สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ แบบข้อต่อ 3 แกน
3-AXIS COORDINATE MEASURING MACHINE

T 061790

นางสาวกฤติญา จิตต์แจ้ง
นายกอบศักดิ์ โกวิทยา
นายกังวาล จิตต์อารี

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 61790
วัน,เดือน,ปี 21 ก.ค. 2549

b.....
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ แบบข้อต่อ 3 แกน

3-AXIS COORDINATE MEASURING MACHINE

โดย

นางสาวกฤติญา จิตต์แจ้ง

นายกอบศักดิ์ โกวิทยา

นายกังวาล จิตต์อารี

อาจารย์ที่ปรึกษา

อ.ชนาธิป ชัยดิลกพัฒนกุล

ผศ.ดร.อุณณัติ พิณโสภณ

ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ แบบข้อต่อ 3 แกน

3-AXIS COORDINATE MEASURING MACHINE

ผู้จัดทำ

1. นางสาวกฤติญา จิตต์แจ้ง รหัสประจำตัว 44010633
2. นายกอบศักดิ์ โกวิทยา รหัสประจำตัว 44010637
3. นายกังวาล จิตต์อารี รหัสประจำตัว 44010639

_____ อาจารย์ที่ปรึกษา

(อ.ชนาธิป ชัยดิลกพัฒนกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ แบบข้อต่อ 3 แกน

นางสาวกฤติญา จิตต์แจ้ง 44010633
นายกอบศักดิ์ โกวิทยา 44010637
นายกังวาล จิตต์อารี 44010639
อ.ชนาธิป ชัยดิลกพัฒนกุล อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2547

บทคัดย่อ

โครงงานนี้เป็นการศึกษาและออกแบบสร้างเครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ แบบข้อต่อ 3 แกน เพื่อวัดพิกัด 3 มิติ สำหรับกระบวนการทางด้านวิศวกรรมย้อนกลับ (Reverse Engineering) การศึกษาจะรวมถึงการออกแบบโครงสร้าง กลไก และหลักจลนศาสตร์ (Kinematics) ของแขนกล ที่ปลายสุดของแขนจะมีหัววัดพิกัด ซึ่งการหาตำแหน่งของหัววัดสามารถคำนวณได้โดยการทราบความยาวของแต่ละแขน และมุมของข้อต่อทั้งหมดที่วัดได้จากการแปลงสัญญาณพัลส์ (Pulse) ของออฟติคอลโรตารี่เอนโคดเดอร์ (Optical Rotary Encoder) ที่ติดตั้งในแต่ละข้อต่อ โดยผู้ปฏิบัติงานจะเป็นผู้เคลื่อนย้ายหัววัดไปยังตำแหน่งต่างๆ ที่ต้องการวัดบนชิ้นงานด้วยตนเอง จากนั้นค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะถูกส่งไปคำนวณด้วยวิธีทางจลนศาสตร์ เพื่อให้ได้พิกัดของจุดที่ทำการวัดของชิ้นงานนั้น และแสดงผลลงบนโปรแกรมแลบวิว (LabVIEW) ข้อมูลตำแหน่งพิกัดที่วัดได้สามารถนำไปแสดงผลลงบนโปรแกรมแคด (CAD) ที่ใช้กันทั่วไป เช่น โปรแกรมยูนิกราฟฟิก (Unigraphics) โปรแกรมคาเทีย (CATIA) โปรแกรมโซลิดเอดจ์ (Solid Edge)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3-AXIS COORDINATE MEASURING MACHINE

Miss Krittiya Chittchang	44010633
Mr. Kobsak Kovitaya	44010637
Mr. Kangwan Jitaree	44010639
Mr. Chanathip Chaidilokpatthanakul	Advisor

Abstract

This project is to develop a three-axis articulate machine for three-dimension coordinate measuring. The study includes mechanism design and kinematics design. The coordinate measuring machine is developed for the reverse engineering application. A probe head location can then be calculated by kinematics method which using parameters, the length of each link and the angle at each joint. The high resolution optical rotary encoders are installed at each arm joint are used for measuring each joint angle. Coordinate data are shown on LabVIEW then can be converted to be three dimension model by CAD programming such as Unigraphics, CATIA, Solid Edge.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อ. ชนาธิป ชัยดิลกพัฒนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ผศ.ดร.อุณณัติ พิณโสภณ ดร.มนต์ศักดิ์ พิมสาร ที่ได้กรุณาสละเวลาเพื่อให้คำแนะนำปรึกษา และข้อคิดเห็นต่างๆ ในการทำโครงงานนี้ ขอขอบคุณ คุณสุพจน์ ชอบทำกิจ (ร้านพาวเวอร์ ไลน์) ที่ได้ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับระบบอิเล็กทรอนิกส์ บริษัทจี-พริซิชั่น เอนจิเนียริ่ง จำกัด ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านการสร้างชิ้นงาน คุณสุรศักดิ์ ตรงแสงปัญญา บริษัทเอ็นทีเอ็น แบริ่ง (ประเทศไทย) จำกัด ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับแบริ่ง คุณเจริญ เพชรมุณี บริษัทเนชันเนล อินสตรูเมนท์ ประเทศไทย ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการ์ดประมวลผล และโปรแกรม นายจาตุพล อนันตกุล ที่ให้คำแนะนำในการเขียนแบบ และขอขอบคุณ อาจารย์พร้อมทั้งเพื่อนนักศึกษาที่ได้ร่วมกันให้ข้อคิดเห็น และข้อเสนอแนะต่างๆ พร้อมทั้งยังให้กำลังใจที่ดีแก่กันเสมอมา

สุดท้ายนี้ ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้คงจะไม่มีทางประสบความสำเร็จลงได้ถ้าหากขาดความช่วยเหลือจากบิดามารดาในทุกด้าน ทั้งในด้านข้อคิดเห็นต่างๆ รวมทั้งกำลังใจและความห่วงใยที่อบอุ่นยิ่งที่มีให้เสมอมา และในโอกาสนี้ต้องขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่ได้อบรมเลี้ยงดู พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

		หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย		I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ		II
กิตติกรรมประกาศ		III
สารบัญ		IV
สารบัญตาราง		VI
สารบัญรูปภาพ		VII
บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 ความสำคัญและที่มา	1
	1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย	2
	1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
	1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
	1.5 วิธีการดำเนินงาน	2
บทที่ 2	หลักการของเครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ	4
	2.1 การจำแนกประเภทของ CMMs ในระบบพิกัดฉาก	5
	2.1.1 ซีเอ็มเอ็มในระบบพิกัดแบบคาร์ทีเซี่ยน (Cartesian CMMs)	5
	2.1.2 ซีเอ็มเอ็มที่ไม่ใช้ระบบพิกัดแบบคาร์ทีเซี่ยน (Non-Cartesian CMMs)	9
บทที่ 3	การเลือกใช้วัสดุที่ใช้ในการสร้างเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ (เคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม)	15
	3.1 ประเภทของวัสดุ	15
	3.2 กลุ่มวัสดุที่ใช้ในการสร้างเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ (เคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม)	18
บทที่ 4	ตลับลูกปืน (Bearing)	24
	4.1 การจำแนกและคุณลักษณะเฉพาะของตลับลูกปืน	24
	4.2 ขอบเขตมิติและตัวเลขรหัสของตลับลูกปืน	34
	4.3 การเลือกตลับลูกปืน	38
	4.4 การสวมแน่นตลับลูกปืน	44
บทที่ 5	เอนโคดเดอร์ (Encoder)	45
	5.1 บทนำ	45
	5.2 โรตารี่เอ็นโคดเดอร์ (Rotary Encoder)	45
บทที่ 6	การ์ดรับและประมวลผลสัญญาณจากเอนโคดเดอร์	49
บทที่ 7	การออกแบบ	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		หน้า
	7.1 การหาขนาดความหนาของแขนวัดที่เหมาะสม	52
บทที่ 8	จลนศาสตร์ (Kinematics)	57
	8.1 สมการสำหรับการหาตำแหน่งของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ (เคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม)	63
บทที่ 9	โปรแกรมประมวลผลและเก็บข้อมูล	68
	9.1 โปรแกรมแลบวิว (LabVIEW)	68
	9.2 โปรแกรมประมวลผลและเก็บข้อมูลของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ (เคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม)	71
บทที่ 10	การทดลองและผลการทดลอง	76
	10.1 การทดลองและผลการทดลอง	77
	10.2 ตัวอย่างการใช้งาน	81
บทที่ 11	สรุปผลและข้อเสนอแนะ	83
เอกสารอ้างอิง		
ภาคผนวก		
	ภาคผนวก ก.	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4-1 แสดงอนุกรมหมายเลขของตลับลูกปืน	36
4-2 แสดงสัญลักษณ์ของอนุกรมตลับลูกปืน	37
4-3 แสดงสัญลักษณ์แสดงมุมสัมผัสของตลับลูกปืน	37
4-4 แสดงสัญลักษณ์ช่วยเสริมตัวหน้าของตลับลูกปืน	37
4-5 แสดงสัญลักษณ์ช่วยเสริมตัวหลังของตลับลูกปืน	38
4-6-1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติตลับลูกปืนแต่ละชนิด	40
4-6-2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติตลับลูกปืนแต่ละชนิด	41
4-7 ตารางแสดงการติดตั้งตลับลูกปืน	42
4-8 ตารางเปรียบเทียบค่าความเผื่อของมาตรฐานสากล	43
8-1 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ในระบบจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์พูม่า	61
8-2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่วัดจากแบบ	64
8-3 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเมตริกซ์การแปลง	66
10-1 แสดงชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1-1 กระบวนการวิศวกรรมย้อนกลับ	1
2-1 แสดงเครื่องวัดพิกัดแบบ 3 แกนของบริษัท Brown&Sharpe	4
2-2 ซีเอ็มเอ็มแบบมูฟวิ่งริงบริดจ์ (Moving ring bridge CMM) ของบริษัท Mitutoyo	5
2-3 ซีเอ็มเอ็มแบบฟิกจ์บริดจ์ (Fixed Bridge CMM)ของบริษัท Mitutoyo	6
2-4 ซีเอ็มเอ็มแบบแคนทิลีเวอร์ (Cantilever CMM)	7
2-5 รูปแสดงซีเอ็มเอ็มแบบฮอริซอนทอลอาร์มขณะทำการวัดชิ้นส่วนประตูรถยนต์ของบริษัท Coord 3	7
2-6 รูปแสดงซีเอ็มเอ็มแบบแกนทรี่ของบริษัท WANZEL	8
2-7 หุ่นยนต์สำหรับงานวัดพิกัดในระบบควบคุมการผลิตของบริษัท Mitutoyo	9
2-8 รูปแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดพิกัดระบบไทรเลทเทอเรชั่น	10
2-9 รูปแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดพิกัดระบบทีโอโดไลต์	10
2-10 รูปแสดงหลักการของระบบสเตริโอวิชั่นเพื่อใช้ในการวัดขนาด	11
2-11 รูปแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดพิกัดระบบเลเซอร์แทรคกิ้งแบบ 3 แกน	11
2-12 รูปแสดงหลักการของระบบโมโนไซต์ติ้ง	12
2-13 รูปแสดงหลักการของระบบสตรัคเจอร์ไลท์แบบเลเซอร์สแกนนิ่ง	13
2-14 รูปแสดงระบบวิชั่นเช็คกิ้งของบริษัท Perceptrom, Inc	13
2-15 รูปแสดงเครื่องวัดพิกัดระบบออฟติคอลโรโบติคเกจจิ้ง	14
2-16 แสดงเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบอาร์ติคิวเลทติ้งอาร์มของบริษัท Cimcore	14
3-1 Ashby chart	17
3-2 แสดงวัสดุที่ใช้ในการทำโครงสร้างเครื่องวัดพิกัด 3มิติ(เคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม)	22
4-1 ตลับลูกปืนชนิดต่างๆ	25
4-2 การจำแนกชนิดของตลับลูกปืน	26
4-3 แสดงการจัดเรียงตลับลูกปืนเม็ดกลมสัมผัสเชิงมุมแบบคู่	27
4-4 แสดงลักษณะตลับลูกปืนเม็ดกลมปรับแนวได้เอง	28
4-5 แสดงแนวของจุดร่วมของตลับลูกปืนเม็ดเรียว	30
4-6 ตลับลูกปืนเม็ดเรียวแถวคู่	31
4-7 ตลับลูกปืนเม็ดเรียวสี่แถว	31
4-8 ตลับลูกปืนเม็ดโค้งปรับแนวเองได้	32
4-9 แสดงขอบเขตมิติของตลับลูกปืนแบบต่างๆ	34
4-10 การเปรียบเทียบอนุกรมมิติ (ยกเว้นตลับลูกปืนเม็ดเรียว) สำหรับตลับลูกปืนรับแรงรัศมีที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเดียวกัน	35
5-1 แสดงการแบ่งประเภทของเอนโคดเดอร์	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
5-2 รูปแสดงลักษณะสัญญาณของเอนโคดเดอร์ทั้ง 3 ชนิด	46
5.3 ค่าความละเอียดของตัววัดตำแหน่งแบบต่างๆ	48
5-4 เอนโคดเดอร์ Omron รุ่น E6D-CWZ1E	48
6-1 แสดง เคาท์เตอร์/ไทเมอร์ส เอ็นไอ 6602 (Counter/Timers NI 6602)	49
6-2 รูปแสดงช่องต่อสัญญาณขาเข้าของเคาท์เตอร์/ไทเมอร์ส เอ็นไอ 6602	50
6-3 สายนำสัญญาณรุ่น SH68-68D1	51
6-4 กล่องเชื่อมต่อรุ่น SCB-68	51
7-1 แสดงรูปที่ใช้ในการวิเคราะห์	52
7-2 แสดงแรงกระจายอันเนื่องจากน้ำหนักของแขนวัด	52
7-3 แสดงแรงกระทำที่กดลงส่วนปลายแขนวัด	53
7-4 แสดงโมเมนต์เนื่องจากแรงกดเยื้องศูนย์	53
7-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับค่าความโก่งตัวของแขนวัด	55
7-6 รูปแสดงเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบข้อต่อ 3 แกน (เคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม) ที่สร้างขึ้น	56
8-1 แสดงตัวอย่างการตั้งระบบแกนพิกัด	58
8-2รูปแสดงหุ่นยนต์พูม่าที่ใช้กันในอุตสาหกรรมทั่วๆไป	59
8-3 รูปแสดงตำแหน่งการกำหนดระบบพิกัด (แกนที่1-4) ของแขนหุ่นยนต์พูม่า	60
8-4 รูปแสดงตำแหน่งการกำหนดระบบพิกัด (แกนที่5-6) ของแขนหุ่นยนต์พูม่า	60
8-5 รูปแสดงตำแหน่งของการวัดพารามิเตอร์	64
8-6 รูปแสดงการตั้งระบบแกนพิกัดของข้อต่อทั้ง 3 ของเคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม	65
9-1 รูปแสดงตัวอย่างฟังก์ชันต่างๆ ใน บล็อกไดอะแกรม โดยโปรแกรมแลบวิว	69
9-2 รูปแสดงตัวอย่างเครื่องมือต่างๆ ในฟร๊อน แพนเนล โดยโปรแกรมแลบวิว	69
9-3 รูปแสดงหลักการทำงานของโปรแกรมแลบวิว	70
9-4 รูปแสดงหลักการทำงานของโปรแกรมแลบวิว	71
9-5 รูปแสดงบล๊อกไดอะแกรม ของโปรแกรมประมวลผลและเก็บข้อมูลของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ (เคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม) โดยโปรแกรมแลบวิว	73
9-6 รูปแสดงปุ่มเปิดการใช้งานของโปรแกรม และปุ่มแสดงสถานะโปรแกรมกำลังทำงาน	73
9-7 รูปแสดงฟร๊อน แพนเนล ของโปรแกรมประมวลผลและเก็บข้อมูลของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ (เคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม) โดยโปรแกรมแลบวิว	74
10-1 รูปแสดงตำแหน่งเริ่มต้นของการวัดของเคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม	76
10-2 รูปแสดงแท่งมาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบไมโครมิเตอร์	77
10-3 กราฟการกระจายตัวแบบมาตรฐานของชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	80

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้าที่
10-4 รูปแสดงลักษณะของตัวเครื่องขณะทำการใช้งาน	81
10-5 รูปแสดงเมาส์ที่ใช้ในการทดลอง	81
10-6 รูปแสดงกลุ่มของจุดที่ได้จากการทดลอง	82

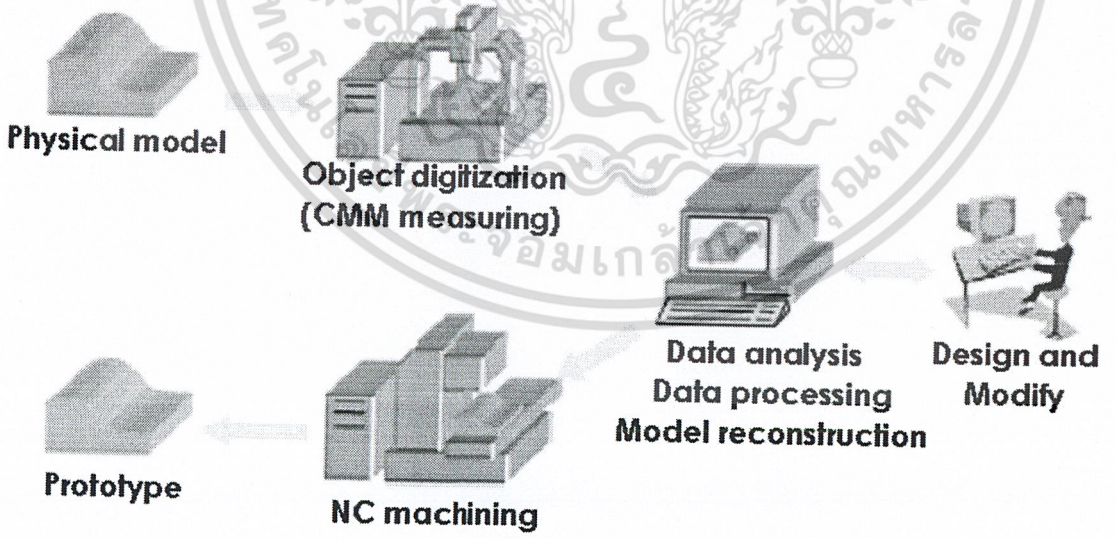
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มา

ความก้าวหน้าของภาคอุตสาหกรรมในปัจจุบันทำให้มีการแข่งขันกันสูง นอกจากการแข่งขันกันทางด้านคุณภาพและราคาแล้ว สิ่งสำคัญอีกสิ่งหนึ่งที่จะขาดไม่ได้คือ ความรวดเร็วในการผลิต ที่สามารถตอบสนองความต้องการของลูกค้าที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างรวดเร็วตลอดเวลา โดยเฉพาะในงานออกแบบสินค้าใหม่ๆให้ตามยุคสมัยได้ทัน

ในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ นักออกแบบจะทำการออกแบบและผลิตผลิตภัณฑ์ต้นแบบออกมา จากนั้นนักออกแบบจะต้องทำการเขียนแบบจากผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่ได้สร้างขึ้น โดยผู้เขียนแบบจะต้องทำการวัดขนาดต่างๆ ของงานต้นแบบ โดยที่ความถูกต้องของแบบจะขึ้นอยู่กับการวัดของผู้เขียนแบบ ซึ่งจะต้องพยายามไม่ให้เกิดความผิดพลาด จากนั้นจึงนำข้อมูลที่วัดได้ไปเขียนแบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการออกแบบ (CAD) ซึ่งในขั้นตอนการเขียนแบบนี้ก็มีความยุ่งยากมาก และต้องใช้ประสบการณ์ในการเขียนระดับหนึ่ง การทำงานด้วยวิธีการนี้จะทำให้เสียเวลาและเกิดความผิดพลาดได้ง่าย วิธีการหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหานี้ได้ก็คือ การวัดพิกัดต่างๆ ของงานต้นแบบด้วยเครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ แล้วจึงนำข้อมูลที่วัดได้นี้ส่งไปยังโปรแกรมแคด เพื่อทำการสร้างแบบ 3 มิติบนคอมพิวเตอร์ ซึ่งเรียกว่ากระบวนการวิศวกรรมย้อนกลับ (Reverse Engineering) ซึ่งจะสามารถลดขั้นตอนและความผิดพลาดต่างๆ ลงได้มาก ทำให้ผู้ผลิตสามารถผลิตสินค้าได้รวดเร็วขึ้น



รูปที่ 1-1 กระบวนการวิศวกรรมย้อนกลับ [7]

การตรวจเช็คคุณภาพ (Quality Control) เป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญในการผลิตสินค้า ซึ่งจะบ่งบอกถึงคุณภาพของสินค้า โดยปกติผู้ตรวจสอบจะทำโดยการวัดชิ้นงานว่าได้อยู่ในช่วงที่ออกแบบไว้หรือไม่ ซึ่งความเที่ยงตรงในการวัดอาจเกิดความผิดพลาดขึ้นได้เนื่องจาก ผู้ตรวจสอบ หรือความเที่ยงตรงของเครื่องมือที่ใช้วัด และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นอกจากนี้ยังทำให้เสียเวลาในการตรวจสอบมากเช่นกัน ถ้าหากใช้เครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ ก็จะทำให้การตรวจสอบมีความเที่ยงตรงมากขึ้น และเป็นการประหยัดเวลาในการทำงานด้วย

ดังนั้นจะเห็นว่าเครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ มีความสำคัญอย่างยิ่งในการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตในปัจจุบัน ซึ่งหากสามารถพัฒนาเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ที่มีความแม่นยำในการใช้งานสูงและราคาไม่สูงมากขึ้นมาใช้เองภายในประเทศ จะเป็นการทำให้อุตสาหกรรมภายในประเทศพัฒนาก้าวหน้ามากยิ่งขึ้นตามไปด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาลักษณะและหลักการทำงานของเครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ แบบแขน (Articulating Arm CMM)

1.2.2 ออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ แบบข้อต่อ 3 แกน

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ แบบข้อต่อ ที่มีแกนการหมุนทั้งหมด 3 แกน โดยการวิเคราะห์โครงสร้างจะใช้การวิเคราะห์การโก่งตัว (Deflection) มาร่วมในการพิจารณาออกแบบด้วย

การคำนวณพิกัดจุดปลายจะใช้หลักทางจลนศาสตร์ (Kinematics) มาทำการวิเคราะห์ และแสดงผลลงบนโปรแกรมแลบวิว (LabVIEW) จากนั้นจะนำข้อมูลตำแหน่งพิกัดที่ได้ไปเข้าโปรแกรมแคดแคม (CAD/CAM) ที่ใช้โดยทั่วไปในอุตสาหกรรม ตัวอย่างเช่น ยูนิกราฟฟิก (Unigraphic) คาเทีย (CATIA) และโปรแกรมโซลิดเอดจ์ (Solid Edge)

นอกจากนั้นในโครงงานนี้ยังถือว่าเป็นโครงการที่ทดลองสร้าง เพื่อทดลองระบบและศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้งาน ดังนั้นจึงมีข้อจำกัดในการสร้างและการใช้ข้อมูลบางอย่างเช่น วัสดุและอุปกรณ์ของเครื่อง จะเลือกใช้ชนิดที่มีราคาไม่สูงมากและสามารถหาได้ตามท้องตลาด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้เครื่องมือวัดชิ้นงาน 3 มิติ ที่มีราคาถูกกว่าการนำเข้าจากต่างประเทศ

1.4.2 ช่วยในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตให้มีคุณภาพมากขึ้น

1.4.3 เป็นพื้นฐานในการพัฒนาความรู้ทางวิศวกรรมต่อไป

1.5 วิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาหลักการทำงานของเครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ แบบต่างๆ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบ
2. ศึกษาหลักการทางจลนศาสตร์ (Kinematic) เพื่อใช้ในการแปลงพิกัดจากระบบพิกัดแบบข้อต่อ (Joint Coordinate) ไปยังระบบแบบคาร์ทีเซี่ยน (Cartesian Coordinate)
3. ออกแบบโปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผลและเก็บค่าของเครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ
4. ออกแบบเครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ
5. ศึกษาการวิเคราะห์การโก่งตัว (Deflection) ของเครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ โดยวิธีทางไฟไนท์อิลิเมนต์ (Finite Element)

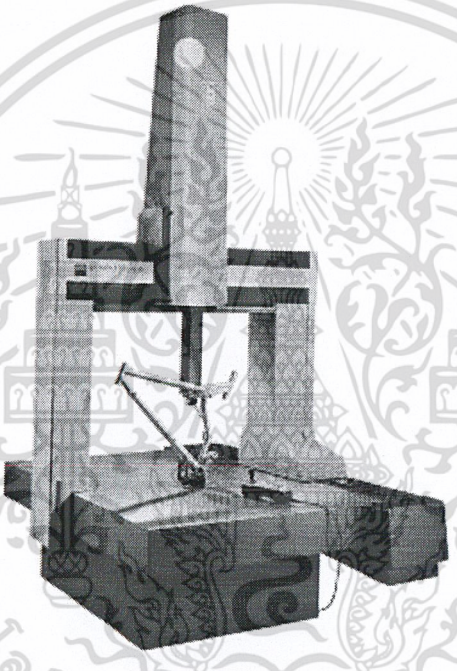
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. สร้างเครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ
7. ศึกษาวิธีการเก็บข้อมูลเพื่อให้สามารถใช้กับโปรแกรมแคดแคม เช่น โปรแกรมยูนิกราฟฟิก (Unigraphics)
8. ทำการทดลองใช้เครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ ที่ได้สร้างขึ้น
9. สรุป และวิเคราะห์ผลการทดลอง
10. เขียนวิทยานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
หลักการของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ

เครื่องวัดพิกัด 3 มิติ(Coordinate Measuring Machines, CMMs) มีลักษณะต่างๆกันมากมาย แต่ที่รู้จักกันโดยทั่วไปได้แก่ เครื่องวัดพิกัดที่เป็นระบบพิกัดฉาก (CMMs with Cartesian Coordinate Systems) กล่าวคือในการวัดพิกัดของเครื่องวัดพิกัดในระบบพิกัดฉากจะอาศัยการอ่านตำแหน่งของตัวเครื่องเอง ซึ่งอาจจะมีหลายแกน แต่ละแกนก็จะตั้งฉากซึ่งกันและกัน เช่นเครื่องวัดพิกัดแบบ 3 แกน ก็จะมีแกน X, Y, Z ดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 แสดงเครื่องวัดพิกัดแบบ 3 แกนของบริษัท Brown&Sharpe [21]

ซีเอ็มเอ็มประกอบด้วยส่วนที่เป็นโครงสร้าง (Hardware) และส่วนที่เป็นโปรแกรมทำงาน (Software) ส่วนที่เป็นโปรแกรมทำงานจะทำหน้าที่ติดต่อสื่อสารกับผู้ใช้ เช่น รับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ การตรวจสอบสถานะของโครงสร้าง ทำการคำนวณหาพิกัด เป็นต้น

2.1 การจำแนกประเภทของ CMMs โดยระบบพิกัดฉาก [1]

ซีเอ็มเอ็มนั้นหมายถึงเครื่องที่สามารถวัดและบอกพิกัดฉาก 3 มิติ ในระบบพิกัดแบบคาร์ทีเซี่ยน (Cartesian Coordinate System) ได้โดยการเคลื่อนที่ของแกนเครื่องมือซึ่งเคลื่อนที่ตั้งฉากกัน นอกจากนั้นยังมีซีเอ็มเอ็มบางประเภทที่สามารถวัดและบอกพิกัดฉาก 3 มิติได้เช่นเดียวกัน แต่แกนของเครื่องไม่ได้เคลื่อนที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ในที่นี้จึงแบ่งประเภทของซีเอ็มเอ็มตามระบบพิกัดของตัวเครื่องออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

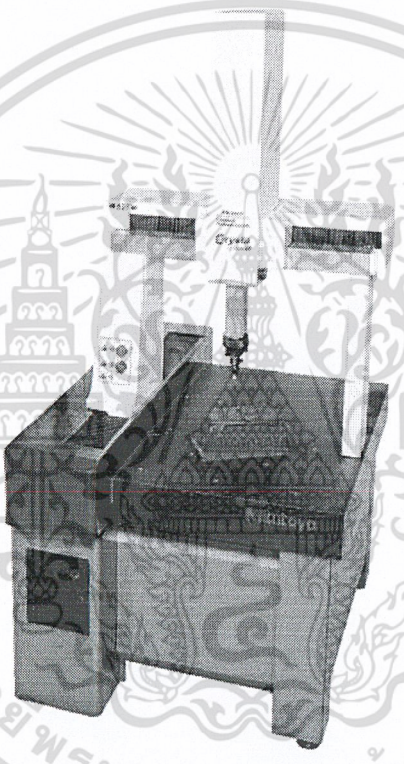
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ซีเอ็มเอ็มในระบบพิกัดแบบคาร์ทีเซี่ยน (Cartesian CMMs)

เป็นซีเอ็มเอ็มที่มีแกนของเครื่องเคลื่อนที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน 3 แกน ทำให้สามารถวัดพิกัดฉาก 3 มิติ ในระบบคาร์ทีเซี่ยนได้โดยตรง ซึ่งก็ยังมีรูปแบบต่างๆกันอีกตามลักษณะโครงสร้าง และคุณลักษณะของเครื่องดังเช่น ค่าความถูกต้อง (Accuracy) ความยืดหยุ่นในการใช้งาน (Flexibility) เวลาที่ใช้ในการวัดและราคา โดยแบ่งได้ดังนี้

2.1.1.1 มูฟวิ่งบริดจ์ (Moving Bridge)

เป็นรูปแบบโครงสร้างของซีเอ็มเอ็มที่แพร่หลายที่สุด โดยตัวเครื่องจะมีแท่นรองรับชิ้นงานที่จะทำการวัดพิกัดยึดแน่นอยู่กับที่แล้วตัวแกนของเครื่องจะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งต่างๆของชิ้นงาน โดยตัวแกนเครื่องจะมีลักษณะดังรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 ซีเอ็มเอ็มแบบมูฟวิ่งริงบริดจ์ (Moving ring bridge CMM) ของบริษัท Mitutoyo [16]

จะเห็นว่าลักษณะแกนของเครื่องคล้ายกับสะพาน ซึ่งจะทำให้เกิดการบิดตัวของแกนได้หากเสาทั้ง 2 เคลื่อนที่ไม่เท่ากันส่งผลให้ค่าความถูกต้องของเครื่องที่ตำแหน่งต่างๆ ของแท่นรองชิ้นงานไม่เท่ากัน แต่ลักษณะโครงสร้างแบบนี้มีประโยชน์คือ ตัวโครงสร้างจะมีลักษณะแข็งแรง และทำให้มีค่าความถี่ธรรมชาติของเครื่องสูงกว่าโครงสร้างแบบแคนทิลีเวอร์ (Cantilever)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1.2 ฟิกจ์บริดจ์ (Fixed Bridge)

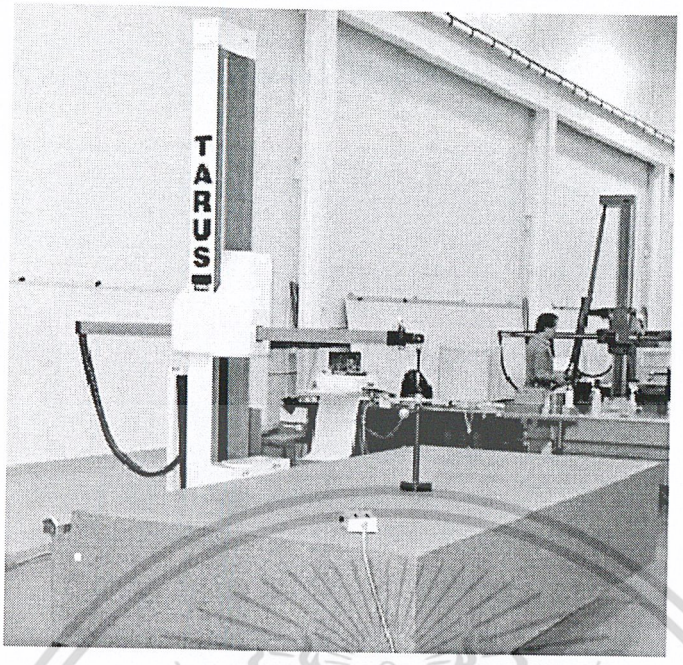
สำหรับโครงสร้างแบบนี้จะมีความแตกต่างกับแบบแรก คือ ตัวแกนของเครื่องที่มีลักษณะคล้ายสะพานจะยึดแน่นอยู่กับที่ ส่วนตัวแท่นรองรับชิ้นงานจะสามารถเคลื่อนที่ได้แทนดังรูปที่ 2.3 โครงสร้างแบบนี้มีข้อดีคือ โครงสร้างของเครื่องมีความแข็งเกร็ง (Rigid) สูง และเนื่องจากตัวแกนถูกยึดอยู่กับที่ทำให้ไม่เกิดการบิดตัวของโครงสร้างส่งผลให้โครงสร้างแบบนี้มีค่าความถูกต้องในการวัดสูง แต่มีข้อเสียคือความเร็วในการทำงานต่ำ เนื่องจากจะต้องเคลื่อนตำแหน่งของแท่นรองรับชิ้นงาน ซึ่งมีน้ำหนักมากและยังมีข้อจำกัดในเรื่องน้ำหนักของชิ้นงานที่จะนำมาทำการวัด

รูปที่ 2-3 ซีเอ็มเอ็มแบบฟิกจ์บริดจ์ (Fixed Bridge CMM)ของบริษัท Mitutoyo[16]

2.1.1.3 แคนทิลีเวอร์ (Cantilever)

โครงสร้างแบบนี้จะมีคานเคลื่อนที่ เพียงหนึ่งแนวแกนและจะทำหน้าที่รองรับอีกสองแกนที่เหลือดังแสดงในรูปที่ 2-4 โดยทั่วไปแล้วด้วยโครงสร้างลักษณะนี้จะทำให้โครงสร้างที่ต้องมีการเคลื่อนที่มีน้ำหนักน้อยจึงทำให้สามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว ไม่ว่าจะเป็นการวัดโดยผู้ปฏิบัติงานหรือโดยการควบคุมผ่านคอมพิวเตอร์โดยตรง (Direct Computer Control) อีกทั้งยังสามารถเข้าถึงชิ้นงานได้ดี เนื่องจากโครงสร้างเป็นแบบเปิด 3 ด้าน (มีคานเป็นโครงสร้างเพียงด้านเดียว) แต่ก็มีข้อเสียคือการแอ่นเนื่องจากโครงสร้างที่เป็นแบบคาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตำแหน่งที่แกนยืดออกสุด ซึ่งทำให้ความถี่ธรรมชาติของตัวเครื่องมีค่าต่ำเป็นข้อจำกัดทำให้เครื่องมีขนาดเล็ก ดังนั้นโดยทั่วไปโครงสร้างแบบนี้จะมีแท่นรองรับชิ้นงานที่ยาว แต่จะมีช่วงการใช้งานในอีกสองแกนที่เหลือต่ำมาก โครงสร้างแบบนี้จึงเหมาะกับชิ้นงานที่มีลักษณะบางแต่ยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-4 ซีเอ็มเอ็มแบบแคนทิลีเวอร์ (Cantilever CMM)[22]

2.1.1.4 ฮอริซอนทอลอาร์ม (Horizontal Arm)

เป็นซีเอ็มเอ็มที่มีลักษณะโครงสร้างของเครื่อง เหมาะสำหรับใช้ในงานวัดพิกัดชิ้นส่วนรถยนต์มากที่สุด โดยลักษณะโครงสร้างของเครื่องจะมีลักษณะคล้ายกับซีเอ็มเอ็มแบบแคนทิลีเวอร์ แต่แกนของหัววัดจะสามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวระดับแทน ดังรูปที่ 2-5 จึงทำให้ซีเอ็มเอ็มแบบนี้สามารถเกิดการแอ่นของโครงสร้างได้เช่นเดียวกับโครงสร้างแบบแคนทิลีเวอร์

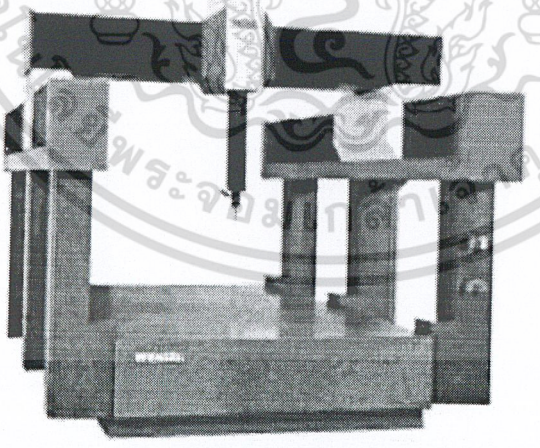
รูปที่ 2-5 รูปแสดงซีเอ็มเอ็มแบบฮอริซอนทอลอาร์มขณะทำการวัดชิ้นส่วนประตูรถยนต์ของบริษัท Coord 3[23]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของซีเอ็มเอ็มชนิดนี้คือ ความสามารถในการเข้าถึงชิ้นงานมาก โดยเฉพาะความรวดเร็วในการทำงาน อันเป็นจุดเด่นของโครงสร้างแบบนี้ แต่มีข้อเสียอันเนื่องมาจากการแอ่นตัวของโครงสร้างจึงทำให้มีข้อจำกัดในเรื่องของค่าความถูกต้อง อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการปรับปรุงแก้ไขจุดบกพร่องเหล่านี้ให้หมด ดังเช่นการถ่วงสมดุลให้กับตัวโครงสร้างเพื่อลดการแอ่นของคาน และการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาใช้แก้ไขค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยการชดเชย (Compensate) ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการแอ่นตัวของคาน

2.1.1.5 ซีเอ็มเอ็มแบบแกนทรี่ (Gantry CMM)

เป็นซีเอ็มเอ็มที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ที่สุดเหมาะสำหรับวัดชิ้นงานที่มีขนาด 10 ลูกบาศก์เมตรขึ้นไป ตัวโครงสร้างฐานของเครื่องจะได้รับการออกแบบให้มีขนาดใหญ่ และมีความแข็งแรงมากเพื่อลดการเกิดการบิดตัวของโครงสร้างในส่วนที่ใช้สำหรับการวัดตำแหน่ง นอกจากลดการบิดตัวแล้วโครงสร้างฐานของเครื่องยังจำเป็นที่จะต้องแข็งแรงเพียงพอที่จะสามารถรองรับน้ำหนักของชิ้นงานขนาดใหญ่ได้โดยไม่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดขึ้น ดังรูปที่ 2-6 และ 2-7 ในการหลีกเลี่ยงการเกิดการบิดในแกน ยอว์ (Yawing) ของคานเคลื่อนที่ ระบบขับเคลื่อนร่วม (Dual Drive Systems-Master and Slave Configuration) มักจะเป็นระบบที่ถูกนำมาใช้มากที่สุด อีกทั้งยังมีการนำโปรแกรมสำหรับแก้ไขความผิดพลาดของรูปทรง ลักษณะโครงสร้างอันเนื่องมาจากการติดตั้งโครงสร้างฐานของเครื่องและผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ



รูปที่ 2-6 รูปแสดงซีเอ็มเอ็มแบบแกนทรี่ของบริษัท WANZEL [18]

2.1.1.6 ซีเอ็มเอ็มระบบพิกัดฉากแบบอื่นๆ

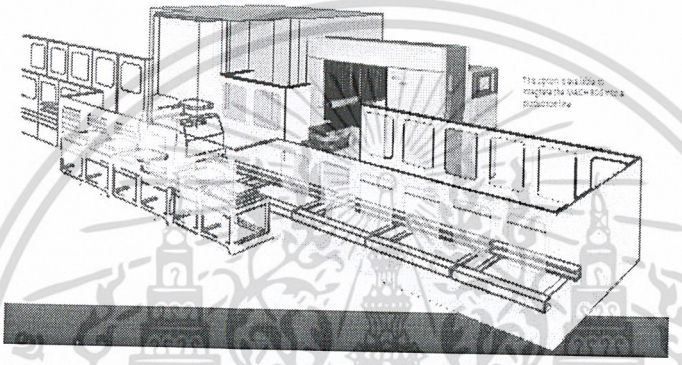
โครงสร้างแบบคอลัมน์ (Column Configuration CMMs) การเคลื่อนที่ในแนวระดับจะเคลื่อนโดยตัวแท่นรองรับชิ้นงาน ส่วนการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งจะได้จาการเคลื่อนที่โดยใช้เสาซึ่งยึดแน่นอยู่กับที่จึงมีความแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกร็งในแนวดิ่งสูง ทำให้โครงสร้างแบบนี้มีความแม่นยำในการวัดสูง แต่ด้วยโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นตัวซี (Open C Section) จึงทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัดจากผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมาก ดังนั้นซีเอ็มเอ็มประเภทนี้จึงมักใช้งานอยู่ภายในห้องควบคุมอุณหภูมิมากกว่าที่จะนำไปใช้อยู่ร่วมกับสายการผลิต

โครงสร้างแบบตัวแอล (L-Shaped Bridge Configuration) เป็นโครงสร้างที่ดัดแปลงมากจากโครงสร้างแบบคาน โดยมีการเพิ่มขาสำหรับรองรับปลายแกนของเครื่องในฝั่งตรงข้าม แต่ถึงแม้จะมีการเพิ่มการรองรับมากขึ้น ซีเอ็มเอ็มแบบนี้ก็ยังมีความเร็วในการทำงาน และความถี่ธรรมชาติต่ำ

ยังมีซีเอ็มเอ็มอีกชนิดซึ่งมักถูกเรียกว่า หุ่นยนต์สำหรับงานวัดพิกัด (Measuring Robot) คุณลักษณะของเครื่องวัดแบบนี้คือมีความเร็วในการวัดสูง และมักจะใช้ร่วมอยู่ในสายการผลิต (รูปที่ 2-7)



รูปที่ 2-7 หุ่นยนต์สำหรับงานวัดพิกัดในระบบควบคุมการผลิตของบริษัท Mitutoyo [16]

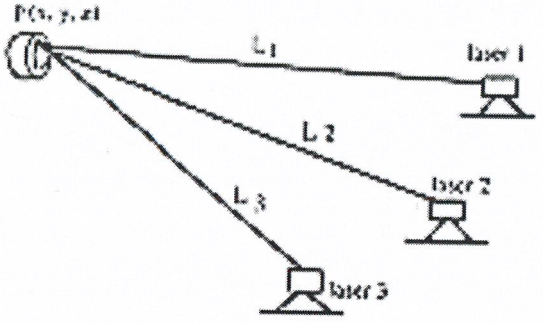
2.1.2 ซีเอ็มเอ็มที่ไม่ใช้ระบบพิกัดแบบคาร์ทีเซี่ยน (Non-Cartesian CMMs)

เครื่องวัดพิกัดประเภทให้ค่าพิกัดเป็นระบบพิกัดฉาก โดยไม่มีแกนเคลื่อนที่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน ในที่นี้จะแบ่งซีเอ็มเอ็มประเภทนี้ออกเป็นแบบต่างๆ ดังนี้ ไทรเลทเทอเรชั่น (Trilateration) ไทรแองกูเลชั่น (Triangulation) โมโนไซต์ติ้ง (Mono-sighting) สตรัคเจอร์ ไลท์ (Structured Light) และอาร์ติคิวเลทติ้งอาร์มแมชชีน (Articulating Arm Machines) หากเปรียบเทียบกับซีเอ็มเอ็มในระบบพิกัดฉากแล้ว ซีเอ็มเอ็มประเภทนี้จะมีค่าความถูกต้องต่ำกว่า

2.1.2.1 ระบบไทรเลทเทอเรชั่น (Trilateration System)

ไทรเลทเทอเรชั่นเป็นวิธีในการหาตำแหน่งโดยวัดความยาวในแนวรัศมีด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟโรมิเตอร์ (Laser Interferometer) ในการวัดตำแหน่งจุดใน 3 มิติ จำเป็นจะต้องใช้เทรคกิ้งเลเซอร์อินเตอร์เฟโรมิเตอร์ (Tracking Laser Interferometer) อย่างน้อย 3 ตัวเพื่อโฟกัสไปยังไวด์แองเกิ้ลรีโทรรีเฟรคเตอร์ (Wide-Angle Retroreflector) หรือที่เรียกอีกอย่างว่าแคทส์อาย (Catseye) ดังในรูปที่ 2-8 ซึ่งตัวแคทส์อายนี้ถูกติดตั้งอยู่บนวัตถุที่ต้องการจะวัดขนาดพิกัด ซีเอ็มเอ็มชนิดนี้จะเหมาะสำหรับงานวัดพิกัดชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่มากๆ เช่นลำตัว และปีกเครื่องบิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-8 รูปแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดพิกัดระบบไทรเลทเทอเรชั่น [1]

2.1.2.2 ระบบไทรแองกูเลชั่น (Triangulation System)

ในที่นี้จะแบ่งซีเอ็มเอ็มในระบบนี้ออกเป็นระบบทีโอโดไลต์ (Theodolite Systems) และระบบแบบสเตริโอวิชั่น (Stereo-Vision Systema) ดังนี้

2.1.2.2.1 ระบบทีโอโดไลต์ (Theodolite Systems)

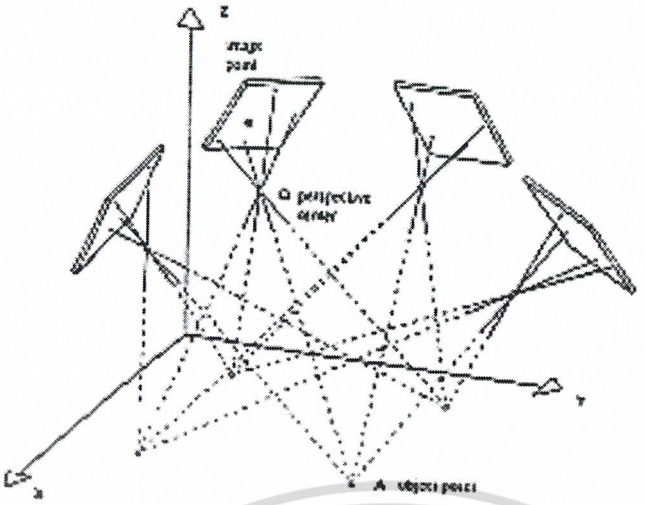
ระบบนี้ได้ริเริ่มมาจากอุปกรณ์ และงานทางด้านการสำรวจ โดยมีหลักการพื้นฐานคือใช้กล้องสำรวจ 2 ตัว ส่องไปยังจุดที่ต้องการหาพิกัด แล้วนำมุม 2 มุมที่เกิดจากกล้องส่องแต่ละตัวมาคำนวณหาพิกัดของจุดที่ต้องการวัด ดังในรูปที่ 2-9 นอกจากการวัดตำแหน่งโดยระบบแมนนวล (Manual) แล้ว ยังมีการติดตั้งอุปกรณ์ขับเคลื่อนกล้องพร้อมทั้งใช้กล้องซีซีดี (CCD) ในการวิเคราะห์ภาพร่วมกัน เพื่อทำการวัดชิ้นงานโดยอัตโนมัติ

