

การประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับราคาถูกในการทำแผนที่ความละเอียดสูง: กรณีศึกษาการทำแผนที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พื้นที่การศึกษาราชบุรี

ธีระ ลาภิศขยางกูร^{1*} อภิสิทธิ์ ภาสตา² และ คมศิลป์ วังยาว^{3*}

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

* Corresponding Author: theera.lil@mail.kmutt.ac.th และ komsilp@jgsee.kmutt.ac.th

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

² นักศึกษาระดับปริญญาโท บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม และ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีพลังงานและสิ่งแวดล้อม

³ Research Associate บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม และ Research Associate ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีพลังงานและสิ่งแวดล้อม

ข้อมูลบทความ

บทคัดย่อ

ประวัติบทความ :

รับเพื่อพิจารณา : 20 มกราคม 2563

แก้ไข : 29 กรกฎาคม 2563

ตอบรับ : 17 สิงหาคม 2563

คำสำคัญ :

การสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ / แผนที่ภูมิประเทศ / โดรน

โครงการวิจัยนี้เป็นการทำแผนที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พื้นที่การศึกษาราชบุรี ด้วยเทคนิคการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับชนิดราคาถูก เพื่อสร้างภาพออร์โธแบบจำลองระดับพื้นผิววัตถุ แบบจำลองระดับพื้นดิน และประเมินหาความถูกต้องของแผนที่และแบบจำลองในการทำแผนที่ได้เก็บค่าพิกัดจากจุดควบคุมภาพภาคพื้นดินจำนวน 16 จุด และจุดตรวจสอบจำนวน 21 จุด เพื่อนำมาใช้ในการตรึงภาพและประเมินความถูกต้องของแผนที่ จากนั้นใช้อากาศยานไร้คนขับถ่ายภาพที่ Ground Sampling Distance (GSD) เท่ากับ 5 เซนติเมตร/จุดภาพ ระยะซ้อนทับด้านหน้า 80 เปอร์เซ็นต์ และระยะซ้อนทับด้านข้าง 75 เปอร์เซ็นต์ นำภาพที่ได้ทั้งหมดไปประมวลผลด้วยโปรแกรม Pix4Dmapper เวอร์ชัน 4.4 พบว่า จุดควบคุมภาพมีค่า $RMSE_x$ เท่ากับ 1.24 เซนติเมตร ค่า $RMSE_y$ เท่ากับ 1.86 เซนติเมตร ค่า $RMSE_z$ เท่ากับ 0.42 เซนติเมตร และค่า $RMSE_r$ เท่ากับ 1.17 เซนติเมตร ที่จุดตรวจสอบมีค่า $RMSE_x$ เท่ากับ 4.75 เซนติเมตร ค่า $RMSE_y$ เท่ากับ 4.76 เซนติเมตร ค่า $RMSE_z$ เท่ากับ 6.95 เซนติเมตร และค่า $RMSE_r$ เท่ากับ 5.48 เซนติเมตร เมื่อเทียบความถูกต้องในแนวราบตาม ASPRS 2014 พบว่า ภาพออร์โธที่ได้มีค่า $RMSE_x$ และ $RMSE_y$ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 จุดภาพ จึงสามารถใช้แผนที่ภาพถ่ายทางอากาศที่ได้ในงานความถูกต้องสูง และเมื่อเทียบกับมาตรฐาน ASPRS 1990 พบว่า จัดเป็นงานชั้น 1 ที่มาตราส่วน 1:400 หรือมาตราส่วนที่เล็กกว่าได้ ในแง่ของความถูกต้องในแนวตั้งตามมาตรฐาน ASPRS 2014 พบว่า ชั้นความถูกต้องทางแนวตั้งอยู่ที่ 10 เซนติเมตร ดังนั้น เทคนิคการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับชนิดราคาถูกจึงนับเป็นเทคโนโลยีที่มีความก้าวหน้า และสามารถเข้ามาเปลี่ยนรูปแบบการทำแผนที่แบบเดิม อีกทั้งยังประหยัดทั้งค่าใช้จ่าย เวลา และแรงงานในการทำงานในสนามได้มาก

Application of Low-cost Unmanned Aerial Vehicle for Accurate Mapping: Case Study at King Mongkut's University of Technology Thonburi, Ratchaburi Residential College

Theera Laphitchayangkul^{1*}, Abhisit Bhatsada² and Komsilp Wangyao^{3*}

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Thungkru, Bangkok 10140

* Corresponding Author : theera.lil@mail.kmutt.ac.th and komsilp@jgsee.kmutt.ac.th

¹ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering

² Master Student, The Joint Graduate School of Energy and Environment and Center of Excellence on Energy Technology and Environment (CEE), PERDO.

³ Research Associate, The Joint Graduate School of Energy and Research Associate, Environment and Center of Excellence on Energy Technology and Environment (CEE), PERDO.

Article Info

Abstract

Article History:

Received: January 20, 2020

Revised: July 29, 2020

Accepted: August 17, 2020

Keywords:

UAV photogrammetry /

Topographic map / Drone

In this study, photogrammetric potential of low-cost UAVs for accurate mapping was tested at King Mongkut's University of Technology Thonburi, Ratchaburi Residential College by analyzing the accuracy of a digital elevation model (DEM) from low-cost UAV photogrammetry. Ground control points (GCPs) and check points (CPs) were established using a technique based on global navigation satellite system. Sixteen points were placed as GCPs for geo-referencing and twenty-one points were placed as CPs for accuracy evaluation. A flight plan was set at the ground sampling distance (GSD) of 5 cm/pixel with 80% frontal overlap and 75% side overlap. The collected photos and positions were processed via the Pix4Dmapper software (version 4.5) for generating densified point cloud, DEM, orthomosaic and contour lines. The outputs were evaluated for planimetric and vertical accuracies using root mean square error (RMSE). The results showed that $RMSE_x$, $RMSE_y$, $RMSE_z$, and $RMSE_T$ of GCPs were 1.24, 1.86, 0.42, and 1.17 cm, respectively. At the CPs, $RMSE_x$, $RMSE_y$, $RMSE_z$, and $RMSE_T$ were 4.75, 4.76, 6.95, and 5.48 cm, respectively. In accordance with the ASPRS 2014 standard, the orthomosaic obtained in this study can be used for the highest accuracy work because both $RMSE_x$ and $RMSE_y$ values were less than 1-pixel. As per the former ASPRS 1990 standard, the map scale was noted to be 1:400 or smaller in Class 1. In the case of the vertical accuracy evaluation, the result was in "the 10 cm of vertical accuracy class" that meets the ASPRS 2014 standard. Therefore, UAV photogrammetry from low-cost UAV could be regarded as an advanced technology, which can potentially change conventional mapping; it also leads to the savings in terms of cost, time and labor in the field.

1. บทนำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พื้นที่การศึกษาราชบุรี จัดตั้งขึ้นเพื่อพัฒนาให้เป็นวิทยาเขตที่มีลักษณะเป็นเมืองมหาวิทยาลัย คือมีสถานที่เรียนและวิจัย สถานที่ทำสวนอุตสาหกรรม โรงเรียนและโรงพยาบาล ที่พักอาศัยของอาจารย์และนักศึกษา แปลงทดลองสำหรับงานด้านเกษตรกรรมเพื่ออุตสาหกรรม งานด้านทรัพยากรชีวภาพและเครื่องจักรกลเกษตร สวนธรรมชาติที่แสดงความหลากหลายทางชีวภาพ พื้นที่พักผ่อนและเล่นกีฬา และอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ ซึ่งในปี พ.ศ. 2553 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พื้นที่การศึกษาราชบุรี ได้จัดสร้าง อาคารเรียนรวม อาคารหอสมุดและสำนักงานผู้บริหาร อาคารปฏิบัติการ อาคารวิจัยและอาคารหอประชุม สำหรับจัดการเรียนการสอนหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้นักศึกษาพักในมหาวิทยาลัย โดยที่มหาวิทยาลัยเป็นทั้งที่พักและที่จัดการเรียนรู้ แต่เนื่องจากพื้นที่ของมหาวิทยาลัยมีขนาดกว้างขวางในการจัดการด้านพื้นที่จะต้องมีแผนที่สำหรับการจัดการและดูแล โดยเครื่องมือในการสำรวจจากการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม หรือรังวัดด้วยการกำหนดตำแหน่งพิกัดด้วยดาวเทียมสำหรับการทำแผนที่ยังมีข้อจำกัดต่างๆ คือ ใช้ระยะเวลานาน มีต้นทุนค่อนข้างสูง

ปัจจุบันเทคโนโลยีในการสำรวจมีความเจริญก้าวหน้าเป็นอย่างมาก ได้มีการพัฒนาเครื่องบินถ่ายภาพทางอากาศแบบเดิมมาเป็นอากาศยานไร้คนขับ เนื่องจากมีความง่ายในการบังคับใช้งาน ความสามารถในการบังคับควบคุมการบินด้วยอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อน และกำหนดตำแหน่งพิกัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสบนภาพในการประมวลผล ให้ภาพที่มีความละเอียดและมีความคมชัด และความถูกต้อง สามารถนำไปใช้งานในด้านต่างๆ ได้

การศึกษาโครงการวิจัยนี้เป็นการนำเทคนิคการทำแผนที่ด้วยเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ในการรังวัดบนพื้นที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พื้นที่การศึกษาราชบุรี เพื่อให้ได้ค่าพิกัดและระยะที่ถูกต้องของพื้นที่ในการจัดการด้านพื้นที่และงานด้านอื่นๆ เช่น การวางตำแหน่งอาคาร การกำหนดพื้นที่บ่อน้ำ การตรวจสอบแนวเขต และแสดงระดับความสูง-ต่ำของพื้นที่ในมหาวิทยาลัย ได้อย่างถูกต้อง

2. วัตถุประสงค์

- เพื่อสร้างภาพออร์โธ (Ortho Mosaic) แบบจำลองระดับพื้นผิววัตถุ (Digital Surface Model, DSM) แบบจำลองระดับพื้นดิน (Digital Terrain Model, DTM) ด้วยอากาศยานไร้คนขับชนิดรอกคานูก
- เพื่อหาค่าความถูกต้องทางตำแหน่งของผลลัพธ์ที่ได้

3. ขอบเขต

- พื้นที่ที่ทำการศึกษาคือ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พื้นที่การศึกษาราชบุรี
- อากาศยานไร้คนขับที่ใช้ในการบินถ่ายภาพคือชนิด Quadcopter รุ่น DJI Phantom 3 Professional ติดกล้องยี่ห้อ Sony EXMOR โดยมีเซนเซอร์ขนาด 1/2.3 นิ้ว CMOS มีความละเอียด 12.0 megapixels (4000 × 3000 จุดภาพ) โดยบินให้ได้ Ground Sampling Distance (GSD) เท่ากับ 5 เซนติเมตร/จุดภาพ
- ใช้โปรแกรม Pix4Dmapper เวอร์ชัน 4.4 ในการประมวลผลและทำแผนที่
- การหาพิกัดหมุดควบคุมและจุดตรวจสอบใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมยี่ห้อ Hi-Target รุ่น V100 รังวัดด้วยวิธีแบบจลน์ (Real Time Kinematic, RTK) มีความละเอียดทางราบ ± 8 มม.+1 ppm และทางตั้ง ± 15 มม. + 1 ppm

4. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) เริ่มแรกใช้สำหรับทางการทหารเพื่อตรวจสอบพื้นที่ทำการรบหรือสอดแนมข้าศึกที่ต้องการทราบสภาพแวดล้อมในพื้นที่แทนการส่งทหารเข้าไปซึ่งจะเสี่ยงต่อการบาดเจ็บ ในบางครั้งอาจจะมีการติดอาวุธเพื่อใช้ทำลายเป้าหมายที่ต้องการ [1] ปัจจุบันมีการพัฒนาไม่ได้จำกัดแต่ในทางทหารเท่านั้น ได้ถูกใช้ในงานหลากหลาย เช่น ถ่ายรูปหรือวิดีโอจากมุมสูง การขนส่งสินค้า เป็นต้น อากาศยานไร้คนขับแต่ละบริษัทจะมีรูปร่าง ขนาด รูปแบบ และลักษณะที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับการใช้งาน แต่การควบคุมจะมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ การควบคุมด้วยเครื่องควบคุมจากผู้ใช้งานหรือการควบคุมอัตโนมัติ โดยการควบคุมแบบอัตโนมัติจะใช้ระบบการบินด้วยตนเองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อกำหนดทิศทางการบินในพื้นที่ที่ต้องการและในส่วนของการ

ตัดสินใจเส้นทางการบินนั้น แบ่งออกเป็น 3 รูปแบบ [2] คือ

- 1) บังคับจากศูนย์ควบคุมระยะไกล
- 2) มีการโปรแกรมไว้ให้บินไปตามเส้นทางที่กำหนด
- 3) วินิจฉัยการเดินทางด้วยคอมพิวเตอร์บนอากาศยาน

ในปัจจุบันงานสำรวจภูมิประเทศได้นำ เทคโนโลยีดังกล่าว มาใช้ในงานสำรวจด้วยภาพถ่าย (UAV Photogrammetry) ทำการถ่ายภาพและนำมาประมวลผล ซึ่งให้ผลลัพธ์ 3 ลักษณะ คือ ภาพออร์โธ แบบจำลองข้อมูลจุดความสูงเชิงพื้นผิว และแบบจำลองสามมิติ (3D model) การใช้อากาศยานไร้คนขับ ในงานสำรวจด้วยภาพถ่ายนั้นเหมาะสำหรับพื้นที่ที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากมีพิสัย การบินครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 1-5 ตาราง กิโลเมตร ขึ้นอยู่กับชนิดและระบบของอากาศยานไร้คนขับ



ก) อากาศยานไร้คนขับประเภทปีกหมุน (Multirotor)



ข) อากาศยานไร้คนขับประเภทปีกยัด (Fixed wing)

รูปที่ 1 แสดงอากาศยานไร้คนขับประเภท ก) ปีกหมุน (Multirotor) [3] ข) ปีกยัด (Fixed wing) [4] ตามลำดับ

