

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ

(Unmanned Aerial Vehicle: UAV)

ในการผลิตแผนที่ภาพถ่ายออร์โธรีโธและแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข

ในพื้นที่บริเวณวงรอบของเขตพัฒนาที่ดิน

ตำบลน้ำพุ อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี

จัดทำโดย

นายมณฑล สุริยาประสิทธิ์

ตำแหน่ง นักวิชาการแผนที่ภาพถ่ายชำนาญการ ตำแหน่งเลขที่ ๑๓๖๙

กลุ่มวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการสำรวจและทำแผนที่

สำนักเทคโนโลยีการสำรวจและทำแผนที่

กรมพัฒนาที่ดิน

b 10201



สารบัญ

หัวข้อ

หน้า

บทคัดย่อ

บทที่ ๑

บทนำ

๑.๑ หลักการและเหตุผล

๑.๒ วัตถุประสงค์

๑.๓ พื้นที่ดำเนินการ

๑.๔ ข้อมูลและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการ

๑.๕ ระยะเวลาดำเนินการ

๑.๖ ผู้รับผิดชอบโครงการ

๑.๗ ประโยชน์ที่ได้รับ

บทที่ ๒

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

๒.๑ อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV)

๒.๒ อากาศยานไร้คนขับของประเทศไทย

๒.๓ อากาศยานไร้คนขับที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

๒.๔ การทำแผนที่ด้วยอากาศยานไร้คนขับ

๒.๕ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทที่ ๓

สภาพทั่วไปของพื้นที่ดำเนินการ

๓.๑ อาณาเขต

๓.๒ การปกครอง

๓.๓ ลักษณะภูมิประเทศ ประชากร และการประกอบอาชีพ

๓.๔ ลักษณะภูมิอากาศ

๓.๕ หน่วยธุรกิจในเขตองค์การบริหารส่วนตำบลน้ำพุ

๓.๖ ระบบสาธารณูปโภค

๓.๗ ทรัพยากรธรรมชาติ

บทที่ ๔

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

๔.๑ การบินถ่ายภาพด้วยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV)

๔.๒ การประมวลผลเพื่อจัดทำภาพถ่ายออร์โธรีและแบบจำลองระดับสูง

๔.๓ การตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายออร์โธรีที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ

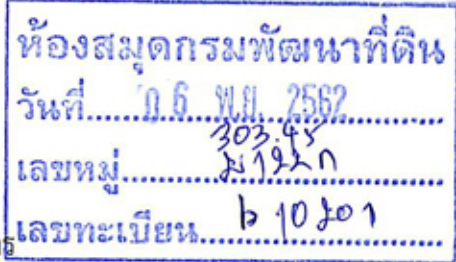
บทที่ ๕

ผลการดำเนินงาน

๕.๑ การบินถ่ายภาพด้วยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV)

๕.๒ การจัดทำหมุดควบคุมภาพถ่าย

๕.๓ การจัดทำภาพถ่ายออร์โธรีเชิงเลข และแบบจำลองระดับสูงจากเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ(Unmanned Aerial Vehicle: UAV)



๑

๑

๒

๒

๒

๒

๓

๔

๕

๕

๑๐

๑๒

๒๔

๒๔

๓๐

๓๐

๓๐

๓๑

๓๑

๓๓

๔๒

๕๗

๕๔

๖๐

๖๓

303.45

๓ 122 ก

กรมพัฒนาที่ดิน

สารบัญ (ต่อ)

หัวข้อ	หน้า	
	๕.๔ การตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายออร์โธรีตีที่ได้จาก อากาศยานไร้คนขับ	๗๔
บทที่ ๖	สรุปผลการดำเนินการและข้อเสนอแนะ	
	๖.๑ ข้อมูลออร์โธรีตี (True Orthophoto)	๗๖
	๖.๒ แบบจำลองระดับสูง (Digital Surface Model: DSM)	๗๘
	๖.๓ การตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่ง	๘๐
	๖.๔ ข้อเสนอแนะ	๘๐
เอกสารอ้างอิง		
ภาคผนวก		

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
๑	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า RMSE กับมาตราส่วนของแผนที่ ตามมาตรฐาน ASPRS (FGDC, ๑๙๙๘)	๕๘
๒	แสดงผลการคำนวณปรับแก้ค่าพิกัดด้วยหมุดควบคุมภาพ	๖๗
๓	แสดงการคำนวณในการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของจุดตรวจสอบ จำนวน ๒๐ จุด	๗๔
๔	แสดงผลการเปรียบเทียบค่า RMSE กับ Map Scale ตามมาตรฐาน ASPRS	๗๔
๕	แสดงข้อดีและข้อจำกัดของอากาศยานไร้คนขับ (UAV)	๘๐
๖	แสดงข้อดีและข้อจำกัดของดาวเทียมสำรวจทรัพยากร	๘๑
๗	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างภาพดาวเทียมความละเอียดจุดภาพต่ำกว่า ๑ เมตร และภาพถ่ายความละเอียดสูงจากอากาศยานไร้คนขับ (UAV)	๘๒

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
๑	แสดงตัวอย่างของอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ที่ใช้ในการทำแผนที่	๔
๒	แสดงอากาศยานประเภทปีกตรึง รุ่น Trimble UX๕	๕
๓	แสดงอากาศยานประเภทปีกหมุน รุ่น DJI Phantom ๓ professional	๖
๔	แสดงอากาศยานปีกตรึงขึ้นลงแนวดิ่ง (Fixed-Wing Hybrid)	๖
๕	แสดงส่วนประกอบหลักของระบบ UAV	๘
๖	แสดงอากาศยานไร้คนขับแบบสี่ใบพัด รุ่น DJI Phantom ๓ professional	๙
๗	แสดงส่วนประกอบของอากาศยานไร้คนขับแบบสี่ใบพัด รุ่น DJI Phantom ๓ professional	๑๐
๘	แสดงส่วนข้อต่อส่วนเกยในการบิน	๑๑
๙	แสดงจุดควบคุมภาพถ่ายแบบธรรมชาติ (natural photo control point)	๑๓
๑๐	แสดงจุดควบคุมภาพถ่ายแบบเป่าชนิดให้สัญญาณ (signalized photo control point)	๑๓
๑๑	แสดงตำแหน่งและความสัมพันธ์ระหว่างจุดควบคุมภาพถ่าย	๑๗
๑๒	แสดงวิธีการระบุค่าการจับวางภายนอกของภาพถ่าย	๑๘
๑๓	แสดงวิธีการระบุค่าการจับวางภายนอกของภาพถ่าย	๑๙
๑๔	แสดงชายสามเหลี่ยมที่เกิดเรขาคณิตของการเดินทางของลำแสง	๒๐
๑๕	แสดงตำแหน่งและจำนวนจุดบังคับภาพถ่ายสำหรับบล็อกปกติ	๒๑
๑๖	แสดงตำแหน่งและจำนวนจุดบังคับภาพถ่ายสำหรับบล็อกปกติโดยการใช้การรังวัดจีพีเอส	๒๒
๑๗	แสดงตำแหน่งและจำนวนจุดบังคับภาพถ่ายสำหรับบล็อกความถูกต้องสูง (Unmanned Aerial Vehicle: UAV)	๒๒
๑๘	แสดงตำแหน่งและจำนวนจุดบังคับภาพถ่ายสำหรับบล็อกมีแถบคุม	๒๓
๑๙	แสดงการปฏิบัติงาน GPS photogrammetry	๒๔
๒๐	แสดงวิธีการใช้กล้องสถานีรวมหาค่าจีพีเอสออฟเซต	๒๕
๒๑	แสดงการค้นหาจุดสนใจ (keypoint) ในมิติขนาดและระยะทาง โดยการเปรียบเทียบเพื่อหาผลต่างของแต่ละภาพ (Difference-of-Gaussian:DOG)	๒๗
๒๒	แสดงการหาตำแหน่งของจุดสนใจ (keypoint) โดยพิจารณาที่ค่าสูงสุดและต่ำสุด	๒๗
๒๓	การสร้างลักษณะเฉพาะของจุดสนใจ	๒๘
๒๔	แสดงพื้นที่ศึกษา ตำบลน้ำพุ อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัดราชบุรี	๒๙
๒๕	แสดงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานทั้งหมด	๓๒
๒๖	แสดงขั้นตอนการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle :UAV)	๓๓
๒๗	แสดงพื้นที่วงรอบเขตพัฒนาที่ดิน ตำบลน้ำพุ อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี	๓๓
๒๘	แสดงบริเวณพื้นที่โล่งใช้ในการขึ้นลงของอากาศยานไร้คนขับ (UAV)	๓๔
๒๙	แสดงพื้นที่ดำเนินการบินถ่ายภาพเพื่อจัดทำแผนที่ภาพถ่ายออร์โธรีโอสตีด้วยอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV)	๓๔
๓๐	แสดงการถ่ายภาพตามทฤษฎีสมการสภาวะร่วมเส้น	๓๕
๓๑	แสดงรูปแบบการบินแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก	๓๖

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
๓๒	แสดงวิธีการวิเคราะห์หาความผิดเพี้ยนเลนส์ (lenses distortion modeling)	๓๘
๓๓	แสดงขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์โดยอาศัย แบบจำลองความผิดเพี้ยน (Distortion model) สำหรับใช้ในขั้นตอนการปรับแก้กล้องถ่ายภาพ	๓๘
๓๔	แสดงการรังวัดหมุดควบคุมภาคพื้นดิน ด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS วิธีการรังวัดแบบจลน์ ณ เวลารังวัด (Real Time Kinematic: RTK)	๓๙
๓๕	แสดงการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุน (Multirotor)	๔๑
๓๖	แสดงตัวอย่างของระบบนำร่อง (Way point) ระบบการรังวัดกำหนดตำแหน่งด้วยดาวเทียม (Global Positioning System: GPS) และระบบการหาค่าอากาศเอียงของเครื่องบิน (Inertial measurement unit: IMU) ที่นำไปติดตั้งอยู่บนอากาศยานไร้คนขับ (UAV)	๔๒
๓๗	แสดงขั้นตอนการประมวลผลเพื่อจัดทำภาพถ่ายออร์โธสตีและแบบจำลองระดับสูง	๔๒
๓๘	แสดงการนำเข้าภาพที่คัดเลือกไว้แล้วเข้าสู่โปรแกรม เพื่อเตรียมขั้นตอนการนำเข้าค่าพิกัด	๔๓
๓๙	แสดงการจัดเรียงภาพ (Photo alignment) โดยอาศัยค่าพิกัดที่ได้จากการถ่ายภาพ	๔๔
๔๐	แสดงการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนของเลนส์กล้องถ่ายภาพ	๔๕
๔๑	แสดง Point cloud ที่แปลงมาจากภาพที่ถ่ายด้วยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV)	๔๗
๔๒	แสดงตัวอย่างการปรับแก้ค่าพิกัดด้วยจุดควบคุมภาพถ่าย	๔๙
๔๓	แสดงการสร้างพอยท์คลาวด์แบบหนาแน่น (dense point cloud)	๕๐
๔๔	แสดงการสร้าง Mesh Model	๕๑
๔๕	แสดง Mesh Model แบบ wireframe	๕๒
๔๖	แสดงการสร้างแบบจำลองระดับสูง	๕๓
๔๗	แสดงแบบจำลองระดับสูง (Digital Surface Model: DSM)	๕๔
๔๘	แสดงการสร้างภาพออร์โธจริง (True Orthophoto)	๕๕
๔๙	แสดงภาพออร์โธจริง (True Orthophoto)	๕๖
๕๐	แสดงจุดขึ้นบินและบล็อกของการบินถ่ายภาพทั้งหมดในโครงการ	๕๙
๕๑	แสดงการรังวัด BASE STATION ภายในโรงเรียนวัดมัญจาคีรี	๖๐
๕๒	แสดงการรังวัดหมุดควบคุมภาพถ่ายและจุดตรวจสอบ	๖๑
๕๓	แสดงตำแหน่งจุดควบคุมภาพถ่าย (บน) และจุดตรวจสอบ (ล่าง)	๖๒
๕๔	แสดงความคลาดเคลื่อนของเลนส์และพารามิเตอร์ในการปรับแก้	๖๓
๕๕	แสดงตัวอย่างภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ (UAV)	๖๔
๕๖	แสดงการจับคู่ภาพโดยใช้ข้อมูลจุดสำคัญจากการสกัดหาวัตถุภายในภาพ	๖๕
๕๗	แสดงจำนวน tie points ที่ได้จากการประมวลผล	๖๖
๕๘	แสดงที่ตั้งและจำนวนหมุดควบคุมภายในโครงการ	๖๗
๕๙	แสดงจำนวน Dense Point Cloud ที่ได้จากการประมวลผล	๖๘
๖๐	แสดง Mesh Model ในรูปแบบ Wireframe	๖๙

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
๖๑	แสดงการ Render ในรูปแบบ Solid	๗๐
๖๒	แสดงการ Render ในรูปแบบ Shade	๗๑
๖๓	แสดงแบบจำลองระดับสูง และมุมมองแบบ Hill shade	๗๒
๖๔	แสดงข้อมูลออร์โธจิง (True Orthophoto)	๗๓
๖๕	แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลออร์โธจิงปี ๒๕๖๑ และภาพถ่ายออร์โธสตี ปี ๒๕๔๕ ที่มาตราส่วน ๑:๔๐๐๐	๗๖
๖๖	แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลออร์โธจิงปี ๒๕๖๑ และภาพถ่ายออร์โธสตี ปี ๒๕๔๕ ที่มาตราส่วน ๑:๑๐๐๐	๗๗
๖๗	แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลออร์โธจิงปี ๒๕๖๑ และภาพถ่ายออร์โธสตี ปี ๒๕๔๕ ที่มาตราส่วน ๑:๕๐๐	๗๗
๖๘	แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองความสูงภูมิประเทศ ปี ๒๕๖๑ (บน) กับแบบจำลอง ระดับสูงเชิงเลข ปี๒๕๔๕ (ล่าง)	๗๘
๖๙	แสดงการเปรียบเทียบ hill shade ที่ได้จากแบบจำลองความสูงภูมิประเทศ ปี ๒๕๖๑ กับแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข ปี๒๕๔๕	๗๙
๗๐	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างภาพจากดาวเทียมที่ใช้ในโปรแกรม google earth (ซ้าย) ภาพที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ (UAV) (ขวา)	๘๒

บทคัดย่อ

การจัดระบบอนุรักษ์ดินและน้ำจำเป็นต้องอาศัยฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ที่สำคัญ ได้แก่ ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ซึ่งจะต้องมีความถูกต้อง เป็นปัจจุบัน และต้องสามารถเก็บข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว เพื่อจะสามารถนำมาวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น แต่ปัญหาที่สำคัญประการหนึ่ง คือ การเข้าปฏิบัติงานในพื้นที่เป็นไปได้อย่างยากเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ รวมถึงการใช้ประโยชน์ที่ดินที่มีความหลากหลาย ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการเก็บข้อมูล จากการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) ในการผลิตภาพถ่ายออร์โธรี และแบบจำลองระดับสูง ซึ่งต้องมีการควบคุมปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการบินถ่ายภาพ การประมวลผลภาพ และการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งตามมาตรฐาน FGDC ผลผลิตที่ได้เป็นแผนที่ที่มีรายละเอียดสูง มีความถูกต้องเชิงตำแหน่งตามมาตรฐาน และมีความเป็นปัจจุบัน โดยได้ภาพถ่ายออร์โธรีเชิงเลข มีความละเอียดสูง (๐.๑๐ เมตร) และแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (Digital Surface Model: DSM) (๐.๓๐ เมตร) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับภาพถ่ายออร์โธรี (๐.๕ เมตร) และแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (๕ เมตร) ที่ได้จากโครงการจัดทำแผนที่เพื่อการบริหารทรัพยากรธรรมชาติและทรัพย์สินของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ จะแสดงให้เห็นถึงพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินได้อย่างชัดเจน เช่น การเปลี่ยนชนิดพืช การเปลี่ยนแปลงพื้นที่เกษตรกรรมเป็นพื้นที่ปศุสัตว์ การขุด/ขยายบ่อน้ำขนาดเล็ก สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงข้อมูลการปลูกพืช สำหรับสนับสนุนภารกิจของกรมพัฒนาที่ดิน ในการนำไปใช้ในการส่งเสริมการปรับปรุงบำรุงดิน และพิจารณากำหนดแผนการใช้ที่ดินระยะยาว รวมถึงการออกแบบระบบอนุรักษ์ดินและน้ำได้เป็นอย่างดี

บทที่ ๑

บทนำ

๑.๑ หลักการและเหตุผล

กรมพัฒนาที่ดิน มีภารกิจและความรับผิดชอบโดยตรงในการอนุรักษ์ดินและน้ำ รวมทั้งการป้องกันการเสื่อมโทรมของทรัพยากรดินและที่ดิน มีการศึกษาทดสอบและเปรียบเทียบ เพื่อหาระบบและวิธีการอนุรักษ์ดินและน้ำที่เหมาะสมกับประเทศไทย ตั้งแต่ปีพ.ศ. ๒๕๐๖ เป็นต้นมา ตลอดระยะเวลา ๕๕ ปี กรมพัฒนาที่ดิน ได้ศึกษาวิจัย คัดเลือกและพัฒนาระบบวิธีการอนุรักษ์ดินและน้ำ ให้เหมาะสมกับสภาพปัญหาการใช้ที่ดิน สังคม วัฒนธรรม และเศรษฐกิจของประเทศ

การจัดระบบอนุรักษ์ดินและน้ำจำเป็นต้องอาศัยฐานข้อมูลเชิงพื้นที่ที่สำคัญ ได้แก่ ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ซึ่งจะต้องมีความถูกต้อง เป็นปัจจุบัน และต้องสามารถเก็บข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว เพื่อจะสามารถนำมาวิเคราะห์ ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น แต่ปัญหาที่สำคัญประการหนึ่ง คือ การเข้าปฏิบัติงานในพื้นที่เป็นไปได้อย่างยากเนื่องจากสภาพภูมิประเทศ รวมถึงการใช้ประโยชน์ที่ดินที่มีความหลากหลาย ทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการเก็บข้อมูล ดังนั้น การจัดทำแผนที่ด้วยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) จะสามารถตอบสนองต่อภารกิจได้อย่างเหมาะสม มีความถูกต้องสูงและลดระยะเวลาในการปฏิบัติงานในพื้นที่ดำเนินการ

ด้วยสาเหตุดังกล่าวข้างต้น ผู้ปฏิบัติงานจึงมีความต้องการศึกษาและจัดทำแผนที่ออร์โธรีจากเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ ในบริเวณวงรอบของพื้นที่เขตพัฒนาที่ดิน ตำบลน้ำพุ อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี ซึ่งมีความสอดคล้องตามวัตถุประสงค์และแผนยุทธศาสตร์ของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ในยุทธศาสตร์ที่ ๔ การบริหารจัดการทรัพยากรการเกษตรและสิ่งแวดล้อมอย่างสมดุลและยั่งยืน เกิดประโยชน์กับหน่วยงานในระดับพื้นที่ได้แก่ สำนักงานพัฒนาที่ดินเขต ๑๐ และสถานีพัฒนาที่ดินราชบุรี ในการนำแผนที่ภาพถ่ายออร์โธรีดังกล่าว ไปเป็นกรอบในการปรับปรุงข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน สำหรับสนับสนุนภารกิจของกรมพัฒนาที่ดิน สามารถนำไปใช้ ในการส่งเสริมการปรับปรุงบำรุงดิน การวางแผนและการออกแบบระบบอนุรักษ์ดินและน้ำ การพิจารณากำหนดแผนการใช้ที่ดินระยะยาว

๑.๒ วัตถุประสงค์

๑) เพื่อจัดทำภาพถ่ายออร์โธรี (Orthophoto) และแบบจำลองระดับสูง (Digital Surface Model: DSM) จากภาพถ่ายที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ในพื้นที่เป้าหมาย วงรอบเขตพัฒนาที่ดิน ตำบลน้ำพุ อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี

๒) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายออร์โธรีที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV)

๑.๓ พื้นที่ดำเนินการ

พื้นที่ดำเนินการอยู่ในขอบเขตของในบริเวณวงรอบของพื้นที่เขตพัฒนาที่ดิน ตำบลน้ำพุ อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ ๕,๐๐๐ ไร่

๑.๔ ข้อมูลและอุปกรณ์ที่ใช้ในการดำเนินการ

๑.๔.๑ ข้อมูล

๑) ภาพถ่ายออร์โธรีซีเชิงเลข มาตราส่วน ๑: ๔,๐๐๐ ครอบคลุมพื้นที่ ตำบลน้ำพุ อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี (สำนักเทคโนโลยีการสำรวจและทำแผนที่) ซึ่งเป็นข้อมูลในปี พ.ศ. ๒๕๔๕

๒) แบบจำลองระดับสูงเชิงเลข มาตราส่วน ๑: ๔,๐๐๐ ครอบคลุมพื้นที่ ตำบลน้ำพุ อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี (สำนักเทคโนโลยีการสำรวจและทำแผนที่) ซึ่งเป็นข้อมูลในปี พ.ศ. ๒๕๔๕

๓) หมุดหลักฐานแผนที่ หมายเลข A๑๐๔๕๓๐ (สำนักเทคโนโลยีการสำรวจและทำแผนที่) ซึ่งเป็นข้อมูลในปี พ.ศ. ๒๕๔๕

๑.๔.๒ อุปกรณ์

๑) อากาศยานไร้คนขับ (UAV) ชนิดปีกหมุน (Multirotor) DJI Phantom ๓ Professional

๒) คอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผล

๓) เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS (Global Navigation Satellite System)

แบบรับวัด Trimble ๕๗๐๐ series

๑.๔.๓ โปรแกรม

๑) โปรแกรมสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ ArcGIS Desktop version ๙.x

๒) โปรแกรมประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ Agisoft Photoscan Professional

๓) โปรแกรมสำนักงาน Microsoft Office

๑.๕ ระยะเวลาดำเนินการ

มีนาคม – กันยายน ๒๕๖๑

๑.๖ ผู้รับผิดชอบโครงการ

นายมนชล สุริยาประสิทธิ์ ตำแหน่งนักวิชาการแผนที่ภาพถ่ายชำนาญการ

ผอ.กลุ่มวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการสำรวจและทำแผนที่

กลุ่มวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการสำรวจและทำแผนที่

สำนักเทคโนโลยีการสำรวจและทำแผนที่

๑.๗ ประโยชน์ที่ได้รับ

๑) สพข. ๑๐ และ สพด.ราชบุรี สามารถนำภาพถ่ายออร์โธรี และแบบจำลองระดับสูงที่มีความละเอียดสูง มีความถูกต้องเชิงตำแหน่งสูง และเป็นปัจจุบัน ไปใช้ในการปรับปรุงข้อมูลการปลูกพืชสำหรับสนับสนุนภารกิจของกรมพัฒนาที่ดิน ในการนำไปใช้ในการส่งเสริมการปรับปรุงบำรุงดิน และพิจารณากำหนดแผนการใช้ที่ดินระยะยาว รวมถึงการออกแบบระบบอนุรักษ์ดินและน้ำ

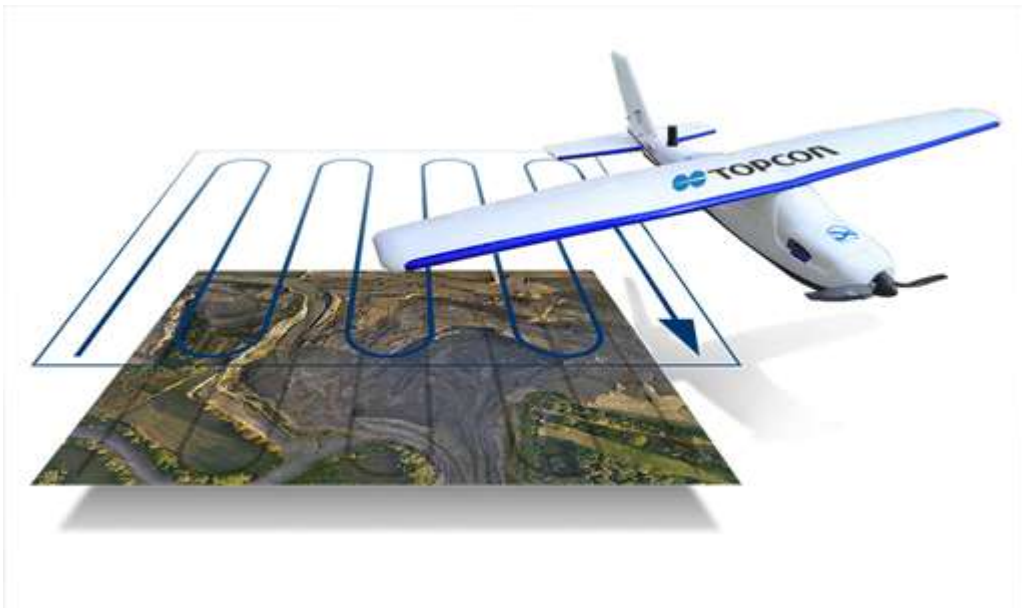
๒) หน่วยงานต่างๆ ภายในกรมพัฒนาที่ดิน สามารถนำแผนที่ภาพถ่ายออร์โธรี และแบบจำลองระดับสูง ไปใช้ในการศึกษา วิเคราะห์ วิจัย วางแผน เพื่อสนับสนุนภารกิจของกรมพัฒนาที่ดิน ด้านต่าง ๆ เช่น การจัดทำสำมะโนที่ดินด้านการเกษตร การ Zoning พื้นที่เกษตร การสำรวจดิน การติดตามการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land use change) การวิเคราะห์พื้นที่เพื่อวางแผนในการสร้างบ่อน้ำขนาดเล็ก และ การวางแผนด้านการจัดระบบอนุรักษ์ดินและน้ำ

บทที่ ๒

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

๒.๑ อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV)

อากาศยานไร้คนขับ หรือ " Unmanned Aerial Vehicle: UAV " ตามความหมายของ Canadian Aviation Regulations (CARs) คือ เครื่องบินที่ใช้กำลัง (power) ขับเคลื่อน สามารถบินได้ด้วยระบบอัตโนมัติ โดยไม่มีนักบินอยู่เครื่องบินแต่ควบคุมจากภาคพื้นดินที่อยู่ระยะไกล ใช้การควบคุมอัตโนมัติซึ่งมีอยู่ ๒ ลักษณะ ได้แก่ การควบคุมจากระยะไกล และการควบคุมแบบอัตโนมัติโดยใช้ระบบการบินด้วยตนเอง ซึ่งต้องอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่มีระบบที่ซับซ้อนและมีการติดตั้งไว้ในอากาศยาน อาจกล่าวได้ว่า อากาศยานไร้คนขับคือเครื่องบินที่สามารถบินได้ด้วยระบบอัตโนมัติ โดยไม่ต้องใช้นักบินประจำการอยู่บนอากาศยาน อาจมีการติดตั้งกล้องถ่ายภาพคุณภาพสูงทั้งกล้องถ่ายภาพในเวลากลางวัน (electro optical) และกล้องอินฟราเรด (infrared sensor) ที่สามารถบันทึกภาพระยะไกลได้ และแพร่ภาพสัญญาณมายังจอภาพที่สถานีภาคพื้นดินในเวลาใกล้เคียงเวลาจริงมากที่สุด (Near Real Time: NRT) ทำให้ผู้บังคับสามารถมองเห็นภาพในเวลาใกล้เคียงเวลาเป็นจริงมากที่สุด นอกจากนี้อากาศยานไร้คนขับยังสามารถปฏิบัติการกิจด้านการติดตามการแผ้วถาง การค้นหาเป้าหมาย และการลาดตระเวนหรือที่เราเรียกว่า ISTAR (Intelligence, Surveillance, Target Acquisition, Reconnaissance) ได้ เป็นต้น



รูปที่ ๑ แสดงตัวอย่างของอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ที่ใช้ในการทำแผนที่
ที่มา: <https://www.btcsurvey.co.th/drone>

๒.๑.๑ ประเภทของอากาศยานไร้คนขับหรือยูเอวี (UAV: unmanned aerial vehicle)

อากาศยานไร้คนขับหรือยูเอวีที่ถูกนำมาใช้ปฏิบัติงาน แบ่งออกเป็น ๓ ประเภทใหญ่ๆ คือ

๑) อากาศยานปีกตรึง (fixed-wing aircraft)

อากาศยานปีกตรึง จัดเป็นอากาศยานชนิดหนักกว่าอากาศ อาศัยปีกแข็งในการบินในอากาศ มีลักษณะคล้ายเครื่องบิน และใช้งานได้นานกว่าอากาศยานไร้คนขับประเภทอื่นๆ โดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการบินด้วยอากาศยานปีกตรึงดังนี้

๑.๑) แร้งยก (lift)

