

การประเมินประสิทธิภาพของอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำสำหรับการสำรวจ
และทำแผนที่อาคารสิ่งปลูกสร้างเพื่อการประยุกต์ใช้งานขององค์กรปกครอง
ส่วนท้องถิ่น กรณีศึกษาเทศบาลตำบลแม่กา



วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาภูมิสารสนเทศประยุกต์

มีนาคม 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

การประเมินประสิทธิภาพของอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำสำหรับการสำรวจและทำแผนที่
อาคารสิ่งปลูกสร้างเพื่อการประยุกต์ใช้งานขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น กรณีศึกษา
เทศบาลตำบลแม่กา



วิทยานิพนธ์เสนอมหาวิทยาลัยพะเยา เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาภูมิสารสนเทศประยุกต์

มีนาคม 2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยพะเยา

PERFORMANCE EVALUATION OF LOW-COST UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR
SURVEYING AND MAPPING OF BUILDINGS IN LOCAL GOVERNMENT ORGANIZATION
APPLICATION: A CASE STUDY OF MAE KA SUBDISTRICT MUNICIPALITY



A Thesis Submitted to University of Phayao
in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Master of Science Degree in Applied Geoinformatics
March 2024
Copyright 2024 by University of Phayao

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประเมินประสิทธิภาพของอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำสำหรับการสำรวจและทำแผนที่
อาคารสิ่งปลูกสร้างเพื่อการประยุกต์ใช้งานขององค์การปกครองส่วนท้องถิ่น กรณีศึกษา

เทศบาลตำบลแม่กา

ของ ชยกร พุ่มนวล

ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาภูมิสารสนเทศประยุกต์

ของมหาวิทยาลัยพะเยา

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ เกตุอ้อต)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ดร. สวรรินทร์ ฤกษ์อยู่สุข)

..... กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาพ แพงวังทอง)

..... อาจารย์บัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยพะเยา

(รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล จี๊ฟู)

..... คณบดีคณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรเทพ โรจนวสุ)

เรื่อง:	การประเมินประสิทธิภาพของอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำสำหรับการสำรวจและทำแผนที่อาคารสิ่งปลูกสร้างเพื่อการประยุกต์ใช้งานขององค์การปกครองส่วนท้องถิ่น กรณีศึกษาเทศบาลตำบลแม่กา
ผู้วิจัย:	ชยกร พุ่มนวล, วิทยานิพนธ์: วท.ม.(ภูมิสารสนเทศประยุกต์), มหาวิทยาลัยพะเยา, 2566
อาจารย์ที่ปรึกษา:	ดร. สวรินทร์ ฤกษ์อยู่สุข อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภพ พ่างวังทอง
คำสำคัญ:	การรังวัดด้วยภาพเชิงเลข, การสกัดข้อมูลอาคารสิ่งปลูกสร้าง, แผนที่ภูมิ, ภูมิสารสนเทศ

บทคัดย่อ

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์ คือ 1) ประเมินศักยภาพของเทคนิคการทำแผนที่จากอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำในการสำรวจอาคารสิ่งปลูกสร้างและ 2) วิเคราะห์ความเหมาะสมต่อการบูรณาการอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำกับงานประยุกต์ขององค์การปกครองส่วนท้องถิ่นในการสำรวจอาคารสิ่งปลูกสร้าง ผ่านการสำรวจจากภาคสนาม การทดลองการประมวลผลและการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อค้นหาความสามารถของการสำรวจและทำแผนที่จากอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำในการบันทึกภาพ การสร้างแบบจำลอง 3 มิติอย่างแม่นยำและการสกัดข้อมูลสำรวจงานอาคารสิ่งปลูกสร้าง

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ครอบคลุมถึงการประเมินความถูกต้องของการทำแผนที่จากอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำเพื่อการสำรวจอาคารสิ่งปลูกสร้างทั้งแบบไม่ใช้งานจุดควบคุมภาคพื้นดิน (Without Ground Control Point : Without GCP) และแบบมีการใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP) จากการศึกษาพบว่า หากไม่ใช้งานจุดควบคุมภาคพื้นดินจะให้ค่าความถูกต้องทางราบของข้อมูลประมาณ 10 เมตร ในขณะที่เดียวกันเมื่อมีการใช้งานจุดควบคุมภาคพื้นดินความถูกต้องทางราบประมาณ 1 เมตร และความถูกต้องทางตั้งประมาณ 4 เมตร ข้อค้นพบนี้แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของความถูกต้องทางราบและความแม่นยำของแผนที่ที่ได้จากการบูรณาการจุดควบคุมภาคพื้นดิน นอกจากนี้ การศึกษาค้นคว้านี้ยังทำการสืบสวนหามาตราส่วนการแสดงผลข้อมูลที่เหมาะสมต่อการสร้างข้อมูลจากการดิจิไทซ์บนข้อมูลภาพตัดแก้ออร์โธ โดยแบ่งมาตราส่วนออกเป็น 1:100, 1:250 และ 1:500 ผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่ามาตราส่วน 1:100 และ 1:500 ให้คุณภาพข้อมูลที่ได้จากการดิจิไทซ์น้อยกว่ามาตราส่วน 1:250 เนื่องจากมาตราส่วน 1:250 มีความสมดุลของระดับการแสดงผลรายละเอียดข้อมูลอาคารสิ่งปลูกสร้าง ความครบถ้วนของอาคารสิ่งปลูกสร้าง

แม้ว่า การทำแผนที่จากอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำจะมีประโยชน์หลากหลายในการสำรวจอาคารสิ่งปลูกสร้างในงานประยุกต์ขององค์การปกครองส่วนท้องถิ่น แต่ในทางปฏิบัติแล้วความซับซ้อนของงานประยุกต์ดังกล่าวที่มีกฎระเบียบ เงื่อนไขและข้อจำกัดในการปฏิบัติงานทำให้ไม่สามารถทดแทนการทำงานรูปแบบเดิมได้ทั้งหมดแต่สามารถบูรณาการร่วมกันระหว่างการสำรวจและทำแผนที่จากอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำร่วมกับการสำรวจข้อมูลจากภาคสนามเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการทำงาน ลดระยะเวลาในการสำรวจภาคสนาม ลดข้อจำกัดของการเข้าถึงพื้นที่และช่วยลดข้อขัดแย้งที่เกิดขึ้นระหว่างปฏิบัติงาน ทำให้้องค์การปกครองส่วนท้องถิ่นมีข้อมูลอาคารสิ่งปลูกสร้างที่มีความถูกต้องทางตำแหน่งและทันสมัยสำหรับการบริหารจัดการงานขององค์การปกครองส่วนท้องถิ่น



Title: PERFORMANCE EVALUATION OF LOW-COST UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR SURVEYING AND MAPPING OF BUILDINGS IN LOCAL GOVERNMENT ORGANIZATION APPLICATION: A CASE STUDY OF MAE KA SUBDISTRICT MUNICIPALITY

Author: Chayakon Pumnoun, Thesis: M.Sc. (Applied Geoinformatics), University of Phayao, 2023

Advisor: Sawarin Lerk-u-suke , Ph.D. Co-advisor Assistant Professor Wipop Paengwangthong , Ph.D.

Keywords: Digital Photogrammetry, Building Data Extraction, Taxation Map, Geoinformatic

ABSTRACT

This study aims to: 1) Assess the potential of low-cost unmanned aerial vehicle (UAV) mapping techniques for surveying buildings and 2) Analyze the suitability of integrating low-cost UAVs into the operational practices of local government organizations (LGO) for surveying buildings through field surveys, processing experiments, and data analysis to explore the capabilities of low-cost UAV surveying and mapping techniques for image capture, accurate 3D model generation, and data extraction.

This study encompasses assessing the accuracy of low-cost UAV mapping techniques for surveying buildings, both without Ground Control Points (GCP) and with GCP. The study found that without GCP, horizontal accuracy is approximately 10 meters. Conversely, when using GCP, horizontal accuracy is approximately 1 meter, with vertical accuracy around 4 meters. These findings underscore the significant improvement in horizontal accuracy and map precision achieved through the integration of GCPs into UAV mapping. Additionally, the study investigates the appropriate scale representation of creating features by digitizing on orthophoto, dividing scales into 1:100, 1:250, and 1:500. Experimental results show that the 1:250 scale provides a balanced level of detail representation and completeness of building data compared to the 1:100 and 1:500 scales.

While low-cost UAV mapping techniques offer various benefits for surveying buildings in the operational contexts of LGO, the complexity of these applications, including regulations, conditions, and constraints, often prevents a complete replacement of conventional methods. However, a collaborative approach integrating low-cost UAV surveying and mapping with field data collection can enhance operational efficiency, reduce field survey durations, overcome access limitations, and mitigate conflicts during operations. Consequently, LGO can obtain accurate and up-to-date building data for effective management and decision-making processes.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยการประเมินประสิทธิภาพของอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำสำหรับการสำรวจและทำแผนที่อาคารสิ่งปลูกสร้างเพื่อการประยุกต์ใช้งานขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นกรณีศึกษาเทศบาลตำบลแม่กาครั้งนี้จะสำเร็จลุล่วงสมบูรณ์ไม่ได้หากไม่มีบุคคลเหล่านี้

ขอขอบคุณ ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร.สวรินทร์ ฤกษ์อยู่สุข ที่ให้องค์ความรู้แนวคิด เทคนิควิธีการและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยให้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.วิภาพ พงษ์วังทอง ที่ให้องค์ความรู้แนวคิด เทคนิควิธีการและอำนวยความสะดวกในการดำเนินงานวิจัยให้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คณาจารย์สาขาวิชาภูมิสารสนเทศ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยพะเยาที่ให้องค์ความรู้ แนวคิดและเทคนิควิธีการในการดำเนินงานจัดทำวิทยานิพนธ์ให้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยพะเยา ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องมือสำรวจอากาศยานไร้คนขับ รุ่น ดีเจไอ แพน เท็ม โฟร์ โปร วี ทู

ขอขอบคุณ นางสาวประนอม เครือวัลย์ เจ้าหน้าที่ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยพะเยาที่ช่วยดำเนินการเอกสาร หนังสือภายนอกและภายในต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการดำเนินการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ นายกเทศมนตรีเทศบาลตำบลแม่กา นายสะอาด ไชยกุล ที่ให้ความอนุเคราะห์เข้าพื้นที่และสำรวจพื้นที่

ขอขอบคุณ นายประสงค์ สุภาณี ผู้อำนวยการกองช่าง เทศบาลตำบลแม่กา ที่ให้ความอนุเคราะห์นิสิตเข้าร่วมโครงการแก้ปัญหาคุณภาพน้ำบริเวณหน้ามหาวิทยาลัยพะเยา

ขอขอบคุณ นายสะอาด วงศ์ใหญ่ เจ้าหน้าที่งานแผนที่ภาษีเทศบาลตำบลแม่กาที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูลสำรวจภาคสนามข้อมูลอาคารและสิ่งปลูกสร้างและให้แนวคิด การดำเนินการวิจัย

ชยกร พุ่มนวล

สารบัญ

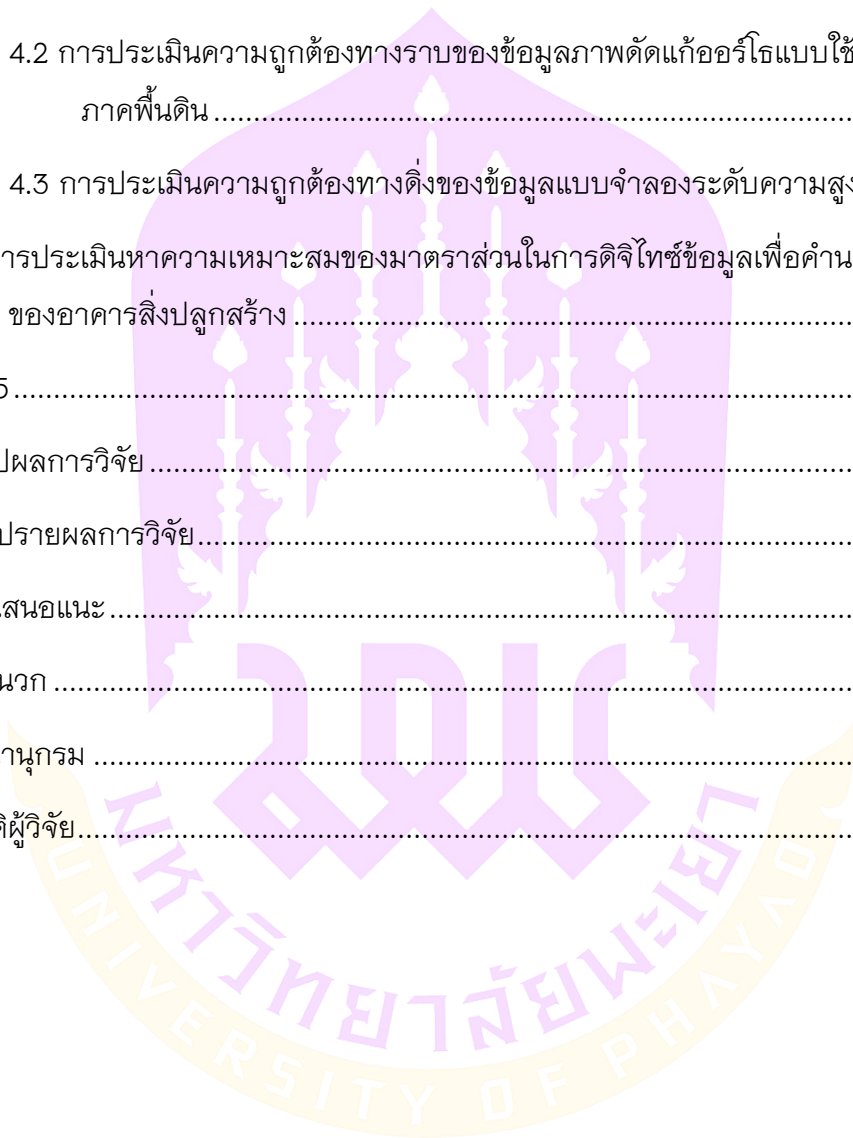
	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญภาพ	จ
บทที่ 1.....	1
ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ขอบเขตของการวิจัย	2
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	4
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2	6
การสำรวจด้วยภาพถ่าย.....	7
1. ขั้นตอนการสำรวจด้วยภาพถ่ายแบบเดิม.....	7
1.1 การวางแผนโครงการ	7
1.2 การรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดิน.....	7
1.3 การถ่ายภาพทางอากาศ.....	7
1.4 งานถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ	8
1.5 การจัดภาพภายใน	8
1.6 การรังวัดจุดภาพ	8

1.7 การปรับแก้ปลอกลำแสง	9
1.8 การสร้างรูปจำลองสามมิติ.....	10
1.9 การสกัดข้อมูล.....	10
1.10 การสร้างพื้นผิวดิน	11
1.11 การแก้ไขพื้นผิวดิน	11
1.12 การสร้างภาพตัดแก้ออร์โธ.....	11
2. ขั้นตอนการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ	12
2.1 การวางแผนโครงการ	13
2.2 การวางแผนการบินและการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ	13
2.3 การสร้างจุดควบคุมภาคพื้นดิน	13
2.4 การประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ	13
2.4.1 ขั้นตอนการสร้างจุดยึดโยงแบบอัตโนมัติ (Auto Tie Point Generation)	13
2.4.2 ขั้นตอนการการประมวลผล เอสเอฟเอ็ม (Structure From Motion : SFM).....	14
2.4.3 ขั้นตอนการสร้างตาข่ายพื้นผิว (Mesh)	14
2.4.4 ขั้นตอนการสร้างภาพตัดแก้ออร์โธ (Orthophoto).....	14
3. ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ	15
3.1 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากคุณภาพของภาพถ่าย	15
3.2 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเครื่องมือ	15
3.3 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากบุคคล.....	16
3.4 ความคลาดเคลื่อนเกิดจากการประมวลผล	16
4. องค์ประกอบของการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ.....	16

4.1 ประเภทอากาศยานไร้คนขับสำหรับการสำรวจด้วยภาพถ่าย	16
4.1.1 อากาศยานไร้คนขับประเภทปีกตรึง (Fixed Wing UAV).....	16
4.1.2 อากาศยานไร้คนขับประเภทหลายปีกหมุน (Multirotor UAV).....	16
4.1.3 อากาศยานไร้คนขับประเภทปีกหมุนเดี่ยว (Single-Rotor Helicopter UAV)	17
4.1.4 อากาศยานไร้คนขับประเภทปีกตรึงขึ้นลงแนวดิ่ง (Fixed-Wing Hybrid UAV).....	17
4.2 ระบบรังวัดสัญญาณดาวเทียมของอากาศยานไร้คนขับ	17
4.3 อากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำ	18
5. มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการสำรวจด้านอากาศยานไร้คนขับเพื่องานวิศวกรรม .	18
5.1 ASPRS (1990) ASPRS Accuracy Standards for Large-Scale Maps, March 1990	19
5.2 ASPRS (2014) ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data, November 2014.....	19
6. การวางแผนการบินและการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ	20
6.1 การวางแผนการบิน	21
6.1.1 ความสูงบิน.....	21
6.1.2 ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางจุดภาพบนพื้นดิน	22
6.1.3 ส่วนซ้อนและส่วนเกย.....	22
6.1.4 รูปแบบการบิน.....	22
7. จุดควบคุมภาคพื้นดิน	23
7.1 การรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดิน	23
7.2 ตำแหน่งและการกระจายตัวของจุดควบคุมภาคพื้นดิน	24
แบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข	25
การสำรวจรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม	26

พระราชบัญญัติภาษีที่ดินและสิ่งปลูกสร้าง พ.ศ. 2562	27
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	30
บทที่ 3.....	34
แผนผังวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	35
1. กระบวนการก่อนการประมวลผล	36
1.1 การวางแผนการบิน.....	36
1.2 การวางจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบ	37
1.3 การรังวัดค่าพิกัดจุดควบคุมภาคพื้นดิน และ จุดตรวจสอบ	40
1.4 ขั้นตอนการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการบินถ่ายภาพและ การ บินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ	41
2. การประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ	41
2.1 กระบวนการจัดเรียงตำแหน่งของภาพถ่าย (Align photo).....	42
2.2 การกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Point).....	43
2.3 การปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของกล้อง (Optimize Camera Alignment).....	43
2.4 การสร้างข้อมูลจุดสามมิติ (Point Cloud).....	43
2.5 การสร้างข้อมูลตาข่ายพื้นผิว (Mesh)	43
2.6 การสร้างแบบจำลองความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model)	44
2.7 การสร้างภาพตัดแก้เออร์โธ (Orthophoto).....	44
3. การสกัดข้อมูล	44
4. การประเมินศักยภาพและความถูกต้องของข้อมูลจากการสำรวจด้วยอากาศยาน ไร้คนขับต้นทุนต่ำสำหรับงานสำรวจอาคารสิ่งปลูกสร้าง.....	45
บทที่ 4	48
1. การวางแผนบินถ่ายภาพและการบินถ่ายภาพ	48
2. การรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบจากภาคสนาม	49

3. การประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ.....	51
4. การประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งของข้อมูลภาพจากอากาศยานไร้คนขับ	63
4.1 การประเมินความถูกต้องของข้อมูลภาพตัดแก้ออร์โธแบบไม่ใช้จุดควบคุม ภาคพื้นดิน.....	64
4.2 การประเมินความถูกต้องทางราบของข้อมูลภาพตัดแก้ออร์โธแบบใช้จุดควบคุม ภาคพื้นดิน.....	65
4.3 การประเมินความถูกต้องทางตั้งของข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข.....	67
5.การประเมินหาความเหมาะสมของมาตราส่วนในการดิจิทัลไลซ์ข้อมูลเพื่อคำนวณหาเนื้อที่ ของอาคารสิ่งปลูกสร้าง	70
บทที่ 5.....	73
สรุปผลการวิจัย.....	73
อภิปรายผลการวิจัย.....	75
ข้อเสนอแนะ.....	77
ภาคผนวก	78
บรรณานุกรม	90
ประวัติผู้วิจัย.....	93



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1 มาตรฐานค่าความถูกต้องแนวราบ เมื่อ X คือ ชั้นความถูกต้องทางราบ.....	20
ตาราง 2 มาตรฐานค่าความถูกต้องแนวตั้ง เมื่อ X คือ ชั้นความถูกต้องทางตั้ง.....	20
ตาราง 3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการประมวลผลภาพถ่าย.....	42
ตาราง 4 พารามิเตอร์ของการบินถ่ายภาพ.....	49
ตาราง 5 ค่าพิกัดจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP).....	50
ตาราง 6 ค่าพิกัดจุดตรวจสอบ (CP).....	51
ตาราง 7 ผลการประเมินความถูกต้องทางราบของข้อมูลภาพตัดแก้ออร์โธแบบไม่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน.....	65
ตาราง 8 ผลการประเมินความถูกต้องทางราบของข้อมูลภาพตัดแก้ออร์โธแบบใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน.....	67
ตาราง 9 ผลการประเมินความถูกต้องทางตั้งของข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข....	69
ตาราง 10 ผลการประเมินความเหมาะสมมาตราส่วนในการดิจิทัลไอซ์ข้อมูลเพื่อคำนวณหาเนื้อที่ของอาคารสิ่งปลูกสร้าง.....	71
ตาราง 11 แสดงการเปรียบเทียบเนื้อที่อาคารสิ่งปลูกสร้างของแต่ละมาตราส่วน.....	84
ตาราง 12 แสดงการเปรียบเทียบเนื้อที่อาคารสิ่งปลูกสร้างของแต่ละมาตราส่วน (ต่อ).....	85
ตาราง 13 แสดงการเปรียบเทียบเนื้อที่อาคารสิ่งปลูกสร้างของแต่ละมาตราส่วน (ต่อ).....	86
ตาราง 14 แสดงการเปรียบเทียบเนื้อที่อาคารสิ่งปลูกสร้างของแต่ละมาตราส่วน (ต่อ).....	87
ตาราง 15 แสดงการเปรียบเทียบเนื้อที่อาคารสิ่งปลูกสร้างของแต่ละมาตราส่วน (ต่อ).....	88
ตาราง 16 แสดงการเปรียบเทียบเนื้อที่อาคารสิ่งปลูกสร้างของแต่ละมาตราส่วน (ต่อ).....	89

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพ 1 พื้นที่ศึกษาบ้านแม่กาห้วยเคียน หมู่ 16 บริเวณหน้ามหาวิทยาลัยพะเยา.....	3
ภาพ 2 หลักการของสภาวะร่วมเส้น (Collinearity Equation).....	9
ภาพ 3 หลักการสร้างภาพตัดแก้ออร์โธ	12
ภาพ 4 รูปแบบการบินแบบทั่วไปและรูปแบบการบินแบบกริด ตามลำดับ	23
ภาพ 5 รูปแบบจุดควบคุมภาคพื้นดินรูปกากบาท รูปวงกลมและสี่เหลี่ยมตามลำดับ	23
ภาพ 6 แสดงตัวอย่างการกำหนดตำแหน่งและการกระจายตัวของจุดควบคุมภาคพื้นดินเมื่อใช้	24
ภาพ 7 แสดงตัวอย่างการกำหนดตำแหน่งและการกระจายตัวของจุดควบคุมภาคพื้นดินเมื่อใช้	24
อากาศยานไร้คนขับประเภทระดับมาตรฐาน (Professional Grade)	25
ภาพ 8 การกำหนดตำแหน่งและการกระจายตัวของจุดควบคุมภาคพื้นดินเมื่อใช้อากาศยานไร้	25
คนขับประเภทระดับมาตรฐานสูง.....	25
ภาพ 9 การจำแนกประเภทความสูง แบบจำลองความสูงพื้นผิว แบบจำลองความสูงตามสภาพ	26
ภูมิประเทศ.....	26
ภาพ 10 แบบฟอร์ม ผ.ท.1 แบบสำรวจแปลงที่ดิน	28
ภาพ 11 แบบฟอร์ม ผ.ท.2 แบบสำรวจข้อมูลโรงเรือนและสิ่งปลูกสร้าง	29
ภาพ 12 แบบฟอร์ม ผ.ท.3 แบบสำรวจป้ายและใบอนุญาตต่าง ๆ.....	29
ภาพ 13 แผนผังการดำเนินงานวิจัย	35
ภาพ 14 แสดงจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP)	38
ภาพ 15 แสดงจุดตรวจสอบ (CP)	39
ภาพ 16 แสดงการรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบ	40
ภาพ 17 คำแนะนำสำหรับการกระจายตัวและระยะห่างขั้นต่ำของจุดตรวจสอบ	46

ภาพ 18 ตารางสำหรับประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งของข้อมูลตามมาตรฐานระดับชาติ สหรัฐอเมริกาสำหรับความถูกต้องของข้อมูลเชิงทางตำแหน่ง.....	46
ภาพ 19 แสดงแผนการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำ	48
ภาพ 20 ตัวอย่างภาพถ่ายที่ได้จากการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ	49
ภาพ 21 การจัดวางตำแหน่งและการวางตัวของข้อมูลภาพ.....	52
ภาพ 22 ตัวอย่างการรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดินสำหรับการเสริมความถูกต้องและแม่นยำของ การประมวลผล	53
ภาพ 23 (ก) ข้อมูลกลุ่มจุดภาพ 3 มิติของทั้งพื้นที่ศึกษา (ข) และ (ค) ตัวอย่างข้อมูลกลุ่ม จุดภาพ 3 มิติบางส่วนในพื้นที่ศึกษา.....	54
ภาพ 24 (ก) ข้อมูลตาข่ายพื้นผิวของทั้งพื้นที่ศึกษา (ข) และ (ค) ตัวอย่างข้อมูลตาข่ายพื้นผิว บางส่วนในพื้นที่ศึกษา	56
ภาพ 25 (ก) ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลขของทั้งพื้นที่ศึกษา (ข) และ (ค) ตัวอย่าง ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลขบางส่วนในพื้นที่ศึกษา.....	57
ภาพ 26 ข้อมูลภาพตัดแก้ออร์โธของทั้งพื้นที่ศึกษา (ข) และ (ค) ตัวอย่างข้อมูลภาพตัดแก้ออร์ โธบางส่วนในพื้นที่ศึกษา.....	58
ภาพ 27 ตำแหน่งของกล้องและการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนจากการประมวลผลแบบไม่ ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน.....	59
ภาพ 28 ข้อมูลกลุ่มจุดภาพ 3 มิติ (Point Cloud) จากการประมวลผลแบบไม่ใช้จุดควบคุม ภาคพื้นดิน.....	59
ภาพ 29 ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (DEM) การประมวลผลแบบไม่ใช้จุดควบคุม ภาคพื้นดิน.....	60
ภาพ 30 ข้อมูลภาพตัดแก้ออร์โธ การประมวลผลแบบไม่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน.....	60
ภาพ 31 ตำแหน่งของกล้องและการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนจากการประมวลผลแบบใช้ จุดควบคุมภาคพื้นดิน.....	61
ภาพ 32 ข้อมูลกลุ่มจุดภาพ 3 มิติ (Point Cloud) จากการประมวลผลแบบใช้จุดควบคุม ภาคพื้นดิน.....	62

ภาพ 33 ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (DEM) การประมวลผลแบบใช้จุดควบคุม
ภาคพื้นดิน.....62

ภาพ 34 ข้อมูลภาพตัดแก้ออร์โธ การประมวลผลแบบใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน.....63

ภาพ 35 ตัวอย่างการแสดงผลมาตราส่วนที่แตกต่างกัน (ก) 1:100 (ข) 1:250 และ (ค) 1:500 71

ภาพ 36 รายละเอียดเพิ่มเติมค่าความคลาดเคลื่อนจุดควบคุมภาคพื้นดิน79

ภาพ 37 รายละเอียดเพิ่มเติมการประมวลผลภาพถ่ายแบบมีจุดควบคุมภาคพื้นดิน.....80

ภาพ 38 รายละเอียดเพิ่มเติมการประมวลผลภาพถ่ายแบบมีจุดควบคุมภาคพื้นดิน 81

ภาพ 39 รายละเอียดเพิ่มเติมการประมวลผลภาพถ่ายแบบไม่มีจุดควบคุมภาคพื้นดิน.....82

ภาพ 40 รายละเอียดเพิ่มเติมการประมวลผลภาพถ่ายแบบไม่มีจุดควบคุมภาคพื้นดิน83



บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหา

องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นเป็นผู้นำที่มีบทบาทสำคัญในการบริหารจัดการและให้บริการในระดับท้องถิ่น โดยมีพื้นที่ความรับผิดชอบที่หลากหลาย ตั้งแต่การบริหารจัดการทรัพยากรธรรมชาติ การพัฒนาทางเศรษฐกิจ การบริหารการเงิน การศึกษา สุขภาพ และมีส่วนร่วมในการสร้างสรรค์ทุนทรัพย์และวัฒนธรรมท้องถิ่น การจัดเก็บภาษีขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นถือเป็นงานส่วนหนึ่งขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น โดยการเก็บภาษีนั้นไม่เพียงเป็นแหล่งรายได้สำหรับท้องถิ่นเท่านั้น แต่การจัดเก็บภาษีโดยเฉพาะภาษีอาคารและสิ่งปลูกสร้างเป็นกระบวนการที่มีความสำคัญสำหรับการรักษาและพัฒนาพื้นที่ท้องถิ่น โดยองค์กรจะรับผิดชอบในการประเมินและเรียกเก็บภาษีที่เกี่ยวข้องกับอาคารและสิ่งปลูกสร้างที่ตั้งในพื้นที่นั้น ๆ ภาษีที่ได้รับนี้ไม่เพียงเป็นแหล่งรายได้สำหรับองค์กร แต่ยังเป็นเครื่องมือสำคัญที่สนับสนุนการให้บริการสาธารณะและการพัฒนาท้องถิ่นให้มีการพัฒนาอย่างยั่งยืนและมีประสิทธิภาพ (ฝ่ายพัฒนารายได้ กองคลัง เทศบาลตำบลแม่กา, 2563)

การจัดเก็บภาษีอาคารและสิ่งปลูกสร้างเป็นหน้าที่หลักที่สำคัญต่อองค์กร โดยมีพระราชบัญญัติภาษีที่ดินและสิ่งปลูกสร้างได้บัญญัติไว้ว่าให้องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นดำเนินการจัดเก็บภาษีที่ดินและทะเบียนทรัพย์สิน จึงทำให้ 7,255 ตำบลในประเทศไทยต้องจัดเก็บภาษี โดยมอบหมายให้องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นเป็นผู้ดำเนินการ ภาษีอาคารและสิ่งปลูกสร้างจึงเป็นส่วนงานหนึ่งของภาระหน้าที่ที่สำคัญที่ต้องดำเนินการ จึงทำให้มีการสำรวจอาคารและสิ่งปลูกสร้างทุกปีเพื่อจัดทำแผนที่ภาษี (พระราชบัญญัติภาษีที่ดินและสิ่งปลูกสร้าง พ.ศ. 2562, 9 มีนาคม 2562)

อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicles : UAV) หรือ ยูเอวี เป็นเทคโนโลยีที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านการให้บริการ การสำรวจ และการจัดการทรัพยากรทั้งในด้านการพาณิชย์และอุตสาหกรรม มีข้อดีมากมายที่ทำให้ ยูเอวี เป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพและมีความยืดหยุ่นสูง ทำให้เทคโนโลยีนี้กลายเป็นเครื่องมือที่หลายองค์กรและหลากหลายธุรกิจเลือกใช้ ยูเอวี ถูกออกแบบมาเพื่อให้ทำงานในสภาพแวดล้อมที่หลากหลายและทำงานได้

อย่างยืดหยุ่น ซึ่งทำให้มีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในหลายหน่วยงาน (สำนักงานคณะกรรมการป้องกันและปราบปรามยาเสพติด, 2560)

การนำอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำและการรังวัดด้วยภาพ (Photogrammetry) เข้ามาช่วยในงานสำรวจอาคารสิ่งปลูกสร้าง เป็นแนวทางการนำเทคโนโลยีปัจจุบันที่เข้าถึงและใช้งานได้อย่างง่าย สะดวก ไม่จำเป็นต้องมีความรู้มากนัก มาช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน การศึกษาค้นคว้าวิจัยวัตถุประสงค์หลัก คือ การประเมินศักยภาพและความเหมาะสมของอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำในการนำมาประยุกต์ใช้งานสำหรับการสำรวจข้อมูลอาคารสิ่งปลูกสร้าง ทั้งคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความถูกต้องเชิงตำแหน่งและขนาดพื้นที่ของข้อมูลอาคารสิ่งปลูกสร้าง เพื่อให้เกิดความน่าเชื่อถือและความเหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้งาน

การสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับนั้นจะประกอบด้วยกระบวนการหลักประกอบด้วย การวางแผนบินถ่ายภาพ การบินถ่ายภาพ การประมวลผลข้อมูลที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ และการสกัดข้อมูลอาคารสิ่งปลูกสร้าง โดยผู้ใช้งานสามารถดำเนินการได้ด้วยตนเอง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- เพื่อประเมินศักยภาพของการสำรวจข้อมูลเชิงตำแหน่งจากอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำ
- เพื่อศึกษาความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้ข้อมูลที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำสำหรับงานอาคารสิ่งปลูกสร้างขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น

ขอบเขตของการวิจัย

- ขอบเขตด้านพื้นที่

พื้นที่ศึกษาบ้านแม่กาห้วยเคียน หมู่ 16 บริเวณหน้ามหาวิทยาลัยพะเยา ตำบลแม่กา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา เนื่องจากบริเวณพื้นที่ดังกล่าวเป็นพื้นที่ที่มีอาคารสิ่งปลูกสร้างหนาแน่น และยังเป็นพื้นที่โครงการแก้ปัญหาคุณภาพน้ำของเทศบาลตำบลแม่กา ซึ่งมีโครงการสำรวจอยู่ในขณะนี้ จึงใช้พื้นที่โครงการดังกล่าวเป็นพื้นที่ศึกษา เนื่องจากภาพถ่ายทางอากาศที่บินถ่ายนั้นสามารถใช้ได้ทั้งงานวิจัยของนิสิตและใช้ในโครงการแก้ปัญหาคุณภาพน้ำของเทศบาลตำบลแม่กา พื้นที่ศึกษา แสดงดังภาพที่ 1 ดังนี้



ภาพ 1 พื้นที่ศึกษาบ้านแม่กาห้วยเคียน หมู่ 16 บริเวณหน้ามหาวิทยาลัยพะเยา

- **ขอบเขตด้านการสำรวจ**

อากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำ (UAV) ที่ใช้ในการสำรวจบินถ่ายภาพทางอากาศครั้งนี้ คือ ดิเจไอ แฟน เทิม โฟร์ โพร วี ทู (DJI Phantom 4 Pro V.2) โดยเป็นอากาศยานที่มีราคาจัดอยู่ในเกณฑ์อากาศยานไร้คนขับที่มีต้นทุนต่ำ เนื่องจากคุณสมบัติ สมรรถนะในการทำงานที่มีข้อจำกัดและองค์ประกอบเครื่องส่วนท้องถิ่นสามารถจัดซื้อจัดหาได้ การรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอปใช้กล้องประมวลผลรวม (Total Station) ยี่ห้อ ท็อปคอน จีทีเอชหนึ่ง ศูนย์ สอง เอ็น (TOPCON GTS-102N) โครงข่ายหมุดหลักฐานที่ใช้สำรวจค่าพิกัดจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอป คือ หมุดโครงข่ายการถ่ายภาพทางอากาศสี่ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ รหัสหมุดควบคุมภาคพื้นดิน “A100251” และข้อมูลการสำรวจอาคารสิ่งปลูกสร้างจากการลงพื้นที่สำรวจจริงที่ใช้ในงานแผนที่ภาษีของเทศบาลตำบลแม่กา

นิยามศัพท์เฉพาะ

- อากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำที่ใช้ในการสำรวจเพื่อทำแผนที่ หมายถึง อากาศยานไร้คนขับที่มีต้นทุนต่ำที่สามารถนำมาใช้ในการสำรวจทำแผนที่ภาพถ่ายโดยปกติทั่วไปอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำ มีคุณลักษณะดังนี้
 - มีข้อจำกัดการบินในระยะกระจัด ไม่เกิน 5 กิโลเมตร
 - มีแบตเตอรี่ที่ใช้บินไม่เกิน 20 นาที
 - ไม่สามารถบินถ่ายในพื้นที่ 1 ตารางกิโลเมตรได้ในการบินถ่ายเพียงครั้งเดียว
 - มีเซนเซอร์สำคัญที่ใช้ในการบินสำรวจเพื่อทำแผนที่
 - มีราคาไม่เกิน 70,000 บาท
 - ภาพถ่ายที่ได้จากการบินถ่ายอากาศยานไร้คนขับต้องนำไปประมวลผลได้
- การรังวัดด้วยภาพเชิงเลข หมายถึง กระบวนการทางภาพที่ใช้รูปถ่ายดิจิทัลเพื่อวัดและสร้างแผนที่ 3 มิติ หรือข้อมูลทางภูมิศาสตร์ โดยใช้หลายภาพจากมุมต่าง ๆ เพื่อสร้างโมเดลทางภูมิศาสตร์ของวัตถุหรือพื้นที่นั้น ๆ ในโลกจริง
- รังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม หมายถึง การสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวม กล้องประมวลผลรวมเป็นอุปกรณ์สำรวจในงานด้านวิศวกรรม มี

ความน่าเชื่อถือในด้านการรังวัดที่แม่นยำเป็นอย่างมาก และนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั่วโลก

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- สมรรถนะของผลิตภัณฑ์จากอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำในการรังวัดสำรวจข้อมูลเชิงตำแหน่งอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำมีความเหมาะสมในการนำมาใช้สำรวจงานอาคารสิ่งปลูกสร้างในงานขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น
- คุณสมบัติและความเหมาะสมของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำต่อการนำไปใช้งานเพื่อการสำรวจอาคารสิ่งปลูกสร้างในงานขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น



บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะอธิบายถึงแนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่มีความสำคัญต่อแนวทางการศึกษาอันประกอบไปด้วย

1. ขั้นตอนการสำรวจด้วยภาพถ่าย
2. ขั้นตอนการสำรวจ
3. ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ
4. องค์ประกอบของการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ
5. มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการสำรวจด้านอากาศยานไร้คนขับเพื่องานวิศวกรรม
6. การวางแผนการบินและการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ
7. จุดควบคุมภาคพื้นดิน
8. แบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข
9. การสำรวจรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม
10. พระราชบัญญัติภาษีที่ดินและสิ่งปลูกสร้าง พ.ศ. 2562
11. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การสำรวจด้วยภาพถ่าย

ศาสตร์การสำรวจรังวัดด้วยภาพถ่ายถูกพัฒนามาตั้งแต่ 600 ปีที่แล้วหลังจากการถ่ายภาพได้ถูกคิดค้น การสำรวจรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศก็ได้ถือกำเนิดขึ้น โดยวิวัฒนาการในการสำรวจรังวัดด้วยภาพถ่ายสามารถแบ่งได้เป็น 3 ยุค ยุคแรกคือ สถาปัตยกรรมภาพแอนะล็อก (Analog Photogrammetry) ยุคที่ 2 คือ สถาปัตยกรรมภาพวิเคราะห์ (Analytical Photogrammetry) และยุคที่ 3 คือ สถาปัตยกรรมภาพดิจิทัล (Digital Photogrammetry) ต่อมาได้มีการใช้เทคนิคทางด้านคอมพิวเตอร์วิชั่นมาช่วยในกระบวนการรังวัดด้วยภาพและการประมวลผล โดยเทคนิควิธีที่มีชื่อเรียกว่า เอสเอฟเอ็ม (Structure From Motion : SFM) หรือ สตรักเจอร์ ฟรอม โมชัน และ ซิฟท (Scale-Invariant Feature Transform : SIFT) หรือ เอสไอเอฟที ช่วยทำให้การทำงานเป็นไปอย่างอัตโนมัติมากขึ้นในทุกขั้นตอน (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2565)

1. ขั้นตอนการสำรวจด้วยภาพถ่ายแบบเดิม

1.1 การวางแผนโครงการ

ประกอบไปด้วยการวางแผนบินและการวางจุดควบคุมภาคพื้นดิน การวางแผนการบินจำเป็นต้องมีการกำหนดพารามิเตอร์การบินของอากาศยานไร้คนขับที่เหมาะสมกับงานและพื้นที่ เพื่อให้ได้ภาพถ่ายที่มีคุณสมบัติตามต้องการและครอบคลุมพื้นที่โครงการ การวางจุดควบคุมภาคพื้นดินควรเลือกวางในพื้นที่ไม่มีสิ่งบดบัง มีจำนวนที่เหมาะสม และรูปแบบการวางควรมีการกระจายตัวในพื้นที่อย่างเหมาะสม

1.2 การรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดิน

จุดควบคุมภาคพื้นดินที่ใช้ในโครงการสามารถจำแนกได้ 2 ประเภท คือ หมุดพิกัดควบคุมหลัก ซึ่งเป็นจุดที่มีค่าพิกัดอยู่แล้วจากการสำรวจรังวัดของหน่วยงานอื่นเพื่อใช้สำหรับอ้างอิงระบบพิกัดทั้งราบและตั้ง และจุดควบคุมที่ต้องทำการรังวัดใหม่ตามที่ได้กำหนดเลือกในขั้นตอนการวางแผนจุดควบคุมภาคพื้นดิน โดยต้องพิจารณาค่าความถูกต้องของพิกัดและพื้นหลักฐานที่หน่วยงานนั้นใช้ด้วย

1.3 การถ่ายภาพทางอากาศ

การถ่ายภาพสำหรับการสำรวจรังวัดบนภาพถ่ายแบบดั้งเดิม กล้องที่ใช้จะเป็นแบบกล้องเมตริก ซึ่งเป็นกล้องที่มีค่ากล้องคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง ได้แก่ ความยาวโฟกัส ความ

เพี้ยนของเลนส์ ตำแหน่งจุดดัชนี (Fiducial Marks) ตำแหน่งจุดमुखยสำคัญ (Principle Point) เป็นต้น จึงเป็นกล้องที่ค่าทางเรขาคณิตมีความละเอียดถูกต้องสูงด้วยการวัดสอบค่ากล้อง โดยข้อมูลวัดสอบกล้องเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการจัดภาพภายใน (Interior Orientation)

1.4 งานถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ

งานถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ เป็นกระบวนการขยายจุดควบคุมภาพถ่ายให้มีความหนาแน่นมากขึ้นเพียงพอต่อการขึ้นรูปจำลองสามมิติจากคู่ภาพสามมิติ ประกอบไปด้วยขั้นตอนการรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดิน การจัดภาพภายใน การวัดจุดภาพ และคำนวณปรับแก้บล็อกภาพถ่าย ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการนี้ คือ พารามิเตอร์การจัดภาพภายนอก (Exterior Orientation) สำหรับภาพถ่ายแต่ละภาพ

1.5 การจัดภาพภายใน

ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดเครื่องมือวัดกับระบบพิกัดภาพถ่าย ซึ่งระบบพิกัดภาพถ่ายมีจุดอ้างอิงอยู่ที่จุดमुखยสำคัญที่ได้จากการวัดสอบกล้อง และมีความเชื่อมโยงกับตำแหน่งจุดดัชนี ในขั้นตอนนี้เป็นการบ่อนค่าเรขาคณิตกล้องที่ได้จากการวัดสอบ ได้แก่ ความยาวโฟกัสวัดสอบ ตำแหน่งพิกัดจุดดัชนี ตำแหน่งพิกัดจุดमुखยสำคัญ ความเพี้ยนเลนส์ตามแนวรัศมีและแนวสัมผัส

1.6 การรังวัดจุดภาพ

เป็นขั้นตอนถัดมาหลังการจัดภาพภายในแล้วเสร็จ จะทำการวัดพิกัดจุดภาพของจุดต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการคำนวณปรับแก้ถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ ได้แก่ จุดภาพของจุดยึดโยง จุดผ่าน จุดควบคุมภาคพื้นดิน และจุดตรวจสอบ เป็นต้น โดยจะต้องวัดกับภาพถ่ายทุกใบ ตำแหน่งจุดยึดโยงจะเป็นจุดภาพที่ปรากฏบนภาพข้างเคียงกันที่อยู่ต่างแนวบินและจุดผ่านจะเป็นจุดภาพที่ปรากฏบนภาพข้างเคียงกันที่อยู่ตามแนวบินเดียวกัน ซึ่งปกติกำหนดตำแหน่งไว้ 9 จุดต่อภาพ ค่าพิกัดจุดภาพที่วัดได้จะถูกแปลงให้อยู่ในระบบพิกัดภาพถ่าย และมีการตรวจแก้ค่าความคลาดเคลื่อนเป็นระบบของเลนส์ คือ ความเพี้ยนของเลนส์ทั้งชนิดตามแนวรัศมี (Radial Lens Distortion) และแนวสัมผัส (Tangential Lens Distortion) ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แสดงดัง สมการที่ 1 และ สมการที่ 2 ตามลำดับดังนี้

$$dx = x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + 2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2) \quad \text{สมการที่ 1}$$

$$dy = y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy \quad \text{สมการที่ 2}$$

เมื่อ

dx, dy คือ ค่าปรับแก้ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวแกน เอ็กซ์ และแกนวาย

x, y คือ ค่าพิกัดภาพถ่ายจุดภาพ

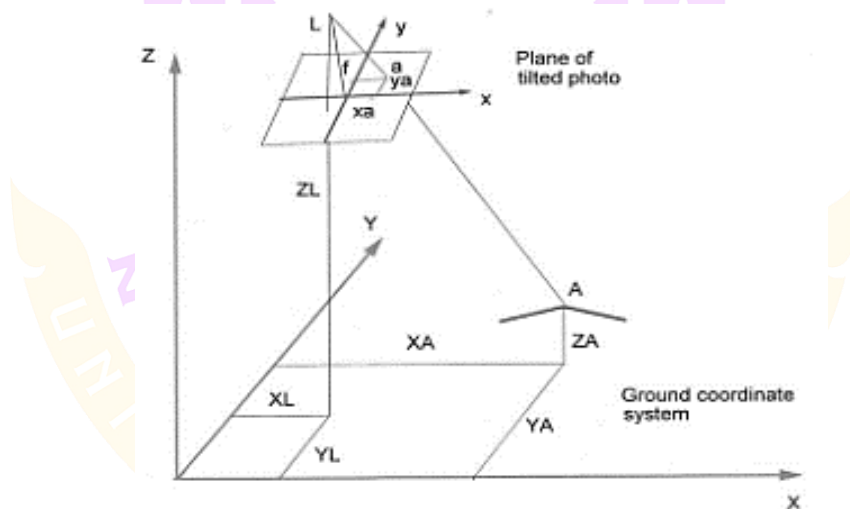
k_1, k_2, k_3 คือ ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมี

p_1, p_2 คือ ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวสัมผัส

ที่มา: (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2565)

1.7 การปรับแก้บล็อกลำแสง

การปรับแก้บล็อกลำแสงเป็นกระบวนการคำนวณปรับแก้ที่นิยมใช้ในปัจจุบัน โดยอาศัยหลักการของสภาวะร่วมเส้น (Collinearity Equation) แสดงดังภาพที่ 2 ดังนี้



ภาพ 2 หลักการของสภาวะร่วมเส้น (Collinearity Equation)

ที่มา: (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2565)

ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างจุดภาพบนภาพถ่าย จุดควบคุมภาคพื้นดิน และตำแหน่งกล้องขณะถ่ายภาพ ทำการคำนวณปรับแก้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Squares Adjustment) ซึ่งมีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สภาวะร่วมเส้นแสดงดังสมการที่ 3 และสมการที่ 4 ตามลำดับ ดังนี้

$$x_a = x_0 - f \frac{m_{11}(x_a - x_L) + m_{12}(y_a - y_L) + m_{13}(z_a - z_L)}{m_{31}(x_a - x_L) + m_{32}(y_a - y_L) + m_{33}(z_a - z_L)} \quad \text{สมการที่ 3}$$

$$y_a = y_0 - f \frac{m_{21}(x_a - x_L) + m_{22}(y_a - y_L) + m_{23}(z_a - z_L)}{m_{31}(x_a - x_L) + m_{32}(y_a - y_L) + m_{33}(z_a - z_L)} \quad \text{สมการที่ 4}$$

เมื่อ x_a, y_a คือ ค่าพิกัดภาพถ่ายของจุดภาพ เอ

x_0, y_0 คือ ค่าพิกัดของจุดमुखยสำคัญ

f คือ ความยาวโฟกัสกล้องถ่ายภาพ

x_a, y_a, z_a คือ ค่าพิกัดพื้นดินของจุด เอ

x_L, y_L, z_L คือ ค่าพิกัดพื้นดินของตำแหน่งถ่ายภาพ แอล

m_{ij} คือ องค์ประกอบของเมทริกซ์การหมุน (Rotation Matrix

M) ขนาด 3x3

ที่มา: (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2565)

1.8 การสร้างรูปจำลองสามมิติ

เป็นกระบวนการสร้างรูปจำลองสามมิติขึ้นจากคูภาพสามมิติที่ถ่ายคู่ลำดับกัน โดยอาศัยจากข้อมูลการวางตัวของภาพถ่ายและจุดควบคุมภาพถ่ายที่ได้จากงานถ่ายภาพสามเหลี่ยมทางอากาศ

1.9 การสกัดข้อมูล

การสกัดข้อมูลเป็นการดึงข้อมูลรายละเอียดต่าง ๆ ที่ปรากฏบนรูปจำลองสามมิติ ได้แก่ รายละเอียดทางราบและทางตั้ง โดยเฉพาะข้อมูลจุดระดับความสูงที่จะถูกนำไปใช้ในการสร้างภาพตัดแก้ออร์โธ จะเป็นข้อมูลระดับพื้นผิวดินภูมิประเทศที่เรียกว่าแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model : DEM)

1.10 การสร้างพื้นผิวดิน

เป็นการนำแบบข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลขที่ได้จากขั้นตอนการสกัดข้อมูลมาสร้างตาข่ายพื้นผิว (Mesh) จากรูปจำลองสามมิติขึ้นจากคู่ภาพสามมิติสามารถใช้ในรูปแบบของดิน (TIN) หรือตาข่ายพื้นผิว ซึ่งแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลขที่ได้จากการสกัดแบบอัตโนมัติ ข้อมูลจุดระดับความสูงที่ได้จะเป็นตำแหน่งพื้นผิวบนสุดของรูปจำลองสามมิติ

1.11 การแก้ไขพื้นผิวดิน

เป็นขั้นตอนการตรวจสอบพื้นผิวภูมิประเทศที่สร้างขึ้นก่อนนำไปใช้ในการผลิตภาพตัดแก้ออร์โธ โดยเฉพาะการใช้แบบจำลองระดับความสูงเชิงเลขที่ได้จากการสกัดแบบอัตโนมัติ ด้วยการนำพื้นผิวภูมิประเทศที่สร้างมาซ้อนทับกับรูปจำลองสามมิติอีกครั้ง

1.12 การสร้างภาพตัดแก้ออร์โธ

การสร้างภาพตัดแก้ออร์โธเป็นกระบวนการตัดแก้ภาพถ่ายจากกล้องถ่ายภาพซึ่งเป็นการฉายแบบผ่านจุดศูนย์ทิวทัศน์ (Perspective Projection) เป็นการฉายแบบตั้งฉาก (Orthogonal Projection) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของแผนที่ภาพถ่ายที่ผ่านการตัดแก้แล้ว จึงเรียกว่าภาพตัดแก้ออร์โธ แสดงดังในภาพที่ 3 โดยจะแสดงหลักการสร้างภาพตัดแก้ออร์โธ โดยต้องใช้จุดภาพจากภาพถ่าย ข้อมูลการจัดภาพภายในการจัดภาพภายนอกของภาพถ่ายนั้น และข้อมูลพื้นผิวภูมิประเทศจากขั้นตอนต่าง ๆ ข้างต้นมาใช้ในการคำนวณตำแหน่งจุดภาพใหม่ แสดงดังสมการที่ 5 และสมการที่ 6 ตามลำดับ ดังนี้

$$x_a = \frac{m_{11}(x_a - x_L) + m_{21}(y_a - y_L) + m_{31}(z_a - z_L)}{m_{13}(x_a - x_L) + m_{23}(y_a - y_L) + m_{33}(z_a - z_L)} \quad \text{สมการที่ 5}$$

$$y_a = \frac{m_{12}(x_a - x_L) + m_{22}(y_a - y_L) + m_{32}(z_a - z_L)}{m_{13}(x_a - x_L) + m_{23}(y_a - y_L) + m_{33}(z_a - z_L)} \quad \text{สมการที่ 6}$$

เมื่อ x_a, y_a = ค่าพิกัดภาพถ่ายของจุดภาพ เอ

x_0, y_0 = ค่าพิกัดของจุดมูขยสาคัญ

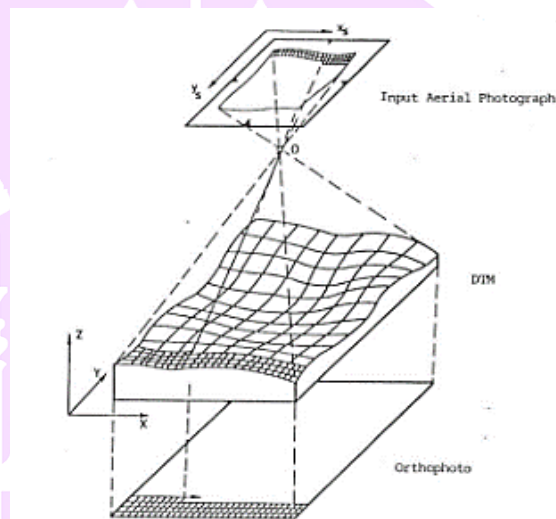
f = ความยาวโฟกัสกล้องถ่ายภาพ

x_a, y_a, z_a = ค่าพิกัดพื้นดินของจุด เอ

x_L, y_L, z_L = ค่าพิกัดพื้นดินของตำแหน่งถ่ายภาพ แอล

m_{ij} = องค์ประกอบของเมทริกซ์การหมุน (Rotation Matrix

M) ขนาด 3x3



ภาพ 3 หลักการสร้างภาพตัดแก้เออร์โธ

ที่มา: (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2565)

2. ขั้นตอนการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ

อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicles : UAV) หรือ ยูเอวี เป็นเทคโนโลยีที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านการให้บริการ การสำรวจ และการจัดการทรัพยากรทั้งในด้านพาณิชย์และอุตสาหกรรม ทำให้เทคโนโลยีนี้กลายเป็นเครื่องมือที่หลายองค์กรและหลากหลายธุรกิจเลือกใช้ ยูเอวี ถูกออกแบบมาเพื่อให้ทำงานในสภาพแวดล้อมที่หลากหลายและทำงานได้อย่างยืดหยุ่น ซึ่งทำให้มีการนำมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางในหลาย ๆ หน่วยงาน

การสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับมีขั้นตอนดังนี้ การวางแผนโครงการ การวางแผนการบินและการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ การสร้างจุดควบคุมภาคพื้นดิน

การประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คน (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2565)

2.1 การวางแผนโครงการ

การวางแผนโครงการคือการเตรียมพร้อมก่อนการบินสำรวจ โดยทำการจัดแจงเตรียมข้อมูล ตรวจสอบข้อมูลพื้นที่ที่ศึกษา วางแผนการดำเนินงานเพื่อให้การทำงานเป็นไปด้วยความราบรื่นและได้ข้อมูลจากการสำรวจอย่างครบถ้วน รวมถึงการวางแผนการบิน การกำหนดปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น รูปแบบการบินถ่ายภาพ ระยะบนพื้นดินของภาพถ่าย ความสูงบิน จำนวนแนวกบินจำนวนภาพถ่ายที่ได้ในหนึ่งแนวกบิน เป็นต้น

2.2 การวางแผนการบินและการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ

เป็นขั้นตอนที่ต้องกำหนดความละเอียดของภาพ คุณภาพของภาพ จุดภาพสามมิติหรือพอยท์คลาวด์ และความถูกต้องเชิงตำแหน่ง โดยมีปัจจัยที่ต้องคำนึงถึง คือ ขนาดของระยะระหว่างจุดศูนย์กลางจุดภาพพื้นดิน ความสูงบิน ส่วนซ้อนและส่วนเกยของภาพ และรูปแบบการบิน

2.3 การสร้างจุดควบคุมภาคพื้นดิน

มีความสำคัญต่อคุณภาพการผลิตข้อมูลเชิงตำแหน่งให้ถูกต้อง การสร้างจุดควบคุมภาคพื้นดินควรสร้างให้เด่นชัด อยู่ในที่โล่งไม่มีสิ่งบดบัง กระจายทั่วพื้นที่การบินถ่าย และมีจำนวนที่เหมาะสมตามสัดส่วนของขนาดพื้นที่ที่บินถ่าย

2.4 การประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ

มีลักษณะการทำงานที่ใช้คอมพิวเตอร์วิชั่นมาช่วยในการประมวลผล ซึ่งเป็นอัตโนมัติเกือบทั้งหมด ยกเว้นการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการประมวลผลและการกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดิน โดยขั้นตอนการประมวลผลมีดังนี้

2.4.1 ขั้นตอนการสร้างจุดยึดโยงแบบอัตโนมัติ (Auto Tie Point Generation)

เป็นขั้นตอนการสกัดจุดภาพที่จะใช้เป็นจุดยึดโยงแบบอัตโนมัติจำนวนมากด้วยขั้นตอนวิธีการของชิฟท์ หรือ เอสไอเอฟที (Scale Invariant Feature Transform : SIFT) โดยวิธีการของ ชิฟท์ ประกอบไปด้วย การกำหนดเลือกระดับขนาดภาพ (Image Size) การสกัดจุดภาพที่เป็นจุดสำคัญ (Keypoint Feature Extraction) การจับคู่จุดภาพที่เป็นจุดสำคัญ (Keypoint Feature Matching)

2.4.2 ขั้นตอนการการประมวลผล เอสเอฟเอ็ม (Structure From Motion : SFM)

เป็นเทคนิควิธีการสร้างแบบจำลอง 3 มิติจากภาพถ่าย 2 มิติ โดยจะประมวลผลหาค่าการจัดภาพภายนอก (Exterior Orientation : EO) และการจัดภาพภายใน (Interior Orientation : IO) โดยในกระบวนการ เอสเอฟเอ็ม จะใช้วิธีการที่เรียกว่า การปรับแก้บล็อกลำแสง (Bundle Block Adjustment) ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า (Unknown) ของการจัดภาพภายนอก และการจัดภาพภายในการปรับแก้บล็อกลำแสงอาศัยหลักการของสมการร่วมเส้น (Collinearity Equation) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างจุดภาพบนภาพถ่าย จุดควบคุมและตำแหน่งของกล้องขณะถ่ายภาพแล้วทำการคำนวณปรับแก้ด้วยวิธีการกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squared Adjustment) แสดงดังสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ (Forstner และ Wrobel, 2016; Hartley และ Zisserman, 2003)

2.4.3 ขั้นตอนการสร้างตาข่ายพื้นผิว (Mesh)

แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขเป็นการสร้างพื้นผิวของภูมิประเทศจากข้อมูลพอยท์คลาวด์ชนิดหนาแน่น ซึ่งจะสร้างด้วยเทคนิควิธีการที่เรียกว่า ดิน (TIN) หรือ มีช (Mesh) ก็ได้ เช่น สิ่งปลูกสร้าง ต้นไม้ และพุ่มไม้ เป็นต้น

2.4.4 ขั้นตอนการสร้างภาพตัดแก้ออร์โธ (Orthophoto)

เป็นภาพที่มีคุณสมบัติการฉายแบบตั้งฉากเช่นเดียวกับแผนที่ในการแสดงพื้นผิวโลก ภาพตัดแก้ออร์โธเป็นข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่ถูกปรับแก้เพื่อให้มีความแม่นยำทางภูมิศาสตร์ (ทางตำแหน่ง) โดยทำการตัดแก่มุมมองและข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในกระบวนการถ่ายภาพผลที่ได้ คือ ภาพที่มีลักษณะทางภูมิศาสตร์ที่ต้องแม่นยำเชิงตำแหน่งสูง อัตราส่วนของวัตถุบนภาพใกล้เคียงกับขนาดจริงบนพื้นโลก โดยการสร้างจะใช้แบบจำลองระดับความสูงเป็นส่วนสำคัญในการสร้าง เนื่องจากภาพตัดแก้ออร์โธจำเป็นต้องใช้ค่าความสูงของวัตถุบนภาพประกอบในการคำนวณปรับแก้ความคลาดเคลื่อนบนภาพถ่ายทางอากาศ อันเนื่องมาจากความสูงต่ำของภูมิประเทศ (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2565)

3. ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ

ความคลาดเคลื่อนต่าง ๆ โดยทั่วไปที่เกิดขึ้นมี 2 ชนิด คือ ความคลาดเคลื่อนระบบและความคลาดเคลื่อนสุ่ม ซึ่งความคลาดเคลื่อนสุ่มนั้นมีค่าน้อยและไม่คงที่ ส่วนความคลาดเคลื่อนระบบมีความสำคัญต่อความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ต้องทำการควบคุมหรือตรวจแก้จากค่าสังเกตก่อนนำไปประมวลผลลัพธ์ในขณะที่ความคลาดเคลื่อนสุ่มนั้นสามารถทำให้ลดลงได้ด้วยการคำนวณปรับแก้ความคลาดเคลื่อนเหล่านี้สามารถแบ่งตามแหล่งกำเนิดของความคลาดเคลื่อนได้ 4 สาเหตุ ดังนี้

3.1 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากคุณภาพของภาพถ่าย

ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากคุณภาพของภาพถ่ายเป็นผลมาจากสภาพแวดล้อมธรรมชาติ ได้แก่ สภาพอากาศ อุณหภูมิ มุมแสงดวงอาทิตย์ สภาพอากาศเหนือพื้นดิน การเกิดหมอกควันต่าง ๆ สิ่งเหล่านี้ล้วนมีผลกระทบต่อคุณภาพของภาพถ่าย

3.2 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากเครื่องมือ

ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมืออันเนื่องมาจากความไม่สมบูรณ์ของเครื่องมือนี้สามารถหาค่าได้จากวิธีการวัดสอบ (Calibration) ในงานสำรวจด้วยภาพถ่ายประกอบด้วย 2 ส่วนที่สำคัญ คือ เครื่องมือที่ใช้รังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดินและกล้องถ่ายภาพ การถ่ายภาพในแต่ละรอบการบินต้องทำการตรึงค่าความยาวโฟกัสและห้ามใช้โหมดการบันทึกแบบโฟกัสอัตโนมัติ ด้วยเหตุนี้โปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผลภาพต้องสามารถประมวลผลแบบมีการวัดสอบกล้องในตัว (Self-Calibration) หรือการวัดสอบกล้องอัตโนมัติ (Auto-Calibration) ในขั้นตอนการคำนวณปรับแก้บล็อกลำแสง (Simultaneous Bundle Block Adjustment) ค่าความคลาดเคลื่อนระบบกล้องถ่ายภาพ ได้แก่ ความเพี้ยนของเลนส์ทั้งชนิดตามแนวรัศมีและแนวสัมผัส ซึ่งสามารถตรวจแก้ได้ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แสดงให้เห็นดังสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ (Sonka, Hlavac และBoyle, 2013; วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2565)

3.3 ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากบุคคล

คือ ค่าคลาดคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความไม่ระมัดระวัง ความไม่ประณีต ความไม่ชำนาญ รวมทั้งความไม่รู้ของผู้ปฏิบัติงานในการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ ทั้งในงานรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดินและงานรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดินบนภาพถ่าย

3.4 ความคลาดเคลื่อนเกิดจากการประมวลผล

ค่าคลาดคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการใช้เครื่องคำนวณที่มีความละเอียดไม่เพียงพอ หรือโปรแกรมประมวลผลไม่ถูกต้อง กรณีการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ ส่วนสำคัญของโปรแกรมประมวลผล คือ การปรับแก้บล็อกลำแสง โดยเฉพาะขั้นตอนการตัดกรองจุดยึดโยงแบบอัตโนมัติที่มีความผิดพลาดและความคลาดคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่

4. องค์ประกอบของการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ

อากาศยานไร้คนขับหรืออากาศยานซึ่งไม่มีนักบินควบคุมภายใน หมายถึง เครื่องบินที่สามารถบินได้ด้วยการควบคุมจากนักบินภายนอกหรือทำการบินด้วยระบบอัตโนมัติ โดยจะมีสถานีควบคุมหลักสนับสนุนอยู่ภาคพื้นดินและควบคุมการทำงานตามความต้องการหลัก 5 ประการ ได้แก่ ระยะเวลาบิน ความเร็ว รัศมีทำการบิน ความสูงบินและน้ำหนักรวม

4.1 ประเภทอากาศยานไร้คนขับสำหรับการสำรวจด้วยภาพถ่าย

การแบ่งประเภทของอากาศยานไร้คนขับสำหรับการสำรวจด้วยภาพถ่ายสามารถแบ่งตามคุณลักษณะเฉพาะสำหรับการบินออกเป็น 4 ประเภท ดังนี้

4.1.1 อากาศยานไร้คนขับประเภทปีกตรึง (Fixed Wing UAV)

อากาศยานไร้คนขับประเภทปีกตรึงเป็นอากาศยานที่มีลักษณะคล้ายกับเครื่องบินทั่วไป มีระยะเวลาการบินประมาณ 30-60 นาที สามารถบินครอบคลุมพื้นที่ได้มากกว่าอากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุนและต้องการพื้นที่ลงจอดอย่างน้อย 25 ตร.ม.