รูปที่ 2-9 รูปแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดพิกัดระบบทีโอโดไลต์ [1]

2.1.2.2.2 สเตริโอวิชั่น หรือโฟโตแกรมเมททรี่ (Stereo Vision or Phoyogrammetry)

สเตริโอวิชั่น จะใช้กล้องถ่ายรูปอย่างน้อย 2 ตัว ถ่ายภาพเดียวกัน แต่ถ่ายจากคนละมุมมอง ภาพที่ได้จึงมีความเหลื่อม (Offsets) แบบสัมพัทธ์กันไปในแต่ละภาพที่ถ่ายได้ ดังแสดงในรูปที่ 2-10 แล้วจึงนำค่าความเหลื่อมที่ได้มาคำนวณหาข้อมูลค่าความลึก หรือระยะของวัตถุที่ต้องการวัดชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



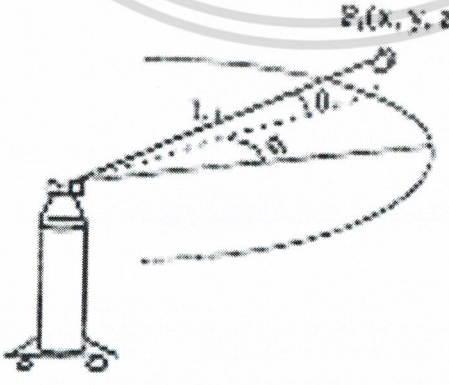
รูปที่ 2-10 รูปแสดงหลักการของระบบสเตริโอวิชั่นเพื่อใช้ในการวัดขนาด [1]

2.1.2.3 ระบบโนโนไซติ้ง (Mono-Sighting Systems)

ในส่วนนี้จะขอกล่าวถึงซีเอ็มเอ็มประเภทนี้เพียง 3 ชนิดเท่านั้น ได้แก่ เลเซอร์แทรคเกอร์ (Laser-Tracker) เลเซอร์เรดาร์ (Laser Radar) และระบบอินฟราเรดเรนจิ้ง (Infrared Ranging Systems)

2.1.2.3.1 ระบบเลเซอร์แทรคกิ้ง (Laser Tracking System)

ระบบเลเซอร์แทรคกิ้งนั้นจะมีเซอร์โว (Servo System)ทำหน้าที่ ในการติดตามตำแหน่งวัตถุโดยอัตโนมัติ ระบบนี้จะประกอบไปด้วยตัวติดตาม ตำแหน่งวัตถุ หรือแทรคกิ้งเฮด (Tracking Head) หนึ่ง หรือสองตัว และจะใช้ตัวรีโทรรีเฟรคเตอร์ แบบแคทส์อาย (Cateye Retroreflector) เพื่อบอกตำแหน่งของวัตถุ หรืออาจจะใช้ชุดมอเตอร์ไรซ์มิเนเจอร์ไรซ์แทรคกิ้งทาร์เก็ต (Motorized Miniaturized Tracking Target) แทน ซึ่งสามารถเป็นได้ทั้งตัวบอกตำแหน่ง และตัวบอกโอเรียนเทชั่น (Orientation) ของวัตถุ โดยระบบพิกัดที่วัดได้จากเครื่องชนิดนี้จะเป็นระบบพิกัดแบบทรงกลม (Spherical Coordinate System) ดังแสดงในรูปที่ 2-11 จากนั้นจึงทำการแปลงข้อมูลให้กลายเป็นตำแหน่งในระบบพิกัดฉาก



รูปที่ 2-11 รูปแสดงหลักการทำงานของเครื่องวัดพิกัดระบบเลเซอร์แทรคกิ้งแบบ 3 แกน [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.3.2 ระบบเลเซอร์เรดาร์แบบไทม์ออฟไฟล์ท (Laser Radar, Time-of-Flight System)

ในการวัดพื้นผิวของวัตถุแบบ 3 มิติ ยังสามารถวัดได้โดยใช้เทคนิคเลเซอร์เรดาร์ซึ่งใช้หลักการไทม์ออฟไฟล์ท โดยมีวิธีการพื้นฐานในการวัดอยู่ 2 วิธีคือ หนึ่ง วัดระยะโดยการวัดระยะเวลาที่ลำแสงเดินทางจากแหล่งกำเนิดไปยังวัตถุทั้งขาไปและกลับแล้วนำมาคำนวณหาระยะทาง ส่วนวิธีที่สองคำนวณระยะทางจากความแตกต่างเฟสของลำแสงที่สะท้อนกลับมากับลำแสงที่ออกจากแหล่งกำเนิด

2.1.2.3.3 ระบบอินฟราเรดเรนจิ้ง (Infrared Ranging System)

เป็นระบบที่พัฒนามาจากระบบทีโอโดไลต์ โดยใช้ระบบการคำนวณหาพิกัดคล้ายกับระบบเลเซอร์แทรคกิ้งแบบ 3 แกน แต่จะไม่มีระบบเซอร์โวในการจับตำแหน่งอัตโนมัติ ต้องให้ผู้ปฏิบัติงานเป็นผู้จับตำแหน่งวัตถุด้วยตนเอง ดังในรูปที่ 2-12

รูปที่ 2-12 รูปแสดงหลักการของระบบโมโนไซต์ติ้ง [1]

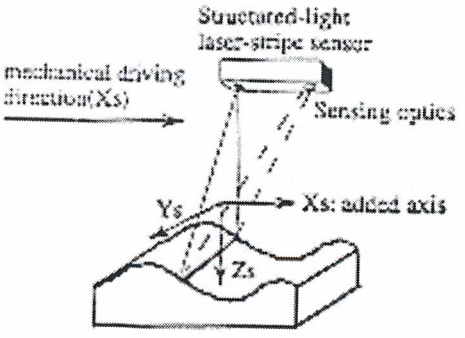
2.1.2.4 ระบบสตรัคเจอร์ไลท์ (Structured-Light Systems)

ระบบที่จัดอยู่ในซีเอ็มเอ็มประเภทนี้ได้แก่ เลเซอร์สแกนนิ่ง (Laser-Scanning) วิชั่นเช็คกิ้ง (Vision Checking) และระบบออฟติคอลโรโบติคเกจจิ้ง (Optical-Robotic Gauging Systems)

2.1.2.4.1 ระบบเลเซอร์สแกนนิ่ง (Laser Scanning Systems)

ระบบนี้จะทำการวัดหาพื้นที่ผิวของวัตถุใน 3 มิติได้โดยใช้วิธีแอคทีฟไลท์ติ้ง (Active Light Method) เพื่อสร้างภาพจากแสงซึ่งรู้ค่าของมุมที่ฉายไปยังวัตถุ แล้วนำภาพที่ได้มาคำนวณเพื่อหาตำแหน่งพิกัดของวัตถุ ดังแสดงในรูปที่ 2-13

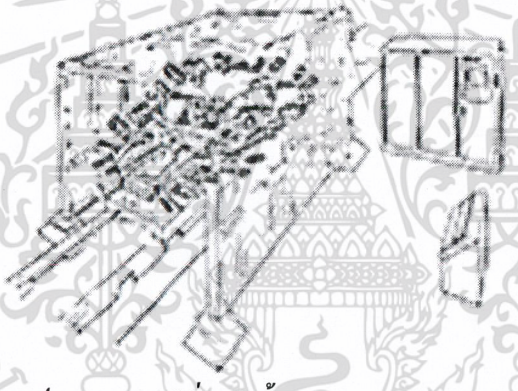
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-13 รูปแสดงหลักการของระบบสตรัคเจอร์ไลท์แบบเลเซอร์สแกนนิ่ง [1]

2.1.2.4.2 ระบบวิชั่นเช็คกิ้ง (Vision Checking System)

ระบบนี้เป็นระบบที่ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตตัวถังรถยนต์ โดยไม่มีชิ้นส่วนใดๆ ของเครื่องเคลื่อนไหว แต่จะทำการวัดพิกัดด้วยการใช้ระบบเลเซอร์ไทรแองกูเลชั่น (Laser Triangulation) ซึ่งถูกยึดติดอยู่กับที่หลายๆ ตัว เพื่อทำการวัดพิกัดชิ้นส่วนต่างๆ ของตัวถังรถยนต์ที่ตำแหน่งต่างๆ กัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2-14

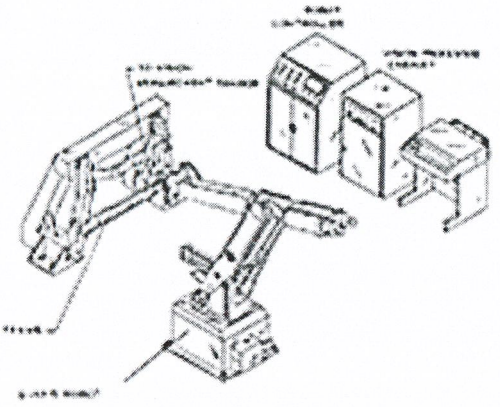


รูปที่ 2-14 รูปแสดงระบบวิชั่นเช็คกิ้งของบริษัท Perceptrom, Inc. [1]

2.1.2.4.3 ระบบออฟติคอลโรโบติคเกจจิ้ง (Optical Robotic Gauging System)

ระบบนี้จะประกอบด้วยตัวหุ่นยนต์อุตสาหกรรม และตัวฟิกเจอร์ (Fixture) ที่ใช้สำหรับจับยึดชิ้นงานที่จะทำการตรวจวัด ดังแสดงในรูปที่ 2-15 ซีเอ็มเอ็มชนิดนี้จะเหมาะสำหรับงานตรวจวัดที่เป็นชิ้นส่วนโลหะแผ่น หลักการทำงานของเครื่องคือจะหาพิกัดต่างๆ ของชิ้นส่วนด้วยทรีดีสตรัคเจอร์ไลท์วิชั่นเซนเซอร์ (3D Structured Light Vision Sensor) ที่ติดตั้งอยู่ปลายแขนของตัวหุ่นยนต์ การทำงานจะเป็นไปโดยอัตโนมัติ ดังนั้นค่าความถูกต้องของเครื่องจึงขึ้นอยู่กับค่าความถูกต้องของตัวทรีดีสตรัคเจอร์ไลท์วิชั่นเซนเซอร์และตัวหุ่นยนต์ประกอบเข้าด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-15 รูปแสดงเครื่องวัดพิกัดระบบออฟติคอลโรโบติคเกจจิ้ง [1]

2.1.2.5 ระบบแบบอาร์ติคิวเลทติ้งอาร์ม (Articulating Arm Systems)

ระบบนี้จะใช้ชุดของแขนกลซึ่งมีค่าองศาความอิสระเท่ากับ 6 (Six-Degrees-of-Freedom Linkage Arm) ดังแสดงในรูปที่ 2-16 ค่าพิกัดต่างๆได้จากพรีซิชั่นโรตารี่ทรานส์ดิวเซอร์ (Precision Rotary Transducers) ที่ติดอยู่ภายในทุกข้อต่อเพื่อใช้ในการวัดตำแหน่งของตัวแขนกล แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาตำแหน่งของหัววัด (Probe) โดยการใช้หลักการทางจลนศาสตร์ (Kinematics) ของแขนกล โดยผู้ปฏิบัติงานจะเป็นผู้เคลื่อนย้ายหัววัดไปยังตำแหน่งต่างๆ บนชิ้นงานด้วยตนเอง ปริมาตรการวัดของตัวเครื่องแบบนี้จะเป็นทรงกลมที่มีรัศมีเท่ากับความยาวของตัวแขนกล แต่ก็อาจจะมีบางข้อจำกัดในปริมาตรการวัดอันเนื่องมาจากทั้งคอนฟิกกูเลชั่น (Configuration) ของตัวแขนกล และลักษณะการติดตั้งขณะใช้งานของตัวแขน ค่าความถูกต้องของซีเอ็มเอ็มประเภทนี้จะไม่สามารถนำไปเปรียบเทียบกับซีเอ็มเอ็มแบบพิกัดฉากได้เลย เนื่องจากค่าความถูกต้องของซีเอ็มเอ็มชนิดนี้จะค่อนข้างต่ำกว่ามาก แต่มีข้อดีที่แตกต่างจากซีเอ็มเอ็มระบบพิกัดฉาก คือสามารถเคลื่อนย้ายได้โดยสะดวก จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ปฏิบัติงานนอกสถานที่ หรือนำไปใช้ร่วมอยู่ในระบบการผลิต อีกทั้งชิ้นงานที่จะทำการวัดก็ไม่จำเป็นต้องนำมาติดตั้งบนแท่นรองรับชิ้นงานของเครื่อง จึงมีประโยชน์มากสำหรับการวัดชิ้นงานที่มีความยากลำบากในการเคลื่อนย้ายหรือไม่สามารถนำมาติดตั้งบนแท่นรองรับชิ้นงานได้โดยสะดวก

รูปที่ 2-16 แสดงเครื่องวัดพิกัด 3 มิติแบบอาร์ติคิวเลทติ้งอาร์มของบริษัท Cimcore [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การเลือกใช้วัสดุที่ใช้ในการสร้างเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ(เคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม)

วัสดุ หมายถึง สสารที่ทำขึ้นหรือประกอบขึ้นจากบางสิ่งบางอย่าง ตั้งแต่เริ่มอารยธรรมขึ้น มนุษย์เรารู้จักการนำวัสดุและพลังงานมาใช้ปรับระดับความเป็นอยู่ให้ดีขึ้นตามลำดับ ตามจริงแล้วแล้ววัสดุอยู่รอบๆตัวเรา เพราะผลิตภัณฑ์หรือผลผลิตทุกอย่างทำขึ้นจากวัสดุทั้งสิ้น วัสดุที่มักพบใช้กันอยู่เสมอคือ ไม้ คอนกรีต เหล็กกล้า พลาสติก แก้ว ยาง อลูมิเนียม ทองแดง และกระดาษ ถ้าเราหันไปมองรอบๆ จะพบว่ามีวัสดุอยู่มามายหลายชนิดเกินกว่าที่เราจะคาดคิด เพราะการพัฒนาและการวิจัยอย่างต่อเนื่องทำให้มีวัสดุใหม่เกิดขึ้นตลอดเวลา

เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาวัสดุทางวิศวกรรมมักแบ่งเป็นประเภทใหญ่ได้ 3 ประเภทคือ โลหะ พอลิเมอร์ (พลาสติก) และเซรามิก ในที่นี้จะกล่าวถึงความแตกต่างระหว่างวัสดุทั้งสามตามสมบัติที่สำคัญเชิงกล ไฟฟ้า และฟิสิกส์ นอกจากวัสดุทั้งสามประเภทที่กล่าวมาแล้วยังมีวัสดุที่สำคัญอีกสองกลุ่มคือ วัสดุผสมและวัสดุอิเล็กทรอนิกส์ด้วย เพราะทั้งสองกลุ่มหลังนี้มีความสำคัญทางวิศวกรรมมาก

3.1 ประเภทของวัสดุ [4]

3.1.1 วัสดุประเภทโลหะ

วัสดุประเภทนี้เป็นอนินทรีย์สารที่มีธาตุที่เป็นโลหะประกอบอยู่อย่างน้อยหนึ่งธาตุและบางครั้งอาจมีธาตุที่ไม่ใช่โลหะบางชนิดเจือปนด้วย ตัวอย่างของธาตุที่เป็นโลหะเช่น เหล็ก ทองแดง อลูมิเนียม นิกเกิลและไทเทเนียม ธาตุที่ไม่ใช่โลหะเช่น คาร์บอน ไนโตรเจน และออกซิเจน ซึ่งอาจปนอยู่ในโลหะได้ โครงสร้างของโลหะมีรูปผลึกนั่นคือ อะตอมมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ โดยปกติโลหะเป็นสื่อนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดี โลหะหลายชนิดที่แข็งแรงและอ่อนเหนียว (Ductile) ที่อุณหภูมิห้อง และหลายชนิดที่คงความแข็งแรงได้ดีแม้ที่อุณหภูมิสูง

โลหะและโลหะผสมมักแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ โลหะที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบและโลหะผสม (หรืออาจเรียกว่าโลหะในกลุ่มเหล็ก) หมายถึงโลหะที่มีเปอร์เซ็นต์องค์ประกอบที่เป็นเหล็ก เช่น เหล็กกล้าและเหล็กหล่อ และอีกประเภทหนึ่งคือโลหะที่ไม่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบและโลหะผสม (หรือเรียกว่าโลหะนอกกลุ่มเหล็ก) หมายถึงโลหะที่ไม่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบหรือมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้นที่ประกอบอยู่ เช่น อลูมิเนียม ทองแดง สังกะสี ไทเทเนียม และนิกเกิล

3.1.2 วัสดุประเภทพอลิเมอร์ (พลาสติก)

พอลิเมอร์ส่วนใหญ่เป็นอินทรีย์สาร (มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ) โมเลกุลเป็นลูกโซ่ยาวหรือร่างแห โดยโครงสร้างแล้ว พอลิเมอร์ส่วนใหญ่ไม่มีรูปผลึก แต่บางชนิดมีโครงสร้างทั้งเป็นรูปผลึกและไม่เป็นรูปผลึกอยู่ในตัว ความแข็งแรงและความอ่อนเหนียวของพอลิเมอร์อาจแตกต่างกันได้มาก พอลิเมอร์นำไฟฟ้าได้ไม่ดีเนื่องจากธรรมชาติของโครงสร้างภายใน บางชนิดก็เป็นฉนวนที่ดีและนำมาใช้ทำฉนวนไฟฟ้า โดยปกติพอลิเมอร์มีความหนาแน่นต่ำ และมีจุดอ่อนตัวหรือจุดสลายโครงสร้างต่ำ (Decomposition Temperature)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 วัสดุประเภทเซรามิก

เซรามิกเป็นอนินทรีย์สารที่มีธาตุที่เป็นโลหะและอโลหะเป็นองค์ประกอบ ยึดกันด้วยพันธะทางเคมี โครงสร้างของเซรามิกอาจเป็นไปได้ทั้งแบบมีรูปผลึกและไมมีรูปผลึกหรือทั้งสองแบบ เซรามิกส่วนใหญ่มีความแข็งแรงสูง และคงความแข็งแรงแม้ที่อุณหภูมิสูงได้ดี แต่มักจะเปราะ ในช่วงหลังมีการพัฒนาเซรามิกจนสามารถทำเป็นเครื่องยนต์ได้ ข้อได้เปรียบของเซรามิกสำหรับนำมาใช้ทำเครื่องยนต์คือน้ำหนักเบา มีความแข็งแรงสูง ทนอุณหภูมิและการขัดสีได้ดี ลดการเสียดทาน และยังมีสมบัติเป็นฉนวนด้วย

สมบัติด้านการเป็นฉนวน ความทนทานต่ออุณหภูมิสูงและการขัดสี ทำให้เซรามิกหลายชนิดสามารถนำมาใช้บุผนังเตาเผาอุณหภูมิสูงเพื่อหลอมโลหะ เช่น เหล็กกล้าได้ การนำเซรามิกมาใช้กับงานในอวกาศก็อาจทำได้ เช่น ใช้กระเบื้องเซรามิกบุผนังกระสวยอวกาศ เป็นต้น เซรามิกดังกล่าวช่วยกันความร้อนม่ให้ผ่านเข้ามาถึงโครงสร้างอลูมิเนียมภายในกระสวยอวกาศ ขณะบินออกและกลับเข้าสู่บรรยากาศของโลก

3.1.4 วัสดุผสม (Composite Material)

วัสดุผสมเป็นวัสดุที่มีวัสดุอื่น 2 ชนิดขึ้นไปเป็นองค์ประกอบ วัสดุผสมส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารเติมที่เหมาะสมหรือวัสดุเสริมแรงกับสารเชื่อมประสานพวกเรซินที่เข้ากันได้ เมื่อผสมผสานแล้วกันแล้วจะได้ลักษณะเฉพาะที่เป็นสมบัติตามต้องการ โดยปกติ สารต่างๆจะไม่ละลายเข้าด้วยกันและสามารถสังเกตได้ที่รอยต่อระหว่างสารเหล่านั้น วัสดุผสมมีหลายประเภทบางประเภทมีเส้นใยประกอบอยู่(คือมีเส้นใยเสริมแรงในเนื้อของวัสดุอีกชนิดหนึ่ง) และแบบมีอนุภาคประกอบอยู่ (คือมีอนุภาคกระจายอยู่ในเนื้อวัสดุอีกชนิดหนึ่ง) วัสดุที่เสริมแรงและวัสดุที่เป็นเนื้อสามารถผสมผสานกันได้หลายชนิดที่นำมาใช้งานในปัจจุบัน ชนิดที่ใช้กันแพร่หลายในปัจจุบัน และจัดว่าเป็นวัสดุผสมแบบใหม่คือใช้เส้นใยแก้วเสริมแรงในพอลิเอสเทอร์หรือในเนื้ออีพอกซี และอีกชนิดหนึ่งคือ ใช้เส้นใยคาร์บอนเสริมแรงในเนื้ออีพอกซี

3.1.5 วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Material)

วัสดุอิเล็กทรอนิกส์อาจไม่จัดเป็นวัสดุหลักเมื่อเทียบกับปริมาณการนำไปใช้แต่ก็เป็นวัสดุประเภทที่สำคัญมากโดยเฉพาะทางเทคโนโลยีระดับสูง วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความสำคัญที่สุดชนิดหนึ่งก็คือ ซิลิคอนบริสุทธิ์ วัสดุชนิดนี้มีลักษณะเฉพาะตัวคือสามารถปรับปรุงคุณสมบัติได้หลายแบบ วงจรที่ซับซ้อนอาจทำให้มีขนาดเล็กลงได้บนแผ่นซิลิคอนซึ่งมีขนาดกว้างยาวเพียง $\frac{1}{4}$ ตารางนิ้ว (หรือ 0.035 ตารางเซนติเมตร) จึงสามารถใช้ประกอบเป็นอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ เช่น อุปกรณ์สื่อสารผ่านดาวเทียม คอมพิวเตอร์สมัยใหม่ เครื่องคิดเลขแบบพกพา นาฬิการะบบดิจิตอล และหุ่นยนต์เชื่อม

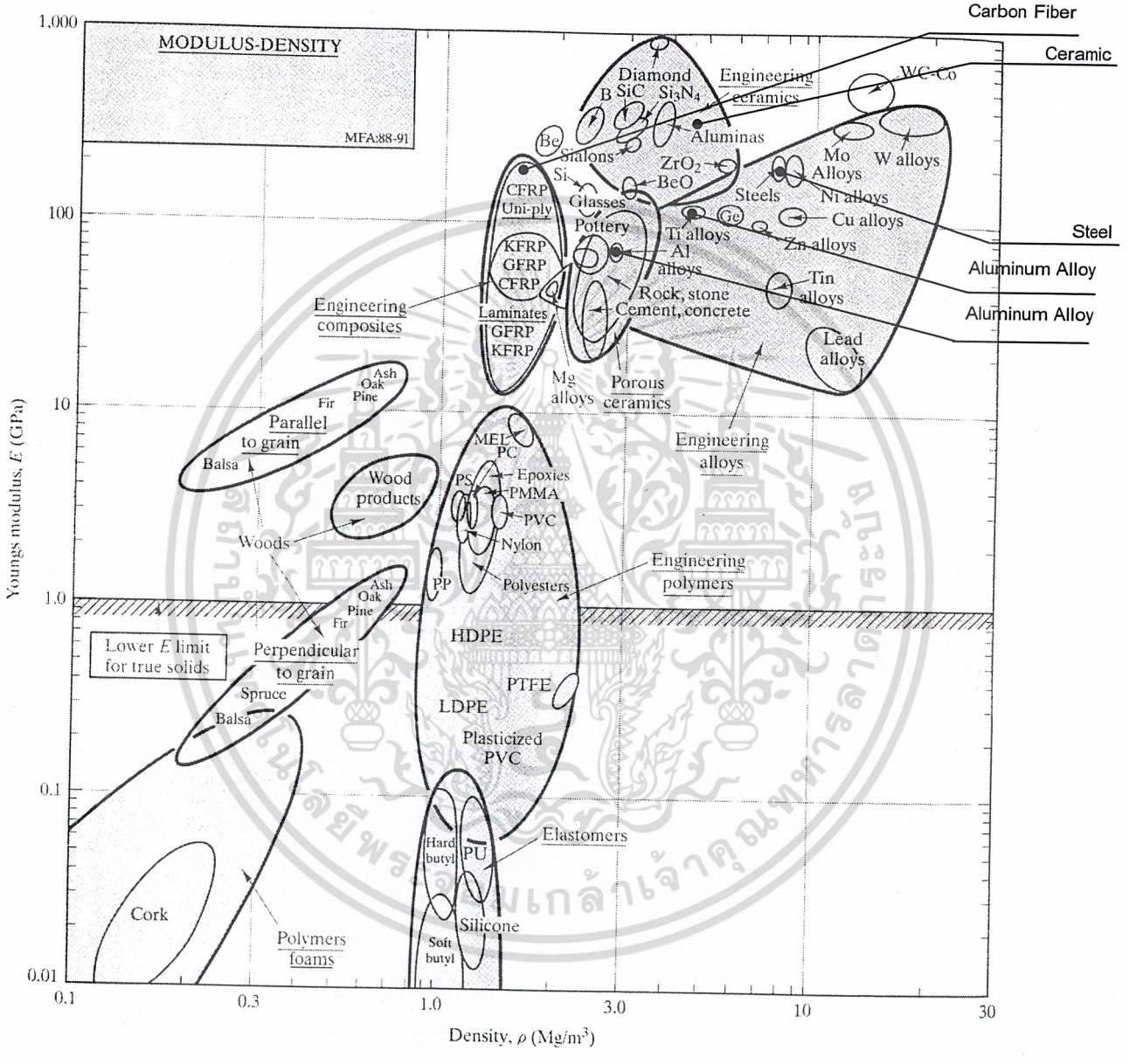
เนื่องจากเครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ ต้องการความเที่ยงตรงของการวัดที่สูงและมีน้ำหนักเบาเพื่อความสะดวกในการใช้งานและลดการเสียรูป ดังนั้นคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้เป็นโครงสร้างซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่อง คือ [1]

- ความเสถียรในด้านรูปร่าง
- ค่าความแข็งเกร็งสูง
- น้ำหนักเบา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความสามารถในการดูดซับแรงสูง
- ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ

เมื่อพิจารณาคุณสมบัติด้านความแข็งเกร็งและน้ำหนักจาก Ashby Chart



รูปที่ 3-1 Ashby chart [5]

นอกจากคุณสมบัติข้างต้นแล้ว การพิจารณาเลือกวัสดุควรคำนึงถึงความสะดวกในการใช้งานและราคาอีกด้วย ดังนั้นผู้จัดทำจึงเลือกกลุ่มวัสดุในการทำชิ้นส่วนโครงสร้างของเคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
61790

(1) วัสดุในกลุ่มเหล็กกล้าผสม

(2) วัสดุในกลุ่มอลูมิเนียมผสม

3.2 กลุ่มวัสดุที่ใช้ในการสร้างเคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม

3.2.1 โลหะในกลุ่มเหล็ก

โลหะในกลุ่มเหล็กมีประโยชน์ต่องามทางด้านวิศวกรรมอย่างมาก ดังนั้นจึงถูกใช้อย่างกว้างขวางในงานออกแบบทางวิศวกรรม เหล็กและอัลลอยด์ของเหล็กโดยส่วนใหญ่คือเหล็กกล้าซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ถูกผลิตขึ้นมากถึง 90% ของผลผลิตโลหะทั้งหมด เนื่องจากมีความแข็งแรง ความทนต่อแรงกระแทกและมีความเหนียวสูง นอกจากนี้ยังมีราคาถูกกว่าเมื่อเทียบกับโลหะอื่น ๆ

3.2.1.1 การแบ่งชนิดของเหล็กกล้า

เหล็กกล้าถูกจัดแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา และเหล็กกล้าผสม การแบ่งกลุ่มของเหล็กกล้าอาจจัดแบ่งเป็นหลายแบบ ระบบที่ใช้กันมากจะเป็น SAE (Society of Automotive Engineers) และ AISI (American Iron and Steel Institute)

1. เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา โดยทั่วไปบอกเป็นเลข 4 ตัว AISI-SAE ตัวเลข 2 ตัวแรกเป็น 10 และบ่งว่าเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา 2 ตัวหลังบอกปริมาณคาร์บอนของเหล็กกล้าเป็นเศษส่วนร้อยของหนึ่งเปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างเช่น AISI-SAE 1030 บอกว่าเป็นเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาที่มีคาร์บอน 0.30 % เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาทุกชนิดมีแมงกานีสเป็นธาตุผสมเพื่อเสริมความแข็งแรง ปริมาณแมงกานีสของเหล็กกล้าคาร์บอนส่วนใหญ่อยู่ในช่วงระหว่าง 0.30 – 0.95% เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดามีสารเจือปนของกำมะถัน ฟอสฟอรัส ซิลิกอนและธาตุผสมอื่นๆ ด้วย

เหล็กกล้าคาร์บอนที่มีคาร์บอนต่ำมากมีความแข็งแรงค่อนข้างต่ำ แต่ความเหนียวสูงมาก เหล็กกล้าเหล่านี้ใช้เป็นแผ่นสำหรับการขึ้นรูป เช่น กันชนและตัวถังรถ เมื่อปริมาณคาร์บอนของเหล็กกล้าคาร์บอนเพิ่มขึ้น เหล็กกล้าจะแข็งแรงขึ้นแต่เหนียวน้อยลง เหล็กกล้าคาร์บอนปานกลาง (1020-1040) ใช้งานเป็นเพลาและเกียร์ เหล็กกล้าคาร์บอนสูง (1060-1095) ใช้เป็นสปริง บล็อกแม่พิมพ์ มีดตัดและแผ่นมีด(Shear blade)

ในการใช้งานธรรมดาจะใช้เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาได้ดี ถ้าความแข็งแรงและความต้องการทางวิศวกรรมอื่นๆ ไม่รุนแรงเกินไป เหล็กกล้าเหล่านี้มีราคาค่อนข้างต่ำ แต่มีข้อจำกัดบางอย่างดังนี้

1. ไม่สามารถทำให้เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาแข็งแรงขึ้นเกิน 100,000 psi (690 MPa) โดยประมาณ โดยไม่สูญเสียความเหนียวละความต้านทานการกระแทกมาก

2. ไม่สามารถทำให้เหล็กกล้าคาร์บอนที่มีความหนามากได้โครงสร้างมาร์เทนไซท์ตลอดทั้งชิ้น กล่าวคือไม่สามารถทำให้แข็งขึ้นได้ลึก

3. เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดามีความต้านทานการกัดกร่อนและความต้านทานการเกิดออกซิเดชั่นต่ำ

4. ต้องชุบเหล็กกล้าคาร์บอนปานกลางให้เร็ว เพื่อจะให้ได้โครงสร้างมาร์เทนไซท์ โดยสมบูรณ์ การชุบให้เย็นตัวเร็วก่อให้เกิดการบิดเบี้ยวและการแตกหักของชิ้นส่วนที่อบชุบความร้อนได้

5. เหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดามีความต้านทานการกระแทกเลวที่อุณหภูมิต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เหล็กกล้าผสม เพื่อจะเอาชนะข้อเสียของเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดาจึงได้พัฒนาเหล็กกล้าผสมซึ่งมีธาตุผสมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติให้ดีขึ้น โดยทั่วไปเหล็กกล้าผสมราคาแพงกว่าเหล็กกล้าคาร์บอนธรรมดา แต่ในการใช้งานหลายอย่างจำเป็นต้องใช้เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการทางวิศวกรรม ธาตุผสมที่สำคัญที่เติมลงไปในเหล็กกล้าผสมคือ แมงกานีส นิกเกิล โครเมียม โมลิบดีนัมและทังสเตน ธาตุอื่นๆ ที่อาจเติมลงไปก็มีวานาเดียม โคบอลต์ โบรอน ทองแดง อะลูมิเนียม ตะกั่ว ไทเทเนียมและโคลัมเบียม (ไนโอเบียม)

การแบ่งแยกเหล็กกล้าผสม

เหล็กกล้าผสมอาจประกอบด้วยธาตุผสมบางธาตุสูงถึง 50 % ก็ยังคงเรียกว่าเหล็กกล้าผสมในที่นี้เหล็กกล้าผสมต่ำที่มีธาตุผสมประมาณ 1-4 % จะเรียกเป็นเหล็กกล้าผสม เหล็กกล้าเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นเหล็กกล้าพวกรถยนต์และการก่อสร้าง จึงเรียกกันง่ายๆ ว่าเป็นเหล็กกล้าผสม

เหล็กกล้าผสมในสหรัฐอเมริกาบอกเป็นระบบ AISI-SAE ตัวเลข 4 ตัว สองตัวแรกบอกธาตุผสมหรือกลุ่มของธาตุที่สำคัญในเหล็กกล้าและสองตัวหลังบอกเศษส่วนร้อยของเปอร์เซ็นต์คาร์บอนในเหล็กกล้า

มาตรฐานเหล็กกล้าที่สำคัญ

13 XX	แมงกานีส 1.75
40 XX	โมลิบดีนัม 0.20 หรือ 0.25 หรือโมลิบดีนัม 0.25 และกำมะถัน 0.042
41 XX	โครเมียม 0.50, 0.80 หรือ 0.95 โมลิบดีนัม 0.12 หรือ 0.30
43 XX	นิกเกิล 1.83, โครเมียม 0.50 หรือ 0.80 โมลิบดีนัม 0.25
44 XX	โมลิบดีนัม 0.53
46 XX	นิกเกิล 0.85 หรือ 1.83 โมลิบดีนัม 0.20 หรือ 0.25
47 XX	นิกเกิล 1.05, โครเมียม 0.45, โมลิบดีนัม 0.20 หรือ 0.35
48XX	นิกเกิล 3.50, โมลิบดีนัม 0.25
50XX	โครเมียม 0.40
51XX	โครเมียม 0.80, 0.88, 0.93, 0.95 หรือ 1.00
51XXX	โครเมียม 1.03
52XXX	โครเมียม 1.45
61XX	โครเมียม 0.60 หรือ 0.95 วาเนเดียม 0.13 หรือ 0.15
86XX	นิกเกิล 0.55, โครเมียม 0.50, โมลิบดีนัม 0.20
87XX	นิกเกิล 0.55, โครเมียม 0.50, โมลิบดีนัม 0.25
88XX	นิกเกิล 0.55, โครเมียม 0.50, โมลิบดีนัม 0.35
92 XX	ซิลิกอน 2.00 หรือ 1.40 และโครเมียม 0.70

50BXX* โครเมียม 0.28 หรือ 0.50

51BXX* โครเมียม 0.80

81BXX* นิกเกิล 0.30, โครเมียม 0.45, โมลิบดีนัม 0.12

94BXX* นิกเกิล 0.45, โครเมียม 0.40, โมลิบดีนัม 0.12

*B หมายถึงเหล็กกล้าโบรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 โลหะในกลุ่มอลูมิเนียม

3.2.2.1 คุณสมบัติทั่วไปของอะลูมิเนียมและผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียม

คุณสมบัติทางวิศวกรรมของอะลูมิเนียม อะลูมิเนียมมีคุณภาพที่ดีหลายอย่างรวมกันที่ทำให้อะลูมิเนียมเป็นวัสดุทางวิศวกรรมที่มีประโยชน์มาก อะลูมิเนียมมีความหนาแน่นต่ำ (2.70 กรัม/ลบ.ซม.) ทำให้เป็นประโยชน์ต่อการเคลื่อนย้ายขนถ่าย ผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมมีความต้านทานการกัดกร่อนดีในสภาพแวดล้อมธรรมชาติ เนื่องจากฟิล์มออกไซด์ที่เกิดขึ้นบนผิวของมัน แม้ว่าอะลูมิเนียมบริสุทธิ์จะมีความแข็งแรงต่ำ แต่ก็สามารถเติมธาตุผสมให้มีความแข็งแรงประมาณ 100 ksi (690 MPa) ได้ อะลูมิเนียมไม่เป็นพิษจึงใช้กันกว้างขวางในการบรรจุและห่ออาหาร คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดีของอะลูมิเนียมทำให้เหมาะในการใช้งานในอุตสาหกรรมไฟฟ้าหลายอย่าง ราคาที่ค่อนข้างต่ำของอะลูมิเนียม (96 เซนต์/ปอนด์ ในปี 1989) กับคุณสมบัติที่เป็นประโยชน์หลายอย่างทำให้มันสำคัญมากในทางอุตสาหกรรม

การแยกประเภทอะลูมิเนียมผสมขึ้นรูป (Wrought) อะลูมิเนียมผสมที่ผลิตขึ้นมาในรูปของการขึ้นรูป (wrought form) เช่นแผ่นบาง(sheet) แผ่นหนา (plate) แท่ง (rod) และเส้นลวด (wire) ได้แยกประเภทตามธาตุผสมหลักที่ใส่ ใช้สัญลักษณ์ตัวเลข 4 ตัวเพื่อบอกอะลูมิเนียมผสมขึ้นรูปชนิดต่างๆ เลขตัวแรกบอกกลุ่มอะลูมิเนียมผสมที่ประกอบด้วยธาตุผสมเฉพาะ และตัวเลขสองตัวหลังจะบอกถึงความบริสุทธิ์ของโลหะผสมของอะลูมิเนียมนั้น ส่วนตัวเลขหลักที่สองจะบอกถึงการปรับปรุงในโลหะผสมเดิมหรือปริมาณจำกัดของสิ่งเจือปน (impurity)

มาตรฐานกลุ่มอลูมิเนียมผสม

อะลูมิเนียมอย่างต่ำ 99.00% หรือมากกว่า	1XXX
กลุ่มอะลูมิเนียมผสมกับธาตุผสมหลัก	
ทองแดง	2XXX
แมงกานีส	3XXX
ซิลิกอน	4XXX
แมกนีเซียม	5XXX
แมกนีเซียมและซิลิกอน	6XXX
สังกะสี	7XXX
ธาตุอื่นๆ	8XXX
ชุดที่ไม่ได้ใช้	9XXX

อะลูมิเนียมผสมขึ้นรูปสามารถแบ่งอย่างง่ายๆ ออกเป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มที่อบชุบความร้อนไม่ได้และกลุ่มที่อบชุบความร้อนได้

อะลูมิเนียมผสมที่อบชุบความร้อนไม่ได้ ไม่สามารถทำให้แข็งแรงขึ้นจากการตกตะกอน แต่สามารถเพิ่มความแข็งแรงโดยการขึ้นรูปแบบเย็น(Cold working) สามกลุ่มหลักของอะลูมิเนียมผสมที่อบชุบความร้อนไม่ได้คือ กลุ่ม 1XXX, 3XXX และ 5XXX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะลูมิเนียมผสม 1XXX อะลูมิเนียมผสมเหล่านี้มีอะลูมิเนียมอย่างน้อย 99.0 % กับสารเจือปนหลักคือเหล็กและซิลิกอน การเมทองแดง 0.12 % ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมาอีก อะลูมิเนียมผสม 1100 มีแรงดึงประมาณ 13 ksi (90 MPa) ในสภาพอบอ่อนและใช้งานเป็นโลหะแผ่นเป็นหลัก

อะลูมิเนียมผสม 3XXX ธาตุผสมหลักของกลุ่มนี้คือแมงกานีสและทำให้อะลูมิเนียมมีความแข็งแรงขึ้นโดยวิธีการ solid – solution strengthening เท่านั้น อะลูมิเนียมผสมที่สำคัญที่สุดของกลุ่มนี้คือ 3003 ซึ่งเป็นโลหะผสม 1100 ที่ถูกเติมด้วยแมงกานีส 1.25 % โลหะผสม 3003 ที่ถูกอบอ่อนจะมีค่าแรงดึงประมาณ 16 ksi (110 MPa) อะลูมิเนียมผสมชนิดนี้จะถูกใช้ในงานทั่วๆ ไป อะลูมิเนียมผสม 5XXX แมกนีเซียมเป็นธาตุผสมหลักของอะลูมิเนียมผสมในกลุ่มนี้ และจะถูกเติมเพื่อทำให้แข็งแรงขึ้น(solid – solution strengthening) ได้ประมาณมากถึง 5 % อะลูมิเนียมผสมในกลุ่มนี้ที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมของกลุ่มนี้คือ 5052 ซึ่งประกอบด้วยแมกนีเซียม 2.5 % โครเมียม 0.2 % อะลูมิเนียมผสม 5052ที่ถูกอบอ่อนจะมีค่าแรงดึงประมาณ 28 ksi (193 MPa) โลหะผสมชนิดนี้จะถูกใช้เป็นโลหะแผ่นในอุตสาหกรรมรถยนต์ รถบรรทุกและเรือ

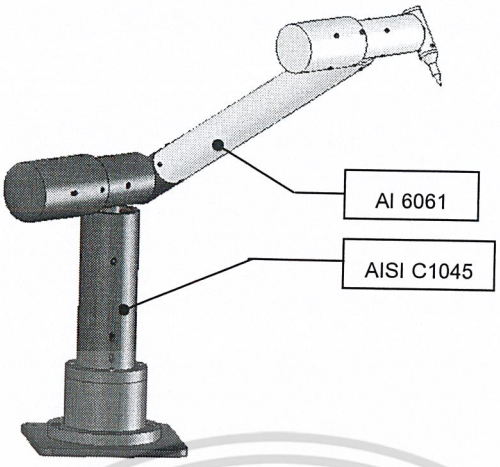
อะลูมิเนียมผสมขึ้นรูปที่อบชุบความร้อนได้ อะลูมิเนียมผสมบางชนิดทำให้แข็งแรงขึ้นจากการตกตะกอนด้วยการอบชุบความร้อนได้ อะลูมิเนียมผสมขึ้นรูปที่อบชุบความร้อนได้ ได้แก่กลุ่ม 2XXX, 6XXX และ 7XXX

อะลูมิเนียมผสม 2XXX ธาตุผสมหลักของกลุ่มนี้คือทองแดงแต่ส่วนใหญ่เติมแมกนีเซียมด้วย ธาตุอื่นก็เติมลงไปด้วยพอสมควร ตัวที่สำคัญที่สุดของกลุ่มนี้คือ 2024 ซึ่งมีทองแดงประมาณ 4.5 % แมกนีเซียม 1.5 % และแมงกานีส 0.6 % โลหะผสมกลุ่มนี้จะถูกทำให้แข็งแรงขึ้นโดยวิธีการ solid – solution และ precipitation strengthening อะลูมิเนียมผสมที่อยู่ในสภาวะ T6 จะมีค่าแรงดึงประมาณ 64 ksi (442 MPa) และมักนำมาใช้ทำโครงสร้างของเครื่องบิน

อะลูมิเนียมผสม 6XXX ธาตุผสมหลักของกลุ่ม 6XXX คือแมกนีเซียมและซิลิกอนซึ่งรวมตัวกันเป็นสารประกอบเชิงโลหะ Mg_2Si ที่ทำให้อะลูมิเนียมผสมกลุ่มนี้แข็งแรงขึ้น อะลูมิเนียมผสม 6061 เป็นตัวที่สำคัญที่สุดของกลุ่มนี้และมีส่วนผสมโดยประมาณคือ แมกนีเซียม 1.0 % ซิลิกอน 0.6 % ทองแดง 0.3 % เมื่อทำการอบจนมีสภาวะ T6 จะมีค่าแรงดึงประมาณ42 ksi (290 MPa) ส่วนใหญ่ใช้ในงานโครงสร้างทั่วไป

อะลูมิเนียมผสม 7XXX ธาตุผสมหลักของกลุ่ม 7XXX คือสังกะสี แมกนีเซียมและทองแดง สังกะสีและแมกนีเซียมจะรวมตัวกันเกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะ $MgZn_2$ ซึ่งเป็นตะกอนหลักที่ทำให้อะลูมิเนียมผสมเหล่านี้แข็งแรงขึ้นเมื่อนำไปอบชุบความร้อน ความสามารถในการละลายที่ค่อนข้างสูงของสังกะสีและแมกนีเซียมในอะลูมิเนียมทำให้เกิดตะกอนที่หนาแน่นมาก จึงทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นสูงมาก อะลูมิเนียมผสม 7075 เป็นตัวที่สำคัญที่สุดของกลุ่มนี้มีส่วนผสมโดยประมาณคือ สังกะสี 5.6% แมกนีเซียม 2.5% ทองแดง 1.6% และโครเมียม 0.25% อะลูมิเนียมผสม 7075 เมื่ออบชุบความร้อนจนมีสภาวะ T6 จะมีค่าแรงดึงประมาณ 73 ksi (504 MPa) ใช้ในงานโครงสร้างเครื่องบิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3-2 รูปแสดงวัสดุที่ใช้ในการทำโครงสร้าง

ดังนั้นจากการพิจารณาคุณสมบัติต่างๆของวัสดุที่ได้กล่าวมา วัสดุที่มีความเหมาะสมที่ใช้ในการทำ เคเอ็ม ไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม แบ่งเป็นสองส่วน ดังแสดงในรูปที่ 3-2 คือ

1. ส่วนที่ผู้ใช้งานไม่ต้องรับน้ำหนักขณะทำการใช้ (แสดงด้วยสีเข้ม) ใช้เหล็กกล้าผสม AISI C1045 เพราะไม่คำถึงเรื่องน้ำหนัก และต้องการความแข็งแรงสูง เพราะเป็นส่วนที่รับน้ำหนักของตัวเครื่อง
2. ส่วนที่ผู้ใช้งานต้องรับน้ำหนักขณะทำการใช้ (แสดงด้วยสีอ่อน) ใช้ AL 6061 เพราะต้องการวัสดุที่มีน้ำหนักเบา เพื่อความสะดวกในการใช้งาน

โดยที่คุณสมบัติของวัสดุทั้งสองชนิดมีดังนี้

AISI C1045 หรือ JIS S45C เป็นเหล็กคาร์บอนปานกลาง ชุบแข็งได้ง่าย ทนทานการเสียดสีได้ดี มีความแข็งแรงสูง เหมาะสำหรับทำชิ้นส่วนพื้นฐาน หรือโครงสร้างของแม่พิมพ์และงานทั่ว ๆ ไป โดยมีคุณสมบัติดังนี้ [14]

ส่วนผสม (%)	
คาร์บอน (C)	0.42 - 0.48
ซิลิคอน (Si)	0.15 - 0.35
แมงกานีส (Mn)	0.60 - 0.90
ฟอสฟอรัส (P)	ไม่เกิน 0.030
กำมะถัน (S)	ไม่เกิน 0.035
คุณสมบัติเชิงกล	
ความทนต่อการยืดตัว (Yield Strength)	350 MPa
ความทนต่อแรงดึงสูงสุด(Tensile Strength)	570 MPa
เปอร์เซ็นการยืดตัวก่อนขาด (Elongation)	20 %
ความแข็ง	167 - 229 HB
ความหนาแน่น(Density)	7.89 g/cc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Al 6061 เป็นอลูมิเนียมผสมในอนุกรม 6xxxx ซึ่งมีธาตุผสมหลักคือ แมกนีเซียม และซิลิคอน มีคุณสมบัติเด่นดังนี้ มีความแข็งแรงสูง ทนต่อการกัดกร่อนได้ดี สามารถเชื่อมได้ดี ส่วนใหญ่ใช้ในงานโครงสร้างทั่วไป โดยมีคุณสมบัติดังนี้ [14]