เครื่องบินสามารถลอยอยู่ในอากาศได้ เนื่องมาจากแรงยกที่เกิดขึ้นที่ปีก ซึ่งแรงยกนี้ จะเกิดขณะที่เครื่องบินมีการเคลื่อนที่ผ่านอากาศ (หรือมองในมุมกลับคือ มีอากาศเคลื่อนที่ผ่านปีก) ด้วยความเร็วที่เหมาะสม จะเกิดแรงยกที่เพียงพอจะ ยกเครื่องบินให้ลอยขึ้นได้

๑.๒) แร้งต้าน (drag)

แรงต้านคือแรงที่เกิดขึ้นขณะที่เครื่องบินมีการเคลื่อนที่ผ่านอากาศ ตัวแปรหลักของแรงต้าน คือ ขนาดรูปทรงของเครื่องบิน และความเร็วขณะเคลื่อนที่

๑.๓) น้ำหนัก (weight)

หมายถึงน้ำหนักรวมของเครื่องบิน

๑.๔) แร้งขับเคลื่อน (thrust)

แรงขับเคลื่อน คือ แรงที่ขับเคลื่อน หรือผลัก จุด เครื่องบินให้เคลื่อนที่ไปข้างหน้ามีแหล่งกำเนิดมาจากเครื่องยนต์ชนิดต่าง ๆ



รูปที่ ๒ แสดงอากาศยานประเภทปีกตรึง รุ่น Trimble UX๕ (Trimble, ๒๐๑๕)

๒) อากาศยานปีกหมุน (Multirotor)

อากาศยานปีกหมุน ใช้หลักการหมุนของใบพัดที่มีหน้าตัดเป็นรูปแพนอากาศ (air foil) หมุนเพื่อสร้างแรงยก อากาศยานไร้คนขับชนิดปีกหมุน (Multirotor) เป็นอากาศยานขึ้นลงแนวดิ่งโดยอาศัยการหมุนของใบพัดในการขึ้นลงและขับเคลื่อนไปในทิศทางต่าง ๆ ประกอบด้วยใบพัดจำนวน ๓, ๔, ๖ และ ๘ ใบพัด โดยทั่วไปใช้ระยะเวลาการบินประมาณ ๑๐-๒๐ นาที



รูปที่ ๓ แสดงอากาศยานประเภทปีกหมุน รุ่น DJI Phantom ๓ professional (Da-Jiang Innovations, ๒๐๑๕)

๓) อากาศยานปีกตรึงขึ้นลงแนวดิ่ง (Fixed-Wing Hybrid)

อากาศยานไร้คนขับชนิดปีกตรึงขึ้นลงแนวดิ่ง (Fixed-Wing Hybrid) เป็นอากาศยานที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมาใหม่ มีลำตัวอากาศยานเป็นแบบอากาศยานไร้คนขับชนิดปีกตรึง แต่สามารถขึ้นลงแนวดิ่งได้ ซึ่งเป็นการนำเอาข้อดีของประเภทอากาศยานไร้คนขับชนิดปีกตรึงมารวมกับอากาศยานไร้คนขับชนิดปีกหมุน แต่อากาศยานไร้คนขับประเภทนี้ยังมีการนำมาใช้งานน้อยมาก เนื่องจากมีราคาสูง



รูปที่ ๔ แสดงอากาศยานปีกตรึงขึ้นลงแนวดิ่ง (Fixed-Wing Hybrid)

ที่มา: <https://products.embention.com/veronte/uav-autopilot/hybrid-vtol-uav>

๒.๑.๒ ส่วนประกอบของระบบอากาศยานไร้คนขับ

จากคำจำกัดความของอากาศยานไร้คนขับหมายถึง เครื่องบินที่สามารถบินได้ด้วยระบบอัตโนมัติโดยไม่ใช้นักบิน จะเห็นว่าลักษณะของอากาศยานไร้คนขับจะกำหนดได้จากการออกแบบ การสร้างระบบต่าง ๆ ในอากาศยานไร้คนขับและระบบสนับสนุนที่อยู่บนพื้นดิน ซึ่งสิ่งเหล่านี้ได้มาจากความต้องการหลัก ๕ ประการ คือ ระยะเวลาบิน ความเร็ว รัศมีทำการ ความสูง และน้ำหนักรวม เมื่อพิจารณาโดยรวมทั้งระบบแล้วระบบอากาศยานไร้คนขับจะแยกได้ ๑๐ ส่วน คือ

๑) โครงเครื่องบิน (Airframe) มีรูปร่างที่แตกต่างกันตามแต่ประเภทของอากาศยานไร้คนขับ ในลำตัวประกอบด้วย เฟรม มอเตอร์ ใบพัด ชุดอิเล็กทรอนิกส์ควบคุมรอบ มอเตอร์ หรือ เซอร์โวสำหรับเครื่องบินปีกแข็ง ส่วนวัสดุที่ใช้ก็มีหลายแบบ เช่น โลหะ พลาสติกผสม คาร์บอนไฟเบอร์ผสม

๒) ระบบควบคุม (Control System) เป็นแบบการบังคับโดยใช้วิทยุจากพื้นดิน หรือ ควบคุมการบินด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ชุดควบคุมการบิน ประกอบด้วย ตัวแก้อียง IMU ทำงาน ร่วมกับระบบรับสัญญาณดาวเทียม จีพีเอส (GPS) และตัวตรวจจับอื่นๆ เพื่อรักษาระดับความสูงและตำแหน่ง

๓) กล้อง (Camera) เป็นอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพทางอากาศ

๔) ระบบการปล่อยและลงจอด (Launch and Landing System) การปล่อยอากาศยานไร้คนขับขึ้นบินทำได้หลายวิธี เช่น การยิงจากเครื่องส่ง (Launch) การวิ่งขึ้นจากทางวิ่ง การโยน และการลงจอดก็มีหลายวิธี เช่น การจับด้วยตาข่าย การใช้ร่มชูชีพ การใช้พาราพอยล์ และการบังคับลงบนรันเวย์

๕) ระบบนำร่องและนำวิถี (Navigation and Guidance System) จะใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส (GNSS) เป็นอุปกรณ์ทำงานด้านระบบนำร่องและนำวิถี ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญของอากาศยานไร้คนขับ

๖) ระบบควบคุมและสนับสนุนภาคพื้น (Ground Control Station) หลักการทำงานคล้ายๆ กับระบบควบคุมภาคพื้นของอากาศยานทั่วไป โดยมีหน้าที่ตรวจสอบการทำงานและตรวจข้อมูลต่าง ๆ ที่ส่งมาจากอากาศยานไร้คนขับ

๗) ช่องสัมภาระที่บรรทุกได้ (Payload) เช่น กล้องถ่ายภาพ แบตเตอรี่

๘) ระบบการเชื่อมต่อและเก็บข้อมูล (Data Link and Storage System) ระบบเชื่อมต่อ ระหว่างอากาศยานไร้คนขับและระบบควบคุมและสนับสนุนภาคพื้น ใช้หลายย่านความถี่ เช่น ย่านความถี่สูง (HF) ย่านความถี่สูงมาก (VHF) และย่านไมโครเวฟ

๙) ระบบป้องกันตนเอง (Self-Protection Systems) อากาศยานจะมีระบบป้องกันตนเอง เบื้องต้นเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายกับอากาศยานในระหว่างการบิน เช่น เมื่อแบตเตอรี่ใกล้หมดแต่ยังไม่ถึงจุดร่อนลง อากาศยานจะร่อนลงเองอัตโนมัติเพื่อไม่ให้เกิดการทิ้งตัว ในระหว่างการบิน

๑๐) ผู้ควบคุมอากาศยาน (Pilot) ต้องเป็นผู้ที่มีประสบการณ์สูง และได้รับการฝึกมาเป็นอย่างดี เพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายระหว่างการบินและได้ข้อมูลภาพถ่ายที่สามารถนำมาประมวลผลได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ ๕ แสดงส่วนประกอบหลักของระบบ UAV

๒.๒ อากาศยานไร้คนขับของประเทศไทย

ประเทศไทยได้มีการนำอากาศยานไร้คนขับมาใช้ตั้งแต่สมัยสงครามร่มเกล้า ซึ่งเป็นสงครามระหว่างประเทศไทยกับประเทศสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว โดยมีการจัดหาอากาศยานไร้คนขับจากประเทศอังกฤษเข้าประจำการในกองทัพอากาศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. ๒๕๓๑ คือรุ่น R&D SkyEye จำนวน ๗ ลำของบริษัท BAe โดยประจำการอยู่ที่ฝูงบิน ๔๐๒ กองบิน ๔ ตาคลี ซึ่งเป็นอากาศยานไร้คนขับประเภท RPV (Remotely Pilot Vehicle) มีภารกิจตรวจการณ์และถ่ายภาพ โดยร่วมปฏิบัติการอยู่กับเครื่องบินลาดตระเวนแบบ Arava แต่ด้วยข้อจำกัดทางเทคโนโลยีในขณะนั้น ทำให้อากาศยาน RPV ไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของกองทัพอากาศได้เท่าที่ควร เนื่องจากยาน RPV เหมาะกับการใช้งานในพื้นที่เป็นพื้นที่โล่ง แต่ไม่เหมาะกับการใช้งานในภูมิประเทศที่มีลักษณะเป็นป่าอย่างประเทศไทย

จนกระทั่งปี พ.ศ. ๒๕๓๘ ในสมัยสงครามอ่าวเปอร์เซีย ผลงานของอากาศยานไร้คนขับทำให้นักวิชาการและกองทัพอากาศไทยหันไปให้ความสนใจอากาศยานประเภทนี้อีกครั้งหนึ่ง แต่ก็ไม่ได้มีความสำคัญมากนัก ในปี พ.ศ. ๒๕๔๖ สมัยสงครามอ่าวเปอร์เซียครั้งที่สอง อากาศยานไร้คนขับได้มีบทบาทสำคัญต่อความสำเร็จในการปฏิบัติการกิจของประเทศสหรัฐอเมริกาในการบุกจับ ซัดดัม ฮุสเซน และได้มีการพัฒนาอากาศยานไร้คนขับอย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว จากอากาศยานที่ใช้สำหรับการสังเกตการณ์ จนกลายเป็นอากาศยานใช้สำหรับการรบและโจมตีที่มีประสิทธิภาพ ทำให้ประเทศไทยให้ความสำคัญกับอากาศยานประเภทนี้อย่างชัดเจนมากขึ้น กองทัพอากาศมีการจัดหาอากาศยานไร้คนขับรุ่น Searcher Mk.๑ จากประเทศอิสราเอลเข้ามาประจำการที่กองพลทหารปืนใหญ่ที่ ๑

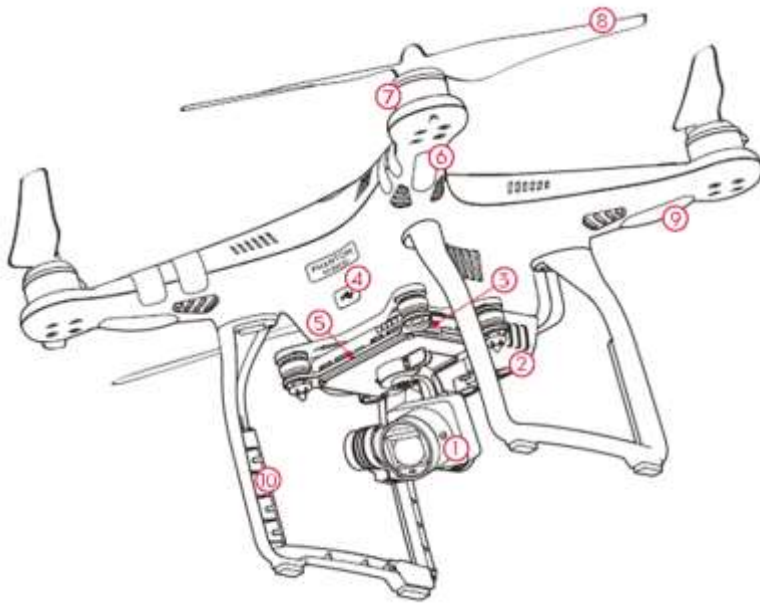
รักษาพระองค์ ในการกิจตรวจการณ์ ซึ่เป่า และเป็นผู้ตรวจการณ์หน้าในการยิงปืนใหญ่จนก่อให้เกิดโครงการวิจัยทางด้านอากาศยานไร้คนขับอย่างแพร่หลายมากยิ่งขึ้น

๒.๓ อากาศยานไร้คนขับที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้

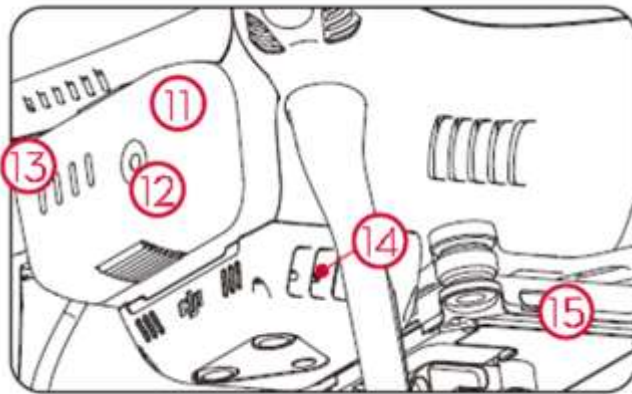
อากาศยานไร้คนขับที่นำมาใช้ในงานวิจัยเป็นอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็ก รุ่น DJI Phantom ๓ professional (ดังแสดงในรูปที่ ๖) เป็นอากาศยานไร้คนขับขนาดเล็กสี่ใบพัด ที่ได้ติดตั้งกล้องดิจิทัลไว้ด้านล่างของเครื่องโดยมีการเชื่อมต่อกับกิมบอลซึ่งเป็นอุปกรณ์ในการเพิ่มความเสถียรภาพป้องกันการสั่นไหวของกล้องถ่ายภาพ สามารถบินได้ไม่เกิน ๒๓ นาที โดยสามารถบินได้สูงไม่เกิน ๕๐๐ เมตร มีกล้องถ่ายภาพมีความละเอียดขนาด ๑๒.๔ เมกะพิกเซล (๔๐๐๐ x ๓๐๐๐) และถ่ายวิดีโอที่มีความละเอียดระดับ ๓๒๐p (p ย่อมาจาก progressive scan) (๑๒๘๐ x ๗๒๐ พิกเซล) ที่ ๒๔ เฟรมต่อวินาที การควบคุมการปรับกล้องเอียงขึ้นลงได้ในระยะ ๐ - ๙๐° ในแนวตั้ง ภายในติดตั้งระบบบินอัตโนมัติด้วย GPS (auto pilot) และระบบการบินในร่ม (indoor flight) สามารถบินขึ้นลงอัตโนมัติ (auto take-off, landing) ควบคุมด้วยวิทยุบังคับให้เคลื่อนที่ทุกทิศทาง (มีระบบแก้เอียง stabilizer) สามารถบินลอยอยู่กับที่เมื่อไม่ได้บังคับ (position hold) และสั่งให้บินกลับได้เอง (return to home) บินผ่านกล้องแบบ FPV (First Person View) โดยสามารถควบคุมผ่านคันบังคับ หรือโทรศัพท์แบบสมาร์ทโฟนได้ การเชื่อมต่อจะเป็นการเชื่อมต่อสัญญาณจากอากาศยานไร้คนขับไปยังคันบังคับ และเชื่อมต่อไปยังตัวขยายสัญญาณ wi-fi ที่เชื่อมต่อกับโทรศัพท์แบบสมาร์ทโฟนอีกต่อหนึ่ง ระยะส่งสัญญาณจากที่บังคับไปยังตัวอากาศยานไร้คนขับสามารถส่งสัญญาณในรัศมีได้ไม่เกิน ๘๐๐ เมตร ตัวส่งสัญญาณไปโทรศัพท์สมาร์ทโฟนได้ไม่เกิน ๒ กิโลเมตร สัญญาณภาพและวิดีโอสามารถแสดงผลทันทีบนหน้าจอโทรศัพท์สมาร์ทโฟน ซอฟแวร์ที่ใช้เป็นซอฟต์แวร์ใช้งานผ่านทางสมาร์ทโฟนไปในระบบปฏิบัติการ ไอโอเอส (ios) และแอนดรอยด์ (android) (คุณลักษณะเฉพาะของอากาศยานไร้คนขับแบบสี่ใบพัด รุ่น DJI Phantom ๓ professional แสดงในภาคผนวก ข)



รูปที่ ๖ แสดงอากาศยานไร้คนขับแบบสี่ใบพัด รุ่น DJI Phantom ๓ professional
(Da-Jiang Innovations, ๒๐๑๕)



1. กล้อง และ Gimbal
2. ระบบ Vision Positioning System
3. ช่องใส่ Micro SD Card
4. ช่องต่อ Micro USB port
5. ไฟ LED แสดงสถานะกล้อง
6. ไฟ LED ด้านหน้า
7. มอเตอร์
8. ใบพัด
9. ไฟ LED แสดงสถานะของตัวลำ
10. เสาอากาศ



11. แบตเตอรี่
12. ปุ่มเปิด - ปิด แบตเตอรี่
13. ไฟ LED แสดงระดับแบตเตอรี่
14. ปุ่ม Link
15. ช่องต่อ Micro USB port ของกล้อง

รูปที่ ๗ แสดงส่วนประกอบของอากาศยานไร้คนขับแบบสี่ใบพัด รุ่น DJI Phantom ๓ professional (Da-Jiang Innovations, ๒๐๑๕)

๒.๔ การทำแผนที่ด้วยอากาศยานไร้คนขับ

การประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อการสำรวจและทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศนั้น ต้องมีการบันทึกภาพในแนวตั้งหรือเกือบตั้ง และภาพที่ได้ต้องมีการบันทึกให้ครอบคลุมอย่างมีระบบ ดังนั้นด้วยความสามารถของอากาศยานไร้คนขับ ที่สามารถทำการบินได้อย่างอัตโนมัติตามรูปแบบแผนการบินที่วางไว้ เนื่องมาจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ติดตั้งบนอากาศยาน ร่วมกับการติดตั้งอุปกรณ์การสำรวจ เช่น กล้องบันทึกภาพหรือเซนเซอร์ ทำให้ข้อมูลภาพที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ มีคุณสมบัติที่จะนำมาประมวลผลทำแผนที่ภาพถ่ายได้ ในการบินถ่ายภาพเพื่อทำแผนที่นั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น ๒ ภาค ดังนี้

๒.๔.๑ ภาคอากาศยาน

ประกอบไปด้วย ๓ ส่วนหลัก ได้แก่

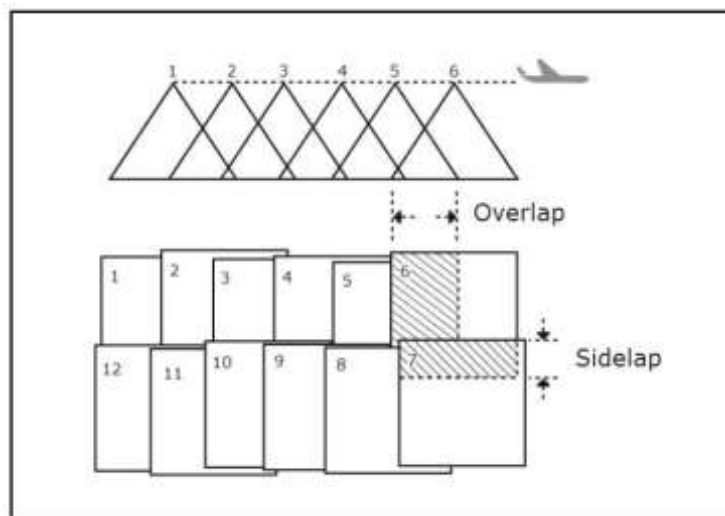
๑) ตัวเครื่องอากาศยาน (platform) เป็นโครงของเครื่องบินซึ่งมักทำมาจากวัสดุที่น้ำหนักน้อยและมีความแข็งแรง เช่น Kevlar , EPP , CFK รวมไปถึงระบบนำทางอัตโนมัติ (auto pilot) ระบบนำร่อง (GPS: global positioning system) ระบบรับรู้การทรงตัว (IMU: inertial measurement unit) และ แบตเตอรี่

๒) กล้องและเซนเซอร์(camera and sensor) โดยขึ้นอยู่กับลักษณะงานและข้อมูลที่ต้องการได้จากการสำรวจ โดยกล้องที่นำมาใช้สามารถหาได้ทั่วไปตามท้องตลาด ทั้งกล้องบันทึกภาพนิ่ง กล้องบันทึกภาพวิดีโอ กล้องอินฟราเรด หรือเรดาร์

๓) สถานีควบคุมภาคพื้นดิน (ground control station) ประจำการอยู่ที่ภาคพื้นดิน เพื่อตรวจสอบการทำงานและสถานะของอากาศยานในขณะปฏิบัติงานให้เป็นไปตามรูปแบบแผนการบินที่วางไว้

๒.๔.๒ ภาคประมวลผล

การวางแผนการบิน ต้องคำนึงถึงความละเอียด และความถูกต้องของข้อมูลที่ต้องการ โดยการบันทึกภาพเมื่อทำการขึ้นบินในแต่ละครั้งต้องพิจารณาลักษณะภูมิประเทศเพื่อกำหนดความสูงบินที่เหมาะสม พร้อมทั้งกำหนดส่วนซ้อนระหว่างภาพ หรือส่วนซ้อน (Overlap) และส่วนซ้อนระหว่างแนวบิน หรือส่วนเกย (Sidelap) เส้นทางการบินต้องไม่อยู่ในเขตหวงห้าม การปฏิบัติงานของอากาศยานไร้คนขับต้องรักษาระยะจากสถานีควบคุมภาคพื้นดินให้ไม่เกินระยะการสื่อสาร และต้องคำนวณเวลาปฏิบัติงานของอากาศยานไร้คนขับให้สอดคล้องกับประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ด้วย โดยมีหลักการดังนี้



รูปที่ ๘ แสดงส่วนซ้อนและส่วนเกยในการบินถ่ายภาพทางอากาศ (ไพศาล สันติธรรมนนท์, ๒๕๕๓)

๑) การบันทึกข้อมูล

การบันทึกข้อมูลและบันทึกภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับนั้นสามารถบันทึกได้ทั้งภาพนิ่งและภาพเคลื่อนไหว โดยรูปแบบการบันทึกจะขึ้นอยู่กับกล้องและเซนเซอร์ที่ติดตั้งอยู่บนอากาศยานไร้คนขับ ส่วนการบันทึกตำแหน่งและการเอียงตัวของอากาศยานไร้คนขับจะได้จาก GPS และ IMU ตามลำดับ

๒) การประมวลผลภาพด้วยซอฟต์แวร์

การประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ต้องมีข้อมูลนำเข้า คือข้อมูลภาพ (Image File) และข้อมูลตำแหน่งและการเอียงตัวของอากาศยานไร้คนขับในกรณีที่ต้องการแผนที่ที่มีความละเอียด ถูกต้องที่ดีจำเป็นต้องนำเข้าจุดบังคับถ่ายภาพ (photo control point) ใช้ในการประมวลผลด้วยการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์จะเป็นไปอย่างอัตโนมัติ โดยใช้หลักการในการจับคู่ภาพ แล้วนำไปสร้างโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ (aerial triangulation) เพื่อคำนวณหาค่าองค์ประกอบการจัดภาพภายนอก (exterior orientation parameters) ของภาพทุกภาพ และได้ผลลัพธ์ออกมาเป็นภาพออร์โธ (orthophoto) แบบจำลองระดับสูง (digital surface model: DSM) และข้อมูลกลุ่มจุดความสูงสามมิติ (๓D point cloud)

๓) แผนที่ผลลัพธ์

แผนที่ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลภาพ คือภาพออร์โธ (orthophoto) แบบจำลองระดับสูง (digital surface model: DSM) และข้อมูลกลุ่มจุดความสูงสามมิติ (๓D point cloud) ซึ่งสามารถนำผลลัพธ์ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศได้

๒.๕ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

๒.๕.๑ ภาพถ่าย

๑) จุดควบคุมภาพถ่าย

จุดควบคุมภาพถ่าย คือ จุดที่สามารถสังเกตเห็นได้อย่างเด่นชัดบนภาพถ่าย ไม่ว่าจะเป็นจุดที่สร้างขึ้นหรือจุดที่สังเกตเห็นได้จากธรรมชาติ อีกทั้งยังสามารถค้นหาและเข้าถึงง่ายในพื้นที่ดำเนินการ เพื่อที่จะสามารถหาพิกัดของจุดในพื้นที่ดำเนินการได้

ตัวอย่างของจุดควบคุมภาพถ่าย (photo control) ในงานข่ายสามเหลี่ยมจะมีทั้งหมดที่ทราบค่าพิกัดภาคพื้นดินและไม่ทราบค่าพิกัดภาคพื้นดิน มีความเด่นชัดดังรูปที่ ๙



รูปที่ ๙ แสดงจุดควบคุมภาพถ่ายแบบธรรมชาติ (natural photo control point)

ถ้าหากต้องการให้ผลการคำนวณปรับแก้ของโครงข่ายสามเหลี่ยมได้ผลที่ดีที่สุดและน่าเชื่อถือควรมีการจัดทำเป้าให้สัญญาณ (signalized target) หรือเป่าลวงหน้า (premarking target) เป็นการเตรียมเป้าในสนามโดยเป็นเป้าที่สร้างขึ้นหรือเป็นเป้าธรรมชาติที่มีความเด่นชัดตัดกับสภาพแวดล้อม และแต่ละตัวเป่าลวงนั้นต้องมีขนาดใหญ่มากพอที่จะสามารถมองเห็นบนภาพถ่ายโดยมีขนาดด้านกว้างและด้านยาวไม่น้อยกว่า ๑๐ - ๒๕ เท่าของ GSD (ground sampling distance) เป่าลวงหน้านั้นจะต้องดำเนินการสร้างให้เสร็จและเผื่อระวังเป็นอย่างดีจนกว่าจะมีการเก็บข้อมูลภาพถ่ายแล้วเสร็จ



รูปที่ ๑๐ แสดงจุดควบคุมภาพถ่ายแบบเป่าชนิดให้สัญญาณ (signalized photo control point)

๒) ชนิดของจุดควบคุมภาพถ่ายทางอากาศ

ในส่วนของการถ่ายภาพทางอากาศ ชนิดของจุดควบคุมภาพถ่ายจะสามารถแบ่งได้ตามลักษณะ บทบาท การคำนวณปรับแก้และตำแหน่งการจัดวางบนภาพถ่าย โดยใช้สมการสถานะร่วมเส้นในการคำนวณและปรับแก้ จึงสามารถแบ่งออกเป็นสามประเภทดังนี้

๒.๑) จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (ground control point)

จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (ground control point) เป็นจุดควบคุมภาพถ่ายที่ต้องมีค่าพิกัดทั้งสามแกนโดยจะต้องทำการรังวัดด้วยเครื่องมือที่มีความละเอียดสูงและปรับแก้ด้วยเทคนิควิธีที่น่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับงานโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ อีกทั้งต้องเป็นจุดที่สามารถสังเกตเห็นได้อย่างเด่นชัดบนภาพและในพื้นที่ดำเนินการอีกด้วย

ในการคำนวณปรับแก้ข่ายสามเหลี่ยม ค่าพิกัดของจุดควบคุมภาคพื้นดินจะถูกนำไปใช้เป็นค่าคงที่ในการปรับแก้สมการ ดังนั้น การวัดค่าพิกัดบนภาพถ่ายที่เป็นของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินจะให้สมการเพิ่มขึ้นสองสมการเสมอ โดยจะไม่ทำให้เกิดตัวไม่ทราบค่าเพิ่มขึ้น ดังนี้

$$x_i + vx_i = -f \frac{[a_{11}^p (X_g - X_0) + a_{12}^p (Y_g - Y_0) + a_{13}^p (Z_g - Z_0)]}{[a_{31}^p (X_g - X_0) + a_{32}^p (Y_g - Y_0) + a_{33}^p (Z_g - Z_0)]} \quad \text{สมการที่ ๑}$$

$$y_i + vy_i = -f \frac{[a_{21}^p (X_g - X_0) + a_{22}^p (Y_g - Y_0) + a_{23}^p (Z_g - Z_0)]}{[a_{31}^p (X_g - X_0) + a_{32}^p (Y_g - Y_0) + a_{33}^p (Z_g - Z_0)]} \quad \text{สมการที่ ๒}$$

โดยที่ x_i, y_i คือ ค่าพิกัดภาพถ่ายจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินที่ปรากฏบนภาพหนึ่งภาพ

X_g, Y_g, Z_g คือ ค่าพิกัดของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินที่เป็นค่าคงที่

p คือ ดัชนีลำดับของภาพถ่าย

ในทางปฏิบัติ หากว่าจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินปรากฏมากกว่า ๒ ภาพยิ่งเป็นผลดี เนื่องจากทำให้สามารถวัดค่าพิกัดภาพถ่ายได้เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สามารถเพิ่มสมการค่าสังเกตเพิ่มขึ้นอีกสองสมการต่อการวัดค่าพิกัดบนภาพถ่ายเพิ่มขึ้นหนึ่งภาพเสมอ การมีจำนวนสมการค่าสังเกตเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลการคำนวณปรับแก้มีความละเอียดถูกต้องและน่าเชื่อถือมากขึ้นไปด้วย

