

การหาตำแหน่งของคาปาซิทีฟเซนเซอร์ในการสอบเทียบแบบอินซิทู

ด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

Determination of the Position of Capacitive Sensors for In-situ Calibration
by Laser Interferometer

สิริวรรณ บริพัตรโกศล

ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

ติดต่อ: โทรศัพท์: 02-555-2000 ต่อ 6407 E-mail: siriwanb@kmutnb.ac.th**บทคัดย่อ**

การสอบเทียบแบบอินซิทูเป็นการสอบเทียบที่นิยมใช้ในงานวิจัยที่ต้องการความแม่นยำสูง เนื่องจากการสอบเทียบที่หน้างานจริง เครื่องมือวัดที่ต้องการสอบเทียบอยู่ภายใต้เงื่อนไขและสภาพแวดล้อมเดียวกับตอนนำไปใช้งาน แต่ความยุ่งยากของวิธีนี้คือการออกแบบเพื่อหาตำแหน่งของเครื่องมือวัดและเครื่องมือมาตรฐานที่จะใช้ในการสอบเทียบให้สอดคล้องกัน บทความนี้นำเสนอการหาตำแหน่งของคาปาซิทีฟเซนเซอร์แบบไม่สัมผัสเพื่อการสอบเทียบแบบอินซิทูด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ ผลจากการทดลองพบว่า กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลการวัดจากคาปาซิทีฟเซนเซอร์และจากเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ที่ตำแหน่งของคาปาซิทีฟเซนเซอร์จากการทดลอง มีความเป็นเชิงเส้นและมีความสามารถในการวัดซ้ำที่ดีกว่าตำแหน่งข้างเคียง นอกจากนั้นความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของคาปาซิทีฟเซนเซอร์ทั้ง 16 ตัวจากการทดลองยังสอดคล้องกับตำแหน่งที่ถูกติดตั้งจริงของชุดหัววัดอีกด้วย

คำหลัก: การสอบเทียบแบบอินซิทู, เลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์, คาปาซิทีฟเซนเซอร์

Abstract

The In-situ calibration used widely in studies that require high precision, because this method has the actual operating conditions of the environment as the work situation. The difficulty of this approach is to design and install a standard tool that is used to calibrate in the setup. This paper presents the determination of the position of non contact capacitive sensors for the In-situ calibration by laser interferometer. The results show that for the calculated position of the experiment, the calibration curves have linearity and repeatability better than the others positions. However the relative positions of the 16 capacitive sensors of the experiment is also consistent with the actual installation of the sensors as well.

Keywords: In-situ calibration, laser interferometer, capacitive sensor

1. บทนำ

การสอบเทียบ เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดและค่าที่อ่านได้จากระบบมาตรฐาน ในทางปฏิบัติแล้วเป็นไปได้เลยที่จะมีระบบสอบเทียบมาตรฐานที่สามารถถูกจัดทำขึ้นให้เหมือนภายใต้สภาวะที่เครื่องมือวัดถูกนำไปใช้งานจริง เนื่องจากการใช้งานจริง เครื่องมือวัดมีผลกระทบมาจากตัวแปรต่างๆ เช่น การถอดประกอบติดตั้ง องศาระหว่างหน้าสัมผัสของเซนเซอร์กับชิ้นงาน นอกจากนี้แล้วยังมีผลกระทบมาจากสิ่งแวดล้อมภายนอก การสั่นสะเทือน ตลอดจนความเครียดของอุปกรณ์จากอุณหภูมิที่แตกต่างกันจะส่งผลกระทบต่อค่าความคลาดเคลื่อนที่ต่างกันด้วย ดังนั้นการสอบเทียบแบบอินซิทู (In-situ calibration) [1-5] จึงเป็นการสอบเทียบที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านมาตรวิทยาเชิงมิติ [6-9]

