau_{\text{motor}} - \min\{\tau_1, \tau_2, \tau_3\}}{\tau_{\text{motor}}} \quad (3.3)$$

รายละเอียดทั้งหมดของโปรแกรมและโค้ดสามารถดูได้ในภาคผนวก ก.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงาน

4.1 ผลของการออกแบบ

การออกแบบด้วย Solidwork® ได้แบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่ประกอบด้วยชุดขับเคลื่อนภายใน



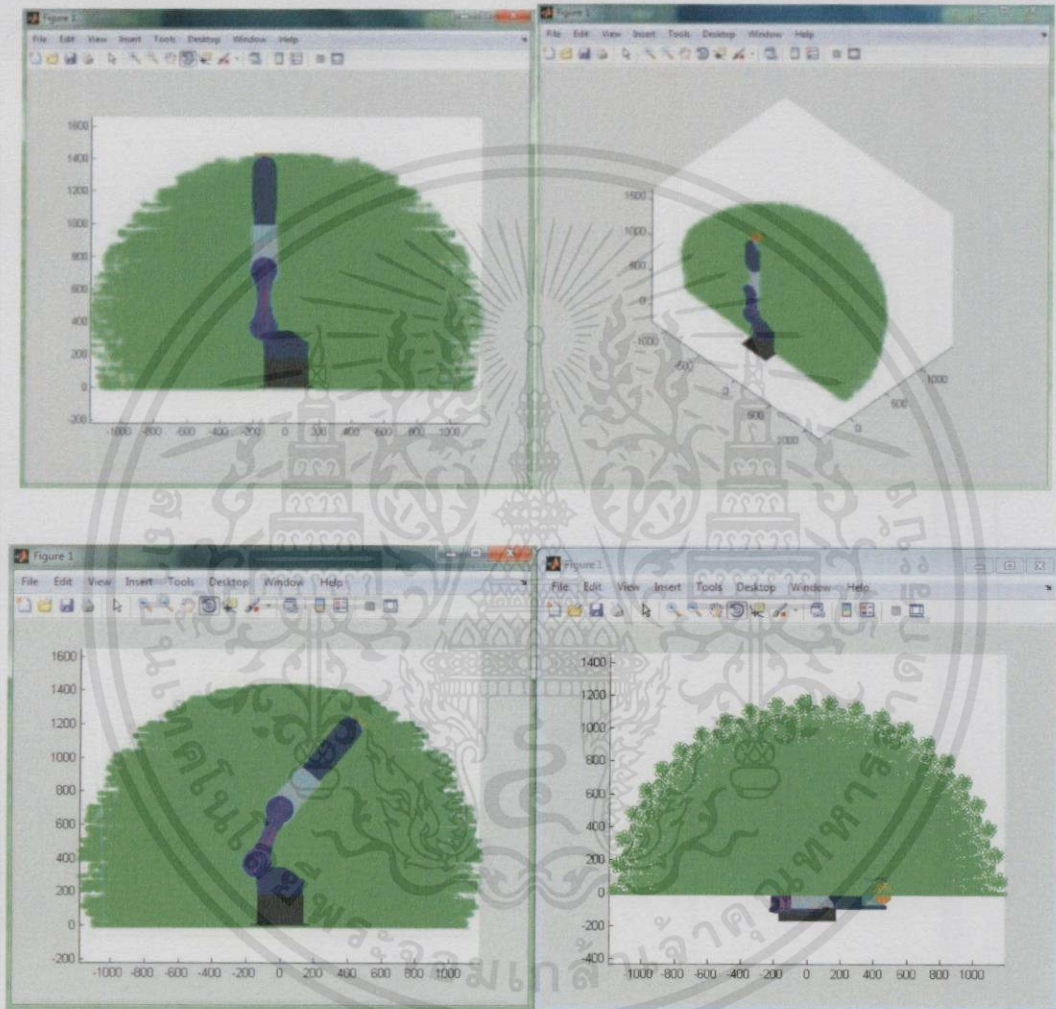
รูปที่ 4.1 แสดงผลของการออกแบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรมทั้ง 6 แกน

โดยแบบรายละเอียดทั้งหมดสามารถดูได้ในภาคผนวก ข.

