



การพัฒนาความละเอียดในการวัดของเซนเซอร์วัดความลาดเอียง Nivel20

Amelioration of the resolution of a high precision electronic inclinometer Nivel20

สิริวรรณ บริพัตรโกศล*

Siriwan Boripatkosol*

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800
Department of Mechanical Engineering, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North, Bangkok, Thailand, 10800

Received March 2012

Accepted August 2012

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการพัฒนาความละเอียดในการวัดของเซนเซอร์วัดความลาดเอียง Nivel20 ซึ่งมีค่าความละเอียดในการวัด 1 ไมโครเรเดียน ($\cong 0.0000573$ องศา) ด้วยวิธีการเพิ่มตำแหน่งของการวัดเพื่อให้เกิดการกระจายตัวของข้อมูลสำหรับการหาค่าเฉลี่ยในการวัดซ้ำ โดยใช้เพียโซอิเล็กทริกในการเคลื่อนที่ชุดทดลองเพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความลาดเอียงในระดับที่ต่ำกว่าค่าความละเอียดในการวัดของ Nivel20 และใช้คาปาซิทีฟเซนเซอร์วัดระยะการยกตัวครั้งแรกในแต่ละตำแหน่งการวัดเพื่อชดเชยกลับเข้าไปในผลการวัด ชุดทดลองถูกเชื่อมต่อกับกล่องควบคุมซึ่งถูกโปรแกรมการเคลื่อนที่แบบอัตโนมัติผ่านโปรแกรมออกแบบระบบ ผลจากการวัดซ้ำ 10 ครั้งในแต่ละตำแหน่งที่ทำการวัดพบว่า ก่อนทำการชดเชยค่าเริ่มต้น และหลังทำการชดเชยค่าเริ่มต้น ผลการวัดในแต่ละตำแหน่งมีความแม่นยำ ± 2.5 ไมโครเรเดียน และ ± 0.15 ไมโครเรเดียน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความละเอียดในการวัดของ Nivel20 ถึงสามเท่า

คำสำคัญ : ความละเอียดในการวัด อินคลิโนมิเตอร์ การวัดมุม เพียโซอิเล็กทริก

Abstract

This paper presents a method to ameliorate the resolution of an electronic inclinometer Nivel20 which has resolution one micro-radians ($\cong 0.0000573$ degrees) with the addition of the measuring position for the average of repeated measurements. Using the piezoelectric to achieve a change in slope that is lower than its resolution. Capacitive sensor is used to measure the first step distance for the compensation system and system design software is used for automatic movement in the experiment. The results show that before the compensation, the accuracy at each measurement position is ± 2.5 micro-radians and after the compensation, the accuracy is ± 0.15 micro-radians that is smaller than its resolution three times.

Keywords : Resolution, Inclinometer, Angle measurement, Piezoelectric

*Corresponding author.

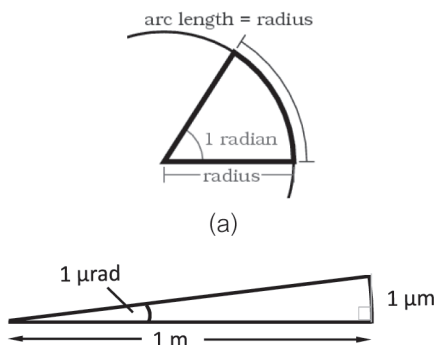
Email address: siriwanb@kmutnb.ac.th

1. บทนำ

การวัดความยาวและการวัดมุมเป็นส่วนหนึ่งของมาตรวิทยาเชิงมิติ ซึ่งทั้งสองปริมาณนี้มีความสัมพันธ์กันทางด้านเรขาคณิต กล่าวคือ มุมสามารถถูกกำหนดค่าได้โดยการวัดความยาวของส่วนประกอบมุม

ในทางคณิตศาสตร์ มุม เกิดจากปลายรังสี 2 เส้นเชื่อมกันที่จุดๆ หนึ่ง มีหน่วยเป็นองศาหรือหน่วยเรเดียน ซึ่งเป็นหน่วยอนุพันธ์เอสไอ* โดยที่ 1 เรเดียน คือ ขนาดของมุมที่วัดจากจุดศูนย์กลางของวงกลม ที่แกว่งออกตามส่วนโค้งของวงกลม ซึ่งส่วนโค้งนั้นมีความยาวเท่ากับรัศมีของวงกลมพอดี (รูปที่ 1a) และด้วยนิยามนี้ เราสามารถอธิบายมุมขนาด 1 ไมโครเรเดียนได้ดังรูปที่ 1b

