

การพัฒนาเครื่องสอบเทียบไดอัลเกจแบบอัตโนมัติ

พีรนนท์ สมทรง

TNI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

บัณฑิตวิทยาลัย สาขาเทคโนโลยีวิศวกรรม

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

ปีการศึกษา 2561

DEVELOPMENT OF AUTOMATIC DIAL GAUGE CALIBRATOR

Peeranon Somsong



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of Requirements
for The Degree of Master of Engineering Program in Engineering Technology

Graduate School

Thai-Nichi Institute of Technology

Academic Year 2018

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาชุดสอบเทียบไดอัลเกจแบบอัตโนมัติ

โดย

พริณนธ์ สมทรง

สาขาวิชา

เทคโนโลยีวิศวกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราคม เนินน้อย

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิชิต สุขเจริญพงษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย ศรีพัฒนะพิพัฒน์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทวัฒน์ ไชยชนะวงศ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย นิเวศน์รังสรรค์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราคม เนินน้อย)



พรีนทร์ สมทรง : การพัฒนาชุดสอบเทียบไดอัลเกจแบบอัตโนมัติ, ผู้ช่วยศาสตราจารย์
ดร.วรารคม เนติน้อย, 127 หน้า.

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเครื่องมือสอบเทียบไดอัลเกจแบบเข็ม ซึ่งประกอบด้วยเครื่องสอบเทียบไดอัลเกจแบบมือหมุนและชุดวัดระยะทางด้วยเซ็นเซอร์LVDT (Linear Variable Differential Transformer) รุ่น Sylvac80 ที่ทำงานโดยใช้คนควบคุมการทำงาน และบันทึกผล เพื่อนำมาปรับปรุงให้เป็นระบบอัตโนมัติ ทั้งระบบควบคุมการเคลื่อนที่ และบันทึกผลโดยคอมพิวเตอร์ในการปรับปรุงชุดขับเคลื่อนของเครื่องสอบเทียบไดอัลเกจแบบมือหมุนทำโดยใช้สายพานขับเคลื่อนที่มีอัตราทด 5:1 และสแตปมอเตอร์ที่ใช้วิธีการขับเคลื่อนแบบไมโครสเต็ปที่ 1/32 พร้อมพัฒนาโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ด้วย Arduino ทำให้ได้การเคลื่อนที่ของเครื่องสอบเทียบที่ 0.000047 mm/step และเชื่อมต่อการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ผ่านทาง RS232และชุดวัดระยะทาง Sylvac80 ได้พัฒนาโปรแกรมควบคุมการทำงาน และอ่านค่าด้วยโปรแกรม LabVIEW ผ่านทาง RS232 สำหรับโปรแกรมควบคุมการทำงานระบบอัตโนมัติทั้งหมดใช้กล้อง USB Digital Camera ที่มีความละเอียด 2592x1944 pixel โดยเขียนโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องสอบเทียบไปที่ตำแหน่งที่ต้องการสอบเทียบ และโปรแกรมจะทำการตรวจสอบว่าเข็มของ Dial Gauge ตรงกับขีดโดยการวิเคราะห์ด้วยภาพที่รับมาจากกล้อง แล้วจึงอ่านค่าที่ถูกต้องจากชุดวัดระยะของ Sylvac80 โปรแกรมจะทำการระบุการนี้ซ้ำๆ กับทุกตำแหน่งที่ต้องการสอบเทียบ

จากการทดสอบเครื่องสอบเทียบไดอัลเกจหลังการปรับปรุงเครื่องควรเคลื่อนที่ด้วยความเร็วระหว่าง 4.49mm/min ถึง 0.28mm/min จึงจะให้ความไม่แน่นอนในการเคลื่อนที่ต่ำกว่า $\pm 3.2\%$ และมีความไม่แน่นอนในการตรวจสอบว่าเข็มตรงกับขีดดีกว่า ± 0.0012 mm เมื่อทำการทดสอบเครื่องสอบเทียบที่ทำการปรับปรุงนี้ กับเครื่อง Precision Gauge Calibratorที่มีใช้ในห้องปฏิบัติการสอบเทียบด้านความยาวและขนาด ได้ค่า EN Ratio ≤ 1 ในทุกตำแหน่ง ตามมาตรฐาน ISO17043

บัณฑิตวิทยาลัย
สาขาวิชา เทคโนโลยีวิศวกรรม
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

PEERANON SOMSONG : DEVELOPMENT OF AUTOMATIC DIAL GAUGE CALIBRATOR TECHNIQUE. ADVISOR : ASST. PROF. DR. WARAKOM NERDNOI, 127 PP.

This research is study, the manual Needle Dial Gauges, consisting of the Precision Gauge Calibrator and a Distance Measurement Instrument (Sylvac80) which is the LVDT (Linear Variable Differential Transformer) sensor. This calibrator was modified to be a fully computerized calibrator system which based on vision analysis system. In order to improve, a 5:1 belt driver and a stepping motor using micro-step drive at 1/32 were installed to the Gauge Calibrator drive system. With help of Arduino and developed program, the movement of calibrator was 0.000047 mm/step and it can be controlled by computer via RS232 interface. The LabVIEW program was developed to control and read the Sylvac80 via RS232. All automation calibration process based on a USB Digital Camera with a resolution of 2592x1944 pixels and vision analysis program. The program move calibrator to the calibration location then check the match of the needle and the marker line by vision analysis system. After that the true position was read from the Sylvac80. These will repeat to all calibration positions.

The best speed of calibrator was between 0.28 mm/min to 4.49 mm/min which gave a movement uncertainty less than $\pm 3.2\%$. The uncertainty of the match of the needle and the marker of vision system was ± 0.0012 mm. And the EN Ratio < 1 , when compare the improved calibrator to the Reference calibrator.

Graduate School

Student's Signature.....

Field of Engineering of Technology

Advisor's Signature

Academic Year 2018

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้กระทำให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี อันเนื่องมาจากความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราคม เนติน้อย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่าของท่าน มาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาแนวทางและการพัฒนาในการทำวิจัย ตลอดจนสอนขั้นตอนการดำเนินวิจัยตลอดการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย ศรีพัฒนะพิพัฒน์ ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรชัย นิเวศน์รังสรรค์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทวัฒน์ ไชยชนะวงศ์ (สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น) ที่กรุณาเสียสละเวลาเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

และท้ายที่สุดขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ให้โอกาสในการศึกษาและขอบคุณเพื่อนๆ อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ทั้งผู้ที่กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนามใน ณ ที่นี้ผู้เขียนมีความซาบซึ้งในความกรุณาอันดีเยี่ยมจากทุกท่านและขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

พิรณัท สมทรง

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	5
1.3 ขอบเขตของการศึกษาและวิจัย.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ไดอัลเกจ.....	6
2.2 การสอบเทียบไดอัลเกจและการหาค่าความไม่แน่นอนของผลการวัด.....	7
2.3 สเต็ปมอเตอร์(Stepping Motor).....	14
2.4 พอร์ตอนุกรม(Serial Port).....	22
2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์(Microcontroller).....	32
2.6 LabVIEW.....	34
2.7 Image Processing.....	41
3 วิธีการดำเนินงาน.....	46
3.1 Analysis Tools.....	47

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
3	3.2 การออกแบบโครงสร้างและประกอบโครงสร้าง.....	57
	3.3 ศึกษาข้อมูลการเชื่อมต่อของเครื่อง Sylvac80.....	61
	3.4 สร้างขาตั้งกล้องและโคมไฟส่องสว่าง.....	62
4	ผลการวิจัย.....	65
	4.1 ผลการทดลองหาค่าความสามารถของสแต็ปปั๊มมอเตอร์.....	65
	4.2 ผลการทดลองการประมวลผลของภาพและการแสดงผล.....	66
	4.3 ผลการทดลองระบบการทำงานทั้งหมดของเครื่องDial Test Indicator....	68
	4.4 ผลดำเนินงาน.....	70
5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	76
	5.1 สรุปผลการวิจัย.....	76
	5.2 ข้อเสนอแนะ.....	77
	5.3 บทวิจารณ์.....	77
	บรรณานุกรม.....	78
	ภาคผนวก.....	79
	ภาคผนวก ก.....	80
	ภาคผนวก ข.....	82
	ประวัติย่อผู้วิจัย.....	127

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	ระยะการเคลื่อนที่ของตำแหน่งที่สอบเทียบไดอัลเกจ..... 5
2.1	ค่ามาตรฐานของแต่ละ Range ในการสอบเทียบ Dial Indicator อ้างอิงตามมาตรฐาน JIS B 7503:1997..... 8
2.2	ตารางแสดงค่า k..... 13
2.3	การทำงานของ สเต็ปมอเตอร์ แบบ Wave..... 19
2.4	การกระตุ้นของขดลวดแบบ 2 เฟส..... 20
2.5	การทำงานของ แบบครึ่งเฟส..... 21
2.6	การส่งข้อมูลของ RS-232..... 24
2.7	ลักษณะการต่อใช้งานมาตรฐาน RS-422, RS-485..... 27
2.8	การเปรียบเทียบคุณสมบัติ RS-232, RS-423, RS-422 และ RS-485..... 29
2.9	ความยาวสายเคเบิล RS-232 ตาม Texas Instruments..... 31
2.10	แรงดันไฟฟ้าของ RS-232..... 31
2.11	เปรียบเทียบคำศัพท์ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม..... 39
4.1	ข้อมูลที่ LVDT อ่านได้เมื่อเข็มทับเส้นบนหน้าปัดไดอัลเกจ..... 67
4.2	ผลการทดลองของ Dial Gauge จำนวน 3 ครั้ง..... 69
4.3	ตารางเปรียบเทียบผล EN Ratio ของการสอบเทียบครั้งที่ 1..... 70
4.4	ตารางเปรียบเทียบผล EN Ratio ของการสอบเทียบครั้งที่ 2..... 72
4.5	ตารางเปรียบเทียบผล EN Ratio ของการสอบเทียบครั้งที่ 3..... 73
ข.1	การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 1 ขนาด 0-2.4 mm..... 83
ข.2	การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 1 ขนาด 5-7.5 mm..... 85
ข.3	การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 1 ขนาด 10-13 mm..... 87
ข.4	การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 1 ขนาด 15-17.5 mm..... 89
ข.5	การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 1 ขนาด 20-22.5 mm..... 91
ข.6	การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 2 ขนาด 0-2.4 mm..... 93
ข.7	การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 2 ขนาด 5-7.5 mm..... 95
ข.8	การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 2 ขนาด 10-13 mm..... 97
ข.9	การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 2 ขนาด 15-17.5 mm..... 99

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.10	การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 2 ขนาด 20-22.5 mm.....101
ข.11	การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 3 ขนาด 0-2.4 mm.....103
ข.12	การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 3 ขนาด 5-7.5 mm.....105
ข.13	การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 3 ขนาด 10-13 mm.....107
ข.14	การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 3 ขนาด 15-17.5 mm.....109
ข.15	การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 3 ขนาด 20-22.5 mm.....111
ข.16	แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 1 (ความถี่ 1.6 kHz, Forward).....113
ข.17	แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 1 (ความถี่ 1.6 kHz, Backward).....114
ข.18	แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 1 (ความถี่ 1.6 kHz, Repeat).....115
ข.19	แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 2 (ความถี่ 1.6 kHz, Forward).....116
ข.20	แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 2 (ความถี่ 1.6 kHz, Backward).....117
ข.21	แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 2 (ความถี่ 1.6 kHz, Repeat).....118
ข.22	แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 3 (ความถี่ 1.6 kHz, Forward).....119
ข.23	แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 3 (ความถี่ 1.6 kHz, Backward).....120
ข.24	แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 3 (ความถี่ 1.6 kHz, Repeat).....121
ข.25	เปรียบเทียบผล En Ratio ครั้งที่ 1.....122
ข.26	เปรียบเทียบผล En Ratio ครั้งที่ 2.....123
ข.27	เปรียบเทียบผล En Ratio ครั้งที่ 3.....125

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	Dial Indicator ที่ลูกค้าส่งมาสอบเทียบ/เลขงาน.....	2
1.2	Outside Micrometer และเครื่องมือชนิดต่างๆที่ลูกส่งมาสอบเทียบ.....	2
1.3	Precision Gauge Calibrator.....	3
1.4	Dial Test Indicator.....	4
1.5	Dial Test Indicator (Sylvac80).....	4
2.1	กลไกการทำงานของไดอัลเกจ.....	6
2.2	โครงสร้างของ Stepping Motor.....	15
2.3	โครงสร้างอย่างง่ายของ Stepping Motor ชนิดไฮบริด.....	16
2.4	ลักษณะการพันขดลวด สเต็ปมอเตอร์ แบบ ไบโพลาร์.....	16
2.5	ลักษณะการพันขดลวด สเต็ปมอเตอร์ แบบ ยูนิโพลาร์.....	17
2.6	โครงสร้างการทำงานของ Stepping Motor.....	18
2.7	หลักการทำงานของ สเต็ปมอเตอร์.....	19
2.8	Port Communicate ชนิดต่างๆ.....	22
2.9	การจัดขาของคอนเน็กเตอร์ อนุกรมแบบ DB9 และหน้าที่การใช้งานต่างๆ.....	24
2.10	การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับคอมพิวเตอร์ด้วยสาย DB9.....	25
2.11	การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกผ่าน DB9 แบบ Null modem.....	25
2.12	การใช้งานของ RS-422.....	26
2.13	RS-422, RS-485 DB-9 Female Pinout.....	26
2.14	RS232 to RS422 or RS-422 to RS-232 Serial Interface Convert Diagram[12].....	27
2.15	การเชื่อมต่อ RS-232 ระหว่างคอมพิวเตอร์กับเครื่องมือวัด.....	28
2.16	ส่วนประกอบต่างๆของ Arduino UNO-R3.....	33
2.17	Arduino รุ่น UNO R3.....	34
2.18	LabVIEW 2017.....	36
2.19	Front Panel ของ LabVIEW.....	37
2.20	Object ที่อยู่บน Front Panel ของ LabVIEW.....	37
2.21	Controls Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel.....	38
2.22	Tools Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel.....	38

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.23	การเพิ่ม SubVI ลงใน MainVI ในรูปแบบโปรเจค.....	39
2.24	ฟังก์ชันที่ใช้งานกับระบบ Vision.....	40
2.25	หลักการของ Image Processing.....	41
2.26	ตำแหน่งของ Pixel.....	42
2.27	การทำ Sampling และ Quantization.....	43
3.1	ขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัยและการจัดการเครื่อง Sylvac 80.....	46
3.2	วิธีเข้าไปเลือกฟังก์ชันใช้งาน IMAQ Find Circular Edge 3.....	47
3.3	ฟังก์ชันที่สามารถใช้ IMAQ Find Circular Edge 3.....	48
3.4	ตัวอย่างฟังก์ชันใช้งานของ IMAQ Find Circular Edge 3.....	48
3.5	วิธีเข้าไปเลือกฟังก์ชันใช้งาน IMAQ Concentric Rake 3.....	49
3.6	ฟังก์ชันที่สามารถใช้ IMAQ Concentric Rake 3.....	49
3.7	ตัวอย่างฟังก์ชันใช้งานของ IMAQ Concentric Rake 3.....	50
3.8	วิธีเข้าไปเลือกฟังก์ชันใช้งาน IMAQ Multi Threshold.....	51
3.9	ฟังก์ชันที่สามารถใช้ IMAQ Multi Threshold.....	51
3.10	ตัวอย่างฟังก์ชันใช้งานของ IMAQ Multi Threshold.....	52
3.11	วิธีเข้าไปเลือกฟังก์ชันใช้งาน IMAQ Point Distances.....	53
3.12	ฟังก์ชันที่สามารถใช้ IMAQ Point Distances.....	53
3.13	ตัวอย่างฟังก์ชันใช้งานของ IMAQ Point Distances.....	54
3.14	วิธีเข้าไปเลือกฟังก์ชันใช้งาน IMAQ Overlay Line.....	54
3.15	ฟังก์ชันที่สามารถใช้ IMAQ Overlay Lines.....	55
3.16	ตัวอย่างฟังก์ชันใช้งานของ IMAQ Overlay Line.....	55
3.17	วิธีเข้าไปเลือกฟังก์ชันใช้งาน IMAQ Get Angle.....	56
3.18	ฟังก์ชันที่สามารถใช้ IMAQ Get Angle.....	56
3.19	ตัวอย่างฟังก์ชันใช้งานของ IMAQ Get Angle.....	56
3.20	สิ่งที่ต้องสร้างและพัฒนาเพิ่มเติม.....	57
3.21	ฐานต้นแบบของเครื่อง Sylvac 80.....	57
3.22	บุทเดิมและบุทที่สร้างขึ้นใหม่.....	58

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.23	จานหมุนแบบเดิม และ แบบใหม่.....	58
3.24	ประกอบชุดที่ปรับปรุงเข้ากับจานหมุนเดิม.....	58
3.25	ติดตั้งเสร็จสมบูรณ์.....	59
3.26	ฐานของเครื่อง Sylvac80.....	59
3.27	ออกแบบและจัดทำวงจร Drive Stepping Motor ด้วย DRV8825.....	60
3.28	ติดตั้ง Stepping Motor พร้อมชุดควบคุม.....	60
3.29	ติดตั้งเครื่องเสร็จสมบูรณ์.....	61
3.30	จัดทำสาย RS-232 เพื่อต่อกับ CHL340.....	61
3.31	ขาตั้งกล้องและติดตั้งไฟส่องสว่าง.....	63
3.32	โคมไฟส่องสว่าง แบบ A,B และ C.....	63
3.33	เครื่อง Sylvac80 ที่ทำการปรับปรุงให้เป็นอัตโนมัติ.....	64
4.1	ผลค่าเฉลี่ยของแต่ละความถี่ในการทดสอบระบบการทำงานของ Stepping Motor.....	65
4.2	กราฟแสดงผลการหาค่า Standard Deviation.....	66
4.3	ค่าความผิดพลาดของการทดลองหาค่าการวัดซ้ำของระบบการประมวลผลของภาพ.....	67
4.4	ค่าความไม่แน่นอนของระบบวิเคราะห์ด้วยภาพ.....	68
4.5	หาค่า EN Ratio จำนวน 3 ครั้ง.....	75
ก.1	เครื่อง Dial Test Indicator (Sylvac80).....	81
ก.2	เครื่อง Precision Gauge Calibrator.....	81

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

มาตรวิทยา(Metrology) คือ กิจกรรมทางวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการสอบเทียบ ปรับตั้งความถูกต้องของเครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด หรือวิเคราะห์ทดสอบ โดยผลการสอบเทียบต้องสามารถสอกลับไปสู่มาตรฐานการวัดสากลได้ ปัจจุบันสำนักงานมาตรวิทยาโลก(BIPM)ที่ประเทศฝรั่งเศส เป็นผู้ดูแลระบบมาตรวิทยาระหว่างประเทศสำหรับประเทศไทยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ(NIMT)ซึ่งเป็นPrimary Standard ของประเทศไทยและเป็นสำนักงาน ที่ทำหน้าที่ถ่ายค่ามาตรฐานของเครื่องมือ แต่ละประเภท ไปยังห้องปฏิบัติการสอบเทียบภายในประเทศ ที่จัดเป็นระดับ Secondary Standard โดยกระบวนการมาตรฐานด้านคุณภาพที่ใช้ควบคุมห้องปฏิบัติการสอบเทียบทุกระดับคือISO/IEC17025 ผู้ทำหน้าที่ตรวจประเมินคุณภาพของห้องปฏิบัติการ และให้การรับรองคุณภาพตามมาตรฐาน ISO17025 คือสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม(สมอ.)

ห้องปฏิบัติการสอบเทียบด้านมิติ มีหน้าที่ทำการสอบเทียบเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับการวัดความยาวและขนาดทั้งหมด เช่น ไมโครมิเตอร์ เวอร์เนียคาลิเปอร์ เกจวัดเกลียว ไม้บรรทัด เวอร์เนียวัดความสูงและไดอัลเกจ(Dial Gauge)ชนิดต่างๆไดอัลเกจชนิดเข็มเป็นเครื่องมือวัดระยะ ที่มีใช้กันมากในหลากหลายรูปแบบเช่น วัดความกลมของชิ้นงาน ตั้งระดับของเครื่องจักรใหญ่ๆ หรือปรับตั้งแนวแกนหมุนให้ตรง เพื่อให้ เวลาแกนหมุนทำงานอย่างสมบูรณ์ซึ่งจะเกิดการสั่นสะเทือนน้อยที่สุด

สำหรับห้องปฏิบัติการที่เข้าพเจ้าทำงานต้องให้บริการงานตั้งระดับของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ในโรงไฟฟ้า ซึ่งในการทำงานครั้งหนึ่งๆต้องใช้ ไดอัลเกจประมาณ 40-50 ตัวติดตั้งเพื่อวัดในครั้งเดียว ซึ่งไดอัลเกจทั้งหมดจะต้องผ่านการสอบเทียบเพื่อความถูกต้องในการปรับตั้งระดับ หากไดอัลเกจไม่ได้รับการสอบเทียบอย่างถูกต้อง จะส่งผลให้การตั้งระดับของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าไม่สมบูรณ์ ซึ่งอาจเกิดการสั่นสะเทือนมากเกินไป ซึ่งจะส่งผลให้ต้องหยุดเดินเครื่องได้ โดยมีไดอัลเกจถูกส่งมาสอบเทียบที่ห้องปฏิบัติการประมาณ500 ชิ้น/ปี คิดเป็นปริมาณงาน 60% ของงานในห้องปฏิบัติการมิติ ดังนั้นการสอบเทียบไดอัลเกจได้อย่างถูกต้อง และรวดเร็วจึงมีความสำคัญมาก



รูปที่ 1.1 Dial Indicator ที่ถูกค้าส่งมาสอบเทียบ/เลขงาน



รูปที่ 1.2 Outside Micrometer และเครื่องมือชนิดต่างๆที่ถูกส่งมาสอบเทียบ

ปัจจุบันห้องปฏิบัติการสอบเทียบด้านความยาวและขนาด ใช้เครื่อง Precision Gauge Calibrator เป็นเครื่องมือมาตรฐานที่ใช้สอบเทียบไดอัลเกจ เป็นเครื่องมือที่สอบเทียบแบบอัตโนมัติ มีความสามารถที่วัดได้ 0.1 ไมโครเมตร (μm) สามารถสอบเทียบได้ตั้งแต่ขนาด 0-100 มิลลิเมตร (mm) โดยเราสามารถจัดสร้างไฟล์หลักของไดอัลเกจแต่ละขนาดได้เองซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐาน JIS B 7503:1997 เป็นมาตรฐานที่ใช้สอบเทียบไดอัลเกจซึ่งการทำงานของเครื่อง Precision Gauge Calibrator เราทำการเลือกไฟล์ให้ตรงกับขนาดของไดอัลเกจพร้อมใส่ หมายเลขเครื่อง รุ่น เวลา

วัน/เดือน/ปี และ อุณหภูมิ/ความชื้นสัมพัทธ์ เมื่อทำการสอบเทียบเสร็จ เครื่อง Precision Gauge Calibrator จะรายงานค่าที่พร้อมออกไปรายงานผล ใช้เวลาเพียง 10 นาที/ชิ้น เท่านั้น ถ้าเราใช้เครื่องมือมาตรฐานแบบ Manual (Dial Test Indicator) จะใช้เวลาถึง 3 ชั่วโมง/ชิ้น โดยใช้วิธีที่ให้เจ้าหน้าที่สอบเทียบด้านมิติ ทำการสอบเทียบพร้อมจดทำบันทึกค่าที่ละค่า โดยไดอัลเกจขนาด 10 mm จะต้องทำการสอบเทียบทั้ง หมุนตามเข็มนาฬิกา และ ทวนเข็มนาฬิกา และค่า Repeat ของไดอัลเกจ ทั้งหมดจำนวนกว่า 100 ค่า



รูปที่ 1.3 Precision Gauge Calibrator

เนื่องจาก Precision Gauge Calibrator มีอายุการใช้งานมากกว่า 10 ปี แต่ Software และ Computer ที่ใช้ในการสอบเทียบนั้นไม่สามารถจัดหารุ่นเดิมทดแทนได้จึงจำเป็นต้อง พัฒนา โปรแกรม ขึ้นมาใหม่ให้รองรับกับระบบปฏิบัติการที่ทันสมัยขึ้นเพราะ Software เดิมนั้นติด License จึงไม่สามารถนำไปลงเครื่องอื่นได้เพราะฉะนั้นถ้าเราไม่สร้าง Software ขึ้นมาใหม่เราจะต้องเสียค่าใช้จ่ายที่สูงในการซื้อ License มาใช้งานจึงมีแนวคิดพัฒนาอุปกรณ์สอบเทียบขึ้นมาทดแทน และเมื่อเราไม่ได้ใช้เครื่อง Precision Gauge Calibrator จะใช้เวลานานมากในการสอบเทียบ ไดอัลเกจ 1 ชิ้น ซึ่งห้องปฏิบัติการสอบเทียบที่ได้รับการรับรองตาม ISO/IEC 17025:2005 จะกำหนดว่าเมื่อเครื่องมือของลูกค้าส่งมาสอบเทียบต้องใช้เวลาไม่เกิน 1 เดือนในการสอบเทียบ จึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องสร้าง Software ขึ้นมาใหม่ เพื่อรองรับเครื่องมือลูกค้าทั้งภายในและภายนอกองค์กรที่มากขึ้นและให้เป็นไปตามข้อกำหนดของ ISO/IEC 17025:2005 อีกด้วย



รูปที่ 1.4 Dial Test Indicator

แต่ในปัจจุบันเครื่องมือมาตรฐานที่ใช้สอบเทียบ Dial Indicator แบบ Manual (Sylvac80) นั้นได้ปรับปรุง และ ปรับเปลี่ยนให้เป็นระบบดิจิทัล ซึ่งใช้ Probe เป็นตัวชี้วัดค่าของ Dial Indicator และมีกล่องที่รับค่าทางไฟฟ้าของ Probe มาแปลงเป็นค่าที่มีหน่วยเป็น mm โดยเครื่อง Sylvac80 มีความสามารถในการวัดละเอียด (Resolution) $0.1\ \mu\text{m}$ ซึ่งเทียบเท่ากับเครื่อง Precision Gauge Calibrator



รูปที่ 1.5 Dial Test Indicator (Sylvac80)

ตารางที่ 1.1 ระยะการเคลื่อนที่ของตำแหน่งที่สอบเทียบไดอัลเกจ

ช่วงการเคลื่อนที่ (mm)	เคลื่อนที่ครั้งละ (mm)
0 – 2	0.1
2 – 5	0.5
5 – 20	1
20 – 100	5

จากตารางที่ 1.1 เป็นมาตรฐานการกำหนดตำแหน่งที่ต้องทำการสอบเทียบ สำหรับไดอัลเกจที่มีระยะการวัด (Measuring Range) ต่างกัน จะเห็นได้ว่าถ้าเป็นไดอัลเกจที่มีระยะการวัด 10 mm ก็จะต้องทำการสอบเทียบ 32 ตำแหน่งแต่เมื่อต้องทำการสอบเทียบ 3 ครั้ง/ตำแหน่ง จึงต้องทำการสอบเทียบทั้งหมด 96 ครั้งต่อไดอัลเกจหนึ่งตัว ดังนั้นเมื่อใช้เครื่องสอบเทียบไดอัลเกจแบบใช้มือหมุนที่ใช้คนทำงาน จะใช้เวลาประมาณ 180 นาทีต่อไดอัลเกจหนึ่งตัว แต่ถ้าใช้เครื่องสอบเทียบไดอัลเกจอัตโนมัติจะใช้เวลาสอบเทียบเพียง 10 นาที เท่านั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการปรับปรุง และพัฒนาเครื่องสอบเทียบไดอัลเกจปกติ ให้เป็นเครื่องสอบเทียบไดอัลเกจอัตโนมัติ

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อพัฒนาอุปกรณ์สอบเทียบไดอัลเกจ

1.2.2 เพื่อศึกษาการพัฒนาโปรแกรมด้วย LabVIEW ซึ่งโปรแกรมสามารถควบคุมการทำงานเป็นระบบอัตโนมัติและการทำงานร่วมกับกล้องได้

1.2.3 เพื่อศึกษาการทำงานของ LabVIEW ร่วมกับกล้องได้

1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

1.3.1 โปรแกรมที่สร้างขึ้นสามารถเชื่อมต่อกับ Sylvac80 ได้

1.3.2 ปรับปรุงเครื่อง Sylvac80 และ สร้างโปรแกรมสอบเทียบ ไดอัลเกจ

1.3.3 สามารถสอบเทียบได้ตามมาตรฐาน JIS B 7503:1997

1.3.4 สอบเทียบไดอัลเกจ ขนาด 0-20 mm

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เพื่อพัฒนาระบบการสอบเทียบให้ดีขึ้นและรวดเร็วยิ่งขึ้น

1.4.2 สามารถรองรับจำนวนลูกค้าที่มีเพิ่มมากขึ้น

1.4.3 เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการสอบเทียบของห้องปฏิบัติการอื่นๆได้

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

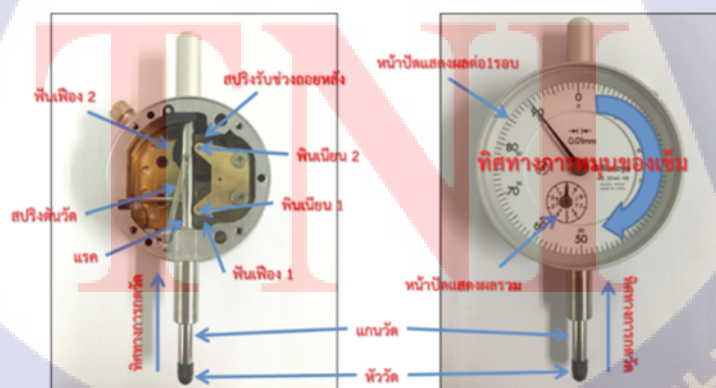
2.1 ไดอัลเกจ

ไดอัลเกจเป็นอุปกรณ์มาตรฐานพื้นฐานสำหรับงานวัดด้านความยาวและขนาดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนประกอบยานยนต์ และอุตสาหกรรมเหล็กและเหล็กกล้า และ การทำ Alignment ของแกน Turbine หรือ แกน Generator เป็นต้น โดยนำมาใช้วัดและตรวจสอบความถูกต้องของชิ้นงาน เพื่อให้เป็นไปตามข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์และสอดคล้องกับความต้องการของลูกค้า เพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพ, มีอายุการใช้งานที่นานขึ้นและเป็นที่น่าเชื่อถือในระดับสากล ดังนั้น ไดอัลเกจ จึงจำเป็นที่จะต้องได้รับการสอบเทียบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำตามข้อกำหนดของมาตรฐานสากล อย่างไรก็ตาม หนึ่งในปัญหาด้านการสอบเทียบ ไดอัลเกจ คือ ใช้เวลาในการสอบเทียบค่อนข้างมาก

2.1.1 หลักการทำงานของไดอัลเกจ

2.1.1.1 นาฬิกาวัดชนิดมาตรฐาน (Dial Gauge Standard Type) ค่าความละเอียดของนาฬิกาวัดชนิดนี้ มีทั้งแบบ 0.01 mm. และ 0.001 mm. เมื่อหัวสัมผัสถูกดันขึ้นเข็มยาวของหน้าปัดจะหมุนตามเข็มนาฬิกา เมื่อเข็มยาวหมุนครบ 1 รอบ เข็มสั้นจะหมุนไป 1 ช่องสเกล เมื่อมองดูที่หน้าปัดของเข็มสั้นจะทราบทันทีว่าเข็มยาวหมุนไปกี่รอบ[1]

2.1.1.2 หลักการทำงานของนาฬิกาวัด



รูปที่ 2.1 กลไกการทำงานของไดอัลเกจ

การส่งผ่านการเคลื่อนที่จากหัววัดไปยังเข็มยาวจะใช้กลไกของเฟืองเป็นตัวส่งจากภาพที่ 1 เมื่อแกนวัดเคลื่อนที่ขึ้นลงเฟืองสะพานที่แกนจะดันให้เฟืองพินเนียน 1 นั้นหมุนเฟืองพินเนียน 1 จะมีแกนร่วมกับเฟือง 1 เฟือง 1 จะขบอยู่กับเฟืองพินเนียน 2 ซึ่งติดอยู่กับเข็มยาวหรือหน้าปัดระยะทางการเคลื่อนที่ของแกนและการเคลื่อนที่ของเข็มสามารถกำหนดเป็นค่าคงที่ที่ถูกต้องด้วยสัดส่วนจำนวนเฟืองและช่วงฟันของแรค (เฟืองสะพาน) ตัวอย่างเช่นเมื่อแกนวัดเคลื่อนที่ไป 1 mm. เข็มยาวจะหมุนไป 1 รอบแล้วแบ่งสเกลออกเป็น 100 ช่องเท่ากันจะได้ความกว้างของช่องสเกลเป็น 0.01 mm. นอกจากนี้เข็มสั้นจะติดอยู่กับฟันเฟือง 1 ดังนั้นเมื่อเข็มยาวหมุนไป 1 รอบเข็มสั้นจะหมุนไป 1 ช่อง (1/10 รอบ) ถ้ากำหนดให้สัดส่วนจำนวนฟันระหว่างฟันเฟือง 1 และพินเนียน 2 เป็น 10:1

เพื่อป้องกันการถอยหลัง (Back Lash) ของฟันเฟืองเนื่องจากเฟืองแรคและพินเนียนนั้นจะมีช่วงถอยหลัง (การคลอนตัว) อยู่จึงมีฟันเฟืองซึ่งมีขนาดและจำนวนฟันเฟืองเท่ากับฟันเฟือง 1 เรียกว่าฟันเฟือง 2 ขบอยู่กับพินเนียน 2 แล้วมีสปริงกันหอยติดอยู่เพื่อยันรับช่วงถอยหลังของฟันเฟืองทั้งหมดทำให้หน้าฟันเฟืองทุกตัวสัมผัสกันเพียงด้านเดียวตลอดเวลา [1]

2.2. การสอบเทียบไดอัลเกจและการหาค่าความไม่แน่นอนของผลการวัด

2.2.1 JIS B 7503:1997

อ้างอิงตามมาตรฐาน JIS B 7503 : 1997 มีการกำหนดจุดการสอบเทียบดังนี้ [2]

0 ~ 2 mm เพิ่ม Step ละ 0.1 mm

>2 ~ 5 mm เพิ่ม Step ละ 0.5mm

>5 ~ 20 mm เพิ่ม Step ละ 1mm

>20 ~Max. Range เพิ่ม Step ละ 5 mm

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

ตารางที่ 2.1 ค่ามาตรฐานของแต่ละ Range ในการสอบเทียบ Dial Indicator อ้างอิงตามมาตรฐาน JIS B 7503:1997 [3]

		Scale interval and measuring range					
		0.01 mm	0.02 mm		0.001 mm		
Measuring range		10 mm max.	2 mm max.	Over 2 mm and less than 10 mm.	1 mm max.	Over 1 mm and less than 2 mm.	Over 2 mm and less than 5 mm.
Retrace error		5	3	4	3	3	4
Repeatability		5	0.5	1	0.5	0.5	1
Indication error	1/10 revolution (')	8	4	5	2.5	4	5
	½ revolution	±9	±5	±6	±3	±5	±6
	One revolution	±10	±6	±7	±4	±6	±7
	Two revolution	±15	±6	±8	±4	±6	±8
	Whole measuring range	±15	±7	±12	±5	±7	±10

Note (') Adjacent error

Remarks : The value in this table shall at 20°C

2.2.2 ค่าความไม่แน่นอนในการวัด

การนำค่าความแน่นอนไปใช้งานจะใช้ความเชื่อมั่นที่ 95%

2.2.2.1 การประเมินผลค่าความไม่แน่นอนแบบ Type A เป็นการประเมินค่าที่ได้จากการวัด ซ้ำๆ กัน

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n} \quad (2.1)$$

โดยหาเฉลี่ย ($\bar{x}$) ของผลการวัดแต่ละค่า

x_i = ผลของการวัดแต่ละครั้ง

n = จำนวนครั้งของการวัด

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.2)$$

- การประเมินค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) SD

- การประเมินค่าความไม่แน่นอน (Uncertainty due to repeated observation) ; u_A

$$u_A = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}} \quad (2.3)$$

2.2.2.2 Type B คือ ค่าความไม่แน่นอนที่มีผลต่อการวัด เช่น อุณหภูมิ, โครงสร้างของเครื่องมือมาตรฐาน, ค่าความไม่แน่นอนของเครื่องมือมาตรฐาน, อุณหภูมิ และ ความสามารถของเครื่องมือที่วัดได้ เป็นต้น การประเมินผลค่าความไม่แน่นอนแบบ Type B เป็น ส่วนประกอบความไม่แน่นอนแบบระบบ(Systematic) พิจารณาจากส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้