ตัวอย่างอากาศยานไร้คนขับชนิดต่างๆ แสดง ไว้ในรูปที่ 1 ก) ประเภทปีกหมุน (Multirotor) แล ข) ประเภทปีกยัด (Fixed wing) ตามลำดับ นอกจากนั้นมีการใช้เพื่อการศึกษาวิจัย และพัฒนาในหลายสาขา Ajayi [5] ได้ทำวิจัยเรื่อง การสร้างแผนที่แบบจำลองสามมิติเพื่อใช้แก้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมในด้านต่างๆ เช่น การใช้เพื่อวางแผนทางอุทกวิทยาและอุตุนิยมวิทยา อุตสาหกรรมเหมืองแร่และน้ำมัน การประเมินความเสี่ยงและการคาดการณ์เรื่องอันตราย รูปแบบการวิจัยดังกล่าวได้กำหนด ลักษณะการถ่ายภาพจากอากาศยานไร้คนขับซึ่งมีการซ้อนทับ ด้านข้างประมาณ 15-20% และซ้อนทับด้านหน้ามากกว่า 50% ที่ระดับความสูงบิน 50 เมตร โดยใช้อากาศยานไร้คนขับยี่ห้อ DJI Phantom 3 Professional ประมวลผลภาพถ่ายด้วยซอฟต์แวร์ Agisoft PhotoScan ในการสร้างแบบจำลองแบบ Orthomosaic และแบบจำลองระดับความสูงแบบดิจิทัล (DEM)

ขณะที่อากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำมีการพัฒนาที่ดีขึ้น ทำให้ค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานลดลง และมีประสิทธิภาพในการผลิตผลลัพธ์ที่สามารถให้ความถูกต้องทางตำแหน่งสูงขึ้นในระดับน้อยกว่า 10 เซนติเมตรได้ ทั้งนี้ ผู้ใช้ต้องมีการวางแผนการบินอย่างเหมาะสม รวมทั้งมีความเข้าใจในหลักการและวิธีการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ ประเภทของอากาศยานไร้คนขับ อากาศยานไร้คนขับที่ใช้ในงานสำรวจด้วยภาพถ่ายนั้น จำแนกได้เป็น 2 ประเภท คือ 1. ประเภทปีกหมุน (Multirotor) ที่มีลักษณะการทำงานแบบเดียวกับเฮลิคอปเตอร์ โดยมีใบพัด แนวนอนมากกว่า 2 ใบพัด และ 2. ประเภทปีกยัด (Fixed wing) มีลักษณะเช่นเดียวกับเครื่องบินทั่วไป มีขนาดเล็ก และอาจมีการลดองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องลง ขึ้นอยู่กับการออกแบบของผู้ผลิต

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของ DEM ที่สร้างขึ้น ในการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลเชิงพื้นที่พบว่ามีความถูกต้องในแนวนอน และแนวตั้งเท่ากับ 4.67 และ 11.51 เซนติเมตรตามลำดับ [5] Hamilton [6] ได้ทำวิจัยเรื่อง การถ่ายภาพทางอากาศด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่อใช้ประโยชน์ในงานโบราณคดี พบว่า การทำแผนที่ทางโบราณคดีจะมีคุณภาพและให้ค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้ซอฟต์แวร์วางแผนการบิน การประมวลผลข้อมูลภาพและการปรับแก้ รวมถึงการวิเคราะห์ผลลัพธ์ภายในระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ การถ่ายภาพทางอากาศเป็นเครื่องมือในการวิจัยทางโบราณคดีเป็นกฎระเบียบที่ซับซ้อนมาก โดยในการทดลองนี้ทำการบิน 3 แบบ โดยมีระยะซ้อนทับด้านหน้าและด้านข้างเท่ากับ 75% และ 90%, 75% และ 80%, 75% และ 75% ตามลำดับ ที่ความสูงบิน 70, 50 และ 40 เมตร ตามลำดับ และนำมาสร้างแบบจำลองระดับ

ความสูงแบบดิจิทัล (DEM) และแบบจำลอง 3 มิติ ผลที่ได้คือการซ้อนทับด้านข้าง ที่ 75%, 80% และ 90% ให้ภาพที่มีคุณภาพดีและต่างกันไม่มาก เพียงแต่การทำแบบจำลองระดับความสูงแบบดิจิทัล (DEM) ต้องเก็บข้อมูลทั้งทางตั้งและทางราบจึงควรวางแผนบินให้มีระยะซ้อนทับด้านหน้า 75% และด้านข้าง 90% จะให้ผลดีที่สุด [6]

5. เครื่องมือและขั้นตอนในการดำเนินงาน

5.1 เครื่องมือที่ใช้ในการรังวัด ประกอบด้วย

- เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมหาค่าพิกัด Hi-Target รุ่น V100 จำนวน 2 เครื่อง (Base station และ Rover station)
- ขาตั้งกล้อง
- อากาศยานไร้คนขับที่ใช้ถ่ายภาพชนิด Quadcopter รุ่น DJI Phantom 3 Professional



ก) ลักษณะของจุดควบคุมภาพภาคพื้นดิน



ข) ลักษณะของจุดตรวจสอบ

รูปที่ 2 ลักษณะของจุดที่ใช้ในการรังวัด ก) ลักษณะของจุดควบคุมภาพภาคพื้นดิน
ข) ลักษณะของจุดตรวจสอบ

3) หาค่าพิกัดของจุดควบคุมภาพภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบโดยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสด้วยวิธีการแบบจลน์ ซึ่งกำหนดจุดควบคุมภาพภาคพื้นดิน 1 จุดให้มีพิกัดแน่นอนเป็นจุดออกงานวางพิกัดไว้ที่ทางเข้ามหาวิทยาลัยฯ โดยมีตำแหน่งทางภูมิศาสตร์คือ $N = 1,502,532.000$ เมตร, $E = 554,745.000$ เมตร, $Z = 50.000$ เมตร จากนั้นทำการตั้งเครื่องเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส (Base station) ที่จุดดังกล่าว อีกเครื่องหนึ่ง (Rover) ย้ายไปแต่ละจุดเพื่อทำการหาค่าพิกัดที่อ้างอิงจากจุดเริ่มต้น โดยทำการตั้งรับสัญญาณหาค่าพิกัดแต่ละจุดละ 3-10 นาที

5.2. ขั้นตอนในการดำเนินงาน

1) กำหนดตำแหน่งจุดควบคุมภาพภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบ โดยใช้ภาพถ่ายดาวเทียมจาก Google Maps และกำหนดลักษณะการบินถ่ายภาพโดยใช้ Pix4Dcapture application

2) วางตำแหน่งจุดควบคุมภาพภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบ ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยจุดควบคุมภาพภาคพื้นดินนั้นมีขนาดเท่ากับ 120×120 เซนติเมตร มีจำนวน 16 จุด ส่วนจุดตรวจสอบจะเป็นจุดที่ถูกสร้างขึ้นใหม่หรือใช้จุดที่มีอยู่ในพื้นที่ มีขนาด 50×50 เซนติเมตร จำนวน 21 จุด กระจายตามพื้นที่ดังรูปที่ 3

4) ทำการบินถ่ายภาพตามลักษณะการบินที่วางแผนไว้ ซึ่งมีจำนวนในการบินถ่ายภาพ 12 ครั้ง แต่ละภาพมีการซ้อนทับด้านหน้าและด้านข้างเท่ากับ 80% และ 75% ตามลำดับ เวลาที่ใช้ในการบินแต่ละครั้งอยู่ในช่วง 15-17 นาที รายละเอียดแสดงในตารางที่ 1 การบินถ่ายภาพในครั้งนี้ได้กำหนดความละเอียดของภาพถ่ายซึ่งแสดงผลในรูปแบบของค่า GSD เท่ากับ 5 เซนติเมตร/จุดภาพ ซึ่งค่า GSD นี้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความสูงการบินถ่ายภาพและ Resolution ของกล้องถ่ายภาพ

