

เทคนิคการประเมินค่าความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบสายวัด

UNCERTAINTY EVALUATION MEASUREMENT TECHNIQUE OF MEASURING  
TAPE CALIBRATION SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-D-018-068

เทคนิคการประเมินค่าความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบสายวัด

UNCERTAINTY EVALUATION MEASUREMENT TECHNIQUE OF MEASURING  
TAPE CALIBRATION SYSTEM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-D-018-068

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

UNCERTAINTY EVALUATION MEASUREMENT TECHNIQUE OF  
MEASURING TAPE CALIBRATION SYSTEM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ KMITL-2018-TH-D-018-068  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2018**

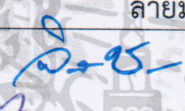
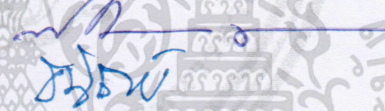

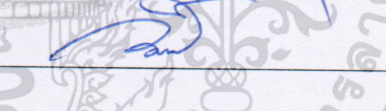
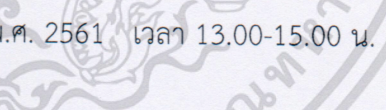
**FACULTY OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เทคนิคการประเมินค่าความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบสายวัด  
Thesis Title Uncertainty Evaluation Measurement Technique of Measuring Tape  
Calibration System  
นักศึกษา นายวันชัย ชินชูศักดิ์  
รหัสประจำตัว 53610151  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-D-018-068

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.จิระศักดิ์	ชาญวุฒิธรรม	
รศ.ดร.ทวีพล	ชื่อสัตย์	
รศ.ดร.ธินิตย์	ตรีสุวรรณวัฒน์	
รศ.ดร.วิศรุต	ศรีรัตน์	
รศ.ดร.วิทยา	ทิพย์สุวรรณพร	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 13.00-15.00 น.  
สถานที่สอบ ณ ห้อง HM-305 อาคารเฉลิมพระเกียรติ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
วันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2561  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เทคนิคการประเมินค่าความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบสายวัด
นักศึกษา	นายวันชัย ชินชูศักดิ์
รหัสประจำตัว	53610151
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร

## บทคัดย่อ

โดยทั่วไปการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเครื่องมือวัดความยาวนั้นจะพิจารณาพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบสำคัญเกี่ยวข้องกับแหล่งที่มาของความไม่แน่นอนการวัดอย่างเหมาะสม เพื่อที่จะได้ค่าความไม่แน่นอนตามเกณฑ์มาตรฐาน OIML กำหนดช่วงการยอมรับ  $1/3$  ของเกณฑ์การยอมรับสูงสุดหรือประมาณ  $\pm 0.7 \text{ mm}$  ที่ระยะ  $20 \text{ m}$  อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการประเมินค่าความไม่แน่นอนของระบบการสอบเทียบสายวัด ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนความตรงเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะวิเคราะห์แหล่งที่มาความคลาดเคลื่อนความตรงของราง ทั้งพิท และยอร์ดด้วยเทคนิคการประเมินค่าความไม่แน่นอนจากความคลาดเคลื่อนแอบเบ้ หรือความคลาดเคลื่อนฮายน์ และพิจารณาค่าความไม่แน่นอนที่เกี่ยวข้องและไม่เกี่ยวข้องกับค่าความยาวจากผลของการประเมินค่าความไม่แน่นอนการวัดที่ระยะ  $20 \text{ m}$  น้อยกว่า  $0.19 \mu\text{m}$  ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นเทคนิคการประเมินค่าความไม่แน่นอนการวัดของระบบสอบเทียบสายวัดนี้ทำให้ได้ค่าความไม่แน่นอนการวัดคิดเป็นร้อยละ 30 ของเกณฑ์การยอมรับสูงสุด

<b>Thesis Title</b>	Uncertainty Evaluation Measurement Technique of Measuring Tape Calibration System
<b>Student</b>	Mr.Wanchai Chinchusak
<b>Student ID.</b>	53610151
<b>Degree</b>	Doctor of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2018
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc.Prof.Dr.Vittaya Tipsuwanporn

## ABSTRACT

Generally, the evaluation of measurement uncertainty of length measuring instrument that would properly considering many of main effective parameters. Those parameters related to their source of uncertainties in order to obtain the target uncertainty, which is one third of maximum permissible error (MPE) or equal to  $\pm 0.7$  mm at 20 m. However, the most effective of main component must be considered that is straightness of guiderail. This thesis propose both of pitch and yaw in the mean of Abbe's error or sine error, and evaluated measurement uncertainty with length and without length function as well. The measurement uncertainty evaluation is 0.19 mm, length 20 m at confidence level 95 %. Hence, this measurement uncertainty evaluation technique is obtained approximately 30 % of 1/3 MPE.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประการที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จิระศักดิ์ ชาญวุฒิธรรม ประธานกรรมการ รศ.ดร.ทวิผล ชื้อสตัย รองประธานกรรมการ รศ.ดร.ธนิตย์ ตรีสุวรรณวัฒน์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ และ รศ.ดร.วิศรุต ศรีรัตนะ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ ดร.วีระชัย วาริยาตร์ ที่ให้คำปรึกษาการออกแบบชุดแสดงผลการวัดมุม

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการสอบเทียบความและมิติ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ให้การสนับสนุนการวิจัยนี้ ขอขอบคุณน้อง ๆ และเจ้าหน้าที่ในห้องปฏิบัติการทุกคน

สุดท้ายต้องขอขอบคุณภรรยาของข้าพเจ้า คุณเยาวลักษณ์ ชินชูศักดิ์ ที่เป็นเสมือนคู่คิดและเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

วันชัย ชินชูศักดิ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การพิจารณาขอบเขตและเงื่อนไข.....	4
2.2 วิจารณ์เนื้อหาของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.3 สรุปการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
บทที่ 3 ทฤษฎีและหลักการทํางานเครื่องสอบเทียบสายวัด.....	6
3.1 สายวัดมาตรฐานและหลักการสอบเทียบ.....	6
3.1.1 สายวัดมาตรฐาน .....	6
3.1.2 การหมุนสายวัด .....	7
3.1.3 การชั่งเทป .....	7
3.1.4 หลักการวัดความตรง.....	8
3.1.5 หลักการสอบเทียบสายวัดมาตรฐาน.....	9
3.1.5.1 วิธีเปรียบเทียบมาตรฐาน .....	9
3.1.5.2 วิธีอินเตอร์เฟียรอมิเตอร์ .....	9
3.2 หลักการทํางานของระบบสอบเทียบสายวัด.....	10
3.2.1 แท่นและรางตรง .....	11
3.2.1.1 แท่นรูปทรงตัวเอช (H-shaped beams).....	11
3.2.1.2 ฐานรองรับแท่นรูปทรงตัวเอช (H-beam supporter).....	12
3.2.1.3 หมอนรองรางและเพลลา (Sleepers and Shafts).....	12
3.2.2 ชุดหัววัดแบบรถขับเคลื่อน (Measuring probe carriage).....	13
3.2.3 ระบบเลเซอร์อินเตอร์เฟียรอมิเตอร์ .....	15

# สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.4 ระบบควบคุมและประมวลผลกลาง.....	16
บทที่ 4 การวัดความตรงและการสอบเทียบสายวัด.....	17
4.1 การวัดด้วยออสซิลโลสโคปและพีทด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์.....	17
4.1.1 การวัดความคลาดเคลื่อนยาวด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์.....	18
4.1.2 การวัดความคลาดเคลื่อนพีทด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์.....	20
4.2 การสอบเทียบสายวัด.....	23
4.2.1 วิธีการเตรียมและติดตั้งเครื่องมือและสายวัด.....	23
4.2.2 ขั้นตอนการสอบเทียบสายวัดมาตรฐานด้วยระบบสอบเทียบสายวัด.....	24
4.2.3 การทำงานของระบบควบคุมและประมวลผล.....	25
บทที่ 5 การประเมินค่าความไม่แน่นอนการวัด .....	27
5.1 หลักการประเมินค่าความไม่แน่นอน.....	27
5.1.1 ค่าเฉลี่ยของการวัด .....	27
5.1.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน.....	27
5.1.3 ค่าความไม่แน่นอนชนิดเอ .....	27
5.1.4 การแจกแจงความน่าจะเป็น .....	27
5.1.4.1 การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ .....	28
5.1.4.2 การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า .....	28
5.1.4.3 ความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบสามเหลี่ยม .....	28
5.1.5 ค่าความไม่แน่นอนชนิดบี .....	28
5.1.6 ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน .....	29
5.1.7 ค่าความไม่แน่นอนรวม .....	29
5.1.8 ค่าความไม่แน่นอนขยาย .....	29
5.2 แหล่งที่มาของค่าความคลาดเคลื่อน .....	30
5.2.1 ค่าความคลาดเคลื่อนเดดพาธ .....	30
5.2.2 ค่าความคลาดเคลื่อนโคซายน์ .....	31
5.2.3 ค่าความคลาดเคลื่อนซายน์ .....	31
5.2.4 ความคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิ .....	31
5.2.5 ค่าความคลาดเคลื่อนรีเวอร์ซัล .....	32
5.2.6 ค่าความคลาดเคลื่อนจากแรงดึง .....	32
5.3 การประเมินค่าความไม่แน่นอนการวัด .....	33
5.3.1 ค่าการวัดซ้ำ.....	34
5.3.2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของมาตรฐาน.....	34
5.3.3 ค่าความคลาดเคลื่อนจาก Dead path setup.....	34

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
5.3.4 ค่าความละเอียดของเลเซอร์.....	34
5.3.5 ค่าความคลาดเคลื่อนจากชายน์.....	34
5.3.6 ค่าความคลาดเคลื่อนจากโคชายน์.....	35
5.3.7 ความคลาดเคลื่อนผลเนื่องจากอุณหภูมิ.....	35
5.3.8 ความคลาดเคลื่อนจากการวัดอุณหภูมิ.....	35
5.3.9 ค่าลอยเลื่อน.....	35
5.3.10 ค่าความคลาดเคลื่อนจากดัชนีหักเหของอากาศ.....	35
5.3.11 ค่าความคลาดเคลื่อนจากแรงดึงของสายวัด.....	35
บทที่ 6 การประเมินสมรรถนะระบบสอบเทียบสายวัด.....	38
6.1 การทวนสอบ .....	38
6.2 การเปรียบเทียบผลการสอบเทียบระหว่างห้องปฏิบัติการ .....	39
6.3 เสถียรภาพระยะยาวและค่าลอยเลื่อน.....	42
บทที่ 7 บทสรุป.....	44
เอกสารอ้างอิง .....	45
ภาคผนวก.....	48
ภาคผนวก ก Investigation of yaw error in measuring tape calibration system....	49
ภาคผนวก ข The error reduction of the ALSM control system with the measurement error feedback.....	58
ภาคผนวก ค The measurement uncertainty evaluation of a reversal error for the ALSM.....	62
ประวัติผู้เขียน.....	66

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 จำแนกความแม่นยำของสายวัดวัดมาตรฐาน.....	6
3.2 ค่าน้ำหนักที่ใช้ถ่วงสายเทปวัด.....	8
5.1 สัญลักษณ์แหล่งที่มาของความไม่แน่นอน.....	36
5.2 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดของการสอบเทียบสายเทป 20 m.....	37
6.1 ผลการทวนสอบกับเกณฑ์การยอมรับมาตรฐานของ OIML (R35-1) .....	38
6.2 การเปรียบเทียบผลการสอบเทียบด้วย En number.....	41



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 แผนผังการสอบกลับสายวัดมาตรฐานไปยังหน่วยเอสไอ.....	1
3.1 สายวัดมาตรฐาน.....	6
3.2 เปรียบเทียบจุดเริ่มต้นที่ศูนย์ของสายวัดชนิดต่างๆ.....	7
3.3 อุปกรณ์หมุนสายวัด.....	7
3.4 การชั่งตวงสายวัดโดยการถ่วงด้วยตุ้มน้ำหนัก.....	7
3.5 การวัดความตรง.....	8
3.6 การสอบเทียบสายวัดมาตรฐานด้วยวิธีเปรียบเทียบ.....	9
3.7 หลักการวัดแบบอินเทอร์เฟียร์รอมเมทรี.....	10
3.8 ระบบสอบเทียบสายวัด.....	11
3.9 โครงสร้างรางตรงระยะ 50 เมตรและความตรงแนวตั้งและแนวนอน.....	11
3.10 การออกแบบแท่นรูปทรงตัวเอช.....	12
3.11 ฐานรองแท่นรูปทรงตัวเอช.....	12
3.12 การออกแบบการวางเพลาแท่นรูปทรงตัวเอช (ซ้าย) และหมอนรองราง (ขวา).....	13
3.13 เพลากลมรองสายวัดระยะ (ซ้าย) ตุ้มถ่วงสายเทป (ขวา).....	13
3.14 ชุดหัววัดแบบรถขับเคลื่อน.....	14
3.15 ชุดเลเซอร์อินเทอร์เฟียร์รอมเมทรีและอุปกรณ์.....	15
3.16 การติดตั้งชุดเลเซอร์อินเทอร์เฟียร์รอมเมทรีและตัวตรวจวัดอุณหภูมิ.....	15
3.17 ผังการทำงานของระบบควบคุมและประมวลผล.....	16
4.1 ชุดเลเซอร์อินเทอร์เฟียร์รอมเมทรีสำหรับมุม (วัดพิทและยอร์).....	17
4.2 ผังการทำงานและการวัดพิท และยอร์ด้วยเลเซอร์อินเทอร์เฟียร์รอมเมทรี.....	18
4.3 การวัดยอร์และการติดตั้งอุปกรณ์ชุดเลเซอร์อินเทอร์เฟียร์รอมเมทรี.....	18
4.4 การวัดความคลาดเคลื่อนของยอร์ด้วยเลเซอร์อินเทอร์เฟียร์รอมเมทรี.....	19
4.5 เป้าเลเซอร์ (ซ้าย) และตัวรับสัญญาณ (ขวา).....	19
4.6 การออกแบบการวัดยอร์ด้วยเลเซอร์อินเทอร์เฟียร์รอมเมทรี.....	20
4.7 การวัดความคลาดเคลื่อนยอร์โดยใช้เลเซอร์อินเทอร์เฟียร์รอมเมทรี.....	20
4.8 การวัดพิทและการติดตั้งอุปกรณ์ชุดเลเซอร์อินเทอร์เฟียร์รอมเมทรี.....	21
4.9 การวัดความคลาดเคลื่อนของพิทด้วยเลเซอร์อินเทอร์เฟียร์รอมเมทรี.....	22
4.10 การออกแบบการวัดพิทด้วยชุดเลเซอร์อินเทอร์เฟียร์รอมเมทรี.....	22
4.11 การวัดความคลาดเคลื่อนพิทโดยใช้เลเซอร์อินเทอร์เฟียร์รอมเมทรี.....	22
4.12 การวัดระยะแบบเชิงเส้นและการติดตั้งอุปกรณ์ชุดลิเนียร์อินเทอร์เฟียร์รอมเมทรี.....	23
4.13 การสอบเทียบสายวัดด้วยเลเซอร์อินเทอร์เฟียร์รอมเมทรี.....	23
4.14 การปรับตั้งสายวัด.....	24
4.15 การควบคุมสถานะห้องปฏิบัติการ .....	24
4.16 แผนภูมิการทำงานของชุดโปรแกรมควบคุมและประมวลผล.....	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และเที่ยงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

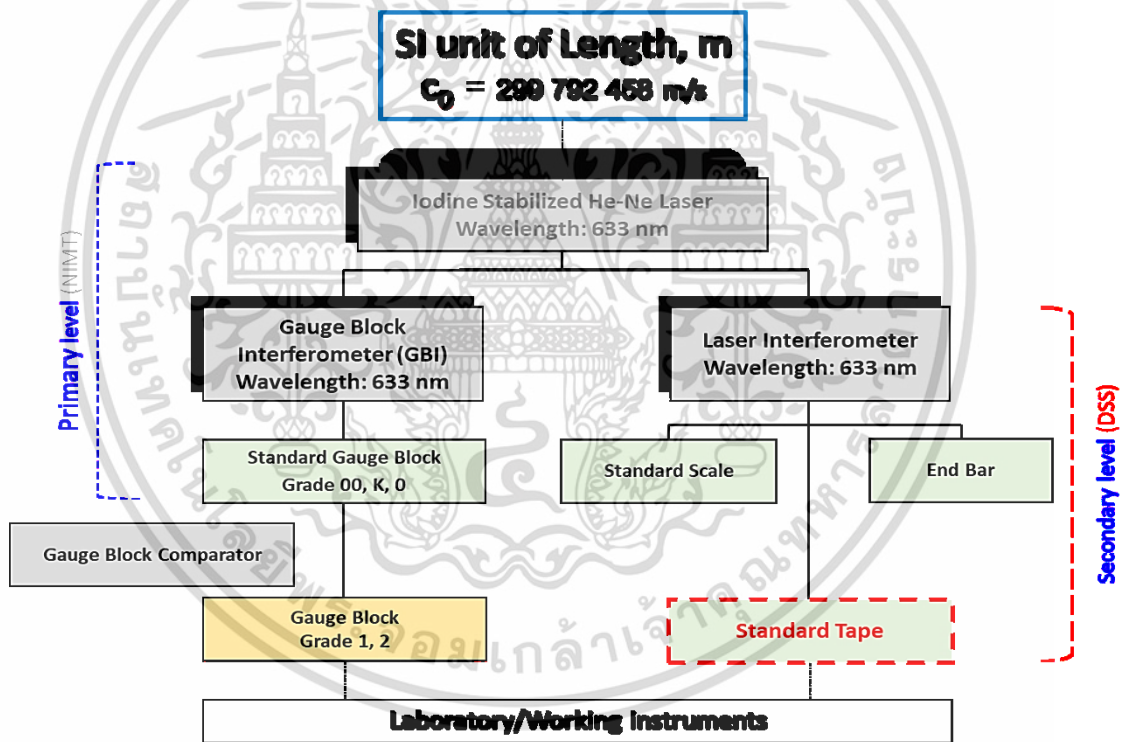
รูปที่	หน้า
4.17 การวิเคราะห์ผลการวัดจากการเปรียบเทียบสัญญาณเอาร์ทพุทของเลเซอร์ กับสัญญาณภาพ.....	26
4.18 ผลการสอบเทียบสายวัดมาตรฐานที่ระยะ 20 m.....	26
5.1 แผนภูมิการวิเคราะห์แหล่งที่มาของความคลาดเคลื่อน.....	30
5.2 แหล่งที่มาของความไม่แน่นอนจาก Dead path error.....	30
5.3 ความคลาดเคลื่อนจากโคซายน์ .....	31
5.4 ความคลาดเคลื่อนจากซายน์ .....	31
5.5 ลักษณะความคลาดเคลื่อนของรีเวอร์ซัล.....	32
5.6 แผนภูมิการประเมินค่าความไม่แน่นอนการวัด.....	33
6.1 การทวนสอบผลการสอบเทียบสายวัดมาตรฐานกับเกณฑ์มาตรฐาน OIML.....	39
6.2 สายวัดมาตรฐาน (JIS B 7512, Grade I) ใช้เป็น Artifact .....	39
6.3 แผนภูมิการประเมินสมรรถนะด้วยวิธีเปรียบเทียบระหว่างห้องปฏิบัติการ.....	40
6.4 การเปรียบเทียบผลการสอบเทียบระหว่างกรมวิทยาศาสตร์บริการ (DSS) กับสถาบันมาตรวิทยา ของประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน (NIM).....	42
6.5 การเปรียบเทียบผลการสอบเทียบสายวัดมาตรฐานปี พ.ศ. 2559 และปี พ.ศ. 2560.....	43
6.6 ค่าเลื่อนลอยระยะยาวของระบบสอบเทียบสายวัดจากผลการสอบเทียบสายวัด มาตรฐาน.....	43

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของปัญหา

โดยทั่วไปการสอบเทียบ ความถูกต้องของเครื่องมือวัดมาตรฐาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสายวัดมาตรฐาน [1-3] และสายวัดงานสำรวจ [4-6] เป็นบทบาทสำคัญของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (National Institute of Metrology, NMI) เพื่อให้อ้างอิงมาตรฐานเหล่านี้เป็นไปตามมาตรฐานขององค์การมาตรวิทยาเชิงพาณิชย์สากล (International Organization of Legal Metrology, OIML), หมายเลขเอกสารมาตรฐาน OIML R35-1 [7] ซึ่งเป็นเอกสารมาตรฐานที่เกี่ยวกับกฎหมาย ชั่ง ตวง วัด อีกประการหนึ่งสามารถสอบกลับมาตรฐานได้ในระดับประเทศไปยังหน่วยเอสไอ ตามแผนผังการสอบกลับสายวัดมาตรฐานดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แผนผังการสอบกลับสายวัดมาตรฐานไปยังหน่วยเอสไอ

ปัจจุบันวิธีการสอบเทียบสายวัดมาตรฐานของห้องปฏิบัติการนิยมใช้มีอยู่สองวิธี โดยวิธีแรกใช้การเปรียบเทียบระหว่างสายวัดทั่วไปกับสายวัดมาตรฐาน และส่วนอีกวิธีหนึ่งคือการวัดโดยตรงด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าแบบสัมบูรณ์ ห้องปฏิบัติการสอบเทียบเลือกใช้วิธีที่สองกันเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากการวัดแบบสัมบูรณ์ที่ใช้เลเซอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ จะมีค่าความคลื่อนน้อยกว่า เนื่องจากประเทศไทยยังไม่มีหน่วยงานใดที่สามารถสอบเทียบความถูกต้องกับสายวัดมาตรฐานได้ ด้วยเหตุนี้ห้องปฏิบัติการสอบเทียบความยาวและมิติ กรมวิทยาศาสตร์บริการจึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากกรมวิทยาศาสตร์บริการ กรุณาแจ้งกรมวิทยาศาสตร์บริการทราบเพื่อจะได้ดำเนินการตามกฎหมายต่อไป

ได้ จัดตั้งโครงการวิจัยเพื่อทำการศึกษาพัฒนาเครื่องมือสำหรับการสอบเทียบสายวัดมาตรฐานหรือ เอ็มทีดีพี (Measuring Tape Development Project, MTDP) ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2553

การประเมินค่าความไม่แน่นอนการวัด เป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์และสถิติที่นำปัจจัยของความคลาดเคลื่อนต่างๆ ได้แก่ ความตรง, รีเวอร์ซัล (Reversal error) [8], อุณหภูมิ (Thermal effect), โคไซน์ (Cosine error) และอื่นๆ เป็นต้น ซึ่งอาจเป็นเหตุของที่มาหรือเกี่ยวข้อง และมีผลกระทบโดยตรงกับค่าความคลื่อนของการวัดมาวิเคราะห์ และประเมินทางเชิงสถิติ (Statistical evaluation) ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ ตามวิธีการและขั้นตอนการดำเนินการ เพื่อให้ได้ประเมินค่าความไม่แน่นอนการวัดที่เหมาะสมกับการวัดนั้นๆ หากว่าห้องปฏิบัติการต้องการจะประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดใด ก็ควรใช้วิธีการหรือเทคนิคการประเมินค่าความไม่แน่นอนเฉพาะของการวัดนั้น เพราะฉะนั้นการสอบเทียบสายวัดมาตรฐานนับว่าเป็นเครื่องมือวัดที่มีความเที่ยงตรงสูง ห้องปฏิบัติการสอบเทียบควรใช้เทคนิคและวิธีการประเมินค่าความไม่แน่นอนเฉพาะที่ถูกต้องและเหมาะสมกับเป้าหมายหรือเกณฑ์ค่าความไม่แน่นอนที่กำหนด

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย

โดยทั่วไปห้องปฏิบัติการของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติของนานาประเทศ ส่วนมากล้วนแต่มีการพัฒนาเครื่องมือดังกล่าวนี้ด้วยตนเอง เพื่อให้การสอบกลับได้ของสายวัดมาตรฐานของแต่ละประเทศนั้นเป็นไปอย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ห้องปฏิบัติการสอบเทียบยังมีการวิจัยพัฒนาต่อยอดโดยใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยเพิ่มมากขึ้น ตัวอย่างเช่น การใช้กล้องซีซีดี, การส่งสัญญาณแบบไร้สาย, การวิเคราะห์ภาพด้วยอิมเมจโปรเซสซิง, ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์, และระบบอัตโนมัติอื่นๆ วัตถุประสงค์ที่สำคัญก็เพื่อทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนลดน้อยลง ซึ่งการสอบเทียบสายวัดมาตรฐานยังมีพารามิเตอร์สำคัญๆที่เป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนการวัดอีกมาก ทั้งปัจจัยทางตรงและทางอ้อม ได้แก่ ความเป็นเชิงเส้น, ความตรง, ผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิ, พิตช์ (Pitch), ยอร์ (Yaw), และโรลล์ (Roll) เป็นต้น

การวัดความตรงของระบบสอบเทียบสายวัดจัดเป็นพารามิเตอร์สำคัญลำดับต้นๆที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนดังได้กล่าวมาแล้ว และปัจจัยการวัดความตรงก็คือพิตช์และยอร์ ซึ่งเป็นการวัดมุมที่เกิดรอบแกนแนวแกน Y และแกน Z ตามลำดับ จากการศึกษาที่ผ่านมา เรื่องการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของยอร์ การวัดยอร์มีการศึกษาวิจัยอยู่น้อยมาก ทั้งๆที่การวัดยอร์นับว่าเป็นองค์ประกอบสำคัญอย่างมากต่อการวัดความตรงของโครงสร้างรางตรง และแนวการเคลื่อนที่ของรถเลื่อน

โดยทั่วไปการพัฒนาการวัดยอร์เซ็นเซอร์ [9] จะนำไปใช้เกี่ยวกับยานยนต์ อากาศยาน ระบบนำร่อง เช่น เครื่องบิน และเป็นที่รู้จักกันทั่วไปในนามของเครื่องใจโรสโคป (Gyroscope) หรือใจโรเซ็นเซอร์ (Gyro sensor) การพัฒนาดังกล่าวยังถือว่าอยู่ในแวดวงจำกัด ยังไม่สามารถนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากสาเหตุว่ามีราคาสูง ส่วนใจโรเซ็นเซอร์ที่มีการพัฒนาในรูปของไมโครชิพ (Microchip set) ถูกนำไปใช้ในงานการวัดมุมรอบแกน Z ที่มีความละเอียดต่ำ และช่วงการใช้งานที่ไม่ครอบคลุม หากนำมาใช้งานในห้องปฏิบัติการอาจจะไม่เหมาะสม และคุ้มค่า นอกจากการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของยอร์ของระบบสอบเทียบสายวัด เป็นการวัดเพื่อชดเชยค่าความผิดพลาดเพื่อปรับแก้แนวการเคลื่อนที่ให้ความตรงอีกด้วย ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีเทคนิคการประเมินค่าความไม่แน่นอนการวัดความคลาดเคลื่อนของระบบสอบเทียบสายวัด เพื่อที่ได้พิจารณาพารามิเตอร์สำคัญๆและผลการวัดให้เป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัตถุประสงค์ของการวิจัยแบ่งตามหัวข้อดังนี้

1. การประเมินค่าความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบสายวัด
2. การประเมินสมรรถนะของระบบสอบเทียบสายวัด

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะนำเสนอเทคนิคการประเมินค่าความไม่แน่นอนการสอบเทียบสายวัดมาตรฐานด้วยระบบสอบเทียบสายวัดที่ระยะ 20 m ตาม Guide to Expression Uncertainty Evaluation in Measurement (GUM) [10] ซึ่งเทคนิคและรูปแบบการประเมินค่าความไม่แน่นอนนี้จัดว่าเป็นประเมินค่าความไม่แน่นอนต้นแบบ (Prototype evaluation) หรือแบบนำร่อง ซึ่งปัจจุบันยังไม่มีแนวทางการประเมินลักษณะนี้มาก่อน

### 1.4 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์ มีดังนี้

1. พื้นฐาน เหตุผลความจำเป็น ความเป็นมา วัตถุประสงค์ ขอบเขตของการวิจัย
2. ทฤษฎี หลักการทำงานและการออกแบบเครื่อง พร้อมอธิบายรายละเอียดส่วนประกอบสำคัญ นอกจากนี้เน้นการออกแบบและพัฒนาออร์เซ็นเซอร์แบบใหม่ การประยุกต์ใช้วัดมุมออร์ เพื่อที่ลดค่าความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบสายวัดได้ด้วยการควบคุมปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อค่าความคลาดเคลื่อน
3. นำเสนอเทคนิคการวัดความคลาดเคลื่อนออร์และพิท ซึ่งเป็นปัจจัยหลักของความตรงของรางตรงของระบบสอบเทียบสายวัดและการสอบเทียบสายวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์
4. การประเมินค่าความไม่แน่นอน โดยการวิเคราะห์แหล่งที่มาของความไม่แน่นอนต่างๆ เช่น เครื่องมือวัด อุปกรณ์ทางแสง อุณหภูมิ และแรงดึง เป็นต้น แล้วนำแหล่งที่มาค่าความไม่แน่นอนทั้งหมดมารวมกันเป็นความไม่แน่นอนรวม หรือเรียกอีกอย่างว่าค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน ที่ระดับความเชื่อมั่น 68 % ดังนั้นการรายงานค่าความไม่แน่นอนขยายที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % เท่ากับ 0.19 mm และสรุปผลการวัด
5. งานวิจัยนี้ได้เน้นการตรวจสอบสมรรถนะ ได้แก่ การทวนสอบกับเกณฑ์มาตรฐาน OIML R35-1 โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนและค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบสายวัดมาตรฐานที่ระยะ 20 m นำเสนอการเปรียบเทียบผลการสอบเทียบระหว่างห้องปฏิบัติการสอบเทียบของกรมวิทยาศาสตร์บริการกับสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติของประเทศสาธารณรัฐ ประชาชนจีน พิจารณาเกณฑ์จาก En number  $\leq 1$  และความเสถียรภาพและค่าลอยเลื่อนระยะยาวของระบบสอบเทียบสายวัด
6. การศึกษาการวัดความตรงด้วยออร์เซ็นเซอร์ที่ออกแบบขึ้นมาใหม่ พร้อมวิธีการสอบเทียบและการประเมินค่าความไม่แน่นอน นำเสนอการเปรียบเทียบผลการวัดออร์ระหว่างการวัดด้วยแองกูลาอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Angular interferometer) โดยที่ผลการวัดความคลาดเคลื่อนออร์เพื่อ สำหรับกับ จากวิธีดังกล่าวมาแล้วข้างต้นทำให้สามารถลดค่าความไม่แน่นอนและค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องระบบสอบเทียบสายวัดได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### การทบทวนวรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนผลงานวิจัยมีประเด็นหัวข้อที่สนใจเพื่อให้สอดคล้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ก็คือ การสืบค้นเทคนิคหรือวิธีการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบสายวัดมาตรฐานการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อดังนี้

#### 2.1 การพิจารณาขอบเขตและเงื่อนไข

- ต้องเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเครื่องมือ วิธีการสอบเทียบสายวัดมาตรฐานจากห้องปฏิบัติการด้านมาตรวิทยาทางมิติเท่านั้น
- ต้องมีวิธีการ ขั้นตอน เนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับประเมินค่าความไม่แน่นอนอย่างละเอียดและถูกต้อง
- ตีพิมพ์ในวารสารที่มีชื่อเสียงด้วยค่าดัชนีชี้วัด (Citation index) สูง เช่น Science direct, Measurement (IMEKO) หรือเอกสารวิจัยตีพิมพ์จากวารสารที่เทียบเท่า เป็นต้น
- ต้องเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่อยู่ในช่วงเวลาไม่เกิน 5 ปี

จากการสืบค้นพบว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องมือสอบเทียบสายวัดมาตรฐานชื่อเรื่อง Investigation of yaw errors in measuring tape calibration system ตีพิมพ์วารสาร Measurement ปี พ.ศ. 2561 [1] มีความทันสมัย และเป็นไปตามขอบเขตและเงื่อนไขที่กำหนด มีการวิจัยมุ่งเน้นเพื่อแก้ปัญหาการวัดความตรงของระบบสอบเทียบสายวัดมาตรฐาน ด้วยยอร์เซ็นเซอร์ มีการนำผลลัพธ์ที่ได้จากการวัดสายวัดไปทวนสอบโดยตรงกับเกณฑ์การยอมรับของ OIML และทำการเปรียบเทียบผลระหว่างห้องปฏิบัติการ (สถาบันมาตรวิทยาของประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน, NIM China) แต่ไม่มีการกำหนดเกณฑ์การยอมรับของค่าความไม่แน่นอน (Target uncertainty) ไว้ให้ชัดเจนและใช้รูปแบบการประเมินค่าความไม่แน่นอนทั่วไป และการสืบค้นพบว่าวรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องมือสอบเทียบสายวัดมาตรฐานชื่อเรื่อง A motorized 5 m tape comparator for traceable measurements of tapes and rules ตีพิมพ์วารสาร Measurement ปี พ.ศ. 2556 [2] มีความทันสมัยและเป็นไปตามขอบเขตและเงื่อนไขที่กำหนด อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าวนี้มีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ทั้งด้วยระยะความยาวของรางตรงระยะ 5 m เท่านั้นและวิธีการประเมินค่าความไม่แน่นอนที่แตกต่างกัน เนื่องจากวิธีการสอบเทียบสายวัดมาตรฐานของงานวิจัยนี้จะวัดเป็นช่วงๆละ 5 m แล้วนำค่าความไม่แน่นอนของแต่ละช่วงมารวมกัน ดังนั้นจึงได้นำเอาแนวทางการประเมินค่าความไม่แน่นอนจากแหล่งที่มาบางส่วนมาใช้ได้ และนอกจากนี้เป็นเอกสารอ้างอิงอื่นๆที่มีกล่าวไว้และใช้ประกอบการเรียบเรียงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แต่ไม่เป็นไปตามขอบเขตและเงื่อนไขที่กำหนด [3-6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 วิจารณ์เนื้อหาของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กล่าวได้ว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ดี ความชัดเจน สอดคล้อง ตรงตามวัตถุประสงค์และเหมาะสมกับการสืบค้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยดังกล่าวข้างต้น ถึงแม้ว่ามีการวิจัยมุ่งเน้นเกี่ยวกับการวัดความคลาดเคลื่อนยวด้วยยอว์เซ็นเซอร์เปรียบเทียบกับการวัดด้วยเลเซอร์ แต่ก็สามารถนำเอาแนวทางวิจัยที่เกี่ยวข้องและแตกต่างกันมาใช้ทำวิจัยได้ เช่น การตั้งเกณฑ์ของค่าความไม่แน่นอนเป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณาก่อนการประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดเสมอ การพิจารณาเกณฑ์ของค่าความไม่แน่นอนด้วย  $1/3$  ของเกณฑ์การยอมรับสูงสุด OIML ( $\pm 2.1$  mm ที่ระยะ 20 m) หรือ  $1/3$  of MPE ( $U_{20}$  เท่ากับ 0.7 mm) รวมถึงเทคนิคการประเมินค่าความไม่แน่นอนจากแหล่งที่มาทุกพารามิเตอร์อย่างครบถ้วนครอบคลุมตลอดช่วงระยะ 20 m

