

ระบบตรวจวัดและติดตามด้วยแสง laser เพื่อการปรับตั้งเครื่องจักรหลายแกน

Laser Tracking System for Multi-Axis Machine Calibration

วราคม เนินน้อย เสถียรพงศ์ หุยะนันท์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

บทคัดย่อ

ระบบการตรวจวัดด้วยแสง laser (laser measurement system) ซึ่งใช้หลักการ laser interfero techniques ได้ถูกนำมาใช้ในการปรับตั้งเครื่องจักรที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง เนื่องจากการวัดระบบการวัดนี้ สามารถให้ความถูกต้องในการวัดระยะทางได้ถึง 0.01 ไมครอน และ เมื่อรวมระบบการติดตามเข้ากับระบบการตรวจวัดแบบนี้ ก็จะทำให้การปรับตั้งเครื่องจักรหลายแกน และ หุ่นยนต์ (robot) เป็นไปได้อย่างเที่ยงตรง และ รวดเร็ว ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาวิธีการ และ หลักการของระบบติดตามด้วยแสง laser เพื่อการทำให้การวัดมีความสะดวก และ เหมาะสมในการใช้งานมากยิ่งขึ้น

ในบทความนี้ จะได้กล่าวถึง หลักการในการตรวจวัดค่าผิดพลาดของเครื่องจักรด้วย laser measurement system ซึ่งในที่นี้คือ ระบบ laser interferometer และ การปรับปรุงระบบติดตามด้วยแสง laser ในลักษณะ 3 มิติ ที่มีราคาต่ำ และ ทำงานร่วมกับระบบ laser interferometer ซึ่งมีใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง

Abstract

The laser measurement system, using laser interfero techniques, is used for calibration in high-precision machines. This system has an advantage in the accuracy of measurement up to 0.01 micron. If combined with the tracking system, the laser measurement system will be beneficial in the calibration of multi-axes machines and robots, giving a high-precision and rapid measurement. Recently there is an development of methods and principals of tracking system with laser, which helps the measurement be more convenient and suitable in applications.

This paper presents the principal of laser measurement and tracking system and the development of a low-cost three-dimension tracking system, using laser interferometer. The system can be used in various high-precision industry applications.

พื้นฐานของการวัดด้วยลำแสง laser (Principle of Laser Measurement System)

การวัดระยะทาง (linear distance measurement)

หลักการพื้นฐานในการวัด อุปกรณ์ beam splitter และ reference retroreflector จะถูกยึดไว้กับส่วนที่หยุดนิ่ง (ดู Fig 1) และ measurement retroreflector จะถูกยึดกับส่วนที่เคลื่อนที่ ลำแสง laser จะถูกยิงมาที่ตำแหน่ง A ของ beam splitter ซึ่งความเข้มของลำแสงจะถูกแบ่งครึ่ง โดยครึ่งหนึ่งจะผ่านทะลุ beam splitter ออกไปตรงๆ และถูก measurement retroreflector สะท้อนกลับมาที่ตำแหน่ง B ของ beam splitter; ส่วนอีกครึ่งหนึ่งจะสะท้อนไปที่ reference retroreflector และถูก reference retroreflector สะท้อนกลับมาที่ตำแหน่ง B ของ beam splitter จากนั้นลำแสงทั้งสองที่สะท้อนกลับมารวมกัน และเกิดการ interference ซึ่งกันและกัน ความเข้มของลำแสงจะถูกตรวจวัด ถ้า measurement retroreflector ไม่เคลื่อนที่ ค่าความเข้มของแสงที่วัดได้จะคงที่ เมื่อ measurement retroreflector เคลื่อนที่ไปจะทำให้ความเข้มของแสงที่วัดได้แปรเปลี่ยนจากสว่างไปมืด, มืดไปสว่าง สลับกันไป ระยะทางที่ทำให้ความเข้มแสงเปลี่ยนจากสว่างไปมืด หรือมืดไปสว่าง จะมีระยะเท่ากับ $\frac{1}{4}$ ของความยาวคลื่นของ ลำแสง laser (ปกติลำแสง laser ที่ใช้มีความยาวคลื่น $0.6 \mu\text{m}$ ก็ทำให้วัดได้ละเอียดถึงประมาณ $0.15 \mu\text{m}$) แต่ในเชิงการค้าจะมีการปรับปรุงหลักการขึ้นอีกเล็กน้อย คือ จะใช้ลำแสง laser ที่มีค่าความถี่ 2 ค่า และใช้หลักการ twin frequency technique เพื่อทำการวัด Doppler shifted frequency ทำให้สามารถวัดได้ว่า เป็นการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า หรือ ถอยหลัง, ลดปัญหาที่อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสง laser และ ทำให้เพิ่มความละเอียดในการวัดได้เป็น $0.01 \mu\text{m}$