5) หลังจากนั้นนำภาพทั้งหมดที่ถ่ายได้ไปประมวลผลด้วยโปรแกรม Pix4Dmapper, version 4.4 เพื่อสร้างโมเดลแผนที่

ภาพออร์โธ แบบจำลองระดับพื้นผิววัดถุ และคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของจุดควบคุมภาพภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบ

6. การประเมินความถูกต้อง

6.1 สถิติในการประเมินความถูกต้อง

ในการศึกษานี้ใช้การประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลโมเดลด้วย Root Mean Square Error (RMSE) สำหรับค่าพิกัดของจุดควบคุมภาพภาคพื้นดิน ในการใส่ค่าพิกัดให้ภาพ (Geo-referencing) ของแผนที่ และการตรวจสอบความถูกต้องของตำแหน่งในแผนที่และแบบจำลองด้วยจุดตรวจสอบ สมการที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบด้วยสมการดังต่อไปนี้

$$RMSE_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{oi} - X_{GNSSi})^2}{n}} \quad (1)$$

$$RMSE_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{oi} - Y_{GNSSi})^2}{n}} \quad (2)$$

$$RMSE_{XY} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(X_{oi} - X_{GNSSi})^2 + (Y_{oi} - Y_{GNSSi})^2]}{n}} \quad (3)$$

$$RMSE_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{oi} - Z_{GNSSi})^2}{n}} \quad (4)$$

$$RMSE_T = \sqrt{(RMSE_{XY})^2 + (RMSE_Z)^2} \quad (5)$$

โดยที่

- n คือ จำนวนจุดควบคุมภาพภาคพื้นดิน หรือจุดตรวจสอบที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด

- X_{oi} , Y_{oi} และ Z_{oi} คือ ค่าพิกัด ในแกน X, Y และ Z ตามลำดับ ที่ได้จากการประมวลผลด้วยภาพ

- X_{GNSSi} , Y_{GNSSi} และ Z_{GNSSi} คือ ค่าพิกัดของจุดควบคุมภาพภาคพื้นดิน หรือจุดตรวจสอบ ในแกน X, Y และ Z ตามลำดับ ซึ่งได้จากการวัดจริงด้วยการรังวัดแบบ RTK โดยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม [7]

6.2 มาตรฐานสำหรับประเมินความถูกต้อง

ในการศึกษานี้ได้อ้างอิงความถูกต้องของพิกัดด้วยมาตรฐาน ASPRS 2014 ซึ่งเปรียบเทียบกับที่ได้กับค่าเกณฑ์ความถูกต้องสำหรับข้อมูลดิจิทัลภาพออร์โธ ค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของผลลัพธ์เชิงตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลข้อมูล ซึ่งเปรียบเทียบกับ ขนาดของจุดภาพ ซึ่งสัมพันธ์กับค่า GSD ต่อความถูกต้องเชิงตำแหน่งของผลลัพธ์ ในมาตรฐานจะ

แนะนำการนำภาพออร์โธที่ได้มาใช้ในการงานตั้งแต่ระดับ Highest accuracy work ซึ่งเป็นงานที่มีคุณภาพดีที่สุดในระดับที่ค่า $RMSE_X$ และ $RMSE_Y$ มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 จุดภาพ ระดับ Standard mapping and GIS work เป็นระดับที่ค่า $RMSE_X$ และ $RMSE_Y$ มีค่าอยู่ระหว่าง 1 จุดภาพ และระดับ Visualization and less accurate work เป็นระดับที่ค่า $RMSE_X$ และ $RMSE_Y$ มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 3 จุดภาพ [8]

7. ผลและวิจารณ์ผลการศึกษา

ผลจากการสำรวจและวิเคราะห์ข้อมูล จุดควบคุมภาพภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบ นำไปสร้างภาพถ่ายจริงของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พื้นที่การศึกษาราชบุรี สามารถแบ่งผลการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ

7.1 ภาพออร์โธที่ได้จากการประมวลผลด้วยโปรแกรม

7.2 ผลความถูกต้องของจุดควบคุมภาพภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบ

7.1 ภาพออร์โธที่ได้จากการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์

การศึกษานี้ใช้อากาศยานไร้คนขับบินถ่ายภาพครอบคลุมพื้นที่ 1.6 ตารางกิโลเมตร มีภาพที่ใช้ประมวลผลทั้งสิ้น 1,118 ภาพ โดยภาพที่ได้จากการประมวลผลเป็นภาพแสดงภูมิประเทศแบบ ออร์โธ ดังรูปที่ 4 ก) ภาพที่ถูกถ่ายซ้อนทับกันมีการประมวลผลแล้วเกิดจุดสำคัญภาพ (Key point image) เฉลี่ย จำนวน 11,787 จุดต่อภาพ ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพของการจับคู่ (Matching) กันของภาพถ่ายขณะประมวลผล การจับคู่ภาพถ่ายขณะประมวลผลจะมีการปรับแก้ Bundle Block ซึ่งเป็นการสร้างสมการร่วมเส้นของจุดควบคุมภาพถ่ายและจุดโยงยึด (Tie point) การปรับแก้นี้จะเป็นการจัดภาพถ่ายและค่าพิกัดของภูมิประเทศจริงของจุดโยงยึดซึ่งจะทำให้ค่าพิกัดของโมเดลมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น ในการปรับแก้ครั้งนี้ได้ผลความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.125 จุดภาพ จากการประมวลผลเป็นภาพแบบจำลองระดับพื้นผิววัดถุ (DSM) และภาพแบบจำลองระดับพื้นดิน (DTM) ดังแสดงในรูปที่ 4 ข) และ ค) ตามลำดับ มีระยะเวลาแตกต่างกันไป การประมวลผลภาพเป็นแบบจำลองระดับพื้นดิน (DSM) คือการสร้างโมเดลสามมิติจากกลุ่มจุด (Point Cloud) ซึ่งเมื่อรวมเป็นโมเดลแล้วจะเกิดเป็น

ตำแหน่งพิกัดเกิดขึ้น สำหรับการประมวลผลเป็นแบบจำลองระดับพื้นดิน จะแสดงพื้นผิวของพื้นที่ ดังรูปที่ 4 ค) แสดงเป็นระดับของสี โดยโทนสีแดงจะแสดงพื้นที่ที่ระดับสูงมากที่สุดไล่ไปพื้นที่ที่มีระดับต่ำสุดซึ่งแสดงด้วยโทนสีเขียว

7.2 ผลความถูกต้องของจุดควบคุมภาพภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบ

การทำแผนที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พื้นที่การศึกษาราชบุรี ด้วยอากาศยานไร้คนขับชนิดราคาถูกเพื่อพัฒนาให้ได้ค่าความถูกต้องทางพิกัดอยู่ในระดับสูงโดยเปรียบเทียบกับมาตรฐานสากล (ASPRS 2014) โดยขั้นตอนการถ่ายภาพนั้นใช้ DJI Phantom 3 Professional ซึ่งเป็น

