

เลเซอร์ดอปเพลอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์สำหรับการวัดมุมขนาดเล็ก

Laser Doppler Interferometer for Small Angle Measurement

มนตรี ผักกระโทก¹ และ วราวุฒิ เถาวัลดี²

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

โทรศัพท์ 0-2470-9096 E-mail: montaleyjack@hotmail.com¹

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถ.ฉลองกรุง ข.ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ 0-2737-3000 ต่อ 6197 E-mail: ktwarawo@kmitl.ac.th²

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการวัดมุมขนาดเล็กโดยใช้ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ของแสงเลเซอร์ เลเซอร์ดอปเพลอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่สร้างขึ้นประกอบด้วยกระจกสะท้อนแสงชนิดรีโทรเฟลิกเตอร์สองชิ้นติดตั้งบนแท่นหมุนซึ่งถูกขับด้วยสเต็ปมอเตอร์ชนิด 5 เฟสและควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ แสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนสองลำที่สะท้อนจากรีโทรเฟลิกเตอร์ที่กำลังหมุนจะมีความถี่เปลี่ยนไปเนื่องจากปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ เมื่อแสงทั้งสองแทรกสอดกันจะเกิดการบีตทำให้ความเข้มของแสงเกิดการเปลี่ยนแปลงด้วยความถี่เท่ากับผลต่างของความถี่ของแสงซึ่งเรียกว่าความถี่บีต โดยการวัดความถี่บีตจะสามารถคำนวณหามุมของการหมุนได้ ผลจากการสอบเทียบระบบวัดมุมที่สร้างขึ้นกับออคอลิเมเตอร์ ปรากฏว่าระบบวัดมุมนี้มีช่วงการทำงานอยู่ที่ ± 7 องศา ด้วยความละเอียดประมาณ 0.014 องศา มีความคลาดเคลื่อนสูงสุด 0.0063 องศา และจากการประเมินค่าความไม่แน่นอนของระบบวัดพบว่ามีค่า 0.0042 องศา ที่ความเชื่อมั่น 95 %

คำสำคัญ: ปรากฏการณ์ ดอปเพลอร์, เลเซอร์ดอปเพลอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์, ความถี่บีต

Abstract

This research proposes a method for measuring a small angle. This is accomplished by using the technique of laser doppler effect. The developed laser Doppler interferometer consists of two retro-reflectors mounted to the rotating arm of a rotary table. The computer controlled rotary table is driven by a five phase stepping motor. Frequencies of two helium neon laser beams reflected from both rotating retro-reflectors will be changed according to doppler effect. Interference of these reflected beams produces beat frequency. The angle of rotation can be calculated from measured beat frequency. The angle measurement system was calibrated with autocollimator. The resolution of the system is approximately 0.014 degrees within the measuring range of ± 7 degrees with the 0.0063 degrees of

maximum error. The uncertainty of the measurement system is 0.0042 degrees at 95% confident interval.

Keywords: doppler effect, laser doppler interferometer, beat frequency.

1. บทนำ

โดยทั่วไปการวัดมุมขนาดเล็กมีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสเกลของแท่นหมุน (rotary table) หลักการพื้นฐานของการวัดมุมคือการแบ่งวงกลมออกเป็นส่วนย่อย ๆ ความแม่นยำและความละเอียดของการวัดมุมด้วยวิธีนี้ขึ้นอยู่กับความแม่นยำในการแบ่งแยกส่วนย่อยของวงกลม ในส่วนของมาตรฐานการวัดมุมจะใช้เครื่องมือต่างๆ เช่น ออคอลิเมเตอร์ (autocollimator) แท่งเกจวัดมุม (angle gauges) รูปหลายเหลี่ยมเที่ยงตรง (precision polygons) และแผ่นแกวสเกล (circular scale) เป็นต้น [1-5]