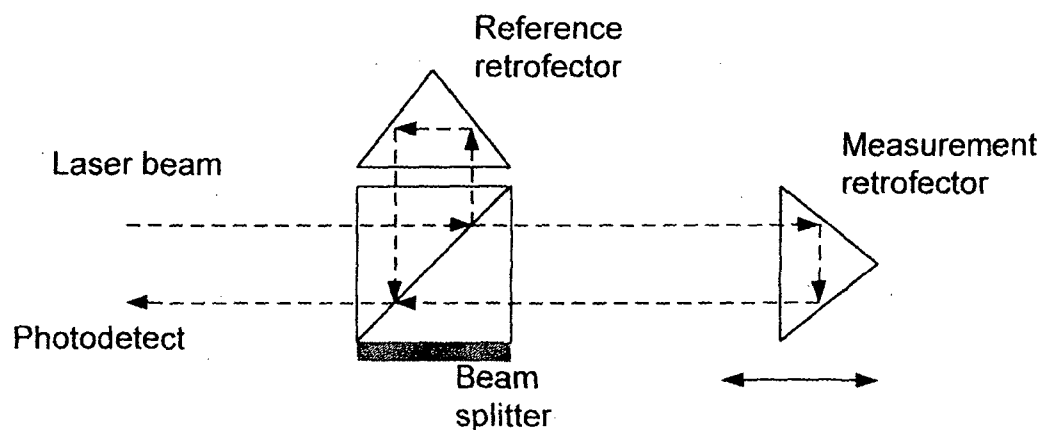


Fig 1. Linear Distance Measurement

การวัดมุม (Angular measurement)

ใช้พื้นฐานของการวัด linear distance (ดู Fig 2) จากรูป beam bender จะถูกยึดกับส่วนที่หยุดนิ่ง ส่วน twin reflector จะถูกยึดกับส่วนที่เคลื่อนที่ ลำแสง laser จะถูกยิงมายังตำแหน่ง A ของ beam bender จากนั้นลำแสง laser จะถูกแยกออกเป็น 2 ส่วน และถูกสะท้อนไปยัง reflector C และ D ตามลำดับ เมื่อลำแสงทั้งสองสะท้อนกลับมายัง beam bender ลำแสงทั้งสองจะมารวมกันที่ตำแหน่ง B และเกิดการ interference ของลำแสงทั้งสอง ให้เมื่อเริ่มการวัด twin reflector ทำมุม θ กับ beam bender ถ้า twin reflector เคลื่อนที่โดยมุม θ คงที่ ความแตกต่างของระยะทางระหว่างลำแสงทั้งสองก็คงที่ ทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า Doppler shifted frequency แต่ถ้ามุม θ เปลี่ยนไปก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าความแตกต่างของระยะทางระหว่างลำแสงขึ้น ก็จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า Doppler shifted frequency เมื่อนำค่าระยะทางที่เปลี่ยนแปลง ไปคำนวณร่วมกับระยะห่างระหว่าง reflector C และ D ก็จะได้ค่ามุม θ ที่เปลี่ยนไป