๒.๒) จุดควบคุมภาพถ่ายชนิดระดับ (leveling control point)

จุดควบคุมภาพถ่ายชนิดระดับ (leveling control point) เป็นจุดบังคับภาพที่มีค่าพิกัดในแนวตั้ง โดยใช้การรังวัดด้วยเครื่องมือที่มีความละเอียดสูงเพียงพอสำหรับการใช้ในงานควบคุมได้ โดยทั่วไปจะเป็นการเดินทางระดับด้วยกล้องระดับ เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่าย รวดเร็วและประหยัดค่าใช้จ่าย

การเลือกตำแหน่งของจุดควบคุมภาพถ่ายชนิดระดับควรจะต้องเลือกจุดในภูมิภาคที่มีลักษณะที่ราบเรียบเพราะนอกจากจะสามารถรังวัดหาค่าพิกัดทางตั้งได้ง่ายแล้วในการรังวัดบนภาพถ่ายหากผู้รังวัดทำการรังวัดคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งไปบ้าง ก็จะทำให้การคำนวณปรับแก้ไม่ได้รับผลกระทบ เนื่องจากการรังวัดค่าพิกัดทางตั้งเพียงอย่างเดียว

ในปัจจุบันจุดควบคุมภาพถ่ายชนิดระดับได้รับความนิยมลดลงเนื่องจากการรังวัดค่าพิกัดในสนามด้วยการรังวัดดาวเทียมจีพีเอสสามารถที่จะรังวัดได้พร้อมกันทั้งสามแกน อีกทั้งยังมีความสะดวก รวดเร็ว และประหยัดค่าใช้จ่าย

๒.๓) จุดผ่าน (pass point)

จุดผ่าน คือ จุดควบคุมภาพถ่ายชนิดชี้ชัดตำแหน่งบนภาพถ่ายแต่ไม่จำเป็นต้องหาค่าพิกัดหรือค้นหาในสนาม อาจจะเป็นจุดธรรมชาติหรือสร้างขึ้นเองก็ได้ จุดผ่านจะต้องปรากฏในส่วนซ้อนของภาพถ่าย หรือกล่าวได้ว่าต้องอยู่ในส่วนซ้อนที่อยู่ในแนวนอน โดยที่การเลือกจุดผ่านใหม่หนึ่งทุกๆจุดจะทำให้เกิดตัวไม่ทราบค่าในสมการคำนวณปรับแก้สามเหลี่ยมทางอากาศเพิ่มขึ้น ๓ ตัว ค่าพิกัดที่วัดได้บนภาพถ่ายอย่างน้อยสองภาพจะเป็นค่าสังเกตที่ทำให้ค่าพิกัดไม่ทราบค่าคำนวณออกมาได้ ภายหลังจากการคำนวณปรับแก้แต่ละจุดผ่านก็จะมีค่าพิกัดที่สามารถนำไปใช้งานต่อไป

ดังนั้น การคำนวณปรับแก้สามเหลี่ยม เมื่อทำการเลือกจุดผ่านมาหนึ่งจุดทำให้เกิดตัวไม่ทราบค่าเพิ่มขึ้น ๓ ตัว ในขณะที่หากทำการรังวัดค่าพิกัดภาพถ่ายบนภาพสองภาพก็จะสามารถสร้างสมการค่าสังเกตได้ ดังนี้

สมการค่าสังเกตสำหรับภาพแรกที่พิจารณา

$$x_i + vx_i = -f \frac{[a_{11}^p (X_t - X_0^p) + a_{12}^p (Y_t - Y_0^p) + a_{13}^p (Z_t - Z_0^p)]}{[a_{31}^p (X_t - X_0^p) + a_{32}^p (Y_t - Y_0^p) + a_{33}^p (Z_t - Z_0^p)]} \quad \text{สมการที่ ๓}$$

$$y_i + vy_i = -f \frac{[a_{21}^p (X_t - X_0^p) + a_{22}^p (Y_t - Y_0^p) + a_{23}^p (Z_t - Z_0^p)]}{[a_{31}^p (X_t - X_0^p) + a_{32}^p (Y_t - Y_0^p) + a_{33}^p (Z_t - Z_0^p)]} \quad \text{สมการที่ ๔}$$

X_t, Y_t, Z_t คือ ค่าพิกัดของผ่านที่ให้เป็นตัวไม่ทราบค่าในระบบสมการ

x_i, y_i คือ ค่าพิกัดภาพถ่ายของจุดผ่านที่ปรากฏบนภาพหนึ่งภาพ

i คือ ดัชนีของจุดการรังวัดพิกัดภาพถ่ายแต่ละภาพ

p คือ ดัชนีลำดับของภาพถ่ายเช่นเดียวกันสำหรับสมการค่าสังเกตของภาพคู่ซ้อนถัดไป

$$x_{i+1} + vx_{i+1} = -f \frac{[a_{11}^{p+1}(X_t - X_0^{p+1}) + a_{12}^{p+1}(Y_t - Y_0^{p+1}) + a_{13}^{p+1}(Z_t - Z_0^{p+1})]}{[a_{31}^{p+1}(X_t - X_0^{p+1}) + a_{32}^{p+1}(Y_t - Y_0^{p+1}) + a_{33}^{p+1}(Z_t - Z_0^{p+1})]}$$

สมการที่ ๕

$$y_{i+1} + vy_{i+1} = -f \frac{[a_{21}^{p+1}(X_t - X_0^{p+1}) + a_{22}^{p+1}(Y_t - Y_0^{p+1}) + a_{23}^{p+1}(Z_t - Z_0^{p+1})]}{[a_{31}^{p+1}(X_t - X_0^{p+1}) + a_{32}^{p+1}(Y_t - Y_0^{p+1}) + a_{33}^{p+1}(Z_t - Z_0^{p+1})]}$$

สมการที่ ๖

โดยที่ x_{i+1}, y_{i+1} คือ ค่าพิกัดภาพถ่ายของจุดที่ปรากฏบนภาพ
ในลำดับถัดมา

X_t, Y_t, Z_t คือ ค่าพิกัดของจุดผ่านที่ให้เป็นตัวไม่
ทราบ

ค่าในระบบสมการเป็นตัวเดียวกับที่
กำหนดในสมการค่าสังเกต สมการที่ ๓
และสมการที่ ๔ ก่อนหน้านี้ ดังนั้น
จำนวนตัวไม่ทราบค่าจึงไม่เพิ่มขึ้น

i คือ ดัชนีของจุดการรังวัดพิกัดภาพถ่าย
แต่ละภาพ

p คือ ดัชนีลำดับของภาพถ่าย

จะเห็นว่า ในการวัดอย่างน้อยที่สุดสองจุดบนภาพสองภาพนี้ จะทำให้เกิดสมการค่าสังเกตขึ้น ๔ สมการ จำนวนสมการจะเกินจำนวนตัวไม่ทราบค่า ๓ ตัว อยู่ ๑ สมการเสมอ ดังนั้นจึงสามารถหาค่าตัวไม่ทราบค่าได้

ในทางปฏิบัติ หากว่าพบจุดผ่านปรากฏบนภาพถ่ายมากกว่า ๒ ภาพ จะต้องทำการรังวัดเพิ่มต่อไป ในการวัดจุดผ่านเดิมนั้นบนภาพต่อไป ซึ่งจะทำให้สามารถสร้างสมการค่าสังเกตเพิ่มขึ้นได้อีก ๒ สมการ ต่อการรังวัดค่าพิกัดบนภาพที่เพิ่มขึ้นหนึ่งภาพเสมอ โดยที่ตัวไม่ทราบค่าจะไม่เพิ่มขึ้นอีก

ตามหลักของสถิติและการคำนวณปรับแก้ การมีจำนวนสมการค่าสังเกตเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลการคำนวณปรับแก้มีความละเอียดถูกต้องและน่าเชื่อถือมากขึ้น

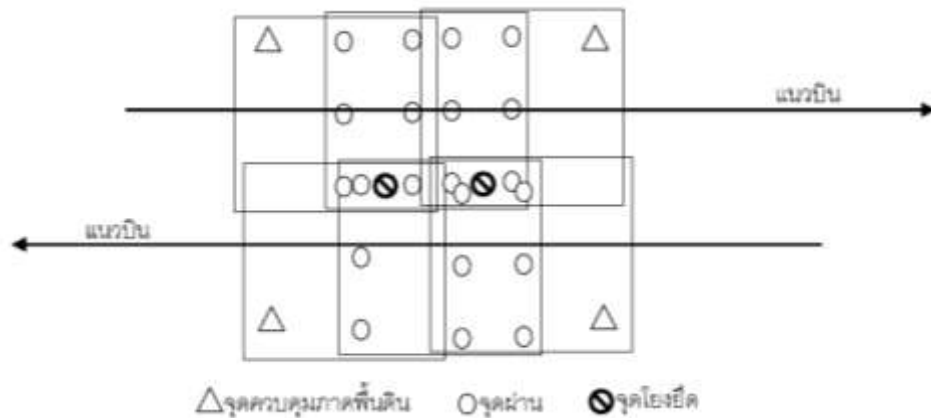
๒.๔) จุดโยงยึด (tie point)

จุดโยงยึด คือ จุดควบคุมภาพถ่ายที่มีการชี้ชัดตำแหน่งบนภาพถ่าย จุดโยงยึดจะต้องปรากฏบนภาพถ่ายอย่างน้อยสองภาพขึ้นไป แต่ไม่จำเป็นต้องลงไปค้นหาและรังวัดค่าพิกัดจริงในสนาม โดยที่ตำแหน่งของจุดผ่านจะต้องปรากฏอยู่บนส่วนซ้อนด้านข้างระหว่างแนวนบิน

จุดโยงยึดจะมีคุณสมบัติ บทบาท หน้าที่และการคำนวณปรับแก้ เช่นเดียวกับจุดผ่านทุกประการ ดังนั้น ในแง่ของการรังวัดและการคำนวณปรับแก้สามารถนำหลักการของจุดผ่านมาประยุกต์ใช้ได้

๓) ตำแหน่งของจุดควบคุมภาพถ่าย

จากผลการวิจัย (ไพศาล สันติธรรมนนท์, ๒๕๕๓) ในการหาตำแหน่งและความเหมาะสม ของจุดผ่านและจุดโยงยึดที่จะทำให้สามารถกำหนดตำแหน่งและจำนวนของจุดควบคุมภาพถ่ายในการรังวัดเพื่อคำนวณข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศในภาพให้เหมาะสม ดังนี้



รูปที่ ๑๑ แสดงตำแหน่งและความสัมพันธ์ระหว่างจุดควบคุมภาพถ่าย (ไพศาล สันติธรรมนนท์, ๒๕๕๓)

จะเห็นได้ว่าจุดควบคุมภาคพื้นดิน บางส่วนจะอยู่ตามขอบพื้นที่โดยรอบของบล็อกและบางส่วนอยู่ในกลางบล็อก โดยมีหลักเกณฑ์ดังนี้

๓.๑) จุดผ่าน จะต้องกำหนดให้อย่างน้อย ๖ จุดกระจายอยู่บนส่วนซ้อนด้านหน้าในแนวบินเดียวกันดังภาพ

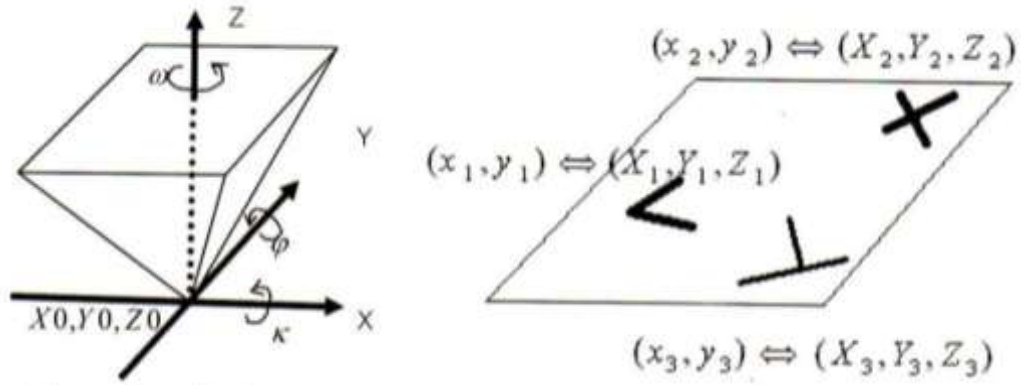
๓.๒) จุดโยงยึด จะต้องกำหนดให้มีทุกแบบจำลองของส่วนซ้อนด้านข้างหรืออาจให้เว้นได้ทุก ๆ หนึ่งแบบจำลอง

หากยึดถือการจัดวางในรูปแบบดังกล่าวจะพบว่า มีจุดผ่านและจุดโยงยึดจำนวนมากอยู่ในส่วนเกย จากการวิเคราะห์ที่ผ่านมามีเห็นว่าจุดผ่านหรือจุดโยงยึด จะทำให้เกิดตัวไม่ทราบค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ ๓ ตัว เมื่อมีการกำหนดจุดผ่านหรือจุดโยงยึดใหม่ ดังนั้น ควรจะหลีกเลี่ยงการเลือกจุดผ่านและจุดโยงยึดที่อยู่ใกล้กัน โดยกำหนดให้จุดเหล่านั้นเป็นจุดเดียวกัน ซึ่งนอกจากจะทำให้จำนวนตัวไม่ทราบค่าลดลงแล้ว ยังทำให้สัดส่วนของตัวไม่ทราบค่าต่อค่าสังเกตลดลงอีกด้วย ซึ่งจะทำให้ผลการคำนวณปรับแก้มีความละเอียดถูกต้องและน่าเชื่อถือมากขึ้น

๔) วิธีการระบุค่าการจัดวางภาพภายนอก (Exterior orientation)

การระบุค่าการจัดวางภาพภายนอกของภาพถ่าย สามารถระบุด้วยค่าพารามิเตอร์ที่บอกตำแหน่งของจุดเปิดถ่ายภาพและความเอียงของกล้อง $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, K$ แล้ว ยังสามารถระบุได้นัยได้ โดยการระบุจุดควบคุมภาพถ่ายในรูปของตำแหน่งทั้งบนภาพและบนวัตถุหรือบนพื้นดิน ในกรณีภาพถ่ายทางอากาศ ในรูปที่ ๑๒ แสดงการระบุค่าการจัดวางภาพภายนอกที่เทียบเท่ากัน เนื่องจากค่าพารามิเตอร์การจัดวางภาพภายนอกมี ๖ พารามิเตอร์ ในภาพทางขวามีจุดควบคุมภาพถ่าย

สามจุด ซึ่งโดยวิธีการวัดย้อนของภาพถ่ายเดี่ยว (single photo resection) จะสามารถใช้คำนวณย้อนกลับไปหาพารามิเตอร์การจัดวางภาพภายนอกได้



รูปที่ ๑๒ แสดงวิธีการระบุค่าการจัดวางภายนอกของภาพถ่าย (ไพศาล สันติธรรมนนท์, ๒๕๕๓)

การระบุค่าการจัดวางภายนอกด้วยวิธีจุดควบคุมภาพอย่างน้อย ๓ จุดมีข้อดี คือ ค่าที่ได้สามารถนำไปใช้กับซอฟต์แวร์หรือเครื่องมือใดก็ได้ โดยแต่ละซอฟต์แวร์หรือเครื่องมือก็จะทำการแก้ปัญหาด้วยวิธี single photo resection ก็จะได้พารามิเตอร์การจัดวางภาพภายนอก ส่วนการระบุค่าการจัดวางภาพภายนอกด้วยการระบุค่าพารามิเตอร์การจัดวางภาพภายนอกโดยตรง มักจะมีปัญหาในนิยามของเมทริกซ์ของการหมุน เช่น ลำดับของพารามิเตอร์ ω, φ, κ ซึ่งทำให้ค่าพารามิเตอร์การจัดวางภาพภายนอกไม่สามารถใช้ร่วมกันได้

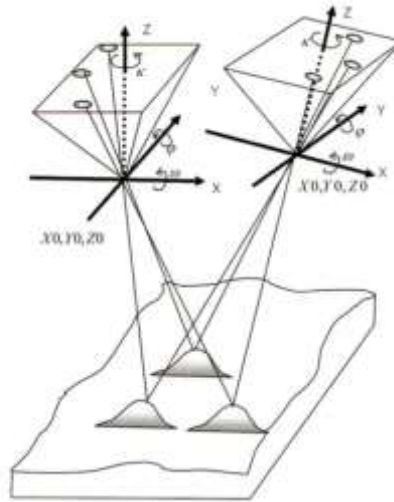
๕) เทคนิคการคำนวณข่ายสามเหลี่ยมแบบลำแสงเป็นบล็อก

การที่จะหาค่าพารามิเตอร์การจัดวางภาพภายนอกของภาพในทางปฏิบัติ โดยเฉพาะการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศที่ครอบคลุมพื้นที่กว้าง ทำให้วิธีการวัดย้อนบนภาพถ่ายเดี่ยวไม่มีประสิทธิภาพและสิ้นเปลือง เนื่องจากต้องมีการรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดินให้ปรากฏทุกภาพถ่ายอย่างน้อยสามจุด ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย ซึ่งสามารถแก้ปัญหาได้โดยวิธีการดังนี้

๕.๑) การพิจารณาคู่ภาพที่อยู่ติดกัน

เมื่อพิจารณาภาพคู่สามมิติสองภาพ ที่ได้จากการบันทึกในแนวบินเดียวกัน ซึ่งเป็นคู่ภาพที่มีส่วนซ้อนด้านหน้าประมาณ ๖๐% จากทฤษฎีของการจัดวางภาพสัมพันธ์ (relative orientation) (Wolf, ๑๙๘๓) ซึ่งกล่าวถึงกรณีที่ภาพคู่สามมิติในอากาศ สามารถนำมาสัมพันธ์กันในลักษณะที่รังสีของแสงที่มาจากจุดจุดเดียวกันบนภาพคู่สามมิติ จะตัดกันในทุกๆ ลำแสงที่เกิดจากจุดอื่นๆ ที่ปรากฏบนภาพ หรือรู้จักกันในนามของทฤษฎีของสภาวะร่วมระนาบ (coplanarity condition) ความสัมพันธ์ระหว่างภาพคู่สามมิตินี้ สามารถทำได้โดยพารามิเตอร์ของกล้องฉายที่เป็นอิสระต่อกัน ๕ พารามิเตอร์ หมายความว่า สภาวะร่วมระนาบสามารถสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้โดยการวัดจุดที่ปรากฏบนภาพทั้งสองอย่างน้อย ๓ จุดซึ่งจะให้สมการค่าสังเกต ๖ สมการ ซึ่งมากพอที่จะสามารถคำนวณหาพารามิเตอร์ ๕ พารามิเตอร์นั้นได้ การรังวัดบนส่วนซ้อนระหว่างภาพจะวัดมากกว่านั้นเพื่อให้

เกิดความละเอียดถูกต้องสูงและเชื่อถือได้ โดยทั่วไปจากการวิจัยและทดสอบในทางปฏิบัติพบว่าควรใช้จุดในการจัดความสัมพันธ์ ๖ จุดกระจายทั่วทั้งส่วนซ้อนของภาพคู่สามมิติ



รูปที่ ๑๓ แสดงวิธีการระบุค่าการจัดวางภายนอกของภาพถ่าย (ไพศาล สันติธรรมนนท์, ๒๕๕๓)

ดังนั้น อย่างน้อยที่สุดจะมีการรังวัดที่เด่นชัดบนภาพคู่สามมิติอย่างน้อย ๓ จุด โดยวัดบนทั้งสองภาพเพื่อให้ภาพทั้งสองสามารถโยงยึดกันได้ จุดเหล่านี้ซึ่งภายหลังเรียกว่า จุดผ่าน (pass point) ถ้าเป็นจุดที่วัดบนภาพที่มีส่วนซ้อนในแนวนอน (Overlap) และจุดโยงยึด (tie point) เมื่อเป็นการรังวัดในส่วนซ้อนที่อยู่ระหว่างแนวนอน (Sidelap)

๕.๒) การพิจารณาบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

เมื่อภาพถ่ายโยงยึดกันในสามมิติแต่ระบบพิกัดยังเป็นของตนเอง ดังนั้น จะต้องทำการจัดวางแบบจำลองให้สัมพันธ์กับระบบพิกัดภาคพื้นดิน ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองสามมิติในอากาศกับระบบพิกัดภาคพื้นดินสามารถทำได้ โดยใช้ความสัมพันธ์แบบเฮลเมิร์ตชนิดสามมิติ หรือเรียกว่า การแปลงค่าพิกัดชนิด ๗ พารามิเตอร์ โดยแบบจำลองจะมีความอิสระในการเปลี่ยนแปลงมาตราส่วนได้ ๑ มาตราส่วน เคลื่อนย้ายจุดกำเนิดแกนพิกัดได้ทั้งสามแกนและการทำมุมกันระหว่างระบบพิกัดด้วยมุมรอบแกนทั้งสามแกน เมื่อทำการเปรียบเทียบพิกัดของแบบจำลองที่เกิดจากการโยงยึดของบล็อกภาพถ่ายมีพิกัดเป็นพิกัดของแบบจำลองลอยอิสระอยู่ในอากาศ เมื่อนำค่าพิกัดของแบบจำลองในสามมิติมาเปรียบเทียบกับพิกัดภาคพื้นดินสามจุดก็จะสามารถสร้างสมการได้ ๙ สมการ ซึ่งจะพอเพียงและเกินต่อการที่จะแก้ปัญหาค่าพารามิเตอร์ทั้ง ๗ ค่าซึ่งทางปฏิบัติจะใช้มากกว่านั้นเพื่อให้เกิดความละเอียดถูกต้องสูงและเชื่อถือได้

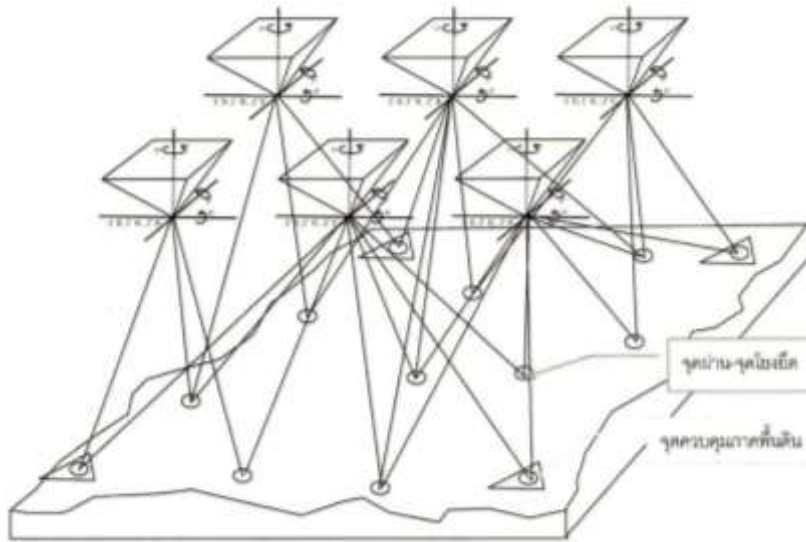
ดังนั้น เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดภาคพื้นดิน และระบบพิกัดในแบบจำลองจำเป็นต้องมีจุดบังคับภาคพื้นดิน (ground control point) ซึ่งเป็นจุดเด่นชัดในภาพถ่ายสามารถชี้ชัดในสนามได้อย่างชัดเจนทั้งตำแหน่งทางราบหรือทางตั้งหรือในสามแกนทั้งหมดพร้อมกัน จุดบังคับภาคพื้นดินเป็นจุดที่มีค่าพิกัดภาคพื้นดิน มีความละเอียดถูกต้องสูงเนื่องจากต้องนำไปใช้ในการคำนวณขยายสามเหลี่ยม ซึ่งในทางปฏิบัติต้องไปรังวัดในสนาม โดยเทคนิคการสำรวจปกติ เช่น การทำวงรอบเป็นวิธีที่สามารถทำได้ แต่ในปัจจุบันนิยมทำการสำรวจด้วยดาวเทียมจีพีเอส (GPS) มากกว่า

เพราะมีความสะดวก มีอิสระในการเลือกวางจุด มีความละเอียดถูกต้องสูง และเชื่อถือได้ นอกจากนี้ ในอนาคตเครื่องมือสำรวจด้วยดาวเทียมจีพีเอส (GPS) จะมีราคาถูกลงและใช้งานได้สะดวกมากขึ้น

๕.๓) รูปแบบของโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ

การขยายจุดควบคุมภาพถ่ายด้วยวิธีข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ เป็นการนำค่าจุดควบคุมภาพถ่ายที่ได้จากงานรังวัดภาคพื้นดินด้วยความละเอียดถูกต้องสูงมาใช้ในการคำนวณ เพื่อทำการจัดวางแบบจำลองของบล็อกในอากาศให้สัมพันธ์กับระบบพิกัดภาคพื้นดิน จุดบังคับภาพถ่ายชนิดจุดควบคุมภาคพื้นดินสามารถที่จะสร้างสมการค่าสังเกตสำหรับสมการร่วมเส้นได้ ๒ สมการ โดยให้ค่าพิกัดที่รังวัดมาด้วยความละเอียดถูกต้องสูงเป็นค่าคงที่ ดังนั้นหมายความว่า ทุกครั้งที่มีการจุดควบคุมภาคพื้นดินจะทำให้ค่าสังเกตเพิ่มขึ้นเสมอ และไม่ทำให้ระบบสมการมีจำนวนไม่ทราบค่าเพิ่มขึ้น

อีกส่วนหนึ่งเป็นการวัดจุดโยงยึดและการวัดจุดผ่าน สามารถสังเกตได้ชัดเจนบนภาพโดยไม่จำเป็นต้องไปรังวัดภาคพื้นดิน การวัดค่าพิกัดบนภาพถ่ายหรือภาพดิจิทัลที่เป็นจุดที่วัดบนส่วนซ้อนจะให้สมการค่าสังเกต ๒ ค่าและสมการ ๒ สมการซึ่งจะเป็นสมการที่โดยรวมอย่างน้อย ๔ สมการ อย่างไรก็ตาม จุดผ่านและจุดโยงยึดเป็นจุดที่ยังไม่ทราบค่าพิกัด ดังนั้น ต้องมีการกำหนดให้ตัวไม่ทราบค่าเกิดขึ้นใหม่ ๓ ตัวต่อจุดโยงยึดหรือจุดผ่าน เมื่อจุดผ่านจุดโยงยึดพบในภาพเพียงสองภาพจะมีสมการเกินมา ๑ สมการ ดังนั้น จุดผ่านหรือจุดโยงยึดจะต้องปรากฏอยู่บนภาพอย่างน้อยสองภาพขึ้นไป จึงจะสามารถหาค่าตอบได้

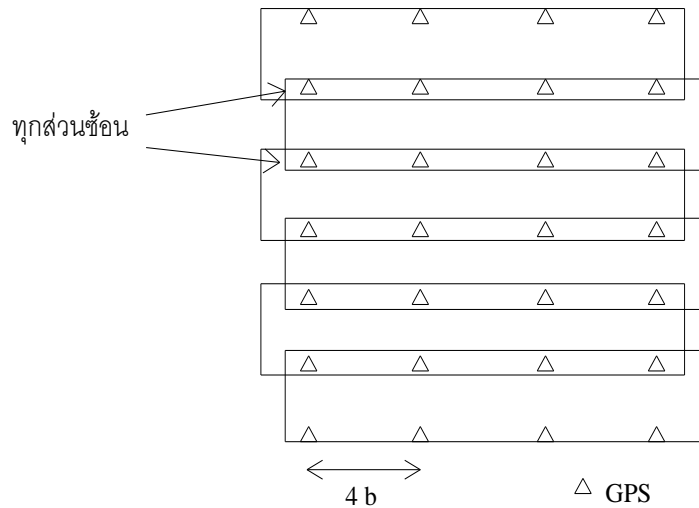


รูปที่ ๑๔ แสดงข่ายสามเหลี่ยมที่เกิดเรขาคณิตของการเดินทางของลำแสง (ไพศาล สันติธรรมนนท์, ๒๕๕๓)

๖) ประเภทบล็อกของโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ

๖.๑) บล็อกปกติ (typical block)

บล็อกปกติ คือ บล็อกของภาพถ่ายทางอากาศที่บินถ่ายภาพด้วยส่วนซ้อน ๖๐% และมีส่วนซ้อนด้านข้าง ๒๐-๓๐% ตำแหน่งการจัดวางจุดบังคับภาคพื้นดินและจำนวนที่เหมาะสมจะมีลักษณะดังนี้

