



ความถูกต้องเชิงพื้นที่ของการใช้อากาศยานไร้คนขับ
เพื่อผลิตแผนที่ภาพถ่ายรายละเอียดสูง

SPATIAL ACCURACY OF APPLYING UNMANNED AERIAL VEHICLE
TO PRODUCE HIGH – RESOLUTION MAP

นภัศวรณ บุญทวีสวัสดิ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

2562

ความถูกต้องเชิงพื้นที่ของการใช้อากาศยานไร้คนขับ
เพื่อผลิตแผนที่ภาพถ่ายรายละเอียดสูง



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาภูมิสารสนเทศ
คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปีการศึกษา 2562
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

SPATIAL ACCURACY OF APPLYING UNMANNED AERIAL VEHICLE
TO PRODUCE HIGH – RESOLUTION MAP



NAPASSAWAN BOONTHAWEESAWASDI

A Thesis Submitted in partial Fulfillment of Requirements
for MASTER OF SCIENCE (Geoinformatics)
Faculty of Social Sciences Srinakharinwirot University

2019

Copyright of Srinakharinwirot University

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง
ความถูกต้องเชิงพื้นที่ของการใช้อากาศยานไร้คนขับ
เพื่อผลิตแผนที่ภาพถ่ายรายละเอียดสูง
ของ
นั้สวรรณ บุญพิสวัสดี

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาภูมิสารสนเทศ
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ฉัตรชัย เอกปัญญาสกุล)

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์

..... ที่ปรึกษาหลัก ประธาน
(อาจารย์ ดร.สุทธาทิพย์ ขวณะเวสสกุล) (รองศาสตราจารย์ ดร.พรรณี ชีวินศิริวัฒน์)
..... ที่ปรึกษาร่วม กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พันทิพย์ ปิยะทัศนานนท์) (อาจารย์ ดร.อสมมาตรณ์ สิทธิ)

ชื่อเรื่อง	ความถูกต้องเชิงพื้นที่ของการใช้อากาศยานไร้คนขับ เพื่อผลิตแผนที่ภาพถ่ายรายละเอียดสูง
ผู้วิจัย	นภัสวรรณ บุญทวีสวัสดิ์
ปริญญา	วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต
ปีการศึกษา	2562
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. สุชาติพิทย์ ชวนะเวสสกุล

การศึกษาวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความถูกต้องของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับที่ใช้ระบบ PPK (Post Process Kinematic) กับไม่ใช้ระบบ PPK (ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย) พื้นที่ศึกษาขนาดกว้าง 1.5 กิโลเมตร ยาว 1.5 กิโลเมตร บริเวณเขื่อนศรีนครินทร์ จังหวัดกาญจนบุรี ถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับประเภทปีกแข็งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร (ความสูงบิน 192 เมตร) , 0.10 เมตร (ความสูงบิน 319 เมตร) และ 0.15 เมตร (ความสูงบิน 479 เมตร) กำหนดจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน 5 จุด ใช้การรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบจลน์ในทันที (Real-Time Kinematic; RTK) ผลการศึกษพบว่า ค่าความถูกต้องทางราบของอากาศยานไร้คนขับที่ใช้ระบบ PPK จะไม่ดีเท่าอากาศยานไร้คนขับที่ไม่ใช้ PPK แต่ค่าความถูกต้องทางดิ่งของอากาศยานไร้คนขับที่ใช้ระบบ PPK จะดีกว่าอากาศยานไร้คนขับที่ไม่ใช้ระบบ PPK ยกเว้นเมื่อความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) มากกว่า 0.15 เมตร ค่าความถูกต้องทางดิ่งของอากาศยานไร้คนขับที่ไม่ใช้ระบบ PPK จะดีกว่าใช้ระบบ PPK ซึ่งรูปแบบการบินกริดสามารถเพิ่มค่าความถูกต้องทางดิ่งให้กับอากาศยานไร้คนขับที่ใช้ระบบ PPK ให้ดียิ่งขึ้นได้ ถ้าต้องการนำอากาศยานไร้คนขับด้วยระบบ PPK มาใช้ในงานผลิตแผนที่ เพื่อลดระยะเวลาในการวางจุดควบคุมภาพถ่าย ลดเวลาในการปฏิบัติงาน หรือมีจำนวนผู้ปฏิบัติงานไม่เพียงพอ

คำสำคัญ : ค่าความถูกต้อง, ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน, การรังวัดแบบจลน์โดยประมวลผลภายหลังการบิน

Title	SPATIAL ACCURACY OF APPLYING UNMANNED AERIAL VEHICLE TO PRODUCE HIGH – RESOLUTION MAP
Author	NAPASSAWAN BOONTHAWEESAWASDI
Degree	MASTER OF SCIENCE
Academic Year	2019
Thesis Advisor	Sutatip Chavanavesskul , Ph.D.

The purpose of this study is to compare the accuracy between Post Process Kinematic (PPK) flights with no Ground Control Point (GCP) used and non-PPK flights with well-distributed GCPs. The area mapped during the test was 1.5 square kilometers at Srinagarind dam, Kanchanaburi Province, Thailand by fixed wing Unmanned Aerial Vehicle (UAV). The UAV flew at 0.06 meters Ground Sample Distance (GSD) (192 meters flight altitude), 0.10 meters GSD (319 meters flight altitude) and 0.15 meters GSD (479 meters flight altitude). There were 5 ground control points, which were surveyed by using Real Time Kinematic (RTK) GNSS. The results showed that non-PPK flights gave better horizontal accuracy than PPK flights, but PPK flights had greater vertical accuracy than non-PPK flights. However, even at this higher GSD of 0.15 meters the non-PPK flights had better vertical accuracy than the PPK flights. Furthermore, flying grid patterns allowed better vertical accuracy for PPK flights. Mapping with a PPK UAV is especially advantageous when it is not always feasible to measure GCPs due to many reasons on site, such as fragile terrain textures, unreachable spots, and other personal safety concerns. Also, the planning and measurement of GCPs could take a long time.

Keyword : Ground Sample Distance (GSD), Post Process Kinematic (PPK), Spatial Accuracy, Unmanned Aerial Vehicle, High Resolution Map

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ทั้งนี้เพราะได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลดังกล่าว ดังต่อไปนี้

รองศาสตราจารย์ ดร.พรณี ชีวินศิริวัฒน์ ประธานกรรมการปริญญานิพนธ์ อาจารย์ ดร. สุรชาติพิทย์ ขวณะเวสสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนทิพย์ ปิยะทัศนนานนท์ และ อาจารย์ ดร. อสมภรณ์ สิทธิ ที่กรุณาให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการ แนะนำแนวทาง แนวคิดในการวิจัย และ เสนอแนะการแก้ปัญหาต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำงานวิจัยนี้ ตลอดจนให้ความกรุณา ตรวจแก้ไขปริญญานิพนธ์สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัย ในสิ่งที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่ง และขอบพระคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ เจ้าหน้าที่ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะ สังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่ให้คำปรึกษาช่วยเหลือตลอดช่วงระยะเวลาการศึกษา

ขอขอบพระคุณ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อากาศยานไร้คนขับและอำนวยความสะดวกในการเข้าดำเนินงานในพื้นที่ศึกษา รวมทั้งพี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ กองสำรวจที่ดินและทรัพยากรดิน ฝ่ายที่ดิน ที่ให้คำปรึกษาและให้ความช่วยเหลือในการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ

สุดท้ายนี้ผู้วิจัยขอบพระคุณ คุณแม่ พี่ชาย และคุณกมลดิษฐ์ นิลศร ที่ให้กำลังใจและช่วยเหลือ สนับสนุนผู้วิจัยมาโดยตลอดในทุกๆด้าน ทำให้การทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดี

นภัสวรรณ บุญทวีสวัสดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ต
บทที่ 1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์.....	3
ขอบเขตในการดำเนินการวิจัย	4
นิยามศัพท์เฉพาะ	5
กรอบแนวคิดในการวิจัย.....	6
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
1. ทฤษฎีการรังวัดด้วยภาพถ่าย (Photogrammetry)	7
2. การรังวัดด้วยดาวเทียมระบบ GNSS	22
4. การหาค่าความถูกต้องจากการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ	28
5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	36
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	43
เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา.....	43
การวางแผนบินถ่ายภาพ	47
การบินถ่ายภาพ	62

การประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ	62
การรังวัดพิกัดและระดับของจุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Point) และจุดตรวจสอบความถูกต้อง (Check point)	63
การตรวจสอบความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ	65
การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร	70
บทที่ 4 ผลการวิจัย	72
การบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ	72
การประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ	88
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	115
สรุปผลการวิจัย	116
อภิปรายผล	120
ข้อเสนอแนะ	122
ปัญหาและอุปสรรค	123
บรรณานุกรม	124
ภาคผนวก.....	127
ประวัติผู้เขียน.....	152

สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 1 เลขยกกำลังที่ใช้คำนวณหาจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินที่น้อยที่สุด	19
ตาราง 2 รายละเอียดการรังวัดหาค่าพิกัดด้วยดาวเทียม GNSS แบบต่างๆ	24
ตาราง 3 การเปรียบเทียบการบินถ่ายภาพจากอากาศยานไร้คนขับกับเครื่องบิน	27
ตาราง 4 มาตรฐานความละเอียดถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบของ ASPRS 1990	34
ตาราง 5 มาตรฐานความละเอียดถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบของ ASPRS 2014	35
ตาราง 6 ความสัมพันธ์ของมาตราส่วน ความสูงและความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) โดยมีความยาวโฟกัสและความละเอียดของจุดภาพ (Pixel Size) เป็นค่าคงที่	54
ตาราง 7 ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) และขนาดพื้นที่ต่อการบินที่ความสูงบินระดับต่างๆ ของอากาศยานไร้คนขับยี่ห้อ Trimble รุ่น UX5HP เลนส์ขนาด 15 มิลลิเมตร	55
ตาราง 8 ตัวอย่างตารางค่าพิกัดของจุดควบคุมภาคพื้นดิน	64
ตาราง 9 ตัวอย่างตารางค่าพิกัดของจุดตรวจสอบความถูกต้อง	65
ตาราง 10 เปรียบเทียบค่าพิกัด (X,Y) และค่าระดับ (Z) ของจุดตรวจสอบที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.06 เมตรกับค่าที่ได้จากการรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS แบบจลน์ในทันทีจากภาคสนาม	66
ตาราง 11 เปรียบเทียบค่าพิกัด (X,Y) และค่าระดับ (Z) ของจุดตรวจสอบที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.10 เมตรกับค่าที่ได้จากการรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS แบบจลน์ในทันทีจากภาคสนาม	67
ตาราง 12 เปรียบเทียบค่าพิกัด (X,Y) และค่าระดับ (Z) ของจุดตรวจสอบที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.15 เมตรกับค่าที่ได้จากการรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS แบบจลน์ในทันทีจากภาคสนาม	68
ตาราง 13 ตัวอย่างตารางความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการบิน ค่าความถูกต้องและระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับกับ ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.6 เมตร, 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร	71

ตาราง 14 จำนวนภาพถ่ายที่ได้จากการบินถ่ายภาพตามความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร.....	74
ตาราง 15 ตัวอย่างรายละเอียดข้อมูลภาพในบริเวณต่างๆที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร	77
ตาราง 16 ค่าพิกัดของจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจทดสอบความถูกต้อง จำนวนทั้งหมด 23 จุด	89
ตาราง 17 แสดงการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.06 เมตร ระหว่างการบินในรูปแบบทั่วไปกับการบินในรูปแบบกริด	91
ตาราง 18 แสดงการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.10 เมตร ระหว่างการบินในรูปแบบทั่วไปกับการบินในรูปแบบกริด	93
ตาราง 19 แสดงการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.15 เมตร ระหว่างการบินในรูปแบบทั่วไปกับการบินในรูปแบบกริด	95
ตาราง 20 แสดงการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างการใช้ระบบ PPK กับการใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ที่รังวัดค่าพิกัดโดยใช้ RTK ทั้งในรูปแบบการบินทั่วไปและแบบกริด ที่ GSD 0.06 เมตร	97
ตาราง 21 แสดงการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างการใช้ระบบ PPK กับการใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ที่รังวัดค่าพิกัดโดยใช้ RTK ทั้งในรูปแบบการบินทั่วไปและแบบกริด ที่ GSD 0.10 เมตร	99
ตาราง 22 แสดงการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างการใช้ระบบ PPK กับการใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ที่รังวัดค่าพิกัดโดยใช้ RTK ทั้งในรูปแบบการบินทั่วไปและแบบกริด ที่ GSD 0.15 เมตร	101

ตาราง 23 ค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วย อากาศยานไร้คนขับ กับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบทั่วไปโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP).....	103
ตาราง 24 ค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วย อากาศยานไร้คนขับ กับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบทั่วไปโดยใช้ระบบ PPK.....	106
ตาราง 25 ค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วย อากาศยานไร้คนขับ กับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบกริดโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP).....	108
ตาราง 26 ค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วย อากาศยานไร้คนขับกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบกริดโดยใช้ระบบ PPK.....	110
ตาราง 27 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้ จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร, 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร.....	114
ตาราง 28 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการบิน ค่าความถูกต้องและระยะเวลาที่ใช้ในการ ประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับด้วยระบบ PPK และใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ที่ GSD 0.06 เมตร, 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร.....	119
ตาราง 29 ค่าความถูกต้องทางราบของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศ ยานไร้คนขับที่ GSD 0.06 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ที่ใช้ระบบ GCP	128
ตาราง 30 ค่าความถูกต้องทางราบของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศ ยานไร้คนขับที่ GSD 0.06 เมตร ในรูปแบบกริด ที่ใช้ระบบ GCP	129
ตาราง 31 ค่าความถูกต้องทางราบของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศ ยานไร้คนขับที่ GSD 0.06 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ที่ใช้ระบบ PPK	130
ตาราง 32 ค่าความถูกต้องทางราบของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศ ยานไร้คนขับที่ GSD 0.06 เมตร ในรูปแบบกริด ที่ใช้ระบบ PPK	131

[illegible]

ตาราง 46 ค่าความถูกต้องทางดิ่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.10 เมตร ในรูปแบบกริด ที่ใช้ระบบ GCP	145
ตาราง 47 ค่าความถูกต้องทางดิ่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.10 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ที่ใช้ระบบ PPK	146
ตาราง 48 ค่าความถูกต้องทางดิ่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.10 เมตร ในรูปแบบกริด ที่ใช้ระบบ PPK	147
ตาราง 49 ค่าความถูกต้องทางดิ่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.15 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ที่ใช้ระบบ GCP	148
ตาราง 50 ค่าความถูกต้องทางดิ่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.15 เมตร ในรูปแบบกริด ที่ใช้ระบบ GCP	149
ตาราง 51 ค่าความถูกต้องทางดิ่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.15 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ที่ใช้ระบบ PPK	150
ตาราง 52 ค่าความถูกต้องทางดิ่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.10 เมตร ในรูปแบบกริด ที่ใช้ระบบ PPK	151

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพประกอบ 1 พื้นที่ศึกษาบริเวณเขื่อนศรีนครินทร์.....	4
ภาพประกอบ 2 กรอบแนวคิดในการวิจัย	6
ภาพประกอบ 3 ส่วนซ้อนระหว่างภาพ (Overlap หรือ Frontlap) ส่วนซ้อนระหว่างแนวกบิน (Sidelap) และจุดเปิดถ่ายภาพ	9
ภาพประกอบ 4 การปรากฏของจุดภาพวัตถุบนภาพถ่ายหลายใบ	10
ภาพประกอบ 5 การบินถ่ายภาพโดยใช้อากาศยานไร้คนขับมีส่วนซ้อนระหว่างภาพ (Overlap). 11	
ภาพประกอบ 6 การบินถ่ายภาพโดยใช้อากาศยานไร้คนขับมีส่วนซ้อนระหว่างภาพ (Overlap). 11	
ภาพประกอบ 7 ความสัมพันธ์ของพิกัดบนภาพถ่ายทางอากาศและพิกัดบนวัตถุ	12
ภาพประกอบ 8 รูปแบบการบินทั่วไป.....	13
ภาพประกอบ 9 รูปแบบการบินสลับแนว.....	14
ภาพประกอบ 10 รูปแบบการบินแบบกริด.....	15
ภาพประกอบ 11 การตั้งรับสัญญาณ GNSS บนจุดควบคุมที่ทราบค่าพิกัดอ้างอิง เรียกว่า สถานีฐาน ค่าพิกัดของจุดเปิดถ่ายภาพที่รังวัดด้วย GNSS บนเครื่องบินและข้อมูลที่รับได้จากสถานีฐาน จะถูกนำมาคำนวณปรับแก้เข้ากับระบบสมการทำให้การคำนวณปรับแก้มีความเชื่อถือได้สูง	17
ภาพประกอบ 12 ตำแหน่งและจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินสำหรับบล็อกจีพีเอส	18
ภาพประกอบ 13 ขั้นตอนการประมวลผลภาพจากอากาศยานไร้คนขับ.....	21
ภาพประกอบ 14 การยึดโยงโดยตรง (direct geo-referencing).....	22
ภาพประกอบ 15 อากาศยานไร้คนขับแบบปีกตรึง (Fixed-wing)	25
ภาพประกอบ 16 อากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุน (Multi-rotor)	25
ภาพประกอบ 17 ระดับความถูกต้องทางตำแหน่งและขนาดพื้นที่ของวิธีการสำรวจชนิดต่างๆ ...	26
ภาพประกอบ 18 จำนวนและความห่างของจุดตรวจสอบ (Check point).....	29

ภาพประกอบ 19 กราฟแจกแจงความคลาดเคลื่อนที่ระดับความเชื่อมั่นต่างๆ.....	31
ภาพประกอบ 20 รูปแบบการใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินทั้ง 6 รูปแบบ	40
ภาพประกอบ 21 กราฟเส้นแสดงค่า RMSE ของจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินทั้ง 6 รูปแบบ	40
ภาพประกอบ 22 อากาศยานไร้คนขับประเภทปีกตรึงของ Trimble รุ่น UX5HP	44
ภาพประกอบ 23 กล้องยี่ห้อ Sony รุ่น a7R ชนิด mirrorless เซ็นเซอร์เต็มเฟรม (full frame)	44
ภาพประกอบ 24 ซอฟต์แวร์ Aerial Imagine ใช้ในการวางแผนการบินและควบคุมการบิน	45
ภาพประกอบ 25 ซอฟต์แวร์ Trimble Business Center ใช้ประมวลผลภาพถ่าย	46
ภาพประกอบ 26 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ของ Trimble รุ่น R8.....	46
ภาพประกอบ 27 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา	47
ภาพประกอบ 28 ลูกศรสีฟ้าแสดงตำแหน่งจุดปล่อยอากาศยาน.....	48
ภาพประกอบ 29 ตำแหน่งจุดปล่อยอากาศยาน.....	48
ภาพประกอบ 30 กรอบสีแดง คือ การกำหนดส่วนซ้อนระหว่างภาพ (Overlap) ร้อยละ 80 และ ส่วนซ้อนระหว่างแนวกบิน (Sidelap) ร้อยละ 80 ลงในซอฟต์แวร์ Aerial Imagine.....	49
ภาพประกอบ 31 ความสัมพันธ์ของความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.06 เมตรและความสูงที่ 188 เมตร มีความยาวโฟกัส 15 มิลลิเมตร ที่ได้จากซอฟต์แวร์ Aerial Imagine	52
ภาพประกอบ 32 ความสัมพันธ์ของความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.10 เมตรและความสูงที่ 314 เมตร มีความยาวโฟกัส 15 มิลลิเมตร ที่ได้จากซอฟต์แวร์ Aerial Imagine	53
ภาพประกอบ 33 ความสัมพันธ์ของความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.15 เมตรและความสูงที่ 470 เมตร มีความยาวโฟกัส 15 มิลลิเมตร ที่ได้จากซอฟต์แวร์ Aerial Imagine	54
ภาพประกอบ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินกับความสูงบินที่	56
ภาพประกอบ 35 รูปแบบการบินแบบกริด GSD ที่ 0.06 เมตร.....	57
ภาพประกอบ 36 รูปแบบการบินแบบทั่วไป GSD ที่ 0.06 เมตร.....	57

ภาพประกอบ 37 รูปแบบการบินแบบกริด GSD ที่ 0.10 เมตร.....	58
ภาพประกอบ 38 รูปแบบการบินแบบทั่วไป GSD ที่ 0.10 เมตร.....	58
ภาพประกอบ 39 รูปแบบการบินแบบกริด GSD ที่ 0.15 เมตร.....	59
ภาพประกอบ 40 รูปแบบการบินแบบทั่วไป GSD ที่ 0.15 เมตร.....	59
ภาพประกอบ 41 เบ้าของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินมีขนาด 1 เมตร	61
ภาพประกอบ 42 จุดวงกลมสีชมพูแสดงตำแหน่งจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน	61
ภาพประกอบ 43 จำลองการบินถ่ายภาพของอากาศยานไร้คนขับตามแผนการบินที่ได้วางไว้ใน ขั้นตอนก่อนหน้าด้วยระบบ Autopilot ควบคุมการบินด้วยโปรแกรม Aerial Imagine	62
ภาพประกอบ 44 ตัวอย่างการรังวัดค่าพิกัดตำแหน่งจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินและจุด ตรวจสอบความถูกต้องโดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีรังวัดแบบจลน์ในทันที	64
ภาพประกอบ 45 ภาพถ่ายออร์โธจากอากาศยานไร้คนขับที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร.....	74
ภาพประกอบ 46 ภาพถ่ายออร์โธจากอากาศยานไร้คนขับที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร.....	75
ภาพประกอบ 47 ภาพถ่ายออร์โธจากอากาศยานไร้คนขับที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร.....	76
ภาพประกอบ 48 ตัวอย่างภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับที่.....	87
ภาพประกอบ 49 ตำแหน่งจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบความถูกต้อง	88
ภาพประกอบ 50 กราฟแสดงเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.06 เมตร ระหว่างการบิน ในรูปแบบ ทั่วไปกับการบินในรูปแบบกริด.....	91
ภาพประกอบ 51 กราฟแสดงเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.10 เมตร ระหว่างการบินในรูปแบบ ทั่วไปกับการบินในรูปแบบกริด.....	93

ภาพประกอบ 52 กราฟแสดงเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.15 เมตร ระหว่างการบินในรูปแบบทั่วไปกับการบินในรูปแบบกริด.....	95
ภาพประกอบ 53 กราฟแสดงเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างการใช้ระบบ PPK กับการใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ที่รังวัดค่าพิกัดโดยใช้ RTK ทั้งในรูปแบบการบินทั่วไปและแบบกริด ที่ GSD 0.06 เมตร.....	98
ภาพประกอบ 54 กราฟแสดงเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างการใช้ระบบ PPK กับการใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ที่รังวัดค่าพิกัดโดยใช้ RTK ทั้งในรูปแบบการบินทั่วไปและแบบกริด ที่ GSD 0.10 เมตร....	100
ภาพประกอบ 55 กราฟแสดงเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างการใช้ระบบ PPK กับการใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ที่รังวัดค่าพิกัดโดยใช้ RTK ทั้งในรูปแบบการบินทั่วไปและแบบกริด ที่ GSD 0.15 เมตร....	102
ภาพประกอบ 56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบทั่วไปโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP)	104
ภาพประกอบ 57 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบทั่วไปโดยใช้ระบบ PPK.....	106
ภาพประกอบ 58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบกริดโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP)..	108
ภาพประกอบ 59 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบกริดโดยใช้ระบบ PPK.....	111

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อากาศยานไร้คนขับ (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) หรือ Drone คือ อากาศยานที่ไม่มีนักบินบังคับอยู่บนเครื่อง โดยเครื่องบินจะถูกควบคุมให้บินได้อัตโนมัติด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งไว้บนอากาศยานตามแผนการบินที่กำหนดไว้ มีหลากหลายขนาดและรูปร่าง ไม่จำกัดรูปแบบแล้วแต่ผู้ใช้งานจะนำไปใช้ให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ต่างๆ อาจจะมีการนำกล้องถ่ายภาพคุณภาพสูงมาติดตั้ง ทั้งกล้องถ่ายภาพในเวลากลางวัน และกล้องอินฟราเรดที่สามารถบันทึกภาพระยะไกลได้แล้วส่งสัญญาณภาพมายังสถานีภาคพื้นดิน ในเวลาที่ใกล้เคียงเวลาจริงมากที่สุด (NRT : Near Real Time)

ในระยะเริ่มแรกอากาศยานไร้คนขับถูกพัฒนามาเพื่อภารกิจทางด้านการทหารและการรบ ใช้ในการสอดแนมและตรวจการณ์สนามรบเพื่อหาข้อมูลฝ่ายตรงข้าม และส่งข้อมูลสถานการณ์มายังสถานีภาคพื้นดิน (Ground Control Station) รวมไปถึงภารกิจลาดตระเวนเพื่อบันทึกภาพสถานที่เป้าหมาย ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับมาใช้ในการกิจด้านพลเรือนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเทคโนโลยีดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้งานในภารกิจที่นอกเหนือไปจากภารกิจด้านการทหาร ทั้งทางด้านการเกษตรกรรม ด้านการสำรวจทรัพยากรธรรมชาติ หรือใช้ในลักษณะของการถ่ายภาพนิ่งหรือภาพวิดีโอเพื่อใช้ในกิจกรรมทางด้านบันเทิง การโฆษณา หรืองานอดิเรก และจากการประยุกต์ใช้ทฤษฎี ไฟโตเกรมเมตรี สามารถนำอากาศยานไร้คนขับมาใช้ในการทำแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศรายละเอียดสูง ทำให้การใช้อากาศยานไร้คนขับเป็นที่แพร่หลายสังเกตได้จากในปัจจุบันเกิดบริษัทเอกชนรับให้บริการจัดทำแผนที่ด้วยอากาศยานไร้คนขับมากขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งภาพถ่ายทางอากาศโดยใช้อากาศยานไร้คนขับสามารถจัดซื้อจำกัดบางประการของภาพถ่ายทางอากาศจากเครื่องบินและภาพถ่ายดาวเทียมได้ เช่น ความละเอียดของภาพถ่าย โดยภาพถ่ายจากดาวเทียม Worldview-3 ถ่ายภาพความละเอียดสูงที่สุดในภาพชนิด Panchromatic หรือชนิดภาพขาวดำ มีความละเอียดดีที่สุดที่ 31 เซนติเมตร และชนิดภาพสีมีความละเอียดดีที่สุดที่ 1.24 เมตร แต่ภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับสามารถให้ภาพที่มีความละเอียดดีกว่า 1 เซนติเมตร และจากการที่อากาศยานไร้คนขับ โดยทั่วไปนั้นจะมีระดับความสูงบินที่ต่ำกว่า 1000 เมตร จึงทำให้ไม่มีเมฆบดบังในภาพถ่าย ดังเช่นปรากฏบ่อยครั้งในภาพถ่ายดาวเทียม ตลอดจนข้อดีของอากาศยานไร้คนขับที่สามารถถ่ายภาพทางอากาศได้ทันทั่วทั้งที่ตามความต้องการของผู้ใช้งาน ซึ่งภาพถ่ายดาวเทียมไม่สามารถทำได้ เนื่องจากต้องรอกวโคจร

ในการวนกลับมาถ่ายภาพในบริเวณที่ต้องการ อีกทั้งการจัดทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศในแต่ละครั้ง อาจต้องอาศัยผู้ที่มีความเชี่ยวชาญเฉพาะด้าน หรืองบประมาณจำนวนมาก ดังนั้นการสร้างแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศโดยใช้อากาศยานไร้คนขับจึงเป็นเครื่องมืออีกทางเลือกหนึ่งที่มีความสำคัญ

การนำอากาศยานไร้คนขับมาใช้ในการสำรวจ จำเป็นต้องมีการสร้างมาตรฐานการดำเนินงานเพื่อให้ผลผลิตที่ได้มีความถูกต้อง มีความน่าเชื่อถือในการนำไปใช้งานอื่นๆ ต่อไป เนื่องจากการรังวัดด้วยภาพไม่ได้เป็นการวัดโดยตรง จึงทำให้มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากมาย อาจกระทบต่อคุณภาพความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้ แต่อย่างไรก็ตามขณะนี้การใช้อากาศยานไร้คนขับในงานสำรวจจัดทำแผนที่ยังไม่ถูกกำหนดเป็นมาตรฐานไว้อย่างชัดเจน ว่าผู้ใช้งานควรจะต้องวางแผนการบินถ่ายภาพอย่างไรเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ โดยจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆ นั้นพบว่า ส่วนใหญ่ของงานวิจัยที่ต้องการศึกษาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ ไม่ว่าจะเป็นการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องกับงานสำรวจภูมิประเทศของ (Barry and Coakley, 2013) และ (ศิริพร ตรีธาร, 2558) ที่มีการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างความถูกต้องจากการรังวัดด้วยอากาศยานไร้คนขับกับระดับความสูงบิน หรือการศึกษาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องกับงานแผนที่ของ (วิชัย เยี่ยงวีรชน และคณะ, 2560) และ (เนติ ศรีหาม และศิวา แก้วปลั่ง, 2560) หรือการศึกษาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของภาพถ่ายที่ใช้รูปแบบการบินแบบกริดกับการบินแบบทั่วไป ทั้งที่ใช้อากาศยานไร้คนขับระบบจลน์ในทันที (RTK) กับไม่ใช้ระบบจลน์ในทันที (RTK) และใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินกับไม่ใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินของ (Gerke and Przybilla, 2016) และ (Mian และคนอื่น ๆ, 2015) หรือการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อความถูกต้องของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้อากาศยานไร้คนขับของ (Raczynski, 2017) การประเมินจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินเพื่อให้ได้ภาพถ่ายที่ดีที่สุดจากการใช้อากาศยานไร้คนขับของ (Tahar, 2013) หรือการศึกษาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของภาพถ่ายที่ใช้อากาศยานไร้คนขับระบบจลน์ในทันที (RTK) และใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินกับไม่ใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินตามระดับความสูงของ (Küng และคนอื่น ๆ, 2011) หรือการศึกษาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของภาพถ่ายที่ใช้อากาศยานไร้คนขับระบบ RTK-GNSS โดยไม่ใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินกับไม่ใช้ระบบจลน์ในทันที (RTK) แล้วใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินของ (Shi and Chen, 2017)

จากทฤษฎีทางโฟโตแกรมเมตรีจะเห็นว่า หนึ่งในตัวแปรสำคัญที่ทำให้ภาพที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับมีค่าความถูกต้องมากหรือน้อยนั้น คือ จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (GCP : Ground Control Point) ซึ่งเป็นที่แน่นอนว่า จำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายมากจะทำให้มีค่าความถูกต้องสูง

แต่ทำให้ใช้ระยะเวลาในการดำเนินงานมากขึ้นและต้องเสียค่าใช้จ่ายมากขึ้นเช่นกัน อีกตัวแปรหนึ่ง คือ รูปแบบการบิน ที่อาจเพิ่มความถูกต้องของข้อมูลภาพถ่ายได้ เช่น รูปแบบการบินแบบกริด การบินลักษณะนี้ทำให้ได้ข้อมูลภาพที่เก็บรายละเอียดจากหลายมุมมอง ทำให้การประมวลผลภาพจะได้คุณภาพดีขึ้นได้ และในปัจจุบันได้มีอากาศยานไร้คนขับบางชนิดนำเทคโนโลยีควบคุมความถูกต้องของตำแหน่งภาพถ่ายด้วยระบบ PPK (Post Process Kinematic) เป็นการรังวัดแบบจลน์โดยประมวลผลภายหลังการบิน พัฒนาการหาค่าพิกัดจาก GNSS (Global Navigation Satellite System) ในรูปแบบใหม่ที่ใช้กับการถ่ายภาพทางอากาศด้วยอากาศยานไร้คนขับ โดยสามารถหาค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องรับสัญญาณและสถานีฐาน ทำให้ค่าพิกัดภาพถ่ายมีความถูกต้องมากขึ้น นำไปสู่การประมวลผลสร้างแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศที่ความถูกต้องสูงขึ้น อาจทำให้สามารถลดความยุ่งยากในการวางจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน เช่น ในพื้นที่ที่ยากต่อการเข้าถึง หรือในพื้นที่ที่มีภูมิประเทศปกคลุมไปด้วยต้นไม้ เป็นต้น

ปัจจุบันยังไม่ปรากฏงานวิจัยในการศึกษาหาความเหมาะสมว่าควรที่จะเลือกการบินแบบกริดหรือบินแบบธรรมดา มีข้อดีและข้อเสียของผลลัพธ์ที่ได้แตกต่างกันอย่างไร ตลอดจนการศึกษาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของภาพถ่ายที่ใช้รูปแบบการบินแบบกริดกับการบินแบบทั่วไป ทั้งที่ใช้อากาศยานไร้คนขับระบบการรังวัดแบบจลน์โดยประมวลผลภายหลังการบิน หรือ PPK (Post Process Kinematic) กับไม่ใช้ระบบ PPK และใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินกับไม่ใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินตามระดับความสูง ถ้าระดับความสูงเพิ่มขึ้นค่าความถูกต้องจะลดลงเป็นอัตราส่วนผกผันกันหรือไม่และการใช้อากาศยานไร้คนขับที่ติดตั้งระบบ PPK อาจจะทำให้ค่าความถูกต้องที่ดีได้ใกล้เคียงกับการวางจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความถูกต้องเชิงพื้นที่ของภาพถ่ายรายละเอียดสูงจากอากาศยานไร้คนขับ ผลของการวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อกำหนดเบื้องต้นและข้อมูลอ้างอิงสำหรับงานรังวัดภาพถ่ายรายละเอียดสูงจากอากาศยานไร้คนขับในอนาคต

วัตถุประสงค์

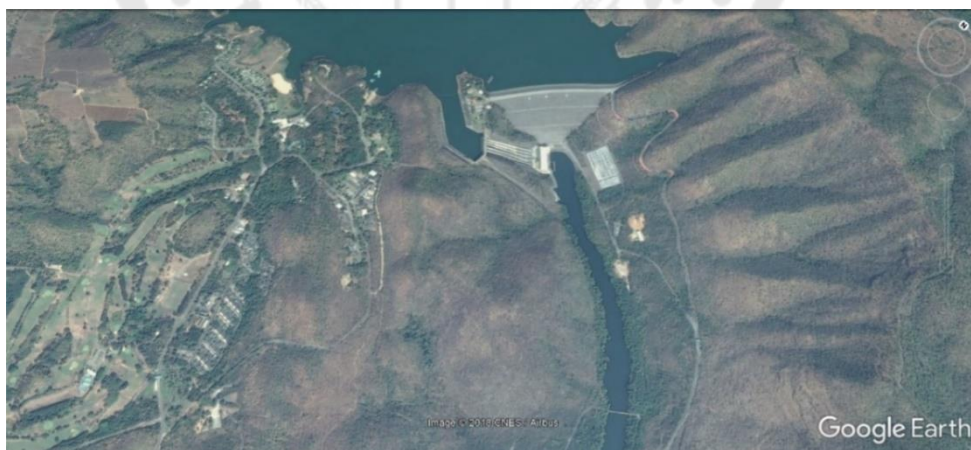
1. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างการบินในรูปแบบทั่วไปกับการบินในรูปแบบกริด
2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างการใช้ระบบ PPK (ไม่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP)) กับการใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ที่รังวัดค่าพิกัดโดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบจลน์ในทันที (RTK : Real Time Kinematic)

3. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ กับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร, 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร

ขอบเขตในการดำเนินการวิจัย

1. ถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับประเภทปีกแข็งของ Trimble รุ่น UX5HP โดยใช้ระบบ Autopilot ควบคุมการบินผ่านโปรแกรม Aerial Imaging ควบคุมความถูกต้องของตำแหน่งภาพถ่ายด้วยระบบ PPK

2. พื้นที่ศึกษา มีขนาดพื้นที่ 1.5 ตารางกิโลเมตร บริเวณเขื่อนศรีนครินทร์ ตั้งอยู่ตำบลท่ากระดาน อำเภอศรีสวัสดิ์ จังหวัดกาญจนบุรี เป็นเขื่อนอเนกประสงค์บนแม่น้ำแควใหญ่ สภาพพื้นที่มีความแตกต่างทางระดับความสูงและการใช้ประโยชน์ที่ดิน เช่น พื้นที่ป่า (Forest) พื้นที่สิ่งปลูกสร้าง (Built-up areas) สนามกอล์ฟ พื้นที่น้ำ (Water) และพื้นที่เบ็ดเตล็ด (Miscellaneous) การทดสอบความถูกต้องของภาพถ่ายทางอากาศรายละเอียดสูงด้วยอากาศยานไร้คนขับภายในเขื่อน จึงไม่กระทบกับการใช้ประโยชน์ที่ดินของผู้ครอบครองโดยรอบ ทำให้สามารถประหยัดเวลาในการขออนุญาตบินเนื่องจากการขออนุญาตบินเพียงรายเดียว ด้วยข้อได้เปรียบเชิงพื้นที่เหล่านี้และการควบคุมเวลาในการทำวิจัยครั้งนี้ จึงได้เลือกเขื่อนศรีนครินทร์ เป็นพื้นที่ศึกษา



ภาพประกอบ 1 พื้นที่ศึกษาบริเวณเขื่อนศรีนครินทร์

ที่มา : Google Earth

3. ประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับด้วยโปรแกรม Trimble Business Center โดยกำหนดรูปแบบการประมวลผล 2 รูปแบบ ดังนี้

3.1 การประมวลผลแบบ indirect geo-referencing โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายในการประมวลผล

3.2 การประมวลผลแบบ direct geo-referencing โดยไม่ใช้จุดควบคุมภาพถ่ายในการประมวลผล เนื่องจากใช้อากาศยานไร้คนขับที่มีระบบวัดพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพความแม่นยำสูง (PPK)

4. ตรวจสอบความถูกต้องของการสำรวจรังวัดด้วยภาพจากอากาศยานไร้คนขับในแต่ละรูปแบบศึกษาเปรียบเทียบกับสำรวจรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบจลน์ในทันที (RTK : Real Time Kinematic)

นิยามศัพท์เฉพาะ

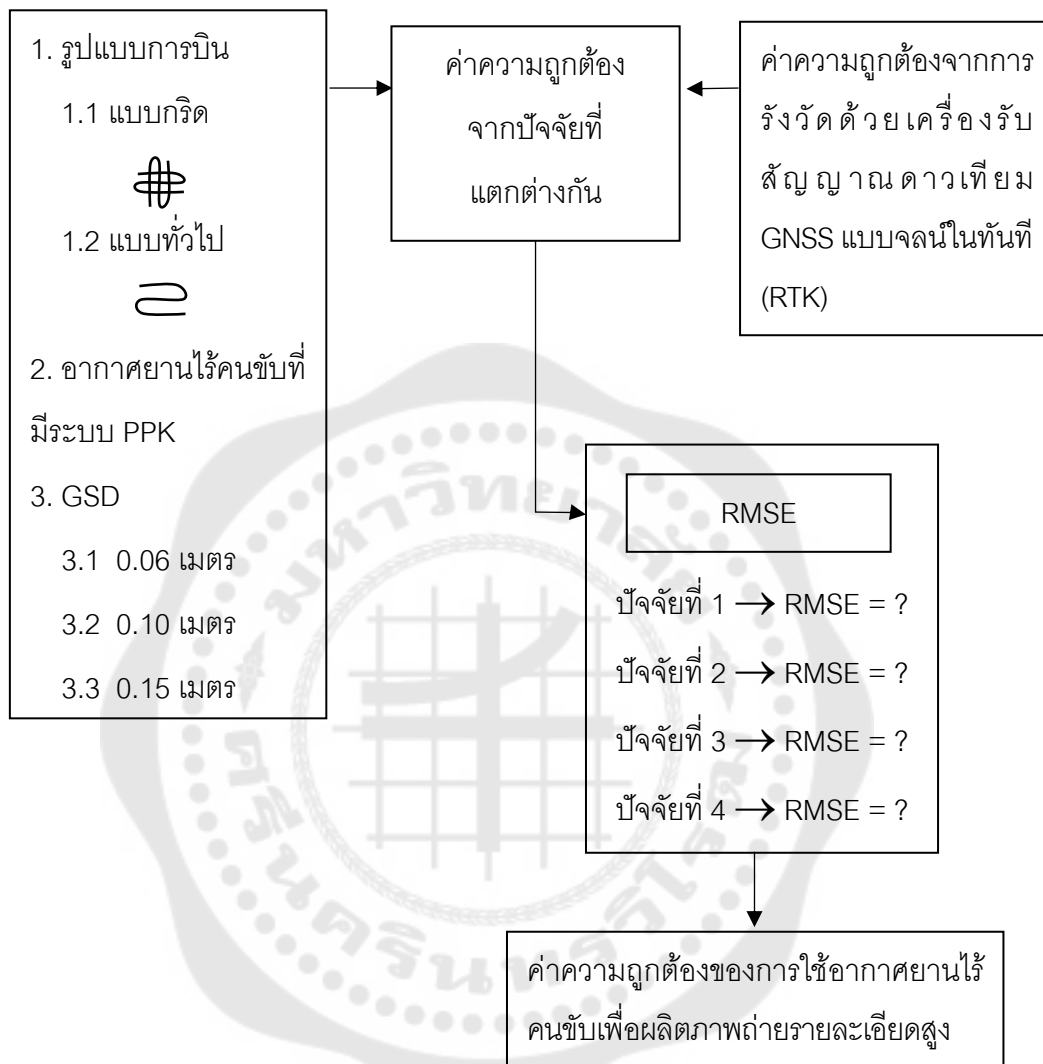
ค่าความถูกต้อง (accuracy) หมายถึง ค่าที่บ่งบอกถึงความถูกต้องของค่าที่วัดได้ว่าใกล้เคียงค่าจริงเพียงใด (วิชัย เยี่ยงวีรชน, 2558)

ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD : Ground Sample Distance) หมายถึง ตัวเลขระยะบอกขนาดของตัวอย่างบนพื้นดินคิดที่ 1 จุดภาพ (pixel) ซึ่งโดยทั่วไปเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส เช่น กรณีที่ถ่ายภาพที่ GSD = 10 เซนติเมตร หมายความว่า 1 จุดภาพบนภาพถ่ายจะเท่ากับระยะบนพื้นดิน 10 เซนติเมตร เป็นต้น เนื่องจากขนาด 1 จุดภาพของตัวเซ็นเซอร์มีขนาดคงที่ ดังนั้นการถ่ายภาพให้ได้ค่า GSD ตามต้องการจะขึ้นอยู่กับระยะการถ่ายภาพนั้น สำหรับอากาศยานไร้คนขับจะหมายถึงความสูงบินในการถ่ายภาพ (วิชัย เยี่ยงวีรชน, 2558)

จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP : Ground Control Point) หมายถึง จุดที่ปรากฏบนภาพถ่ายที่มีลักษณะเด่นชัด สามารถชี้ชัดทางตำแหน่งได้อย่างชัดเจนบนภาพ และเมื่อลงไปในสนามจุดดังกล่าวก็จะสามารถค้นหาได้ง่ายบนวัตถุหรือภูมิประเทศ (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2555b)

PPK (Post Process Kinematic) หมายถึง การรังวัดแบบจลน์โดยประมวลผลภายหลังการบิน เป็นการหาค่าพิกัดจาก GNSS ในรูปแบบใหม่ที่ใช้กับการถ่ายภาพทางอากาศด้วยอากาศยานไร้คนขับ โดยสามารถจัดค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องรับสัญญาณและสถานีฐานทำให้ค่าพิกัดได้รับความถูกต้องมากขึ้น (Sebastian, 2012)

กรอบแนวคิดในการวิจัย



ภาพประกอบ 2 กรอบแนวคิดในการวิจัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาวิจัยใดๆ นั้น การทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจำเป็นจะต้องมีการศึกษาทฤษฎี แนวคิด หรือหลักเกณฑ์ว่าจะใช้วิธีการใดในการศึกษาปัญหาในการวิจัยนั้น รวมทั้งศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งในและต่างประเทศว่าได้มีการศึกษาปัญหางานวิจัยดังกล่าวหรือไม่ มีขั้นตอนการดำเนินการศึกษาวิจัยอย่างไร และผลลัพธ์ของการวิจัยที่ได้รับเป็นอย่างไร เพื่อใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการออกแบบงานศึกษาวิจัย การกำหนดสมมุติฐานหรือการดำเนินการวิจัย เพื่อให้ตรงตามวัตถุประสงค์ของงานศึกษาวิจัยที่กำหนดไว้

ในการศึกษาวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. ทฤษฎีการรังวัดด้วยภาพถ่าย (Photogrammetry)
2. การรังวัดด้วยดาวเทียมระบบ GNSS
3. อากาศยานไร้คนขับ (UAV: Unmanned Aerial Vehicle)
4. การหาค่าความถูกต้องจากการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ
5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ทฤษฎีการรังวัดด้วยภาพถ่าย (Photogrammetry)

การรังวัดด้วยภาพ (Photogrammetry) เป็นศาสตร์และเทคโนโลยีหนึ่งสำหรับการสำรวจรังวัดเพื่อทำแผนที่และผลิตเป็นข้อมูลภูมิสารสนเทศ การรังวัดด้วยภาพจะใช้ภาพเป็นสื่อกลางในการรังวัดโดยภาพจะบันทึกสิ่งที่ปรากฏอยู่บนภูมิประเทศ สิ่งปกคลุมดิน หรือวัตถุที่สนใจ โดยภาพของวัตถุดังกล่าวนั้นจะปรากฏอยู่ในลักษณะการจำลองแบบตามหลักการฉายของแสงด้วยวิธีทางกลไก เชิงทัศน หรือเชิงคณิตศาสตร์ ทำให้สามารถจำลองสถานการณ์เหมือนขณะที่บันทึกภาพได้ ผลลัพธ์ที่ได้จากการรังวัดด้วยภาพจะได้ทั้งพิกัดของตำแหน่งวัตถุ ขนาด และรูปร่างสามมิติโดยผู้ที่รังวัดไม่จำเป็นต้องเข้าไปสัมผัสวัตถุนั้นโดยตรง (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2555b)

