

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

เครื่องวัดพิกัด

Coordinate Measuring Machine



นางสาว วีรวรรณ เอ่องสุภาภรณ์
Miss Veerawan Eungsupaporn

นาย เอกถักษ์ เตตยานนท์
Mr.Eakalux Tetayanont

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่...
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....
วันที่.....
49840
b.....
i.....

หัวข้อปริญญานิพนธ์

การสร้างเครื่องวัดพิกัด

Coordinate Measuring Machine

นักศึกษา

นางสาว วีรวรรณ เอื้องสุภาภรณ์

รหัสประจำตัว

42010630

นักศึกษา

นาย เอกลักษณ์ เตตะยานนท์

รหัสประจำตัว

42010701

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหการ

ปีการศึกษา

2545

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การสร้างเครื่องวัดพิกัด
นักศึกษา	นางสาว วีรวรรณ เอื้องสุภารณ์ นาย เอกลักษณ์ เตชะยานนท์
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2545
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ผศ. ดร. สรรพสิทธิ์ ถิ่นนรรัตน์ อาจารย์ พลชัย โขติปราชญกุล

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์หลักของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้คือการศึกษาการออกแบบและการพัฒนาเครื่องวัดพิกัด (Coordinate Measuring Machine) ซึ่งควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ โดยส่วนประกอบหลักของเครื่องวัดพิกัดนี้ได้แก่ หัวรับสัญญาณแบบสัมผัสและสัญญาณที่ได้รับจากหัวรับสัญญาณนั้นจะถูกนำเข้าสู่ประมวลผลโดยคอมพิวเตอร์ โดยข้อมูลที่ได้จากการวัดคือค่าพิกัดจะถูกนำไปคำนวณค่าทางเรขาคณิตที่ต้องการ เช่น ค่าระยะทาง, ค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง และค่ารัศมี

สำหรับ โครงการนี้ได้ทำการศึกษาและการสร้างเครื่องวัดพิกัดโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการควบคุมการทำงาน และวัดพิกัดของรูปทรงเรขาคณิต เช่น สี่เหลี่ยม วงกลม ฯลฯ จากนั้นจะทำการประมวลผลออกมาเป็นค่าจุดพิกัด (Point), ค่าจุดศูนย์กลางของวงกลม (Circle), ค่าสมการระนาบ (Plane), ค่าสมการเส้นตรง (Least Square Line) และนำผลของค่าที่ได้มาแสดงเป็นรูปร่างของชิ้นงานออกทางหน้าจอคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Coordinate Measuring Machine
Student	Miss Veerawan Eungsupaporn Mr. Eakalux Tetayanont
Degree	Bachelor of Industrial Engineering
Academic year	2002
Advisor	Asst. Prof. Dr. Sunpasit Limnararat Mr. Pholchai Chotiprayanakul



ABSTRACT

The main objective of this thesis is to design and development of the coordinate measuring machine (CMM) which is operated by microcomputer. The main components of this machine consists of a contact probe which is used to receive a signal in the coordinate form. This signal will be calculated by a computer program in order to determine the geometrical results such as distance, diameter and radius.

The computer program, developed in this thesis, is used to control and measure the form and size of the workpiece in term of distance, least square line, plane, diameter of circle and then will be used to establish the shape of the workpiece on the screen monitor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง เครื่องวัดพิคัด 3 มิติฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้จัดทำขอขอบพระคุณบุคคลเหล่านี้เป็นอย่างสูง อาจารย์ที่ปรึกษา อ.พลชัย โชติปราชญกุล สำหรับการให้แนวคิดในการดำเนินงาน การแก้ปัญหา ความเชื่อมั่นในตนเอง ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะเป็นประโยชน์กับชีวิตการทำงานในอนาคตต่อไป

ผศ.ดร.สรรพสิทธิ์ ลิ้มบรรณรัตน์ สำหรับกำลังใจ ความห่วงใย ความกังวล ที่มีให้มาตลอดตั้งแต่วันแรกจนถึงวันสุดท้ายของโครงการนี้

อ.อุดม จันทร์จรัสสุข สำหรับความช่วยเหลือ และแนะนำด้านวงจร ที่มีให้แม้จะเวลาใดก็ตาม

อ.ประภาส อุกคกิมพันธ์ อ.เอกพจน์ ตันตราภิวัดน์ สำหรับคำแนะนำต่างๆเกี่ยวกับโครงการนี้

นายภัทรชัย วิเศษบรรจง สำหรับคำแนะนำทางด้านซอฟต์แวร์

คุณพ่อ คุณแม่ สำหรับกำลังใจที่สำคัญที่สุด

ขอขอบคุณห้องภาคที่มีทั้งพี่ เพื่อน น้องและความอบอุ่น

ขอบคุณผู้โปรเจกต์ที่เคยร่วมท้อแท้ ผิดหวัง สมหวัง ผ่านอุปสรรคต่างๆกันจนมาถึงวันนี้ได้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระ

จอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ทำให้คณะผู้จัดทำมาจนถึงวันนี้

วีรวรรณ เอื้องสุภาภรณ์

เอกลักษณ์ เตะตะยานนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VI
สารบัญตาราง	VIII

บทที่ 1

บทนำ

1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการ	1
1.2	ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3	ขอบเขตการศึกษา	1
1.4	ประโยชน์ที่จะได้รับ	1
1.5	ข้อได้เปรียบของเครื่องมือวัดพิทัก	2

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1	เครื่องมือวัดพิทัก	3
2.2	สเตปป์มอเตอร์	12
2.3	พอร์ตขนาน	22
2.4	การอินเตอร์เฟสกับคอมพิวเตอร์	25
2.5	ทฤษฎีที่ใช้ในการวัดพิทัก	27
2.6	การหาค่า Repeatability	27
2.7	การหาตำแหน่งศูนย์ให้กับชิ้นงาน	27
2.8	การคำนวณ Least-squares line	28
2.9	การคำนวณ Least-squares plane	29

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1	ลำดับขั้นตอนในการทำงาน	31
3.2	การวางแผนโครงการ	31
3.3	การศึกษาข้อมูล	32
3.4	การออกแบบและดำเนินงาน	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5	วงจรับัสเตปปีงมอเตอร์	หน้า
		37
บทที่ 4 ผลการทดลอง		
4.1	ผลการทดลองด้านฮาร์ดแวร์	38
4.2	ผลการทดลองด้านโปรแกรม	39
4.3	ผลการคำนวณจากการทดลอง	44
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง		
5.1	สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน	47
5.2	สาเหตุและแนวทางในการแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้น	47
5.3	แนวทางในการพัฒนาโครงการ	47

บรรณานุกรม

ภาคผนวก รายละเอียดโปรแกรม Geopak



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	ส่วนประกอบของเครื่องวัดสามแกน	3
2.2	ส่วนประกอบพื้นฐานของ โครงสร้างเครื่องมือวัดพิกัด	4
2.3	Manual Floating CMM	5
2.4	CNC CMM	6
2.5	Organization of the Measuring System	7
2.6	ตัวรับสัญญาณ TP1	7
2.7	ตัวรับสัญญาณ TP2	8
2.8	Scanning Probe System	8
2.9	Auto-probe-change system	9
2.10	CMM แบบแกนทีเลเวอร์	10
2.11	CMM แบบบริดจ์	10
2.12	CMM แบบคอลัมน์	11
2.13	CMM แบบฮอติซอนทอล	11
2.14	CMM แบบแกนทรี	12
2.15	ไดอะแกรมแสดงการทำงานของสเตปป์มอเตอร์	12
2.16	เส้นทางเดินของสนามแม่เหล็กใน โรเตอร์และสเตเตอร์	13
2.17	โครงสร้างของ Permanent Magnet stepping motor	13
2.18	โครงสร้างของ Single stack variable reluctance stepping motor	14
2.19	ลักษณะการทำงานของ Single stack variable reluctance stepping motor	15
2.20	ลักษณะการทำงานของ Multistack variable reluctance stepping motor	16
2.21	โครงสร้างภายในของ Hybrid stepping motor	17
2.22	เส้นทางเดินของสนามแม่เหล็กใน Hybrid stepping motor	18
2.23	ระบบการขับเคลื่อนให้สเตปป์มอเตอร์	20
2.24	การกระตุ้นสเตปป์มอเตอร์ 4 เฟสแบบ 2 ทิศทาง	21
2.25	วงจรการขับเคลื่อนสเตปป์มอเตอร์	21
2.26	ขั้นตอนการหาค่า Repeatability	27
3.1	การออกแบบการทำงานในส่วนฮาร์ดแวร์	33
3.2	แสดงส่วนประกอบเครื่องในแนวแกน x และแกน y	34
3.3	ส่วน โครงแกน z	35
3.4	หัวรับสัญญาณ	35
3.5	Flow chart แสดงขั้นตอนการทำงานของ โปรแกรม	36
3.6	วงจรขับเคลื่อนสเตปป์มอเตอร์	37

เอกสารนี้เป็นเอกสาร โครงสร้างในแกน z พร้อมหัวรับสัญญาณ ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่		หน้า
4.2	รูปแบบฟอร์มหน้าจอของโปรแกรมในการวัดพิกัด	39
4.3	รูปแบบของการเลือกกระดานที่ต้องการ	40
4.4	กำหนดรูปแบบของชิ้นงานที่ต้องการ	40
4.5	การขับเคลื่อน โต๊ะวางชิ้นงานและหัวรับสัญญาณ	41
4.6	การวัดพิกัดตำแหน่งที่ 1	41
4.7	การวัดพิกัดตำแหน่งที่ 2	42
4.8	การวัดพิกัดตำแหน่งที่ 3 แสดงรูปร่างและสมการเส้นตรง	42
4.9	รูปแบบของการเลือกกระดานที่ต้องการ	43
4.10	การขับเคลื่อน โต๊ะวางชิ้นงานและหัวรับสัญญาณ	43
4.11	การวัดพิกัดตำแหน่งที่ 3 แสดงรูปร่างและสมการวงกลม	44



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงการกระตุ้นแบบ 1 เฟส	19
2.2	แสดงการกระตุ้นแบบ 2 เฟส	19
2.3	แสดงการกระตุ้นแบบ Half step	20
2.4	แสดงแอดเดรสของพอร์ตขนาน	22
2.5	แสดงสัญญาณทั้งหมดที่อยู่บนพอร์ตขนาน	24
3.1	อุปกรณ์โครงสร้างหลัก	35
4.1	ตารางแสดงผลการทดลอง	45
4.2	ผลการทดลองหาค่าความผิดพลาดแต่ละครั้ง	45
4.3	แสดงการหาค่า Repeatability	46



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาความสำคัญของโครงการ

เครื่องมือวัดเป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญและจำเป็นมากสำหรับตรวจสอบเพื่อให้ได้คุณภาพที่ดีที่สุด นอกจากนี้ เครื่องมือวัดที่มีความละเอียดมากกว่าเครื่องวัดชนิดอื่นๆ และมีความสะดวกในการใช้งานกับผู้ที่ทำการวัด รวมทั้งลดข้อผิดพลาดที่อาจเกิดจากตัวผู้วัดเอง หรือค่าความผิดพลาดที่เกิดจากเครื่องมือที่ใช้ในการวัดอีกด้วย ในปัจจุบันเครื่องมือวัดที่มีความสำคัญและใช้กันอย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรม โดยเฉพาะวงการอุตสาหกรรมรถยนต์ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาและพัฒนาให้เครื่องมือวัดมีความถูกต้องแม่นยำตามความต้องการของผู้ใช้งานว่าต้องการวัดให้มีความละเอียดถูกต้องเพียงใด

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1) เพื่อทำการศึกษาโปรแกรม Visual Basic และนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่อง
- 2) เพื่อทำการออกแบบและสร้างตัวเครื่องวัดพิกัด รวมทั้งหัวรับสัญญาณ (Probe)
- 3) เพื่อทำการศึกษาในด้านการวัดและเครื่องมือวัดทางอุตสาหกรรม โดยเน้นในด้านความถูกต้องและแม่นยำในการวัด
- 4) เพื่อออกแบบและพัฒนาโปรแกรมในการนำค่าพิกัดไปคำนวณทางเรขาคณิต

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1) ออกแบบและทำการสร้างเครื่องวัดพิกัดและหัวรับสัญญาณที่สามารถใช้วัดชิ้นงานขนาดความกว้าง ความยาวและความสูงไม่เกิน 60 มิลลิเมตร
- 2) ควบคุมและสั่งงานทางคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม Visual Basic
- 3) เขียนโปรแกรมคำนวณค่าพิกัดที่ได้จากหัวรับสัญญาณออกเป็นค่าทางเรขาคณิตที่ต้องการ อาทิเช่น ค่าความยาวเส้นผ่านศูนย์กลาง, ความกว้างของชิ้นงาน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เพื่อใช้ทักษะและทฤษฎีทางด้านวิศวกรรมที่ได้ศึกษามาใช้ให้เป็นประโยชน์
- 2) เพื่อสร้างทักษะและประสบการณ์ในงานทางด้านวิศวกรรม
- 3) เพื่อสร้างทักษะการทำงานร่วมกันเป็นหมู่คณะ
- 4) เพื่อให้รู้จักการวางแผนงานและการดำเนินงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ข้อได้เปรียบของเครื่องมือวัดพิกัด

ข้อได้เปรียบของเครื่องมือวัดพิกัด มีดังนี้คือ

- การเพิ่มความสามารถในการผลิต
- เพิ่มความแม่นยำ
- ลดความผิดพลาดจากการทำงานของคน
- เพิ่มความยืดหยุ่นในการทำงาน

1.5.1 การเพิ่มความสามารถในการผลิต

การเพิ่มความสามารถในการผลิตสามารถพิจารณาได้จากความสามารถของเครื่องมือวัดพิกัด โดยพิจารณาได้จากเวลาในการทำงานที่น้อยกว่าการทำงานของคน โดยสามารถลดเวลาที่ใช้ในการตั้งเครื่อง และการตั้งจุดอ้างอิง

1.5.2 เพิ่มความแม่นยำ

ทำให้มีความแม่นยำมากขึ้นเนื่องจากการใช้เครื่องมือวัดพิกัด สามารถลดโอกาสการเกิดการสะสมของความผิดพลาดจากการวัดและการปรับตั้งเครื่อง โดยจะมีการทำเพียงครั้งเดียว

1.5.3 ลดความผิดพลาดจากการทำงานของคน

ใช้ระบบดิจิทัลในการอ่านค่า และเป็นการกำจัดความผิดพลาดที่เกิดจากการอ่านค่าจากการวัดโดยใช้มือ ได้แก่การใช้เวอร์เนีย เป็นต้น

การบันทึกข้อมูล การวิเคราะห์ การหาค่า ทำโดยเครื่องจักรเพื่อเป็นการป้องกันการเกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการทำงานของเครื่อง เครื่องมือวัดพิกัด จะมีความเที่ยงตรงมากในการทำงาน เมื่อเทียบกับการทำงานแบบการทำงานด้วยคน

เครื่องมือวัดพิกัดเป็นเครื่องจักรที่ใช้ในการวัดขนาดและ ตำแหน่ง เป็นเครื่องมือวัดที่มีขอบเขตความสามารถในการวัดที่ดี และ เป็นเครื่องมือวัดที่มีความยืดหยุ่นที่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

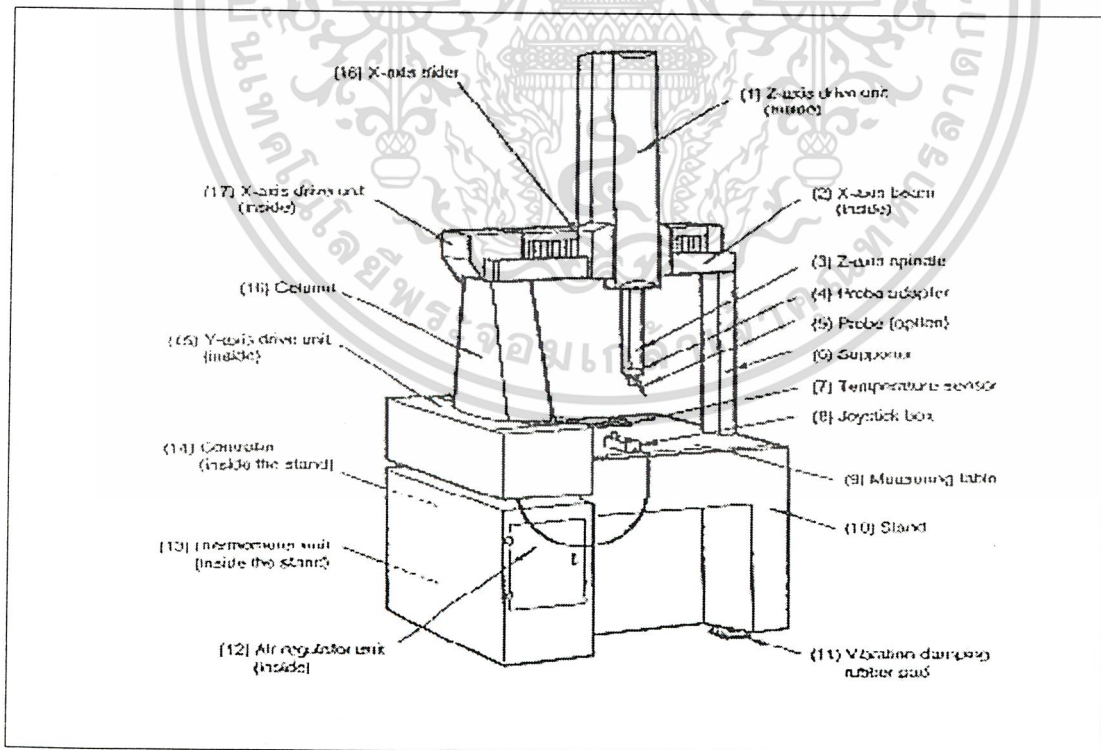
หลักการและทฤษฎี

2.1 เครื่องมือวัดพิกัด (Coordinate Measuring Machine)

เป็นเครื่องมือที่นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น โรงงานผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ หรือโรงงานผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งเป็นโรงงานที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำในการผลิตสูง เครื่องวัด 3 แกนจะใช้งานตรวจสอบคุณภาพ (Quality Control) คือจะทำหน้าที่ตรวจวัดขนาดของชิ้นงานที่ทำการผลิตว่าได้ขนาดถูกต้องตามที่ผู้ออกแบบต้องการหรือไม่มีหน้าที่คล้ายกับเวอร์เนียหรือไมโครมิเตอร์ แต่มีข้อได้เปรียบคือมีความละเอียดมากกว่า และสามารถวัดชิ้นงานที่มีรูปร่างสลับซับซ้อนได้ดีกว่า รวมทั้งสามารถหาค่าเปรียบเทียบของพิสัยความเผื่อได้ เช่น ค่าความร่วมศูนย์, ค่าความตั้งฉาก, ค่าความขนาน เป็นต้น

เครื่องวัด 3 แกน สามารถเคลื่อนที่ได้ 3 มิติ คือ ด้านแกน X, Y และ Z ตามกฎมือขวา ความสามารถเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับขนาดของเครื่อง ซึ่งสามารถวัดขนาดชิ้นงานเล็กๆ เช่น ด้ายของแผ่นปริ้นท์วงจรรีเลกทรอนิกส์ ไปจนถึงขนาดของโครงสร้างรถยนต์ขนาดใหญ่ได้ น้ำหนักของเครื่องจะอยู่ระหว่าง 100 - 15,000 กิโลกรัม

การเคลื่อนที่ของเครื่องวัด 3 แกน มีการเคลื่อนที่อยู่ 2 ระบบ คือระบบที่เคลื่อนที่ด้วยคลັบลูกปืนและระบบที่เคลื่อนที่ด้วย Air Bearing ระบบที่ใช้คลັบลูกปืนจะมีค่าความถูกต้องน้อยกว่าระบบที่เคลื่อนที่ด้วย Air Bearing ประมาณ 5-20 ไมครอน ขึ้นอยู่กับขนาดและรุ่นของเครื่อง ระบบที่ใช้ Air Bearing จะใช้ Air Pad ซึ่งมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม หรือวงกลมแทนคลັบลูกปืน แรงดันลมที่ใช้คือ 0.4 Mpa รายละเอียดของส่วนประกอบจะแสดงให้ดูดังรูป 2.1



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเครื่องวัด 3 แกน

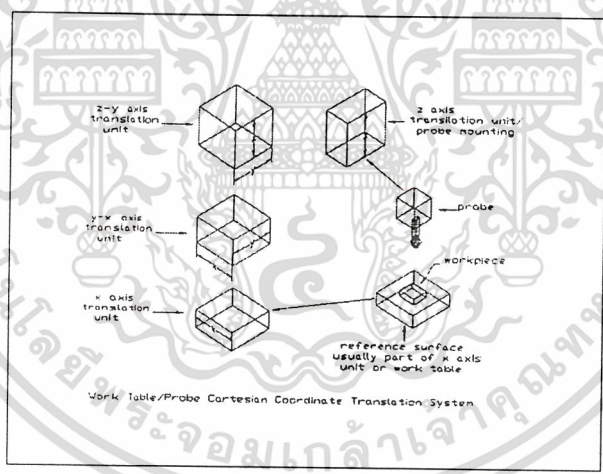
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัดพิกัด(Coordinate Measuring Machine: CMM) เครื่องมือวัดพิกัดนี้จะมีหัวโพรบ(Probe)ที่จะถูกใช้ ในการสัมผัสกับพื้นผิวของชิ้นงานที่พิจารณาในตำแหน่งที่ต้องการและความราบของพื้นผิวของชิ้นงานที่กำลังพิจารณา นี้จะประมวลผลโดยโปรแกรม(software)ของเครื่อง โดยจะคำนวณจากตำแหน่งพิกัดสามแกน(X,Y,Z)ของจุดที่ทำการวัด ความสามารถในการวัดของเครื่อง เครื่องมือวัดพิกัด จะไม่มีข้อจำกัดสำหรับหัวโพรบ ในการวัดพื้นผิวของชิ้นงานที่มีการพลิก การกลับตัว ข้อจำกัดทางด้านตำแหน่ง และจำนวนความหนาแน่นของจุดที่วัด แม้ว่าบนพื้นผิวที่ทำการวัดจะมีจุดที่ไม่ต่อเนื่อง ได้แก่ พื้นผิวมีรูหลุม ที่เกิดจากอากาศ ด้วยลักษณะทางด้านความสามารถทางด้าน การวัดของ เครื่องมือวัดพิกัด ในด้านการวัดขนาด รูปแบบการพลิก การกลับตัว เป็นผลให้การใช้เครื่องมือวัดแบบ เครื่องมือวัดพิกัด มีการใช้อย่างกว้างขวาง

