

การออกแบบและพัฒนาตัวรับสัญญาณแบบสัมผัสชนิดเคลื่อนที่อิสระได้  
สองแกนของเครื่องวัดสามแกน

THE DESIGN AND DEVELOPMENT OF A TWO DEGREE OF FREEDOM  
TOUCH SIGNAL PROBE FOR COORDINATE MEASURING MACHINES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ 2542

ISBN 974-622-555-3

วพ.  
ศ 149  
2542  
เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน...33892  
วัน,เดือน,ปี...17.08.2542

สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**THE DESIGN AND DEVELOPMENT OF A TWO DEGREE OF FREEDOM  
TOUCH SIGNAL PROBE FOR COORDINATE MEASURING MACHINES**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**1999**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ISBN 974-622-555-3  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 1999**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

เอกสารนี้ King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบและพัฒนาตัวรับสัญญาณแบบสัมผัสชนิดเคลื่อนที่ อีสระ ได้สองแกนของเครื่องวัดสามแกน
นักศึกษา	นายศราวิน ทัทสิกรณ์
รหัสประจำตัว	37061201
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
พ.ศ	2542
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์

### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยนี้ได้เสนอ การออกแบบและพัฒนาตัวรับสัญญาณแบบสัมผัสชนิดเคลื่อนที่อีสระ ได้ 2 แกนของเครื่องวัด 3 แกน โดยทำการสร้างตัวรับสัญญาณที่สามารถเคลื่อนที่อีสระได้ 2 แกนจากการใช้ ไมโครคอมพิวเตอร์ควบคุมสเตปมอเตอร์ 2 ตัว ให้ตัวรับสัญญาณรับสัญญาณจากการสัมผัส ใช้สำหรับการวัดแบบจุด ต่อ จุด ตัวรับสัญญาณจะรับสัญญาณเมื่อแกนรับสัญญาณมีการเคลื่อนที่ในทิศทางใดๆเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง และศึกษาหาค่าความถูกต้อง, ค่าความเชื่อถือได้ และค่าความไวของตัวรับสัญญาณ ได้ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบกับ Check Master ที่ตำแหน่งศูนย์เท่ากับ 3.15 ไมโครเมตร และค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 11.55 ไมโครเมตร

<b>Thesis Title</b>	The Design and Development of a two degree of freedom Touch Signal Probe for Coordinate Measuring Machines
<b>Student</b>	Mr.Sravin Thunhikorn
<b>Student ID.</b>	37061201
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Programme</b>	Mechanical Engineering
<b>Year</b>	1999
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Mongkol Mongkolwongroj

### ABSTRACT

This research describes a design and development of a 2-degree of freedom touch signal probe for coordinate measuring machines. The touch-trigger signal probe is driven in 2-degree of freedom by 2 stepping motors with microcomputer controlled. The probe is used for point-to-point measurement. The detected signal is generated from the displacement of the stylus tip in any directions from its neutral position. The study of factors effect the accuracy, reliability and sensitivity are included in this study. The average of error is 3.15 micrometer and the standard deviation is 11.55 micrometer from checking by the check master at zero position.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาเกี่ยวกับการออกแบบและพัฒนาตัวรับสัญญาณแบบสัณฐานคณิตศาสตร์ที่ อิศระ ได้ 2 แกนของเครื่องวัด 3 แกน จาก รศ. ดร.มงคล มงคลวงศ์โรจน์ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ คุณเขมทัต สุคนธสิงห์ ประธานกรรมการบริษัทโรบอทิกส์ ที่ให้การสนับสนุนในการศึกษาต่อระดับมหาบัณฑิต และเอื้อเฟื้ออุปการะในการทำวิจัย

ขอขอบคุณครอบครัวและเพื่อนพี่น้องทุกคนที่ได้ให้กำลังใจต่อผู้วิจัยอย่างใกล้ชิดตลอดมา  
สุดท้ายขอขอบพระคุณองค์พระผู้เป็นเจ้าที่ประทานความสำเร็จในครั้งนี้  
คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน



# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 เครื่องวัด 3 แกน.....	3
2.1 ส่วนประกอบของเครื่องวัด 3 แกน.....	3
2.2 หลักการทำงานของเครื่องวัด 3 แกน.....	5
2.3 โปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับเครื่องวัด 3 แกน.....	8
2.3.1 โปรแกรม Geopak.....	8
2.3.2 โปรแกรม Scanpak.....	8
2.3.3 โปรแกรม Statpak.....	9
2.3.4 โปรแกรม Transpak.....	9
2.4 ชนิดของตัวรับสัญญาณ.....	10
2.4.1 Hard probe system.....	10
2.4.2 Touch signal probe system.....	10
2.4.3 Scanning probe system.....	12
2.4.4 Auto-probe-change system.....	12
2.4.5 Centering microscope & CCTV monitor system.....	13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 สเตปปีงมอเตอร์.....	14
3.1 ทฤษฎีและหลักการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์.....	14
3.2 ชนิดของสเตปปีงมอเตอร์.....	15
3.2.1 Permanent Magnet stepping motor (PM stepping motor).....	15
3.2.2 Variable Reluctance stepping motor (VR stepping motor).....	16
3.2.3 Hybrid stepping motor.....	20
3.3 การกระตุ้นสเตปปีงมอเตอร์.....	23
3.4 ระบบขับเคลื่อนและวงจรสำหรับควบคุมสเตปปีงมอเตอร์.....	24
3.5 การใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์.....	27
บทที่ 4 ตัวรับสัญญาณแบบสัมผัส.....	29
4.1 การออกแบบตัวรับสัญญาณแบบสัมผัส.....	29
4.1.1 แผ่นรับสัญญาณ.....	29
4.1.2 แกนกลาง.....	29
4.1.3 สปริงแผ่น.....	29
4.1.4 ชุดสปริงสำหรับตั้งแรงเค้น.....	30
4.1.5 ฝาบน.....	30
4.1.6 ก่อกลาง.....	30
4.1.7 ฝาล่าง.....	30
4.2 การสอบเทียบหัวรับสัญญาณ.....	33
4.2.1 การคำนวณหาขนาดหัวรับสัญญาณ.....	34
4.3 การหาค่าแห่งศูนย์ให้กับชิ้นงาน.....	36
4.4 การหาค่า Repeatability.....	37
4.5 การหาค่าคงที่ของสปริงที่มุมต่างๆ.....	38
4.6 การหาความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดเมื่อเปลี่ยนค่าคงที่ของสปริง.....	39
4.7 สมการทางคณิตศาสตร์ของตัวรับสัญญาณ.....	40

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 ผลการทดลอง.....	42
5.1 การหาค่า Repeatability.....	43
5.2 การหาค่าคงที่ของสปริงที่มุมต่างๆ.....	46
5.3 การหาความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดเมื่อเปลี่ยนค่าคงที่ของสปริง.....	46
บทที่ 6 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	48
6.1 สาเหตุของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการรับสัญญาณของตัวรับสัญญาณ.....	48
6.2 แนวทางในการแก้ไขและพัฒนาตัวรับสัญญาณจากข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น.....	48
เอกสารอ้างอิง.....	49
ภาคผนวก.....	50
ภาคผนวก ก. โปรแกรมที่ใช้ควบคุมสเตปปีงมอเตอร์.....	51
ภาคผนวก ข. แบบวงจร ไฟฟ้าและแบบตัวรับสัญญาณ.....	54
ภาคผนวก ค. รายละเอียด โปรแกรม Geopak.....	70
ภาคผนวก ง. ตัวรับสัญญาณต้นแบบ.....	77
ประวัติผู้เขียน.....	80

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ฟังก์ชันการทำงานของเกทต่างๆ.....	25
3.2 ความหมายของขาสัญญาที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์.....	27
5.1 ค่าความผิดพลาดที่ใช้คำนวณค่า Repeatability .....	44
5.2 ค่าคงที่ของสปริง ที่มุมต่างๆ .....	46
5.3 ค่าความสัมพันธ์ของ แรงและความผิดพลาดที่เกิดขึ้น.....	46



# สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบของเครื่องวัด 3 แกน.....	4
2.2 Manual floating CMM.....	6
2.3 CNC CMM.....	6
2.4 ระบบการทำงานของเครื่องวัด 3 แกน.....	7
2.5 โปรแกรม Geopak.....	8
2.6 โปรแกรม Scanpak.....	9
2.7 โปรแกรม Statpak.....	9
2.8 โปรแกรม Transpak.....	9
2.9 Hard probe system.....	10
2.10 ตัวรับสัญญาณ TP1.....	11
2.11 ตัวรับสัญญาณ TP2.....	11
2.12 Scanning probe system.....	12
2.13 Auto-probe-change System.....	12
2.14 Centering microscope และ CCTV monitor system.....	13
3.1 โค้ดแกรมแสดงการทำงานของสเตปปีงมอเตอร์.....	14
3.2 เส้นทางเดินของสนามแม่เหล็กใน โรเตอร์และสเตเตอร์.....	14
3.3 โครงสร้างของ Permanent Magnet stepping motor.....	15
3.4 โครงสร้างของ Single stack variable reluctance stepping motor.....	16
3.5 ลักษณะการทำงานของ Single stack variable reluctance stepping motor.....	17
3.6 โครงสร้างภายในของ Multistack variable reluctance stepping motor.....	18
3.7 ลักษณะการทำงานของ Multistack variable reluctance stepping motor.....	19
3.8 โครงสร้างภายในของ Hybrid stepping motor.....	20
3.9 เส้นทางเดินของสนามแม่เหล็กใน Hybrid stepping motor.....	21
3.10 ลำดับการทำงานของ Hybrid stepping motor.....	22
3.11 การกระตุ้นแบบ 1 เฟส.....	23
3.12 การกระตุ้นแบบ 2 เฟส.....	23
3.13 การกระตุ้นแบบครึ่งสเตป.....	24
3.14 ระบบการขับกระแสให้สเตปปีงมอเตอร์.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ(ต่อ)

	หน้า
3.15 การกระตุ้นมอเตอร์ 4 เฟสแบบทิศทางเดียว.....	25
3.16 การกระตุ้นมอเตอร์ 4 เฟสแบบ 2 ทิศทาง .....	26
3.17 วงจรขับสเตรปิ้งมอเตอร์ 4 เฟส.....	26
3.18 ขาสัญญาณของParallel port.....	27
4.1 แผ่นรับสัญญาณ.....	29
4.2 ส่วนประกอบตัวรับสัญญาณ.....	31
4.3 ภาพตัดของตัวรับสัญญาณ.....	32
4.4 ภาพแสดงตำแหน่งต่างๆของแกนรับสัญญาณ.....	32
4.5 สเตปป์มอเตอร์กับตัวรับสัญญาณ.....	33
4.6 แสดงทิศทางการหมุนของมุม A และ B.....	34
4.7 จุดแตะของหัวรับสัญญาณบน Master ball.....	34
4.8 การแตะเพื่อหาตำแหน่งอ้างอิง.....	37
4.9 ขั้นตอนการหาค่า Repeatability.....	37
4.10 จุดแตะสำหรับหาค่า k.....	38
4.11 ขั้นตอนการหาค่าคงที่ของสปริง.....	39
4.12 ขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ของ F และ X.....	39
4.13 Free body diagram ของตัวรับสัญญาณ.....	40
5.1 เครื่องวัด 3 แกนรุ่น Geoboy300.....	42
5.2 ตัวรับสัญญาณที่ใช้ในการทดลอง.....	43
5.3 Control chart of Repeatability .....	45
5.4 Histogram of Repeatability.....	45
5.5 Radar chart ของค่า k.....	46
5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง F และ X.....	47

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เครื่องมือวัดเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญและจำเป็นมากสำหรับการตรวจสอบเพื่อให้ได้คุณภาพที่ดีที่สุด จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาและพัฒนาให้เครื่องมือวัดมีความถูกต้องและแม่นยำตามความต้องการของผู้ใช้งานว่าต้องการวัดให้มีความละเอียดถูกต้องเพียงใด

เครื่องวัด 3 แกนหรือเครื่อง CMM เป็นเครื่องมือวัดที่มีค่าความถูกต้องสูงคือ มี ค่าResolution อยู่ในช่วง 0.001-0.0002 mm ขึ้นอยู่กับสเกลที่ใช้ ดังนั้นตัวรับสัญญาณ(Touch Signal Probe)จึงมีความสำคัญมากที่จะให้ค่าความถูกต้องเป็นไปตามความต้องการ ยิ่งเครื่องมือวัดที่มีค่าความถูกต้องมากๆราคาก็จะสูงตามค่าความถูกต้องนั้นๆด้วย ในปัจจุบันตัวรับสัญญาณมีราคาสูง ไม่ต่ำกว่า 100,000 บาทต่อหัว ทั้งยังจะต้องรอคอยเป็นเวลานานในการนำเข้า เมื่อตัวรับสัญญาณเกิดความบกพร่องจะต้องส่งซ่อม ไปยังประเทศของผู้ผลิตซึ่งเสียเวลานานกว่าการสั่งซื้อของใหม่เสียอีก เพราะจะต้องเสียเวลาถึง 2 ต่อในการส่งออกและนำเข้า ทั้งนี้จะต้องรวมค่าเสียเวลาคอยในการซ่อมรวมทั้งเวลาที่จะต้องเสียไปกับค่าขนส่งในการส่งของเข้า-ออกประเทศดังนั้นจึงเกิดแนวความคิดที่จะสร้างและพัฒนาตัวรับสัญญาณเพื่อลดการสูญเสียดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น

การวัดงานด้วยเครื่องวัด 3 แกน จะต้องสอบเทียบ (Calibrate) หัวรับสัญญาณก่อนการใช้งาน ทิศทางของหัวรับสัญญาณ ขึ้นอยู่กับลักษณะของงาน จะต้องปรับทิศทางของหัวรับสัญญาณเพื่อให้สามารถสัมผัสจุดตำแหน่งที่จะวัด ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการวัดชิ้นงานที่ต้องปรับทิศทางหัวรับสัญญาณ 5 ทิศทาง ดังนั้นการวัดชิ้นงานแบบเดียวกัน 10 ตัวจะต้องสอบเทียบหัวรับสัญญาณถึง 50 ครั้ง สำหรับเครื่องวัด 3 แกนที่เป็นแบบ CNC จะมีหัวรับสัญญาณที่ใช้เซอร์โวมอเตอร์ควบคุมทิศทางซึ่งมีราคาสูง แต่สำหรับเครื่องวัด 3 แกนที่เป็นแบบ Manual ยังไม่มีจึงเกิดแนวความคิดที่จะใช้สเตปปีงมอเตอร์ควบคุมทิศทางของหัวรับสัญญาณ ดังนั้นการวัดชิ้นงานแบบเดียวกันนี้ 10 ตัวจะสอบเทียบหัวรับสัญญาณเพียง 5 ครั้งเท่านั้น

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ศึกษาและพัฒนาหัวรับสัญญาณแบบสัมผัสของเครื่องวัด 3 แกนแบบ Manual ซึ่งสามารถหมุนอิสระได้ 2 แกนโดยใช้ สเตปปีงมอเตอร์เป็นตัวขับ และใช้ไมโครคอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมการขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

ทำการพัฒนาให้ตัวรับสัญญาณแบบสัมผัสชนิดเคลื่อนที่อิสระได้ 2 แกนของเครื่องวัด 3 แกน มีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 50 ไมโครเมตร

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

แนวความคิดที่ใช้ในการสร้างตัวรับสัญญาณมาจากประสบการณ์การทำงานเกี่ยวกับเครื่องวัด 3 แกน โดยทำการศึกษาศูนย์รับสัญญาณจากต่างประเทศ และใช้ทฤษฎีของสเตปป์ิงมอเตอร์ในการควบคุมทิศทางการหมุน

### 1.5 ขอบเขตการวิจัย

ผู้วิจัยได้ทำการสร้างตัวรับสัญญาณด้วยตนเอง โดยใช้เครื่องจักรของภาควิชาเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในการผลิต อุปกรณ์ทุกชิ้นสามารถหาได้ในประเทศ การทดลองได้ทดลองที่บริษัท โรบอติกส์โดยใช้เครื่องวัด 3 แกน Mitutoyo รุ่น Geoboy 300

### 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1 ออกแบบและสร้างตัวรับสัญญาณ
- 2 ออกแบบและสร้างชุดสเตปป์ิงมอเตอร์
- 3 เขียน โปรแกรมควบคุมชุดสเตปป์ิงมอเตอร์
- 4 การทดลองหาค่าความผิดพลาด
- 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

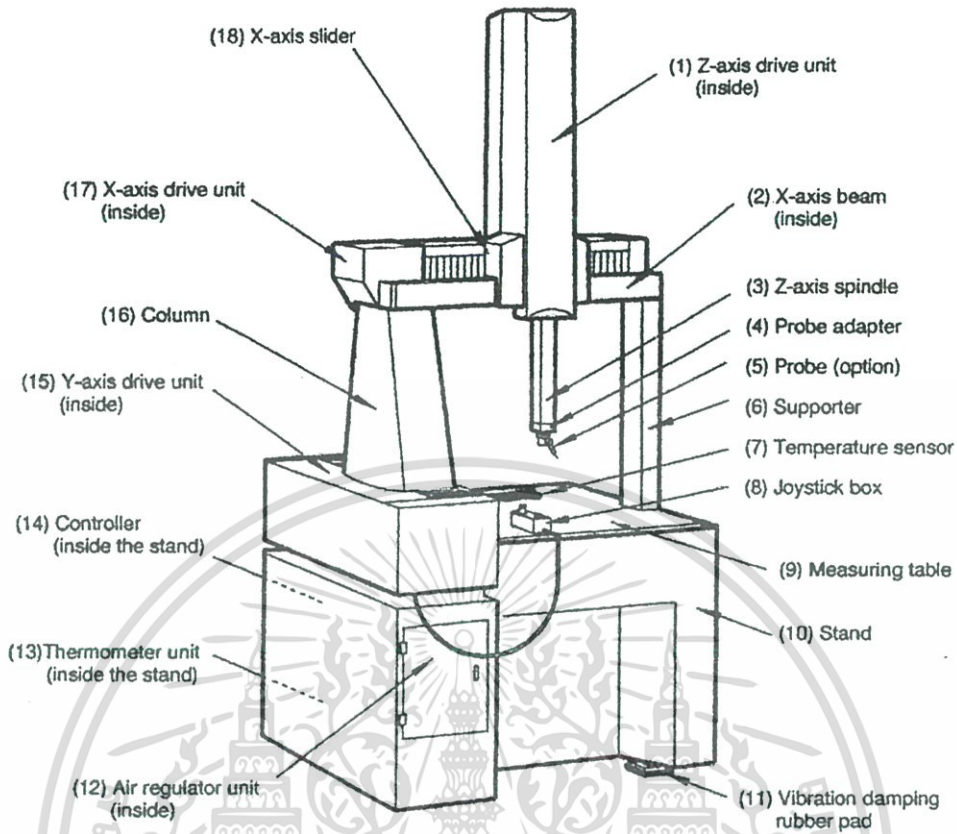
### เครื่องวัด 3 แกน (Coordinate Measuring Machine)

#### 2.1 ส่วนประกอบของเครื่องวัด 3 แกน

เครื่องวัด 3 แกน หรือเครื่อง CMM เป็นเครื่องมือวัดที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ หรือ โรงงานผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งเป็นโรงงานที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำในการผลิตสูง เครื่องวัด 3 แกน จะใช้ในงานตรวจสอบคุณภาพ คือจะทำหน้าที่ตรวจวัดขนาดของชิ้นงานที่ทำการผลิตว่าได้ขนาดตามที่ผู้ออกแบบต้องการหรือไม่มีหน้าที่คล้ายกับ เวอเนียร์ หรือ ไมโครมิเตอร์ แต่มีข้อได้เปรียบคือ มีความละเอียดมากกว่า และสามารถวัดชิ้นงานที่มีรูปร่างสลับซับซ้อนได้ดีกว่า รวมทั้งสามารถหาค่าเปรียบเทียบของพิสัยความเผื่อได้ เช่น ค่าความร่วมศูนย์, ค่าความตั้งฉาก, ค่าความขนาน เป็นต้น

เครื่องวัด 3 แกน สามารถเคลื่อนที่ได้ 3 มิติ คือ ด้านแกน X, Y และ Z ตามทฤษฎีของ ความสามารถในการเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่อง ซึ่งสามารถวัดขนาดชิ้นงานเล็กๆ เช่น ลายของแผ่นปริ้นท์วงจรอิเล็กทรอนิกส์ ไปจนถึงขนาดของโครงสร้างรถยนต์ขนาดใหญ่ ได้น้ำหนักของเครื่องจะอยู่ระหว่าง 100 - 15,000 กิโลกรัม

การเคลื่อนที่ของเครื่องวัด 3 แกน มีการเคลื่อนที่อยู่ 2 ระบบ คือระบบเคลื่อนที่ด้วยสลักลูกปืน และระบบที่เคลื่อนที่ด้วย Air Bearing ระบบที่ใช้สลักลูกปืนจะมีค่าความถูกต้องน้อยกว่าระบบที่เคลื่อนที่ด้วย Air Bearing ประมาณ 5-20 ไมครอน ขึ้นอยู่กับขนาดและรุ่นของเครื่อง ระบบที่ใช้ Air Bearing จะใช้ Air Pad ซึ่งมีรูปร่างเป็น สี่เหลี่ยม หรือ วงกลม แทน สลักลูกปืน แรงดันลมที่ใช้คือ 0.4 MPa รายละเอียดของส่วนประกอบจะแสดงให้ดูดังรูปที่ 2.1



Name	Function
(1) Z-axis drive unit	Drives the Z-axis spindle
(2) X-axis beam	Guides the X-axis air bearing
(3) Z-axis spindle	Guides the Z-axis air bearing
(4) Probe adapter	Holds the probe
(5) Probe (option)	Detects the position coordinate of a workpiece
(6) Supporter	Supports the X-axis beam (with an air bearing at the bottom)
(7) Temperature sensor (for workpieces)	Measures temperature of workpiece
(8) Joystick box	Remote control box
(9) Measuring table	Guides the Y-axis air bearing and used to place a workpiece
(10) Stand	Used to install the measuring machine on it
(11) Vibration damping rubber pad	Isolates the machine from floor vibration.
(12) Air regulator unit	Controls the air pressure and cleans air
(13) Thermometer unit	Measures temperature
(14) Controller	Controls driving motor for each axis
(15) Y-axis drive unit	Drives the column
(16) Column	Supports the X- and Z-axis sections
(17) X-axis drive unit	Drives the X-axis slider
(18) X-axis slider	Supports the Z-axis and moves along the X-beam

รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเครื่องวัด 3 แกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 หลักการทำงานของเครื่องวัด 3 แกน

เนื่องจากเครื่องวัด 3 แกน เป็นเครื่องมือที่มีความละเอียดสูงและไวต่อสภาวะแวดล้อม ดังนั้น การติดตั้งและใช้งานจะต้องอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม คือ

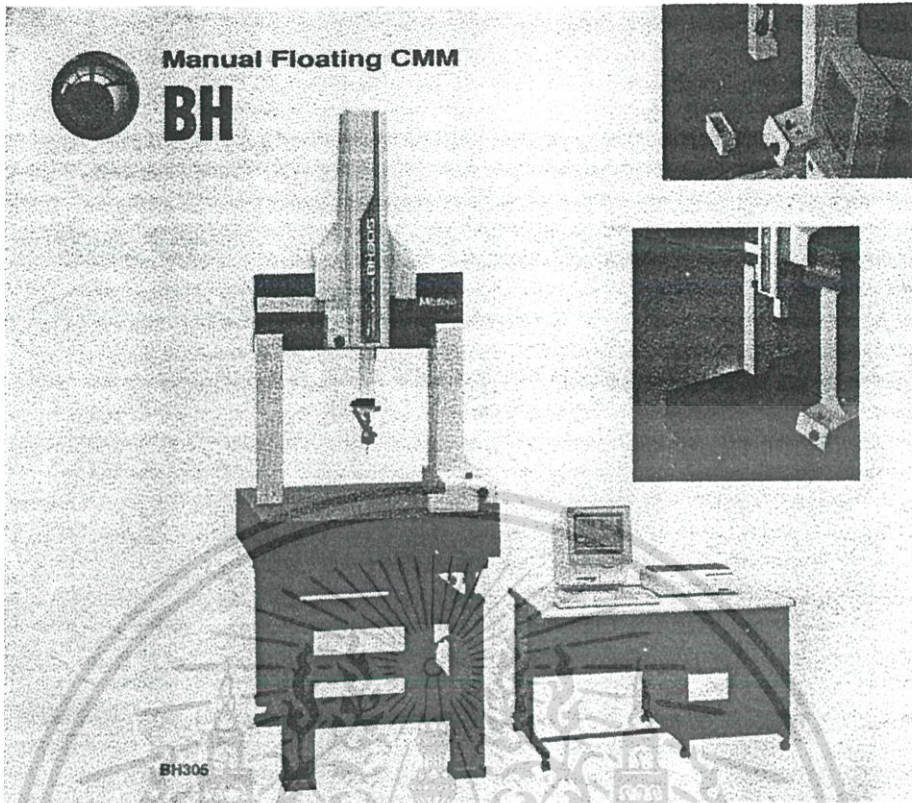
- 1 ห้องจะต้องมีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส บวกลบได้ 1 องศา
- 2 อุณหภูมิห้องจะต้องคงที่ ภายในเวลา 8 ชั่วโมงจะต้องไม่แกว่งมากกว่า 1 องศาเซลเซียส
- 3 การกระจายของอุณหภูมิจะต้องไม่เกิน 0.5 องศาเซลเซียสต่อเมตร
- 4 ความชื้นสัมพัทธ์ของห้องจะต้องอยู่ระหว่าง 55-65 %
- 5 การสั่นสะเทือนของพื้นห้องที่ความถี่ น้อยกว่า 10 Hz จะต้องไม่เกิน 2

ไมครอน จากยอดถึงยอด

- 6 การสั่นสะเทือนของพื้นห้องที่ความถี่ 10 ถึง 50 Hz จะต้องมีความเร่งไม่เกิน  $0.004 \text{ m/s}^2$
- 7 แหล่งจ่ายลมจะต้องสามารถจ่ายลมได้มากกว่า 100 ลิตร ต่อ นาที
- 8 แหล่งจ่ายลมจะต้องสามารถจ่ายลมที่แรงดันระหว่าง 0.5-0.9 MPa
- 9 ลมที่จะเข้าเครื่องวัด 3 แกน จะต้องมีความชื้นน้อยที่สุดที่จะเป็นไปได้

