วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา
Engineering Journal of Research and Development
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage
ปีที่ 35 ฉบับที่ 3 กรกฎาคม-กันยายน 2567
Volume 35 Issue 3 July-September 2024
Received 6 August 2024
Revised 3 September 2024
Accepted 11 September 2024

การปรับแก้ค่าพิกัดของเป้าควบคุมในแผ่นสอบเทียบสำหรับการสอบเทียบกล้องถ่ายภาพอากาศยานไร้คน

COORDINATE ADJUSTMENT OF CONTROL TARGETS IN THE CALIBRATION SHEET FOR UAV CAMERA CALIBRATION

ดีบุญ เมธากุลชาติ
สมาคมการสำรวจและการแผนที่แห่งประเทศไทย
*Corresponding author, E-Mail: deeboon@noobeed.com

บทคัดย่อ

การสอบเทียบกล้องถ่ายภาพที่ใช้ในการทำแผนที่บนอากาศยานไร้คนเป็นกระบวนการสำคัญสำหรับหาค่าพารามิเตอร์การจัดภาพภายในของกล้องถ่ายภาพ ซึ่งใช้เป็นสะพานเชื่อมรังสีจากจุดบนภาพออกไปสู่โลกภายนอก การสอบเทียบกล้องถ่ายภาพโดยการใช้แผ่นสอบเทียบที่พล็อตโดยเครื่องพล็อตเตอร์แบบหมึกพ่น เป็นวิธีการสอบเทียบแบบหนึ่งที่ใช้กันทั่วไป แผ่นสอบเทียบมักจะมีขนาดประมาณกระดาษ A0 และมีจุดควบคุมหรือเป้าควบคุมที่รู้ค่าพิกัดแน่นอนกระจายอยู่ทั่วทั้งแผ่น ในสถานการณ์จริง ตำแหน่งของเป้าควบคุมมิได้ถูกพล็อตลงบนแผ่นสอบเทียบอย่างถูกต้อง ความคลาดเคลื่อนจากเครื่องพล็อตเตอร์อาจมีค่าถึง 2 มิลลิเมตรต่อระยะทาง 1 เมตร บทความนี้นำเสนอแนวทางการใช้ไม้บรรทัดเหล็ก ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ให้ความถูกต้องในการวัดระยะสูง และมีความถูกต้องมากกว่าความถูกต้องของเครื่องพล็อตเตอร์แบบหมึกพ่น มาใช้ในการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของเป้าควบคุม เพื่อนำความคลาดเคลื่อนมาทำการปรับแก้ค่าพิกัดของเป้าควบคุม พร้อมกับการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดของเป้าควบคุมที่ได้ทำการปรับแก้แล้ว

คำสำคัญ: อากาศยานไร้คน; การสอบเทียบกล้องถ่ายภาพ; แผ่นสอบเทียบ; เป้าควบคุม; ความเพี้ยนเลนส์; พารามิเตอร์การจัดภาพภายใน; เครื่องพล็อตเตอร์แบบหมึกพ่น; ไม้บรรทัดเหล็ก

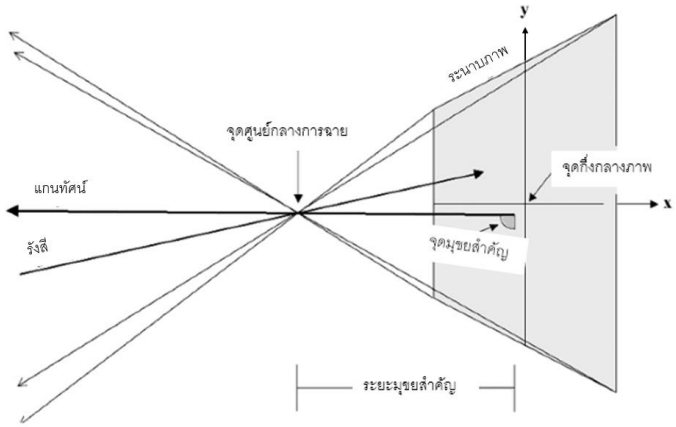
ABSTRACT

Camera calibration for mapping from UAV is an important process for determining the camera interior orientation parameters, which are used as a bridge to link rays from points on the image to the outside world. The camera calibration which utilizes a calibration sheet plotted by an inkjet plotter is a method that is mostly used in general. A calibration sheet size is approximately the size of an A0 paper and consists of control targets distributed throughout the entire sheet. In reality, the locations of the control targets are not plotted correctly. The error generated by the plotter can reach as much as 2 millimeters for a one-meter distance. This paper presents a procedure to use a steel ruler, which is an accurate device for measuring distances and has higher accuracy than an inkjet plotter, to check for positional error of the control target. The error is then used to adjust the target coordinates. The analysis of error of the adjusted coordinates of control targets are also presented.