4.1.2 อากาศยานไร้คนขับประเภทหลายปีกหมุน (Multirotor UAV)

อากาศยานไร้คนขับประเภทหลายปีกหมุน เป็นอากาศยานที่สามารถขึ้นลงแนวดิ่ง โดยอาศัยการหมุนของใบพัดในการเคลื่อนไปในทิศทางต่าง ๆ ซึ่งอากาศยานไร้คนขับประเภทหลายปีกหมุนมีจำนวนใบพัดตั้งแต่ 3 ใบพัด จนถึง 8 ใบพัด มีระยะเวลาการบินประมาณ 10-30 นาที

4.1.3 อากาศยานไร้คนขับประเภทปีกหมุนเดี่ยว (Single-Rotor Helicopter UAV)

อากาศยานไร้คนขับประเภทปีกหมุนเดี่ยวเป็นอากาศยานที่มีรูปร่างและโครงสร้างคล้ายเฮลิคอปเตอร์ ไม่เหมือนอากาศยานไร้คนขับประเภทหลายปีกหมุน มีใบพัดขนาดใหญ่เพียงใบเดียวที่ใช้ในการเคลื่อนที่และมีใบพัดขนาดเล็กอยู่บนหางของอากาศยานเพื่อควบคุมทิศทางในการบิน

4.1.4 อากาศยานไร้คนขับประเภทปีกตรึงขึ้นลงแนวดิ่ง (Fixed-Wing Hybrid UAV)

อากาศยานไร้คนขับประเภทปีกตรึงขึ้นลงแนวดิ่ง เป็นอากาศยานที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาใหม่ มีลำตัวอากาศยานเป็นแบบอากาศยานไร้คนขับประเภทปีกตรึง แต่สามารถขึ้นลงแนวดิ่งได้ ซึ่งเป็นการนำเอาข้อดีของประเภทอากาศยานไร้คนขับประเภทปีกตรึงมารวมกับอากาศยานไร้คนขับประเภทหลายปีกหมุน (National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2018; วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2565)

4.2 ระบบรังวัดสัญญาณดาวเทียมของอากาศยานไร้คนขับ

ระบบรังวัดสัญญาณดาวเทียมที่ติดตั้งภายในอากาศยานไร้คนขับมีหน้าที่สำคัญอยู่ 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนควบคุมและสนับสนุนการบินอัตโนมัติ และส่วนการรังวัดเพื่อบันทึกค่าพิกัดตำแหน่งถ่ายภาพ ระบบรังวัดสัญญาณดาวเทียมเพื่อควบคุมและสนับสนุนการบินอัตโนมัติ การบินอัตโนมัติจำเป็นต้องอาศัยการนำเข้าค่าพิกัดตำแหน่งต่าง ๆ เรียกว่า เวปอยต์ (Way Point) เพื่อสร้างแนวบินตามแผนการบินที่กำหนดไว้ โดยความถูกต้องของค่าพิกัดที่รังวัดได้จากเครื่องรับสัญญาณที่ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับเท่ากับ 5 – 10 เมตร ซึ่งเพียงพอต่อการกำหนดแนวบิน ระบบรังวัดสัญญาณดาวเทียมเพื่อบันทึกค่าพิกัดตำแหน่งถ่ายภาพ การบันทึกค่าพิกัดตำแหน่งถ่ายภาพจะเกิดขึ้นพร้อมกับการถ่ายภาพขณะทำการบิน โดยความถูกต้องเชิงตำแหน่งของพิกัดที่บันทึกจะขึ้นกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับ ทั้งนี้การรังวัดสัญญาณดาวเทียมบนอากาศยานไร้คนขับ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ การกำหนดตำแหน่งแบบจุดเดี่ยว (Single Point Positioning) และการรังวัดแบบจลน์ (Kinematic Positioning) (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2565)

4.3 อากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำ

อากาศยานไร้คนขับหรือยูเอวี (Unmanned Aerial Vehicle : UAV) เป็นอากาศยานที่ไม่มีนักบินประจำการอยู่บนเครื่อง เป็นอากาศยานที่ไร้คนขับหรือนักบินแต่สามารถควบคุมได้ อากาศยานไร้คนขับมีรูปร่าง ขนาด รูปแบบ และเอกลักษณ์ที่แตกต่างกันออกไปตามหลักแล้วอากาศยานไร้คนขับ คือ โดรน (Drone) เป็นอากาศยานที่ควบคุมจากระยะไกล ใช้การควบคุมอัตโนมัติ ซึ่งมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ การควบคุมอัตโนมัติจากระยะไกลและการควบคุมแบบอัตโนมัติโดยใช้ระบบการบินด้วยตนเอง ซึ่งต้องอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีระบบที่ซับซ้อนที่มีการติดตั้งไว้ในอากาศยาน (สำนักงานคณะกรรมการป้องกันและปราบปรามยาเสพติด, 2560)

อากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำที่ใช้ในการสำรวจเพื่อทำแผนที่หมายถึงอากาศยานไร้คนขับที่มีต้นทุนต่ำที่สามารถนำมาใช้ในการสำรวจทำแผนที่ภาพถ่ายโดยปกติทั่วไป อากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำ มีคุณลักษณะ ดังนี้

- มีข้อจำกัดการบินในระยะกระจัด ไม่เกิน 5 กิโลเมตร
- มีแบตเตอรี่ที่ใช้บินไม่เกิน 20 นาที
- ไม่สามารถบินถ่ายในพื้นที่ 1 ตารางกิโลเมตรได้ในการบินถ่ายเพียงครั้งเดียว
- มีเซนเซอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการบินสำรวจเพื่อทำแผนที่
- มีราคาไม่เกิน 70,000 บาท
- ภาพถ่ายที่ได้จากการบินถ่ายอากาศยานไร้คนขับต้องนำไปประมวลผลได้

5. มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการสำรวจด้านอากาศยานไร้คนขับเพื่องานวิศวกรรม

(วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2565) ได้กล่าวไว้ว่า มาตรฐานชุดนี้จัดทำขึ้นเพื่อกำหนดแนวทางปฏิบัติงานของวิชาชีพวิศวกรรมสำรวจ ซึ่งจะกล่าวถึงเกณฑ์ความถูกต้องของงานสำรวจที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานทางด้านวิศวกรรม และเกณฑ์การวางแผนปฏิบัติงานด้านสำรวจกับงานวิศวกรรม เพื่อที่จะสามารถควบคุมคุณภาพความถูกต้องของผลการรังวัดเชิงตำแหน่งทั้งทางราบและทางตั้ง

5.1 ASPRS (1990) ASPRS Accuracy Standards for Large-Scale Maps, March 1990

มาตรฐานนี้ถูกจัดทำขึ้นโดยคณะกรรมการมาตรฐานของหน่วยงานสมาคมอเมริกันเพื่อโฟโต้แกรมเมตรีและการสำรวจระยะไกล (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing : ASPRS) ซึ่งมาตรฐานนี้จัดทำขึ้นเพื่อระบุค่าความแม่นยำทางตำแหน่งโดยเปรียบเทียบกับมาตราส่วนภาคพื้นดิน นอกจากนี้มาตรฐานชุดนี้ยังจัดทำขึ้นเพื่อมุ่งเน้นให้เห็นถึงความสำคัญในเรื่องของการนำข้อมูลผลลัพธ์เชิงตำแหน่งและข้อมูลแผนที่มาประยุกต์ใช้ โดยต้องมีการเลือกใช้มาตราส่วนแผนที่ให้เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางด้านวิศวกรรมและค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่ง ดังนั้นมาตรฐานนี้จะทำการรวบรวมเนื้อหาในส่วนในเรื่องความถูกต้องเชิงพื้นที่ว่าแผนที่ภูมิประเทศในมาตราส่วนขนาดใหญ่ที่จัดทำขึ้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิศวกรรมใดได้บ้าง (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), 2015)

5.2 ASPRS (2014) ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data, November 2014

มาตรฐานชุดนี้จัดทำขึ้นเพื่อพัฒนาและปรับปรุงเนื้อหาในส่วนของ มาตรฐานความแม่นยำ เอเอสพีอาร์เอส สำหรับทำแผนที่ขนาดใหญ่ (ASPRS Accuracy Standards for Large-Scale Maps) โดยความร่วมมือของหน่วยงานที่เรียกว่า เอเอสพีอาร์เอส หน่วยงานประยุกต์ใช้โฟโต้แกรมเมตริก (ASPRS Photogrammetric Applications Division : PAD) และหน่วยจัดเก็บข้อมูลหลัก (Primary Data Acquisition Divisions : PDAD) ซึ่งวัตถุประสงค์ของการจัดทำมาตรฐานงานนี้ คือ การกำหนดและพัฒนามาตรฐานความถูกต้องเชิงตำแหน่ง โดยมุ่งเน้นในเรื่องของข้อมูลดิจิทัล ได้แก่ ข้อมูลดิจิทัลของภาพตัดแก้ออร์โธและข้อมูลค่าระดับในรูปแบบของข้อมูลดิจิทัล (Digital Elevation Data) ทั้งนี้มาตรฐานงานนี้ได้รวบรวมเกณฑ์ของค่าความถูกต้องสำหรับข้อมูลดิจิทัลของภาพตัดแก้ออร์โธและข้อมูลค่าระดับในรูปแบบของข้อมูลดิจิทัล ซึ่งค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งจะไม่ได้นำมาอ้างอิงเปรียบเทียบกับ มาตราส่วนแผนที่ และช่วงของเส้นชั้นความสูง แต่มาตรฐานชุดนี้จะทำการระบุค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของผลลัพธ์เชิงตำแหน่งที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลเปรียบเทียบกับขนาดของจุดภาพเพื่อมุ่งเน้นผลของความสำคัญในเรื่องของค่าระยะระหว่างจุดศูนย์กลางจุดภาพบนพื้นดินต่อความถูกต้องเชิงตำแหน่งของผลลัพธ์ ซึ่งสามารถคำนวณผลความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบตาม

มาตรฐาน เอเอสพีอาร์เอส มาตรฐานความแม่นยำของตำแหน่งสำหรับข้อมูลภูมิสารสนเทศ ดิจิทัล (ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data) แสดงดังตารางที่ 1 ดังนี้

ตาราง 1 มาตรฐานค่าความถูกต้องแนวราบ เมื่อ X คือ ชั้นความถูกต้องทางราบ

Horizontal Accuracy Class	RMSE _x and RMSE _y (cm)	RMSE _r (cm)	Horizontal Accuracy at 95% Confidence Level (cm)
X-cm	$\leq X$	$\leq 1.41 * X$	$\leq 2.4 * X$

ในส่วนของการคำนวณค่าความถูกต้องแนวตั้ง สามารถแบ่งชนิดของค่าความถูกต้องแนวตั้งได้จากลักษณะข้อมูลของพื้นที่ โดยสามารถแบ่งออกเป็นข้อมูลพื้นที่ที่ไม่มีพืชปกคลุม (Non-Vegetated Area : NVA) และข้อมูลพื้นที่ที่มีพืชปกคลุม (Vegetated Area : VVA) ได้แก่ ข้อมูลพื้นที่บริเวณป่า ข้อมูลพื้นที่ที่มีวัชพืชและพืชพรรณดิน เป็นต้น ซึ่งสามารถทำการคำนวณค่าความถูกต้องแนวตั้งที่ความเชื่อมั่นที่ 95% (Cressie, 2015; Pfeffermann, 2000) ได้ตามตารางที่ 2 ดังนี้

ตาราง 2 มาตรฐานค่าความถูกต้องแนวตั้ง เมื่อ X คือ ชั้นความถูกต้องทางตั้ง

Vertical Accuracy Class	RMSE _z NonVegetated (cm)	NVA at 95% Confidence Level (cm)	VVA at 95th Percentile (cm)
X-cm	$\leq X$	$\leq 1.96 * X$	$\leq 3.00 * X$

6. การวางแผนการบินและการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ

(วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2565) ได้กล่าวไว้ว่า การวางแผนการบินและการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับเป็นส่วนหนึ่งของการสำรวจด้วยภาพถ่ายในการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ ดังนั้นการวางแผนการบินจึงเป็นสิ่งสำคัญ

เนื่องจากภาพถ่ายที่ได้จากการบินถ่ายเป็นข้อมูลดิบสำหรับการผลิตภาพตัดแก้เออร์โธและข้อมูลแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข โดยเป็นส่วนที่สำคัญให้การผลิตภาพถ่ายทางอากาศเพื่อนำไปประมวลผลในขั้นตอนการประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ ดังนั้นในขั้นตอนนี้ผู้ปฏิบัติงานจะต้องควบคุมคุณภาพของภาพถ่ายและตำแหน่งถ่ายภาพให้ถูกต้องและเป็นไปตามแผนที่วางไว้ ทั้งนี้การถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ การวางแผนการบินและการถ่ายภาพ

6.1 การวางแผนการบิน

เพื่อควบคุมความแม่นยำและความถูกต้องเชิงตำแหน่งของผลลัพธ์ของการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ ขั้นตอนการวางแผนการบินจึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เนื่องจาก การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของการวางแผนการบินจะต้องสอดคล้องกับความถูกต้องเชิงตำแหน่งที่ต้องการ ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการวางแผนการบินประกอบด้วย ความสูงบิน ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางจุดภาพบนพื้นดิน ส่วนซ้อนและส่วนเกยและรูปแบบการบิน

6.1.1 ความสูงบิน

ความสูงบินของการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเป็นการกำหนดความละเอียดของภาพและความถูกต้องของผลลัพธ์ โดยความสูงบินต่ำจะให้ความละเอียดภาพสูง ขณะที่ความสูงบินสูงจะให้ความละเอียดภาพต่ำเพื่อให้สามารถผลิตข้อมูลและแผนที่มาตราส่วนตามความต้องการของผู้ใช้งาน การวางแผนความสูงบิน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 7 ดังนี้

$$DW = \frac{GSD \times IW}{100}$$

สมการที่ 7

เมื่อ DW (Distance Width) คือ ความยาวพื้นดินจริงต่อหนึ่งภาพในหน่วยเมตร

GSD คือ ระยะบนพื้นดินต่อจุดภาพในหน่วยเซนติเมตรต่อจุดภาพ

IW (Image Width) คือ จำนวนจุดภาพด้านกว้างในหน่วยจุดภาพ

ที่มา: (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2565)

6.1.2 ระยะระหว่างจุดศูนย์กลางจุดภาพบนพื้นดิน

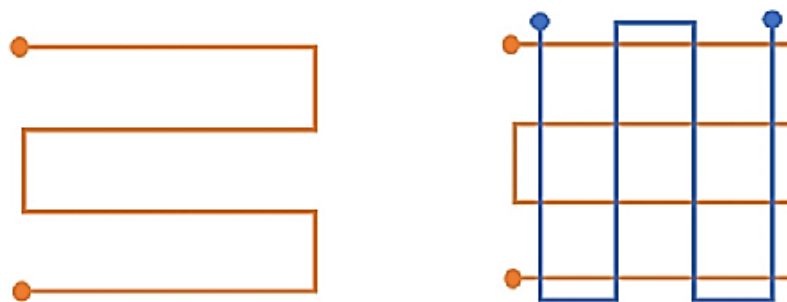
การเลือกใช้ค่าระยะระหว่างจุดศูนย์กลางจุดภาพบนพื้นดินจะขึ้นกับความถูกต้องของข้อมูลเชิงตำแหน่งที่ต้องการ โดยพิจารณาจากความถูกต้องในงานวิศวกรรมด้านต่าง ๆ ซึ่งแบ่งตามประเภทกิจกรรมหรือการใช้งานตามแนวทางของ เอฟจีดีซี มาตรฐานความถูกต้องของพิกัดทางภูมิศาสตร์ ส่วนที่ 4 มาตรฐานสำหรับสถาปัตยกรรม วิศวกรรมก่อสร้าง (เอ/อี/ซี) และการบริหารจัดการสิ่งก่อสร้างระดับชาติ (FGDC Geospatial Positioning Accuracy Standards PART 4: Standards for Architecture, Engineering, Construction (A/E/C) and Facility Management National)

6.1.3 ส่วนซ้อนและส่วนเกย

เนื่องจากอากาศยานไร้คนขับมีขนาดเล็กและไม่สามารถควบคุมความเร็วและทิศทางการบินได้อย่างสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาในการถ่ายภาพ ดังนั้นหากกำหนดส่วนซ้อนและส่วนเกยที่น้อยเกินไปอาจทำให้ภาพที่ถ่ายไม่สามารถต่อกันได้ และจากหลักการ มัลติ-วิว สเตอริโอ (Multi-View Stereo) การสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับแนะนำให้กำหนดส่วนซ้อนและส่วนเกย ดังนี้ ส่วนซ้อนหรือพื้นที่ที่ทับกันอยู่ของภาพประชิดในแนวนอนแนะนำให้การถ่ายภาพมีส่วนซ้อนกันไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ส่วนเกยหรือพื้นที่ที่ทับกันอยู่ระหว่างแนวนอนที่ประชิดกัน แนะนำให้การถ่ายภาพมีส่วนเกยกันไม่น้อยกว่าร้อยละ 70

6.1.4 รูปแบบการบิน

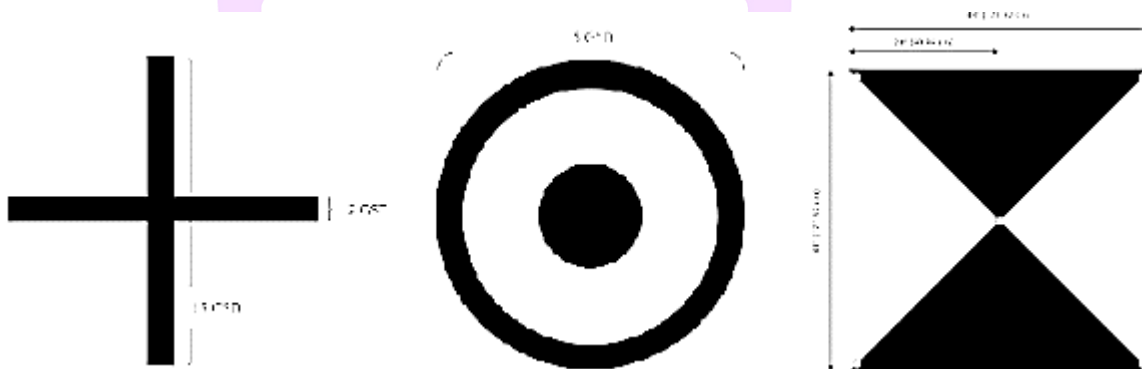
การวางแผนรูปร่างของบล็อกการบินสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับโดยทั่วไปจะกำหนดให้บินถ่ายในลักษณะบล็อกสี่เหลี่ยมมุมฉาก เพื่อให้โครงข่ายมีความแข็งแรงและลดจำนวนจุดควบคุมภาคพื้นดิน โดยสามารถเลือกรูปแบบการบินได้ ดังนี้ รูปแบบการบินแบบทั่วไปซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานรูปแบบการบินแบบกริดสำหรับความต้องการแบบจำลองสามมิติรายละเอียดดีขึ้น แสดงดังภาพที่ 4 ดังนี้



ภาพ 4 รูปแบบการป็นแบบทั่วไปและรูปแบบการป็นแบบกริด ตามลำดับ
ที่มา: (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2565)

7. จุดควบคุมภาคพื้นดิน

(วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2565) ได้อธิบายไว้ว่า การสร้างจุดควบคุมภาคพื้นดินที่ดีจะต้องมองเห็นและสามารถรังวัดได้บนภาพถ่าย และสามารถหมายตำแหน่งจุดกึ่งกลางของจุดควบคุมภาคพื้นดินได้ ประกอบไปด้วย สีเหลี่ยม วงกลมและกากบาทและมีขนาดความใหญ่ที่มองเห็นได้ชัดเจนสอดคล้องกับความสูงบิน แสดงดังภาพที่ 5 ดังนี้



ภาพ 5 รูปแบบจุดควบคุมภาคพื้นดินรูปกากบาท รูปวงกลมและสี่เหลี่ยมตามลำดับ
ที่มา: (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2565)

7.1 การรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดิน

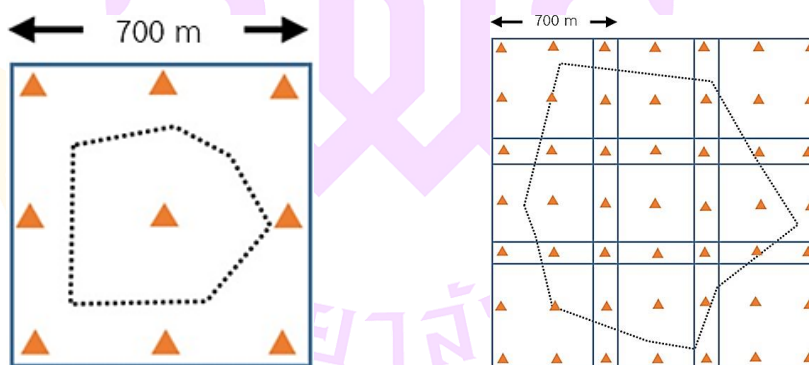
ตามมาตรฐาน เอเอสพีอาร์เอส มาตรฐานความแม่นยำของตำแหน่งสำหรับข้อมูลภูมิสารสนเทศดิจิทัล (ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data) กำหนดให้ค่าความถูกต้องทางราบ อาร์เอ็มเอสอีอาร์ หรือ ค่าผลต่างแบบรากที่สองของค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อน (Root Mean Square Error of Residuals : RMSEr) และค่า

ผลต่างแบบรากที่สองของค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนทางแนวตั้ง (Root Mean Square Error of the Vertical component : RMSEz) ของจุดควบคุมภาคพื้นดินสำหรับการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับจะต้องมีค่าเป็น 1 ส่วน 4 เท่าของค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของข้อมูลที่ต้องการ (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), 2015; Barnhart, Marshall และShappee, 2021; Thompson และคณะ, 1966)

7.2 ตำแหน่งและการกระจายตัวของจุดควบคุมภาคพื้นดิน

(วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2565) ได้อธิบายไว้ว่า ตำแหน่งและการกระจายตัวของจุดควบคุมภาคพื้นดินแบ่งได้ 3 รูปแบบ ตามประเภทอากาศยานไร้คนขับ ได้แก่

- การกำหนดตำแหน่งและการกระจายตัวของจุดควบคุมภาคพื้นดินเมื่อใช้อากาศยานไร้คนขับประเภท ระดับทั่วไป (Consumer Grade) โดยแบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้ กรณีที่ 1 เมื่อบลิ๊อคการประมวลผลภาพถ่ายใช้ภาพถ่ายจำนวน 1 เทียบวินาที กรณีที่ 2 เมื่อบลิ๊อคการประมวลผลภาพถ่ายใช้ภาพถ่ายจำนวนมากกว่า 1 เทียบวินาที (Federal Geographic Data Committee, 1998) แสดงดังภาพที่ 6 ตามลำดับ



กรณีที่ 1

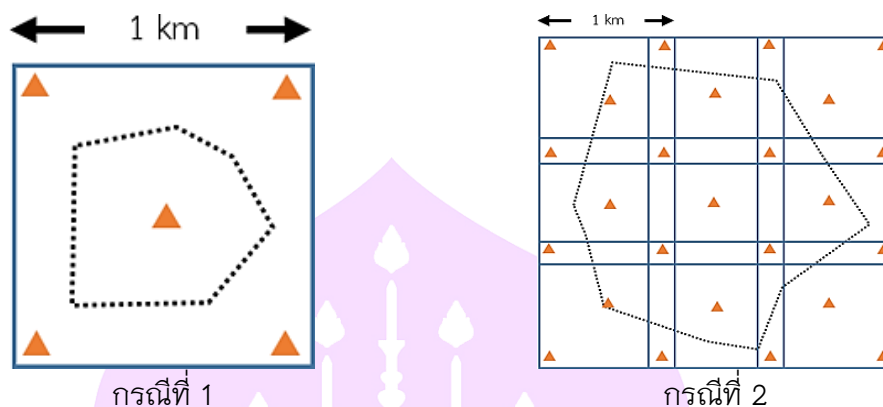
กรณีที่ 2

ภาพ 6 แสดงตัวอย่างการกำหนดตำแหน่งและการกระจายตัวของจุดควบคุมภาคพื้นดินเมื่อใช้อากาศยานไร้คนขับประเภทระดับทั่วไป (Consumer Grade) ทั้ง 2 กรณี

ที่มา: (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2565)

- การกำหนดตำแหน่งและการกระจายตัวของจุดควบคุมภาคพื้นดินเมื่อใช้อากาศยานไร้คนขับประเภทระดับมาตรฐาน (Professional Grade) โดยแบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

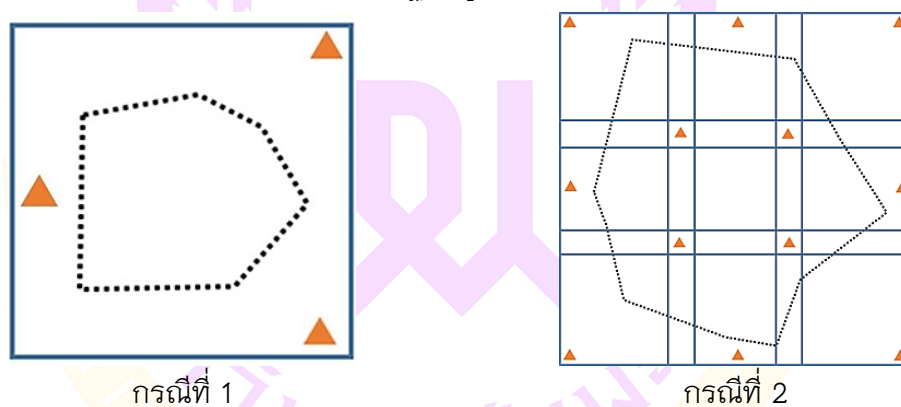
กรณีที่ 1 เมื่อบล็อกการประมวลผลภาพถ่ายใช้ภาพถ่ายจำนวน 1 เทียวบิน กรณีที่ 2 เมื่อบล็อกการประมวลผลภาพถ่ายใช้ภาพถ่ายจำนวนมากกว่า 1 เทียวบิน แสดงดังภาพที่ 7 ตามลำดับ



ภาพ 7 แสดงตัวอย่างการกำหนดตำแหน่งและการกระจายตัวของจุดควบคุมภาคพื้นดินเมื่อใช้อากาศยานไร้คนขับประเภทระดับมาตรฐาน (Professional Grade)

ที่มา: (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2565)

• การกำหนดตำแหน่งและการกระจายตัวของจุดควบคุมภาคพื้นดินเมื่อใช้อากาศยานไร้คนขับประเภทระดับมาตรฐานสูง (Survey Grade) แสดงดังภาพที่ 8 ตามลำดับ



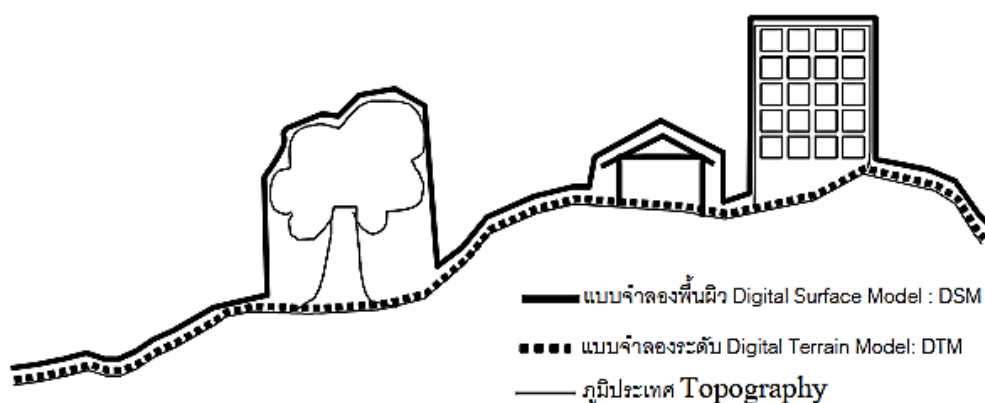
ภาพ 8 การกำหนดตำแหน่งและการกระจายตัวของจุดควบคุมภาคพื้นดินเมื่อใช้อากาศยานไร้คนขับประเภทระดับมาตรฐานสูง

ที่มา: (วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2565)

แบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข

แบบจำลองระดับ (Digital Elevation Model : DEM) คือ กระบวนการรังวัดความสูงที่เป็นตัวแทนของภูมิประเทศ แบบจำลองระดับมีความสำคัญอย่างยิ่งยวดต่อความถูกต้องทางตำแหน่งของภาพตัดแก้ออร์โธที่จะผลิตได้ เนื่องจากค่าระดับสูงที่เรียกออกมาใช้ในระหว่างการคำนวณความคลาดเคลื่อนบนภาพถ่ายทางอากาศเนื่องจากความสูงต่ำของภูมิประเทศ (Relief

Displacement) ดังนั้นจึงต้องมีการกำหนดวิธีการรังวัด วิธีการประมวลผลและวิธีการจัดเก็บให้รัดกุม เพื่อให้ได้แผนที่ภาพตัดแก้ออร์โธโธที่มีความถูกต้องทางตำแหน่ง เช่นเดียวกับแผนที่ในรูปแบบอื่นตามที่มุ่งหวัง การวัดความสูงสิ่งปลูกสร้างและพุ่มไม้เราสามารถเรียกแบบจำลองในลักษณะนี้ว่าแบบจำลองพื้นผิว (Digital Surface Model : DSM) การวัดความสูงตามสภาพภูมิประเทศจริง สามารถเรียกแบบจำลองในลักษณะนี้ว่าแบบจำลองภูมิประเทศ (Digital Terrain Model : DTM) ตัวอย่างของความสัมพันธ์ระหว่างสองแบบจำลองสามารถแสดงให้เห็นดังภาพที่ 9 ดังนี้ (Balasubramanian A, 2017; ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2564)



ภาพ 9 การจำแนกประเภทความสูง แบบจำลองความสูงพื้นผิว แบบจำลองความสูงตามสภาพภูมิประเทศ

ที่มา: (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2564)

การสำรวจรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม

กล้องสำรวจแบบประมวลผลรวม (Total Station) เป็นเครื่องมือทางด้าน การสำรวจรังวัดที่รวมคุณสมบัติของกล้องวัดมุม (Theodolite) และเครื่องวัดระยะอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Distance Meter : EDM) เข้าไว้ด้วยกัน สามารถใช้ในการรังวัดมุมและระยะทางระหว่างตำแหน่งที่ต้องการ รวมทั้งสามารถบันทึกข้อมูลผลการรังวัดและจัดเก็บในหน่วยความจำของกล้องเพื่อส่งออกข้อมูลนำไปต่อยอดใช้งานร่วมกับโปรแกรมอื่นต่อไปได้ กล้องประมวลผลรวมนิยมอย่างแพร่หลายทั่วโลกเป็นที่ยอมรับในงานด้านวิศวกรรม เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ให้ความแม่นยำสูงในงานวิศวกรรม เป็นอุปกรณ์สำรวจที่สามารถทำงานได้หลายรูปแบบ เช่น งานรังวัดที่ดิน (Cadastral Surveys) งานวางผัง (Setting-out Survey) งานสำรวจ

วางตำแหน่งจุดตอกเสาเข็ม (Pile Setting Out) งานสำรวจแผนที่ภูมิศาสตร์ (Topographic Survey) งานสำรวจเส้นทาง (Route Survey) งานสำรวจธรณี (Geologic Survey) งานชลประทาน (Irrigation) และงานรังวัดเหมือง (Mine survey) เป็นต้น กล้องประมวลผลรวม (Total station) สามารถรังวัดได้หลายแบบ ค่าต่าง ๆ ที่สามารถทราบได้จากการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม มี ดังนี้ เนื้อที่ (Area) การวัดในระนาบแผนที่ ขอบเขต (Boundaries) การวัดและรวบรวมข้อมูลสำหรับเขียนแผนที่แนวเขต รูปร่าง (Shape) ทิศทาง (Direction) ตำแหน่ง (Location) ค่าระดับ (Elevation) ระยะตั้งวัดจากฐานระดับถึงจุดบนพื้นดินไม่ใช่ปะปนกับความสูง (Altitude) ซึ่งหมายถึงระยะตั้งวัดขึ้นจากพื้นดินปริมาตร (Volume) มักนิยมนำไปใช้กับงานสำรวจเส้นทาง วางผัง – วางหมุด คำนวณเก็บพิกัดและยังสามารถใช้วัดระยะทางการวัดมุมได้ (Gopi, 2007; Hussein และYaseen, 2021; สงวน มณีรัตน์ศักดิ์, 2562)