1) การประเมินค่าความไม่แน่นอนเนื่องมาจาก Uncertainty ของ เครื่องมือ(Precision Gauge Calibrator) โดย Precision Gauge Calibrator มี Uncertainty ณ ขณะนั้นตามใบรับรองการสอบเทียบโดยคำนวณได้ดังนี้

Uncertainty ค่าที่ได้จะมีการแจกแจงแบบปกติ (Normal) มีตัวหาร (Divisor) เท่ากับ $k \geq 2$ มีสัมประสิทธิ์ความไวระหว่างอินพุตกับเอาต์พุต เท่ากับ 1 และมี Degree of freedom เป็นอนันต์ (Infinity) แทนค่าในสมการ

$$u_{B1} = \frac{\text{Uncertainty}}{2} \quad (2.4)$$

2) การประเมินค่าความไม่แน่นอนเนื่องมาจาก Resolution ของ เครื่องมือ (Precision Gauge Calibrator) โดยคำนวณได้ดังนี้ค่าที่ได้จะมีการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular) มีตัวหาร (Divisor) เท่ากับ $\sqrt{3}$ มีสัมประสิทธิ์ความไวระหว่างอินพุตกับเอาต์พุต เท่ากับ 1 และมี Degree of freedom เป็นอนันต์ (Infinity) แทนค่าในสมการ

$$u_{B2} = \frac{\text{Resolution (STD)}}{2\sqrt{3}} \quad (2.5)$$

Resolution (STD)คือความละเอียดในการวัดของตัวมาตรฐานโดยพิจารณาค่าจาก Digital แบ่งเป็น 2 ส่วน

3) การประเมินค่าความไม่แน่นอนเนื่องมาจาก ความสามารถในการ วัดของไดอัลเกจ สำหรับ Dial Gauge ที่เป็น Digital โดยคำนวณได้ดังนี้ค่าที่ได้จะมีการแจกแจงแบบ สี่เหลี่ยม (Rectangular) มีตัวหาร (Divisor) เท่ากับ $\sqrt{3}$ มีสัมประสิทธิ์ความไวระหว่างอินพุตกับ เอาต์พุตเท่ากับ 1 และมี Degree of freedom เป็นอนันต์ (Infinity) แทนค่าในสมการ

$$u_{B3} = \frac{\text{Resolution (Digimatic) Indicator}}{2\sqrt{3}} \quad (2.6)$$

Resolution (Dial Gauge) คือความละเอียดในการวัดของ Dial Gauge โดยพิจารณาค่าจาก Digital แบ่งเป็น 2 ส่วน

สำหรับ Dial Gauge ที่เป็นเข็ม โดยคำนวณได้ดังนี้ค่าที่ได้จะมีการ แจกแจงแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular) มีตัวหาร (Divisor) เท่ากับ $\sqrt{3}$ มีสัมประสิทธิ์ความไวระหว่าง อินพุตกับเอาต์พุต เท่ากับ 1 และมี Degree of freedom เป็นอนันต์ (Infinity) แทนค่าในสมการ

$$u_{B3} = \frac{\text{Readability}}{\sqrt{3}} \quad (2.7)$$

Readability = 0.00019

Readability (Precision Gauge Calibrator) คือ ความสามารถในการอ่านของเครื่อง Precision Gauge Calibrator โดยพิจารณาค่าจาก ความสามารถในการวัดที่ เครื่องทำได้คือเครื่อง Precision Gauge Calibrator สามารถอ่านค่าที่ ตำแหน่งเดียวกันแต่ต่าง สูงสุด 0.00019mm หากจากการทำ Repeat ที่ตำแหน่ง 0.1 mm 20 ครั้ง Mitutoyo Model : 3062S-19 S/N : FNX217 เมื่อ 2 มกราคม 2556

4) การประเมินค่าความไม่แน่นอนเนื่องมาจากความไม่เรียบของ ผิวหน้าสัมผัสด้าน Spindle ของ Precision Gauge Calibrator ค่าความไม่เรียบหาได้จาก Certificate of Calibration ค่าความไม่แน่นอนในส่วน ของ Flatness of measuring face = 0.0006 mm เมื่อปี 2555 ของ เครื่อง Precision Gauge Calibrator หาได้จากสูตร

$$u_{B4} = \frac{\text{Flatness of measuring face}}{\sqrt{3}} \quad (2.8)$$

Flatness of measuring face = ค่าความไม่เรียบของหัววัด Spindle จากใบ Certificate ใน ส่วน ของ Flatness

Sensitivity coefficient (C_i) = 1

Divisor = $\sqrt{3}$ มีการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular)

Degree of freedom = Infinity

5) การประเมินค่าความไม่แน่นอนเนื่องมาจากการขยายตัวเฉลี่ยของโลหะที่มีผลจากเปลี่ยนแปลงทางด้านอุณหภูมิ การสอบเทียบ Dial Gauge ด้วย Precision Gauge Calibrator ได้มีการปรับให้อุณหภูมิของ Dial Gauge และ Precision Gauge Calibrator อยู่ในสภาวะสมดุล โดยเก็บไว้ในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิ (20 ± 1.5)°C เมื่อพิจารณาวัสดุที่ใช้ทำ Dial Gauge และ Precision Gauge Calibrator โดยทั่วไปแล้วทำจาก Steel ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเฉลี่ยของโลหะ (Coefficient of thermal expansion, $\bar{\alpha}$) เท่ากับ $(11.5 \pm 1) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ โดยคำนวณได้ดังนี้ค่าที่ได้จะมีการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular) มีตัวหาร (Divisor) เท่ากับ $\sqrt{3}$ มีสัมประสิทธิ์ความไวระหว่างอินพุตกับเอาต์พุต เท่ากับ 1 และมี Degree of freedom เป็นอนันต์ (Infinity) แทนค่าในสมการ

$$u_{B5} = l_0 * \bar{\alpha} * \frac{u(\delta t)}{\sqrt{3}} \quad (2.9)$$

l_0 = ความยาวที่ระบุ ณ อุณหภูมิอ้างอิง ($t_0 = 20^\circ\text{C}$)

$(\bar{\alpha})$ = ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การขยายตัวของโลหะระหว่าง Dial Gauge และ Precision Gauge Calibrator

(δT) = ค่าความเบี่ยงเบนของอุณหภูมิห้อง $= \pm 1.5^\circ\text{C}$

6) การประเมินค่าความไม่แน่นอนเนื่องมาจากโครงสร้างของ Precision Gauge Calibrator (Mechanical Effect), u_{B6} ของ Precision Gauge Calibrator โดยพิจารณาจากค่า Resolution ของเครื่อง โดยค่า Resolution ของเครื่องเป็น 0.0001 mm คำนวณหาความไม่แน่นอนทางด้าน Mechanical Effect ของเครื่อง Precision Gauge Calibrator ค่าที่ได้จะมีการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular) มีตัวหาร (Divisor) เท่ากับ $\sqrt{3}$ มีสัมประสิทธิ์ความไวระหว่างอินพุตกับเอาต์พุต เท่ากับ 1 และมี Degree of freedom เป็นอนันต์ (Infinity) แทนค่าในสมการ

$$u_{B6} = \frac{0.0001}{\sqrt{3}} \quad (2.10)$$

$$u_{B6} = 0.000058 \text{ mm.}$$

7) การประเมินค่าความไม่แน่นอนเนื่องมาจากการเลื่อนค่าของ Reference Standard (u_{drift}), u_{B7} ค่าที่ได้จะมีการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular) มีตัวหาร (Divisor) เท่ากับ $\sqrt{3}$ มีสัมประสิทธิ์ความไวระหว่างอินพุตกับเอาต์พุต เท่ากับ 1 และมี Degree of freedom เป็นอนันต์ (Infinity) แทนค่าในสมการ

$$u_{B7} = \frac{\text{Drift}}{\sqrt{3}} \quad (2.11)$$

Drift = จากการสอบเทียบ Reference Standard นำค่า Error ที่ตำแหน่งเดียวกันของปีปัจจุบัน ลบ ด้วยค่า Error ปีก่อนหน้าในกรณีที่มีผลการสอบเทียบมากกว่า 3 ครั้ง กรณีที่ Reference Standard สอบเทียบเพียงครั้งเดียวพิจารณาค่า Uncertainty จากการสอบเทียบของ Reference Standard หารด้วย $\sqrt{3}$

8) การประเมินค่าความไม่แน่นอนเนื่องมาจากค่า Error ของ Reference Standard (u_{Error}), u_{B8} ค่าที่ได้จะมีการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular) มีตัวหาร (Divisor) เท่ากับ $\sqrt{3}$ มีสัมประสิทธิ์ความไวระหว่างอินพุตกับเอาต์พุต เท่ากับ 1 และมี Degree of freedom เป็นอนันต์ (Infinity) แทนค่าในสมการ

$$u_{B8} = \frac{\text{Error}}{\sqrt{3}} \quad (2.12)$$

Error = จากการสอบเทียบ Reference Standard นำค่า Error มากที่สุดของปีปัจจุบัน

9) การประเมินค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (Combined Standard Uncertainty) โดยคำนวณได้ดังนี้

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2 + u_{B5}^2 + u_{B6}^2 + u_{B7}^2 + u_{B8}^2} \quad (2.13)$$

10) การประเมินค่าความไม่แน่นอนขยาย (Expand Uncertainty), U_{exp} เมื่อหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (Combined Standard Uncertainty) ได้แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณค่า Degree of freedom รวมโดยพิจารณาองศาอิสระของค่าความไม่แน่นอนรวม (Effective Degree of freedom), ν_{eff} โดยคำนวณได้ดังนี้

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^N \frac{u_A^4}{\nu_i}} \quad (2.14)$$

ν_{eff} = ค่าองศาอิสระ

u_c = ค่าผลรวมของแหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอน

u_A = ค่าความไม่แน่นอนที่มาจาก Type A คือความสามารถในการทำซ้ำ

ν_i = ค่าจำนวนครั้งที่ทำการวัด(n) ของการทำซ้ำ (Repeatability) ลบด้วย 1 เท่ากับ n-1 นำค่า

ν_{eff} มาหาค่า Coverage Factor : k ตามตารางที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 %

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงค่า k

ν_{eff}	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	∞
K	13.97	4.53	3.31	2.87	2.65	2.52	2.43	2.37	2.28	2.13	2.05	2.00

หรือ ν_{eff} = ค่า Degree of Freedom ของ n ใดๆ ใช้คำสั่ง $TINV(0.04545, \nu_{eff})$ ใน Excel จะได้ค่า k

11) การประเมินค่าความไม่แน่นอนขยาย (Expand Uncertainty), U_{exp} ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยคำนวณได้ดังนี้นำค่า k ที่ได้มาแทนในสมการ

$$U_{exp} = k^* U_c \quad (2.15)$$

2.2.3. วิธีการสอบเทียบไดอัลเกจ

2.2.3.1 ขั้นตอนการสอบเทียบไดอัลเกจ

แสดงขั้นตอนการสอบเทียบแต่ละขั้นตอนโดยใช้เครื่อง Precision Gauge

Calibrator[3]

1) กำหนดรายละเอียดและเตรียมความพร้อมสำหรับการสอบเทียบ Dial Gauge เลือกวิธีการที่ใช้สอบเทียบอ้างอิงตามมาตรฐาน JIS B 7503 : 1997[2]

2) ตรวจสอบ Dial Gauge ของลูกค้าโดยพิจารณา Dial Gauge ของลูกค้าเช่น Model, Serial No., Range, และ Resolution เพื่อเลือกโปรแกรมในการสอบเทียบ

3) ทำความสะอาด Dial Gauge ของลูกค้าโดยดำเนินการดังนี้ ทำความสะอาดเครื่องมือของลูกค้า โดยใช้กระดาษชำระกับ Alcohol หรือ Solvent เช็ดทำความสะอาดเครื่องมือของลูกค้า (Dial Gauge)

4) บันทึกรายละเอียด Dial Gauge ของลูกค้าโดยดำเนินการดังนี้

- บันทึกรายละเอียดเครื่องมือของ Dial Gauge ลงในแบบฟอร์ม FM-01/WI-HCC-M-508 โดยบันทึก เช่น วันที่, Model, Serial No., Range และ Resolution ฯลฯ และนำ Dial Gauge เข้าห้องสอบเทียบด้านความยาวและขนาดอย่างน้อย 12 ชั่วโมงก่อนสอบเทียบ

- ตรวจสอบใบรับงานเครื่องมือของลูกค้าเช่น Range , Model, Serial No. เครื่องมือของลูกค้า

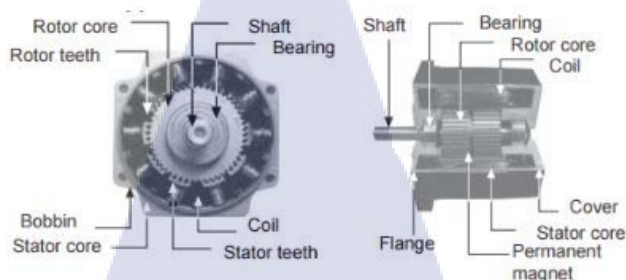
5) ปรับสภาวะแวดล้อมของห้องปฏิบัติการโดยมีเกณฑ์ดังนี้

- อุณหภูมิขณะทำการสอบเทียบอยู่ระหว่าง : $(20 \pm 1)^{\circ}\text{C}$

- ความชื้นสัมพัทธ์ขณะทำการสอบเทียบอยู่ระหว่าง : $(50 \pm 10) \% \text{RH}$

2.3 สเต็ปมอเตอร์ (Stepping Motor)

สเต็ปมอเตอร์ เป็นมอเตอร์ที่ขับเคลื่อนด้วยพัลส์ ลักษณะการขับเคลื่อน จะหมุนรอบแกนได้ 360 องศา มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง แต่มีลักษณะเป็นสเต็ป โดยแต่ละสเต็ปจะขับเคลื่อนได้ 1, 1.5, 1.8 หรือ 2 องศา แล้วแต่ละโครงสร้างของมอเตอร์ลักษณะที่ นำมอเตอร์ไปใช้ จะเป็นงานที่ต้องการตำแหน่งแม่นยำ เช่น ระบบขับเคลื่อนหัวแม่พิมพ์ในเครื่องพิมพ์ (PRINTER) ระบบขับเคลื่อนหัวอ่านในเครื่องอ่านบันทึกเหล็ก ระบบขับเคลื่อนตำแหน่งของปากกาใน X-Y PLOTTER เป็นต้น



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของ Stepping Motor

สแต็ปมอเตอร์ที่พบในปัจจุบันมี 3 ลักษณะดังนี้

1. แบบแม่เหล็กถาวร(PERMANENT MAGNET : PM)

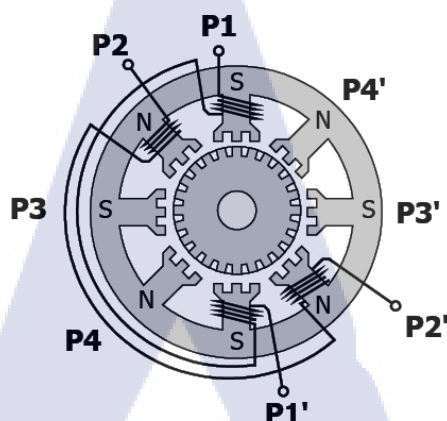
สแต็ปมอเตอร์แบบ PM จะมีสเตเตอร์ (STATOR) ที่ฟันขดลวดไว้หลายๆ โพล โดยมีโรเตอร์ (ROTOR) เป็นรูปทรง กระบอกฟันเลื่อย และโรเตอร์ทำด้วยแม่เหล็กถาวร เพื่อป้องกันไฟกระแสดตรงให้กับขดสเตเตอร์ จะทำให้เกิดแรงแม่เหล็กไฟฟ้าผลักต่อโรเตอร์ ทำให้มอเตอร์หมุนมอเตอร์แบบ PM จะเกิดแรงฉุดยัดให้โรเตอร์หยุดอยู่กับที่ แม้จะไม่ได้ป้อนไฟเข้าขดลวด

2. แบบแปรค่ารีลักแตนซ์ (VARIABLE RELUCTANCE : VR)

สแต็ปมอเตอร์แบบ VR จะมีการหมุนโรเตอร์ได้อย่างอิสระ แม้จะไม่ได้จ่ายไฟให้โรเตอร์ทำจากสารเฟอร์ไรต์แมกเนติก กำลังอ่อน มีลักษณะเป็นฟันเลื่อย รูปทรงกระบอกโดยจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับจำนวนโพลในสเตเตอร์ แรงบิดที่เกิดขึ้นจะไปหมุนโรเตอร์ ไปในเส้นทางของอำนาจแม่เหล็กที่มีค่ารีลักแตนซ์ต่ำที่สุด ตำแหน่งที่จะเกิดแน่นอนและมีเสถียรภาพแต่จะเกิดขึ้นได้หลายๆ จุดดังนั้นเมื่อป้อนไฟเข้าขดลวดต่างๆ ในมอเตอร์แตกต่างกันไป ก็ทำให้มอเตอร์ หมุนไปตำแหน่งต่างๆ กันโรเตอร์ของ VR จะมีความเฉื่อยของโรเตอร์น้อยจึงมีความเร็วรอบสูงกว่ามอเตอร์แบบ PM

3. แบบผสม(HYBRID-H)

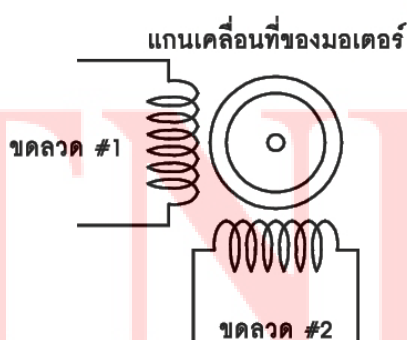
สแต็ปมอเตอร์แบบ H จะเป็นการผสมกันระหว่างแบบ PM และ VR โดยจะมีสเตเตอร์คล้ายกับที่ใช้ใน VR โรเตอร์มีหมวกหุ้มปลาย ซึ่งในปัจจุบันนี้ Stepping Motor ส่วนใหญ่เป็นแบบไฮบริด เนื่องจากสามารถทำให้มีความละเอียดในการเคลื่อนที่ของแกนได้สูงถึง 0.9 องศาต่อสเต็ป (ซึ่งเป็นข้อดีของแบบ VR) และให้แรงบิดหรือทอร์กที่สูง โดยใช้พลังงานต่ำ (เป็นข้อดีของแบบ PM) จึงทำให้ Stepping Motor แบบ H ให้แรงบิดสูงและมีขนาดกระทัดรัด และให้แรงฉุดยัดโรเตอร์นิ่งกับที่ตอนไม่จ่ายไฟ



รูปที่ 2.3 โครงสร้างอย่างง่ายของ Stepping Motor ชนิดไฮบริด[4]

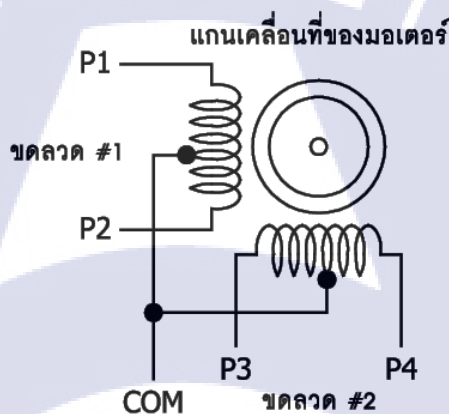
ดังนั้นการกำหนดชนิดของ Stepping Motor ในยุคต่อมาจนถึงปัจจุบันจึงพิจารณาที่ลักษณะของการฟันขดลวด, การต่อสายออกมาใช้งาน และวงจรขับ ซึ่งแบ่งเป็น 2 ชนิดหลักๆ คือ ชนิดไบโพลาร์ (bipolar) และชนิดยูนิโพลาร์ (uni-polar) [4]

- สเต็ปมอเตอร์ แบบไบโพลาร์ มีลักษณะการฟันขดลวดของมอเตอร์แสดงในรูปที่ 2.5 แบ่งออกเป็น 2 ขดที่ไม่มีแท่งกลาง ทำให้บางครั้งจึงเรียก สเต็ปมอเตอร์ แบบนี้ว่า เป็น สเต็ปมอเตอร์ แบบ 2 เฟส การขับให้มอเตอร์แบบนี้หมุนจะต้องป้อนแรงดันต่างขั้วกันให้แก่ขดลวดแต่ละขด ทำให้วงจรขับ สเต็ปมอเตอร์ แบบนี้ค่อนข้างซับซ้อน



รูปที่ 2.4 ลักษณะการฟันขดลวด สเต็ปมอเตอร์ แบบ ไบโพลาร์ [4]

- สเต็ปมอเตอร์ แบบยูนิโพลาร์ มีลักษณะการพันขดลวดของมอเตอร์แสดงในรูปที่ 2.4 มีด้วยกัน 2 แบบคือ แบบ 5 และ 6 สาย บางครั้งเรียก สเต็ปมอเตอร์ แบบนี้ว่า เป็น สเต็ปมอเตอร์ แบบ 4 เฟส การขับจะต้องป้อนสัญญาณเข้าที่ขั้วหรือเฟสของมอเตอร์ให้เรียงลำดับอย่างถูกต้อง มอเตอร์จึงจะสามารถหมุนได้อย่างราบรื่น สเต็ปมอเตอร์ แบบนี้มีการพันขดลวด 2 ขดบนแต่ละขั้วแม่เหล็กของสเตเตอร์ แต่ละขดแบ่งเป็น 2 เฟส รวมมอเตอร์ทั้งตัวจะมี 4 เฟสคือ เฟส 1, 2, 3 และ 4 มีการต่อสายออกมาจากขดลวดแต่ละขดเพื่อจ่ายไฟเลี้ยง ทำให้สเต็ปมอเตอร์แบบนี้มีทั้งแบบ 5 สาย และ 6 สาย ถ้าเป็นแบบ 5 สาย จะเป็นการนำสายไฟเลี้ยงของขดลวดทั้งสองมาต่อรวมกันเป็นสายเดียว สำหรับในบทความนี้จะเน้นหนักไปที่สเต็ปเปอร์แบบยูนิโพลาร์นี้ เนื่องจากสามารถหาได้ง่ายกว่า และใช้วงจรขับที่มีความซับซ้อนน้อยกว่ามาก



รูปที่ 2.5 ลักษณะการพันขดลวด สเต็ปมอเตอร์ แบบ ยูนิโพลาร์[4]

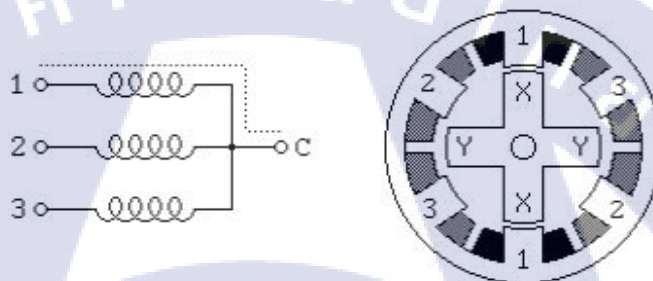
2.3.1 โครงสร้างและการทำงานของ สเต็ปมอเตอร์

ขึ้นชื่อว่าเป็นมอเตอร์แล้วก็ต้องประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนคือ 1 rotor ซึ่งเป็นส่วนที่หมุนหรือเคลื่อนที่ได้ 2 คือ stator ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่กับที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ สำหรับ สเต็ปมอเตอร์ ก็เช่นเดียวกันที่ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนนี้(ดูรูปด้านล่างประกอบ) โดยที่ส่วนที่เป็น stator ของ สเต็ปมอเตอร์ นี้จะเป็นส่วนซึ่งมีขดลวดพันล้อมอยู่บนแกนเหล็ก(ส่วนที่เขียน 1,2,3 ที่เป็นส่วนนอก ของ สเต็ปมอเตอร์ นั้นแหละคือส่วนที่เป็น stator) เมื่อเราจ่ายไฟเข้าที่ขดลวดที่พันอยู่บน stator ที่ขด 1 ก่อน ก็จะทำให้เกิดอำนาจแม่เหล็กขึ้นที่ตำแหน่ง 1 นี้ และผลักให้ rotor(จากรูปส่วนที่เขียน x-y นั้นแหละคือ rotor)เกิดการเคลื่อนที่ได้ การเคลื่อนที่นี้เรียกว่ามันเคลื่อนที่ไป 1 step นั้นเอง(นี่แหละที่เรียกว่า สเต็ปมอเตอร์ เพราะมันเคลื่อนที่เป็น step นั้นเอง) ซึ่งการที่มันจะเคลื่อนที่ไปเป็นมุมเท่าไรนั้นก็ขึ้นอยู่กับ spec ของ สเต็ปมอเตอร์ ตัวนั้นว่ามันสามารถที่จะหมุนได้ step ละกี่

องศา และต่อไปถ้าเราหยุดจ่ายไฟเข้าที่ขดลวด 1 และไปจ่ายไฟเข้าที่ขดลวด 2 แทนก็จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้นที่บริเวณ 2 บน stator และก็จะทำให้สนามแม่เหล็กนี้ผลัก rotor ให้เคลื่อนที่ต่อไปได้ และถ้าเราหยุดจ่ายกระแสเข้าที่ 2 และไปจ่ายเข้าที่ขด 3 แทนก็จะทำให้สนามแม่เหล็กมาเกิดที่บริเวณ 3 และผลักให้ rotor เคลื่อนที่ต่อไปได้อีก

จะเห็นว่า สเต็ปมอเตอร์ นั้นสามารถที่จะเคลื่อนที่ได้จากหลักการของการจ่ายไฟเข้าที่ขดลวดบน stator ในลักษณะที่จ่ายไฟให้เกิดแบบ ลำดับเฟสกันไป ซึ่งนี่เองเป็นหลักการของการควบคุม สเต็ปมอเตอร์

โครงสร้างการทำงานของ สเต็ปมอเตอร์ มีลักษณะดังรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยขดลวด stator 4 ขดสำหรับชนิด 4 phase ล้อมรอบแกน (Shalt) Rotor ซึ่งเป็นแม่เหล็กถาวร



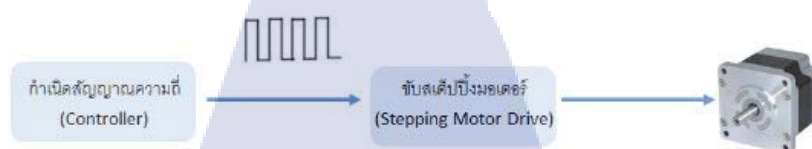
รูปที่ 2.6 โครงสร้างการทำงานของ Stepping Motor

ข้อมูลทางเทคนิคที่สำคัญของ Stepping Motor ที่เลือกใช้งาน

- เส้นผ่านศูนย์กลางของแกนหมุน 0.25 นิ้ว
- เส้นผ่านศูนย์กลางของร่องแกน 1.5 นิ้ว
- จำนวนสเต็ปต่อรอบ 200 สเต็ป (1.8 องศา/สเต็ป)
- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวถังมอเตอร์ 2.2 นิ้ว

หลักการทำงาน คือ เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวด stator Coil a, b, c, d ไม่พร้อมกัน นั่นคือ ถ้าเราจ่ายกระแสให้ a ก่อนโดยไม่จ่ายให้ขดอื่น แล้วตามด้วย b, c และ d เรียงตามลำดับ จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก หมุนวนในลักษณะทวนเข็มนาฬิกา ซึ่งส่วนของ Rotor ที่เป็นแม่เหล็กถาวรก็จะหมุนตามสนามแม่เหล็กไปด้วย คือ ทวนเข็มนาฬิกา ในลักษณะเดียวกันถ้าเราจ่ายกระแสให้ขด d, c, b, a.... ก็จะทำให้ สนามแม่เหล็กหมุนในทิศทางตามเข็มนาฬิกา ซึ่งส่งผลให้ Rotor หมุนตามเข็มนาฬิกาด้วย การกำหนดความเร็วของ สเต็ปมอเตอร์ ทำได้โดยการเปลี่ยนแปลง ความเร็วของการเปลี่ยนการจ่ายกระแสจากขดลวดหนึ่งไปยังอีกขดหนึ่งให้เร็วขึ้น การควบคุม สเต็ปมอเตอร์ ดังที่กล่าว

มาแล้ว เป็นแบบ 4 phase 1 excitation ซึ่งมีลักษณะตามตารางที่ 1 (ตัวเลข 1 หมายถึง มีการจ่ายแรงดันให้กับขดลวด 0 คือไม่จ่ายแรงดันให้กับขดลวด



รูปที่ 2.7 หลักการทำงานของ สเต็ปมอเตอร์[5]

2.3.1.1 การสั่งงานควบคุมการหมุนของสเต็ปมอเตอร์

การควบคุมและสั่งงานให้สเต็ปมอเตอร์ทำงาน ไปทีละสเต็ปสามารถทำได้โดยการจ่ายกำลังไฟไปยังขดลวด ในแต่ละขอบนสเตเตอร์ โดยการป้อนจะทำในลักษณะเป็นลำดับหรือเรียกว่า ซีควเอนเชียลในลูปที่ถูกต้อง ซึ่งจะแบบ ได้เป็น 3 รูปแบบ คือ แบบเวฟ (wave) แบบ 2 เฟส (2 phase) และแบบครึ่งสเต็ป (half step) ทั้ง 3 แบบนี้ก็มีข้อดีและข้อเสียต่างกันไป

- แบบเวฟ (Wave) จะเป็นการกระตุ้นแบบที่ง่ายที่สุด ซึ่งจะทำให้การกระตุ้นขดลวดทีละขดในเวลาหนึ่งๆเรียงกันไปตัวอย่างเช่น ขดที่ 1, 2, 3, 4, 1, 2, 3, 4 เป็นลำดับอย่างนี้หรือขด 1, 4, 3, 2, 1, 4, 3, 2 เป็นลำดับกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับทิศทางที่เราต้องให้มอเตอร์หมุนไป วงจรที่นำมากระตุ้นนั้นจะมีราคาค่อนข้างจะถูกกว่าและง่ายกว่า ดังในรูปของวงจรการจ่ายไฟ ที่อยู่ด้านบนนั้น

ตารางที่ 2.3 การทำงานของ สเต็ปมอเตอร์ แบบ Wave

Step No.	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
1	ON			
2		ON		
3			ON	
4				ON
5	ON			
6		ON		

- แบบ 2 เฟส (2 Phase) แบบนี้ก็จะคล้ายกับการกระตุ้นในแบบเวฟแต่จะต่างกันตรงที่แบบ 2 เฟส จะกระตุ้นทีละ 2 ขด ที่อยู่ใกล้กันใน เวลาเดียวกัน และจะเรียงลำดับกันไป ดังเช่นแบบเดียวกับแบบเวฟครึ่ง จะยกตัวอย่างการกระตุ้นขดลวดในลักษณะ ซีควนให้ดูดังนี้ 12, 23, 34, 41, 12, 23, 34, 41 เรียงลำดับกันไปเรื่อยๆ หรือจะเป็น 14, 43, 32, 21, 14, 43, 32, 21 เรียงกันไปเรื่อยๆเช่นกัน ถ้าจะมากล่าวถึงข้อดีข้อเสียของแบบ 2 เฟส แล้วมีดังนี้

ข้อดี การที่เราจะเพิ่มจำนวนขดลวดที่ถูกกระตุ้นจะทำให้แรงบิดได้มากกว่า แบบเวฟ ซึ่งโรเตอร์จะหมุนด้วยแรง ดึงแบเต็มๆแรงจาก ทั้ง 2 ขดลวดที่กระตุ้นพร้อมกัน

ข้อเสีย แบบ 2 เฟส จะกระตุ้นขดลวดนั้นต้องใช้กำลังไฟมากขึ้นเป็น 2 เท่าของแบบเวฟ ก็เป็นไปตามธรรมชาติ ได้อย่างก็ต้องเสียอย่าง

ตารางที่ 2.4 การกระตุ้นของขดลวดแบบ 2 เฟส ได้ดังในตารางต่อไปนี้

Step No.	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
1	ON	ON		
2		ON	ON	
3			ON	ON
4	ON			ON
5	ON	ON		
6		ON	ON	

- แบบครึ่งสเต็ป แบบนี้แบบรูปแบบผสมผสานของการกระตุ้นระหว่าง แบบเวฟ กับ แบบ 2 เฟส เพื่อให้จำนวนรอบของสเต็ปให้ มากขึ้นเป็น 2 เท่า ซึ่งในระบบนี้จะทำการกระตุ้นขดลวดเรียงกันไปเรื่อยๆเป็นลำดับ ดังจะยกตัวอย่าง เช่น 1, 12, 2, 23, 3, 34, 4, 41, 1, 12, 2, 23, 3, 34, 4, 41, 1 เป็นลำดับอยู่อย่างนี้เรื่อยไปครับ ถ้าเราจะกลับทิศทางการหมุนก็จะได้ 1, 41, 4, 43, 3, 32, 2, 21, 1, 41, 4, 43, 3, 32, 2, 21, 1 เป็นลำดับ ลำดับต่อไปจะมาพูดถึงข้อดีและข้อเสียของการกระตุ้นแบบครึ่งสเต็ปกัน

ข้อดี การกระตุ้นแบบนี้จะให้แรงบิดที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากช่วงสเต็ปที่มีระยะสั้นลงอีกประการหนึ่งแต่ละ สเต็ปเกิดแรงดึงจากขดลวด 2 ขดที่ถูกกระตุ้นพร้อมกันเป็นผลให้ค่าตำแหน่งความถูกต้องมากขึ้นไปด้วย

ข้อเสีย ก็คงจะเช่นเดียวกับแบบ 2 เฟสละครับ ที่ต้องจ่ายกำลังไฟเป็น 2 เท่าของแบบเวฟ หรือจะใช้เท่ากับแบบ 2 เฟส นั้นเอง

ตารางที่ 2.5 การทำงานของ แบบครึ่งเฟส ได้ดังในตารางต่อไปนี้

Step No.	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
1	ON			
2	ON	ON		
3		ON		
4		ON	ON	
5			ON	ON
6				ON
7				ON
8	ON			
9	ON			
10	ON	ON		

ข้อดีของสเต็ปมอเตอร์

- การควบคุมไม่ต้องอาศัยตัวตรวจจับการหมุน
- ไม่ต้องใช้แปรงถ่าน ดังนั้นจึงทำให้ไม่มีส่วนที่จะต้องสึกหรอ และปัญหาของการสปาร์ค (ที่เกิดจากหน้าสัมผัสของแปรงถ่านแหวนตัวนำในโรเตอร์) ที่ทำให้เกิดสัญญาณรบกวน
- เหมาะกับงานที่ต้องการกลไกเคลื่อนที่ความเร็วต่ำ แรงบิดสูง
- ใช้ในการควบคุมตำแหน่งแบบระบบเปิดที่มีความแม่นยำสูง โดยไม่ต้องใช้สัญญาณป้อนกลับของการกำหนดตำแหน่ง
- ความเร็วในการหมุน (rotation speed) มีค่าตามสัดส่วนและสัมพันธ์กับความถี่ของสัญญาณพัลส์อินพุตที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์
- มุมในการหมุน (rotation angle) มีค่าตามสัดส่วนของจำนวนของพัลส์อินพุตที่ใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์
- การควบคุมโดยทางวงจรดิจิทัลหรือไม่โครคอนโทรลเลอร์ ทำได้ง่าย และสะดวก

โดยแนวทางสเต็ปมอเตอร์เป็นอุปกรณ์จำพวกเชิงกลทางไฟฟ้า โดยมีรูปของไบนารีโวลต์เตตเป็นอินพุตและการเคลื่อนที่ แบบเชิงมุมเป็นเอาต์พุต หรือว่าหมุนทีละสเต็ปซึ่งอยู่ระหว่าง 0.1 - 30 องศา อยู่ที่โครงสร้างของสเต็ปมอเตอร์ โดยตามสัญญาณ พัลส์ที่จ่ายให้กับขดสเตเตอร์ทำให้เกิดแรงผลักแกโรเตอร์หมุนไป สเต็ปมอเตอร์มีขดลวดหลายชุดในที่นี่เราเรียกว่า Phase (เฟส) ดังนั้นสัญญาณที่ต่อเนื่องเป็น Sequence (ซีควีน) ลักษณะของ Binary (ไบนารี) ซึ่งจะต้องไปผ่านวงจร Driver (ไดรเวอร์) ก็จะทำให้โรเตอร์หมุนไปอย่างต่อเนื่อง

2.4 พอร์ตอนุกรม (Serial Port)[6]

Port Communication คือช่องทางการติดต่อสื่อสารระหว่างระบบ System Unit และ อุปกรณ์รอบข้าง (Peripheral) เช่น จอภาพ โมเด็ม เครื่องพิมพ์ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะทำการเชื่อมต่อโดยผ่านสายเคเบิลเข้าสู่ Port ของอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งถูกกำหนดขึ้นให้เป็นมาตรฐานสำหรับการติดต่อสื่อสาร Port ที่ใช้การเชื่อมต่อมีอยู่หลายรูปแบบ หลายหัวเสียบ บางที่เรียกว่า หัว Connectors ซึ่ง Connectors ก็จะมีอยู่ 2 อย่างด้วยกันคือ Male Type และ Female Type หรือที่รู้จักกันดีคือ ปลั๊กตัวผู้ ปลั๊กตัวเมีย และสามารถแบ่งได้ดังนี้