KEYWORD: UAV; camera calibration; calibration sheet; control target; lens distortion; interior orientation parameters; inkjet plotter; steel ruler

1. ความเป็นมา

ในทฤษฎีการทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศซึ่งตั้งอยู่บนหลักการของแสงที่เดินทางเป็นเส้นตรงนั้น มีจุดจุดหนึ่งที่สำคัญมาก ชื่อว่า จุดศูนย์กลางการฉาย (Projection center) จุดศูนย์กลางการฉายทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมระหว่างจุดบนพื้นดินกับจุดบนภาพถ่าย บนเงื่อนไขที่ว่า จุดทั้งสามอยู่บนเส้นตรงเดียวกัน (Collinearity) กระบวนการที่จะหาตำแหน่งของจุดศูนย์กลางการฉายของกล้องถ่ายภาพว่าอยู่ที่ไหน เรียกว่า การสอบเทียบกล้อง (Camera calibration) ซึ่งจะคำนวณตำแหน่งของจุดศูนย์กลางการฉาย โดยมักจะอ้างอิงกับจุดกึ่งกลางภาพถ่าย และบอกเป็นค่าพิกัด x และ y ของจุดมุขยสำคัญ (Principal point) บนระนาบภาพ กับระยะมุขยสำคัญ (Principal distance) หรือบางแห่งเรียกว่า ความยาวโฟกัส (Focal length) ที่วัดตั้งฉากออกจากระนาบภาพที่จุดมุขยสำคัญ ดูรูปที่ 1 ประกอบ นอกจากนี้ การสอบเทียบกล้องยังรวมถึงการหาความเพี้ยนเลนส์ (Lens distortion) ที่ทำให้รังสีหักเหออกจากแนวเส้นตรง ซึ่งมักจะอธิบายด้วยพารามิเตอร์ 5 ตัว และรวมถึงความไม่ฉากและไม่จัตุรัสของแผงรับภาพ (Sensor) ซึ่งอธิบายด้วยพารามิเตอร์อีก 2 ตัว พารามิเตอร์ทั้งหมดนี้ รวมเรียกว่า พารามิเตอร์การจัดภาพภายใน (Interior Orientation Parameters - IOP) [1] [2] [3] [4] [5]



รูปที่ 1 ตำแหน่งของจุดศูนย์กลางการฉาย จุดมุขยสำคัญ และระยะมุขยสำคัญเมื่อเทียบกับจุดกึ่งกลางภาพ

กล้องถ่ายภาพที่ใช้สำหรับงานทำแผนที่โดยเฉพาะจะถูกสอบเทียบมาจากโรงงานผู้ผลิต และจะมาพร้อมกับรายงานการสอบเทียบกล้อง (Camera calibration report) กล้องถ่ายภาพประเภทนี้ถูกออกแบบมาให้มีความแข็งแรงและเสถียรมาก จึงไม่จำเป็นต้องทำการสอบเทียบบ่อย แตกต่างกับกล้องถ่ายภาพที่ติดมากับอากาศยานไร้คนที่มิได้ถูกสอบเทียบมาก่อน ผู้ใช้งานที่ต้องการทำแผนที่จากภาพถ่ายอากาศยานไร้คนจะต้องทำการสอบเทียบกล้องถ่ายภาพเพื่อหาค่าพารามิเตอร์การจัดภาพภายในเอง

วิธีการสอบเทียบกล้องถ่ายภาพอากาศยานไร้คนที่นิยมใช้กัน คือการใช้แผ่นสอบเทียบ (Calibration sheet) ขนาดประมาณกระดาษ A0 ภายในแผ่นสอบเทียบมีจุดควบคุมหรือเป้าควบคุม (Control target) ที่รู้ค่าพิกัดแน่นอนกระจายอยู่ทั่วทั้งแผ่น แล้วจัดการให้กล้องถ่ายภาพทำการถ่ายภาพของแผ่นสอบเทียบตามกรรมวิธี แล้วนำภาพถ่ายมาทำการวัดและประมวลผล เป้าควบคุมก็

เหมือนกับจุดควบคุมพื้นดิน (Ground control point) ที่ใช้ในงานข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ (Aerial triangulation) เพื่อหาคำตอบของพารามิเตอร์การจัดภาพภายนอก (Exterior Orientation Parameters - EOP) ต่างกันที่ว่า เป้าควบคุมในงานสอบเทียบกล้องจะใช้หาคำตอบของพารามิเตอร์การจัดภาพภายนอกและพารามิเตอร์การจัดภาพภายในพร้อมกันในคราวเดียว

รูปที่ 2 ตัวอย่างแผ่นสอบเทียบแบบต่างๆ

แผ่นสอบเทียบและเป้าควบคุมมีรูปร่างลักษณะหลากหลาย ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการออกแบบหรือซอฟท์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผล การใช้เครื่องพล็อตเตอร์แบบหมึกพ่น (Inkjet plotter) เป็นวิธีหนึ่งที่นิยมใช้ในการพล็อตแผ่นสอบเทียบ หากเครื่องพล็อตเตอร์ลงตำแหน่งของเป้าควบคุมแต่ละจุดได้อย่างถูกต้องตามแบบ ค่าพิกัดของเป้าควบคุมบนแผ่นสอบเทียบก็ไม่จำเป็นต้องทำการวัด เพราะทราบค่าอยู่แล้วจากในแบบ แต่ในความเป็นจริง ตำแหน่งของเป้าควบคุมมิได้ถูกพล็อตลงบนแผ่นสอบเทียบอย่างถูกต้อง เพราะเครื่องพล็อตเตอร์มีขีดจำกัดของความถูกต้องอยู่ ตัวอย่างเช่น เครื่องพล็อตเตอร์แบบหมึกพ่นที่ใช้พล็อตแผ่นสอบเทียบในการศึกษานี้ มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.2% หรือเท่ากับ 2 มิลลิเมตรต่อระยะทาง 1 เมตร [6] การปรับแก้ค่าพิกัดของเป้าควบคุมในแผ่นสอบเทียบจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้พิกัดของเป้าควบคุมมีความถูกต้องสูงสุดสำหรับใช้ในการควบคุมการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆในกระบวนการสอบเทียบกล้อง

