



การศึกษาวิธีการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์แบบผสมผสานระหว่างข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์
และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการรังวัดโครงสร้างจากการเคลื่อนไหวของภาพถ่ายทางอากาศ
A STUDY OF HYBRID STRIP ADJUSTMENT BETWEEN UAV LIDAR POINT CLOUD
AND STRUCTURE-FROM-MOTION POINT CLOUD

เทพฤทธิ์ ศรีรัตนไพศาล^{1*} และไพศาล สันติธรรมนนท์²

^{1*} นิสิตมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

² รองศาสตราจารย์, สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*Corresponding author, E-Mail: jadethepparit@gmail.com

บทคัดย่อ

การสแกนด้วยเลเซอร์หรือไลดาร์ทางอากาศจะทำให้ได้ข้อมูลพอยต์คลาวด์สำหรับการจัดทำแบบจำลองความสูงภูมิประเทศที่มีความละเอียดถูกต้องสูง แต่เมื่อตรวจสอบข้อมูลพอยต์คลาวด์พบว่า พอยต์คลาวด์จากต่างแนวบินที่เกิดจากเลเซอร์ตกกระทบลงบนพื้นผิววัตถุเดียวกันกลับมีค่าความสูงที่ไม่เท่ากัน โดยพบว่ามีค่าคลาดเคลื่อนทางความสูงอยู่ในระดับ 5 – 20 ซม. ซึ่งปกติจะพบได้บริเวณส่วนซ้อนระหว่างแนวบิน ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวบินโดยอาศัยการประมวลผลร่วมกับบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ ที่มีการถ่ายภาพพร้อมการสแกนด้วยเลเซอร์ขณะทำการบิน โดยจะประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศด้วยการคำนวณการสำรวจด้วยภาพถ่าย และมีการจัดทำจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินเพื่อนำไปร่วมปรับแก้บล็อกค่าแสงของภาพถ่ายให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ในการปรับแก้บล็อกค่าแสงจะมีการจับคู่จุดภาพซึ่งจะนำไปสู่การสร้างข้อมูลพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่นด้วยการรังวัดภาพถ่ายทางอากาศหลายมุมมองจากเทคนิคการสำรวจโครงสร้างจากการเคลื่อนไหว (SfM) โดยจะนำข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ไปใช้ในการสร้างเส้นกำกับกับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวบินเพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนที่มีอยู่ โดยจะปรับแก้เฉพาะค่าความสูงเท่านั้น เนื่องมาจากความหนาแน่นของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่มีเพียง 5 – 10 จุดต่อตารางเมตร ทำให้ยากต่อการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนทางราบและการเอียงตัว โดยในงานวิจัยได้มีการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์อยู่ 2 แบบ ได้แก่ การปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวบินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ และการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวบินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ ผลจากการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งโดยการคำนวณหาค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางตั้งกำลังสอง ($RMSE_z$) พบว่า ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้ มีค่า $RMSE_z$ อยู่ที่ 8.3 ซม. ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวบินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ มีค่า $RMSE_z$ อยู่ที่ 9.2 ซม. และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวบินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM

Thepparit Srirattanapaisarn ^{1*} and Phisan Santitamnont ²

^{1*} Master Student, Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

² Associate Professor, Center of Excellence in Infrastructure Management, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

ประกอบกับการปรับแก้ มีค่า $RMSE_z$ อยู่ที่ 7.4 ซม. ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการประมวลผลผสมผสานร่วมกันระหว่างข้อมูลไลดาร์และ
บล็อกของภาพถ่ายทางอากาศสามารถช่วยให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์มีความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งดีขึ้น

คำสำคัญ: ข้อมูลพอยต์คลาวด์; การผสานด้วยเลเซอร์ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับ; ไลดาร์; การสร้างพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่น;
การรังวัดโครงสร้างจากการเคลื่อนไหว; การปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวนอน

ABSTRACT

Laser scanning as know as LiDAR can produce point cloud for creating high resolution and high-accurate digital elevation model. Nevertheless, after a lidar mission, the point clouds from two adjacent flightlines in the overlapping area were found that there are discrepancy in height in the range of 5 – 20 centimeters. Therefore, these point cloud data needs to be treated e.g. via strip adjustment by hybrid processing in such a way that aerial photogrammetric block co-flight with laser scanning will first processed and be used to produce control features for later strip adjustment. The aerial images are organized for bundle block adjustment (BBA) using photogrammetric computer vision (PCV), together with the ground control points for improving accuracy. While doing the BBA, the key points will be produced from the image matching and lead to point cloud densification by multiple-view geometry of aerial images in Structure-from-Motion (SfM) technique. The SfM point cloud will be used to create tie-line for LiDAR strip adjustment to reduce those discrepancies. Nevertheless, the inadequate density of LiDAR point cloud (5 - 10 point/sqm), it is difficult to adjust the horizontal discrepancies and the drift of attitude. So, only the height discrepancies will be adjusted. In this research there are has two types of strip adjustments, the first one is the strip adjustment of LiDAR point cloud not using SfM point cloud and the second is the strip adjustment LiDAR point cloud using SfM point cloud. The research's result was found that the unadjusted LiDAR point cloud has $RMSE_z$ at 8.3 centimeters, the strip adjustment of LiDAR point cloud not using SfM point cloud has $RMSE_z$ at 9.2 centimeters and the strip adjustment of LiDAR point cloud using SfM point cloud improve the height accuracy upto $RMSE_z$ of 7.4 centimeters. So it can be concluded that the hybrid processing between UAV LiDAR mapping and aerial photogrammetric block could help improving vertical positioning accuracy of this LiDAR point cloud block.