ในการวัดมุมที่เกิดความคลาดเคลื่อน 1 ไมโครเรเดียน จะมีผลให้ตำแหน่งของความสูงคลาดเคลื่อนไป 1 ไมโครเมตร ต่อความยาว 1 เมตร ซึ่งมุมที่เล็กในระดับนี้ ความโค้งของวงกลมไม่มีนัยสำคัญ และสามารถพิจารณาได้เทียบเท่ากับ ความยาวที่ตั้งฉากกับรัศมีของวงกลมนั้น



รูปที่ 1 หน่วยวัดมุมเรเดียน

การวัดมุมแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบตามลักษณะการวัด คือ แบบที่ 1 การวัดมุม ที่มีสองระนาบของเครื่องมือวัดประกบกันเป็นมุม และสัมผัสโดยตรงกับผิวของชิ้นงาน เครื่องมือวัดมุมประเภทนี้ ได้แก่ ไบวัดมุม โปรแทคเตอร์ ซึ่งมีค่าความละเอียดในการวัดประมาณ 1 องศา

แบบที่ 2 การวัดความลาดเอียง เป็นการวัดมุมโดยใช้การเปรียบเทียบค่าระหว่างความเอียงของเส้นสมมติที่ลากเชื่อมต่อดูจุด 2 จุดที่ต้องการวัดความลาดเอียงกับเส้นอ้างอิงที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก ตัวอย่างเครื่องมือวัดความลาดเอียง

ที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไป เช่น ระดับน้ำ และอุปกรณ์วัดความลาดเอียงของทางที่ใช้ในงานวิศวกรรมโยธา

การวัดความลาดเอียงนั้นมีความสำคัญอย่างมากในการตรวจสอบเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตชิ้นงาน ตัวอย่างเช่น ความฉากระหว่างระนาบได้ะงานกับดอกสว่าน ความตรงในระดับไมโครเมตรของรางเครื่องจักรในการเคลื่อนที่มีดกถึง [1] ซึ่งมีผลโดยตรงต่อคุณภาพของชิ้นงาน**

ในงานวิจัยด้านมาตรวิทยาเชิงมิติ อินคลิโนมิเตอร์ (Inclinometer) และ ออโตโคลิมาเตอร์ (Autocollimator) เป็นเซนเซอร์วัดความลาดเอียงความแม่นยำสูงที่นิยมใช้ในชุดทดลองขั้นสูง ใช้วัดค่าความลาดเอียงที่เปลี่ยนแปลงไประหว่างทำการทดลองและทำการคำนวณชดเชยกลับเข้าไปในระบบ เพื่อให้ได้ค่าการวัดที่แม่นยำยิ่งขึ้น [2-3] แต่ความแตกต่างระหว่างค่าความละเอียดในการวัดของอินคลิโนมิเตอร์ (1 ไมโครเรเดียน) และของออโตโคลิมาเตอร์ (0.01 ไมโครเรเดียน) รวมถึงราคาที่แตกต่างกันอย่างมากตามค่าความละเอียดในการวัด ทำให้การใช้งานออโตโคลิมาเตอร์นั้นยังคงจำกัดวงอยู่แต่ในห้องปฏิบัติการทางด้านมิติระดับประเทศเท่านั้น ดังนั้นการพัฒนาค่าความละเอียดในการวัดของอินคลิโนมิเตอร์จึงยังเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องพัฒนาสำหรับห้องปฏิบัติการระดับกลาง

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาค่าความละเอียดในการวัดของอินคลิโนมิเตอร์รุ่น Nivel20 จากบริษัท Leica Geosystems ซึ่งมีค่าความละเอียดในการวัด (resolution) เท่ากับ 1 ไมโครเรเดียน (μrad)