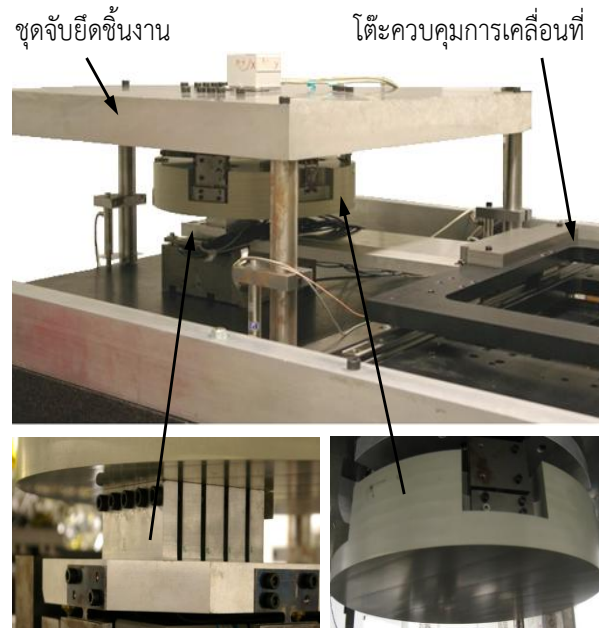
การสอบเทียบแบบอินซิทู คือ การสอบเทียบที่หน้างานจริงจึงสามารถแก้ปัญหาที่ได้อ่านมาในตอนต้นได้เป็นอย่างดี แต่ก็มีข้อจำกัดทางด้านการติดตั้งอุปกรณ์การสอบเทียบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งตำแหน่งระหว่างระบบมาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบและเครื่องมือวัดที่ต้องการสอบเทียบซึ่งมีผลโดยตรงต่อค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในระบบ

บทความนี้นำเสนอเทคนิคในการหาตำแหน่งของคาปาซิทีฟเซนเซอร์จากชุดทดลองการวัดความเรียบผิวเพื่อการสอบเทียบแบบอินซิทูด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียร์โรมิเตอร์ [10-11]

2. ชุดทดลองวัดความเรียบผิว

2.1 คาปาซิทีฟเซนเซอร์ในชุดทดลอง

ชุดทดลองวัดความเรียบผิวของชิ้นงานอลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 440 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 1 ชุดทดลองประกอบด้วยสองส่วนหลัก คือ ส่วนจับยึดชิ้นงานทำจากอลูมิเนียมขนาด 850 มิลลิเมตร x 850 มิลลิเมตร หนา 150 มิลลิเมตร รองรับด้วยแท่งเหล็กทรงกระบอก 3 จุด โดยแต่ละจุดได้ติดตั้งเพียโซอิเล็กทริกเพื่อใช้ในการเคลื่อนที่ชิ้นงานขึ้นลงระหว่างการสอบเทียบ



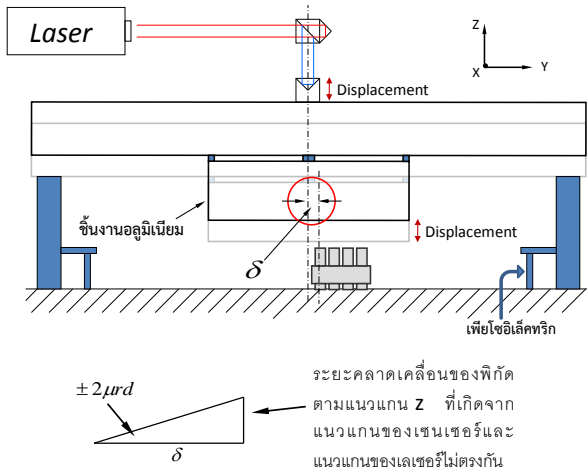
รูปที่ 1 ชุดทดลองวัดความเรียบผิว

ส่วนที่สอง คือ ส่วนของชุดหัววัดซึ่งประกอบด้วยคาปาซิทีฟเซนเซอร์ 16 ตัวแบ่งติดตั้งเป็น 4 แถวๆละ 4 ตัว โดยมีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของเซนเซอร์แต่ละตัว 20 มิลลิเมตร ขณะทำการวัด ชุดหัววัดเคลื่อนที่บนระนาบ xy ด้วยการขับเคลื่อนจากมอเตอร์ของโต๊ะควบคุมการเคลื่อนที่ (Positioning Table) ซึ่งถูกควบคุมแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรมที่สามารถกำหนดตำแหน่งในการวัด

