

ระบบการสอบเทียบโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์

นายวัชรินทร์ สามิตร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชามาตรวิทยา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2555
บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

ROTARY ENCODER CALIBRATION SYSTEM

Mr. Watcharin Samit

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Metrological Science
Faculty of Science Chulalongkorn University
Academic Year 2012
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

โดย

สาขาวิชา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ระบบการสอบเทียบโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์

นายวัชรินทร์ สามิตร

มาตรวิทยา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ ทารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขจรยศ อยู่ดี)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัฐชาติ มงคลนาวิน)

.....กรรมการ(ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอก)
(ดร. เกษญา วัชรระนุกุล)

วัชรินทร์ สามิตร : ระบบการสอบเทียบโรตารีเอ็นโค้ดเดอร์ (ROTARY ENCODER CALIBRATION SYSTEM) อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา, 93 หน้า

Rotary Encoder เป็นเครื่องมือวัดมุมที่มีการใช้อย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคอุตสาหกรรมเช่น เครื่องพิมพ์, เครื่องจักร, CNC, กล้องสำรวจและ Servo Motor เป็นต้น ปัจจุบันประเทศไทยยังไม่ระบบสอบเทียบ Rotary Encoder ที่มีความน่าเชื่อถือในด้านมาตรวิทยา เนื่องจากยังไม่มีระบบที่ได้รับการรับรอง ด้วยความต้องการที่จะแก้ปัญหาดังกล่าว วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการสร้างระบบสอบเทียบ Rotary Encoder ซึ่งใช้หลักการ Equal-Division-Averaged (EDA Method) ที่คิดค้นโดย Dr. Tsukasa Watanabe แห่งสถาบันมาตรวิทยาประเทศญี่ปุ่น การวิจัยนี้มุ่งที่จะพัฒนาให้ระบบสอบเทียบ Rotary Encoder ให้มีศักยภาพที่เหมาะสมกับการใช้งานสอบเทียบเครื่องมือวัดทางด้านมุมที่มีความเที่ยงตรงและแม่นยำสูงของประเทศ และเพื่อถ่ายทอดความถูกต้องทางด้านมาตรวิทยากับภาคอุตสาหกรรมและประชาชนทั่วไป ระบบสอบเทียบนี้มีการประเมินค่าความไม่แน่นอนของตัวระบบเองน้อยกว่า 0.2" (arc second) สามารถวัดได้ทั้งแกนตั้งและแกนนอน มีน้ำหนักเพียง 30 กิโลกรัมและขนาดที่สามารถยกได้ด้วยคนเพียง 1-2 คน เพื่อเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างแกนตั้งกับแกนนอนได้ นอกจากนี้ระบบสอบเทียบ Rotary Encoder ยังสามารถสอบเทียบตัวเองได้อีกด้วย จึงไม่ต้องส่งสอบเทียบไปยังต่างประเทศอีกต่อไป ทำให้ประหยัดทั้งเวลาและค่าใช้จ่าย ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอธิบายถึงหลักการ ส่วนประกอบ และการทำงาน แล้วนำระบบเครื่องสอบเทียบที่สร้างเสร็จแล้วไปตรวจสอบกับเครื่องมือวัดทางด้านมุมอันได้แก่ Rotary Encoder, Autocollimator, Polygon Mirror และ Electronic Level ซึ่งได้ผลของค่า EN RATIO น้อยกว่า 1

สาขาวิชา.....มาตรวิทยา.....ลายมือชื่อนิสิต.....
ปีการศึกษา.....2555.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

##5272527923: MAJOR METROLOGICAL SCIENCE

KEYWORDS: Rotary Encoder/Angle Measurement/Self Calibration

WATCHARIN SAMIT : ROTARY ENCODER CALIBRATION SYSTEM. ADVISOR : ASST.
PROF. TONPHONG KAEWKONGKA, Ph.D., 93 pp.

Rotary encoder is an angle measuring instrument which is widely used in various instruments and machines especially in the industrial sector such as printers, CNC machines, theodolites and servo motors. At the moment, there is no accredited calibration system for rotary encoder in Thailand. The rotary encoder calibration system is developed to accredited calibration capability in Thailand. The measurement principle of a rotary encoder is based on the Equal-Division-Averaged (EDA) Method which was invented by Dr. Tsukasa Watanabe, National Institute Metrology of Japan. This thesis objective is to develop rotary encoder calibration system to have suitable performance for accurate and precise angle calibration in Thailand and to transfer measurement values to industrial and public sector. The system provides the uncertainty of measurement less than $0.2''$ (arc second). The system can be used in vertical and horizontal axis. With 30 kilogram weight, this calibration unit is the portable system and can be carried by one man for swapping between both axes. Moreover, the system can be self-calibrated so that there is no need to perform calibration aboard; hence this can save a lot of time and budget. This thesis will include the principle, the configuration and the operation process. The system was used to calibrate several instruments such as Rotary Encoder, Autocollimator, Polygon Mirror and Electronic Level. The measurement results show the system good performance and the EN RATIO is less than 1.

Field of Study : Metrological Science Student' s Signature :

Academic Year : 2012 Advisor' s Signature :

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จของการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ถ้าปราศจากความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่านดังต่อไปนี้

อาจารย์ที่ปรึกษา ผ.ศ. ดร.ต้นพงศ์ แก้วคงคา ผู้ให้โอกาสทำงานวิจัย

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย

ผ.ศ. ดร. ขจรยศ อยู่ดี ผ.ศ. ดร. รัฐชาติ มงคลนาวิน และ ดร.เกษญา วัชรานุกุล

Dr. Tsukasa Wayanabe ผู้คิดค้นระบบสอบเทียบที่ใช้เป็นต้นแบบและความช่วยเหลือต่างๆ

สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ที่ให้โอกาสใช้ช่วงเวลาส่วนหนึ่งของการทำงานในการทำวิจัย

เพื่อน ดร.ดุสิต งามรุ่งโรจน์ และ ดร.กัญจน์ชญา หงส์เลิศคงสกุล

พ่อ แม่ และ ภรรยาผู้ให้กำลังใจมาโดยตลอด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 ระบบสอบกลับได้ของ Rotary Encoder.....	3
1.3 การประยุกต์ใช้งาน Rotary Encoder.....	4
1.4 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.5 ผลการศึกษาระบบ Self-calibration Rotary Encoder.....	7
1.6 ขอบเขตของการวิจัย.....	10
บทที่ 2 ปรัชญาวรรณกรรม.....	11
2.1 ประวัติความเป็นมาของการสอบเทียบ Rotary Encoder.....	11
2.2 ข้อเสนอในการพัฒนาระบบสอบเทียบ Rotary Encoder.....	15
บทที่ 3 หลักการและทฤษฎี.....	16
3.1 ความเป็นมาของการวัดมุม.....	16
3.2 เครื่องมือวัดมุมในสมัยปัจจุบัน.....	18
3.3 ทำไมต้องเป็น Rotary Encoder.....	18
3.4 องค์ประกอบของ Rotary Encoder.....	18
3.5 ความคลาดเคลื่อนของ Rotary Encoder.....	19
3.6 วิธีการทำงานของหัวอ่าน.....	20
3.7 Cross Calibration.....	22
3.8 Cross Calibration by Rotary Encoder.....	25
3.9 Equal-Division-Averaged Method (EDA).....	29

	หน้า
3.10 หลักการ n^{th} integral multiple Fourier component ของ EDA method...	33
3.11 สาเหตุการเกิด n^{th} integral multiple Fourier component.....	34
3.12 Self Calibration Rotary Encoder.....	35
3.13 Multi-Combination Method.....	36
บทที่ 4 ระบบสอบเทียบ Rotary Encoder.....	38
4.1 การออกแบบระบบสอบเทียบเครื่อง Rotary Encoder.....	39
4.2 ส่วนประกอบสำคัญของระบบเครื่องสอบเทียบ Rotary Encoder.....	40
4.3 การติดตั้งงานสเกลบนแกนระบบ.....	44
4.4 ความเยื้องศูนย์ Eccentric Error.....	45
4.5 Optical Alignment.....	47
4.6 Electronic Alignment.....	50
4.7 Scale and Reading Head Alignment.....	54
บทที่ 5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล.....	56
5.1 การสอบเทียบ Internal Rotary Encoder ของระบบ SelfA.....	57
5.2 การตรวจสอบความแม่นยำของระบบเมื่อใช้งานช่วง 360°	68
5.3 การตรวจสอบความแม่นยำของระบบเมื่อใช้งานที่มีความละเอียดสูง.....	72
5.4 การใช้งานในแกนนอน ที่มีช่วงการวัดกว้างและมีความละเอียดต่ำ.....	76
5.5 การใช้งานในแกนตั้ง ที่มีช่วงการวัดแคบและมีความละเอียดสูง.....	80
5.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	83
บทที่ 6 บทสรุป.....	88
6.1 สรุปผลการเปรียบเทียบ.....	88
6.2 ความสำเร็จของจุดประสงค์จากการสร้างระบบสอบเทียบ Rotary Encoder.....	89
6.3 ข้อเสนอแนะ.....	90
รายการอ้างอิง.....	91
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	93

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1	เปรียบเทียบอุปกรณ์ทางการวัดมุมที่มีความเที่ยงตรงสูง..... 2
ตารางที่ 1.2	ผลการเปรียบเทียบการวัดแบบ 5, 7, 11 กับ 13 Division..... 9
ตารางที่ 1.2	แสดงผลการเปรียบเทียบจำนวน interpolator ที่จะนำมาใช้งาน..... 10
ตารางที่ 2.1	สรุปผลงานวิจัยเรื่อง ระบบสอบเทียบ Rotary Encoder Calibration System ... 14
ตารางที่ 3.1	ปริมาณพื้นฐานทางการวัด..... 17
ตารางที่ 3.2	วิธีการคำนวณความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบ Polygon Mirror by one Autocollimator..... 23
ตารางที่ 3.3	วิธีการคำนวณความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบ Polygon Mirror by two Autocollimators..... 24
ตารางที่ 5.1	แหล่งความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบ SelfA..... 67
ตารางที่ 5.2	แหล่งความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ External Rotary Encoder..... 71
ตารางที่ 5.3	ผลการวัดเปรียบเทียบ Autocollimator: ELCOMAT 2000 (X axis)..... 74
ตารางที่ 5.4	แหล่งความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ Elcomat2000..... 75
ตารางที่ 5.5	ผลการวัดเปรียบเทียบ Polygon mirror..... 78
ตารางที่ 5.6	แหล่งความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ Polygon mirror..... 79
ตารางที่ 5.7	ผลการวัดเปรียบเทียบ Electronic Level..... 81
ตารางที่ 5.8	แหล่งความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ Electronic Level..... 82
ตารางที่ 6.1	สรุปผลการเปรียบเทียบผลวัดเครื่องมือทางด้านมุมด้วยระบบSelfA..... 88

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 อุปกรณ์ทางด้านการวัดมุมที่มีความเที่ยงตรงสูงเรียงจากซ้ายไปขวา.....	2
รูปที่ 1.2 ระบบการสอบกลับได้ของ Rotary Encoder.....	3
รูปที่ 1.3 การควบคุมตำแหน่งของสายพาน.....	4
รูปที่ 1.4 การควบคุมตำแหน่งของแท่นเครื่อง.....	4
รูปที่ 1.5 การควบคุมตำแหน่งของแขนกล.....	4
รูปที่ 1.6 การควบคุมตำแหน่งของเครน.....	4
รูปที่ 1.7 การควบคุมตำแหน่งของเครื่องจักร.....	4
รูปที่ 1.8 การควบคุมระยะการตัดชิ้นงาน.....	4
รูปที่ 1.9 การสอบกลับได้ของการวัดมุม.....	5
รูปที่ 1.10 ระบบสอบเทียบ Self-calibration Rotary Encoder (NIMT-DMA1/07).....	7
รูปที่ 1.11 ผลการวัด internal encoder calibration system ที่ 5, 7, 11, 13 Division.....	8
รูปที่ 1.12 ผลการเปรียบเทียบการวัดแบบ 5, 7, 11 กับ 13 Division.....	8
รูปที่ 1.13 Interpolation Error ของ 5 Scale Pitch.....	10
รูปที่ 2.1 แผนผังความเป็นมาของการวิจัยเรื่องการสอบเทียบ Rotary Encoder.....	13
รูปที่ 3.1 องค์ประกอบและการทำงานพื้นฐานของ Rotary Encoder.....	19
รูปที่ 3.2 ความคลาดเคลื่อนของ Rotary Encoder.....	19
รูปที่ 3.3 Image Scanning Principle.....	20
รูปที่ 3.4 Interferential Scanning Principle.....	21
รูปที่ 3.5 การสอบเทียบ Polygon Mirror by one Autocollimator.....	22
รูปที่ 3.6 การสอบเทียบ Polygon Mirror by two Autocollimators.....	24
รูปที่ 3.7 Cross Calibration Rotary Encoder b_1 vs Encoder A.....	27
รูปที่ 3.8 Cross Calibration Rotary Encoder b_2 vs Encoder A.....	27
รูปที่ 3.9 Cross Calibration Rotary Encoder C vs Encoder D.....	28
รูปที่ 3.10 ระบบสอบเทียบ EDA.....	29
รูปที่ 3.11 หลักการทำงานของ EDA.....	30
รูปที่ 3.12 ตำแหน่งหัวอ่าน (Sensor) บนจานสเกลของระบบ EDA.....	31
รูปที่ 3.13 ตัวอย่างผลการวัดจากระบบ EDA แบบ 5 Sensors.....	33
รูปที่ 3.14 Fourier Component จากผลการวัดด้วยระบบ EDA แบบ 5 Sensors.....	33
รูปที่ 3.15 ระบบสอบเทียบ Self Calibration Rotary Encoder.....	35
รูปที่ 3.16 ตำแหน่งหัวอ่าน (Sensor) บนจานสเกลของระบบ Self Calibration Rotary Encoder.....	36
รูปที่ 3.17 วิธีการคำนวณแบบ Multi-Combination Method.....	37
รูปที่ 4.1 แผนการประกอบระบบสอบเทียบ Rotary Encoder.....	39

	หน้า
รูปที่ 4.2 ระบบสอบเทียบ Rotary Encoder.....	39
รูปที่ 4.3 ภาพตัดขวางระบบหลัก Rotary Encoder.....	40
รูปที่ 4.4 จานสเกล (Scale Disc).....	40
รูปที่ 4.5 หัวอ่าน SMD-01.....	41
รูปที่ 4.6 มิติของ SMD-01.....	41
รูปที่ 4.7 องค์ประกอบและการทำงานของหัวอ่าน SMD-01.....	42
รูปที่ 4.8 Canon Air Bearing: AB-80RV.....	42
รูปที่ 4.9 Direct Drive Motor.....	43
รูปที่ 4.10 ประกอบจานสเกลลงบน Motor.....	43
รูปที่ 4.11 Filter Regulator.....	43
รูปที่ 4.12 ส่วนประกอบในการติดตั้งจานสเกล (Grating).....	44
รูปที่ 4.13 Eccentric Error ความเยื้องศูนย์.....	45
รูปที่ 4.14 มุมที่คลาดเคลื่อนเนื่องจากความเยื้องศูนย์.....	45
รูปที่ 4.15 การติดตั้งกล้อง CCD เพื่อทำ Optical Alignment.....	47
รูปที่ 4.16 การติดตั้งจานสเกลบน Hub.....	48
รูปที่ 4.17 รูปแสดงการแกว่งของขอบสเกลที่ตำแหน่งมุมต่างๆ.....	49
รูปที่ 4.18 รูปแสดงการ Alignment อย่างสมบูรณ์มี eccentric error เป็นศูนย์.....	49
รูปที่ 4.19 ความหนาของขีดหรือความกว้างของช่องสเกล.....	49
รูปที่ 4.20 วิธีติดตั้งหัวอ่าน 2 หัวสำหรับ Electrical Alignment.....	50
รูปที่ 4.21 วิธีติดตั้งสำหรับ Electrical Alignment.....	52
รูปที่ 4.22 ภาพจาก Oscilloscope เมื่อ ทำการ Alignment ได้ 1/2 fringe.....	53
รูปที่ 4.23 ภาพจาก Oscilloscope เมื่อ ทำการ Alignment ได้ 1/5 fringe.....	54
รูปที่ 4.24 ตำแหน่งในการติดตั้ง Sensor บนแถบสเกล.....	54
รูปที่ 4.25 ตำแหน่งหัวอ่านหรือ Sensor สองชุดบนแถบสเกล.....	55
รูปที่ 4.26 ตำแหน่ง Sensor เมื่อติดตั้งและเชื่อมต่อสายสัญญาณแล้ว.....	55
รูปที่ 5.1 ผลการสอบเทียบ SelfA.....	58
รูปที่ 5.2 Fourier component ของ SelfA-4, M^{-4}	59
รูปที่ 5.3 Fourier component ของ SelfA-7, M^{-7}	59
รูปที่ 5.4 SelfA-7 shift phase 4 ครั้งแล้วเฉลี่ย.....	60
รูปที่ 5.5 Fourier component ของ ค่าเฉลี่ย SelfA-7x4s, $M^{-7} \times 4s$	60
รูปที่ 5.6 Fourier component ของ Multi-combination M-4 กับ M-7x4s.....	61
รูปที่ 5.7 Multi-combination M^{-4} กับ $M^{-7} \times 4s$	61
รูปที่ 5.8 SelfA-4 shift phase 7 ครั้งแล้วเฉลี่ย.....	62
รูปที่ 5.9 Fourier component ของ ค่าเฉลี่ย SelfA-4x7s, $M^{-4} \times 7s$	62
รูปที่ 5.10 Fourier component ของ Multi-combination M^{-7} กับ $M^{-4} \times 7s$	63

	หน้า
รูปที่ 5.11 Multi-combination M ⁻⁷ กับ M ⁻⁴ x7s.....	63
รูปที่ 5.12 เปรียบเทียบผลการวัดระหว่าง SelfA 4, SelfA 7 และ SelfA 28 กับ SelfA All.....	64
รูปที่ 5.13 วิธีการปรับความเยื้องศูนย์กลางของ Adaptor โดยใช้ Dial Test Indicator.....	68
รูปที่ 5.14 การสอบเทียบ RON905.....	69
รูปที่ 5.15 ผลการสอบเทียบ RON905ระหว่าง NIMT กับ AIST.....	70
รูปที่ 5.16 ผลความแตกต่างในการสอบเทียบ RON905ระหว่าง NIMT กับ AIST.....	70
รูปที่ 5.17 ELCOMAT 2000.....	72
รูปที่ 5.18 หลักการทำงานของ ELCOMAT 2000.....	73
รูปที่ 5.19 การวัด Autocollimator: ELCOMAT 2000 (X axis) ด้วย SelfA.....	73
รูปที่ 5.20 ผลการวัดเปรียบเทียบ Autocollimator: ELCOMAT 2000 (X axis).....	74
รูปที่ 5.21 Polygon mirror 12 หน้า.....	76
รูปที่ 5.22 การวัด Polygon mirror ด้วย SelfA.....	77
รูปที่ 5.23 ผลการวัด Polygon mirror ด้วย SelfA เทียบกับ Indexing Table.....	77
รูปที่ 5.24 Levelnic DL-S3.....	80
รูปที่ 5.25 การวัด Levelnic ด้วย SelfA.....	80
รูปที่ 5.26 ผลการวัด Levelnic ด้วย SelfA เทียบกับ Autocollimator Elcomat2000.....	81
รูปที่ 5.27 ผลการสอบเทียบตัวเองของระบบ SelfA.....	83
รูปที่ 5.28 ภาพด้านล่างของ Rotary Encoder: RON905.....	84
รูปที่ 5.29 ภาพด้านบนของ RON905.....	84
รูปที่ 5.30 ภาพด้านข้างของ RON905.....	84
รูปที่ 5.31 ผลการสอบเทียบ External Rotary Encoder ที่ตำแหน่งการติดตั้งต่างๆ.....	85
รูปที่ 5.32 ผลการสอบเทียบ Autocollimator ที่ตำแหน่งการติดตั้งต่างๆ.....	85
รูปที่ 5.33 ผลการสอบเทียบ Polygon Mirror ที่ตำแหน่งการติดตั้งต่างๆ.....	86
รูปที่ 5.34 SelfA 5x6.....	87
รูปที่ 5.35 SelfA 4x7.....	87

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

"	Arc Second
NIMT	National Institute of Metrology (Thailand)
NMIJ	National Metrology Institute of Japan
AIST	Advance Institute of Science and Technology
ISO	International Organization for Standardization
SI	International System of Units
EDA	Equal Division Average
θ_s	ความคลาดเคลื่อนของ SelfA
θ_x	ค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือที่ถูกสอบเทียบด้วย SelfA
$\Delta\theta$	ค่าความเบี่ยงเบนของข้อมูลจากการวัดซ้ำ (Repeatability)
θ_{is}	ความละเอียดของการอ่านค่าจาก External counter ของ SelfA
θ_{ix}	ความละเอียดของการอ่านค่าจากเครื่องมือที่ถูกสอบเทียบด้วย SelfA
$\theta_{counter}$	ความไม่เสถียรของ external counter
$\theta_{rotation}$	ความไม่คงที่ของความเร็วในการหมุน
θ_{sensor}	ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการวัดของหัววัด
θ_{pitch}	ความคลาดเคลื่อนของการแบ่งช่องสเกล
θ_{gap}	ความเยื้องศูนย์ในการติดตั้ง External Rotary Encoder
N_c	ความถี่ของ External Counter
T_r	คาบ หรือ ระยะเวลาที่ใช้ในการหมุนหนึ่งรอบ
R_c	ความไม่เสถียรของ Quartz Oscillator (ppm)
N	จำนวนช่องสเกลในหนึ่งรอบ
$u(x_i)$	Standard Uncertainty
c_i	Sensitivity Coefficient
$u_i(y)$	Contribution Uncertainty
u_c	Combine Uncertainty
U_x	Expanded Uncertainty
\mathcal{E}	Eccentricity Error

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา

ROTARY ENCODER เป็นอุปกรณ์ทางการวัดมุมซึ่งในปัจจุบันมีใช้งานกันอย่างแพร่หลายในด้านอุตสาหกรรม ได้แก่ เครื่องจักร CNC กล้องสำรวจ Servo Motor กล้องถ่ายรูป เครื่องพิมพ์เอกสาร แขนกล กล้องดูดาว จานดาวเทียม และ Rotary Table เป็นต้น ในแต่ละปีเครื่องมือเหล่านี้ถูกผลิตออกมาเป็นจำนวนมาก ผู้ใช้งานย่อมต้องการความเชื่อมั่นในผลิตภัณฑ์เหล่านี้ว่ามีคุณภาพที่ดี ในระบบคุณภาพของการผลิตสินค้าในปัจจุบันเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบสินค้าจะต้องมีการสอบเทียบก่อน ทำให้เกิดระบบสอกลับของการวัดขึ้น เพื่อให้แน่ใจว่าเครื่องมือต่างๆ ที่นำมาใช้มีมาตรฐานและความน่าเชื่อถือในการใช้งาน

ปัจจุบันประเทศไทยยังไม่มีห้องปฏิบัติการที่สามารถรองรับการสอบเทียบ Rotary Encoder หากผู้ใช้งานต้องการตรวจสอบเครื่องมือที่มี Rotary Encoder เป็นส่วนประกอบอยู่ภายในจึงไม่สามารถกระทำได้ นอกจากต้องส่งเครื่องมือไปตรวจสอบกับผู้ผลิต ซึ่งมักจะอยู่ในต่างประเทศทำให้เกิดความสูญเสียทั้งค่าใช้จ่ายและเวลาในกระบวนการตรวจสอบดังกล่าว การทำวิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์ที่จะสร้างระบบเครื่องสอบเทียบ Rotary Encoder ที่นอกจากจะสอบเทียบ Rotary Encoder ได้แล้ว ยังสามารถสอบเทียบเครื่องมือมาตรฐานทางการวัดมุมประเภทอื่นๆ อันได้แก่ Autocollimator, Polygon Mirror, Angle gauge block และ Inclinator เป็นต้น นอกจากนี้ยังเป็นระบบที่สอบเทียบตัวเองได้ ทำให้ไม่จำเป็นต้องถูกสอบเทียบโดยเครื่องมือมาตรฐานทางการวัดมุมประเภทอื่นๆ ลดค่าใช้จ่าย ทั้งค่าสอบเทียบในแต่ละปี และค่าขนส่งไปสอบเทียบยังต่างประเทศ

ในทางมาตรวิทยาแล้ว อุปกรณ์การสอบเทียบทางด้านมุมที่มีความเที่ยงตรงและแม่นยำสูงนั้นมีหลากหลายประเภท มีลักษณะเด่นและด้อยต่างกันไป ตัวอย่างเช่น Autocollimator เป็นอุปกรณ์วัดมุมที่มีลักษณะเป็นกล้องวัดมุม มีทั้งแบบที่ใช้หลักการของการแทรกสอดของแสงและแบบที่ใช้ Sensor ที่เป็น CCD Camera ปัจจุบัน Autocollimator ที่มีความเที่ยงตรงสูง จะมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 0.1" - 0.25" แต่มีช่วงการวัดแคบ คือประมาณ $\pm 1,500''$ Polygon Mirror เป็นอุปกรณ์การวัดมุมที่สามารถวัดมุมครบรอบ 360° แต่มีข้อด้อยคือ มีจุดวัดจำกัดไม่สามารถวัดงานที่มีความละเอียดน้อยกว่าระดับ 1° ได้ Inclinator เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดระดับความเอียงที่มีความเที่ยงตรงสูงในระดับ $2 \mu\text{m}/\text{m}$ ($0.4''$) แต่สามารถวัดได้เฉพาะแกนตั้ง และมีช่วงการวัดเพียง 20 mm/m ($4,000''$) ซึ่งจะเห็นได้ว่าตัวอย่างอุปกรณ์ที่กล่าวมาแล้วนั้น มีข้อจำกัดอย่างน้อย 1 อย่าง เช่น มีช่วงการวัดแคบ ไม่ครบรอบ 360° มีช่วงการวัดไม่ละเอียด เป็นต้น

ระบบเครื่องสอบเทียบ Rotary Encoder ที่จะทำการสร้างในวิทยานิพนธ์นี้มีจุดประสงค์ที่จะแก้ปัญหาเหล่านี้ คือ 1) มีความเที่ยงตรงสูง 2) มีช่วงการวัดครอบคลุมทุกองศา 3) มีช่วงการวัดละเอียด และ 4) สามารถสอบเทียบตัวเองได้

ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบอุปกรณ์ทางการวัดมุมที่มีความเที่ยงตรงสูง

อุปกรณ์	รุ่น	ผู้ผลิต	ความเที่ยงตรง	ช่วงการวัด	ความละเอียด
Laser Interferometer	5530	Agilent	0.05" /m	±20°	0.006"
Autocollimator	ELCOMAT 2000	Moller Wedel	0.25"	±1,000"	0.01"
Inclinometer	Blue System	Wyler	2 um/m	±20 mm/m	±0.01 um/m
Indexing Table	1440 Precision Index	Moore	0.1"	360°	15'
Theodolite	TM 30	Leica	0.5"	360°	0.01"
Polygon Mirror	12 Side	Moller Wedel	2"	360°	30°

หมายเหตุ : $1^\circ = 60' = 3,600''$ และ $1'' = 4.85 \text{ um/m}$

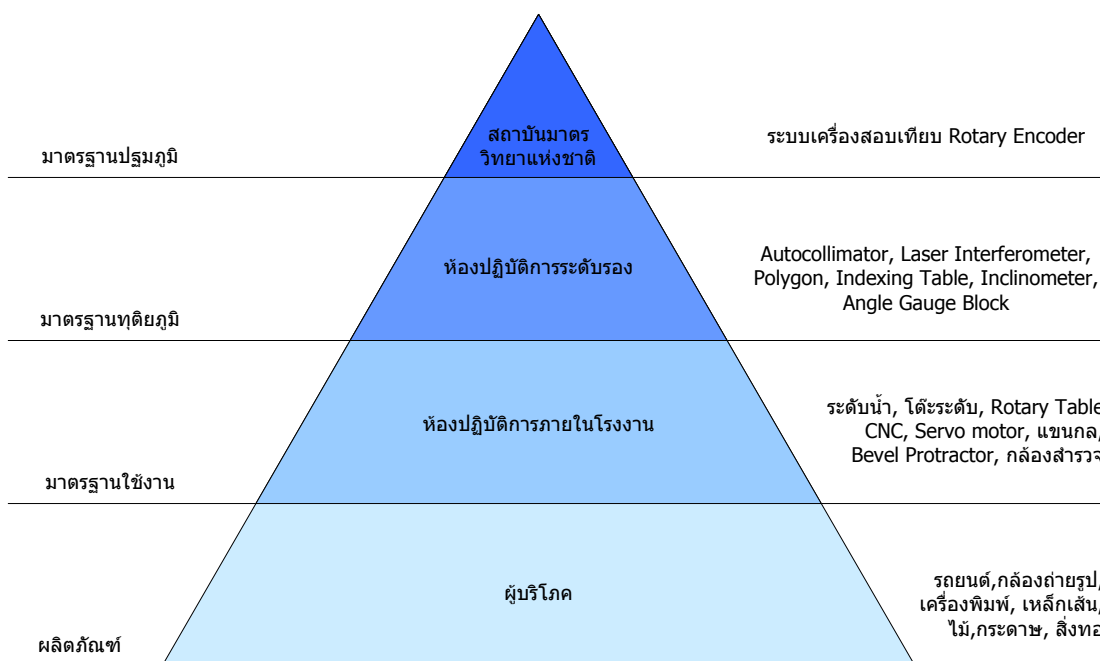


รูปที่ 1.1 อุปกรณ์ทางการวัดมุมที่มีความเที่ยงตรงสูงเรียงจากซ้ายไปขวา

- 1) Laser Interferometer, 2) Autocollimator, 3) Inclinometer, 4) Indexing Table, 5) Theodolite, 6) Polygon Mirror

1.2 ระบบสอบกลับได้ของ Rotary Encoder

ระบบสอบกลับได้คือลำดับขั้นตอนในการควบคุมคุณภาพของสินค้าเพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือในกระบวนการผลิต โดยผลิตภัณฑ์ต่างๆก่อนที่จะถึงมือผู้บริโภคจะถูกตรวจสอบโดยฝ่ายควบคุมคุณภาพ(Quality Assurance หรือ Quality Control) จากโรงงานหรือแหล่งผลิต เครื่องมือที่ใช้ตรวจสอบสินค้าที่อยู่ภายในโรงงานก็จะถูกนำไปสอบเทียบโดยห้องปฏิบัติการระดับรองก่อนนำไปใช้งาน และในที่สุดเครื่องมือมาตรฐานของห้องปฏิบัติการระดับรองจะถูกสอบเทียบโดยสถาบันมาตรวิทยาของประเทศ โดยระบบดังกล่าวของประเทศไทยจะถูกดำเนินการโดยสำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม (สมอ) ภายใต้ข้อกำหนดมาตรฐาน ISO9001 และ ISO/IEC 17025 สินค้าที่ได้มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก) จะได้รับความน่าเชื่อถือจากผู้บริโภค

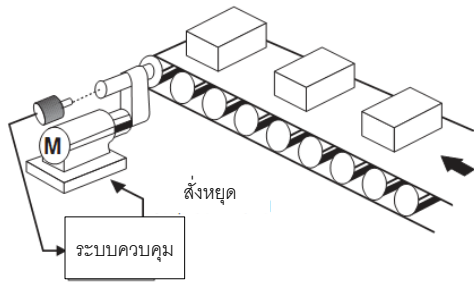


รูปที่ 1.2 ระบบการสอบกลับได้ของ Rotary Encoder

1.3 การประยุกต์ใช้งาน Rotary Encoder

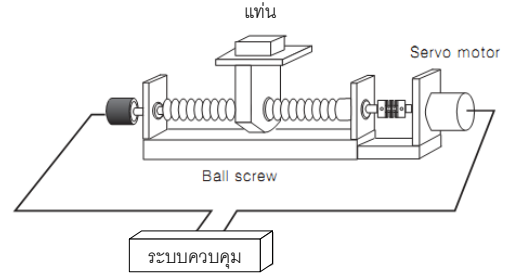
Rotary Encoder ถูกนำมาใช้งานอย่างหลากหลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคอุตสาหกรรม เครื่องจักรต่างๆมักใช้ Rotary Encoder เป็นอุปกรณ์ควบคุมระยะและตำแหน่งในการผลิต

หยุดมอเตอร์ในตำแหน่งที่ถูกต้อง



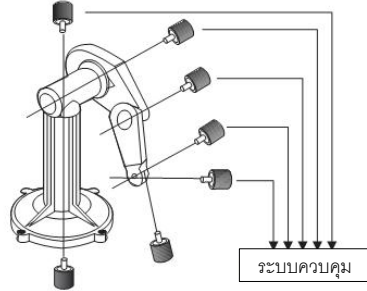
รูปที่ 1.3 การควบคุมตำแหน่งของสายพาน

แท่นเลื่อนแกนของเครื่องจักร



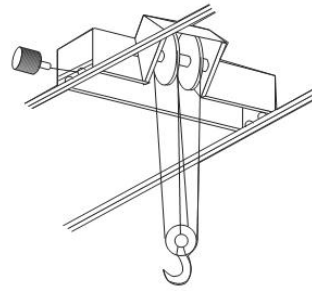
รูปที่ 1.4 การควบคุมตำแหน่งของแท่นเครื่อง

ควบคุมระยะและมุมให้แขนกล

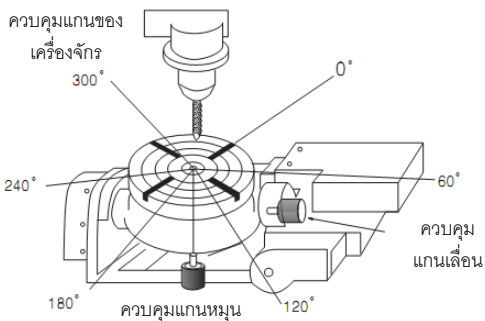


รูปที่ 1.5 การควบคุมตำแหน่งของแขนกล

ควบคุมตำแหน่งการเลื่อนของแครน

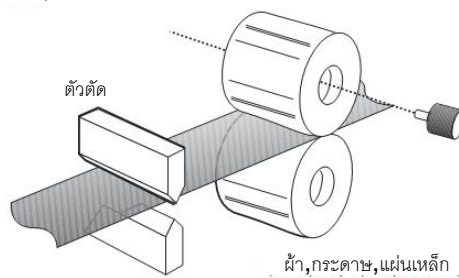


รูปที่ 1.6 การควบคุมตำแหน่งของแครน



รูปที่ 1.7 การควบคุมตำแหน่งของเครื่องจักร

ควบคุมความยาวของชิ้นงาน



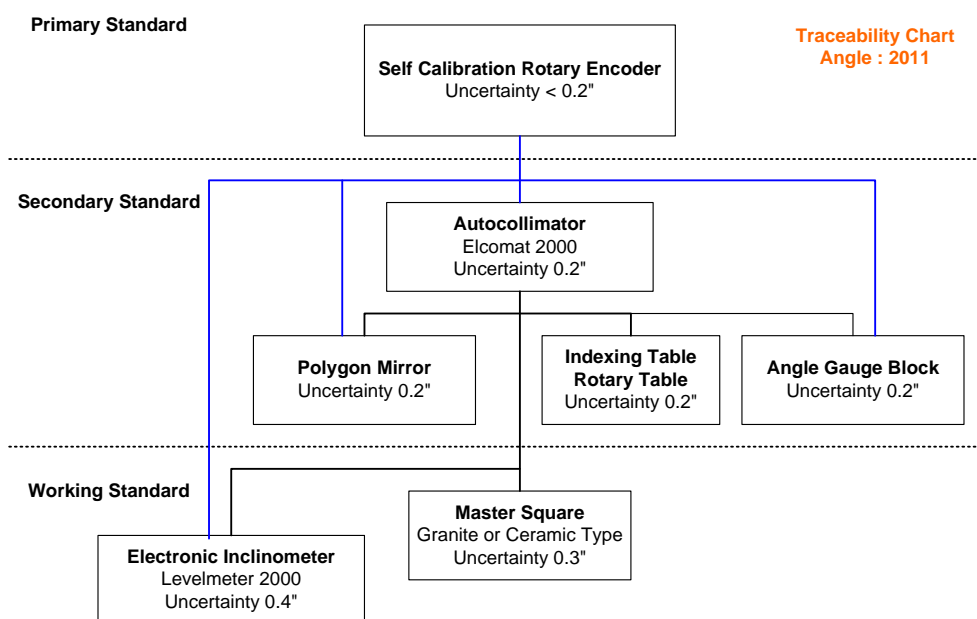
รูปที่ 1.8 การควบคุมระยะการตัดชิ้นงาน

1.4 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์การวิจัยนี้เพื่อสร้างระบบสอบเทียบ Rotary Encoder ที่มีคุณสมบัติดังนี้

1) สามารถสอบเทียบเครื่องมาตรฐานทางด้านการวัดมุมโดยมีความแม่นยำในระดับ 0.2"

ปัจจุบันห้องปฏิบัติการกรม ฝายมาตรวิทยามิติ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ มีความสามารถสอบเทียบเครื่องมือมาตรฐานทางด้านการวัดมุมที่ความคลาดเคลื่อนตามที่ระบุไว้ใน BIPM Appendix C คือ 0.2" การที่จะสร้างเครื่องมือมาตรฐานใหม่ขึ้นมาจึงต้องมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าเดิมที่มีอยู่เพื่อสามารถถ่ายค่าความถูกต้องของการวัดไปยังเครื่องมือมาตรฐานทางด้านการวัดมุมทุกชนิดที่มีอยู่จากรูปที่ 1.9 จะเห็นได้ว่าค่าไม่แน่นอนของมาตรฐานที่มีความแม่นยำสูงกว่าจะถูกถ่ายค่าไปยังมาตรฐานที่มีความแม่นยำต่ำกว่าระบบสอบเทียบที่จะสร้างขึ้นจึงต้องมีความแม่นยำน้อยกว่า 0.2"



รูปที่ 1.9 การสอบกลับได้ของการวัดมุม

2) สามารถวัดครอบคลุมช่วงการใช้งานทั้ง 360° ใช้งานได้ทั้งแกนตั้งและแกนนอน

ช่วงการใช้งานของเครื่องมือวัดต่างๆไปมักมีข้อจำกัดเช่นใช้งานได้บางช่วงหรือบางแกนเท่านั้น แต่เครื่องมือมาตรฐานใหม่จะสามารถวัดงานได้ครอบคลุมเกือบทุกมิติการวัดกล่าวคือสามารถวัดงานของมุมระนาบได้ทุกมุมตลอดช่วง 360° และสามารถวัดงานได้ทั้งแกนตั้งและแกนนอนซึ่งเมื่อเทียบกับระบบสอบเทียบ Rotary Encoder ที่เคยมีมาก่อนหน้านี้อาจจะวัดได้เฉพาะแกนนอนเท่านั้น

3) มีความละเอียดในการวัด(Resolution)ที่ละเอียดกว่า 1"

เครื่องมือมาตรฐานทางด้านมุมหลายชนิดของลูกค้ำที่ส่งมาสอบเทียบที่สถาบันมาตรฐานจะมีจุดสอบเทียบไม่พอดีกับตำแหน่งของสเกลของระบบสอบเทียบ Rotary Encoder พบว่าเครื่องมือที่มีความละเอียดสูงเช่น Autocollimator (วัดทุกๆช่วง $10''$), Electronic Level (วัดทุกๆช่วง $1''$) หรือ Angle Gauge Block บางขนาด($3''$) ต้องการการวัดงานที่มีตำแหน่งอยู่ระหว่างสเกล จึงต้องใช้การ Interpolation ทำให้การวัดในช่วงดังกล่าวมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงขึ้น ระบบสอบเทียบ Rotary Encoder ที่จะสร้างขึ้นใหม่จึงควรมีความสามารถวัดค่าในตำแหน่งที่ละเอียดครอบคลุมงานที่มีตำแหน่งการวัดที่ละเอียดพอสมควรซึ่งจากประสบการณ์ของผู้ทำวิทยานิพนธ์เห็นว่าความละเอียดของเครื่องมือที่จะใช้เป็นมาตรฐานใหม่นี้ควรมีความละเอียดไม่น้อยกว่า $1''$ เท่ากับช่วงการวัดของ Electronic Level ที่มีช่วงการวัดที่ดีที่สุด

4) สอบเทียบตัวเองได้ (Self Calibrate)

การสอบเทียบตัวเองได้เป็นคุณสมบัติพิเศษของระบบ SelfA โดยทั่วไปแล้วเครื่องมือวัดต่างๆทางมาตรวิทยาจะต้องถูกสอบเทียบด้วยเครื่องมือที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงกว่า แต่ด้วยเทคนิคทางด้านการคำนวณทางคณิตศาสตร์ทำให้ระบบ SelfA ไม่ต้องสอบเทียบอ้างอิงไปที่มาตรฐานอื่นได้อีก การสอบเทียบตัวเองได้จึงมีประโยชน์ที่มีความสำคัญมากกล่าวคือประเทศไทยจะมีมาตรฐานปฐมภูมิเป็นของตัวเองนอกจากนี้ยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการส่งสอบเทียบเครื่องมือปฐมภูมิไปยังประเทศที่มีมาตรฐานที่สูงกว่า แต่หากต้องการตรวจสอบว่าระบบยังมีความถูกต้องอยู่หรือไม่ก็สามารถทำได้โดยอาศัยช่องทางการเปรียบเทียบผลการวัดกับสถาบันมาตรวิทยา

แห่งชาติของประเทศที่มีความสามารถในระดับเดียวกันหรือสูงกว่า โดยเลือกใช้เครื่องมือที่มีความเที่ยงตรงเหมาะสมมาเป็นตัวเปรียบเทียบ

1.5 ผลการศึกษาระบบ Self-Calibration Rotary Encoder (NIMT-DMA1/07)