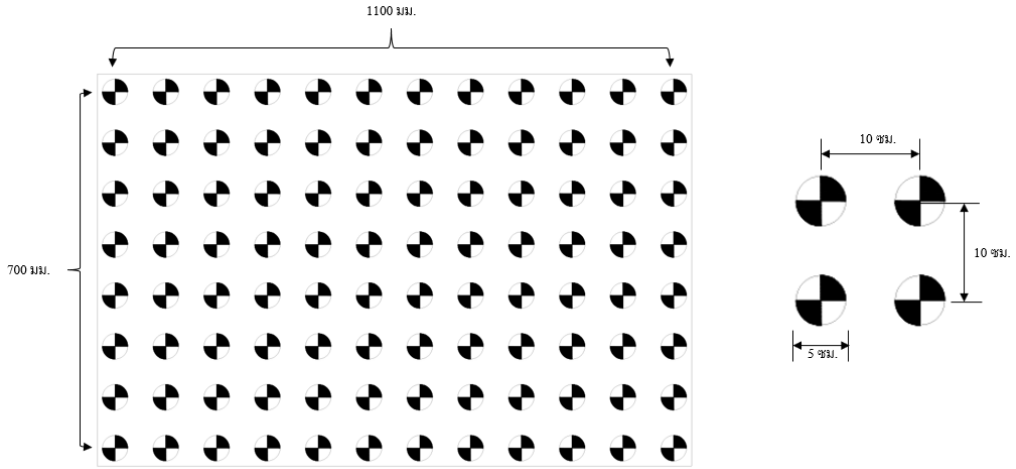
บทความนี้มีจุดประสงค์เพื่อต้องการชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการตรวจสอบความถูกต้องของแผ่นสอบเทียบ และนำเสนอแนวทางการใช้ไม้บรรทัดเหล็ก ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ให้ความถูกต้องในการวัดระยะสูง และมีความถูกต้องมากกว่าความถูกต้องของเครื่องพล็อตเตอร์แบบหมึกพ่น มาใช้ในการตรวจสอบความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของเป้าควบคุม เพื่อนำความคลาดเคลื่อนมาทำการปรับแก้ค่าพิกัดของเป้าควบคุม พร้อมกับการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดของเป้าควบคุมที่ได้ทำการปรับแก้แล้ว

2. การเตรียมแผ่นสอบเทียบ

ในการนำเสนอแนวทางการใช้ไม้บรรทัดเหล็กเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแผ่นสอบเทียบ จำเป็นต้องมีแผ่นสอบเทียบตัวอย่างเสียก่อน ผู้เขียนบทความจึงได้ออกแบบและสร้างแผ่นสอบเทียบตัวอย่างขึ้น แผ่นสอบเทียบตัวอย่างมีขนาดกว้างยาวเท่ากับ 770 x 1170 มิลลิเมตร หรือเล็กกว่าขนาดของกระดาษ A0 เล็กน้อย ภายในแผ่นสอบเทียบประกอบด้วยเป้าควบคุมจำนวน 8 แถว แถวละ 12 จุด เป้าควบคุมเป็นรูปวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในวงกลม 2 เส้นที่ตั้งฉากกัน ศูนย์กลางของแต่ละเป้าห่างกัน 10 เซนติเมตร ระยะทางจากศูนย์กลางเป้าแรกไปยังเป้าสุดท้ายในแนวนอนเท่ากับ 1100 มิลลิเมตร และระยะทางจากศูนย์กลางเป้าแรกไปยังเป้าสุดท้ายในแนวตั้งเท่ากับ 700 มิลลิเมตร ดูรูปที่ 3 ประกอบ

การพล็อตแผ่นสอบเทียบใช้เครื่องพล็อตเตอร์แบบหมึกพ่น ยี่ห้อ Hewlett-Packard รุ่น HP DesignJet 500 Plus ขนาด 42 นิ้ว พล็อตลงบนแผ่นฟิล์มโพลีเอสเตอร์ ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง ทนทาน และมีค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัวจากความร้อนต่ำมาก คือมีค่าเท่ากับ 1.7×10^{-5} นิ้ว/นิ้ว/°เซนติเกรด หรือเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตรต่อความยาว 1 เมตร เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น 10°ซ [7] เมื่อพล็อต

แผ่นสอบเทียบเสร็จแล้ว ทำการติดตั้งแผ่นสอบเทียบบนกระดานขาว (Whiteboard) โดยใช้เทปกาว 2 หน้าติดแผ่นสอบเทียบให้แนบสนิทกับกระดานขาวเพื่อมิให้มีช่องว่างอากาศเกิดขึ้น



รูปที่ 3 แบบแผ่นสอบเทียบ และแบบขยายแสดงขนาดและระยะห่างของเป้าควบคุมในแผ่นสอบเทียบ

รูปที่ 4 แผ่นสอบเทียบที่ติดเข้ากับกระดานขาว

3. การตรวจสอบระยะบนแผ่นสอบเทียบด้วยไม้บรรทัดเหล็ก

ไม้บรรทัดเหล็กเป็นอุปกรณ์วัดระยะขนาดสั้นที่มีความถูกต้องสูง ไม้บรรทัดเหล็กที่จำหน่ายอยู่ในท้องตลาดมีหลายขนาด ตั้งแต่ความยาว 30 เซนติเมตร จนถึง 150 เซนติเมตร ความถูกต้องของไม้บรรทัดเหล็กตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น (Japanese Industrial Standard – JIS) JIS B 7516 กำหนดความคลาดเคลื่อนยินยอมบนความยาว (Tolerance on Length) เป็น 2 เกรด ดังนี้ [8]