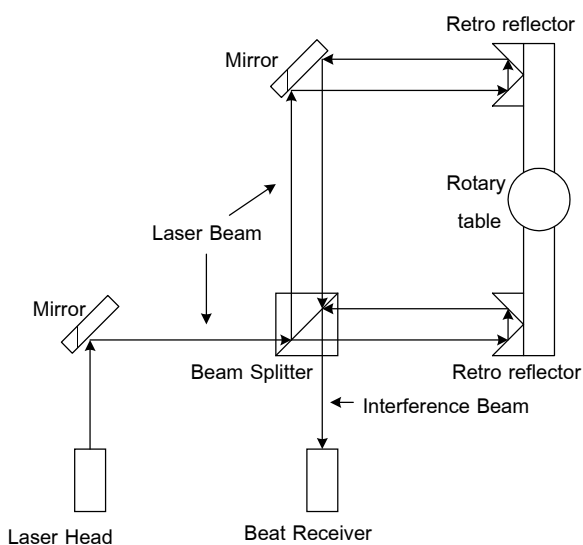
การสร้างและการวัดมุมขนาดเล็กทำได้หลายวิธี [6-9] ทุกวิธีใช้หลักการของสามเหลี่ยมมุมฉาก (sine principle) กล่าวคือขนาดของมุมหาได้จากอัตราส่วนของความยาวของด้านตรงข้ามมุมที่ต้องการวัดและด้านตรงข้ามมุมฉาก ความแม่นยำของวิธีนี้จึงขึ้นอยู่กับความแม่นยำในการวัดความยาวของด้านทั้งสอง

การวัดมุมให้มีความละเอียด (resolution) ได้ถึง 1.43×10^{-5} องศา (0.05 ฟลิปดา) สามารถทำได้โดยใช้วิธีการทางแสง โดยมีเลเซอร์ฮีเลียมนีออนชนิดสองความถี่เป็นแหล่งกำเนิดแสง [10] งานวิจัยนี้เป็นวิธีการวัดมุมขนาดเล็กโดยใช้ปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (doppler effect) ของแสงเลเซอร์ แสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิดความถี่เดียว ซึ่งราคาจะถูกกว่าชนิดสองความถี่มาก เลเซอร์ดอปเพลอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่สร้างขึ้นประกอบด้วยกระจกสะท้อนแสงชนิดรีโทรเฟลิกเตอร์ (retro-reflector) สองชิ้น ติดตั้งบนแท่นหมุนซึ่งถูกขับด้วยสเต็ปมอเตอร์ชนิด 5 เฟส การหมุนของแท่นถูกควบคุมโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์จะตรวจวัดความเร็วสัมพัทธ์ของรีโทรเฟลิกเตอร์ทั้งสองในขณะที่แท่นหมุนกำลังหมุนในรูปของการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงเลเซอร์อันเนื่องจากการบีตของแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากรีโทรเฟลิกเตอร์ทั้งสอง มุมของการหมุนสามารถคำนวณได้จากค่าที่อ่านได้จากอินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

และพารามิเตอร์ของระบบ ได้แก่ ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์และระยะห่างระหว่างรีโทริเฟลกเตอร์ทั้งสอง

2. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการ

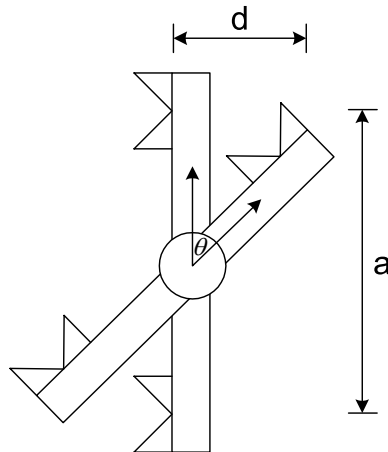
เลเซอร์ดอปเพลอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ที่สร้างขึ้นสำหรับการวัดมุมในงานวิจัยนี้มีการจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 1 อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ประกอบด้วยรีโทริเฟลกเตอร์ขนาด 10.2 mm สองชิ้น ติดตั้งห่างกัน 32.61 mm บนแกนโลหะ โดยจุดกึ่งกลางของแกนโลหะนี้ยึดติดกับแกนหมุนในแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่นหมุน แสงโพลาไรซ์จากเลเซอร์ฮีเลียมนีออน JDS Uniphase Model 1108p ขนาด 0.5 mW ซึ่งถูกจัดให้แนวโพลาไรซ์ทำมุม 45 องศากับแนวตั้งจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ลำที่มีความเข้มแสงเท่ากันโดยตัวแยกแสงชนิดโพลาไรซ์ (polarized beam splitter) ไปตกยังรีโทริเฟลกเตอร์ทั้งสองแล้วสะท้อนกลับมารวมกันที่ตัวแยกแสงอีกครั้งหนึ่ง จากนั้นจะถูกวัดความเข้มแสงด้วยตัวตรวจวัด Agilent Model 10780C Receiver [11] แท่นหมุนถูกขับเคลื่อนด้วยสเต็ปมอเตอร์ชนิด 5 เฟส มีความละเอียด 0.72 องศาต่อสเต็ปเมื่อขับเคลื่อนที่อัตราการรอบ 50 : 1 ทำให้แท่นหมุนมีความละเอียดประมาณ 0.014 องศา มุมและความเร็วของการหมุนจะถูกควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์