เครื่องวัด 3 แกน แบ่งออกเป็น 2 ชนิด

- 1 Manual floating CMM แกนของเครื่องจะเคลื่อนที่ได้ด้วยแรงของผู้ใช้เครื่อง
- 2 CNC CMM แกนของเครื่องจะเคลื่อนที่ด้วยแรงของ Servo motor โดยควบคุมผ่านทาง Joy stick สามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยความเร็วตั้งแต่ 0-430 mm/s ทั้งยังสามารถเคลื่อนที่ไปวัดงานได้ โดยอัตโนมัติ แรงที่หัววัดใช้ในการแตะชิ้นงานจะคงที่ ทำให้ได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำกว่าแบบ Manual



รูปที่ 2.2 Manual floating CMM

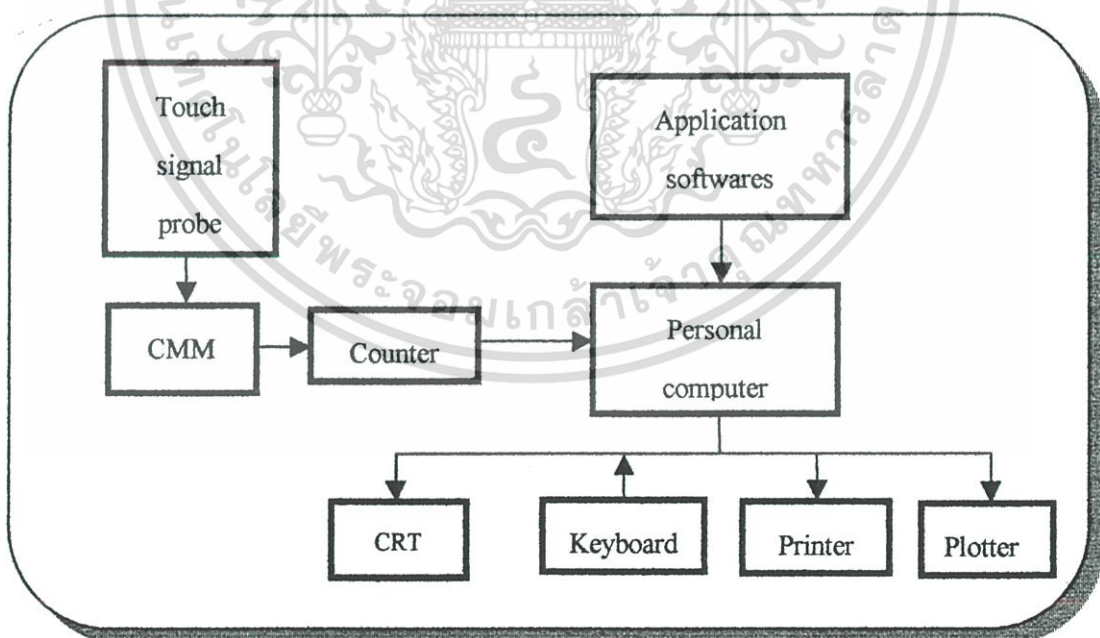


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบการทำงานของเครื่องวัด 3 แกน จะขึ้นกับส่วนประกอบดังนี้คือ

- 1 ตัวเครื่องวัด 3 แกน
- 2 ตัวคอนโทรลเลอร์ หรือ ตัวเคาท์เตอร์
- 3 ตัวรับสัญญาณ
- 4 การ์ดอินเตอร์เฟส
- 5 เครื่องคอมพิวเตอร์และ โปรแกรม
- 6 อุปกรณ์เสริม เช่น เครื่องพิมพ์ หรือ พล็อตเตอร์

จากรูปที่ 2.4 จะเห็น Organization of the Measuring System ของเครื่องวัด 3 แกน ได้ดีขึ้น ขั้นตอนแรกคือเมื่อ หัวรับสัญญาณและถูกชิ้นงาน ตัวเคาท์เตอร์จะบันทึกตำแหน่งนั้นไว้จำนวนจุดที่ทำการแตะขึ้นอยู่กับรูปร่างของชิ้นงาน เช่น วงกลมจะต้องทำการแตะอย่างน้อย 3 จุด, ทรงกระบอกจะต้องทำการแตะอย่างน้อย 5 จุด เป็นต้น เมื่อได้จุดครบตามที่ต้องการคอมพิวเตอร์ก็จะทำการประมวลผลตามลักษณะของชิ้นงาน เช่น วงกลมก็จะให้ค่า เส้นผ่าศูนย์กลาง, รัศมีของจุดศูนย์กลาง และค่าความกลม(ในกรณีที่วัดมากกว่า 3 จุด) แล้วจึงส่งผลการวัดไปยังเครื่องพิมพ์และรูปกราฟิกไปยังพล็อตเตอร์ซึ่งรายละเอียดของโปรแกรมและหัววัดสัญญาณจะได้เสนอในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.4 ระบบการทำงานของเครื่องวัด 3 แกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 โปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับเครื่องวัด 3 แกน

โปรแกรมที่ใช้กับเครื่องวัด 3 แกนมีใช้ด้วยกันหลายโปรแกรมแล้วแต่วัตถุประสงค์การใช้งาน ซึ่งโปรแกรมจะต้องใช้คอมพิวเตอร์ที่มีคุณสมบัติดังนี้

- 1  $\geq$  PC 386
- 2  $\geq$  520 KB free memory
- 3  $\geq$  20 MB of hard disk space

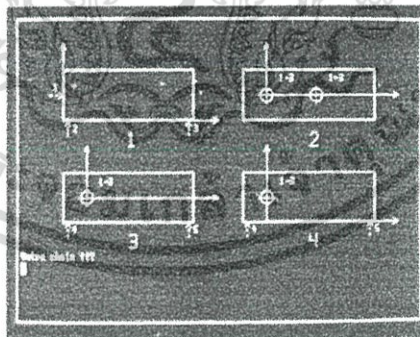
การส่งสัญญาณจากคอนโทรเลอร์ของเครื่องวัด 3 แกนไปยังคอมพิวเตอร์จะต้องมี Interface card เพื่อจัดแอดเดรสของคอนโทรเลอร์กับโปรแกรมให้ตรงกัน

โปรแกรมมาตรฐานที่เครื่องวัด 3 แกนใช้โดยทั่วไปมี 4 โปรแกรม

- 1 Geopak
- 2 Scanpak
- 3 Statpak
- 4 Transpak

### 2.3.1 Geopak โปรแกรมนี้ใช้สำหรับ

- 1 การวัดงานที่เป็นรูปทรงเรขาคณิต เช่น วงกลม, เส้นตรง, ทรงกระบอก เป็นต้น
- 2 คำนวณค่าที่ได้จากการวัด เช่น ค่ามุม, ระยะทาง, จุดตัด เป็นต้น
- 3 เปรียบเทียบพิสัยความถี่ เช่น ความร่วมศูนย์, ความตั้งฉาก, ค่าความกลม



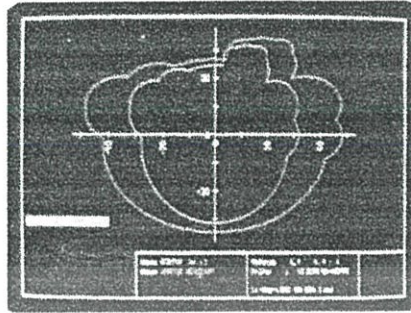
รูปที่ 2.5 โปรแกรม Geopak

### 2.3.2 Scanpak โปรแกรมนี้ใช้สำหรับ

- 1 การคัดลอกชิ้นงานจากงานต้นฉบับ

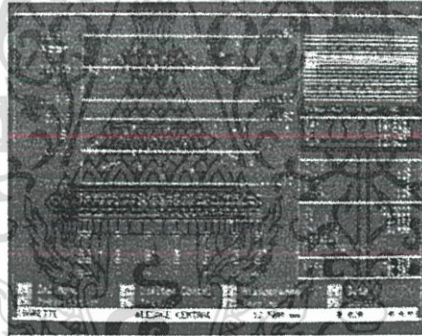
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2 วัดงานรูปทรงใดๆที่เป็นงาน Contour
- 3 คำนวณค่าที่ได้จากการวัด เช่น ค่ามุม, ระยะทาง, จุดตัด เป็นต้น



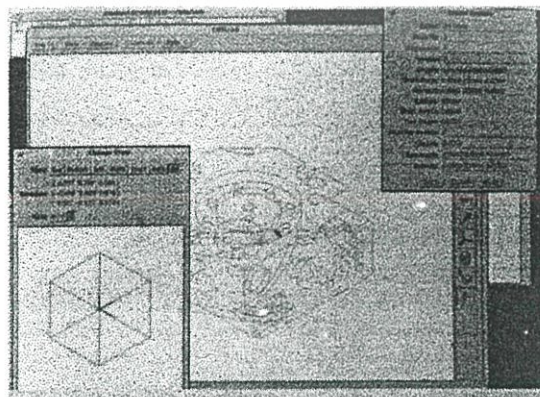
รูปที่ 2.6 โปรแกรม Scanpak

2.3.3 Statpak โปรแกรมนี้ใช้สำหรับการคำนวณค่าและสร้างกราฟทางสถิติ เช่น ฮิสโตแกรม (Histogram), คอนโทรลชาร์ต(Control chart)



รูปที่ 2.7 โปรแกรม Statpak

2.3.4 Transpak โปรแกรมนี้ใช้สำหรับการส่งข้อมูลที่ได้จากการสแกน ไปยังเครื่องจักรอื่น



รูปที่ 2.8 โปรแกรม Transpak

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 ชนิดของตัวรับสัญญาณ การรับสัญญาณของ CMM มี 5 วิธีคือ

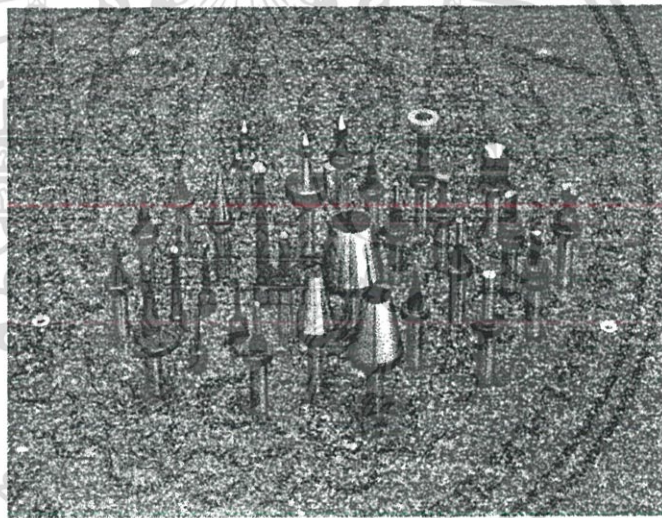
### 2.4.1 Hard probe system จะใช้กับเครื่อง Manual floating CMM เท่านั้น รูปที่ 2.9

1 Ball-point-probe เป็นหัววัดที่มีปลายเป็นทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 2- 10 mm

2 Taper probe เป็นหัววัดที่มีรูปร่างเป็นทรงกรวย ใช้วัดงานที่เป็นรูเจาะสามารถวัดได้ใน 2 มิติเท่านั้น ซึ่งมีช่วงการวัดครุที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 2-56 mm

3 Cylindrical probe เป็นหัววัดที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ใช้สำหรับวัดงานที่เป็นแผ่นบางใช้วัดงานใน 2 มิติเท่านั้น ขนาดของหัววัดมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2,3,5,6,10 mm

4 Universal probe เป็นหัววัดที่มีปลายเป็นทรงกลมเหมือนกับแบบBall-point-probe แต่สามารถเปลี่ยนมุม ในการวัดได้ทำให้วัดค้ำข้างได้ด้วยปลายหัววัดมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2,3 5,6,10,15 mm



รูปที่ 2.9 Hard probe system

2.4.2 Touch signal probe system เป็นหัววัดที่รับสัญญาณจากการแตะ เมื่อหัววัดมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจากแกนนิวทรอล สัญญาณจะส่งผ่านไปยังคอนโทรเลอร์

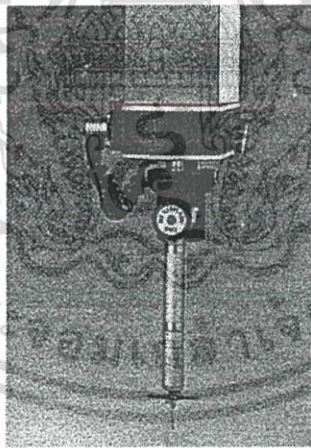
1 TP1 เป็นตัวรับสัญญาณที่มีขนาดใหญ่ไม่สามารถลงไปวัดงานที่ลึกๆได้ แต่มีข้อดีคือมีความทนทานสูงมักจะ ไม่ค่อยมีปัญหาสัญญาณค้ำง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ตัวรับสัญญาณ TP1

2 TP2 เป็นตัวรับสัญญาณที่มีขนาดเล็กสามารถลงไปได้งานที่มีความลึกได้ดี ลักษณะการทำงานเหมือนกับ TP1 แต่มักจะพบว่ามีการใช้งานสั้นกว่าทั้งนี้เนื่องจากมีขนาดเล็ก ทำให้ยากต่อการผลิตและมีความทนทานน้อยกว่า ทั้งนี้ยังมีราคาสูงกว่าแบบ TP1 อีกด้วย



รูปที่ 2.11 ตัวรับสัญญาณ TP2

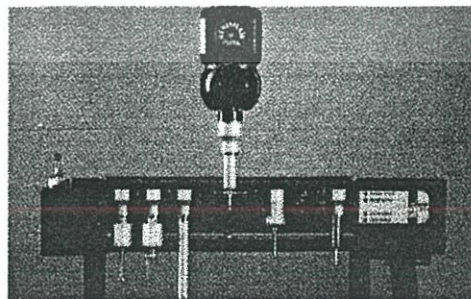
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.4.3 Scanning probe system** เป็นหัววัดที่สามารถวัดเป็นจุดและสามารถวัดแบบต่อเนื่องได้ด้วยหัววัดจะ ทำการลากไปตาม Contour ของชิ้นงาน ภายในหัววัดจะใช้ลมเป็นตัวลดการเสียดทานในการเคลื่อนที่เนื่องจากหัววัดจะต้องสัมผัสชิ้นงานอยู่เกือบตลอดเวลา จึงมีค่าความถูกต้องสูงมาก และมีราคาไม่ ต่ำกว่า 1,000,000 บาททีเดียว ใช้ได้กับเครื่อง CNC เท่านั้น



รูปที่ 2.12 Scanning probe system

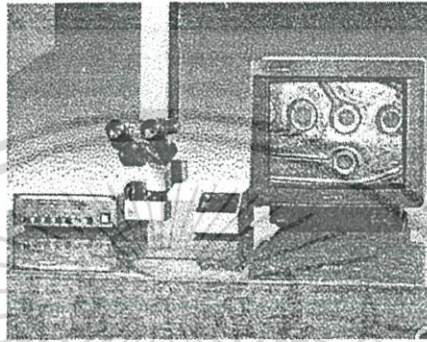
**2.4.4 Auto-probe-change system** ในการวัดที่ใช้ระบบอัตโนมัติที่สมบูรณ์แบบสำหรับการวัด งาน 3 มิติจะต้องมี Probe PH9A ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนมุมได้โดยอัตโนมัติ สเตปการหมุนครั้งละ 7.5 องศา หมุนได้ 2 ทิศทางคือ หมุนรอบตัวเองจาก 0 ถึง 180 และ 0 ถึง -180 องศา เรียกว่ามุม B ส่วนมุม A จะเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากหมุนได้ 0 ถึง 90 องศา แต่การที่หัววัดหมุนได้ยังไม่ทำให้เป็นอัตโนมัติที่ สมบูรณ์แบบ เพราะบางครั้งจะต้องมีการเปลี่ยนรูปร่างและขนาดของปลายหัววัด (Stylus) จึงต้องใช้ Auto-probe-change system เข้ามาช่วย



รูปที่ 2.13 Auto-probe-change System

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**2.4.5 Centering microscope & CCTV monitor system** ใช้สำหรับการวัดรูที่มีขนาดเล็ก และชิ้นงานที่อ่อน เช่น ยาง หรือ พลาสติก ซึ่งการวัดด้วยการสัมผัสไม่สามารถทำได้ ตัวกล้องจะมีทั้งระบบ คาเดียว และ ส่องตา มีอัตราส่วนขยายของเลนส์ 10X, 20X, 30X, 50X, 100X จอโทรทัศน์ CCTV monitor system จะแสดงภาพที่ได้จาก Centering microscope เพิ่มความสะดวกให้กับผู้ใช้ในกรณีที่ผู้ใช้มี CMM ที่เป็น CNC และต้องการใช้วัดงานที่มีความกว้างมากๆซึ่งจะไม่สามารถขึ้นไปนั่งบน CMM เพื่อส่องชิ้นงานได้

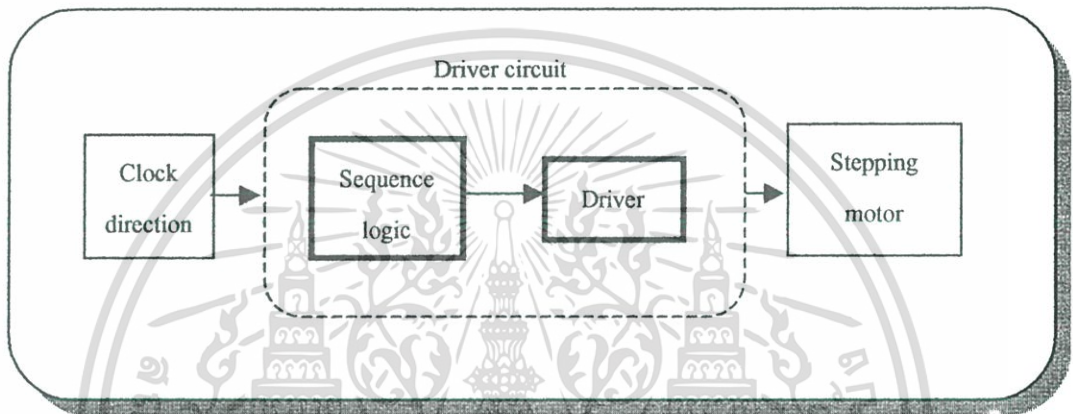


รูปที่ 2.14 Centering microscope และ CCTV monitor system

### บทที่ 3

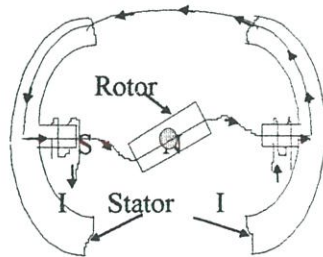
## ทฤษฎีและหลักการทำงานของสเตปป์ิ่งมอเตอร์

3.1 ทฤษฎีและหลักการทำงานของสเตปป์ิ่งมอเตอร์ สเตปป์ิ่งมอเตอร์คือมอเตอร์ที่มีมุมในการหมุนที่แน่นอน ใช้วงจรดิจิทัลในการกระตุ้นเฟสของมอเตอร์ ทำให้ควบคุมความเร็วและมุมได้ตามต้องการเป็นการควบคุมแบบไม่มีการป้อนกลับ(Open loop control system)



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมแสดงการทำงานของสเตปป์ิ่งมอเตอร์

ส่วนประกอบหลักของสเตปป์ิ่งก็คือ โรเตอร์(Rotor)และสเตเตอร์(Stator) ตัวโรเตอร์จะมีแกนเป็นสารแม่เหล็กถาวร ส่วนตัวสเตเตอร์จะเป็นแกนพันเหล็กพันด้วยชุดขดลวดไฟฟ้าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน แกนนั้นจะมีสภาพเป็นแม่เหล็ก เกิดการเหนี่ยวนำทำให้แกนโรเตอร์หมุน ถ้าตัวโรเตอร์มีแม่เหล็กหลายชุด และตัวสเตเตอร์มีชุดขดลวดหลายชุด การจัดลำดับการกระตุ้นชุดขดลวดอย่างถูกต้องจะทำให้แกนโรเตอร์หมุนเป็นสเตปตามตำแหน่งการวางของชุดขดลวดบนพื้นของสเตเตอร์และชุดแม่เหล็กถาวรบนโรเตอร์



รูปที่ 3.2 เส้นทางเดินของสนามแม่เหล็กในโรเตอร์และสเตเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 ชนิดของสเตปปีงมอเตอร์ สเตปปีงมอเตอร์แบ่งตามลักษณะทางโครงสร้างได้ 3 ประเภทคือ

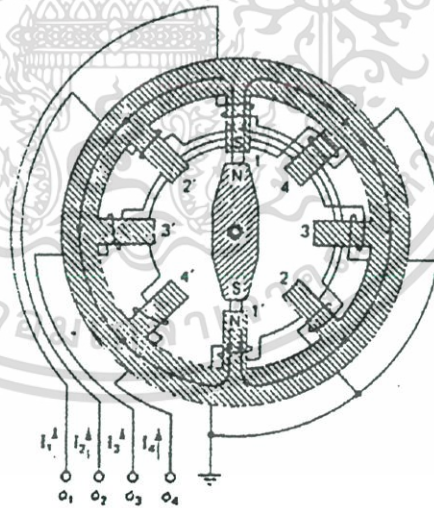
- 1 Permanent Magnet stepping motor (PM stepping motor)
- 2 Variable Reluctance stepping motor (VR stepping motor)
- 3 Hybrid stepping motor

**3.2.1 Permanent Magnet stepping motor (PM stepping motor)** รูปที่ 3.3 เป็นรูปที่แสดงโครงสร้างภายในของมอเตอร์ 4 เฟสซึ่งแต่ละเฟสจะพันรอบขั้ว(Pole) 2 ขั้วคั้งนั้นมอเตอร์ 4 เฟสจะมีทั้งหมด 8 ขั้ว ส่วนโรเตอร์ทำจากแม่เหล็กถาวรตรงกับขั้ว 1 และ 1' ซึ่งเป็นขั้วขดลวดเดียวกัน เมื่อมีการกระตุ้นขดลวด 1-4-3-2 จะทำให้ขดลวดหมุนตามเข็มนาฬิกา โครงสร้างชนิดนี้ไม่เหมาะกับงานที่ต้องการความละเอียดมากนัก สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\theta_s = 360/N_p \quad (3.1)$$

เมื่อ  $\theta_s$  = มุมระหว่างขั้วของสเตเตอร์

$N_p$  = จำนวนขั้วของสเตเตอร์



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของ Permanent Magnet stepping motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.2.2 Variable Reluctance stepping motor (VR stepping motor)** ตัวโรเตอร์และสเตเตอร์จะทำด้วยโลหะที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กแต่ละขั้วไม่มีแม่เหล็กถาวรอยู่ในมอเตอร์ชนิดนี้ แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

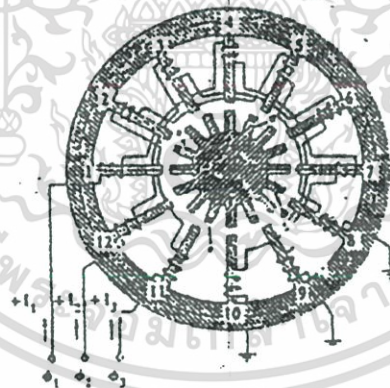
1 Single stack variable reluctance stepping motor มอเตอร์ชนิดนี้จะมีโรเตอร์เพียงตัวเดียว จากรูป 3.4 เป็นมอเตอร์ 3 เฟส 12 ขั้ว แต่ละเฟสมีขดขดลวดพัน 4 ขั้วที่สเตเตอร์ เฟสที่ 1 พันขั้ว 1,4,7, 10 เมื่อปล่อยกระแส  $I_1$  กระแสจะไหลเข้าขั้วที่ 4 และ 10 ออกที่ขั้ว 1 และ 7 ครบรูป(loop)เกิดเส้นแรงของสนามแม่เหล็กที่ 0 องศา เมื่อปล่อยกระแส  $I_2$  กระแสจะไหลไปที่ขั้ว 2,5,8,11 โรเตอร์จะหมุนตามเข็มนาฬิกา 7.5 องศา ตามเส้นแรงแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นมากที่สุด เมื่อปล่อยกระแส  $I_3$  ขั้วกระแสจะไหลไปที่ขั้ว 3,6,9,12 มอเตอร์จะหมุนไปที่ 15 องศา เป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆสลับละ 7.5 องศา จากสูตร

$$\theta = 360/N_R N_P \quad (3.2)$$

เมื่อ  $\theta$  คือ สเตปต่อองศาของสเตปปีงมอเตอร์

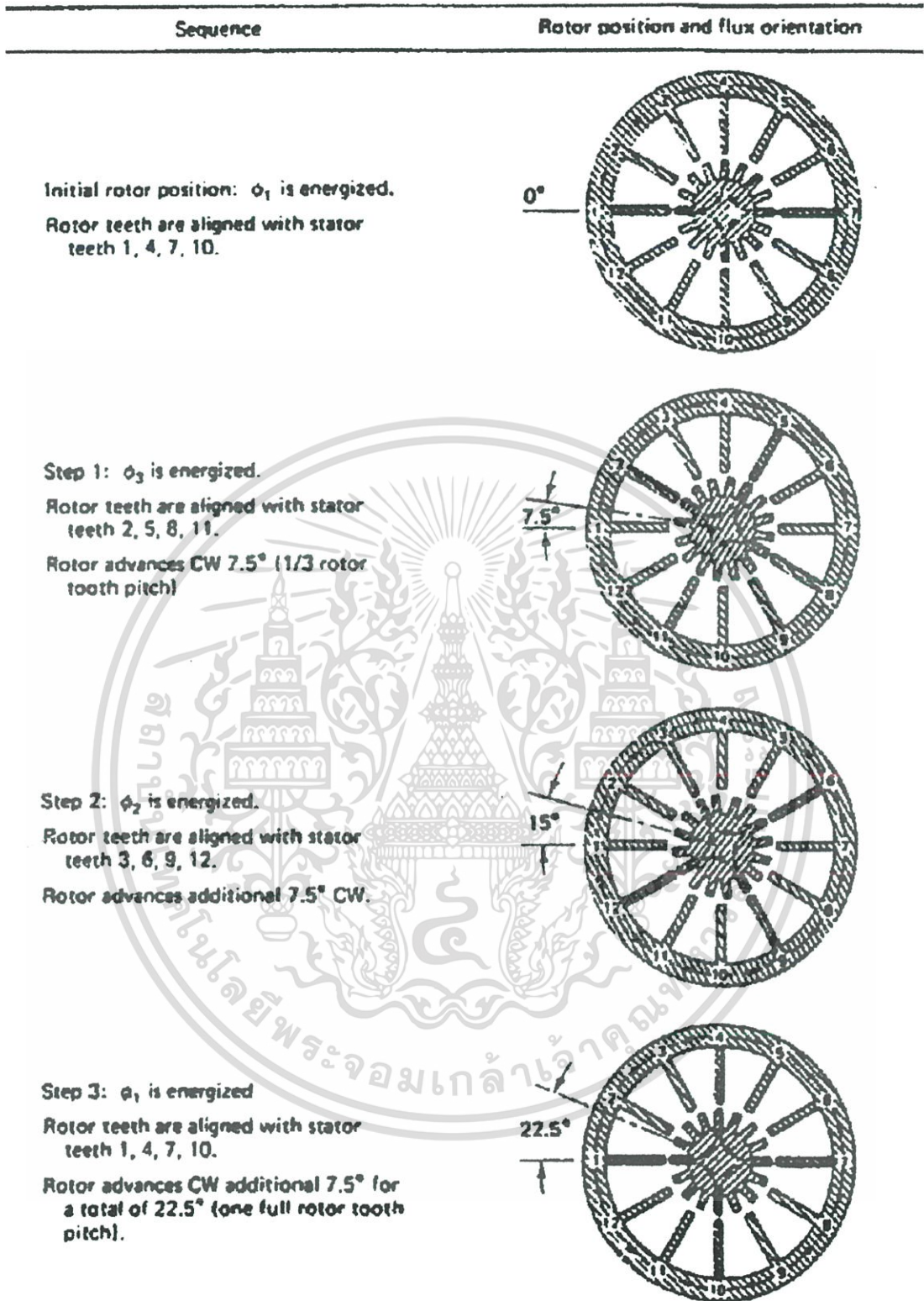
$N_R$  คือ จำนวนขั้วของโรเตอร์

$N_P$  คือ จำนวนเฟสของมอเตอร์



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของ Single stack variable reluctance stepping motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ลักษณะการทำงานของ Single stack variable reluctance stepping motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