## 2.3 สรุปการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

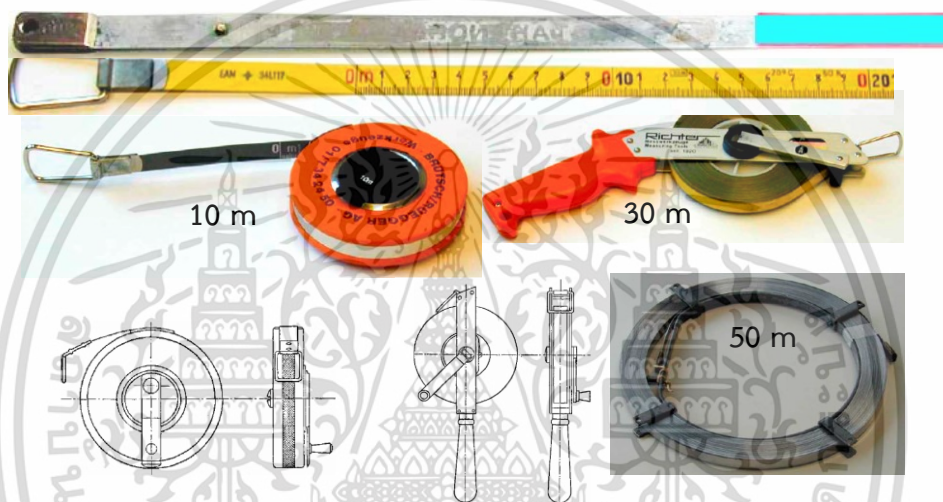
การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจากการสืบค้นทั้ง เรื่อง Investigation of yaw errors in measuring tape calibration system และ A motorized 5 m tape comparator for traceable measurements of tapes and rules ทำให้พบข้อดีข้อเสียและแนวทางการค้นคว้าวิจัยที่แตกต่างการประเมินค่าความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบสายวัดมาตรฐาน และที่ต้องศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเนื้อหาทั้งส่วนของการออกแบบ การวิเคราะห์ผลและเทคนิคการประเมินค่าความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบสายวัดมาตรฐานให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

### บทที่ 3

## ทฤษฎีและหลักการทำงานระบบสอบเทียบสายวัด

### 3.1 สายวัดมาตรฐานและหลักการสอบเทียบ

3.1.1 สายวัดมาตรฐาน โดยทั่วไปสายวัดมาตรฐาน ดังรูปที่ 3.1 ที่ใช้เป็นมาตรฐานอ้างอิงวัสดุ ทำจากโลหะชนิดเหล็กกล้าลักษณะแบนราบ มีขีดแบ่งสเกลตามความยาวของสายวัด มีทั้งชนิดเคลือบสีและไม่เคลือบสีป้องกันสนิมมีความยาวหลายขนาด เช่น 10 m, 20 m, 30 m และ 50 m ตรงส่วนปลายมีตะขอหรือห่วงสำหรับขึงตึงด้วยการแขวนตุ้มน้ำหนักถ่วง



รูปที่ 3.1 สายวัดมาตรฐาน

ตามเอกสารมาตรฐาน OIML R35-1 กำหนด ความแม่นยำการวัด แบ่งออกเป็น 3 ระดับ (I, II, และ III) มีหน่วยเป็น mm ดังสมการที่ 3.1 และ ตารางที่ 3.1

$$(a + bL)$$

(3.1)

เมื่อ  $L$  เป็นค่าความยาวหน่วยเป็นเมตร

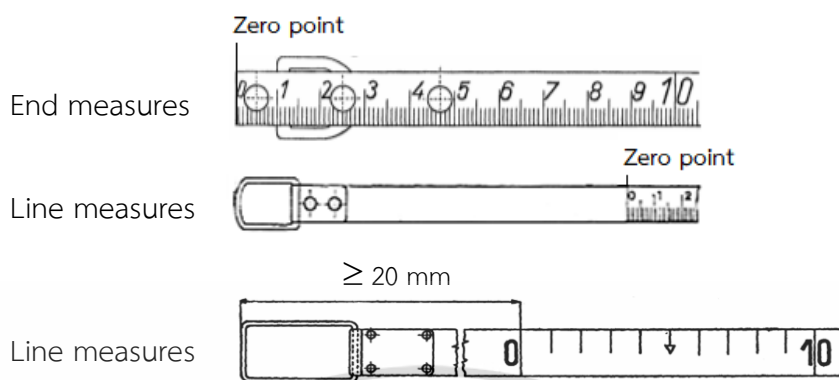
$a, b$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 จำแนกความแม่นยำของสายวัดมาตรฐาน

Class	$a$	$b$
I	0.1	0.1
II	0.3	0.2
III	0.6	0.4

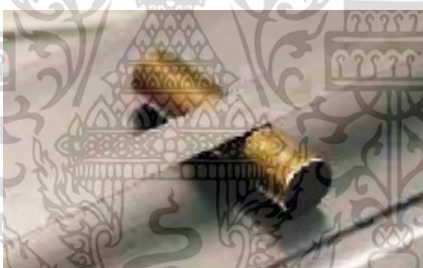
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะจุดอ้างอิงหรือจุดเริ่มต้นที่ศูนย์ของสายวัด มีทั้งแบบเริ่มที่ปลายสุด และแบบเว้นระยะไว้ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 mm ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 เปรียบเทียบจุดเริ่มต้นที่ศูนย์ของสายวัดชนิดต่างๆ

**3.1.2 การหุนสายวัด** การสอบเทียบต้องมีการหุนสายวัดด้วยตัวหุนสายวัด ดังรูปที่ 3.3 ทำจากวัสดุที่มีผิวเรียบ พลาสติก โลหะ รูปทรงกลมหรือมีลักษณะโค้งมนไร้แรงเสียดทาน (Frictionless effect) ขึ้นอยู่กับผู้ออกแบบ ทุกๆระยะ 1 m หรือน้อยกว่า การหุนสายวัดนับว่ามีความสำคัญมากขณะสอบเทียบ เพราะป้องกันไม่ให้สายวัดหย่อน (Zag) ขณะมีการขึงสายวัด ซึ่งจะส่งผลทำให้มีค่าความคลาดเคลื่อนไซนัสหรือแอบแบ้ (Sine error or Abbe's error) เกิดขึ้นได้



รูปที่ 3.3 อุปกรณ์หุนสายวัด

**3.1.3 การขึงสายวัด** การขึงสายวัดดังรูปที่ 3.4 ให้ตั้งด้วยการถ่วงตุ้มน้ำหนักเพื่อขจัดปัญหาของค่าความคลาดเคลื่อนโคซายน์ แต่การใช้แรงดึงสายวัดที่ไม่เหมาะสมกับสายวัดก็ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนได้ มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.2 ค่าแก้จากแรงดึง (Tensile correction value,  $C_p$ ) เนื่องจากสายวัดแต่ละชนิดก็มีค่าความเครียดไม่เท่ากัน ดังนั้นแรงดึงของโหลดที่ใช้ขณะทำการสอบเทียบสายวัดควรใช้ตามที่ผู้ผลิตกำหนดดังตารางที่ 3.2 ค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ของตุ้มน้ำหนัก 45 g



รูปที่ 3.4 การขึงตึงสายวัดโดยการถ่วงด้วยตุ้มน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

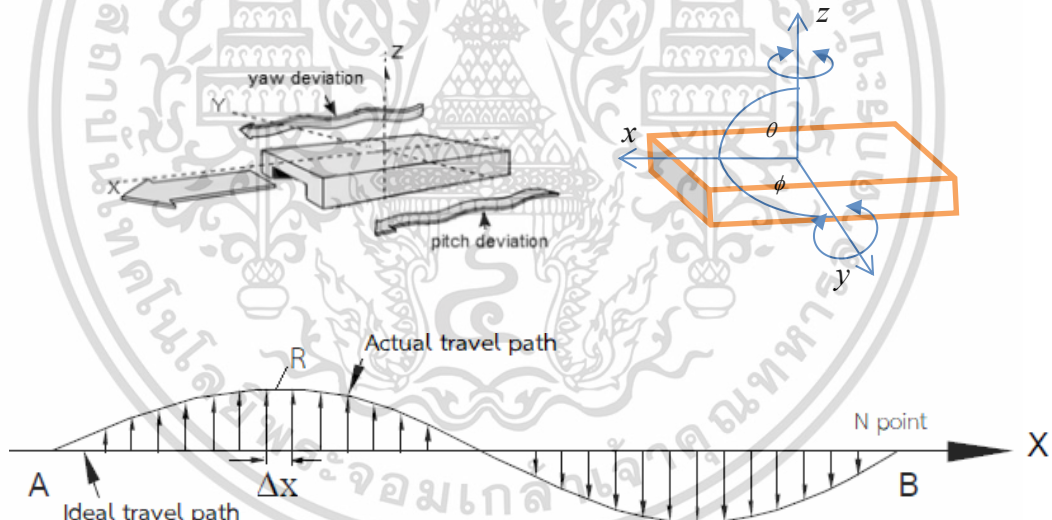
ตารางที่ 3.2 ค่าน้ำหนักที่ใช้ถ่วงสายวัด

Length Interval	Tension
Less than 10 m	2.0 kg
10 – 30 m	5.0 kg
Greater than 30 m	10.0 kg

$$C_p = \frac{(P - P_0)L}{E.A} \quad (3.2)$$

กำหนดให้แรงดึง ( $P$ ) และค่าแรงที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ( $P_0$ ) มีหน่วยเป็น kgf หรือ N ที่  $C_p$  เป็นค่าแก้ความยาวเนื่องจากแรงที่ใช้ซึ่งสายวัด,  $E$  เป็นค่าการยืดหยุ่นมอดูลัสของยัง (Young's elastic modulus, kgf/mm<sup>2</sup> or N/mm<sup>2</sup>),  $L$  เป็นความยาว (mm) และ  $A$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของสายวัด (mm<sup>2</sup>)

### 3.1.4 หลักการวัดความตรง (Straightness measurement)



รูปที่ 3.5 การวัดความตรง

พิจารณาหกแกนองศาอิสระต่างๆ ที่กำหนดไว้บนรถขับเคลื่อนดั่งนี้ สามแกนองศาอิสระแกน X, Y, และ Z อีกสามองศาอิสระเป็นการหมุนรอบแกน X, Y, และ Z การเคลื่อนที่เหล่านี้เป็นไปตามกฎมือขวาโดยแกน X, Y แทนด้วยนิ้วชี้และนิ้วกลางตั้งฉากกันกับแกน Z แทนด้วยนิ้วหัวแม่มือชี้ไปในทิศทางบวกแกนต่างๆ ก็ชี้ไปในทิศทางบวกรวมไปถึงการหมุนรอบแกนนั้นด้วย

การประกอบด้วยการเคลื่อนที่ไปตามแกน, การหมุนรอบแกนร่วม (Coordinate axes) แกน X, Y อยู่บนระนาบตามแนวนอน การเคลื่อนที่ของแท่นบนและล่างให้ปรับไปที่แกน X และแกน Z อยู่บนระนาบตามแนวตั้ง ในกรณีการวัดความตรง [11] ดังรูปที่ 3.5 เป็นการวัดระยะที่ตั้งฉากกับแนวการเอกสาร์นี้เป็นเอกสาร์ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนที่ในระนาบแนวนอน ให้  $y(x)$  ถูกกำหนดให้เป็นเส้นตรงอ้างอิงผ่านจุดเริ่มต้น  $y(0)$  และจุดสิ้นสุด  $y(L)$ ,  $L$ : ความยาว (Length) ซึ่ง  $y(0) = y(L) = 0$  ค่าความชันกำหนดได้ว่า

$$\frac{dy}{dx} = \tan \phi \quad (2.3)$$

สมมติว่าให้  $R$  เป็นรัศมีส่วนโค้งของแนวการเคลื่อนที่จริงมีค่ามากกว่า  $\Delta x$  หนึ่ง  $\tan$  เท่ากับ  $\phi$  ดังนั้น

$$y(x) = \int_0^x \frac{dy}{dx} dx = \int_0^x \phi(x) dx \quad (2.4)$$

จำนวนจุดทั้งหมด  $N$  จุด เท่ากับ  $L/\Delta x$ , ให้  $x_n = n\Delta x$ ;

$$y(x_n) = \sum_{i=0}^n \phi(x_{i-1}) \Delta x + const \quad (3.5)$$

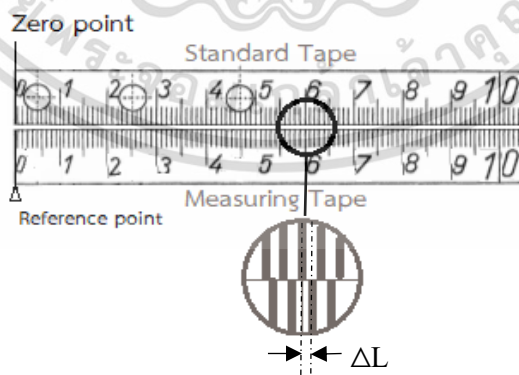
เพราะว่า  $Y(0) = Y(L) = 0$ , สมการที่ 3.5 เป็น

$$y(x_n) = \sum_{i=0}^n \phi(x_{i-1}) \Delta x - \frac{n}{N} \sum_{i=0}^N \phi(x_{i-1}) \Delta x \quad (3.6)$$

ที่  $y(x_n)$  เป็นค่าความตรงของระนาบแนวนอน,  $\phi(x_n)$  มุมยอร์ที่วัดได้  $\Delta x$  ค่ามุมการวัดที่เพิ่มขึ้น และ  $N$  เป็นจำนวนจุดที่ต้องการวัดทั้งหมด ดังนั้นการวัดยอร์ด้วยรัศมีเคลื่อนบนรางเปรียบเสมือนเป็นการวัดความตรงราง

### 3.1.5 หลักการสอบเทียบสายวัดมาตรฐาน มีอยู่ 2 วิธี ดังนี้

**3.1.5.1 วิธีเปรียบเทียบมาตรฐาน** เป็นวิธีการสอบเทียบแบบดั้งเดิมดังรูปที่ 3.6 โดยใช้สายวัดมาตรฐานวางคู่ขนานกับสายวัดที่ต้องการสอบเทียบแล้วปรับตั้งจุดเริ่มต้นให้ตรงกันใช้กล้องขยายปรับระยะที่หัววัดไมโครมิเตอร์อ่านค่าจากผลต่าง  $\Delta L$  ความเสถียรภาพ  $1 \times 10^{-5}$



รูปที่ 3.6 การสอบเทียบสายวัดมาตรฐานด้วยวิธีเปรียบเทียบ

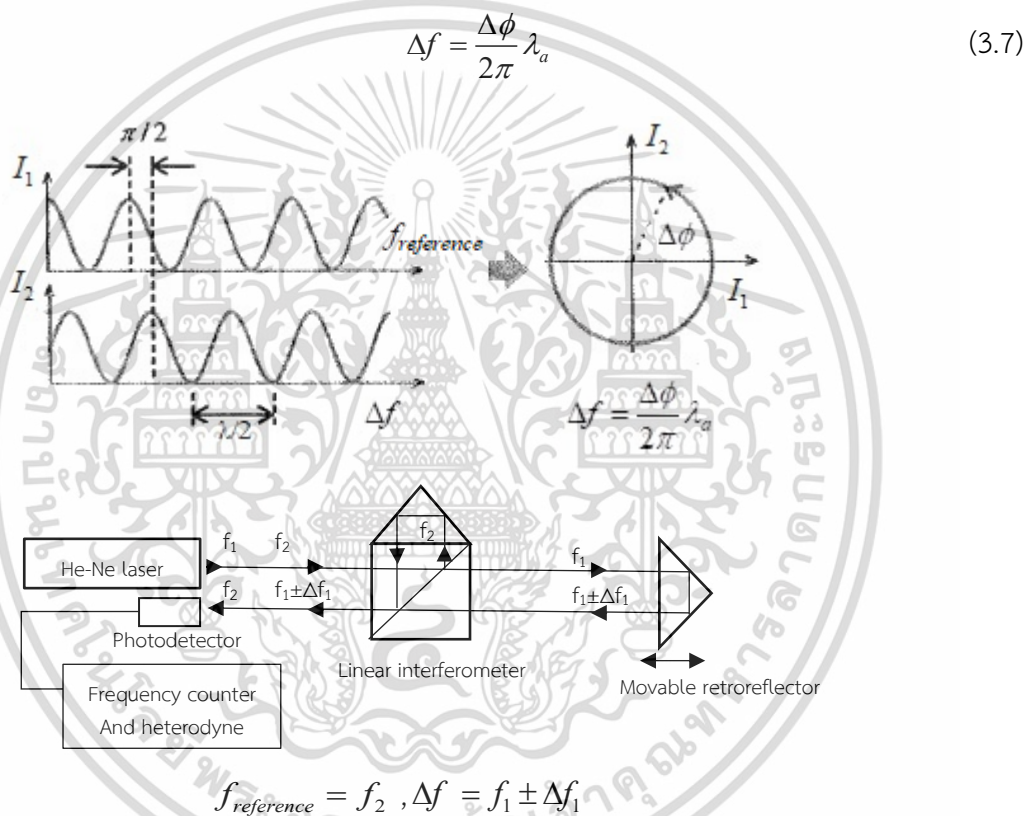
### 3.1.5.2 วิธีอินเตอร์เฟียรอมเทรี (Interferometry method) เป็นวิธีการสอบเทียบ

ที่ใช้เปรียบสายวัดระยะกับชุดเลเซอร์อินเตอร์เฟียรอมิเตอร์หรือวิธีวัดแบบสัมบูรณ์ ดังรูปที่ 3.6 มี

เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงชนิดฮีเลียม-นีออนเลเซอร์ (He-Ne laser) ช่วงความยาวคลื่น 633 nm เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาทานาน ไม่นุญญาติเนาไปเซประเยชนคานการค

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยหลักการวัดแทรกสอดทางแสงของ Michelson's interferometer จากหลักการวัดแทรกสอดทางแสง ได้มีการพัฒนาเป็น heterodyne interferometer แบบความถี่ต่างสองความถี่  $\Delta f$  ( $f_1$  และ  $f_2$ ) ดังสมการที่ 3.7 [12] ติดตั้งอุปกรณ์ทางแสงได้แก่ Linear interferometer, Movable retroreflector ติดตั้งกับกล้องสำหรับส่องขยายขีดสเกลเคลื่อนที่ไปตามแนวของสายวัดและ photodetector เชื่อมต่อเครื่องนับความถี่ ซึ่งอ่านค่าเป็นระยะที่วัด ดังนั้นผลลัพธ์เป็นค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการเปรียบเทียบระยะขีดสเกลกับค่าที่อ่านได้จากเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ ปัจจุบันห้องปฏิบัติการใช้เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์กันอย่างแพร่หลายมากกว่าแบบวิธีเดิม เนื่องจากให้ความถูกต้องสูงมีความเสถียรภาพถึง  $\pm 1 \times 10^{-7}$  และ ค่าความยาวคลื่น  $1 \times 10^{-8}$  ดังรูปที่ 3.7 ผังหลักการทำงานเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

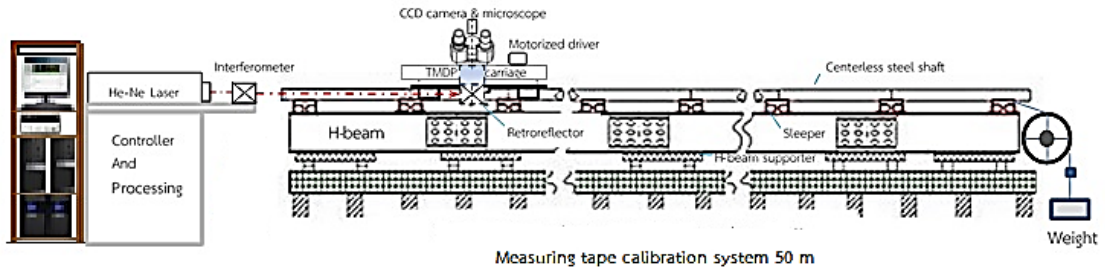


รูปที่ 3.7 หลักการวัดแบบอินเตอร์เฟียโรเมทรี

### 3.2 หลักการทำงานของระบบสอบเทียบสายวัด

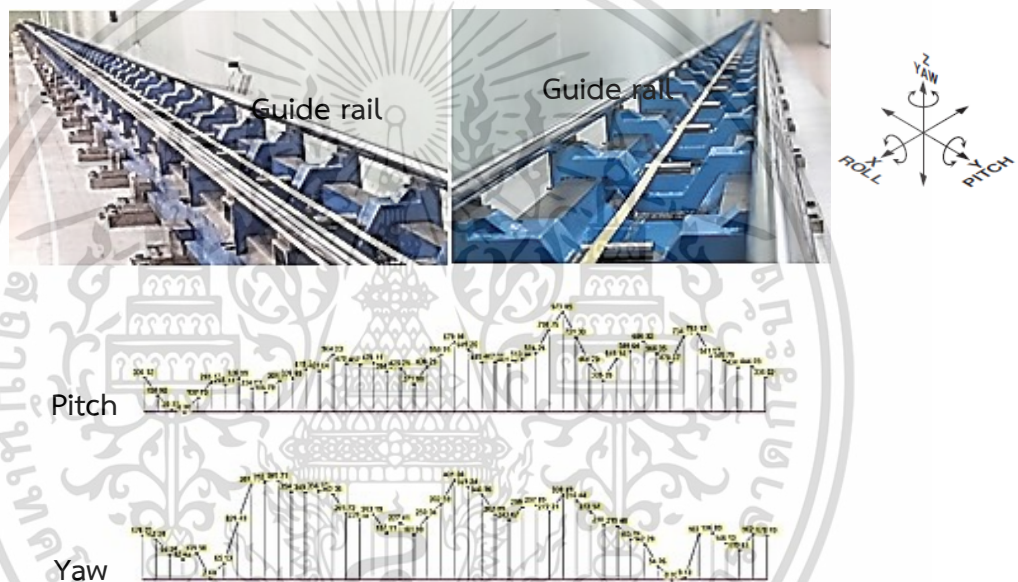
หลักการทำงานของระบบสอบเทียบสายวัด ดังรูปที่ 3.8 ประกอบด้วย 4 ส่วน ได้แก่ แท่นพร้อมรางตรง ระยะ 50 m, ชุดหัววัดแบบรถขับเคลื่อน (Measuring probe carriage) ชุดเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์แบบระยะไกลพิเศษ (Long range laser interferometer) และชุดควบคุมและประมวลผลกลางทั้งสี่ส่วนนี้จะทำงานร่วมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ระบบสอบเทียบสายวัด

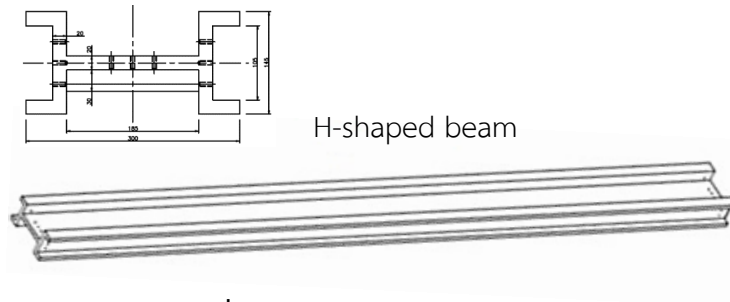
3.2.1 แท่นและรางตรง ทำหน้าที่เป็นเสมือนแกนอ้างอิงมาตรฐานวางทอดตามแนวแกน X ระยะ 50 m ปรับระดับความสูงต่างไม่มากกว่า  $\pm 1.0$  mm ดังรูปที่ 3.9 มีความตรงทั้งแนวตั้ง และ แนวนอนด้วยเกณฑ์กำหนด  $\pm 1000$  arcsec/50 m โครงสร้างรางตรง มีส่วนประกอบดังนี้



รูปที่ 3.9 โครงสร้างรางตรงระยะ 50 m และความตรงแนวตั้งและแนวนอน

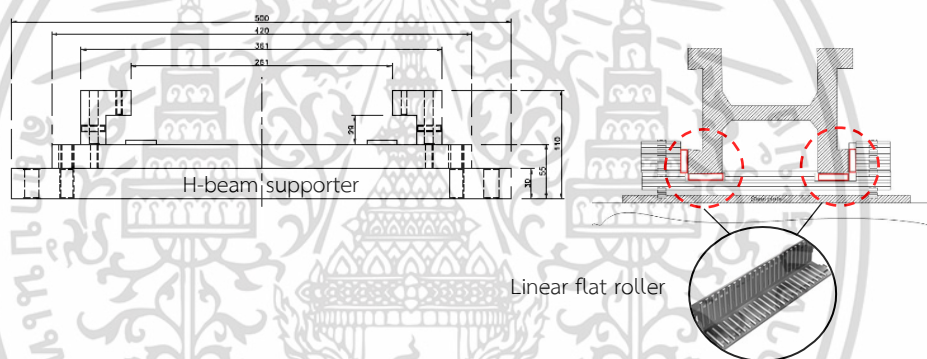
3.2.1.1 แท่นรูปทรงตัวเอช (H-shaped beams) ดังรูปที่ 3.10 การออกแบบแท่นรูปทรงตัวเอชวัสดุทำจากเหล็กชนิด FC300 ขนาด  $300 \times 4000 \times 145$  mm น้ำหนักประมาณ 800 kg จำนวน 12 แท่นและขนาด  $300 \times 2500 \times 145$  mm น้ำหนักประมาณ 600 kg จำนวน 1 แท่น รวมทั้งหมด 13 แท่น นำมาเชื่อมต่อกันความยาวรวมทั้งสิ้น 50.5 m แท่นรูปทรงตัวเอชได้ถูกพัฒนาจากรูปทรงเดิมแบบตัวไอ (I-shaped beams) จะได้แท่นแบบรูปทรงตัวเอชมีเสถียรภาพและความแข็งแรงทนทาน การปรับตั้งง่ายกว่ารูปทรงแบบเดิม ข้อมูลจากการทำแบบจำลองการเปลี่ยนรูปทรงด้วยโปรแกรม Solid work ใช้โหนดน้ำหนัก 70 kg มีการยุบตัวลงเพียง 0.001 ถึง 0.002 mm เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



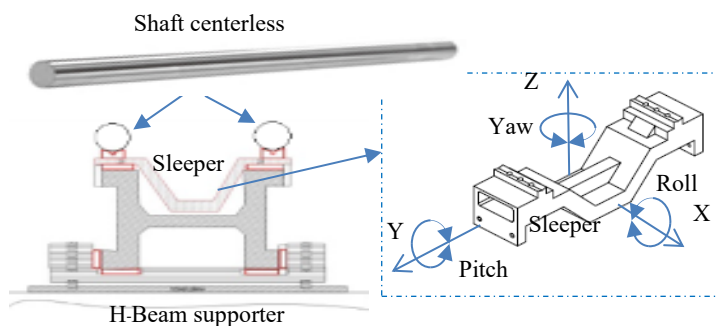
รูปที่ 3.10 การออกแบบแทนรูปทรงตัวเอช

3.2.1.2 **ฐานรองรับแทนรูปทรงตัวเอช (H-beam supporter)** รูปที่ 3.11 วัสดุทำจากเหล็ก ขนาด 200 x 420 x 20 mm จำนวน 51 ตัว เพื่อใช้ปรับความสูงต่างระดับของแทนรูปทรงตัวเอชให้อยู่ในช่วง  $\pm 1$  mm/50 m พร้อมรองรับด้วยแผ่นลิเนียร์ฟลัตโรลเลอร์ (Linear flat roller) สำหรับช่วยให้แทนไม่เปลี่ยนรูปทรงเมื่อมีการขยายตัวแบบอิสระเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง แทนเครื่องซึ่งถูกติดตั้งบนพื้นหินขัดคอนกรีตผิวเรียบขนาด 0.9 x 51 x 0.9 m



รูปที่ 3.11 ฐานรองรับแทนรูปทรงตัวเอช

3.2.1.3 **หมอนรองรางและเพลา (Sleepers and Shafts)** ด้านบนแทนรูปทรงตัวเอช วางด้วยหมอนรองราง ดังรูปที่ 3.12 (ขวา) แบบปรับระดับได้ 6 แกนองศาอิสระจำนวน 85 ตัว มีไว้สำหรับรองรับเพลากลมชนิดไร้ศูนย์กลาง (Centerless shaft) เพื่อให้มีการปรับความตรงได้อย่างอิสระ เส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm จำนวนข้างละ 17 ท่อน (ขนาดยาวท่อนละ 3 m จำนวน 16 ท่อน ขนาดยาวท่อนละ 2.5 m จำนวน 1 ท่อน) รวมความยาวทั้งหมด 50.5 m



รูปที่ 3.12 การออกแบบการวางเพลลาแทนรูปทรงตัวเอช (ซ้าย) และหมอนรองราง (ขวา)

เพื่อปรับระดับให้รางอยู่ช่วงการยอมได้  $\pm 0.1$  mm เพลากลมรองสายวัด ดังรูปที่ 3.13 (ซ้าย) ทำจากเหล็กกล้ารูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 mm หนา 50 mm จำนวน 85 ท่อน ยึดติดบนหมอนรองรางทุกตัวออกแบบเพื่อลดแรงเสียดทานระหว่างสายวัดกับฐานรองสายวัด เมื่อมีการชิงสายวัดขณะสอบเทียบด้วยตุ้มน้ำหนักขนาด 10 kg หรือตามมาตรฐาน OIML R35-1 และผู้ผลิตกำหนด ดังรูปที่ 3.12 (ขวา) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความยาวและชนิดของสายวัดมาตรฐาน



รูปที่ 3.13 เพลากลมรองสายวัดระยะ (ซ้าย) ตุ้มน้ำหนักสายวัด (ขวา)

3.2.2 ชุดหัววัดแบบรถขับเคลื่อน (Measuring probe carriage) ทำหน้าที่สำหรับวัดค่าความคลาดเคลื่อนของสายวัด ตามระยะที่กำหนดพร้อมส่งสัญญาณระบบการทำงานแบบไร้สายไปยังคอมพิวเตอร์ส่วนกลางเพื่อประมวลผล ตัวรถมีการออกแบบให้รับน้ำหนักได้ถึง  $20 \pm 5$  kg (น้ำหนักจริงรวม 17 kg) และประกอบด้วยตัวรถ กล้องดิจิทัล มอเตอร์กระแสตรง และเครื่องคอมพิวเตอร์ พร้อมแบตเตอรี่ลิเธียมไอออนส่งผ่านสัญญาณภาพและควบคุมการทำงานการขับเคลื่อนมอเตอร์ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. ตัวรถ ทำจากวัสดุอะลูมิเนียมเพื่อให้มีน้ำหนักเบา ขนาด  $400 \times 350 \times 30$  mm ด้านล่างของรถติดตั้งล้อเลื่อนแบบบอลเบริงชนิดเปิด (Ball bearing, Open type) จำนวน 3 ชุด พร้อมติดตั้งกระจกสะท้อนรีโทรฟิเคเตอร์ (Retroreflector) ไว้ด้านล่างตัวรถติดกับแท่นปรับตามแนวแกน XY

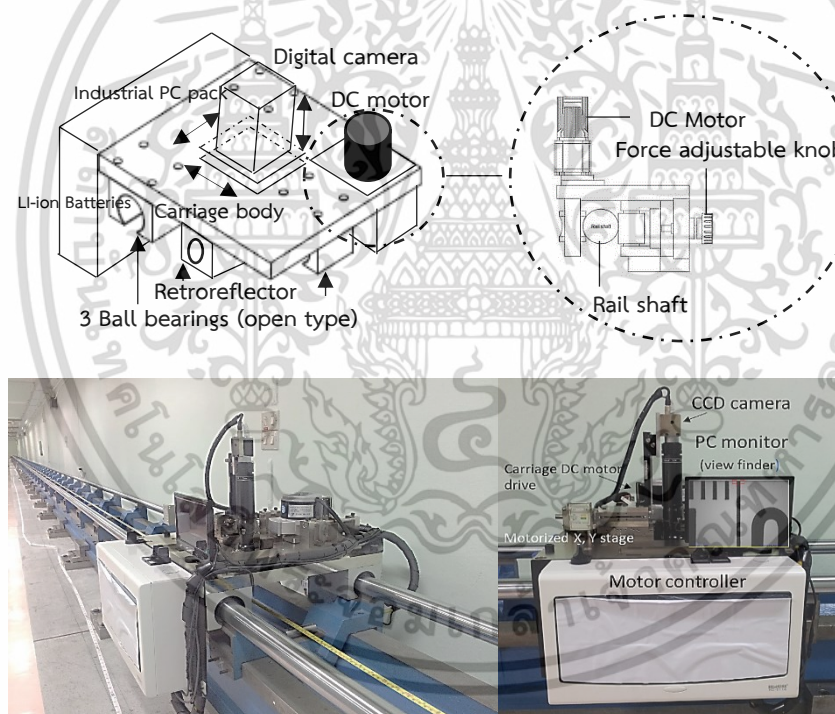
2. กล้องดิจิทัล ที่มีความละเอียดสูงพร้อมเลนส์ใช้ส่งขยายภาพตำแหน่งกึ่งกลางของขีดสเกลบนสายวัดระยะ เชื่อมต่ออินเตอร์เฟสแบบ GigE Vision เซ็นเซอร์ขนาด 0.67 mm ความละเอียด  $2448 \times 2048$  (5MP) เลนส์กำลังขยาย 10 เท่า ติดตั้งบนแท่นปรับตามแนวแกน XYZ (XYZ Motorized translator) แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. มอเตอร์กระแสตรง ทำหน้าที่ขับเคลื่อนตัวรถบนรางตรง มอเตอร์ขนาดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 24 V กระแส 5 ถึง 8 A และกำลังขับ 0.25 HP การออกแบบให้ล้อทั้งสามอยู่ในตำแหน่งอย่างสมมาตรกันเพื่อกระจายแรงกดให้สมดุลย์กันขณะขับเคลื่อนรถไปตามราง ดังรูปที่ 3.13 เป็นการออกแบบสมดุลย์แรงทั้งสามจุด โดยสองล้อแรกใช้เป็นตัวขับเคลื่อนส่วนอีกหนึ่งล้อใช้เป็นตัวปรับตั้งแรงกดเพื่อกำหนดแรงเสียดทาน ออกแบบให้รักษาแรงกดอย่างสมดุลย์ด้วยล้อสามล้อทำให้มีความเสถียรภาพดีมาก

4. เครื่องคอมพิวเตอร์ ขนาดเล็ก 200 x 250 x 50 mm น้ำหนักเบา 1.5 kg แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 12 V กระแส 2 A ทำหน้าที่ควบคุมการขับเคลื่อนมอเตอร์ วิเคราะห์ภาพจากกล้องดิจิทัล ส่งสัญญาณแบบไร้สาย (USB wifi router) และส่วนต่างๆ ไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ ส่วนกลางที่ควบคุมระบบทั้งหมด