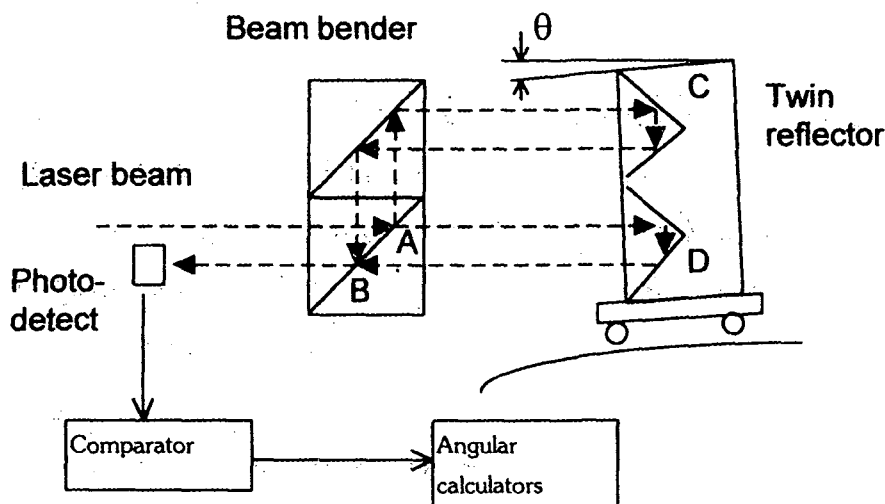


Fig 2. Angular Measurement

การวัดแนวตรงของการเคลื่อนที่ (Straightness measurement)

การวัดทำได้ดังรูปที่ 3 Straightness reflector ซึ่งถูกยึดติดกับส่วนที่เคลื่อนที่ Wollaston prism และ beam splitter โดยทั้งสองจะยึดอยู่กับส่วนหยุดนิ่ง ลำแสง laser จะถูกยิงผ่าน beam splitter ไปยัง wollaston prism จากนั้นลำแสงจะถูกแยกเป็นสองแนวไปยัง straightness reflector ดังรูป เมื่อลำแสงสะท้อนกลับมายัง wollaston prism ก็จะรวมกันและผ่านกลับไปยัง beam splitter ซึ่งจะทำให้การสะท้อนลำแสงที่สะท้อนกลับมานี้ ไปยังตัวตรวจวัด ทำนองเดียวกับการวัดมุม เมื่อ straightness reflector เคลื่อนที่ออกจากแนวเส้นตรงจะทำให้ระยะทางระหว่าง wollaston prism กับ straightness reflector ของลำแสงทั้งสองแนวเพิ่มขึ้นไม่เท่ากัน ก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงค่า Doppler

shifted frequency ขึ้น เมื่อรู้ค่ามุมของลำแสงทั้งสองที่พุ่งไปยัง straightness reflector ก็จะสามารถคำนวณระยะที่ straightness reflector เคลื่อนออกไปจากแนวเส้นตรงได้