$$\text{เกรด 1} = [0.10 + 0.05 \times (L/0.5)] \quad \text{มม.} \tag{1}$$

$$\text{เกรด 2} = [0.10 + 0.10 \times (L/0.5)] \quad \text{มม.} \tag{2}$$

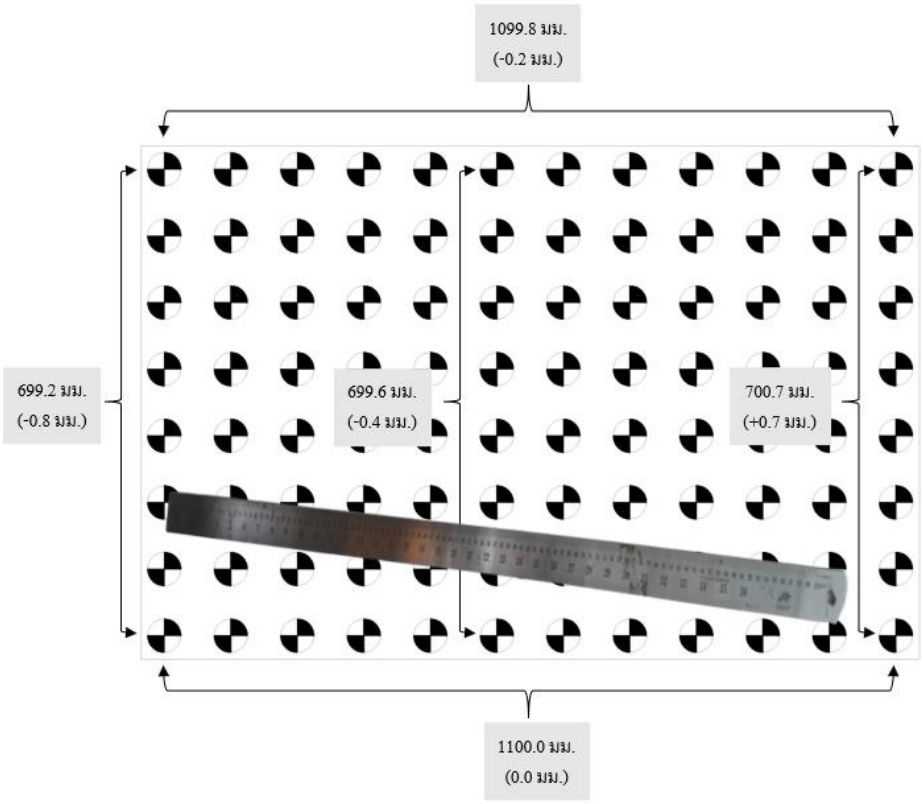
โดย L คือตัวเลขระยะทางที่วัดด้วยไม้บรรทัดเหล็กเป็นเมตร

ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น ที่ระยะทางการวัด 1 เมตร ไม้บรรทัดเหล็กเกรด 1 จะมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.2 มิลลิเมตร และไม้บรรทัดเหล็กเกรด 2 จะมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.3 มิลลิเมตร

ในประเทศไทย สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติได้ทำการสอบเทียบไม้บรรทัดเหล็กขนาดความยาว 30 เซนติเมตรที่จำหน่ายในท้องตลาด พบว่า ความสามารถของการวัดที่ดีที่สุด (Best Measurement Capacity) มีค่าเท่ากับ 0.05 – 0.1 มิลลิเมตร [9]

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างความถูกต้องของไม้บรรทัดเหล็กกับของเครื่องพล็อตเตอร์แบบหมึกพ่นพบว่า ความถูกต้องของไม้บรรทัดเหล็กมีค่าสูงกว่ามาก กล่าวคือ ที่ระยะทางการวัด 1 เมตร ความคลาดเคลื่อนจากเครื่องพล็อตเตอร์แบบหมึกพ่นมีค่าเท่ากับ 2 มิลลิเมตร แต่ความคลาดเคลื่อนจากไม้บรรทัดเหล็กมีเพียง 0.2 - 0.3 มิลลิเมตรเท่านั้น ดังนั้น ไม้บรรทัดเหล็กจึงเป็นอุปกรณ์ที่สามารถใช้ตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องพล็อตเตอร์แบบหมึกพ่นได้

ในการศึกษานี้ได้ใช้ไม้บรรทัดเหล็กวัดระยะยาวที่สุดตามแนวนอนในแผ่นสอบเทียบ จำนวน 2 ระยะ คือ ระยะจากกึ่งกลางเป้าควบคุมซ้ายสุดถึงขวาสุดของแถวที่ 1 และ 8 และวัดระยะยาวที่สุดตามแนวตั้ง จำนวน 3 ระยะ คือ ระยะจากกึ่งกลางเป้าควบคุมล่างสุดถึงบนสุดของสดมภ์ที่ 1 6 และ 12 ผลการวัดระยะแสดงอยู่ในรูปที่ 5