ในปีพ.ศ. 2550 สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติได้ทำการจัดซื้อเครื่อง Self-Calibration Rotary Encoder (NIMT-DMA1/07) จากบริษัท Emotion Inc. ประเทศญี่ปุ่น มาติดตั้งที่ห้องปฏิบัติการมุมฝ้ายมาตรวิทยามิติ ซึ่งเป็นระบบที่ได้สร้างจากหลักการ EDA ของ Dr. Tsukasa Watanabe แห่งสถาบันมาตรวิทยาประเทศญี่ปุ่น (NMIJ) ระบบดังกล่าวประกอบด้วยจานสเกลหลักซึ่งใช้เป็นจานสเกลมาตรฐาน 2 จาน และจานสเกลรองซึ่งใช้ควบคุมตำแหน่งของ Servo Motor อีก 1 จาน รวมทั้งหมด 3 จาน ดังรูป 3.18 ระบบดังกล่าวมีความไม่แน่นอนในการวัดตัวเองเพียง 0.06" จานสเกลหลักทั้งสองจานมีจำนวนขีดของสเกล 23,049 เส้น ส่วนจานรองมีจำนวนขีดของสเกล 225,000 เส้น สามารถวัดช่วงละเอียดที่สุดประมาณ 57" ($360^{\circ} \times 60' \times 60'' / 23,049 = 56.228 \cong 57''$)



รูปที่ 1.10 ระบบสอบเทียบ Self-Calibration Rotary Encoder (NIMT-DMA1/07)

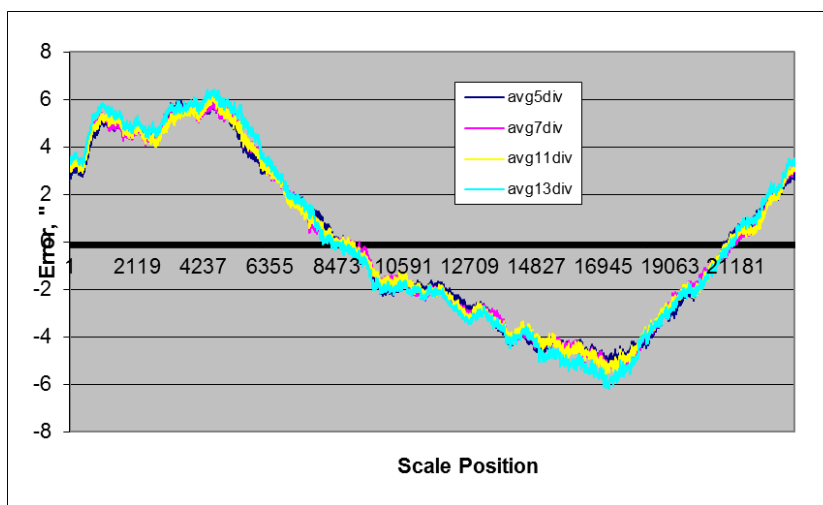
ระบบสอบเทียบ Self-Calibration Rotary Encoder (NIMT-DMA1/07) มีความพิเศษอย่างหนึ่งคือสามารถเปลี่ยนตำแหน่งหัววัดหรือ sensor เพื่อเลือกจำนวน Division ที่ต้องการได้อย่างอิสระ เมื่อใช้งานมาระยะหนึ่งพบว่าระบบสอบเทียบ Self-Calibration Rotary Encoder สามารถวิจัยและพัฒนาให้เหมาะสมกับงานที่ทำอยู่มากขึ้นดังนี้

1.5.1 ลดจานสเกลเหลือจานเดียว

ระบบสามารถใช้จานสเกลเหลือเพียงจานเดียวได้ จากเดิมใช้ 3 จานโดยใช้หลักการตามหัวข้อ 3.10 และนอกจากนี้ยังใช้จานสเกลเดียวกันเป็นตัวควบคุมตำแหน่งของ Motor อีกด้วยทำให้ขนาดของระบบลดลงไปมากแต่จะสูญเสียคุณสมบัติการเปลี่ยนตำแหน่งได้อย่างอิสระไป

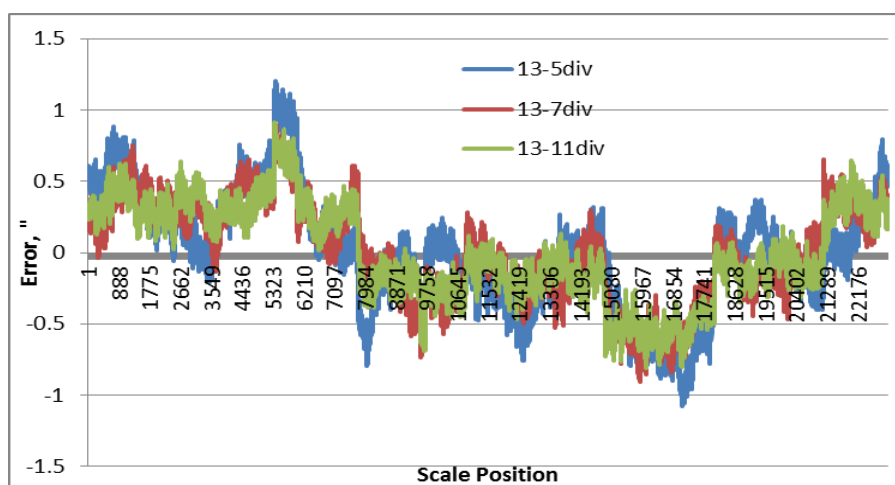
1.5.2 หาจำนวนหัววัดที่เหมาะสม

เมื่อไม่สามารถเปลี่ยนตำแหน่งหัววัดได้อย่างอิสระจึงจำเป็นต้องหาเงื่อนไขว่าจำนวนหัววัดที่เหมาะสมแก่การใช้งานคือกี่หัววัด โดยมีหลักการของ Multiple Integral Fourier Component ที่ว่าหากมีหัววัดมากขึ้นผลการสอบเทียบก็จะสมบูรณ์มากขึ้น ปัจจุบันเครื่องมือมาตรฐานที่ใช้ภายในห้องปฏิบัติการมูมควรมีค่าความไม่แน่นอนน้อยกว่า 0.2" เพื่อรองรับงานที่มีอยู่จึงต้องหาเงื่อนไขว่าต้องใช้หัววัดเป็นจำนวนกี่หัว ด้วยเหตุดังกล่าวจึงได้ทำการทดลองหาจำนวนหัววัดที่เหมาะสม โดยการวัดค่า rotary encoder ที่อยู่ภายในระบบที่ 5, 7, 11, 13 Division แล้วนำค่ามาวิเคราะห์



รูปที่ 1.11 ผลการวัด internal encoder calibration system ที่ 5, 7, 11, 13 Division

จากหลักการของ Multiple Integral Fourier Component แบบ 13 Division จะมีผลการวัดที่สมบูรณ์ที่สุดเมื่อเทียบกับแบบ 5, 7 หรือ 11 Division จึงนำข้อมูลแต่ละชุดมาเปรียบเทียบกับแบบ 13 Division ซึ่งได้ผลดังนี้



รูปที่ 1.12 ผลการเปรียบเทียบการวัดแบบ 5, 7, 11 กับ 13 Division

ตารางที่1.2 ผลการเปรียบเทียบการวัดแบบ 5, 7, 11 กับ 13 Division

Position	13-5 div	13-7 div	13-11 div
Maximum Error	1.207"	0.891"	0.913"
Minimum Error	-1.080"	-0.907"	-0.810"

จากตารางแสดงผลการเปรียบเทียบการวัดแบบ 5, 7, 11 กับ 13 Division จะเห็นได้ว่าเมื่อค่าจาก 13-5 div จะต่างจาก 13-7 div ประมาณ 0.3" แต่ค่าจาก 13-7 div จะต่างจาก 13-11 div ประมาณ 0.02" เท่านั้น หากต้องการระบบสอบเทียบที่มีความไม่แน่นอนน้อยกว่า 0.2" ตามหลักมาตรวิทยาแล้วปัจจัยของความคลาดเคลื่อนที่จะละทิ้งได้ต้องมีค่าน้อยกว่า 20% ของค่าความคลาดเคลื่อนรวมนั่นคือ 20% ของ 0.2" เท่ากับ 0.04" ดังนั้นจำนวนหัววัดที่น้อยที่สุดจึงควรเป็น 7 หัววัด อย่างไรก็ตามเพื่อเพิ่มความถูกต้องหรือสมบรูณ์ให้กับระบบสอบเทียบที่จะสร้างขึ้นใหม่จึงเพิ่มหัววัดลงไปในระบบเท่าที่ความยาวของเส้นรอบวงของแถบสเกลจะรับได้คือประมาณ 10 หัววัด

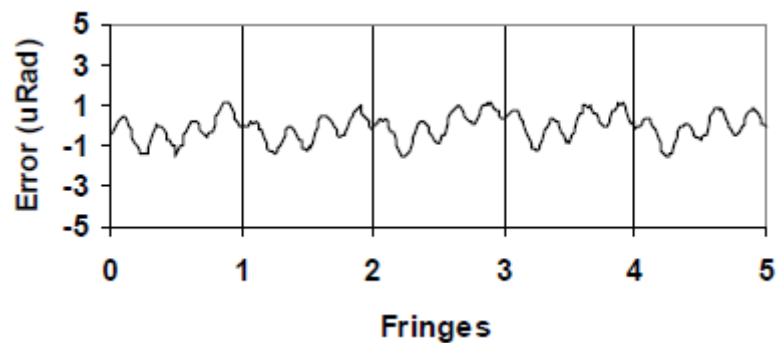
จากหลักการของ Multi Combination Method ทำให้สามารถเพิ่มศักยภาพให้กับระบบสอบเทียบได้อีกโดยนอกจากจะมีชุดหัววัด 7 หัวแล้วหากเพิ่มชุดหัววัดอีกหนึ่งชุดคือชุด 4 หัววัดโดยใช้หัววัดอ้างอิงเดียวกันจะทำให้ Component ที่ขาดหายไปอยู่ตำแหน่ง Component ที่ 28 ซึ่งเป็นการเพิ่มความสมบรูณ์ของข้อมูลโดยใช้หัววัดเพียง 10 หัวแทนที่จะใช้หัววัดถึง 28 หัว

1.5.3 จำนวนขีดสเกลของบนจานสเกล

จำนวนขีดสเกลมีความสัมพันธ์กับหัววัด หัววัดที่นำมาใช้คือรุ่น SMD-01 การที่เลือกหัววัดรุ่นดังกล่าวเนื่องจากมีขนาดที่เล็กมากเมื่อเทียบกับรุ่นอื่นๆที่มีขายในท้องตลาด เพื่อให้สามารถติดตั้งจำนวนหัววัดได้มากที่สุด โดยหัววัดดังกล่าวมีความสามารถอ่านช่องสเกลได้ละเอียดขนาด 20 μm จึงต้องเลือกจานสเกลที่มีขนาดของช่องสเกลให้เท่ากับ 20 μm ไปด้วย จากการค้นหาจานสเกลที่มีขายในตลาดพบว่าจานสเกลที่ผลิตโดยบริษัท Koshibu Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่นมีคุณสมบัติตามต้องการ กล่าวคือนอกจากจะมีขนาดของช่องสเกลเท่ากับ 20 μm ตามต้องการแล้วยังมีความคลาดเคลื่อนของสเกลเพียง 3 μm อีกทั้งมีความเยื้องศูนย์เพียง 2 μm เท่านั้น โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 150 mm ซึ่งเป็นขนาดไม่ใหญ่มากนักเหมาะกับระบบที่ต้องการสร้าง

1.5.4 ความละเอียดของระบบ

จากวัตถุประสงค์ที่ต้องการระบบที่สามารถสอบเทียบในช่วงการวัดประมาณ 1" หรือน้อยกว่า จากคุณสมบัติของจานสเกลข้างต้นมีจำนวนช่อง 18,000 ช่องโดยแต่ละช่องทำมุมกันเท่ากับ 72" จึงต้องใช้ Interpolator เข้ามาช่วยเพิ่มความละเอียด แต่การทำ Interpolation นั้นจะทำให้ค่า Error เพิ่มขึ้น จากรูป 3.19 จะเห็นได้ว่าแต่ละช่องจะมี sine wave 4 ลูกต่อช่อง เมื่อเลือกใช้ Interpolation 1024 เท่าในหนึ่งช่องสเกล จึงควรใช้การ Interpolation $1024/4 = 256$ เท่า หรือ $72"/256 = 0.3"$ ซึ่งทำให้ความละเอียดของช่วงการวัดน้อยกว่า 1" ที่ได้ตั้งไว้



รูปที่ 1.13 Interpolation Error ของ 5 Scale Pitch

ตารางที่ 1.3 แสดงผลการเปรียบเทียบจำนวน Interpolator ที่จะนำมาใช้งาน

Interpolator, N	Interpolator/4, n	Resolution, 72/n
128	32	2.3
256	64	1.1
512	128	0.6
1024	256	0.3

1.6 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์บทที่1นี้กล่าวถึง ความสำคัญ ที่มาของปัญหาและสาเหตุของการมีระบบสอบเทียบ Rotary Encoder ที่มีต่อกระบวนการผลิตของประเทศ บทที่2คือปริทรรศน์วรรณกรรมกล่าวถึงความ เป็นมาและการทำงานของ Rotary Encoder ผลงานวิจัยเกี่ยวกับการสอบเทียบ Rotary Encoder ที่ เคยมีมาก่อน บทที่3 กล่าวถึงหลักการและทฤษฎีของ Equal-Division-Averaged Method ในบทที่ 4 อธิบายถึงอุปกรณ์และวิธีการสร้างระบบเครื่องสอบเทียบ Rotary Encoder บทที่5 กล่าวถึงการนำ เครื่องสอบเทียบ Rotary Encoder ที่สร้างขึ้นไปตรวจสอบกับเครื่องมือมาตรฐานทางด้านการวัดมุม ประเภทต่างๆรวมทั้งการวิเคราะห์ผลการทดลอง บทที่6กล่าวถึงอุปสรรคและปัญหาที่เกิดขึ้นและการ สรุปลงการวิจัยทั้งหมดจากทุกหัวข้อที่กล่าวมารวมถึงการเสนอข้อแนะนำต่างๆ

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรม

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวความคิดของระบบสอบเทียบ Rotary Encoder ที่เคยมีมาก่อน จนกระทั่งปัจจุบัน และการนำเสนอแนวทางใหม่ในการวิจัยและพัฒนาระบบสอบเทียบ Rotary Encoder ให้มีประสิทธิภาพ เหมาะกับการใช้งานมากขึ้น

2.1 ประวัติความเป็นมาของการสอบเทียบ Rotary Encoder

ถึงแม้ว่ามาตรฐานทางการวัดจะมีประวัติที่ยาวนาน แต่ในทางด้านการวัดมุมโดยเฉพาะอย่างยิ่ง การสอบเทียบ Rotary Encoder เพิ่งจะมีประวัติเพียง 20 กว่าปีมานี้เอง ในสมัยปัจจุบันอาจสามารถเริ่มอ้างอิงมาจากผลงานของ T.Masuda และ M.Kajitani [1] (1989) ซึ่งใช้วิธี Multi-reading-head method and error determinations วิธีดังกล่าวกำหนดให้มุมที่คลาดเคลื่อนไปของ encoder เขียนเป็นสมการอยู่ในรูปของอนุกรมฟูรีเยร์ โดยตัวระบบจะมีหัวอ่าน 2 หัว ที่ทำมุมกัน หัวอ่านแต่ละหัวจะวัดความคลาดเคลื่อนจาก Rotary Encoder แล้วนำไปหาค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ นั่นก็คือ ผลต่างระหว่างความคลาดเคลื่อนที่ได้จากหัววัดทั้งสอง พบว่าหากวางตำแหน่งของหัววัดทั้งสองเป็น สัดส่วนของวงกลม ยกตัวอย่างเช่น หากแบ่ง n ส่วนออกเป็นส่วนเท่าๆ กันแล้ว จะสามารถหาค่า ความคลาดเคลื่อนของ encoder ที่แต่ละตำแหน่งได้ แต่ก็จะมีความไม่สมบูรณ์เกิดขึ้นเนื่องจากการ คำนวณด้วยวิธีการดังกล่าวจะขาดองค์ประกอบของฟูรีเยร์ ในลำดับที่ n (n order of Fourier component) ด้วยวิธีการนี้ ผลการวัดที่ได้จะมีความคลาดเคลื่อนประมาณ $0.3''$ และเมื่อทำการสอบ เทียบระบบแล้วจะสามารถลดความคลาดเคลื่อนเป็น $0.05''$ ได้

T.Masuda และ M.Kajitani [2] (1993) ยังมีผลงานวิจัยต่อมา โดยพบว่าหากเลื่อนตำแหน่งการวาง หัวอ่านให้เหมาะสมแล้วจะสามารถทำให้การสอบเทียบ Rotary Encoder มีความเที่ยงตรงสูงขึ้นได้ นอกจากนี้ หากทำการแบ่งมุมของการวัดเป็น 2 ชุดที่มีการแบ่งเป็นสัดส่วนที่ต่างกัน เช่น ชุดแรกแบ่ง วงกลมออกเป็น m ส่วน และชุดที่ 2 แบ่งออกเป็น n ส่วน เมื่อนำค่าจากทั้ง 2 ชุด มา “ผสมกัน” (combine) จะทำให้องค์ประกอบของอนุกรมฟูรีเยร์จากแต่ละชุดมาชดเชยกันได้ แต่ทั้งนี้ก็ยังขาด องค์ประกอบที่เป็นคุณร่วมน้อยอยู่ (องค์ประกอบในลำดับที่ $m \times n$)

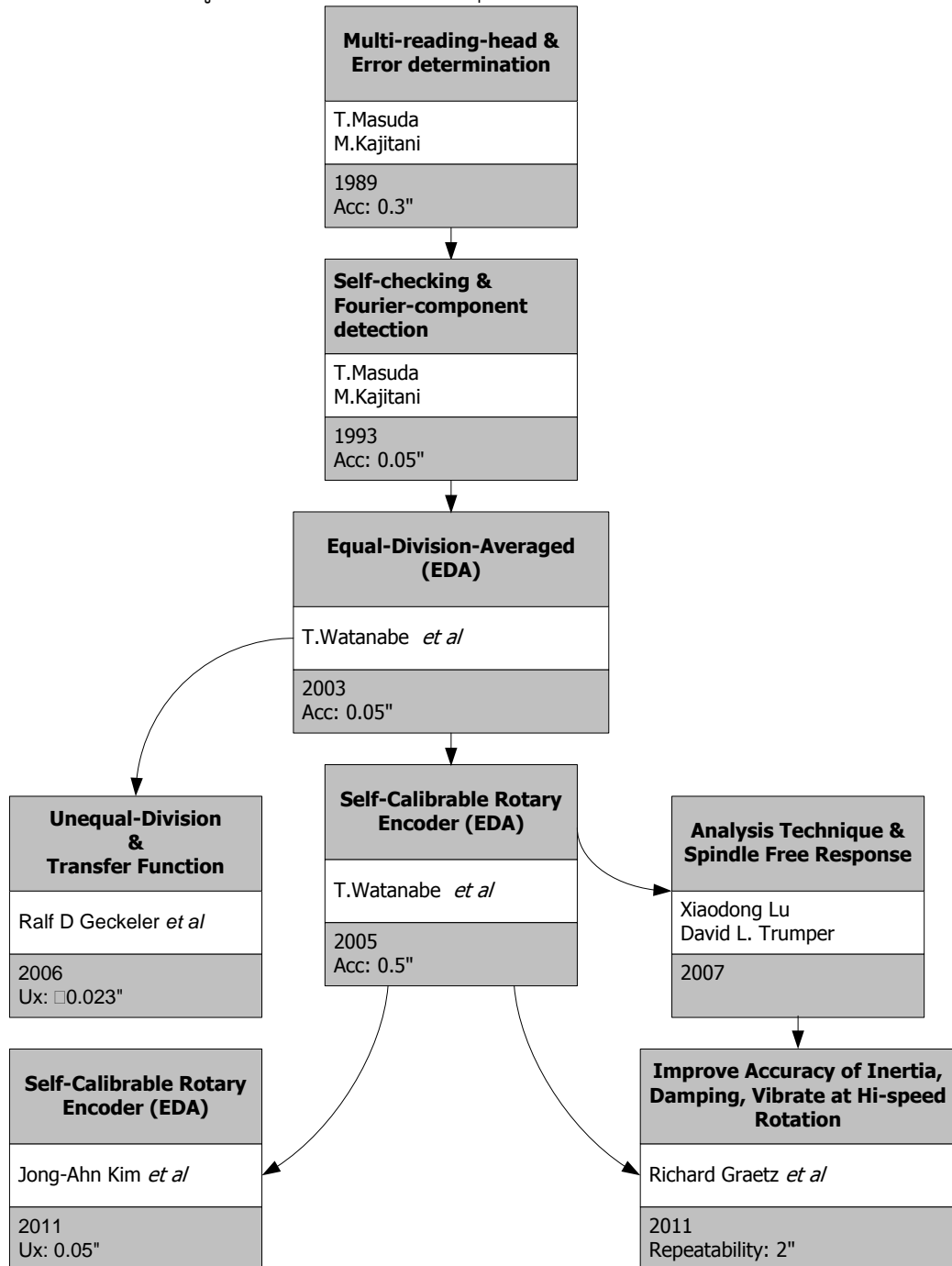
T.Watanabe et al. [3] (2003) นำหลักการของ T.Masuda มาใช้สร้างระบบสอบเทียบ Rotary Encoder โดยใช้หลักการที่เรียกว่า Equal-division-averaged (EDA) ซึ่งระบบ EDA นี้มี การกำหนดตำแหน่งของหัวอ่านที่ติดตั้งให้มีระยะมุมที่เป็นสัดส่วนของวงกลมเท่าๆ กัน เมื่อนำค่าที่วัด ได้จากแต่ละหัวอ่านมาคำนวณจะสามารถหาค่าความคลาดเคลื่อนของ Rotary Encoder ที่แต่ละ ตำแหน่งได้ โดยระบบนี้จะประกอบด้วย จานสเกล 3 ชุดที่ติดตั้งบนแกนหมุนเดียวกัน จากสเกล 2 ชุด แรกเป็นจานสเกลมาตรฐาน ส่วนอีก 1 อันที่เหลือ ทำหน้าที่ควบคุมตำแหน่งและความเร็วของ Servo Motor นอกจากนี้ ยังมีการนำระบบ Interpolation ($\times 2048$) และใช้ encoder ที่มีความละเอียดสูง (225,000 P/R) มาใช้งาน ทำให้ระบบดังกล่าวมีความละเอียดสูงสุดถึง $0.0028''$ และความคลาด เคลื่อน $\pm 0.0112''$

T.Watanabe et al. [4] (2003) ใช้หลักการของ EDA มาสอบเทียบ Polygon Mirror โดยใช้ Autocollimator มาช่วยในการปรับตำแหน่งและระบุตำแหน่งของหน้า Polygon ซึ่งวางอยู่บนระบบสอบเทียบ Rotary Encoder การวัด Polygon Mirror จะให้หัวอ่าน Encoder A บอกค่ามุมที่หมุนไปแต่ละหน้าว่าหมุนไปที่ช่อง ส่วนหัวอ่าน Encoder B จะเป็นตัวอ่านและนำไปคำนวณค่าว่าแต่ละหน้ามีค่าต่างไปจากค่าบ่งชี้ (Nominal) เป็นปริมาณเท่าไร ในการวัด Polygon Mirror ด้วยวิธีข้างต้น จะมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานประมาณ $0.007''$ โดยใช้ Rotary Encoder ทั้งชุด A และชุด B รุ่น X1 ของ Canon ที่มีขีดสเกลละเอียดสูง (225,000 P/R) มีความคงความเร็วรอบที่ $5 \text{ rpm} \pm 0.1\%$

T.Watanabe et al. [5] (2005) ได้พัฒนาระบบสอบเทียบ Rotary Encoder ขึ้นไปอีกสาเหตุเนื่องจากการสอบเทียบ Rotary Encoder นั้นมีความจำเป็นต้องถอด Rotary Encoder ออกจากเครื่องจักร และเมื่อนำ Rotary Encoder กลับไปติดตั้งพบว่าเกิดความคลาดเคลื่อนจากการติดตั้งเสมอ สาเหตุหลักนั้นมาจากการเอียงศูนย์ จึงเป็นสาเหตุที่ต้องสร้าง Rotary Encoder ที่สอบเทียบตัวเองได้ และสามารถติดตั้งเข้าไปในระบบของเครื่องจักรด้วย ด้วยความคิดดังกล่าว Rotary Encoder แบบนี้จะต้องมีขนาดที่ลดลงและพอจะประกอบเข้าไปในเครื่องจักรได้ นอกจากนั้น ยังลดปริมาณของจานสเกลจาก 3 จาน เป็น 1 จาน แต่ก็มีข้อจำกัดที่ไม่สามารถเปลี่ยนตำแหน่งของหัวอ่านได้เหมือนแบบ 3 จาน ระบบดังกล่าวถูกออกแบบให้มีหัวอ่าน 5 หัว แต่ละหัวทำมุมกัน 72° มีความเที่ยงตรงในระดับ $0.5''$ และความคลาดเคลื่อน $\pm 0.2''$

R.D. Geckeler et al. [6] (2006) ได้พัฒนาระบบ Rotary Encoder โดยมีหลักการที่คล้ายคลึงกับ T.Masuda แต่จะมีข้อแตกต่างกันตรงที่ใช้ Autocollimator และ Polygon เป็นอุปกรณ์สำหรับระบุตำแหน่ง และแตกต่างจากวิธี EDA คือ ใช้การแบ่งช่วงของวงกลมให้ไม่เท่ากัน โดยระบบจะมีจานสเกลอยู่ 2 ชุด ชุดแรกอยู่ด้านใน เป็นที่ตั้งของ Polygon และ Polygon นี้แต่ละหน้าจะทำมุมกันเป็น 74° , 132.85° , 237.85° และ 297.85° ส่วนจานสเกลอีกชุดจะติดตั้งอยู่รอบนอก เป็นที่ตั้งของ Autocollimator เพื่อใช้เป็นหัวอ่านตำแหน่งของมุมของ Polygon สาเหตุที่ต้องใช้ Polygon ที่ทำมุมในแต่ละหน้าไม่เท่ากัน เนื่องจากต้องการหลีกเลี่ยงปัญหาที่ T.Masuda และ T.Watanabe พบ นั่นคือ ไม่ต้องการสูญเสียข้อมูลของการวัดในลำดับที่ n (ในกรณีนี้ $n=5$) ของอนุกรมฟูเรียร์ ระบบของ R.D. Geckeler มีความไม่แน่นอน $\pm 0.023''$

เพื่อการเข้าใจถึงประวัติความเป็นมาของระบบสอบเทียบ Rotary Encoder ให้ง่ายและชัดเจนขึ้น ให้พิจารณารูปที่ 2.1 และเปรียบเทียบคุณสมบัติของแต่ละระบบในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนผังความเป็นมาของการวิจัยเรื่องการสอบเทียบ Rotary Encoder

ผู้ทำวิจัย	ระบบ	วิธี	Graduation Line	Resolution, "	Reading Head	Scale Disc	Accuracy, "
T.Matsuda and M.Kajitani[1]	An automatic calibration system for angular encoders	Multi-reading-head	6480	0.01	6	2	0.3
T.Matsuda and M.Kajitani[2]	High Accuracy Calibration System for Angular Encoder	Self-checking and Fourier component detection	225,000	0.001	6	2	0.05
T.Watanabe, et al.[3]	Automatic High precision calibration system for angle encoder	Equal-Division-Averaged	225,000	0.0028	6	3	0.0012
T.Watanabe, et al.[4]	Self-Calibratable Rotary Encoder	Equal-Division-Averaged	225,000	0.0028	5	2	0.5
R. D. Geckeler, et al.[6]	Calibration of angle encoders using transfer functions	Transfer functions	162,000	0.03	5	2	0.023
Xiaodong Lu, et al.[9]	Self Calibration for Air-Bearing Rotary-Encoders	Equal-Division-Averaged	2,500	0.25x scale pitch	5	1	0.002x scale pitch
R. Graetz, et al.[22]	Self-Calibration for Precision Encoder	Equal-Division-Averaged	32,768	10	4	1	2
J. A. Kim, et al.[25]	Precision Angle Comparator	Equal-Division-Averaged	64,800	0.005	4+6	1	0.005

ตาราง 2.1 สรุปผลงานวิจัยเรื่อง ระบบสอบเทียบ Rotary Encoder Calibration System

2.2 ข้อเสนอในการพัฒนาระบบสอบเทียบ Rotary Encoder

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเสนอแนวทางการพัฒนา ระบบสอบเทียบ Rotary Encoder ให้มี ศักยภาพเพิ่มขึ้นดังนี้

2.2.1 ลดจำนวนงานสเกลให้เหลือเพียง 1 งาน

การลดจำนวนงานสเกลให้เหลือเพียง 1 งานทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายและลดความซับซ้อน ของระบบลง เนื่องจากการติดตั้งงานสเกลแต่ละงานจะต้องใช้เวลาและเทคนิคต่างๆในการติดตั้ง เช่น การปรับความเยื้องศูนย์, การติดตั้งหัวอ่านบน Encoder และ การ Synchronize ข้อมูลที่ได้ระหว่าง Encoder

2.2.2 ลดขนาดและน้ำหนักของตัวระบบลง

ประโยชน์ของการลดจำนวนงานสเกลลงยังมีผลทำให้ขนาดและน้ำหนักของตัวระบบลดลง การเคลื่อนย้ายง่ายขึ้นจนสามารถยกได้ด้วยคนเพียง 1-2 คน อีกทั้งยังนำไปใช้งานนอกห้องปฏิบัติการ ได้ในอนาคต

2.2.3 สามารถใช้งานในแกนนอนได้

สืบเนื่องจากขนาดและน้ำหนักที่ลดลง ทำให้สามารถวางใช้งานในแกนนอนได้ นั่นคือ สามารถสอบเทียบอุปกรณ์ ประเภทที่วัดระดับความเอียงได้ เช่น Precision Level, Electronic Level และ Inclinator เป็นต้น ซึ่งเป็นข้อจำกัดของระบบสอบเทียบแบบก่อนหน้าเนื่องจากมี ขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก

2.2.4 เพิ่มจำนวนหัวอ่าน

การเพิ่มจำนวนหัวอ่านทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องยิ่งขึ้น แต่เดิมนั้นระบบ Self Calibration Rotary Encoder ของ T.Watanabe et al. [4] ได้ใช้หัวอ่าน 5 หัวทำให้ขาดข้อมูล ทุกๆ Fourier Component ที่ 5 แต่หากเพิ่มจำนวนหัวอ่านเช่นเป็นเพิ่มเป็น 10 หัวก็ทำให้ขาดข้อมูล ทุกๆ Fourier Component ที่ 10 ซึ่งเป็น Component ที่มีผลกระทบต่อผลการวัดน้อยกว่าแบบ 5 หัววัด

2.2.5 แบ่งชุดหัวอ่านออกเป็นสองชุด

หากการเพิ่มหัวอ่านทำให้ผลการวัดถูกต้องแม่นยำมากขึ้นแล้ว การแบ่งชุดหัวอ่านให้มากขึ้น จะทำให้ผลการวัดถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้นไปอีก ยกตัวอย่างเช่น หากมีหัวอ่าน 10 หัวแต่แบ่ง ออกเป็นสองชุดเช่น ชุดแรกมี 4 หัวส่วนชุดที่สองมี 6 หัวเมื่อนำข้อมูลมา “ผสม” กันด้วยเทคนิค ทางการคำนวณจะทำให้ข้อมูลที่ได้อาจขาดข้อมูล ทุกๆ Fourier Component ที่ 24 ($4 \times 6 = 24$) เมื่อ เทียบกับแบบหัวอ่าน 10 หัวธรรมดาที่ขาดข้อมูล ทุกๆ Fourier Component ที่ 10 แล้ว แบบที่แบ่ง ชุดหัวอ่านออกเป็นสองชุดจะทำให้ผลการวัดถูกต้องมากกว่า

บทที่ 3

หลักการและทฤษฎี

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการ แนวคิด และทฤษฎี ของการสอบเทียบ Rotary Encoder ที่เคยมีมาก่อน แล้วการทำวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการประยุกต์และพัฒนาให้เหมาะสมกับงานสอบเทียบมากขึ้น

3.1 ความเป็นมาของการวัดมุม

ก่อนที่จะกล่าวถึงหลักการวัด Rotary Encoder ควรที่จะทราบถึงประวัติความเป็นมาของการวัดมุม ซึ่งอาจย้อนกลับไปเมื่อสมัยบาบิโลน 1894BC หรือประมาณเกือบ 4,000 ปีที่แล้วโดยชาวบาบิโลนสังเกตพบว่าในแต่ละปีมีจำนวนวันประมาณ 360 วัน คลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริงในปัจจุบันประมาณ 5 วันซึ่งอันที่จริงอาจเกิดจากความไม่เหมาะสมของตัวเลข 365 ซึ่งนำไปคำนวณค่าต่างๆได้ยากกว่า อาจด้วยเหตุดังกล่าววงกลมจึงมีมุมเท่ากับ 360° นอกจากนี้ชาวบาบิโลนมีระบบตัวเลขเป็นเลขฐานหกสิบต่อมาชาวกรีกและอียิปต์ได้คิดค้นวิชาตรีโกณมิติซึ่งเป็นศาสตร์ที่ว่าด้วยเรื่อง การวัดมุมและระยะทางขึ้น ประโยชน์จากวิชาดังกล่าวทำให้มนุษย์มีความสามารถในการสร้างสถาปัตยกรรมต่างๆ คำนวณการเคลื่อนที่ของดวงดาวและช่วยคำนวณการเดินทางเรือเพิ่มมากขึ้น

ปัจจุบันเราใช้ระบบตัวเลขฐานสิบเสนอโดยLagrange,ซึ่งเป็นนักคณิตศาสตร์ผู้มีชื่อเสียงชาวฝรั่งเศส และมีกษัตริย์โนโปเลียนเป็นผู้ให้การสนับสนุนให้เกิดระบบเมตริกขึ้นในปลายศตวรรษที่ 18 โดยระบบเมตริกในสมัยนั้นจะแบ่งวงกลมออกเป็น 4 ส่วนเท่าๆกันหนึ่งมุมฉากจะแบ่งเป็น 100 gon ดังนั้นวงกลม 1 วงจะมีทั้งหมด 400 gon เมื่อแบ่งวงกลมให้ละเอียดขึ้น $1 \text{ gon} = 100 \text{ minutes}$ และ $1 \text{ minute} = 100 \text{ second}$ ทำให้มุมคำนวณง่ายขึ้นในระบบพีชคณิตแต่ระบบดังกล่าวมีความยุ่งยากกว่าระบบเดิมจึงไม่เป็นที่นิยม ในปัจจุบันเรายังคงแบ่งมุมในชีวิตประจำวันเป็นเลขฐานหกสิบโดยเรากำหนดให้ $1^\circ (\text{degree}) = 60' (\text{arc minute})$ และ $1' = 60'' (\text{arc second})$ ส่วนทางด้านเวลา 1 ชั่วโมง = 60 นาที และ 1 นาที = 60 วินาที นอกจากนั้นเรามีหน่วยปริมาณพื้นฐานอยู่ทั้งหมด 7 หน่วยตามที่ปรากฏในตารางที่ 3.1 ส่วนปริมาณอื่นๆเกิดจากการสร้างจากหน่วยพื้นฐานเหล่านี้ มุมนั้นเป็นปริมาณที่มีความพิเศษเมื่อเทียบกับปริมาณพื้นฐานอื่นๆคือ 1) มุมมีค่าอ้างอิงเป็นของตัวเองคือวงกลมมีมุมเท่ากับ 360° ในขณะที่ปริมาณพื้นฐานอื่นๆมักต้องอ้างอิงกับค่าคงที่ของธรรมชาติ เช่นความเร็วแสง ความถี่ของธาตุcesium จุดเยือกแข็งของน้ำ หรือ มวลของธาตุ carbon เป็นต้น 2) มุมเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วยเมื่ออ้างอิงกับหน่วยพื้นฐานทั้งเจ็ดกล่าวคือ หน่วยเรเดียนและสโตเรเดียน เดิมถูกกำหนดให้เป็นหน่วยเสริม (Supplement Unit) ของระบบเอสไอ แต่ภายหลังได้รับการยกเลิกและจัดเป็นหน่วยอนุพันธ์ประเภทหนึ่งที่มีมิติ (Dimensionless) หรือไม่มีหน่วย โดยมุมระนาบมีหน่วยเป็น m/m ส่วนมุมตันซึ่งจะไม่กล่าวในวิทยานิพนธ์นี้มีหน่วยเป็น m^2/m^2 ปัจจุบัน International System of Units (SI) กำหนดให้มุมมีหน่วยเป็น Radian เพื่อให้สอดคล้องกับความยาวรอบวงกลมที่มีค่ากับ 2π radian แต่ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้หน่วยของมุมเป็น arc second หรือ " เนื่องจากเป็นหน่วยที่นิยมของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติของประเทศต่างๆ

ตารางที่ 3.1 ปริมาณพื้นฐานทางการวัด[14]

ปริมาณ	หน่วย	นิยาม
ความยาว	Meter (m)	(1983): ระยะทางที่แสงเดินทางในสุญญากาศเป็นเวลา $1/299792458$ วินาที
มวล	Kilogram (Kg)	(1889): มวลมาตรฐานระหว่างประเทศของกิโลกรัม ทำด้วยโลหะผสมของ platinum 90% และ iridium 10% มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอก สูง 39 mm และ เส้นผ่านศูนย์กลาง 39 mm ปัจจุบันเก็บไว้ที่สถาบัน BIPM ประเทศฝรั่งเศส
เวลา	Second (s)	(1967): ระยะเวลายกเท่ากับ 9 192 631 770 เท่าของคาบของคลื่นการแผ่รังสีที่เกิดจากการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานไฮเปอร์ไฟน์สองระดับของอะตอมของธาตุซีเซียม-133 (caesium-133) ซึ่งอยู่ที่สถานะพื้น (ground state)
กระแสไฟฟ้า	Ampere (A)	(1946): ขนาด ของกระแสไฟฟ้าคงที่ซึ่งหากให้ไหลผ่านเส้นลวดตัวนำที่เป็นเส้นตรงสองเส้นที่ มีความยาวเป็นอนันต์ และมีพื้นที่ภาคตัดขวางที่เล็กมากจนไม่ต้องคำนึงถึงและวางขนานกันโดยให้ ห่างกัน 1 เมตรในสุญญากาศ จะทำให้เกิดแรงระหว่างเส้นลวดตัวนำทั้งสองนี้ขนาด 2×10^{-7} นิวตันต่อความยาว 1 เมตร
อุณหภูมิ	Kelvin (K)	(1967): หน่วยของอุณหภูมิทางเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งเท่ากับ $1/273.16$ ของอุณหภูมิเทอร์โมไดนามิกส์ของจุดสามสถานะ (triple point) ของน้ำ
ความเข้มแสง	Candela (cd)	(1979): ความเข้มของการส่องสว่างในทิศทางที่กำหนดของแหล่งกำเนิดแสงที่แผ่รังสีของแสงความถี่เดียว (สีเดียว หรือโมนโครม) ที่ความถี่ 540×10^{12} เฮิร์ตซ์ และมีความเข้มของการแผ่รังสีในทิศทางนั้นซึ่งมีขนาด $1/683$ วัตต์ต่อสเตอเรเดียน (watt/steradian)
ปริมาณสาร	Mole (M)	(1967): ปริมาณ ของสารในระบบหนึ่งซึ่งประกอบไปด้วยองค์ประกอบย่อยมูลฐาน (elementary entities) ที่มีจำนวนเท่ากับจำนวนอะตอมของคาร์บอน-12 ที่มีมวลรวมกันเท่ากับ 0.012 กิโลกรัม เมื่อใช้หน่วยโมล ต้องมีการระบุองค์ประกอบมูลฐานนี้อาจเป็นอะตอม ไอออน อิเล็กตรอน อนุภาคอื่นๆ หรือกลุ่มของอนุภาคอื่นๆ ตามแต่ระบุ
มุมระนาบ	Radian (rad)	อัตราส่วนความยาวระหว่างส่วนโค้งของวงกลมที่ติดกับเส้นรัศมีสองเส้นต่อความยาวรัศมี

3.2 เครื่องมือวัดมุมในสมัยปัจจุบัน

ในปัจจุบันเราอาจแบ่งประเภทของเครื่องมือวัดมุมออกเป็นสองประเภทได้แก่

3.2.1 แบบวัดได้ไม่เต็มวงกลม

เครื่องมือประเภทนี้จะมีช่วงการใช้งานเฉพาะจุดหรือเฉพาะช่วงมีจุดเด่นคือมักมีความเที่ยงตรงสูง หากมีการใช้งานเป็นช่วงมักจะมีค่าความละเอียดสูงได้แก่

- 1) แบบมีจุดใช้งานเฉพาะ Polygon mirror, Angle gauge block, Precision Square
- 2) แบบมีช่วงใช้งานเฉพาะ Autocollimator, Small angle generator, Inclinator, Laser Interferometer, Sine bar

3.2.2 แบบวัดได้เต็มวงกลม

เป็นเครื่องมือวัดมุมที่ใช้งานได้ครบวงกลม ได้แก่ Indexing table, Rotary Table, Theodolite, ในอดีตเครื่องมือเหล่านี้จะมีความละเอียดไม่สูงมากนักเนื่องจากข้อจำกัดในการทำฟันเฟือง แต่ในปัจจุบันเมื่อมีการนำ Rotary Encoder มาใช้งานควบคู่กับ Motor เช่น Servo Motor ทำให้สามารถใช้งานในช่วงที่ละเอียดมากขึ้น

