

การประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัดค่าความถูกต้องและแม่นยำ
ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อิสระ 6 แกน ตามมาตรฐาน ISO 9283 ด้วยเลเซอร์แทรกเกอร์
The Measurement Uncertainty Evaluation of Accuracy and Precision
for 6-axis Robotic Arm in Accordance with ISO 9283 by Laser Tracker

อัฐภูมิ เหลืองทองคำ ชนะ รัชศิริ และ กฤติยา พาอิม

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

E-mail: a.loungthongkam@gmail.com, fengcnr@ku.ac.th, krittiya.pa@gmail.com

บทคัดย่อ

หุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมเป็นเครื่องมือที่นำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรมทางการแพทย์ ทางทหารและอื่น ๆ เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่มีความยืดหยุ่น มีความถูกต้องแม่นยำ และมีความน่าเชื่อถือสูง ซึ่งมีความจำเป็นมากในงานที่มีความซับซ้อนที่ต้องการความถูกต้องแม่นยำของระบบอัตโนมัติ งานวิจัยนี้นำเสนอการประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัดค่าความถูกต้องและแม่นยำของหุ่นยนต์แขนกลเคลื่อนที่อิสระ 6 แกน โดยใช้เลเซอร์แทรกเกอร์วัดตามข้อกำหนด ISO 9283 ประกอบด้วย การทดสอบของตำแหน่งและการทดสอบของเส้นทาง การทดสอบจะทำการติดตั้งตัวสะท้อนแสงเลเซอร์ไว้ที่ส่วนปลายของหุ่นยนต์เพื่อวัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ หลักการการระบุขนาดที่ทำการวัดและตำแหน่งของจุดวัด การวัดซ้ำของการทดสอบของตำแหน่งและเส้นทางเป็นไปตามข้อกำหนด ISO 9283 ผลการทดลองการทดสอบของตำแหน่งจากตำแหน่งการวัดที่แตกต่างกัน 5 ตำแหน่ง มีค่าความถูกต้อง (AP_p) เฉลี่ยเท่ากับ 0.5679 มิลลิเมตร ค่าความแม่นยำเฉลี่ย (RP_p) เท่ากับ 0.0163 มิลลิเมตร ค่าความไม่แน่นอนในการวัด ± 0.0149 มิลลิเมตร และผลการทดลองการทดสอบของเส้นทางที่มีจำนวนจุดวัดในแนวเส้นทางจำนวน 11 ตำแหน่ง ค่าความถูกต้องเฉลี่ย (AT_p) เท่ากับ 0.5818 มิลลิเมตร ค่าความแม่นยำเฉลี่ย (RT_p) เท่ากับ 0.0264 มิลลิเมตร ค่าความไม่แน่นอนในการวัด ± 0.0160 มิลลิเมตร โดยการรายงานค่าความไม่แน่นอนขยายของการทดสอบตำแหน่งและการทดสอบเส้นทางที่ขึ้นอยู่กับค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานคูณกับตัวประกอบครอบคลุม ($k=2$) ซึ่งให้ระดับความเชื่อมั่นอยู่ที่ 95%

คำสำคัญ: ค่าความไม่แน่นอนในการวัดของหุ่นยนต์แขนกล; ค่าความถูกต้องและแม่นยำของหุ่นยนต์แขนกล; มาตรฐาน ISO 9283

Abstract

Industrial robots are the equipment that is widely used in the industry, medical, military because they are highly flexible, accurate, precision and reliable. It is very necessary to work for complex tasks that require more accuracy and precision of automation system. In this research present an analysis of the uncertainty of the accuracy and precision of 6-axis robotic arm by using laser tracker as comply with the requirements of ISO 9283. In this paper, the measurement is separated into 2 measuring tests, post accuracy and repeatability tests and path accuracy and repeatability tests. In the measuring test, a laser reflector is installed at the robot end effector to measure the designed position while testing and selected plane and measured plane, the measurement point, the number of repeated measurement and the measurement pose and path sequence meet the ISO 9283. The test results of the pose measuring tests were evaluated by 5 measurement points, the average pose accuracy (AP_p) is 0.5679 mm. The average pose repeatability (RP_p) is 0.0163 mm. The measurement uncertainty is ± 0.0236 millimeters. The test results of the path measuring test were evaluated by the 11 measurement points, the average path accuracy (AT_p) is 0.5818 mm. The average repeatability (RT_p) is 0.0264 mm. The measurement uncertainty is ± 0.0243 millimeters. The reported expanded uncertainty of measurement is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor $k = 2$, providing a level of confidence of approximately 95%.

Keywords: Uncertainty of robotics arm; accuracy and pose repeatability of robotics arm; ISO 9283

1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมการผลิตยุคใหม่มีการนำเทคโนโลยีเข้ามาประยุกต์ใช้ ไม่ว่าจะเป็นทางด้านซอฟต์แวร์ (Software) และฮาร์ดแวร์ (Hardware) หรือนำมาผสมผสานกัน ซึ่งหุ่นยนต์แขนกลหรือหุ่นยนต์อุตสาหกรรม เป็นเครื่องจักรกลหนึ่งที่มีการผสมผสานกันอย่างลงตัว เป็นเครื่องจักรกลที่ถูกออกแบบให้มีความยืดหยุ่นเปลี่ยนแบบการทำงานของมนุษย์ ประกอบด้วยส่วนแขนกลและส่วนควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งหุ่นยนต์แขนกลนี้เป็นเครื่องจักรกลที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงมาก แต่ก็เหมือนกับ

เครื่องจักรกลทั่วไป เมื่อนำไปใช้งานเป็นเวลานานและการทำงานในสถานะที่ไม่เหมาะสม จะส่งผลให้เกิดความเสื่อมถอย ส่งผลให้ความถูกต้องแม่นยำต่ำลงไม่เป็นไปตามคุณลักษณะที่กำหนด และยังส่งผลให้เสียความน่าเชื่อถืออีกด้วย ซึ่งในช่วงเวลาที่ผ่านมามีนักวิจัยจำนวนมากทำการวิจัย และวิเคราะห์หุ่นยนต์แขนกลในหลายหนทาง เช่น การนำมาตรฐาน ISO 9283 มาใช้ในการวิเคราะห์ความถูกต้องและแม่นยำในรูปแบบต่าง ๆ [1] – [4] และมีนักวิจัยอีกกลุ่มหนึ่งทำการวิจัยและวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดของหุ่นยนต์แขนกลและทำการชดเชยค่าดังกล่าวด้วยวิธีต่าง ๆ กัน [5] – [10] เช่น การใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อน

