



การศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพของพอยต์คลาวด์จากวิธีการสแกนด้วยเลเซอร์บนอากาศยานไร้คนขับ
และวิธีการประมวลผลบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

A COMPARATIVE STUDY OF THE POINT-CLOUD QUALITY FROM
UAV LASER SCANNING AND BLOCK-BASED IMAGES PROCESSING

เทพฤทธิ์ ศรีรัฐไพศาล^{1*}, ไพศาล สันติธรรมนนท์² และธิรวาท บัรรณกุลพิพัฒน์³

^{1*}นิสิตมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²รองศาสตราจารย์, ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านการจัดการ โครงสร้างพื้นฐาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

³นิสิตมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการสแกนด้วยเลเซอร์ที่ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับเริ่มมีบทบาทในงานสำรวจและการทำแผนที่มากยิ่งขึ้น โดยข้อมูลสำคัญที่จะได้จากการเทคโนโลยีสำรวจนี้คือข้อมูลพอยต์คลาวด์ แต่การได้มาซึ่งข้อมูลพอยต์คลาวด์นั้นยังสามารถได้มาด้วยวิธีการประมวลผลบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศด้วยเทคนิคการรังวัดโครงสร้างจากการเคลื่อนไหวของการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ตามกระบวนการสำรวจด้วยภาพถ่าย โดยในงานวิจัยมุ่งเน้นไปที่การศึกษาลักษณะการเรียงตัวของข้อมูลพอยต์คลาวด์ตามลักษณะโครงสร้างหลังคาของอาคารขนาดใหญ่ และการเปรียบเทียบค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่างทางความสูงของข้อมูลพอยต์คลาวด์แต่ละชุด เพื่อแสดงให้เห็นถึงคุณภาพของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการสำรวจรังวัดมาด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน ใน 2 วิธี โดยในงานวิจัยนี้ได้นำข้อมูลพอยต์คลาวด์จำนวน 3 ชุดมาเปรียบเทียบกัน 1 ชุดจากเลเซอร์สแกนเนอร์รุ่น LiDAR Swiss และอีก 2 ชุดจากข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่ใช้กล้องถ่ายภาพและรูปแบบการบินที่แตกต่างกัน ได้แก่ ชุดภาพถ่ายทางอากาศที่ถ่ายด้วยกล้อง Cannon EOS 5DSR มีส่วนซ้อนร้อยละ 60 และส่วนเกยร้อยละ 30 และชุดภาพถ่ายทางอากาศที่ถ่ายด้วยกล้อง ZENMUSE P1 มีส่วนซ้อนร้อยละ 80 และส่วนเกยร้อยละ 60 ผลจากการเปรียบเทียบลักษณะการเรียงตัวของข้อมูลพอยต์คลาวด์จำนวน 3 ชุด ด้วยมุมมองภาพตัดขวางของตัวอาคาร จำนวน 5 อาคาร พบว่า ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากเลเซอร์สแกนและข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสร้างพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่นด้วยชุดข้อมูลภาพถ่ายของกล้อง ZENMUSE P1 มีลักษณะการเรียงตัวที่สอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างหลังคาของอาคารทั้งหมด แต่สำหรับข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากชุดข้อมูลภาพถ่ายของกล้อง Cannon EOS 5DSR มีลักษณะการเรียงตัวที่ไม่สอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างหลังคาของอาคารทั้งหมด โดยในแต่ละอาคารมีการคำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่างทางความสูงระหว่างข้อมูลพอยต์คลาวด์จากเลเซอร์สแกนเทียบกับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศของกล้อง ZENMUSE P1 และ Cannon EOS 5DSR ตามลำดับ ได้ค่าดังนี้ อาคารที่ 1 เท่ากับ 0.016 ม.และ 0.318 ม., อาคาร

Thepparit Srirattanapaisarn ^{1*}, Phisan Santitamnont ² and Thirawat Bannakulpiphat ³

^{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.

³ Master Student, Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

ที่ 2 เท่ากับ 0.023 ม. และ 0.545 ม., อาคารที่ 3 เท่ากับ 0.020 ม. และ 0.695 ม., อาคารที่ 4 เท่ากับ 0.018 ม. และ 0.609 ม. และสุดท้ายอาคารที่ 5 เท่ากับ 0.019 ม. และ 2.230 ม. ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าข้อมูลพอยต์คลาวด์จากเลเซอร์สแกนและข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสร้างพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่นด้วยชุดข้อมูลภาพถ่ายของกล้อง ZENMUSE P1 มีความถูกต้องและคุณภาพที่ดีกว่า สามารถใช้เป็นทางเลือกในวิธีการสำรวจเพื่อให้ได้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่มีคุณภาพและเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปแบบจำลองของอาคาร ตลอดจนการนำไปใช้จัดทำแผนที่สามมิติ

คำสำคัญ: ข้อมูลพอยต์คลาวด์; การสแกนด้วยเลเซอร์ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับ; ไลดาร์; การสร้างพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่น

ABSTRACT

Nowadays, UAV Laser scanning is increasingly being a part of surveying and mapping. The key data of this survey technology is point cloud. But the acquisition of point cloud data can also be obtained through the processing of a block of aerial images by using Structure-from-motion technique (SfM) in photogrammetric computer vision. This research aims to study of qualitative comparison of point cloud from two different survey techniques. The research study characterizes of point cloud formation and standard deviation of height differences according to the roof of buildings. Three point clouds data are used in this research, one is laser scanning point cloud data from LiDAR Swiss. The others are SfM point clouds from two different of aerial images data using different cameras and flight models, including a block of Cannon EOS 5DSR aerial images which has 60% of overlap and 30% of sidelap and a block of ZENMUSE P1 aerial images which has 80% of overlap and 60% of sidelap. By mean of cross-sectional studies of 5 large buildings it reveals that the UAV laser scanning point cloud and the SfM point cloud from ZENMUSE P1 aerial images is consistent with the roof structure of all buildings. In comparison, the cross-section of SfM point cloud from Cannon EOS 5DSR aerial images is not consistent with the roof structure of all buildings. The standard deviation of height differences in each building by using UAV laser scanning point cloud compares to SfM point cloud from ZENMUSE P1 and Cannon EOS 5DSR respectively are 0.016 m and 0.318 m for 1st building, 0.023 m and 0.545 m for 2nd building, 0.020 m and 0.695 m for 3rd building, 0.018 m and 0.609 m for 4th building and the last building are 0.019 m and 2.230 m. As a result, the UAV laser scanning point cloud and SfM point cloud from ZENMUSE P1 have more accuracy and quality, it can be applied in building modeling as well as being used to generate a 3D map.

KEYWORD: Point cloud; UAV Laser Scanning; LiDAR; Dense cloud generation

1. บทนำ

ปัจจุบันการสแกนด้วยเลเซอร์ที่ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับ (UAV Laser Scanning) เริ่มมีบทบาทในงานสำรวจและการทำแผนที่มากยิ่งขึ้น กรมแผนที่ทหารได้นำเทคโนโลยีการสำรวจดังกล่าวมาใช้เพื่อสำรวจข้อมูลความสูงภูมิประเทศที่มีความละเอียดถูกต้องสูง [1] สำหรับการทำความเข้าใจที่มากขึ้น รวมไปถึงแผนที่สามมิติที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน โดยผลผลิตที่เป็นหัวใจหลักของการสำรวจนี้คือ ข้อมูลพอยต์คลาวด์ (Point cloud) ที่ได้โดยตรง ซึ่งจะได้จากการสแกนด้วยเลเซอร์ อันเกิดจากการที่เลเซอร์ตกกระทบบนพื้นผิววัตถุและสะท้อนกลับมายังอุปกรณ์ ตามหลักการของไลดาร์ (Light Detection And Ranging : LiDAR)

ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้นี้จะครอบคลุมพื้นที่การสำรวจได้โดยการกวาดของลำแสงในแนวการเคลื่อนที่ของอากาศยาน ส่งผลให้เกิดจุดตกกระทบบนพื้นผิววัตถุและภูมิประเทศเป็นจำนวนมาก ทำให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์มีการเรียงตัวจนเกิดเป็นรูปทรงของวัตถุและพื้นผิวภูมิประเทศ และผลผลิตที่ได้รับเพิ่มเติมคือ ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้มาโดยทางอ้อม ซึ่งจะได้จากการสร้างพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่น (Dense cloud generation) ด้วยการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ในการประมวลผลลือภาพถ่ายทางอากาศตามกระบวนการสำรวจด้วยภาพถ่าย (Photogrammetric Computer Vision : PCV) [2,3] ด้วยเทคนิคการรังวัด โครงสร้างจากการเคลื่อนไหว (Structure-from-motion : SfM) [4] โดยในขณะที่บินสำรวจได้มีการถ่ายภาพทางอากาศแบบดิ่งด้วยกล้องถ่ายภาพความละเอียดสูง ซึ่งเป็นการถ่ายภาพเช่นเดียวกับการสแกนด้วยเลเซอร์ จะทำให้ได้ภาพถ่ายเหนือบริเวณพื้นที่สำรวจเดียวกัน และจะพบว่าในการสำรวจดังกล่าวจะทำให้ได้มาซึ่งข้อมูลพอยต์คลาวด์จากสองวิธีการ

การทำแผนที่สามมิติในปัจจุบัน มีการนำข้อมูลพอยต์คลาวด์ไปประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปแบบจำลองของอาคาร (Building modeling) เพื่อให้เกิดความสมจริงในแผนที่สามมิติ แบบจำลองนี้ยังสามารถใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์รูปแบบและโครงสร้างทางวิศวกรรมอีกด้วย [5] ดังนั้นการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพของข้อมูลพอยต์คลาวด์ในส่วนของหลังคาอาคารขนาดใหญ่ที่อยู่ในพื้นที่การสำรวจ เพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของคุณภาพของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้มาด้วยวิธีการที่ต่างกัน รวมไปถึงความเหมาะสมในการนำข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้ไปใช้ขึ้นรูปแบบจำลองของตัวอาคาร โดยในการศึกษาจะมีการจัดทำจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (Ground Control Point : GCP) สำหรับการปรับแก้ค่าสามเหลี่ยมทางอากาศของบล็อกภาพถ่ายทางอากาศ จากนั้นจะประมวลผลเพื่อสร้างพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่นด้วยการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ แล้วนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสแกนด้วยเลเซอร์ซึ่งมีการกำหนดพิกัดตำแหน่งของโลกด้วยวิธีตรง (Georeferencing) ไว้แล้ว และผลจากการวิจัยจะแสดงผลมุมมองด้านบนของตัวอาคารด้วยภาพถ่ายทางอากาศ และภาพตัดขวางของตัวอาคารด้วยข้อมูลพอยต์คลาวด์ รวมไปถึงการคำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ของค่าต่างทางความสูงของข้อมูลพอยต์คลาวด์แต่ละชุด บริเวณพื้นผิวเรียบของหลังคาอาคารเพื่อนำมาใช้ในการเปรียบเทียบกัน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสแกนด้วยเลเซอร์ทางอากาศ

ข้อมูลพอยต์คลาวด์มีจุดเด่นสำคัญคือเป็นจุดที่มีค่าพิกัดสามมิติ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของงานด้านการสำรวจรังวัด และการทำแผนที่ และเมื่อมีจุดเหล่านี้เป็นจำนวนมากจะสามารถจัดทำเป็นแบบจำลองความสูงของวัตถุบนผิวโลก หรือแม้แต่ความสูงของภูมิประเทศได้ โดยการได้มาซึ่งค่าพิกัดสามมิตินี้ จะได้จากหลักการจับเวลาที่เลเซอร์เริ่มเดินทางออกจากอุปกรณ์จนไปตกกระทบกับพื้นผิววัตถุแล้วสะท้อนกลับมา จะทำให้ได้ช่วงเวลาที่ใช้เดินทาง (t) และเมื่อทราบความเร็วแสง (v) จะสามารถคำนวณหาระยะทาง (R) ที่แสงเดินทางได้ในระยะทาง 2 เท่า (ไป-กลับ) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1) และเรียกเทคนิคการสำรวจนี้ว่า ไลดาร์ [6, 7]

$$2R = v \cdot t \quad (1)$$

เมื่อนำอุปกรณ์เลเซอร์สแกนเนอร์ไปติดตั้งกับอากาศยานไร้คนขับจะสามารถนำไปใช้สำรวจในพื้นที่บริเวณกว้างได้ โดยมีการกวาดลำแสงอย่างต่อเนื่องพร้อมกับการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของอากาศยาน ระยะทางที่วัดได้นั้นจะนำไปคำนวณให้เป็นค่าพิกัดสามมิติ (X_{LS} , Y_{LS} , Z_{LS}) จำนวนมากของจุดบนพื้นผิววัตถุหรือภูมิประเทศ โดยจะต้องอาศัยการบูรณาการร่วมกันของระบบรังวัดพิกัดตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS และระบบหาค่าการเอียงตัว (Inertial Motion Unit : IMU) ในรูปแบบของข้อมูลวิถีการบิน (Flight Trajectory)

ในการคำนวณจะใช้การกำหนดพิกัดตำแหน่งบนโลกด้วยวิธีตรงให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์ ซึ่งจะต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความสัมพันธ์ร่วมกับอุปกรณ์ต่างๆ ที่ติดตั้งบนอากาศยาน โดยจะต้องใช้ข้อมูลอยู่ 3 ส่วน ได้แก่ 1) ข้อมูลระยะทางและมุมแสงออกที่วัดได้ของเครื่องเลเซอร์สแกน 2) ข้อมูลวิถีการบิน และ 3) พารามิเตอร์ของการวางตัวของเครื่องเลเซอร์สแกน (Mounting calibration parameters) จากนั้นจะสามารถคำนวณหาค่าพิกัดสามมิติของจุดที่ตกกระทบกับวัตถุ (t) ที่ได้จากการสแกนด้วยเลเซอร์ (1) ณ เวลา t ได้ดังสมการที่ (2) [8]

$$x_{(t)}^e(t) = g^e(t) + R_n^e(t)R_n^i(t)(a_{(t)}^i + R_{s(i)}^i x_{(t)}^s) \quad (2)$$

ในสมการจะปรากฏระบบพิกัดอ้างอิงอยู่ 4 ระบบพิกัด ได้แก่

s เป็น ระบบพิกัดของเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์

i เป็น ระบบพิกัดของ INS (Inertial Navigation System)

e เป็น ระบบพิกัดที่อ้างอิงจุดกำเนิดอยู่ที่จุดกึ่งกลางของโลก

n เป็น ระบบพิกัดของการนำหนด้วยดาวเทียม

(Earth-Centered, Earth-Fixed : ECEF)

2.2 ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากกระบวนการผลิตของคอมพิวเตอร์ในทางการสำรวจด้วยภาพถ่าย

