การตรึงข้อมูลพอยต์คลาวด์จากอากาศยานไร้คนขับด้วยข้อมูลพอยต์คลาวด์จากเครื่องเลเซอร์สแกน เพื่องานรังวัดปริมาตรการขุด-ขนดินและถ่านหินบริเวณเหมืองถ่านหินเปิดแม่เมาะ

Referencing of UAV point cloud with TLS point cloud for excavation surveying in Mae Moh Open-pit Coal Mine

นายธนนันท์ แสนคำลือ[1] นายธเนศพล บุญประกอบ[2,*] นายบุญฤทธิ์ เขียวอร่าม[3] และ นายอัษฎาวุธ ตอนจักร์[4]

[1,2,3,4] *การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เหมืองแม่เมาะ จ.ลำปาง*

**Corresponding author; E-mail address: thanatepol.boo@egat.co.th*

บทคัดย่อ

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) เหมืองแม่เมาะ ได้ใช้เครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน (terrestrial laser scanner : TLS) ในการรังวัดหาปริมาตรการขุด-ขน ดินและถ่านหิน ซึ่งบ่อเหมืองแม่เมาะมีลักษณะภูมิประเทศที่ซับซ้อนและมีขนาดใหญ่ มีพื้นที่การขุด-ขน ที่ต้องรังวัดปริมาตร ประมาณเดือนละ 2 ล้านตารางเมตร ทำให้ในการรังวัดบางพื้นที่ต้องตั้งเครื่องเลเซอร์สแกนฯ หลายครั้ง และใช้เวลารังวัดนาน ต้องหยุดเครื่องจักรในระหว่างการรังวัดเป็นเวลานาน ส่งผลให้โอกาสในการขุดดินและถ่านหินลดลง ดังนั้น การเสริมด้วยข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับ (unmanned aerial vehicle : UAV) จึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ แต่การที่จะทำให้ข้อมูลที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับมีความถูกต้อง จำเป็นต้องมีการวางจุดควบคุมภาคพื้นดิน (ground control point : GCP) ให้ครอบคลุมหน้างานรังวัด อย่างไรก็ตามการติดตั้งและกระบวนการวาง GCP ในบ่อเหมืองแม่เมาะที่มีลักษณะภูมิประเทศที่ซับซ้อนและมีขนาดใหญ่นั้นใช้เวลานาน ทำให้กระบวนการรังวัดปริมาตรยุ่งยากขึ้น และระยะเวลาการทำงานมิได้ลดลงอย่างน่าพอใจ ไม่เหมาะในการปฏิบัติจริง จึงเป็นที่มาของการนำเอาข้อมูลพอยต์คลาวด์จากเครื่องเลเซอร์สแกนฯ มาใช้ตรึงข้อมูลแทนการวาง GCP โดยพบว่าพื้นผิวที่ได้จาก UAV ที่ได้จากการตรึงด้วยพอยท์คลาวด์จากเครื่องเลเซอร์สแกนฯ มีความต่างทางค่าระดับกับพื้นผิวที่ได้จากการสแกนด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนฯเพียงอย่างเดียว เฉลี่ย 0.023 ม. โดยมีค่าการกระจายตัว 0.013 ม. ซึ่งอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนที่เหมืองแม่เมาะยอมรับให้ใช้งานได้ ช่วยให้การรังวัดปริมาตรขุดขนดินและถ่านหินรวดเร็วและข้อมูลมีความสมบูรณ์ขึ้นอย่างมาก

คำสำคัญ: เครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน, อากาศยานไร้คนขับ, การรังวัดหาปริมาตรการขุดขนดินและถ่านหิน, เหมืองแม่เมาะ

Abstract

Electricity Generating Authority of Thailand (EGAT) Mae Moh mine uses the terrestrial laser scanner (TLS) for excavation volume determination. About 2 million sqm of complex and large terrain are scanned each month. The TLS needs a lot of scanning position for quality data and takes so much operation times, which enforces the excavation to stop for longer time and lower the production rate. Enrichment the data with the unmanned aerial vehicle (UAV) is an interesting solution, but the accuracy of the UAV is terrible, which can be resolved with fair amount of ground control point (GCP) covering the target area. However, the GCP preparing in Mae Moh mine is a time-consuming work, that cause the surveying process to be more complicate and doesn't significantly reduce the working time. Because of these, using UAV with GCP is impractical for us. Hence, we tried to reference UAV point cloud with TLS point cloud as control point. The results revealed the height difference between UAV and TLS surface, which provide the average difference of 0.023 m. and the standard deviation of 0.013 m. This amount of difference is in acceptable range, in this way, the determination of excavation volume can be rapidly done and can achieve the best result.

Keywords: Terrestrial laser scanner, Unmanned aerial vehicle, Excavation volume determination, Mae Moh mine

1. คำนำ

กฟผ.เหมืองแม่เมาะ ได้นำเอาเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน (terrestrial laser scanner : TLS) มาใช้ในงานรังวัดปริมาตรการขุด-ขนดินและถ่านหินเป็นระยะเวลากว่า 2 ปี ทำให้พบปัญหาในการรังวัดหน้างานขุดที่มีความซับซ้อน เช่น หน้างานที่มีระดับความสูงหลายระดับ และมีรถขุดหลายคันทำงานร่วมกันทำให้เกิดซอกหลืบจำนวนมาก อยู่นอกเหนือขอบเขตแนวเล็งของ TLS การรังวัดหน้างานลักษณะนี้ต้องทำการติดตั้ง TLS บนหน้างานหลายตำแหน่ง และย้ายตำแหน่งการสแกนไปเรื่อย ๆ

จนกว่าจะสามารถสแกนได้ข้อมูลหน้างานมาจนครบถ้วน ทำให้ใช้ระยะเวลาในการรังวัดและส่งมอบข้อมูลค่อนข้างมาก และทำให้ผู้รับเหมามีอัตราการผลิตลดลงเนื่องจากต้องหยุดเครื่องจักรในระหว่างที่มีการเข้าทำการรังวัด นอกจากนั้นยังทำให้อุปกรณ์ถูกใช้งานอย่างหนักจนต้องส่งไปบำรุงรักษาก่อนเวลาอันควร กฟผ. ได้เล็งเห็นศักยภาพของอากาศยานไร้คนขับ (unmanned aerial vehicle : UAV) ที่สามารถเก็บข้อมูลภูมิประเทศครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่ ปราศจากสิ่งกีดขวางด้วยการเก็บข้อมูลจากทางอากาศ จึงมีแนวคิดนำ UAV มาใช้ร่วมกับ TLS ในการรังวัดหา ปริมาตรการขุด-ขน ดินและถ่านหิน ให้เป็นไปอย่างรวดเร็ว จากการศึกษางานวิจัยของ Seung Woo Son ซึ่งได้ทำการตั้งกล้อง TLS กว่า 20 ครั้งในการสแกนรังวัดปริมาตรกองวัสดุ และมีการวาง จุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Points: GCP) กว่า 14 จุด แล้วทำการเปรียบเทียบปริมาตรระหว่างข้อมูลจาก TLS และ UAV และ TLS ร่วมกับ UAV พบว่าการนำข้อมูลมารวมกันทำให้ได้ปริมาตรที่ใกล้เคียงกับการรังวัดปกติด้วย TLS อีกทั้งมีความละเอียดของการรังวัดมากกว่า หากแต่ต้องใช้เวลาในการรังวัดมากกว่าเดิม [1] ในขณะที่งานวิจัยของ Huseyin Yurtseven ได้ทำการเปรียบเทียบอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการรังวัดภูมิประเทศลักษณะเป็นพื้นที่ราบเรียบ โดยมีการใช้ข้อมูลจาก TLS เป็นข้อมูลอ้างอิงแล้วเปรียบเทียบกับข้อมูลจาก UAV ที่ตรึงด้วย GCP 14 จุด โดยนำพื้นผิวจากข้อมูลทั้งสองมาคำนวณเป็นปริมาตรแล้วหารด้วยพื้นที่พบว่ามีความแตกต่างทางระดับ 0.06 เมตร ที่เพดานบิน 350 เมตร [2]