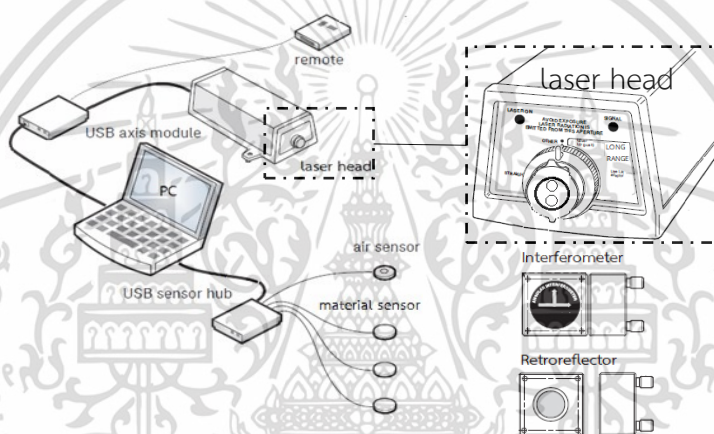
5. แบตเตอรี่แห้งชนิดลิเทียมไอออน ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ทั้งหมดบนรถ มีขนาดเล็กและเบาเพียง 50 x 100 x 80 mm และ น้ำหนัก 1 kg ตามลำดับ ขนาด 24 V สามารถจ่ายกระแสไฟสูงถึง 20 A ยาวนาน 1 ชั่วโมง ขณะมีโหลดสูงสุดเมื่อระดับแรงดันต่ำลง 20 % ระบบจะควบคุมให้หยุดการทำงานและเคลื่อนไปประจุไฟจากแท่นชาร์จเองโดยอัตโนมัติ



รูปที่ 3.14 ชุดหัววัดแบบรถขับเคลื่อน

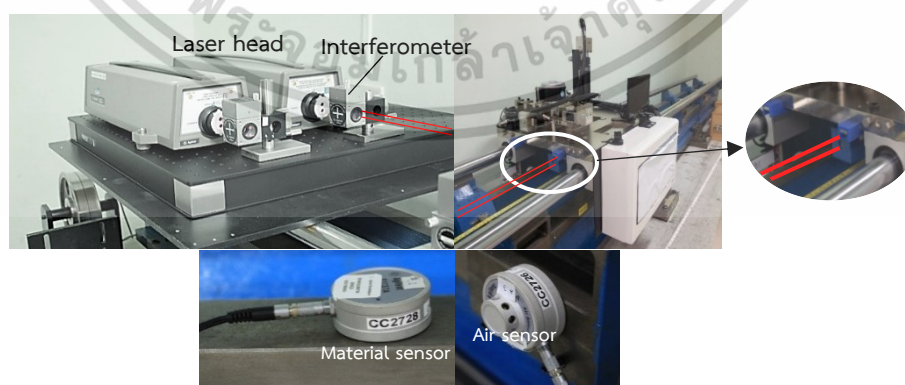
หลักการงานเครื่องคอมพิวเตอร์แบบอินดัสเทียล (Industrial PC) ที่ติดตั้งบนรถของชุดหัววัดแบบรถขับเคลื่อนจะรับคำสั่งจากเครื่องคอมพิวเตอร์ระบบควบคุมและประมวลผล (Controller and Processing system) เพื่อควบคุมการขับเคลื่อนความเร็วและตำแหน่ง ขณะเดียวกันก็ส่งสัญญาณภาพโดยผ่านการสื่อสารระยะไกลแบบไร้สาย ให้รถวิ่งไปหยุดยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ในโปรแกรมแล้วสัญญาณภาพจะถูกวิเคราะห์เพื่อประมวลผลการวัดร่วมกับชุดเลเซอร์อินเตอร์เฟียรอมิเตอร์วัดระยะแล้วบันทึกข้อมูลเก็บไว้ และระบบควบคุมและประมวลผล จะควบคุมและประสานงานกับชุดหัววัดแบบรถขับเคลื่อนไปยังระบบควบคุมตลอดการวัดทั้งหมดนั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.2.3 ชุดเลเซอร์อินเตอร์เฟียรอมิเตอร์ (Laser interferometer measurement system)** ทำหน้าที่เป็นเครื่องมือวัดอ้างอิงมาตรฐานของการวัดระยะ 0 ถึง 50 m ดังรูปที่ 3.15 ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ชนิด ฮีเลียม-นีออน (He-Ne laser) มีความยาวคลื่น 632.991354 (สุญญากาศ) หรือประมาณ 633 nm ความแม่นยำของความยาวคลื่น  $\pm 0.02$  ppm กำลังออกของลำแสงประมาณ 180  $\mu\text{w}$  เส้นผ่านศูนย์กลางลำแสง 2 และ 6 mm ในกรณีที่ใช้เลเซอร์อินเตอร์เฟียรอมิเตอร์เป็นมาตรฐานอ้างอิงที่ระยะการวัดถึง 50 m จำเป็นต้องใช้เลเซอร์วัดระยะแบบระยะไกลพิเศษ (Long range option) ชนิดที่วัดระยะได้ถึง 80 m จึงจะครอบคลุมระยะที่จะวัด ซึ่งปกติเลเซอร์แบบธรรมดา (Typical range) วัดระยะได้เพียง 20 ถึง 40 m เท่านั้น พร้อมมีการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Error compensation of temperature) ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดสภาวะแวดล้อมประกอบด้วยวัดสภาวะ (อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความกดอากาศ) อากาศ 1 ตัว และตรวจอุณหภูมิ(ชนิด pt 100) วัดถ 3 ตัว



รูปที่ 3.15 ชุดเลเซอร์อินเตอร์เฟียรอมิเตอร์และอุปกรณ์

การติดตั้งอุปกรณ์ชุดเลเซอร์อินเตอร์เฟียรอมิเตอร์ ดังรูปที่ 3.15 และ 3.16 ลำแสงจากหลอดเลเซอร์ ผ่านกระจกชุดอินเตอร์เฟียรอมิเตอร์ ไปยังกระจกสะท้อนหรือ รีโทรรีเฟลคเตอร์ ติดตั้งอยู่ด้านล่างรถขับเคลื่อน ณ ตำแหน่งใดๆ ที่ต้องการจะวัด



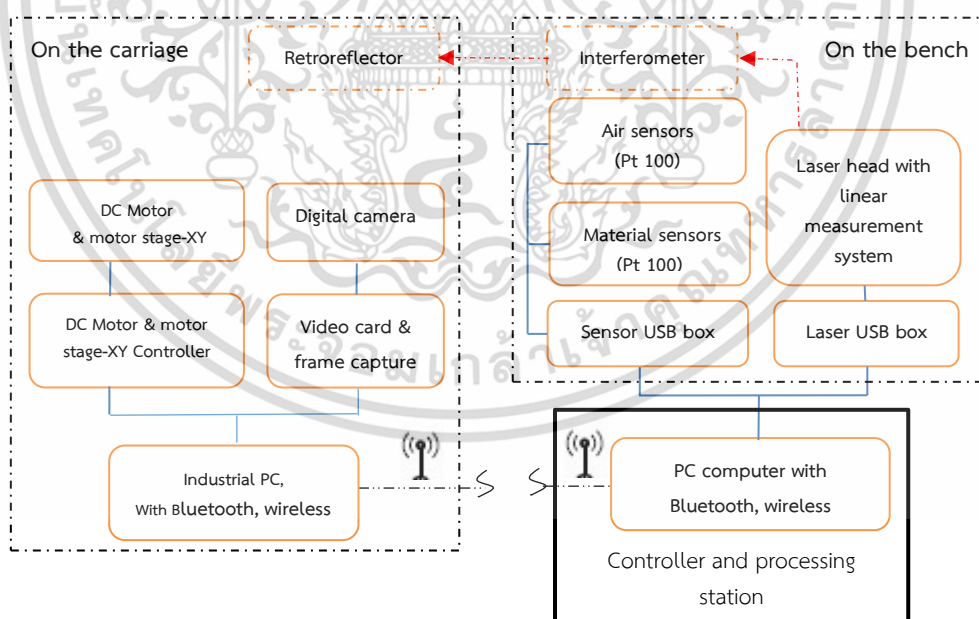
รูปที่ 3.16 การติดตั้งชุดเลเซอร์อินเตอร์เฟียรอมิเตอร์และตัวตรวจวัดอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**3.2.4 ระบบควบคุมและประมวลผลกลาง** เป็นส่วนสำคัญมากทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบการวัดทั้งหมด เช่น ความเร็วการเคลื่อนที่ และกำหนดตำแหน่งของชุดรถขับเคลื่อนบนรางตรง, วิเคราะห์ภาพและประมวลผล ดังแสดงรูปที่ 3.17 ผังการทำงานของระบบควบคุมและประมวลผลกลาง ประกอบด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ชุดรับ-ส่งสัญญาณแบบไร้สายบลูทูธ และโปรแกรมที่ห้องปฏิบัติการพัฒนาซอฟต์แวร์ขึ้นจากโปรแกรม LabVIEWs โดยมีขั้นตอนการทำงานอย่างง่ายตามลำดับดังนี้

1. เริ่มต้นทำงานเปิดสวิทช์ชุดควบคุมและประมวลผลกลาง และแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ (Laser head) เพื่ออุ่นเครื่องราว 30-60 นาที
2. เปิดสวิทช์ชุดหัววัดแบบรถขับเคลื่อน (Measuring probe carriage)
3. ป้อนคำสั่ง HOME ในโปรแกรมเพื่อให้ชุดหัววัดแบบรถขับเคลื่อนกลับมาที่จุดเริ่มต้นเตรียมพร้อมการวัดใหม่ (กรณีที่รถขับเคลื่อนไม่อยู่ที่ตำแหน่งจุดเริ่มต้น)
4. กำหนดตำแหน่งที่ต้องการวัด (Measuring point) และจำนวนครั้งที่วัดซ้ำลงในโปรแกรมแล้วป้อนคำสั่ง RUN
5. ระบบสอบเทียบสายวัดจะทำงานตามคำสั่งเมื่อเสร็จระบบจะประมวลผลและพิมพ์รายงานผลการวัด

การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน (Measurement error) ได้มาจากการเปรียบเทียบระยะของขีดสเกลของสายวัดระยะ (Measuring tape) กับระยะที่วัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียรอมิเตอร์ผลต่างก็คือค่าความคลาดเคลื่อนการวัดสายวัดระยะต่อจากนั้นโปรแกรมระบบควบคุมจะนำผลที่ได้ไปคำนวณพร้อมออกรายงานผลการโดยอัตโนมัติ



รูปที่ 3.17 ผังการทำงานของระบบควบคุมและประมวลผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

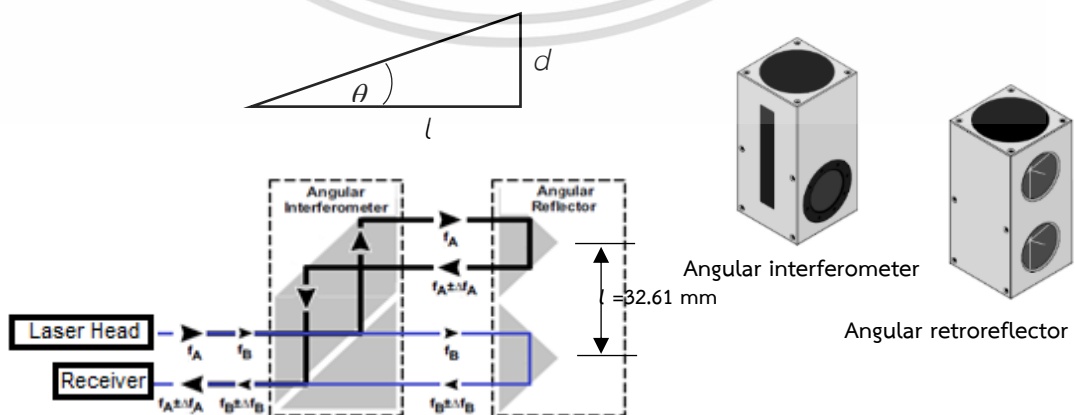
## บทที่ 4

### การวัดความตรงและการสอบเทียบสายวัดระยะ

การวัดความตรงดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ของร่างตรงในอุดมคติเป็นเส้นที่มีความตรงและไม่เบี่ยงเบนใดๆไปจากแนวเส้นตรงในระนาบแนวนอนนั้นเรียกว่าเป็นความตรงในแนวนอน (Horizontal straightness) หรือเรียกว่ายอร์ (Yaw) รอบแกน Z และการเบี่ยงเบนใดๆไปจากแนวเส้นตรงในระนาบแนวตั้งนั้นเรียกว่าเป็นความตรงในแนวตั้ง (Vertical straightness) หรือเรียกว่าพิท (Pitch) รอบแกน Y ดังนั้นความตรงจึงเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่นำมาใช้ประเมินสมรรถนะของเครื่องสอบเทียบสายวัดดังรายละเอียดการวัดพิทและยอร์ด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์หัวข้อต่อไป

#### 4.1 การวัดยอร์และพิทด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

หลักการวัดความคลาดเคลื่อนยอร์และพิทด้วยการมุมไซน์ (Sine angular measurement)  $\sin\theta = d/l$  เมื่อ  $d$  เป็นผลต่างของระยะที่ทำให้เกิดมุมและ  $l$  เป็นระยะคงที่ ด้วยชุดวัดมุมแบบอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ (Angular measurement system) ฟังก์ชันเป็นแบบลำแสงเลเซอร์ควบคุมเปรียบเสมือนว่าสองลำแสงเลเซอร์เกิดจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ (Laser head) ชนิดลำแสงเดี่ยวสองแหล่งกำเนิด (Double beam laser) หรือ แอ่งกูลาร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ (Angular interferometer) ผลต่างของสองชุดลำแสงเลเซอร์กับชุดกระจกสะท้อน ( $d$ ) ซึ่งชุดกระจกสะท้อนคู่ประกอบด้วยกระจกสะท้อนสองชุดยึดติดเข้าด้วยกันระยะห่าง 65.22 mm สองหารด้วยระยะห่างของกระจกทั้งสอง ( $l$ ) เท่ากับ 32.61 mm ติดตั้งกับรถขับเคลื่อนโดยใช้กระจกสะท้อนนี้เพื่อสะท้อนแสงเลเซอร์ทั้งสองกลับมายังแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์นั่นเอง ดังรูปที่ 4.1 มีเอาท์พุทสองค่า  $f_A \pm \Delta f_A$  และ  $f_B \pm \Delta f_B$  ออกมาจากชุดกระจกสะท้อนผลต่างทั้งด้านบนและล่าง คือค่ามุมพิทหรือยอร์ (Pitch or Yaw angle) เข้าสู่ตัวรับสัญญาณ (Receiver) เมื่อเชื่อมต่ออินเตอร์เฟซด้วยยูเอสบี (USB) และเครื่องคอมพิวเตอร์ ทั้งมุมยอร์และพิทจากชุดกระจกสะท้อนสามารถบันทึกการวัดได้ทันทีที่กระจกเคลื่อนที่แล้วหยุด คุณลักษณะเฉพาะของชุดวัดมุม  $\pm 10$  degree ความละเอียดการอ่าน 0.005 arcsec ความแม่นยำ  $\pm 0.2$  % ของค่าที่อ่านได้ วัดมุมทั้งพิทและยอร์ระยะ 0 ถึง 15 m

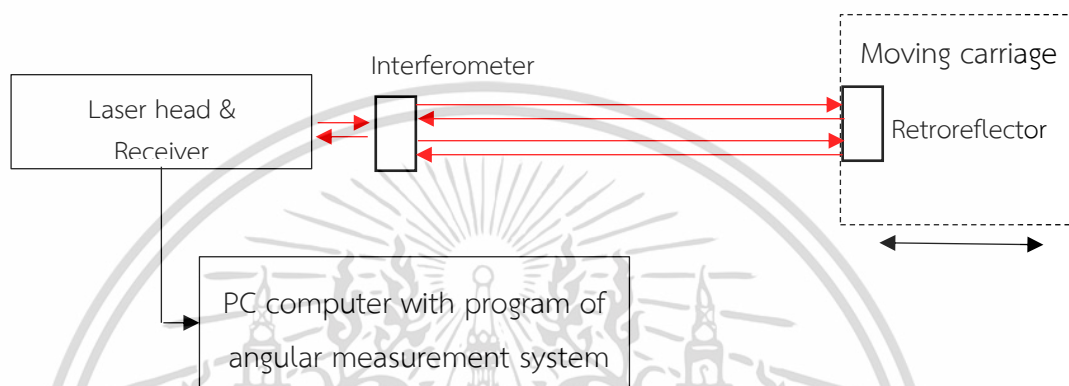


รูปที่ 4.1 ชุดเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์สำหรับวัดมุม (พิทและยอร์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยสำนักงานมาตรฐานแห่งชาติแห่งประเทศไทย ขอสงวนสิทธิ์ในชื่อและชื่อหน่วยงานในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดพิทและยอร์ด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ มีขั้นตอนดังนี้

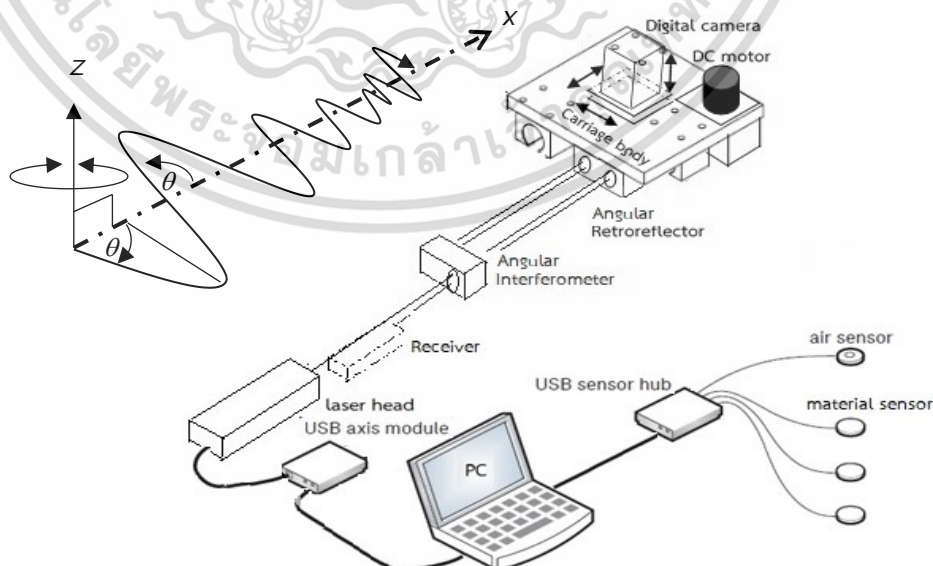
1. เตรียม ทำความสะอาด และติดตั้งอุปกรณ์ทางแสงประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงและตัวรับสัญญาณ ชุดอุปกรณ์ทางแสงได้แก่ อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ รีโทรรีเฟคเตอร์ และเครื่องคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 4.2
2. ปรับตั้ง (Alignment) ลำแสงเลเซอร์ตามขั้นตอนในข้อ 4.1.1 หรือตามคู่มือผู้ผลิต
3. กำหนดระยะที่จะวัดตามช่วง (Interval) ของระยะรถประมาณ 350 ถึง 450 mm
4. บันทึกผล



รูปที่ 4.2 ผังการทำงานและการวัดพิท และยอร์ด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

#### 4.1.1 การวัดความคลาดเคลื่อนยอร์ด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

วิธีการวัดมุมยอร์ (รอบแกน Z) ติดตั้งกระจกวัดมุมอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ (Angular interferometer) ในแนวนอนติดบนแท่นของรางและส่วนกระจกสะท้อน (Angular retroreflector) ติดตั้งในแนวนอนอยู่บนชุดรถขับเคลื่อน ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 มีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 4.3 การวัดยอร์และการติดตั้งอุปกรณ์ชุดเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



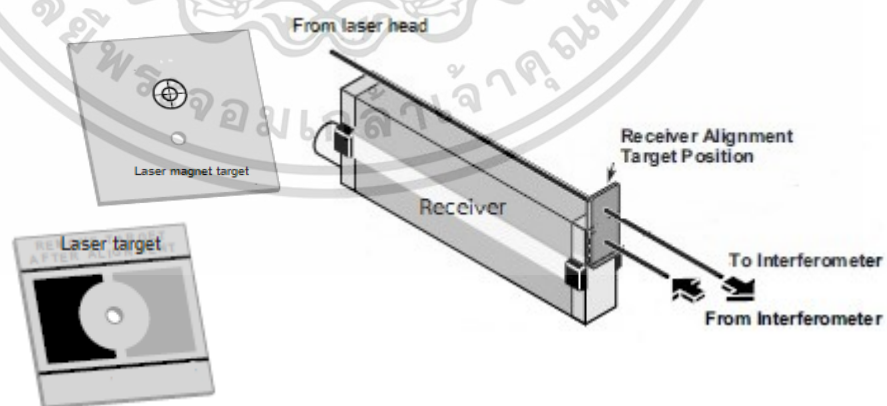
รูปที่ 4.4 การวัดความคลาดเคลื่อนของยอร์ด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

1. ขั้นตอนแรกการปรับตั้งเลเซอร์ (Laser alignment) เพื่อให้ตำแหน่งของลำแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดเลเซอร์ผ่านกระจกอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์และกระจกสะท้อนรีโทรเรเฟคเตอร์อยู่ในแนวเดียวกันตลอดระยะที่ต้องการจะวัด

2. ให้นำเป้าเลเซอร์แบบแผ่นแม่เหล็ก (Laser magnet target) ดังรูปที่ 4.5 (ซ้าย) ติดไว้ที่กระจกรีโทรเรเฟคเตอร์ที่ติดตั้งอยู่บนรถ ขณะปรับควรเคลื่อนรถเข้า-ออก จากตำแหน่งเริ่มต้นเป็นระยะสั้นๆ ประมาณ 1 ถึง 2 m ให้สังเกตตำแหน่งลำแสงเลเซอร์บนเป้าต้องอยู่ตำแหน่งเดิมไม่เคลื่อนที่

3. ให้เคลื่อนรถเข้า-ออกไปยังตำแหน่งระยะไกลออกไป 5 ถึง 10 m ตำแหน่งของลำแสงเลเซอร์ต้องไม่เปลี่ยนแปลง สังเกตที่สัญญาณไฟวัดระดับความแรงของแสงเลเซอร์ (Beam strength) ที่ตัวรับสัญญาณ (Receiver) ดังรูปที่ 4.5 (ขวา) ต้องติดสว่างตลอดระยะที่ต้องการจะวัด

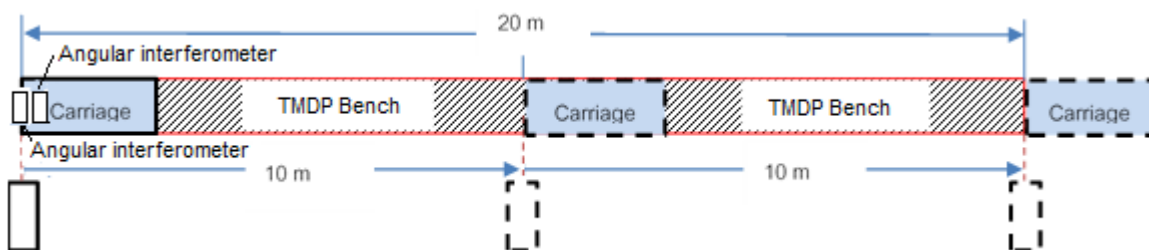
4. กรณีที่มีช่วงใดช่วงหนึ่งของระยะที่จะวัดที่มีสัญญาณไฟวัดระดับความแรงของแสงเลเซอร์กระพริบ(ติดๆดับๆ) แสดงว่าการปรับตั้งยังไม่เสร็จสมบูรณ์ต้องทำการปรับตั้งใหม่ ให้ปรับตั้งกระจกจนกว่าสัญญาณไฟวัดระดับความแรงของแสงเลเซอร์จะต้องติดสว่างตลอดระยะที่ต้องการจะวัดแสดงว่าการปรับตั้งเสร็จสมบูรณ์ (Good alignment) รายละเอียดการปรับตั้งอ่านเพิ่มเติมในคู่มือของผู้ผลิตประกอบ



รูปที่ 4.5 เป้าเลเซอร์ (ซ้าย) และตัวรับสัญญาณ (ขวา)

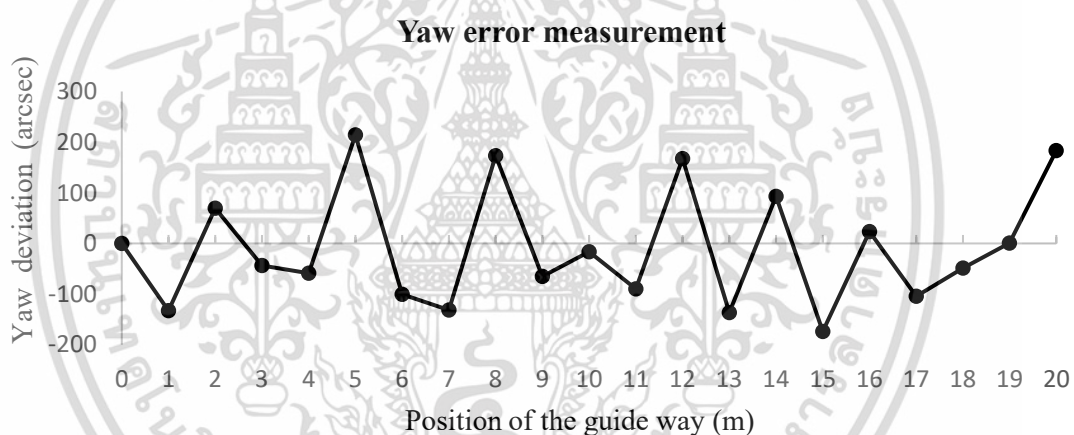
5. ด้วยข้อจำกัดทางเทคนิคและคุณลักษณะเฉพาะของผู้ผลิตทำให้ชุดวัดมุม (Angular measurement system) ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น จึงทำให้ไม่สามารถวัดค่าความคลาดเคลื่อนยอร์ได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่อเนื่องตลอดระยะ 20 m ห้องปฏิบัติการต้องออกแบบการวัดยอว์โดยการวัดเป็นช่วงๆละ 10 m แล้วนำผลการวัดยอว์มาพิจารณาค่าสูงสุดตลอดช่วงการวัด ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 การออกแบบการวัดยอว์ด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียรอมิเตอร์

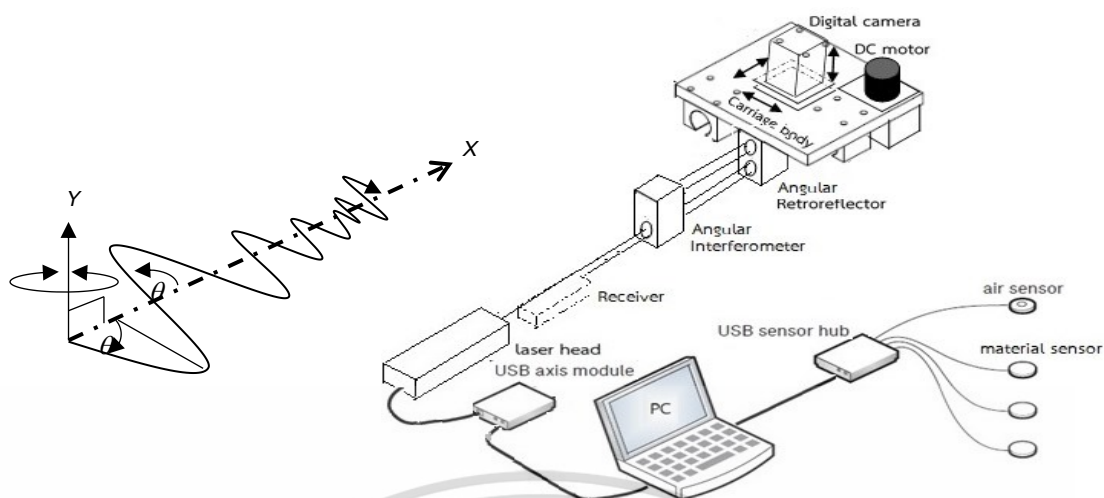
ผลการวัดยอว์ได้ทั้งหมดนำมาทำข้อมูลรวมกันและพล็อตกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.7 ได้ค่าเบี่ยงเบนของความคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 388 arcsec ตลอดช่วงระยะ 20 m



รูปที่ 4.7 การวัดความคลาดเคลื่อนยอว์โดยใช้เลเซอร์อินเตอร์เฟียรอมิเตอร์

#### 4.1.2 การวัดความคลาดเคลื่อนพิทด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียรอมิเตอร์

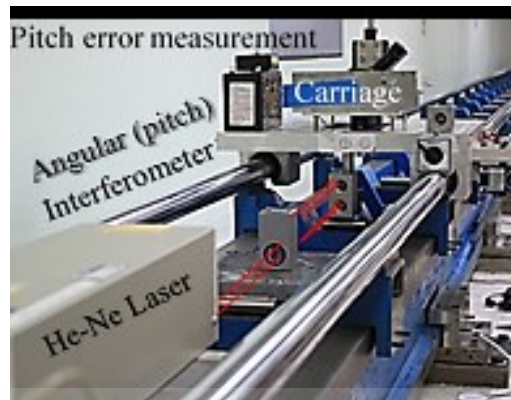
วิธีการวัดมุมพิท (รอบแกน Y) ติดตั้งกระจกอินเตอร์เฟียรอมิเตอร์ (Angular interferometer) ในแนวตั้งบนแท่นของรางตรงและส่วนกระจกสะท้อน (Angular retroreflector) ติดตั้งอยู่บนชุดรถขับเคลื่อน ดังรูปที่ 4.8 มีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 4.8 การวัดพิทและการติดตั้งอุปกรณ์ชุดเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

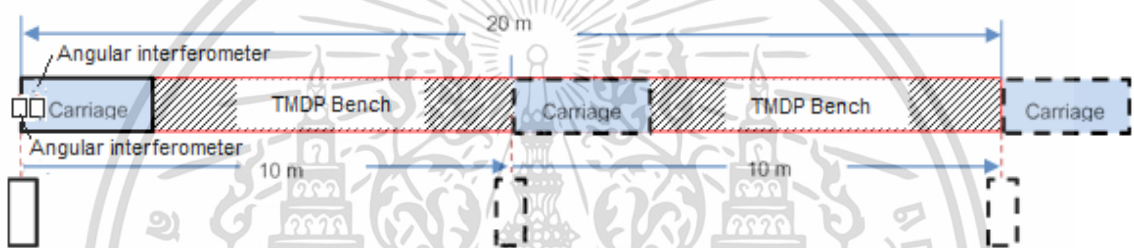
1. ขั้นตอนแรกการปรับตั้งเลเซอร์ (Laser alignment) เพื่อให้ตำแหน่งของลำแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ผ่านกระจกอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่ติดตั้งบนแท่นและไปยังกระจกสะท้อนรีโทรเรฟเลคเตอร์ให้อยู่ในแนวเดียวกันตลอดระยะที่ต้องการจะวัด
2. ให้นำเป้าเลเซอร์แบบแผ่นแม่เหล็ก (Laser magnet target) ติดไว้ที่กระจกรีโทรเรฟเลคเตอร์ที่ติดตั้งอยู่บนรถ ขณะปรับครเคลื่อนรถเข้า-ออก จากตำแหน่งเริ่มต้นเป็นระยะสั้นๆ ประมาณ 1-2 m ให้สังเกตตำแหน่งลำแสงเลเซอร์บนเป้าต้องอยู่ตำแหน่งเดิมไม่เคลื่อนที่
3. ให้เคลื่อนรถเข้า-ออกไปยังตำแหน่งระยะไกลออกไป 5 ถึง 10 m ตำแหน่งของลำแสงเลเซอร์ต้องไม่เปลี่ยนแปลง สังเกตที่สัญญาณไฟวัดระดับความแรงของแสงเลเซอร์ (Beam strength) ที่ตัวรับสัญญาณต้องติดสว่างตลอดระยะที่ต้องการจะวัด
4. กรณีที่มีช่วงใดช่วงหนึ่งของระยะที่จะวัดที่มีสัญญาณไฟวัดระดับความแรงของแสงเลเซอร์กระพริบ (ติดๆดับๆ) แสดงว่าการปรับตั้งยังเสร็จสมบูรณ์ต้องทำการปรับตั้งใหม่ ให้ปรับตั้งกระจกจนกว่าสัญญาณไฟวัดระดับความแรงของแสงเลเซอร์จะต้องติดสว่างตลอดระยะที่ต้องการจะวัดแสดงว่าการปรับตั้งเสร็จสมบูรณ์ (Good alignment) รายละเอียดการปรับตั้งอ่านเพิ่มเติมในคู่มือประกอบ
5. ด้วยข้อจำกัดทางเทคนิคและคุณลักษณะเฉพาะของผู้ผลิตทำให้ชุดวัดมุม (Angular measurement system) ดังกล่าวมาแล้วข้างต้น จึงทำให้ไม่สามารถวัดค่าความคลาดเคลื่อนพิทได้ต่อเนื่องตลอดระยะ 20 m เช่นเดียวกันกับการวัดมุมยอร์ ห้องปฏิบัติการต้องออกแบบการวัดพิทโดยการวัดเป็นช่วงๆละ 10 m แล้วนำผลการวัดพิทมาพิจารณาค่าสูงสุดตลอดช่วงการวัด ดังรูปที่ 4.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



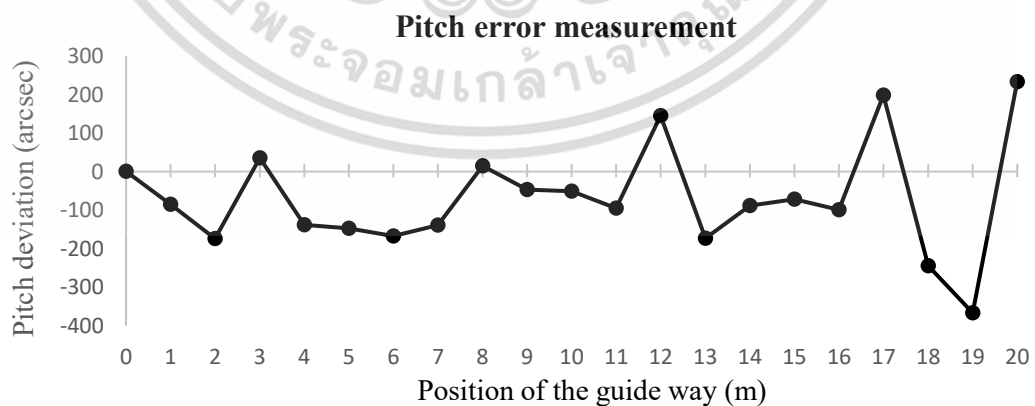
รูปที่ 4.9 การวัดความคลาดเคลื่อนของพิทด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียรอมิเตอร์

แม้ว่าช่วงการวัดมมมีข้อจำกัดด้วยคุณลักษณะเฉพาะของผู้ผลิตแต่ก็สามารถออกแบบให้รวบรวมข้อมูลสำหรับสองช่วงการวัดโดยแต่ละช่วงๆละ 10 m ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การออกแบบการวัดพิทด้วยชุดเลเซอร์อินเตอร์เฟียรอมิเตอร์

ผลการวัดพิทที่ได้ทั้งหมดนำมาทำข้อมูลรวมกันและพล็อตกราฟดังแสดงในรูปที่ 4.11 ค่าเบี่ยงเบนของความคลาดเคลื่อนสูงสุดประมาณ 600 arcsec ตลอดช่วงระยะ 20 m