4.2 ผลจากการวิเคราะห์ความสามารถในการรับภาระงาน

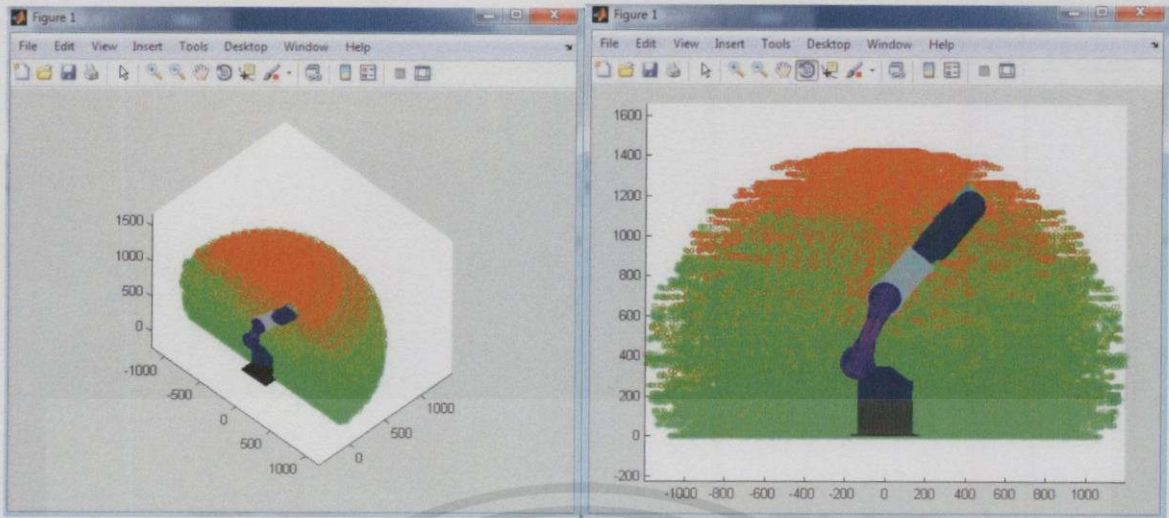
ไม่ผ่านการวิเคราะห์ความสามารถในการรับภาระงาน ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ความสามารถของการเคลื่อนที่ในแต่ละทิศทางที่แตกต่างกันนี้สามารถอธิบายในเชิงปริมาณได้
ด้วยการจำลองพื้นที่การทำงานของหุ่น หุ่นยนต์ที่สามารถหยิบ จับ เคลื่อนย้าย สิ่งของได้ในพื้นที่การ

ทำงาน (Workspace) ของมัน แต่ไม่สามารถทำงานนอกพื้นที่การทำงานได้ และ ทำการวิเคราะห์ความสามารถในการรับภาระงาน การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในแต่ละตำแหน่งจะมีความสามารถในการรับแรงภายนอกที่ไม่เท่ากันแต่จากการออกแบบ จะต้องให้ค่าที่หุ่นรับแรงได้มากกว่าค่าแรงที่กำหนดไว้ทุกตำแหน่งที่หุ่นเคลื่อนที่ไปได้



รูปที่ 4.2 แสดงพื้นที่การใช้งานที่เป็นไปได้ของแบบแขนกลเฉพาะส่วนสามแกนล่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 แสดงพื้นที่การใช้งานที่เป็นไปได้ของแบบแขนกลทั้ง 6 แขน

รูปที่ 4.3 แสดงภาพของพื้นที่การทำงานที่เห็นเป็นรูปทรงกลมรี (ภาพที่แสดงเป็นการตัดส่วนพื้นที่การทำงานออกมาเพียงครึ่งซ้ายของหุ่น) พร้อมกันนี้สีของพื้นที่การทำงานจะลงสีไล่ระดับระหว่างเขียวกับแดง โดยสีเขียวเป็นตำแหน่งที่ค่า Safety Factor มากกว่า 1 มาก และ จะเปลี่ยนเป็นสีผสมแดงเมื่อ Safety Factor เข้าใกล้ 1 โดย Safety Factor ต่ำสุดของทั้งหมด มีค่าเท่ากับ 1.00 ซึ่งยืนยันว่าแบบหุ่นยนต์ที่ออกแบบสามารถรับภาระงานที่กำหนดไว้ได้