รูปที่ 1 การจัดอุปกรณ์สำหรับเลเซอร์ดอปเพลอร์อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์

ในขณะที่แท่นหมุนกำลังหมุน รีโทริเฟลกเตอร์ทั้งสองบนแท่นหมุนจะเคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้ามและทำให้แสงที่สะท้อนจากรีโทริเฟลกเตอร์ทั้งสองมีความถี่ไม่เท่ากัน โดยแสงสะท้อนลำหนึ่งจะมีความถี่สูงขึ้นในขณะที่แสงอีกลำหนึ่งมีความถี่ต่ำลงเนื่องจากปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ เมื่อแสงสะท้อนทั้งสองซึ่งมีความถี่ต่างกันเล็กน้อยมารวมกันที่ตัวแยกแสงจะเกิดการบีต (beat) กันของคลื่นแสง ผลของการบีตนี้จะทำให้ความเข้มแสงมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาด้วยความถี่เท่ากับความถี่บีตซึ่งเท่ากับความแตกต่างของความถี่ของแสงสะท้อน

ทั้งสอง ชุดตรวจวัดความเข้มแสงจะตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสง จากนั้นวงจรปรับปรุงสัญญาณ (signal conditioning circuit) จะปรับรูปสัญญาณและให้เอาต์พุตออกมาในรูปสัญญาณพัลส์ เมื่อป้อนสัญญาณเข้าเครื่องนับ Agilent Model 53132A จะทำให้ทราบจำนวนการกระเพื่อมของแสงในช่วงเวลาที่แท่นหมุนกำลังหมุนหรือความถี่บีตนั่นเอง ข้อมูลที่ได้นี้จะนำมาคำนวณหามุมของการหมุนได้ดังความสัมพันธ์ต่อไปนี้



รูปที่ 2 รีโทริเฟลกเตอร์หมุนไปเป็นมุม θ

จากรูปที่ 2 รีโทริเฟลกเตอร์บนแท่นหมุนอยู่ห่างกันเป็นระยะ a เมื่อแท่นหมุน ๆ ไปเป็นมุม θ จะทำให้รีโทริเฟลกเตอร์เคลื่อนที่ได้ระยะทาง d ดังสมการที่ (1)

$$\sin \theta = \frac{d}{a/2} \quad \text{หรือ} \quad d = \frac{a}{2} \sin \theta \quad (1)$$

ในการหมุน รีโทริเฟลกเตอร์ทั้งสองจะเคลื่อนที่ในทิศตรงกันข้ามด้วยความเร็วเท่ากัน, V แสงที่สะท้อนจากรีโทริเฟลกเตอร์จะมีความถี่เปลี่ยนจาก f ไปเป็น f' โดย

$$f' = f \left(1 \pm \frac{V_s}{c} \right) \quad \text{หรือ} \quad f' = f \pm \Delta f \quad (2)$$

เมื่อ $\Delta f = \frac{V_s}{c} f$ ส่วน V_s คือความเร็วของแหล่งกำเนิดแสง และ C คือความเร็วของแสง

เนื่องจากความถี่บีต, f_b มีค่าเท่ากับผลต่างของความถี่ของคลื่นแสงที่สะท้อนทั้งสองและในกรณีนี้ $V_s = 2V$ นั่นคือ

$$\begin{aligned} f_b &= f_1 - f_2 \\ &= (f + \Delta f) - (f - \Delta f) \end{aligned}$$

ดังนั้น $f_b = 2\Delta f = 2 \frac{V_s}{c} f = 2 \frac{V_s}{\lambda} = 4 \frac{V}{\lambda}$ (3)

ถ้าให้ n คือจำนวนนับที่ได้จากเครื่องนับการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงในขณะที่แท่นหมุนกำลังเคลื่อนที่ สามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{dn}{dt} = f_b = 4 \frac{v}{\lambda} \quad (4)$$