การได้มาซึ่งข้อมูลพอยต์คลาวด์นั้นนอกจากจะได้จากการสแกนด้วยเลเซอร์แล้ว ยังจะได้จากวิธีการสำรวจด้วยภาพถ่ายเช่นเดียวกัน โดยในปัจจุบันการที่คอมพิวเตอร์มีสมรรถนะที่สูงขึ้น รวมไปถึงซอฟต์แวร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้การรังวัดค่าพิกัดสามมิติในภาพถ่ายตามกระบวนการสำรวจด้วยภาพถ่ายมีความเป็นอัตโนมัติมากยิ่งขึ้น ในเบื้องหลังนั้นจะมีขั้นตอนต่างๆ มากมายกว่าจะได้ออกมาเป็นผลผลิตตามที่ต้องการ ในที่นี้คือข้อมูลพอยต์คลาวด์ โดยเริ่มต้นจากการมีกล้องถ่ายภาพทางอากาศที่ทราบค่าพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายใน (Interior Orientation Parameters : IOP) โดยจะได้จากการวัดสอบเทียบด้วยความละเอียดสูง (In-situ Calibration) จากนั้นเป็นการจัดภาพสัมพันธ์ (Relative Orientation : RO) ระหว่างภาพถ่ายที่มีอยู่ในบล็อกการสำรวจทั้งหมด โดยเป็นการจับคู่จุดภาพที่สอดคล้องกันระหว่างภาพถ่ายทางอากาศที่มีส่วนซ้อนหรือส่วนเกยที่ต่อเนื่องกัน (Key point) พร้อมกับการสกัดจุดภาพที่ไม่สอดคล้องกัน (Outlier) ออกไป ให้คงไว้แต่จุดที่สอดคล้องกันสำหรับการสร้างความสัมพันธ์ของการจัดภาพสัมพันธ์ (RO) ดังที่กล่าวไว้แล้ว ซึ่งจะช่วยลดความผิดพลาดที่จะส่งผลถึงการประมวลผลในขั้นตอนต่อไป โดยคอมพิวเตอร์สามารถทำได้โดยอัตโนมัติด้วยอัลกอริทึม RANSAC (Random Sample Consensus) [4] ต่อมาคือการจัดภาพสัมพันธ์ (Absolute Orientation : AO) โดยจะมีขั้นตอนสำคัญที่เกี่ยวข้องคือการกำหนดค่าพิกัดภาคพื้นดินจากจุดที่ทราบค่าโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน โดยจุดเหล่านี้จะเป็นจุดควบคุมในการปรับแก้บล็อกลำแสงของภาพถ่ายทางอากาศ (Bundle Block Adjustment

: BBA) ขณะทำการประมวลผลคอมพิวเตอร์จะมีการคำนวณค่าพารามิเตอร์การจัดภาพภายนอก (Exterior Orientation Parameters : EOP) ของกล้องถ่ายภาพ ณ ขณะที่ทำการถ่าย (จุดเปิดถ่าย) ให้สอดคล้องกับจุดภาพที่ตรงกับจุดทราบค่าพิกัดของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน และจุดภาพที่สอดคล้องกับภาพถ่ายที่ต่อเนื่องกันในแนวนินเดียวกันหรือแนวนินข้างเคียง ซึ่งจะส่งผลไปถึงพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายนอกของกล้องนั้นๆ ด้วย โดยคอมพิวเตอร์จะทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ แบบวนซ้ำเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด เสมือนเป็นการรังวัดค่าพิกัดสามมิติของจุดสนใจด้วยภาพถ่ายทางอากาศหลายมุมมอง (Multiple View Geometry : MVG) [9] โดยใช้เทคนิคการสำรวจโครงสร้างจากการเคลื่อนไหว (SFM) และสุดท้ายผลลัพธ์ที่ได้คือค่าพิกัดสามมิติ (X_{SIM} , Y_{SIM} , Z_{SIM}) ของจุดสนใจในภูมิประเทศจากการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศที่ดีที่สุด และเมื่อคอมพิวเตอร์ทำการจัดภาพสมบูรณ์อย่างต่อเนื่องกับภาพถ่ายทั้งหมดในบล็อก (Simultaneous Absolute Orientation) จะทำให้ได้พอยต์คลาวด์ของจุด Matching key point ทั่วทั้งพื้นที่การสำรวจ

2.3 ข้อมูลคุณลักษณะจำเพาะของข้อมูลพอยต์คลาวด์

ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสแกนด้วยเลเซอร์นั้นเมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสำรวจด้วยภาพถ่ายแล้ว ยังมีข้อได้เปรียบอื่นๆ นั่นคือข้อมูลคุณลักษณะจำเพาะ (Attributes) ที่มีการเก็บข้อมูลไว้ในหลายหัวข้อด้วยกัน ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากต่อการนำไปใช้งานด้านวิศวกรรมและการทำแผนที่ เช่น การจำแนกประเภทให้กับพอยต์คลาวด์ (Point cloud classification) เป็นต้น โดยปกติแล้วข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสแกนด้วยเลเซอร์ นอกจากจะมีข้อมูลค่าพิกัดตำแหน่ง (X_{LS} , Y_{LS} , Z_{LS}) แล้ว ยังจะมีการเก็บข้อมูลคุณลักษณะจำเพาะถึง 9 หัวข้อด้วยกัน [10] ได้แก่ ความเข้มขึ้นในการสะท้อนของเลเซอร์ (Intensity), หมายเลขลำดับการสะท้อนกลับของเลเซอร์ที่ตกกระทบบนพื้นผิววัตถุ (Return number), จำนวนการสะท้อนกลับหมดของเลเซอร์ (Number of returns), หมายเลขการจำแนกประเภทของจุด (Point classification), พอยต์คลาวด์ที่อยู่บริเวณขอบของแนวนิน (Edge of flightline), ค่าสีของจุดตกกระทบที่สืบทอดจากภาพสีของกล้องที่ติดตั้งร่วม (RGB), การประทับเวลา GPS ของเลเซอร์ที่ปล่อยออกมา (GPS time), มุมแสงออกของเลเซอร์ที่วัดได้เทียบกับทิศทางของแนวนิน (Scan angle) และทิศทางการสแกน (Scan direction) แต่สำหรับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากกระบวนการผลิตของคอมพิวเตอร์ในการสำรวจด้วยภาพถ่ายนั้นจะมีเพียงแต่ข้อมูลค่าพิกัดตำแหน่ง (X_{SIM} , Y_{SIM} , Z_{SIM}) เท่านั้น

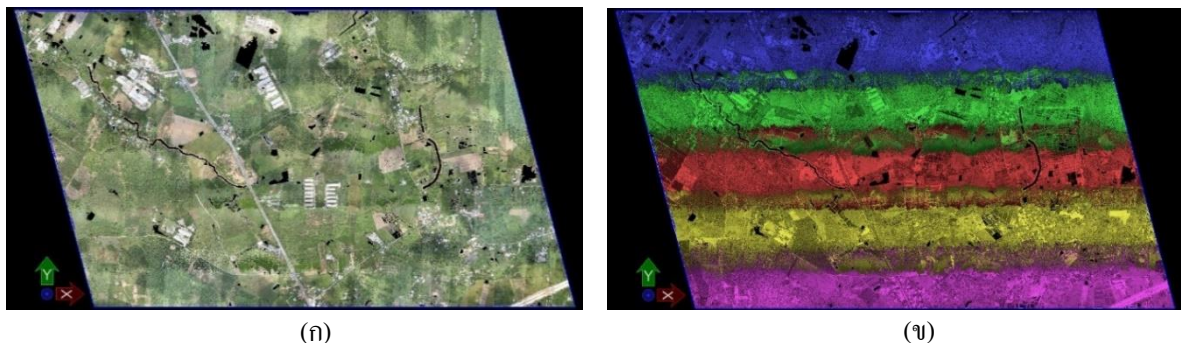
3. ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

3.1 ชุดข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสแกนด้วยเลเซอร์ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับ

ข้อมูลพอยต์คลาวด์จะใช้ข้อมูลที่รับจากกรมแผนที่ทหาร ซึ่งได้ดำเนินการสำรวจด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ รุ่น LiDAR Swiss Micro VUX CE ติดตั้งเข้ากับอากาศยานไร้คนขับชนิด VTOL รุ่น SUD VTIOL-60 สำหรับข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่นำมาใช้นั้นได้ผ่านกระบวนการอ้างอิงระบบพิกัดแล้ว เป็นระบบพิกัด UTM โซน 47N พื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 และค่าความสูงเหนือพื้นผิวทรงรี (Ellipsoidal height) มีความหนาแน่นของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ 5 – 10 จุดต่อตารางเมตร เมื่อบินสำรวจที่ความสูง 400 เมตรเหนือภูมิประเทศ โดยจะประกอบไปด้วย ชุดข้อมูลพอยต์คลาวด์ทั้งหมด 5 แนวนิน จำนวน 34,496,009 จุด โดยเป็นชุดข้อมูลในพื้นที่บริเวณศูนย์เครือข่ายการเรียนรู้เพื่อภูมิภาค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และพื้นที่ขอบเขตโดยรอบใน ต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี รวม 10 ตารางกิโลเมตร



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



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

3.2 ชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ

ภาพถ่ายทางอากาศแบบดั้งเดิม จะใช้ข้อมูลของทางกรรมแผนที่ทหาร ที่ถ่ายด้วยกล้องดิจิทัล ยี่ห้อ Canon EOS รุ่น 5DSR แบบ full-frame และใช้เซ็นเซอร์ชนิด CMOS ขนาด 50 ล้านพิกเซล ชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศนี้เป็นภาพถ่ายที่อยู่เหนือพื้นที่สำรวจ บริเวณเดียวกับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสแกนด้วยเลเซอร์ ภาพถ่ายทางอากาศมีความละเอียดจุดภาพเชิงพื้นที่ (Ground sampling distance : GSD) 10 ซม. และมีการถ่ายภาพให้มีส่วนซ้อนระหว่างภาพถ่ายในแนวนินเดียวกันที่ร้อยละ 60 และส่วนเกินของภาพระหว่างแนวนินที่ติดกันร้อยละ 30 (เรียกโดยย่อว่า ส่วนซ้อน 65% / 35%) ในขอบเขตพื้นที่ศึกษา มีจำนวนภาพถ่ายทางอากาศทั้งหมด 140 ภาพ

ตารางที่ 1 รายละเอียดข้อมูลจำเพาะที่สำคัญของกล้อง Canon EOS รุ่น 5DSR

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



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

3.3 ข้อมูลวิธีการบินของอากาศยานไร้คนขับ

ในการบินสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับจะมีการติดตั้งอุปกรณ์รับวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS เพื่อการนำหนและระบุตำแหน่ง และเครื่องวัดค่าการเอียงตัว (IMU) ของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ติดตั้งอยู่ในอุปกรณ์ โคนในขณะที่ทำการบินสำรวจ ได้มีการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS บนพื้นดินอีก 1 เครื่อง เพื่อทำหน้าที่เป็นสถานีฐาน โดยตั้งรับวัดบนจุดทราบค่าพิกัด (จุด LD61B034) ซึ่งเป็นจุดที่ทางกรมแผนที่ทหารได้ดำเนินการสำรวจไว้ก่อนหน้านี้แล้ว จากนั้นจะทำการประมวลผลในภายหลัง (Post-processed kinematic differential) เพื่อให้ได้ข้อมูลพิกัดตำแหน่งและการเอียงตัวของอากาศยานไร้คนขับในแต่ละช่วงเวลา

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	ความสูงเหนือพื้นผิวชื่อยอด (H)	60.89 ม.

3.4 ชุดข้อมูลพอยต์คลาวด์จากกระบวนการ SFM ของชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่ถ่ายด้วยกล้อง ZENMUSE P1

เพื่อให้งานวิจัยนี้สามารถเปรียบเทียบกับวิธีการทำแผนที่จากภาพถ่ายยูวีดีคัลลิงฟูลเฟรม (full-frame) ซึ่งถือได้ว่าเป็นมาตรฐานสำหรับงานรังวัดทำแผนที่ ณ ห้วงเวลาปัจจุบัน งานวิจัยได้ใช้ชุดข้อมูลพอยต์คลาวด์จากคณะทำงานวิจัยของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [11] ซึ่งได้มีการประมวลผลมาจากชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่ถ่ายด้วยกล้อง ZENMUSE P1 ที่ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับยี่ห้อ DJI รุ่น MATRICE 300 ซึ่งเริ่มเป็นที่นิยมและแพร่หลายในอุตสาหกรรมด้านการทำแผนที่ เนื่องจากมีคุณภาพที่สูงและราคาสามารถจับต้องได้ โดยชุดภาพมีส่วนซ้อนที่ร้อยละ 80 และส่วนเกยที่ร้อยละ 60 (ส่วนซ้อน 80% / 60%) บินถ่ายที่ความสูง 150 เมตร เหนือภูมิประเทศ ทำให้มีความละเอียดจุดภาพเชิงพื้นที่ที่ (GSD) 2 เซนติเมตร จากการประมวลผลทำให้ชุดข้อมูลพอยต์คลาวด์นี้มีค่าพิกัดสามมิติที่อ้างอิงกับระบบพิกัด UTM โซน 47N พื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 และค่าความสูงเหนือพื้นผิวทรี โดยมีความหนาแน่น 100 – 500 จุดต่อตารางเมตร และมีขอบเขตของข้อมูลอยู่ในพื้นที่บริเวณศูนย์เครือข่ายการเรียนรู้เพื่อภูมิภาค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี ดังรูปที่ 5



รูปที่ 4 ตำแหน่งของขอบเขตชุดข้อมูลพอยต์คลาวด์ และภาพถ่ายทางอากาศในพื้นที่ศึกษา

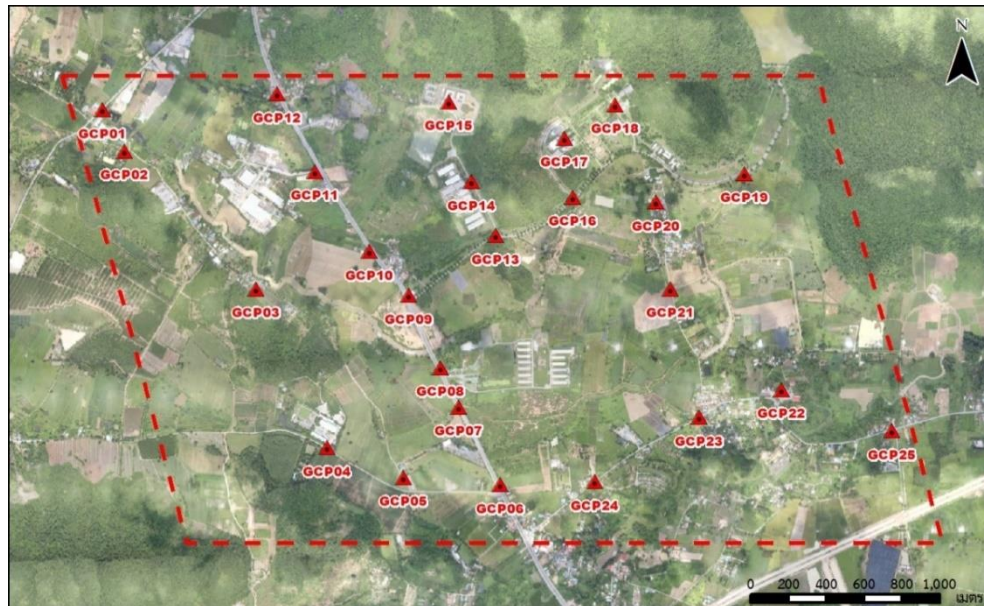
4. ระเบียบวิธีการปฏิบัติงานวิจัย

4.1 การสำรวจจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ

เนื่องจากความต้องการที่จะทำให้ชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่จะนำไปประมวลผลในกระบวนการสำรวจด้วยภาพถ่ายมีความถูกต้องทางตำแหน่งที่มากยิ่งขึ้น จึงจำเป็นที่จะต้องจัดทำจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน แต่เนื่องด้วยชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศของกรมแผนที่ทหารนี้ได้มีการสำรวจไปก่อนหน้านี้แล้ว (เมื่อ 7 ต.ค.62) ทำให้การจัดทำจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน เป็นการจัดทำเป้าภายหลัง (Post-marking GCP) ที่อาศัยจุดเด่นชัดในภาพถ่ายและต้องเข้าถึงได้ในภูมิประเทศ (ป่าธรรมชาติ)