(Tolerancing analysis) การควบคุมการทำซ้ำที่ปรับปรุงใหม่ และการศึกษาและชดเชยค่าความผิดพลาดที่เกิดจากอุณหภูมิ เป็นต้น ซึ่งหุ่นยนต์แขนกลก็มีลักษณะไม่แตกต่างจากเครื่องมือหรือเครื่องจักรอื่น ๆ เมื่อใช้งานไปนาน ๆ หรือใช้งานในลักษณะที่ไม่ถูกต้องค่าความถูกต้องและแม่นยำที่ระบุไว้จึงไม่สามารถนำมาอ้างอิงได้ จึงจำเป็นต้องมีการสอบเทียบเพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพ ณ เวลานั้น ๆ เช่น [11] ทำการสอบเทียบหุ่นยนต์แขนกลเคลื่อนที่อิสระ 6 แกน โดยใช้วิธี Circle point analysis (CPA) ในการกำหนดค่าวงกลมในการวัดและใช้มอนิเตอร์ในการหาค่าความไม่แน่นอนในการวัด [12] นำเสนอวิธีการใหม่ในการสอบเทียบหุ่นยนต์แขนกลโดยทดสอบตำแหน่ง ซึ่งจะทำการวิเคราะห์คุณสมบัติชุดของจุดที่ทำการวัดบนวิถีของวงกลมการหมุน และนำผลที่ได้จากการสอบเทียบมาเปรียบเทียบกับผลการสอบเทียบมาตรฐาน

จากปัญหาดังกล่าวจึงเป็นที่มาของการทดสอบความถูกต้องและแม่นยำของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อิสระ 6 แกนตามมาตรฐาน ISO 9283:1998 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ว่าด้วยหุ่นยนต์อุตสาหกรรม (Manipulating Industrial Robots) อันเป็นหลักเกณฑ์ด้านสมรรถนะและการทดสอบที่เกี่ยวข้อง โดยที่ผู้วิจัยได้ทำการประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัดซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดของ UKAS M3003 “The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement” เพื่อเป็นข้อมูลในการพิจารณาในการนำหุ่นยนต์แขนกลไปใช้งานได้อย่างเหมาะสม ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์อยู่ 2 ประการคือ ประการแรก วิเคราะห์และทดสอบความถูกต้องแม่นยำของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อิสระ 6 แกนตามมาตรฐาน ISO 9283 ประการที่สอง วิเคราะห์และประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัดความถูกต้องแม่นยำของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อิสระ 6 แกนโดยใช้เลเซอร์แทรกเกอร์

2. อุปกรณ์ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และวิธีการทดลอง

2.1 อุปกรณ์

2.1.1 หุ่นยนต์แขนกล

ในงานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอนในการวัดค่าความถูกต้องและแม่นยำของหุ่นยนต์ชนิดข้อต่อ (Articulated Arm Robot (Revolute)) แบบ 6 ข้อต่อตามมาตรฐาน ISO 9283 โดยหุ่นยนต์แขนกลที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ หุ่นยนต์แขนกล KUKA KR150 QUANTEC R2700 ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 หุ่นยนต์แขนกล

KUKA KR150 QUANTEC R2700

2.1.2 เลเซอร์แทรกเกอร์ (laser tracker)

เลเซอร์แทรกเกอร์เป็นอุปกรณ์ในการวัดแบบ 3 มิติ ซึ่งถือเป็นมาตรฐานในมาตรวิทยาในด้านความแม่นยำ ความน่าเชื่อถือ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เลเซอร์แทรกเกอร์ FARO laser tracker ION model ดังแสดงในภาพที่ 2 การตรวจวัดของเลเซอร์แทรกเกอร์เป็นการวัดแบบติดตามการเคลื่อนที่ที่เกิดจากการสะท้อนรังสีและคำนวณออกมาเป็นระยะทิศทางในรูปพิกัดทรงกลม ระยะห่างของการสะท้อนรังสีสามารถวัดได้โดยใช้ Interferometer หรือ Absolute Distance Meter (ADM) ในขณะที่มุมเอียงและ Azimuthal วัดได้โดยใช้ Encoders เชิงมุม 2 ตัว การสะท้อนกลับของลำแสงเลเซอร์จะกระทบกับ

ตำแหน่งเซ็นเซอร์ (Position-Sensing Detector : PSD) ซึ่งจะตรวจจับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของแกนเลเซอร์แทรกเกอร์ซึ่งทำให้ลำแสงเลเซอร์เกิดขึ้น จะสะท้อนกลับไปที่กระทบยังจุดรับแสง จากนั้นหัวเลเซอร์แทรกเกอร์จะทำการตรวจสอบระยะทางที่ได้จากการสะท้อนกลับอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงวิธีการไว้ในหัวข้อที่ 2.3 โดยมีคุณลักษณะ ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการวัดระยะทาง และประสิทธิภาพในการวัดมุม ประกอบด้วยความละเอียดและความถูกต้อง เป็นต้น



ภาพที่ 2 เลเซอร์แทรกเกอร์

FARO laser tracker ION model

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของเลเซอร์แทรกเกอร์

ประสิทธิภาพในการวัดระยะทาง (Distance Measurement Performance)	
ความละเอียด (Resolution):	0.5 μm
อัตราการวัด (Sample rate):	10,000 points/sec
ความถูกต้อง (Accuracy):	16 μm + 0.8 $\mu\text{m}/\text{m}$
ประสิทธิภาพในการวัดมุม (Angle Measurement Performance)	
ความถูกต้องเชิงมุม (Angular accuracy):	20 μm + 5 $\mu\text{m}/\text{m}$
ความถูกต้องเชิงมุมสูงสุด (Maximum angular velocity):	180°/sec

ตารางที่ 1 คุณลักษณะของเลเซอร์แทรกเกอร์ (ต่อ)

ความเร็วในการหมุนสูงสุดของแต่ละข้อต่อ (100% Speed)	
ข้อต่อที่ 1 (A1):	120 °/s
ข้อต่อที่ 2 (A2):	115 °/s
ข้อต่อที่ 3 (A3):	120 °/s
ข้อต่อที่ 4 (A4):	190 °/s
ข้อต่อที่ 5 (A5):	180 °/s
ข้อต่อที่ 6 (A6):	260 °/s

ตารางที่ 2 คุณลักษณะของเลเซอร์แทรกเกอร์หลังจากสอบเทียบ

เส้นผ่านศูนย์กลางที่กำหนด (Nominal Diameter):	25.4330 mm
ความถูกต้องของเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter Accuracy):	-0.0001 mm
ความสามารถในการทำซ้ำ ของเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter Repeatability):	0.0151 mm
ความแม่นยำเฉลี่ยในแกน Z (Average Z Accuracy):	-0.0048 mm
ความสามารถในการทำซ้ำเฉลี่ย ในแกน Z (Average Z Repeatability):	0.0057 mm