KEYWORD: Point cloud; UAV Laser Scanning; LiDAR; Dense cloud generation; Structure-from-motion; Point cloud strip adjustment

1. บทนำ

ในการผสานด้วยเลเซอร์หรือไลดาร์ทางอากาศ ที่ติดตั้งกับอากาศยานไร้คนขับ จะทำให้ได้ข้อมูลพอยต์คลาวด์สำหรับการจัดทำแบบจำลองความสูงภูมิประเทศที่มีความละเอียดถูกต้องสูง โดยกรมแผนที่ทหารได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของข้อมูลความสูงภูมิประเทศที่จะมีส่วนช่วยต่อการแก้ไขปัญหาอุทกภัยและการพัฒนาประเทศ ดังนั้นกรมแผนที่ทหารจึงได้นำเทคโนโลยีการสำรวจดังกล่าวมาใช้ในการสำรวจข้อมูลความสูงภูมิประเทศบริเวณลุ่มน้ำภาคกลาง [1] แต่เมื่อนำข้อมูลพอยต์คลาวด์มาตรวจสอบกลับพบว่า ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากแนวนอนที่ต่างกันซึ่งเกิดจากเลเซอร์ตกกระทบลงบนพื้นผิววัตถุเดียวกันกลับมีค่าความสูงที่ไม่เท่ากัน โดยเมื่อนำข้อมูลพอยต์คลาวด์ทั้งหมดในพื้นที่ศึกษามาตรวจสอบพบว่ามีความคลาดเคลื่อนทางความสูงอยู่ในระดับ 5 – 20 ซม. (ΔZ

= 5 – 20 cm) ซึ่งจะสามารถพบได้บริเวณส่วนซ้อนระหว่างแนวมิน (Overlap) และด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวมิน (Point cloud strip adjustment) เพื่อลดความคลาดเคลื่อนทางความสูงที่มีอยู่

ในการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวมิน จะอาศัยการประมวลผลร่วมกันระหว่างข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์และชุดข้อมูลภาพถ่ายจากกล้องของภาพถ่ายทางอากาศที่มีการถ่ายภาพพร้อมกับการแสดงด้วยเลเซอร์ขณะทำการบิน โดยจะเป็นการประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศด้วยการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ตามกระบวนการสำรวจด้วยภาพถ่าย (Photogrammetric Computer Vision : PCV) [2,3] ซึ่งจะมีการจัดทำจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (Ground Control Point : GCP) แบบเป่าภายหลังการบิน (Post-marking GCP) เพื่อนำไปร่วมปรับแก้คลอคลาแสงของภาพถ่าย เพื่อให้การรังวัดค่าพิกัดภาคพื้นดินในภาพถ่ายมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น จากนั้นจะทำการสร้างข้อมูลพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่น (Dense cloud generation) ด้วยการรังวัดภาพถ่ายทางอากาศหลายมุมมอง (Multiple View Geometry : MVG) [4] ในเทคนิคการสำรวจโครงสร้างจากการเคลื่อนไหว (Structure-from-Motion : SfM) [5,6] โดยจะนำข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการทำ SfM ไปใช้ในการสร้างเส้นกำกับสำหรับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวมินเพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนทางความสูง โดยในการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์จะทำการปรับแก้เฉพาะค่าความสูงเท่านั้น เนื่องจากข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ของทางกรมแผนที่ทหารมีความละเอียดหนาแน่นของจุดเพียง 5 – 10 จุดต่อตารางเมตร ซึ่งไม่เพียงพอต่อการปรับแก้ในทางราบรวมถึงการเอียงตัว ที่จะต้องอาศัยรูปทรงจำหรือแนวกำแพงสำหรับการสร้างเส้นกำกับสำหรับการปรับแก้ โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์อยู่ 2 รูปแบบ ได้แก่ การปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวมินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ และการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวมินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ เมื่อปรับแก้เสร็จสิ้นแล้วจะนำไปตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งเทียบกับจุดตรวจสอบ (Check point : CP) โดยจะตรวจสอบข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์จำนวน 3 รูปแบบ ได้แก่ ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวมิน ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวมินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวมินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ โดยผลของงานวิจัยจะแสดงค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางดิ่งกำลังสอง ($RMSE_z$) จากการตรวจสอบกับจุดตรวจสอบ เพื่อให้ทราบถึงความแตกต่างของความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์ทั้ง 3 รูปแบบ

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การกำหนดพิกัดตำแหน่งบนโลกด้วยวิธีตรงให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์

การจะทำให้จุดของพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการแสดงด้วยเลเซอร์หรือไลดาร์มีค่าพิกัดตำแหน่งบนโลก จะใช้การคำนวณโดยการกำหนดพิกัดตำแหน่งบนโลกด้วยวิธีตรงให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์ ซึ่งจะต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความสัมพันธ์ร่วมกับอุปกรณ์รังวัดต่างๆ ที่ติดตั้งบนอากาศยาน เช่น ระบบรังวัดพิกัดตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS และระบบรังวัดค่าการเอียงตัวด้วยความเฉื่อย (Inertial Motion Unit : IMU) โดยในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะสร้างขึ้นต้องใช้ข้อมูลอยู่ 3 ส่วน ได้แก่ 1) ข้อมูลระยะทางและมุมแสงออกที่วัดได้ของเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ 2) ข้อมูลวิถีการบิน (Flight trajectory) ได้แก่ ความเร็ว พิกัดตำแหน่ง และการเอียงตัว และ 3) พารามิเตอร์ของการวางตัวของเลเซอร์สแกนเนอร์ (Mounting calibration parameters) จากนั้นจะสามารถคำนวณหาพิกัดสามมิติของจุดที่ตกกระทบกับวัตถุ (i) ที่ได้จากการแสดงด้วยเลเซอร์ (l) ณ เวลา t ได้ดังสมการที่ (1) [5]

$$x^e(t) = g^e(t) + R_n^e(t)R_n^i(t)(a_{(l)}^i + R_{s(l)}^i x_{(t)}^s) \quad (1)$$

ในสมการจะปรากฏระบบพิกัดอ้างอิงอยู่ 4 ระบบพิกัด ได้แก่

e เป็น ระบบพิกัดของเลเซอร์แสดกนเนอร์ e เป็น ระบบพิกัด ECEF (Earth-Centered, Earth-Fixed)
 i เป็น ระบบพิกัดของ INS n เป็น ระบบพิกัดของการนำหนด้วยดาวเทียม