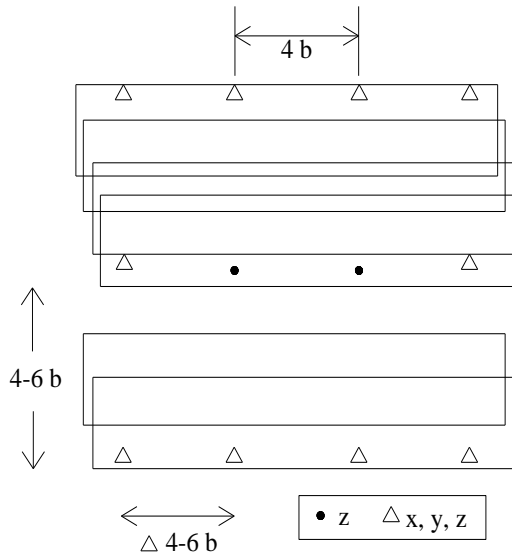


รูปที่ ๑๕ แสดงตำแหน่งและจำนวนจุดบังคับภาพถ่ายสำหรับบล็อกปกติ
 (ไพศาล สันติธรรมนนท์, ๒๕๕๓)

จะเห็นได้ว่าสำหรับบล็อกปกติ รอบๆ บล็อกจะต้องมีจุดควบคุมภาคพื้นดิน ทุกๆระยะ ๔ ถึง ๖ เท่าของระยะฐานบิน หรือเรียกว่าระยะ ๔b ถึง ๖b ตามลำดับ (Albertz, ๑๙๘๙) ระหว่างส่วนซ้อนด้านข้างทุกๆส่วนซ้อนระหว่างแนวบิน จะต้องมีจุดควบคุมภาคพื้นดินทุกๆระยะสี่เท่าของระยะฐานบิน (๔b) จุดควบคุมพื้นดินที่ปรากฏบนส่วนซ้อนด้านข้างนี้เป็นจุดอย่างน้อยมีค่าระดับก็พอเพียง ด้วยวิธีการรังวัดสนามโดยใช้กล้องสำรวจจะสามารถช่วยให้งานสนามน้อยลงได้

ปัจจุบันมีการใช้การรังวัดด้วยดาวเทียมที่มีความละเอียดถูกต้องที่จะใช้บังคับงานข่ายสามเหลี่ยมได้ จึงนิยมที่จะใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินที่ส่วนซ้อนด้านข้างเป็นจุดพิกัดที่มีค่าพิกัดทั้งสามแกน แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ค่าพิกัดจากงานรังวัดดาวเทียมต้องคำนึงถึงความแตกต่างระหว่างค่าระดับแบบออร์โธเมตริกกับค่าระดับเหนือทรงรี ซึ่งจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป

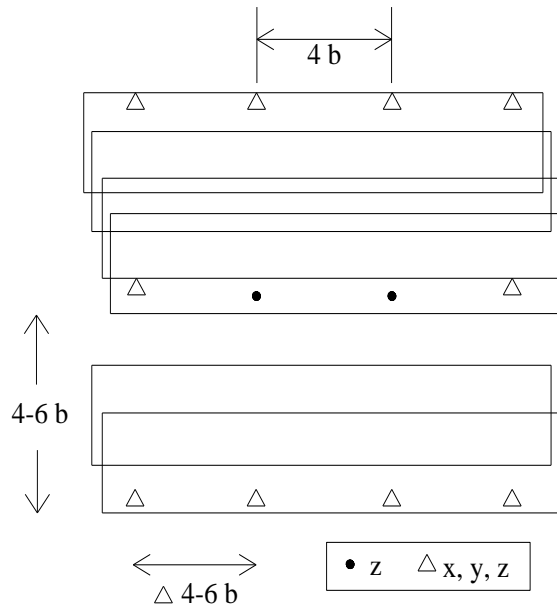
ดังนั้น สำหรับบล็อกปกติที่มีการใช้การรังวัดดาวเทียมจีพีเอสที่ให้ค่าพิกัดพร้อมกันทั้งในทางราบและทางตั้งด้วยความละเอียดถูกต้องสูง ในแต่ละบล็อกจึงอาจกำหนดตำแหน่งของจุดควบคุมภาพถ่ายที่ได้จากการรังวัดดาวเทียมจีพีเอส ดังรูปที่ ๑๗



รูปที่ ๑๖ แสดงตำแหน่งและจำนวนจุดบังคับถ่ายภาพสำหรับบล็อกปกติโดยการใช้การรังวัดจีพีเอส (ไพศาล สันติธรรมนนท์, ๒๕๕๓)

๖.๒) บล็อกความถูกต้องสูง (high-accuracy block)

บล็อกความถูกต้องสูง คือ บล็อกของภาพถ่ายทางอากาศที่มีส่วนซ้อนด้านหน้าเป็น ๖๐% และส่วนซ้อนด้านข้างเป็น ๖๐% ซึ่งการทำเช่นนี้จะทำให้ภาพถ่ายมีการยึดแน่นมากขึ้น โดยเฉพาะระหว่างแนวกบิน ดังรูป



รูปที่ ๑๗ แสดงตำแหน่งและจำนวนจุดบังคับภาพสำหรับบล็อกความถูกต้องสูง (ไพศาล สันติธรรมนนท์, ๒๕๕๓)

จะเห็นได้ว่าสำหรับบล็อกความถูกต้องสูงรอบ ๆ บล็อกจะต้องมีจุดควบคุมภาคพื้นดินทุก ๆ ระยะ $4b$ ถึง $6b$ เท่าของระยะฐานบิน (b) เช่นเดียวกับบล็อกปกติ

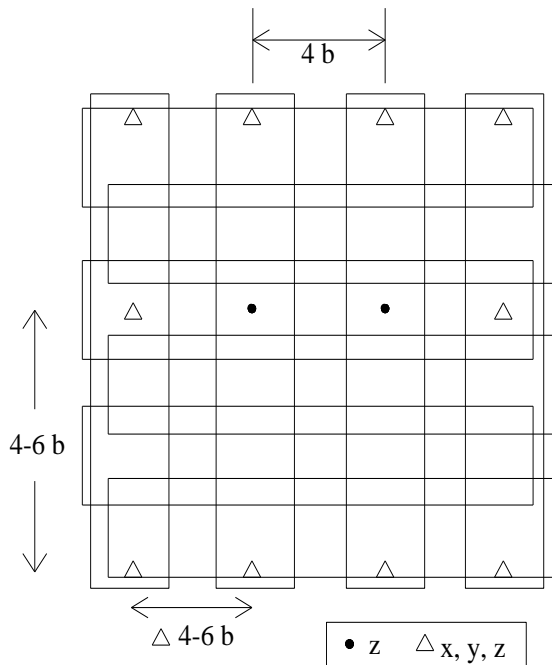
แต่ภายในบล็อกระหว่างส่วนซ้อนด้านข้างจะต้องมี จุดควบคุมภาคพื้นดิน ทุกๆระยะ $4b$ โดยที่ส่วนซ้อนระหว่างแนวบินจะสามารถเว้นไปได้ทุก ๆ $4b$ ถึง $6b$ จุดควบคุมภาคพื้นดินที่ปรากฏบนส่วนซ้อนด้านข้างนี้เป็นจุดอย่างน้อยมีค่าระดับก็พอเพียง

การที่ภายในบล็อกมีจุดควบคุมภาคพื้นดินบนส่วนซ้อนด้านข้างเป็นระยะห่าง $4b$ ถึง $6b$ ก็จะทำให้งานสนามลดลงไปได้มากโดยเฉพาะบล็อกที่มีขนาดใหญ่ แต่อย่างไรก็ตาม สำหรับบล็อกความถูกต้องสูง ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการบินถ่ายภาพและบันทึกภาพมากขึ้น เมื่อจำนวนแนวบินเพิ่มขึ้น ก็จะทำให้มีงานสำนักงานเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะการวัดจุดผ่านและจุดโยงยึด

บล็อกความถูกต้องสูงควรจะให้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือสูงมาก และให้ความละเอียดถูกต้องของค่าพิกัดจุดผ่านจุดโยงยึดดีขึ้น และจำนวนจุดผ่านและจุดโยงยึดจะมีมากขึ้นด้วย

๖.๓) บล็อกมีแถบคุม (block with control strips)

บล็อกของภาพถ่ายทางอากาศที่มีแถบคุม คือ บล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ คล้ายกับ “บล็อกปกติ” แต่มีการบินถ่ายเพิ่มเติมโดยการบินขวางซ้อนทับกับแนวบินของบล็อกปกติ แนวบินที่ขวางซ้อนทับโดยทั่วไปจะให้ห่างกัน $4b$ แนวบินที่ขวางซ้อนทับนี้เรียกว่า แถบคุม (control strip)

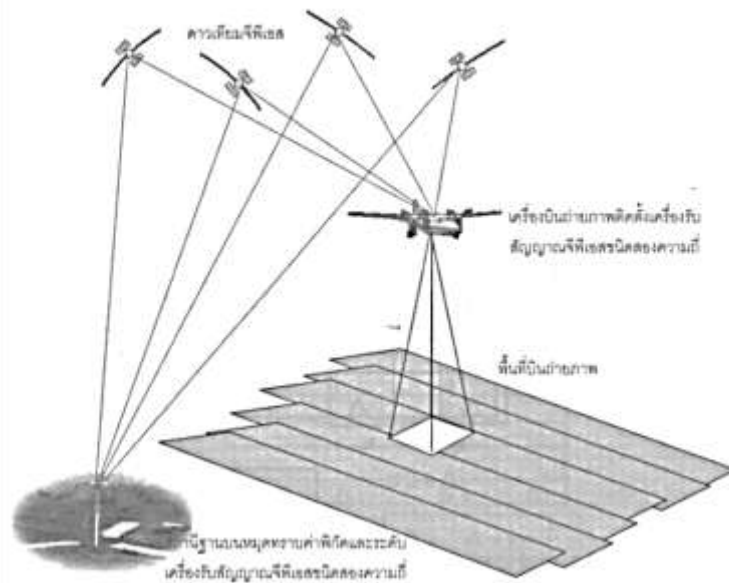


รูปที่ ๑๘ แสดงตำแหน่งและจำนวนจุดบังคับถ่ายภาพสำหรับบล็อกมีแถบคุม (ไพศาล สันติธรรมนนท์, ๒๕๕๓)

จะเห็นว่า บล็อกมีแถบคุมจะมีจำนวนแนวบินไม่ต่างจากบล็อกปกติมากนัก ในขณะที่สามารถลดงานสนามลงไปได้มาก โดยที่ไม่ต้องรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดินที่ส่วนซ้อนด้านข้างทุกส่วนซ้อน แต่อย่างไรก็ตาม งานวัดจุดผ่านและจุดโยงยึดจะมากขึ้นด้วย วิธีนี้น่าจะเป็นทางเลือกที่ดีวิธีหนึ่ง เนื่องจากสามารถหลีกเลี่ยงการเข้าถึงจุดจำนวนมากในภูมิประเทศที่ทุรกันดารยากต่อการเข้าถึง

๖.๔) บล็อกจีพีเอส (GPS block)

บล็อกจีพีเอส หมายถึง บล็อกปกติที่มีส่วนซ้อนด้านหน้า ๖๐% และส่วนซ้อนด้านข้าง ๓๐% มีการใช้เครื่องรับสัญญาณจีพีเอสชนิดสองความถี่เพื่อใช้หาพิกัดของจุดเปิดถ่ายขณะบินถ่ายภาพในเวลาเดียวกันบนภาคพื้นดินในระยะห่างไม่เกิน ๔๐-๖๐ กิโลเมตรหรือมากกว่า มีการตั้งเครื่องรับสัญญาณจีพีเอสชนิดสองความถี่บนหมุดควบคุมที่ทราบค่าพิกัดอ้างอิงที่เรียกว่า สถานีฐาน (base-station) ความถี่ของการรับสัญญาณอาจสูง ๑ Hz ค่าพิกัดของจุดเปิดถ่ายภาพที่รังวัดด้วยจีพีเอสบนเครื่องและข้อมูลที่ได้รับจากสถานีฐาน จะถูกนำมาคำนวณปรับแก้เข้ากับระบบสมการทำให้การคำนวณปรับแก้มีความเชื่อถือได้สูง เปรียบเสมือนมี “จุดควบคุมภาพถ่ายภาคอากาศ” กำกับภาพถ่ายทุกรูป ทำให้สามารถลดจำนวนจุดควบคุมภาคพื้นดิน



รูปที่ ๑๙ แสดงการปฏิบัติงาน GPS photogrammetry (ไพศาล สันติธรรมนนท์, ๒๕๕๓)

แต่อย่างไรก็ตาม ค่าพิกัดที่ได้จากการรับสัญญาณจีพีเอสเป็นค่าพิกัดของเสาอากาศรับสัญญาณจีพีเอส ซึ่งมักจะติดตั้งบนลำตัวของอากาศยาน ดังนั้น จึงต้องมีการหาค่าออฟเซตระยะห่างระหว่างเสาอากาศรับสัญญาณจีพีเอสและจุดเปิดถ่ายภาพของกล้องถ่ายภาพทางอากาศ วิธีหนึ่งที่มีความละเอียดถูกต้องสูงและน่าเชื่อถือคือ การใช้วิธีการวัดโดยใช้กล้องทีโอโดไลท์ กล้องรังวัดอิเล็กทรอนิกส์หรือกล้องสถานีรวม ประกอบกับเป้าปริซึมในการวัดทิศทางราบมุมตั้งและระยะเอียง เพื่อใช้ในการคำนวณค่าออฟเซต ค่าออฟเซตจะบรรยายด้วยค่าต่างของพิกัด

เสาอากาศรับสัญญาณจีพีเอสและจุดเปิดภาพถ่ายทางอากาศในแนวกับ x ที่ให้ขนานกับกึ่งกลางแกนลำตัวเครื่องบิน กึ่งกลางแกนลำตัวเครื่องบินอาจนิยามด้วยจุดปลายสุดยอดส่วนหัวและปลายสุดยอดของส่วนท้ายของลำตัวเครื่องบิน แกนตั้งหรือแกน z มักจะใช้แนวแกนที่ตั้งฉากกับพื้นห้องโดยสารเครื่องบินเป็นแกนอ้างอิง



รูปที่ ๒๐ แสดงวิธีการใช้กล้องสถานีรวมหาค่าจีพีเอสออฟเซต (กระทรวงเกษตรฯ, ๒๕๕๖)

จากงานวิจัยที่มหาวิทยาลัย Hannover พบว่าเมื่อใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินที่มุมของบล็อกเพียง ๑ ถึง ๔ จุดก็เพียงพอ ผลการคำนวณปรับแก้ชายสามเหลี่ยมด้วยวิธีบล็อกลำแสงร่วมกับค่าพิกัดเปิดภาพถ่ายที่ได้จากการรังวัดดาวเทียมจีพีเอสบนเครื่องบิน จะได้ผลลัพธ์เทียบเท่ากับบล็อกปกติ (Lee, ๑๙๙๖; Jacobsen, ๒๐๐๒)

เมื่อบล็อกจีพีเอสต้องการจุดควบคุมภาคพื้นดินที่มุมของบล็อก ๔ จุด จึงสามารถเพิ่มคุณภาพของชายสามเหลี่ยม ความละเอียดถูกต้องและความเชื่อมั่นได้ โดยการใช้จุดควบคุมภาพถ่ายชนิดให้สัญญาณ (signalized control point) ซึ่งอยู่ในขอบเขตที่ทำได้เนื่องจากมีจำนวนน้อยและมีความคุ้มค่าที่จะทำมาก จุดควบคุมพื้นดินสำหรับบล็อกจีพีเอสจึงนิยมที่จะทำเป็นจุดควบคุมภาพถ่ายชนิดให้สัญญาณ นอกจากนี้ การใช้จุดควบคุมมากกว่า ๓ จุด จะช่วยให้สามารถแปลงพื้นหลักฐานอ้างอิงทางระดับจากระบบความสูงบนทรงรีให้เป็นระบบความสูงเหนือพื้นผิวจีโออยด์ได้อีกด้วย

๒.๕.๒ การตัดสินใจด้วยทฤษฎี SIFT (Scale Invariant Feature Transform)

ทฤษฎี SIFT เป็นการประยุกต์ขั้นตอนวิธีการในคอมพิวเตอร์ สำหรับใช้ในการคำนวณหาจุดสนใจ (Keypoints) ในรูปภาพหนึ่งๆ เพื่อนำมาคำนวณหาคุณลักษณะบางประการที่ต้องการ

ขั้นตอนวิธี SIFT คือการเอาจุดสนใจในรูปที่ไม่ขึ้นอยู่กับ สเกล การกำหนดทิศทาง ตำแหน่ง มุมการมอง แสงสว่าง หรือเงา ซึ่งจะทำให้สามารถนำมาใช้ ในการเปรียบเทียบจุดเด่นในรูปอื่นๆ โด่งายและถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยขั้นตอนวิธีนี้ถูกคิดค้น โดย ศ.เดวิด โลว์ (David Lowe) แห่งมหาวิทยาลัย British Columbia ในปี ๑๙๙๙ โดยทั่วไปแล้วจุดสนใจของภาพจะหมายถึงจุดพิกเซลในภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงเชิงสองมิติ (Two -Dimensional) ของระดับความสว่าง (Pixel Intensity) รอบๆ จุดสนใจนั้นๆ

ในการวิเคราะห์ภาพด้วยขั้นตอนวิธี SIFT เพื่อหาจุดสนใจของภาพนั้น จะใช้หลักการ ในการทำซ้ำจำนวนรอบ เพื่อหาจุดสนใจของภาพในแต่ละรอบ โดยจำนวนจุดสนใจของภาพจะมี จำนวน และตำแหน่งที่เปลี่ยนไป ซึ่งการกำหนดจำนวนรอบของการทำงานเพื่อให้ได้จุดสนใจของ ภาพที่เหมาะสม เป็นปัญหาที่ต้องใช้การนำจุดสนใจที่ได้จากการทำงานในรอบที่กำหนดมาทดสอบ ซึ่งต้องอาศัยการสุ่มกำหนดจำนวนรอบของผู้วิเคราะห์ ทำให้การวิเคราะห์มีความล่าช้า หรือ ได้จุดสนใจของภาพที่ไม่เหมาะสม

วิธีการ SIFT ประกอบไปด้วยการทำงาน ๔ ขั้นตอนดังนี้

๑) การค้นหาจุดสนใจ (keypoint) ในมิติขนาดและระยะทาง (Scale-space extrema detection)

ขั้นตอนแรกของการค้นหาจุดสนใจ (keypoint) ของภาพที่มีคุณสมบัติไม่ขึ้นอยู่กับขนาดภาพ จะทำการค้นหาโดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของภาพและทำการเบลอภาพ (Blur) ด้วย ฟังก์ชันเกาส์เซียน (Gaussian) ดังสมการที่ ๗ และสมการที่ ๘

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) \times I(x, y) \quad \text{สมการที่ ๗}$$

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad \text{สมการที่ ๘}$$

โดยที่ (x, y) เป็นพิกัดพื้นที่

σ เป็นมาตราส่วนพิกัด

$G(x, y, \sigma)$ เป็นฟังก์ชันสเกลตัวแปรของ Gaussian

ภาพที่ผ่านการเบลอด้วยฟังก์ชันเกาส์เซียนจะถูกนำมาเปรียบเทียบเพื่อหาผลต่าง ของแต่ละภาพ (Difference-of-Gaussian:DOG) แสดงดังสมการที่ ๙ และ รูปที่ ๒๑

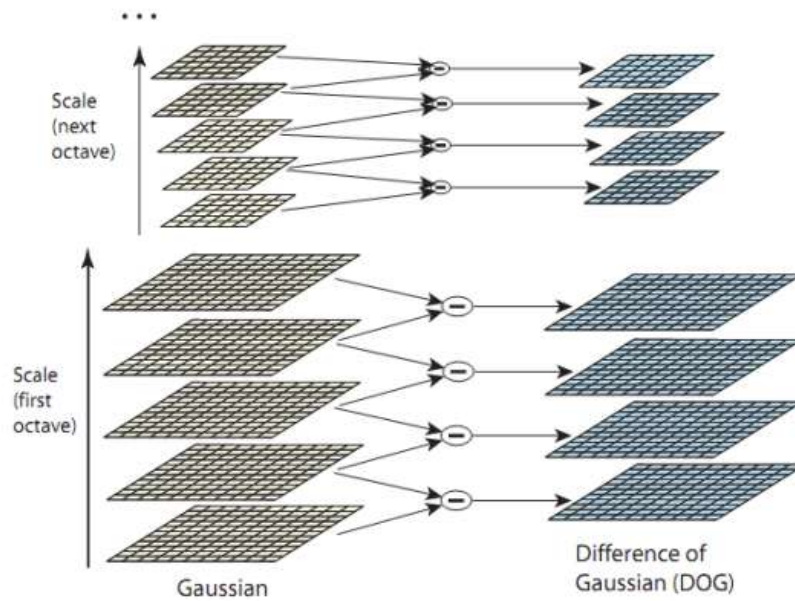
$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k \sigma) - G(x, y, \sigma)) \times I(x, y) = L(x, y, k \sigma) - L(x, y, \sigma)$$

สมการที่ ๙

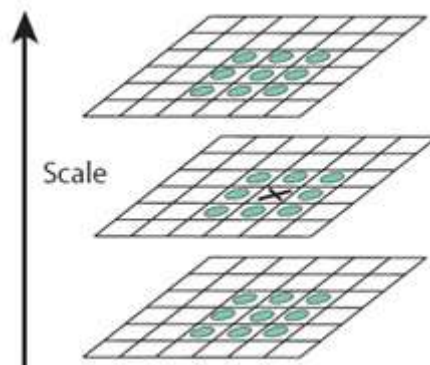
๒) การหาตำแหน่งของจุดสนใจ (Keypoint localization)

การหาตำแหน่งของจุดสนใจ (keypoint) จะพิจารณาที่ค่าสูงสุดและต่ำสุดของ ภาพที่ได้จากขั้นตอนเปรียบเทียบเพื่อหาผลต่างของแต่ละภาพ (Difference-of-Gaussian:DOG) โดยพิจารณาจาก ๘ จุดรอบข้างบริเวณขึ้นเดียวกันกับจุดที่พิจารณา และ ๙ จุดบริเวณขึ้นบนและอีก ๙ จุดบริเวณชั้นล่างที่ติดกับชั้นของจุดที่พิจารณา แสดงดังรูปที่ ๒๒ ถ้าพบว่าจุดที่พิจารณามีค่าสูงสุด หรือต่ำสุดจุดนั้นจะถูกกำหนดให้เป็นจุดสนใจ (keypoint) และถ้าจุดสนใจ (keypoint) ที่ได้

มีค่าความแตกต่างระหว่างความสว่างและความมืดต่ำ (Low contrast) หรือพิจารณาแล้วว่าเป็นขอบ (Edge) จุดสนใจ (keypoint) นั้นจะถูกกลบออกไปไม่นำมาพิจารณา



รูปที่ ๒๑ แสดงการค้นหาจุดสนใจ (keypoint) ในมิติขนาดและระยะทาง โดยการเปรียบเทียบเพื่อหาผลต่างของแต่ละภาพ (Difference-of-Gaussian:DOG) (Lowe, D. G., ๑๙๙๙)



รูปที่ ๒๒ แสดงการหาตำแหน่งของจุดสนใจ (keypoint) โดยพิจารณาที่ค่าสูงสุดและต่ำสุด (Lowe, D. G., ๑๙๙๙)

๓) การกำหนดทิศทางให้กับจุดสนใจ (Orientation assignment)

ขั้นตอนหาค่าขนาดและทิศทางของเกรเดียน (Gradient) บริเวณรอบๆ จุดสนใจ (keypoint) เพื่อที่จะกำหนดทิศทางให้จุดสนใจ (keypoint) โดยใช้สมการที่ ๑๐

$$m(x, y) = \sqrt{(L(x + 1, y) - L(x - 1, y))^2 + (L(x, y + 1) - L(x, y - 1))^2}$$

สมการที่ ๑๐

$$\theta(x, y) = \tan^{-1}((L(x, y + 1) - L(x, y - 1)) / (L(x + 1, y) - L(x - 1, y)))$$

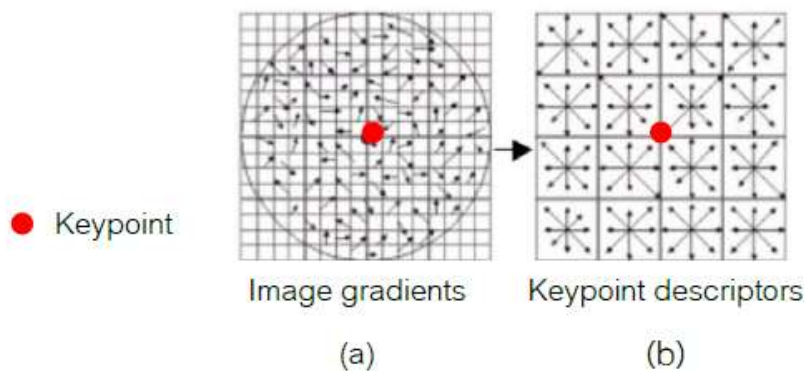
สมการที่ ๑๑

โดยที่ $m(x, y)$ คือ ขนาดของเกรเดียน และ

$\theta(x, y)$ คือ ทิศทางของ keypoint

๔) การสร้างลักษณะเฉพาะของจุดสนใจ (Keypoint descriptor)

จากการหาขนาดของเกรเดียนและทิศทางบริเวณรอบๆ ของจุดสนใจ (keypoint) จากขั้นตอนที่ ๓ แล้ว จึงทำการสร้างกรอบขนาด ๑๖x๑๖ window รอบๆ จุดสนใจ (keypoint) ดังแสดงในรูปที่ ๒๓ (a) และแบ่งออกเป็นพื้นที่กรวยย่อยขนาด ๔x๔ window แสดงดังรูปที่ ๒๓(b) แล้วสร้างแท่งความถี่ของทิศทาง (Orientation histograms) ขนาด ๘ ข้อมูล ในแต่ละพื้นที่กรวยย่อย ดังนั้นจะได้เวกเตอร์ลักษณะเฉพาะของแต่ละจุดสนใจ (keypoint) ที่มีขนาดเท่ากับ ๑๒๘ ข้อมูล



รูปที่ ๒๓ การสร้างลักษณะเฉพาะของจุดสนใจ (Lowe, D. G., ๑๙๙๙)

บทที่ ๓

สภาพทั่วไปของพื้นที่ดำเนินการ

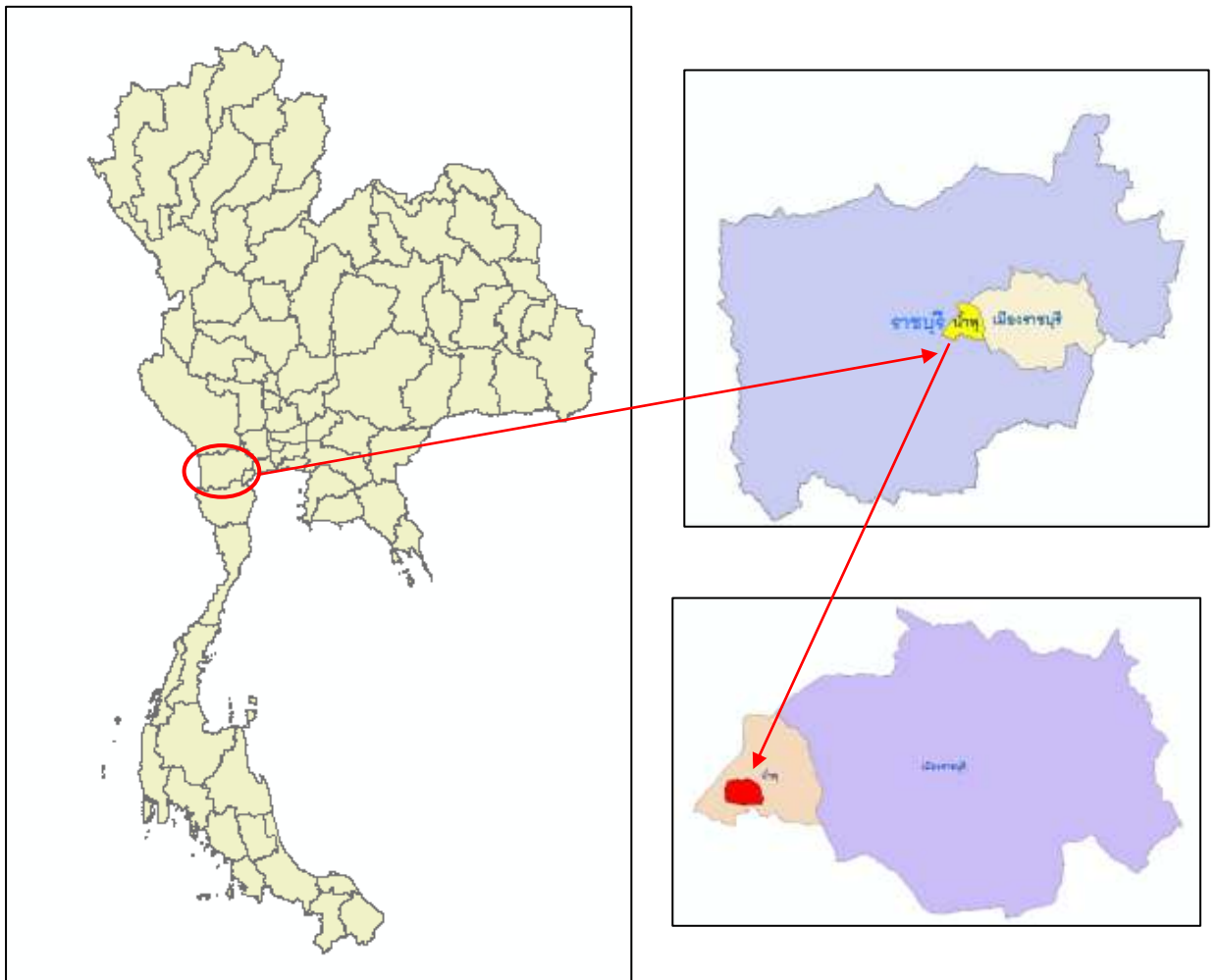
ตำบลน้ำพุ เป็นตำบลที่ได้รับการแบ่งแยกมาจากตำบลหินกองส่วนหนึ่ง อยู่ห่างจากอำเภอเมืองราชบุรี ประมาณ ๑๕ กิโลเมตร ประกอบไปด้วย ๖ หมู่บ้าน มีพื้นที่ประมาณ ๕๔ ตารางกิโลเมตร หรือประมาณ ๓๓,๗๕๐ ไร่