รูปที่ 2.8 Port Communicate ชนิดต่างๆ

Serial Port คือ พอร์ตอนุกรม ในการสื่อสารข้อมูลนั้นพอร์ตอนุกรมจะมีความเร็วในการสื่อสารที่ช้ากว่าแบบขนาน เพราะการเคลื่อนย้ายข้อมูลแบบอนุกรมนั้นเป็นการส่งข้อมูลครั้งละ 1 บิต แต่พอร์ตขนานนั้นสามารถส่งข้อมูลที่ละหลายๆ บิต พร้อมๆ กันได้ แต่ข้อดีของการสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรมคือ สามารถส่งข้อมูลได้ในระยะทางที่ไกลกว่าแบบขนาน และใช้สายสัญญาณที่น้อยกว่าการสื่อสารข้อมูลแบบขนาน

ประเภทของการสื่อสารแบบอนุกรมแบ่งตามลักษณะสามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ

1. การสื่อสารแบบซิงโครนัส (Synchronous) เป็นการสื่อสารข้อมูลโดยใช้สัญญาณนาฬิกาในการควบคุมจังหวะของการรับส่งสัญญาณ
2. การสื่อสารแบบอะซิงโครนัส (Asynchronous) เป็นการสื่อสารที่ใช้สายข้อมูลเพียงตัวเดียว จะใช้รูปแบบของการส่งข้อมูล (Bit Pattern) เป็นตัวกำหนดว่าส่วนไหนเป็นส่วนเริ่มต้นข้อมูล ส่วนไหนเป็นตัวข้อมูล ส่วนไหนจะเป็นตัวตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล และส่วนไหนเป็นส่วนปิดท้ายของข้อมูล โดยต้องกำหนดให้สัญญาณนาฬิกาเท่ากันทั้งภาคส่งและภาครับ

การ Interface กับ Serial Port จะยากกว่าการ Interface กับ Parallel Port การสื่อสารของอุปกรณ์ที่ต่อกับ Serial Port จะถูกเปลี่ยน (Convert) เป็น สัญญาณแบบ Parallel แล้วจึงนำไป

Process ต่อ ซึ่งจะใช้ Universal Asynchronous Receiver / Transmitter (UART) เป็นตัวทำหน้าที่นี้ ส่วนทางด้าน Software ก็มี Register ที่ต้องจัดการมากกว่า Standard Parallel Port (SPP) อีกหลายตัว และ Serial Port มีข้อดีกว่า Parallel Port ดังนี้

1. ระยะของสาย Serial สามารถมีความยาวได้มากกว่าสายของ Parallel มาก ทั้งนี้เพราะสัญญาณของ Serial Port ซึ่งส่วนใหญ่ใช้มาตรฐาน RS-232C จะมีค่า -3 โวลต์ ถึง -15 โวลต์ สำหรับ Logic "1" หรือ "Mark" และมีค่า +3 โวลต์ ถึง +15 โวลต์ สำหรับ Logic "0" หรือ "Space" (สำหรับช่วง +3 โวลต์ ถึงถึง -3 โวลต์ เป็นช่วง Undefined) ส่วนสัญญาณของ Parallel นั้น Logic "1" จะมีค่า +5 โวลต์ และ logic "0" จะมีค่า 0 โวลต์ ทำให้สัญญาณของ Serial สามารถรับการสูญเสียของสาย (Cable loss) ได้มากกว่าสัญญาณของ Parallel ปกติสาย Parallel Port จะไปได้เพียง 5 ฟุต ส่วนสาย RS-232 จะไปได้ถึง 50 ฟุตที่ speed สูงสุดของมัน

2. Serial จะใช้จำนวนสายไฟน้อยกว่า Parallel ถ้าต่อในลักษณะ Null Modem จะใช้สายเพียง 3 เส้น ขณะที่แบบ Parallel จะต้องใช้สาย 19 ถึง 25 เส้น

3. การสื่อสารแบบไร้สาย เช่น การใช้ Infra Red การส่งพร้อมกันทีละ 8 บิต แบบ Parallel จะทำให้ไม่สามารถแยกแยะได้ว่า บิต ไตเป็น บิต 0 หรือ บิต 1 เป็นต้น ปัจจุบันอุปกรณ์ IrDA มีความเร็วไม่ต่ำกว่า 115.2 k Baud แต่มี Pulse length เพียง 3/16 ของ RS-232 เพื่อประหยัดพลังงาน เพราะส่วนมากใช้ในอุปกรณ์แบบพกพาเช่น Laptop หรือ Palmtop

4. ปัจจุบัน Microcontroller มักมีการผนวก Port การสื่อสารแบบ Serial ไว้ด้วย เพราะใช้จำนวนขาน้อยกว่าแบบ Parallel

อุปกรณ์สื่อสารจะจำแนกออกเป็น 2 กลุ่มคือ

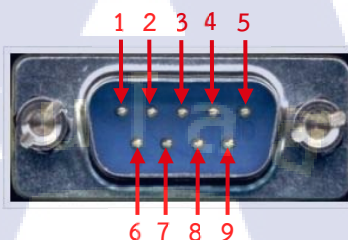
1. อุปกรณ์ DTE (Data Terminal Equipment) เป็นอุปกรณ์สำหรับส่งข้อมูล (Output) โดยทั่วไปคอนเน็กเตอร์จะเป็นตัวผู้

2. อุปกรณ์ DCE (Data Communication Equipment) เป็นอุปกรณ์สำหรับรับข้อมูล (Input) โดยทั่วไปคอนเน็กเตอร์จะเป็นตัวเมียคอน เน็กเตอร์ที่นิยมใช้จะเป็นชนิด D-Type แบบ 9 ขา และแบบ 25 ขา โดยจะติดตั้งอยู่หลังเครื่องคอมพิวเตอร์

มาตรฐานของ Serial Port มีดังนี้

1. มาตรฐาน RS-232-C เป็นมาตรฐาน RS-232 ที่มีการปรับปรุงแก้ไขจากมาตรฐานเดิม ซึ่งเราอาจคุ้นเคยกับชื่อนี้มากกว่า RS-232-A หรือ RS-232-B อันที่จริงแล้วยังมีมาตรฐาน RS-232-D ที่ใหม่กว่า RS-232-C โดยที่มีการเพิ่มข้อกำหนดของ Connectors แบบ DB เข้าไปด้วย เช่น DB-25 ซึ่งในขณะนั้นสิทธิบัตรของ Connectors แบบนี้ได้หมดอายุลงพอดี จึงสามารถรวมข้อกำหนดเข้าไว้ได้ลักษณะโดยทั่วไปของการเชื่อมต่อข้อมูลแบบอนุกรมตามมาตรฐาน RS-232 คือเป็นการสื่อสารข้อมูลแบบจุดต่อจุด ซึ่งเดิมทีเป็นการสื่อสารข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์กับ

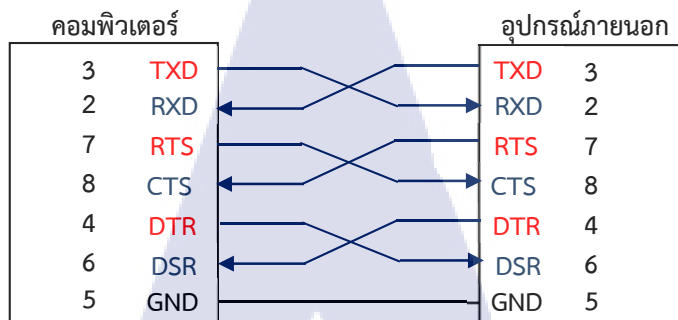
โมเด็ม ซึ่งจริงๆ แล้วทั้งสองฝั่งจะเป็นอะไรก็ได้ การสื่อสารเป็นแบบสองทางพร้อมกัน (Full-duplex) โดยอาจใช้สายสัญญาณอื่นร่วมเพื่อทำแฮนด์เชก (Hand-shake) หรือไม่ได้ มาตรฐาน RS-232 จำกัดความยาวสายไว้ที่ 50 ฟุต (หรือประมาณ 15 เมตร) สำหรับการส่งสัญญาณที่ความเร็ว 19,200 บิตต่อวินาที โดยที่ความยาวสายจะต้องสั้นลงถ้าต้องการสื่อสารที่ความเร็วสูงขึ้น และถ้ามีสัญญาณรบกวนมากๆ เช่นในโรงงาน หรือบริเวณใกล้เครื่องจักรที่เป็นแบบมีการสวิตซ์สัญญาณไฟฟ้าที่กระแสวิกๆ ก็จะทำให้ต้องมีการลดความเร็วในการส่งสัญญาณลงหรือใช้สายที่สั้นลง



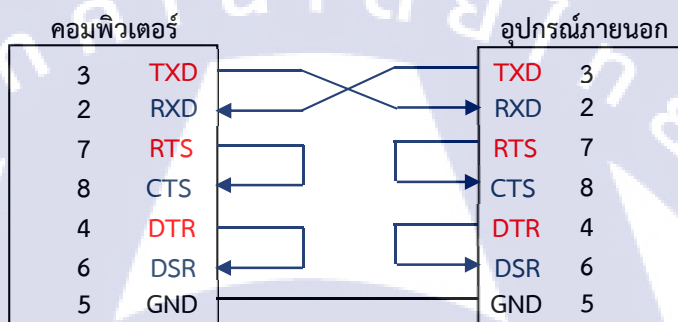
รูปที่ 2.9 การจัดขาของคอนเน็กเตอร์ อนุกรมแบบ DB9 และหน้าที่การใช้งานต่างๆ

ตารางที่ 2.6 การส่งข้อมูลของ RS-232

Pin	Signal
1	Data Carrier Detect
2	Receives Data
3	Transmitted Data
4	Data Terminal Ready
5	Signal Ground
6	Data Set Ready
7	Request to Send
8	Clear to Send
9	Ping Indicator



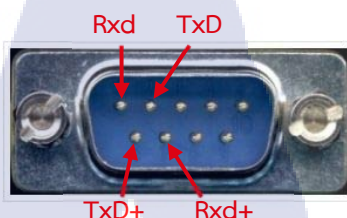
รูปที่ 2.10 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกเข้ากับคอมพิวเตอร์ด้วยสาย DB9



รูปที่ 2.11 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภายนอกผ่าน DB9 แบบ Null modem

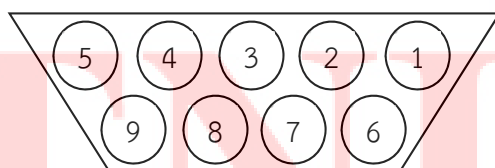
2.มาตรฐาน RS-422 หรือ RS-422-A ถูกกำหนดขึ้นโดยสมาคมผู้ประกอบการอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์หรือ EIA เช่นเดียวกันกับมาตรฐาน RS-232 โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะแก้ปัญหาเรื่องความยาวของสายสื่อสารโดยใช้การส่งสัญญาณแบบผลต่าง (Differential) แทนที่จะใช้การส่งสัญญาณแบบอ้างอิงกับจุดกราวด์ (หรือสายดิน) เช่นเดียวกันกับ RS-232 การส่งสัญญาณแบบ Differential นี้ช่วยลดปัญหาสัญญาณรบกวนจาก 2 ปัจจัยด้วยกัน ได้แก่ ปัญหาแรงดันกราวด์ 2 ผังสายไม่เท่ากัน อันเกิดจากกระแสไฟฟ้าที่ไหลในสายกราวด์ที่ยาวมากๆ ก่อให้เกิดความต่างศักย์ และปัญหาสัญญาณรบกวนที่เกิดจากแม่เหล็กไฟฟ้าเหนี่ยวนำในสาย โดยหากสายไฟที่ใช้ถูกตีเกลียวและวางไว้ใกล้กัน เมื่อมีแรงดันเหนี่ยวนำจะปรากฏแรงดันรบกวนบนสายทั้งสองเท่าๆ กันเป็นผลให้ ตัวรับที่อ่านความต่างศักย์ระหว่างสายอ่านข้อมูลได้เช่นเดิม ทั้งสองปัจจัยนี้เองเป็นสาเหตุที่ทำให้ความต้านทานต่อสัญญาณรบกวนของการสื่อสารแบบ RS-232 ต่ำกว่า RS-422 ตามมาตรฐาน RS-422 นี้จะใช้สายสัญญาณทั้งหมด 4 เส้น (2 เส้นสำหรับการส่งสัญญาณ และอีก 2 เส้นสำหรับรับสัญญาณ) และ

สามารถใช้ความยาวสายสัญญาณได้ถึง 4,000 ฟุต (หรือ 1.2 กม.) ที่ความเร็ว 100,000 บิตต่อวินาที และการสื่อสารเป็นแบบ 2 ทางพร้อมกัน (Full Duplex)



รูปที่ 2.12 ขาการใช้งานของ RS-422

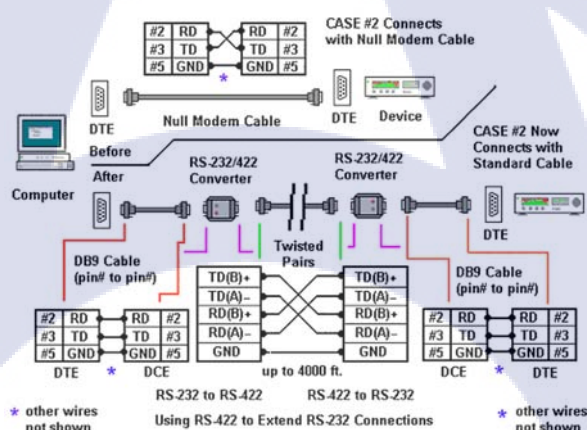
3.มาตรฐาน RS-485 กำหนดโดยสมาคมผู้ประกอบการอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์หรือ EIA เป็นมาตรฐานการเชื่อมต่อสัญญาณแบบอนุกรม (Serial Communication) มีลักษณะการเชื่อมต่อเป็นแบบหลายจุด (Multi-point) หรือ Multi-drop สายสัญญาณที่ใช้มีทั้งแบบที่เป็น 2 สาย และแบบที่เป็น 4 สาย การต่อแบบหลายจุดนี้ทำให้สามารถมองสายสัญญาณเป็นบัสนำสัญญาณได้ (Signal Bus) จำนวนคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์ที่สามารถอยู่บน RS-485 บัสหนึ่งถูกกำหนดไว้ที่ 32 ตัว ในกรณีที่ต้องการเพิ่มจะต้องมีตัวทวนสัญญาณ (Signal Repeater) หรือใช้ตัวส่ง-รับสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์ (ความต้านทานเสมือน) สูงขึ้น ซึ่งเราอาจเพิ่มจำนวนจุดเชื่อมต่อขึ้นได้ถึง 128 จุด ความยาวของสายสัญญาณตามมาตรฐาน RS-485 นี้สามารถยาวได้ถึง 1.2 กม เช่นเดียวกับมาตรฐาน RS-422 แต่การสื่อสารจะเป็นแบบสองทางไม่พร้อมกัน (Half Duplex) มีเพียงคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์ตัวเดียวเท่านั้นที่สามารถส่งสัญญาณออกได้ ณ เวลาหนึ่งๆ ส่วนที่เหลือจะเป็นผู้รับสัญญาณ



รูปที่ 2.13 RS-422, RS-485 DB-9 Female Pinout

ตารางที่ 2.7 ลักษณะการต่อใช้งานมาตรฐาน RS-422, RS-485

Pin	Signal
1	Auxiliary Output+
2	Data Output+
3	Signal Ground
4	Data Input+
5	Auxiliary Input+
6	Auxiliary Output-
7	Data Output-
8	Data Input-
9	Auxiliary Input-



รูปที่ 2.14 RS232 to RS422 or RS-422 to RS-232 Serial Interface Convert Diagram

โดยการเชื่อมต่อของ Arduino นั้นจะใช้การรับ-ส่ง ข้อมูล ผ่านทาง พอร์ตอนุกรม (Serial port) เป็นพอร์ตสำหรับต่อกับอุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุต โดยส่วนใหญ่เราจะใช้ สำหรับต่อกับเมาส์ ในกรณีที่คอมพิวเตอร์เครื่องนั้นไม่มีพอร์ต PS/2 หรือเป็น เคสแบบ AT นอกจากนั้นเรายังใช้สำหรับ เป็นช่องทางการติดต่อโมเด็มด้วย ในคอมพิวเตอร์หนึ่งเครื่องจะมีพอร์ตอนุกรมให้อยู่สองพอร์ต เรียกว่าพอร์ต คอม 1 และพอร์ตคอม 2 นอกจากนั้นอาจจะมีฮาร์ดแวร์บางตัว เช่น

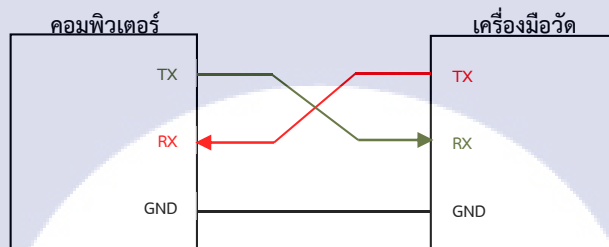
- พอร์ตอนุกรมจะมีหัวเข็ม 9 เข็ม หรือ 25 เข็ม
- พอร์ตนี้จะต่อกับอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น เมาส์ โมเด็ม สแกนเนอร์ เป็นต้น
- สามารถต่อความยาวได้ถึง 6 เมตรและราคาสายก็ไม่แพงนัก

RS232 (ย่อมาจาก : Recommended Standard no. 232) คือ มาตรฐานการสื่อสารข้อมูลดิจิทัลแบบอนุกรม (serial communication) ซึ่งถูกกำหนดขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1960 โดย EIA (Electronic Industries Association) หรือ สมาคมอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ของอเมริกา ซึ่งในยุคแรก RS232 เป็นที่นิยมมากขนาดที่คอมพิวเตอร์ทุกเครื่องจะต้องมี Serial port สำหรับการสื่อสารมาตรฐานนี้และเชื่อว่าคอมพิวเตอร์ของผู้ใช้หลายๆท่านก็ยังมี Port เชื่อมต่อนี้อยู่ แต่ในปัจจุบันได้มี USB ซึ่งเป็นมาตรฐานสื่อสารที่รับ/ส่งข้อมูลได้เร็วกว่าเข้ามาแทนที่ ทำให้มาตรฐานการสื่อสารอย่าง RS232 ก็ค่อยๆมีอุปกรณ์ที่รองรับน้อยลงเรื่อยๆตามเวลา

2.4.1 หลักการทำงานของ RS232

มาตรฐาน RS232 เป็นมาตรฐานที่รับ/ส่งข้อมูลแบบ Full duplex หรือจะให้พูดง่ายๆคือสามารถรับและส่งข้อมูลได้พร้อมกันทั้งคู่ในเวลาเดียวกัน โดยการรับ/ส่งข้อมูลนั้นจะใช้สายไฟทั้งหมด 3 เส้น ได้แก่

- Tx (Transmit data) คือ สายส่งข้อมูล ซึ่งสายเส้นนี้จะมีหน้าที่ในการส่งข้อมูลเท่านั้น
- Rx (Receive data) คือ สายรับข้อมูล ซึ่งสายเส้นนี้จะมีหน้าที่ในการรับข้อมูลเท่านั้น
- GND (Signal ground) คือ สายกราวด์ เป็นสายเทียบหรืออ้างอิงแรงดันไฟฟ้า 0V



รูปที่ 2.15 การเชื่อมต่อ RS-232 ระหว่างคอมพิวเตอร์กับเครื่องมือวัด

จากรูปที่ 2.15 เป็นตัวอย่างการเชื่อมต่อแบบ RS232 ของเครื่องมือวัดอุตสาหกรรมกับคอมพิวเตอร์ เพื่อตั้งค่าเครื่องมือวัดผ่าน Software โดย

- Tx (เครื่องมือวัด) จะถูกต่อเข้ากับ Rx (คอม) เพื่อส่งข้อมูลจากเครื่องมือวัดไปยังตัวรับของคอมพิวเตอร์
- Rx (เครื่องมือวัด) จะถูกต่อเข้ากับ Tx (คอม) เพื่อรับข้อมูลที่ถูกส่งมาจากคอมพิวเตอร์
- GND (เครื่องมือวัด) จะถูกต่อเข้ากับ GND (คอม) เพื่อเทียบสัญญาณแรงดัน 0V

ตารางที่ 2.8 การเปรียบเทียบคุณสมบัติ RS-232, RS-423, RS-422 และ RS-485

คุณสมบัติ	RS-232	RS-423	RS-422	RS-485
Differential	No	No	Yes	yes
Max number of drivers	1	1	1	32
Max number of receivers	1	10	10	32
Modes of operation	Half duplex full duplex	Half duplex	Half duplex	Half duplex
Network topology	Point-to-point	multidrop	multidrop	multidrop
Max distance (acc. standard)	15 m	1200 m	1200 m	1200 m
Max speed at 12 m	20 kbs	100 kbs	10 Mbs	35 Mbs
Max speed at 1200 m	1 kbs	1 kbs	100 kbs	100 kbs
Max slew rate	30 V/ μ s	adjustable	n/a	n/a
Receiver input resistance	3k Ω -7 k Ω	≥ 4 k Ω	≥ 4 k Ω	≥ 12 k Ω
Driver load impedance	3k Ω -7 k Ω	≥ 450 Ω	100 Ω	540 Ω
Receiver input sensitivity	± 3 V	± 200 mV	± 200 mV	± 200 mV
Receiver input range	± 15 V	± 12 V	± 10 V	-7 to 12 V
Max driver output voltage	± 25 V	± 6 V	± 6 V	-7 to 12 V
Min driver output voltage (with load)	± 5 V	± 3.6 V	± 2 V	± 1.5 V

2.4.2 ข้อดีและข้อเสียของสัญญาณ RS232

2.4.2.1 ข้อดีของสัญญาณ RS232

จากที่กล่าวมาข้างต้นการสื่อสารแบบ RS232 ถูกคิดค้นมาตั้งแต่ปี 1960 ซึ่งถือว่านานมาก จากการถือกำเนิดมาอย่างยาวนานนั้นก็ทำให้ข้อดีเหลือน้อยลงไปทุกทีเพราะมีการสื่อสารรูปแบบใหม่ที่ถูกพัฒนาให้ดีกว่าเกิดขึ้นอยู่ทุกวัน แต่ถึงกระนั้น RS232 ก็ยังพอมีข้อดีหลงเหลืออยู่ ซึ่งจะขออธิบายเป็นข้อๆดังนี้

RS232 เป็นระบบที่ถูกคิดค้นมาตั้งแต่ปี 1960 และเป็นที่ยอมรับในยุคแรกซึ่งมีข้อดีคือ มีอุปกรณ์ที่รองรับเยอะ การสื่อสารแบบ RS232 เป็นการสื่อสารที่มีอยู่ในเมนบอร์ดคอมพิวเตอร์แทบทุกรุ่น ซึ่งคนทั่วไปจะรู้จักกันในชื่อ Serial port ซึ่งทำให้การสื่อสารแบบ RS232 ไม่จำเป็นต้องใช้ Converter (ตัวแปลงสัญญาณ) ในการเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ ซึ่งต่างจากมาตรฐาน

ใหม่อย่าง RS422, RS485 ที่ถึงแม้จะมีข้อดีที่มากกว่าแต่ก็ต้องใช้ Converter ในการแปลงสัญญาณ อยู่ดี แต่ข้อดีข้อนี้อาจอยู่ได้อีกไม่นาน เพราะปัจจุบันเมนบอร์ดรุ่นใหม่ๆได้นำ Serial port ออกจาก เมนบอร์ดและเพิ่ม Port การสื่อสารน้องใหม่ที่กำลังเป็นที่นิยมเข้าไปแทนที่นั่นคือการสื่อสารแบบ USB ซึ่งทำให้การสื่อสารรุ่นเก่าอย่าง RS232 ค่อยๆเลือนหายไปตามกาลเวลา

2.4.2.2 ข้อเสียของสัญญาณ RS232

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาการสื่อสารข้อมูลรูปแบบใหม่ขึ้นมามากมาย RS232 ซึ่งเป็นการสื่อสารรุ่นเก่าก็ย่อมมีข้อเสียอยู่เช่นกัน ซึ่งจะขออธิบายเป็นข้อๆดังนี้

- ปัญหาการส่งสัญญาณในระยะไกล RS232 สามารถรับ/ส่งข้อมูล ที่ความเร็วสูงสุด 19.2 kbit/s ได้ที่ระยะ 15 เมตร ซึ่งแตกต่างกันมากเมื่อเทียบกับการสื่อสาร มาตรฐานใหม่อย่าง RS485 ซึ่งสามารถรับ/ส่งข้อมูลได้ไกลถึง 1,200 เมตร ที่ความเร็ว 100 kbit/s เนื่องจากการสื่อสารแบบ RS232 นั้นเป็นระบบที่ง่ายต่อการถูกสัญญาณรบกวน (Noise) เข้าแทรกแทรง ทำให้ระยะการสื่อสารของ RS232 ไม่สามารถส่งในระยะไกลได้ แต่หากมองดูเผินๆแล้ว 15 เมตร อาจจะถือว่าไกลมากสำหรับการใช้งานทั่วไป แต่ในโรงงานอุตสาหกรรมแล้ว การส่งข้อมูลใน เครื่องมือวัดอุตสาหกรรมหรือเครื่องมือทางวิศวกรรมมายังห้องควบคุมด้วยระยะ 15 เมตรนั้นถือว่า สั้นมากๆเมื่อเทียบกับขนาดของโรงงาน

- รับ/ส่งข้อมูลได้เฉพาะแบบ 1 ต่อ 1 อีกหนึ่งปัญหาของ RS232 คือ ไม่สามารถส่งข้อมูลจากอุปกรณ์พร้อมกันหลายๆตัวมายังคอมพิวเตอร์ได้ โดยทำได้เพียงแค่ส่งข้อมูล มาที่คอมพิวเตอร์ทีละตัวแบบ 1 ต่อ 1 ซึ่งแตกต่างกันมากเมื่อเทียบกับการสื่อสารมาตรฐานใหม่ อย่าง RS485 ซึ่งสามารถส่งข้อมูลจากอุปกรณ์พร้อมกันได้ถึง 32 ตัว

- ความเร็วที่ล่าช้าในการรับ/ส่งข้อมูล อีกจุดเปลี่ยนของการสื่อสาร แบบ RS232 คือ ความล่าช้าในการรับ/ส่งข้อมูล นี่คือสาเหตุหลักที่ Microsoft เคยประกาศยกเลิก การสนับสนุน RS232 และถูกแทนที่ด้วยการสื่อสารแบบใหม่นั้นคือการสื่อสารแบบ USB ซึ่งเชื่อมต่อ ง่ายและรวดเร็วกว่า RS232 ถึงเกือบ 100 เท่าในยุคแรกๆ ซึ่งปัจจุบันอาจเร็วกว่านี้มาก แต่อย่างไรก็ ตาม ระบบการรับ/ส่งข้อมูลในเครื่องมือวัดอุตสาหกรรมหรือเครื่องมือทางวิศวกรรมก็ยังใช้การสื่อสาร แบบ RS232 อยู่ เพราะผู้ใช้งานจำนวนมากยังคงคุ้นชินและยังมีอุปกรณ์จำนวนมากในโรงงาน อุตสาหกรรมที่ยังรองรับมาตรฐานนี้อยู่ บวกกับงานบางประเภทเป็นการสื่อสารแบบ 1 ต่อ 1 ในระยะ สั้นเช่น การตั้งค่าเครื่องมือวัดอุตสาหกรรมโดยใช้ Note book ในการตั้งค่าตามจุดต่างๆที่เป็นปัญหา เป็นต้น

2.4.2.3 ความยาวสายเคเบิลสูงสุดของ RS232

ความยาวของสายเคเบิล RS232 เป็นอีกหนึ่งสิ่งที่ถูกกล่าวถึงมากที่สุด ในโลก ซึ่งตัวมาตรฐานได้พูดไว้อย่างชัดเจนว่าความยาวสูงสุดของสายเคเบิล RS232 คือ 50 ฟุต (15

เมตร) หรือ สายเคเบิลต้องมีค่า capacitance สูงสุดเท่ากับ 2,500 pF ซึ่งกฎข้อหลังนี้มักจะถูกกลืนนั้นหมายความว่า การใช้สายเคเบิลที่มีค่า capacitance ต่ำๆ จะช่วยขยายระยะสายเคเบิลให้ไกลขึ้นได้ ยกตัวอย่าง หากใช้สายเคเบิลแบบ UTP CAT-5 ที่มีค่า capacitance อยู่ที่ 17 pF/ft ก็จะทำให้สามารถใช้สายเคเบิลได้ที่มีความยาวสูงสุด 147 ฟุต (44 เมตร)

ความยาวสูงสุดของสายเคเบิล RS232 ที่ระบุในมาตรฐานเป็นความยาวที่จะช่วยให้สามารถรับ/ส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุด ถ้าความเร็วในการรับ/ส่งข้อมูลลดลง นั่นก็หมายความว่าความยาวสูงสุดของสายเคเบิลก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งทาง Texas Instruments ได้ทดลองในทางปฏิบัติเมื่อหลายปีก่อน โดยใช้ความเร็วในการส่งข้อมูลที่แตกต่างกันเพื่อหาความยาวสูงสุดของสายเคเบิล โปรดจำไว้ว่ามาตรฐาน RS232 เดิมได้รับการพัฒนาขึ้นสำหรับความเร็ว 20,000 bit/s ซึ่งหากลดความเร็วลงครึ่งหนึ่งจะทำความยาวสายเคเบิลเพิ่มขึ้นได้อีกถึง 10 เท่า เลยทีเดียว

ตารางที่ 2.9 ความยาวสายเคเบิล RS-232 ตาม Texas Instruments

อัตราการถ่ายโอนข้อมูล	ความยาวสายเคเบิลสูงสุด (ฟุต)
19200	50
9600	500
4800	1000
2400	3000

2.4.2.4 รหัสสัญญาณของ RS232

RS232 เป็นรูปแบบการส่งข้อมูลดิจิทัลรูปแบบหนึ่ง ซึ่งอย่างที่ทุกคนทราบกันดีว่าข้อมูลดิจิทัลจะประกอบด้วยตัวเลขเพียงสองตัว คือ 0 และ 1 เรียงต่อกันเป็นรหัสหรือชุดคำสั่งเพื่อสั่งงานอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่ง RS232 จะใช้ระดับของแรงดันไฟฟ้าเป็นตัวบอกว่าข้อมูลไหนคือ 0 และ 1 ตามตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 แรงดันไฟฟ้าของ RS-232

การส่งรหัส	ตัวส่งสัญญาณ (V)	ตัวรับสัญญาณ (V)
0	+5...+15	+3...+25
1	-5...-15	-3...-25
undefined	-	-3...+3

2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์เปรียบเหมือนกับสมองของมนุษย์ ซึ่งมีหน้าที่คิด คำนวณทางคณิตศาสตร์ คำนวณทางลอจิก สั่งการ มีส่วนความจำ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณ หรือประมวลผลต่างๆ " แต่จะไม่สามารถทำงานได้เอง " โดยไม่มีมือ เท้า แขน ขา หรือ ตา หู จมูก ซึ่งเปรียบได้กับ อุปกรณ์ส่วนควบ (Accessories) อื่น เช่น เซนเซอร์ มอเตอร์ ระบบสื่อสารผ่านอินเทอร์เน็ต ระบบแสดงผลผ่านจอภาพ เป็นต้น ดังนั้นโดยสรุปคือ ไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่ในการคิดคำนวณ รับค่าจากระบบวัดผลภายนอก เข้ามาประมวลผล เพื่อสั่งการตอบสนองออกไปที่อุปกรณ์ต่อเชื่อมอื่นๆ ตัวมันเองเดียวๆ จะทำอะไรไม่ได้มาก

ไมโครคอนโทรลเลอร์ในปัจจุบันก็มีอยู่หลายยี่ห้อ เช่น PIC ของบริษัทไมโครชิพ Z80 MCS-51 ARM-Cortex AVR และ อื่นๆอีกมากมาย Arduino ก็เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์แบบหนึ่งที่มีเอกลักษณ์เฉพาะตัวที่ต่างจากยี่ห้ออื่นๆ คือ การเป็น Open Source ซึ่งทำให้ได้เปรียบเรื่องราคาและจำนวนผู้ใช้งานทั่วโลก

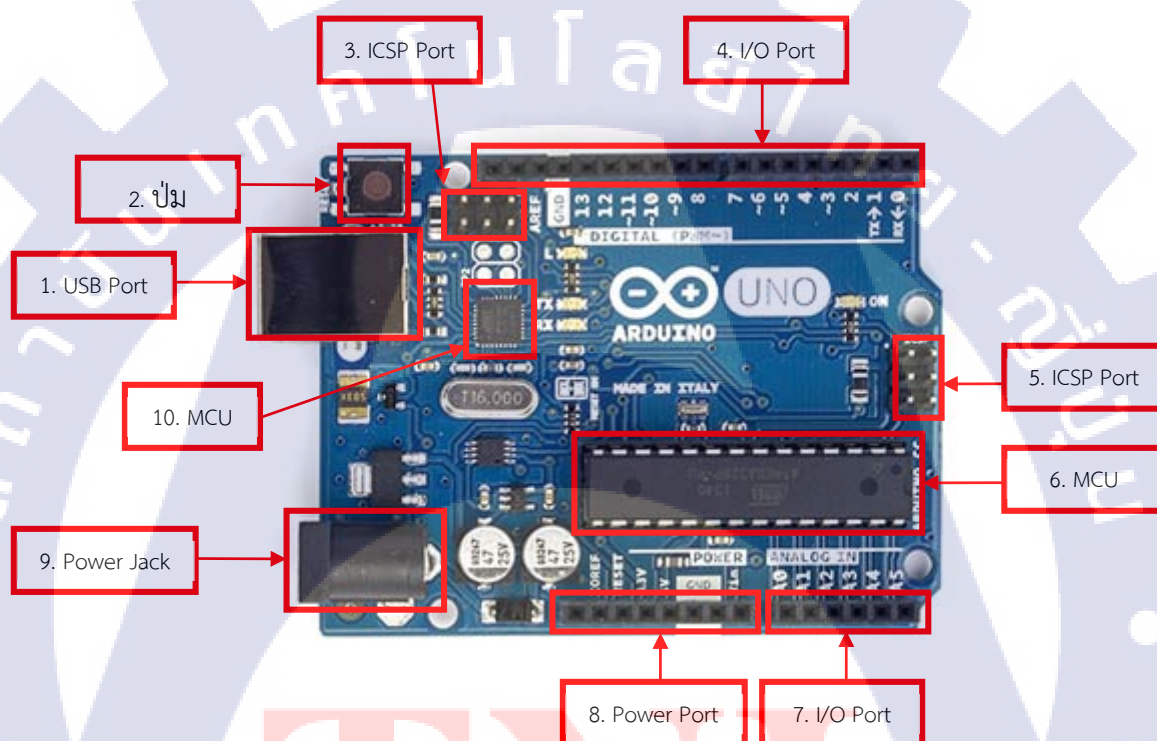
Arduino เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source คือมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้าน Hardware และ Software ตัวบอร์ด Arduino ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษา ทั้งนี้ผู้ใช้งานยังสามารถดัดแปลง เพิ่มเติม พัฒนาต่อยอดทั้งตัวบอร์ด หรือโปรแกรมต่อได้อีกด้วย

ความง่ายของบอร์ด Arduino ในการต่ออุปกรณ์เสริมต่างๆ คือผู้ใช้งานสามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา I/O ของบอร์ด ดังรูปที่ 2.4 หรือเพื่อความสะดวกสามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริม (Arduino Shield) ประเภทต่างๆ เช่น Arduino XBee Shield, Arduino Music Shield, Arduino Relay Shield, Arduino Wireless Shield, Arduino GPRS Shield เป็นต้น มาเสียบกับบอร์ดบนบอร์ด Arduino แล้วเขียนโปรแกรมพัฒนาต่อได้ จุดเด่นที่ทำให้บอร์ด Arduino เป็นที่นิยม

- ง่ายต่อการพัฒนา มีรูปแบบคำสั่งพื้นฐาน ไม่ซับซ้อนเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้น
- มี Arduino Community กลุ่มคนที่ร่วมกันพัฒนาที่แข็งแกร่ง
- Open Hardware ทำให้ผู้ใช้สามารถนำบอร์ดไปต่อยอดใช้งานได้หลายด้าน
- ราคาไม่แพง
- Cross Platform สามารถพัฒนาโปรแกรมบน OS ใดก็ได้
- สามารถสร้าง Pulse Width Modulation ได้สูงถึง 31.25 kHz