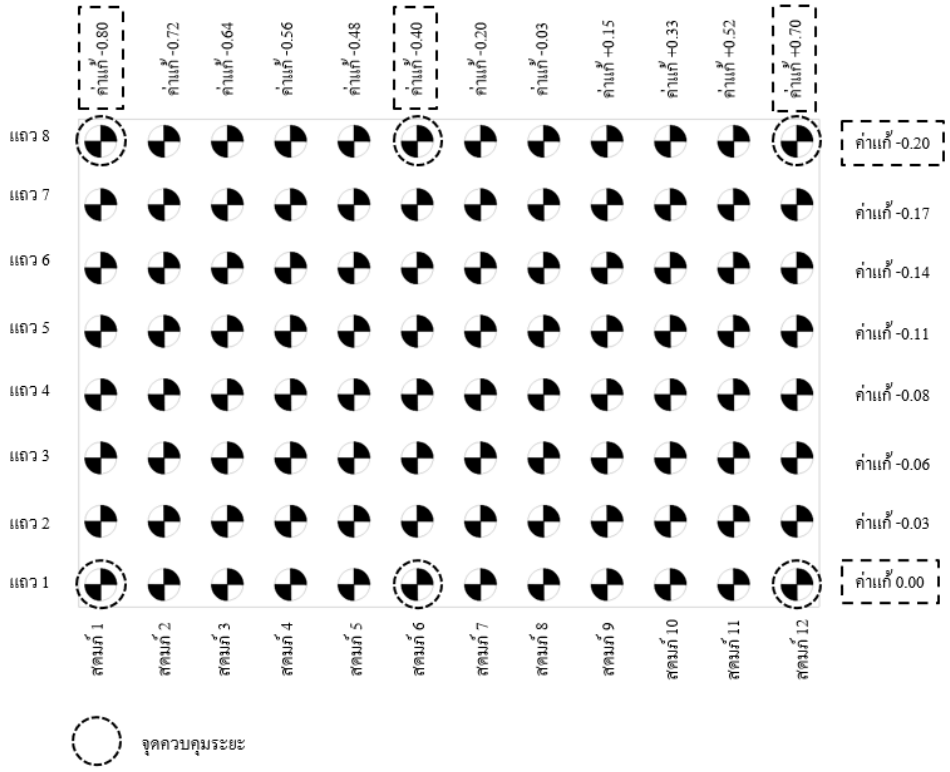
รูปที่ 5 ผลการวัดระยะบนแผ่นสอบเทียบด้วยไม้บรรทัดเหล็ก ในรูปเป็นไม้บรรทัดที่ใช้วัดจริงยี่ห้อ Benhur

หากเครื่องพล็อตเตอร์ลงตำแหน่งเป้าควบคุมได้อย่างถูกต้องตามแบบ ระยะที่วัดได้จะต้องมีค่าเท่ากับ 1100 มิลลิเมตร และ 700 มิลลิเมตรในแนวนอนและแนวตั้งตามลำดับ แต่ผลการตรวจสอบที่แสดงอยู่ในรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่า ระยะที่วัดได้ด้วยไม้บรรทัดเหล็กไม่เท่ากับระยะที่ได้ออกแบบไว้ ตัวเลขในวงเล็บที่แสดงอยู่ในรูปที่ 5 คือค่าความแตกต่างระหว่างระยะที่วัดด้วยไม้บรรทัดเหล็กกับระยะในแบบ

4. การปรับแก้ระยะ

ผลต่างของระยะในแบบกับระยะของไม้บรรทัดเหล็กคือความคลาดเคลื่อนของเครื่องพล็อตเตอร์ เนื่องจากระยะของไม้บรรทัดเหล็กมีความถูกต้องสูงกว่า จึงถูกกำหนดให้เป็นระยะจริง ส่วนระยะในแบบที่พล็อตโดยเครื่องพล็อตเตอร์เป็นระยะที่ต้องถูกปรับแก้ให้เท่ากับระยะจริง

จากข้อมูลระยะในแนวนอนของแถวที่ 1 และ 8 และระยะในแนวตั้งของสดมภ์ที่ 1 6 และ 12 ที่วัดด้วยไม้บรรทัดเหล็กพบว่าความคลาดเคลื่อนมีค่าไม่คงที่ โดยความคลาดเคลื่อนด้านแนวนอนเปลี่ยนไปตามระยะในแนวตั้ง และความคลาดเคลื่อนด้านแนวตั้งเปลี่ยนไปตามระยะในแนวนอน ในการคำนวณความคลาดเคลื่อนสำหรับระยะของแถวและสดมภ์อื่นๆที่ไม่ได้ทำการวัดด้วยไม้บรรทัดเหล็ก จะใช้วิธีประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear interpolation) สังเกตว่า ในแนวตั้งมีระยะควบคุม 3 ระยะ จึงมีการทำการประมาณค่าในช่วงเป็นจำนวน 2 ช่วง

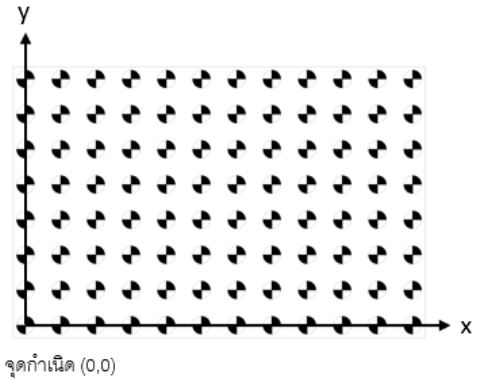


รูปที่ 6 ค่าแก้ในแนวนอนและแนวตั้งจากการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น

จากรูปที่ 6 ค่าแก้ในแนวนอนของแต่ละแถวและในแนวตั้งของแต่ละสดมภ์ คำนวณโดยอาศัยการเปรียบเทียบกับค่าแก้ในแนวนอนของแถวควบคุม (แถวที่ 1 และ 8) และค่าแก้ในแนวตั้งของสดมภ์ควบคุม (สดมภ์ที่ 1 6 และ 12) สังเกตว่า ค่าแก้ในแนวนอนของแต่ละแถวและในแนวตั้งของแต่ละสดมภ์มีค่าไม่เท่ากัน เมื่อนำค่าแก้ในแนวนอนและแนวตั้งของแต่ละแถวและแต่ละสดมภ์มาบวกกับระยะเดิมที่ออกแบบไว้ ก็จะได้ระยะที่ถูกต้องของแต่ละแถวและสดมภ์ และสุดท้ายทำการแบ่งระยะในแนวนอนและแนวตั้งของแต่ละแถวและสดมภ์ โดยในแนวนอนแบ่งเป็น 11 ส่วน และในแนวตั้งแบ่งเป็น 7 ส่วน จะได้เป็นระยะห่างในแนวนอนและแนวตั้งระหว่างแต่ละคู่จุดของเป้าควบคุม สำหรับใช้คำนวณค่าพิกัดของเป้าควบคุมแต่ละจุดต่อไป