ตารางที่ 4.1 ค่าเปอร์เซ็นต์ Safety Factor ของทั้ง 3 ข้อต่อ

	ค่าความปลอดภัย
ข้อต่อที่ 1	66.72
ข้อต่อที่ 2	19.58
ข้อต่อที่ 3	23.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

จากแบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่ประกอบด้วยชุดขับเคลื่อนภายในที่ทำการออกแบบผลจากการวิเคราะห์แบบจำลองแสดงให้เห็นว่าหุ่นยนต์ที่ออกแบบมีความสามารถในการเคลื่อนที่ในระยะที่กำหนดไว้ และหุ่นยนต์ที่สามารถหยิบจับเคลื่อนย้ายชิ้นงานที่มีน้ำหนัก 2 กิโลกรัมตามข้อกำหนดการออกแบบ

ผลที่ได้จากการทดลองจำลองการเคลื่อนที่ให้ค่าความปลอดภัยที่น้อยสุดมีค่าเท่ากับ 1.196 ซึ่งแสดงว่าแบบหุ่นยนต์ในส่วนสามแกนกลางที่ออกแบบสามารถทำงานได้ตามที่กำหนดไว้และมีค่าเผื่อสำหรับภาระงานอีก 19.6 %

ตารางที่ 5.1 สรุปคุณสมบัติของหุ่นยนต์

คุณสมบัติของหุ่นยนต์				
ค่าความปลอดภัยของหุ่นยนต์ (Safety factor)	แขน 3 แกนล่าง	ข้อต่อที่1	หมุนรอบแกน z	1.667
		ข้อต่อที่2	หมุนรอบแกน y	1.195
		ข้อต่อที่3	หมุนรอบแกน y	1.232
	แขน3 แกนบน	ข้อต่อที่4	หมุนรอบแกน z	1.000
		ข้อต่อที่5	หมุนรอบแกน y	1.172
		ข้อต่อที่6	หมุนรอบแกน z	1.931
อัตราเร็วรอบ (องศาต่อวินาที)	แขน 3 แกนล่าง	ข้อต่อที่1	หมุนรอบแกน z	180
		ข้อต่อที่2	หมุนรอบแกน y	144
		ข้อต่อที่3	หมุนรอบแกน y	144
	แขน3 แกนบน	ข้อต่อที่4	หมุนรอบแกน z	25
		ข้อต่อที่5	หมุนรอบแกน y	60
		ข้อต่อที่6	หมุนรอบแกน z	60
ความเร็วรอบมอเตอร์	3 แกนล่าง			3000 (รอบต่อนาที)
	3 แกนบน			150 (รอบต่อนาที)
ความสูงหุ่นยนต์ (มิลลิเมตร)				1200
น้ำหนักหุ่นยนต์ (กิโลกรัม)				40.43
น้ำหนักของที่ยึดได้ (กิโลกรัม)				2
ระยะที่ห่างจากปลาย (มิลลิเมตร)				100

เอกสารอ้างอิง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศ์แสน พิทักษ์วัชร. (2557). พื้นฐานของหุ่นยนต์ กลศาสตร์ของหุ่นยนต์แบบอนุกรม. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พฤทธิกร สมิตไมตรี. (2551). วิทยาการหุ่นยนต์และเทคโนโลยี Robotics and Technology.

รองศาสตราจารย์ ไพโรจน์ ตีรณธนากุล. (2543). ฟิสิกส์พื้นฐาน กลศาสตร์. สำนักพิมพ์ศูนย์สื่อเสริมกรุงเทพ

รศ.ดร.ลัญฉกร วุฒิสีทธิกุลกิจ และคณะ. (2549). การใช้งานโปรแกรม Matlab เบื้องต้น. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดร.ธีระพันธุ์ สันติเทวกุล. กลศาสตร์. พิมพ์ที่ฝ่ายเทคโนโลยีทางการศึกษาสำนักวิทยบริการมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

ผศ. ดร.เสถียร ธีบุญศรีรัตน์. (2551). พื้นฐานหุ่นยนต์อุตสาหกรรม Fundamentals of Industrial Robotics. พิมพ์ที่งานส่งเสริมวิจัยและตำรา โรงพิมพ์สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก

โปรแกรมแบบจำลองหุ่นยนต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
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);
```

ขอ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
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);
```

```
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;
```