พระราชบัญญัติภาษีที่ดินและสิ่งปลูกสร้าง พ.ศ. 2562

(พระราชบัญญัติภาษีที่ดินและสิ่งปลูกสร้าง พ.ศ. 2562, 9 มีนาคม 2562) ได้ประกาศไว้ว่าให้องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นดำเนินการจัดทำแผนที่ภาษีและทะเบียนทรัพย์สิน นับตั้งแต่วันที่พระราชบัญญัติภาษีที่ดินและสิ่งปลูกสร้าง พ.ศ. 2562 ประกาศ การลงพื้นที่สำรวจเก็บข้อมูลให้ปฏิบัติตามแบบฟอร์มการเก็บข้อมูลที่ทางระเบียบกระทรวงมหาดไทยจัดทำไว้ให้ โดยแปลงที่ดินให้ใช้แบบฟอร์ม ผ.ท.1 โรงเรือนและสิ่งปลูกสร้างให้ใช้แบบฟอร์ม ผ.ท.2 บ้ายและใบอนุญาตให้ใช้แบบฟอร์ม ผ.ท.3 (กระทรวงมหาดไทย, 2550; พระราชบัญญัติภาษีที่ดินและสิ่งปลูกสร้าง พ.ศ. 2562, 9 มีนาคม 2562) ตัวอย่างแสดงแบบฟอร์มแสดงให้เห็นดังภาพที่ 10, 11 และ 12 ตามลำดับ ดังนี้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มศวรรณ เสนาสวัสดิ์ (2566) ได้ทำการศึกษาความแม่นยำของวิธีการสำรวจแบบต่าง ๆ เพื่อการก่อสร้าง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดตำแหน่งและขอบเขตของสิ่งก่อสร้างที่จะสร้าง ซึ่งเป็นหนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญก่อนจะลงมือก่อสร้างโครงสร้างอาคาร เช่น เสาเข็ม ฐานราก ตอม่อ เป็นต้น การวิจัยเริ่มจากกำหนดตำแหน่งหมุดของอาคารเรียนคอนกรีตเสริมเหล็ก ที่มีขนาดพื้นที่แตกต่างกัน 3 อาคาร โดยในขั้นตอนการวางตำแหน่งหมุดอาคารใช้เครื่องมือสำรวจ 4 ประเภท ได้แก่ อากาศยานไร้คนขับ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม กล้องประมวลผลรวมและกล้องวัดมุม จากการศึกษาพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความแม่นยำกับขนาดพื้นที่ วิธีที่ให้ความแม่นยำที่สุด คือ กล้องประมวลผลรวม วิธีเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม วิธีกล้องวัดมุม วิธีอากาศยานไร้คนขับ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม วิธีอากาศยานไร้คนขับมีค่าความคลาดเคลื่อนเกินกว่าที่จะนำไปใช้งานในงานก่อสร้างอาคารได้ ซึ่งจะพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์อีก 3 ชนิด มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่ถึง 1 เซนติเมตรเรียงตามลำดับ คือ กล้องประมวลผลรวม (Total Station) เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมและกล้องวัดมุม สรุปได้ว่าการใช้วิธีเครื่องอากาศยานไร้คนขับในการวางผังนั้นสามารถนำมาใช้ในการวางผังได้ในกรณีที่งานไม่ต้องการความละเอียดมาก แต่อากาศยานไร้คนขับเหมาะกับงานถ่ายภาพทางด้านสูงเพื่อประมวลผลภูมิประเทศได้มากกว่าการนำมาวางผังอาคาร เนื่องจากปัจจัยในหลาย ๆ ด้าน เช่น ด้านแรงลม ความสูงของการบินและสัญญาณที่ใช้ในการขับเคลื่อนอากาศยานไร้คนขับ ทำให้ไม่สามารถใช้งานได้ในงานก่อสร้างที่ต้องการความแม่นยำสูง

Mazzoleni M และคณะ (2020) ได้ทำการศึกษาศักยภาพของอากาศยานไร้คนขับที่ใช้ในการสำรวจสภาพภูมิประเทศ โดยการศึกษาจะเปรียบเทียบข้อมูลภูมิประเทศที่ได้มาจากการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ การรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ ไลดาร์และเอสอาร์ทีเอ็ม (SRTM) แล้วนำข้อมูลแบบจำลองความสูง (DEM) ที่ได้จากวิธีการการสำรวจดังกล่าวมาประมวลผลในแบบจำลองไฮดรอลิกและทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพความถูกต้องของแต่ละวิธีการสำรวจโดยจะใช้ ไลดาร์ เป็นเกณฑ์มาตรฐานในการเปรียบเทียบศักยภาพความถูกต้อง แบบจำลองไฮดรอลิก (Hydraulic Model) เป็นรุ่นหนึ่งของโมเดล เอชอีซี-อาร์เอเอส (HEC-RAS) ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการสร้างแบบจำลองที่เกี่ยวกับภูมิประเทศที่เป็นแหล่งน้ำ เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการคำนวณและการใช้งานที่ประสบความสำเร็จมาก่อนหน้านี้ในหลาย ๆ งานวิจัยพื้นที่ศึกษางานวิจัยนี้อยู่ห่างจากแม่น้ำลิมโปโปตอนล่างเป็นระยะทาง

30 กิโลเมตรในเขต ชกเว จังหวัดกาซา ประเทศโมซัมบิก ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีแม่น้ำหลายสายตัดผ่านและมีเขื่อนกั้นน้ำที่ใช้สำหรับผันน้ำเข้าสู่คลองชลประทานกันอยู่ ผลการศึกษาพบว่า การวิเคราะห์ข้อมูลของแบบจำลองไฮดรอลิกของข้อมูลที่สามารถได้จากอากาศยานไร้คนขับสามารถทำได้ดีกว่าการสำรวจด้วยการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ ในเรื่องของการจำแนกขอบเขตของน้ำกับพื้นดิน อย่างไรก็ตามการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ ทำได้ดีกว่าในการบอกถึงลักษณะพื้นผิวหรือรูปทรงเรขาคณิตที่อยู่ใต้น้ำ อย่างไรก็ตามหากต้องการสำรวจพื้นที่อย่างละเอียด อุปกรณ์สำรวจความลึก (Sounder) ร่วมกับการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์เป็นทางเลือกที่ดีกว่าการสำรวจดังกล่าวหากต้องการความแม่นยำในการสำรวจสูง

Alkan และคณะ (2020) ได้ศึกษาและประเมินประสิทธิภาพของโฟโตแกรมเมตริกอากาศยานไร้คนขับ ในพื้นที่ที่อยู่อาศัยหนาแน่นในรูปแบบของ 2 มิติ และ 3 มิติ รวมถึงทดสอบความแม่นยำเมื่อบินถ่ายด้วยความสูง-ต่ำที่แตกต่างกัน 30 เมตร 45 เมตร และมากกว่า 60 เมตร การศึกษานี้เกิดขึ้นที่มหาวิทยาลัยฮิตติ (Hitit) ในเมืองออสมานซิก (Osmançik) จังหวัดโครุม (Corum) ประเทศตุรกี (Turkiye) ในการทดสอบก่อนบินมีการวางจุดควบคุมภาคพื้นดิน 5-10 จุดกระจายทั่วพื้นที่ศึกษา เพื่อใช้ยึดโยงปรับแก้ภาพให้เกิดความแม่นยำสูง โดยการศึกษาจะใช้ซอฟต์แวร์ พิก โฟร์ ดี (Pix4D) ในการทำโฟโตแกรมเมตริกอากาศยานไร้คนขับ ผลการศึกษาพบว่าการบินอากาศยานไร้คนขับที่ระดับความสูง-ต่ำแตกต่างกันในระดับ 30 และ 45 เมตร สามารถให้ผลลัพธ์ความแม่นยำที่สูงทั้งในการวางตำแหน่งการบินแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ โดยความแตกต่างของตำแหน่งอยู่ในระหว่าง 0.005 - 0.138 เมตร ในรูปแบบ 2 มิติ และ 0.020 - 0.181 เมตร ในรูปแบบ 3 มิติ อย่างไรก็ตามในความสูงที่ 60 เมตร เกิดความผิดพลาดเนื่องจากเกิดการบดบังของมุมสิ่งปลูกสร้าง อย่างไรก็ตามการบินที่ระดับความสูง 30 และ 45 เมตร สามารถให้ผลลัพธ์ที่ความแม่นยำที่สูงแม้ในสภาพพื้นที่ที่อยู่อาศัยที่มีสิ่งปลูกสร้างหนาแน่น

Alper (2017) ได้ทำการศึกษาการประเมินความถูกต้องของข้อมูลภาพที่ได้จากการบินถ่ายด้วย ยูเอวี ในสภาพภูมิประเทศที่แตกต่างกัน พื้นที่ราบและพื้นที่ที่มีความลาดเอียงสูง โดยใช้เทคนิคการสร้างข้อมูลความสูงเชิงเลข (DEM) ทั้งหมด 8 วิธี ได้แก่ ธรรมชาติที่ใกล้เคียงโดยรอบ (Natural Neighbour) ฟังก์ชันพื้นฐานรัศมี (Radial Basis Function) สามเหลี่ยมกับมีการประมาณค่าเชิงเส้น (Triangulation with Linear Interpolation) สิ่งรอบข้างที่ใกล้เคียงที่สุด

(Nearest Neighbor), การคำนวณความห่างที่ถอยกลับถึงกำลังหนึ่ง (Invers Distance to a Power), และความโค้งที่น้อยที่สุด (Minimum Curvature) โดยการศึกษาที่เกิดขึ้นที่มหาวิทยาลัยคิงดอม ทูธ (Kingdom Truth) ในสหรัฐอเมริกา มีการเลือกพื้นที่ศึกษา ออกเป็น 2 แบบ ได้แก่ แบบแบนราบและแบบลาดเอียง ซึ่งแบบลาดเอียงมีความชันตั้งแต่ 10 ถึง 58 องศา การศึกษาพบว่าวิธีการประมาณค่าด้วยเทคนิคคริกิง (Kriging Interpolation) ให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำที่สุดสำหรับภูมิประเทศทั้ง 2 แบบ ซึ่งวัดโดย อาร์เอ็มเอสอี (RMSE) เอสดี (SD) เอ็มอี (ME) และ เอ็มเออี (MAE) ดังนั้น วิธี คริกิง (Kriging interpolation) จึงถือว่าเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองความสูงเชิงเลขของพื้นที่ศึกษา ในการศึกษายังพบอีกว่า วิธีการสามเหลี่ยมกับการประมาณค่าเชิงเส้น (Triangulation with Linear Interpolation) ธรรมชาติที่ใกล้เคียงโดยรอบ (Natural Neighbour) และฟังก์ชันพื้นฐานรัศมี (Radial Basis Function) ให้ผลลัพธ์ที่เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับวิธีการคริกิง (Kriging Interpolation)

Yastikli, Bagci และBeser (2013) ทำการอัปเดตข้อมูลภูมิสารสนเทศข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศการสร้างภาพตัดแก้ออร์โธ โดยการใช้อากาศยานไร้คนขับที่มีต้นทุนต่ำ ออกโทคอปเตอร์ (Octocopter) คือ อากาศยานบังคับต้นทุ่นต่ำที่ดัดแปลงให้เป็นอากาศยานไร้คนขับสำหรับการบินถ่ายภาพเพื่อการสำรวจ โดยมีต้นทุนการดัดแปลงไม่ถึง 1000 ยูโร ใช้ซอฟต์แวร์โอเพ่นซอร์สสำหรับการวางแผนการบิน แล้ววางจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP) จำนวน 45 จุดเพื่อใช้ปรับแก้ตำแหน่งความถูกต้องของภาพและใช้ซอฟต์แวร์ที่เรียกว่า แชดโอ อิมเมจ สเตชัน ออโตเมตริก ไทรแองกูลเลชัน (ZI Image Station Automatic Triangulation) สำหรับการสร้างแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (DEM) โดยการวิจัยและการทดสอบนี้เกิดขึ้นที่ เดวูสปาซ่า ในเขตมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีฮิวติส เมืองฮิสตันบลู ประเทศตุรกี เป็นการทดสอบการบินถ่ายของอากาศยานไร้คนขับต้นทุ่นต่ำในพื้นที่ศึกษาขนาดเล็กผลการทดสอบพบว่า อากาศยานไร้คนขับต้นทุ่นต่ำทำการบินถ่ายภาพผ่านไปได้ด้วยดีกล้องราคาประหยัดที่ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับต้นทุ่นต่ำที่ดัดแปลงสามารถบันทึกภาพได้ความแม่นยำในการวางแผนภาพที่เพียงพอสำหรับการสร้างรูปสามเหลี่ยมทางอากาศ เนื่องจากพิกัดศูนย์กลางกล้องที่ไม่แม่นยำระหว่างการบินจึงมีการใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP) จำนวนมากเพื่อปรับปรุงความแม่นยำของรูปสามเหลี่ยมทางอากาศ ภาพที่บันทึกไว้จากระบบอากาศยานไร้คนขับต้นทุ่นต่ำถูกนำมาสร้างภาพตัดแก้ออร์โธด้วยซอฟต์แวร์ แชดโอ อิมเมจ สเตชัน ออโตเมตริก ไทรแองกูลเลชัน (ZI

Image Station Automatic Triangulation) ผลที่ได้ประสบความสำเร็จได้ภาพตัดแก้เออร์โธที่ถูกปรับแก้ตำแหน่งจากจุดควบคุมภาคพื้นดินเรียบร้อยสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามการทดสอบยังขาดการเปรียบเทียบของชุดข้อมูลอ้างอิงคุณภาพสูง เช่น ข้อมูลไลดาร์ (LiDAR) เพื่อให้การทดสอบมีการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองความสูงเชิงเลขที่สร้างขึ้นในอนาคตสามารถนำข้อมูลไลดาร์ (LiDAR) มาเปรียบเทียบกับจะทำให้เห็นผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

Remondino และคณะ (2011) ได้ทำการสำรวจสภาพภูมิประเทศโดยการใช้อากาศยานไร้คนขับ (UAV) เพื่อการสำรวจทำแผนที่การสร้าง แบบจำลองพื้นผิว (DSM) ภาพตัดแก้เออร์โธ (Ortho-Images) และการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ทางธรณีศาสตร์ โดยเน้นความง่ายและประหยัดต้นทุนในการได้มาซึ่งข้อมูลในขณะที่ข้อมูลยังมีความแม่นยำสูง ทั้งนี้การสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ยังคงเป็นรูปแบบกึ่งอัตโนมัติ โดยยังมีการบังคับด้วยมือและจำเป็นต้องมีการวางจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP) เพื่อใช้เป็นจุดตำแหน่งอ้างอิงภาพ โดยพื้นที่ศึกษาประกอบไปด้วย 3 พื้นที่ ดังนี้ แหล่งโบราณคดีเวอีโอ ประเทศอิตาลี แหล่งโบราณคดีโคปาน ประเทศฮอนดูรัส พื้นที่ขุดค้นพบเมืองปาวา ประเทศอิตาลี ผลการสำรวจพบว่าทั้ง 3 พื้นที่ การสำรวจด้วย อากาศยานไร้คนขับ (UAV) มีความสามารถในการสำรวจที่ให้ความแม่นยำสูง แม้ในสภาพพื้นที่ที่พื้นผิวของพื้นที่ไม่ดี มีความสูงต่ำไม่เท่ากัน นอกเหนือความแม่นยำแล้วยังมีข้อดีอย่างอื่นเช่น การส่งข้อมูลความละเอียดสูงอย่างรวดเร็วและเรียลไทม์ของโดรนในขณะที่บินสำรวจ เห็นมุมมองรายละเอียดที่ชัดเจนกว่าการสำรวจภาคพื้นดินและเมื่อเทียบกับแพลตฟอร์มทางอากาศแบบดั้งเดิม อากาศยานไร้คนขับ (UAV) ช่วยลดต้นทุนการดำเนินงานในขณะที่ยังคงมีศักยภาพความแม่นยำสูง ในอนาคตเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) รวมถึงการอ้างอิงตำแหน่งทางภูมิศาสตร์สามารถพัฒนาให้มีประสิทธิภาพพร้อมกันได้โดยอาจลดต้นทุนหรือเพิ่มความสามารถของอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ในขณะที่ผลลัพธ์ยังมีประสิทธิภาพสูง

บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษาค้างนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำเพื่อ
การสำรวจอาคารสิ่งปลูกสร้างและการประยุกต์ใช้งานขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาและวิธีการดำเนินงานมีรายละเอียด ดังนี้

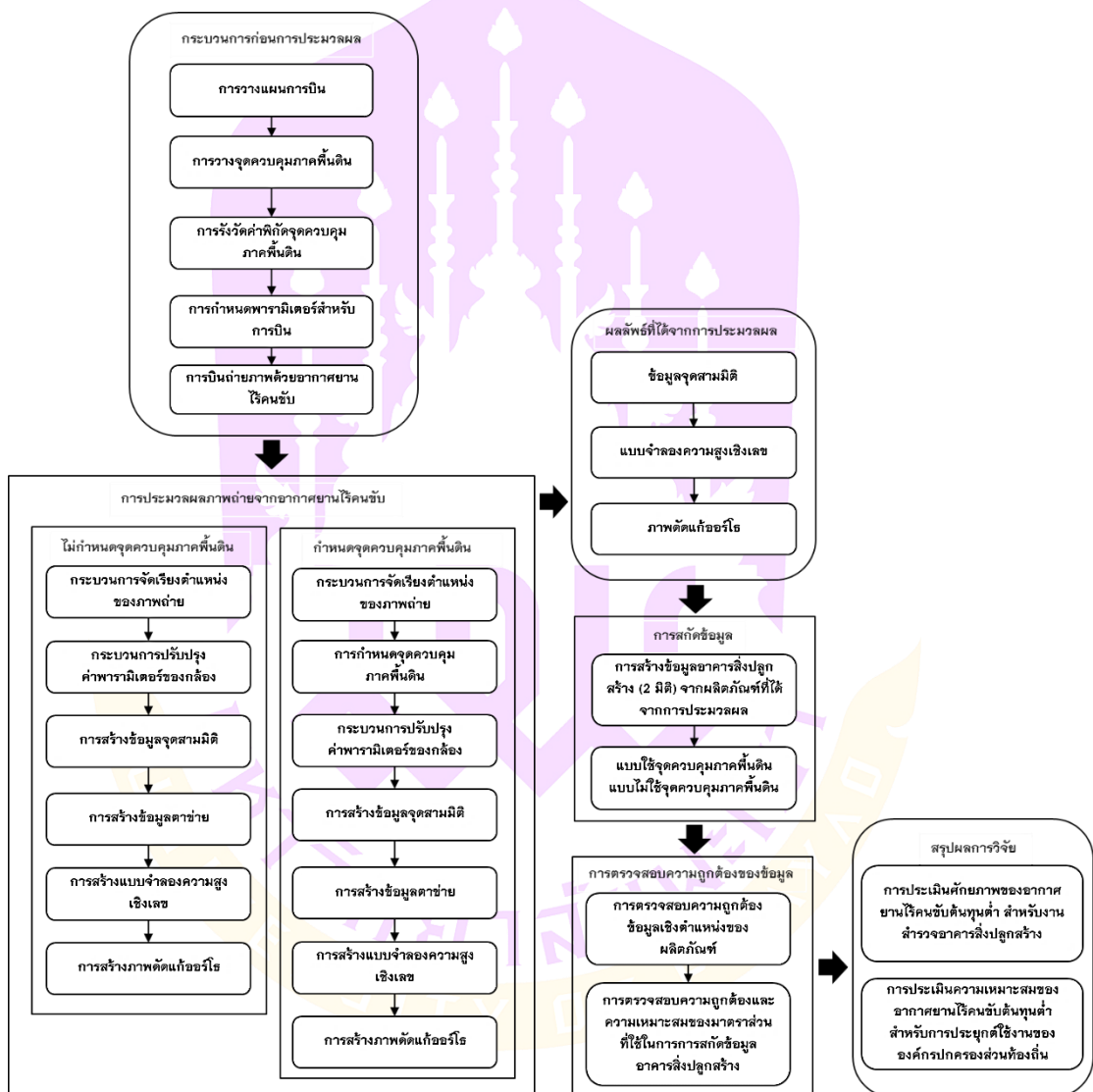
1. อากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำ ยี่ห้อ ดิเจไอ รุ่น แฟน เทม โพร วี ทู (DJI Phantom 4 Pro V.2)
2. กล้องประมวลผล โท เทิล สเตชัน ยี่ห้อ ท็อปคอน รุ่น จี ที เอส วัน ซีโร ทู เอ็น (Total Station : GTS 102 N)
3. คอมพิวเตอร์เคลื่อนที่ (Notebook)
4. อุปกรณ์สำหรับทำหมุดชั่วคราว (BM)
5. เป้าสำหรับสร้างจุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Point) โปรแกรมหรือซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้ ประกอบด้วย
6. ซอฟต์แวร์ ควอนตัมจี ไอ เอส (QGIS) สำหรับจัดทำแผนที่ วิเคราะห์ผลและนำเสนอข้อมูล
7. แอปพลิเคชันสำหรับควบคุมการบินถ่ายภาพทางอากาศของอากาศยานไร้คนขับ พิกซ์ โพร ดี โพร (Pix4D Pro)
8. ซอฟต์แวร์ เอจิสซอฟต์ เมทาเชพ โพรเฟสชันเนล (Agisoft Metashape Professional) สำหรับประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ
9. ชุดโปรแกรม ไมโครซอฟต์ ออฟฟิศ (Microsoft Office) สำหรับการจัดทำเอกสาร รายงานวิจัย การปรับปรุงแก้ไขข้อมูลและการออกแบบแผนภาพลำดับขั้นตอนการทำงาน

ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

1. ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศบริเวณพื้นที่ศึกษา
2. ข้อมูลค่าพิกัดจุดควบคุมภาคพื้นดินที่ได้จากการรังวัดด้วยกล้องประมวลผลรวม
3. ข้อมูลเนื้อที่อาคารสิ่งปลูกสร้างจากการลงพื้นที่สำรวจจริงที่ใช้ในงานแผนที่ภาษีของเทศบาลตำบลแมกกา

แผนผังวิธีการดำเนินงานวิจัย

การศึกษานี้มีแผนการดำเนินงานที่แบ่งเป็นลำดับส่วนกระบวนการตามลำดับขั้นตอน ประกอบไปด้วยกระบวนการก่อนการประมวลผล การประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล การตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล การสกัดข้อมูล และการประเมินผลลัพธ์ เป็นแผนผังดังภาพที่ 13 ดังนี้



ภาพ 13 แผนผังการดำเนินงานวิจัย

1. กระบวนการก่อนการประมวลผล

เป็นขั้นตอนที่มีไว้เพื่อเตรียมข้อมูลเบื้องต้นให้เหมาะสมและพร้อมใช้งานสำหรับการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ หรือการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงเลข โดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ การลดข้อบกพร่อง ความพลั่งเฟลอ การปรับปรุงคุณภาพข้อมูลหรือการจัดการข้อมูลเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานในกระบวนการการประมวลผลต่อไป กระบวนการนี้จะประกอบไปด้วย

1.1 การวางแผนการบิน

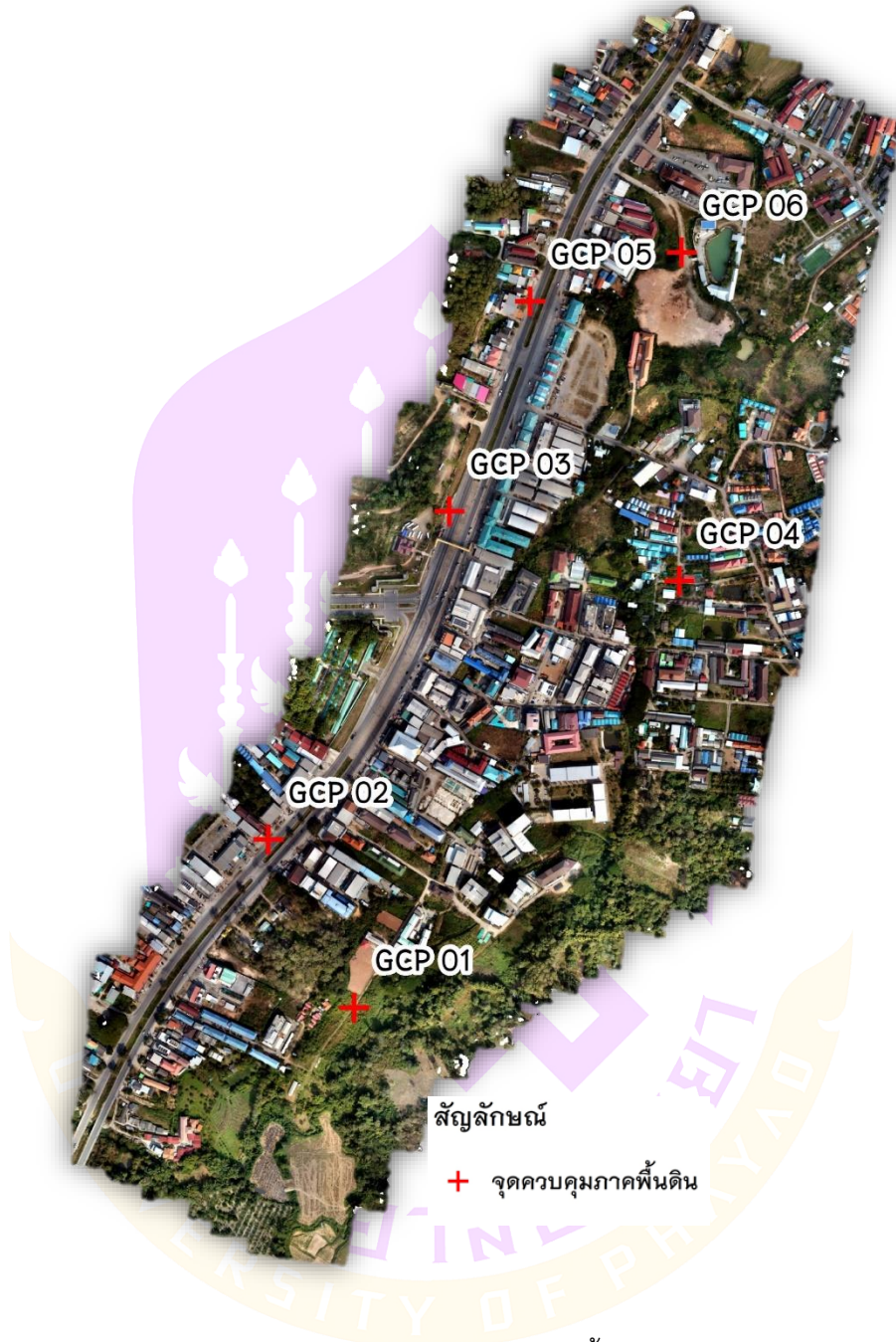
การวางแผนการบินหรือการเตรียมความพร้อมก่อนการนำอากาศยานไร้คนขับขึ้นบิน ได้แก่ การลงพื้นที่สำรวจพื้นที่โครงการ การพิจารณา การประเมินและกำหนดจุดขึ้นบินและลงจอดของอากาศยานไร้คนขับ การสำรวจความสูงของวัตถุในพื้นที่เพื่อหลีกเลี่ยงการบินชนวัตถุระหว่างบินถ่ายภาพ การกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการบินถ่ายภาพ โดยอากาศยานไร้คนขับต้นทุ่นต่ำที่ใช้ในการบินถ่ายภาพครั้งนี้ คือ ดีเจไอ แฟน เทิม โฟร์ โปร วี ทู (DJI Phantom 4 Pro V.2) โดยกำหนดค่าความสูงบินที่ 90 เมตร เหนือพื้นดิน (Above Ground Level : AGL) เนื่องจากเป็นระยะสูงสุดที่กฎหมายอนุญาตให้ทำการขึ้นบินได้ ระยะส่วนซ้อนของรูปภาพที่ถ่ายกับภาพถัดไปในแนวบินเดียวกัน หรือ โอ เวกะ แลพ (Overlap) เท่ากับที่ 80 เปอร์เซ็นต์และส่วนที่ซ้อนทับกันบริเวณด้านข้างหรือระหว่างแนวบิน ที่มักเรียกว่า ซายด์ แลพ (Sidelap) เท่ากับ 60 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการสำรวจครั้งนี้ไม่ได้ต้องการทำข้อมูลภาพ 3 มิติ จึงไม่จำเป็นต้องปรับส่วนซ้อนและส่วนเกยของภาพให้ซ้อนทับกันสูงมากนักและขนาดจุดภาพเท่ากับ 2.45 เซนติเมตรต่อพิกเซลเมื่อเทียบกับขนาดของวัตถุที่ต้องการถ่ายภาพแล้วมีขนาดใหญ่แตกต่างกันมากจึงเลือกปรับส่วนซ้อนและส่วนเกยกันของภาพถ่ายเป็น 80 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าเป็นส่วนซ้อนและส่วนเกยที่มีความซ้อนทับกันสูงมากในงานสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับทั่วไปรวมถึงสามารถผลิตข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลขและภาพตัดแก้ออร์โธที่มีความละเอียดทางด้านสูง ในส่วนของมุมมองของกล้องถ่ายภาพกำหนดให้เป็นมุมตั้งตลอดการบินถ่ายภาพ -90 องศา เนื่องจากต้องการให้กล้องถ่ายภาพถ่ายเป็นแนวตั้งตั้งฉากกับวัตถุและเพื่อลดปัญหาเกี่ยวกับแสงที่อาจทำให้ภาพถ่ายเบลอและไม่คมชัด ความเร็วในการบินถ่ายภาพ อยู่ที่ 8.3 เมตรต่อวินาทีซึ่งเป็นความเร็วที่แอปพลิเคชันที่ใช้ในการวางแผนการบินทำการคำนวณมาให้อัตโนมัติมีการกำหนดความละเอียดจุดภาพ (Ground Sampling Distance : GSD) หรือ จีเอสดี ของภาพ อยู่ที่ 2.45 เซนติเมตรต่อจุดภาพ (พิกเซล) ในส่วนนี้แอปพลิเคชันที่ใช้ในการวางแผนการบินจะคำนวณมาให้อัตโนมัติเมื่อเรากำหนดความ

สูงบินและมีเส้นทางการบินกำหนดให้เป็นแนวขึ้น-ลงตามทิศเหนือ-ใต้ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาเกี่ยวกับแสงที่มีผลจากการขึ้น-ลงของดวงอาทิตย์

1.2 การวางจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบ

การวางจุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Points) ก่อนการบินถ่ายภาพมีผลทำให้สามารถลดความผิดพลาดในข้อมูลเชิงเรขาคณิตและทำให้รูปภาพที่ถ่ายทางอากาศมีความแม่นยำมากขึ้น ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการผลิตภาพตัดแก้เออร์โธและการวางจุดตรวจสอบ (Check Point) จะช่วยตรวจสอบความถูกต้องของภาพตัดแก้เออร์โธที่ได้จากการประมวลผล โดยการวางจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบจะใช้เป้าไวนิลขาวดำขนาด 60 คูณ 60 เซนติเมตร โดยมีการวางจุดควบคุมภาคพื้นดินทั้งหมด 6 จุดและจุดตรวจสอบทั้งหมด 20 จุดกระจายทั่วพื้นที่ ตามแบบมาตรฐานความถูกต้องของ เอ เอส พี อาร์ เอส (ASPRS) แสดงดังภาพที่ 14 และ 15 ดังนี้





ภาพ 14 แสดงจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP)



ภาพ 15 แสดงจุดตรวจสอบสวน (CP)