5. การคำนวณค่าพิกัดของเป้าควบคุม

ค่าพิกัดของเป้าควบคุมคำนวณโดยใช้ระยะจากการปรับแก้ภายหลังจากการตรวจสอบด้วยไม้บรรทัดเหล็ก เมื่อระยะทั้งหมดในแผ่นสอบเทียบถูกต้อง ก็จะมีผลให้การคำนวณค่าพิกัดของเป้าควบคุมถูกต้องด้วย กำหนดให้จุดกำเนิดของระบบพิกัด xy ของแผ่นสอบเทียบอยู่ที่ด้านล่างซ้าย โดยใช้จุดกึ่งกลางของเป้าควบคุมของแถวที่ 1 และสดมภ์ที่ 1 เป็นจุดกำเนิด ดังนั้นค่าพิกัด x ของเป้าควบคุมคือระยะในแนวนอนจากแกน y และค่าพิกัด y ของเป้าควบคุมคือระยะในแนวตั้งจากแกน x ดังแสดงในรูปที่ 7 เนื่องจากระยะในแนวนอนและแนวตั้งของแต่ละแถวและสดมภ์มีความยาวแตกต่างกัน ซึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนของเครื่องพล็อตเตอร์ ดังนั้น ค่าพิกัด x ของเป้าควบคุมในสดมภ์เดียวกันจะไม่เท่ากัน และค่าพิกัด y ของเป้าควบคุมในแถวเดียวกันก็ไม่เท่ากัน



รูปที่ 7 ระบบพิกัดของเป้าควบคุม

6. การวิเคราะห์ความถูกต้องของค่าพิกัดของเป้าควบคุมภายหลังการปรับแก้

ค่าพิกัดของเป้าควบคุมคือระยะทางในแนวนอนและแนวตั้งจากแกน y และแกน x ถึงจุดศูนย์กลางของเป้าควบคุม โดยระยะในแนวนอนคือค่าพิกัด x และระยะในแนวตั้งคือค่าพิกัด y ดังนั้น ความถูกต้องของค่าพิกัดของเป้าควบคุมก็คือความถูกของระยะในแนวนอนและแนวตั้งจากแกน y และแกน x ถึงจุดศูนย์กลางของเป้าควบคุม

ในเวลานี้ ระยะทางทั้งหมดในแผ่นสอบเทียบเป็นระยะที่วัดด้วยไม้บรรทัดเหล็กหรือคำนวณจากระยะที่วัดด้วยไม้บรรทัดเหล็ก ความความคลาดเคลื่อนของเครื่องพล็อตเตอร์ได้ถูกปรับแก้ไปแล้วจึงไม่เกี่ยวข้องด้วย คงเหลือแต่ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัดระยะด้วยไม้บรรทัดเหล็กที่จะต้องพิจารณาตามลำดับ ดังนี้

1. ความคลาดเคลื่อนของระยะที่วัดด้วยไม้บรรทัดเหล็กโดยตรง คือระยะของแถวที่ 1 และ 8 และสดมภ์ที่ 1 6 และ 12 ประกอบด้วยความคลาดเคลื่อจากการเล็งที่จุดต้นและจุดปลาย และความคลาดเคลื่อนของไม้บรรทัดเหล็ก จากหลักการของการแพร่ของความคลาดเคลื่อน (Propagation of errors) ความคลาดเคลื่อนของระยะที่วัดด้วยไม้บรรทัดเหล็ก มีค่าดังนี้ [10]

$$\sigma_D = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2 + \sigma_C^2} \quad (3)$$