ส่วนผสม (%)

แมกนีเซียม (Mg)	0.8-1.2
ซิลิคอน (Si)	0.4-0.8
ทองแดง (Cu)	0.15-0.4 %
โครเมียม (Cr)	0.04-0.05 %
เหล็ก (Fe)	ไม่เกิน 0.7 %

คุณสมบัติเชิงกล

ความทนต่อการยืดตัว (Yield Strength)	275 MPa
ความทนต่อแรงดึงสูงสุด (Tensile Strength)	310 MPa
เปอร์เซ็นการยืดตัวก่อนขาด (Elongation)	12%
ความแข็ง (Hardness)	95HB
ความหนาแน่น (Density)	2.7 g/cc

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ตลับลูกปืน (Bearings)

4.1 การจำแนกและคุณลักษณะเฉพาะของตลับลูกปืน [8]

4.1.1 โครงสร้างของตลับลูกปืน

ตลับลูกปืนโดยทั่วไปจะประกอบด้วย แหวนของตลับลูกปืน (แหวนในและแหวนนอก) ส่วนประกอบของลูกกลิ้ง (อาจเป็นแบบเม็ดกลม-Balls หรือเม็ดยาว-Rollers) และส่วนของโครงประคอง (Retainer) หรือรังของลูกปืน โดยโครงประคองจะแยกส่วนของลูกกลิ้งซึ่งอยู่ระหว่างร่องกลิ้ง (Raceway) ของแหวนในและแหวนนอกให้มีระยะห่างปกติที่จะยึดลูกกลิ้งไว้และสามารถหมุนได้อย่างอิสระ ดูรูปที่ 4-1 ถึง 4-8 ประกอบ

ส่วนของลูกกลิ้งจะมีรูปลักษณะโดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 รูปแบบคือ แบบเม็ดกลมและแบบเม็ดยาว โดยที่แบบเม็ดยาวจะมีรูปลักษณ์ 4 แบบได้แก่ แบบเม็ดทรงกระบอก (Cylindrical) เม็ดเข็ม (Needle) เม็ดเรียว (Tapered) และเม็ดโค้ง (Spherical)

ลูกกลิ้งเม็ดกลมสัมผัสกับผิว ร่องกลิ้งในวงแหวนนอกและเป็น “จุด” (Point) ของแหวนในและนอก ส่วนลูกกลิ้งเม็ดยาวจะสัมผัสผิวโดยจะสัมผัสเป็นแนว “เส้น” (Line)

ในทางทฤษฎี ตลับลูกปืนถูกสร้างให้ส่วนของลูกกลิ้งสามารถหมุนไปตามวิธีการหมุน และหมุนตามแกนของตัวมันเองในเวลาเดียวกัน

ในส่วนของลูกกลิ้งและแหวนของตลับลูกปืนเมื่อมีแรงกระทำใดๆต่อตลับลูกปืน (ที่ผิวสัมผัสระหว่างส่วนของลูกกลิ้งและผิวของร่องกลิ้ง) จะไม่มีแรงกระทำโดยตรงกับโครงประคอง เพียงแต่ว่าโครงประคองทำหน้าที่ยึดชุดลูกกลิ้งให้มีระยะห่างจากกันเท่ากัน และป้องกันไม่ให้ชุดลูกกลิ้งหลุดออกจากกัน

4.1.2 การจำแนกตลับลูกปืน

ตลับลูกปืนจำแนกรูปแบบหลักออกเป็น 2 แบบได้แก่ ตลับลูกปืนเม็ดกลมและตลับลูกปืนเม็ดยาว ตลับลูกปืนเม็ดกลมยังถูกแบ่งย่อยออกไปตามรูปแบบของแหวนตลับลูกปืน เช่น แบบเม็ดกลมร่องลึก เม็ดกลมสัมผัสเชิงมุม และแบบกันรุนเม็ดกลม ส่วนตลับลูกปืนเม็ดยาวแบ่งออกเป็นแบบเม็ดทรงกระบอก และแบบปรับแนวได้เอง

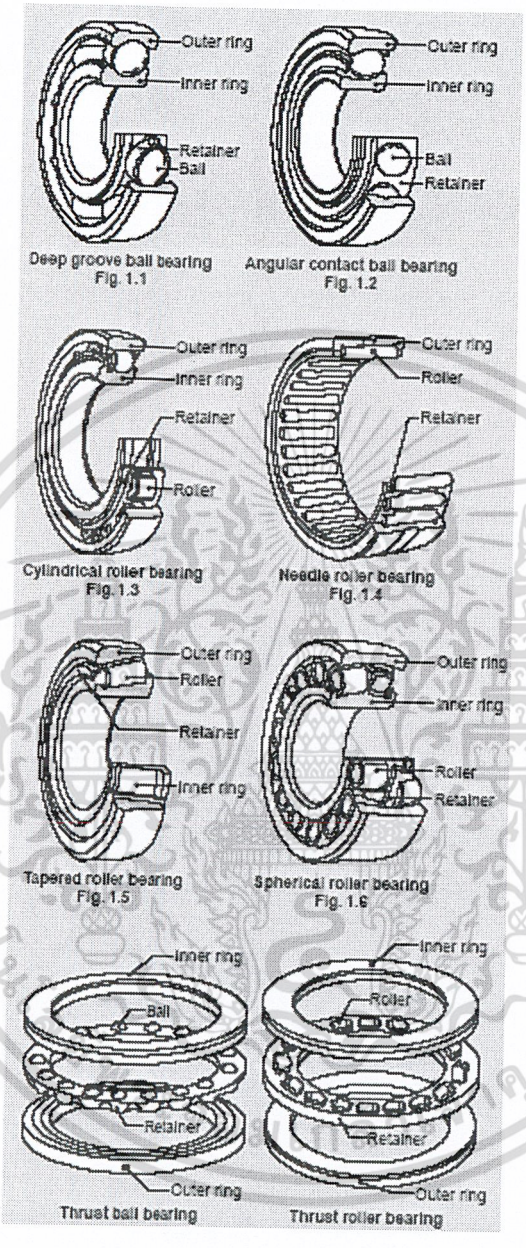
ตลับลูกปืนยังสามารถจำแนกออกตามทิศทางของแรงกระทำเช่น แรงแนวรัศมี กระทำต่อตลับลูกปืนแนวรัศมี (Radial Bearing) และแรงแนวแกนกระทำต่อตลับลูกปืนกันรุน (Thrust Bearing)

วิธีการจำแนกอื่นๆ รวมถึง 1) จำนวนแถวลูกกลิ้งเช่น แถวเดียว แถวคู่ หรือสี่แถว เป็นต้น 2) แบบแยกและแบบไม่แยกซึ่งทั้งแหวนใน หรือแหวนนอกถูกแยกออกจากกัน 3) ตลับลูกปืนกันรุนรับแรงทิศทางเดียวสามารถรับแรงสองทิศทางก็สามารถรับแรงได้สองทิศทาง

ยังมีตลับลูกปืนซึ่งออกแบบเพื่อใช้ในงานพิเศษโดยเฉพาะ เช่นตลับลูกปืนที่ใช้กับล้อรถไฟ บอลสกรู ตลับลูกปืนสำหรับแท่นหมุน (Turntable Bearing) เช่นเดียวกับตลับลูกปืน สำหรับการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น เช่นตลับลูก

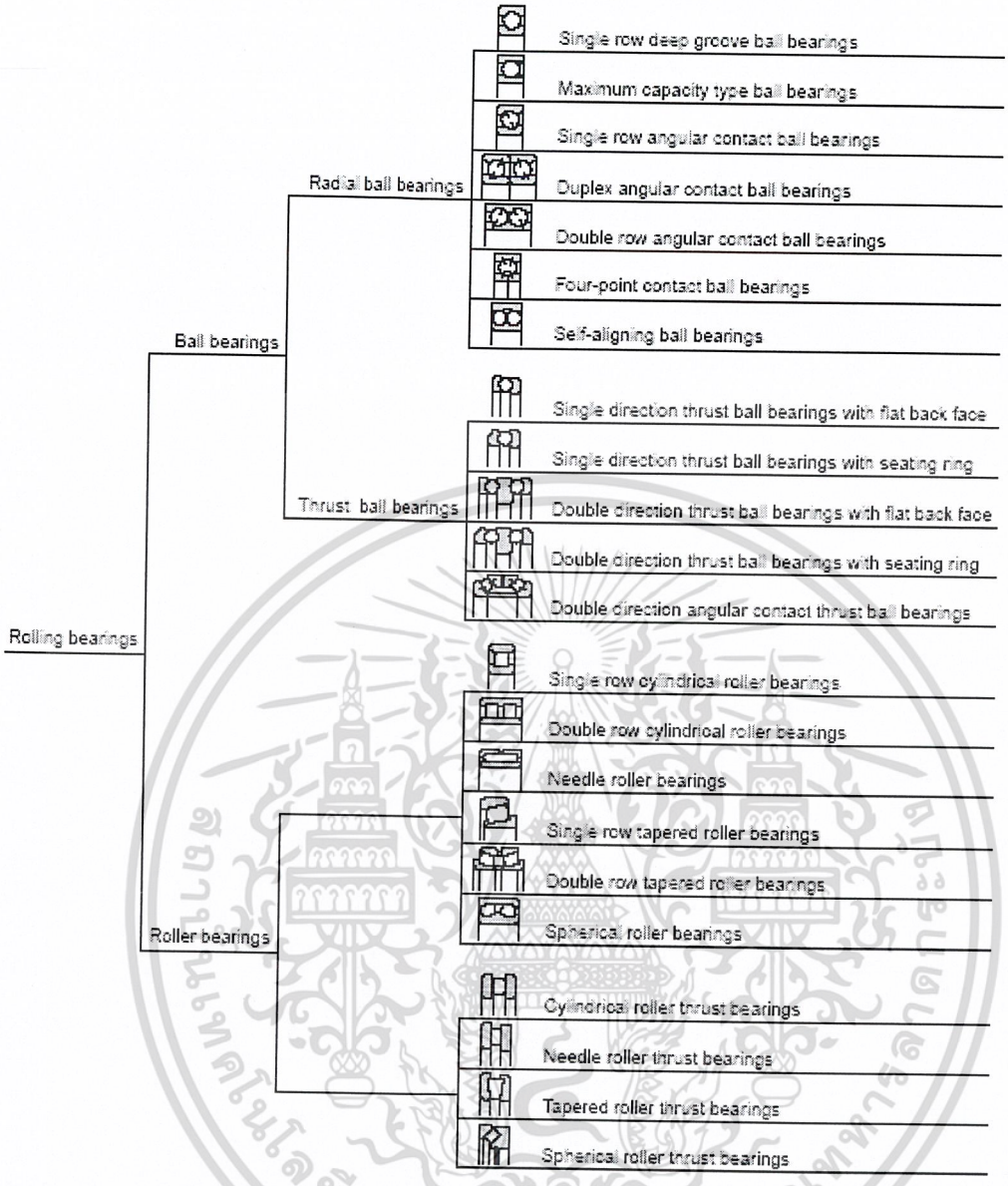
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปืนเม็ดกลมเชิงเส้น (Linear Ball Bearing) ตลับลูกปืนเม็ดยาวเชิงเส้น (Linear Roller Bearing) และLinear Flat Bearing เป็นต้น



รูปที่ 4-1 ตลับลูกปืนชนิดต่างๆ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-2 การจำแนกชนิดของตลับลูกปืน [8]

4.1.2.1 ตลับลูกปืนเม็ดกลมร่องลึก

ตลับลูกปืนเม็ดกลมร่องลึกถูกใช้ในงานต่างๆ อย่างกว้างขวาง ตัวร่องที่ทำจอยู่ในแต่ละด้านของวงแหวนด้านในและด้านนอกของตลับลูกปืนเม็ดกลมร่องลึก และสามารถรับแรงรับแรงรวมของทั้งในแนวรัศมีและแนวแกนได้ ดังนั้นตลับลูกปืนดังกล่าวจึงเหมาะกับงานที่ใช้ความเร็วสูง

สำหรับตลับลูกปืนดังกล่าวจะมีหลายชนิดที่มีการหล่อลื่นด้วยจาระบีไว้สำหรับตลับลูกปืนที่มีฝาเหล็กหรือฝายางทั้งสองข้าง ตลับลูกปืนพร้อมแหวนสปริงและตลับลูกปืนชนิดเปิด เมื่อใช้ตลับลูกปืนเหล่านี้จะทำให้การออกแบบเพื่อการติดตั้งกับเสื้อ (Housing) สะดวกและง่ายขึ้น

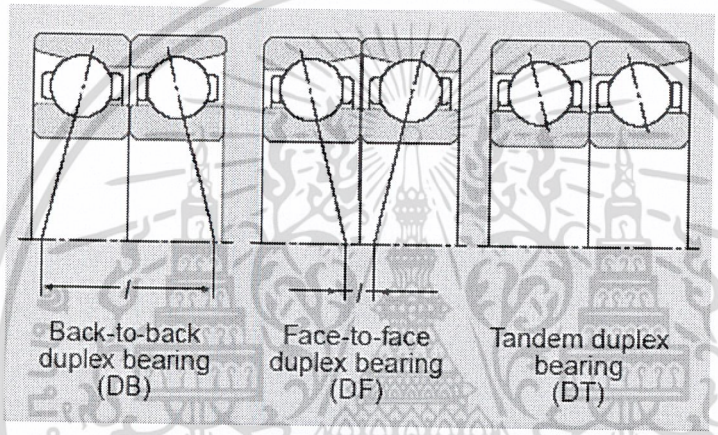
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.2 ตลับลูกปืนเม็ดกลมสัมผัสเชิงมุม

ตลับลูกปืนชนิดนี้ได้รวมกันเป็นชุดของอนุกรม 79, 70, 72B, 73 และ 73B แนวเส้นของมุมสัมผัสของวงแหวนนอก เม็ดลูกปืนและวงแหวนใน จะทำมุมของเส้นรัศมี เรียกว่ามุมสัมผัส ซึ่งมีมุมมาตรฐานเป็น 30 องศา และอักษร "B" ระบุท้ายมีมุม 40 องศา

เมื่อแรงแนวรัศมี พร้อมกับมีแรงในแนวแกนเพลามากในทิศทางเดียว สามารถที่ใช้ตลับลูกปืนดังกล่าว และเมื่อต้องรับแรงกระทำและขนาดมุมสัมผัสที่มากขึ้นแล้วเปลี่ยนแรงแนวรัศมีเป็นแรงในแกนเพลาทำได้ด้วยการใช้ตลับลูกปืนคู่ โดยหันหน้าเข้าหากัน

4.1.2.2.1 การจัดเรียงตลับลูกปืนเม็ดกลมสัมผัสเชิงมุมเป็นคู่



รูปที่ 4-3 แสดงการจัดเรียงตลับลูกปืนเม็ดกลมสัมผัสเชิงมุมแบบคู่ [8]

การรับแรงในแนวรัศมีและแนวแกนทั้ง 2 ทิศทางสามารถกระทำได้โดย การใช้ตลับลูกปืนเม็ดกลมสัมผัสเชิงมุมเป็นคู่ติดตั้งโดยหันหลังชนกัน (DB) หรือหันหน้าชนกัน (DF) ชนิดเป็นคู่ DB มีระยะห่างมาก ระหว่างแรงกระทำที่ศูนย์กลางของตลับลูกปืนและความจุของโมเมนต์ที่มีมาก ส่วนชนิดเป็นคู่ DF จะมีความจุของแรงโมเมนต์น้อยกว่าแบบชนิดที่เป็นคู่หันหลังชนกัน (DB) แต่ว่าแบบ DF มีความสามารถในการรับการเยื้องแนวได้มากกว่า การรับแรงแนวรัศมีและรับแรงในแนวแกนมากๆ สามารถกระทำได้โดยใช้ตลับลูกปืนคู่เรียงตามกัน (DT) อย่างไรก็ตามการรับแรงตามแนวเพลาสามารถใช้เฉพาะในทิศทางเดียวเท่านั้น

ตลับลูกปืนเม็ดกลมสัมผัสเชิงมุมเป็นคู่ถูกผลิตขึ้นเป็นชุดตามช่องว่าง (Clearance) หรือค่าพรีโหลดตามการระบุของผู้ใช้โดยเฉพาะตลับลูกปืนดังกล่าวต้องทำการประกอบรวมเข้าด้วยกันและไม่ควรผสมกับชุดอื่นๆ

4.1.2.3 ตลับลูกปืนเม็ดกลมปรับแนวได้เอง

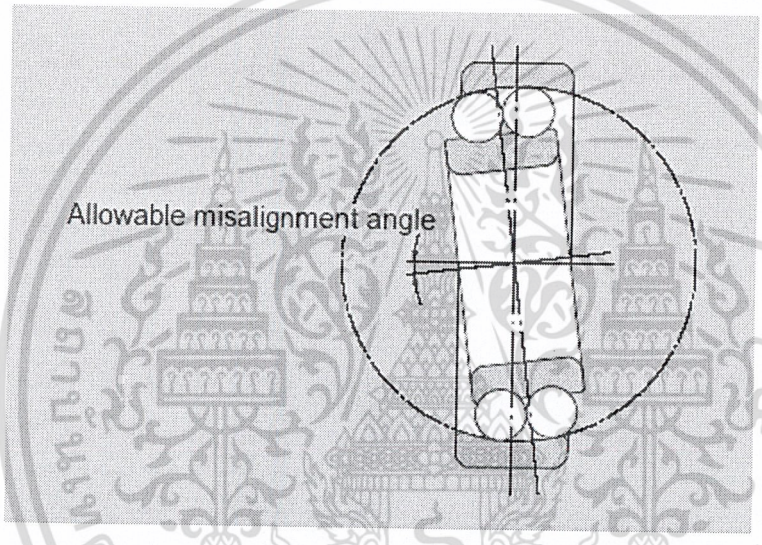
รางวิ่งวงแหวนนอกของตลับลูกปืนเม็ดกลมปรับแนวได้เอง มีรูปลักษณะเป็นผิวโค้งซึ่งมีศูนย์กลางร่วมกับแกนของตลับลูกปืนและวงแหวนในของตลับลูกปืนมีรางวิ่งสองรางด้วยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลูกบอลเหล็กกล้า ,รัง และวงแหวนในสามารถหมุนได้อย่างอิสระโดยรักษามุมที่แน่นอน ดังที่ได้กล่าวไว้แล้วว่าตลับลูกปืนดังกล่าวเป็นตลับลูกปืนแบบปรับแนวได้เอง การเยื้องแนวไปจากเดิมของเพลาตลับลูกปืนเนื่องมาจากการตัดกลึงและการติดตั้งของเพลาและตัวเสื้อจะถูกปรับได้เอง

โดยอัตโนมัติ มุมจากการเยื้องแนวที่ยอมให้ได้ของตลับลูกปืนคือประมาณ 0.07 rad (4 องศา) ในกรณีของแรงของแรงรับธรรมดา(สมมูลกับ $0.09C_r$) อย่างไรก็ตามมุมปรับดังกล่าวจะจำกัดโดยโครงสร้างรอบๆตัวตลับลูกปืน ที่อาจจะทำให้สัมผัสกับตลับลูกปืนในสภาวะการเยื้องแนว

การนำปลอกรัดเพลา (adapter) มาใช้จะทำให้ง่ายต่อการติดตั้งหรือถอดแยกส่วนออกได้ง่าย และถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุปกรณ์การส่งผ่านหรืออุปกรณ์ในการขับเคลื่อนและอื่นๆ อย่างไรก็ตามความสามารถในการรับแรงตามแนวแกนถูกจำกัดและตลับลูกปืนดังกล่าวไม่เหมาะกับการใช้งานในการรับแรงแนวแกนมากๆได้



รูปที่ 4-4 แสดงลักษณะตลับลูกปืนเม็ดกลมปรับแนวได้เอง [8]

4.1.2.4 ตลับลูกปืนเม็ดทรงกระบอก

โดยเหตุที่ลูกกลิ้งของตลับลูกปืนสัมผัสเป็นแนวเส้นกับรางวิ่งทำให้สามารถรับแรงมากๆ ได้ จึงเหมาะสำหรับงานที่ต้องใช้ความเร็วสูง ตลับลูกปืนเม็ดทรงกระบอกมีรูปลักษณะที่แตกต่างกันออกไป ลูกกลิ้งทรงกระบอกซึ่งถูกบังคับด้วยขอบหรือบ่าบนวงแหวนในหรือวงแหวนนอก

โดยที่ตลับลูกปืน NU และ N ไม่มีบ่าบนวงแหวนในหรือวงแหวนนอกทำให้การรับแรงแนวแกนลอยตัว ตลับลูกปืนดังกล่าวจึงเหมาะสมที่สุดสำหรับใช้กับด้านเพลาที่เป็นอิสระ ส่วนตลับลูกปืนชนิด NJ, NUP, NH, และ NF ซึ่งมีบ่าบน วงแหวนในหรือวงแหวนนอก สามารถรับแรงแนวแกนที่แน่นอน ตลับลูกปืนชนิดดังกล่าวบางครั้งใช้กับด้านของเพลาที่อยู่กับที่

โดยที่ตลับลูกปืนเม็ดทรงกระบอกชนิดแยกนั้น สามารถประกอบหรือถอดออกในกรณีเมื่อต้องการสวมแน่น ตลับลูกปืนเม็ดทรงกระบอกมีทั้งรังอัดขึ้นรูป และรังจากการตัดกลึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.4.1 ตลับลูกปืนเม็ดทรงกระบอกสำหรับรับแรงในแนวแกนมากขึ้น (ชนิด HT)

ตลับลูกปืนเม็ดทรงกระบอกเช่นชนิด NUP ซึ่งมีแหวนบ่าบนวงแหวนในหรือวงแหวนนอก สามารถรับแรงได้ทั้งแรงในแนวแกนและแรงในแนวรัศมีในเวลาเดียวกัน

ในการปรับปรุงรูปทรง ขั้วลูกกลิ้งกับบ่าของวงแหวนในและวงแหวนนอกชนิด HT ให้มีความเที่ยงตรงสูง จะทำให้ตลับลูกปืนสามารถรับแรงแนวแกนได้มากขึ้น

4.1.2.4.2 ตลับลูกปืนเม็ดทรงกระบอกแถวคู่

ตลับลูกปืนเม็ดทรงกระบอกแถวคู่ได้แก่ชนิด NN และ NNU โดยทั่วไปเป็นตลับลูกปืนแบบเนื้อบางใช้สำหรับเพลาหลักของเครื่องมือกล ลูกหีบในโรงงาน และลูกกลิ้งของเครื่องพิมพ์

ช่องว่างภายในแนวรัศมีของตลับลูกปืนที่มีรูเรียว จะปรับได้โดยการดันแกนในของตลับลูกปืนบนเพลาที่เรียว รังมาตรฐานจะเป็นชนิดทำจากการตัดกลึง

4.1.2.4.3 ตลับลูกปืนเม็ดทรงกระบอกสี่แถว

ตลับลูกปืนเม็ดทรงกระบอกสี่แถว ถูกนำมาใช้กับคอลูกกลิ้งเครื่องรีด (roll neck) ในส่วนของคอลูกกลิ้งโดยการออกแบบให้คอลูกกลิ้งสัมพันธ์กับช่องว่างจำกัดทำให้สามารถรับแรงประเมินสูงสุดและแรงเสียดทานได้มาก

ในกรณีที่ตลับลูกปืนมีขนาดใหญ่สามารถจะใช้เหล็กกล้าชุบแข็งแบบ Carburized และรังเป็นชนิดหมุดย้ำจะทำให้อายุการใช้งานของตลับลูกปืนยาวนานขึ้น

การดูแลปฏิบัติเกี่ยวกับตลับลูกปืนได้แก่ การตรวจสอบและการทำความสะอาดอย่างสม่ำเสมอ

นอกจากนี้ยังคำนึงถึงความเที่ยงตรงในการใช้งานสำหรับความเร็วสูง โดยการเพิ่มความแกร่งกับรังและเพิ่มการหล่อลื่น(ในรูปลักษณะของละอองน้ำมัน) และการป้องกันฝุ่นที่จะเล็ดลอดเข้าโดยการติดร่องเวียน (spiral) ที่ผิวเส้นผ่านศูนย์กลางในและติดแผ่นกันเพื่อป้องกันน้ำเข้า เป็นต้น

4.1.2.4.4 ตลับลูกปืนทรงกระบอกแถวคู่

อนุกรม SL01, SL02 และ SL04 เป็นตลับลูกปืนเม็ดทรงกระบอก สองแถวบรรจุเม็ดลูกปืนเต็ม มีชนิดแบบยึดกับที่และแบบลอยตัว สำหรับงานหนักมากๆ วงแหวนในและวงแหวนนอกเหล่านี้ ถูกผ่าแยกออกเป็นสองชั้นด้วยวิธีพิเศษเพื่อใส่เม็ดลูกปืนแล้วประกอบเป็นชุดเดียวเดียวกันอย่างแข็งแรง

ลูกปืนดังกล่าวเป็นแบบชนิดบาง กำหนดมาตรฐาน ISO สามารถทนต่อแรงแนวรัศมีและแนวแกนเพลาและแรงกระแทก

และเมื่อใช้ตลับลูกปืนแบบยึดกับที่ สามารถทนต่อแรงในแนวเพลาทั้งสองทิศทางและแนวรัศมีโดยผ่านเม็ดลูกปืน

ตลับลูกปืนชนิดนี้เหมาะเป็นพิเศษสำหรับงานหนักที่มีความเร็วรอบต่ำหรือสูง ในตำแหน่งยึดกับที่ ตัวอย่างเช่น ในอุปกรณ์ก่อสร้าง ล้อรถไฟ โรงรีดเหล็ก และอุปกรณ์ทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

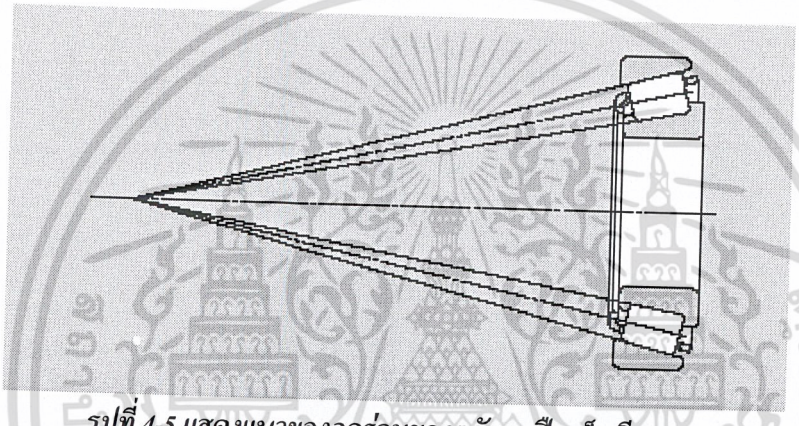
สำหรับชนิด SL04 ซึ่งใช้กับรอกยก (sheaves) จะมีแหวนกันฝุ่นที่ยึดกับวงแหวนนอก ซึ่งง่ายต่อการติดตั้งและอิสระต่อการออกแบบให้เข้ากับส่วนข้างเคียงได้

อนุกรม SL เป็นลูกปืนเม็ดหมอน มีทั้งแบบสาม,สี่ และห้าแถว

4.1.2.5 ตลับลูกปืนเม็ดเรียว

4.1.2.5.1 ตลับลูกปืนเม็ดเรียวแถวเดี่ยว

ตลับลูกปืนเม็ดเรียวออกแบบให้ลูกกลิ้งกรวย และรางวิ่งถูกเรียงกันในลักษณะที่มีแนวของจุดร่วมรวมกันเป็นมุมแหลมบนแนวแกนเพลาของตัวตลับลูกปืน ดังรูปที่ 4-5 ตัวลูกกลิ้งถูกนำโดยสัมผัสของขอบบนวงแหวนในทั้งสองด้าน



รูปที่ 4-5 แสดงแนวของจุดร่วมของตลับลูกปืนเม็ดเรียว [8]

ลักษณะโครงสร้างดังกล่าวทำให้สามารถรับแนวแรงรัศมี และแรงแนวแกนในทิศทางเดียว และแรงรวมได้ ถ้ามุมสัมผัสยิ่งกว้างก็จะทำให้สามารถรับแรงแนวแกนได้มากขึ้น โดยแรงแนวรัศมีจะถูกแปลงเป็นแรงในแนวแกนเพลา โดยทั่วไปตลับลูกปืนดังกล่าวถูกใช้ในลักษณะเป็นคู่หันหน้าไปคนละทาง ช่องว่างเฉพาะหรือพลีโหลดสามารถกำหนดได้โดยการปรับระยะห่างของตลับลูกปืนเข้าไปหาอีกตลับหนึ่ง

โดยเหตุที่วงแหวนในและวงแหวนนอกถูกแยกจากกัน วงแต่ละวงสามารถติดตั้งเป็นอิสระ และในทางปฏิบัติสามารถทำการปรับวงแหวนทั้งสองให้ชิดได้ ระบบมาตรฐานโดยอนุกรมตลับลูกปืนทั้งสองระบบคือระบบเมตริก และระบบเป็นนิ้วถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยระบบเมตริกถูกระบุไว้ใน ISO335 และ JIS B 1512 และในระบบมาตรฐานเป็นนิ้ว อยู่ในมาตรฐาน SFBMA

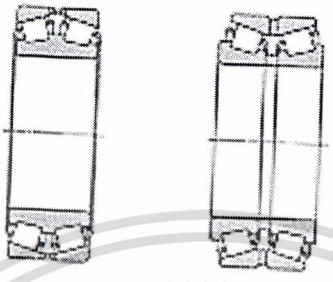
รังอัดขึ้นรูปโดยทั่วไปถูกใช้กับตลับลูกปืนดังกล่าว อย่างไรก็ตามสำหรับลูกปืนขนาดใหญ่จะใช้รังที่ทำจากการตัดกลึงหรือรังชนิดหมุดย้ำ และบางครั้งจะใช้รังพลาสติกสำหรับตลับลูกปืนขนาดเล็ก ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับการใช้งาน

ตลับลูกปืนเม็ดเรียวสามารถถอดแยกออกเป็นชุดแยก (Subunits) ก็คือวงแหวนในพร้อมลูกกลิ้ง (Cone) กับวงแหวนนอก (Cup) โดยชุดแยกถูกกำหนดเป็นมาตรฐานไว้ใน ISO หรือในมาตรฐาน AFMBA และมารฐาน JIS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.5.2 ตลับลูกปืนเม็ดเรียวแถวคู่

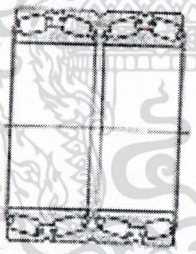
ตลับลูกปืนเม็ดเรียวแถวคู่ดังแสดงในรูปที่ 4-6 เป็นชนิดหันออกด้านนอก (ใช้กับวงแหวนนอกแถวคู่) กับชนิดหันเข้าใน (ใช้กับวงแหวนในแถวคู่) โดยที่ช่องว่างภายในตลับลูกปืนถูกปรับไว้แล้ว ฉะนั้นในการใช้งานจะต้องใช้อะไหล่ที่ผลิตขึ้นชนิดเดียวกันโดยมีหมายเลขรหัสเหมือนกันด้วย



รูปที่ 4-6 ตลับลูกปืนเม็ดเรียวแถวคู่ [8]

4.1.2.5.3 ตลับลูกปืนเม็ดเรียวสี่แถว

ตลับลูกปืนเม็ดเรียวสี่แถว ดังแสดงในรูปที่4-7 โครงสร้างของตลับลูกปืนดังกล่าว คือสร้างจากวงแหวนในแถวคู่ 2 อัน กับวงแหวนนอกแถวคู่ 1 อัน และวงแหวนนอกแถวเดี่ยวแถวเดี่ยว 2 อัน ทำให้สามารถรับแรงได้มากขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้ในงานที่มีแรงกระทำมากๆ เช่นคอลูกกลิ้งของเครื่องรีด



รูปที่ 4-7 ตลับลูกปืนเม็ดเรียวสี่แถว [8]

ตลับลูกปืนดังกล่าวใช้วิธีการเจือปนถ่านกับเหล็กกล้าผสม (Carburizing steel) และในกรณีของตลับลูกปืนที่มีขนาดใหญ่จะใช้ลูกกลิ้งกลวงกับรังชนิดเข็มทำให้อายุการใช้งานยาวนานขึ้น

4.1.2.6 ตลับลูกปืนเม็ดโค้งปรับแนวเองได้

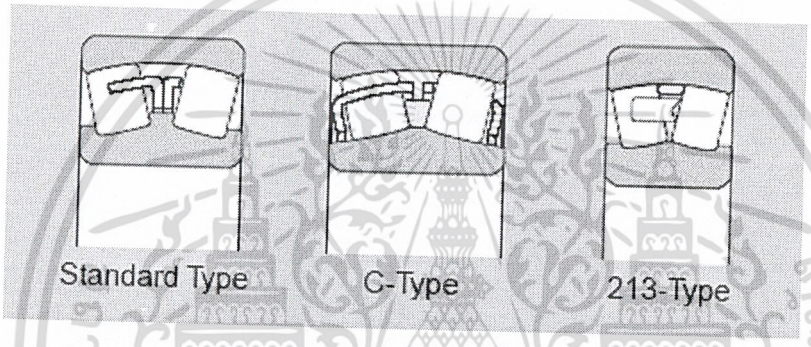
ตลับลูกปืนเม็ดโค้งปรับแนวเองได้ ประกอบด้วยวงแหวนนอกซึ่งภายในรางวิ่งมีลักษณะเป็นผิวโค้ง มีลูกกลิ้งรูปร่างเหมือนถังเบียร์อยู่สองแถว โดยวงแหวนในมีสันตรงกลางเป็นตัวนำลูกกลิ้ง เนื่องจากตลับลูกปืนชนิดนี้เป็นแบบปรับแนวเองได้ ดังนั้นจึงสามารถใช้กับกรณีที่เกิดการเยื้องแนวขึ้นระหว่างวงแหวนในและวงแหวนนอกซึ่งเกิดจากการผิดพลาดของการประกอบเพลาหรือเพลาคด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเยื้องแนวจำกัดสำหรับตลับลูกปืนดังกล่าวถูกแปรผันเนื่องจากอนุกรมมิติ และสภาวะการรับแรง คือ ประมาณ 0.009 เรเดียน (0.5 องศา) สำหรับแรงรับปกติ และสำหรับแรงรับเบามุมดังกล่าวจะเกินกว่า 0.035 เรเดียน (2 องศา)

ตลับลูกปืนดังกล่าวสามารถรับแรงแนวรัศมี แรงในแนวแกนทั้งสองทิศทาง และแรงรับรวมได้มาก นอกจากนี้ยังเหมาะสำหรับใช้กับงานที่มีการแกว่งหรือมีแรงกระทบเกิดขึ้นได้

ในการออกแบบตลับลูกปืนเม็ดโค้งตามมาตรฐานที่กำหนด โดยมีสันกลางเป็นตัวนำลูกกลิ้งกับวงแหวนใน สำหรับตลับลูกปืนขนาดเล็กกว่า (เส้นผ่าศูนย์กลางใน 50 มม. หรือน้อยกว่า) การออกแบบดังกล่าวจะใช้รังลูกปืนแยกระหว่างสองแถวของเม็ดลูกปืน และจะระบุโดยอักษรต่อท้าย “C” ที่ท้ายหมายเลขพื้น สำหรับตลับลูกปืนอนุกรม 213 (เส้นผ่าศูนย์กลางใน 55 มม. หรือมากกว่า) รังลูกปืนระหว่างลูกกลิ้งอยู่ที่ตำแหน่งบนรางวิ่งของวงแหวนนอก



รูปที่ 4-8 ตลับลูกปืนเม็ดโค้งปรับแนวเองได้ [8]

4.1.2.7 ตลับลูกปืนกันรุนเม็ดกลม

4.1.2.7.1 ตลับลูกปืนกันรุนเม็ดกลมสัมผัสเชิงมุมสองทิศทาง

โครงสร้างของตลับลูกปืนกันรุนเม็ดกลมสัมผัสเชิงมุมสองทิศทางถูกผลิตขึ้นโดยการติดตั้งตลับลูกปืนกลมสัมผัสเชิงมุม โดยหันหลังชนกันเพื่อที่ว่าตลับลูกปืนดังกล่าวสามารถรับแรงแนวแกนได้สองทิศทางในขณะที่มุมสัมผัสมีมุม 60 องศา ทำให้ตลับลูกปืนมีความคงทนต่อการรับแรงแนวแกนมากๆ
สำหรับรังของลูกปืนชนิดนี้ จะทำจากทองแดงผสมกลึงขึ้นรูป

4.1.2.7.2 ตลับลูกปืนเม็ดกลมสัมผัสเชิงมุมแถวใช้กับความเร็วสูง (ตลับลูกปืนสำหรับแนวแกน)

ตลับลูกปืนเม็ดกลมสัมผัสเชิงมุมแถวคู่ใช้กับความเร็วสูงมีโครงสร้างของตลับลูกปืนเม็ดกลมสัมผัสเชิงมุมทำมุม 40 องศาโดยต่างหันหลังชนกันเป็นคู่ (DB) ความเบี่ยงเบนมิติเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของตลับลูกปืนเหมือนกับตลับลูกปืนกันรุนเม็ดกลมสัมผัสเชิงมุม ซึ่งมีค่าเป็นลบ และสามารถรับแรงในแนวแกนเท่านั้น สำหรับรังของลูกปืนชนิดนี้จะทำมาจากฟีโนลิกเรซิน (Phenolic resin) ด้วยการกลึงขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 คุณลักษณะเฉพาะของตลับลูกปืน

4.1.3.1 คุณลักษณะเฉพาะของตลับลูกปืน

ตลับลูกปืนมีรูปลักษณะและชนิดแตกต่างกันโดยแต่ละแบบจะมีคุณลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่างกันออกไป อย่างไรก็ตามตลับลูกปืนกับตลับลูกปืนแบบเลื่อนมีข้อดีเปรียบเทียบได้ว่า

(1) สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานชั้นต้นจะต่ำ และสัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานพลวัติจะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย

(2) ต่างก็เป็นผลิตภัณฑ์มาตรฐานสากล สามารถสับเปลี่ยนกันได้และหาซื้อได้ง่าย

(3) การหล่อลื่นง่ายและลดการสิ้นเปลืองของการหล่อลื่น

(4) ตามกฎทั่วไป ตลับลูกปืนหนึ่งตลับสามารถรับแรงทั้งแนวรัศมีและแนวแกนในเวลาเดียวกัน

(5) อาจใช้งานได้ทั้งที่อุณหภูมิสูงหรืออุณหภูมิต่ำ

(6) ความแกร่งของตลับลูกปืนสามารถแก้ไขให้ดีขึ้นโดยพรีโหลด (Pre-Load)

สำหรับรายละเอียดโครงสร้าง รูปลักษณะ และรูปแบบพิเศษของตลับลูกปืนจะได้ทำการอธิบายในหัวข้อมิติของขอบข่าย และเลขรหัสของตลับลูกปืน

4.1.3.2 ตลับลูกปืนเม็ดกลมและเม็ดยาว

โดยทั่วไปการเปรียบเทียบตลับลูกปืนเม็ดกลมและเม็ดยาวโดยมีมิติเดียวกัน ตลับลูกปืนแบบเม็ดกลมจะมีค่าความเสียดทานต่ำกว่าและหน้าสัมผัสน้อยกว่าตลับลูกปืนเม็ดยาวทำให้เหมาะสมในการใช้งานบางอย่างที่ต้องการความเร็วสูง ความแม่นยำสูง แรงบิดต่ำ และการสั่นสะเทือนต่ำ ในทางกลับกันตลับลูกปืนเม็ดยาวสามารถรับแรงกระทำได้มากกว่าและมีความเหมาะสมในการใช้งานซึ่งต้องการอายุการใช้งานยาวและทนทานต่อแรงกระทำและแรงกระแทกสูง

4.1.3.3 ตลับลูกปืนรับแรงแนวรัศมีและแนวแกน

ตลับลูกปืนเกือบทุกชนิดที่ออกแบบสามารถรับแรงกระทำทั้งในแนวรัศมีและแนวแกนในเวลาเดียวกัน โดยทั่วไปตลับลูกปืนซึ่งมีมุมสัมผัสน้อยกว่า 45 องศา สามารถรับแรงในแนวรัศมีได้มากและถูกจัดเป็นตลับลูกปืนรับแรงในแนวรัศมี ในทำนองเดียวกันถ้าตลับลูกปืนซึ่งมีมุมสัมผัสมากกว่า45องศา จะสามารถรับแรงในแนวแกนได้มากกว่าก็ถูกจัดเป็นตลับลูกปืนรับแรงกันรุน นอกจากนี้ยังมีตลับลูกปืนวิ่งถูกจัดเป็นตลับลูกปืนเชิงซ้อน ซึ่งจะรวมเอาคุณลักษณะทั้งการรับแรงแนวรัศมีและแรงกันรุนเข้าด้วยกัน

4.1.3.4 ตลับลูกปืนมาตรฐานและตลับลูกปืนพิเศษ

ตลับลูกปืนจะเป็นไปตามมาตรฐานสากล มีรูปแบบและขนาดเพื่อใช้ประโยชน์มากที่สุด สามารถใช้แทนกันได้ และมีอยู่ทั่วไป

อย่างไรก็ตามอาจนำตลับลูกปืนชนิดพิเศษ หรือชนิดที่ไม่เป็นไปตามมาตรฐานมาใช้กับเครื่องจักร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องจักรและจุดประสงค์การใช้งานของเครื่องจักร ตลับลูกปืนอาจประยุกต์ให้ถูกใช้กับงานเฉพาะอย่าง เช่น เป็นชุด หรือตลับลูกปืนที่ออกแบบเป็นพิเศษและสร้างรวมกับส่วนประกอบของเครื่องจักร เป็นต้น

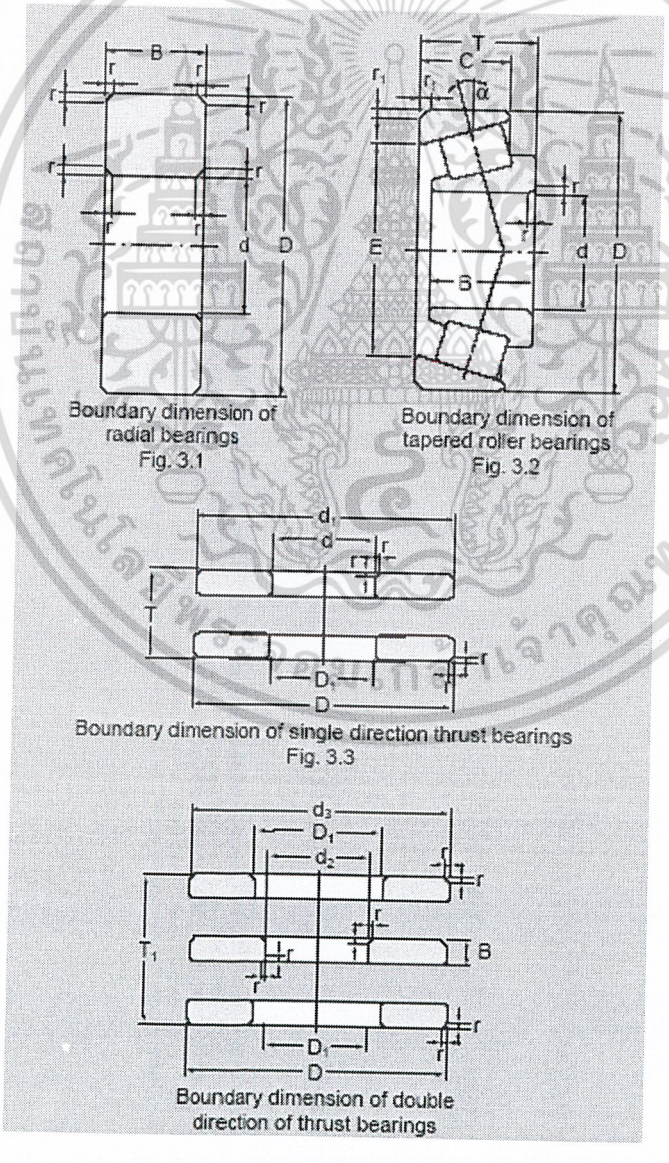
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ขอบเขตมิติและตัวเลขรหัสของตลับลูกปืน [8]

4.2.1 ขอบเขตมิติ

เพื่อความสะดวกในการใช้เปลี่ยนแทนกันได้ระหว่างประเทศและความประหยัดในการผลิตตลับลูกปืน ขอบเขตมิติของตลับลูกปืนซึ่งเป็นมาตรฐานสากลที่องค์กร ISO ได้กำหนด เช่น ISO 15 (ตลับลูกปืนรับแรงรัศมียกเว้นตลับลูกปืนเม็ดเรียว) ISO 355 (ตลับลูกปืนเม็ดเรียว) และISO 104 (ตลับลูกปืนกันรุน) ในประเทศญี่ปุ่น มาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (JIS B 1512) ได้กำหนดขอบเขตมิติของตลับลูกปืนให้สอดคล้องกับมาตรฐานขององค์กร ISO

ขอบเขตมิติซึ่งจัดเป็นมาตรฐานตัวอย่างเช่น เส้นผ่าศูนย์กลางด้านใน เส้นผ่าศูนย์กลางด้านนอก ความกว้างหรือความสูง และมิติการลบมุม ดังแสดงในรูปภาพตัดขวางรูปที่ 4-9 อย่างไรก็ตามจากกฎทั่วไปมิติโครงสร้างภายในของตลับลูกปืนไม่ได้ครอบคลุมไว้โดยมาตรฐานนี้ เส้นผ่าศูนย์กลางภายในของของตลับลูกปืน (d) สำหรับมิติมาตรฐานในขอบข่าย 90 ชนิดที่ถูกกำหนดภายใต้ระบบเมตริกซึ่งมีช่วงตั้งแต่ 0.6 มม. – 2500 มม.