จากข้อกำหนดของจำนวนจุดบังคับภาพถ่ายที่ใช้ในบล็อกภาพถ่ายทางอากาศที่ทราบค่าพารามิเตอร์การจัดภาพภายนอก ซึ่งจะต้องมีจุดบังคับภาพถ่ายในทุกระยะ 30 เท่าของระยะห่างระหว่างจุดเปิดถ่าย (30b) ในบริเวณแนวนอนแรกและแนวนอนสุดท้าย และในพื้นที่ส่วนแหว่งระหว่างแนวนอนควรมีจุดบังคับภาพถ่ายอยู่บริเวณหัวและท้ายแนวส่วนแหว่ง [7] โดยบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศในงานวิจัยนี้มีขนาด 4 x 2.5 ตารางกิโลเมตร และมีระยะห่างระหว่างจุดเปิดถ่ายที่ 150 เมตร จึงจำเป็นต้องมีจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศอย่างน้อย 12 จุด ผู้วิจัยจึงได้จัดทำจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินจำนวน 25 จุด ซึ่งมีกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งพื้นที่ศึกษา (รูปที่ 5) โดยใช้การรังวัดค่าพิกัดด้วยระบบ GNSS ในวิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวร (Network-based Real-Time Kinematics : NRTK) ของกรมแผนที่ทหาร โดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบ 2 ความถี่ ยี่ห้อ Leica รุ่น GS10 เพื่อใช้เป็นสถานีจร (rover) ในการรังวัดแต่ละจุดจะรังวัดเป็นเวลา 3 นาที (180 Epoch) และรังวัดจำนวน 2 ครั้ง เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของค่าพิกัดที่รังวัดได้ และจะนำค่าพิกัดที่ได้ในการรังวัด 2 ครั้ง มาเฉลี่ยออกเป็นค่าเดียว

สำหรับโครงข่ายสถานีฐานถาวร (Continuously Operating Reference Stations : CORS) ของกรมแผนที่ทหาร จะมีการรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบอัตโนมัติ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้ร่วมกับสถานีจรในวิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวร ซึ่งมีข้อดีคือ การได้ค่าพิกัดมาอย่างรวดเร็ว และมีความถูกต้องในระดับ 3 – 5 เซนติเมตร [12] โดยในงานวิจัยนี้ได้มีการเชื่อมต่อกับสถานีฐานถาวร TSRI ในสถานีโทรคมนาคมทหารเขาแผงม้า ซึ่งอยู่ใกล้ที่สุดประมาณ 20 กิโลเมตร



รูปที่ 5 จุดควบคุมภาพถ่ายทางอากาศ จำนวน 25 จุด (สามเหลี่ยมสีแดง) ในพื้นที่ศึกษา

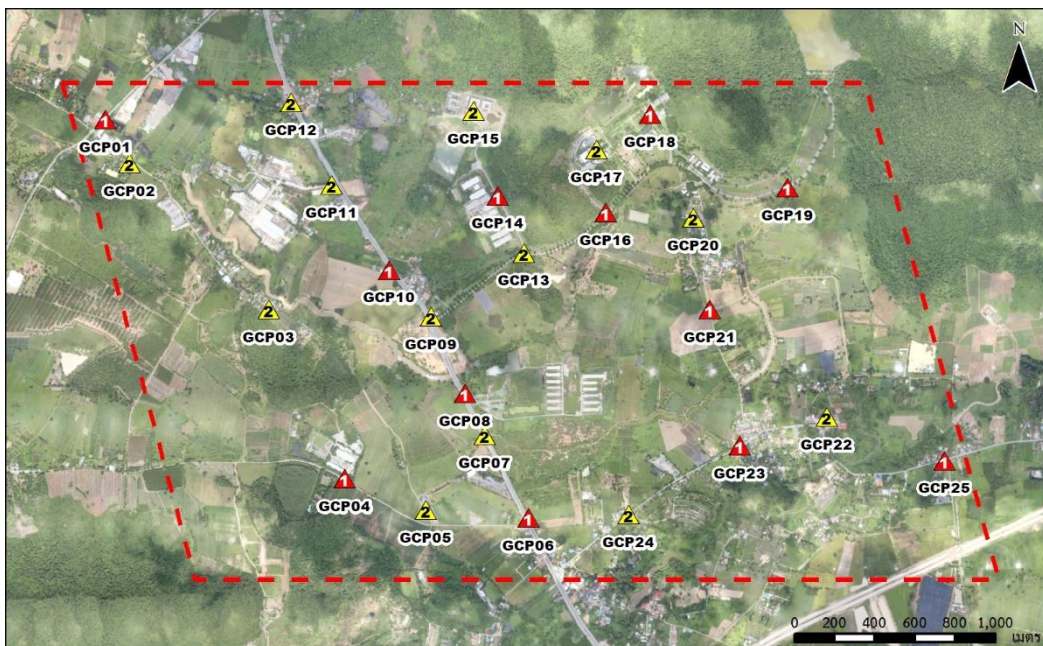


รูปที่ 6 ตัวอย่างการสำรวจรังวัดค่าพิกัดภาคพื้นดินของจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศที่อาศัยเป็นธรรมชาติ (Post-marking GCP)

4.2 การประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ

ในขั้นตอนของการประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศจะประมวลผลด้วยโปรแกรม PIX4Dmapper ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถทำงานในด้านการสำรวจด้วยภาพถ่ายได้เป็นอย่างดี โดยมีขั้นตอนในการประมวลผลภาพถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศเพื่อปรับแก้บล็อกกล่าแสง (BBA) ซึ่งจะเป็นการปรับแก้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของบล็อกภาพถ่ายทางอากาศจำนวน 140 ภาพ การปรับแก้ในส่วนของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการจัดภาพภายนอก (EOP) จะอ้างอิงค่าเริ่มต้นจากข้อมูลวิถีการบินของอากาศยานไร้คนขับ ณ เวลาที่ทำการถ่ายภาพแต่ละภาพ โดยกำหนดให้มีค่าความถูกต้องทางตำแหน่งของค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายในทางราบที่ 0.05 เมตร และทางตั้งที่ 0.10 เมตร และในการประมวลผลจะมีการกำหนดตำแหน่งจุดควบคุมในภาพถ่าย ซึ่งจะใช้ข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินที่ได้ไปสำรวจมา โดยจะทำการแบ่งชุดข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินที่ออกเป็น 2 ชุด ดังตารางที่ 3 สำหรับการประมวลผลนั้นจะแบ่งออกเป็น 3 ครั้ง โดยในครั้งที่ 1 และ 2 จะดำเนินการตามแนวปฏิบัติประมวลผลควบคุมคุณภาพ 2 ขั้นตอน [13] กล่าวคือจะใช้ข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินชุดที่ 1 เป็นจุดควบคุม และชุดที่ 2 จะใช้เป็นชุดตรวจสอบคุณภาพหลังการปรับแก้ (ครั้งที่ 1) จากนั้นจะสลับกัน (ครั้งที่ 2) เพื่อเป็นการตรวจสอบซึ่งกันและกัน สำหรับการควบคุม