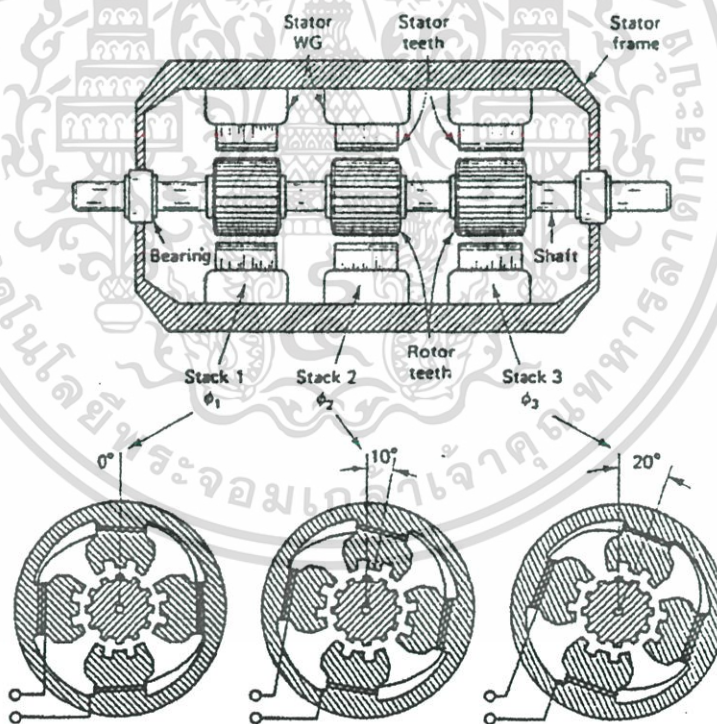
2 Multistack variable reluctance stepping motor คือ VR สเตปปีงมอเตอร์ที่มีหลายสเตค แต่ละสเตคแทนด้วย เฟส 1 เฟส สเตคที่ตัวโรเตอร์จะมีฟันเรียงเหมือนกันทั้ง 3 สเตค ส่วนสเตคทั้ง 3 ของตัวโรเตอร์จะเรียงเบี่ยงเบนจากกัน ตามจำนวน องศาที่กำหนด จากรูปที่ 3.7 จะแสดงลักษณะการหมุนของสเตคทั้ง 3 คือ เมื่อกระตุ้นเฟสที่ 1 สเตคที่ 1 จะถูกเหนี่ยวนำที่ 0 องศา เมื่อเฟสที่ 2 ถูกกระตุ้น สเตคที่ 2 จะเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กให้โรเตอร์หมุนไป 10 องศา เมื่อเฟสที่ 3 ถูกเหนี่ยวนำ สเตคที่ 3 ก็จะเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กให้โรเตอร์หมุนไปอีก 10 องศา เป็น 20 องศา สูตร คือ

$$\theta = P_R / N_p \quad (3.3)$$

เมื่อ  $\theta$  คือ สเตปต่อองศาของสเตปปีงมอเตอร์

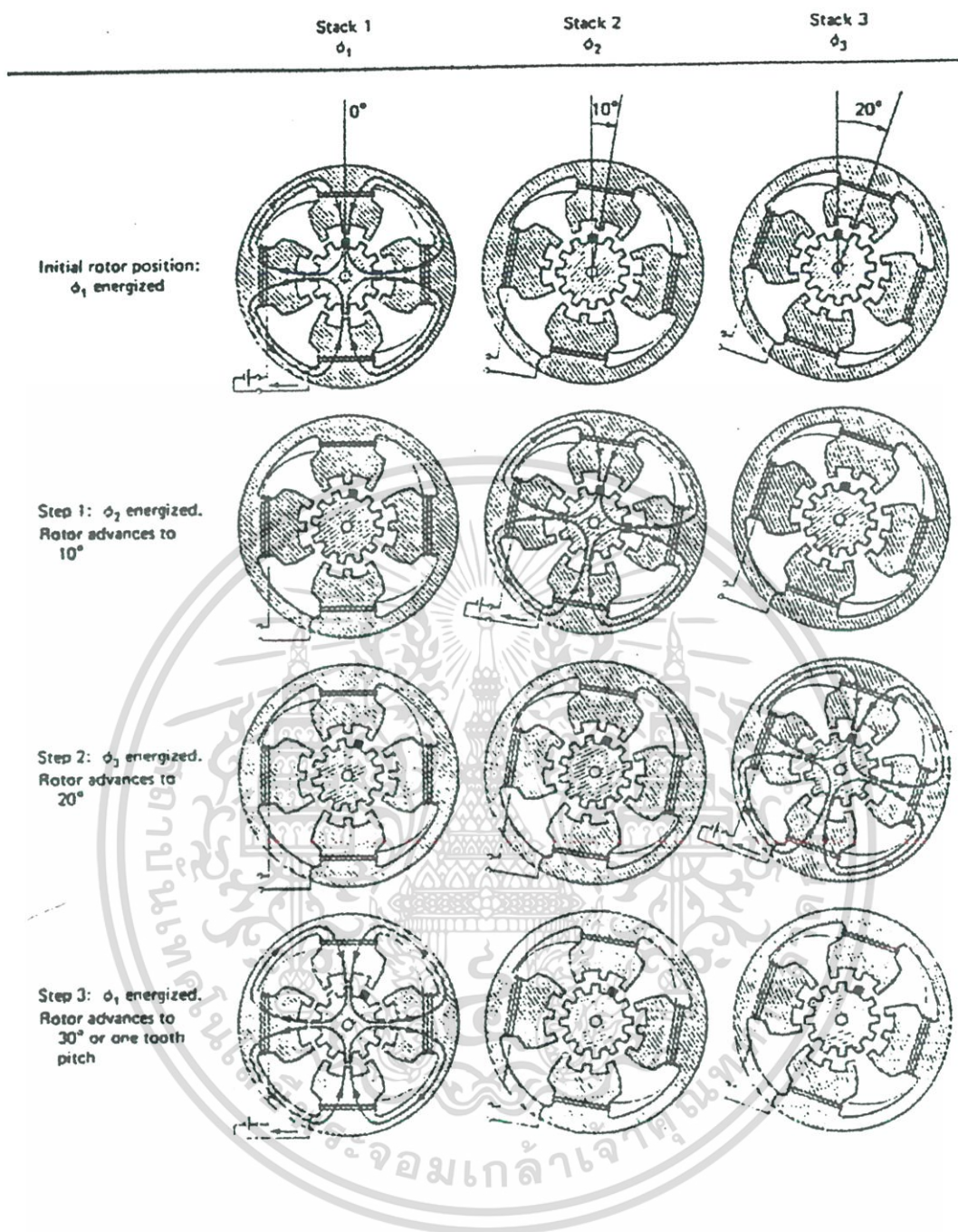
$P_R$  คือ มุมระหว่างฟันของโรเตอร์

$N_p$  คือ จำนวนเฟสของมอเตอร์



รูปที่ 3.6 โครงสร้างภายในของ Multistack variable reluctance stepping motor

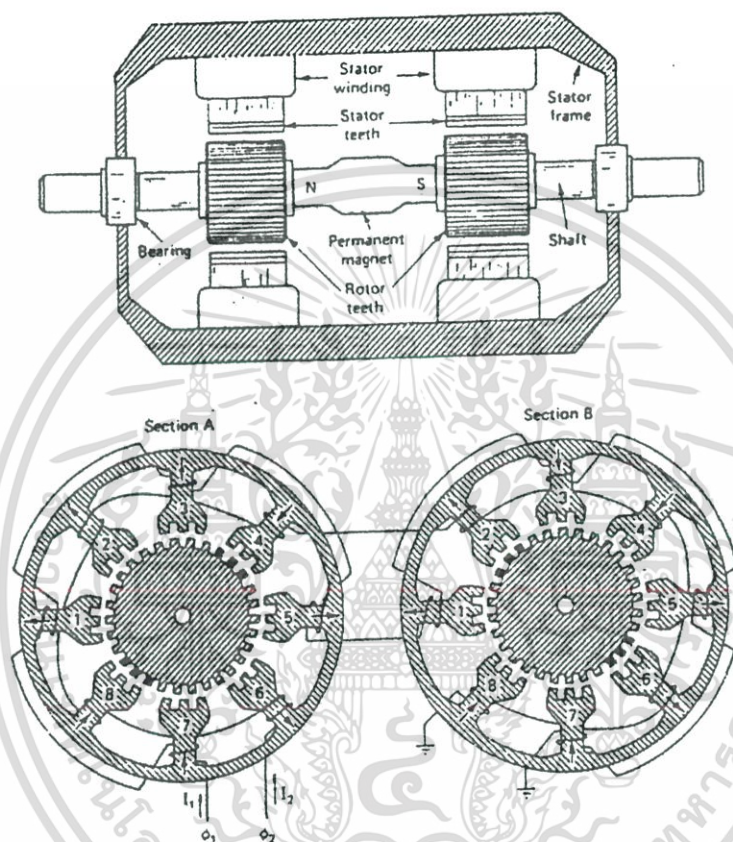
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ลักษณะการทำงานของ Multistack variable reluctance stepping motor

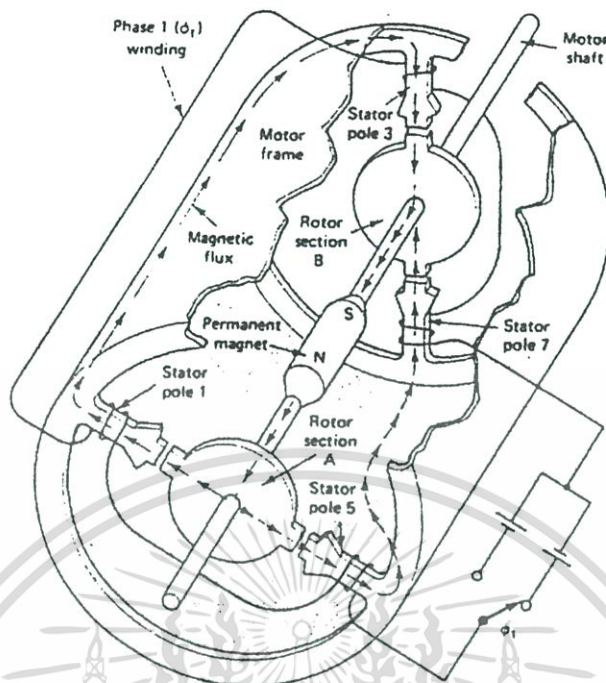
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.2.3 Hybrid stepping motor** มอเตอร์ชนิดนี้จะมีหลายสเตคโดยแกนกลางของโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร ตำแหน่งฟันของสเตเตอร์จะตรงกันทุกสเตค แต่ของโรเตอร์จะเอียงกันเท่ากับ  $180/N_r$  เมื่อ  $N_r$  คือ จำนวนฟันของโรเตอร์ จากรูปที่ 3.8 ฟันของโรเตอร์ทั้ง 2 สเตคจะเอียงกัน  $180/30 = 6$  องศา ชุดขดลวดที่สเตเตอร์แยกเป็น 2 ชุดคือ ชุดที่ 1 จะพันรอบขั้วที่ 1,3,5,7 โดยขั้วที่ 1,5 มีทิศทางของสนามแม่เหล็กเหมือนกัน และขั้วที่ 3,7 มีทิศทางของสนามแม่เหล็กเดียวกัน



รูปที่ 3.8 โครงสร้างภายในของ Hybrid stepping motor

แกนกลางของโรเตอร์ที่ส่วน A จะเป็นขั้วเหนือ และส่วน B เป็นขั้วใต้จากรูปที่ 3.9 เมื่อเฟสที่ 1 ถูกกระตุ้น ฟลักซ์จากขั้วเหนือของแม่เหล็กถาวรจะไหลไปยังโรเตอร์ส่วน A ออกที่ขั้ว 1 และ 5 แล้วจึงไหลไปยังโรเตอร์ส่วน B เข้าที่ขั้ว 3 และ 7 แล้วเดินทางต่อไปยังขั้วใต้ของแกน โรเตอร์ ซึ่งจะครบรูป(loop)ของสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 3.9 เส้นทางเดินของสนามแม่เหล็กใน Hybrid stepping motor

ลำดับการทำงานของสเตปป์มอเตอร์จะแสดงในรูป 3.10 คือ

สเตปป์ที่ 1 ป้อนกระแส  $I_1+$  ที่ส่วน A จะมีฟลักซ์แม่เหล็กไหลออกที่ ขั้ว 1 และ 5 แล้วไหลไปที่ ส่วน B เข้าที่ขั้ว 3 และ 7

สเตปป์ที่ 2 ป้อนกระแส  $I_2-$  ที่ส่วน A จะมีฟลักซ์แม่เหล็กไหลออกที่ ขั้ว 4 และ 8 แล้วไหลไปที่ ส่วน B เข้าที่ขั้ว 2 และ 6

สเตปป์ที่ 3 ป้อนกระแส  $I_1-$  ที่ส่วน A จะมีฟลักซ์แม่เหล็กไหลออกที่ ขั้ว 3 และ 7 แล้วไหลไปที่ ส่วน B เข้าที่ขั้ว 1 และ 5

สเตปป์ที่ 4 ป้อนกระแส  $I_2+$  ที่ส่วน A จะมีฟลักซ์แม่เหล็กไหลออกที่ ขั้ว 2 และ 6 แล้วไหลไปที่ ส่วน B เข้าที่ขั้ว 4 และ 8

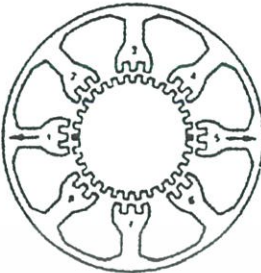
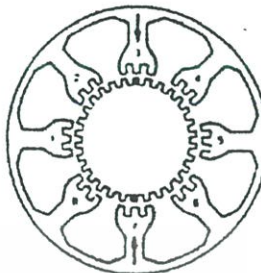

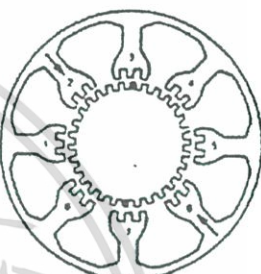

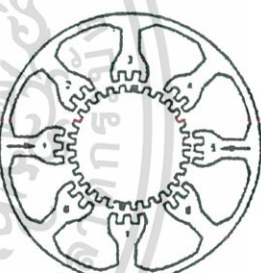
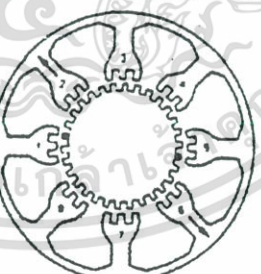
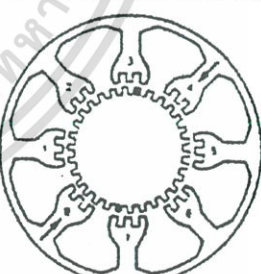
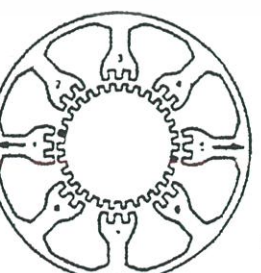
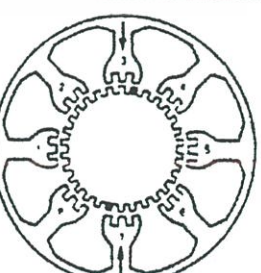
การเคลื่อนที่ของโรเตอร์ 1 ฟันจะต้องป้อนสัญญาณทั้งหมด 4 ครั้ง คือ  $I_1+, I_2-, I_1-, I_2+$  ตามลำดับ สูตรการคำนวณคือ

$$\theta = 360/4 N_R \quad (3.4)$$

เมื่อ  $\theta$  คือ สเตปป์ต่อองศาของสเตปป์มอเตอร์

$N_R$  คือ จำนวนฟันของโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Step	$\phi_1$ $I_1$	$\phi_2$ $I_2$	Flux out sec. A pole nos.	Flux in sec. B pole nos.	Section A	Section B
1	+		1, 5	3, 7		
2		-	4, 8	2, 6		
3		-	3, 7	1, 5		
4		+	2, 6	4, 8		
1	+		1, 5	3, 7		

รูปที่ 3.10 ลำดับการทำงานของ Hybrid stepping motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การกระตุ้นสเตปป์ิงมอเตอร์มีอยู่ 3 แบบ คือ

1 การกระตุ้นเฟสเดียว จะมีแรงบิดน้อยที่สุด มี Over shoot สูง เข้าสู่ตำแหน่งช้า เมื่อเข้าสู่ Steady state แล้วจะ ไม่มีการแกว่งไปมา

Clock	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Phase 1	■				■				■
Phase 2		■				■			
Phase 3			■				■		
Phase 4				■				■	

รูปที่ 3.11 การกระตุ้นแบบ 1 เฟส

2 การกระตุ้น 2 เฟส การกระตุ้นแบบนี้ให้แรงบิดสูง มี Over shoot ต่ำ และมีการแกว่งไปมาเล็กน้อยเมื่อเข้าสู่ Steady state

Clock	R	1	2	3	4	5	6	7	8
Phase 1	■	■			■	■			■
Phase 2		■	■		■	■			
Phase 3			■	■		■	■		■
Phase 4	■			■	■			■	■

รูปที่ 3.12 การกระตุ้นแบบ 2 เฟส

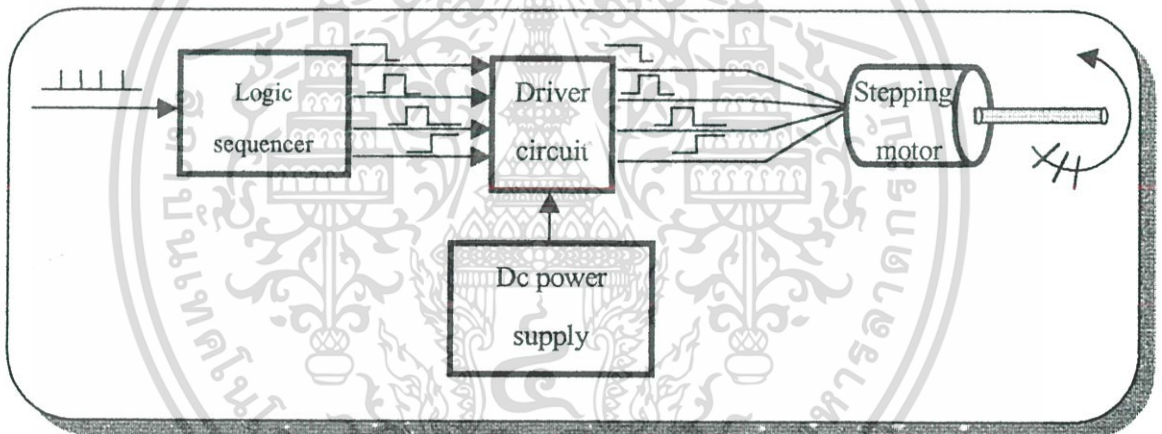
3 การกระตุ้นครึ่งสเตป จะทำให้มุมในการกระตุ้นลดลงจากค่าที่กำหนดไว้ครึ่งหนึ่ง เป็นการรวมข้อดีของการกระตุ้นแบบ 1 เฟส และ 2 เฟส คือ เมื่อเคลื่อนที่จะกระตุ้นแบบ 2 เฟสทำให้ได้แรงบิดสูง เมื่อเข้าสู่ Steady state จะกระตุ้นเพียง 1 เฟส ทำให้ไม่เกิดการออสซิลเลท แต่มีข้อเสียเหมือนกับกระตุ้นแบบ 1 เฟสคือ ที่ Steady state มีค่าแรงบิดน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Clock	R	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Phase 1	High	High	Low	Low	Low	High	High	High	Low	Low
Phase 2	Low	High	High	High	Low	Low	Low	High	High	High
Phase 3	Low	Low	Low	High	High	High	Low	Low	Low	High

รูปที่ 3.13 การกระตุ้นแบบครึ่งสเตป


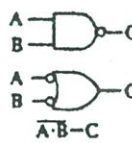


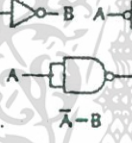
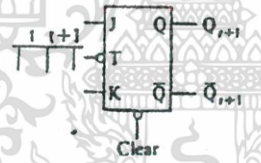
3.4 ระบบขับกระแสและวงจรถ้าหรับควบคุมสเตปปี้งมอเตอร์ การควบคุมสเตปปี้งมอเตอร์จะต้องมีวงจรถ้าหน้าทีเรีงลำดับเฟสของขดลวด เรียกว่า Logic Sequence circuit แต่วงจรถ้าหน้าทีนี้ไม่มีกำลังมากเพียงพอทีจะขับมอเตอร์ให้หมุนได้จึงต้องมียวงจรถ้าหน้าที เรียกว่า Driver circuit เข้ามาช่วยดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ระบบการขับกระแสให้สเตปปี้งมอเตอร์

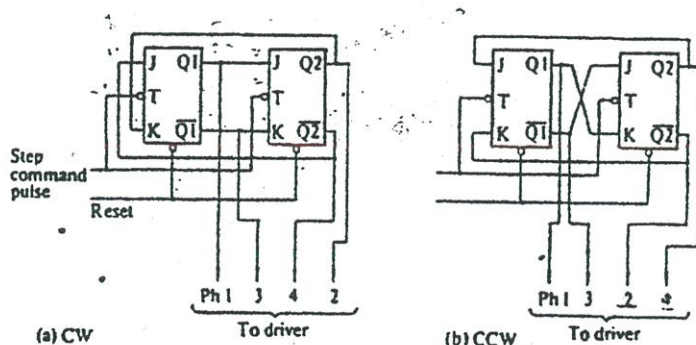
การออกแบบวงจรถ้าหน้าทีสำหรับการลำดับเฟสจะต้องใช้ Logic gates เพื่อสร้างวงจรถ้าหน้าทีดิจิทัล ตารางที่ 3.1 แสดงฟังก์ชันของเกทต่างๆ ตัว J-K ฟลิปฟลอปเป็น IC ตัวสำคัญในการลำดับการกระตุ้นลักษณะการกระตุ้นตามเข็มและทวนเข็มนาฬิกาของมอเตอร์ 4 เฟสจะแสดงดังรูปที่ 3.15 แต่ถ้าต้องการลำดับแบบ 2 ทิศทางจะต้องใช้เกทอื่นๆร่วมด้วยดังรูปที่ 3.16 ซึ่งเป็นการกระตุ้นแบบ 2 ทิศทาง

ตารางที่ 3.1 ฟังก์ชันการทำงานของเกตต่างๆ

AND		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Input</th> <th>Output</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	Input		Output	A	B	C	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0						
Input		Output																								
A	B	C																								
1	1	1																								
1	0	0																								
0	1	0																								
0	0	0																								
NAND		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Input</th> <th>Output</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	Input		Output	A	B	C	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1						
Input		Output																								
A	B	C																								
1	1	0																								
1	0	1																								
0	1	1																								
0	0	1																								
OR		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Input</th> <th>Output</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	Input		Output	A	B	C	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0						
Input		Output																								
A	B	C																								
1	1	1																								
1	0	1																								
0	1	1																								
0	0	0																								
NOR		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Input</th> <th>Output</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	Input		Output	A	B	C	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1						
Input		Output																								
A	B	C																								
1	1	0																								
1	0	0																								
0	1	0																								
0	0	1																								
NOT		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Input</th> <th>Output</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td></td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td></td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	Input		Output	A	B		1		0	0		1												
Input		Output																								
A	B																									
1		0																								
0		1																								
JK-FF		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Input</th> <th colspan="2">Output</th> </tr> <tr> <th>J</th> <th>K</th> <th>Q<sub>r+1</sub></th> <th>Q<sub>r+1</sub></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>Q<sub>r</sub></td><td>Q<sub>r</sub></td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>Q<sub>r</sub></td><td>Q<sub>r</sub></td></tr> </tbody> </table> <p>The function of the table is effected when the clear terminal is on level H. If the clear terminal is on level L, output Q will be on L and Q̄ on H.</p>	Input		Output		J	K	Q <sub>r+1</sub>	Q <sub>r+1</sub>	1	1	Q <sub>r</sub>	Q <sub>r</sub>	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	Q <sub>r</sub>	Q <sub>r</sub>
Input		Output																								
J	K	Q <sub>r+1</sub>	Q <sub>r+1</sub>																							
1	1	Q <sub>r</sub>	Q <sub>r</sub>																							
1	0	1	0																							
0	1	0	1																							
0	0	Q <sub>r</sub>	Q <sub>r</sub>																							

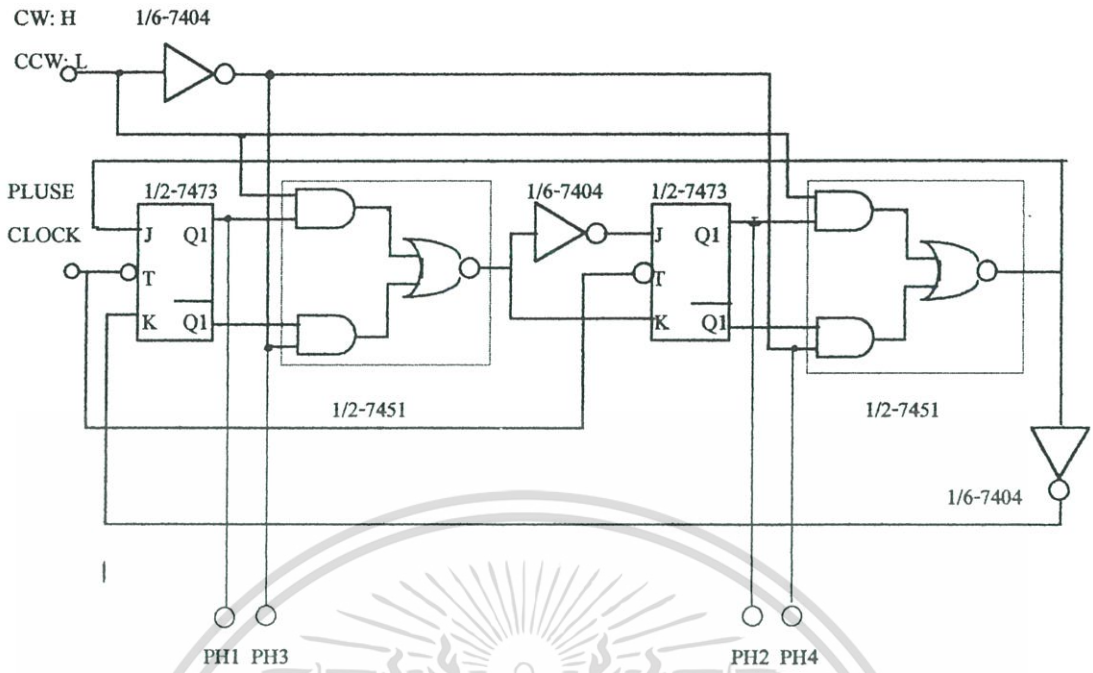
	R	1	2	3	4	5	6	...
Ph1, Q1	0	1	1	0	0	1	1	...
Ph2, Q2	0	0	1	1	0	0	1	...
Ph3, Q1	1	0	0	1	1	0	0	...
Ph4, Q2	1	1	0	0	1	1	0	...