เมื่อแท่นหมุน หมุนไปเป็นมุมเล็ก ๆ จะพิจารณาได้ว่า v มีค่าคงที่ ดังนั้น

$$\begin{aligned} n &= \frac{4}{\lambda} \int v dt = \frac{4}{\lambda} d \\ d &= \frac{a}{2} \sin \theta = \frac{n\lambda}{4} \\ \theta &= \sin^{-1} \left(\frac{n\lambda}{2a} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

เมื่อ θ คือ มุมที่ต้องการวัด (องศา)

n คือ จำนวนนับที่นับได้โดยเครื่องนับ

a คือ ระยะห่างของรีโทริเฟลกเตอร์ มีค่า 32.61 mm

λ คือ ความยาวคลื่นของแสงที่ใช้ 632.8 nm

2.1 การทดสอบความเป็นเชิงเส้น

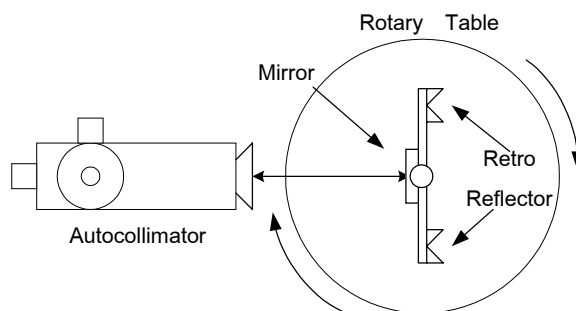
การทดสอบการทำงานของระบบวัดมุมขนาดเล็กที่สร้างขึ้นขั้นแรกได้ทำการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบโดยการวัดมุมของแท่นหมุน เริ่มโดยการจัดตำแหน่งของแท่นหมุนให้แสงเลเซอร์ตกตั้งฉากกับรีโทริเฟลกเตอร์ทั้งสองและใช้จุดนี้เป็นจุดอ้างอิงเริ่มต้นเป็นมุม 0 องศา ให้มุมเป็นบวกเมื่อหมุนตามเข็มนาฬิกาและเป็นลบเมื่อหมุนทวนเข็มนาฬิกา

ทำการวัดมุมด้วยอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ในขณะที่หมุนแท่นหมุนตามเข็มนาฬิกาเพิ่มขึ้นทีละหนึ่งสเต็ปของมอเตอร์ที่ขับหรือประมาณ 0.014 องศา โดยเริ่มต้นจากมุม 0 องศา ทุกครั้ง ทำการวัดจนกระทั่งมุมที่วัดได้โดยอินเตอร์เฟอริมิเตอร์และมุมของแท่นหมุนมีความสัมพันธ์กันแบบไม่เป็นเชิงเส้น จากนั้นทำการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของมุมเมื่อหมุนแท่นหมุนทวนเข็มนาฬิกาด้วยวิธีเดียวกัน

2.2 การสอบเทียบด้วยอโตคอลิเมเตอร์

ความถูกต้องของมุมที่วัดได้โดยอินเตอร์เฟอริมิเตอร์สามารถตรวจสอบได้โดยการสอบเทียบกับอโตคอลิเมเตอร์ Hilger Watts Model TA50-1 ซึ่งมีช่วงการวัด 10 ลิปดา ที่ความละเอียด 5.55×10^{-5} องศา (0.2 ฟิลิปดา) โดยใช้อโตคอลิเมเตอร์ที่ใช้ได้รับการสอบเทียบภายใต้มาตรฐาน ISO/IEC Guide 25 (17025) [12] แล้ว อโตคอลิเมเตอร์ถูกติดตั้งเพื่อวัดมุมที่หมุนไปของแท่นหมุน โดยสังเกตมุมที่เบี่ยงเบนไปของกระจกสะท้อนแสงที่ถูกติดไว้ที่ด้านหลังของแกนยัติรีโทริเฟลกเตอร์ ดังรูปที่ 3 วัดมุมด้วยอโตคอลิเมเตอร์พร้อมกับการวัดด้วยอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ซึ่งยังคงจัดระบบเหมือนเดิม (รูปที่ 1) แบ่งมุมในช่วงที่อินเตอร์เฟอริมิเตอร์ให้ผลการวัดเป็นเชิงเส้นออกเป็น 12 ช่วง ใน

แต่ละช่วงวัดมุม 12 ค่าโดยเพิ่มมุมขึ้นทีละประมาณ 0.014 องศา หรือทุก ๆ 1 สเต็ป เปรียบเทียบมุมที่วัดได้จากอโตคอลิเมเตอร์กับอินเตอร์เฟอริมิเตอร์