2.5.1 Arduino UNO-R3 [7]

Arduino Uno R3 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ Open-source บนแพลตฟอร์ม Arduino ของแท้จากผู้ผลิต arduino.cc ประเทศอิตาลี ออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ใช้ชิพ ATmega328P รุ่นที่ความถี่ 16 MHz หน่วยความจำแฟลช 32 KB แรม 2 KB บอร์ดใช้ไฟเลี้ยง 7 ถึง 12 V มีระดับแรงดันไฟฟ้าในการทำงานและขาสัญญาณอยู่ที่ 5 V (TTL) มี Digital Input / Output 14 ขา (เป็น PWM ได้ 6 ขา) มี Analog Input 6 ขา Serial UART 1 ชุด I2C 1 ชุด SPI 1 ชุด เขียนโปรแกรมบนซอฟต์แวร์ Arduino IDE และโปรแกรมผ่านพอร์ต USB



รูปที่ 2.16 ส่วนประกอบต่างๆของ Arduino UNO-R3

รายละเอียดข้อมูลของแต่ละจุดบนบอร์ด Arduino UNO-R3 มีดังนี้

1. USB Port : ใช้สำหรับต่อกับ Computer เพื่ออัปโหลดโปรแกรมเข้า MCU และจ่ายไฟให้กับบอร์ด
2. Reset Button : เป็นปุ่ม Reset ใช้กดเมื่อต้องการให้ MCU เริ่มการทำงานใหม่
3. ICSP Port : ของ Atmega16U2 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Visual Comport บน Atmega16U2

4. I/O Port : Digital I/O ตั้งแต่ขา D0 ถึง D13 นอกจากนี้ บาง Pin จะทำหน้าที่อื่นๆเพิ่มเติมด้วย เช่น Pin0,1 เป็นขา TX และ RX Serial, Pin3, 5, 6, 9, 10 และ 11 เป็นขา PWM
5. ICSP Port : Atmega328 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Boot loader
6. MCU : Atmega328 เป็น MCU ที่ใช้บนบอร์ด Arduino
7. I/O Port : นอกจากจะเป็น Digital I/O แล้ว ยังเปลี่ยนเป็น ช่องรับสัญญาณอนาล็อก ตั้งแต่ขา A0-A5
8. Power Port : ไฟเลี้ยงของบอร์ดเมื่อต้องการจ่ายไฟให้กับวงจรภายนอก ประกอบด้วย ไฟไฟเลี้ยง +3.3 V, +5V, GND, V_{in}
9. Power Jack : รับไฟจาก Adapter โดยที่แรงดันอยู่ระหว่าง 7-12 V
10. MCU : ของ Atmega16U2 เป็น MCU ที่ทำหน้าที่เป็น USB to Serial โดย Atmega328 จะติดต่อกับ Computer ผ่าน Atmega16U2



รูปที่ 2.17 Arduino รุ่น UNO R3

2.6 LabVIEW

LabVIEW เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างเพื่อนำมาใช้ในการวัดและเครื่องมือวัดสำหรับงานทางวิศวกรรม LabVIEW ย่อมาจาก Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับพัฒนาระบบการสอบเทียบหรือทางด้านวิศวกรรม ดังนั้นจุดเด่นของโปรแกรมนี้ คือสามารถพัฒนาระบบของการวัดและเครื่องมือวัด ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และส่วนโปรแกรมจะมีฟังก์ชันที่ช่วยในการวัดมากมายและแน่นอนที่สุด โปรแกรมนี้จะมีประโยชน์อย่างสูงเมื่อใช้ร่วมกับเครื่องมือวัดทางวิศวกรรมต่างๆ

สิ่งที่ LabVIEW แตกต่างจากโปรแกรมอื่นก็คือ LabVIEW นี้เป็นโปรแกรมที่เราไม่จำเป็นต้องเขียน code หรือคำสั่งใดๆ ทั้งสิ้น และภาษาที่ใช้ในโปรแกรมเรียกว่า ภาษารูปภาพ หรือเรียกอีกอย่างว่า ภาษา G (Graphical Language) ซึ่งจะแทนการเขียนโปรแกรมเป็นบรรทัดอย่างที่เราคุ้นเคยกับภาษาพื้นฐาน เช่น C, BASIC ด้วยรูปภาพหรือสัญลักษณ์ทั้งหมด ซึ่งแม้ว่าในเบื้องต้นเราอาจจะสับสนกับการจัดระเบียบหรือเขียนโปรแกรมบ้าง แต่เมื่อเราคุ้นเคยกับการใช้โปรแกรมนี้แล้วเราจะพบว่า LabVIEW นี้มีความสะดวกและสามารถลดเวลาในการเขียนโปรแกรมลงไปได้มาก โดยเฉพาะในงานเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่นๆ เพื่อใช้ในการวัดและการควบคุม

LabVIEW โดยจุดประสงค์หลักแล้ว บริษัท National Instrument ได้เริ่มพัฒนาโปรแกรมที่จะนำมาใช้กับระบบเครื่องมือวัดที่มีความง่ายในการเขียนโปรแกรมและมีฟังก์ชันเพื่อจะช่วยให้การวัดทางวิศวกรรมให้มากที่สุด เพราะด้วยความเป็นมาบริษัท National Instrument เริ่มจากการผลิตอุปกรณ์ที่ใช้กับการวัดทางวิศวกรรม ไม่ใช่บริษัทที่เริ่มต้นมาจากการผลิต Software เป็นหลัก ดังนั้นคงไม่ผิดนักสำหรับผู้ที่ต้องการจะใช้ประโยชน์สูงสุดจากโปรแกรม LabVIEW คือผู้ที่ต้องการจะนำข้อมูลจากภายนอกเครื่องคอมพิวเตอร์ เข้ามาในเครื่องเพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูล ประมวลผลค่า แสดงผลและในหลายกรณีใช้ในระบบควบคุมอัตโนมัติด้วยคอมพิวเตอร์ ข้อได้เปรียบสูงสุดของ LabVIEW คือพยายามทำให้คอมพิวเตอร์ของเราเมื่อรวมกับ LabVIEW และ DAQ Card แล้วสามารถเปลี่ยนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลของเราให้กลายเป็นเครื่องมือวัดในหลายรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็น Oscilloscope, Multi-meter, Function Generator, Strain Meter Thermometer หรือเครื่องมือวัดอื่นๆ ตามที่เราต้องการ ทำให้เราสามารถใส่คอมพิวเตอร์ในการทำการวัดและเครื่องมือวัดได้อย่างกว้างขวาง ข้อได้เปรียบเหนือการใช้อุปกรณ์จริงเหล่านั้นคือ Virtual Instrument สามารถปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมกับการใช้งานของผู้ใช้แต่ละกลุ่มได้ โดยการเปลี่ยน VI ให้เป็นไปตามต้องการเป็นเรื่องที่ไม่ยุ่งยากนัก

จุดเด่นของ LabVIEW คือ สามารถทำให้คอมพิวเตอร์เครื่องหนึ่งกลายเป็นเครื่องมือวัดได้ ซึ่งสามารถทำให้เป็น Data Logger และ PLC (Programmable Logical Controlled) ทำงานพร้อมๆ กันได้ โดยปกติแล้ว ระบบควบคุมไม่ค่อยจะมีเครื่องมือวัดจริง แม้จะเก็บข้อมูลในการวัดขึ้นพื้นฐาน และในการควบคุมหรือสั่งการ อุปกรณ์อื่นก็สามารถทำได้แต่มีความยุ่งยากซับซ้อนมาก ถ้าเป็นการใช้โปรแกรมที่เป็นตัวอักษร หรือ ที่คุ้นเคยกันคือ ภาษา C นั้นมีความยุ่งยากมาก เพราะประกอบด้วยตัวอักษรที่เยอะจนตาลาย และการเชื่อมต่อต่างๆ กับ Sensor หรืออุปกรณ์ชนิดอื่นๆ ก็ทำได้ยุ่งยากมากซึ่งปัญหาที่พบ LabVIEW จะสามารถอำนวยความสะดวกและแก้ไขปัญหามาเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่างๆ ได้อย่างง่ายดาย

กล่าวโดยสรุปก็คือหากเรามี LabVIEW คอมพิวเตอร์และ DAQ Card (หรือระบบการติดต่อสื่อสารอื่นเช่น GPIB หรือ Serial Port ซึ่งรายละเอียดและความแตกต่างจะกล่าวต่อไปภายหลัง

เราสามารถสร้างเครื่องมือวัดเสมือนจริงได้มากมาย หากเราต้องมี Transducer ที่เหมาะสมประกอบอยู่ด้วยซึ่งจุดนี้เองคือข้อดีของโปรแกรมนี้[8]



รูปที่ 2.18 LabVIEW 2017

2.6.1 องค์ประกอบของ LabVIEW

โปรแกรมที่สร้างขึ้นจาก LabVIEW จะเป็นไฟล์ .vi ย่อมาจาก Virtual Instrument โดยจะมีองค์ประกอบหลักๆ อยู่ 3 ส่วน คือ

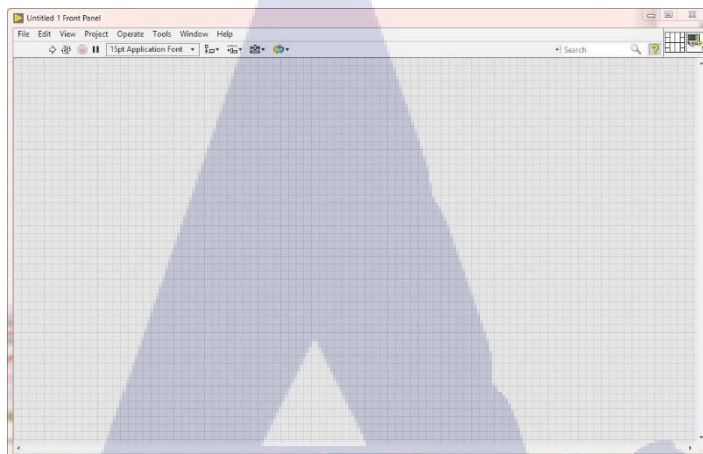
2.6.1.1 Front Panel

2.6.1.2 Block Diagram

2.6.1.3 Icon และ Connector

โดยทั้ง 3 ส่วนนี้เป็นปัจจัยหลักของโปรแกรม เมื่อทั้ง 3 ส่วนนี้มาประกอบกันขึ้นมา เปรียบได้ว่า เราจะได้เครื่องมือวัดเพิ่มมาใช้งานได้อีก 1 เครื่อง ซึ่งลักษณะและหน้าที่ ของทั้ง 3 ส่วนมีดังนี้

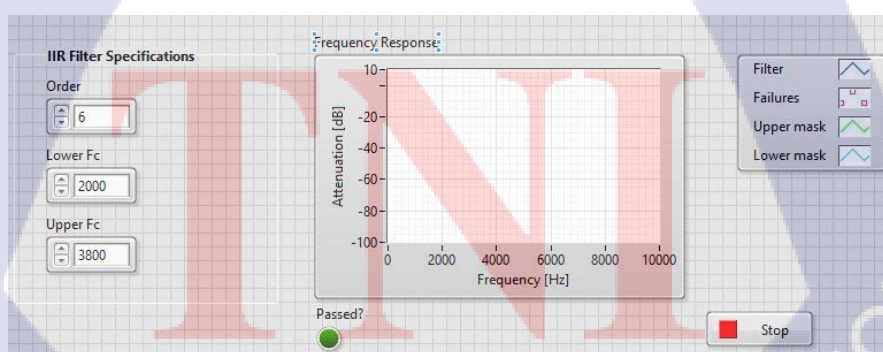
2.6.1.1 Front Panel จะเป็นส่วนที่ใช้สื่อความกันระหว่างผู้ใช้กับโปรแกรม (หรือที่นิยมเรียก User Interface) โดยทั่วไปจะมีลักษณะเหมือนกับหน้าปัทม์ของเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้งานด้านการวัดต่างๆ ไป โดยทั่วไปจะประกอบด้วย สวิตช์ปิด-เปิด, ปุ่มบิด, ปุ่มกด จอแสดงผลหรือแม้แต่ค่าที่ผู้ใช้สามารถกำหนด สำหรับผู้ที่คุ้นเคยกับการเขียนโปรแกรมประเภท Visual ทั้งหมดคงจะเข้าใจกันดีว่า Front Panel นี้จะเปรียบเสมือนเป็น GUI ของโปรแกรมหรือ VI นั้นเอง



รูปที่ 2.19 Front Panel ของ LabVIEW

Object ที่อยู่บน Front Panel จะมีอยู่ 3 ประเภท คือ

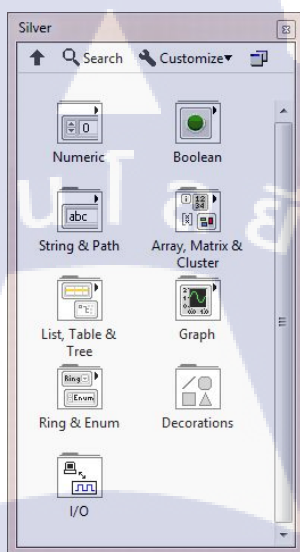
- 1) Control คือประเภทที่รับค่าจากผู้ใช้งาน (Input) ซึ่งผู้ใช้งานสามารถพิมพ์ค่าลงไป หรือใช้เมาส์คลิกเพื่อเปลี่ยนแปลงค่าได้ เช่น ปุ่มหมุน ปุ่มเลื่อน สวิตช์ เป็นต้น
- 2) Indicators คือประเภทที่ใช้แสดงค่าต่างๆเท่านั้น (Output) ผู้ใช้ไม่สามารถแก้ไขได้ เช่น กราฟ มิเตอร์ LED
- 3) Decorations เป็น Object ที่ไม่เกี่ยวข้องกับโปรแกรมและ code บน Block Diagram เลยแต่มีไว้เพื่อความสวยงามเป็นระเบียบของ Front panel เท่านั้นนั่นเอง ลักษณะของ Front Panel แสดงดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 2.20 Object ที่อยู่บน Front Panel ของ LabVIEW

เครื่องมือที่ใช้ออกแบบ Front Panel มีดังนี้

เครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel จะประกอบไปด้วย Control Palette และ Tools Palette ซึ่ง LabVIEW มี Controls Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel แสดงดังรูป 2.21 ซึ่งเป็นส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้งาน (User Interface) โดยจะจัดเป็นกลุ่มต่าง ๆ เช่น กลุ่มของตัวเลข (Numeric) ซึ่งภายในกลุ่มจะมี Control และ Indicator ต่างๆ ที่เกี่ยวกับตัวเลข



รูปที่ 2.21 Controls Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel

Tools Palette คือ เครื่องมือที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรม ซึ่งจะใช้ทั้งการออกแบบ Front Panel และ Block Diagram ในส่วนนี้จะกล่าวถึง Tools Palette สำหรับออกแบบ Front Panel



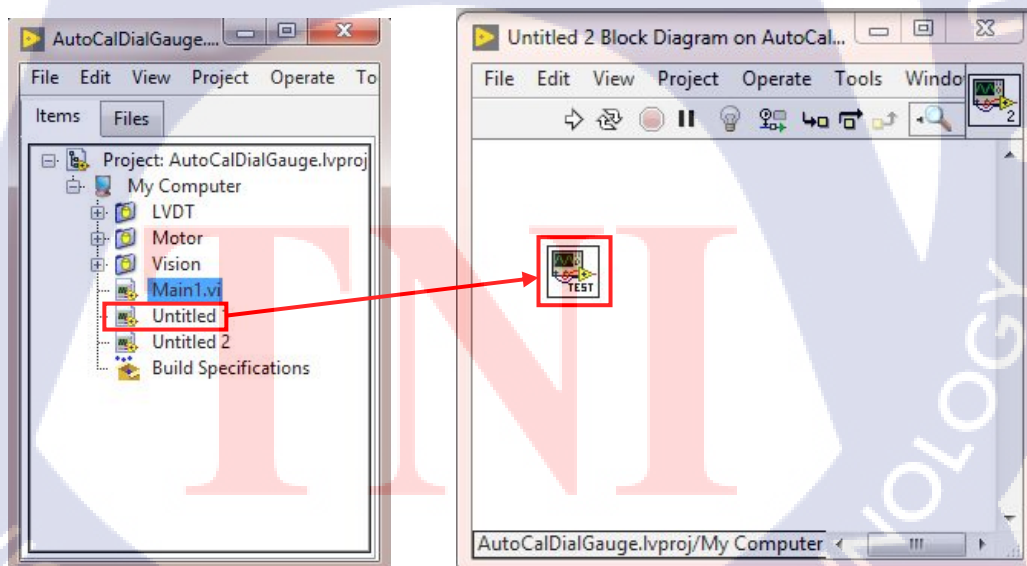
รูปที่ 2.22 Tools Palette ที่ใช้ในการออกแบบ Front Panel

ตารางที่ 2.11 เปรียบเทียบคำศัพท์ที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม

LabVIEW	โปรแกรมพื้นฐาน	หน้าที่
VI	Program	ตัวโปรแกรมหลัก
Function	Function	ฟังก์ชันสำเร็จรูปที่สร้างขึ้นมากับโปรแกรม
SubVI	Subroutine	โปรแกรมย่อยที่ถูกเรียกใช้โดยโปรแกรมหลัก
Front Panel	User Interface	ส่วนที่ติดต่อกับผู้ใช้
Block Diagram	Program Code	การเขียนตามขั้นตอนของที่แต่ละโปรแกรมกำหนดขึ้น

2.6.2 SubVI

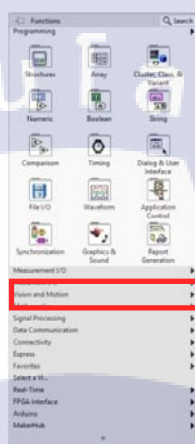
SubVI คือ โปรแกรมย่อยหรือโมดูล ที่สร้างไว้ในรูปแบบที่เราต้องการและสามารถนำมาใช้ร่วมกับโปรแกรมหลักที่สร้างไว้ได้ เมื่อ SubVI ถูกเรียกใช้งาน SubVI ย่อยจะเป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรมหลักที่ทำงานร่วมกัน หรือ ร่วมกันกับโปรแกรมหลัก แต่ไม่แสดงผล Front Panel ของ SubVI ให้เราเห็นเท่านั้น ดังนั้น SubVI จึงเป็นสิ่งที่จำเป็นมากในการเขียน LabVIEW เพราะจะทำให้เราสามารถบริหารจัดการการเขียนโค้ด และ หน้าที่ของแต่ละ SubVI ทำงานไปในทิศทางที่ต้องการและไม่ซับซ้อน ทำให้ควบคุมของแต่ละส่วนได้ง่าย



รูปที่ 2.23 การเพิ่ม SubVI ลงใน MainVI ในรูปแบบโปรเจค

2.6.3 Vision and Motion

เป็นฟังก์ชันที่ใช้เชื่อมต่อกับกล้องและประมวลผลเพื่อที่จะแสดงค่า โดยฟังก์ชันนี้จะเป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการดึงข้อมูลภาพจากกล้องหรือการนำเข้าภาพ และในการดึงข้อมูลต่างๆที่เป็นข้อมูลภาพมานั้นสามารถแปลงภาพนั้นๆ ให้เป็นภาพขาว-ดำ หรือ สามารถวิเคราะห์ภาพให้เป็นข้อมูล Text ได้ ยิ่งไปกว่านั้น ฟังก์ชันนี้ยังสามารถวิเคราะห์วิดีโอได้ด้วยการกำหนด Region of Interest (ROI) ให้วิเคราะห์ประมวลผลภาพเฉพาะจุดได้ และยังทำให้การประมวลผล แบบ ROI นั้นเร็วขึ้นกว่าที่จะประมวลผลภาพแบบทั้งหมดของเฟรม



รูปที่ 2.24 ฟังก์ชันที่ใช้กับระบบ Vision

ฟังก์ชัน Vision and Motion นั้นมีเครื่องมือที่ให้เลือกใช้งานเยอะมากอาทิเช่น การเชื่อมต่อกับ DAQ Card ของ NI หรือ อุปกรณ์ของ กล้อง Webcam ด้วยสาย USB ก็ยังสามารถทำได้ โดยง่าย ด้วยที่ฟังก์ชันของ LabVIEW นั้นทำออกมาให้รองรับกับอุปกรณ์ทุกชนิดที่เชื่อมต่อแบบ Serial Port ได้ และฟังก์ชันหลักที่เลือกใช้มีทั้งหมด 6 ฟังก์ชันหลัก คือ

2.6.3.1 IMAQ Find Circular Edge 3

2.6.3.2 IMAQ Concentric Rake 3

2.6.3.3 IMAQ Multi Threshold

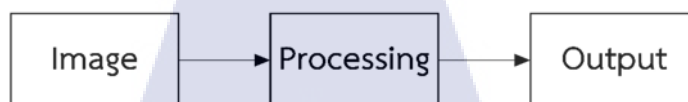
2.6.3.4 IMAQ Point Distances

2.6.3.5 IMAQ Overlay Lines VI

2.6.3.6 IMAQ Get Angles

2.7 Image Processing[9]

การประมวลผลภาพ (Image Processing) หมายถึง การนำภาพมาประมวลผลหรือคิดคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เราต้องการทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ[3]



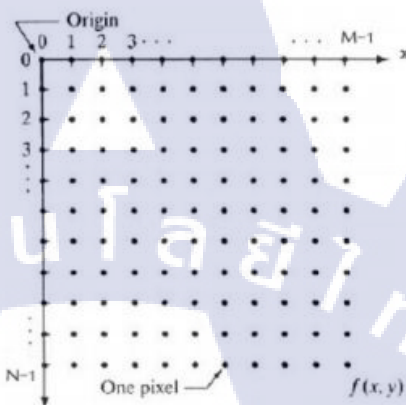
รูปที่ 2.25 หลักการของ Image Processing

โดยมีขั้นตอนต่าง ๆ ที่สำคัญ คือ การทำให้ภาพมีความคมชัดมากขึ้น การกำจัดสัญญาณรบกวนออกจากภาพ การแบ่งส่วนของวัตถุที่เราสนใจออกมาจากภาพ เพื่อนำภาพวัตถุที่ได้ไปวิเคราะห์หาข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น ขนาด รูปร่าง และทิศทางการเคลื่อนของวัตถุในภาพ จากนั้นเราสามารถนำข้อมูลเชิงปริมาณเหล่านี้ไปวิเคราะห์ และสร้างเป็นระบบ เพื่อใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ เช่น ระบบรู้จำลายนิ้วมือเพื่อตรวจสอบว่าภาพลายนิ้วมือที่มีอยู่นั้นเป็นของผู้ใด ระบบตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ระบบคัดแยกเกรดหรือคุณภาพของพืชผลทางการเกษตร ระบบอ่านรหัสไปรษณีย์อัตโนมัติ เพื่อคัดแยกปลายทางของจดหมายที่มีจำนวนมากในแต่ละวันโดยใช้ภาพถ่ายของรหัสไปรษณีย์ที่อยู่บนซอง ระบบเก็บข้อมูลรถที่เข้าและออกอาคารโดยใช้ภาพถ่ายของป้ายทะเบียนรถเพื่อประโยชน์ในด้านความปลอดภัย ระบบดูแลและตรวจสอบสภาพการจราจรบนท้องถนนโดยการนับจำนวนรถบนท้องถนนในภาพถ่ายด้วยกล้องวงจรปิดในแต่ละช่วงเวลา ระบบรู้จำใบหน้าเพื่อเฝ้าระวังผู้ก่อการร้ายในอาคารสถานที่สำคัญ ๆ หรือในเขตคนเข้าเมือง เป็นต้น จะเห็นได้ว่าระบบเหล่านี้จำเป็นต้องมีการประมวลผลภาพจำนวนมาก และเป็นกระบวนการที่ต้องทำซ้ำ ๆ กันในรูปแบบเดิมเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งงานในลักษณะเหล่านี้ หากให้มนุษย์วิเคราะห์เอง มักต้องใช้เวลามากและใช้แรงงานสูง อีกทั้งหากจำเป็นต้องวิเคราะห์ภาพเป็นจำนวนมาก ผู้วิเคราะห์ภาพเองอาจเกิดอาการล้า ส่งผลให้เกิดความผิดพลาดขึ้นได้ ดังนั้นคอมพิวเตอร์จึงมีบทบาทสำคัญในการทำหน้าที่เหล่านี้แทนมนุษย์ อีกทั้ง เป็นที่ทราบโดยทั่วกันว่า คอมพิวเตอร์มีความสามารถในการคำนวณและประมวลผลข้อมูลจำนวนมากในเวลาอันสั้น จึงมีประโยชน์อย่างมากในการเพิ่มประสิทธิภาพการประมวลผลภาพและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากภาพ

2.7.1 ภาพและความหมายของพิกเซล[10]

2.7.1.1 พิกเซล (Pixel) คือ ความเข้มแสงที่รวมกันทำให้เกิดเป็นภาพภาพหนึ่งๆ จะประกอบด้วยพิกเซลมากมาย ซึ่งภาพแต่ละภาพที่สร้างขึ้นจะมีความหนาแน่นของพิกเซล

เหล่านี้แตกต่างออกไป ความหนาแน่นนี้เป็นตัวบอกถึงความละเอียด (Resolution) ของภาพซึ่งมีหน่วยเป็น ppi (Pixel Per Inch) คือจำนวนพิกเซลต่อนิ้ว ซึ่งโดยทั่วไปถือว่าภาพที่มีความละเอียด สูงหรือคุณภาพดีจะมีความละเอียด 300 x 300 ppi ขึ้นไป ค่า ppi ยิ่งสูงขึ้นภาพก็จะมี ความละเอียดและคมชัดมากขึ้น

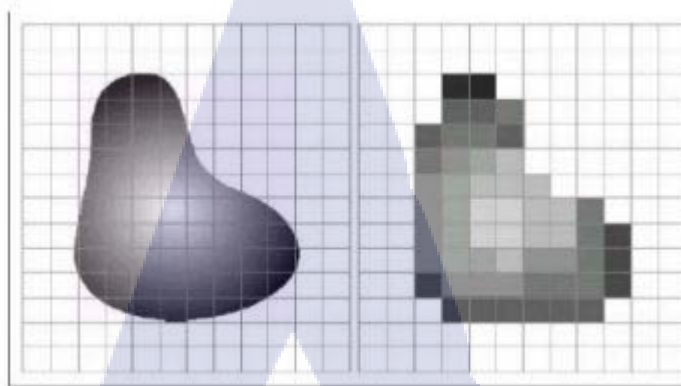


รูปที่ 2.26 ตำแหน่งของ Pixel

N = จำนวนพิกเซลที่มากที่สุดในแกน Y

M = จำนวนพิกเซลที่มากที่สุดในแกน X

2.7.1.2 การประมาณผลภาพเชิงตัวเลข (Digital Image Processing) การแทนภาพด้วยภาพแบบดิจิทัลหรือภาพแบบดิจิทัล (Digital Image) เป็นภาพที่ถูกแปลงมาจากอนาล็อกให้อยู่ในรูปของตัวเลขโดยภาพอนาล็อกถูกแบ่งเป็นพื้นที่ที่สี่เหลี่ยมเล็กๆที่เรียกว่าพิกเซล ในแต่ละพิกเซลจะถูกระบุตำแหน่งด้วยคู่อพิกัด x, y และค่าระดับความเข้มของแสงของพิกเซลนั้นๆ โดยเราสามารถแปลงภาพเป็นแบบดิจิทัลโดยมีขั้นตอนและวิธีการดังนี้ เมื่อนำสัญญาณอนาล็อกที่ต้องการประมวลผลผ่านส่วนที่ เรียกว่าดิจิไทเซอร์ (Digitizer) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัลจากนั้นทำการควอนไทซ์ (Quantizing) เพื่อแปลงค่าความเข้มของแสงให้เป็นตัวเลข ฟังก์ชันของภาพ $f(x, y)$ จะถูกทำให้เป็นสัญญาณไม่ต่อเนื่องทั้ง ระยะเวลาของภาพซึ่งเรียกว่า การสุ่มภาพ (Image Sampling) ของฟังก์ชันที่ได้เรียกว่า การควอนไทซ์ ระดับความเข้มของแสง (Greasy Level Quantization) ก็จะได้ข้อมูลที่เป็นดิจิทัลดังรูปที่ 2.45



รูปที่ 2.27 การทำ Sampling และ Quantization

2.7.1.3 ลักษณะการจัดเก็บรูปภาพแบบดิจิทัล โดยทั่วไปแล้วภาพจะมีความเข้มตั้งแต่ 2 ระดับขึ้นไป แต่ที่นิยมใช้กันมาก คือ ค่าระดับความเข้มของพิกเซลที่เท่ากับ 256 ระดับ ซึ่งจะทำให้ค่าของพิกเซลอยู่ในช่วง (0-255) โดยใช้เนื้อที่ในการเก็บข้อมูลขนาด 1 ไบต์หรือ 8 บิต สำหรับข้อมูล 1 พิกเซล (256) ในกรณีที่ต้องการภาพที่มีความเข้มสูงอาจต้องการจำนวนบิตสำหรับการเก็บข้อมูลมากกว่า 8 บิต คืออาจจะเป็น 16 หรือ 24 บิตโดยจะแยกความแตกต่างของภาพแต่ละประเภทให้เห็นอย่างชัดเจนได้ดังนี้

- ภาพ 2 ระดับ คือ มีพิกเซลสีขาวกับสีดำเท่านั้น โดยแต่ละพิกเซลจะมีขนาดของ ข้อมูลเท่ากับ 1 บิต
- ภาพ 16 ระดับ คือ ในแต่ละพิกเซลจะมีขนาดของข้อมูล 8 บิต ซึ่งสามารถแสดง ภาพได้ความเข้มถึง 256 ระดับ
- ภาพ 256 ระดับ คือ ในแต่ละพิกเซลจะมีขนาดของข้อมูล 8 บิต ซึ่งทำให้สามารถแสดงภาพได้ความเข้มถึง 256 ระดับ
- ภาพทิวคัลเลอร์ (True Color) คือในแต่ละพิกเซลจะมีขนาดของข้อมูล 24 บิต ทำให้สามารถแสดงภาพออกมาได้เฉพาะภาพสีเท่านั้น ไม่สามารถแสดงเป็นภาพขาวดำได้

โดยวิธีการประมวลผลภาพเชิงตัวเลขที่ทำให้คอมพิวเตอร์สามารถรู้วัตถุในภาพได้นั้นแบ่งออกได้เป็นสองระดับด้วยกันคือ การประมวลผลภาพในระดับต่ำ (Low-Level Image) และการประมวลผลภาพในระดับสูง (High-Level Image Processing) การประมวลผลภาพในระดับต่ำจะเป็นการประมวลผลเชิงตัวเลขเกือบทั้งหมด เพื่อหาตัวแปรต่างๆมาอธิบายข้อมูลภาพ โดยมีจุดประสงค์ที่จะนำตัวแปรเหล่านั้นไปใช้ในการประมวลผลภาพระดับสูงต่อไปโดยทั่วไปแล้ว การประมวลผลภาพระดับต่ำจะประกอบด้วย การประมวลผลภาพก่อน (Preprocessing) เช่น การกำจัดสัญญาณรบกวน หรือการทำให้ภาพมีความชัดเจนมากขึ้น เป็นต้น การประมวลผลระดับสูงเป็นการนำ

ผลลัพธ์ หรือสัญลักษณ์ที่ได้จากการประมวลผลภาพในระดับต่ำมาตีความหรือประมวลเพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถรู้จักและเข้าใจภาพได้ สำหรับความแตกต่างของการประมวลผลภาพทั้ง 2 ประเภทนั้นคือ การประมวลผลภาพระดับต่ำจะใช้ ค่าความสว่างของจุดภาพ (พิกเซล) ส่วนการประมวลผลภาพระดับสูงนั้นข้อมูลภาพที่นำมาประมวลผล จะถูกแสดงในรูปสัญลักษณ์ ซึ่งสัญลักษณ์เหล่านี้จะแสดงถึงสิ่งต่างๆที่อยู่ในภาพเช่น ขนาดของ วัตถุรูปร่าง และความสัมพันธ์กันระหว่างวัตถุภาพ

2.7.2 การสร้างภาพไบนารี

การสร้างภาพไบนารีสามารถทำได้ โดยใช้เทคนิคการทำเทรชโฮล (Thresholding Technique) โดยพิจารณาว่าพิกเซลสีขาวหรือสีดำจะกระทำโดยการเปรียบเทียบระหว่างพิกเซล ของภาพเริ่มต้นกับค่าคงที่หนึ่งเรียกว่า ค่าเทรชโฮล (Threshold Value) เทคนิคนี้ใช้กันมากในกรณีที่ข้อมูลภาพมีลักษณะที่ต่างกันระหว่างวัตถุ (Object) และพื้นหลัง (Background) โดยค่าของพิกเซลของภาพใด ๆ ที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าเทรชโฮลจะถูกเปลี่ยนเป็น 0 (จุดดำ) และ พิกเซลของภาพที่มีน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าเทรชโฮลจะถูกเปลี่ยนเป็น 1 (จุดขาว) เป็นต้น ในการสร้างภาพไบนารีโดยใช้เทคนิคเทรชโฮลเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เหมาะสมและคมชัดสิ่ง ที่สำคัญที่สุดคือค่าเทรชโฮล เนื่องจากถ้าเลือกค่าเทรชโฮลที่ไม่เหมาะสม (ค่าเทรชโฮลที่มีค่าน้อยเกินไปหรือมากเกินไป) ภาพที่ได้อาจจะสว่างน้อยเกินไป หรือ สว่างมากเกินไป หรือ ภาพที่ได้มีสิ่งรบกวน(Noise) เกิดขึ้น อันเป็นผลทำให้ภาพที่ได้ ไม่สวยงามเท่าที่ควรดังนั้นปัญหาของการสร้างภาพไบนารี ซึ่งมีวิธีคำนวณหาค่าเทรชโฮลโดยกำหนดค่าล่วงหน้า (Pre-assigned Threshold Value) การหาค่าเทรชโฮลจากค่ากลาง (Mid-Range Threshold Value) ซึ่งแต่ละวิธีอธิบายได้ดังนี้

2.7.2.1 การหาค่าเทรชโฮลโดยกำหนดค่าล่วงหน้าเป็นการกำหนดค่าเทรชโฮลโดยการ กำหนดเองจากผู้ ใช้ ซึ่งการกำหนดนี้จะขึ้นอยู่กับประสบการณ์ ของผู้ใช้คนนั้นๆโดยการเลือกค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า ค่าเทรชโฮล โดยค่าที่เลือกมานี้จะเป็นค่าที่อยู่ระหว่างค่าต่ำและค่าสูงสุดของระดับความเข้มแสงของภาพ เช่น ภาพอินพุตมีระดับความเข้มแสง 256 ระดับ จะมีค่าได้ตั้งแต่ 0-255 เมื่อเลือกค่าเทรชโฮลได้แล้วสามารถสร้างภาพไบนารีได้

2.7.2.2 การหาค่าเทรชโฮลจากค่ากลางเป็นการหาเทรชโฮลที่แตกต่างจากการหาค่าเทรช โฮลวิธีแรกสำหรับวิธีนี้จะเป็นการคำนวณหาค่าเทรชโฮลโดยอัตโนมัติโดยไม่ต้องให้ผู้ใช้เป็นผู้กำหนดโดยการหาค่าเทรชโฮลนี้ ใช้วิธีทางสถิติในเรื่องการหาค่ากลางหรือค่าเฉลี่ย (Mean) ค่าเทรชโฮลที่คำนวณได้จากค่ากึ่งกลางที่อยู่ระหว่างค่าระดับความเข้มสูงสุด (Maximum Level) และระดับความเข้มต่ำสุด (Minimum Level) ของภาพเมื่อการคำนวณค่าเทรชโฮลได้แล้วก็สามารถสร้างภาพไบนารีได้โดยนำค่าเทรชโฮลที่ได้มาใช้

2.7.3 การซ้อนทับภาพ (Image Registration)