	R	1	2	3	4	5	6	...
Ph1, Q1	0	0	1	1	0	0	1	...
Ph2, Q2	0	1	1	0	0	1	1	...
Ph3, Q1	1	1	0	0	1	1	0	...
Ph4, Q2	1	0	0	1	1	0	0	...



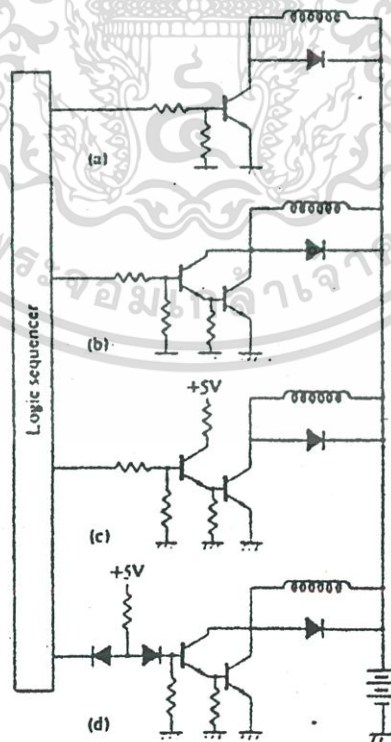
รูปที่ 3.15 การกระตุ้นมอเตอร์ 4 เฟสแบบทิศทางเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 การกระตุ้นมอเตอร์ 4 เฟสแบบ 2 ทิศทาง

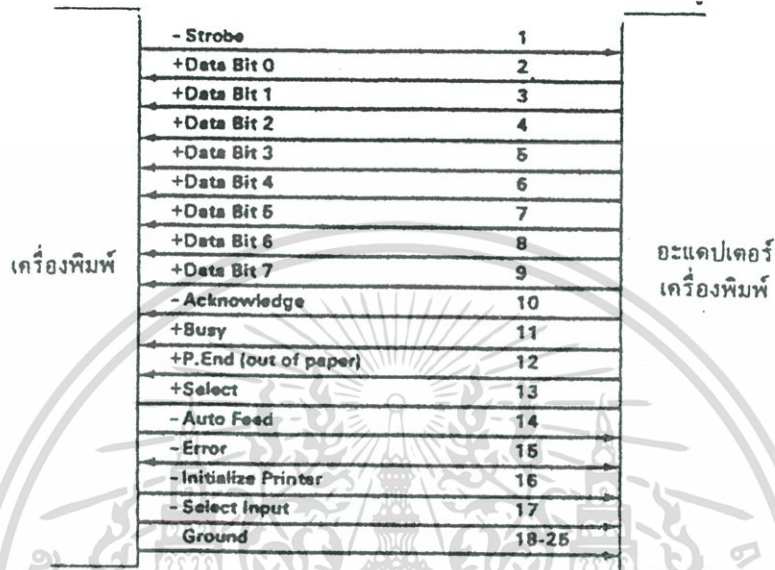
วงจรที่ใช้ในการขับเคลื่อนจะใช้ตัวทรานซิสเตอร์เป็นตัวย้ายสัญญาณ ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ 4 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.5 การใช้ไมโครคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานของสแตมป์มอเตอร์** การเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกจะมี Parallel port และ Serial port ในโครงงานนี้จะใช้ Parallel port ในการติดต่อกับมอเตอร์ แอคเตสคือ 378 ส่งข้อมูลจำนวน 8 บิต (D0-D7) รายละเอียดของขาสัญญาณจะแสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 ขาสัญญาณของParallel port

การสร้างสัญญาณกระตุ้นมอเตอร์ จะใช้ลอจิก 0 กับ 1 เพื่อใช้ในการกำหนดให้มอเตอร์หมุนหรือหยุด และหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกาหรือทวนเข็มนาฬิกา ตารางที่ 3.2 จะแสดงความสัมพันธ์ของขาสัญญาณกับการทำงานของมอเตอร์

ตารางที่ 3.2 ความหมายของขาสัญญาณที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์

ขาสัญญาณ	ความหมาย
2	ส่งสัญญาณนาฬิกาเพื่อกระตุ้นมอเตอร์ในมุม A
3	กำหนดทิศทางการหมุนมอเตอร์ในมุม A
4	ส่งสัญญาณนาฬิกาเพื่อกระตุ้นมอเตอร์ในมุม B
5	กำหนดทิศทางการหมุนมอเตอร์ในมุม B

การควบคุมสเตปป์มอเตอร์ด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ โปรแกรมที่ใช้ควบคุมมอเตอร์คือ ภาษาซี เพราะ เป็นภาษาที่มีความอ่อนตัว และมีประสิทธิภาพในการติดต่อกับฮาร์ดแวร์สูง ทั้งยังสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว คำสั่งที่สำคัญในการควบคุม คือ `outport(address,data)`; ใช้สำหรับส่งข้อมูล, `inport(address,data)`; ใช้สำหรับรับข้อมูล, `delay(msec.)`; ใช้ในการหน่วงเวลาหน่วยเป็นมิลลิวินาที เช่นการสั่งให้มอเตอร์หมุนตามเข็มจะต้องสั่งให้ บิตที่ 0 และ 1 ทำงาน 1 สเตปเราจะต้องแปลงจากเลขฐาน 2 คือ 0 0 1 1 เป็นเลขฐาน 10 คือ  $(2^3 \times 0) + (2^2 \times 0) + (2^1 \times 1) + (2^0 \times 1) = 3$  ฉะนั้นคำสั่งคือ `outport(0x378,0x3)`; ขึ้นด้วยคำสั่ง `delay(100)`; คือหน่วงไว้ 100 ms แล้วสั่งให้หยุดคือ `outport(0x378,0x2)`;



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ตัวรับสัญญาณแบบสัมผัส

#### 4.1 การออกแบบตัวรับสัญญาณแบบสัมผัส

ตัวรับสัญญาณมีความสำคัญมากสำหรับเครื่องวัด 3 แกนค่าความถูกต้องของข้อมูลที่ได้อาจแปรผันโดยตรงกับตัวรับสัญญาณ ตัวรับสัญญาณเปรียบเสมือนกับสวิชแบบปกติปิดตัวหนึ่งที่สามารถส่งสัญญาณออกไปเมื่อถูกสัมผัสในทิศทางใดๆ

**4.1.1 แผ่นรับสัญญาณ** ตัวรับสัญญาณจะส่งสัญญาณเมื่อถูกสัมผัสในทิศทางของแกน X หรือ Y หรือ Z ดังนั้นเราจะต้องทำหน้าสัมผัส 3 ตัว แล้วนำหน้าสัมผัสทั้ง 3 ตัวมาต่ออนุกรมกัน เมื่อหน้าสัมผัสตัวใดตัวหนึ่งเปิดออกสัญญาณก็จะถูกส่งออกไป แผ่นรับสัญญาณจะต้องมี 2 แผ่น คือแผ่นรับสัญญาณบนและล่าง ทำจากแผ่นปรินทรีวงจรไฟฟ้าคือเป็นรูปร่างกลม แผ่นบนกัดเป็นลายวงจรแล้วทำการเชื่อมติดกับเม็ดลูกปัด 3 เม็ด ทำมุม 120 องศาซึ่งกันและกัน ส่วนแผ่นล่างกัดเป็นลายวงจรเพื่อเป็นหน้าสัมผัสแล้วเชื่อมเข้ากับสายสัญญาณ รูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผ่นรับสัญญาณ

**4.1.2 แกนกลาง** ทำจากอลูมิเนียม ปลายด้านล่างทำเกลียวขนาด 2 มิลลิเมตรเพื่อติดกับหัวรับสัญญาณ ส่วนปลายด้านบนทำรูเจาะไว้สำหรับรองรับชุดสปริงสำหรับตั้งแรงแตะ แผ่นรับสัญญาณแผ่นบนจะถูกนำมาติดเข้ากับแกนกลาง ตามรูปที่ 4.2 เมื่อหัวรับสัญญาณถูกแตะแกนกลางจะเคลื่อนที่ด้วยทำให้หน้าสัมผัสของแผ่นประกบบบนและล่างแยกออกจากกัน สัญญาณจึงถูกส่งออกไป

**4.1.3 สปริงแผ่น** ทำจากแผ่นพลาสติกที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นเหมือนกับสปริง จะต้องมีความ

เอกสารหน้าแน่นเท่ากันทั่วทั้งแผ่น นำแผ่นพลาสติกนี้มากลึงให้เป็นวงกลม แล้วแบ่งลายเป็น 3 ส่วนๆ ละ 2 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

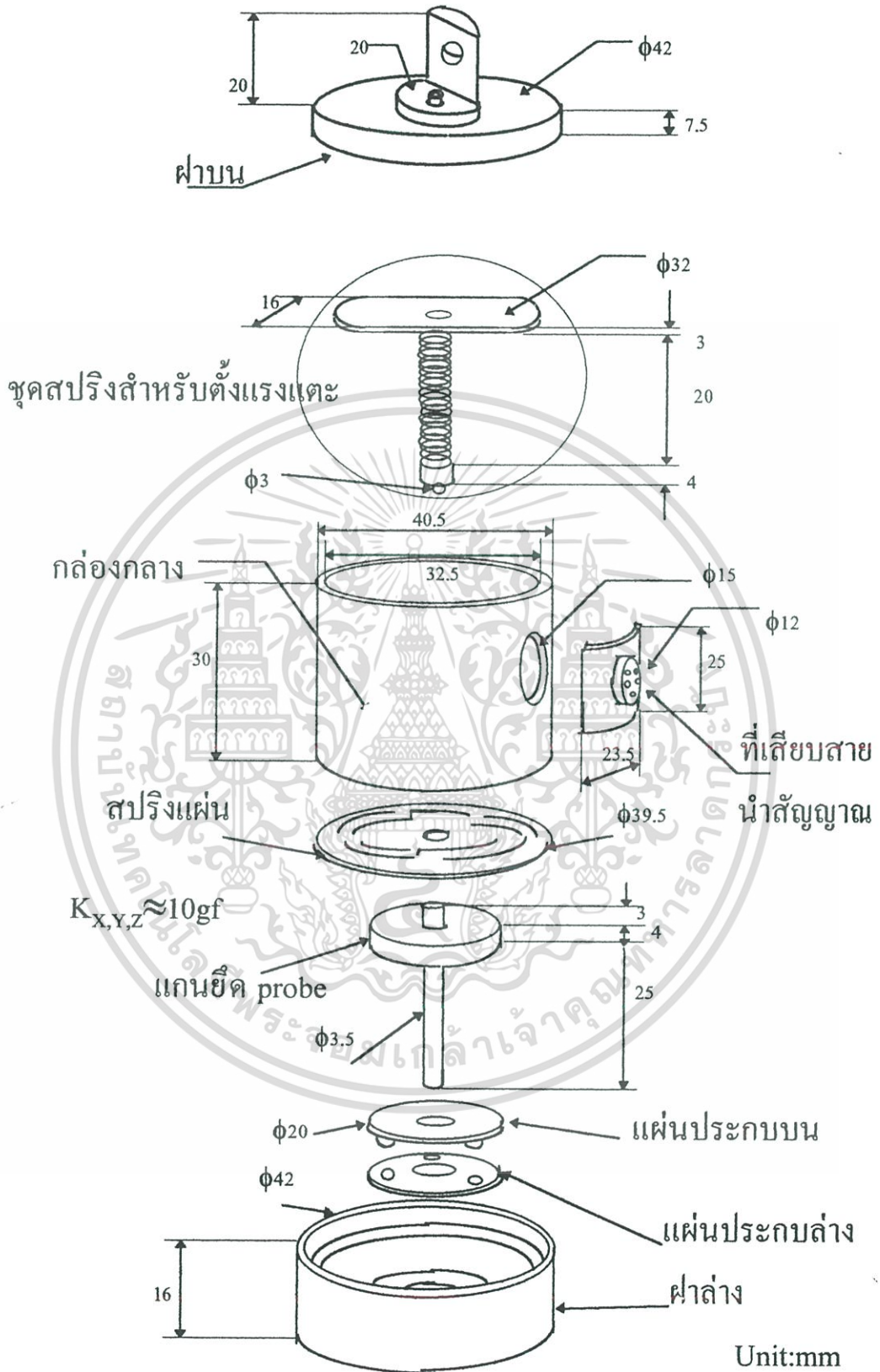
ชั้นตามรูปในภาคผนวก นำไปติดเข้ากับแกนกลางดังรูปที่ 4.2 เมื่อแกนกลางเคลื่อนที่ สปริงแผ่นจะดึงแกนกลางเข้าสู่ตำแหน่งเดิม การแบ่งลายของวงกลม จะต้องแบ่งให้เท่าๆกันทั้ง 3 ส่วนเพื่อให้ค่าคงที่ของสปริงมีค่าเท่ากันในทุกทิศทาง

**4.1.4 ชุดสปริงสำหรับตั้งแรงและประกอบ** ไปด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นแผ่นพลาสติกกลม นำมาตัดขอบทั้งสองข้างออกเพื่อหลบสายไฟ ตรงกลางแผ่นด้านล่างมีปุ่มอยู่กึ่งกลางสำหรับยึดสปริง ส่วนตรงกลางแผ่นด้านบนเจาะรูเล็กน้อยเพื่อเป็นร่องสำหรับสกรูที่กดลงมาจากฝาบน ส่วนที่สอง คือ สปริงแบบขด (Helix spring) ส่วนที่สามคือปุ่มอลูมิเนียมด้านบนมีบ่าไว้ยึดกับสปริงขดด้านล่างเจาะรูแล้วติดเม็ดลูกปัด เพื่อลดแรงเสียดทานเมื่อแกนกลางเคลื่อนที่ ชุดสปริงสำหรับตั้งแรงและจะกดลงบนแกนกลาง ถ้าสปริงขดถูกตั้งให้กดลงมาก จะทำให้ค่าคงที่ของสปริงแผ่นมีค่ามากขึ้น ประโยชน์ของชุดสปริงสำหรับตั้งแรงและ คือ หัวรับสัญญาณมีขนาดและความยาวที่ต่างกัน ถ้าหัวรับสัญญาณมีความยาวมาก ก็จะต้องตั้งให้สปริงมีความแข็งมากเพื่อหน้าสัมผัสจะไม่เปิดออกก่อนที่จะถูกแตะ

**4.1.5 ฝาบน** ทำจากพลาสติกตรงกลางทำเกลียวขนาด 2 มิลลิเมตรเพื่อยึดสกรูสำหรับปรับแรง ส่วนบนสุดทำเป็นแกนยื่นขึ้นไปเพื่อติดกับชุดสเตปป์มอเตอร์

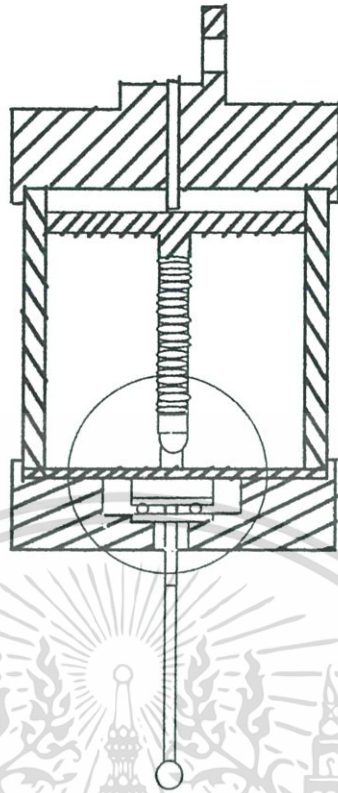
**4.1.6 กล่องกลาง** ทำจากพลาสติกเป็นรูปทรงกระบอกกลวง ตรงกลางเจาะรูเพื่อยึดกับที่เสียบสายนำสัญญาณ

**4.1.7 ฝาล่าง** ทำจากพลาสติก ที่ฝาล่างจะมีบ่าอยู่สองชั้น ชั้นบนจะเป็นที่วางแผ่นพลาสติก ส่วนบ่าล่างเป็นที่วางแผ่นประกบล่าง ตรงกลางเจาะรูเพื่อให้แกนกลางผ่านลงมาได้



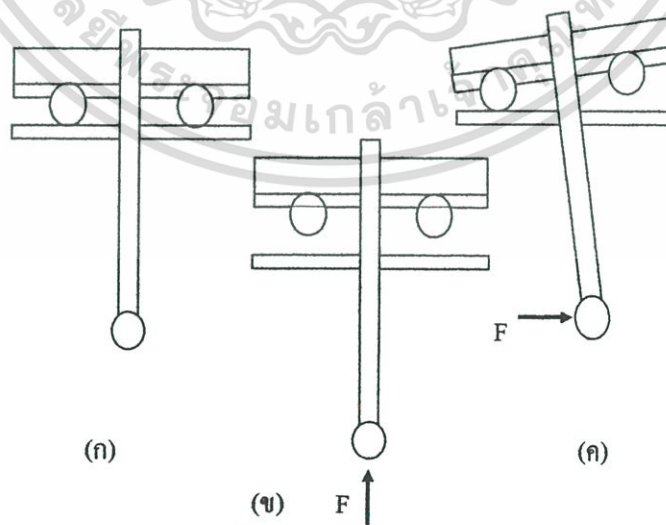
รูปที่ 4.2 ส่วนประกอบตัวรับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 ภาพตัดของตัวรับสัญญาณ

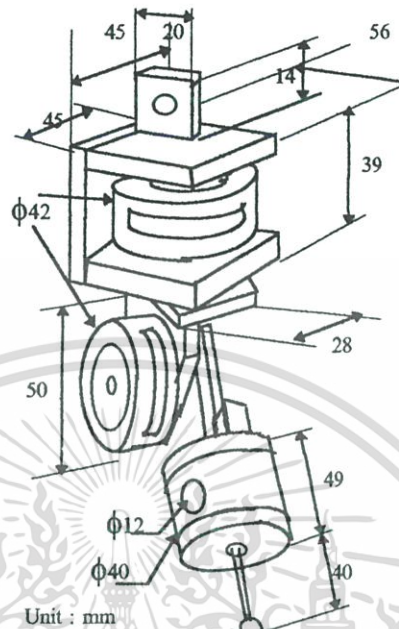
จากรูปที่ 4.3 เมื่อขยายภาพในส่วนของเส้นประจากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าหน้าสัมผัสจะเปิดออกตามทิศทางของแรงที่สัมผัส ดังรูปที่ 4.4 จากภาพ(ก) เป็นภาพที่ตำแหน่งสมดุลไม่มีแรงมากระทำ จากภาพ(ข) จะมีการสัมผัสในแนวตั้ง จากภาพ(ค)เป็นการสัมผัสด้านข้าง



รูปที่ 4.4 ภาพแสดงตำแหน่งต่างๆของแกนรับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การปรับมุมของหัวรับสัญญาณ จะใช้สเกลปิ้งมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อนที่อิสระได้ 2 ทิศทาง คือหมุน ซ้าย-ขวา และขึ้นลง เรียกว่า การเคลื่อนที่แบบ Cylindrical Radius ภาพที่ 4.5



รูปที่ 4.5 สเกลปิ้งมอเตอร์กับหัวรับสัญญาณ

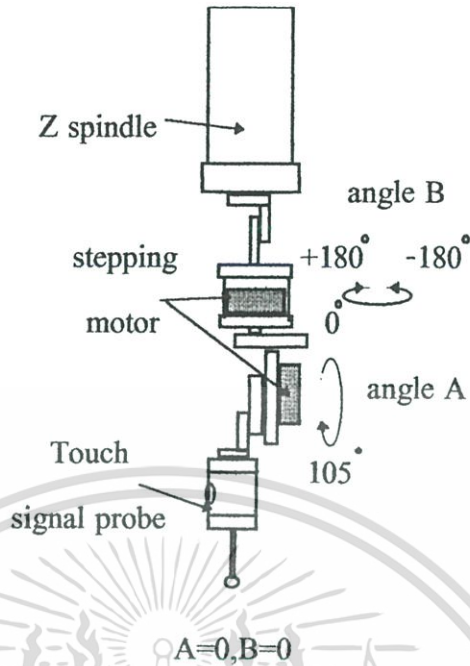
#### 4.2 การสอบเทียบขนาดหัวรับสัญญาณ (Probe Calibration)

การสอบเทียบหัวรับสัญญาณ คือการหาขนาดและตำแหน่งของหัวรับสัญญาณ (Stylus tip) ซึ่งหัวรับสัญญาณมีขนาดและความยาวต่างกัน จะต้องทำการสอบเทียบใหม่ถ้ามีการถอดหรือเปลี่ยนตำแหน่ง

การหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและตำแหน่งจุดศูนย์กลางของหัวรับสัญญาณจะใช้บอลกลมเป็นมาตรฐาน เรียกว่า Master Ball ที่นิยมใช้มี 2 ขนาดคือ 25.4 และ 19.05 มิลลิเมตร ทำด้วยเหล็กหรือเซรามิค ทิศทางในการสอบเทียบหัวรับสัญญาณขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นงานที่จะวัด

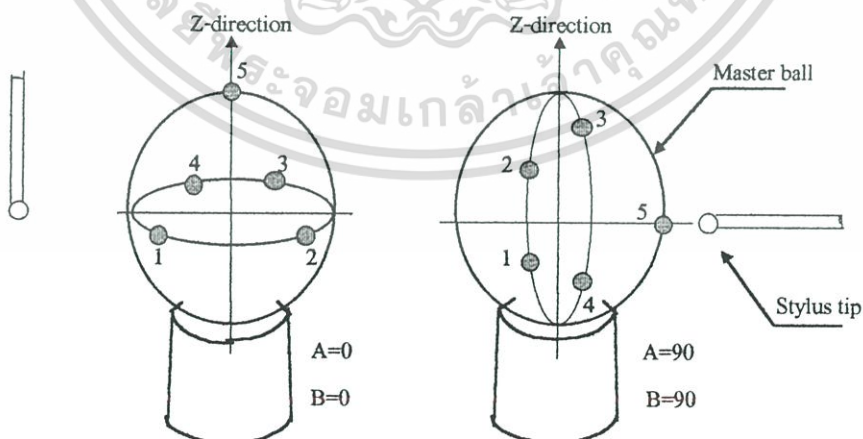
มุมของหัวรับสัญญาณจะมี 2 มุมคือ

1. มุมที่ขึ้นลงในแนวแกน Z จะเรียกว่ามุม A
2. มุมที่หมุนรอบตัวเองบนระนาบ XY จะเรียกว่ามุม B ดูรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงทิศทางการหมุนของมุม A และ B

การแตะ Master ball จะต้องแตะอย่างน้อย 4 จุดขึ้นไป ใช้คำสั่ง Define probe กำหนดการแตะที่มุม A และ B ใดๆ ให้พิจารณาจากรูปที่ 4.7 คือให้ปลายของหัวprobeชี้ไปยังจุดศูนย์กลางของ Master ball เสมอ ตามแนวแกนprobe แล้วแบ่งมุมตามระนาบที่ชี้ออกเป็น 4 ส่วนโดยประมาณ และจุดสุดท้ายคือจุดด้านหน้าสุดที่หัว probe ชี้อยู่



รูปที่ 4.7 จุดแตะของหัวรับสัญญาณบน Master ball

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1 การคำนวณหาขนาดหัวรับสัญญาณ

เมื่อหัวรับสัญญาณและ Master ball ครอบ 5 จุด คอมพิวเตอร์จะคำนวณหาทรงกลมที่มีขนาดเหมาะสมที่สุดที่เกิดจากจุด 5 จุดนี้ แล้วทำการ หักลบกับขนาดจริงของ Master ball เกิดค่าความผิดพลาด ของสปริงในหัวรับสัญญาณ นำค่าความผิดพลาดนี้ลบออกจากขนาดจริงของหัวรับสัญญาณตามสมการ

$$D_{PC} = D_P - (D_{MC} - D_M) \quad (4.1)$$

เมื่อ

$D_{PC}$  คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวรับสัญญาณ ที่ชดเชยค่าความผิดพลาดของสปริง

$D_P$  คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางจริงของหัวรับสัญญาณ

$D_{MC}$  คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของ Master ball ที่ชดเชยค่าความผิดพลาดของสปริงแล้ว

$D_M$  คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางจริงของ Master ball