เอก Robot.A1F(:,3)=3:3:(480); สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
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.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]);

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

```

```

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

```

```

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) ;
```

```
%% 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');

เอกสารนี้เป็นเอกสาร %% Transformation ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่หวังกำไรใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีลิขสิทธิ์เป็นของตนเอง จึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

% 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;

```

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

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

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

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

$$T12I=m2*W1P*\text{norm}((\text{Robot.B1}(1:3,4)/1000)+(\text{CG2}')-(\text{Robot.B1}(1:3,4)/1000));$$

$$T13I=m3*W1P*\text{norm}((\text{Robot.B2}(1:3,4)/1000)+(\text{CG3}')-(\text{Robot.B1}(1:3,4)/1000));$$

$$T14I=m4*W1P*\text{norm}((\text{Robot.B3}(1:3,4)/1000)+(\text{CG4}')-(\text{Robot.B1}(1:3,4)/1000));$$

$$T15I=m5*W1P*\text{norm}((\text{Robot.B4}(1:3,4)/1000)+(\text{CG5}')-(\text{Robot.B1}(1:3,4)/1000));$$

$$T16I=m6*W1P*\text{norm}((\text{Robot.B5}(1:3,4)/1000)+(\text{CG6}')-(\text{Robot.B1}(1:3,4)/1000));$$

$$T17I=m7*W1P*\text{norm}((\text{Robot.B6}(1:3,4)/1000)+(\text{CG7}')-(\text{Robot.B1}(1:3,4)/1000));$$

$$T1=T12+T13+T14+T15+T16+T17+T18+T12C+T13C+T14C+T15C+T16C+T17C+T12I+T13I+T14I+T15I+T16I+T17I;$$

% joint2

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

$$T24=\text{cross}((\text{Robot.B3}(1:3,4)/1000)+(\text{CG4}')-(\text{Robot.B2}(1:3,4)/1000),m4*[0 \ 0 \ -9.8 \]);$$

$$T25=\text{cross}((\text{Robot.B4}(1:3,4)/1000)+(\text{CG5}')-(\text{Robot.B2}(1:3,4)/1000),m5*[0 \ 0 \ -9.8 \]);$$

$$T26=\text{cross}((\text{Robot.B5}(1:3,4)/1000)+(\text{CG6}')-(\text{Robot.B2}(1:3,4)/1000),m6*[0 \ 0 \ -9.8 \]);$$

$$T27=\text{cross}((\text{Robot.B6}(1:3,4)/1000)+(\text{CG7}')-(\text{Robot.B2}(1:3,4)/1000),m7*[0 \ 0 \ -9.8 \]);$$

$$T28=((\text{Robot.B7}(1:3,4)/1000)-\text{Robot.B2}(1:3,4)/1000$$

$$T23C=m3*(\text{cross}(W2,(\text{Robot.B2}(1:3,4)/1000)+(\text{CG3}')-(\text{Robot.B1}(1:3,4)/1000))).^2;$$

$$T24C=m4*(\text{cross}(W2,(\text{Robot.B3}(1:3,4)/1000)+(\text{CG4}')-(\text{Robot.B1}(1:3,4)/1000))).^2;$$

$$T25C=m5*(\text{cross}(W2,(\text{Robot.B4}(1:3,4)/1000)+(\text{CG5}')-(\text{Robot.B1}(1:3,4)/1000))).^2;$$

$$T26C=m6*(\text{cross}(W2,(\text{Robot.B5}(1:3,4)/1000)+(\text{CG6}')-(\text{Robot.B1}(1:3,4)/1000))).^2;$$

$$T27C=m7*(\text{cross}(W2,(\text{Robot.B6}(1:3,4)/1000)+(\text{CG7}')-(\text{Robot.B1}(1:3,4)/1000))).^2;$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่า T23I=m3*W1P*norm((Robot.B2(1:3,4)/1000)+(CG3')-(Robot.B1(1:3,4)/1000)); รังที่มีการนำไปใช้

$$T24I=m4*W1P*\text{norm}((\text{Robot.B3}(1:3,4)/1000)+(\text{CG4}')-(\text{Robot.B1}(1:3,4)/1000));$$

$$T25I=m5*W1P*norm((Robot.B4(1:3,4)/1000)+(CG5')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));$$

$$T26I=m6*W1P*norm((Robot.B5(1:3,4)/1000)+(CG6')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));$$

$$T27I=m7*W1P*norm((Robot.B6(1:3,4)/1000)+(CG7')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));$$

$$T2=T23+T24+T25+T26+T27+T28+T23C+T24C+T25C+T26C+T27C+T23I+T24I+T25I+T26I+T27I;$$

% 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

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

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

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

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

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

$$T56I=m6*W1P*norm((Robot.B5(1:3,4)/1000)+(CG6')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));$$

$$T57I=m7*W1P*norm((Robot.B6(1:3,4)/1000)+(CG7')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));$$

$$T5=T56+T57+T58+T56C+T57C+T56I+T57I;$$

% joint6

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

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

เอกสิทธิ์ 67C=m7*(cross(W6,(Robot.B6(1:3,4)/1000)+(CG7')-(Robot.B1(1:3,4)/1000))).^2; ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T67I=m7*W1P*norm((Robot.B6(1:3,4)/1000)+(CG7')-(Robot.B1(1:3,4)/1000));$$