2.2 การปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวนบิน

ในการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวนบินที่มีการยึดโยงร่วมกับแบบจำลองของระบบรังวัดต่างๆ ที่ติดตั้งร่วมกับเครื่องมือสำรวจ เช่น ระบบ GNSS และระบบ INS ซึ่งจะมีความเชื่อมโยงต่อเนื่องถึงจุดพอยต์คลาวด์ในแต่ละจุดที่รังวัดได้ การปรับแก้นี้จะเรียกว่า Sensor system model [6] ดังสมการที่ (2) ที่แสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของพอยต์คลาวด์ร่วมกับระบบรังวัดต่างๆ

$$p_{i,j} = f(O(t_i), R(t_i), r_i, \alpha_i, s) \quad (2)$$

โดยที่ t เป็น เวลา ณ ขณะที่รังวัดจุดพอยต์คลาวด์นั้นๆ r_i เป็น ระยะทางที่เลเซอร์วัดระยะได้
 s เป็น เวกเตอร์ระยะขดเซช (offset) α_i เป็น มุมที่เลเซอร์ออกไปกระทบกับวัตถุ
 $O(t_i), R(t_i)$ เป็น จุดกำเนิดและแนวการวางตัวของระบบพิกัดอ้างอิง

2.3 ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากกระบวนการผลิตของคอมพิวเตอร์ในการสำรวจด้วยภาพถ่าย

ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการรังวัดด้วยภาพตามหลักการสำรวจด้วยภาพถ่ายนั้น เกิดจากการรังวัดค่าพิกัดสามมิติของจุดสนใจในภาพถ่าย โดยใช้หลักการสำรวจโครงสร้างจากการเคลื่อนไหว (SfM) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมของคอมพิวเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับงานด้านการสำรวจด้วยภาพถ่าย (PCV) สำหรับการรังวัดจุดที่สนใจด้วยภาพถ่ายในหลายมุมมอง (MVG) อันเกิดจากการเคลื่อนไหวเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและทิศทางของกล้องถ่ายภาพ โดยการรังวัดจุดสนใจจะทำในทุกภาพที่จุดปรากฏอยู่ ซึ่งจะ ทำให้เกิดการคำนวณด้วยแนวตัดของรังสีจากกล้องถ่ายภาพในหลายมุมมองและมีการปรับแก้ระหว่างพิกัดและการวางตัวของกล้องถ่ายภาพและเรขาคณิตของภาพถ่าย ซึ่งจะได้ออกมาเป็นค่าพิกัดสามมิติของจุดๆ นั้น โดยหากภาพถ่ายที่ใช้ในการประมวลผลเป็นภาพถ่ายทางอากาศ จะเปรียบได้กับการทำ BBA ของบล็อกรูปภาพถ่ายทางอากาศ ซึ่งมีการรังวัดจุดผ่านและจุดโยงยึดที่มีคุณลักษณะเป็นจุดสำคัญซึ่งปรากฏในส่วนซ้อนระหว่างภาพถ่ายหรือระหว่างแนวนบินที่ต่อเนื่องกัน หลังจากการคำนวณปรับแก้บล็อกแสงของภาพถ่ายทางอากาศแล้วจะทำให้ได้ค่าพิกัดภาคพื้นดินของจุดสำคัญเหล่านี้ และเมื่อมีการรังวัดจุดเหล่านี้ในจำนวนที่มาก จะเป็นข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ หรือข้อมูลพอยต์คลาวด์

3. ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

3.1 ชุดข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสแกนด้วยเลเซอร์ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับ

ข้อมูลพอยต์คลาวด์จะใช้ข้อมูลของกรมแผนที่ทหาร ซึ่งได้ดำเนินการสำรวจด้วยเครื่องเลเซอร์แสดกนเนอร์ รุ่น LiDAR Swiss Micro VUX CE ติดตั้งเข้ากับอากาศยานไร้คนขับชนิด VTOL รุ่น SUD VTIOI-60 โดยชุดข้อมูลพอยต์คลาวด์นี้ได้ผ่านกระบวนการอ้างอิงระบบพิกัดแล้ว ซึ่งเป็นระบบพิกัด UTM โซน 47N พื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 และค่าความสูงเหนือพื้นผิวทวงรี (Ellipsoidal

height) ความหนาแน่นของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ 5 – 10 จุดต่อตารางเมตร เมื่อบินสำรวจที่ความสูง 400 เมตรเหนือภูมิประเทศ โดยจะประกอบไปด้วย ชุดข้อมูลพอยต์คลาวด์ทั้งหมด 5 แนวบิน จำนวน 34,496,009 จุด โดยเป็นชุดข้อมูลในพื้นที่บริเวณศูนย์เครือข่ายการเรียนรู้เพื่อภูมิภาค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และพื้นที่ขอบเขตโดยรอบใน ต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี รวม 10 ตารางกิโลเมตร



(ก)

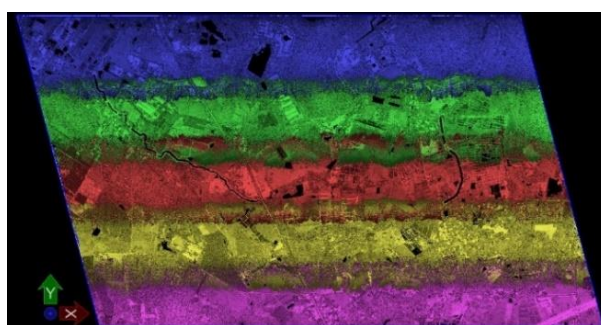


(ข)

รูปที่ 1 (ก) เครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ รุ่น LiDAR Swiss Micro VUX CE และกล้องถ่ายภาพดิจิทัล Cannon EOS 5DSR
(ข) การติดตั้งอุปกรณ์สำรวจเข้ากับอากาศยานไร้คนขับรุ่น SUD VTIOI-60



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 ข้อมูลพอยต์คลาวด์ (ก) แสดงสีด้วยค่าสี RGB ในจุดภาพของภาพถ่ายทางอากาศ (ข) แสดงสีด้วยลำดับของแนวบินที่แตกต่างกัน