1.3 การรังวัดค่าพิกัดจุดควบคุมภาคพื้นดิน และ จุดตรวจสอบ

การรังวัดค่าพิกัดของจุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Points) และจุดตรวจสอบ (Check Point) โดยที่จุดควบคุมภาคพื้นดินจะช่วยเพิ่มความแม่นยำของผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายและจุดตรวจสอบจะช่วยตรวจสอบความแม่นยำของภาพตัดแก้ ออร์โธหลังการประมวลผลภาพถ่าย โดยการสำรวจจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบครั้งนี้ใช้กล้องประมวลผลรวม (Total Station) ในการสำรวจค่าพิกัดโดยทำการถ่ายภาพค่าพิกัดจากโครงข่ายหมุดหลักฐานโครงการถ่ายภาพทางอากาศสี่กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ปี พ.ศ. 2545 – 2546 ชื่อ “A100251” โดยค่าความสูงของพื้นที่เลือกใช้เป็นแบบ ออร์โธ เมตริก ไฮท์ (EGM96) หรือความสูงเหนือพื้นผิวออยด์ (Geoid) เนื่องจากให้ค่าความสูงที่ใกล้เคียงกับสภาพภูมิประเทศจริงมากที่สุด หากมีการปรับค่าความสูงให้อยู่บนพื้นหลักฐานรูปทรงรีแล้วจะเป็นการเพิ่มความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของข้อมูลเข้าไปยังจุดควบคุมทุกจุด โดยทำการสำรวจทั้งหมด 26 จุด ประกอบไปด้วยจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP) จำนวน 6 จุด จุดตรวจสอบ (CP) จำนวน 20 จุด ภาพวิธีการรังวัดจุดตรวจควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบ แสดงดังภาพที่ 16 ดังนี้



ภาพ 16 แสดงการรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบ

1.4 ขั้นตอนการกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการบินถ่ายภาพและการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ

อากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำที่ใช้ในการบินถ่ายครั้งนี้ คือ ดิเจไอ แฟน เทิม โพร โปร์ วี ทู (DJI Phantom 4 Pro V.2) โดยมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการบินถ่ายแสดงดังตารางที่ 4 ในบทที่ 4 หัวข้อการวางแผนบินถ่ายภาพและการบินถ่ายภาพ

2. การประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ

การประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับเป็นกระบวนการที่นำเอาข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพนำเข้าสู่ระบบคอมพิวเตอร์เพื่อทำการปรับแก้วิเคราะห์และประมวลผลภาพถ่าย การสร้างข้อมูลผลลัพธ์เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงาน ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลภาพ ประกอบไปด้วย ข้อมูลจุดภาพ 3 มิติ (พอยท์คลาวด์) ข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลข (DEM) และภาพตัดแก้ออร์โธ (Orthophoto) การประมวลผลภาพถ่ายในครั้งนี้ใช้ซอฟต์แวร์เอจิสซอฟต์ เมทาเซพ โพรเฟสชันเนล (Agisoft Metashape Professional) และแบ่งการประมวลผลออกเป็นออกเป็น 2 แบบ โดยแบบแรกทำการประมวลผลภาพโดยไม่มีการกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดินและแบบที่สองทำการประมวลผลภาพแบบมีการกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดิน โดยขั้นตอนการประมวลผลและการกำหนดค่าพารามิเตอร์ในการประมวลผลภาพใช้การกำหนดค่าแบบเดียวกันทั้งหมดทั้งการประมวลผลภาพโดยไม่มีการกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดินและการประมวลผลภาพแบบมีการกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดิน โดยมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการประมวลผลภาพ ทั้งการประมวลผลภาพถ่ายแบบมีการกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดินและไม่มีจุดควบคุมภาคพื้นดินตามตารางที่ 3 ดังนี้

ตาราง 3 การกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับการประมวลผลภาพถ่าย

พารามิเตอร์	การกำหนดค่าพารามิเตอร์
การจัดเรียงตำแหน่งของภาพถ่าย (Align Photo)	ระดับสูง (High)
ลิมิตของ จุดสำคัญ (Key points)	40,000 และ 5,000 จุด
การปรับปรุงตำแหน่งของกล้องในการ จัดเรียงภาพ (Optimize Camera Alignment)	ปรับแต่งตำแหน่งและโมเดลของกล้องใน ลักษณะที่เป็นเอกลักษณ์ต่อภาพถ่ายแต่ละ ภาพ (Adaptive Camera Model Fitting)
การสร้างพอยทคลาวด์ชนิดหนาแน่น (Dense Point Cloud)	ระดับปานกลาง (Medium)
การสร้างข้อมูลตาข่ายพื้นผิว (Mesh)	ระดับสูง (High)
การสร้างแบบจำลองความสูงเชิงเลข (DEM)	ใช้ พอยทคลาวด์ชนิดหนาแน่นและระบบ พิกัดเป็น ยูทีเอ็ม ดับเบิลยูจีเอส 1984 โซน 47 เอ็น (UTM WGS84 Zone 47N หรือ EPSG:32647)
การสร้างภาพตัดแกออร์โธ (Orthophoto)	พื้นผิวใช้แบบจำลองความสูงเชิงเลขและ การรวมภาพใช้เป็นการ โมเสก (Mosaic)

2.1 กระบวนการจัดเรียงตำแหน่งของภาพถ่าย (Align photo)

ขั้นตอนแรกของการประมวลผลภาพถ่าย คือ การจัดเรียงตำแหน่งของภาพถ่าย (Align photo) มีการกำหนดความถูกต้องที่ระดับสูง (High) และเลือกใช้วิธีการเลือกภาพประมวลผลทั้ง 2 แบบในการจัดเรียงตำแหน่งของภาพถ่ายกำหนดลิมิตของ จุดสำคัญ (Key Points) และจุดยึดโยง (Tie Points) ที่ 40,000 และ 5,000 จุดตามลำดับ มีการเลือกให้การจัดเรียงตำแหน่งภาพถ่ายใช้เทคนิคการปรับแต่งโมเดลกล้อง เพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลภาพที่มีอยู่ในขณะทำการจับคู่ภาพ

2.2 การกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Point)

เมื่อจัดเรียงตำแหน่งของภาพถ่ายเรียบร้อยแล้วในขั้นตอนนี้การประมวลผลภาพแบบที่หนึ่ง แบบไม่กำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดินจะข้ามขั้นตอนนี้ไป ในขั้นตอนนี้จะทำการกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดิน จุดควบคุมภาคพื้นดินที่ได้จากการรังวัดเป็น ระบบพิกัดกริด ยูทีเอ็ม ดับเบิลยูจีเอส 1984 โซน 47 เอ็น (UTM WGS84 Zone 47N หรือ EPSG:32647)

2.3 การปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของกล้อง (Optimize Camera Alignment)

เมื่อกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดินสำเร็จในขั้นตอนนี้ทั้งการประมวลผลภาพแบบมีจุดควบคุมภาคพื้นดินและไม่มีจุดควบคุมภาคพื้นดินจะทำการปรับปรุงตำแหน่งของกล้องในการจัดเรียงภาพ โดยเลือกที่คำสั่งเพื่อให้การจัดเรียงตำแหน่งของภาพถ่ายได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดมีความถูกต้องแม่นยำและสัมพันธ์กันมากที่สุด

2.4 การสร้างข้อมูลจุดสามมิติ (Point Cloud)

เมื่อปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของกล้องเรียบร้อยแล้ว จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการการสร้างข้อมูลจุดภาพ 3 มิติ (พอยท์คลาวด์) โดยใช้คำสั่งสร้างพอยท์คลาวด์ชนิดหนาแน่น โดยคุณภาพของพอยท์คลาวด์เลือกที่ระดับปานกลาง เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านฮาร์ดแวร์คอมพิวเตอร์ที่ใช้ประมวลผลมีกำลังการประมวลผลไม่เพียงพอต่อการปรับใช้ระดับสูง เนื่องจากขั้นตอนการสร้างพอยท์คลาวด์ชนิดหนาแน่น จำเป็นต้องอาศัยคอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะในการประมวลผลสูงมากและต้องการระยะเวลาในการประมวลผลยาวนาน งานวิจัยครั้งนี้จึงเลือกระดับปานกลาง (Medium) เนื่องจากมีการลดลงของพารามิเตอร์เพียงครั้งเดียวจากข้อมูลภาพต้นฉบับ โดยการถ่ายภาพที่ความละเอียดจุดภาพสูงสุดของเซนเซอร์หรือกล้องบันทึกภาพซึ่งจะให้ภาพถ่ายขนาด 5472 x 3648 จุดภาพหรือประมาณ 20 ล้านจุดภาพ แม้จะปรับระดับคุณภาพของพอยท์คลาวด์ที่ต้องการให้อยู่ในระดับปานกลาง (คุณภาพลดลงเพียงครั้งหนึ่งของแต่ละด้านของภาพถ่าย) ก็ยังถือว่าจำนวนจุดที่ได้มากเพียงพอต่อการนำไปใช้สกัดข้อมูลอาคารสิ่งปลูกสร้าง เนื่องจากวัตถุที่ปรากฏบนภาพมีขนาดใหญ่มากเมื่อเทียบกับขนาดความละเอียดจุดภาพของภาพถ่าย (ประมาณ 3 เซนติเมตร)

2.5 การสร้างข้อมูลตาข่ายพื้นผิว (Mesh)

เมื่อสร้างข้อมูลจุดสามมิติเรียบร้อยแล้ว ต่อมาในกระบวนการสร้างข้อมูลตาข่ายพื้นผิว (Mesh) ทำการสร้างตาข่ายพื้นผิวเพื่อเติมเต็มข้อมูลพื้นผิวในกรณีที่บางส่วนในพื้นที่ศึกษาขาดหายไปไม่สามารถคำนวณพิกัดแบบ 3 มิติได้ โดยเลือกที่คำสั่งสร้างแบบจำลองพื้นผิว ในการสร้างแบบจำลองพื้นผิวเลือกให้การสร้างข้อมูลตาข่ายพื้นผิว ใช้ข้อมูลกลุ่มจุดภาพสามมิติเป็นจุดหลักในการสร้างแบบจำลองพื้นผิว

2.6 การสร้างแบบจำลองความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model)

หลังจากการสร้างการสร้างข้อมูลตาข่ายพื้นผิว (Mesh) เสร็จสิ้น จากนั้นจึงทำการสร้างแบบจำลองความสูงเชิงเลข โดยการกำหนดค่าของระบบพิกัดข้อมูลที่ต้องการให้อยู่ในระบบพิกัดกริด ยูทีเอ็ม ดับเบิลยูจีเอส 1984 โซน 47 เ็น (UTM WGS84 Zone 47N หรือ EPSG:32647) โดยเลือกข้อมูลที่น่ามาสร้างแบบจำลองความสูงเชิงเลข คือ ข้อมูลพอยทคลาวชนิดหนาแน่น

2.7 การสร้างภาพตัดแก้ออร์โธ (Orthophoto)

เมื่อสร้างแบบจำลองความสูงเชิงเลขเรียบร้อยแล้วจะเข้าสู่กระบวนการสร้างภาพตัดแก้ออร์โธ โดยการสร้างส่วนของพื้นผิว เลือกใช้เป็นแบบจำลองความสูงใช้ในการตัดแก้ออร์โธเพื่อแก้ไขความเอียงความไม่เท่ากันของพื้นที่ในภาพออร์โธแล้วทำการผลิตภาพตัดแก้ออร์โธโดยการต่อภาพให้เป็นผืนเดียวกัน (โมเสก) แล้วทำการจัดเก็บภาพตัดแก้ออร์โธในรูปแบบของ ทิฟ ไฟล์ (Tif File)

3. การสกัดข้อมูล

การสกัดข้อมูลจากภาพตัดแก้ออร์โธในงานวิจัยครั้งนี้ เป็นการสร้างชั้นข้อมูลอาคารสิ่งปลูกสร้าง โดยการวาดภาพหรือดิจิทัลไอซ์อาคารสิ่งปลูกสร้างที่ปรากฏบนภาพตัดแก้ออร์โธ โดยข้อมูลที่ได้จะเป็นข้อมูลรูปร่างแบบ 2 มิติ ที่มีการกำหนดการแสดงผลบนหน้าจอในมาตราส่วนที่แตกต่างกัน ประกอบด้วยมาตราส่วน 1:100, 1:250 และ 1:500 โดยทำการดิจิทัลไอซ์ (สกัดข้อมูลขนาดเนื้อที่อาคารจากภาพตัดแก้ออร์โธเพื่อทำการวัดขนาดพื้นที่) อาคารสิ่งปลูกสร้างรวมทั้งหมด 200 อาคาร ตามสัดส่วนของจำนวนอาคาร (Stratified random sampling) แต่ละประเภท ประกอบด้วย อาคารที่ใช้ประโยชน์เพื่อเป็นที่อยู่อาศัยจำนวน 50 ตัวอย่าง ร้านค้า 50 ตัวอย่าง หอพัก 80 ตัวอย่าง และ โรงจอดรถ 20 ตัวอย่าง ตัวแทนอาคารสำหรับเปรียบเทียบความถูกต้องในการศึกษาครั้งนี้ เป็นข้อมูลจริงที่มีการสำรวจจากการลงพื้นที่รังวัดสำรวจจริง มีการนำไปใช้งานจริงของระบบแผนที่ภาษีของเทศบาลตำบลแม่กา โดยทำการสกัดข้อมูล 2 ชุดข้อมูลได้แก่ การสกัดข้อมูลจากการประมวลผลภาพโดยไม่มีการกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดินและการสกัดข้อมูลจากการประมวลผลภาพแบบมีการกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดิน (สาธิต แสง ประดิษฐ์, 2014)

4. การประเมินศักยภาพและความถูกต้องของข้อมูลจากการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำสำหรับงานสำรวจอาคารสิ่งปลูกสร้าง

การประเมินความถูกต้องของข้อมูลที่ประมวลผลจากภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำในครั้งนี้จะอาศัยมาตรฐานระดับชาติสหรัฐอเมริกาสำหรับความถูกต้องของข้อมูลเชิงทางตำแหน่ง (US National Standard for Spatial Data Accuracy : NSSDA) ที่พัฒนาโดยคณะกรรมการข้อมูลภูมิศาสตร์แห่งสหรัฐอเมริกา (Federal Geographic Data Committee : FGDC) โดยอาศัยวิธีการทางสถิติในการทดสอบและประเมินค่าความถูกต้องทางตำแหน่งของข้อมูลทางตำแหน่งเชิงเลข (Digital Spatial Data) ที่สามารถปรับใช้ได้กับทั้งข้อมูลในรูปแบบเวกเตอร์และแรสเตอร์ สำหรับมาตรฐานการนำข้อมูลไปใช้งาน (Data Usability Standard) ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Root Mean Square Error : RMSE) เป็นค่าที่ใช้เป็นตัวแทนในการประเมินค่าความถูกต้องทางตำแหน่งของข้อมูล โดยค่าดังกล่าวจะคำนวณจากค่าพิกัดของข้อมูลอิสระ (Independent Data) ที่มีความถูกต้องทางตำแหน่งและความน่าเชื่อถือสูงกว่ากับข้อมูลที่ต้องการประเมินความถูกต้อง (Test Data) (Federal Geographic Data Committee, 1998; Plourde และ Congalton, 2003; วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2565) จำนวนจุดตรวจสอบที่ใช้ในการประเมินนั้นไม่ควรต่ำกว่า 20 จุด ที่ควรกระจายอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของแต่ละจุดภาค (Quadrant) ของชุดข้อมูลและมีการกระจายตัวทั่วทั้งพื้นที่ โดยระยะห่างของจุดตรวจสอบไม่ควรน้อยกว่าร้อยละสิบของความยาวแนวทแยงของขอบเขตชุดข้อมูล (Bounding Box) (ดังภาพที่ 17) การทดสอบด้วยจำนวนจุดตรวจสอบขั้นต่ำ 20 จุดนี้จะยินยอมให้ 1 จุดตรวจสอบสามารถคลาดเคลื่อนได้ ในระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 (95 % Confidence Level) ตัวอย่างตารางสำหรับการประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งของข้อมูลเชิงเลขแสดงดังภาพที่ 18 ดังนี้

ค่าทางสถิติสำหรับการประเมินความถูกต้องของข้อมูลเชิงตำแหน่งตามมาตรฐานระดับชาติสหรัฐอเมริกา นั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น ค่าความถูกต้องทางราบ (Horizontal Accuracy) และค่าความถูกต้องทางตั้ง (Vertical Accuracy) โดยค่าความถูกต้องทางราบจะอาศัยการหาค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (RMSE) ทั้งจากตามแนวแกนเอ็กซ์ (X Axis) และแกนวาย (Y Axis) ของระบบพิกัดรวมกันเป็นค่าเดียวแล้วทำการคูณเข้ากับค่าคงที่ (1.7308) เพื่อเป็นตัวแทนของค่าความถูกต้องทางราบตามมาตรฐานฯ ส่วนค่าความถูกต้องทางตั้งนั้นจะนำค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในแนวแกน (Z axis) คูณเข้ากับค่าคงที่ (1.9600) เพื่อเป็นตัวแทนของค่าความถูกต้องทางตั้งตามมาตรฐานฯ โดยค่าความถูกต้องทั้งทางราบและทางตั้งนี้จะอยู่ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (Congalton และ Green, 2019; Minnesota Planning Land Management Information Center, 1999; Plourde และ Congalton, 2003)



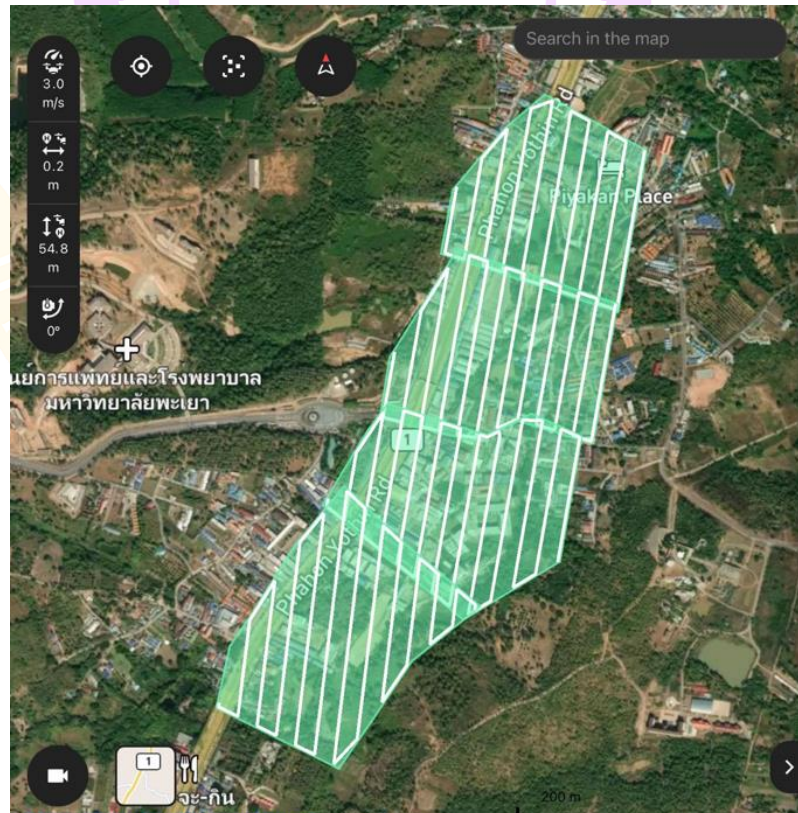
บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล/ผลการทดลอง/ผลการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำเพื่อการสำรวจอาคารสิ่งปลูกสร้างและการประยุกต์ใช้งานขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ประกอบไปด้วย การประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำ ทั้งแบบการประมวลผลภาพถ่ายแบบไม่กำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดินและแบบกำหนดจุดควบคุมภาคพื้นดิน การสกัดข้อมูลจากภาพตัดแก้ออร์โธและการประเมินความถูกต้อง

1. การวางแผนบินถ่ายภาพและการบินถ่ายภาพ

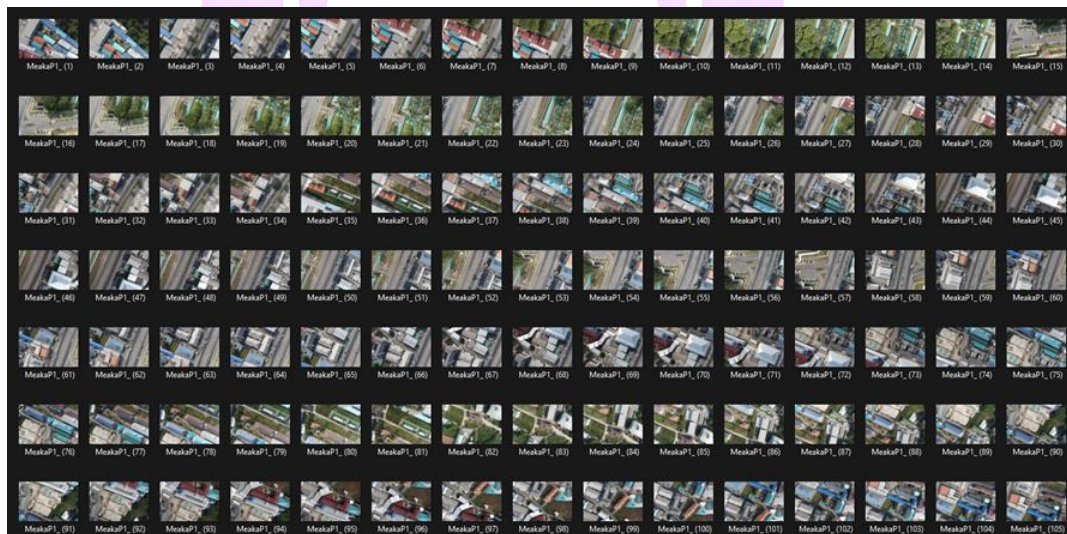
การศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการบินถ่ายภาพจากอากาศยานไร้คนขับยี่ห้อ ดิเจไอ รุ่น แฟนเทม โฟร์ โพร วีทู (DJI Phantom 4 Pro V.2) ครอบคลุมบริเวณด้านหน้ามหาวิทยาลัยพะเยา (ดังภาพที่ 19) ได้จำนวนภาพรวมทั้งสิ้น 1,101 ภาพ เป็นข้อมูลภาพดิจิทัลแบบสีผสม (RGB Color) รูปแบบมาตรฐาน เจเพ็ก (JPG) พารามิเตอร์ของการถ่ายภาพแสดงดังตารางที่ 4 และตัวอย่างภาพถ่ายที่ได้แสดงดังภาพที่ 20 ดังนี้



ภาพ 19 แสดงแผนการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำ

ตาราง 4 พารามิเตอร์ของการบินถ่ายภาพ

พารามิเตอร์สำหรับการบินถ่ายภาพของอากาศยานไร้คนขับ	
ความสูงบิน	90 เมตร
ระยะส่วนซ้อนของภาพในแนว	
บินเดียวกัน (Overlap)	80 เปอร์เซ็นต์
ระยะส่วนซ้อนของภาพแนว	
บินด้านข้าง (Sidelap)	60 เปอร์เซ็นต์
มุมมองของกล้องถ่ายภาพ	-90 องศา
ความเร็วในการบินถ่ายภาพ	8.3 เมตรต่อวินาที
ความละเอียดจุดภาพ (GSD)	2.45 เซนติเมตรต่อจุดภาพ
เส้นทางการบิน	แนวขึ้น-ลง ตามทิศเหนือ-ใต้



ภาพ 20 ตัวอย่างภาพถ่ายที่ได้จากการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ

2. การรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบจากภาคสนาม

การสำรวจและรังวัดจุดควบคุม (Ground Control Point : GCP) และจุดตรวจสอบ (Check Point : CP) เพื่อใช้ในการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับและการประเมินความถูกต้องทางตำแหน่ง (Positional Accuracy Assessment : PAA) สำหรับการศึกษาค้างนี้ใช้วิธีการถ่ายค่าพิกัดจากจุดควบคุมภาคพื้นดินจากโครงการบินถ่ายภาพทางอากาศของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (ภาพถ่าย) มาตรฐาน 1:25,000 ที่มีการดำเนินการบินถ่ายภาพ

ทางอากาศเมื่อ พ.ศ. 2545 – 2546 ครอบคลุมพื้นที่เกือบทั้งประเทศ โดยจุดที่ใช้งาน คือ หมุดเลขที่ “A100251” ที่ตั้งอยู่ในโรงเรียนบ้านห้วยเคียน ตำบลแม่กา อำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา ค่าพิกัดในระบบพิกัดกริดยูทีเอ็ม (UTM) บนพื้นหลักฐาน ดับเบิลยูจีเอส 1984 (WGS84) ที่มีค่าทางตะวันออก (Easting : E) เท่ากับ 597987.045 เมตร ค่าทางเหนือ (Northing : N) เท่ากับ 2107125.276 เมตร ค่าความสูงออร์โธเมตริก (EGM96) เท่ากับ 425.555 เมตร

การรังวัดจุดควบคุม (GCP) และจุดตรวจสอบ (CP) สำหรับการประมวลผลข้อมูลอากาศยานไร้คนขับในการศึกษาครั้งนี้ ได้ทำการรังวัดสำรวจรวมทั้งสิ้น 26 จุด โดยแบ่งเป็นจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP) สำหรับการปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ของการวางตัวภายนอก (Exterior Orientation : EO) ตำแหน่งกล้องถ่ายภาพ (Camera location) และการคำนวณปรับแก้บล็อกลำแสง (Bundle Block Adjustment) ทั้งสิ้น 6 จุดและจุดตรวจสอบความถูกต้อง (CP) ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคำนวณและการประมวลผลภาพตามมาตรฐานระดับชาติสหรัฐอเมริกาสำหรับความถูกต้องของข้อมูลเชิงตำแหน่ง (NSSDA) อีกจำนวน 20 จุด การสำรวจในครั้งนี้อาศัย กล้องประมวลผลรวม (Total Station) ยี่ห้อ ท็อปคอน รุ่น จีทีเอช หนึ่ง ศูนย์ สอง เอ็น (TOPCON GTS-102N) ที่เป่าระยะสามารถรังวัดได้ไกลถึง 2,000 เมตร ค่ามาตรฐานในการวัดระยะอยู่ในเกณฑ์ไม่เกิน 2 มิลลิเมตร บวก 2 ส่วนในล้าน (ppm.) คูณกับระยะทางรวมที่สำรวจ (Distance) (+/- 2mm. + 2ppm. x Distance) ค่าความละเอียดของมุมราบและมุมตั้งไม่เกิน 1ฟิลิปดา ค่าความถูกต้องในการอ่านมุมไม่เกิน 2 ฟิลิปดา (Topcon Corporation, 2006) ค่าพิกัดจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP) และค่าพิกัดจุดตรวจสอบ (CP) ในการศึกษาครั้งนี้ แสดงดังตาราง 5 และ 6 ดังนี้

ตาราง 5 ค่าพิกัดจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP)

จุดที่	E	N	H
1	597379.347	2103912.148	447.545
2	597254.932	2104154.681	454.991
3	597516.958	2104628.653	445.570
4	597848.361	2104528.164	449.262
5	597633.189	2104931.653	440.235
6	597852.025	2105002.069	437.859

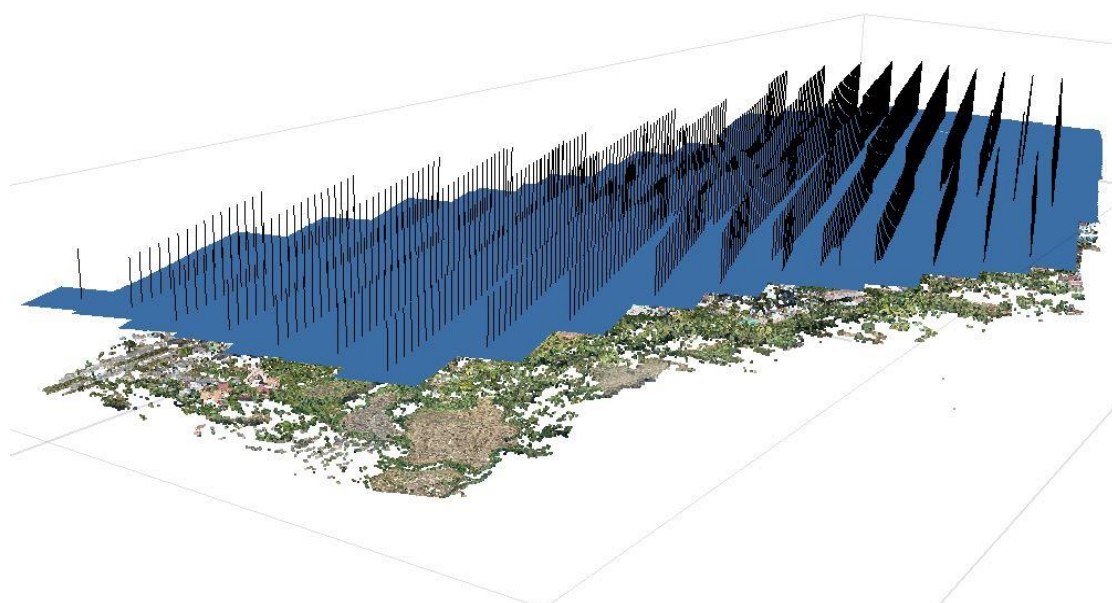
ตาราง 6 ค่าพิกัดจุดตรวจสอบ (CP)

จุดที่	E	N	H
1	597045.544	2103731.03	452.096
2	597319.167	2103831.007	448.713
3	597374.764	2104278.737	452.881
4	597504.743	2104189.163	447.709
5	597544.21	2104297.644	446.819
6	597464.699	2104438.687	449.227
7	597746.493	2104435.199	446.364
8	597571.431	2104780.621	443.893
9	597794.847	2104766.478	440.670
10	597860.261	2104688.249	443.102
11	597875.509	2104861.262	439.379
12	597806.76	2105104.747	436.354
13	597808.506	2105199.812	436.497
14	597490.314	2104095.437	448.271
15	597585.408	2104019.096	446.122
16	597548.206	2104133.206	444.583
17	597708.913	2104362.449	447.002
18	597980.87	2104415.017	453.757
19	598021.568	2104724.786	462.766
20	597737.646	2105106.992	438.275

3. การประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ

การประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับในครั้งนี้ ได้เลือกใช้โปรแกรมเอจิชอฟต์ เมทาเซพ โพรเฟสชันเนล (Agisoft Metashape Professional) เวอร์ชัน 2.0.1 บิวด์ 16069 แบบ โหนดส์ลีด ไลเซนซ์สำหรับการศึกษาแบบเดี่ยว (Education Single Node License) ของ สวารินทร์ ฤกษ์อยู่สุข (Sawarin Lerk-u-suke) การประมวลผลข้อมูลนั้นจะเริ่มจากการจัดเรียงตำแหน่ง

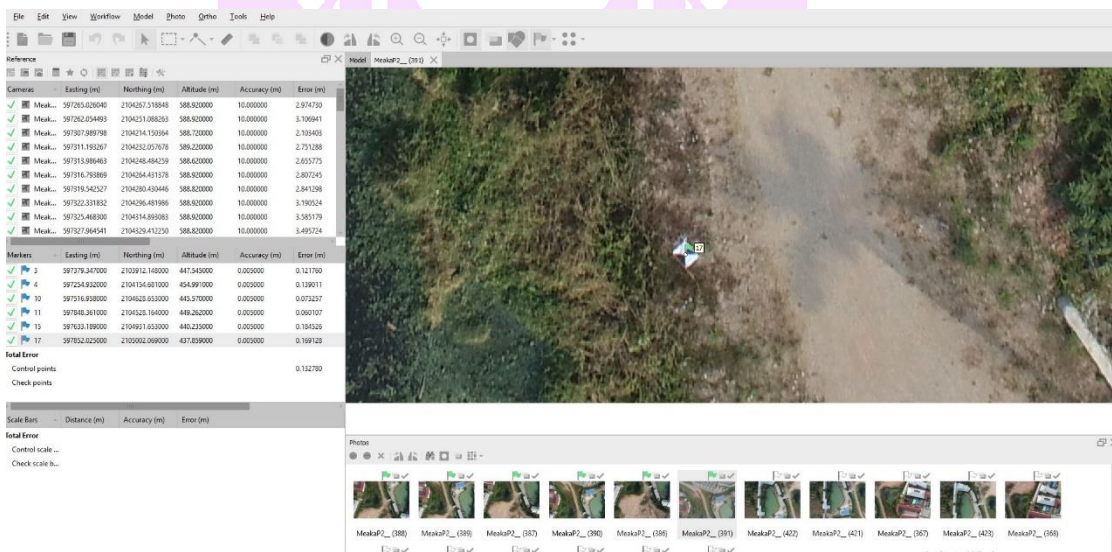
และการวางตัวของภาพ (Align Photo) เลือกที่ระดับความถูกต้อง (Accuracy) เป็นแบบสูง (High) มีการเลือกใช้การเลือกค่าก่อนแบบทั่วไป (Generic Preselection) การเลือกค่าก่อนอ้างอิง (Reference Preselection) และการรีเซ็ตค่าการจัดวางปัจจุบัน (Reset Current Alignment) ลิขิตของจุดสำคัญ (Key Point Limit) เท่ากับ 40,000 จุด ลิขิตของจุดโยงยึด (Tie Point Limit) เท่ากับ 5,000 จุดและเลือกใช้การปรับให้พอดีของแบบจำลองกล้องถ่ายภาพที่ปรับเปลี่ยนได้ (Adaptive Camera Model Fitting) ผลของการจัดวางตำแหน่งและการวางตัวของข้อมูลภาพ แสดงดังภาพ 21 ดังนี้