การวัดตำแหน่งด้วยเครื่อง เครื่องมือวัดพิกัด(Concept of Measurement) เครื่องมือวัดพิกัดเป็นเครื่องมือที่ใช้ ในการวัดเพื่อแสดงลักษณะด้านกายภาพของชิ้นงานที่ต้องการ ในรูปของระบบคู้่อันดับแบบสามแกน โดยมีฟังก์ชันพื้นฐานที่ประกอบด้วย

- การวัดรูปร่างแท้จริงของชิ้นงาน
- การเปรียบเทียบระหว่างรูปร่างของชิ้นงานที่แท้จริง กับ รูปร่างของชิ้นงานที่ต้องการ
- การหารายละเอียดของชิ้นงาน ได้แก่ ขนาด รูปแบบ ของชิ้นงาน

ขนาดของชิ้นงานที่แท้จริงนั้น ได้จากการที่ใช้หัวโพรบทำการวัดตำแหน่งที่ต้องการ ตำแหน่งที่ได้ถูกแสดงในพิกัดสาม(X Y Z) ในทางปฏิบัติ ไม่สามารถหาค่าตัวแปร ของชิ้นงานโดยตรงจากพิกัดของตำแหน่งที่ทำการวัด ดังนั้นการหาค่าตัวแปร การวิเคราะห์ชิ้นงาน ทำให้โดยการประยุกต์ใช้การคำนวณทางเรขาคณิตที่เหมาะสม



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบพื้นฐานของโครงสร้าง เครื่องมือวัดพิกัด

ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องมือวัดพิกัดที่แสดง ดังรูปชิ้นงานถูกแทนที่บนพื้นราบที่เป็นพื้นอ้างอิง หรือ บนโต๊ะงาน จากนั้นหัวโพรบ จะเคลื่อนที่สัมผัสกับผิวของชิ้นงานในตำแหน่งที่ต้องการ ในการเคลื่อนที่จะสามารถเคลื่อนที่ไปได้ทั้งสามแกน คือ ในทิศแกน X ในทิศแกน Y และในทิศแกน Z โดยในการเคลื่อนที่หัวโพรบ และ โต๊ะงานจะเคลื่อนที่โดยสัมพันธ์กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อหัวโพรบสัมผัสผิวของชิ้นงาน ตำแหน่งพิกัดสามแกน (X, Y, Z) จะถูกบันทึกไว้ โดยหลักการเครื่องวัดต้องมีสเกลที่มีความแน่นอน แม่นยำ และ ต้องมีเครื่องมือที่ใช้ในการวัดที่เหมาะสม โดยเครื่องมือนี้มิอยู่ในแต่ละแกนของเครื่องมือวัด

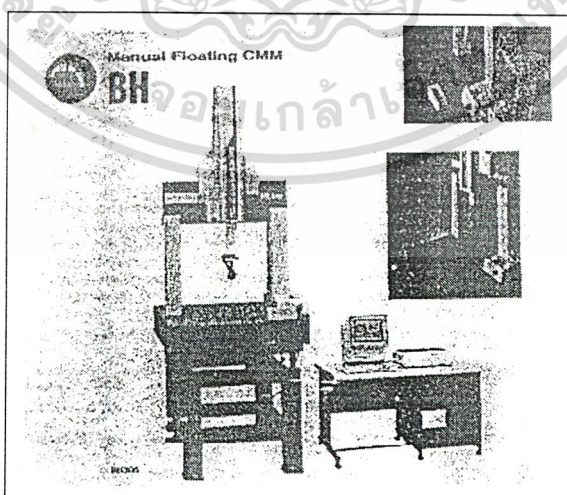
2.1.1 หลักการทำงานของเครื่องวัด 3 แกน

เนื่องจากเครื่องวัด 3 แกน เป็นเครื่องมือที่มีความละเอียดสูงและไวต่อสภาพแวดล้อม ดังนั้นการติดตั้งและใช้งานจะต้องอยู่ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม คือ

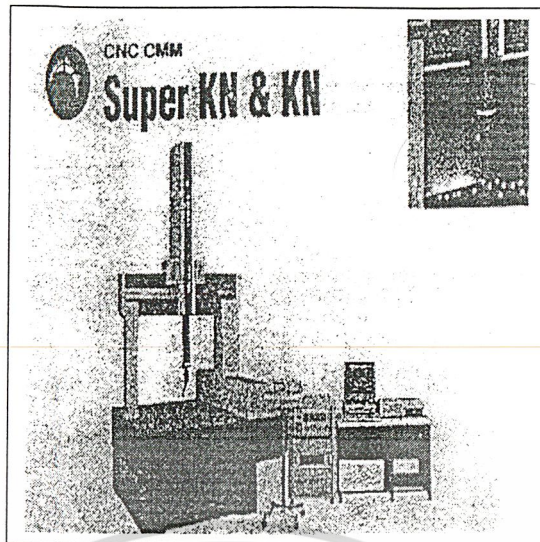
1. ห้องจะต้องมีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส บวกลบได้ 1 องศา
2. อุณหภูมิห้องจะต้องคงที่ ภายในเวลา 8 ชั่วโมงจะต้องไม่แกว่งมากกว่า 1 องศาเซลเซียส
3. การกระจายของอุณหภูมิจะต้องไม่เกิน 0.5 องศาเซลเซียสต่อเมตร
4. ความชื้นสัมพัทธ์ของห้องจะต้องอยู่ระหว่าง 55-65 %
5. การสั่นสะเทือนของพื้นห้องที่ความถี่ น้อยกว่า 10 Hz จะต้องไม่มีแอมพลิจูด ไม่เกิน 2 ไมครอนจากยอดถึงยอด
6. การสั่นสะเทือนของพื้นห้องที่ความถี่ 10 ถึง 50 Hz จะต้องมีความเร่งไม่เกิน 0.004 m/s^2
7. แหล่งจ่ายลมจะต้องสามารถจ่ายลม ได้มากกว่า 100 ลิตรต่อนาที
8. แหล่งจ่ายลมจะต้องสามารถจ่ายลมที่แรงดันระหว่าง 0.5-0.9 Mpa
9. ลมที่จะเข้าเครื่องวัด 3 แกน จะต้องมีความชื้นน้อยที่สุดที่จะเป็นไปได้

เครื่องวัด 3 แกน แบ่งออกเป็น 2 ชนิด

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รูปที่ 2.3 Manual floating CMM อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



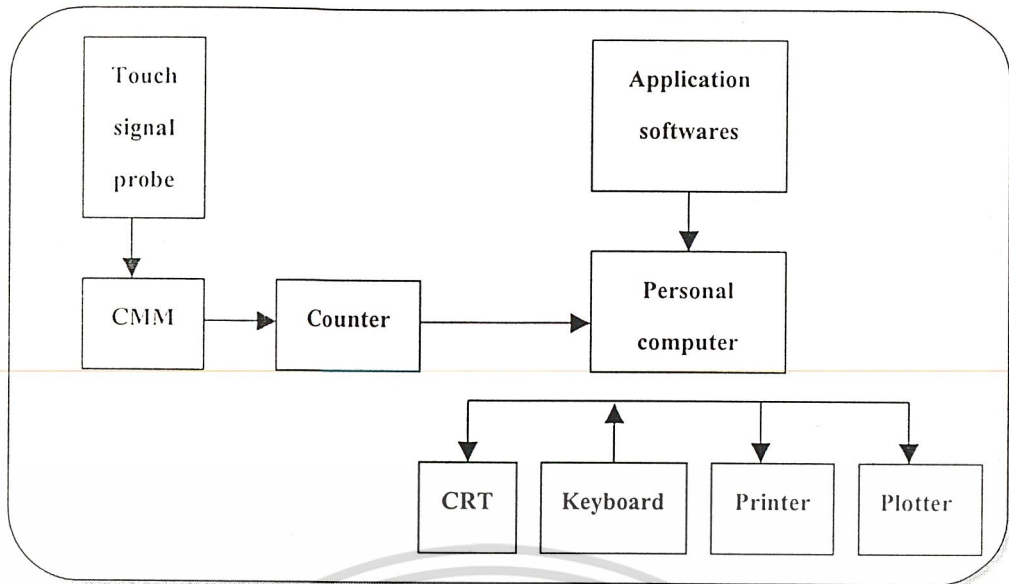
รูปที่ 2.4 CNC CMM

ระบบการทำงานของเครื่องวัด 3 แกน จะขึ้นกับส่วนประกอบดังนี้คือ

1. ตัวเครื่องวัด 3 แกน
2. ตัว Controller หรือ ตัว Counter
3. ตัวรับสัญญาณ
4. การ์ดอินเตอร์เฟส
5. เครื่องคอมพิวเตอร์และโปรแกรม
6. อุปกรณ์เสริม เช่น เครื่องพิมพ์ หรือ Plotter

จากรูปที่ 2.5 จะเห็น Organization of the Measuring System ของเครื่องวัด 3 แกน ได้ดีขึ้น ขั้นตอนแรกก็เมื่อหัวรับสัญญาณแต่ละถูกขึ้นงาน ตัว Counter จะบันทึกตำแหน่งนั้นไว้จำนวนจุดที่ทำการแตะขึ้นอยู่กับรูปร่างของชิ้นงาน เช่น วงกลมจะต้องทำการแตะอย่างน้อย 3 จุด, ทรงกระบอกจะต้องทำการแตะอย่างน้อย 5 จุด เป็นต้น เมื่อได้จุดครบตามที่ต้องการคอมพิวเตอร์ก็จะทำการประมวลผลตามลักษณะของชิ้นงาน เช่น วงกลมก็จะให้ค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง, รัศมีของจุดศูนย์กลาง และค่าความกลม (ในกรณีที่มีจุดมากกว่า 3 จุด) แล้วจึงส่งผลการวัดไปยังเครื่องพิมพ์และรูปกราฟิกไปยัง Plotter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 Organization of the Measuring System

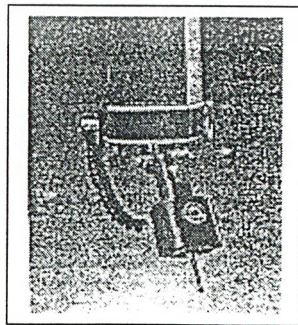
2.1.2 ชนิดของตัวรับสัญญาณ การรับสัญญาณของ CMM มี 5 วิธีคือ

2.1.2.1 Hard probe system จะใช้กับเครื่อง Manual floating CMM เท่านั้น

1. Ball-point-probe เป็นหัววัดที่มีปลายเป็นทรงกลมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 2- 10 mm
2. Taper probe เป็นหัววัดที่มีรูปร่างเป็นทรงกรวย ใช้วัดงานที่เป็นรูเจาะสามารถวัดได้ใน 2 มิติเท่านั้น ซึ่งมีช่วงการวัดรูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 2-56 mm
3. Cylindrical probe เป็นหัววัดที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก ใช้สำหรับวัดงานที่เป็นแผ่นบางใช้วัดงานใน 2 มิติเท่านั้น ขนาดของหัววัดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2,3,5,6,10 mm
4. Universal probe เป็นหัววัดที่มีปลายเป็นทรงกลมเหมือนกับแบบ Ball-point-probe แต่สามารถเปลี่ยนมุมในการวัดได้ทำให้หัววัดด้านข้างได้ด้วยปลายหัววัดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2,3,5,6,10,15 mm

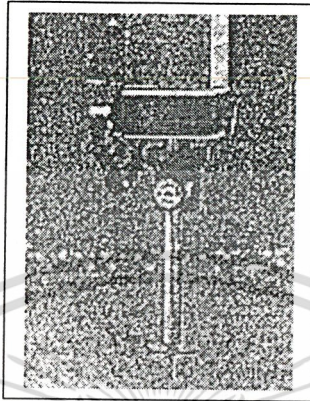
2.1.2.2 Touch signal probe system เป็นหัววัดที่รับสัญญาณจากการแตะ เมื่อหัววัดมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งจากแกนนิวทอรอล สัญญาณจะส่งผ่านไปยังคอนโทรลเลอร์

1. TPI เป็นตัวรับสัญญาณที่มีขนาดใหญ่ไม่สามารถลงไปยังจุดงานที่ลึกๆ ได้ แต่มีข้อดีคือมี ความทนทานสูงมักจะไม่ค่อยมีปัญหาสัญญาณค้าง



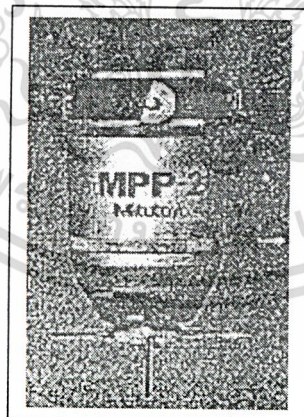
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.6 ตัวรับสัญญาณ TPI ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. TP2 เป็นตัวรับสัญญาณที่มีขนาดเล็กสามารถลงไปวัดงานที่มีความลึกได้ดี ลักษณะการทำงานเหมือนกับ TPI แต่มักจะพบว่ามียาอายุการใช้งานสั้นกว่าทั้งนี้ก็เป็นเพราะมีขนาดเล็ก ทำให้ยากต่อการผลิตและมีความทนทานน้อยกว่า ทั้งนี้ยังมีราคาสูงกว่าแบบ TPI อีกด้วย



รูปที่ 2.7 ตัวรับสัญญาณ TP2

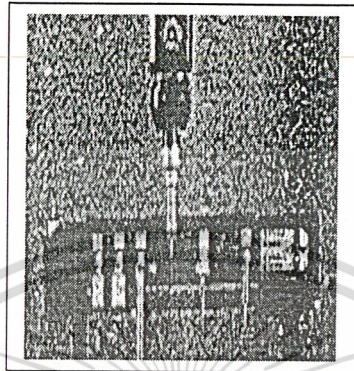
2.1.2.3 Scanning probe system เป็นหัววัดที่สามารถวัดเป็นจุดและสามารถวัดแบบต่อเนื่องได้ด้วยหัววัดจะทำการลากไปตาม Contour ของชิ้นงาน ภายในหัววัดจะใช้ลมเป็นตัวลดการเสียดทานในการเคลื่อนที่เนื่องจากหัววัดจะต้องสัมผัสชิ้นงานอยู่เกือบตลอดเวลา จึงมีค่าความถูกต้องสูงมากและมีราคาไม่ต่ำกว่า 1,000,000 บาท ใช้ได้กับเครื่อง CNC เท่านั้น



รูปที่ 2.8 Scanning probe system

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2.4 Auto-probe-change system ในการวัดที่ใช้ระบบอัตโนมัติที่สมบูรณ์แบบสำหรับการวัดงาน 3 มิติจะต้องมี Probe PH9A ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนมุมได้โดยอัตโนมัติมีสเตรปการหมุนครั้งละ 7.5 องศา หมุนได้ 2 ทิศทางคือ หมุนรอบตัวเองจาก 0 ถึง 180 และ 0 ถึง -180 องศา เรียกว่ามุม B ส่วนมุม A จะเคลื่อนที่ในแนวตั้งจากมุมได้ 0 ถึง 90 องศา แต่การที่หัววัดหมุนได้ยังไม่ทำให้เป็นอัตโนมัติที่สมบูรณ์แบบ เพราะบางครั้งจะต้องมีการเปลี่ยนรูปร่างและขนาดของปลายหัววัด (Sylus) จึงต้องใช้ Auto-probe-change system เข้ามาช่วย



รูปที่ 2.9 Auto-probe-change system

2.1.2.5 Centering microscope & CCTV monitor system ใช้สำหรับการวัดที่มีขนาดเล็ก และชิ้นงานที่อ่อน เช่น ยาง หรือพลาสติก วงการวัดด้วยการสัมผัสไม่สามารถทำได้ ตัวกล้องจะมีทั้งระบบตาเดียวและสองตา มีอัตราส่วนขยายของเลนส์ 10X, 20X, 30X, 50X, 100X จอโทรทัศน์ CCTV monitor system จะแสดงภาพที่ได้จาก Centering microscope เพิ่มความสะดวกให้กับผู้ใช้ในกรณีที่ผู้ใช้มี CMM ที่เป็น CNC และต้องการใช้วัดงานที่มีความกว้างมากๆซึ่งจะไม่สามารถขึ้นไปนั่งบน CMM เพื่อส่องชิ้นงานได้

2.1.3 ลักษณะของเครื่อง Coordinate Measuring Machine

2.1.3.1 แบบแกนทีเลเวอร์ (Cantilever Type)

2.1.3.2 แบบบริจด์ (Bridge Type)

2.1.3.3 แบบคอลัมน์ (Column Type)

2.1.3.4 แบบฮอริซอนทอล (Horizontal Arm Type)

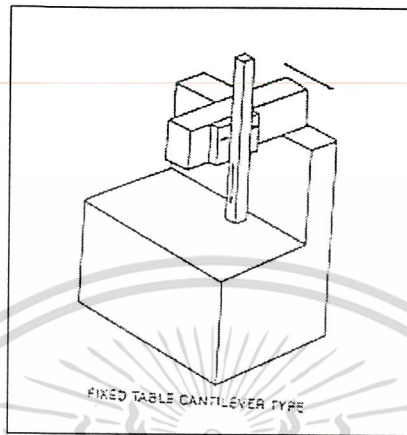
2.1.3.5 แบบแกนทรี (Gantry Type)

แบบต่างๆดังที่ได้กล่าวมามีลักษณะดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.1 แบบแคนทิลิเวอร์ (Cantilever Type)

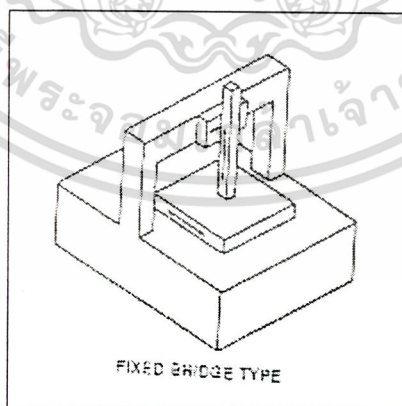
แบบแคนทิลิเวอร์ เป็นรูปแบบของเครื่องมือวัดพิคกิ้งที่ใช้สำหรับการวัดที่ต้องการขอบเขตของการวัดที่กว้าง และไม่ต้องต้องการความแม่นยำมากนัก ในการทำงานสามารถเข้าสู่พื้นที่ที่จะทำการวัดได้อย่างรวดเร็ว เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องมือวัดรูปแบบอื่น



รูปที่ 2.10 แบบแคนทิลิเวอร์ (Cantilever Type)

2.1.3.2 แบบบริดจ์ (Bridge Type)

แบบบริดจ์ (Bridge Type) เป็นรูปแบบของเครื่องมือวัดพิคกิ้งที่มีการใช้กว้างขวางมาก เป็นเครื่องที่ใช้ในการวัดชิ้นงานขนาดปานกลางและต้องการความแม่นยำสูง โคนพื้นฐานแล้วแบบบริดจ์จะมีแกนที่เคลื่อนที่ได้โดยที่จุดปลายของแกน Y จะอยู่บนฐาน โดยโครงสร้างของแบบบริดจ์ จะเป็นโครงสร้างที่มีความแข็งแรงที่สุดแต่มีข้อจำกัด เนื่องจากปลายทั้งสองของแกน Y จะต้องมีเนื้อที่ บริเวณที่จะต้องมีความที่บริเวณที่เหมือนกันมากที่สุด เครื่องมือวัดพิคกิ้งประเภทนี้ จะสามารถให้กับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ได้ แต่จะทำได้ยากกว่าแบบแคนทิลิเวอร์

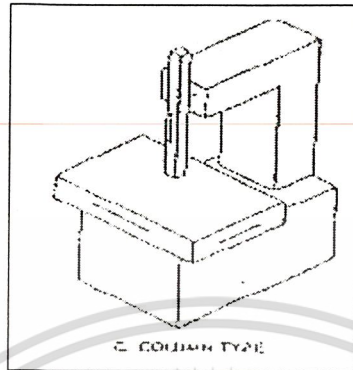


รูปที่ 2.11 แบบบริดจ์ (Bridge Type)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.3 แบบคอลัมน์ (Column Type)

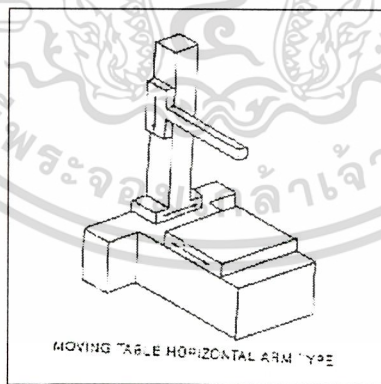
แบบคอลัมน์ (Column Type) เป็นเครื่องมือวัดพิคกิ้งที่ใช้ในการวัดชิ้นงานที่มีขนาดเล็ก โดยสามารถเข้าถึงชิ้นงานเพื่อทำการวัดได้อย่างสะดวกและใช้สำหรับการวัดที่ต้องการความแม่นยำสูง



รูปที่ 2.12 แบบคอลัมน์ (Column Type)

2.1.3.4 แบบฮอริซอนทอล (Horizontal Type)