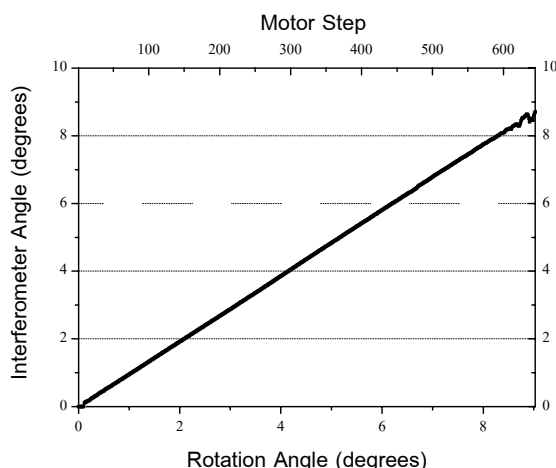


รูปที่ 3 การจัดอุปกรณ์สำหรับสอบเทียบด้วยอโตคอลิเมเตอร์

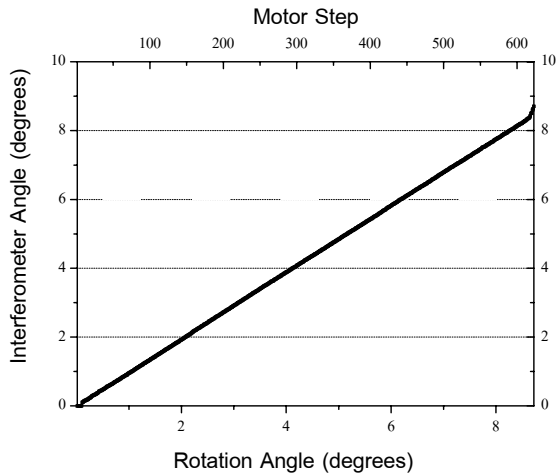
3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 ความเป็นเชิงเส้น

ผลการวัดมุมด้วยอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ในขณะที่แท่นหมุนทำมุมเพิ่มขึ้นทีละหนึ่งสเต็ปของมอเตอร์ที่ขับหรือประมาณ 0.014 องศา ทั้งตามและทวนเข็มนาฬิกา แสดงดังรูปที่ 4 และ 5 ตามลำดับ จากผลการวัดพบว่าอินเตอร์เฟอริมิเตอร์ทำงานได้ผลใกล้เคียงกันมากทั้งด้านตามและทวนเข็มนาฬิกา โดยให้ผลการวัดเป็นเชิงเส้นจนกระทั่งถึงมุมมากกว่า 8 องศา เล็กน้อย จากนั้นจะทำงานไม่เป็นเชิงเส้น ทั้งนี้จากการสังเกตพบว่า เมื่อมุมมีค่ามากขึ้น แสงที่สะท้อนจากรีโทริเฟลกเตอร์ทั้งสองจะไม่รวมเป็นจุดเดียวกันที่ตัวแยกแสง การเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงเนื่องจากการบิดจึงทำให้ชุดตรวจวัดความเข้มแสงไม่สามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงได้อย่างถูกต้อง