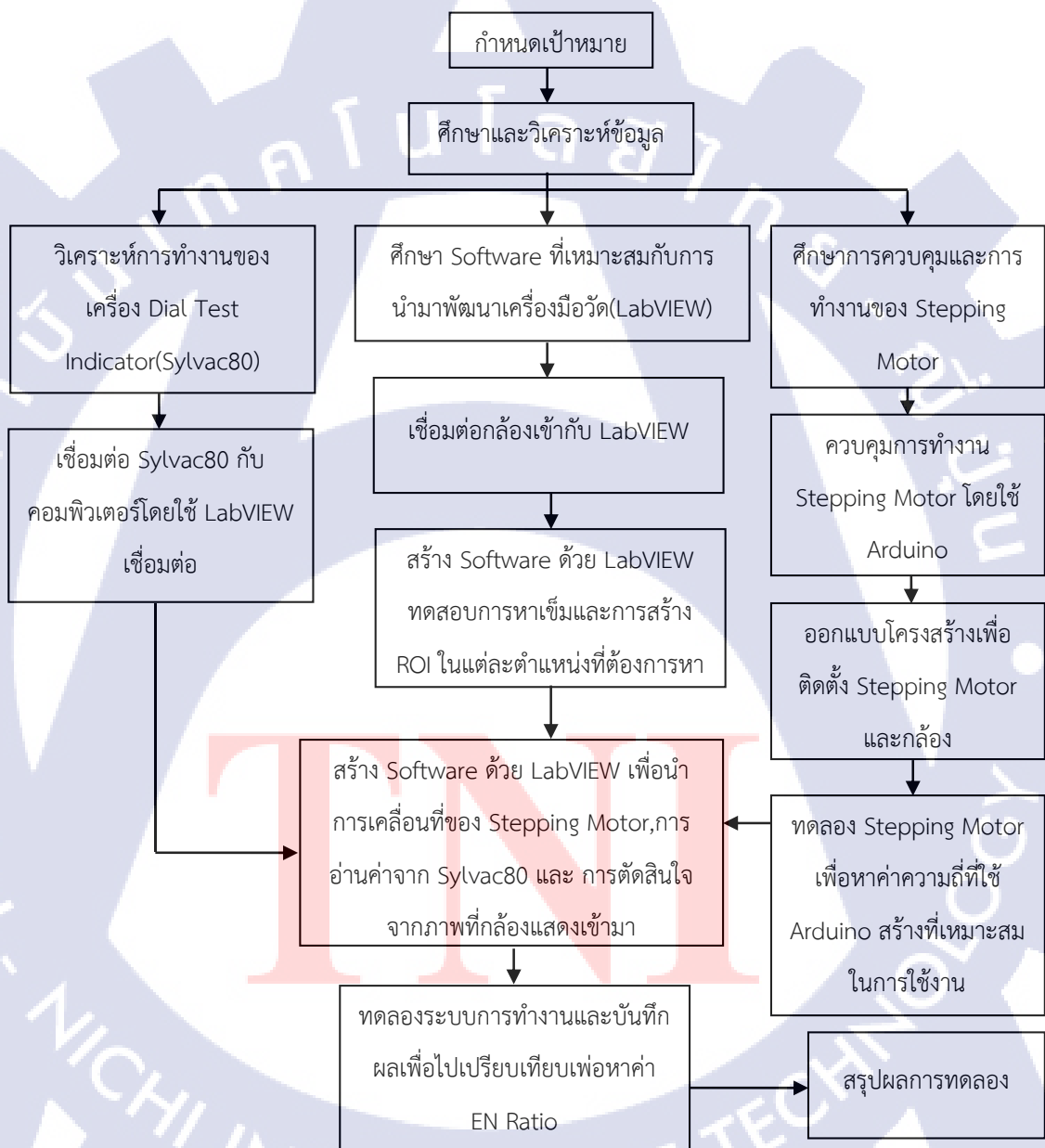
เป็นวิธีการนำข้อมูลของสองภาพหรือมากกว่า มารวมกันเพื่อให้เกิดภาพใหม่ที่มีข้อมูลภาพสมบูรณ์มากขึ้น โดยภาพใหม่ที่ได้นี้ จะเป็นการรวมตัวกันของข้อมูลหรือรายละเอียดในแต่ละภาพที่นำมาผสมผสานกัน มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ภาพที่มีรายละเอียดและข้อมูลที่เพียงพอสำหรับการนำไปใช้งาน หรือการนำภาพไปวิเคราะห์ โดยส่วนใหญ่แล้วภาพที่จะนำมาซ้อนทับกันนั้น อาจเป็นภาพถ่ายของอวัยวะเดียวกัน ที่ถ่ายต่างเวลากัน ต่างมุมมองกัน หรือ ใช้เทคนิคในการถ่ายภาพที่แตกต่างกัน เป็นต้น และการนำวิธีการซ้อนทับภาพมาใช้กับภาพทางการแพทย์ มีประโยชน์ในหลาย ๆ ด้าน

ตัวอย่างเช่น การตรวจ ติดตาม หรือหาความผิดปกติของอวัยวะต่าง ๆ ทำได้โดยการนำภาพถ่ายของอวัยวะที่ต้องการตรวจ ที่ได้ถ่ายไว้ในอดีต มาทำการซ้อนทับกับภาพถ่ายของอวัยวะเดียวกันที่ถ่ายไว้ในปัจจุบัน โดยทำให้ตำแหน่งของอวัยวะต่าง ๆ ของทั้งสองภาพตรงกัน ซึ่งการทำในลักษณะนี้ จะทำให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของอวัยวะนั้น ว่ามีการเปลี่ยนแปลงไปอย่างไรบ้างในช่วงเวลานั้น มีแนวโน้มที่จะเป็นอย่างไรต่อไป มีสิ่งผิดปกติเกิดขึ้นหรือไม่ มีอวัยวะที่โตขึ้นผิดปกติหรือไม่ เป็นต้น การนำภาพทางการแพทย์ที่ใช้เทคนิคในการถ่ายภาพแตกต่างกัน มาทำการซ้อนทับภาพ เป็นอีกหนึ่งประโยชน์ของวิธีการนี้ เนื่องจากภาพทางการแพทย์ที่ถ่ายโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพเพียงแบบเดียว อาจจะทำให้ได้ข้อมูลไม่ครบถ้วนตามที่ต้องการ จึงจำเป็นต้องใช้เทคนิคการถ่ายภาพหลาย ๆ แบบ เพื่อให้ได้ข้อมูล รายละเอียดของอวัยวะ หรือองค์ประกอบรอบข้างอื่น ๆ ของอวัยวะนั้น ๆ เพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการนำภาพไปวิเคราะห์

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินงานวิจัยและการจัดการเครื่อง Sylvac 80 แบ่งขั้นตอนออกเป็น 2 ส่วน โดยแบ่งในส่วนของ Hardware และ Software ขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัย แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนวิธีการดำเนินงานวิจัยและการจัดการเครื่อง Sylvac 80

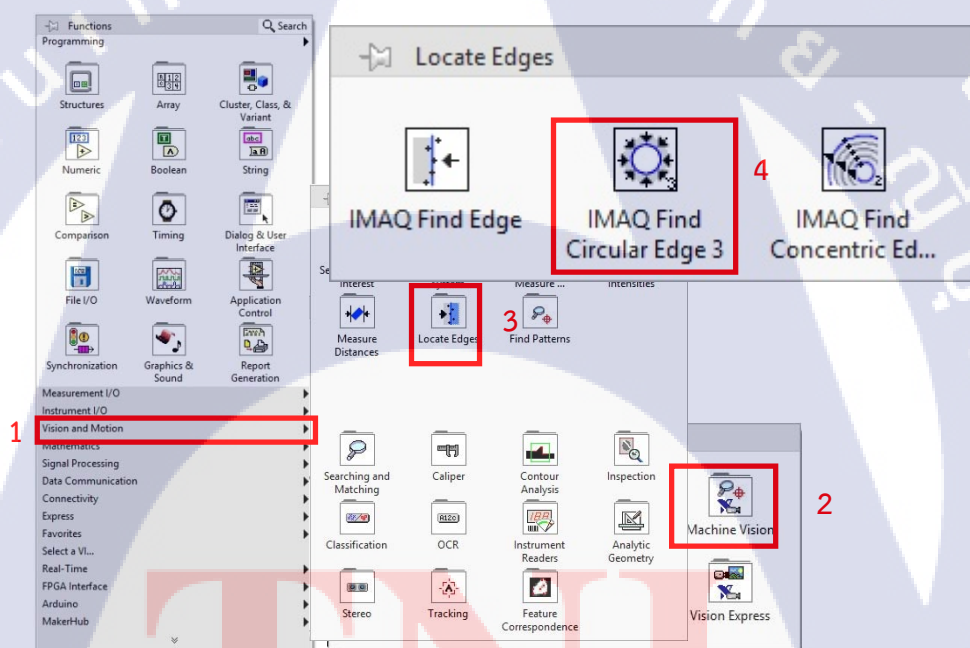
3.1 Analysis Tools

3.1.1 ฟังก์ชันของ LabVIEW ที่ใช้งาน

ฟังก์ชันหลักๆที่ใช้งานในการประมวลผล Software หลักๆจะมีอยู่ 6 ฟังก์ชัน โดยแต่ละฟังก์ชันนั้นจะมีหน้าที่ในการประมวลผลแตกต่างกันไปแต่ในการประมวลผลนั้นฟังก์ชันหลักๆนี้จะทำงานเป็นอิสระต่อกันและยังประมวลผลพร้อมๆกันอีกด้วย ซึ่งจะมีรายละเอียดดังนี้

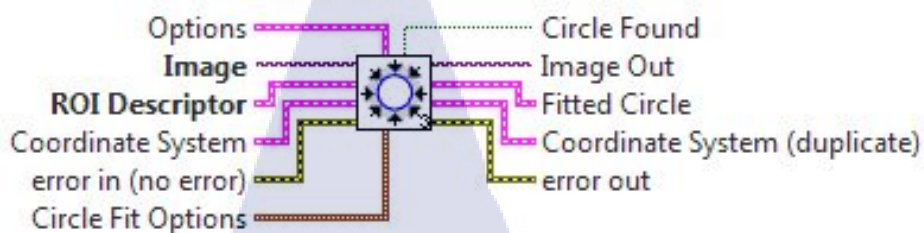
1. IMAQ Find Circular Edge 3

เป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการหาเส้นรอบวงของหน้าปัดไดอัลเกจที่เป็นวงกลมเพื่อใช้ในการหาตำแหน่งกึ่งกลางของหน้าปัดไดอัลเกจ โดยสามารถเลือกใช้ฟังก์ชันนี้ได้ที่คลิกขวาฝั่ง Block Diagram >> เลือก Vision and Motion >> เลือก Machine Vision >> เลือก Caliper >> เลือก IMAQ Find Circular Edge 3 ดังรูปที่ 3.1



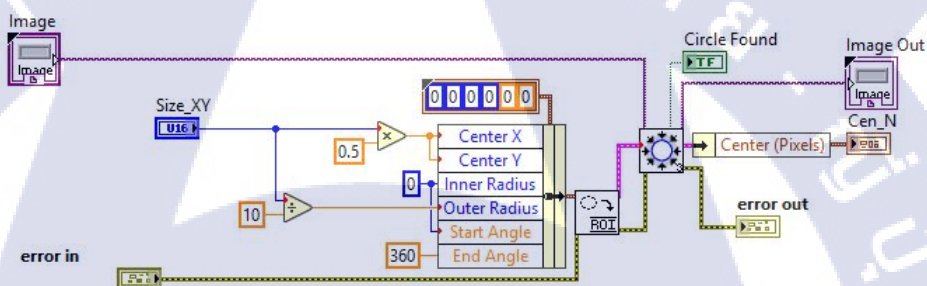
รูปที่ 3.2 วิธีเข้าไปเลือกฟังก์ชันใช้งาน IMAQ Find Circular Edge 3

IMAQ Find Circular Edge 3 นั้นสามารถเลือก Option ในการหาเส้นรอบวงของหน้าปัดไดอัลเกจได้โดยกำหนด ROI Descriptor ร่วมกับ Option ของฟังก์ชัน IMAQ Find Circular Edge 3



รูปที่ 3.3 ฟังก์ชันที่สามารถใช้ IMAQ Find Circular Edge 3

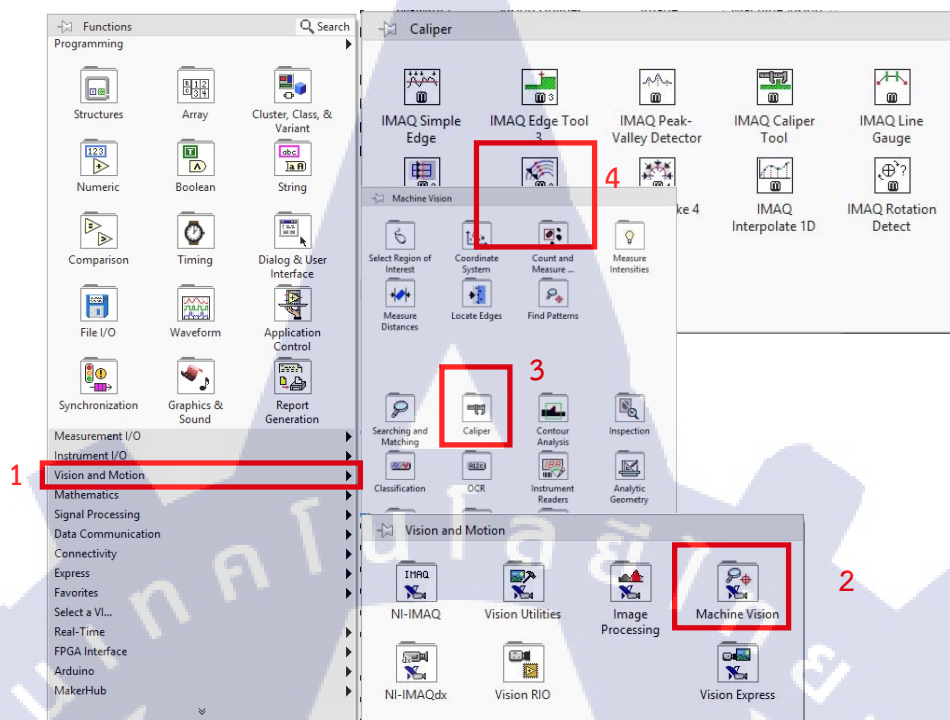
การใช้งาน IMAQ Find Circular Edge 3 นั้นจะต้องมีสัญญาณภาพที่ส่งเข้ามาในฟังก์ชันนี้และกำหนดตำแหน่งที่ต้องการหาในแกน X และ Y โดยใช้ ROI ช่วยสร้างเส้นวงกลมเพื่อให้เห็นได้ชัดเจนและแสดงผลออกมา ด้วยการหาจาก Pixel และ ใช้องศาในการหาเส้นรอบวง



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างฟังก์ชันใช้งานของ IMAQ Find Circular Edge 3

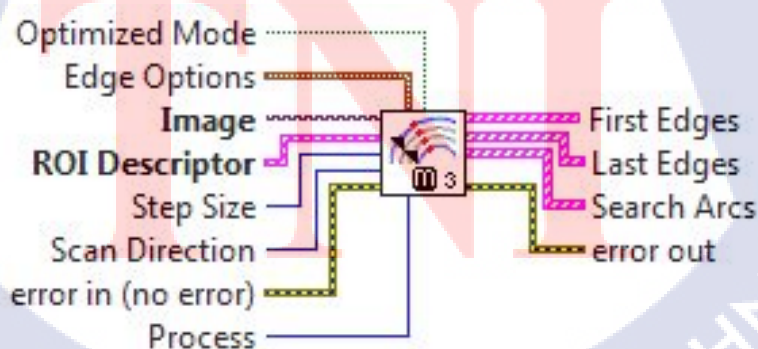
2. IMAQ Concentric Rake 3

เป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการหาเส้นของขีดในตำแหน่งที่ต้องการวัดซึ่งสามารถสร้างเป็น SubVI ไว้ให้หาได้ทั้งด้านซ้ายและด้านขวาของขนาดเส้นบนหน้าปัดที่ต้องการวัด โดยสามารถเลือกใช้ฟังก์ชันนี้ได้ที่ คลิกขวาฝั่ง Block Diagram >> เลือก Vision and Motion >> เลือก Machine Vision >> เลือก Caliper >> เลือก IMAQ Concentric Rake 3 ดังรูปที่ 3.5



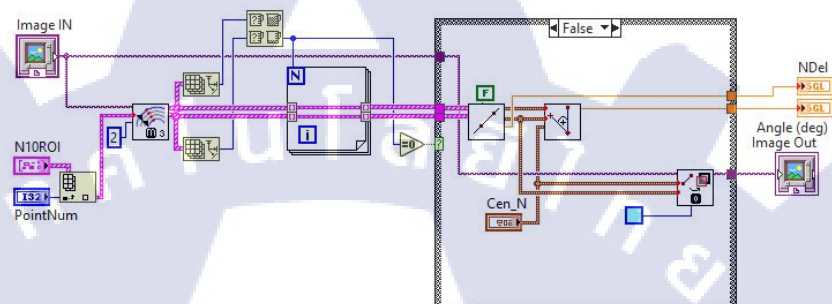
รูปที่ 3.5 วิธีเข้าไปเลือกฟังก์ชันใช้งาน IMAQ Concentric Rake 3

IMAQ Concentric Rake เป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการหาขอบเส้นที่ตำแหน่งที่ต้องการวัด โดยสามารถกำหนดความยาวของเส้นที่ต้องการหาด้วย ROI Descriptor และ Edge Option และยังสามารถกำหนดจำนวนที่ต้องการหาได้ด้วย Step Size ซึ่งถือได้ว่าฟังก์ชันนี้เป็นฟังก์ชันที่สำคัญมากในการสร้าง โปรแกรมที่ต้องการหาเส้นและกำหนดจำนวนเส้นได้



รูปที่ 3.6 ฟังก์ชันที่สามารถใช้ IMAQ Concentric Rake 3

การใช้งาน IMAQ Concentric Rake 3 นั้นจะต้องมีสัญญาณภาพส่งเข้ามาในฟังก์ชันนี้เหมือนกับ IMAQ Find Circular Edge 3 และกำหนดตำแหน่งที่ต้องการหาด้วยการกำหนด Pixel โดนใช้ ROI เป็นตัวกำหนดตำแหน่งที่ต้องการหาเส้นด้วยการอ้างอิงจาก Pixel ที่เรากำหนดไว้ในตอนแรก และ ช่วยสร้างเส้นของตำแหน่งที่ต้องการหาเมื่อเข็มของไดอัลเกจเข้ามาใน Pixel ที่กำหนดไว้ด้วย ROI ก็จะทำให้การบันทึกค่าที่อ่านได้ และ เพื่อให้เห็นได้ชัดเจนและแสดงผลออกมา

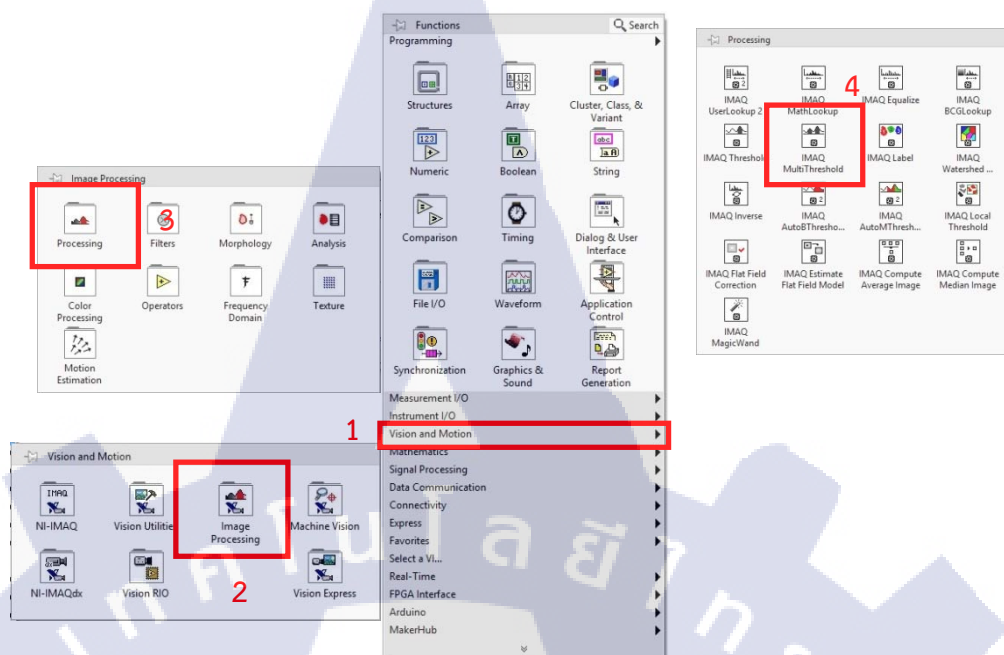


รูปที่ 3.7 ตัวอย่างฟังก์ชันใช้งานของ IMAQ Concentric Rake 3

3. IMAQ Multi Threshold

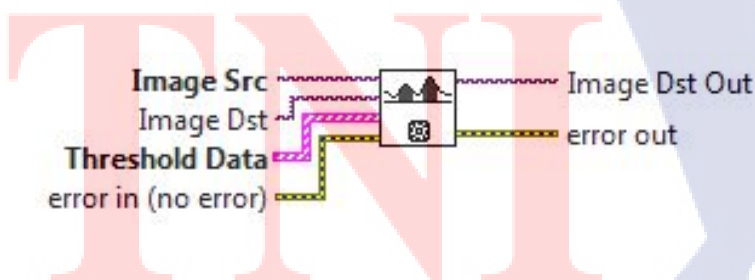
เป็นฟังก์ชันที่ใช้ในการแปลงภาพจากภาพสีให้เป็นขาวดำเนื่องจากฟังก์ชันที่ใช้เป็นฟังก์ชันไว้ใช้สำหรับวิดีโอเพราะต้องทำการแปลงภาพตลอดเวลา โดยสามารถเลือกใช้ฟังก์ชันนี้ได้ที คลิควาฝั่ง Block Diagram >> เลือก Vision and Motion >> เลือก Image Processing >> เลือก Processing >> เลือก IMAQ Milti Threshold ดังรูปที่ 3.8

TNI



รูปที่ 3.8 วิธีเข้าไปเลือกฟังก์ชันใช้งาน IMAQ Multi Threshold

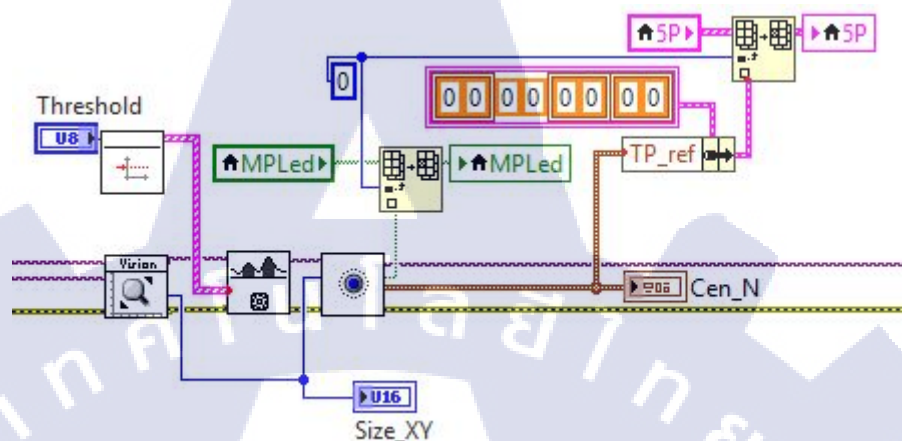
IMAQ Milti Threshold เป็นอีกฟังก์ชันที่ขาดไม่ได้สำหรับคนที่จะเล่น Vision เพราะในการคำนวณค่าต่างของ Vision ที่อาศัยเฉดสีต่างจะเป็นปัญหาหลักที่พบบ่อยในการใช้ภาพเข้ามาและโปรแกรมตัดสินใจเนื่องจากถ้าเราไม่ได้ Threshold ภาพให้เป็น Gray Scale ก่อน การหาค่านั้น โปรแกรมจะสับสนมากและการแสดงผลจะไม่ค่อยชัดเจนเท่าที่ควรเราจึงจำเป็นต้องกำหนดค่าที่เป็น Gray Scale ให้ทำงานแสดงผลที่เท่าไรถึงเท่าไรก็จะสามารถประมวลผลและแสดงผลออกมาได้ชัดเจน



รูปที่ 3.9 ฟังก์ชันที่สามารถใช้ IMAQ Multi Threshold

การใช้งาน IMAQ Multi Threshold นั้นต้องใช้สัญญาณภาพนิ่ง หรือ วีดีโอ เพื่อนำสัญญาณเหล่านี้มาแปลงให้เป็น Gray Scale เพื่อให้ง่ายต่อการประมวลผล และยัง สามารถเพิ่มช่อง Control ที่ใช้ในการปรับค่า Min และ Max ของค่าที่ต้องการใช้ในการแปลง

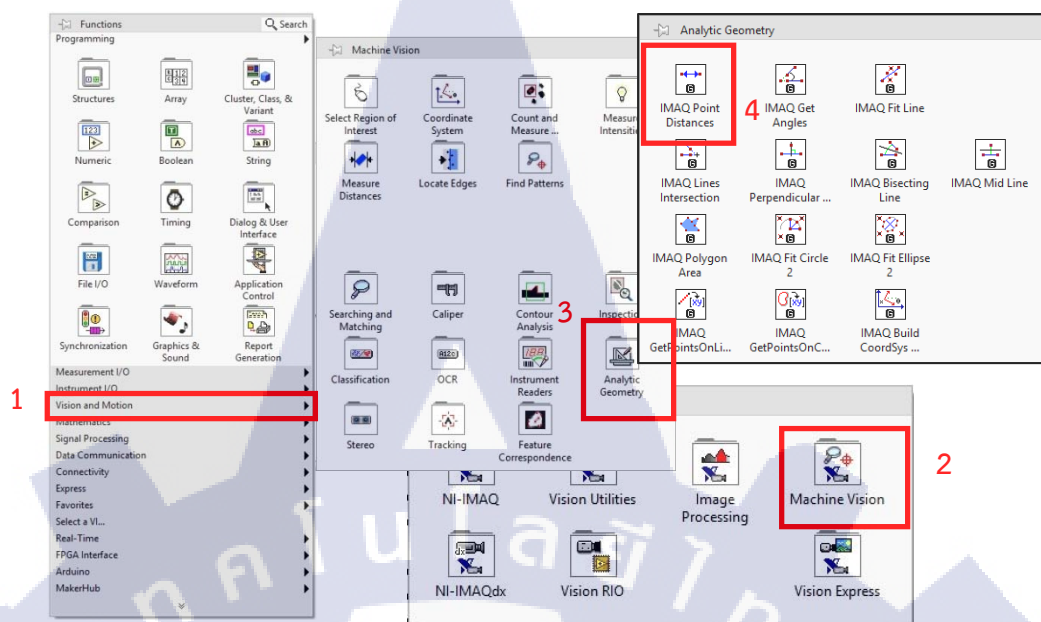
สัญญาณภาพนั้นได้แบบ Real Time จนกระทั่งได้ค่าที่ถูกต้องที่สุด หากค่านั้นมากหรือน้อยไป ภาพที่ได้ออกมาก็อาจจะผิดเพี้ยนไป ไม่มีดีไปก็สว่างเกินไปจนทำให้ไม่สามารถนำภาพนั้นมาใช้งานได้ ดังตัวอย่างโปรแกรม รูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างฟังก์ชันใช้งานของ IMAQ Multi Threshold

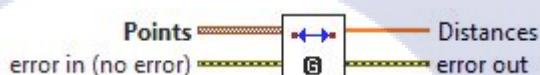
4. IMAQ Point Distances

เป็นฟังก์ชันกำหนดตำแหน่งที่ต้องการวัดบนหน้าปัดได้อัลเกจโดยใช้คำนวณระยะห่างระหว่างคู่ที่ต่อเนื่องของจุด ของอาร์เรย์ของกลุ่มพิกัดจุด อาร์เรย์นี้ต้องมีสองหรือมากกว่าหนึ่งจุดพิกัดคลัสเตอร์ที่สอดคล้องกับสองจุดหรือมากขึ้นในบรรทัด โดยสามารถเลือกใช้ฟังก์ชันนี้ได้ที่ คลิกขว้าง Block Diagram >> เลือก Vision and Motion >> เลือก Machine Vision >> เลือก Analytic Geometry >> เลือก IMAQ Point Distances ดังรูปที่ 3.11



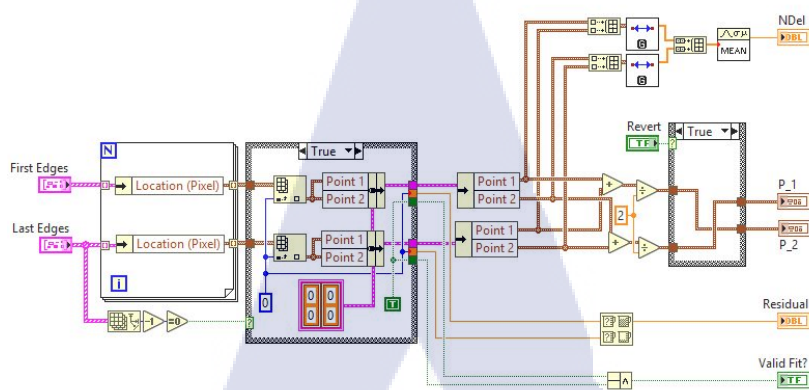
รูปที่ 3.11 วิธีเข้าไปเลือกฟังก์ชันใช้งาน IMAQ Point Distances

IMAQ Point Distances เป็นฟังก์ชันที่สำคัญอีกฟังก์ชันหนึ่งเลยทีเดียว ที่ใช้ในการกำหนดหาตำแหน่งของเส้นที่บนหน้าปัดได้อัลเกจ โดยจะสร้างกรอบของ ROI เพื่อที่จะ Mark ตำแหน่งของเส้นที่ต้องการวัดทั้งหมดบนหน้าปัดได้อัลเกจ



รูปที่ 3.12 ฟังก์ชันที่สามารถใช้ IMAQ Point Distances

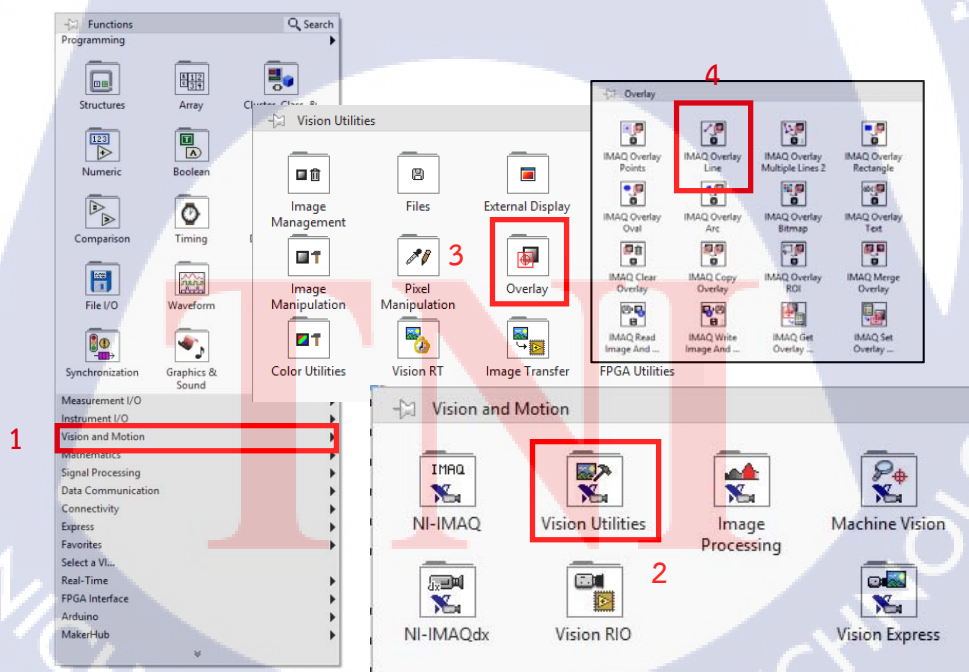
การใช้งาน IMAQ Point Distances จะต้องมีการหนดจุดเริ่มต้นและสิ้นสุดของตำแหน่งที่ต้องการวัด โดยจะระบุเป็นตำแหน่งของ Pixel นั่นๆทั้งตำแหน่งเริ่มและสิ้นสุด และจะมีการนำค่าตำแหน่งเหล่านี้เข้าไปเก็บไว้ใน Array เพื่อที่จำนำค่าของตำแหน่งเหล่านี้ไปประมวลผลและแสดงค่าออกมา



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างฟังก์ชันใช้งานของ IMAQ Point Distances

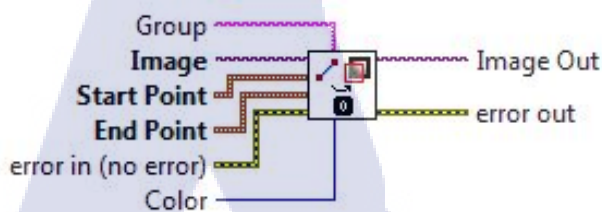
5. IMAQ Overlay Lines

เป็นฟังก์ชันที่ใช้สร้างเส้นของตำแหน่งทั้ง 10 จุดเพื่อหาจุดกึ่งกลาง
กลุ่มระบูกุ่มที่คุณต้องการเพิ่มข้อมูลการวางซ้อน หากไม่มีการระบุชื่อข้อมูลการซ้อนทับจะถูกเพิ่มลง
ในกลุ่มดีพอลต์ โดยสามารถเลือกใช้ฟังก์ชันนี้ได้ที่ คลิกขว้าง Block Diagram >> เลือก Vision and
Motion >> เลือก Vision Utilities >> เลือก Overlay >> เลือก IMAQ Overlay Line ดังรูปที่ 3.14



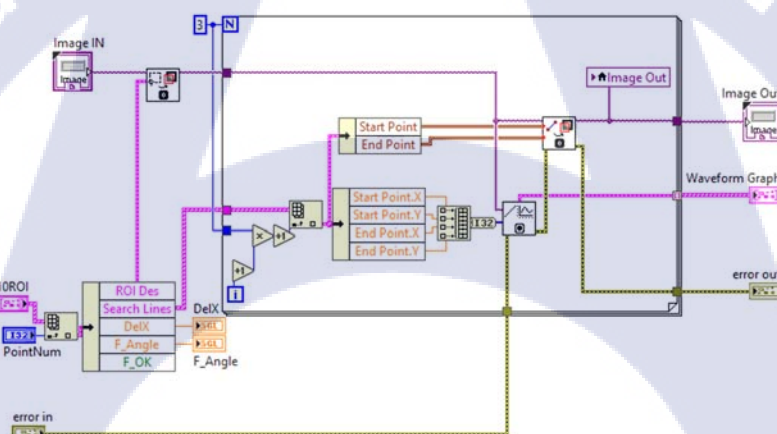
รูปที่ 3.14 วิธีเข้าไปเลือกฟังก์ชันใช้งาน IMAQ Overlay Line

IMAQ Overlay Lines จะต้องกำหนดจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของกลุ่มพิกัดจุดที่กำหนดของบรรทัด เพื่อที่จะเป็นการซ้อนทับของภาพกับเส้นที่ต้องการสร้างขึ้น



รูปที่ 3.15 ฟังก์ชันที่สามารถใช้ IMAQ Overlay Lines

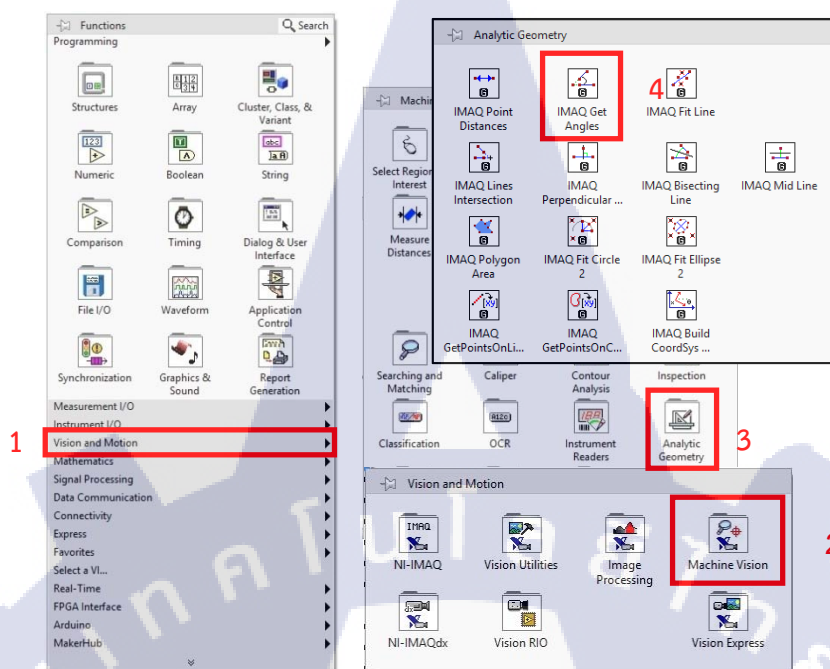
การใช้ IMAQ Overlay Lines จะต้องมีส่วนของภาพเข้ามาเพื่อที่จะกำหนด ตำแหน่งที่ต้องการสร้างเส้นทับภาพตามตำแหน่งที่ต้องการ