ที่ผ่านมา กฟผ. เหมืองแม่เมาะได้มีการทดสอบประสิทธิภาพของอากาศยานไร้คนขับเปรียบเทียบกับเครื่องเลเซอร์สแกนฯ โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่ถูกตรึงด้วย GCP นำมาแปลงเป็น พอยต์คลาวด์ (point cloud) แล้วทำการสร้างพื้นผิวจากข้อมูล UAV จากนั้นนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างกับพื้นผิวที่สร้างจาก point cloud ของ TLS ออกมาในรูปของปริมาตร โดยข้อมูลจาก TLS ถือว่ามีความถูกต้องสูง เนื่องจากค่าพิกัดของข้อมูลสแกนทั้งหมดยึดโยงกับการรังวัดจุดตั้งกล้องด้วย GNSS ใช้เป็นค่าอ้างอิงในการเปรียบเทียบ พบว่าปริมาตรที่ได้มีความใกล้เคียงกัน [3] อย่างไรก็ตามเมื่อหาความแตกต่างทางระดับ โดยการนำปริมาตรหารด้วยพื้นที่ ค่าที่ได้นั้นยังไม่ผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับการรังวัดปริมาตรในเหมืองแม่เมาะ [4] ผลการศึกษาวิจัยในครั้งนั้นชี้ให้เห็นว่าพื้นผิวจากข้อมูล UAV สามารถปรับปรุงค่าระดับให้ใกล้เคียงกับพื้นผิวจากข้อมูล TLS ได้ ด้วยการเพิ่มจำนวน GCP ให้กระจายตัวครอบคลุมหน้างานและเลือกตำแหน่ง GCP ให้ครอบคลุมความแตกต่างทางระดับความสูงของภูมิประเทศ อย่างไรก็ตามเนื่องจากลักษณะภูมิประเทศภายในบ่อเหมืองแม่เมาะมีความซับซ้อน มีกฎระเบียบข้อห้ามที่รัดกุม ทำให้การเดินทางในบ่อเหมืองเพื่อติดตั้ง GCP เป็นเรื่องยุ่งยาก และใช้เวลาในการปฏิบัติงานมาก และที่สำคัญจำนวน GCP ที่มากพอจะทำให้ความแตกต่างของปริมาตรนั้นผ่านเกณฑ์ที่ยอมรับได้มีจำนวนไม่แน่นอนแล้วแต่ความหลากหลายของความสูงต่ำภูมิประเทศแปลงขุดขนนั้น ๆ [5] การนำ UAV มาใช้รังวัดร่วมกับ TLS โดยใช้แนวทางดังกล่าว จึงเป็นการเพิ่มภาระในการทำงานไม่เหมาะในการปฏิบัติงานจริง กฟผ. เหมืองแม่เมาะ จึงมองหาความเป็นไปได้ในการที่จะไม่พึ่งพา GCP โดยพบว่าโปรแกรมในการประมวลผลข้อมูล TLS ที่ใช้งานอยู่ปัจจุบันมีฟังก์ชันในการตรึงข้อมูล point cloud ในรูปแบบของ cloud-matching ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ point cloud จาก TLS มาเป็นตัวยึดโยงข้อมูล point cloud ของ UAV ให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น อันส่งผลให้พื้นผิวของ UAV มีความใกล้เคียงกับพื้นผิว TLS จนสามารถนำข้อมูลการรังวัดจากอุปกรณ์ทั้งสองมาใช้ร่วมกันในงานรังวัดปริมาตรการขุด-ขนดินและถ่านหินในบ่อเหมืองแม่เมาะได้

2. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย

2.1 เครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดิน (terrestrial laser scanner : TLS)

หลักการทำงานของ TLS นั้น ตัวเครื่องจะปล่อยแสงเลเซอร์ออกไปเมื่อเลเซอร์กระทบพื้นผิววัตถุก็จะสะท้อนกลับมายังภาครับ จากนั้นระบบภายในตัวเครื่องจะคำนวณระยะทางแต่ละจุดเลเซอร์ สุดท้ายก็จะคำนวณออกมาเป็นค่าพิกัดจุดบนพื้นผิว วิธีการได้มาซึ่งระยะทางของ TLS มีอยู่ 2 รูปแบบ คือ phase-shift และ TOF (time-of-flight) แบบแรกให้ความละเอียดที่มากกว่า ความเร็วในการสแกนมากกว่า แต่มีระยะในการสแกนที่สั้น (ประมาณ 300 กว่าเมตร [6]) ในขณะที่แบบหลังมีระยะในการสแกนไกลกว่ามาก [7] (ถึง 6 กิโลเมตร [6]) ซึ่งเป็นรูปแบบที่นิยมใช้ในการรังวัดพื้นผิวภูมิประเทศ [8] และใช้ในเหมืองแม่เมาะ

phase-shift มีหลักการในการเปรียบเทียบคลื่นเลเซอร์ที่ปล่อยและสะท้อนกลับมา เพื่อให้ได้ความต่างเฟส ( ) หรือเศษของลูกคลื่น ดังนั้นความถูกต้องของการวัดระยะจึงขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น ความยาวคลื่นยิ่งสั้นก็ยิ่งวัดได้ละเอียดโดยสามารถคำนวณระยะทาง ( ) ได้ดังสมการ (1) [9]

$$r \quad —\cdot— \tag{1}$$

โดยที่ R คือ ความถี่ของคลื่น และ c คือ ความเร็วแสงที่ 299,792,458 m/s อย่างไรก็ตามแม้วัตถุจะมีระยะต่างกัน ค่าความต่างเฟส (มีค่าระหว่าง 0-2) อาจเท่ากันได้ เมื่อเป็นเช่นนั้นระยะที่คำนวณได้ก็จะเท่ากัน ทำให้คำนวณผิดพลาด ดังนั้นระยะของวัตถุที่มากกว่า

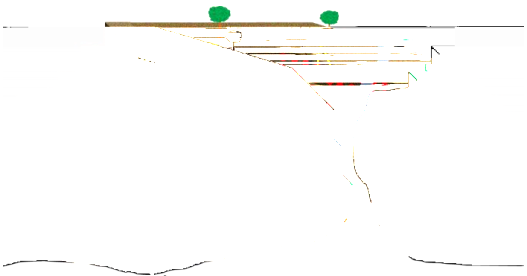
$$R \quad \frac{c}{f} \tag{2}$$

จะเรียกว่า unambiguous range การหาระยะทางที่มากกว่า R ต้องอาศัยจำนวนเต็มลูกคลื่น ( ) เพื่อนำมาบวกกับเศษลูกคลื่น

$$r \quad — \quad n \cdot— \tag{3}$$

แต่การหาจำนวนลูกคลื่นทั้งหมดจากเครื่องไปยังจุดสะท้อนทำได้ยาก การหาระยะทางจึงเป็นข้อจำกัดของรังวัดด้วยวิธีการนี้ ซึ่งก็สามารถแก้ไขได้ จากสมการ (2) จะพบว่าการลดความถี่คลื่น ระยะ R จะเพิ่มขึ้น ดังนั้นเครื่อง TLS ที่ใช้การวัดแบบ phase-shift จึงมีการวัดแบบหลายความถี่ (multi-frequency-ranging : MF) โดยความถี่สูงทำให้วัดระยะได้ความละเอียดถูกต้องสูง และความถี่ต่ำทำให้วัดระยะได้ไกลขึ้น จึงสามารถเลี่ยงการหา