รูปที่ 4-9 แสดงขอบเขตมิติของตลับลูกปืนแบบต่างๆ

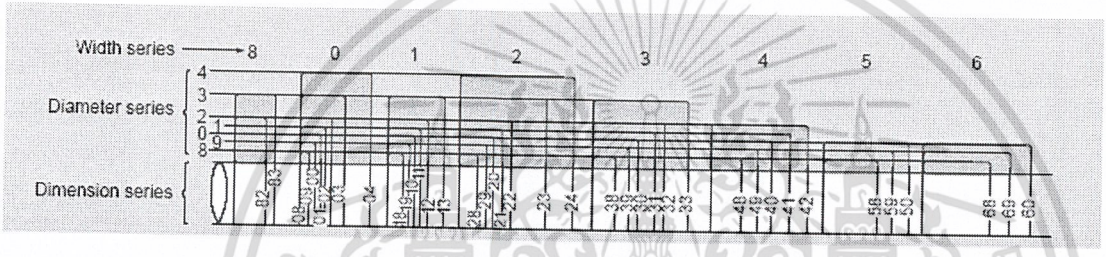
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตลับลูกปืนมาตรฐานทุกชนิดนั้นได้มีการจัดตั้งอนุกรมรวมที่เรียกว่า อนุกรมมิติในตลับลูกปืนรับแรงแนวรัศมี (ยกเว้นตลับลูกปืนเม็ดเรียว) จะมี 8 แบบสูงสุดที่เส้นผ่าศูนย์กลางนอก (D) ถูกกำหนดเมื่อเทียบกับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในมาตรฐานแต่ละแบบ

อนุกรมดังกล่าวถูกเรียกว่าอนุกรมเส้นผ่าศูนย์กลาง ซึ่งแสดงโดยการลำดับตัวเลข (7, 8, 9, 0, 1, 2, 3, 4) เรียงลำดับจากเส้นผ่าศูนย์กลางมากไปหาน้อย (7 เป็นค่าต่ำสุด และ 4 เป็นค่าสูงสุด)

สำหรับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในซึ่งเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกรวมกันจะมี 8 แบบสูงสุดที่มิติความกว้าง (B) ถูกกำหนด อนุกรมดังกล่าวถูกเรียกว่าอนุกรมความกว้าง ซึ่งแสดงโดยลำดับตัวเลข (8, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6) ซึ่งเรียงจากขนาดมากไปหาน้อย (ตัวอย่าง 8 แคบที่สุด และ 6 กว้างที่สุด) โดยการรวมกันของอนุกรมทั้งสองกล่าวคือ อนุกรมเส้นผ่าศูนย์กลางและอนุกรมความกว้าง รวมกันเป็นอนุกรมมิติ

ความสัมพันธ์ของอนุกรมทั้งสามอธิบายได้ดังรูปที่ 4-10



รูปที่ 4-10 การเปรียบเทียบอนุกรมมิติ (ยกเว้นตลับลูกปืนเม็ดเรียว) สำหรับตลับลูกปืนรับแรงรัศมีที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเดียวกัน

อนุกรมสำหรับตลับลูกปืนเม็ดเรียว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในมาตรฐาน (d) และเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (D) ซึ่งแบ่งเป็น 6 หมวดใหญ่และแสดงด้วยลำดับอักษร (B, C, D, E, F, G) ในการเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (B เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกที่เล็กที่สุด และ G เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก) ความกว้าง (T) ถูกกำหนดเป็นอนุกรมความกว้างด้วยลำดับอักษร 4 ตัว (B, C, D, E) ในลักษณะการเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก ตัวอย่าง E เป็นค่าที่กว้างที่สุด

มุมสัมผัส (a) แสดงโดยอนุกรมมุมสัมผัสจำนวน 6 ตัว (2, 3, 4, 5, 6, 7) ในการเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก (ตัวอย่าง 2 เป็นมุมต่ำสุด 7 คือมุมกว้างสุด) ผลรวมของอนุกรมมุมสัมผัส อนุกรมเส้นผ่าศูนย์กลาง และอนุกรมความกว้าง รวมกันเป็นอนุกรมมิติ

สำหรับตลับลูกปืนกันรุน เส้นผ่าศูนย์กลางภายในมาตรฐาน (d) และเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก (D) ความสัมพันธ์ดังกล่าวถูกแสดงโดยตัวเลขอนุกรมเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ตัว (0, 1, 2, 3, 4) สำหรับเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเดียวกันและเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก รวมความสูง (T) ได้ถูกกำหนดเป็นมาตรฐาน 4 ขั้น และถูกแสดงโดยลำดับตัวเลข (7, 9, 1, 2)

มิติการลบมุม (r) ที่ถูกระบุโดยองค์กร ISO มาตรฐาน 582 และมาตรฐาน JIS B1512 (r_s min เป็นค่ามิติลบมุมต่ำสุดเผื่อ) มิติที่เป็นมาตรฐานทั้ง 22 มิติ สำหรับการลบมุมจาก 0.1 มม. – 19 มม. (0.05, 0.08, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.6, 1, 1.1, 1.5, 2, 2.1, 2.5, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 9.5, 12, 15, 19)

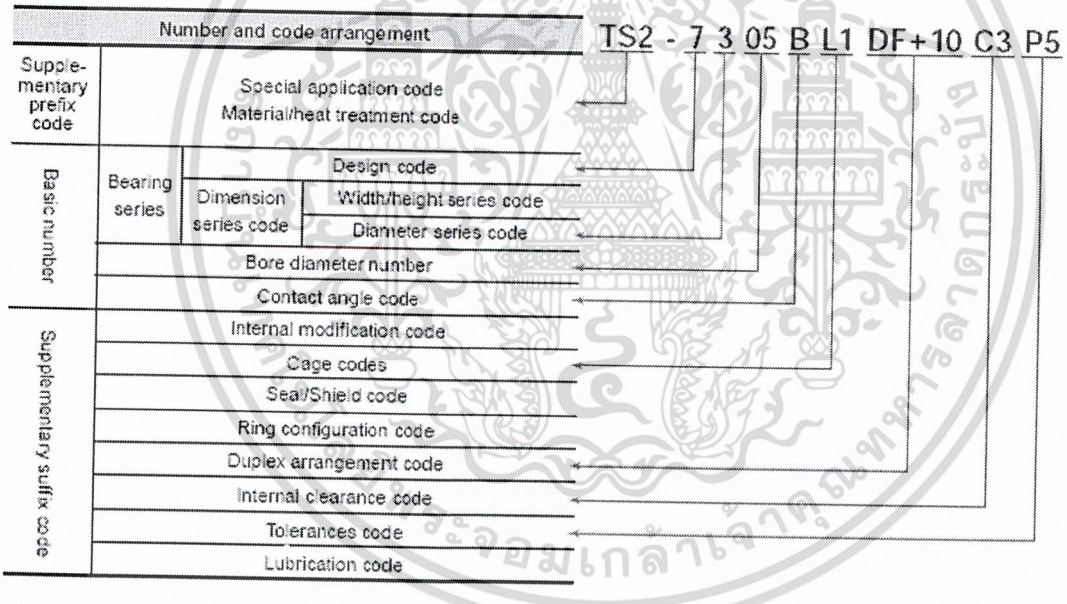
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ทั้งหมดจากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งถูกกำหนดให้เป็นมาตรฐานในขอบเขตของมิติและการรวมขนาดมาตรฐาน (เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน อนุกรมเส้นผ่าศูนย์กลาง อนุกรมความกว้าง และอนุกรมความสูง) ซึ่งยังมีขนาดของตลับลูกปืนมาตรฐานจำนวนมากซึ่งไม่ได้ทำเป็นอุตสาหกรรม

4.2.2 เลขรหัส

เลขรหัสระบุของตลับลูกปืน กำหนดขึ้นตามชนิด มิติ ความเที่ยงตรง โครงสร้างภายในและองค์ประกอบอื่นๆ โดยการกำหนดจากเลขหมายพื้นฐานกับสัญลักษณ์ ช่วยเสริม การวัดเรียงลำดับดังแสดงในตารางที่ 4-1 เลขหมายพื้นฐานแสดงถึงชนิดของตลับลูกปืนมิติหลักอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับรายละเอียดพื้นฐานทั่วไปอันได้แก่ สัญลักษณ์อนุกรมตลับลูกปืน เลขหมายเส้นผ่าศูนย์กลาง และจากสัญลักษณ์มุมสัมผัส ดังแสดงในตาราง 4-2 และตาราง4-3 ตามลำดับ

สัญลักษณ์ช่วยเสริมได้แก่สัญลักษณ์ช่วยเสริมตัวหน้า (Prefix) และสัญลักษณ์ช่วยเสริมตัวหลัง (Suffix) โดยแสดงถึงคุณลักษณะเฉพาะของตลับลูกปืน เช่นความเที่ยงตรงของตลับลูกปืน ช่องเผื่อภายในตลับลูกปืน และอื่นๆ ดังแสดงในตาราง 4-4 และตาราง 4-5



ตารางที่ 4-1 แสดงอนุกรมหมายเลขของตลับลูกปืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bearing series	Type symbol	Dimension series		Bearing type
		width series	diameter series	
67	6	(1)	7	Single row deep groove ball bearings
68		(1)	8	
69		(1)	9	
60		(1)	0	
62		(0)	2	
63		(0)	3	
78	7	(1)	8	Single row angular contact ball bearings
79		(1)	9	
70		(1)	0	
72		(0)	2	
73		(0)	3	
12	1	(0)	2	Self-aligning ball bearings
13	1	(0)	3	
22	2	(2)	2	
23	2	(2)	3	
NU10	NU	1	0	Cylindrical roller bearings
NU2		(0)	2	
NU22		2	2	
NU3		(0)	3	
NU23		2	3	
NU4		(0)	4	
N10	N	1	0	
N2		(0)	2	
N3		(0)	3	
N4		(0)	4	
NF2	NF	(0)	2	
NF3		(0)	3	
NA48	NA	4	8	Needle roller bearings
NA49		4	9	
NA59		5	9	

Bearing series	Type symbol	Dimension series		Bearing type
		width series	diameter series	
329X	3	2	9	Tapered roller bearings
320X		2	0	
302		0	2	
322		2	2	
303		0	3	
303D		0	3	
313X		1	3	
323		2	3	
239	2	3	9	Spherical roller bearings
230		3	0	
240		4	0	
231		3	1	
241		4	1	
222		2	2	
232		3	2	
213		0	3	
223		2	3	
511	5	1	1	Single-thrust ball bearings
512			2	
513			3	
514			4	
522	5	2	2	Double-thrust ball bearings
523			3	
524			4	
811	8	1	1	Cylindrical roller thrust bearings
812		1	2	
893		9	3	
292	2	9	2	Spherical roller thrust bearings
293			3	
294			4	

ตารางที่ 4-2 แสดงสัญลักษณ์ของอนุกรมตลับลูกปืน

Code	Nominal contact angle		Bearing type
A[1]	Standard 30°		Angular contact ball bearings
B	Standard 40°		
C	Standard 15°		
B[1]	Over 10°	Incl. 17°	Tapered roller bearings
C	Over 17°	Incl. 24°	
D	Over 24°	Incl. 32°	

Note 1) A and B are not usually included in bearing numbers.

ตารางที่ 4-3 แสดงสัญลักษณ์แสดงมุมสัมผัสของตลับลูกปืน

Code	Definition
TS-	Dimension stabilized bearing for high temperature use
M-	Hard chrome plated bearings
F-	Stainless steel bearings
H-	High speed steel bearings
N-	Special material bearings
TM-	Specially treated long-life bearings
EC-	Expansion compensation bearings
4T-	NTN 4 Top tapered roller bearings
ET-	ET Tapered roller bearings

ตารางที่ 4-4 แสดงสัญลักษณ์ช่วยเสริมตัวหน้าของตลับลูกปืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Code		Explanation
Internal modifications	U	Internationally interchangeable tapered roller bearings
	R	Non-internationally interchangeable tapered roller bearings
	ST	Low torque tapered roller bearings
	HT	High axial load use cylindrical roller bearings
Cage	L1	Machined Brass cage
	F1	Machined steel cage
	G1	Machined brass cage for cylindrical roller bearings, rivetless
	G2	Pin-type steel cage for tapered roller bearings
	J	Pressed steel cage
	T1	Phenolic cage
	T2	Plastic cage, nylon or teflon
Seal or shield	LLB	Synthetic rubber seal (non-contact type)
	LLU	Synthetic rubber seal (contact type)
	ZZ	Shield
	ZZA	Removable shield
Ring configuration	K	Tapered inner ring bore, taper 1 : 12
	K30	Tapered inner ring bore, taper 1 : 30
	N	Snap ring groove on outer ring, but without snap ring
	NR	Snap ring on outer ring
	D	Bearings with oil holes
Duplex arrangement	DB	Back-to-back arrangement
	DF	Face-to-face arrangement
	DT	Tandem arrangement
	D2	Two identical paired bearings
	G	Single bearings, flush ground side face for DB, DF and DT
	+α	Spacer, (α=nominal width of spacer, mm)

Code		Explanation
Internal clearance	C2	Radial internal clearance less than Normal
	C3	Radial internal clearance greater than Normal
	C4	Radial internal clearance greater than C3
	CM	Radial internal clearance for electric motor bearings
	NA	Non-interchangeable clearance (shown after clearance code)
	/GL	Light preload
	/GN	Normal preload
	/GM	Medium preload
	/GH	Heavy preload
Tolerance standard	P6	JIS standard Class 6
	P6X	JIS standard Class 6X (tapered roller brg.)
	P5	JIS standard Class 5
	P4	JIS standard Class 4
	P2	JIS standard Class 2
	2	Class 2 for inch series tapered roller bearings
	3	Class 3 for inch series tapered roller bearings
	0	Class 0 for inch series tapered roller bearings
	00	Class 00 for inch series tapered roller bearings
Lubrication	/2A	Shell Alvania 2 grease
	/5C	Chevron SRI 2
	/3E	ESSO Beacon 325 grease
	/5K	MUL-TEMP SRL

ตารางที่ 4-5 แสดงสัญลักษณ์ช่วยเสริมตัวหลังของตลับลูกปืน

4.3 การเลือกตลับลูกปืน [8]

ตลับลูกปืนที่ใช้ในปัจจุบันแบ่งชนิดรูปร่างและมิติออกได้หลายแบบแตกต่างกันไป องค์ประกอบที่สำคัญที่สุดในการพิจารณาเลือกตลับลูกปืนคือ ตลับลูกปืนนั้นๆเมื่อติดตั้งเข้ากับเครื่องจักรหรือเป็นส่วนของเครื่องจักรจะสามารถทำงานได้ดีตามความต้องการที่คาดหวังไว้ ฉะนั้นกระบวนการเลือกใช้ตลับลูกปืนนั้นไม่มีกฎเกณฑ์ที่ลำดับการกำหนด แต่โดยทั่วไปแล้วเราอาจประเมินกระบวนการขั้นตอนการเลือกตลับลูกปืนให้เหมาะสมกับงานได้ดังนี้ [8]

(1) ก่อนอื่นต้องทำความเข้าใจกับชนิดของตัวเครื่องจักรที่ตลับลูกปืนถูกนำมาใช้และสภาวะการทำงานภายใต้สมรรถนะของเครื่องจักร

(2) กำหนดขอบข่ายขององค์ประกอบต่างๆที่จำเป็นของตลับลูกปืน

(3) การเลือกรูปแบบของตลับลูกปืน

(4) การเลือกกำหนดตลับลูกปืน

(5) การเลือกมิติของตลับลูกปืน

(6) เลือกรายละเอียดหรือสเป็คของตลับลูกปืน

(7) เลือกวิธีการติดตั้งและอื่นๆของตลับลูกปืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 สภาวะการใช้งานและสภาวะแวดล้อมของตลับลูกปืน

เมื่อต้องการเลือกตลับลูกปืนให้มีความถูกต้องนั้น จะต้องเข้าใจถึงอุปกรณ์และส่วนของเครื่องจักรที่จะถูกติดตั้งอย่างถ่องแท้เสียก่อนและต้องทราบถึงสภาวะการทำงาน ทำให้การเลือกตลับลูกปืนเป็นไปอย่างถูกต้องตามความต้องการและเหมาะสมกับชนิดของงาน ข้อมูลที่จำเป็นในการเลือกได้แก่

(1) ชนิดของอุปกรณ์เครื่องจักรกับโครงสร้าง

(2) ตำแหน่งที่ใช้ติดตั้งของตลับลูกปืน

(3) แรงกระทำต่อตลับลูกปืน (ขนาดและทิศทางของแรง)

(4) ความเร็วในการหมุน

(5) แรงสั่นสะเทือนและแรงกระแทก

(6) อุณหภูมิของตลับลูกปืน (อุณหภูมิรอบๆและอุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทาน)

(7) สภาวะแวดล้อม (การผุกร่อน ความสะอาดของสภาวะแวดล้อม การหล่อลื่น)

4.3.2 องค์ประกอบที่จำเป็นของตลับลูกปืน

การกำหนดความสามารถในการทำงานและความจำเป็นที่เหมาะสมนั้นขึ้นอยู่กับสภาวะการใช้งานและสภาวะการทำงานของตลับลูกปืน โดยองค์ประกอบที่จำเป็นในการพิจารณามีดังนี้

(1) การจำกัดมิติ

(2) ช่วงระยะเวลา

(3) ความแม่นยำในการทำงาน

(4) ความเร็วที่ยอมให้ได้

(5) ความแกร่ง

(6) เสียงรบกวนและความสั่นสะเทือน

(7) แรงเสียดทาน

(8) การเยื้องแนวที่ยอมได้สำหรับแหวนด้านในและแหวนด้านนอก

(9) ความต้องการสำหรับการประกอบและการถอด

(10) ตลับลูกปืนที่สามารถจัดหามาได้และราคาประหยัด

4.3.3 การเลือกออกแบบตลับลูกปืน

ความเหมาะสมในการเลือกออกแบบสามารถกระทำได้โดยการเปรียบเทียบจากชนิดของตลับลูกปืนและการทำงานกับคุณลักษณะของตลับลูกปืนแต่ละชนิด โดยสามารถอ้างอิงคุณลักษณะโดยทั่วไปของตลับลูกปืนชนิดต่างๆจึงได้ดังตารางที่ 4-6

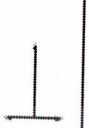
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Bearing types / Characteristics	Deep groove ball bearings	Angular contact ball bearings	Double row angular contact ball bearings	Duplex angular contact ball bearings	Self-aligning ball bearings	Cylindrical roller bearings	Single-flange cylindrical roller bearings	Double-flange cylindrical roller bearings
Load Carrying Capacity (Radial load / Axial load)								
High speed[1]	☆☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆	☆☆☆	☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆
High rotating accuracy[1]	☆☆☆	☆☆☆	☆☆	☆☆☆		☆☆☆	☆☆	☆
Low noise/vibration[1]	☆☆☆☆	☆☆☆☆		☆		☆	☆	☆
Low friction torque[1]	☆☆☆☆	☆☆☆☆		☆☆	☆	☆		
High rigidity[1]			☆☆	☆☆		☆☆	☆☆	☆☆
Vibration/shock resistance[1]			☆		★	☆☆	☆☆	☆☆
Allowable misalignment for inner/outer rings[1]	☆				☆☆☆	☆		
For fixed bearings[2]	◎	○	◎	◎ For DB and DF arrangement	◎		○	◎
For floating bearings[1]	○		○	○ For DB arrangement	○	◎		
Non-separable or separable[4]						○	○	○
Tapered bore bearings[3]					○			
Remarks		For duplex arrangement				NJ, N type	NJ, NF type	NUP, NP, N type
Reference page	B-6	B-44	B-68	B-44	B-74	B-84	B-84	B-84

Note 1) ☆ The number of stars indicate the degree to which that bearing type displays that particular characteristic.
★ Not applicable to that bearing type.
2) ◎ Indicates dual direction. ○ Indicates single direction axial movement only.

ตารางที่ 4-6-1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติตลับลูกปืนแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Double row cylindrical roller bearings	Needle roller bearings	Tapered roller bearings	Spherical roller bearings	Thrust ball bearings	Thrust ball bearings with seating ring	Double row angular contact thrust ball bearings	Cylindrical roller thrust bearings	Spherical roller thrust bearings	Reference page
									
☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆	☆	☆	☆☆☆	☆	☆	A-77
☆☆☆		☆☆☆		☆		☆☆☆			A-22
☆	☆								A-77
									A-78
☆☆☆	☆☆	☆☆	☆☆☆			☆☆	☆☆☆	☆☆☆	A-74
☆☆	☆☆	☆☆	☆☆☆			★	☆☆☆	☆☆☆	—
		☆	☆☆☆	★	☆☆☆	★	★	☆☆☆	—
		○	◎	○	○	◎	○	○	A-94
◎	◎		○						A-94
○	○	○		○	○	○	○	○	—
○			○						A-99
NNU, NN, type		For duplex arrangment					Housing thrust needle roller bearings		
B-85	B-112	B-118	B-186	B-218	B-218	B-218	B-218	B-218	

c. 3) ◎ Indicates movement at raceway. ○ Indicates movement at mated surface of inner or outer ring.
4) ○ Indicates both inner ring and outer ring are detachable.
5) ○ Indicates inner ring with tapered bore is possible.

ตารางที่ 4-6-2 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติตลับลูกปืนแต่ละชนิด

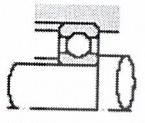
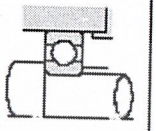
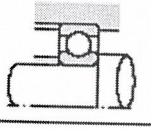
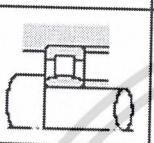
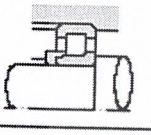
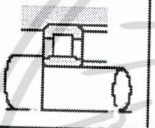
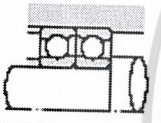
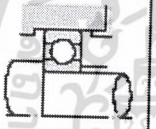
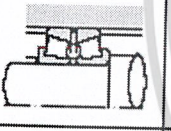
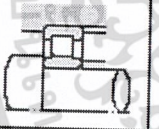
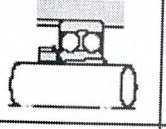
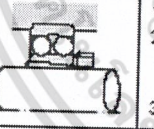
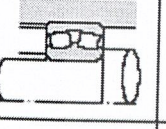
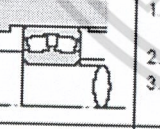
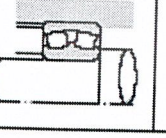
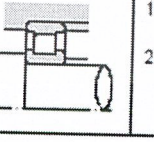
4.3.4 การเลือกกำหนดตลับลูกปืน

โดยทั่วไปการประกอบเพลาต้องมีตลับลูกปืนสองตลับมายึดและกำหนดตำแหน่งเพลาทั้งในแนวรัศมีและแนวแกนที่สัมพันธ์กับตัวเสื้อที่ติดอยู่กับที่ ตลับลูกปืนดังกล่าวถูกเรียกว่า ตลับลูกปืนด้านตรึง (Fixed Bearing) และด้านลอย (Floating Bearing) ตลับลูกปืนจะรับแรงทั้งในแนวแกนและในแนวรัศมี และจะกำหนดตำแหน่งหรือปรับแนวแกนเพลาให้สัมพันธ์กับตัวเสื้อ (Housing) ในทำนองเดียวกัน ปล่อยให้อีกด้านหนึ่งลอยตัวอิสระเพื่อยอมให้แรงดันที่เกิดจากการขยายหรือหดตัวของเพลาเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น และยังช่วยขจัดความผิดพลาดเนื่องจากการเยื้องแนว (Misalignment) เนื่องจากความผิดพลาดในการยึดติดตั้ง (Fitting Error)

ตลับลูกปืนซึ่งสามารถรองรับแรงในแนวแกนได้ทั้งสองทิศทางนั้นเหมาะสมที่สุดสำหรับใช้เป็นตลับลูกปืนด้านตรึง สำหรับตลับลูกปืนด้านลอยนั้นการเคลื่อนตัวในแนวแกนไปตามร่องทางวิ่ง (ตัวอย่างเช่นตลับลูกปืนเม็ดทรงกระบอก) หรือหน้าสัมผัสสวมอัด (ตัวอย่างเช่นตลับลูกปืนเม็ดกลมร่องลึก) นอกจากนี้มีการกำหนดให้ตลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลูกปืนสัมผัสเชิงมุมรับแรงเพียงด้านเดียว (ตัวอย่างเช่นตลับลูกปืนเม็ดกลมเชิงสัมผัส) ทำหน้าที่เป็นตลับลูกปืนด้านตรึงและด้านลอยตามลำดับ โดยตลับลูกปืนแต่ละตลับจะรองรับและเป็นตัวนำให้เพลาไปในทิศทางแนวแกนแนวเดียวเท่านั้น การเตรียมการดังกล่าวถูกใช้ในการเปรียบเทียบกับการใช้เพลาสั้น โดยการจัดเตรียมติดตั้งตลับลูกปืนดังแสดงในตารางที่ 4-7

Arrangement		Comment	Application
Fixed	Floating		
		1. General arrangement for small machinery 2. For radial loads, but will also accept axial loads. 3. Preloading by springs or shims on outer ring face.	Small pumps, small electric motors, auto-mobile transmissions, etc.
		1. Suitable for high speed. Widely used. 2. Even with expansion and contraction of shaft, non-fixing side moves smoothly.	Medium-sized electric motors, ventilators, etc.
		1. Withstands heavy loading and some axial loading. 2. Inner and outer ring shrink-fit suitable. 3. Easy mounting and dismounting.	Railway vehicle electric motors, etc.
		1. Radial loading plus dual direction axial loading possible. 2. In place of duplex angular contact ball bearings, double-row angular contact ball bearings are also used.	Wormgear speed reducers, etc.
		1. Heavy loading capable. 2. Shafting rigidity increased by preloading the two back-to-back fixed bearings. 3. Requires high precision shafts and housings, and minimal fitting errors.	Machine tool spindles, etc.
		1. Allows for shaft deflection and fitting errors. 2. By using an adaptor on long shafts without screws or shoulders, bearing mounting and dismounting can be facilitated. 3. Not suitable for axial load applications.	Counter shafts for general industrial equipment, etc.
		1. Widely used in general industrial machinery with heavy and shock load demands. 2. Allows for shaft deflection and fitting errors. 3. Accepts radial loads as well as dual direction axial loads.	Reduction gears for general industrial equipment, etc.
		1. Widely used in general industrial machinery with heavy and shock loading. 2. Radial and dual directional axial loading.	Industrial machinery reduction gears, etc.

ตารางที่ 4-7 ตารางแสดงการติดตั้งตลับลูกปืน

4.3.5 ความเผื่อของตลับลูกปืน

พิกัดความเผื่อของตลับลูกปืน เช่น ความถูกต้องของขนาดของตลับลูกปืน ความถูกต้องการขับหมุนของตลับลูกปืน ฯลฯ ซึ่งถูกกำหนดตามมาตรฐาน เช่น มาตรฐาน ISO และมาตรฐาน JIS สำหรับความถูกต้องของขนาดของตลับลูกปืนนั้นตามมาตรฐานได้กำหนดค่าพิกัดความเผื่อและค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมให้ได้ตามขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของตลับลูกปืน (ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของรูเพลาของตลับลูกปืน) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของตลับลูกปืน ความกว้าง ความกว้างของตลับลูกปืน เมื่อประกอบแล้วรัศมีลบมุม และค่าความเรียว ค่าต่างๆเหล่านี้มีความจำเป็นต่อการประกอบตลับลูกปืนกับเพลาหรือเสื้อตลับลูกปืน สำหรับค่าความถูกต้อง มาตรฐานความแม่นยำการผลิตได้กำหนดค่าสูงสุดที่ยอมให้ได้เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกโดยเฉลี่ยและความกว้าง หรือความหนาทางเดินของลูกปืน (สำหรับตลับลูกปืนกันรุน) ลำดับความแม่นยำจะเป็นการกำหนดขอบเขตความคาดเคลื่อนของตลับลูกปืน ซึ่งประกอบด้วยความมาตรบานของตัววงแหวนนอกและใน โดยจะมีความคลาดเคลื่อนจากตัวผิวด้านข้างและเส้นผ่าศูนย์กลางของวงนอกและวงในความเผื่อและความคลาดเคลื่อนที่ยอมได้ จะจำแนกออกเป็นแต่ละความเผื่อหรือชั้น ตัวอย่างเช่น มาตรฐาน JIS B1514 (พิกัดความเผื่อสำหรับตลับลูกปืน) ได้จำแนกออกเป็น 5 ชั้น (0, 6, 5, 4, 2) เริ่มต้นจากชั้น 0 (เป็นชั้นของตลับลูกปืนมีความถูกต้องเที่ยงตรงสำหรับใช้ทั่วไป) ค่าความถูกต้องของตลับลูกปืนสูงขึ้นตามตัวเลขแสดงชั้นของตลับลูกปืนที่มีตัวเลขน้อยลง

การเปรียบเทียบพิกัดความเผื่อสัมพัทธ์กับชั้นมาตรฐานระหว่างมาตรฐานของ JIS ชั้น B1514 และมาตรฐานอื่นได้แสดงเปรียบเทียบในตารางที่ 4-8

Standard		Tolerance Class					Bearing Types
Japanese Industrial Standard	JIS B 1514	Class 0 Class 6X	Class 6	Class 5	Class 4	Class 2	All types
International Organization for Standardization	ISO 492	Normal class Class 6X	Class 6	Class 5	Class 4	Class 2	Radial bearings
	ISO 199	Normal class	Class 6	Class 5	Class 4	—	Thrust ball bearings
	ISO 578	Class 4	—	Class 3	Class 0	Class 00	Tapered roller bearings (Inch series)
	ISO 1224	—	—	Class 5A	Class 4A	—	Precision instrument bearings
Deutsches Institut fur Normung	DIN 620	P0	P6	P5	P4	P2	All types
American National Standards Institute (ANSI) Anti-Friction Bearing Manufacturers (AFBMA)	ANSI/AFBMA Std. 20[1]	ABEC-1 RBEC-1	ABEC-3 RBEC-3	ABEC-5 RBEC-5	ABEC-7	ABEC-9	Radial bearings (Except tapered roller bearings)
	ANSI/AFBMA Std. 19.1	Class K	Class N	Class C	Class B	Class A	Tapered roller bearings (Metric series)
	ANSI B 3.19 AFBMA Std. 19	Class 4	Class 2	Class 3	Class 0	Class 00	Tapered roller bearings (Inch series)
	ANSI/AFBMA Std. 12.1	—	Class 3P	Class 5P Class 5T	Class 7P Class 7T	Class 9P	Precision instrument ball bearings (Metric series)
	ANSI/AFBMA Sts. 12.2	—	Class 3P	Class 5P Class 5T	Class 7P Class 7T	Class 9P	Precision instrument ball bearings (Inch series)

1) "ABEC" is applied for ball bearings and "RBEC" for roller bearings.

Notes: 1. JIS B 1514, ISO 492 and 199, and DIN 620 have the same specification level.
2. The tolerance and allowance of JIS B 1514 are a little different from those of AFBMA standards.

ตารางที่ 4-8 ตารางเปรียบเทียบค่าความเผื่อของมาตรฐานสากล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การสวมแน่นตลับลูกปืน [8]

4.4.1 การสวมแน่น (Interference)

สำหรับตลับลูกปืน แหวนของตลับลูกปืนจะสวมอัดติดกับเพลาหรืออยู่ในเสื้อตลับลูกปืนดังนั้นจะไม่เกิดการลื่นไถลหรือการเคลื่อนที่ระหว่างผิวที่สวมติดกันนั้น ระหว่างการทำงานภายใต้ภาระการเคลื่อนขยับสัมพัทธ์ (บางครั้งเรียก creep) ระหว่างผิวที่สวมปรับของตลับลูกปืนและเพลาหรือเสื้อตลับลูกปืนอาจจะเกิดในแนวรัศมีหรือในแนวแกน หรือในทิศทางของการหมุน การเกิด creep ภายใต้ภาระจะทำให้เกิดความเสียหายต่อแหวนตลับลูกปืน เพลา หรือเสื้อตลับลูกปืนในรูปของการสึกหรอ หรือการเกิดรอยขีดข่วน หรือการแตกร้าวเนื่องจากความฝืด ซึ่งจะทำให้เศษฝุ่นโลหะเข้าไปในตลับลูกปืนและจะทำให้เกิดการสั่น ทำให้ความร้อนสูงเกินไป ทำให้ประสิทธิภาพในการหมุนลดต่ำลง เพื่อให้แน่ใจว่าไม่เกิดการลื่นไถลระหว่างตลับลูกปืนกับเพลาหรือเสื้อตลับลูกปืน ตลับลูกปืนปกติจะติดตั้งแบบสวมปรับแน่น

การสวมปรับที่ให้ผลมากที่สุดคือการสวมปรับแน่น (หรือการสวมปรับด้วยวิธีหดตัว) ข้อดีของการสวมปรับแน่นกับตลับลูกปืนที่มีผนังผิวบางก็เพื่อให้ภาระกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอด เส้นรอบวงแหวนจะไม่ทำให้ความสามารถในการรับภาระของตลับลูกปืนลดลง อย่างไรก็ตามการสวมปรับแน่นนั้นสามารถสวมประกอบตลับลูกปืนง่ายและถอดได้ค่อนข้างยาก สำหรับตลับลูกปืนที่ไม่สามารถแยกตลับออกได้จะไม่มีระยะเคลื่อนที่ในแนวแกน

4.4.2 การเลือกปรับการสวมแน่น

การเลือกปรับการสวมแน่นที่เหมาะสมจะขึ้นกับปัจจัยต่างๆดังนี้

(1) ทิศทางและภาระต่างๆที่กระทำต่อตลับลูกปืน

(2) แหวนในหรือแหวนนอกที่เป็นตัวหมุน

(3) ภาระกระทำต่อแหวนในหรือแหวนนอกที่หมุนหรือไม่หมุน

(4) เป็นภาระสถิตหรือภาระที่ไม่สามารถหาทิศทางได้

สำหรับตลับลูกปืนที่หมุนรับภาระหรือที่ไม่สามารถหาทิศทางการของภาระได้นั้นควรใช้การสวมปรับแน่น แต่สำหรับตลับลูกปืนที่รับภาระสถิตควรใช้การสวมปรับแน่นไม่มากนักหรือแบบสวมธรรมดาก็เพียงพอ

ระยะยืดหดเมื่อสวมปรับแน่นจะเหมาะกับตลับลูกปืนรับภาระหนักหรือเกิดการสั่นและรับแรงสะท้านการสวมปรับแน่นกว่าปกติจำเป็นกับตลับลูกปืนที่ใช้รองรับเพลากลวง หรือเสื้อตลับลูกปืนที่มีผนังบาง หรือเสื้อตลับลูกปืนที่ทำด้วยวัสดุโลหะผสมเบาหรือพลาสติก

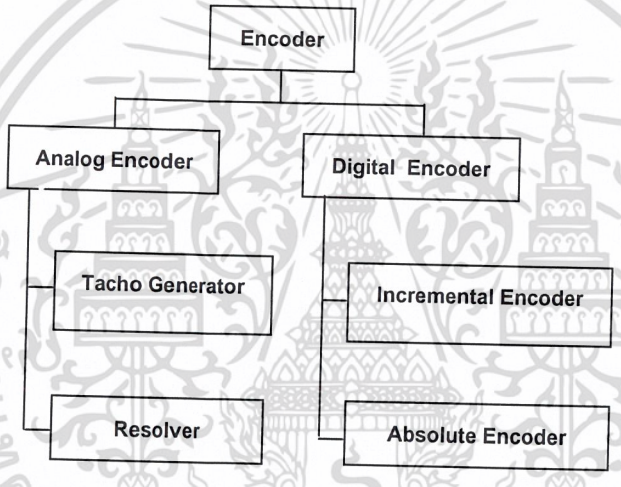
การใช้งานที่ต้องการความถูกต้องสูง จำเป็นต้องใช้ตลับลูกปืนที่มีความเที่ยงตรงสูง และมีค่าพิกัดความเผื่อของเพลาและเสื้อตลับลูกปืนสูง ควรหลีกเลี่ยงการสวมปรับที่ให้ระยะยืดหดสูงเพราะจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเสื้อตลับลูกปืนทำให้ความเที่ยงของการหมุนของตลับลูกปืนลดลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
เอนโคดเดอร์ (Encoder)

5.1 บทนำ

เอนโคดเดอร์เป็นอุปกรณ์ตรวจรู้ (sensor) ชนิดหนึ่ง ทำหน้าที่หลายอย่าง เช่น ตรวจวัดความเร็ว (speed)ทิศทางการหมุนของมอเตอร์ (Direction of Rotation) และตำแหน่งเพลา (shaft position) โดยในที่นี้จะใช้เอนโค้ดเดอร์ในการวัดการหมุนของแต่ละข้อต่อ โดยเอนโค้ดเดอร์จะส่งสัญญาณพัลส์ไปยังการ์ดรับและประมวลผลสัญญาณ เพื่อนำค่ามุมที่แต่ละข้อต่อเคลื่อนที่ไปทำการคำนวณต่อไป โดยสามารถแบ่งประเภทของเอนโค้ดเดอร์ได้ตามรูปที่ 5-1 [19]



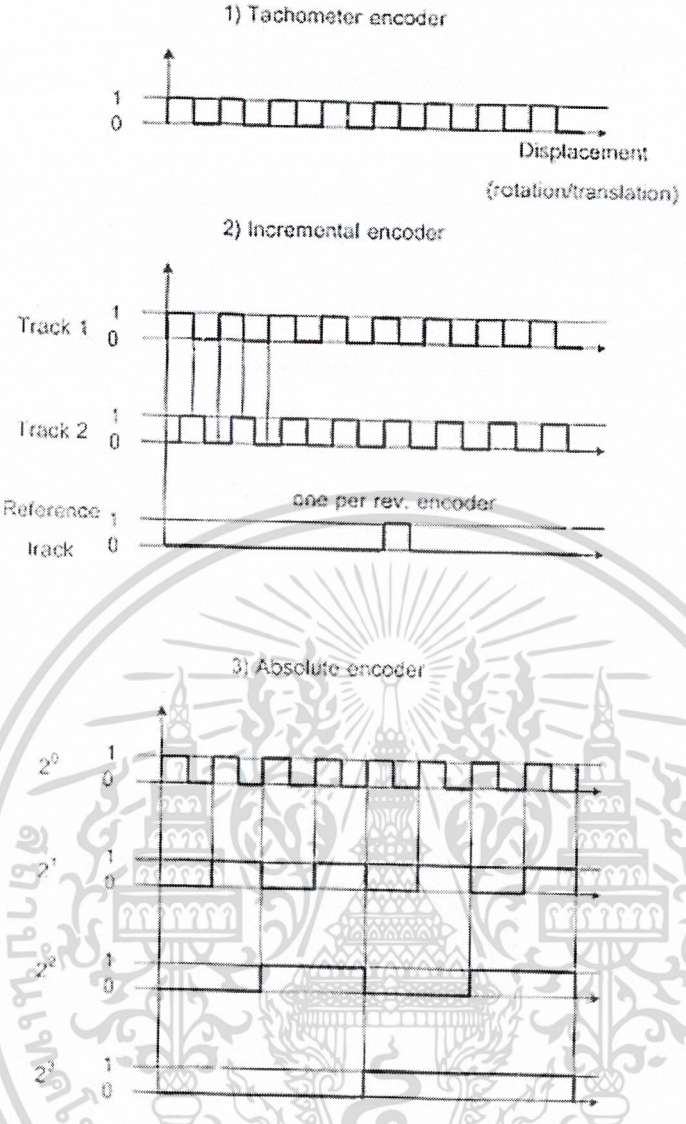
รูปที่ 5-1 แสดงการแบ่งประเภทของเอนโคดเดอร์

5.2 โรตารี่เอนโคดเดอร์ (Rotary Encoder) [11]

5.2.1 หลักการทำงานของโรตารี่เอนโคดเดอร์

โดยทั่วไปไม่ว่าจะเป็นทั้งทรานสเลชั่นแนล (Translational) หรือโรตารี่เอนโคดเดอร์ จะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทหลักดังนี้ แทคโคมิเตอร์ (Tachometer) อินครีเมนทอล (Incremental) และแอ็บโซลูท (Absolute) ในรูปที่ 5-2 จะแสดงถึงคุณลักษณะของของสัญญาณที่ได้จากเอนโคดเดอร์ทั้ง 3 แบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 รูปแสดงลักษณะสัญญาณของเอนโคดเดอร์ทั้ง 3 ชนิด

5.2.1.1 แทคโคมิเตอร์เอนโคดเดอร์

จากรูปที่ 5-2 จะเห็นว่า แทคโคมิเตอร์เอนโคดเดอร์ จะให้สัญญาณออกเพียงสัญญาณเดียวที่ประกอบด้วยลูกคลื่น (Pulse) ที่เกิดจากแต่ละขั้นการเคลื่อนที่ (Incremental Step of Displacement) โดยไม่สนใจทิศทางของการเคลื่อนที่ ดังนั้นหากเป็นการเคลื่อนที่ใน 2 ทิศทางจะทำให้ค่าที่ได้มีความผิดพลาด เอนโคดเดอร์ชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับการตรวจวัดความเร็วมากกว่าการตรวจวัดตำแหน่งนอกจากว่าเป็นการเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวเท่านั้น

5.2.1.2 อินครีเมนทอลเอนโคดเดอร์

สำหรับอินครีเมนทอลเอนโคดเดอร์ จะให้สัญญาณขาออกอย่างน้อย 2 สัญญาณ เพื่อแก้ปัญหาการเคลื่อนที่ใน 2 ทิศทาง โดยสัญญาณขาออกแต่ละสัญญาณจะมีเฟสแตกต่างกันหนึ่งในสี่ การหาทิศทางการเคลื่อนที่ของเอนโคดเดอร์จะทำได้โดยการตรวจสัญญาณว่าสัญญาณใดจะเกิดขึ้นก่อน นอกจากนี้อินครีเมนทอลเอนโคดเดอร์ยังอาจ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

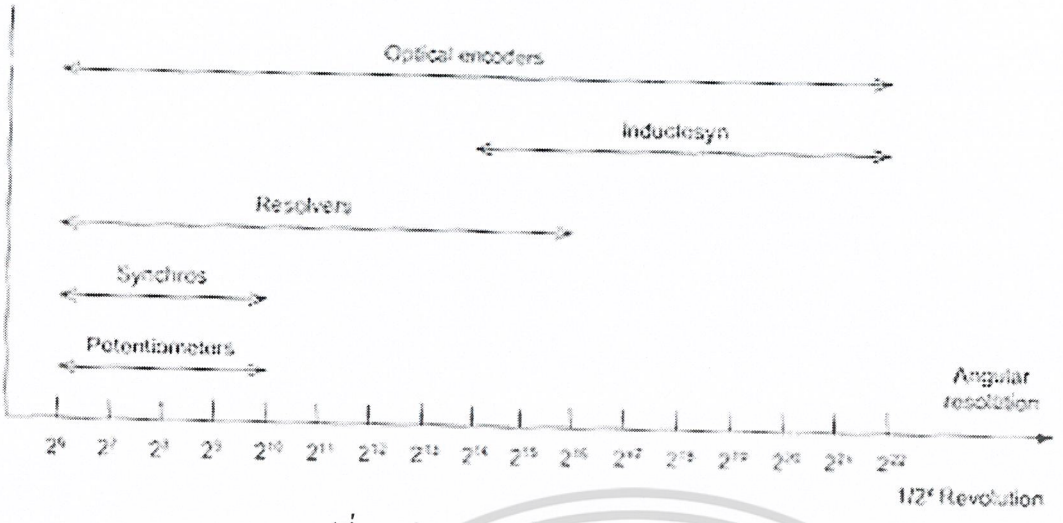
จะมีสัญญาณขาออกอีก 1 สัญญาณซึ่งจะให้สัญญาณออกมาเพียง 1 สัญญาณต่อรอบการเคลื่อนที่ที่ตำแหน่งคงที่ตำแหน่งหนึ่งซึ่งบางครั้งถูกเรียกว่า จุดศูนย์อ้างอิง (Zero Reference) อินครีเมนทอลเอนโคดเดอร์มีข้อดีคือ สามารถหมุนรอบตัวเองเท่าใดก็ได้ตามลักษณะของงานที่นำไปใช้ แต่อย่างไรก็ตามสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้า (Electrical Noise) สามารถทำให้เกิดการผิดพลาดในการวัดได้ โดยความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้จะยังคงมีอยู่ตลอดการใช้งานถึงแม้ว่าสัญญาณรบกวนจะหมดไปแล้วก็ตาม อีกทั้งหากพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับอินครีเมนทอลเอนโคดเดอร์หมดไปข้อมูลตำแหน่งที่เก็บไว้ก็จะหายไปด้วยเช่นกันถึงแม้จะมีการป้อนพลังงานไฟฟ้ากลับเข้าสู่ตัวอินครีเมนทอลเอนโคดเดอร์ใหม่แล้วก็ตาม

5.2.1.3 แอ็บโซลูทเอนโคดเดอร์

การใช้งานแอ็บโซลูทเอนโคดเดอร์ โดยทั่วไปแล้วจะถูกจำกัดให้ใช้งานได้เพียงการหมุนในหนึ่งรอบเท่านั้นและจะให้สัญญาณขาออกมากกว่าแบบอินครีเมนทอลเอนโคดเดอร์มาก โดยจะให้สัญญาณขาออกมาเป็นแบบไบนารี่ (Binary) เพื่อแสดงตำแหน่งเชิงมุมของเพลาแอ็บโซลูทเอนโคดเดอร์ได้ทันที ดังนั้นแอ็บโซลูทเอนโคดเดอร์จึงสามารถเก็บรักษาตำแหน่งข้อมูลเอาไว้ได้ถึงแม้จะไม่มีสัญญาณไฟฟ้าป้อนอยู่ก็ตาม อีกทั้งสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเพียงชั่วคราวก็จะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการวัดเพียงชั่วคราวเช่นกัน โดยเมื่อสัญญาณรบกวนหมดไปแอ็บโซลูทเอนโคดเดอร์สามารถที่จะให้ข้อมูลตำแหน่งที่ถูกต้องเช่นเดิมได้ แต่ข้อเสียคือหากเคลื่อนที่ในระยะทางไกลช่องสัญญาณต้องมีจำนวนมากและโดยทั่วไปแอ็บโซลูทเอนโคดเดอร์จะมีราคาสูงกว่าอินครีเมนทอลเอนโค้ดเดอร์มาก

นอกจากการแบ่งเอนโคดเดอร์ออกเป็น 3 แบบด้วยลักษณะสัญญาณดังแสดงข้างต้นแล้ว เอนโคดเดอร์ยังสามารถที่จะแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ แบบสัมผัส (Contact Devices) และแบบไม่สัมผัส (Noncontacting Devices) ซึ่งใช้หลักการทางแม่เหล็ก หรือทางแสง (Magnetic or Optical Principles) ในการบอกตำแหน่ง โดยทั่วไปแล้วหากงานที่ทำการวัดต้องการความละเอียดสูงจะต้องใช้อ๊อปติคอลเอนโคดเดอร์ โดยรูปที่ 5-3 จะแสดงให้เห็นถึงค่าความละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้วัดตำแหน่งต่างๆที่มีขายอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าเอนโคดเดอร์แบบอ๊อปติคอลจะมีค่าความละเอียดสูงกว่าแบบอื่นๆ อีกทั้งยังเป็นที่นิยมและหาซื้อได้ตามท้องตลาดทั่วไปได้โดยไม่ยาก