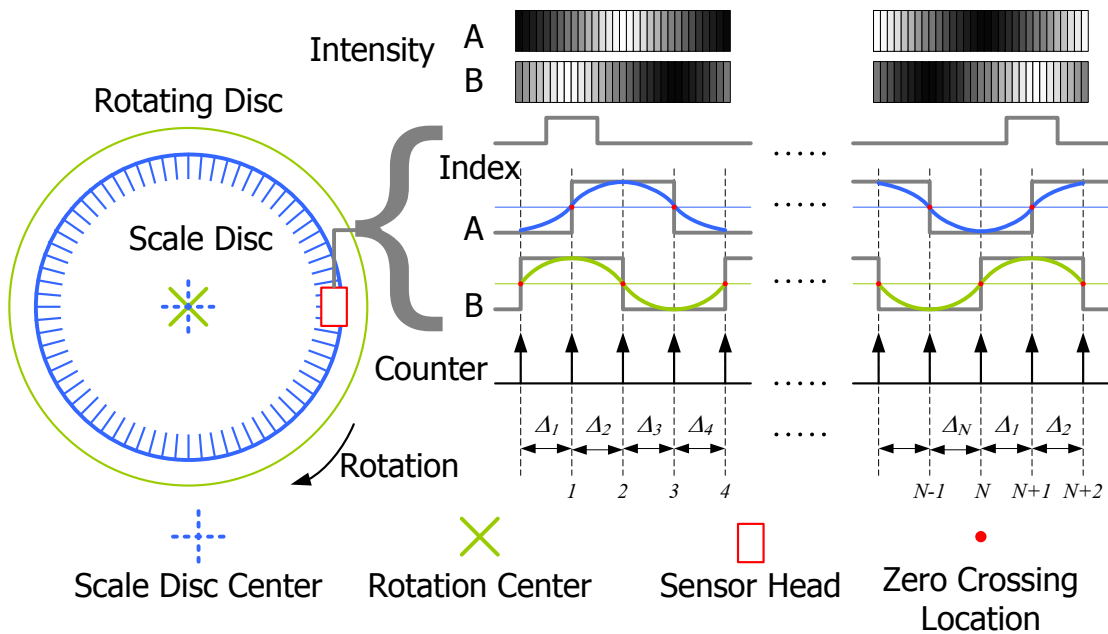
3.3 ทำไมต้องเป็น Rotary Encoder

เนื่องจากเครื่องมือวัดมุมต่างๆที่กล่าวมาข้างต้นมักมีข้อจำกัดอย่างใดอย่างหนึ่ง เช่น มีช่วงการใช้งานจำกัด หรือมีความละเอียดจำกัด Rotary Encoder คืออุปกรณ์ที่สามารถนำมาตอบโจทย์เหล่านี้ได้ กล่าวคือ สามารถใช้งานได้ครบวงกลม มีความละเอียดสูง ใช้งานได้ทั้งแกนตั้งและแกนนอน มีรอบการทำงานที่รวดเร็ว และสามารถเลือกได้ว่าจะใช้ความแม่นยำหรือละเอียดเท่าไร เนื่องจากมีรุ่นการใช้งานที่หลากหลาย นอกจากนี้ยังสามารถทำงานร่วมกับหน่วยประมวลผล เช่น คอมพิวเตอร์ทั้งที่ติดตั้งภายในและภายนอกเครื่องทำให้สะดวกต่อการใช้งาน ปัจจุบัน Rotary Encoder ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายทั้งด้านอุตสาหกรรม หรือการศึกษาวิจัย แต่ยังมีข้อด้อยบางประการคือ ในประเทศไทยยังไม่มีระบบตรวจสอบหรือสอบเทียบอย่างเป็นทางการและมีความน่าเชื่อถือ การทำวิทยานิพนธ์นี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะสร้างระบบสอบเทียบเครื่อง Rotary Encoder แล้วนำมาใช้เป็นมาตรฐานทางด้านการวัดมุมเพื่อให้มีระบบสอบกลับทางการวัด (Traceability) ของ Rotary Encoder ของประเทศ

3.4 องค์ประกอบของ Rotary Encoder

Rotary Encoder หรือ Angel Encoder ประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก 2 อย่างดังรูปที่ 3.1 คือ

- 3.4.1 จานสเกล (Scale disc) โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นแผ่นกลมที่มีขีดทำเป็นเครื่องหมายไว้อยู่บนรอบจาน ซึ่งจะติดอยู่บนแกนหมุน
- 3.4.2 หัวอ่าน (Reading Head หรือ Sensor) ใช้สำหรับอ่านตำแหน่งของขีดบนจานสเกล โดยหัวอ่านจะอยู่กับที่ไม่ได้หมุนไปตามแกนหมุน



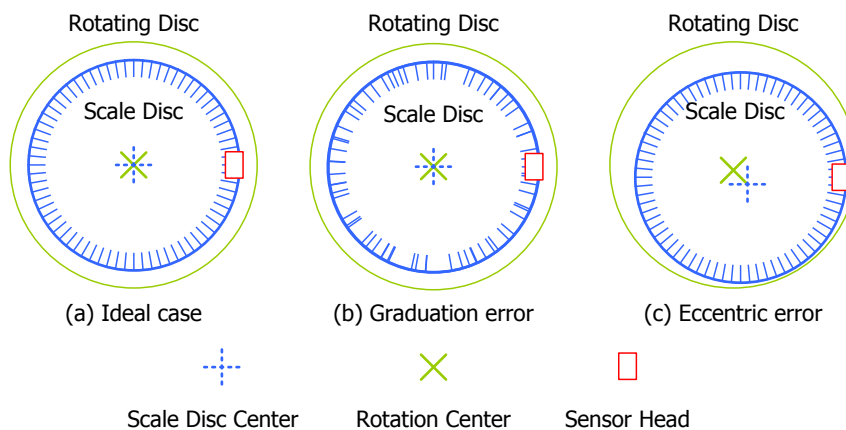
รูปที่ 3.1 องค์ประกอบและการทำงานพื้นฐานของ Rotary Encoder

เมื่อจานสเกลหมุนไปขีดสเกลที่อยู่บนจาน จะถูกอ่านโดยหัวอ่านแล้วส่งสัญญาณเป็นคลื่นรูป sine 2 ชุด ที่มีความต่างเฟสอยู่ 90° ตัวนับสัญญาณจะทำการนับขีดสเกลที่ตัดผ่านหัวอ่านว่า หมุนไปเป็นมุมขนาดเท่าใด ตัวอย่างเช่น จานสเกลแผ่นหนึ่งมีขีดทั้งหมด 360 ขีด โดยแต่ละขีดมีระยะทำมุมกัน 1° เมื่อจานสเกลหมุนผ่านหัวอ่านไป 10 ขีด จะอ่านค่าได้ว่า หมุนไป 10° เป็นต้น แต่ในความเป็นจริงแล้ว ไม่เป็นเช่นนั้นเนื่องจาก Rotary Encoder มีความคลาดเคลื่อนอยู่

3.5 ความคลาดเคลื่อนของ Rotary Encoder

ความคลาดเคลื่อนของ Rotary Encoder สามารถแสดงดังรูป 3.2 ดังนี้

- 3.5.1 Graduation Error เกิดจากขีดสเกลที่อยู่บนจานมีความคลาดเคลื่อน (b)
- 3.5.2 Eccentric Error เกิดจากการเอียงศูนย์ของจานสเกลที่ไม่ร่วมแกนกับแกนหมุน (c)

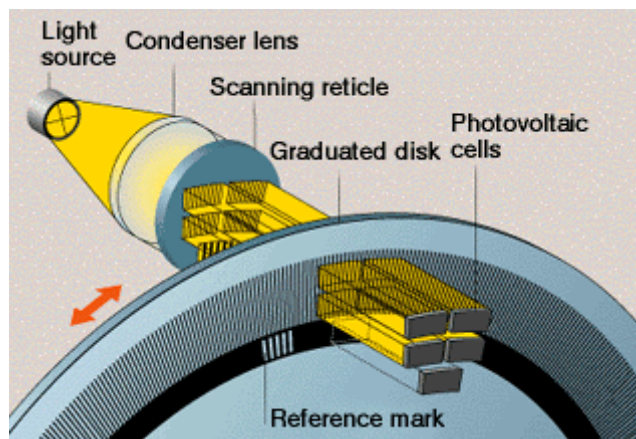


รูปที่ 3.2 ความคลาดเคลื่อนของ Rotary Encoder

3.6 วิธีการทำงานของหัวอ่าน

3.6.1 Image Scanning Principle [8]

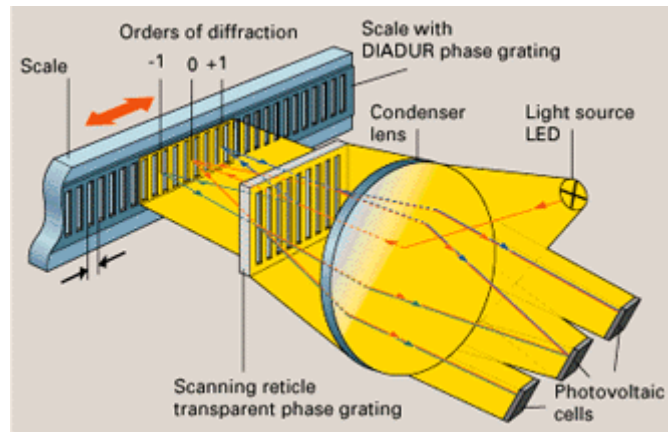
Rotary Encoder ส่วนมากที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน มีลักษณะการทำงานเป็นแบบ Image Scanning โดยทั่วไปแล้วจะใช้กับขีดสเกลที่มีความห่างกันในแต่ละขีดมากกว่า 10 um ในส่วนของหัวอ่านจะมีแหล่งกำเนิดแสง(Light source) เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดแสงส่องผ่านเลนส์รวมแสง (Condenser lens) และไปยังช่องแสง (Scanning reticle) แล้วผ่านทะลุจานสเกล(Graduated disk) ไปยังเซลล์รับแสง (Photovoltaic cells) พลังงานแสงจะเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า เมื่อจานสเกลหมุนผ่านหัวอ่านความเข้มแสงที่ตกกระทบบนเซลล์รับแสงจะเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ ถ้าเป็นส่วนที่เป็นช่องว่างระหว่างขีดสเกล ความเข้มชั้นแสงก็จะมาก หากเป็นส่วนที่เป็นขีดก็จะทึบแสง ความเข้มแสงที่ตกกระทบเป็นเซลล์รับแสงก็จะลดลงเกิดเป็นสัญญาณมีด-สว่างสลับกันไป สัญญาณที่ได้ออกมาจะมีลักษณะเหมือนสัญญาณรูป Sine



รูปที่ 3.3 Image Scanning Principle

3.6.2 Interferential Scanning Principle [8]

วิธี Interferential Scanning Principle มีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกับแบบ Image Scanning แต่จะใช้หลักการของการแทรกสอดของแสงเข้ามาช่วย กล่าวคือ แสงจากแหล่งกำเนิด (LED) จะผ่านเลนส์รวมแสง (Condenser lens) ไปยังช่องแสง (Scanning reticle) ที่ช่องแสงนี้เองแสงที่มากกระทบจะถูกหักเหทั้งที่เป็นแบบรวมกันและหักล้างกันเป็นลักษณะ $-1, 0, +1$ หลังจากนั้น แสงจะไปตกกระทบบนจานสเกลที่มีแถบสเกลลักษณะเป็นขั้นๆ แต่จะต่างกันตรงที่ขีดสเกลแบบนี้สามารถสะท้อนแสงได้ เมื่อลำแสงตกกระทบลงบนจานสเกลจะถูกหักเหอีกครั้ง ทำให้เกิดลำแสงใหม่ที่มีความเข้มแสงเป็นลักษณะ $-1, 0$ และ $+1$ หลังจากนั้น ลำแสงจะสะท้อนกลับไปช่องแสงแล้วหักเหเป็นครั้งสุดท้ายก่อนจะไปตกกระทบบนเซลล์รับแสง เซลล์รับแสงจะเปลี่ยนพลังงานแสงที่มีความเข้มต่างๆ กันไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า



รูปที่ 3.4 Interferential Scanning Principle

วิธีการสอบเทียบหรือวัดค่าสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทได้แก่

1) การวัดโดยตรง (Direct Measurement)

วิธีการวัดแบบตรงคือการนำอุปกรณ์ที่เป็นตัวมาตรฐานไปวัดอุปกรณ์ที่ต้องการสอบเทียบโดยตรง

2) การวัดโดยอ้อม (Indirect Measurement)

วิธีการวัดแบบอ้อมคือการนำอุปกรณ์ที่เป็นตัวมาตรฐานไปวัดสิ่งอื่นที่สามารถแสดงถึงสิ่งที่เราต้องการวัดได้

ตัวอย่างการวัดโดยตรงได้แก่การนำไม้บรรทัดไปวัดความยาวของสิ่งของที่เราต้องการทราบ ส่วนการวัดโดยอ้อมได้แก่การวัดความเร็วลม เนื่องจากเราไม่สามารถวัดความเร็วลมโดยตรงได้ แต่หากมีอุปกรณ์ที่เปลี่ยนความเร็วลมเป็นสิ่งที่นับค่าได้เช่นกังหันลมโดยสามารถนับว่าหมุนด้วยความเร็วกี่รอบต่อนาทีเราก็สามารถวัดความเร็วลมออกมาได้ การวัดแบบ Indirect ในทางมาตรวิทยาสามารถทำได้หลายแบบเช่น

วิธีการวัดแบบเปรียบเทียบ (Comparison Measurement) เป็นวิธีการวัดแบบที่สนใจเฉพาะค่าที่แตกต่างกันโดยใช้สิ่งใดสิ่งหนึ่งมาเป็นตัวเปรียบเทียบตัวอย่างเช่นตาชั่งเงินโบราณ

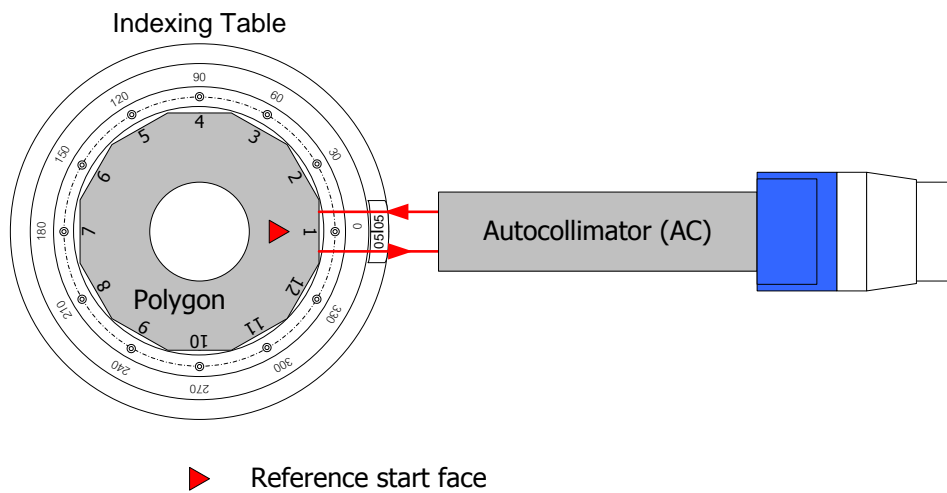
วิธีการวัดแบบ Spectrophotometer เป็นวิธีการวัดแบบใช้ Spectrum ของแสงวัดปริมาณของสสาร

วิธีการวัดแบบข้าม (Cross Calibration) คือการวัดที่อุปกรณ์ที่สามารถวัดกันเองได้นั้นคืออุปกรณ์แต่ละตัวสามารถเป็นได้ทั้งตัวมาตรฐานและตัวถูกสอบเทียบ ตัวอย่างได้แก่ การวัด Polygon Mirror ด้วย Indexing Table โดยใช้ Autocollimator อ่านค่า, การวัดความกลมของ Hemisphere ด้วย Indexing Table โดยใช้ Inductive Probe อ่านค่า เป็นต้น วิธีการวัดประเภทนี้มักใช้การเทคนิคคำนวณแบบ Phase Shifted มาหาค่าความคลาดเคลื่อนซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

หลักการสอบเทียบ Rotary Encoder มีพื้นฐานมาจากการวัด Indexing Table เนื่องจากอุปกรณ์ทั้งสองทำหน้าที่แบบเดียวกันนั้นคือหมุนชิ้นงานไปยังตำแหน่งมุมที่ต้องการ

3.7 Cross Calibration

Cross Calibration หรือ Multistep Method เป็นวิธีดั้งเดิมที่ใช้ในการวัดอุปกรณ์ที่มีการทำงานเป็นคาบหรือครบรอบของวงกลม เช่น Indexing Table, Polygon Mirror เป็นต้น จุดประสงค์ในการวัดก็คือการหาค่าความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ที่มุมตำแหน่งต่างๆ ระบบการวัดหรือสอบเทียบจะประกอบด้วย 1) Polygon Mirror ที่มีหน้าเป็นกระจกสะท้อนและติดตั้งอยู่บน Indexing Table 2) Indexing Table ซึ่งทำหน้าที่หมุน Polygon Mirror ไปในตำแหน่งมุมต่างๆ และ 3) Autocollimator คืออุปกรณ์ที่ใช้อ่านค่าของมุมที่คลาดเคลื่อนไป



รูปที่ 3.5 การสอบเทียบ Polygon Mirror by one Autocollimator

เมื่อหมุน Polygon จากหน้าหนึ่งไปอีกหน้าถัดไปค่าที่อ่านได้จาก Autocollimator คือค่าความคลาดเคลื่อนที่รวมกันระหว่าง Polygon และ Indexing ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ กำหนดให้

$\delta_{i,j}$ คือค่าความคลาดเคลื่อนที่อ่านได้จาก Autocollimator

a_i คือค่าความคลาดเคลื่อนของ Polygon Mirror ที่ตำแหน่ง i เมื่อเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง

b_j คือค่าความคลาดเคลื่อนของ Indexing Table ที่ตำแหน่ง j เมื่อเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง

A คือค่าความคลาดเคลื่อนรวมของ Polygon Mirror ซึ่งมีค่าเท่ากับศูนย์

B คือค่าความคลาดเคลื่อนรวมของ Indexing Table

จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ว่า

$$\delta_{i,j} = a_i + b_j \quad (3.1)$$

เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจจะใช้ Mathematical Model ที่ใช้กับ Polygon Mirror แบบ 4 หน้าที่ทำมุมกันในแต่ละหน้าเป็นมุม 90° โดยมีลำดับวิธีการวัดดังนี้

3.7.1 วิธีการวัดแบบ Cross Calibration by one Autocollimator

1) Polygon Mirror จะถูกติดตั้งบน Indexing Table โดยให้ Polygon Mirror หน้าที 1 ตรงกับ Indexing Table หน้าที 0° แล้วติดตั้ง Autocollimator ให้ตรงกับหน้าที 1 ของ Polygon Mirror จากนั้นหมุนไปที่ละหน้าพร้อมบันทึกค่าที่อ่านได้จาก Autocollimator ในทีนี้คือช่องสี่มุมซึ่งค่าที่อ่านได้จะเป็น $(a_1+b_1) \rightarrow (a_2+b_2) \rightarrow (a_3+b_3) \rightarrow (a_4+b_4) \rightarrow (a_1+b_1)$

2) เปลี่ยนตำแหน่ง Polygon Mirror บน Indexing Table โดยให้ Phase Shifted ทีละ 90° นั่นคือให้ Polygon Mirror หน้าที 1 ตรงกับ Indexing Table หน้าที 90° แล้วหมุนไปที่ละหน้าพร้อมบันทึกค่าที่อ่านได้จาก Autocollimator ในทีนี้คือช่องสี่ฟ้า ซึ่งค่าที่อ่านได้จะเป็น $(a_2+b_1) \rightarrow (a_3+b_2) \rightarrow (a_4+b_3) \rightarrow (a_1+b_4) \rightarrow (a_2+b_1)$

3) ทำเหมือนขั้นตอนที่ 2) โดยเปลี่ยนตำแหน่งของ Polygon Mirror ไปที 180° (ช่องสีเหลือง) และ 270° (ช่องเขียว) ตามลำดับ

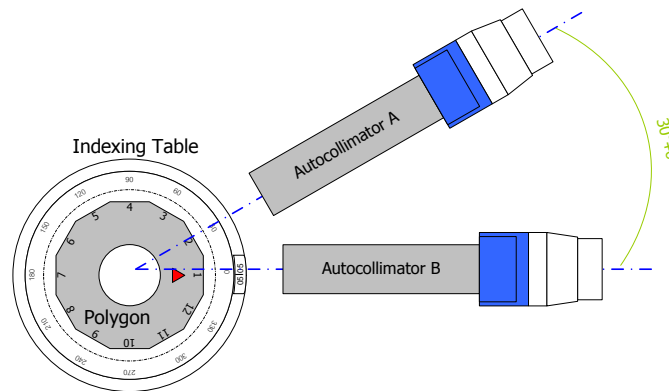
4) เมื่อเก็บข้อมูลที่ได้ทั้งหมด $(n \times n; n=4)$ 16 ค่า แล้วนำมาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของ Polygon และ Indexing Table ดังตารางที่ 3.2 กล่าวคือ นำค่าที่ได้ในแต่ละแถวและแต่ละหลักมาหาค่าผลรวม ทำการเฉลี่ยแล้วนำไปหาค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของแต่ละหน้าของ Indexing Error และ Polygon Error ตามลำดับ

ตารางที่ 3.2 วิธีการคำนวณความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบ Polygon Mirror by one Autocollimator

Polygon \ Indexing	1→2	2→3	3→4	4→1	sum	Face-Face Indexing Error
$0^\circ-90^\circ$	a_1+b_1	a_2+b_1	a_3+b_1	a_4+b_1	$A+4b_1$	b_2-b_1
$90^\circ-180^\circ$	a_1+b_2	a_2+b_2	a_3+b_2	a_4+b_2	$A+4b_2$	b_3-b_2
$180^\circ-270^\circ$	a_1+b_3	a_2+b_3	a_3+b_3	a_4+b_3	$A+4b_3$	b_4-b_3
$270^\circ-0^\circ$	a_1+b_4	a_2+b_4	a_3+b_4	a_4+b_4	$A+4b_4$	b_1-b_4
sum	$4a_1+B$	$4a_2+B$	$4a_3+B$	$4a_4+B$	$A=\sum a_i=0$	$A=a_1+a_2+a_3+a_4$
Face-Face Polygon Error	a_2-a_1	a_3-a_2	a_4-a_3	a_1-a_4	$B=\sum b_i$	$B=b_1+b_2+b_3+b_4$

3.7.2 วิธีการวัดแบบ Cross Calibration by two Autocollimators

วิธีการนี้พัฒนาขึ้นมาจากแบบที่ใช้ Autocollimator เพียงตัวเดียวโดยมีวิธีการวัดดังนี้



รูปที่ 3.6 การสอบเทียบ Polygon Mirror by two Autocollimators

c คือค่าความคลาดเคลื่อนของ การวางตำแหน่งของ Autocollimator ระหว่างหน้า Polygon

1) ติดตั้ง Polygon Mirror บน Indexing Table โดยให้ Polygon Mirror หน้าที 1 ตรงกับ Indexing Table หน้าที 0° วาง Autocollimator ตัวที่หนึ่ง (A) ให้ตรงกับ Polygon Mirror หน้าที 1 ส่วน Autocollimator ตัวที่สอง (B) ให้ตรงกับ Polygon Mirror หน้าที 2 แล้วหมุนไปที่ละหน้าพร้อมบันทึกค่าที่อ่านได้จาก Autocollimator ทั้งสองตัวลงในตารางบันทึกค่า

2) ถ้า Polygon มี 4 ด้านจะเก็บข้อมูลที่ได้ทั้งหมด 8 ค่าโดยได้จาก Autocollimator A และ B ตัวละ 4 ค่า แล้วนำมาคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของ Polygon และ Indexing Table ดังตารางที่ 3.3 กล่าวคือ นำค่าที่ได้ในแต่ละแถวมาหาค่าผลต่าง ทำการเฉลี่ยแล้วนำไปหาค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของแต่ละหน้าของทั้ง Indexing Error และ Polygon Error

ตารางที่ 3.3 วิธีการคำนวณความคลาดเคลื่อนของการสอบเทียบ Polygon Mirror by two Autocollimators

Indexing Table Position	A Read Out	B Read Out	B-A	Polygon Face Number	Face-Face Polygon Error	Face-Face Indexing Error
$0^\circ-90^\circ$	a1+b1	a2+b1+c	a2-a1+c	1-2	a2-a1	b2-b1
$90^\circ-180^\circ$	a2+b2	a3+b2+c	a3-a2+c	2-3	a3-a2	b3-b2
$180^\circ-270^\circ$	a3+b3	a4+b3+c	a4-a3+c	3-4	a4-a3	b4-b3
$270^\circ-0^\circ$	a4+b4	a1+b4+c	a1-a4+c	4-5	a1-a4	b1-b4
Average	-	-	sum/n=c n=4	-	-	-

จากตารางที่ 3.3 สามารถเขียนความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้จากการทดลองได้เป็น

$$\delta_{i,j} = a_{i+1} - a_i + c \quad (3.2)$$

$\delta_{i,j}$ เป็นค่าผลต่างระหว่าง Autocollimator A กับ B ที่วัดได้จากการทดลอง

$a_{i+1} - a_i$ เป็นค่าที่ต้องการหา

$$c \text{ เป็นที่ได้จากการคำนวณโดย } c = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_{i,j}}{n} \quad (3.3)$$

จะเห็นได้ว่าการสอบเทียบ Polygon และ Indexing Table จากทั้งสองวิธีจะสามารถวัดค่าไปพร้อมๆ กันและด้วยเทคนิคการคำนวณทางคณิตศาสตร์จะสามารถหาค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละหน้าของ Polygon Mirror และแต่ละตำแหน่งของ Indexing Table ได้ แต่วิธีที่ใช้ Autocollimator สองตัว อ่านค่านั้นสามารถวัดผลการทดลองทั้งหมดได้เพียงการหมุนเพียงหนึ่งรอบและไม่ต้องการการเปลี่ยนตำแหน่งการติดตั้งของ Polygon Mirror บน Indexing Table อีกทั้งข้อมูลที่ต้องการยังมีปริมาณที่น้อยกว่าอีกด้วยโดยวิธีที่ใช้ Autocollimator 1 ตัวต้องการข้อมูล n^2 ค่า ส่วนแบบที่ใช้ Autocollimator 2 ตัวต้องการข้อมูล $2n$ ค่า

3.8 Cross Calibration by Rotary Encoder

เป็นการนำเอาหลักการของ Cross Calibration มาใช้กับ Rotary Encoder โดยระบบสอบเทียบแบบนี้จะประกอบไปด้วย Encoder 2 ชุดคือ Encoder A และ B ทุกๆช่องสเกลของ Encoder B จะถูกเปรียบเทียบกับ ทุกๆช่องสเกลของ Encoder A ดังรูปที่ 3.7 และ 3.8 b_i และ a_j คือระยะมุมที่ i ของ Encoder B และมุมที่ j ของ Encoder A ตามลำดับ โดยกำหนดให้ $\delta_{i,j} = b_i - a_j$ จะได้ว่า

$$\begin{array}{ccccccc} \delta_{1,1} = b_1 - a_1; & \delta_{1,2} = b_1 - a_2; & \delta_{1,3} = b_1 - a_3; & \dots; & \delta_{1,n} = b_1 - a_n \\ \delta_{2,1} = b_2 - a_1; & \delta_{2,2} = b_2 - a_2; & \delta_{2,3} = b_2 - a_3; & \dots; & \delta_{2,n} = b_2 - a_n \\ \delta_{3,1} = b_3 - a_1; & \delta_{3,2} = b_3 - a_2; & \delta_{3,3} = b_3 - a_3; & \dots; & \delta_{3,n} = b_3 - a_n \\ \Downarrow & \Downarrow & \Downarrow & & \Downarrow \\ \delta_{n,1} = b_n - a_1; & \delta_{n,2} = b_n - a_2; & \delta_{n,3} = b_n - a_3; & \dots; & \delta_{n,n} = b_n - a_n \end{array}$$

กำหนดให้ $a_j = a_o + \delta a_j$ และ $b_i = b_o + \delta b_i$

a_o คือค่าของระยะมุมแต่ละช่องของ Encoder A ที่เป็นอุดมคติโดย $a_o = \frac{2\pi}{n_a}$

b_o คือค่าของระยะมุมแต่ละช่องของ Encoder B ที่เป็นอุดมคติโดย $b_o = \frac{2\pi}{n_b}$

$\mu_{i,j} = \frac{1}{n} \sum_{i=1, j=1}^n \delta_{i,j}$ คือค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่าง b_i กับ a_j จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta_{1,j} = b_1 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_j = b_o + \delta b_1 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (a_o + \delta a_j) \quad (3.4) \\ &= b_o + \delta b_1 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_o - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta a_j = b_o + \delta b_1 - a_o - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta a_j = \delta b_1 \end{aligned}$$

ถ้า Encoder A และ B มีขีดสเกลเท่ากัน $b_o = a_o$

และเนื่องจาก $\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta a_j = 0$ จะได้ว่า

$$\mu_1 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta_{1,j} = b_1 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_j = \delta b_1 \quad (3.5)$$

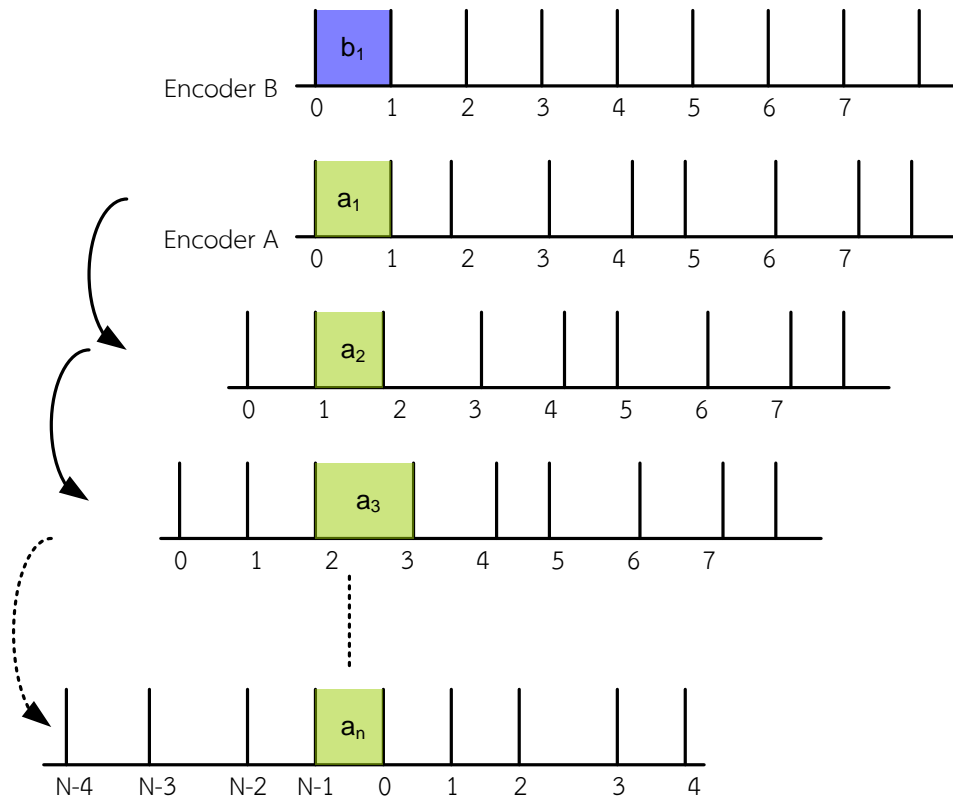
$$\mu_2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta_{2,j} = b_2 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_j = \delta b_2 \quad (3.6)$$

$$\mu_3 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta_{3,j} = b_3 - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_j = \delta b_3 \quad (3.7)$$

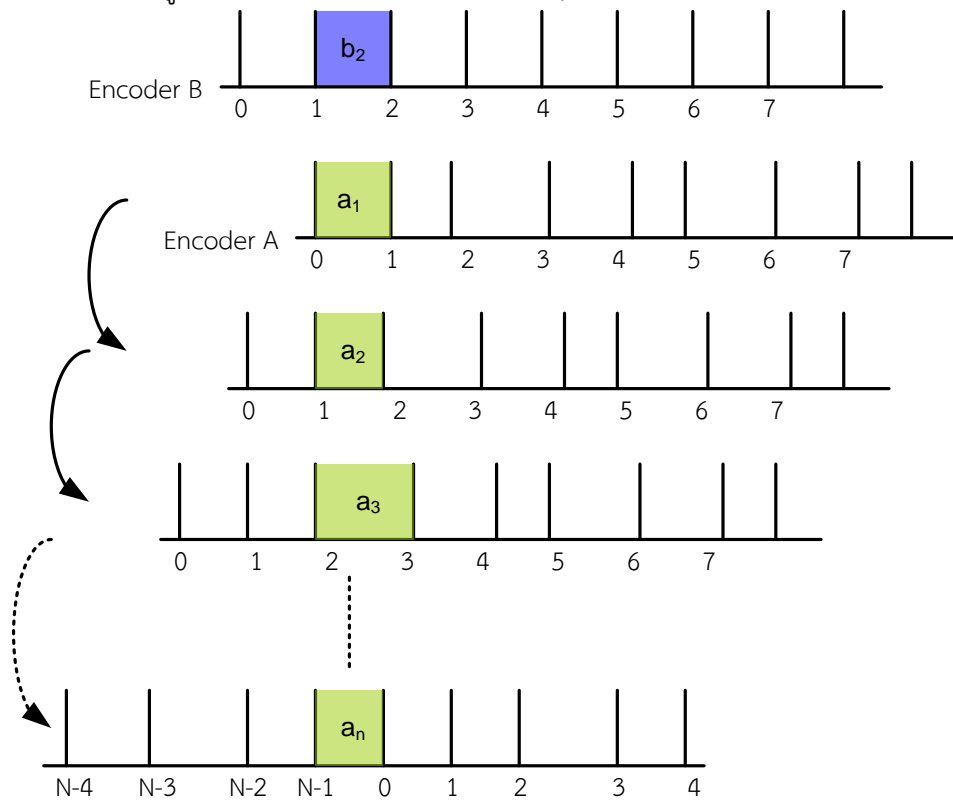
↓ ↓ ↓

$$\mu_n = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta_{n,j} = b_n - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_j = \delta b_n \quad (3.8)$$

แทนค่า a_o และ b_o

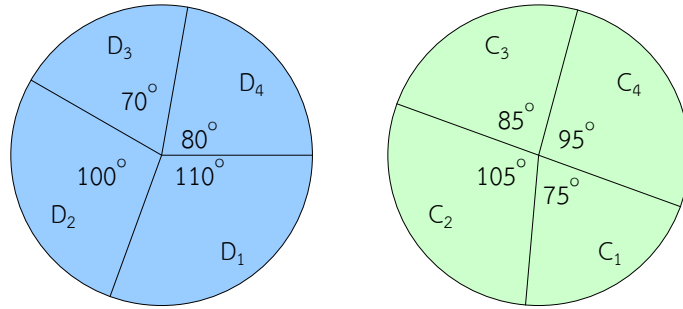


รูปที่ 3.7 Cross Calibration Rotary Encoder b_1 vs Encoder A



รูปที่ 3.8 Cross Calibration Rotary Encoder b_2 vs Encoder A

เพื่อให้ทำความเข้าใจง่ายขึ้นสมมติให้มี Encoder C และ Encoder D แต่ละ Encoder มีช่องสเกล 4 ช่องแต่ละช่องทำมุมกันดังรูปที่ 3.9 ช่องสเกลแต่ละช่องของ Encoder C จะถูกเปรียบเทียบกับทุกช่องสเกลของ Encoder D จะได้ว่า



รูปที่ 3.9 Cross Calibration Rotary Encoder C vs Encoder D

$$\delta_{1,1} = D_1 - C_1 = 110 - 75 = (90 + 20) - (90 - 15) = 35$$

$$\delta_{1,2} = D_1 - C_2 = 110 - 105 = (90 + 20) - (90 + 15) = 5$$

$$\delta_{1,3} = D_1 - C_3 = 110 - 85 = (90 + 20) - (90 - 5) = 25$$

$$\delta_{1,4} = D_1 - C_4 = 110 - 95 = (90 + 20) - (90 + 5) = 15$$

นำค่าที่ได้จากด้านบนมาแทนค่าลงในสมการ (3.4)

$$\mu_n = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta_{n,j} = d_n - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_j = d_o + \delta d_1 - c_o - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta c_j = \delta d_n \quad (3.9)$$

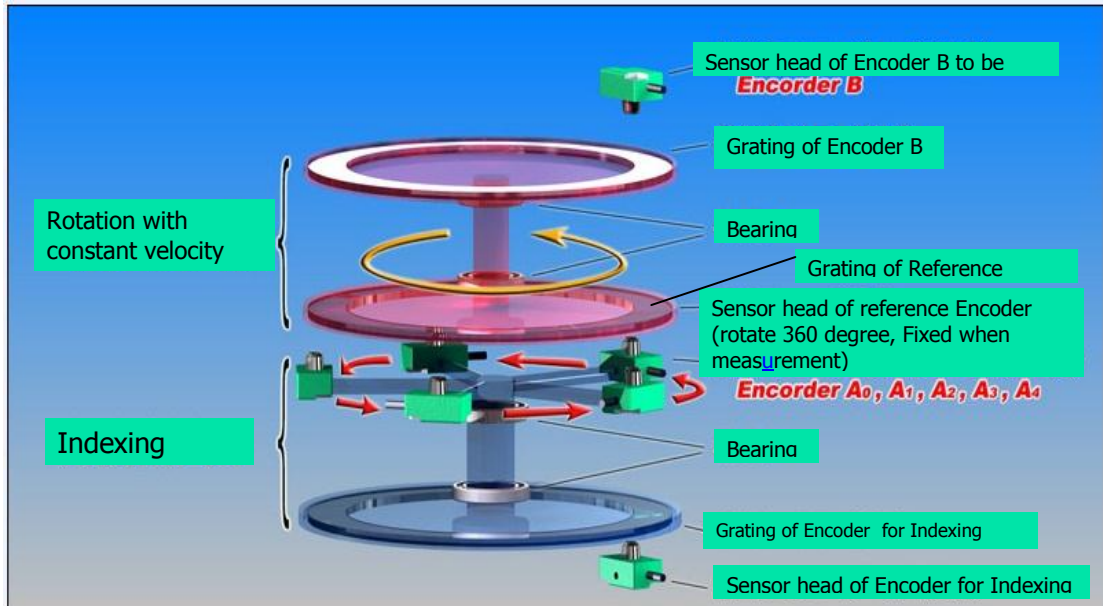
$$\mu_1 = \frac{(35 + 5 + 25 + 15)}{4} = d_n - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_j = 90 + \delta d_1 - 90 - 0 = 20 \quad (3.10)$$

$$d_1 = d_o + \delta d_1 = 110 = 90 + 20 \quad (3.11)$$

δd_1 คือค่า Error ของช่องสเกล $D_1 = 20^\circ$ เป็นค่าที่ต้องการ

ข้อสังเกต เราต้องวัดข้อมูล $1 \times N$ ค่าเพื่อสอบเทียบ ช่องสเกลเพียง 1 ช่อง และต้องวัดข้อมูล $N \times N$ ค่าเพื่อสอบเทียบช่องสเกลทั้งหมด

3.9 Equal-Division-Averaged Method (EDA)



รูปที่ 3.10 ระบบสอบเทียบ EDA

ระบบสอบเทียบแบบ EDA ถูกสร้างขึ้นโดย T. Watanabe et al. [3] มีส่วนประกอบหลักดังนี้

3.9.1 Encoder for Indexing ทำหน้าที่เพียงควบคุมตำแหน่งของ Servo Motor

3.9.2 Encoder A เป็น Encoder อ่างอิง มีหัวอ่าน 5 หัวแต่ละหัวห่างกันเป็นมุม $\frac{2\pi}{5}$

3.9.3 Encoder B เป็น Encoder อ่างอิง มีหัวอ่าน 1 หัว

Encoder ทั้งสามชุดถูกติดตั้งบนแกนหมุนเดียวกัน เมื่อเริ่มทำงาน Encoder ทั้งหมดจะหมุนไปด้วยความเร็วคงที่ซึ่งสเกลที่อยู่บน Encoder ทั้ง A และ B จะเคลื่อนตัดผ่านหัวอ่าน ค่าที่อ่านได้จาก Encoder A และ B จะถูกนำไปคำนวณหาค่า Error ของแต่ละ Encoder ได้

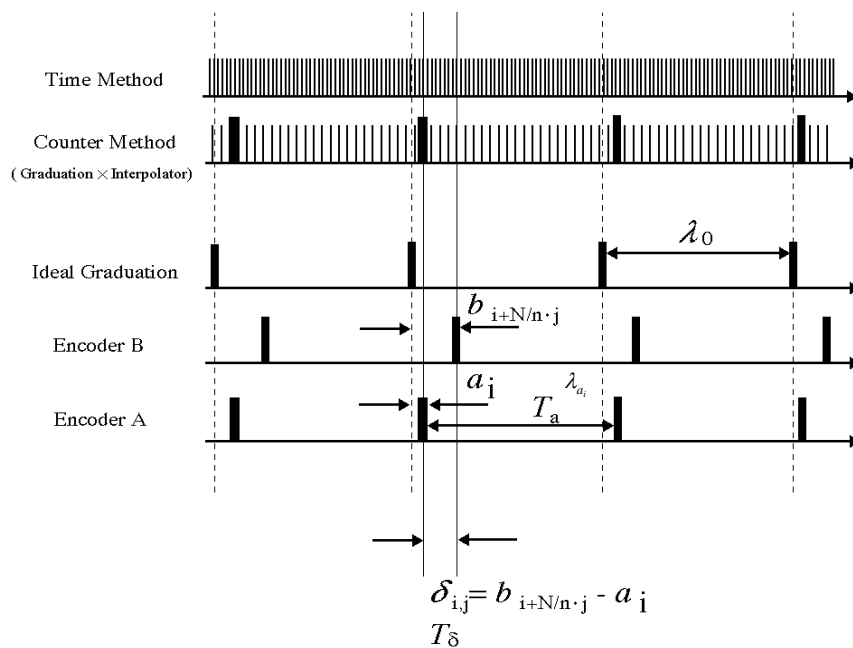
พิจารณารูปที่ 3.11

Time Method คือระยะเวลาจริงที่ดำเนินไปขณะทำการทดลอง

Counter Method คืออุปกรณ์นับสัญญาณโดยการนับขีดที่อยู่บนแผ่นสเกล ทั้งนี้อาจใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Interpolator มาช่วยสร้างสัญญาณเทียมที่อยู่ระหว่างช่องของขีดสเกล