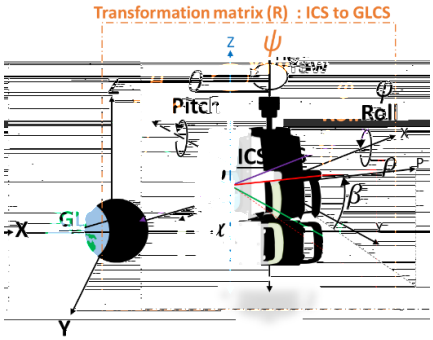
ได้ [10] การคำนวณระยะจะมีการถ่วงน้ำหนักโดยให้ความถี่สูงมีน้ำหนักมากกว่า



รูปที่ 1 การสแกนด้วยเทคนิค TOF

TOF คือการอาศัยเทคนิค LiDAR (Light Detection And Ranging) หาระยะเวลาที่คลื่นเลเซอร์เดินทางไปจนถึงวัตถุและสะท้อนกลับมา ( ) แล้วจึงคำนวณเป็นระยะทาง ( ) [11]

$$d \quad \frac{c}{} \qquad (4)$$



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ของระบบพิกัด ICS ของ TLS และ GLCS

ระยะทาง ( ) มุมราบ ( ) และมุมดิ่ง ( ) ถูกคำนวณจนได้เป็นจุดบนระบบพิกัดตัวเครื่อง (Intrinsic coordinate system : ICS)

$$\begin{matrix} x \\ y \\ z \end{matrix} \quad \begin{matrix} \rho \cos\beta \cos\alpha \\ \rho \cos\beta \sin\alpha \\ \rho \sin\beta \end{matrix} \qquad (5)$$

การยึดโยงค่าพิกัด (georeferencing) ให้มาอยู่ในระบบพิกัดโลก (Global coordinate system : GLCS) มีอยู่ 2 รูปแบบ คือ

1.ทางอ้อม (indirect) อาศัยการสแกนให้ติดจุดควบคุม (target) ที่ทราบค่าพิกัด GLCS ซึ่งอาจได้จากการรังวัดด้วย GNSS อย่างน้อยสามจุด ค่าพิกัดจุดควบคุมทั้งหมดบนระบบพิกัดทั้งสองจะถูกคำนวณเป็น 6 พารามิเตอร์ในการหมุนและเลื่อน และผ่านการทำ least square จนได้เป็นเมทริกซ์ R

2.ทางตรง (direct) อาศัยการทราบพิกัด GLCS ของจุดตั้งกล้อง เพื่อลด unknown ให้เหลือแค่ 3 พารามิเตอร์หมุน สำหรับสร้างเมทริกซ์ R โดยถ้ากล้องตั้งได้ระดับจะทำให้ค่า roll และ pitch เป็น 0 หรืออาจคำนวณได้จากเซนเซอร์ภายในเครื่อง ส่วนค่า yaw จะได้จากมุม azimuth ที่ได้จากการส่องเป้าหลัง (backsight) ซึ่งเป็นวิธีที่รวดเร็ว ถูกต้อง และแม่นยำกว่าแบบทางอ้อม [12] หลังจากนั้นจึงนำจุดทั้งหมด เรียกว่า point cloud จะถูกกรอง noise ออกไปและผ่านกระบวนการ triangulation สร้างเป็นพื้นผิว 3 มิติ (3D textured mesh)

$$\begin{matrix} x \\ y \\ z \end{matrix} \quad \begin{matrix} x \\ y \\ z \end{matrix} \quad R \quad \begin{matrix} x \\ y \\ z \end{matrix} \qquad (6)$$

2.2 อากาศยานไร้คนขับ (unmanned aerial vehicle : UAV)

ภาพถ่ายที่ได้จาก UAV มีความเกี่ยวโยงกันระหว่างตัวกล้อง ภาพ และพื้นโลก ถูกนำมาผ่านกระบวนการจัดการภาพถ่าย ได้แก่

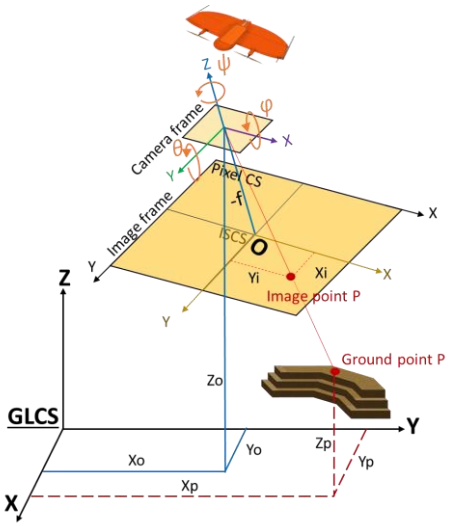
1.การจัดภาพภายใน (interior orientation) เป็นการกำหนดพิกัดทางราบของวัตถุให้อยู่ในระบบพิกัดภาพถ่าย (Image Space Coordinate System : ISCS) โดยอ้างอิงจากพิกัดจุดศูนย์กลางภาพ (principal point) และค่าพิกัดดิ่งจากโฟกัสของเลนส์กล้อง (focal length : f) นอกจากนั้นยังเป็นการปรับแก้การบิดเบือนทางแสง (lens distortion) อีกด้วย

2.การจัดภาพภายนอก (exterior orientation) เป็นการโยงยึดค่าพิกัดบน ISCS ให้มาอยู่บน GLCS ในการถ่ายภาพของ UAV จะมีการรังวัดค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายกล้อง (exposure station) ด้วยโมดูล GNSS ที่ติดอยู่บน UAV [13-14] ส่วน 3 พารามิเตอร์หมุนของกล้อง อาจได้มาจากไจโรสโคป หรือใช้พิกัดจาก GNSS ในการคำนวณหา heading angle หรืออาศัยการคำนวณจากภาพถ่ายที่ต่อเนื่องกัน [15]

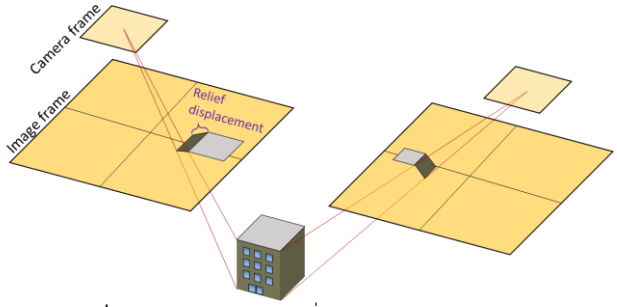
ภาพที่ได้จะถูกนำมาคำนวณหาจุดร่วม (tie point) การถ่ายภาพให้ซ้อนทับทั้งในแนวบิน (overlap) และระหว่างแนวบิน (sidelap) ยิ่งซ้อนมากก็ยิ่งมีจุดร่วมมากขึ้น วัตถุที่ถูกถ่ายจากหลายมุม จะเกิดสิ่งที่เรียกว่า parallax เป็นความแตกต่างของตำแหน่งของวัตถุในภาพที่ต่างกันทำให้สามารถคำนวณความสูงวัตถุได้ด้วยหลักการ structure from motion (SFM) จุดร่วมในหลายภาพจะถูกนำมาสร้างเป็นจุด 3 มิติ โดยอัตโนมัติ [16]