๓.๑ อาณาเขต

- ๓.๑.๑ ทิศเหนือ ติดต่อกับตำบลจอมบึง อำเภอจอมบึง จังหวัดราชบุรี
- ๓.๑.๒ ทิศตะวันออก ติดต่อกับตำบลหินกอง, ห้วยไผ่ อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี
- ๓.๑.๓ ทิศใต้ ติดต่อกับตำบลอ่างหิน อำเภอปากท่อ จังหวัดราชบุรี
- ๓.๑.๔ ทิศตะวันตก ติดต่อกับตำบลรางบัว อำเภอจอมบึง จังหวัดราชบุรี

๓.๒ การปกครอง

มีการปกครองในรูปแบบราชการส่วนท้องถิ่น คือ องค์การบริหารส่วนตำบลน้ำพุ ครอบคลุมพื้นที่ตำบลน้ำพุทั้งตำบล



รูปที่ ๒๔ แสดงพื้นที่ศึกษา ตำบลน้ำพุ อำเภอเมืองราชบุรี จังหวัดราชบุรี

๓.๓ ลักษณะภูมิประเทศ ประชากร และการประกอบอาชีพ

เป็นพื้นที่ราบลุ่มเหมาะแก่การเกษตรกรรม และเลี้ยงสัตว์ ราษฎรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ได้แก่ ทำไร่อ้อย ปลูกลำไย ปลูกมันสำปะหลัง ทำนา และเลี้ยงสุกร รองลงมาได้แก่ค้าขาย รับจ้างทั่วไป และอื่นๆ

ประชากรในเขตองค์การบริหารส่วนตำบลน้ำพุรวมทั้งสิ้น ๕,๑๕๙ คน แยกเป็นชาย ๒,๕๔๗ คน หญิง ๒,๖๑๒ คน มีจำนวนครัวเรือนจำนวน ๒,๐๕๘ ครัวเรือน

๓.๔ ลักษณะภูมิอากาศ

อุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ ๒๗ องศาเซลเซียส สูงสุดเดือนเมษายนถึงเดือนพฤษภาคม ประมาณ ๓๖ องศาเซลเซียส และต่ำสุดในเดือนธันวาคมถึงเดือนมกราคม ประมาณ ๑๘ องศาเซลเซียส ฤดูฝนเริ่มตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนพฤศจิกายน โดยตกหนักที่สุดในเดือนกันยายน และทิ้งช่วงในเดือนมิถุนายนและเดือนสิงหาคม ฝนส่วนใหญ่จะถูกพัดเลยไปตกในแถบลุ่มแม่น้ำแม่กลองและด้านตะวันออกของพื้นที่จังหวัด

๓.๕ หน่วยธุรกิจในเขตองค์การบริหารส่วนตำบลน้ำพุ

๓.๕.๑ บิมน้ำมันและก๊าซ มีจำนวน ๓ แห่ง (หมู่ที่ ๓ จำนวน ๒ แห่ง และหมู่ที่ ๕ จำนวน ๒ แห่ง)

๓.๕.๒ โรงงานอุตสาหกรรม มีจำนวน ๕ แห่ง ได้แก่

๑) บริษัทจีหิง เอ็นเตอร์ไพรส์ จำกัด	หมู่ที่ ๓
๒) บริษัทกฤษณ์ไฟเบอร์ซีเมนต์ จำกัด	หมู่ที่ ๓
๓) บริษัทราชบุรีสตาร์วู้ด จำกัด	หมู่ที่ ๓
๔) บริษัทฟาร์มเทค จำกัด	หมู่ที่ ๔
๕) บริษัท บางกอกแล็ป แอนด์ คอสเมติกส์ จำกัด	หมู่ที่ ๕

๓.๕.๓ ฟาร์มสุกร / ไก่ มีจำนวน ๑๓ แห่ง ได้แก่

๑) ชุนฟาร์ม	หมู่ที่ ๒
๒) ฟาร์มทอง	หมู่ที่ ๓
๓) ฟาร์มกำนันพนม พระลักษณะ	หมู่ที่ ๓
๔) ฟาร์มนายอำนวย พระลักษณะ	หมู่ที่ ๓
๕) ฟาร์มผู้ช่วยสุนทร คำแพง	หมู่ที่ ๓
๖) ฟาร์มวารภรณ์ ทรัพย์เดช	หมู่ที่ ๓
๗) บริษัทชูชัยทรัพย์เจริญฟาร์ม จำกัด (ฟาร์มไก่)	หมู่ที่ ๓
๘) ฟาร์มธาดา ธีระสัตยกุล	หมู่ที่ ๕
๙) อารีรัตน์ฟาร์ม	หมู่ที่ ๕
๑๐) ฟาร์มมณีรัตน์	หมู่ที่ ๕
๑๑) ฟาร์มบุญลือ	หมู่ที่ ๕
๑๒) ฟาร์มนายพีระ เล็กมณี	หมู่ที่ ๖
๑๓) ฟาร์มตรุณี	หมู่ที่ ๖

๓.๖ ระบบสาธารณูปโภค

๓.๖.๑ การคมนาคม

- | | |
|---|--------------|
| ๑) ถนนลาดยางแบบแอสฟัลท์ติกคอนกรีตเชื่อมต่อภายในหมู่บ้าน | จำนวน ๓๕ สาย |
| ๒) ถนนคอนกรีตเสริมเหล็กเชื่อมต่อภายในหมู่บ้าน | จำนวน ๙ สาย |
| ๓) ถนนลูกรัง/หินคลุก เชื่อมต่อภายในหมู่บ้าน | จำนวน ๑๑ สาย |
| ๔) ถนนหินลูกรังบดอัดแน่น เชื่อมต่อภายในหมู่บ้าน | จำนวน ๒๗ สาย |
| ๕) ถนนทางหลวงแผ่นดินหมายเลข ๓๒๐๗ ตอนหนองกระทุ่ม – หนองแซง | |
| ๖) ถนนทางหลวงแผ่นดินหมายเลข ๓๒๐๘ ตอนห้วยไผ่ – น้ำพุ | |
| ๗) ถนนทางหลวงชนบท ตอน น้ำพุ - ราม่วง | |
| ๘) ถนนทางหลวงชนบท ตอน น้ำพุ - ปากบึง | |

๓.๖.๒ การโทรคมนาคม

- | | |
|---------------------------------|--------------------------|
| ๑) ที่ทำการไปรษณีย์ | จำนวน ๑ แห่ง (หมู่ที่ ๔) |
| ๒) โทรศัพท์สาธารณะ | จำนวน ๘ แห่ง |
| ๓) ระบบกระจายข่าว / เสียงตามสาย | จำนวน ๓ แห่ง |
| ๔) ระบบเสียงไร้สาย | จำนวน ๒๐ แห่ง |

๓.๖.๓ การไฟฟ้า

ประชาชนมีไฟฟ้าใช้ร้อยละ ๙๕ ของครัวเรือนทั้งหมด

๓.๖.๔ มีระบบประปาหมู่บ้าน ๑๐ แห่ง

ประชาชนมีน้ำประปาใช้ร้อยละ ๙๕ ของครัวเรือนทั้งหมด

๓.๗ ทรัพยากรธรรมชาติ

๓.๗.๑ แหล่งน้ำธรรมชาติ

มีลำน้ำ ลำห้วย บึง หนอง	จำนวน ๓ แห่ง
-------------------------	--------------

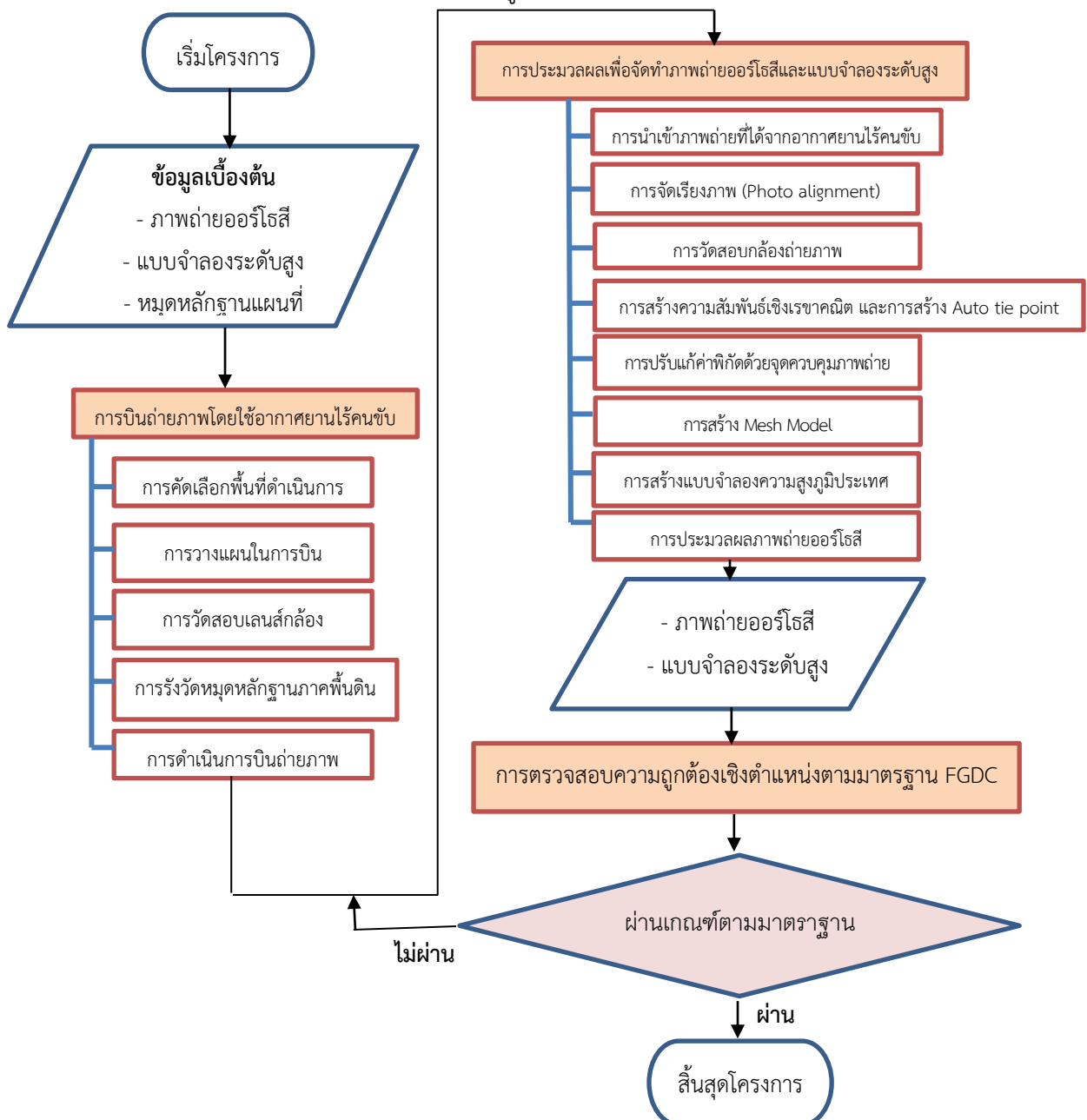
๓.๗.๒ แหล่งน้ำที่สร้างขึ้น

- | | |
|--------------------------------|---------------|
| ๑) อ่างเก็บน้ำห้วยสำนักไม้เต็ง | จำนวน ๑ แห่ง |
| ๒) บ่อบาดาล | จำนวน ๒๖ แห่ง |
| ๓) บ่อน้ำตื้น | จำนวน ๗๕ แห่ง |
| ๔) สระน้ำ | จำนวน ๑๒ แห่ง |

บทที่ ๔

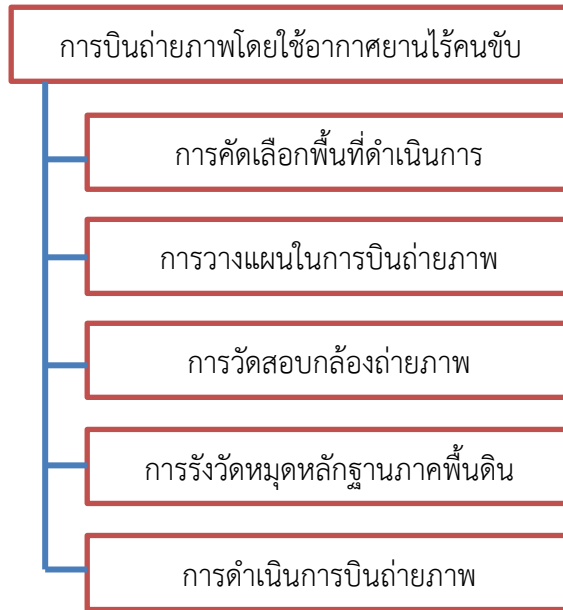
ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

กระบวนการในการผลิตภาพถ่ายออร์โธรีและแบบจำลองระดับสูง โดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ จำเป็นต้องมีการวางแผนขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานโดยคำนึงถึงหลักวิชาการด้านการสำรวจและทำแผนที่ เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องเชิงตำแหน่งตามมาตรฐาน Federal Geographic Data Committee (FGDC) ซึ่งเป็นมาตรฐานการตรวจสอบที่ได้รับการยอมรับเป็นสากล ในการปฏิบัติงานตามโครงการนี้ สามารถแบ่งขั้นตอนออกเป็น ๓ ขั้นตอน ได้แก่ การบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ การประมวลผลเพื่อจัดทำภาพถ่ายออร์โธรีและแบบจำลองระดับสูง และการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายออร์โธรีที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ โดยมีรายละเอียดตามแผนผังที่แสดงในรูปที่ ๒๕



รูปที่ ๒๕ แสดงขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานทั้งหมด

๔.๑ การบินถ่ายภาพด้วยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV)



รูปที่ ๒๖ แสดงขั้นตอนการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle :UAV)

๔.๑.๑ การคัดเลือกพื้นที่ดำเนินการ

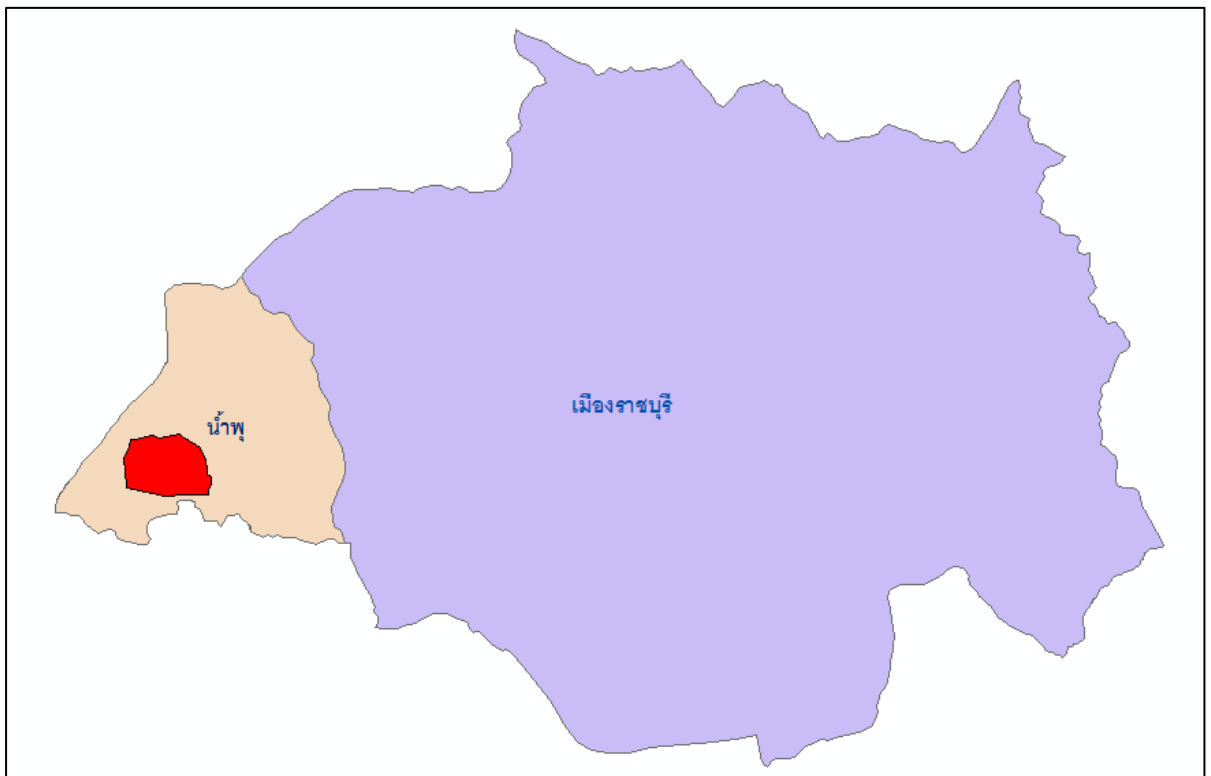
ดำเนินการพิจารณาร่วมกับ สพข.๑๐ และ สพด.ราชบุรี โดยทำการเลือกพื้นที่ของวงรอบเขตพัฒนาที่ดิน ตำบลน้ำพุ อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี เพื่อใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงข้อมูลการปลูกพืช สำหรับสนับสนุนภารกิจของกรมพัฒนาที่ดิน ในการนำไปใช้ในการส่งเสริมการปรับปรุงบำรุงดิน และพิจารณากำหนดแผนการใช้ที่ดินระยะยาว รวมถึงการออกแบบระบบบ่อนุรักษ์ดินและน้ำ



รูปที่ ๒๗ แสดงพื้นที่วงรอบเขตพัฒนาที่ดิน ตำบลน้ำพุ อำเภอเมือง จังหวัดราชบุรี



รูปที่ ๒๘ แสดงบริเวณพื้นที่โล่งใช้ในการขึ้นลงของอากาศยานไร้คนขับ (UAV)



รูปที่ ๒๙ แสดงพื้นที่ดำเนินการบินถ่ายภาพเพื่อจัดทำแผนที่ภาพถ่ายออร์โธรีด้วยอากาศยานไร้คนขับ (UAV: Unmanned Aerial Vehicle)

๔.๑.๒ การวางแผนในการบินถ่ายภาพ

งานวางแผนการบิน (Flight planning) เป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดในการทำแผนที่ภาพถ่ายออร์โธรีสตีด้วยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่กำหนดความละเอียดของภาพ คุณภาพของภาพ พอยท์คลาวด์ และความถูกต้องเชิงตำแหน่ง

๑) ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงสำหรับการวางแผนการบิน

๑.๑) ความสูงบิน

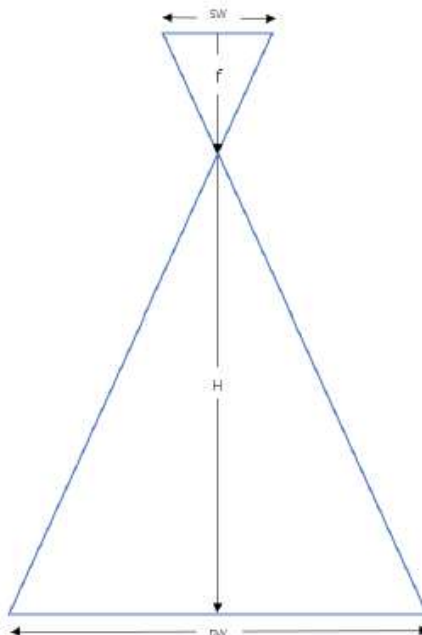
ความสูงบินเป็นส่วนสำคัญของการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ เนื่องจาก

ความสูงบินที่ต่ำลงจะได้ความละเอียดของภาพถ่ายสูงขึ้น สามารถผลิตข้อมูลเชิงตำแหน่งที่มีความถูกต้องมากขึ้น แต่ต้องใช้เวลาบินนานขึ้นเพื่อให้ได้ภาพที่มีส่วนซ้อน (Overlap) และส่วนเกย (Sidelap) เท่าเดิม นอกจากระยะเวลาในการบินเพิ่มขึ้นแล้วยังต้องคำนึงถึงจำนวนภาพที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อระยะเวลาในการประมวลผล ดังนั้นนอกจากจะต้องระวังเรื่องความสูงของสภาพพื้นที่แล้ว ความสูงบินมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ โดยสามารถคำนวณระดับสูงบินได้จากสมการที่ ๑๑

$$H = \frac{GSD \times f \times IW}{SW \times 1000}$$

สมการที่ ๑๑

- เมื่อ H (Flight Height) คือ ความสูงการบินเหนือจุดขึ้นบิน หน่วย เมตร
 GSD คือ ระยะพื้นที่ต่อพิกเซล หน่วย เซนติเมตรต่อพิกเซล
 SW (Sensor Width) คือ ระยะด้านกว้างของเซนเซอร์ หน่วย มิลลิเมตร
 f (Focal Length) คือ ทางยาวโฟกัสของเลนส์ หน่วย มิลลิเมตร
 IW (Image Width) คือ จำนวนพิกเซลด้านกว้าง หน่วย พิกเซล



รูปที่ ๓๐ แสดงการถ่ายภาพตามทฤษฎีสัมการสภาวะร่วมเส้น

๑.๒) ความละเอียดของจุดภาพต่อพื้นที่ (Ground Sampling Distance: GSD)

ความละเอียดของจุดภาพต่อพื้นที่ คือ ค่าเฉลี่ยของระยะทางบนพื้นโลกระหว่างจุดศูนย์กลางของจุดภาพที่อยู่ติดกันหรืออาจเรียกว่ารายละเอียดเชิงพื้นที่ (Spatial Resolution) ของจุดภาพ ซึ่งหมายถึงรายละเอียดเล็กที่สุดที่อุปกรณ์รับรู้ (Sensor) สามารถแยกแยะความแตกต่างระหว่างวัตถุได้

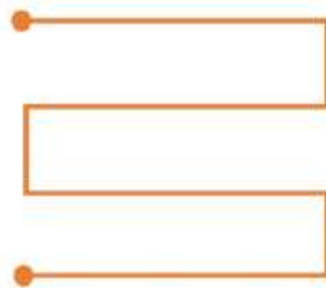
การกำหนดค่าความละเอียดของจุดภาพต่อพื้นที่ (GSD) ขึ้นกับความถูกต้องของข้อมูลเชิงตำแหน่งที่ต้องการ โดยมีการกำหนด ความถูกต้องในงานวิศวกรรมด้านต่าง ๆ แบ่งตามประเภทกิจกรรมหรือการใช้งานตามแนวทางของ FGDC (Geospatial Positioning Accuracy Standards PART ๔ : Standards for Architecture, Engineering, Construction (A/E/C) and Facility Management National) ในการปฏิบัติงานครั้งนี้กำหนดให้ GSD มีค่าเท่ากับ ๑๐ เซนติเมตร

๑.๓) ส่วนซ้อนและส่วนเกย (Overlap and Sidelap)

การกำหนดส่วนซ้อนและส่วนเกยสำหรับการวางแผนการบินในงานสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับนั้น มีความแตกต่างกับการสำรวจด้วยภาพถ่ายแบบดั้งเดิมเนื่องจากอากาศยานไร้คนขับมีขนาดเล็กและไม่สามารถควบคุมความเร็วและทิศทางการบินได้อย่างสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาในการถ่ายภาพ ดังนั้นหากกำหนดส่วนซ้อนและส่วนเกยที่น้อยเกินไปอาจทำให้ภาพที่ถ่ายไม่สามารถต่อกันได้ โดยการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับในครั้งนี้จึงกำหนดส่วนซ้อน (Overlap) ไม่น้อยกว่าร้อยละ ๘๐ และส่วนเกย (Sidelap) ไม่น้อยกว่าร้อยละ ๘๐

๑.๔) รูปแบบการบิน

การวางแผนรูปร่างของบล็อกการบินสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ โดยทั่วไปจะกำหนดให้บินภายในลักษณะบล็อกสี่เหลี่ยมมุมฉาก เพื่อให้โครงข่ายมีความแข็งแรงและลดจำนวนจุดควบคุมภาพถ่าย



รูปที่ ๓๑ แสดงรูปแบบการบินแบบสี่เหลี่ยมมุมฉาก

๒) การกำหนดค่าปัจจัยต่างๆ และการคำนวณเพื่อวางแผนการบิน

ในการวางแผนการบิน จะต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของกล้องถ่ายภาพได้แก่ ทางยาวโฟกัสของเลนส์มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร ขนาดของพิกเซล (Pixel size) มีหน่วยเป็นตารางมิลลิเมตร และขนาดของภาพ (Frame size) (กว้าง x สูง) มีหน่วยเป็นพิกเซล โดยมีขั้นตอนในการวางแผนการบิน ดังนี้

๒.๑) กำหนดความละเอียดของจุดภาพต่อพื้นที่ (GSD)
 โดยกำหนดจากความต้องการในการใช้งาน

๒.๒) กำหนดขนาดพื้นที่ในการบินถ่ายภาพ ๑ ครั้ง

๒.๓) คำนวณความสูงบิน
 โดยการคำนวณ

$$\text{Flight height} = \text{GSD} \times f / \text{pixel size}$$

๒.๔) คำนวณขนาดภาพบนพื้นดิน

$$\text{ด้านกว้าง (width)} = \text{GSD} \times \text{ความกว้างของภาพ สำหรับส่วนเกย (Sidalap)}$$

$$\text{ด้านสูง (height)} = \text{GSD} \times \text{ความสูงของภาพ สำหรับส่วนซ้อน (Overlap)}$$

๒.๕) กำหนดส่วนซ้อน (Overlap) และ ส่วนเกย (Sidalap)

๒.๖) คำนวณระยะห่างระหว่างแนวบิน (Spacing, SP) และจำนวนแนวบิน
 (Number of Flight: NFL)

$$\text{SP} = \text{ด้านกว้าง (width)} \times (\text{๑๐๐- ส่วนเกย}) / \text{๑๐๐}$$

$$\text{NFL} = (\text{ขนาดพื้นที่ด้านกว้าง} / \text{SP}) + \text{๑}$$

๒.๗) คำนวณระยะถ่ายภาพ (B) และจำนวนภาพ (NP)

$$\text{B} = \text{ด้านสูง (height)} \times (\text{๑๐๐-ส่วนซ้อน}) / \text{๑๐๐}$$

$$\text{NP} = (\text{ขนาดพื้นที่ด้านยาว} / \text{ระยะถ่ายภาพ}) + \text{๑}$$

$$\text{เพื่อภาพหัวท้าย (๒+๒=๔)} = \text{NP} + \text{๔} = \text{จำนวนภาพต่อแนวบิน}$$