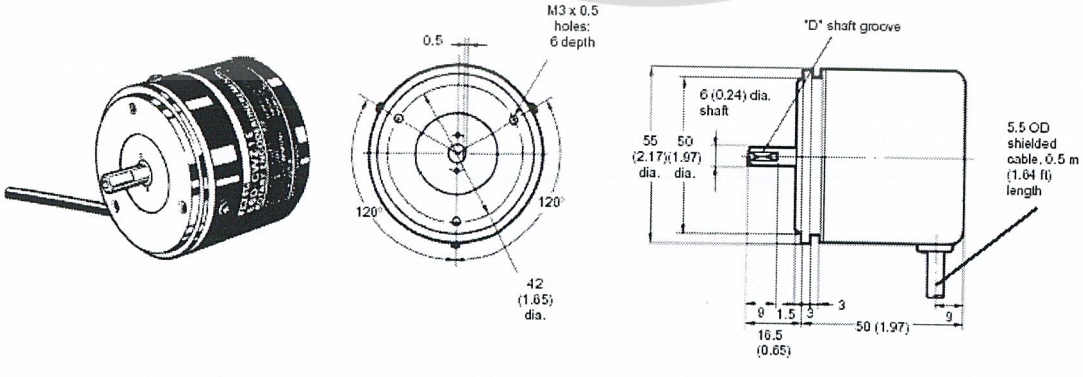
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5-3 ค่าความละเอียดของตัววัดตำแหน่งแบบต่างๆ

ซึ่งโครงงานนี้ได้เลือกใช้ Incremental Rotary Encoder ของ Omron รุ่น E6D-CWZ1E (ดังแสดงในรูปที่5-4) ทั้งหมด 3 ตัวโดยมีคุณสมบัติดังนี้ [10]

Supply Voltage	:	5 VDC ± 5%
Current Consumption	:	150 mA max.
Resolution	:	5,000 PPR
Output phases	:	A, B, Z
Rotation direction	:	Reversible, CW+CCW
Starting torque	:	100 g-cm^2
Approximate Weight	:	280 g
Operating temperature	:	-10°C to 70°C
Storage temperature	:	-25°C to 80°C
Ambient Humidity	:	35% to 80% RH



รูปที่ 5-4 เอนโค้ดเดอร์ Omron รุ่น E6D-CWZ1E [10]

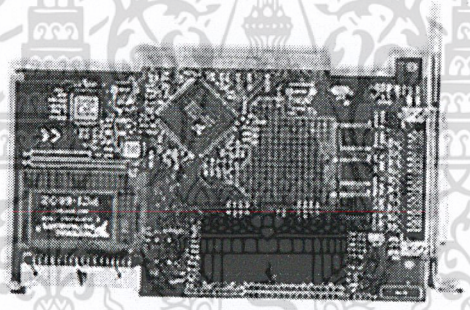
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
การ์ดรับและประมวลผลสัญญาณจากนเอนโคดเดอร์

จากเนื้อหาในบทต่างๆ ก่อนหน้านี้ที่ได้กล่าวถึงในส่วนของหลักการของเครื่องมือวัด วัสดุที่ใช้ เอนโค้ดเดอร์ แบริ่ง สิ่งจำเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่จะขาดไม่ได้เลยก็คืออุปกรณ์ และโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณและแสดงผลพิกัดที่ได้จากการวัด ดังนั้นในบทนี้จะขอกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการรับสัญญาณจากเอ็นโคดเดอร์เพื่อนำมาประมวลผล

6.1 การ์ดรับและประมวลผลสัญญาณจากนเอนโค้ดเดอร์

การ์ดรับและประมวลผลสัญญาณจากเอนโค้ดเดอร์จะทำหน้าที่ในการติดต่อรับสัญญาณขาออกที่ได้มาจากเอนโค้ดเดอร์ แล้วนำมาประมวลผลเพื่อหาทิศทางการหมุน, ตำแหน่ง, ความเร็ว และเก็บข้อมูลของตัวเอนโค้ดเดอร์ โดยในโครงงานนี้ได้ใช้การ์ดรับและประมวลผลสัญญาณ “เคาท์เตอร์/ไทเมอร์ส เอ็นไอ 6602 (Counter/Timers NI 6602)” ของบริษัท National Instruments [20]



รูปที่ 6-1 แสดง เคาท์เตอร์/ไทเมอร์ส เอ็นไอ 6602 (Counter/Timers NI 6602)

เคาท์เตอร์/ไทเมอร์ส เอ็นไอ 6602 (ดังแสดงในรูปที่6-1) จะสามารถรับสัญญาณมาจากเอนโค้ดเดอร์ได้พร้อมกัน 8 ตัว (8 ช่องสัญญาณ) และสื่อสารกับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทาง พีซีไอบัส (PCI Bus) โดยมีคุณสมบัติอื่นๆ (Specification) ดังต่อไปนี้

สภาพแวดล้อมในการใช้งาน

ช่วงอุณหภูมิทำงาน	:	0 ถึง 50 องศาเซลเซียส
ช่วงอุณหภูมิในการเก็บรักษา	:	-20 ถึง 70 องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์	:	10 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีการกลั่นตัว (10 to 90 %, noncondensing)

ปริมาณไฟที่ต้องการ

กำลังไฟหลัก	:	+5 VDC (± 5%) 0.5 ถึง 1.5 A
กำลังไฟที่ช่องต่อสัญญาณเข้าออก	:	+4.65 to +5.25 VDC, 1 A

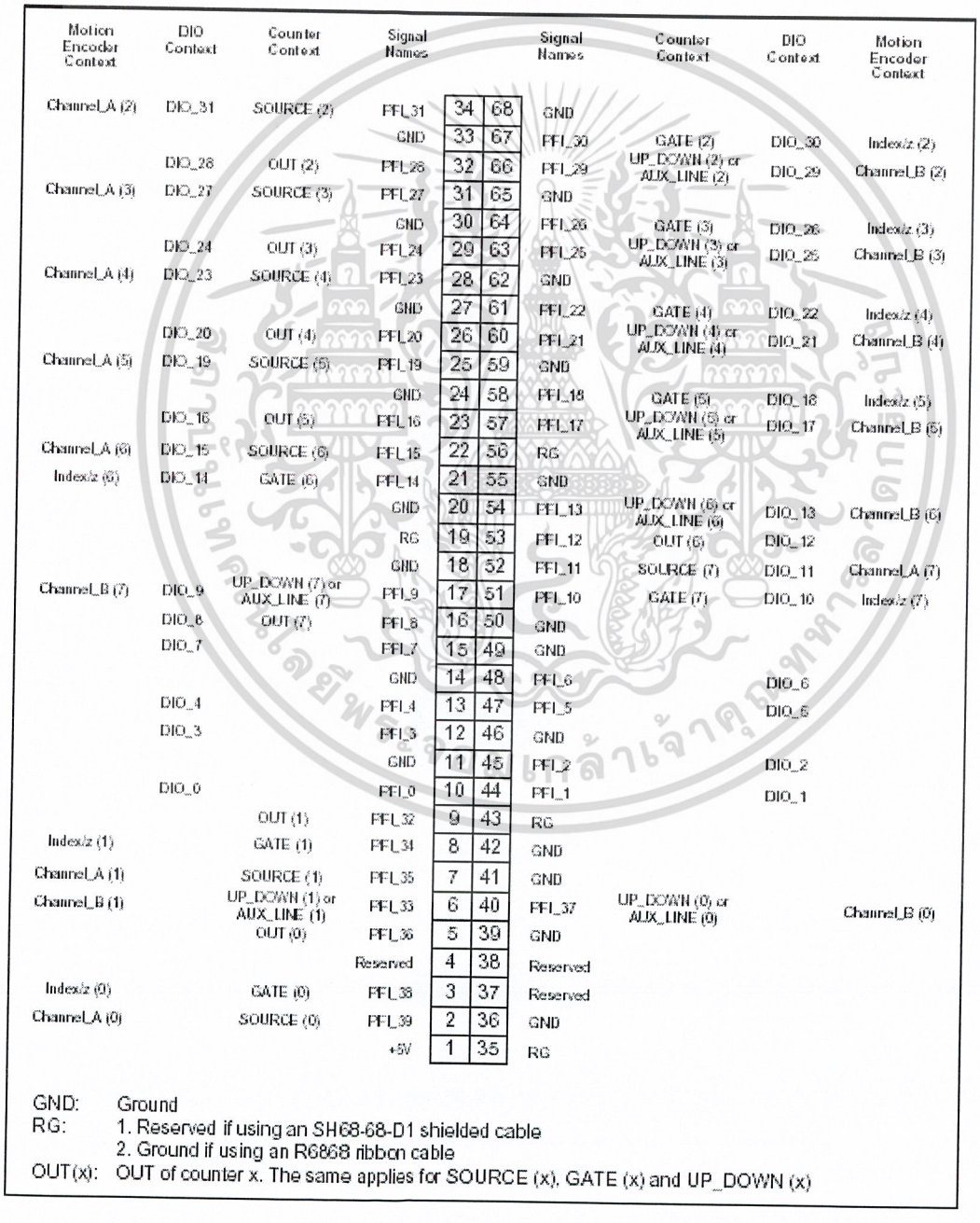
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การติดต่อกับคอมพิวเตอร์

บัส (Bus) ที่ใช้ในการติดต่อ	:	PCI BUS
จำนวนบิต	:	32 บิต

การติดต่อกับเอ็นโค้ดเดอร์

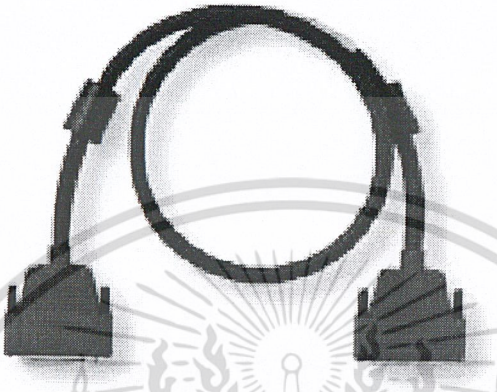
ชนิดของเอ็นโค้ดเดอร์	:	Incremental Encoder แบบ 3 ช่องสัญญาณ
ความถี่ของแล่งกำเนิดสูงสุด	:	80 MHz
จำนวนสัญญาณสูงสุดที่นับได้	:	4,294,967,295 เคาน์ท (Counts)



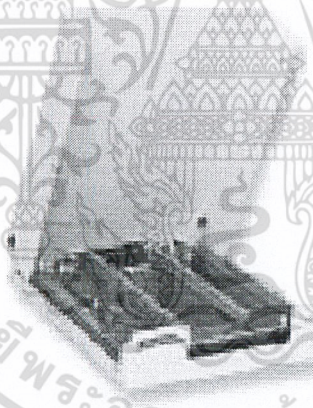
รูปที่ 6-2 รูปแสดงช่องต่อสัญญาณขาเข้าของเคาท์เตอร์/ไทเมอร์ส เอ็นไอ 6602

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในการใช้งานการ์ดรับและประมวลผลสัญญาณ เคาท์เตอร์/ไทเมอร์ส เอ็นไอ 6602 จะต้องใช้งานร่วมกับสายนำสัญญาณรุ่น SH68-68D1 (ดังแสดงในรูปที่6-3) ซึ่งเป็นสายนำสัญญาณที่มีการป้องกันสัญญาณรบกวน และใช้กล่องเชื่อมต่อรุ่น SCB-68 (ดังแสดงในรูปที่6-4) ซึ่งมีช่องเชื่อมต่อแบบขันจำนวน 68 ช่อง และมีการป้องกันสัญญาณรบกวนขณะใช้งาน



รูปที่ 6-3 สายนำสัญญาณรุ่น SH68-68D1



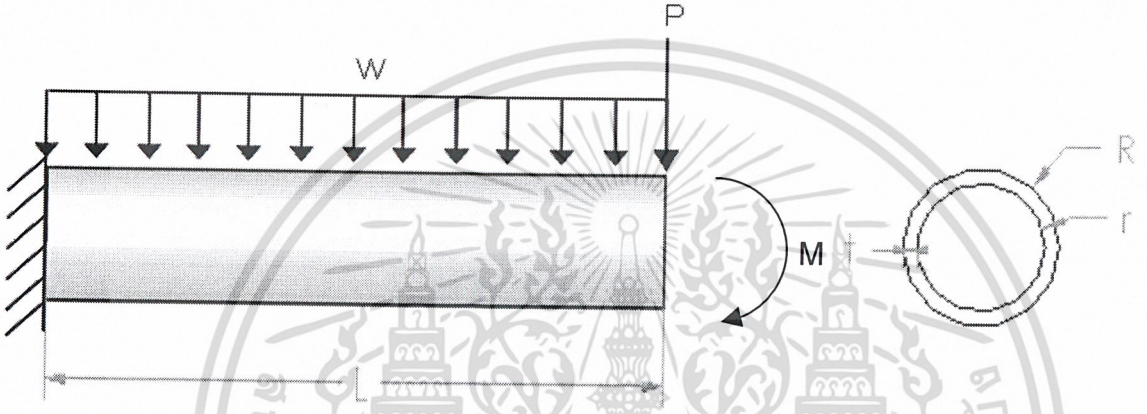
รูปที่ 6-4 กล่องเชื่อมต่อรุ่น SCB-68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 7
การออกแบบ

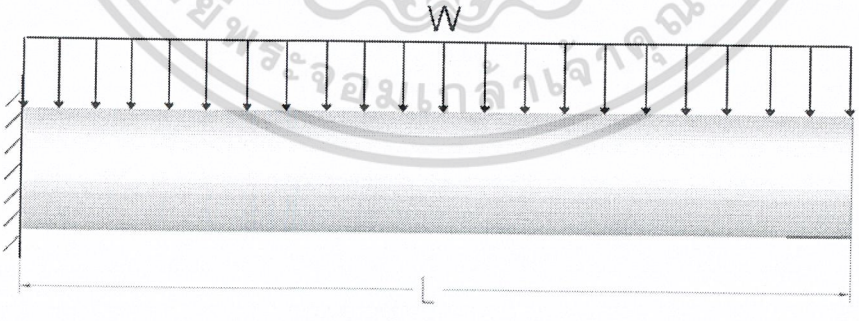
7.1 การหาขนาดความหนาของแขนวัดที่เหมาะสม

การพิจารณาหาความหนาที่เหมาะสมจะทำการวิเคราะห์การเสียรูปที่มีตัวแปรต้นคือความหนา ตามวิธีการทาง Solid Mechanics สามารถคำนวณโดยการโมเดลปัญหาเป็นดังนี้



รูปที่ 7-1 แสดงรูปที่ใช้ในการวิเคราะห์

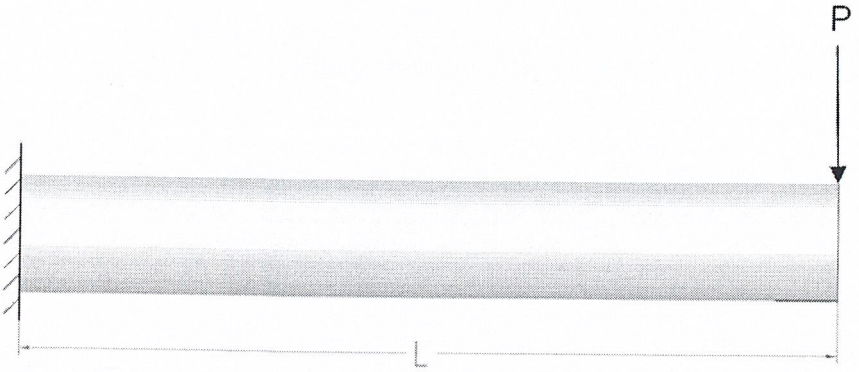
โดยแทนน้ำหนักอันเนื่องมาจากแขนวัดด้วย W น้ำหนักที่กดที่ปลายของแขนวัดด้วย F และโมเมนต์อันเนื่องมาจากแรงเยื้องศูนย์ที่กระทำต่อแขนวัดด้วย M โดยการคำนวณจะให้มีค่า Safety Factor เท่ากับ 1.2



รูปที่ 7-2 แสดงแรงกระจายอันเนื่องจากน้ำหนักของแขนวัด

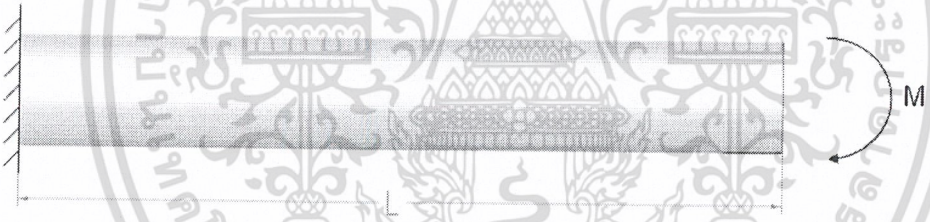
$$\upsilon_1 = -\frac{WL^4}{8EI} = -\frac{\rho g L^4 \left(R^2 - r^2\right)}{2E\left(R^4 - r^4\right)} \tag{7.1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7-3 แสดงแรงกระทำที่กดลงส่วนปลายแขนวัด

$$\upsilon_2 = -\frac{PL^3}{3EI} = -\frac{4PL^3}{3\pi E\left(R^4 - r^4\right)} \tag{7.2}$$



รูปที่ 7-4 แสดงโมเมนต์เนื่องจากแรงกดเยื้องศูนย์

$$\upsilon_3 = -\frac{ML^2}{2EI} = -\frac{2ML^2}{\pi E\left(R^4 - r^4\right)} \tag{7.3}$$

ดังนั้นสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์การโก่งตัวรวมของระบบคือ

$$\upsilon_{\max} = -\frac{PL^3}{3EI} - \frac{WL^4}{8EI} - \frac{ML^2}{2EI} \tag{7.4}$$

โดย $\upsilon_{\max}$ = ค่าความโก่งตัวสูงสุด (Maximum Deflection)

L = ความยาวของแขนวัด

W = แรงกระจายเนื่องจากน้ำหนักของท่อนแขนวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

P = แรงกดที่จุดปลายเนื่องจากน้ำหนักของชิ้นส่วนที่ต่อกับปลายแขนวัด
(P = น้ำหนักของชิ้นส่วนที่กด + น้ำหนักแบริ่ง + น้ำหนักเอนโคดเดอร์)

M = โมเมนต์อันเนื่องมาจากการกดเยื้องศูนย์

E = สัมประสิทธิ์การยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity)

I = โมเมนต์ความเฉื่อย (Moment of Inertia)

ซึ่งมีค่าตัวแปรต่างๆ ดังนี้

L = 0.5175 m

R = 0.325 m

P = 22.5378 N

M = P x (ระยะเยื้องศูนย์)

= 22.5378(0.0425)

= 0.9578 N.m

E = 69 GPa

จาก
$$I = \frac{1}{4}\pi(R^4 - r^4) \tag{7.5}$$

กำหนดให้ x คือความหนาของแขนวัด

ได้
$$I = \frac{1}{4}\pi\left[(0.0225 + x)^4 - 0.0225^4\right]$$

จาก
$$m = \rho V \tag{7.6}$$

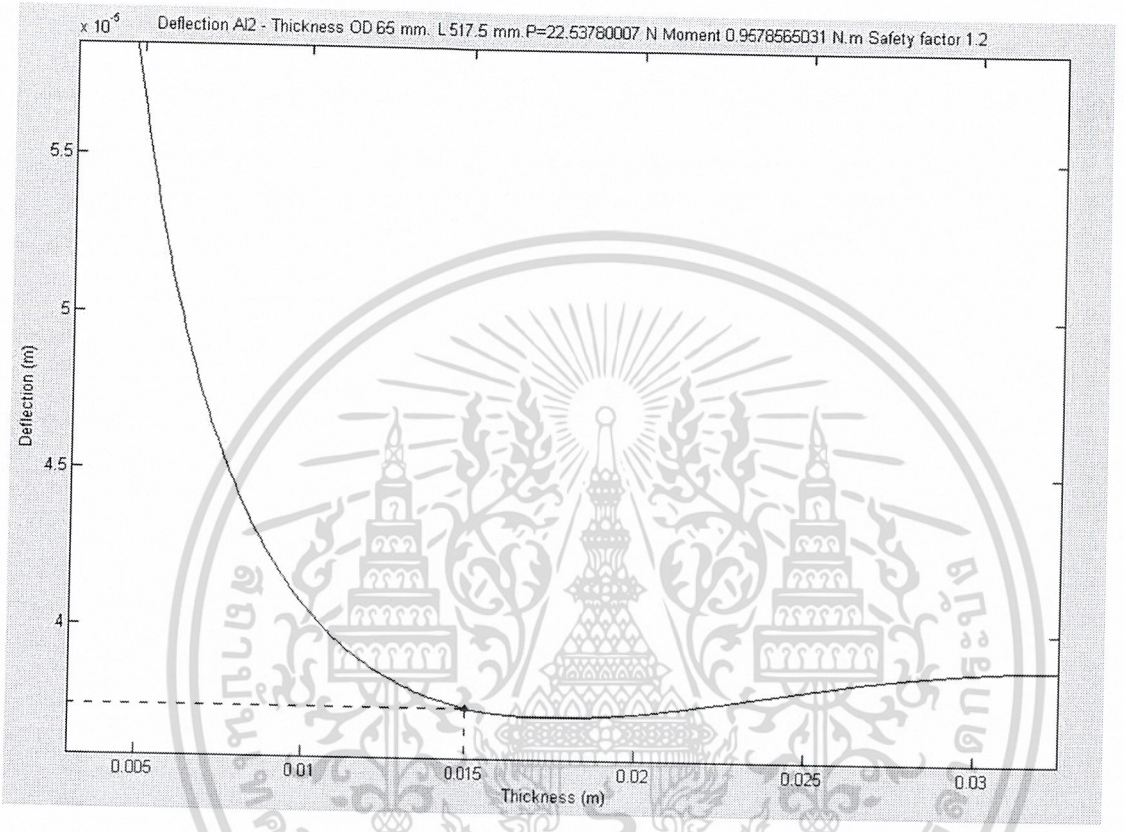
ได้
$$m = 2700[\rho((0.0225 + x)^2 - 0.0225^2) \times 0.5175$$

จาก
$$w = \frac{mg}{L} \tag{7.7}$$

ได้
$$w = \frac{2700[\rho((0.0225 + x)^2 - 0.0225^2) \times 0.5175 \times 9.81]}{L}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

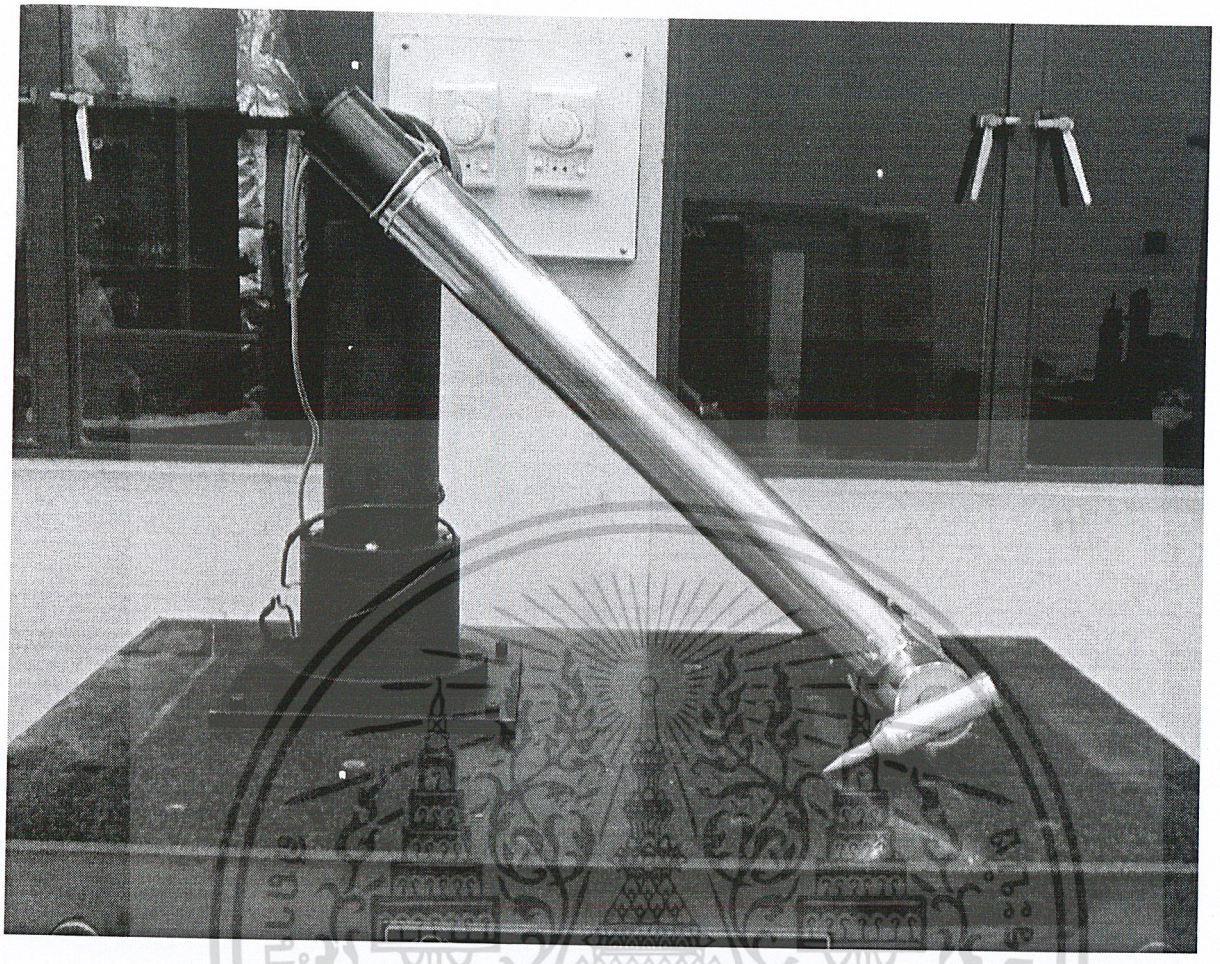
เมื่อทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม MATLAB ได้ผลดังนี้



รูปที่ 7-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนากับค่าความโก่งตัวของแขนวัด

จากกราฟ พบว่าความหนาที่ทำให้เกิด Deflection น้อยที่สุดประมาณ 17 mm. แต่เมื่อพิจารณากราฟพบว่าที่ค่าความหนาตั้งแต่ 15 mm. ขึ้นไป ค่าความหนาที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลต่อการลดลงของการโก่งตัวน้อย ดังนั้นจึงไม่คุ้มค่าในการเลือกใช้เมื่อเทียบกับน้ำหนักและราคาของแขนวัดที่จะเพิ่มขึ้นอีกมาก จึงเลือกใช้ค่าความหนาของแขนวัดที่ 15 mm. เป็นค่าความหนาใช้งานที่เหมาะสมที่สุด จึงได้ขนาดของแขนวัดในการออกแบบคือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางนอก 65 mm. (R=32.5 mm.) และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางใน 35 mm. (r=17.5 mm.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7-6 รูปแสดงเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบข้อต่อ 3 แกน (เคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม) ที่สร้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8
จลนศาสตร์ (Kinematics)

จลนศาสตร์ (Kinematics) เป็นศาสตร์ที่ว่าด้วยเรื่องของการเคลื่อนไหวโดยไม่สนใจเรื่องผลของแรงที่กระทำกับระบบจลนศาสตร์ โดยจะกล่าวถึงแต่เฉพาะเรื่องของตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่งและอนุพันธ์อันดับที่สูงขึ้นไปของตัวแปรตำแหน่ง ซึ่งเราสามารถที่จะใช้หลักทางจลนศาสตร์ในการคำนวณหาตำแหน่งของจุดปลายของแขนกลในระบบพิกัดคาร์ทีเซี่ยน ซึ่งไม่สามารถหาได้จากการตรวจวัดโดยตรง แต่สามารถคำนวณได้จากตำแหน่งของแขนกลในระบบพิกัดแบบข้อต่อ (Joint Coordinate) โดยการใช้เมตริกซ์การแปลง (Transformation Matrix)

เมตริกซ์การแปลงคือเมตริกซ์ที่ใช้ในการแปลงเวกเตอร์ที่อยู่ในระบบพิกัดหนึ่งไปยังอีกระบบพิกัดหนึ่ง ดังแสดงในสมการต่อไปนี้ [2]

$$P_A = T_B^A P_B \tag{8.1}$$

เมื่อ P_A คือเวกเตอร์ที่กำหนดในแกนพิกัด A

P_B คือเวกเตอร์ที่กำหนดในแกนพิกัด B

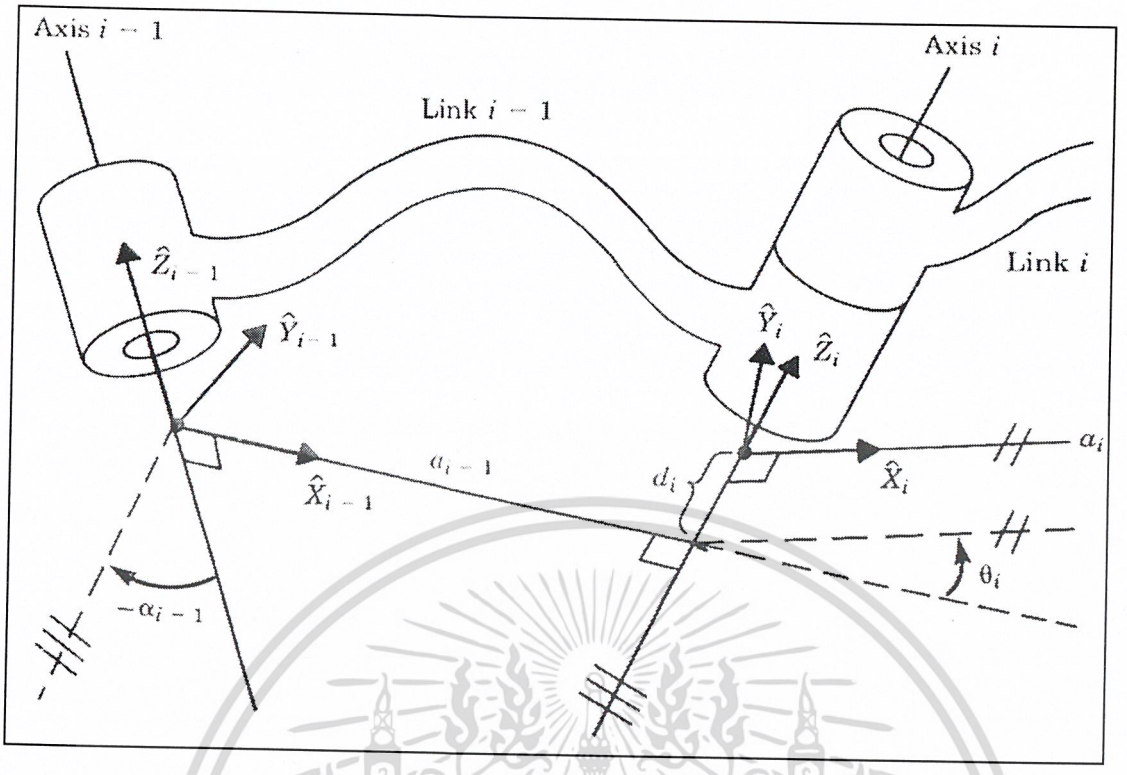
T_B^A คือเมตริกซ์การแปลงของแกนพิกัด B เทียบกับแกนพิกัด A

เมตริกซ์การแปลงที่ใช้ในการแปลงระบบพิกัดของแขนกลแบบ N ข้อต่อสามารถหาได้โดยใช้หลักการตามวิธีของดีนาวิท-ฮาร์ทเทนเบอร์ก (Denavit-Hartenberg) [2] ซึ่งหาได้โดยขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

ขั้นที่หนึ่ง ต้องกำหนดแกนพิกัดของแต่ละข้อต่อตามหลักต่อไปนี้

1. กำหนดให้แกน $\hat{Z}_i$ ชี้ไปตามแกนหมุนของข้อต่อข้อที่ i นั้นๆ
2. กำหนดให้แกน $\hat{X}_i$ ชี้ไปในทิศทางตั้งฉากกับแกน $\hat{Z}_i$ และแกน $\hat{Z}_{i+1}$ หรือถ้าแกนทั้งคู่ตัดกัน ก็ให้แกน $\hat{X}_i$ ชี้ไปในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบที่เกิดจากแกนทั้งสอง
3. กำหนดให้แกน $\hat{Y}_i$ ชี้ไปในทิศทางตามกฎมือขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8-1 แสดงตัวอย่างการตั้งระบบแกนพิกัด [3]

ขั้นที่สอง กำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ของข้อต่อให้เป็นไปตามดังนี้

a_i = ระยะทางจากแกน $\hat{Z}_i$ ไปยังแกน $\hat{Z}_{i+1}$ โดยวัดตามแกน $\hat{X}_i$

α_i = มุมระหว่างแกน $\hat{Z}_i$ กับแกน $\hat{Z}_{i+1}$ โดยวัดรอบแกน $\hat{X}_i$

d_i = มุมระหว่างแกน $\hat{X}_{i-1}$ ไปยังแกน $\hat{X}_i$ โดยวัดรอบแกน $\hat{Z}_i$

θ_i = มุมระหว่างแกน $\hat{X}_{i-1}$ ไปยังแกน $\hat{X}_i$ โดยวัดรอบแกน $\hat{Z}_i$

ขั้นที่สาม สร้างเมตริกซ์การแปลงของแต่ละแกนจากสมการดังต่อไปนี้

กำหนดให้ T_i^{i-1} เป็นเมตริกซ์การแปลงของแกนที่ i เทียบกับแกนที่ i-1

จะได้ว่า

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8.2}$$

โดย

$$c\theta_i = \cos\theta_i$$
$$s\theta_i = \sin\theta_i$$
$$c\alpha_i = \cos\alpha_i$$
$$s\alpha_i = \sin\alpha_i$$

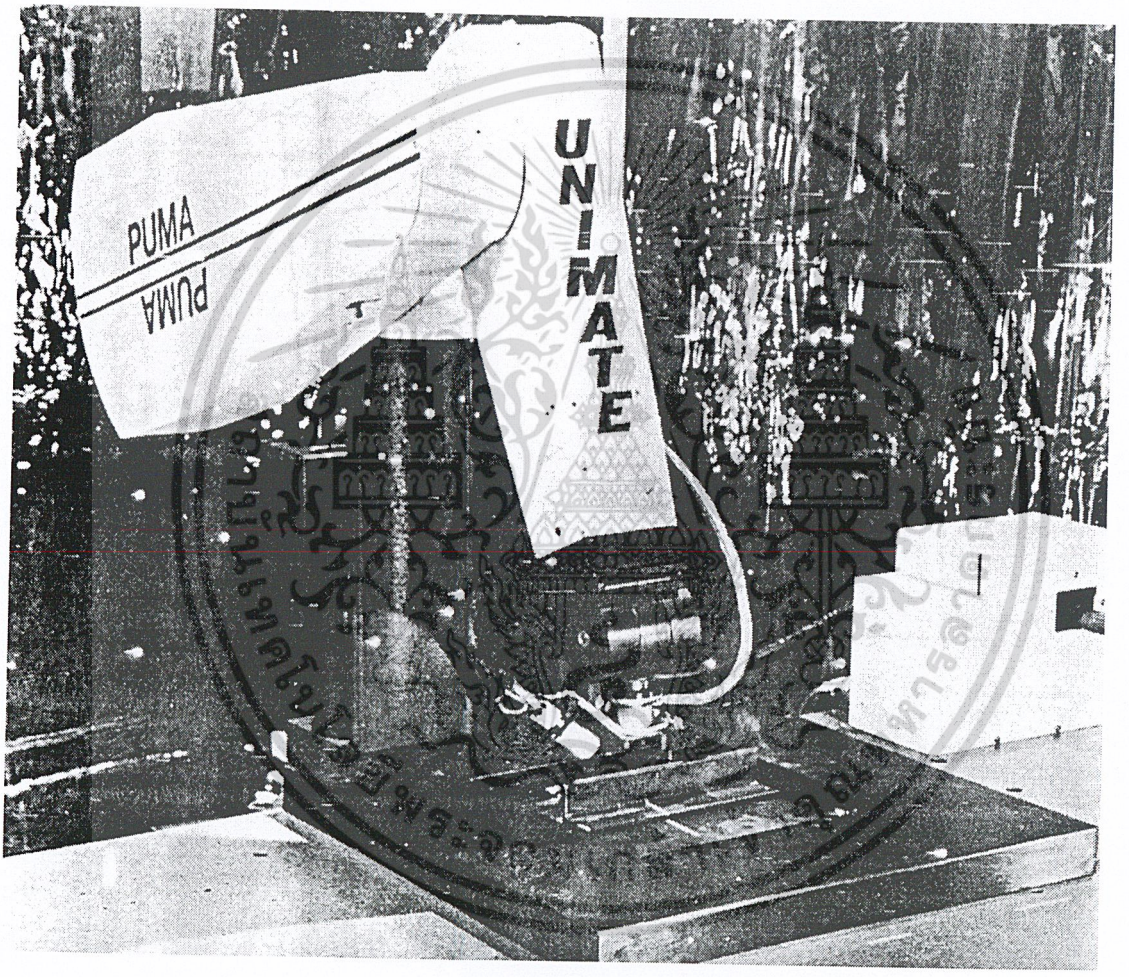
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่สี่ สร้างเมตริกซ์การแปลงของแกนที่ N เทียบกับแกนที่ 0 (เมื่อระบบรวมแขนกลมีทั้งหมด N แกน) ดังนี้

$$T_N^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 ... T_N^{N-1} \tag{8.3}$$

จะเห็นว่าเมตริกซ์การแปลง T_N^0 ที่คำนวณได้นี้จะเป็นฟังก์ชั่นของตัวแปรของทั้ง N แกน และสามารถใช้เมตริกซ์การแปลง T_N^0 ในการคำนวณหาตำแหน่งและทิศทางของแกนสุดท้ายได้

ตัวอย่างต่อไปนี้จะแสดงการคำนวณหาเมตริกซ์การแปลง T_N^0 ของแขนกลพูม่า 560 (PUMA 560) ซึ่งมีรูปร่างดังแสดงในรูปต่อไปนี้

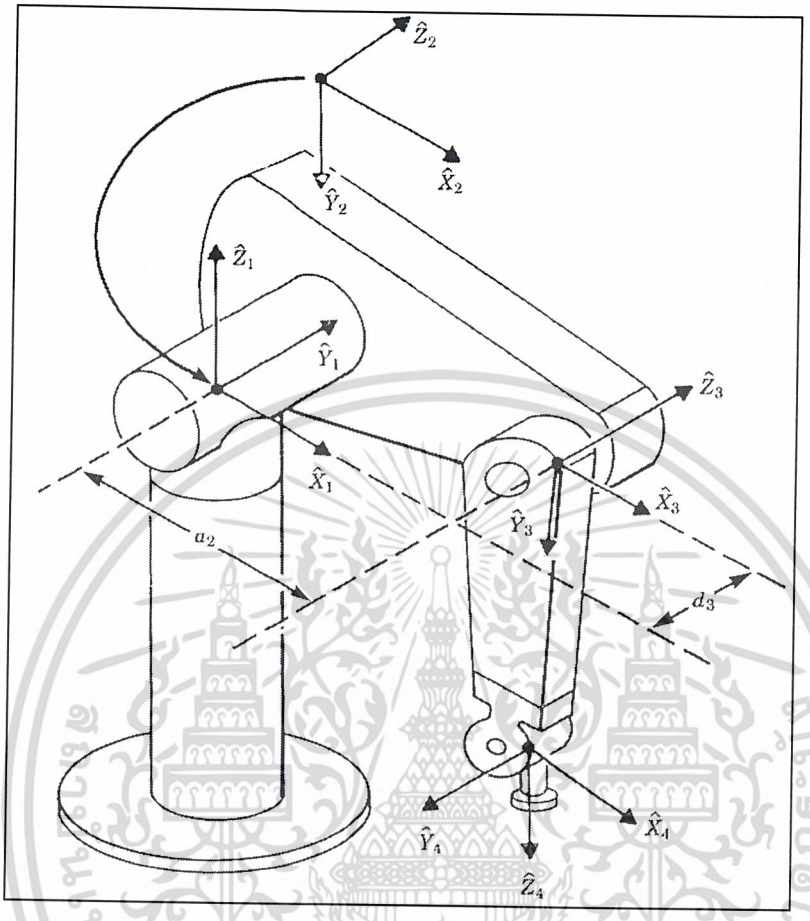


รูปที่ 8-2 รูปแสดงหุ่นยนต์พูม่าที่ใช้กันในอุตสาหกรรมทั่วๆไป [3]

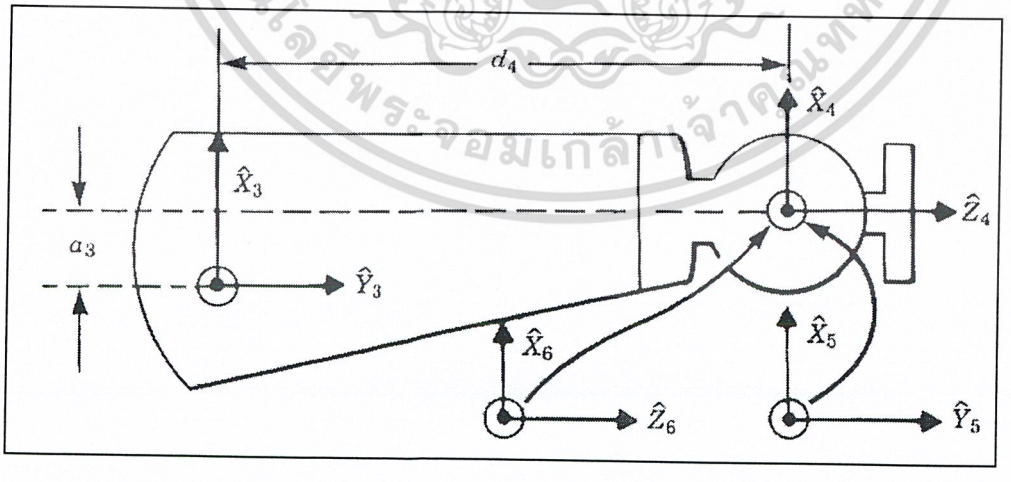
แขนกลพูม่าเป็นแขนกลแบบอาติคูเลต (Articulate Type) 6 ข้อต่อ ที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรมทั่วไป เราสามารถที่จะทำการหาเมตริกซ์การแปลงของแขนกลพูม่าตามหลักการข้างต้นได้ดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่หนึ่ง กำหนดแกนพิกัดของแต่ละข้อต่อให้ครบทุกแกนดังรูป



รูปที่ 8-3 รูปแสดงตำแหน่งการกำหนดระบบพิกัด (แกนที่1-4) ของแขนหุ่นยนต์พูม่า [3]



รูปที่ 8-4 รูปแสดงตำแหน่งการกำหนดระบบพิกัด (แกนที่5-6) ของแขนหุ่นยนต์พูม่า [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่สอง กำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ของแขนกล ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

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

ตารางที่ 8-1 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ในระบบจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์พูม่า

ขั้นที่สาม สร้างเมตริกซ์การแปลงของแต่ละแกนตามสมการข้างต้นได้ดังนี้

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8.4}$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_2 & -c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8.5}$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & a_2 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8.6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ -s\theta_4 & -c\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8.7}$$

$$T_5^4 = \begin{bmatrix} c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -s\theta_5 & -c\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8.8}$$

$$T_6^5 = \begin{bmatrix} c\theta_6 & -s\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_6 & -c\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8.9}$$

ขั้นที่สี่ จากสมการที่ 8.3 จะสามารถหาเมตริกซ์การแปลงของแกนที่ 6 เทียบกับแกนที่ 0 ได้ดังนี้

$$T_6^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 \tag{8.10}$$

ซึ่งจะได้ว่า

$$T_6^0 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8.11}$$

โดยที่

$$r_{11} = c_1\left[c_{23}\left(c_4c_5c_6 - s_4s_6\right) - s_{23}s_5c_6\right] + s_1\left(s_4c_5c_6 + c_4s_6\right) \tag{8.12}$$

$$r_{21} = s_1\left[c_{23}\left(c_4c_5c_6 - s_4s_6\right) - s_{23}s_5c_6\right] - c_1\left(s_4c_5c_6 + c_4s_6\right) \tag{8.13}$$

$$r_{31} = -s_{23}\left(c_4c_5c_6 - s_4s_6\right) - c_{23}s_5c_6 \tag{8.14}$$

$$r_{12} = c_1\left[c_{23}\left(-c_4c_5c_6 - s_4s_6\right) + s_{23}s_5c_6\right] + s_1\left(c_4c_6 - s_4c_5s_6\right) \tag{8.15}$$

$$r_{22} = s_1\left[c_{23}\left(-c_4c_5c_6 - s_4s_6\right) + s_{23}s_5c_6\right] - c_1\left(c_4c_6 - s_4c_5s_6\right) \tag{8.16}$$

$$r_{32} = -s_{23}\left(-c_4c_5c_6 - s_4s_6\right) - c_{23}s_5c_6 \tag{8.17}$$

$$r_{13} = -c_1\left(c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5\right) - s_1s_4s_5 \tag{8.18}$$

$$r_{23} = -s_1\left(c_{23}c_4s_5 + s_{23}c_5\right) + c_1s_4s_5 \tag{8.19}$$

$$r_{33} = s_{23}c_4s_5 - c_{23}c_5 \tag{8.20}$$

$$P_x = c_1\left[a_2c_2 + a_3c_{23} - d_4s_{23}\right] - d_3s_1 \tag{8.21}$$

$$P_y = s_1\left[a_2c_2 + a_3c_{23} - d_4s_{23}\right] + d_3c_1 \tag{8.22}$$

$$P_z = -a_3s_{23} - a_2s_2 - d_4c_{23} \tag{8.23}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$c_i = \cos\theta_i$$
$$s_i = \sin\theta_i$$
$$c_{23} = \cos\theta_2 \cos\theta_3 - \sin\theta_2 \sin\theta_3$$
$$s_{23} = \cos\theta_2 \sin\theta_3 + \sin\theta_2 \cos\theta_3$$

หากพิจารณาสมการข้างต้นจะเห็นว่าสมาชิกในแถวที่ 1-3 และคอลัมน์ที่ 1-3 ของเมตริกซ์การแปลง T_6^0 จะเป็นเมตริกซ์ซึ่งแสดงตำแหน่งของการหมุนของระบบแกนที่ 6 ส่วนสมาชิกในคอลัมน์สุดท้ายจะเป็นเมตริกซ์แสดงตำแหน่งพิกัดของจุดกำเนิดของระบบแกนที่ 6 เทียบกับระบบแกนที่ 0 ดังนั้นเมื่อรวมทั้งสองส่วนเข้าด้วยกันเป็นเมตริกซ์การแปลง T_6^0 จึงทำให้สามารถหาได้ทั้งตำแหน่งพิกัด และตำแหน่งการหมุนของเวกเตอร์ที่อยู่บนระบบแกนพิกัดที่ 6 หรือปลายแขนกลพูม่า เทียบกับระบบแกนที่ 0 ได้