อากาศยานไร้คนขับที่ถูกจัดอยู่ในประเภทราคาถูก ถึงแม้จะมีข้อจำกัดในการบินที่ระดับสูงไม่มากและมีระยะเวลาการปฏิบัติงานน้อย แต่ด้วยตัวอากาศยานมีกล้องถ่ายภาพความละเอียดสูง [9] จึงได้โมเดลที่มีความคมชัดและให้ค่าพิกัดถูกต้องเนื่องจากบินระยะต่ำซึ่ง David และคณะ [10] ได้แสดงในผลการทดลองถึงความสูงของการถ่ายภาพมีผลต่อค่าความถูกต้องของภาพ [10] สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้กล้องยี่ห้อเดียวกัน แต่ผลของงานวิจัยนี้กลับแสดงให้เห็นว่าความถูกต้องที่เกิดขึ้นกับค่าพิกัดได้ค่าความถูกต้องสูงตามมาตรฐานสากล Torres- Sánchez และคณะ [11] และ Sadeq [12] ให้ข้อมูลว่าการทำแผนที่ด้วยอากาศยานไร้คนขับต้องทำการถ่ายภาพด้วยการซ้อนทับภาพสูงเพื่อให้เกิดค่าความถูกต้องทางพิกัดสูงสุด



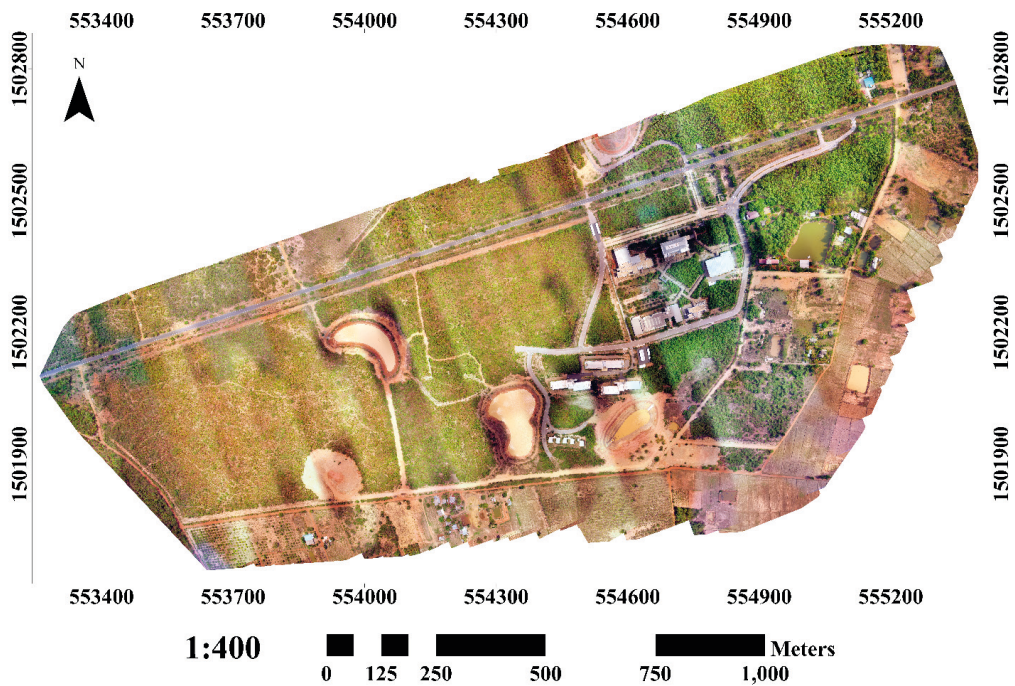
รูปที่ 3 ตำแหน่งของจุดควบคุมภาพภาคพื้นดิน (จุดสีแดง) และตำแหน่งจุดตรวจสอบ (จุดสีเหลือง)

ตารางที่ 1 กำหนดระยะเวลาและแนวนบินในการเก็บข้อมูล

หมายเลขแนวนบิน	การซ้อนทับระหว่างภาพ	การซ้อนทับระหว่างแถว	เวลาบิน	วัน/เดือน/ปี	เวลาขึ้นบิน
00204	80	75	16.05	6 May 2019	14:30 p.m.
00205	80	75	16.49	6 May 2019	13:56 p.m.
00206	80	75	17.03	6 May 2019	13:31 p.m.
00207	80	75	17.29	6 May 2019	13:04 a.m.

ตารางที่ 1 กำหนดระยะเวลาและแนวนบินในการเก็บข้อมูล (ต่อ)

หมายเลขแนวนบิน	การซ้อนทับ ระหว่างภาพ	การซ้อนทับ ระหว่างแถว	เวลาบิน	วัน/เดือน/ปี	เวลาขึ้นบิน
00208	80	75	17.36	6 May 2019	11:14 a.m.
00212	80	75	16.41	6 May 2019	8:20 a.m.
00213	80	75	15.12	6 May 2019	7:50 a.m.
00215	80	75	15.47	6 May 2019	9:09 a.m.
00216	80	75	17.01	6 May 2019	10:10 a.m.
00217	80	75	15.50	6 May 2019	10:50 a.m.
00220	80	75	17.38	6 May 2019	12:30 p.m.
00221	80	75	15.37	6 May 2019	14:54 p.m.

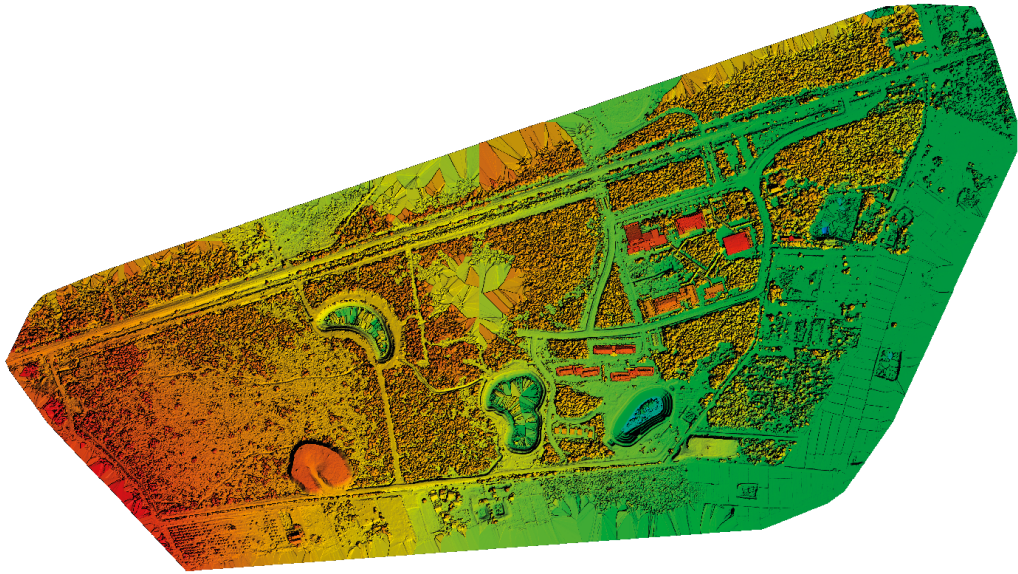


ก) ภาพออร์โธ (Ortho Mosaic)