การปรับปรุงค่าพิกัดให้มีความละเอียดถูกต้องมากยิ่งขึ้นสามารถทำได้โดยการมี GCP ซึ่งอาจใช้ GNSS รังวัดให้ได้ค่าพิกัดสามมิติในระบบ GLCS โดย GCP ควรมีจำนวนและรูปแบบการกระจายตัวที่ดี ครอบคลุมพื้นที่เป้าหมายทั้งทางราบและในเชิงความสูงต่ำของภูมิประเทศ [17] GCP ที่ปรากฏในหลายภาพจะถูกนำมาหาจุดร่วมโดยผู้ทำการประมวลผลจากนั้นจึงถูกสร้างเป็นจุด 3 มิติ ชุดใหม่อีกทีหนึ่ง

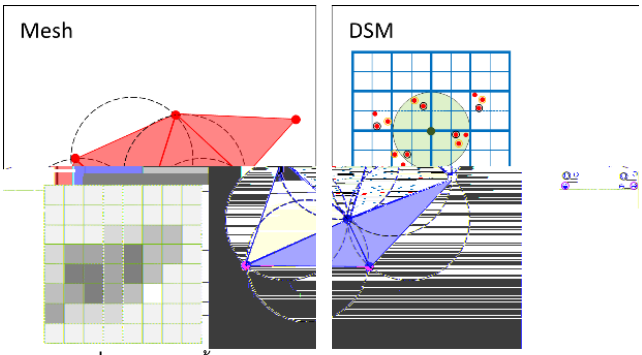
กลุ่มของจุด 3 มิติ เรียกว่า point cloud ยังมีการกระจายตัวที่ไม่เท่ากัน ทำให้การสร้างโมเดล 3 มิติ สูญเสียรายละเอียดและความถูกต้องของลักษณะภูมิประเทศได้ [18] ดังนั้นจะต้องนำจุด 3 มิติ มาผ่านกระบวนการ point densification ซึ่งทำให้จุดมีปริมาณมากขึ้นและกระจายอย่างทั่วถึง หลังจากนั้นจึงสามารถนำไปสร้างเป็น 3D textured mesh และสามารถ sampling จุดลงบนตารางกริดเพื่อสร้างโมเดลพื้นผิว (Digital Surface Model: DSM) [19] ซึ่งเป็นข้อมูลแบบราสเตอร์ (raster) ที่มีค่าระดับเป็นข้อมูล attribute



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ของระบบพิกัดภาพ และ GLCS

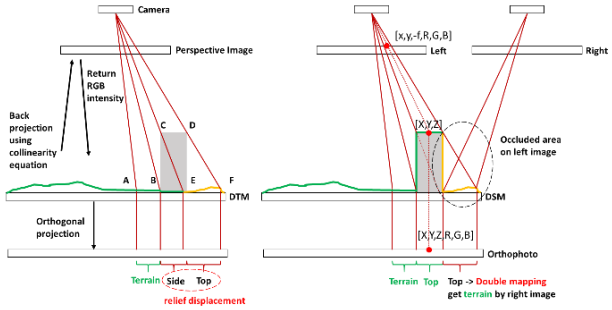


รูปที่ 4 เหตุการณ์ parallax เมื่อถ่ายภาพหลายตำแหน่ง



รูปที่ 5 การสร้างพื้นผิว 3 มิติ และแบบจำลองความสูงภูมิประเทศ

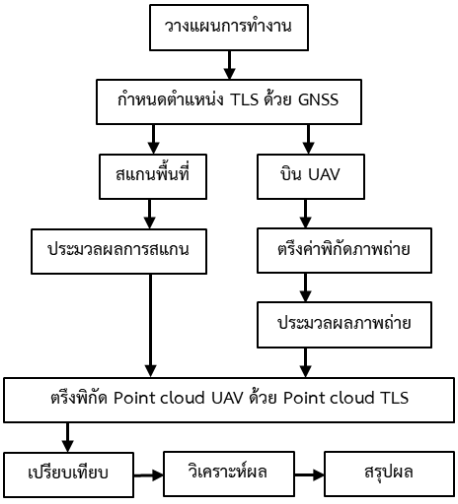
ภาพถ่ายจาก UAV มีลักษณะเป็น perspective image จะมีระยะราบของวัตถุดิ่ง (relief displacement) เป็นความคลาดเคลื่อนออกจากจุดศูนย์กลางภาพ จะมีผลมากขึ้นเมื่อใกล้ขอบภาพ การนำภาพถ่ายทางอากาศไปทำแผนที่จำเป็นต้องขจัดความคลาดเคลื่อนนี้ โดยอาศัย DSM และพารามิเตอร์จากการจัดการภายในและภายนอก เพื่อทำการฉายจุดพิกัดบน DSM ย้อนกลับ (back projection) ไปยังตำแหน่งบนภาพถ่าย ผ่านสมการ collinear ค่าความเข้มสี (intensity) ทั้ง R G และ B ที่พิกัดภาพนั้นจะถูก interpolate ด้วยเทคนิคการ sampling และถูกเก็บไว้ที่จุดพิกัดบน DSM สุดท้ายจึงทำการฉายจุดพิกัดในแนวฉาก (orthogonal projection) [20] ผลที่ได้คือ ภาพถ่ายที่ปรับแก้ทางเรขาคณิตแล้วเรียกว่า orthophoto



รูปที่ 6 กระบวนการแปลง DSM เป็น Orthophoto

สาเหตุที่ใช้ DSM แทนโมเดลภูมิประเทศ (Digital Terrain Model: DTM) เนื่องจาก DTM ไม่สามารถขจัด relief displacement ได้ แสดงดังรูปที่ 6 เมื่อจุดบนพื้น DTM ฉายกลับไปบนภาพถ่ายแล้วไปตรงกับวัตถุ พอฉายลงไปยัง orthophoto ก็จะทำให้ยังมี relief displacement อยู่ อย่างไรก็ตาม การใช้ DSM ก็ยังประสบปัญหาการฉายซ้ำ (double mapping หรือ ghost image effect) เกิดขึ้นเมื่อจุดบน DSM ฉายกลับมายังภาพถ่ายแล้วไม่มีข้อมูล (occlusions) เนื่องจากถูกวัตถุบดบังบริเวณดังกล่าว ทำให้ค่าความเข้มสีของวัตถุถูกนำไปฉายลงบน orthophoto แทน ซึ่งจะทำให้เห็นวัตถุซ้อนทับกัน [21] ปัญหาดังกล่าวทำได้โดยการใช้ algorithm เช่น Z-buffer เข้ามาช่วยตรวจจับส่วนที่ไม่มีข้อมูล [22] แต่จะทำให้เกิดเป็นช่องโหว่บน orthophoto ซึ่งจะถูกเติมเต็มด้วยภาพถ่ายอื่น ๆ ที่อยู่ข้างเคียง เมื่อนำ orthophoto หลายๆ ภาพนำมารวมกันก็จะกลายเป็นภาพขนาดใหญ่เรียกว่า orthomosaic