3.2 ชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ

ชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศของกรมแผนที่ทหาร ชนิดภาพถ่ายตั้ง ที่ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัล ยี่ห้อ Cannon EOS รุ่น 5DSR แบบ full-frame และใช้เซนเซอร์ชนิด CMOS ขนาด 50 ล้านพิกเซล โดยกล้องจะติดตั้งอยู่ติดกับเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ ซึ่งจะทำให้การถ่ายภาพไปพร้อมกับการสแกนด้วยเลเซอร์ ทำให้ภาพถ่ายเป็นภาพที่อยู่เหนือพื้นที่สำรวจเดียวกับข้อมูลพอยต์คลาวด์ ภาพถ่ายทางอากาศมีความละเอียดจุดภาพเชิงพื้นที่ (Ground sampling distance : GSD) 10 ซม. และมีการถ่ายภาพให้มีส่วนซ้อนระหว่างภาพถ่ายในแนวบินเดียวกันที่ร้อยละ 65 และส่วน 겹ของภาพระหว่างแนวบินที่ติดกันร้อยละ 35 (เรียกโดยย่อว่า ส่วนซ้อน 65% / 35%) ในขอบเขตพื้นที่ศึกษามีจำนวนภาพถ่ายทางอากาศตั้งทั้งหมด 140 ภาพ



รูปที่ 3 (ก) ชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศในขอบเขตพื้นที่ศึกษา (ข) ตัวอย่างภาพถ่ายทางอากาศที่ถ่ายจากกล้อง Cannon EOS 5DSR สำหรับชุดข้อมูลที่ 3.1 และ 3.2 ทางกรมแผนที่ทหารได้ดำเนินการสำรวจไว้เมื่อวันที่ 7 ตุลาคม พ.ศ. 2562

ตารางที่ 1 รายละเอียดข้อมูลจำเพาะที่สำคัญของกล้อง Cannon EOS รุ่น 5DSR

ข้อมูลจำเพาะของกล้อง Cannon EOS รุ่น 5DSR	
ความยาวโฟกัส (Focal length)	18 มม. หรือ 4,390.24 พิกเซล
ความกว้างของเซนเซอร์ (Sensor width)	35.6208 มม.
ความสูงของเซนเซอร์ (Sensor height)	23.7472 มม.
ความกว้างของภาพ (Image width)	8,688 พิกเซล
ความสูงของภาพ (Image height)	5,792 พิกเซล
ขนาดจุดภาพ (Pixel size)	4.1 ไมโครเมตร (ไมครอน)

3.3 ข้อมูลวิธีการบินของอากาศยานไร้คนขับ

ในการบินสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับมีการติดตั้งอุปกรณ์รับวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS เพื่อการนำหน้และระบุตำแหน่ง และเครื่องวัดค่าการเอียงตัว (IMU) ของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ติดตั้งอยู่ในอุปกรณ์ โดรนในขณะที่ทำการบินสำรวจ ได้มีการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS บนพื้นดินอีก 1 เครื่อง เพื่อทำหน้าที่เป็นสถานีฐานโดยตั้งรับวัดบนจุดทราบค่าพิกัด (จุด LD61B034) ซึ่งเป็นจุดที่ทางกรมแผนที่ทหารได้ดำเนินการสำรวจไว้ก่อนหน้านี้แล้ว จากนั้นจะทำการประมวลผลในภายหลัง (Post-processed kinematic differential) เพื่อให้ได้ข้อมูลพิกัดตำแหน่งและการเอียงตัวของอากาศยานไร้คนขับในแต่ละช่วงเวลา และจัดเป็นข้อมูลวิธีการบิน

ตารางที่ 2 รายละเอียดค่าพิกัดของจุด LD61B034

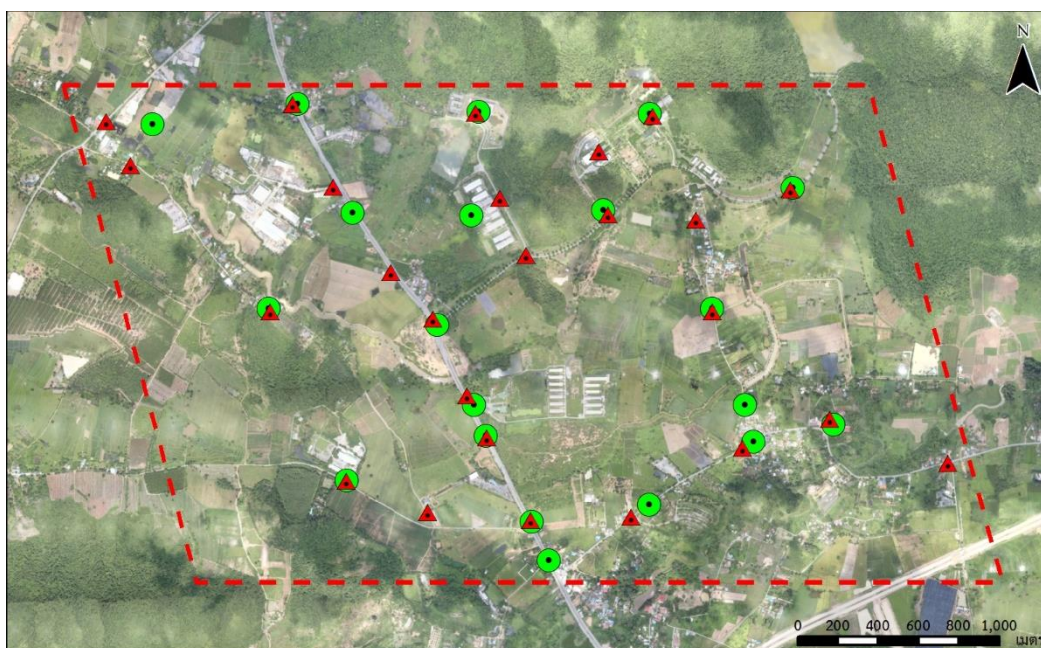
ค่าพิกัดของจุด LD61B034		
ค่าพิกัดในระบบพิกัดภูมิศาสตร์บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS 84	ลองจิจูด (Longitude)	101° 03' 27.88268" E
	ละติจูด (Latitude)	14° 26' 34.17132" N
ค่าพิกัดในระบบ UTM zone 47N	Easting	721,827.433 ม.
	Northing	1,597,695.322 ม.
WGS 84	ค่าความสูงเหนือทรีอ้างอิง (h)	31.43 ม.
TGM 2017 Geoid model	ความสูงเหนือพื้นผิวฮอยด์ (H)	60.89 ม.