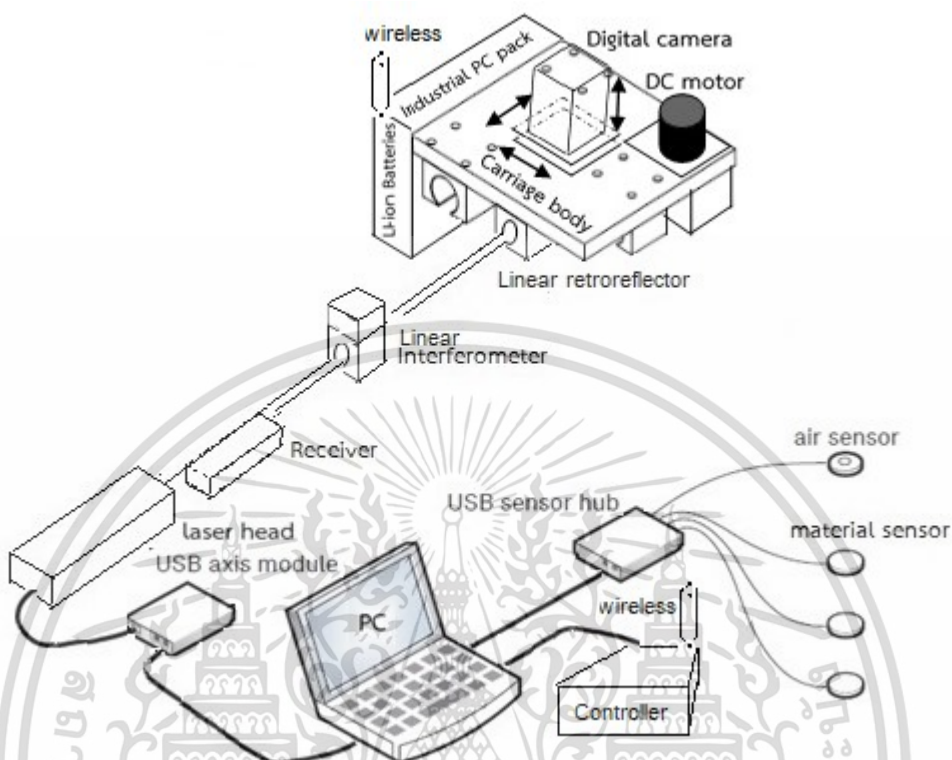


รูปที่ 4.11 การวัดความคลาดเคลื่อนพิทโดยใช้เลเซอร์อินเตอร์เฟียรอมิเตอร์

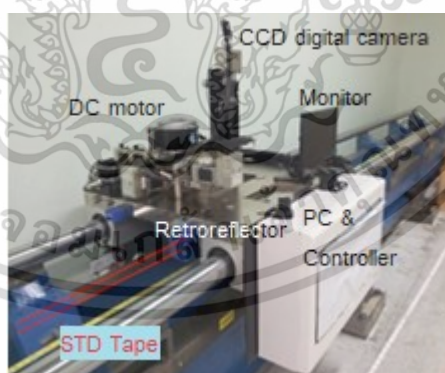
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การสอบเทียบสายวัดระยะ

ขั้นตอนการสอบเทียบสายวัดมาตรฐานด้วยระบบสอบเทียบสายวัดมีดังนี้



รูปที่ 4.12 การวัดระยะแบบเชิงเส้นและการติดตั้งอุปกรณ์ชุดลิเนียร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์



รูปที่ 4.13 การสอบเทียบสายวัดด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

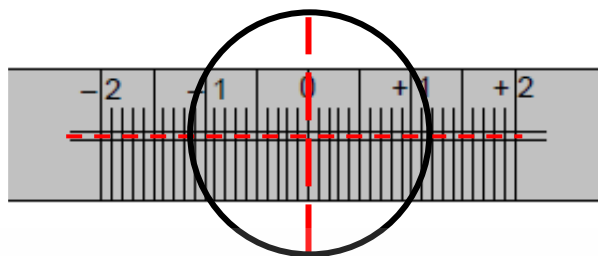
### 4.2.1 วิธีการเตรียมและติดตั้งเครื่องมือและสายวัด

1. การเตรียม ทำความสะอาดสายวัด การถ่วงสายวัดระยะมาตรฐานทำโดยการพาดสายวัดไปบนวงล้อลอคที่ติดตั้งอยู่ที่ปลายทั้งสองเครื่องสอบเทียบสายวัด ซึ่งสายวัดจะต้องชั่งด้วยตุ้มน้ำหนักขนาดตามที่ผู้ผลิตหรือกำหนดไว้ในมาตรฐาน ได้แก่ OIML Recommendation ที่ปลายของสายวัด

ระยะจะถูกกำหนดแรงดึงขนาด 10 kgf โดยถ่วงด้วยตุ้มน้ำหนักชนิดสแตนเลสสตีล [13,14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ และอยู่ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานที่ปรากฏในเอกสารฉบับนี้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

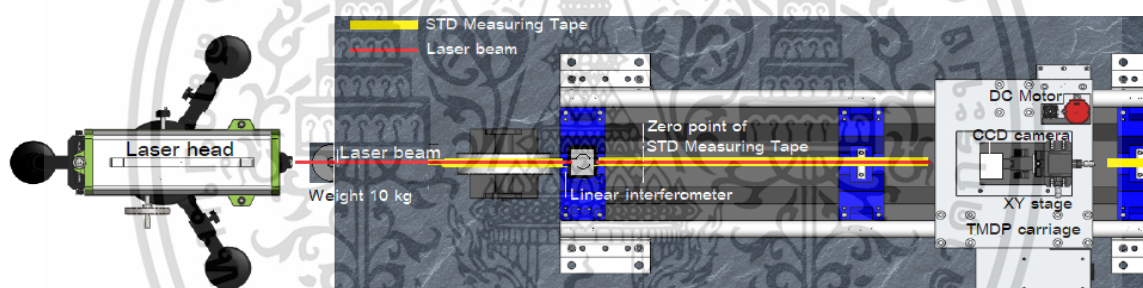
2. ปรับตั้งสายวัดให้อยู่แนวเดียวกับกล้องตลอดช่วงการวัดก่อน สังเกตเครื่องหมายกากบาทตั้งอยู่ในแนวเดียวกับเส้นที่อยู่บนสายวัด ดังรูปที่ 4.14 เพื่อป้องกันการเกิดค่าความคลาดเคลื่อนชนิดโคซายน์



รูปที่ 4.14 การปรับตั้งสายวัด

3. ปรับตั้งรถขับเคลื่อนศูนย์ที่จุดเริ่มต้น จากนั้นก็วัดไปตามลำดับไปถึงจุดที่กำหนด ลำดับขั้นตอนต่างๆจะถูกวัดซ้ำเมื่อวัดกลับมาอยู่ที่จุดเริ่มต้น

4. ควบคุมสภาวะอุณหภูมิห้องปฏิบัติการ  $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$  ความแปรปรวนของอากาศสูงสุด 1 ถึง  $2^{\circ}\text{C}$  ความชื้นสัมพัทธ์  $50 \pm 10\%$  ดังรูปที่ 4.15



Controlled temperature  $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ , Relative Humidity  $50 \pm 10\%$

รูปที่ 4.15 การควบคุมสภาวะอุณหภูมิห้องปฏิบัติการ

#### 4.2.2 ขั้นตอนการสอบเทียบสายวัดมาตรฐานด้วยระบบสอบเทียบสายวัด

ขั้นตอนประกอบด้วยส่วนเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์และชุดควบคุมและประมวลผลมีรายละเอียดดังนี้

1. ขั้นตอนแรกเปิดแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์อุ่นเครื่องเพื่อให้เกิดความเสถียรภาพอย่างน้อย 1 ชั่วโมง หลังจากที่ไฟแสดงความพร้อม (Ready) สีเขียวติดสว่างเพื่อความเสถียรภาพ ในกรณีที่ไฟแสดงความพร้อมยังกระพริบอยู่แสดงว่าหลอดเลเซอร์ยังไม่พร้อมใช้งานอาจมีผลทำให้ค่าเกิดความผิดพลาดได้

2. ตรวจสอบการปรับตั้งเลเซอร์ (Laser re-alignment) ก่อนทำการสอบเทียบทุกครั้ง เพื่อให้แน่ใจว่าตำแหน่งของลำแสงเลเซอร์จากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ผ่านกระจกอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่ติดตั้งบนแท่นไปยังกระจกสะท้อนรีโทรเรเฟลคเตอร์ต้องอยู่ในแนวเดียวกันตลอดช่วงระยะที่ต้องการจะวัด

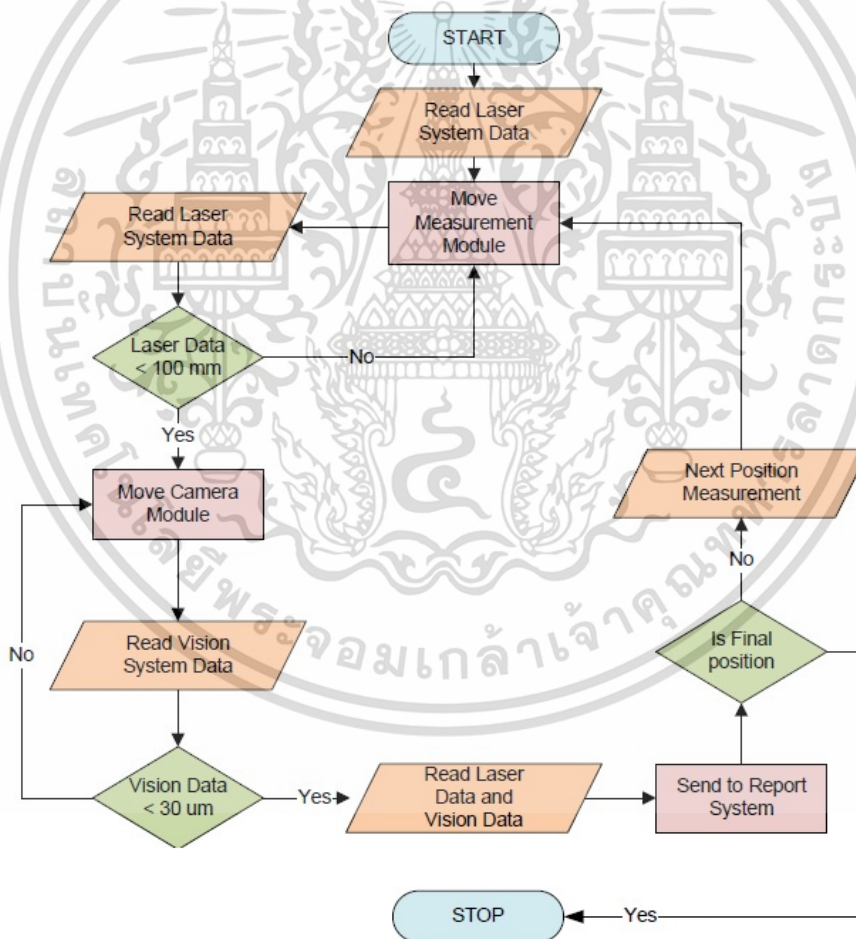
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 ให้นำเป้าเลเซอร์แบบแผ่นแม่เหล็ก (Laser magnet target) ติดไว้ที่กระจกหรือโพรซีเพคเตอร์ที่ติดตั้งอยู่บนรถ ขณะปรับจูนเคลื่อนรถเข้า-ออก จากตำแหน่งเริ่มต้นเป็นระยะสั้นๆ ประมาณ 1-2 m ให้สังเกตตำแหน่งลำแสงเลเซอร์บนเป้าต้องอยู่ตำแหน่งเดิมไม่เคลื่อนที่

2.2 ให้เคลื่อนรถเข้า-ออกไปยังตำแหน่งระยะไกลออกไป 0 ถึง 20 m ตำแหน่งของลำแสงเลเซอร์ต้องไม่เปลี่ยนแปลง สังเกตที่สัญญาณไฟวัดระดับความแรงของแสงเลเซอร์ ที่ตัวรับสัญญาณต้องติดสว่างตลอดระยะที่ต้องการจะวัด

2.3 กรณีที่มีช่วงใดช่วงหนึ่งของระยะที่จะวัดที่มีสัญญาณไฟวัดระดับความแรงของแสงเลเซอร์กระพริบ แสดงว่าการปรับตั้งยังเสร็จสมบูรณ์ต้องทำการปรับตั้งใหม่ ให้ปรับตั้งกระจกจนกว่าสัญญาณไฟวัดระดับความแรงของแสงเลเซอร์จะต้องติดสว่างตลอดระยะที่ต้องการจะวัดแสดงว่าการปรับตั้งเสร็จสมบูรณ์ (Good alignment) รายละเอียดการปรับตั้งอ่านเพิ่มเติมในคู่มือประกอบ

4.2.3. การทำงานของระบบควบคุมและประมวลผล ตามแผนภูมิของรูปที่ 4.16 มีขั้นตอนดังนี้



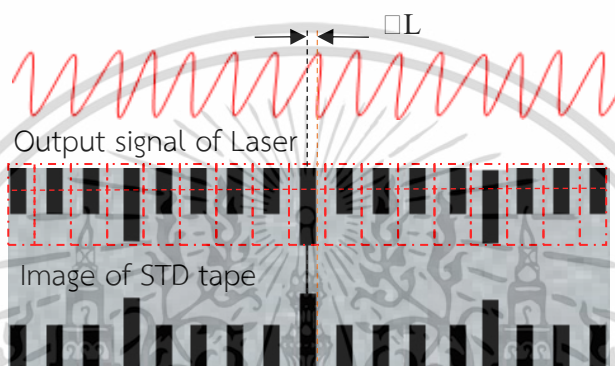
รูปที่ 4.16 แผนภูมิการทำงานของชุดโปรแกรมควบคุมและประมวลผล

1. เริ่มการทำงานมอเตอร์จะได้รับคำสั่งให้เคลื่อนรถและเมื่อชุดเลเซอร์อินเตอร์เฟียรอมิเตอร์แสดงเป็นตัวเลขวัดระยะใกล้ถึงตำแหน่งที่คำสั่งกำหนดหรือจุดที่จะวัด (Measuring point) เพิ่มขึ้นที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ละ 1 m ไปถึง 10 m และ เพิ่มขึ้นทีละ 5 m ตั้งแต่ 10 m ไปถึง 20 m และขึ้นอยู่กับความต้องการของลูกค้า ตำแหน่งเริ่มต้นและจุดสิ้นสุด จำนวน  $n$  ครั้ง และช่วงระยะการวัดถูกป้อนลงในโปรแกรมมอเตอร์จะได้รับคำสั่งให้ชะลอความเร็วลงแบบ deceleration และ หยุดรถก่อนตำแหน่งที่คำสั่งในโปรแกรมกำหนด

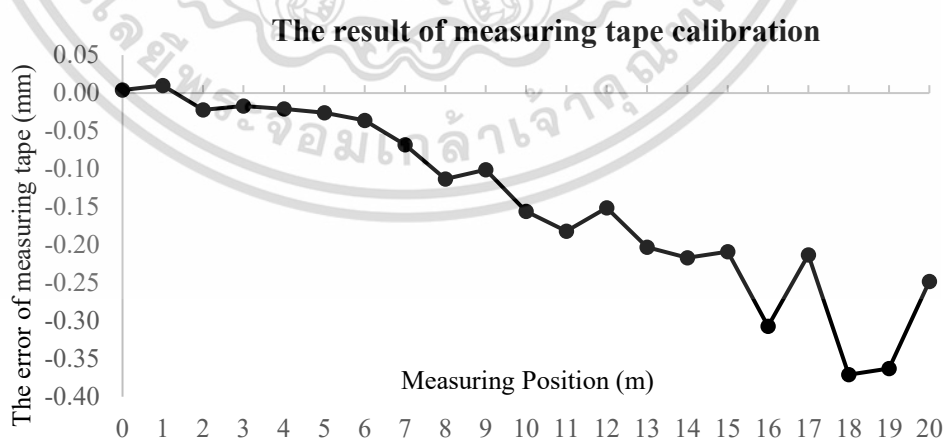
2. กล้องดิจิตอลจะได้รับคำสั่งให้บันทึกภาพ (Frame capture) ก่อนและหลังตำแหน่งที่คำสั่งโปรแกรมระบุช่วงประมาณ  $\pm 100$  mm

3. ซิตสเกลที่ถูกบันทึกภาพไว้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณเอาต์พุทของเลเซอร์โดยตรง และระยะที่อ่านเลเซอร์จะสัมพันธ์กับตำแหน่งกากบาท (Cross mark) กึ่งกลางของซิตสเกล ได้ผลลัพธ์เป็นผลต่างของระยะทั้งสอง ( $\square L$ ) ที่เปรียบเทียบกัน ดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 การวิเคราะห์ผลการวัดจากการเปรียบเทียบสัญญาณเอาต์พุทของเลเซอร์กับสัญญาณภาพ

3.4 เมื่อวัดถึงตำแหน่งสุดท้ายตามที่ได้ตั้งโปรแกรมการวัดไว้ระบบควบคุมจะสั่งให้มอเตอร์จะเคลื่อนรถกลับไปจุดเริ่มต้น (Home) แล้ววัดซ้ำใหม่ตามขั้นตอนตั้งแต่หัวข้อ 3.1 ถึง 3.4 จนครบตามจำนวนครั้งที่ตั้งโปรแกรมไว้เป็นการสิ้นสุดการวัด ระบบจะประมวลผลพร้อมรายงานผลการวัดดังกราฟรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ผลการสอบเทียบสายวัดมาตรฐานที่ระยะ 20 m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# การประเมินค่าความไม่แน่นอนการวัด

### 5.1 หลักการประเมินค่าความไม่แน่นอน

หลักการประเมินค่าความไม่แน่นอนการสอบเทียบสายวัดมาตรฐานนั้นใช้หลักการประเมินเชิงสถิติในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ ตามเอกสารมาตรฐานของ GUM ประกอบด้วยหัวข้อต่อไปนี้

**5.1.1 ค่าเฉลี่ยของการวัด ( $\bar{X}$ )** พิจารณาจากผลรวมของการวัดทั้งหมดหารด้วยจำนวนครั้งที่วัด( $n$ ) ดังสมการที่ 5.1 เมื่อค่าวัดใดๆ ( $x_i$ ) ที่  $x_i = 1, 2, 3, \dots, n$  พิจารณาผลรวมการวัดนั้นจะได้ค่าเป็นดังสมการที่ 5.1 และ ค่าเฉลี่ยของการวัด ดังสมการที่ 5.2

$$\sum_{i=1}^n x_i = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n \quad (5.1)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i)}{n} \quad (5.2)$$

**5.1.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ( $\sigma_{n-1}$ )** ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการวัดเป็นค่าเฉลี่ยรากที่สองของผลรวมของผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ย ( $\bar{X}$ ) กับค่าวัดใดๆ ( $x_i$ ) ดังสมการที่ 5.4 ต่อไปนี้

เมื่อ 
$$\sum_{i=1}^n (\bar{X} - x_i)^2 = (\bar{X} - x_1)^2 + (\bar{X} - x_2)^2 + \dots + (\bar{X} - x_n)^2 \quad (5.3)$$

ดังนั้น

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - x_i)^2}{n-1}} \quad (5.4)$$

**5.1.3 ค่าความไม่แน่นอนชนิดเอ ( $u_a$ )** เป็นผลจากความคลาดเคลื่อนของการสุ่มการวัด (Random error) ได้จากการนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ( $\sigma_{n-1}$ ) ของการวัดมาเฉลี่ยด้วยรากที่สอง (Square root) ของจำนวนครั้งที่วัดหรือค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ย (Standard deviation of mean) เราเรียกตามจากแหล่งที่มาของการวัดว่า การวัดซ้ำได้ (Repeatability) ดังสมการที่ 5.5

$$u_a = u(x_i) = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}} \quad (5.5)$$

**5.1.4 การแจกแจงความน่าจะเป็น** เมื่อพิจารณาการแจกแจงความน่าจะเป็นจากพื้นที่ใต้กราฟทั้งหมดคิดเป็นร้อยละ 100 หรือ  $P_{(x)} = 1$  เป็นที่ทราบกันอยู่แล้วว่าการอินทิเกรท พื้นที่ใต้กราฟช่วงตั้งแต่  $\pm\sigma$ ,  $\pm 2\sigma$ , และ  $\pm 3\sigma$  จะได้  $P_{(x)}$  เท่ากับ 68.27 (68 %), 95.45 (95 %), และ 99.73 (99 %) ตามลำดับ การแจกแจงความน่าจะเป็นมีส่วนเกี่ยวข้องและสำคัญกับกระบวนการวัดเป็นอย่างมาก ณ ที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการแจกแจงความน่าจะเป็นที่ อาจเกี่ยวข้องเท่านั้น ได้แก่ การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า และสามเหลี่ยม ดังรายละเอียดตามหัวข้อต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเชิงหนึ่งเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**5.1.4.1 การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบปกติ** โดยทั่วไปการวัดที่มีความสมบูรณ์จัดให้มีลักษณะโค้งแบบระฆังคว่ำ โดยมีความสมมาตรกันทั้งด้านบวกและลบ ดังรูปที่ 5.1 การแจกแจงดังกล่าวได้แก่ การวัดซ้ำได้ ซึ่งมีความสัมพันธ์ต่อจำนวนครั้งของการวัดด้วย หากว่าจำนวนครั้งการวัดมากโอกาสความน่าจะเป็นจะเข้าสู่อนันต์ก็จะยิ่งมากตามไปด้วย หรือเป็นค่าความแปรปรวน (Variance,  $\sigma^2$ ) ของการวัดนั่นเอง ดังสมการที่ 5.6

$$\text{เมื่อ } P_{(x)} = \frac{e^{-(x-\bar{x})^2/2\sigma^2}}{\sigma\sqrt{2\pi}}$$

$$\text{ดังนั้น } \sigma^2 = \int_{-\sigma}^{+\sigma} P_{(x)} dx \quad (5.6)$$

**5.1.4.2 การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า** พิจารณาการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังรูปที่ 5.2 เป็นปริมาณที่ขอบเขตชัดเจนไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการวัดด้วยความแปรปรวนดังสมการที่ 5.8 ประเภทค่าความไม่แน่นอนของการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังกล่าวได้แก่ เกณฑ์การยอมรับ ความแม่นยำการวัด และความละเอียดการอ่าน (Resolution) เป็นต้น

$$\sigma^2 = \int_{-a}^{+a} P_{(x)} \cdot (x-\bar{x})^2 dx \quad (5.7)$$

**5.1.4.3 ความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบสามเหลี่ยม** พิจารณาการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสามเหลี่ยมดังรูปที่ 5.3 ด้วยความแปรปรวนดังสมการที่ 5.8 ประเภทค่าความไม่แน่นอนของการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการแจกแจงดังกล่าวต้องมีความชัดเจนเชิงข้อมูลและรูปธรรม ได้แก่ การควบคุมอุณหภูมิ (Controlled temperature) เป็นต้น

$$\sigma^2 = \int_{-a}^{+a} \frac{(a-x)}{a^2} \cdot (x-\bar{x})^2 dx \quad (5.8)$$

เมื่อ  $P_{(x)} = \frac{(a-x)}{a^2}$  กรณีที่พิจารณาด้านเดียวก็กำหนดให้  $\bar{x} = 0$  คงเหลือเทอม  $x^2$  เท่านั้น

### 5.1.5 ค่าความไม่แน่นอนชนิดบี ( $u_b$ )

เป็นค่าความไม่แน่นอนที่ได้จากค่าความคลาดเคลื่อนของระบบการวัด ทั้งหมดมารวมกันแบบรากที่สองของแต่ละปริมาณยกกำลังสอง (Root sum square) กล่าวคือนำค่าความไม่แน่นอนจากแหล่งต่างๆ ที่พิจารณาได้มายกกำลังสองแล้วบวกกันแล้วถอดรากที่สองของผลบวกก็จะได้ค่าความไม่แน่นอนชนิดบีจะเป็น  $u_b^2 = u_{b1}^2 + u_{b2}^2 + \dots + u_n^2$  หรือสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 5.9

$$u_b = \sqrt{u_{b1}^2 + u_{b2}^2 + \dots + u_{bn}^2} \quad (5.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.6 ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน ( $u_i$ )

การรวมค่าความไม่แน่นอนชนิดต่างๆเข้าด้วยกันนั้น เนื่องจากค่าความไม่แน่นอนดังกล่าวมาจากคนละแหล่งที่มา ดังนั้นควรพิจารณาก่อนว่าค่าความไม่แน่นอนชนิดใดๆนั้นต้องเป็นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานเท่านั้น หากว่าไม่ใช่ความไม่แน่นอนมาตรฐานต้องแปลงให้เป็นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 68 % ก่อนเสมอ ดังกรณีตัวอย่างต่อไปนี้

1. ค่าความละเอียดการอ่านของเครื่องมือวัด ต้องแปลงค่าความละเอียดการอ่านให้อยู่ในรูปของค่าความไม่แน่นอน โดยสังเกตเครื่องหมายบวกลบ ( $\pm$ ) ให้ทำ semi-range โดยการหารด้วยสองโดยแบ่งออกเป็นช่วงบวกและลบก่อน ( $u_{res}$ ) ต่อมาแปลงให้เป็นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน กรณีนี้เป็นการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมให้หารด้วย  $\sqrt{3}$  ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของการแจกแจง

2. ค่าความไม่แน่นอนจากใบรับรองผลการสอบเทียบ ( $u_{STD}$ ) ที่ระดับความเชื่อมั่นไว้ที่ 95 % วิธีการแปลงให้เป็นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน ( $u_{STD}/k$ ) กรณีนี้พิจารณาเป็นการแจกแจงแบบปกติให้หารด้วย 2 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่า  $k$  ของใบรับรองนั้น

### 5.1.7 ค่าความไม่แน่นอนรวม ( $u_c$ )

ได้จากแบบรูปที่สองของผลรวมระหว่างค่าความไม่แน่นอนชนิดแยกกำลังสองกับ ค่าความไม่แน่นอนชนิดพิกกำลังสองจะได้เป็น  $u_c^2 = u_a^2 + u_b^2$  หรือสามารถเขียนใหม่ดังสมการที่ 5.10 ที่ระดับความเชื่อมั่น 68 %

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \quad (5.10)$$

### 5.1.8 ค่าความไม่แน่นอนขยาย ( $u_{ex}$ )

การคำนวณหาค่า  $k_p$  (Coverage factor) ขององศาอิสระ  $v_{eff}$  ดังสมการที่ 5.11 เพื่อปรับขยายค่าความไม่แน่นอนที่ระดับความเชื่อมั่นจาก 68 % ไปที่ระดับความเชื่อมั่นต่างๆ เช่น 95 % หรือ 99 % ตามต้องการ

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4}{v_i}} = \frac{u_c^4}{\frac{u_a^4}{v_a} + \frac{u_b^4}{v_b}} \quad (5.11)$$

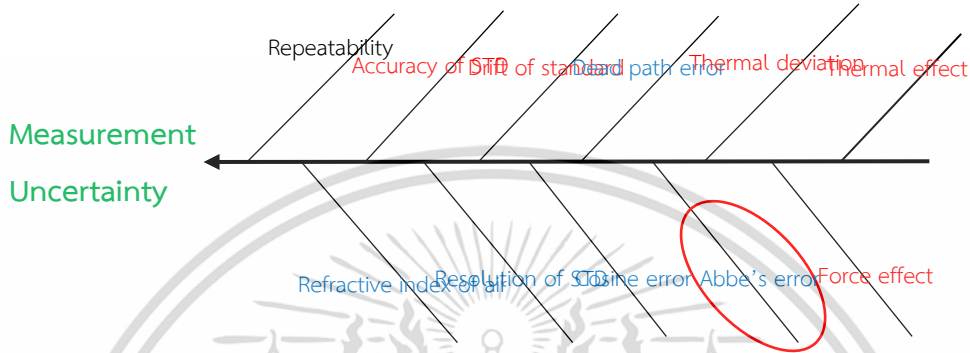
เมื่อได้ค่า  $v_{eff}$  หาค่าจาก Student's T- Distribution หรือจะใช้ฟังก์ชัน `tinu` ในโปรแกรมไมโครซอฟท์พเอกเซลก็ได้ ดังนั้นเราจะได้ค่าความไม่แน่นอนพร้อมรายงานค่าความไม่แน่นอน (Report uncertainty) ดังสมการที่ 5.12 จากการขยายค่าความไม่แน่นอนไปที่ระดับความเชื่อมั่นที่ต้องการ

$$u_{ex} = k u_c \quad (5.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 การวิเคราะห์แหล่งที่มาของค่าความคลาดเคลื่อน

เมื่อกล่าวถึงแหล่งที่มาของค่าความคลาดเคลื่อนการวัดนั้น มีอยู่ด้วยกันหลายอย่างขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของการวัดของห้องปฏิบัติการ การวิเคราะห์แหล่งที่มาของความคลาดเคลื่อนเพื่อที่จะทราบ ที่มา และเมื่อรู้สาเหตุก็สามารถกำจัดหรือลดค่าความคลาดเคลื่อนที่มีผลกระทบเหล่านั้น ดังแผนภูมิแสดง ในรูปที่ 5.1 ในหัวข้อนี้จะกล่าวเฉพาะองค์ประกอบหลักที่ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนการวัด ซึ่งมีผลกระทบโดยตรงต่อค่าความไม่แน่นอนการวัดเท่านั้น ดังหัวข้อต่อไปนี้

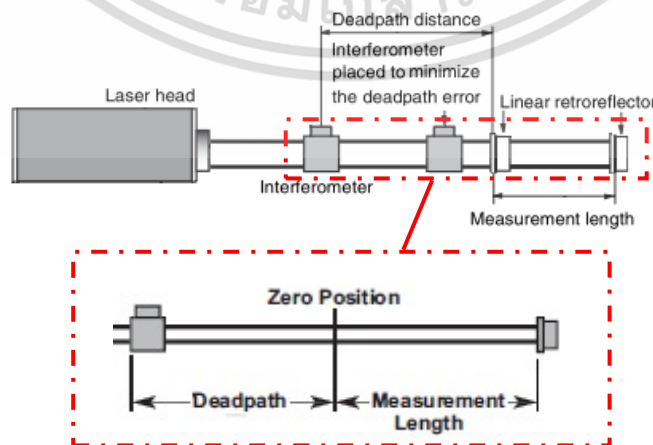


รูปที่ 5.1 แผนภูมิการวิเคราะห์แหล่งที่มาของความคลาดเคลื่อน

### 5.2.1 ค่าความคลาดเคลื่อนเดดพาท

ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการติดตั้งอุปกรณ์ทางแสงหรือเรียกว่า Dead path error ระหว่างกระจกอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์กับกระจกสะท้อน ซึ่งควรจะต้องติดตั้งให้ใกล้ชิดกันมากที่สุดเท่าที่จะทำได้แต่ไม่ให้อึดอัดกัน อาจทำให้ส่วนหนึ่งส่วนใดขยับเขยื้อนได้จะมีผลต่อค่าการวัดซ้ำได้ในบางบริษัทผู้ผลิตได้มีการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวไว้ในโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว เพียงแต่ใส่ระยะ Dead path ( $D_0$ ) ดังเส้นประวงกลมรูปที่ 5.2 ลงในโปรแกรมเท่านั้น ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 5.13 เมื่อ  $D_0$  เป็นระยะระหว่างกระจกอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์กับกระจกสะท้อนที่วัดได้

$$\begin{aligned} \delta L_{\text{deadpath}} &= [92.98 \times (t_{Li} - t_0) - 0.2682 \times (p_{Li} - p_0) + 0.0371 \times (f_{Li} - f_0)] \times 10^{-8} D_0 \\ &= (92.98 \Delta t_r - 0.2682 \Delta p_r + 0.0371 \Delta f_r) \times 10^{-8} D_0 \end{aligned} \quad (5.13)$$

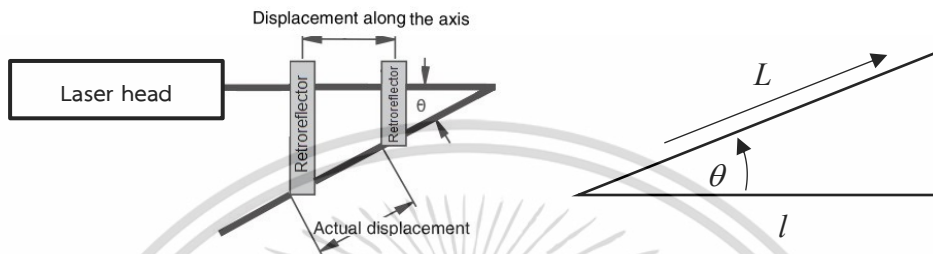


รูปที่ 5.2 แหล่งที่มาของความไม่แน่นอนจาก Dead path error

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.2 ค่าความคลาดเคลื่อนโคซายน์ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากขณะวัดแนวของลำแสงเลเซอร์กับสิ่งที่ต้องการจะวัดไม่ขนานเกิดมุมโคซายน์ ดังรูปที่ 5.3 ผลทำให้ค่าที่วัดได้น้อยกว่าความเป็นจริงเมื่อมุมมากขึ้น ดังสมการที่ 5.14

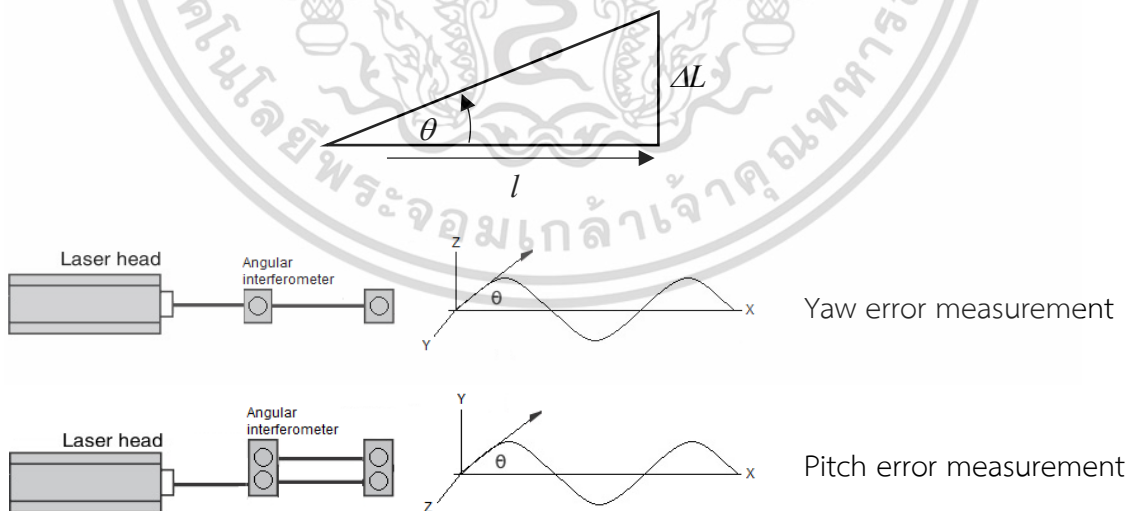
$$L = l(\cos \theta) \tag{5.14}$$



รูปที่ 5.3 ความคลาดเคลื่อนโคซายน์

5.2.3 ค่าความคลาดเคลื่อนของซายน์ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากกระจกอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์กับกระจกสะท้อนที่ติดตั้งอยู่กับสิ่งที่ต้องการจะวัดไม่ขนานกันทั้งแนวนอน หรือเรียกว่าออร์และแนวตั้งหรือเรียกว่าพิท ดังรูปที่ 5.4 ตามความสัมพันธ์การวัดความยาว ดังสมการที่ 5.15

$$\Delta L = l(\sin \theta) \tag{5.15}$$



รูปที่ 5.4 ความคลาดเคลื่อนจากซายน์

5.2.4 ความคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิ ค่าความคลาดเคลื่อนการวัดเกิดจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป (Temperature variation) ระบบควบคุมอุณหภูมิ หรือความแปรปรวนจากกระแสเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