การรังวัดด้วยภาพดิจิทัลเริ่มต้นด้วยการเปลี่ยนภาพถ่ายทางอากาศที่อยู่บนฟิล์มเนกาตีฟหรือไดอะพอซิตีฟให้เป็นภาพถ่ายเชิงเลข หรือภาพถ่ายดิจิทัลด้วยประสิทธิภาพของกล้องดิจิทัลที่สามารถบันทึกภาพด้วยความละเอียดสูง มีซอฟต์แวร์ที่มีขีดความสามารถในการประมวลผลได้อย่างสะดวกและซับซ้อน

1.1 การรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ (UAV Photogrammetry)

การรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับใช้หลักการรังวัดด้วยภาพดิจิทัล (Digital Photogrammetry) เป็นการรังวัดที่ประยุกต์มาจากการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศ (Photogrammetry) โดยนำเอาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และการประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing) มาใช้ในกระบวนการรังวัดและประมวลผลอาศัยการคำนวณเชิงเลขเป็นหลัก การนำคอมพิวเตอร์ซอฟต์แวร์มาช่วยในการรังวัดสามารถลดความผิดพลาด ความเห็น้อยล้าของมนุษย์ในการทำงานได้ ขั้นตอนการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับมีดังต่อไปนี้

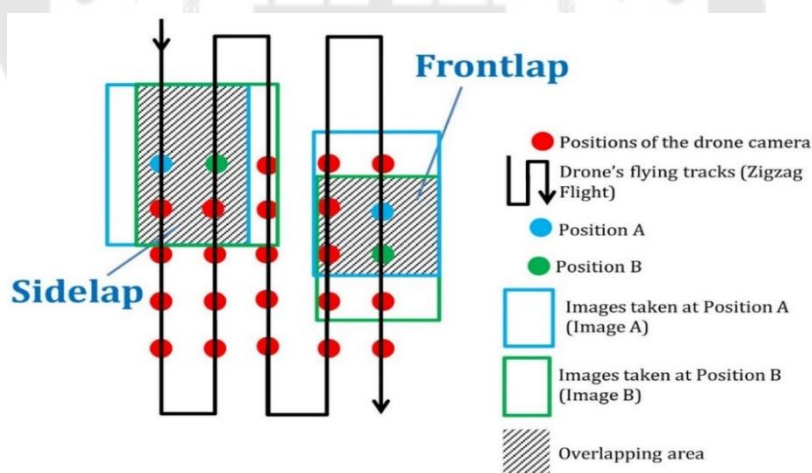
1.1.1 วางแผนการบิน

ในการบินถ่ายภาพบริเวณใดบริเวณหนึ่ง จำเป็นต้องมีการวางแผนก่อนการบินถ่ายภาพเพื่อจะได้ตรงตามวัตถุประสงค์ของงาน มักจะทำในสำนักงานก่อนที่จะมีการบิน สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการวางแผนการบิน เช่น กำหนดขอบเขตศึกษาลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ มาตราส่วนของภาพถ่าย รวมทั้งพิจารณาความละเอียดและความถูกต้องของข้อมูลที่ต้องการเพื่อกำหนดความสูงบิน และรูปแบบการบินที่เหมาะสม พร้อมทั้งกำหนดส่วนซ้อนระหว่างภาพ (Overlap) และส่วนซ้อนระหว่างแนวบิน (Sidelap) เพื่อให้ภาพที่ได้สามารถนำมาประมวลผลได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากในพื้นที่ที่ต้องการทำแผนที่หรือทำการวัดตำแหน่ง ขนาด รูปร่าง ของวัตถุด้วยวิธีการรังวัดด้วยภาพ ขอบเขตของภูมิประเทศหรือวัตถุจะไม่สามารถบันทึกให้เห็นปรากฏได้บนภาพเพียงภาพเดียว เนื่องจากข้อจำกัดขนาดของภาพถ่ายทางอากาศ โดยเฉพาะการวัดพิกัดวัตถุหนึ่งจะต้องวัดจากภาพคู่สามมิติ ซึ่งเป็นการวัดจุดเดียวกันบนภูมิประเทศ และจุดนั้นต้องปรากฏบนภาพทั้งสองพร้อมกันจึงจะสามารถคำนวณค่าพิกัดได้ เรายกณิธของภาพวัตถุที่ปรากฏจะสามารถพิจารณาความละเอียดถูกต้องได้ ดังนั้นจำเป็นต้องให้ภาพที่ปรากฏมีความชัดเจนสม่ำเสมอทุกภาพ

การเลือกพื้นที่ในการบินถ่ายภาพจะต้องเป็นพื้นที่ที่มีขนาดมากเพียงพอที่จะสามารถปล่อยอากาศยานหรือให้อากาศยานลงจอดได้อย่างปลอดภัย

การถ่ายภาพทางอากาศเพื่อใช้ในงานแผนที่จะถ่ายภาพให้มีส่วนซ้อนระหว่างภาพ (Overlap) $60 \pm 5\%$ เพื่อที่จะครอบคลุมให้พื้นที่สำหรับภาพสามมิติต่อเนื่องกันไป และป้องกันผลกระทบอันเนื่องมาจากความเบน (crab) ความเอียง ความต่างระดับบิน และความแตกต่างของระดับภูมิประเทศ ส่วนซ้อนระหว่างแนวบิน (Sidelap) มีความจำเป็นเพื่อไม่ให้เกิดช่องโหว่ระหว่างแนวบิน ซึ่งมีผลมาจากการบินออกจากแนว (Drift) ความเบน (Crab) ความเอียง ความแตกต่างของระดับบิน และความแตกต่างของระดับภูมิประเทศ ซึ่งโดยปกติจะถ่ายภาพให้มีส่วนซ้อนระหว่างแนวบิน (Sidelap) ประมาณ 30 % (กิตติศักดิ์ ศรีกลาง, ม.ป.ป)

แต่การสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับควรกำหนดให้มีส่วนซ้อนมากกว่าการบินถ่ายภาพปกติ เนื่องจากอากาศยานไร้คนขับใช้หลักการประมวลผลจุดภาพ เป็นการจับคู่จุดที่เหมือนกันบนคู่ภาพมาพิจารณา เรียกว่า การจับคู่ภาพ (image matching) โดยจะตรวจจับจุดที่เหมือนกันนับพัน ๆ จุดในแต่ละภาพโดยอัตโนมัติ หากพบว่ามีจุดสำคัญสองจุดบนภาพสองภาพที่เหมือนกัน จุดสองจุดนั้นจะกลายเป็น keypoints ที่จับคู่กันอย่างถูกต้อง จากนั้นคอมพิวเตอร์จะสกัดรายละเอียดของจุดภาพจากจำนวน keypoints ทั้งหมดที่ตรงกันและนำมาสร้างเป็นแบบจำลอง 3 มิติ keypoints ที่ถูกจับคู่นั้นจะสามารถตรวจพบได้เฉพาะในพื้นที่ที่ทับซ้อนกันระหว่างภาพต่างๆ พื้นที่ที่ทับซ้อนกันที่ใหญ่ขึ้น ยิ่งจะมี keypoints ที่มากขึ้น ดังภาพประกอบ 3 และถ้ามี keypoints มากขึ้นเท่าไรแบบจำลอง 3 มิติ ก็จะมีมีความแม่นยำยิ่งขึ้นเท่านั้น จึงจำเป็นต้องมีส่วนซ้อนระหว่างภาพ (Overlap) สูงถึงร้อยละ 80 หรือมากกว่า และส่วนซ้อนระหว่างแนวนอน (Sidelap) สูงถึงร้อยละ 60 หรือมากกว่า (อัจริยะ มีชัยพิทักษ์สกุล และคณะ, 2558) เพื่อให้มีจำนวนภาพที่มีภาพของวัตถุเดียวกันปรากฏอยู่มากขึ้นเป็นการให้เรขาคณิตของการทำงานโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ (Aerial Triangulation) ได้ผลที่ดีและครอบคลุมภูมิประเทศ

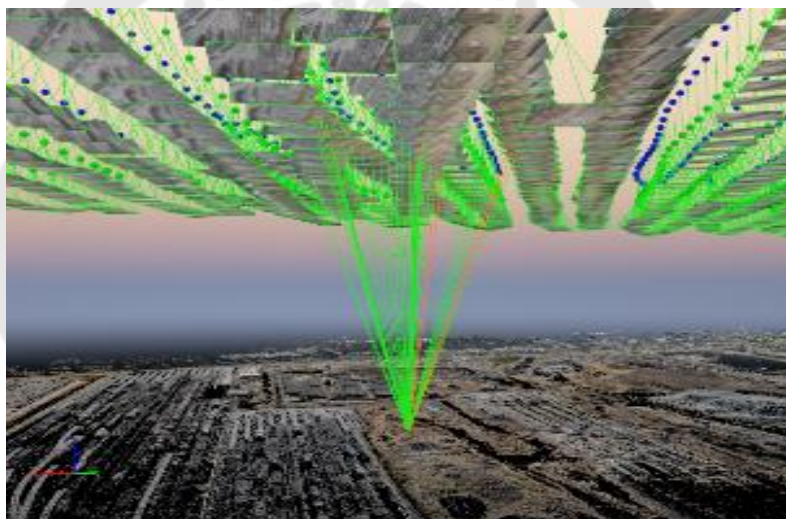


ภาพประกอบ 3 ส่วนซ้อนระหว่างภาพ (Overlap หรือ Frontlap) ส่วนซ้อนระหว่างแนวนอน (Sidelap) และจุดเปิดถ่ายภาพ

ที่ มา : Ji, K. (2017). What is the 'overlapping'? And why is it so critical in 3 D reconstruction? Retrieved from <https://blog.altizure.com/what-does-overlap-really-mean-in-3-d-modelling-cf8d321bf25>

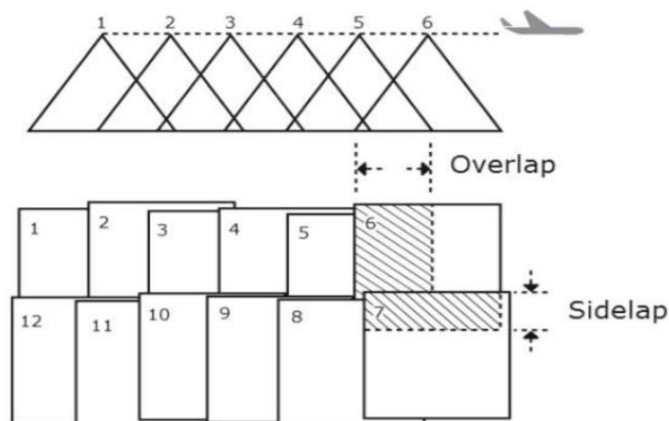
จากภาพประกอบ 3 ส่วนซ้อนระหว่างแนวนอน (Sidelap) หมายถึง เปอร์เซ็นต์ การซ้อนทับกันระหว่างภาพถ่ายบินที่ต่างกัน มีขนาดภาพที่เท่ากัน แสดงโดยรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ ถูกบันทึกภาพในแต่ละจุด จุดสีน้ำเงิน หมายถึง ตำแหน่ง A ในขณะที่จุดสีเขียว หมายถึง ตำแหน่ง B พื้นที่แรเงา หมายถึง พื้นที่ทับซ้อนกันระหว่างภาพ A และ B. ดังนั้นหากพื้นที่แรเงาเป็น 80% ของ สี่เหลี่ยมผืนผ้า ส่วนซ้อนระหว่างแนวนอน (Sidelap) จะเป็น 80%

ส่วนซ้อนระหว่างภาพ (Overlap) หมายถึง เปอร์เซ็นต์การซ้อนทับกันระหว่าง ภาพหนึ่งภาพและภาพถัดไป ภาพทั้งสองภาพจะถูกถ่ายโดยอากาศยานไร้คนขับเมื่อบินไปในทิศทาง เดียวกัน ถ้าพื้นที่แรเงาในภาพเป็น 80% ของสี่เหลี่ยมผืนผ้า หมายความว่า ส่วนซ้อนระหว่างภาพ (Overlap) จะเป็น 80%



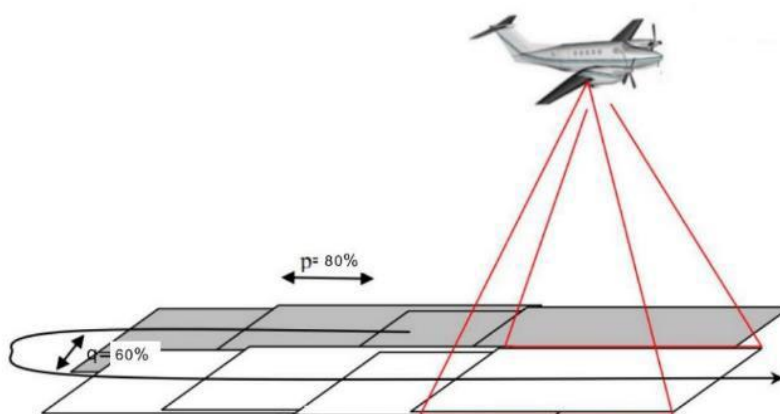
ภาพประกอบ 4 การปรากฏของจุดภาพวัตถุบนภาพถ่ายหลายใบ

ที่มา : วิชัย เยี่ยงวีรชน, และคณะ. (2560). การศึกษาการใช้อากาศยานไร้คนขับใน การทำแผนที่ภูมิประเทศ มาตราส่วน 1:4,000 และแนวทางการนับจำนวนและหาความสูงต้นไม้. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. หน้า 25.



ภาพประกอบ 5 การบินถ่ายภาพโดยใช้อากาศยานไร้คนขับมีส่วนซ้อนระหว่างภาพ (Overlap) และมีส่วนซ้อนระหว่างแนวนิน (Sidelap)

ที่มา: อัจฉริยะ มีชัยพิทักษ์สกุล, และคณะ. (2558). เอกสารสรุปผลการศึกษาค้นคว้าของกลุ่มรายวิชา โฟโตแกรมเมตรี (โฟโตแกรมเมตรีเชิงเลข) เรื่อง อากาศยานไร้คนขับกับงานโฟโตแกรมเมตรี. Retrieved from กรุงเทพฯ: หน้า25.



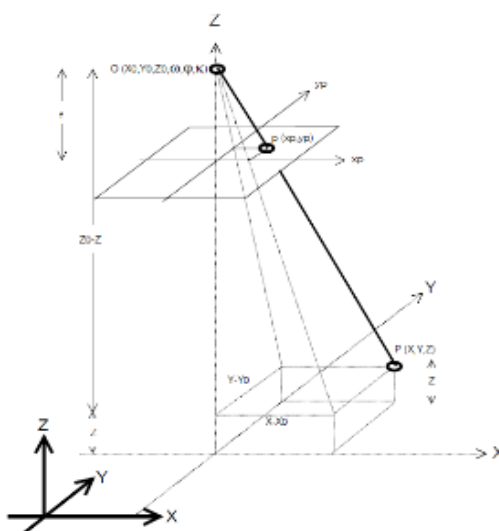
ภาพประกอบ 6 การบินถ่ายภาพโดยใช้อากาศยานไร้คนขับมีส่วนซ้อนระหว่างภาพ (Overlap) ร้อยละ 80 และมีส่วนซ้อนระหว่างแนวนิน (Sidelap) ร้อยละ 60

ที่มา : ไพศาล สันติธรรมนนท์. (2555a). การทำแผนที่และข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับชนิดเบา Mapping and Geodata Survey using light-weight UAV. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

การหาความสูงในการบินถ่ายภาพนั้น ส่วนใหญ่จะขึ้นอยู่กับ GSD ที่ต้องการและค่าคงที่ของกล้องซึ่งจะใช้หลักการเรขาคณิตภาพถ่ายคือ ภาพถ่ายเดี่ยวที่มีวางตัวตามอุดมคติคือ ภาพถ่ายที่ถูบบันทึกขณะที่แกนของกล้องถ่ายภาพตั้งฉากกับพื้นดิน แนวของกล้องในทิศทางที่ลากผ่านแกนพิกัดภาพถ่ายแกน x ขนานกับแกน X ของระบบพิกัดภาพพื้นดิน และเช่นเดียวกันแกนพิกัดภาพถ่ายแกน y ขนานกับแกน Y ของระบบพิกัดภาพพื้นดิน ค่าการวางตัวเป็นศูนย์นั้นคือไม่มีความเอียงของกล้องแสดงได้ดังภาพประกอบ 7 ดังนั้นการคำนวณความสูงในการบินถ่ายภาพได้จากค่าความยาวโฟกัสของกล้องถ่ายภาพ (Focus Length) ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) และค่าความละเอียดของจุดภาพ (Image Resolution) แสดงดังภาพประกอบ 7

$$\text{จากภาพประกอบ 7 ความสูงในการบินถ่ายภาพ (เมตร) = } \frac{\text{ความยาวโฟกัสของกล้องถ่ายภาพ (เมตร)} \times \text{ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (เมตร)}}{\text{ความละเอียดของจุดภาพ (เมตร)}}$$

(1)



ภาพประกอบ 7 ความสัมพันธ์ของพิกัดบนภาพถ่ายทางอากาศและพิกัดบนวัตถุ

ที่มา : ไพศาล สันติธรรมนนท์. (2555b). การรังวัดด้วยภาพดิจิทัล = Digital photogrammetry (พิมพ์ครั้งที่ 2 ฉบับปรับปรุงแก้ไข ed.). กรุงเทพฯ: กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินจะเป็นตัวกำหนดค่าความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้และการวัดจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินบนภาพ ฉะนั้นค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินสูงจะให้ความถูกต้องของผลลัพธ์สูงกว่าค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินต่ำ อย่างไรก็ตาม การบินต่ำเพื่อให้ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินสูง จะทำให้ใช้เวลาในการบินมากขึ้น หากพื้นที่มีขนาดใหญ่ต้องใช้แบตเตอรี่ จำนวนมากและต้องทำการบินหลายรอบ ดังนั้น ขนาดค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินจึงเป็นปัจจัยหนึ่งในการกำหนดความถูกต้องทางตำแหน่งของผลลัพธ์ที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ (วิชัย เยี่ยงวีรชน และคณะ, 2560)

ส่วนการวางแผนรูปแบบการบินของอากาศยานไร้คนขับจะนิยมถ่ายภาพเป็นบล็อกสี่เหลี่ยมมุมฉากมากกว่ารูปร่างหักมุมไปมา เพราะจะทำให้ความแข็งแรงของการโยงยึดภาพในบล็อกภาพถ่ายดีกว่ารูปแบบอื่น ที่สำคัญจะช่วยลดจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินให้น้อยลง ซึ่งรูปแบบการบินที่พบได้บ่อย ได้แก่

- 1) รูปแบบการบินทั่วไป คือ รูปแบบการบินที่กำหนดแนวนบินไปกลับวนเป็นลำดับกัน ดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 รูปแบบการบินทั่วไป

ที่มา : วิชัย เยี่ยงวีรชน, และคณะ. (2560). การศึกษาการใช้อากาศยานไร้คนขับในการทำแผนที่ภูมิประเทศ มาตราส่วน 1:4,000 และแนวทางการนับจำนวนและหาความสูงต้นไม้. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. หน้า 26.

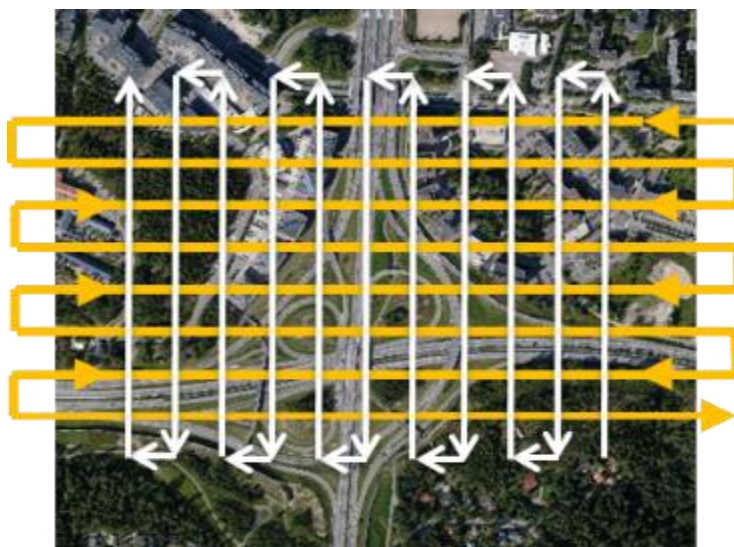
2) รูปแบบการบินสลับแนว คือ รูปแบบการบินที่กำหนดแนวบินไปกลับวนในลักษณะแนวเว้นแนว และบินกลับมาถ่ายภาพแทรกระหว่างแนวที่เหลือ เนื่องจากระยะระหว่างแนวบินอยู่ชิดกันและอากาศยานไร้คนขับ ต้องใช้วงเลี้ยวกว้างทำให้การบินตามแนวคู่ลำดับกันไม่สะดวกและใช้เวลามาก ดังภาพประกอบ 9



ภาพประกอบ 9 รูปแบบการบินสลับแนว

ที่มา : วิชัย เยี่ยงวีรชน, และคณะ. (2560). การศึกษาการใช้อากาศยานไร้คนขับในการทำแผนที่ภูมิประเทศ มาตรฐาน 1:4,000 และแนวทางการนับจำนวนและหาความสูงต้นไม้. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. หน้า 26.

3) รูปแบบการบินแบบกริด คือ รูปแบบการบินที่กำหนดการบิน 2 รอบ โดยให้แต่ละรอบมีแนวบินตัดกันเหมือนตารางกริด การบินลักษณะนี้ทำให้ได้ข้อมูลภาพที่เก็บรายละเอียดจากหลายมุมมอง ทำให้การประมวลผลภาพจะได้คุณภาพดีขึ้นและสามารถสร้างโมเดล 3 มิติที่มีความถูกต้องมากขึ้นได้ แต่ทำให้ใช้เวลาในการบินมากขึ้น 2 เท่า และมีจำนวนภาพมาก ใช้เวลาในการประมวลผลมากยิ่งขึ้น เหมาะสำหรับงานที่ต้องการละเอียดถูกต้องสูง ดังภาพประกอบ 10



ภาพประกอบ 10 รูปแบบการบินแบบกริด

ที่มา : วิชัย เยี่ยงวีรชน, และคณะ. (2560). การศึกษาการใช้อากาศยานไร้คนขับในการทำแผนที่ภูมิประเทศ มาตราส่วน 1:4,000 และแนวทางการนับจำนวนและหาความสูงต้นไม้. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. หน้า 27.

1.1.2 การวัดสอบกล้องถ่ายภาพ

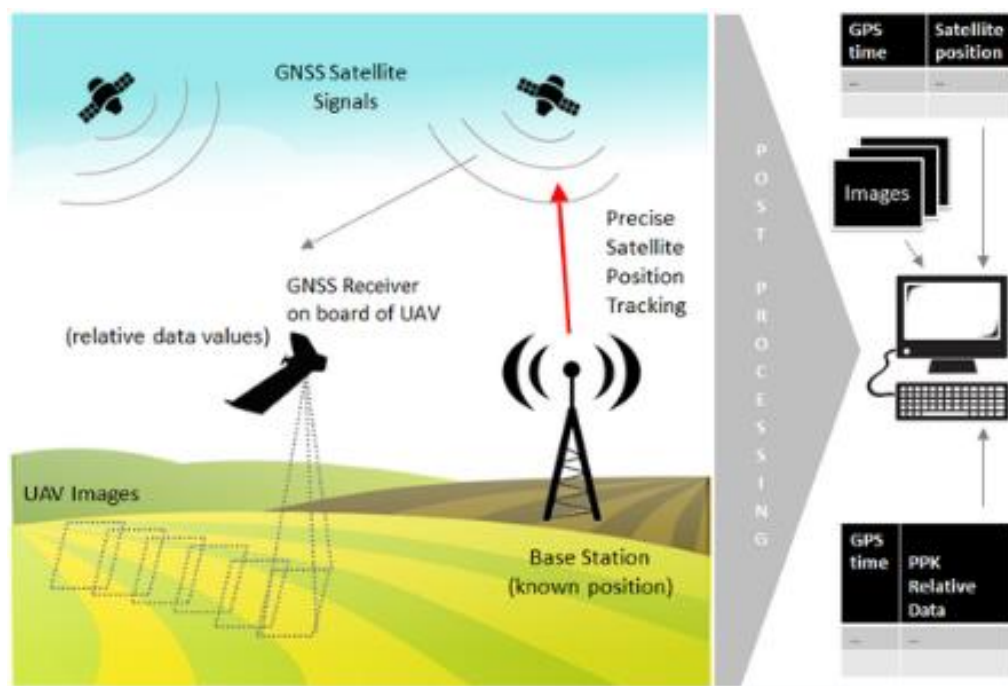
การวัดสอบกล้องถ่ายภาพเป็นขั้นตอนที่มีผลกระทบอย่างมากต่อความถูกต้องของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ เป็นขั้นตอนการวัดสอบทางเรขาคณิตทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์สำหรับการวางทิศทางภายใน (Interior Orientation) ของคุณลักษณะเฉพาะของกล้องถ่ายภาพ ได้แก่ ค่าความยาวโฟกัส (calibrated focal length) ค่าพิกัดตำแหน่งจุดมูขยสำคัญ (principle point position) ค่าความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมีและแนวสัมผัส (radial lens distortion and tangential lens distortion) เนื่องจากกล้องที่ใช้เป็นกล้องถ่ายภาพทั่วไปไม่ได้เป็นกล้องประเภทสำหรับงานการวัดด้วยภาพถ่าย (metric camera) ที่ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้ไม่มีความเสถียรเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งสามารถใช้วิธีทำการวัดสอบทุกครั้งก่อนการใช้งาน (pre-calibration) หรือจะใช้วิธีการวัดสอบไปพร้อมกับการประมวลผลภาพที่เรียกว่า (self-calibration) (วิชัย เยี่ยงวีรชน และคณะ, 2560)

1.1.3 กำหนดตำแหน่งจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน

จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน คือ จุดใด ๆ บนภาพถ่ายที่มีลักษณะเด่นชัด ทราบค่าพิกัดในระบบพิกัดภูมิศาสตร์ สามารถชี้ชัดทางตำแหน่งได้อย่างชัดเจนบนภาพและในสนาม เป็นตัวกลางที่ทำให้สามารถจัดภาพให้มีความสัมพันธ์อ้างอิงกับพื้นผิวภูมิประเทศ เมื่อลงไป ในสนามจุดดังกล่าวก็จะสามารถค้นหาได้ง่าย มีการไปรังวัดในสนามด้วยเครื่องมือและวิธีการที่ให้ความละเอียดถูกต้องสูงในระดับที่สามารถนำมาควบคุมงานโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ จะทำให้ภาพ มีความละเอียดถูกต้องสูงมากยิ่งขึ้น ในทางปฏิบัติ หากว่าจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน ปรากฏบน ภาพถ่ายมากกว่า 2 ภาพยังเป็นผลดี เนื่องจากทำให้สามารถวัดค่าพิกัดภาพถ่ายได้เพิ่มขึ้น ผลการคำนวณปรับแก้มีความละเอียดถูกต้องและน่าเชื่อถือมากขึ้นไปด้วย

จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินมีความสำคัญต่อความสำเร็จของงานรังวัดด้วย ภาพอย่างยิ่ง ค่าความถูกต้องพิกัดของจุดควบคุมภาคพื้นดินจะถูกถ่ายทอดเข้าไปในระบบสมการของการ คำนวณปรับแก้ในบล็อกของภาพถ่าย หากมีจำนวนจุดพิกัดควบคุมภาคพื้นดินมากจะทำให้ผลลัพธ์ มีความถูกต้องน่าเชื่อถือ อย่างไรก็ตาม จำนวนจุดพิกัดควบคุมภาคพื้นดินมากไม่ได้ทำให้มี ความถูกต้องเสมอไป ถ้าเป็นตำแหน่งที่วางไม่ชัดเจนหรือรังวัดค่าพิกัดไม่ถูกต้อง จะทำให้เกิด ค่าความคลาดเคลื่อน (error) เกิดขึ้น ดังนั้นการเลือกตำแหน่งและจำนวนของจุดควบคุมภาพถ่าย ภาคพื้นดินจึงเป็นเรื่องสำคัญ จะต้องมีความไม่มากจนทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่ไม่จำเป็น ขณะเดียวกันก็ ต้องให้การคำนวณปรับแก้มีผลลัพธ์ที่ถูกต้องสูงพอสมควร

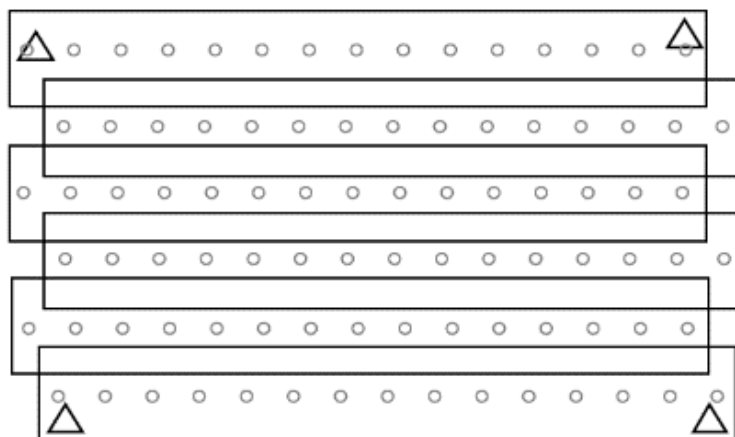
การกำหนดจุดควบคุมภาพถ่ายในบล็อกจีพีเอสที่มีการใช้เครื่องรับสัญญาณ GNSS เพื่อให้หาพิกัดของจุดเปิดถ่ายขณะที่บินถ่ายภาพ ในเวลาเดียวกันบนภาคพื้นดินในระยะห่างไม่เกิน 40 – 60 กิโลเมตร มีการตั้งรับสัญญาณ GNSS บนจุดควบคุมที่ทราบค่าพิกัดอ้างอิง เรียกว่า สถานีฐาน ค่าพิกัดของจุดเปิดถ่ายภาพที่รังวัดด้วย GNSS บนเครื่องบินและข้อมูลที่ได้รับจากสถานีฐาน จะถูกนำมา คำนวณปรับแก้เข้ากับระบบสมการทำให้การคำนวณปรับแก้มีความเชื่อถือได้สูง เปรียบเสมือนมีจุด ควบคุมภาพถ่ายภาคอากาศอยู่บนภาพถ่ายทุกรูป ทำให้สามารถลดจำนวนจุดควบคุมภาคพื้นดิน (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2555a)



ภาพประกอบ 11 การตั้งรับสัญญาณ GNSS บนจุดควบคุมที่ทราบค่าพิกัดอ้างอิง เรียกว่า สถานีฐาน ค่าพิกัดของจุดเปิดถ่ายภาพที่รันด้วย GNSS บนเครื่องบินและข้อมูลที่รับได้จากสถานีฐาน จะถูกนำมาคำนวณปรับแก้เข้ากับระบบสมการทำให้การคำนวณปรับแก้มีความเชื่อถือได้สูง

ที่ ม ๑ : Aerial Surveying: What is GPS, GNSS, RTK, PPK. Retrieved from <https://www.uasimagery.com/map-accuracy-for-aerial-surveying/>

ตำแหน่งของจุดควบคุมภาพถ่ายในบล็อกจีพีเอส ถ้าพื้นที่ที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าจำเป็นจะต้องมีจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน 5 จุด คือ บริเวณมุมพื้นที่ทั้ง 4 จุดและกลางพื้นที่ 1 จุด ถ้ามีหลายเที่ยวบิน (Flight) ต้องมีจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินในพื้นที่ส่วนซ้อนระหว่างบล็อก ลักษณะของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินสามารถกำหนดจุดในพื้นที่ที่สามารถชี้ได้ชัดเจนกับภาพถ่าย เช่น มุมเส้นจราจร มุมรั้ว จุดตัดทางร่วมทางแยก เป็นต้น หรือจะสร้างจุดเป้าที่มีขนาดไม่น้อยกว่า 15–25 พิกเซลขึ้นมา จำนวนและตำแหน่งจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินที่เหมาะสมและประหยัดต่อการดำเนินการจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการศึกษาวิจัยถึงความถูกต้องของภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ



ภาพประกอบ 12 ตำแหน่งและจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินสำหรับบล็อกจีพีเอส

ที่มา : ไพศาล สันติธรรมนนท์. (2555b). การรังวัดด้วยภาพดิจิทัล = Digital photogrammetry (พิมพ์ครั้งที่ 2 ฉบับปรับปรุงแก้ไข ed.). กรุงเทพฯ: กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

หลักเกณฑ์และวิธีคำนวณจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินอย่างน้อยที่สุด จะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงลักษณะของภูมิประเทศ จะใช้สมการดังนี้

$$\frac{(t + 1)(t + 2)}{2} \quad (2)$$

โดยที่ t เป็นเลขยกกำลัง ถ้าลักษณะเป็นพื้นที่ราบการเปลี่ยนแปลง ลักษณะของภูมิประเทศมีน้อยจะใช้สมการเลขยกกำลัง 1 ถ้าพื้นที่เป็นเชิงเขา มีความต่างระดับ จะใช้สมการเลขยกกำลัง 2 ถ้ามีลักษณะเป็นภูเขา ก็จะใช้สมการเลขยกกำลัง 3.. (ERDAS, 2010)

ตาราง 1 เลขยกกำลังที่ใช้คำนวณหาจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินที่น้อยที่สุด

ลักษณะ ภูมิประเทศ	t เป็นเลข ยกกำลัง	จำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน ที่น้อยที่สุด
ที่ราบ	1	3
ที่ราบสูง	2	6
เนินเขา	3	10
ภูเขา	4	15

ที่มา : ERDAS, I. (2010). Polynomial Transformation. Retrieved from ftp://ftp.ecn.purdue.edu/jshan/ERDAS_Library/2011help/html/FieldGuide/wwhelp/wwhimpl/common/html/wwhelp.htm?context=FieldGuide&file=Polynomial_Transformation.html

1.1.4 บินถ่ายภาพ

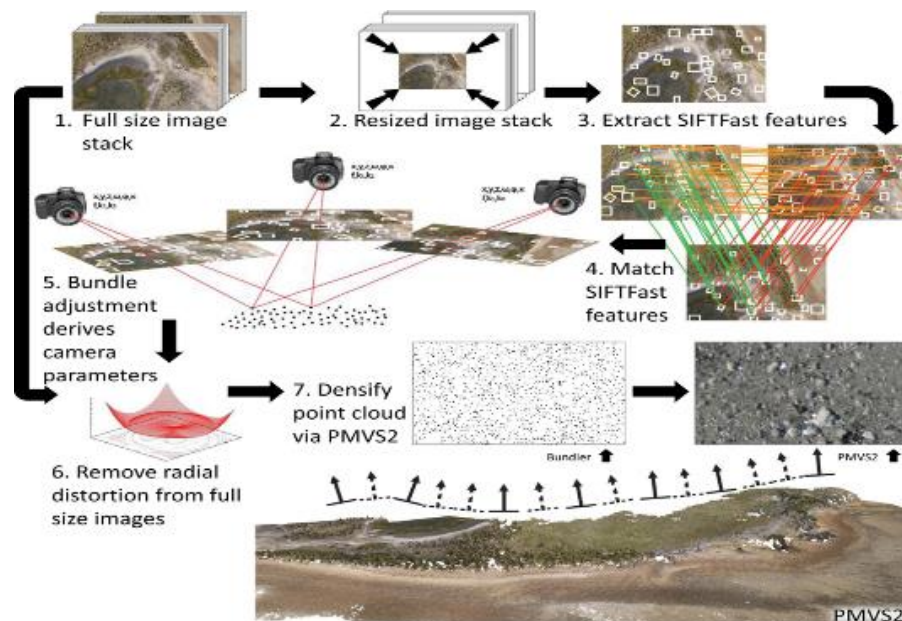
เมื่อได้ทำการวางแผนการบินถ่ายภาพทางอากาศแล้ว โดยทั่วไปจะเริ่มดำเนินการบินบันทึกภาพ ขณะบินถ่ายภาพข้อมูลการบิน เช่น ตำแหน่ง ความสูง จะถูกส่งมายังสถานีภาคพื้นดิน การบินถ่ายภาพในอุดมคติควรจะบันทึกภาพให้อยู่ในแนวตั้งเสมอ เพื่อให้ส่วนซ้อนด้านหน้าและด้านหลังเป็นไปตามที่วางแผนไว้ ดังนั้นจึงต้องมีการรักษาเรขาคณิตของภาพถ่ายดี จะทำให้ได้ภาพที่มีคุณภาพและได้ภาพถ่ายครอบคลุมพื้นที่ตามที่ต้องการ

1.1.5 ประมวลผลภาพ

การประมวลผลภาพด้วยซอฟต์แวร์ต้องมีข้อมูลนำเข้า คือ ข้อมูลภาพ (Image File) ข้อมูลตำแหน่งและการเอียงตัวของอากาศยานไร้คนขับ ในกรณีที่ต้องการแผนที่ที่มีความถูกต้องสูง จำเป็นต้องนำเข้าจุดควบคุมภาพถ่ายเพื่อใช้ในการประมวลผล การประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์จะเป็นไปอย่างอัตโนมัติ โดยใช้เทคนิคทางด้านการประมวลผลจุดภาพ (Image processing) และคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer vision) ประกอบด้วยทฤษฎีการจับคู่จุดภาพ (Image matching) ในขั้นตอน auto tie point ด้วยอัลกอริทึม “Scale-Invariant Feature Transform” (SIFT) ที่เป็นการหาตำแหน่งจุดพิกัดบนพื้นดิน ซึ่งเกิดจากรังสีแสงจากจุดเปิดถ่าย ผ่านจุดภาพจากภาพถ่ายหลายใบมาตัดกัน ที่เรียกว่า การเล็งสกัดจากภาพถ่าย (photo intersection) ร่วมกับการคำนวณปรับแก้เพื่อให้ได้ตำแหน่งจุดตัดกันของแนวลำแสงที่ดีที่สุด และทฤษฎีการประมวลผลBundle (กรีซีย์ เยียงวีรชน และคณะ. 2560)

แล้วไปสร้างโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ (Aerial Triangulation) อัตโนมัติ เพื่อคำนวณหา
ค่าองค์ประกอบการจัดค่าภายนอก (Exterior Orientation Parameters) ของภาพทุกภาพ และได้ผลลัพธ์
ออกมาเป็นภาพออร์โธ (Orthophoto) แบบจำลองความสูงพื้นผิวภูมิประเทศ (DSM) และข้อมูลกลุ่ม
จุดความสูงสามมิติ (3D Point Cloud) ดังนั้นความแม่นยำในการจับคู่จุดภาพในขั้นตอนการทำ auto tie
point ถือเป็นปัจจัยหนึ่งในการกำหนดความถูกต้องทางตำแหน่งของผลลัพธ์ที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ
ขั้นตอนการประมวลผลภาพจากอากาศยานไร้คนขับ มีขั้นตอนดังนี้

- 1) ภาพที่บันทึกได้จะมีความละเอียดสูงมีขนาดเซ็นเซอร์เต็มเฟรม (full frame)
- 2) ลดขนาดภาพเพื่อให้การประมวลผลเร็วขึ้น หรือใช้เนื้อที่ภาพในการประมวลผลบางส่วน เช่น 1/8, 1/4 และ 1/2 ของภาพ ซึ่งการใช้ทั้งภาพจะได้เนื้อที่ครอบคลุมภาพที่มากขึ้น ใช้เวลาในการประมวลผลนานขึ้น แต่จะให้ผลลัพธ์ที่ดีมากขึ้น
- 3) สกัดรายละเอียดจุดภาพที่ชัดเจนเพื่อใช้กับอัลกอริทึม SIFT
- 4) จับคู่จุดภาพของรายละเอียดจุดภาพที่สกัดได้ในแต่ละภาพที่ตรงกันด้วยอัลกอริทึม SIFT
- 5) ประมวลผลภาพเพื่อคำนวณค่าพารามิเตอร์ของกล้องด้วยวิธีการปรับแก้แบบลำแสง (bundle adjustment)
- 6) ตรวจแก้ค่าความเพี้ยนของเลนส์ออกจากภาพ
- 7) คำนวณค่าพิกัด 3 มิติความหนาแน่นสูงจากจุดภาพวัตถุ เพื่อประกอบขึ้นเป็นแบบจำลองสามมิติ เรียกว่า พอยต์คลาวด์ (point cloud) แบบจำลองความสูงพื้นผิวภูมิประเทศ (DSM) และภาพออร์โธ (Orthophoto)



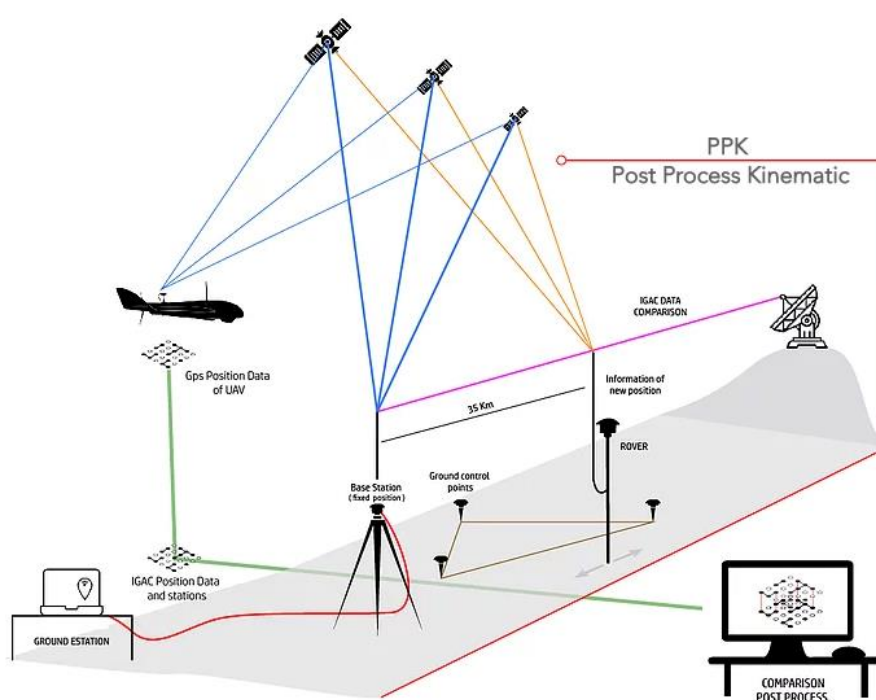
ภาพประกอบ 13 ขั้นตอนการประมวลผลภาพจากอากาศยานไร้คนขับ

ที่มา : วิชัย เยี่ยงวีรชน, และคณะ. (2560). การศึกษาการใช้อากาศยานไร้คนขับในการทำแผนที่ภูมิประเทศ มาตราส่วน 1:4,000 และแนวทางการนับจำนวนและหาความสูงต้นไม้. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. หน้า 27

กลุ่มข้อมูลพอยต์คลาวด์จะมีค่าสี RGB ทำให้สามารถมองกลุ่มข้อมูลพอยต์คลาวด์เหล่านี้เป็นแบบจำลองสามมิติได้ แบบจำลองที่ได้นี้ยังไม่มีขนาดมาตราส่วนและการวางตัวที่ถูกต้อง จึงต้องทำการยึดโยงระบบพิกัดของแบบจำลองสามมิติเข้ากับระบบพิกัดพื้นดิน (model georeferencing) โดยสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1) การยึดโยงโดยอ้อม (Indirect georeferencing) เป็นการยึดแบบจำลองสามมิติของพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการประมวลผลเข้ากับจุดพิกัด 3 มิติที่ได้จากการรังวัดจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน วิธีนี้จะนิยมใช้กันทั่วไปเนื่องจากอากาศยานไร้คนขับที่ใช้ส่วนใหญ่จะมีค่าพิกัดของจุดเปิดถ่ายภาพที่ได้จากอุปกรณ์การบินอัตโนมัติ (autopilot) ที่มีความถูกต้องทางตำแหน่งต่ำในระดั ±10 เมตร ดังนั้นจำนวนและตำแหน่งของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน จึงมีความสำคัญต่อความถูกต้องของภาพที่ได้ (วิชัย เยี่ยงวีรชน และ และคณะ, 2560)

2) การยึดโยงโดยตรง (Direct geo-referencing) เป็นการใช้อากาศยานไร้คนขับที่มีการติดตั้งระบบหาพิกัดตำแหน่งของการบันทึกภาพแต่ละภาพด้วยวิธี RTK หรือ PPK ดังภาพประกอบ 14 จะทำให้ค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายของภาพถ่ายแต่ละภาพมีความถูกต้องสูง ทำให้การประมวลผลภาพไม่ต้องใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน ผลลัพธ์ที่ได้จะมีความถูกต้องทางตำแหน่งสูง (วิชัย เยี่ยงวีรชน และ และคณะ, 2560)



ภาพประกอบ 14 การยึดโยงโดยตรง (direct geo-referencing)

ที่มา : Sky-watch. New Hardware – Higher Accuracy. Retrieved from <http://sky-watch.com/new-hardware-higher-accuracy/>

2. การรังวัดด้วยดาวเทียมระบบ GNSS

GNSS ย่อมาจาก Global Navigation Satellite System คือ ระบบนำหนด้วยดาวเทียม เพื่อใช้ในการกำหนดพิกัดตำแหน่งบนพื้นผิวโลก ปัจจุบันระบบดาวเทียม GNSS ได้เข้ามามีบทบาทอย่างยิ่งในงานสำรวจรังวัดพิกัดตำแหน่ง เป็นระบบที่สามารถใช้ได้ทุกพื้นที่ทั่วโลก ประกอบด้วยเครือข่ายของดาวเทียมที่โคจรรอบโลกและส่งสัญญาณรหัสข้อมูลอย่างต่อเนื่อง เครื่องรับสัญญาณจะทำการรับสัญญาณและประมวลผลให้ตำแหน่ง ความเร็ว และเวลา โดยสามารถให้ความถูกต้อง

ในระดับ 10 เซนติเมตร ถึง 10 เมตร สำหรับการประมวลผลแบบทันที (real time) และในระดับ มิลลิเมตร สำหรับการประมวลผลแบบภายหลัง (post-process)

ระบบดาวเทียม GNSS มีหลายระบบ ได้แก่ GPS, GLONASS, Galileo และ Compass ทั้งนี้ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจะรับสัญญาณจากระบบใดได้บ้างขึ้นอยู่กับ การออกแบบของ เครื่องนั้น (วิชัย เยี่ยงวีรชน, 2558)

วิธีการวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS สามารถแบ่งได้ดังนี้

1) การวัดแบบสถิต (Static GPS) คือ การวัดโดยใช้เครื่องรับสัญญาณอย่างน้อย 2 เครื่อง โดยเครื่องหลักหรือสถานีฐาน (Base station) จะถูกวางไว้บนหมุดที่ทราบค่าพิกัดแล้ว ส่วนเครื่องรับเครื่องที่สองจะถูกนำไปวางรับสัญญาณตามจุดที่ต้องการหาพิกัด วิธีนี้เครื่องรับสัญญาณทั้งสองสถานีจะต้องรับข้อมูลจากดาวเทียมกลุ่มเดียวกันและช่วงเวลาเดียวกันอย่างน้อย 4 ดวง และต้องตั้งอยู่กับที่เป็นระยะเวลาหนึ่งๆ โดยทั่วไปอยู่ระหว่าง 1-2 ชั่วโมง วิธีนี้จะได้ ค่าความถูกต้องที่สุด โดยเริ่มตั้งแต่ 5 มิลลิเมตร ถึง 2.5 เซนติเมตร (สำหรับเส้นฐานที่มีความยาว ไม่เกิน 20 กิโลเมตร) ทั้งนี้ระยะเวลาการทำการวัดจะมากขึ้นเมื่อระยะทางระหว่างเครื่องหลักและ เครื่องรับเครื่องที่สองมีระยะทางมากขึ้น

2) การวัดแบบสถิตอย่างรวดเร็ว (Fast Static หรือ Rapid Static) คือ การวัดแบบสถิต แต่ใช้เวลาในการวัดสั้นกว่า โดยใช้ระยะเวลาในการรับสัญญาณน้อยลงเหลือประมาณ 10 - 20 นาที วิธีนี้จะให้ค่าความถูกต้องระหว่าง 1 - 3 เซนติเมตร (สำหรับเส้นฐานที่ยาวไม่เกิน 5 - 10 กิโลเมตร)

3) การวัดแบบจลนในทันที (Real Time Kinematic หรือ RTK) เป็นวิธีการที่ทำให้หา ตำแหน่งของจุดจำนวนมากได้อย่างรวดเร็วโดยวิธีวัดจะคล้ายกับวิธีวัดแบบสถิต คือ ต้องใช้ เครื่องรับสัญญาณอย่างน้อย 2 เครื่อง โดยเครื่องหลักหรือสถานีฐาน จะถูกวางไว้บนหมุดที่ทราบ ค่าพิกัดแล้ว ส่วนเครื่องรับเครื่องที่สอง จะถูกนำไปวางรับสัญญาณตามจุดที่ต้องการหาพิกัดเพียง ช่วงระยะเวลาสั้น ๆ (10 - 30 วินาที) เท่านั้น แต่กรณีของวิธีการหาพิกัดแบบจลนในทันทีนั้น สามารถเคลื่อนย้ายเครื่องรับสัญญาณเครื่องที่สองได้ มีการติดตั้งอุปกรณ์สื่อสารระหว่าง เครื่องรับทั้งสอง การหาพิกัดของตำแหน่งจุดต่างๆ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่สถานีฐานและ สถานีผู้ใช้งานต้องรับข้อมูลจากดาวเทียมกลุ่มเดียวกันและช่วงเวลาเดียวกันอย่างน้อย 4 ดวง วิธีนี้ สามารถให้ค่าความถูกต้องในระดับ 1 - 5 เซนติเมตร (สำหรับเส้นฐานที่ยาวไม่เกิน 15 กิโลเมตร) (เฉลิมชนม์ สกิระพจน์, 2549)

ในการรังวัดค่าพิกัดจุดบังคับภาพถ่ายรวมทั้งจุดตรวจสอบความถูกต้อง เพื่อทำการวิเคราะห์ถึงค่าความถูกต้องที่ได้ โดยการรังวัดค่าพิกัดด้วยดาวเทียมนั้นสามารถใช้วิธีการรังวัดทั้งแบบสถิตอย่างเร็วและแบบจลน์ในทันที ซึ่งให้ค่าความถูกต้องเพียงพอสำหรับใช้เป็นจุดบังคับภาพถ่ายและจุดตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ (วิชัย เยี่ยงวีรชน และคณะ, 2560)

ตาราง 2 รายละเอียดการรังวัดหาค่าพิกัดด้วยดาวเทียม GNSS แบบต่างๆ

วิธีการรังวัด	วิธีการทำงานในสนาม	ค่าความถูกต้องที่ได้รับ
การรังวัดแบบสถิต	ตั้งเครื่องรับทั้งสองอยู่กับที่ ประมาณ 1-2 ชม. ต้องมีดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง	5 มม. – 2.5 ซม.
การรังวัดแบบสถิต อย่างรวดเร็ว	ตั้งเครื่องรับทั้งสองอยู่กับที่ ประมาณ 10-20 นาที ต้องมีดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง	1 - 3 ซม.
การรังวัดแบบจลน์ ในทันที	ตั้งเครื่องรับเครื่องแรกอยู่กับที่ เครื่องที่สองสามารถเคลื่อนย้ายไปตามจุดที่ต้องการหาค่าพิกัดได้รอบจุดละประมาณ 10-30 วินาที ต้องมีดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง	1 – 5 ซม.