คุณภาพจะใช้การตรวจสอบเปรียบเทียบผลความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) ทั้งทางราบและทางตั้ง ของทั้งจุดควบคุมและจุดตรวจสอบ ซึ่งทั้ง 2 ชุดข้อมูลนั้นจะต้องมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมาก เพื่อเป็นการยืนยันว่าจุดบังคับภาพถ่ายที่จะนำมาใช้ในการประมวลผลลือกภาพถ่ายทางอากาศนั้นไม่มีความผิดพลาด (Mistake) และสุดท้าย (ครั้งที่ 3) จะนำจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินทั้งหมด 25 จุด มาใช้เป็นจุดควบคุมในการปรับแก้ เพื่อให้ความถูกต้องของค่าพิกัดภาคพื้นดินที่คำนวณจากภาพถ่ายทางอากาศมีความถูกต้องที่ดีที่สุด และในการประมวลผลได้มีการกำหนดค่าความถูกต้อง (Accuracy) ทางตำแหน่งของจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินที่ได้จากการรังวัดภาคสนามด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธี NRTK ในทางราบที่ 0.03 เมตร และทางตั้งที่ 0.05 เมตร และจะกำหนดให้มีการวัดสอบ (Calibration) ในทุก ๆ พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในรูปแบบมาตรฐาน (Standard) ของโปรแกรม



รูปที่ 7 การแบ่งชุดจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินจำนวน 2 ชุด (ชุดที่ 1 สามเหลี่ยมสีแดง และ ชุดที่ 2 สามเหลี่ยมสีเหลือง)

ตารางที่ 3 การแบ่งชุดจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน

ชุดที่	ชื่อจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน	จำนวน (จุด)
1	GCP01, GCP04, GCP06, GCP08, GCP10, GCP14, GCP16, GCP18, GCP19, GCP21, GCP23 และ GCP25	12
2	GCP02, GCP03, GCP05, GCP07, GCP09, GCP11, GCP12, GCP13, GCP15, GCP17, GCP20, GCP22 และ GCP24	13

ขั้นตอนต่อมาหลังจากทำการปรับแก้ลือกค่าแสงของชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศแล้ว จะเป็นขั้นตอนการผลิตข้อมูลพอยต์คลาวด์ โดยใช้การสร้างพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่นด้วยการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ด้วยเทคนิคการรังวัดโครงสร้างจากการเคลื่อนไหว ซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่มีค่าพิกัดสามมิติจากการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศหลายมุมมองที่มีส่วนที่ซ้อนหรือเกยกันของภาพถ่ายทางอากาศ ค่าพิกัดสามมิติที่ได้นั้นจะมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นหากเกิดจากการตัดกันของรังสีของแสง

มากกว่า 2 เส้น ขึ้นไป [9,14] โดยรังสีของแสงเหล่านี้จะมีความถูกต้องสอดคล้องตามการคำนวณปรับแก้กล้องลำแสงในขั้นตอนก่อนหน้านี้

5. ผลการศึกษา

5.1 ผลขยายสามเหลี่ยมทางอากาศของบล็อกภาพถ่ายทางอากาศ

ผลการประมวลผลขยายสามเหลี่ยมทางอากาศด้วยโปรแกรม PIX4Dmapper จะแบ่งออกเป็น 3 ผลการศึกษา ตามรูปแบบการประมวลผล 3 ครั้ง ได้แก่

- 1) การใช้จุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน ชุดที่ 1 เป็นจุดควบคุม และจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน ชุดที่ 2 เป็นจุดตรวจสอบ ได้ผลดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าสถิติของความคลาดเคลื่อนของแต่ละแกนพิกัด ได้แก่ Easting, Northing และ Height ของ (ก) จุดบังคับฯ ชุดที่ 1 ที่ใช้เป็นจุดควบคุม และ (ข) จุดบังคับฯ ชุดที่ 2 ที่ใช้เป็นจุดตรวจสอบ ของการประมวลผลขยายสามเหลี่ยมทางอากาศในแบบที่ 1

(ก)				(ข)					
GCP = 12 จุด		ค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละแกนพิกัด (ม.)			CP = 13 จุด		ค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละแกนพิกัด (ม.)		
		Easting	Northing	Height			Easting	Northing	Height
ค่าเฉลี่ย		0.0009	0.0009	0.0071	ค่าเฉลี่ย		-0.0283	-0.0062	0.1337
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.0199	0.0322	0.0265	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.0753	0.0910	0.1585
RMSE		0.0200	0.0322	0.0274	RMSE		0.0805	0.0912	0.2073

- 2) การใช้จุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินชุดที่ 2 เป็นจุดควบคุม และจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินชุดที่ 1 เป็นจุดตรวจสอบ ได้ผลดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าสถิติของความคลาดเคลื่อนของแต่ละแกนพิกัด ได้แก่ Easting, Northing และ Height ของ (ก) จุดบังคับฯ ชุดที่ 2 ที่ใช้เป็นจุดควบคุม และ (ข) จุดบังคับฯ ชุดที่ 1 ที่ใช้เป็นจุดตรวจสอบ ของการประมวลผลขยายสามเหลี่ยมทางอากาศในแบบที่ 2

(ก)				(ข)					
GCP = 13 จุด		ค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละแกนพิกัด (ม.)			CP = 12 จุด		ค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละแกนพิกัด (ม.)		
		Easting	Northing	Height			Easting	Northing	Height
ค่าเฉลี่ย		0.0031	-0.0009	0.0171	ค่าเฉลี่ย		0.0013	0.0041	-0.0799
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.0190	0.0258	0.0521	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.0648	0.1079	0.1086
RMSE		0.0193	0.0258	0.0548	RMSE		0.0648	0.1080	0.1348

- 3) การใช้จุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินทั้งหมด 25 จุด เป็นจุดควบคุม ได้ผลดังตารางที่ 6

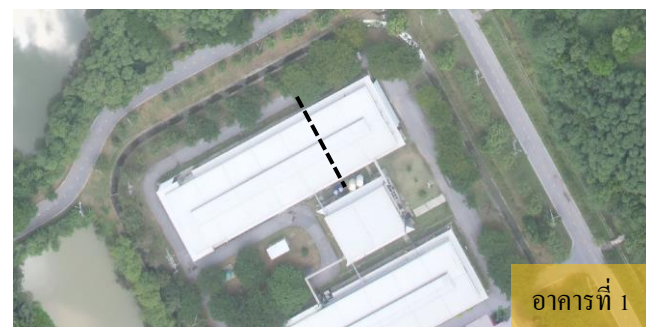
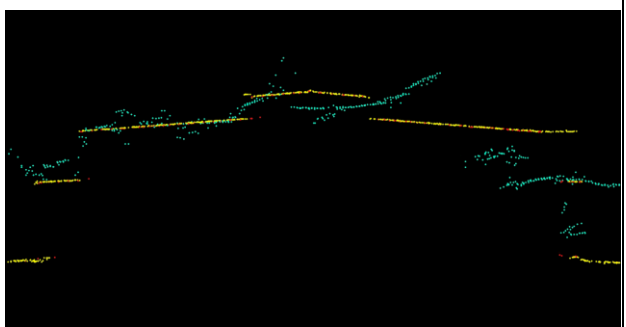
ตารางที่ 6 ค่าสถิติของความคลาดเคลื่อนของแต่ละแกนพิกัด ได้แก่ Easting, Northing และ Height ของการใช้จุดบังคับฯ ทั้งหมดจำนวน 25 จุด ในการประมวลผลถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ ในแบบที่ 3