สังเกต ว่าค่า  $D_P$  และ  $D_M$  เป็นค่าคงที่เพราะฉะนั้นค่าที่จะต้องหาคือ  $D_{MC}$  ซึ่งหาได้จาก Method of Least Squares ซึ่งกล่าวไว้ว่า “ระยะทางที่น้อยที่สุดคือผลต่างระหว่างระยะทางของสมการกับจุดคู่ลำดับ ทั้งหมดยกกำลัง 2” จากสมการทรงกลม

$$(x-h)^2 + (y-k)^2 + (z-l)^2 = r^2$$

เมื่อ  $(h,k,l)$  คือจุดศูนย์กลางของทรงกลม หรือ

$$x^2 + y^2 + z^2 + Dx + Ey + Fz + G = 0 \quad (4.2)$$

เมื่อ  $h = -D/2$ ,  $k = -E/2$ ,  $l = -F/2$ , และ  $r = 1/2(|D^2 + E^2 + F^2 - 4G|)^{1/2}$   
นำสมการที่ 2 มายกกำลัง 2 แล้วหาผลรวม

$$q = \sum (x^2 + y^2 + z^2 + Dx + Ey + Fz + G)^2 \quad (4.3)$$

เทียบการเปลี่ยนแปลงสมการ  $q$  กับตัวแปร  $D, E, F, G$  เพื่อหาค่าตัวแปรทั้ง 4 ตัวนี้

$$\partial q / \partial D = \sum x^3 + \sum xy^2 + \sum xz^2 + D \sum x^2 + E \sum xy + F \sum xz + G \sum x = 0 \quad (4.4)$$

$$\partial q / \partial E = \sum y^3 + \sum x^2 y + \sum yz^2 + D \sum xy + E \sum y^2 + F \sum yz + G \sum y = 0 \quad (4.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\partial q/\partial F = \sum z^3 + \sum x^2 z + \sum y^2 z + D \sum xz + E \sum yz + F \sum z^2 + G \sum z = 0 \quad (4.6)$$

$$\partial q/\partial G = \sum x^2 + \sum y^2 + \sum z^2 + D \sum x + E \sum y + F \sum z + G n = 0 \quad (4.7)$$

### ตัวอย่างการคำนวณ

เครื่อง CMM เครื่องหนึ่งมี Master ball ขนาดรัศมี 20 mm หัวรับสัญญาณขนาด  $\varnothing 2$  mm ให้หาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวรับสัญญาณที่ได้ชดเชยค่าความผิดพลาดของสปริงแล้ว เมื่อจุดแต่ละที่ Master มีค่าค้ำอยู่ที่  $(-20.005, 0.002, -0.001), (0.003, 20.004, 0.001), (20.002, -0.003, -0.002), (-0.001, -20.002, -0.003), (0.002, 0.001, 20.001)$

soln

$$\begin{aligned} \sum x &= 1e-3, \sum y = 2e-3, \sum z = 19.996, n = 5 \\ \sum x^2 &= 800.280, \sum y^2 = 800.240, \sum z^2 = 400.040 \\ \sum x^3 &= -3.601, \sum y^3 = 2.401, \sum z^3 = 8001.200 \\ \sum xy &= -0.020, \sum xz = 20.009e-3, \sum yz = 100.015e-3 \\ \sum x^2 y &= -399.680e-3, \sum x^2 z = -1.200, \\ \sum xy^2 &= 800.500e-3, \sum y^2 z = 800.060e-3 \\ \sum xz^2 &= 800.140e-3, \sum yz^2 = 399.880e-3 \end{aligned}$$

แทนค่าทั้งหมดลงในสมการที่ 4 – 7 จะได้

$$D = -0.003, E = 0.002, F = -0.004, G = 400.130$$

แทนค่า D, E, F, G จะได้  $r = 20.003$  mm เพราะฉะนั้น

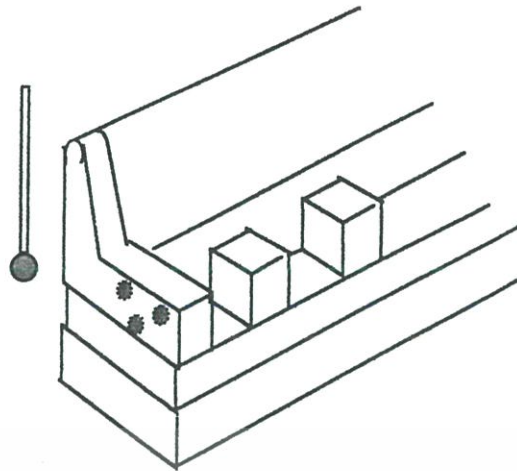
$$D_{MC} = 2 \times 20.003 = 40.006 \text{ mm}$$

$$D_{PC} = 2 - (40.006 - 40) = 1.994 \text{ mm}$$

### 4.3 การหาตำแหน่งศูนย์ให้กับชิ้นงาน

เมื่อทราบขนาดของหัวรับสัญญาณแล้วขั้นตอนต่อไปก็คือการหาตำแหน่งศูนย์ให้กับชิ้นงานซึ่งในการทดลองนี้ใช้ตัว Check master เป็นตัวมาตรฐานใช้คำสั่งวัด Plane การแตะจะต้องแตะอย่างน้อย 3 จุด หลังจากนั้นจุดต่างๆจะถูกนำมาเชื่อมโยงเข้าหากันเพื่อสร้างระนาบแล้วจึงปรับระนาบนั้นให้เป็นศูนย์ลักษณะการแตะแสดงดังรูปที่ 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



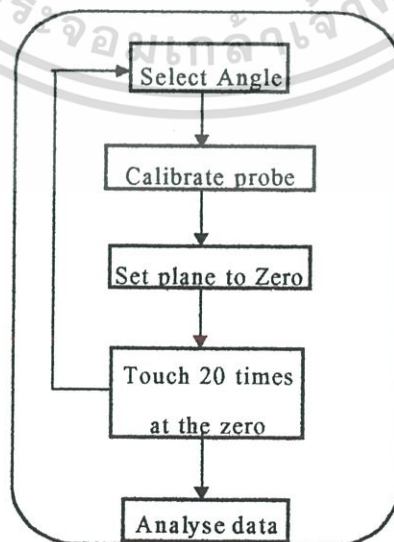
รูปที่ 4.8 การแตะเพื่อหาค่าแห่งอ้างอิง

#### 4.4 การหาค่า Repeatability

ค่า Repeatability คือค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) เป็นค่าความเบี่ยงเบนของความผิดพลาดที่เกิดจากการแตะชิ้นงานซ้ำที่จุดเดียวกันหลายๆครั้ง เมื่อได้ตำแหน่งศูนย์แล้ว ใช้คำสั่ง side แต่ละ 1 จุด ที่ตำแหน่งนี้ 20 ครั้ง แล้วคำนวณตามสูตรหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2 - 1/n [\sum_{i=1}^n X_i]^2}{n-1}} \quad (4.8)$$

ขั้นตอนการหาค่า Repeatability คือ ขั้นแรกจะต้องเลือกมุมที่จะตรวจสอบ แล้วทำการสอบเทียบ หลังจากนั้นจึงหาค่าแห่งอ้างอิง แล้วแตะที่ตำแหน่งนั้น 20 ครั้ง



รูปที่ 4.9 ขั้นตอนการหาค่า Repeatability

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การหาค่าคงที่ของสปริงที่มุมต่างๆ

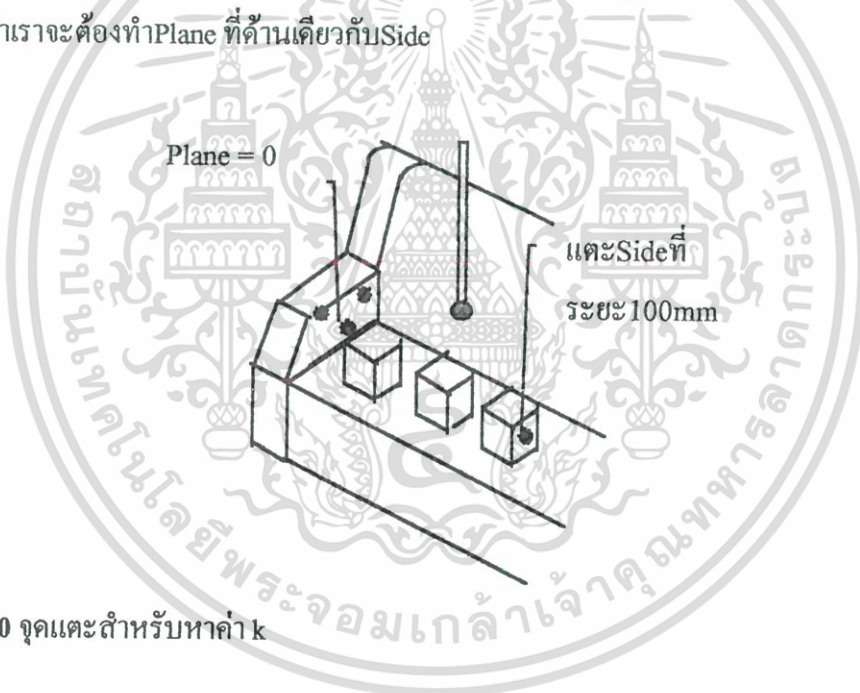
$$F = kx \quad (4.9)$$

เมื่อ  $F$ =แรงที่ทำให้หน้าสัมผัสของวงจรมแยกจากกัน

$k$ =ค่าสัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของสปริง

$x$ =ระยะความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

การหาค่า  $F$  หาได้จากการใช้ Force gage และที่ปลายของหัวรับสัญญาณแล้วดันจนกระทั่งหน้าสัมผัสเปิด อ่านค่า ณ ตำแหน่งนั้น การหาค่าความผิดพลาด( $x$ ) จะต้องหาจากขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางกลางจริงของ probe ที่ยังไม่ได้ชดเชยความผิดพลาดของสปริง ก็จะต้อง input ค่าเส้นผ่าศูนย์กลาง probe แทนการ Calibrate ต่อไปแต่ละ Check master หาค่าแหน่งศูนย์กลาง แล้วไปแต่ละที่ตำแหน่ง 100mm สังเกตว่าเราจะต้องทำ Plane ที่ด้านเดียวกับ Side



รูปที่ 4.10 จุดแต่ละสำหรับหาค่า  $k$

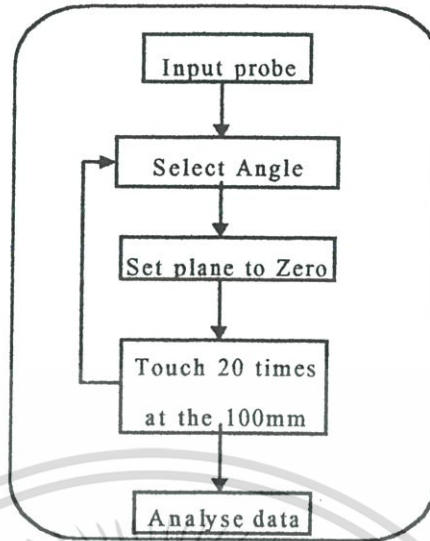
การแต่ละให้เริ่มที่มุม  $A=0, B=0$  ก่อน กำหนดให้ค่า error = 0 เพื่อตัดค่า error ของเครื่อง CMM ออก เมื่อเปลี่ยน probe เป็นตำแหน่งอื่นแล้วให้เซต Plane ให้เป็นศูนย์กลางแต่ละ side ที่ระยะ 100mm นำค่า error ที่เกิดขึ้นมาลบกับค่า error ที่เกิดจากมุม  $A=0, B=0$  จะทำการแต่ละที่ระยะอื่นก็ได้ยกเว้นที่ตำแหน่งศูนย์กลาง เพราะว่า ตำแหน่งนี้จะมีการชดเชยค่าความผิดพลาดของสปริง

ตัวอย่าง กำหนดให้  $F=10\text{gf}, x=0.035\text{mm}$

Soln

$$k = 10 / 0.035 = 285.7 \text{ gf/mm}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

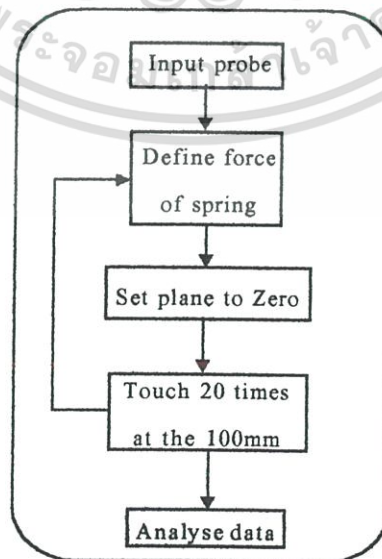


รูปที่ 4.11 ขั้นตอนการหาค่าคงที่ของสปริง

#### 4.6 การหาความสัมพันธ์ของค่าความผิดพลาดเมื่อเปลี่ยนค่าคงที่ของสปริง

$x \propto F$  มีความหมายว่า เมื่อแรงที่กดลงบนสปริงเปลี่ยน ค่าความผิดพลาด  $x$  ก็จะต้องเปลี่ยนตาม ในหัวข้อนี้จะศึกษาถึงความสัมพันธ์นี้ โดยการเปลี่ยนแรงที่กดบนสปริง แล้วหาค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

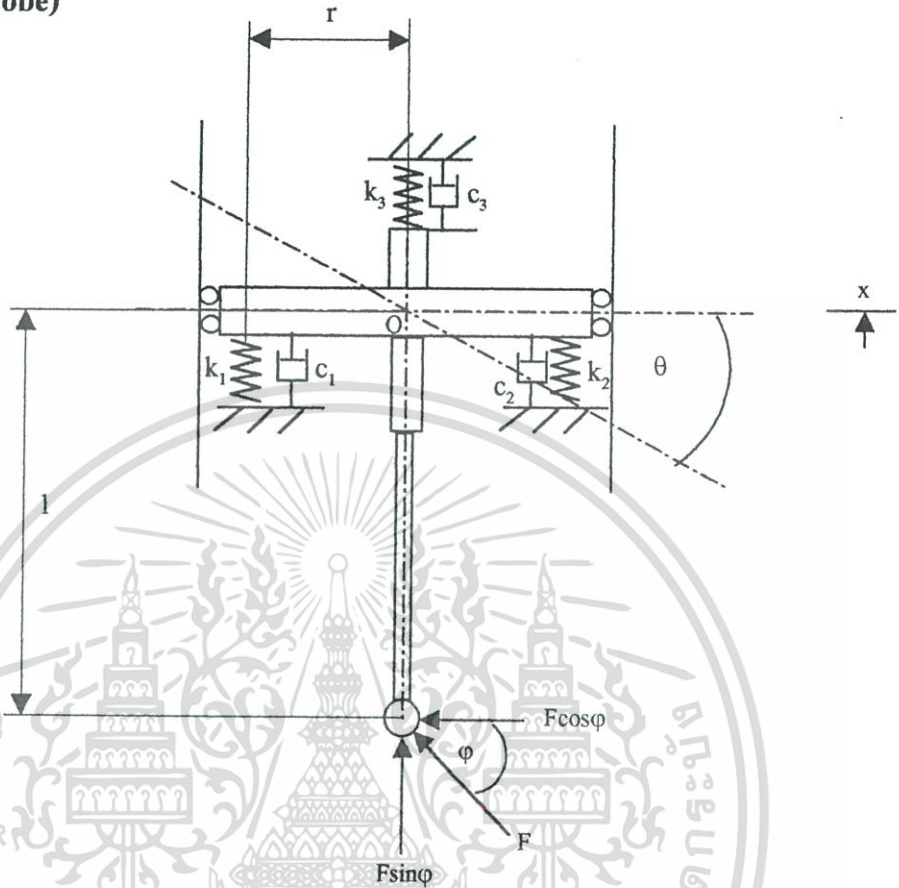
ขั้นตอนแรกคือ Input เส้นผ่านศูนย์กลางของ Probe ตามขนาดจริง แล้วทำ Plane = 0 และ Side ที่ ระยะ 100mm ตามรูปที่ 14 แล้วเพิ่มแรงกดที่สปริง โดยการขันสกรูที่ฝาดบน ใช้ Force gage ตรวจสอบว่า ได้แรงตามที่ต้องการหรือไม่ ทำการทดลองอีกครั้ง โดยทำที่มุม A=0, B=0 เท่านั้น



รูปที่ 4.12 ขั้นตอนการหาความสัมพันธ์ของ F และ x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 สมการทางคณิตศาสตร์ของตัวรับสัญญาณ (Mathematical Model of Touch Signal Probe)



รูปที่ 4.13 Free body diagram ของตัวรับสัญญาณ

การพิจารณาสมการทางคณิตศาสตร์ของตัวรับสัญญาณ จะต้องกำหนดการเคลื่อนที่ของแกนไม่ให้เลื่อนไปทางซ้ายหรือขวา และแปลงการเคลื่อนที่ของสปริงแผ่นให้อยู่ในรูปของสปริงชด เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา ดังรูปที่ 4.13 เมื่อมีแรง F มากระทำที่หัวรับสัญญาณ จะเกิดแรงขึ้น 2 แนวทาง คือ  $F\cos\theta$  และ  $F\sin\theta$  ดังนั้นจะเกิด 2 สมการ คือ

$$\Sigma F ; \quad F\sin\phi = m\ddot{x} + c_1\dot{x} + c_2\dot{x} + c_3\dot{x} + k_1x + k_2x + k_3x + k_1r\theta - k_2r\theta \quad (4.10)$$

$$\Sigma M_o; \quad Fl\cos\phi = J_o\ddot{\theta} + c_1r^2\dot{\theta} + c_2r^2\dot{\theta} + k_1r^2\theta + k_2r^2\theta + k_1x - k_2x \quad (4.11)$$

นำสมการมาจัดรูปจะได้

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & J_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (c_1+c_2+c_3) & 0 \\ 0 & (c_1+c_2)r^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (k_1+k_2+k_3) & (k_1-k_2)r \\ (k_1-k_2) & (k_1+k_2)r^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \theta \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} \sin\phi \\ l\cos\phi \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อ  $F$  คือ แรงที่ใช้ในการสัมผัสหัวรับสัญญาณ
- $m$  คือ มวลของแกนกลางรวมกับหัวรับสัญญาณ
- $x$  คือ ระยะทางที่เคลื่อนที่ของจุด  $O$  จากตำแหน่งสมดุล
- $c$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของ Damp
- $J_0$  คือ Moment of inertia ของแกนกลางรวมกับหัวรับสัญญาณรอบจุด  $O$
- $l$  คือ ระยะทางจากจุด  $O$  ถึงจุดศูนย์กลางของหัวรับสัญญาณ
- $r$  คือ ระยะทางจากจุด  $O$  ถึงแนวแกนสปริง
- $\theta$  คือ มุมที่เบี่ยงเบนออกจากแนวสมดุลของสปริง
- $\phi$  คือ มุมที่แรงกระทำกับหัวรับสัญญาณ

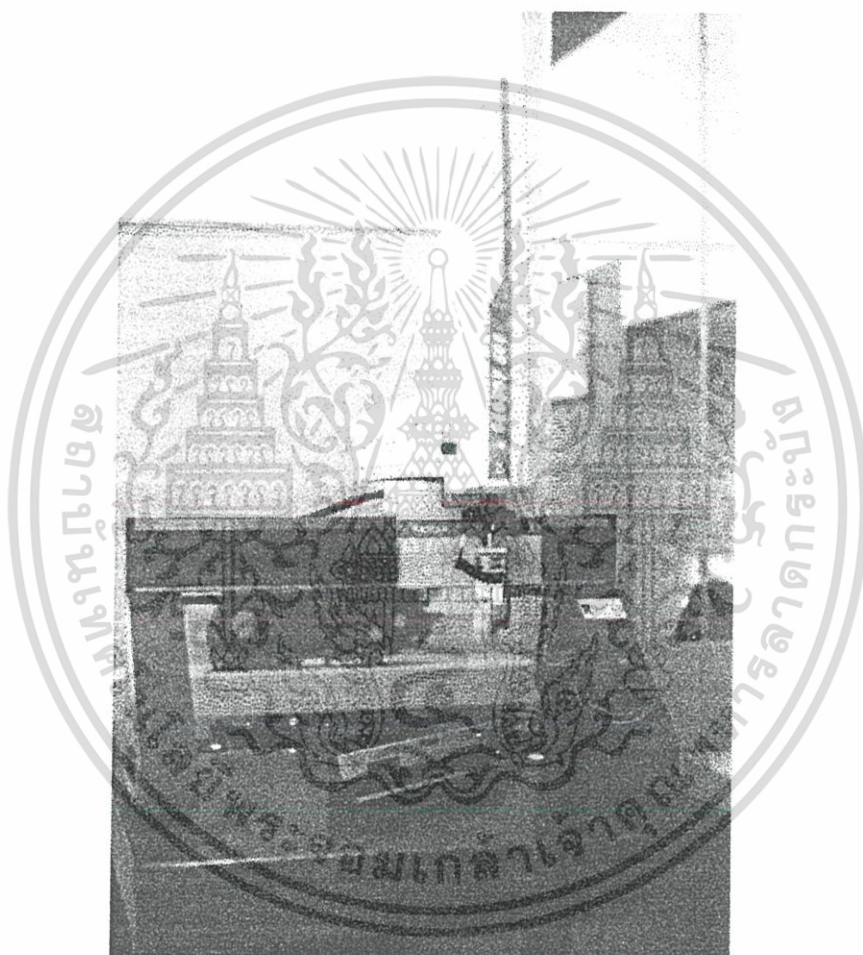


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

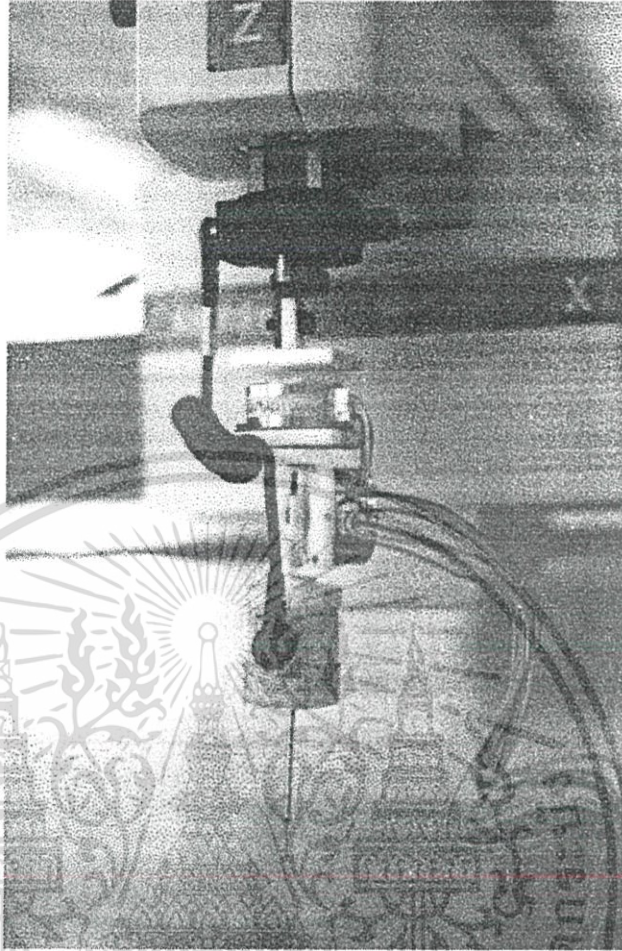
### ผลการทดลอง

การทดลองนี้ใช้เครื่องวัด 3 แกนรุ่น Geoboy300 ตามรูปที่ 5.1 ซึ่งมีค่าความผิดพลาด  $15+(20L/1000)$   $\mu\text{m}$  คือที่  $L=0$  จะผิดพลาดได้  $15 \mu\text{m}$  และใช้ตัวรับสัญญาณ ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.1 เครื่องวัด 3 แกนรุ่น Geoboy300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 ตัวรับสัญญาณที่ใช้ในการทดลอง

### 5.1 ค่า Repeatability

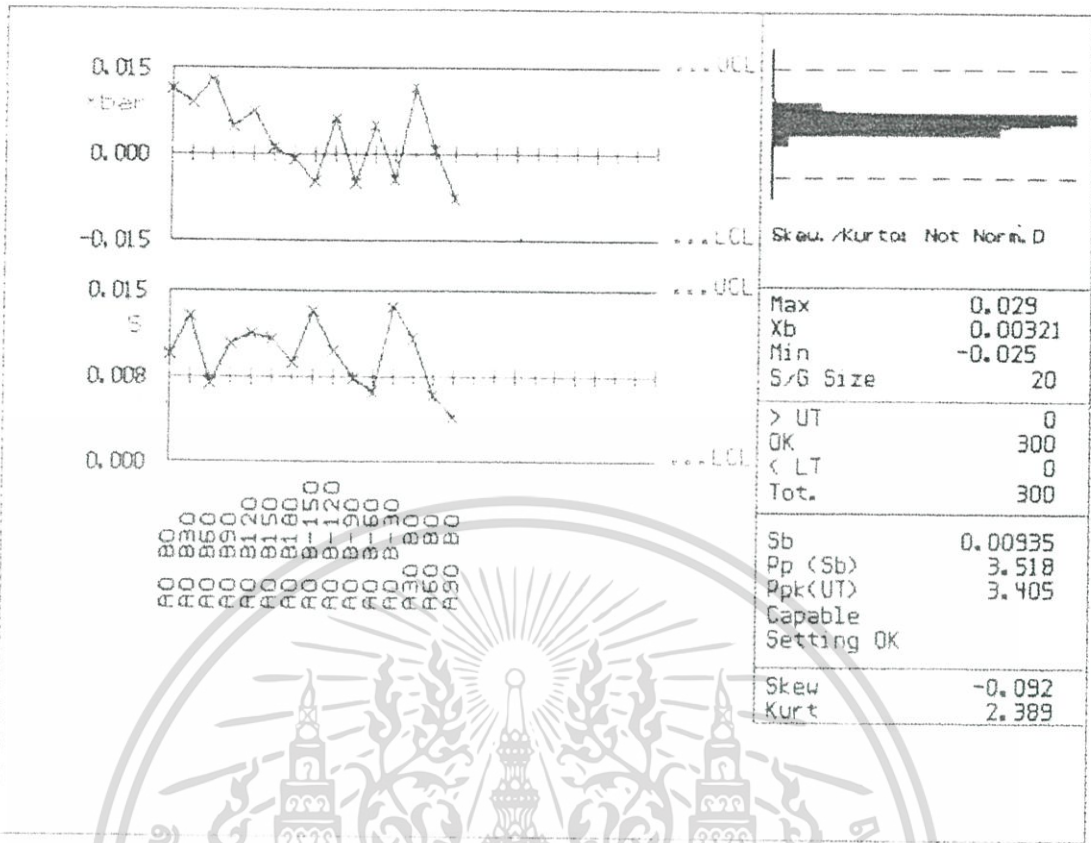
ผลการทดลองของมุมต่างๆ ได้นำมา Plot ลงบน Control chart โดยทำการทดลองมุมละ 20 ตัว ได้ค่า Repeatability รวม จากข้อมูล 300 ค่า เท่ากับ  $11.55 \mu\text{m}$  ที่  $F=4\text{gf}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