แบบฮอริซอนทอล (Horizontal Type) มีแกนที่ใช้ในการเคลื่อนที่ในแกน Y แกนนี้ใช้ในการจับหัวโพรบ ข้อได้เปรียบของรูปทรงของเครื่องมือวัดพิคกิ้ง ประเภทนี้ได้แก่ มีขนาดใหญ่แต่ไม่ขัดขวางพื้นที่ในการวัดและสามารถใช้กับ การวัดชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ได้

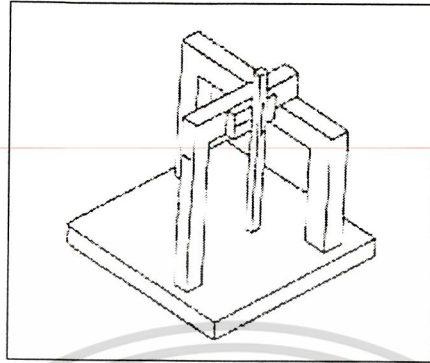


รูปที่ 2.13 แบบฮอริซอนทอล (Horizontal Type)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.5 แบบแกนทรี (Gantry Type)

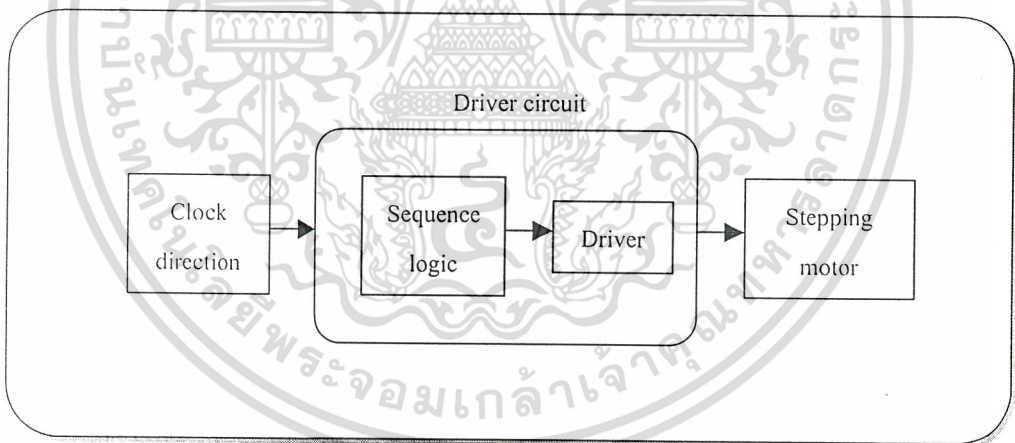
แบบแกนทรี (Gantry Type) เป็นเครื่องมือวัดพิกัด ที่ออกแบบเพื่อใช้ในการวัดชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่มาก นอกจากนี้ยังสามารถทำการวัดชิ้นส่วนในแนวนอนได้ดี และมีความแข็งแรงกว่าแบบแกนทีเลเวอร์



รูปที่ 2.14 แบบแกนทรี (Gantry Type)

2.2 ทฤษฎีและหลักการทำงานของสเตปป์มอเตอร์

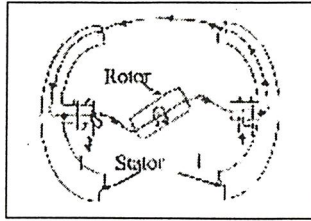
สเตปป์มอเตอร์ คือ มอเตอร์ที่มีมุมในการหมุนที่แน่นอน ใช้วงจรดิจิทัลในการกระตุ้นเฟสของมอเตอร์ ทำให้ควบคุมความเร็วและมุมได้ตามต้องการเป็นการควบคุมแบบไม่มีการป้อนกลับ (Open loop control system)



รูปที่ 2.15 โปรแกรมแสดงการทำงานของสเตปป์มอเตอร์

ส่วนประกอบหลักของสเตปป์มอเตอร์ก็คือ โรเตอร์ (Rotor) และสเตเตอร์ (Stator) ตัวโรเตอร์จะมีแกนเป็นสารแม่เหล็กถาวร ส่วนตัวสเตเตอร์จะเป็นแกนพันเหล็กพันด้วยชุดขดลวดไฟฟ้าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน แกนนั้นจะมีสภาพเป็นแม่เหล็ก เกิดการเหนี่ยวนำทำให้แกนโรเตอร์หมุน ถ้าตัวโรเตอร์มีแม่เหล็กหลายชุด และตัวสเตเตอร์มีชุดขดลวดหลายชุด การจัดลำดับกระตุ้นชุดขดลวดอย่างถูกต้องจะทำให้แกนโรเตอร์หมุนเป็นสเตปตามตำแหน่งการวางของชุดขดลวดบนพื้นของสเตเตอร์และชุดแม่เหล็กถาวรบนโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 เส้นทางเดินของสนามแม่เหล็กในโรเตอร์และสเตเตอร์

2.2.1 ชนิดของสเตปป์มอเตอร์ สเตปป์มอเตอร์แบ่งตามลักษณะทางโครงสร้างได้ 3 ประเภทคือ

2.2.1.1 Permanent Magnet stepping motor (PM stepping motor)

2.2.1.2 Variable Reluctance stepping motor (VR stepping motor)

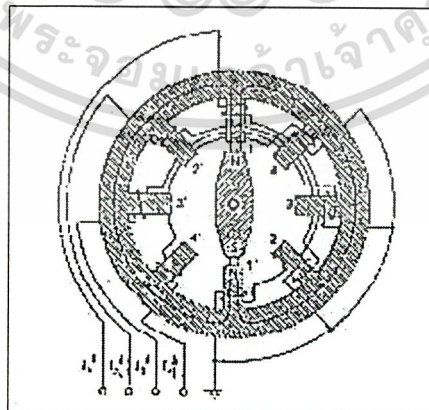
2.2.1.3 Hybrid stepping motor

2.2.1.1 Permanent Magnet stepping motor (PM stepping motor) รูปที่ 2.17 เป็นรูปที่แสดงโครงสร้างภายในของมอเตอร์ 4 เฟสซึ่งแต่ละเฟสจะมีทั้งหมด 8 ขั้ว ส่วนโรเตอร์ทำจากแม่เหล็กถาวรตรงขั้ว 1 และ 1' ซึ่งเป็นขั้วขดลวดเดียวกัน เมื่อมีการกระตุ้นขดลวด 1-4-3-2 จะทำให้ขดลวดหมุนตามเข็มนาฬิกา โครงสร้างชนิดนี้ไม่เหมาะกับการความละเอียดมากนัก สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\theta_s = 360 / N_p \quad (2.1)$$

เมื่อ θ_s = มุมระหว่างขั้วของสเตเตอร์

N_p = จำนวนขั้วของสเตเตอร์



รูปที่ 2.17 โครงสร้างของ Permanent Magnet stepping motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.2 Variable Reluctance stepping motor (VR stepping motor) ตัวโรเตอร์และสเตเตอร์จะทำด้วยโลหะที่มีคุณสมบัติทางแม่เหล็กแต่จะไม่มีแม่เหล็กถาวรอยู่ในมอเตอร์ชนิดนี้ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1) Single stack variable reluctance stepping motor มอเตอร์ชนิดนี้จะมีโรเตอร์เพียงตัวเดียวจากรูป 2.18 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_1 กระแสจะไหลไปที่ขั้ว 2,5,8,11 โรเตอร์จะหมุนตามเข็ม 7.5 องศา ตามเส้นแรงแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นมากที่สุด เมื่อปล่อยกระแส I_1 ขั้วกระแสจะไหลไปที่ขั้ว 3,6,9,12 มอเตอร์จะหมุนไปที่ 15 องศา เป็นเช่นนี้ไปเรื่อยๆสลับละ 7.5 องศา จากสูตร

$$\theta = 360 / N_R N_P \quad (2.2)$$

เมื่อ θ คือ สเตปต่อองศาของสเตปปีงมอเตอร์

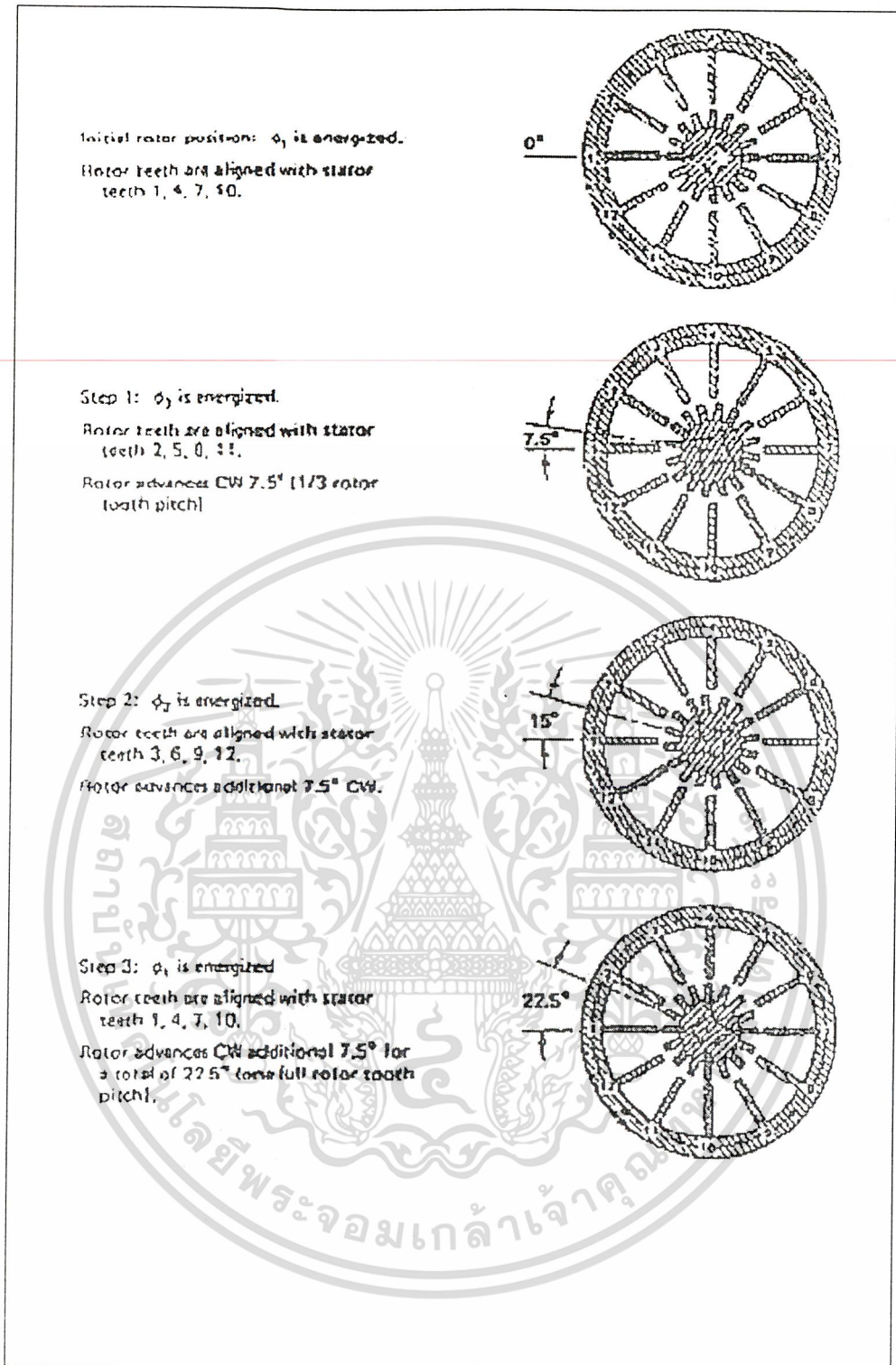
N_R คือ จำนวนขั้วของโรเตอร์

N_P คือ จำนวนเฟสของมอเตอร์



รูปที่ 2.18 โครงสร้างของ Single stack variable reluctance stepping motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ลักษณะการทำงานของ Single stack variable reluctance stepping motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

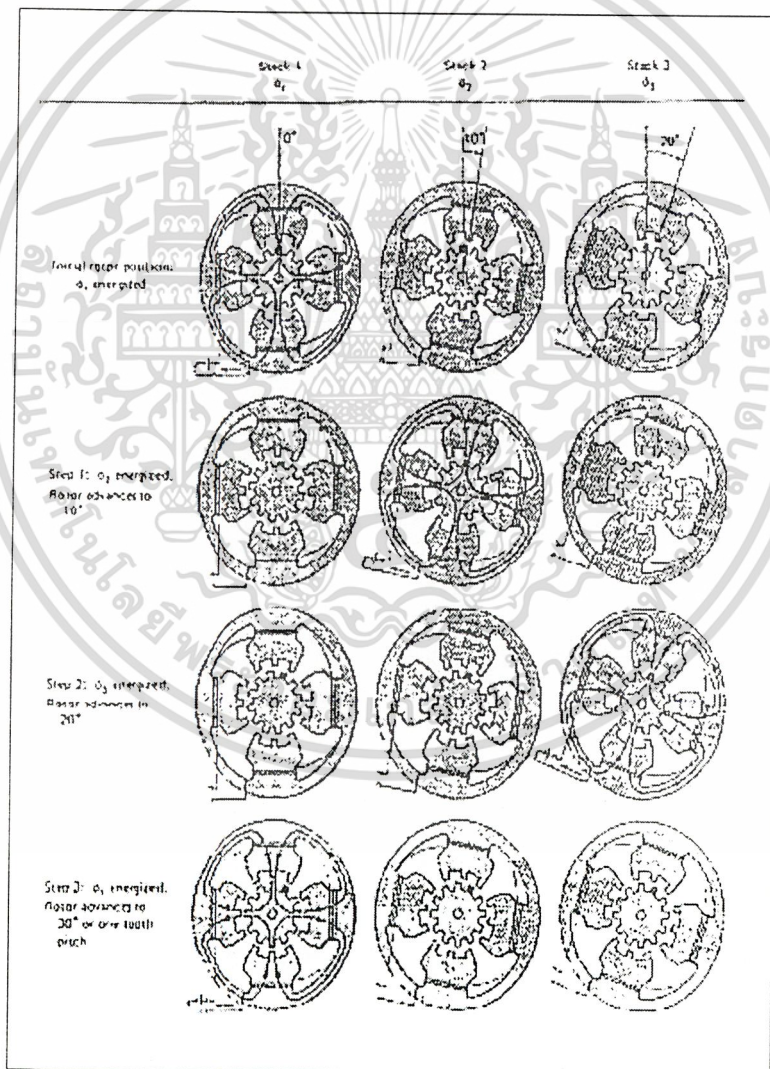
2) Multistack variable reluctance stepping motor คือ VR สเตปปีงมอเตอร์ที่มีหลายสเตค แต่ละสเตคแทนด้วยเฟส 1 เฟส สเตคที่ตัวโรเตอร์จะมีฟันเรียงเหมือนกันทั้ง 3 สเตค ส่วนสเตคทั้ง 3 ของตัวโรเตอร์จะเรียงเบี่ยงเบนจากกัน ตามจำนวนองศาที่กำหนด จากรูปที่ 2.20 จะแสดงลักษณะการหมุนของสเตคทั้ง 3 คือเมื่อกระตุ้นเฟสที่ 1 สเตคที่ 1 จะถูกเหนี่ยวนำที่ 0 องศา เมื่อเฟสที่ 2 ถูกกระตุ้น สเตคที่ 2 จะเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กให้โรเตอร์หมุนไป 10 องศา เมื่อเฟสที่ 3 ถูกเหนี่ยวนำ สเตคที่ 3 ก็จะเหนี่ยวนำเส้นแรงแม่เหล็กให้โรเตอร์หมุนไปอีก 10 องศา สูตรคือ

$$\theta = P_R / N_p$$

เมื่อ θ คือ สเตปต่อองศาของสเตปปีงมอเตอร์

P_R คือ มุมระหว่างฟันของโรเตอร์

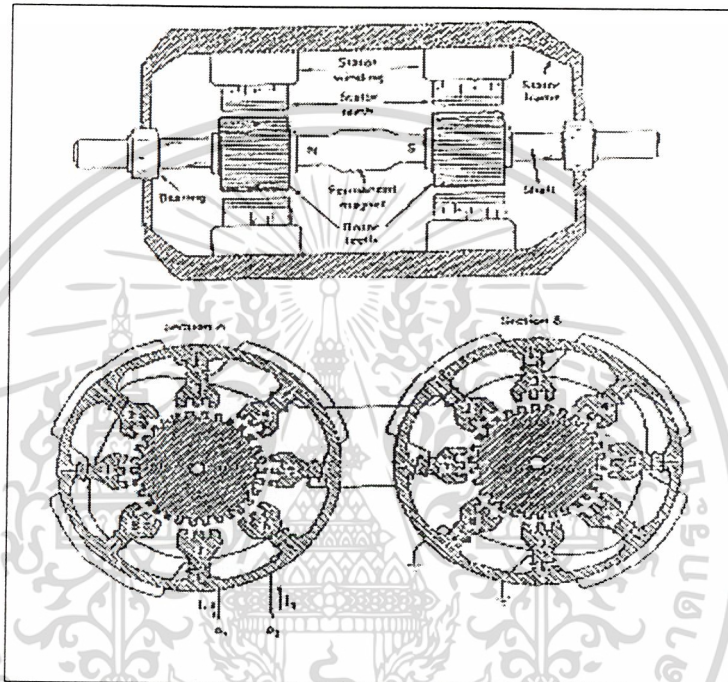
N_p คือ จำนวนเฟสของมอเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 2.20 ลักษณะการทำงานของ Multistack variable reluctance stepping motor
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.2.1.3 Hybrid stepping motor มอเตอร์ชนิดนี้จะมีหลายสแตกโดยแกนกลางของโรเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร ตำแหน่งฟันของสเตเตอร์จะตรงกันทุกสแตก แต่ของโรเตอร์จะเอียงกันเท่ากับ $180/N_r$ เมื่อ N_r คือ จำนวนฟันของโรเตอร์ จากรูปที่ 2.21 ฟันของโรเตอร์ทั้ง 2 สแตกจะเอียงกัน $180/30 = 6$ องศา จุดขดลวดที่สเตเตอร์แยกเป็น 2 ชุดคือ ชุดที่ 1 จะพันรอบขั้วที่ 1,3,5,7 โดยขั้วที่ 1,5 มีทิศทางของสนามแม่เหล็กเหมือนกัน และขั้วที่ 3,7 มีทิศทางของสนามแม่เหล็กเดียวกัน

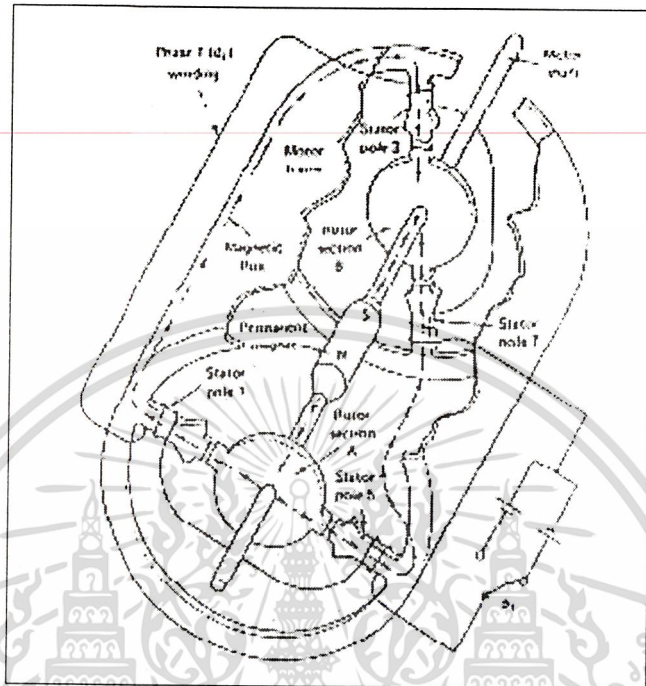


รูปที่ 2.21 โครงสร้างภายในของ Hybrid stepping motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

49840

แกนกลางของโรเตอร์ที่ส่วน A จะเป็นขั้วเหนือและส่วน B เป็นขั้วใต้จากรูปที่ 2.22 เมื่อเฟสที่ 1 ถูกกระตุ้น ฟลักซ์จากขั้วเหนือของแม่เหล็กถาวรจะไหลไปยังโรเตอร์ส่วน A ออกที่ขั้ว 1 และ 5 แล้วจึงไหลไปยังโรเตอร์ส่วน B เข้าที่ขั้ว 3 และ 7 แล้วเดินทางต่อไปยังขั้วใต้ของแกนโรเตอร์ ซึ่งจะครบรูป(loop)ของสนามแม่เหล็ก



รูปที่ 2.22 เส้นทางเดินของสนามแม่เหล็กใน Hybrid stepping motor

ลำดับการทำงานของสเตปป์มอเตอร์จะแสดงในตาราง 2.1 คือ

สเตปป์ที่ 1 ป้อนกระแส I_1+ ที่ส่วน A จะมีฟลักซ์แม่เหล็กไหลออกที่ขั้ว 1 และ 5 แล้วไหลไปที่ส่วน B เข้าที่ขั้ว 3 และ 7
 สเตปป์ที่ 2 ป้อนกระแส I_2- ที่ส่วน A จะมีฟลักซ์แม่เหล็กไหลออกที่ขั้ว 4 และ 8 แล้วไหลไปที่ส่วน B เข้าที่ขั้ว 2 และ 6
 สเตปป์ที่ 3 ป้อนกระแส I_1- ที่ส่วน A จะมีฟลักซ์แม่เหล็กไหลออกที่ขั้ว 3 และ 7 แล้วไหลไปที่ส่วน B เข้าที่ขั้ว 1 และ 5
 สเตปป์ที่ 2 ป้อนกระแส I_2+ ที่ส่วน A จะมีฟลักซ์แม่เหล็กไหลออกที่ขั้ว 2 และ 6 แล้วไหลไปที่ส่วน B เข้าที่ขั้ว 4 และ 8