รูปที่ 3.16 ตัวอย่างฟังก์ชันใช้งานของ IMAQ Overlay Line

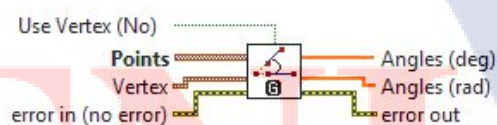
6. IMAQ Get Angles

เป็นฟังก์ชันที่ใช้กำหนดมุมเพื่อหาตำแหน่งที่ต้องการวัดทั้ง 10 ตำแหน่งบนหน้าปัดไดอัลเกจและคำนวณมุมที่เกิดขึ้นจากชุดของสี่จุดในภาพหรือระหว่างชุดของจุดสองจุดและจุดบนสุดโดยสามารถเลือกใช้ฟังก์ชันนี้ได้ที่ คลิกขว้าง Block Diagram >> เลือก Vision and Motion >> เลือก Machine Vision >> เลือก Analytic Geometry >> เลือก IMAQ Get Angle ดังรูปที่ 3.17

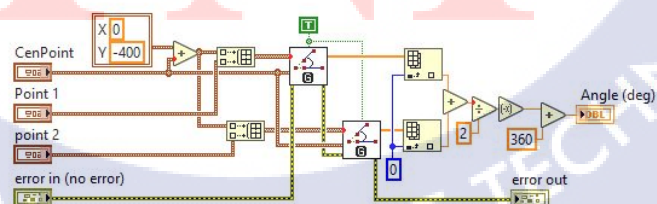


รูปที่ 3.17 วิธีเข้าไปเลือกฟังก์ชันใช้งาน IMAQ Get Angle

IMAQ Get Angles คือการกำหนดค่าลงอาร์เรย์ของพิกัดจุด ถ้าใช้ Vertex คือ No. จะพิจารณาจุดสี่จุดในแต่ละครั้งเมื่อคำนวณมุมดังที่แสดงไว้ในรูปซ้ายสุด ถ้าใช้ Vertex คือใช่มุมคำนวณโดยสองจุดติดต่อกันในอาร์เรย์และจุดยอดจะคำนวณตามที่แสดงในรูปขวาสุด และถ้าจะใช้ตัวเลือกให้เลือก Vertex เป็น TRUE



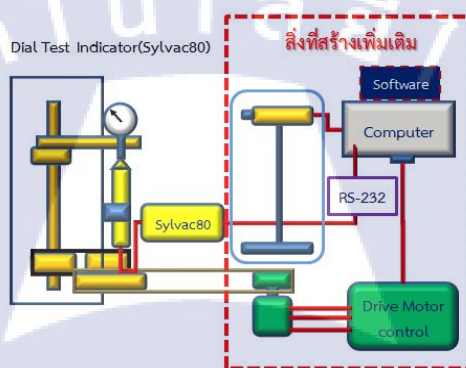
รูปที่ 3.18 ฟังก์ชันที่สามารถใช้ IMAQ Get Angle



รูปที่ 3.19 ตัวอย่างฟังก์ชันใช้งานของ IMAQ Get Angle

3.2 การออกแบบโครงสร้างและประกอบโครงสร้าง

ออกแบบในส่วนฐานของโครงสร้าง จะต้องออกแบบให้สามารถยึดเครื่องสอบเทียบเดิมและสามารถติดตั้งสแต็ปมอเตอร์ พร้อมระบบขับเคลื่อนมอเตอร์และควบคุมการทำงานผ่านคอมพิวเตอร์ ให้ทำหน้าที่หมุนแทนมือคนและมีโครงสร้างที่มั่นคงแข็งแรง ดังรูปที่ 4 และ 5 ระบบที่ สองที่เพิ่มเข้าไปคือระบบ Vision ซึ่งประกอบด้วยกล้อง USB Digital Cameraที่มีความละเอียด 2592x1944 pixel พร้อมทั้งพัฒนาโปรแกรมให้สามารถรับรู้ได้ว่าเข็มของไดอัลเกจตรงกับขีดบน scale ของไดอัลเกจหรือเปล่า ระบบสุดท้ายที่เพิ่มคือการอ่านค่าจากเครื่อง Sylvac80 ผ่านทาง RS232



รูปที่ 3.20 สิ่งที่ต้องสร้างและพัฒนาเพิ่มเติม

3.2.1 จากการศึกษาโครงสร้างของเครื่อง Sylvac 80 ทั้งหมดได้ทำตามขั้นตอนดังนี้

- ได้ทำการทดลองสร้างฐานจากไม้เพื่อเป็นต้นแบบในการจัดทำฐานที่จะติดตั้งเข้ากับเครื่อง Sylvac 80 ดังรูปที่ 3.21



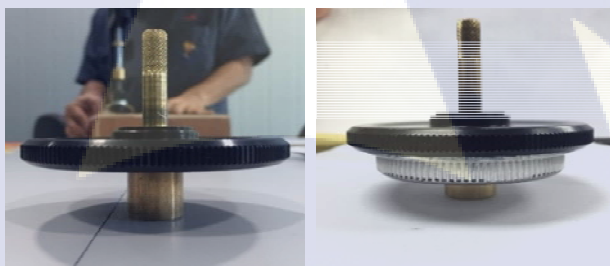
รูปที่ 3.21 ฐานต้นแบบของเครื่อง Sylvac 80

- สร้างบูทเพื่อต่อกับพู่และจานหมุนของเครื่อง Sylvac 80 ดังรูปที่ 3.22



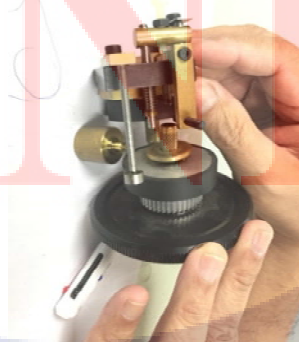
รูปที่ 3.22 บูทเดิมและบูทที่สร้างขึ้นใหม่

- ประกอบพู่เลย, บูทและจานหมุนเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 จานหมุนแบบเดิม และ แบบใหม่

- ทำการประกอบเข้าเครื่องเพื่อพร้อมการติดตั้ง



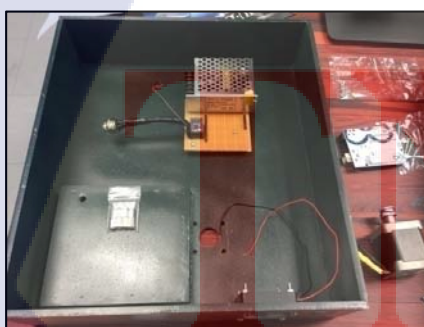
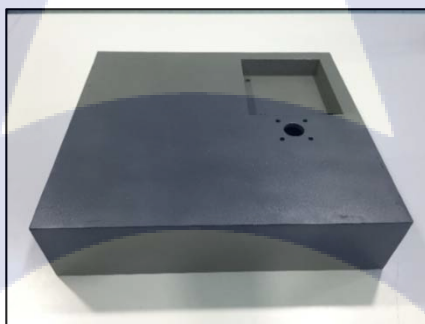
รูปที่ 3.24 ประกอบชุดที่ปรับปรุงเข้ากับจานหมุนเดิม



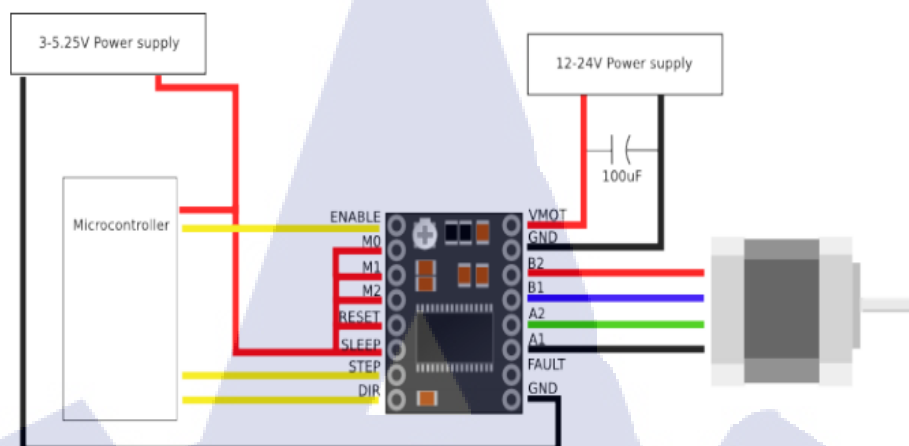
รูปที่ 3.25 ติดตั้งเสร็จสมบูรณ์

3.2.2 ประกอบโครงสร้างของงาน

เมื่อทดลองโครงสร้างของฐานเรียบร้อยแล้วได้นำมาสร้างให้มีความคงทนแข็งแรงได้เปลี่ยนจากไม้ที่ทำเป็นต้นแบบ ให้เป็นเหล็กมีความหนาขนาด 5 mm ดังรูปที่ 3.26



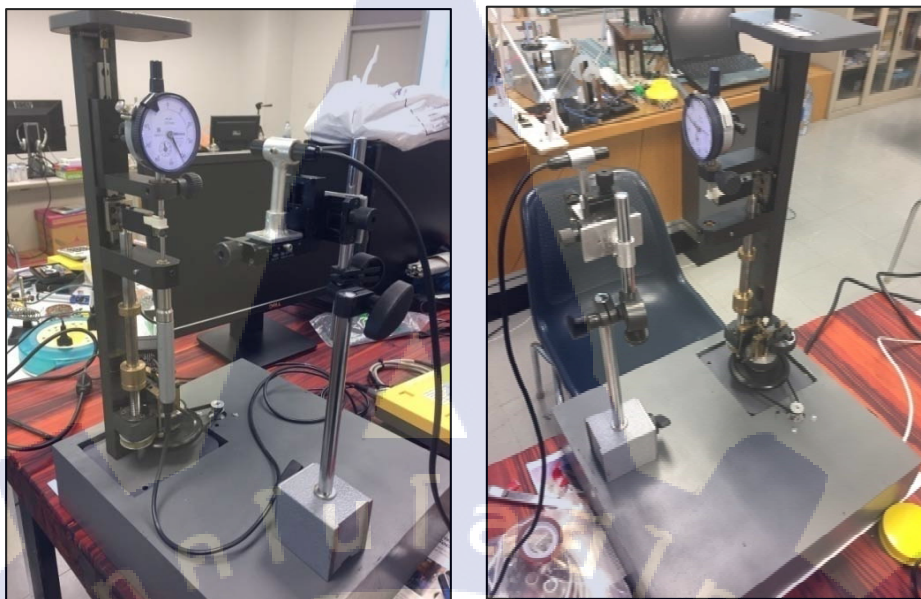
รูปที่ 3.26 ฐานของเครื่อง Sylvac80



รูปที่ 3.27 ออกแบบและจัดทำวงจร Drive Stepping Motor ด้วย DRV8825



รูปที่ 3.28 ติดตั้ง Stepping Motor พร้อมชุดควบคุม



รูปที่ 3.29 ติดตั้งเครื่องเสร็จสมบูรณ์

3.3 ศึกษาข้อมูลการเชื่อมต่อของเครื่อง Sylvac80

จากการศึกษาจากคู่มือของเครื่อง Sylvac80 สามารถส่งข้อมูลผ่านทาง RS-232 ของทางด้านหลังเครื่องได้เลยแต่การส่งข้อมูลผ่านทาง RS-232 นั้นมีความยุ่งยากและ โน้ตบุ๊กรุ่นใหม่ไม่มีช่องการเชื่อมต่อของ RS-232 ดังนั้นจึงได้ทำการสร้างสายการส่งข้อมูลของ RS232 เพื่อที่จะเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ CHL340 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่แปลงจาก RS-232 เป็น USB ได้



รูปที่ 3.30 จัดทำสาย RS-232 เพื่อต่อกับ CHL340

3.3.1 ตั้งค่าการเชื่อมต่อผ่าน Serial Port (RS-232)

จากคู่มือการใช้งานของเครื่อง Sylvac80 RS-232 ของเครื่องนั้นมีทั้งหมด 9 ขา แต่ละขามีหน้าที่การทำงานดังนี้

- Pin 1 : Charger output 8.5 V / 300 mA non-regulates (current limit protection).Output only with charger connected
- Pin 2 : RXD = RS-232-C output when foot pedal is processed (=function nr0 of external contract), or by remote command
- Pin 3 : TXD = RS-232-C input for remote command from a computer
- Pin 4 : DTR (Data Terminal Ready) = not used on D80
- Pin 5 : SG = Signal ground.
- Pin 6 : DSR (Data set ready) = Used on channel 0 to ask measuring value of RS-232-C connected instrument.
- Pin 7,8 : Unconnected.
- Pin 9 : Charger output 8.5 V / 300 mA, same as pin 1.

*** RS-232 transmission parameters are fixed like following : 4800 bps, 7 bits and even parity

จากข้อมูลข้างต้น RS-232 นั้นจำเป็นต้องใช้เพียง 3 ขา เท่านั้น โดยขาที่จำเป็นต้องใช้เชื่อมต่อคือ ขา2, 3 และ 5 ก็เพียงพอต่อการใช้งานในการรับ-ส่ง command ดังรูปที่ 3.29

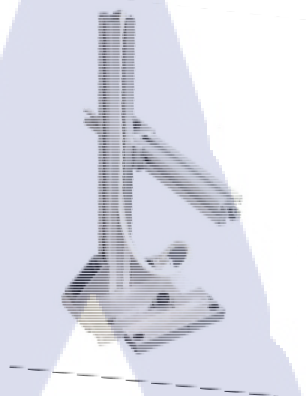
3.3.2 คำสั่งที่ใช้ในการดึง command จากLVDT ของเครื่อง Sylvac80

คำสั่งที่ใช้ในการดึง command จะใช้ทั้งหมด 2 คำสั่ง

- PRI = จะเป็นคำสั่งที่ใช้ในการดึง command ออกมาแสดงผล
- PRE = จะเป็นคำสั่งในการตั้งค่าให้อยู่ที่ 0

3.4 สร้างขาตั้งกล้องและคอมไฟส่องสว่าง

เนื่องจากการสอบเทียบแบบเดิมที่เป็นระบบ Manual ที่ใช้สายตาของเจ้าหน้าที่ตัดสินใจในการอ่านค่าของเครื่องมือวัด จึงได้ทำการติดตั้งกล้องเพื่อใช้ในการตัดสินใจแทนและใช้คอมไฟส่องสว่างเพื่อให้ได้ภาพที่ชัดเจนขึ้น



รูปที่ 3.31 ขาตั้งกล้องและติดตั้งไฟส่องสว่าง

โคมไฟส่องสว่างมีความสำคัญต่อการทำงานของกล้องเป็นอย่างมากเพราะในการใช้กล้องตัดสินใจแทนสายตาของเจ้าหน้าที่สอบเทียบนั้นความสว่างของแสงต้องมีการกระจายทั่วหน้าปัดของ Dial Gauge หากมีมุมเงยสักเพียงเล็กน้อยอาจทำให้การทำงานของกล้องนั้นคลาดเคลื่อนได้และทำให้การสอบเทียบนั้นเกิดข้อผิดพลาด อาจจะทำให้เกิดปัญหาใหญ่ตามมาภายหลัง

จากการทดลองโคมไฟส่องสว่าง แบบ A และ B นั้น สามารถใช้งานได้แต่ประสิทธิภาพในการส่องสว่างยังไม่เพียงพอเนื่องจากยังมีเงาของแสงนั้นส่องเข้ามาทับทำให้กล้องเกิดความผิดพลาดในการอ่านตำแหน่งของเข็มที่จะทับเส้น และ โคมไฟส่องสว่าง แบบ C นั้น สามารถแก้ไขในส่วนนี้ได้จึงได้ทำการเลือกโคมไฟส่องสว่าง แบบ C ดังรูปที่ 3.32



รูปที่ 3.32 โคมไฟส่องสว่าง แบบ A,B และ C



รูปที่ 3.33 เครื่อง Sylvac80 ที่ทำการปรับปรุงให้เป็นอัตโนมัติ

TNI

THAI - NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

บทที่ 4

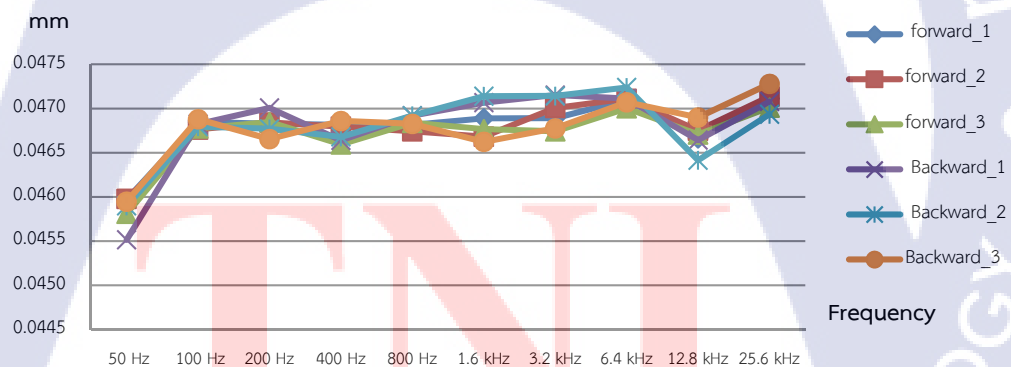
ผลการทดลอง

จากการออกแบบวงจรข้างต้น ได้ใช้ระบบ Drive Motor มีความละเอียด 1/32 step และต่อเข้ากับ Stepping Motor มีเคลื่อนที่ 1 Step/1.8 องศา จากการคำนวณ จะมีความละเอียด 0.1 μm ซึ่งจะใช้ Arduino สร้าง PWM เพื่อใช้ในการขับเคลื่อน Stepping Motor แต่ Arduino สามารถสร้างค่าความถี่ได้สูงสุด 31.25 kHz ซึ่งการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

- 4.1 ผลการทดลองตรวจสอบความสามารถของ Stepping Motor
- 4.2 ผลการทดลองการประมวลผลของภาพและการแสดงผล
- 4.3 ผลการทดลองระบบการทำงานทั้งหมดของเครื่อง Dial Test Indicator
- 4.4 ผลการดำเนินงาน

4.1 ผลการทดลองหาค่าความสามารถของสเต็ปมอเตอร์

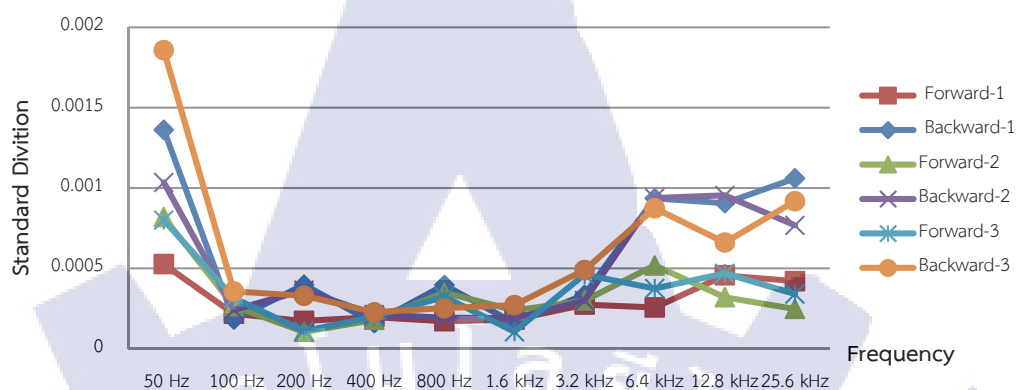
จากการทดลองหาค่าความถี่ที่เหมาะสมที่ใช้ขับเคลื่อน Stepping Motor จึงได้ทำการทดลองแต่ละความถี่ เริ่มตั้งแต่ 50Hz-25.6kHz ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลค่าเฉลี่ยของแต่ละความถี่ในการทดสอบระบบการทำงานของ Stepping Motor

จากรูปที่ 4.1 ผลการวัดการทำงานของ Stepping Motor และ ชุดควบคุมของระบบขับเคลื่อนทั้งหมด และได้ทดลองที่ความถี่ 30 kHz นั้น พบว่า ที่ความถี่นี้ขณะที่มอเตอร์มีการเคลื่อนที่จะเกิดการสั่นมากและระบบการทำงานผิดพลาด ซึ่งไม่สามารถควบคุมการทำงานได้ โดยมีความคลาด

เคลื่อนที่มากกว่าปกติ จึงไม่นำมาเป็นความถี่ที่ใช้เลือก ซึ่งผลที่ได้จากการเก็บข้อมูลมาวิเคราะห์หาค่า Standard Deviation ของแต่ละความถี่ จะแสดงผลได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลการหาค่า Standard Deviation

จากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้หาค่า Standard Deviation ของความถี่ที่ 400 Hz นั้นมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่อยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกัน แต่ความถี่ 400 Hz นั้น มีความเร็วที่ช้าไปที่จะเป็นความถี่ที่ทำงานทุกขั้นตอนจึงนำความถี่ 400 Hz ไปใช้ในการเคลื่อนที่ตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับเส้น และการเคลื่อนที่ที่สามารถใช้ความเร็วได้มากขึ้นจึงเลือกความถี่ที่ 1.6 kHz เพราะมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานมีความใกล้เคียงทั้ง 3 ครั้ง จากความถี่ทั้งหมด 10 ความถี่ จึงได้นำความถี่ที่ 1.6 kHz มาใช้เป็นความถี่ที่ทำงานในช่วงที่ต้องการความเร็วและความถี่ 400 Hz จะใช้ในช่วงที่ต้องการความเร็วต่ำ

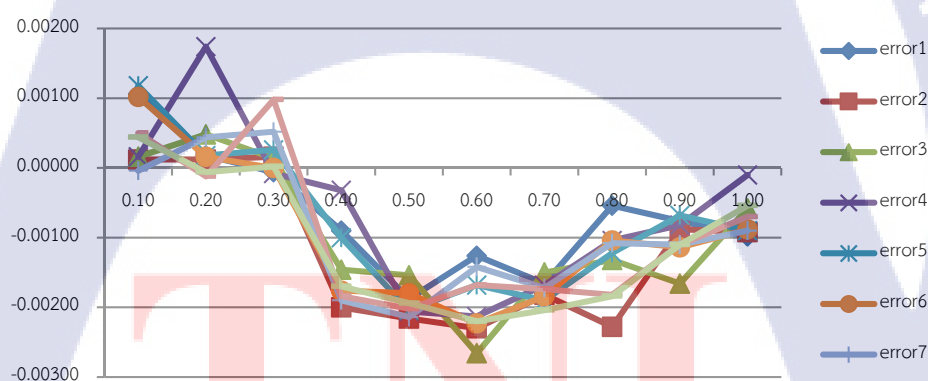
4.2 ผลการทดลองการประมวลผลของภาพและการแสดงผล

จากการทดลองได้ข้อมูลตามตารางที่ 4.1 ซึ่งใช้เป็นการเก็บข้อมูลด้วยวิธีที่ใช้การประมวลผลของภาพและเก็บข้อมูลจาก LVDT (Sylvac80) ที่สามารถอ่านค่าได้ขณะที่ใช้โปรแกรมเป็นส่วนที่ประมวลผลของภาพในการตรวจสอบขนาดของเส้นกับเข็มของหน้าปัดได้อัลเกจ

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลที่ LVDT อ่านได้เมื่อเข็มทับเส้นบนหน้าปัดไดอัลเกจ

Value	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	ครั้งที่ 6	ครั้งที่ 7	ครั้งที่ 8	ครั้งที่ 9
0.10	0.09894	0.09988	0.09984	0.09984	0.09882	0.09898	0.10004	0.09950	0.09956
0.20	0.19982	0.19988	0.19952	0.19826	0.19982	0.19984	0.19956	0.20012	0.20006
0.30	0.30006	0.29984	0.29986	0.30008	0.29974	0.30000	0.29948	0.29902	0.29998
0.40	0.40090	0.40200	0.40146	0.40032	0.40100	0.40176	0.40190	0.40184	0.40170
0.50	0.50188	0.50216	0.50154	0.50206	0.50204	0.50180	0.50214	0.50202	0.50194
0.60	0.60126	0.60230	0.60266	0.60213	0.60168	0.60223	0.60142	0.60168	0.60220
0.70	0.70166	0.70182	0.70150	0.70168	0.70190	0.70184	0.70172	0.70174	0.70204
0.80	0.80054	0.80228	0.80132	0.80104	0.80122	0.80104	0.80108	0.80182	0.80180
0.90	0.90076	0.90088	0.90166	0.90082	0.90068	0.90114	0.90110	0.90110	0.90110
1.00	1.00098	1.00092	1.00058	1.00010	1.00090	1.00088	1.00090	1.00070	1.00054

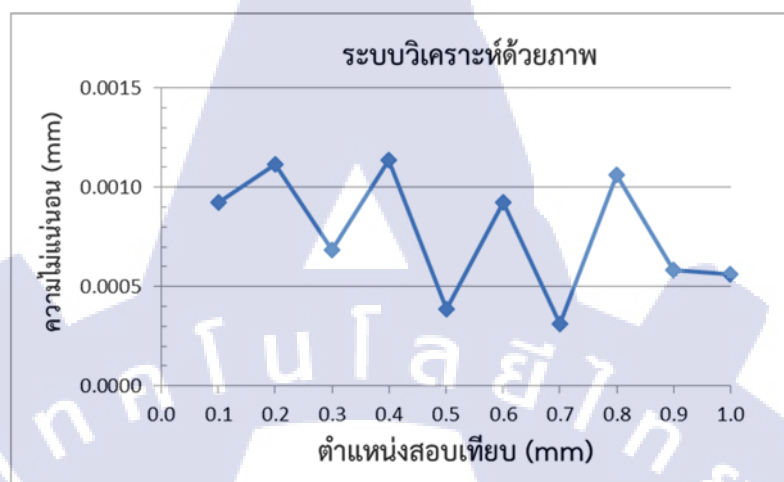
จากตารางที่ 4.1 ได้นำค่าที่วัดได้ไปหาค่าความผิดพลาดเพื่อที่จะมาสร้างรูปที่ 4.3 เพื่อตรวจสอบผลการทดลองของค่า Repeat ในตำแหน่งนั้น ซึ่งผลจะเห็นได้ว่าการวัดซ้ำทั้ง 9 ครั้ง จะไปในทิศทางเดียวกันแสดงให้เห็นได้ว่า เครื่อง Dial Test Indicator มีความเที่ยงตรงที่สูง สามารถนำไปใช้งานในรูปแบบอัตโนมัติที่เต็มระบบได้



รูปที่ 4.3 ค่าความผิดพลาดของการทดลองหาค่าการวัดซ้ำของระบบการประมวลผลของภาพ

จากรูปที่ 4.3 การทดลองให้โปรแกรมเคลื่อนไปยังตำแหน่งสอบเทียบโดยใช้ระบบวิเคราะห์ด้วยภาพที่ 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 และ 0 ทำทั้งหมด 9 ครั้ง ค่าความแตกต่างระหว่างตำแหน่งขีดที่สอบเทียบกับค่าที่อ่านจากเครื่อง Sylvac80 คือค่าความผิดพลาดของไดอัลเกจแสดงไว้ในรูปที่ 4.3 และ ค่าความไม่แน่นอนเมื่อใช้ confidence level ที่ 95.5%, $k=2$ ของการเข้าสู่

ตำแหน่งดังกล่าวข้างบนด้วยระบบวิเคราะห์ด้วยภาพ แสดงไว้ดังรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่ามีความไม่แน่นอนของการเข้าสู่ตำแหน่งแต่ละตำแหน่งต่ำกว่า $\pm 0.0012\text{mm}$ ในทุกตำแหน่ง



รูปที่ 4.4 ค่าความไม่แน่นอนของระบบวิเคราะห์ด้วยภาพ

4.3 ผลการทดลองระบบการทำงานทั้งหมดของเครื่อง Dial Test Indicator

จากการทดลองสามารถเก็บข้อมูลผลการสอบเทียบของ Dial Gauge Brand : Mitutoyo Model : 2046S Serial No. : MBW986 Range 0-10 mm Resolution 0.01 mm จำนวน 3 ครั้ง ผลการทดลองที่ได้ข้อมูลจะบันทึกลงใน ตารางที่ 4.2

TNI

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองของ Dial Gauge จำนวน 3 ครั้ง

ค่ามาตรฐานการสอบเทียบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
0.0000	-0.0001	0.0002	-0.0002
0.1000	0.0987	0.0982	0.0991
0.2000	0.1985	0.1975	0.1996
0.3000	0.2996	0.2984	0.2999
0.4000	0.4013	0.3998	0.4001
0.5000	0.5014	0.5007	0.5009
0.6000	0.6012	0.6000	0.6007
0.7000	0.7011	0.6993	0.7015
0.8000	0.8013	0.7999	0.8005
0.9000	0.9010	0.8994	0.9017
1.0000	1.0010	1.0000	1.0016
1.1000	1.1005	1.0995	1.1012
1.2000	1.1999	1.1991	1.2007
1.3000	1.2997	1.2992	1.3001
1.4000	1.4003	1.3994	1.4001
1.5000	1.5002	1.4995	1.5011
1.6000	1.6015	1.6011	1.6031
1.7000	1.7030	1.7012	1.7030
1.8000	1.8024	1.8012	1.8011
1.9000	1.9008	1.9002	1.9008
2.0000	1.9998	1.9988	1.9999
2.5000	2.5003	2.4999	2.5006
3.0000	2.9996	2.9984	2.9996
3.5000	3.4998	3.4990	3.5011
4.0000	4.0012	3.9999	4.0009
4.5000	4.4985	4.4984	4.4994
5.0000	5.0001	4.9985	5.0001

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองของ Dial Gauge จำนวน 3 ครั้ง (ต่อ)

ค่ามาตรฐานการสอบเทียบ	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
6.0000	6.0008	6.0010	6.0018
7.0000	7.0002	7.0003	7.0014
8.0000	8.0015	8.0012	8.0023
9.0000	8.9997	8.9995	9.0016
10.0000	10.0001	10.0002	10.0017

4.4 ผลดำเนินงาน

จากผลการทดลองสามารถนำผลการทดลองไปเปรียบเทียบผลการวัดกับเครื่อง Precision Gauge Calibrator ที่เป็นระบบการสอบเทียบไดอัลเกจแบบอัตโนมัติโดยใช้วิธีการเปรียบเทียบการวัดตามมาตรฐาน ISO17043 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบค่า EN Ratio ≤ 1 ซึ่งผลการเปรียบเทียบผลจะแสดงในตารางที่ 4.3, 4.4 และ 4.5

สูตรการหาค่า EN Ratio
$$ABS = \frac{(UUC \text{ reading} - UUR \text{ reading})}{\sqrt{U_{uncer} UUC^2 + U_{uncer} UUR^2}} \quad (4.1)$$

ตารางที่ 4.3 ตารางเปรียบเทียบผล EN Ratio ของการสอบเทียบครั้งที่ 1

ค่าที่อ่านได้ (mm) UUC	Uncertainty (mm) UUC	ค่าที่อ่านได้ (mm) UUR	Uncertainty (mm) UUR	EN Ratio
-0.0001	0.0017	-0.00026	0.0015	0.0715
0.0987	0.0017	0.09911	0.0015	0.1822
0.1985	0.0017	0.19861	0.0015	0.0498
0.2996	0.0017	0.29980	0.0015	0.0887
0.4013	0.0017	0.40037	0.0015	0.4120
0.5014	0.0017	0.50118	0.0015	0.0979
0.6012	0.0017	0.60102	0.0015	0.0785
0.7011	0.0017	0.70049	0.0015	0.2686
0.8013	0.0017	0.80112	0.0015	0.0812

ตารางที่ 4.3 ตารางเปรียบเทียบผล EN Ratio ของการสอบเทียบครั้งที่ 1 (ต่อ)

ค่าที่อ่านได้ (mm) UUC	Uncertainty (mm) UUC	ค่าที่อ่านได้ (mm) UUR	Uncertainty (mm) UUR	EN Ratio
0.9010	0.0017	0.90090	0.0015	0.0454
1.0010	0.0017	1.00109	0.0015	0.0375
1.1005	0.0017	1.10134	0.0015	0.3683
1.1999	0.0017	1.20130	0.0015	0.6188
1.2997	0.0017	1.30124	0.0015	0.6797
1.4003	0.0017	1.40043	0.0015	0.0565
1.5002	0.0017	1.50071	0.0015	0.2250
1.6015	0.0017	1.60130	0.0015	0.0869
1.7030	0.0017	1.70196	0.0015	0.4587
1.8024	0.0017	1.80227	0.0015	0.0565
1.9008	0.0017	1.90140	0.0015	0.2633
1.9998	0.0017	2.00027	0.0015	0.2082
2.5003	0.0017	2.50130	0.0015	0.4424
2.9996	0.0017	2.99986	0.0015	0.1160
3.4998	0.0017	3.50055	0.0015	0.3321
4.0012	0.0017	4.00115	0.0015	0.0234
4.4985	0.0017	4.49961	0.0015	0.4909
5.0001	0.0017	5.00001	0.0015	0.0397
6.0008	0.0017	6.00121	0.0015	0.1808
7.0002	0.0017	7.00140	0.0015	0.5280
8.0015	0.0017	8.00259	0.0015	0.4786
8.9997	0.0017	9.00140	0.0015	0.7485
10.0001	0.0017	10.00202	0.0015	0.8478

ตารางที่ 4.4 ตารางเปรียบเทียบผล EN Ratio ของการสอบเทียบครั้งที่ 2

ค่าที่อ่านได้ (mm) UUC	Uncertainty (mm) UUC	ค่าที่อ่านได้ (mm) UUR	Uncertainty (mm) UUR	EN Ratio
0.0002	0.0017	-0.00026	0.0015	0.2038
0.0982	0.0017	0.09911	0.0015	0.4027
0.1975	0.0017	0.19861	0.0015	0.4909
0.2984	0.0017	0.29980	0.0015	0.6180
0.3998	0.0017	0.40037	0.0015	0.2497
0.5007	0.0017	0.50118	0.0015	0.2108
0.6000	0.0017	0.60102	0.0015	0.4508
0.6993	0.0017	0.70049	0.0015	0.5253
0.7999	0.0017	0.80112	0.0015	0.5364
0.8994	0.0017	0.90090	0.0015	0.6603
1.0000	0.0017	1.00109	0.0015	0.4786
1.0995	0.0017	1.10134	0.0015	0.8094
1.1991	0.0017	1.20130	0.0015	0.9717
1.2992	0.0017	1.30124	0.0015	0.9002
1.3994	0.0017	1.40043	0.0015	0.4534
1.4995	0.0017	1.50071	0.0015	0.5337
1.6011	0.0017	1.60130	0.0015	0.0895
1.7012	0.0017	1.70196	0.0015	0.3352
1.8012	0.0017	1.80227	0.0015	0.4552
1.9002	0.0017	1.90140	0.0015	0.5280
1.9988	0.0017	2.00027	0.0015	0.6493
2.4999	0.0017	2.50130	0.0015	0.6188
2.9984	0.0017	2.99986	0.0015	0.6453
3.4990	0.0017	3.50055	0.0015	0.6850
3.9999	0.0017	4.00115	0.0015	0.5500
4.4984	0.0017	4.49961	0.0015	0.5350

ตารางที่ 4.4 ตารางเปรียบเทียบผล EN Ratio ของการสอบเทียบครั้งที่ 2 (ต่อ)

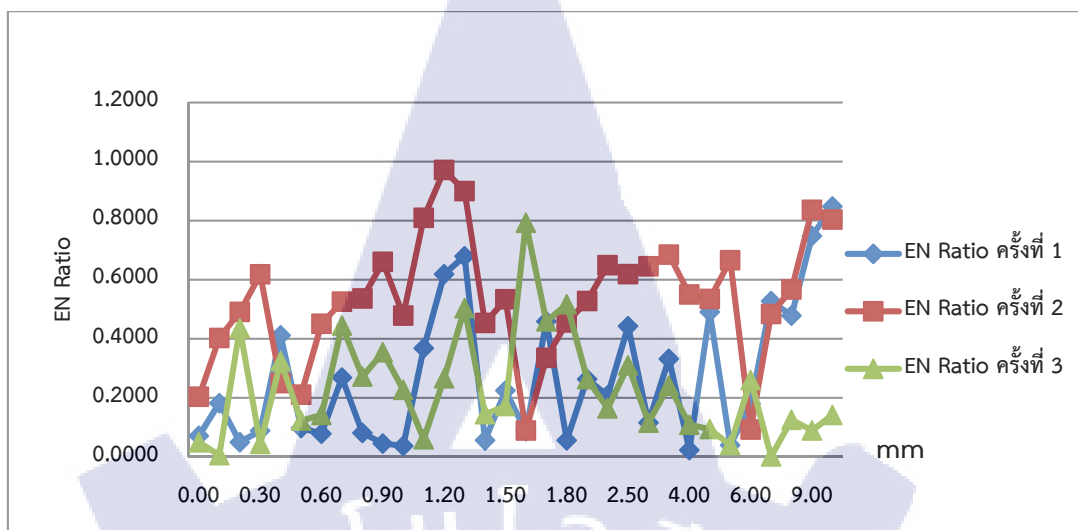
ค่าที่อ่านได้ (mm) UUC	Uncertainty (mm) UUC	ค่าที่อ่านได้ (mm) UUR	Uncertainty (mm) UUR	EN Ratio
4.9985	0.0017	5.00001	0.0015	0.6660
6.0010	0.0017	6.00121	0.0015	0.0926
7.0003	0.0017	7.00140	0.0015	0.4839
8.0013	0.0017	8.00259	0.0015	0.5668
8.9995	0.0017	9.00140	0.0015	0.8367
10.0002	0.0017	10.00202	0.0015	0.8036