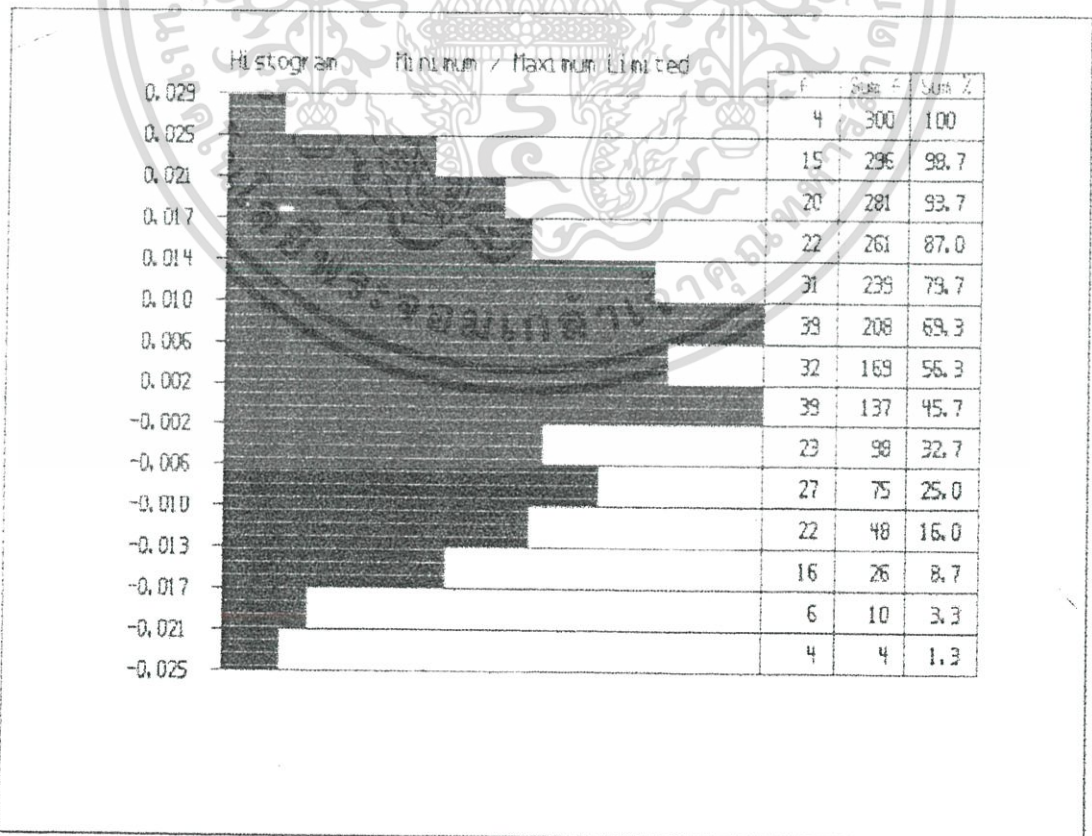
ตารางที่ 5.1 ค่าความผิดพลาดที่ใช้คำนวณค่า Repeatability

Angle		Error for 20 times (Micrometer)																				X	S
A	B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	X	S
0	0	10	11	10	23	12	9	13	20	23	10	-9	14	3	10	6	-11	19	21	24	13	11.6	9.4
0	30	-3	-5	-8	7	9	2	5	7	2	-2	-15	5	18	22	25	27	29	13	25	18	9.1	12.7
0	60	20	13	23	19	12	19	0	14	10	4	5	14	14	7	14	7	20	18	3	16	12.6	6.5
0	90	-2	6	15	14	9	12	6	1	-8	0	-8	0	-15	8	9	0	-8	12	23	23	4.8	10.3
0	120	-21	14	6	-9	-1	6	-1	6	21	16	-3	19	23	21	19	7	9	0	9	10	7.6	11.2
0	150	-8	11	5	6	1	-4	-14	0	-14	0	-16	5	23	11	6	12	17	-12	2	-7	1.2	10.8
0	180	-11	-5	-20	-11	-11	4	-12	4	1	5	-1	-5	6	9	0	12	7	7	7	-2	-0.8	8.6
0	-150	20	14	4	5	16	-5	15	-19	-17	-19	-17	-4	-6	-6	-17	-6	-20	-17	-1	-15	-4.7	13.2
0	-120	5	11	4	27	21	8	8	19	-2	8	-5	-12	14	9	7	-2	-8	1	11	4	6.4	9.7
0	-90	4	3	3	8	1	3	-2	-14	-15	-1	-15	-1	-4	-11	-12	-10	-7	-11	-11	-11	-5.2	7.3
0	-60	13	16	14	12	4	10	-1	7	6	0	-3	4	-3	-4	-1	3	-1	11	10	-1	4.8	6.4
0	-30	9	11	14	7	-24	-17	-25	3	1	8	-1	-8	-18	-22	-17	-7	-15	-8	1	19	-4.4	13.5
30	0	15	12	4	22	22	4	5	6	-22	10	12	21	20	2	14	14	15	27	23	8	11.7	10.8
60	0	13	0	-6	0	5	-7	-6	0	-8	-6	-7	3	2	2	10	4	0	2	6	4	0.6	5.8
90	0	1	-4	-8	-8	-6	-10	-11	-12	-3	-5	-9	-3	-6	-11	-13	-11	-11	-13	-10	-4	-7.8	3.9
																					3.15	9.35	
																					$X_b$	$S_b$	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 Control chart of Repeatability



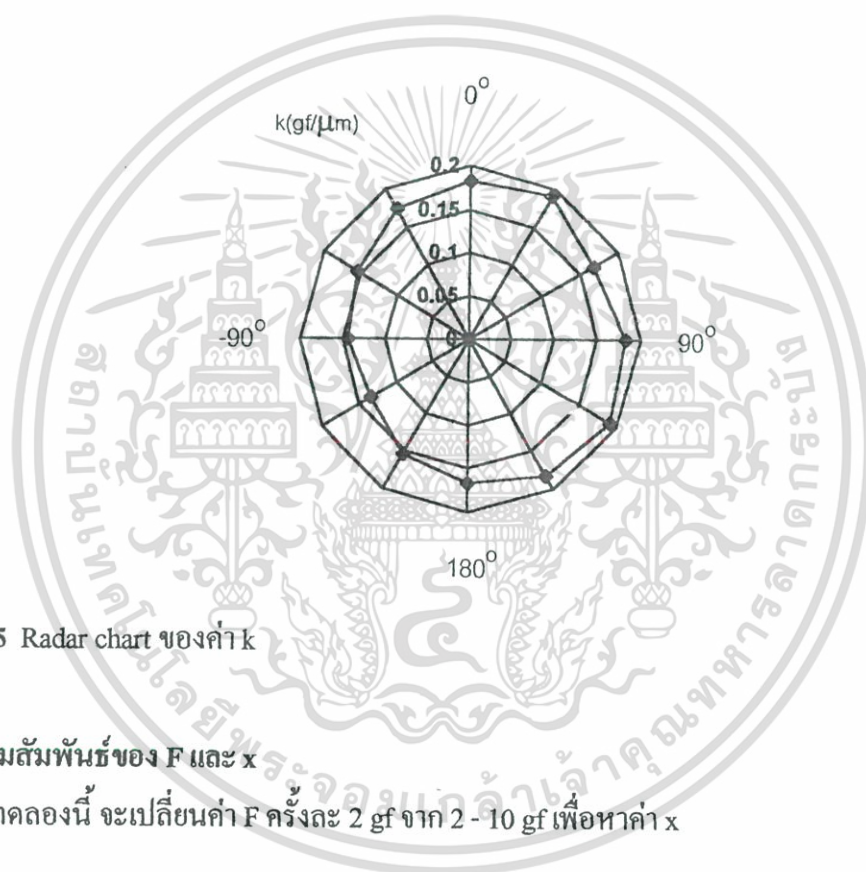
เอกสารรูปที่ 5.4 Histogram of Repeatability งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 ค่าคงที่ของสปริง

การหาค่าคงที่ของสปริงจะให้มุม  $A=0$  แล้วเปลี่ยน มุม  $B$  ไปครั้งละ 30 องศา

ตารางที่ 5.2 ค่าคงที่ของสปริง ที่มุมต่างๆ

องศา มุม $B$	0	30	60	90	120	150	180	-150	-120	-90	-60	-30
ค่าคงที่ของสปริง (gf/μm)	0.182	0.190	0.167	0.182	0.190	0.182	0.167	0.154	0.133	0.143	0.154	0.174



รูปที่ 5.5 Radar chart ของค่า  $k$

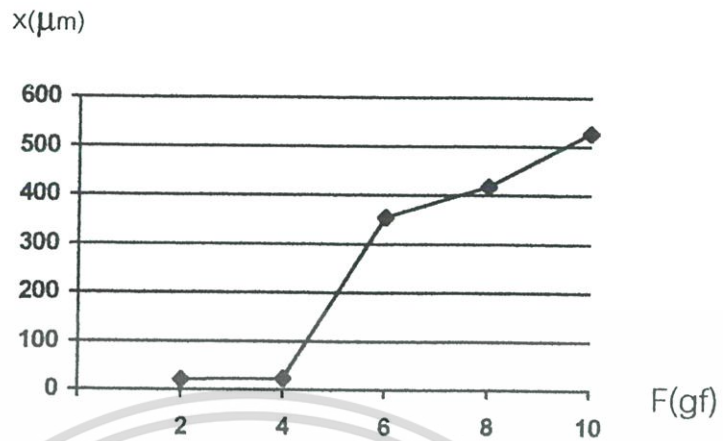
## 5.3 ความสัมพันธ์ของ $F$ และ $x$

การทดลองนี้ จะเปลี่ยนค่า  $F$  ครั้งละ 2 gf จาก 2 - 10 gf เพื่อหาค่า  $x$

ตารางที่ 5.3 ค่าความสัมพันธ์ของ  $F$  และ  $x$

$F$ (gf)	2	4	6	8	10
$x$ (μm)	20	22	354	418	527

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง F และ x



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผลการทดลอง

### 6.1 สาเหตุของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการรับสัญญาณของตัวรับสัญญาณ

1 ค่าคงที่ของสปริงในทิศทางต่างๆมีค่าไม่เท่ากัน ไม่ว่าค่าคงที่ของสปริง จะมากหรือน้อยจะไม่ มีผลกับค่าความผิดพลาด เพราะว่าการสอบเทียบหัวรับสัญญาณ จะทำการชดเชยค่าความผิดพลาด ของสปริง แต่ถ้าค่าคงที่ของสปริง ในทิศทางต่างๆไม่เท่ากันจะทำให้ค่าของการชดเชยจากการ สอบเทียบหัวรับสัญญาณ ผิดพลาดไปด้วย

2 แรงที่ใช้ในการแคะตัวรับสัญญาณ ไม่คงที่ ทำให้ค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการแคะที่จุดเดียว กันไม่เท่ากัน

3 ตัวสเตปป์มอเตอร์มีความสามารถในการรับแรงบิดได้ไม่เพียงพอ จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มแรง กดของสปริงให้มากขึ้น ค่าความผิดพลาดก็จะมากขึ้นด้วยแต่จะต้องมากขึ้นในลักษณะเชิงเส้น แต่ จากการทดลองไม่เป็นเช่นนั้น เพราะเวลาที่แคะชิ้นงานค่าสปริงที่แข็งจะทำให้ตัวมอเตอร์มีการ หมุนเล็กน้อยก่อนที่หน้าสัมผัสสวางจรจะเปิด

### 6.2 แนวทางการแก้ไขและพัฒนาตัวรับสัญญาณจากข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้น

1 การแก้ไขค่าคงที่ของสปริงให้มีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้นทำได้โดย หัวสตุที่มีค่าความหนาแน่น คงที่ตลอดทั่วทั้งแผ่น มาทำสปริง และทำการแบ่งลายสปริงด้วยเครื่องจักรที่สามารถเดินแบบ CNC ได้ เพื่อการแบ่งลายในทิศทางต่างๆมีค่าที่เท่ากัน

2 การแก้ไขแรงแคะที่ไม่เท่ากัน จะต้องทดสอบด้วยเครื่องวัด 3 แกนที่เป็น CNC เพราะสามารถ กำหนดความเร็วที่แคะได้คงที่

3 การแก้ไขสเตปป์มอเตอร์ให้รับแรงบิดได้มากขึ้น ทำได้หลายวิธี คือใช้เทคนิคการเหนี่ยวนำ กระแสให้มากขึ้นเมื่อต้องการให้มอเตอร์หยุดนิ่ง หรือ ออกแบบระบบกลไกในการล็อกตัวรับ สัญญาณให้หยุดนิ่ง และถ้าต้องการให้สเตปป์ในการหมุนของมอเตอร์หมุนได้ละเอียดมากขึ้นก็ สามารถเลือกมอเตอร์ที่มีความละเอียดของมุมในการหมุนให้มากขึ้นได้ด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Catalogue Coordinate Measuring Machine No: MAP.1021 (2) Mitutoyo Asia Pacific Pte.Ltd.,Singapore. 1994.
- [2] Geopak-3 (v5.0) Instruction Manual Nr.011090 Mitutoyo Neuss, Germany. 1995.
- [3] Hugh D. Young . **Physics**. 8th Ed. Reading : Addison-Wesley publishing Company,Inc. 1992.
- [4] Statpak-3 Instruction Manual Nr.011090 1995 Mitutoyo Neuss, Germany.
- [5] William T. Thomson . **Theory of Vibration with Application**. 3rd Ed. Singapore : Prentice-Hall, Inc.1988.
- [6] ชาศรี อภินันท์กุล, จูติพงษ์ เฉิดสกุล “สแตปป์มอเตอร์ คอนโทรลเลอร์” รายงานวิชาการประยุกต์ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2536
- [7] มนตรี เจริญเชิดดวงศ์, วิสูตร ชาญพิพัฒน์ชัย, วิเศษฐ์ เรืองวงศ์โรจน์, ศรีชัย รุจิรวัฒน์กุล. “สแตปป์มอเตอร์ไครฟ์.” ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2535

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

## โปรแกรม การควบคุมสเตปปีงมอเตอร์

```

/* Test arrow */
#include <stdio.h>
#include <time.h>
#include <stdlib.h>
#include <conio.h>
#include <dos.h>
#define freq 10
main()
{
    char ch;
    float up,down,left,right,angleA,angleB;

    up = 0;
    down = 0;
    left = 0;
    right = 0;

    printf("This program is used for drive stepping moter 1.8deg/step \n");
    printf("Press Arrow Left or Right for controll Angle B in rang -180 to 180 \n");
    printf("Press Arrow Up or Down for controll Angle A in rang 0 to 90\n");
    while ((ch=getch( 85))!= 27 )
    {
        if (ch =='H' && angleA < 89 )
        {
            outp(0x378,0x32);
            delay(freq);
            outp(0x378,0x00);
            up=up+1.8;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    angleA = up-down;
    angleB = left-right;
    printf("Angle A = %1.2f B = %1.2f degree \n",angleA,angleB);
}
else if (ch == 'P' && angleA > 1 )
{
    outp(0x378,0x96);
    delay(freq);
    outp(0x378,0x64);
    down=down+1.8;
    angleA = up-down;
    angleB = left-right;
    printf(" Angle A = %1.2f B = %1.2f degree \n",angleA,angleB);
}
else if (ch == 'K' && angleB < 179 )
{
    outp(0x378,0x01);
    delay(freq);
    outp(0x378,0x00);
    left=left+1.8;
    angleA = up-down;
    angleB = left-right;
    printf(" Angle A = %1.2f B = %1.2f degree \n",angleA,angleB);
}
else if (ch == 'M' && angleB > -179 )
{
    outp(0x378,0x03);
    delay(freq);
    outp(0x378,0x02);
    right = right+1.8;
    angleA = up-down;
    angleB = left-right;

```

```
printf("Angle A = %1.2f B = %1.2f degree \n",angleA,angleB);  
}  
}  
}  
return 5;  
}  
}
```



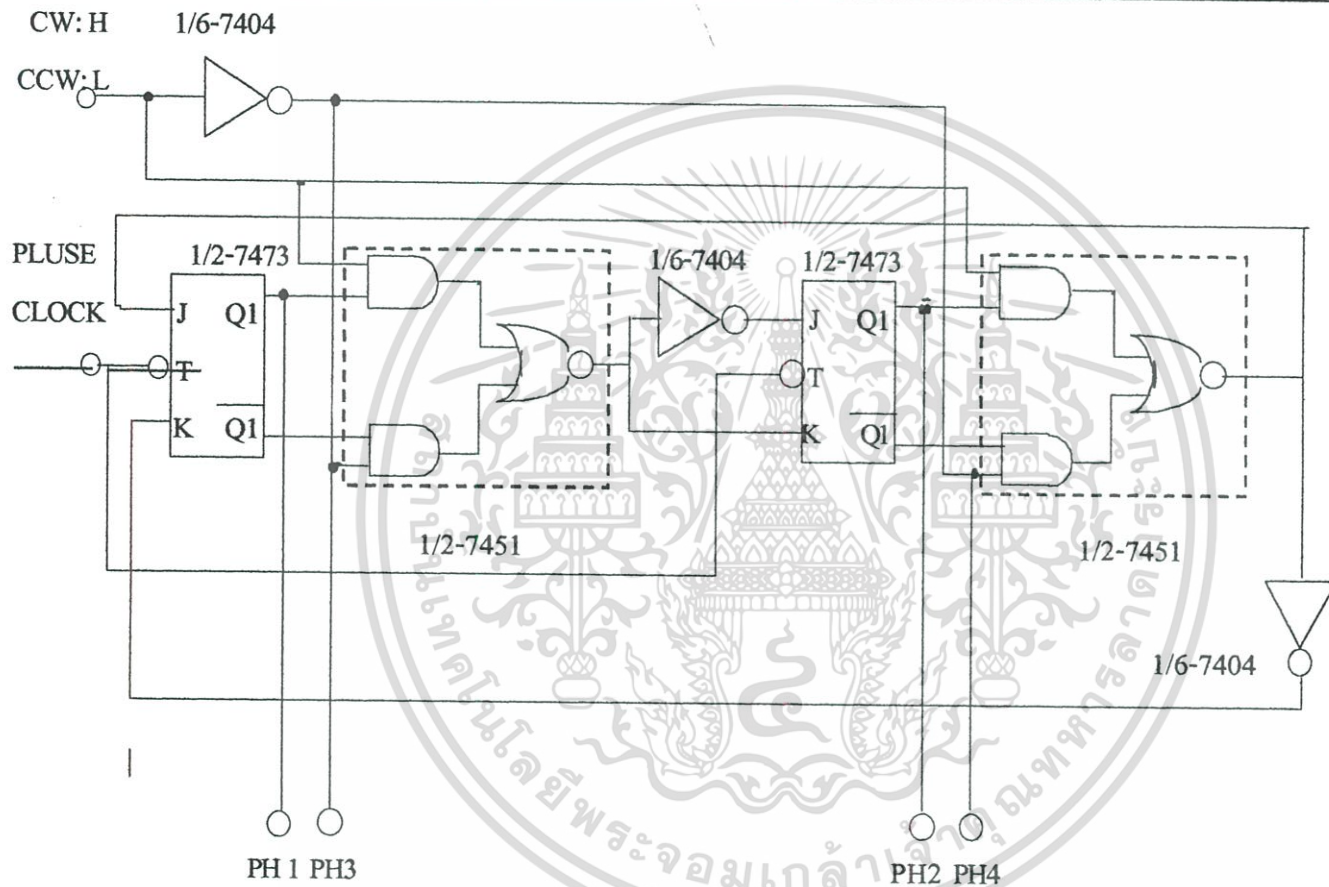
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.

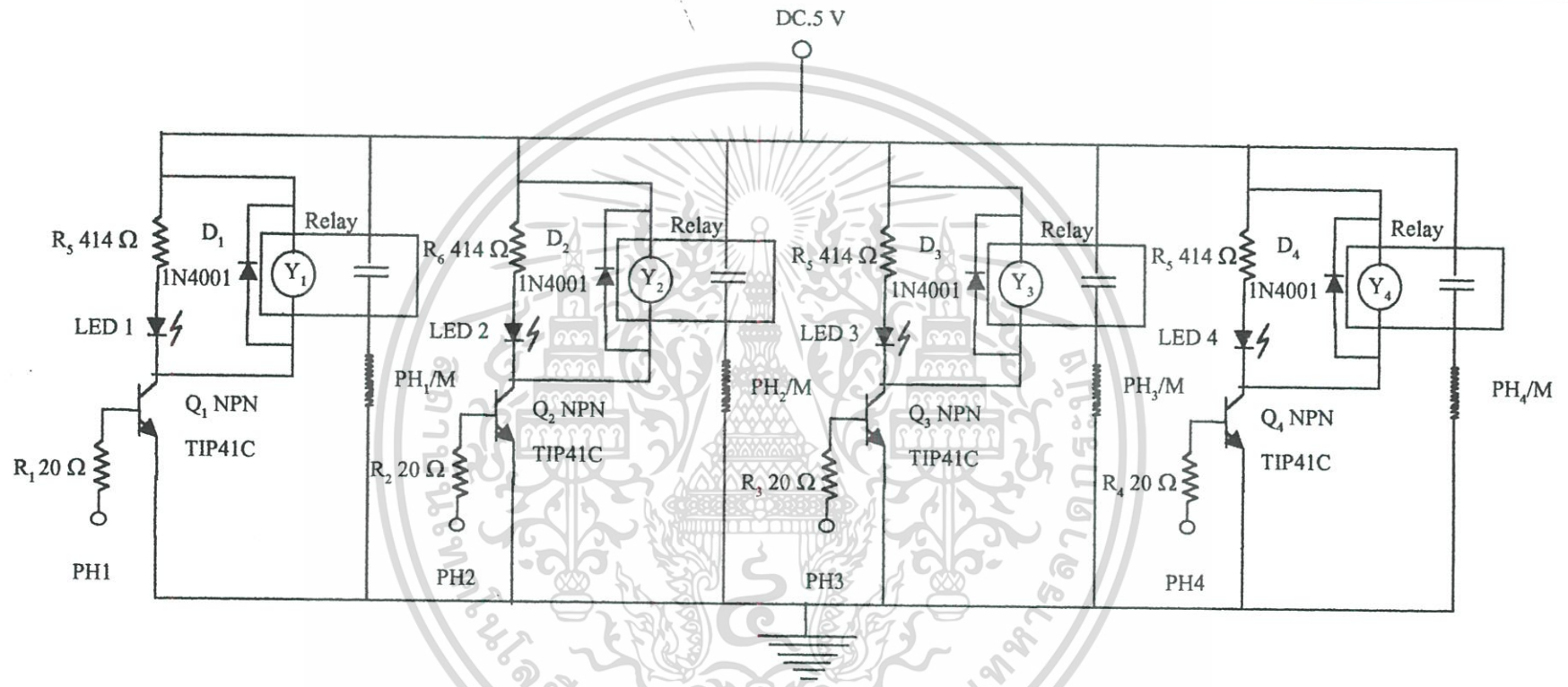
## แบบวงจรไฟฟ้าและแบบตัวรับสัญญาณ



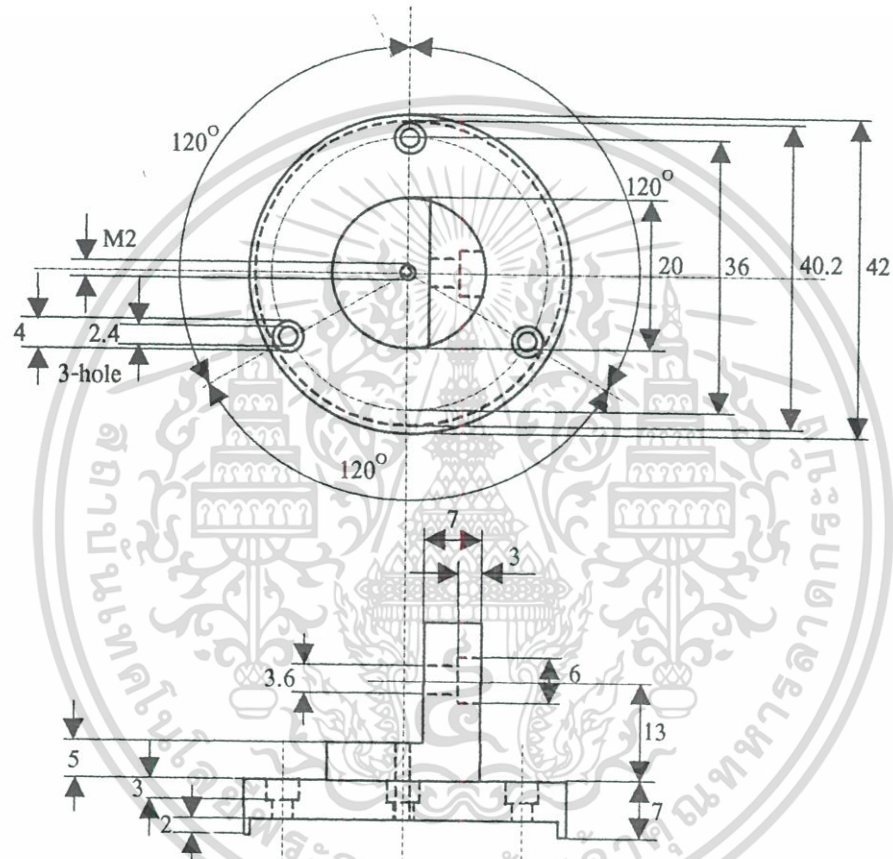
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