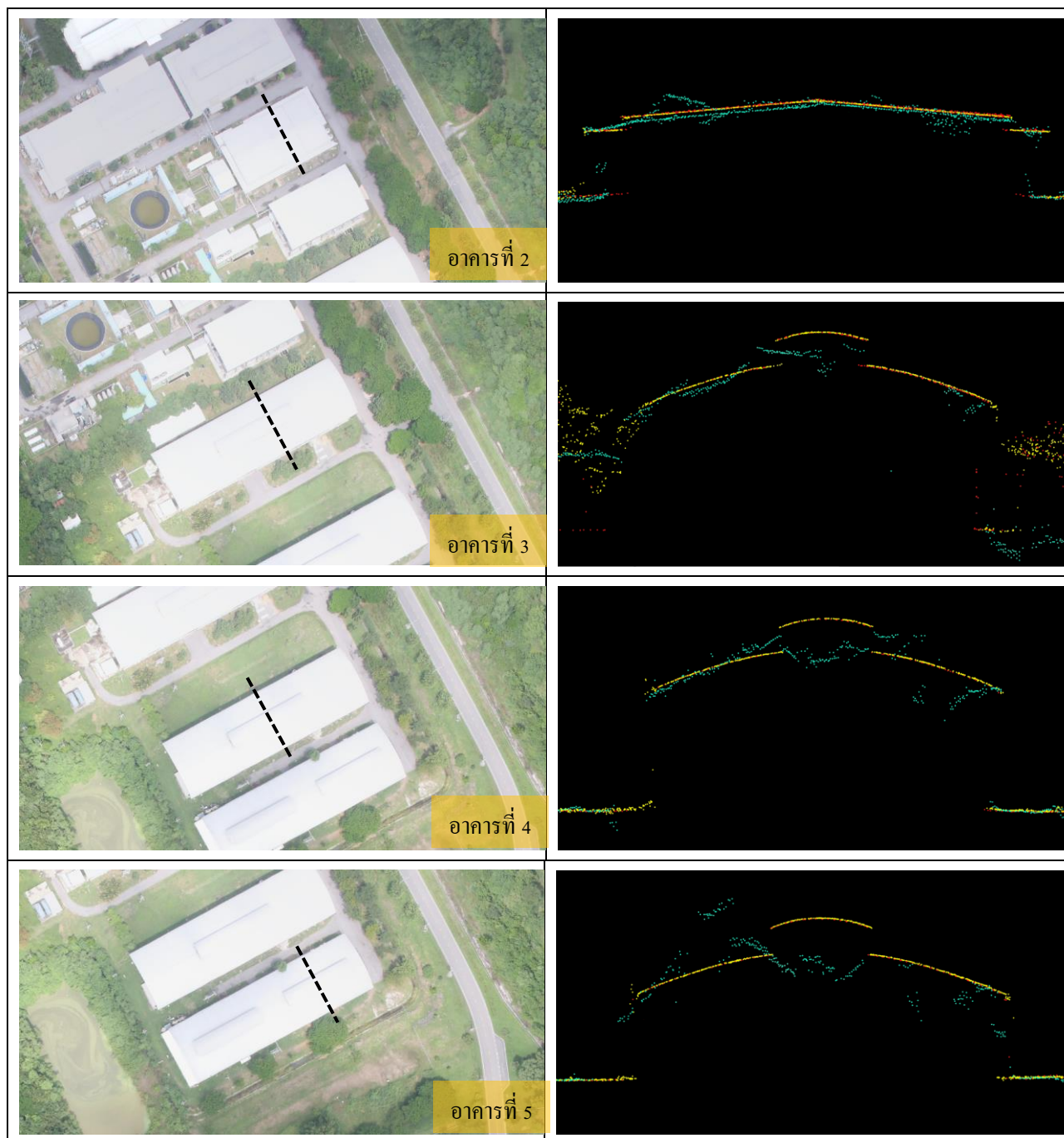
GCP = 25 จุด	ค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละแกนพิกัด (ม.)		
	Easting	Northing	Height
ค่าเฉลี่ย	0.0017	-0.0008	0.0197
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0260	0.0405	0.0579
RMSE	0.0260	0.0405	0.0612

5.2 ผลการเปรียบเทียบลักษณะการเรียงตัวของข้อมูลพอยต์คลาวด์

หลังจากการประมวลผลถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศของบล็อกภาพถ่ายทางอากาศเสร็จเรียบร้อยแล้ว จะผลิตข้อมูลพอยต์คลาวด์ด้วยการสร้างพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่น โดยจะมีการกำหนดค่า มาตราส่วนภาพ (Image scale) เป็น $\frac{1}{2}$ ของขนาดภาพ (Half image size, Default) ความหนาแน่นของจุด เป็น ตามความเหมาะสม (Optimal) และ การจับคู่จุดภาพที่ใช้ต่อการรังวัด 1 จุด (Minimum Number of Matches) อย่างน้อย 3 จุดภาพขึ้นไป (At least 3 points) โดยค่าที่ระบุทั้งหมดนี้เป็นค่ากำหนดเบื้องต้นที่โปรแกรมได้กำหนดไว้ให้อยู่แล้ว (Default) จากนั้นจะนำข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการผลิตด้วยคอมพิวเตอร์ตามกระบวนการสำรวจด้วยภาพถ่ายทั้ง 2 ชุดข้อมูล (ข้อมูลพอยต์คลาวด์จาก SfM ที่ได้จากชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่ถ่ายด้วยกล้อง Cannon EOS 5DSR และ ZENMUSE P1) ไปเปรียบเทียบกับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสแกนด้วยเลเซอร์ที่มีการกำหนดพิกัดตำแหน่งของโลกด้วยวิธีตรงไว้แล้ว เฉพาะในส่วนของการอาคารขนาดใหญ่ที่อยู่ในพื้นที่การศึกษา (ตารางที่ 7)

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบลักษณะการเรียงตัวของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จาก 2 วิธีการ เฉพาะอาคารขนาดใหญ่ที่อยู่ในพื้นที่ศึกษา โดยจุดสีแดงเป็นข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสแกนด้วยเลเซอร์ทางอากาศ จุดสีเหลืองเป็นข้อมูลพอยต์คลาวด์จาก SfM (ZENMUSE P1) และจุดสีฟ้าเป็นข้อมูลพอยต์คลาวด์จาก SfM (Cannon EOS 5DSR) และเส้นประสีดำคือแนวตัดของภาพตัดขวาง

มุมมองด้านบน (ภาพถ่ายออร์โธ)	มุมมองภาพตัดขวาง (ข้อมูลพอยต์คลาวด์)
	



5.3 ผลการคำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่างทางความสูง

ในการคำนวณเพื่อหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่างทางความสูงระหว่างข้อมูลพอยต์คลาวด์นั้น จะเลือกนำตัวอย่างมาจากบริเวณพื้นที่ที่มีความราบเรียบของตัวหลังคาของแต่ละอาคารในขนาดพื้นที่ 5 x 6 ตร.ม. โดยในการเปรียบเทียบเพื่อคำนวณค่าความสูงต่างของข้อมูลพอยต์คลาวด์นั้นจะใช้การเปรียบเทียบระหว่าง 1) ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากเลเซอร์สแกนเนอร์เทียบกับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากชุดข้อมูลภาพถ่ายของ ZENMUSE P1 และ 2) ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากเลเซอร์สแกนเนอร์เทียบกับข้อมูล

พอยต์คลาวด์จากชุดข้อมูลภาพถ่ายของ Cannon EOS 5DSR โดยจุดของพอยต์คลาวด์แต่ละชนิดที่นำมาเปรียบเทียบค่าความสูงต่อกันนั้นจะต้องเป็นจุดที่มีค่าพิกัดทางทิศตะวันออกและทิศเหนือ (E, N) ที่ตรงกัน หรือใกล้เคียงกัน โดยมีรัศมีไม่เกิน 10 ซม. และเมื่อคำนวณค่าความสูงต่างแล้วจะนำไปคำนวณหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 8 ซึ่งพบว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่างทางความสูงระหว่างข้อมูลพอยต์คลาวด์จากเลเซอร์สแกนและข้อมูลพอยต์คลาวด์จากชุดข้อมูลภาพถ่ายของ ZENMUSE P1 มีค่าอยู่ในช่วง 0.016 – 0.023 เซนติเมตรเท่านั้น แต่แตกต่างกับ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่างทางความสูงระหว่างข้อมูลพอยต์คลาวด์จากเลเซอร์สแกนและข้อมูลพอยต์คลาวด์จากชุดข้อมูลภาพถ่ายของ Cannon EOS 5DSR ที่มีค่าสูงถึง 0.318 – 2.23 เมตร แสดงให้เห็นได้ว่า ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากชุดข้อมูลภาพถ่ายของ Cannon EOS 5DSR มีความไม่ถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งที่สูงมาก