```
T6=T67+T68+T67C+T67I;
```

```
% 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';
```

```
%% DrawFigure
```

```
%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
```

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น 'ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่รังเกียจหากมีข้อผิดพลาดทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
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=[SF3];
```

```
op=(min(SF));
```

```
clear all ;
```

```
clc;
```

```
clf
```

```
hold on
```

```
axis equal
```

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

```
colormap hot
```

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

```
samp=randsample(1:1166400,20000);
```

```
load position1 ;
```

```
load safetyfactor1 ;
```

```
outSF=(outSF+16.447)*0.0579;
```

```
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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])

```

ออก load position4 ; สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม้ load safetyfactor4 ; ห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 outSF=(outSF+16.447)*0.0579;

```
% %%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+16.447)*0.0579;
```

```
% %%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+16.447)*0.0579;
```

```
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
```

```
% %%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+16.447)*0.0579;
```

```
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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)];

```

เอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ควรนำเอกสารไปเผยแพร่ในที่สาธารณะอื่นอีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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])

```

เอกสารฉบับนี้ "ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่า" %%scatter3(c(:,1),b(:,2),b(:,3),10,[1-a17(:,4) a17(:,4) o]) "ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้"

```

load position18 ;
load safetyfactor18 ;
outSF=(outSF+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 ไม่สามารถเผยแพร่หรือแจกจ่ายโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม

```

%%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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
```

```
% %%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+16.447)*0.0579;
```

```
% %%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])
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่าในรูปแบบใดๆ ทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
load position27 ;
```

```
load safetyfactor27 ;
```

```

outSF=(outSF+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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 ;
```

เอกสาร load safetyfactor36 ; ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่า outSF=(outSF+16.447)*0.0579; แปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%scatter3(output(samp,1),output(samp,2),output(samp,3),10,[outSF(samp)

```

outSF(samp) outSF(samp)]) รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่จำกัดจำนวนครั้งในการใช้งาน แต่ขอสงวนสิทธิ์ในการนำไปใช้ ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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])

```

เอกศ
 นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

load position43 ;
load safetyfactor43 ;
outSF=(outSF+16.447)*0.0579;
% %%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+16.447)*0.0579;
% %%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])

```

เอกส load position45 ;งานไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่า load safetyfactor45 ;งานมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 outSF=(outSF+16.447)*0.0579;

```

%% %%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 pi/4 1/10*pi pi/2 0 pi/5];
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);