เลเซอร์แทรกเกอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ผ่านการสอบเทียบตามระยะเวลา โดยทำการสอบเทียบด้วยการวัดวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.433 มิลลิเมตร ค่าความถูกต้องและแม่นยำของเลเซอร์แทรกเกอร์ในการสอบเทียบ แสดงในตารางที่ 2

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอนในการวัดค่าความถูกต้องและแม่นยำของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อิสระ 6 แกนตามมาตรฐาน ISO 9283 ด้วยเลเซอร์แทรกเกอร์ จึงมุ่งเน้นในการศึกษาค่าความไม่แน่นอนในการวัดอันเกิดมาจากเลเซอร์แทรกเกอร์

ซึ่งมีแหล่งที่มาประกอบด้วย ความละเอียดของ
จอแสดงผลของเลเซอร์แทรกเกอร์ ความแม่นยำ
ของเลเซอร์แทรกเกอร์ และความเบี่ยงเบนของ
เลเซอร์แทรกเกอร์ ซึ่งได้มีนักวิจัยทำการประเมิน
ค่าความไม่แน่นอนในการวัด อันเกิดมาจากเลเซอร์
แทรกเกอร์แบบหลายสถานี โดยใช้วิธีมอนติคาร์โล [13]
และมีนักวิจัยนำเสนอค่าความผิดพลาดอย่างเป็นระบบ
ที่เกิดจากความผิดพลาดทางเรขาคณิต สภาพแวดล้อม
การสั่นไหวทางกลและตัวแปรที่คาดเดาไม่ได้อื่น ๆ
โดยนำเสนอวิธีการสอบเทียบทางเลือก โดยยึดตาม
แบบจำลองค่าความผิดพลาดใหม่ของเลเซอร์
แทรกเกอร์ [14]

2.2 ทฤษฎี

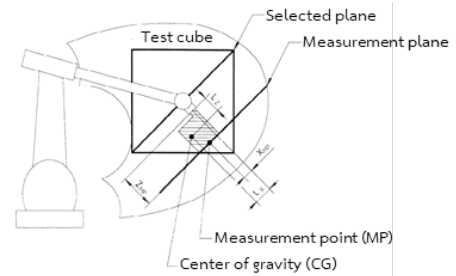
2.2.1 ISO 9283 การจัดการหุ่นยนต์
อุตสาหกรรม – เกณฑ์ประสิทธิภาพและวิธีทดสอบ
ที่เกี่ยวข้อง [15]

ISO 9283 เป็นส่วนหนึ่งของมาตรฐาน
สากลที่เกี่ยวข้องกับการจัดการหุ่นยนต์อุตสาหกรรม
มีวัตถุประสงค์เพื่อให้เข้าใจต่อความเข้าใจระหว่างผู้ใช้
ผู้ผลิต และระบบหุ่นยนต์ มาตรฐานนี้จะกำหนดลักษณะ
การทำงานสำคัญ โดยอธิบายถึงการระบุและการแนะนำ
ในการทดสอบ ลักษณะของการทดสอบ ซึ่งจะพิจารณา
ถึงผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของหุ่นยนต์
อย่างมีนัยสำคัญ โดยในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบ
ความถูกต้องและแม่นยำในตำแหน่ง 2 แบบ คือ
การทดสอบตำแหน่งและการทดสอบเส้นทาง

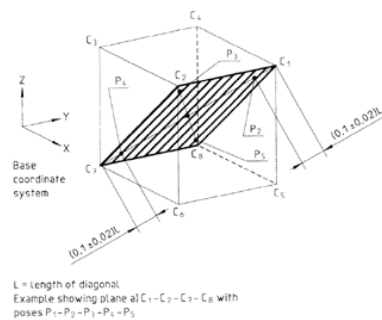
การทดสอบตำแหน่ง

คำสั่งโพลสำหรับการเขียนโปรแกรมใน
หุ่นยนต์ จะถูกกำหนดเป็นการวัดจุดบนหุ่นยนต์ โดย
การเคลื่อนที่หุ่นยนต์เข้าใกล้กับจุดที่กำหนด การกำหนด
จุดวัดตำแหน่ง จะกำหนดจุดวัด 5 จุด (P_1 ถึง P_5)
ซึ่งตั้งอยู่ตามแนวเส้นทแยงมุมของระนาบที่ทำการวัด
และสอดคล้องกับระนาบที่เลือก ซึ่งระนาบที่ทำการวัด

และระนาบที่เลือกจะขนานกัน ดังแสดงในภาพที่ 3
โดย P_1 คือจุดตัดของเส้นทแยงมุมและเป็นจุดศูนย์กลาง
ของลูกบาศก์ จุด P_2 ถึง P_5 จะตั้งอยู่ที่ระยะห่างจาก
ปลายเส้นทแยงมุมเท่ากับ $(10 \pm 2)\%$ ของความยาว
ของเส้นทแยงมุม ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 3 ระนาบที่เลือกและระนาบที่ทำการวัด [15]



ภาพที่ 4 การวัดตำแหน่งสำหรับหุ่นยนต์ 6 แกน [15]

ค่าความถูกต้องและแม่นยำในการทดสอบ
ตำแหน่ง (Pose accuracy, AP and Pose repeatability, RP)

ความถูกต้องในตำแหน่ง (Positioning
accuracy) สำหรับการทดสอบตำแหน่ง ซึ่งมีการทดสอบ
ซ้ำจำนวน 30 รอบตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ISO 9283
สามารถหาได้ ดังนี้

$$AP_x = \bar{x} - x_c \quad (1)$$

$$AP_y = \bar{y} - y_c \quad (2)$$

$$AP_z = \bar{z} - z_c \quad (3)$$

$$AP_P = \sqrt{(AP_x)^2 + (AP_y)^2 + (AP_z)^2} \quad (4)$$

เมื่อ AP_x คือ ค่าความถูกต้องในแนวแกน x
 AP_y คือ ค่าความถูกต้องในแนวแกน y
 AP_z คือ ค่าความถูกต้องในแนวแกน z
 $\bar{x}, \bar{y}$ และ $\bar{z}$ คือ พิกัดของแบรีเซนเตอร์ (Barycenter) ของกลุ่มของจุดที่ทำการวัดซ้ำ n ครั้ง
 ความแม่นยำของตำแหน่ง (Positioning repeatability) สำหรับการทดสอบตำแหน่ง ซึ่งมีการทดสอบซ้ำจำนวน 30 รอบ ตามที่ระบุไว้ในมาตรฐาน ISO 9283 สามารถหาได้ ดังนี้

$$AP_l = \bar{l} - 3S_l \quad (5)$$

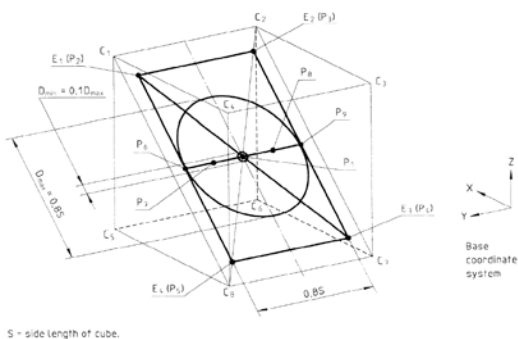
$$S_l = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_j - \bar{l})^2}{n-1}} \quad (6)$$