ตารางที่ 4.5 ตารางเปรียบเทียบผล EN Ratio ของการสอบเทียบครั้งที่ 3

ค่าที่อ่านได้ (mm) UUC	Uncertainty (mm) UUC	ค่าที่อ่านได้ (mm) UUR	Uncertainty (mm) UUR	EN Ratio
-0.0002	0.0017	-0.00026	0.0015	0.0494
0.0991	0.0017	0.09911	0.0015	0.0057
0.1996	0.0017	0.19861	0.0015	0.4353
0.2999	0.0017	0.29980	0.0015	0.0437
0.4011	0.0017	0.40037	0.0015	0.3238
0.5009	0.0017	0.50118	0.0015	0.1226
0.6007	0.0017	0.60102	0.0015	0.1420
0.7015	0.0017	0.70049	0.0015	0.4451
0.8005	0.0017	0.80112	0.0015	0.2717
0.9017	0.0017	0.90090	0.0015	0.3542
1.0016	0.0017	1.00109	0.0015	0.2272
1.1012	0.0017	1.10134	0.0015	0.0595
1.2007	0.0017	1.20130	0.0015	0.2660
1.3001	0.0017	1.30124	0.0015	0.5033
1.4001	0.0017	1.40043	0.0015	0.1447

ตารางที่ 4.5 ตารางเปรียบเทียบผล EN Ratio ของการสอบเทียบครั้งที่ 3 (ต่อ)

ค่าที่อ่านได้ (mm) UUC	Uncertainty (mm) UUC	ค่าที่อ่านได้ (mm) UUR	Uncertainty (mm) UUR	EN Ratio
1.5011	0.0017	1.50071	0.0015	0.1720
1.6031	0.0017	1.60130	0.0015	0.7926
1.7030	0.0017	1.70196	0.0015	0.4587
1.8011	0.0017	1.80227	0.0015	0.5169
1.9008	0.0017	1.90140	0.0015	0.2633
1.9999	0.0017	2.00027	0.0015	0.1641
2.5006	0.0017	2.50130	0.0015	0.3101
2.9996	0.0017	2.99986	0.0015	0.1160
3.5011	0.0017	3.50055	0.0015	0.2413
4.0009	0.0017	4.00115	0.0015	0.1089
4.4994	0.0017	4.49961	0.0015	0.0940
5.0001	0.0017	5.00001	0.0015	0.0397
6.0018	0.0017	6.00121	0.0015	0.2602
7.0014	0.0017	7.00140	0.0015	0.0013
8.0023	0.0017	8.00259	0.0015	0.1257
9.0016	0.0017	9.00140	0.0015	0.0895
10.0017	0.0017	10.00202	0.0015	0.1420



รูปที่ 4.5 หาค่า EN Ratio จำนวน 3 ครั้ง

จากรูปที่ 4.5 เป็นการทดสอบหาค่า EN Ratio ทำโดยทำการสอบเทียบด้วยเครื่องที่พัฒนาขึ้นมากับเครื่องที่เป็น Reference ทำได้โดยนำไดอัลเกจ ไปทำการสอบเทียบกับเครื่องที่พัฒนาที่ตำแหน่งสอบเทียบ 0.00, 0.01, 0.02, 0.03 ... , 2.00, 2.50, 3.00, 3.50 ... , 5.00, 6.00, 7.00, 8.00 ... 10.00 mm แล้วนำไดอัลเกจตัวเดียวกันนี้ไปสอบเทียบด้วยเครื่องที่เป็น Reference ซึ่งในการทดสอบนี้ได้ทำ 3 ครั้ง แล้วนำผลไปคำนวณด้วยสมการที่ (1) ซึ่งให้ผลดังแสดงไว้ในรูปที่ 20 จะเห็นได้ว่าค่า EN Ratio ต่ำกว่า 1 ในทุกตำแหน่งที่สอบเทียบ นั่นคือเครื่องที่พัฒนาขึ้นมาสามารถใช้ทดแทนเครื่องสอบเทียบที่เป็น Reference ได้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้พัฒนาขึ้นเพื่อให้ห้องปฏิบัติการสอบเทียบทางด้านมิติ ทำงานได้รวดเร็ว ถูกต้อง แม่นยำและสะดวกมากขึ้น เนื่องจากมีปริมาณของ ไดอัลเกจ เข้ามาใช้บริการสอบเทียบจำนวนมาก ซึ่งเป็นการพัฒนาเครื่องมือวัดที่มีอยู่ให้มีประโยชน์สูงสุดในการใช้งานและลดภาระการนำเข้าสินค้าจากต่างประเทศและการจัดซื้อเครื่องใหม่เพื่อลดค่าใช้จ่ายของหน่วยงาน จึงนำมาพัฒนาเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว

ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวจะแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้

1. การทดลองของ Stepping Motor และ ชุดขับเคลื่อน ซึ่งผลที่ได้ ค่า Standard Deviation ของความถี่ที่ 400 Hz นั้นมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่อยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกัน แต่ความถี่ 400 Hz นั้น มีความเร็วที่ช้าเกินไปที่จะเป็นความถี่ที่ทำงานทุกขั้นตอนจึงนำความถี่ 400 Hz ไปใช้ในการเคลื่อนที่ตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับเส้น และการเคลื่อนที่ที่สามารถใช้ความเร็วได้มากขึ้นจึงเลือกความถี่ที่ 1.6 kHz เพราะมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานมีความใกล้เคียงทั้ง 3 ครั้ง จากความถี่ทั้งหมด 10 ความถี่ จึงได้นำความถี่ที่ 1.6 kHz มาใช้ เป็นความถี่ที่ทำงานในช่วงที่ต้องการความเร็วและความถี่ 400 Hz จะใช้ในช่วงที่ต้องการความเร็วต่ำ

2. การทดลองของส่วน LVDT (Sylvac80) ได้นำค่าที่ได้หาค่า error เพื่อตรวจสอบผลการทดลองของค่า Repeat ในตำแหน่งนั้น ซึ่งผลจะเห็นได้ว่าค่า Repeat ทั้ง 9 ครั้ง จะไปในทิศทางเดียวกันแสดงให้เห็นได้ว่า เครื่อง Dial Test Indicator มี Precision ที่สูง สามารถนำไปใช้งานในรูปแบบอัตโนมัติที่เต็มระบบได้ ดังรูปที่ 4.3 จะสังเกตได้ว่าผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกันทั้ง 9 ครั้ง

3. การทดลองแบบอัตโนมัติทั้งระบบ จะนำผลการสอบเทียบของเครื่อง Precision Gauge Indicator ที่เป็นเครื่องสอบเทียบไดอัลเกจที่เป็นระบบอัตโนมัติ และ เครื่อง Sylvac80 ที่พัฒนาจาก Manual ให้เป็น อัตโนมัติ นั้นค่าของการเปรียบเทียบผล EN Ratio ต้องไม่เกิน 1 ตามมาตรฐาน ISO/IEC 17043 ซึ่งการเปรียบเทียบผลดังกล่าว ของแต่ละตำแหน่งการสอบเทียบ ค่า EN Ratio ไม่เกิน 1 ของทุกตำแหน่งการสอบเทียบทั้ง 3 ครั้งของผลการสอบเทียบ ดังตารางที่ 4.3 4.4 และ 4.5

ดังนั้นเครื่องสอบเทียบที่พัฒนาขึ้นมาสามารถใช้งานได้ และ ความสามารถในการเคลื่อนที่เฉลี่ย 0.0000468 mm/step และควรทำงานโดยใช้ความเร็วระหว่าง 4.49mm/min ถึง 0.28mm/minซึ่งจะให้ความไม่แน่นอนในการเคลื่อนที่ต่ำกว่า $\pm 3.2\%$ สำหรับโปรแกรมวิเคราะห์

ด้วยภาพซึ่งควบคุมการตรวจสอบว่าเข็มตรงกับขีดมีความไม่แน่นอนในการวิเคราะห์ดีกว่า $\pm 0.0012\text{mm}$ และสุดท้าย เครื่องสอบเทียบไดอัลเกจที่พัฒนาขึ้น และดปรแกรมที่ควบคุมการทำงานทั้งหมด สามารถทำให้เครื่องสอบเทียบที่พัฒนาสามารถ ใช้ทดแทนเครื่องสอบเทียบแบบอัตโนมัติ ที่ใช้อยู่ในห้องปฏิบัติการได้ เพราะมีค่า EN Ratio ≤ 1 ในทุกตำแหน่งของการทดสอบการวัด

5.2 ข้อเสนอแนะ

ปัญหาที่เกิดในการพัฒนาเครื่อง Sylvac80 หลักๆนั้นคือ ปัญหาเรื่องแสงสว่างที่ใช้ในการส่องแสงสว่างให้หน้าปัดไดอัลเกจ เพื่อให้มีความสว่างเพียงพอสำหรับใช้กล้องจับภาพเพื่อนำไปประมวลผล แต่จากผลการทดลองความสว่างเพียงพอแต่หากมีดวงไฟที่ชัดเจนเกิดขึ้นบนหน้าปัดก็จะทำให้การประมวลผลผิดพลาด และ บางที่อาจทำให้การหาตำแหน่งกึ่งกลาง และตำแหน่งที่ต้องการวัดคลาดเคลื่อนและผิดพลาดได้ จึงจำเป็นมากที่ต้องมีความสว่างที่เพียงพอแต่ต้องไม่มีดวงไฟที่สะท้อนบนหน้าปัดไดอัลเกจ จึงต้องใช้แผ่นอะคริลิคลดแสงสะท้อนออกไปได้

5.3 บทวิจารณ์

1. การทำงานของ Stepping Motor นั้น เมื่อทำการหมุนไปกลับสลับกันเร็วเกินไปจะทำให้องศาของการหมุนนั้นผิดพลาดได้ของแต่ละตำแหน่งในการหมุน
2. เมื่อใช้งานเครื่อง Sylvac80 ไปนานๆจะทำให้ Stepping Motor เกิดความร้อนขึ้นมาก จึงจำเป็นต้องใช้พัดลมระบายอากาศให้เหมาะสมกับขนาดของ Stepping Motor
3. ความร้อนที่เกิดขึ้นในคอมไฟ โดยการใช้งานที่มีระยะเวลานานนั้น จะทำให้หลอดไฟเสียและอาจทำให้กล้องเสียได้

บรรณานุกรม

- [1] วิทยาลัยเทคนิคท่าหลวงซีเมนต์ไทยอุสรณ์, *การวัดด้วยนาฬิกาวัด*, สระบุรี : แผนก ช่างซ่อมบำรุงเครื่องจักรกล วิทยาลัยเทคนิคท่าหลวงซีเมนต์ไทยอุสรณ์, 2557.
- [2] Japanese Standards Association, *JIS B 7503:1997 Dial Gauges, (Japanese Industrial Standard)*, Bangkok : Thai Industrial Standards Institute, 1997.
- [3] การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, *การจัดทำรายงานผลการสอบเทียบ Dial Gauge ขนาด 0 mm ถึง 100 mm*, นนทบุรี : แผนกสอบเทียบเครื่องมือวัดทางกล การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2559.
- [4] Editorial, “Stepping Motor,” [Online]. Available : https://www.inventor.in.th/home/สตีปเปอร์มอเตอร์/#.XPX_elgzaUk. [Accessed: April 20, 2017].
- [5] National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC), “Stepping Motor,” [Online]. Available : https://www.nectec.or.th/schoolnet/library/webcontest2003/100team/dlnes137/am/step_motor.html. [Accessed: December 12, 2016].
- [6] Omega Measuring Instrument, “Serial Port,” [Online]. Available : <https://www.omi.co.th/th/article/rs232>. [Accessed: May 10, 2017].
- [7] Thai Easy Elec, “Arduino,” [Online]. Available : <https://www.thaieasyelec.com/article-wiki/latest-blogs/what-is-arduino-ch1.html>. [Accessed: March 11, 2017].
- [8] กิจไพบูลย์ ชิวพันธุ์ศรี, *การสร้างระบบอัตโนมัติด้วยLabVIEW*, กรุงเทพฯ : National Instruments (Thailand) Co.,Ltd., 2559.
- [9] Jarat_cyberu, “เทคโนโลยีการประมวลผลภาพ (Image Processing),” [Online]. Available : <http://jaratcyberu.blogspot.com/2009/10/image-processing.html>. [Accessed: 20 เมษายน 2559].
- [10] มนูญ วรรณประพันธ์ และ เอกพันธ์ อินดี, “Pixel และ Threshold,” [Online]. Available : http://www.researchsystem.siam.edu/images/thesistee/AUTOMATIC_VEHICLE_MODEL_DETECTION_SYSTEM/09.pdf. [Accessed: 12 กันยายน 2559].

ภาคผนวก

TNI

ภาคผนวก ก

เครื่องสอบเทียบไดอัลเกจแบบ Manual(Sylvac80) และ เครื่องสอบเทียบ
ไดอัลเกจแบบอัตโนมัติ (Precision Gauge Calibrator)

TNI

1. เครื่อง Dial Test Indicator (Sylvac80)

- สอบเทียบด้วยมือ
- สามารถวัดได้ : 0 - 25 mm.
- ความสามารถของเครื่อง : 0.1 μm .
- การประเมินค่าความไม่แน่นอน $U=(1.5 + 2 * 10^{-6} * L) \mu\text{m}$



รูปที่ ก.1 เครื่อง Dial Test Indicator (Sylvac80)

2. เครื่อง Precision Gauge Calibrator

- สอบเทียบแบบอัตโนมัติ
- สามารถวัดได้ : 0 - 100 mm.
- ความสามารถของเครื่อง : 0.1 μm .
- การประเมินค่าความไม่แน่นอน $U=(1.5 + 2 * 10^{-6} * L) \mu\text{m}$



รูปที่ ก.2 เครื่อง Precision Gauge Calibrator

ภาคผนวก ข

ตารางเก็บข้อมูลการทดสอบเครื่องสอบเทียบไดอัลเกจ(Sylvac80)

TNI

DATA ที่เก็บข้อมูล(พร้อมทั้งข้อมูลภายในมาใส่ในภาคผนวก)

ตารางที่ ข.1 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 1 ขนาด 0-2.4 mm

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
50	1000	0.0420	50	1000	0.0479
50	1000	0.0470	50	1000	0.0474
50	1000	0.0460	50	1000	0.0474
50	1000	0.0465	50	1000	0.0464
50	1000	0.0465	50	1000	0.0458
100	1000	0.0471	100	1000	0.0458
100	1000	0.0469	100	1000	0.0467
100	1000	0.0464	100	1000	0.0465
100	1000	0.0465	100	1000	0.0462
100	1000	0.0469	100	1000	0.0464
200	1000	0.0470	200	1000	0.0467
200	1000	0.0471	200	1000	0.047
200	1000	0.0479	200	1000	0.047
200	1000	0.0479	200	1000	0.0475
200	1000	0.0472	200	1000	0.0468
400	1000	0.0453	400	1000	0.0462
400	1000	0.0466	400	1000	0.0464
400	1000	0.0470	400	1000	0.0472
400	1000	0.0468	400	1000	0.0477
400	1000	0.0468	400	1000	0.0476
800	1000	0.0475	800	1000	0.0482
800	1000	0.0461	800	1000	0.0477
800	1000	0.0465	800	1000	0.0475
800	1000	0.0465	800	1000	0.0472
800	1000	0.0463	800	1000	0.0467

ตารางที่ ข.1 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 1 ขนาด 0-2.4 mm(ต่อ)

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
1600	1000	0.0472	1600	1000	0.0471
1600	1000	0.0473	1600	1000	0.0458
1600	1000	0.0475	1600	1000	0.0455
1600	1000	0.0472	1600	1000	0.0457
1600	1000	0.0465	1600	1000	0.0459
3200	1000	0.0466	3200	1000	0.0461
3200	1000	0.0474	3200	1000	0.0466
3200	1000	0.0482	3200	1000	0.0472
3200	1000	0.0471	3200	1000	0.0474
3200	1000	0.0455	3200	1000	0.0453
6400	1000	0.0476	6400	1000	0.0458
6400	1000	0.0476	6400	1000	0.047
6400	1000	0.0475	6400	1000	0.0476
6400	1000	0.0471	6400	1000	0.0474
6400	1000	0.0464	6400	1000	0.0474
12800	1000	0.0470	12800	1000	0.0472
12800	1000	0.0468	12800	1000	0.0468
12800	1000	0.0459	12800	1000	0.0462
12800	1000	0.0472	12800	1000	0.0468
12800	1000	0.0480	12800	1000	0.0472
25600	1000	0.0478	25600	1000	0.0473
25600	1000	0.0469	25600	1000	0.0464
25600	1000	0.0451	25600	1000	0.0462
25600	1000	0.0465	25600	1000	0.0466
25600	1000	0.0469	25600	1000	0.0473

ตารางที่ ข.2 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 1 ขนาด 5-7.5 mm

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
50	1000	0.0449	50	1000	0.0434
50	1000	0.0468	50	1000	0.047
50	1000	0.0468	50	1000	0.0471
50	1000	0.0471	50	1000	0.0464
50	1000	0.0468	50	1000	0.0466
100	1000	0.0467	100	1000	0.0465
100	1000	0.047	100	1000	0.0467
100	1000	0.0465	100	1000	0.0477
100	1000	0.0456	100	1000	0.0468
100	1000	0.0462	100	1000	0.0473
200	1000	0.0463	200	1000	0.047
200	1000	0.0467	200	1000	0.0469
200	1000	0.047	200	1000	0.047
200	1000	0.0457	200	1000	0.0472
200	1000	0.0464	200	1000	0.0475
400	1000	0.0459	400	1000	0.047
400	1000	0.0468	400	1000	0.0461
400	1000	0.047	400	1000	0.0465
400	1000	0.0473	400	1000	0.0465
400	1000	0.0464	400	1000	0.0464
800	1000	0.0462	800	1000	0.0466
800	1000	0.0459	800	1000	0.0465
800	1000	0.0471	800	1000	0.0462
800	1000	0.0475	800	1000	0.046
800	1000	0.0482	800	1000	0.0464
1600	1000	0.0478	1600	1000	0.0466

ตารางที่ ข.2 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 1 ขนาด 5-7.5 mm(ต่อ)

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
1600	1000	0.0476	1600	1000	0.0471
1600	1000	0.0465	1600	1000	0.048
1600	1000	0.0466	1600	1000	0.0471
1600	1000	0.0468	1600	1000	0.0465
3200	1000	0.0473	3200	1000	0.0472
3200	1000	0.0474	3200	1000	0.0478
3200	1000	0.0454	3200	1000	0.0471
3200	1000	0.0455	3200	1000	0.0482
3200	1000	0.0462	3200	1000	0.0474
6400	1000	0.0469	6400	1000	0.0489
6400	1000	0.0471	6400	1000	0.0467
6400	1000	0.046	6400	1000	0.046
6400	1000	0.0476	6400	1000	0.047
6400	1000	0.0465	6400	1000	0.0478
12800	1000	0.0462	12800	1000	0.047
12800	1000	0.046	12800	1000	0.0461
12800	1000	0.048	12800	1000	0.0471
12800	1000	0.0474	12800	1000	0.0463
12800	1000	0.0466	12800	1000	0.0464
25600	1000	0.0484	25600	1000	0.0473
25600	1000	0.0468	25600	1000	0.0468
25600	1000	0.0468	25600	1000	0.0466
25600	1000	0.0467	25600	1000	0.0464
25600	1000	0.0465	25600	1000	0.0456

ตารางที่ ข.3 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 1 ขนาด 10-13 mm

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
50	1000	0.0442	50	1000	0.0415
50	1000	0.0467	50	1000	0.0449
50	1000	0.0471	50	1000	0.0459
50	1000	0.0468	50	1000	0.0468
50	1000	0.0477	50	1000	0.046
100	1000	0.0469	100	1000	0.0471
100	1000	0.0464	100	1000	0.0465
100	1000	0.0461	100	1000	0.0465
100	1000	0.0475	100	1000	0.047
100	1000	0.0478	100	1000	0.0462
200	1000	0.0471	200	1000	0.0485
200	1000	0.0466	200	1000	0.0481
200	1000	0.0466	200	1000	0.0463
200	1000	0.0463	200	1000	0.0459
200	1000	0.0465	200	1000	0.0466
400	1000	0.0463	400	1000	0.0461
400	1000	0.0472	400	1000	0.0462
400	1000	0.0472	400	1000	0.047
400	1000	0.0469	400	1000	0.0473
400	1000	0.045	400	1000	0.0473
800	1000	0.0461	800	1000	0.0454
800	1000	0.047	800	1000	0.0475
800	1000	0.047	800	1000	0.0474
800	1000	0.0469	800	1000	0.0481

ตารางที่ ข.3 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 1 ขนาด 10-13 mm(ต่อ)

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
800	1000	0.047	800	1000	0.0483
1600	1000	0.0469	1600	1000	0.0486
1600	1000	0.0473	1600	1000	0.0463
1600	1000	0.0472	1600	1000	0.0482
1600	1000	0.0471	1600	1000	0.0473
1600	1000	0.0472	1600	1000	0.047
3200	1000	0.0472	3200	1000	0.0485
3200	1000	0.0468	3200	1000	0.047
3200	1000	0.0459	3200	1000	0.0446
3200	1000	0.0473	3200	1000	0.0468
3200	1000	0.048	3200	1000	0.0464
6400	1000	0.0474	6400	1000	0.0482
6400	1000	0.0469	6400	1000	0.045
6400	1000	0.0452	6400	1000	0.0475
6400	1000	0.0471	6400	1000	0.0465
6400	1000	0.0478	6400	1000	0.0468
12800	1000	0.0455	12800	1000	0.0449
12800	1000	0.0459	12800	1000	0.0474
12800	1000	0.0471	12800	1000	0.0487
12800	1000	0.0479	12800	1000	0.0473
12800	1000	0.0455	12800	1000	0.0466
25600	1000	0.0491	25600	1000	0.0501
25600	1000	0.048	25600	1000	0.0473
25600	1000	0.0486	25600	1000	0.0476
25600	1000	0.0474	25600	1000	0.0448
25600	1000	0.0453	25600	1000	0.0481

ตารางที่ ข.4 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 1 ขนาด 15-17.5 mm

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
50	1000	0.042	50	1000	0.0406
50	1000	0.0462	50	1000	0.0461
50	1000	0.0468	50	1000	0.0463
50	1000	0.047	50	1000	0.0461
50	1000	0.0472	50	1000	0.0457
100	1000	0.0469	100	1000	0.0459
100	1000	0.0471	100	1000	0.0467
100	1000	0.047	100	1000	0.048
100	1000	0.0473	100	1000	0.0472
100	1000	0.0472	100	1000	0.0475
200	1000	0.0476	200	1000	0.0476
200	1000	0.0475	200	1000	0.0466
200	1000	0.0462	200	1000	0.0464
200	1000	0.0461	200	1000	0.046
200	1000	0.0468	200	1000	0.0475
400	1000	0.0477	400	1000	0.0473
400	1000	0.047	400	1000	0.0463
400	1000	0.0469	400	1000	0.0461
400	1000	0.0467	400	1000	0.0458
400	1000	0.0467	400	1000	0.0472
800	1000	0.0456	800	1000	0.0464
800	1000	0.0466	800	1000	0.0481
800	1000	0.0471	800	1000	0.0467
800	1000	0.0477	800	1000	0.0471
800	1000	0.0474	800	1000	0.0465
1600	1000	0.0466	1600	1000	0.0476

ตารางที่ ข.4 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 1 ขนาด 15-17.5 mm(ต่อ)

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
1600	1000	0.0459	1600	1000	0.048
1600	1000	0.0459	1600	1000	0.048
1600	1000	0.0462	1600	1000	0.0466
1600	1000	0.0473	1600	1000	0.0474
3200	1000	0.0487	3200	1000	0.0473
3200	1000	0.0475	3200	1000	0.0478
3200	1000	0.0455	3200	1000	0.0456
3200	1000	0.046	3200	1000	0.048
3200	1000	0.0474	3200	1000	0.0471
6400	1000	0.0488	6400	1000	0.05
6400	1000	0.0466	6400	1000	0.0448
6400	1000	0.0463	6400	1000	0.0438
6400	1000	0.0484	6400	1000	0.0497
6400	1000	0.047	6400	1000	0.047
12800	1000	0.0442	12800	1000	0.0442
12800	1000	0.047	12800	1000	0.047
12800	1000	0.0484	12800	1000	0.0488
12800	1000	0.0478	12800	1000	0.0464
12800	1000	0.0473	12800	1000	0.042
25600	1000	0.0476	25600	1000	0.0522
25600	1000	0.0473	25600	1000	0.0484
25600	1000	0.0476	25600	1000	0.0485
25600	1000	0.0464	25600	1000	0.0439
25600	1000	0.0474	25600	1000	0.0460

ตารางที่ ข.5 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 1 ขนาด 20-22.5 mm

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
50	1000	0.0428	50	1000	0.0366
50	1000	0.0461	50	1000	0.0464
50	1000	0.0459	50	1000	0.0471
50	1000	0.0459	50	1000	0.0469
50	1000	0.0465	50	1000	0.0456
100	1000	0.0472	100	1000	0.0471
100	1000	0.0477	100	1000	0.0475
100	1000	0.0472	100	1000	0.0474
100	1000	0.0464	100	1000	0.0471
100	1000	0.0467	100	1000	0.0463
200	1000	0.0472	200	1000	0.0469
200	1000	0.0472	200	1000	0.0467
200	1000	0.0465	200	1000	0.0472
200	1000	0.0467	200	1000	0.047
200	1000	0.0466	200	1000	0.0473
400	1000	0.0467	400	1000	0.0461
400	1000	0.0469	400	1000	0.0461
400	1000	0.0478	400	1000	0.0462
400	1000	0.0485	400	1000	0.0463
400	1000	0.047	400	1000	0.0471
800	1000	0.0464	800	1000	0.0463
800	1000	0.0461	800	1000	0.0466
800	1000	0.0466	800	1000	0.0465
800	1000	0.0471	800	1000	0.0467
800	1000	0.048	800	1000	0.0464
1600	1000	0.0474	1600	1000	0.0473

ตารางที่ ข.5 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 1 ขนาด 20-22.5 mm (ต่อ)

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
1600	1000	0.047	1600	1000	0.0473
1600	1000	0.0461	1600	1000	0.0481
1600	1000	0.0468	1600	1000	0.047
1600	1000	0.0464	1600	1000	0.0467
3200	1000	0.0479	3200	1000	0.0483
3200	1000	0.0476	3200	1000	0.0472
3200	1000	0.0463	3200	1000	0.0460
3200	1000	0.0464	3200	1000	0.0480
3200	1000	0.0472	3200	1000	0.0471
6400	1000	0.0484	6400	1000	0.0500
6400	1000	0.046	6400	1000	0.0455
6400	1000	0.0457	6400	1000	0.0442
6400	1000	0.0479	6400	1000	0.0498
6400	1000	0.0477	6400	1000	0.0474
12800	1000	0.0449	12800	1000	0.0459
12800	1000	0.0455	12800	1000	0.0480
12800	1000	0.0478	12800	1000	0.0488
12800	1000	0.0473	12800	1000	0.0468
12800	1000	0.0454	12800	1000	0.0462
25600	1000	0.0489	25600	1000	0.0487
25600	1000	0.0462	25600	1000	0.0475
25600	1000	0.0469	25600	1000	0.0462
25600	1000	0.0462	25600	1000	0.0462
25600	1000	0.0466	25600	1000	0.0450

ตารางที่ ข.6 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 2 ขนาด 0-2.4 mm

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
50	1000	0.0454	50	1000	0.05
50	1000	0.0467	50	1000	0.0484
50	1000	0.0461	50	1000	0.0474
50	1000	0.0460	50	1000	0.0468
50	1000	0.0465	50	1000	0.0466
100	1000	0.0469	100	1000	0.0465
100	1000	0.0467	100	1000	0.0466
100	1000	0.0468	100	1000	0.0466
100	1000	0.0467	100	1000	0.0467
100	1000	0.0469	100	1000	0.046
200	1000	0.0468	200	1000	0.0456
200	1000	0.0470	200	1000	0.0456
200	1000	0.0477	200	1000	0.0462
200	1000	0.0479	200	1000	0.0472
200	1000	0.0468	200	1000	0.0454
400	1000	0.0450	400	1000	0.0488
400	1000	0.0464	400	1000	0.0472
400	1000	0.0468	400	1000	0.0469
400	1000	0.0464	400	1000	0.0467
400	1000	0.0466	400	1000	0.047
800	1000	0.0466	800	1000	0.0471
800	1000	0.0460	800	1000	0.0474
800	1000	0.0462	800	1000	0.0468
800	1000	0.0459	800	1000	0.0465
800	1000	0.0457	800	1000	0.0467
1600	1000	0.0466	1600	1000	0.047

ตารางที่ ข.6 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 2 ขนาด 0-2.4 mm(ต่อ)

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
1600	1000	0.0461	1600	1000	0.0474
1600	1000	0.0470	1600	1000	0.0467
1600	1000	0.0474	1600	1000	0.0463
1600	1000	0.0464	1600	1000	0.0467
3200	1000	0.0477	3200	1000	0.046
3200	1000	0.0479	3200	1000	0.0482
3200	1000	0.0483	3200	1000	0.0479
3200	1000	0.0470	3200	1000	0.0485
3200	1000	0.0458	3200	1000	0.0469
6400	1000	0.0472	6400	1000	0.0484
6400	1000	0.0480	6400	1000	0.047
6400	1000	0.0472	6400	1000	0.0473
6400	1000	0.0473	6400	1000	0.0472
6400	1000	0.0469	6400	1000	0.0465
12800	1000	0.0472	12800	1000	0.0472
12800	1000	0.0458	12800	1000	0.0466
12800	1000	0.0459	12800	1000	0.0462
12800	1000	0.0468	12800	1000	0.0449
12800	1000	0.0480	12800	1000	0.0475
25600	1000	0.0476	25600	1000	0.0468
25600	1000	0.0470	25600	1000	0.0469
25600	1000	0.0462	25600	1000	0.0462
25600	1000	0.0468	25600	1000	0.0462
25600	1000	0.0475	25600	1000	0.0461

ตารางที่ ข.7 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 2 ขนาด 5-7.5 mm

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
50	1000	0.0443	50	1000	0.0438
50	1000	0.0464	50	1000	0.0458
50	1000	0.0457	50	1000	0.0475
50	1000	0.0467	50	1000	0.0469
50	1000	0.0464	50	1000	0.0463
100	1000	0.0467	100	1000	0.046
100	1000	0.0471	100	1000	0.047
100	1000	0.0467	100	1000	0.047
100	1000	0.0461	100	1000	0.0477
100	1000	0.0466	100	1000	0.0475
200	1000	0.0469	200	1000	0.0482
200	1000	0.0475	200	1000	0.0473
200	1000	0.0462	200	1000	0.0468
200	1000	0.0466	200	1000	0.0473
200	1000	0.0462	200	1000	0.0477
400	1000	0.0464	400	1000	0.047
400	1000	0.0466	400	1000	0.0464
400	1000	0.0473	400	1000	0.0457
400	1000	0.0473	400	1000	0.0465
400	1000	0.047	400	1000	0.0472
800	1000	0.0463	800	1000	0.0465
800	1000	0.0464	800	1000	0.047
800	1000	0.0477	800	1000	0.0468
800	1000	0.0472	800	1000	0.0467
800	1000	0.0485	800	1000	0.0461
1600	1000	0.0474	1600	1000	0.0465

ตารางที่ ข.7 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 2 ขนาด 5-7.5 mm(ต่อ)

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
1600	1000	0.0476	1600	1000	0.0473
1600	1000	0.0467	1600	1000	0.0476
1600	1000	0.0463	1600	1000	0.0471
1600	1000	0.0467	1600	1000	0.0465
3200	1000	0.0477	3200	1000	0.0459
3200	1000	0.0469	3200	1000	0.0462
3200	1000	0.0458	3200	1000	0.0458
3200	1000	0.046	3200	1000	0.0472
3200	1000	0.0466	3200	1000	0.0473
6400	1000	0.0472	6400	1000	0.0475
6400	1000	0.0467	6400	1000	0.0454
6400	1000	0.0467	6400	1000	0.0467
6400	1000	0.0474	6400	1000	0.0466
6400	1000	0.0464	6400	1000	0.0471
12800	1000	0.0451	12800	1000	0.0469
12800	1000	0.0473	12800	1000	0.0468
12800	1000	0.0478	12800	1000	0.0478
12800	1000	0.0465	12800	1000	0.0465
12800	1000	0.0465	12800	1000	0.0459
25600	1000	0.0483	25600	1000	0.047
25600	1000	0.0473	25600	1000	0.0473
25600	1000	0.0471	25600	1000	0.0476
25600	1000	0.0466	25600	1000	0.0466
25600	1000	0.0465	25600	1000	0.0465

ตารางที่ ข.8 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 2 ขนาด 10-13 mm

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
50	1000	0.0441	50	1000	0.0426
50	1000	0.0467	50	1000	0.0451
50	1000	0.0473	50	1000	0.046
50	1000	0.0467	50	1000	0.046
50	1000	0.0471	50	1000	0.0465
100	1000	0.0469	100	1000	0.0463
100	1000	0.0458	100	1000	0.0462
100	1000	0.0464	100	1000	0.0472
100	1000	0.0474	100	1000	0.0462
100	1000	0.0477	100	1000	0.0474
200	1000	0.0473	200	1000	0.0479
200	1000	0.0468	200	1000	0.0484
200	1000	0.0462	200	1000	0.0465
200	1000	0.0465	200	1000	0.0461
200	1000	0.0462	200	1000	0.0454
400	1000	0.0466	400	1000	0.0461
400	1000	0.047	400	1000	0.0463
400	1000	0.0464	400	1000	0.0474
400	1000	0.0462	400	1000	0.0473
400	1000	0.0459	400	1000	0.0466
800	1000	0.0471	800	1000	0.0464
800	1000	0.0451	800	1000	0.0476
800	1000	0.0469	800	1000	0.0476
800	1000	0.0472	800	1000	0.0482
800	1000	0.047	800	1000	0.0477
1600	1000	0.0462	1600	1000	0.0481

ตารางที่ ข.8 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 2 ขนาด 10-13 mm

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
1600	1000	0.0466	1600	1000	0.0484
1600	1000	0.0469	1600	1000	0.0484
1600	1000	0.0473	1600	1000	0.0464
1600	1000	0.0472	1600	1000	0.0471
3200	1000	0.0474	3200	1000	0.0479
3200	1000	0.0478	3200	1000	0.0465
3200	1000	0.0476	3200	1000	0.0449
3200	1000	0.0457	3200	1000	0.0458
3200	1000	0.0465	3200	1000	0.0477
6400	1000	0.0478	6400	1000	0.0508
6400	1000	0.0491	6400	1000	0.0453
6400	1000	0.0466	6400	1000	0.0454
6400	1000	0.0455	6400	1000	0.0464
6400	1000	0.0461	6400	1000	0.0507
12800	1000	0.0483	12800	1000	0.0414
12800	1000	0.0453	12800	1000	0.0457
12800	1000	0.046	12800	1000	0.048
12800	1000	0.0475	12800	1000	0.0491
12800	1000	0.049	12800	1000	0.0459
25600	1000	0.0467	25600	1000	0.0495
25600	1000	0.0464	25600	1000	0.0468
25600	1000	0.0462	25600	1000	0.048
25600	1000	0.0481	25600	1000	0.0465
25600	1000	0.0483	25600	1000	0.0437

ตารางที่ ข.9 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 2 ขนาด 15-17.5 mm

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
50	1000	0.0419	50	1000	0.0413
50	1000	0.0466	50	1000	0.0458
50	1000	0.0471	50	1000	0.0463
50	1000	0.0471	50	1000	0.0465
50	1000	0.0473	50	1000	0.0452
100	1000	0.0472	100	1000	0.0453
100	1000	0.047	100	1000	0.0461
100	1000	0.047	100	1000	0.0473
100	1000	0.047	100	1000	0.0475
100	1000	0.0473	100	1000	0.0472
200	1000	0.0476	200	1000	0.0468
200	1000	0.0468	200	1000	0.0473
200	1000	0.0465	200	1000	0.0458
200	1000	0.0464	200	1000	0.0461
200	1000	0.0464	200	1000	0.0472
400	1000	0.0479	400	1000	0.0467
400	1000	0.0468	400	1000	0.0465
400	1000	0.0473	400	1000	0.046
400	1000	0.047	400	1000	0.0463
400	1000	0.0464	400	1000	0.0463
800	1000	0.0457	800	1000	0.0464
800	1000	0.046	800	1000	0.0485
800	1000	0.0474	800	1000	0.0469
800	1000	0.0484	800	1000	0.0471
800	1000	0.0477	800	1000	0.0471
1600	1000	0.0475	1600	1000	0.0473