ที่มา : วัลลพ ตาเขียว. (ม.ป.ป.). เอกสารประกอบวิชาการสำรวจด้วยดาวเทียม. กรมแผนที่ทหาร. หน้า 44

3. อากาศยานไร้คนขับ

3.1 ความหมายของอากาศยานไร้คนขับ

อากาศยานไร้คนขับ (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) หรือ Drone คือ อากาศยานที่ไม่ใช้นักบินบังคับอยู่บนเครื่อง โดยเครื่องบินจะถูกควบคุมให้บินได้อัตโนมัติด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งไว้บนอากาศยานตามแผนการบินที่กำหนดไว้ จะควบคุมจากระบบนำหน (Navigation System) หรือระบบการบินด้วยตนเอง (Manual System)

ประเภทของอากาศยานไร้คนขับที่ใช้ในงาน UAV Photogrammetry แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) อากาศยานไร้คนขับชนิดปีกตรึง (Fixed Wing) เป็นอากาศยานที่มีคุณลักษณะใกล้เคียงกับเครื่องบินจริง โดยทั่วไปใช้ระยะเวลาการบินประมาณ 40-60 นาที รัศมีการบินจึงครอบคลุมพื้นที่ได้มากกว่าอากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุน ในการลงจอดจะต้องอาศัยพื้นที่โล่งกว้างพอสมควร ยกเว้นบางประเภทที่เป็นแบบขึ้นลงแนวตั้งซึ่งจะใช้พื้นที่ในการขึ้นลงน้อย



ภาพประกอบ 15 อากาศยานไร้คนขับแบบปีกตรึง (Fixed-wing)

ที่มา : Trimble. UX5 HP. Retrieved from <https://construction.trimble.com/products-and-solutions/ux5-hp>

2) อากาศยานไร้คนขับชนิดปีกหมุน (Multirotor) เป็นอากาศยานขึ้นลงแนวตั้งอาศัยการหมุนของใบพัดในการขึ้นลงและขับเคลื่อนไปในทิศทางต่าง ๆ ประกอบด้วยใบพัดจำนวน 4-8 ใบพัด โดยทั่วไปใช้ระยะเวลาการบินประมาณ 10-20 นาที



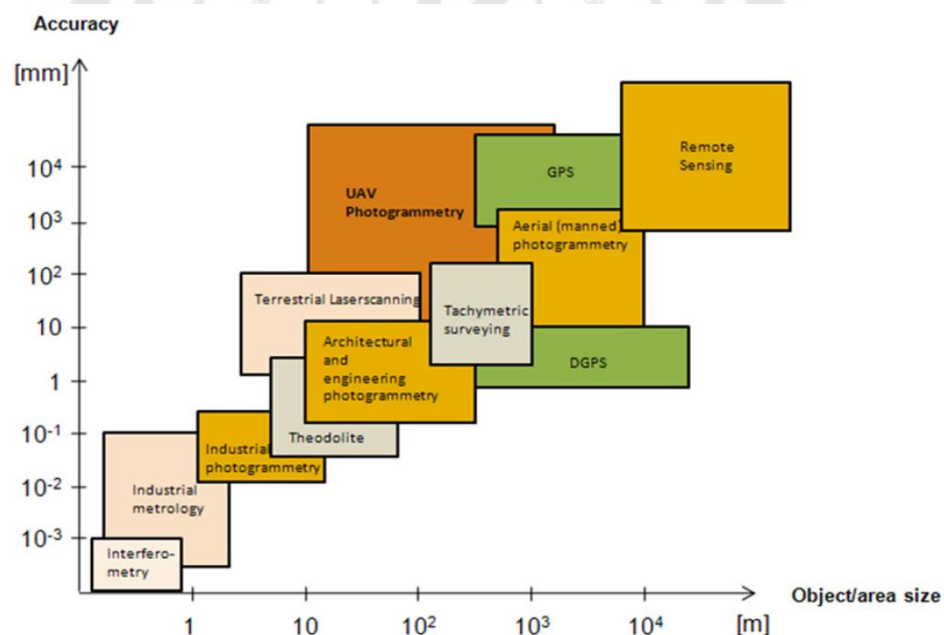
ภาพประกอบ 16 อากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุน (Multi-rotor)

ที่มา : Dji. Phantom 2. Retrieved from <https://www.dji.com/phantom-2>

ผลลัพธ์ที่ได้จากการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศโดยอากาศยานไร้คนขับ คือ

- 1) ภาพถ่ายออร์โธ (Ortho photo)
- 2) แบบจำลองความสูงพื้นผิวภูมิประเทศ (DSM)
- 3) แบบจำลองสามมิติเชิงเลข (3D model)

ในอดีตแหล่งที่มาของภาพถ่ายที่ใช้ในการสำรวจรังวัดจะใช้ภาพถ่ายทางอากาศจากเครื่องบินที่มีนักบินเป็นผู้ขับเคลื่อน แต่ปัจจุบันภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับได้เข้ามามีบทบาทในงานสำรวจรังวัดด้วยภาพถ่ายมากขึ้น เนื่องจากเป็นอากาศยานขนาดเล็ก ง่ายต่อการใช้งาน จัดเก็บข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว ค่าใช้จ่ายในการบินถ่ายภาพน้อย มีความเป็นปัจจุบันและติดตั้งกล้องบันทึกภาพที่มีความละเอียดสูงสามารถให้ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในระดับเซนติเมตรได้ ซึ่ง (Luhmann, Robson, Kyle, และ Harley, 2006) ได้เปรียบเทียบถึงระดับความถูกต้องที่ได้จากวิธีการสำรวจแบบต่างๆ เทียบกับขนาดพื้นที่การทำงาน ดังภาพประกอบ 17 รวมทั้งได้เปรียบเทียบการบันทึกภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับกับเครื่องบินดังแสดงตาราง 3



ภาพประกอบ 17 ระดับความถูกต้องทางตำแหน่งและขนาดพื้นที่ของวิธีการสำรวจชนิดต่างๆ

ที่ ม า : Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Harley, I. (2006). Close range photogrammetry: principles, techniques and applications: Whittles. P4.

ตาราง 3 การเปรียบเทียบการบินถ่ายภาพจากอากาศยานไร้คนขับกับเครื่องบิน

อากาศยานไร้คนขับ	เครื่องบิน
ง่ายต่อการใช้งาน	ยากต่อการใช้งาน
บินถ่ายภาพได้ทันทีตามความต้องการ	ต้องมีแผนการบินล่วงหน้า
ค่าใช้จ่ายน้อย	ค่าใช้จ่ายมาก
พื้นที่ขนาดเล็ก	พื้นที่ขนาดกลาง
เพดานบิน 75 - 750 เมตร	เพดานบิน 1 - 4 กิโลเมตร
สภาพอากาศที่มีเมฆมาก	สภาพอากาศที่มีเมฆมาก
ภาพไม่ติดเมฆ	ภาพอาจจะติดเมฆ
GSD : 0.03-0.30 เมตร	GSD : 0.10-0.5 เมตร
การประมวลผลใช้ระบบอัตโนมัติ	การประมวลผลใช้ผู้เชี่ยวชาญปฏิบัติ

3.2 การประยุกต์ใช้งานผลผลิตจากกระบวนการทางโฟโตแกรมเมตรีของอากาศยานไร้คนขับ

ภาพถ่ายออร์โธ (Orthophoto) แบบจำลองความสูงพื้นผิวภูมิประเทศ (DSM) และแบบจำลองสามมิติเชิงเลข (3D model) เป็นข้อมูลภาพของภูมิประเทศที่สร้างจากคู่ภาพที่ซ้อนกัน โดยผ่านกระบวนการปรับแก้ความผิดเพี้ยนเนื่องจากเรขาคณิตของการถ่ายภาพออกไป สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานต่างๆ ดังนี้

- 1) การสำรวจด้วยภาพถ่ายในการทำแผนที่ภูมิประเทศ
- 2) งานรังวัดที่ดิน (Land Survey) โดยใช้ทำแผนที่แสดงขอบเขตการถือครองที่ดินเพื่อป้องกันการรุกล้ำที่ดินทำกินของผู้อื่นและของทางราชการ จำแนกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน
- 3) สำรวจขอบเขตพื้นที่ป่าไม้ จำแนกประเภทชนิดป่าไม้ วัดปริมาณไม้
- 4) ประเมินผลกระทบจากภัยพิบัติธรรมชาติ
- 5) การออกแบบทางวิศวกรรมและภูมิสถาปัตย์
- 6) อื่นๆ

4. การหาค่าความถูกต้องจากการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ

4.1 การวัดและความคลาดเคลื่อน

การวัดเป็นกรรมวิธีพื้นฐานของการได้มาซึ่งค่าสังเกตของข้อมูลตามที่ต้องการ เมื่อใดก็ตามที่มีการวัดย่อมมีความคลาดเคลื่อน (error) เกิดขึ้นทุกครั้ง ดังนั้นจำเป็นต้องมีการประเมินค่าความถูกต้อง (accuracy) ของการวัดทุกครั้ง เพื่อให้ทราบถึงคุณภาพของข้อมูลก่อนการนำไปใช้งาน (วิชัย เยี่ยงวีรชน, 2558)

การวัดเป็นกระบวนการหาขนาด ปริมาณ ของสิ่งที่ต้องการเทียบกับมาตรฐานอันหนึ่งที่ใช้ในการหาขนาดหรือปริมาณนั้นๆ การวัดแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) การวัดโดยตรง คือ การวัดที่สามารถกระทำได้โดยตรงด้วยเครื่องมือ เช่น เทปวัดไม้บรรทัด ซึ่งแต่ละชนิดจะให้ความถูกต้องเมื่อเทียบกับขนาดหรือปริมาณที่กำหนดไว้เป็นมาตรฐานสากลที่แตกต่างกัน ทำให้ความคลาดเคลื่อนของปริมาณที่วัดได้ขึ้นอยู่กับเครื่องมือที่ใช้วัดและกรรมวิธีการวัดนั้นๆ

2) การวัดโดยอ้อม คือ การวัดที่ไม่สามารถวัดด้วยเครื่องมือได้โดยตรง แต่จะวัดสิ่งอื่นแทนแล้วนำมาคำนวณหาขนาดหรือปริมาณที่ต้องการนั้นด้วยความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์

การรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับไม่ได้เป็นการวัดโดยตรง จึงทำให้มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากมาย อาจกระทบต่อคุณภาพความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้

4.2 การประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่ง

ค่าความถูกต้อง (accuracy) หมายถึง ค่าที่บ่งบอกถึงความถูกต้องของค่าที่วัดได้ว่าใกล้เคียงค่าจริงเพียงใด การวัดค่าความถูกต้องทางตำแหน่งจะแบ่งได้ 2 ลักษณะ คือ

1) ความถูกต้องทางราบ หมายถึง ค่าความถูกต้องที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าพิกัดทางราบของตำแหน่งจุดตรวจสอบที่อ่านได้จากชุดข้อมูลและค่าพิกัดตำแหน่งอ้างอิงของจุดตรวจสอบ ค่าพิกัดทางราบจะมี 2 องค์ประกอบ คือ ค่าพิกัด X และ ค่าพิกัด Y ดังนั้นการระบุความถูกต้องทางราบจะแสดงในรูปแบบของค่ารัศมีวงกลมที่เรียกว่า ความคลาดเคลื่อนวงกลม (CE : Circular Error)(วิชัย เยี่ยงวีรชน, 2555)

2) ความถูกต้องทางตั้ง หมายถึง ค่าความถูกต้องที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าระดับของตำแหน่งจุดตรวจสอบที่อ่านได้จากชุดข้อมูลและค่าระดับอ้างอิงของจุดตรวจสอบ

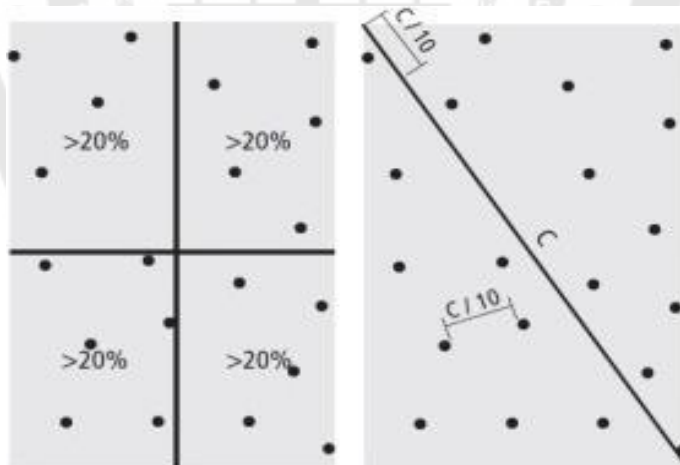
ขั้นตอนและหลักการการประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่ง มีดังนี้

4.2.1 กำหนดจุดตรวจสอบ

การใช้จุดตรวจสอบตามวิธีการแนวทางของ Federal Geographic Data Committee (FGDC) คือ จุดที่นำมาใช้การตรวจสอบ (Check point) จะต้องไม่ใช่จุดเดียวกับจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (GCPs) แนวทางที่ใช้กำหนดจุดตรวจสอบ ดังนี้

1) ต้องเป็นจุดที่มองเห็นได้ชัดเจนบนภาพและสามารถที่จะกำหนดจุดในภาพได้ เช่น มุมจุดตัดถนน เส้นจราจร ขอบสนามฟุตบอล

2) ตำแหน่งจุดตรวจสอบต้องให้กระจายทั่วทั้งภาพ ถ้าขนาดพื้นที่น้อยกว่า 500 ตารางกิโลเมตร จะใช้จุดตรวจสอบอย่างน้อย 20 จุด โดยแบ่งภาพเป็น 4 ส่วน ในแต่ละส่วนจะต้องมีจุดไม่น้อยกว่า 20 % ระยะห่างของแต่ละจุดให้ใช้ระยะประมาณ 1 ใน 10 ส่วนของเส้นทะแยงมุมภาพ ดังภาพประกอบ 16 เพื่อให้สามารถใช้อธิบายข้อมูลในความหมายที่เข้าใจได้ง่าย เช่น หากต้องการประเมินที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ แสดงว่า ยอมรับให้ค่าพิกัดของจุดตรวจสอบที่วัดได้จากภาพมีความผิดพลาดได้ไม่เกิน 1 จุด จากการวัดตรวจสอบ 20 จุด (Federal Geographic Data Committee Secretariat, 1998)



ภาพประกอบ 16 จำนวนและความห่างของจุดตรวจสอบ (Check point)

ที่มา : ASHTIWOW. (2015). การตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่ง Positioning Accuracy. Retrieved from <https://geo2ass.wordpress.com/2015/08/07/asprs-positional-accuracy-standards-of-1990/>

4.2.2 การประเมินความถูกต้อง

ความถูกต้องเชิงตำแหน่งของข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศสามารถอธิบายด้วยค่าที่คลาดเคลื่อนไปจากค่าที่แท้จริง การที่ลักษณะทางตำแหน่งของข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศคลาดเคลื่อนไปจากค่าจริงถือว่าเป็นความผิดพลาดทางเรขาคณิตของข้อมูล ซึ่งอาจมีผลมาจากการได้มาซึ่งข้อมูลทั้งจากระบบสำรวจและระบบการประมวลผลภาพ การประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่งของข้อมูลเป็นการสร้างความเชื่อมั่นในการนำข้อมูลไปใช้ การชี้วัดความถูกต้องจะอธิบายด้วยค่าความคลาดเคลื่อนที่หาจากวิธีการทางสถิติ (กาญจน์เชจร ชูชีพ, 2561)

ตัวชี้วัดความถูกต้องเชิงตำแหน่งของข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ ได้แก่

- 1) ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (MSE : Mean Square Error)
- 2) ค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ย (RMSE : Root Mean

Square Error) ใช้ประมาณค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่ง ซึ่งมีค่าเท่ากับ รากที่สองของค่าเฉลี่ยผลรวมกำลังสองของค่าต่างค่าที่วัดได้กับค่าตรวจสอบที่มีความถูกต้องสูงกว่า ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

2.1) ค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยทาง X ($RMSE_x$) และ Y ($RMSE_y$)

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum (X_{data\ i} - X_{check\ i})^2}{n}} \quad (3)$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum (Y_{data\ i} - Y_{check\ i})^2}{n}} \quad (4)$$

2.2) ค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยทางราบ ($RMSE_r$)

$$RMSE_r = \sqrt{(RMSE_x)^2 + (RMSE_y)^2} \quad (5)$$

2.3) ค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยทางตั้ง ($RMSE_z$)

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum (Z_{data\ i} - Z_{check\ i})^2}{n}} \quad (6)$$

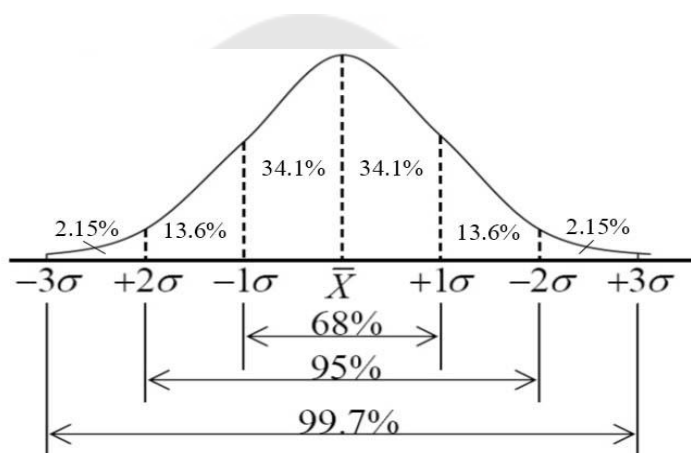
$X_{data\ i}, Y_{data\ i}, Z_{data\ i}$ เป็นค่าพิกัดและค่าระดับของจุดทดสอบที่ i ในชุดข้อมูล

$X_{check\ i}, Y_{check\ i}, Z_{check\ i}$ เป็นค่าพิกัดและค่าระดับของจุดทดสอบที่ i ที่ใช้เป็นค่าอ้างอิง

n คือจำนวนจุดที่ใช้ทดสอบทั้งหมด

l คือจุดทดสอบเริ่มจาก 1 ถึง n

ค่า RMSE ที่คำนวณได้อยู่ที่ระดับความเชื่อมั่น 68% เท่านั้น ดังภาพประกอบ 19 สำหรับงานที่ต้องการเพิ่มความถูกต้องและความน่าเชื่อถือ ผู้ใช้ควรประเมินความละเอียดถูกต้องที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตามมาตรฐาน NSSDA (สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ, 2556)



ภาพประกอบ 19 กราฟแจกแจงความคลาดเคลื่อนที่ระดับความเชื่อมั่นต่างๆ

4.2.3 การเทียบมาตรฐาน

ข้อมูลภาพหรือข้อมูลแผนที่ เมื่อผ่านการปรับแก้ความผิดพลาดทางเรขาคณิตและกำหนดพิกัดแผนที่ให้กับภาพแล้ว สามารถสร้างความมั่นใจให้กับผู้ที่นำไปใช้งานได้ด้วยการเทียบความถูกต้องกับมาตรฐาน NSSDA (National Standard for Spatial Data Accuracy) หรือมาตรฐานของ ASPRS (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing Accuracy Standard)

1) มาตรฐาน National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA)

กำหนดโดยคณะกรรมการเฉพาะกิจที่แต่งตั้งโดย Federal Geographic Data Committee (FGDC) สหรัฐอเมริกา เผยแพร่ในเดือนเมษายน พ.ศ. 2541 สำหรับใช้เป็นแนวปฏิบัติทางสถิติ วิธีการทดสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของแผนที่ ข้อมูลภูมิสารสนเทศที่ได้จากภาพถ่ายทางอากาศ ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมหรือแผนที่ และวิธีการรายงานค่าความถูกต้อง ไม่ใช่มาตรฐานที่กำหนดค่าความถูกต้อง

แผนที่เช่นเดียวกับมาตรฐาน NMAS และ ASPRS แต่มีลักษณะเป็นแนวปฏิบัติถึงวิธีการ การทดสอบ และแนวปฏิบัติทางสถิติ โดยไม่ได้ระบุถึงเงื่อนไขของเกณฑ์การผ่านมาตรฐานหรือไม่ ผู้ใช้ต้องกำหนดเกณฑ์ดังกล่าวสำหรับผลิตภัณฑ์ของตนเอง (วิชัย เยี่ยงวีรชน และคณะ, 2560)

มาตรฐาน NSSDA จะกล่าวถึงสมการคำนวณตัวชี้วัดค่าความถูกต้องของข้อมูลในระดับความเชื่อมั่น 95% (Federal Geographic Data Committee Secretariat, 1998) ดังนี้

1.1) คำนวณความถูกต้องทางราบ โดยคำนวณเป็นความคลาดเคลื่อนวงกลม (CE) แบ่งเป็น 2 กรณี

กรณีที่ 1 เมื่อ $RMSE_x = RMSE_y$ แล้ว

$$RMSE_r = \sqrt{2RMSE_x^2} = \sqrt{2RMSE_y^2} \quad (7)$$

$$= 1.4142 \times RMSE_x = 1.4142 \times RMSE_y \quad (8)$$

โดยสมมติว่าได้จัดความคลาดเคลื่อนระบบแฝงอยู่ออกไปแล้ว ถ้าความคลาดเคลื่อนยังคงมีการแจกแจงแบบปกติ โดยที่ความคลาดเคลื่อนทางแกน X เป็นอิสระจากความคลาดเคลื่อนทางแกน Y แล้ว ค่าความถูกต้องทางราบที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คำนวณได้จากการคูณค่า RMSE ด้วยค่าคงที่ 2.4477

ดังนั้น ค่าความถูกต้องทางราบ ตามมาตรฐาน NSSDA สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$Accuracy_r = 2.4477 \times RMSE_x = 2.4477 \times RMSE_y \quad (9)$$

$$= 2.4477 \times RMSE_r / 1.4142 \quad (10)$$

$$Accuracy_r = 1.7308 \times RMSE_r \quad (11)$$

กรณีที่ 2 เมื่อ $RMSE_x \neq RMSE_y$

ถ้า $RMSE_{\min} / RMSE_{\max}$ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.6 – 1 (ค่า $RMSE_{\min}$ คือค่าที่น้อยกว่าอาจจะเป็น $RMSE_x$ หรือ $RMSE_y$ ก็ได้ ส่วน $RMSE_{\max}$ คือค่า $RMSE_x$ หรือ $RMSE_y$ ที่ เป็นค่ามาก) ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานวงกลม (circular standard error) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีค่าโดยประมาณเท่ากับ $0.5 \times (RMSE_x + RMSE_y)$

ถ้าความคลาดเคลื่อนยังคงมีการแจกแจงแบบปกติ โดยที่ความคลาดเคลื่อนทางแกน X เป็นอิสระจากความคลาดเคลื่อนทางแกน Y ค่าความถูกต้องทางราบ ตามมาตรฐาน NSSDA อาจคำนวณประมาณค่าได้จากสูตร

$$Accuracy_r \sim 2.4477 \times 0.5 \times (RMSE_x + RMSE_y) \quad (12)$$

$$Accuracy_r \sim 1.2239 \times (RMSE_x + RMSE_y) \quad (13)$$

1.2) คำนวณความถูกต้องทางดิ่ง สามารถคำนวณได้โดยใช้หลักการเดียวกัน โดยสมมติว่าได้ขจัดความคลาดเคลื่อนระบบแฝงอยู่ออกไปแล้ว ถ้าความคลาดเคลื่อนยังคงมีการแจกแจงแบบปกติแล้ว ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ระดับความเชื่อมั่น 95% คำนวณได้จากการคูณค่า RMSE ด้วยค่าคงที่ 1.9600

ดังนั้น ค่าความถูกต้องทางดิ่ง ตามมาตรฐาน NSSDA สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$Accuracy_z = 1.9600 \times RMSE_z \quad (14)$$

2) มาตรฐานความละเอียดถูกต้องของ American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) เป็นมาตรฐานที่กำหนดเพื่อใช้กับการประเมินแผนที่ รายงานความถูกต้องของข้อมูลเป็นค่าความถูกต้องภาคพื้นดิน (Ground scale accuracy) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบได้ว่าข้อมูลที่ประเมินนั้นสอดคล้องกับแผนที่ที่ระดับมาตราส่วนใด ผู้ใช้สามารถประเมินความถูกต้องของค่าที่อ่านจากข้อมูลนี้ได้โดยไม่ต้องใช้การอ้างอิงกับตารางมาตรฐาน จะใช้ค่า RMSE เป็นค่าแสดงขีดจำกัดสูงสุดที่ยอมให้เกิดได้เมื่อนำข้อมูลเชิงพื้นที่นั้นไปทำเป็นแผนที่ที่ขนาดมาตราส่วนหนึ่ง ๆ

ในปี 1990 ASPRS ได้กำหนดมาตรฐาน ASPRS Accuracy Standards for Large-Scale Maps เพื่อประเมินความละเอียดถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบทั้งแนวแกน x และแกน y ที่ละแกน ความละเอียดถูกต้องทางราบ เป็นเกณฑ์ค่า RMSE ที่มีความสัมพันธ์กับมาตราส่วนของแผนที่ตามตาราง 4 เช่น เกณฑ์ RMSE ของความละเอียดถูกต้องทางราบชั้นที่ 1 มีค่า 1 เมตร สัมพันธ์กับมาตราส่วนของแผนที่ 1:4,000 หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่า แผนที่มาตราส่วน 1:4,000 จะต้องมีความ RMSE ตามเกณฑ์ของความละเอียดถูกต้องทางราบชั้นที่ 1 ไม่เกิน 1 เมตร (Federal Geographic Data Committee Secretariat, 1998) ต่อมาในปี 2014 ASPRS ได้กำหนดมาตรฐานใหม่เป็น ASPRS

Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data มีการปรับปรุงมาตรฐานในหลายส่วน โดยเทียบค่า RMSE กับขนาด GSD ที่เหมาะสมในการทำแผนที่มาตราส่วนต่างๆ

ตาราง 4 มาตรฐานความละเอียดถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบของ ASPRS 1990

เกณฑ์ RMSE (เมตร) ของความละเอียด ถูกต้องทางราบชั้นที่ 1	มาตราส่วนแผนที่
0.0125	1:50
0.0250	1:100
0.0500	1:200
0.1250	1:500
0.2500	1:1,000
0.5000	1:2,000
1.0000	1:4,000
1.2500	1:5,000
2.5000	1:10,000
5.0000	1:20,000

ที่มา : Federal Geographic Data Committee Secretariat. (1998). Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy. National Aeronautics and Space Administration

ตาราง 5 มาตรฐานความละเอียดถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบของ ASPRS 2014

ASPRS 2014				Equivalent to map scale in		Equivalent to map scale
Horizontal Accuracy Class	RMSE _r (cm)	Horizontal Accuracy at the 95% Confidence Level (cm)	Approximate GSD of Source Imagery (cm)	ASPRS 1990 Class 1	ASPRS 1990 Class 2	in NMAS
0.63	0.9	1.5	0.31 to 0.63	1:25	1:12.5	1:16
1.25	1.8	3.1	0.63 to 1.25	1:50	1:25	1:32
2.5	3.5	6.1	1.25 to 2.5	1:100	1:50	1:63
5.0	7.1	12.2	2.5 to 5.0	1:200	1:100	1:127
7.5	10.6	18.4	3.8 to 7.5	1:300	1:150	1:190
10.0	14.1	24.5	5.0 to 10.0	1:400	1:200	1:253
12.5	17.7	30.6	6.3 to 12.5	1:500	1:250	1:317
15.0	21.2	36.7	7.5 to 15.0	1:600	1:300	1:380
17.5	24.7	42.8	8.8 to 17.5	1:700	1:350	1:444
20.0	28.3	49.0	10.0 to 20.0	1:800	1:400	1:507
22.5	31.8	55.1	11.3 to 22.5	1:900	1:450	1:570
25.0	35.4	61.2	12.5 to 25.0	1:1000	1:500	1:634
27.5	38.9	67.3	13.8 to 27.5	1:1100	1:550	1:697
30.0	42.4	73.4	15.0 to 30.0	1:1200	1:600	1:760

ที่มา : ASPRS. (2014). ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data.

4.3 ปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องทางตำแหน่งของ UAV Photogrammetry

ความถูกต้องทางราบและทางตั้งของผลลัพธ์ที่ได้จาก UAV Photogrammetry ประกอบด้วยองค์ประกอบต่างๆ ได้แก่

- 1) ความละเอียดของจุดภาพที่บันทึกได้ โดยอ้างอิงกับค่า Ground Sample Distance (GSD) ขึ้นอยู่กับความละเอียดและความยาวโฟกัสของกล้องถ่ายภาพที่ใช้
- 2) ความเสถียรของค่าคงตัวทางเรขาคณิตของกล้องถ่ายภาพขณะถ่ายภาพ ได้แก่ ความยาวโฟกัส ค่าพิกัดจุดมุมขยสำคัญ ค่าความเพี้ยนของเลนส์
- 3) ความคมชัดของภาพ จะมีผลต่อการประมวลผลภาพ
- 4) การกำหนดตำแหน่งจุด GCPs อย่างเหมาะสม

ปัจจัยเหล่านี้หากเลือกใช้ไม่เหมาะสมและไม่ควบคุมคุณภาพอาจเป็นสาเหตุให้ผลลัพธ์ไม่ได้คุณภาพตามต้องการ โดยเฉพาะจะมีผลต่อความถูกต้องทางตั้ง ทำให้สิ้นเปลืองเวลาค่าใช้จ่ายและไม่สามารถนำไปใช้งานได้อย่างถูกต้องตามมาตรฐาน

5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Barry และ Coakley, 2013 ได้ศึกษาความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ C-Astral Bramor เปรียบเทียบกับการรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS แบบ RTK เพื่อนำมาใช้ในงานสำรวจภูมิประเทศ มีจุดควบคุมภาพถ่าย 10 จุด จุดตรวจสอบความถูกต้อง 45 จุด ความถูกต้องในการรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS ± 20 มิลลิเมตร กำหนดส่วนซ้อนในการบิน (Over Lab) 80% ส่วนซ้อนด้านข้าง (Side Lab) 80% กำหนดความสูงบิน 80 เมตร สรุปผลว่า ค่าความถูกต้องทางราบที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ที่ 41 มิลลิเมตร และทางตั้ง 68 มิลลิเมตร หมายความว่า UAV Photogrammetry สามารถนำมาใช้แทนงานรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS และสามารถผลิตแผนที่มาตราส่วน 1 : 200 RMSE ที่ได้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน US National Accuracy Standard โดยพิจารณาจากค่า RMSE ได้แผนที่ภาพถ่ายมาตราส่วน 1 : 200

ศิริพร ตรีธาร, 2558 ได้ศึกษาการนำเทคโนโลยีการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry) มาประยุกต์ใช้ในงานสำรวจเส้นทางเพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับกับงานสำรวจภูมิประเทศตามมาตรฐานงานสำรวจภูมิประเทศ สำหรับงานออกแบบเรขาคณิต และเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างความถูกต้องจากการรังวัดด้วยอากาศยานไร้คนขับกับระดับความสูงบิน

ผลการศึกษาพบว่า การรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ ที่ระดับความสูงบิน 95 เมตร มีค่าความถูกต้องทางราบ เท่ากับ 4 เซนติเมตร มีค่าความถูกต้องทางดิ่ง เท่ากับ 5 เซนติเมตร มีค่าความถูกต้องตามมาตรฐานงานสำรวจภูมิประเทศ สำหรับงานออกแบบเรขาคณิต สามารถนำข้อมูลมาใช้ในการออกแบบเรขาคณิตได้ ส่วนที่ระดับความสูงบิน 198 เมตร มีค่าความถูกต้องทางราบ เท่ากับ 7 เซนติเมตร มีค่าความถูกต้องทางดิ่ง เท่ากับ 12 เซนติเมตร และที่ระดับความสูงบิน 302 เมตร มีค่าความถูกต้องทางราบ เท่ากับ 12 เซนติเมตร มีค่าความถูกต้องทางดิ่ง เท่ากับ 21 เซนติเมตร ที่ระดับความสูงการบิน 198 เมตร และ 302 เมตร มีความถูกต้องเพียงพอตามมาตรฐานงานสำรวจภูมิประเทศ สำหรับงานศึกษาความเหมาะสมของโครงการ (Feasibility Study) เท่านั้น ไม่สามารถนำข้อมูลมาใช้ในการออกแบบเรขาคณิตได้

วิชัย เยี่ยงวีรชน และคณะ, 2560 ได้ศึกษา การใช้อากาศยานไร้คนขับในการทำแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:4,000 หรือดีกว่า ด้วย UAV Photogrammetry ได้

วิธีการดำเนินการ ทำการบินบันทึกภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ 2 ประเภทที่มีกล้องบันทึกภาพต่างกัน คือ ประเภทที่ใช้กล้องคอมแพค (compact camera) และกล้องที่ติดมากับอากาศยานไร้คนขับ รวมทั้งอากาศยานไร้คนขับของทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (Trimble UX5HP) ได้เข้าร่วมการทดสอบในพื้นที่ระบบโครงข่ายไฟฟ้า 230 กิโลโวลต์ อยุธยา 4 – สีคิ้ว 2 ความยาว 5 กิโลเมตร หน้ากว้าง 300 เมตร บันทึกภาพด้วยส่วนซ้อน 85% ส่วนเกย 75% โดยประมาณ จำนวน 5 GSD วาง GCP 3 รูปแบบ คือ BND, BNDC และ FULL ประมวลผลแบบ indirect georeferencing แบบ global shutter และ linear global shutter ใช้จุดตรวจสอบจำนวน ไม่น้อยกว่า 30 จุด ตรวจสอบความถูกต้องทางราบตามเกณฑ์แผนที่มาตราส่วน 1:4,000 (ASPRS) และความถูกต้องทางดิ่งไม่เกิน 20 เซนติเมตร ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตามมาตรฐาน NSSDA ผลการวิจัย พบว่า การประมวลผลแบบ linear rolling shutter มีผลให้ค่า RMSE ในการยึดโยง GCP ดีขึ้น แต่ไม่ทำให้ค่า RMSE ของจุดตรวจสอบดีขึ้น ในทางกลับกันทำให้มีประสิทธิภาพลดลง การตรวจสอบความถูกต้องจึงใช้ผลจากการประมวลผลแบบ global shutter ซึ่งแผนที่ภาพถ่าย (orthophoto) ที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับทุกประเภทให้ความถูกต้องทางราบสูงกว่าแผนที่มาตราส่วน 1:4,000 สำหรับความถูกต้องทางดิ่งพบว่า อากาศยานไร้คนขับที่ใช้กล้องคอมแพค วาง GCP รูปแบบ FULL ผ่านเกณฑ์ 20 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน NSSDA เท่านั้น กรณีอากาศยานไร้คนขับของ กฟผ. เป็นชนิด PPK เมื่อประมวลผลร่วมกับ GCP 1 จุด พบว่า ทุก GSD ที่บินทดสอบให้ความถูกต้อง

ทางตั้งอยู่ในเกณฑ์ไม่เกิน 20 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน NSSDA โดยเป็นไปตามหลักทั่วไป คือ ไม่เกิน 2 เท่า GSD

เนติ ศรีหาม และ ศิลา แก้วปลั่ง, 2560 ได้ศึกษาความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำกับมาตรฐานความถูกต้องแผนที่ทั่วไป ทำการทดลองโดยการบินอากาศยานไร้คนขับเหนือพื้นที่ทดสอบโดยทำการถ่ายภาพให้มีระยะส่วนซ้อนระหว่างภาพ 80% และระยะส่วนซ้อนระหว่างแนวกบิน 60 % กำหนดจุดควบคุมภาพ 8 จุด โดยใช้การรังวัดเพื่อหาตำแหน่งด้วยดาวเทียมจีพีเอสแบบจลนในทันที (Real-Time Kinematic; RTK) และทำการรังวัดค่าระดับโดยใช้กล้องระดับตามมาตรฐานงานชั้น 3 เพื่อใช้ในขั้นตอนการประมวลผลภาพและทำการรังวัดเพิ่มอีก 12 จุด ด้วยโปรแกรม QGIS 2.18 สำหรับเปรียบเทียบการรังวัดทางราบ (X,Y) และทางตั้ง (Z) ของแผนที่ภาพถ่ายออร์โทและแบบจำลองระดับที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับกับผลการสำรวจจากภาคสนาม ผลการศึกษาพบว่า การรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศด้วยอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำที่ความเชื่อมั่น 68% มีค่าความถูกต้องทางราบเท่ากับ 0.052 เมตร และ ทางตั้งเท่ากับ 0.102 เมตร

Gerke และ Przybilla, 2016 วิเคราะห์ความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ : อิทธิพลของ RTK-GNSS บนเครื่องบินและรูปแบบการบินแบบกริด ทำการทดลองโดยการใช้อากาศยานไร้คนขับ Mavinci Sirius Pro ซึ่งเป็นประเภทปีกตรึงมีอุปกรณ์รับสัญญาณ RTK-GNSS ติดอยู่กับตัวเครื่องบิน มีระยะส่วนซ้อนระหว่างภาพ 85% และระยะส่วนซ้อนระหว่างแนวกบิน 65% ที่ระดับความสูง 105 เมตร ใช้กล้อง Panasonic LumixGX1 เลนส์ขนาด 14 มิลลิเมตร โดยบินเหนือพื้นที่ทดสอบ 2 พื้นที่ พื้นที่ที่ 1 ลักษณะภูมิประเทศเป็นหินและทราย พื้นที่ที่ 2 เป็นพื้นที่ราบและมีสิ่งปลูกสร้างอาคาร ผลการศึกษาพบว่า ค่าความถูกต้องของจุดตรวจสอบที่พื้นที่ 1 และ 2 โดยไม่ใช้อุปกรณ์รับสัญญาณ RTK-GNSS ที่ติดอยู่กับเครื่องบิน ถ่ายภาพในรูปแบบกริดเปรียบเทียบกับแบบทั่วไป ใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน 4 จุดกับ 18 จุด ค่าความถูกต้องที่ได้จากการบินในรูปแบบกริดจะดีกว่าแบบทั่วไปแต่ไม่มีนัยสำคัญของการเปลี่ยนแปลง ค่าความถูกต้องทางตั้งจะถูกต้องมากขึ้น เมื่อมีการเพิ่มจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน ส่วนค่าความถูกต้องของจุดตรวจสอบที่พื้นที่ 1 และ 2 โดยใช้อุปกรณ์รับสัญญาณ RTK-GNSS ที่ติดอยู่กับตัวเครื่องบิน ถ่ายภาพในรูปแบบกริดเปรียบเทียบกับแบบทั่วไป ใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน 0 จุด 4 จุดและ 18 จุด ค่าความถูกต้องที่ได้จากการบินในรูปแบบกริดจะสูงกว่าแบบทั่วไป ซึ่งค่าความถูกต้องทางตั้งเมื่อมีการเพิ่มจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินจะให้ค่าความถูกต้องที่ดีขึ้น