$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \quad (7)$$

เมื่อ AP_l คือค่าความแม่นยำในตำแหน่ง
 $\bar{l}$ คือค่าเฉลี่ยความแม่นยำในตำแหน่ง

การทดสอบเส้นทาง

การทดสอบเส้นทางเป็นการทดสอบความถูกต้องและแม่นยำ โดยการให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ในลักษณะที่กำหนด เช่น เส้นตรง สี่เหลี่ยมและวงกลมตามจุดที่กำหนดในมาตรฐาน ISO 9283 ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ตัวอย่างการทดสอบเส้นทาง [15]

ค่าความถูกต้องและแม่นยำในการทดสอบเส้นทาง (Path accuracy, AT and Path repeatability, RT)

ความถูกต้องในการทดสอบเส้นทาง (Path accuracy, AT) สำหรับการทดสอบเส้นทางสามารถหาได้ ดังนี้

$$AT_P = \sqrt{(\bar{x}_l - x_{ci})^2 + (\bar{y}_l - y_{ci})^2 + (\bar{z}_l - z_{ci})^2} \quad (8)$$

โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, m$

$$\bar{x}_l = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij}, \bar{y}_l = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij} \text{ และ } \bar{z}_l = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{ij} \quad (9)$$

เมื่อ x_{ci} , y_{ci} และ z_{ci} คือพิกัดของจุด i ในคำสั่งเส้นทาง

x_{ij} , y_{ij} และ z_{ij} คือพิกัดของจุดตัดระหว่างเส้นทาง j กับระนาบปกติ i

ความแม่นยำในการทดสอบเส้นทาง (Path repeatability, RT) สำหรับการทดสอบเส้นทางสามารถหาได้ ดังนี้

$$RT_P = \max RT_{Pi} = \max [\bar{l}_i - 3S_{li}] \quad (10)$$

โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, m$

$$\bar{l}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n l_{ij} \quad (11)$$

$$S_{li} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (l_{ij} - \bar{l}_i)^2}{n-1}} \quad (12)$$

$$l_{ij} = \sqrt{(x_{ij} - \bar{x}_i)^2 + (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 + (z_{ij} - \bar{z}_i)^2} \quad (13)$$

2.2.2 การประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัด

ค่าความไม่แน่นอนในการวัดเป็นข้อมูลที่ใช้ประกอบกับผลการวัด ข้อมูลนี้แสดงถึงค่าที่ทำการวัดอยู่ในช่วงใด จึงเป็นข้อมูลที่มีความจำเป็นที่ต้องประกอบกับผลการวัด โดยเฉพาะเมื่อต้องการ

นำผลการวัดนั้นมาประกอบการตัดสินใจในเรื่อง
ของคุณภาพ หรือต้องการระบุค่าสิ่งที่ทำการวัดนั้น
มีคุณภาพตามที่ระบุหรือไม่ [16] การประเมินค่า
ความไม่แน่นอนในการวัดในงานวิจัยนี้จะเป็นไปตาม
ข้อกำหนดของ [17] UKAS M3003 “The Expression
of Uncertainty and Confidence in Measurement”
ซึ่งประกอบด้วยหัวข้อและวิธีการ ดังนี้

การประมาณค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน
แบบเอ (Type A Standard Uncertainty)

ในการประมาณค่าความไม่แน่นอน
มาตรฐานแบบเอ เป็นการประมาณค่าโดยใช้หลักการ
ทางสถิติ โดยทำการวัดซ้ำตามที่กำหนดให้อยู่
ภายใต้เงื่อนไข เพื่อเป็นการดูถึงความซ้ำค่าเดิม
ในการวัด ซึ่งเป็นการวัดการกระจายตัวของค่าเฉลี่ย
ที่ได้จากการวัดมีขั้นตอน ดังนี้

หาค่าเฉลี่ยของค่าที่ทำการวัด ตามสมการ
ที่ (14) และหาการกระจายตัวของข้อมูลโดยประมาณ
จากส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตามสมการที่ (15)

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (14)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (15)$$

เมื่อ $\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยจากการวัดทั้งหมด

x_i คือ ค่าที่วัดได้ในแต่ละครั้ง และ n คือ
จำนวนครั้งที่วัด

และสามารถหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
ของค่าเฉลี่ยได้ ตามสมการที่ (16) โดยค่าส่วนเบี่ยงเบน
มาตรฐานนี้เองคือค่าประมาณความไม่แน่นอนมาตรฐาน
แบบเอ

$$S(\bar{x}) = \frac{S}{\sqrt{n}} = u_A(\bar{x}) \quad (16)$$

การประมาณค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน
แบบบี (Type B Standard Uncertainty)

จากการพิจารณาการประมาณค่า
ความไม่แน่นอนมาตรฐานแบบเอ ที่กล่าวมาข้างต้น
เป็นการประเมินโดยใช้วิธีทางสถิติ แต่การประมาณ
ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานแบบบี เป็นการใช่วิธีการ
อื่น ๆ ที่ไม่ใช่วิธีทางสถิติ โดยเป็นข้อมูลจากแหล่ง
ที่มีความน่าเชื่อถือทางวิชาการมาพิจารณาประกอบ
การประเมิน

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานแบบเอและ
แบบบี เป็นส่วนประกอบของการวัดโดยรวม ซึ่งต้อง
นำค่าที่ได้มารวมกันเป็นค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน
ร่วม (Combined Standard Uncertainty) ดังนี้

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i)} \equiv \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)} \quad (17)$$

เมื่อ c_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความไว (Sensitivity
Coefficient)

$u(x_i)$ คือ ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจาก
ปริมาณอินพุตต่าง ๆ

$u_i(y)$ คือ ค่าความไม่แน่นอนของเอาต์พุต
ย่อย ๆ แต่ละตัว

ค่าความไม่แน่นอนร่วมที่กล่าวมานั้น
เป็นค่าที่มีความเชื่อมั่นระดับหนึ่งซึ่งยังไม่มากพอที่จะ
นำมาใช้ได้ ในงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงปฏิบัติการ
ซึ่งต้องการระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ดังนั้นจึงจำเป็น
ที่จะต้องมีการประเมินค่าความไม่แน่นอนขยาย
(Expanded Uncertainty) เพื่อให้ได้ระดับ
ความเชื่อมั่นที่ต้องการ ดังนี้

$$U = t u_c \quad (18)$$

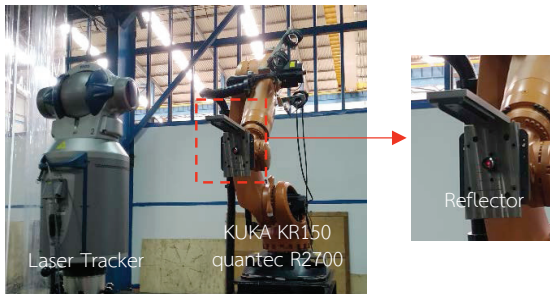
เมื่อ t คือ ค่าตัวประกอบครอบคลุม (Coverage
Factor) ที่เลือกจากตารางการแจกแจงแบบที
(t-Distribution)