รูปที่ 2 เซนเซอร์วัดความลาดเอียง Nivel20

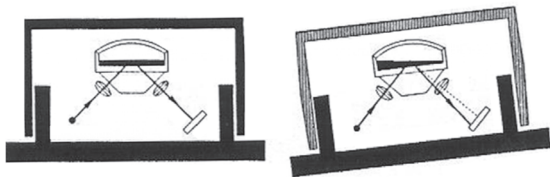
*หน่วยอนุพันธ์เอสไอ คือ หน่วยที่เกิดจากการร่วมกันของหน่วยฐานเอสไอโดยการคูณหรือหาร เพื่อใช้ในเรื่องการวัดและการแสดงปริมาณต่างๆ

**ความตรงของเครื่องจักรสามารถตรวจสอบได้โดยการคำนวณค่าจากความลาดเอียงที่เปลี่ยนไป ในแต่ละช่วงที่ทำการวัด

2. ทฤษฎีและหลักการ

2.1 เทคโนโลยีเซนเซอร์วัดความลาดเอียง Nivel20

Nivel20 แสดงค่าการวัดออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ความลาดเอียงรอบแกน x, ความลาดเอียงรอบแกน y (ไมโครเรเดียน), อุณหภูมิภายในกล่อง (องศาเซลเซียส) และสัญญาณ P แสดงสถานะในช่วงการใช้งาน ความลาดเอียงจะถูกวัดทุกวินาทีและถูกจัดเก็บไว้ในหน่วยความจำภายในระบบ ในการวัดแต่ละครั้งค่าที่ได้เกิดจากการเฉลี่ยกลุ่มความลาดเอียงสุดท้ายด้วยอินเตอร์เฟสเชิงตัวเลขที่มีค่าความละเอียดในการวัด 1 ไมโครเรเดียน



รูปที่ 3 หลักการของออปโตอิเล็กทรอนิก

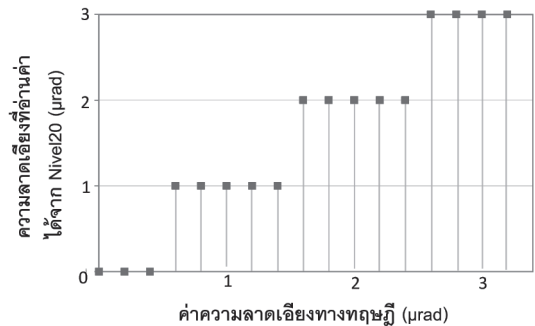
หลักการของออปโตอิเล็กทรอนิก (Optoelectronic) ถูกนำมาใช้ในอินคลิโนมิเตอร์ Nivel20 ระบุข้างอิงถูกกำหนดโดยพื้นผิวอิสระของของเหลวซึ่งตั้งฉากโดยธรรมชาติกับแนวแกนตั้งของโลกและสามารถตอบสนองต่อความลาดเอียงที่เปลี่ยนแปลงได้ดี ถูกนำมาบรรจุในภาชนะปิด ดังรูปที่ 3 ลำแสงถูกส่งออกจากไดโอดเปล่งแสงหรือแอลอีดี (LED) ไปยังของเหลวซึ่งทำหน้าที่หักเหแสงไปยังตัวรับ มุมระหว่างการเปลี่ยนแปลงของของเหลวถูกกำหนดโดยฟังก์ชันของตำแหน่งตกกระทบของแสงบนตัวรับและถูกแปลงสัญญาณให้อยู่ในรูปดิจิทัลหรือไดอะล็อกเอาท์พุทต่อไป อย่างไรก็ตาม การที่มีแหล่งกำเนิดแสงอยู่ภายในระบบปิดนี้มีผลโดยตรงต่ออุณหภูมิภายใน ดังนั้นก่อนทำการเก็บข้อมูล จึงควรรอให้อุณหภูมิเข้าสู่สภาวะคงที่

2.2 แบบจำลองค่าความละเอียดในการวัดของ Nivel20

อินคลิโนมิเตอร์ Nivel20 มีค่าความละเอียดในการวัด 1 ไมโครเรเดียน กล่าวคือ ค่าที่เล็กที่สุดที่ Nivel20 สามารถแยกแยะได้คือ 1 ไมโครเรเดียน