Ideal Graduation คือแผ่นสเกลอุดมคติที่มีขนาดของช่องเท่ากันทุกช่อง

Encoder A และ B คือแผ่นสเกลจริงที่มีขนาดของช่องคลาดเคลื่อนไปจากสเกลอุดมคติ



รูปที่ 3.11 หลักการทำงานของ EDA

กำหนดให้

λ_o คือขนาดของช่องสเกลอุดมคติ

T_o คือเวลาระหว่างช่องสเกลอุดมคติ

λ_a และ λ_b คือขนาดของช่องสเกลของ Encoder A และ B ตามลำดับ

T_a และ T_b คือเวลาระหว่างช่องสเกลของ Encoder A และ B ตามลำดับ

$\delta_{i,j}$ คือขนาดของระยะสเกลที่แตกต่างกันระหว่าง Encoder A กับ B

T_δ คือเวลาที่เกิด $\delta_{i,j}$

ω คือความเร็วที่ใช้ในการหมุน

เนื่องจากระบบหมุนไปด้วยความเร็วคงที่พร้อมๆกัน

$$\omega = \frac{\lambda_o}{T_o} = \frac{\lambda_a}{T_a} = \frac{\lambda_b}{T_b} = \frac{\delta_{i,j}}{T_\delta} \quad (3.12)$$

จากสมการ (3.12) เราสามารถหาค่า λ_a และ λ_b ได้หากทราบค่าของ λ_o และ T_o แต่ในความเป็นจริงแล้ว λ_o และ T_o เป็นค่าในอุดมคติสมการ (3.12) จึงไม่สามารถใช้ได้จริง

แต่เราสามารถหาค่าผลต่างของสัญญาณระหว่าง Encoder A กับ B ได้ดังนี้
กำหนดให้

δ_i คือผลต่างระหว่างขีดสเกลบน Encoder A และ B

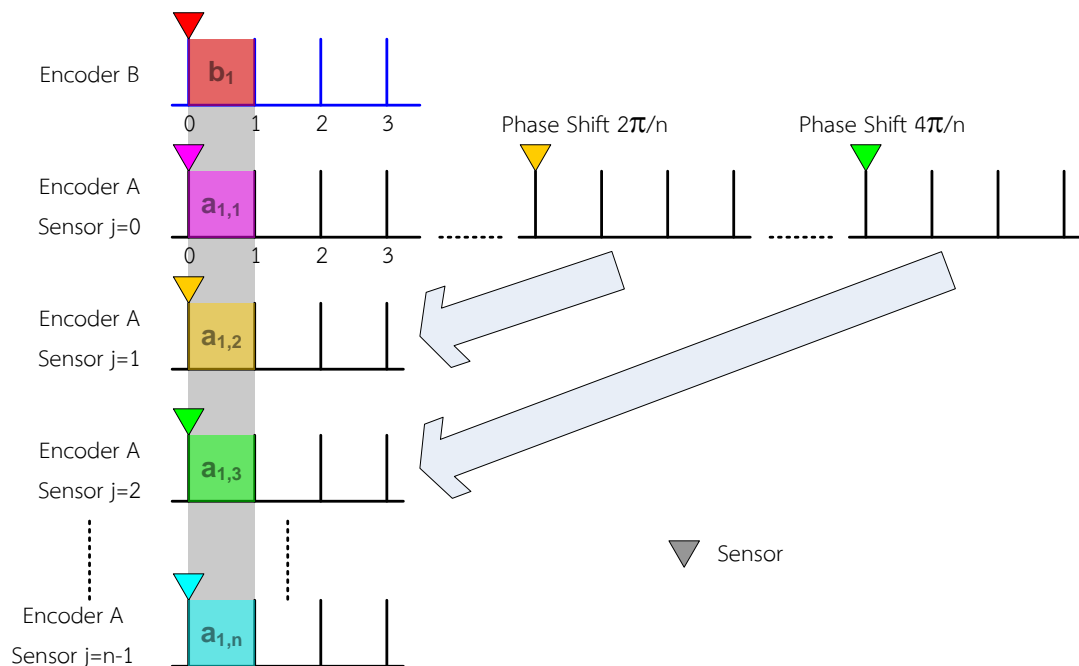
a_i คือตำแหน่งของขีดสเกลที่ i บน Encoder A

b_i คือตำแหน่งของขีดสเกลที่ i บน Encoder B

ถ้า Encoder A และ B มีขีดบนงานสเกลเท่ากันจะได้ว่า

$$\delta_i = b_i - a_i \quad (3.13)$$

ถ้า Encoder A มีหัวอ่าน (Reading Head หรือ Sensor) ที่วางตำแหน่งเป็นระยะมุมเท่าๆกัน
($2\pi/n$) เป็นจำนวน n หัวดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.12 ตำแหน่งหัวอ่าน (Sensor) บนงานสเกลของระบบ EDA

หากเราให้ Encoder A มีหัวอ่าน 5 หัวที่แต่ละหัวทำมุมกันเท่ากับ $2\pi/5$ หรือ 72° สามารถเขียนความสัมพันธ์ของค่าที่อ่านได้จากหัวอ่านดังนี้

กำหนดให้

$i=1,2,3,\dots,N$ เป็นอันดับของซีดสเกลบน Encoder A และ B

$j=0,1,2,\dots,n$ เป็นอันดับของหัวอ่านบน Encoder A

$$\text{ที่ตำแหน่งเริ่มต้น } 0^\circ \quad \delta_{i,0} = b_{i,0} - a_i \quad (3.14)$$

$$\text{ที่ตำแหน่ง } 72^\circ \quad \delta_{i,1} = b_{i,1} - a_i \quad (3.15)$$

$$\text{ที่ตำแหน่ง } 144^\circ \quad \delta_{i,2} = b_{i,2} - a_i \quad (3.16)$$

$$\text{ที่ตำแหน่ง } 216^\circ \quad \delta_{i,3} = b_{i,3} - a_i \quad (3.17)$$

$$\text{ที่ตำแหน่ง } 288^\circ \quad \delta_{i,4} = b_{i,4} - a_i \quad (3.18)$$

นำค่าที่ได้จากสมการ (3.14) ถึง (3.18) มาทำการเฉลี่ยโดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ μ_i จะได้ว่า

$$\mu_i = \frac{\delta_{i,0} + \delta_{i,1} + \delta_{i,2} + \delta_{i,3} + \delta_{i,4}}{5} \quad (3.19)$$

$$= \frac{b_{i,0} + b_{i,1} + b_{i,2} + b_{i,3} + b_{i,4}}{5} - a_i \quad (3.20)$$

นำสมการ (3.14) – (3.20)

$$\delta_i - \mu_i = b_{i,0} - \frac{b_{i,0} + b_{i,1} + b_{i,2} + b_{i,3} + b_{i,4}}{5} \quad (3.21)$$

เทอม $\delta_i - \mu_i$ ได้จากการวัดผลการทดลอง

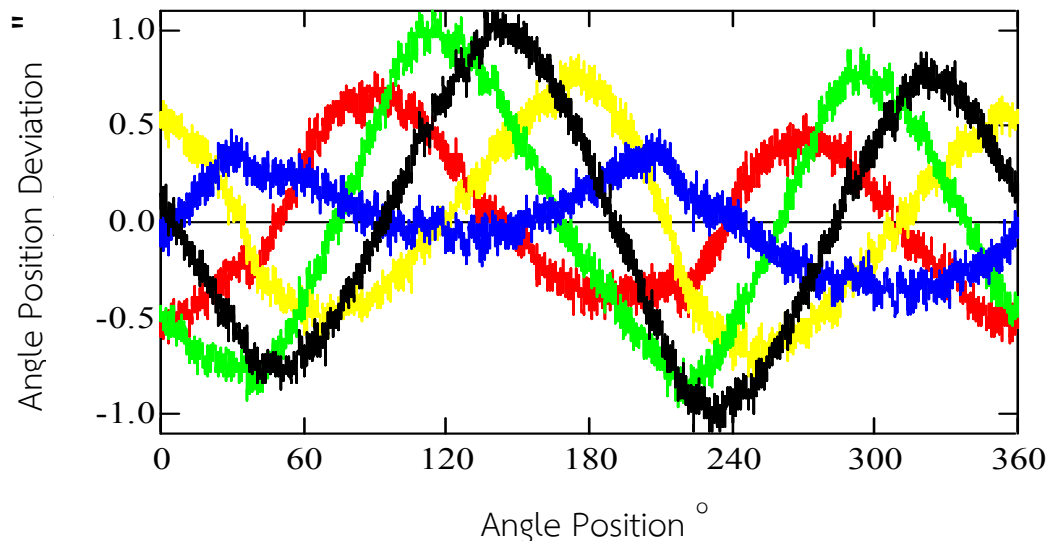
เทอม $b_{i,0}$ คือค่า Error ของ Encoder B ที่เราต้องการหาค่า

เทอม $\frac{b_{i,0} + b_{i,1} + b_{i,2} + b_{i,3} + b_{i,4}}{5}$ เป็นเทอมที่เกิดจากการนำค่า Error ของ Encoder B มาทำ

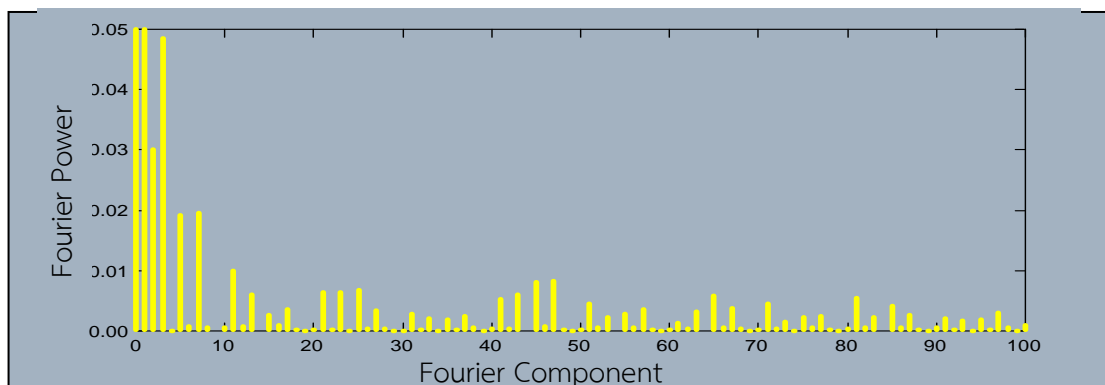
การเฉลี่ยแล้วทำให้เกิด Fourier Component ทุกๆอันดับที่ 5 ของการรวมกันจากข้อมูลทั้งห้าค่า ดังนั้นค่าที่อยู่ทางด้านขวาของสมการ (3.21) คือค่า Error ของ Encoder B ที่ไม่สมบูรณ์โดยขาดข้อมูลของ Fourier Component ทุกๆอันดับที่ 5 ไปซึ่งอธิบายได้ดังนี้

3.10 หลักการ n^{th} integral multiple Fourier component ของ EDA method

“เส้นโค้งที่มีลักษณะเป็นคาบสามารถอธิบายได้โดยใช้ *Fourier series* เมื่อนำเส้นโค้งดังกล่าวมา n เส้นโดยแต่ละเส้นมีความต่างเฟสเป็น $2\pi/n$ มาทำการเฉลี่ย ผลที่ได้คือเส้นโค้งที่มีองค์ประกอบของ *Fourier* เฉพาะลำดับที่ n ของเส้นโค้งต้นแบบ”



รูปที่ 3.13 ตัวอย่างผลการวัดจากระบบ EDA แบบ 5 Sensors



รูปที่ 3.14 Fourier Component จากผลการวัดด้วยระบบ EDA แบบ 5 Sensors

ข้อสังเกต เราต้องวัดข้อมูลเพียง $N \times n$ ค่าเพื่อสอบเทียบช่องสเกลทั้งหมด เมื่อเทียบกับแบบ Cross Calibration ต้องใช้ข้อมูลถึง $N \times N$ ค่าและ จากรูปที่ 3.14 จะเห็นได้ว่าทุก Component ที่ 5 ได้แก่ Component ที่ 5, 10, 15,...จะขาดหายไป

3.11 สาเหตุการเกิด“nth” integral multiple Fourier Component

กำหนดให้

a_i และ b_i ($i=1,2,\dots,N$) เมื่อ N คือจำนวนขีดสเกลทั้งหมด เป็นตัวบ่งชี้ตำแหน่งของขีดสเกลที่เคลื่อนไปของ encoder A และ B

$2\pi j/n$ ($j=0,1,\dots,n$) เมื่อ n คือจำนวนช่วงที่แบ่ง เป็นตัวบ่งชี้ตำแหน่งของหัววัด

a_i และ $b_{i+2\pi j/n}$ เป็นตัวบ่งชี้ตำแหน่งของขีดสเกลที่เคลื่อนไปของ encoder A และ B ที่ตำแหน่ง

$2\pi j/n$

ความต่างของค่าที่วัดได้จากขีดสเกลระหว่าง Encoder A และ B ที่ตำแหน่ง j สามารถเขียนได้เป็น

$$\delta_{i,j} = b_{i+N \cdot j/n} - a_i \quad (3.22)$$

เมื่อทำการเฉลี่ย ข้อมูล n ชุดของค่า $\delta_{i,j}$ ที่วัดได้ โดยข้อมูลแต่ละชุดจะเลื่อนไปเป็นระยะเท่าๆกันเช่น

ถ้าทำการวัดแบบมีการแบ่งเป็น 5 ช่วงก็จะมีการเลื่อนไปที่ละ 72° เท่าๆกัน ค่าเฉลี่ยที่ได้ $\mu_{i,n}$

สามารถเขียนได้เป็น

$$\mu_{i,n} = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \delta_{i,j} = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} b_{i+Nj/n} - a_i = \sum_{k=1}^{N/n} E_{kn} \sin\left(kn \frac{2\pi}{N} i + \alpha_{kn}\right) - a_i \quad (3.23)$$

b_i สามารถเขียนเป็น Fourier series ได้ตามสมการ

$$b_i = \sum_{m=1}^N E_m \sin\left(m \frac{2\pi}{N} i + \alpha_m\right) \quad (3.24)$$

(3.22) - (3.23)

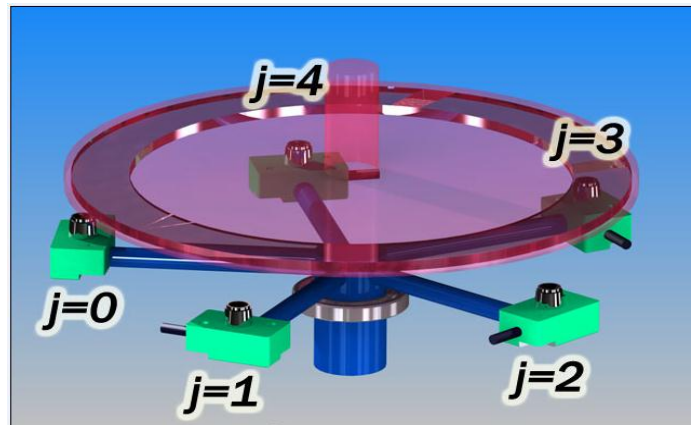
$$\delta_{i,j} - \mu_{i,n} = b_i - \sum_{k=1}^{N/n} E_{kn} \sin\left(kn \frac{2\pi}{N} i + \alpha_{kn}\right) \quad (3.25)$$

เมื่อ k เป็นจำนวนเต็มบวก E_{kn} และ α_{kn} คือ amplitude และ phase angle ของ kn -order Fourier component ของ b_i

จากสมการ (3.25) ด้านซ้ายของสมการสามารถหาได้จากการวัด ส่วนด้านขวาของสมการคือ ผลรวมของ Fourier components ของ b_i ของ Encoder B ยกเว้น ที่ค่า n^{th} -multiple order Fourier component ของ b_i

3.12 Self Calibration Rotary Encoder

Self Calibration Rotary Encoder เกิดจากการนำหลักการของ EDA มาประยุกต์ใช้ โดยทำการลดจำนวน Encoder ลงให้เหลือเพียง 1 Encoder ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.15 ระบบสอบเทียบ Self Calibration Rotary Encoder

ระบบ Self Calibration Rotary Encoder มีความคล้ายคลึงกับระบบสอบเทียบแบบ EDA ที่ใช้ Encoder A และ B แต่จะใช้เพียง Encoder A เท่านั้นโดยเปลี่ยนตำแหน่งอ้างอิงจากที่อยู่บน Encoder B ก็หันมาใช้ตำแหน่งอ้างอิงของ Encoder A เองซึ่งมีหัวอ่าน 5 หัวที่แต่ละหัวทำมุมกันเท่ากับ $2\pi/5$ หรือ 72° เหมือนเดิมและสามารถเขียนความสัมพันธ์ของค่าที่อ่านได้จากหัวอ่านดังนี้กำหนดให้

$i=1,2,3,\dots,N$ เป็นอันดับของซีตสเกลบน Encoder A

$j=0,1,2,\dots,n$ เป็นอันดับของหัวอ่านบน Encoder A

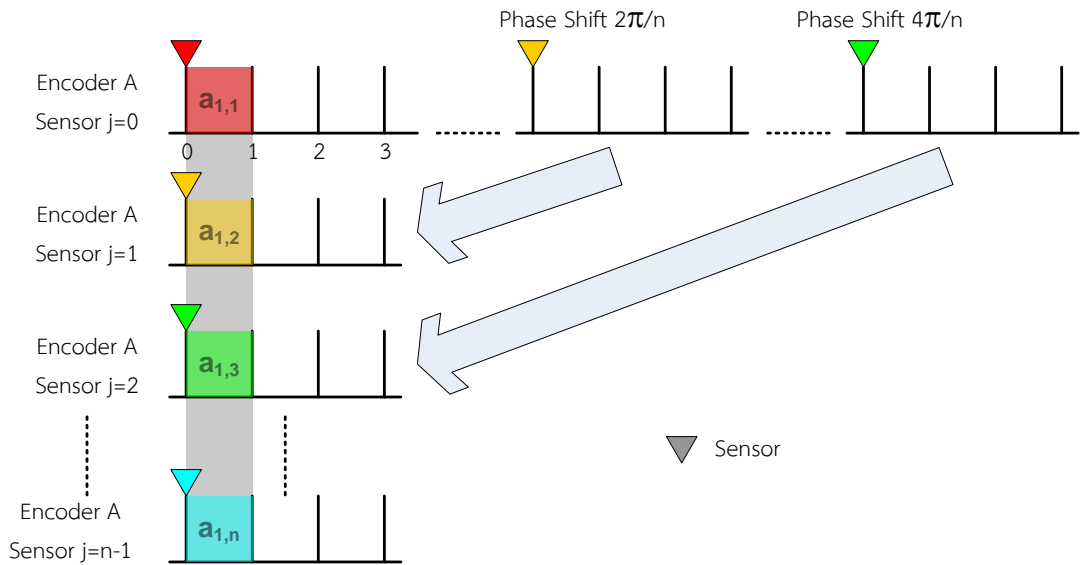
$$\text{ที่ตำแหน่งเริ่มต้น } 0^\circ \quad \delta_{i,0} = a_{i,0} - a_i = 0 \quad (3.26)$$

$$\text{ที่ตำแหน่ง } 72^\circ \quad \delta_{i,1} = a_{i,1} - a_i \quad (3.27)$$

$$\text{ที่ตำแหน่ง } 144^\circ \quad \delta_{i,2} = a_{i,2} - a_i \quad (3.28)$$

$$\text{ที่ตำแหน่ง } 216^\circ \quad \delta_{i,3} = a_{i,3} - a_i \quad (3.29)$$

$$\text{ที่ตำแหน่ง } 288^\circ \quad \delta_{i,4} = a_{i,4} - a_i \quad (3.30)$$



รูปที่ 3.16 ตำแหน่งหัวอ่าน (Sensor) บนจานสเกลของระบบ Self Calibration Rotary Encoder

นำค่าที่ได้จากสมการ (3.26) ถึง (3.30) มาทำการเฉลี่ยโดยกำหนดให้มีค่าเท่ากับ μ_i จะได้ว่า

$$\mu_i = \frac{\delta_{i,0} + \delta_{i,1} + \delta_{i,2} + \delta_{i,3} + \delta_{i,4}}{5} \quad (3.31)$$

$$= \frac{a_{i,0} + a_{i,1} + a_{i,2} + a_{i,3} + a_{i,4}}{5} - a_i \quad (3.32)$$

นำสมการ (3.32) – (3.26)

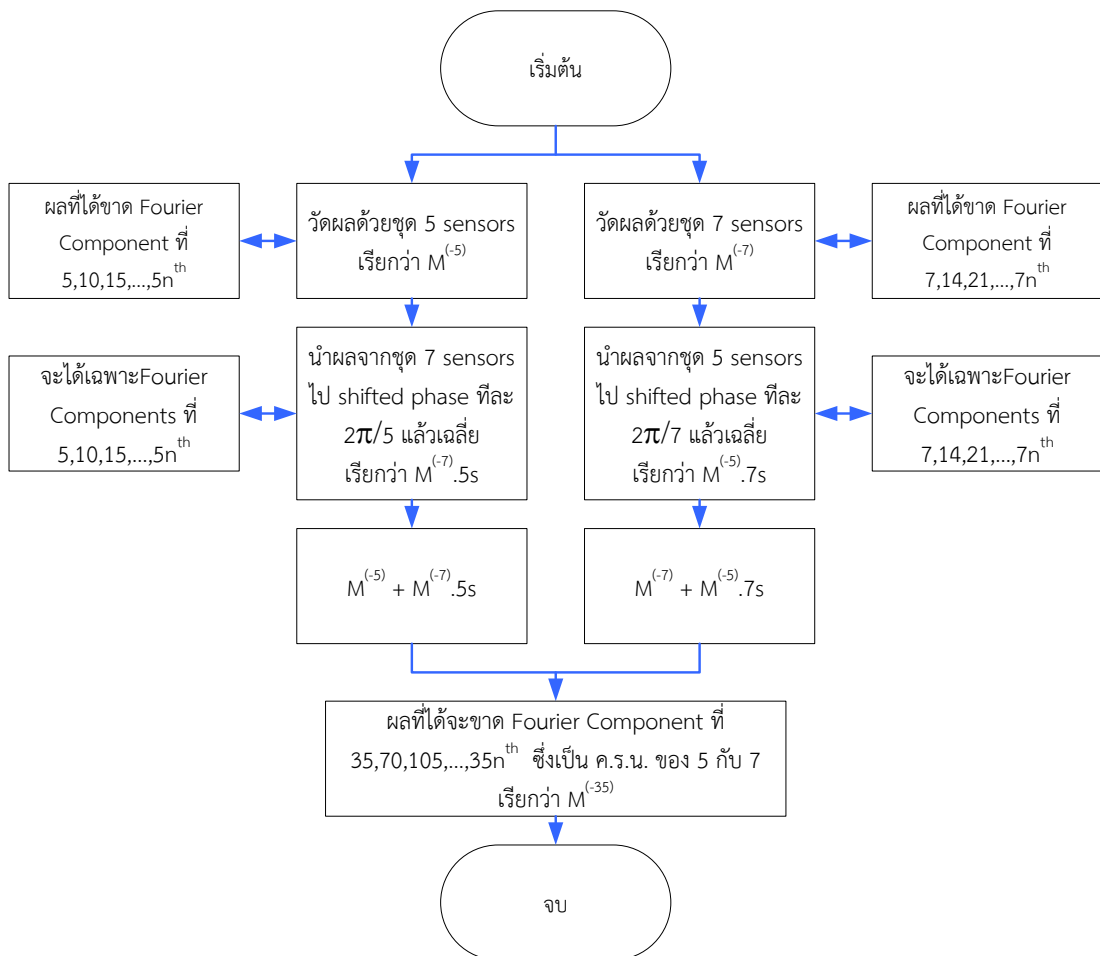
$$\mu_i = \frac{a_{i,0} + a_{i,1} + a_{i,2} + a_{i,3} + a_{i,4}}{5} - a_{i,0} \quad (3.33)$$

3.13 Multi-Combination Method

Multi-Combination Method คือการปรับปรุงระบบ EDA เพื่อให้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้นโดยการเพิ่มชุดหัวอ่านหรือ sensor เพิ่มขึ้นอีกอย่างน้อยหนึ่งชุดที่มีจำนวนหัวอ่านไม่เป็นจำนวน “คูณร่วมน้อย” ของชุดเดิม เช่นถ้าเดิมใช้หัวอ่าน 5 หัวก็เพิ่มชุดหัวอ่านที่มีหัวอ่าน 7 ชุด เป็นต้น เนื่องจากผลการวัดแบบ 5 sensors จะขาดข้อมูลที่ทุก component ที่ 5 และหากใช้ผลการวัดแบบ 7 sensors ก็ขาดข้อมูลที่ทุก component ที่ 7

เมื่อนำข้อมูลจากชุด 5 sensors มาทำการ shifted phase ที่ละ $2\pi/7$ แล้วนำมาเฉลี่ยจะได้ผลของ เฉพาะที่ 7 Multiple Integral Fourier Component หลังจากนั้นนำข้อมูลจากชุด 7 sensors มารวมกับชุด 5 sensors ที่ทำการ shifted phase และเฉลี่ยแล้ว ก็จะสามารถชดเชยข้อมูลที่ขาดหายที่ทุก component ที่ 7 ได้

นอกจากนี้อาจใช้ข้อมูลจากชุด 7 sensors มาทำการ shifted phase ที่ละ $2\pi/5$ แล้วนำมาเฉลี่ยจะได้ผลของ เฉพาะที่ 5 Multiple Integral Fourier Component หลังจากนั้นนำข้อมูลจากชุด 5 sensors มารวมกับชุด 7 sensors ที่ทำการ shifted phase และเฉลี่ยแล้ว ก็จะสามารถชดเชยข้อมูลที่ขาดหายไปที่ทุก component ที่ 5 ได้เช่นกัน
 แต่ทั้งนี้ก็จะยังมีข้อมูลของทุก Component ที่ 35 ซึ่งเป็นจำนวนคูณร่วมน้อยของจำนวน sensor จากทั้งสองชุดอยู่



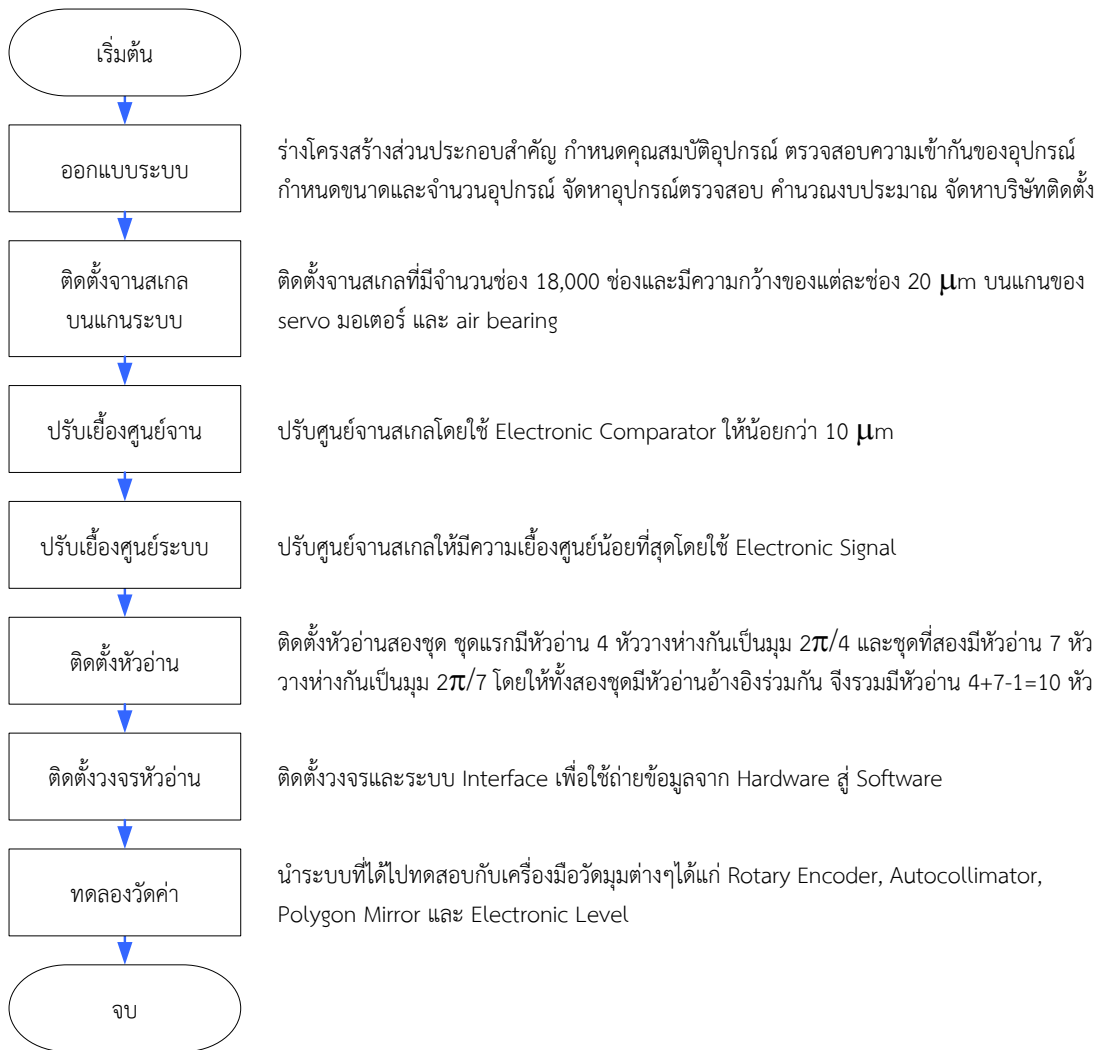
รูปที่ 3.17 วิธีการคำนวณแบบ Multi-Combination Method

บทที่ 4

ระบบสอบเทียบ Rotary Encoder

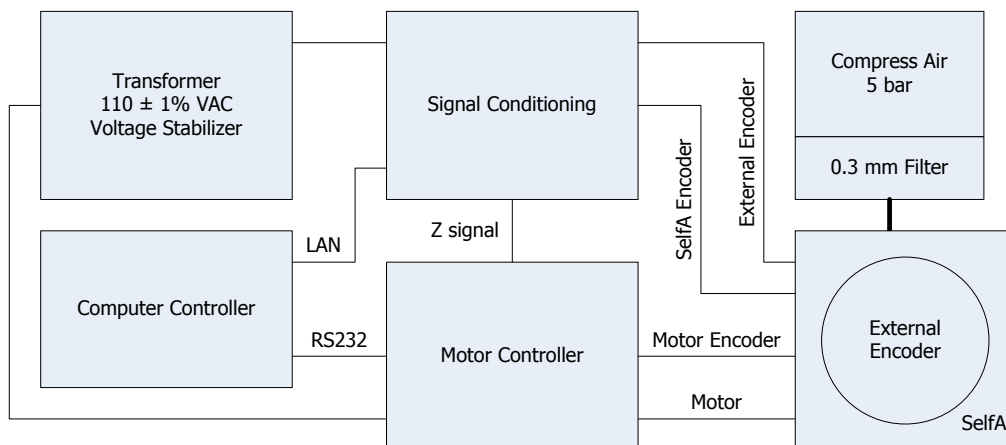
ในบทนี้จะกล่าวถึงองค์ประกอบและขั้นตอนการประกอบระบบสอบเทียบ Rotary Encoder ระบบสอบเทียบ Rotary Encoder ได้ทำการร่วมออกแบบกับบริษัท E-motion Inc. ซึ่งตั้งอยู่ที่กรุงโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น โดยเป็นบริษัทที่เคยได้รับจัดจ้างในการสร้าง Self Calibration Rotary Encoder รุ่นแรกที่ติดตั้งในห้องปฏิบัติการมูม ฝ่ายมาตรวิทยามิติ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติมาก่อน (NIMT-DMA1/07) โดยในปี 2550 ขณะดำเนินการสร้างระบบดังกล่าวบริษัท E-motion Inc. และ Dr.Tsukasa Watanabe ได้ถ่ายทอดความรู้ทั้งทางด้านหลักการ และ เทคนิคการสร้างระบบสอบเทียบให้กับผู้ทำวิทยานิพนธ์ หลังจากนำมาติดตั้งและใช้งานเป็นเวลาสามปีด้วยการช่วยเหลือทางด้านแนวคิดจาก Dr.Tsukasa Watanabe ได้สังเกตเห็นว่าระบบสอบเทียบ Self Calibration Rotary Encoder รุ่นแรกสามารถปรับปรุงและพัฒนาให้ใช้งานให้เหมาะสมกับงานสอบเทียบของห้องปฏิบัติการมูมได้มากยิ่งขึ้นตามแนวทางที่กล่าวไว้ในบทที่ 1 จึงเริ่มวางแผนการสร้าง Self Calibration Rotary Encoder รุ่นที่สองโดยมีประสบการณ์การเรียนรู้จากระบบแรกดังนี้

- จำนวนงานสามารถลดให้เหลืองานเดียวได้ โดยอาศัยหลักการในหัวข้อ 1.5.1 และ 3.12
- สามารถเพิ่มความถูกต้องและแม่นยำของระบบได้จากการเพิ่มหัววัดและชุดหัววัดโดยอาศัยหลักการในหัวข้อ 3.13
- จำนวนหัววัดที่เหมาะสมกับความต้องการโดยอาศัยหลักการในหัวข้อ 1.5.2
- สามารถเพิ่มความละเอียดของจุดวัดได้โดยใช้การ Interpolation โดยอาศัยหลักการในหัวข้อ 1.5.4
- เมื่อลดจำนวนของงานสเกลให้เหลือเพียงงานเดียวได้ระบบจะมีขนาดเล็กลงจนสามารถยกได้ด้วยเพียง 1-2 คนได้ทำให้สะดวกต่อการยกเปลี่ยนแกนหมุนจากแนวแกนหมุนตั้งฉากกับพื้นโต๊ะระดับมาเป็นแนวแกนหมุนขนานกับพื้นโต๊ะระดับแทน ทำให้สามารถวัดงานจำพวกระดับความเอียงได้ ซึ่งไม่เคยมีระบบสอบเทียบ Self Calibration Rotary Encoder ใดเคยมีมาก่อนเนื่องจากระบบรุ่นก่อนๆมักมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก
- ด้วยเทคนิคการคำนวณสามารถลดเวลาการสอบเทียบได้มากเนื่องจากหัววัดมีจำนวนตายตัว จึงต้องการวัดเพียงหนึ่งรอบที่ 12 rpm ก็สามารถสอบเทียบตัวเองได้ เมื่อเทียบกับระบบแรกต้องหมุนเป็นจำนวนรอบเท่ากับ จำนวนหัววัดที่ต้องการใช้งานเช่นหากต้องการวัดแบบ 5 หัววัดก็ต้องหมุน 5 รอบเป็นต้น
- เทคนิคการประกอบระบบเช่นการ alignment งานสเกลให้ศูนย์ร่วมกับแกนหมุนซึ่งเป็นการคลาดเคลื่อนสูงสุดของระบบ
- เทคนิคอื่นๆของระบบเช่นข้อจำกัด ข้อดี ข้อเสีย ของส่วนประกอบต่างๆของระบบ



รูปที่4.1 แผนการประกอบระบบสอบเทียบ Rotary Encoder

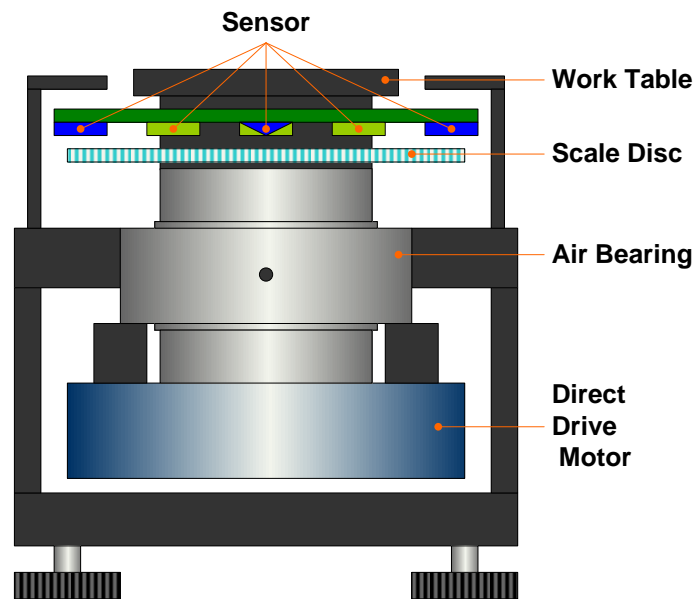
4.1 การออกแบบระบบสอบเทียบเครื่อง Rotary Encoder



รูปที่4.2 ระบบสอบเทียบ Rotary Encoder

ระบบสอบเทียบ Rotary Encoder มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ

- Rotary Encoder เป็นระบบหลักประกอบด้วย จานสเกล, Air Bearing, DD Motor และหัวอ่าน
- Signal conditioning และ Motor controller เป็นส่วนจัดการสัญญาณ และ ควบคุมมอเตอร์
- Computer controller สำหรับกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ควบคุมการทำงานโดยรวม

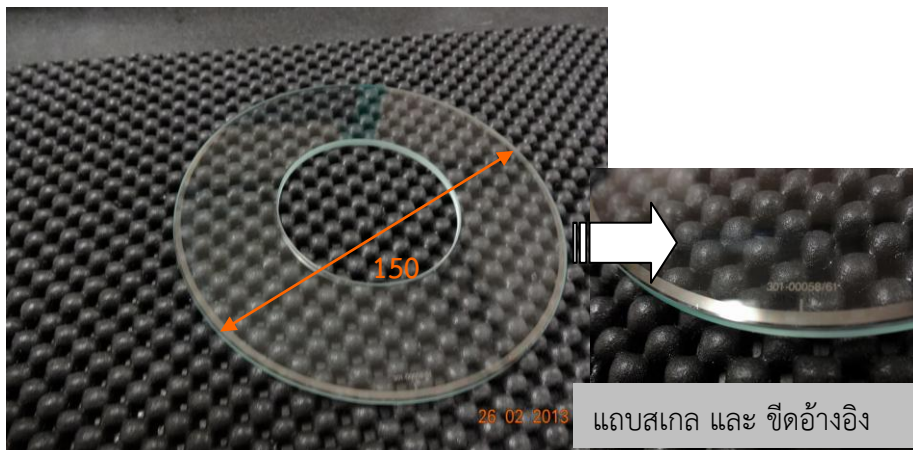


รูปที่4.3 ภาพตัดขวางระบบหลัก Rotary Encoder

4.2 ส่วนประกอบสำคัญของระบบเครื่องสอบเทียบ Rotary Encoder

4.2.1 จานสเกล (Scale Disc)

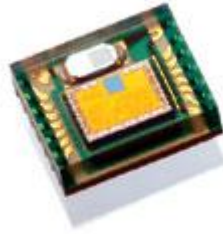
จานสเกลผลิตโดย Koshibu Precision Co., Ltd. มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 mm จำนวนสเกลบนจาน 18,000 ช่องแต่ละช่องมีความกว้าง $20 \pm 3 \mu\text{m}$ และคิดเป็นมุมช่องละ $72''$ โดยตัวจานสเกลมีความเยื้องศูนย์กลางน้อยกว่า $2 \mu\text{m}$



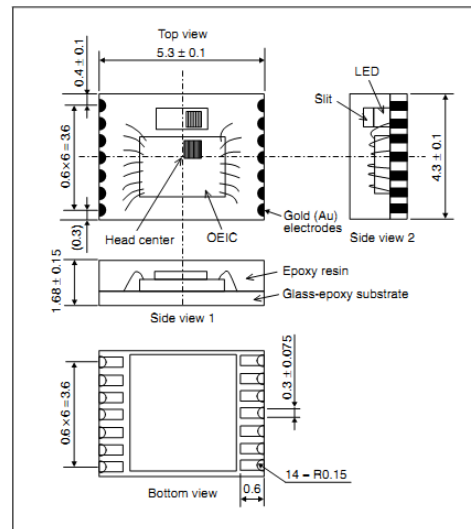
รูปที่4.4 จานสเกล (Scale Disc)

4.2.2 หัวอ่าน (Sensor)

หัวอ่านใช้ทั้งหมด 10 หัว ผลิตโดย SEIKO NPC CORPORATION รุ่น SMD-01 ซึ่งเป็นหัวอ่านแบบ optical encoder ที่มีความแม่นยำสูงโดยใช้หลักการ Diffraction image projection method หัวอ่านประกอบด้วย OEIC (Opto-Electric Integrated Circuit) ซึ่งเป็นส่วนของวงจรและ LED (Light Emitting Diode) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสง ที่รวมอยู่เป็นชั้นเดียวกัน