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

$$\theta = 360 / 4N_R \quad (2.4)$$

เมื่อ คือ สเตปป์ต่อองศาของสเตปป์มอเตอร์
 คือ จำนวนฟันโรเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การกระตุ้นสเตปป์มอเตอร์ มีอยู่ 3 แบบ คือ

2.2.2.1 การกระตุ้น 1 เฟส จะมีแรงบิดน้อยที่สุดมี Over shoot สูง เข้าสู่ตำแหน่งช้า เมื่อเข้าสู่ Steady state แล้วจะ ไม่มีการแกว่งไปมา

ตารางที่ 2.1 แสดงการกระตุ้นแบบ 1 เฟส

	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
Step 1				
Step 2				
Step 3				
Step 4				

2.2.2.2 การกระตุ้น 2 เฟส การกระตุ้นแบบนี้ให้แรงบิดสูง มี Over shoot ต่ำและมีการแกว่งไปมาเล็กน้อยเมื่อเข้าสู่ Stead state

ตารางที่ 2.2 แสดงการกระตุ้นแบบ 2 เฟส

	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
Step 1				
Step 2				
Step 3				
Step 4				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

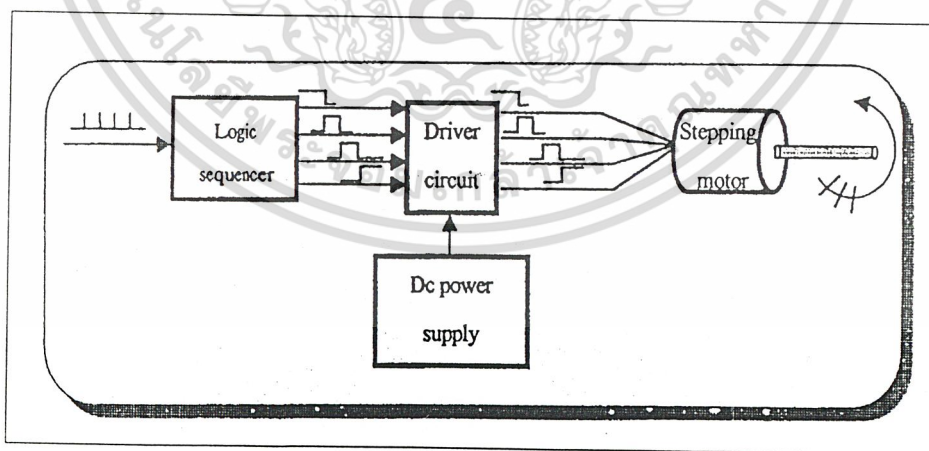
2.2.2.3 การกระตุ้น Half step จะทำให้มุมในการกระตุ้นลดลงจากค่าที่กำหนดไว้ครึ่งหนึ่ง เป็นการรวมข้อดีของการกระตุ้นแบบ 1 เฟสและ 2 เฟส คือ เมื่อเคลื่อนที่จะกระตุ้นแบบ 2 เฟสทำให้ได้แรงบิดสูง เมื่อเข้าสู่ Steady state จะกระตุ้นเพียง 1 เฟส ทำให้ไม่เกิดการออสซิลเลท แต่มีข้อเสียเหมือนกับการกระตุ้นแบบ 1 เฟสคือ ที่ Steady state มีค่าแรงบิดน้อย

ตารางที่ 2.3 แสดงการกระตุ้นแบบ Half step

	Phase	Phase	Phase	Phase
Step	1	2	3	4
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

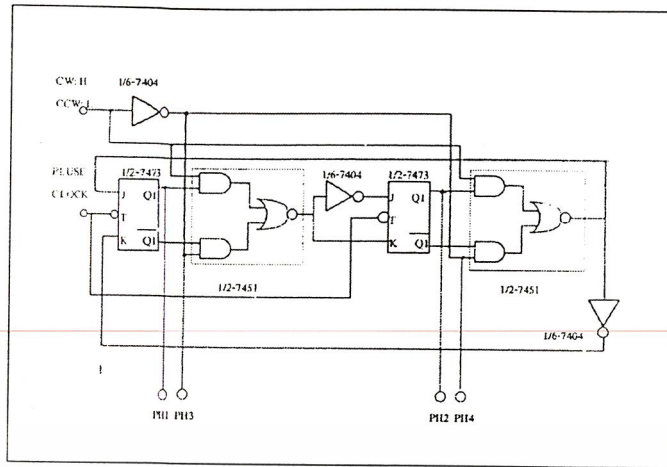
2.2.3 ระบบขับเคลื่อนและวงจรสำหรับควบคุมสเตปป์มอเตอร์

การควบคุมสเตปป์มอเตอร์จะต้องมีวงจรที่ทำหน้าที่เรียงลำดับเฟสของขดลวด เรียกว่า Logic sequence circuit แต่วงจรนี้ไม่มีกำลังเพียงพอที่จะขับมอเตอร์ให้หมุนได้จึงต้องมีวงจรขับ เรียกว่า driver circuit เข้ามาช่วยดังรูป



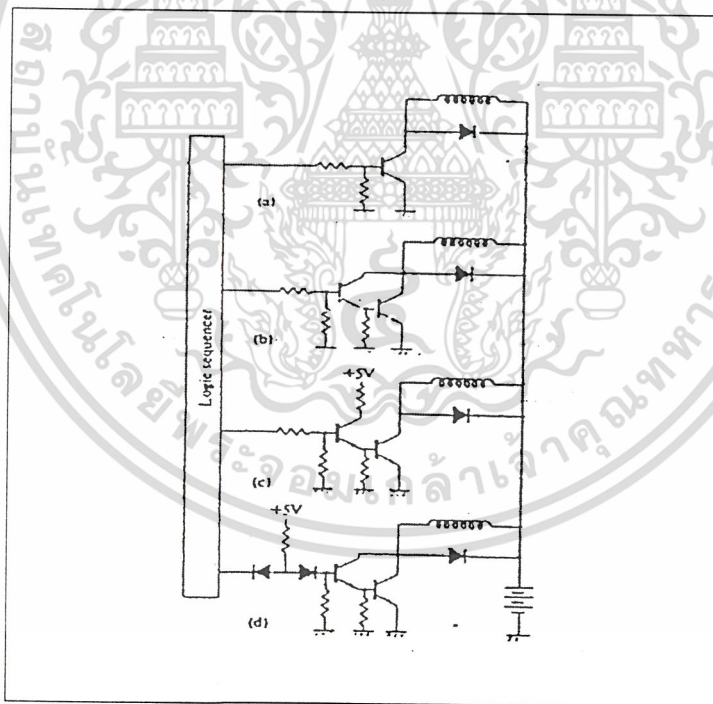
รูปที่ 2.23 ระบบการขับเคลื่อนให้สเตปป์มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 การกระตุ้นสเตปป์มอเตอร์ 4 เฟสแบบ 2ทิศทาง

2.2.3.1 วงจรที่ใช้ในการขับเคลื่อนจะใช้ตัวทรานซิสเตอร์เป็นตัวขยายสัญญาณ ดังรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 วงจรการขับเคลื่อนสเตปป์มอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 หลักการทำงานของพอร์ตนาน (Parallel port)

2.3.1 โครงสร้างของพอร์ตนาน

พอร์ตนานประกอบด้วยสัญญาณทั้งหมด 25 เส้นสัญญาณ โดยการเชื่อมต่อได้เพียงต่อสายสำหรับเชื่อมต่อเข้ากับ Connector DB-25 ของพอร์ตนาน แบ่งย่อยได้เป็น 3 พอร์ต

2.3.1.1 พอร์ตดาต้า (Data Port) เป็นรีจิสเตอร์เอาต์พุต มีขนาด 8 bits สัญญาณข้อมูลจะถูกส่งไปปรากฏที่พอร์ตนานในตำแหน่งขา 2 ถึงขา 9 โดยขาที่ได้รับสัญญาณจะเปลี่ยนจากลอจิก 0 เป็นลอจิก 1 โดยมีระดับแรงดันสูงสุดสำหรับลอจิก 0 เท่ากับ 0.5 V และระดับแรงดันต่ำสุดของลอจิก 1 เท่ากับ 2.4 V

2.3.1.2 พอร์ตคอนโทรล (Control Port) เป็นรีจิสเตอร์เอาต์พุต มีขนาด 4 bits สัญญาณข้อมูลจะถูกส่งไปปรากฏที่พอร์ตนานในตำแหน่งขา 1, 14, 16, 17 โดยบิต 0, 1 และ 3 จะต้องมีการกลับสถานะด้วยคือ ถ้าต้องการลอจิก 1 ก็ให้ส่งข้อมูลลอจิก 0 ออกไปโดยสามารถทั้งอ่านและเขียนข้อมูลได้คือเป็นได้ทั้ง อินพุตและเอาต์พุต

2.3.1.3 พอร์ตแสดงสถานะ (Status Port) เป็นรีจิสเตอร์อินพุต มีขนาด 5 bits ใช้สำหรับอ่าน สถานะของอินพุตจากภายนอกเพื่อส่งค่าไปประมวลผลโดยอยู่ที่ขา 10-13 และ 15

ตารางที่ 2.4 แสดงแอดเดรสของพอร์ตนาน

ชื่อพอร์ต	LPT1:		LPT2:		LPT3:	
	ฐานสิบ	ฐานสิบหก	ฐานสิบ	ฐานสิบหก	ฐานสิบ	ฐานสิบหก
DATA	888	378H	956	3BCH	632	278H
STATUS	889	379H	957	3BDH	633	279H
CONTROL	890	37AH	958	3BEH	634	27AH

2.3.2 การจัดแอดเดรส สำหรับหน่วยความจำและ I/O

2.3.2.1 การจัดแอดเดรสของพอร์ต I/O ใน IBM PC

ในการควบคุมการตรวจสอบสถานะ ในการทำงานรวมทั้งการอ่านข้อมูลจากอุปกรณ์ที่เป็นชิพพอร์ต หรือ การ์ดในการควบคุมต่างๆที่ใช้ในระบบของ IBM PC จะกระทำโดยผ่านทางพอร์ต I/O ของระบบด้วยและเนื่องจากการควบคุมหรือติดต่อกับพอร์ตเหล่านี้เองกระทำโดยการอ้างถึงแอดเดรสของพอร์ต I/O เหล่านี้ โดยตรง เราจึงจำเป็นต้องศึกษาถึงหลักการอ้างแอดเดรสของ 8088 ในเครื่อง PC ด้วย

สำหรับแอดเดรสที่จัดไว้สำหรับ I/O นั้น จะเป็นแอดเดรสที่ถูกสร้างขึ้นโดย 8088 ซึ่งแอดเดรสเหล่านี้เป็นแอดเดรสที่จัดไว้ สำหรับ I/O พอร์ต โดยเฉพาะ คือแยกจากแอดเดรสของหน่วยความจำโดยเด็ดขาด ส่วนการส่งข้อมูลให้กับพอร์ตเหล่านี้ต้องกระทำโดยการ ใช้คำสั่ง in ของ 8088 ส่งข้อมูลนั้นไปยังแอดเดรสของพอร์ตที่ต้องการ และสำหรับการตรวจสอบหรือการอ่านข้อมูลจากพอร์ตก็จะทำได้โดยการ ใช้คำสั่ง in ของ 8088 อ่านข้อมูลจากแอดเดรสของพอร์ตที่ต้องการเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์ 8088 จะมีแอดเดรสสำหรับการใช้พอร์ต I/O อยู่ทั้งสิ้น 65,536 แอดเดรสซึ่งทำให้การอ้างแอดเดรสของพอร์ต I/O ที่ทำงานร่วมกับ 80288 นั้น ต้องใช้จำนวนเส้นแอดเดรสในบิตแอดเดรสทั้งสิ้น 16 เส้น แต่สำหรับใน IBM PC นี้ถูกออกแบบมาให้ใช้แอดเดรสเฉพาะ 10 เส้นล่าง คือ A0-A9 เท่านั้นในการอ้างอิงถึงแอดเดรสของพอร์ตของอุปกรณ์หรือชิพพอร์ตใดๆที่ใช้ร่วมกับ IBM PC จึงใช้เส้นจำนวนแอดเดรสเพียง 10 เส้นด้วย โดยเส้นแอดเดรสที่เหลือคือ A10-A15 นั้น จะไม่ถูกนำไปใช้งาน แต่แอดเดรสบนเส้นแอดเดรสเหล่านี้ยังคงเปลี่ยนแปลงตามค่าแอดเดรสพอร์ตที่กำหนดใช้ในคำสั่ง OUT หรือ IN อยู่ด้วย เพียงแต่ไม่ได้ถูกนำมาตีโค้ดร่วมกับแอดเดรส 00i0H นั้น จะให้ผลเหมือนกับการส่งข้อมูลไปยังพอร์ตที่ตรงกับแอดเดรส 04100h,0810H,0C10H ทั้งนี้เนื่องจากแอดเดรส 6 บิตบนไม่ถูกนำมาใช้งาน จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงค่าแอดเดรสบนเส้นแอดเดรส A0-A15 นั้นไม่ทำให้เกิดความแตกต่างใดๆ ขึ้น

เนื่องจากใน IBM PC ได้ใช้งานเส้นแอดเดรสเพียง 10 เส้น ดังนั้นจึงสามารถที่จะอ้างแอดเดรสของ พอร์ตได้สูงสุดเพียง 1024 เท่านั้นนอกจากนี้ในกรณีที่เป็นการอ่านข้อมูลของพอร์ตของ IBM PC ข้อมูลที่เป็นบิต A9 เป็น 0 แล้วเราจะทำการอ่านข้อมูลได้เฉพาะจากพอร์ตของอุปกรณ์หรือชิพพอร์ตต่างๆที่อยู่บนเมนบอร์ดของ IBM PC เช่น 8253-5, 8237-5, 8259A เท่านั้น แต่ถ้าข้อมูลในบิต A9 นี้เป็น 1 แล้ว เราจะทำการอ่านข้อมูลได้เฉพาะจากพอร์ตที่อยู่บนการ์ดต่างๆ เท่านั้น

พอร์ตบน IBM PC ทั้ง 1024 พอร์ต ถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม โดยที่กลุ่มแรกเป็นกลุ่มของพอร์ตที่อยู่บนเมนบอร์ด และกลุ่มที่สองเป็นกลุ่มที่จัดเตรียมไว้สำหรับพอร์ตที่อยู่บนการ์ดต่างๆ

สำหรับในกรณีของการส่งข้อมูลให้กับพอร์ตทั้ง 1024 พอร์ต เราสามารถที่จะเลือกส่งไปยังพอร์ตใดๆใน IBM PC ได้ ดังนั้นการเลือกแอดเดรสสำหรับพอร์ตที่อยู่บนการ์ดจึงสามารถทำได้โดยสะดวก แต่อย่างไรก็ตามสิ่งหนึ่งที่จะต้องคำนึงถึงก็คือ ถ้าแอดเดรสที่เราเลือกให้กับพอร์ตนี้ตรงกับค่าแอดเดรสเดิมที่มีอยู่บนบอร์ด เมื่อเราทำการส่งข้อมูลให้กับพอร์ตที่อยู่ในตำแหน่งแอดเดรสนั้นก็เท่ากับเป็นการส่งข้อมูลให้กับพอร์ตที่อยู่บนการ์ดด้วยซึ่งในกรณีเช่นนี้อาจก่อให้เกิดความผิดพลาดขึ้นเช่นกัน ดังนั้นในการกำหนดค่า แอดเดรสที่ถูกสร้างขึ้นมาบนการ์ดต่างๆ จึงควรใช้ ค่าแอดเดรสที่แอดเดรสบิต A9 มีค่าเป็น 1 คือ แอดเดรส 0FE00H หรือ 0FFFFH เท่านั้น

2.3.2.2 การใช้งานแอดเดรสในพอร์ต I/O ของ IBM PC

จากที่กล่าวมาแล้วพอร์ต I/O ทั้ง 1024 พอร์ตใน IBM PC ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มๆละ 512 พอร์ต สำหรับในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการ ใช้งานพอร์ตต่างๆ โดยจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ตามที่ได้อธิบายไว้แล้วข้างต้น

1. ในกลุ่มแรกนี้เป็นของพอร์ต I/O ที่อยู่บนเมนบอร์ดของ IBM PC ซึ่งจะมีแอดเดรสอยู่ที่ตำแหน่ง 000H จนถึง 01FF หรือ แอดเดรส A9 เป็น 0 นั่นเอง

สำหรับแอดเดรสของพอร์ต I/O ในกลุ่มนี้จะถูกใช้ในการอ้างแอดเดรสของชิพพอร์ตและอุปกรณ์ I/O ต่างๆ บนเมนบอร์ด IBM PC จะเห็นว่าแอดเดรส 00C0H จนถึงแอดเดรส 01FFH นั้นไม่ได้ถูกใช้งานบนเมนบอร์ด ดังนั้นในกรณีดังกล่าวเราก็สามารถที่จะใช้งานแอดเดรสต่างๆ เหล่านี้ได้อย่างไรก็ตามแอดเดรสเหล่านี้ยังคงถูกตีโค้ดให้เป็นแอดเดรสที่ใช้ในการอ่านข้อมูลจากพอร์ต I/O บนเมนบอร์ดเท่านั้น ดังนั้นการใช้ค่าแอดเดรส 00C0H-01FFH กับพอร์ต I/O บนการ์ดหรือพอร์ต ที่เราสร้างขึ้นนั้น ต้องเป็นพอร์ตเอาพู่เพียงชนิดเดียวเท่านั้นกล่าวคือ จะทำการอ่านข้อมูลที่มีค่าแอดเดรสอยู่ในช่วง 00C0H -01FFH ไม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ในกลุ่มที่สองนี้จะเป็นกลุ่มของพอร์ต I/O ที่ถูกใช้งานบนการ์ดที่เสียบใช้งานบน Slot ต่างๆ ของ IBM PC สำหรับแอดเดรสของพอร์ตเหล่านี้จะเริ่มต้นจากแอดเดรส 0200H -03FFH ซึ่งก็คือ แอดเดรสที่มีบิต A9 เป็น 1 นั่นเอง สำหรับการใช้งานแอดเดรสของพอร์ต I/O ในกลุ่มนี้

อย่างไรก็ตาม การใช้งานแอดเดรสในกลุ่มนี้อาจจะเปลี่ยนแปลงได้ ทั้งนี้ ขึ้นอยู่กับการใช้งานบนการ์ดต่างๆ ร่วมกับ IBM PC โดยการ์ดที่ถูกออกแบบผลิตขึ้นใหม่นั้นอาจจะใช้ค่าแอดเดรสสำหรับพอร์ต I/O จึงควรจะตรวจสอบดูก่อนว่าการ์ดต่างๆ ที่ใช้อยู่ในระบบของ IBM PC ที่เราใช้อยู่มีการ์ดใดบ้างและการ์ดเหล่านั้นใช้งานแอดเดรสใดบ้าง จากนั้นจึงทำการออกแบบวงจรอินเทอร์เฟซโดยเลือกใช้เฉพาะแอดเดรสที่ยังไม่ถูกใช้งาน

2.3.2 การเขียนโปรแกรมติดต่อกับพอร์ตขนาน

พอร์ตขนานของคอมพิวเตอร์จะมีลักษณะเช่นเดียวกับอุปกรณ์อินพุท เอาท์พุทตัวอื่นๆ คือเมื่อต้องการติดต่อจะต้องกำหนดแอดเดรสที่ต้องการติดต่อด้วย

ตารางที่ 2.5 แสดงสัญญาณทั้งหมดที่อยู่บนพอร์ตขนาน

DB-25	Register	ทิศทาง	ตำแหน่งบิต	ชื่อขาสัญญาณ	หน้าที่การทำงาน
1	Control	Out	C0	STROBE	แอกทีฟ "0" ส่งค่าออกไปเพื่อบอกว่า ที่ขาด้านข้อมูลแล้ว
2-9	Data	Out	D1-D8	DATA1-DATA8	สำหรับพอร์ตขนานมาตรฐานเดิมขานี้ ทำหน้าที่เป็นขาส่งข้อมูลเอาท์พุท สำหรับในปัจจุบันขานี้รับข้อมูลอินพุทได้ ด้วย
10	Status	In	S6	nACK	เป็นพัลส์ลอจิก "0" ที่ส่งมาจากเครื่องพิมพ์ เพื่อบอกว่าได้รับข้อมูลที่ส่งไปแล้ว
11	Status	In	S7	BUSY	เป็นสัญญาณแจ้งมาจากเครื่องพิมพ์ว่า ยังไม่พร้อมรับข้อมูล
12	Status	In	S5	PE	แจ้งกระดาษหมด
13	Status	In	S4	SELECT	แจ้งว่าเครื่องพิมพ์ค้อยู่
14	Control	Out	C1	AUTO FEED	สั่งให้เครื่องพิมพ์เลื่อนบรรทัด
15	Status	In	S3	ERROR	สัญญาณจากเครื่องพิมพ์มายังคอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงข้อผิดพลาดจากการพิมพ์
16	Control	Out	C2	INIT	รีเซ็ตเครื่องพิมพ์โดยให้ลอจิก "0"
17	Control	Out	C3	SELECT-IN	ส่งสัญญาณไปยังเครื่องพิมพ์เพื่อแจ้งว่า ต้องการเลือกเครื่องพิมพ์เครื่องนี้
18-25				GND	กราวด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การอินเตอร์เฟสกับคอมพิวเตอร์

การอินเตอร์เฟสกับคอมพิวเตอร์ หรือ ไมโครโปรเซสเซอร์ คือ การทำงานติดต่อกันระหว่างซีพียูและอุปกรณ์อื่น ๆ สำหรับการโอนถ่ายข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ต่าง ๆ นอกเหนือจากจะต้องทำงานติดต่อกับ RAM,ROM แล้ว ยังต้องมีการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกที่มีการส่งข้อมูลอินพุต, เอาท์พุทอีกทางหนึ่ง ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบมีความสมบูรณ์ขึ้น ในระบบต่างของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จะทำงานต่อเนื่องเป็นลูกโซ่ ดังเช่น การส่งรับข้อมูลจากซีพียูไปยังส่วนอื่น ๆ เป็นต้น