๒.๘) คำนวณจำนวนภาพทั้งหมด

$$= \text{NFL} \times \text{จำนวนภาพต่อแนวบิน}$$

๒.๙) คำนวณความเร็วชัตเตอร์ขั้นต่ำ

$$\text{Min shutter speed} = \text{GSD} / \text{๒} / \text{plane speed}$$

๒.๑๐) คำนวณช่วงเวลาการถ่ายภาพ = ระยะถ่ายภาพ / plane speed

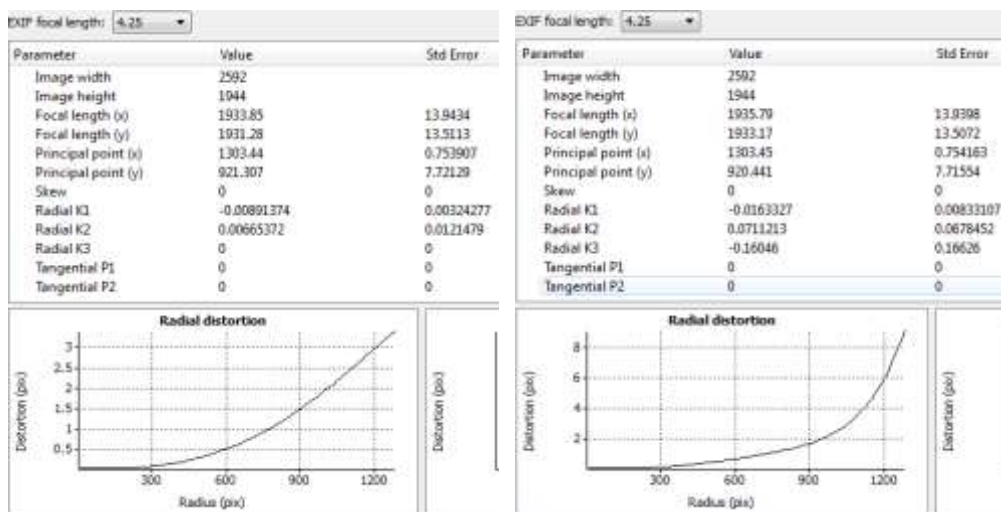
๔.๑.๓ การวัดสอบกล้องถ่ายภาพ

การวัดสอบกล้องเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ประกอบภายในของกล้องถ่ายภาพ (interior orientation) ซึ่งเป็นค่าการจัดวางข้อมูลภาพถ่ายที่มีความสัมพันธ์กับทิศทางแนวนอน นอกจากนี้กระบวนการวัดสอบยังใช้หาค่าพารามิเตอร์เพื่อนำมาใช้ในการแก้ไขค่าความคลาดเคลื่อนของเลนส์ ของกล้องที่บันทึกภาพถ่าย ซึ่งเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญต่อการแก้ไข และการควบคุมความถูกต้องเชิงตำแหน่งของผลลัพธ์จากการประมวลผล

การวัดสอบกล้องอาศัยวิธีการวิเคราะห์หาความผิดเพี้ยนเลนส์ (lenses Distortion modeling) ทำได้โดยใช้กล้องที่ต้องการวัดสอบ ถ่ายภาพตารางหมากรุก (Chess board) ในมุมต่างๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ ๓๒ จากนั้นนำไปวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองความผิดเพี้ยน (Distortion model) โดยใช้ซอฟต์แวร์ Agisoft Lens ดังแสดงในรูปที่ ๓๓ เพื่อทำการประมาณค่าพารามิเตอร์สำหรับการปรับแก้เลนส์กล้องถ่ายภาพ ในขั้นตอนการประมวลผลภาพ ต่อไป



รูปที่ ๓๒ แสดงวิธีการวิเคราะห์หาความผิดเพี้ยนเลนส์ (lenses distortion modeling)



รูปที่ ๓๓ แสดงขั้นตอนการประมาณค่าพารามิเตอร์โดยอาศัย แบบจำลองความผิดเพี้ยน

(Distortion model) สำหรับใช้ในขั้นตอนการปรับแก้กล้องถ่ายภาพ

๔.๑.๔ การรังวัดหมุดควบคุมภาพ (Photo Control)

ในขั้นตอนนี้ จำเป็นต้องมีการเลือกจุดควบคุมที่สามารถมองเห็นได้ทั้งบนภาพถ่ายทางอากาศ และในพื้นที่จริง และต้องเป็นบริเวณที่เปิดโล่งเพื่อความสะดวกในการรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส (Global Navigation Satellite System: GNSS) จากนั้นทำการรังวัดค่าพิกัดของหมุดควบคุมภาคพื้นดินวิธีการรังวัดแบบจลน์ ณ เวลาจริง (Real Time Kinematic: RTK) ดังแสดงในรูปที่ ๓๔ ซึ่งเป็นวิธีการทำงานรังวัดแบบจลน์แต่สามารถแสดงผลพิกัดคือ ค่าพิกัดตำแหน่งได้ทันทีในสนาม โดยเหตุที่การทำงานยังเป็นการหาตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ หมายความว่า ข้อมูลจากทั้งสองจุดต้องนำมาประมวลผลร่วมกัน ดังนั้น จึงต้องใช้คลื่นวิทยุในการรับส่งข้อมูลระหว่างกัน เนื่องจากจุดอ้างอิงเป็นจุดรู้ตำแหน่งอยู่แล้ว ในการทำงานแบบ RTK นี้ จึงเป็นการส่งข้อมูลที่รับสัญญาณดาวเทียมได้ไปยังจุดที่ต้องการหาตำแหน่งเครื่องรับ ที่จุดต้องการหาตำแหน่งจะรับข้อมูลแล้วนำไปประมวลผล แล้วแสดงค่าพิกัดได้อย่างรวดเร็วในพื้นที่ ระยะห่างระหว่างจุดที่ใช้ทำงานได้ไม่เกิน ๒๐ กิโลเมตร (เฉลิมชนม์, ๒๕๖๑) นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับกำลังของคลื่นวิทยุที่ใช้ ในการรับส่งข้อมูลระหว่างกัน เพื่อใช้ในการประมวลผลภาพถ่ายที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ และใช้ในการปรับแก้ค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งต่อไป



รูปที่ ๓๔ แสดงการรังวัดหมุดควบคุมภาคพื้นดิน ด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS วิธีการรังวัดแบบจลน์ได้ค่าพิกัดทันที ณ เวลาทำการรังวัด (Real Time Kinematics: RTK)

ในการดำเนินการครั้งนี้จุดที่ทำการรังวัดจะต้องเป็นจุดที่สามารถมองเห็นได้รอบด้าน เพื่อสะดวกในการกำหนดจุดในภาพถ่ายทางอากาศ เพื่อจะนำมาปรับแก้ค่าความสูงและภาพถ่ายออร์โธรีที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ โดยหมุดควบคุมภาพถ่ายจะต้องอ้างอิงจากหมุดของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (reference control point) โดยในการรังวัดหมุดควบคุมครั้งนี้จะใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส (Global Navigation Satellite System: GNSS) ชนิด ๒ ความถี่ และรังวัดโดยใช้วิธีการแบบจลน์ได้ค่าพิกัดทันที ณ เวลาทำการรังวัด (Real Time Kinematics: RTK) โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

๑) ตรวจสอบพื้นที่ที่จะดำเนินการ เพื่อกำหนดจำนวนของหมุดควบคุมภาพ โดยคำนึงถึงความครอบคลุมของพื้นที่ และสถานที่ตั้งหมุดต้องคำนึงถึงปัจจัยอื่นๆ ดังนี้ (เฉลิมชนม์, ๒๕๖๑)

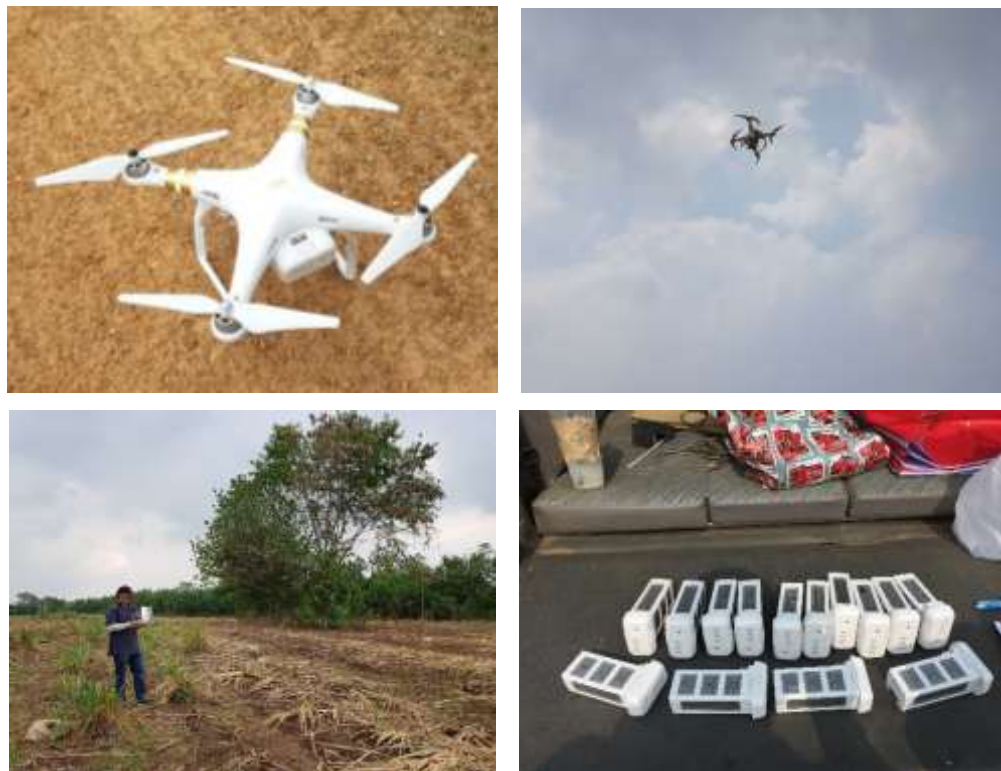
- ๑.๑) สามารถค้นหาได้โดยง่าย และสะดวกต่อการใช้งาน
- ๑.๒) อยู่ในตำแหน่งที่โล่ง ไม่มีสิ่งกีดขวางที่มุมสูง ๑๕ องศา
- ๑.๓) ตำแหน่งของหมุดต้องไม่อยู่ใกล้แหล่งน้ำขนาดใหญ่ หรือใกล้อาคาร สิ่งก่อสร้างที่มีผิวเรียบ ทำให้เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นหลายทิศทาง (Multipath) มายังเสาอากาศได้
- ๑.๔) ตำแหน่งของหมุดต้องไม่อยู่ใกล้เสาอากาศที่รับสัญญาณที่มีความถี่เดียวกัน หรือใกล้เคียงกันกับความถี่ของสัญญาณดาวเทียม รวมทั้งหลีกเลี่ยงตั้งใกล้สถานีวิทยุ เสาอากาศแรงสูง (High Power Communication Antenna) สายส่งศักย์สูง (High Voltage Transmission Line) หรือเสาอากาศเรดาร์

๒) ดำเนินการสร้างหมุดควบคุมภาพโดยการทำสัญลักษณ์บนพื้นผิวจราจร พื้นคอนกรีต โดยการพ่นสี และในพื้นที่ที่เป็นดินจะใช้เป้าชนิดให้สัญญาณ (signalized photo control point) ซึ่งในการดำเนินการในครั้งนี้ได้ทำการจัดทำหมุดควบคุมภาพจำนวน ๑๖ หมุด และหมุดตรวจสอบ (Check points) จำนวน ๒๐ หมุด รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.

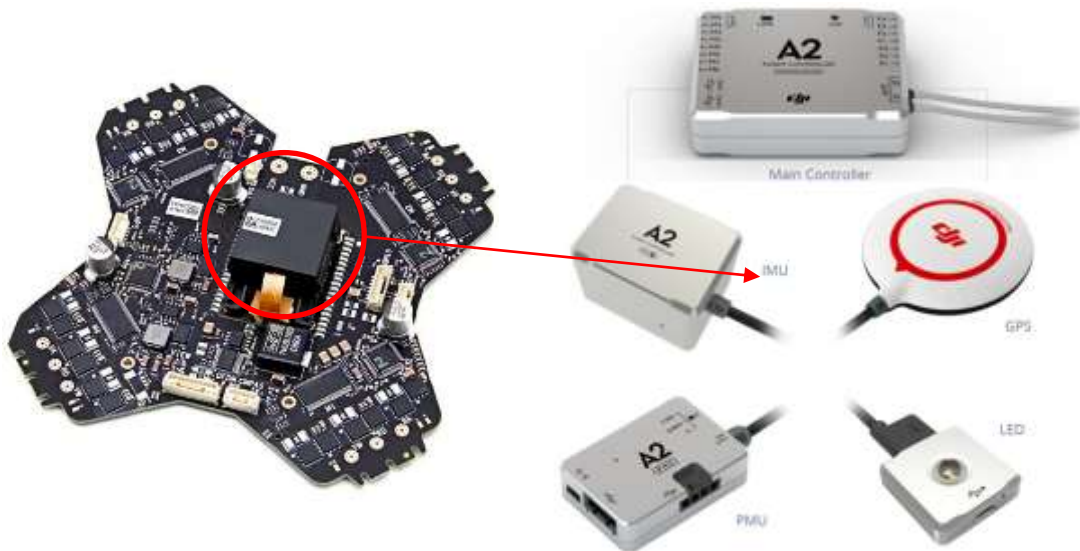
๓) รับสัญญาณดาวเทียมที่ สถานีฐาน (Base Station) และ รับสัญญาณดาวเทียมที่ จุดควบคุมภาพถ่ายที่สร้างขึ้น ๑๖ จุด และจุดตรวจสอบ ๒๐ จุด โดยใช้เทคนิคการรังวัดดาวเทียมแบบจลน์ได้ค่าพิกัดทันที ณ เวลาทำการรังวัด (Real Time Kinematics: RTK)

๔.๑.๕ การดำเนินการบินถ่ายภาพ

การบินถ่ายภาพใช้ระบบควบคุมการบินอัตโนมัติ ด้วยระบบนำร่อง (Way point) ที่ถูกติดตั้งในระบบการบังคับการบิน ร่วมกับระบบการรังวัดกำหนดตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส (Global Navigation Satellite System: GNSS) และระบบการหาค่าอาการเอียงของเครื่องบิน (Inertial measurement unit: IMU) ทำให้การบินถ่ายภาพด้วยวิธีดังกล่าวสามารถที่จะควบคุมการบินได้อย่างอิสระ โดยกำหนดค่าพิกัดจุดเริ่มต้น และจุดสุดท้าย กำหนดจำนวนแนวบิน ความสูง ส่วนซ้อน (Overlap) และส่วนเกย (Sidelap) ได้เหมือนกับการบินถ่ายด้วยเครื่องบินขนาดใหญ่ นอกจากนี้ค่าความเอียงของกล้องจะถูกนำมาใช้ในขั้นตอนการทำภาพถ่ายออร์โธรีซีต่อไป

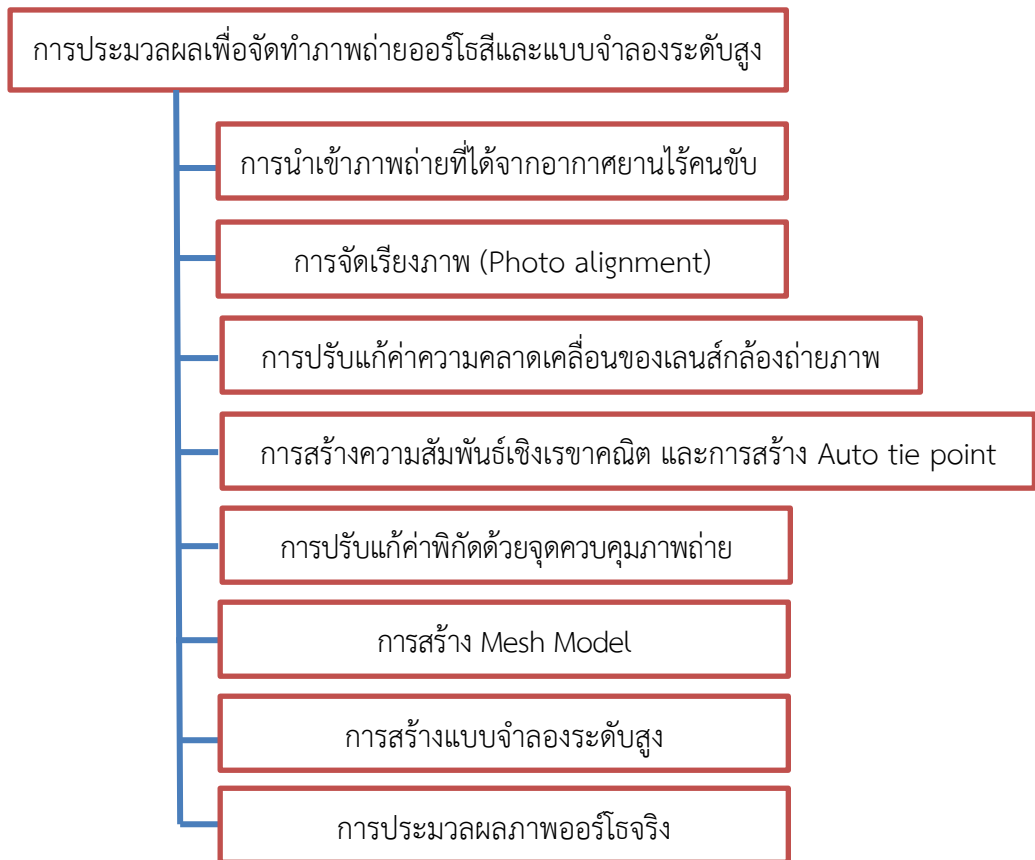


รูปที่ ๓๕ แสดงการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับแบบปีกหมุน (Multirotor)



รูปที่ ๓๖ แสดงตัวอย่างของระบบนำร่อง (Way point) ระบบการรังวัดกำหนดตำแหน่งด้วยดาวเทียม (Global Positioning System: GPS) และระบบการหาค่าอาการเอียงของเครื่องบิน (Inertial measurement unit: IMU) ที่นำไปติดตั้งอยู่บนอากาศยานไร้คนขับ (UAV)

๔.๒ การประมวลผลเพื่อจัดทำภาพถ่ายออร์โธรีและแบบจำลองระดับสูง

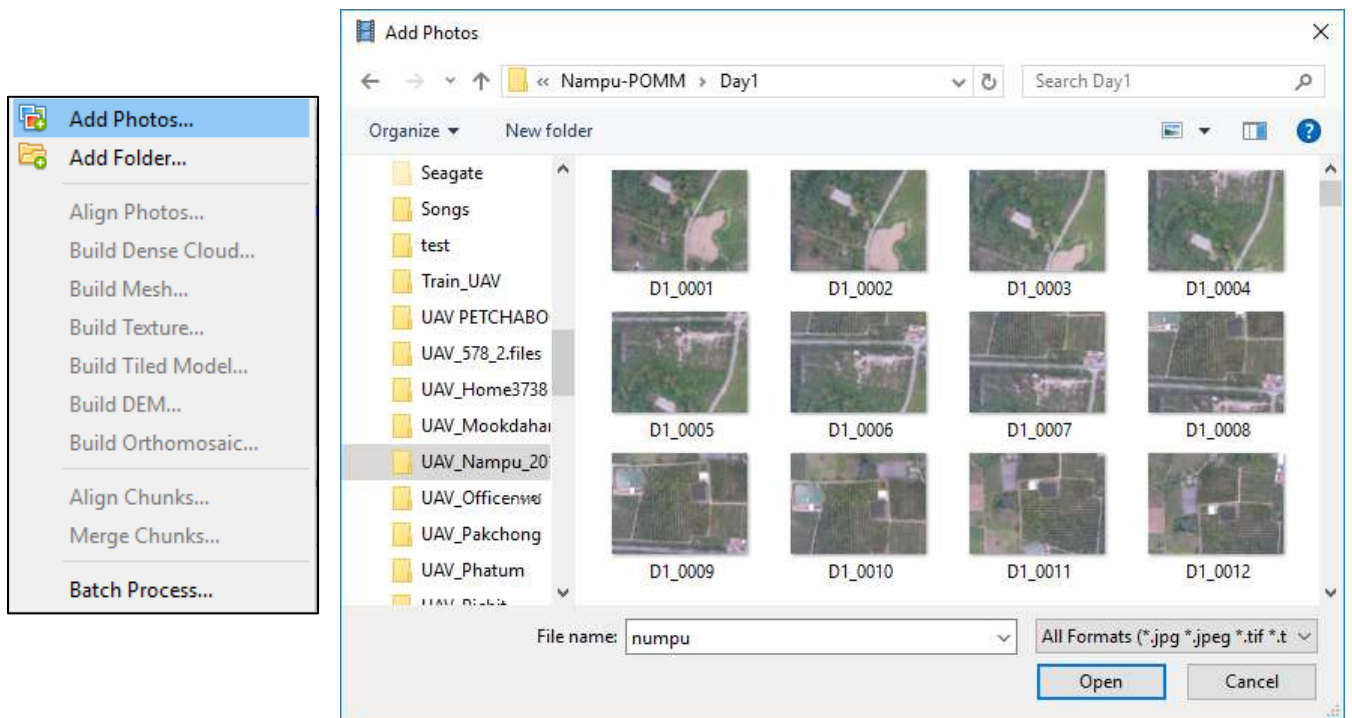


รูปที่ ๓๗ แสดงขั้นตอนการประมวลผลเพื่อจัดทำภาพถ่ายออร์โธรีและแบบจำลองระดับสูง

๔.๒.๑ การนำเข้าภาพถ่ายที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ

ขั้นตอนแรกต้องมีการคัดเลือกภาพที่จะนำมาทำภาพถ่ายออร์โธ โดยอาศัยการวิเคราะห์เบื้องต้นด้วยสายตา โดยการเลือกภาพที่เป็นภาพถ่ายตั้งเท่านั้น เนื่องจากบางครั้งกล้องจะทำการถ่ายภาพในขณะที่อากาศยานกำลังขึ้น-ลง หรือในช่วงเดินทางไปยังจุดพักเป้าหมายโดยยังไม่ได้ทำการปรับมุมกล้องให้ตั้ง ๙๐ องศา ดังนั้น การคัดเลือกภาพจะช่วยลดจำนวนของภาพถ่ายลงได้เป็นจำนวนมากซึ่งจะส่งผลต่อระยะเวลาในการประมวลผลที่ลดลง

จากนั้นทำการนำเข้าภาพที่คัดเลือกไว้แล้วเข้าสู่โปรแกรม เพื่อเตรียมขั้นตอนการนำเข้าค่าพิกัด ดังแสดงในรูปที่ ๓๘ ต่อไป



รูปที่ ๓๘ แสดงการนำเข้าภาพที่คัดเลือกไว้แล้วเข้าสู่โปรแกรม เพื่อเตรียมขั้นตอนการนำเข้าค่าพิกัด

๔.๒.๒ การจัดเรียงภาพ (Photo alignment) โดยอาศัยค่าพิกัดที่ได้จากการถ่ายภาพ

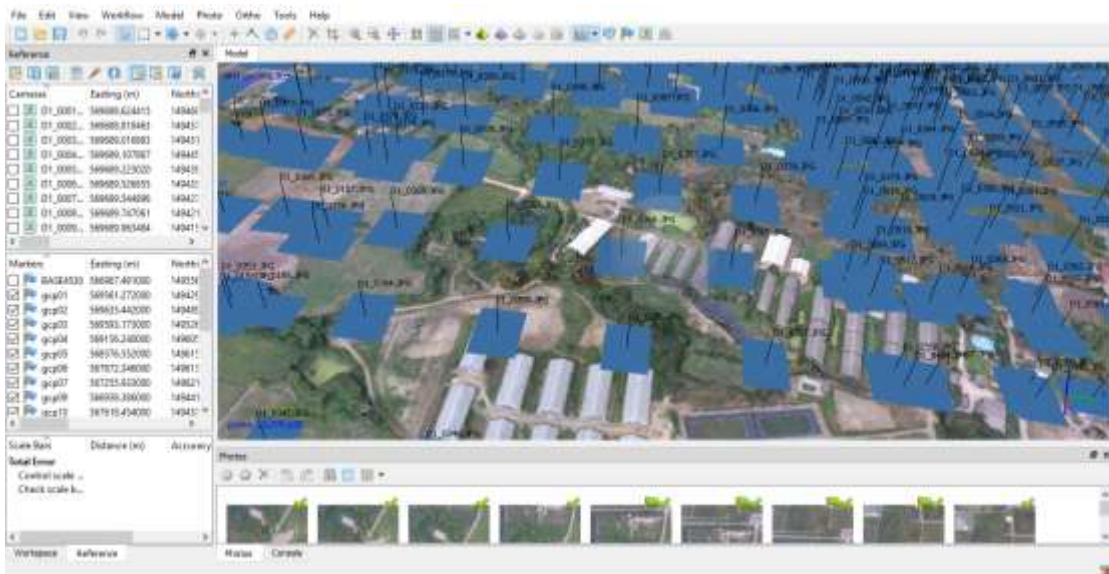
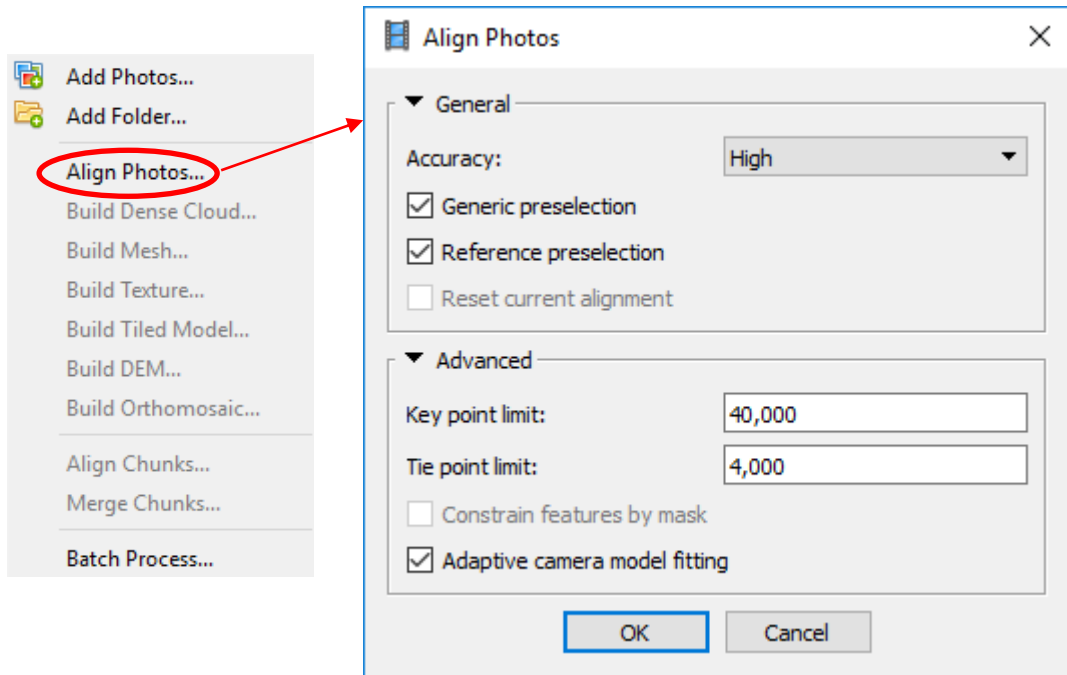
ในขั้นตอนนี้ อาศัยค่าพิกัดที่บันทึกไว้ในขณะทำการถ่ายภาพจากระบบการรังวัดกำหนดตำแหน่งด้วยดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส (Global Navigation Satellite System: GNSS) ที่ติดตั้งอยู่บนอากาศยานไร้คนขับ (UAV) โดยทำการตั้งค่าในโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ ๓๘ ตามคำแนะนำของโปรแกรม

Accuracy หมายถึง ความแม่นยำในการประมาณตำแหน่งของกล้องถ่ายภาพ เลือก High สำหรับการใส่ภาพถ่ายที่ไม่ผ่านการบีบอัดข้อมูล ถ้าเลือกความแม่นยำต่ำกว่า High ค่าความแม่นยำจะลดลงครึ่งละ ๔ เท่า

Keypoint limit หมายถึง ขีดจำกัดสูงสุดของจุดสนใจในแต่ละภาพที่จะนำมาพิจารณาในขณะประมวลผล

Tie point limit หมายถึง ขีดจำกัดสูงสุดของจุดเชื่อมโยง (matching point) ระหว่างคู่ภาพที่นำมาพิจารณา

โปรแกรมจะทำการจัดเรียงภาพตามแนวนอนที่คำนวณได้ตามค่าพิกัด เพื่อเตรียมการในขั้นตอนการสร้างความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตต่อไป



รูปที่ ๓๙ แสดงการจัดเรียงภาพ (Photo alignment) โดยอาศัยค่าพิกัดที่ได้จากการถ่ายภาพ

๔.๒.๓ การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนของเลนส์กล้องถ่ายภาพ

ในขั้นตอนที่ ๔.๒.๒ การจัดเรียงภาพ โปรแกรมจะทำการประมาณค่าพารามิเตอร์เพื่อหองค์ประกอบภายใน (interior orientation) และองค์ประกอบภายนอก (Exterior orientation) ของกล้องถ่ายภาพ การประมาณค่านี้ดำเนินการโดยใช้ข้อมูลภาพเพียงอย่างเดียวและอาจมีข้อผิดพลาดบางประการในการประมาณการขั้นสุดท้าย ความแม่นยำของการประมาณการขั้นสุดท้ายนั้น ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยเช่นการซ้อนทับระหว่างภาพถ่ายที่อยู่ใกล้เคียงรวมถึงรูปร่างของพื้นผิววัตถุ ข้อผิดพลาดเหล่านี้สามารถนำไปสู่ ความคลาดเคลื่อนแบบไม่เชิงเส้น (Non-Linear Deformation)