ดังนั้น จากหลักการทางจลนศาสตร์ข้างต้น เราสามารถนำมาประยุกต์สร้างเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบข้อต่อได้ โดยการวัดตำแหน่งของชิ้นงานจะทำโดยการแปลงตำแหน่งของแต่ละข้อต่อที่วัดได้ ไปเป็นตำแหน่งจุดปลายในระบบพิกัดคาร์ทีเซี่ยนของปลายแขนเครื่องมือวัดพิกัด

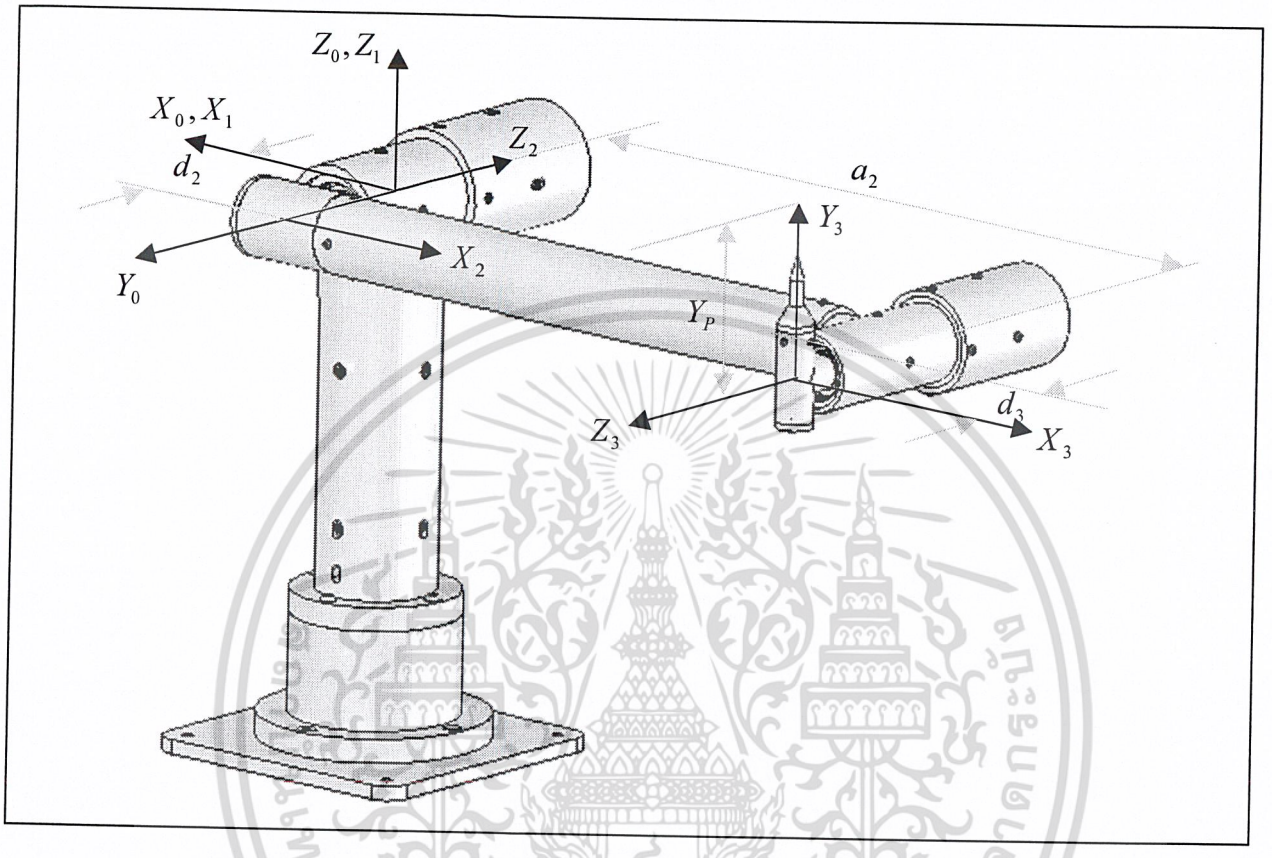
8.1 สมการสำหรับการหาตำแหน่งของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ (เคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม)

สมการที่ใช้ในการหาตำแหน่งของปลายหัววัดของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบข้อต่อนี้จะเป็นระบบสมการที่ทำหน้าที่แปลงเวกเตอร์จากระบบแกนพิกัดหนึ่งไปยังระบบแกนพิกัดอื่นด้วยเมตริกซ์การแปลง โดยในการหาตำแหน่งของหัววัดนี้ เวกเตอร์ที่จะทำการแปลงจะเป็นเวกเตอร์ในระบบแกนพิกัดของข้อต่อสุดท้ายซึ่งชี้ไปยังตำแหน่งปลายของหัววัด แล้วทำการแปลงเวกเตอร์นี้ให้ไปเป็นเวกเตอร์ซึ่งอยู่ในระบบแกนพิกัดที่ตั้งอยู่บนฐานของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ (ในการสร้างเมตริกซ์การแปลงทั่วไป จะตั้งให้เป็นระบบแกนพิกัดที่ศูนย์ โดยในการวัดตำแหน่งต่างๆ ตำแหน่งที่ได้จะอ้างอิงมาจากระบบแกนนี้) และเนื่องจากระบบแกนพิกัดของข้อต่อสุดท้ายตั้งอยู่บนข้อต่อที่มีการติดตั้งหัววัดเอาไว้ ดังนั้นไม่ว่าเครื่องวัดพิกัด 3 มิติจะตั้งอยู่ในตำแหน่งหรือลักษณะใดก็ตาม เวกเตอร์ที่ชี้ไปยังปลายหัววัดก็จะยังคงเป็นเวกเตอร์เดิมในระบบแกนพิกัดสุดท้าย ดังนั้นสมการในการหาตำแหน่งจุดปลายของเคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม จะประกอบด้วยตัวเมตริกซ์การแปลง และเวกเตอร์ชี้ตำแหน่งปลายหัววัด

เนื่องจากเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบแขน เป็นเครื่องวัดพิกัด 3 มิติที่ได้ได้วัดตำแหน่งพิกัดเป็นระบบพิกัดฉาก โดยจะตรวจวัดตำแหน่งการหมุนของแต่ละข้อต่อ แล้วจึงนำมาคำนวณหาตำแหน่งพิกัดปลายของหัววัดในระบบพิกัดฉากด้วยวิธีทางจลนศาสตร์แทน ดังนั้นในการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ใช้ในเมตริกซ์การแปลง และเวกเตอร์ชี้ตำแหน่งหัววัดจึงมีผลต่อค่าตำแหน่งพิกัดของปลายหัววัด และความถูกต้องในการวัด ซึ่งโดยปกติแล้วค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะได้มาจากแบบ (Drawing) ของแขนกล แต่ในทางปฏิบัติ การผลิตชิ้นส่วนต่างๆ ไม่ว่าจะผลิตด้วยกระบวนการใดก็ตามก็ไม่สามารถผลิตชิ้นส่วนให้ได้ขนาดตามที่กำหนดในแบบได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นขนาดของชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ที่ผลิตออกมาจึงไม่ตรงตามที่ได้เขียนในแบบ และเมื่อนำชิ้นส่วนต่างๆ มาประกอบเข้าด้วยกัน พิกัดขนาดต่างๆ ของเครื่องวัดพิกัด 3 มิติจึงไม่ตรงตามแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่เนื่องจากการหาค่าพารามิเตอร์ที่ถูกต้องมีความยุ่งยากมาก เพราะต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีความแม่นยำสูง ดังนั้นทางผู้จัดทำจึงได้ทำการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากแบบเพื่อทดลองระบบ โดยค่าพารามิเตอร์ที่วัดได้จากแบบได้แสดงดังต่อไปนี้



รูปที่ 8-5 รูปแสดงตำแหน่งของการวัดพารามิเตอร์

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i
1	0	0	0
2	$\frac{\pi}{2}$	0	-100
3	π	600	100

ตารางที่ 8-2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่วัดจากแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

α_i = มุมระหว่างแกน $\hat{Z}_i$ กับแกน $\hat{Z}_{i+1}$ โดยวัดรอบแกน $\hat{X}_i$ (เรเดียน)

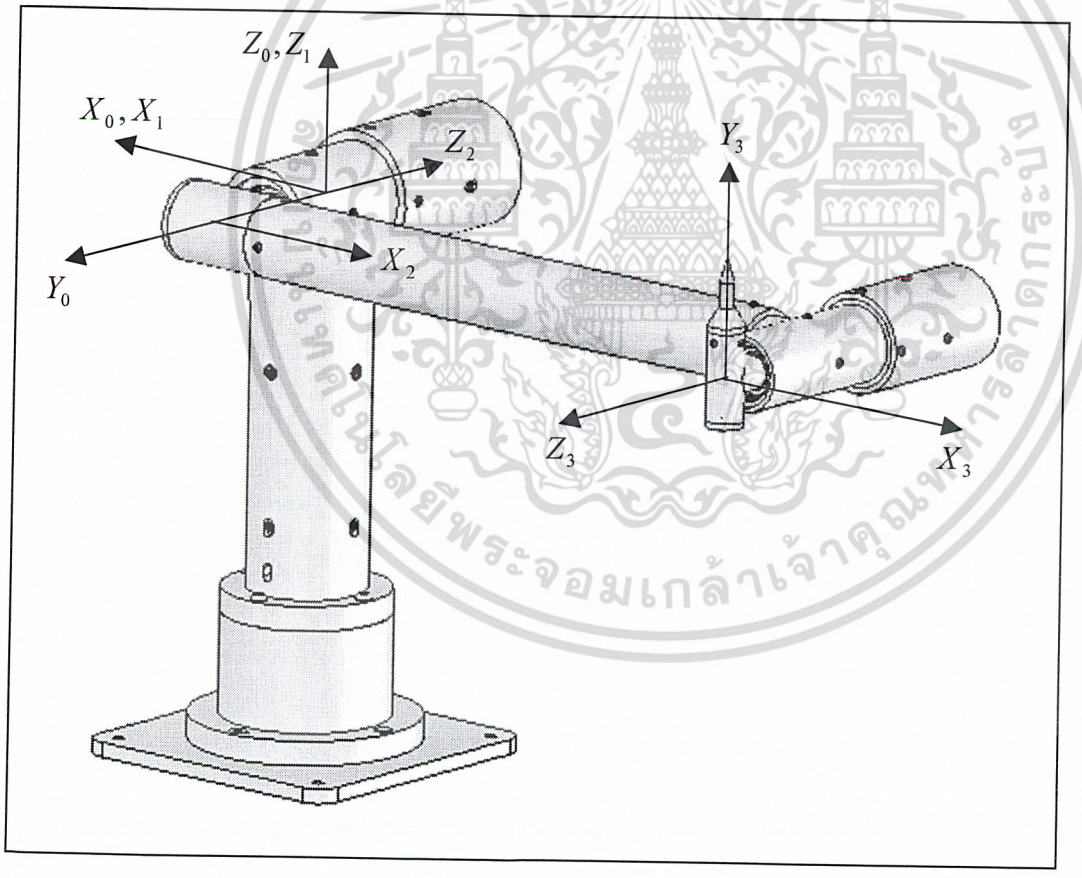
a_i = ระยะทางจากแกน $\hat{Z}_i$ ไปยังแกน $\hat{Z}_{i+1}$ โดยวัดตามแกน $\hat{X}_i$ (มิลลิเมตร)

d_i = มุมระหว่างแกน $\hat{X}_{i-1}$ ไปยังแกน $\hat{X}_i$ โดยวัดรอบแกน $\hat{Z}_i$ (มิลลิเมตร)

8.1.1 เมตริกซ์การแปลงของเคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม

ในการสร้างเมตริกซ์การแปลงของเคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็มจะใช้หลักการทางจลนศาสตร์ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่เนื่องจากเคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็มเป็นเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ ที่มีข้อต่อทั้งหมดเพียง 3 ข้อต่อเท่านั้น เพราะฉะนั้นการสร้างเมตริกซ์การแปลงก็จะมีระบบแกนพิกัดของข้อต่อเพียง 3 แกน (i=3) ดังนี้

ขั้นที่หนึ่ง กำหนดและตั้งระบบแกนพิกัดให้กับทุกข้อต่อ ดังรูปที่ 8-6



รูปที่ 8-6 รูปแสดงการตั้งระบบแกนพิกัดของข้อต่อทั้ง 3 ของเคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นที่สอง กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแต่ละแกน

i	α_{i-1}	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	$\frac{\pi}{2}$	0	-100	θ_2
3	π	600	100	θ_3

ตารางที่ 8-3 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของเมตริกซ์การแปลง

โดยที่

α_i = มุมระหว่างแกน $\hat{Z}_i$ กับแกน $\hat{Z}_{i+1}$ โดยวัดรอบแกน $\hat{X}_i$ (เรเดียน)

a_i = ระยะทางจากแกน $\hat{Z}_i$ ไปยังแกน $\hat{Z}_{i+1}$ โดยวัดตามแกน $\hat{X}_i$ (มิลลิเมตร)

d_i = มุมระหว่างแกน $\hat{X}_{i-1}$ ไปยังแกน $\hat{X}_i$ โดยวัดรอบแกน $\hat{Z}_i$ (มิลลิเมตร)

θ_i = มุมระหว่างแกน $\hat{X}_{i-1}$ ไปยังแกน $\hat{X}_i$ โดยวัดรอบแกน $\hat{Z}_i$ (เรเดียน)

ขั้นที่สาม จากสมการที่ 8.2 สร้างเมตริกซ์การแปลงของแต่ละแกนจากตัวแปรในตารางที่ ได้ดังนี้

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8.24}$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 100 \\ s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8.25}$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & 600 \\ -s\theta_3 & -c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -100 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8.26}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง T_1^0 คือ เมตริกซ์การแปลงของแกนที่ 1 มายังแกนที่ 0 (ฐานของเครื่อง)

T_2^1 คือ เมตริกซ์การแปลงของแกนที่ 2 มายังแกนที่ 1

T_3^2 คือ เมตริกซ์การแปลงของแกนที่ 3 มายังแกนที่ 2

ขั้นที่สี่ จากเมตริกซ์การแปลงของแต่ละแกนและสมการที่ 8.3 ที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถนำมาหาเมตริกซ์การแปลงของแกนที่ 3 เทียบกับแกนที่ 0 (ฐานของเครื่อง) ได้ดังนี้

$$T_3^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 \tag{8.27}$$

8.1.2 เวกเตอร์ชี้ตำแหน่งปลายหัววัด

เนื่องจากเวกเตอร์ชี้ตำแหน่งของปลายหัววัดนี้เป็นเวกเตอร์คงที่ซึ่งอ้างอิงจากระบบแกนพิกัดสุดท้าย (ระบบแกนพิกัดที่ 3) ดังรูปที่ 8.6 จึงกำหนดให้เวกเตอร์นี้มีชื่อว่าเวคเตอร์ P^3 และกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

$$P^3 = \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} \tag{8.28}$$

โดย

X_P คือระยะในแกน X ของเวกเตอร์ชี้ตำแหน่งปลายของหัววัดที่ระบบแกนพิกัดที่ 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0 มิลลิเมตร

Y_P คือระยะในแกน Y ของเวกเตอร์ชี้ตำแหน่งปลายของหัววัดที่ระบบแกนพิกัดที่ 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 100 มิลลิเมตร

Z_P คือระยะในแกน Z ของเวกเตอร์ชี้ตำแหน่งปลายของหัววัดที่ระบบแกนพิกัดที่ 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0 มิลลิเมตร

8.1.3 สมการที่ใช้ในการหาตำแหน่งของปลายหัววัด

จากเมตริกซ์การแปลง และเวกเตอร์ชี้ตำแหน่งปลายหัววัดที่สร้างขึ้นมา สามารถนำมาสร้างสมการที่ใช้ในการหาตำแหน่งของเคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม ได้ดังนี้

$$P^0 = T_3^0 P^3 \tag{8.29}$$

โดย

P^0 คือ เวกเตอร์ชี้ตำแหน่งปลายหัววัดซึ่งอ้างอิงจากระบบแกนพิกัดที่ศูนย์ (ฐานของเครื่อง)

ในสมการที่ 8.29 จะประกอบไปด้วยตัวแปรอิสระคือ ค่ามุมของข้อต่อในแต่ละข้อต่อทั้ง 3 ซึ่งได้รวมอยู่ในเมตริกซ์การแปลง และเวกเตอร์ P^0 จะเป็นตัวแปรตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 9
โปรแกรมประมวลผลและเก็บข้อมูล

9.1 โปรแกรมแลบวิว (LabVIEW) [13]

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) เป็นโปรแกรมประยุกต์ชนิดหนึ่ง เช่นเดียวกับ Visual Basic, Visual C++ แต่จะเป็นการเขียนโดยการใช้รูป (Graphical Programming) โปรแกรมแลบวิวสามารถเขียนเป็นสมการต่างๆ ที่ซับซ้อนได้เช่นเดียวกับภาษา C การทำงานจะเน้นทางการติดต่อกับเครื่องมือหรือทรานสดิวเซอร์ (Tranducer) ที่ใช้วัดสัญญาณทางกายภาพต่างๆ และนอกจากนั้นสามารถนำประโยชน์จาก Computer Technology และ Network Technology มาประยุกต์ใช้งาน เช่น การเก็บข้อมูลลงในฐานข้อมูล (Database) หรือส่งข้อมูลผ่านทางอินเตอร์เน็ต ทำให้หลายอุตสาหกรรมได้นำเอาโปรแกรมแลบวิว มาประยุกต์ใช้กับงานควบคุมและออโตเมชัน (Automation) และเราจะเรียกโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นโดยโปรแกรมแลบวิวว่าวิชวลอินสตูเมนต์ (Virtual Instrument) หรือ VI ซึ่งหมายถึงเครื่องมือวัดเสมือน เพราะลักษณะและการควบคุมจะเลียนแบบเครื่องมือวัดทางกายภาพ

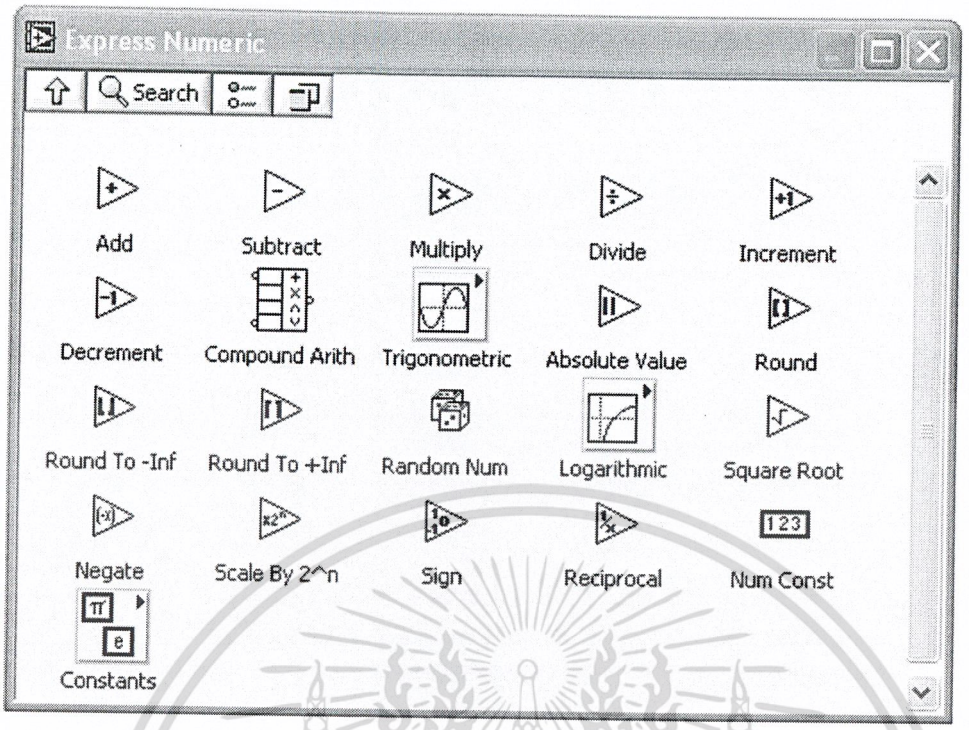
เนื่องจากโปรแกรมแลบวิว เป็นโปรแกรมที่มีการใช้งานได้หลากหลาย ดังนั้นในโครงงานนี้ ทางผู้จัดทำจะขอกล่าวเฉพาะส่วนที่ได้นำมาใช้ในโครงงานเท่านั้น

9.1.1 ส่วนประกอบของโปรแกรมแลบวิว

โปรแกรมแลบวิว ประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก คือ

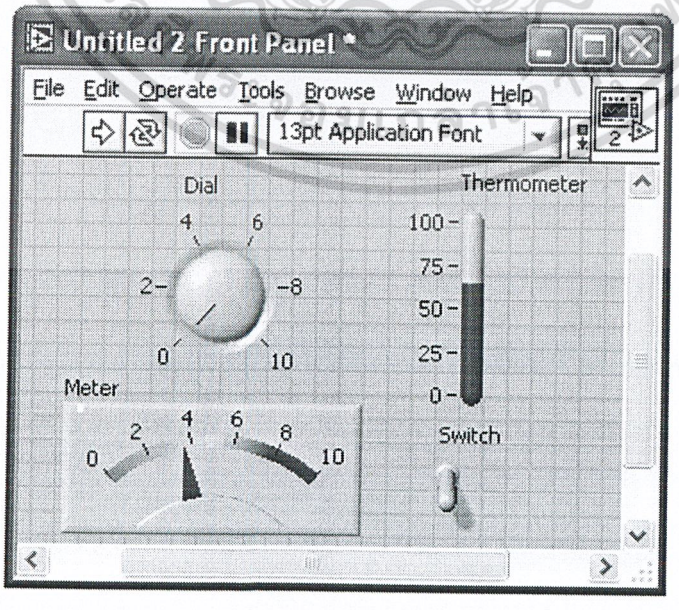
9.1.1.1 บล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) ซึ่งเปรียบเสมือนกับฮาดแวร์ (Hardware) ภายในเครื่องมือวัด โดยการเขียนโปรแกรมแลบวิวจะเขียนโดยการอาศัยรูปภาพ ซึ่งจะแสดงเป็นไอคอนต่างๆ โดยที่ไอคอนแต่ละไอคอนจะเป็นฟังก์ชันการทำงานอย่างใดอย่างหนึ่งของโปรแกรม เช่น ฟังก์ชันบวก (Add), ฟังก์ชันคูณ (Multiply) และจะทำการเชื่อมต่อหรือส่งข้อมูลผ่านทางสาย นอกจากนี้โปรแกรมแลบวิว ยังสามารถทำการคำนวณโดยใช้สูตรทางคณิตศาสตร์หรือทำการเชื่อมต่อกับโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ เช่น โปรแกรมแมทแลบ (Matlab) ได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9-1 รูปแสดงตัวอย่างฟังก์ชันต่างๆ ใน บล็อกไดอะแกรม โดยโปรแกรมแลบวิว

9.1.1.2 ฟร๊อนแพนเนล (Front Panel) ซึ่งเปรียบเสมือนได้กับสิ่งที่ผู้ใช้จะเห็นและควบคุมการทำงาน ผู้ใช้สามารถสร้างรูปแบบขึ้นมาเองได้อย่างรวดเร็วเพราะโปรแกรมแลบวิว มีส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้สำหรับออกแบบมากมาย โดยจะแบ่งเป็นส่วนของเครื่องมือควบคุมคือสิ่งที่ผู้ใช้งานจะป้อนค่าหรือเปลี่ยนค่าได้ (Input) และส่วนแสดงผลซึ่งจะแสดงผลให้ผู้ใช้งานเห็น (Output) เช่น หน้าปัดแสดงผล (Dial), มิเตอร์ (Meter), เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer), สวิตช์ (Switch) เมื่อทำการกำหนดเครื่องมือในฟร๊อน แพนเนล โปรแกรมแลบวิวก็จะทำการแสดงผลในบล็อก ไดอะแกรม ด้วยเช่นเดียวกัน

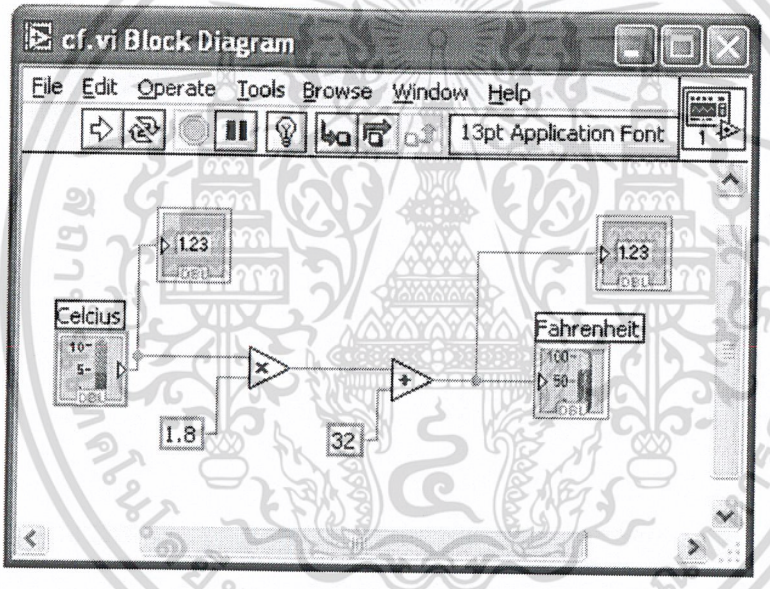


รูปที่ 9-2 รูปแสดงตัวอย่างเครื่องมือต่างๆ ในฟร๊อน แพนเนล โดยโปรแกรมแลบวิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

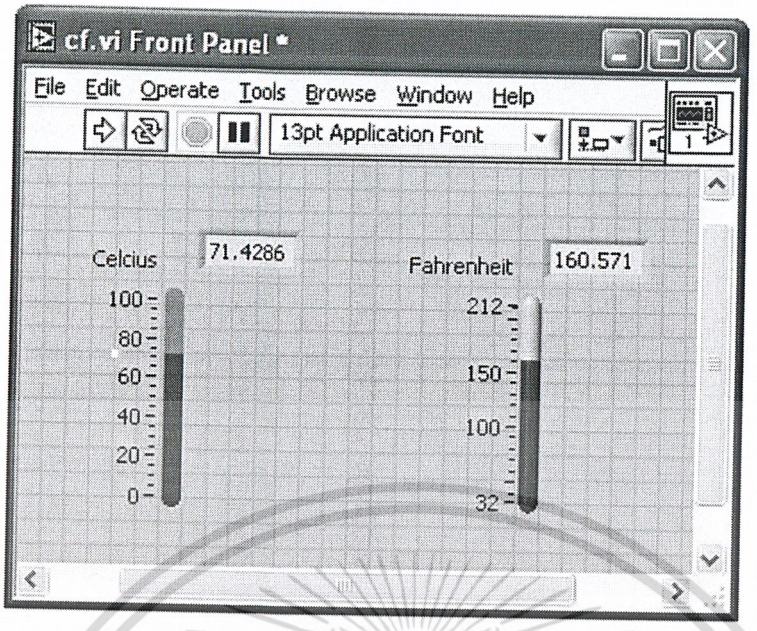
9.1.2 หลักการทำงานของโปรแกรมแลบวิว

โปรแกรมแลบวิวอาศัยหลักการทำงานของเครื่องมือวัดหรือการวัดคุมทำให้ผู้ใช้สามารถออกแบบรูปแบบโปรแกรมตามที่ผู้ใช้ต้องการ โดยการทำงานจะเป็นแบบการส่งผ่านข้อมูล (Dataflow) กล่าวคือ ฟังก์ชันต่างๆ จะทำงานเมื่อมีข้อมูล (input) จากสิ่งแวดล้อมภายนอกเข้าสู่ระบบ ในที่นี้คือ คอมพิวเตอร์ โดยข้อมูลที่เข้าสู่ระบบนี้อาจจะมาจากผู้ใช้งานทำการป้อนข้อมูลเองในคอมพิวเตอร์ หรือมาจากการ์ดรับค่าสัญญาณต่างๆ เช่น สัญญาณไฟฟ้า หรือการ์ดสำหรับควบคุมเครื่องมือวัด หลังจากที่ได้รับข้อมูลก็จะทำการส่งข้อมูลไปทำการวิเคราะห์โดยฟังก์ชันต่างๆ และจะให้ข้อมูล (Output) ออกมา ซึ่งอาจจะส่งไปยังฟังก์ชันอื่นๆ ที่ต้องการข้อมูลเพื่อการวิเคราะห์ต่อไป โดยข้อมูลต่างๆ จะถูกส่งผ่านโดยสาย (Wire) เมื่อฟังก์ชันทุกฟังก์ชันทำการวิเคราะห์ข้อมูลเสร็จ ก็จะทำการส่งไปแสดงผลในรูปแบบที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งาน โดยอาจแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งโปรแกรมแลบวิว จะมีฟังก์ชันที่ให้ผู้ใช้งานสามารถที่จะสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการแสดงผลได้ หรือจะเก็บข้อมูลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์โดยโปรแกรมอื่นต่อไป



รูปที่ 9-3 รูปแสดงหลักการทำงานของโปรแกรมแลบวิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9-4 รูปแสดงหลักการทำงานของโปรแกรมแลบวิว

จารูปที่ 9-3 และรูปที่ 9-4 เป็นโปรแกรมการแปลงองศาเซลเซียส (Celcius) เป็น องศาฟาเรนไฮน์ (Fahrenheit) โดยขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมจะเป็นดังนี้

1. ข้อมูลที่ป้อนเข้า ซึ่งในที่นี้คือ องศาเซลเซียส จะถูกรับมาจากผู้ใช้ และจะถูกส่งไปยังฟังก์ชันคูณ เพื่อทำการวิเคราะห์
2. หลังจากฟังก์ชันคูณทำงานเสร็จก็จะให้ข้อมูลออกมา ซึ่งจะเป็นข้อมูลป้อนเข้าของฟังก์ชันบวกในการวิเคราะห์ต่อไป โดยข้อมูลทั้งหมดจะถูกส่งผ่านทางสาย
3. หลังจากฟังก์ชันบวกทำงานเสร็จก็จะส่งผลลัพธ์ซึ่งเป็นองศาฟาเรนไฮน์ ไปแสดงผลในรูปแบบที่เป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งาน

9.2 โปรแกรมประมวลผลและเก็บข้อมูลของเครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ (เคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม)

เนื่องจากการประมวลผลของเครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ จะต้องใช้หลักการทางจลนศาสตร์ ซึ่งผู้จัดทำได้ใช้โปรแกรมแมทแลบ ในการวิเคราะห์ และโปรแกรมแลบวิว ก็มีฟังก์ชันที่สามารถใช้ร่วมกับโปรแกรมแมทแลบได้ ดังนั้นผู้จัดทำจึงได้เลือกโปรแกรมแลบวิว มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบโปรแกรมประมวลผลและเก็บข้อมูลของเคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม

9.2.1 ส่วนประกอบหลักของโปรแกรมประมวลผลและเก็บข้อมูลของเคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม

9.2.1.1 บล็อกไดอะแกรม (Block Diagram) จะเป็นส่วนที่แสดงฟังก์ชัน (Function) การทำงานต่างๆ ของโปรแกรม ซึ่งจะประกอบด้วย

1. ฟังก์ชันรับค่าสัญญาณจากการ์ดรับค่าและประมวลผล เป็นฟังก์ชันที่ทำหน้าที่ติดต่อกับการ์ดรับค่าและประมวลผล ซึ่งสำหรับโครงงานนี้ได้ใช้ในการรับค่าสัญญาณพัลส์จากเอนโคดเดอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ฟังก์ชันแปลงสัญญาณพัลส์เป็นค่าตำแหน่งของมุม เป็นฟังก์ชันที่ทำการแปลงสัญญาณพัลส์ที่ได้จากฟังก์ชันเอนโคดเดอร์ให้เป็นตำแหน่งของมุม โดยทางผู้จัดทำได้ใช้ฟังก์ชันเขียนสูตร (Formula) ในโปรแกรมแลบวิวมาช่วยในการวิเคราะห์การแปลงนี้ และจะมีหลักการแปลง คือ จำนวนพัลส์ต่อรอบของเอนโคดเดอร์ จะมีค่าเท่ากับมุมการหมุน 1 รอบ (360 องศา) และเนื่องจากโครงงานนี้ได้ใช้เอนโคดเดอร์ที่จำนวนพัลส์ต่อรอบเท่ากับ 5000 พัลส์ เพราะฉะนั้นถ้าเอนโคดเดอร์ให้สัญญาณพัลส์ออกมาเท่ากับ n พัลส์ ค่าตำแหน่งของมุมที่ได้จะมีค่าเท่าดังนี้

$$A = \frac{n \times 360}{5000}$$

โดยที่ A = ตำแหน่งของมุมที่วัดได้

n = จำนวนสัญญาณพัลส์จากเอนโคดเดอร์

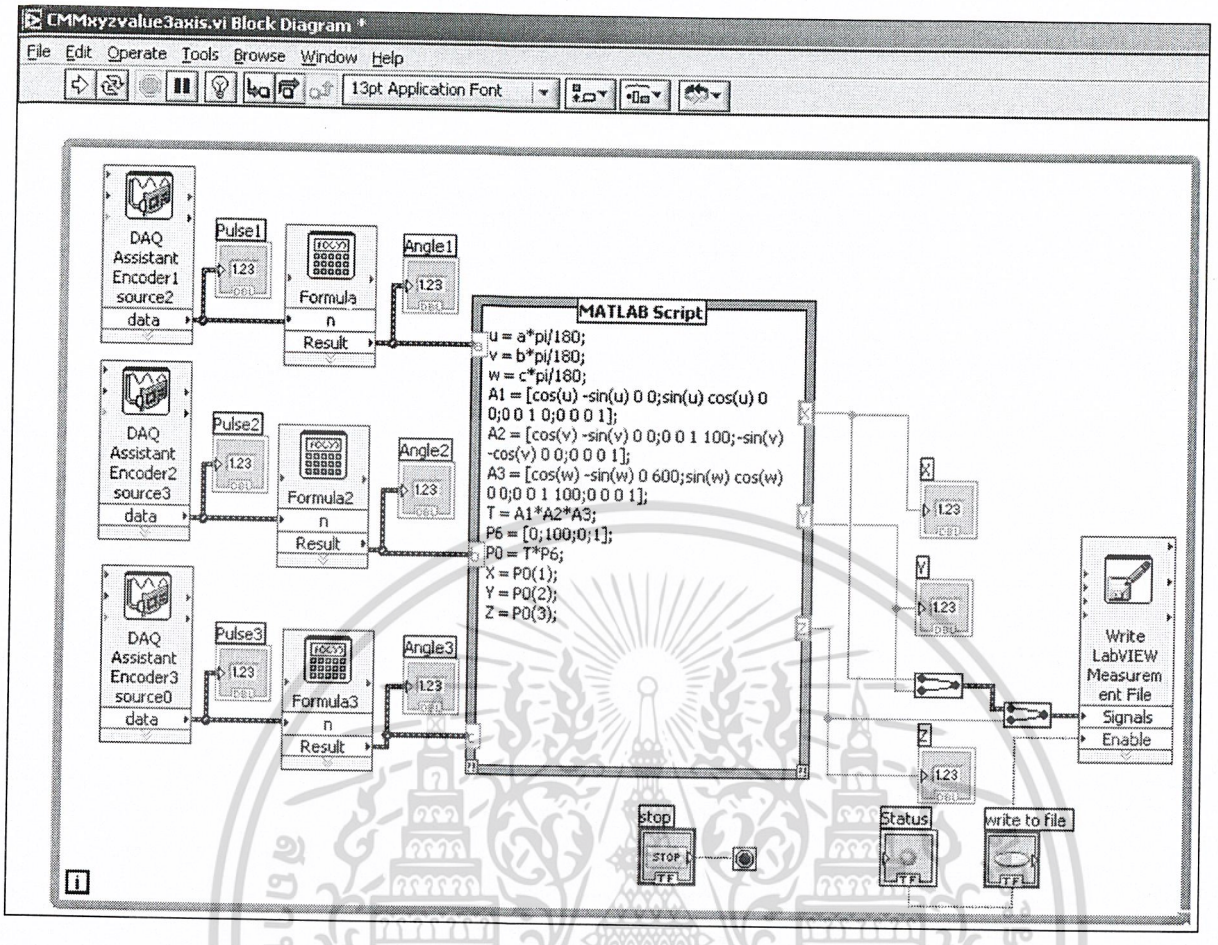
3. ฟังก์ชันแมทแลบ (Matlab script) เป็นฟังก์ชันที่สามารถนำข้อมูล (Import) การวิเคราะห์ที่ได้เขียนในโปรแกรมแมทแลบมาใช้ในโปรแกรมแลบวิว ซึ่งในโครงงานนี้ผู้จัดทำได้ใช้โปรแกรมแมทแลบทำการวิเคราะห์หลักการทางจลนศาสตร์เพื่อหาค่าตำแหน่งพิกัดจุดปลายของหัววัด

4. ฟังก์ชันแสดงค่าตำแหน่งพิกัดจุดปลายของหัววัด เป็นฟังก์ชันที่แทนแถบแสดงค่าตำแหน่งพิกัดจุดปลายของหัววัดจากฟร็อน แพนเนล ซึ่งข้อมูลที่เข้าจะเป็นค่าตำแหน่งจุดปลายหัววัดที่ถูกได้ทำการวิเคราะห์มาแล้วในฟังก์ชันแมทแลบ

5. ฟังก์ชันบันทึกข้อมูล เป็นฟังก์ชันที่ทำการเก็บค่าตำแหน่งพิกัดจุดปลายของหัวในขณะนั้น เมื่อผู้ใช้งานทำการกดปุ่มบันทึก ซึ่งจะประกอบด้วย ตัวรับสัญญาณและบันทึกค่า, ปุ่มกดบันทึก และไฟแสดงสถานะเมื่อทำการกดปุ่มบันทึก

6. ฟังก์ชันวนซ้ำ (While loop) เป็นฟังก์ชันที่กำหนดให้โปรแกรมที่อยู่ภายในกรอบที่ได้กำหนดทำงานวนซ้ำ ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้งานสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

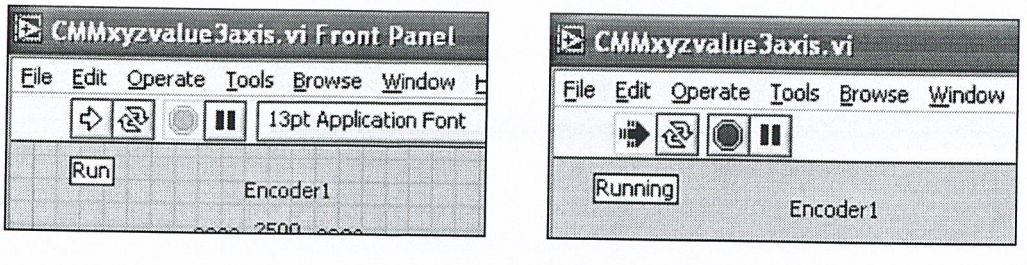
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9-5 รูปแสดงบล๊อกไดอะแกรม ของโปรแกรมประมวลผลและเก็บข้อมูลเคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม โดยโปรแกรมแลบวิว

9.2.1.2 ฟร๊อนแพนเนล จะเป็นส่วนควบคุมและแสดงผลที่ผู้จัดทำได้ทำการออกแบบเอาไว้ ซึ่งจะประกอบไปด้วย

1. ปุ่มเปิดการใช้งานของโปรแกรม (Run) จะเป็นปุ่มเพื่อสั่งให้โปรแกรมที่ได้ออกแบบขึ้นทำงาน ซึ่งผู้ใช้งานจะต้องทำการกดปุ่มนี้ก่อนทุกครั้ง และเมื่อโปรแกรมทำงาน ปุ่มนี้จะเปลี่ยนรูปแบบสถานะให้รู้ว่าโปรแกรมกำลังทำงาน (Running)



รูปที่ 9-6 รูปแสดงปุ่มเปิดการใช้งานของโปรแกรม และปุ่มแสดงสถานะโปรแกรมกำลังทำงาน

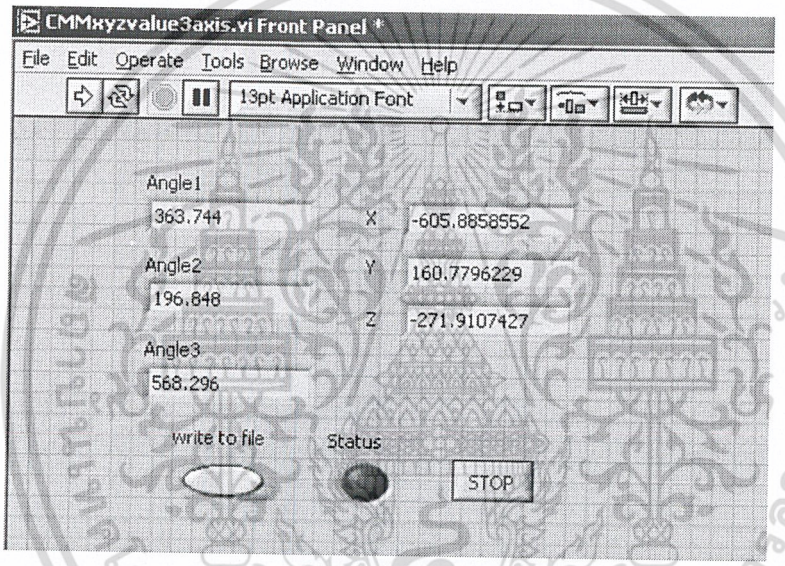
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. แถบแสดงค่าตำแหน่งของมุม เป็นแถบแสดงค่าตำแหน่งปัจจุบันของมุมทั้ง 3 ซึ่งได้มาจากการแปลงค่าสัญญาณพัลส์ที่ได้จากอ่านค่า โดยจะแสดงออกมาเป็นค่าองศา ค่ามุมที่วัดได้นี้จะถูกนำไปทำการคำนวณหาพิกัดจุดปลายโดยวิธีทางจลนศาสตร์ต่อไป

3. แถบแสดงค่าตำแหน่งพิกัดจุดปลายของหัววัด เป็นแถบแสดงค่าตำแหน่งปัจจุบันทั้ง 3 แกนของปลายหัววัด อันได้แก่ แกนเอ็กซ์ (X-Axis), แกนวาย (Y-Axis), แกนแซด (Z-Axis) ซึ่งมีระบบแกนพิกัด (Axis system) เป็นแบบพิกัดฉาก และมีจุดกำเนิดอยู่ที่ระบบแกนพิกัดที่ศูนย์ของเครื่องวัดพิกัด

4. ปุ่มบันทึกข้อมูล (Write to file) เป็นปุ่มสำหรับการบันทึกค่าพิกัดจุดปลาย เมื่อทำการกดปุ่มนี้โปรแกรมจะทำการบันทึกค่าจุดพิกัดจุดปลายที่ได้ในตำแหน่งนั้นๆ ลงในไฟล์ (File) โดยจะมีไฟแสดงสถานะเมื่อทำการกดปุ่มนี้

5. ปุ่มหยุด (Stop) จะเป็นปุ่มเพื่อสั่งให้โปรแกรมที่กำลังทำงานอยู่หยุดทำงาน



รูปที่ 9-7 รูปแสดงฟร๊อน แพนเนล ของโปรแกรมประมวลผลและเก็บข้อมูลของเคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม โดยโปรแกรมแลบวิว

9.2.2 หลักการทำงานของโปรแกรมประมวลผลและเก็บข้อมูลของเคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม

พิจารณารูปที่ 9-5 และ 9-7 ประกอบ

1. การทำงานของโปรแกรมประมวลผลและเก็บข้อมูลนี้ จะเป็นการรับข้อมูลที่เป็นสัญญาณพัลส์มาจากเอนโคดเดอร์ทั้ง 3 ตัว ผ่านทางการ์ดรับค่าและประมวลผล

2. เมื่อได้รับสัญญาณพัลส์แล้ว ก็จะถูกส่งไปยังฟังก์ชันที่ทำการแปลงสัญญาณพัลส์เป็นค่าตำแหน่งของมุม เมื่อข้อมูลได้ถูกแปลงเป็นค่าตำแหน่งของมุมแล้ว ก็จะส่งค่าไปยังฟังก์ชันแสดงตำแหน่งของการวัดมุม เพื่อที่จะแสดงผลที่สัญลักษณ์แทนตำแหน่งของการวัดมุม

3. ค่าตำแหน่งของการวัดมุมที่วัดได้ทั้ง 3 มุมจะถูกส่งไปทำการคำนวณด้วยวิธีทางจลนศาสตร์โดยฟังก์ชันแมทแลบของโปรแกรมแลบวิว ข้อมูลที่ได้ออกมาจากฟังก์ชันแมทแลบจะเป็นค่าพิกัดจุดปลายของหัววัด (X, Y, Z) ซึ่งข้อมูลนี้จะถูกส่งไปยังฟังก์ชันแสดงค่าตำแหน่งพิกัดจุดปลายของหัววัด เพื่อที่จะทำการแสดงผลที่แถบแสดงค่าตำแหน่งของปลายหัววัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ค่าตำแหน่งจุดปลายของหัววัดที่ได้ สามารถที่จะเก็บข้อมูลลงไปในไฟล์ได้ โดยผู้ใช้งานทำการกดปุ่มบันทึกข้อมูล

5. ค่าพิกัดจุดปลายที่ได้สามารถนำไปแสดงผลในโปรแกรมแคดทั่วไป เช่น ยูนิกราฟฟิก คาเทีย ต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 10
การทดลองและผลการทดลอง