การที่จะโอนย้ายข้อมูลทุกตัวนั้นจะต้องมีแหล่งส่งข้อมูลและแหล่งที่รับข้อมูล สำหรับกระบวนการเหล่านั้นจะมีส่วนที่สำคัญ คือ ข้อมูลนั้นเป็น address หรือว่าเป็น data, จะส่งไปยังจุดไหน ตัวอย่างเช่น ส่งไปยังหน่วยความจำหรืออุปกรณ์อินพุต/เอาท์พุต และจะส่งเมื่อไร การทำงานเหล่านี้โดยทั่ว ๆ ไป จะต้องมีความสำคัญในการตรวจสอบอุปกรณ์ว่าพร้อมที่จะส่ง/รับข้อมูลหรือไม่ก่อนเสมอ เนื่องจากจุดที่รับและส่งข้อมูล จะต้องมีความสำคัญตรวจสอบความพร้อมอยู่เสมอ เพื่อให้ข้อมูลที่เรากำลังใช้งานนั้น ๆ เป็นระเบียบ ตัวอย่างเช่น ส่งข้อมูลจากซีพียูไปยังอุปกรณ์รอบข้าง เป็นต้น ซึ่งจุดรับส่งคู่หนึ่ง ๆ อาจจะเป็นระหว่างซีพียูด้วยกัน หรือ ซีพียูกับหน่วยความจำ หรือ ซีพียูกับอุปกรณ์รอบข้าง หรือระหว่างอุปกรณ์รอบข้างด้วยกัน หรือ ระหว่างหน่วยความจำ กับอุปกรณ์รอบข้าง ก็ได้ สำหรับข้อมูลที่โอนย้ายไปมานั้น จะอยู่ในลักษณะของเลขฐานสอง ตัวอย่างเช่น 011011002 ซึ่งเลขแต่ละตัวจะแทนด้วย 1 บิต อาจเป็น 8 บิต หรือ 16 บิต ขึ้นอยู่กับระบบนั้น ๆ ถ้าหากเป็นการต่อจากคอมพิวเตอร์ ไม่ว่าจะป็นพอร์ตขนานในสัญญาณที่ส่งมาจะมีระบบแรงดันไฟฟ้า คือ

- พอร์ตอนุกรม (RS-232) มีแรงดัน 3 ถึง 25 VDC
- พอร์ตขนาน มีแรงดัน 5 VDC (TTL) ต่อ 1 บิต

จะเห็นได้ว่าระดับสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ยกมาให้ดูนี้ เราสามารถที่จะควบคุมและนำมาใช้กับอุปกรณ์รอบข้างหรืออุปกรณ์ภายนอกได้ ดังจะยกตัวอย่าง เช่น พอร์ตขนานระดับแรงดันไฟฟ้า 5 VDC สามารถนำมาใช้ในการขับรีเลย์, ทรานซิสเตอร์, หลอดไฟ LED ให้ทำงานได้ โดยการเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ไปควบคุมที่พอร์ตพริ้นเตอร์ เป็นต้น

2.4.1 การเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับคอมพิวเตอร์

โดยจะแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ อุปกรณ์เชื่อมต่ออยู่หลังคอมพิวเตอร์ และอยู่ภายในคอมพิวเตอร์ ดังนี้

2.4.1.1 อุปกรณ์เชื่อมต่ออยู่หลังคอมพิวเตอร์

- พอร์ตต่อคีย์บอร์ด หรือ อาจเรียกกันว่า PS/2, mini-DIN
 - พอร์ตต่อเมาส์ หรือ อาจเรียกกันว่า PS/2, mini-DIN
 - พอร์ตต่ออนุกรม อาจเรียกว่า Serial Port, Com Port (Com1,Com2) ใช้ในระบบติดต่อสื่อสาร RS-232
 - พอร์ตต่อขนาน อาจเรียกว่า Parallel Port,Printer port (LPT1,LPT2) ส่วนใหญ่จะใช้พ่วงต่อกับเครื่องพิมพ์
 - พอร์ตต่อจอยสติ๊ก ส่วนมากจะเห็นพอร์ตนี้อยู่ที่ซาว์ดการ์ดเป็นส่วนใหญ่
 - พอร์ตต่อโมเด็ม โดยตัว Connector จะเป็นประเภทเดียวกับสายสัญญาณโทรศัพท์
 - พอร์ต USB (Universal Serial Bus) เป็นพอร์ตรุ่นใหม่ที่สามารถพ่วงอุปกรณ์ได้หลายชนิด เช่น เมาส์ คีย์บอร์ด ,โมเด็ม, กล้องดิจิทัล เป็นต้น
 - พอร์ตเชื่อมต่อระบบเครือข่าย จะพบอยู่กับการ์ดแลน หรือเรียกว่า พอร์ต RJ-45
 - พอร์ต SCSI (Small Computer System Interface) มักใช้เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่ต้องการความเร็วสูง
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.2 อุปกรณ์เชื่อมต่ออยู่ในคอมพิวเตอร์

- EIDE (Enhanced Integrated Drive Electronics) สายเชื่อมต่อกับฮาร์ดดิส
- SCSI (Small Computer System Interface) โดยมากจะมากับการ์ด ที่เป็นแบบสล็อตซี
- ฟลอปปีไดรฟ์ คอมพิวเตอร์ทุกเครื่องจะมีไว้สำหรับต่อฟลอปปีไดรฟ์
- คอนเน็กเตอร์อนุกรม มี 10 เข็ม อยู่ที่แผงวงจรเมนบอร์ด
- คอนเน็กเตอร์ขนาน มี 26 เข็ม อยู่ที่แผงวงจรเมนบอร์ด

2.4.2 ระบบที่ใช้ติดต่อสื่อสารข้อมูลของคอมพิวเตอร์

- USB (Universal Serial Port) รวมถึง Firewire (IEEE-1348) เป็นระบบใช้ติดต่อสื่อสารข้อมูลแบบใหม่ ที่มีความเร็วสูง อีกทั้งเสถียรมากมากขึ้น ระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์ หรือคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ภายนอก (Hardware) ซึ่ง USB ได้ถูกนำมาเข้ามาแทน การติดต่อแบบ RS-232 และ Centronics Printer Ports ดังจะเห็นได้จากอุปกรณ์ โมเด็ม หรือ อุปกรณ์ตัวอื่น ๆ เป็นต้น
- Firewire มันได้ถูกออกแบบเพื่อรองรับการสื่อสารสำหรับข้อมูลที่เป็น สัญญาณภาพ,เสียง,วิดีโอ รวมถึง ขนาดของบัสที่มียุคใหญ่
- Microwire,SPI,I²C Interface การติดต่อสื่อสารเป็นแบบ Synchronous Serial เหมาะสำหรับใช้ในระยาระดับต่ำ ๆ ซึ่ง Microcontroller ส่วนใหญ่แล้วจะติดต่อแบบนี้
- Ethernet ใช้ติดต่อสื่อสารในระบบเครือข่ายหรือที่เรียก ระบบแลนค์ ที่มีเครื่องคอมพิวเตอร์ต่อกันไปมาหลาย ๆ เครื่อง เป็นระบบที่มีความเร็วสูง และอุปกรณ์ด้านฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์ มีความซับซ้อน รวมทั้งราคาสูงกว่า ระบบการติดต่อสื่อสารแบบอื่น ๆ ในที่นี้มากกว่าทั้งหมดนี้
- Centronics Parallel Printer Port Interface สามารถส่งข้อมูลได้หลายบิต สำหรับการส่งหนึ่งครั้ง ซึ่งมีความเร็วสูงสุด มักจะนิยมใช้สำหรับการติดต่อสื่อสาร ระหว่างซีพีและเครื่องพิมพ์ (Printer) , เครื่องสแกนเนอร์, เครื่องเก็บข้อมูลแบบภายนอก (Data Acquisition Devices) เป็นต้น
- IrDA (Interface Data Association) เป็นการสื่อสารข้อมูลแบบไร้สาย โดยใช้แสงอินฟราเรด ซึ่งใช้ได้ในระยะทางสั้น ๆ ในที่สายเคเบิลไม่สามารถติดตั้งได้ หรือ เข้าไปไม่ถึง ดังจะพบเห็นในชีวิตประจำวัน เช่น รีโมททีวี หรือวิดีโอ,เมาส์ หรือ คีย์บอร์ดอินฟราเรด เป็นต้น

MIDI (Musical Instrument Digital Interface) ใช้สำหรับการสื่อสารแบบอนาล็อกในเครื่องมือด้านเครื่องเสียง, เครื่องมือด้านดนตรี (ซินติไซเซอร์ / เปอร์คัชชัน / กีตาร์แอฟเฟ็ก) เครื่องมือควบคุมเสียงในโรงภาพยนตร์ (มิกเซอร์ / อีควอไรเซอร์ / แอฟเฟกต่าง ๆ) ซึ่งมันจะใช้กระแสไฟประมาณ 5 mA ที่ความเร็ว 31.5 kbps

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ทฤษฎีที่ใช้ในการวัดพิคัด

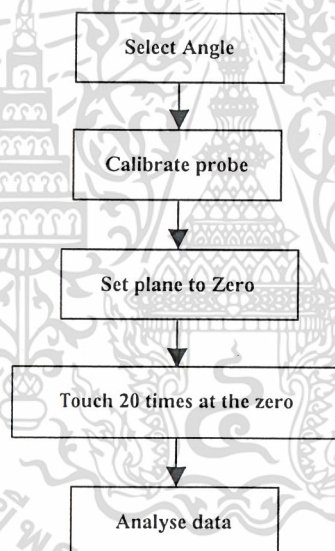
ดังรายละเอียดแสดงในภาคผนวกรายละเอียดโปรแกรม Geopak

2.6 การหาค่า Repeatability

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

$$S = \left[\left[\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2 \right] / N - 1 \right]^{1/2} \quad (2.5)$$

ขั้นตอนการหาค่า Repeatability คือ ขั้นแรกจะต้องเลือกมุมที่จะตรวจสอบ แล้วทำการสอบเทียบ หลังจากนั้นจึงหาตำแหน่งอ้างอิง แล้วแตะที่ตำแหน่งนั้น 20 ครั้ง



รูปที่ 2.26 ขั้นตอนการหาค่า Repeatability

2.7 การหาตำแหน่งศูนย์ให้กับชิ้นงาน

เมื่อทราบขนาดของหัวรับสัญญาณแล้วขั้นต่อไปก็คือการหาตำแหน่งศูนย์ให้กับชิ้นงานซึ่งในการทดลองนี้ใช้ตัว Check master เป็นตัวมาตรฐาน ใช้คำสั่งวัด Plane การแตะจะต้องแตะอย่างน้อย 3 จุด หลังจากนั้นจุดต่างๆจะถูกนำมาเชื่อมโยงเข้าหากันเพื่อสร้างระนาบแล้วจึงปรับระนาบนั้นให้เป็นศูนย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 การคำนวณ Least-squares line ใน 2 มิติ

สมการเส้นตรง :

$$\begin{aligned} y &= f(x) \\ &= (A)x + (D) \end{aligned}$$

ในทางปฏิบัติค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดคือ

$$f(x) = (y) + (\text{error})$$

$$\text{ฟังก์ชันความผิดพลาด} = f(x) - (y)$$

ฟังก์ชันของค่าความผิดพลาดในเทอมของ Least-squares definition ;

$$\begin{aligned} E(A,D) &= \sum \{f(x)-(y)\}^2 \\ &= \sum \{(A)x + (D) - y\}^2 \end{aligned}$$

หาค่า Minimise ของสมการนี้โดยการ Differentiate E(A,D) ด้วย A :

$$\begin{aligned} \frac{\delta E}{\delta A} &= \sum \{2(Ax + D - y) * (x)\} \\ 0 &= (\sum x^2)A + (\sum x)D - (\sum xy) \end{aligned}$$

หาค่า Minimise ของสมการนี้โดยการ Differentiate E(A,D) ด้วย D

$$\begin{aligned} \frac{\delta E}{\delta D} &= \sum \{2(Ax + D - y) * (0+1-0)\} \\ 0 &= (\sum x)A + (N)D - (\sum y) \end{aligned}$$

กำหนดให้ ;

$$N = \text{จำนวนจุดที่ทำการวัด}$$

จัดรูปสมการสมการใหม่ได้ ;

$$(\sum x^2) A + (\sum x) D = (\sum xy)$$

$$(\sum x) A + (N) D = (\sum y)$$

ผลลัพธ์ของสมการข้างต้น คือ ;

$$A = A_0$$

$$D = D_0$$

ดังนั้นสมการ Least Square line คือ

$$y = (A_0)x + D_0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 การคำนวณ Least-squares plane ใน 3 มิติ

สมการระนาบ :

$$ax+by+cz+d = 0$$

เขียนสมการ ได้ใหม่ดังนี้

$$z = f(x,y) \\ = (A)x + (B)y + (D)$$

ในทางปฏิบัติค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการวัดคือ

$$f(x,y) = (z) + (\text{error})$$

$$\text{ฟังก์ชันความผิดพลาด} = f(x,y) - (z)$$

ฟังก์ชันของค่าความผิดพลาดในเทอมของ Least-squares definition ;

$$E(A,B,D) = \sum \{ f(x,y) - (z) \}^2 \\ = \sum \{ (A)x + (B)y + (D) - z \}^2$$

หาค่า Minimise ของสมการนี้โดยการ Differentiate $E(A,B,D)$ ด้วย A :

$$\frac{\partial E}{\partial A} = \sum \{ 2(Ax + By + D - z) * (x) \} \\ 0 = (\sum x^2)A + (\sum xy)B + (\sum x)D - (\sum xz)$$

หาค่า Minimise ของสมการนี้โดยการ Differentiate $E(A,B,D)$ ด้วย B

$$\frac{\partial E}{\partial B} = \sum \{ 2(Ax + By + D - z) * (y) \} \\ 0 = (\sum xy)A + (\sum y^2)B + (\sum y)D - (\sum yz)$$

หาค่า Minimise ของสมการนี้โดยการ Differentiate $E(A,B,D)$ ด้วย D :

$$\frac{\partial E}{\partial D} = \sum \{ 2(Ax + By + D - z) * (1) \} \\ 0 = (\sum x)A + (\sum y)B + (N)D - (\sum z)$$

กำหนดให้ :

$$N = \text{จำนวนจุดที่ทำกรวัด}$$

จัดรูปสมการสมการใหม่ได้ ;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(\sum x^2) A + (\sum xy) B + (\sum x) D = (\sum xz)$$

$$(\sum xy) A + (\sum y^2) B + (\sum y) D = (\sum yz)$$

$$(\sum x) A + (\sum y) B + (N) D = (\sum z)$$

ผลลัพธ์ของสมการข้างต้น คือ ;

$$A = A_0$$

$$B = B_0$$

$$D = D_0$$

ดังนั้นสมการ Least Square plane คือ

$$z = (A_0)x + (B_0)y + (D_0)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 ลำดับขั้นตอนในการทำงาน ประกอบด้วย

- 3.1.1. ศึกษาและเก็บข้อมูลโครงการเบื้องต้น
- 3.1.2. ทำการวางแผนโครงการ
- 3.1.3. ทำการศึกษาข้อมูลในด้านต่างๆ
 - ด้านเครื่องวัดพิกัด
 - ด้านฮาร์ดแวร์
 - ด้านวงจรไฟฟ้า
 - ด้านซอฟต์แวร์
- 3.1.4. ออกแบบและดำเนินงานทางด้านฮาร์ดแวร์
- 3.1.5. ออกแบบและดำเนินงานทางด้านวงจรไฟฟ้าและส่วนอินเตอร์เฟส
- 3.1.6. ออกแบบและดำเนินงานทางด้านซอฟต์แวร์

3.2 การวางแผนโครงการ

ก่อนเริ่มลงมือทำโครงการ จำเป็นที่ต้องมีการวางแผนการทำโครงการ และเป้าหมายให้แน่ชัด โครงการจึงจะสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ซึ่งระยะเวลาการทำโครงการ รวมทั้งสิ้นประมาณ 1 ปี แบ่งออกเป็น 2 เทอม คือ เทอมที่ 1 และ เทอมที่ 2 โดยเทอมแรกเป็นส่วนการศึกษาข้อมูลด้านต่างๆ เช่น ข้อมูลด้านเครื่องวัดพิกัด , ข้อมูลด้านฮาร์ดแวร์, ข้อมูลด้านวงจรไฟฟ้า และ ข้อมูลการเขียนโปรแกรมซอฟต์แวร์ เป็นต้น เมื่อศึกษาข้อมูลส่วนต่างๆเสร็จเรียบร้อยแล้วต่อไปจะเป็นในด้านการออกแบบชุดหัวรับสัญญาณ ว่าควรออกแบบอย่างไรพร้อมทั้งแก้ไขปรับปรุงแบบให้มีความเหมาะสมและตรงกับความต้องการใช้งานมากที่สุด ส่วนเทอมที่สองจะลงมือทำจริง ทำตามแบบที่เราได้ออกแบบไว้ ซึ่งการลงมือจริงบางส่วน อาจต้องมีการปรับปรุงแก้ไขแบบ ไม่สามารถทำจริงได้เหมือนตามแบบ อาจเป็นเพราะว่า อุปกรณ์ที่ได้ ออกแบบไว้ หาได้ยาก มีราคาแพง เป็นต้น หลังจากสร้างและปรับปรุงส่วนต่างๆเรียบร้อยแล้ว ส่วนสุดท้าย เป็นส่วนสรุปผลการทดลองและจัดทำปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การศึกษาข้อมูล

แบ่งเป็นการศึกษาข้อมูลด้านต่างๆ ต่อไปนี้

3.3.1 ด้านเครื่องวัดพิกัด

ได้ทำการศึกษาข้อมูล

- หนังสือจากห้องสมุด
- ข้อมูลจากโรงงาน
- ข้อมูลจากอินเทอร์เน็ต
- ปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ

3.3.2 ด้านฮาร์ดแวร์

ได้ทำการศึกษาข้อมูล

- หัวรับสัญญาณ
- sensor ต่างๆที่ใช้ในการรับสัญญาณ
- ข้อมูลจากอินเทอร์เน็ต
- ข้อมูลจากห้องสมุด
- ปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษา

3.3.3 ด้านวงจรไฟฟ้า

ได้ทำการศึกษาข้อมูล

- ศึกษาวงจรอินเตอร์เฟส
- ศึกษาวงจรขับ stepping motor
- หนังสือวงจรอิเล็กทรอนิกส์

3.3.4 ด้านซอฟต์แวร์

ได้ทำการศึกษาข้อมูล

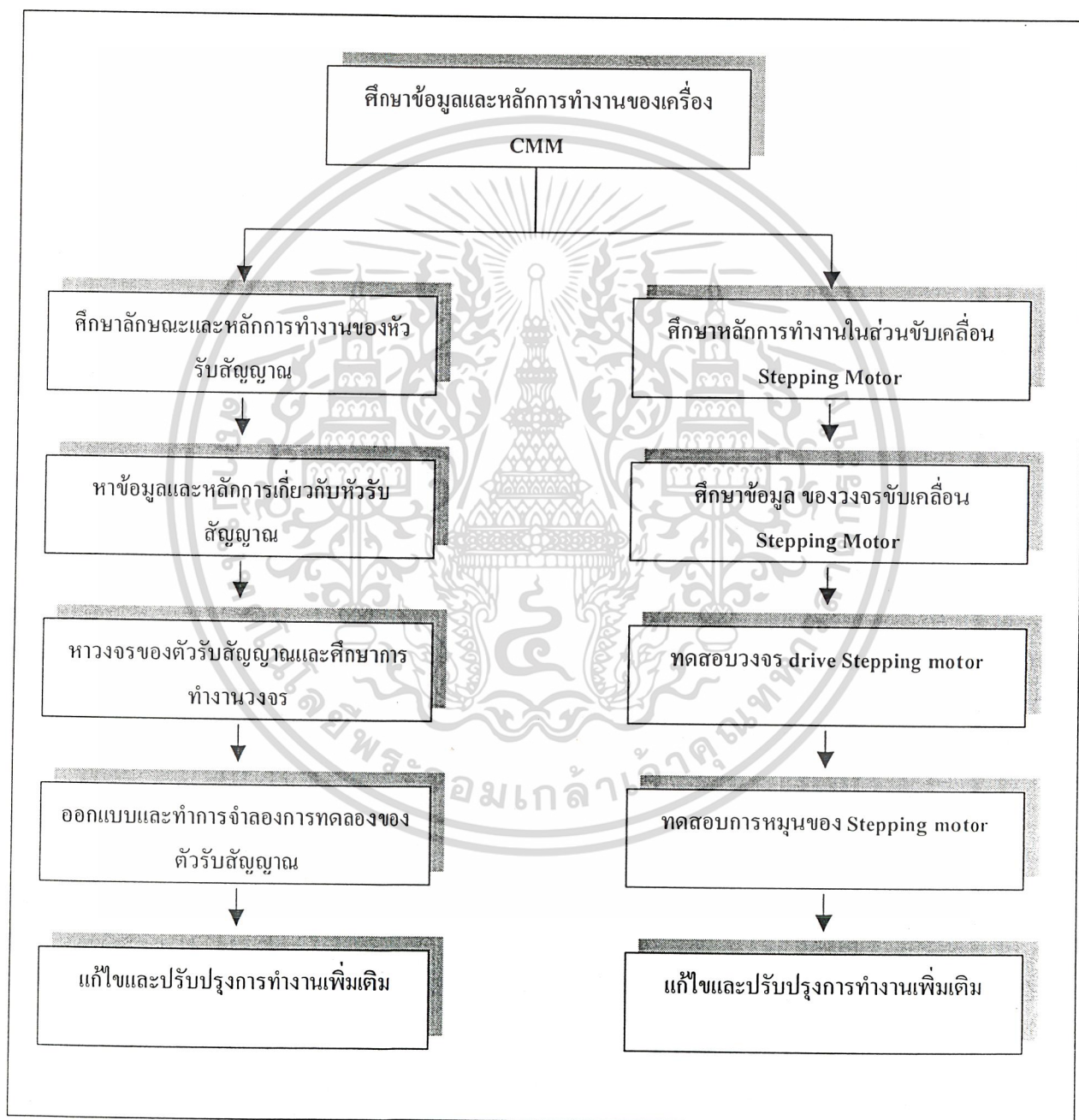
- การเขียนโปรแกรม Visual Basic
- หนังสือคู่มือการใช้คอมพิวเตอร์
- วิทยานิพนธ์และปริญญานิพนธ์ที่มีเนื้อหาใกล้เคียง
- ปรึกษาอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ
- หนังสือจากห้องสมุด
- ข้อมูลจากอินเทอร์เน็ต
- หนังสือวงจรอิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบและดำเนินงาน

3.4.1 การออกแบบด้านฮาร์ดแวร์

ได้ทำการออกแบบการพัฒนาเครื่องวัดพิกัดโดยในเครื่องวัดพิกัดมีส่วนประกอบต่างๆทางด้านฮาร์ดแวร์ โดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ชุดขับเคลื่อนในแนวแกน X แกน Y และแกน Z โดยใช้ stepping motor ในการขับเคลื่อน และชุดหัวรับสัญญาณ โดยมีขั้นตอนการออกแบบดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การออกแบบการทำงานส่วนฮาร์ดแวร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

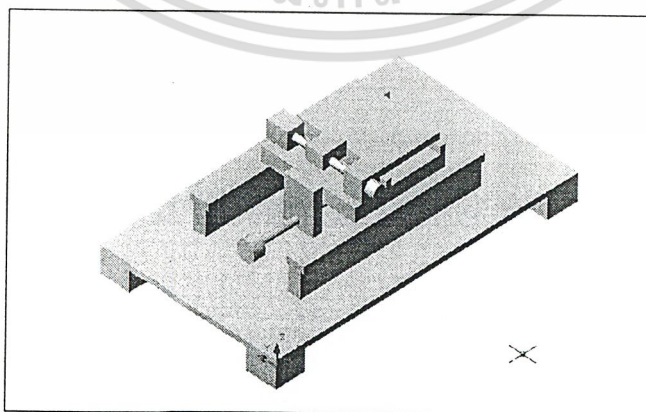
3.4.2. การดำเนินงานการด้านฮาร์ดแวร์

ด้าน Hardware ที่ออกแบบพัฒนาขึ้นในการศึกษาครั้งนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ ส่วนโครงสร้างหลัก ได้แก่ โต๊ะการเคลื่อนที่ในแนวแกน x และแกน y และส่วนชุดหัวโพรบ

3.4.2.1 โครงสร้างหลัก (โต๊ะการเคลื่อนที่ในแนวแกน x และแกน y)

ชุดควบคุมการเคลื่อนที่ในแนวแกน x และแกน y ประกอบด้วยอุปกรณ์และชิ้นส่วนต่างๆ ดังนี้

1. โต๊ะ (table) มีขนาดกว้าง 32 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร ซึ่งเคลื่อนที่โดยใช้มอเตอร์ ในการส่งกำลังไปยังสกรูนำ (Lead Screw) ในการหมุนในแต่ละรอบของสกรูนำ จะทำหน้าที่ส่งกำลังไปยังจับโต๊ะ โดยการเคลื่อนที่ของโต๊ะจะสามารถเคลื่อนที่ได้ ในแนวแกน x และแกน y เป็นระยะทาง 20 เซนติเมตร
2. ฐานรองรับแผ่นเหล็กพร้อมขาตั้งปรับระดับได้ ใช้ช่วยให้การเคลื่อนที่ของโต๊ะมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยการปรับระดับของขาตั้งจะช่วยให้โต๊ะสามารถเคลื่อนที่ได้เป็นระนาบที่ไม่มีการเอียงไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ซึ่งจะส่งผลทำให้การวัดพื้นผิวของชิ้นงานนั้นถูกต้องมากยิ่งขึ้น
3. สกรูนำ (Lead Screw) ช่วยในการเคลื่อนที่ที่มีความราบเรียบ ต่อเนื่อง และแม่นยำมากขึ้น โดยความยาวของสกรูนำจะต้องมีความยาวอย่างเหมาะสมกับระยะทางที่ต้องการให้โต๊ะเคลื่อนที่ โดยสกรูนำ (Lead Screw) ตัวใหญ่จะมีความยาว 30 เซนติเมตร และสกรูนำตัวเล็กจะมีความยาว 25 เซนติเมตร
4. แบริ่ง จำนวน 2 ตัว ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 17 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 19 มิลลิเมตร ซึ่งเส้นผ่าศูนย์กลางที่ใช้ ควรมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดเพลลาของสกรูนำให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพราะจะทำให้การหมุนของสกรูนำเป็นไปด้วยความราบเรียบมากยิ่งขึ้น ในกรณีที่เส้นผ่าศูนย์กลางของแบริ่ง นั้นมีขนาดไม่พอดีกับขนาดเพลลา ผลเสียที่เกิดขึ้นคือ ทำให้เกิดการกระแทกยิ่งขึ้นในขณะที่สกรูนำหมุน ซึ่งจะมีผลทำให้มอเตอร์เสียดำงในการหมุนไปอย่างเปล่าประโยชน์
5. สเตปปีงมอเตอร์ ที่เลือกใช้ในโครงการนี้ ใช้แบบ 6 สาย 4 เฟส หรือที่เรียกว่า ยูนิโพลาร์ โดยส่วนประกอบที่สำคัญของ มอเตอร์ชนิดนี้สามารถสังเกตได้ง่าย เนื่องจากมีสายไฟทั้งหมด 6 เส้นด้วยกัน และในการพันขดลวดนั้นจะมีการพันทั้งหมด 2 ขดด้วยกัน บนขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ซึ่งในแต่ละขดจะทำให้เกิดขั้วแม่เหล็กในทิศทางตรงข้ามกัน
6. เครื่องคอมพิวเตอร์ ที่ใช้เป็นเครื่องที่มีการประมวลผลที่รวดเร็ว ทั้งนี้เพื่อประสิทธิภาพของการแสดงผล โดยมีโปรแกรมที่จำเป็นสำหรับการควบคุมการทำงานและวัดต่าง ๆ ของเครื่องมือ คือ ภาษา Visual Basic, ภาษา Assembly

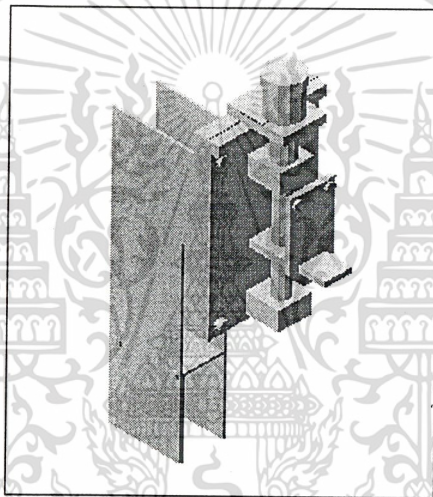


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ 3.2 แสดงส่วนประกอบของเครื่องในแนวแกน x และ แกน y
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์โครงสร้างหลัก (โต๊ะ และชุดควบคุมแนวแกน x และแกน y)

ชนิด	ขนาด	จำนวน
1. โต๊ะ	32 เซนติเมตร	1
2. สเต็ปป์ มอเตอร์	12 โวลท์, 1.8 องศา/สเต็ป	2
3. สกรุนำ (Lead Screw)	30 เซนติเมตร และ 25 เซนติเมตร	2
4. แบริ่ง	19 มิลลิเมตร	1
5. แบริ่ง	17 มิลลิเมตร	1

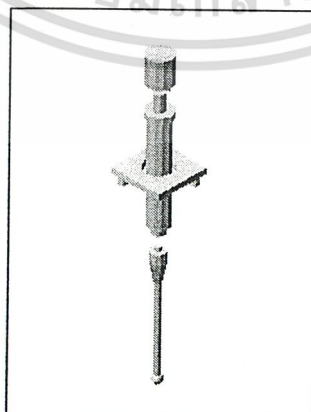
3.4.2.2 การออกแบบส่วนชุดขับเคลื่อนแกน Z



รูปที่ 3.3 ส่วนโครงแกน Z

3.4.2.3 การออกแบบส่วนของหัวรับสัญญาณ (Probe)

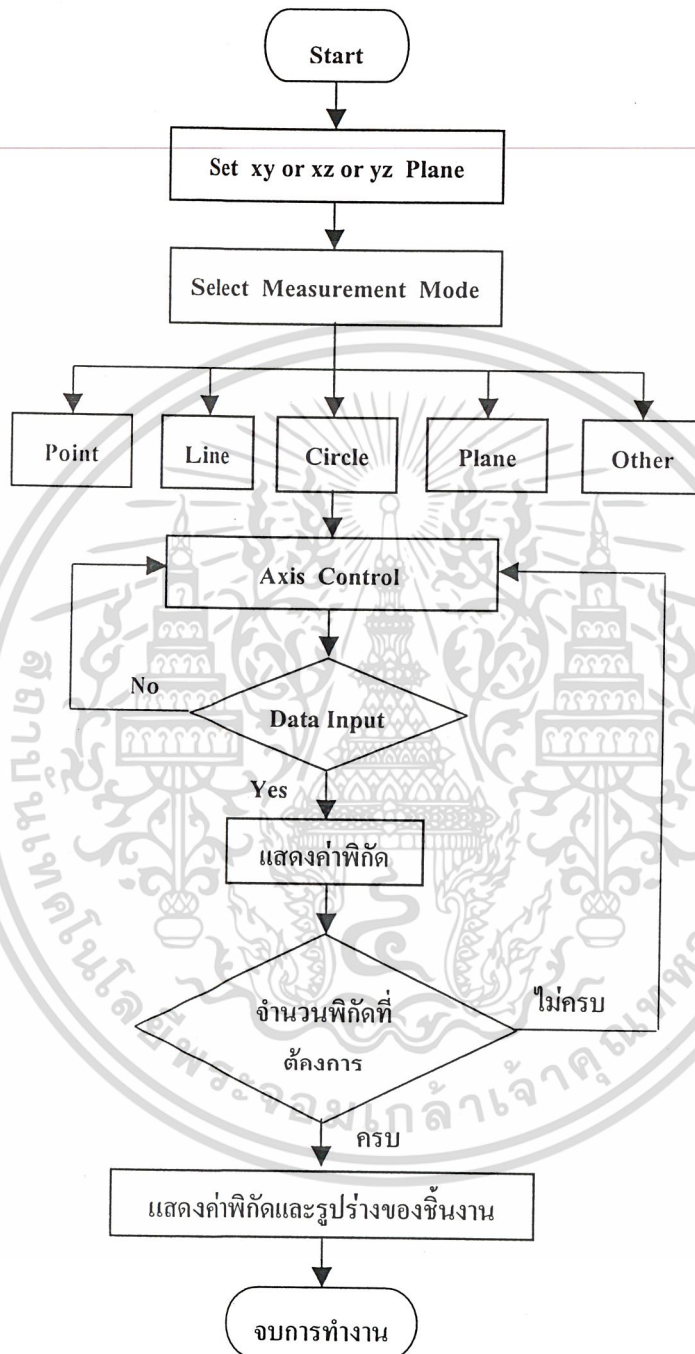
โดยทำการออกแบบและใช้หัวรับสัญญาณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 มิลลิเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.4 หัวรับสัญญาณ (Probe) นั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การดำเนินการด้านโปรแกรม

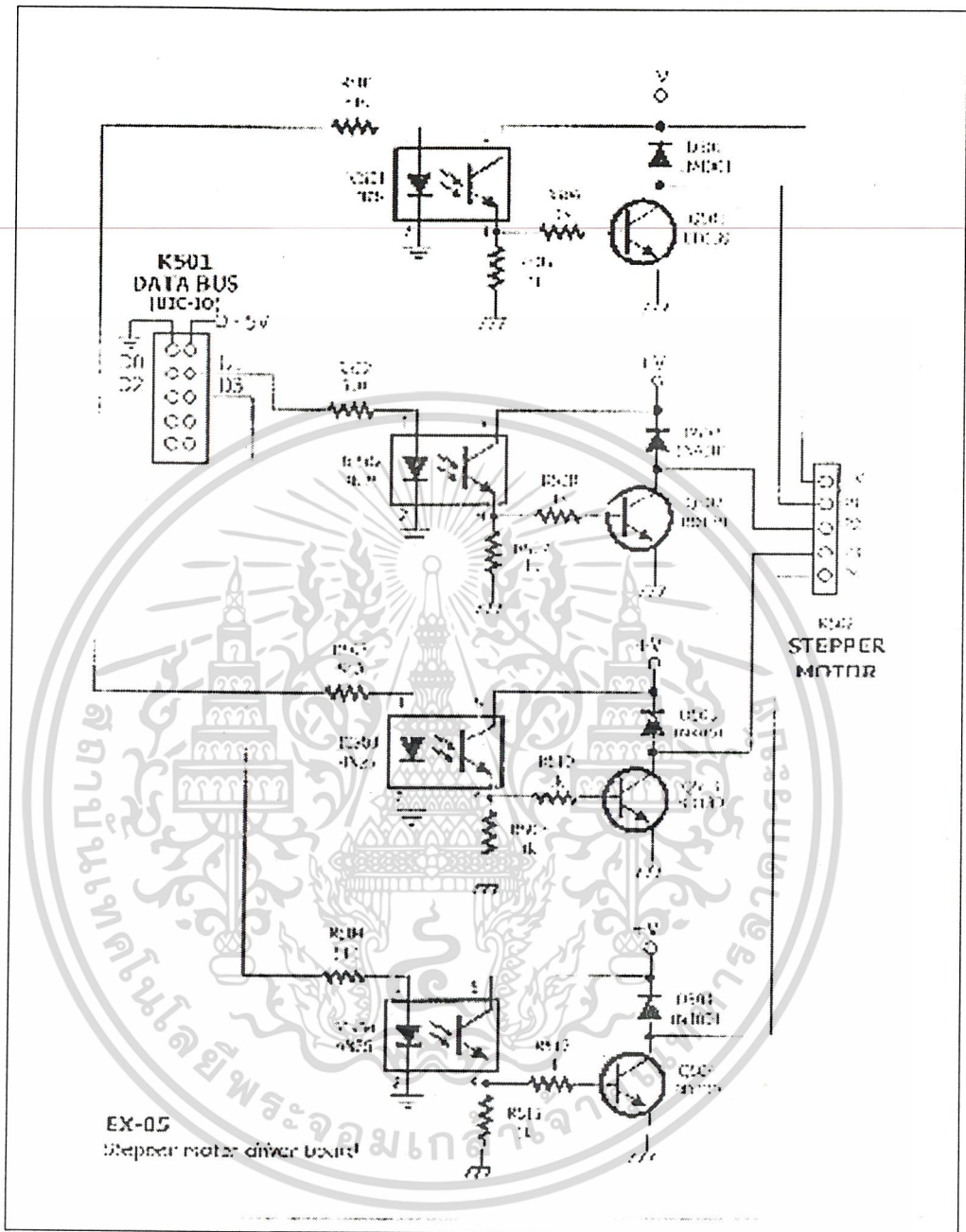
แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรกดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 Flow Chart แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ด้านวงจรขับ Stepping Motor



รูปที่ 3.6 วงจรขับ Stepping motor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

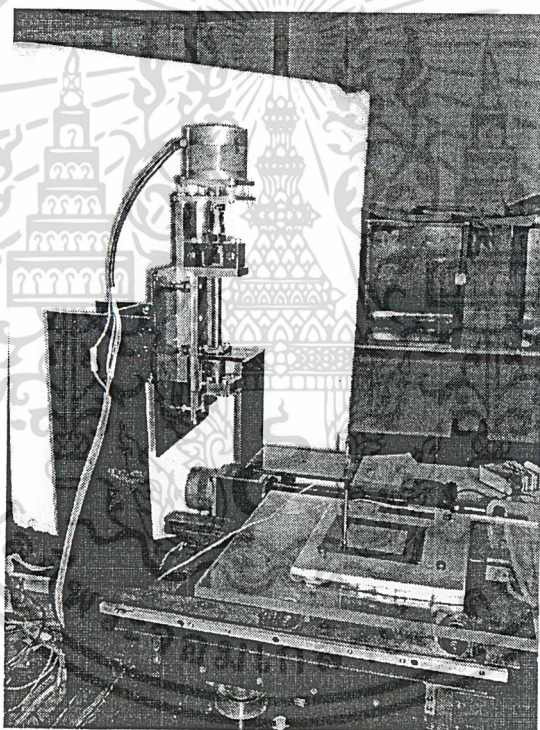
ผลการทดลองและการดำเนินงาน

การศึกษาการสร้างเครื่องวัดพิคัดแบ่งการดำเนินงานเป็น 2 ด้าน คือ

- ด้านฮาร์ดแวร์ เกี่ยวข้องกับการศึกษาหลักการทำงานของเครื่องวัดพิคัดและพิจารณาถึงความสามารถในการพัฒนาเครื่องวัดพิคัด
- ด้านซอฟต์แวร์ เกี่ยวข้องกับการศึกษาการสร้าง โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรมที่ใช้ในการสร้างคือ โปรแกรมภาษา Visual Basic

4.1 ผลการทดลองด้านฮาร์ดแวร์

จากการออกแบบแกน Z พร้อมหัวรับสัญญาณได้โดยมีลักษณะดังรูปที่ 4.1

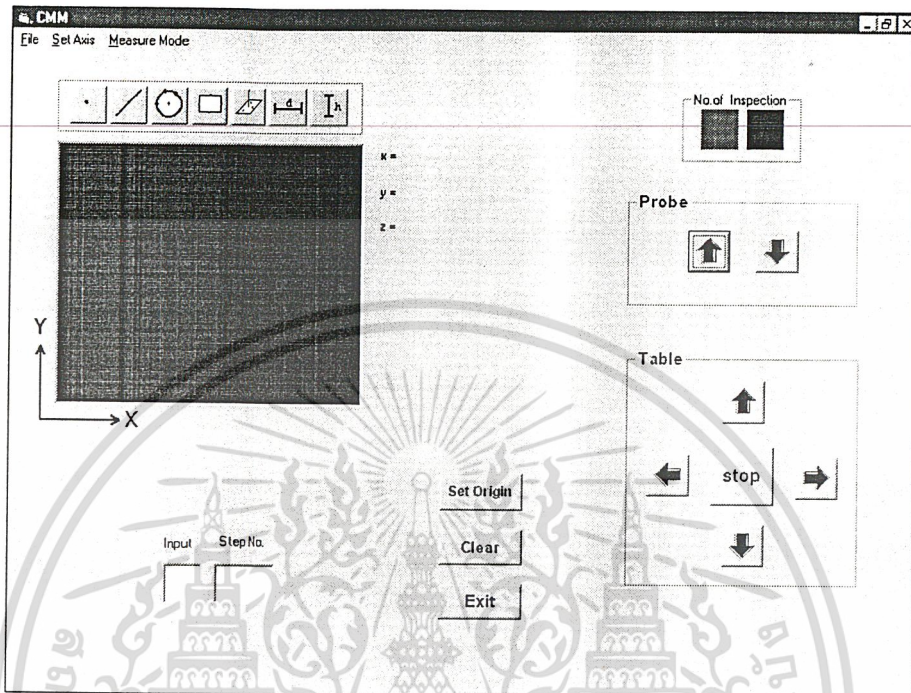


รูปที่ 4.1 โครงสร้างในแกน z พร้อมหัวรับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลองด้านโปรแกรม

การทดลองด้าน โปรแกรมจะเป็นการทดลองในการวัดรูปทรงเรขาคณิต เช่น จุด เส้นตรง วงกลม สี่เหลี่ยม การทดลองโปรแกรมเริ่มต้นที่หน้าจอแรกดังแสดงในรูปที่4.2



รูปที่ 4.2 รูปแบบฟอร์มหน้าจอของโปรแกรมในการวัดพิคัด

โดยเริ่มจากวางชิ้นงาน และทำการเลือกรูปแบบของการวัดในระนาบต่างๆเช่น ระนาบ XY ระนาบ XZ ระนาบ YZ กำหนดรูปร่างชิ้นงานที่จะวัด เช่น จุด, เส้นตรง, วงกลม, สี่เหลี่ยม เป็นต้น หลังจากนั้นก็จะทำการตั้งค่าจุดกำเนิด เริ่มต้นบนโต๊ะวางชิ้นงาน เมื่อตั้งค่าจุดกำเนิดเริ่มต้นแล้วจะทำการวัดชิ้นงาน โดยการกดปุ่มขับเคลื่อน โต๊ะวางชิ้นงานและ หัวรับสัญญาณไปยังตำแหน่งพิคัดที่ต้องการวัด หลังจากนั้นวัดจนครบจำนวนจุดที่กำหนด จะได้ผลแสดงค่าทางเรขาคณิตของชิ้นงานนั้น และแสดงรูปร่างของชิ้นงานที่ได้จากการวัดออกทางหน้าจอโปรแกรม