4. ระเบียบวิธีการปฏิบัติงานวิจัย

4.1 การสำรวจจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบ

จากความต้องการที่จะทำให้ชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่จะนำไปประมวลผลในกระบวนการสำรวจด้วยภาพถ่าย มีความถูกต้องทางตำแหน่งที่ดียิ่งขึ้น จึงจำเป็นต้องจัดทำจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน แต่เนื่องด้วยชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศของกรมแผนที่ทหารนี้ได้มีการสำรวจเสร็จสิ้นไปแล้วเมื่อ 7 ต.ค.62 ทำให้การจัดทำจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินต้องจัดทำเป็นภายหลัง การบิน (Post-marking GCP) โดยใช้จุดเด่นชัดในภาพถ่ายและต้องเข้าถึงได้ในภูมิประเทศ (เป็นธรรมชาติ) รวมถึงการจัดทำจุดตรวจสอบเพื่อใช้สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ โดยจะเลือกตำแหน่งของจุดตรวจสอบเป็นบริเวณพื้นที่ที่มีพื้นผิวราบเรียบและสะท้อนแสงได้ดี เพื่อให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่เกิดจากเลเซอร์ตกกระทบบนพื้นผิวดังกล่าวมีการสะท้อนเพียงครั้งเดียว (Single return) ซึ่งจะทำให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์บริเวณพื้นที่ดังกล่าวมีความสูงที่ใกล้เคียงกัน

จากข้อกำหนดของจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายที่ใช้ในบล็อกภาพถ่ายทางอากาศที่ทราบค่าพารามิเตอร์การจัดภาพภายนอก ซึ่งจะต้องมีจุดควบคุมภาพถ่ายในทุกระยะ 30 เท่าของระยะห่างระหว่างจุดเปิดถ่าย (30b) ในบริเวณแนวบินแรกและแนวบินสุดท้าย และในพื้นที่ส่วนกลางระหว่างแนวบินควรมีจุดบังคับภาพถ่ายอยู่บริเวณหัวและท้ายแนวส่วนกลาง [7] โดยบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศในงานวิจัยนี้มีขนาด 4 x 2.5 ตารางกิโลเมตร และมีระยะห่างระหว่างจุดเปิดถ่ายที่ 150 เมตร จึงจำเป็นต้องมีจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศอย่างน้อย 12 จุด ผู้วิจัยจึงได้จัดทำจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินจำนวน 25 จุด และจุดตรวจสอบค่าทางดิ่ง จำนวน 20 จุด กระจายตัวอยู่ทั่วทั้งพื้นที่ศึกษา (รูปที่ 4) โดยใช้วิธีการรังวัดค่าพิกัดภาคพื้นดินแบบการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวร (Network-based Real-Time Kinematics : NRTK) ของกรมแผนที่ทหาร โดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบ 2 ความถี่ ยี่ห้อ Leica รุ่น GS10 เพื่อใช้เป็นสถานีจร (rover) ในการรังวัดแต่ละจุดจะรังวัดจำนวน 2 ครั้ง ครั้งละ 3 นาที (180 Epoch)



รูปที่ 4 จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน 25 จุด (สามเหลี่ยมสีแดง) และจุดตรวจสอบ 20 จุด (วงกลมสีเขียว) ในพื้นที่ศึกษา



(ก)

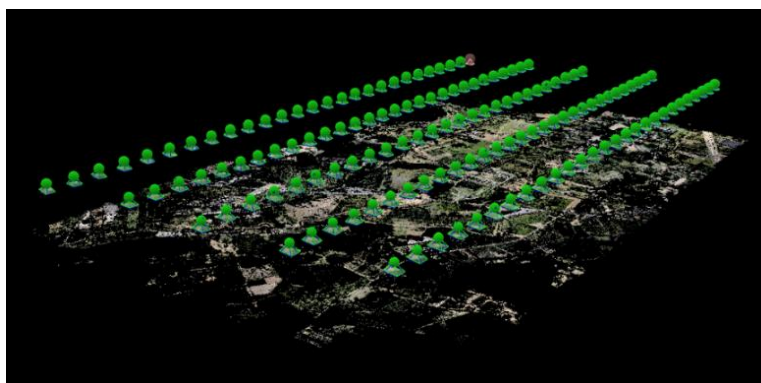


(ข)

รูปที่ 5 ตัวอย่างการสำรวจรังวัดค่าพิกัดภาคพื้นดินของ (ก) จุดบั้งกับภาพถ่ายภาคพื้นดิน (ข) จุดตรวจสอบค่าทางดิ่ง

4.2 การประมวลผลถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ

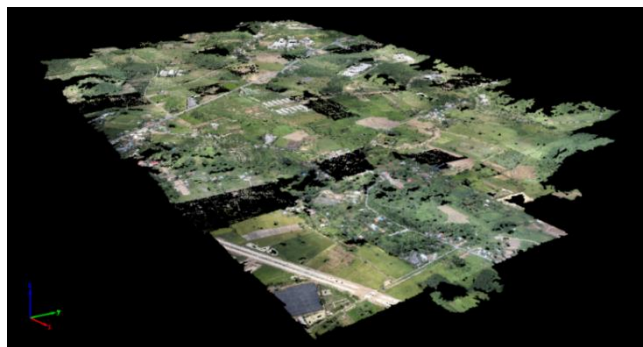
การประมวลผลถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศให้กับชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศจะประมวลผลด้วยโปรแกรม PIX4Dmapper ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถทำงานในด้านการสำรวจด้วยภาพถ่ายได้เป็นอย่างดี โดยจะประมวลผลถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศเพื่อปรับแก้บล็อกค่าแสง (Bundle Block Adjustment : BBA) ซึ่งเป็นการปรับแก้ค่าของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของบล็อกภาพถ่ายทางอากาศจำนวน 140 ภาพ ในส่วนของค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการจัดภาพภายนอก (EOP) จะได้จากข้อมูลวิถีการบินของอากาศยานไร้คนขับ ณ เวลาที่ทำการถ่ายภาพแต่ละภาพ ซึ่งจะทำให้ทราบค่าพิกัดของจุดเปิดถ่ายและค่าการเอียงตัวของกล้องขณะถ่ายภาพ โดยกำหนดให้มีค่าความถูกต้องทางตำแหน่งของค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายในทางราบที่ 0.05 เมตร และทางดิ่งที่ 0.10 เมตร และในการประมวลผลจะมีการกำหนดตำแหน่งจุดควบคุมในภาพถ่าย ซึ่งจะใช้ข้อมูลจุดบั้งกับภาพถ่ายภาคพื้นดินที่ได้ไปสำรวจมา โดยจะนำจุดบั้งกับภาพถ่ายภาคพื้นดินทั้งหมด 25 จุด มาใช้เป็นจุดควบคุมในการปรับแก้ และในการประมวลผลได้มีการกำหนดค่าความถูกต้อง (Accuracy) ที่ได้จากการรังวัดภาคสนามด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ในทางราบที่ 0.03 เมตร และทางดิ่งที่ 0.05 เมตร