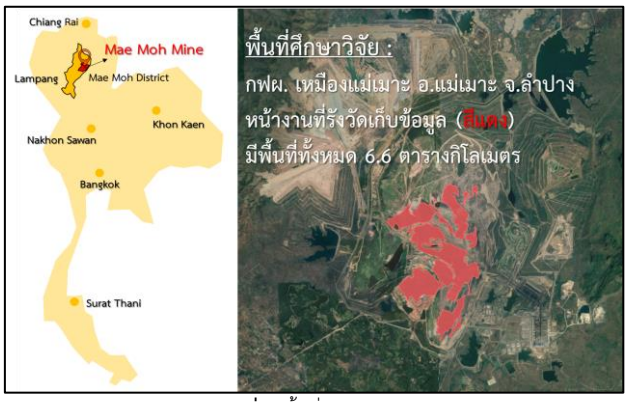
3. วิธีการวิจัย



รูปที่ 7 ผังงานขั้นตอนการวิจัย

การใช้ TLS ในการรังวัดปริมาตรเพื่อจ่ายค่าดำเนินการขุด-ขนดินและถ่านหินในแต่ละเดือน ได้รับการยอมรับจากบริษัทผู้รับจ้าง ตลอดจนหน่วยงานที่นำข้อมูลไปใช้งานต่อ อีกทั้งยังมีงานวิจัย ที่บ่งชี้ถึงประสิทธิภาพ

ในการทำงาน สำหรับเหมืองแม่เมาะ [23] ข้อมูลจาก TLS นับเป็นที่ยึดถือสำหรับการเปรียบเทียบอุปกรณ์หรือวิธีการรังวัดใด ๆ ในการคำนวณปริมาตรงานขุด-ขน ดินและถ่านหิน สำหรับงานวิจัยนี้ ได้ใช้ข้อมูลจากรังวัดด้วย TLS และ UAV ในแต่ละเดือนบริเวณบ่อเหมืองแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยนำข้อมูลจากทั้งสองวิธีการมาประมวลผลร่วมกันในการสร้างพื้นผิวและทำการคำนวณปริมาตรเปรียบเทียบกับการใช้เพียงข้อมูลจาก TLS อย่างเดียว



รูปที่ 8 พื้นที่ศึกษาวิจัย

3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

สำหรับการเก็บข้อมูลภูมิประเทศภาคพื้นดิน งานวิจัยนี้เลือกใช้ Maptek I-site XR3 จากประเทศออสเตรเลีย สแกนด้วยเทคนิค TOF ที่สามารถสแกนได้ระยะทางไกลสูงสุดถึง 2,400 เมตร [24] โดยมีอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียม GNSS Trimble R10 สำหรับกำหนดตำแหน่งตั้ง TLS และเป้าหลังด้วยวิธี RTK ที่มีความถูกต้องทางราบ ±8 mm + 1 ppm และความถูกต้องทางดิ่ง ±15 mm + 1 ppm [25]

สำหรับการเก็บข้อมูลภูมิประเทศทางอากาศ เลือกใช้ WingtraOne Gen I เป็น UAV ชนิดปีกตรึง จากประเทศสวิสเซอร์แลนด์ ระยะเวลาการบินสูงสุด 55 นาที ที่ความเร็ว 35.8 กิโลเมตรต่อชั่วโมง พร้อมกล้องถ่ายภาพ Sony RX1RII ความละเอียด 42 Megapixels ความยาวโฟกัส 35 mm [26]



รูปที่ 9 Maptek I-site XR3 (ซ้าย) และ WingtraOne Gen I (ขวา)

3.2 การรังวัดภาคสนาม

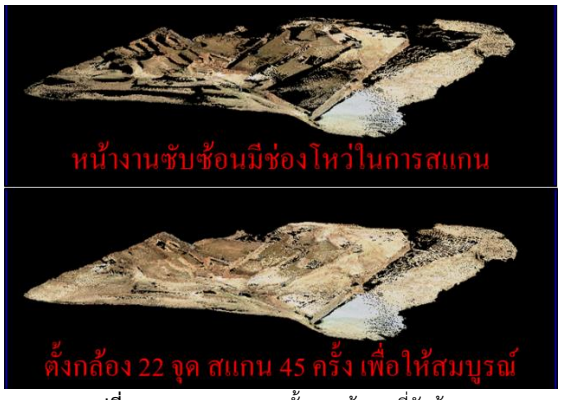
แผนกรังวัดเหมืองจะทำการรังวัดปริมาตรการขุด-ขนทุกสิ้นเดือนซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลจากการรังวัดโดยปกติมาใช้วิเคราะห์ผล ตั้งแต่เดือนกันยายน 2564 ถึงเดือนเมษายน 2565 ลักษณะของหน้างานมีความหลากหลายขึ้นกับประเภทรถขุด เช่น backhoe, shovel และ bucket wheel ซึ่งอาจมีเพียงประเภทเดียวหรือหลายประเภทขุดร่วมกัน

การสแกนจะเริ่มจากการพิจารณาตำแหน่งจุดตั้ง TLS ที่เหมาะสม ให้สามารถสแกนครอบคลุมหน้างานได้มาก โดยตั้ง TLS น้อยครั้งที่สุด TLS จะถูกตั้งบนขาตั้งสามขาและปรับระดับให้ขนานกับพื้นโลกและถูกปรับแก้ด้วยเซนเซอร์วัดความเอียงภายใน TLS ร่วมด้วย เป้าหลังจะถูกกำหนดไว้บนตำแหน่งที่กล้องสแกนสามารถมองเห็นได้จากทุกทิศทางให้มากที่สุดเพื่อลดการตั้งเป้าที่ไม่จำเป็น ทั้งตำแหน่ง TLS และเป้าหลังจะถูกรังวัดโดย GNSS ด้วยเทคนิค RTK จำนวน 5 ครั้ง และใช้ค่าเฉลี่ยป้อนข้อมูลเขาไปในอุปกรณ์ควบคุม ความละเอียดของจุดสแกนโดยทั่วไปจะเลือกใช้โหมดความละเอียดปานกลางที่ระยะ 100 เมตร จะห่างกัน 8.7 เซนติเมตร และมากขึ้นเมื่อระยะจากกล้องสแกนไปยังหน้างานเพิ่มขึ้น ในการทำงานมักจะมีระยะสแกนไม่เกิน 400 เมตร โหมดการทำงานส่งผลต่อระยะเวลาในการสแกน ซึ่งจะถูกใช้งานตามความเหมาะสม โดยคำนึงถึงระยะห่างระหว่าง TLS ไปยังบริเวณที่สนใจบนหน้างาน TLS จะทำการถ่ายภาพและสแกนไปพร้อม ๆ กัน ในขอบเขตมุมสแกนที่ผู้ใช้งานกำหนดโดยอัตโนมัติ

โดยในแต่ละเดือนจะมีหน้างานที่มีความยากในการสแกน ซับซ้อนต่อการเข้าถึง ทำให้ต้องตั้ง TLS หลายตำแหน่งและใช้เวลาในการทำงานอย่างมาก ดังนั้นการนำเอา UAV มาใช้ในการรังวัดร่วมกับ TLS ในหน้างานเหล่านี้เพื่อเสริมข้อมูลในเฉพาะส่วนที่ขาดหายไป ทำให้ลดจำนวนครั้งในการตั้ง TLS และลดเวลาในการทำงาน โดยที่การรังวัดด้วย UAV จะไม่มีการวาง GCP เนื่องจากเป็นการเพิ่มภาระงาน และการหวังผลในความถูกต้องที่ได้ ยังไม่มีความแน่นอน