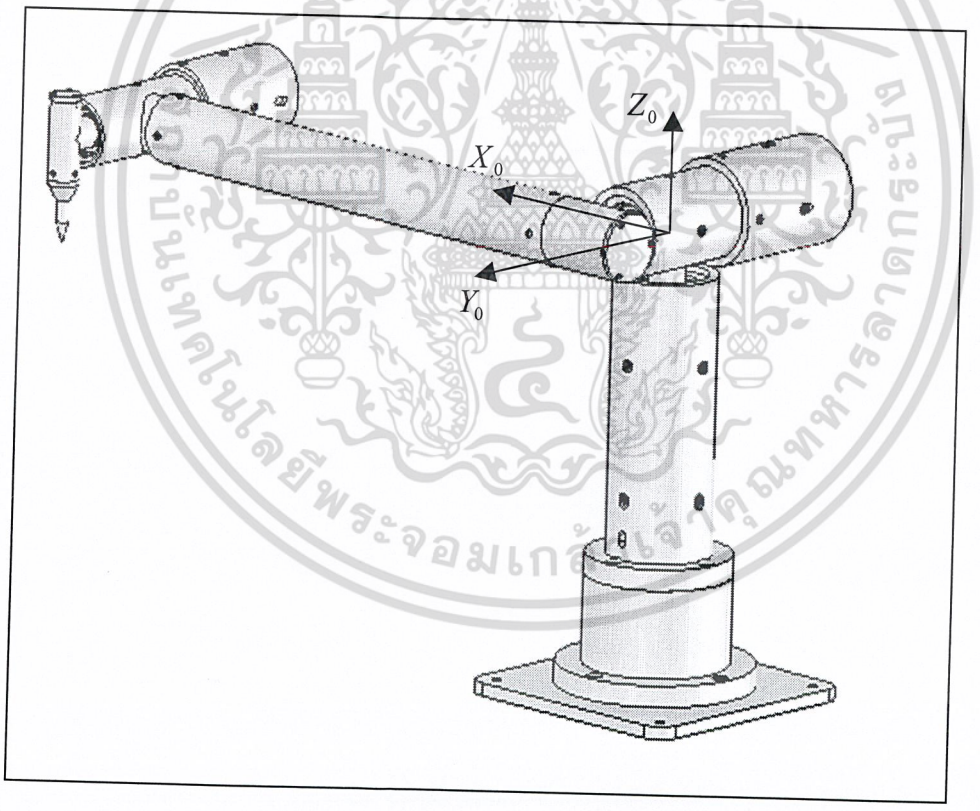
ก่อนทำการวัดทุกครั้ง ผู้ใช้งานจะต้องทำการตั้งเครื่องในตำแหน่งเริ่มต้นของการวัด ในการหาตำแหน่งเริ่มต้นของการวัด ตำแหน่งมุมการหมุนของแต่ละข้อต่อ (θ_i) ในรูปการตั้งระบบแกนพิกัดของเครื่อง (รูปที่10-1) จะต้องเท่ากับศูนย์ ซึ่งจะพบว่ามุมการหมุนของรูปการตั้งระบบแกนพิกัดของเครื่องเป็นดังนี้

$\theta_1 = 0$ เรเดียน

$\theta_2 = -\pi$ เรเดียน

$\theta_3 = 0$ เรเดียน

ดังนั้นหากตำแหน่งมุมการหมุนของแต่ละข้อต่อเท่ากับศูนย์ ก็จะเป็นตำแหน่งเริ่มต้นของการวัด ซึ่งผู้จัดทำจะเรียกว่าตำแหน่งนี้ว่าโฮมโพซิชัน (Home position)

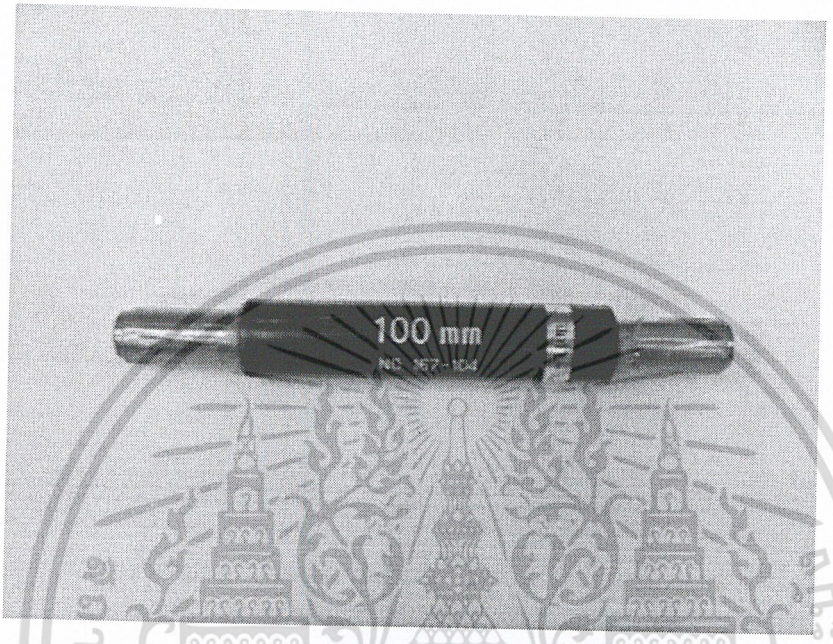


รูปที่ 10-1 รูปแสดงตำแหน่งเริ่มต้นการวัดของ เคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.1 การทดลองและผลการทดลอง

ในโครงงานนี้ได้ทำการทดสอบความถูกต้องในการใช้งานของเครื่องโดยการนำเครื่องเคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็ม ไปทำการวัดค่าความยาวแท่งมาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบไมโครมิเตอร์ที่มีขนาด 100 มิลลิเมตร โดยทำการวัดจุดต้นและจุดปลายของแท่งมาตรฐาน และทำการคำนวณหาระยะระหว่างจุดเป็นจำนวน 50 ชุดข้อมูล ซึ่งได้ผลดังนี้



รูปที่ 10-2 รูปแสดงแท่งมาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบไมโครมิเตอร์

ตารางที่ 10-1 แสดงชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

ชุดข้อมูล	X	Y	Z	Distance
1	-369.031 -422.948	287.4237 206.9367	-473.548 -471.079	96.90905
2	-440.079 -465.973	164.1066 71.21465	-472.1 -471.322	96.4366
3	-465.44 -462.007	36.50942 -57.5757	-475.49 -476.449	94.15266
4	-457.674 -430.408	-79.4607 -170.01	-476.723 -479.03	94.59326
5	-461.962 -465.872	-56.921 36.34465	-477.177 -475.687	93.35947
6	-462.298 -437.638	69.52569 161.6481	-475.785 -476.119	95.36627
7	-418.838 -363.158	204.7499 285.5744	-476.747 -480.231	98.2091
8	-428.786 -454.039	164.5239 73.10176	-482.838 -483.145	94.84635
9	-457.628 -458.099	42.26759 -52.6076	-482.992 -481.378	94.89005
10	-452.049 -426.628	-76.1062 -165.934	-483.201 -483.667	93.35662

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

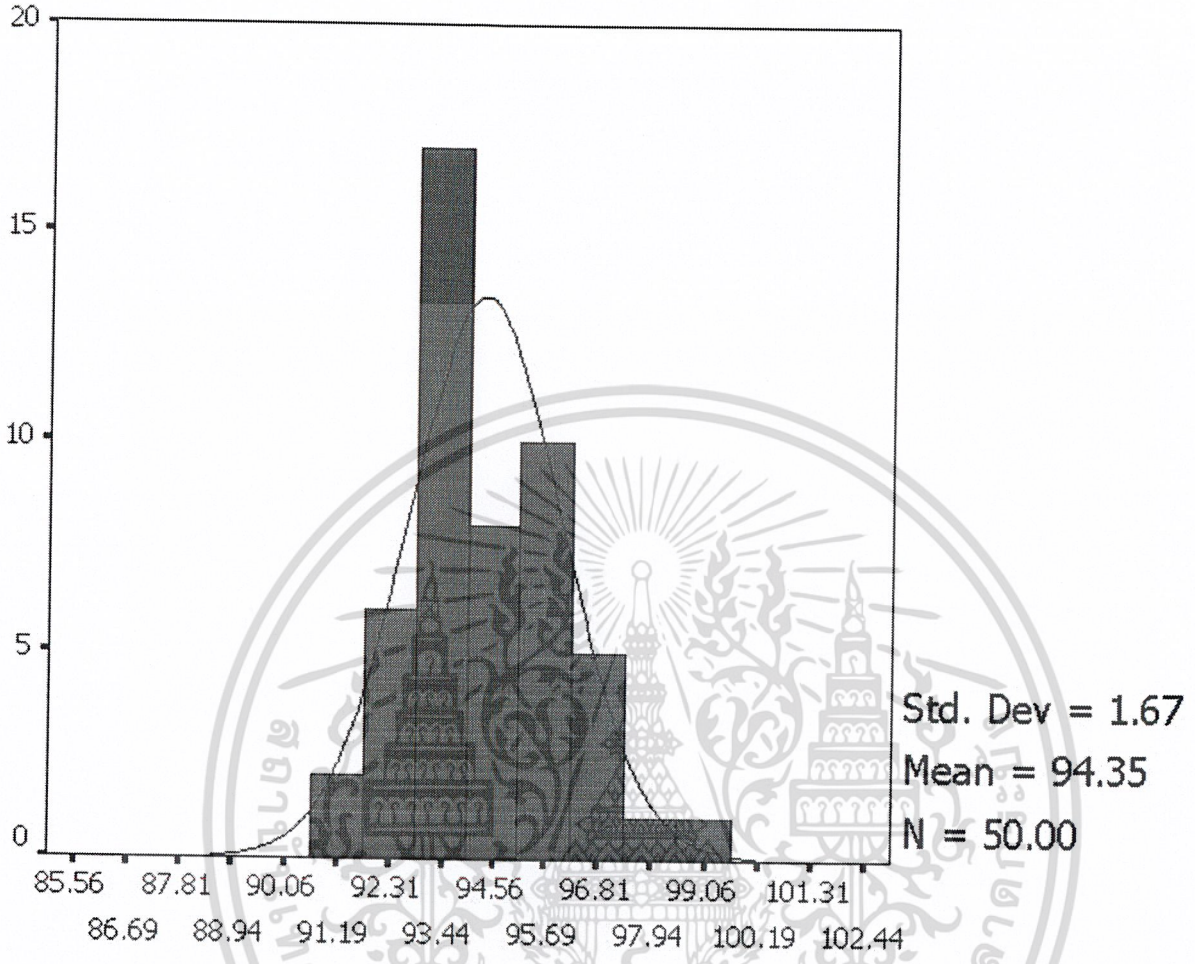
11	-456.361 -433.085	70.22231 160.4783	-481.681 -480.957	93.21159
12	-414.859 -364.448	204.7049 283.7149	-480.534 -480.957	93.72304
13	-432.598 -455.913	160.5237 70.90445	-481.53 -482.304	92.60569
14	-457.431 -455.772	37.89576 -55.4471	-484.286 -483.563	93.36039
15	-451.455 -425.243	-80.1467 -168.247	-483.253 -484.236	91.92187
16	-455.024 -458.075	-56.1998 35.41614	-484.031 -483.716	91.66728
17	-456.215 -431.859	67.53344 155.8855	-482.203 -483.563	91.65768
18	-413.627 -363.8	200 277.7319	-483.716 -485.221	92.3432
19	-430.353 -454.644	155.523 65.29714	-485.169 -484.438	93.44144
20	-458.151 -457.097	32.59216 -61.2793	-484.438 -482.203	93.90395
21	-452.077 -426.268	-85.1076 -173.227	-482.421 -482.472	91.82137
22	-455.555 -459.006	-59.643 34.49194	-483.716 -483.347	94.19897
23	-419.088 -371.724	197.3707 277.7246	-480.831 -479.632	93.28216
24	-438.367 -460.804	151.4954 60.56822	-479.533 -479.204	93.65507
25	-464.264 -461.289	29.58564 -65.9375	-478.627 -477.424	95.57706
26	-455.275 -428.282	-88.122 -177.808	-478.708 -478.708	93.66033
27	-461.032 -466.08	-63.8681 28.28742	-477.952 -477.089	92.29774
28	-465.806 -443.266	57.25859 149.8683	-475.057 -475.979	95.31767
29	-424.417 -376.545	194.6821 277.5978	-477.089 -475.931	95.75002
30	-441.152 -466.775	155.9811 63.12504	-475.979 -474.269	96.34177
31	-469.533 -467.182	33.22705 -63.4273	-474.129 -472.917	96.69056
32	-462.99 -436.413	-88.5052 -181.242	-472.097 -471.07	96.47535
33	-464.535 -467.594	-62.9882 31.68906	-474.818 -475.543	94.72943
34	-465.192 -444.148	63.62203 154.5991	-475.152 -473.942	93.38697
35	-427.335 -378.293	198.3904 279.5744	-473.547 -473.989	94.8479
36	-445.075 -468.787	152.8859 60.23495	-474.083 -472.658	95.64767
37	-472.971 -466.786	26.68156 -72.1674	-470.811 -471.749	99.04666

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

38	-463.312 -433.553	-96.7551 -186.096	-469.852 -471.513	94.18131
39	-468.25 -472.82	-72.4988 23.25277	-470.857 -472.21	95.8701
40	-431.42 -383.299	195.1333 277.2728	-472.256 -472.074	95.19754
41	-449.959 -471.629	150.1786 56.48159	-471.085 -471.354	96.17047
42	-382.435 -396.665	225.4536 132.6215	-472.076 -471.142	93.92118
43	-446.934 -414.856	136.5289 50.35611	-474.13 -469.54	92.06408
44	-472.356 -471.694	44.80399 -50.3759	-469.592 -468.772	95.18569
45	-471.08 -431.465	-4.79184 -91.6175	-468.827 -470.61	95.45283
46	-464.266 -439.081	-71.1206 -161.511	-472.1 -474.379	93.86059
47	-461.438 -435.375	81.38975 170.8721	-475.495 -475.882	93.20151
48	-442.731 -406.287	140.3346 54.72855	-475.888 -476.179	93.04099
49	-417.745 -369.446	207.9108 287.5165	-476.943 -475.302	93.12643
50	-343.413 -333.142	314.0688 221.3549	-476.348 -471.719	93.39586

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อนำมาสร้างกราฟการกระจายตัวแบบมาตรฐาน (Normal Curve) จะได้ผลดังรูปที่ 10-3

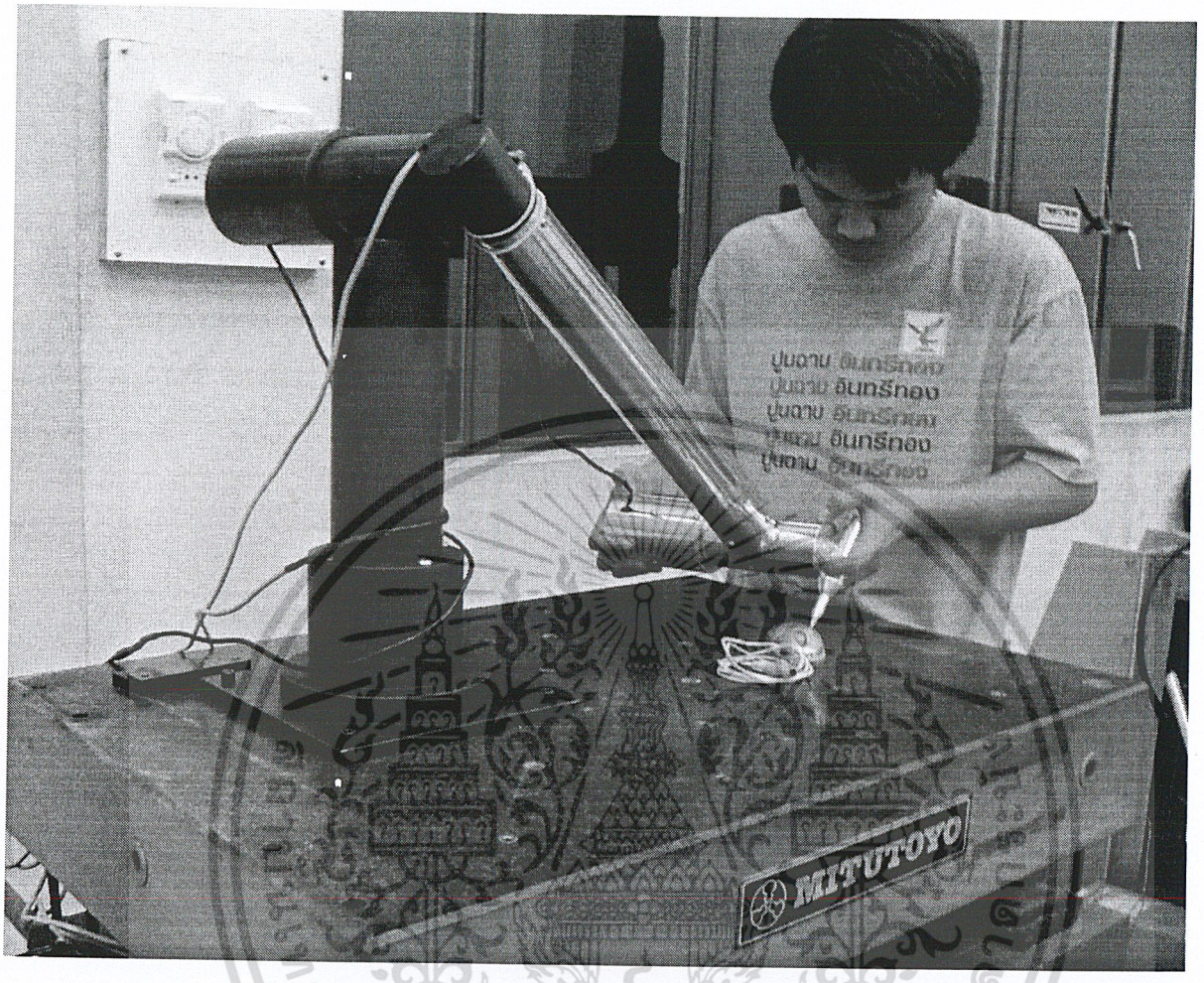


รูปที่ 10-3 กราฟการกระจายตัวแบบมาตรฐานของชุดข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

จากกราฟพบว่า จากจำนวนชุดข้อมูล (N) 50 ชุด ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการวัดความยาวของแท่งมาตรฐานเท่ากับ 94.35 มิลลิเมตร จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.67

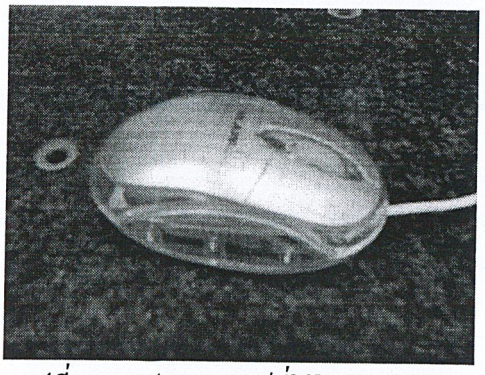
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.2 ตัวอย่างในการใช้งาน



10-4 รูปแสดงลักษณะของตัวเครื่องขณะทำการใช้งาน

ในหัวข้อนี้จะเป็นตัวอย่างการนำเคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็มมาใช้งาน แต่เนื่องจากเคเอ็มไอทีแอล-ซีเอ็มเอ็มเป็นเครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ ที่มีแกนการหมุนเพียง 3 แกน ดังนั้นจึงทำให้การเข้าถึงชิ้นงานที่จะทำการวัดมีจำกัด เพราะฉะนั้นผู้จัดทำจึงทำการทดลองวัดค่าตำแหน่งพิกัดของพื้นผิวด้านบนของเมาส์ (Mouse) คอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 10-5 เป็นต้นแบบในการวัด แต่เพื่อให้จุดพิกัดที่วัดได้มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ จึงจะต้องมีการตีตารางบนพื้นผิวที่จะทำการวัด ดังแสดงในรูปที่ 10-5 เช่นกัน



รูปที่ 10-5 รูปแสดงเมาส์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวัดตำแหน่งพื้นผิวของชิ้นงานต้นแบบ ผู้ใช้งานสามารถที่จะทำการบันทึกค่าพิกัดที่ได้จากการวัดโดยการกดปุ่มบันทึกข้อมูล ในหน้าฟร็อนแพลแนลของโปรแกรมแลบวิว และเมื่อทำการวัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว ข้อมูลตำแหน่งพิกัดที่ถูกเก็บบันทึกจะถูกเก็บบันทึกอยู่ในรูปแบบของไฟล์นามสกุลแด็ท (dat) ซึ่งสามารถใช้ในการสร้างแบบเป็นกลุ่มของจุดในโปรแกรมยูนิกราฟฟิกได้

หลังจากได้ไฟล์ข้อมูลที่เก็บค่าตำแหน่งพิกัดแล้ว จึงส่งข้อมูลนี้ไปยังโปรแกรมยูนิกราฟฟิก โดยข้อมูลที่ส่งเข้าไปในโปรแกรมยูนิกราฟฟิกนี้จะแสดงผลออกเป็นกลุ่มของจุด (Point Cloud) ดังแสดงในรูปที่ 10-6

รูปที่ 10-6 รูปแสดงกลุ่มของจุดที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 11
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

11.1 สรุปผลของโครงงาน

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการออกแบบและสร้างเครื่องวัดพิกัด 3 มิติ แบบข้อต่อ 3 แกน เพื่อใช้ในกระบวนการวิศวกรรมย้อนกลับ โดยอาศัยหลักการทางจลนศาสตร์ ในการแปลงค่าตำแหน่งมุมของแต่ละข้อต่อของเครื่องวัดพิกัดไปเป็นค่าตำแหน่งพิกัดของปลายหัววัดในระบบพิกัดฉาก และค่าพิกัดที่ได้จะนำไปใช้กับโปรแกรมแคดทั่วไปเช่น โปรแกรมยูนิกราฟฟิก โปรแกรมคาเทีย และโปรแกรมโซลิดเอดจ์

เนื่องจากเครื่องมือวัดพิกัด 3 มิติ ที่สร้างขึ้นนี้ มีแกนการหมุนเพียง 3 แกนเท่านั้น จึงทำการการเข้าถึงในการวัดชิ้นงานนั้นมีจำกัด ซึ่งจากการทดลองวัดพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่างพร้อมทั้งนำผลที่ได้ไปสร้างเป็นกลุ่มของจุดในโปรแกรมยูนิกราฟฟิก พบว่ารูปร่างที่ได้มีลักษณะเป็นไปตามชิ้นงานตัวอย่าง แต่ก็ยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่ ซึ่งอาจจะเกิดจากอุปกรณ์ที่ใช้สร้าง หรือจากผู้ใช้งานเอง

11.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากตำแหน่งพิกัดจุดปลายของหัววัดจะได้มาจากเมตริกซ์การแปลง ดังนั้นค่าความถูกต้องส่วนหนึ่งจึงขึ้นอยู่กับความแม่นยำของค่าพารามิเตอร์ต่างๆของโครงสร้างของเครื่องที่อยู่ภายในเมตริกซ์การแปลง สำหรับโครงงานนี้ได้นำค่าพารามิเตอร์มาจากแบบทำให้อาจเกิดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณได้ ดังนั้นเพื่อการพัฒนาให้ค่าความถูกต้องในการวัดมากขึ้นจึงอาจจะกระทำได้โดยการหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเครื่องจากการวัดได้โดยตรงด้วยเครื่องมือที่แม่นยำ

สำหรับวัสดุที่นำมาเลือกใช้เป็นโครงสร้าง หากมีการพัฒนาเลือกใช้เป็นวัสดุที่มีความแข็งเกร็งสูงและมีน้ำหนักเบายิ่งขึ้น เช่น วัสดุประกอบ (Composite Material) จะทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการโก่งตัวของโครงสร้างลดลง อีกทั้งวัสดุที่มีน้ำหนักเบาจะช่วยให้ความสะดวกในการใช้งานมากขึ้นด้วย

การเลือกใช้เอนโคดเดอร์ หากเลือกใช้เอนโคดเดอร์ที่มีคุณภาพและมีความละเอียดสูงมากขึ้น จะทำให้เครื่องมือวัดมีความละเอียดสูงขึ้น

และจากการทดสอบวัดพื้นผิวชิ้นงานต้นแบบพบว่า เนื่องจากหัววัดที่ใช้เป็นแบบปลายเข็มจึงทำให้การวัดพื้นผิวไม่สามารถวัดได้อย่างรวดเร็วเพราะจะต้องทำการวัดทีละจุด และจะต้องนำหัววัดให้ไปแตะที่ผิวชิ้นงานด้วยแรงที่พอดี หากมากไปก็จะทำให้ชิ้นงานเสียหาย หากน้อยไปก็อาจจะสัมผัสไม่ถูกผิวของชิ้นงาน ดังนั้นหากมีการพัฒนาหัววัดแบบไม่มีการสัมผัส (non-contacting probe) เพื่อมาใช้ร่วมกันได้ก็จะสามารถทำให้การวัดมีประสิทธิภาพมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] John A. Bosch, "Coordinate Measuring Machines and Systems" New York : Marcel Dekker, 1995

[2] Saeed B. Niku, "Introdution to Robotics Analysis, Systems, Applications" New Jersey : Prentice Hall, 2001

[3] John J. Craig, "Introduction to Robotics Mechanics and Control" 2nd ed. New York : Addison – Wesley, 1989

[4] William F. Smith, "Fundamental of Materials Science and Engineering", New York :Mcgraw Hill, 1992

[5] James F. Shackelford, "Introduction to Materials Science for Engineers" 6th ed. New Jersey : Prentice Hall, 2000

[6] R.C. Hibbeler, "Mechanics of Materials" 4th ed. New Jersey : Prentice Hall, 2000

[7] Yu Zhang "Research into the engineering application of reverse engineering technology"

[8] NTN Corperation "Ball and Roller Bearing Bearings" Cat. No.2202/E Tokyo : NTN Coperation, 1997

[9] Nachi Fushikoshi Corp. "Precision Rolling Bearings", Cat No. B1031E

[10] OMRON Electronics,Inc. "Rotary Encoder", Cat No. CEDSAX3

[11] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, กิตติศักดิ์ บุญยังคุณ, "เครื่องวัด 3 มิติ แบบข้อต่อ 6 แกน" จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545

[12] รศ.ดร. มนัส สังวรศิลป์, วรรัตน์ ภัทรอมรกุล, "คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์" สำนักพิมพ์ อินโฟเพรส, 2543

[13] เจริญ เพชรมุณี, "เรียนลัด LabVIEW" ซีเอ็ดยูเคชั่น, 2547

[14] http://matweb.com

[15] http://www.cimcore.com

[16] http://www.mitutoyo.com

[17] http://www.cimcore.com

[18] http://www.wanzel.com

[19] http://www.9engineer.com

[20] http://www.ni.com

[21] http: //www.brownandsharpe.com

[22] http: //www.tarus.com

[23] http: //www.coord3.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

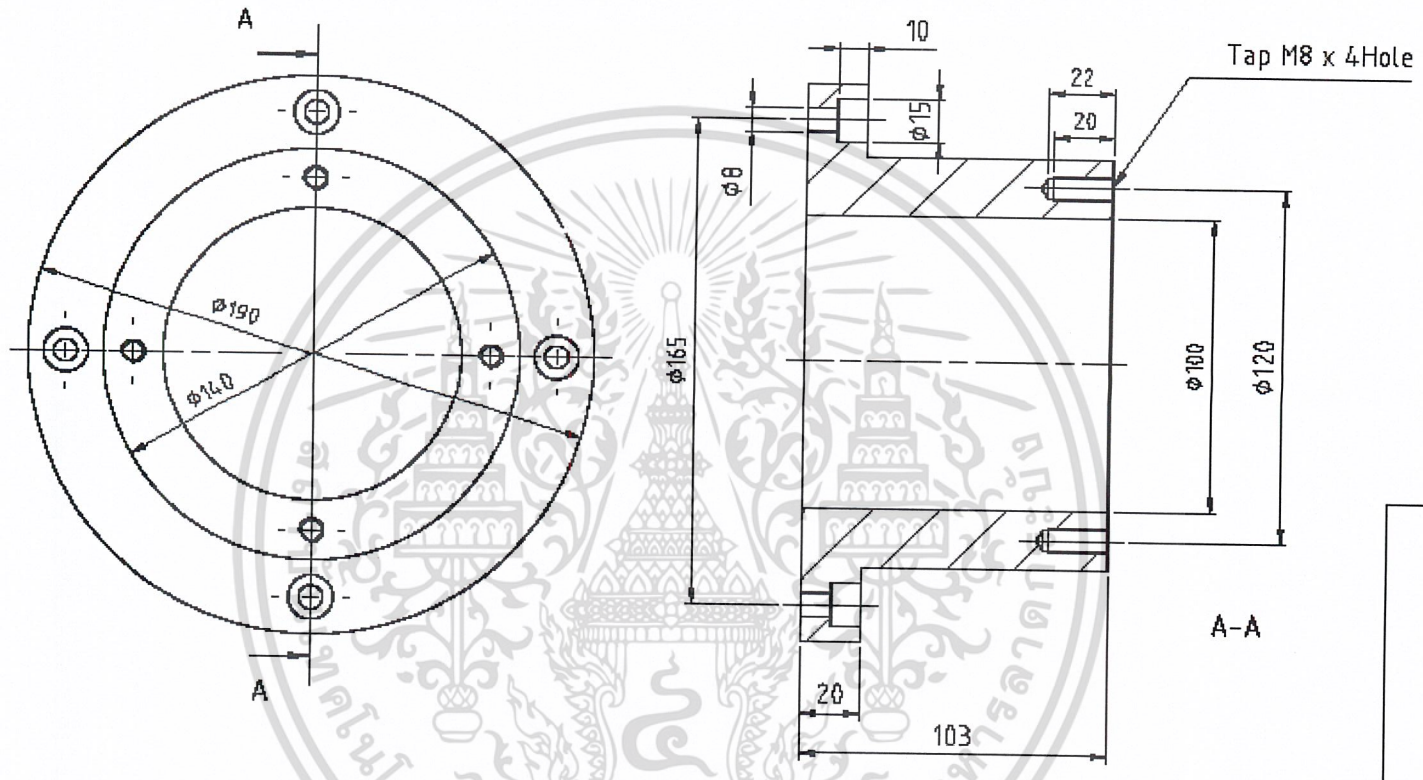
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

General tolerances Class ISO 2768-1 "m"			
0.5-3 mm	±0.1	>120-400 mm	±0.5
>3-6 mm	±0.1	>400-1000 mm	±0.8
>6-30 mm	±0.2	>1000-2000 mm	±1.2
>30-120 mm	±0.3	>2000 mm	±2

No.	Drawing No.	Part Name.	Material.	Q'tity.	Reference.
1	CMM-001	Rectan base	S45C	1	

Scale	Drawn by	Date	Fomat	Q'tity	Material
1:2		Feb5,05	A4	-	-
ISO-E	Title: Rectan base		Drg.Rev. 00	Drawing No. CMM-001	

File name :

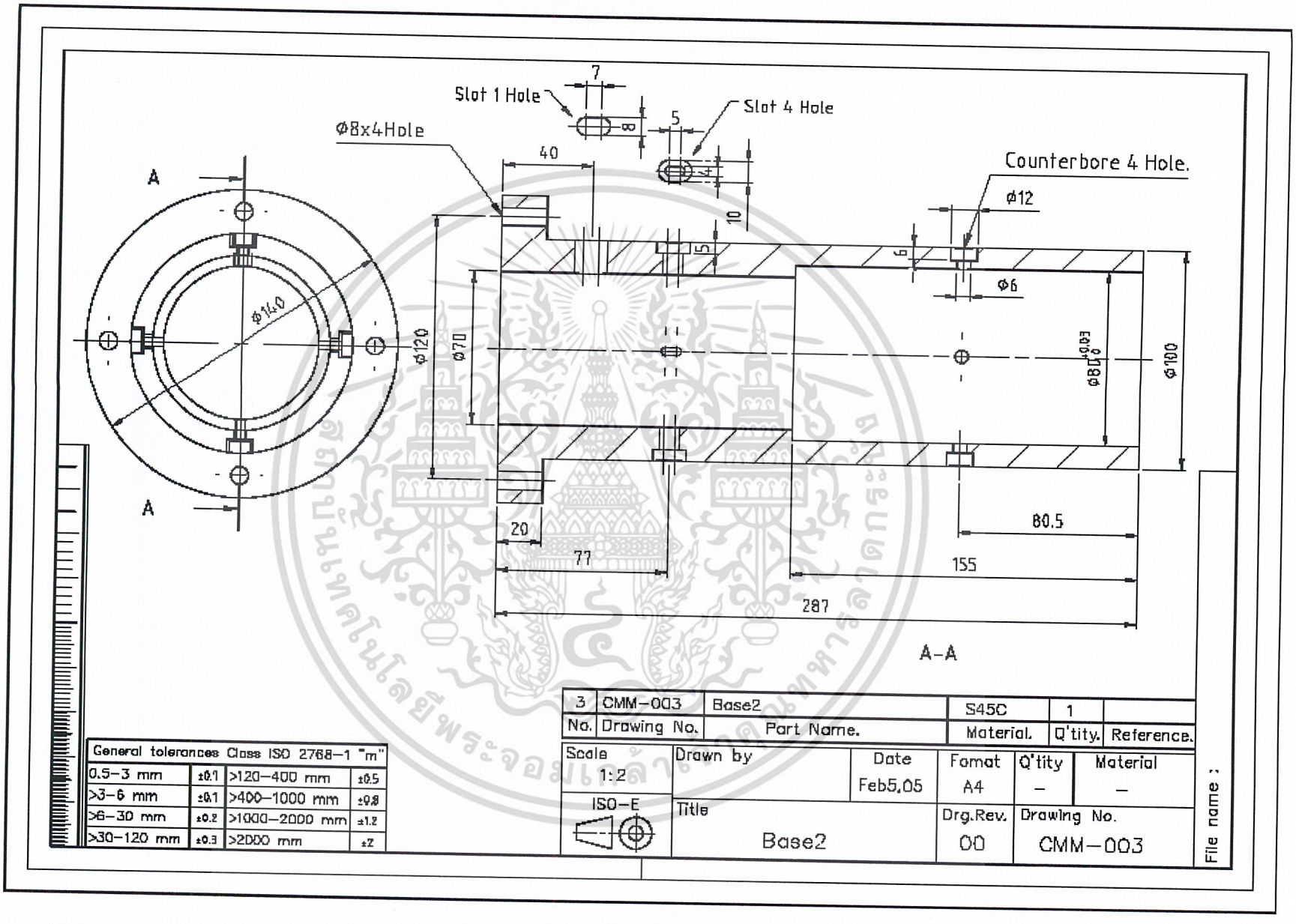


General tolerances Class ISO 2768-1 "m"			
0.5-3 mm	±0.1	>120-400 mm	±0.5
>3-6 mm	±0.1	>400-1000 mm	±0.8
>6-30 mm	±0.2	>1000-2000 mm	±1.2
>30-120 mm	±0.3	>2000 mm	±2

No.	Drawing No.	Part Name.	Material.	Q'tity.	Reference.
2	CMM-002	Base1	S45C	1	

Scale 1:2	Drawn by	Date Feb5,05	Fomat A4	Q'tity –	Material –
ISO-E	Title: Base1		Drg.Rev. 00	Drawing No. CMM-002	

File name :

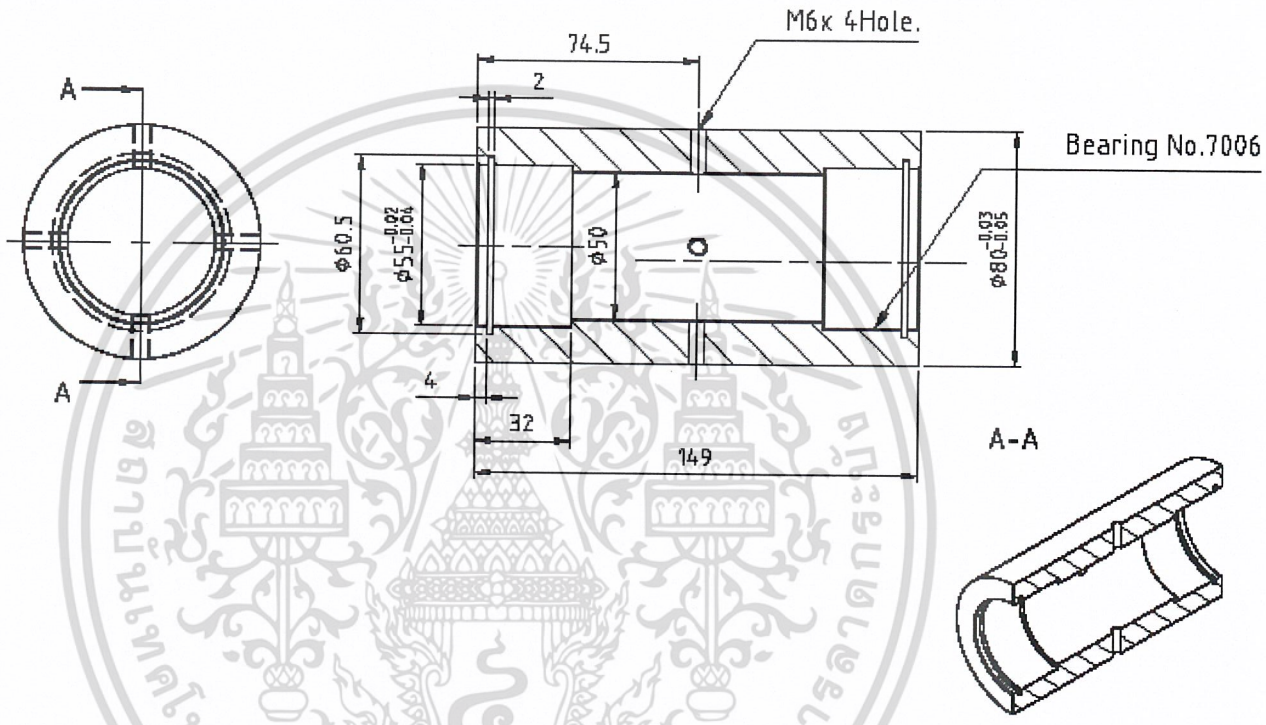


General tolerances Class ISO 2768-1 "m"			
0.5-3 mm	±0.1	>120-400 mm	±0.5
>3-6 mm	±0.1	>400-1000 mm	±0.8
>6-30 mm	±0.2	>1000-2000 mm	±1.2
>30-120 mm	±0.3	>2000 mm	±2

No.	Drawing No.	Part Name.	Material.	Q'tity.	Reference.
3	CMM-003	Base2	S45C	1	

Scale	Drawn by	Date	Fomat	Q'tity	Material
1:2		Feb5,05	A4	-	-
ISO-E	Title: Base2		Drg.Rev. 00	Drawing No. CMM-003	

File name :

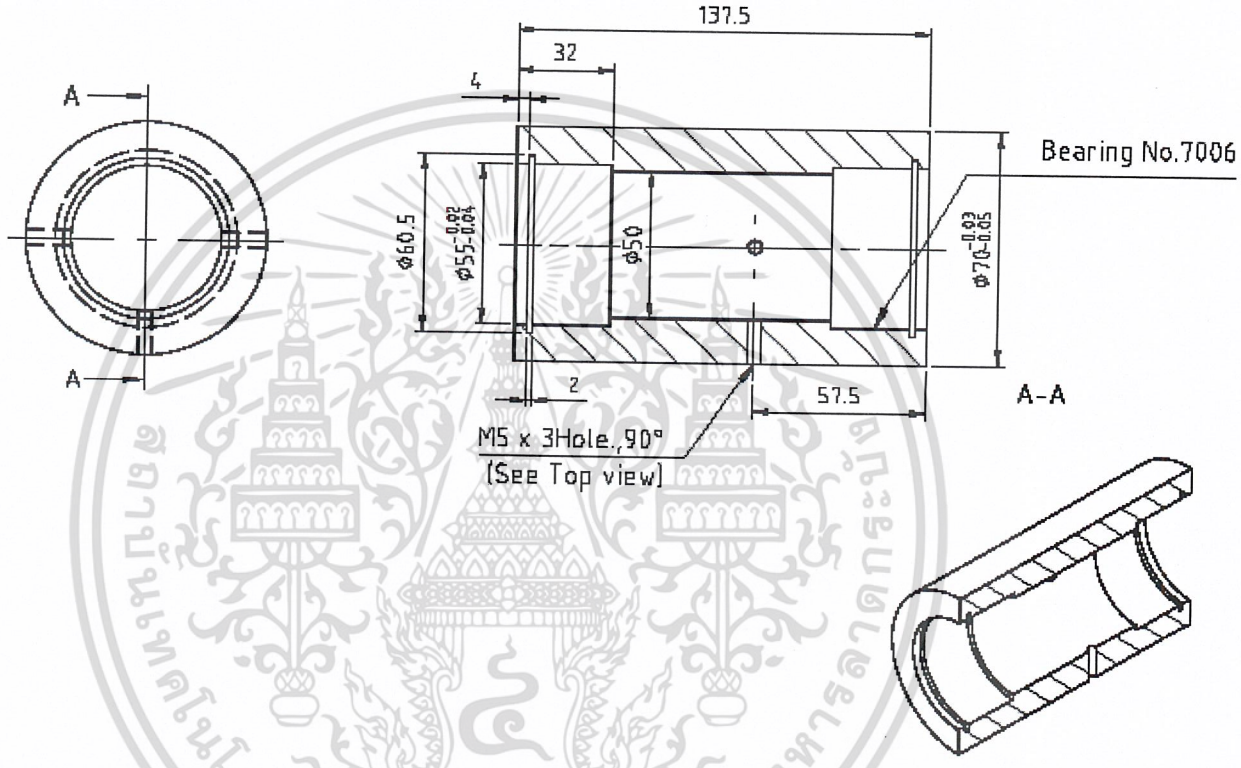


General tolerances Class ISO 2768-1 "m"			
0.5-3 mm	±0.1	>120-400 mm	±0.5
>3-6 mm	±0.1	>400-1000 mm	±0.8
>6-30 mm	±0.2	>1000-2000 mm	±1.2
>30-120 mm	±0.3	>2000 mm	±2

No.	Drawing No.	Part Name.	Material.	Q'tity.	Reference.
4	CMM-004	Collar1	S45C	1	

Scale	Drawn by	Date	Fomat	Q'tity	Material
1:2		Feb5,05	A4	-	-
ISO-E	Title: Collar1		Drg.Rev. 00	Drawing No. CMM-004	

File name :

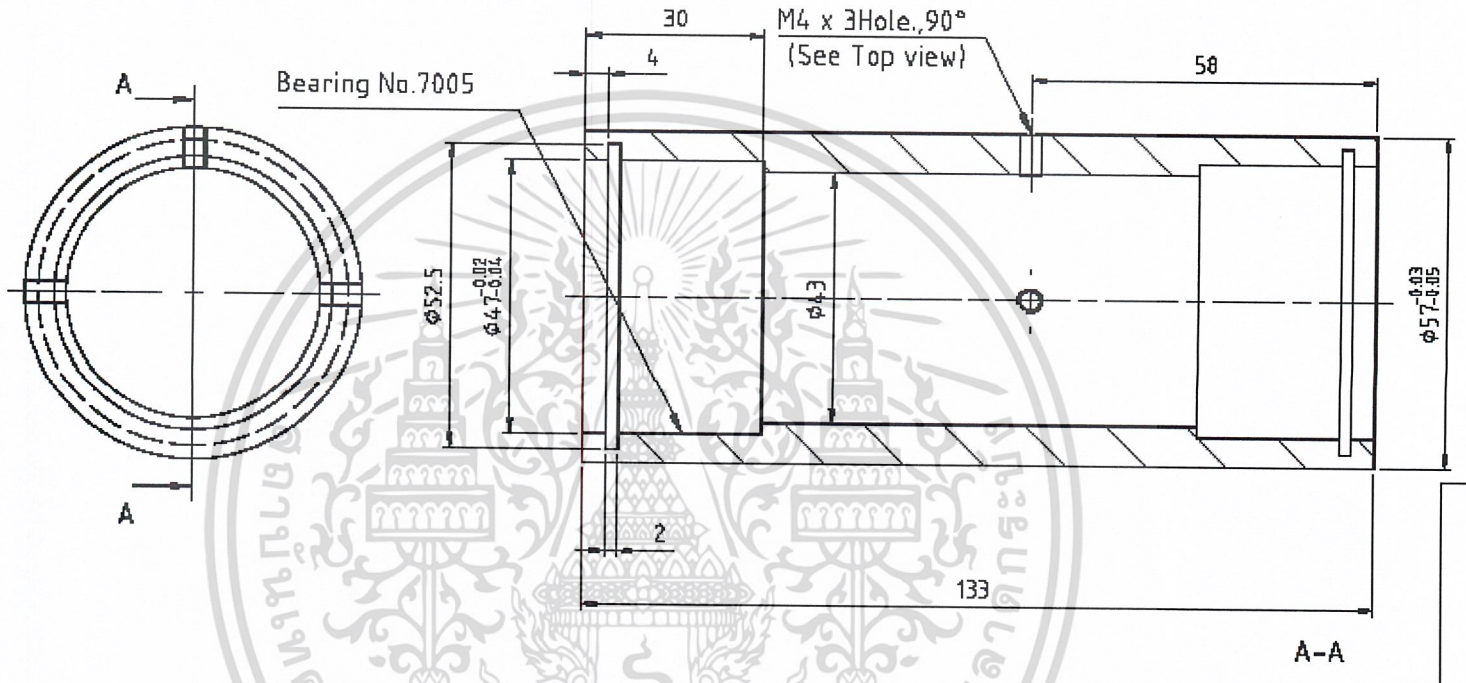


General tolerances Class ISO 2768-1 "m"			
0.5-3 mm	±0.1	>120-400 mm	±0.5
>3-6 mm	±0.1	>400-1000 mm	±0.8
>6-30 mm	±0.2	>1000-2000 mm	±1.2
>30-120 mm	±0.3	>2000 mm	±2

No.	Drawing No.	Part Name.	Material.	Q'tity.	Reference.
5	CMM-005	Collar2	S45C	1	

Scale	Drawn by	Date	Fomat	Q'tity	Material
1:2		Feb5,05	A4	-	-
ISO-E	Title: Collar2		Drg.Rev. 00	Drawing No. CMM-005	

File name :