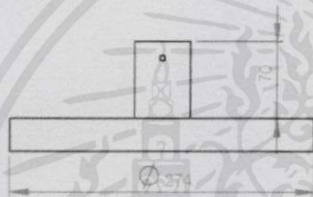
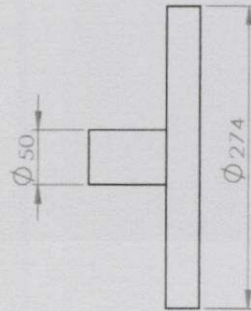
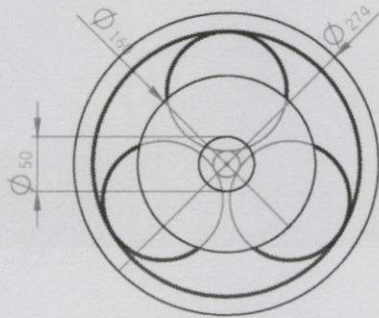
%% Transformation
Robot.A1X = (Robot.B0*Robot.A1)';
Robot.A2X = (Robot.B1*Robot.A2)';
Robot.A3X = (Robot.B2*Robot.A3)';
Robot.A4X = (Robot.B3*Robot.A4)';
Robot.A5X = (Robot.B4*Robot.A5)';
Robot.A6X = (Robot.B5*Robot.A6)';
Robot.A7X = (Robot.B6*Robot.A7)';
DrawRobot

```



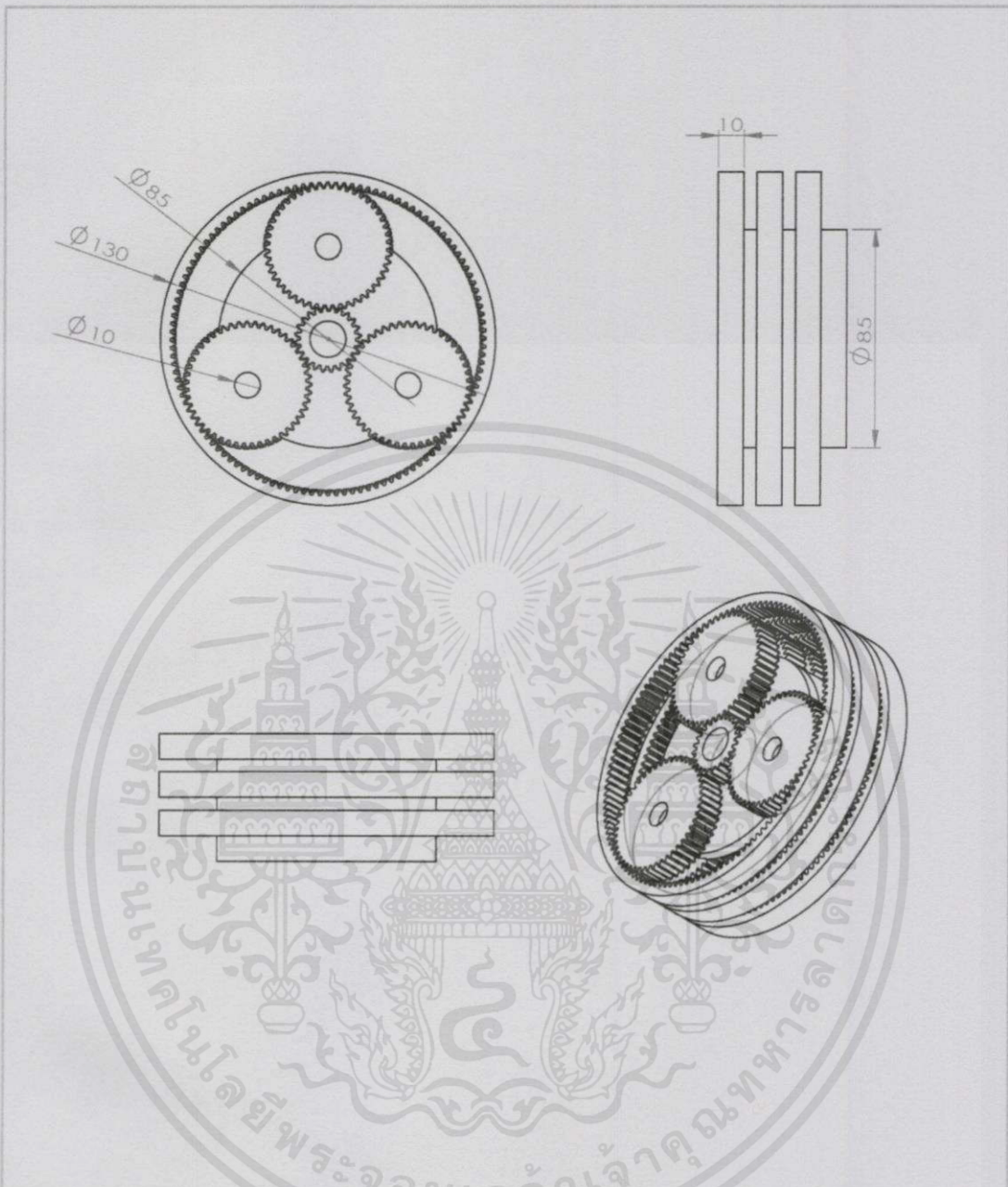
ภาคผนวก ข
แบบรายละเอียดของหุ่นยนต์ที่ออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



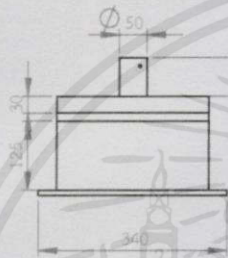
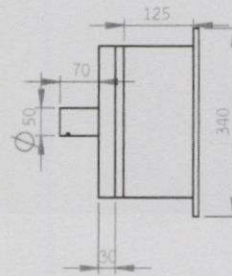
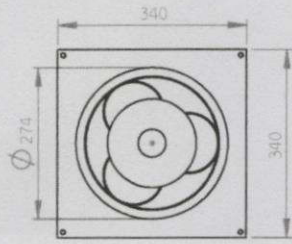
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
SURFACE FINISH:						
TOLERANCES:						
LINEAR:						
ANGULAR:						
NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:	
DRAWN						
CHECK'D						
APP'VD						
MFG						
Q.A			MATERIAL:		DWG NO.	
					gear1	A4