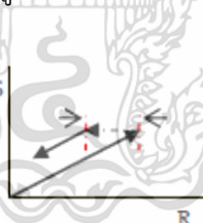
ลมและความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature different) ระหว่างเครื่องมือวัดกับสิ่งที่ต้องการจะวัด ซึ่งหากเกิดขึ้นขณะทำการวัดจะมีผลทำให้ค่าที่วัดผิดพลาด ดังสมการที่ 5.16

$$L_t = L_{Ref} (1 + \alpha \Delta T) \quad (5.16)$$

- เมื่อ  $L_{Ref}$  เป็นค่าความยาวที่วัดได้ ณ อุณหภูมิอ้างอิง
- $\alpha$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิแบบเชิงเส้น (Linear thermal expansion coefficient: ppm/°C) ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ เช่น ของเหล็ก ประมาณ  $(10.5 - 11.7) \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
- $\Delta T$  เป็นผลต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิอ้างอิง ( $T_{20} = 20^{\circ}\text{C}$ ) กับอุณหภูมิห้องขณะทำการวัด ( $T_t$ )

### 5.2.5 ค่าความคลาดเคลื่อนรีเวอร์ซัล

ความคลาดเคลื่อนรีเวอร์ซัล (Reversal error) หรือวงกลับของเครื่องมือวัดมีความเกี่ยวข้องกับโครงสร้างของเครื่องมือวัด เมื่อเครื่องมือวัดได้รับผลจากแรงกระทำต่างๆ รวมไปถึงแรงเสียดทานด้วย แรงกระทำนั้นมีทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ทำให้เกิดการสูญเสียระยะการเคลื่อนที่ของการวัดไป โดยทั่วไปค่าความคลาดเคลื่อนนี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับระยะการวัดจากจุดเริ่มต้นยิ่งวัดระยะมากค่าความคลาดเคลื่อนก็จะเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ยกตัวอย่างเครื่องขนาดสามมิติ (Coordinating Measuring Machine, CMM) ความคลาดเคลื่อนรีเวอร์ซัลจะเกิดขึ้นที่แกนหมุนเนื่องด้วยผลมาจากได้รับแรงกระทำทางกล ในกรณีเครื่องมือวัดความเที่ยงตรงสูงจะมีความคลาดเคลื่อนของรีเวอร์ซัลประมาณ ตั้งแต่ 0.001 ถึง 0.01 mm ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ลักษณะความคลาดเคลื่อนของรีเวอร์ซัล

5.2.6 ค่าความคลาดเคลื่อนจากแรงดึง ค่าความคลาดเคลื่อนจากแรงดึงของสายวัด เป็นการแจกแจงค่าความไม่แน่นอนจากการวัดแรง เช่น แรงดึงของโพลด์ที่ใช้ขณะทำการสอบเทียบสายวัด ตามที่ผู้ผลิตกำหนดมีความสัมพันธ์ดังสมการค่าแก้จากแรงดึง (Tensile correction value,  $C_p$ ) ด้วยแรงดึง ( $P$ ) และค่าแรงที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ( $P_0$ ) มีหน่วยเป็น kgf หรือ N ดังสมการที่ 5.17

$$C_p = \frac{(P - P_0)L}{E.A}, \left( \frac{N.mm}{N} \right) \quad (5.17)$$

เมื่อ  $L = l + C_p$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่  $C_p$  เป็นค่าแก้ความยาวเนื่องจากแรงที่ใช้ซึ่งสายวัด  $E$  เป็นค่าการยืดหยุ่นมอดูลัสของยัง (Young's elastic modulus,  $\text{kgf/mm}^2$  or  $\text{N/mm}^2$ ) ที่  $L$  เป็นความยาว (mm) และ  $A$  เป็นพื้นที่หน้าตัดของสายวัด ( $\text{mm}^2$ ) พิจารณาค่าความไม่แน่นอนเนื่องแรงดึงด้วยการหาอนุพันธ์ของสมการที่ 5.18

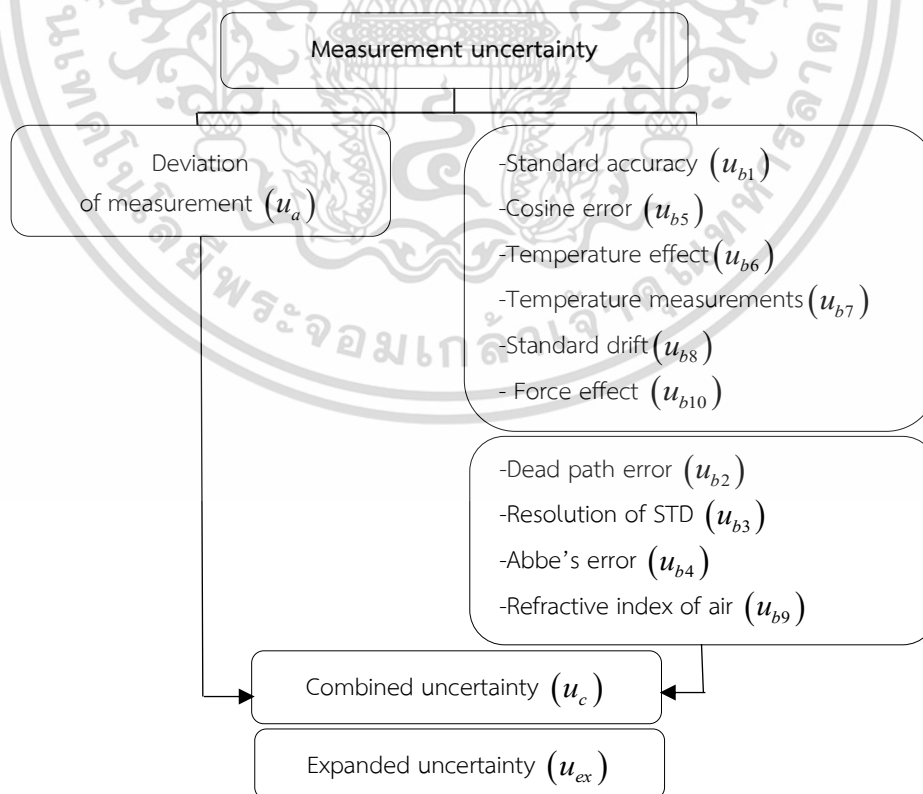
$$u(\Delta C_p) = u(P) \times \frac{1}{E.A} \times L \quad (5.18)$$

### 5.3 การประเมินค่าความไม่แน่นอนการวัด

การประเมินค่าความไม่แน่นอนการวัด [16, 17] ของการสอบเทียบสายวัดพิจารณารูปแบบทางคณิตศาสตร์ของการสอบเทียบ โดยแบ่งกลุ่มออกเป็นกลุ่มที่มีความสัมพันธ์กับค่า  $L$  กับกลุ่มที่ไม่สัมพันธ์กับค่า  $L$  ดังสมการที่ 5.19

$$l_x = (l_{dev} + l_{dp} + l_{res} + l_{Abbe} + l_n) + (l_{std} + l_{cos} + \delta l_t + l_{\Delta t} + l_d + l_f) \times L \quad (5.19)$$

จากแผนภูมิดังรูปที่ 5.6 ค่าความไม่แน่นอนชนิดเอ ได้แก่ Deviation of measurement ( $l_{dev}$ ) และค่าความไม่แน่นอนชนิดบี ประกอบด้วยกลุ่มที่มีความสัมพันธ์กับค่าความยาวที่วัด ( $L$ ) ได้แก่ Standard accuracy, Cosine error, Temperature effect, Temperature measurements, Standard drift, และ Force effect ส่วนกลุ่มที่ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า  $L$  ได้แก่ Dead path error, Resolution of STD, Abbe's error และ Refractive index of air



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ผู้ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3.1 ค่าการวัดซ้ำ

ค่าการวัดซ้ำ ( $u_a$ ) ค่าเบี่ยงเบนจากการวัดสายวัดทั้งสองทิศทางการกำหนดให้เป็นค่าความไม่แน่นอนชนิดเอ (Type A uncertainty) จากการวัดจำนวน 6 ครั้ง ค่าวัดการวัดซ้ำได้ค่าเท่ากับ  $36 \mu\text{m}$  การแจกแจงค่าความไม่แน่นอนเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าได้ค่าเท่ากับ  $36/\sqrt{5}$  เท่ากับ  $14.7 \mu\text{m}$

### 5.3.2 เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของมาตรฐาน

เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของมาตรฐาน ( $u_b$ ) เป็นเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่ห้องปฏิบัติการกำหนดไว้ ซึ่งอาจจะนำมาจากค่าความแม่นยำของผู้ผลิตหรือเกณฑ์มาตรฐาน ในที่นี้ชุดเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่ใช้สำหรับสอบเทียบมีความแม่นยำ  $1.5 \times 10^{-6}L$  ภายใต้สภาวะควบคุมการแจกแจงค่าความไม่แน่นอนเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าได้ค่าเท่ากับ  $(1.5 \times 10^{-6}L)/\sqrt{3}$  เท่ากับ  $0.87 \times 10^{-6}L \mu\text{m}$

### 5.3.3 ค่าความคลาดเคลื่อนจาก Dead path setup

ค่าความคลาดเคลื่อนจาก Dead path error, ( $u_{b2}$ ) [18] เป็นระยะระหว่างกระจกอินเตอร์เฟียโรมิเตอร์กับปากช่องปลายหลอดแสงเลเซอร์มีค่าเท่ากับ  $0.35 \mu\text{m}$  พิจารณาการแจกแจงเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ  $0.35/\sqrt{3}$  เท่ากับ  $0.2 \mu\text{m}$

### 5.3.4 ค่าความละเอียดของเลเซอร์

ค่าความละเอียดที่อ่านได้ของเลเซอร์วัดระยะ ( $u_{b3}$ ) อ่านได้ละเอียด  $0.001 \text{ mm}$  พิจารณาให้เป็นการแจกแจงความไม่แน่นอนแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ semi-range ได้เป็น  $0.001/2$  เท่ากับ  $0.0005/\sqrt{3}$  เท่ากับ  $0.3 \mu\text{m}$

### 5.3.5 ค่าความคลาดเคลื่อนจาก Abbe's error

ค่าความคลาดเคลื่อน Abbe's error ( $u_{b4}$ ) เป็นค่าเบี่ยงเบนสูงสุดของยอร์ และ พิทมมูมีอยู่สองแหล่งที่นำมาพิจารณาคือการประเมินค่าความไม่แน่นอนจาก Abbe error ในกรณีที่พิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนยอร์จากการใช้ทั้งยอร์เซ็นเซอร์และ เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ สำหรับค่าความไม่แน่นอนการวัดค่าความคลาดเคลื่อนยอร์ด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์มีการวัดเป็นสองช่วงตามคุณลักษณะเฉพาะของผู้ผลิตที่มีช่วงการวัดมุมได้ถึง  $15 \text{ m}$  ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.1(รูปที่ 4.6) ค่าความคลาดเคลื่อนยอร์สูงสุดที่ระยะ  $0$  ถึง  $10 \text{ m}$  และ  $10$  ถึง  $20 \text{ m}$  เป็น  $346$  และ  $357 \text{ arcsec}$  ตามลำดับ จากเส้นอ้างอิง (แกน X) ที่จะใช้ในการสอบเทียบกำหนดให้เป็น  $\pm 2 \text{ mm}$  ตลอดช่วงการวัด ( $20 \text{ m}$ ) ที่สำหรับครึ่งหนึ่งของช่วงการวัดทั้งหมด [ $\sin(346/3600) + \sin(357/3600) \times 1 \text{ mm}$ ] เท่ากับ  $3.41 \mu\text{m}$ , ซึ่งผลลัพธ์รวมของค่าความไม่แน่นอนของ  $3.41/\sqrt{3}$  เท่ากับ  $1.97 \mu\text{m}$

เมื่อพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนพิทมมูสูงสุดที่ระยะ  $0$  ถึง  $10 \text{ m}$  และ  $10$  ถึง  $20 \text{ m}$  เป็น  $210$  และ  $600 \text{ arcsec}$  ตามลำดับ จากเส้นอ้างอิง (แกน X) ที่จะใช้ในการสอบเทียบกำหนดให้เป็น  $\pm 2 \text{ mm}$  ตลอดช่วงการวัด ( $20 \text{ m}$ ) ที่สำหรับครึ่งหนึ่งของช่วงการวัดทั้งหมด [ $\sin(210/3600) + \sin(600/3600) \times 1 \text{ mm}$ ] เท่ากับ  $3.93 \mu\text{m}$  ซึ่งผลลัพธ์รวมของค่าความไม่แน่นอนของ  $3.93/\sqrt{3}$  เท่ากับ  $2.27 \mu\text{m}$

### 5.3.6 ค่าความคลาดเคลื่อนจากโคซายน์

ค่าความคลาดเคลื่อนจากโคซายน์ ( $U_{b5}$ ) เลเซอร์ถูกปรับให้ขนานเสมือนมีค่าดีกว่า 5 mm ตลอดช่วงการวัดระยะ 20 m ผลลัพธ์คือค่าความคลาดเคลื่อนโคซายน์ เป็น  $0.625 \times 10^{-6} L / \sqrt{3}$  เท่ากับ  $0.21 \times 10^{-6} L$  ผลลัพธ์ที่ได้เป็นการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

### 5.3.7 ความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากอุณหภูมิ

ค่าความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากอุณหภูมิ ( $U_{b6}$ ) ของสายวัดระยะ 20 m ในช่วง  $\pm 1$  ppm/ $^{\circ}C$  และอุณหภูมิแปรปรวนจาก  $20^{\circ}C$  ต่ำกว่า  $0.5^{\circ}C$  ค่าความไม่แน่นอนคำนวณได้จากค่าแก้ความคลาดเคลื่อนเนื่องมาจากอุณหภูมิ  $0.5^{\circ}C \times 1 \times 10^{-6} L$  พิจารณาค่าที่ได้เป็นการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าค่าความไม่แน่นอนเป็น  $0.5 \times 10^{-6} L / \sqrt{3}$  เท่ากับ  $0.3 \times 10^{-6} L$

### 5.3.8 ความคลาดเคลื่อนจากการวัดอุณหภูมิ

ค่าความคลาดเคลื่อนการวัดอุณหภูมิ ( $U_{b7}$ ) สำหรับสายวัดสอบเทียบโดยติดตั้งตัวตรวจจับอุณหภูมิวัดอยู่ที่ระยะ 0 m, 10 m และ 20 m มีค่าน้อยกว่า  $\pm 0.1^{\circ}C$  ค่าความไม่แน่นอนคำนวณได้เป็น  $0.1^{\circ}C \times 11.5 \times 10^{-6} L$  พิจารณาค่าที่ได้เป็นการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าค่าความไม่แน่นอนเป็น  $1.15 \times 10^{-6} L / \sqrt{3}$  เท่ากับ  $0.67 \times 10^{-6} L$

### 5.3.9 ค่าลอยเลื่อน

ค่าเลื่อนลอยของเครื่องมือวัด ( $U_{b8}$ ) ที่ได้จากผลต่างของการสอบเทียบครั้งก่อนและครั้งล่าสุด แต่เนื่องจากชุดเลเซอร์อินเตอร์เฟียรอมิเตอร์ยังไม่เคยสอบเทียบมาก่อน ให้พิจารณาค่าความแม่นยำของผู้ผลิตได้เท่ากับ  $4.0 \times 10^{-7} L$

### 5.3.10 ค่าความคลาดเคลื่อนจากดัชนีหักเหของอากาศ

ค่าความคลาดเคลื่อนของเลเซอร์อินเตอร์เฟียรอมิเตอร์เนื่องจากดัชนีหักเหของอากาศ ( $U_{b9}$ ) เมื่อไรก็ตามที่ห้องปฏิบัติการมีสภาวะแวดล้อมภายในอุณหภูมิห้องประมาณ 0 ถึง  $35^{\circ}C$  ( $20 \pm 1^{\circ}C$ ) ความชื้นสัมพัทธ์ 0 ถึง 100 %RH ( $50 \pm 5$  %RH) ความดันอากาศ 50 ถึง 120 kPa (100 kPa) และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์  $CO_2$ , 300 ถึง 600  $\mu mol/mol$  ให้ใช้ค่าดัชนีดังสมการที่ 5.20

$$n = 1 + 7.86 \times 10^{-4} \times P / (273 + t) - 1.5 \times 10^{-11} \times RH(t^2 + 160) \quad (5.20)$$

เมื่อองค์ประกอบของอากาศอุณหภูมิห้องประมาณ  $20 \pm 1^{\circ}C$  ความชื้นสัมพัทธ์  $50 \pm 5$  %RH ความดันอากาศ 100 kPa และ ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 300 ถึง 600  $\mu mol/mol$  ให้ค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ  $0.15 \times 10^{-6}$

### 5.3.11 ค่าความคลาดเคลื่อนจากแรงดึงของสายวัด

ค่าความคลาดเคลื่อนจากแรงดึงของสายวัด ( $U_{b10}$ ) เป็นการแจกแจงค่าความไม่แน่นอนจากการวัดแรง เช่น แรงดึงของโหลดที่ใช้ขณะทำการสอบเทียบสายวัดตามที่ผู้ผลิตกำหนดมีความสัมพันธ์ดังสมการค่าแก้จากแรงดึง (tensile correction value,  $C_p$ ) ด้วยแรงดึง ( $P$ ) และค่าแรงที่กำหนดไว้ในมาตรฐาน ( $P_0$ ) มีหน่วยเป็น kgf หรือ N ดังสมการที่ 5.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะได้เป็น

$$u(P) = (P - P_0) \times \frac{1}{E.A} \times L \quad (5.21)$$

A เท่ากับ  $2.34 \text{ mm}^2$  และ E เราสามารถนำค่าดังกล่าวจากผู้ผลิตเท่ากับ  $2.1 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2$  หรือ  $20.6 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$  ดังนั้นพิจารณาค่าความไม่แน่นอน ( $P - P_0$ ) จากสมการที่ 10 เป็น  $u(P)$  เป็นผลต่างระหว่างแรงที่ให้กับแรงที่กำหนดไว้เท่ากับ  $1.52 \text{ N}$  ดังสมการที่ 5.22

$$u(P) = \frac{(P - P_0).L}{E.A} = \frac{1.52L}{48.2 \times 10^4 \times 2.34} = 3.15 \times 10^{-6} \times L \quad (5.22)$$

ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากแรงดึง  $u(P)$  เป็น  $3.15 \times 10^{-6}L$  (N) สำหรับการชิงสายวัดที่ระยะ  $20 \text{ m}$  พิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนนี้เป็นการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า จะได้ค่าความไม่แน่นอนเนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนนี้ เป็น  $3.15 \times 10^{-6}L / \sqrt{3}$  เท่ากับ  $1.82 \times 10^{-6}L$

ตารางที่ 5.1 สัญลักษณ์แหล่งที่มาของความไม่แน่นอน

No.	Sources of uncertainty	Symbol
1	deviation of measurement ( $I_{dev}$ )	$u_a$
2	accuracy of standard ( $I_{std}$ )	$u_{b1}(L)$
3	dead path error ( $I_{dp}$ )	$u_{b2}$
4	resolution of standard ( $I_{res}$ )	$u_{b3}$
5	Abbe error (pitch and yaw) ( $I_{Abbe}$ )	$u_{b4}$
6	cosine error ( $I_{cos}$ )	$u_{b5}(L)$
7	temperature effect ( $\delta I_t$ )	$u_{b6}(L)$
8	temperature measurements ( $I_{\Delta t}$ )	$u_{b7}(L)$
9	drift of standard ( $I_d$ )	$u_{b8}(L)$
10	refractive index of air ( $I_n$ )	$u_{b9}$
11	force effect ( $I_f$ )	$u_{b10}(L)$

สัญลักษณ์แหล่งที่มาของความไม่แน่นอนดังตารางที่ 5.1 สามารถเทียบสัญลักษณ์เพื่อใช้ในการประเมินค่าความไม่แน่นอนดังตารางที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าทั้งในคอลัมน์ value และ standard uncertainty ค่าความไม่แน่นอนจัดออกเป็นสองกลุ่ม ดังนี้ กลุ่มแรกเป็นกลุ่มที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการวัดความยาวหรือเป็นค่าที่ได้มาจากเครื่องมือวัดนั่นเอง ได้แก่ ค่าความละเอียด การวัดซ้ำ ดัชนีหักเห อากาศ และความคลาดเคลื่อนชายน์ เป็นต้น สังเกตได้ว่าค่าความไม่แน่นอนจะไม่ได้คูณด้วย L กลุ่มที่สองเป็นกลุ่มที่ส่งผลกระทบโดยตรงกับการวัดความยาวขณะที่วัด ได้แก่ ความคลาดเคลื่อนโคซายน์ ค่าลอยเลื่อน อุณหภูมิ และแรงดึง เป็นต้น สังเกตได้ว่าค่าความไม่แน่นอนจะมี L คูณอยู่ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้นในการรวมค่าความไม่แน่นอน จึงไม่สามารถรวมกันได้โดยตรงต้องใช้วิธีรวมแบบแยกกลุ่ม โดยให้กลุ่มแรกรวมเข้าด้วยกันเอง และกลุ่มที่สองก็รวมเข้าด้วยกันเอง

ตารางที่ 5.2 การประเมินค่าความไม่แน่นอนของการวัดของการสอบเทียบสายวัด 20 m

Uncertainty budget of tape calibration 20 m using laser interferometer						
Symbol	Source of uncertainty	Value		Distribution	Standard uncertainty	
$u_a$	Deviation of tape measurement	1.92E-02		Normal	1.92E-02	19.18 $\mu$ m
$u_{b1}$	Standard accuracy, ( $L$ )		4.00E-07	Rectangular	2.31E-07	0.23 $L$
$u_{b2}$	Dead path error	2.00E-04		Rectangular	1.15E-04	0.12 $\mu$ m
$u_{b3}$	Resolution of laser interferometer	1.00E-03		Rectangular	5.77E-04	0.58 $\mu$ m
$u_{b4}$	Abbe error					
	- Yaw error (arcsec)	3.76E-03		Rectangular	2.17E-03	2.17 $\mu$ m
	- Pitch error (arcsec)	5.82E-03		Rectangular	3.36E-03	3.36 $\mu$ m
$u_{b5}$	Cosine error, ( $L$ )		3.61E-04	Rectangular	2.08E-04	0.21 $L$
$u_{b6}$	Temperature effect, ( $L$ )		5.75E-06	Rectangular	3.32E-06	3.32 $L$
$u_{b7}$	Temperature measurements, ( $L$ )		1.15E-06	Rectangular	6.64E-07	0.66 $L$
$u_{b8}$	Standard drift	4.00E-07		Rectangular	2.31E-07	0.23 $\mu$ m
$u_{b9}$	Refractive index of air, ( $L$ )		1.50E-06	Rectangular	8.66E-07	0.87 $L$
$u_{b10}$	Force effect (tension load), ( $L$ )		3.15E-06	Rectangular	1.82E-06	1.82 $L$
					19.4	3.95
	Combined standard uncertainty; $U_c$ (68%)				$\sqrt{(20)^2 + (4.0 \times 10^{-6})^2} L^2$	
	Expanded uncertainty; $U_{20}$ (95%)				$\sqrt{(40)^2 + (8.0 \times 10^{-6})^2} L^2$	

ดังนั้นจะได้ค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ  $\sqrt{(20)^2 + (4.0 \times 10^{-6})^2} L^2$  ที่ระดับความเชื่อมั่น 68% เมื่อทำให้เป็นค่าความไม่แน่นอนขยายที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ดังได้กล่าวไว้ในสมการที่ 5.12 ( $U_{ex} = k U_c$ ) ดังนั้น  $U_{20}$  (มีหน่วยเป็น  $\mu$ m) ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้ในตารางที่ 5.2 จะเป็นดังสมการที่ 5.23 ที่  $L$  เป็นความยาวที่วัด หรือประมาณ  $\pm 0.19$  mm ที่  $L$  เท่ากับ 20 m

$$U_{20} = \sqrt{(40)^2 + (8.0 \times 10^{-6})^2} L^2 \quad (5.23)$$

## บทที่ 6

### การประเมินสมรรถนะระบบสอบเทียบสายวัด

การตรวจสอบสมรรถนะเครื่องมือวัดและ การประเมินสมรรถนะ โดยรวมของเครื่องมือวัดนั้น มีความสำคัญอย่างมากเพราะนอกจากจะต้องเป็นวิธีที่ถูกต้อง น่าเชื่อถือแล้วยังต้องเป็นที่ยอมรับของสากลอีกด้วย วิธีการประเมินสมรรถนะจากผลการวัดของเครื่องมือวัดที่ห้องปฏิบัติการใช้กันอยู่ทั่วไป เช่น การทวนสอบ การเปรียบเทียบผลการวัดระหว่างห้องปฏิบัติการ และการเสถียรภาพระยะยาว เป็นต้น แล้วนำประเมินทางสถิติ

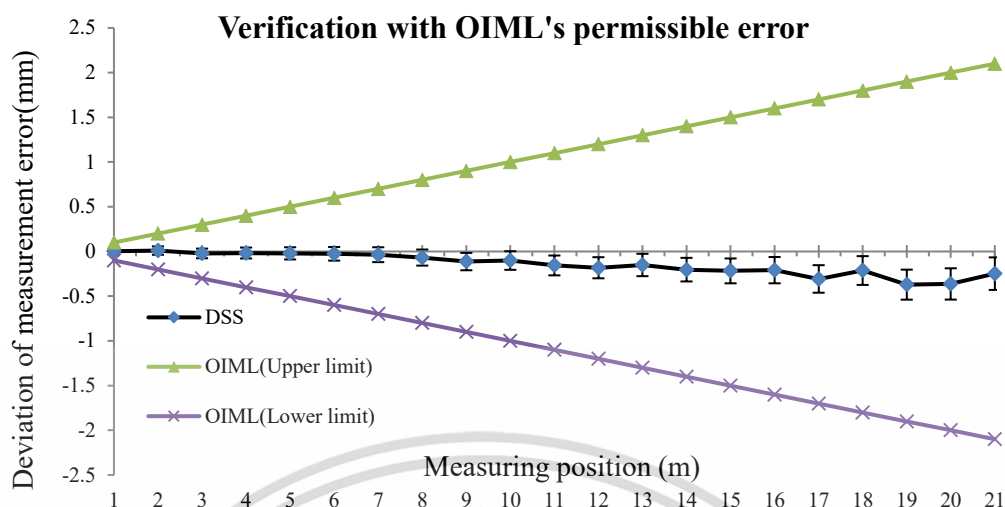
#### 6.1 การทวนสอบ

การประเมินสมรรถนะของเครื่องมือวัด เมื่อนำผลการประเมินที่ได้ไปทวนสอบกับเกณฑ์การยอมรับมาตรฐานของ OIML (R35-1) ตารางที่ 6.1 ซึ่งแสดงว่าสายวัดมาตรฐานจัดอยู่ใน Class I เพราะฉะนั้นระบบสอบเทียบสายวัดนี้มีความแม่นยำเหมาะสมสำหรับสอบเทียบสายวัดมาตรฐานได้ ดังรูปที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ผลการทวนสอบกับเกณฑ์การยอมรับมาตรฐานของ OIML (R35-1)

Nominal	OIML (MPE)		DSS		Verification
0	0.1	-0.1	0.044	-0.036	PASS
1	0.2	-0.2	0.057	-0.037	PASS
2	0.3	-0.3	0.032	-0.076	PASS
3	0.4	-0.4	0.044	-0.078	PASS
4	0.5	-0.5	0.047	-0.089	PASS
5	0.6	-0.6	0.050	-0.102	PASS
6	0.7	-0.7	0.047	-0.119	PASS
7	0.8	-0.8	0.022	-0.158	PASS
8	0.9	-0.9	-0.016	-0.210	PASS
9	1	-1	0.003	-0.205	PASS
10	1.1	-1.1	-0.045	-0.267	PASS
11	1.2	-1.2	-0.064	-0.300	PASS
12	1.3	-1.3	-0.026	-0.276	PASS
13	1.4	-1.4	-0.071	-0.335	PASS
14	1.5	-1.5	-0.078	-0.356	PASS
15	1.6	-1.6	-0.063	-0.356	PASS
16	1.7	-1.7	-0.153	-0.461	PASS
17	1.8	-1.8	-0.052	-0.374	PASS
18	1.9	-1.9	-0.203	-0.539	PASS
19	2	-2	-0.188	-0.538	PASS
20	2.1	-2.1	-0.066	-0.430	PASS

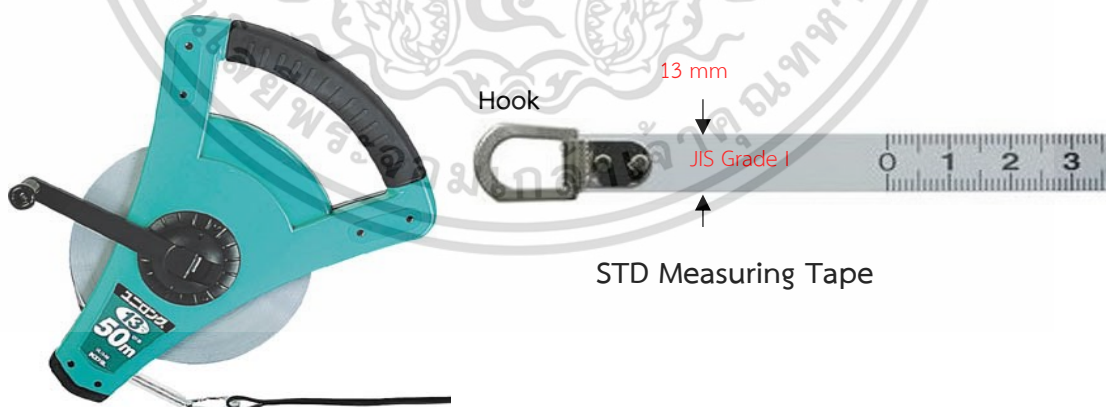
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.1 การทวนสอบผลการสอบเทียบสายวัดมาตรฐานกับเกณฑ์มาตรฐาน OIML

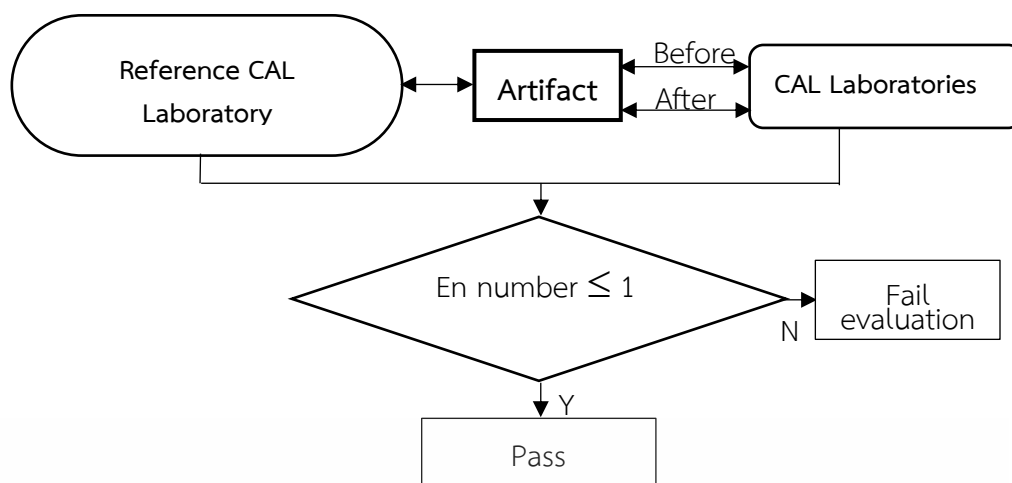
## 6.2 การเปรียบเทียบผลการสอบเทียบระหว่างห้องปฏิบัติการ

การเปรียบเทียบผลการสอบเทียบระหว่างห้องปฏิบัติการ เป็นการรับประกันคุณภาพวิธีหนึ่ง เพื่อควบคุมคุณภาพของการสอบเทียบให้คงไว้ซึ่งความถูกต้องน่าเชื่อถือและเป็นหัวข้อสำคัญหลักที่ระบุไว้ในข้อกำหนด ISO/IEC 17025 ห้องปฏิบัติการใช้สายวัดมาตรฐานเป็นตัวอย่างหรือต่อจากนี้ไป จะเรียกว่า อาร์ติแฟกต์ (Artifact) รูปที่ 6.2 เป็นสายวัดมาตรฐานชนิดโลหะ ทำจากเหล็กกล้า (Steel tape) เคลือบสี ขนาดยาว 50 m, กว้าง 13 mm, และหนา 0.23 mm ตามมาตรฐาน JIS B 7512 เกรด 1 น้ำหนัก 1.4 kg กำหนดแรงดึงมาตรฐาน 100 N (10 kgf)



รูปที่ 6.2 สายวัดมาตรฐาน (JIS B 7512, Grade I) ใช้เป็น Artifact

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.3 แผนภูมิการประเมินสมรรถนะด้วยวิธีเปรียบเทียบระหว่างห้องปฏิบัติการ

การเปรียบเทียบการวัดระหว่างห้องปฏิบัติการมีวิธีปฏิบัติตามขั้นตอน ดังแผนภูมิแสดงรูปที่ 6.3

1. ห้องปฏิบัติการสอบเทียบสายวัดมาตรฐานที่ใช้เป็น Artifact ก่อนส่งไปสอบเทียบกับห้องปฏิบัติการสอบเทียบอ้างอิง (Reference calibration laboratory) ออกรายงานผลการสอบเทียบ
2. ส่ง Artifact ไปสอบเทียบกับห้องปฏิบัติการสอบเทียบอ้างอิง ซึ่งเป็นห้องปฏิบัติการที่ได้รับการรับรอง ISO/IEC 17025 หรือเป็นห้องปฏิบัติการอ้างอิงระดับประเทศก็ได้ ก็จะได้ใบรับรองผลการสอบเทียบ
3. หลังจากรับ Artifact กลับจากห้องปฏิบัติการสอบเทียบอ้างอิง ห้องปฏิบัติการต้องสอบเทียบสายวัดมาตรฐานอีกครั้งวัด เพื่อที่จะให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือเหมาะสมที่จะนำผลนั้นมาเปรียบเทียบ โดยปราศจากการลำเอียงของการวัด
4. นำผลการสอบเทียบและค่าความไม่แน่นอนของทั้งสองห้องปฏิบัติการมาเปรียบเทียบ การเปรียบเทียบผลการวัดต้องเปรียบเทียบที่จุดวัด ด้วยเกณฑ์  $En \text{ number} \leq 1$
5. หากว่าผล  $En \text{ number} \leq 1$  เป็นไปตามเกณฑ์ถือว่าผ่านการประเมิน (Pass evaluation) ในทางกลับกัน หากว่าผล  $En \text{ number} \leq 1$  ไม่เป็นไปตามเกณฑ์ถือว่าประเมินนั้นไม่ผ่าน (Fail evaluation)