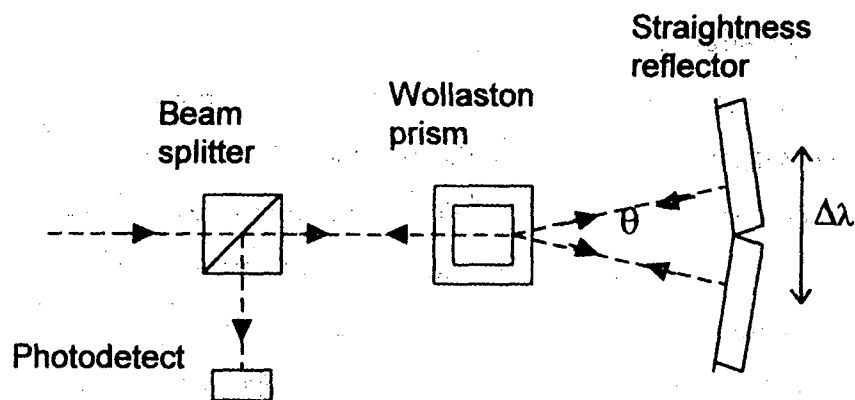


Fig 3. Straightness measurement

การปรับตั้งเครื่องจักร

เนื่องจากในอุตสาหกรรมปัจจุบันมีความต้องการคุณภาพของผลผลิตสูง ซึ่งความแม่นยำของเครื่องจักรที่ทำการผลิตมีผลโดยตรงต่อคุณภาพของผลผลิต เพื่อเป็นการประกันความถูกต้องแม่นยำของเครื่องจักรตลอดช่วงเวลาที่ทำการผลิตจึงต้องมีการตรวจวัดความถูกต้องของเครื่องจักรอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งต้องใช้เวลามากในการตรวจวัด ยิ่งถ้าเครื่องจักรมีความซับซ้อนมากเช่นเครื่องกัดซึ่งมีการเคลื่อนที่ได้ 3 มิติก็จะใช้เวลาในการตรวจวัดมากยิ่งขึ้น โดยทั่วไปการวัดจะทำได้โดยการวัดค่าผิดพลาดที่ละหนึ่งลักษณะอย่างกรณีของเครื่องที่มีการเคลื่อนที่ 3 มิติ ก็จะต้องทำการวัดค่าผิดพลาดถึง 21 ลักษณะ ซึ่งประกอบไปด้วย ความผิดพลาดของตำแหน่งตามแนวแกน X, Y, Z; ความผิดพลาดที่เกิดจากการหมุนในลักษณะ pitch และ yaw ตามแนวแกน X, Y, Z; ความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงตาม แกน X, Y, Z และความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากระหว่างแกน X, Y, Z จากวิธีการวัดค่าผิดพลาดที่กล่าวไว้ข้างต้นจะเห็นได้ว่าแต่ละลักษณะการวัดก็จะต้องคิดตั้งอุปกรณ์การวัดต่างกันออกไป ซึ่งเป็นเหตุให้ใช้เวลาในการตรวจวัดมาก และถ้าต้องการให้การตรวจวัดมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นก็ต้องทำการตรวจวัดความผิดพลาดแต่ละลักษณะหลายๆครั้ง ซึ่งก็ยิ่งทำให้ใช้เวลามากขึ้นไปอีก

ในปัจจุบันได้มีความพยายามที่จะพัฒนาเครื่องมือต้นแบบสำหรับการตรวจวัดแบบ 3 มิติ โดยไม่มีการสัมผัส และสามารถทำงานได้โดยอัตโนมัติ ซึ่งจะทำให้การตรวจวัดเครื่องจักรที่เคลื่อนที่แบบ 3 มิติ และ Robot เป็นไปได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น ด้วยคุณสมบัติที่ดีในด้านความเที่ยงตรงและความแม่นยำในการวัดสูงของระบบ Laser Measurement ทำให้มีความพยายามที่จะร่วมระบบติดตามเป้าหมายเข้ากับระบบ Laser Measurement เพื่อทำให้เกิดการวัดได้โดยอัตโนมัติ เช่น Gilby, J [1] ได้ออกแบบระบบโดยใช้หลักการคำนวณหาตำแหน่งในลักษณะ 3 เหลี่ยม และใช้ลำแสง laser

2 หรือมากกว่า ในระบบตรวจวัด และติดตามเป้า การคำนวณตำแหน่งของเป้าทำได้โดยรู้ค่ามุมของลำแสงทั้งสอง และรู้ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดของลำแสงทั้งสอง ; [2] ได้เสนอระบบหลายลำแสง (multilaser interferometry) การคำนวณตำแหน่งของเป้าทำได้โดยรู้ค่าความยาวด้านทั้งสามของสามเหลี่ยม ซึ่งได้มาจากการใช้ชุด laser interferometry 4 ชุด และยังสามารถปรับปรุงไปใช้ชุด laser interferometry ถึง 6 ชุด [3] ; ในช่วงไม่นานมานี้ได้มีการพัฒนา cat's eye reflector ขึ้นมาทำให้มีความแม่นยำในการวัดถึง $1\ \mu\text{m}$ [4]