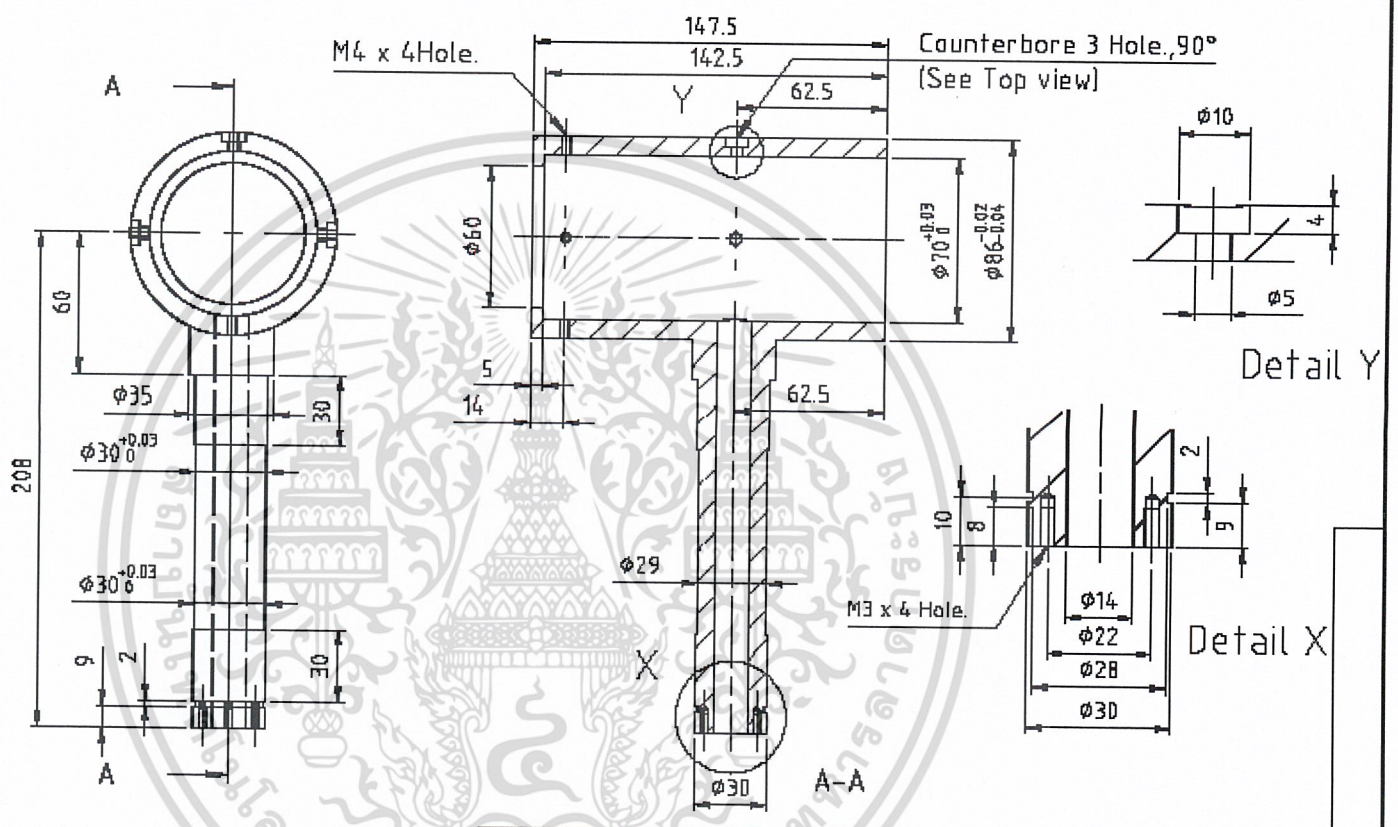


General tolerances Class ISO 2768-1 "m"			
0.5-3 mm	±0.1	>120-400 mm	±0.5
>3-6 mm	±0.1	>400-1000 mm	±0.8
>6-30 mm	±0.2	>1000-2000 mm	±1.2
>30-120 mm	±0.3	>2000 mm	±2

No.	Drawing No.	Part Name.	Material.	Q'tity.	Reference.
6	CMM-006	Collar3	AL6061	1	

Scale	Drawn by	Date	Fomat	Q'tity	Material
1:1		Feb5,05	A4	-	-
ISO-E	Title: Collar3		Drg.Rev. 00	Drawing No. CMM-006	

File name :

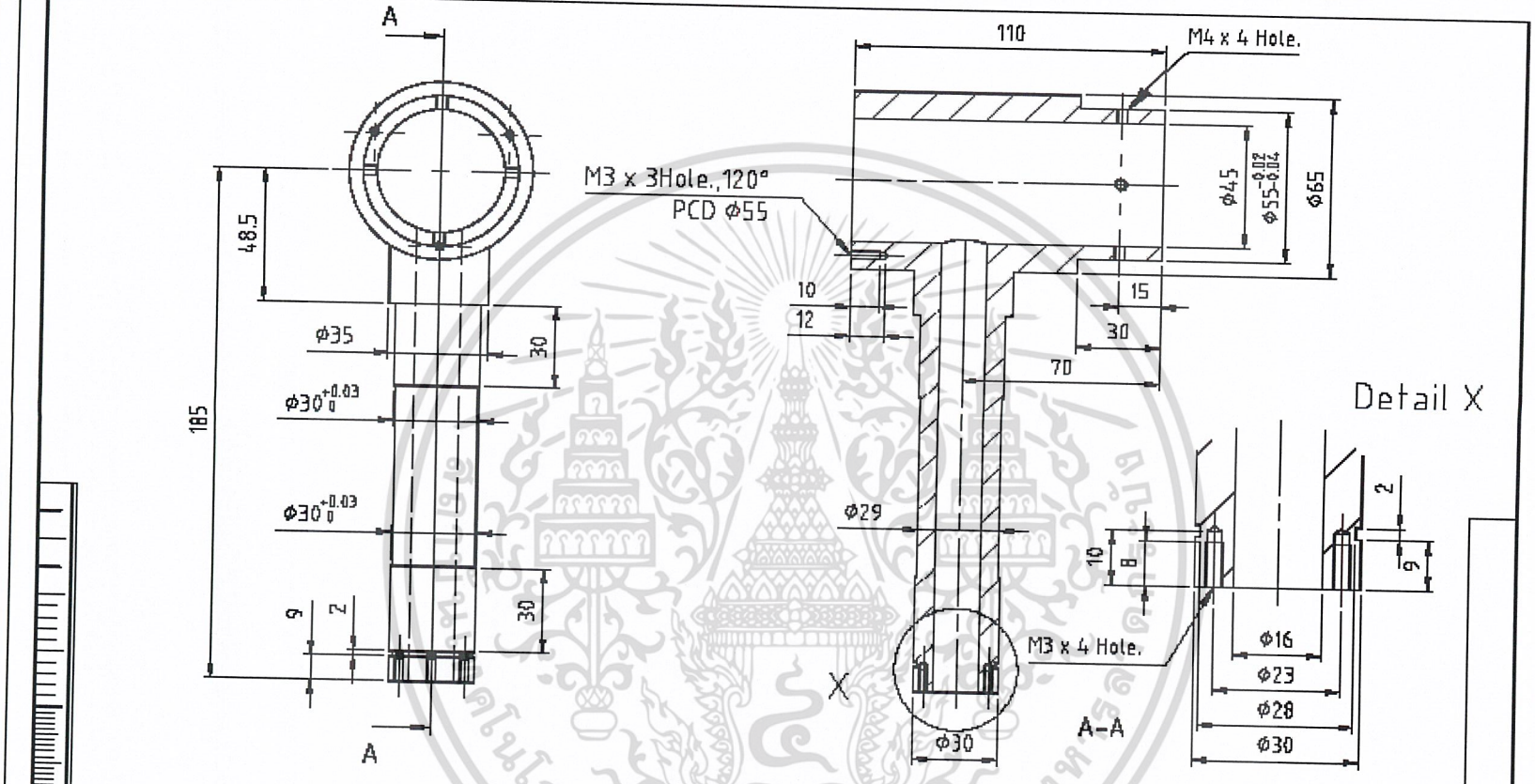


7	CMM-007	TW1	S45C	1	
No.	Drawing No.	Part Name.	Material.	Q'tity.	Reference.

General tolerances Class ISO 2768-1 "m"			
0.5-3 mm	±0.1	>120-400 mm	±0.5
>3-6 mm	±0.1	>400-1000 mm	±0.8
>6-30 mm	±0.2	>1000-2000 mm	±1.2
>30-120 mm	±0.3	>2000 mm	±2

Scale	Drawn by	Date	Fomat	Q'tity	Material
–		Feb5,05	A4	–	–
ISO-E	Title		Drg.Rev.	Drawing No.	
	TW1		00	CMM-007	

File name :

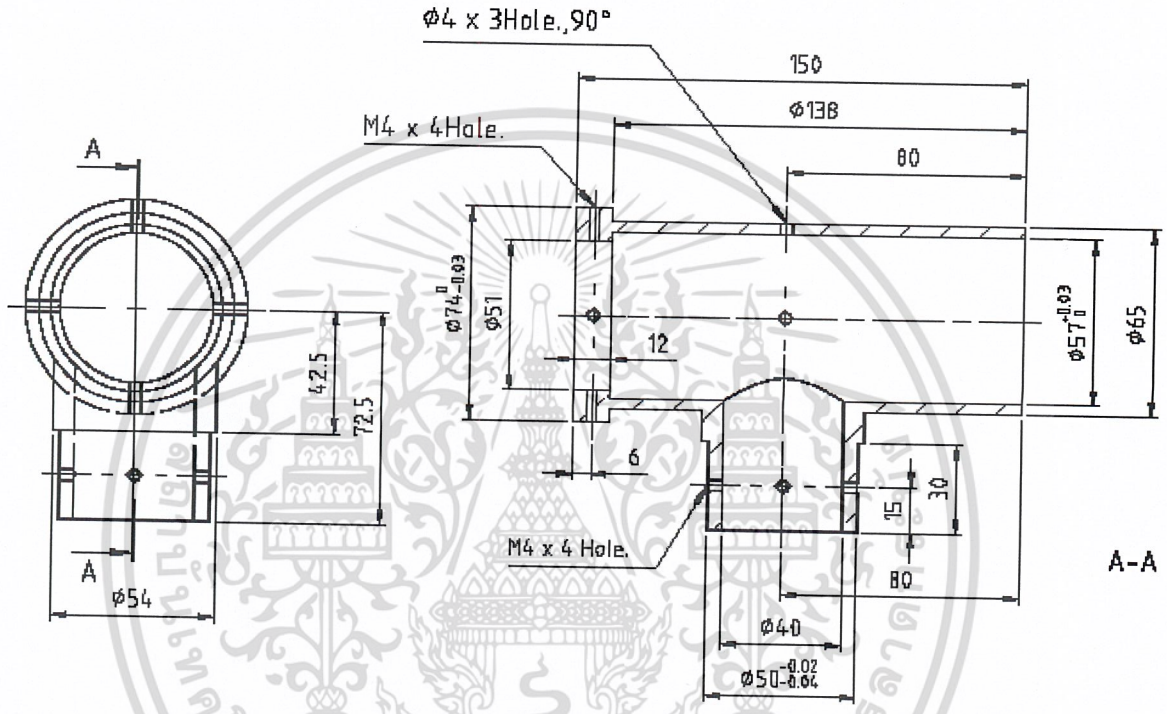


General tolerances Class ISO 2768-1 "m"			
0.5-3 mm	±0.1	>120-400 mm	±0.5
>3-6 mm	±0.1	>400-1000 mm	±0.8
>6-30 mm	±0.2	>1000-2000 mm	±1.2
>30-120 mm	±0.3	>2000 mm	±2

No.	Drawing No.	Part Name.	Material.	Q'ty.	Reference.
8	CMM-008	TW2	S45C	1	

Scale	Drawn by	Date	Fomat	Q'tity	Material
1:2		Feb5,05	A4	-	-
ISO-E	Title: TW2		Drg.Rev.: 00	Drawing No.: CMM-008	

File name :

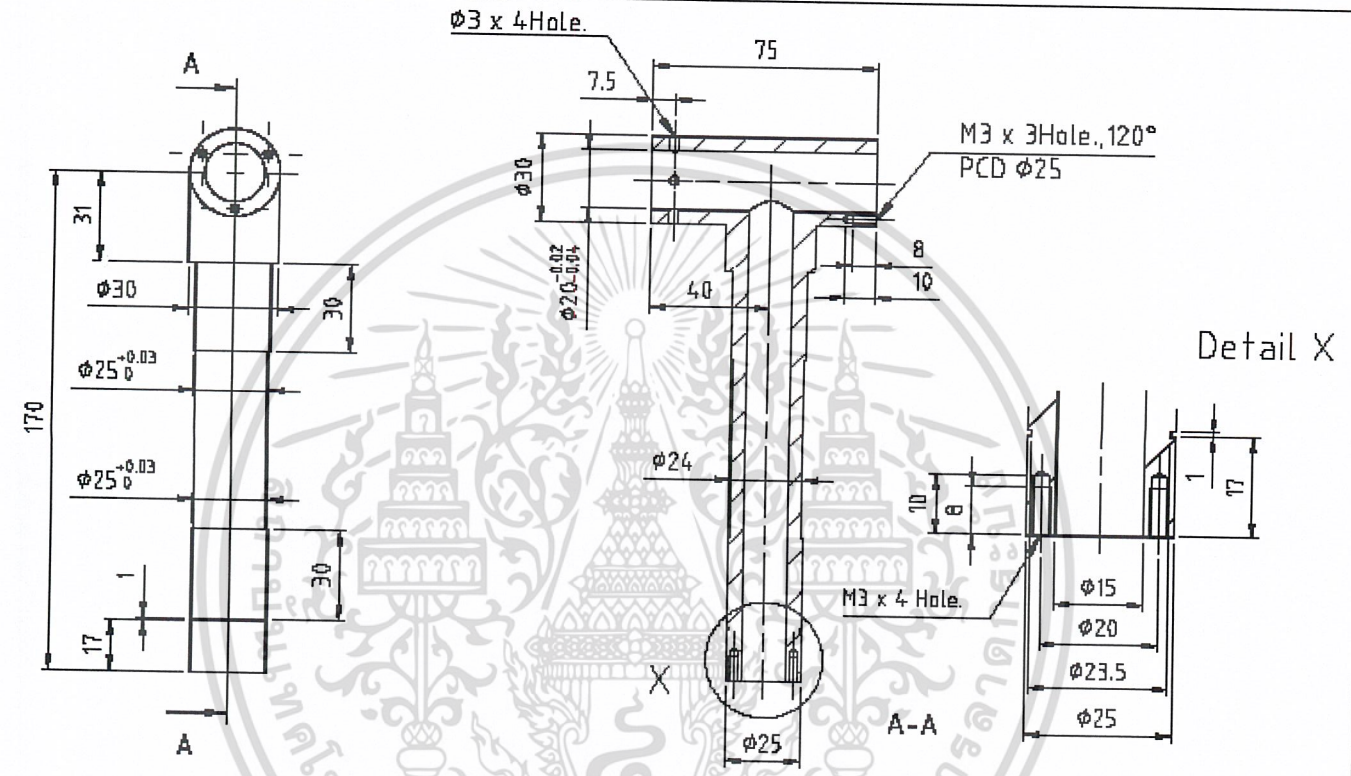


9	CMM-009	TW3	AL6061	1	
No.	Drawing No.	Part Name.	Material.	Q'tity.	Reference.

Scale 1:2	Drawn by	Date Feb5,05	Famat A4	Q'tity –	Material –
ISO-E	Title TW3		Drg.Rev. 00	Drawing No. CMM-009	

File name :

General tolerances Class ISO 2768-1 "m"			
0.5-3 mm	±0.1	>120-400 mm	±0.5
>3-6 mm	±0.1	>400-1000 mm	±0.8
>6-30 mm	±0.2	>1000-2000 mm	±1.2
>30-120 mm	±0.3	>2000 mm	±2

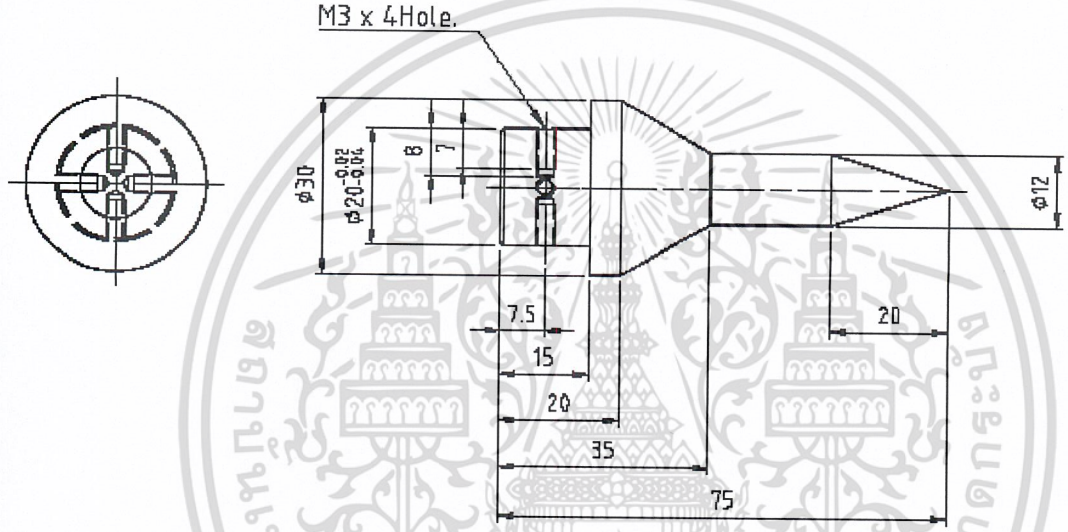


General tolerances Class ISO 2768-1 "m"			
0.5-3 mm	±0.1	>120-400 mm	±0.5
>3-6 mm	±0.1	>400-1000 mm	±0.8
>6-30 mm	±0.2	>1000-2000 mm	±1.2
>30-120 mm	±0.3	>2000 mm	±2

No.	Drawing No.	Part Name.	Material.	Q'tity.	Reference.
10	CMM-010	TW4	AL6061	1	

Scale	Drawn by	Date	Fomat	Q'tity	Material
1:2		Feb5,05	A4	-	-
ISO-E	Title: TW4		Drg.Rev.: 00	Drawing No.: CMM-010	

File name :

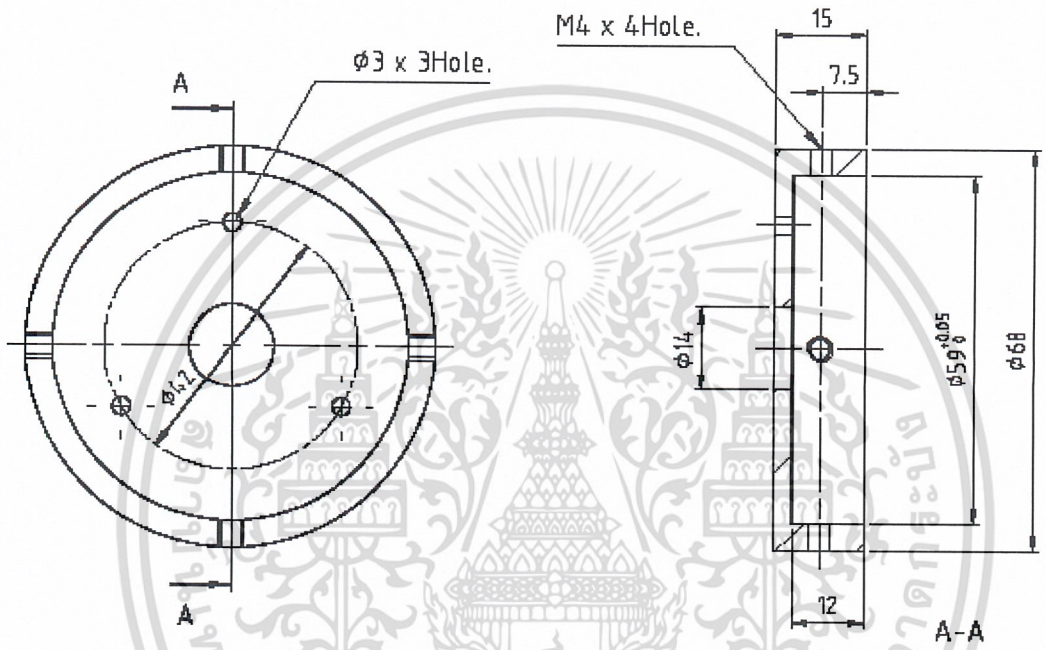


General tolerances Class ISO 2768-1 "m"			
0.5-3 mm	±0.1	>120-400 mm	±0.5
>3-6 mm	±0.1	>400-1000 mm	±0.8
>6-30 mm	±0.2	>1000-2000 mm	±1.2
>30-120 mm	±0.3	>2000 mm	±2

No.	Drawing No.	Part Name.	Material.	Q'tity.	Reference.
11	CMM-011	Probe	AL6061	1	

Scale	Drawn by	Date	Fomat	Q'tity	Material
1:1		Feb5,05	A4	-	-
ISO-E	Title: Probe		Drg.Rev. 00	Drawing No. CMM-011	

File name :

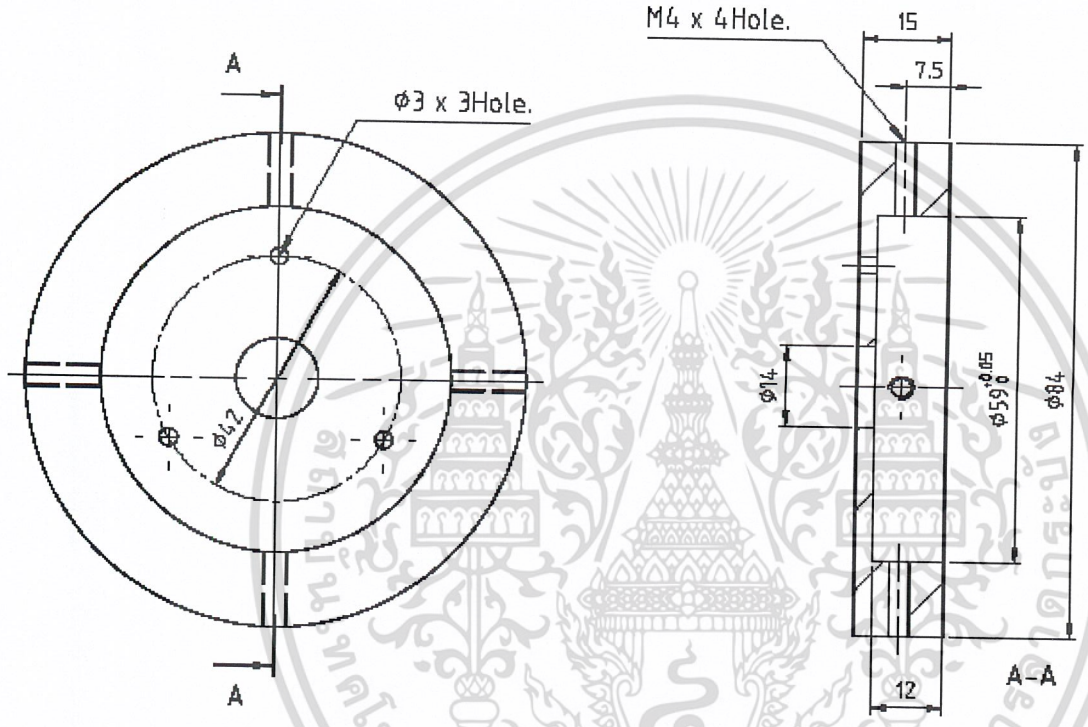


General tolerances Class ISO 2768-1 "m"			
0.5-3 mm	±0.1	>120-400 mm	±0.5
>3-6 mm	±0.1	>400-1000 mm	±0.8
>6-30 mm	±0.2	>1000-2000 mm	±1.2
>30-120 mm	±0.3	>2000 mm	±2

No.	Drawing No.	Part Name.	Material.	Q'tity.	Reference.
12	CMM-012	Plan Enc1	S45C	1	

Scale	Drawn by	Date	Fomat	Q'tity	Material
1:1		Feb5,05	A4	-	-
ISO-E	Title: Plan Enc1		Drg.Rev. 00	Drawing No. CMM-012	

File name :



General tolerances Class ISO 2768-1 "m"			
0.5-3 mm	±0.1	>120-400 mm	±0.5
>3-6 mm	±0.1	>400-1000 mm	±0.8
>6-30 mm	±0.2	>1000-2000 mm	±1.2
>30-120 mm	±0.3	>2000 mm	±2

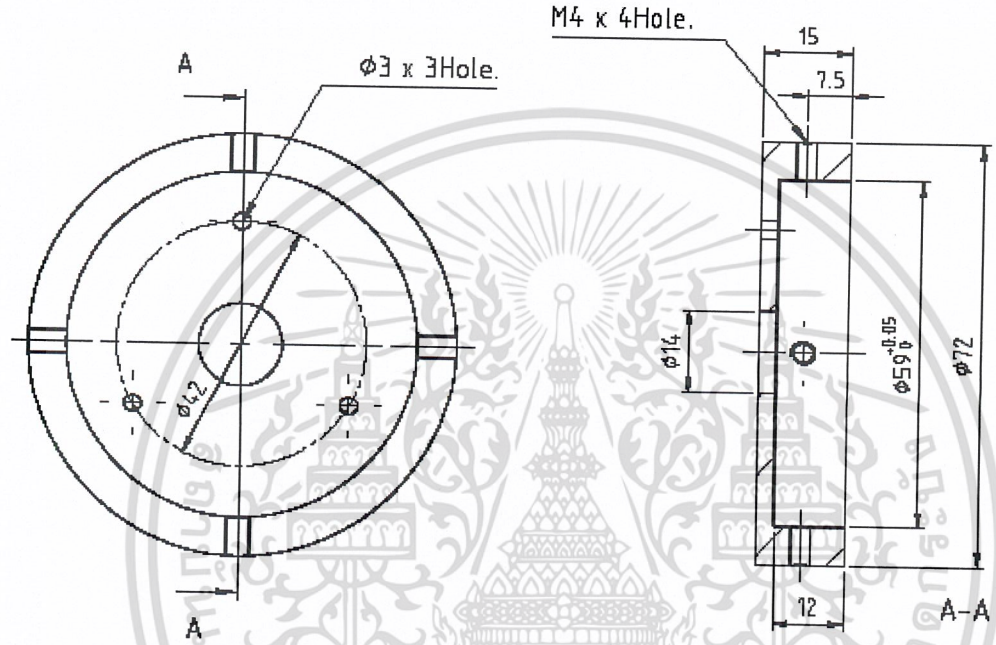
No.	Drawing No.	Part Name.	Material.	Q'ty.	Reference.
13	CMM-013	Plan Enc2	S45C	1	

Scale	Drawn by	Date	Fomat	Q'tity	Material
1:1		Feb5,05	A4	-	-

ISO-E

Title	Drg.Rev.	Drawing No.
Plan Enc2	00	CMM-013

File name :

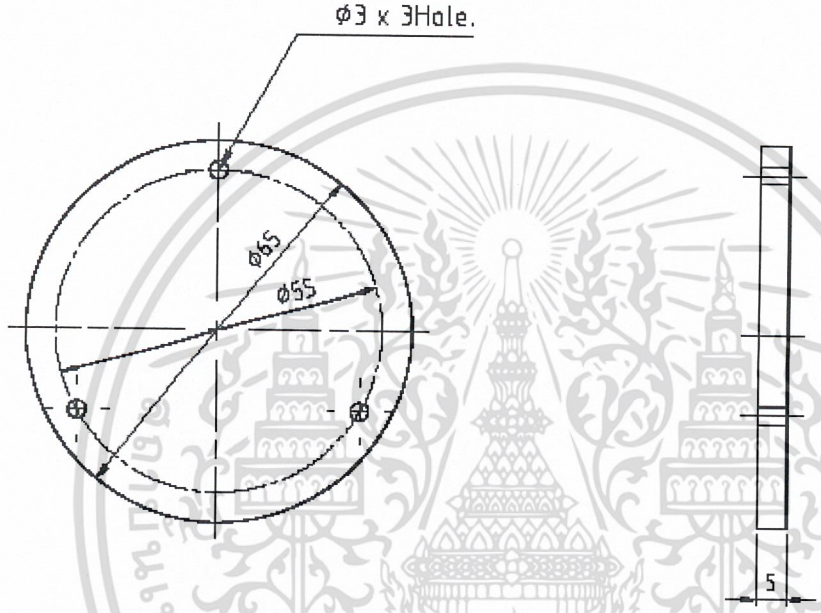


General tolerances Class ISO 2768-1 "m"			
0.5-3 mm	±0.1	>120-400 mm	±0.5
>3-6 mm	±0.1	>400-1000 mm	±0.8
>6-30 mm	±0.2	>1000-2000 mm	±1.2
>30-120 mm	±0.3	>2000 mm	±2

No.	Drawing No.	Part Name.	Material.	Q'tity.	Reference.
14	CMM-014	Plan Enc3	AL6061	1	

Scale	Drawn by	Date	Fomat	Q'tity	Material
1:1		Feb5,05	A4	-	-
ISO-E	Title: Plan Enc3		Drg.Rev. 00	Drawing No. CMM-014	

File name :

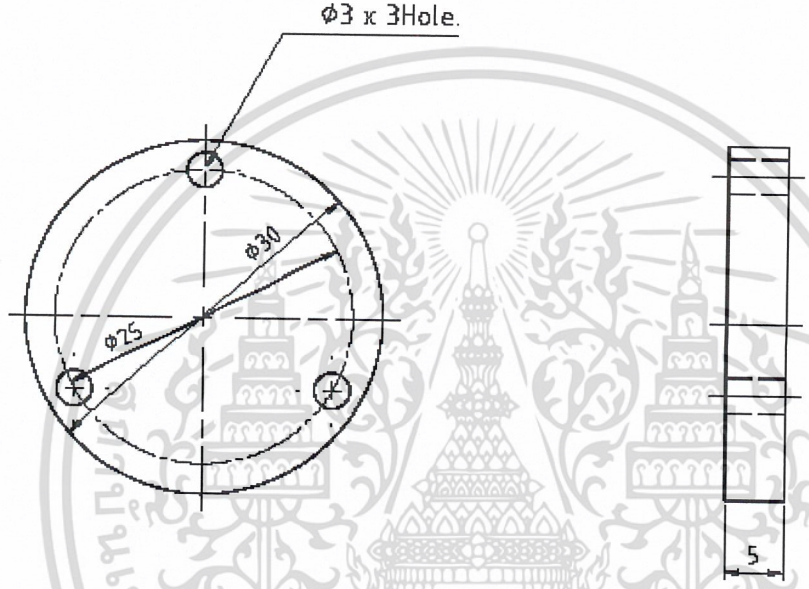


General tolerances Class ISO 2768-1 "m"			
0.5-3 mm	±0.1	>120-400 mm	±0.5
>3-6 mm	±0.1	>400-1000 mm	±0.8
>6-30 mm	±0.2	>1000-2000 mm	±1.2
>30-120 mm	±0.3	>2000 mm	±2

No.	Drawing No.	Part Name.	Material.	Q'tity.	Reference.
15	CMM-015	Cap tw2	S45C	1	

Scale	Drawn by	Date	Format	Q'tity	Material
1:1		Feb5,05	A4	-	-
ISO-E	Title: Cap tw2		Drg.Rev. 00	Drawing No. CMM-015	

File name :



General tolerances Class ISO 2768-1 "m"			
0.5-3 mm	±0.1	>120-400 mm	±0.5
>3-6 mm	±0.1	>400-1000 mm	±0.8
>6-30 mm	±0.2	>1000-2000 mm	±1.2
>30-120 mm	±0.3	>2000 mm	±2

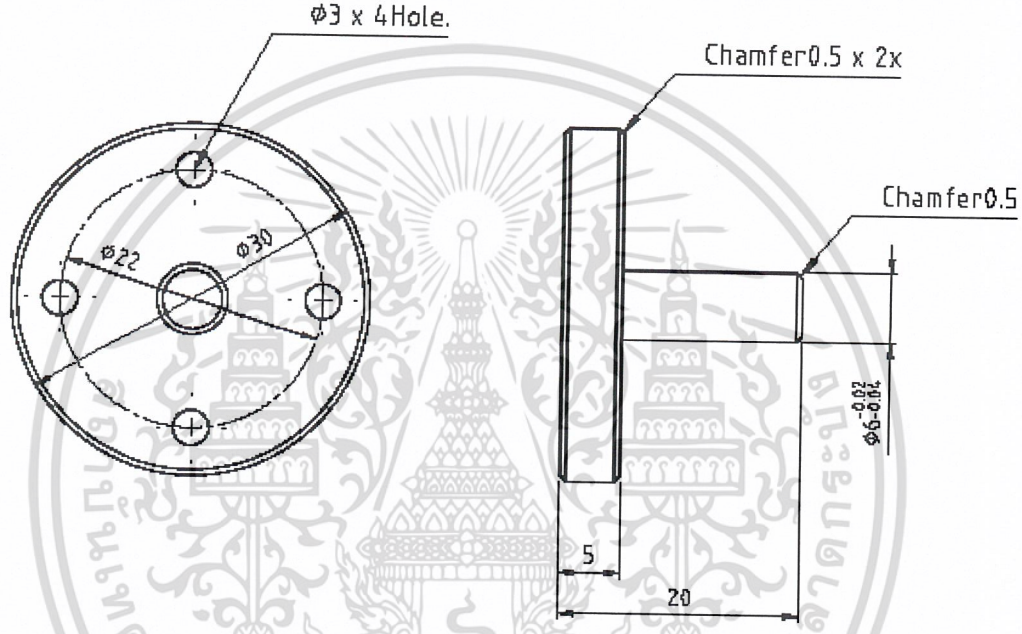
No.	Drawing No.	Part Name.	Material.	Q'tity.	Reference.
16	CMM-016	Cap tw4	AL6061	1	

Scale	Drawn by	Date	Format	Q'tity	Material
2:1		Feb5,05	A4	-	-

ISO-E

Title	Drg.Rev.	Drawing No.
Cap tw4	00	CMM-016

File name :



General tolerances Class ISO 2768-1 "m"			
0.5-3 mm	±0.1	>120-400 mm	±0.5
>3-6 mm	±0.1	>400-1000 mm	±0.8
>6-30 mm	±0.2	>1000-2000 mm	±1.2
>30-120 mm	±0.3	>2000 mm	±2

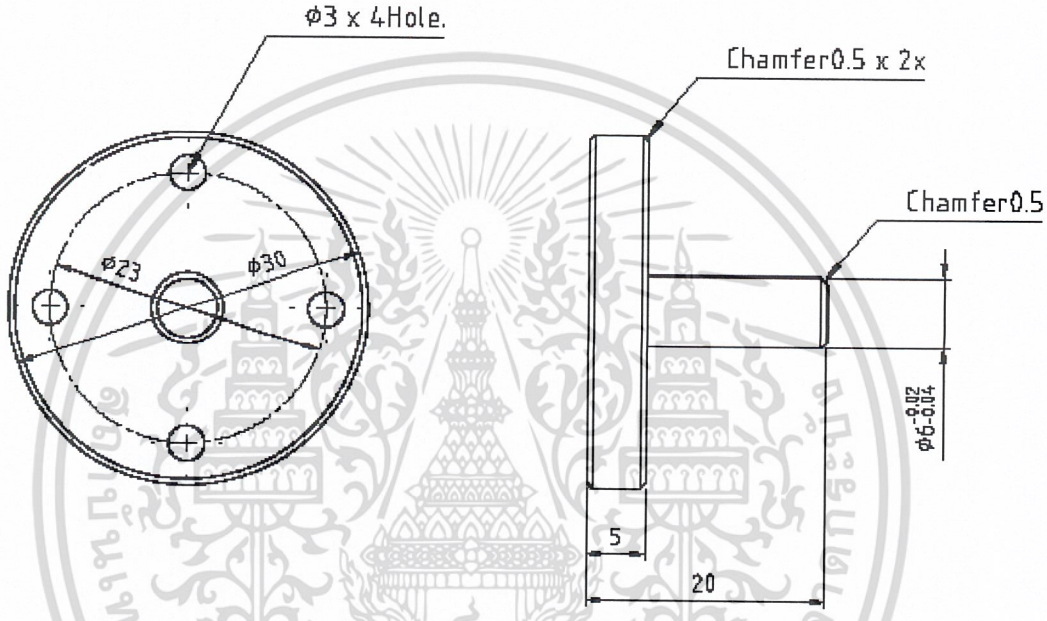
No.	Drawing No.	Part Name.	Material.	Q'tity.	Reference.
17	CMM-017	Shaft Enc1	S45C	1	

Scale	Drawn by	Date	Format	Q'tity	Material
2:1		Feb5,05	A4	-	-

ISO-E

Title	Drg.Rev.	Drawing No.
Shaft Enc1	00	CMM-017

File name :

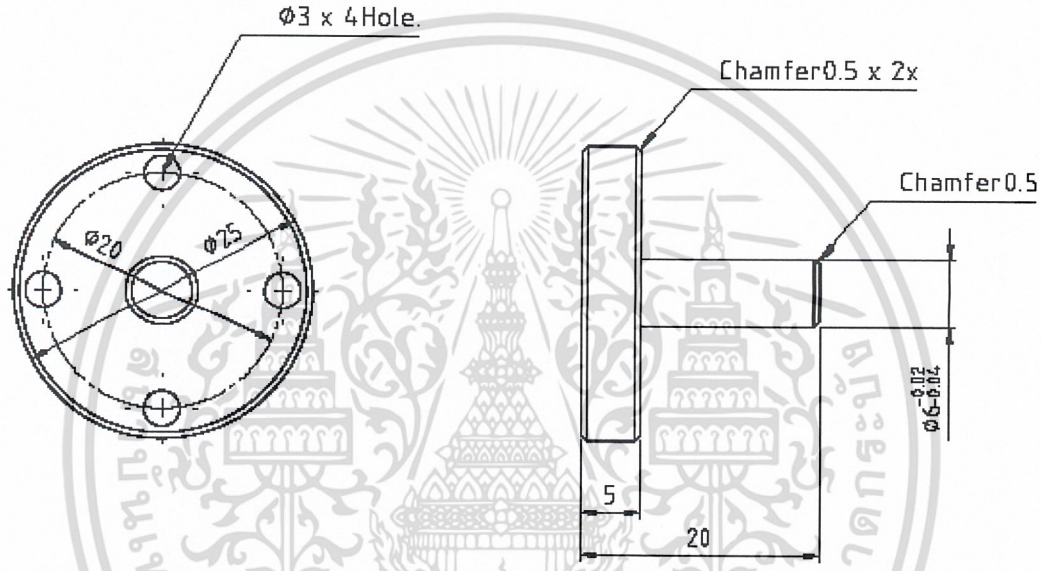


General tolerances Class ISO 2768-1 "m"			
0.5-3 mm	±0.1	>120-400 mm	±0.5
>3-6 mm	±0.1	>400-1000 mm	±0.8
>6-30 mm	±0.2	>1000-2000 mm	±1.2
>30-120 mm	±0.3	>2000 mm	±2

No.	Drawing No.	Part Name.	Material.	Q'tity.	Reference.
18	CMM-018	Shaft Enc2	S45C	1	

Scale	Drawn by	Date	Format	Q'tity	Material
2:1		Feb5,05	A4	-	-
ISO-E	Title: Shaft Enc2		Drg.Rev. 00	Drawing No. CMM-018	

File name :

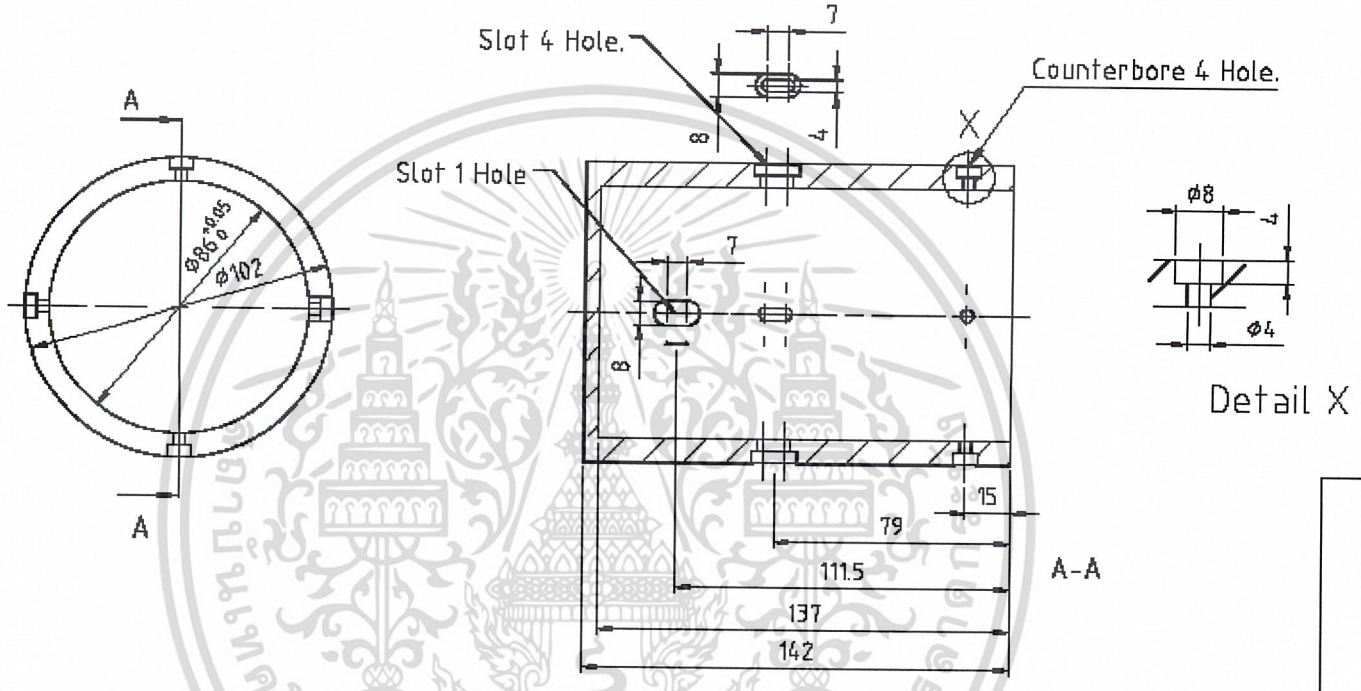


General tolerances Class ISO 2768-1 "m"			
0.5-3 mm	±0.1	>120-400 mm	±0.5
>3-6 mm	±0.1	>400-1000 mm	±0.8
>6-30 mm	±0.2	>1000-2000 mm	±1.2
>30-120 mm	±0.3	>2000 mm	±2

No.	Drawing No.	Part Name.	Material.	Q'tity.	Reference.
19	CMM-019	Shaft Enc3	AL6061	1	

Scale	Drawn by	Date	Fomat	Q'tity	Material
2:1		Feb5,05	A4	-	-
ISO-E	Title: Shaft Enc3		Drg.Rev.: 00	Drawing No.: CMM-019	

File name :

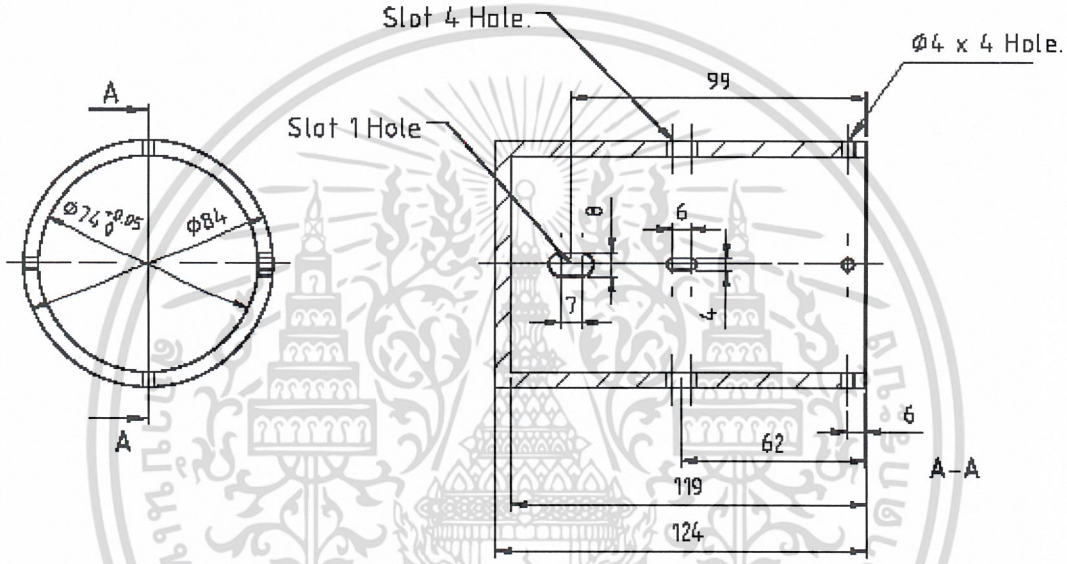


General tolerances Class ISO 2768-1 "m"			
0.5-3 mm	±0.1	>120-400 mm	±0.5
>3-6 mm	±0.1	>400-1000 mm	±0.8
>6-30 mm	±0.2	>1000-2000 mm	±1.2
>30-120 mm	±0.3	>2000 mm	±2

No.	Drawing No.	Part Name.	Material.	Q'tity.	Reference.
20	CMM-020	Tack tw1	S45C	1	

Scale	Drawn by	Date	Fomat	Q'tity	Material
1:2		Feb5,05	A4	-	-
ISO-E	Title: Tack tw1		Drg.Rev.: 00	Drawing No.: CMM-020	

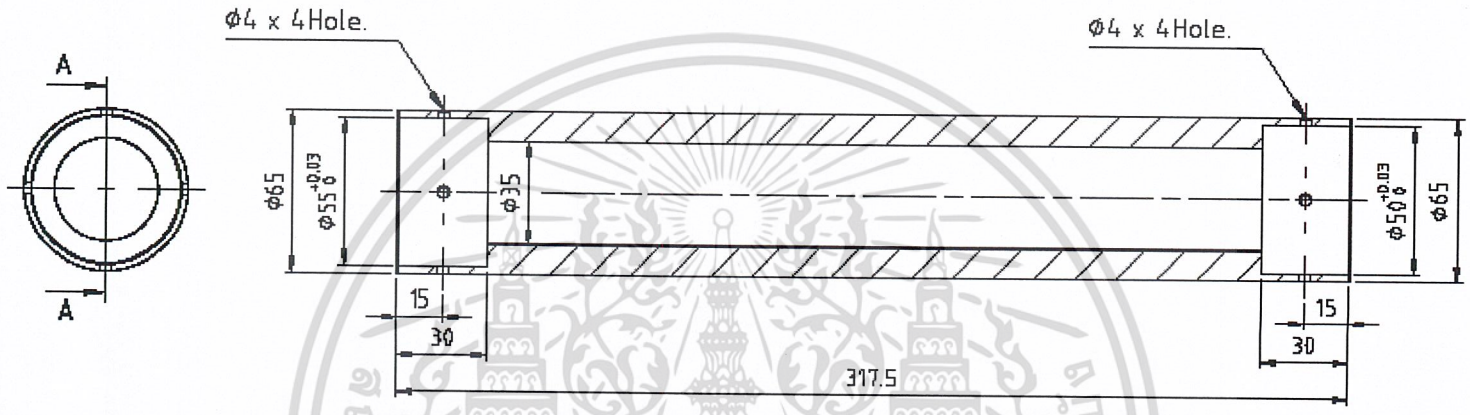
File name :



21	CMM-021	Tack tw3		AL6061	1	
No.	Drawing No.	Part Name.		Material.	Q'tity.	Reference.

Scale 2:1	Drawn by	Date Feb5.05	Famat A4	Q'tity –	Material –	File name :
ISO-E	Title: Tack tw3		Drg.Rev. 00	Drawing No. CMM-021		

General tolerances Class ISO 2768-1 "m"			
0.5-3 mm	±0.1	>120-400 mm	±0.5
>3-6 mm	±0.1	>400-1000 mm	±0.8
>6-30 mm	±0.2	>1000-2000 mm	±1.2
>30-120 mm	±0.3	>2000 mm	±2



General tolerances Class ISO 2768-1 "m"			
0.5-3 mm	±0.1	>120-400 mm	±0.5
>3-6 mm	±0.1	>400-1000 mm	±0.8
>6-30 mm	±0.2	>1000-2000 mm	±1.2
>30-120 mm	±0.3	>2000 mm	±2

No.	Drawing No.	Part Name.	Material.	Q'tity.	Reference.
22	CMM-022	ArmAlu	AL6061	1	

Scale	Drawn by	Date	Fomat	Q'tity	Material
1:2		Feb5,05	A4	-	-
ISO-E	Title		Drg.Rev.	Drawing No.	
	ArmAlu		00	CMM-022	

File name :