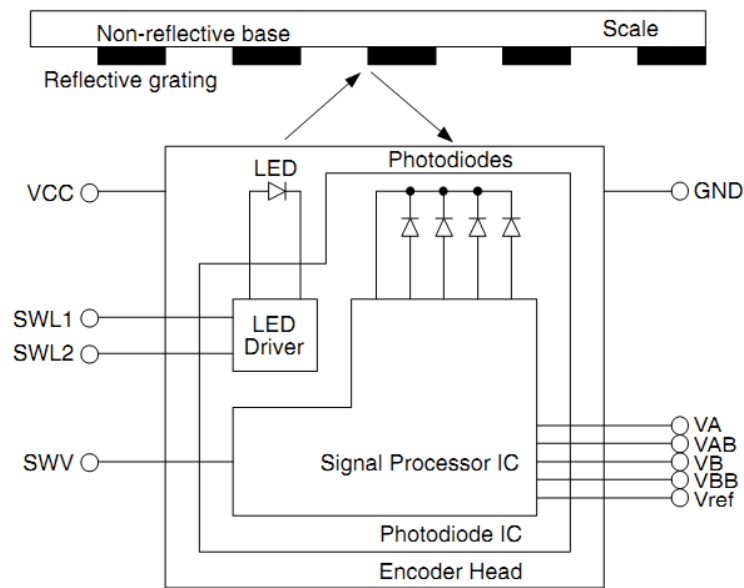


รูปที่ 4.5 หัวอ่าน SMD-01



รูปที่ 4.6 มิติของ SMD-01

หลักการทำงานของหัวอ่าน ต้นกำเนิดแสงขนาดความยาวคลื่น 635 nm จาก LED ทะลุผ่านช่อง slit แล้วตกกระทบบนแถบสเกลที่มีช่องสเกล (Scale Pitch) ขนาด 20 μm โดยเส้นสเกลมีความหนา 10 μm และ ช่องว่างสเกลมีความกว้าง 10 μm หลังจากนั้นแสงจะเลี้ยวเบนและสะท้อนกลับไปยัง Photodiode Array เพื่อตรวจจับสัญญาณการเคลื่อนที่ของแผ่นสเกลเทียบกับหัวอ่าน ความเข้มแสงที่เปลี่ยนไปจากกลไกดังกล่าวทำให้เกิดสัญญาณรูป sine ที่มีขนาดของคาบ 20 μm ออกมาสองชุดเป็นสัญญาณ A (VA) และ B (VB) ซึ่งมีความต่างเฟสกันอยู่ 90° สาเหตุสำคัญที่เลือกใช้หัวอ่านรุ่นนี้คือขนาดที่เล็กมากกล่าวคือมีขนาด 5.3x4.3x1.68 mm ทำให้สามารถติดตั้งบนจานสเกลได้มากกว่าหัวอ่านรุ่นอื่นๆที่มีอยู่ในท้องตลาด



รูปที่ 4.7 องค์ประกอบและการทำงานของหัวอ่าน SMD-01

4.2.3 Air Bearing



รูปที่ 4.8 Canon Air Bearing: AB-80RV

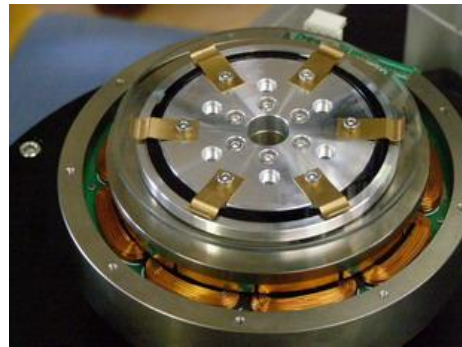
Air Bearing ผลิตโดย Canon รุ่น AB-80RV ซึ่งมีความแม่นยำและทนทานสูงกล่าวคือมีความแม่นยำของการหมุน (Radial Rotation) ถึง $0.05 \mu\text{m}$ สามารถรับแรงได้ถึง $34.3 \text{ N}/\mu\text{m}$ และรับ Load ด้านข้าง (วางแนวนอนเพื่อใช้วัดเครื่องมือประเภทวัดความเอียงเช่น Inclinometer หรือ Level) ได้สูงสุด 68.6 N แต่วางแนวตั้งจะสามารถรับแรงได้ถึง $205.8 \text{ N}/\mu\text{m}$ หรือรับ Load ด้านบนได้สูงสุด 519.4 N มีความแน่นอน (Reproducibility) $0.01 \mu\text{m}$ ทั้งนี้ต้องใช้ลมอัด (Compressor air) ขนาด 490 kPa ข้อดีของการเลือกใช้ Air Bearing เมื่อเทียบกับ Ball Bearing คือ มีความแม่นยำสูง ไม่สึกหรอเนื่องจากไม่มีการเสียดสีและยังทำให้อุณหภูมิสูงเพียงขึ้นเล็กน้อยขณะใช้งาน ไม่สั่นสะเทือน ไม่มี slip stick หรือไม่เคลื่อนไปจากตำแหน่งที่เราต้องการ สามารถหมุนด้วยความเร็วสูงได้ สะอาดเนื่องจากไม่ต้องใช้สารหล่อลื่น ส่วนข้อเสียคือ ไม่ทนต่อแรงกระแทก ต้องใช้ลมอัด (Compressor Air และ อุปกรณ์ร่วมเช่น Filter Regulator) และมีราคาแพง

4.2.4 Direct Drive Motor (DD Motor)

Motor ที่ใช้ประกอบมีขั้วแม่เหล็กทั้งหมด 20 ขั้วแบ่งเป็นขั้วเหนือและใต้อย่างละ 10 ขั้ว มีแรงบิดขนาด $15 \text{ kg}\cdot\text{cm}$, Winding Impedance $5.7 \pm 3 \text{ Ohm}$ Inductance $3 \pm 0.3 \text{ mH}$ สาเหตุที่เลือกใช้ Direct Drive Motor เนื่องจากมีคุณสมบัติ แรงไม่ตกเมื่อเกิดการเสียดสี noise หรือ สัญญาณรบกวนต่ำ มีอายุการใช้งานยาวนาน สามารถใช้กับงานที่ต้องการความรวดเร็วและแม่นยำในการระบุตำแหน่งเนื่องจากมีแรงบิดสูงแต่มีความหน่วงต่ำ ลดปัญหา Drive stiffness เช่น Mechanical backlash, hysteresis และ elasticity



รูปที่4.9 Direct Drive Motor



รูปที่4.10 ประกอบงานสเกลลงบน Motor

4.2.5 Air Compressor System

เนื่องจากระบบ SelfA ใช้ Air Bearing จึงจำเป็นต้องใช้ระบบความดันอากาศ โดยต้องมีการจ่ายอากาศที่มีแรงดันขนาด 5 bar ตลอด 24 ชั่วโมง หากต้องการเคลื่อนย้ายระบบ SelfA จำเป็นต้องมีการยึดแกนของระบบให้ติดแน่นกับ Housing เพื่อป้องกันการเสียดสีของ Air Bearing ข้อควรระวังอย่างยิ่งคือความสะอาดของระบบความดันอากาศ เนื่องจากช่องว่างระหว่างเพลลาของ Air Bearing มีระยะแคบมากตาม Specification ของผู้ผลิต Canon AB-80RV ต้องการอากาศที่มี Filter ขนาด 1 micrometer และความชื้นของอากาศต่ำจึงจำเป็นต้องมี Filter Regulator ที่ทำหน้าที่ทั้งกรองฝุ่น ความชื้น และ ปรับความดันอากาศ โดยรุ่นที่เลือกใช้รุ่น W3000-8-W-FY-B3W ผลิตโดย CKD ซึ่งสามารถกรองฝุ่นขนาด 0.3 micrometers ได้

อากาศจากระบบ
Compressor Air ของ
ฝ่ายอาคารสถาบันมาตรฯ
ขาเข้า 7 Bar

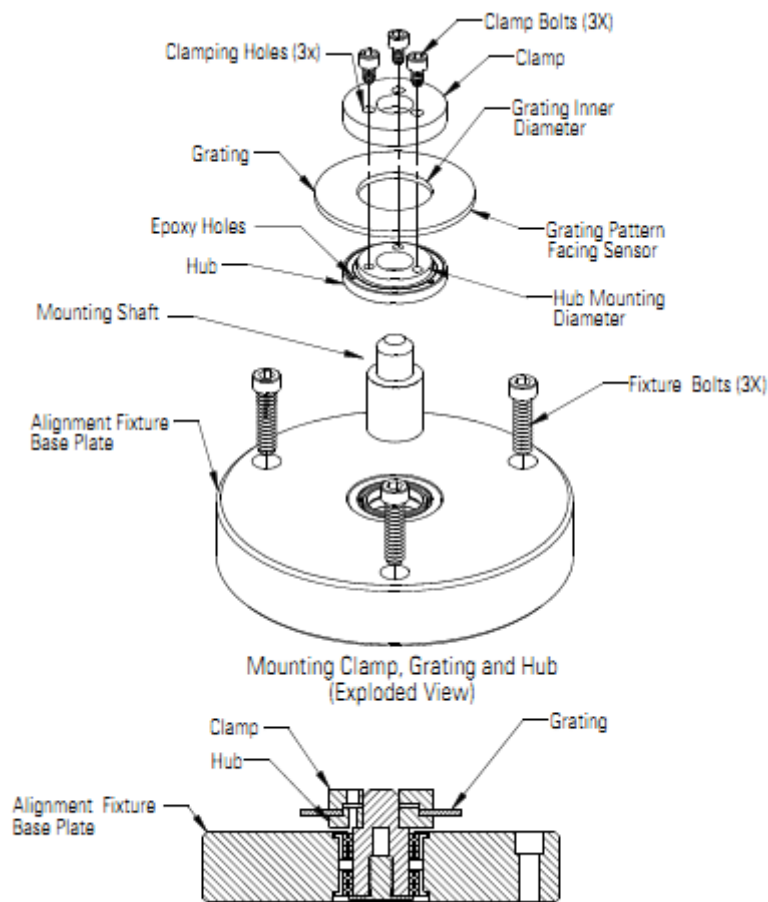


อากาศขาออก 5 Bar
Particle < 0.3 μm

รูปที่4.11 Filter Regulator

4.3 การติดตั้งงานสเกลบนแกนระบบ

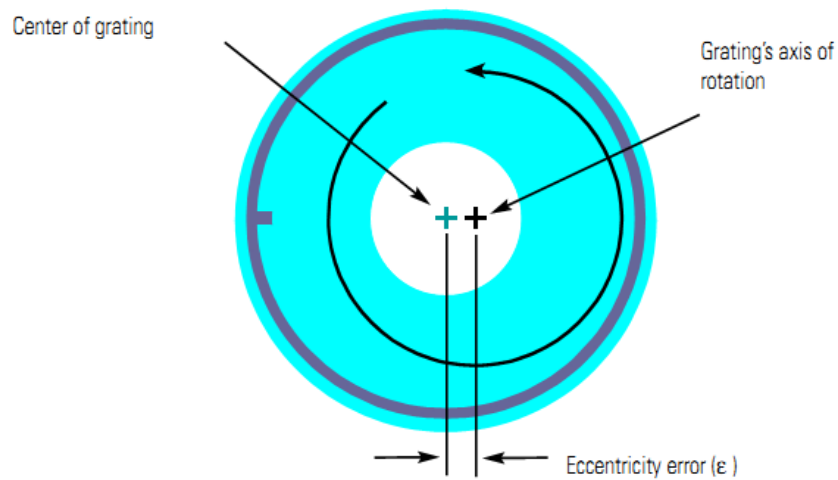
ขั้นตอนการติดตั้งงานสเกล เริ่มจากนำงานสเกลติดบน Hub ด้วย Clamp ทองเหลืองแบบชั่วคราว โดยสวมลงไปบนแกนที่ติดตั้งบนฐาน (Base Plate) อีกทีหนึ่งแล้วทำการ Optical Alignment ด้วย กล้อง CCD ซึ่งจะมีกล่าวในหัวข้อถัดไป ฉีดกาว Epoxy ลงไปในช่องบนตัว Hub ที่มีการเจาะรูไว้ด้านบน หลังจากกาวแห้งสนิทแล้วยึดตัวงานกับสเกลอีกครั้งด้วย Clamp และ Bolts ทำการปรับ เยื้องศูนย์อีกครั้ง ด้วย Electronic Alignment แล้วนำไปติดตั้งเข้ากับ Air Bearing



รูปที่ 4.12 ส่วนประกอบในการติดตั้งงานสเกล (Grating)

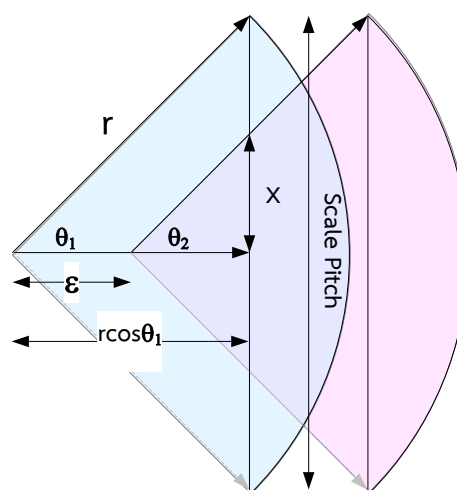
4.4 ความเยื้องศูนย์กลาง Eccentric Error

Eccentric Error คือผลต่างของระยะรัศมีระหว่างจุดศูนย์กลางของจานสเกลกับจุดศูนย์กลางของแกนหมุน ดังแสดงในรูปที่ 4.13 Eccentric Error เป็นแหล่งที่มาของความคลาดเคลื่อน หรือ error ของ Rotary Encoder ที่มากที่สุดแต่สามารถควบคุมได้ เพื่อให้ Rotary Encoder มีความถูกต้องแม่นยำมากที่สุดจึงจำเป็นต้องทำให้ค่าของ Eccentric Error น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ในการปรับศูนย์ หรือ Alignment ของระบบมีอยู่สองวิธี วิธี Optical Alignment สามารถปรับได้ถึง $10\ \mu\text{m}$ ส่วนวิธี Electronic Alignment จะสามารถปรับให้ Eccentric Error ลดลงได้น้อยกว่า $3\ \mu\text{m}$



รูปที่ 4.13 Eccentric Error ความเยื้องศูนย์กลาง

4.3.2 การปรับความเยื้องศูนย์กลางของจานสเกล



รูปที่ 4.14 มุมที่คลาดเคลื่อนเนื่องจากความเยื้องศูนย์กลาง

จำนวนช่องสเกลทั้งหมดมี 18,000 ช่อง แต่ละช่องจึงทำมุมกัน 72" โดยมีระยะ Scale Pitch คือ 0.02 mm ดังนั้นรัศมีของสเกลหรือ r จึงเป็น

$$r = \frac{\text{Pitch}}{72''} = \frac{0.02\text{mm} \times 3600'' \times 360^\circ}{72'' \times 2\pi} = 57.29578\text{mm}$$

มุมความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความเยื้องศูนย์กลาง (Eccentric Error) เมื่อพิจารณารูปที่ 4.14 สามารถเขียนเป็นสมการได้เป็น

$$\theta_1 = \frac{\text{pitch} / 2}{r \cos \theta_1} = \theta_2 = \frac{X}{r \cos \theta_1 - \varepsilon} \quad (4.1)$$

โดย

- θ_1 คือมุมของ Scale Pitch ที่ตำแหน่งศูนย์กลาง=72"
- θ_2 คือมุมของ Scale Pitch ที่ตำแหน่งศูนย์กลางเคลื่อนไปเป็นระยะ ε
- ε คือระยะความเยื้องศูนย์กลาง (Eccentric error) = 0.01 mm
- r คือรัศมีของสเกล
- X คือระยะของ Scale Pitch ที่เปลี่ยนไปเมื่อเกิดความเยื้องศูนย์กลาง

แทนค่าลงในสมการ (4.1) จะได้ว่า

$$X = \frac{(r \cos \theta_1 - \varepsilon) \times \text{pitch} / 2}{r \cos \theta_1} = 0.009998\text{mm} \quad (4.2)$$

ถ้า Scale Pitch ขนาด 0.02 mm รองรับมุม	72"
ระยะครึ่ง Scale Pitch ขนาด 0.01 mm รองรับมุม θ_1	36"
ระยะ X ขนาด 0.0099982 mm จะรองรับมุม θ_2	35.9937"

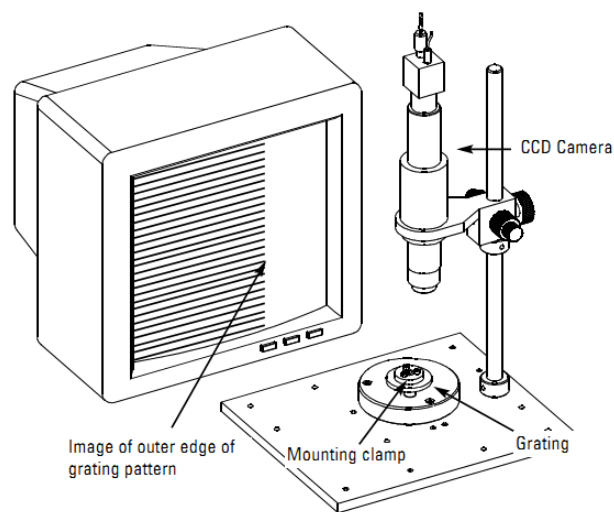
ถ้าให้ $\Delta\theta$ คือผลต่างของ $\theta_1 - \theta_2$

จะได้ว่ามุมที่คลาดเคลื่อนไปเนื่องจากความเยื้องศูนย์กลางเท่ากับ 0.0063"

จะเห็นได้ว่าหากปรับความเยื้องศูนย์กลางได้น้อยกว่า 0.01 mm มุมที่คลาดเคลื่อนไปจะมีผลต่อความเที่ยงตรงของระบบที่ 0.2" น้อยมาก

4.5 Optical Alignment

วิธี Optical Alignment เริ่มจากติดตั้งงานสเกลบน Hub แล้วใช้กล้อง CCD เป็นเครื่องมือเพื่อตรวจวัดขอบด้านนอกของแถบสเกลว่ามีความเที่ยงศูนย์มากน้อยอย่างไร โดยมีหลักว่าขอบนอกของแถบสเกลจะเคลื่อนที่น้อยที่สุดเมื่อจุดศูนย์กลางของงานสเกลร่วมแกนกับแกนหมุนมากที่สุด กล้อง CCD ที่ใช้ในการติดตั้งเพื่อปรับความเที่ยงศูนย์นี้มีความละเอียดหรือ Resolution $1\ \mu\text{m}$ ซึ่งสามารถตรวจวัดได้ว่าเมื่องานสเกลหมุนครบรอบ 360° ขอบนอกของแถบสเกลจะมีการเคลื่อนที่อย่างไร



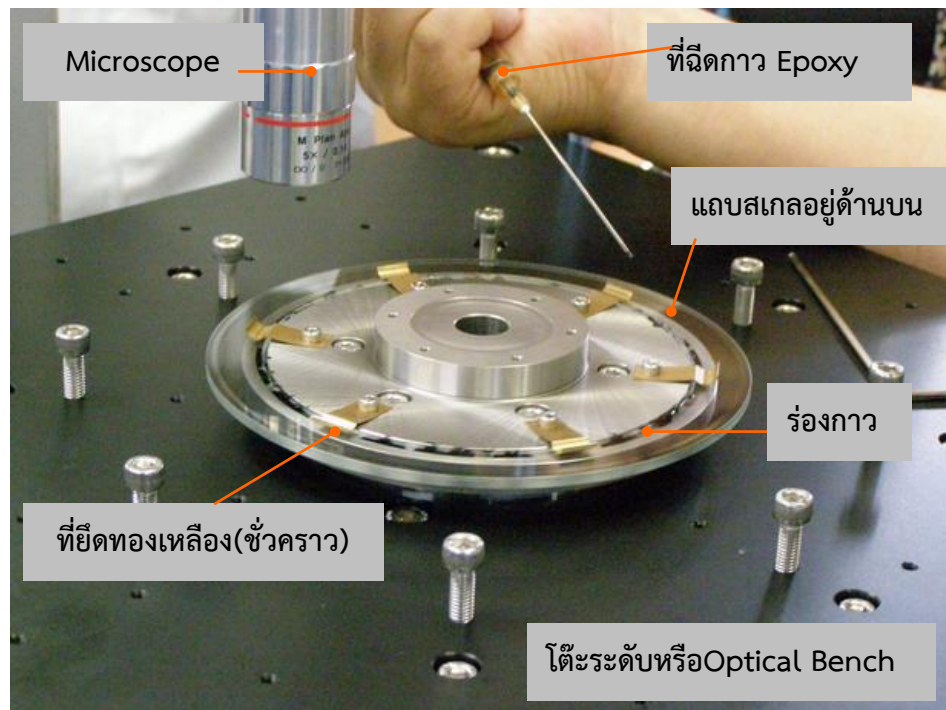
รูปที่ 4.15 การติดตั้งกล้อง CCD เพื่อทำ Optical Alignment

อุปกรณ์ในการทำ Optical Alignment

- Scale Disc หรือ Grating
- Hub
- Scale Clamp
- Mounting Clamp
- กล้อง CCD (Resolution $\leq 1\ \mu\text{m}$)
- กาว Epoxy (TPA-BOND 21430)
- Acetone (ใช้ทำความสะอาดสเกล)
- กระดาษไร้ขน (Kimwipes : Lint Free 100%)
- ถุงมือไร้ขน ไร้แป้ง

ขั้นตอน Optical Alignment

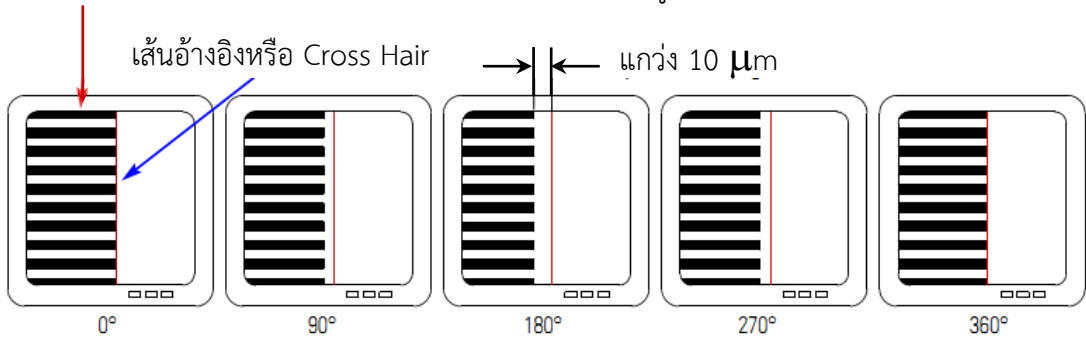
1. เพื่อความปลอดภัยควรใช้โต๊ะที่เรียบและได้ระดับเช่น Optical Bench ในการ Alignment
2. ยึด Hub กับ Base Plate
3. วางจานสเกลลงบน Hub โดยให้ด้านของแถบสเกลอยู่ด้านบน
4. นำกล้อง CCD มาวางโดยให้เล็งกล้องไปที่ขอบนอกของแถบสเกล
5. ใช้ตัวยึดทองเหลืองซึ่งใช้ชั่วคราว ยึดแผ่นสเกลติดกับ Hub ให้แน่นพอประมาณแต่ไม่ต้องแน่นมากเพื่อที่จะสามารถปรับเอียงศูนย์ได้
6. หมุนแผ่นสเกลแล้วสังเกตภาพของขอบแถบสเกลผ่านจอ monitor ว่าเป็นอย่างไร
7. บันทึกค่าตำแหน่งของขอบสเกลแบบ peak-to-peak ว่าในหนึ่งรอบการหมุนมีการค่าเคลื่อนไปสูงสุดขนาดเท่าไร
8. หาค่าแห่งสูงสุดของค่าที่บันทึกได้ แล้วทำการปรับจนค่าลดเหลือครึ่งหนึ่งของค่าที่บันทึก
9. ทำตามขั้นตอน 6-8 ไปเรื่อยๆจนกระทั่งค่าสูงสุดที่ได้ น้อยกว่า $\pm 10 \mu\text{m}$
10. ฉีดกาวลงในร่องที่เจาะไว้บน Hub จนเต็มพอดีรอกาวแห้งเพื่อให้แผ่นสเกลติดแน่นกับ Hub
11. ค่อยๆถอดที่ยึดทองเหลืองออก
12. ใช้ Mounting Clamp ยึดจานสเกลกับ Hub อีกชั้นเพื่อเพิ่มความแน่นหนาให้กับจานสเกล



รูปที่ 4.16 การติดตั้งจานสเกลบน Hub

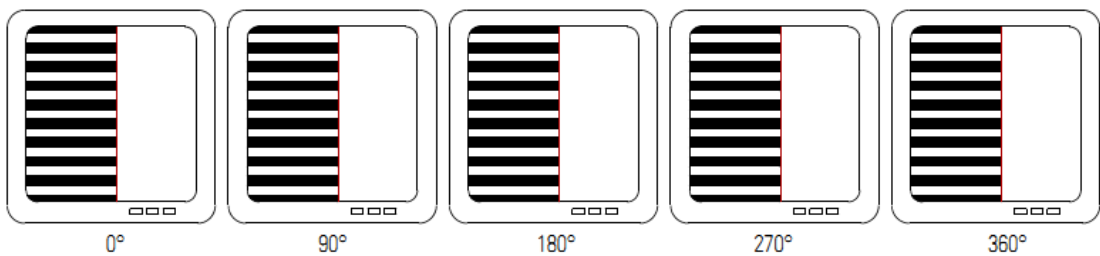
พิจารณารูปที่ 4.13 Eccentric Error มีค่าเท่ากับ $5 \mu\text{m}$ โดยคำนวณได้จากระยะการแกว่งของขอบสเกลหารด้วยสอง ($10 \mu\text{m}/2 = 5 \mu\text{m}$)

ขอบด้านนอกของแถบสเกลมีการแกว่งเนื่องจากความเยื้องศูนย์กลางของแผ่นสเกล



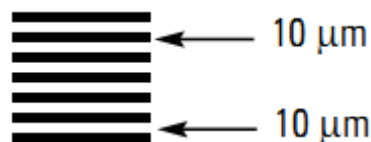
รูปที่ 4.17 รูปแสดงการแกว่งของขอบสเกลที่ตำแหน่งมุมต่างๆ

หากสามารถ Alignment ให้ขอบของสเกลไม่แกว่งเลย eccentric error จะมีค่าเป็นศูนย์นั่นคือ จุดศูนย์กลางของสเกลมีการร่วมศูนย์กลางกับแกนหมุนอย่างสมบูรณ์



รูปที่ 4.18 รูปแสดงการ Alignment อย่างสมบูรณ์มี eccentric error เป็นศูนย์

กรณีที่กล้อง CCD หรือ Microscope ไม่มีเส้นอ้างอิงหรือ Cross Hair มาให้ สามารถประมาณจากความกว้างของสเกลหรือความหนาของขีดก็ได้ซึ่งทั้งสองมีระยะเท่ากัน คือเท่ากับ $10 \mu\text{m}$ ในกรณีไม่มีเส้นอ้างอิงให้ใช้ความหนาของขีดหรือความกว้างของช่องสเกลแทน



รูปที่ 4.19 ความหนาของขีดและความกว้างของช่องสเกล

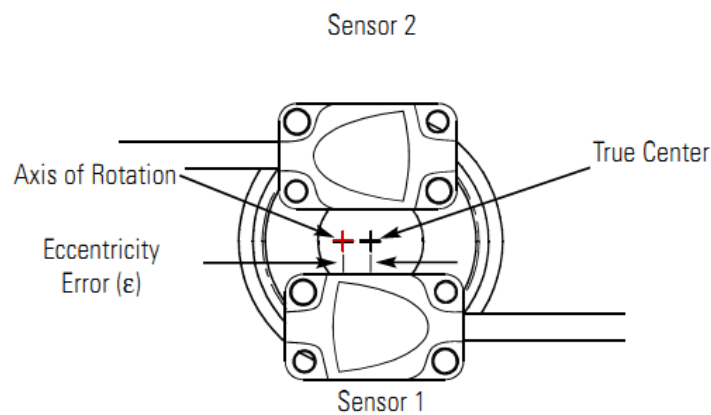
4.6 Electronic Alignment

หลักการ

หัวอ่านหรือ Sensor ตัวที่ n มี Phase Error (ψ) ซึ่งเกิดจาก Eccentric Error สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์กับมุมของแกนได้เป็นสมการ

$$\psi_n(\theta) = \frac{360}{\lambda} \varepsilon \sin(\alpha + \theta) \quad (4.2)$$

โดย ε = Eccentric Error ของสเกล
 360 = จำนวนมุมทั้งหมดของ Electronic fringe
 λ = คาบของ Electronic fringe
 α = ตำแหน่งมุมของ sensor
 θ = มุมที่หมุนไปของแกน



รูปที่ 4.20 วิธีติดตั้งหัวอ่าน 2 หัวสำหรับ Electrical Alignment

ที่ Sensor1 มี $\alpha = 0^\circ$ มี Phase Error เป็น

$$\psi_1(\theta) = \frac{360}{\lambda} \varepsilon \sin(\theta) \quad (4.3)$$

ที่ Sensor2 มี $\alpha = 180^\circ$ มี Phase Error เป็น

$$\psi_2(\theta) = \frac{360}{\lambda} \varepsilon \sin(180 + \theta) = -\frac{360}{\lambda} \varepsilon \sin(\theta) \quad (4.4)$$

กำหนดให้ $\psi_n'(\theta)$ คือค่า Phase different ที่แตกต่างระหว่าง Sensor n ใด ๆ กับค่าที่อ่านได้จาก Sensor1

$$\begin{aligned}\psi_n'(\theta) &= \psi_n(\theta) - \psi_1(\theta) \\ \psi_n'(\theta) &= \psi_n(\theta) - \frac{360}{\lambda} \varepsilon \sin(\theta)\end{aligned}\quad (4.5)$$

ถ้าค่าที่ได้มาจาก Sensor 1 เอง

$$\psi_1'(\theta) = \psi_1(\theta) - \frac{360}{\lambda} \varepsilon \sin(\theta) = \frac{360}{\lambda} \varepsilon \sin(\theta) - \frac{360}{\lambda} \varepsilon \sin(\theta) = 0 \quad (4.6)$$

ถ้าค่าที่ได้มาจาก Sensor 2

$$\psi_2'(\theta) = \psi_2(\theta) - \frac{360}{\lambda} \varepsilon \sin(\theta) = -\frac{360}{\lambda} \varepsilon \sin(\theta) - \frac{360}{\lambda} \varepsilon \sin(\theta) \quad (4.7)$$

$$\psi_2'(\theta) = -2 \left[\frac{360}{\lambda} \varepsilon \sin(\theta) \right] \quad (4.8)$$

ในสมการที่ 4.8 $\psi_2'(\theta)$ มีลักษณะเป็น sinusoidal function ที่มี Amplitude เป็น

$$\text{Amplitude} = 2 \left[\frac{360}{\lambda} \varepsilon \right] \quad (4.9)$$

ค่า Phase error ที่เปลี่ยนแปลงมีขนาดเป็นสองเท่าของขนาด Eccentric error, ε การแกว่งของสัญญาณนี้ปรากฏอยู่ใน Oscilloscope เป็นลักษณะ peak-to-peak ซึ่งมีขนาดเป็นสองเท่าของ Amplitude ของ $\psi_2'(\theta)$ หรือเป็นสี่เท่าของ Eccentric error, ε ดังนั้น

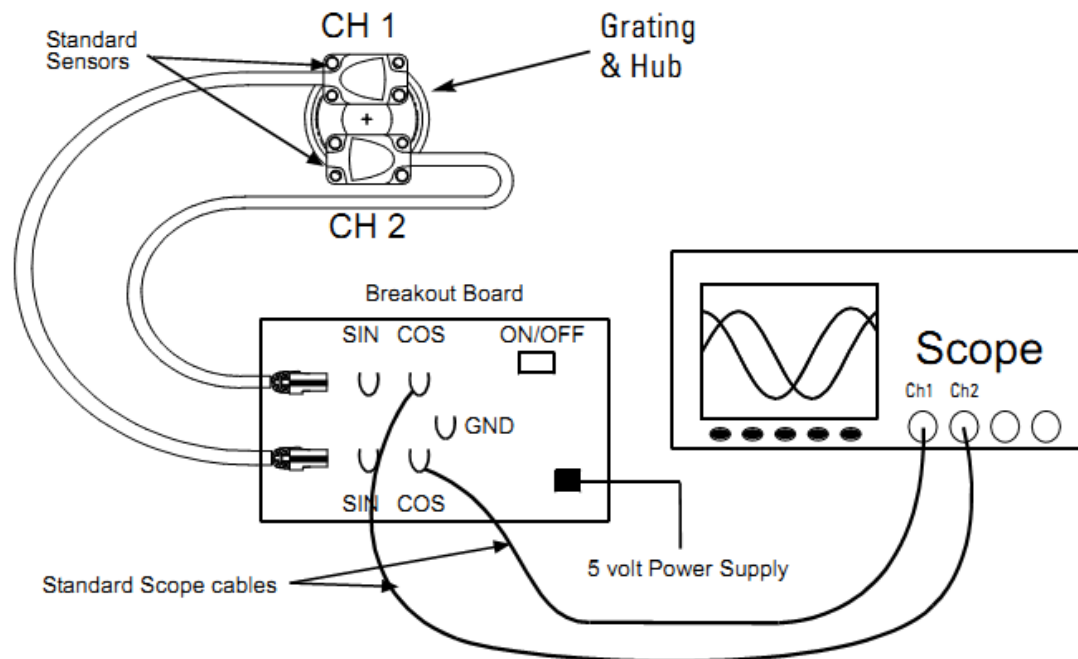
$$\text{ระยะแกว่งรวม(จำนวนfringe)} = 2 \times 2 \left[\frac{360}{\lambda} \varepsilon \right] = 4 \left[\frac{360}{\lambda} \varepsilon \right] \quad (4.10)$$

จากสมการ (4.10) ค่า Eccentric error, ε จึงสามารถหาได้จากสมการ

$$\varepsilon = \left[\frac{\lambda \times \text{ระยะแกว่งรวม(จำนวนfringe)}}{4 \times 360^\circ} \right] \quad (4.11)$$

เมื่อระยะ 1 fringe = 360° และ λ ของสเกลเท่ากับ $20 \mu\text{m}$ จึงได้ว่า

$$\varepsilon = 5 \times \text{ระยะแกว่งรวม(จำนวนfringe)} \quad (4.12)$$



รูปที่ 4.21 วิธีติดตั้งสำหรับ Electrical Alignment

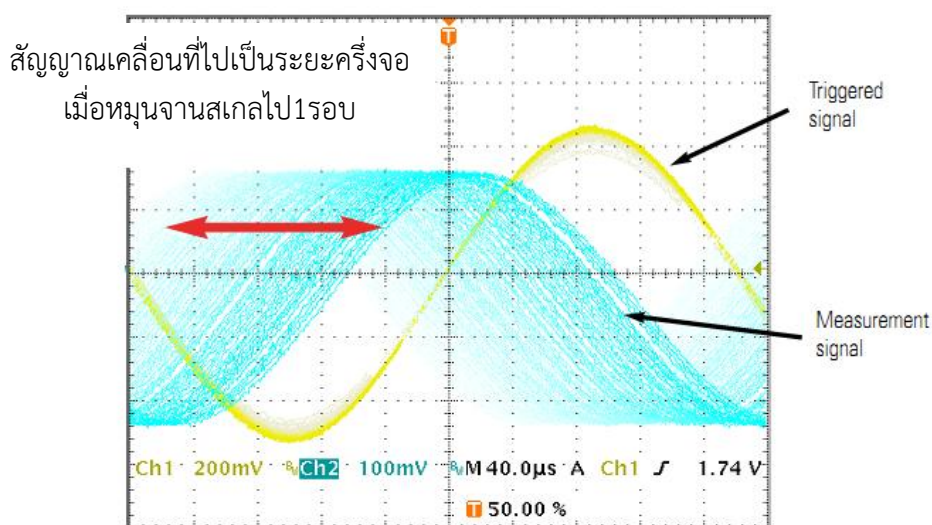
อุปกรณ์ในการทำ Electrical Alignment หัวอ่าน หรือ Sensor 2 ชุด (ใช้ Jig Figure ประกอบ)

- Break Board พร้อม Power Supply (ใช้ของ MicroE)
- สายสัญญาณ Oscilloscope 2 เส้น
- Digital Oscilloscope แบบ 2 channel
- กาว Epoxy (TPA-BOND 21430)
- Acetone (ใช้ทำความสะอาดสเกล)
- กระดาษไร้ขน (Kimwipes : Lint Free 100%)
- ถุงมือไร้ขน ไร้แป้ง
- Motor สำหรับใช้หมุนแผ่นสเกลให้คงที่ 20-50 RPM

ติดตั้งหัวอ่านทั้งสองหัวให้อยู่ในตำแหน่งทำมุมกัน 180° ต่อสายสัญญาณระหว่างหัวอ่านกับ Break Board โดยจะเลือกใช้ช่องสัญญาณ sin หรือ cos อย่างไม่อย่างหนึ่งก็ได้ เพื่อให้เกิดสัญญาณ lissajous บน Oscilloscope ใน X-Y mode ปรับสัญญาณ Lissajous จนกระทั่งมีขนาด $0.8 \pm 20\%$ Volts

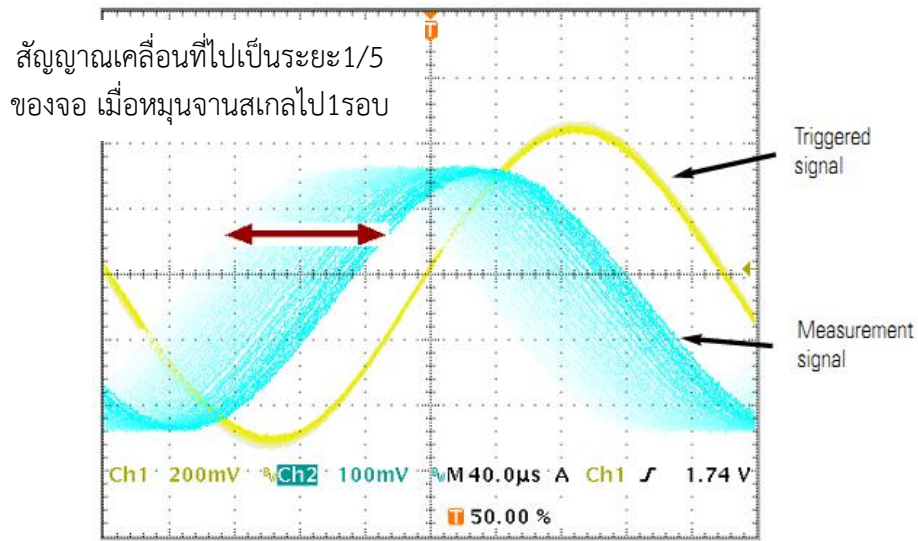
หลังจากติดตั้งหัวอ่านเข้ากับสเกลแล้วทำการต่อสัญญาณ sin เข้ากับ Oscilloscope โดยตั้งให้อยู่ใน time based mode และ trigger off สำหรับสัญญาณที่ Channel 1 และที่สำคัญคือในขณะที่ทำการ alignment นั้นความเร็วในการหมุนของมอเตอร์จะต้องคงที่ หากความเร็วของมอเตอร์เปลี่ยนแปลงไปจะทำให้สัญญาณเกิดการขยายและหดตัว ส่งผลให้ยากต่อการ alignment สเกล หากสามารถ alignment ได้อย่างสมบูรณ์ สัญญาณจากหัวอ่านทั้งสองจะนิ่งไม่เคลื่อนที่ (stationary) เมื่อเกิดความเอียงศูนย์ขึ้นสัญญาณใน Channel2 ขณะที่งานสเกลหมุนไปจะเกิดการเคลื่อนที่ของสัญญาณบนจอ Oscilloscope จากขอบจอด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง ระยะการเคลื่อนที่ของสัญญาณคือระยะแกว่งรวม(Total Swing) ของสัญญาณและสามารถนำไปหา Eccentric Error ของสเกลได้จากสูตร

$$\text{Eccentric Error, } \mathcal{E} = 5 \times \text{Total Swing (Number of fringe)}$$



รูปที่ 4.22 ภาพจาก Oscilloscope เมื่อ ทำการ Alignment ได้ 1/2 fringe

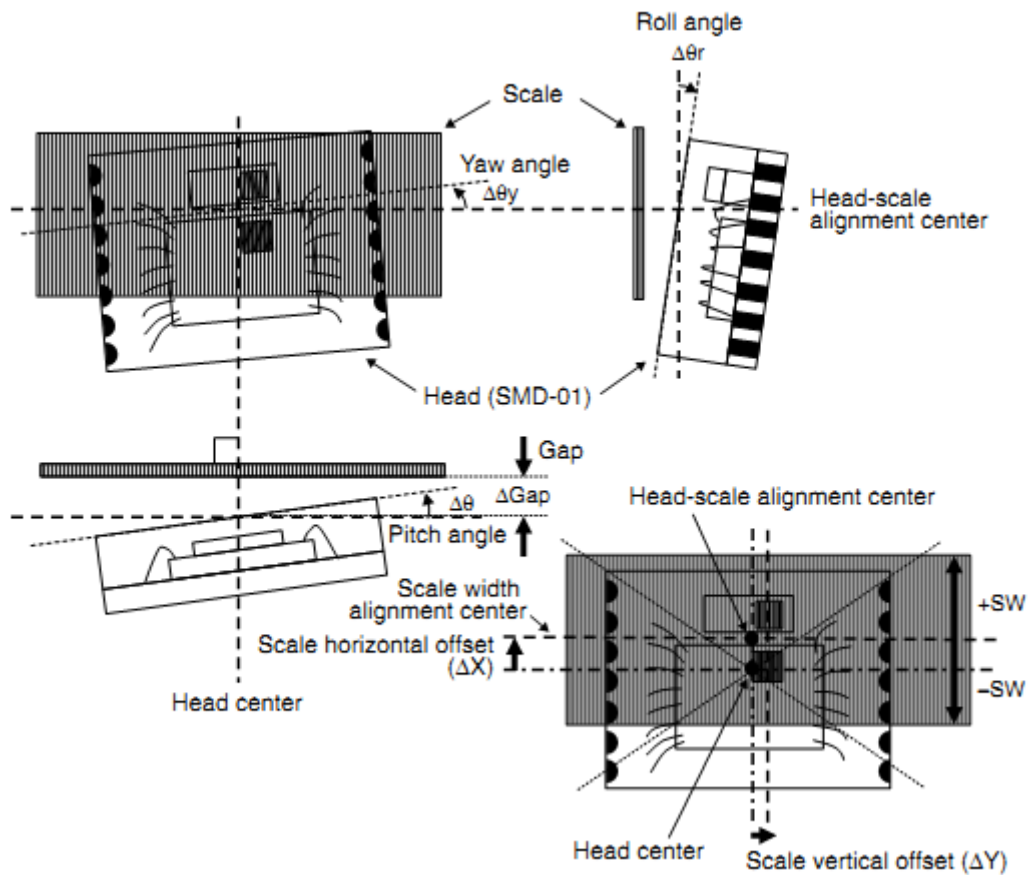
จากรูปจะเห็นได้ว่าสัญญาณมีการเคลื่อนที่ไปเป็นระยะประมาณครึ่งจอเมื่อหมุนงานสเกลไปครบ 1 รอบ 360° จะได้ว่า Eccentric Error มีค่าเท่ากับ $2.5 \mu\text{m}$ ($5 \times 0.5 \text{ fringe} = 2.5 \mu\text{m}$)
เมื่อทำการ Alignment ต่อไปจนได้ระยะ Total Swing เป็น 1/5 ของจอหรือของ fringe จะได้ว่ามีค่า Eccentric Error เป็น ($5 \times 0.2 \text{ fringe} = 1 \mu\text{m}$)