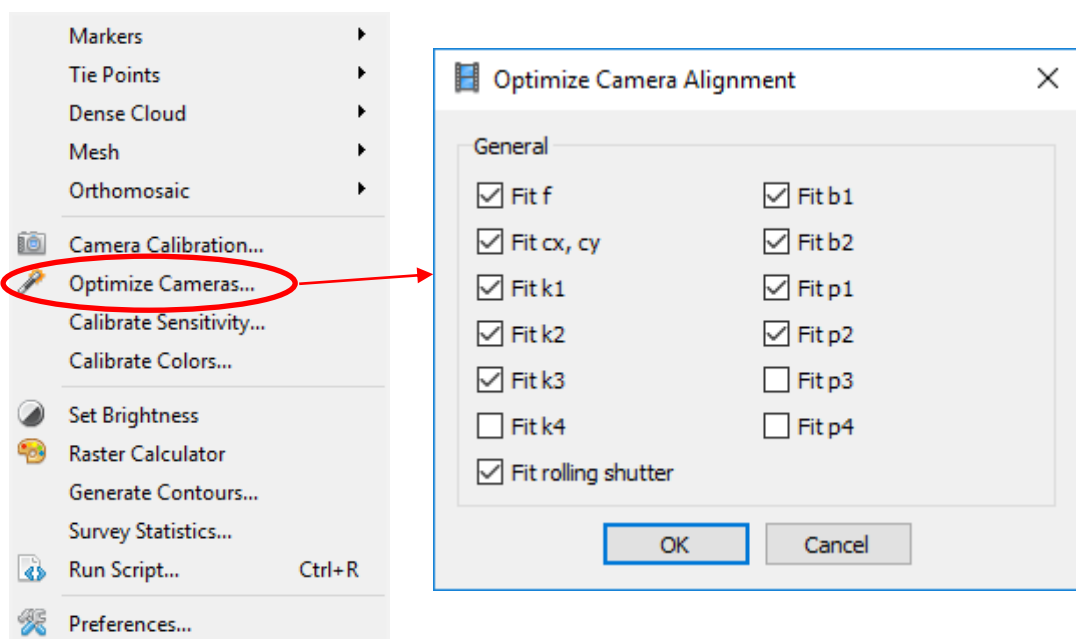
การปรับแก้ความคลาดเคลื่อนของเลนส์กล้องถ่ายภาพ จะเป็นการใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดสอบกล้องถ่ายภาพ ในขั้นตอนที่ ๔.๑.๓ เพื่อนำมาใช้ในการแก้ไขค่าความคลาดเคลื่อนของเลนส์ของกล้องที่บันทึกภาพถ่าย เพื่อสามารถควบคุมกระบวนการประมวลผลให้ได้ผลลัพธ์เชิงตำแหน่งที่มีคุณภาพ ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนของเลนส์แบ่งออกเป็น ๒ ประเภทได้แก่ ค่าความผิดเพี้ยนตามแนวรัศมี และค่าความผิดเพี้ยนตามแนวเส้นสัมผัส

๑) ความผิดเพี้ยนตามแนวรัศมี

เป็นความคลาดเคลื่อนอย่างเป็นระบบที่ เกิดจากการขีดผิวเลนส์ไม่เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ ทำให้ตำแหน่งจุดภาพปรากฏคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งเดิมตามแนวรัศมีจากจุดमुखยสำคัญ (cx,cy) ทำการปรับแก้ด้วยค่าพารามิเตอร์ k_1 k_2 และ k_3 ที่ได้จากการวัดสอบ

๒) ความผิดเพี้ยนตามแนวเส้นสัมผัส

ความเพี้ยนเลนส์ตามแนวสัมผัส เกิดจากการจัดวางเลนส์โดยที่แกนทัศนเลนส์แต่ละเลนส์ไม่อยู่ในแนวเดียวกัน ทำให้ตำแหน่งจุดภาพปรากฏคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งเดิมตามแนวสัมผัสกับรัศมีจากจุดमुखยสำคัญ ทำการปรับแก้ด้วยค่าพารามิเตอร์ b_1 b_2 p_1 และ p_2 ที่ได้จากการวัดสอบ



รูปที่ ๔๐ แสดงการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนของเลนส์กล้องถ่ายภาพ

๔.๒.๔ การสร้างความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิต และการสร้าง Auto tie point

ในขั้นตอนนี้จะทำการแปลงภาพที่ถ่ายจากเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ให้กลายเป็น Point cloud ที่มีค่าพิกัดทางราบและทางตั้ง (x, y และ z) จำนวนมาก โดยอาศัยค่าพิกัดจากภาพถ่ายมาทำการประมาณค่า เพื่อสร้างความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตระหว่างภาพถ่ายทั้งหมดให้มีความสัมพันธ์เชิงตำแหน่งทั่วบริเวณพื้นที่ศึกษา ในการประมวลผลของโปรแกรมประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศประกอบด้วยขั้นตอนการทำงานย่อยได้แก่ การคำนวณหาพิกัดจุดถ่ายภาพ การปรับแก้และวัดสอบค่าความคลาดเคลื่อนของเลนส์ การสกัดหาข้อมูลจุดสนใจ การจับคู่ภาพ และการสร้าง Auto tie points จากสมการสภาวะร่วมเส้น ทั้งนี้ในขั้นตอนเริ่มต้นนี้จะเป็นส่วนสำคัญที่สุดในการผลิตข้อมูล Point cloud และภาพออร์โธรีจิงที่มีคุณภาพ

๑) การสกัดหาข้อมูลจุดสำคัญ

การสกัดหาข้อมูลจุดสำคัญคือการใช้เทคนิคการค้นหาจุดสนใจของภาพ แต่ละภาพโดยคอมพิวเตอร์สามารถเข้าใจทัศนียภาพ หรือแยกแยะวัตถุภายในภาพได้ ทั้งนี้ความชัดเจนของภาพจะทำให้คอมพิวเตอร์สามารถระบุข้อมูลวัตถุได้อย่างชัดเจนและการจับคู่ภาพ (image matching) ได้อย่างถูกต้อง

๒) การจับคู่ภาพด้วยวิธีการ SIFT

การจับคู่ภาพคือนำข้อมูลจุดสำคัญจากการสกัดหาวัตถุภายในภาพ ซึ่งข้อมูลจุดสนใจที่สร้างขึ้นมาจะต้องไม่ขึ้นอยู่กับขนาดภาพ การหมุน และมุมมอง เพื่อนำมาใช้จับคู่ ภาพและหาความสัมพันธ์ของวัตถุระหว่างภาพถ่ายได้อย่างแม่นยำ วิธีการประมวลผลการจับคู่ภาพจะใช้คอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลหาปริภูมิค่าในมิติขนาดและระยะทางคำนวณหาตำแหน่งของข้อมูล จุดสำคัญและกำหนดทิศทางให้กับข้อมูลจุดสนใจ

๓) การสร้าง Auto tie points จากสมการสภาวะร่วมเส้น

การสร้าง Auto tie points เกิดจากโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ (Aerial Triangulation, AT) คือ กระบวนการที่นำข้อมูลลำแสงที่ฉายลงบนภาพถ่ายที่ถูกบันทึกโดยกล้องถ่ายภาพทางอากาศจำนวนมาก มาทำการประมวลผลในการคำนวณทั้งการเล็งสกัดย้อนและกระบวนการเล็งสกัด ซึ่งการเล็งสกัดย้อนคือกระบวนการในการหาค่าองค์ประกอบการจัดภาพภายนอก ทำให้ทราบตำแหน่งและการวางตัวของภาพถ่ายเทียบกับระบบพิกัดภาคพื้นดิน และในส่วนของการทำงานกระบวนการเล็งสกัดจะเป็นกระบวนการในการคำนวณตำแหน่งและการวางตัวของภาพถ่ายคู่ช้อนสามมิติ รวมไปถึงกระบวนการเล็งสกัดนี้ยังใช้หาค่าพิกัดบนพื้นหลักฐานจริง ทั้งนี้การประมวลผลโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศจะทำการประมวลผลทั้งการเล็งสกัดย้อนและการเล็งสกัด โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สมการสภาวะร่วมเส้น นำมาใช้ในการปรับแก้และคำนวณค่าพิกัด ภาคพื้นดินที่ไม่ทราบค่าซึ่งได้จากกระบวนการเล็งสกัด รวมไปถึงคำนวณปรับแก้ค่าองค์ประกอบการจัดภาพภายนอกของแต่ละภาพถ่าย ซึ่งในปัจจุบันการประมวลผลโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศจะใช้วิธีการคำนวณปรับแก้ของบล็อกแบบลำแสง เพื่อสร้าง Tie points ดังรูปที่ ๔๑



รูปที่ ๔๑ แสดง Point cloud ที่แปลงมาจากภาพที่ถ่ายด้วยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV)

ในขั้นตอนนี้จะมีกระบวนการคัดกรองข้อมูลที่มีความผิดปกติออกจากข้อมูลของ Tie point ดังเช่นค่า Reprojection error ที่แสดงถึงความแม่นยำในทางตำแหน่งที่ไม่ดีที่เกิดในขั้นตอนการจับคู่ภาพ ทั้งนี้เพื่อทำให้ความถูกต้องเชิงตำแหน่งมีค่าที่ดียิ่งขึ้น จึงต้องมีการขจัดข้อมูล Tie point ที่มีค่า Reprojection error สูงออกไป และนอกจากนี้เพื่อควบคุมคุณภาพของข้อมูลควรมีการขจัดข้อมูล Tie point ที่ได้จากการประมวลผลจับคู่ภาพถ่ายในจำนวนที่น้อยกว่า ๓ ภาพหรือข้อมูล Tie point ที่อยู่แปลกแยกจากกลุ่มข้อมูล Tie point อื่นๆ เนื่องจากข้อมูลเหล่านี้อาจเป็นข้อมูลที่ไม่มีคุณภาพส่งผลให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งที่สูงขึ้น ดังนั้น ขั้นตอนการกำจัดข้อมูลที่มีความผิดปกติออกจากข้อมูล Tie point จึงเป็นขั้นตอนที่สำคัญและเมื่อทำการประมวลผลขจัดข้อมูลที่มีความผิดปกติเสร็จสิ้นแล้ว ต้องทำการประมวลผลใหม่อีกครั้งและ ตรวจสอบว่าข้อมูล Tie point ที่ได้ทำการประมวลผลนั้นครอบคลุมขอบเขตพื้นที่ที่ต้องการนำข้อมูลมาประยุกต์ใช้งานต่อหรือไม่ ถ้าหากมีส่วนที่ขาดหายไปจะต้องทำการวางแผนการบินใหม่และทำการบันทึกข้อมูลประมวลผลใหม่อีกครั้ง

ส่วนสุดท้ายคือ Bundle Block Adjustment เป็นการสร้างระบบสมการร่วมเส้นของจุดบนภาพถ่ายซึ่งคำว่า Bundle หมายถึงกลุ่มของลำแสงซึ่งมีจุดกำเนิดจากจุด Perspective Center ของภาพถ่ายและพาดผ่านจุดที่ปรากฏบนภาพถ่ายทั้งหมด ทั้งนี้การคำนวณปรับแก้ของบล็อกแบบลำแสงจะเป็นวิธีคำนวณหาค่าองค์ประกอบที่ไม่ทราบค่าโดยค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า ได้แก่ พารามิเตอร์การจัดภาพภายนอกของภาพถ่ายทุกภาพในบล็อกค่าองค์ประกอบการจัดเรียงภายนอกของภาพ (Exterior Orientation : EO) เป็นการกำหนดตำแหน่ง (Position : X_o, Y_o, Z_o) และการเอียง (Orientation : ω, ϕ, κ) ของภาพถ่ายในระวางวัตถุซึ่งตำแหน่งถ่ายภาพ กำหนดโดยพิกัดวัตถุของจุด Perspective Center ส่วนการเอียงอธิบายโดยใช้อาการเอียงของแกนกล้องขณะถ่ายภาพ (ขณะเปิดหน้ากล้อง) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ (spatial relationship) ระหว่างระบบพิกัดวัตถุ (X, Y, Z) กับระบบพิกัดภาพถ่าย (x, y, z)

นอกจากนี้ การคำนวณปรับแก้ของบล็อกแบบลำแสงยังสามารถนำมาใช้คำนวณค่าพารามิเตอร์ที่ยังไม่ทราบค่าได้แก่ ค่าพิกัดภาคพื้นดิน ของจุดโยงยึด (Tie points) ดังนั้นหากสามารถสร้างจำนวนสมการได้มากกว่าตัวไม่ทราบค่า ก็จะสามารถหาตัวไม่ทราบค่าทั้งหมดโดยการปรับแก้ด้วยวิธี Least Square Adjustment เมื่อทำการประมวลผลเสร็จสิ้นแล้วผลลัพธ์ที่ได้มานั้น คือ พารามิเตอร์การจัดภาพภายนอก และ ค่าพิกัดภาคพื้นดินของจุดโยงยึด ในขั้นตอนนี้จะมีการวัดสอบค่าพารามิเตอร์ในการปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนทางเลนส์ด้วยกระบวนการ Self-Calibration ที่จะทำการวัดสอบจากข้อมูลชุดภาพถ่าย

๔.๒.๕ การปรับแก้ค่าพิกัดด้วยจุดควบคุมภาพถ่าย

การปรับแก้ค่าพิกัดตำแหน่งด้วยจุดควบคุมภาพถ่าย คือ การนำเข้าและรังวัดจุดควบคุมภาพถ่ายเพื่อใช้ในปรับแก้ และทำการคำนวณค่าองค์ประกอบภายนอกของภาพ ค่าการวางตัวของภาพถ่ายใหม่ เมื่อโยนยัดค่าพิกัดด้วยจุดควบคุมภาพถ่ายแล้วจะทำให้ Auto tie points มีความถูกต้องเชิงตำแหน่งที่ถูกต้อง และสามารถนำไปประมวลผลในขั้นตอนต่อไปได้

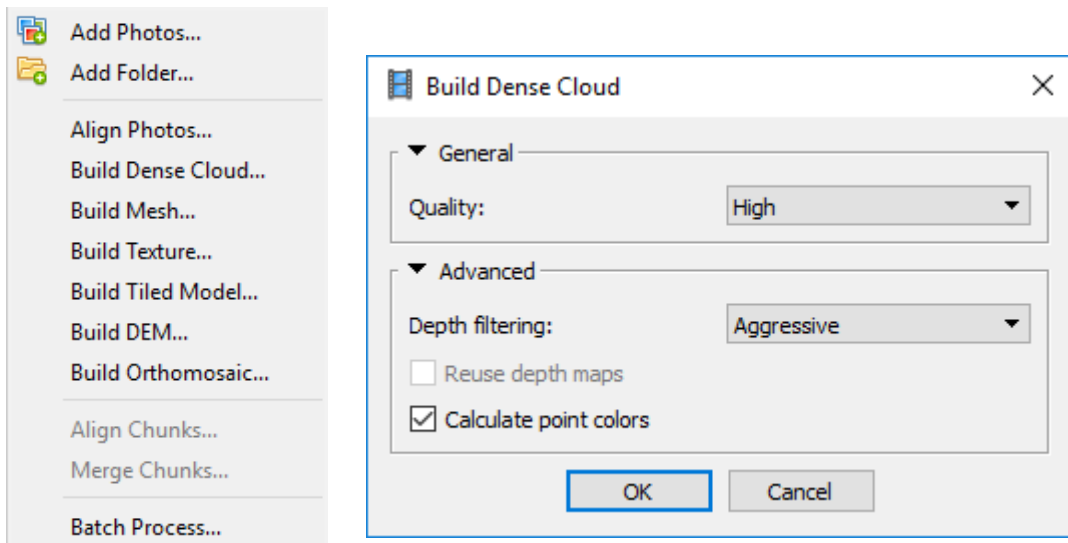


Markers	Easting (m)	Northing (m)	Altitude (m)	Accuracy (m)	Error (m)
<input checked="" type="checkbox"/> gcp01	569561.272000	1494297.513000	53.275000	0.005000	0.000606
<input checked="" type="checkbox"/> gcp02	569635.442000	1494892.320000	50.307000	0.005000	0.000482
<input checked="" type="checkbox"/> gcp03	569593.173000	1495265.662000	53.976000	0.005000	0.000465
<input checked="" type="checkbox"/> gcp04	569156.240000	1496054.391000	59.862000	0.005000	0.000912
<input checked="" type="checkbox"/> gcp05	568576.552000	1496155.386000	60.441000	0.005000	0.000571
<input checked="" type="checkbox"/> gcp06	567872.346000	1496136.414000	58.943000	0.005000	0.000976
<input checked="" type="checkbox"/> gcp07	567255.933000	1496217.269000	69.334000	0.005000	0.000756
<input checked="" type="checkbox"/> gcp09	566938.386000	1494419.071000	66.224000	0.005000	0.000404
<input checked="" type="checkbox"/> gcp10	567618.454000	1494378.190000	62.210000	0.005000	0.000239
<input checked="" type="checkbox"/> gcp11	567987.023000	1494314.240000	61.015000	0.005000	0.000204

รูปที่ ๔๒ แสดงตัวอย่างการปรับแก้ค่าพิกัดด้วยจุดควบคุมภาพถ่าย

๔.๒.๖ การสร้างพอยท์คลาวด์แบบหนาแน่น (dense point cloud)

การสร้างพอยท์คลาวด์แบบหนาแน่น (dense point cloud) ซึ่งเป็นกลุ่มของจุดสามมิติที่เก็บค่าตำแหน่งของวัตถุในพิกัด X,Y,Z ทั้งนี้ปัจจัยหลักในกระบวนการนี้ขึ้นอยู่กับจำนวนค่าตำแหน่งของกล้องที่บันทึกภาพถ่าย โดยขั้นตอนในการประมวลผลสร้างข้อมูลพอยท์คลาวด์แบบหนาแน่นจะเป็นการเพิ่มจำนวน Tie Point ซึ่งหากทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ในการประมวลผลในระดับสูง หรือตั้งค่าความละเอียดในการประมวลผลที่ระดับสูง ทำให้ข้อมูลมีองค์ประกอบรายละเอียดที่หนาแน่น รวมไปถึงส่งผลให้ผลลัพธ์มีค่าความถูกต้องเชิงเรขาคณิตที่แม่นยำ แต่ต้องใช้เวลาในการประมวลผลค่อนข้างมาก และพอยท์คลาวด์ที่ได้จากการประมวลผลในขั้นตอนนี้จะต้องสร้างจากภาพอย่างน้อย ๓ ภาพ เพื่อควบคุมคุณภาพความถูกต้องเชิงตำแหน่ง

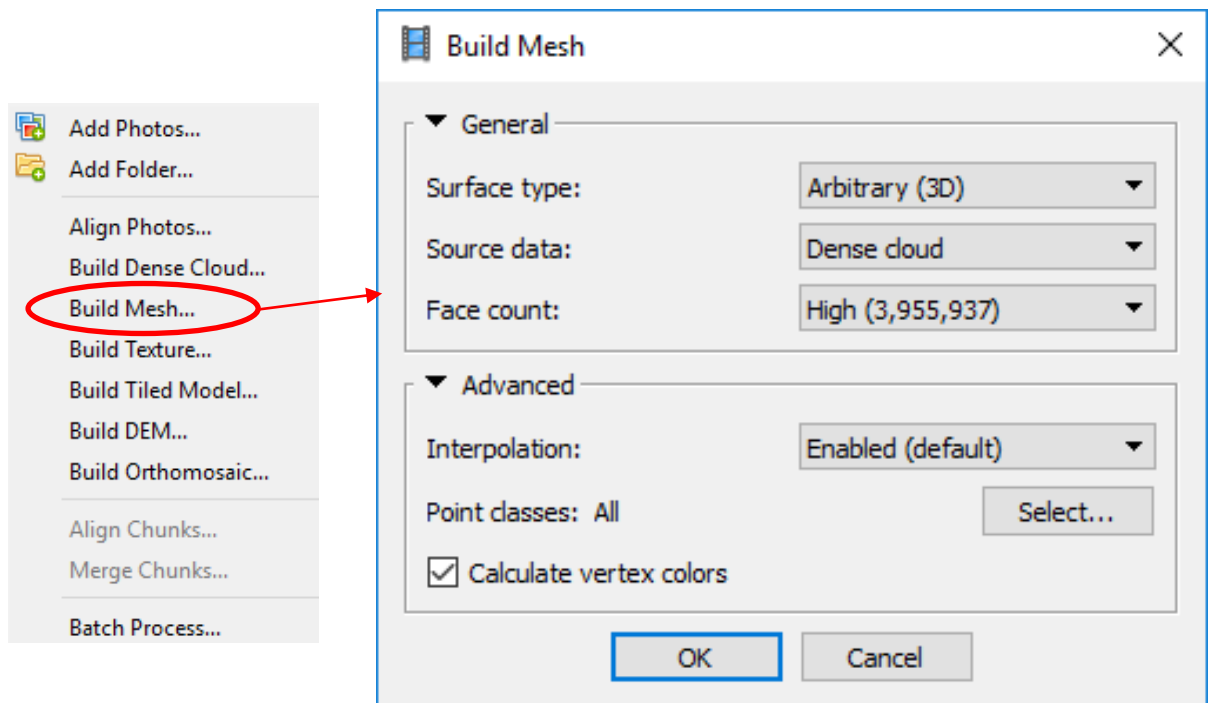


รูปที่ ๔๓ แสดงการสร้างพอยท์คลาวด์แบบหนาแน่น (dense point cloud)

๔.๒.๗ การสร้างข้อมูลพื้นผิว Mesh Model

Mesh คือ ข้อมูลพื้นผิวที่มีโครงสร้างแบบเวกเตอร์ ที่ใช้แสดงลักษณะของรูปร่างของโมเดลที่ประกอบด้วยพื้นผิวของโมเดล ยอดมุม และขอบมุมของโมเดล โดยจะนำพอยท์คลาวด์มาประมวลผลสร้าง Mesh เพื่อที่จะได้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพเชิงตำแหน่ง แต่ทั้งนี้คุณภาพในการประมวลผลสร้าง Mesh นั้นจะขึ้นกับคุณภาพของพอยท์คลาวด์ที่ได้จากการประมวลผลในขั้นตอนก่อนหน้า นอกจากนี้ในการประมวลผลสร้าง Mesh จะต้องมีการกำหนดและควบคุม จำนวนของรูปหลายเหลี่ยม (polygon) ในข้อมูล Mesh ซึ่งทำการคำนวณมาจากจำนวนจุดพอยท์คลาวด์ โดยจำนวนของรูปหลายเหลี่ยมในข้อมูล Mesh จะแสดงถึงระดับความละเอียดในข้อมูล ทั้งนี้หากจำนวนของรูปหลายเหลี่ยม มีค่าน้อยจะส่งผลกระทบต่อ Mesh ที่ทำการสร้างนั้นหยาบและ ไม่มีความละเอียดเพียงพอจะนำไปประมวลผลใช้งานต่อ นอกจากนี้ยังมีส่วนของการ Interpolate Mesh เพื่อทำการสร้างพื้นผิวข้อมูลหรือเติมเต็มข้อมูลให้ครบถ้วน โดยทำการ Interpolate ด้วยวิธีการค้นหาจุดที่ใกล้เคียงกันบนพอยท์คลาวด์ เพื่อที่จะทำการประมวลผลสร้างเป็นพื้นผิว เพื่อให้ข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลนั้นมีความสมบูรณ์และมีคุณภาพเพียงพอที่จะนำไปสร้างแบบจำลองความสูงภูมิประเทศในขั้นตอนต่อไป

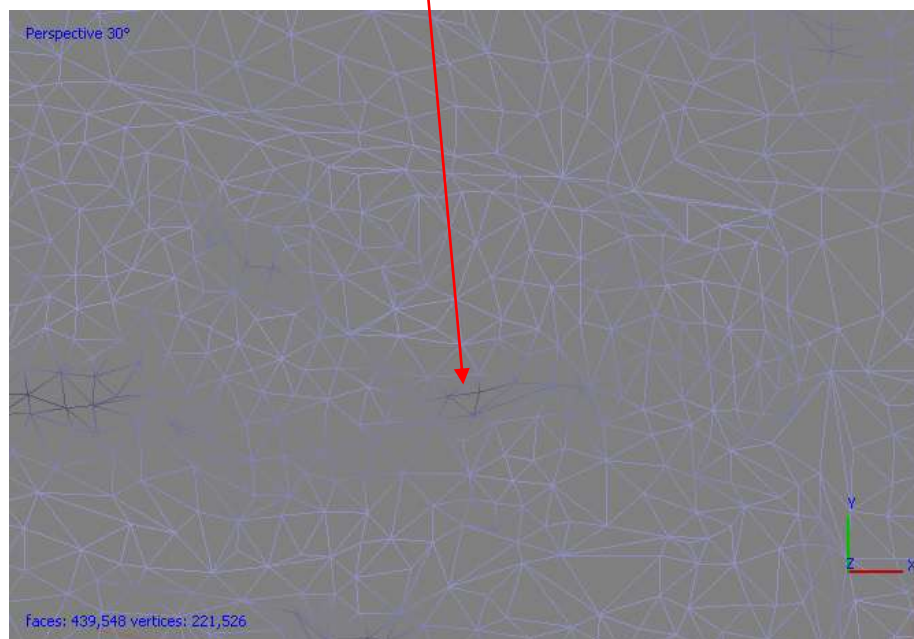
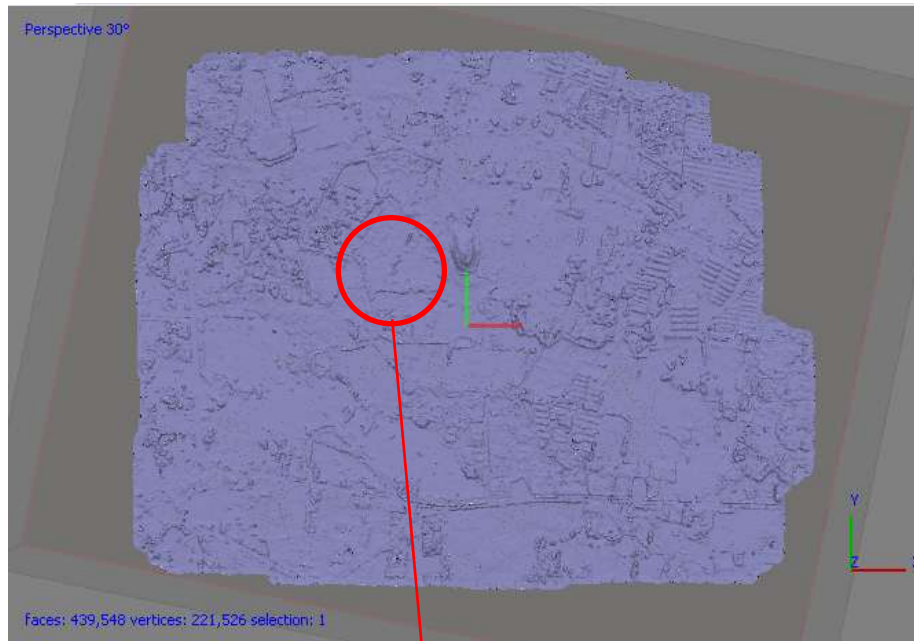
การสร้างข้อมูลพื้นผิว Mesh Model ควรเลือกพื้นผิว (Surface type) แบบ Arbitrary ซึ่งเหมาะกับพื้นผิวแบบสามมิติ ในส่วนของข้อมูลที่จะนำมาสร้าง Mesh (Source data) ควรใช้ข้อมูล Dense Cloud จากขั้นตอนที่ ๔.๒.๖ และให้มีการสร้างพื้นที่รูปปิด (Face count) แบบ High เพื่อเพิ่มความละเอียดของข้อมูลพื้นผิว Mesh



รูปที่ ๔๔ แสดงการสร้าง Mesh Model

การสร้างข้อมูลพื้นผิว Mesh Model จะแสดงผลออกมาในรูปแบบ Wireframe ซึ่งเป็นลักษณะการแสดงผลของแบบจำลองสามมิติของวัตถุหรือสิ่งของที่สร้างในคอมพิวเตอร์ โดยการแสดงเส้นตรงหรือเส้นโค้ง ซึ่งเป็นเส้นของขอบของวัตถุที่เกิดจากคำนวณทางคณิตศาสตร์ของพื้นผิวที่ไม่ต่อเนื่องของวัตถุ