รูปที่ 6 การประมวลผลถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศของชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ

4.3 การสร้างพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่น

การผลิตข้อมูลพอยต์คลาวด์จากกระบวนการสำรวจด้วยภาพถ่าย โดยใช้การสร้างพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่นด้วยการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม PIX4Dmapper โดยโปรแกรมจะทำการรังวัดมิติค่าพิกัดสามมิติด้วยภาพถ่ายทางอากาศหลายมุมมองที่มีส่วนที่ซ้อนหรือเกยกันของภาพถ่ายทางอากาศให้เกิดเป็นข้อมูลพอยต์คลาวด์ โดยค่าพิกัดสามมิติที่ได้นั้นจะมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นหากเกิดจากการตัดกันของรังสีของแสงมากกว่า 2 เส้นขึ้นไป [8] รังสีของแสงเหล่านี้จะมีความถูกต้องสอดคล้องตามการคำนวณปรับแก้สล็อตแสงในขั้นตอนก่อนหน้านี้ ที่ได้มีการประมวลผลร่วมกับจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินและจุดโยงยึดที่เกิดจากการจับคู่จุดภาพให้เป็นจุดสำคัญต่อการคำนวณปรับแก้



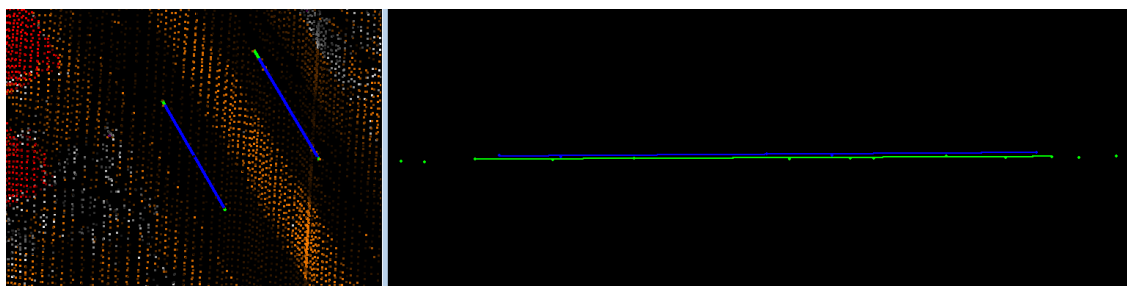
รูปที่ 7 การสร้างพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่นจากชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศด้วยกระบวนการสำรวจด้วยภาพถ่าย

4.4 การปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวนิน

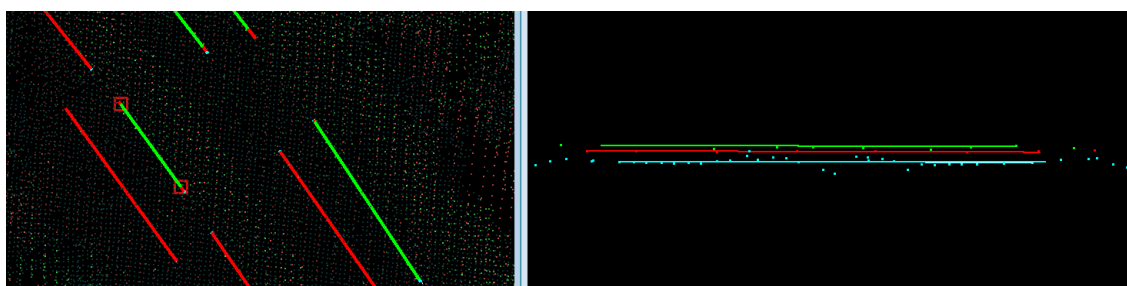
ในงานวิจัยจะมีการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวนินอยู่ 2 รูปแบบ ได้แก่ การปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวนินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ และการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวนินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ โดยในการปรับแก้จะใช้การประมวลผลด้วยโปรแกรม Terra Solid โดยจะเป็นการปรับแก้แบบใช้เส้นกำกับ (Tie line) ซึ่งจะต้องสร้างเส้นกำกับกับการปรับแก้จากข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่มีการซ้อนกันตั้งแต่ 2 แนวบินขึ้นไป ดังนั้นการสร้างเส้นกำกับจะถูกแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบตามรูปแบบการปรับแก้ของงานวิจัย

การสร้างเส้นกำกับด้วยผู้ใช้ (Manual) โปรแกรมจะให้ผู้เลือกจุดต้นและจุดปลายจากพอยต์คลาวด์เพื่อสร้างเส้นกำกับในมุมมองด้านบน (Top view) ก่อนเพื่อเป็นการกำหนดแนวเส้นในแกน X และ Y จากนั้นจะให้กำหนดจุดต้นและจุดปลายอีกครั้งด้วยมุมมองด้านข้าง (Side view) เพื่อเป็นการกำหนดแนวเส้นในแนวแกน Z แต่ในการกำหนดด้วยมุมมองด้านข้างโปรแกรมจะให้กำหนด 2 ครั้ง คือ ครั้งที่ 1 ด้วยข้อมูลพอยต์คลาวด์ในแนวนินแรก และครั้งที่ 2 ด้วยข้อมูลพอยต์คลาวด์ในแนวนินที่ต่อเนื่องกัน และมีการซ้อนทับกัน จะทำให้เกิดเป็นแนวเส้นกำกับที่มีความแตกต่างทางค่าความสูง โดยจะทำเช่นนี้ไปทั่วทั้งพื้นที่ศึกษา (รูปที่ 8)