2.3 วิธีการทดลอง

การทดลองในงานวิจัยนี้แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ 1) ขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์ 2) ขั้นตอนการทดสอบความถูกต้องและแม่นยำ ในขั้นตอนนี้จะแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 การทดสอบ คือการทดสอบตำแหน่งและการทดสอบเส้นทาง 3) ขั้นตอนการประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัด

2.3.1 การติดตั้งอุปกรณ์

อุปกรณ์ที่สำคัญในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยหุ่นยนต์เคลื่อนที่อิสระ 6 แกน KUKA KR150 QUANTEC R2700 เลเซอร์แทรกเกอร์ FARO ION model และอุปกรณ์สะท้อนแสงเลเซอร์ โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์สะท้อนแสงเลเซอร์ไว้ที่ส่วนปลายของหุ่นยนต์เพื่อวัดตำแหน่ง ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การติดตั้งอุปกรณ์

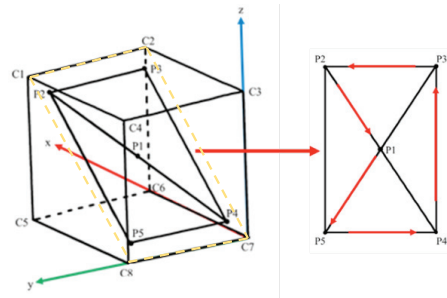
2.3.2 การทดสอบค่าความถูกต้องและแม่นยำตำแหน่ง

ในขั้นตอนการทดสอบค่าความถูกต้องและแม่นยำตำแหน่ง การทดสอบมีขั้นตอน ดังนี้

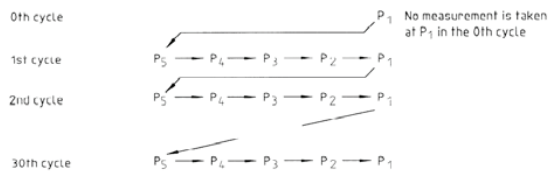
- 1) กำหนดพิกัดเริ่มต้นการทดสอบให้อยู่ที่ตำแหน่ง C_7 ในตำแหน่ง 0, 0, 0, 0, 0, 1
- 2) เคลื่อนหุ่นยนต์จากพิกัดที่กำหนดไปยังตำแหน่ง P_1 เพื่อเริ่มทำการทดสอบในรอบที่ 0 จากนั้นเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง P_5, P_4, P_3, P_2, P_1 เป็นการทดสอบในรอบที่ 1 จากนั้นทำซ้ำจนครบ 30 รอบ ดังแสดงในภาพที่ 8 และ 9

3) กำหนดความเร็วในการทดสอบที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 1

4) กำหนดให้ไม่มีโหลดในการทดสอบ



ภาพที่ 8 ระนาบที่ใช้ในการทดสอบจุดที่ทำการวัดและเส้นทางการเคลื่อนที่ในการทดสอบตำแหน่ง

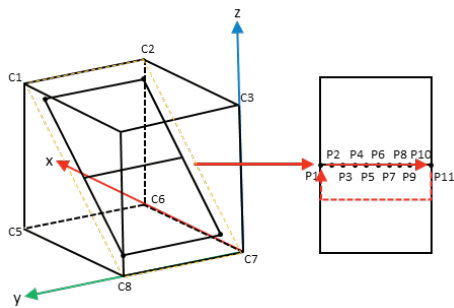


ภาพที่ 9 จำนวนรอบการวัดซ้ำในการทดสอบตำแหน่ง [15]

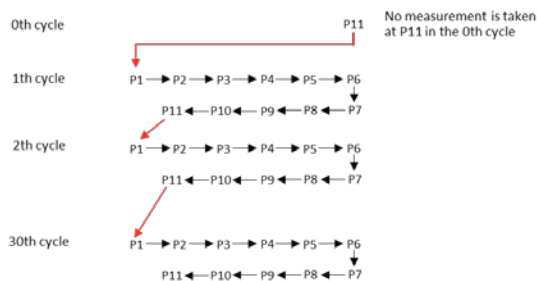
2.3.3 การทดสอบค่าความถูกต้องและแม่นยำของเส้นทาง

ในขั้นตอนการทดสอบค่าความถูกต้องและแม่นยำตำแหน่ง การทดสอบมีขั้นตอน ดังนี้

- 1) กำหนดพิกัดเริ่มต้นการทดสอบให้อยู่ที่ตำแหน่ง C_7 ในตำแหน่ง 0, 0, 0, 0, 0, 1
- 2) เคลื่อนหุ่นยนต์จากพิกัดที่กำหนดไปยังตำแหน่ง P_{11} เพื่อเริ่มทำการทดสอบในรอบที่ 0 จากนั้นเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่ง $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}$ เป็นการทดสอบในรอบที่ 1 จากนั้นทำซ้ำจนครบ 30 รอบ ดังแสดงในภาพที่ 10 และ 11
- 3) กำหนดความเร็วในการทดสอบที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 1
- 4) กำหนดให้ไม่มีโหลดในการทดสอบ



ภาพที่ 10 ระบายที่ใช้ในการทดสอบจุดที่ทำกรวัด
และเส้นทางการเคลื่อนที่ในการทดสอบเส้นทาง



ภาพที่ 11 จำนวนรอบการวัดซ้ำในการทดสอบเส้นทาง

2.3.4 การประมาณค่าความไม่แน่นอน ในการวัด

ในขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การประมาณ
ค่าความไม่แน่นอนในการวัดค่าความถูกต้องและแม่นยำ
ในการทดสอบตำแหน่งและการทดสอบเส้นทาง โดยมีข้อกำหนด ดังนี้

- 1) ใช้เลเซอร์แทรกเกอร์รุ่น FARO ION model ในการวัด
- 2) ระยะห่างในการวัด 300 มิลลิเมตร
- 3) อุณหภูมิในการทดสอบ 32 ถึง 35 องศาเซลเซียส

ในการทดลองนี้จะพิจารณาแหล่งที่มา
ของค่าความไม่แน่นอนในการวัด ดังนี้

- ค่าความซ้ำค่าเดิมในการวัด
- ความละเอียดของจอแสดงผลของ
เลเซอร์แทรกเกอร์

- ความแม่นยำของเลเซอร์แทรกเกอร์
- ความเบี่ยงเบนของเลเซอร์แทรกเกอร์
- การขยายตัวของอุปกรณ์ยึดตัวสะท้อน