Raczynski, 2017 ได้ศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อความถูกต้องของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้อากาศยานไร้คนขับ ซึ่งพารามิเตอร์หลัก คือ ระดับความสูง ระยะส่วนซ้อนระหว่างภาพ และระหว่างแนวนอน ความเร็วและจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (GCP) ทำการทดลองโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ DJI Phantom 3 Advanced ประมวลผลภาพโดยใช้ซอฟต์แวร์ Pix4D Mapper Professional และ Agisoft PhotoScan Pro ผลจากการตรวจสอบค่าความถูกต้องของภาพถ่ายออร์โธที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับพบว่า ความสูงของการบินมีความสัมพันธ์อย่างมากกับ GSD และค่าความสูงควรคำนวณจาก GSD และความยาวโฟกัสของกล้องในขณะที่ทำการบิน ยิ่งเพิ่มความสูงขึ้นจะใช้เวลาและแบตเตอรี่น้อยลง ระยะส่วนซ้อนระหว่างภาพและระหว่างแนวนอนไม่มีผลต่อค่าความถูกต้อง แต่จะส่งผลต่อเวลาที่ต้องใช้ในการถ่ายภาพและประมวลผลภาพในซอฟต์แวร์ อย่างไรก็ตามพบว่า บทความทางวิทยาศาสตร์อื่นๆ กล่าวว่าพารามิเตอร์นี้เป็นสิ่งสำคัญที่จะได้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือ ความแตกต่างในข้อสรุปของสองวิธีนี้อาจเป็นได้ว่า ในการศึกษาในระยะส่วนซ้อนระหว่างภาพและระหว่างแนวนอนที่ได้รับการทดสอบอยู่ในระดับความสูงเพียงพอที่จะให้ผลลัพธ์ที่ดี ความเร็วของเครื่องบินมีความสำคัญต่อการวางแผนภารกิจสำหรับอากาศยานไร้คนขับชนิดปีกหมุนใช้กล้องชัตเตอร์แบบกลิ้ง (rolling shutter) แต่ไม่มีความสำคัญสำหรับอากาศยานไร้คนขับชนิดปีกตรึงเพราะกล้องไม่สามารถเลื่อนไปมาในอากาศและหยุดบนจุดที่กำหนดได้ จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินเป็นหนึ่งในพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุด ควรที่จะกระจายจุดควบคุมภาคพื้นที่ย่างเท่าเทียมกันในพื้นที่ที่น่าสนใจซึ่งจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่ดียิ่งขึ้น

Tahar, 2013 ได้ศึกษาการประเมินจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินเพื่อให้ได้ภาพถ่ายที่ดีที่สุดจากการใช้อากาศยานไร้คนขับ ทำการทดสอบในพื้นที่ที่มีขนาด 1.5 ตารางกิโลเมตร กำหนดรูปแบบการใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน 6 รูปแบบ ดังภาพประกอบ 20 ผลการศึกษาพบว่า การกำหนดจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน 8 จุด หรือ 9 จุด จะให้ค่าความถูกต้องที่ดีที่สุด ดังภาพประกอบ 21

ผลการศึกษาพบว่า การจัดทำแผนที่จากการใช้อากาศยานไร้คนขับควรใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน 1 จุด จะให้ค่าความถูกต้องที่ดีมากยิ่งขึ้น และมีค่าความถูกต้องทางราบ 3 เซนติเมตร ค่าความถูกต้องทางตั้ง 11 เซนติเมตร

Küng และคนอื่น ๆ, 2011 ได้ศึกษาความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับเปรียบเทียบความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายแบบมีจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินกับไม่มีจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน โดยใช้อากาศยานไร้คนขับ SenseFly Swinglet บินถ่ายภาพที่ระดับความสูง 3 ระดับ คือ 130 เมตร 262 เมตร และ 900 เมตร ประมวลผลโดยใช้ซอฟต์แวร์ PIX4D ผลการศึกษารูปได้ว่า

ระดับความสูงบิน 130 เมตร การรังวัดด้วยภาพถ่ายแบบมีจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินมีค่าความถูกต้อง 0.056 เมตร และแบบไม่มีจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินมีค่าความถูกต้อง 1.97 เมตร

ระดับความสูงบิน 262 เมตร การรังวัดด้วยภาพถ่ายแบบมีจุดควบคุมมีค่าความถูกต้อง 0.19 เมตร และแบบไม่มีจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินมีค่าความถูกต้อง 2.28 เมตร

ระดับความสูงบิน 900 เมตร การรังวัดด้วยภาพถ่ายแบบมีจุดควบคุมมีค่าความถูกต้อง 1.25 เมตร และแบบไม่มีจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินมีค่าความถูกต้อง 7.84 เมตร

Shi และ Chen, 2017 ศึกษาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของภาพถ่ายที่ได้จากการใช้อากาศยานไร้คนขับระหว่างการใช้อากาศยานไร้คนขับที่มีระบบ RTK และ PPK โดยไม่ใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินกับอากาศยานไร้คนขับที่ไม่มีระบบ RTK และ PPK แต่มีจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน ซึ่งการใช้อากาศยานไร้คนขับที่มี RTK หรือ PPK จะช่วยลดระยะเวลาในการวางจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินหรืออาจจะมีข้อจำกัดในเรื่องสถานที่ อย่างไรก็ตามอากาศยานไร้คนขับที่มี RTK / PPK จะต้องมียุทธรณ์ประมวลผลโดยเฉพาะ และจะต้องมีการใช้สถานีฐาน (Base Station) หรือ สถานีอ้างอิงเสมือน (VRS : Virtual Reference Station) เพื่อใช้ในการประมวลผลค่าความถูกต้องทำการทดลองโดยใช้อากาศยานไร้คนขับ senseFly eBee Plus บินที่ระดับความสูง 102 เมตร ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน 2.5 เซนติเมตร ระยะเวลาซ้อนระหว่างภาพ 80% ใช้ระบบ RTK กับ PPK โดยไม่ใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินกับไม่ใช้ระบบ RTK และ PPK แล้วใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน ผลการทดลองพบว่า

ค่า RMSE ของอากาศยานไร้คนขับที่ใช้ระบบ RTK (71% RTK-fixed) เท่ากับ 0.081

ค่า RMSE ของอากาศยานไร้คนขับที่ใช้ระบบ PPK เท่ากับ 0.067 และ

ค่า RMSE ของอากาศยานไร้คนขับที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน เท่ากับ 0.04



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย ผู้วิจัยได้สรุปวิธีการดำเนินงานวิจัยออกเป็นหัวข้อดังนี้

1. เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา
2. การวางแผนการบินถ่ายภาพ
3. การบินถ่ายภาพ
4. การประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ
5. การรังวัดพิกัดและระดับของจุดควบคุมภาคพื้น (Ground Control Point) และจุดตรวจสอบความถูกต้อง (Check point)
6. การตรวจสอบความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ
7. การเปรียบเทียบค่าพิกัดและค่าระดับจากการรังวัดภาคสนามกับการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

เครื่องมือที่ใช้ในงานศึกษาวิจัยเป็นสิ่งที่มีความสำคัญและมีบทบาทอย่างมากในงานศึกษาวิจัย

ในงานศึกษาวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้เครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูล ดังนี้

- 1) คอมพิวเตอร์ 1 ชุด มีคุณสมบัติ ดังนี้
 - 1.1) หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) แบบ Intel Core i7 หรือ Intel XEON
 - 1.2) หน่วยความจำหลัก (RAM) ความจุรวมไม่น้อยกว่า 64 GB
 - 1.3) หน่วยจัดเก็บข้อมูล (Hard disk) ชนิด Solid State (SSD) ขนาดความจุไม่น้อยกว่า 128 GB
 - 1.4) ส่วนควบคุมการแสดงผลเป็นชนิดแยกจากแผงวงจรหลักไม่น้อยกว่า 2 GB
- 2) อากาศยานไร้คนขับประเภทปีกตรึงของ Trimble รุ่น UX5HP มีคุณสมบัติ ดังนี้
 - 2.1) พิสัยการบิน : 35 นาที
 - 2.2) ความเร็ว : 85 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
 - 2.3) ความจุแบตเตอรี่ : 6,600 มิลลิแอมป์
 - 2.4) พื้นที่ร่อนลง (ก x ย) : 30 x 50 เมตร

2.5) ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) : 1 - 25 เซนติเมตร

2.6) ความสูงบิน : 75 - 750 เมตร

2.7) กล้อง : ยี่ห้อ Sony รุ่น a7R ชนิด mirrorless เซ็นเซอร์เต็มเฟรม (full frame)

ความละเอียด 36 ล้านพิกเซล มีขนาดพิกเซล 4.8799×10^6

2.8) Lens : ยี่ห้อ Voigtlander ขนาด 15 มิลลิเมตร

2.9) ตัวรับสัญญาณ GNSS แบบ 2 ความถี่ สามารถรับได้ทั้งระบบ GPS, Glonass, Beidou และ Galileo

2.10) ควบคุมความถูกต้องทางตำแหน่งภาพถ่ายด้วยระบบการรังวัดแบบจลน์โดยประมวลผลภายหลังการบิน (PPK : Post Process Kinematic)



ภาพประกอบ 22 อากาศยานไร้คนขับประเภทปีกตรึงของ Trimble รุ่น UX5HP
ที่ใช้เป็นเครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูล

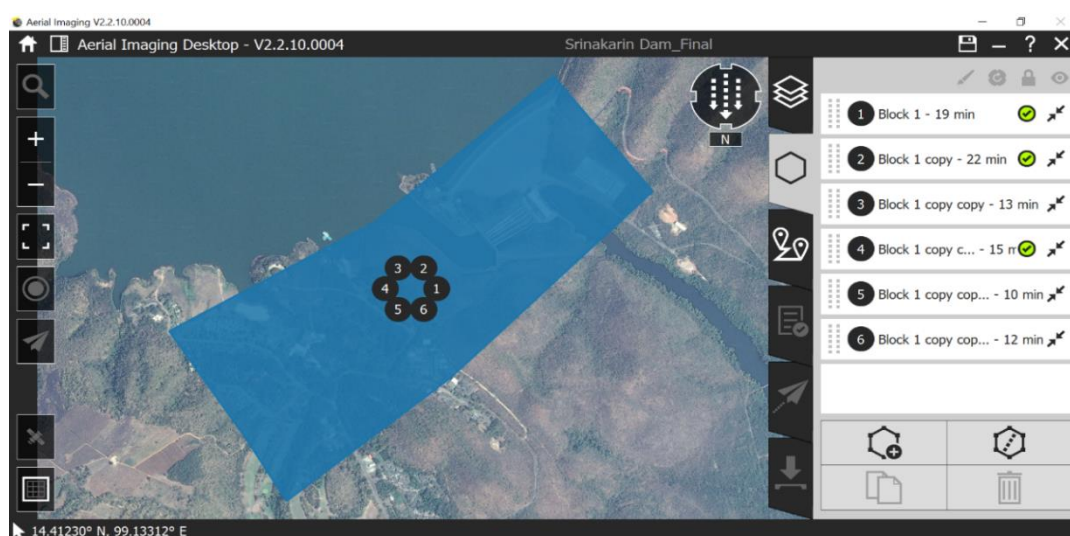
ที่มา : Trimble. UX5 HP. Retrieved from <https://construction.trimble.com/products-and-solutions/ux5-hp>



ภาพประกอบ 23 กล้องยี่ห้อ Sony รุ่น a7R ชนิด mirrorless เซ็นเซอร์เต็มเฟรม (full frame)
พร้อมเลนส์ขนาด 15 มิลลิเมตร

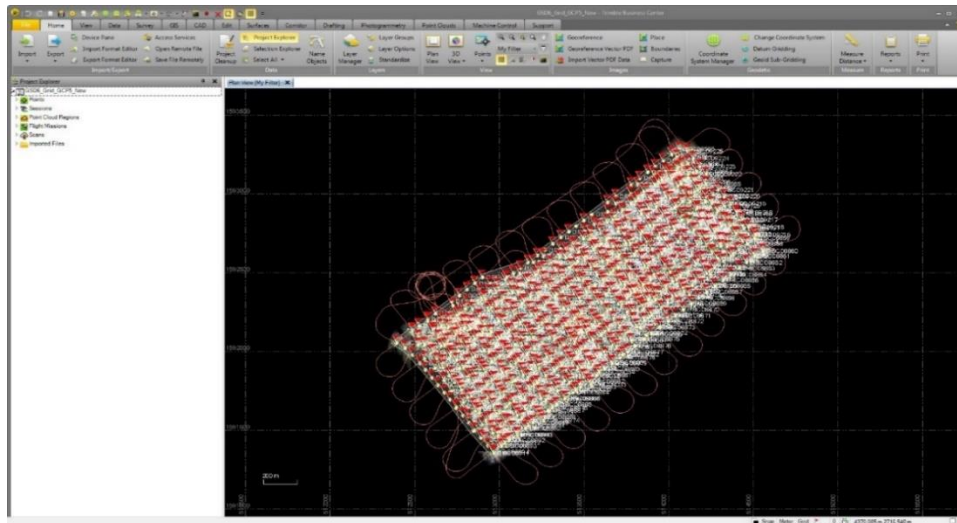
จากคุณสมบัติของอากาศยานไร้คนขับประเภทปีกตรึงของ Trimble รุ่น UX5HP ที่สามารถควบคุมความถูกต้องทางตำแหน่งภาพถ่ายด้วยระบบการรังวัดแบบจลน์โดยประมวลผลภายหลังการบิน (PPK : Post Process Kinematic) ได้ จึงเป็นเหตุให้นำเครื่องบินดังกล่าวมาใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษาเพื่อให้สามารถบรรลุตามวัตถุประสงค์ของการศึกษานี้

3) ซอฟต์แวร์ Aerial Image ใช้ในการวางแผนการบินและควบคุมการบิน



ภาพประกอบ 24 ซอฟต์แวร์ Aerial Image ใช้ในการวางแผนการบินและควบคุมการบิน

4) ซอฟต์แวร์ Trimble Business Center ใช้ประมวลผลภาพถ่าย เนื่องจากเป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายที่มีค่าการรังวัดแบบจลน์โดยประมวลผลภายหลังการบิน (PPK : Post Process Kinematic) ได้



ภาพประกอบ 25 ซอฟต์แวร์ Trimble Business Center ใช้ประมวลผลภาพถ่าย

5) เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ของ Trimble รุ่น R8 ในการสำรวจจริงวัดแบบ จลน์ในทันที (Real Time Kinematic : RTK) ให้ค่าความถูกต้องทางราบ 8 มิลลิเมตร ค่าความถูกต้อง ทางตั้ง 15 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการสำรวจจริงวัดค่าพิกัดและค่าระดับของจุดควบคุมภาพถ่าย ภาคพื้นดินกับจุดตรวจสอบความถูกต้อง



ภาพประกอบ 26 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ของ Trimble รุ่น R8

ที่มา : TS Geosystems Bangladesh. Trimble R8 RTK GNSS. Retrieved from <https://www.ts-geosystems.com/product/trimble-r8-rtk-gps/>

การวางแผนบินถ่ายภาพ

ในการบินถ่ายภาพบริเวณใดบริเวณหนึ่ง จำเป็นต้องมีการวางแผนก่อนการบินถ่ายภาพเพื่อจะได้ภาพตรงตามวัตถุประสงค์ของงาน ซึ่งมักจะวางแผนในสำนักงานก่อนที่จะมีการบิน สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการวางแผนการบินมีดังนี้

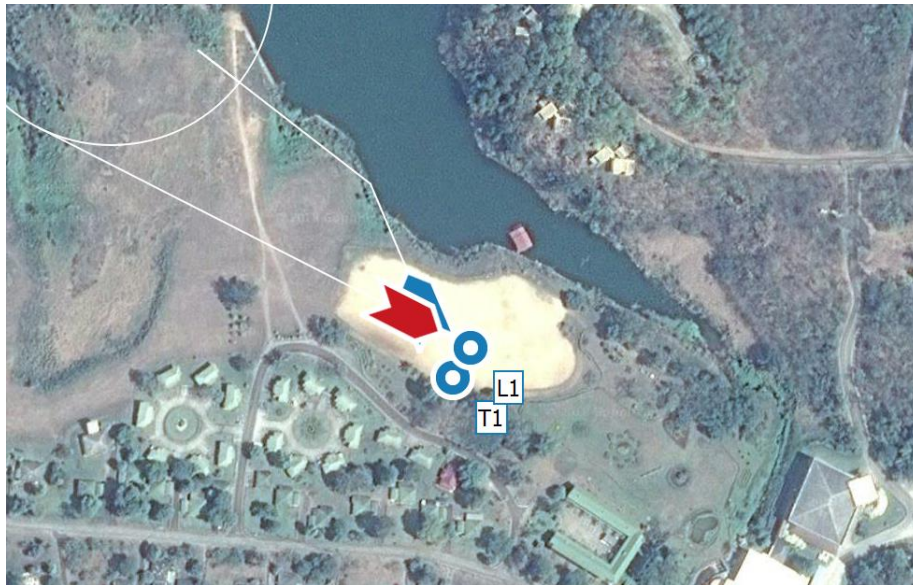
1) กำหนดขอบเขตพื้นที่

กำหนดขอบเขตพื้นที่ที่ต้องการบินถ่ายภาพ มีขนาดพื้นที่ประมาณ 1.5 ตารางกิโลเมตร บริเวณเขื่อนศรีนครินทร์ โดยใช้ซอฟต์แวร์ Aerial Imagine ดังภาพประกอบ 27 เนื่องจากลักษณะพื้นที่ภายในเขื่อนมีความแตกต่างทางระดับความสูงและการใช้ประโยชน์ที่ดิน เช่น พื้นที่ป่า (Forest) พื้นที่สิ่งปลูกสร้าง (Built-up areas) สนามกอล์ฟ พื้นที่น้ำ (Water) และพื้นที่เบ็ดเตล็ด (Miscellaneous) ซึ่งสามารถเป็นตัวแทนของความแตกต่างทางภูมิประเทศที่เห็นได้ชัด



ภาพประกอบ 27 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

กำหนดจุดปล่อยอากาศยานที่ค่าพิกัด $14.40183^{\circ} \text{ N}$, $99.11888^{\circ} \text{ E}$ และจุดร่อนลงของอากาศยานที่ค่าพิกัด $14.40200^{\circ} \text{ N}$, $99.11898^{\circ} \text{ E}$ บริเวณลานชายหาด เขื่อนศรีนครินทร์ ตำบลท่ากระดาน อำเภอศรีสวัสดิ์ จังหวัดกาญจนบุรี เมื่อวันที่ 25 กันยายน 2560



ภาพประกอบ 28 ลูกศรสีฟ้าแสดงตำแหน่งจุดปล่อยอากาศยาน
ลูกศรสีแดงแสดงตำแหน่งจุดร่อนลงของอากาศยาน



ภาพประกอบ 29 ตำแหน่งจุดปล่อยอากาศยาน

2) กำหนดส่วนซ้อนระหว่างภาพ (Overlap) และส่วนซ้อนระหว่างแนวกบิน (Sidelap)

กำหนดส่วนซ้อนระหว่างภาพ (Overlap) ร้อยละ 80 และส่วนซ้อนระหว่างแนวกบิน (Sidelap) ร้อยละ 80 ตามคำแนะนำของซอฟต์แวร์ Aerial Imagine ว่าไม่ควรกำหนดส่วนซ้อนระหว่างภาพ (Overlap) และส่วนซ้อนระหว่างแนวกบิน (Sidelap) น้อยกว่าที่กำหนดเพราะอาจทำให้ขาด tie point ที่ดี ควรจะกำหนดส่วนซ้อนระหว่างภาพ (Overlap) และส่วนซ้อนระหว่างแนวกบินมากกว่าการบินถ่ายภาพปกติ เนื่องจากอากาศยานไร้คนขับใช้หลักการประมวลผลจุดภาพของการจับคู่จุดภาพในขั้นตอน auto tie point ด้วยอัลกอริทึม "Scale-Invariant Feature Transform" (SIFT) ในการหาตำแหน่งจุดพิกัดบนพื้นดิน ดังนั้นแนวคิดของอัลกอริทึม SIFT จึงต้องการให้มีส่วนซ้อนระหว่างภาพ (Overlap) และส่วนซ้อนระหว่างแนวกบิน (Sidelap) ที่มากขึ้น เพื่อให้มีจำนวนภาพที่มีภาพของวัตถุเดียวกันปรากฏอยู่เป็นจำนวนที่มากขึ้น จะทำให้เรขาคณิตของการทำงานโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ (Aerial Triangulation) ได้ผลที่ดีและครอบคลุมภูมิประเทศ



ภาพประกอบ 30 กรอบสีแดง คือ การกำหนดส่วนซ้อนระหว่างภาพ (Overlap) ร้อยละ 80 และส่วนซ้อนระหว่างแนวกบิน (Sidelap) ร้อยละ 80 ลงในซอฟต์แวร์ Aerial Imagine

3) กำหนดความสูงบิน

การกำหนดความสูงบินจะหาได้จากสมการดังนี้

$$\frac{\text{ความสูงในการบินถ่ายภาพ (เมตร)} \times \text{ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (เมตร)}}{\text{ความละเอียดของจุดภาพ (เมตร)}}$$

โดยมีค่าพารามิเตอร์ของกล้องถ่ายภาพ คือ ความยาวโฟกัสของกล้องถ่ายภาพและค่าความละเอียดของจุดภาพเป็นค่าคงที่

จากสมการดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินกับความสูงจะแปรผันตามกัน ถ้าค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินสูง จะได้ความสูงในการบินถ่ายภาพต่ำ ถ้าค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินต่ำ จะได้ความสูงในการบินถ่ายภาพสูง

ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินจะเป็นปัจจัยหนึ่งในการกำหนดค่าความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้ ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินสูง จะให้ค่าความถูกต้องของผลลัพธ์สูงกว่าค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินต่ำ ดังนั้นการนำภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับไปใช้เพื่อการรังวัดด้วยภาพหรืองาน UAV Photogrammetry ควรกำหนดให้มีค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินที่สูง เพื่อให้มีค่าความถูกต้องในการรังวัดสูง การกำหนดค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินที่ต่ำ จะทำให้การรังวัดด้วยภาพไม่เห็นรายละเอียดที่ชัดเจนและเกิดความผิดพลาดในการรังวัดได้ เช่น จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินไม่ชัดเจนในขั้นตอนการวัดจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินบนภาพ แต่อย่างไรก็ตามการบินในระดับต่ำเพื่อให้ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินสูง จะทำให้ใช้ระยะเวลาในการบินมากขึ้น หากพื้นที่มีขนาดใหญ่จำเป็นต้องใช้แบตเตอรี่จำนวนมากและต้องทำการบินหลายรอบ อาจจะทำให้เกิดปัญหาเรื่องเงาของวัตถุแตกต่างกันจากการเคลื่อนที่ของดวงอาทิตย์ อีกทั้งลักษณะภูมิประเทศในพื้นที่บินเป็นอีกปัจจัยที่ต้องนำมาพิจารณา ถ้าความสูงบินไม่เหมาะสมอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ เช่น บริเวณที่มีอาคารหรือภูเขาสูง ควรกำหนดระดับความสูงบินให้มากพอที่จะไม่ก่อให้เกิดความเสียหายระหว่างการบิน

ดังนั้นในงานศึกษาวิจัยนี้ พื้นที่ศึกษาบางพื้นที่เป็นพื้นที่ราบ บางพื้นที่มีอาคาร ภูเขา หรือเสาไฟฟ้าแรงสูง จึงกำหนดค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน เพื่อไปคำนวณหาความสูงบินได้ดังนี้

- 3.1) ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินที่ 0.06 เมตร
- 3.2) ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินที่ 0.10 เมตร
- 3.3) ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินที่ 0.15 เมตร

$$\text{จากสูตรการหาความสูงบิน (เมตร) =} \\ \frac{\text{ความยาวโฟกัสของกล้องถ่ายภาพ (เมตร) \times ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (เมตร)}}{\text{ความละเอียดของจุดภาพ (เมตร)}}$$

กำหนดค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินที่ 0.06 เมตร โดยมีความยาวโฟกัส (f) 0.015579 เมตร และความละเอียดของจุดภาพ (Pixel Size) 0.000004880 เมตร เป็นค่าคงที่ จะได้ว่า

$$\text{ความสูงในการบินถ่ายภาพ (เมตร) =} \\ \frac{\text{ความยาวโฟกัสของกล้องถ่ายภาพ (เมตร) \times ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (เมตร)}}{\text{ความละเอียดของจุดภาพ (เมตร)}}$$

$$= \frac{0.015579 \times 0.06}{0.000004880}$$

$$= 191.545 \approx 192$$

เมื่อนำระดับความสูงบินที่ได้จากการคำนวณในสมการ กำหนดลงในซอฟต์แวร์ Aerial Image เพื่อใช้ในการวางแผนการบิน จะได้ตั้งภาพประกอบ 31



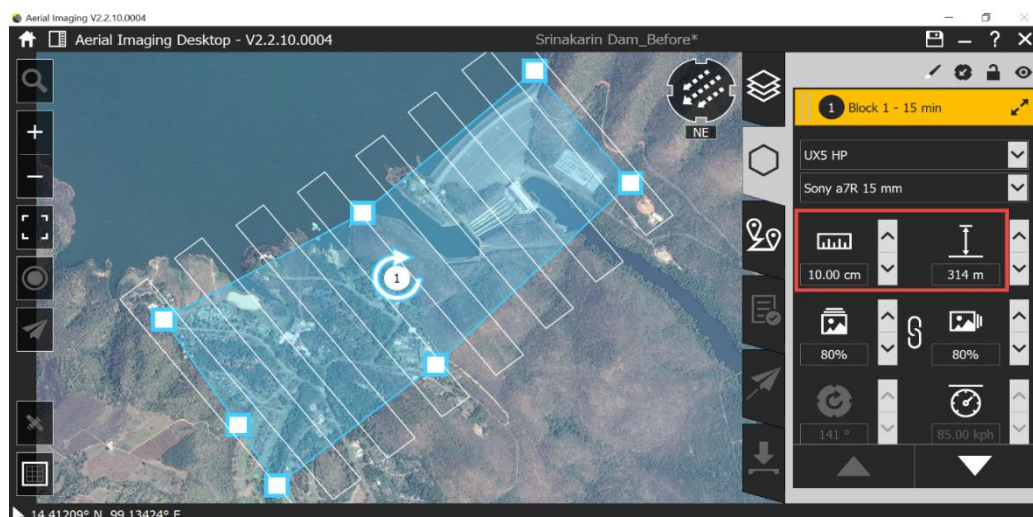
ภาพประกอบ 31 ความสัมพันธ์ของความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.06 เมตรและความสูงที่ 188 เมตร มีความยาวโฟกัส 15 มิลลิเมตร ที่ได้จากซอฟต์แวร์ Aerial Imagine

หมายเหตุ ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินและค่าความสูงที่ได้จากซอฟต์แวร์ Aerial Imagine เป็นค่าโดยประมาณที่ได้จากการคำนวณในโปรแกรมเบื้องต้น (นนทวัฒน์ นกเพชร, 2561)

กำหนดค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินที่ 0.10 เมตร โดยมีความยาวโฟกัส (f) 0.015579 เมตร และความละเอียดของจุดภาพ (Pixel Size) 0.000004880 เมตร เป็นค่าคงที่ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 &\text{ความสูงในการบินถ่ายภาพ (เมตร)} = \\
 &\frac{\text{ความยาวโฟกัสของกล้องถ่ายภาพ (เมตร)} \times \text{ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (เมตร)}}{\text{ความละเอียดของจุดภาพ (เมตร)}} \\
 &= \frac{0.015579 \times 0.10}{0.000004880} \\
 &= 319.242 \approx 319
 \end{aligned}$$

เมื่อนำระดับความสูงบินที่ได้จากการคำนวณในสมการ กำหนดลงในซอฟต์แวร์ Aerial Image เพื่อใช้ในการวางแผนการบิน จะได้ภาพประกอบ 32



ภาพประกอบ 32 ความสัมพันธ์ของความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.10 เมตรและความสูงที่ 314 เมตร มีความยาวโฟกัส 15 มิลลิเมตร ที่ได้จากซอฟต์แวร์ Aerial Image

หมายเหตุ ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินและค่าความสูงที่ได้จากซอฟต์แวร์ Aerial Image เป็นค่าโดยประมาณที่ได้จากการคำนวณในโปรแกรมเบื้องต้น (นนทวัฒน์ นกเพชร, 2561)

กำหนดค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินที่ 0.15 เมตร โดยมีความยาวโฟกัส (f) 0.015579 เมตร และความละเอียดของจุดภาพ (Pixel Size) 0.00000480 เมตร เป็นค่าคงที่ จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 & \text{ความสูงในการบินถ่ายภาพ (เมตร)} = \\
 & \frac{\text{ความยาวโฟกัสของกล้องถ่ายภาพ (เมตร)} \times \text{ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (เมตร)}}{\text{ความละเอียดของจุดภาพ (เมตร)}} \\
 & = \frac{0.015579 \times 0.15}{0.00000480} \\
 & = 478.862 \approx 479
 \end{aligned}$$

เมื่อนำระดับความสูงบินที่ได้จากการคำนวณในสมการ กำหนดลงในซอฟต์แวร์ Aerial Image เพื่อใช้ในการวางแผนการบิน จะได้ภาพประกอบ 33



ภาพประกอบ 33 ความสัมพันธ์ของความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.15 เมตรและความสูงที่ 470 เมตร มีความยาวโฟกัส 15 มิลลิเมตร ที่ได้จากซอฟต์แวร์ Aerial Image

หมายเหตุ ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินและค่าความสูงที่ได้จากซอฟต์แวร์ Aerial Image เป็นค่าโดยประมาณที่ได้จากการคำนวณในโปรแกรมเบื้องต้น (เนทวัฒน์ นกเพชร, 2561)

จากสมการดังกล่าวสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

ตาราง 6 ความสัมพันธ์ของมาตราส่วน ความสูงและความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) โดยมีความยาวโฟกัสและความละเอียดของจุดภาพ (Pixel Size) เป็นค่าคงที่

ความยาวโฟกัส (f) (เมตร)	ความละเอียดของ จุดภาพ (Pixel Size) (เมตร)	ความละเอียดของจุดภาพบน พื้นดิน (GSD) (เมตร)	ความสูง (เมตร)
0.015579	0.000004880	0.06	192
0.015579	0.000004880	0.10	319
0.015579	0.000004880	0.15	479

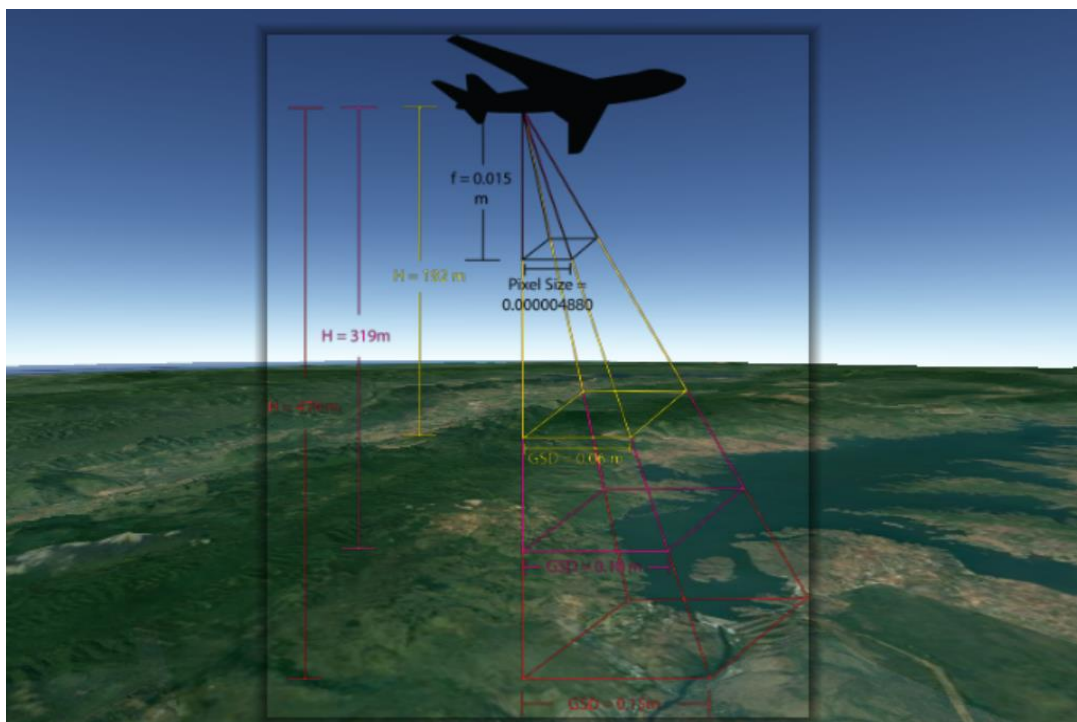
ตาราง 7 ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) และขนาดพื้นที่ต่อการบินที่ความสูงบินระดับต่างๆ ของอากาศยานไร้คนขับยี่ห้อ Trimble รุ่น UX5HP เลนส์ขนาด 15 มิลลิเมตร

ระดับความสูง (Height AGL)	ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD)	ขนาดพื้นที่ / การบิน (Area/flight)
75 เมตร	2.4 เซนติเมตร	1.4 ตารางกิโลเมตร
100 เมตร	3.3 เซนติเมตร	1.9 ตารางกิโลเมตร
120 เมตร	3.9 เซนติเมตร	2.4 ตารางกิโลเมตร
150 เมตร	4.9 เซนติเมตร	3.1 ตารางกิโลเมตร
300 เมตร	9.8 เซนติเมตร	6.5 ตารางกิโลเมตร
750 เมตร	16 เซนติเมตร	16.1 ตารางกิโลเมตร

ที่มา : Trimble. Trimble UX5HP Unmanned Aircraft System. Retrieved from [http:// www.nikon-trimble.co.jp/pdf/field/0301_geospatial/trimble_ux5_hp_e.pdf](http://www.nikon-trimble.co.jp/pdf/field/0301_geospatial/trimble_ux5_hp_e.pdf)

หมายเหตุ ตารางดังกล่าวเป็นอัตราส่วนของบล็อกการบินรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ส่วนซ้อนระหว่างภาพ (Overlap) ร้อยละ 80% รวมระยะเวลาในการบิน 5 นาที จากจุดปล่อยอากาศยานไปจนถึงแนวบินจุดแรกและจากแนวบินจุดสุดท้ายไปถึงจุดร่อนลงของอากาศยาน

จากตาราง 6 จะเห็นว่าตามคุณลักษณะเฉพาะของเครื่องบินนั้น หากทำการบินที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 2.4 เซนติเมตร จะสามารถครอบคลุมพื้นที่การบินได้ประมาณ 1.4 ตารางกิโลเมตร ขณะที่การศึกษาวิจัยนี้ ค่าความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 6 เซนติเมตร แต่สามารถครอบคลุมพื้นที่ได้เพียงขนาด 1.5 ตารางกิโลเมตร เนื่องจากตารางดังกล่าวนี้เป็นข้อมูลที่ได้จากรูปแบบการบินแบบปกติ ใช้แบตเตอรี่ 1 ก้อน แต่ในงานศึกษาวิจัยนี้กำหนดรูปแบบการบินแบบกริด จึงทำให้ได้ขนาดพื้นที่น้อยกว่า เพราะรูปแบบการบินแบบกริด จะต้องบินซ้ำในพื้นที่เดิม 2 รอบ ทำให้ใช้เวลาในการบินมากขึ้น 2 เท่า ขนาดพื้นที่จึงลดลงไป 1 เท่า อีกทั้งยังต้องใช้เวลาในการบินขึ้นลงจากปล่อยและจุดร่อนลง เพื่อให้เพียงพอต่อการใช้แบตเตอรี่ 1 ก้อน



ภาพประกอบ 34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินกับความสูงบินที่ระดับต่างๆซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ของกล้องถ่ายภาพเป็นค่าคงที่

4) กำหนดรูปแบบการบิน

เพื่อให้ปัจจัยด้านทิศทางและแรงลมมีผลกระทบต่อการบินถ่ายภาพน้อยที่สุด ควรกำหนดเส้นทางการบินให้ทิศทางของลมตั้งฉากกับแนวบิน ซึ่งการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้กำหนดรูปแบบการบิน แบ่งเป็นแบบทั่วไปและแบบกริด ตามแต่ละ GSD ดังนี้

4.1) กำหนดรูปแบบการบินแบบทั่วไป แบ่งเป็น

4.1.1) ค่าความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.06 เมตร

4.1.2) ค่าความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.10 เมตร

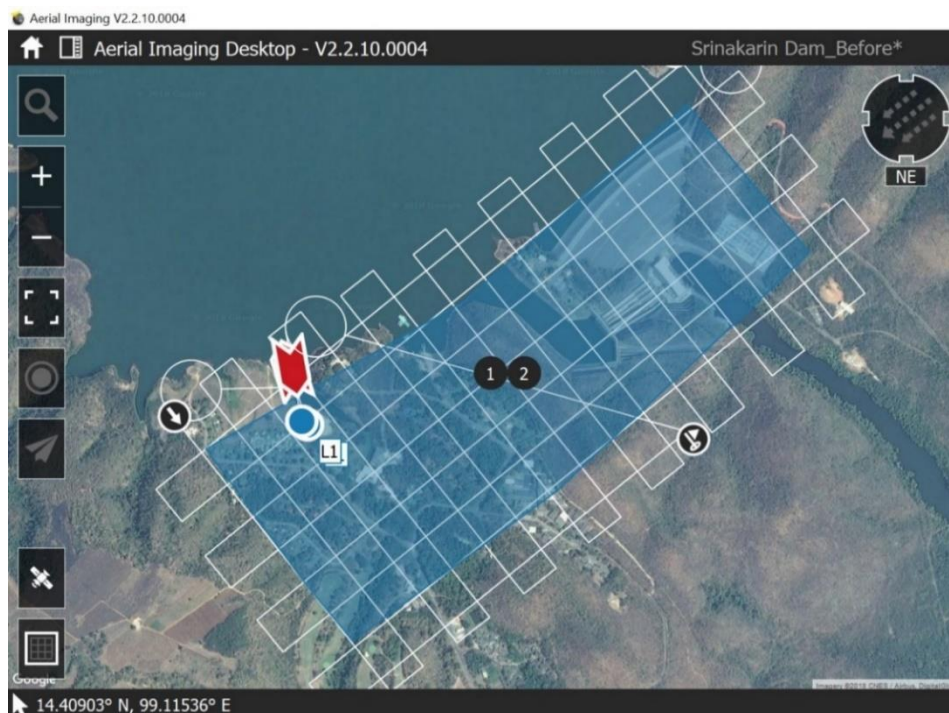
4.1.3) ค่าความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.15 เมตร

4.2) กำหนดรูปแบบการบินแบบกริด แบ่งเป็น

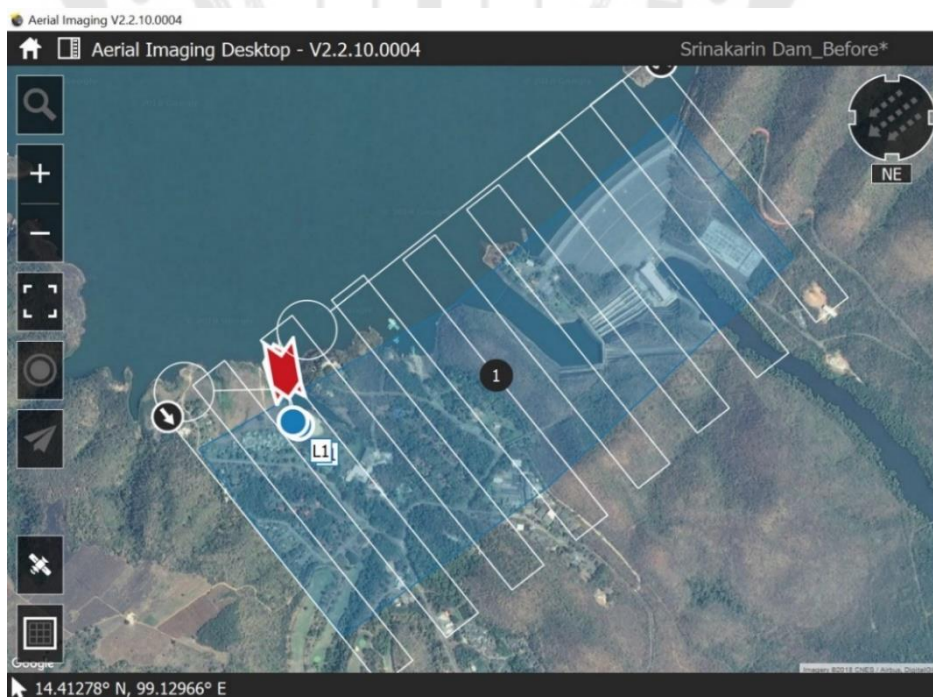
4.2.1) ค่าความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.06 เมตร

4.2.2) ค่าความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.10 เมตร

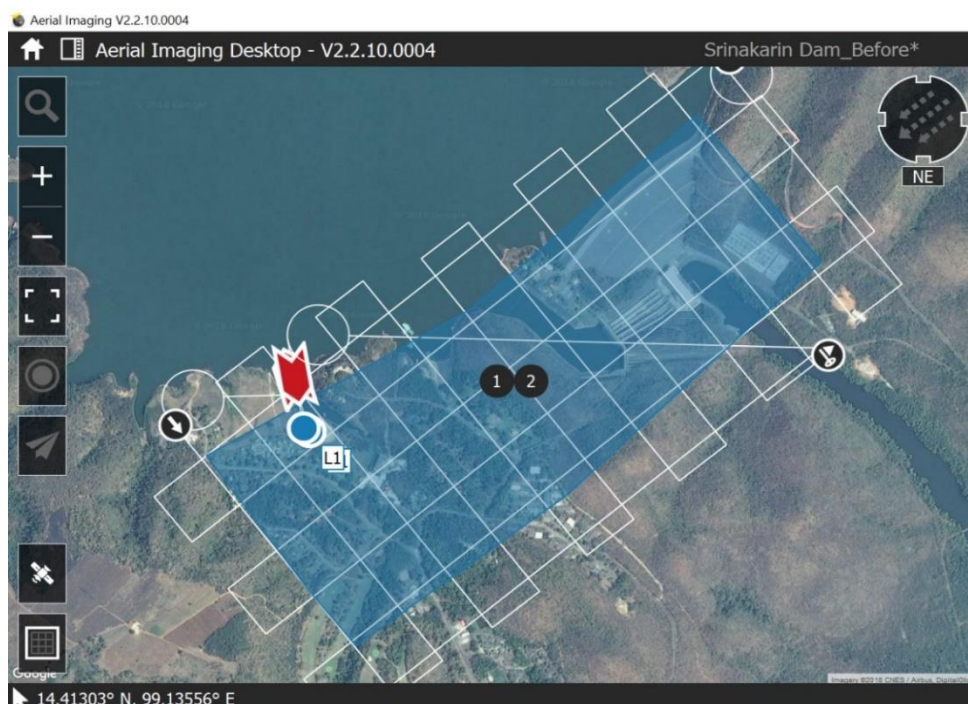
4.2.3) ค่าความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.15 เมตร



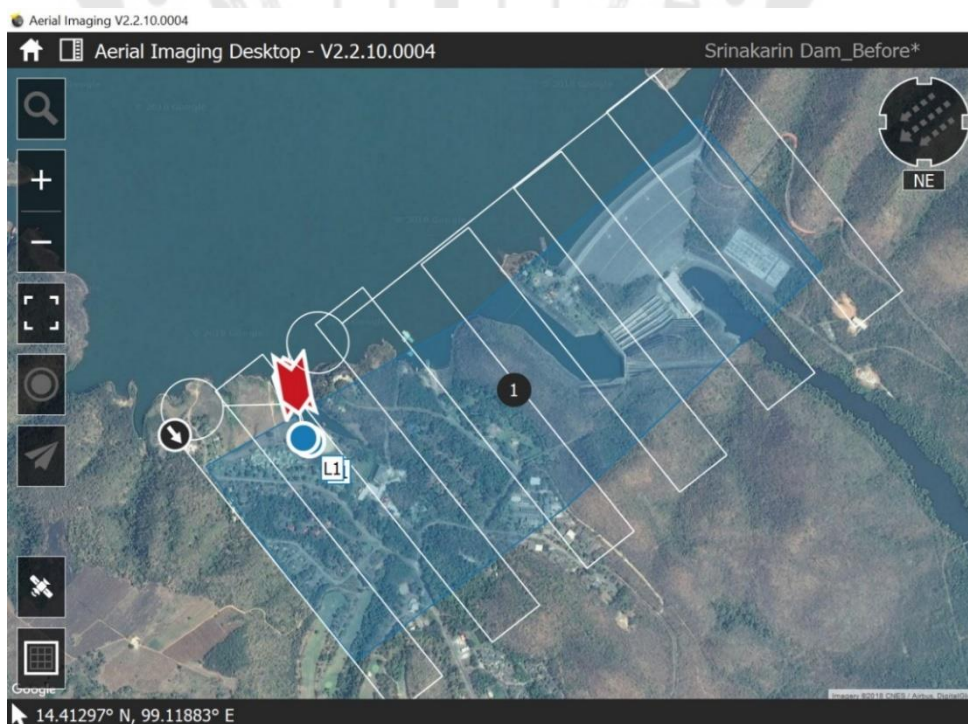
ภาพประกอบ 35 รูปแบบการบินแบบกริด GSD ที่ 0.06 เมตร