			WEIGHT:		SCALE:1:5	SHEET 1 OF 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



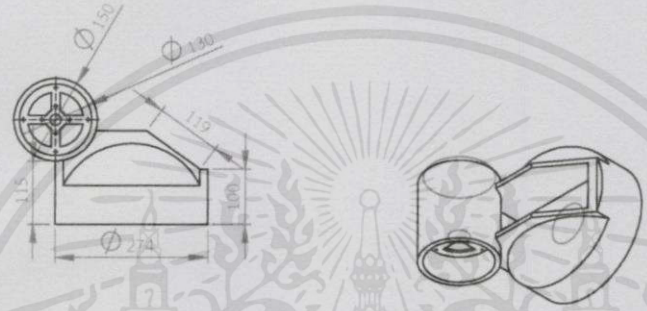
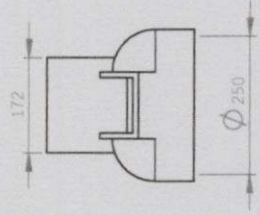
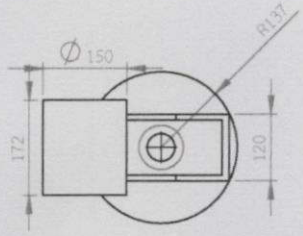
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE			
DRAWN									
CHK'D									
APP'VD									
MFG									
Q-A				MATERIAL:		DWG NO.		A4	
						gear2			
				WEIGHT:		SCALE:1:2		SHEET 1 OF 1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



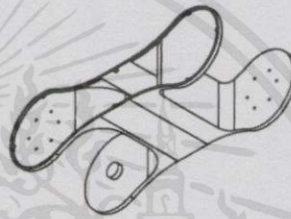
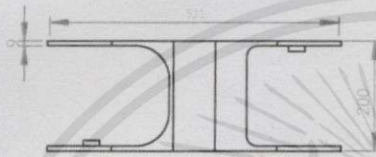
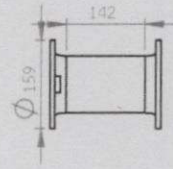
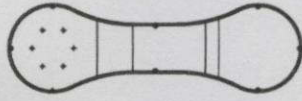
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE			
DRAWN									
CHK'D									
APPR'D									
MFG									
Q.A									
				MATERIAL:		DWG NO.		A4	
				WEIGHT:		SCALE: 1:10		SHEET 1 OF 1	
						AssemBase_2			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:	DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