วิธีการประเมินแบบใช้อีเอ็นเอ็มเบอร์ (En number evaluation method) [18] ได้จากการนำผลการสอบเทียบเครื่องมือวัดและค่าความไม่แน่นอนระหว่างห้องปฏิบัติการอ้างอิงกับห้องปฏิบัติการทั่วไป นำมาเปรียบเทียบด้วยวิธีทางสถิติ ดังสมการที่ 6.1

$$E_n = \frac{|\bar{X}_{Lab} - \bar{X}_{Ref}|}{\sqrt{U_{Lab}^2 + U_{Ref}^2}} \quad (6.1)$$

$\bar{X}_{Lab}$  เป็นค่าเฉลี่ยของห้องปฏิบัติการทั่วไป

$U_{Lab}$  เป็นค่าความไม่แน่นอนห้องปฏิบัติการทั่วไป

$\bar{X}_{Ref}$  เป็นค่าเฉลี่ยของห้องปฏิบัติการอ้างอิง

$U_{Ref}$  เป็นค่าความไม่แน่นอนห้องปฏิบัติการอ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยจากผลการสอบเทียบสายวัดมาตรฐานห้องปฏิบัติการสอบเทียบความยาวและมิติ กรมวิทยาศาสตร์บริการประเทศไทย กับ สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติของประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน ที่ระยะความยาว 20 m ดังรูปที่ 6.4 โดยการเปรียบเทียบผลการวัดทั้งค่าเฉลี่ย และค่าความไม่แน่นอน ดังแสดงในตารางที่ 6.2 [19,20] ซึ่งผลการประเมินสมรรถนะด้วย En number ยังสามารถใช้ในการตรวจสอบความใช้ได้ของวิธี (method validation) การสอบเทียบสายวัดมาตรฐานรวมถึงสมรรถนะของระบบสอบเทียบสายวัดได้อีกด้วย

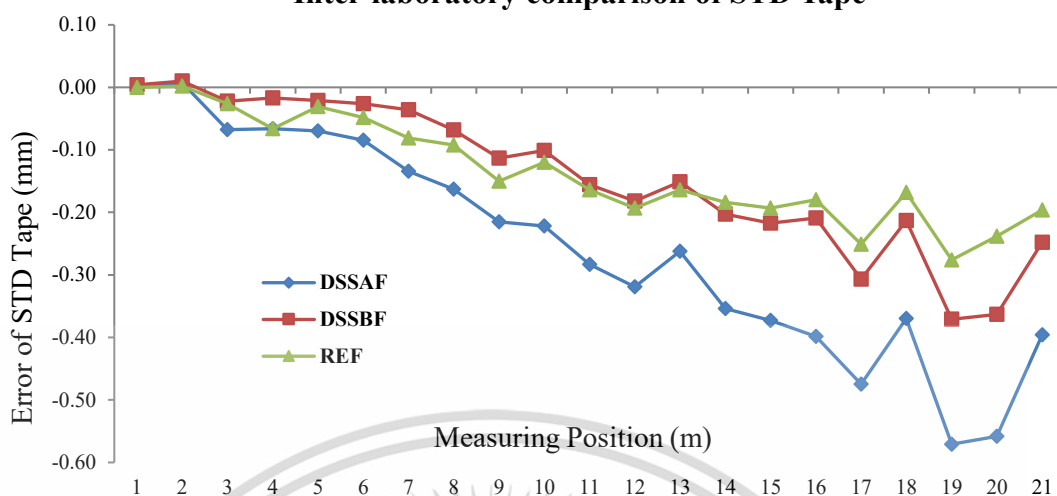
จากผลการเปรียบเทียบด้วยเกณฑ์การประเมินค่า En number ควรมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 ( $\leq 1$ ) นั้น ค่า En number ที่ได้อยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.1 ถึง 0.8 ซึ่งจัดว่าเป็นไปตามเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด

ตารางที่ 6.2 การเปรียบเทียบผลการสอบเทียบด้วย En number

Nominal (mm)	Reference Laboratory		Calibration Laboratory		$ \bar{X}_{Lab} - \bar{X}_{Ref} $	$\sqrt{U_{Lab}^2 + U_{Ref}^2}$	EN number
	Correct value	Ur	Correct value	Ur			
0	0.000	0.003	0.004	0.040	0.004	0.040	0.1
1000	1000.002	0.006	1000.010	0.047	0.008	0.047	0.2
2000	1999.974	0.009	1999.978	0.054	0.004	0.055	0.1
3000	2999.934	0.012	2999.983	0.061	0.049	0.062	0.8
4000	3999.969	0.015	3999.979	0.068	0.010	0.070	0.1
5000	4999.952	0.018	4999.974	0.076	0.022	0.078	0.3
6000	5999.919	0.021	5999.964	0.083	0.045	0.085	0.5
7000	6999.908	0.024	6999.932	0.090	0.024	0.093	0.3
8000	7999.850	0.027	7999.887	0.097	0.037	0.100	0.4
9000	8999.880	0.030	8999.899	0.104	0.019	0.108	0.2
10000	9999.836	0.033	9999.844	0.111	0.008	0.116	0.1
11000	10999.807	0.036	10999.818	0.118	0.011	0.123	0.1
12000	11999.836	0.039	11999.849	0.125	0.013	0.131	0.1
13000	12999.816	0.042	12999.797	0.132	0.019	0.139	0.1
14000	13999.807	0.045	13999.783	0.139	0.024	0.146	0.2
15000	14999.820	0.048	14999.791	0.147	0.029	0.154	0.2
16000	15999.749	0.051	15999.693	0.154	0.056	0.162	0.3
17000	16999.832	0.054	16999.787	0.161	0.045	0.170	0.3
18000	17999.724	0.057	17999.629	0.168	0.095	0.177	0.5
19000	18999.762	0.060	18999.637	0.175	0.125	0.185	0.7
20000	19999.804	0.063	19999.752	0.182	0.052	0.193	0.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Inter-laboratory comparison of STD Tape

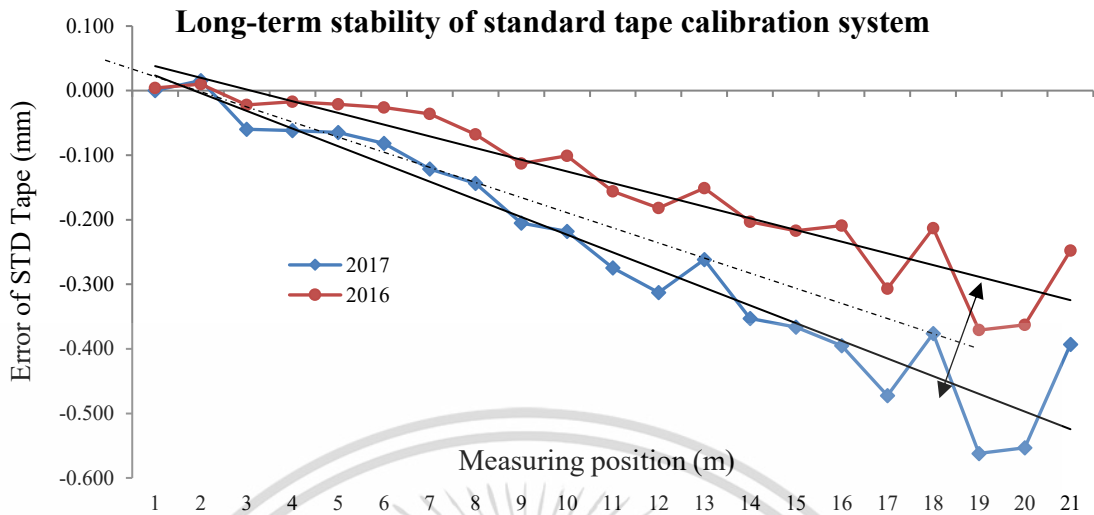


รูปที่ 6.4 การเปรียบเทียบผลการสอบเทียบระหว่างกรมวิทยาศาสตร์บริการ (DSS) กับ สถาบันมาตรวิทยาของประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน (NIM)

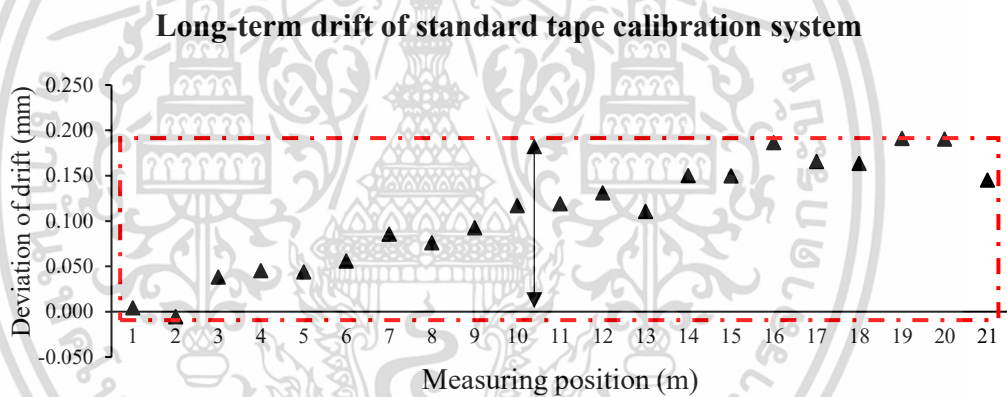
### 6.3 เสถียรภาพระยะยาวและค่าลอยเลื่อน

สมรรถนะของเครื่องมือวัดที่มีความละเอียดสูงผลการวัดเสถียรภาพระยะยาวสั้นอาจไม่สามารถบอกถึงสมรรถนะได้ดีพอ เนื่องจากความเปลี่ยนแปลงผลการวัดมีความแตกต่างกัน ด้วยเหตุผลดังกล่าวห้องปฏิบัติการจึงส่วนมากจะเลือกเสถียรภาพระยะยาว การประเมินเสถียรภาพของระบบสอบเทียบสายวัดวัดอุณหภูมิประสงค์หลักเพื่อเป็นการเฝ้าระวังติดตามความเปลี่ยนแปลงของผลการวัดในลักษณะของค่าเบี่ยงเบนความคลาดเคลื่อน หรือผลการวัดค่าความถูกต้องแบบต่อเนื่องระยะยาวนาน โดยเปรียบเทียบผลการวัดกับห้องปฏิบัติการอ้างอิง การประเมินเสถียรภาพยาวจะใช้เวลาตั้งแต่ 90 วัน ถึง 1 ปี งานวิจัยนี้ห้องปฏิบัติการทำการทดลองเริ่มเก็บข้อมูลตั้งแต่วันที่ 24 กันยายน พ.ศ. 2558 จนถึงวันที่ 28 มีนาคม พ.ศ. 2559 (รวมเวลาทั้งสิ้นประมาณ 6 เดือน) จากข้อมูลค่าเบี่ยงเบนสูงสุดตลอดช่วงได้ประมาณ  $\pm 0.1$  mm/year สังเกตได้ว่าโดยเฉพาะช่วงการวัดระยะที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 10 m ถึง 20 m ดังรูปที่ 6.5

การพิจารณาผลการวัดค่าลอยเลื่อนระยะยาวจะมีลักษณะคล้ายกับเสถียรภาพระยะยาว เนื่องจากทั้งสองกรณีขึ้นอยู่กับเวลา ซึ่งแตกต่างจากเสถียรภาพระยะยาวตรงที่ค่าลอยเลื่อนจะแสดงในรูปของผลต่างระหว่างครั้งแรกกับครั้งล่าสุด จากนิยามของค่าลอยเลื่อนก็คือผลต่างของค่าแก้ครั้งก่อนลบด้วยค่าแก้ครั้งล่าสุด การประเมินค่าลอยเลื่อนเสถียรภาพยาวจะใช้เวลาตั้งแต่ 90 วัน ถึง 1 ปี งานวิจัยนี้ห้องปฏิบัติการใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2558 และปี พ.ศ. 2559 จากข้อมูลค่าผลต่างสูงสุดตลอดช่วงประมาณ 0.2 mm/year (กรอบเส้นประสีแดง) ดังรูปที่ 6.6



รูปที่ 6.5 การเปรียบเทียบผลการสอบเทียบสายวัดมาตรฐานปี พ.ศ. 2559 และปี พ.ศ. 2560



รูปที่ 6.6 ค่าลอยเลื่อนระยะยาวของระบบสอบเทียบสายวัดจากผลการสอบเทียบสายวัดมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 7

### บทสรุป

จากการประเมินค่าความไม่แน่นอนของระบบสอบเทียบสายวัดมาตรฐานได้ผลลัพธ์ค่าความไม่แน่นอนเท่ากับ  $\sqrt{(40)^2 + (8.0 \times 10^{-6})^2 L^2}$  ( $\mu\text{m}$ ) หรือเท่ากับ  $\pm 0.19 \text{ mm}$  ที่  $L$  เป็นความยาวที่ 20 m ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% หากพิจารณาผลของการประเมินค่าความไม่แน่นอนความตรงซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบสอบเทียบสายวัด กับเกณฑ์มาตรฐานของ OIML ผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน class I และเมื่อพิจารณาค่าความไม่แน่นอนเปรียบเทียบกับเกณฑ์การยอมรับสูงสุด (Maximum permissible error, MPE)  $\pm 2.1 \text{ mm}$  ที่ความยาว 20 m ซึ่งนำมากำหนดเกณฑ์ค่าความไม่แน่นอน (target uncertainty) โดยคิดเป็นหนึ่งในสามของค่าคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้สูงสุด นั่นคือ  $2.1 \times 1/3$  เท่ากับ 0.7 mm เมื่อเปรียบเทียบค่าความไม่แน่นอนกับเกณฑ์การยอมรับสูงสุดแล้วคิดเป็นร้อยละ 30 ดังนั้นผลการวัดและค่าความไม่แน่นอนอยู่ในเกณฑ์การยอมรับที่กำหนด

การประเมินสมรรถนะของระบบสอบเทียบสายวัด ใช้วิธีการเปรียบเทียบผลการสอบเทียบกับห้องปฏิบัติการอ้างอิง โดยใช้เกณฑ์จากค่า En number ตามมาตรฐาน ISO/IEC 17043 กำหนดไว้ว่าค่า En number ต้องได้น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 ( $\text{En number} \leq 1$ ) ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้ En number  $< 1$  เป็นไปตามเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด นอกจากนี้ยังได้มีการประเมินแบบเสถียรภาพและค่าลอยเลื่อนระยะยาว ผลลัพธ์ที่ได้เท่ากับ  $\pm 0.1 \text{ mm/year}$  และ  $0.2 \text{ mm/year}$  โดยลำดับอีกด้วย

สำหรับงานวิจัยที่ห้องปฏิบัติการได้ศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมคือแนวทางการลดค่าความคลาดเคลื่อนของยอร์เซ็นเซอร์แบบเชิงกล [21-23] พร้อมการประเมินค่าความไม่แน่นอนการวัดของยอร์ [24] และการวิจัยพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยการนำเอาหลักการของแม่เหล็กเลวิเตชัน (Magnetic levitations or maglev) [25] มาใช้เป็นแม่เหล็กแบริ่ง (Magnetic bearing การศึกษาวิจัยเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในอนาคต เป็นการศึกษาแนวทางการวัดความคลาดเคลื่อนยอร์เซ็นเซอร์ด้วยเทคนิคการวัดแบบเชิงแสง) เพื่อนำไปประยุกต์ใช้กับงานที่ต้องการความแม่นยำสูง เช่น ระบบรางตรง และ ระบบการวัดระยะอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Distance Meter, EDM) เป็นต้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] W.Chinchusak, and V.Tipsuwanporn “Investigation of yaw errors in measuring tape calibration system” Journal Measurement, Volume 125/September 2018, p.142-150.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224118303348>  
(online published, 24 April 2018).
- [2] T.Yandayan and B. Ozgur, 2013 “A motorized 5 m tape comparator for traceable measurements of tapes and rules” Journal Measurement, 2013.11.040, TUBITAK UME, Baris Mah. Dr. Zeki Acar Cad. Pk54, 41470 Gebze/Kocaeli, Turkey.
- [3] T.Yandayan and B. Ozgur, 2003 “5 m-measurement system for traceable measurements of tapes and rules” Proceedings of SPIE, vol. 5190, TUBITAK UME, Baris Mah. Dr. Zeki Acar Cad. Pk54, 41470 Gebze/Kocaeli, Turkey, SPIE 2003.
- [4] Jae Wan Kim, Don Young Jeong, Myung Soon Kim, Chu-Shik Kang, Jong-Ahn Kim and Tae Bong Eom, 2007 -2008 “A 50 m laser interferometer for automatic calibration of surveying tapes using wireless communication” Measurement Science and Technology, Volume 19, Number 1, Published 23 November 2007 - 2008.
- [5] H.P. Layer and W.T. Estler, 1988 “Traceability of laser interferometric length measurements,” National Bureau of Standards Gaithersburg, MD 20899. 10, June 1988.
- [6] P.E. Ciddor, K.H. Edensor, K.J. Loughry, and H.M.P. Stock, 1987 “A 70 m laser interferometer for the calibration of survey and mapping,” The Australian Surveyor, 1987, 33: 493.
- [7] OIML R 35 – EN series, Material measures of length for general use, 2013, <<http://www.oiml.org/publications/>>.
- [8] Wanchai.C, and Vittaya.T, “The error reduction of the ALSM control system with the measurement error feedback”, IEEE TENCON-2014 Proceeding 22-25 October 2014, Bangkok, Thailand.
- [9] R. Treichel, R. Sesselmann, and J. Krieger, 1999 “Optical sensor for measurement of roll + pitch + yaw angles over large distances with high accuracy,” Proc. SPIE 3824, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection, 1999 (September 21, 1999).
- [10] The Guide to Expression Uncertainty Evaluation in Measurement (GUM), 2008  
[https://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM\\_100\\_2008\\_E.pdf](https://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf).

- [11] C.P. Wang, 1987, Optodyne, Inc., “Straightness measurement by laser Doppler displacement meter technique,” *Lasers and Optronics*, 6( 9) , pp. 69-71, September 1987. 1180 Mahalo Place Compton, CA 90220.  
<http://www.optodyne.it/inglese/publications/TA522E-Precision%20positioning.pdf>  
[http://www.optodyne.it/inglese/publications/TA530E-RAM\\_Sag.pdf](http://www.optodyne.it/inglese/publications/TA530E-RAM_Sag.pdf)
- [12] Agilent Technologies, Inc., 2010, Laser Measurement System 5529A - User’s Guide. Hewlett-Packard Company, 5301 Stevens Creek Boulevard, Santa Clara, California 95052-8059. May 10, 2010.
- [13] C.L. Carroll Jr. , October 2014, National Bureau of standards (NBS), NBSIR 74-451, “Field comparisons of steel surveyors’ tapes,” SOP No.12, recommended standard operating procedure for calibration of metal tapes tape to tape method.
- [14] KDS, MARUTEC-KDS CORP. Instruction manual
- [15] J. Unkuri, A. Rantanen, J. Manninen, V.-P. Esala, and A. Lassila, “Interferometric 30 m bench for calibrations of 1D scales and optical distance measuring instruments,” *Measurement Science and Technology*, 23( 9) , 094017 doi:10.1088/0957-0233/23/9/094017.
- [16] A. Godina and B. Acko, 2012, “Calibration of Tape Measures with Small Measurement Uncertainty,” Chapter 16 in DAAAM International Scientific Book 2012, pp. 187-196, B. Katalinic (Ed.),Published by DAAAM International, ISBN 978-3-901509-86-5, ISSN 1726-9687,Vienna, Austria DOI: 10.2507/daaam.scibook.2012.16.
- [17] [http://www.feanor.com/laser\\_uk.htm](http://www.feanor.com/laser_uk.htm) and [http://www.com/laser\\_principles.pdf](http://www.com/laser_principles.pdf), Principle of operation, dead path error, ABBE error, Cosine error, Refractive air index and compensation. Feanor, UK.
- [18] Conformity assessment — General, requirements for proficiency testing ISO/IEC 17043(E). 2010.
- [19] R. Thalmann 2004, EUROMET Supplementary Comparison, Project 677, Steel tape Measures Final report, Wabern, EUROMET 677 Final report.doc 12.10.2004.
- [20] Wabern and R. Thalmann June 2006, EUROMET Supplementary Comparison, Project 875 Steel tape measure final report.
- [21] Wanchai.C, Vittaya.T, Arjin.N and Viriya. K, 2016 “The Application of Yaw Sensor for Measuring Carriage System”, 16<sup>th</sup> International Conference on Control, Automation and Systems, ICCAS 2016, Oct. 16-19, 2016 in HICO, Gyeongju, Korea.
- [22] R.A. Serway and J.W. Jewett, Jr., 2003, “Physics for Scientists and Engineers,” 6<sup>th</sup> Ed. Brooks Cole. ISBN 0-534-40842-7.
- [23] P. Tipler, 2004, “Physics for Scientists and Engineers: Mechanics,” Oscillations and Waves, Thermodynamics (5<sup>th</sup> ed.). W. H. Freeman. ISBN 0-7167-0809-4.

- [24] Vittaya.T, Wanchai.C and Supaporn.J, 2016 “The Measurement Uncertainty Evaluation of Yaw Sensor Calibration”, 16<sup>th</sup> International Conference on Control, Automation and Systems, ICCAS 2016, Oct. 16-19, 2016 in HICO, Gyeongju, Korea.
- [25] Vittaya Tipsuwanporn, Wanchai Chinchusak, and Arjin Numsomran “The Modification of Yaw Sensor for Length Standard Calibration System”, 17<sup>th</sup> International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2017) Oct. 18-21, 2017, Ramada Plaza, Jeju, Korea.





Contents lists available at ScienceDirect

Measurement

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/measurement](http://www.elsevier.com/locate/measurement)



## Investigation of yaw errors in measuring tape calibration system

Wanchai Chinchusak, Vittaya Tipsuwanpom\*

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 1 Soi Chalang Krung 1, Ladkrabang Subdistrict, Ladkrabang District, Bangkok 10520, Thailand



### ARTICLE INFO

**Keywords:**  
Yaw error  
Yaw sensor  
Measuring tape calibration system

### ABSTRACT

Yaw error measurements using a new designed yaw sensor were carried out to determine the characteristics of yaw errors and analyze the behavior of the structural guide. Laser interferometers have generally been used in calibration laboratories for the angular measurement of measuring tape calibration systems, and their performance must be verified to determine whether it meets the laboratory specifications. The yaw sensor technique is identical to the error compensation used in a measuring tape calibration, and also has some special parameters. Although the yaw error observation period is very short, it is sufficiently accurate for a carriage yaw sensor. The results of a yaw error measurement comparison between a yaw sensor and the angular measurement system of a laser interferometer were satisfactory. The measurement uncertainty of a yaw sensor calibration was approximately  $U = 40$  arcsec at a confidence level of 95%.

### 1. Introduction

Several design solutions for improving a measuring tape calibration system have been developed, such as a motorized 5 m tape comparator [1,2], an automatic calibration of surveying tapes using wireless communication [3], and a laser interferometer for the calibration of surveying tape [4,5]; these solutions are very different from the conceptual design of the original system. There are also some problems in the constructive design of the carriage's guide system, which causes an insufficient straightness, such as errors in the yaw and pitch. Since 2011, the length and dimensional calibration laboratory of the Department of Science Service (DSS) in Bangkok, Thailand has been improving the standard tape measuring system. The Measuring Tape Development Project (MTDP), the main purpose of which is to set up an appropriate and complete traceable calibration of a 50 m long measuring tape, has been developed to serve customers from both industry and public organizations. At present, this project still does not provide a complete alignment of up to 50 m. However, it is operable up to 20 m. The MTDP calibration and verification technique requirements for a long-distance measuring system were proven through an inter-laboratory comparison with the National Institute of Metrology (NIM), China. The performance follows the reference document, International Organization of Legal Metrology (OIML), R35 [6]. There are several constructive solutions for an improvement of the tape calibration system, which differ from the conceptual design of the original system. There are also some constructive solutions regarding the installation of the guide, which causes an insufficient level of straightness, such as errors

in the measured yaw and pitch. Generally, an angular measurement uses a laser interferometer, which is a highly accurate application. However, in many cases, the original method is expensive and its potential is limited. The angular measurement application of laser measurement is limited to a measurement range of up to 15 m according to the manufacturer's specifications, and is only suitable for use in a high-level laboratory such as a National Metrology Institute (NMI) or legal metrological laboratory. In addition, it is impossible to observe an angular measurement at the same time as a linear measurement owing to the different optical devices used, meaning that the real-time monitoring of a yaw measurement is not possible. At present, a more suitable high-resolution yaw sensor for investigating yaw errors is needed [7]. A yaw error measurement using a yaw sensor would also resolve the investigation problem. An investigation into yaw error measurements requires a yaw sensor that is capable of angular measurements rotating around the Z-axis. A yaw motion is a rotating movement of the plane from side to side, while the carriage is moving along the guide. If a yaw sensor is mounted on the carriage, then instead of taking only angular measurements, it could detect any yaw errors and compensate them in real time. The rotary encoder is normally a standard instrument used for angle measurements. Generally, the design of an encoder sensor for a roll and pitch angle measurement is relatively simple. The angular investigation of a measuring tape calibration system employs a laser angular measurement system and an electronic level for the long-term stability of the pitch error measurement. This research challenged to develop a high-resolution rotary encoder that is also applicable to measuring the yaw angle. The main purpose of this research is to

\* Corresponding author.

Email addresses: [wanchai@dss.go.th](mailto:wanchai@dss.go.th) (W. Chinchusak), [kvtmay@staff.kmitl.ac.th](mailto:kvtmay@staff.kmitl.ac.th) (V. Tipsuwanpom).

<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.04.053>

Received 16 May 2016; Received in revised form 2 March 2018; Accepted 16 April 2018

Available online 24 April 2018

0263-2241/ © 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

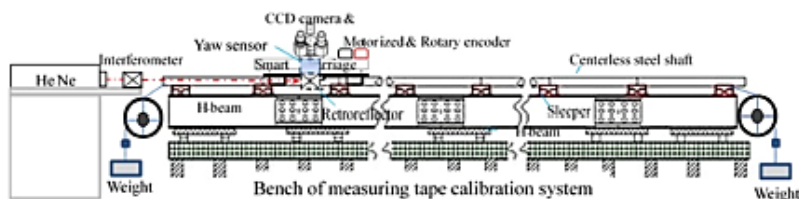


Fig. 1. Designed structure of measuring tape calibration system.

investigate yaw error measurements using a yaw sensor, and to indicate the characteristic factors of the guide alignment and installation.

## 2. Description of measuring tape calibration system

The structure consists of H-shaped beams that are designed for use on a steady-base measuring machine. These beams are placed on 51 foundation supports over a smooth concrete bench 51 m long, 900 mm tall, and 900 mm wide. Eighty-five adjustable sleepers are placed on the H-beams to support 17 centerless steel shafts with a guide diameter of 40 mm. The tape calibration technique will be developed for absolute measurements using a He-Ne laser with a wavelength of 633 nm, as shown in Fig. 1.

The measuring tape calibration system is designed for a controlled environment with a temperature of  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ , humidity of  $50 \pm 10\%$ , and an overall length of 50 m. The sleepers are placed on the H-beams, in order to finely adjust the level of tolerance to  $\pm 0.1$  mm. The tape support is made of steel rods mounted on the sleepers and has a cylindrical roller design to reduce the friction from the tension force while the tape is stretched.

### 2.1. Rotary encoder and motorized driver carriage

The carriage consists of the following five components: three ball bearing brushes supporting the base of the carriage, an X-Y translator, a DC driving motor, and a microscope on the carriage. The carriage is a single optical measuring probe, and is slightly moved by hand with motorized control along the guide. A motorized driver is used to connect each carriage, and to directly drive a DC servomotor coupling with the shaft without the use of rack gear. A wireless joystick control is available for long distance use. The driving motor and wheel are symmetrically designed to provide force equilibrium while the driver moves smoothly along the guide rail, as shown in Fig. 3. Three-point balancing of the roller with a friction adjustment makes it very stable. The first roller drive uses a driving motor, and another one is used for the rotary encoder, with the friction adjusted using a force adjustable knob, as shown in Fig. 4.

### 3. Yaw and pitch error investigation with angular interferometer

For the angular measurement both yaw and pitch error are very important parameters, a laser interferometer, which is a highly accurate device, is traditionally used. As mentioned above, the pitch and roll measurement can be measured by using other devices such as, a high

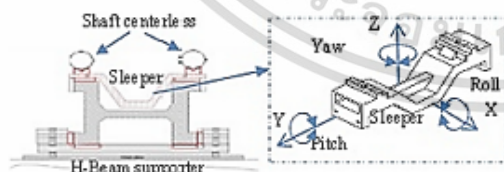


Fig. 2. Design of H-beam and sleepers for guide rail support.

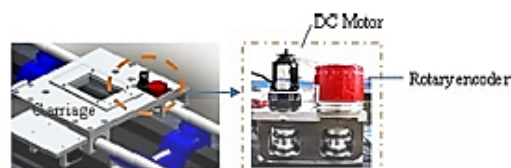


Fig. 3. Carriage of measuring system with driving motor.

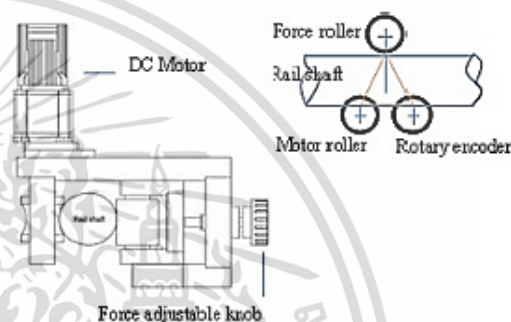


Fig. 4. Design of motorized carriage.

precision electronic level, rotary encoder, capacitive sensor, optical devices, etc. Hence, the yaw error measurement with angular interferometer is more interesting for solving the limiting of range or manufacturer's specification.

### 3.1. Principle of yaw error measurement by using interferometer

The axes of the positioning carriage are considered to have six degrees of freedom as shown in Fig. 5, three for the linear directions along the x-, y-, and z-axes, and three for rotations along the same axes. These motions are described based on the right-hand principle. The cross product of the x- and y-axes (second and third fingers) is the z-axis (thumb). In addition, if the thumb of the right-hand points in the positive direction of the axis, the fingers will wrap around the axis in the direction of the positive rotation about that axis.

All movements consist of translations along, and rotations around, the coordinate axes. The x- and y-axes are on the horizontal plane, the traveling direction of the first or bottom stage being aligned with the x-axis, and the z-axis is on the vertical plane.

The case of straightness measurement [8] is actually a measurement of the traveling path of perpendicular motion in the horizontal plane,  $y(x)$  and as a reference is defined as a straight line passing through the initial,  $y(0)$  and end points,  $y(L)$ ,  $L$ : length.

That is,  $y(0) = y(L) = 0$ . The local slope is given by

$$\frac{dy}{dx} = \tan\phi \quad (1)$$

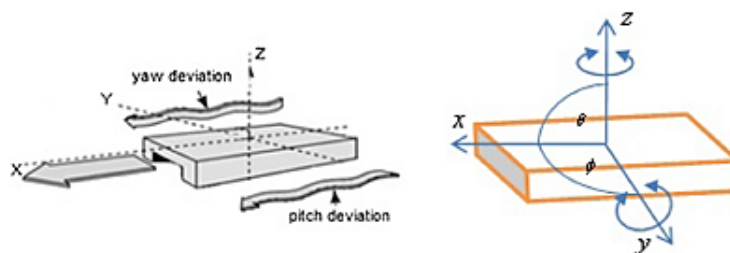


Fig. 5. Angular measurement.

Assuming that the radius of curvature  $R$  is much larger than the measurement increment  $\Delta x$ . In addition,  $\tan \phi$  is approximately equal to  $\phi$ . Hence,

$$y(x) = \int_0^x \frac{dy}{dx} dx = \int_0^x \phi(x) dx \quad (2)$$

The total number of points  $N$  is equal to  $L/\Delta x$ .

Let  $x_n = n\Delta x$

$$y(x_n) = \sum_{i=0}^n \phi(x_{i-1}) \Delta x + \text{const} \quad (3)$$

Since  $Y(0) = Y(L) = 0$ , Eq. (3) becomes

$$y(x_n) = \sum_{i=0}^n \phi(x_{i-1}) \Delta x - \frac{n}{N} \sum_{i=0}^N \phi(x_{i-1}) \Delta x \quad (4)$$

where  $y(x_n)$  is the straightness in the horizontal plane,  $\phi(x_n)$  is the measured yaw angle,  $\Delta x$  is the incremental of the measurement, and  $N$  is the total number of points.

### 3.2. Yaw and pitch error measurement with interferometer

The yaw error measurement used the carriage as a measuring probe as an effective method for straightness error measurement, while the carriage is moving along the guide rail. Practically, this depends on the alignment techniques of the laboratory technician and the measurement design. However, the method of yaw measurement using the angular interferometric system is not continuous over the measurement range. Therefore, the yaw error would generate an accumulation of small angles. Moreover, the center of gravity is directed toward the travel path. The angular measurement principle has certain parameters or characteristics related to the length measurement, which is a measurement of straightness. The yaw axis was defined to be perpendicular to the XY plane, with its origin at the center of gravity and directed toward the bottom of the plane. The yaw axis was parallel to the guiderail with its origin at the reference point. Measuring straightness involves measurement of perpendicular motion along a travel path. The ideal travel path is a straight line; any deviation from this straight line in the horizontal or vertical plane is called horizontal (yaw) or vertical (pitch) straightness respectively. A dual-beam laser head functions like two laser beams placed into, and emitted from, a single laser head. A dual-retroreflector, consisting of two retroreflectors mounted on the carriage, is used to reflect both laser beams back to the laser head, yaw and pitch error measurement using a laser interferometer, as shown in Fig. 6. There are two outputs from the processor module: a linear top and bottom retroreflector. The difference in displacement, divided by separation  $d$ , of the two retroreflectors is the pitch angle. Both the linear position and pitch or yaw angle of the dual-retroreflector could be recorded simultaneously in one continuous stroke with stops by using a USB interface and a computer.

The major features of this technique include automatic data collection, easy setup and operation, and high resolution and accuracy.

The important characteristics of angular measurement are mainly the detection of yaw and pitch errors. Although, the range of the angular measurement was limited by the manufacturer's specifications, it can be designed for gathering data for two intervals. The length of each step is 10m, as shown in Fig. 7.

The yaw measurement results obtained by using the angular measurement system are shown in Fig. 8. The deviation of all yaw error measurements was approximately 388 arcsec over 20m. The pitch measurement results obtained by using the angular measurement system are shown in Fig. 9. The deviation of all pitch error measurements was approximately 600 arcsec over 20m.