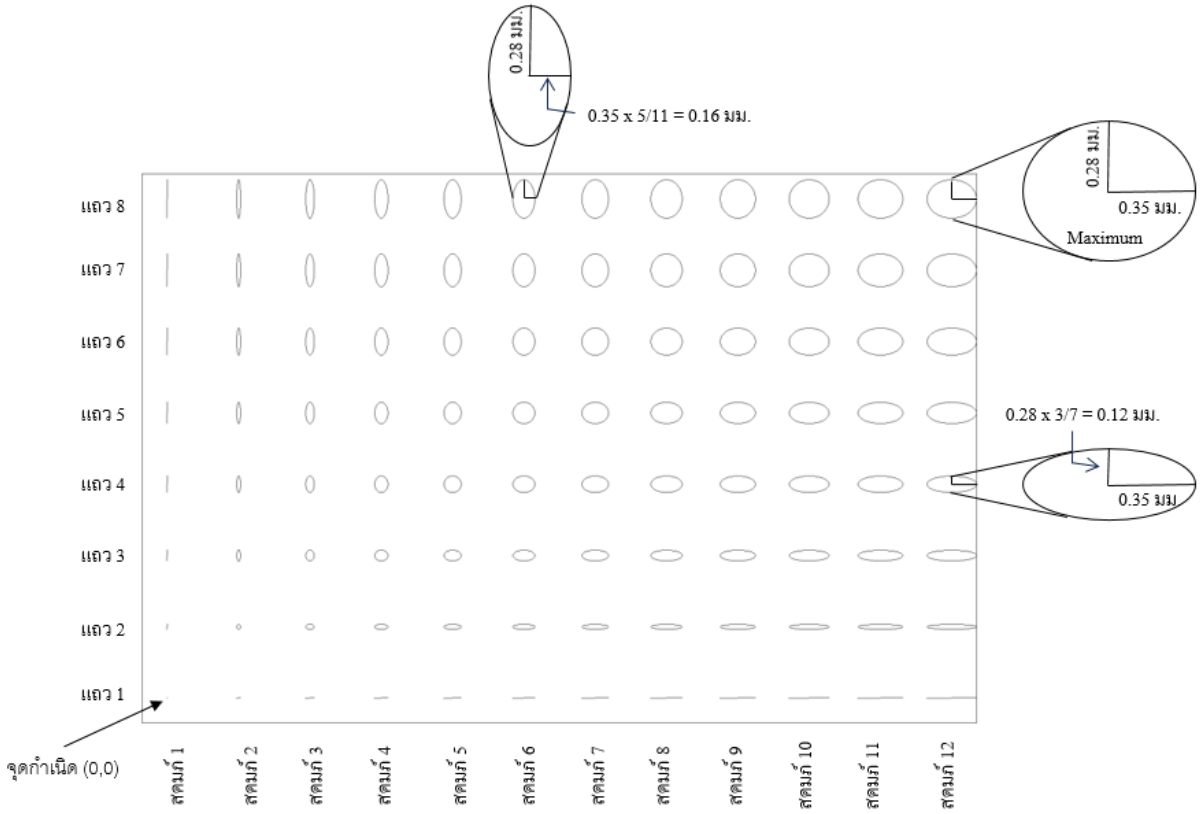
โดย σ_D = ความคลาดเคลื่อนของระยะที่วัดด้วยไม้บรรทัดเหล็ก
σ_A = ความคลาดเคลื่อนของการเล็งที่จุดต้น
σ_B = ความคลาดเคลื่อนของการเล็งที่จุดปลาย
σ_C = ความคลาดเคลื่อนของไม้บรรทัดเหล็ก

ในสมการที่ 3 หากกำหนดให้ความคลาดเคลื่อนของการเล็งที่จุดต้นและจุดปลายมีค่าเท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร และความคลาดเคลื่อนของไม้บรรทัดเหล็กกำหนดเป็นเกรด 2 ตามมาตรฐานอุตสาหกรรมญี่ปุ่น หรือมีค่าเท่ากับ 0.32 มิลลิเมตรและ 0.24 มิลลิเมตร ที่ระยะ 1100 มิลลิเมตร (ระยะยาวสุดในแนวนอน) และ700 มิลลิเมตร (ระยะยาวสุดในแนวตั้ง) ตามลำดับ จะได้ว่า ความคลาดเคลื่อนของระยะที่วัดด้วยไม้บรรทัดเหล็กของระยะที่ยาวที่สุดในแนวนอนและแนวตั้ง เท่ากับ

$$\sigma_D \text{ ในแนวนอน} = \sqrt{0.1^2 + 0.1^2 + 0.32^2} = 0.35 \text{ มม.}$$
$$\sigma_D \text{ ในแนวตั้ง} = \sqrt{0.1^2 + 0.1^2 + 0.24^2} = 0.28 \text{ มม.}$$

2. ความคลาดเคลื่อนของระยะของแถวและสดมภ์ที่ไม่ได้วัดด้วยไม้บรรทัดเหล็กโดยตรง (คำนวณด้วยการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น) เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของระยะแปรผันตามระยะทางที่วัด และความยาวของแต่ละแถวและสดมภ์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จึงอนุโลมใช้ค่าความคลาดเคลื่อนเดียวกันกับความคลาดเคลื่อนของระยะที่วัดด้วยไม้บรรทัดเหล็กโดยตรง คือมีค่าเท่ากับ 0.35 มิลลิเมตรและ 0.28 มิลลิเมตรในแนวนอนและแนวตั้งตามลำดับ (ในทางทฤษฎี ความคลาดเคลื่อนของระยะของแถวหรือสดมภ์ที่เกิดจากการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น จะมีค่าต่ำกว่าความคลาดเคลื่อนของระยะที่วัดด้วยไม้บรรทัดเหล็ก เพราะการประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น เปรียบเหมือนกับการหาค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก ซึ่งจะทำให้ค่าเฉลี่ยมีความคลาดเคลื่อนน้อยลง)

3. ความคลาดเคลื่อนของระยะภายในแต่ละแถวและสดมภ์ ในส่วนนี้ ระยะทางจากแกน x หรือแกน y ถึงเป้าควบคุมแต่ละจุดจะมีความแตกต่างกัน ดังนั้น ความคลาดเคลื่อนจึงไม่เท่ากัน สามารถคำนวณความคลาดเคลื่อนโดยเทียบอัตราส่วนกับความคลาดเคลื่อนสูงสุด (ในแนวนอนเท่ากับ 0.35 มิลลิเมตร และในแนวตั้งเท่ากับ 0.28 มิลลิเมตร) ดูรูปที่ 8 ประกอบ



รูปที่ 8 วงรีความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดเป้าควบคุมในแผ่นสอบเทียบ

วงรีในรูปที่ 8 คือวงรีความคลาดเคลื่อนซึ่งแสดงความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดเป้าควบคุมในแผ่นสอบเทียบ โดยใช้ค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัด x และ y เป็นรัศมีของวงรี วงรีความคลาดเคลื่อน ณ ตำแหน่งต่างๆมีขนาดไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับค่าพิกัด ยิ่งค่าพิกัดมีค่ามาก รัศมีวงรีความคลาดเคลื่อนยิ่งมีค่ามาก ความคลาดเคลื่อนของพิกัดเป้าควบคุมมีค่าเท่ากับศูนย์ที่จุดกำเนิด และมีค่าสูงสุดที่จุดบนขวาสุด