SURFACE FINISH:						
TOLERANCES:						
LINEAR:						
ANGULAR:						
NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:	
DRAWN						
CHK'D						
APP'VD						
MFG						
Q.A			MATERIAL:	DWG. NO.	shoulder	
			WEIGHT:	SCALE: 1:10	A4	
					SHEET 1 OF 1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

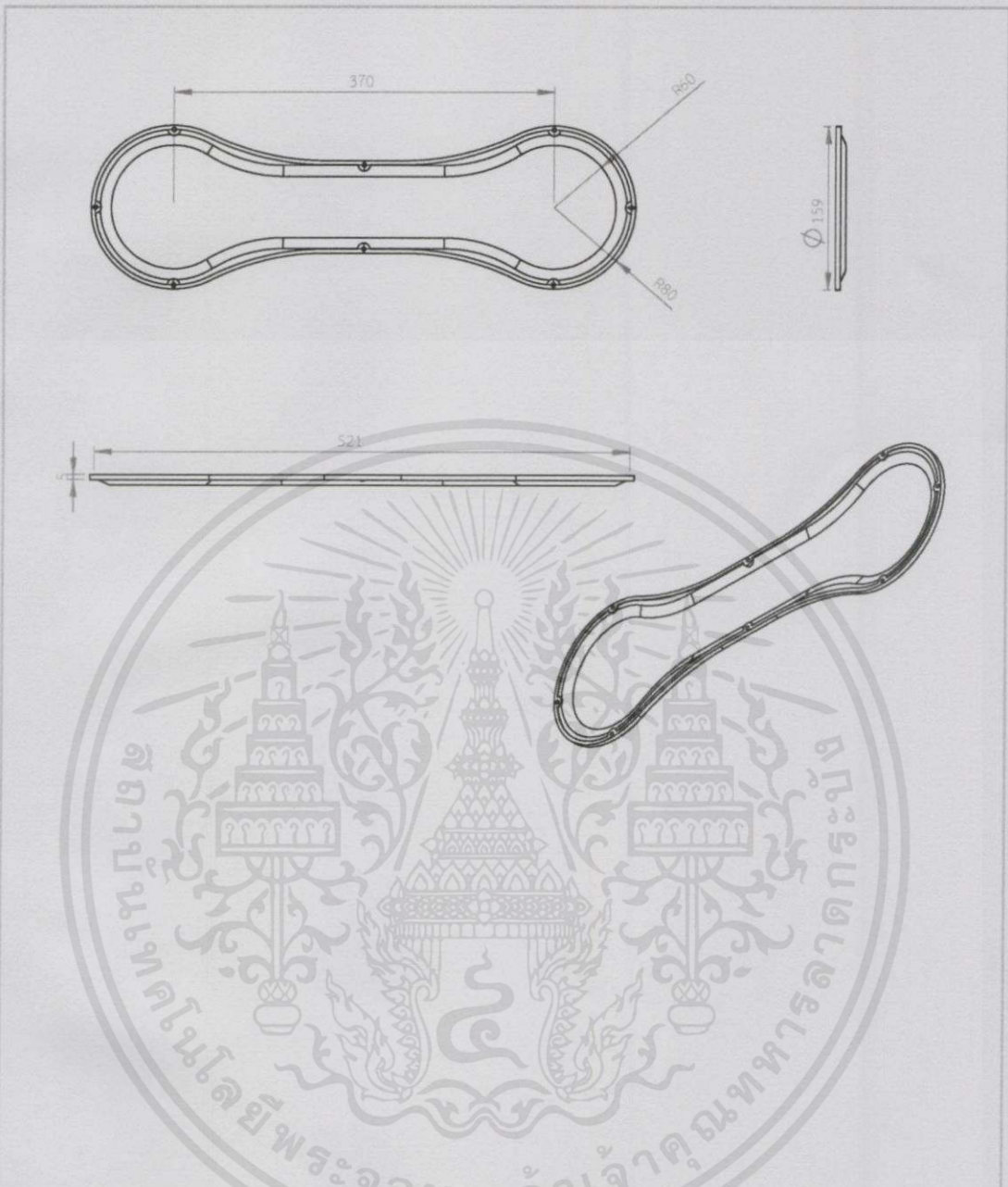


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
DRAWN									
CHK'D									
APP'VD									
MFG									
Q.A				MATERIAL:		DWG NO.:		A4	
				WEIGHT:		SCALE: 1:10		SHEET 1 OF 1	

Arm

A4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION:	
SURFACE FINISH:									
TOLERANCES:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
NAME		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
DRAWN									
CHK'D									
APPR'D									
MFG									
Q.A				MATERIAL:		DWG NO.		A4	
				WEIGHT:		SCALE:1:3		SHEET 1 OF 1	
						sidearm			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้