2.2 การสอบเทียบคาปาซิทีฟเซนเซอร์แบบอินซิทู

เพื่อทำการสอบเทียบคาปาซิทีฟเซนเซอร์ที่หน้างานจริงด้วยเลเซอร์อินเตอร์เฟียร์โรมิเตอร์ อุปกรณ์สะท้อนลำแสง (cube corner reflector interferometer) ของชุดเลเซอร์ถูกติดตั้งบนชุดจับยึดชิ้นงานด้านตรงข้ามกับชุดหัววัดคาปาซิทีฟเซนเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 2

ในขั้นตอนของการสอบเทียบ ชิ้นงานอลูมิเนียมจะถูกยกตัวขึ้นโดยเพียโซอิเล็กทริกที่ขาตั้งทั้งสามจุด แล้วนำค่าที่ได้จากการวัดการเคลื่อนที่ของชิ้นงานอลูมิเนียมจากคาปาซิทีฟเซนเซอร์ไปเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากระบบมาตรฐานอ้างอิงซึ่งในที่นี้คือเลเซอร์อินเตอร์เฟียร์โรมิเตอร์



รูปที่ 2 ความคลาดเคลื่อนของพิกัดตามแนวแกน z ในการสอบเทียบคาปาซิทีฟเซนเซอร์

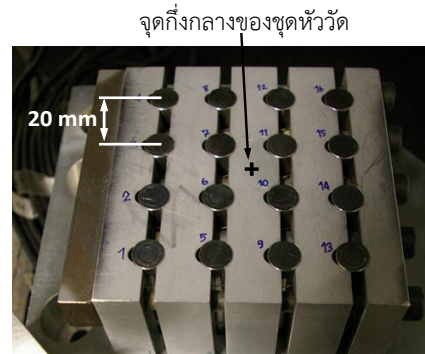
ในระหว่างการสอบเทียบ ถ้าตำแหน่งของเซนเซอร์ที่ต้องการสอบเทียบไม่ตรงกับแนวแกนวัดของเลเซอร์ ตัวอย่างเช่น มีระยะเยื้องกัน $\delta = 20$ มิลลิเมตร ประกอบกับความไม่สมบูรณ์แบบของการเคลื่อนที่ขึ้นลงของชุดจับยึดชิ้นงานอลูมิเนียมที่ประมาณ ± 2 ไมโครเมตรเพียงสามารถทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในแนวแกน z ที่เซนเซอร์และเลเซอร์จะอ่านค่าได้ต่างกันถึง ± 40 นาโนเมตรต่อการวัดหนึ่งครั้ง ซึ่งเป็นค่าที่สูงและไม่สามารถยอมรับได้ เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความไม่แน่นอนในการวัดของเลเซอร์ซึ่งเท่ากับ 5 นาโนเมตร ในทางกลับกันเมื่อคำนวณย้อนกลับจากค่าความไม่แน่นอน 5 นาโนเมตรนี้จะได้ค่า $\delta = 2.5$ มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ในการสอบเทียบนี้

3. การทดลอง

เพื่อให้ตำแหน่งของคาปาซิทีฟเซนเซอร์และเลเซอร์อยู่ในแนวเดียวกันตามหลักการของแอมเบ [12] จำเป็นต้องพบตำแหน่งที่ชุดหัววัดจะเคลื่อนที่เพื่อให้เซนเซอร์แต่ละตัวอยู่ตรงข้ามกับเลเซอร์พอดี การทำให้ทั้งสองอยู่ในแนวเดียวกันนั้นเป็นเรื่องที่ละเอียดอ่อนเนื่องจากเซนเซอร์และเลเซอร์ถูกแยกออกจากกันด้วยชิ้นงานอลูมิเนียมและชุดจับยึดชิ้นงาน

ตำแหน่งของชุดหัววัดที่ต้องการจากการทดลอง คือ ค่าพิกัด (x, y) ในการโปรแกรมโต๊ะควบคุมการเคลื่อนที่