แสงเลเซอร์ อันเนื่องมาจากอุณหภูมิในการทดลอง

3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้
แสดงการวิเคราะห์ค่าความไม่แน่นอนในการวัด
ในการทดสอบความถูกต้องและแม่นยำของหุ่นยนต์
แขนกลเคลื่อนที่อิสระ 6 แกนในรูปแบบต่าง ๆ ตาม
มาตรฐาน ISO 9283 ผลการทดลองแบ่งออกเป็น
3 ส่วน ดังนี้

3.1 ค่าความถูกต้องและแม่นยำในตำแหน่ง
ของหุ่นยนต์แขนกลในการทดสอบตำแหน่ง
จากการทดลองตามหัวข้อที่ 2.3.2 จะสามารถคำนวณหา
ค่าความถูกต้องและแม่นยำในตำแหน่งสำหรับ
การทดสอบตำแหน่ง ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าความถูกต้องและแม่นยำในตำแหน่ง
ของหุ่นยนต์แขนกลในการทดสอบ
ตำแหน่ง

จุดวัดที่	ค่าความถูกต้อง (AP_p)	ค่าความแม่นยำ (RP_l)
P_1	0.6105	0.0139
P_2	0.7503	0.0147
P_3	0.7261	0.0188
P_4	0.2318	0.0164
P_5	0.5206	0.0178

3.2 ค่าความถูกต้องและแม่นยำในตำแหน่ง
ของหุ่นยนต์แขนกลในการทดสอบเส้นทาง
จากการทดลองตามหัวข้อที่ 2.3.3 จะสามารถ
คำนวณหาค่าความถูกต้องและแม่นยำในการทดสอบ
เส้นทาง ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าความถูกต้องและแม่นยำในตำแหน่ง
ของหุ่นยนต์แขนกลในการทดสอบเส้นทาง

จุดวัดที่	ค่าความถูกต้อง (AT_p)	ค่าความแม่นยำ (RT_p)
P_1	0.5937	0.0849
P_2	0.5668	0.0272
P_3	0.5813	0.0190
P_4	0.5956	0.0244
P_5	0.5817	0.0200
P_6	0.5676	0.0233
P_7	0.5865	0.0172
P_8	0.5810	0.0204
P_9	0.5735	0.0182
P_{10}	0.5984	0.0215
P_{11}	0.5737	0.0139

3.3 การประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัด
การประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัด
ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือการประมาณ
ค่าความไม่แน่นอนในการวัดความถูกต้องและ
แม่นยำในการทดสอบตำแหน่งและการประมาณ
ค่าความไม่แน่นอนในการวัดความถูกต้องและแม่นยำ
ในการทดสอบเส้นทาง โดยสมการที่ 19 แสดงถึง
ลักษณะความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของการทดสอบ
ความถูกต้องและแม่นยำในงานวิจัยนี้ ซึ่งค่าต่าง ๆ
เหล่านี้จะนำไปใช้ในการคำนวณหาความไม่แน่นอน
ในจากแต่ละแหล่งที่มา

$$P_X = P_S + P_R + \delta_{L1} + \delta_{L2} + \delta_{L3} + T_P \quad (19)$$

เมื่อ P_X คือ ตำแหน่งที่ทำการวัด

P_S คือ ตำแหน่งที่ระบุ (ตำแหน่งคำสั่ง)

P_R คือ ค่าจากการวัดซ้ำ

δ_{L1} คือ ค่าความละเอียดของจอแสดงผล
ของเลเซอร์แทรกเกอร์

δ_{L2} คือ ค่าความไม่แม่นยำของเลเซอร์
แทรกเกอร์

δ_{L3} คือ ค่าความเบี่ยงเบนของเลเซอร์
แทรกเกอร์

T_P คือ ค่าการขยายตัวของอุปกรณ์ยึด
ตัวสะท้อนแสงเลเซอร์อื่นเนื่องมาจากอุณหภูมิ

การประมาณค่าความไม่แน่นอนใน
การวัดความถูกต้องและแม่นยำในการทดสอบ
ตำแหน่ง และการประมาณค่าความไม่แน่นอน
ในการวัดความถูกต้องและแม่นยำในการทดสอบ
เส้นทาง ซึ่งประกอบด้วยความไม่แน่นอนมาตรฐาน
แบบ เอ และแบบ บี โดยแบ่งเป็นค่าความไม่แน่นอน
มาตรฐานแบบ เอ จาก 1 แหล่งที่มา (U_A) และ
ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานแบบ บี จาก 4
แหล่งที่มา ($U_{B1}-U_{B4}$) ซึ่งค่าต่าง ๆ ที่นำมาคำนวณ
ความไม่แน่นอนมาตรฐานแบบ เอ และแบบ บี
ได้มาจากสมการที่ (19) และแสดงการคำนวณใน
ตารางที่ 5 และ 6

ตารางที่ 5 การประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัดในความถูกต้องและแม่นยำในการทดสอบตำแหน่ง

สัญลักษณ์	แหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอน	ค่า	การกระจาย ตัวของ ข้อมูล	ตัวหาร	ค่าความ ไม่แน่นอน u_i	สัมประสิทธิ์ ความไว c_i	การปรับ ค่าองศา เสรี v_{eff}
U_A	ความไม่แน่นอนจากการวัดซ้ำ	P_R	ปกติ	1	0.0073	1	29
U_{B1}	ความไม่แน่นอนจากความละเอียดของเลเซอร์	δ_{L1}	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.0003	1	∞
U_{B2}	ความไม่แน่นอนจากความแม่นยำของเลเซอร์	δ_{L2}	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.0011	1	∞
U_{B3}	ความไม่แน่นอนจากความเบี่ยงเบนของเลเซอร์	δ_{L3}	ปกติ	2	0.0008	1	∞
U_{B4}	ความไม่แน่นอนจากการขยายตัวของอุปกรณ์ ยึดตัวสะท้อนแสงเลเซอร์อื่นเนื่องมาจาก อุณหภูมิ	T_P	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.0002	1	∞
U_C	ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม		-		0.0074		∞
U_r	ค่าความไม่แน่นอนขยาย		ปกติ K=2		0.0149		∞

ตารางที่ 6 การประมาณค่าความไม่แน่นอนในการวัดในความถูกต้องและแม่นยำในการทดสอบเส้นทาง