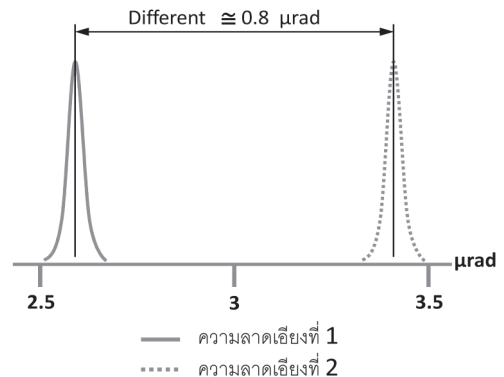
แบบจำลองในรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าค่าความลาดเอียงที่เกิดขึ้นจริงมีการเปลี่ยนแปลงค่าที่น้อยกว่า 1 ไมโครเรเดียน แต่ด้วยค่าความละเอียดในการวัด 1 ไมโครเรเดียน

ของ Nivel20 จึงไม่เพียงพอในการนำค่าความลาดเอียงที่เกิดขึ้นจริงมาใช้งานได้



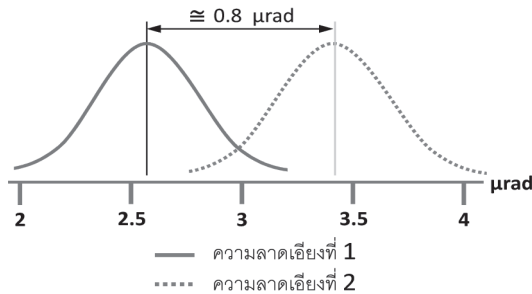
รูปที่ 4 แบบจำลองค่าความละเอียดในการวัดของ Nivel20 (1 ไมโครเรเดียน)

2.3 การกระจายตัวของข้อมูลที่ต้องการวัด



รูปที่ 5 แบบจำลองการกระจายตัวของข้อมูลแบบสมมาตรแบบ

จากรูปที่ 5 การกระจายตัวของข้อมูลทั้งสองกลุ่มมีค่า Repeatability ที่ดีมาก กล่าวคือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) มีค่าน้อยกว่าค่าความละเอียดในการวัดมากๆ [4] ดังนั้นค่าที่วัดซ้ำในแต่ละครั้งจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการวัดมาก เมื่อนำ Nivel20 ซึ่งมีค่าความละเอียดในการวัด 1 ไมโครเรเดียนมาทำการวัดข้อมูลทั้งสองกลุ่มนี้ ค่าที่อ่านได้จากการวัดความลาดเอียงทั้งสองในแต่ละครั้งจะมีค่าเท่ากับ 3 ไมโครเรเดียนเสมอ และเมื่อนำค่าที่วัดซ้ำมาทำการเฉลี่ยก็จะได้ว่าความลาดเอียงทั้งสองมีค่า 3 ไมโครเรเดียนเท่ากัน ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว ความลาดเอียงทั้งสองมีค่าต่างกันโดยประมาณถึง 0.8 ไมโครเรเดียน ซึ่งค่า 0.8 ไมโครเรเดียนนี้มีนัยสำคัญเกินกว่าจะยอมรับได้ในงานมาตรฐานวิธีปฏิบัติ ระบุในนาโนเมตร



รูปที่ 6 แบบจำลองการกระจายตัวของข้อมูลแบบไม่สมมาตรแบบ

ในทางตรงกันข้าม ถ้าการกระจายตัวของข้อมูลไม่สมมาตรแบบ (รูปที่ 6) ค่าความลาดเอียงที่ 1 ที่อ่านได้จาก Nivel20 ในการวัดแต่ละครั้งจะได้ 2 หรือ 3 ไมโครเรเดียนสลับกันไป และเมื่อนำทุกค่าที่วัดเข้ามาเฉลี่ยก็จะได้ค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจริง

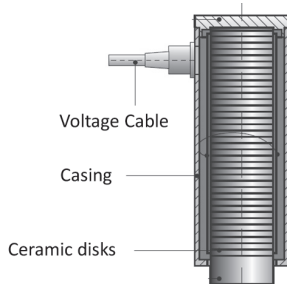
จาก 2 กรณีที่ได้กล่าวไปข้างต้น จะเห็นได้ว่า การกระจายตัวของข้อมูลยิ่งดีเท่าไรก็ยิ่งมีโอกาสที่ค่าเฉลี่ยจากการวัดซ้ำจะคลาดเคลื่อนจากค่าจริงมากขึ้นเท่านั้น ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงในการเก็บข้อมูลการทดลอง