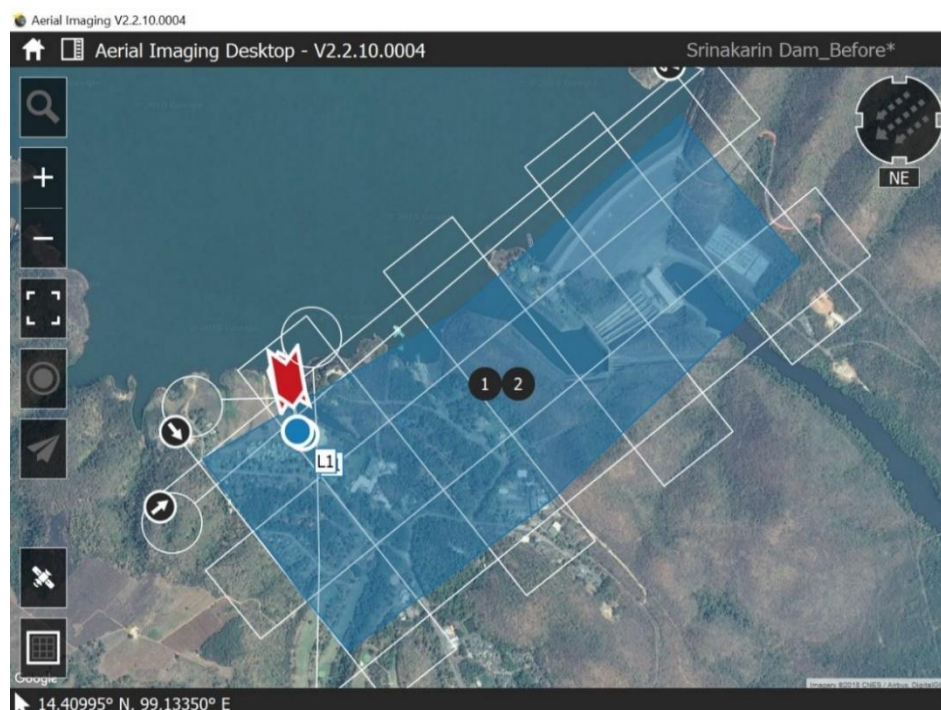
ภาพประกอบ 36 รูปแบบการบินแบบทั่วไป GSD ที่ 0.06 เมตร



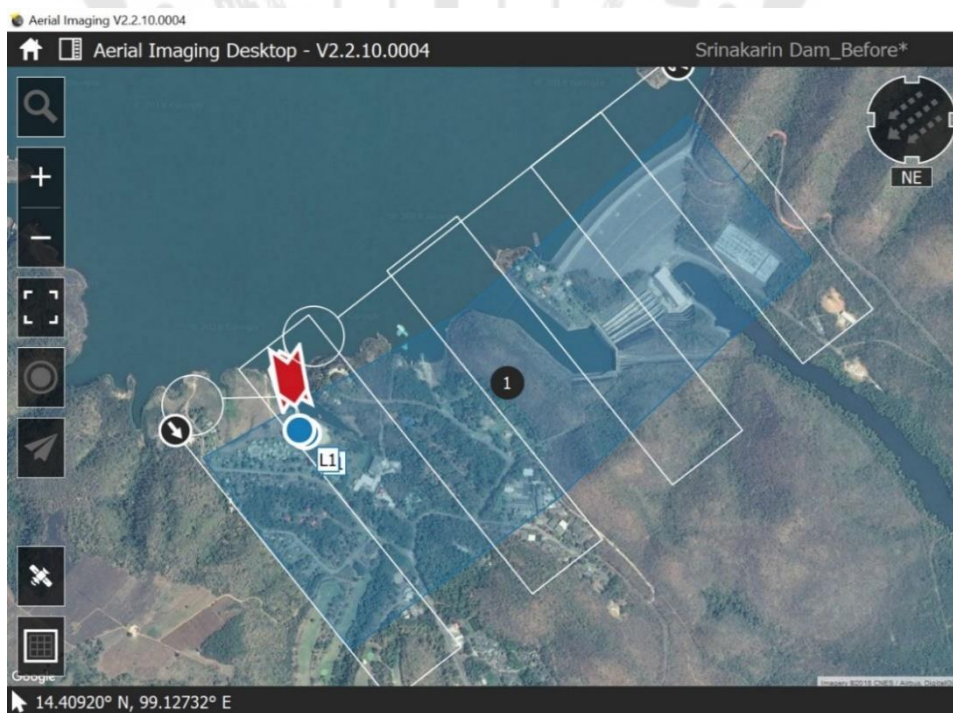
ภาพประกอบ 37 รูปแบบการบินแบบกริด GSD ที่ 0.10 เมตร



ภาพประกอบ 38 รูปแบบการบินแบบทั่วไป GSD ที่ 0.10 เมตร



ภาพประกอบ 39 รูปแบบการบินแบบกริด GSD ที่ 0.15 เมตร



ภาพประกอบ 40 รูปแบบการบินแบบทั่วไป GSD ที่ 0.15 เมตร

5) การวัดสอบกล้องถ่ายภาพ

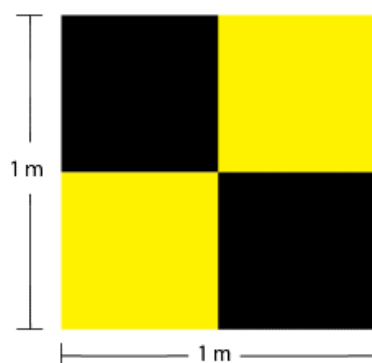
การวัดสอบกล้องถ่ายภาพจะใช้วิธีการวัดสอบกล้องในตัว (Self-calibration method) เป็นวิธีการที่นิยมใช้ในงานอากาศยานไร้คนขับ เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ในตัวกล้องมีความไม่เสถียร โดยจะหาค่าพารามิเตอร์ของกล้องถ่ายภาพไปพร้อมกับการประมวลผล ดังนั้นจะได้ค่าพารามิเตอร์ของกล้องในขณะที่กล้องบันทึกภาพอยู่ในขณะนั้น

6) การกำหนดตำแหน่งและจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินกับจุดตรวจสอบความถูกต้อง (Check point)

การกำหนดตำแหน่งและจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินจะขึ้นอยู่กับขนาดและจำนวนของบล็อกภาพถ่าย ในกรณีพื้นที่ศึกษาบล็อกภาพถ่ายมีรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าและใช้อากาศยานไร้คนขับที่มีการติดตั้งระบบพิกัดหาตำแหน่งของการบันทึกภาพแต่ละภาพด้วยวิธี PPK (Post Process Kinematic) ถือว่าเป็นบล็อกจีพีเอสที่มีการใช้เครื่องรับสัญญาณ GNSS หากเกิดของจุดเปิดถ่ายขณะที่บินถ่ายภาพ ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินเป็นจำนวนมากสามารถลดจำนวนจุดควบคุมภาคพื้นดินได้ ดังนั้น จึงใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินอย่างน้อย 5 จุด ในตำแหน่งที่อยู่บริเวณมุมพื้นที่ทั้ง 4 จุด ซึ่งจะต้องให้ปรากฏบนภาพหลายภาพ และกลางพื้นที่ 1 จุด เพื่อไม่ให้ภาพเกิดการบิดเบี้ยวบริเวณตรงกลางภาพถ่าย

การตำแหน่งจุดตรวจสอบ (Check point) ต้องให้กระจายทั่วทั้งภาพ โดยแบ่งภาพเป็น 4 ส่วน ในแต่ละส่วนจะต้องมีจุดไม่น้อยกว่า 20 % ความห่างของจุดให้ใช้ระยะ 1 ใน 10 ส่วนของเส้นทะแยงมุมภาพ และจำนวนจุดตรวจสอบ (Check point) ที่ใช้ต้องอย่างน้อย 20 จุด เพื่อให้สามารถใช้อธิบายข้อมูลในความหมายที่เข้าใจได้ง่าย

ลักษณะของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบความถูกต้องจะสร้างเป้าที่มีขนาดไม่น้อยกว่า 1 เมตร ดังภาพประกอบ 41 หรืออาจจะใช้จุดในพื้นที่ที่ขีดได้ตรงกับภาพถ่าย เช่น จุดตัดทางแยก มุมเส้นจราจร ขอบอาคาร เพื่อให้สามารถมองเห็นจุดตัดของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินได้อย่างชัดเจนในขั้นตอนการวัดจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินบนภาพ



ภาพประกอบ 41 เป้าของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินมีขนาด 1 เมตร

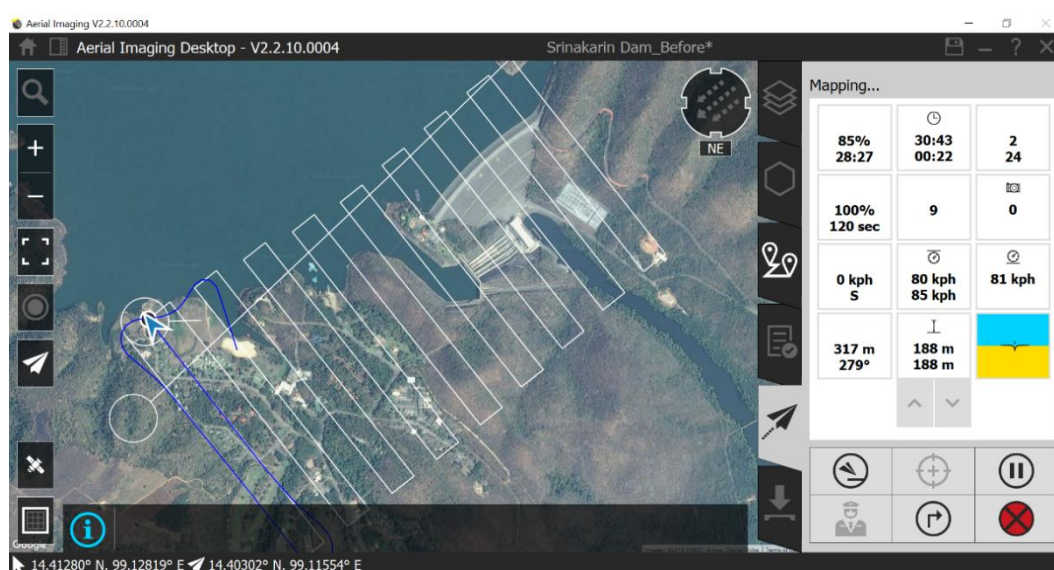
แต่เนื่องจากพื้นที่ศึกษามีความแตกต่างทางระดับความสูง ซึ่งทางด้านขวาของพื้นที่มีสภาพเป็นหุบเขาสลับภูเขา จึงทำให้ไม่สามารถวางจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบความถูกต้องได้ตามหลักทฤษฎี เนื่องจากในบริเวณดังกล่าวไม่สามารถรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ได้เพื่อใช้ในการขั้นตอนการรังวัดค่าพิกัดตำแหน่งจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบความถูกต้อง



ภาพประกอบ 42 จุดวงกลมสีชมพูแสดงตำแหน่งจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน
จุดวงกลมสีฟ้าแสดงตำแหน่งจุดตรวจสอบความถูกต้อง

การบินถ่ายภาพ

อากาศยานไร้คนขับของ Trimble รุ่น UX5HP ทำการถ่ายภาพตามแผนการบินที่ได้วางไว้ในขั้นตอนก่อนหน้าด้วยระบบ Autopilot ควบคุมการบินด้วยโปรแกรม Aerial Imagine จะแสดงรายละเอียดของอากาศยานไร้คนขับขณะทำการบิน เช่น ตำแหน่งของอากาศยาน ความสูง จำนวนภาพที่ถ่ายได้ ความเร็วลม แบตเตอรี่ รวมถึงการส่งคำสั่งต่างๆ ในกรณีมีเหตุฉุกเฉิน



ภาพประกอบ 43 จำลองการบินถ่ายภาพของอากาศยานไร้คนขับตามแผนการบินที่ได้วางไว้ในขั้นตอนก่อนหน้าด้วยระบบ Autopilot ควบคุมการบินด้วยโปรแกรม Aerial Imagine

การประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ

การศึกษาเปรียบเทียบความถูกต้องของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ โดยกำหนดรูปแบบการประมวลผล 2 รูปแบบ ดังนี้

- 1) การประมวลผลแบบ indirect geo-referencing โดยใช้จุดควบคุมภาพภาคพื้นดินในการประมวลผล
- 2) การประมวลผลแบบ direct geo-referencing โดยไม่ใช้จุดควบคุมภาพภาคพื้นดินในการประมวลผล เนื่องจากใช้อากาศยานไร้คนขับที่มีระบบวัดพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพความแม่นยำสูง (PPK)

ข้อมูลที่ได้จากการบินอากาศยานไร้คนขับ เพื่อใช้ในการประมวลผล ประกอบด้วย

- 1) ข้อมูลภาพถ่ายที่ได้จากการบินถ่ายภาพ
- 2) ข้อมูลการวางตัวภายใน (Interior Orientation) ประกอบด้วยความยาวโฟกัส ความละเอียดของจุดภาพ จุดमुखยสำคัญ (Principal Point) และ ความบิดเบี้ยวของเลนส์ (Lens Distortion) จากการวัดสอบกล้องถ่ายภาพ
- 3) ข้อมูลการวางตัวภายนอก (Exterior Orientation) ประกอบด้วย ค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพและมุมเอียงทั้ง 3 แกน (yaw, pitch, roll) ของอากาศยานขณะเปิดถ่ายภาพ

การรังวัดพิกัดและระดับของจุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Point) และจุดตรวจสอบความถูกต้อง (Check point)

การรังวัดค่าพิกัดตำแหน่งจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบความถูกต้อง จำนวน 24 จุด ตามที่กำหนดไว้ในขั้นตอนวางแผนการบิน โดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ชนิด 2 ความถี่ ด้วยวิธีรังวัดแบบจลนในทันที (Real Time Kinematic : RTK) ของ Trimble รุ่น R8 จะใช้เครื่องรับสัญญาณอย่างน้อย 2 เครื่อง ดังนี้

- 1) เครื่องสถานีฐาน จะถูกวางไว้บนหมุดที่ทราบค่าพิกัดแล้ว
- 2) เครื่องรับเครื่องที่สอง จะเคลื่อนย้ายไปวางรับสัญญาณตามจุดที่ต้องการหาค่าพิกัด ประมาณ 10 - 30 วินาที เท่านั้น มีการติดตั้งอุปกรณ์สื่อสารระหว่างเครื่องรับทั้งสอง การหาค่าพิกัดของตำแหน่งจุดต่างๆ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมของทั้งสองเครื่องจะรับข้อมูลจากดาวเทียมกลุ่มเดียวกันและช่วงเวลาเดียวกันอย่างน้อย 5 ดวง



ภาพประกอบ 44 ตัวอย่างการรังวัดค่าพิกัดตำแหน่งจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบความถูกต้องโดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีรังวัดแบบจลน์ในทันที

ค่าพิกัดของจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบความถูกต้องจะแสดงดังตัวอย่างตาราง 8 และ ตาราง 9

ตาราง 8 ตัวอย่างตารางค่าพิกัดของจุดควบคุมภาคพื้นดิน

NO.	X	Y	Z
GCP-1			
GCP-2			
GCP-3			
:			
GCP-5			

ตาราง 9 ตัวอย่างตารางค่าพิกัดของจุดตรวจสอบความถูกต้อง

NO.	X	Y	Z
Chk-1			
Chk-2			
Chk-3			
:			
Chk-18			

การตรวจสอบความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ

ตรวจสอบความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับด้วยวิธีการนำค่าพิกัด (X,Y) และค่าระดับ (Z) ของจุดตรวจสอบทั้ง 18 จุด ที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับที่ค่าความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร, 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร เปรียบเทียบกับค่าพิกัดของจุดเดียวกันที่ได้จากการรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS แบบจลน์ในทันที ของ Trimble รุ่น R8 จากภาคสนาม ตามตัวอย่างตารางที่ 10, ตารางที่ 11 และ ตารางที่ 12 เพื่อหาค่าความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ อ้างอิงวิธีการตามมาตรฐานการตรวจสอบความถูกต้องแผนที่ NSSDA

ตาราง 10 เปรียบเทียบค่าพิกัด (X,Y) และค่าระดับ (Z) ของจุดตรวจสองที่^{ซึ่ง}ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.06 เมตรกับค่าที่ได้จากการรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS แบบจลน์ในพื้นที่จากภาคสนาม

ค่าความแตกต่างที่ ^u ได้จากการบินเทียบ (เมตร)													
ค่าพิกัดและค่าระดับที่ ^u ได้จากเครื่องบิน													
ค่าพิกัดและค่าระดับที่ ^u ได้จากอากาศยานไร้คนขับ													
สัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS แบบจลน์ในพื้นที่													
No.	Point	X _{check}	Y _{data}	Z _{data}	X _{data}	Y _{data}	Z _{data}	ΔX	(ΔX^2)	ΔY	(ΔY^2)	ΔZ	(ΔZ^2)
1	Chk-1												
2	Chk-2												
3	Chk-3												
:	:												
18	Chk-18												

ตาราง 12 เปรียบเทียบค่าพิกัด (X,Y) และค่าระดับ (Z) ของจุดตรวจสอบที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.15 เมตรกับค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS แบบจลน์ในพื้นที่จากภาคสนาม

ค่าพิกัดและค่าระดับที่ได้จากภาพถ่ายที่ ได้จากอากาศยานไร้คนขับ									
ค่าพิกัดและค่าระดับที่ได้จากภาพถ่ายที่ ได้จากอากาศยานไร้คนขับ									
No.	Point	X _{check}	Y _{data}	Z _{data}	X _{data}	Y _{data}	Z _{data}	ΔX	(ΔX ²)
1	Chk-1							ΔY	(ΔY ²)
2	Chk-2							ΔZ	(ΔZ ²)
3	Chk-3								
:	:								
18	Chk-18								

Σ X²

Σ Y²

Σ Z²

นำค่าความแตกต่างที่ได้จากการเปรียบเทียบทั้ง 3 ตารางมาคำนวณหาความคลาดเคลื่อนตามสูตร ดังนี้

1) ค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยทาง X ($RMSE_x$) และ Y ($RMSE_y$)

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum (X_{data\ i} - X_{check\ i})^2}{n}}$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum (Y_{data\ i} - Y_{check\ i})^2}{n}}$$

2) ค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยทางรวม ($RMSE_r$)

$$RMSE_r = \sqrt{(RMSE_x)^2 + (RMSE_y)^2}$$

3) ค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยทางตั้ง ($RMSE_z$)

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum (Z_{data\ i} - Z_{check\ i})^2}{n}}$$

$X_{data\ i}$, $Y_{data\ i}$, $Z_{data\ i}$ เป็นค่าพิกัดและค่าระดับของจุดทดสอบที่ i ในชุดข้อมูล

$X_{check\ i}$, $Y_{check\ i}$, $Z_{check\ i}$ เป็นค่าพิกัดและค่าระดับของจุดทดสอบที่ i ที่ใช้เป็นค่าอ้างอิง

n คือ จำนวนจุดที่ใช้ทดสอบทั้งหมด

i คือ จุดทดสอบเริ่มจาก 1 ถึง n

วิธีการและสมการคำนวณตัวชี้วัดค่าความถูกต้องของข้อมูลที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตามมาตรฐาน NSSDA สามารถคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

1) การคำนวณความถูกต้อง (Accuracy) ทางรวม

$$\text{กรณีที่ 1} \quad RMSE_x = RMSE_y$$

$$Accuracy = 1.7308 \times RMSE_r$$

$$\begin{aligned} \text{กรณีที่ 2} \quad \text{RMSE}_x &\neq \text{RMSE}_y \\ \text{Accuracy}_r &\sim 1.2339 (\text{RMSE}_x + \text{RMSE}_y) \end{aligned}$$

2) การคำนวณความถูกต้อง (Accuracy) ทางดิ่ง สามารถคำนวณได้โดยใช้หลักการเดียวกัน ดังสมการ

$$\text{Accuracy}_z = 1.9600 \times \text{RMSE}_z$$

นำค่า RMSE ที่เป็นค่าความละเอียดถูกต้องทางราบไปหาความสัมพันธ์กับมาตราส่วนของแผนที่ตามตาราง 4 มาตรฐานความละเอียดถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบของ ASPRS

การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร

ในการศึกษาวิจัยนี้ ได้กำหนดให้

- 1) รูปแบบการบิน 2 แบบ คือ แบบทั่วไปกับแบบกริด
- 2) ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร
- 3) อากาศยานไร้คนขับที่ใช้ระบบ PPK และไม่ใช้ระบบ PPK

สามารถแสดงความสัมพันธ์กับค่าความถูกต้อง และระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผลได้

ดังนี้

ตาราง 13 ตัวอย่างตารางความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการบิน ค่าความถูกต้องและระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.6 เมตร, 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร

GSD (เมตร)	ระบบ	รูปแบบ การบิน	ความถูกต้องทางราบ (เมตร)	ความถูกต้องทางตั้ง (เมตร)	ระยะเวลา ประมวลผล (ชั่วโมง)
0.06	GCP	ทั่วไป			
		กริด			
	PPK	ทั่วไป			
		กริด			
0.10	GCP	ทั่วไป			
		กริด			
	PPK	ทั่วไป			
		กริด			
0.15	GCP	ทั่วไป			
		กริด			
	PPK	ทั่วไป			
		กริด			

บทที่ 4

ผลการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ได้ศึกษาหาความถูกต้องเชิงพื้นที่ของการใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อผลิตแผนที่ภาพถ่ายรายละเอียดสูง โดยได้กำหนดรูปแบบการบิน แบ่งเป็นแบบทั่วไปและแบบกริด ตามความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ควบคุมความถูกต้องของตำแหน่งภาพถ่ายด้วยระบบ PPK (ไม่ใช่จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP)) กับการใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการวิจัยออกเป็นหัวข้อดังนี้

การบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ

หลังจากกำหนดแผนการบินแล้ว จะส่งข้อมูลการบินไปยังเครื่องควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Station) ขณะบินจะแสดงข้อมูลการบิน ประกอบด้วย ตำแหน่ง ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน ความสูง ความเอียงของอากาศยาน ความเร็วลม จำนวนภาพถ่ายที่ถ่ายได้ในขณะนั้น ระยะเวลาบิน สถานะแบตเตอรี่ ข้อมูลดังกล่าวนี้ได้ออกส่งมายังภาคพื้นดินโดยผ่านทางสัญญาณวิทยุ แสดงผลทางหน้าจอของเครื่องควบคุมภาคพื้นดินผ่านโปรแกรม Aerial Imagine ซึ่งเชื่อมโยงกับ Google Earth ทำให้สามารถเห็นตำแหน่งของอากาศยานขณะบินได้ชัดเจน

การบินถ่ายภาพได้ดำเนินการเมื่อวันที่ 25 กันยายน 2561 พื้นที่ศึกษาบางพื้นที่เป็นพื้นที่ราบ บางพื้นที่มีอาคาร ภูเขา หุบเขา หรือเสาไฟฟ้าแรงสูง จึงกำหนดค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน เพื่อไปคำนวณหาความสูงบินได้ดังนี้

- 1) ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินที่ 0.06 เมตร
- 2) ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินที่ 0.10 เมตร
- 3) ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินที่ 0.15 เมตร

จากสูตรการหาความสูงบิน

ความสูงในการบินถ่ายภาพ (เมตร) =

$$\frac{\text{ความยาวโฟกัสของกล้องถ่ายภาพ (เมตร)} \times \text{ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (เมตร)}}{\text{ความละเอียดของจุดภาพ (เมตร)}}$$

กำหนดค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินที่ 0.06 เมตร โดยมีความยาวโฟกัส (f) 0.015579 เมตร และความละเอียดของจุดภาพ (Pixel Size) 0.000004880 เมตร เป็นค่าคงที่ จะได้ว่า

ความสูงในการบินถ่ายภาพ (เมตร)

$$= \frac{0.015579 \times 0.06}{0.000004880}$$

$$= 191.545 \approx 192$$

กำหนดค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินที่ 0.10 เมตร โดยมีความยาวโฟกัส (f) 0.015579 เมตร และความละเอียดของจุดภาพ (Pixel Size) 0.000004880 เมตร เป็นค่าคงที่ จะได้ว่า

ความสูงในการบินถ่ายภาพ (เมตร)

$$= \frac{0.015579 \times 0.10}{0.000004880}$$

$$= 319.242 \approx 319$$

กำหนดค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินที่ 0.15 เมตร โดยมีความยาวโฟกัส (f) 0.015579 เมตร และความละเอียดของจุดภาพ (Pixel Size) 0.000004880 เมตร เป็นค่าคงที่ จะได้ว่า

ความสูงในการบินถ่ายภาพ (เมตร)

$$= \frac{0.015579 \times 0.15}{0.000004880}$$

$$= 478.862 \approx 479$$

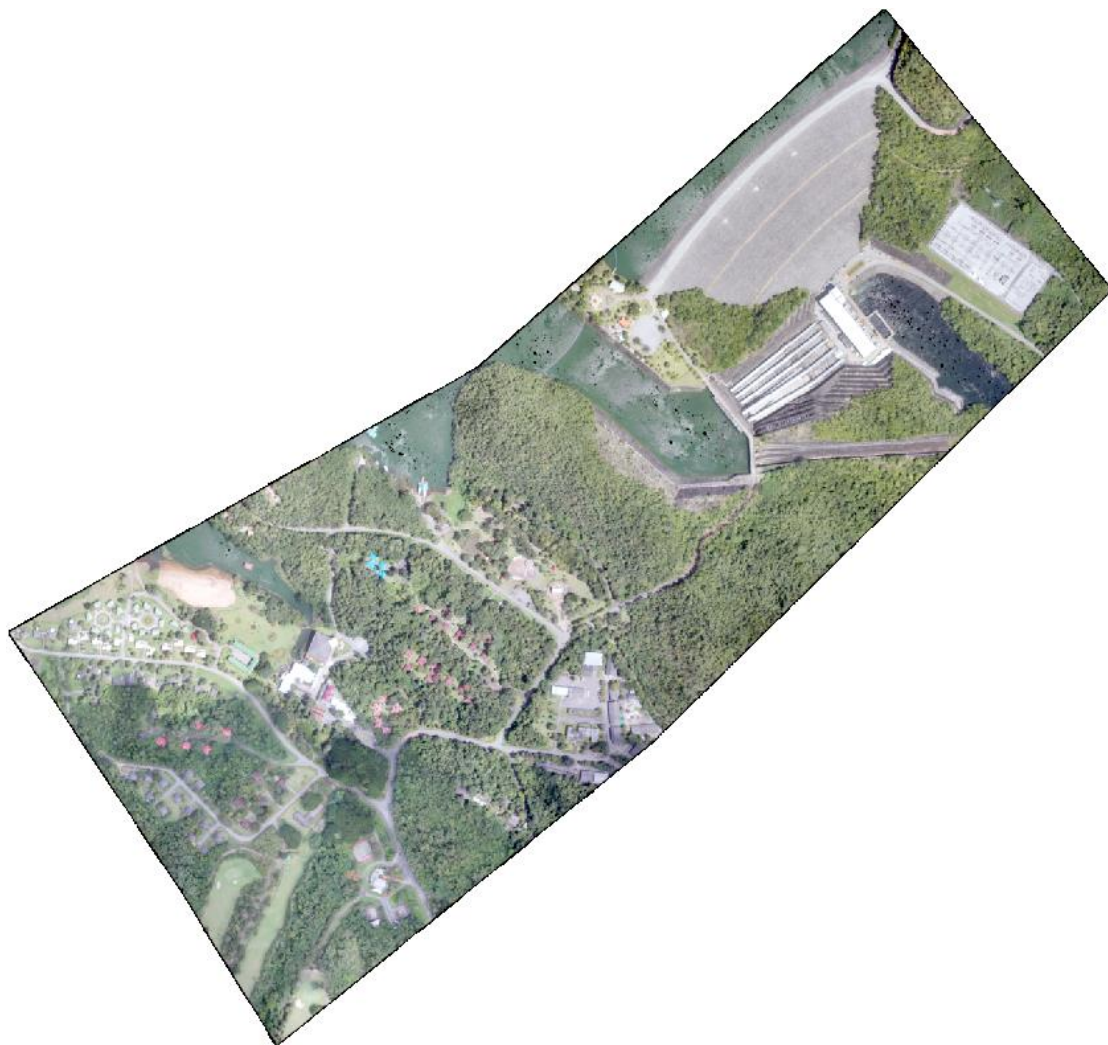
จำนวนภาพถ่ายที่ได้จากการบินถ่ายภาพตามความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร แสดงดังตาราง 14

ตาราง 14 จำนวนภาพถ่ายที่ได้จากการบินถ่ายภาพตามความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร

	รูปแบบการบินทั่วไป	รูปแบบการบินแบบกริด
GSD ที่ 0.06 เมตร	334 รูป	688 รูป
GSD ที่ 0.10 เมตร	132 รูป	279 รูป
GSD ที่ 0.15 เมตร	68 รูป	139 รูป



ภาพประกอบ 45 ภาพถ่ายออร์โธจากอากาศยานไร้คนขับที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร



ภาพประกอบ 46 ภาพถ่ายออร์โธจากอากาศยานไร้คนขับที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน
(GSD) 0.10 เมตร



ภาพประกอบ 47 ภาพถ่ายออร์โธจากอากาศยานไร้คนขับที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน
(GSD) 0.15 เมตร

ตาราง 15 ตัวอย่างรายละเอียดข้อมูลภาพในบริเวณต่างๆที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร

ขนาด GSD	ชื่อ ID	ประเภท สิ่งปก คลุม พื้นที่	ตัวอย่างข้อมูล	สิ่งที่ ปรากฏ
0.06	A	บ้านพัก		ขอบ หลังคา บ้านคมชัด เห็นร่อง กระเบื้อง
0.10	A	บ้านพัก		ขอบ หลังคา บ้านบิด เบี้ยว บางส่วน
0.15	A	บ้านพัก		ขอบ หลังคา บ้านบิด เบี้ยว ละลาย กลืนไปกับ วัตถุอื่น

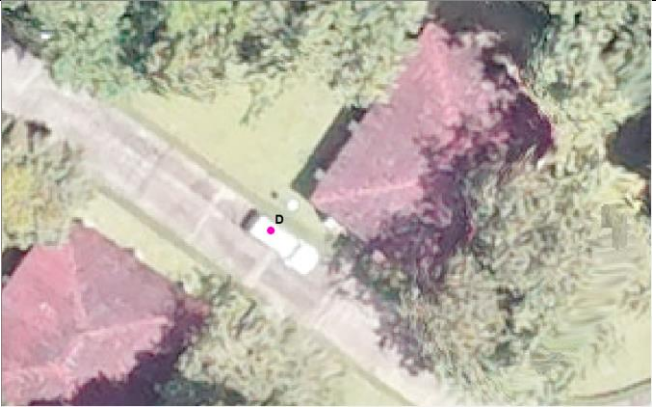
ตาราง 15 (ต่อ)

ขนาด GSD	ชื่อ ID	ประเภท สิ่งปลูก คลุม พื้นที่	ตัวอย่างข้อมูล	สิ่งที่ ปรากฏ
0.06	B	แปลงไม้ ประดับ		เส้นขอบ แปลงและ ต้นไม้มี ความ คมชัด
0.10	B	แปลงไม้ ประดับ		เส้นขอบ แปลงและ ต้นไม้ไม่ คมชัด
0.15	B	แปลงไม้ ประดับ		เส้นขอบ แปลงและ ต้นไม้เบลอ

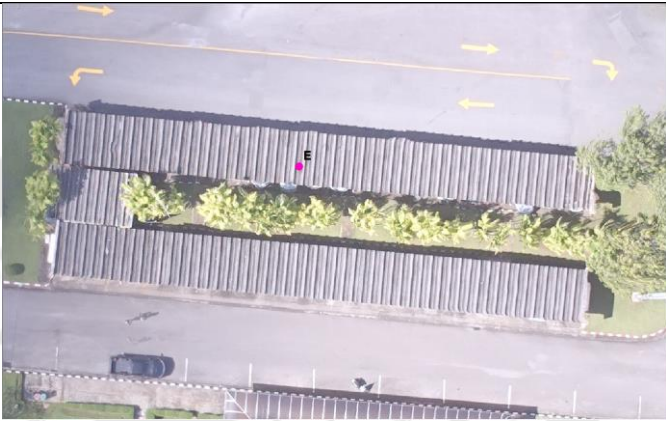
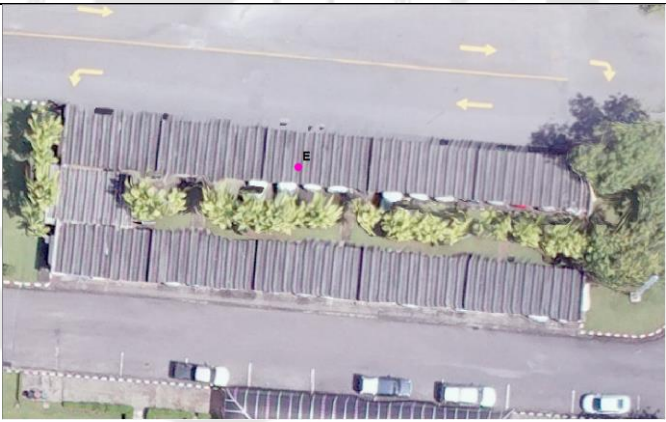
ตาราง 15 (ต่อ)

ขนาด ด GSD	ชื่อ ID	ประเภท สิ่งปก คลุม พื้นที่	ตัวอย่างข้อมูล	สิ่งที่ ปรากฏ
0.06	C	สนาม บาส เกตบอล		เส้นขอบ สนามและ แป้นชู้ต บาสคมชัด
0.10	C	สนาม บาส เกตบอล		เส้นขอบ สนามและ แป้นชู้ต บาสเริ่มไม่ คมชัด มี noise เกิดขึ้น
0.15	C	สนาม บาส เกตบอล		เส้นขอบ สนามและ แป้นชู้ต บาสเบลอ

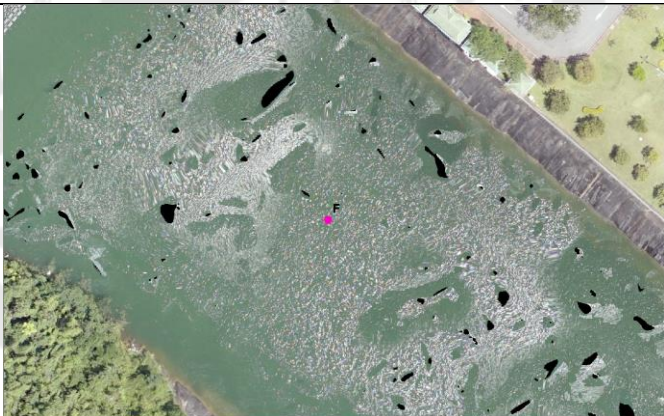
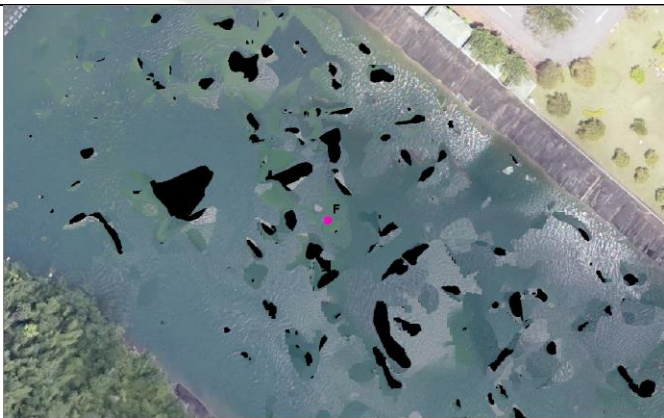
ตาราง 15 (ต่อ)

ขนาด GSD	ชื่อ ID	ประเภท สิ่งปก คลุม พื้นที่	ตัวอย่างข้อมูล	สิ่งที่ ปรากฏ
0.06	D	รถยนต์		เห็น ชัดเจน ว่าเป็น รถยนต์
0.10	D	รถยนต์		เห็นชัด ว่าเป็น รถยนต์ มี noise เกิดขึ้น
0.15	D	รถยนต์		เริ่มไม่ ชัดเจน ว่าเป็น รถยนต์ เส้นขอบ รถ หายไป

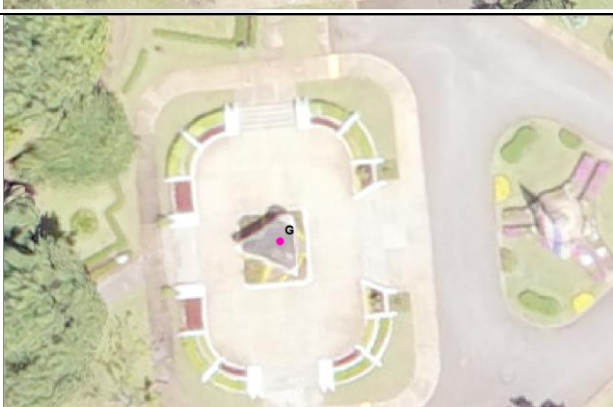
ตาราง 15 (ต่อ)

ขนาด GSD	ชื่อ ID	ประเภท สิ่งปก คลุม พื้นที่	ตัวอย่างข้อมูล	สิ่งที่ ปรากฏ
0.06	E	หลังคา ที่จอด รถ		ขอบ หลังคา คมชัด เห็นร่อง กระเบื้อง
0.10	E	หลังคา ที่จอด รถ		ขอบ หลังคา เริ่มปิด เบี่ยง บางส่วน
0.15	E	หลังคา ที่จอด รถ		ขอบ หลังคา เบลอ ร่อง กระเบื้อง ไม่ชัด

ตาราง 15 (ต่อ)

ขนาด GSD	ชื่อ ID	ประเภท สิ่งปก คลุม พื้นที่	ตัวอย่างข้อมูล	สิ่งที่ ปรากฏ
0.06	F	น้ำ		มี noise สี ดำเกิดขึ้น บ้าง
0.10	F	น้ำ		มี noise สี ดำเกิดขึ้น เยอะ
0.15	F	น้ำ		มี noise สี ดำเกิดขึ้น เยอะและมี ขนาดใหญ่

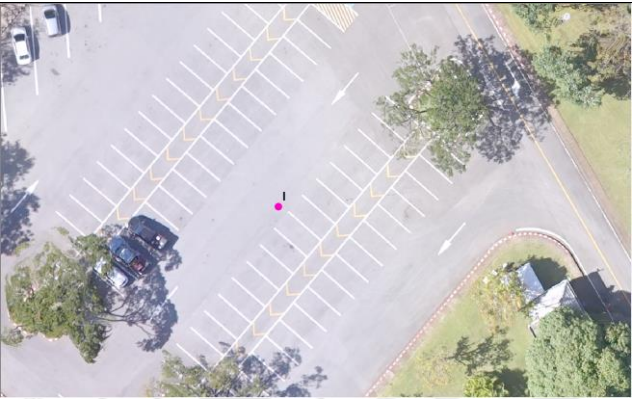
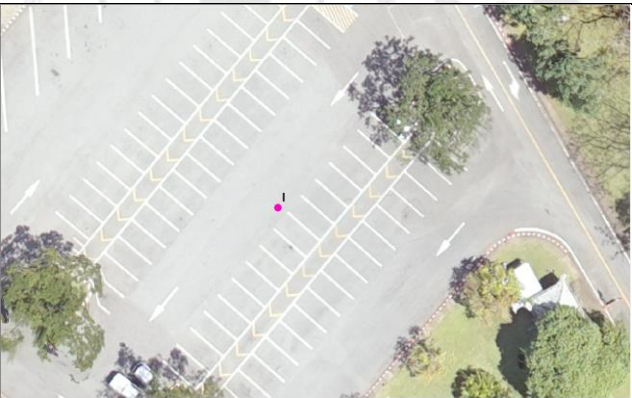
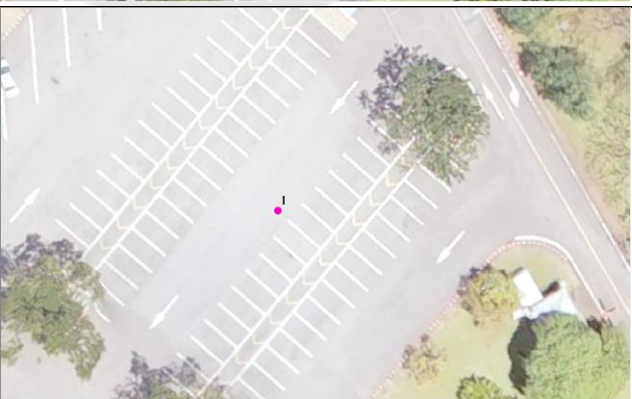
ตาราง 15 (ต่อ)

ขนาด GSD	ชื่อ ID	ประเภท สิ่งปลูก คลุม พื้นที่	ตัวอย่างข้อมูล	สิ่งที่ ปรากฏ
0.06	G	ประติ- มา กรรม		เห็นขอบ แท่นประติ- มากรรม, สวนรอบๆ, บันได ชัดเจน
0.10	G	ประติ- มา กรรม		เห็นขอบ แท่นประติ- มากรรม, สวนรอบๆ, บันไดไม่ ชัดเจน
0.15	G	ประติ- มา กรรม		เห็นขอบ แท่นประติ- มากรรม, สวนรอบๆ, บันได เบลอ

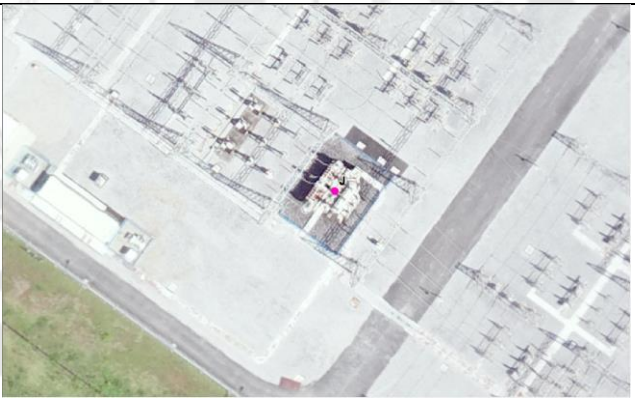
ตาราง 15 (ต่อ)

ขนาด GSD	ชื่อ ID	ประเภท สิ่งปก คลุม พื้นที่	ตัวอย่างข้อมูล	สิ่งที่ ปรากฏ
0.06	H	สันเขื่อน		เห็นเส้น สันเขื่อน ชัดเจน
0.10	H	สันเขื่อน		เห็นเส้น สันเขื่อน ไม่ชัดเจน
0.15	H	สันเขื่อน		เห็นเส้น สันเขื่อน ไม่ชัดเจน

ตาราง 15 (ต่อ)

ขนาด GSD	ชื่อ ID	ประเภท สิ่งปก คลุม พื้นที่	ตัวอย่างข้อมูล	สิ่งที่ปรากฏ
0.06	I	เส้นช่อง จอดรถ, มุมเส้น จราจร		เส้นช่อง จอดรถเห็น ชัดเจน, มุม เส้นจราจร สามเหลี่ยม แหลม
0.10	I	เส้นช่อง จอดรถ, มุมเส้น จราจร		เส้นช่อง จอดรถขอบ จะฟุ้งๆ, มุม เส้นจราจร สามเหลี่ยม หัวทู่
0.15	I	เส้นช่อง จอดรถ, มุมเส้น จราจร		เส้นช่อง จอดรถขอบ จะฟุ้งมี noise , มุม เส้นจราจร ไม่เป็น สามเหลี่ยม

ตาราง 15 (ต่อ)

ขนาด GSD	ชื่อ ID	ประเภท สิ่งปก คลุม พื้นที่	ตัวอย่างข้อมูล	สิ่งที่ ปรากฏ
0.06	J	สถานี ไฟฟ้า		เห็นหม้อ แปลง ไฟฟ้า,เสา ไฟฟ้า ชัดเจน
0.10	J	สถานี ไฟฟ้า		เห็นหม้อ แปลง ไฟฟ้า,เสา ไฟฟ้าไม่ ชัดเจน มี คดโค้งบิด เบี้ยว บางส่วน
0.15	J	สถานี ไฟฟ้า		เห็นหม้อ แปลง ไฟฟ้า,เสา ไฟฟ้าไม่ ชัดเจน เบลอ

จากภาพประกอบ 45 - 47 และ ตาราง 14 แสดงให้เห็นว่า ภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ ที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร จะปรากฏรายละเอียดบนภาพให้เห็นได้ชัดเจนมากที่สุด รายละเอียดบนภาพจะลดน้อยลงไปตามค่าความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) หรือระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น ภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร จึงปรากฏรายละเอียดบนภาพให้เห็นได้ชัดเจนน้อยที่สุด



ภาพประกอบ 48 ตัวอย่างภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับที่ ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร

จากภาพประกอบ 48 แสดงให้เห็นว่า ภาพถ่ายที่ถ่ายด้วยกล้องประเภทเดียวกัน ระยะโฟกัสของกล้องเท่ากัน แต่ถ่ายภาพจากระดับความสูงหรือความละเอียดจุดภาพบนพื้นดินที่แตกต่างกัน ภาพถ่ายในระดับที่สูงกว่าจะครอบคลุมพื้นที่ได้มากกว่าภาพถ่ายที่ถ่ายในระดับต่ำกว่า

พื้นที่ครอบคลุมต่อภาพของภาพถ่ายจากความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ต่ำ (0.15 เมตร) ซึ่งจะบินถ่ายภาพในระดับสูง จะมีขนาดกว้างใหญ่กว่าภาพถ่ายจากความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) สูง (0.06 เมตร) หรือความสูงในการบินถ่ายภาพต่ำ เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ที่