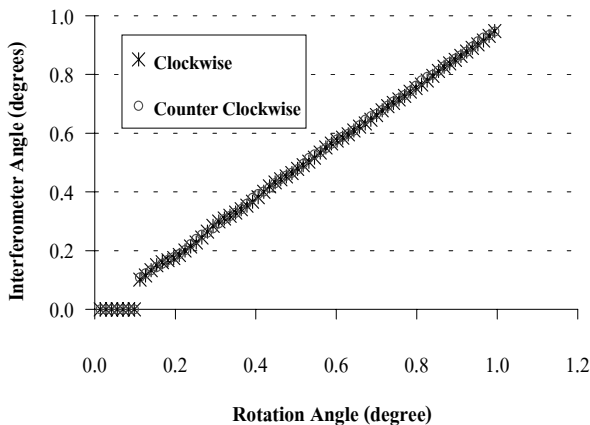


รูปที่ 4 ความเป็นเชิงเส้นของระบบเมื่อมุมเป็นมุมบวก



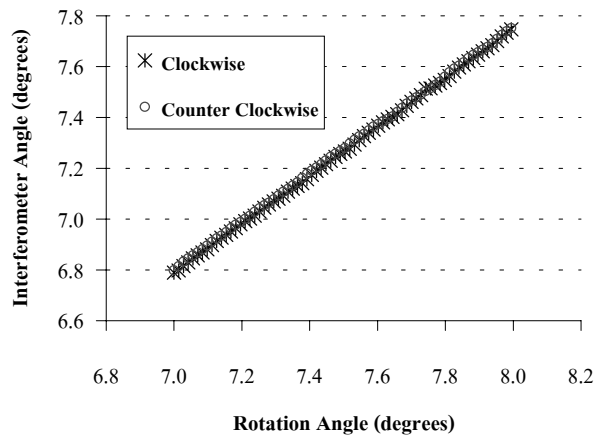
รูปที่ 5 ความเป็นเชิงเส้นของระบบเมื่อมุมเป็นมุมลบ

เมื่อพิจารณาผลการวัดจากกราฟทั้งสองโดยละเอียดพบว่า ระหว่างมุม 0 องศา ถึงประมาณ 0.140 องศา อินเตอร์เฟอริมิเตอร์ไม่สามารถวัดมุมได้ จะเริ่มวัดได้เมื่อมอเตอร์หมุนไปแล้ว 10 สเต็ป หรือประมาณ 0.140 องศา ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดของระบบที่สร้างอย่างหนึ่ง

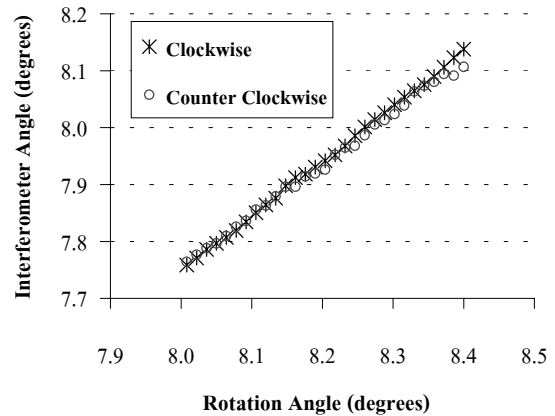


รูปที่ 6 ผลการวัดมุมในช่วง 0 – 1 องศา

จากรูปที่ 6 จะเห็นว่าผลการวัดมุมในช่วง 0 – 1 องศา อินเตอร์เฟอริมิเตอร์สามารถวัดค่ามุมได้ใกล้เคียงกันจนไม่สามารถสังเกตเห็นได้จากกราฟ ไม่ว่าจะวัดมุมที่เป็นบวก (ตามเข็มนาฬิกา) หรือมุมที่เป็นลบ (ทวนเข็มนาฬิกา) อินเตอร์เฟอริมิเตอร์ที่ศึกษานี้จะให้ผลการวัดเป็นเชิงเส้นและสามารถวัดมุมที่เป็นบวกและเป็นลบได้ใกล้เคียงกัน (เมื่อแทนหมุน หมุนไปเป็นมุมเท่ากัน) จนถึงช่วงมุมที่มากกว่า 8 องศา เล็กน้อย จากนั้นจะได้ผลการวัดที่ไม่เป็นเชิงเส้นและได้ผลการของมุมที่เป็นบวกและลบต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 7 และ 8 ซึ่งถือเป็นช่วงการวัดมุมสูงสุดที่ระบบสามารถทำงานได้