รูปที่ 4.23 ภาพจาก Oscilloscope เมื่อ ทำการ Alignment ได้ 1/5 fringe

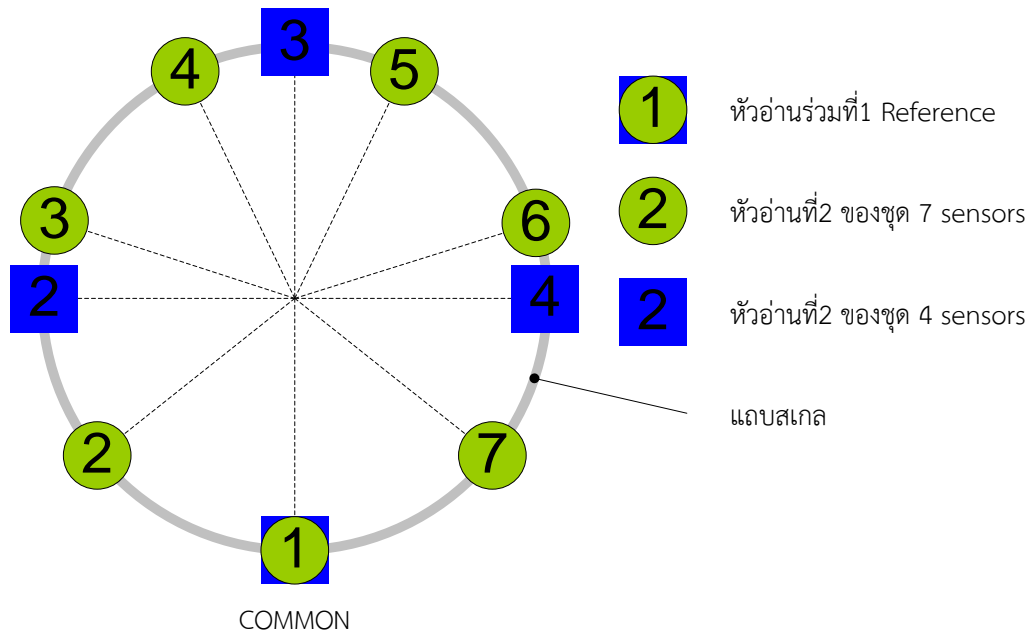
4.7 Scale and Reading Head Alignment

หัวอ่านหรือ Sensor จะถูกวางลงตรงกลางแถบสเกลโดยให้มีระยะ $\Delta X = 0.6 \text{ mm}$ และ $\Delta Y = 0.1 \text{ mm}$ เพื่อให้กึ่งกลางของแถบสเกลอยู่กึ่งกลางระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและตัวรับแสง

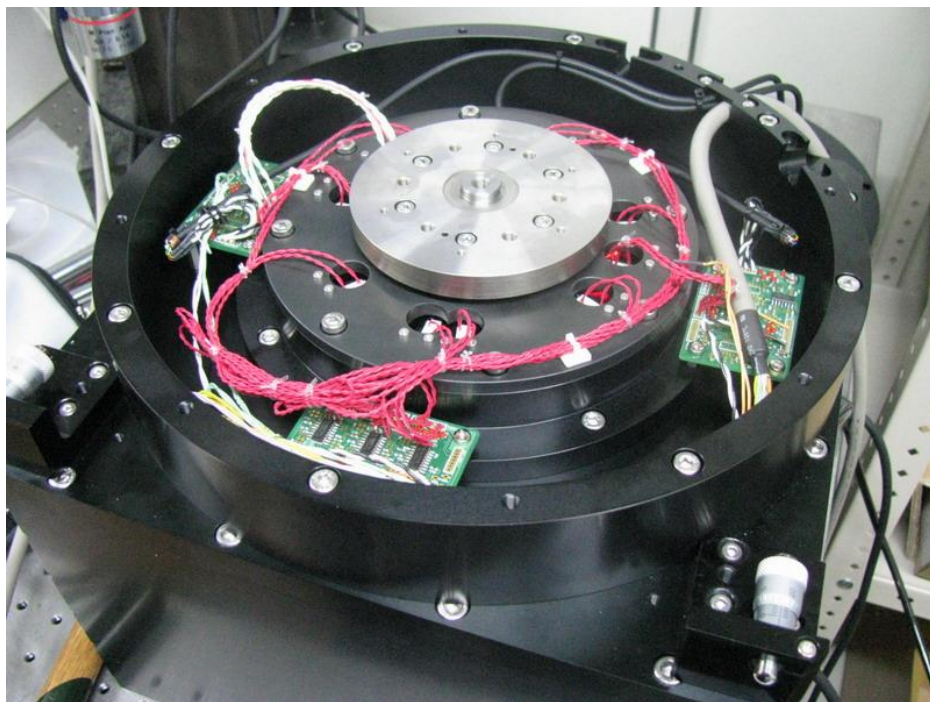


รูปที่ 4.24 ตำแหน่งในการติดตั้ง Sensor บนแถบสเกล

การติดตั้งหัวอ่านบนระบบ Rotary Encoder จะถูกแบ่งออกเป็นสองชุด โดยชุดแรกเรียกว่า SelfA-4 ประกอบด้วย หัวอ่าน 4 หัว แต่ละหัวจะถูกวางที่ตำแหน่งทุก $2\pi/4$ หรือ 90° และชุดที่สองเรียกว่า SelfA-7 ประกอบด้วย หัวอ่าน 7 หัว แต่ละหัวจะถูกวางที่ตำแหน่งทุก $2\pi/7$ หรือ 51.4° โดยใช้หัวอ่านอ้างอิงคือ sensor1 ร่วมกันดังนั้นจะใช้หัวอ่านทั้งหมด $4+7-1=10$ หัว



รูปที่ 4.25 ตำแหน่งหัวอ่านหรือ Sensor สองชุดบนแถบสเกล



รูปที่ 4.26 ตำแหน่ง Sensor เมื่อติดตั้งและเชื่อมต่อสายสัญญาณแล้ว

บทที่ 5

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดลอง ผลการทดลองและการวิเคราะห์ จากการสร้างระบบสอบเทียบ Rotary Encoder ที่กล่าวไว้ในบทที่ 4 ซึ่งประกอบด้วย

- การสอบเทียบ Internal Rotary Encoder ของระบบ SelfA

เป็นการสอบเทียบตัวเองของระบบ SelfA และสามารถนำไปใช้เป็นค่าแก้หรือค่าชดเชยเมื่อนำไปสอบเทียบเครื่องมือทางด้านมุมอื่นๆ

- การตรวจสอบความแม่นยำของระบบเมื่อใช้งานช่วง 360°

โดยใช้ External Rotary Encoder เป็นอุปกรณ์ในการพิสูจน์ จุดประสงค์หลักในการสร้างระบบสอบเทียบ SelfA นี้ขึ้นมาก็เพื่อสอบเทียบ Rotary Encoder โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนที่สำคัญอยู่สองส่วนคือส่วนที่เกิดจากขีดสเกลและส่วนที่เกิดจากความเยื้องศูนย์

- การตรวจสอบความแม่นยำของระบบเมื่อใช้งานที่มีความละเอียด โดยใช้ Autocollimator เป็นอุปกรณ์ในการพิสูจน์ นอกจากจะสามารถวัดงานในช่วง 360° ได้แล้วระบบ SelfA ยังสามารถสอบเทียบเครื่องมือทางด้านมุมที่มีความละเอียดสูงเช่น Autocollimator ได้โดยมีช่วงการวัดแคบ ($\pm 1000''$) แต่ละเอียด ($72''$ เมื่อไม่ใช้ Interpolator และ $0.3''$ เมื่อใช้ Interpolator)

- การสอบเทียบ Polygon mirror และ Electronic Level

เป็นการนำระบบ SelfA ที่ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถวัดงานได้ดีทั้งช่วงกว้างและละเอียดไปวัดงานจริงทั้งแกนนอนคือ Polygon Mirror และ แกนตั้งคือ Electronic Level โดย Polygon Mirror เป็นอุปกรณ์ที่มีช่วงการวัดกว้างแต่ไม่ละเอียด ($30^\circ \times 12 = 360^\circ$) ส่วน Electronic Level เป็นอุปกรณ์ที่มีช่วงการวัดแคบแต่มีความละเอียด ($\pm 0.3''$)

ตามระบบมาตรฐานแล้วเครื่องมือที่ใช้เป็นมาตรฐานจะต้องถูกสอบเทียบก่อนนำไปใช้งาน โดยทั่วไปแล้วเครื่องมือที่ต้องการสอบเทียบจะต้องใช้เครื่องมือมาตรฐานที่มีความเที่ยงตรงสูงกว่าอย่างน้อยสามเท่ามาสอบเทียบเช่นระบบเครื่องสอบเทียบ Rotary Encoder ที่มีความไม่แน่นอน $0.15''$ จะต้องถูกสอบเทียบจากเครื่องมือมาตรฐานที่มีความไม่แน่นอน $0.05''$ เป็นต้น แต่ระบบเครื่องสอบเทียบ Rotary Encoder แบบ SelfA นี้มีคุณสมบัติพิเศษคือสามารถสอบเทียบตัวเองได้จึงไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือมาตรฐานที่มีความเที่ยงตรงสูงกว่ามาตรวจสอบ หากต้องการตรวจสอบว่าตัวระบบยังมีความเที่ยงตรงดีอยู่หรือไม่ สามารถใช้วิธีเปรียบเทียบผลการวัดโดยใช้ Artifact หรือ เครื่องมือกลางในการเปรียบเทียบผลการวัดกับระบบมาตรฐานที่มีความเที่ยงตรงที่สูงกว่าหรือใกล้เคียงกัน ขั้นตอนในการวัดผลการทดลองหลังจากสร้างระบบสอบเทียบ Rotary Encoder เสร็จแล้วคือสอบเทียบตัวระบบเองก่อนแล้วจึงนำไปวัดเครื่องมือ Artifact ต่างๆเพื่อเป็นยืนยันถึงความเที่ยงตรงของตัวระบบ โดยค่าความคลาดเคลื่อน (Error) และความไม่แน่นอน (Uncertainty) จะถูก

ถ่ายไปยังตัว Artifact เหล่านั้น หลังจากนั้นนำผลการสอบเทียบของ Artifact ที่เคยวัดผลไว้จากเครื่องมือมาตรฐานอื่นๆมาเปรียบเทียบโดยใช้ค่า EN Ratio เป็นเกณฑ์ในการตรวจสอบว่าระบบสอบเทียบ Rotary Encoder มีความเที่ยงตรงตามที่ต้องการหรือไม่

$$\text{EnRatio} = \frac{|X_a - x_b|}{\sqrt{U_a^2 + U_b^2}} \quad (5.1)$$

เมื่อ X_a = ค่าที่ได้จากการวัดเครื่องมือ a

X_b = ค่าที่ได้จากการวัดเครื่องมือ b

U_a = Uncertainty ของเครื่องมือ a

U_b = Uncertainty ของเครื่องมือ b

หาก En Ratio มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 ถือว่าผลการวัดยอมรับได้

หาก En Ratio มีค่ามากกว่า 1 ถือว่าไม่สามารถยอมรับผลการวัดได้

5.1 การสอบเทียบ Internal Rotary Encoder ของระบบ SelfA

เมื่อเริ่มต้นทำการวัดงานสเกลภายในระบบที่มีจำนวนเส้นทั้งหมด 18,000 เส้นจะถูกวัดค่าจากหัววัดสองชุด โดยชุดแรกจะมีจำนวนหัววัด 4 หัว ส่วนชุดที่สองจะมีหัววัด 7 หัว แต่ทั้งสองชุดจะใช้หัววัดอ้างอิงเดียวกัน ทำให้มีหัววัดทั้งหมด $4+7-1=10$ หัววัด ในการวัดแต่ละครั้งงานสเกลจะถูกหมุนไปเพียง 1 รอบการหมุนจะถูกควบคุมความเร็วรอบที่ 12 rpm

ค่าจากการวัด SelfA-4 และ SelfA-7 สามารถอธิบายได้โดยใช้หลักการเดียวกับวิธี EDA แต่จะมีข้อแตกต่างคือในวิธีแบบ EDA นั้น ค่าจากการวัดแต่ละค่าจะมาจากงานสเกลสองชุด แต่ในระบบ selfA จะใช้งานสเกลเพียงหนึ่งชุดโดยใช้ ข้อมูลจากตำแหน่งหัววัดอ้างอิงแทน

วิธีวัดแบบ EDA เมื่อ ระบบมีหัวอ่าน 4 หัว

$$\text{ที่ตำแหน่งเริ่มต้น } 0^\circ \quad \delta_{i+0} = b_{i+0} - a_{i+0} \quad (5.2)$$

$$\text{ที่ตำแหน่ง } 2\pi/4 \quad \delta_{i+2\pi/4} = b_{i+2\pi/4} - a_{i+0} \quad (5.3)$$

$$\text{ที่ตำแหน่ง } 4\pi/4 \quad \delta_{i+4\pi/4} = b_{i+4\pi/4} - a_{i+0} \quad (5.4)$$

$$\text{ที่ตำแหน่ง } 6\pi/4 \quad \delta_{i+6\pi/4} = b_{i+6\pi/4} - a_{i+0} \quad (5.5)$$

วิธีวัดแบบ SelfA เมื่อ ระบบมีหัวอ่าน 4 หัว

$$\text{ที่ตำแหน่งเริ่มต้น } 0^\circ \quad \delta_{i+0} = a_{i+0} - a_{i+0} = 0 \quad (5.6)$$

$$\text{ที่ตำแหน่ง } 2\pi/4 \quad \delta_{i+2\pi/4} = a_{i+2\pi/4} - a_{i+0} \quad (5.7)$$

$$\text{ที่ตำแหน่ง } 4\pi/4 \quad \delta_{i+4\pi/4} = a_{i+4\pi/4} - a_{i+0} \quad (5.8)$$

$$\text{ที่ตำแหน่ง } 6\pi/4 \quad \delta_{i+6\pi/4} = a_{i+6\pi/4} - a_{i+0} \quad (5.9)$$

ทำการเฉลี่ยค่าจากการวัด SelfA-4 โดยให้ $[\mu_i]_4$ คือค่าเฉลี่ยของ SelfA-4

$$[\mu_i]_4 = \frac{\delta_{i+0} + \delta_{i+2\pi/4} + \delta_{i+4\pi/4} + \delta_{i+6\pi/4}}{4} \quad (5.10)$$

$$[\mu_i]_4 = \frac{a_{i+0} + a_{i+2\pi/4} + a_{i+4\pi/4} + a_{i+6\pi/4}}{4} - a_{i+0} \quad (5.11)$$

หรือ
$$-[\mu_i]_4 = a_{i+0} - \frac{a_{i+0} + a_{i+2\pi/4} + a_{i+4\pi/4} + a_{i+6\pi/4}}{4} \quad (5.12)$$

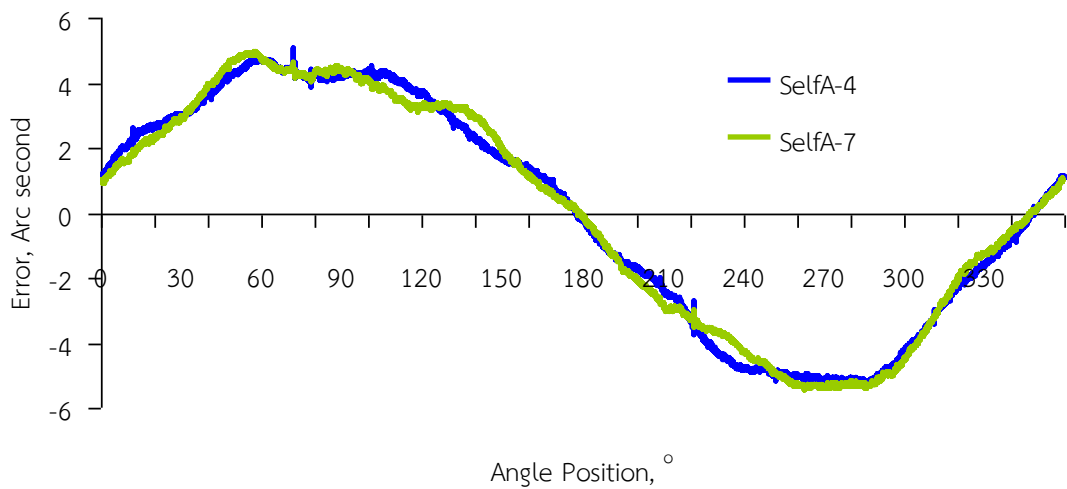
$[\mu_i]_4$ คือค่าของผลการวัดที่ได้จากชุด 4 หัวอ่าน

a_{i+0} คือค่า Error ของ encoder ที่เราต้องการหา

$\frac{a_{i+0} + a_{i+2\pi/4} + a_{i+4\pi/4} + a_{i+6\pi/4}}{4}$ คือค่า 4th multiple integral Fourier

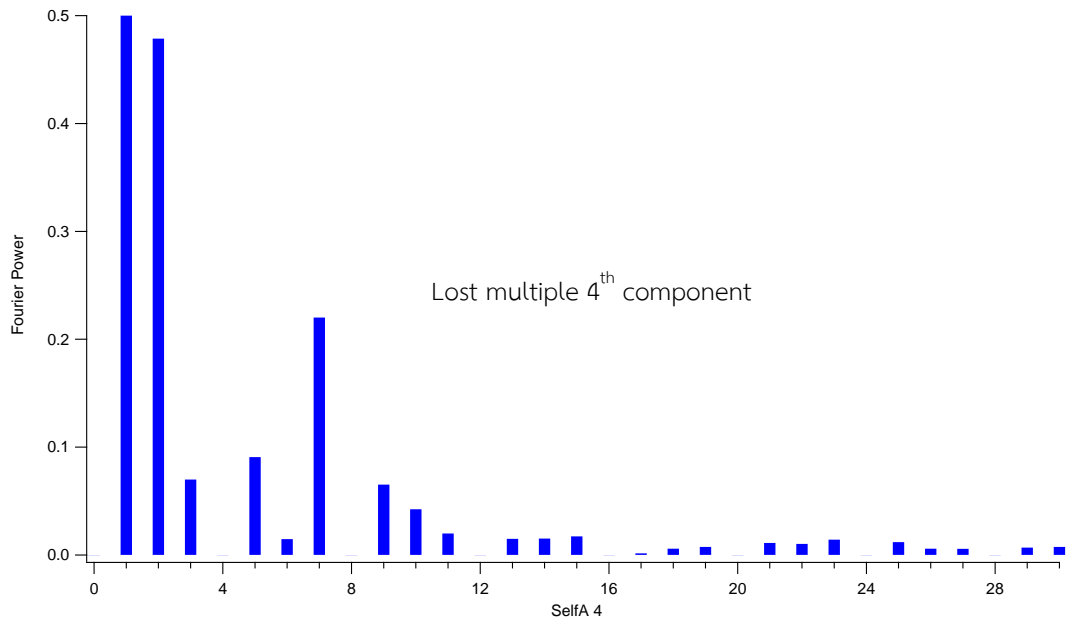
component

เมื่อนำ $[\mu_i]_4$ มา Plot Graph จะได้ผลดังรูปที่ 5.1

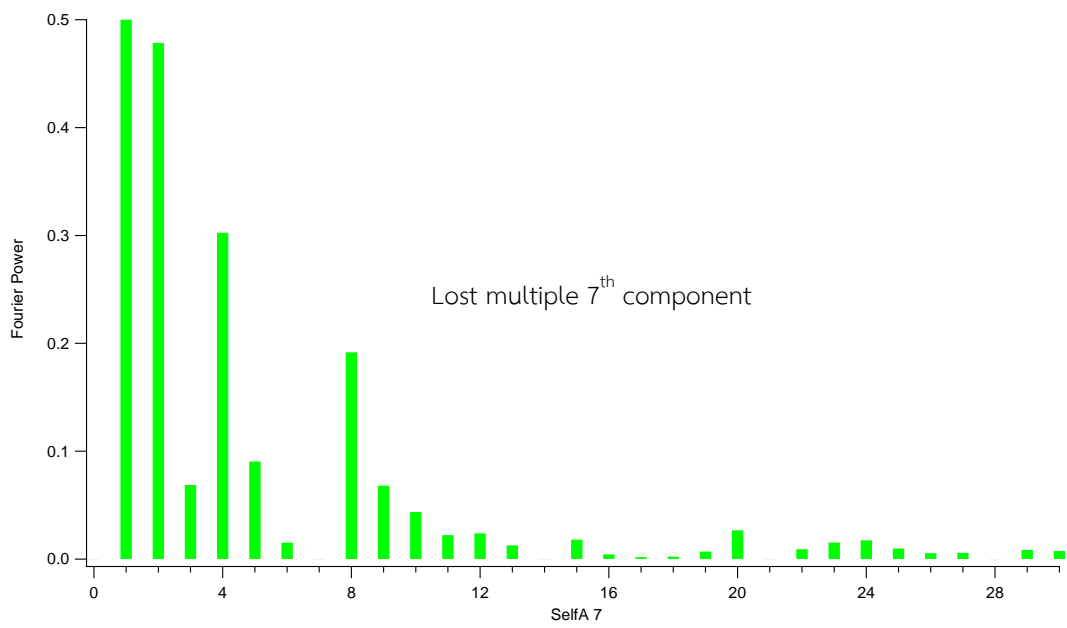


รูปที่ 5.1 ผลการสอบเทียบ SelfA

จากหลักการของ EDA ค่าจากการวัด SelfA-4 จะขาดข้อมูลที่ทุกๆ 4 component (M^{-4}) ส่วนค่าจากการวัด SelfA-7 จะขาดข้อมูลที่ทุกๆ 7 (M^{-7}) component

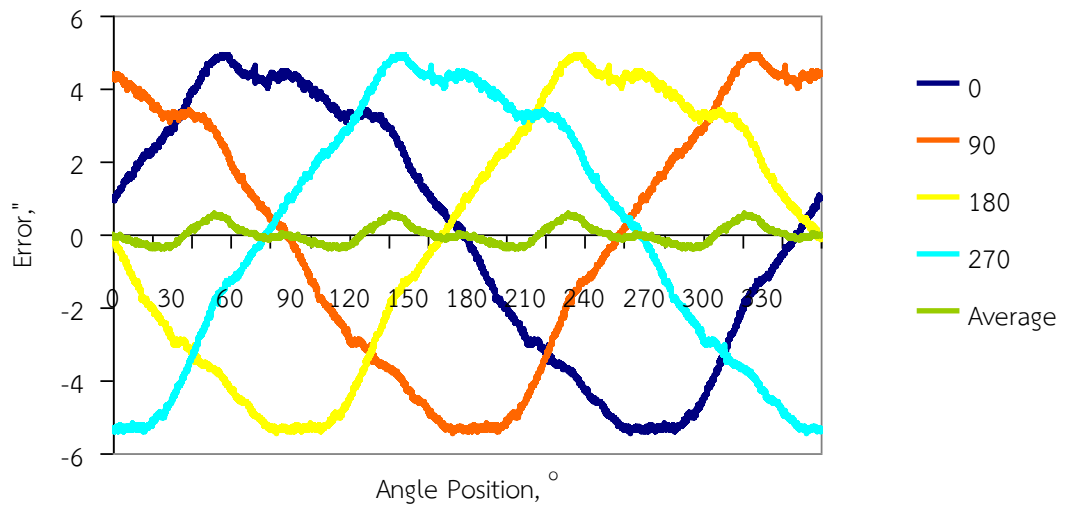


รูปที่ 5.2 Fourier component ของ SelfA-4, M^{-4}



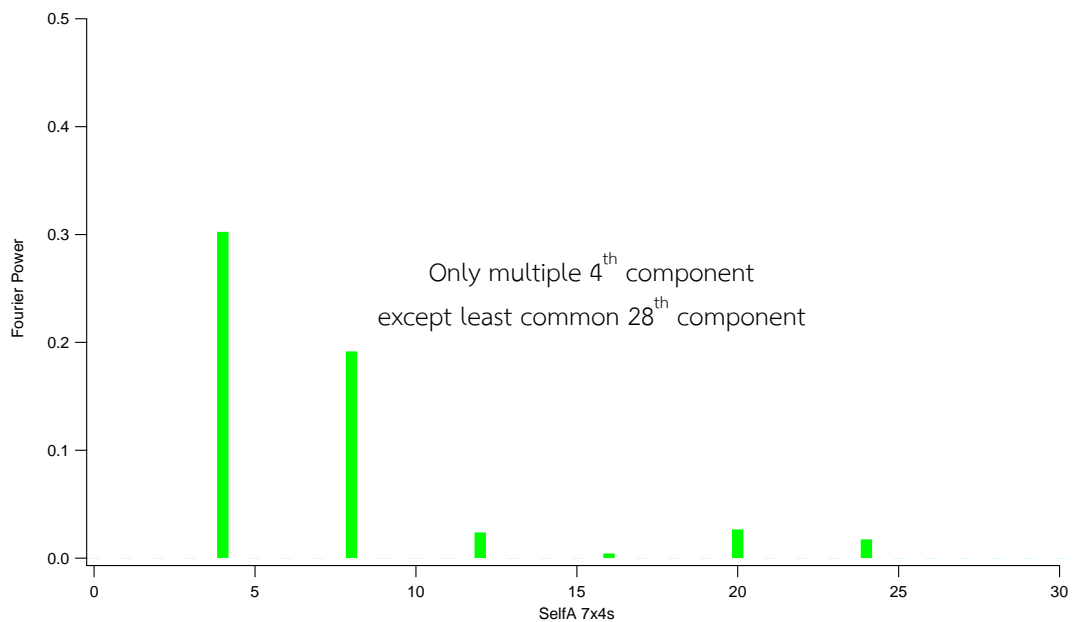
รูปที่ 5.3 Fourier component ของ SelfA-7, M^{-7}

นำค่าที่ได้จากการวัด SelfA-7 มาทำการ shift phase ทีละ $2\pi/4$ เป็นจำนวน 4 ครั้งแล้วทำการเฉลี่ย



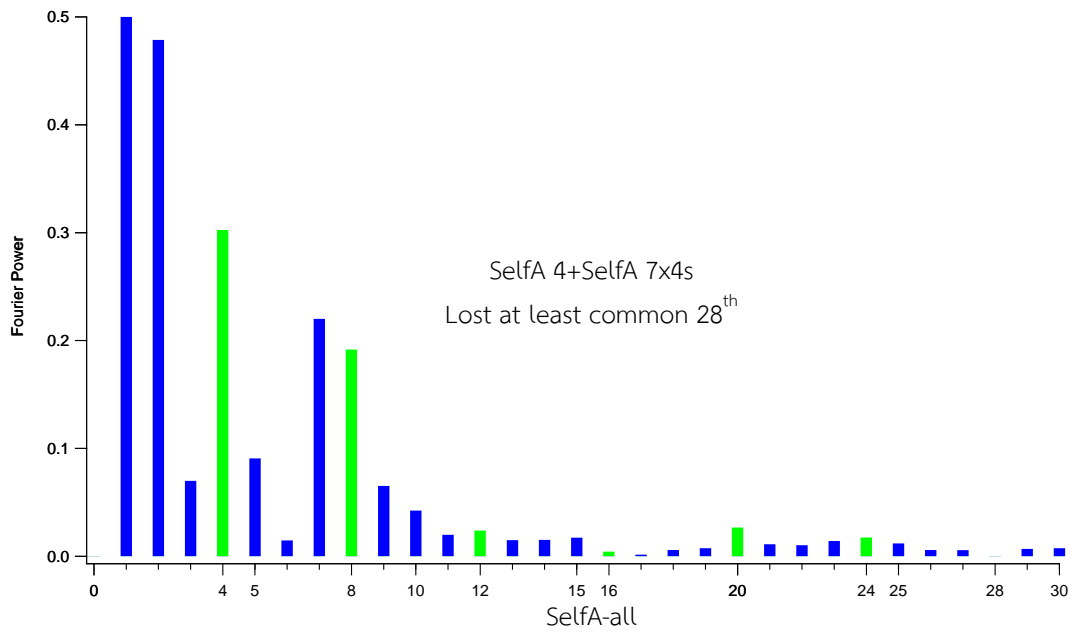
รูปที่ 5.4 SelfA-7 shift phase 4 ครั้งแล้วเฉลี่ย

ค่าเฉลี่ยที่ได้ข้างต้น จะเป็นข้อมูลที่มีเฉพาะทุก 4 component ยกเว้นที่ 28^{th} , 56^{th} , 84^{th} ...



รูปที่ 5.5 Fourier component ของ ค่าเฉลี่ย SelfA-7x4s, $M^{-7} \times 4s$

นำค่าข้อมูลจากรูปที่ 5.2 มารวมกับข้อมูลจากรูปที่ 5.5 เพื่อชดเชยค่าที่ขาดหายไป



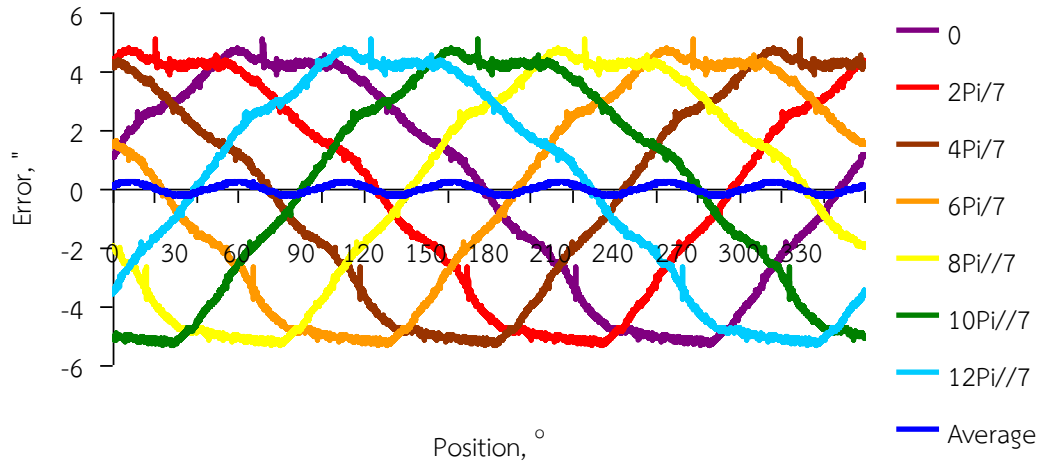
รูปที่ 5.6 Fourier component ของ Multi-combination M^{-4} กับ $M^{-7} \times 4s$

ค่าที่ได้จากการชดเชยแล้วเรียกว่า SelfA-all จะยังคงมีขนาดข้อมูลที่เป็น least common (คูณร่วมน้อย) ของ จำนวนหัววัดทั้งสองชุด คือ $4 \times 7 = 28$



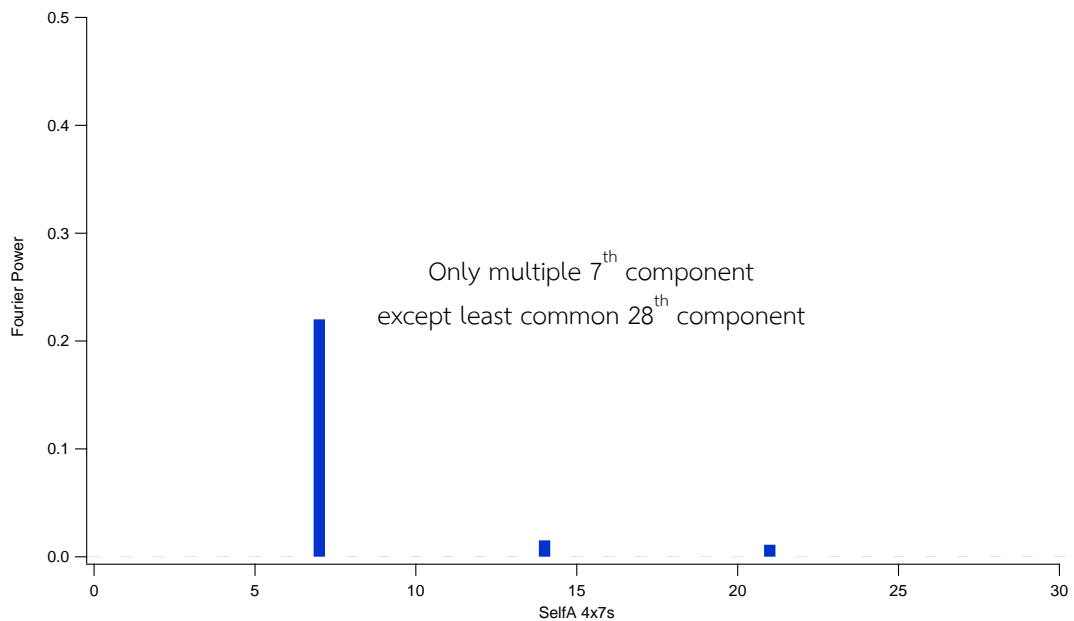
รูปที่ 5.7 Multi-combination M^{-4} กับ $M^{-7} \times 4s$

ในทำนองเดียวกัน การคำนวณด้วยวิธี Multi-combination สามารถทำได้อีกวิธีหนึ่งคือนำค่าที่ได้จากการวัด SelfA-4 มาทำการ shift phase ทีละ $2\pi/7$ เป็นจำนวน 7 ครั้งแล้วทำการเฉลี่ย



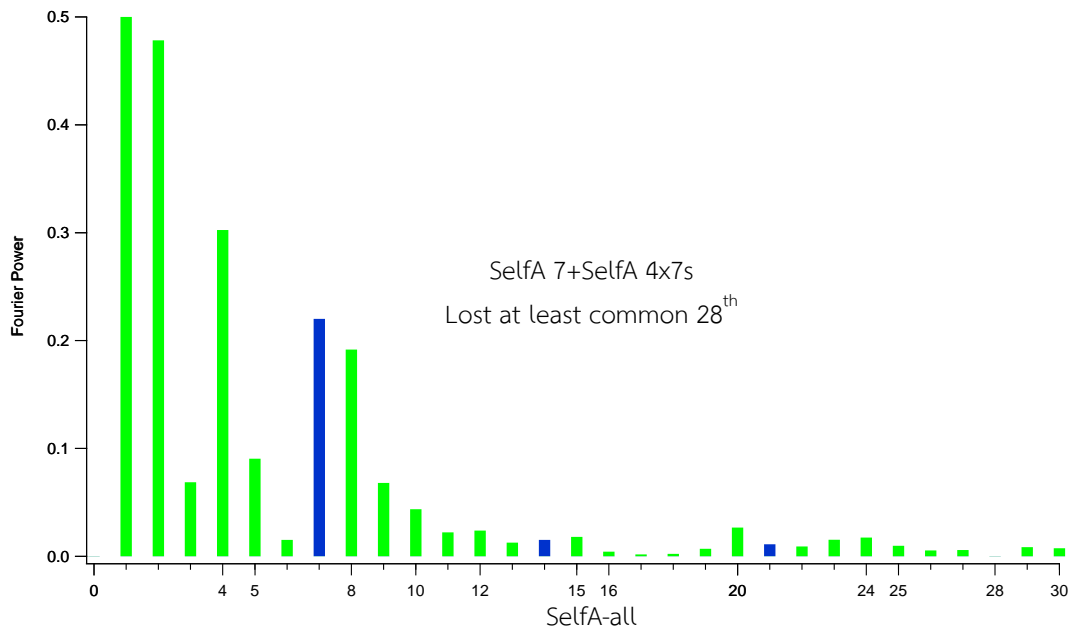
รูปที่ 5.8 SelfA-4 shift phase 7 ครั้งแล้วเฉลี่ย

ค่าเฉลี่ยที่ได้ข้างต้นจะเป็นข้อมูลที่มีเฉพาะทุก 7 component ยกเว้นที่ component 28, 56, 84 ...