## 4. Yaw error investigation with the yaw sensor

### 4.1. The principle of a designed yaw sensor

Generally, many yaw sensors have been applied to observe the angular velocity of aircrafts and vehicles. The commercial yaw sensor is both low resolution and accuracy in degree unit. Although the angular interferometer is more capable than other angular devices with high accuracy. There are still the several disadvantages of laser measurement system and application limit, it is impossible to observe an angular measurement at the same time as a linear measurement owing to the different optical devices used, it means that the real-time monitoring of a yaw measurement is not possible. At present, a more suitable high-resolution yaw sensor for investigating yaw errors is needed. A yaw error measurement using a yaw sensor would also resolve the investigation problem. An investigation into yaw error measurements requires a yaw sensor [9] that is capable of angular measurements rotating around the Z-axis while the carriage is moving along the guide. If a yaw sensor is mounted on the carriage, then instead of taking only angular measurements, it could detect any yaw errors and compensate them in real time. The principle of the designed yaw sensor is based on angular momentum or Coriolis force [10,11].

$$\tau = r \times F \quad (5)$$

$$\tau = |r||F|\sin\phi \quad (6)$$

where  $\tau$  is the torque vector and  $\tau$  is the magnitude of the torque,  $r$  is the displacement vector (a vector from the point measured, typically the axis of rotation, to the point where a force is applied),  $F$  is the force vector, and  $\phi$  is the angle between the force vector and the lever arm vector.

Ideally, the high-resolution yaw sensor requires an incremental rotary encoder type with 324,000 PPR (pulses per revolution), which is equivalent to 1,296,000 PPR ( $3600 \times 360^\circ$  equal to 1 arcsec per pulse), and is used for generating angular measurements during a quadrant  $90^\circ$  rotation made in 1 arcsec. Now, the high pulses per revolution of incremental rotary encoder is very expensive and still have no commercial type of RE. In Fig. 10, design of yaw sensor has the shaft stopper of the rotary encoder, it is a mechanical device, such as a flywheel. It needed to break the rotation of the shaft. It also has the moment of



Fig. 6. Yaw and pitch error measurement using a laser interferometer.

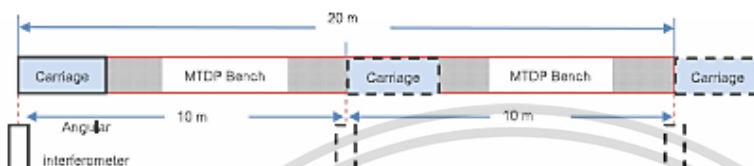


Fig. 7. The setup of yaw and pitch measurement by using an angular measurement system; Measuring Tape Development Project (MTDP).

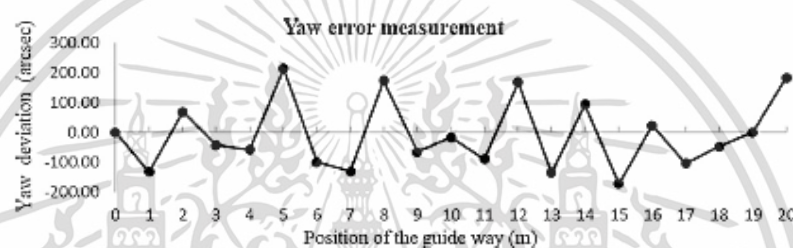


Fig. 8. Yaw error measurement using a laser angular measurement system.

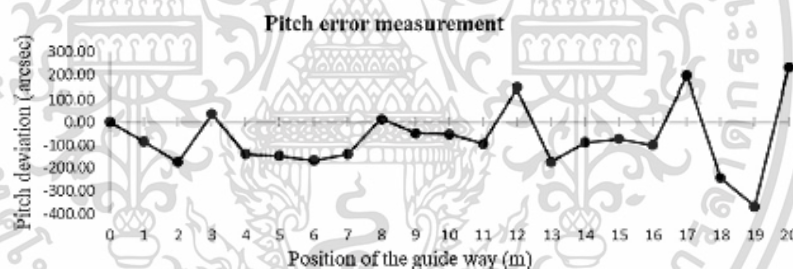


Fig. 9. Pitch error measurement using a laser angular measurement system.

inertia and thus resists in the rotation. The amount of energy stored in a flywheel is proportional to the square of its rotational speed. Energy is transferred to a flywheel by the application of torque.

The yaw sensor consists of the incremental rotary encoder mounted on a mechanical or RS-232 interface card. This angle encoder produces  $(90 \times 3600)/5000$  pulses equal to 64.8 arcsec/pulse (Table 1), which is sufficient to investigate a yaw error measurement. To ensure that the yaw sensor is accurately read, the rotary encoder needs to compare the measurement value with the reference value using a reference positioning an incremental rotary encoder RE design. For this design which this application uses high-sensitivity positioning to observe tiny angular movements for yaw error detection. The designed system uses a 32-bit microcontroller card for reading the rotary encoder result of an angular measurement, and connects to a PC using Visual Basic 2006 version to

run the yaw measurement program, as shown in Fig. 11.

#### 4.2. Calibration of yaw sensor

The yaw sensor was calibrated by a comparison with the angular measurement system of a laser interferometer, as shown in Fig. 12.

The measurement error of yaw sensor calibration is shown in Fig. 13. In the bilaterally positive (blue line) and negative (red line) direction, the maximum range is  $\pm 648$  arcsec or 10 measuring points (reading 64.8 arcsec/step). The yaw

<sup>1</sup> For interpretation of color in Fig. 13, the reader is referred to the web version of this article.

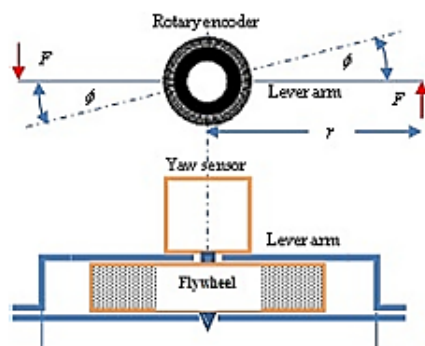


Fig. 10. Design principle of yaw sensor.

Table 1  
Specification of yaw sensor.

Specification of yaw sensor		
Items	Specification	Unit
Measuring range	-650 up to 650	arcsec
Target uncertainty	$\pm 60$	arcsec
Type of encoder	Increment rotary encoder	-
Input/output interface card	32 bits, Microcontroller	-
Software	Visual Basic Version 2006 or better	-
Operating system	Windows 2010	-
Sensitivity	5000 pulses/quadrant or more	ppr
Repeatability	30	arcsec
Resolution (angle)	64.8	arcsec
Rotation torque	Less than 5.0	gf



Fig. 11. Incremental rotary encoder and 32-bit microcontroller card.

error was  $\pm 1$  digit (65 arcsec). The measurement uncertainty evaluation of the yaw sensor [12] was 40 arcsec, with a confidence level of 95% ( $k = 2$ ) (Table 2). Although the uncertainty of the yaw sensor was 40 arcsec and the uncertainty had a normal distribution approximately 200  $\mu\text{m}$  (1 arcsec  $\approx$  0.005 mm), ( $k = 2$ ) at a length of up to 50 m.

This uncertainty could be reduced by the sources of uncertainty (Table 2), such as eccentric error ( $u_{e3}$ ), rotary table ( $u_{s3}$ ), and

repeatability ( $u_{s3}$ ). The uncertainty of the yaw sensor did not depend on the length of the guide way. Moreover, the minimized uncertainty can approach 3  $\mu\text{m}$  (Table 3) if the eccentric error, rotary table, and repeatability were reduced to less than 1.0 arcsec. In this case, the standard uncertainty of the yaw sensor would be 0.687 arcsec, reaching 3.43  $\mu\text{m}$ .

The yaw sensor was placed on the carriage as shown in Fig. 14, and the data were collected by the PC. Temperature was also measured according to a reference temperature of 20 °C. It was possible to use the laboratory developed software to collect the measurement results and monitor the temperature effect on these results. The measurement commands were determined by the software, and the carriage was then positioned at the target points shown on the screen. Next, the measured results were automatically transferred to the software. During the measurement, the straightness values were taken at 350 mm increments along the 20 m guide, and the measurement was continuously conducted for 58 runs, four times each, for a high-precision carriage;

The yaw error measurement with the yaw sensor (solid line) and angular measurement system (dash line) are shown in Fig. 15. The overall error measurement of the yaw sensor compared with angular measurement system was larger than that of the classical method. The different results of comparison were caused by the eccentric and misalignment effect of yaw sensor.

## 5. Measuring tape calibration

The measuring tape was calibrated at 1 m increments up to 10 m, and at 5 m increments from 10 m to 20 m, and can be calibrated depending on the customer design. The start and end positions, number of cycles, and number of intervals are entered into the laboratory developed software. The program then calculates the target values and displays them to the operator on the screen. The program also allows the user to enter non-regular intervals. In addition, the required identification such as the serial number, customer name, material, and thermal expansion coefficient of the rule or tape can also be entered into the program. For the temperature measurement process, the carriage is first set over the zero graduation line, and then sequentially at each line up to the maximum. This sequence is then repeated in reverse order ending at the zero mark. Finally, the carriage is displaced and returned to the maximum graduation. This is called bidirectional mode in the software, and is chosen by the operator before the calibration. The software allows the user to conduct measurements in unidirectional mode as well. Each end of a standard tape is stretched by the tensile force of a 10 kg stainless steel weight [13,14]. A standard tape is placed over the stainless-steel wheel (double pulleys) mounted at each end of the base measuring machine. The results of the measuring tape are shown in Fig. 16.

Each tape needs to be stretched out using the weights according to the manufacturer's specifications or international standards such as the OIML recommendations. The variations in temperature are measured using three platinum resistance thermometers placed on the measuring tape calibration system. The average correction and compensation are executed using an air sensor and software (Keysight technology) [15], compensating for factors such as relative humidity, air pressure, and air index.

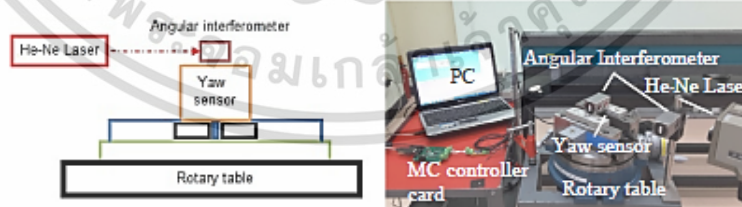


Fig. 12. Yaw sensor calibration system using angular measurement system.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

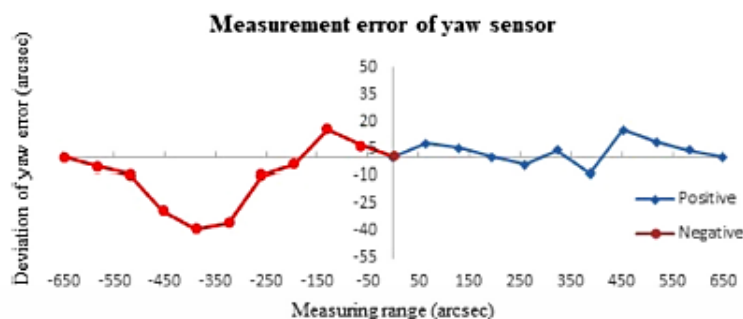


Fig. 13. Measurement error of yaw sensor calibration.

Table 2  
Measurement uncertainty evaluation of yaw sensor calibration.

Uncertainty budget of yaw sensor calibration (arcsec)				
Symbol	Source of uncertainty	Value	Distribution	Standard uncertainty
$U_{b1}$	Standard accuracy	0.05	Rectangular	0.029
$U_{b2}$	Standard drift	0.05	Rectangular	0.029
$U_{b3}$	Resolution of angular system	0.10	Rectangular	0.029
$U_{b4}$	Resolution of rotary encoder	0.80	Rectangular	0.231
$U_{b5}$	Eccentric error	10.00	Rectangular	5.774
$U_{b6}$	Misalignment of angular system	0.50	Rectangular	0.289
$U_{b7}$	Misalignment of yaw sensor	0.50	Rectangular	0.289
$U_{b8}$	Rotary table	15.00	Rectangular	8.660
$U_c$	Repeatability	29.28	Normal	16.905
	Combined uncertainty			19.858
	Expanded uncertainty	$k = 2$		39.7
	Report uncertainty			40

Table 3  
The minimized measurement of the yaw sensor uncertainty.

Uncertainty budget of yaw sensor calibration (arcsec)				
Symbol	Source of uncertainty	Value	Distribution	Standard uncertainty
$U_{b1}$	Standard accuracy	0.05	Rectangular	0.029
$U_{b2}$	Standard drift	0.05	Rectangular	0.029
$U_{b3}$	Resolution of angular system	0.10	Rectangular	0.029
$U_{b4}$	Resolution of rotary encoder	0.80	Rectangular	0.231
$U_{b5}$	Eccentric error	0.50	Rectangular	0.289
$U_{b6}$	Misalignment of angular system	0.50	Rectangular	0.289
$U_{b7}$	Misalignment of yaw sensor	0.50	Rectangular	0.289
$U_{b8}$	Rotary table	0.50	Rectangular	0.289
$U_c$	Repeatability	0.50	Normal	0.289
	Combined uncertainty			0.687
	Expanded uncertainty	$k = 2$		1.4
	Report uncertainty			1.5

## 6. Measurement uncertainty

The evaluation of measurement uncertainty [16,17] of measuring tape calibration, as following items.

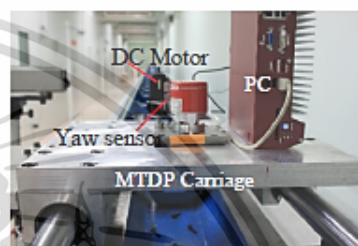


Fig. 14. Measuring Tape Development Project (MTDP) carriage system using yaw sensor.

### 6.1. Deviation of tape measurement ( $U_a$ )

Bi-direction deviations of a tape measurement were set as type A uncertainty. The standard deviation for a mean number,  $n$ , of four repeated measurements was  $36 \mu\text{m}$ . The uncertainty contribution is estimated to be  $36/\sqrt{4} = 18 \mu\text{m}$ .

### 6.2. Standard accuracy ( $U_{b1}$ )

A laser interferometer with a long-range option used for the calibration of a measuring tape has an accuracy of  $1.5 \times 10^{-6} \times L$ , where  $L$  is length, for tape calibration under laboratory conditions. This length-dependent value was considered to have a rectangular distribution resulting in  $(1.5 \times 10^{-6} \times L)/\sqrt{3} = 0.87 \times 10^{-6} \times L$ .

### 6.3. Dead path error ( $U_{b2}$ )

A dead path error [18] is an error associated with the change in environmental parameters during a measurement. Such an error occurs when a part of the light path (a dead path) is not included in the temperature (both air and base), pressure, and humidity compensation. This error is particularly important in laser interferometers where the interferometer is built in a common casing with a laser head, so it is very difficult to reduce the dead path. This error is approximately  $0.2 \mu\text{m}$ . Therefore, the uncertainty contribution owing to this error has a rectangular distribution, and the result of the dead path error is  $0.2/\sqrt{3} = 0.12 \mu\text{m}$ .

### 6.4. Resolution of a laser interferometer ( $U_{b3}$ )

The resolution of a laser interferometer of a linear measurement system is  $1.0 \mu\text{m}$ , and is considered to have a rectangular distribution of  $1.0/2\sqrt{3} = 0.3 \mu\text{m}$  with a semi-range.

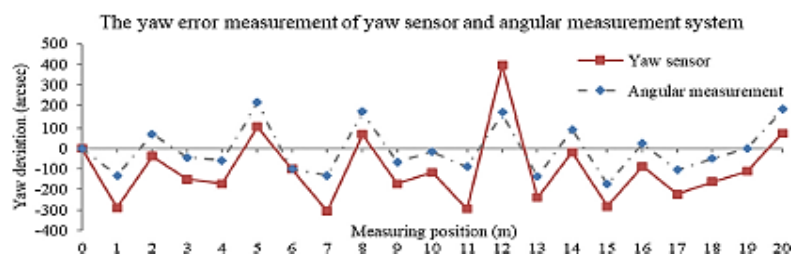


Fig. 15. The yaw error measurement of yaw sensor and angular measurement system.

#### 6.5. Abbe error ( $U_{Ab}$ )

The evaluation uncertainty of the Abbe error in the case of yaw error measurement considered the application of both the angular interferometer and yaw sensor. Regarding the uncertainty of the yaw error measurement with angular interferometer, there were two intervals according to the manufacturer's specifications for angular measurement range of up to 15 m (Fig. 7).

The maximum yaw errors at lengths of up to 10 m and 10–20 m were 346 and 357 arcsec, respectively. The reference line (x-axis) to be calibrated was defined as  $\pm 2$  mm in overall length (20 m). For half of the overall length,  $[\sin(346/3600) + \sin(357/3600) \times 1 \text{ mm}] = 3.41 \mu\text{m}$ , which resulted in the summation of an uncertainty contribution of  $3.41/\sqrt{3} = 1.97 \mu\text{m}$ .

The maximum pitch error at lengths of up to 10 m and 10–20 m were 210 and 600 arcsec, respectively. The reference line (x-axis) to be calibrated was defined as  $\pm 2$  mm in overall length (20 m). For half of the overall length,  $[\sin(210/3600) + \sin(600/3600) \times 1 \text{ mm}] = 3.93 \mu\text{m}$ , which resulted in the summation of an uncertainty contribution of  $3.93/\sqrt{3} = 2.27 \mu\text{m}$ . The uncertainty of the yaw error measurement with the yaw sensor, for the yaw sensor application for overall carriage length of up to 20 m, the result of the uncertainty evaluation was regarded as normal distribution ( $k = 2$ ) with,  $40/2 = 20$  arcsec, equivalent to 0.10 mm or 100  $\mu\text{m}$  (1 arcsec  $\approx 0.005$  mm) (Table 2).

#### 6.6. Cosine error ( $U_{Cs}$ )

The laser is adjusted parallel to the x-axis with a better than 5 mm lateral shift and a 20,000 mm length. This results in a cosine error of  $5 \times 10^{-8} \times L$  resulting in  $2.88 \times 10^{-6} \times L$  with a rectangular distribution.

#### 6.7. Temperature effect ( $U_{b\theta}$ )

The temperature correction with coefficient of thermal expansion (CTE) of steel tape used in a 20 m tape calibrator is known to be within  $\pm 1$  ppm/ $^{\circ}\text{C}$ , and the maximum temperature deviation from  $20^{\circ}\text{C}$  is less than  $0.5^{\circ}\text{C}$ . An uncertainty contribution owing to a CTE correction can be calculated as  $0.5^{\circ}\text{C} \times 1 \times 10^{-6} \times L$ . Considering this value to have a rectangular distribution, the uncertainty contribution is estimated, resulting in:  $0.5 \times 10^{-6} \times L/\sqrt{3} = 0.3 \times 10^{-6} \times L$ .

#### 6.8. Temperature measurements ( $U_{b\theta}$ )

The accuracy of a temperature measurement for a line scale used in 0, 10, and 20 m tape calibrations using material sensors is greater than  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ . The uncertainty contribution can be calculated as  $0.1^{\circ}\text{C} \times 11.5 \times 10^{-6} \times L$ . Uncertainty is estimated using a rectangular distribution as  $1.15 \times 10^{-6} \times L/\sqrt{3} = 0.67 \times 10^{-6} \times L$ .

#### 6.9. Standard drift ( $U_{b\theta}$ )

The standard drift is obtained from the differential between the previous and latest results. There are no calibration results from a laser interferometer used in a linear measurement system. The uncertainty contribution uses an approximate accuracy of a linear measurement system of  $4.0 \times 10^{-7} \times L$ .

#### 6.10. Refractive index of air ( $U_{b\theta}$ )

The angular measurement system is influenced by the refractive effect of air. The refractive index is calculated for the following conditions (with the controlled environment conditions specified in brackets): a temperature range of  $0\text{--}35^{\circ}\text{C}$  ( $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ), relative humidity of  $0\text{--}100\%$  ( $50 \pm 5\%$ ), pressure of  $50\text{--}120$  kPa (100 kPa), and

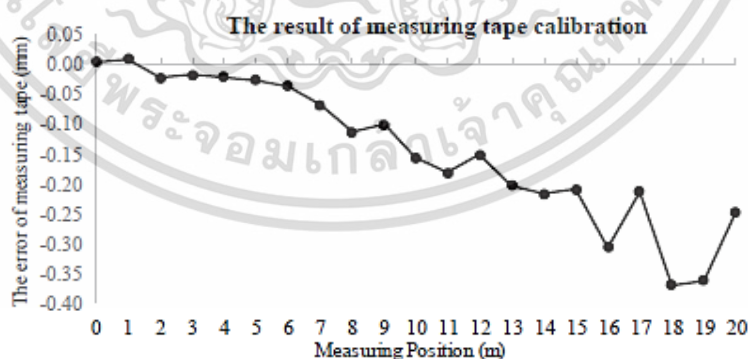


Fig. 16. The result of measuring tape calibration.

Table 4  
Measurement uncertainty of 20 m tape calibration using a laser interferometer.

Uncertainty budget of tape calibration 20 m using laser interferometer						
Symbol	Source of uncertainty	Value		Distribution	Standard uncertainty	
$U_a$	Deviation of tape measurement	1.92E-02		Normal	1.92E-02	19.18 μm
$U_{sr}$	Standard accuracy, (1)		4.00E-07	Rectangular	2.31E-07	0.231
$U_{dp}$	Dead path error	2.00E-04		Rectangular	1.15E-04	0.12 μm
$U_{rl}$	Resolution of laser interferometer	1.00E-03		Rectangular	5.77E-04	0.58 μm
$U_{\omega}$	Abbe error					
	- Yaw error (arcsec)	3.76E-03		Rectangular	2.17E-03	2.17 μm
	- Pitch error (arcsec)	5.82E-03		Rectangular	3.36E-03	3.36 μm
$U_{\omega}$	Cosine error, (1)		3.61E-04	Rectangular	2.08E-04	0.211
$U_{\omega}$	Temperature effect, (1)		5.75E-06	Rectangular	3.32E-06	3.321
$U_{\omega}$	Temperature measurements, (1)		1.15E-06	Rectangular	6.64E-07	0.661
$U_{\omega}$	Standard drift	4.00E-07		Rectangular	2.31E-07	0.23 μm
$U_{\omega}$	Refractive index of air, (1)		1.50E-06	Rectangular	8.66E-07	0.871
$U_{\omega}$	Force effect (tension load), (1)		3.15E-06	Rectangular	1.82E-06	1.821
	Combined standard uncertainty, $U_c$				19.4	3.95
	Expanded uncertainty, $U_{95}$ , $k = 2$				$\sqrt{(20)^2 + (4.0 \times 10^{-4})^2}$	$\sqrt{(40)^2 + (8.0 \times 10^{-4})^2}$

Therefore, the uncertainty contribution is estimated as  $3.15 \times 10^{-6} \times 1/\sqrt{3} = 1.82 \times 10^{-6} \times 1$ .

CO<sub>2</sub> concentration of 300–600 μmol/mol. It can be calculated by the following Eq. (7):

$$n = 1 + 7.86 \times 10^{-4} \times P / (273 + t) - 1.5 \times 10^{-11} \times RH (t^2 + 160) \quad (7)$$

where the air component has a temperature of  $20 \pm 1$  °C, a pressure of 100 kPa, a relative humidity of  $50 \pm 5\%$ , and an uncertainty of  $1.5 \times 10^{-7}$ .

#### 6.11. Force effect ( $U_{b10}$ )

The uncertainty contribution owing to the measuring force, i.e., the tension load, is applied during the calibration of the tape according to the manufacturer's specifications. The following equation is used to determine the tensile correction value, where  $C_p$  is tensile correction value (mm) owing to applied tension  $P-P_0$  ( $P_0$  is the standard tension equal to 100 N),  $L$  is the measuring length (mm),  $E$  is the modulus of elasticity (kgf/mm<sup>2</sup> or N/mm<sup>2</sup>), and  $A$  is steel tape cross-sectional area (mm<sup>2</sup>). The following equations are obtained as a model function for the uncertainty calculations to determine the uncertainty due to the applied force being different from the specified force (i.e., the uncertainty of the measurement force or tensioning load) by applying differential Eq. (8):

$$C_p = \frac{(P-P_0)L}{E \cdot A} \left( \frac{N \cdot mm}{mm^2} \right) \quad (8)$$

The term  $(L/E \cdot A)$  is the sensitivity coefficient used to represent a relation between the measurement force and the deviation in length.

An uncertainty contribution arises owing to the variations in length when there is a difference between the applied and specified forces. The formula for the length deviation owing to the applied force may be written by Eq. (9):

$$u(\Delta C_p) = u(P) \times \frac{1}{E \cdot A} \times L \quad (9)$$

The manufacturers provide specifications and even correction values pertaining to the differences in the applied and specified forces (tensioning loads). For instance, one may use the equation and specifications below for corrections by Eq. (10):

$$u(P) = (P-P_0) \times \frac{1}{E \cdot A} \times L \quad (10)$$

The following numerical values for  $A$  and  $E$  are provided by the manufacturer:

$$A = 2.34 \text{ mm}^2 \text{ and } E = 2.1 \times 10^4 \text{ kgf/mm}^2 \text{ or } 20.6 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$$

In fact,  $(P-P_0)$  can also be considered as  $u(P)$  in Eq. (11) because it represents the difference between the applied and specified force on the tapes. In addition, the value of  $u(P)$  is estimated to be 1.52 N for the tensioning system of a 20 m tape calibration system.

$$u(P) = \frac{(P-P_0) \cdot L}{E \cdot A} = \frac{1.52L}{48.2 \times 10^4 \times 2.34} = 3.15 \times 10^{-6} \times L \quad (11)$$

The measurement uncertainty in (Table 4) is given by the expanded uncertainty  $U_{20}$  (in μm) determined by Eq. (12):

$$U_{20} = \sqrt{(40)^2 + (8.0 \times 10^{-4})^2 L^2} \quad (12)$$

where  $L$  is the measuring length.

The uncertainty of the angular interferometer is based on the guideway alignment. However, the uncertainty should rather be estimated from the summation of each interval. For example, the uncertainty of the yaw error maximum, at lengths of 0–10 m ( $U_{10}$ ), 10–20 m ( $U_{20}$ ), ..., and 40–50 m ( $U_{50}$ ) was obtained assuming that the standard uncertainty was approximately 0.0017 mm or 1.7 μm. The estimated uncertainty of yaw error at a length of 0–50 m was  $1.7 \times 5 = 8.5$  μm.

#### 7. Performance check of measuring tape calibration system

The performance check of tape calibration was carried out by an inter-laboratory comparison with the calibration results of NIM China, for a length of 20,000 mm (20 m), as shown in Fig. 17 [19,20].

The validation of the tape calibration is shown through an  $E_n$  number evaluation, i.e., an inter-laboratory comparison (between DSS and NIM, China) of a measuring tape of up to 20 m. The performance evaluation based on the  $E_n$  number is determined by the following Eq. (13) [21].

$$E_n = \frac{|\bar{X}_{lab} - \bar{X}_{ref}|}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad (13)$$

$\bar{X}_{lab}$ : mean value of laboratory.

$\bar{X}_{ref}$ : mean value of reference laboratory.

$U_{lab}$ : uncertainty of laboratory.

$U_{ref}$ : uncertainty of reference laboratory.

The evaluation criteria of an  $E_n$  number  $\leq 1$  was satisfied both before and after the inter-laboratory comparison. This determination of the

## Inter-laboratory comparison between DSS and NIM, CHINA

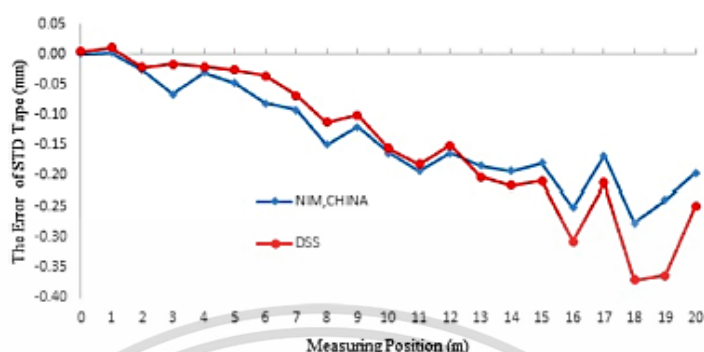


Fig. 17. Inter-laboratory comparison between DSS and NIM, China.

long-term stability of the system was illustrated in the form of test results with the highest OIML Class I accuracy values. The device is therefore suitable for the calibration of reference tapes and rules that can be further used for the calibration of other test tapes by comparison.

### 8. Conclusions

A measuring tape calibration system designed and constructed as part of the TMDP at DSS for the calibration of tapes and other applications was described. The measurement uncertainty of a prototype yaw sensor is currently up to 40 arcsec, but it can be minimized to a few microns with the appropriate devices. However, the yaw sensor application can be practically used as a solution for yaw measurement, as it provides traceable calibration of tapes using a laser interferometer with traceable measurements. Furthermore, it is cost-effective for the evaluation and initial verification of a total length of 20 m, particularly for a new calibration system of 50 m steel tapes and other applications, such as a laser distance meter.

In the near future, a smart carriage with automatic yaw measurement could solve certain problems regarding the mechanical or structural design of the straightness of a guide rail, which can be improved using a yaw sensor carriage.

### Acknowledgments

The authors would like to thank the Department of Science Service (DSS), Thailand for their help and support regarding the equipment used, and their technical discussions. We are also grateful for the technical comments provided by the National Institute of Metrology of Japan (NIMJ) and for the inter-laboratory collaboration with the National Institute of Metrology (NIM), China.

### Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

### Declaration of interests

None.

### References

[1] T.Yandayan, B. Ozgur, A motorized 5 m tape comparator for traceable measurements of tapes and rules, *J. Measure.* 2013.11.040, TUBITAK UME, Bursa Mah. Dr.

Zeki Acar Cad. Pk54, 41470 Gebze/Kocaeli, Turkey, 2013.

[2] T.Yandayan, B. Ozgur, 5 m-measurement system for traceable measurements of tapes and rules, in: *Proceedings of SPIE*, vol. 5190, TUBITAK UME, Bursa Mah. Dr. Zeki Acar Cad. Pk54, 41470 Gebze/Kocaeli, Turkey, SPIE 2003.

[3] Jae Wan Kim, Don-Young Jeong, Myung Soon Kim, Chu-Shik Kang, Jong-Ahn Kim, Tae Bong Eom, A 50 m laser interferometer for automatic calibration of surveying tapes using wireless communication, *Meas. Sci. Technol.* 19 (1) (2008) Published 23 November 2007-2008.

[4] H.P. Layer, W.T. Ertler, Traceability of laser interferometric length measurements, National Bureau of Standards Gaithersburg, MD 20899, 10, June 1988.

[5] P.E. Ciddor, F.H. Ebsen, K.J. Loughey, H.M.P. Stock, A 70 m laser interferometer for the calibration of survey and mapping, *Australian Surveyor* 33 (1987) 493.

[6] OIML R35 – EN series, Material measures of length for general use, 2013, < <http://www.oiml.org/publications/> >.

[7] R. Tschel, R. Stadelmann, J. Krüger, Optical sensor for measurement of roll + pitch + yaw angles over large distances with high accuracy, in: *Proc. SPIE 3824, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection*, 1999 (September 21, 1999).

[8] C.P. Wang, Oprodyne, Inc., Straightness measurement by laser Doppler displacement meter technique, *Laser Optonics*, 6(9) (1987) pp. 69-71 (1180 Mahalo Place Compton, CA 90220). <http://www.optodyne.it/inglese/publications/TAS22E-Precision%20positioning.pdf>. [http://www.optodyne.it/inglese/publications/TAS30E-RAM\\_Sag.pdf](http://www.optodyne.it/inglese/publications/TAS30E-RAM_Sag.pdf).

[9] Wanchai C. Vinyai, T. Arjita N., Vinyai K. The Application of Yaw sensor for measuring carriage system, in: *16th International Conference on Control, Automation and Systems, ICCAS 2016*, Oct. 16–19, 2016 in HICO, Gyeongju, Korea.

[10] R.A. Serway, J.W. Jewett Jr., *Physics for Scientists and Engineers*, sixth Ed, Brooks Cole, 2003 ISBN 0-534-40842-7.

[11] P. Tipler, "Physics for Scientists and Engineers Mechanics", *Oscillations and Waves, Thermodynamics*, fifth ed., W. H. Freeman, 2004.

[12] T. Vinyai, C. Wanchai, J. Supaporn, The Measurement Uncertainty Evaluation of Yaw Sensor Calibration, in: *16th International Conference on Control, Automation and Systems, ICCAS 2016*, Oct. 16–19, 2016 in HICO, Gyeongju, Korea.

[13] C.L. Carroll Jr., National Bureau of standards (NBS), NBSIR 74-451, "Field comparisons of steel surveyors' tapes," SOP No.12, recommended standard operating procedure for calibration of metal tapes tape to tape method, October 2014.

[14] KDS, MARUTEC-KDS CORP. Instruction manual.

[15] Agilent Technologies, Inc., 2010, Laser Measurement System 5529A – User's Guide. Hewlett-Packard Company, 5301 Stevens Creek Boulevard, Santa Clara, California 95052-8059, May 10, 2010.

[16] J. Ukkari, A. Raitanen, J. Manninen, V.-P. Eala, A. Laasila, Interferometric 30 m bench for calibration of 1D scales and optical distance measuring instruments, *Measurement Science and Technology*, 23(9), 094017 <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/23/9/094017>.

[17] A. Godina, R. Acla, Calibration of Tape Measures with Small Measurement Uncertainty, *DAUAM International*, Vienna, Austria, 2012, pp. 187–196 ISBN 978-3-901509-86-5, ISSN 1726-9687, DOI 10.2507/daaam.scibook.2012.16.

[18] [http://www.leanoz.com/laser\\_uk.htm](http://www.leanoz.com/laser_uk.htm). <http://www.com.laser.pdf#ndiples.pdf>, Principle of operation, dead path error, ABBE error, Cosine error, Refractive air index and compensation. Fenox, UK.

[19] R. Thalman, EUROMET Supplementary Comparison, Project 677, Steel tape Measures Final report, Wabern, EUROMET 677 Final report.doc 12.10.2004.

[20] EUROMET Supplementary Comparison, Project 875 Steel tape measure final report, Wabern, June 2006, R. Thalman, 06.06.2006.

[21] Conformity assessment — General requirements for proficiency testing ISO/IEC 17043(E). 201 0.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# The error reduction of the ALSM control system with the measurement error feedback

Mr. Wanchai Chinchusak

Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute Technology Ladkrabang  
Bangkok, Thailand  
[s3610151@kmitl.ac.th](mailto:s3610151@kmitl.ac.th), [c\\_wanchai@hotmail.com](mailto:c_wanchai@hotmail.com)

Assoc.Prof. Dr. Vittaya Tipsuwanporn

Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute Technology Ladkrabang  
Bangkok, Thailand  
[ktvittay@kmitl.ac.th](mailto:ktvittay@kmitl.ac.th)

**Abstract**— Generally, there are many of the error evaluation methods which employed for the length measurement system. The reversal error is one of the important sources of the error. Normally, it is compensated by using the linear error compensation but some residual error is found for measurement uncertainty evaluation.

This paper presents a method which is a new design of an automated line scale measuring machine (ALSM) error compensation module. It can be able to compensate the reversal error from the ALSM by reducing the reversal error approximately 10% more.