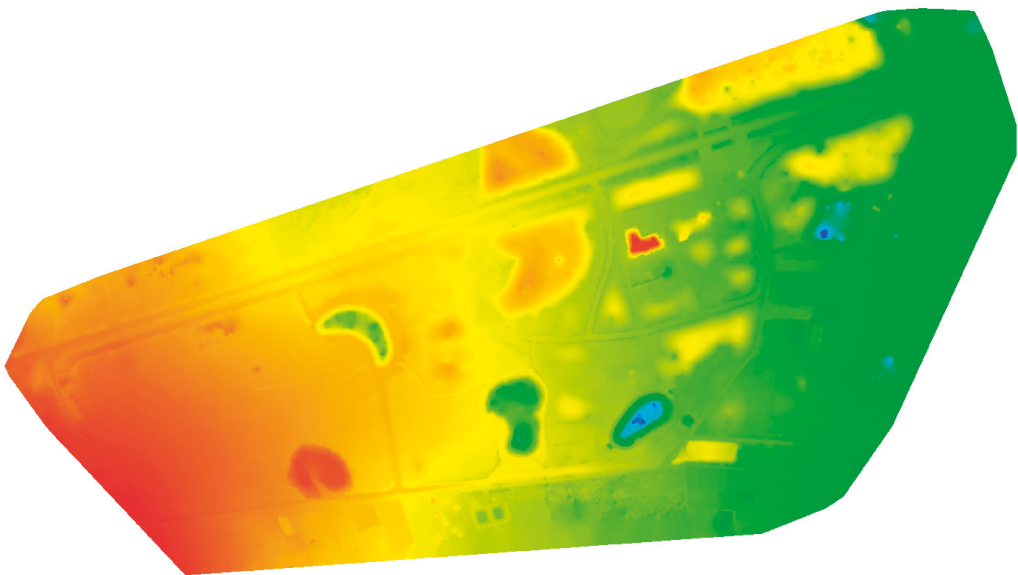
รูปที่ 4 แสดงภาพถ่ายของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีแบบต่างๆ จากการประมวลผล

ก) ภาพออร์โธ (Ortho Mosaic) ข) แบบจำลองระดับพื้นผิววัตถุ (Digital Surface Model : DSM)

และ ค) แบบจำลองระดับพื้นดิน (Digital Terrain Model : DTM)



ข) แบบจำลองระดับพื้นผิววัตถุ (Digital Surface Model : DSM)



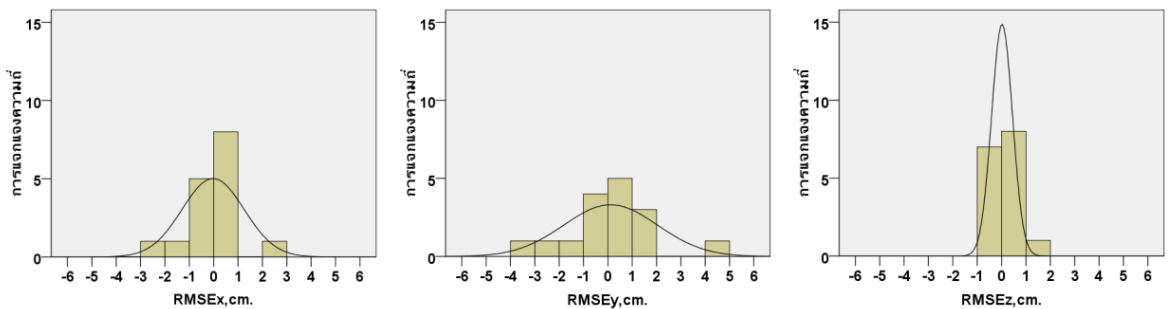
ค) แบบจำลองระดับพื้นดิน (Digital Terrain Model : DTM)

รูปที่ 4 แสดงภาพถ่ายของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรีแบบต่างๆ จากการประมวลผล
ก) ภาพออร์โธ (Ortho Mosaic) ข) แบบจำลองระดับพื้นผิววัตถุ (Digital Surface Model : DSM)
และ ค) แบบจำลองระดับพื้นดิน (Digital Terrain Model : DTM) (ต่อ)

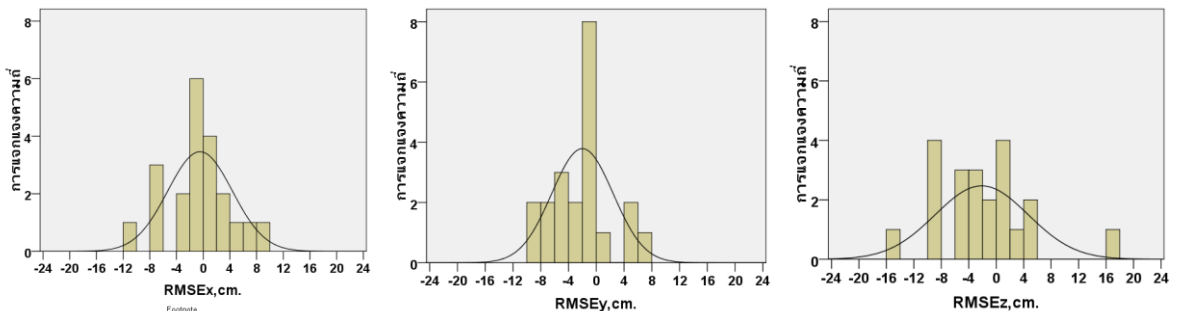
แต่ในงานวิจัยนี้ต้องการลดระยะเวลาการเก็บข้อมูลโดยเลือก การซ้อนทับไม่สูงมากนัก แต่ก็ได้ค่าความถูกต้องทางพิกัดสูง เช่นกัน ซึ่งการรังวัดที่เกิดขึ้นจากการสร้างโมเดลโดยอาศัยการ ใส่ค่าพิกัดให้ภาพจากพิกัดภาคพื้นดินจำนวนมากแทน ซึ่งในงาน วิจัยของ Akturk และ Altunel [13] ได้ทำการรังวัดพื้นที่บริเวณ มหาวิทยาลัย โดยใช้อากาศยานไร้คนขับราคาถูกและซอฟต์แวร์ แบบเดียวกันกับงานวิจัยนี้ กลับพบว่าค่าความคลาดเคลื่อน ในแนวระดับอยู่ที่ ± 146 เซนติเมตร ค่าความผิดพลาดจากการ ประมวลผล แบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model) มีค่าเท่ากับ 57 เซนติเมตร [13] งานวิจัยดังกล่าวได้ ทำการวางจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินจำนวน 14 จุด แต่พบว่าการวางดังกล่าวไม่ได้ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดและไม่มีการวางจุด ตรวจสอบ เมื่อไม่มีการวางจุดตรวจสอบทำให้ความน่าเชื่อถือ

ของข้อมูลลดลงไป เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้แล้วค่าความถูกต้อง ของแผนที่ต่างกันโดยสิ้นเชิง ดังนั้นค่าความถูกต้องของตำแหน่ง จึงแปรผลโดยตรงกับจำนวนและการกำหนดตำแหน่งจุดควบคุม ภาพถ่ายภาคพื้นดิน ตลอดจนรูปแบบการบินของอากาศยานไร้ คนขับ

ในการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการรังวัดด้วย ระบบดาวเทียม RTK และโมเดลที่สร้างจากภาพถ่ายทางอากาศ พบว่าตำแหน่งทั้งสองมีค่าคลาดเคลื่อนกันซึ่งแสดงผลในรูปแบบ ของ RMSE ดังนั้นเพื่อต้องการวิเคราะห์การกระจายตัวของ ความคลาดเคลื่อนทั้งในแนวราบและแนวดิ่งของข้อมูลค่าพิกัด จึงแสดงด้วยข้อมูลกราฟฮิสโตแกรมและเส้นการแจกแจง ดังแสดงในรูปที่ 5