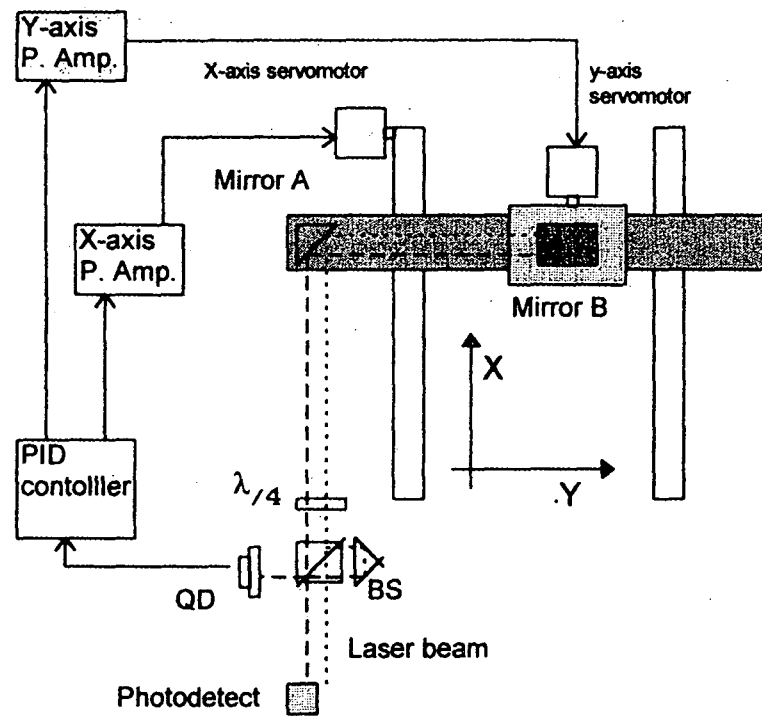
ถึงแม้ว่าการร่วมระบบติดตามเป้าเข้ากับระบบตรวจวัดด้วย laser จะเป็นแนวทางในการพัฒนาชุดตรวจวัดที่สะดวกในการเคลื่อนย้าย และสามารถทำการวัดได้อย่างอัตโนมัติ แต่ในด้านราคา, ความซับซ้อนในการออกแบบ และความแม่นยำในการวัดก็เป็นปัญหาในการพัฒนาเครื่องวัดที่สามารถยอมรับได้ นอกจากนั้นเรายังต้องทำการปรับตั้งชุดเครื่องมือเหล่านี้ก่อนนำไปใช้ เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้ จึงได้เสนอลักษณะของเครื่องต้นแบบที่สามารถวัดได้ใน 3 มิติ และใช้ระบบการวัดด้วย laser interferometry ร่วมกับระบบติดตามเป้า โดยระบบติดตามนี้จะถูกประกอบ และถอดออกจากระบบวัดได้โดยง่าย ชุดเครื่องมือที่เสนอนี้จะทำงานใน Cartesian Coordinates

ระบบตรวจวัด และติดตามด้วยแสง laser ที่ทำงานใน Cartesian Coordinate

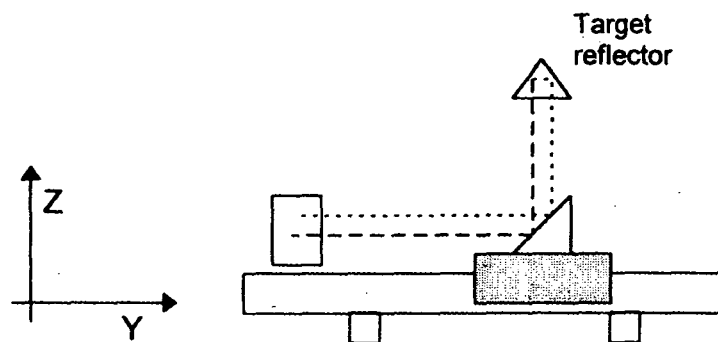
หลักในการออกแบบก็ต้องทำให้กระจกที่ทำหน้าที่สะท้อนแสง laser เพื่อการวัดและติดตามเป้าทำงานในระบบ cartesian coordinate เมื่อนำชุดกระจกติดเข้ากับระบบการควบคุมการเคลื่อนที่แบบ X-Y ที่มีความแม่นยำก็จะทำให้เราสามารถเคลื่อนที่ตามเป้าใน 3 มิติได้ ข้อได้เปรียบของระบบนี้คือไม่ต้องทำการหาค่าที่ถูกต้องเมื่อเริ่มการวัด ก็สามารถตั้งให้จุดเริ่มการวัดเป็น ศูนย์ นอกจากนั้นความผิดพลาดที่เกิดจากการติดตั้งกระจกจะเป็นค่าที่คงที่ ทำให้สามารถกำจัดออกไปได้ โดยการใช้การปรับแก้ด้วยการคำนวณ อย่างไรก็ตามการใช้ระบบการวัด cartesian coordinate ก็มีข้อเสียเปรียบในด้านขนาดของชุดอุปกรณ์ที่ค่อนข้างใหญ่เมื่อคำนึงถึงปริมาตรที่สามารถวัดได้ และปริมาตรในการวัดก็ถูกจำกัดด้วยขนาดของ ชุดเคลื่อนที่ X-Y