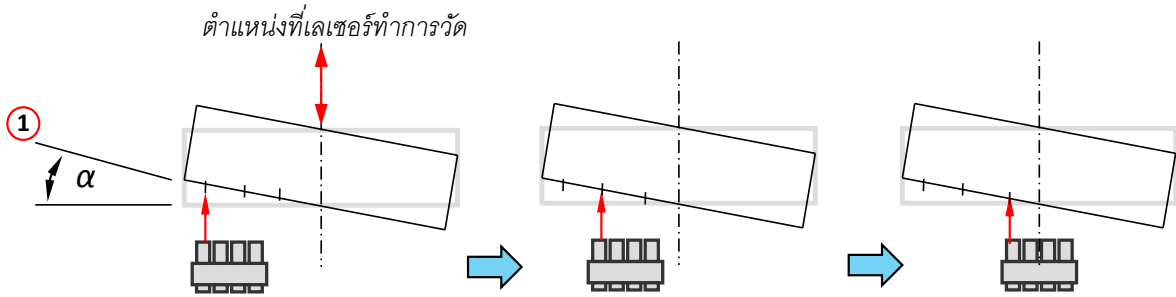
โดยทางทฤษฎี พิกัด (0,0) ในโปรแกรมคือตำแหน่งที่ทำให้จุดกึ่งกลางของชุดหัววัด (รูปที่ 3) ตรงกับจุดกึ่งกลางของชิ้นงานอลูมิเนียม และตรงกับตำแหน่งของเลเซอร์ที่อยู่อีกด้านหนึ่งของชิ้นงาน ตัวอย่างเช่น ถ้าต้องการให้เซนเซอร์ตัวที่ 1 ตรงกับจุดกึ่งกลางของชิ้นงานอลูมิเนียมหมายความว่าต้องโปรแกรมให้จุดกึ่งกลางของชุดหัววัดเคลื่อนที่ไปยังพิกัด (+30,+30) มิลลิเมตร เพื่อให้ตำแหน่งของเซนเซอร์ตัวที่ 1 ตรงกับแนวแกนวัดของเลเซอร์ แต่ในทางปฏิบัติเป็นเรื่องยากที่พิกัดตัวอย่างนี้จะทำให้เซนเซอร์อยู่ในแนวแกนเดียวกับเลเซอร์ เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นระหว่างการประกอบติดตั้งชุดทดลอง การเซตค่าในการติดตั้งชุดเลเซอร์ และความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการโปรแกรมการเคลื่อนที่ของโต๊ะ ดังนั้นในบทความนี้จึงนำเสนอการทดลองที่ใช้ค่าจริงจากเลเซอร์และเซนเซอร์ในการหาตำแหน่งโดยตรงแบบอินซิทู เพื่อหลีกเลี่ยงค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 3 คาปาซิทีฟเซนเซอร์ในชุดหัววัด

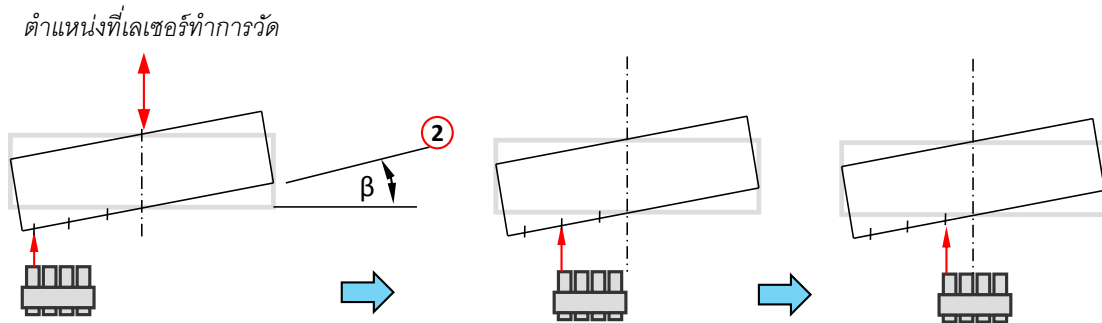
หลักการคือ ทำให้ชิ้นงานเอียงรอบแกนที่ผ่านตำแหน่งการอ่านค่าของเลเซอร์ กำหนดโดยการควบคุมความสูงในการยกตัวของเพียโซอิเล็กทริกจากค่าที่อ่านได้จากเลเซอร์ จากนั้นทำการวัดจุดต่างๆบนผิวชิ้นงาน แต่เนื่องจากค่าที่ได้จากคาปาซิทีฟเซนเซอร์ คือ ระยะระหว่างเซนเซอร์ถึงผิวชิ้นงานที่ตำแหน่งการวัด ดังนั้นเพื่อกำจัดส่วนที่เกิดจากสภาพผิวของชิ้นงานแต่ละจุด จึงทำการวัดซ้ำทุกจุดเดิมที่ตำแหน่งการเอียงใหม่