การบินในแต่ละหน้างานใช้ซอฟต์แวร์ WingtraPilot กำหนดให้บินเก็บข้อมูลทั้งหมดภายในการบิน 1 เที่ยว โดยกำหนด GSD เป็น 4.6 cm/pixel ที่ Overlap 75% และ Sidelap 60% การบินสำรวจเพื่อสนับสนุน TLS แต่ละเที่ยวเฉลี่ยแล้วมีระยะเวลาบินไม่เกิน 40 นาที จำนวนรูปถ่ายไม่เกิน 500 ภาพ ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 3 ตารางกิโลเมตร

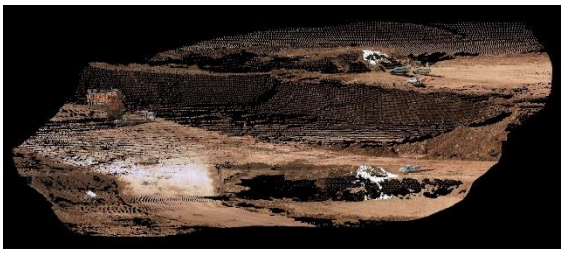
ในระหว่างการรังวัดเก็บข้อมูลบางหน้างานจะยังมีการขุด-ขนอย่างต่อเนื่อง บางหน้างานอาจมีการหยุดเพื่อซ่อมแซมเครื่องจักร มีรถยนต์วิ่งไปมา อีกทั้งการรังวัดบางหน้างานไม่ได้ดำเนินการในเวลาเดียวกัน ดังนั้นบริเวณหน้างานที่กำลังขุดอาจมีข้อมูลที่ทั้งสองอุปกรณ์รังวัดมาไม่ตรงกัน



รูปที่ 10 การสแกนหลายครั้งบนหน้างานที่ซับซ้อน

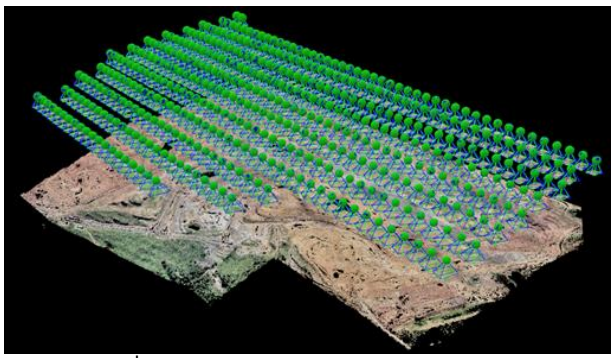
3.3 การประมวลผล

ข้อมูลจากการสแกนด้วย TLS ถูกประมวลผลด้วยโปรแกรม PointStudio เริ่มจากการนำข้อมูลเข้ามาในโปรแกรม ทำการยึดโยงค่าพิกัดจุดตั้ง TLS ทุกตำแหน่งแบบทางตรง ด้วยค่าพิกัดที่ได้จาก GNSS จากนั้นจึงทำการกรองข้อมูล (filtering) เช่น รถยนต์ รถขุด สายพาน และเครื่องจักรต่าง ๆ รวมถึงพิจารณาพื้นที่ที่ยังมีการขุดในระหว่างสแกนให้ข้อมูลมีความสอดคล้องกันทุกตำแหน่งการสแกน จนได้ point cloud ที่ถูกต้องที่สุด



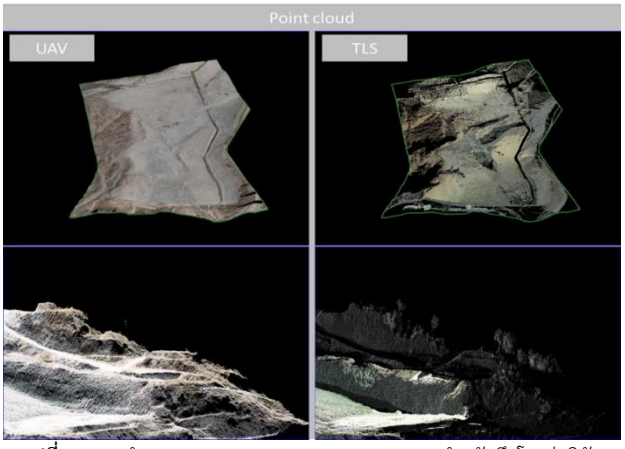
รูปที่ 11 ข้อมูลสแกนจาก TLS บนโปรแกรม PointStudio

ข้อมูลภาพถ่ายจาก UAV ถูกนำไปประมวลผลหาตำแหน่งพิกัดจุดเปิดถ่ายกล้อง โดย WingtraOne Gen I มีโมดูล Post Processing Kinematic (PPK) สำหรับรังวัดตำแหน่ง ณ การถ่ายภาพติดตั้งอยู่ด้วย ข้อมูลส่วนนี้จะถูกประมวลผลร่วมกับสถานีรับสัญญาณดาวเทียมแบบถาวร (CORS) ของแผนกรังวัดเหมือง ทำให้ภาพถ่ายมีค่าพิกัดที่ค่อนข้างถูกต้อง หลังจากนั้นภาพถ่ายถูกประมวลผลด้วย Pix4D เมื่อนำข้อมูลภาพถ่ายเข้ามาในโปรแกรม การจัดภาพและสร้าง tie point จะดำเนินการโดยอัตโนมัติ จนได้ข้อมูล point cloud ที่มีความละเอียด 2 เท่าของขนาด GSD ออกมา



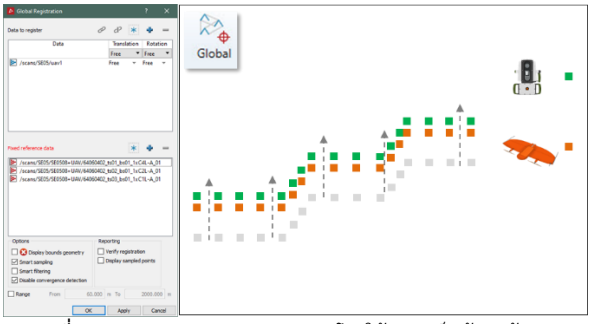
รูปที่ 12 ภาพถ่ายถูกประมวลผลด้วยโปรแกรม Pix4D

ข้อมูล point cloud จาก UAV ต้องถูกกรองข้อมูลเช่นเดียวกัน และเนื่องจาก UAV เก็บข้อมูลได้พื้นที่กว้าง จึงต้องตัดขอบเขตแปลง (boundary) ให้เท่ากับข้อมูลจาก TLS



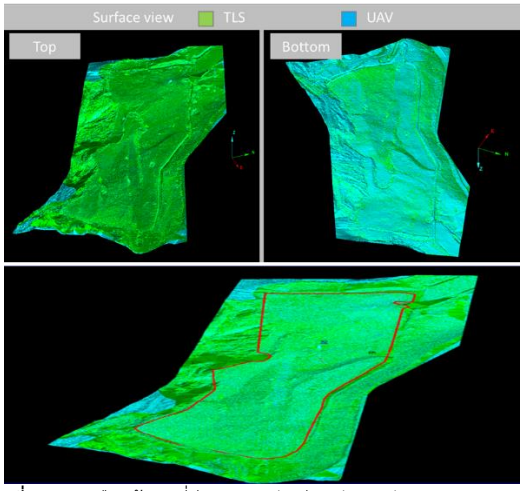
รูปที่ 13 การกำหนดขอบเขต point cloud ของ UAV สำหรับยึดโยงค่าพิกัด