7. สรุป

การสอบเทียบกล้องถ่ายภาพเปรียบเหมือนกับการลับอาวุธ มีดหรือดาบจะใช้งานได้ดีต้องผ่านการลับอย่างถูกวิธี และต้องใช้หินลับมีดที่มีคุณภาพ แผ่นสอบเทียบก็เปรียบเหมือนกับหินลับมีดที่จะทำหน้าที่ปรับแต่งให้กล้องถ่ายภาพมีความถูกต้องพร้อมที่จะนำไปใช้ในการทำแผนที่ ความถูกต้องของค่าพิกัดของเป้าควบคุมในแผ่นสอบเทียบจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อผลลัพธ์ในการสอบเทียบกล้องถ่ายภาพ

ความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของเป้าควบคุมบนแผ่นสอบเทียบอันเกิดขึ้นจากเครื่องพล็อตเตอร์ อาจมีค่ามากถึง 2 มิลลิเมตรต่อระยะทาง 1 เมตร แต่เป็นความคลาดเคลื่อนที่สามารถถูกขจัดออกไปได้ โดยการตรวจสอบด้วยอุปกรณ์วัดระยะที่มีความถูกต้องสูงกว่า เช่น ไม้บรรทัดเหล็ก ดังนั้น กระบวนการสอบเทียบกล้องจึงไม่ควรละเลยที่จะขจัดความคลาดเคลื่อนนี้ออกไปจากแผ่นสอบเทียบ เพราะหากปล่อยทิ้งไว้ ความคลาดเคลื่อนนี้จะแพร่ไปสู่คำตอบของพารามิเตอร์การจัดภาพภายในซึ่งเป็นผลลัพธ์ของการสอบเทียบกล้องถ่ายภาพ ทำให้กลไกที่จะใช้สร้างรังสีจากจุดบนภาพเพื่อเชื่อมออกไปสู่โลกภายนอกเกิดความเพี้ยน แตกต่างจากรังสีที่เกิดขึ้นในขณะถ่ายภาพ ทำให้ตำแหน่งของจุดภาพที่จะปรากฏบนพื้นดินผิดเพี้ยนไปจากตำแหน่งจริง ผู้เขียนหวังว่า ผู้ผลิตแผนที่จากภาพถ่ายอากาศยานไร้คนจะให้ความสำคัญต่อความถูกต้องของแผ่นสอบเทียบอย่างจริงจัง เพื่อให้ผลลัพธ์ของการสอบเทียบกล้องถ่ายภาพมีความถูกต้องน่าเชื่อถืออย่างแท้จริง และทำให้แผนที่ผลลัพธ์ในขั้นสุดท้ายมีความถูกต้องตรงตามความต้องการ

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณคุณบุญเลิศ นิติวัฒนานนท์และบริษัท ซี บี การสำรวจ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อเครื่องพล็อตเตอร์และฟิล์มโพลีเอส-เตอร์ที่ใช้ทำแผ่นสอบเทียบ และขอขอบคุณอาจารย์เจนพล พลังธนสุกิจ อาจารย์ประจำห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งผิดชอบในการติดแผ่นสอบเทียบเข้ากับกระดานขาวด้วยเทปกาวสองหน้าอย่างประณีตและระมัดระวัง เพื่อให้มั่นใจว่าไม่มีช่องว่างอากาศหลงเหลืออยู่ระหว่างแผ่นสอบเทียบกับกระดานขาว

เอกสารอ้างอิง

[1] Moe, D., Sampath, A., Christopherson, J. and Benson, M. Self-Calibration of Small and Medium Format Digital Cameras, *ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS*, Vienna Austria, 2010, July 5-7, pp. 395-400.

[2] Cramer, M. Digital Camera Calibration, *Official publication of the European Spatial Data Network*, EuroSDR, 2009, 55, pp. 262.

[3] Beyer, H. A. Geometric and Radiometric Analysis of a CCD-Camera Based Photogrammetric Close-Range System, *Dissertation ETH Nr. 9701*, Institute of Geodesy and Photogrammetry, Zurich, 1992, pp.186.

[4] Brown, D. *Advanced Methods for the Calibration of Metric Camera*. Final Report, Part1, DBA Systems, Inc., Melbourne, Florida, 1969, pp. 117.

[5] Noobeed, *SELFCALIB Block Adjustment with Self Calibration,* 2023. available from URL http://noobeed.com/nb_AT_BD_manual.htm#selfcalib (last date accessed: 19 August 2023).

[6] HP Development Company, *HP Designjet 500 Series Printers – Product Specification*, 2023. available from URL: https://support.hp.com/us-en/document/bpp0306 (last date accessed: 19 August 2023).

[7] DuPont Teijin Films, *Mylar polyester film – Physical-Thermal Properties*, Virginia, USA, 2003.

[8] Japan Measuring Instrument Federation, *JIS B 7516:2005 Metal Rules*, 2005, Translated and published by Japanese Standards Association, Tokyo.

[9] ยุทธนา หงส์อารมณ์กิจ. การสอบเทียบไม้บรรทัดเหล็ก. สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ, *Metrology Info*, 2009, 11 (53).

[10] ดีบุญ เมธากุลชาติ. *การคำนวณปรับแก้ในงานสำรวจ*. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2563, pp. 188.