ในความเป็นจริงเราไม่สามารถกำหนดการกระจายตัวของข้อมูลในการวัดซ้ำได้ แต่เราสามารถเพิ่มตำแหน่งของการวัดเพื่อให้เกิดการกระจายตัวของข้อมูลและทำให้การประมาณค่าเฉลี่ยที่ได้ใกล้เคียงกับค่าจริงมากยิ่งขึ้น [4-5]

3. วิธีการวิจัย

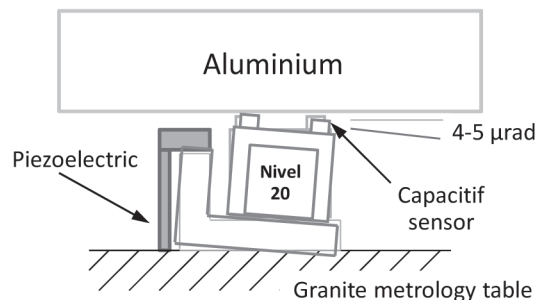
หลักการในการเพิ่มตำแหน่งการวัดของ Nivel20 คือทำให้เกิดการแกว่งขึ้นและลงเป็นสเตปที่คงที่โดยที่แต่ละสเตปต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าความลาดเอียงที่น้อยกว่า 1 ไมโครเรเดียน [6]

เพื่อให้ Nivel20 เกิดการเคลื่อนที่ในระดับที่ต่ำกว่า 1 ไมโครเรเดียน เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) จึงถูกนำมาใช้ในการทดลองนี้



รูปที่ 7 หลักการของเพียโซอิเล็กทริกแบบเซรามิก

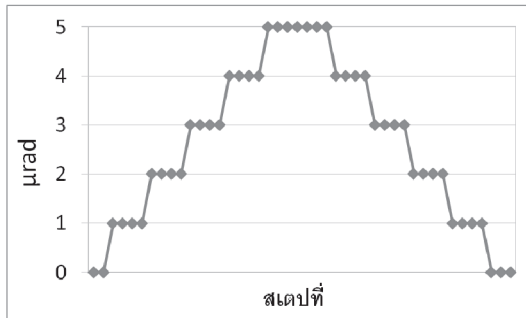
เพียโซอิเล็กทริก PI รุ่น P-845.60 (รูปที่ 7) สามารถเคลื่อนที่ได้ในช่วง 60 ไมโครเมตร ภายในประกอบด้วยแผ่นเซรามิกซึ่งถูกขับเคลื่อนด้วยแผ่นโลหะ ใช้หลักการเพียโซอิเล็กทริกคือ เมื่อใส่กระแสไฟฟ้าเข้าไประหว่างแผ่นเซรามิก จะทำให้แผ่นเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง แต่เนื่องจากเป็นระบบเปิดจึงไม่มีการส่งค่าการเคลื่อนที่จริงกลับมาในระบบ จึงต้องมีการติดตั้งคาปาซิทีฟเซนเซอร์เพิ่มในชุดทดลองเพื่อวัดค่าเริ่มต้นในการยกตัวครั้งแรกของเพียโซอิเล็กทริกและนำค่าที่ได้มาชดเชยกลับให้กับการวัดในแต่ละครั้ง



รูปที่ 8 ชุดทดลองการเปลี่ยนแปลงค่าความลาดเอียง

ชุดทดลองถูกออกแบบโดยการยึดเพียโซอิเล็กทริกกับฐานที่ใช้ติดตั้ง Nivel20 (รูปที่ 8) โดยที่ปลายของเพียโซอิเล็กทริกไม่สัมผัสกับผิวของโต๊ะแกรนิต คาปาซิทีฟเซนเซอร์แบบไม่สัมผัสถูกติดตั้งที่ด้านบนของชุดทดลองโดยมีชิ้นงานอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 400 มิลลิเมตรอยู่ด้านบนเพื่อใช้อ้างอิงความสูงในการยกตัวครั้งแรกของเพียโซอิเล็กทริก การเคลื่อนที่และการเก็บข้อมูลของ Nivel20, คาปาซิทีฟเซนเซอร์และเพียโซอิเล็กทริกถูกควบคุมแบบอัตโนมัติผ่านโปรแกรมออกแบบระบบ

เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมในการเคลื่อนที่ Nivel20 ได้มีการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้น [7] จากแบบจำลองพบว่าเมื่อเคลื่อนที่ในช่วงความลาดเอียงที่กว้างขึ้นยิ่งทำให้ได้ค่าเฉลี่ยจากการเคลื่อนที่ในแต่ละครั้งแม่นยำมากขึ้น และความแม่นยำนี้จะเริ่มเข้าสู่ค่าคงที่เมื่อช่วงความลาดเอียงมากกว่า 4 ไมโครเรเดียน ดังนั้นในการเคลื่อนที่ขึ้นและลงของเพียโซ-อิเล็กทริกเพื่อหาค่าเฉลี่ยในแต่ละครั้งจึงกำหนดให้ใช้ช่วงความลาดเอียงเท่ากับ 5 ไมโครเรเดียน

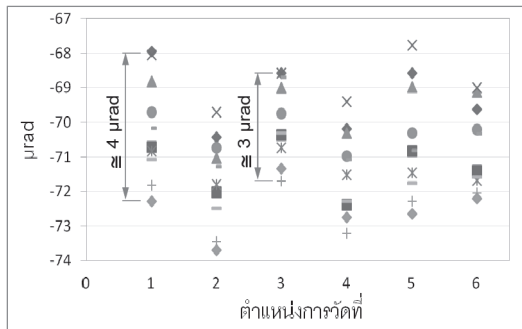


รูปที่ 9 การเคลื่อนที่ขึ้นและลงในการหาค่าเฉลี่ยหนึ่งครั้ง

จากรูปที่ 9 คือแบบจำลองในการเคลื่อนที่ขึ้นและลงสำหรับการหาค่าเฉลี่ยในการวัดหนึ่งครั้ง โดยที่เพียโซอิเล็กทริกจะเคลื่อนที่ทีละสเต็ปและหยุดเพื่อทำการเก็บค่าโดยแต่ละสเต็ปจะทำให้ Nivel20 เกิดการเปลี่ยนแปลงความลาดเอียงประมาณ 0.25 ไมโครเรเดียน

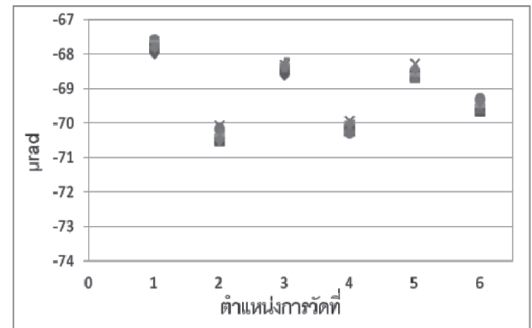
4. ผลการวิจัยและอภิปราย

จากการวัดความลาดเอียงแบบสุ่ม 6 ตำแหน่ง ตำแหน่งละ 10 ครั้ง โดยแต่ละครั้ง Nivel20 เคลื่อนที่ขึ้นและลง 5 ไมโครเรเดียนเพื่อทำการหาค่าเฉลี่ยหนึ่งค่า

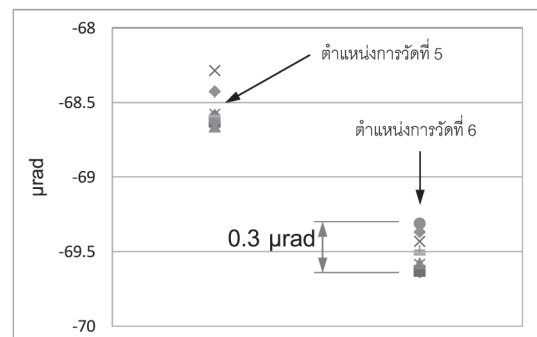


รูปที่ 10 แสดงผลการวัดความลาดเอียง 6 ตำแหน่งก่อนทำการชดเชยค่าเริ่มต้นจากคาปาซิทีฟเซนเซอร์