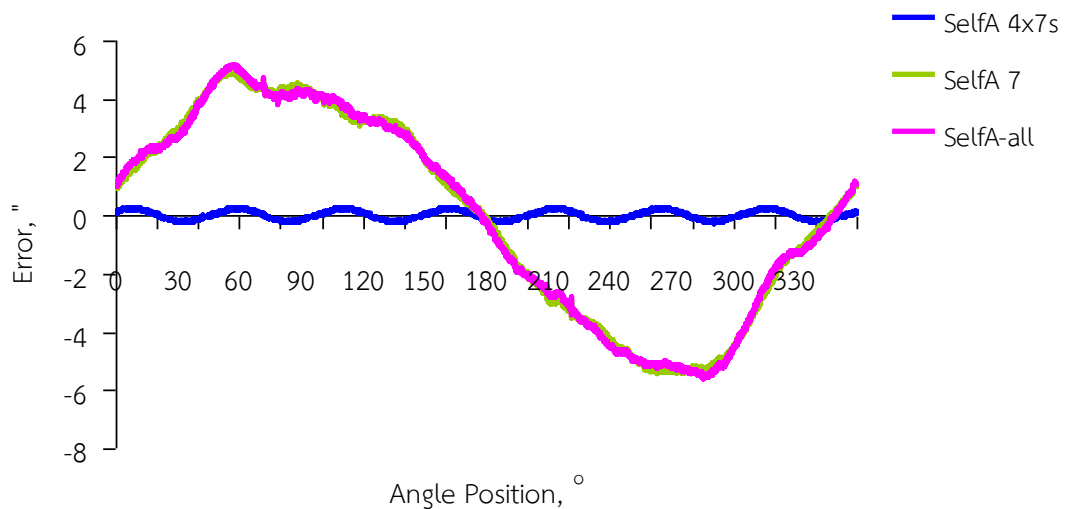
รูปที่ 5.9 Fourier component ของ ค่าเฉลี่ย SelfA-4x7s, $M^{-4} \times 7s$

นำค่าข้อมูลจากรูปที่ 5.3 มารวมกับข้อมูลจากรูปที่ 5.9 เพื่อชดเชยค่าที่ขาดหายไป



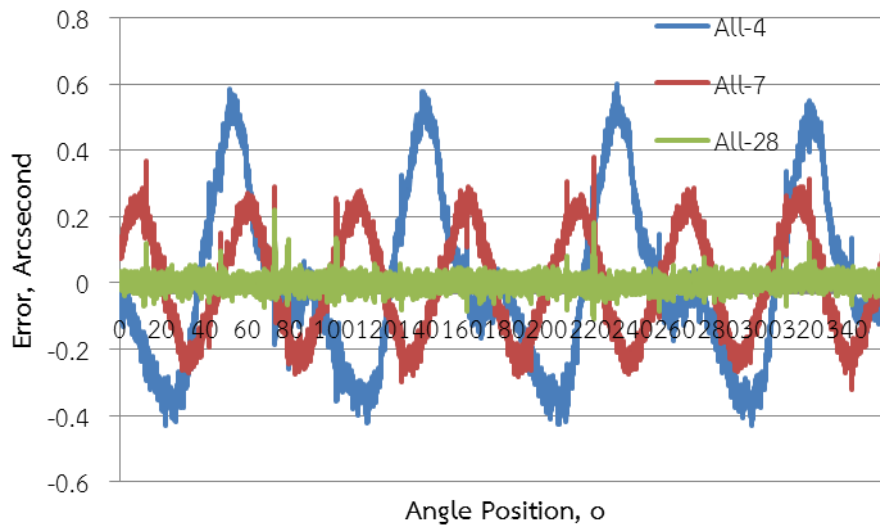
รูปที่ 5.10 Fourier component ของ Multi-combination M^{-7} กับ $M^{-4} \times 7s$

ค่าที่ได้จากการชดเชยแล้วเรียกว่า SelfA-all จะยังคงมีขาดข้อมูลที่ เป็น least common (คูณร่วมน้อย) ของ จำนวนหัววัดทั้งสองชุด คือ $4 \times 7 = 28$



รูปที่ 5.11 Multi-combination M^{-7} กับ $M^{-4} \times 7s$

ค่าจากการ “ผสม” หรือ combine ด้วยวิธีดังกล่าวคือผลการวัด ความคลาดเคลื่อนของระบบสอบเทียบ rotary encoder เมื่อนำระบบสอบเทียบ rotary encoder นี้ไปสอบเทียบเครื่องมืออื่น ๆ จะต้องนำค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้ไปชดเชย (compensate)



รูปที่ 5.12 เปรียบเทียบผลการวัดระหว่าง SelfA 4, SelfA 7 และ SelfA 28 กับ SelfA All

จากรูป 5.12 จะเห็นได้ว่าการใช้ Multi-Combination ระหว่าง SelfA 4 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 0.6" กับ SelfA 7 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 0.4" เพื่อได้ SelfA 28 ทำให้ความคลาดเคลื่อนลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.05"

แหล่งความไม่แน่นอนในการวัดระบบสอบเทียบ SelfA

ความไม่แน่นอนในการวัดสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\theta_N = \theta_S + \Delta\theta + \theta_{is} + \theta_{counter} + \theta_{rotation} + \theta_{sensor} + \theta_{pitch} \quad (5.13)$$

เมื่อ

- θ_S : ค่ามุมจริงของ SelfA
- θ_N : ค่าที่อ่านได้จากการวัด SelfA
- $\Delta\theta$: ค่าความเบี่ยงเบนของข้อมูลจากการวัดซ้ำ (Repeatability)
- θ_{is} : ความละเอียดของการอ่านค่าจาก external counter
- $\theta_{counter}$: ความไม่เสถียรของ external counter
- $\theta_{rotation}$: ความไม่คงที่ของความเร็วในการหมุน
- θ_{sensor} : ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการวัดของหัววัด
- θ_{pitch} : ความคลาดเคลื่อนของการแบ่งช่องสเกล

1) Repeatability, $\Delta\theta$

Repeatability หรือ ความซ้ำ เป็นค่าที่ได้จากการวัดโดยคำนวณได้จากความแตกต่างระหว่างข้อมูลที่วัดได้ค่ามากที่สุด, θ_{\max} กับค่าน้อยที่สุด, θ_{\min} โดยมีการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบ Rectangular ตามสมการ

$$\Delta\theta = \frac{|\theta_{\max} - \theta_{\min}|}{\sqrt{3}} = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.058'' \quad (5.14)$$

2) Standard Resolution, $u\theta_{is}$

ระบบสอบเทียบเครื่อง Rotary Encoder ใช้ Quartz Oscillator ความถี่ 50 MHz เป็นอุปกรณ์นับช่วงสัญญาณโดยในหนึ่งรอบการวัด 360° มีความเร็วของการหมุน 12 rpm หรือ 5 วินาทีต่อรอบมีการกระจายตัวแบบ Rectangular โดยมีความไม่แน่นอนจากความละเอียดของการวัดเป็นไปตามสมการ

$$u\theta_{is} = \frac{\left[\frac{\theta_r}{N_c \times T_r} \right]}{\sqrt{3}} \quad (5.15)$$

$$u\theta_{is} = \frac{\left[\frac{360^\circ \times 60' \times 60''}{50 \times 10^6 \text{ Hz} \times 5 \text{ s}} \right]}{\sqrt{3}} = \frac{\left[\frac{1,296,000''}{250 \times 10^6} \right]}{\sqrt{3}} = 0.003''$$

เมื่อ	θ	คือ มุมที่หมุนไปหนึ่งรอบ
	N_c	คือ ความถี่ของ External Counter 50MHz
	T_r	คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการหมุนหนึ่งรอบ

3) External Counter, $u\theta_{counter}$

Quartz Oscillator ที่ใช้เป็นอุปกรณ์นับช่วงสัญญาณมีความถี่ 50 MHz ตาม specification ของผู้ผลิต มีค่าความไม่เสถียรเท่ากับ 25 ppm และมีการกระจายตัวแบบ Rectangular จะมีความไม่แน่นอนจากความไม่เสถียรของ Quartz Oscillator ตามสมการ

$$u\theta_{counter} = \frac{\frac{N_c T_r R_c}{N}}{\sqrt{3}} \quad (5.16)$$

เมื่อ	N_c	คือ ความถี่ของ External Counter 50MHz
	T_r	คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการหมุนหนึ่งรอบ 5 วินาที (Speed Rotation=12 rpm)
	R_c	คือ ความไม่เสถียรของ Quartz Oscillator 25 ppm
	N	คือ จำนวนช่องสเกลในหนึ่งรอบ 18,000 ช่อง

$$\text{แทนค่า} \quad u_{\theta_{\text{counter}}} = \frac{\left[\frac{50 \times 10^6 \text{ Hz} \times 5 \times 25 \times 10^{-6} \text{ ppm}}{18,000} \right]}{\sqrt{3}} = 0.2406 \text{ count}$$

$$1 \text{ count} = 1 \text{ resolution} = \left[\frac{\theta_r}{N_c \times T_r} \right] = \left[\frac{360^\circ \times 60' \times 60''}{50 \times 10^6 \text{ Hz} \times 5 \text{ s}} \right] = 0.0052''$$

$$u_{\theta_{\text{counter}}} = 0.2406 \text{ count} = 0.2406 \times 0.0052'' = 0.0013'' \quad (5.17)$$

4) Uniformity of Rotation, $u_{\theta_{\text{rotation}}}$

Uniformity of Rotation คือ ความไม่เสถียรของความเร็วรอบขณะทำการหมุน จากการสังเกตพบว่าการหมุนในแต่ละรอบเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า 2 rpm หรือ 1 วินาทีต่อรอบทำให้เกิดความคลาดเคลื่อน 0.002''

$$u_{\theta_{\text{rotation}}} = \frac{0.002''}{\sqrt{3}} = 0.0012'' \quad (5.18)$$

5) Reading Head Position, $u_{\theta_{\text{sensor}}}$

การเคลื่อนของหัวอ่านหรือ Sensor ของ Servo Motor ทำให้การควบคุมตำแหน่งคลาดเคลื่อนขณะทำการวัด โดยประมาณว่าตำแหน่งของหัวอ่านจะคลาดเคลื่อนไปไม่เกิน 4 counts และมีการกระจายตัวเป็น Rectangular ดังนั้นความไม่แน่นอนเนื่องจากตำแหน่งของหัวอ่านสามารถเขียนเป็นสมการ

$$u_{\theta_{\text{counter}}} = \frac{4 \text{ count} \times 0.0052''}{\sqrt{3}} = 0.012'' \quad (5.19)$$

6) Scale Pitch, $u\theta_{pitch}$

ความคลาดเคลื่อนของช่องสเกลแบ่งออกเป็นสองกรณี

กรณีที่มิได้ชดเชยค่าจากผลการสอบเทียบ SelfA ที่มีช่องสเกล 18,000 ช่องหรือช่องละ 72" และมี interpolator 1024 counts โดยประมาณว่ามีความคลาดเคลื่อนไป 4 counts และมีการกระจายตัวแบบ Rectangular จะมีความไม่แน่นอนจากความคลาดเคลื่อนของช่องสเกลตามสมการ

$$u\theta_{pitch} = \frac{\left[\frac{72''}{1024 / 4} \right]}{\sqrt{3}} = 0.1624'' \quad (5.20)$$

กรณีที่ชดเชยค่าจากผลการสอบเทียบ SelfA ความคลาดเคลื่อนของช่องสเกลจะเหลือเพียง 1-2% เนื่องจาก interpolation error ความคลาดเคลื่อนของช่องสเกลลดลงเหลือเพียง

$$u\theta_{pitch} = 0.1624'' \times \frac{2}{100} = 0.0033'' \quad (5.21)$$

ตารางที่ 5.1 แหล่งความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบ SelfA

Quantity	Standard Uncertainty	Probability Distributio	Sensitivity Coefficient	Uncertainty
X_i	$u(x_i)$		c_i	$u_i(y)$
$\Delta\theta$	0.0580 "	Normal	1	0.0580 "
θ_{is}	0.0030 "	Rectangular	1	0.0030 "
$\theta_{counter}$	0.0013 "	Rectangular	1	0.0013 "
$\theta_{rotation}$	0.0020 "	Rectangular	1	0.0020 "
θ_{sensor}	0.0120 "	Rectangular	1	0.0120 "
θ_{pitch}	0.0033 "	Rectangular	1	0.0033 "
$u(\theta_x)$				0.0594 "
U_x	$k= 2$			0.1189 "

ความไม่แน่นอนขยาย (Expansion Uncertainty) = 0.1189"

ในทางมาตรวิทยาแล้วที่ได้จากการคำนวณความไม่แน่นอนข้างต้นมักทำการปิดเศษขึ้นเพื่อความปลอดภัยในความเชื่อมั่นของผลการวัดจึงทำการปัดค่าเป็น 0.12" ดังนั้นความไม่แน่นอนของผลการวัดระบบสอบเทียบ Rotary Encoder จึงเท่ากับ

$$U_x [\text{SelfA}] = 0.12'' \quad (5.22)$$

จากสมการ (5.22) จะเห็นได้ว่าค่าความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบมีค่าเท่ากับ $0.12''$ ซึ่งน้อยกว่า $0.2''$ ตามวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวยังเป็นเพียงค่าที่เกิดจากการประเมิน จำเป็นต้องใช้วิธีเปรียบเทียบผลการวัดเพื่อยืนยันถึงความเที่ยงตรงของระบบโดยใช้เครื่องมือวัดมุม ชนิดต่างๆอันได้แก่ Rotary Encoder, Autocollimator, Polygon Mirror และ Electronic Level

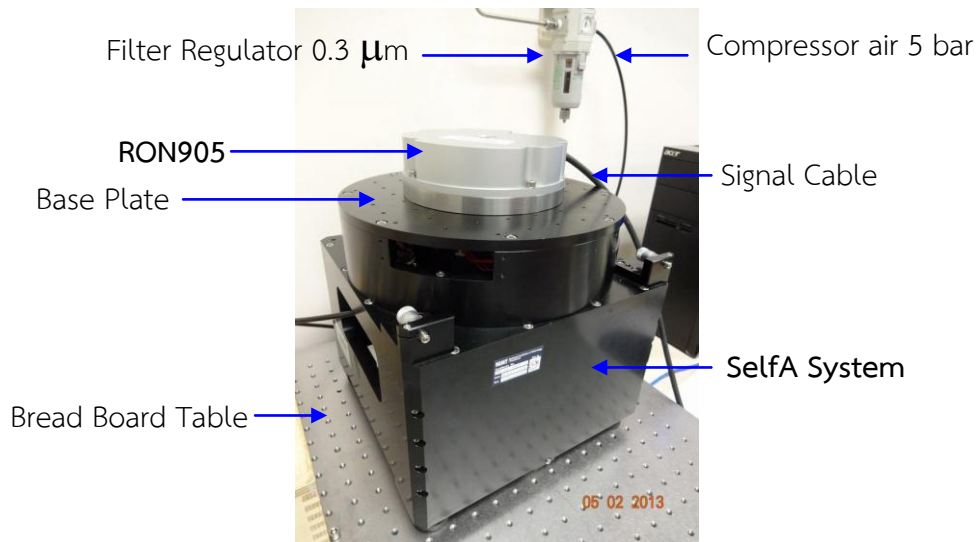
5.2 การตรวจสอบความแม่นยำของระบบเมื่อใช้งานช่วง 360°

External Rotary encoder คือ Rotary Encoder ภายนอกที่ต้องการนำมาตรวจสอบความแม่นยำของระบบเมื่อใช้งานช่วง 360° โดย Rotary Encoder ที่นำมาใช้วัดผลการทดลองเป็น รุ่น RON905 ผลิตโดยบริษัท Heidenhain ซึ่งเป็น Angle Encoder ที่มีความเที่ยงสูงมากที่สุดรุ่นหนึ่งที่มีขายอยู่ในท้องตลาด (ปัจจุบัน RON905 ผลิตตามการสั่งซื้อเท่านั้น) โดยมีจำนวนขีดสเกล 36,000 ช่อง มี Accuracy $0.4''$ และสามารถเพิ่ม Accuracy เป็น $0.2''$ เมื่อใช้คู่กับ Interpolator รุ่น AWE 1024 วิธีการสอบเทียบ Rotary Encoder เริ่มจาก ติดตั้ง Adaptor ระหว่างแกนหมุนของระบบสอบเทียบ กับแกนหมุนของตัว Rotary Encoder โดย Adaptor ดังกล่าวควรเป็น Coupling ที่มีความยืดหยุ่น ในการหมุนน้อยเนื่องจากหากมีความยืดหยุ่นมากเกินไปจะทำให้เกิดแรงทวนขณะเริ่มและหยุดการวัดเป็นผลให้เกิดความคลาดเคลื่อน ในการทดลองนี้จึงใช้ Adaptor ที่ทำขึ้นเองเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหา ดังกล่าว หลังจากติดตั้ง Adaptor แล้วทำการปรับการเยื้องศูนย์ของแกนโดยใช้ Dial Test Indicator เป็นอุปกรณ์สำหรับวัด โดยให้ความเยื้องศูนย์ไม่เกิน 5 micrometer



รูปที่ 5.13 วิธีการปรับความเยื้องศูนย์ของ Adaptor โดยใช้ Dial Test Indicator

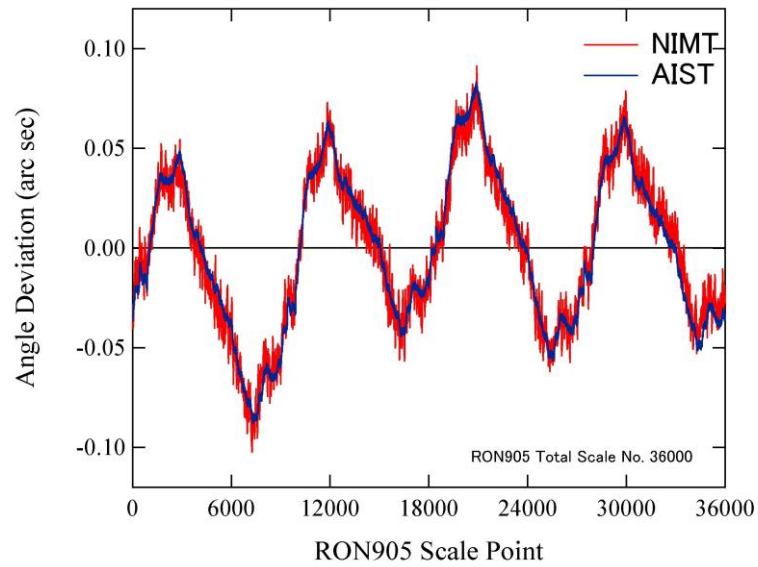
หลังจากนั้นทำการ ติดตั้งแกนหมุนของ Rotary Encoder เข้ากับ Adaptor จากนั้นยึด Housing เข้ากับ Base Plate และเชื่อมต่อสายสัญญาณระหว่าง Rotary Encoder เข้ากับตัวระบบ



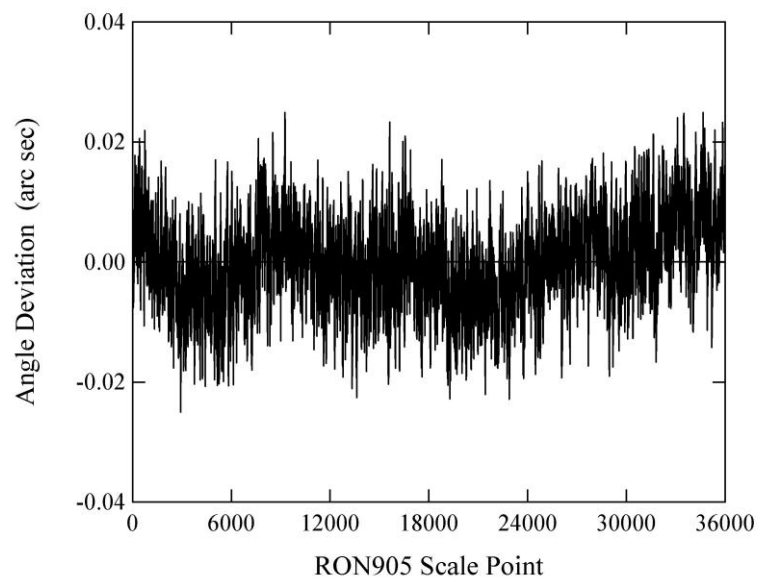
รูปที่ 5.14 การสอบเทียบ RON905

วิธีการวัด External Rotary Encoder เป็นการวัดแบบตรงหรือ Direct Measurement กล่าวคือ ตัวระบบ SelfA และ External Rotary Encoder จะถูกหมุนไปพร้อมๆกันโดยมีหัวอ่านคนละชุดอ่านขีดสเกลของตัวเอง การวัด External Rotary Encoder จะมีการวัดแบบการจัดวางตำแหน่งหลายตำแหน่งเนื่องจากต้องการค่าเฉลี่ยของผลการวัดในการประกบ External Rotary Encoder เข้ากับระบบ SelfA โดยการเปลี่ยนตำแหน่ง Housing 4 ตำแหน่ง ($4 \times 90^\circ$) และ แกนหมุน 3 ตำแหน่ง ($3 \times 120^\circ$) รวมทั้งหมด $4 \times 3 = 12$ ตำแหน่ง ค่าที่ได้ออกมาแต่ละขีดสเกลของ External Rotary Encoder จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลการวัดของ Internal Calibration Data ของ SelfA ที่ได้ทำการวัดมาก่อนในหัวข้อ 5.1 โดยผลการวัด Rotary Encoder RON905 ซึ่งวัดที่ห้องปฏิบัติการมมสถาบันมาตรวิทยา, NIMT เปรียบเทียบกับผลที่วัดจาก Advance Institute of Science and Technology, AIST ซึ่งเป็นต้นสังกัดของสถาบันมาตรวิทยาประเทศญี่ปุ่น, NMIJ แสดงดังรูป 5.15

ตามคุณสมบัติของผู้ผลิต Rotary Encoder RON905 มีความเที่ยงตรงในระดับ 0.2" จึงมีคุณสมบัติเหมาะสมกับการนำมาใช้เป็น Artifact เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของระบบ SelfA



รูปที่ 5.15 ผลการสอบเทียบ RON905ระหว่าง NIMT กับ AIST เมื่อนำเฉพาะส่วนต่างของผลการวัด (NIMT-AIST) มา Plot Graph จะสามารถเห็นได้ชัดเจนขึ้นว่ามีความคลาดเคลื่อนจากกันน้อยกว่า 0.04"



รูปที่ 5.16 ผลความแตกต่างในการสอบเทียบ RON905ระหว่าง NIMT กับ AIST

แหล่งความไม่แน่นอนในการวัด External Rotary Encoder ด้วย SelfA
ความไม่แน่นอนในการวัดสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\theta_x = \theta_s + \Delta\theta + \theta_{is} + \theta_{gap} \quad (5.23)$$

เมื่อ

- θ_s : ความคลาดเคลื่อนของ SelfA
- θ_x : ค่าที่อ่านได้จากการวัด External Rotary Encoder ด้วย SelfA
- $\Delta\theta$: ค่าความเบี่ยงเบนของข้อมูลจากการวัดซ้ำ (Repeatability)
- θ_{is} : ความละเอียดของการอ่านค่าจาก SelfA
- θ_{gap} : ความเยื้องศูนย์ในการติดตั้ง External Rotary Encoder

ตารางที่ 5.2 แหล่งความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ External Rotary Encoder

Quantity X_i	Standard Uncertainty $u(x_i)$	Probability Distribution	Sensitivity Coefficient c_i	Uncertainty Contribution $u_i(y)$
θ_s	0.0594 "	Normal	1	0.0594 "
$\Delta\theta$	0.0225 "	Rectangular	1	0.0225 "
θ_{is}	0.0030 "	Rectangular	1	0.0030 "
θ_{gap}	0.0115 "	Rectangular	1	0.0115 "
$u(\theta_x)$				0.0647 "
U_x	$k= 2$			0.1294 "

$$U_x [\text{Rotary Encoder}] = 0.13'' \quad (5.24)$$

ผลการเปรียบเทียบ En Ratio ในการวัด External Rotary Encoder

จากสมการ (5.1)

$$En = \frac{|X_a - x_b|}{\sqrt{U_a^2 + U_b^2}}$$

- โดย $|X_a - x_b|$ คือผลความแตกต่างระหว่างค่าที่นำมาเปรียบเทียบ
- U_a คือ Uncertainty ของการวัดค่าที่1 (NIMT-SelfA) = 0.13''
- U_b คือ Uncertainty ของการวัดค่าที่2 (NMIJ-AIST) = 0.1''

$$EN_{RON905} = \frac{|0.04|}{\sqrt{0.13^2 + 0.1^2}} \cong 0.25 \quad (5.25)$$

จากผลการเปรียบเทียบค่า En Ratio มีค่าเพียง 0.25 เป็นการพิสูจน์ว่าระบบสอบเทียบมีความเที่ยงตรงในระดับน้อยกว่า 0.2" ตามจุดประสงค์ที่ได้ตั้งไว้

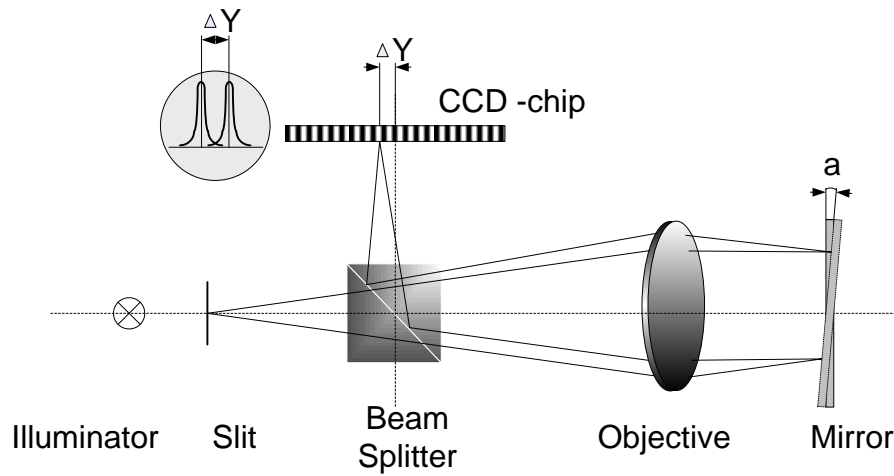
5.3 การตรวจสอบความแม่นยำของระบบเมื่อใช้งานที่มีความละเอียดสูง

Autocollimator เป็นกล้องวัดมุมที่มีความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในสถาบันมาตรวิทยา แห่งชาติต่างๆเนื่องจากมีความเที่ยงตรงสูง Autocollimator นี้นำมาใช้ในการตรวจสอบความแม่นยำ ของระบบเมื่อใช้งานที่มีความละเอียดเป็นรุ่น ELCOMAT2000 ผลิตโดยบริษัท Moller Wedel มี Accuracy 0.25" ที่พิสัยการวัด $\pm 1,000''$ ทั้งแกน X และ แกน Y มีResolutionหรือความละเอียด สูงสุด 0.001" และมีReproducibility 0.05"



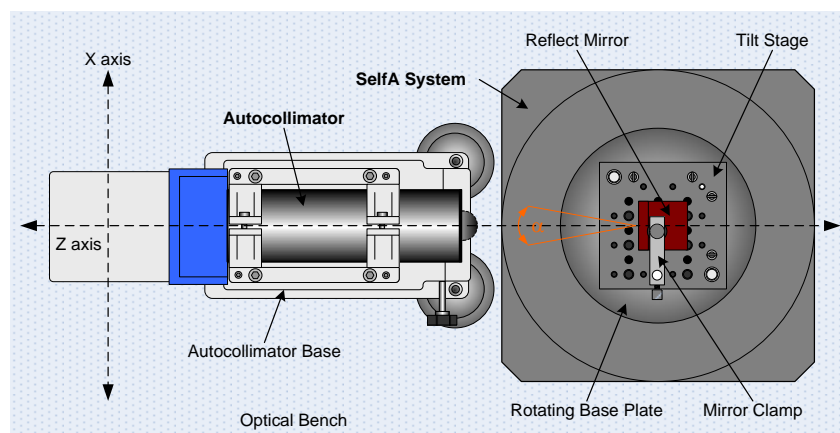
รูปที่ 5.17 ELCOMAT 2000

การทำงานของ Autocollimator เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงขนาด 660 nm ให้ลำแสงผ่านช่อง Slit ไปยัง Beam Splitter ลำแสงจะถูกแยกออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะไปตกกระทบบน CCD chip ส่วนลำแสงที่สองจะผ่านไปยังเลนส์รวมแสงหรือ Objective Lens แล้วสะท้อนกลับมาจนถึง Beam Splitter อีกครั้ง โดยลำแสงที่สองที่กลับมาตกกระทบบน CCD chip จะมีตำแหน่งการตกกระทบที่แปรผันตามมุมของกระจกที่เอียงไปจากเดิม การวัดมุมทำได้โดยการนำกระจกสะท้อนแสงมาติดตั้งบนอุปกรณ์ที่ต้องการสอบเทียบ หลังจาก Alignment ลำแสงแล้วจุดบนที่ค่าที่ตำแหน่งเริ่มต้นแล้ว เปลี่ยนตำแหน่งไปยังตำแหน่งที่สอง คำนวณค่ามุมที่ต่างกันระหว่างสองตำแหน่ง



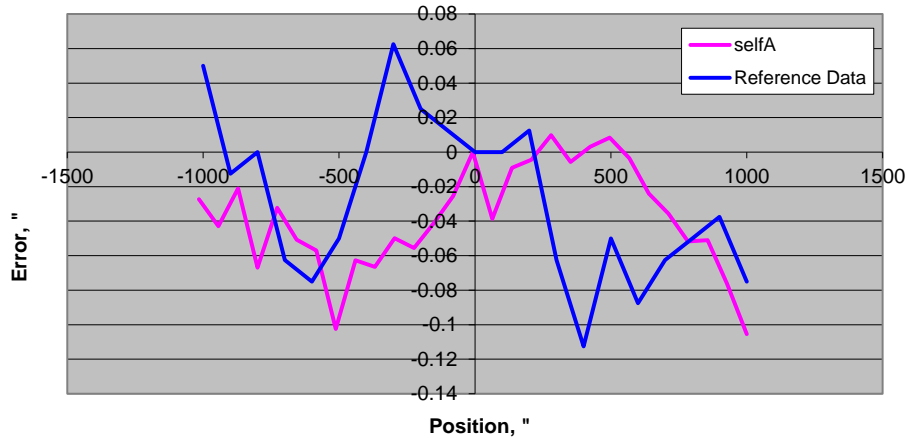
รูปที่ 5.18 หลักการทำงานของ ELCOMAT 2000

ขั้นตอนการสอบเทียบ Autocollimator ด้วย SelfA System เริ่มจากสั่งให้ SelfA หมุนไปในตำแหน่ง Home Position (กรณีนี้ใช้ตำแหน่ง 0°) ติดตั้ง Tilt Stage พร้อม Reflect Mirror บน Rotating Base Plate ของ SelfA จากนั้นนำ Autocollimator มาทำการ Alignment โดยพยายามให้ กึ่งกลางลำแสงของ Autocollimator ตรงกับกึ่งกลาง Reflect Mirror ซึ่งขั้นตอนนี้อาจใช้ View finder หรือ Laser Alignment มาช่วยในการปรับ หลังจากนั้นทำการปรับแกน X ของ Autocollimator ให้ขนานกับระนาบการหมุนของระบบ SelfA โดยการปรับลากล้องให้หมุนไปตามแกน Z เพื่อให้ Cosine Error มีค่าน้อยที่สุด โดยมีหลักการปรับว่าเมื่อ Reflecting Mirror หมุนไปเป็นมุม α (ค่าที่อ่านได้จาก Autocollimator ในแกน X จาก $+1500''$ ไปจนกระทั่ง $-1500''$) ค่าที่อ่านได้จากแกน Y ควรจะมีค่าเปลี่ยนแปลงมากที่สุดไม่เกิน $1''$ ยึด Autocollimator ให้ติดกับฐานให้แน่นแล้วเริ่มทำการวัดโดยการหมุน Reflect Mirror จากตำแหน่งน้อยที่สุดไปสู่ตำแหน่งมากที่สุดของ Autocollimator โดยมีการติดตั้งระบบตามรูป 5.19



รูปที่ 5.19 การวัด Autocollimator: ELCOMAT 2000 (X axis) ด้วย SelfA

ผลการวัด Autocollimator, ELCOMAT 2000 ซึ่งวัดที่ห้องปฏิบัติการมาตรฐานสถาบันมาตรวิทยา, NIMT เปรียบเทียบกับผลที่วัดระหว่างการวัดด้วย ระบบ SelfA กับ Standard Autocollimator (STD-AC) แสดงดังรูป 5.20



รูปที่ 5.20 ผลการวัดเปรียบเทียบ Autocollimator: ELCOMAT 2000 (X axis)

ตารางที่ 5.3 ผลการวัดเปรียบเทียบ Autocollimator: ELCOMAT 2000 (X axis)

by Ref.Autocollimator				by SelfA			
Position	Error	Position	Error	Position	Error	Position	Error
1000	-0.08	-100	0.01	1000	-0.1055	-8	0.0000
900	-0.04	-200	0.02	928	-0.0763	-80	-0.0254
800	-0.05	-300	0.06	856	-0.0510	-152	-0.0412
700	-0.06	-400	0.00	784	-0.0517	-224	-0.0556
600	-0.09	-500	-0.05	712	-0.0357	-296	-0.0499
500	-0.05	-600	-0.07	640	-0.0240	-368	-0.0665
400	-0.11	-700	-0.06	568	-0.0036	-440	-0.0627
300	-0.06	-800	0.00	496	0.0083	-512	-0.1025
200	0.01	-900	-0.01	424	0.0031	-584	-0.0570
100	0.00	-1000	0.05	352	-0.0056	-656	-0.0508
0	0.00	-1016	-0.0272	280	0.0097	-728	-0.0323
				208	-0.0045	-800	-0.0669
				136	-0.0091	-872	-0.0210
				64	-0.0387	-944	-0.0429

หมายเหตุ ตำแหน่งที่ถูกเลือกมาเปรียบเทียบผลการวัดคือตำแหน่งที่มีค่าความแตกต่างกันมากที่สุด คือประมาณตำแหน่งที่ $-300''$ จากรูปที่ 5.20

แหล่งความไม่แน่นอนในการวัด Autocollimator ด้วย SelfA

ความไม่แน่นอนในการวัดสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\theta_x = \theta_s + \Delta\theta + \theta_{is} + \theta_{ix} \quad (5.26)$$

เมื่อ

- θ_s : ความคลาดเคลื่อนของ SelfA
- θ_x : ค่าที่อ่านได้จากการวัด Autocollimator ด้วย SelfA
- $\Delta\theta$: ค่าความเบี่ยงเบนของข้อมูลจากการวัดซ้ำ (Repeatability)
- θ_{is} : ความละเอียดของการอ่านค่าจาก SelfA
- θ_{ix} : ความละเอียดของการอ่านค่าจาก Elcomat2000

ตารางที่ 5.4 แหล่งความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ Elcomat2000

Quantity X_i	Standard Uncertainty $u(x_i)$	Probability Distribution	Sensitivity Coefficient c_i	Uncertainty Contribution $u_i(y)$
θ_s	0.0594 "	Normal	1	0.0594 "
$\Delta\theta$	0.0425 "	Rectangular	1	0.0425 "
θ_{is}	0.0144 "	Rectangular	1	0.0144 "
θ_{ix}	0.0144 "	Rectangular	1	0.0144 "
$u(\theta_x)$				0.0759 "
U_x	$k= 2$			0.1517 "

$$U_x [\text{Elcomat2000}] = 0.16'' \quad (5.27)$$

จากสมการ (5.1)

$$En = \frac{|X_a - x_b|}{\sqrt{U_a^2 + U_b^2}}$$

โดย $|X_a - x_b|$

คือผลความแตกต่างระหว่างค่าที่นำมาเปรียบเทียบ

U_a คือ Uncertainty ของการวัดค่าที่1 (NIMT-SelfA) = 0.16"

U_b คือ Uncertainty ของการวัดค่าที่2 (NMIJ-STD-AC) = 0.2"

$$EN_{Elcomat3000} = \frac{|0.11|}{\sqrt{0.16^2 + 0.2^2}} \cong 0.49'' \quad (5.28)$$

จากผลการเปรียบเทียบค่า En Ratio มีค่า 0.49 เป็นการพิสูจน์ว่าระบบสอบเทียบมีความเที่ยงตรงในระดับน้อยกว่า 0.2" เมื่อนำไปวัดงานที่มีช่วงการวัดละเอียดเช่น Autocollimator ตรงตามจุดประสงค์ที่ได้ตั้งไว้

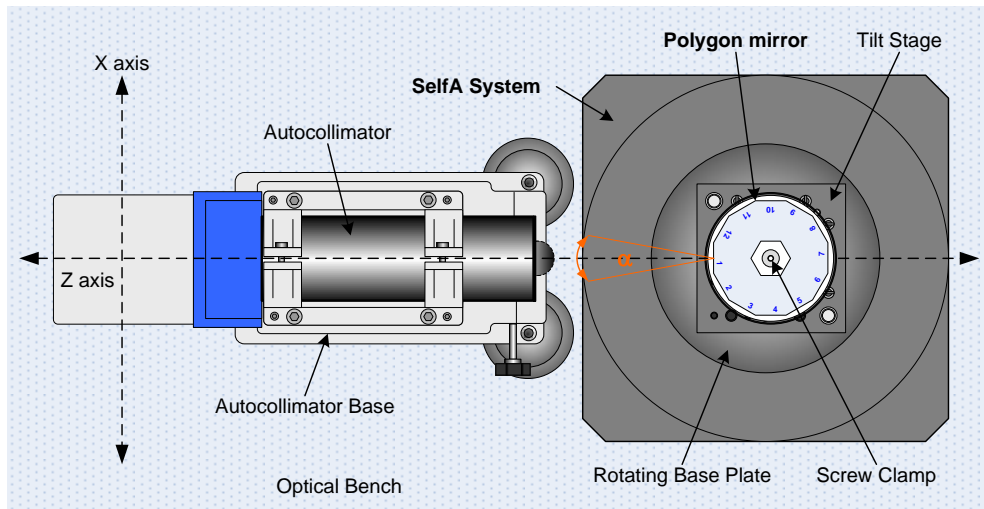
5.3 การใช้งานในแกนนอน ที่มีช่วงการวัดกว้างและมีความละเอียดต่ำ

Polygon mirror เป็นเครื่องมือมาตรฐานทางด้านกรวัดมุมที่มีช่วงกว้างแต่มีความละเอียดน้อย ประกอบด้วยกระจกหลายหน้า โดยทั่วไปแล้วแต่ละหน้าจะทำมุมเท่าๆกัน มักนำไปใช้ในการสอบเทียบ Indexing Table หรือ Rotary Table ส่วน Polygon mirror ที่นำมาเปรียบเทียบผลการวัดนี้เป็นรุ่นที่มี 12 ด้านแต่ละด้านทำมุมกับด้านใกล้เคียง 30° ผลิตโดย Moller Wedel มี Accuracy 2"

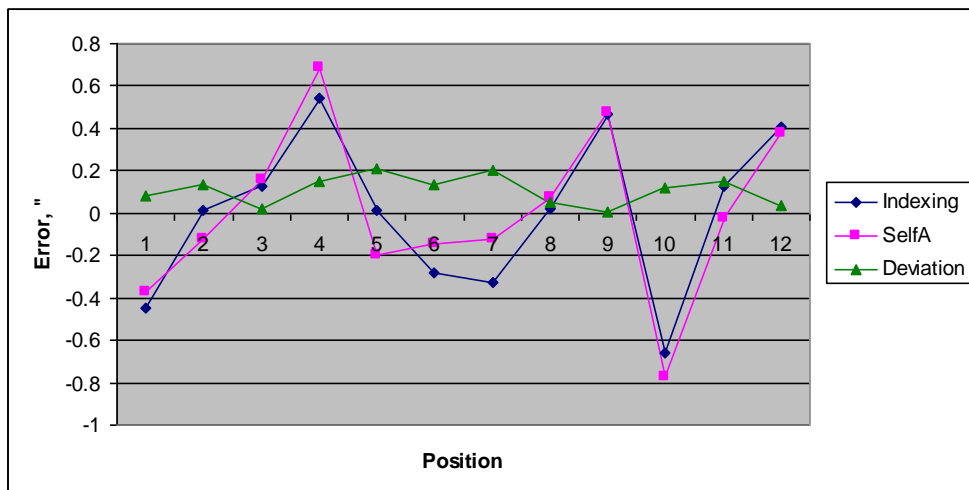


รูปที่ 5.21 Polygon mirror 12 หน้า

วิธีการสอบเทียบ Polygon mirror ทำโดยติดตั้ง Polygon mirror เข้ากับ ระบบ SelfA โดยใช้ฐานของ Polygon mirror ซึ่งประกอบด้วยตัวฐานที่ใช้ยึดติดกับ Rotating Base Plate กับแกนที่ใช้ยึด Polygon mirror ซึ่งมีรูอยู่ตรงกลาง จากนั้นนำ Autocollimator มาใช้เป็นอุปกรณ์ในการอ่านความคลาดเคลื่อนของ Polygon mirror โดยติดตั้งให้ลำแสงของ Autocollimator ชี้ไปทางตำแหน่งของ Polygon mirror หมุน Rotating Base Plate ของ SelfA ให้หน้าที่ 1 ของ Polygon mirror ตรงกับลำแสงจาก Autocollimator แล้วทำการ Alignment ให้กึ่งกลางลำแสงของ Autocollimator ตกกระทบบนกึ่งกลางหน้าที่ 1 ของ Polygon mirror ทำการยึด Polygon ให้ติดแน่นกับตัวฐาน แล้วปรับให้แกน X ของ Autocollimator ขนานกับระนาบการหมุนของ Polygon mirror โดยใช้วิธีเช่นเดียวกับการสอบเทียบ Autocollimator ในหัวข้อ 5.3 แล้วเริ่มทำการวัดค่าที่หน้าแรกนี้โดยบันทึกค่าของตำแหน่งจาก SelfA และ ค่าที่อ่านได้จาก Autocollimator จากนั้นหมุน Polygon ไปที่ละหน้าพร้อมทั้งอ่านค่า จาก Autocollimator จนกระทั่งครบทุกหน้าแล้วนำผลที่ได้ไปคำนวณและเปรียบเทียบผลการวัด



รูปที่ 5.22 การวัด Polygon mirror ด้วย SelfA



รูปที่ 5.23 ผลการวัด Polygon mirror ด้วย SelfA เทียบกับ Indexing Table

ตารางที่ 5.5 ผลการวัดเปรียบเทียบ Polygon mirror

Position	by Indexing	by SelfA	Deviation
1	-0.45	-0.37	0.08
2	0.01	-0.12	0.13
3	0.13	0.15	0.02
4	0.54	0.69	0.15
5	0.01	-0.20	0.21
6	-0.28	-0.15	0.13
7	-0.33	-0.13	0.20
8	0.02	0.07	0.05
9	0.47	0.47	0.00
10	-0.66	-0.78	0.12
11	0.13	-0.02	0.15
12	0.41	0.37	0.04

หมายเหตุ ตำแหน่งที่ถูกเลือกมาเปรียบเทียบผลการวัดคือตำแหน่งที่มีค่าความแตกต่างกันมากที่สุดคือตำแหน่งที่ 5 จากรูปที่ 5.23

แหล่งความไม่แน่นอนในการวัด Polygon mirror ด้วย SelfA

ความไม่แน่นอนในการวัดสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\theta_x = \theta_s + \theta_{AC} + \Delta\theta + \theta_{is} \quad (5.29)$$

เมื่อ

- θ_s : ความคลาดเคลื่อนของ SelfA
- θ_{AC} : ความคลาดเคลื่อนของ Autocollimator
- θ_x : ค่าที่อ่านได้จากการวัด Polygon mirror ด้วย SelfA
- $\Delta\theta$: ค่าความเบี่ยงเบนของข้อมูลจากการวัดซ้ำ (Repeatability)
- θ_{is} : ความละเอียดของการอ่านค่าจาก SelfA

ตารางที่ 5.6 แหล่งความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ Polygon mirror

Quantity X_i	Standard Uncertainty $u(x_i)$	Probability Distribution	Sensitivity Coefficient c_i	Uncertainty Contribution $u_i(y)$
θ_s	0.0594 "	Normal	1	0.0594 "
θ_{AC}	0.0400 "	Normal	1	0.0400 "
$\Delta\theta$	0.0250 "	Rectangular	1	0.0250 "
θ_{is}	0.0144 "	Rectangular	1	0.0144 "
$u(\theta_x)$				0.0772 "
U_x	$k= 2$			0.1545 "

$$U_x [\text{Polygon}] = 0.16'' \quad (5.30)$$

จากสมการ (5.1)

$$En = \frac{|X_a - x_b|}{\sqrt{U_a^2 + U_b^2}}$$

โดย $|X_a - x_b|$ คือผลความแตกต่างระหว่างค่าที่นำมาเปรียบเทียบ
 U_a คือ Uncertainty ของการวัดค่าที่ 1 (NIMT-SelfA) = 0.16"
 U_b คือ Uncertainty ของการวัดค่าที่ 2 (NIMT-Indexing Table) = 0.2"

$$EN_{\text{Polygon}} = \frac{|0.21|}{\sqrt{0.16^2 + 0.2^2}} \cong 0.82'' \quad (5.31)$$

จากผลการเปรียบเทียบค่า En Ratio มีค่า 0.86 เป็นการพิสูจน์ว่าระบบสอบเทียบมีความเที่ยงตรงในระดับน้อยกว่า 0.2" เมื่อนำไปวัดงานที่มีช่วงการวัดกว้างครบ 360° เช่น Polygon mirror ตามจุดประสงค์ที่ได้ตั้งไว้

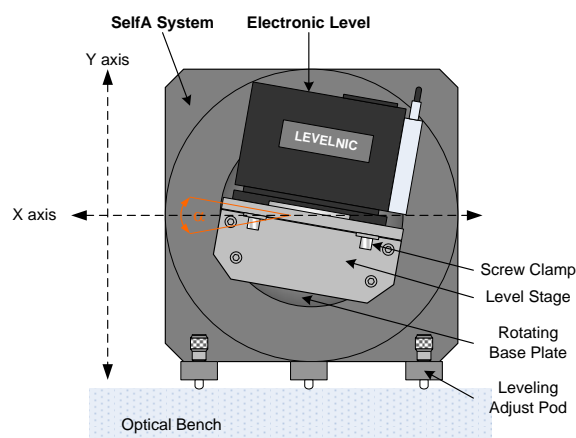
5.4 การใช้งานในแกนตั้ง ที่มีช่วงการวัดแคบและมีความละเอียดสูง