ภาพ 21 การจัดวางตำแหน่งและการวางตัวของข้อมูลภาพ

หลังจากข้อมูลภาพทั้งหมดได้ทำการจัดวางตำแหน่งและการวางตัวเรียบร้อยแล้ว จะแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ส่วน คือ การประมวลผลข้อมูลแบบไม่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP) ในการสร้างข้อมูลกลุ่มจุดภาพสามมิติ (Point Cloud) ข้อมูลตาข่ายพื้นผิว (Mesh) ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (DEM) และข้อมูลภาพถ่ายตัดแก้ออร์โธ (Orthophoto) ส่วนที่ 2 คือ การใช้ข้อมูลจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP) เพื่อการประมวลผลที่แม่นยำมากยิ่งขึ้น (Agisoft, 2019)

การรังวัดข้อมูลจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP) เข้าไปเสริมความถูกต้องและแม่นยำของการประมวลผลนั้น จะเริ่มจากการเพิ่มค่าพิกัดของจุดควบคุมภาคพื้นดินในรูปแบบไฟล์ซีเอสวี (CSV File) ที่มีระบบอ้างอิงทางตำแหน่ง คือ ระบบพิกัดกริดยูทีเอ็ม โซน 47เอ็น พื้นหลักฐานดับเบิ้ลยูจีเอส 1984 (EPSG:32647) หลังจากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณหาตำแหน่งของจุดควบคุมภาคพื้นดินให้แบบอัตโนมัติ แต่อย่างไรก็ดีตำแหน่งนั้นยังไม่ตรงกับตำแหน่งที่แท้จริงบนภาพถ่ายทำให้ต้องทำการเลื่อนเครื่องหมาย (Marker) ของจุดควบคุมไปยังตำแหน่งเป้า (ในการศึกษาค้างนี้ได้ทำการสร้างเป้าสี่เหลี่ยมขนาด 60 x 60 เซนติเมตร รูปกากบาทขาวสลับดำ) ที่ถูกต้องบนภาพทุกจุดและทุกภาพที่มองเห็นหรือมีการถ่ายภาพได้ เมื่อทำการเลื่อนพิกัดของจุดควบคุมภาคพื้นดินที่ได้จากการรังวัดภาคสนามให้ตรงกับเป้าที่ปรากฏบนภาพแล้ว ต้องทำการกดอัปเดต (Update) เพื่อคำนวณปรับแก้บัลลิสต์กล่าแสงใหม่อีกครั้งหนึ่ง ตัวอย่างแสดงในภาพที่ 22 ดังนี้



ภาพ 22 ตัวอย่างการรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดินสำหรับการเสริมความถูกต้องและแม่นยำของการประมวลผล

โดยการปรับปรุงความถูกต้องแม่นยำของบัลลิสต์กล่าแสงจะทำการเลือกพารามิเตอร์ทุกตัวและเลือกการปรับให้พอดีกับแบบจำลองของกล้องถ่ายภาพ (Adaptive Camera Model Fitting) และการประมาณค่าความแปรปรวนร่วมของจุดโยงยึด (Estimate Tie Point Covariance) โดยจุดควบคุมภาคพื้นดินดังกล่าวเมื่อทำการรังวัดและปรับปรุงการคำนวณประมวลผลแล้ว พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนทางราบของจุดควบคุมตามแนวแกนเอ็กซ์ (X Error) หรือค่าทางตะวันออก (Easting) เท่ากับ 0.097 เมตร ค่าความคลาดเคลื่อนตามแนวแกน

วาย (Y Error) หรือค่าทางเหนือ (Northing) เท่ากับ 0.079 เมตร ค่าความคลาดเคลื่อนตามแนวแกนซัด (Z Error) หรือค่าความสูง (Altitude) เท่ากับ 0.037 เมตร ค่าความคลาดเคลื่อนโดยรวม (Total Error) เท่ากับ 0.131 เมตรและความคลาดเคลื่อนของจุดภาพ (Image Error) เท่ากับ 0.203 จุดภาพ (รายละเอียดเพิ่มเติมแสดงดังภาคผนวก ก)

หลังจากเพิ่มจุดควบคุมภาคพื้นดินแล้วจะทำการสร้างข้อมูลกลุ่มแบบหนาแน่น (Build Dense Cloud) โดยมีการกำหนดพารามิเตอร์ ดังนี้

- คุณภาพ (Quality) คือ ระดับปานกลาง (Medium)
- การกรองความลึก (Depth Filtering) คือ แบบราบรื่น (Mild)

ตัวอย่างข้อมูลกลุ่มแบบหนาแน่นแสดงดังภาพที่ 23 ดังนี้



ภาพ 23 (ก) ข้อมูลกลุ่มจุดภาพ 3 มิติของทั้งพื้นที่ศึกษา (ข) และ (ค) ตัวอย่างข้อมูลกลุ่มจุดภาพ 3 มิติบางส่วนของพื้นที่ศึกษา

หลังจากได้ข้อมูลกลุ่มจุดภาพ 3 มิติแล้ว ขั้นตอนต่อมาเป็นการสร้างข้อมูลตาข่ายพื้นผิว (Build Mesh) เพื่อให้ได้รูปร่างของวัตถุต่าง ๆ ที่ประกอบขึ้นจากหน้าปิด (Face) ที่เชื่อมต่อแต่ละจุดของข้อมูลกลุ่มจุดภาพ 3 มิติโดยอาศัยโครงข่ายสามเหลี่ยมในการสร้างพื้นที่หน้าปิดเพื่อให้พื้นผิวของวัตถุหรือสิ่งต่าง ๆ ในแบบจำลองมีขนาดรูปร่างที่สามารถมองเห็นรูปทรงแบบสามมิติและคำนวณขนาดหรือปริมาตรได้ โดยมีการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ประกอบด้วย

- แหล่งข้อมูล (Source Data) คือ ข้อมูลกลุ่มจุดภาพ 3 มิติแบบหนาแน่น (Dense Cloud)
- ชนิดของพื้นผิว (Surface Type) คือ แบบกำหนดเอง (Arbitrary 3D)
- จำนวนหน้าปิด (Face Count) คือ ระดับสูง (รวมทั้งพื้นที่จำนวน 2,485,552 ผิวหน้า)
- การประมาณค่าในช่วง (Interpolation) คือ ยินยอมให้มีการประมาณค่าในช่วง (Enabled) (Metashape, 2020)

ข้อมูลตาข่ายพื้นผิว (Mesh) ที่ได้จากการประมวลผลแสดงดังภาพที่ 24 ดังนี้



(ก)

(ค)

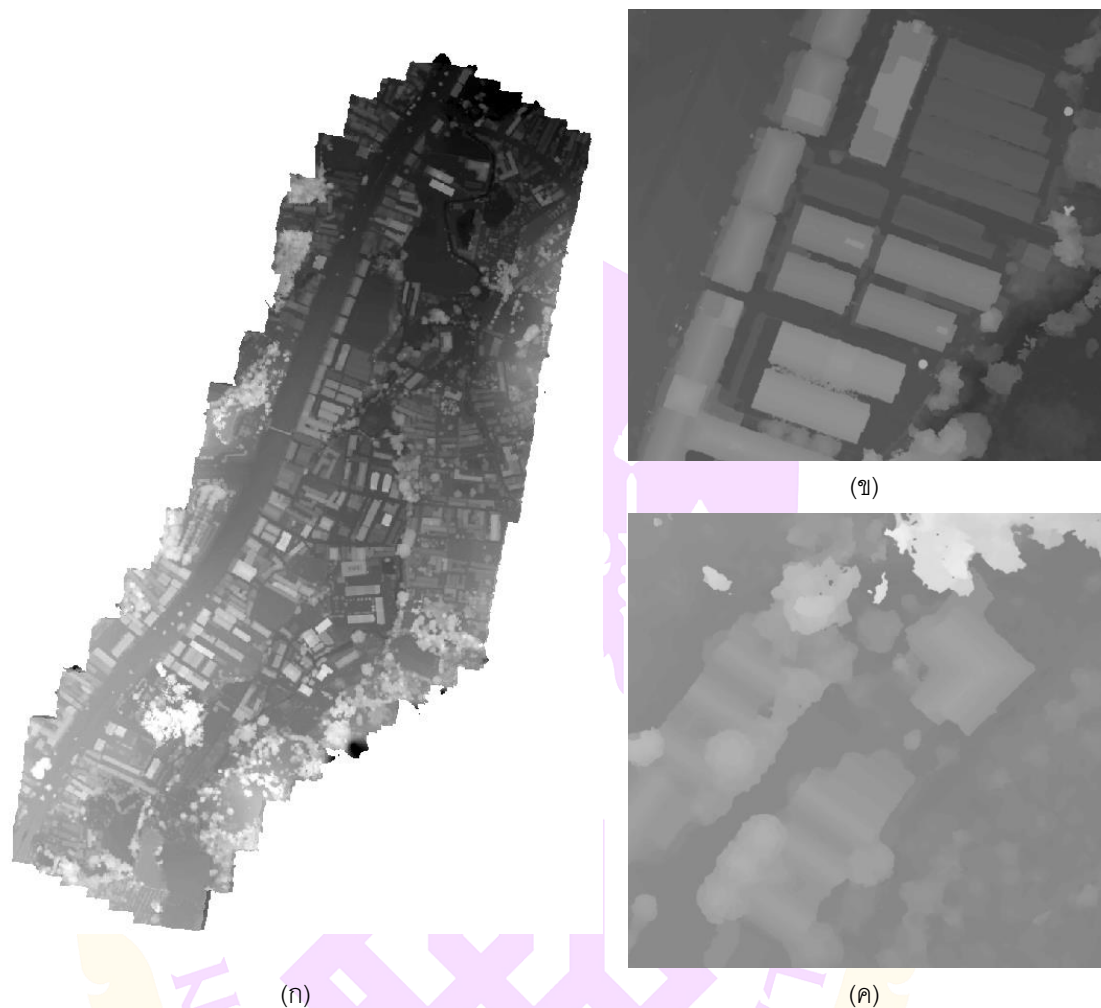
ภาพ 24 (ก) ข้อมูลตาข่ายพื้นผิวของทั้งพื้นที่ศึกษา (ข) และ (ค) ตัวอย่างข้อมูลตาข่ายพื้นผิวบางส่วนของพื้นที่ศึกษา

เมื่อได้ข้อมูลตาข่ายพื้นผิวแล้ว ขั้นตอนต่อมาที่สำคัญ คือ การประมวลผลเพื่อสร้างข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (DEM) โดยการคำนวณหาความสูง-ต่ำของพื้นที่ โดยอาศัยหลากหลายเทคนิคที่ประมวลผลจากข้อมูลภาพถ่ายจำนวนมาก พารามิเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลประกอบด้วย

- การฉาย (Projection) คือ ระบบพิกัดกริดยูทีเอ็ม โซน 47เอ็น พื้นหลักฐาน ดับเบิลยูจีเอส 1984 (EPSG:32647)
- แหล่งข้อมูล (Source Data) คือ ข้อมูลกลุ่มจุดภาพ 3 มิติ แบบหนาแน่น (Dense Cloud)
- การประมาณค่าในช่วง (Interpolation) คือ ยินยอมให้มีการประมาณค่าในช่วง (Enabled)
- ความละเอียดหน่วยเป็นเมตร (Resolution: M) คือ 0.39 (โปรแกรมคำนวณให้อัตโนมัติไม่สามารถแก้ไขได้)
- ขนาดภาพหน่วยเป็นจุดภาพ (Total Size: Pix) คือ 4242 X 5297

โดยแบบจำลองความสูงเชิงเลขที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายในการประมวลผลภาพถ่ายแบบไม่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินนั้นจะได้ความสูงที่เป็นแบบความสูงเหนือรูปทรงรี (Ellipsoid) และในส่วนของความสูงที่ได้จากการประมวลผลแบบมีการจุดควบคุมภาคพื้นดินจะได้ความสูงแบบเสมือนพื้นผิวสภาพภูมิประเทศจริง (Geoid) เนื่องจากการสำรวจจริงวัดจุดควบคุมภาคพื้นดินอ้างอิงค่าความสูงมาจากโครงข่ายหมุดหลักฐานจากโครงการถ่ายภาพทางอากาศสี่ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ปี พ.ศ. 2545 – 2546

ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (DEM) ที่ได้แสดงดังภาพ 25 ดังนี้



ภาพ 25 (ก) ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลขของทั้งพื้นที่ศึกษา (ข) และ (ค) ตัวอย่างข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลขบางส่วนของพื้นที่ศึกษา

ขั้นตอนสุดท้ายในการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ คือ การประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายดัดแก้ออร์โธ (Orthophoto) โดยมีการกำหนดพารามิเตอร์ ประกอบด้วย

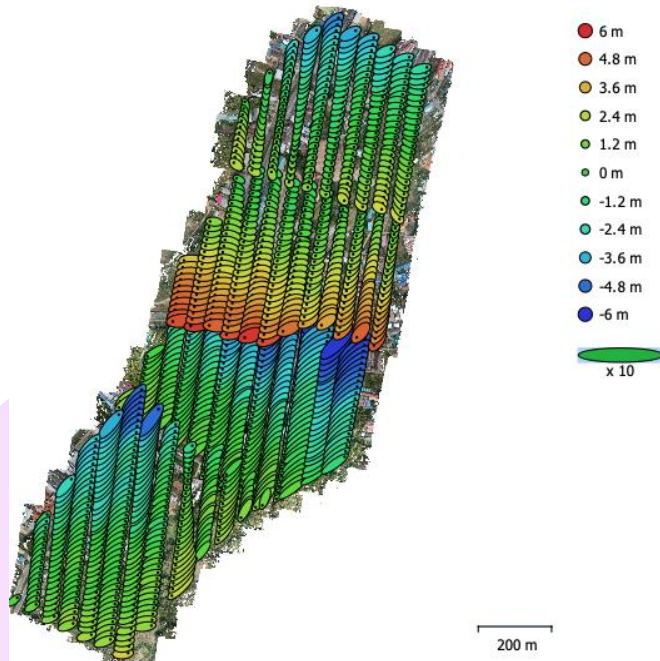
- การฉาย (Projection) คือ ระบบพิกัดกริดยูทีเอ็ม โซน 47เอ็น พื้นหลักฐาน ดับเบิลยูจีเอส 1984 (EPSG:32647)
- ข้อมูลพื้นผิว (Surface) คือ ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (DEM)
- โหมดการเชื่อมข้อมูล (Blending Mode) คือ การโมเสก (Mosaic)
- การเติมหลุม (Hole Filling) คือ เปิดการทำงาน (Enable)
- ขนาดจุดภาพ หน่วยเป็นเมตร (Pixel Size) คือ 0.025

ตัวอย่างข้อมูลภาพถ่ายตัดแก้อร์โธแสดงดังภาพ 26 ดังนี้



ภาพ 26 ข้อมูลภาพถ่ายตัดแก้อร์โธของทั้งพื้นที่ศึกษา (ข) และ (ค) ตัวอย่างข้อมูลภาพถ่ายตัดแก้อร์โธบางส่วนในพื้นที่ศึกษา

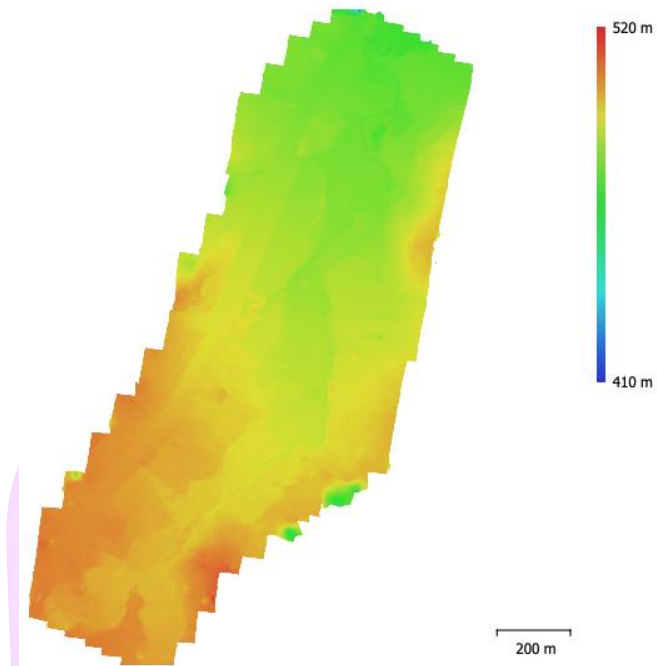
รายงานผลการประมวลผล (Processing Report) แบบไม่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินพบว่า ข้อมูลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนของการฉาย (Reprojection Error) เท่ากับ 0.664 จุดภาพ จำนวนจุดโยงยึด (Tie Point) ที่คำนวณได้ เท่ากับ 1,578,949 จุด ตำแหน่งของกล้องและการประมาณค่าความคลาดเคลื่อน (Camera Locations And Error Estimates) แสดงดังภาพ 27 ส่วนข้อมูลกลุ่มจุดภาพ 3 มิติ (Point Cloud) ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (DEM) และข้อมูลภาพถ่ายตัดแก้อร์โธ (Orthophoto) แสดงดังภาพ 28, 29 และ 30 ดังนี้



ภาพ 27 ตำแหน่งของกล้องและการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนจากการประมวลผลแบบ
ไม่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน



ภาพ 28 ข้อมูลกลุ่มจุดภาพ 3 มิติ (Point Cloud) จากการประมวลผลแบบไม่ใช้จุดควบคุม
ภาคพื้นดิน

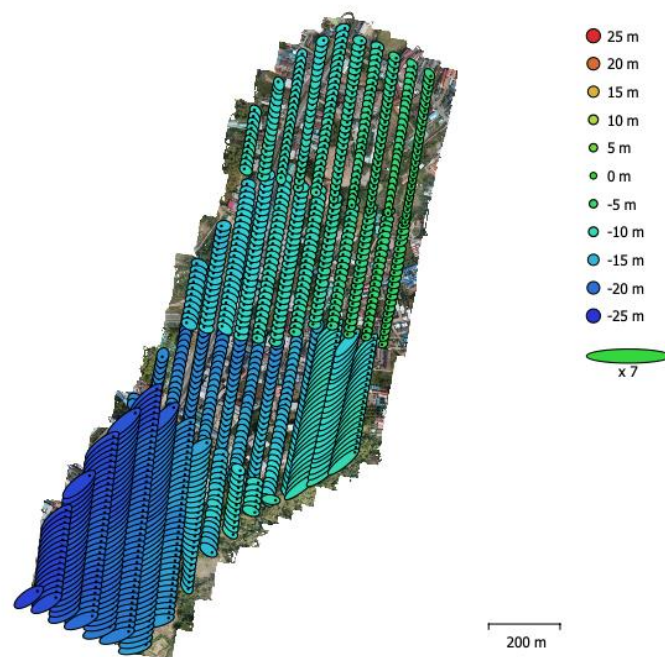


ภาพ 29 ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (DEM) การประมวลผลแบบไม่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน



ภาพ 30 ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม การประมวลผลแบบไม่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน

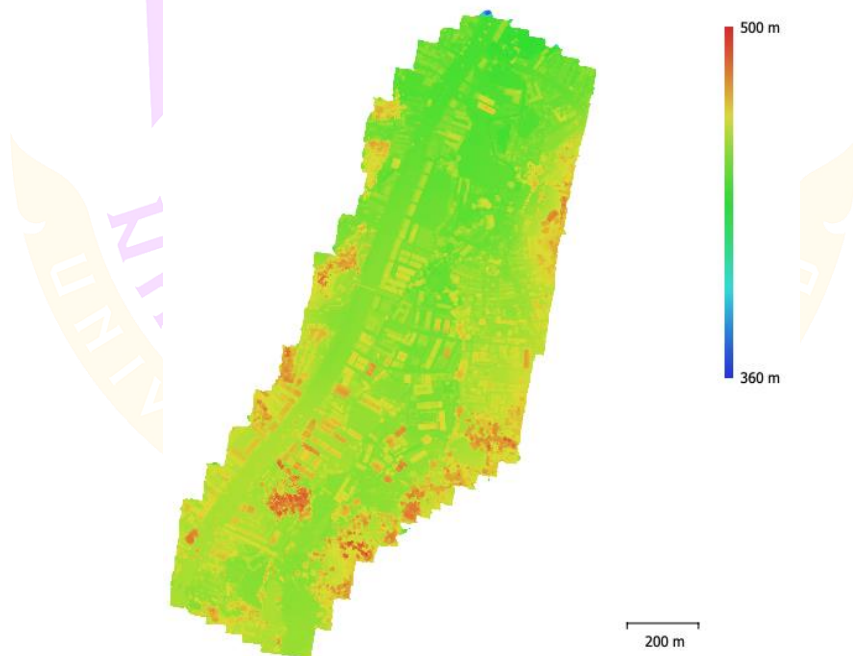
รายงานผลการประมวลผล (Processing Report) แบบใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน พบว่า ข้อมูลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนของการฉาย (Reprojection Error) เท่ากับ 0.694 จุดภาพ จำนวนจุดโยงยึด (Tie Point) ที่คำนวณได้ เท่ากับ 1,578,944 จุด ตำแหน่งของกล้องและการประมาณค่าความคลาดเคลื่อน (Camera Locations And Error Estimates) แสดงดังภาพ 31 ส่วนข้อมูลกลุ่มจุดภาพ 3 มิติ (Point Cloud) ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (DEM) และข้อมูลภาพถ่ายตัดแก้ออร์โธ (Orthophoto) แสดงดังภาพ 32, 33 และ 34 ดังนี้



ภาพ 31 ตำแหน่งของกล้องและการประมาณค่าความคลาดเคลื่อนจากการประมวลผลแบบใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน



ภาพ 32 ข้อมูลกลุ่มจุดภาพ 3 มิติ (Point Cloud) จากการประมวลผลแบบใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน



ภาพ 33 ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (DEM) การประมวลผลแบบใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน



ภาพ 34 ข้อมูลภาพถ่ายตัดแก้เออร์โธ การประมวลผลแบบใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน

จากรายงานผลการประมวลผลพบว่า การใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินร่วมประมวลผลทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของการฉาย (Reprojection Error) แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย (0.694 แบบใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินและ 0.664 ในแบบไม่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน) จนอาจกล่าวได้ว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (โดยค่าทั้งสองค่ามีความแตกต่างกันไม่ถึง 0.050 ซึ่งมีความแตกต่างกันน้อยมากจนแทบไม่แตกต่างจึงเปรียบได้ว่าไม่มีผลในการนำไปใช้เปรียบเทียบความแตกต่าง) รายละเอียดอื่น ๆ ของรายงานผลการประมวลผลแสดงไว้ในส่วนของภาคผนวก ข

4. การประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งของข้อมูลภาพจากอากาศยานไร้คนขับ

การประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลภาพจากการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำ ประกอบด้วย การประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งของข้อมูลภาพถ่ายตัดแก้เออร์โธแบบไม่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน แบบใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินและการประเมินความถูกต้องทางตั้งของข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข โดยอาศัยข้อมูลจุดตรวจสอบจากการสำรวจจากภาคสนาม โดยการถ่ายค่าระดับจากหมุดโครงข่ายทางอากาศสี่ กระทบวงเกษตรและสหกรณ์ (MOAC-GCP-001: A100251) ที่ตั้งอยู่ในโรงเรียน

บ้านห้วยเคียน ตำบลแม่กา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา โดยจุดตรวจสอบที่สร้างขึ้นจะมีจำนวนรวมทั้งสิ้น 20 จุดและมีการกระจายตัวของจุดตรวจสอบกระจายตัวครบทั้งจุดภาค โดยมีระยะห่างไม่น้อยกว่าร้อยละ 10 ของความยาวแนวทแยงของขอบเขตข้อมูล ตามมาตรฐานระดับชาติสหรัฐอเมริกาสำหรับการประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งของข้อมูลเชิงพื้นที่ (NSSDA) โดยมีรายละเอียด ดังนี้

4.1 การประเมินความถูกต้องของข้อมูลภาพถ่ายตัดแก้ออร์โธแบบไม่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน

เป็นการประเมินความถูกต้องทางราบตามมาตรฐานระดับชาติสหรัฐอเมริกา สำหรับการประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งของข้อมูลเชิงพื้นที่ (NSSDA) โดยข้อมูลภาพถ่ายตัดแก้ออร์โธที่สร้างขึ้นนั้นเป็นข้อมูลภาพที่ผลิตจากภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ ข้อมูลภาพนี้ง่ายและสะดวกต่อผู้ที่ไม่มีพื้นฐานเรื่องการรังวัดสำรวจและทำแผนที่มากนัก โดยมีเพียงอากาศยานไร้คนขับ โปรแกรมด้านการประมวลผลการรังวัดด้วยภาพ (Photogrammetry) และคอมพิวเตอร์ก็สามารถสร้างและผลิตข้อมูลภาพถ่ายตัดแก้ออร์โธแบบนี้ได้จึงเหมาะสำหรับหน่วยงานที่เริ่มต้นและสนใจในการประยุกต์การสำรวจและทำแผนที่ด้วยอากาศยานไร้คนขับ

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการผลิตข้อมูลภาพถ่ายตัดแก้ออร์โธแบบไม่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินและประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งร่วมกับจุดตรวจสอบจำนวนทั้งสิ้น 20 จุด ผลจากการประเมินความถูกต้องทางราบพบว่า การไม่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินร่วมประมวลผลจะให้ความถูกต้องทางราบประมาณ 10 เมตร โดยรายละเอียดของแต่ละจุดตรวจสอบและผลการคำนวณการประเมินความถูกต้องตามมาตรฐานแสดง ได้ดังตาราง 7 ดังนี้

จุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP) เช่น ระบบพิกัดภาพที่ถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับจะมีค่าความสูงเหนือรูปทรงรีอ้างอิง (WGS84) ต่างจากระบบพิกัดในงานรังวัดสำรวจชั้นสูงหรืองานก่อสร้างและงานชลประทาน ที่มักใช้ค่าความสูงแบบออร์โธเมตริก (Orthometric Height) เนื่องจากสอดคล้องกับค่าแรงโน้มถ่วงบนพื้นโลกและการไหลของน้ำ เป็นต้น

ในกรณีของภาพตัดแก้ออร์โธนั้นจะอาศัยจุดตรวจสอบ (CP) จำนวนทั้งสิ้น 20 จุด โดยพิจารณาจากค่าทางตะวันออก (Easting) และค่าทางเหนือ (Northing) เพื่อใช้เป็นตัวแทนของความถูกต้องทางราบ ส่วนวิธีการประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งของข้อมูลนั้นจะอาศัยกระบวนการและค่าทางสถิติตามมาตรฐานระดับชาติสหรัฐอเมริกาสำหรับการประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งของข้อมูลเชิงพื้นที่ (NSSDA) จากการประเมินความถูกต้องทางราบ พบว่าหากมีการใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินที่มีความถูกต้องและแม่นยำสูงร่วมด้วยแล้ว ข้อมูลภาพตัดแก้ออร์โธจะมีความถูกต้องในระดับ 0.778 เมตร ที่ความเชื่อมั่นประมาณร้อยละ 66.67 และให้ค่าความถูกต้องทางราบเท่ากับ 1.346 เมตร ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (NSSDA) โดยรายละเอียดของผลการประเมินความถูกต้องทางราบแสดงดังตาราง 8 ดังนี้



ตาราง 8 ผลการประเมินความถูกต้องทางราบของข้อมูลภาพตัดแก้ออร์โธแบบใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน

Check Point	Field Survey		Orthophoto Non-GCP		(Diff in)		(Diff in) ²		Diff in Horizontal
	E	N	E	N	E	N	E	N	
CP 01	597045.544	2103731.030	597044.718	2103730.630	0.826	0.400	0.682	0.160	0.842
CP 02	597319.167	2103831.007	597318.786	2103831.213	0.381	-0.206	0.145	0.042	0.188
CP 03	597374.764	2104278.737	597374.752	2104278.209	0.012	0.528	0.000	0.279	0.279
CP 04	597504.743	2104189.163	597504.152	2104189.699	0.591	-0.536	0.349	0.287	0.637
CP 05	597544.210	2104297.644	597544.016	2104297.354	0.194	0.290	0.038	0.084	0.122
CP 06	597464.699	2104438.687	597464.655	2104437.881	0.044	0.806	0.002	0.650	0.652
CP 07	597746.493	2104435.199	597745.044	2104434.946	1.449	0.253	2.100	0.064	2.164
CP 08	597571.431	2104780.621	597571.372	2104780.736	0.059	-0.115	0.003	0.013	0.017
CP 09	597794.847	2104766.478	597795.613	2104767.188	-0.766	-0.710	0.587	0.504	1.091
CP 10	597860.261	2104688.249	597860.154	2104688.031	0.107	0.218	0.011	0.048	0.059
CP 11	597875.509	2104861.262	597876.251	2104862.417	-0.742	-1.155	0.551	1.334	1.885
CP 12	597806.760	2105104.747	597807.411	2105104.299	-0.651	0.448	0.424	0.201	0.625
CP 13	597808.506	2105199.812	597808.787	2105199.366	-0.281	0.446	0.079	0.199	0.278
CP 14	597490.314	2104095.437	597489.423	2104095.404	0.891	0.033	0.794	0.001	0.795
CP 15	597585.408	2104019.096	597584.744	2104019.469	0.664	-0.373	0.441	0.139	0.580
CP 16	597548.206	2104133.206	597547.839	2104133.481	0.367	-0.275	0.135	0.076	0.210
CP 17	597708.913	2104362.449	597708.338	2104362.257	0.575	0.192	0.331	0.037	0.367
CP 18	597980.870	2104415.017	597979.924	2104414.574	0.946	0.443	0.895	0.196	1.091
CP 19	598021.568	2104724.786	598021.770	2104724.535	-0.202	0.251	0.041	0.063	0.104
CP 20	597737.646	2105106.992	597737.917	2105106.778	-0.271	0.214	0.073	0.046	0.119
								Sum	12.103
								Average	0.605
								RMSE	0.778
								NSSDA	1.346

4.3 การประเมินความถูกต้องทางตั้งของข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข

ในการประเมินความถูกต้องทางตั้งของข้อมูลที่ประมวลผลจากภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับต้นทุ่นต่ำจะอาศัยการประเมินตามมาตรฐานระดับชาติสหรัฐอเมริกาสำหรับการประเมินความถูกต้องของข้อมูลเชิงตำแหน่ง (NSSDA) โดยอาศัยข้อมูลจุดตรวจที่ได้จากการรังวัดภาคสนามด้วยกล้องประมวลผลรวม (Total Station) ที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงในการอ้างอิงและประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งหลังจากนั้นจะใช้ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลขที่ประมวลผลจากการใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินร่วมประมวลผลด้วยเท่านั้น เนื่องจาก

แบบจำลองระดับความสูงเชิงเลขที่ได้จากการประมวลผลแบบไม่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินนั้น มีค่าความสูงที่อ้างอิงบนพื้นหลักฐาน (Datum) ที่แตกต่างกัน กล่าว คือ ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลขที่ผลิตจากข้อมูลภาพโดยไม่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินร่วมประมวลผลด้วยนั้น จะได้ค่าความสูงบนพื้นหลักฐานของรูปทรงรี (Ellipsoid: WGS84) ตามค่าพิกัดสามมิติที่ได้จากการรังวัดด้วยระบบกำหนดตำแหน่งบนโลกด้วยดาวเทียม (GNSS) ซึ่งจะเปรียบเทียบหรือประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งได้ก็ต่อเมื่อจุดตรวจสอบต้องมีการคำนวณรังวัดบนพื้นหลักฐานของรูปทรงรีเช่นเดียวกัน ในขณะที่จุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีการถ่ายค่าพิกัดมาจากพื้นหลักฐานย็อยด์หรือค่าความสูงแบบออร์โธเมตริก (Orthometric Height) การประเมินความถูกต้องทางดิ่งจึงกระทำเพียงเฉพาะข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลขที่ผลิตโดยมีการประมวลผลร่วมกับข้อมูลจุดควบคุมภาคพื้นดินเท่านั้น จากการศึกษาพบว่า การสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำร่วมกับจุดควบคุมภาคพื้นดินที่สำรวจจากภาคสนามสามารถให้ค่าความถูกต้องทางดิ่งในระดับ 2.043 เมตร ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 66.67 ในขณะที่ตามมาตรฐานระดับชาติสหรัฐอเมริกาสำหรับความถูกต้องของข้อมูลเชิงตำแหน่ง (NSSDA) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ให้ค่าความถูกต้องทางดิ่งเท่ากับ 4.004 เมตร ผลการประเมินความถูกต้องทางดิ่งแสดงดังตาราง 9 ดังนี้