ตารางที่ ข.9 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 2 ขนาด 15-17.5 mm (ต่อ)

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
1600	1000	0.0471	1600	1000	0.0477
1600	1000	0.045	1600	1000	0.0478
1600	1000	0.0461	1600	1000	0.0463
1600	1000	0.0461	1600	1000	0.0471
3200	1000	0.0479	3200	1000	0.0482
3200	1000	0.0463	3200	1000	0.0475
3200	1000	0.0459	3200	1000	0.0462
3200	1000	0.047	3200	1000	0.0477
3200	1000	0.0484	3200	1000	0.0472
6400	1000	0.0482	6400	1000	0.0481
6400	1000	0.047	6400	1000	0.0479
6400	1000	0.0457	6400	1000	0.0441
6400	1000	0.0497	6400	1000	0.0457
6400	1000	0.0459	6400	1000	0.0492
12800	1000	0.0447	12800	1000	0.0445
12800	1000	0.0467	12800	1000	0.0461
12800	1000	0.0481	12800	1000	0.0486
12800	1000	0.0473	12800	1000	0.0473
12800	1000	0.0456	12800	1000	0.0435
25600	1000	0.0478	25600	1000	0.0454
25600	1000	0.0474	25600	1000	0.0467
25600	1000	0.0473	25600	1000	0.0487
25600	1000	0.046	25600	1000	0.0495
25600	1000	0.0468	25600	1000	0.0477

ตารางที่ ข.10 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 2 ขนาด 20-22.5 mm

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
50	1000	0.0413	50	1000	0.0385
50	1000	0.0465	50	1000	0.0471
50	1000	0.0462	50	1000	0.0476
50	1000	0.0468	50	1000	0.0469
50	1000	0.0466	50	1000	0.0466
100	1000	0.0469	100	1000	0.0469
100	1000	0.0464	100	1000	0.0475
100	1000	0.0461	100	1000	0.0477
100	1000	0.0462	100	1000	0.0471
100	1000	0.0466	100	1000	0.0464
200	1000	0.0472	200	1000	0.047
200	1000	0.0479	200	1000	0.0468
200	1000	0.0464	200	1000	0.0473
200	1000	0.0467	200	1000	0.0468
200	1000	0.0466	200	1000	0.0466
400	1000	0.0467	400	1000	0.0465
400	1000	0.0474	400	1000	0.0462
400	1000	0.0473	400	1000	0.0461
400	1000	0.0483	400	1000	0.0461
400	1000	0.0469	400	1000	0.0472
800	1000	0.0461	800	1000	0.0466
800	1000	0.0459	800	1000	0.047
800	1000	0.0465	800	1000	0.0465
800	1000	0.047	800	1000	0.0461
800	1000	0.0481	800	1000	0.0457
1600	1000	0.0471	1600	1000	0.047

ตารางที่ ข.10 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 2 ขนาด 20-22.5 mm(ต่อ)

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
1600	1000	0.0466	1600	1000	0.0476
1600	1000	0.0459	1600	1000	0.0477
1600	1000	0.0465	1600	1000	0.0464
1600	1000	0.0468	1600	1000	0.0461
3200	1000	0.0473	3200	1000	0.0475
3200	1000	0.0474	3200	1000	0.0484
3200	1000	0.0468	3200	1000	0.0448
3200	1000	0.0464	3200	1000	0.0475
3200	1000	0.0471	3200	1000	0.0477
6400	1000	0.048	6400	1000	0.0503
6400	1000	0.0454	6400	1000	0.0459
6400	1000	0.0467	6400	1000	0.0446
6400	1000	0.0479	6400	1000	0.048
6400	1000	0.0472	6400	1000	0.0489
12800	1000	0.0457	12800	1000	0.0469
12800	1000	0.0462	12800	1000	0.0467
12800	1000	0.0473	12800	1000	0.0481
12800	1000	0.0474	12800	1000	0.0468
12800	1000	0.0468	12800	1000	0.0455
25600	1000	0.049	25600	1000	0.0486
25600	1000	0.047	25600	1000	0.0472
25600	1000	0.0466	25600	1000	0.0467
25600	1000	0.0469	25600	1000	0.0467
25600	1000	0.047	25600	1000	0.0445

ตารางที่ ข.11 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 3 ขนาด 0-2.4 mm

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
50	1000	0.0412	50	1000	0.0475
50	1000	0.0458	50	1000	0.0475
50	1000	0.0460	50	1000	0.0474
50	1000	0.0465	50	1000	0.0479
50	1000	0.0472	50	1000	0.0476
100	1000	0.0475	100	1000	0.0458
100	1000	0.0474	100	1000	0.0459
100	1000	0.0476	100	1000	0.0462
100	1000	0.0463	100	1000	0.0466
100	1000	0.0459	100	1000	0.0462
200	1000	0.0463	200	1000	0.0459
200	1000	0.0464	200	1000	0.0459
200	1000	0.0478	200	1000	0.0462
200	1000	0.0484	200	1000	0.046
200	1000	0.0471	200	1000	0.0452
400	1000	0.0468	400	1000	0.049
400	1000	0.0476	400	1000	0.0475
400	1000	0.0475	400	1000	0.0476
400	1000	0.0464	400	1000	0.0468
400	1000	0.0466	400	1000	0.0474
800	1000	0.0464	800	1000	0.0468
800	1000	0.0464	800	1000	0.0471
800	1000	0.0467	800	1000	0.0473
800	1000	0.0470	800	1000	0.0471
800	1000	0.0475	800	1000	0.0468
1600	1000	0.0470	1600	1000	0.0455

ตารางที่ ข.11 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 3 ขนาด 0-2.4 mm(ต่อ)

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
1600	1000	0.0468	1600	1000	0.0464
1600	1000	0.0459	1600	1000	0.0467
1600	1000	0.0458	1600	1000	0.0471
1600	1000	0.0469	1600	1000	0.0465
3200	1000	0.0471	3200	1000	0.0471
3200	1000	0.0475	3200	1000	0.0475
3200	1000	0.0472	3200	1000	0.0471
3200	1000	0.0470	3200	1000	0.0477
3200	1000	0.0466	3200	1000	0.0479
6400	1000	0.0477	6400	1000	0.0487
6400	1000	0.0481	6400	1000	0.0473
6400	1000	0.0470	6400	1000	0.0465
6400	1000	0.0470	6400	1000	0.0462
6400	1000	0.0458	6400	1000	0.048
12800	1000	0.0472	12800	1000	0.0471
12800	1000	0.0462	12800	1000	0.0465
12800	1000	0.0470	12800	1000	0.0464
12800	1000	0.0463	12800	1000	0.0459
12800	1000	0.0479	12800	1000	0.0459
25600	1000	0.0461	25600	1000	0.0469
25600	1000	0.0465	25600	1000	0.0466
25600	1000	0.0459	25600	1000	0.0468
25600	1000	0.0472	25600	1000	0.0469
25600	1000	0.0474	25600	1000	0.0461

ตารางที่ ข.12 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 3 ขนาด 5-7.5 mm

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
50	1000	0.0443	50	1000	0.043
50	1000	0.0466	50	1000	0.0458
50	1000	0.0471	50	1000	0.0465
50	1000	0.0478	50	1000	0.0467
50	1000	0.0473	50	1000	0.0466
100	1000	0.0465	100	1000	0.0463
100	1000	0.0465	100	1000	0.0467
100	1000	0.0467	100	1000	0.0465
100	1000	0.0464	100	1000	0.0467
100	1000	0.0462	100	1000	0.0476
200	1000	0.047	200	1000	0.0481
200	1000	0.0466	200	1000	0.0481
200	1000	0.0462	200	1000	0.0466
200	1000	0.0458	200	1000	0.0467
200	1000	0.047	200	1000	0.0472
400	1000	0.0471	400	1000	0.0474
400	1000	0.0473	400	1000	0.0471
400	1000	0.0471	400	1000	0.0473
400	1000	0.0469	400	1000	0.0466
400	1000	0.0457	400	1000	0.0463
800	1000	0.0465	800	1000	0.046
800	1000	0.047	800	1000	0.0466
800	1000	0.0478	800	1000	0.0467
800	1000	0.0477	800	1000	0.0471
800	1000	0.0474	800	1000	0.0467
1600	1000	0.0467	1600	1000	0.0465

ตารางที่ ข.12 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 3 ขนาด 5-7.5 mm(ต่อ)

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
1600	1000	0.0461	1600	1000	0.0468
1600	1000	0.0466	1600	1000	0.0467
1600	1000	0.0471	1600	1000	0.0469
1600	1000	0.047	1600	1000	0.0472
3200	1000	0.0481	3200	1000	0.0475
3200	1000	0.0463	3200	1000	0.0462
3200	1000	0.0451	3200	1000	0.0464
3200	1000	0.0465	3200	1000	0.0471
3200	1000	0.047	3200	1000	0.0469
6400	1000	0.0473	6400	1000	0.0477
6400	1000	0.0468	6400	1000	0.0467
6400	1000	0.0466	6400	1000	0.0464
6400	1000	0.0476	6400	1000	0.0465
6400	1000	0.0462	6400	1000	0.0464
12800	1000	0.0463	12800	1000	0.046
12800	1000	0.0472	12800	1000	0.047
12800	1000	0.0481	12800	1000	0.0479
12800	1000	0.0469	12800	1000	0.0468
12800	1000	0.046	12800	1000	0.0468
25600	1000	0.0472	25600	1000	0.0473
25600	1000	0.0471	25600	1000	0.0466
25600	1000	0.0478	25600	1000	0.0467
25600	1000	0.0473	25600	1000	0.0468
25600	1000	0.0477	25600	1000	0.047

ตารางที่ ข.13 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 3 ขนาด 10-13 mm

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
50	1000	0.0421	50	1000	0.0439
50	1000	0.0462	50	1000	0.0471
50	1000	0.0463	50	1000	0.047
50	1000	0.0472	50	1000	0.0476
50	1000	0.0467	50	1000	0.0475
100	1000	0.0465	100	1000	0.0492
100	1000	0.0466	100	1000	0.0476
100	1000	0.0465	100	1000	0.0473
100	1000	0.0475	100	1000	0.0468
100	1000	0.0476	100	1000	0.046
200	1000	0.0473	200	1000	0.046
200	1000	0.0471	200	1000	0.0456
200	1000	0.0465	200	1000	0.0458
200	1000	0.047	200	1000	0.0483
200	1000	0.0473	200	1000	0.0476
400	1000	0.0478	400	1000	0.0456
400	1000	0.0473	400	1000	0.0466
400	1000	0.0478	400	1000	0.0475
400	1000	0.0459	400	1000	0.0466
400	1000	0.0459	400	1000	0.0462
800	1000	0.0469	800	1000	0.0465
800	1000	0.0481	800	1000	0.0466
800	1000	0.0475	800	1000	0.0468
800	1000	0.0472	800	1000	0.0467
800	1000	0.0467	800	1000	0.046
1600	1000	0.0463	1600	1000	0.0481

ตารางที่ ข.13 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 3 ขนาด 10-13 mm(ต่อ)

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
1600	1000	0.0465	1600	1000	0.0468
1600	1000	0.0468	1600	1000	0.0471
1600	1000	0.047	1600	1000	0.0457
1600	1000	0.0463	1600	1000	0.0467
3200	1000	0.047	3200	1000	0.0455
3200	1000	0.0477	3200	1000	0.0488
3200	1000	0.0448	3200	1000	0.047
3200	1000	0.0458	3200	1000	0.0475
3200	1000	0.0479	3200	1000	0.0452
6400	1000	0.0487	6400	1000	0.0478
6400	1000	0.0458	6400	1000	0.0488
6400	1000	0.0459	6400	1000	0.0476
6400	1000	0.0471	6400	1000	0.0457
6400	1000	0.0478	6400	1000	0.0457
12800	1000	0.0453	12800	1000	0.0494
12800	1000	0.0468	12800	1000	0.0459
12800	1000	0.0476	12800	1000	0.0447
12800	1000	0.0474	12800	1000	0.0463
12800	1000	0.045	12800	1000	0.0485
25600	1000	0.0481	25600	1000	0.0492
25600	1000	0.0471	25600	1000	0.0453
25600	1000	0.0472	25600	1000	0.047
25600	1000	0.0472	25600	1000	0.049
25600	1000	0.0456	25600	1000	0.0488

ตารางที่ ข.14 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 3 ขนาด 15-17.5 mm

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
50	1000	0.0401	50	1000	0.0404
50	1000	0.0481	50	1000	0.0476
50	1000	0.0472	50	1000	0.0465
50	1000	0.0479	50	1000	0.0475
50	1000	0.0477	50	1000	0.0484
100	1000	0.0472	100	1000	0.0482
100	1000	0.0471	100	1000	0.0474
100	1000	0.0473	100	1000	0.0466
100	1000	0.0475	100	1000	0.047
100	1000	0.0475	100	1000	0.0478
200	1000	0.0472	200	1000	0.0471
200	1000	0.0456	200	1000	0.0471
200	1000	0.0468	200	1000	0.047
200	1000	0.0466	200	1000	0.046
200	1000	0.0466	200	1000	0.0465
400	1000	0.0455	400	1000	0.0451
400	1000	0.046	400	1000	0.0468
400	1000	0.045	400	1000	0.0474
400	1000	0.0451	400	1000	0.0458
400	1000	0.045	400	1000	0.0458
800	1000	0.0464	800	1000	0.0457
800	1000	0.047	800	1000	0.0459
800	1000	0.0466	800	1000	0.0471
800	1000	0.046	800	1000	0.0457
800	1000	0.0462	800	1000	0.0468
1600	1000	0.0465	1600	1000	0.0472

ตารางที่ ข.14 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 3 ขนาด 15-17.5 mm(ต่อ)

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
1600	1000	0.0473	1600	1000	0.0467
1600	1000	0.047	1600	1000	0.0474
1600	1000	0.047	1600	1000	0.0472
1600	1000	0.0475	1600	1000	0.0477
3200	1000	0.0468	3200	1000	0.0455
3200	1000	0.0467	3200	1000	0.0465
3200	1000	0.0474	3200	1000	0.0486
3200	1000	0.0481	3200	1000	0.047
3200	1000	0.0462	3200	1000	0.0453
6400	1000	0.0475	6400	1000	0.0479
6400	1000	0.0487	6400	1000	0.051
6400	1000	0.0488	6400	1000	0.046
6400	1000	0.0463	6400	1000	0.0442
6400	1000	0.0456	6400	1000	0.0447
12800	1000	0.0486	12800	1000	0.049
12800	1000	0.0456	12800	1000	0.0454
12800	1000	0.0452	12800	1000	0.0455
12800	1000	0.0459	12800	1000	0.0466
12800	1000	0.0486	12800	1000	0.0488
25600	1000	0.0465	25600	1000	0.0475
25600	1000	0.047	25600	1000	0.0458
25600	1000	0.0466	25600	1000	0.0463
25600	1000	0.0479	25600	1000	0.0514
25600	1000	0.0453	25600	1000	0.0455

ตารางที่ ข.15 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 3 ขนาด 20-22.5 mm

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
50	1000	0.0399	50	1000	0.0348
50	1000	0.0464	50	1000	0.0456
50	1000	0.0468	50	1000	0.0466
50	1000	0.0467	50	1000	0.0459
50	1000	0.0462	50	1000	0.0458
100	1000	0.0458	100	1000	0.0469
100	1000	0.0459	100	1000	0.0465
100	1000	0.0453	100	1000	0.0464
100	1000	0.0467	100	1000	0.0466
100	1000	0.0474	100	1000	0.0472
200	1000	0.0469	200	1000	0.0476
200	1000	0.0461	200	1000	0.0467
200	1000	0.0472	200	1000	0.0464
200	1000	0.0469	200	1000	0.0466
200	1000	0.0475	200	1000	0.0462
400	1000	0.0477	400	1000	0.0465
400	1000	0.0476	400	1000	0.0475
400	1000	0.0466	400	1000	0.0472
400	1000	0.0465	400	1000	0.0469
400	1000	0.0462	400	1000	0.047
800	1000	0.0448	800	1000	0.0471
800	1000	0.0473	800	1000	0.0487
800	1000	0.0468	800	1000	0.0482
800	1000	0.0472	800	1000	0.048
800	1000	0.0459	800	1000	0.0467
1600	1000	0.0465	1600	1000	0.046

ตารางที่ ข.15 การทดสอบมอเตอร์เพื่อหาความถี่ที่เหมาะสม ครั้งที่ 3 ขนาด 20-22.5 mm(ต่อ)

Frequency Forward	Step	LVDT Read	Frequency Backward	Step	LVDT Read
1600	1000	0.0468	1600	1000	0.0464
1600	1000	0.0468	1600	1000	0.0464
1600	1000	0.0473	1600	1000	0.0455
1600	1000	0.0477	1600	1000	0.0444
3200	1000	0.0461	3200	1000	0.0457
3200	1000	0.0459	3200	1000	0.0466
3200	1000	0.0467	3200	1000	0.047
3200	1000	0.0467	3200	1000	0.0459
3200	1000	0.0464	3200	1000	0.0448
6400	1000	0.0469	6400	1000	0.0479
6400	1000	0.0471	6400	1000	0.0482
6400	1000	0.047	6400	1000	0.0471
6400	1000	0.0456	6400	1000	0.0462
6400	1000	0.0462	6400	1000	0.0476
12800	1000	0.0481	12800	1000	0.0473
12800	1000	0.0474	12800	1000	0.0463
12800	1000	0.0448	12800	1000	0.0456
12800	1000	0.0453	12800	1000	0.047
12800	1000	0.047	12800	1000	0.0499
25600	1000	0.049	25600	1000	0.0457
25600	1000	0.0469	25600	1000	0.0474
25600	1000	0.0467	25600	1000	0.0492
25600	1000	0.0474	25600	1000	0.0491
25600	1000	0.0466	25600	1000	0.0471

ตารางที่ ข.16 แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 1 (ความถี่ 1.6 kHz, Forward)

Standard	Read	Error	Tick Wide
0.0000	-0.0001	0.0001	17.33
0.1000	0.0987	0.0013	16
0.2000	0.1985	0.0015	25
0.3000	0.2996	0.0004	17.33
0.4000	0.4013	-0.0013	21.67
0.5000	0.5014	-0.0014	25
0.6000	0.6012	-0.0012	20
0.7000	0.7011	-0.0011	22
0.8000	0.8013	-0.0013	17
0.9000	0.9010	-0.0010	23.67
1.0000	1.0010	-0.0010	22
1.1000	1.1005	-0.0005	19.67
1.2000	1.1999	0.0001	23.67
1.3000	1.2997	0.0003	19.33
1.4000	1.4003	-0.0003	20.67
1.5000	1.5002	-0.0002	25
1.6000	1.6015	-0.0015	22
1.7000	1.7030	-0.0030	25
1.8000	1.8024	-0.0024	20.33
1.9000	1.9008	-0.0008	22
2.0000	1.9998	0.0002	21.33
2.5000	2.5003	-0.0003	21
3.0000	2.9996	0.0004	18.67
3.5000	3.4998	0.0002	23
4.0000	4.0012	-0.0012	21.33
4.5000	4.4985	0.0015	24
5.0000	5.0001	-0.0001	23

ตารางที่ ข.16 แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 1 (ความถี่ 1.6 kHz, Forward)
(ต่อ)

Standard	Read	Error	Tick Wide
6.0000	6.0008	-0.0008	22
7.0000	7.0002	-0.0002	21
8.0000	8.0015	-0.0015	20.67
9.0000	8.9997	0.0003	22
10.0000	10.0001	-0.0001	20.33

ตารางที่ ข.17 แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 2 (ความถี่ 1.6 kHz, Backward)

Standard	Read	Error	Tick Wide
0.0000	-0.0002	0.0002	21.67
0.1000	0.0988	0.0012	16
0.2000	0.1989	0.0011	23.33
0.3000	0.2997	0.0003	22
0.4000	0.4008	-0.0008	21.67
0.5000	0.5014	-0.0014	16.67
0.6000	0.6016	-0.0016	17.67
0.7000	0.7011	-0.0011	21.33
0.8000	0.8018	-0.0018	18
0.9000	0.9015	-0.0015	19.67
1.0000	1.0014	-0.0014	17
1.1000	1.0998	0.0002	23.33
1.2000	1.1994	0.0006	25
1.3000	1.2989	0.0011	16.67
1.4000	1.3997	0.0003	22.33
1.5000	1.5011	-0.0011	20
1.6000	1.6030	-0.0030	22.33

ตารางที่ ข.17 แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 1 (ความถี่ 1.6 kHz, Backward)
(ต่อ)

Standard	Read	Error	Tick Wide
1.7000	1.7021	-0.0021	22
1.8000	1.8016	-0.0016	18
1.9000	1.9014	-0.0014	21.67
2.0000	1.9997	0.0003	20
2.5000	2.4999	0.0001	20
3.0000	2.9995	0.0005	21.33
3.5000	3.4997	0.0003	20
4.0000	4.001	-0.0010	21.67
4.5000	4.499	0.0010	21
5.0000	4.9988	0.0012	20.67
6.0000	6.0005	-0.0005	20.67
7.0000	7.0001	-0.0001	21.00
8.0000	8.0008	-0.0008	25.00
9.0000	8.9994	0.0006	20.67
10.0000	10.0001	-0.0001	20.33

ตารางที่ ข.18 แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 1 (ความถี่ 1.6 kHz, Repeat)

Standard	Read	Error	Tick Wide
0.1000	0.0993	0.0007	18.0000
0.1000	0.0993	0.0007	17.3300
0.1000	0.0994	0.0006	19.0000
0.1000	0.0992	0.0008	16.6700
0.1000	0.0993	0.0007	17.0000

ตารางที่ ข.19 แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 2 (ความถี่ 1.6 kHz, Forward)

Standard	Read	Error	Tick Wide
0.0000	0.0002	-0.0002	21
0.1000	0.0982	0.0018	19.67
0.2000	0.1975	0.0025	24.33
0.3000	0.2984	0.0016	23.33
0.4000	0.3998	0.0002	21
0.5000	0.5007	-0.0007	22.67
0.6000	0.6000	0.0000	19.33
0.7000	0.6993	0.0007	25
0.8000	0.7999	0.0001	18.33
0.9000	0.8994	0.0006	25
1.0000	1.0000	0.0000	20.67
1.1000	1.0995	0.0005	17.33
1.2000	1.1991	0.0009	23.67
1.3000	1.2992	0.0008	21.33
1.4000	1.3994	0.0006	24
1.5000	1.4995	0.0005	22
1.6000	1.6011	-0.0011	17.67
1.7000	1.7012	-0.0012	23.67
1.8000	1.8012	-0.0012	20.67
1.9000	1.9002	-0.0002	19.67
2.0000	1.9988	0.0012	21
2.5000	2.4999	0.0001	23
3.0000	2.9984	0.0016	21.33
3.5000	3.4990	0.0010	21
4.0000	3.9999	0.0001	24
4.5000	4.4984	0.0016	23
5.0000	4.9985	0.0015	21

ตารางที่ ข.19 แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 2 (ความถี่ 1.6 kHz, Forward)
(ต่อ)

Standard	Read	Error	Tick Wide
6.0000	6.0010	-0.0010	22
7.0000	7.0003	-0.0003	21
8.0000	8.0013	-0.0013	20.67
9.0000	8.9995	0.0005	22
10.0000	10.0002	-0.0002	20.33

ตารางที่ ข.20 แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 2 (ความถี่ 1.6 kHz, Backward)

Standard	Read	Error	Tick Wide
0.0000	-0.0002	0.0002	22.00
0.1000	0.0969	0.0031	21.00
0.2000	0.1980	0.0020	23.67
0.3000	0.2980	0.0020	19.33
0.4000	0.4003	-0.0003	22.33
0.5000	0.5006	-0.0006	21.33
0.6000	0.6005	-0.0005	18.00
0.7000	0.6997	0.0003	22.00
0.8000	0.8007	-0.0007	24.00
0.9000	0.9003	-0.0003	20.67
1.0000	1.0002	-0.0002	21.00
1.1000	1.1000	0.0000	17.33
1.2000	1.1994	0.0006	24.00
1.3000	1.2984	0.0016	22.33
1.4000	1.3991	0.0009	22.67
1.5000	1.4996	0.0004	22.00

ตารางที่ ข.20 แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 2 (ความถี่ 1.6 kHz, Backward)
(ต่อ)

Standard	Read	Error	Tick Wide
1.6000	1.6005	-0.0005	20.00
1.7000	1.7011	-0.0011	25.00
1.8000	1.8001	-0.0001	19.67
1.9000	1.8997	0.0003	20.33
2.0000	1.9996	0.0004	23.33
2.5000	2.4998	0.0002	23.33
3.0000	2.9980	0.0020	22.00
3.5000	3.4998	0.0002	23.00
4.0000	3.9991	0.0009	23.33
4.5000	4.4988	0.0012	25.00
5.0000	4.9980	0.0020	22.00
6.0000	6.0005	-0.0005	20.67
7.0000	7.0000	0.0000	21.00
8.0000	8.0006	-0.0006	25.00
9.0000	8.9994	0.0006	20.67
10.0000	10.0002	-0.0002	20.33

ตารางที่ ข.21 แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 2 (ความถี่ 1.6 kHz, Repeat)

Standard	Read	Error	Tick Wide
0.1000	0.0992	0.0008	16.33
0.1000	0.0992	0.0008	16.00
0.1000	0.0993	0.0007	18.00
0.1000	0.0994	0.0006	18.33
0.1000	0.0993	0.0007	18.67

ตารางที่ ข.22 แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 3 (ความถี่ 1.6 kHz, Forward)

Standard	Read	Error	Tick Wide
0.0000	0.0000	0.0000	22.00
0.1000	0.0991	0.0009	16.33
0.2000	0.1996	0.0004	23.00
0.3000	0.2999	0.0001	17.67
0.4000	0.4011	-0.0011	22.00
0.5000	0.5009	-0.0009	21.67
0.6000	0.6007	-0.0007	16.67
0.7000	0.7015	-0.0015	25.00
0.8000	0.8005	-0.0005	21.67
0.9000	0.9017	-0.0017	22.67
1.0000	1.0016	-0.0016	23.33
1.1000	1.1012	-0.0012	15.67
1.2000	1.2007	-0.0007	22.67
1.3000	1.3001	-0.0001	20.67
1.4000	1.4001	-0.0001	23.00
1.5000	1.5011	-0.0011	21.00
1.6000	1.6031	-0.0031	17.33
1.7000	1.7030	-0.0030	23.67
1.8000	1.8011	-0.0011	23.67
1.9000	1.9008	-0.0008	24.33
2.0000	1.9999	0.0001	25.00
2.5000	2.5006	-0.0006	21.00
3.0000	2.9996	0.0004	21.33
3.5000	3.5011	-0.0011	21.33
4.0000	4.0009	-0.0009	20.00
4.5000	4.4994	0.0006	21.33
5.0000	5.0001	-0.0001	25.00

ตารางที่ ข.22 แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 3 (ความถี่ 1.6 kHz, Forward)
(ต่อ)

Standard	Read	Error	Tick Wide
6.0000	6.0018	-0.0018	19.33
7.0000	7.0014	-0.0014	22.33
8.0000	8.0023	-0.0023	21.33
9.0000	9.0016	-0.0016	22.00
10.0000	10.0017	-0.0017	21.33

ตารางที่ ข.23 แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 3 (ความถี่ 1.6 kHz, Backward)

Standard	Read	Error	Tick Wide
0.0000	-0.0005	0.0005	22.00
0.1000	0.0988	0.0012	17.00
0.2000	0.1997	0.0003	23.67
0.3000	0.2998	0.0002	20.67
0.4000	0.4009	-0.0009	23.33
0.5000	0.5008	-0.0008	22.00
0.6000	0.6005	-0.0005	18.33
0.7000	0.7013	-0.0013	23.67
0.8000	0.8004	-0.0004	25.00
0.9000	0.9015	-0.0015	19.67
1.0000	1.0013	-0.0013	21.00
1.1000	1.1002	-0.0002	20.33
1.2000	1.2005	-0.0005	24.00
1.3000	1.2996	0.0004	18.33
1.4000	1.3998	0.0002	23.33
1.5000	1.5008	-0.0008	23.67

ตารางที่ ข.23 แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 3 (ความถี่ 1.6 kHz, Backward)
(ต่อ)

Standard	Read	Error	Tick Wide
1.6000	1.6031	-0.0031	23.00
1.7000	1.7024	-0.0024	24.33
1.8000	1.8018	-0.0018	18.00
1.9000	1.9009	-0.0009	20.33
2.0000	2.0000	0.0000	20.00
2.5000	2.5000	0.0000	23.67
3.0000	2.9995	0.0005	23.00
3.5000	3.5002	-0.0002	24.67
4.0000	4.0006	-0.0006	20.67
4.5000	4.4997	0.0003	21.67
5.0000	4.9997	0.0003	24.00
6.0000	6.0020	-0.0020	21.00
7.0000	7.0006	-0.0006	25.00
8.0000	8.0027	-0.0027	21.00
9.0000	9.0008	-0.0008	20.67
10.0000	10.0017	-0.0017	21.33

ตารางที่ ข.24 แสดงผลการทดลองและขนาดของเข็มทับเส้นครั้งที่ 3 (ความถี่ 1.6 kHz, Repeat)

Standard	Read	Error	Tick Wide
0.1000	0.0991	0.0009	16.67
0.1000	0.0990	0.0010	17.33
0.1000	0.0991	0.0009	17.67
0.1000	0.0990	0.0010	17.33
0.1000	0.0990	0.0010	17.33

ตารางที่ ข.25 เปรียบเทียบผล En Ratio ครั้งที่ 1

ค่าที่อ่าน ได้(mm) UUC	Uncertainty (mm) UUC	ค่าที่อ่านได้(mm) UUR	Uncertainty (mm) UUR	En Ratio
-0.0001	0.0017	-0.00026	0.0015	0.0715
0.0987	0.0017	0.09911	0.0015	0.1822
0.1985	0.0017	0.19861	0.0015	0.0498
0.2996	0.0017	0.29980	0.0015	0.0887
0.4013	0.0017	0.40037	0.0015	0.4120
0.5014	0.0017	0.50118	0.0015	0.0979
0.6012	0.0017	0.60102	0.0015	0.0785
0.7011	0.0017	0.70049	0.0015	0.2686
0.8013	0.0017	0.80112	0.0015	0.0812
0.9010	0.0017	0.90090	0.0015	0.0454
1.0010	0.0017	1.00109	0.0015	0.0375
1.1005	0.0017	1.10134	0.0015	0.3683
1.1999	0.0017	1.20130	0.0015	0.6188
1.2997	0.0017	1.30124	0.0015	0.6797
1.4003	0.0017	1.40043	0.0015	0.0565
1.5002	0.0017	1.50071	0.0015	0.2250
1.6015	0.0017	1.60130	0.0015	0.0869
1.7030	0.0017	1.70196	0.0015	0.4587
1.8024	0.0017	1.80227	0.0015	0.0565
1.9008	0.0017	1.90140	0.0015	0.2633
1.9998	0.0017	2.00027	0.0015	0.2082
2.5003	0.0017	2.50130	0.0015	0.4424
2.9996	0.0017	2.99986	0.0015	0.1160
3.4998	0.0017	3.50055	0.0015	0.3321
4.0012	0.0017	4.00115	0.0015	0.0234

ตารางที่ ข.25 เปรียบเทียบผล En Ratio ครั้งที่ 1(ต่อ)

ค่าที่อ่าน ได้(mm) UUC	Uncertainty (mm) UUC	ค่าที่อ่านได้(mm) UUR	Uncertainty (mm) UUR	En Ratio
4.4985	0.0017	4.49961	0.0015	0.4909
5.0001	0.0017	5.00001	0.0015	0.0397
6.0008	0.0017	6.00121	0.0015	0.1808
7.0002	0.0017	7.00140	0.0015	0.5280
8.0015	0.0017	8.00259	0.0015	0.4786
8.9997	0.0017	9.00140	0.0015	0.7485
10.0001	0.0017	10.00202	0.0015	0.8478

ตารางที่ ข.26 เปรียบเทียบผล En Ratio ครั้งที่ 2

ค่าที่อ่าน ได้(mm) UUC	Uncertainty (mm) UUC	ค่าที่อ่านได้(mm) UUR	Uncertainty (mm) UUR	En Ratio
0.0002	0.0017	-0.00026	0.0015	0.2038
0.0982	0.0017	0.09911	0.0015	0.4027
0.1975	0.0017	0.19861	0.0015	0.4909
0.2984	0.0017	0.29980	0.0015	0.6180
0.3998	0.0017	0.40037	0.0015	0.2497
0.5007	0.0017	0.50118	0.0015	0.2108
0.6000	0.0017	0.60102	0.0015	0.4508
0.6993	0.0017	0.70049	0.0015	0.5253
0.7999	0.0017	0.80112	0.0015	0.5364
0.8994	0.0017	0.90090	0.0015	0.6603
1.0000	0.0017	1.00109	0.0015	0.4786
1.0995	0.0017	1.10134	0.0015	0.8094
1.1991	0.0017	1.20130	0.0015	0.9717

ตารางที่ ข.26 เปรียบเทียบผล En Ratio ครั้งที่ 2(ต่อ)

ค่าที่อ่าน ได้(mm) UUC	Uncertainty (mm) UUC	ค่าที่อ่านได้(mm) UUR	Uncertainty (mm) UUR	En Ratio
1.2992	0.0017	1.30124	0.0015	0.9002
1.3994	0.0017	1.40043	0.0015	0.4534
1.4995	0.0017	1.50071	0.0015	0.5337
1.6011	0.0017	1.60130	0.0015	0.0895
1.7012	0.0017	1.70196	0.0015	0.3352
1.8012	0.0017	1.80227	0.0015	0.4552
1.9002	0.0017	1.90140	0.0015	0.5280
1.9988	0.0017	2.00027	0.0015	0.6493
2.4999	0.0017	2.50130	0.0015	0.6188
2.9984	0.0017	2.99986	0.0015	0.6453
3.4990	0.0017	3.50055	0.0015	0.6850
3.9999	0.0017	4.00115	0.0015	0.5500
4.4984	0.0017	4.49961	0.0015	0.5350
4.9985	0.0017	5.00001	0.0015	0.6660
6.0010	0.0017	6.00121	0.0015	0.0926
7.0003	0.0017	7.00140	0.0015	0.4839
8.0013	0.0017	8.00259	0.0015	0.5668
8.9995	0.0017	9.00140	0.0015	0.8367
10.0002	0.0017	10.00202	0.0015	0.8036

ตารางที่ ข.27 เปรียบเทียบผล En Ratio ครั้งที่ 3

ค่าที่อ่าน ได้(mm) UUC	Uncertainty (mm) UUC	ค่าที่อ่านได้(mm) UUR	Uncertainty (mm) UUR	En Ratio
-0.0002	0.0017	-0.00026	0.0015	0.0494
0.0991	0.0017	0.09911	0.0015	0.0057
0.1996	0.0017	0.19861	0.0015	0.4353
0.2999	0.0017	0.29980	0.0015	0.0437
0.4011	0.0017	0.40037	0.0015	0.3238
0.5009	0.0017	0.50118	0.0015	0.1226
0.6007	0.0017	0.60102	0.0015	0.1420
0.7015	0.0017	0.70049	0.0015	0.4451
0.8005	0.0017	0.80112	0.0015	0.2717
0.9017	0.0017	0.90090	0.0015	0.3542
1.0016	0.0017	1.00109	0.0015	0.2272
1.1012	0.0017	1.10134	0.0015	0.0595
1.2007	0.0017	1.20130	0.0015	0.2660
1.3001	0.0017	1.30124	0.0015	0.5033
1.4001	0.0017	1.40043	0.0015	0.1447
1.5011	0.0017	1.50071	0.0015	0.1720
1.6031	0.0017	1.60130	0.0015	0.7926
1.7030	0.0017	1.70196	0.0015	0.4587
1.8011	0.0017	1.80227	0.0015	0.5169
1.9008	0.0017	1.90140	0.0015	0.2633
1.9999	0.0017	2.00027	0.0015	0.1641
2.5006	0.0017	2.50130	0.0015	0.3101
2.9996	0.0017	2.99986	0.0015	0.1160
3.5011	0.0017	3.50055	0.0015	0.2413
4.0009	0.0017	4.00115	0.0015	0.1089

ตารางที่ ข.27 เปรียบเทียบผล En Ratio ครั้งที่ 3(ต่อ)

ค่าที่อ่าน ได้(mm) UUC	Uncertainty (mm) UUC	ค่าที่อ่านได้(mm) UUR	Uncertainty (mm) UUR	En Ratio
4.4994	0.0017	4.49961	0.0015	0.0940
5.0001	0.0017	5.00001	0.0015	0.0397
6.0018	0.0017	6.00121	0.0015	0.2602
7.0014	0.0017	7.00140	0.0015	0.0013
8.0023	0.0017	8.00259	0.0015	0.1257
9.0016	0.0017	9.00140	0.0015	0.0895
10.0017	0.0017	10.00202	0.0015	0.1420