ก) การแจกแจงความถี่ RMSE ของ GCP



ข) การแจกแจงความถี่ RMSE ของ CP

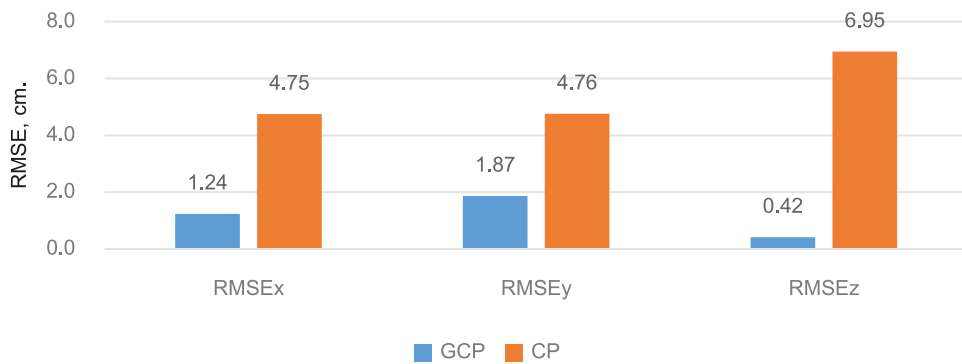
รูปที่ 5 แสดงฮิสโตแกรมการแจกแจงปกติของความคลาดเคลื่อน ก) ของจุดควบคุมภาคพื้นดิน GCP และ

ข) จุดตรวจสอบ CP

ในการวิเคราะห์ด้วยฮิสโตแกรมดังรูปที่ 5 ก) แสดงผลวิเคราะห์ของจุดควบคุมภาคพื้นดิน GCP ทั้งในแนวราบ ($RMSE_x$ และ $RMSE_y$) และแนวตั้ง ($RMSE_z$) พบว่าในแนวราบมีการแจกแจงความถี่ของความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าในแนวตั้ง โดยความถี่สูงสุดของข้อมูลในแนวราบคือ 6 โดยพบว่าข้อมูลของ $RMSE_x$ มีค่าความถี่สูงกว่า $RMSE_y$ และความถี่สูงสุดในแนวตั้งคือ 8 ในกราฟฮิสโตแกรมแสดงเส้นโค้งการกระจายปกติโดยกึ่งกลางของกราฟจะแสดงถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลซึ่งพบว่ายู่ที่ประมาณ 0 เซนติเมตร ในเส้นการกระจายปกติพบว่าเส้นโค้งของข้อมูลในแนวราบมีช่วงกว้างกว่าเส้นโค้งของข้อมูลในแนวตั้งซึ่งวิเคราะห์ได้ว่า ข้อมูลในแนวราบส่วนใหญ่มีความเกาะกลุ่มน้อยกว่าข้อมูลในแนวตั้งโดยช่วงของข้อมูลในแนวราบมีการกระจายตัวอยู่ระหว่าง -5 ถึง 5 เซนติเมตร ส่วนช่วงของข้อมูลในแนวตั้งมีการกระจายตัวอยู่ระหว่าง -2 ถึง 2 เซนติเมตร การเปรียบเทียบความถูกต้อง (Accuracy) และความแม่นยำ (Precision) ของข้อมูลพบว่า ความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดที่เกิดจากการรังวัดด้วย RTK และการรังวัดด้วยอากาศยานไร้คนขับผ่านการสร้างโมเดลเป็นภาพถ่ายออร์โธเป็นแผนที่ทำให้วิเคราะห์ได้ว่าข้อมูลของจุดควบคุมภาคพื้นดิน GCP มีทั้งความถูกต้องและความแม่นยำ โดยที่ข้อมูลพิกัดส่วนใหญ่ของทั้ง RTK และ โมเดลมีความใกล้เคียงกันจึงทำให้ข้อมูลพิกัดมีความถูกต้องสูง และโดยส่วนใหญ่ของข้อมูลพิกัดมีการเกาะกลุ่มกันมากจึงได้ข้อมูลที่มีความแม่นยำสูง ฮิสโตแกรมดังรูปที่ 5 ข) แสดงผลวิเคราะห์ของจุดตรวจสอบทั้งในแนวราบ ($RMSE_x$ และ $RMSE_y$) และแนวตั้ง ($RMSE_z$) พบว่าในแนวตั้งมีการแจกแจงความถี่ของความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าในแนวราบ โดยความถี่สูงสุดของข้อมูลในแนวราบคือ 6 และพบว่าข้อมูลของ $RMSE_y$ มีค่าความถี่สูงกว่า $RMSE_x$ และความถี่สูงสุดในแนวตั้งคือ 4 ในกราฟฮิสโตแกรมแสดงเส้นโค้งการกระจายปกติโดยกึ่งกลางของกราฟจะแสดงถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลซึ่งพบว่ายู่ที่ประมาณ 0 เซนติเมตร ในเส้นการกระจายปกติพบว่าเส้นโค้งของข้อมูลในแนวตั้งมีช่วงกว้างกว่าเส้นโค้งของข้อมูลในแนวราบซึ่งวิเคราะห์ได้ว่า ข้อมูลในแนวราบส่วนใหญ่มีความเกาะกลุ่มมากกว่าข้อมูลในแนวตั้งโดยช่วงของข้อมูลในแนวราบมีการกระจายตัวอยู่

ระหว่าง -16 ถึง 16 เซนติเมตร ส่วนช่วงของข้อมูลในแนวตั้งมีการกระจายตัวอยู่ระหว่าง -20 ถึง 20 เซนติเมตร การเปรียบเทียบความถูกต้อง (Accuracy) และความแม่นยำ (Precision) ของข้อมูลพบว่า ความคลาดเคลื่อนของค่าพิกัดที่เกิดจากการรังวัดด้วย RTK และการรังวัดด้วยโดรนผ่านการสร้างโมเดลเป็นภาพถ่ายออร์โธเป็นแผนที่ทำให้วิเคราะห์ได้ว่าข้อมูลของจุดตรวจสอบ CP มีทั้งความถูกต้องและความแม่นยำ แต่เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลค่าความคลาดเคลื่อนตำแหน่งจากกราฟการกระจายตัวพบว่าข้อมูลของจุดควบคุมภาคพื้นดิน มีการกระจายตัวต่ำกว่าจุดตรวจสอบทั้งแนวราบและแนวตั้งซึ่งกล่าวได้ว่าชุดข้อมูลพิกัดของจุดควบคุมภาคพื้นดินมีความแม่นยำมากกว่าข้อมูลพิกัดของจุดตรวจสอบ