ตาราง 9 ผลการประเมินความถูกต้องทางดิ่งของข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข

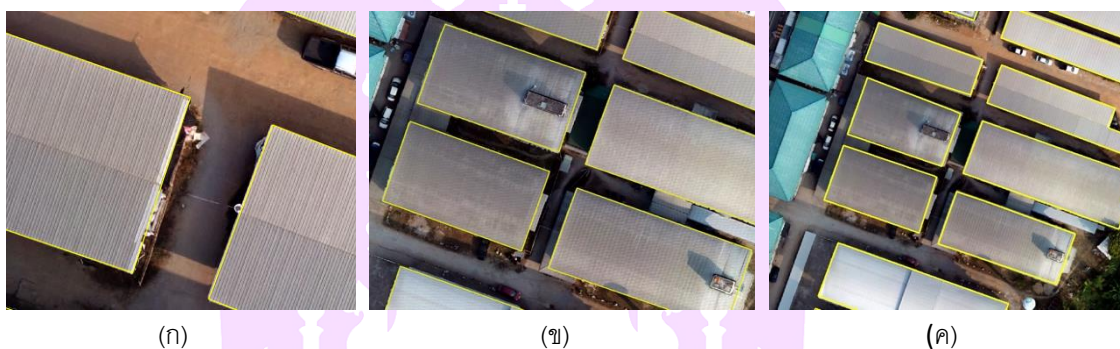
Check Point	Field Survey (m.)	Digital	(Diff in)	(Diff in) ²
		Elevation Model (m)		
CP 01	452.096	449.296	2.800	7.840
CP 02	448.713	447.946	0.767	0.588
CP 03	452.881	452.401	0.480	0.230
CP 04	447.709	450.644	-2.935	8.614
CP 05	446.819	449.534	-2.715	7.371
CP 06	449.227	447.764	1.463	2.140
CP 07	446.364	443.935	2.429	5.900
CP 08	443.893	443.878	0.015	0.000
CP 09	440.670	438.834	1.836	3.371
CP 10	443.102	442.493	0.609	0.371
CP 11	439.379	439.628	-0.249	0.062
CP 12	436.354	436.249	0.105	0.011
CP 13	436.497	435.270	1.227	1.506
CP 14	448.271	450.268	-1.997	3.988
CP 15	446.122	448.872	-2.750	7.563
CP 16	444.583	447.017	-2.434	5.924
CP 17	447.002	444.205	2.797	7.823
CP 18	453.757	456.398	-2.641	6.975
CP 19	462.766	465.710	-2.944	8.667
CP 20	438.275	436.152	2.123	4.507
			Sum	83.452
			Average	4.173
			RMSE	2.043
			NSSDA	4.004

5. การประเมินความเหมาะสมของมาตราส่วนในการดิจิทัลไอซ์ข้อมูลเพื่อคำนวณหาเนื้อที่ของอาคารสิ่งปลูกสร้าง

การศึกษาค้างนี้ได้เลือกใช้มาตราส่วนการแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ใน 3 มาตราส่วน คือ มาตราส่วน 1:100 1:250 และ 1:500 เนื่องจากข้อมูลภาพที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับมีความละเอียดสูงมาก (น้อยกว่า 5 เซนติเมตร) ทำให้การแสดงผลของอาคารสิ่งปลูกสร้างในพื้นที่ศึกษามีความแตกต่างกันในเรื่องการให้รายละเอียดของอาคารสิ่งปลูกสร้างอย่างไรก็ดี ความละเอียดที่สูงมากดังกล่าวทำให้ข้อมูลภาพตัดแก้หรือได้มีขนาดใหญ่ตามไปด้วย (3,476,096,780 จุดภาพ) ทำให้การเรียกแสดงผลบนหน้าจอเพื่อการดิจิทัลไอซ์หรือการสร้างข้อมูลขอบเขตของอาคารสิ่งปลูกสร้างมีความจำเป็นต้องหามาตราส่วนการแสดงผลที่เหมาะสม หรือมาตราส่วนเริ่มต้นสำหรับการวัดความยาว ขนาดพื้นที่และรายละเอียดอื่น ๆ ของอาคารสิ่งปลูกสร้างที่มีขนาดพื้นที่และรูปร่างที่แตกต่างกัน จากผลการศึกษาพบว่า มาตราส่วนที่เหมาะสม คือ มาตราส่วน 1:250 เนื่องจากสามารถแสดงผลขนาดและรูปร่างของอาคารสิ่งปลูกสร้างได้ชัดเจน บนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (PC) โดยพิจารณาจากการเปรียบเทียบความถูกต้องของขอบเขตของอาคารที่สกัดได้จากทั้งข้อมูลภาพตัดแก้หรือแบบไม่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินและภาพหรือแบบใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินที่มีค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (RMSE) น้อยที่สุด คือ 17.04 ในขณะที่กำหนดให้แสดงผลเพื่อทำการดิจิทัลไอซ์ที่มาตราส่วน 1:100 (สามารถมองเห็นรายละเอียดชัดเจนมากเกินไป) ให้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย เท่ากับ 26.25 และเมื่อกำหนดให้แสดงผลเพื่อทำการดิจิทัลไอซ์ที่มาตราส่วน 1:500 (รายละเอียดน้อยเกินไป) ให้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย เท่ากับ 24.80 ทำให้สามารถสรุปได้ว่า มาตราส่วนที่เหมาะสมต่อการนำภาพตัดแก้หรือมาทำการดิจิทัลไอซ์เพื่อสร้างข้อมูลอาคารสิ่งปลูกสร้าง คือ มาตราส่วน 1:250 รายละเอียดของความคลาดเคลื่อนในการรังวัดข้อมูลอาคารในพื้นที่ตัวอย่างทั้ง 200 อาคาร แสดงดังภาคผนวก ค และตารางสรุปผลการประเมินความเหมาะสมมาตราส่วนในการดิจิทัลไอซ์ข้อมูลเพื่อคำนวณหาเนื้อที่ของอาคารสิ่งปลูกสร้างแสดงดังตาราง 10 และตัวอย่างการแสดงผลที่มาตราส่วนต่าง ๆ แสดงดังภาพ 35 ดังนี้

ตาราง 10 ผลการประเมินความเหมาะสมมาตราส่วนในการดิจิทัลข้อมูลเพื่อคำนวณหาเนื้อที่ของอาคารสิ่งปลูกสร้าง

ค่าทางสถิติ	1:100	1:250	1:500
ค่าผลรวมความแตกต่าง	137,824.75	58,068.74	122,991.51
ค่าเฉลี่ยความแตกต่าง	689.12	290.34	614.95
ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย	26.20	17.04	24.79



ภาพ 35 ตัวอย่างการแสดงผลมาตราส่วนที่แตกต่างกัน (ก) 1:100 (ข) 1:250 และ (ค) 1:500

แม้ว่าการสกัดข้อมูลอาคารสิ่งปลูกสร้างจากการดิจิทัลบนภาพตัดแก้ออร์โธนั้นสามารถสร้างข้อมูลขอบเขตหลังคาของอาคารสิ่งปลูกสร้างได้ แต่การวัดเนื้อที่อาคารสิ่งปลูกสร้างของระบบจัดเก็บภาพจะอาศัยวิธีการวัดเนื้อที่พื้นที่ของสิ่งปลูกสร้างตามคู่มือปฏิบัติงานตามพระราชบัญญัติภาษีที่ดินและสิ่งปลูกสร้าง พ.ศ. 2562 ของกรมส่งเสริมการปกครองท้องถิ่นที่ให้วัดเฉพาะตัวอาคาร (ไม่รวมตาดฟ้าหรือหลังคา) ในประเภทอาคารบ้านที่อยู่อาศัยหรือใช้หลักการวัดพื้นที่สิ่งปลูกสร้างของกรมธนารักษ์ (ถ้ามี) ทำให้อาคารประเภทต่าง ๆ ที่มีความหลากหลายทั้งในด้านเนื้อที่อาคารสิ่งปลูกสร้างค่านิยามและการจำแนกประเภทโรงเรือนหรือสิ่งปลูกสร้างรายละเอียดของส่วนประกอบอาคารสิ่งปลูกสร้างรูปแบบใดที่จะต้องทำการรังวัดและสำรวจจากภาคสนามความซับซ้อนของเงื่อนไขดังกล่าวจำเป็นต้องได้รับการตีความจากเจ้าหน้าที่ที่มีความชำนาญและมีประสบการณ์แตกต่างไปจากการแปลตีความด้วยสายตาจากมุมมองด้านบน (Top View) ที่สามารถสำรวจและรังวัดได้จากภาพตัดแก้ออร์โธหรือค่าระดับความสูงของอาคารสิ่งปลูกสร้างที่ได้จากการสำรวจรังวัดด้วยอากาศยานไร้คนขับ

อย่างไรก็ดีในกรณีของสิ่งปลูกสร้างประเภทสถานบริการน้ำมัน อุโมงค์มรดก หรือตลาด ข้อมูลภาพถ่ายตัดแก้ออร์โธจากอากาศยานไร้คนขับจะช่วยให้การสำรวจจริงวัดเนื้อที่อาคารสะดวกและรวดเร็วมากยิ่งขึ้น เนื่องจากสิ่งปลูกสร้างดังกล่าวต้องทำการวัดตามแนวหลังคาของสิ่งปลูกสร้าง (สามารถมองเห็นและวัดขนาดพื้นที่ได้อย่างชัดเจนจากภาพถ่ายตัดแก้ออร์โธ) ตามแนวทางที่ระบุไว้ในคู่มือปฏิบัติงานฯ ของกรมส่งเสริมการปกครองท้องถิ่น (กลุ่มงานนโยบาย การคลังและพัฒนารายได้ กรมส่งเสริมการปกครองท้องถิ่น, 2562)

นอกจากนี้หากอาคารสิ่งปลูกสร้างมีความสลับซับซ้อน เช่น บ้านที่อยู่อาศัยที่มีบันได นอกบ้านและชานบ้าน การคำนวณภาษีจะอนุญาตให้คำนวณเฉพาะพื้นที่ตัวอาคารเท่านั้น ไม่นับรวมขนาดพื้นที่ของบันไดนอกบ้านและชานบ้าน อย่างไรก็ตามข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับ จะช่วยให้การสำรวจจริงวัดเนื้อที่อาคารมีความสะดวกรวดเร็วและแม่นยำมากยิ่งขึ้นช่วยลดข้อขัดแย้งระหว่างเจ้าหน้าที่และเจ้าของบ้าน เนื่องจากข้อมูลภาพที่ได้เป็นหลักฐานเชิงประจักษ์ที่แสดงรายละเอียดต่าง ๆ ของตัวอาคารอย่างชัดเจนรวมถึงการเข้าสำรวจอาคารสิ่งปลูกสร้างที่ผู้สำรวจไม่สามารถเข้าถึงตัวอาคารสิ่งปลูกสร้างได้

ดังนั้น ข้อมูลอาคารสิ่งปลูกสร้างที่ได้จากเทศบาลตำบลแม่กา อำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา จึงมีความแตกต่างทั้งในด้านขนาดของพื้นที่ใช้สอยของอาคารรวมถึงค่าความสูงของอาคารสิ่งปลูกสร้างไม่อาจใช้ค่าความสูงจากแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลขได้โดยตรง เช่น อาคารที่มีมากกว่า 1 ชั้น แต่ไม่มีการใช้ประโยชน์หรือมีการใช้ประโยชน์บางชั้นจะไม่ถูกนำมาคำนวณภาษี ทำให้ความสูงของอาคารที่วัดและคำนวณจากข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลขไม่สามารถนำไปใช้งานได้โดยตรง

แม้ว่าความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีของอากาศยานไร้คนขับและการรังวัดด้วยภาพดิจิทัล จะช่วยให้การรังวัดและสำรวจอาคารพื้นที่ได้อย่างถูกต้องแม่นยำและรวดเร็วแต่ก็ยังไม่อาจทดแทนการทำงานของผู้ปฏิบัติงานเกี่ยวกับการรังวัดสำรวจเพื่อการจัดเก็บภาษีอาคารสิ่งปลูกสร้างได้ทั้งหมด แต่เทคโนโลยีดังกล่าวสามารถช่วยลดเวลาในการสำรวจและช่วยขจัดปัญหาการเข้าถึงพื้นที่และลดการขัดแย้งระหว่างผู้สำรวจและเจ้าของสิ่งปลูกสร้างได้เป็นอย่างดี

บทที่ 5

บทสรุป

การศึกษาครั้งนี้เป็นการประเมินประสิทธิภาพของอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำสำหรับการสำรวจและทำแผนที่อาคารสิ่งปลูกสร้างเพื่อการประยุกต์ใช้งานขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น โดยมุ่งเน้นไปที่การนำอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำเข้ามาช่วยแบ่งเบาการทำงานในส่วนของการสำรวจภาคสนามในงานจัดเก็บข้อมูลอาคารสิ่งปลูกสร้างที่จะถูกนำไปใช้คำนวณภาษี ทั้งนี้ยังเป็นต้นแบบการประยุกต์ใช้งานอากาศยานไร้คนขับกับงานเชิงพื้นที่และงานอาคารสิ่งปลูกสร้างอื่น ๆ ขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นผลลัพธ์ต่าง ๆ ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปได้ในหัวข้อสรุปผลการวิจัย ดังนี้

สรุปผลการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่ต้องการประเมินศักยภาพของการสำรวจข้อมูลเชิงตำแหน่งจากอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำนั้น พบว่า ข้อมูลภาพถ่ายตัดแก้ออร์โธ (Orthophoto) แบบไม่ใช่จุดควบคุมภาคพื้นดิน (Non-GCP) จะให้ค่าความถูกต้องทางราบ (Horizontal Accuracy) ประมาณ 10 เมตร ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ตามมาตรฐานระดับชาติสหรัฐอเมริกา สำหรับการประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งของข้อมูลเชิงพื้นที่ (NSSDA) ในขณะที่เมื่อมีการปรับใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP) ที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง (ต่ำกว่า 0.1 เมตร หรือ 10 เซนติเมตร) พบว่า ข้อมูลภาพถ่ายตัดแก้ออร์โธจะมีความถูกต้องทางราบประมาณ 1 เมตร ที่ความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (NSSDA) ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (DEM) แบบใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP) จะมีความถูกต้องทางตั้ง (Vertical Accuracy) ประมาณ 4 เมตร โดยไม่สามารถเปรียบเทียบหรือประเมินความถูกต้องทางตั้งของแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลขแบบไม่ใช่จุดควบคุมภาคพื้นดิน (Non-GCP) ได้ เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้ทำการรังวัดสำรวจจุดตรวจจุดสอบบนพื้นหลักฐานรูปทรงรี (WGS84)

ในขณะที่การศึกษาความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้ข้อมูลที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำสำหรับงานอาคารสิ่งปลูกสร้างขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นนั้น พบว่า มาตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการสร้างข้อมูลขอบเขตอาคารสิ่งปลูกสร้างที่เหมาะสม คือ มาตราส่วน 1:250 จะให้ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดและการสกัดข้อมูลขนาดพื้นที่ของอาคารสิ่งปลูกสร้างนั้น พบว่า การวัดเนื้อที่อาคารสิ่งปลูกสร้างของระบบจัดเก็บภาษีจะอาศัย

วิธีการวัดขนาดพื้นที่ของสิ่งปลูกสร้างตามคู่มือปฏิบัติงาน ตามพระราชบัญญัติภาษีที่ดินและสิ่งปลูกสร้าง พ.ศ. 2562 ของกรมส่งเสริมการปกครองท้องถิ่น จะแตกต่างกับการวัดขนาดพื้นที่ของอาคารสิ่งปลูกสร้างจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมและข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข ซึ่งไม่สามารถปรับใช้ได้ทั้งหมด เนื่องจากการวัดเนื้อที่ของอาคารสิ่งปลูกสร้างมีความสลับซับซ้อน เงื่อนไขในการคำนวณที่แตกต่างไปจากการแปลตีความด้วยสายตาบนข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมและข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข อย่างไรก็ตามในบางประเภทของอาคารสิ่งปลูกสร้าง พื้นที่ที่ไม่สามารถเข้าถึงได้จากภาคสนามสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการสำรวจจากอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำไปประยุกต์ใช้งานแทนได้ เช่น สถานีบริการน้ำมัน ตู้ซ่อมรถตลาด หรือบ้านอยู่อาศัยที่มีบันไดนอกบ้าน และชานบ้าน เป็นต้น

อากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำที่นำมาประยุกต์ใช้ในงานสำรวจอาคารสิ่งปลูกสร้าง ขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น มีประสิทธิภาพและประหยัดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน ลดต้นทุนในการทำงานทั้งจำนวนบุคลากร ระยะเวลาในการสำรวจและงบประมาณเมื่อเทียบกับการสำรวจแบบเดิม ความถูกต้องทางตำแหน่งและความแม่นยำของการรังวัดขนาดพื้นที่ในพื้นที่ที่ไม่สามารถเข้าถึงได้และยังช่วยลดการขัดแย้งกันระหว่างผู้สำรวจและเจ้าของสิ่งปลูกสร้าง เนื่องจากความคิดเห็นไม่ตรงกันได้เป็นอย่างดี

นอกจากนี้ยังสามารถนำข้อมูลที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำไปประยุกต์ใช้งานในด้านที่เกี่ยวข้องได้หลากหลาย เช่น การวางแผนบริหารจัดการและการสนับสนุนข้อมูลเชิงพื้นที่เพื่องานสิ่งแวดล้อม งานบริหารจัดการสาธารณสุขภาค การจัดการแหล่งน้ำและการบรรเทาสาธารณภัยหรืองานเชิงพื้นที่อื่น ๆ ที่อยู่ในความรับผิดชอบขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น

ตัวอย่างเช่น งานแก้ปัญหาคุณภาพน้ำบริเวณหน้ามหาวิทยาลัยพะเยาที่เทศบาลตำบลแม่กา มีความต้องการข้อมูลสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินที่เป็นปัจจุบันและข้อมูลความสูงต่ำของพื้นที่รวมถึงข้อมูลตำแหน่งอาคารประเภทหอพักเพื่อใช้ในการวางแผนและบริหารจัดการน้ำเสียที่เกิดจากหอพักในพื้นที่ การสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำสามารถผลิตข้อมูลแผนที่ภาพถ่ายดาวเทียมที่มีความเป็นปัจจุบันได้ทุกเมื่อตามความต้องการและยังสามารถประยุกต์ใช้แบบจำลองระดับความสูงเชิงเลขเพื่อแสดงความสูงต่ำของภูมิประเทศและยังสามารถนำข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลข (DEM) มาใช้เพื่อการวิเคราะห์เส้นทางการไหลของน้ำสำหรับการ

นำไปใช้ประกอบการบริหารจัดการปัญหาน้ำเสีย นอกจากนี้ภาพตัดแก้ออร์โธยังสามารถนำมาเปิดเพื่อตรวจสอบความผิดปกติของระบบระบายน้ำ เช่น รางระบายน้ำมีการชำรุดหรือมีสิ่งกีดขวางที่อาจส่งผลกระทบต่อการระบายน้ำเสียจากหอพัก รวมถึงการตรวจสอบระบบบำบัดน้ำเสียของแต่ละหอพักที่สามารถมองเห็นได้บนภาพตัดแก้ออร์โธ เป็นต้น

อภิปรายผลการวิจัย

อากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำสามารถให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งของข้อมูลในระดับเมตรถึงหลายสิบเมตรขึ้นอยู่กับวิธีการรังวัดสำรวจและประมวลผลเมื่อเทียบกับวิธีการสำรวจแบบดั้งเดิมแล้วสามารถทดแทนการทำงานได้บางส่วนในการสำรวจอาคารสิ่งปลูกสร้างเพื่อการคำนวณภาษี โดยการทำงานเพียงครั้งเดียวแต่ให้ข้อมูลที่สามารนำไปปรับใช้ได้หลากหลายภารกิจขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ในขณะที่วิธีการสำรวจแบบดั้งเดิมจะใช้บุคลากร งบประมาณและเวลาจำนวนมากเพื่อทำงานเพียงภารกิจเดียว

คุณภาพของข้อมูลที่ได้นั้นเป็นหลักฐานเชิงประจักษ์ (ภาพถ่าย) ที่มีการบันทึกเวลาอย่างแม่นยำชัดเจนและไม่สามารถแก้ไขได้ ทำให้เกิดความโปร่งใสในการสำรวจข้อมูล ผู้ถูกประเมินสามารถโต้แย้งหรือเห็นต่างได้บนข้อมูลชุดเดียวกัน ลดความขัดแย้งระหว่างเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานและผู้ครอบครองหรือถือครองกรรมสิทธิ์ของตัวอาคารสิ่งปลูกสร้าง

เมื่อพิจารณาถึงความก้าวหน้าของเทคโนโลยีในปัจจุบัน ทำให้ผู้ที่สนใจนำอากาศยานไร้คนขับไปประยุกต์ใช้งานไม่จำเป็นต้องลงทุนในการศึกษามากนัก เนื่องจากมีผู้ให้บริการในลักษณะของแพลตฟอร์มที่ประมวลผลข้อมูลที่สามารถเข้าถึงได้ง่าย สะดวก ประหยัดและไม่ซับซ้อน สามารถผลิตข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลขและข้อมูลภาพตัดแก้ออร์โธจากอากาศยานไร้คนขับได้ด้วยตนเอง เช่น เทศบาลเมืองแม่เหิยะ อำเภอเมืองเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ที่เป็นต้นแบบในการจัดการเมืองด้วยเทคโนโลยีหรือสมาร์ทซิตี (Smart City) ก็ได้มีการนำอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำมาประยุกต์ใช้งานในหลากหลายภารกิจของหน่วยงาน ทำให้การทำงานมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีความเห็นว่าองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นอื่น ๆ ควรให้ความสนใจในการนำอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำมาประยุกต์ใช้งาน

ข้อมูลจากการรังวัดสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำสามารถนำไปปรับใช้กับระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System : GIS) และแบบจำลองสารสนเทศอาคาร (Building Information Modeling : BIM) ได้เป็นอย่างดี ประกอบกับข้อมูลที่

ได้มีความถูกต้องทางตำแหน่งอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมกับการใช้งานขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ทั้งในการวางแผนการดำเนินงานของกิจกรรมต่าง ๆ ของหน่วยงาน การเพิ่มสมรรถนะ และประสิทธิภาพของการทำงาน

ผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้สามารถนำไปปรับใช้กับองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นอื่น ๆ ได้เป็นอย่างดี เนื่องจากทุกองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นต้องทำการสำรวจรังวัดปรับปรุงข้อมูลให้เป็นปัจจุบัน (Update) เกี่ยวกับข้อมูลอาคารสิ่งปลูกสร้างเพื่อคำนวณภาษีเป็นประจำทุกปี

อย่างไรก็ดีข้อจำกัดของการศึกษานี้ มีหลายประการได้แก่

- การสำรวจข้อมูลจุดควบคุมภาคสนามและจุดตรวจสอบจำเป็นต้องอาศัยผู้ที่มีความรู้ทักษะและประสบการณ์ในการรังวัดสำรวจในกรณีที่หน่วยงานสามารถจัดหาหรือสำรวจด้วยวิธีการอื่นมาทดแทนได้จะช่วยลดระยะเวลาในการสำรวจรังวัดข้อมูล เช่น การรังวัดสำรวจด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (Real-Time Kinematic : RTK) เป็นต้น
- การทำงานด้านเทคโนโลยีภูมิสารสนเทศจำเป็นต้องมีการพัฒนาทักษะและองค์ความรู้ให้แก่บุคลากรของหน่วยงาน ซึ่งอาจต้องใช้งบประมาณและระยะเวลา อย่างไรก็ตามหากวิเคราะห์ถึงต้นทุนและประโยชน์ที่จะได้รับ (Cost-Benefit Analysis) ของการนำภูมิสารสนเทศมาประยุกต์ใช้งานแล้วผู้วิจัยเห็นว่า องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นควรมีนักภูมิสารสนเทศในหน่วยงานทั้งเป็นบุคลากรที่สำเร็จการศึกษาโดยตรงและบุคลากรในหน่วยงานที่สนใจที่ผ่านการฝึกอบรมเสริมทักษะความรู้และประสบการณ์ (Upskill/Reskill)

ข้อเสนอแนะ

พิจารณาเลือกใช้งานแพลตฟอร์มที่มีให้บริการผ่านการประมวลผลแบบคลาวด์ (Cloud Computing) ที่ผู้ใช้งานสามารถทำงานได้อย่างง่ายดายประหยัดเวลาและต้นทุนในการจัดหาอุปกรณ์ทั้งฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ แต่ในการใช้บริการแพลตฟอร์มที่มีให้บริการผ่านการประมวลผลแบบคลาวด์อาจมีค่าใช้จ่ายเล็กน้อยในการใช้บริการ

ในการประเมินความถูกต้องทางตำแหน่ง (Positional Accuracy Assessment) ของข้อมูลในครั้งนี้ เป็นการประเมินความถูกต้องแบบสัมบูรณ์ (Absolute Accuracy Assessment) ควรพิจารณาการประเมินความถูกต้องแบบสัมพัทธ์ (Relative Accuracy Assessment) เพิ่มเติมเพื่อให้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

เปรียบเทียบการสำรวจข้อมูลอาคารสิ่งปลูกสร้างด้วยเทคโนโลยีอื่น เช่น ระบบสำรวจและทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้ (Mobile Mapping System : MMS) หรือการรังวัดสำรวจด้วยไลดาร์ (Light Detection And Ranging : LIDAR) ที่มีความถูกต้องแม่นยำสูง

ในการวางจุดตรวจสอบ (CP) แนะนำให้เพิ่มจำนวนจุดตรวจสอบจากเดิม 20 จุด (ขั้นต่ำของมาตรฐาน “NSSDA”) ให้มีจำนวนมากขึ้นกระจายทั่วพื้นที่และเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานของ “NSSDA” เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นในการตรวจสอบความถูกต้อง ให้มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

ในระบบจัดเก็บภาษีขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่นนอกจากภาษีอาคารสิ่งปลูกสร้างแล้วยังมีภาษีประเภทอื่น ๆ ที่สามารถนำข้อมูลที่ผลิตได้จากการสำรวจและทำแผนที่ด้วยอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำไปปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพในการสำรวจข้อมูล เช่น ภาษีป้าย การตรวจสอบสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ที่ไม่สามารถเข้าถึงได้จากการสำรวจจากภาคสนามเพื่อทำการประเมินภาษีและจัดเก็บภาษีที่ดิน นอกจากนี้ยังช่วยลดความขัดแย้งระหว่างเจ้าหน้าที่ที่มีอำนาจในการประเมินภาษีกับผู้เป็นเจ้าของกรรมสิทธิ์ที่ดิน อาคารสิ่งปลูกสร้างและป้ายโฆษณาต่าง ๆ เนื่องจากข้อมูลภาพที่บันทึกได้นั้นเป็นข้อมูลเชิงประจักษ์ที่ไม่สามารถแก้ไขได้โดยง่ายและเป็นที่ยอมรับในกระบวนการพิจารณาตัดสินของภาครัฐ



ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยพะเยา
UNIVERSITY OF PHAYAO

ภาคผนวก ก

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
3	4.2432	11.2744	1.34934	12.1217	0.211 (6)
4	-10.156	-9.38074	-1.65534	13.9242	0.241 (7)
10	2.0823	-5.32559	4.84395	7.49412	0.196 (6)
11	-0.850505	-5.66054	-2.3107	6.17288	0.208 (6)
15	16.9617	-0.806676	-5.92816	17.9859	0.171 (6)
17	-12.5339	10.2638	4.07253	16.7042	0.173 (6)
Total	9.75541	7.97401	3.76591	13.1505	0.203

ภาพ 36 รายละเอียดเพิ่มเติมค่าความคลาดเคลื่อนจุดควบคุมภาคพื้นดิน



ภาคผนวก ข

Survey Data

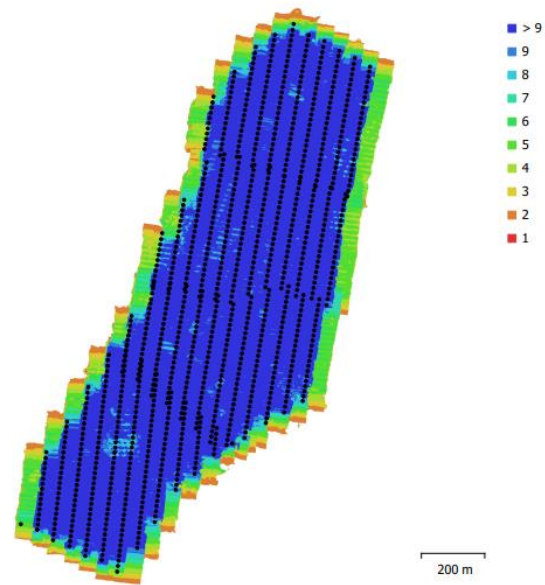


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	1,101	Camera stations:	1,101
Flying altitude:	129 m	Tie points:	1,578,944
Ground resolution:	2.45 cm/pix	Projections:	4,748,314
Coverage area:	1.07 km ²	Reprojection error:	0.694 pix

ภาพ 37 รายละเอียดเพิ่มเติมการประมวลผลภาพถ่ายแบบมีจุดควบคุมภาคพื้นดิน



Camera Calibration

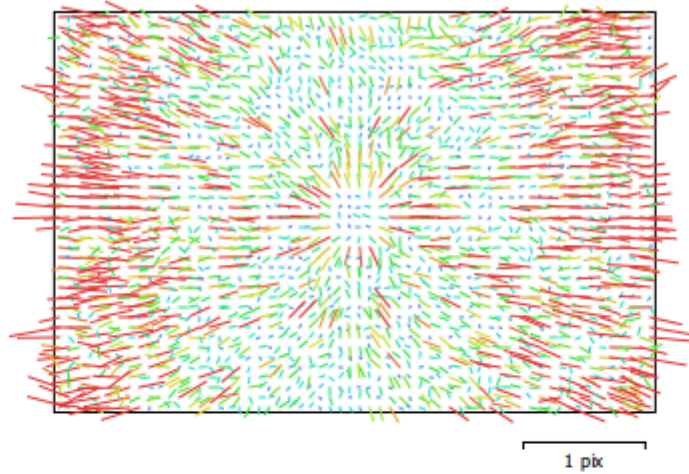


Fig. 2. Image residuals for FC6310S (8.8mm).