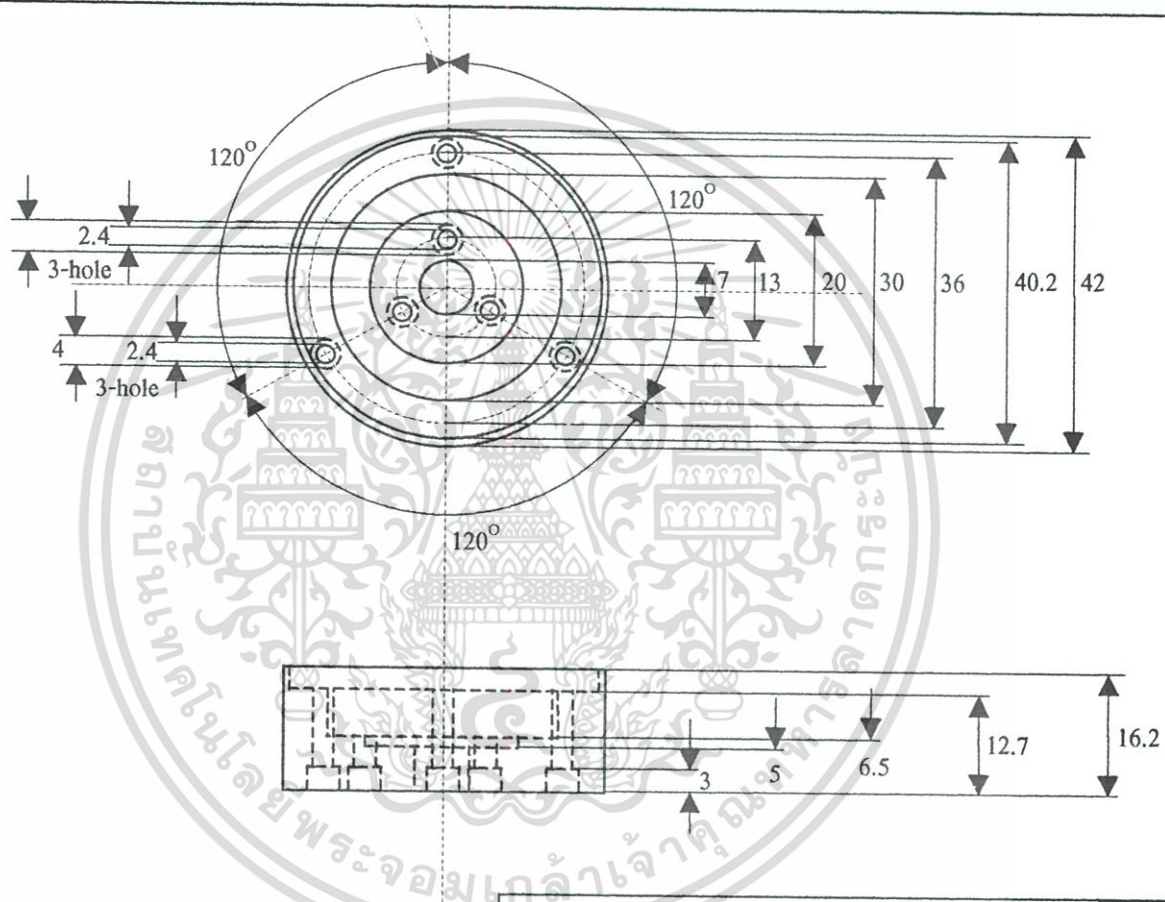
<b>Title :</b> Control board	
<b>Document number :</b> 1	<b>Subtitle :</b> Sequence circuit
<b>Quantity :</b> 2	



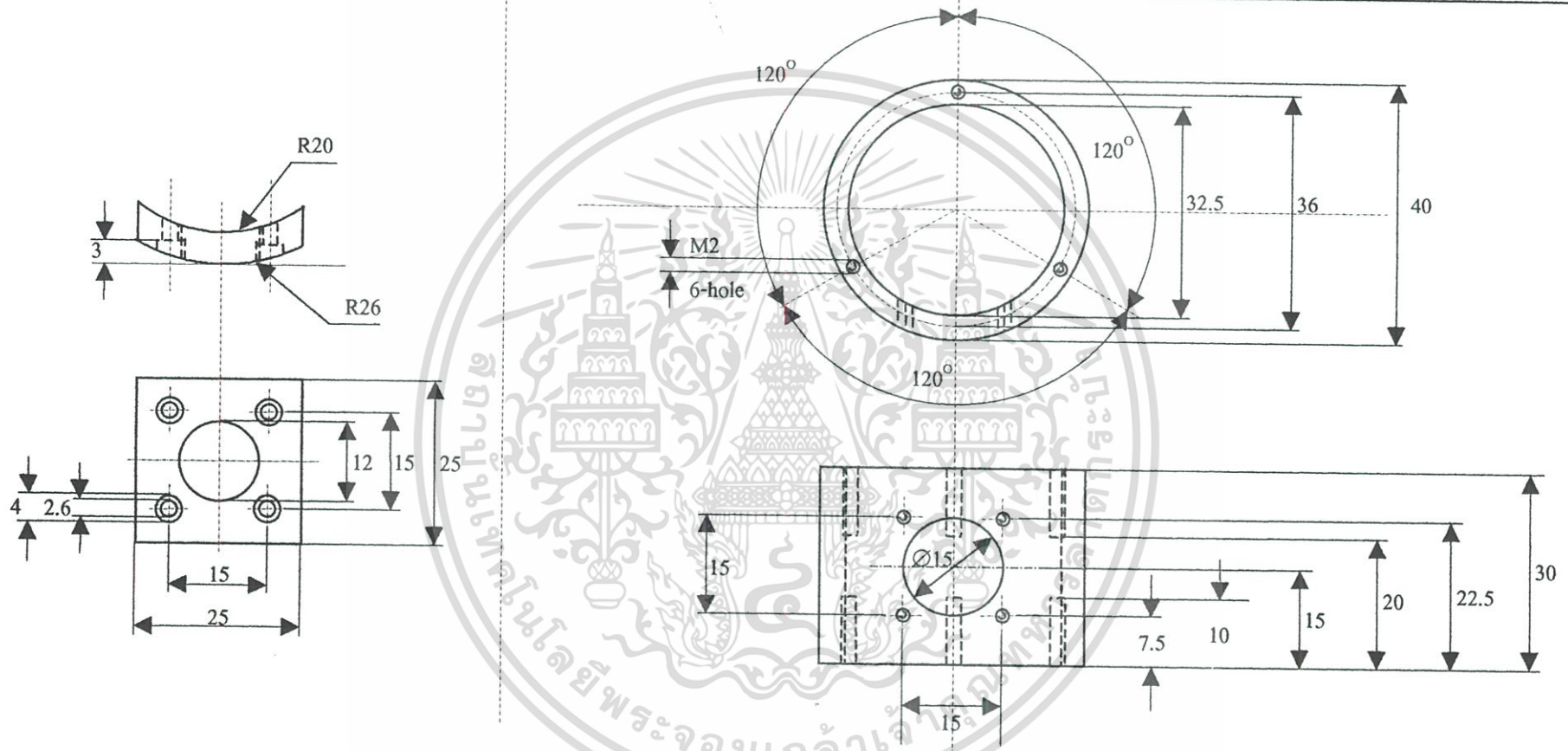
<b>Title :</b> Control board	
<b>Document number :</b> 2	<b>Subtitle :</b> Driver circuit
<b>Quantity :</b> 2	



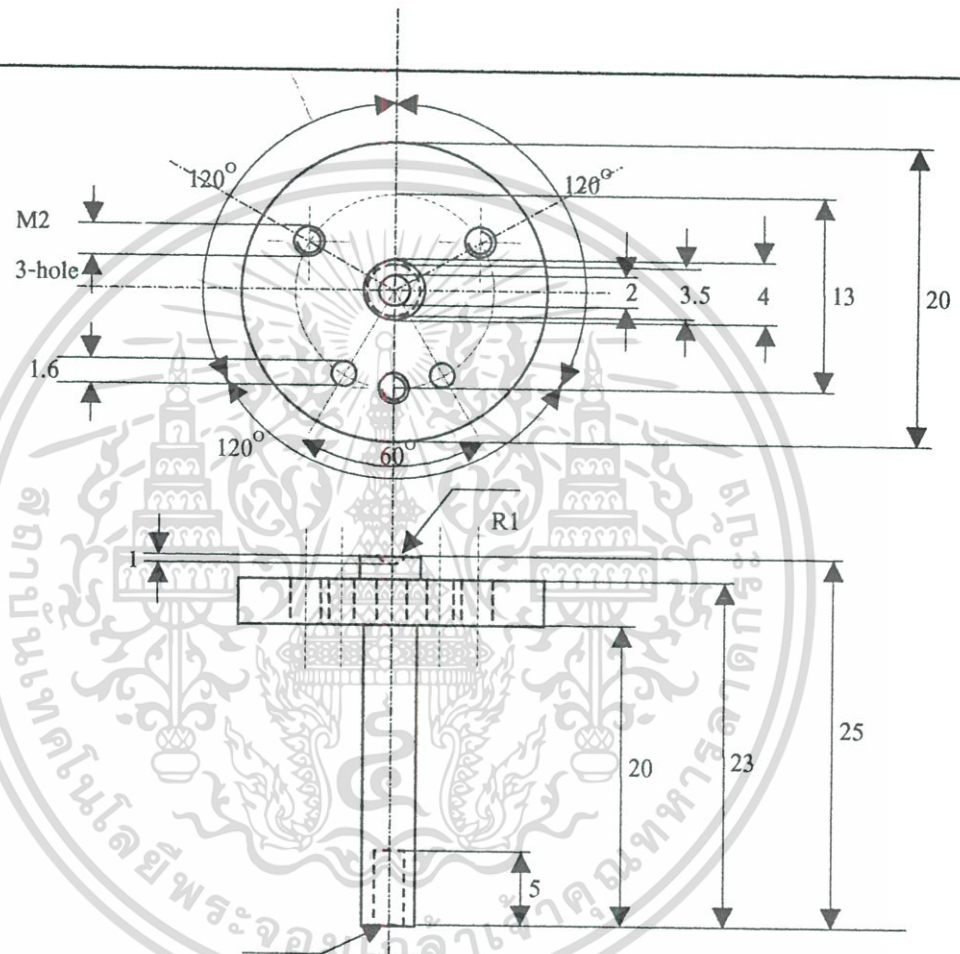
Title : ตัวยับสัญญาณ		Scale : 1:1
Document number : 1	Subtitle : ผ่าบน	
Quantity : 1		



Title : ตั๋วรับสัญญาณ		Scale : 1:1
Document number : 2	Subtitle : ฝาล่าง	
Quantity : 1		

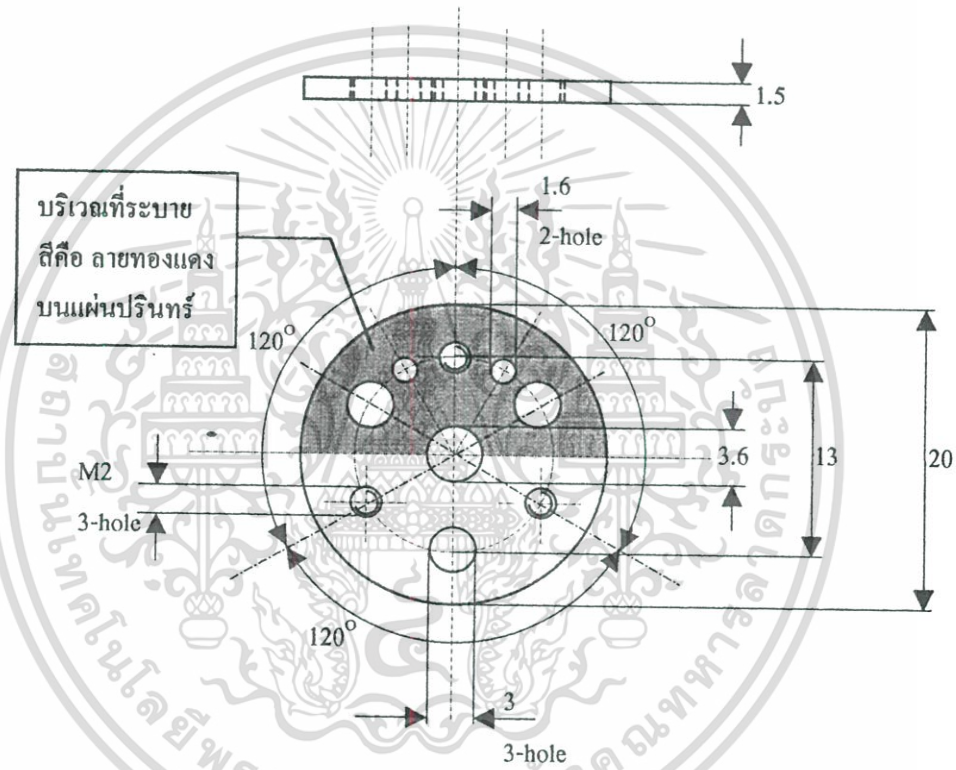


<b>Title :</b> ตัวรับสัญญาณ		<b>Scale :</b> 1:1
<b>Document number :</b> 3	<b>Subtitle :</b> ก่องกลาง	
<b>Quantity :</b> 1		

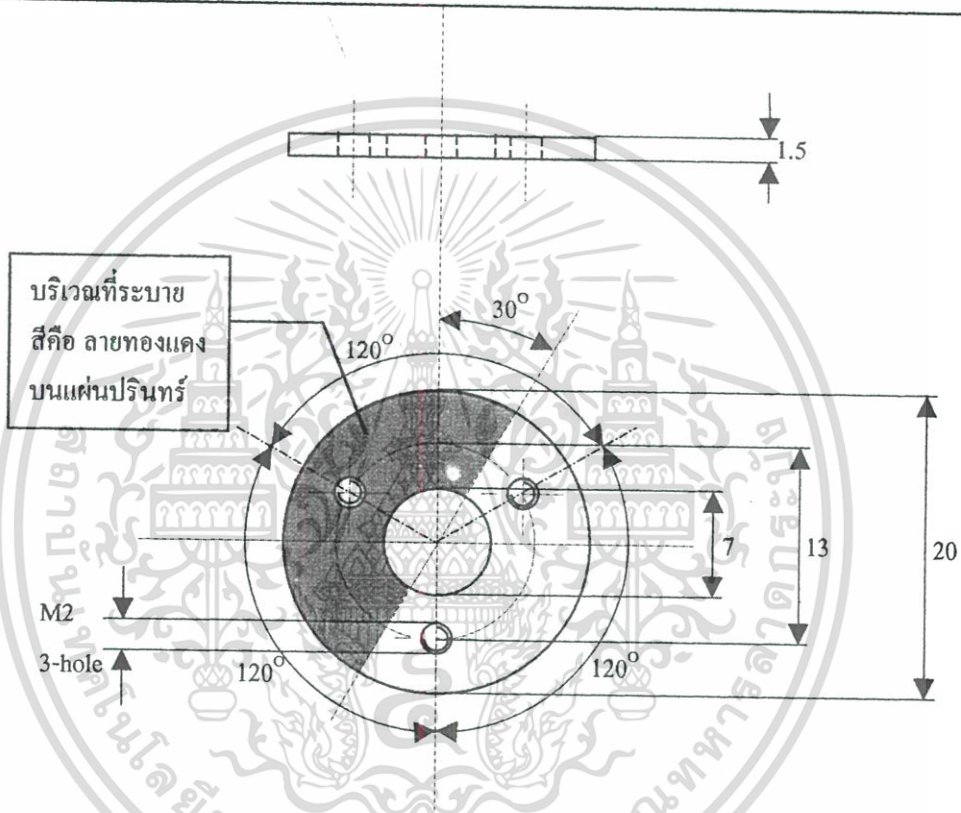


M2

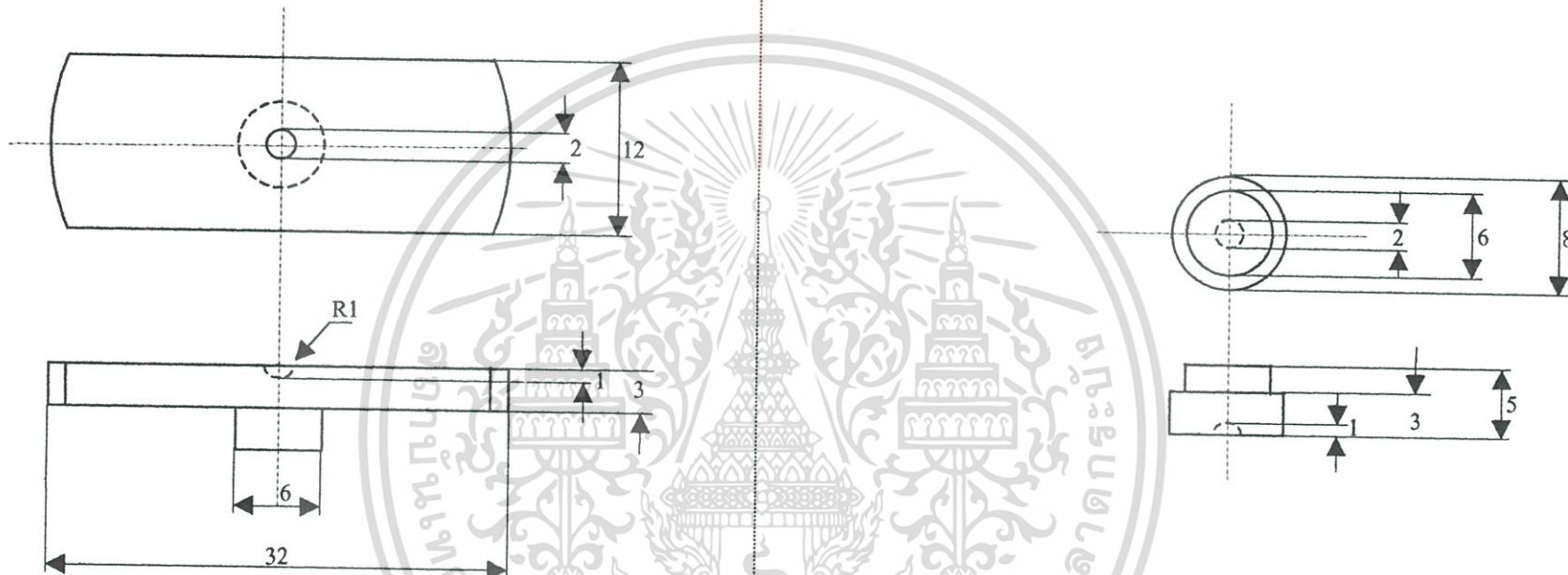
Title : ตัวรับสัญญาณ		Scale : 2:1
Document number : 4	Subtitle : แกนกลาง	
Quantity : 1		



Title : ตัวรับสัญญาณ		Scale : 2:1
Document number : 5	Subtitle : แผ่นประกอบบน	
Quantity : 1		



Title : ตัวรับสัญญาณ		Scale : 2:1
Document number : 6	Subtitle : แผ่นประกบล่าง	
Quantity : 1		



Title : ตัวรับสัญญาณ

Scale : 2:1

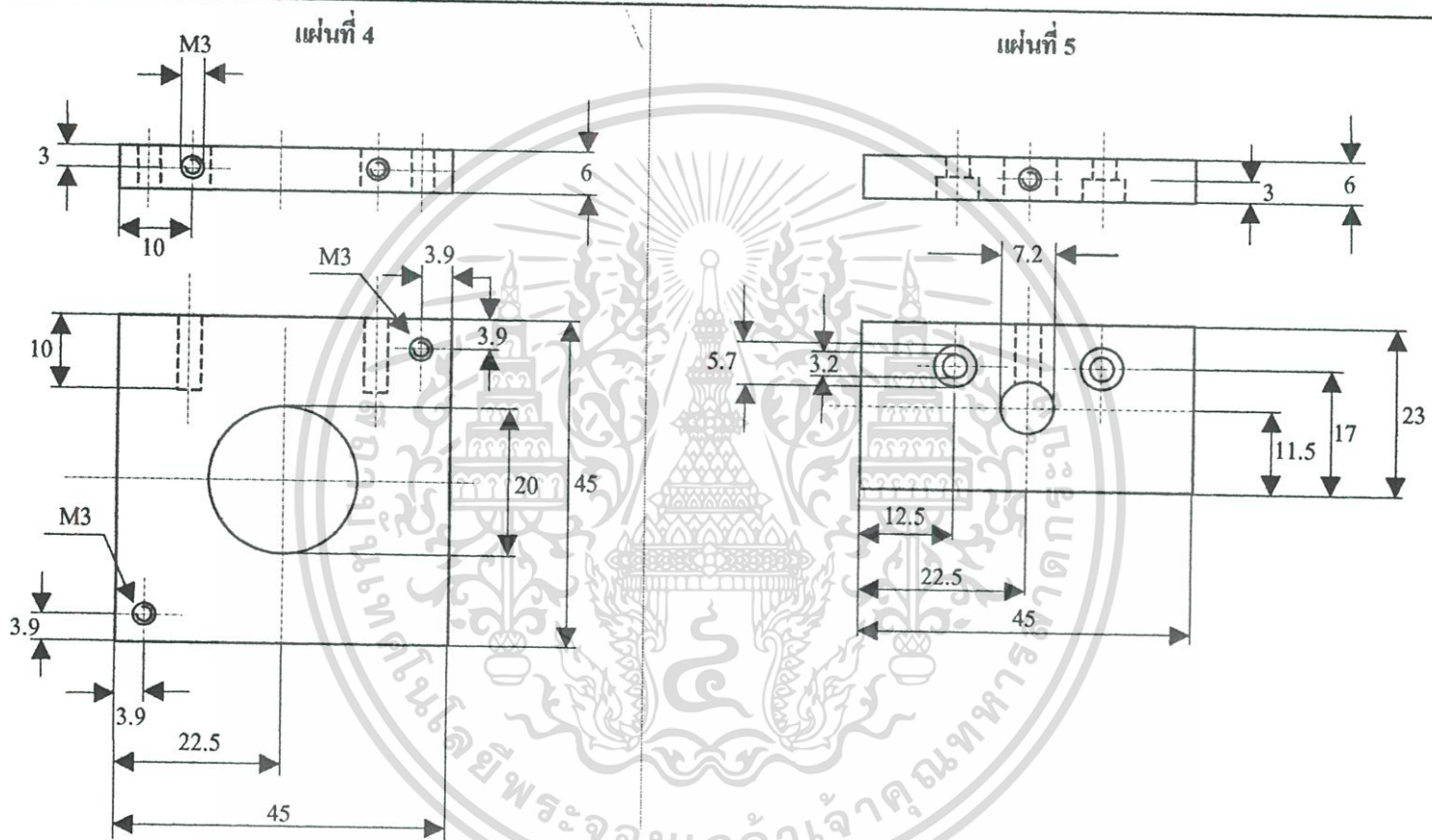
Document number : 7

Subtitle : ชุดสปริงสำหรับตั้งแรงเตะ

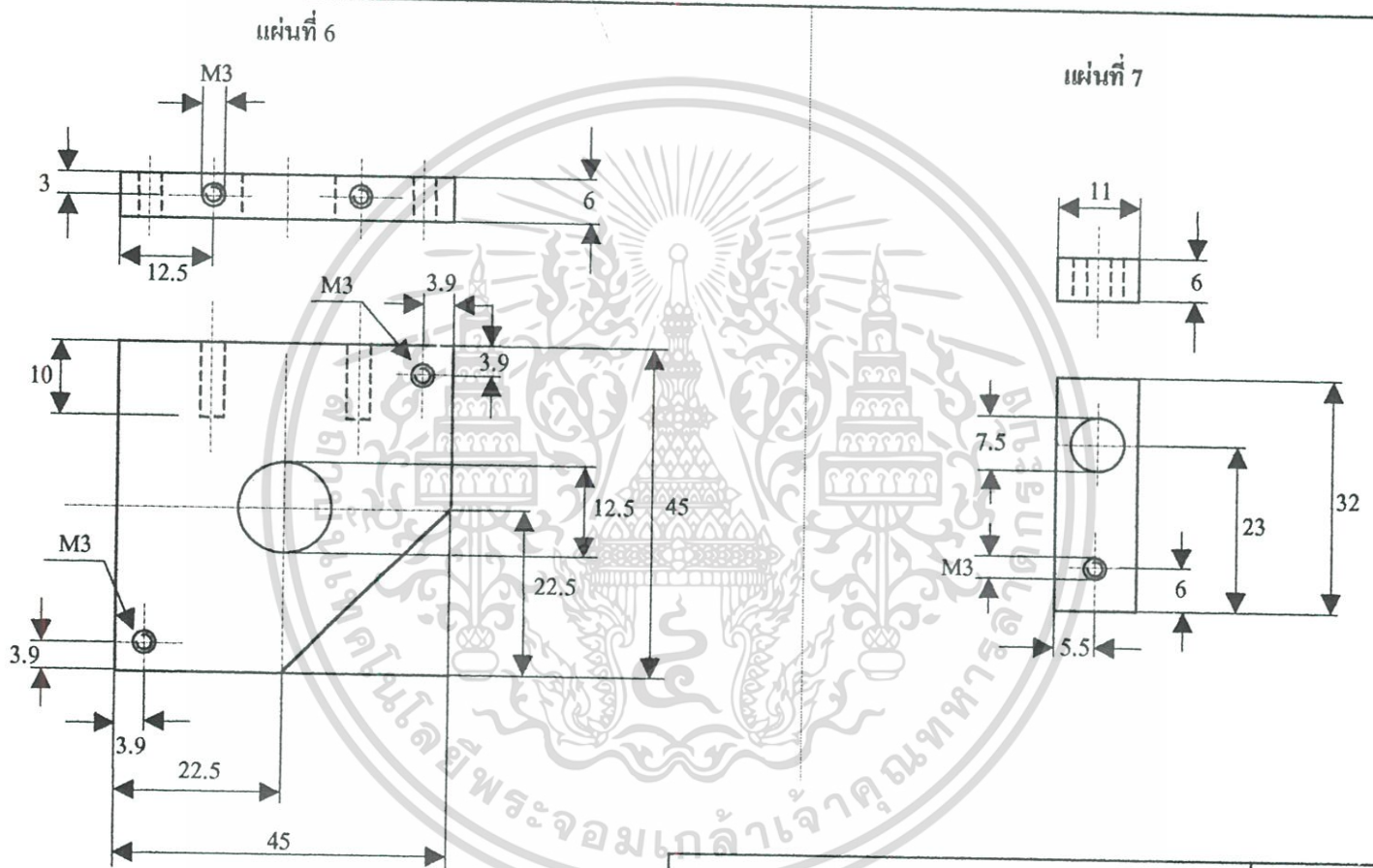
Quantity : 1



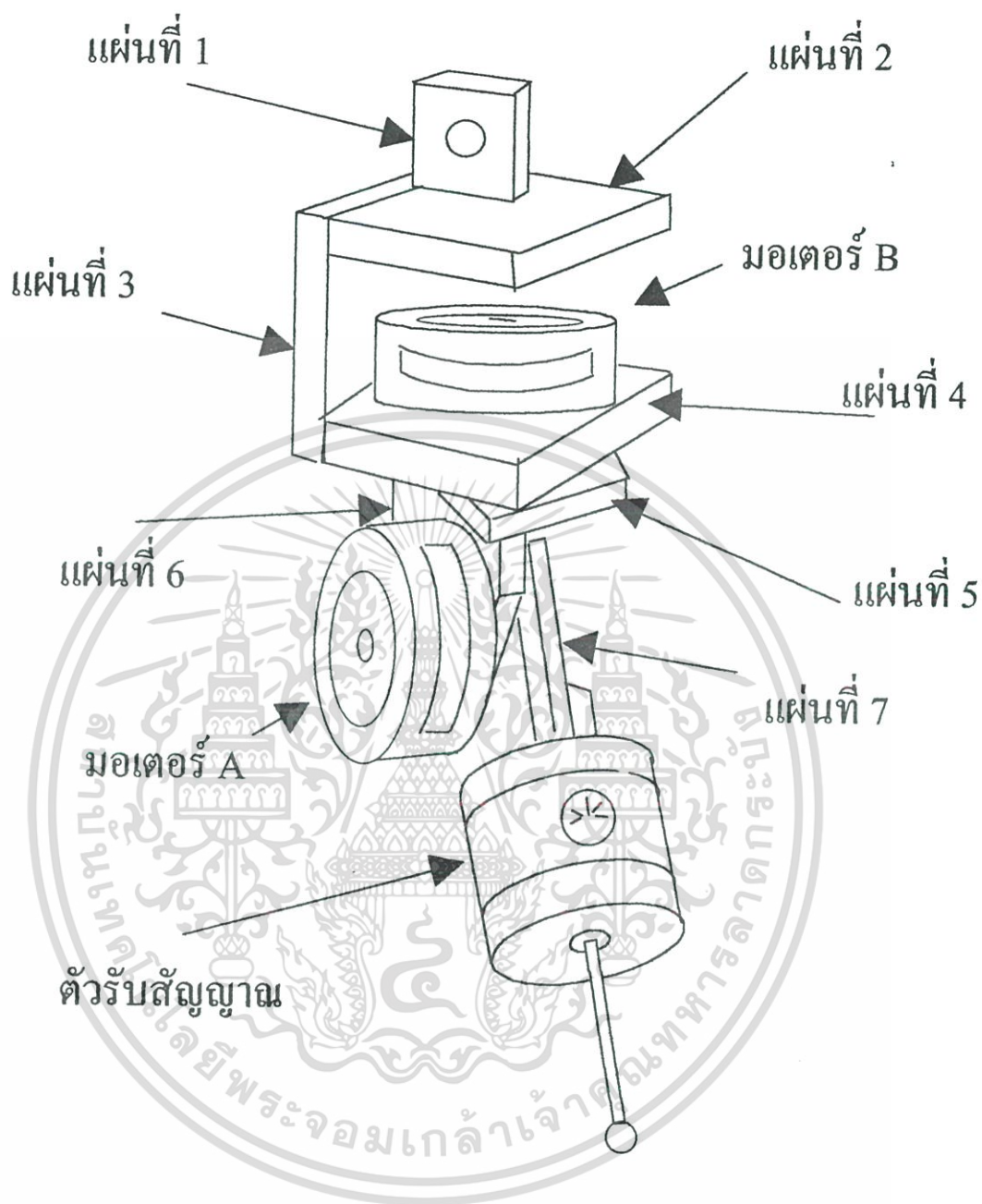




Title : ชุดจับตัวรับสัญญาณ		Scale : 1:1
Document number : 2	Subtitle : แผ่น 4, 5	
Quantity : 1		