เมื่อสร้างเส้นกำกับเสร็จสิ้นแล้ว จะเป็นการประมวลผลเพื่อคำนวณหาความผันผวนทางความสูงของเส้นกำกับ (Tie line fluctuation) ทั้งหมดที่ได้สร้างไว้ ซึ่งโปรแกรมจะทำการประมวลผลออกมาเป็นค่าแก้ (Corrections) เพื่อใช้สำหรับการปรับแก้ค่าความสูงของข้อมูลพอยต์คลาวด์ (รูปที่ 9)

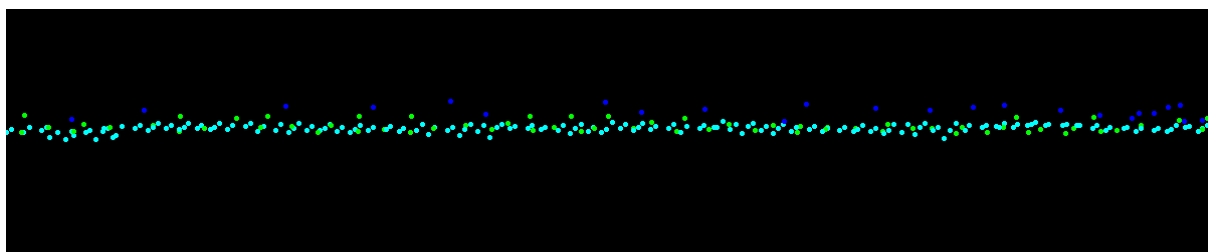


(ก)

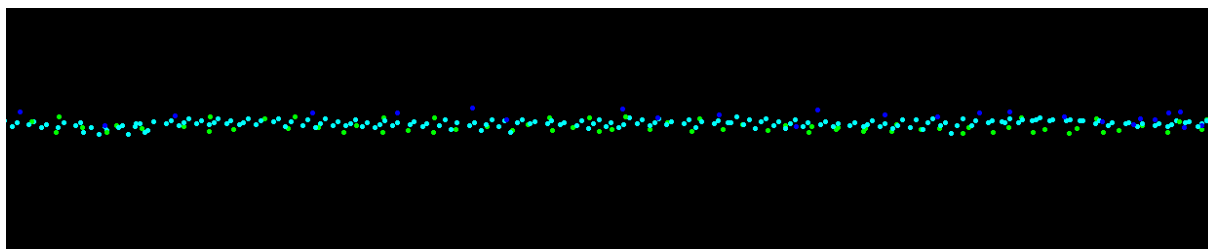


(ข)

รูปที่ 8 การสร้างเส้นกำกับกับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวนิน (ก) กรณีที่มีข้อมูลพอยต์คลาวด์จำนวน 2 แนวนิน จะพบว่าเส้นกำกับ 1 เส้น มีเส้นที่เกิดจากข้อมูลพอยต์คลาวด์จากแนวนินแรก และแนวนินที่ติดกัน
(ข) กรณีที่มีข้อมูลพอยต์คลาวด์จำนวน 3 แนวนิน จะพบว่าเส้นกำกับ 1 เส้น มีเส้นที่เกิดจากข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ 2 แนวนิน 2 เส้น และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM อีก 1 เส้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 9 ข้อมูลพอยต์คลาวด์ในมุมมองด้านข้าง (ก) ก่อนการปรับแก้เป็นแนวนิน (ข) หลังผ่านการปรับแก้เป็นแนวนิน

5. ผลการศึกษา

5.1 ผลขยายสามเหลี่ยมทางอากาศของบล็อกภาพถ่ายทางอากาศ

ผลการประมวลผลขยายสามเหลี่ยมทางอากาศของชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศด้วยโปรแกรม PIX4Dmapper โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินทั้งหมด 25 จุด มีรายละเอียดดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าสถิติของความคลาดเคลื่อนของแต่ละแกนพิกัด ได้แก่ Easting, Northing และ Height ของการใช้จุดบังคับทั้งหมดยกเว้นจำนวน 25 จุด ในการประมวลผลขยายสามเหลี่ยมทางอากาศ

GCP = 25 จุด	ค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละแกนพิกัด (ม.)		
	Easting	Northing	Height
ค่าเฉลี่ย	0.0017	-0.0008	0.0197
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0260	0.0405	0.0579
RMSE	0.0260	0.0405	0.0612

5.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์

การตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์จะใช้การตรวจสอบเทียบกับจุดตรวจสอบจำนวน 20 จุด โดยในงานวิจัยได้ดำเนินการตรวจสอบจำนวน 3 รูปแบบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) การตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนิน ได้ผลดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าสถิติของความคลาดเคลื่อนในทางดิ่ง (Z) ของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนิน เมื่อเทียบกับจุดตรวจสอบจำนวน 20 จุด

ค่าความสูงต่างโดยเฉลี่ย (Average dZ)	0.038 ม.
ค่าความสูงต่างที่ต่ำที่สุด (Minimum dZ)	-0.111 ม.
ค่าความสูงต่างที่สูงที่สุด (Maximum dZ)	0.139 ม.
ขนาดของค่าความสูงต่างโดยเฉลี่ย (Average magnitude)	0.073 ม.
ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางดิ่งกำลังสอง (RMSE _Z)	0.083 ม.
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)	0.076 ม.

เมื่อนำค่า RMSE_Z มาคูณเข้ากับแฟกเตอร์ 1.9600 เพื่อทำให้เป็นค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตามข้อกำหนดของ ASPRS จะได้เป็น 0.163 ม.