ตารางที่ 8 ตารางแสดงค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่างทางความสูงของข้อมูลพอยต์คลาวด์ระหว่างการสแกนด้วยเลเซอร์ (ULS) และการประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่าย จำนวน 2 ชุด (ZENMUSE P1, Cannon EOS 5DSR)

อาคารที่	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่างทางความสูง (ม.) ของข้อมูลพอยต์คลาวด์	
	UAV LS (LiDAR Swiss) - SfM (ZENMUSE P1)	UAV LS (LiDAR Swiss) - SfM (Cannon EOS 5DSR)
1	0.016	0.318
2	0.023	0.545
3	0.020	0.695
4	0.018	0.609
5	0.019	2.230

6. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาเปรียบเทียบลักษณะการเรียงตัวของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้มาด้วยวิธีการ สแกนด้วยเลเซอร์ (ULS) เทียบการประมวลผลด้วยวิธีการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ของภาพถ่ายทางอากาศ (SfM / PCV) ในส่วนของอาคารขนาดใหญ่ในพื้นที่ศึกษาพบว่า ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสแกนด้วยเลเซอร์ และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากชุดข้อมูลภาพถ่ายที่ถ่ายด้วยกล้อง ZENMUSE P1 (ส่วนซ้อน 80% / 60%) มีลักษณะการเรียงตัวที่สอดคล้องไปตามรูปแบบโครงสร้างหลังคาของอาคารทั้ง 5 อาคาร ซึ่งจะมีความแตกต่างกันกับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากชุดข้อมูลภาพถ่ายที่ถ่ายด้วยกล้อง Cannon EOS 5DSR (ส่วนซ้อน 65% / 35%) ที่พบว่า มีการเรียงตัวของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ไม่สอดคล้องกับรูปแบบโครงสร้างหลังคาของอาคารในทุกอาคาร โดยเห็นได้จากภาพตัดขวางในตารางที่ 5 รวมไปถึงการคำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่างทางความสูงของข้อมูลพอยต์คลาวด์แต่ละชนิดที่นำมาเปรียบเทียบกันในตารางที่ 6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่างทางความสูงระหว่างข้อมูลพอยต์คลาวด์จากเลเซอร์สแกนเนอร์และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากชุดภาพถ่ายจากกล้อง ZENMUSE P1 ของแต่ละอาคารจะมีค่าอยู่ที่ราวๆ 2 ซม. เท่านั้น ซึ่งต่างกับค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าต่างทางความสูงระหว่างข้อมูลพอยต์คลาวด์จากเลเซอร์สแกนเนอร์และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากชุดภาพถ่ายจากกล้อง Cannon EOS 5DSR ของแต่ละอาคารที่มีค่าตั้งแต่ 30 ซม. ไปจนถึง 2 ม. นี่แสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนว่าข้อมูลพอยต์คลาวด์จากกระบวนการผลิตด้วยคอมพิวเตอร์ในการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากชุดข้อมูลภาพถ่ายที่ถ่ายด้วยกล้อง Cannon EOS 5DSR ยังมีความไม่ถูกต้องทางตำแหน่งสอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างหลังคาของอาคาร เนื่องมาจากพื้นที่ของส่วนซ้อนและส่วนเกยของภาพถ่ายมีขนาดที่ไม่เพียงพอต่อการจะทำให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์มีความหนาแน่น อีกทั้งมุมมองของ

ภาพที่ซ้อนกันน้อยจึงส่งผลต่อการจับคู่จุดภาพและการปรับแก้สีคลอแสงของภาพถ่ายทางอากาศ นอกจากนี้ยังมีผลสืบเนื่องมาจากการจัดทำจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินที่เป็นการจัดทำเป็นภายหลัง ซึ่งมีระยะเวลาในการสำรวจจุดบังคับภาพถ่ายและการบินถ่ายภาพที่ห่างกันมากถึง 3 ปี ทำให้สภาพภูมิประเทศในพื้นที่จริงมีการเปลี่ยนแปลงไปจากที่เห็นในภาพถ่าย เช่น การตีเส้นถนนและการทำถนนใหม่ เป็นต้น ทำให้การระบุตำแหน่งของจุดบังคับภาพถ่ายลงในภาพถ่ายทางอากาศนั้นเกิดความยุ่งยากและอาจมีความผิดแปลกไปจากความเป็นจริง ซึ่งจะส่งผลไปยังขั้นตอนในการประมวลผลต่อๆ มาด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสแกนด้วยเลเซอร์และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากชุดข้อมูลภาพถ่ายที่ถ่ายด้วยกล้อง ZENMUSE P1 ที่มีรายละเอียดประกอบการบินคือ มีส่วนซ้อนร้อยละ 80 ส่วนเกยร้อยละ 60 และมีความละเอียดจุดภาพเชิงพื้นที่ที่ 2 เซนติเมตร นั้นมีความถูกต้องที่สูงกว่าและมีคุณภาพที่ดีกว่า เหมาะสมในการนำไปจัดทำแบบจำลองพื้นผิว (Digital Surface Model : DSM) และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการขึ้นรูปแบบจำลองของอาคารหรือการจัดทำแผนที่สามมิติได้

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล สันติธรรมนันทน์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ทางด้านทฤษฎีและเทคนิคการปฏิบัติของการสำรวจจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน ตลอดจนการประมวลผลคลอภาพถ่ายทางอากาศ อีกทั้งให้คำแนะนำสำหรับการแก้ไขปัญหาต่างๆ 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, 2014.
- [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] Schönberger, J.L., F. Fraundorfer, and J.M. Frahm. Structure-from-motion for MAV image sequence analysis with photogrammetric applications. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2014. pp. 305-312.
- [5] Hyeon Jeong, J. et al. Dense Thermal 3D Point Cloud Generation of Building Envelope by Drone-based Photogrammetry. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 2021.
- [6] Hillen, F. *Optimization of LiDAR data line of sight analysis in service-oriented architectures using the OGC Web Processing Service*, in *The Geoinformatics course*. 2011, The University of Osnabruck: Germany. pp. 83.
- [7] Santitamont, P. *Digital photogrammetry*. Bangkok. 2021.
- [8] Glira, P. *Hybrid Orientation of LiDAR Point Clouds and Aerial Images*, in *Department of Geodesy and Geoinformation*. TU Wien: Austria, 2018.
- [9] Strecha, C. *The rayCloud—a vision beyond the point cloud*. 2014.
- [10] ESRI. *What is lidar data?*. Available from: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/las-dataset/what-is-lidar-data-.htm>

- [11] Bannakulpiphat, T. *et al.* Best practice for Mapping Production from UAV Imagery. *Engineering Journal of Research and Development*, 2023, 34 (1).
- [12] Laoniphon, C. *et al.* Performance Assessments of Correction Models in GNSS Network-based RTK Positioning. *18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, 2021. pp.2-5
- [13] Bannakulpiphat, T. *et al.* A Case Study Of Multi-Head Camera Systems On UAV For The Generation Of High-Quality 3D Mapping. *Engineering Journal of Research and Development*, 2022, 33 (4).
- [14] Ye, N. *et al.* Accurate and dense point cloud generation for industrial Measurement via target-free photogrammetry. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 140.