FC6310S (8.8mm)

1101 images

Type Resolution Focal Length Pixel Size
Frame 5472 x 3648 8.8 mm 2.41 x 2.41 μ m

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	4850.95	1.4	1.00	0.73	0.09	-0.19	-0.41	-0.18	-0.30	0.50	-0.57	-0.41	-0.63
Cx	-1.61063	0.034		1.00	0.04	-0.15	-0.30	-0.13	-0.22	0.37	-0.42	0.08	-0.48
Cy	-31.2486	0.021			1.00	0.00	-0.01	-0.02	-0.02	0.04	-0.05	-0.08	0.50
B1	-12.5749	0.018				1.00	0.08	0.05	0.05	-0.09	0.10	0.08	0.14
B2	-23.8984	0.019					1.00	0.07	0.13	-0.21	0.24	0.16	0.27
K1	-0.0113624	4.2e-005						1.00	-0.85	0.69	-0.59	0.07	0.11
K2	-0.096094	0.00036							1.00	-0.96	0.92	0.13	0.19
K3	0.375135	0.0013								1.00	-0.99	-0.21	-0.32
K4	-0.378782	0.0015									1.00	0.24	0.36
P1	-0.0017485	1.4e-006										1.00	0.23
P2	-0.00367443	1.7e-006											1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

ภาพ 38 รายละเอียดเพิ่มเติมการประมวลผลภาพถ่ายแบบมีจุดควบคุมภาคพื้นดิน

Survey Data

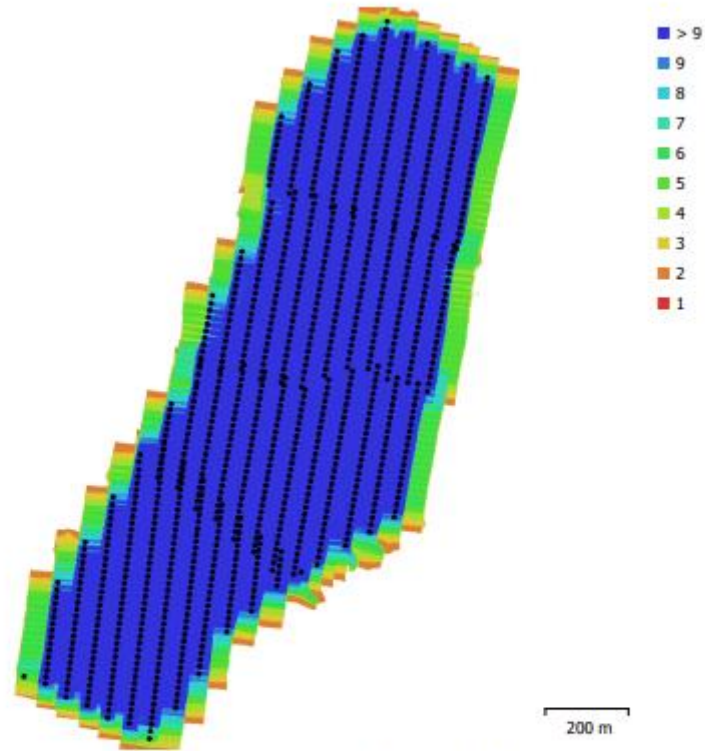


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	1,101	Camera stations:	1,101
Flying altitude:	102 m	Tie points:	1,578,949
Ground resolution:	2.46 cm/pix	Projections:	4,748,345
Coverage area:	1.09 km ²	Reprojection error:	0.664 pix

ภาพ 39 รายละเอียดเพิ่มเติมการประมวลผลภาพถ่ายแบบไม่มีจุดควบคุมภาคพื้นดิน

Camera Calibration

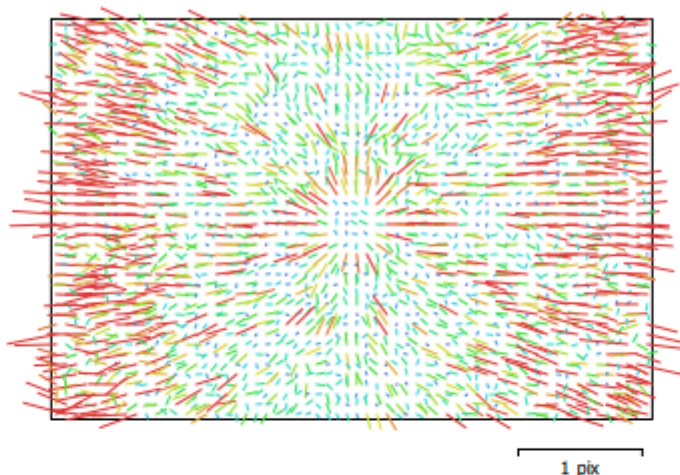


Fig. 2. Image residuals for FC6310S (8.8mm).

FC6310S (8.8mm)

1101 images

Type Resolution Focal Length Pixel Size
Frame 5472 x 3648 8.8 mm 2.41 x 2.41 μ m

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2	P3	P4
F	3681.55	2.4	1.00	0.89	0.22	-0.05	0.02	-0.29	-0.63	0.82	-0.87	-0.61	-0.73	0.10	-0.15
Cx	-18.6513	0.035		1.00	0.19	-0.03	0.05	-0.25	-0.56	0.73	-0.78	-0.41	-0.64	0.10	-0.14
Cy	-32.4015	0.014			1.00	-0.06	0.06	-0.07	-0.13	0.18	-0.19	-0.10	0.10	0.10	-0.08
B1	0.185438	0.041				1.00	0.01	0.03	0.02	-0.03	0.03	0.07	0.03	0.01	0.00
B2	0.952377	0.043					1.00	0.00	-0.01	0.02	-0.02	0.02	0.00	0.01	-0.01
K1	-0.00655139	2.7e-005						1.00	-0.41	0.18	-0.09	0.22	0.22	0.01	0.00
K2	-0.0315762	0.00013							1.00	-0.95	0.91	0.37	0.45	-0.10	0.14
K3	0.0716954	0.00033								1.00	-0.99	-0.49	-0.59	0.11	-0.17
K4	-0.041971	0.00025									1.00	0.51	0.62	-0.12	0.17
P1	-0.00120239	1.3e-006										1.00	0.73	0.42	-0.31
P2	-0.00264984	2.4e-006											1.00	0.47	-0.36
P3	0.136371	0.002												1.00	-0.97
P4	-0.107755	0.0022													1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

ภาพ 40 รายละเอียดเพิ่มเติมการประมวลผลภาพถ่ายแบบไม่มีจุดควบคุมภาคพื้นดิน

ภาคผนวก ค

ตาราง 11 แสดงการเปรียบเทียบเนื้อที่อาคารสิ่งปลูกสร้างของแต่ละมาตราส่วน

ลำดับที่	ประเภทอาคาร	ไม่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน			ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน			ข้อมูลการรังวัด สำรวจ ภาคสนาม
		1:100	1:250	1:500	1:100	1:250	1:500	
1	ที่อยู่อาศัย	201.260	169.402	224.409	205.639	191.630	221.520	178.402
2	ที่อยู่อาศัย	97.106	102.808	108.847	101.626	100.192	118.850	106.075
3	ที่อยู่อาศัย	112.100	112.902	113.673	114.189	116.520	121.909	89.434
4	ที่อยู่อาศัย	77.483	83.335	93.482	80.688	85.198	96.043	77.616
5	ที่อยู่อาศัย	138.475	149.675	149.886	143.047	142.400	154.639	139.419
6	ที่อยู่อาศัย	110.179	100.192	122.870	116.293	110.562	123.778	94.495
7	ที่อยู่อาศัย	229.419	218.309	250.897	237.829	228.011	248.749	219.051
8	ที่อยู่อาศัย	99.643	79.484	128.458	109.612	112.438	125.653	77.943
9	ที่อยู่อาศัย	74.930	70.866	80.242	79.316	77.489	88.626	73.208
10	ที่อยู่อาศัย	79.832	77.123	90.883	78.625	82.216	93.406	78.481
11	ที่อยู่อาศัย	78.543	79.007	89.151	79.487	78.509	90.797	80.508
12	ที่อยู่อาศัย	73.295	74.223	74.998	73.870	73.675	75.341	75.198
13	ที่อยู่อาศัย	81.169	82.472	75.284	81.039	81.291	77.152	83.429
14	ที่อยู่อาศัย	64.341	64.978	79.731	64.616	67.184	83.571	65.720
15	ที่อยู่อาศัย	176.404	179.573	208.440	187.350	191.375	212.741	182.902
16	ที่อยู่อาศัย	145.879	174.995	148.402	148.069	158.953	160.667	178.579
17	ที่อยู่อาศัย	151.087	148.909	152.714	154.443	151.121	164.258	138.387
18	ที่อยู่อาศัย	141.550	133.757	159.191	140.199	147.525	166.221	138.571
19	ที่อยู่อาศัย	125.860	132.586	166.437	130.848	135.352	150.623	134.147
20	ที่อยู่อาศัย	52.495	47.834	51.583	51.638	48.498	51.268	45.617
21	ที่อยู่อาศัย	104.574	92.191	102.349	106.516	102.913	106.359	60.236
22	ที่อยู่อาศัย	83.810	85.042	79.867	87.499	89.559	95.874	74.530
23	ที่อยู่อาศัย	111.639	118.924	116.467	103.822	111.731	123.100	100.880
24	ที่อยู่อาศัย	39.106	43.047	41.162	36.354	40.047	44.450	40.359
25	ที่อยู่อาศัย	139.237	151.660	141.698	140.411	136.425	151.589	139.236
26	ที่อยู่อาศัย	167.313	167.443	173.219	164.403	162.700	174.360	155.470
27	ที่อยู่อาศัย	51.372	49.375	53.604	47.213	45.966	52.269	42.222
28	ที่อยู่อาศัย	70.972	74.910	84.649	72.208	72.286	85.697	88.427
29	ที่อยู่อาศัย	65.127	62.871	67.444	64.354	61.458	64.387	63.779
30	ที่อยู่อาศัย	86.772	89.833	95.351	87.346	87.473	108.198	82.609
31	ที่อยู่อาศัย	149.964	151.275	154.433	157.370	157.529	168.770	156.896
32	ที่อยู่อาศัย	178.591	176.672	180.598	176.354	174.366	195.118	183.847
33	ที่อยู่อาศัย	87.372	89.510	97.498	88.435	89.355	103.038	93.986

ตาราง 12 แสดงการเปรียบเทียบเนื้อที่อาคารสิ่งปลูกสร้างของแต่ละมาตราส่วน (ต่อ)

ลำดับที่	ประเภทอาคาร	ไม่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน			ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน			ข้อมูลการรังวัด สำรวจ ภาคสนาม
		1:100	1:250	1:500	1:100	1:250	1:500	
34	ที่อยู่อาศัย	239.744	243.918	249.231	231.768	222.242	250.369	219.605
35	ที่อยู่อาศัย	164.740	175.295	176.842	166.433	179.438	185.705	198.479
36	ที่อยู่อาศัย	170.858	176.041	186.586	163.633	176.340	190.817	177.492
37	ที่อยู่อาศัย	210.860	223.748	244.504	230.023	221.350	246.868	231.947
38	ที่อยู่อาศัย	70.180	73.612	78.235	72.259	74.172	83.609	58.423
39	ที่อยู่อาศัย	86.860	99.696	104.779	101.343	105.654	124.496	75.882
40	ที่อยู่อาศัย	39.924	43.709	45.685	43.473	47.023	52.373	37.777
41	ที่อยู่อาศัย	94.735	98.508	104.362	103.930	102.889	120.481	89.838
42	ที่อยู่อาศัย	116.981	122.651	128.371	128.200	129.846	145.481	100.651
43	ที่อยู่อาศัย	97.956	103.279	101.060	102.134	102.215	105.074	90.957
44	ที่อยู่อาศัย	56.223	61.955	58.802	54.769	55.688	62.059	50.133
45	ที่อยู่อาศัย	111.015	120.174	116.917	128.354	130.803	122.048	96.750
46	ที่อยู่อาศัย	119.501	124.270	119.501	122.283	131.125	138.979	107.870
47	ที่อยู่อาศัย	89.172	93.810	89.172	86.591	97.102	99.357	82.687
48	ที่อยู่อาศัย	135.283	137.334	139.832	113.056	113.436	114.931	123.812
49	ที่อยู่อาศัย	99.857	108.579	114.520	104.949	105.608	115.695	93.166
50	ที่อยู่อาศัย	35.850	39.933	37.838	35.111	39.429	38.441	35.85
51	ร้านค้า	43.497	46.121	44.246	44.862	47.927	45.678	47.815
52	ร้านค้า	50.595	53.594	53.972	49.956	55.041	56.569	54.690
53	ร้านค้า	37.438	39.659	40.435	39.144	40.484	45.795	40.350
54	ร้านค้า	51.188	54.406	61.809	62.544	57.920	76.859	54.773
55	ร้านค้า	71.326	63.709	60.955	66.673	61.305	63.609	64.922
56	ร้านค้า	50.730	47.762	61.064	54.308	55.613	63.433	43.910
57	ร้านค้า	46.546	44.071	56.839	47.267	46.473	61.657	43.723
58	ร้านค้า	41.891	59.478	42.679	43.928	58.726	46.172	59.766
59	ร้านค้า	176.08	170.321	199.502	179.790	177.408	186.835	166.532
60	ร้านค้า	131.124	147.017	155.363	135.727	147.667	154.596	156.069
61	ร้านค้า	34.094	36.056	36.735	33.061	36.473	31.722	36.430
62	ร้านค้า	120.653	120.076	145.262	123.026	132.295	133.294	117.522
63	ร้านค้า	163.428	158.179	180.401	164.110	160.219	168.402	166.676
64	ร้านค้า	201.59	227.111	243.115	204.918	221.560	232.789	232.834
65	ร้านค้า	580.656	569.683	701.430	583.859	494.295	671.671	591.662
66	ร้านค้า	315.447	315.447	383.447	308.005	317.478	371.882	319.925
67	ร้านค้า	398.657	372.636	442.223	395.069	395.533	419.104	394.891
68	ร้านค้า	64.263	62.751	70.006	65.354	69.410	67.722	65.782

ตาราง 13 แสดงการเปรียบเทียบเนื้อที่อาคารสิ่งปลูกสร้างของแต่ละมาตราส่วน (ต่อ)

ลำดับที่	ประเภทอาคาร	ไม่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน			ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน			ข้อมูลการรังวัด สำรวจภาคสนาม
		1:100	1:250	1:500	1:100	1:250	1:500	
69	ร้านค้า	110.040	106.194	124.128	110.963	115.954	112.705	100.817
70	ร้านค้า	85.480	89.151	96.137	87.232	90.779	94.580	78.937
71	ร้านค้า	22.016	33.469	44.137	27.877	33.178	39.611	30.789
72	ร้านค้า	97.751	43.748	67.020	79.287	49.087	69.197	42.816
73	ร้านค้า	86.207	65.200	59.202	81.242	67.122	60.773	63.414
74	ร้านค้า	76.714	62.137	66.472	73.003	61.044	66.910	60.402
75	ร้านค้า	70.951	62.390	62.671	66.778	62.401	66.313	60.851
76	ร้านค้า	214.205	218.697	252.187	209.311	214.681	242.033	208.698
77	ร้านค้า	230.726	274.444	259.216	238.452	225.841	220.891	246.742
78	ร้านค้า	180.544	194.779	205.327	181.836	202.003	214.942	182.855
79	ร้านค้า	431.304	418.470	428.036	430.726	428.456	450.373	403.842
80	ร้านค้า	69.771	54.850	68.475	57.197	63.804	58.332	47.671
81	ร้านค้า	76.567	62.844	62.153	68.873	68.435	62.561	55.991
82	ร้านค้า	66.241	68.319	83.335	66.207	74.967	76.682	44.003
83	ร้านค้า	48.350	49.374	76.555	46.170	49.943	53.463	50.419
84	ร้านค้า	59.640	60.481	63.139	55.519	61.336	56.057	62.101
85	ร้านค้า	57.761	58.144	74.494	52.119	59.839	64.773	60.011
86	ร้านค้า	37.752	40.816	64.218	38.646	46.565	60.376	36.108
87	ร้านค้า	59.541	60.018	58.892	51.296	56.775	52.946	52.769
88	ร้านค้า	58.819	61.640	72.669	53.246	60.147	63.303	54.034
89	ร้านค้า	81.575	84.644	105.439	78.978	83.324	94.832	77.071
90	ร้านค้า	41.649	42.592	60.193	40.802	44.616	53.497	44.008
91	ร้านค้า	191.648	216.486	223.372	185.821	210.278	207.388	184.641
92	ร้านค้า	90.921	91.458	101.886	87.446	102.656	98.420	85.424
93	ร้านค้า	53.105	56.912	68.492	45.940	57.576	52.465	59.004
94	ร้านค้า	47.321	48.052	51.409	46.482	48.349	54.544	50.480
95	ร้านค้า	46.268	48.152	50.928	40.683	45.457	47.805	50.730
96	ร้านค้า	35.724	37.234	29.317	36.956	31.985	39.538	39.798
97	ร้านค้า	49.967	48.956	69.703	47.905	58.214	66.627	44.994
98	ร้านค้า	79.246	63.723	74.678	63.383	70.194	68.764	58.990
99	ร้านค้า	83.086	78.002	88.122	64.724	73.386	83.695	67.375
100	ร้านค้า	461.287	479.503	534.944	441.679	479.089	513.683	468.536
101	หอพัก	353.956	329.617	384.544	352.657	352.599	346.298	275.644
102	หอพัก	283.398	265.677	294.838	288.389	287.420	294.304	197.045
103	หอพัก	285.531	273.323	334.558	286.806	277.413	291.529	299.258

ตาราง 14 แสดงการเปรียบเทียบเนื้อที่อาคารสิ่งปลูกสร้างของแต่ละมาตราส่วน (ต่อ)

ลำดับที่	ประเภทอาคาร	ไม่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน			ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน			ข้อมูลการรังวัดสำรวจภาคสนาม
		1:100	1:250	1:500	1:100	1:250	1:500	
104	หอพัก	611.775	611.775	675.431	623.746	591.271	624.474	728.976
105	หอพัก	259.551	166.447	265.419	235.240	178.806	243.867	135.379
106	หอพัก	119.873	84.871	93.745	90.162	86.706	109.022	88.624
107	หอพัก	46.913	57.820	86.867	69.137	66.857	63.858	50.156
108	หอพัก	374.719	368.311	405.056	381.207	390.978	402.214	404.982
109	หอพัก	165.936	169.172	168.642	180.205	179.615	186.616	155.867
110	หอพัก	220.706	220.704	290.293	284.633	222.989	293.584	262.689
111	หอพัก	465.130	468.805	522.514	470.031	462.337	472.764	464.675
112	หอพัก	402.024	401.527	433.103	409.550	396.385	424.309	398.081
113	หอพัก	470.864	462.739	478.880	467.270	454.461	475.674	466.360
114	หอพัก	116.493	120.119	147.397	113.689	108.648	127.025	120.120
115	หอพัก	134.100	125.303	169.514	138.605	124.542	127.756	130.885
116	หอพัก	375.669	353.589	426.713	395.125	357.948	412.530	346.895
117	หอพัก	412.205	401.337	427.89	407.356	417.604	418.131	411.674
118	หอพัก	57.767	57.493	64.424	65.670	55.735	60.017	60.472
119	หอพัก	67.446	59.903	66.827	67.205	69.581	78.816	45.326
120	หอพัก	494.769	532.705	575.200	534.728	546.213	544.887	532.703
121	หอพัก	626.738	596.508	634.368	635.460	614.713	664.568	633.450
122	หอพัก	342.548	237.855	310.455	313.848	280.933	350.595	202.856
123	หอพัก	382.068	383.625	373.118	379.310	391.987	379.159	368.681
124	หอพัก	89.170	93.782	101.664	86.087	98.429	101.789	80.860
125	หอพัก	265.117	335.326	337.190	321.241	306.648	319.178	309.167
126	หอพัก	800.645	816.895	857.042	809.153	805.574	819.172	839.471
127	หอพัก	731.465	864.553	814.303	956.848	898.621	702.528	836.111
128	หอพัก	527.388	585.93	558.631	535.967	550.861	523.334	562.904
129	หอพัก	569.530	594.562	593.958	597.227	585.574	584.478	595.989
130	หอพัก	689.069	658.745	650.992	623.662	611.021	695.010	669.614
131	หอพัก	775.816	658.464	708.537	671.278	703.230	753.963	725.414
132	หอพัก	95.004	116.781	128.494	130.063	145.031	137.756	95.004
133	หอพัก	632.738	686.415	785.178	757.624	742.838	645.693	729.487
134	หอพัก	162.985	150.152	165.946	154.760	153.258	152.511	184.349
135	หอพัก	232.318	239.268	205.811	343.042	294.295	367.209	334.834
136	หอพัก	125.415	130.920	133.471	135.900	139.662	130.592	107.420
137	หอพัก	237.835	218.488	234.369	239.043	228.351	242.432	197.865
138	หอพัก	377.110	309.522	372.565	370.084	344.681	383.978	270.134

ตาราง 15 แสดงการเปรียบเทียบเนื้อที่อาคารสิ่งปลูกสร้างของแต่ละมาตราส่วน (ต่อ)

ลำดับที่	ประเภทอาคาร	ไม่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน			ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน			ข้อมูลการรังวัดสำรวจภาคสนาม
		1:100	1:250	1:500	1:100	1:250	1:500	
139	หอพัก	372.809	364.727	371.567	336.406	322.508	369.780	339.988
140	หอพัก	137.314	159.745	148.955	144.512	146.667	149.417	137.315
141	หอพัก	173.116	219.875	235.077	186.883	208.449	209.688	173.116
142	หอพัก	599.282	587.881	620.091	566.703	580.118	601.935	603.292
143	หอพัก	327.243	333.091	267.578	323.613	346.675	368.097	388.493
144	หอพัก	615.870	592.439	575.145	579.650	602.192	612.805	635.505
145	หอพัก	321.409	324.904	379.086	316.795	305.335	327.372	307.285
146	หอพัก	128.725	133.077	133.840	129.478	130.631	128.161	131.613
147	หอพัก	400.444	404.667	442.068	401.535	400.205	403.480	415.738
148	หอพัก	938.269	931.478	977.156	940.607	921.872	996.756	980.537
149	หอพัก	468.763	461.763	504.378	493.258	452.933	472.457	461.761
150	หอพัก	497.170	469.907	448.939	460.125	465.741	440.006	504.068
151	หอพัก	467.394	440.592	474.190	453.922	425.323	461.737	473.281
152	หอพัก	431.566	472.420	455.059	415.786	404.456	433.392	472.418
153	หอพัก	417.782	433.857	436.724	418.045	418.605	421.880	433.855
154	หอพัก	436.096	419.038	439.780	416.100	409.435	434.160	427.006
155	หอพัก	832.129	824.590	844.800	832.129	805.202	817.269	815.541
156	หอพัก	762.315	772.730	789.584	801.289	796.523	782.457	783.553
157	หอพัก	1356.118	1360.011	1360.985	1357.849	1339.222	1376.876	1371.872
158	หอพัก	838.111	844.097	914.413	876.697	820.566	874.322	796.119
159	หอพัก	822.566	822.566	902.260	889.443	836.636	888.807	842.585
160	หอพัก	576.085	546.929	597.562	562.730	559.502	581.544	541.452
161	หอพัก	812.431	819.948	820.402	801.168	792.459	809.659	805.102
162	หอพัก	655.481	660.539	661.867	658.844	640.196	676.022	660.537
163	หอพัก	807.256	816.205	791.793	740.514	759.593	763.090	816.200
164	หอพัก	545.090	555.379	551.161	524.205	507.742	518.153	534.037
165	หอพัก	428.172	428.172	434.438	417.572	408.448	448.997	450.927
166	หอพัก	432.241	441.475	441.226	432.195	421.735	430.012	433.316
167	หอพัก	702.793	707.477	713.271	696.882	678.227	689.719	714.644
168	หอพัก	406.537	413.788	406.537	392.082	396.027	394.752	418.172
169	หอพัก	324.353	324.353	330.687	328.993	329.064	333.548	336.700
170	หอพัก	752.275	755.113	758.865	752.990	727.048	732.175	775.261
171	หอพัก	509.657	509.657	512.427	486.928	484.620	506.223	440.826
172	หอพัก	685.187	685.187	688.323	659.117	668.623	687.668	695.044
173	หอพัก	589.181	594.950	593.329	557.533	580.647	568.641	566.904

ตาราง 16 แสดงการเปรียบเทียบเนื้อที่อาคารสิ่งปลูกสร้างของแต่ละมาตราส่วน (ต่อ)

ลำดับที่	ประเภทอาคาร	ไม่ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน			ใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน			ข้อมูลการรังวัด สำรวจภาคสนาม
		1:100	1:250	1:500	1:100	1:250	1:500	
174	หอพัก	534.465	536.589	549.045	507.187	510.932	529.247	539.785
175	หอพัก	76.970	79.373	87.060	87.938	72.225	73.878	81.890
176	หอพัก	283.972	285.022	285.827	284.576	283.603	256.713	286.046
177	หอพัก	119.315	124.970	121.268	116.174	120.066	113.909	164.787
178	หอพัก	335.006	325.623	351.626	323.742	321.465	330.156	317.107
179	หอพัก	450.471	438.624	454.324	434.434	449.924	428.093	442.867
180	หอพัก	205.986	214.190	230.831	220.325	225.004	221.144	215.799
181	โรงจอดรถ	32.70	31.673	33.262	30.457	30.293	34.994	32.700
182	โรงจอดรถ	48.082	46.757	54.110	50.636	52.318	55.719	48.083
183	โรงจอดรถ	64.229	59.080	57.604	52.902	54.920	54.859	64.977
184	โรงจอดรถ	76.455	71.786	80.119	74.306	74.863	78.649	68.342
185	โรงจอดรถ	117.362	134.774	144.902	127.514	133.843	145.610	141.945
186	โรงจอดรถ	88.398	91.319	93.247	89.626	95.039	92.121	97.447
187	โรงจอดรถ	106.186	103.011	108.168	100.519	96.271	99.413	98.057
188	โรงจอดรถ	67.059	75.422	68.331	69.895	70.633	74.588	71.278
189	โรงจอดรถ	58.011	61.860	67.565	65.042	68.205	60.671	58.011
190	โรงจอดรถ	48.980	66.602	57.067	62.735	69.247	64.084	62.228
191	โรงจอดรถ	99.321	98.580	101.343	101.452	101.406	102.883	103.780
192	โรงจอดรถ	100.081	112.064	112.682	102.424	106.888	110.916	119.596
193	โรงจอดรถ	68.998	68.998	76.763	70.424	73.171	66.462	68.997
194	โรงจอดรถ	30.070	30.070	35.661	32.718	32.527	38.041	30.070
195	โรงจอดรถ	78.465	75.693	81.250	77.131	72.894	77.808	78.464
196	โรงจอดรถ	55.818	55.955	53.323	51.604	54.663	50.616	56.841
197	โรงจอดรถ	191.458	185.710	189.799	189.461	183.999	197.760	190.871
198	โรงจอดรถ	54.689	65.526	57.623	56.920	65.373	55.231	68.305
199	โรงจอดรถ	149.280	131.880	139.876	149.461	135.004	145.267	131.879
200	โรงจอดรถ	87.386	102.318	102.223	94.161	100.878	104.120	89.302

บรรณานุกรม

- Agisoft. (2019). Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 1.5. 138.
- Alkan, M., Aladogan, K., Zafer, K. และ Alkan, O. (2020). 2D and 3D Positioning Performance of UAV-Based Photogrammetry in Residential Regions. **Hittite Journal of Science and Engineering**, 7(2), 115–123.
- Alper, A. (2017). Evaluation of Accuracy of Dems Obtained from uav-point Clouds for Different Topographical Areas. **International Journal of Engineering and Geosciences**, 2(3), 110–117.
- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). (2015). **ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data** (พิมพ์ครั้งที่): ASPRS Map Accuracy Working Group.
- Balasubramanian A. (2017). Digital elevation model (DEM) in GIS. **University of Mysore**.
- Barnhart, K., Marshall, M. และ Shappee, E. (2021). **Introduction to unmanned aircraft systems** (พิมพ์ครั้งที่): Crc Press.
- Congalton, G. และ Green, K. (2019). **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices** (พิมพ์ครั้งที่): CRC press.
- Cressie, N. (2015). **Statistics for spatial data** (พิมพ์ครั้งที่): John Wiley & Sons.
- Federal Geographic Data Committee. (1998). **National standard for spatial data accuracy (NSSDA)** (พิมพ์ครั้งที่). Washington, DC: Federal Geographic Data Committee.
- Forstner, W. และ Wrobel, P. (2016). Photogrammetric computer vision. **Springer International Publishing Switzerland**.
- Gopi, S. (2007). **Advanced surveying: total station, GIS and remote sensing** (พิมพ์ครั้งที่): Pearson Education India.
- Hartley, R. และ Zisserman, A. (2003). **Multiple view geometry in computer vision** (พิมพ์ครั้งที่): Cambridge university press.
- Hussein, S. และ Yaseen, K. (2021). Surveying with GNSS and Total Station: A Comparative Study. **Eurasian Journal of Science and Technology**, 7, 59–73.

- Mazzoleni M, Paron P, Reali A, Juizo D, Manane J และ Brandimarte L. (2020). Testing UAV-derived topography for hydraulic modelling in a tropical environment. **Natural Hazards**, 103, 139–163.
- Metashape, A. (2020). **Agisoft Metashape User Manual, Professional Edition Version 1.7** (พิมพ์ครั้งที่ 1).
- Minnesota Planning Land Management Information Center. (1999). **Using the National Standards for Spatial Data Accuracy to measure and report geographic data quality** (พิมพ์ครั้งที่ 1).
- National Academies of Sciences Engineering and Medicine. (2018). **Assessing the risks of integrating unmanned aircraft systems (UAS) into the national airspace system** (พิมพ์ครั้งที่ 1). United States of America: National Academies Press.
- Pfeffermann, D. (2000). **Handbook of Statistics_29B: Sample Surveys: Inference and Analysis** (พิมพ์ครั้งที่ 29): Elsevier.
- Plourde, L. และ Congalton, G. (2003). Sampling method and sample placement. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 69(3), 289–297.
- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M. และ Sarazzi, D. (2011, 25–31 January 2011). UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling—current status and future perspectives. In **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences** (pp.: Zurich Switzerland).
- Sonka, M., Hlavac, V. และ Boyle, R. (2013). **Image processing, analysis and machine vision** (พิมพ์ครั้งที่ 1): Springer.
- Thompson, M., Eller, R., Radlinski, W. และ Speert, L. (1966). **Manual of photogrammetry** (พิมพ์ครั้งที่ 1). Falls Church: American Society of Photogrammetry.
- Topcon Corporation. (2006). **Instruction Manual Electronic Total Station GTS–100N Series** (พิมพ์ครั้งที่ 1). Tokyo Japan: Topcon Corporation.
- Yastikli, N., Bagci, I. และ Beser, C. (2013, 11 – 17 November 2013). The processing of image data collected by light UAV systems for GIS data capture and updating. In **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences** (pp 267–270). Antalya Turkey.

- กระทรวงมหาดไทย. (2550). ว่าด้วยแผนที่ภาษีและทะเบียนทรัพย์สินขององค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น (พิมพ์ครั้งที่). กรุงเทพฯ: กระทรวงมหาดไทย.
- กลุ่มงานนโยบายการคลังและพัฒนารายได้ กรมส่งเสริมการปกครองท้องถิ่น. (2562). คู่มือปฏิบัติงานตามพระราชบัญญัติภาษีที่ดินและสิ่งปลูกสร้าง พ.ศ. 2562 (พิมพ์ครั้งที่). สำนักบริหารการคลังท้องถิ่น กรมส่งเสริมการปกครองท้องถิ่น กรุงเทพฯ.
- ฝ่ายพัฒนารายได้ กองคลัง เทศบาลตำบลแม่กา. (2563). คู่มือการปฏิบัติงานจัดเก็บรายได้ (พิมพ์ครั้งที่). อำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา: ฝ่ายพัฒนารายได้กองคลัง สำนักงานเทศบาลตำบลแม่กา.
- พระราชบัญญัติภาษีที่ดินและสิ่งปลูกสร้าง พ.ศ. 2562. (9 มีนาคม 2562). ราชกิจจานุเบกษา, 136(130 ก.) หน้า 125-132.
- ไพศาล สันติธรรมนนท์. (2564). การรังวัดด้วยภาพดิจิทัล (พิมพ์ครั้งที่). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- มศวรรษ เสนาสวัสดิ์. (2566, 24-26 พฤษภาคม 2566). การศึกษาความแม่นยำของการสำรวจแบบต่างๆ เพื่อการก่อสร้าง. In การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28 (pp.: ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม).
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2565). มาตรฐานการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่องานวิศวกรรม (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- สงวน มณีรัตนาคักดี. (2562). การวัดสอบกล่องสำรวจแบบประมวลผลรวมของสำนักงานที่ดิน (พิมพ์ครั้งที่). กรมที่ดิน.
- สาธิต แสง ประดิษฐ์. (2014). การสกัดขอบเขตอาคารจากข้อมูลภาพความละเอียดสูง. วารสารวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระบรมราชูปถัมภ์สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 9, 76-88.
- สำนักงานคณะกรรมการป้องกันและปราบปรามยาเสพติด. (2560). การจัดการองค์ความรู้เรื่องอากาศยานไร้คนขับเพื่อการสำรวจพืชเสพติด (พิมพ์ครั้งที่). สถาบันสำรวจและติดตามการปลูกพืชเสพติดสำนักงานคณะกรรมการป้องกันและปราบปรามยาเสพติด.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	ชยกร พุ่มนวล
วัน เดือน ปี เกิด	10 กรกฎาคม พ.ศ. 2538
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ.2561 วท.บ. (ภูมิสารสนเทศศาสตร์), มหาวิทยาลัยพะเยา, พะเยา
ที่อยู่ปัจจุบัน	เลขที่ 280 หมู่ 4 บ้านปากคลองลาน ต. คลองลานพัฒนา อ. คลองลาน จ. กำแพงเพชร 62180
ผลงานตีพิมพ์	ชยกร พุ่มนวล และนิติ เขี่ยมชื่น. (2563) "การวิเคราะห์พื้นที่เสี่ยงเกิดจุดความร้อนอำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา"