จากนั้นจึงนำมาผ่านกระบวนการ ยึดโยงค่าพิกัดด้วยเทคนิค cloud-matching ในโปรแกรม PointStudio ผ่านฟังก์ชัน Global Registration อาศัยการเปรียบเทียบลักษณะการวางตัวของกลุ่ม point cloud ส่วนที่เหลื่อมกัน โดยให้กลุ่มที่มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ เป็นข้อมูลตั้งต้น (fixed point) ในที่นี้คือข้อมูลจาก TLS

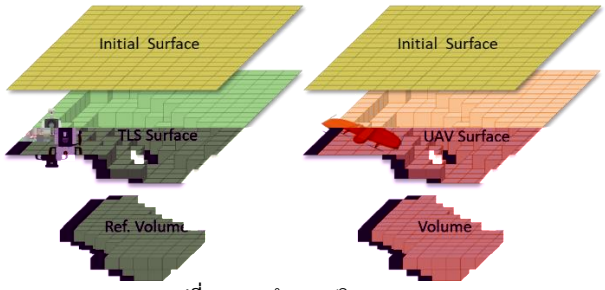


รูปที่ 14 การทำ Global Registration โดยให้ TLS เป็นข้อมูลอ้างอิง

ผลที่ได้คือ point cloud จาก UAV ที่มีค่าพิกัด ลักษณะภูมิประเทศใกล้เคียงและกลมกลืนไปกับ point cloud จาก TLS หลังจากนั้นข้อมูลจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน สำหรับสร้างพื้นผิว 3 มิติ โดย ส่วนแรกเป็นพื้นผิวที่สร้างจาก TLS และส่วนที่สองเป็นพื้นผิวที่สร้างจาก UAV อย่างไรก็ตาม เนื่องจาก TLS เก็บข้อมูลภูมิประเทศได้ไม่ครบถ้วนเท่า UAV คือมีช่องโหว่ จะต้องพิจารณาเลือกเฉพาะส่วนที่ข้อมูลจากทั้งสองอุปกรณ์มีคุณภาพข้อมูลเท่าเทียมกันมาคำนวณเปรียบเทียบ



รูปที่ 15 การเลือกข้อมูลที่มีคุณภาพเท่าเทียมกันระหว่าง TLS และ UAV



รูปที่ 16 การคำนวณปริมาตรขุดขน

พื้นผิวจาก TLS และ UAV ถูกคำนวณปริมาตรขุด-ขนกับพื้นผิวตั้งต้น (Initial) อันเดียวกัน และถูกนำมาหาความแตกต่างระหว่างปริมาตรที่ได้ โดยปริมาตรที่คำนวณจากพื้นผิว TLS ถือว่าเป็นค่าอ้างอิงที่มีความถูกต้อง มีรายละเอียดการคำนวณดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาตรขุดขนจากพื้นผิว TLS และ UAV

แปลง	พื้นที่ (m^2)	ปริมาตรขุดขน เทียบ Initial	
		TLS	UAV (TLS as ref.)
1	101,720	291,132	293,024
2	89,920	58,881	57,469
3	4,989	2,321	2,318
4	100,754	122,689	125,847
5	463,819	2,218,608	2,207,987
6	287,915	1,088,481	1,080,738
8	4,989	2,318	2,321
9	100,754	125,847	122,689
10	463,819	2,207,987	2,218,608
11	287,915	1,080,738	1,088,481
13	19,752	18,815	18,255
14	10,747	30,005	29,646
16	53,184	136,901	135,033
17	30,395	215,360	215,978
18	24,246	119,236	118,854
19	10,087	49,894	50,394
20	8,219	27,089	26,825
21	56,364	267,077	266,702
22	9,365	3,701	3,319
23	72,291	125,414	123,206
24	6,613	8,682	8,359
25	28,842	12,572	11,873
26	63,002	217,425	216,249
27	13,683	21,921	21,826
28	36,189	26,979	26,814
29	126,355	359,322	363,614
30	335,765	1,087,749	1,095,722
31	131,084	566,483	566,593
32	131,129	669,559	666,241
รวมทุกแปลง	**3,073,906**	**11,163,186**	**11,164,985**

4. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

จากการประมวลผลเปรียบเทียบข้อมูลการรังวัดจำนวน 32 แปลง พบว่าการนำ point cloud จาก UAV มาตรึงค่าพิกัด ด้วย point cloud จาก TLS เมื่อสร้างพื้นผิวและทำการคำนวณปริมาตรขุด-ขน ให้ความแตกต่างจากปริมาตรอ้างอิงที่ได้จาก TLS เพียงอย่างเดียว โดยเฉลี่ย 2.3 เซนติเมตร มีค่าการกระจาย (Standard Deviation: SD) 1.3 เซนติเมตร โดยมีทั้งแปลงที่ UAV คำนวณได้มากกว่าและน้อยกว่า TLS ซึ่งเมื่อเทียบกับเกณฑ์ความถูกต้องที่เหมาะสมสำหรับการรังวัดในเหมืองแม่เมาะ [4]

$$\text{ความต่างทางระดับ}_{\text{ต่อแปลง}} \quad \frac{\Delta\text{ปริมาตร}}{\text{พื้นที่}}_{\text{ต่อแปลง}} \quad 5 \text{ เซนติเมตร} \qquad (7)$$

$$\text{ความต่างทางระดับ}_{\text{รวม}} \quad \frac{\Delta\text{ปริมาตร}}{\text{พื้นที่}}_{\text{รวม}} \quad 3 \text{ เซนติเมตร} \qquad (8)$$

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบปริมาตรระหว่างพื้นผิว TLS และ UAV

แปลง	ความแตกต่าง		
	ปริมาตร (m^3)	ค่าระดับ (m)	%
1	1,892	0.019	0.650
2	-1,412	-0.016	-2.398
3	-3	-0.001	-0.129
4	3,158	0.031	2.574
5	-10,621	-0.023	-0.479
6	-7,743	-0.027	-0.711
8	3	0.001	0.129
9	-3,158	-0.031	-2.509
10	10,621	0.023	0.481

11	7,743	0.027	0.716
13	-560	-0.028	-2.976
14	-359	-0.033	-1.196
16	-1,868	-0.035	-1.364
17	618	0.020	0.287

สำรวจ [27] ทำให้สามารถคาดหมายความถูกต้องเชิงตำแหน่งไม่เกิน 5 เซนติเมตร (ยิ่งมีค่าต่ำก็ยิ่งมีความถูกต้องสูง)

ผลที่ได้พบว่าความแตกต่างระหว่างปริมาตรของ TLS และ UAV โดยเฉลี่ย 2.3 เซนติเมตร ซึ่งปัญหาส่วนหนึ่งที่ก่อให้เกิดให้ความแตกต่างมาจากการทำงานของเครื่องจักรซึ่งทำงานตลอดเวลา ทำให้หน้าขุดมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้อุปกรณ์ทั้งสองเก็บข้อมูลได้แตกต่างกันในหน้าขุดดังกล่าว ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการคัดแยกข้อมูลบริเวณหน้างานดังกล่าวออกให้มากที่สุด อีกทั้งความละเอียดของจุด point cloud ที่ค่อนข้างแตกต่างกันของอุปกรณ์ทั้งสอง โดย TLS มีการใช้โหมดความละเอียดการสแกนที่หลากหลาย ประกอบกับระยะในการสแกนทำให้ระยะห่างของจุดไม่สม่ำเสมอกัน รวมไปถึงจุดบอดของ TLS ที่ทำให้มีช่องโหว่บน point cloud ในขณะที่ UAV มีกระบวนการ point cloud densification ทำพื้นผิวของอุปกรณ์ทั้งสองจึงมีความแตกต่างกันเป็นทุนเดิม ส่งผลต่อการคำนวนเปรียบเทียบ แม้กระนั้นความแตกต่างก็ยังอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนที่เหมืองแม่เมาะยอมรับให้ใช้งานได้ [4] วิธีการทำงานรูปแบบนี้จะช่วยให้การรังวัดปริมาตรขุดขนดินและถ่านหินรวดเร็วและสมบูรณ์ขึ้นอย่างมาก