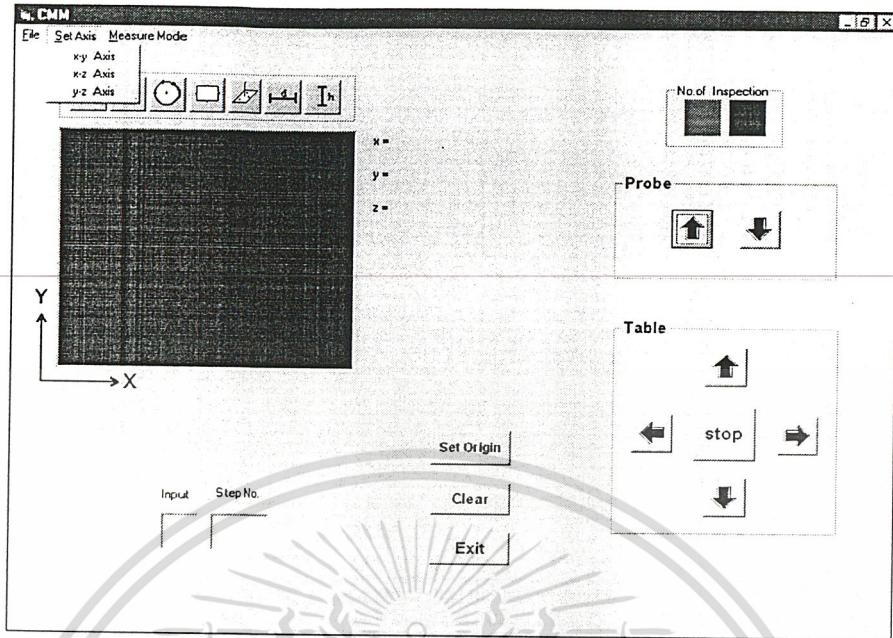
4.2.1 ขั้นตอนการวัดเส้นตรง

จากรูปที่ 4.3 แสดงขั้นตอนการวัดเส้นตรง (Least square line)

โดยการวัดเส้นตรงนั้นจะต้องทำการวัดพิคัดอย่างน้อย 3 จุด เพื่อคำนวณหา Least square line equation โดยมี ขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

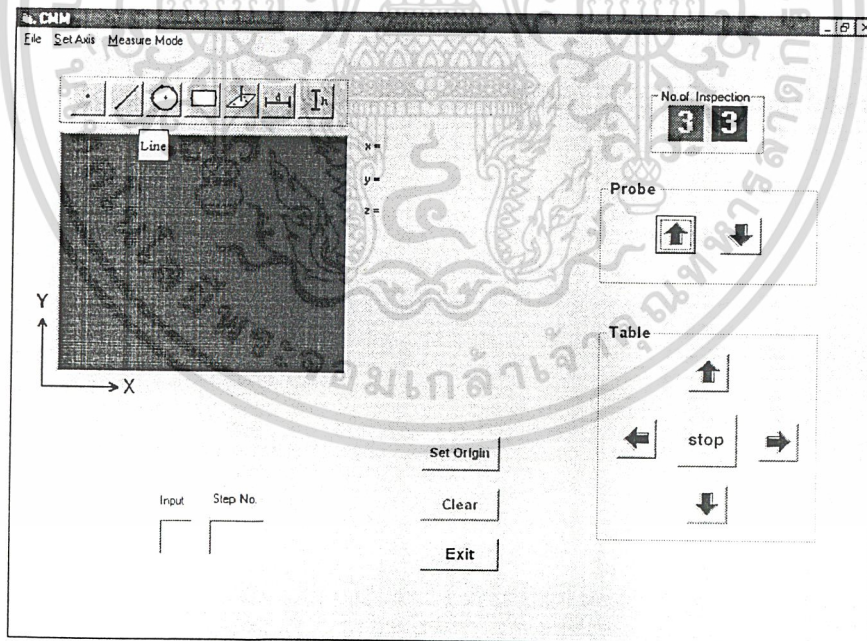
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ทำการเลือกกระดานที่ต้องการ โดยกดปุ่ม Set Axis



รูปที่ 4.3 รูปแบบของการเลือกกระดานที่ต้องการ

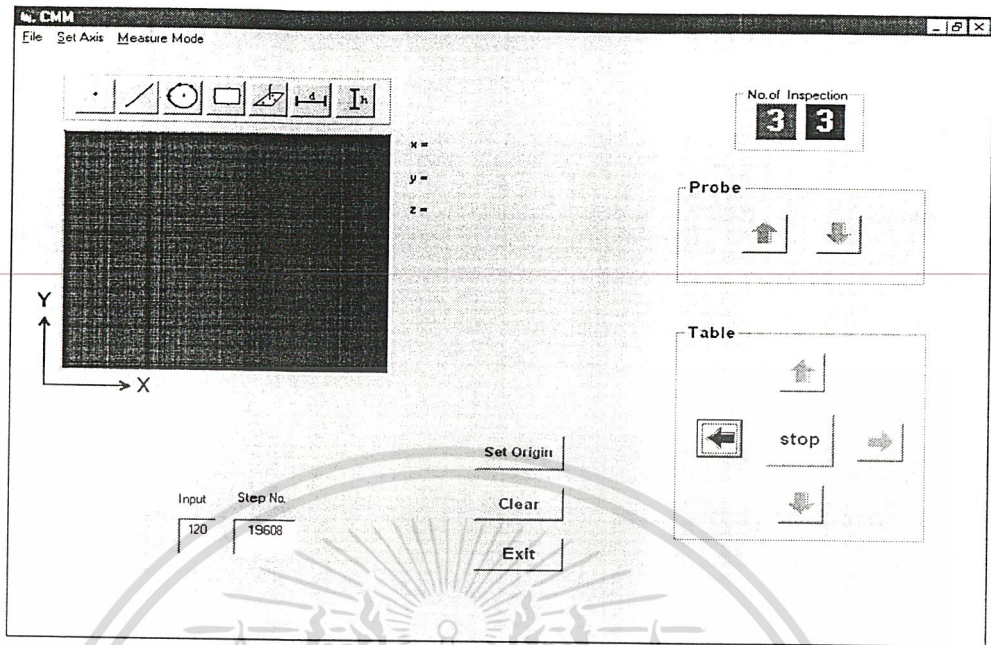
2. เลือกจุดที่ฟังก์ชัน Menu / Measurement Mode / Line หรือคลิกปุ่ม Line



รูปที่ 4.4 กำหนดรูปแบบของชิ้นงานที่ต้องการ

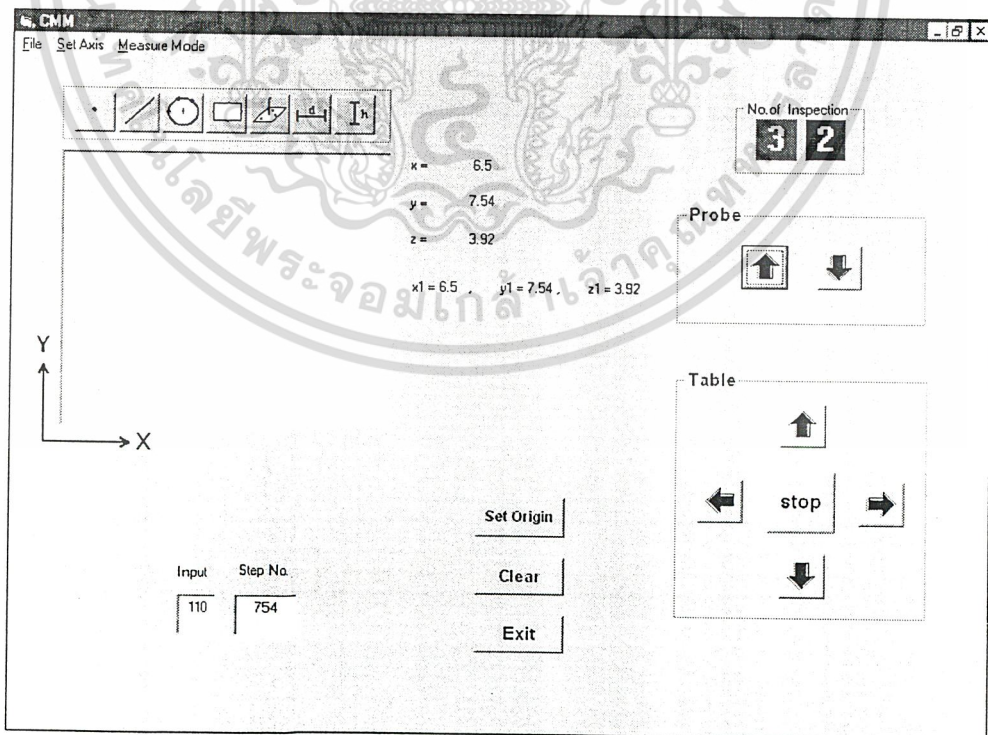
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการขับเคลื่อน โต๊ะวางชิ้นงานและหัวรับสัญญาณ ไปยังตำแหน่งที่จะทำการวัด



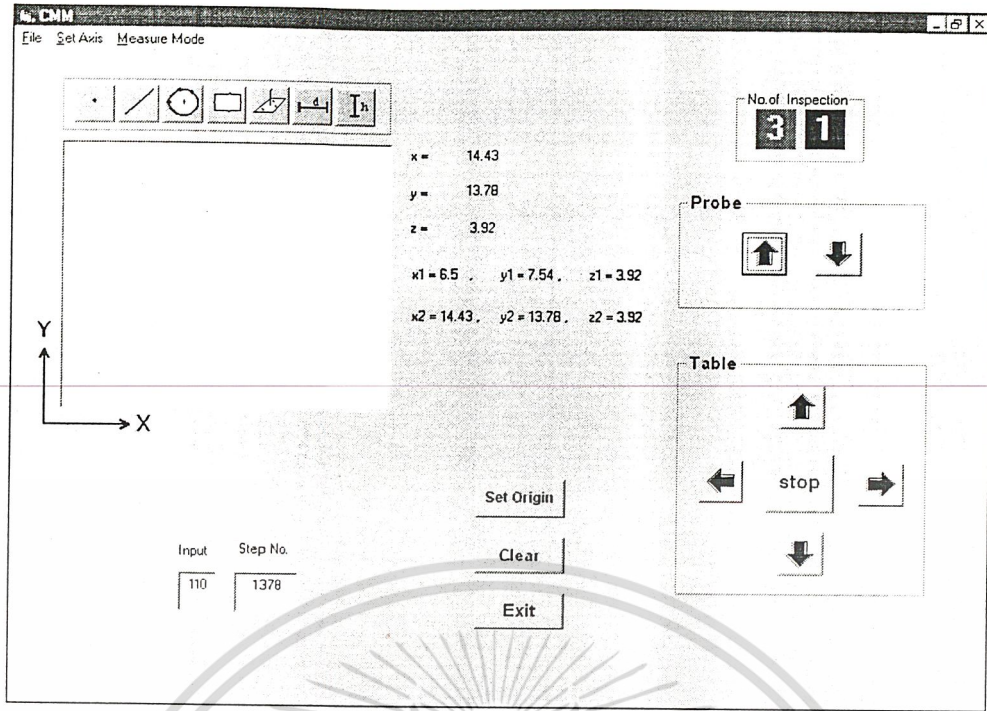
รูปที่ 4.5 การขับเคลื่อน โต๊ะวางชิ้นงานและหัวรับสัญญาณ

4. หน้าจอจะแสดงตำแหน่งพิกัดของชิ้นงานที่ทำการวัด และแสดงค่าตำแหน่งพิกัดดังแสดงในรูปที่ 4.6, รูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.8

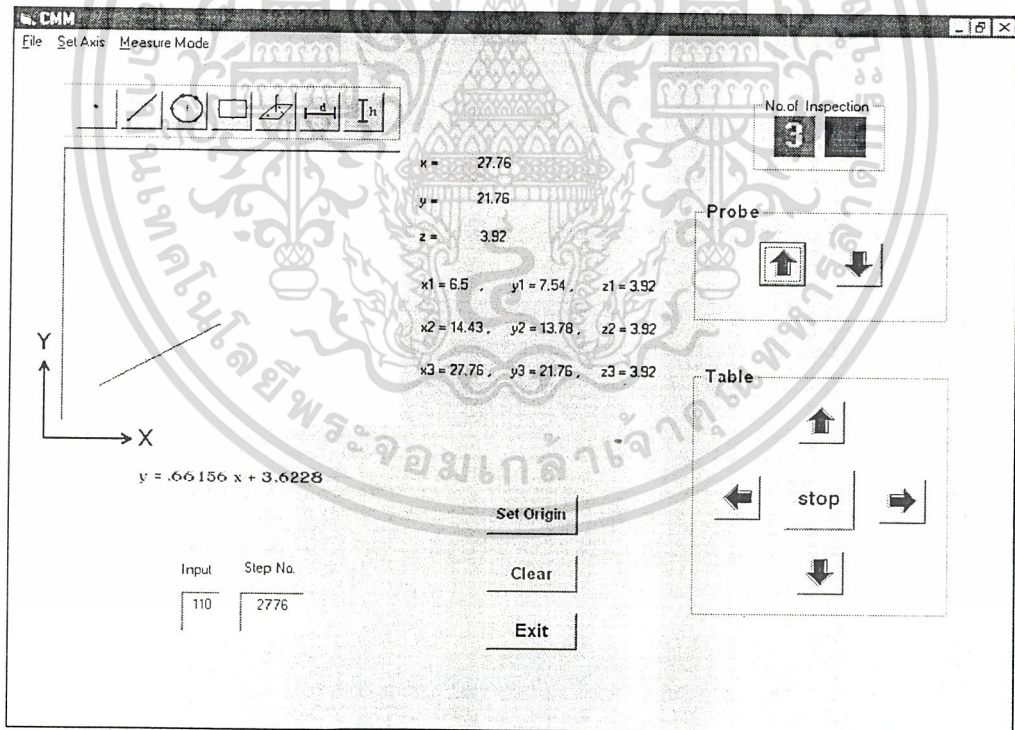


รูปที่ 4.6 การวัดพิกัดตำแหน่งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 การวัดพิกัดตำแหน่งที่ 2



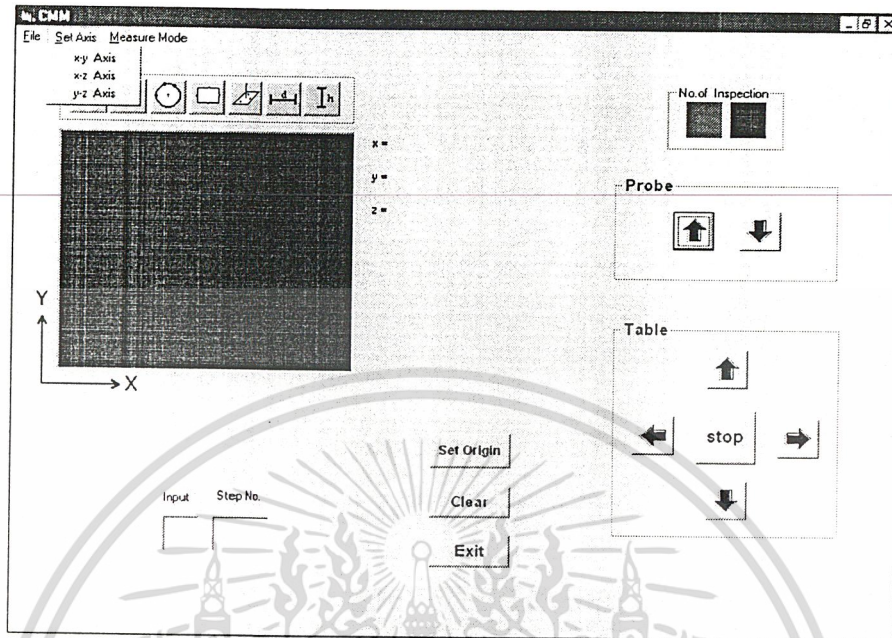
รูปที่ 4.8 การวัดพิกัดตำแหน่งที่ 3 แสดงรูปร่างและสมการเส้นตรง

จากรูปที่ 4.8 เมื่อทำการวัดพิกัดให้ครบ 3 จุด โปรแกรมจะสามารถคำนวณสมการเส้นตรงที่สามารถแทนความสัมพันธ์ของจุดทั้งสามจุดได้ โดยอาศัยหลักการคำนวณแบบ LEAST SQUARE ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ขั้นตอนการวัดวงกลม

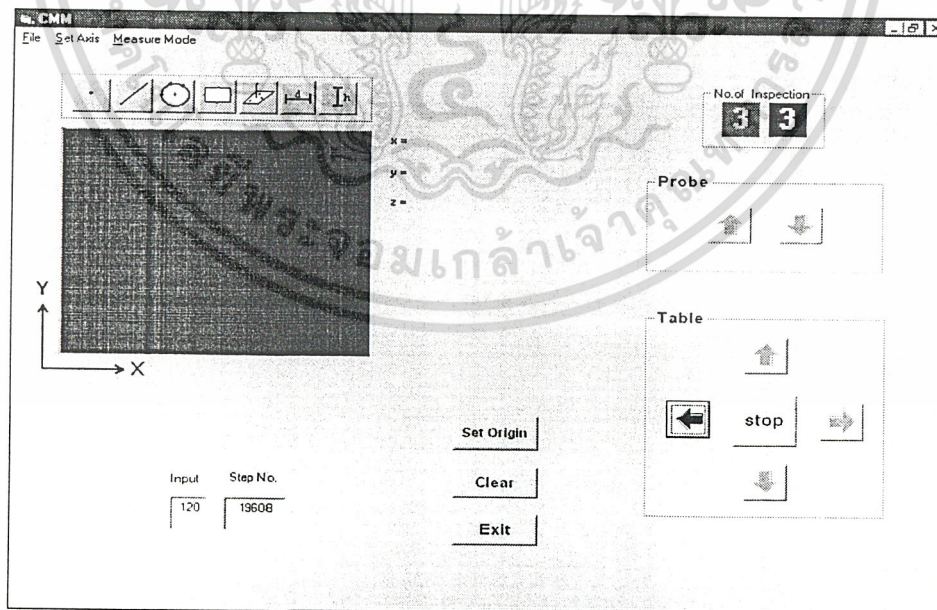
ขั้นตอนการวัดเส้นตรงมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

1. ทำการเลือกกระดานที่ต้องการ โดยกดปุ่ม Set Axis



รูปที่ 4.9 รูปแบบของการเลือกกระดานที่ต้องการ

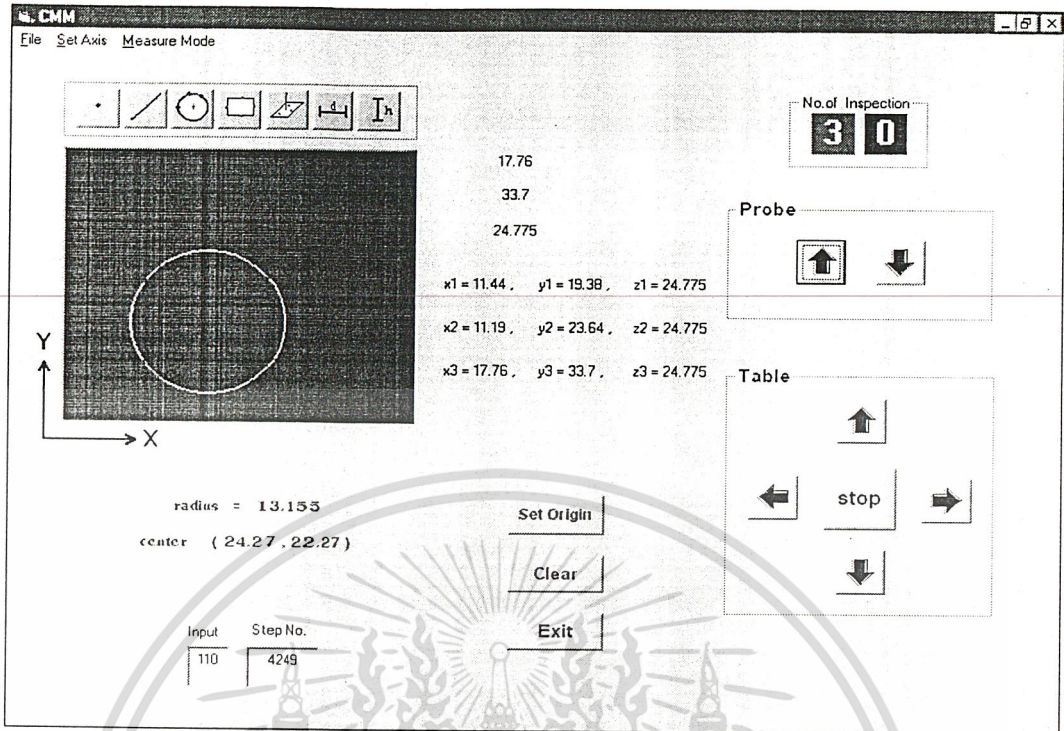
2. เลือกจุดที่ฟังก์ชัน Menu / Measurement Mode / Circle หรือคลิกปุ่ม Circle
3. ทำการขับเคลื่อนโต๊ะวางชิ้นงานและหัวรับสัญญาณไปยังตำแหน่งที่จะทำการวัด



รูปที่ 4.10 การขับเคลื่อนโต๊ะวางชิ้นงานและหัวรับสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. หน้าจอจะแสดงตำแหน่งพิกัดของชิ้นงานที่ทำการวัด และแสดงค่าตำแหน่งพิกัดดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 การวัดพิกัดตำแหน่งที่ 3 แสดงรูปร่างและสมการวงกลม

จากรูปที่ 4.11 เมื่อทำการวัดพิกัดให้ครบ 3 จุด โปรแกรมจะสามารถคำนวณสมการวงกลมที่สามารถแทนความสัมพันธ์ของจุดทั้งสามจุดได้ โดยอาศัยหลักการคำนวณแบบ LEAST SQUARE

4.3 ผลจากการทดลอง

4.3.1 การหาค่าความผิดพลาด (Error)

ในการคำนวณสุ่มค่าตัวอย่างหรือการกำหนดจำนวนครั้งที่ใช้ในการทดลองจะคำนวณได้จากสูตรดังต่อไปนี้

$$N = \left\lceil \left[\frac{K/S(n \sum x^2 - (\sum x)^2)^{1/2}}{(\sum x)} \right]^2 \right\rceil$$