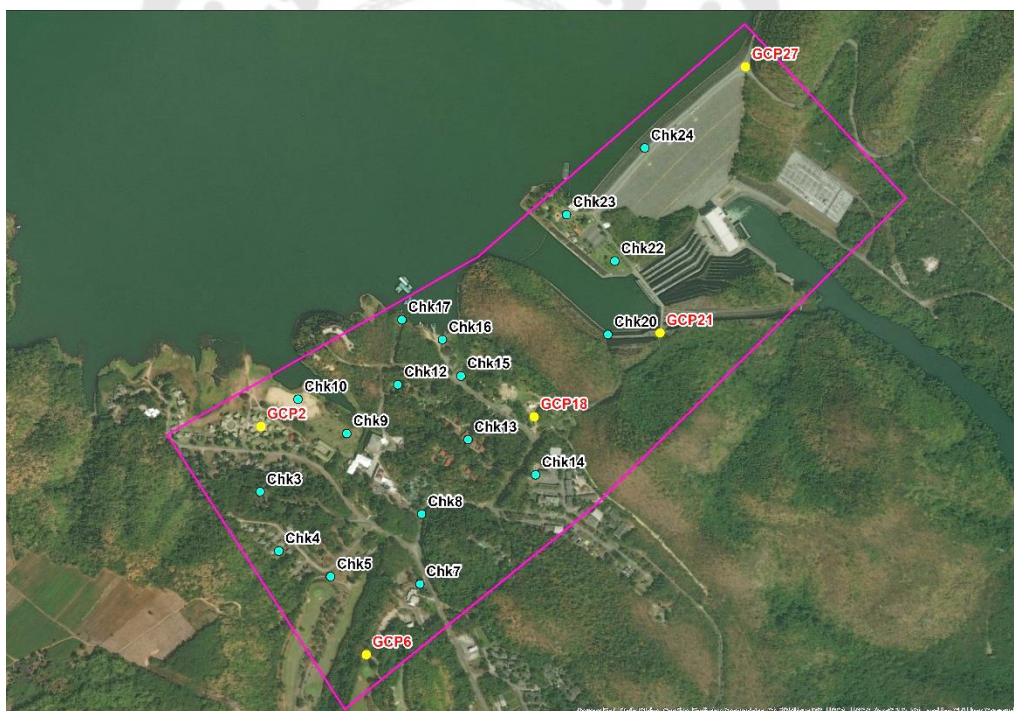
ต้องการ ภาพถ่ายจากที่สูงในการบินถ่ายภาพต่ำจะมีจำนวนภาพมากกว่า ภาพถ่ายจากที่สูงในการบินถ่ายภาพที่สูง ซึ่งอาจจะทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากกว่า

การประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ

การศึกษาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ กำหนดรูปแบบการประมวลผล 2 รูปแบบ ดังนี้

1) การประมวลผลแบบ indirect geo-referencing โดยใช้จุดควบคุมภาพภาคพื้นดินในการประมวลผล

2) การประมวลผลแบบ direct geo-referencing โดยไม่ใช้จุดควบคุมภาพภาคพื้นดินในการประมวลผล เนื่องจากใช้อากาศยานไร้คนขับที่มีระบบวัดพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพความแม่นยำสูง (PPK)



ภาพประกอบ 49 ตำแหน่งจุดควบคุมภาพภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบความถูกต้อง

ค่าพิกัดของจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบความถูกต้องที่ได้จากการสำรวจรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบจลน์ในทันที (Real Time Kinematic : RTK) แสดงดังตาราง 16

ตาราง 16 ค่าพิกัดของจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบความถูกต้อง จำนวนทั้งหมด 23 จุด

NO.	Name	X	Y	Z	Remark
1	GCP-2	512731.742	1592147.912	182.407	จุดควบคุมภาคพื้นดิน
2	GCP-6	513014.327	1591500.283	206.065	จุดควบคุมภาคพื้นดิน
3	GCP-18	513460.776	1592166.441	199.533	จุดควบคุมภาคพื้นดิน
4	GCP-21	513836.421	1592404.286	186.789	จุดควบคุมภาคพื้นดิน
5	GCP-27	514063.628	1593151.206	186.419	จุดควบคุมภาคพื้นดิน
6	Chk-3	512717.014	1591962.404	204.961	จุดตรวจสอบความถูกต้อง
7	Chk-4	512802.247	1591826.145	214.312	จุดตรวจสอบความถูกต้อง
8	Chk-5	512892.844	1591741.211	204.149	จุดตรวจสอบความถูกต้อง
9	Chk-7	513119.696	1591685.794	194.623	จุดตรวจสอบความถูกต้อง
10	Chk-8	513222.008	1591944.329	191.191	จุดตรวจสอบความถูกต้อง
11	Chk-9	512956.998	1592100.762	180.333	จุดตรวจสอบความถูกต้อง
12	Chk-10	512776.382	1592184.971	179.171	จุดตรวจสอบความถูกต้อง
13	Chk-12	513186.860	1592212.669	186.035	จุดตรวจสอบความถูกต้อง
14	Chk-13	513293.562	1592137.088	190.251	จุดตรวจสอบความถูกต้อง
15	Chk-14	513480.890	1591971.380	202.687	จุดตรวจสอบความถูกต้อง
16	Chk-15	513274.568	1592276.397	185.395	จุดตรวจสอบความถูกต้อง
17	Chk-16	513238.274	1592361.301	178.230	จุดตรวจสอบความถูกต้อง
18	Chk-17	513114.447	1592441.505	180.986	จุดตรวจสอบความถูกต้อง
19	Chk-20	513705.228	1592387.105	186.598	จุดตรวจสอบความถูกต้อง
20	Chk-22	513720.664	1592574.777	186.697	จุดตรวจสอบความถูกต้อง
21	Chk-23	513574.713	1592711.433	186.693	จุดตรวจสอบความถูกต้อง
22	Chk-24	513758.271	1592899.356	187.021	จุดตรวจสอบความถูกต้อง
23	Chk-31	512657.692	1591891.518	219.907	จุดตรวจสอบความถูกต้อง

1. การหาค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างการบินในรูปแบบทั่วไปกับการบินในรูปแบบกริด

1.1 ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร

จากตาราง 17 และภาพประกอบ 50 จะได้ค่าความถูกต้อง ดังนี้

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร
ในรูปแบบทั่วไป ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.114 เมตร

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร
ในรูปแบบกริด ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.113 เมตร

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร
ในรูปแบบทั่วไป ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.132 เมตร

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร
ในรูปแบบกริด ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.130 เมตร

ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร
ในรูปแบบทั่วไป ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) มีค่าความถูกต้องทางดิ่ง 0.204 เมตร

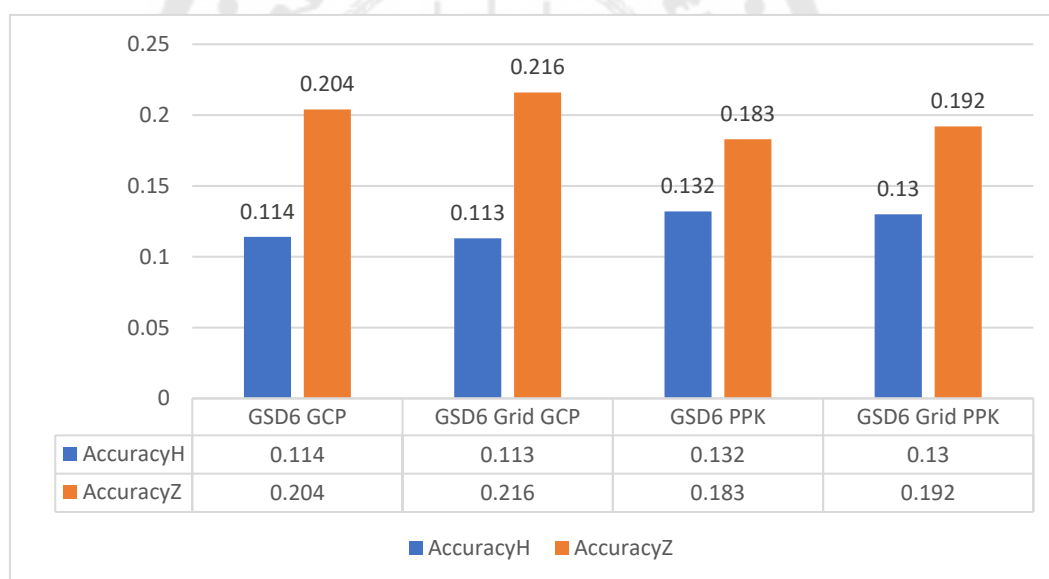
ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร
ในรูปแบบกริด ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) มีค่าความถูกต้องทางดิ่ง 0.216 เมตร

ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร
ในรูปแบบทั่วไป ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK มีค่าความถูกต้องทางดิ่ง 0.183 เมตร

ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร
ในรูปแบบกริด ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK มีค่าความถูกต้องทางดิ่ง 0.192 เมตร

ตาราง 17 แสดงการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.06 เมตร ระหว่างการบินในรูปแบบทั่วไปกับการบินในรูปแบบกริด

ความสูง (เมตร)	GSD (เมตร)	ระบบ	รูปแบบ การบิน	ความถูกต้องทางราบ (เมตร)	ความถูกต้องทางตั้ง (เมตร)
192	0.06	GCP	ทั่วไป	0.114	0.204
			กริด	0.113	0.216
		PPK	ทั่วไป	0.132	0.183
			กริด	0.130	0.192



ภาพประกอบ 50 กราฟแสดงเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.06 เมตร ระหว่างการบินในรูปแบบทั่วไปกับการบินในรูปแบบกริด

จะเห็นว่า ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร ในรูปแบบการบินทั่วไปเปรียบเทียบกับแบบกริด ทั้งที่ใช้ระบบ PPK และใช้จุดควบคุมภาพถ่าย

(GCP) มีค่าความถูกต้องทางราบที่ต่างกัน 0.001 - 0.002 เมตร ซึ่งมีค่าน้อยมาก จึงถือว่าไม่มี ความแตกต่างกัน

ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร ในรูปแบบการบินทั่วไปมีค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ดีกว่ารูปแบบกริด ทั้งที่ใช้ระบบ PPK และใช้ จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP)

ดังนั้นการบินในรูปแบบทั่วไปและแบบกริดที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร ทั้งที่ใช้ระบบ PPK และใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) จะให้ค่าความถูกต้องทางราบ ที่ไม่แตกต่างกันมีนัยสำคัญ แต่การบินในรูปแบบทั่วไป ทั้งที่ใช้ระบบ PPK และใช้จุดควบคุม ภาพถ่าย (GCP) จะให้ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ดีกว่าการบินในรูปแบบกริด

การบินในรูปแบบกริดที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร จึงอาจ ไม่มีผลทำให้ค่าความถูกต้องทางราบและทางดิ่งมีค่าความถูกต้องที่ดีขึ้น

1.2 ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร

จากตาราง 18 และภาพประกอบ 51 จะได้ค่าความถูกต้อง ดังนี้

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.185 เมตร

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร ในรูปแบบกริด ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.183 เมตร

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.194 เมตร

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร ในรูปแบบกริด ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.192 เมตร

ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) มีค่าความถูกต้องทางดิ่ง 0.279 เมตร

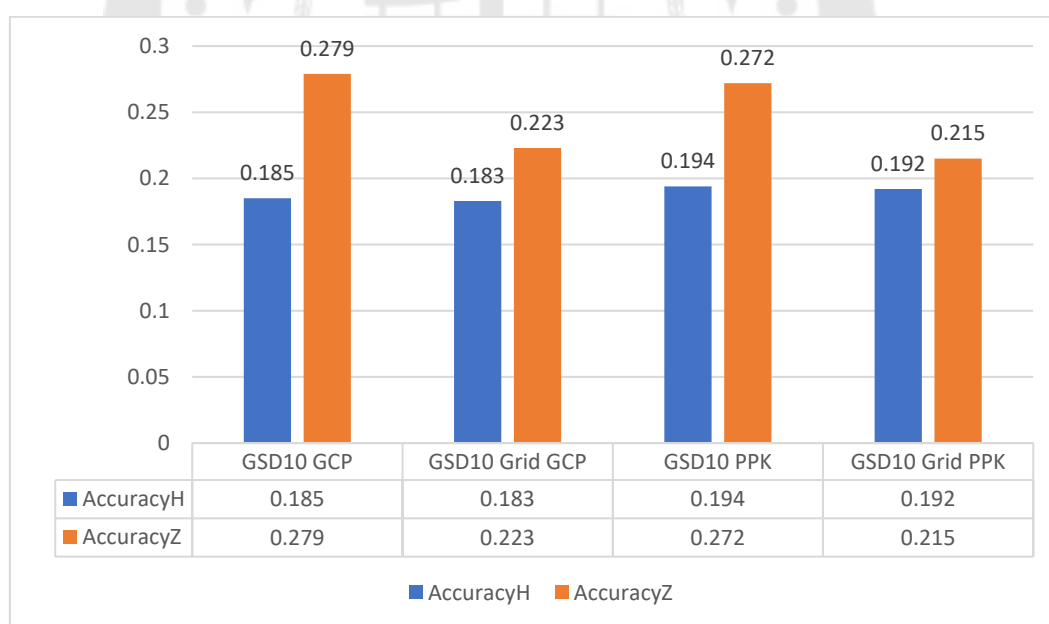
ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร ในรูปแบบกริด ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) มีค่าความถูกต้องทางดิ่ง 0.223 เมตร

ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK มีค่าความถูกต้องทางดิ่ง 0.272 เมตร

ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร
ในรูปแบบกริด ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK มีค่าความถูกต้องทางดิ่ง 0.215 เมตร

ตาราง 18 แสดงการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.10 เมตร ระหว่างการบินในรูปแบบทั่วไปกับการบินในรูปแบบกริด

ความสูง (เมตร)	GSD (เมตร)	ระบบ	รูปแบบการบิน	ความถูกต้องทางราบ (เมตร)	ความถูกต้องทางดิ่ง (เมตร)
319	0.10	GCP	ทั่วไป	0.185	0.279
			กริด	0.183	0.223
		PPK	ทั่วไป	0.194	0.272
			กริด	0.192	0.215



ภาพประกอบ 51 กราฟแสดงเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.10 เมตร ระหว่างการบินในรูปแบบทั่วไปกับการบินในรูปแบบกริด

จะเห็นได้ว่า ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร ในรูปแบบการบินทั่วไปเปรียบเทียบกับแบบกริด ทั้งที่ใช้ระบบ PPK และใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) มีค่าความถูกต้องทางราบที่แตกต่างกัน 0.002 เมตร ซึ่งมีความน้อยมาก จึงถือว่าไม่มีความแตกต่างกัน

ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร ในรูปแบบกริดมีค่าความถูกต้องทางดิ่งดีกว่ารูปแบบทั่วไป ทั้งที่ใช้ระบบ PPK และใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP)

ดังนั้นการบินในรูปแบบทั่วไปและแบบกริดที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร ทั้งที่ใช้ระบบ PPK และใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) จะให้ค่าความถูกต้องทางราบที่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ แต่การบินในรูปแบบกริด ทั้งที่ใช้ระบบ PPK และใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) จะให้ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ดีกว่าการบินในรูปแบบทั่วไป

การบินในรูปแบบกริดที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร สามารถทำให้ค่าความถูกต้องทางดิ่งมีค่าความถูกต้องที่ดีขึ้น

1.3 ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร

จากตาราง 19 และภาพประกอบ 52 จะได้ค่าความถูกต้อง ดังนี้

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.272 เมตร

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร ในรูปแบบกริด ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.208 เมตร

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.290 เมตร

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร ในรูปแบบกริด ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.222 เมตร

ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) มีค่าความถูกต้องทางดิ่ง 0.299 เมตร

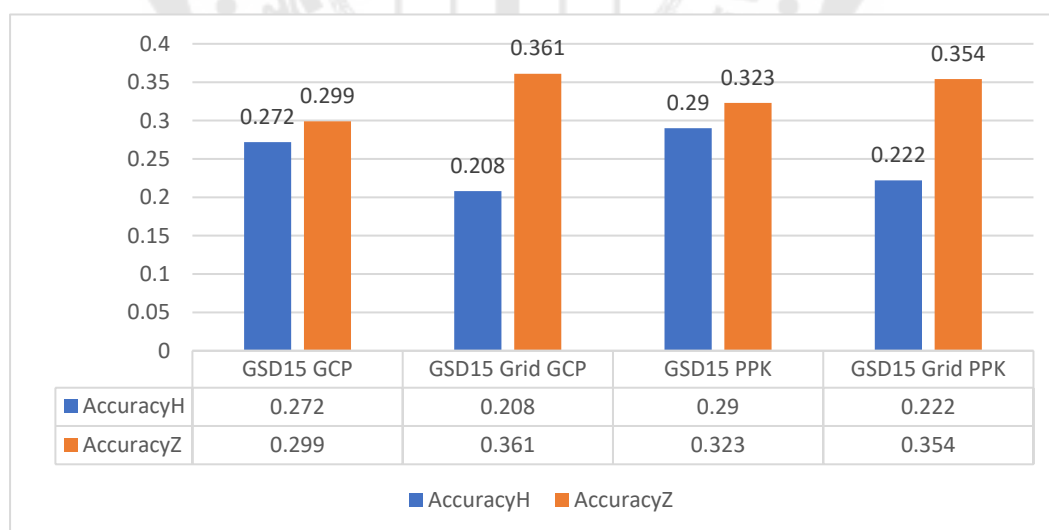
ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร ในรูปแบบกริด ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) มีค่าความถูกต้องทางดิ่ง 0.361 เมตร

ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร
 ในรูปแบบทั่วไป ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK มีค่าความถูกต้องทางดิ่ง 0.323 เมตร

ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร
 ในรูปแบบกริด ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK มีค่าความถูกต้องทางดิ่ง 0.354 เมตร

ตาราง 19 แสดงการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.15 เมตร ระหว่างการบินในรูปแบบทั่วไปกับการบินในรูปแบบกริด

ความสูง (เมตร)	GSD (เมตร)	ระบบ	รูปแบบการบิน	ความถูกต้องทางราบ (เมตร)	ความถูกต้องทางดิ่ง (เมตร)
479	0.15	GCP	ทั่วไป	0.272	0.299
			กริด	0.208	0.361
		PPK	ทั่วไป	0.290	0.323
			กริด	0.222	0.354



ภาพประกอบ 52 กราฟแสดงเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.15 เมตร ระหว่างการบินในรูปแบบทั่วไปกับการบินในรูปแบบกริด

จะเห็นได้ว่า ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร ในรูปแบบการบินกริดมีค่าความถูกต้องทางราบที่ดีกว่ารูปแบบทั่วไป ทั้งที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) และใช้ระบบ PPK

ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร ในรูปแบบการบินทั่วไปมีค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ดีกว่ารูปแบบกริด ทั้งที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) และใช้ระบบ PPK

ดังนั้น ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร การบินในรูปแบบกริด ทั้งที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) และใช้ระบบ PPK จะให้ค่าความถูกต้องทางราบที่ดีกว่าแบบทั่วไป แต่การบินในรูปแบบทั่วไป ทั้งที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) และใช้ระบบ PPK จะให้ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ดีกว่าแบบกริด

ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร ข้อมูลภาพมีความคลาดเคลื่อนมาก การบินในรูปแบบกริดจะช่วยให้ค่าความถูกต้องทางราบดีกว่าแบบทั่วไป แต่การบินในรูปแบบกริดจะไม่ทำให้ค่าความถูกต้องทางดิ่งมีค่าความถูกต้องที่ดีขึ้น

2. การศึกษาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างการใช้ระบบ PPK (ไม่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP)) กับการใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ที่รังวัดค่าพิกัดโดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบจลนในทันที (RTK : Real Time Kinematic)

2.1 ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร

จากตาราง 20 และภาพประกอบ 53 จะได้ค่าความถูกต้อง ดังนี้

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ในรูปแบบการบินทั่วไป มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.114 เมตร

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK ในรูปแบบการบินทั่วไป มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.132 เมตร

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ในรูปแบบการบินกริด มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.113 เมตร

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK ในรูปแบบการบินกริด มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.130 เมตร

ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ในรูปแบบการบินทั่วไป มีค่าความถูกต้องทางดิ่ง 0.204 เมตร

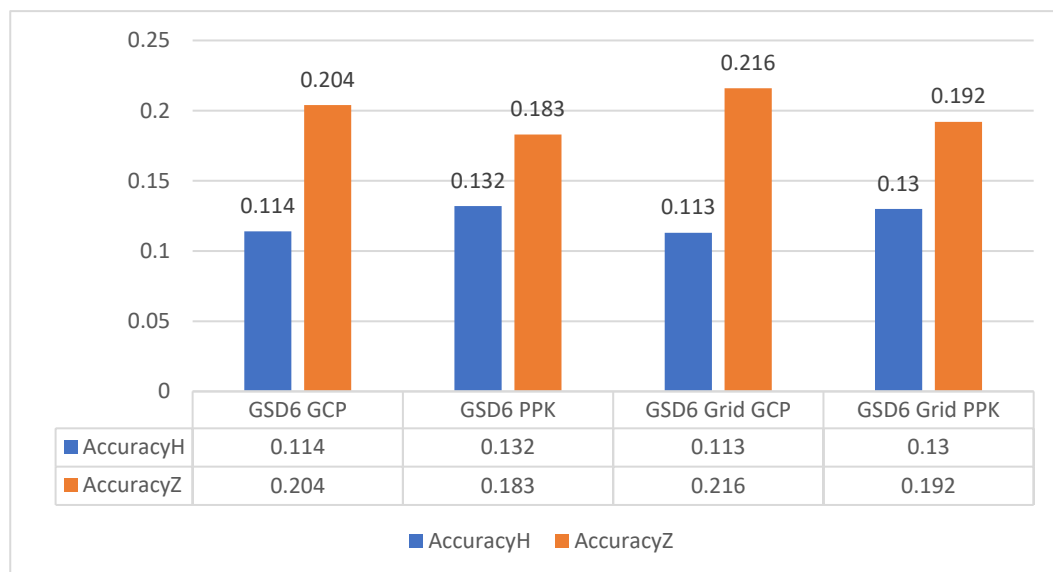
ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK ในรูปแบบการบินทั่วไป มีค่าความถูกต้องทางดิ่ง 0.183 เมตร

ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ในรูปแบบการบินกริด มีค่าความถูกต้องทางดิ่ง 0.216 เมตร

ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK ในรูปแบบการบินกริด มีค่าความถูกต้องทางดิ่ง 0.192 เมตร

ตาราง 20 แสดงการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างการใช้ระบบ PPK กับการใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ที่รังวัดค่าพิกัดโดยใช้ RTK ทั้งในรูปแบบการบินทั่วไปและแบบกริด ที่ GSD 0.06 เมตร

ความสูง (เมตร)	GSD (เมตร)	รูปแบบการบิน	ระบบ	ความถูกต้องทางราบ (เมตร)	ความถูกต้องทางดิ่ง (เมตร)
192	0.06	ทั่วไป	GCP	0.114	0.204
			PPK	0.132	0.183
		กริด	GCP	0.113	0.216
			PPK	0.130	0.192



ภาพประกอบ 53 กราฟแสดงเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างการใช้ระบบ PPK กับการใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ที่รังวัดค่าพิกัดโดยใช้ RTK ทั้งในรูปแบบการบินทั่วไปและแบบกริด ที่ GSD 0.06 เมตร

จะเห็นได้ว่า ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) มีค่าความถูกต้องทางราบที่ดีกว่าการบินที่ใช้ระบบ PPK ทั้งในรูปแบบการบินทั่วไปและแบบกริด

ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK มีค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ดีกว่าการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ทั้งในรูปแบบการบินทั่วไปและแบบกริด

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร การบินโดยใช้ PPK จะช่วยให้ค่าความถูกต้องทางดิ่งดีกว่าการบินโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) แต่การบินโดยใช้ PPK จะไม่ทำให้ค่าความถูกต้องทางราบมีค่าความถูกต้องที่ดีขึ้น

2.2 ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร

จากตาราง 21 และภาพประกอบ 54 จะได้ค่าความถูกต้อง ดังนี้

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ในรูปแบบการบินทั่วไป มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.185 เมตร

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK ในรูปแบบการบินทั่วไป มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.194 เมตร

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ในรูปแบบการบินกริด มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.183 เมตร

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK ในรูปแบบการบินกริด มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.192 เมตร

ค่าความถูกต้องทางตั้งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ในรูปแบบการบินทั่วไป มีค่าความถูกต้องทางตั้ง 0.279 เมตร

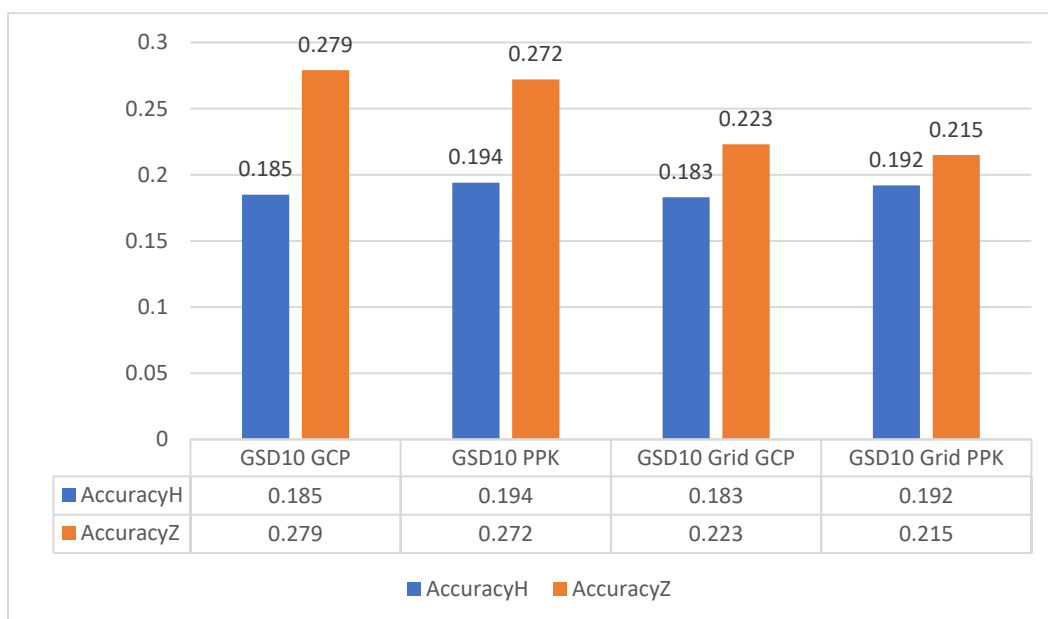
ค่าความถูกต้องทางตั้งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK ในรูปแบบการบินทั่วไป มีค่าความถูกต้องทางตั้ง 0.272 เมตร

ค่าความถูกต้องทางตั้งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ในรูปแบบการบินกริด มีค่าความถูกต้องทางตั้ง 0.223 เมตร

ค่าความถูกต้องทางตั้งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK ในรูปแบบการบินกริด มีค่าความถูกต้องทางตั้ง 0.215 เมตร

ตาราง 21 แสดงการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างการใช้ระบบ PPK กับการใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ที่รังวัดค่าพิกัดโดยใช้ RTK ทั้งในรูปแบบการบินทั่วไปและแบบกริด ที่ GSD 0.10 เมตร

ความสูง (เมตร)	GSD (เมตร)	รูปแบบการบิน	ระบบ	ความถูกต้องทางราบ (เมตร)	ความถูกต้องทางตั้ง (เมตร)
319	0.10	ทั่วไป	GCP	0.185	0.279
			PPK	0.194	0.272
		กริด	GCP	0.183	0.223
			PPK	0.192	0.215



ภาพประกอบ 54 กราฟแสดงเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างการใช้ระบบ PPK กับการใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ที่รังวัดค่าพิกัดโดยใช้ RTK ทั้งในรูปแบบการบินทั่วไปและแบบกริด ที่ GSD 0.10 เมตร

จะเห็นว่า ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) มีค่าความถูกต้องทางราบที่ดีกว่าการบินที่ใช้ระบบ PPK ทั้งในรูปแบบการบินทั่วไปและแบบกริด

ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK มีค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ดีกว่าการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ทั้งในรูปแบบการบินทั่วไปและแบบกริด

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร การบินโดยใช้ PPK จะช่วยให้ค่าความถูกต้องทางดิ่งดีกว่าการบินโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) แต่การบินโดยใช้ PPK จะไม่ทำให้ค่าความถูกต้องทางราบมีค่าความถูกต้องที่ดีขึ้น

2.3 ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร

จากตาราง 22 และภาพประกอบ 55 จะได้ค่าความถูกต้อง ดังนี้

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ในรูปแบบการบินทั่วไป มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.272 เมตร

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร
ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK ในรูปแบบการบินทั่วไป มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.290 เมตร

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร
ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ในรูปแบบการบินกริด มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.208 เมตร

ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร
ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK ในรูปแบบการบินกริด มีค่าความถูกต้องทางราบ 0.222 เมตร

ค่าความถูกต้องทางตั้งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร
ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ในรูปแบบการบินทั่วไป มีค่าความถูกต้องทางตั้ง 0.299 เมตร

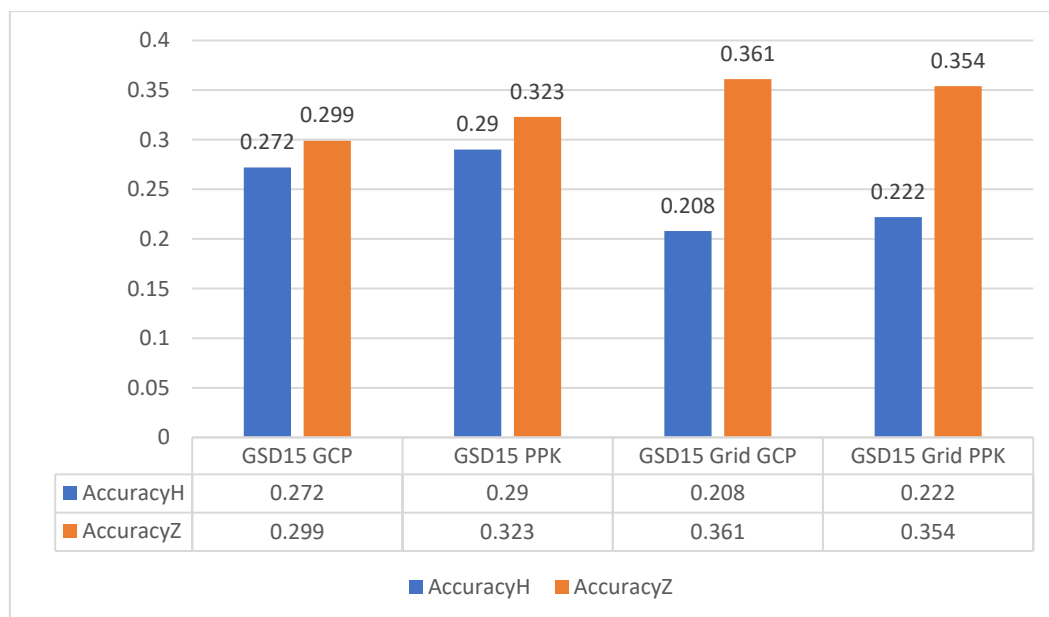
ค่าความถูกต้องทางตั้งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร
ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK ในรูปแบบการบินทั่วไป มีค่าความถูกต้องทางตั้ง 0.323 เมตร

ค่าความถูกต้องทางตั้งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร
ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ในรูปแบบการบินกริด มีค่าความถูกต้องทางตั้ง 0.361 เมตร

ค่าความถูกต้องทางตั้งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร
ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK ในรูปแบบการบินกริด มีค่าความถูกต้องทางตั้ง 0.354 เมตร

ตาราง 22 แสดงการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างการใช้ระบบ PPK กับการใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ที่รังวัดค่าพิกัดโดยใช้ RTK ทั้งในรูปแบบการบินทั่วไปและแบบกริด ที่ GSD 0.15 เมตร

ความสูง (เมตร)	GSD (เมตร)	รูปแบบการบิน	ระบบ	ความถูกต้องทางราบ (เมตร)	ความถูกต้องทางตั้ง (เมตร)
479	0.15	ทั่วไป	GCP	0.272	0.299
			PPK	0.290	0.323
		กริด	GCP	0.208	0.361
			PPK	0.222	0.354



ภาพประกอบ 55 กราฟแสดงเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างการใช้ระบบ PPK กับการใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ที่รังวัดค่าพิกัดโดยใช้ RTK ทั้งในรูปแบบการบินทั่วไปและแบบกริด ที่ GSD 0.15 เมตร

จะเห็นได้ว่า ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) มีค่าความถูกต้องทางราบที่ดีกว่าการบินที่ใช้ระบบ PPK ทั้งในรูปแบบการบินทั่วไปและแบบกริด

ค่าความถูกต้องทางตั้งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) มีค่าความถูกต้องทางตั้งที่ดีกว่าการบินที่ใช้ระบบ PPK ในรูปแบบการบินทั่วไป ส่วนการบินที่ใช้ระบบ PPK มีค่าความถูกต้องทางตั้งที่ดีกว่าการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ในรูปแบบการบินแบบกริด

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร ข้อมูลภาพมีความคลาดเคลื่อนมาก การบินโดยใช้ PPK อาจไม่ได้ช่วยให้ภาพมีค่าความถูกต้องที่ดีขึ้นได้ ยกเว้นค่าความถูกต้องทางตั้งในรูปแบบกริด การบินโดยใช้ PPK จะให้ค่าความถูกต้องดีกว่าแบบใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP)

3. การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร

3.1 รูปแบบการบินทั่วไป โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP)

จากตาราง 23 จะได้ค่าความถูกต้อง ดังนี้

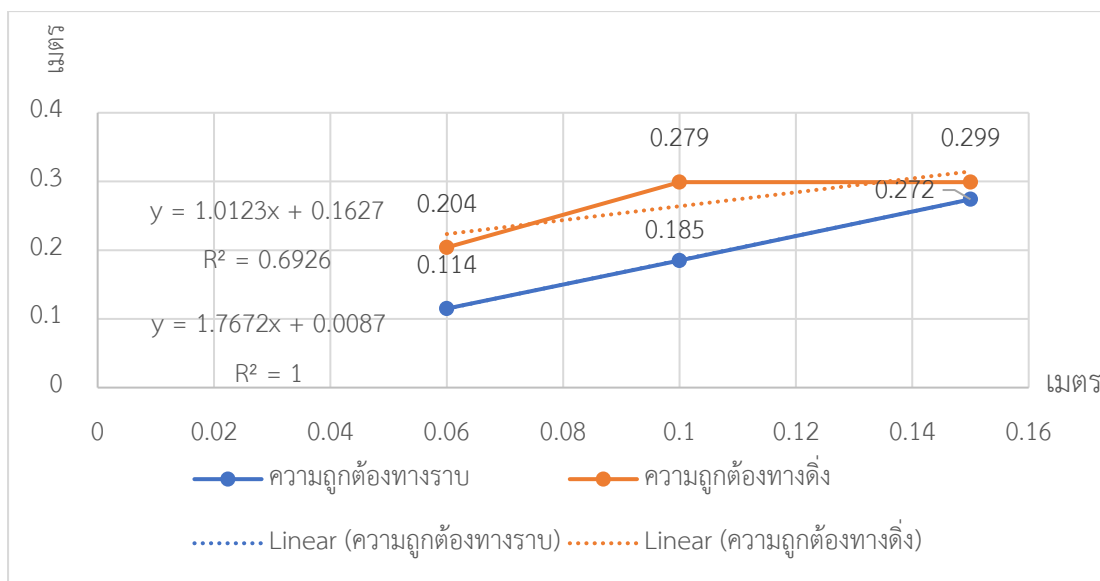
ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 6 เมตร มีค่าความถูกต้องทางราบ เท่ากับ 0.114 เมตร และมีค่าความถูกต้องทางดิ่ง เท่ากับ 0.204 เมตร

ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 10 เมตร มีค่าความถูกต้องทางราบ เท่ากับ 0.185 เมตร และมีค่าความถูกต้องทางดิ่ง เท่ากับ 0.279 เมตร

ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 15 เมตร มีค่าความถูกต้องทางราบ เท่ากับ 0.272 เมตร และมีค่าความถูกต้องทางดิ่ง เท่ากับ 0.299 เมตร

ตาราง 23 ค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ กับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบทั่วไปโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP)

ความสูง (เมตร)	GSD (เมตร)	ความถูกต้องทางราบ (เมตร)	ความถูกต้องทางดิ่ง (เมตร)
192	0.06	0.114	0.204
319	0.10	0.185	0.279
479	0.15	0.272	0.299



ภาพประกอบ 56 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบทั่วไปโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP)

จากภาพประกอบ 56 สามารถอธิบายได้ ดังนี้

สมการถดถอยเชิงเส้น (Simple linear regression) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน ในรูปแบบทั่วไปโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) คือ

$$y = 1.7672x + 0.0087$$

สมการที่ได้หมายความว่า เมื่อระยะตัดแกน Y คงที่ ถ้าค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (x) เปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วย ทำให้ค่าความถูกต้องทางราบ (y) เปลี่ยนแปลงไปในทางเดียวกัน 1.7672 หน่วย

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R Square) = 1 แสดงว่า ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (x) สามารถอธิบายค่าความถูกต้องทางราบ (y) ได้ 100 % สมการถดถอยอธิบายความสัมพันธ์ของค่าความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินได้ 100 % ความผันแปรของค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินสามารถทำนายค่าความถูกต้องทางราบซึ่งมีความแม่นยำสูงมาก

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) = 1 แสดงว่า ความสัมพันธ์กันของค่าความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินไปในทิศทางเดียวกัน มีความสัมพันธ์กันสูงมาก

สมการถดถอยเชิงเส้น (Simple linear regression) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางดิ่งกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน ในรูปแบบทั่วไปโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) คือ

$$y = 1.0123x + 0.1627$$

สมการที่ได้หมายความว่า เมื่อระยะตัดแกน Y คงที่ ถ้าค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน(x) เปลี่ยนแปลง ไป 1 หน่วย ทำให้ค่าความถูกต้องทางดิ่ง (y) เปลี่ยนแปลงไปในทางเดียวกัน 1.0123 หน่วย

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R Square) = 0.6926 แสดงว่า ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (x) สามารถอธิบายค่าความถูกต้องทางดิ่ง (y) ได้ 69.26 % ที่เหลืออีก 30.74 % อธิบายด้วยปัจจัยอื่น สมการถดถอยอธิบายความสัมพันธ์ของค่าความถูกต้องทางดิ่งกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินได้ 69.26 %

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) = 0.8322 แสดงว่า ความสัมพันธ์กันของค่าความถูกต้องทางดิ่งกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินไปในทิศทางเดียวกัน มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง

3.2 รูปแบบการบินทั่วไป โดยใช้ระบบ PPK

จากตาราง 24 จะได้ค่าความถูกต้อง ดังนี้

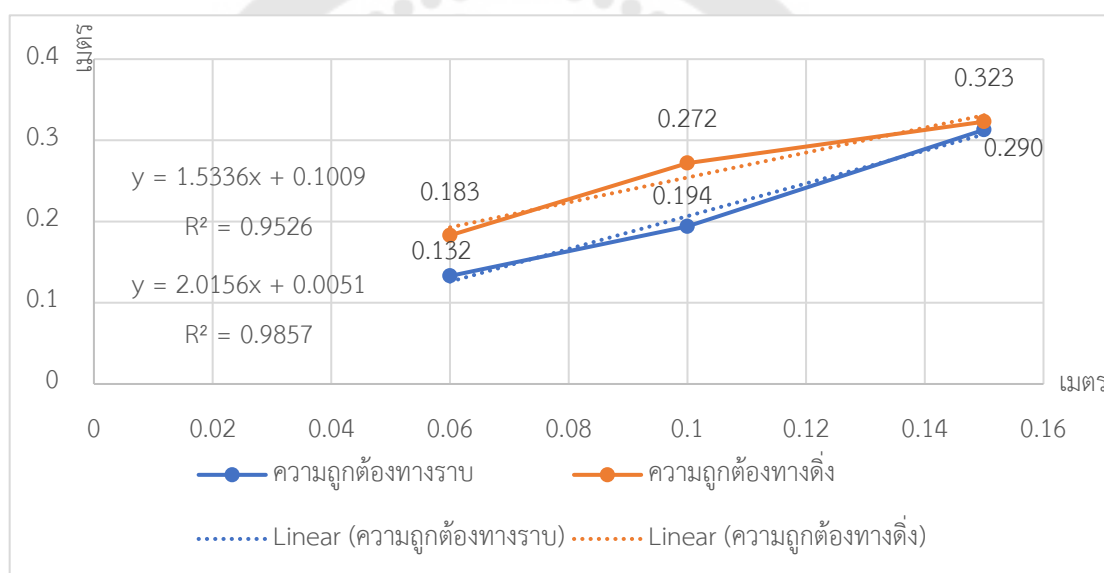
ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 6 เมตร มีค่าความถูกต้องทางราบเท่ากับ 0.132 เมตร และมีค่าความถูกต้องทางดิ่ง เท่ากับ 0.183 เมตร

ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 10 เมตร มีค่าความถูกต้องทางราบเท่ากับ 0.194 เมตร และมีค่าความถูกต้องทางดิ่ง เท่ากับ 0.272 เมตร

ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 15 เมตร มีค่าความถูกต้องทางราบเท่ากับ 0.290 เมตร และมีค่าความถูกต้องทางดิ่ง เท่ากับ 0.323 เมตร

ตาราง 24 ค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ กับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบทั่วไปโดยใช้ระบบ PPK

ความสูง (เมตร)	GSD (เมตร)	ความถูกต้องทางราบ (เมตร)	ความถูกต้องทางตั้ง (เมตร)
192	0.06	0.132	0.183
319	0.10	0.194	0.272
479	0.15	0.290	0.323



ภาพประกอบ 57 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบทั่วไปโดยใช้ระบบ PPK

จากภาพประกอบ 57 สามารถอธิบายได้ ดังนี้

สมการถดถอยเชิงเส้น (Simple linear regression) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน ในรูปแบบทั่วไปโดยใช้ระบบ PPK คือ

$$y = 2.0156x + 0.0051$$

สมการที่ได้หมายความว่า เมื่อระยะตัดแกน Y คงที่ ถ้าค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินเปลี่ยนแปลง (x) ไป 1 หน่วย ทำให้ค่าความถูกต้องทางราบ (y) จะเปลี่ยนแปลงไปในทางเดียวกัน 2.0156 หน่วย

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R Square) = 0.9857 แสดงว่า ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (x) สามารถอธิบายค่าความถูกต้องทางราบ (y) ได้ 98.57% ที่เหลืออีก 1.43 % อธิบายด้วยปัจจัยอื่น สมการถดถอยอธิบายความสัมพันธ์ของค่าความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินได้ 98.57 % ความผันแปรของค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินสามารถทำนายค่าความถูกต้องทางราบซึ่งมีความแม่นยำสูงมาก

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) = 0.9928 แสดงว่า ความสัมพันธ์กันของค่าความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินไปในทิศทางเดียวกัน มีความสัมพันธ์กันสูงมาก

สมการถดถอยเชิงเส้น (Simple linear regression) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางดิ่งกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน ในรูปแบบทั่วไปโดยใช้ระบบ PPK คือ

$$y = 1.5336x + 0.1009$$

สมการที่ได้หมายความว่า เมื่อระยะตัดแกน Y คงที่ ถ้าค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินเปลี่ยนแปลง (x) ไป 1 หน่วย ทำให้ค่าความถูกต้องทางดิ่ง (y) จะเปลี่ยนแปลงไปในทางเดียวกัน 1.5336 หน่วย

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R Square) = 0.9526 แสดงว่า ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (x) สามารถอธิบายค่าความถูกต้องทางดิ่ง (y) ได้ 95.26 % ที่เหลืออีก 4.74 % อธิบายด้วยปัจจัยอื่น สมการถดถอยอธิบายความสัมพันธ์ของค่าความถูกต้องทางดิ่งกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินได้ 95.26 % ความผันแปรของค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินสามารถทำนายค่าความถูกต้องทางดิ่งซึ่งมีความแม่นยำสูง

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) = 0.9760 แสดงว่า ความสัมพันธ์กันของค่าความถูกต้องทางดิ่งกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินไปในทิศทางเดียวกัน มีความสัมพันธ์กันสูงมาก

3.3 รูปแบบการบินกริดโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP)

จากตาราง 25 จะได้ค่าความถูกต้อง ดังนี้

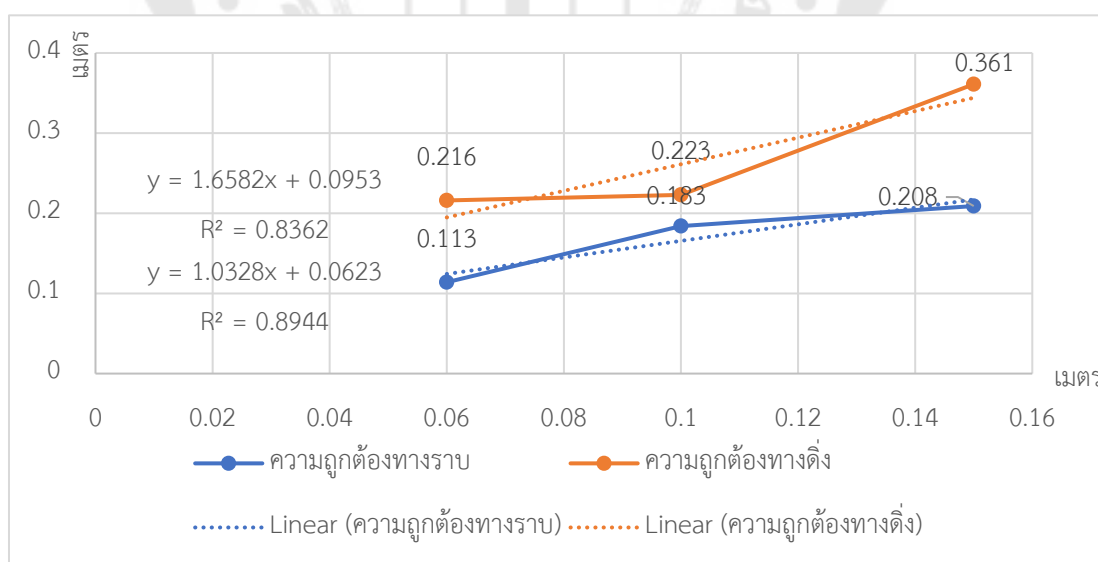
ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.06 เมตร มีค่าความถูกต้องทางราบเท่ากับ 0.113 เมตร และมีค่าความถูกต้องทางดิ่ง เท่ากับ 0.216 เมตร

ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.10 เมตร มีค่าความถูกต้องทางราบเท่ากับ 0.183 เมตร และมีค่าความถูกต้องทางดิ่ง เท่ากับ 0.223 เมตร

ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.15 เมตร มีค่าความถูกต้องทางราบเท่ากับ 0.208 เมตร และมีค่าความถูกต้องทางดิ่ง เท่ากับ 0.361 เมตร