จากหลักการที่กล่าวมา สามารถแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้



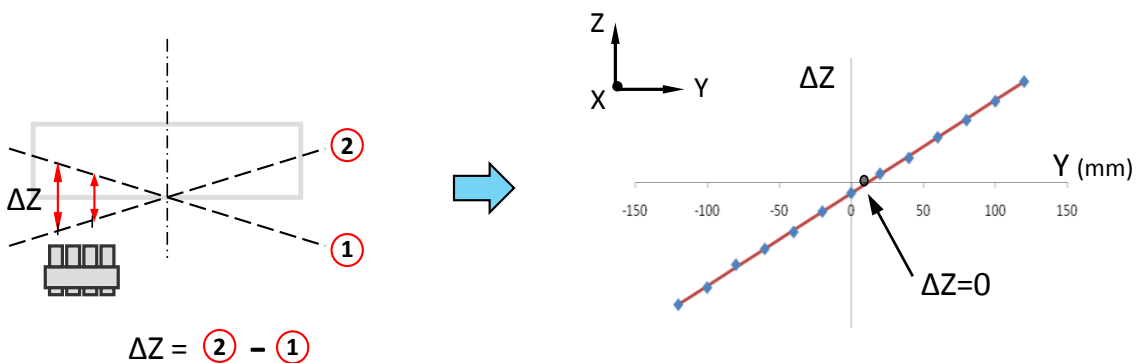
รูปที่ 4 ตำแหน่งชิ้นงานในขั้นตอนที่หนึ่ง

ขั้นตอนแรก (รูปที่ 4) ทำการยกชุดจับยึดชิ้นงานด้วยเพียโซอิเล็กทริก เพื่อทำการเอียงชิ้นงานรอบแกน x ที่ผ่านแนวแกนวัดของเลเซอร์ จากนั้นทำการวัดค่าทุกๆระยะ 20 มิลลิเมตร จำนวน 13 จุดตลอดแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน



รูปที่ 5 ตำแหน่งชิ้นงานในขั้นตอนที่สอง

ขั้นตอนที่สอง (รูปที่ 5) ทำการหมุนชิ้นงานไปในทิศตรงข้ามรอบแกน x เดิม เพื่อให้ได้ผลการวัดในแต่ละจุดที่แตกต่างกัน โดยใช้เลเซอร์ควบคุมเพื่อให้ได้ตำแหน่งของแกน x ที่ความสูงเดียวกันกับในขั้นตอนแรก จากนั้นทำการวัดระยะ z ซ้ำที่ตำแหน่งเดียวกันกับในขั้นตอนที่หนึ่ง



รูปที่ 6 การหาตำแหน่งของคาปาซิทีฟเซนเซอร์จากจุดตัดกราฟ

ขั้นตอนที่สาม (รูปที่ 6) คำนวณผลต่างระหว่างสองค่าที่ได้จากขั้นตอนที่หนึ่งและขั้นตอนที่สองของเซนเซอร์แต่ละตัว ตลอดแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นงาน

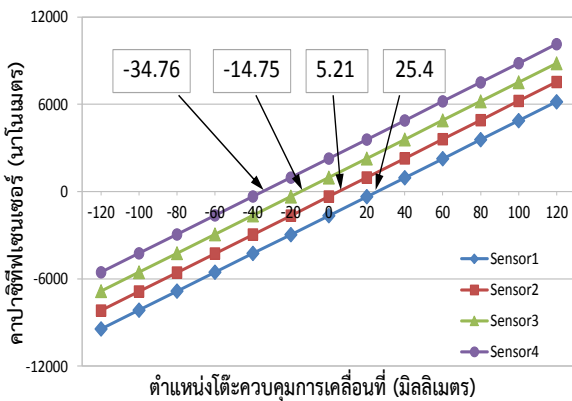
วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) ถูกนำมาใช้เพื่อหาเส้นตรงจากค่าผลต่างในขั้นตอนที่ 3 กราฟในรูปที่ 6 ขวามือ พิกัดต่างขบนเส้นตรงที่เกิดจากค่าผลต่างยังไม่สามารถนำไปใช้ได้เนื่องจากเป็นค่าที่เกิด