อย่างไรก็ตามงานวิจัยข้างต้นเป็นการนำเอาข้อมูลทั้งหมดของการสแกนด้วย TLS มาใช้โยงยึดทั้งหมด ในงานวิจัยขั้นต่อไป จะนำเอาข้อมูลจาก TLS มาใช้ในการตรึงแค่เพียงบางส่วนเท่านั้น เพื่อลดจำนวนการตั้ง TLS แต่จำเป็นต้องวิเคราะห์จำนวนจุดในการตั้ง TLS ความหนาแน่นของจุดจากการสแกน ลักษณะการกระจายตัวของจุดจากการสแกน ความครอบคลุมพื้นที่น้อยที่สุดของการสแกน เพื่อหาความเหมาะสมที่สุดสำหรับใช้ตรึงข้อมูล UAV ได้ โดยไม่จำเป็นต้องตั้ง TLS หลายตำแหน่ง แต่ที่ยังคงทำให้ความแตกต่างยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเครื่องมือสำรวจภาคสนาม คอมพิวเตอร์และโปรแกรมประมวลผลจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และได้รับความร่วมมือจากบุคลากรแผนกรังวัดเหมือง กองวางแผนปฏิบัติการ ฝ่ายวางแผนและบริหารเหมืองแม่เมาะ เป็นอย่างดีด้วยความทุ่มเทมุ่งมั่นให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ คณะผู้จัดทำวิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

เอกสารอ้างอิง

[1] Yurtseven, H. (2019). Comparison of GNSS-, TLS- and Different Altitude UAV-Generated Datasets on the Basis of Spatial Differences. ISPRS Int. J. Geo-Inf, 8(4), 175.

[2] Son, S.W. et al. (2020). Integrating UAV and TLS Approaches for Environmental Management: A Case Study of a Waste Stockpile Area. Remote Sens, 12, 1615.

[3] ธีรดนย์ ทองคำ (2564). เปรียบเทียบการรังวัดเพื่อคำนวณปริมาตรด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนภาคพื้นดินและอากาศยานไร้คนขับในพื้นที่เหมืองแม่เมาะ จังหวัดลำปาง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 26, ระยอง, 23-25 ,มิถุนายน 2564, หน้า 1434 - 1440.

[4] รศ.ดร. พุทธิพล ดำรงชัย (2564). โครงการตรวจสอบความถูกต้องในการสำรวจรังวัดเพื่อหาปริมาตรขุดขนดินถ่านหินความถูกต้องของหมุดควบคุมบริเวณเหมืองแม่เมาะและการเฝ้าติดตามการเคลื่อนตัวของพื้นดินบริเวณพื้นที่ทิ้งดิน (Third Party) ครั้งที่ 1/2564. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่,หน้า 7.

[5] Aber, J., Marzolff, I. and Ries, J.B. (2016). Small Format Aerial Photography: Principles, Techniques and Geoscience Applications. Elsevier, pp.394.

[6] Suchocki, C. (2020). Comparison of Time-of-Flight and Phase- Shift TLS Intensity Data for the Diagnostics Measurements of Buildings. Materials, 13(2), pp.1-18.

[7] Weixing, W. (2014). Applications of terrestrial laser scanning for tunnels: a review. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 1, pp.325-337.

[8] Wehr, A., Lohr, U. (1999). Airborne laser scanning-an introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54, pp.68-82

[9] Payne, A. et al. (2009). Multiple frequency range imaging to remove measurement ambiguity. Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, Vienna, Austria, 1-3 July 2009, pp.139-148.

[10] San José, A. et al. (2011). Comparing time-of-flight and phase-shift. The survey of the royal pantheon in the Basilica of San Isidoro (León). ISPRS, 4th, Trento, Italy, 2-4 March 2011, pp.377-385

[11] Jaboyedoff, M. A. et al. (2012). Use of LIDAR in landslide investigations: a review. Nat Hazards, 61, pp.5-28

[12] Marion, J. et al. (2017). Adequacy of pseudo-direct georeferencing of terrestrial laser scanning data for coastal landscape surveying against indirect georeferencing. European Journal of Remote Sensing, 50:1, pp.155-165.

[13] Aysar, A. et al. (2012). Establishment oF 3D Model With Digital Non-Metric Camera in Close Range Photogrammetry. Master. Thesis, Ministry of Higher Efucation & Scientific Research University of Technology, Iraq.

[14] Chee Ming, L. (2010). Fusion of optical and terrestrial laser scanner data. Canadian Geomatics Conference, Calgary, Canada, 15-18 June 2010, pp.156-161.

[15] Zhang, J. (2018). Measurement of Unmanned Aerial Vehicle Attitude Angles Based on a Single Captured Image. Sensors, 18(8), 2655.

[16] Verhoeven, G. (2011). Taking computer vision aloft - archaeological three- dimensional reconstructions from

aerial photographs with photoscan. Archaeological Prospection, 18(1), pp.67-73.

[17] Basant, A. et al. (2019). Analyzing The Effect of Distribution Pattern & Number of GCPs on Overall Accuracy of UAV Photogrammetry Results. Unmanned Aerial System in Geomatics, Roorkee, India, 06-07 April 2019, pp.339-354.

[18] Mona, F. (2010). Point cloud densification. Master. Thesis, Umeå University, Sweden.

[19] Gm. (2016, November 14). OPALS - Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning data, Retrieved from https://opals.geo.tuwien.ac.at/html/stable/ModuleDSM.html

[20] Silvester, S. et al. (2019). Geometric Accuracy Assessments of Orthophoto Production from UAV Aerial. ImagesInternational Conference on Geodesy, Geomatics, and Land Administration, Semarang, Indonesia, 24-25 July 2019, pp.333-344.

[21] Mehad, H. et al. (2018). Towards Automated Generation of True Orthoimages for Urban Areas. American Journal of Geographic Information System, 7(2), pp.67-74.

[22] Yi-Chun, T. et al. (2021). New Orthophoto Generation Strategies from UAV and Ground Remote Sensing Platforms for High-Throughput Phenotyping. Remote Sensing, 13(5), 860.

[23] บุญฤทธิ์ เขียวอร่าม (2560). การประเมินความถูกต้องของการรังวัดเพื่อหาปริมาตรงานขุดขนหน้าดินและถ่านหินบริเวณเหมืองถ่านหิน. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. วิทยานิพนธ์,มหาวิทยาลัยเชียงใหม่,เชียงใหม่

[24] Lefu, N., Nokwe, V. (2020). Use of laser scanner technology as part of the slope stability risk management strategy at Letseng diamond mine. International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering, Perth, Australia, 12-14 May 2020, pp.241-254.

[25] Trimble Navigation Limited (2013). Trimble R10 GNSS SYSTEM datasheet.

[26] Wingtra AG (2018). WingtraOne Technical Specification Sheet.

[27] Zilkoski, D. et al. (1997). Guidelines for Establishing GPS-Derived Ellipsoidal Heights [standard: 2 cm and 5 cm]. National Geodetic Survey, Rockville, MD, pp.10.