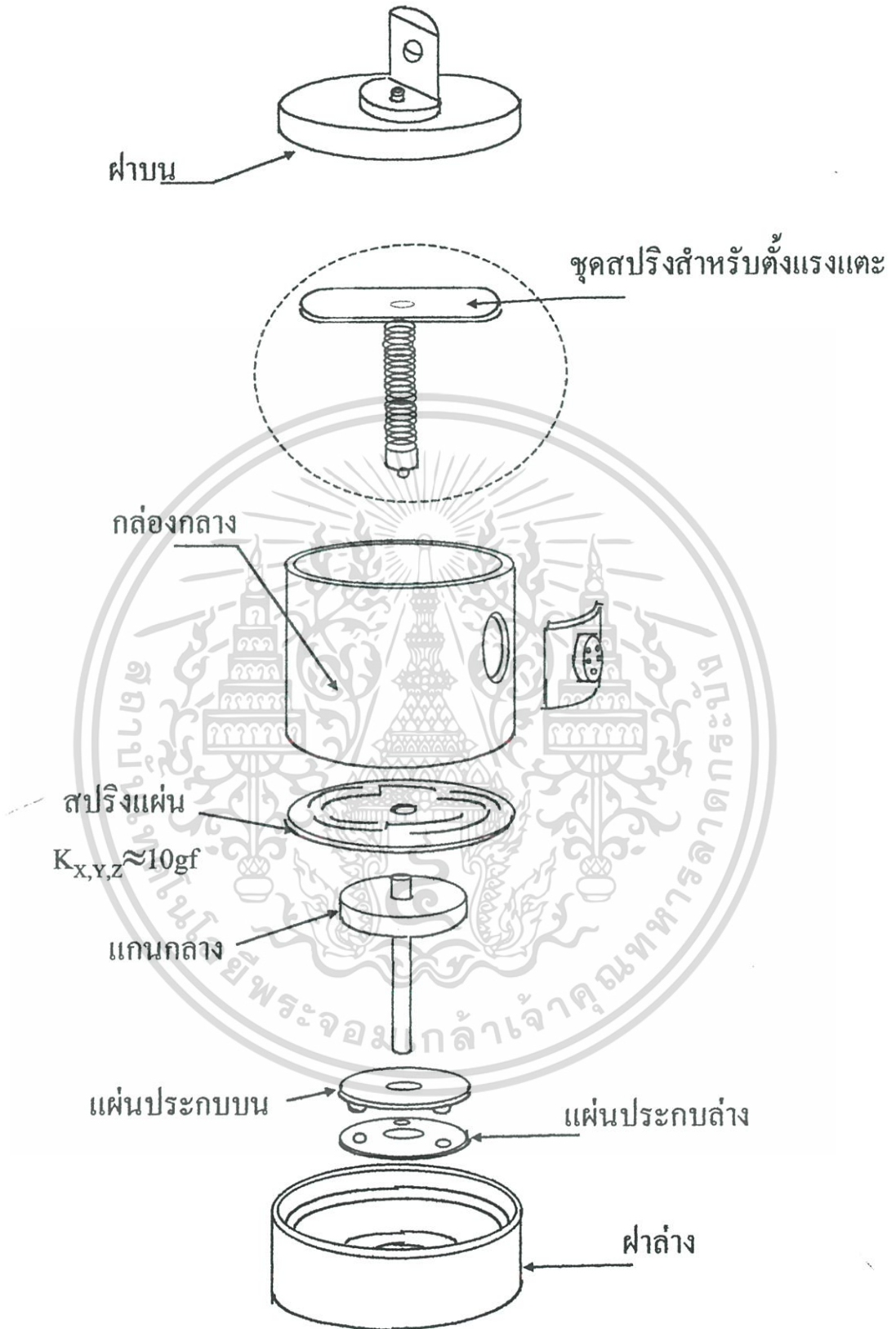


Title : ชุดจับตัวรับสัญญาณ		Scale : 1:1
Document number : 3	Subtitle : แผ่น 6, 7	
Quantity : 1		



## ภาพของส่วนประกอบชุดขับตัวรับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### ภาพประกอบของตัวรับสัญญาณ

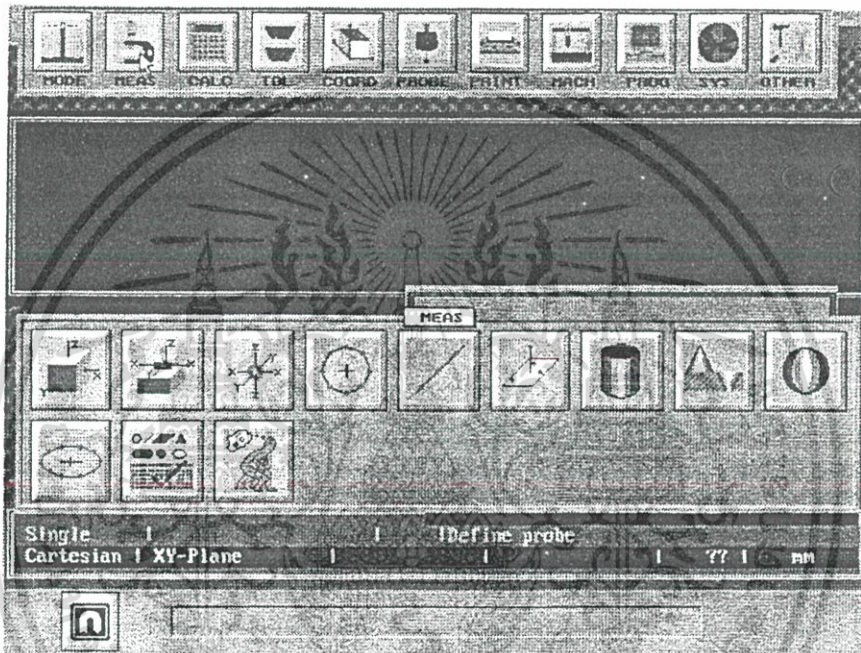
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค.

## รายละเอียดโปรแกรม Geopak

โปรแกรมนี้ใช้สำหรับการวัดชิ้นงานที่เป็นรูปทรงเรขาคณิต แบ่งออกเป็นหมวดต่างๆดังนี้

## 1 หมวดการวัด (Measurement Mode)



1.1 การวัดขอบ (SD:Side) ใช้สำหรับการวัดที่ต้องการค่าตามแนวแกน X หรือ Y หรือ Z ต้องสัมผัสอย่างน้อย 1 จุด

1.2 การวัดจุดแบบชดเชยค่ารัศมีของหัวรับสัญญาณ (PP:Point Compensate) ใช้สำหรับการวัดค่าตามแนวแกน X และ Y และ Z จุดที่แสดงค่าคือ จุดที่เส้นรอบวงของหัวรับสัญญาณสัมผัสชิ้นงาน ต้องสัมผัสอย่างน้อย 1 จุด

1.3 การวัดจุด (PT:Point) ใช้สำหรับการวัดค่าตามแนวแกน X และ Y และ Z จุดที่แสดงค่าคือ ตำแหน่งที่จุดศูนย์กลางของหัวรับสัญญาณ ต้องสัมผัสอย่างน้อย 1 จุด

1.4 การวัดวงกลม (CR:Circle) ใช้สำหรับการวัดวงกลมซึ่งจะแสดงค่าตำแหน่ง X ,Y,Z,ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ต้องสัมผัสอย่างน้อย 3 จุด ถ้าต้องการค่าความกลมด้วยต้องสัมผัส 4 จุดขึ้นไป

1.5 การวัดวงรี (EL:Ellisp) ใช้สำหรับการวัดวงรีซึ่งจะแสดงค่าตำแหน่ง X,Y,Z,ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนหลักและแกนรอง ต้องสัมผัสอย่างน้อย 5 จุด ถ้าต้องการค่าความเป็นวงรีด้วยต้องสัมผัส 6 จุดขึ้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 การวัดระนาบ (PL:Plane) ใช้สำหรับการวัดระนาบซึ่งจะแสดงค่าระยะตั้งฉากจากระนาบไปยังจุดศูนย์กลางของค่า X,Y,Z ต้องสัมผัสอย่างน้อย 3 จุด ถ้าต้องการค่าความเป็นวงรีด้วยต้องสัมผัส 4 จุดขึ้นไป

1.7 การวัดทรงกระบอก (CY:Cylinder) ใช้วัดทรงกระบอกซึ่งจะแสดงค่าตำแหน่ง X,Y,Z, ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ต้องสัมผัสอย่างน้อย 5 จุด ถ้าต้องการค่าความเป็นทรงกระบอกด้วยต้องสัมผัส 6 จุดขึ้นไป

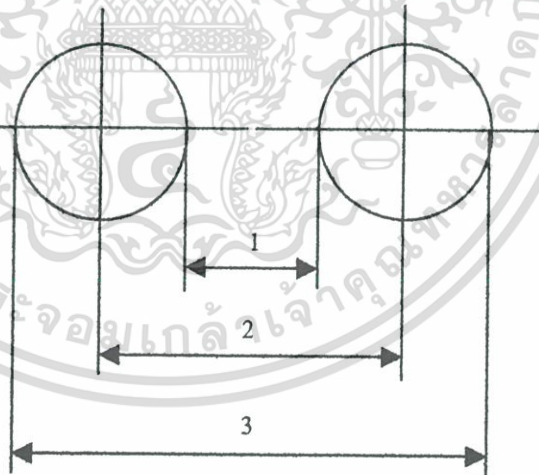
1.8 การวัดทรงกรวย (CO:Cone) ใช้วัดทรงกรวยซึ่งจะแสดงค่าตำแหน่ง X,Y,ความสูงจากยอดถึงฐาน,มุมที่จุดยอดของกรวย ต้องสัมผัสอย่างน้อย 5 จุด ถ้าต้องการค่าความเป็นทรงกรวยด้วยต้องสัมผัส 6 จุดขึ้นไป

1.9 การวัดทรงกลม (SP:Sphere) ใช้วัดทรงกลมซึ่งจะแสดงค่าตำแหน่ง X,Y,Z,ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ต้องสัมผัสอย่างน้อย 4 จุด ถ้าต้องการค่าความกลมด้วยต้องสัมผัส 5 จุดขึ้นไป

1.10 การอินพุตค่าทางคีย์บอร์ด (KI:Key in element) คือการป้อนค่าเข้าไปเอง เช่นถ้าจะป้อนค่าจุด จะต้องกด KI แล้วตามด้วย PT แล้วจึงใส่ค่าลำดับที่ต้องการ

## 2 หมวดการคำนวณ (Calculation Mode)

2.1 การหาระยะ (DI:Distance) ใช้สำหรับการคำนวณระยะทางสามารถคำนวณได้ 3 แบบคือ



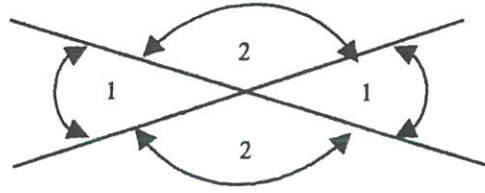
1 แบบลบรัศมี (Subtract Radius)

2 แบบคิดที่จุดศูนย์กลาง (Without Compensation)

3 แบบบวกรัศมี (Add Radius)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การหามุม (AN:Angle) ใช้สำหรับการคำนวณหา มุม ให้เลือก 2 มุมคือ

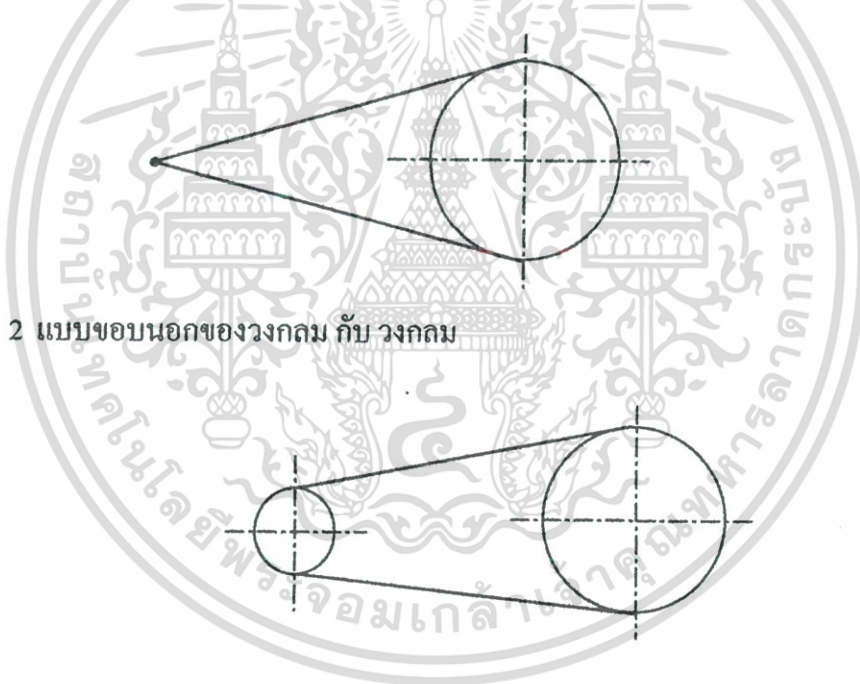


2.3 การหาค่าความสมมาตร (SY:Symmetry) ใช้สำหรับการคำนวณหา จุด,เส้น,ระนาบ ที่อยู่กึ่งกลาง

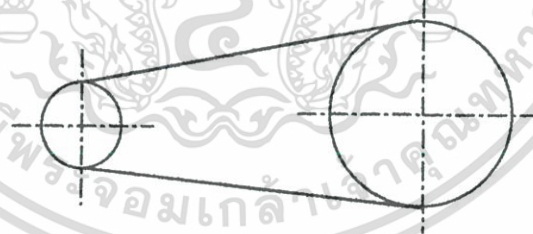
2.4 การตัดกัน (IN:Intersection) ใช้สำหรับการหาการตัดกันของ เส้น, วงกลม, ระนาบ

2.5 การหาเส้นสัมผัสวงกลม (TA:Tangent) มีอยู่ 3 แบบคือ

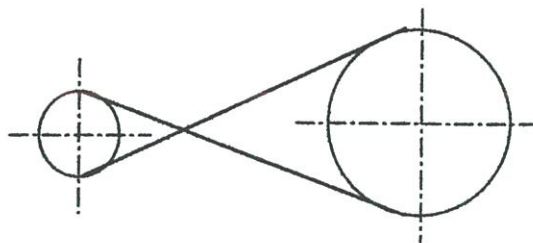
1 เส้นสัมผัสแบบ จุด กับ วงกลม



2 แบบขอบนอกของวงกลม กับ วงกลม

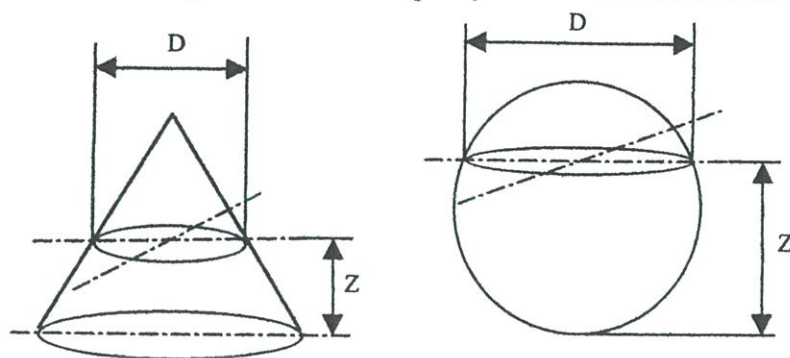


3 แบบขอบในของวงกลม กับ วงกลม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

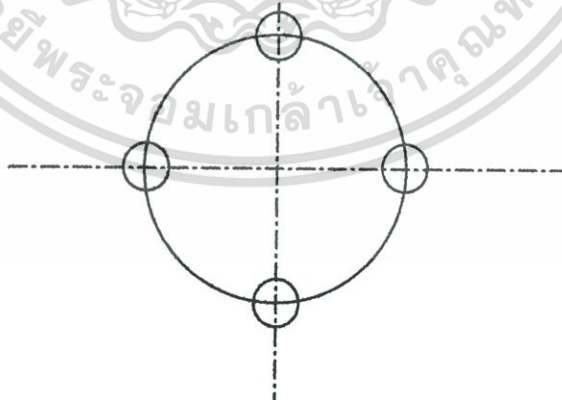
## 2.6 การคำนวณหาเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงใดๆ ของทรงกรวยและทรงกลม



## 2.7 การหาค่าจุดที่มากและน้อยที่สุดของ วงกลม, ระนาบ, เส้นตรง



## 2.8 การต่อให้เป็นรูปทรงเรขาคณิต เช่น ต่อจุดเป็นเส้นหรือวงกลม



## 2.9 การป้อนสูตรในการคำนวณ ใช้สำหรับเป็นเครื่องคิดเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3 หมวดพิกัดความเื้อ

- 1 พิกัดความเื้อของมุม
- 2 พิกัดความเื้อของระยะ
- 3 พิกัดความเื้อของ เส้นผ่าศูนย์กลาง, รัศมี, ความกลม, ความเรียบ, ความตรง,
- 4 พิกัดความเื้อของตำแหน่ง
- 5 พิกัดความเื้อของแนวแกน
- 6 พิกัดความเื้อของทิศทาง

- 1 ความตั้งฉาก
- 2 ความขนาน
- 3 ความเป็นเชิงมุม
- 4 แกนร่วมประสาน
- 5 ความสมมาตร
- 7 พิกัดความเื้อของค่าความส่าย
- 8 พิกัดความเื้อของผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องคิดเลข

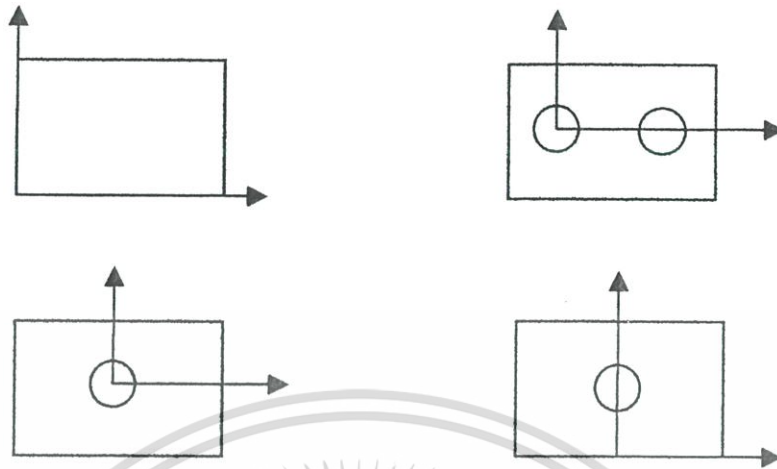
### 4 หมวดคู่ลำดับ

#### 4.1 ระบบคู่ลำดับ

- 1 การปรับระนาบให้เป็นระนาบอ้างอิง
- 2 การสร้างจุดให้เป็นจุดอ้างอิง
- 3 การสร้างแกนอ้างอิง
- 4 การปรับระยะเียงของแกนอ้างอิง(Offset alignment for axis)
- 5 การปรับระยะเียงของระนาบอ้างอิง(Offset alignment for plane)
- 6 การหมุนแกนอ้างอิง
- 7 การเก็บคู่ลำดับลงในฮาร์ดดิส
- 8 การเรียกคู่ลำดับที่เก็บไว้ออกมา

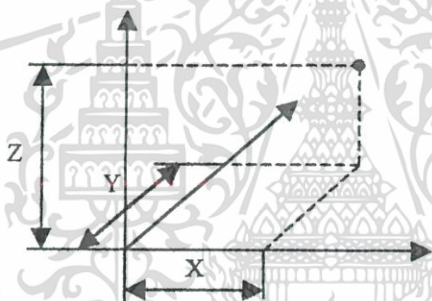
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การสร้างคู่ลำดับแบบมาตรฐาน 4 แบบ

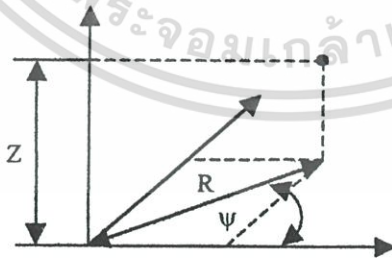


4.3 รูปแบบของระบบคู่ลำดับ

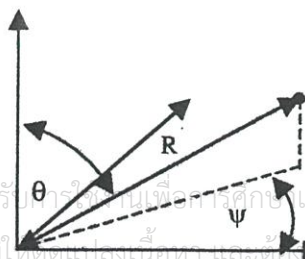
1 แบบคาร์ทีเซียน (Cartesian)



2 แบบ 2D-Polar

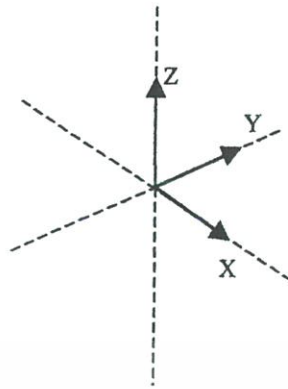


3 แบบ 3D-Polar



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่ลงเนื้อหา และทำซ้ำอย่างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การคู่กล้าดับของชิ้นงานเทียบกับแกนของเครื่องวัด 3 แกน



#### 5 หมวดเกี่ยวกับโปรแกรมวัดชิ้นงาน

- 1 การจัดการ โปรแกรม เช่น การลบ, การคัดลอก, การเปลี่ยนชื่อ
- 2 การเขียนโปรแกรม
- 3 การเรียกโปรแกรมออกมาใช้
- 4 การแก้ไขโปรแกรม

#### 6 หมวดเกี่ยวกับหัวรับสัญญาณ

- 1 การกำหนดขนาดหัวรับสัญญาณ
- 2 การดูขนาดและทิศทางของหัวรับสัญญาณ

#### 7 หมวดเกี่ยวกับเครื่องวัด 3 แกน

- 1 การดูตำแหน่งของเครื่อง
- 2 การวัดแบบอัตโนมัติ
- 3 การกำหนดตำแหน่งให้เครื่องเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติ

#### 8 หมวดเกี่ยวกับระบบ

- 1 การเปลี่ยนหน่วย
- 2 การดูเวลา
- 3 การเลือกปริ้นเตอร์
- 4 การเลือกPath สำหรับการเก็บข้อมูล

#### 9 หมวดอื่นๆ

- 1 การดูรูป

เอกสารนี้เป็น 2. การคำนวณค่าทางสถิติอย่างง่าย ๆ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง.

## ตัวรับสัญญาณต้นแบบ

ตัวรับสัญญาณต้นแบบที่ได้ทำการศึกษาคือตัวรับสัญญาณรุ่น MRP-1 ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

**Touch signal probe: MRP-1**

The MRP-1 is a small sized touch signal probe which is used on the C series CMMs and GEOBOY. The MRP-1 probe has a  $\varnothing 14\text{mm}$  shank with a universal holder.

**Specifications: MRP-1**

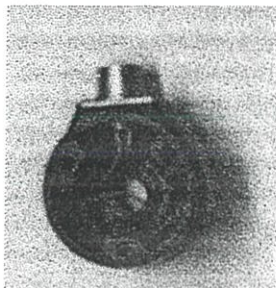
Model	MRP-1
Repeatability	1.2 $\mu\text{m}$
Measuring direction	Omni-directional ( $\pm X$ , $\pm Y$ and $+Z$ )
Measuring force	0.4N (horizontal)
	1.2N (vertical)
Stylus displacement limit	10mm (horizontal), 5mm (vertical)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนประกอบต่างๆมีดังนี้คือ

1 ตัวกล่องรับสัญญาณ



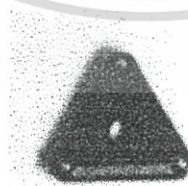
2 ชุดสปริงในการปรับแรงเคาะ



3 สปริงแผ่น



4 แผ่นรับสัญญาณด้านหน้าและด้านหลัง

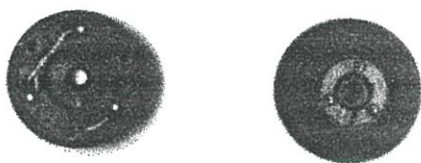


5 แกนกลาง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6 ฝาอ่าง



## 7 ก้านยึดตัวรับสัญญาณ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นายศราวิน ทัททิกรณ์ เกิดเมื่อวันที่ 1 สิงหาคม 2513 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษา  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เครื่องกล) จากมหาวิทยาลัยรังสิต ปีการศึกษา 2536  
ปี 2537 เข้าทำงานที่บริษัทโรบอทิกส์ ปัจจุบันเป็นวิศวกรแผนกเครื่องวัดละเอียด 3 แกน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้