- 2) การตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ ได้ผลดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าสถิติของความคลาดเคลื่อนในทางตั้ง (Z) ของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SLM ประกอบการปรับแก้ เมื่อเทียบกับจุดตรวจสอบจำนวน 20 จุด

ค่าความสูงต่างโดยเฉลี่ย (Average dZ)	0.052 ม.
ค่าความสูงต่างที่ต่ำที่สุด (Minimum dZ)	-0.122 ม.
ค่าความสูงต่างที่สูงที่สุด (Maximum dZ)	0.165 ม.
ขนาดของค่าความสูงต่างโดยเฉลี่ย (Average magnitude)	0.079 ม.
ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางตั้งกำลังสอง (RMSE _Z)	0.092 ม.
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)	0.079 ม.

เมื่อนำค่า RMSE_Z มาคูณเข้ากับแฟกเตอร์ 1.9600 เพื่อทำให้เป็นค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตามข้อกำหนดของ ASPRS จะได้เป็น 0.180 ม.

- 3) การตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SLM ประกอบการปรับแก้ ได้ผลดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าสถิติของความคลาดเคลื่อนในทางตั้ง (Z) ของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SLM ประกอบการปรับแก้ เมื่อเทียบกับจุดตรวจสอบจำนวน 20 จุด

ค่าความสูงต่างโดยเฉลี่ย (Average dZ)	-0.022 ม.
ค่าความสูงต่างที่ต่ำที่สุด (Minimum dZ)	-0.125 ม.
ค่าความสูงต่างที่สูงที่สุด (Maximum dZ)	0.111 ม.
ขนาดของค่าความสูงต่างโดยเฉลี่ย (Average magnitude)	0.066 ม.
ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางตั้งกำลังสอง (RMSE _Z)	0.074 ม.
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)	0.073 ม.

เมื่อนำค่า RMSE_Z มาคูณเข้ากับแฟกเตอร์ 1.9600 เพื่อทำให้เป็นค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตามข้อกำหนดของ ASPRS จะได้เป็น 0.145 ม.

6. สรุปผลการวิจัย

การที่จะทำให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสำรวจด้วยไลดาร์ทางอากาศมีความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งมากยิ่งขึ้นนั้นสามารถทำได้โดยใช้การปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวนินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SLM มาประกอบการปรับแก้ โดยข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SLM นั้นจะต้องผ่านการดำเนินการตามกระบวนการสำรวจด้วยภาพถ่าย โดยมีการปรับแก้ค่าสามเหลี่ยมทางอากาศร่วมกับจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินแบบเข้าภายหลังการบินจำนวน 25 จุด เพื่อให้มีความถูกต้องทางตำแหน่งที่ดียิ่งขึ้น โดยผลของค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) ที่แสดงถึงความถูกต้องทางตำแหน่งของจุดควบคุมในภาพถ่ายหลังการประมวลผลภาพถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศมีค่าทางแกน X ที่ 2.6 ซม. ค่าทางแกน Y ที่ 4.1 ซม. และค่าทางแกน Z ที่ 6.1 ซม. จากนั้นจะทำการสร้างข้อมูลพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่นด้วยการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศหลายมุมมอง

ด้วยเทคนิคการสำรวจโครงสร้างจากการเคลื่อนไหว (SfM) และนำไปใช้สำหรับการสร้างเส้นกำกับกับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ เมื่อสร้างเส้นกำกับเสร็จสิ้นจะทำการประมวลผลหาความผันผวนทางความสูงของเส้นกำกับเพื่อให้ได้ค่าแก้ไขสำหรับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ โดยมีการปรับแก้ 2 รูปแบบ ได้แก่ การปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวนินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จาก SfM ประกอบการปรับแก้ และการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวนินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จาก SfM ประกอบการปรับแก้ หลังจากดำเนินการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เสร็จสิ้นแล้ว ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางคิงให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ใน 3 รูปแบบ โดยการนำไปตรวจสอบกับจุดตรวจสอบจำนวน 20 จุด พบว่า ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้มีค่า $RMSE_z$ อยู่ที่ 8.3 ซม. (ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ASPRS เท่ากับ 16.3 ซม.) ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ มีค่า $RMSE_z$ อยู่ที่ 9.2 ซม. (ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ASPRS เท่ากับ 18.0 ซม.) และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ มีค่า $RMSE_z$ อยู่ที่ 7.4 ซม. (ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ASPRS เท่ากับ 14.5 ซม.) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการประมวลผลผสมผสานร่วมกันระหว่างข้อมูลไลดาร์และบล็อทของภาพถ่ายทางอากาศสามารถช่วยให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์มีความถูกต้องทางตำแหน่งในทางคิงมากยิ่งขึ้น

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล สันติธรรมนนท์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ทั้งในด้านทฤษฎีและการปฏิบัติของการประมวลผลข้อมูลพอยต์คลาวด์ ตลอดจนการประมวลผลบล็อกภาพถ่ายทางอากาศ อีกทั้งให้คำแนะนำสำหรับการแก้ไขปัญหาดังกล่าว และผู้เขียนขอขอบพระคุณกรมแผนที่ทหาร ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการนำข้อมูลมาใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ตลอดจนการใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ และซอฟต์แวร์สำหรับการประมวลผล

เอกสารอ้างอิง

- [1] Srirattanapaisarn, T. RTSD Unmanned Aerial Laser Scanner. *Royal Thai Survey Department Journal*, 2020. pp. 12-28.
- [2] Xiong, B., S. Oude Elberink. and G. Vosselman. Building Model From Noisy Photogrammetric Point Clouds. *ISPRS Technical Commission III Symposium*, 2014, Volume II-3.
- [3] Do, P.N.B. et al. A Review of Stereo-Photogrammetry Method for 3-D reconstruction in Computer Vision. *19th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, 2019.
- [4] Strecha, C. *The rayCloud—a vision beyond the point cloud*. 2014.
- [5] Glira, P. *Hybrid Orientation of LiDAR Point Clouds and Aerial Images*, in Department of Geodesy and Geoinformation. TU Wien: Austria, 2018.
- [6] Pfeifer, N. *Airborne Laser Scanning Strip Adjustment and Automation of Tie Surface Measurement*, 2005.
- [7] Santitamont, P. *Digital photogrammetry*. Bangkok, 2021.

- [8] Ye, N. *et al.* Accurate and dense point cloud generation for industrial Measurement via target-free photogrammetry. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, Volume 140.