เมื่อ

N = จำนวนครั้งที่ใช้ในการทดลอง

n = จำนวนตัวอย่างการทดลอง

K = ตัวประกอบของความเชื่อมั่น

S = ความคลาดเคลื่อน

X = ค่าที่ได้จากการทดลอง

ถ้าต้องการระดับความเชื่อมั่น 99.7% และยอมให้คลาดเคลื่อนได้ 5% และที่ระดับความเชื่อมั่น 99.7% จะได้ค่า K = 3 จากการศึกษาจะได้อัตรา N = 10 ทำการทดลองได้ผลดังนี้
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงผลการทดลอง

ค่ารัศมี	ค่ามาตรฐาน	ค่าที่วัดได้	ค่าความผิดพลาด
R1	22.50	22.493	0.007
R2	22.50	22.504	0.004
R3	22.50	22.505	0.015
R4	22.50	22.499	0.001
R5	22.50	22.557	0.057
R6	22.50	22.473	0.027
R7	22.50	22.390	0.110
R8	22.50	22.495	0.005
R9	22.50	22.479	0.021
R10	22.50	22.567	0.067
Mean		22.496	
error			3.040

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นว่าทำการทดลองโดยใช้การทดลองจำนวน 10 ครั้ง จะได้ค่าความผิดพลาด = 3.040 %

ในการทำการทดลองแต่ละครั้งจะได้ค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น ซึ่งแต่ละครั้งได้ทำการเปลี่ยนปัจจัยในการทดลองแต่ละครั้งซึ่งได้ทำการทดลอง 5 ครั้งได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองหาค่าความผิดพลาดแต่ละครั้ง

ผลการทดลอง	Mean	Error
การทดลองครั้งที่ 1	21.95	37.19
การทดลองครั้งที่ 2	22.00	28.90
การทดลองครั้งที่ 3	22.19	21.06
การทดลองครั้งที่ 4	22.15	8.33
การทดลองครั้งที่ 5	22.22	3.040

จากตารางข้างต้นจะเห็นได้ว่าการทดลองครั้งที่ 1 จะเกิดค่าความผิดพลาด 37.19%ทำการทดลอง 5 ครั้งซึ่งครั้งสุดท้ายจะได้ค่าความผิดพลาดลดลงเหลือ 3.20 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การหาค่าการแตะซ้ำที่ตำแหน่งเดิม (Repeatability)

จากสูตร

$$S = \left[\left[\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i)^2 \right] / (n-1) \right]^{1/2}$$

ได้ค่า Repeatability ของ แกน X ,แกน Y และแกน Z ดังนี้

ตารางที่ 4.3 แสดงการหาค่า Repeatability

ค่า Repeatability	
X =	0.08
Y =	0.04
Z =	0.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงานด้าน Hardware

จากการศึกษาในครั้งนี้ สามารถสรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงานด้าน Hardware ได้ 2 ประเด็น คือ

1. การเคลื่อนที่ในแนวแกน X และแนว แกน Y

การเคลื่อนที่ของสเตปป์ิ่งมอเตอร์ที่ทำให้โต๊ะ (Table) เคลื่อนที่นั้นมีความน่าเชื่อถือสูง เช่น การสั่งให้โต๊ะเคลื่อนที่ 300 มิลลิเมตร โดยสั่งให้สเตปป์ิ่งมอเตอร์ทำงาน จะทำให้โต๊ะเคลื่อนที่ไปได้ค่อนข้างใกล้เคียง การควบคุมสเตปป์ิ่งมอเตอร์เป็นแบบระบบเปิด (Open Loop) ซึ่งไม่มีสัญญาณป้อนกลับ (Feed Back)ย้อนกลับมาจึงทำให้การเคลื่อนที่อาจไม่เป็นไปตามที่กำหนดไว้

2. การเคลื่อนที่ของหัว โพรบใน แนวแกน Z

การเคลื่อนที่ที่ขึ้นและลงของหัวโพรบยังทำให้เกิดค่าความผิดพลาด เนื่องจากการขึ้นลงของหัวโพรบและการหมุนของสเตปป์ิ่งมอเตอร์ทำให้หัวโพรบเกิดการส่ายไปมาระหว่างการขึ้นและลง

5.2 สาเหตุและแนวทางในการแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการทดลอง

จากการทดลองพบว่าสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาดได้เนื่องจาก

1. แรงที่ใช้ในการเตะโต๊ะแต่ละครั้งที่เกิดจากการเตะที่จุดเดียวกันมีค่าไม่คงที่ ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดดังนั้น ควรแก้ไขโดยการทดสอบด้วยเครื่องวัด 3 แกนที่เป็นเครื่อง CNC เพราะสามารถกำหนดความเร็วและได้คงที่
2. การหมุนของสเตปป์ิ่งมอเตอร์ทำให้หัวโพรบเกิดการส่ายไปมาระหว่างการขึ้นและลงดังนั้นควรแก้ไข โดยยึดแกน Z และหัวโพรบให้มีความแข็งแรงขึ้น
3. เมื่อหัวโพรบเตะขึ้นงานทำให้ชิ้นงานเกิดการเคลื่อนที่ดังนั้นควรทำที่ยึดชิ้นงานติดกับ โต๊ะวางชิ้นงานเพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของชิ้นงานเนื่องจากแรงจากการล้มผิด

5.3 แนวทางการพัฒนาโครงการในอนาคต

จากการวิเคราะห์และสรุปผลการศึกษาพบว่าแนวทางในการพัฒนาโครงการนี้ในอนาคต คือ

1. ทำการปรับปรุงในส่วนชุดขับแกน Z ให้มีความแข็งแรงมากขึ้น
2. ทำการวิเคราะห์ทางเรขาคณิตแบบอื่นๆ ได้เช่น วงรี เป็นต้น
3. ควรจะมีการใช้หัวโพรบที่ใช้ในการวัดที่มีขนาดเล็กๆ และได้มาตรฐาน เพื่อลดความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นจากการวัด
4. ออกแบบให้ง่ายต่อการ ใช้และสื่อสารกับผู้ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพรวมทั้งมีฟังก์ชันช่วยต่อการ ใช้โปรแกรมพร้อมทั้งมีระบบฐานข้อมูลเพื่อสามารถ แก้ไขข้อมูลเพื่อนำข้อมูลไปใช้จริง
5. มีการพัฒนาโปรแกรมให้ยืดหยุ่นมากขึ้นและสื่อสารกับผู้ใช้ได้ง่ายรวมทั้งควรมีระบบ Help และคำอธิบายการใช้งานเพื่อแนวทางแก่ผู้ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. Stepping motor, รวมโครงการอิเล็กทรอนิกส์ 9 บริษัทซีเคยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), หน้า 95-105
2. SEROPE KALPAKJIAN, "Manufacturing Engineering and Technology" ,Illinois Institute of Technology, Coordinate Measuring Machines, P.1049-1051
3. Huang, P.S., Ni, J., "On-Line Error Compensation of Coordinate Measuring Machines,"International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1994
4. ISO. 10360-1 : Definitions and applications of the fundamental geometric principals.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายละเอียดโปรแกรม GEOPAK

โปรแกรมนี้ใช้สำหรับการวัด ชิ้นงานที่เป็นรูปทรงเรขาคณิต แบ่งออกเป็นหมวดต่างๆดังนี้

1. หมวดการวัด (Measurement mode)

1.1 การวัดขอบ (sd:side) ใช้สำหรับการวัดที่ต้องการค่าตามแนวแกน X หรือ แกน y หรือ Z ต้องสัมผัสอย่างน้อย 1 จุด

1.2 การวัดจุดแบบชดเชยค่ารัศมีของหัวรับสัญญาณ (pp: point compensate) ใช้สำหรับการวัดค่าตามแนวแกน X และ Y และ Z จุดที่แสดงค่าคือ จุดที่เส้นรอบวงของหัวรับสัญญาณสัมผัสชิ้นงานต้องสัมผัสอย่างน้อย 1 จุด

1.3 การวัดจุด (PT:point) ใช้สำหรับการวัดค่าตามแนวแกน X แกน Y และแกน Z จุดที่แสดงค่าคือตำแหน่งที่จุดศูนย์กลางของหัวรับสัญญาณต้องสัมผัสอย่างน้อย 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 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนหลักและ แกนรองต้องสัมผัสอย่างน้อย 5 จุด ถ้าต้องการค่าความเป็นวงรีด้วยต้องสัมผัส 6 จุดขึ้นไป

1.6 การวัดระนาบ (Pl:plant) ใช้สำหรับการวัดระนาบซึ่งจะแสดงค่าระยะตั้งฉากจากระนาบไปยังจุดศูนย์กลางของค่า X,Y,Z ต้องสัมผัสอย่างน้อย 3 จุด ถ้าต้องการค่าความเป็นวงรี ด้วยต้องสัมผัส 4 จุดขึ้นไป

1.7 การวัดทรงกระบอก (CY:cylinder) ใช้สำหรับการวัดทรงกระบอก ซึ่งจะแสดงค่าตำแหน่ง X,Y,Z ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ต้องสัมผัสอย่างน้อย 5 จุด ถ้าต้องการค่าความเป็นทรงกระบอก ด้วยต้องสัมผัส 6 จุดขึ้นไป

1.8 การวัดทรงกรวย (Co:cone) ใช้สำหรับการวัดทรงกรวย ซึ่งจะแสดงค่าตำแหน่ง X,Y และความสูงจากยอดถึงฐาน.มุมที่จุดยอดของกรวย ต้องสัมผัสอย่างน้อย 5 จุด ถ้าต้องการค่าความเป็นทรงกรวยด้วยต้องสัมผัส 6 จุดขึ้นไป

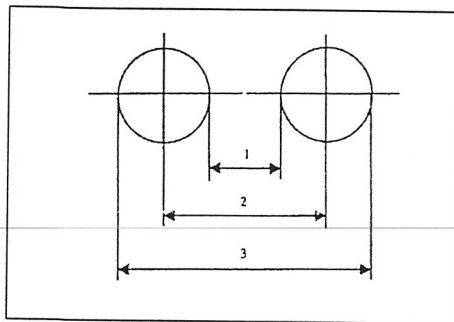
1.9 การวัดทรงกลม (sp:sphere) ใช้สำหรับการวัดทรงกลมซึ่งจะแสดงค่าตำแหน่ง x,y,z ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง ต้องสัมผัสอย่างน้อย 4 จุด ถ้าต้องการค่าความเป็นทรงกลมด้วยต้องสัมผัส 5 จุดขึ้นไป

1.10 การอินพุตค่าทางคีย์บอร์ด (KI: Key in element) คือการป้อนค่าเข้าไปเอง เช่นถ้าป้อนค่าจุด จะต้องกด KI แล้วตามด้วย pi แล้วจึงใส่คู่อันดับที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หมวดการคำนวณ (calculation mode)

2.1 การหาระยะทาง (DI: Distance) ใช้สำหรับการคำนวณระยะทางสามารถคำนวณได้ 3 แบบคือ



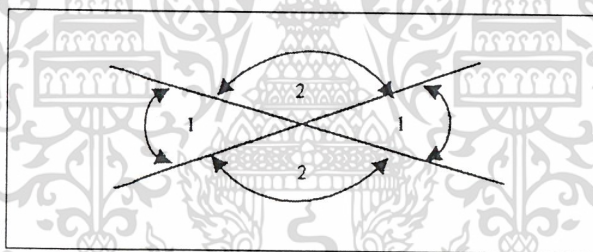
รูปที่ 1 การแสดงการหาระยะทาง

2.1.1 แบบลบรัศมี (subtract Radius)

2.1.2 แบบคิดที่จุดศูนย์กลาง % (without Compensation)

2.1.3 แบบบวกรัศมี (add radius)

2.2 การหามุม (AN: angel) ใช้สำหรับการคำนวณหามุม มีให้เลือก 2 มุมคือ



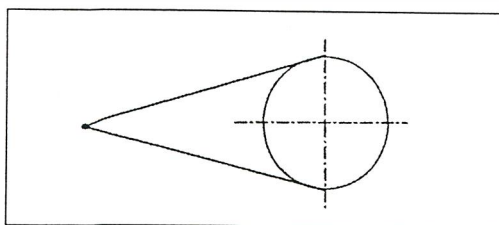
รูปที่ 2 การแสดงการหามุม

2.3 การหาค่าความสมมาตร (sy: symmetry) ใช้สำหรับการคำนวณหา จุด, เส้น, ระนาบ ที่อยู่กึ่งกลาง

2.4 การตัดกัน (in: intersection) ใช้สำหรับการหาการตัดกันของ วงกลม, เส้น, ระนาบ

2.5 การหาเส้นสัมผัสวงกลม (tA: tangent) มีอยู่ 3 แบบ คือ

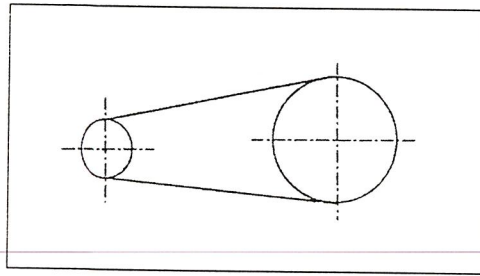
2.5.1 เส้นสัมผัสแบบจุด กับวงกลม



รูปที่ 3 การแสดงเส้นสัมผัสแบบจุด กับวงกลม

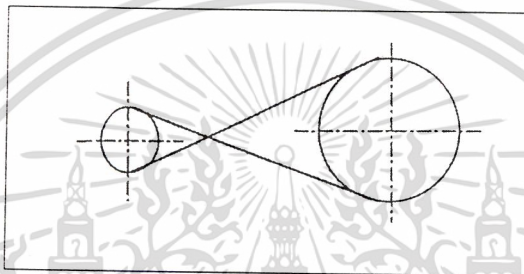
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 แบบขอบนอกของวงกลม กับ วงกลม



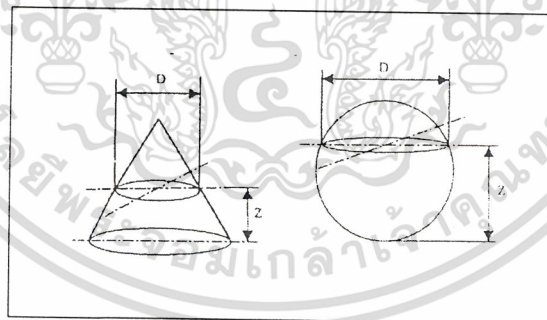
รูปที่ 4 การแสดงแบบขอบนอกของวงกลม กับวงกลม

2.5.3 แบบขอบในของวงกลม กับ วงกลม



รูปที่ 5 การแสดงแบบขอบในของวงกลม กับวงกลม

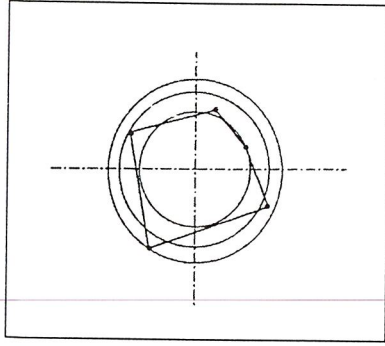
2.6 การคำนวณหาเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงใดๆของกรวยและทรงกลม



รูปที่ 6 การแสดงการหาเส้นผ่าศูนย์กลางและความสูงใดๆของกรวยและทรงกลม

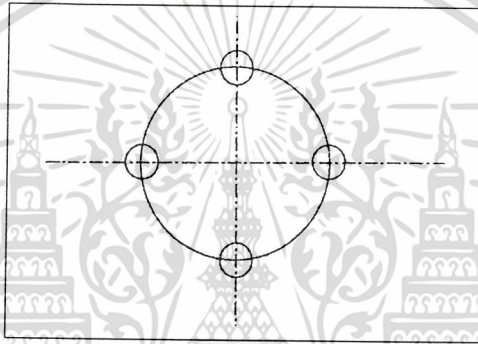
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 การหาค่าจุดที่มากและน้อยที่สุด ของวงกลม, ระนาบ, เส้นตรง



รูปที่ 7 การแสดงการหาค่าจุดที่มากและน้อยที่สุด ของวงกลม, ระนาบ, เส้นตรง

2.8 การต่อให้เป็นรูปทรงเรขาคณิต เช่น ต่อจุดเป็นเส้นหรือวงกลม



รูปที่ 8 การแสดงการต่อจุดเป็นเส้นหรือวงกลม

2.9 การป้อนสูตรในการคำนวณ ใช้สำหรับเป็นเครื่องคิดเลข

3. หมวดที่กักความเมื่อ

3.1 พิกัดความเมื่อของมุม

3.2 พิกัดความเมื่อของระยะ

3.3 พิกัดความเมื่อของเส้นผ่าศูนย์กลาง, รัศมี, ความกลม, ความเรียบ, ความตรง

3.4 พิกัดความเมื่อของตำแหน่ง

3.5 พิกัดความเมื่อของแนวแกน

3.6 พิกัดความเมื่อของทิศทาง

3.6.1 ความตั้งฉาก

3.6.2 ความขนาน

3.6.3 กวางเป็นเชิงมุม

3.6.4 แคนร่วมประสาน

3.6.5 ความสมมาตร

3.7 พิกัดความเมื่อของค่าความต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

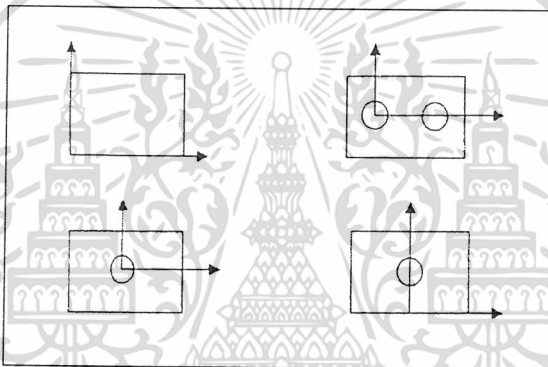
3.8 พิกัดความถี่ของผลลัพธ์ที่ได้จากเครื่องคิดเลข

4. หมวดคำสั่ง

4.1 ระบบคำสั่ง

- 4.1.1 การปรับระนาบให้เป็นระนาบเอียง
- 4.1.2 การสร้างจุดให้เป็นจุดอ้างอิง
- 4.1.3 การสร้างแกนอ้างอิง
- 4.1.4 การปรับระยะเยื้องของแกนอ้างอิง (offset alignment for axis)
- 4.1.5 การปรับระยะเยื้องของระนาบอ้างอิง (offset alignment for plant)
- 4.1.6 การหมุนแกนอ้างอิง
- 4.1.7 การเก็บคำสั่งลงในฮาร์ดดิส
- 4.1.8 การเรียกคำสั่งที่เก็บไว้ออกมา

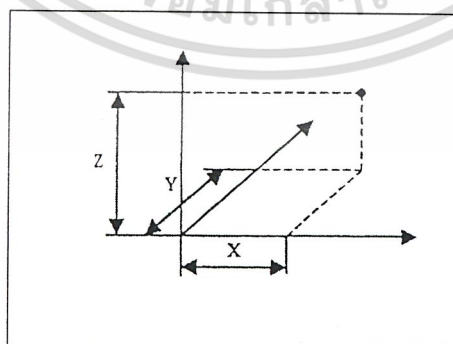
4.2 การสร้างคำสั่งแบบมาตรฐาน 4 แบบ



รูปที่ 9 การสร้างคำสั่งแบบมาตรฐาน 4 แบบ

4.3 รูปแบบของระบบคำสั่ง

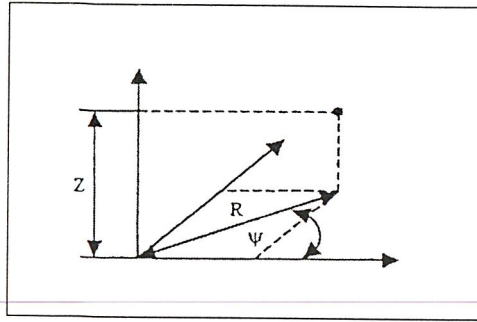
4.3.1 แบบคาร์ทีเซียน (cartesian)



รูปที่ 10 การสร้างคำสั่งแบบคาร์ทีเซียน (cartesian)

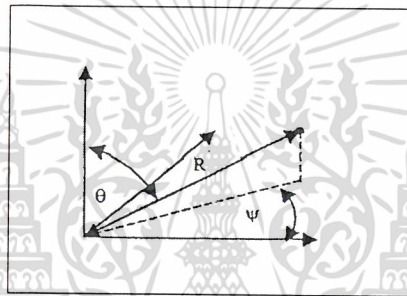
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 แบบ 2D-polar



รูปที่ 11 การสร้างคู่ลำดับแบบ 2D-polar

4.3.3 แบบ 3d-polar



รูปที่ 12 การสร้างคู่ลำดับแบบ 3D-polar

5. หมวดเกี่ยวกับโปรแกรมวัดชิ้นงาน

- 5.1 การจัดการโปรแกรม เช่น การลบ ,การคัดลอก, การเปลี่ยนชื่อ
- 5.2 การเขียนโปรแกรม
- 5.3 การเรียกโปรแกรมออกมาใช้
- 5.4 การแก้ไขโปรแกรม

6. หมวดเกี่ยวกับหัวรับสัญญาณ

- 6.1 การกำหนดขนาดของหัวรับสัญญาณ
- 6.2 การดูขนาดและทิศทางของหัวรับสัญญาณ

7. หมวดเกี่ยวกับเครื่องวัด 3 แกน

- 7.1 การดูตำแหน่งของเครื่อง
- 7.2 การวัดแบบอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ประโยชน์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. หมวดเกี่ยวกับระบบ

- 8.1 การเปลี่ยนหน่วย
- 8.2 การดูเวลา
- 8.3 การเลือกปริ้นท์เตอร์
- 8.4 การเลือก path สำหรับการเก็บข้อมูล

9. หมวดอื่นๆ

- 9.1 การดูรูป
- 9.2 การคำนวณค่าทางสถิติอย่างง่าย ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้