จากคาปาซิทีฟเซนเซอร์ที่ไม่ได้ทำการสอบเทียบ ยกเว้นตำแหน่งที่กราฟตัดแกน y ซึ่งมีค่าผลต่าง $\Delta z=0$ เนื่องจากเป็นตำแหน่งของแกน x ที่เป็นแกนหมุนในการเอียงของชิ้นงาน ดังนั้นพิกัด y ที่ได้จึงอยู่ในแนวเดียวกับแกนอ่านค่าของเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์

ทำซ้ำขั้นตอนทั้งสามในการหาตำแหน่งของคาปาซิทีฟเซนเซอร์ในแนวแกน x โดยยกชุดจับยึดชิ้นงานหมุนรอบแกน y และทำการวัดตลอดแนวเส้นผ่านศูนย์กลางตามแนวแกน x แทน

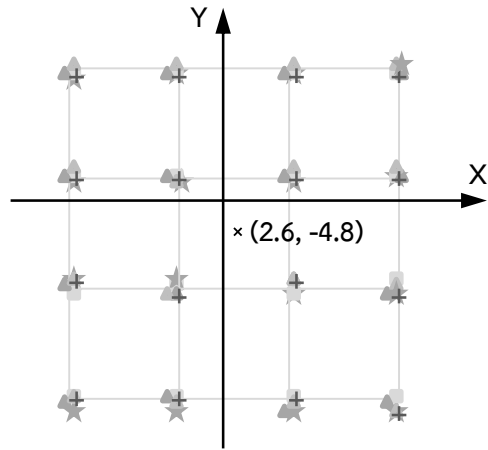
4. ผลการทดลอง

จากการวัดผิวชิ้นงานอลูมิเนียมตลอดแนวเส้นผ่านศูนย์กลางจำนวน 13 จุด รูปที่ 7 แสดงเส้นตรงซึ่งเกิดจากวิธีกำลังสองน้อยที่สุดของผลการวัดจากเซนเซอร์แถวที่ 1 (เซนเซอร์ตัวที่ 1-4) ตำแหน่งของโต๊ะควบคุมการเคลื่อนที่ที่ต้องการคือพิกัดของแกน y ที่ทำให้ผลต่างของคาปาซิทีฟเซนเซอร์แต่ละตัวเป็นศูนย์ ได้แก่ ตำแหน่ง $y = -34.76, -14.75, 5.21$ และ 25.4 มิลลิเมตร ตามลำดับ



รูปที่ 7 กราฟเส้นตรงจากค่าผลต่างในขั้นตอนที่สามของเซนเซอร์ตัวที่ 1 ถึงเซนเซอร์ตัวที่ 4

เมื่อทำการวัดด้วยเซนเซอร์แถวที่ 2, 3 และ 4 ตามแนวแกน y และในทำนองเดียวกันตามแนวแกน x ทำให้ได้ตำแหน่งของโต๊ะควบคุมการเคลื่อนที่ในพิกัด (x,y) สำหรับคาปาซิทีฟเซนเซอร์ทั้ง 16 ตัว



รูปที่ 8 ตำแหน่งโต๊ะควบคุมการเคลื่อนที่ของเซนเซอร์ทั้งหมด 16 ตัว จากการวัดซ้ำ 5 รอบ

รูปที่ 8 แสดงพิกัด (x, y) ของโต๊ะควบคุมการเคลื่อนที่ที่ทำให้คาปาซิทีฟเซนเซอร์แต่ละตัวมีตำแหน่งตรงกับแนวแกนวัดของเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ เซนเซอร์แต่ละตัวทำการวัดซ้ำทั้งหมด 5 ครั้ง ทั้ง 5 ครั้งตำแหน่งที่ได้มีความแตกต่างกันอยู่ในช่วง ± 1 มิลลิเมตร