รูปที่ 7 ผลการวัดมุมในช่วง 7 – 8 องศา

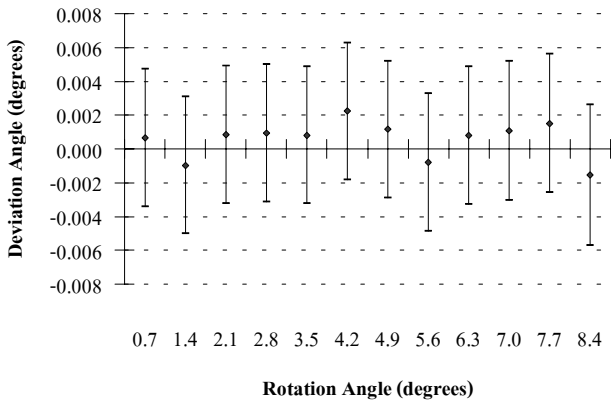


รูปที่ 8 ผลการวัดมุมในช่วง 8 – 8.4 องศา

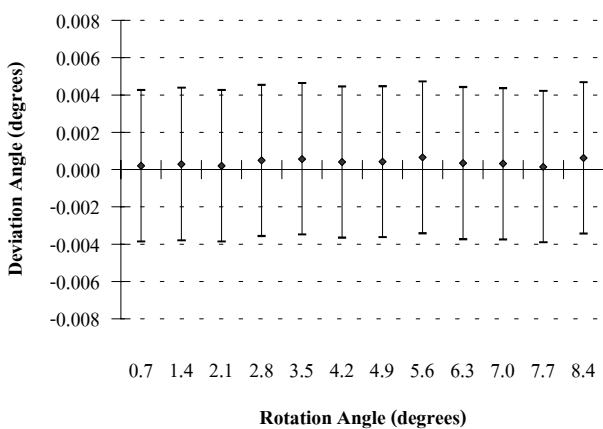
3.2 ผลการสอบเทียบ

การสอบเทียบด้วยออคโตลิเมเตอร์ทำในช่วง ± 8.5 องศา โดยแบ่งมุมออกเป็น 12 ช่วง สอบเทียบมุม 13 มุมในแต่ละช่วง โดยในช่วงที่หนึ่งเริ่มต้นที่สเต็ปที่ 50 แล้วเพิ่มมุมขึ้นทีละหนึ่งสเต็ปจนถึงสเต็ปที่ 62 (ประมาณ 0.700 – 0.868 องศา) ช่วงถัดไปแต่ละช่วงที่สอบเทียบจะเริ่มต้นห่างกัน 50 สเต็ป โดยช่วงสุดท้ายเริ่มต้นที่สเต็ปที่ 600 (ประมาณ 8.400 – 8.568 องศา) ได้ผลการสอบเทียบดังรูปที่ 9 และ 10

จากผลการสอบเทียบด้วยออคโตลิเมเตอร์ซึ่งมีความละเอียดสูงมาก พบว่าระบบมีความคลาดเคลื่อนต่างกันมากระหว่างการวัดมุมที่เป็นบวกและมุมที่เป็นลบ สำหรับการสอบเทียบมุมทุก ๆ 1 สเต็ปของการหมุน มุมทางด้านบวกมีความคลาดเคลื่อนสูงสุด 0.0063 องศา ในช่วงมุม 0-8.4 องศา ในขณะที่มุมที่เป็นลบมีความคลาดเคลื่อนสูงสุด 0.0047 องศา ตลอดช่วงมุม 0-8.4 องศา



รูปที่ 9 ผลการสอบเทียบมุมเมื่อมุมเป็นนวก (ตามเข็มนาฬิกา)



รูปที่ 10 ผลการสอบเทียบมุมเมื่อมุมเป็นลบ (ทวนเข็มนาฬิกา)

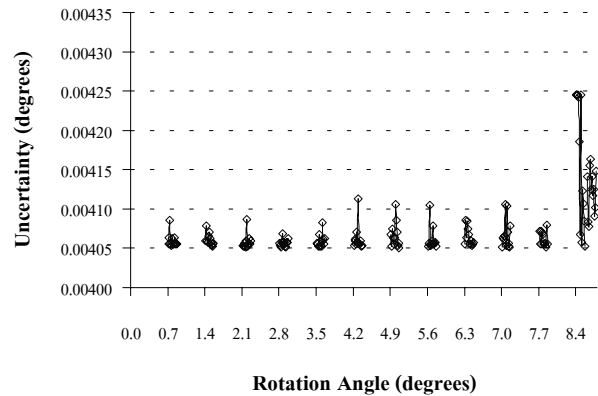
3.3 การประเมินความไม่แน่นอน

ความไม่แน่นอนของผลการวัดประเมินตามข้อกำหนดของ ISO Guide to Expression of Uncertainty in Measurement (GUM) [13] ซึ่งแบ่งความไม่แน่นอนออกเป็นสองประเภท ประเภทที่หนึ่งเรียกว่า ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A ซึ่งเป็นความไม่แน่นอนที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนเชิงสุ่ม (random error) เมื่อการวัดกระทำอย่างอิสระต่อกันและอยู่ภายใต้สภาวะเดียวกัน ความไม่แน่นอนนี้ได้รับการประเมินทางสถิติของข้อมูลที่ได้มาจากผลการวัดซ้ำ ๆ ประเภทที่สองเรียกว่า ความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type B เป็นความไม่แน่นอนที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (systematic error) ไม่สามารถประเมินทางสถิติได้ โดยจะประเมินจากความแม่นยำของแหล่งกำเนิดแสง ความละเอียดของระบบวัด ความละเอียดของแท่นหมุนและผลการสอบเทียบอโตคอลิเมเตอร์ ซึ่งมีค่าดังตารางที่ 1