ในรูปที่ 4 แสดงถึงลักษณะของชุดเครื่องมือที่ออกแบบซึ่งจะมีหลักการทำงานดังนี้ลำแสง laser ถูกยิงขนานมาตามแกน X ผ่าน beam splitter (BS) ซึ่งถูกยึดติดกับฐานของ ชุดเคลื่อนที่ X-Y แล้วทะลุผ่าน quarter wavelength plate ($\lambda/4$) ไปยังกระจก A ที่ทำมุม 45 องศาที่ถูกยึดอยู่บนปลายของแกน Y ซึ่งจะสะท้อนลำแสงไปตามแนวแกน Y จากนั้นก็ไปยังกระจก B ที่ทำมุม 45 องศา ที่อยู่บนชุดเคลื่อนที่ตามแกน Y ซึ่งจะสะท้อนลำแสงไปในแนวแกน Z และถูก reflector ที่ติดอยู่กับเป้าสะท้อนกลับมายังกระจก B และ A ตามลำดับแล้วผ่าน quarter wavelength plate ไปยัง beam splitter ลำแสงส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนไปยัง quadrant detector (QD) ซึ่งจะก่อให้เกิดสัญญาณไป

ควบคุมการทำงานของชุดเคลื่อนที่ X-Y ในการติดตามเป้า ถ้าแสงอีกส่วนก็จะทะลุ beam splitter ไปยังตัวตรวจวัดระยะการเคลื่อนที่ของระบบ Laser-measurement



(a) plane view



(b) front view

Fig. 4. ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์ของเครื่องตรวจวัด และ ติดตามด้วย แสง Laser

สัญญาณที่เกิดจาก QD จะถูกส่งไปยัง PID controller ของชุดเคลื่อนที่ X-Y เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามเป้า ถ้าสัญญาณจาก QD มีค่าเป็น ศูนย์ ก็แสดงว่าเป้าหมายอยู่ในตำแหน่งที่สามารถอ่านค่าได้พอดี สำหรับค่าระยะทางที่อ่านได้จากชุด laser interferometer จะเป็นค่าที่รวมระยะการเคลื่อนที่ของแกน X, Y และ Z ฉะนั้นเพื่อแยกระยะทางการเคลื่อนที่แต่ละแกนออกจากกัน จึงต้องติดตั้ง linear scale ที่แกน X และ Y ดังนั้นตำแหน่งตามแกน X และ Y จะถูกอ่านจาก linear scale ส่วนค่าตำแหน่งตามแกน Z คำนวณจากค่าที่อ่านจากชุด laser interferometer ลบด้วยค่าการเคลื่อนที่ตามแนวแกน X และ Y ที่อ่านจาก linear scale

บทสรุป

การออกแบบชุดเครื่องมือนี้ทำเพื่อลดราคา, ลดความซับซ้อนในการ setup เครื่องเพื่อเริ่มทำการวัด และทำให้สามารถใช้กับเครื่องมือที่เป็นมาตรฐานในการวัดที่มีอยู่แล้วในวงการอุตสาหกรรม ซึ่งขณะนี้ได้เริ่มสร้างเครื่องต้นแบบโดยใช้อุปกรณ์ที่ให้ความเที่ยงตรงในระดับปานกลาง เพื่อทำการทดสอบหลักการในการติดตามเป้าด้วยแสง laser ในลักษณะของ cartesian coordinate ว่าสามารถทำงานได้ดีเพียงใด และเพื่อทดสอบ math-model ของค่าผิดพลาด ที่ได้สร้างไว้ว่ามีความถูกต้องเพียงใด อย่างไรก็ตามผลความก้ำกั้นในการทดสอบคงสามารถเสนอได้ในการประชุมครั้งหน้า

References

- [1] Gilby, J. and Parker, G. 'Laser tracking system to measure robot arm performance', Sensor Review, Oct. 1982.
- [2] 'Laser trilateration-a fast, accurate and flexible measuring technique', Quality Today, May 1989.
- [3] Slocum, et.al, 'Development of six-degree of freedom position and orientation sensing device: design, theory and testing', Int. JNL. of M/C and manufacture, Vol.28/4. 1988.
- [4] Nakamura, et al. 'A laser tracking robot performance calibration system using ball-seated bearing mechanisms and a spherically shaped cat's eye reflector' Rev.Sci. Instrum. 65(4), April 1994.
- [5] Burdiken, M. and Voutsadoulos, C. 'Computer aided calibration of the geometric errors of Multi-axis coordinate measuring machine' Pro. I.Mech.E. 195 No.20, 1981.