ก่อนทำการชดเชยค่าเริ่มต้นจากคาปาซิทีฟเซนเซอร์ ผลการวัดซ้ำในแต่ละตำแหน่งมีการแกว่งตัวของข้อมูลค่าเฉลี่ย 10 ค่าซึ่งแต่ละค่าเกิดจากการเคลื่อนที่ขึ้นและลง 5 ไมโครเรเดียน มีความกว้าง 3-4 ไมโครเรเดียน (รูปที่ 10) เนื่องจากเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการเคลื่อนที่ Nivel20 ยังมีความไม่แน่นอนในการเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงต้องวัดตำแหน่งเริ่มต้นของชุดทดลองเพื่อนำมาชดเชยในส่วนที่เพียโซอิเล็กทริกเคลื่อนที่ได้ไม่สมบูรณ์แบบในการสัมผัสโต๊ะแกรนิตเพื่อการยกตัวขึ้นครั้งแรก



รูปที่ 11 แสดงผลการวัดความลาดเอียง 6 ตำแหน่งหลังทำการชดเชยค่าเริ่มต้นจากคาปาซิทีฟเซนเซอร์



รูปที่ 12 แสดงรูปขยายผลการวัดตำแหน่งที่ 5 และ 6 หลังทำการชดเชยค่าเริ่มต้นจากคาปาซิทีฟเซนเซอร์

จากรูปที่ 11 แสดงผลการวัดหลังทำการชดเชยค่าเริ่มต้น จากการวัดซ้ำ 10 ครั้ง พบว่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่งมีค่าประมาณ 0.3 ไมโครเรเดียน (รูปที่ 12) ซึ่งมีค่าน้อยกว่าความละเอียดในการวัดของตัวเครื่องมือวัดเองถึงสามเท่า

5. สรุป

การพัฒนาค่าความละเอียดในการวัดความลาดเอียงของ Nivel20 ด้วยวิธีการเพิ่มการกระจายตัวของข้อมูลจากการเปลี่ยนแปลงค่าความลาดเอียงในระดับที่ต่ำกว่า 1 ไมโครเรเดียน ค่าการวัดซ้ำมีความคลาดเคลื่อนจากการวัด 10 ครั้ง ± 0.15 ไมโครเรเดียน ค่า ± 0.15 ไมโครเรเดียนนี้ รวมถึงค่าความไม่แน่นอนต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างช่วงเวลาในการวัด ซึ่งประกอบด้วย ความแม่นยำของ Nivel20 ความแม่นยำและความถูกต้องของคาปาซิทีฟเซนเซอร์ อุณหภูมิขณะวัด และระยะคลาดเคลื่อนต่างๆที่เกิดขึ้นในชุดทดลอง ดังนั้นการนำวิธีนี้ไปใช้ในการพัฒนาค่าความละเอียดในการวัด

ความลาดเอียง ผลที่ได้จึงขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องวัดในชุดทดลอง การสอบเทียบเครื่องมือวัด และประสบการณ์ความชำนาญของผู้ทำการทดลอง

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และผู้เขียนขอขอบคุณ Prof.Thierry COOREVITS ที่ช่วยให้คำแนะนำในการทดลองและในการเขียนบทความครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ardelean FA. The Measurement of the straightness in the case of long guideways, using modern measurement methods, namely, the laser. ANNALS of the ORADEA UNIVERSITY. Fascicle of Management and Technological Engineering. 2008, Vol.7(17): 705-709.
- [2] Paziani FT, Giacomo BD, Tsunaki RH. Development of an Automated and Dedicated Measuring System for Straightness Evaluation. J. of the Braz. Soc. Of Mech. Sci. & Eng. 2007, Vol 29(3): 290-298.
- [3] Shujie L, Watanabe K, Chen X, Takahashi S, Takamasu K. Profile measurement of a wide-area resist surface using a multi-ball cantilever system. Precision Engineering. 2009. 33(1): 50-55.
- [4] Oswald J. Theorie de l'information ou Analyse diacritique des syst?mes. 2nd ed. MASSON et CNET-ENST: Paris; 1986.
- [5] Leleu S, David JM, Vailleau GP. La mesure des angles au BNM-LNE cr?ation d'une nouvelle r?f?rence de mesure angulaire. 11e Congr?s International de M?trologie. Toulouse, 20-23 Octobre 2003.
- [6] Lahousse L, Ducourtieux S. Z calibration of the LNE ultra precision coordinate measuring machine. 7th EUSPEN International Conference. Br?me, Allemagne, 20-24 Mai 2007.
- [7] Boripatkosol S, Leleu S. Calibration of capacitive sensors and electronic levels for the straightness measurements using multiprobe method. 15th International Congress of Metrology. Paris, France, 3-6 October 2011.