ตาราง 25 ค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ กับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบกริดโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP)

ความสูง (เมตร)	GSD (เมตร)	ความถูกต้องทางราบ (เมตร)	ความถูกต้องทางดิ่ง (เมตร)
192	0.06	0.113	0.216
319	0.10	0.183	0.223
479	0.15	0.208	0.361



ภาพประกอบ 58 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบกริดโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP)

จากภาพประกอบ 58 สามารถอธิบายได้ ดังนี้

สมการถดถอยเชิงเส้น (Simple linear regression) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน ในรูปแบบกริดโดยใช้จุดควบคุม ภาพถ่าย (GCP) คือ

$$y = 1.0328x + 0.0623$$

สมการที่ได้หมายความว่า เมื่อระยะตัดแกน Y คงที่ ถ้าค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินเปลี่ยนแปลง (x) ไป 1 หน่วย ทำให้ค่าความถูกต้องทางราบ (y) จะเปลี่ยนแปลงไปในทางเดียวกัน 1.0328 หน่วย

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R Square) = 0.8944 แสดงว่า ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (x) สามารถอธิบายค่าความถูกต้องทางราบ (y) ได้ 89.44% ที่เหลืออีก 10.56% อธิบายด้วยปัจจัยอื่น สมการถดถอยอธิบายความสัมพันธ์ของค่าความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินได้ 89.44% ความผันแปรของค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินสามารถทำนายค่าความถูกต้องทางราบซึ่งมีความแม่นยำสูง

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) = 0.9457 แสดงว่า ความสัมพันธ์กันของค่าความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินไปในทิศทางเดียวกัน มีความสัมพันธ์กันสูงมาก

สมการถดถอยเชิงเส้น (Simple linear regression) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความถูกต้องทางดิ่งกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน ในรูปแบบกริดโดยใช้จุดควบคุม ภาพถ่าย (GCP) คือ

$$y = 1.6582x + 0.0953$$

สมการที่ได้หมายความว่า เมื่อระยะตัดแกน Y คงที่ ถ้าค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินเปลี่ยนแปลง (x) ไป 1 หน่วย ทำให้ค่าความถูกต้องทางดิ่ง (y) จะเปลี่ยนแปลงไปในทางเดียวกัน 1.6582 หน่วย

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R Square) = 0.8362 แสดงว่า ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (x) สามารถอธิบายค่าความถูกต้องทางดิ่ง (y) ได้ 83.62 % ที่เหลืออีก 16.38 % อธิบายด้วยปัจจัยอื่น สมการถดถอยอธิบายความสัมพันธ์ของค่าความถูกต้องทางดิ่งกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินได้ 83.62 % ความผันแปรของค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินสามารถทำนายค่าความถูกต้องทางดิ่งซึ่งมีความแม่นยำสูง

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) = 0.9144 แสดงว่า ความสัมพันธ์กันของค่าความถูกต้องทางดิ่งกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินไปในทิศทางเดียวกัน มีความสัมพันธ์กันสูงมาก

3.4 รูปแบบการบินกริด โดยใช้ระบบ PPK

จากตาราง 26 จะได้ค่าความถูกต้อง ดังนี้

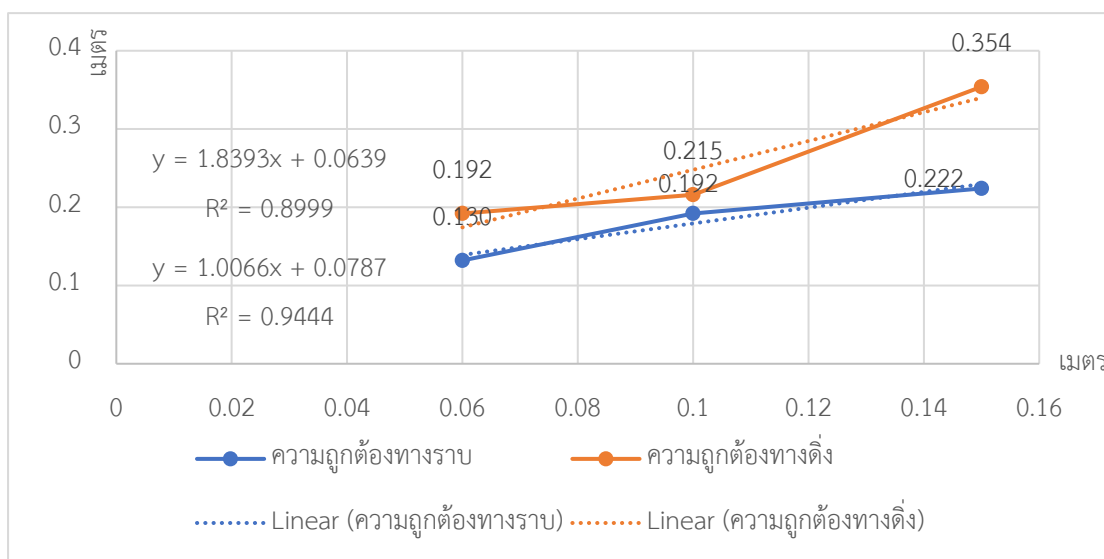
ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.06 เมตร มีค่าความถูกต้องทางราบเท่ากับ 0.130 เมตร และมีค่าความถูกต้องทางตั้ง เท่ากับ 0.192 เมตร

ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.10 เมตร มีค่าความถูกต้องทางราบเท่ากับ 0.192 เมตร และมีค่าความถูกต้องทางตั้ง เท่ากับ 0.215 เมตร

ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.15 เมตร มีค่าความถูกต้องทางราบเท่ากับ 0.222 เมตร และมีค่าความถูกต้องทางตั้ง เท่ากับ 0.354 เมตร

ตาราง 26 ค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบกริดโดยใช้ระบบ PPK

ความสูง (เมตร)	GSD (เมตร)	ความถูกต้องทางราบ (เมตร)	ความถูกต้องทางตั้ง (เมตร)
192	0.06	0.130	0.192
319	0.10	0.192	0.215
479	0.15	0.222	0.354



ภาพประกอบ 59 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบกริดโดยใช้ระบบ PPK

จากภาพประกอบ 59 สามารถอธิบายได้ ดังนี้

สมการถดถอยเชิงเส้น (Simple linear regression) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน ในรูปแบบกริดโดยใช้ระบบ PPK คือ

$$y = 1.0066x + 0.0787$$

สมการที่ได้หมายความว่า เมื่อระยะตัดแกน Y คงที่ ถ้าค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินเปลี่ยนแปลง (x) ไป 1 หน่วย ทำให้ค่าความถูกต้องทางราบ (y) จะเปลี่ยนแปลงไปในทางเดียวกัน 1.0066 หน่วย

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R Square) = 0.9444 แสดงว่า ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (x) สามารถอธิบายค่าความถูกต้องทางราบ (y) ได้ 94.44 % ที่เหลืออีก 5.56 % อธิบายด้วยปัจจัยอื่น สมการถดถอยอธิบายความสัมพันธ์ของค่าความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินได้ 94.44 % ความผันแปรของค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินสามารถทำนายค่าความถูกต้องทางราบซึ่งมีความแม่นยำสูง

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) = 0.9718 แสดงว่า ความสัมพันธ์กันของค่าความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินไปในทิศทางเดียวกัน มีความสัมพันธ์กันสูงมาก

สมการถดถอยเชิงเส้น (Simple linear regression) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางดิ่งกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน ในรูปแบบกริดโดยใช้ระบบ PPK คือ

$$y = 1.8393x + 0.0639$$

สมการที่ได้หมายความว่า เมื่อระยะตัดแกน Y คงที่ ถ้าค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินเปลี่ยนแปลง (x) ไป 1 หน่วย ทำให้ค่าความถูกต้องทางดิ่ง (y) จะเปลี่ยนแปลงไปในทางเดียวกัน 1.8393 หน่วย

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R Square) = 0.8999 แสดงว่า ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (x) สามารถอธิบายค่าความถูกต้องทางดิ่ง (y) ได้ 89.99 % ที่เหลืออีก 10.01 % อธิบายด้วยปัจจัยอื่น สมการถดถอยอธิบายความสัมพันธ์ของค่าความถูกต้องทางดิ่งกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินได้ 89.99 % ความผันแปรของค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินสามารถทำนายค่าความถูกต้องทางดิ่งที่มีความแม่นยำสูง

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R) = 0.9487 แสดงว่า ความสัมพันธ์กันของค่าความถูกต้องทางดิ่งกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินไปในทิศทางเดียวกัน มีความสัมพันธ์กันสูงมาก

สรุปได้ว่า

1. รูปแบบการบินทั่วไป โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP)

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.06 เมตร, 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบการบินทั่วไป โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) จะมีความสัมพันธ์กันมากที่สุด สมการถดถอยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของค่าความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินได้ 100 % ความผันแปรของค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินสามารถทำนายค่าความถูกต้องทางราบที่มีความแม่นยำสูงมากและมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางดิ่งกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.06 เมตร, 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบการบินทั่วไป โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) จะมีความสัมพันธ์กันในระดับสูง สมการถดถอยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของค่าความถูกต้องทางดิ่งกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินได้ 69.26 % และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน

2. รูปแบบการบินทั่วไป โดยใช้ระบบ PPK

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.06 เมตร, 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบการบินทั่วไป โดยใช้ระบบ PPK จะมีความสัมพันธ์กันสูงมาก สมการถดถอยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของค่าความถูกต้อง

ทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินได้ 98.57 % ความผันแปรของค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินสามารถทำนายค่าความถูกต้องทางราบซึ่งมีความแม่นยำสูงมากและมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างความถูกต้องทางดิ่งกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.06 เมตร, 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบการบินทั่วไป โดยใช้ระบบ PPK จะมีความสัมพันธ์กันสูงมาก สมการถดถอยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของค่าความถูกต้องทางดิ่งกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินได้ 95.26 % และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน

3. รูปแบบการบินกริดโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP)

ความสัมพันธ์ระหว่างความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.06 เมตร, 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบการบินกริด โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) จะมีความสัมพันธ์กันสูงมาก สมการถดถอยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของค่าความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินได้ 89.44 % และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างความถูกต้องทางดิ่งกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.06 เมตร, 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบการบินกริด โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) จะมีความสัมพันธ์กันสูงมาก สมการถดถอยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของค่าความถูกต้องทางดิ่งกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินได้ 83.62 % และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน

4. รูปแบบการบินกริด โดยใช้ระบบ PPK

ความสัมพันธ์ระหว่างความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.06 เมตร, 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบการบินกริด โดยใช้ระบบ PPK จะมีความสัมพันธ์กันสูงมาก สมการถดถอยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของค่าความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินได้ 94.44 % และมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างความถูกต้องทางดิ่งกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 0.06 เมตร, 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ในรูปแบบการบินกริดโดยใช้ระบบ PPK จะมีความสัมพันธ์กันสูงมาก สมการถดถอยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของค่าความถูกต้องทางดิ่งกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินได้ 89.99 % มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน

ตาราง 27 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร, 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร

รูปแบบการบิน	ระบบ	ความถูกต้อง	R ²	ความสัมพันธ์	ทิศทางความสัมพันธ์
ทั่วไป	GCP	ทางราบ	100 %	ความสัมพันธ์มากที่สุด	ทิศทางเดียวกัน
ทั่วไป	GCP	ทางตั้ง	69.26 %	ความสัมพันธ์สูง	ทิศทางเดียวกัน
ทั่วไป	PPK	ทางราบ	98.57 %	ความสัมพันธ์สูงมาก	ทิศทางเดียวกัน
ทั่วไป	PPK	ทางตั้ง	95.26 %	ความสัมพันธ์สูงมาก	ทิศทางเดียวกัน
กริด	GCP	ทางราบ	89.44 %	ความสัมพันธ์สูงมาก	ทิศทางเดียวกัน
กริด	GCP	ทางตั้ง	83.62 %	ความสัมพันธ์สูงมาก	ทิศทางเดียวกัน
กริด	PPK	ทางราบ	94.44 %	ความสัมพันธ์สูงมาก	ทิศทางเดียวกัน
กริด	PPK	ทางตั้ง	89.99 %	ความสัมพันธ์สูงมาก	ทิศทางเดียวกัน

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

ปัจจุบันการใช้อากาศยานไร้คนขับในงานสำรวจจัดทำแผนที่ยังไม่ถูกกำหนดเป็นมาตรฐานไว้อย่างชัดเจนว่าผู้ใช้งานควรจะต้องวางแผนการบินถ่ายภาพอย่างไรเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ โดยจากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่างๆ นั้นยังไม่ปรากฏงานวิจัยในการศึกษาหาความเหมาะสมว่าควรจะต้องเลือกการบินแบบกริดหรือบินแบบธรรมดา มีข้อดีและข้อเสียของผลลัพธ์ที่ได้แตกต่างกันอย่างไร ตลอดจนการศึกษเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของภาพถ่ายที่ใช้รูปแบบการบินแบบกริดกับการบินแบบทั่วไป ทั้งที่ใช้อากาศยานไร้คนขับระบบการรังวัดแบบจลนโดยประมวลผลภายหลังการบิน หรือ PPK (Post Process Kinematic) กับใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ตามระดับความสูง ถ้าระดับความสูงเพิ่มขึ้นค่าความถูกต้องจะลดลงเป็นอัตราส่วนผกผันกันหรือไม่ และการใช้อากาศยานไร้คนขับที่ติดตั้งระบบ PPK อาจจะทำให้ค่าความถูกต้องที่ดีได้ใกล้เคียงกับการวางจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน

งานวิจัยเรื่อง ความถูกต้องเชิงพื้นที่ของการใช้อากาศยานไร้คนขับ เพื่อผลิตแผนที่ภาพถ่ายรายละเอียดสูง จึงมีวัตถุประสงค์ ดังนี้

1. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างการบินในรูปแบบทั่วไปกับการบินในรูปแบบกริด
2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างการใช้ระบบ PPK (ไม่ใช่จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP)) กับการใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ที่รังวัดค่าพิกัดโดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบจลนในทันที (RTK : Real Time Kinematic)
3. เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ กับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร, 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร

ขอบเขตในการดำเนินการวิจัย

1. ถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับประเภทปีกแข็งของ Trimble รุ่น UX5HP โดยใช้ระบบ Autopilot ควบคุมการบินผ่านโปรแกรม Aerial Imaging ควบคุมความถูกต้องของตำแหน่งภาพถ่ายด้วยระบบ PPK
2. พื้นที่ศึกษามีขนาดพื้นที่ 1.5 ตารางกิโลเมตร บริเวณเขื่อนศรีนครินทร์ ตั้งอยู่ที่ตำบลท่ากระดาน อำเภอศรีสวัสดิ์ จังหวัดกาญจนบุรี
3. ประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับด้วยโปรแกรม Trimble Business Center โดยกำหนดรูปแบบการประมวลผล 2 รูปแบบ ดังนี้
 - 3.1 การประมวลผลแบบ indirect geo-referencing โดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายในการประมวลผล
 - 3.2 การประมวลผลแบบ direct geo-referencing โดยไม่ใช้จุดควบคุมภาพถ่ายในการประมวลผล เนื่องจากใช้อากาศยานไร้คนขับที่มีระบบวัดพิกัดจุดเปิดถ่ายภาพความแม่นยำสูง (PPK)
4. ตรวจสอบความถูกต้องของการสำรวจจริงวัดด้วยภาพจากอากาศยานไร้คนขับในแต่ละรูปแบบศึกษาเปรียบเทียบกับสำรวจจริงวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบจลน์ในทันที (Real Time Kinematic : RTK)

สรุปผลการวิจัย

1. การหาค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างการบินในรูปแบบทั่วไปกับการบินในรูปแบบกริด

การบินในรูปแบบทั่วไปและแบบกริดที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร ทั้งที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) และใช้ PPK จะให้ค่าความถูกต้องทางราบที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่การบินในรูปแบบทั่วไป ทั้งที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) และใช้ PPK จะให้ค่าความถูกต้องทางตั้งที่ดีกว่าการบินในรูปแบบกริด

สรุปได้ว่า การบินในรูปแบบกริดที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร จึงอาจไม่มีผลทำให้ค่าความถูกต้องทางราบและทางตั้งมีค่าความถูกต้องที่ดีขึ้น

การบินในรูปแบบทั่วไปและแบบกริดที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร ทั้งที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) และใช้ PPK จะให้ค่าความถูกต้องทางราบที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่การบินในรูปแบบกริด ทั้งที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) และใช้ PPK จะให้ค่าความถูกต้องทางตั้งที่ดีกว่าการบินในรูปแบบทั่วไป

สรุปได้ว่า การบินในรูปแบบกริดที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร สามารถทำให้ค่าความถูกต้องทางดิ่งมีค่าความถูกต้องที่ดีขึ้น

การบินในรูปแบบกริดที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร ทั้งที่ใช้ จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) และใช้ PPK จะให้ค่าความถูกต้องทางราบที่ดีกว่าแบบทั่วไป แต่การบินในรูปแบบทั่วไป ทั้งที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) และใช้ PPK จะให้ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ดีกว่าแบบกริด

สรุปได้ว่า ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร ข้อมูลภาพมีความคลาดเคลื่อนมาก การบินในรูปแบบกริดจะช่วยให้ค่าความถูกต้องทางราบดีกว่าแบบทั่วไป แต่การบินในรูปแบบกริดจะไม่ทำให้ค่าความถูกต้องทางดิ่งมีค่าความถูกต้องที่ดีขึ้น

2. การศึกษาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างการใช้ระบบ PPK (ไม่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP)) กับการใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ที่รังวัดค่าพิกัดโดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบจลน์ในทันที (RTK : Real Time Kinematic)

ค่าความถูกต้องของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับที่ใช้ระบบ PPK เปรียบเทียบกับใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) นั้น ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร, 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ด้วยการบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) จะให้ค่าความถูกต้องดีกว่าใช้ระบบ PPK

ส่วนค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร, 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ด้วยการบินที่ใช้ระบบ PPK จะให้ค่าความถูกต้องดีกว่าใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ยกเว้นค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร ของการบินในรูปแบบทั่วไป การบินที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) จะดีกว่าใช้ระบบ PPK

3. การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ กับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร

3.1 รูปแบบทั่วไปโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP)

ความสัมพันธ์กันของค่าความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินไปในทิศทางเดียวกัน มีความสัมพันธ์กันสูงมาก

ความสัมพันธ์กันของค่าความถูกต้องทางดิ่งกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินไปในทิศทางเดียวกัน มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง

3.2 รูปแบบทั่วไปโดยใช้ระบบ PPK

ความสัมพันธ์กันของค่าความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน
ไปในทิศทางเดียวกัน มีความสัมพันธ์กันสูงมาก

ความสัมพันธ์กันของค่าความถูกต้องทางดิ่งกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน
ไปในทิศทางเดียวกัน มีความสัมพันธ์กันสูงมาก

3.3 รูปแบบการบินกริดโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP)

ความสัมพันธ์กันของค่าความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน
ไปในทิศทางเดียวกัน มีความสัมพันธ์กันสูงมาก

ความสัมพันธ์กันของค่าความถูกต้องทางดิ่งกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน
ไปในทิศทางเดียวกัน มีความสัมพันธ์กันสูงมาก

3.4 รูปแบบการบินกริด โดยใช้ระบบ PPK

ความสัมพันธ์กันของค่าความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน
ไปในทิศทางเดียวกัน มีความสัมพันธ์กันสูงมาก

ความสัมพันธ์กันของค่าความถูกต้องทางราบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน
ไปในทิศทางเดียวกัน มีความสัมพันธ์กันสูงมาก

ตาราง 28 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการบิน ค่าความถูกต้องและระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับด้วยระบบ PPK และใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ที่ GSD 0.06 เมตร, 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร

GSD (ม.)	ความ สูง (ม.)	ระบบ	รูปแบบ การบิน	ความ ถูกต้อง ทางราบ (เมตร)	ความ ถูกต้อง ทางตั้ง (เมตร)	ความ สัมพันธ์	ทิศทางความ สัมพันธ์	ระยะ เวลา ประมวล ผล (ชม.)
0.06	192	GCP	ทั่วไป	0.114	0.204	สูงมาก	ทางเดียวกัน	7
			กริด	0.113	0.216	สูงมาก	ทางเดียวกัน	9
		PPK	ทั่วไป	0.132	0.183	สูงมาก	ทางเดียวกัน	7
			กริด	0.130	0.192	สูงมาก	ทางเดียวกัน	9
0.10	319	GCP	ทั่วไป	0.185	0.279	สูงมาก	ทางเดียวกัน	5
			กริด	0.183	0.223	สูงมาก	ทางเดียวกัน	6
		PPK	ทั่วไป	0.194	0.272	สูงมาก	ทางเดียวกัน	5
			กริด	0.192	0.215	สูงมาก	ทางเดียวกัน	6
0.15	479	GCP	ทั่วไป	0.272	0.299	สูงมาก	ทางเดียวกัน	2
			กริด	0.208	0.361	สูงมาก	ทางเดียวกัน	3
		PPK	ทั่วไป	0.290	0.323	สูงมาก	ทางเดียวกัน	2
			กริด	0.222	0.354	สูงมาก	ทางเดียวกัน	3

อภิปรายผล

1. การหาค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างการบินในรูปแบบทั่วไปกับการบินในรูปแบบกริด

เมื่อนำค่าความถูกต้องของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพจากอากาศยานไร้คนขับในรูปแบบกริดเปรียบเทียบกับรูปแบบทั่วไป ทั้ง 2 ระบบ (ระบบที่ใช้ PPK กับใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP)) จะได้ว่า ค่าความถูกต้องทางราบที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร กับ 0.10 เมตร จะใกล้เคียงกัน แต่เมื่อความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ยิ่งลดลงที่ 0.15 เมตร ปรากฏว่า ค่าความถูกต้องทางราบในรูปแบบกริดจะดีกว่ารูปแบบทั่วไป เนื่องจากการบินในรูปแบบกริดเป็นรูปแบบการบิน 3 รอบ ในพื้นที่เดียวกันมีแนวบินตัดกันเหมือนตารางกริด จึงทำให้ได้ข้อมูลภาพที่เก็บรายละเอียดจากหลายมุมมอง ทำให้การประมวลผลภาพจะได้คุณภาพดีขึ้นและสามารถสร้างโมเดล 3 มิติที่มีความถูกต้องมากขึ้นได้ ซึ่งงานวิจัยของ (Gerke และ Przybilla, 2016) เรื่อง วิเคราะห์ความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ : อิทธิพลของ RTK-GNSS บนเครื่องบินและรูปแบบการบินแบบกริด ได้ผลลัพธ์ตรงกันว่า ค่าความถูกต้องที่ได้จากการบินในรูปแบบกริดจะดีกว่าแบบทั่วไป ดังนั้น ความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดินที่ลดลง การบินในรูปแบบกริดจะสามารถเพิ่มความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้

ส่วนค่าความถูกต้องทางดิ่ง ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร กับ 0.15 เมตร การบินในรูปแบบกริดจะไม่ทำให้ค่าความถูกต้องทางดิ่งมีค่าความถูกต้องที่ดีขึ้น แต่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.10 เมตร การบินในรูปแบบกริดกลับสามารถทำให้ค่าความถูกต้องทางดิ่งมีค่าความถูกต้องที่ดีขึ้น แสดงให้เห็นว่า การบินในรูปแบบกริดอาจจะไม่ทำให้ค่าความถูกต้องทางดิ่งมีค่าความถูกต้องที่ดีขึ้น

2. การศึกษาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างการใช้ระบบ PPK (ไม่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP)) กับการใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ที่รังวัดค่าพิกัดโดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบจลนในทันที (RTK : Real Time Kinematic)

การเปรียบเทียบความถูกต้องของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับที่ใช้ระบบ PPK กับการใช้จุดควบคุมภาพถ่ายที่สำรวจรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS แบบจลนในทันที (Real Time Kinematic : RTK) ผลการศึกษาพบว่า ในทุกความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ของทั้ง 2 รูปแบบการบิน (รูปแบบกริดกับรูปแบบทั่วไป) ความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่าย

(GCP) จะมีค่าความถูกต้องทางราบที่ดีกว่าใช้ระบบ PPK เนื่องจากอากาศยานไร้คนขับโดยใช้ระบบ PPK จะไม่ได้วางจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน แต่จะรังวัดแบบจลน์ ซึ่งจะใช้เครื่องรับสัญญาณ GNSS เพื่อใช้หาค่าพิกัดของจุดเปิดถ่ายขณะที่ยิงถ่ายภาพ ในเวลาเดียวกันบนภาคพื้นดิน มีการตั้งรับสัญญาณ GNSS บนจุดควบคุมที่ทราบค่าพิกัดอ้างอิง เรียกว่า สถานีฐาน ค่าพิกัดของจุดเปิดถ่ายภาพที่รังวัดด้วย GNSS บนเครื่องบินและข้อมูลที่รับได้จากสถานีฐาน จะถูกนำมาคำนวณปรับแก้เข้ากับระบบสมการภายหลังการบิน ทำให้เปรียบเทียบเสมือนมีจุดควบคุมภาพถ่ายภาคอากาศอยู่บนภาพถ่ายทุกรูป จึงเป็นผลทำให้ค่าความถูกต้องทางราบที่ได้จึงไม่ดีเท่าการวางจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน ซึ่ง (Küng et al., 2011) ได้ศึกษาความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับแบบมีจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินเปรียบเทียบกับไม่มีจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน ได้ผลลัพธ์ตรงกันว่า ค่าความถูกต้องที่ได้จากการมีจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินจะดีกว่าไม่มีจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน

ส่วนค่าความถูกต้องทางดิ่งพบว่า ในทุกความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร 0.10 เมตร และ 0.15 เมตร ของรูปแบบการบินกริด ความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับโดยใช้ระบบ PPK จะมีค่าความถูกต้องทางดิ่งดีกว่าใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) แต่ในรูปแบบการบินทั่วไป เมื่อความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ลดลงที่ 0.15 เมตร ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) จะดีกว่าใช้ระบบ PPK เนื่องจากการบินในรูปแบบทั่วไป เมื่อความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ลดลง ค่าความถูกต้องจะลดลงด้วย มีความคลาดเคลื่อนของข้อมูลมากเป็นผลทำให้ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ใช้ระบบ PPK มีค่าความถูกต้องไม่ดีเท่าระบบที่ใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) เพราะอากาศยานไร้คนขับโดยใช้ระบบ PPK จะไม่ได้วางจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน แต่เมื่อมีการใช้รูปแบบการบินกริดกลับทำให้ค่าความถูกต้องของระบบ PPK มีค่าความถูกต้องทางดิ่งดีกว่าไม่ใช้ระบบ PPK เพราะการบินในรูปแบบกริดทำให้ได้ข้อมูลภาพที่เก็บรายละเอียดจากหลายมุมมอง การประมวลผลภาพจะได้คุณภาพดีขึ้นและสร้างโมเดล 3 มิติ ที่มีความถูกต้องมากขึ้นได้ตามที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

สรุปได้ว่า การใช้อากาศยานไร้คนขับโดยใช้ระบบ PPK จะให้ค่าความถูกต้องทางราบไม่ดีเท่าระบบใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) และการใช้อากาศยานไร้คนขับโดยใช้ระบบ PPK จะให้ค่าความถูกต้องทางดิ่งดีกว่าระบบใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) แต่เมื่อความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ลดลง ค่าความถูกต้องทางดิ่งของระบบใช้จุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) จะดีกว่าใช้ PPK ซึ่งรูปแบบการบินกริดสามารถเพิ่มค่าความถูกต้องทางดิ่งให้กับการใช้อากาศยานไร้คนขับโดยใช้ระบบ PPK ได้ดียิ่งขึ้น

สำหรับงานแผนที่นั้น ถ้าต้องการนำอากาศยานไร้คนขับด้วยระบบ PPK มาใช้ในงานผลิตแผนที่ ในกรณีที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.06 เมตร เมื่อนำค่าความถูกต้องทางราบ เท่ากับ 0.132 เมตร ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (NSSDA Horizontal Accuracy (ACCr) at 95% Confidence) ไปเทียบมาตรฐานความถูกต้องเชิงตำแหน่งของ ASPRS สามารถประเมินได้ว่า สอดคล้องกับแผนที่มาตราส่วน 1: 300 ตามเกณฑ์ของความละเอียดถูกต้องทางราบขั้นที่ 1 และในกรณีที่ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร เมื่อนำค่าความถูกต้องทางราบ เท่ากับ 0.290 เมตร ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (NSSDA Horizontal Accuracy (ACCr) at 95% Confidence) ไปเทียบมาตรฐานความถูกต้องเชิงตำแหน่งของ ASPRS จะสามารถประเมินได้ว่า สอดคล้องกับแผนที่มาตราส่วน 1:500 ตามเกณฑ์ของความละเอียดถูกต้องทางราบขั้นที่ 1 โดยถ้าบินในรูปแบบกริดจะช่วยให้ค่าความถูกต้องทางราบดีขึ้น เท่ากับ 0.222 เมตร ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (NSSDA Horizontal Accuracy (ACCr) at 95% Confidence) จึงทำให้สามารถประเมินได้ว่า การบินในรูปแบบกริดที่มีความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) 0.15 เมตร จะสอดคล้องกับแผนที่มาตราส่วน 1:400 ตามเกณฑ์ของความละเอียดถูกต้องทางราบขั้นที่ 1 (ASPRS, 2014)

ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยนี้พบว่า การใช้อากาศยานไร้คนขับด้วยระบบ PPK จะให้ค่าความถูกต้องทางดิ่งที่ดีกว่าไม่ใช้ระบบ PPK จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในงานรังวัดภูมิประเทศ เพื่อจัดทำแผนที่แสดงรายละเอียดภูมิประเทศด้วยเส้นชั้นความสูง หรือรายละเอียดของสิ่งปลูกสร้าง เช่น ถนน อาคาร เป็นต้น งานรังวัดแนวทางเป็นงานรังวัดเพื่อหาหรือกำหนดแนวก่อสร้างซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นตรงแนวยาว เช่น รางรถไฟ ทางหลวง คลองชลประทาน สายไฟฟ้าแรงสูง เป็นต้น หรือนำไปใช้ในงานรังวัดที่ดินสำหรับการออกเอกสารกรรมสิทธิ์ที่ดินหรือหาขนาดพื้นที่ของที่ดิน อีกทั้งยังเหมาะที่จะนำไปใช้ในงานรังวัดเหมืองเพื่อคำนวณปริมาตรดิน

2. ในงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่า ความสามารถของอากาศยานไร้คนขับด้วยระบบ PPK จะสามารถผลิตแผนที่ภาพถ่ายรายละเอียดสูง โดยปราศจากการวางจุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ได้ซึ่งสามารถลดระยะเวลาในการวางจุดควบคุมภาพถ่าย (GCP) ลดเวลาในการปฏิบัติงาน ลดจำนวนผู้ปฏิบัติงาน หรือ ขจัดปัญหาอุปสรรคในการสำรวจพื้นที่ที่ยากแก่การเข้าถึง ลดอันตรายที่จะเกิดจากการปฏิบัติงาน เช่น พื้นที่ป่าหรือภูเขาสูง ที่ไม่สามารถเข้าไปวางจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (GCP) ได้ อากาศยานไร้คนขับด้วยระบบ PPK จึงอาจจะไปเติมช่องว่างตรงนี้ เพื่อให้ในอนาคตสามารถผลิตแผนที่ภาพถ่ายรายละเอียดสูงได้หลากหลายพื้นที่มากขึ้น

3. ในงานวิจัยนี้มีพื้นที่ศึกษาอยู่บริเวณเขื่อนศรีนครินทร์ สภาพพื้นที่มีความแตกต่างทางระดับความสูง ในอนาคตสามารถนำเอาแบบจำลองสามมิติ (point cloud) มาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาเปรียบเทียบข้อมูลความสูงภูมิประเทศที่ผลิตจากอากาศยานไร้คนขับกับการสำรวจจริงวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS

4. การบินถ่ายภาพโดยใช้อากาศยานไร้คนขับแบบปีกแข็ง (Fixed Wing) ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของพื้นที่ขึ้นลง ปัจจุบันเริ่มมีอากาศยานไร้คนขับแบบไฮบริดสามารถขึ้นลงได้ในแนวดิ่งคล้ายประเภทยานบิน แต่ทำงานด้วยประสิทธิภาพแบบปีกแข็ง จะให้ข้อจำกัดในเรื่องของพื้นที่ขึ้นลงหมดไปสามารถนำไปใช้งานในพื้นที่ที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น

ปัญหาและอุปสรรค

1. พื้นที่ศึกษาที่มีความแตกต่างทางระดับความสูง ซึ่งทางด้านขวาของพื้นที่มีสภาพเป็นหุบเขาสลับภูเขา จึงทำให้ไม่สามารถวางจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบความถูกต้องได้ตามหลักทฤษฎี เนื่องจากในบริเวณดังกล่าวไม่สามารถรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ได้เพื่อใช้ในขั้นตอนการรังวัดค่าพิกัดตำแหน่งจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบความถูกต้อง

2. ขอบเขตงานวิจัยได้กำหนดระดับความสูงบินไว้เพียง 3 ระดับความสูงเท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดของระยะเวลาในการทำวิจัยภาคสนาม อุปกรณ์ ค่าใช้จ่าย และทรัพยากรต่างๆที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งปัจจัยทางสภาพแวดล้อมที่มีผลต่อการบิน จึงทำให้ผลการศึกษาที่ได้อาจจะแสดงความสัมพันธ์ได้ แต่อาจยังไม่ดีนัก

บรรณานุกรม

- ASHTIWOW. (2015). การตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่ง Positioning Accuracy. Retrieved from <https://geo2ass.wordpress.com/2015/08/07/asprs-positional-accuracy-standards-of-1990/>
- ASPRS. (2014). ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. In.
- Barry, P., และ Coakley, R. J. I. A. P. R. S. (2013). Accuracy of UAV photogrammetry compared with network RTK GPS. (2), 27-31.
- ERDAS, I. (2010). Polynomial Transformation.
ftp://ftp.ecn.purdue.edu/jshan/ERDAS_Library/2011help/html/FieldGuide/wwhelp/whimpl/common/html/wwhelp.htm?context=FieldGuide&file=Polynomial_Transformation.html
- Federal Geographic Data Committee Secretariat. (1998). Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy. In: National Aeronautics and Space Administration.
- Gerke, M., และ Przybilla, H.-J. J. P.-F.-G. (2016). Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. 2016(1), 17-30.
- Jl, K. (2017). What is the 'overlapping'? And why is it so critical in 3D reconstruction? Retrieved from <https://blog.altizure.com/what-does-overlap-really-mean-in-3d-modelling-cf8d321bf25>
- Küng, O., Strecha, C., Beyeler, A., Zufferey, J.-C., Floreano, D., Fua, P., และ Gervais, F. (2011). *The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery*. Paper presented at the UAV-g 2011-Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., และ Harley, I. (2006). *Close range photogrammetry: principles, techniques and applications*: Whittles.
- Mian, O., Lutes, J., Lipa, G., Hutton, J., Gavelle, E., Borghini, S. J. T. i. a. o. p., remote sensing, และ sciences, s. i. (2015). Direct georeferencing on small unmanned

aerial platforms for improved reliability and accuracy of mapping without the need for ground control points. 40(1), 397.

Raczynski, R. J. (2017). *Accuracy analysis of products obtained from UAV-borne photogrammetry influenced by various flight parameters*. NTNU.

Sebastian, M. (2012). GCPs v. PPK/RTK: Which is Best to Receive Fast and Accurate Data? <https://www.identifiedtech.com/blog/drone-technology/gcps-ppk-rtk-best-receive-fast-accurate-data/>

Shi, D., และ Chen, L. (2017). Do RTK/PPK drones give you better results than GCPs? <https://pix4d.com/rtk-ppk-drones-gcp-comparison/>

Tahar, K. J. I. A. P. R. S. S. I. S. (2013). An evaluation on different number of ground control points in unmanned aerial vehicle photogrammetric block. 40, 93-98.

Trimble. Trimble UX5HP Unmanned Aircraft System. https://www.nikon-trimble.co.jp/pdf/field/0301_geospatial/trimble_ux5_hp_e.pdf

Trimble. UX5 HP. <https://construction.trimble.com/products-and-solutions/ux5-hp>

TS Geosystems Bangladesh. Trimble R8 RTK GNSS. <https://www.ts-geosystems.com/product/trimble-r8-rtk-gps/>

กิตติศักดิ์ ศรีกลาง. (ม.ป.ป). การวางแผนโครงการทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศ. กรมแผนที่ทหาร.

เฉลิมชนม์ สติระพจน์. (2549). เอกสารประกอบคำสอนวิชางานรังวัดดาวเทียมจีพีเอสขั้นสูง.

ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นนท์วัฒน์ นกเพชร. (2561, 10 กรกฎาคม) ความสัมพันธ์ของความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) ที่ 6 เซนติเมตรและความสูงที่ 188 เมตร มีความยาวโฟกัส 15 มิลลิเมตร ที่ได้จากซอฟต์แวร์ *Aerial Imagine* /Interviewer: นักสำรวจ บัญชีวีลส์.

เนติ ศรีหาม, และ ศิลา แก้วปลั่ง. (2560). การประเมินความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศด้วยอากาศยานไร้คนขับต้นทุนต่ำ. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

ไพศาล สันติธรรมนนท์. (2555a). การทำแผนที่และข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับชนิดเบา *Mapping and Geodata Survey using light-weight UAV*. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ไพศาล สันติธรรมนนท์. (2555b). การรังวัดด้วยภาพดิจิทัล = *Digital photogrammetry* (พิมพ์ครั้งที่ 2 ฉบับปรับปรุงแก้ไข). กรุงเทพฯ: กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิชัย เยี่ยงวีรชน. (2555). การสำรวจทางวิศวกรรม 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิชัย เยี่ยงวีรชน. (2558). การสำรวจรังวัด : ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้ (พิมพ์ครั้งที่ 7, [ฉบับพิมพ์ซ้ำ]). กรุงเทพฯ: กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิชัย เยี่ยงวีรชน และคณะ. (2560). การศึกษาการใช้อากาศยานไร้คนขับในการทำแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:4,000 และแนวทางการนับจำนวนและหาความสูงต้นไม้. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. Retrieved

ศิริพร ตริธาร. (2558). ความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับสำหรับงานออกแบบเรขาคณิต กรณีศึกษา โครงการทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 6 สายบางปะอิน – นครราชสีมา. (วศ.ม.). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ: . (วิศวกรรมโครงสร้างพื้นฐานและการบริหาร ภาควิชาวิศวกรรมโยธา).

สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ. (2556). มาตรฐานข้อกำหนดข้อมูลภูมิสารสนเทศพื้นฐาน (FGDS) ชั้นข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศออร์โธ.

อัจฉริยะ มีชัยพิทักษ์สกุล และคณะ. (2558). เอกสารสรุปผลการศึกษาค้นคว้ารายการภูมิวิชา โฟโตแกรมเมตรี (โฟโตแกรมเมตรีเชิงเลข) เรื่อง อากาศยานไร้คนขับกับงานโฟโตแกรมเมตรี. กรุงเทพฯ:



ตาราง 29 ค่าความถูกต้องทางราบของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.06 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ที่ใช้ระบบ GCP

Point ID	Map		Survey Check Point		Diff			
	X/East (m)	Y/North (m)	X/East (m)	Y/North (m)	dX	dX ²	dY	dY ²
Chk-3	512716.982	1591962.374	512717.014	1591962.404	-0.032	0.001	-0.030	0.001
Chk-4	512802.226	1591826.132	512802.247	1591826.145	-0.021	0.000	-0.013	0.000
Chk-5	512892.852	1591741.198	512892.844	1591741.211	0.008	0.000	-0.013	0.000
Chk-7	513119.638	1591685.698	513119.696	1591685.794	-0.058	0.003	-0.096	0.009
Chk-8	513221.944	1591944.286	513222.008	1591944.329	-0.064	0.004	-0.043	0.002
Chk-9	512957.046	1592100.756	512956.998	1592100.762	0.048	0.002	-0.006	0.000
Chk-10	512776.408	1592184.942	512776.382	1592184.971	0.026	0.001	-0.029	0.001
Chk-12	513186.808	1592212.633	513186.860	1592212.669	-0.052	0.003	-0.036	0.001
Chk-13	513293.467	1592137.046	513293.562	1592137.088	-0.095	0.009	-0.042	0.002
Chk-14	513480.851	1591971.342	513480.890	1591971.380	-0.039	0.002	-0.038	0.001
Chk-15	513274.581	1592276.325	513274.568	1592276.397	0.013	0.000	-0.072	0.005
Chk-16	513238.324	1592361.198	513238.274	1592361.301	0.050	0.003	-0.103	0.011
Chk-17	513114.483	1592441.497	513114.447	1592441.505	0.036	0.001	-0.008	0.000
Chk-20	513705.236	1592387.064	513705.228	1592387.105	0.008	0.000	-0.041	0.002
Chk-22	513720.726	1592574.742	513720.664	1592574.777	0.062	0.004	-0.035	0.001
Chk-23	513574.737	1592711.393	513574.713	1592711.433	0.024	0.001	-0.040	0.002
Chk-24	513758.327	1592899.366	513758.271	1592899.356	0.056	0.003	0.010	0.000
Chk-31	512657.745	1591891.513	512657.692	1591891.518	0.053	0.003	-0.005	0.000
					sum(dX ²)	0.040	sum(dY ²)	0.038
Number of Check Points					18			
RMSE _x					$= \sqrt{\hat{\sigma}^2(X_{data,i} - X_{check,i})^2 / n}$			
					= 0.047			
RMSE _y					$= \sqrt{\hat{\sigma}^2(Y_{data,i} - Y_{check,i})^2 / n}$			
					= 0.046			
RMSE _r					$= \sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2}$			
					= 0.066			
NSSDA Horizontal Accuracy at 95% Confidence					$= 1.7308 \times RMSE_r$			
					= 0.114			

ตาราง 30 ค่าความถูกต้องทางราบของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.06 เมตร ในรูปแบบกริด ที่ใช้ระบบ GCP

	Map		Survey Check Point		Diff			
Point ID	X/East (m)	Y/North (m)	X/East (m)	Y/North (m)	dX	dX ²	dY	dY ²
Chk-3	512717.059	1591962.305	512717.014	1591962.404	0.045	0.002	-0.099	0.010
Chk-4	512802.330	1591826.114	512802.247	1591826.145	0.083	0.007	-0.031	0.001
Chk-5	512892.945	1591741.223	512892.844	1591741.211	0.101	0.010	0.012	0.000
Chk-7	513119.751	1591685.775	513119.696	1591685.794	0.055	0.003	-0.019	0.000
Chk-8	513222.040	1591944.268	513222.008	1591944.329	0.032	0.001	-0.061	0.004
Chk-9	512957.028	1592100.761	512956.998	1592100.762	0.030	0.001	-0.001	0.000
Chk-10	512776.332	1592184.950	512776.382	1592184.971	-0.050	0.002	-0.021	0.000
Chk-12	513186.866	1592212.653	513186.860	1592212.669	0.006	0.000	-0.016	0.000
Chk-13	513293.540	1592137.016	513293.562	1592137.088	-0.022	0.000	-0.072	0.005
Chk-14	513480.906	1591971.375	513480.890	1591971.380	0.016	0.000	-0.005	0.000
Chk-15	513274.622	1592276.384	513274.568	1592276.397	0.054	0.003	-0.013	0.000
Chk-16	513238.369	1592361.322	513238.274	1592361.301	0.095	0.009	0.021	0.000
Chk-17	513114.463	1592441.497	513114.447	1592441.505	0.016	0.000	-0.008	0.000
Chk-20	513705.229	1592387.042	513705.228	1592387.105	0.001	0.000	-0.063	0.004
Chk-22	513720.712	1592574.725	513720.664	1592574.777	0.048	0.002	-0.052	0.003
Chk-23	513574.709	1592711.456	513574.713	1592711.433	-0.004	0.000	0.023	0.001
Chk-24	513758.298	1592899.421	513758.271	1592899.356	0.027	0.001	0.065	0.004
Chk-31	512657.701	1591891.490	512657.692	1591891.518	0.009	0.000	-0.028	0.001
					sum(dX ²)	0.043	sum(dY ²)	0.034
Number of Check Points					18			
RMSE _x					$=\sqrt{\hat{\sigma}^2(X_{data,i} - X_{check,j})^2 / n}$		= 0.049	
RMSE _y					$=\sqrt{\hat{\sigma}^2(Y_{data,i} - Y_{check,j})^2 / n}$		= 0.043	
RMSE _r					$=\sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2}$		= 0.065	
NSSDA Horizontal Accuracy at 95% Confidence					$=1.7308 \times RMSE_r$		= 0.113	

ตาราง 31 ค่าความถูกต้องทางราบของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.06 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ที่ใช้ระบบ PPK