สัญลักษณ์	แหล่งที่มาของค่าความไม่แน่นอน	ค่า	การกระจาย ตัวของ ข้อมูล	ตัวหาร	ค่าความ ไม่แน่นอน u_i	สัมประสิทธิ์ ความไว c_i	การปรับ ค่าองศา เสรี v_{eff}
U_A	ความไม่แน่นอนจากการวัดซ้ำ	P_R	ปกติ	1	0.0079	1	29
U_{B1}	ความไม่แน่นอนจากความละเอียดของเลเซอร์	δ_{L1}	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.0003	1	∞
U_{B2}	ความไม่แน่นอนจากความแม่นยำของเลเซอร์	δ_{L2}	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.0011	1	∞
U_{B3}	ความไม่แน่นอนจากความเบี่ยงเบนของเลเซอร์	δ_{L3}	ปกติ	2	0.0008	1	∞
U_{B4}	ความไม่แน่นอนจากการขยายตัวของอุปกรณ์ ยึดตัวสะท้อนแสงเลเซอร์อื่นเนื่องมาจาก อุณหภูมิ	T_P	สี่เหลี่ยม	$\sqrt{3}$	0.0002	1	∞
U_C	ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม		-		0.0080		∞
U_r	ค่าความไม่แน่นอนขยาย		ปกติ K=2		0.0160		∞

4. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัดค่าความถูกต้องและแม่นยำของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อิสระ 6 แกนรุ่น KUKA KR150 QUANTEC R2700 ตามมาตรฐาน ISO 9283 ด้วยเลเซอร์แทรกเกอร์ โดยทำการทดลอง 2 การทดลอง คือการหาค่าความถูกต้องและแม่นยำในการทดสอบตำแหน่ง และการหาค่าความถูกต้องและแม่นยำในการทดสอบเส้นทาง ซึ่งการทดสอบนี้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ISO 9283 จากนั้นหาค่าความไม่แน่นอนในการวัดของทั้ง 2 การทดสอบ ซึ่งแสดงผลการทดสอบ ดังนี้

ค่าความถูกต้องและแม่นยำในการทดสอบตำแหน่ง จากการทดสอบวัดทั้งหมด 5 จุด วัดซ้ำจุดละ 30 ครั้ง มีผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 3 โดยมีค่าความถูกต้องเฉลี่ย (*APP*) เท่ากับ 0.5679 มิลลิเมตร และค่าความแม่นยำเฉลี่ย (*RPI*) เท่ากับ 0.0163 มิลลิเมตร โดยมีค่าความไม่แน่นอนในการวัดสำหรับการทดสอบตำแหน่ง ± 0.0149 มิลลิเมตร โดยการรายงานค่าความไม่แน่นอนขยายของการทดสอบตำแหน่งและการทดสอบเส้นทางที่ขึ้นอยู่กับค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานคูณกับตัวประกอบครอบคลุม ($k=2$) ซึ่งให้ระดับความเชื่อมั่นอยู่ที่ 95% ดังแสดงในตารางที่ 5

ค่าความถูกต้องและแม่นยำในการทดสอบเส้นทาง จากการทดสอบวัดทั้งหมด 11 จุด วัดซ้ำจุดละ 30 ครั้ง มีผลการทดสอบดังแสดงในตารางที่ 4 โดยมีค่าความถูกต้องเฉลี่ย (*ATP*) เท่ากับ 0.5818 มิลลิเมตร ค่าความแม่นยำเฉลี่ย (*RTP*) เท่ากับ 0.0264 มิลลิเมตร โดยมีค่าความไม่แน่นอนในการวัด ± 0.0160 มิลลิเมตร โดยการรายงานค่าความไม่แน่นอนขยายของการทดสอบตำแหน่งและการทดสอบเส้นทางที่ขึ้นอยู่กับ

ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานคูณกับตัวประกอบครอบคลุม ($k=2$) ซึ่งให้ระดับความเชื่อมั่นอยู่ที่ 95% ดังแสดงในตารางที่ 6

จากค่าระบุความสามารถของหุ่นยนต์แขนกล KUKA KR150 QUANTEC R2700 ที่กำหนดโดยผู้ผลิตพบว่า มีค่าความถูกต้องในตำแหน่ง ± 0.5 มิลลิเมตร และมีความแม่นยำ ± 0.05 มิลลิเมตร เมื่อนำค่าที่ได้จากการทดสอบมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองจะแสดงให้เห็น ดังนี้

จากวัตถุประสงค์ที่ 1 วิเคราะห์และทดสอบความถูกต้องแม่นยำของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อิสระ 6 แกนตามมาตรฐาน ISO 9283 เมื่อพิจารณาจากค่าความถูกต้องในการทดสอบตำแหน่งพบว่า ค่าความถูกต้องเฉลี่ย (*APP*) เท่ากับ 0.5679 มิลลิเมตร มีค่ามากกว่า ค่าระบุค่าความถูกต้องในตำแหน่งของหุ่นยนต์แขนกล ที่กำหนดโดยผู้ผลิต คือ ± 0.5 มิลลิเมตร ในขณะที่ค่าความแม่นยำเฉลี่ย (*RPI*) เท่ากับ 0.0163 มิลลิเมตร มีค่าน้อยกว่า ค่าระบุความแม่นยำในตำแหน่งของหุ่นยนต์แขนกล ที่กำหนดโดยผู้ผลิต คือ ± 0.05 มิลลิเมตร นอกจากนี้เมื่อพิจารณาถึงค่าความถูกต้องในการทดสอบเส้นทาง พบว่า ค่าความถูกต้องในการทดสอบเส้นทางเฉลี่ย (*ATP*) เท่ากับ 0.5818 มิลลิเมตร มีค่ามากกว่า ค่าระบุค่าความถูกต้องในตำแหน่งของหุ่นยนต์แขนกล ที่กำหนดโดยผู้ผลิต คือ ± 0.5 มิลลิเมตร ในขณะที่ค่าความแม่นยำในการทดสอบเส้นทางเฉลี่ย (*RPI*) เท่ากับ 0.0264 มิลลิเมตร มีค่าอยู่ในช่วงของค่าระบุความแม่นยำในการทดสอบเส้นทางของหุ่นยนต์แขนกล ที่กำหนดโดยผู้ผลิต คือ ± 0.05 มิลลิเมตร ซึ่งจากการรายงานค่าความถูกต้องในการทดสอบตำแหน่งและค่าความถูกต้องในการทดสอบเส้นทาง มีค่ามากกว่าค่าความถูกต้องในตำแหน่งของหุ่นยนต์แขนกล