5. สรุปผลการทดลอง

ตำแหน่ง $(0,0)$ ของชุดหัววัดเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองคลาดเคลื่อนจากทางทฤษฎี $(+2.6, -4.8)$ มิลลิเมตร กล่าวคือ ถ้าต้องการให้จุดกึ่งกลางของชุดหัววัดตรงกับแนวแกนวัดของเลเซอร์ ต้องโปรแกรมให้โต๊ะเคลื่อนที่ไปยังพิกัด $(+2.6, -4.8)$ มิลลิเมตร

สำหรับค่าความคลาดเคลื่อน การวัดซ้ำของเซนเซอร์แต่ละตัวมีความคลาดเคลื่อนจากการวัดซ้ำ 5 ครั้งเท่ากับ ± 1 มิลลิเมตร หรือเทียบเท่า δ สูงสุด 2 มิลลิเมตร ซึ่งระยะนี้ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในแนวแกน z เท่ากับ 4 นาโนเมตร ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้เนื่องจากมีค่าน้อยกว่าค่าความไม่แน่นอนของเลเซอร์อินเตอร์เฟียโรมิเตอร์ นอกจากนี้ตำแหน่งของโต๊ะควบคุมการเคลื่อนที่ที่ได้จากการทดลองสำหรับเซนเซอร์ทั้ง 16 ตัว ยังสอดคล้องกับตำแหน่งของคาปาซิทีฟเซนเซอร์ในชุดหัวจับในระดับ ± 0.2 มิลลิเมตร สำหรับเซนเซอร์ในแต่ละแถว

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Yan, P. Theobald, B.E. Jones (2002), A self-calibrating piezoelectric transducer with integral sensor for in situ energy calibration of acoustic emission, *NDT&E International*, vol.35. pp. 459-464.
- [2] A. Davila, J.E.A. Landgrave and G. Garnica (2007). In-situ calibration of a Michelson type, speckle-shearing interferometer : Wobbling mirror effect, *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 45(1), January 2007, pp. 70 – 76.
- [3] Hsin-Hung C. (2008). In-situ alignment calibration of attitude and ultra short baseline sensors for precision underwater positioning, *Ocean Engineering*. Vol. 35. pp. 1448-1462.
- [4] Hong-Jung H., Tung-Wu L., and Sheng-Chqng C. (2011). A new device for in situ static and dynamic calibration of force platforms, *Gait & Posture*, vol. 33. pp. 701-705.
- [5] P. Yameogo, P. Pons, G. Vardon and E. Schmidt (2011), Self-calibrating pressure sensor for biomedical applications, *IRBM*, vol. 32. pp. 145-147.
- [6] A.E. Holman, W. Chr. Heerens, F. Tuinstra, Using capacitive sensors for in-situ calibration of displacements in a piezo-driven translation stage of an STM, *Sensors and Actuators A : Physical*, vol. 36(1), March 1993, pp. 37-42.
- [7] Shizhou Zhang, Satoshi Kiyono (2001). An absolute calibration method for displacement sensors, *Measurement*, vol. 29(1), January 2001, pp. 11 – 20.
- [8] H.F.F. Castro, M. Burdekin (2003). Dynamic calibration of the positioning accuracy of machine tools and coordinate measuring machines using a laser interferometer, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 43. pp. 947-954.
- [9] H.F.F. Castro, M. Burdekin (2006). Calibration system based on a laser interferometer for kinematic accuracy assessment on machine tools, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 46. pp. 89-97.
- [10] Anthony C. O., Yalcin M. E. (2000). Vertical machining center accuracy characterization using laser interferometer Part 1. Linear positional errors, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 105(3), September 2000, pp. 394-406.
- [11] Anthony C. O., Yalcin M. E. (2000). Vertical machining center accuracy characterization using laser interferometer Part 2. Angular errors, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 105(3), September 2000, pp. 407-420.
- [12] สิริวรรณ บริพัตรโกศล (2555) หลักการของแอบเบกับเครื่องมือวัด, *วารสารพัฒนาเทคนิคศึกษา*, 82, เมษายน 2555.