**Keywords**—ALS<sub>M</sub>, reversal error, uncertainty, linear error compensation

## I. INTRODUCTION

The calibration method of line scale such as metal rule, measuring tape, those uses a line scale measuring machine which is either compares with the rotary encoder [1] or linear encoder. For a highly precision line scale measuring system which it directly compares with the standard glass scale or laser measurement system [2]. Those high precision methods apply a CCD camera to observe the line scale which was captured and analyzed the scale images [3]. There are many designs of the linear error compensation technique for the linear measurement system that has been developed for several years. Many of them employed a simply designed technique of compensation. The error compensation principle was widely used for reducing the instabilities of a control system. Those applications were really not able to eliminate some errors of system, such as reversal error. The applications of linear control module need precisely more compensating device and a special design. Especially, the long-term stability of control system caused by some effect of error that is necessary to correct the control system. However, the reversal error evaluation must be improved.

The conceptual designed of main topic emphasized the error compensation for the ALSM's control system which can utilize the electronics unit for line scale calibration. Images of graduation scale replace the line scale of reference standard. The field constituting of images are recorded by a moving microscope and by a CCD camera with 1 ms charging time interval. The exact distance between the microscope positions the time of charging the CCD pixels is deduced from the video synchronization signals. The reference standard of line scale was used directly compare the reference value with the linear of systematic controller. The experimental result was obviously proved by using a high precision instrument of metrological laboratory. Moreover, in order to achieve the long term progress of

this ALSM development project, the error compensation module of ALSM was proved by the calibration technique.

## II. RELATED WORK

Automatic ruler scale calibration using a rotary machine [1] used the electrical reflecting optical sensor for detecting lines. A beam points to the scale mark of the metal rule. The amplifier detects the reflection and the intensity is compared to a reference value. The signal will be converted to the electrical voltage. The total length of the metal rule will be calculated by counting number of all scale marks on the ruler. The distance of one interval can be measured by the rotary system.

## III. PRINCIPLE

The one important parameter of the residual error is the reversal error caused by systematic drive motion. The reversal error characteristic of measuring machine as shown in the Fig. 1. Basically, the directional reverse is a loss of motion when a reverses direction occurs in the length measuring machine. It is also referred to as reverse motion error. The reversal error is detrimental to accuracy. If the reversal error associated with the motion profile were similar to the variations in the overall error profile and the variations in the amount of reversal over the range of motion would make this difficult to compensate using the simple method. This would be a case for using error compensation [4].

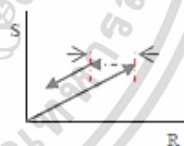


Fig.1. The characteristic of reversal error.

This content is about the reversal error comes from a drive module that is defined as a loss of motion among the components of the drive module when the direction of motion is reversed.

The reversal error of measuring machine concerns the rigidity of the machine when the structure of the measuring machine is under a load of machine. The load occurs caused by any type of force, including friction. Any force opposing an axes direction of motion contributes to lost motion to some degree. Commonly, the error is proportional to the distance from the origin of the angular change. That means the greater the distance is the greater the error. For example the coordinate measuring machine, reversal errors arise with rotary axis due to the effect of mechanical loading. Actual cases of

this reversal error with one high precision measuring machine are a few microns up to ten microns.

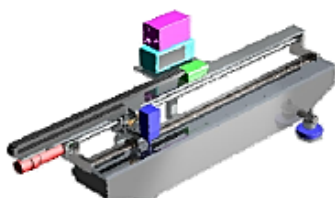


Fig. 2. The structure of line scale measuring machine with linear encoder.

#### A. Linear feedback device

A linear axis travels straight back and forth. Fig. 2, this linear motion is generated by a rotary motion in which a servo motor turns a ball screw of measuring machine came positioning feedback devices. The relationship between encoders and drive components has to do with the type of encoder which attached to the machine. In this case, the axis uses a linear encoder for the position feedback device, the controller of line scale measuring machine may still be completely the unknown error of the lost motion in the drive component but show up the drop of axes reversals at all. This is because of the way that a linear encoder is attached to the machine. The scale part of the encoder is bolted to the axis base which is stationary, and the measuring machine part that is reads the scale is attached to the axis. The only amount of reversal error that will show up in the case of the linear encoder comes from measuring lost motion in the working area, traveling axial setup at some measuring point. If the position feedback device for that axis is a rotary encoder in the motor and there is any backlash in the drive component between that encoder and the axis on the other end, then the line scale controller can send out positioning commands unaware of the backlash. The axis will not show up the drop of the targeted position every time it reverses directions. It is not depend upon the drive module integrity at all because it is not attached to the drive module as in the case of the rotary encoder.

#### B. Software

Software compensation [5] is a feature of controller. As far as backlash is concerned, it is used to compensate for reversal error. It simply involves inputting the appropriate value for the reversal error into the control's parameter for that.

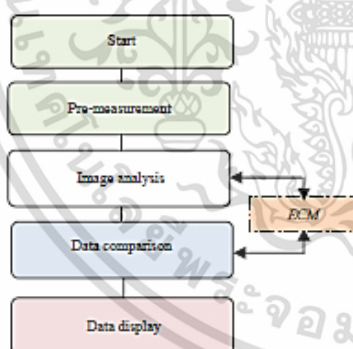


Fig. 3. The flowchart of ALSM measurement program

Then on the ALSM controller will make up for the lost motion upon axis reversals without reflecting it as a position change. These devices feedback the axes positions to the measuring system controller and the controller adjusts those positions as dictated by the computer program as flowchart in Fig.3. With modern machines these are typically encoders. There are linear encoders sometimes called a linear scale.

#### IV. METHOD

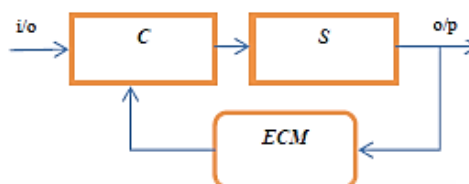


Fig.4. The feedback of ALSM's error compensation module.

In this method mainly points to reduce the reversal error. It would estimates the error compensation of measuring machine linear motion. The block diagram of feedback control system is shown in Fig. 4. The positioning of reversal errors was observed both forward and backward directions of motion. The measurement values are independently recorded. The line scale standard 500 mm grade 1 (tolerance  $1+L/1000 \mu\text{m}$ ) is specially used a reference sample for checking the compensated error of ALSM module. It would be simulated this method of entering the compensation values which is the specific control. These errors would then be entered into the control as separate compensation values and the control would consider direction of motion when determining which value to use.



Fig.5. The CCD camera observed the standard of line scale.

The image of line scale measured shown on Fig.5, the demonstrated measurement being taken in the line scale standard using a simulation of the multisensory measuring machine. The standard scale that its graduate line is basically aligned a stage for the unit under test the same location of the CCD camera with the illumination of LED ring light. There is CCD sensor over the graduate line where the work is continuously performed on the all length.

The conceptual design of error compensation module (ECM) is used to reduce the reversal error of the ALSM. This module bases on both the image analysis and linear compensation technique dictated by software application. The line scale measuring system designs which a modern design consists of mechanism part, system controller and PC with programming software. This measuring machine obtained data directly from linear encoder and the captured image analyzed by image processing software laboratory developing type.



Fig. 6. The plane alignment for a sample set.

As mentioned above in Fig.6, the measuring program flowchart, the block diagram start to preliminary measurement with image scanning or pre-measurement, then program analyze the viewed image of nominal value that was set up at the beginning of measurement. Then a detected image relate to the ECM. The simulation software analyzes the center of line scale on displays [6] [7] and compare with data from linear encoder as shown in Fig.7, (left). The dash line block of search area would shows around of the higher and lower of line scale center by using the image analysis as Fig.7, (right). The reversal error detection is analyzed between the image of reverse motion (brown background area) and the image of nominal value (green background area). These images of line scale which are within the search area by using automatic target function.

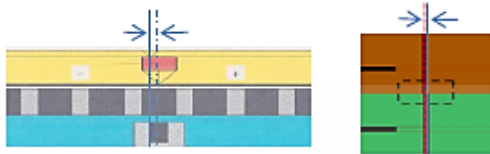


Fig. 7. The view of image simulation distance (left) and the view of image reverse distance (right).

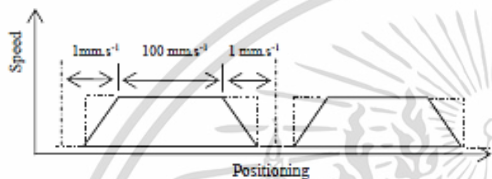


Fig. 8. The speed factor of measurement.

The speed factor, it is caused effect to the measuring machine. This experiment is also optimizes the speed factor control with 50 up to 100  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Fig.8, the deceleration is decreasing motor drive speed when CCD camera approached to measuring point with motor speed  $1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

In case of reversal path that means the different of reversal distance. This modified software automatically measures the marked area which the software performs the image analysis and correction. It means that mean value of image would be corrected directly to reading value. Hence, the corrected value may be higher or lower mean value depend on sensitive and magnify enough to be detected by comparison with standard scale. The mathematical model of measurement equation (1) is the summation of the measuring machine's linear encoder ( $L_{LE}$ ) and the imaging reverse motion ( $L_{IR}$ ), as equation below.

$$L_z = L_{LE} + L_{IR} \quad (1)$$

$$L_z = l_r + \delta l_D + \alpha dt + \delta \alpha dt + d l_{Abbe} + l_{image} + l_{res} + l_{rev} \quad (2)$$

The measurable length defined as the equation (2) comprised of measurable sources such as,  $l_r$ ,  $l_D$ ,  $dt$ ,  $l_{Abbe}$ ,  $l_{image}$ ,  $\alpha dt$ ,  $l_{res}$  and  $l_{rev}$ . The  $l_r$ ,  $l_D$ ,  $dt$ ,  $l_{Abbe}$ ,  $l_{image}$ ,  $\alpha dt$ ,  $l_{res}$  and  $l_{rev}$ , these are the reference standard, drift influence, air temperature, material temperature, Abbe's error, image conditions, resolution and reversal error respectively. Considering, the reversal length that is a simulation of the measurement value. The result of the reversal error corrected directly to the error compensation module.

## V. THE RESULTS

The measuring position measured up to 500 mm, forward incrementing 100 mm and additional turning back 10 mm for the backward direction. In Fig.9, and Fig.10, shown the maximum error reduction both before and after compensation of the forward and backward direction are 12.8% and 12.7% respectively, which the comparison of error reduction is between the forward (before: FB and after: FA) and backward (before: BB and after: BA).

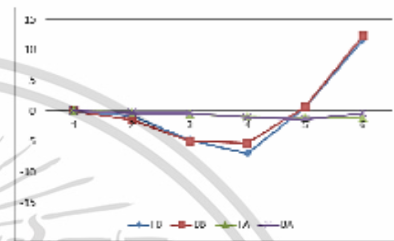


Fig. 9. The error reduction (%) of forward and backward direction.

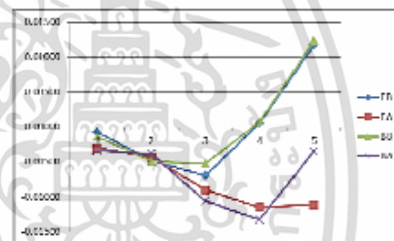


Fig. 10. The error reduction (mm) of forward and backward direction.

## VI. CONCLUSION

Certainly, this solution would be able to reduce the reversal error of the ALSM measuring system more than 10%. This effective result would be applied to correcting for the measuring system. This is a good of case study but there is still some of residual error of measuring system more than that mentioned here. Although it is just one tiny area among many of measuring machine technology the different measuring instruments for more details of the causes and effects. This evaluation of reversal error for the ALSM measuring system is an optional method, therefore the reversal error is used image correcting of the digital image processing which this application is also applies to measuring for positioning errors and performance evaluation. And it had found that there could not completely compensate or correct to this error, because that error is

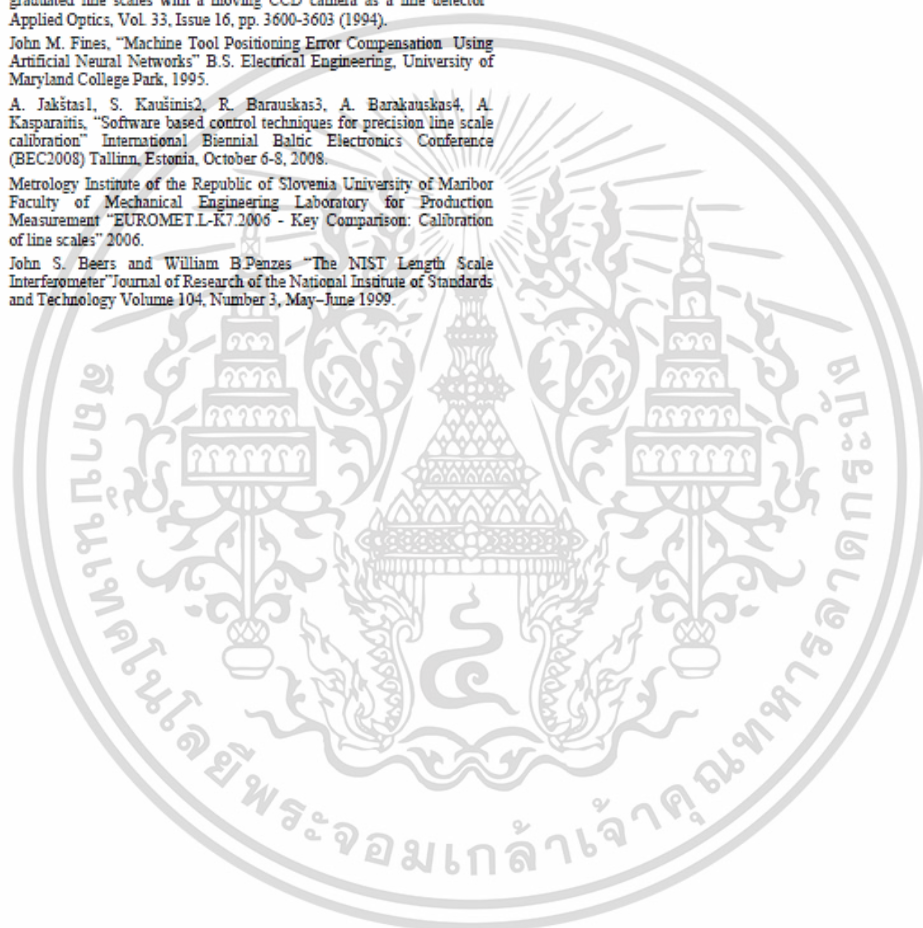
included in the uncertainties. On the next studying, the uncertainty of reversal error would be evaluated.

## VII. ACKNOWLEDGEMENT

The author would like to thank the Length and dimensions calibration laboratory, Department of Science Service for their supports on equipment, facilities, staffs and technical knowledge.

## REFERENCES

- [1] Suricha K raiprawes, Anusorn T onmueanwai and Poj Tangamchit "Automatic Ruler Scale Calibration using a Rotary Machine" ECTI-CON 2008, vol. 2, pp.649-652, May 2008.
- [2] Ichiro Fujima, Yasuaki Fujimoto, Kaoru Sasaki, Hideaki Yoshimori, Souichi Telada and Hirokuza Matsumoto "Laser interferometer for calibration of a line scale module with analog output" SPIE 5190, 103 (2003).
- [3] A. Lassila, E. Ikonen, and K. Riski " Interferometer for calibration of graduated line scales with a moving CCD camera as a line detector" Applied Optics, Vol. 33, Issue 16, pp. 3600-3603 (1994).
- [4] John M. Fines, "Machine Tool Positioning Error Compensation Using Artificial Neural Networks" B.S. Electrical Engineering, University of Maryland College Park, 1995.
- [5] A. Jakštasi, S. Kaušinis2, R. Barauskas3, A. Barakauskas4, A. Kasparaitis, "Software based control techniques for precision line scale calibration" International Biennial Baltic Electronics Conference (BEC2008) Tallinn, Estonia, October 6-8, 2008.
- [6] Metrology Institute of the Republic of Slovenia University of Maribor Faculty of Mechanical Engineering Laboratory for Production Measurement "EUROMET-L-K7.2006 - Key Comparison: Calibration of line scales" 2006.
- [7] John S. Beers and William B.Penzas "The NIST Length Scale Interferometer" Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology Volume 104, Number 3, May-June 1999.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ภาคผนวก ค

2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2015)  
Oct. 13-16, 2015 in BEXCO, Busan, Korea

## The Measurement Uncertainty Evaluation of a Reversal Error for The ALSM

Wanchai Chinchusak<sup>1</sup>, Vittaya Tipsuwanpom<sup>2\*</sup> and Viriya Krongratana<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute Technology Ladkrabang  
Bangkok, Thailand, (s3610151@kmitl.ac.th, c\_wanchai@hotmail.com)

<sup>2,3</sup> Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute Technology Ladkrabang  
Bangkok, Thailand (ktvittay@kmitl.ac.th)\* Corresponding author, (kkviriya@kmitl.ac.th)

**Abstract:** most recently, the measurement uncertainty evaluation employs entirely for evaluating the measurement process which is also use to investigate the residual error of length measuring system. This paper presents the measurement uncertainty of the reversal errors that would be compensated by using the error with the measurement uncertainty compensation module. The confident level of measurement uncertainty is approximately 95%. This evaluation result of the measuring system errors were approximately minimized to 8.0  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** reversal error, measurement uncertainty.

### 1. INTRODUCTION

Generally, the measurement uncertainty (MU) is usually together with the result of calibration report. The error reduction are also necessary the MU in order to compensate their systematic error. However, it is known well that the calibration and measurement capabilities (CMC) defined both the capability of calibration and measurement laboratory. The error compensation of line scale measuring machine is also an advantage for control system precision. Practically, those are still no anyone who directly employed the MU to compensate the error in control system. This is one reason that it could not improve their accuracy. The application of reversal error (re) compensation for the control system of an automated line scale measuring machine (ALSM) has been studied in the early of year 2013[1]. The reversal motion of the line scale measuring machine needs to improve appropriately with compensation feedback. Hence, the improvement of measurement result was obtained more accurately by using the error compensation module (ECM).

In additionally the error with measurement uncertainty compensation module (MUCM) which is the ECM included the MU analysis process and it refers to the uncertainty evaluation follow as the guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)[2]. This paper would propose a special feedback of ALSM's control system with the MU evaluation which added the reversal error source. Although, this is not entirely eliminates all of the measurement errors, the most of residual error was reduced more increasingly in the control system than earlier. This paper expectation would be able to improve more measurement results of the ALSM's control system.

### 2. RELATED WORK

The error reduction of the ALSM control system with the measurement error feedback [1], the conceptual designed of the main topic emphasized the error compensation for the ALSM's control system. The

reference standard of line scale was used directly compare the reference value with the linear of systematic controller. The experimental result was obviously proved by using a high precision instrument of metrological laboratory. Moreover, in order to achieve the long term progress of this ALSM project, the error compensation module of ALSM was proved by the calibration technique.

### 3. THE PRINCIPLE AND METHOD

The conceptual designs of MUCM module is simply based on principle of the feedback control. Generally, this control system process model has the input signal (I/P) of linear encoder to cooperate with output signal or corrected value (O/P) and feeding back to the system controller, it is not only compensates the measurement error, but it also must be included the measurement uncertainty, in order to response more significantly to the control system as, Fig. 1. The feedback design diagram of the MUCM module ( $\text{ECM} \pm U$ ).

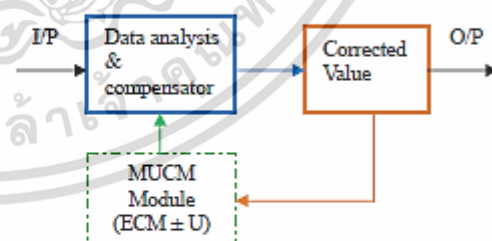


Fig.1. The feedback design with the MUCM module.

As mentioned in previous paper, the reversal error measurement results of the ALSM were obtained by measuring machine simulation with the coordinating measuring machine (CMM) that its control system is the most similar to ALSM's control system. The last of measurement result emphasized to correct and compensate the measurement error caused by the reversal effect. In fact, it is not only the measurement error, but the MU result also needs to compensate in the

measurement control system. Simply method to compare linear encoder with the artefact of line scale standard 500 mm (grade 1, Tolerance:  $1+L/1000 \mu\text{m}$ ) as a reference standard, then take reading and correct the measurement results of the CMM and to evaluate the measurement uncertainty. As the line scale image [3] of reversal motion effect was precisely analyzed by image processing from a captured file in the Fig.2 that showed the small gap of reversal error between measurement positioning (dash line scale: p) and reversal motion positioning (solid line scale: p') image. The  $l_r$  is the reversal motion length from p and p'.

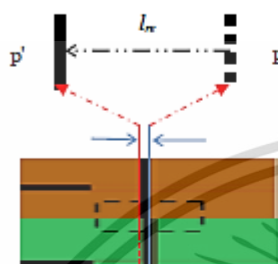


Fig.2. The reversal motion length of line scale image.

#### 4. THE MEASUREMENT UNCERTAINTY

In general a measurement uncertainty evaluation can be refers to the GUM, that estimated input quantities  $x_i$ , whose values given the symbol ( $l_i$ ). That would contribute to the estimated some value of the output quantity. Where, as in most cases, there are several input quantities, the standard uncertainty associated with the estimated value of each one is represented by  $u(x_i)$ . So, standard uncertainty and its evaluation are discussed in the next items.

##### 4.1 The probability distribution evaluation for reversal effect

The measurement uncertainty was evaluated for correctly compensation that would be more considering through the upper and lower bound of range. The reversal error is a part of type B source uncertainty which has unavoidably effect to the measurement result. It is necessary to evaluate these distribution and then, to combine with the other uncertainty sources. Fig.3 shows the distribution of reversal error effect that is defined as the rectangular distribution [4], some of their errors due to the quoted rectangular distribution are the  $\alpha$ -range of two points(the reversal motion from p up to p') which semi-range is  $\pm \alpha$ -zone and peak with  $\alpha/2$ . The minimized standard uncertainty, it is mean a standard uncertainty zone  $\pm \alpha/\sqrt{3}$  at 68 % confident level. Therefore, the main point of evaluation distribution is more significantly than their result. A source uncertainty budget would be combined to the other sources and divided by root square of 3.

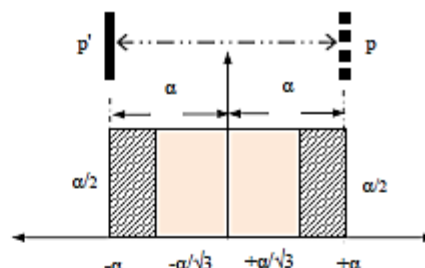


Fig.3. The rectangular distribution of reversal error.

##### 4.2 The analyzed measurement uncertainty

This mathematical model of measurement uncertainty evaluation was applied from the mathematical equation of the line scale measurements, Eq.(1). The result could significantly estimate their very small values, even though there are some mechanical effects such as,

$$l_c = l_r + \delta l_D + \alpha \Delta t + \delta \alpha \Delta t + d_{\text{Abbe}} + l_{\text{image}} + l_{\text{res}} + l_{\text{re}} \quad (1)$$

The source of uncertainties,

$l_c$  - deviation of the length measurement

$l_r$  - accuracy of reference standard

$\delta l_D$  - drift of reference standard

$\alpha \Delta t$  - temperature deviation of the line scale,  $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$

$\delta \alpha \Delta t$  - linear thermal expansion coefficient of line scale

$d_{\text{Abbe}}$  - Abbe's error effect

$l_{\text{image}}$  - error of calibration image

$l_{\text{res}}$  - resolution of reading values

$l_{\text{re}}$  - reversal error(re)

The components [5] of measurement uncertainty evaluation equation, such as repeatability as type A, uncertainty with the degree of freedom ( $\nu = n-1$ ) and type B, uncertainty are also shows in table 1 [7]. The  $u_{\text{re}}$  uncertainty component is significant to the  $re$  of source uncertainty that it is quoted to be the maximum  $re$  value that it has the standard uncertainty about  $0.75 \mu\text{m}$ .

The combined uncertainty with a root sum square of all uncertainty sources was estimated as show in, Eq.(2)-(4), respectively with the expanded uncertainty equal to approximately  $7.1 \mu\text{m}$ , at the confident level approximately 95% ( $k=2$ ) as show in table 1.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (2)$$

Therefore, the combined uncertainty ( $U_C$ )

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (3)$$

Then,  $U_C^2$  as

$$U_C^2 = u_{\text{ep}}^2 + u_s^2 + u_d^2 + u_{\text{dt}}^2 + u_{\alpha}^2 + u_{\text{Abbe}}^2 + u_{\text{image}}^2 + u_{\text{res}}^2 + u_{\text{re}}^2 \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hence, the effective degree of freedom ( $v_{eff}$ )[6].

$$v_{eff} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{v_i}} = \infty \quad (5)$$

However, the effective degree of freedom ( $v_{eff}$ ) is approached to the infinity because of a good repeatability. The measurement uncertainty absolutely defines as the normal distribution due to, Eq. (5).

## 5. RESULTS

The result of measurement error FB (forward) and BB (backward) before compensation compared with FA (forward) and BA (backward) after compensation which are refers to the last paper Fig.4, [1], although they have already compensated and the error determinates were compensated by the ECM module as the Fig.5. Additionally, a measurement uncertainty must be within the error compensation module ( $ECM \pm U$ ) of the MUCM module as shown Fig.1. These uncertainty evaluations could be appropriately contributed for the ALSM's control system compensation. Hence, these technically compensation are set to be the tolerance of measurement's control system, in order to limit the upper and lower error bound with the uncertainties, as the Fig.6~7. So, this is mean that the  $U_m$  uncertainty source which can be also indirectly added to the MUCM in the measurement uncertainty model.

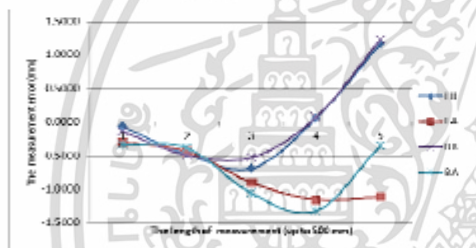


Fig. 4 The error reduction of forward and backward.

A main factor of measurement error discussing on the probability distribution consideration such as, Normal distribution or t- distribution. Type of error sources are set to be a tolerance, which are defined as the upper and lower limit of reversal motion range. the result analysis of the uncertainty showed in Fig.6~7, which is obviously clarified in the table I. The analyzed source of uncertainty, the  $U_m$  is not very large uncertainty source and then applied with tolerance as showed in Fig.8, that it obtained from the average of forward and backward reversal error with measurement uncertainties to the control system of the line scale measuring machine.

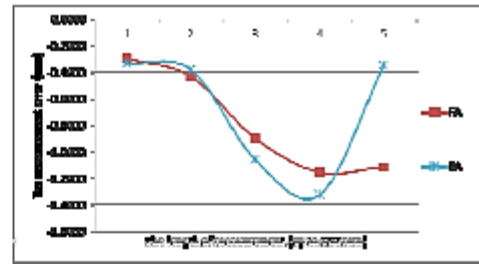


Fig.5 The compensated reversal error.

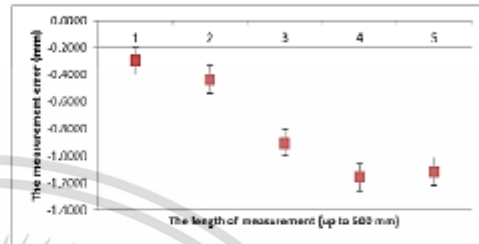


Fig.6 The MU evaluation of forward compensation.

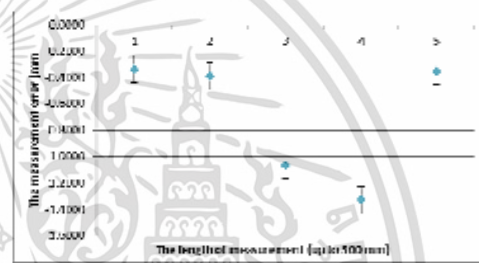


Fig.7 The MU evaluation of backward compensation.

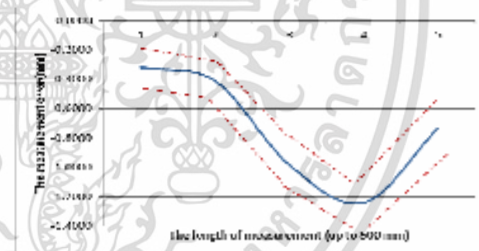


Fig.8. The tolerance of measurement error.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1 The measurement uncertainty evaluation.

Source of Uncertainty	Values	Distribution	Divisor	Ci	u(xi)	V <sub>eff</sub>
Repeatability	2.26E-04	normal	1	1	2.26E-04	4
Accuracy of reference STD, ( $l_s$ )	8.00E-04	rectangular	$\sqrt{3}$	1	4.62E-04	$\infty$
Resolution of reading values, ( $l_{res}$ )	1.00E-04	rectangular	$\sqrt{3}$	1	2.89E-05	$\infty$
Drift of reference standard, ( $dl_s$ )	5.00E-04	rectangular	$\sqrt{3}$	1	2.89E-04	$\infty$
Abbe's error and alignment effect, ( $dl_{Abbe}$ )	3.00E-03	rectangular	$\sqrt{3}$	1	1.73E-03	$\infty$
Temperature Variation at 20 °C, ( $\alpha dt$ )	5.00E-01	triangular	$\sqrt{6}$	0.001	2.04E-04	$\infty$
Linear thermal expansion, ( $\delta \alpha dt$ )	2.00E-01	rectangular	$\sqrt{3}$	0.004	4.91E-04	$\infty$
Error of calibration image, ( $l_{img}$ )	5.00E-03	rectangular	$\sqrt{3}$	1	2.89E-03	$\infty$
Reversal error, ( $l_r$ )	1.30E-03	rectangular	$\sqrt{3}$	1	7.51E-04	$\infty$
Combined Uncertainty		normal			3.54E-03	$\infty$
Expanded Uncertainty		kp = 2			7.08E-03	2.4E+05

## 6. CONCLUSION

In practically, the residual error of measurement could be significantly reduced with measurement uncertainty by adding the reversal error of uncertainty source ( $U_r$ ) and appropriately setting up to the MUCM module and minimized measurement error. Therefore, the tolerance consists of measurement error with measurement uncertainty those are applied this control system, it is approximately equal to  $\pm 8.0 \mu\text{m}$ . This improvement of measurement accuracy would be continuously applied to the other measurement systems. However, in the nearly future expectation of measurement error, it would be presented more reducing with the real time of the measurement error compensation.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Department of science Service (DSS) for their helpful and supports on equipment, and technical knowledge discussion.

## REFERENCES

- [1] W.Chinchusak and V.Tipsuwanaporn, "The error reduction of the ALSM control system with the measurement error feedback" IEEE proceeding, TENCON 2014.
- [2] GUM, "guide to the expression of uncertainty in measurement" JCGM, First edition, September 2008.
- [3] M. Druzovec, T. Welzer, Acko B and A. Godina, "Simulation of line scale contamination in calibration uncertainty model", Int. J simul Model 7(2008)3, pp. 113-123, 2008.
- [4] C.F.Dietrich, "Uncertainty calibration & probability" The statistics of science and industrial measurement, SBN852741758, ADAM Hilger, London, 1973.
- [5] Runje, B. Iserka, Medic, S. rdjan, "Measurement uncertainty in process of line scales calibrating" Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International DAAAM Symposium, Volume 22, No. 1, Editor B. Katalinic, Published by DAAAM International, Vienna, Austria, EU, 2011.
- [6] M3003, "The expression of the uncertainty and confidence in measurement", Edition 3, UKAS, November 2012.
- [7] EA-4/02.M:2013, "Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration", rev01, EA, September 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ประวัติผู้เขียน

- ชื่อ-นามสกุล นายวันชัย ชินชูศักดิ์
- วัน เดือน ปีเกิด 17 ตุลาคม พ.ศ. 2505 จังหวัดอุทัยธานี
- ที่อยู่ 204/302 หมู่บ้านชัยพฤกษ์ (บางบัวทอง) ถ.บางกรวย-ไทรน้อย  
ตำบลพิมลราช อำเภอบางบัวทอง นนทบุรี 11110 โทร. 0-2571-4849
- ประวัติการศึกษา พ.ศ. 2529 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์  
มหาวิทยาลัยรามคำแหง  
พ.ศ. 2545 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาไฟฟ้า  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ความชำนาญเฉพาะด้าน 1) การสอบเทียบเครื่องมือวัดไฟฟ้าและความถี่  
2) การสอบเทียบเครื่องมือวัดความยาวและมิติ  
3) วิจัย พัฒนาและการออกแบบเครื่องมือวัดความยาวและมิติ
- ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย
- พ.ศ. 2532 - 2534 ตำแหน่งนักอำนวยการนิเทศ 3 กรมอำนวยการนิเทศ กระทรวงคมนาคม
- พ.ศ. 2534 - 2542 ตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 3-5 กรมวิทยาศาสตร์บริการ
- พ.ศ. 2542 - 2547 ตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 6ว-7ว กรมวิทยาศาสตร์บริการ  
- ออกแบบ Automated line scale measuring machine : ALSM
- พ.ศ. 2548 - 2559 ตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 8ว หรือ ตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ  
กรมวิทยาศาสตร์บริการ  
- ออกแบบ Measuring tape (50 m) calibration system  
- ออกแบบ Yaw sensor and smart carriage
- ปัจจุบัน ตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ชำนาญการพิเศษ หัวหน้ากลุ่มงานสอบเทียบ  
เครื่องมือวัด 2 กองความสามารถห้องปฏิบัติการและรับรองผลิตภัณฑ์  
กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
- ผลงานวิชาการ
1. W.Chinchusak, V. Tipsuwanporn, V. Kongratana and W. Piyarat  
,Multi-Channel Automated Voltage Standard  
Comparison Equipment Ladkrabang Engineering Journal,  
Volume 16, No. 3, September 1999.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. W.Chinchusak, V. Tipsuwanporn and V. Kongratana, The Design of Voltage Working Standard for The Voltage Standard Comparison Equipment), EECON -24, KMITL, 23-24 November 2001.
3. Wanchai Chinchusak, and Vittaya Tipsuwanporn, The error reduction of the ALSM control system with the measurement error feedback, TENCON 2014, Bangkok, Thailand.
4. Wanchai Chinchusak, Vittaya Tipsuwanporn and Viriya Krongratana, The Measurement Uncertainty Evaluation of a Reversal Error for The ALSM, ICCAS 2015, BEXCO, Busan, Korea.
5. Wanchai Chinchusak, Vittaya Tipsuwanporn, Arjin Numsomran and Viriya Krongratana, The Application of Yaw Sensor for Measuring Carriage System, ICCAS 2016, HICO, Gyeongju, Korea.
6. Vittaya Tipsuwanporn, Wanchai Chinchusak and Supaporn Jaturunruangsri, The Measurement Uncertainty Evaluation of Yaw Sensor Calibration ICCAS 2016, HICO, Gyeongju, Korea.
7. Vittaya Tipsuwanporn, Wanchai Chinchusak, and Arjin Numsomran, The Modification of Yaw Sensor for Length Standard Calibration System, ICCAS 2017, Ramada Plaza, Jeju, Korea.
8. Wanchai Chinchusak, and Vittaya Tipsuwanporn, Investigation of yaw errors in measuring tape calibration system, Elsevier/Measurement (IMEKO) , Volume 125C, p. 142- 150, September 2018.