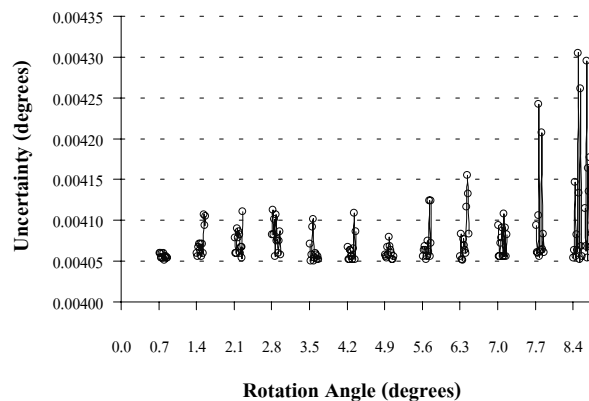
ผลการประเมินพบว่าความไม่แน่นอนของระบบวัดมีค่า 0.0042 องศา สำหรับการวัดมุมในช่วง ± 7 องศา และมีค่าต่ำกว่า 0.0043 องศา สำหรับการวัดมุมในช่วง ± 8.4 องศา ที่ความเชื่อมั่น 95% ดังแสดงในรูปที่ 11 และ 12

ตารางที่ 1 Uncertainty budget

Source of uncertainty	Value (\pm)	Uncertainty (deg.)
Accuracy of laser	10 nm	0.0000051
Resolution of system	0.00056 deg.	0.00016
Resolution of rotary table	0.0144 deg.	0.0041
Calibration of autocollimator	0.000208 deg.	0.00021



รูปที่ 11 ผลการประเมินค่าความไม่แน่นอนเมื่อมุมเป็นนวก



รูปที่ 12 ผลการประเมินค่าความไม่แน่นอนเมื่อมุมเป็นลบ

4. สรุป

เลเซอร์คอปเพลอร์อินเตอร์เฟอริเตอร์สำหรับการวัดมุมขนาดเล็กสร้างขึ้นโดยใช้ปรากฏการณ์คอปเพลอร์ของแสงเลเซอร์และการบีบตัวของแสงเลเซอร์ที่สะท้อนจากรีโทรรีเฟลคเตอร์ทั้งสองที่ติดตั้งบนแท่นหมุน แท่นหมุนซึ่งถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ชนิด 5 เฟสและควบคุมการหมุนโดยไม่โครคอนโทรลเลอร์มีความละเอียดในการหมุนประมาณ 0.014 องศา ใช้แสงเลเซอร์ฮีเลียมนีออนชนิดความถี่เดียวเป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งประหยัดค่าใช้จ่ายได้มาก

จากการทดสอบการใช้งานและการสอบเทียบด้วยอโตคอลิเมเตอร์พบว่า ระบบวัดสามารถวัดมุมได้ในช่วง ± 7 องศา ด้วยความละเอียดประมาณ 0.0140 องศา และมีความไม่แน่นอนในการวัด

0.0042 องศา สำหรับการวัดมุมในช่วง ± 7 องศา ที่ความเชื่อมั่น 95%

เอกสารอ้างอิง

- [1] Hume, K.J. "Engineering Metrology" 3rd Edition MacDonald, London, 1970.
- [2] Miller, L. "Engineering Dimensional Metrology" Arnold, London, 1962.
- [3] Scarr, A.J.T. "Metrology and Precision Engineering" McGraw-Hill, London, 1967.
- [4] Thomas, G.G. "Engineering Metrology" Butterworths , London, 1967.
- [5] Evans, J.C. and Taylerson, C.O. "Measurement of Angle in Engineering" Note and Apply Science No.26, National Physical Laboratory, London, 1964.
- [6] W. Beiyer, Measurement 2, 14(1984)
- [7] Jablonsk R. and Toyama A., Bulletin PME 43, 29(1979)
- [8] Schatz B., Bulletin BNM 43, 52(1981)
- [9] Moore Special Tool Co. Model 1440 Small-Angle Divider
- [10] Agilent Technologies, Model 5527B catalog 2002
- [11] Agilent Technologies, Model 10780C Receiver Operating and Service Manual
- [12] ISO / IEC 17025:1999, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
- [13] C.F. Dietrich, "Uncertainty, Calibration and Probability" Adam Hilger, London, 1973.