Electronic Level เป็นเครื่องมือที่ใช้ในแนวแกนตั้งที่มีช่วงการวัดแคบแต่มีความละเอียดสูง สามารถวัดระดับความเอียงของระนาบพื้นผิวต่างๆเช่นโต๊ะระดับหรือแท่นวางเครื่องมือและเครื่องจักรต่างๆ Electronic Level ที่นำมาใช้เป็นรุ่น Levelnic DL-S3 ผลิตโดย SK มี Accuracy ดีที่สุด $\pm 1.0\%$ rdg มีพิสัยการวัด ± 5 mm/m ($\pm 0.286^\circ$ หรือ $\pm 1030''$) ความละเอียด 0.001 mm/m (0.0001° หรือ 0.36'') สามารถส่งสัญญาณไร้สาย Bluetooth ผ่าน ช่องสัญญาณ RS232 ไปยัง Computer ได้



รูปที่ 5.24 Levelnic DL-S3

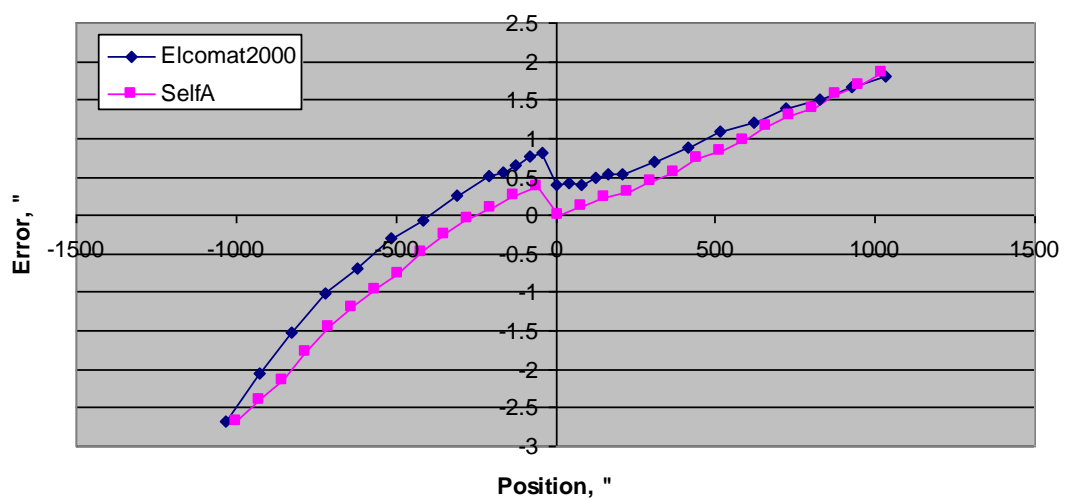
วิธีการสอบเทียบ Electronic Level ด้วย SelfA เริ่มจากติดตั้งฐานสำหรับยึด Electronic Level เข้ากับ SelfA จากนั้นจับ SelfA ให้วางนอนตามรูป 5.24 หมุนฐานให้อยู่ในแนวระดับโดยประมาณ แล้วยึด Electronic Level ให้ติดแน่นกับฐาน เปิดเครื่อง Levelnic และทำการเชื่อมสัญญาณเข้ากับ Computer หมุน SelfA ไปยังตำแหน่งมากที่สุดของพิสัยการวัดของ Levelnic หรือ +5 mm/m โดยอ่านและบันทึกค่าจาก Computer ทั้ง SelfA และ Levelnic จากนั้นหมุน SelfA ไปยังตำแหน่งถัดไปจนกระทั่งถึงตำแหน่งน้อยที่สุดของพิสัยการวัดของ Levelnic หรือ -5 mm/m นำผลที่ได้ไปคำนวณและเปรียบเทียบผลการวัด



รูปที่ 5.25 การวัด Levelnic ด้วย SelfA

ตารางที่ 5.7 ผลการวัดเปรียบเทียบ Electronic Level

Elcomat2000				SelfA			
Position	Error	Position	Error	Position	Error	Position	Error
1029.9	1.81443	0.0	0.40206	1020.4	1.85933	10.4	0
927.8	1.6701	-41.2	0.80412	948.2	1.67998	-61.2	0.37455
824.7	1.49485	-82.5	0.7732	876.2	1.56492	-133.3	0.26957
721.6	1.39175	-123.7	0.64948	804.0	1.38471	-205.4	0.10664
618.6	1.19588	-164.9	0.56701	731.8	1.29594	-277.6	-0.0472
515.5	1.09278	-206.2	0.51546	659.7	1.14932	-349.8	-0.2523
412.4	0.8866	-309.3	0.24742	587.5	0.98308	-422.0	-0.4751
309.3	0.69072	-412.4	-0.0619	515.4	0.83754	-494.3	-0.7538
206.2	0.54639	-515.5	-0.299	443.3	0.73766	-566.5	-0.9596
164.9	0.53608	-618.6	-0.6804	371.1	0.555	-638.8	-1.2073
123.7	0.48454	-721.6	-1.0103	298.9	0.44811	-711.0	-1.462
82.5	0.40206	-824.7	-1.5155	226.8	0.29319	-783.4	-1.7829
41.2	0.42268	-927.8	-2.0619	154.7	0.23786	-855.7	-2.1345
0.0	0.40206	-1029.9	-2.6804	82.5	0.11611	-928.0	-2.3881
				10.4	0	-1000.4	-2.6795



รูปที่ 5.26 ผลการวัด Levelnic ด้วย SelfA เทียบกับ Autocollimator Elcomat2000

แหล่งความไม่แน่นอนในการวัด Electronic Level ด้วย SelfA

ความไม่แน่นอนในการวัดสามารถเขียนเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\theta_x = \theta_s + \Delta\theta + \theta_{is} + \theta_{ix} \quad (5.32)$$

เมื่อ

- θ_s : ความคลาดเคลื่อนของ SelfA
 θ_x : ค่าที่อ่านได้จากการวัด Electronic Level ด้วย SelfA
 $\Delta\theta$: ค่าความเบี่ยงเบนของข้อมูลจากการวัดซ้ำ (Repeatability)
 θ_{is} : ความละเอียดของการอ่านค่าจาก SelfA
 θ_{ix} : ความละเอียดของการอ่านค่าจาก Electronic Level

ตารางที่ 5.8 แหล่งความไม่แน่นอนของการสอบเทียบ Electronic Level

Quantity X_i	Standard Uncertainty $u(x_i)$	Probability Distribution	Sensitivity Coefficient c_i	Uncertainty Contribution $u_i(y)$
θ_s	0.0594 "	Normal	1	0.0594 "
$\Delta\theta$	0.0430 "	Rectangular	1	0.0430 "
θ_{is}	0.0144 "	Rectangular	1	0.0144 "
θ_{ix}	0.1039 "	Rectangular	1	0.1039 "
$u(\theta_x)$				0.1280 "
U_x	$k = 2$			0.2561 "

$$U_x [\text{Levelnic}] = 0.26'' \quad (5.33)$$

จากสมการ (5.1)

$$En = \frac{|X_a - X_b|}{\sqrt{U_a^2 + U_b^2}}$$

โดย $|X_a - X_b|$ คือผลความแตกต่างระหว่างค่าที่นำมาเปรียบเทียบ

U_a คือ Uncertainty ของการวัดค่าที่1 (NIMT-SelfA) = 0.26''

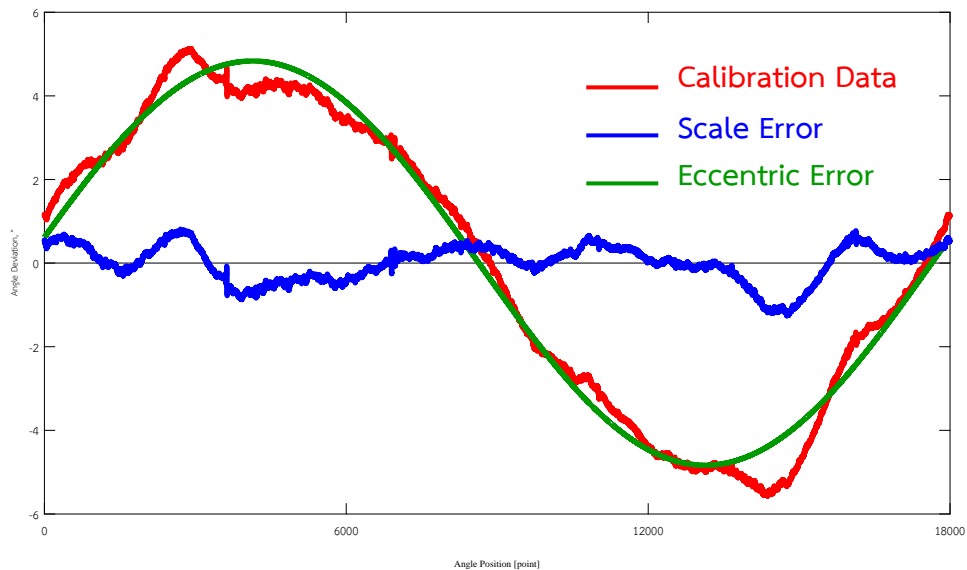
U_b คือ Uncertainty ของการวัดค่าที่2 (NIMT-Elcomat2000) = 0.4''

$$EN_{\text{Level}} = \frac{|0.40''|}{\sqrt{0.26''^2 + 0.4''^2}} \cong 0.84'' \quad (5.34)$$

จากผลการเปรียบเทียบค่า En Ratio มีค่า 0.84 เป็นการพิสูจน์ว่าระบบสอบเทียบมีความเที่ยงตรงในระดับน้อยกว่า 0.2" เมื่อนำไปวัดงานในแนวแกนตั้งเช่น Electronic Level ตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้

5.6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ความคลาดเคลื่อนของ Rotary Encoder เกิดจากสองสาเหตุหลักคือ ความคลาดเคลื่อนของช่องสเกลบนจานสเกล (Scale Error) และความคลาดเคลื่อนจากความเยื้องศูนย์ (Eccentric Error) เมื่อนำผลการวัดตัวเองของระบบ SelfA มาวิเคราะห์จะสามารถแยกความคลาดเคลื่อนทั้งสองออกจากกันได้



รูปที่ 5.27 ผลการสอบเทียบตัวเองของระบบ SelfA

จากรูปที่ 5.26 Calibration Data ของระบบ SelfA จะถูกนำไปใช้เป็นค่าแก้เพื่อชดเชยผลการวัดเมื่อนำเครื่องมืออื่นมาสอบเทียบ นอกจากนี้ยังพบความคลาดเคลื่อนอื่นๆที่ส่งผลกระทบต่อผลการสอบเทียบดังนี้

5.6.1 ความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งการติดตั้งเครื่องมือ

จากการทดลองพบว่าเมื่อนำเครื่องมือที่ถูกสอบเทียบติดตั้งบนระบบสอบเทียบ Rotary Encoder ที่ตำแหน่งมุมต่างกันจะให้ผลการทดลองไม่เท่ากัน

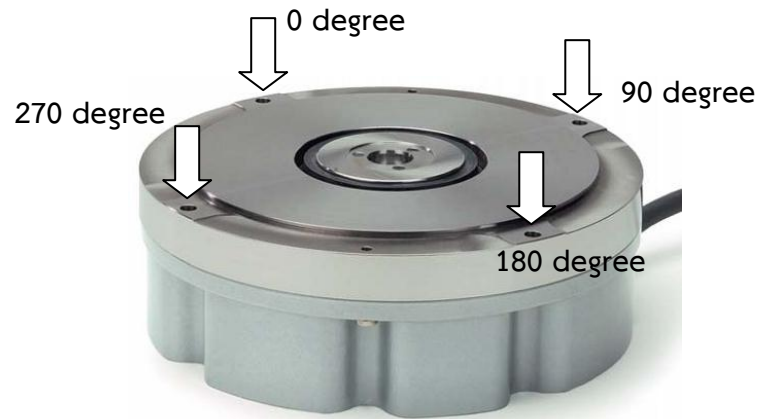
5.6.2 ความคลาดเคลื่อนจาก Housing Position Error

เมื่อพิจารณาในรูป 5.27 และ 5.28 จะพบว่าที่ Housing ของ Rotary Encoder จะมี Screw Nut ที่ใช้สำหรับยึด Housing กับ ระบบสอบเทียบทั้งหมด 4 ตัว การเปลี่ยนตำแหน่งของ Screw Nut มีผลทำให้ค่าของผลการทดลองเปลี่ยนไป การวัดผลจึงต้องจำเป็นต้องเปลี่ยนตำแหน่งหมุนเวียนกันไปทั้งหมดครั้งละ $90^\circ \times 4$ ครั้ง

5.6.3 ความคลาดเคลื่อนจากเพลลา Shaft Position Error

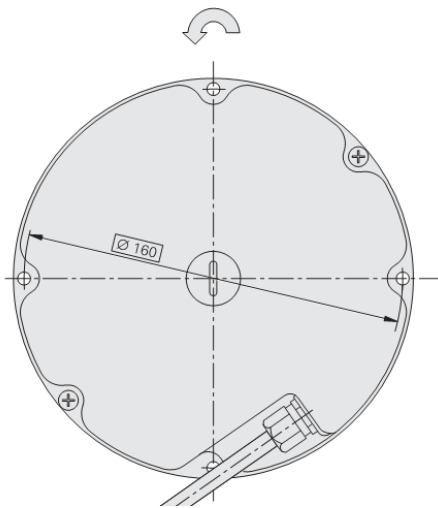
พิจารณาในรูป 5.29 พบว่า Rotary Encoder รุ่น RON 905 มีคุณสมบัติพิเศษคือเพลลาของแกนหมุนกับเพลลาของแกนยึดจานสเกลที่อยู่ภายในเป็นคนละแกนกันสามารถเปลี่ยนตำแหน่งได้ การวัดผลจึง

จำเป็นต้องเปลี่ยนตำแหน่งของเพลากลอนไปที่ตำแหน่งต่างๆ โดยมีหลักการว่าถ้าต้องการให้ผลการวัดดีขึ้นสามารถเพิ่มตำแหน่งได้เช่นหมุนครั้งละ 180° , 120° , 90° , 60° หรือ 45° เป็นต้น ในที่นี้จะเลือกวัดทีละ $120^{\circ} \times 3$ ครั้ง เนื่องจากไม่ทำให้จำนวนผลการวัดมากเกินไปจนเกิดความจำเป็น จากความคลาดเคลื่อนทั้งสองข้างต้นจึงต้องทำการวัดทั้งหมด 4 Screw Nut Position \times 3 Shaft Position = 12 ครั้ง แล้วทำการเฉลี่ยดังรูป 5.30

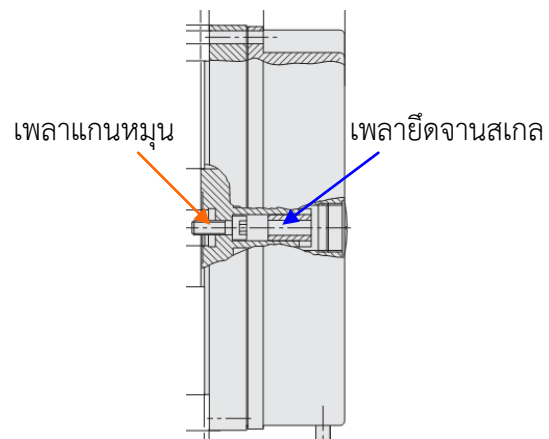


รูปที่ 5.28 ภาพด้านล่างของ Rotary Encoder: RON905

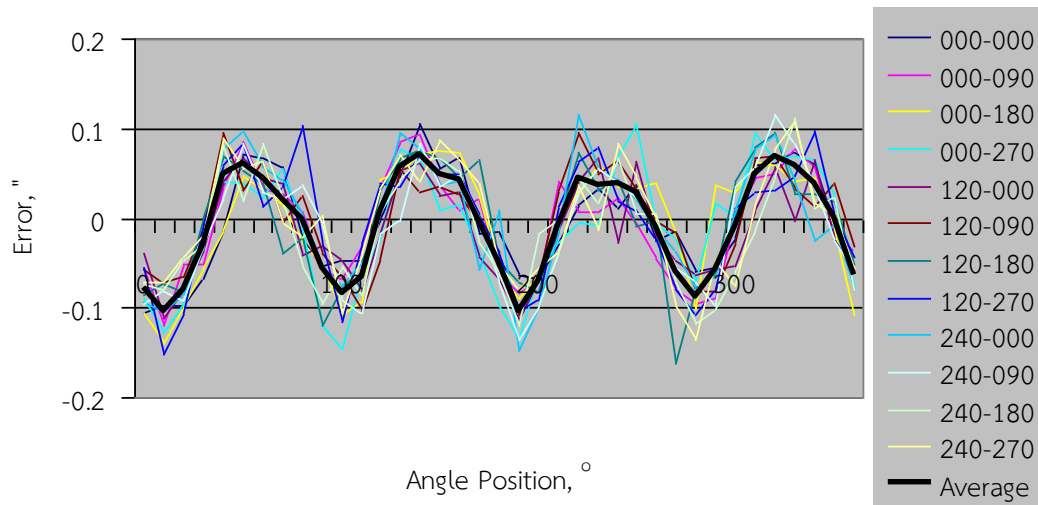
หมายเหตุ : ลูกศรระบุตำแหน่ง Screw Nut Hole



รูปที่ 5.29 ภาพด้านบนของ RON905



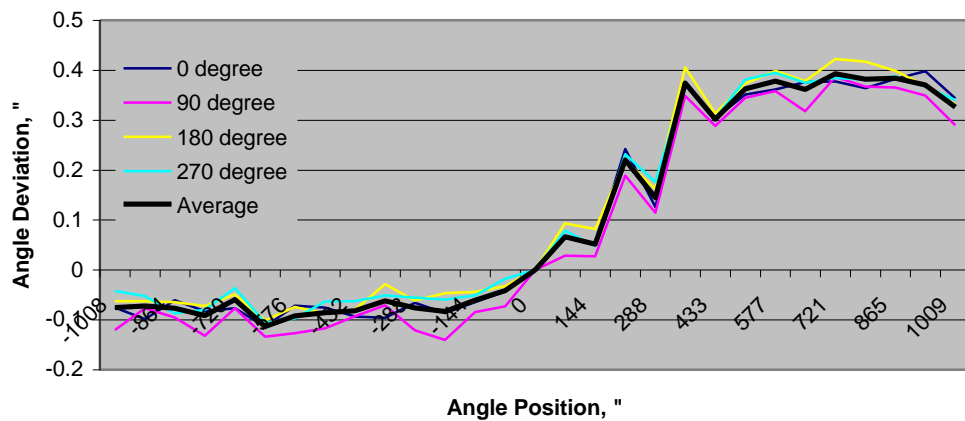
รูปที่ 5.30 ภาพด้านข้างของ RON905



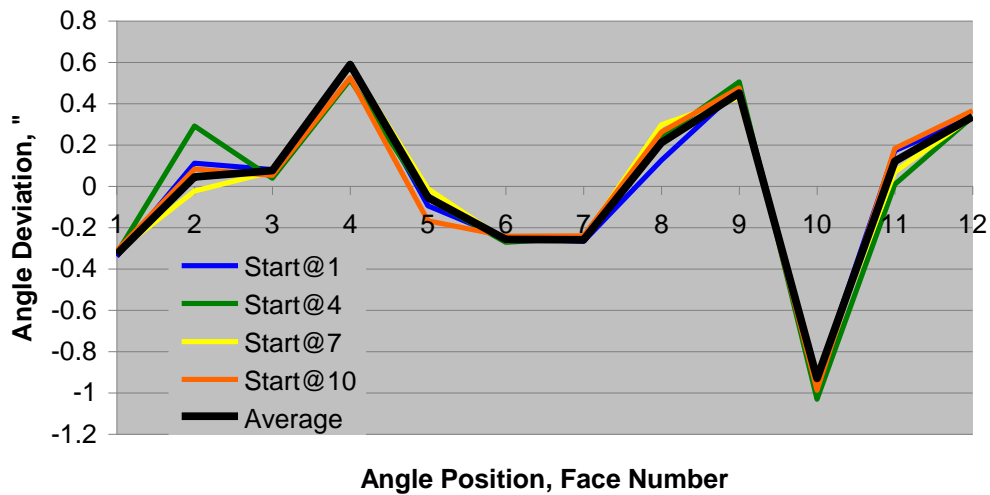
รูปที่ 5.31 ผลการสอบเทียบ External Rotary Encoder ที่ตำแหน่งการติดตั้งต่างๆ

จากรูปที่ 5.31 จะเห็นได้ว่าเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของการติดตั้ง Rotary Encoder ผลการวัดจะมีค่าเปลี่ยนไปจึงต้องทำการวัดที่ตำแหน่งต่างๆแล้วนำมาเฉลี่ย

ในการทำงานเดียวกันการวัด Rotary Encoder Autocollimator จะต้องทำการวัดค่าที่ตำแหน่งเริ่มต้นต่างๆกัน



รูปที่ 5.32 ผลการสอบเทียบ Autocollimator ที่ตำแหน่งการติดตั้งต่างๆ

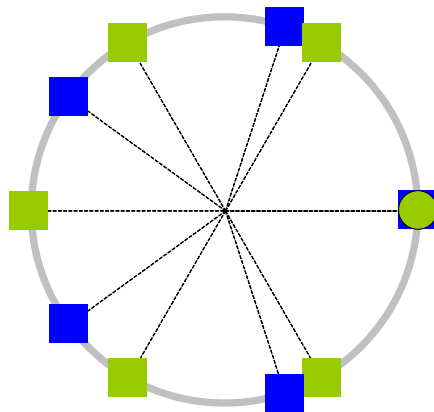


รูปที่ 5.33 ผลการสอบเทียบ Polygon Mirror ที่ตำแหน่งการติดตั้งต่างๆ

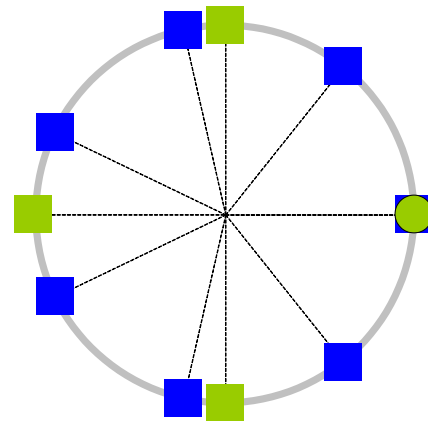
5.6.4 ความจำกัดของจำนวนหัวอ่าน

หัวอ่านหรือ Sensor เป็นปัจจัยสำคัญของการวัดด้วยระบบ SelfA การมีจำนวนหัววัดที่มากขึ้นส่งผลให้ผลการวัดมีความสมบูรณ์มากขึ้นแต่ถูกจำกัดด้วยขนาดของจานสเกลจึงทำให้มีจำนวนหัววัดได้สูงสุดได้เพียง 10 หัว หากเพิ่มขนาดของสเกลให้ใหญ่ขึ้นก็จะส่งผลต่อระบบมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีน้ำหนักโดยรวมมากขึ้น ระบบ SelfA มีขนาด 320 x 320 x 350 mm และมีน้ำหนักประมาณ 30 กิโลกรัม ซึ่งเป็นขนาดที่สามารถยกได้ด้วยคนเพียง 1-2 คนเท่านั้น เมื่อเทียบกับระบบสอบเทียบ Rotary Encoder แบบอื่นๆแล้วถือว่ามีความเล็กกว่ากันมาก หากพิจารณาในแง่แบ่งจำนวนชุดหัววัด พบว่าการแบ่งชุดวัดเป็นสองชุดมีที่หัววัดอ้างอิงร่วมกัน ค.ร.น. ที่มากที่สุดคือ $5 \times 6 = 30$ แต่พบว่าไม่สามารถทำได้ในทางปฏิบัติเนื่องจากหัววัดทั้งสองชุดจะมีส่วนที่ทับซ้อนกัน ค.ร.น. ที่มากที่สุดรองลงมาคือ $4 \times 7 = 28$ ซึ่งสามารถทำได้ในทางปฏิบัติจึงถูกนำมาใช้

จากผลการศึกษาระบบสอบเทียบ Self-Calibration Rotary Encoder จำนวนหัววัดที่เหมาะสมที่น้อยที่สุดเพื่อให้ได้ผลการวัดมี Uncertainty น้อยกว่า $0.2''$ คือ 7 หัววัด เมื่อสร้างระบบ SelfA พบว่าหากใช้การวัดแบบ 7 หัววัดมีความคลาดเคลื่อนประมาณ $0.3''$ แต่เมื่อใช้วิธีการวัดแบบ Multi-Combination แบบ SelfA 4 และ 7 หัววัด ซึ่งเปรียบได้กับการวัดแบบ 28 หัววัด ทำให้ความคลาดเคลื่อนลดลงเหลือเพียง $0.05''$



รูปที่ 5.34 SelfA 5x6



รูปที่ 5.35 SelfA 4x7

5.6.5 การชดเชยค่าผลการวัดกับความเยื้องศูนย์

ในทางมาตรมาตรวิทยาหากทำการวัดเครื่องมือใดๆก็ตาม ผลการวัดนั้นต้องถูกนำมาชดเชยด้วยค่าแก้ด้วยผลการวัดของเครื่องมือมาตรฐานเสียก่อน ระบบสอบเทียบ SelfA ก็เป็นเช่นเดียวกัน กล่าวคือค่าผลการวัด External Rotary Encoder ที่ได้จากระบบ SelfA ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นทั้ง ความคลาดเคลื่อนของสเกลและความเยื้องศูนย์ เมื่อนำ Rotary Encoder ดังกล่าวไปติดตั้งยังระบบเครื่องมือหรือเครื่องจักรอื่นๆค่าความเยื้องศูนย์ในการติดตั้งแต่ละครั้งก็จะมีค่าเปลี่ยนไป ค่าที่ใช้ได้จริงๆคือค่าแก้ของความคลาดเคลื่อนของช่องสเกล ส่วนความคลาดเคลื่อนจากความเยื้องศูนย์นั้นไม่สามารถนำมาใช้ได้ นอกจากจะพยายามทำให้ความเยื้องศูนย์มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่จะสามารถปรับได้ แนวทางการแก้ไขปัญหาดังกล่าวสามารถทำได้โดยติดตั้งระบบ SelfA เข้าไปกับเครื่องมือหรือเครื่องจักร ทั้งนี้ ระบบ SelfA ที่ติดตั้งเข้ากับเครื่องจักรอาจไม่จำเป็นต้องมีความเที่ยงตรงสูงมากนัก เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานและงบประมาณที่มีอยู่

อย่างไรก็ตามในการสร้างระบบสอบเทียบแบบ SelfA ในขณะที่ทำการ alignment สเกลนั้นได้ปรับความเยื้องศูนย์ให้น้อยกว่า 0.01 mm ซึ่งมีผลทำให้ความคลาดเคลื่อนของระบบที่เกิดจากการเยื้องศูนย์ของงานสเกลนั้นน้อยกว่า 0.0063"

บทที่ 6

บทสรุป

บทนี้เป็นบทสุดท้ายโดยเป็นการสรุปผลงานทั้งหมดที่ได้ทำมาและเสนอแนวทางที่จะสามารถพัฒนาต่อไป การสรุปจะแบ่งออกเป็นสามส่วน ส่วนแรกจะเป็นการนำผลการวัดเปรียบเทียบเครื่องมือวัดมุมมาสรุปซึ่งประกอบไปด้วย External Rotary Encoder, Autocollimator, Polygon Mirror และ Electronic Level ที่ใช้เป็น artifact สำหรับเปรียบเทียบกับผลที่เคยทำมาก่อนโดยมีจุดประสงค์ที่จะแสดงให้เห็นว่า ระบบสอบเทียบแบบ SelfA มีศักยภาพเพียงพอที่จะใช้งานเป็นมาตรฐานทางด้านการวัดมุมของประเทศ ในส่วนที่สองจะเป็นการสรุปให้เห็นว่าตัวระบบสอบเทียบได้บรรลุวัตถุประสงค์ที่วางไว้อย่างไร และส่วนที่สามคือข้อเสนอแนะที่สามารถจะนำไปพัฒนาต่อไปในอนาคต

6.1 สรุปผลการเปรียบเทียบ

ตารางที่ 6.1 สรุปผลการเปรียบเทียบผลวัดเครื่องมือทางด้านมุมด้วยระบบSelfA

Artefact	$U_{Ref.}$	U_{SelfA}	Lab-Ref	En ratios
Rotary Encoder	0.1	0.13	0.04	0.25
Autocollimator	0.2	0.14	0.12	0.49
Polygon Mirror	0.2	0.14	0.21	0.86
Electronic Level	0.4	0.26	0.40	0.84

6.1.1 Rotary Encoder : การวัด RON905 ในหัวข้อ 5.2 มีความความไม่แน่นอน 0.13" เมื่อนำค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบกับสถาบันมาตรวิทยาประเทศญี่ปุ่นตลอดพิสัยการวัด 360° ได้ผล En ratio มีค่าเพียง 0.25 (< 1) แสดงถึงความถูกต้องของการวัดและการประเมินความไม่แน่นอนของระบบ SelfA อย่างไรก็ตามเมื่อนำไปวัด External Rotary Encoder ควรจะมีการติดตั้งและวัดผลเฉลี่ยจากหลายๆตำแหน่งเพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาจากการติดตั้งเครื่องมือเข้ากับระบบหรือมีการทำ Reproducibility นั้นเอง

6.1.2 Autocollimator : การวัด Elcomat 2000 ในหัวข้อ 5.3 มีความความไม่แน่นอน 0.14" เมื่อนำค่าที่ได้จากการเปรียบเทียบกับผลการวัดอ้างอิงโดยมีความละเอียดหรือ Resolution ที่ 0.05" การได้ผล En ratio น้อยกว่า 1 แสดงถึงความถูกต้องของการวัดของระบบ SelfA เมื่อวัดงานที่มีความละเอียดน้อยกว่า 1"

6.1.3 Polygon Mirror : การวัด Polygon Mirror ทั้ง 12 side ในหัวข้อ 5.4 มีความความไม่แน่นอน 0.14" ได้ผล En ratio น้อยกว่า 1 แสดงถึงความถูกต้องของการวัดของระบบ SelfA เมื่อวัดงานที่มีช่วงการวัดตำแหน่งครบรอบ 360°

6.1.1 Electronic Level : การวัด Levelnic DL-S3 ในหัวข้อ 5.5 มีความไม่แน่นอน $0.26''$ มีพิสัยการวัด $\pm 5 \text{ mm/m}$ ($\pm 0.286^\circ$ หรือ $\pm 1030''$) ความละเอียด 0.001 mm/m (0.0001° หรือ $0.36''$) การได้ผล En ratio น้อยกว่า 1 แสดงถึงความถูกต้องของการวัดของระบบ SelfA เมื่อวัดงานในแนวแกนตั้ง

จากผลการเปรียบเทียบกับเครื่องมือทั้ง 4 ประเภทจะเห็นได้ว่า ระบบสอบเทียบ Rotary Encoder แบบ SelfA สามารถวัดงานได้ครอบคลุมทุกย่านการวัดของมุมหรือ 360° สามารถวัดช่วงงานที่ละเอียด และยังสามารถวัดงานได้ทั้งแกนตั้งและนอนอีกด้วย โดยมีความไม่แน่นอนของตัวระบบที่ $1.2''$

6.2 ความสำเร็จของจุดประสงค์จากการสร้างระบบสอบเทียบ Rotary Encoder

6.2.1 ระบบมีความความแม่นยำในการวัดในระดับ $0.2''$

ระบบสอบเทียบ Rotary Encoder, SelfA ที่สร้างขึ้นมีความความไม่แน่นอนวัดเท่ากับ $0.12''$ ทำให้มีศักยภาพเพียงพอที่จะสามารถสอบเทียบเครื่องมือมาตรฐานทางด้านมุมที่มีความเที่ยงตรงสูงเกือบทุกชนิด เช่น Rotary Encoder, Autocollimator, Polygon Mirror และ Angle Gauge Block เป็นต้น ในอนาคตระบบ SelfA จะถูกสถาปนาให้เป็นมาตรฐานปฐมภูมิของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

6.2.2 สามารถวัดงานได้ทั้งแกนตั้งและแนนอน

ระบบสอบเทียบ Rotary Encoder ที่เคยมีมายังไม่สามารถใช้งานในแนนอนได้เนื่องจากเครื่องมือมาตรฐานทางด้านมุมส่วนใหญ่เป็นเครื่องที่ใช้งานในแนนอนหรือระนาบเดียวกับพื้น การสร้างระบบสอบเทียบ Rotary Encoder ให้รองรับการวัดงานในแกนตั้งเพียงแกนเดียวซึ่งมีงานไม่มากนักจึงไม่คุ้มกับการสร้าง แต่ระบบ SelfA สามารถวัดงานได้ทั้งสองแกนสาเหตุหลักเนื่องมาจากขนาดที่มีขนาดเล็ก

6.2.3 มีความละเอียดสูงสุดน้อยกว่า $1''$

ระบบสอบเทียบ SelfA มีความละเอียดสูงสุดของขีดสเกล $72''$ เมื่อใช้ Interpolator ขนาด $1024 \times$ ขีดความสามารถในการอ่านจะเพิ่มสูงสุดเป็น $72''/1024 = 0.07''$ อย่างไรก็ตามเพื่อให้ผลความไม่แน่นอนอยู่ในระดับน้อยกว่า $0.2''$ ที่เกิดจากการ Interpolation ความละเอียดสูงสุดที่ใช้งานควรเป็น $0.07'' \times 4 \approx 0.28''$ ทำให้สอบเทียบเครื่องมือมาตรฐานทางด้านมุมที่ต้องการความละเอียดของช่วงการวัดสูงเช่น Autocollimator ได้

6.2.4 สามารถสอบเทียบตัวเองได้

จากผลการสอบเทียบตัวเองได้ซึ่งบ่งชี้คุณสมบัติพิเศษของระบบ SelfA ในบทที่ 5 เป็นการพิสูจน์ได้ว่าระบบสอบเทียบดังกล่าวมีความน่าเชื่อถือมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อพิจารณาในกรณีที่ใช้ External Rotary Encoder RON905 ซึ่งมี Uncertainty น้อยกว่าตัวระบบสอบเทียบนี้โดยมีค่า En ratios เพียง 0.25 เท่านั้น

6.3 ข้อเสนอแนะ

6.3.1 แนวทางที่1 : ระบบที่มีความแม่นยำน้อยกว่า 0.1"

ปัจจุบัน Rotary Encoder ได้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในประเทศโดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคอุตสาหกรรม แต่พบว่ายังไม่มีความตระหนักถึงความสำคัญของการสอบเทียบ เนื่องจากขบวนการผลิตยังไม่ต้องการความแม่นยำสูงมากนัก อย่างไรก็ตามในมาตรฐาน ISO 9001 เครื่องมือวัดที่มีผลต่อการผลิตสินค้ายังจำเป็นต้องมีกระบวนการสอบเทียบอยู่ การมีระบบสอบเทียบที่มีความแม่นยำไม่สูงมาก ราคาต้นทุนไม่สูง แต่มีความน่าเชื่อถือ น่าจะเป็นทางเลือกที่เหมาะสมกว่า โดยอาจปรับปรุงให้งานสเกลมีขนาดเล็กลง จำนวนขีดสเกลต่อรอบน้อยลง จำนวนหัวอ่านลดลง หรือเปลี่ยนไปใช้ Ball Bearing เป็นต้น นอกจากนี้การติดตั้งระบบสอบเทียบแบบ SelfA ลงไปแทนที่ Rotary Encoder เดิมจะสามารถตรวจสอบความคลาดเคลื่อนได้ดีกว่า เนื่องจากการสอบเทียบในปัจจุบันจำเป็นต้องถอด Rotary Encoder ของเครื่องจักรเพื่อนำไปตรวจสอบ เมื่อนำ Rotary Encoder กลับมาติดตั้งที่เครื่องจักรจะทำให้ความเที่ยงศูนย์เปลี่ยนไปเสมอ

6.3.2 แนวทางที่2 : ระบบที่มีความเที่ยงตรงหรือแม่นยำมากกว่า 0.1"

ระบบสอบเทียบ Rotary Encoder แบบ Multi-Combination Method มีความคลาดเคลื่อนของระบบอยู่ที่ 0.12" ซึ่งนับว่าสูงมากแล้ว หากต้องการระบบที่มีความเที่ยงตรงสูงขึ้นอีกสามารถทำได้โดย เลือกอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมตำแหน่งเช่น Motor และ Air Bearing ให้มีความเสถียรมากขึ้น เนื่องจากพบว่า ค่าการวัดซ้ำ (Repeatability) อยู่ที่ประมาณ 0.06" ซึ่งเป็นปัจจัยความคลาดเคลื่อนที่มีอิทธิพลต่อผลการวัดมากที่สุด แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงจุดประสงค์การนำไปใช้ให้เหมาะสมกับขนาดและราคาต้นทุนที่ต้องเพิ่มตามไปด้วย

รายการอ้างอิง

- [1] T. Masuda and M. Kajitani. An automatic calibration system for angular encoders. Precision Engineer 11 (1989) : 95–100.
- [2] T. Masuda and M. Kajitani. High-accuracy calibration system for angular encoders. J. Robot. Mechatronics 5 (1993) : 448–52.
- [3] T. Watanabe, H.Fujimoto, K.Nakayama, M.Kajitani and T. Masuda. Automatic high-precision calibration system for angle encoder. Proceedings of SPIE, Recent Development in Traceable Dimensional Measurements 4401 (2001) : 267-274.
- [4] T.Watanabe, H.Fujimoto, K.Nakayama, M.Kajitani and T. Masuda. Automatic high precision calibration system for angle encoders. Proceedings SPIE 5190 (2003) : 400–409.
- [5] T. Watanabe, H.Fujimoto and T. Masuda. Self-calibratable rotary encoder. J. Phys.: Conf. Ser 13 (2005) : 240–245.
- [6] Ralf D Geckeler, Andreas Fricke and Clemens Elster. Calibration of angle encoders using transfer functions. Meas. Sci. Technol 17 (2006) : 2811-2818.
- [7] Tsukasa Watanabe and Hiroyuki Fujimoto. Application of a self-calibratable rotary encoder. In Proceedings of ISMTII-2009, 54-58. 2009.
- [8] Automation and Metrology Inc. Photoelectric Scanning [Online]. Available from : http://www.auto-met.com/heidenhain/rotary_encoders/scanning.htm [2013, April 7]
- [9] X. D. Lu and D. L. Trumper. Self-calibration of on-axis rotary encoders. Annals of the CIRP 56 (2007) : 499-504.
- [10] T.Watanabe, H.Fujimoto, K.Nakayama, M.Kajitani and T.Masuda. Calibration of a Polygon Mirror by The Rotary Encoder Calibration System. In Proceedings of XVII IMEKO World Congress TC14, 2003.
- [11] Ted Busch, Roger Harlow, Richard Thompson. Fundamentals of Dimensional Metrology. Third Edition. : Delmar Publishers, 1998.
- [12] Heidenhain. Angle Encoders [WWW] [cited: Technical documentation pertaining to the RON 905 operation principle] [Online]. Available from : <http://www.heidenhain.com/phaise2/angenc.html> [2013, April 7]
- [13] BIPM. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM). JCGM 200 2012.
- [14] European co-operation for Accreditation. EA-4/02 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration 1999.

- [15] David G. Martin. High Precision Angle Calibration for Spherical Measurement Systems. Doctoral dissertation, School of Engineering, University of Warwick, 2009.
- [16] Asia Pacific Laboratory Accreditation Cooperation (APLAC). Calibration Interlaboratory Comparisons., 2008.
- [17] UKAS, Editor. M3003 The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement., 2007.
- [18] Yandayan, T., S.A. Akgoz, and H. Haitjema. A novel technique for calibration of polygon angles with non-integer subdivision of indexing table. Precision Engineering-Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology 2002 : 412-424.
- [19] Satoshi Kiyono et al. Self-calibration of precision angle sensor and polygon mirror. Measurement 21 No. 4 (1997) : 125-136.
- [20] SEIKO NPC CORPORATION. SMD-01 Optical Encoder Head., 2011.
- [21] Alexius J. Hebra. Angles and arcs. The Physics of Metrology (2010) : 23-38.
- [22] Graetz, R.; Amin-Shahidi, D.; Smeds, K.; Lu, X. Self-Calibration for Precision Encoders. In Proceedings of the American Society for Precision Engineering, 2009.
- [23] Autonics. Application [WWW] [cited; Technical documentation pertaining to application of rotary encoder] [Online]. Available from : http://www.autonics.com/upload/data/1316517373_9_F_62_app_110822.pdf [2013, April 7]
- [24] Richard J. Graetz. On-axis Self-calibration of Angle Measurement Errors in Precision Rotary Encoders. Doctoral dissertation, FACULTY OF GRADUATE STUDIES, University Of British Columbia, 2011.
- [25] Kim, et al. Precision angle comparator using self-calibration of scale errors based on the equal-division-averaged method. In Proceedings of MacroScale 2011.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-นามสกุล นายวัชรินทร์ สามิตร
วัน เดือน ปีเกิด 1 กุมภาพันธ์ 2516
สถานที่เกิด โรงพยาบาลศิริราช กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำเร็จเมื่อปี พ.ศ. 2542

ประสบการณ์การทำงาน

ปัจจุบัน ทำงานอยู่ที่ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ในตำแหน่ง
นักมาตรวิทยา ระดับ 6 ห้องปฏิบัติการมุม ฝ่ายมาตรวิทยามิติ พ.ศ. 2544 จนถึงปัจจุบัน