ที่กำหนดโดยผู้ผลิตนั้น ผู้ผลิตสามารถนำผลการวัดที่ได้จากกระบวนการในงานวิจัยนี้มาชดเชยในระบบควบคุมได้ ก็จะสามารถลดค่าความถูกต้องในการทดสอบตำแหน่งและค่าความถูกต้องในการทดสอบเส้นทางซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่ได้ครอบคลุมและประเมินถึงผลของการชดเชยค่าความผิดพลาดเหล่านั้น และในขณะที่การรายงานค่าความแม่นยำในการทดสอบตำแหน่งและค่าความแม่นยำในการทดสอบเส้นทางมีค่าอยู่ช่วงของค่าความแม่นยำของหุ่นยนต์แขนกลที่กำหนดโดยผู้ผลิตนั้น ถือว่าเป็นสิ่งที่สำคัญมากกว่าการพิจารณาค่าความถูกต้องในการทดสอบข้างต้น เนื่องจากถ้าค่าความแม่นยำในการทดสอบทั้งสองเกินกว่าค่าที่กำหนดโดยผู้ผลิตจะไม่สามารถทำการชดเชยในระบบควบคุมได้ เนื่องจากเป็นค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม การกำจัดค่าความผิดพลาดแบบสุ่มนั้นต้องมีการเปลี่ยนระบบทางกล เช่น ระบบเกียร์ทด ระบบอ่านตำแหน่ง ซึ่งเมื่อพิจารณาสาเหตุที่ส่งผลกระทบต่อค่าความถูกต้องและแม่นยำ อาจมาจากหลายสาเหตุ เช่น หุ่นยนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ถูกใช้งานมาเป็นเวลานาน หรือเกิดจากการติดตั้งเคลื่อนย้าย เป็นต้น

จากวัตถุประสงค์ที่ 2 วิเคราะห์และประเมินค่าความไม่แน่นอนในการวัดค่าความถูกต้องแม่นยำของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อิสระ 6 แกนโดยใช้เลเซอร์แทรกเกอร์ในการหาค่าความไม่แน่นอนในการวัดสำหรับค่าความถูกต้องและแม่นยำในการทดสอบตำแหน่ง และค่าความถูกต้องและแม่นยำในการทดสอบเส้นทาง ดังแสดงวิธีการคำนวณในตารางที่ 5 และ 6 จากผลการวิจัยพบว่าค่าความไม่แน่นอนในการวัดที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีค่าต่ำอยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ กล่าวคือมีค่าน้อยมาก และเมื่อนำไปรวมกับค่าความถูกต้องและแม่นยำจะไม่ส่งผลให้ค่าความถูกต้องและแม่นยำมีค่าแตกต่างไปจากเดิม ซึ่งค่าความไม่แน่นอนที่มากที่สุด คือค่าความไม่แน่นอน

จากการวัดซ้ำ ซึ่งคิดเป็น 96.417% และ 96.925% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่าความไม่แน่นอนจากการทำซ้ำมีผลอย่างมากที่จะทำให้ค่าความไม่แน่นอนในการวัดรวมมีค่ามากหรือน้อย จึงสมควรที่จะพิจารณาเป็นพิเศษ

ดังนั้นผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะทำให้สามารถประยุกต์ใช้ในการประเมินสมรรถนะของหุ่นยนต์ได้ว่าสามารถประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการความถูกต้องและแม่นยำเท่าไร เพื่อให้สอดคล้องกับความสามารถของหุ่นยนต์ในปัจจุบัน โดยขั้นตอนหาค่าความไม่แน่นอนในงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับหุ่นยนต์ชนิดข้อต่อทุกแบบ ซึ่งต้องเป็นไปตามการทดสอบตามมาตรฐาน ISO 9283 เพราะเนื่องจากหุ่นยนต์ชนิดข้อต่อนั้น จำนวนของข้อต่อของหุ่นยนต์มีการทดสอบที่ไม่เหมือนกัน

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Mohamed Slamani (2012). Assessment of the positioning performance of an industrial robot. *Industrial Robot*, 39: 57-68.
- [2] Arif Şirinterlikçi, Murat Tiryakioğlu, Adam Bird, Amie Harris and Kevin Kweder (2009). Repeatability and accuracy of an industrial robot: Laboratory experience for a design of experiments course. *Technology Interface*, 9.
- [3] Jan Semjon, Rudolf Janos, Marek Sukop, Peter Tuleja, Mikulas Hajduk, Ondrej Juras, Peter Marcinko, Ivan Virgala and Marek Vagas (2020). Verification of the UR5 robot's properties after a crash caused by a fall of a transferred load from a crane. *Advanced Robotic Systems*.

- [4] นริสา ทองนุ่น (2560). การประยุกต์ใช้เลเซอร์แทรกเกอร์ในการตรวจสอบค่าความถูกต้องและแม่นยำของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อิสระ 6 แกนตามมาตรฐาน ISO 9283. ปรัญญาวិวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต.
- [5] Raksiri Chana, Pa-im Krittiya and Rodkwan Supasit (2020). An analysis of joint assembly geometric errors affecting end-effector for six-axis robots. *Robotics*, 27(9): 1-13.
- [6] Zhu Weidong, Li Guanhua, Dong Huiyue and Ke Yinglin (2019). Positioning error compensation on two-dimensional manifold for robotic machining. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 59: 394-405.
- [7] Yuanfan Zeng, Wei Tian and Wenhe Liao (2016). Positional error similarity analysis for error compensation of industrial robots. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 42: 113-120.
- [8] Gang Xiong, Zhou-Long Li, Ye Ding and LiMin Zhu (2020). A closed-loop error compensation method for robotic flank milling. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 63: 1-9.
- [9] Rui Li and Yang Zhao (2016). Dynamic error compensation for industrial robot based on thermal effect model, *Measurement*, 88: 113-120.
- [10] พงศกร รูปใหญ่ และ เบญจมาศ พนมรัตน์รักษ์ (2561). การลดระยะผิดพลาดจากการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แกนกล SEIKO D-TRAN RT3200 โดยใช้การควบคุมแบบทำซ้ำที่ปรับปรุงใหม่. *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 28(2): 299-312.
- [11] Jorge Santoria and Mauel Gines (2013). Uncertainty estimation in robot kinematic calibration. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29: 370-384.
- [12] Hoai-Nhan Nguyen, Jian Zhou and Hee-Jun Kang (2013). A New Full Pose Measurement Method for Robot Calibration. *Sensors*, 13: 9132-9147.
- [13] Ana Cristina Majarena, Javier Conte, Jorge Santolaria and Raquel Acero (2017). A New Methodology for Kinematic Parameter Identification in Laser Trackers. *Intech*, 171-191.
- [14] Jindong WANG, Junjie GUO, Hao WANG and Yufen DENG (2011). The Evaluation of Measurement Uncertainty for Laser Tracker based on Monte Carlo Method. *Mechatronics and Automation*, 608-612.
- [15] International Organization for Standardization ISO. (1998). *Manipulating Industrial Robots-Performance Criteria and Related Test Methods*.
- [16] สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) (2551). การสอบเทียบเครื่องมือวัด. แผนกวารสารวิชาการ ฝ่ายสำนักพิมพ์ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 1.
- [17] United Kingdom Accreditation Service. (2019). *The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement*, M3003.