จากการกำหนดตำแหน่งในการตริ่งภาพด้วยการสร้างจุดควบคุมภาคพื้นดิน (X,Y,Z) จำนวน 16 จุด และจุดตรวจสอบจำนวน 21 จุด ผลการประมวลผลแสดงค่าความผิดพลาดเชิงตำแหน่งของจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบแสดงในรูปที่ 6 สำหรับความผิดพลาดเชิงตำแหน่งของจุดควบคุมภาคพื้นดินทางแนวแกน x, y และ z เมื่อนำมาหา $RMSE$ พบว่าค่า $RMSE_x$ มีค่าเท่ากับ 1.24 เซนติเมตร $RMSE_y$ มีค่าเท่ากับ 1.87 เซนติเมตร และ $RMSE_z$ เท่ากับ 0.42 เซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบค่าความถูกต้อง โดยพิจารณาจากค่า RMS_E ต่อ GSD พบว่า การวางจุดควบคุมภาคพื้นดินมีคุณภาพของการ Geo-referencing สูง สำหรับความผิดพลาดเชิงตำแหน่งของจุดตรวจสอบพบว่า ค่า $RMSE_x$ มีค่าเท่ากับ 4.75 เซนติเมตร ค่า $RMSE_y$ มีค่าเท่ากับ 4.76 เซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบค่าความถูกต้องในแนวราบกับมาตรฐาน ASPRS 2014 ที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่าภาพถ่ายออร์โธที่สามารถนำไปใช้ในงานระดับ Highest accuracy work ได้ ซึ่งเป็นระดับงานสูงสุด และสามารถจัดอยู่ในมาตราส่วน 1:400 หรือมาตราส่วนที่เล็กกว่าได้และเทียบได้เป็นงานชั้น 1 ตามมาตรฐาน ASPRS 1990 ส่วนค่า $RMSE_z$ เท่ากับ 6.95 เซนติเมตร โดยเมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน ASPRS 2014 พบว่า อยู่ในระดับความถูกต้อง 10 เซนติเมตร [8, 14]



รูปที่ 8 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในแนวราบ และแนวตั้งของจุดควบคุมภาพและจุดตรวจสอบ

8. สรุปผลการทดลอง

การศึกษานี้เป็นการประยุกต์นำอากาศยานไร้คนขับชนิดราคาถูกมาใช้ในการทำแผนที่มหาวิทยาลัยมหาวิทยาลัเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พื้นที่การศึกษาราชบุรี ที่มีขนาดพื้นที่ 1.6 ตารางกิโลเมตร โดยนำภาพถ่ายจำนวน 1,118 ภาพ ที่ถ่ายได้มาประมวลผล พบว่า ผลลัพธ์ที่ออกมา ทั้งภาพออร์โธ และแบบจำลองระดับพื้นผิววัตถุ มีค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งอยู่ในระดับสูงสุดตามมาตรฐาน ASPRS 2014 ซึ่งจำนวนและตำแหน่งการวางของจุดควบคุมภาพภาคพื้นดินถือว่ามีส่วนสำคัญต่อความถูกต้องที่ได้รับมาก นอกจากนี้ การมีจุดตรวจสอบในจำนวนตามเกณฑ์มาตรฐานยังทำให้ข้อมูลและผลลัพธ์ยังมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น จากผลการศึกษาได้ค่าความถูกต้องทางแนวราบสูงโดยภาพออร์โธที่ได้สามารถใช้งานในระดับ Highest accuracy work ได้ ส่วนความถูกต้องทางตั้งนั้นก็อยู่ในช่วงที่มีความถูกต้องสูงคืออยู่ในชั้นความถูกต้องทางแนวตั้งที่ 10 เซนติเมตร ดังนั้นจะเห็นได้ว่าเทคนิคการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับชนิดราคาถูกนั้นเป็นเทคโนโลยีที่สามารถช่วยประหยัดทั้งค่าใช้จ่าย เวลา และแรงงานในการทำงานในสนามได้มาก ซึ่งในการศึกษากับพื้นที่ขนาดใหญ่ในครั้งนี้ใช้เวลาสำรวจในสนามเพียง 2 วัน โดยใช้แรงงานคนเพียง 6 คนเท่านั้น โดยแผนที่แสดงลักษณะแบบจำลองระดับพื้นผิววัตถุ ซึ่งแสดงลักษณะอาคารเรียน หอพักนักศึกษา และสิ่งปลูกสร้างอื่นๆ ตลอดจนแบบจำลองระดับพื้นดินที่สามารถแสดงลักษณะความสูง-ต่ำของภูมิประเทศในมหาวิทยาลัยข้อมูลดังกล่าวเหล่านี้

สามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการวางแผน ออกแบบ และการศึกษาอื่นๆ ต่อไปในอนาคตได้

9. กิตติกรรมประกาศ

ในโครงการวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลือในการออกพื้นที่เก็บข้อมูลภาคสนามจาก นายเฉลิมพล วังสำเภา นักศึกษาปริญญาโท จาก บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม นายนพรุจ เพชรทอง และ นางสาวปาริชาติ สุขนาคน นักศึกษาปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ตลอดจนบุคคลต่างๆ ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี พื้นที่การศึกษาราชบุรี ที่มีส่วนให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไว้ ณ โอกาสนี้

10. เอกสารอ้างอิง

1. Rakha, T. and Gorodetsky, A., 2018, "Review of Unmanned Aerial System (UAS) Applications in the Built Environment: Towards Automated Building Inspection Procedures using Drones," *Automation in Construction*, 93, pp. 252-264.
2. Crouch, C.C., 2005, Integration of Mini-Uavs At The Tactical Operations Level: Implications of Operations, Implementation, And Information Sharing, Naval Postgraduate School Monterey CA.

3. Hassanalain, M. and Abdelkefi, A., 2017, "Classifications, Applications, and Design Challenges of Drones: A Review," *Progress in Aerospace Sciences*, 91, pp. 99-131.
4. Fornace, K.M., Drakeley, C.J., William, T., Espino, F. and Cox, J., 2014, "Mapping Infectious Disease Landscapes: Unmanned Aerial Vehicles and Epidemiology," *Trends in Parasitology*, 30 (11), pp. 514-519.
5. Ajayi, O.G., Salubi, A.A., Angbas, A.F. and Odigure, M.G., 2017, "Generation of Accurate Digital Elevation Models from UAV Acquired Low Percentage Overlapping Images," *International Journal of Remote Sensing*, 38 (8-10), pp. 3113-3134.
6. Hamilton, S., 2017, UAV (drone) Aerial Photography and Photogrammetry and its Utility for Archaeological Site Documentation, Lakehead University [Online], Available: http://www.apaontario.ca/resources/Documents/APA_OccasionalPaper2_Drone_Testing_2017.pdf.
7. Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Mesas-Carrascosa, F.J., García-Ferrer, A. and Pérez-Porras, F.J., 2018, "Assessment of UAV-Photogrammetric Mapping Accuracy based on Variation of Ground Control Points," *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 72, pp. 1-10.
8. American Society for Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (ASPRS), 2015, "ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data (Edition 1, Version 1.0., November, 2014)," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 81 (3), pp. A1-A26.
9. Singhal, G., Bansod, B. and Mathew, L., 2018, Unmanned Aerial Vehicle Classification, Applications and Challenges: A Review.
10. Day, D., Weaver, W. and Wilsing, L., 2016, "Accuracy of UAS Photogrammetry: A Comparative Evaluation," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 82 (12), pp. 909-914.
11. Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., Borra-Serrano, I. and Peña, J.M., 2018, "Assessing UAV-collected Image Overlap Influence on Computation Time and Digital Surface Model Accuracy in Olive Orchards," *Precision Agriculture*, 19 (1), pp. 115-133.
12. Sadeq, H.A., 2019, "Accuracy Assessment Using Different UAV Image Overlaps," *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 7 (3), pp. 175-193.
13. Akturk, E. and Altunel, A.O., 2019, "Accuracy Assesment of a Low-cost UAV Derived Digital Elevation Model (DEM) in a Highly Broken and Vegetated Terrain," *Measurement*, 136, pp. 382-386.
14. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), 1990, "ASPRS Accuracy Standards for Large-scale Maps," *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56 (7), pp. 1068-1070.