Point ID	Map		Survey Check Point		Diff			
	X/East (m)	Y/North (m)	X/East (m)	Y/North (m)	dX	dX ²	dY	dY ²
Chk-3	512717.018	1591962.382	512717.014	1591962.404	0.004	0.000	-0.022	0.000
Chk-4	512802.249	1591826.157	512802.247	1591826.145	0.002	0.000	0.012	0.000
Chk-5	512892.850	1591741.177	512892.844	1591741.211	0.006	0.000	-0.034	0.001
Chk-7	513119.636	1591685.722	513119.696	1591685.794	-0.060	0.004	-0.072	0.005
Chk-8	513221.940	1591944.215	513222.008	1591944.329	-0.068	0.005	-0.114	0.013
Chk-9	512957.033	1592100.749	512956.998	1592100.762	0.035	0.001	-0.013	0.000
Chk-10	512776.419	1592184.912	512776.382	1592184.971	0.037	0.001	-0.059	0.003
Chk-12	513186.795	1592212.665	513186.860	1592212.669	-0.065	0.004	-0.004	0.000
Chk-13	513293.475	1592137.024	513293.562	1592137.088	-0.087	0.008	-0.064	0.004
Chk-14	513480.949	1591971.312	513480.890	1591971.380	0.059	0.003	-0.068	0.005
Chk-15	513274.591	1592276.330	513274.568	1592276.397	0.023	0.001	-0.067	0.004
Chk-16	513238.313	1592361.193	513238.274	1592361.301	0.039	0.002	-0.108	0.012
Chk-17	513114.441	1592441.419	513114.447	1592441.505	-0.006	0.000	-0.086	0.007
Chk-20	513705.242	1592387.072	513705.228	1592387.105	0.014	0.000	-0.033	0.001
Chk-22	513720.739	1592574.757	513720.664	1592574.777	0.075	0.006	-0.020	0.000
Chk-23	513574.739	1592711.401	513574.713	1592711.433	0.026	0.001	-0.032	0.001
Chk-24	513758.357	1592899.385	513758.271	1592899.356	0.086	0.007	0.029	0.001
Chk-31	512657.745	1591891.542	512657.692	1591891.518	0.053	0.003	0.024	0.001
					sum(dX ²)	0.045	sum(dY ²)	0.060
Number of Check Points					18			
RMSE _x					$=\sqrt{\hat{\sigma}^2(X_{data,i} - X_{check,i})^2 / n}$			
					= 0.050			
RMSE _y					$=\sqrt{\hat{\sigma}^2(Y_{data,i} - Y_{check,i})^2 / n}$			
					= 0.058			
RMSE _r					$=\sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2}$			
					= 0.076			
NSSDA Horizontal Accuracy at 95% Confidence					$=1.7308 \times RMSE_r$			
					= 0.132			

ตาราง 32 ค่าความถูกต้องทางราบของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.06 เมตร ในรูปแบบกริด ที่ใช้ระบบ PPK

	Map		Survey Check Point		Diff			
Point ID	X/East (m)	Y/North (m)	X/East (m)	Y/North (m)	dX	dX ²	dY	dY ²
Chk-3	512717.065	1591962.333	512717.014	1591962.404	0.051	0.003	-0.071	0.005
Chk-4	512802.363	1591826.154	512802.247	1591826.145	0.116	0.013	0.009	0.000
Chk-5	512892.830	1591741.238	512892.844	1591741.211	-0.014	0.000	0.027	0.001
Chk-7	513119.771	1591685.765	513119.696	1591685.794	0.075	0.006	-0.029	0.001
Chk-8	513222.070	1591944.278	513222.008	1591944.329	0.062	0.004	-0.051	0.003
Chk-9	512957.061	1592100.789	512956.998	1592100.762	0.063	0.004	0.027	0.001
Chk-10	512776.381	1592184.987	512776.382	1592184.971	-0.001	0.000	0.016	0.000
Chk-12	513186.973	1592212.701	513186.860	1592212.669	0.113	0.013	0.032	0.001
Chk-13	513293.566	1592137.064	513293.562	1592137.088	0.004	0.000	-0.024	0.001
Chk-14	513480.934	1591971.371	513480.890	1591971.380	0.044	0.002	-0.009	0.000
Chk-15	513274.646	1592276.452	513274.568	1592276.397	0.078	0.006	0.055	0.003
Chk-16	513238.386	1592361.330	513238.274	1592361.301	0.112	0.013	0.029	0.001
Chk-17	513114.403	1592441.535	513114.447	1592441.505	-0.044	0.002	0.030	0.001
Chk-20	513705.288	1592387.079	513705.228	1592387.105	0.060	0.004	-0.026	0.001
Chk-22	513720.728	1592574.755	513720.664	1592574.777	0.064	0.004	-0.022	0.000
Chk-23	513574.706	1592711.459	513574.713	1592711.433	-0.007	0.000	0.026	0.001
Chk-24	513758.311	1592899.429	513758.271	1592899.356	0.040	0.002	0.073	0.005
Chk-31	512657.742	1591891.528	512657.692	1591891.518	0.050	0.003	0.010	0.000
					sum(dX ²)	0.077	sum(dY ²)	0.024
Number of Check Points					18			
RMSE _x					$=\sqrt{\hat{\sigma}^2(X_{data,i} - X_{check,i})^2 / n}$			
					= 0.065			
RMSE _y					$=\sqrt{\hat{\sigma}^2(Y_{data,i} - Y_{check,i})^2 / n}$			
					= 0.037			
RMSE _r					$=\sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2}$			
					= 0.075			
NSSDA Horizontal Accuracy at 95% Confidence					$=1.7308 \times RMSE_r$			
					= 0.130			

ตาราง 33 ค่าความถูกต้องทางราบของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.10 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ที่ใช้ระบบ GCP

Point ID	Map		Survey Check Point		Diff			
	X/East (m)	Y/North (m)	X/East (m)	Y/North (m)	dX	dX ²	dY	dY ²
Chk-3	512717.044	1591962.363	512717.014	1591962.404	0.030	0.001	-0.041	0.002
Chk-4	512802.207	1591826.137	512802.247	1591826.145	-0.040	0.002	-0.008	0.000
Chk-5	512892.817	1591741.205	512892.844	1591741.211	-0.027	0.001	-0.006	0.000
Chk-7	513119.663	1591685.765	513119.696	1591685.794	-0.033	0.001	-0.029	0.001
Chk-8	513221.918	1591944.293	513222.008	1591944.329	-0.090	0.008	-0.036	0.001
Chk-9	512957.119	1592100.704	512956.998	1592100.762	0.121	0.015	-0.058	0.003
Chk-10	512776.346	1592184.921	512776.382	1592184.971	-0.036	0.001	-0.050	0.002
Chk-12	513187.045	1592212.528	513186.860	1592212.669	0.185	0.034	-0.141	0.020
Chk-13	513293.657	1592137.032	513293.562	1592137.088	0.095	0.009	-0.056	0.003
Chk-14	513480.955	1591971.324	513480.890	1591971.380	0.065	0.004	-0.056	0.003
Chk-15	513274.600	1592276.347	513274.568	1592276.397	0.032	0.001	-0.050	0.003
Chk-16	513238.324	1592361.225	513238.274	1592361.301	0.050	0.003	-0.076	0.006
Chk-17	513114.591	1592441.465	513114.447	1592441.505	0.144	0.021	-0.040	0.002
Chk-20	513705.102	1592387.057	513705.228	1592387.105	-0.126	0.016	-0.048	0.002
Chk-22	513720.777	1592574.788	513720.664	1592574.777	0.113	0.013	0.011	0.000
Chk-23	513574.771	1592711.470	513574.713	1592711.433	0.058	0.003	0.037	0.001
Chk-24	513758.401	1592899.398	513758.271	1592899.356	0.130	0.017	0.042	0.002
Chk-31	512657.637	1591891.482	512657.692	1591891.518	-0.055	0.003	-0.036	0.001
					sum(dX ²)	0.152	sum(dY ²)	0.053
Number of Check Points					18			
RMSE _x					$=\sqrt{\hat{\sigma}^2(X_{data,i} - X_{check,i})^2 / n}$			
					= 0.092			
RMSE _y					$=\sqrt{\hat{\sigma}^2(Y_{data,i} - Y_{check,i})^2 / n}$			
					= 0.054			
RMSE _r					$=\sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2}$			
					= 0.107			
NSSDA Horizontal Accuracy at 95% Confidence					$=1.7308 \times RMSE_r$			
					= 0.185			

ตาราง 34 ค่าความถูกต้องทางราบของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.10 เมตร ในรูปแบบกริด ที่ใช้ระบบ GCP

Point ID	Map		Survey Check Point		Diff			
	X/East (m)	Y/North (m)	X/East (m)	Y/North (m)	dX	dX ²	dY	dY ²
Chk-3	512717.064	1591962.300	512717.014	1591962.404	0.050	0.002	-0.104	0.011
Chk-4	512802.321	1591826.182	512802.247	1591826.145	0.074	0.005	0.037	0.001
Chk-5	512892.975	1591741.131	512892.844	1591741.211	0.131	0.017	-0.080	0.006
Chk-7	513119.653	1591685.864	513119.696	1591685.794	-0.043	0.002	0.070	0.005
Chk-8	513222.021	1591944.258	513222.008	1591944.329	0.013	0.000	-0.071	0.005
Chk-9	512957.175	1592100.697	512956.998	1592100.762	0.177	0.031	-0.065	0.004
Chk-10	512776.388	1592184.950	512776.382	1592184.971	0.006	0.000	-0.021	0.000
Chk-12	513186.940	1592212.632	513186.860	1592212.669	0.080	0.006	-0.037	0.001
Chk-13	513293.641	1592137.059	513293.562	1592137.088	0.079	0.006	-0.029	0.001
Chk-14	513480.785	1591971.398	513480.890	1591971.380	-0.105	0.011	0.018	0.000
Chk-15	513274.663	1592276.374	513274.568	1592276.397	0.095	0.009	-0.023	0.001
Chk-16	513238.324	1592361.225	513238.274	1592361.301	0.050	0.003	-0.076	0.006
Chk-17	513114.524	1592441.441	513114.447	1592441.505	0.077	0.006	-0.064	0.004
Chk-20	513705.124	1592387.142	513705.228	1592387.105	-0.104	0.011	0.037	0.001
Chk-22	513720.764	1592574.720	513720.664	1592574.777	0.100	0.010	-0.057	0.003
Chk-23	513574.663	1592711.489	513574.713	1592711.433	-0.050	0.002	0.056	0.003
Chk-24	513758.244	1592899.319	513758.271	1592899.356	-0.027	0.001	-0.037	0.001
Chk-31	512657.693	1591891.366	512657.692	1591891.518	0.001	0.000	-0.152	0.023
					sum(dX ²)	0.124	sum(dY ²)	0.078
Number of Check Points					18			
RMSE _x					$=\sqrt{\hat{\sigma}^2(X_{data,i} - X_{check,i})^2/n}$			= 0.083
RMSE _y					$=\sqrt{\hat{\sigma}^2(Y_{data,i} - Y_{check,i})^2/n}$			= 0.066
RMSE _r					$=\sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2}$			= 0.106
NSSDA Horizontal Accuracy at 95% Confidence					$=1.7308 \times RMSE_r$			= 0.183

ตาราง 35 ค่าความถูกต้องทางราบของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.10 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ที่ใช้ระบบ PPK

Point ID	Map		Survey Check Point		Diff			
	X/East (m)	Y/North (m)	X/East (m)	Y/North (m)	dX	dX ²	dY	dY ²
Chk-3	512717.044	1591962.363	512717.014	1591962.404	0.030	0.001	-0.041	0.002
Chk-4	512802.207	1591826.137	512802.247	1591826.145	-0.040	0.002	-0.008	0.000
Chk-5	512892.817	1591741.205	512892.844	1591741.211	-0.027	0.001	-0.006	0.000
Chk-7	513119.563	1591685.765	513119.696	1591685.794	-0.133	0.018	-0.029	0.001
Chk-8	513221.918	1591944.293	513222.008	1591944.329	-0.090	0.008	-0.036	0.001
Chk-9	512957.119	1592100.704	512956.998	1592100.762	0.121	0.015	-0.058	0.003
Chk-10	512776.346	1592184.921	512776.382	1592184.971	-0.036	0.001	-0.050	0.002
Chk-12	513187.001	1592212.528	513186.860	1592212.669	0.141	0.020	-0.141	0.020
Chk-13	513293.657	1592137.032	513293.562	1592137.088	0.095	0.009	-0.056	0.003
Chk-14	513480.955	1591971.324	513480.890	1591971.380	0.065	0.004	-0.056	0.003
Chk-15	513274.580	1592276.347	513274.568	1592276.397	0.012	0.000	-0.050	0.003
Chk-16	513238.424	1592361.225	513238.274	1592361.301	0.150	0.023	-0.076	0.006
Chk-17	513114.591	1592441.465	513114.447	1592441.505	0.144	0.021	-0.040	0.002
Chk-20	513705.102	1592387.057	513705.228	1592387.105	-0.126	0.016	-0.048	0.002
Chk-22	513720.777	1592574.788	513720.664	1592574.777	0.113	0.013	0.011	0.000
Chk-23	513574.771	1592711.470	513574.713	1592711.433	0.058	0.003	0.037	0.001
Chk-24	513758.401	1592899.398	513758.271	1592899.356	0.130	0.017	0.042	0.002
Chk-31	512657.637	1591891.482	512657.692	1591891.518	-0.055	0.003	-0.036	0.001
					sum(dX ²)	0.173	sum(dY ²)	0.053
Number of Check Points					18			
RMSE _x					$=\sqrt{\hat{\sigma}(X_{data,i} - X_{check,i})^2 / n}$			
					= 0.098			
RMSE _y					$=\sqrt{\hat{\sigma}(Y_{data,i} - Y_{check,i})^2 / n}$			
					= 0.054			
RMSE _r					$=\sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2}$			
					= 0.112			
NSSDA Horizontal Accuracy at 95% Confidence					$=1.7308 \times RMSE_r$			
					= 0.194			

ตาราง 36 ค่าความถูกต้องทางราบของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.10 เมตร ในรูปแบบกริด ที่ใช้ระบบ PPK

	Map		Survey Check Point		Diff			
Point ID	X/East (m)	Y/North (m)	X/East (m)	Y/North (m)	dX	dX ²	dY	dY ²
Chk-3	512717.119	1591962.331	512717.014	1591962.404	0.105	0.011	-0.073	0.005
Chk-4	512802.330	1591826.233	512802.247	1591826.145	0.083	0.007	0.088	0.008
Chk-5	512892.956	1591741.214	512892.844	1591741.211	0.112	0.013	0.003	0.000
Chk-7	513119.656	1591685.884	513119.696	1591685.794	-0.040	0.002	0.090	0.008
Chk-8	513222.008	1591944.299	513222.008	1591944.329	0.000	0.000	-0.030	0.001
Chk-9	512957.215	1592100.749	512956.998	1592100.762	0.217	0.047	-0.013	0.000
Chk-10	512776.457	1592184.901	512776.382	1592184.971	0.075	0.006	-0.070	0.005
Chk-12	513186.990	1592212.636	513186.860	1592212.669	0.130	0.017	-0.033	0.001
Chk-13	513293.663	1592137.070	513293.562	1592137.088	0.101	0.010	-0.018	0.000
Chk-14	513480.822	1591971.473	513480.890	1591971.380	-0.068	0.005	0.093	0.009
Chk-15	513274.657	1592276.436	513274.568	1592276.397	0.089	0.008	0.039	0.002
Chk-16	513238.290	1592361.146	513238.274	1592361.301	0.016	0.000	-0.155	0.024
Chk-17	513114.525	1592441.458	513114.447	1592441.505	0.078	0.006	-0.047	0.002
Chk-20	513705.156	1592387.124	513705.228	1592387.105	-0.072	0.005	0.019	0.000
Chk-22	513720.656	1592574.867	513720.664	1592574.777	-0.008	0.000	0.090	0.008
Chk-23	513574.717	1592711.484	513574.713	1592711.433	0.004	0.000	0.051	0.003
Chk-24	513758.268	1592899.406	513758.271	1592899.356	-0.003	0.000	0.050	0.003
Chk-31	512657.708	1591891.436	512657.692	1591891.518	0.016	0.000	-0.082	0.007
					sum(dX ²)	0.136	sum(dY ²)	0.085
Number of Check Points					18			
RMSE _x					$=\sqrt{\hat{\sigma}^2(X_{data,i} - X_{check,i})^2 / n}$		= 0.087	
RMSE _y					$=\sqrt{\hat{\sigma}^2(Y_{data,i} - Y_{check,i})^2 / n}$		= 0.069	
RMSE _r					$=\sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2}$		= 0.111	
NSSDA Horizontal Accuracy at 95% Confidence					$=1.7308 \times RMSE_r$		= 0.192	

ตาราง 37 ค่าความถูกต้องทางราบของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.15 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ที่ใช้ระบบ GCP

Point ID	Map		Survey Check Point		Diff			
	X/East (m)	Y/North (m)	X/East (m)	Y/North (m)	dX	dX ²	dY	dY ²
Chk-3	512717.131	1591962.333	512717.014	1591962.404	0.117	0.014	-0.071	0.005
Chk-4	512802.425	1591826.178	512802.247	1591826.145	0.178	0.032	0.033	0.001
Chk-5	512892.974	1591741.104	512892.844	1591741.211	0.130	0.017	-0.107	0.011
Chk-7	513119.700	1591685.763	513119.696	1591685.794	0.004	0.000	-0.031	0.001
Chk-8	513222.070	1591944.144	513222.008	1591944.329	0.062	0.004	-0.185	0.034
Chk-9	512957.225	1592100.695	512956.998	1592100.762	0.227	0.052	-0.067	0.004
Chk-10	512776.421	1592184.926	512776.382	1592184.971	0.039	0.002	-0.045	0.002
Chk-12	513187.017	1592212.597	513186.860	1592212.669	0.157	0.025	-0.072	0.005
Chk-13	513293.653	1592137.049	513293.562	1592137.088	0.091	0.008	-0.039	0.002
Chk-14	513480.840	1591971.381	513480.890	1591971.380	-0.050	0.002	0.001	0.000
Chk-15	513274.710	1592276.379	513274.568	1592276.397	0.142	0.020	-0.018	0.000
Chk-16	513238.421	1592361.162	513238.274	1592361.301	0.147	0.022	-0.139	0.019
Chk-17	513114.538	1592441.444	513114.447	1592441.505	0.091	0.008	-0.061	0.004
Chk-20	513705.077	1592386.963	513705.228	1592387.105	-0.151	0.023	-0.142	0.020
Chk-22	513720.806	1592574.545	513720.664	1592574.777	0.142	0.020	-0.232	0.054
Chk-23	513574.720	1592711.443	513574.713	1592711.433	0.007	0.000	0.010	0.000
Chk-24	513758.267	1592899.356	513758.271	1592899.356	-0.004	0.000	0.000	0.000
Chk-31	512657.657	1591891.335	512657.692	1591891.518	-0.035	0.001	-0.183	0.033
					sum(dX ²)	0.249	sum(dY ²)	0.197
Number of Check Points					18			
RMSE _x					$=\sqrt{\hat{\sigma}(X_{data,i} - X_{check,i})^2 / n}$			
					= 0.118			
RMSE _y					$=\sqrt{\hat{\sigma}(Y_{data,i} - Y_{check,i})^2 / n}$			
					= 0.105			
RMSE _r					$=\sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2}$			
					= 0.157			
NSSDA Horizontal Accuracy at 95% Confidence					$=1.7308 \times RMSE_r$			
					= 0.272			

ตาราง 38 ค่าความถูกต้องทางราบของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.15 เมตร ในรูปแบบกริด ที่ใช้ระบบ GCP

Point ID	Map		Survey Check Point		Diff			
	X/East (m)	Y/North (m)	X/East (m)	Y/North (m)	dX	dX ²	dY	dY ²
Chk-3	512717.126	1591962.365	512717.014	1591962.404	0.112	0.013	-0.039	0.002
Chk-4	512802.364	1591826.229	512802.247	1591826.145	0.117	0.014	0.084	0.007
Chk-5	512892.998	1591741.193	512892.844	1591741.211	0.154	0.024	-0.018	0.000
Chk-7	513119.754	1591685.754	513119.696	1591685.794	0.058	0.003	-0.040	0.002
Chk-8	513221.879	1591944.296	513222.008	1591944.329	-0.129	0.017	-0.033	0.001
Chk-9	512956.908	1592100.712	512956.998	1592100.762	-0.090	0.008	-0.050	0.003
Chk-10	512776.520	1592184.988	512776.382	1592184.971	0.138	0.019	0.017	0.000
Chk-12	513186.978	1592212.805	513186.860	1592212.669	0.118	0.014	0.136	0.018
Chk-13	513293.592	1592137.068	513293.562	1592137.088	0.030	0.001	-0.020	0.000
Chk-14	513480.920	1591971.353	513480.890	1591971.380	0.030	0.001	-0.027	0.001
Chk-15	513274.609	1592276.403	513274.568	1592276.397	0.041	0.002	0.006	0.000
Chk-16	513238.277	1592361.150	513238.274	1592361.301	0.003	0.000	-0.151	0.023
Chk-17	513114.444	1592441.323	513114.447	1592441.505	-0.003	0.000	-0.182	0.033
Chk-20	513705.262	1592387.045	513705.228	1592387.105	0.034	0.001	-0.060	0.004
Chk-22	513720.718	1592574.787	513720.664	1592574.777	0.054	0.003	0.010	0.000
Chk-23	513574.752	1592711.379	513574.713	1592711.433	0.039	0.002	-0.054	0.003
Chk-24	513758.450	1592899.399	513758.271	1592899.356	0.179	0.032	0.043	0.002
Chk-31	512657.723	1591891.430	512657.692	1591891.518	0.031	0.001	-0.088	0.008
					sum(dX ²)	0.153	sum(dY ²)	0.106
Number of Check Points					18			
RMSE _x					$=\sqrt{\hat{\sigma}(X_{data,i} - X_{check,i})^2/n}$			= 0.092
RMSE _y					$=\sqrt{\hat{\sigma}(Y_{data,i} - Y_{check,i})^2/n}$			= 0.077
RMSE _r					$=\sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2}$			= 0.120
NSSDA Horizontal Accuracy at 95% Confidence					$=1.7308 \times RMSE_r$			= 0.208

ตาราง 39 ค่าความถูกต้องทางราบของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.15 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ที่ใช้ระบบ PPK

Point ID	Map		Survey Check Point		Diff			
	X/East (m)	Y/North (m)	X/East (m)	Y/North (m)	dX	dX ²	dY	dY ²
Chk-3	512716.941	1591962.475	512717.014	1591962.404	-0.073	0.005	0.071	0.005
Chk-4	512802.157	1591826.347	512802.247	1591826.145	-0.090	0.008	0.202	0.041
Chk-5	512892.709	1591741.333	512892.844	1591741.211	-0.135	0.018	0.122	0.015
Chk-7	513119.589	1591685.938	513119.696	1591685.794	-0.107	0.011	0.144	0.021
Chk-8	513221.853	1591944.334	513222.008	1591944.329	-0.155	0.024	0.005	0.000
Chk-9	512956.832	1592100.885	512956.998	1592100.762	-0.166	0.028	0.123	0.015
Chk-10	512776.246	1592185.094	512776.382	1592184.971	-0.136	0.018	0.123	0.015
Chk-12	513186.700	1592212.743	513186.860	1592212.669	-0.160	0.026	0.074	0.005
Chk-13	513293.445	1592137.163	513293.562	1592137.088	-0.117	0.014	0.075	0.006
Chk-14	513480.784	1591971.367	513480.890	1591971.380	-0.106	0.011	-0.013	0.000
Chk-15	513274.393	1592276.444	513274.568	1592276.397	-0.175	0.031	0.047	0.002
Chk-16	513238.179	1592361.114	513238.274	1592361.301	-0.095	0.009	-0.187	0.035
Chk-17	513114.343	1592441.523	513114.447	1592441.505	-0.104	0.011	0.018	0.000
Chk-20	513705.242	1592386.954	513705.228	1592387.105	0.014	0.000	-0.151	0.023
Chk-22	513720.742	1592574.896	513720.664	1592574.777	0.078	0.006	0.119	0.014
Chk-23	513574.860	1592711.484	513574.713	1592711.433	0.147	0.022	0.051	0.003
Chk-24	513758.367	1592899.196	513758.271	1592899.356	0.096	0.009	-0.160	0.026
Chk-31	512657.575	1591891.633	512657.692	1591891.518	-0.117	0.014	0.115	0.013
					sum(dX ²)	0.265	sum(dY ²)	0.239
Number of Check Points					18			
RMSE _x					=sqrt[$\hat{\sigma}(X_{data,i} - X_{check,i})^2 / n$] = 0.121			
RMSE _y					=sqrt[$\hat{\sigma}(Y_{data,i} - Y_{check,i})^2 / n$] = 0.115			
RMSE _r					=sqrt(RMSE _x ² +RMSE _y ²) = 0.167			
NSSDA Horizontal Accuracy at 95% Confidence					=1.7308 x RMSE _r = 0.290			

ตาราง 40 ค่าความถูกต้องทางราบของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.15 เมตร ในรูปแบบกริด ที่ใช้ระบบ PPK

Point ID	Map		Survey Check Point		Diff			
	X/East (m)	Y/North (m)	X/East (m)	Y/North (m)	dX	dX ²	dY	dY ²
Chk-3	512716.990	1591962.345	512717.014	1591962.404	-0.024	0.001	-0.059	0.003
Chk-4	512802.228	1591826.298	512802.247	1591826.145	-0.019	0.000	0.153	0.023
Chk-5	512892.906	1591741.328	512892.844	1591741.211	0.062	0.004	0.117	0.014
Chk-7	513119.636	1591685.790	513119.696	1591685.794	-0.060	0.004	-0.004	0.000
Chk-8	513222.048	1591944.152	513222.008	1591944.329	0.040	0.002	-0.177	0.031
Chk-9	512956.771	1592100.775	512956.998	1592100.762	-0.227	0.052	0.013	0.000
Chk-10	512776.401	1592185.100	512776.382	1592184.971	0.019	0.000	0.129	0.017
Chk-12	513186.928	1592212.756	513186.860	1592212.669	0.068	0.005	0.087	0.008
Chk-13	513293.431	1592137.015	513293.562	1592137.088	-0.131	0.017	-0.073	0.005
Chk-14	513480.810	1591971.410	513480.890	1591971.380	-0.080	0.006	0.030	0.001
Chk-15	513274.486	1592276.461	513274.568	1592276.397	-0.082	0.007	0.064	0.004
Chk-16	513238.109	1592361.214	513238.274	1592361.301	-0.165	0.027	-0.087	0.008
Chk-17	513114.362	1592441.498	513114.447	1592441.505	-0.085	0.007	-0.007	0.000
Chk-20	513705.297	1592387.119	513705.228	1592387.105	0.069	0.005	0.014	0.000
Chk-22	513720.663	1592574.800	513720.664	1592574.777	-0.001	0.000	0.023	0.001
Chk-23	513574.674	1592711.350	513574.713	1592711.433	-0.039	0.002	-0.083	0.007
Chk-24	513758.298	1592899.196	513758.271	1592899.356	0.027	0.001	-0.160	0.026
Chk-31	512657.640	1591891.431	512657.692	1591891.518	-0.052	0.003	-0.087	0.008
					sum(dX ²)	0.141	sum(dY ²)	0.155
Number of Check Points					18			
RMSE _x					$\sqrt{\hat{\sigma}^2(X_{data,i} - X_{check,i})^2 / n}$			
					= 0.088			
RMSE _y					$\sqrt{\hat{\sigma}^2(Y_{data,i} - Y_{check,i})^2 / n}$			
					= 0.093			
RMSE _r					$\sqrt{RMSE_x^2 + RMSE_y^2}$			
					= 0.128			
NSSDA Horizontal Accuracy at 95% Confidence					$1.7308 \times RMSE_r$			
					= 0.222			

ตาราง 41 ค่าความถูกต้องทางดิ่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.06 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ที่ใช้ระบบ GCP

	Map	Survey Check Point	Diff	
Point ID	Z/Altitude(m)	Z/Altitude(m)	dZ	dZ ²
Chk-3	204.952	204.961	-0.009	0.000
Chk-4	214.331	214.312	0.019	0.000
Chk-5	204.149	204.149	0.000	0.000
Chk-7	194.649	194.623	0.026	0.001
Chk-8	191.140	191.191	-0.051	0.003
Chk-9	180.381	180.333	0.048	0.002
Chk-10	179.342	179.171	0.171	0.029
Chk-12	186.098	186.035	0.063	0.004
Chk-13	190.374	190.251	0.123	0.015
Chk-14	202.380	202.687	-0.307	0.094
Chk-15	185.379	185.395	-0.016	0.000
Chk-16	178.207	178.230	-0.023	0.001
Chk-17	180.995	180.986	0.009	0.000
Chk-20	186.797	186.598	0.199	0.040
Chk-22	186.644	186.697	-0.053	0.003
Chk-23	186.694	186.693	0.001	0.000
Chk-24	187.068	187.021	0.047	0.002
Chk-31	219.916	219.907	0.009	0.000
			sum(dZ ²)	0.194
Number of Check Points			18	
RMSE _Z			= $\sqrt{\frac{\sum (Z_{data,i} - Z_{check,i})^2}{n}}$	
NSSDA Vertical Accuracy at 95% Confidence			= 1.9600 x RMSE _Z	
			= 0.204	

ตาราง 42 ค่าความถูกต้องทางดิ่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.06 เมตร ในรูปแบบกริด ที่ใช้ระบบ GCP

	Map	Survey Check Point	Diff	
Point ID	Z/Altitude(m)	Z/Altitude(m)	dZ	dZ ²
Chk-3	204.974	204.961	0.013	0.000
Chk-4	214.403	214.312	0.091	0.008
Chk-5	204.156	204.149	0.007	0.000
Chk-7	194.741	194.623	0.118	0.014
Chk-8	191.189	191.191	-0.002	0.000
Chk-9	180.375	180.333	0.042	0.002
Chk-10	179.347	179.171	0.176	0.031
Chk-12	186.382	186.035	0.347	0.120
Chk-13	190.348	190.251	0.097	0.009
Chk-14	202.650	202.687	-0.037	0.001
Chk-15	185.450	185.395	0.055	0.003
Chk-16	178.304	178.230	0.074	0.005
Chk-17	181.112	180.986	0.126	0.016
Chk-20	186.622	186.598	0.024	0.001
Chk-22	186.682	186.697	-0.015	0.000
Chk-23	186.627	186.693	-0.066	0.004
Chk-24	187.028	187.021	0.007	0.000
Chk-31	219.855	219.907	-0.052	0.003
			sum(dZ ²)	0.219
Number of Check Points			18	
RMSE _Z			= $\sqrt{\hat{\sigma}^2(Z_{data,i} - Z_{check,i})^2 / n}$	
			= 0.110	
NSSDA Vertical Accuracy at 95% Confidence			= 1.9600 x RMSE _Z	
			= 0.216	

ตาราง 43 ค่าความถูกต้องทางดิ่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.06 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ที่ใช้ระบบ PPK

	Map	Survey Check Point	Diff	
Point ID	Z/Altitude(m)	Z/Altitude(m)	dZ	dZ ²
Chk-3	205.037	204.961	0.076	0.006
Chk-4	214.351	214.312	0.039	0.002
Chk-5	204.203	204.149	0.054	0.003
Chk-7	194.667	194.623	0.044	0.002
Chk-8	191.099	191.191	-0.092	0.008
Chk-9	180.430	180.333	0.097	0.009
Chk-10	179.405	179.171	0.234	0.055
Chk-12	186.168	186.035	0.133	0.018
Chk-13	190.443	190.251	0.192	0.037
Chk-14	202.718	202.687	0.031	0.001
Chk-15	185.415	185.395	0.020	0.000
Chk-16	178.237	178.230	0.007	0.000
Chk-17	181.062	180.986	0.076	0.006
Chk-20	186.618	186.598	0.020	0.000
Chk-22	186.721	186.697	0.024	0.001
Chk-23	186.701	186.693	0.008	0.000
Chk-24	187.084	187.021	0.063	0.004
Chk-31	219.975	219.907	0.068	0.005
			sum(dZ ²)	0.156
Number of Check Points			18	
RMSE _Z			= $\sqrt{\hat{\sigma}^2(Z_{data,i} - Z_{check,i})^2 / n}$ = 0.093	
NSSDA Vertical Accuracy at 95% Confidence			= 1.9600 x RMSE _Z = 0.183	

ตาราง 44 ค่าความถูกต้องทางดิ่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.06 เมตร ในรูปแบบกริด ที่ใช้ระบบ PPK

	Map	Survey Check Point	Diff	
Point ID	Z/Altitude(m)	Z/Altitude(m)	dZ	dZ ²
Chk-3	205.002	204.961	0.041	0.002
Chk-4	214.410	214.312	0.098	0.010
Chk-5	204.202	204.149	0.053	0.003
Chk-7	194.761	194.623	0.138	0.019
Chk-8	191.198	191.191	0.007	0.000
Chk-9	180.405	180.333	0.072	0.005
Chk-10	179.417	179.171	0.246	0.061
Chk-12	186.077	186.035	0.042	0.002
Chk-13	190.444	190.251	0.193	0.037
Chk-14	202.726	202.687	0.039	0.002
Chk-15	185.482	185.395	0.087	0.008
Chk-16	178.307	178.230	0.077	0.006
Chk-17	181.086	180.986	0.100	0.010
Chk-20	186.567	186.598	-0.031	0.001
Chk-22	186.692	186.697	-0.005	0.000
Chk-23	186.728	186.693	0.035	0.001
Chk-24	187.072	187.021	0.051	0.003
Chk-31	219.983	219.907	0.076	0.006
			sum(dZ ²)	0.174
Number of Check Points			18	
RMSE _Z			= $\sqrt{\hat{\sigma}^2(Z_{data,i} - Z_{check,i})^2 / n}$ = 0.098	
NSSDA Vertical Accuracy at 95% Confidence			= 1.9600 x RMSE _Z = 0.192	

ตาราง 45 ค่าความถูกต้องทางดิ่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.10 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ที่ใช้ระบบ GCP

	Map	Survey Check Point	Diff	
Point ID	Z/Altitude(m)	Z/Altitude(m)	dZ	dZ ²
Chk-3	205.129	204.961	0.168	0.028
Chk-4	214.258	214.312	-0.054	0.003
Chk-5	204.120	204.149	-0.029	0.001
Chk-7	194.795	194.623	0.172	0.030
Chk-8	191.299	191.191	0.108	0.012
Chk-9	180.452	180.333	0.119	0.014
Chk-10	179.254	179.171	0.083	0.007
Chk-12	186.131	186.035	0.096	0.009
Chk-13	190.456	190.251	0.205	0.042
Chk-14	202.688	202.687	0.001	0.000
Chk-15	185.470	185.395	0.075	0.006
Chk-16	178.361	178.230	0.131	0.017
Chk-17	181.218	180.986	0.232	0.054
Chk-20	186.713	186.598	0.115	0.013
Chk-22	186.845	186.697	0.148	0.022
Chk-23	186.722	186.693	0.029	0.001
Chk-24	187.331	187.021	0.310	0.096
Chk-31	220.015	219.907	0.108	0.012
			sum(dZ ²)	0.366
Number of Check Points			18	
RMSE _Z			= $\sqrt{\hat{\sigma}^2(Z_{data,i} - Z_{check,i})^2 / n}$	
			= 0.143	
NSSDA Vertical Accuracy			= 1.9600 x RMSE _Z	
at 95% Confidence			= 0.279	

ตาราง 46 ค่าความถูกต้องทางดิ่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.10 เมตร ในรูปแบบกริด ที่ใช้ระบบ GCP

	Map	Survey Check Point	Diff	
Point ID	Z/Altitude(m)	Z/Altitude(m)	dZ	dZ ²
Chk-3	205.183	204.961	0.222	0.049
Chk-4	214.481	214.312	0.169	0.029
Chk-5	204.168	204.149	0.019	0.000
Chk-7	194.663	194.623	0.040	0.002
Chk-8	191.359	191.191	0.168	0.028
Chk-9	180.232	180.333	-0.101	0.010
Chk-10	179.198	179.171	0.027	0.001
Chk-12	186.160	186.035	0.125	0.016
Chk-13	190.373	190.251	0.122	0.015
Chk-14	202.748	202.687	0.061	0.004
Chk-15	185.481	185.395	0.086	0.007
Chk-16	178.444	178.230	0.214	0.046
Chk-17	180.975	180.986	-0.011	0.000
Chk-20	186.700	186.598	0.102	0.010
Chk-22	186.776	186.697	0.079	0.006
Chk-23	186.694	186.693	0.001	0.000
Chk-24	187.090	187.021	0.069	0.005
Chk-31	219.983	219.907	0.076	0.006
			sum(dZ ²)	0.234
Number of Check Points			18	
RMSE _Z			= $\sqrt{\hat{\sigma}^2(Z_{data,i} - Z_{check,i})^2 / n}$	
			= 0.114	
NSSDA Vertical Accuracy			= 1.9600 x RMSE _Z	
at 95% Confidence			= 0.223	

ตาราง 47 ค่าความถูกต้องทางดิ่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.10 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ที่ใช้ระบบ PPK

	Map	Survey Check Point	Diff	
Point ID	Z/Altitude(m)	Z/Altitude(m)	dZ	dZ ²
Chk-3	205.119	204.961	0.158	0.025
Chk-4	214.328	214.312	0.016	0.000
Chk-5	204.206	204.149	0.057	0.003
Chk-7	194.796	194.623	0.173	0.030
Chk-8	191.409	191.191	0.218	0.048
Chk-9	180.402	180.333	0.069	0.005
Chk-10	179.215	179.171	0.044	0.002
Chk-12	186.092	186.035	0.057	0.003
Chk-13	190.286	190.251	0.035	0.001
Chk-14	202.723	202.687	0.036	0.001
Chk-15	185.421	185.395	0.026	0.001
Chk-16	178.173	178.230	-0.057	0.003
Chk-17	181.195	180.986	0.209	0.044
Chk-20	186.702	186.598	0.104	0.011
Chk-22	186.729	186.697	0.032	0.001
Chk-23	186.763	186.693	0.070	0.005
Chk-24	187.401	187.021	0.380	0.144
Chk-31	220.047	219.907	0.140	0.020
			sum(dZ ²)	0.347
Number of Check Points			18	
RMSE _Z			= $\sqrt{\hat{\sigma}^2(Z_{data,i} - Z_{check,i})^2 / n}$	
			= 0.139	
NSSDA Vertical Accuracy			= 1.9600 x RMSE _Z	
at 95% Confidence			= 0.272	

ตาราง 48 ค่าความถูกต้องทางดิ่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.10 เมตร ในรูปแบบกริด ที่ใช้ระบบ PPK

	Map	Survey Check Point	Diff	
Point ID	Z/Altitude(m)	Z/Altitude(m)	dZ	dZ ²
Chk-3	205.148	204.961	0.187	0.035
Chk-4	214.402	214.312	0.090	0.008
Chk-5	204.088	204.149	-0.061	0.004
Chk-7	194.554	194.623	-0.069	0.005
Chk-8	191.223	191.191	0.032	0.001
Chk-9	180.412	180.333	0.079	0.006
Chk-10	179.215	179.171	0.044	0.002
Chk-12	185.977	186.035	-0.058	0.003
Chk-13	190.213	190.251	-0.038	0.001
Chk-14	202.614	202.687	-0.073	0.005
Chk-15	185.335	185.395	-0.060	0.004
Chk-16	178.304	178.230	0.074	0.005
Chk-17	180.705	180.986	-0.281	0.079
Chk-20	186.631	186.598	0.033	0.001
Chk-22	186.581	186.697	-0.116	0.013
Chk-23	186.518	186.693	-0.175	0.031
Chk-24	187.132	187.021	0.111	0.012
Chk-31	219.935	219.907	0.028	0.001
			sum(dZ ²)	0.217
Number of Check Points			18	
RMSE _Z			= $\sqrt{\hat{\sigma}^2(Z_{data,i} - Z_{check,i})^2 / n}$	
NSSDA Vertical Accuracy at 95% Confidence			= 1.9600 x RMSE _Z	
			= 0.215	

ตาราง 49 ค่าความถูกต้องทางดิ่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.15 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ที่ใช้ระบบ GCP

	Map	Survey Check Point	Diff	
Point ID	Z/Altitude(m)	Z/Altitude(m)	dZ	dZ ²
Chk-3	204.895	204.961	-0.066	0.004
Chk-4	214.296	214.312	-0.016	0.000
Chk-5	204.304	204.149	0.155	0.024
Chk-7	194.823	194.623	0.200	0.040
Chk-8	191.224	191.191	0.033	0.001
Chk-9	180.553	180.333	0.220	0.048
Chk-10	179.353	179.171	0.182	0.033
Chk-12	186.143	186.035	0.108	0.012
Chk-13	190.531	190.251	0.280	0.078
Chk-14	202.540	202.687	-0.147	0.022
Chk-15	185.349	185.395	-0.046	0.002
Chk-16	178.185	178.230	-0.045	0.002
Chk-17	181.235	180.986	0.249	0.062
Chk-20	186.684	186.598	0.086	0.007
Chk-22	186.692	186.697	-0.005	0.000
Chk-23	186.668	186.693	-0.025	0.001
Chk-24	187.247	187.021	0.226	0.051
Chk-31	219.733	219.907	-0.174	0.030
			sum(dZ ²)	0.418
Number of Check Points			18	
RMSE _Z			= $\sqrt{\hat{\sigma}^2(Z_{data,i} - Z_{check,i})^2 / n}$	
NSSDA Vertical Accuracy at 95% Confidence			= 1.9600 x RMSE _Z	
			= 0.299	

ตาราง 50 ค่าความถูกต้องทางดิ่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.15 เมตร ในรูปแบบกริด ที่ใช้ระบบ GCP

	Map	Survey Check Point	Diff	
Point ID	Z/Altitude(m)	Z/Altitude(m)	dZ	dZ ²
Chk-3	204.777	204.961	-0.184	0.034
Chk-4	214.450	214.312	0.138	0.019
Chk-5	204.483	204.149	0.334	0.112
Chk-7	194.605	194.623	-0.018	0.000
Chk-8	191.264	191.191	0.073	0.005
Chk-9	180.618	180.333	0.285	0.081
Chk-10	179.430	179.171	0.259	0.067
Chk-12	185.926	186.035	-0.109	0.012
Chk-13	190.441	190.251	0.190	0.036
Chk-14	202.828	202.687	0.141	0.020
Chk-15	185.770	185.395	0.375	0.141
Chk-16	178.270	178.230	0.040	0.002
Chk-17	180.818	180.986	-0.168	0.028
Chk-20	186.687	186.598	0.089	0.008
Chk-22	186.898	186.697	0.201	0.040
Chk-23	186.726	186.693	0.033	0.001
Chk-24	187.084	187.021	0.063	0.004
Chk-31	219.924	219.907	0.017	0.000
			sum(dZ ²)	0.610
Number of Check Points			18	
RMSE _Z			= $\sqrt{\hat{\sigma}^2(Z_{data,i} - Z_{check,i})^2 / n}$	
			= 0.184	
NSSDA Vertical Accuracy			= 1.9600 x RMSE _Z	
at 95% Confidence			= 0.361	

ตาราง 51 ค่าความถูกต้องทางดิ่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.15 เมตร ในรูปแบบทั่วไป ที่ใช้ระบบ PPK

	Map	Survey Check Point	Diff	
Point ID	Z/Altitude(m)	Z/Altitude(m)	dZ	dZ ²
Chk-3	204.995	204.961	0.034	0.001
Chk-4	214.430	214.312	0.118	0.014
Chk-5	204.285	204.149	0.136	0.018
Chk-7	194.783	194.623	0.160	0.026
Chk-8	191.296	191.191	0.105	0.011
Chk-9	180.583	180.333	0.250	0.063
Chk-10	179.435	179.171	0.264	0.070
Chk-12	186.146	186.035	0.111	0.012
Chk-13	190.469	190.251	0.218	0.048
Chk-14	202.642	202.687	-0.045	0.002
Chk-15	185.521	185.395	0.126	0.016
Chk-16	178.220	178.230	-0.010	0.000
Chk-17	180.896	180.986	-0.090	0.008
Chk-20	186.727	186.598	0.129	0.017
Chk-22	186.994	186.697	0.297	0.088
Chk-23	186.752	186.693	0.059	0.003
Chk-24	187.119	187.021	0.098	0.010
Chk-31	220.195	219.907	0.288	0.083
			sum(dZ ²)	0.489
Number of Check Points			18	
RMSE _Z			= $\sqrt{\hat{\sigma}^2(Z_{data,i} - Z_{check,i})^2 / n}$	
			= 0.165	
NSSDA Vertical Accuracy			= 1.9600 x RMSE _Z	
at 95% Confidence			= 0.323	

ตาราง 52 ค่าความถูกต้องทางดิ่งของภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับที่ GSD 0.10 เมตร ในรูปแบบกริด ที่ใช้ระบบ PPK

	Map	Survey Check Point	Diff	
Point ID	Z/Altitude(m)	Z/Altitude(m)	dZ	dZ ²
Chk-3	204.689	204.961	-0.272	0.074
Chk-4	214.380	214.312	0.068	0.005
Chk-5	204.162	204.149	0.013	0.000
Chk-7	194.574	194.623	-0.049	0.002
Chk-8	191.076	191.191	-0.115	0.013
Chk-9	180.381	180.333	0.048	0.002
Chk-10	179.243	179.171	0.072	0.005
Chk-12	185.725	186.035	-0.310	0.096
Chk-13	190.222	190.251	-0.029	0.001
Chk-14	202.628	202.687	-0.059	0.003
Chk-15	185.656	185.395	0.261	0.068
Chk-16	178.056	178.230	-0.174	0.030
Chk-17	180.590	180.986	-0.396	0.157
Chk-20	186.294	186.598	-0.304	0.092
Chk-22	186.700	186.697	0.003	0.000
Chk-23	186.545	186.693	-0.148	0.022
Chk-24	186.952	187.021	-0.069	0.005
Chk-31	219.801	219.907	-0.106	0.011
			sum(dZ ²)	0.588
Number of Check Points			18	
RMSE _Z			$= \sqrt{\frac{\sum (Z_{data,i} - Z_{check,i})^2}{n}}$	
NSSDA Vertical Accuracy at 95% Confidence			$= 1.9600 \times RMSE_Z$	
			0.181	
			0.354	

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นภัสวรรณ บุญทวีสวัสดิ์
วัน เดือน ปี เกิด	29 ธันวาคม 2529
สถานที่เกิด	กรุงเทพฯ
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี สาขาวิชาภูมิศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปริญญาตรี สาขาวิชานิติศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