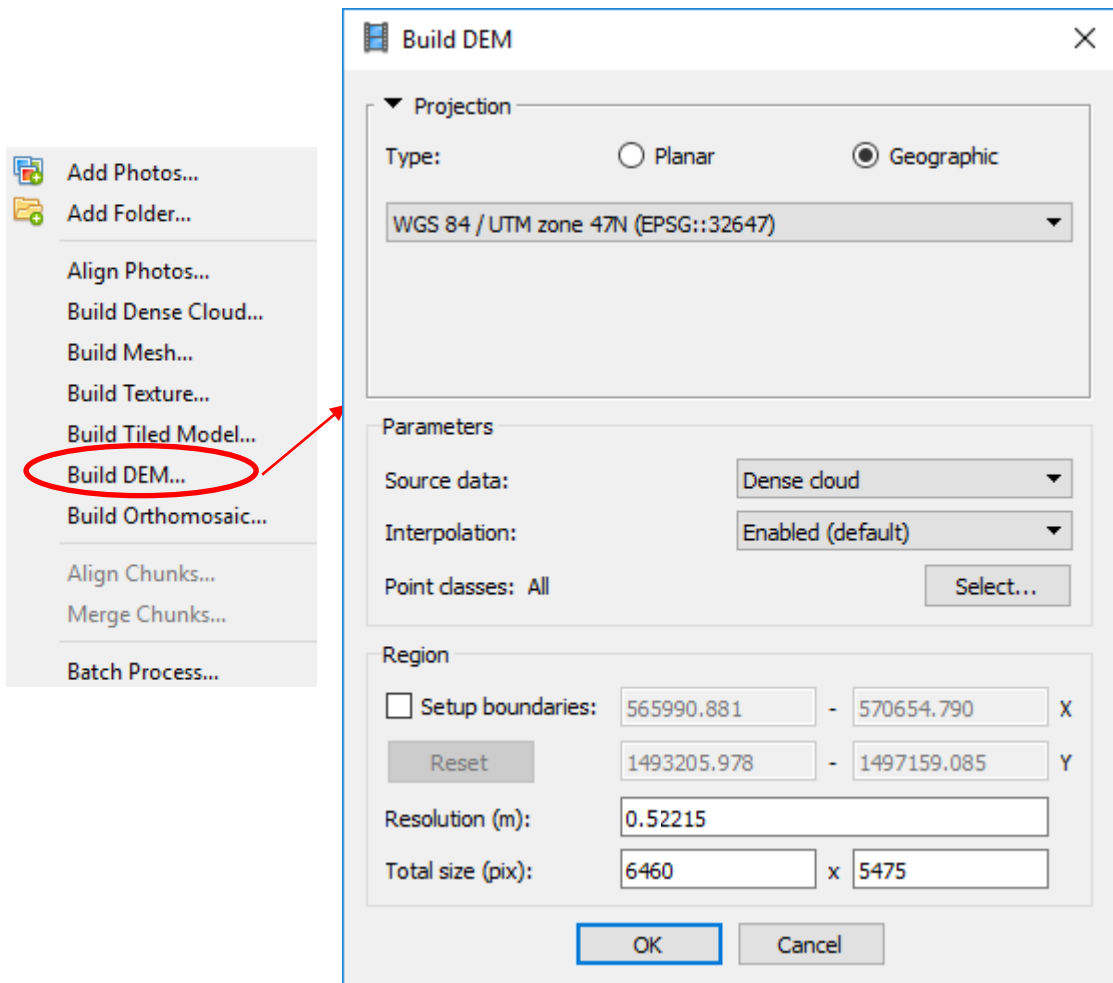
การแสดงผลแบบนี้จะแสดงผลได้เร็วกว่าการแสดงผลแบบจำลองสามมิติทั่วไป ส่วนมากนิยมใช้ในโครงสร้างวัตถุสามมิติที่ซับซ้อน เพื่อให้ผู้ออกแบบสามารถปรับเปลี่ยน ตรวจสอบ และแก้ไขได้ง่ายและสะดวกกว่า โดยเมื่อสร้างและแก้ไขเสร็จแล้ว แบบจำลองสามมิติจะถูกนำไปสร้างเป็นแบบจำลองเสมือนจริงผ่านกระบวนการเรนเดอร์ (render) ในรูปแบบทรงตัน (solid) และแบบระดับสี (shade) ซึ่งเป็นการเน้นรูปทรงทางกายภาพและให้สีที่ตรงกับความเป็นจริง



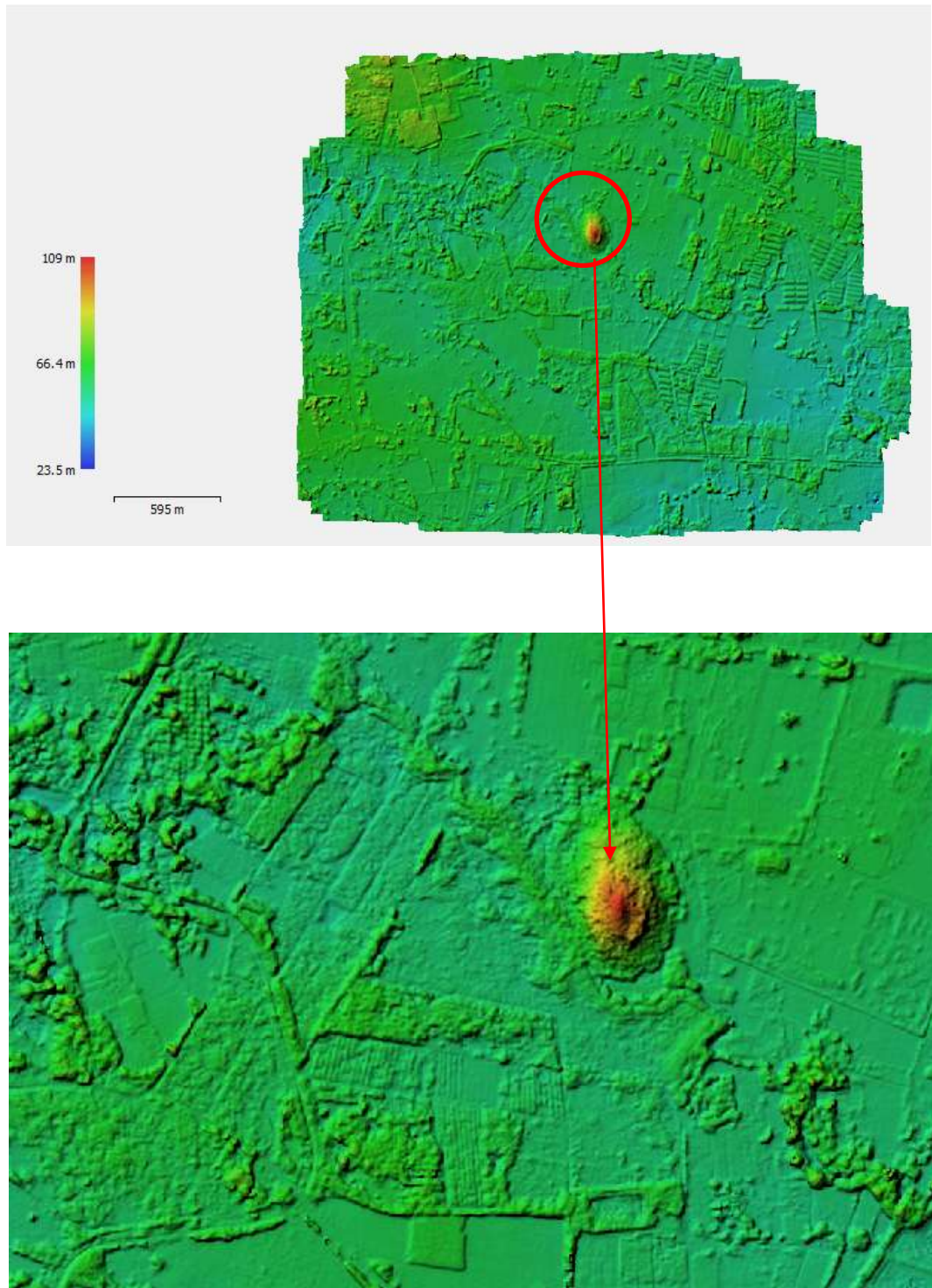
รูปที่ ๔๕ แสดง Mesh Model แบบ wireframe

๔.๒.๘ การสร้างแบบจำลองระดับสูง (Digital Surface Model: DSM)

การสร้างแบบจำลองระดับสูง คือการจำลองความสูงของภูมิประเทศ และ จัดเก็บให้อยู่ในรูปแบบตารางกริด หรือข้อมูลราสเตอร์ โดยรวมความสูงของสิ่งปกคลุมพื้นผิวทางกายภาพของโลกด้วย เช่น สิ่งปลูกสร้าง ต้นไม้ และพุ่มไม้ เป็นต้น ซึ่งจะทำการประมวลผลจากข้อมูล Mesh ทั้งนี้คุณภาพของ Mesh จึงส่งผลโดยตรงต่อความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองระดับสูง ซึ่งโปรแกรมจะทำการประมวลผลโดยอาศัยความสัมพันธ์ของภาพถ่าย (image correlation) และทำการ Interpolate ชนิดข้อมูลทั้งหมดออกมาในรูปแบบข้อมูลราสเตอร์ โดยโปรแกรมจะทำการคำนวณค่าความละเอียดจุดภาพ (Resolution) มาให้โดยไม่สามารถแก้ไขได้ เพื่อนำไปประมวลผลสร้างข้อมูลออร์โธรีจริงในขั้นตอนถัดไป



รูปที่ ๔๖ แสดงการสร้างแบบจำลองระดับสูง

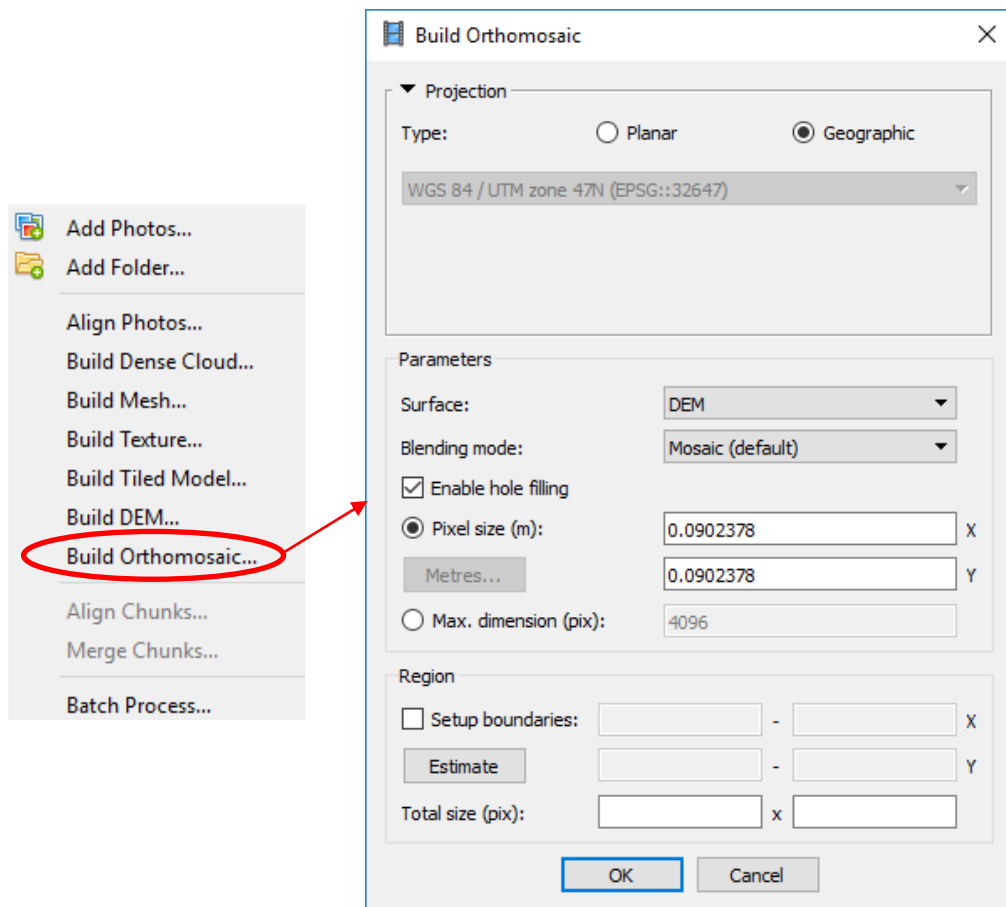


รูปที่ ๔๗ แสดงแบบจำลองระดับสูง (Digital Surface Model: DSM)

๔.๒.๙ การประมวลผลภาพออร์โธจริง (True Orthophoto)

เนื่องจากเมื่อพื้นที่ที่ทำการถ่ายภาพมีค่าระดับความสูงที่แตกต่างกัน จะก่อให้เกิดผลกระทบต่อจุดภาพจากความสูงที่ต่างของพื้นที่ (Relief displacement) ซึ่งจะทำให้จุดภาพบนภาพถ่ายคลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งบนพื้นหลักฐานอ้างอิง ซึ่งจะมีลักษณะเคลื่อนที่ออกจากจุดमुखยสำคัญตามแนวรัศมี และแปรผันตามความสูงที่เทียบกับพื้นหลักฐานอ้างอิง ทั้งนี้จึงทำให้ต้องมีการประมวลผลเพื่อตัดแก้ค่าความคลาดเคลื่อนนี้ด้วยการประมวลผลสร้างออร์โธจริง

การประมวลผลภาพออร์โธจริง (True Orthophoto) คือการนำภาพมาประมวลผลแก้ไขและขจัดความผิดเพี้ยนทางลักษณะเรขาคณิตของวัตถุทั้งหมด ซึ่งจะแตกต่างจากภาพถ่ายออร์โธ (Orthophoto) ที่ทำการแก้ไขความผิดเพี้ยนทาง เรขาคณิตด้วยข้อมูลแบบจำลองภูมิประเทศ ได้แก่ Digital Terrain Model (DTM), Digital Elevation Model (DEM) ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความผิดเพี้ยนของวัตถุที่อยู่ในระดับพื้นดินเท่านั้นที่จะถูกแก้ไข ดังนั้นในการประมวลผลภาพออร์โธจริงจะต้องใช้ข้อมูลแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเพื่อนำมาประมวลผลแก้ไขความผิดพลาดทางเรขาคณิต รวมถึงจะต้องทำการผสมสีของภาพเข้าด้วยกัน โดยวิธีการ Mosaic และต้องทำการแก้ไขสีของวัตถุในภาพ เช่น ใช้วิธี Color Balancing หรือ Histogram Matching ในการแก้ไขสีของวัตถุภายในภาพ เป็นต้น ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการที่มีประโยชน์สำหรับการประมวลผลชุดข้อมูลที่มีความแตกต่างของระดับความสว่าง และเมื่อทำการประมวลผลเสร็จสิ้นแล้ว โปรแกรมจะทำการคำนวณค่าความละเอียดจุดภาพ (Resolution) ให้ ซึ่งจะต้องได้ผลลัพธ์ดีกว่าค่าความละเอียดของจุดภาพต่อพื้นที่ (GSD) ที่กำหนดไว้



รูปที่ ๔๘ แสดงการสร้างภาพออร์โธจริง (True Orthophoto)



รูปที่ ๔๙ แสดงภาพออร์โธจริง (True Orthophoto)

๔.๓ การตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายออร์โธรีที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ

เมื่อภาพออร์โธรีจริง (True ortho) ผ่านการปรับแก้ความผิดพลาดทางเรขาคณิตและปรับแก้ค่าพิกัดเชิงตำแหน่ง เรียบร้อยแล้ว จำเป็นต้องได้รับการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งตามมาตรฐานสากล เพื่อสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้ใช้งาน ในการศึกษาครั้งนี้จะตรวจสอบความถูกต้องของภาพออร์โธรีจริง (True ortho) ด้วยการเปรียบเทียบความถูกต้องกับมาตรฐาน National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA) ของ Federal Geographic Data Committee (FGDC) และมาตรฐานของ American Society of Photogrammetry and Remote Sensing Accuracy Standard (ASPRS) มีรายละเอียดดังนี้

๔.๓.๑ มาตรฐาน National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA) ของ Federal Geographic Data Committee (FGDC)

มาตรฐาน NSSDA กำหนดโดยคณะกรรมการเฉพาะกิจที่แต่งตั้งโดย FGDC ของสหรัฐอเมริกา เพื่อใช้เป็นมาตรฐานในการรายงานความถูกต้องของข้อมูลเชิงพื้นที่ในรูปข้อมูลดิจิทัล โดยไม่ขึ้นกับมาตราส่วนของข้อมูลแผนที่ ค่ามาตรฐาน NSSDA มีการคำนวณการประเมินความถูกต้อง (Accuracy Assessment) ที่อิงหลักการทางสถิติและแสดงเป็นค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error) ตามระดับความเชื่อมั่นหนึ่ง ๆ มีหน่วยเป็นระยะภาคพื้นดิน โดยมีขั้นตอนดังนี้

๑) เปรียบเทียบค่าพิกัดทางราบของจุดตรวจสอบบนภาพออร์โธรีจริงกับค่าพิกัดของจุดเดียวกันจากการรังวัดในสนาม

๒) หาผลต่างระหว่างค่าพิกัดทางราบของจุดตรวจสอบบนภาพออร์โธรีจริงกับค่าพิกัดของจุดเดียวกันจากการรังวัดในสนาม

๓) ใช้ค่าทางสถิติ Root Mean Square Error (RMSE) เพื่อให้ได้ความถูกต้องที่ความเชื่อมั่น ๖๘% โดยใช้สมการดังนี้

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{\sum (X_{data\ i} - X_{check\ i})^2}{n}} \quad \text{สมการที่ ๑๒}$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{\sum (Y_{data\ i} - Y_{check\ i})^2}{n}} \quad \text{สมการที่ ๑๓}$$

โดย

$RMSE_x$ คือ ค่า Root Mean Square Error ทางแกน x

$RMSE_y$ คือ ค่า Root Mean Square Error ทางแกน y

$\sqrt{\quad}$ คือ เครื่องหมาย Square Root

$X_{data\ i}$, $Y_{data\ i}$ เป็นค่าพิกัดของจุดทดสอบที่ i ในชุดข้อมูล

$X_{check\ i}$, $Y_{check\ i}$ เป็นค่าพิกัดของจุดทดสอบที่ i ที่ใช้เป็นค่าอ้างอิงที่ได้จากการรังวัดมาตรฐานภาคพื้นดิน

n คือ จำนวนจุดที่ใช้ทดสอบทั้งหมด

i คือ จุดทดสอบเริ่มจาก ๑ ถึง n

ความคลาดเคลื่อนทางราบของจุดที่ i คือ

$$\sqrt{(X_{data\ i} - X_{check\ i})^2 + (Y_{data\ i} - Y_{check\ i})^2} \quad \text{สมการที่ ๑๔}$$

RMSE ทางราบ คือ

$$RMSE_r = \sqrt{\frac{\sum((X_{data} - X_{check})^2 + (Y_{data} - Y_{check})^2)}{n}}$$

สมการที่ ๑๕

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

สมการที่ ๑๖

๔) คำนวณความถูกต้อง (Accuracy) ซึ่งตำแหน่ง ที่ระดับความเชื่อมั่น ๙๕% สามารถคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$Accuracy_r = ๑.๗๓๐๘ \times RMSE_r$$

สมการที่ ๑๗

๔.๓.๒ มาตรฐาน the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)

มาตรฐาน ASPRS เป็นมาตรฐานที่กำหนดเพื่อใช้กับการประเมินแผนที่ รายงานความถูกต้องของข้อมูลเป็นค่าความถูกต้องภาคพื้นดิน (Ground Scale Accuracy) โดยใช้ค่า RMSE เป็นค่าแสดงขีดจำกัดสูงสุดที่ยอมรับให้เกิดได้เมื่อนำข้อมูลเชิงพื้นที่นั้นไปทำเป็นแผนที่ที่ขนาดมาตราส่วนหนึ่ง ๆ กล่าวคือ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบได้ว่าข้อมูลที่ประเมินนั้นสอดคล้องกับแผนที่ที่ระดับมาตราส่วนใด โดยสามารถเปรียบเทียบได้ดังนี้

ตารางที่ ๑ แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่า RMSE กับมาตราส่วนของแผนที่ ตามมาตรฐาน ASPRS (FGDC,๑๙๙๘)

ค่าขีดจำกัดความถูกต้องสูงสุดของ RMSE (เมตร) Accuracy limiting RMSE (meters)	มาตราส่วนแผนที่ (Map Scale)
๐.๐๑๒๕	๑:๕๐
๐.๐๒๕	๑:๑๐๐
๐.๐๕๐	๑:๒๐๐
๐.๑๒๕	๑:๕๐๐
๐.๒๕	๑:๑,๐๐๐
๐.๕๐	๑:๒,๐๐๐
๑.๐๐	๑:๕,๐๐๐
๑.๒๕	๑:๕,๐๐๐
๒.๕๐	๑:๑๐,๐๐๐
๕.๐๐	๑:๒๐,๐๐๐

บทที่ ๕ ผลการดำเนินงาน

๕.๑ การบินถ่ายภาพด้วยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV)

จากการทดสอบการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ มีการบินถ่ายภาพทั้งหมด ๓๓ บล็อก แต่ละบล็อกครอบคลุมพื้นที่ประมาณ ๕๐๐ เมตร x ๕๐๐ เมตร โดยมีส่วนซ้อน (Overlap) ๘๐ เปอร์เซ็นต์ และส่วนเกย (Sidelap) ๘๐ เปอร์เซ็นต์ บินถ่ายภาพที่ความสูง ๒๐๐ เมตร ครอบคลุมพื้นที่ ๘ ตารางกิโลเมตร หรือประมาณ ๕,๐๐๐ ไร่ ถ่ายภาพทางอากาศเป็นจำนวนทั้งสิ้น ๒,๑๘๓ ภาพ จำนวนภาพที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับมีจำนวนมากกว่าภาพถ่ายทางอากาศที่ใช้ในการทำภาพถ่ายออร์โธรีของกรมพัฒนาที่ดิน และมีรายละเอียดและความคมชัดของภาพสูง โดยแต่ละภาพมีความละเอียด ๑๒ ล้านพิกเซล (Pixel) และมีขนาดประมาณ ๘ เมกะไบท์(Mb)



รูปที่ ๕๐ แสดงจุดขึ้นบินและบล็อกของการบินถ่ายภาพทั้งหมดในโครงการ

๕.๒ การจัดทำหมุดควบคุมภาพถ่าย

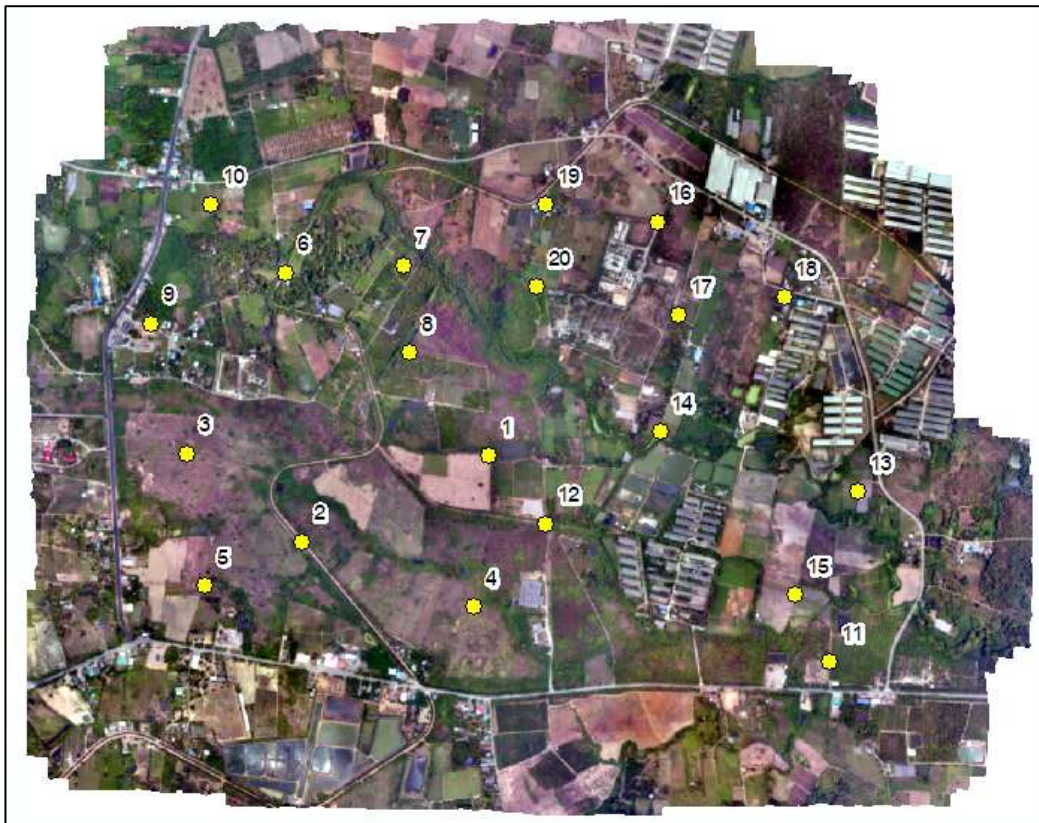
หมุดควบคุมภาพถ่ายจะต้องอ้างอิงจากหมุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Point : GCP) ของหน่วยงานราชการที่ได้จัดทำไว้ เช่นหมุดของกรมแผนที่ทหาร หรือหมุดของกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ โดยในการรังวัดหมุดควบคุมจะใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS/GNSS ชนิด ๒ ความถี่ และรังวัดโดยใช้วิธีการจลนได้ค่าพิกัดทันที ณ เวลารังวัด (Real Time Kinematic: RTK) โดยจะดำเนินการสร้างหมุดควบคุมภาพถ่ายทางอากาศ ในบริเวณที่สามารถมองเห็นได้ชัดเจน ซึ่งในโครงการนี้ เลือกใช้เป้าที่ทำจากไวนิลสีขาวแดงสลับเป็นตารางหมากรุก ขนาด ๑.๐๐ x ๑.๐๐ เมตร ในกรณีที่เป็นพื้นที่ธรรมชาติ และการทำสัญลักษณ์บนพื้นผิวจราจรในกรณีที่เป็น พื้นคอนกรีตโดยการพ่นสี และอ้างอิงค่าพิกัดจากหมุดควบคุมของโครงการบริหารทรัพยากรธรรมชาติและทรัพย์สินของกระทรวงเกษตร หมายเลข A๑๐๔๕๓๐ ซึ่งมีค่าพิกัดและค่าระดับ โดยได้ดำเนินการรังวัดหมุดควบคุมทั้งสิ้น ๑๖ จุด จุดตรวจสอบ ๒๐ จุด และ Base Station ๑ จุด



รูปที่ ๕๑ แสดงการรังวัด BASE STATION ภายในโรงเรียนวัดน้ำพุ



รูปที่ ๕๒ แสดงการรังวัดหมุดควบคุมภาพถ่ายและจุดตรวจสอบ

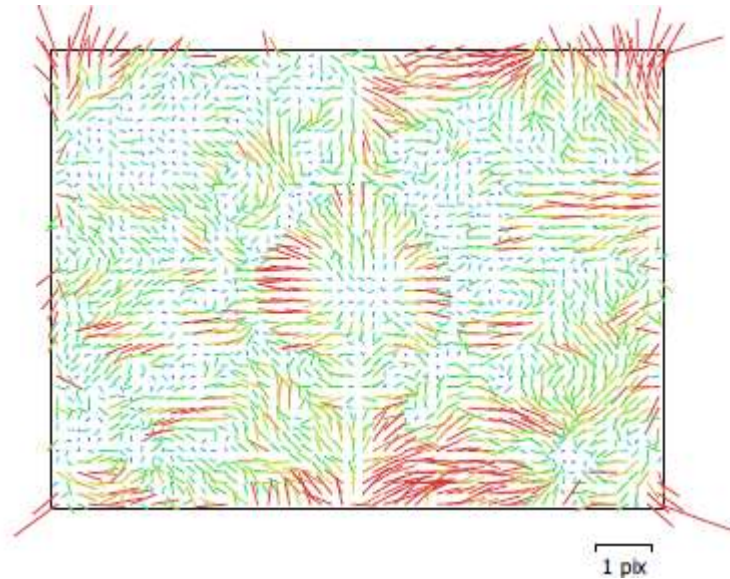


รูปที่ ๕๓ แสดงตำแหน่งจุดควบคุมภาพถ่าย (บน) และจุดตรวจสอบ (ล่าง)

๕.๓ การจัดทำภาพถ่ายออร์โธรีโอสเชิงเลข และแบบจำลองระดับสูงจากเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV)

๕.๓.๑ การวัดสอบกล้องถ่ายภาพ

การวัดสอบกล้องเพื่อหาองค์ประกอบภายในของกล้องถ่ายภาพ (interior orientation) ซึ่งเป็นค่าการจัดวางข้อมูลภาพถ่ายที่มีความสัมพันธ์กับทิศทางแนวนอน นอกจากนี้ กระบวนการวัดสอบยังใช้หาค่าพารามิเตอร์เพื่อนำมาใช้ในการแก้ไขค่าความคลาดเคลื่อนของเลนส์กล้องที่บันทึกภาพถ่าย ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการปรับแก้เป็นไปดังรายละเอียดในรูปที่ ๕๔



	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
F	2399.47	0.54	1.00	-0.11	-0.09	-0.56	-0.00	-0.07	0.07	0.07	0.00	-0.18
Cx	-16.8452	0.22		1.00	-0.01	0.10	0.05	0.05	-0.06	0.06	0.78	0.02
Cy	-37.5522	0.39			1.00	0.19	-0.08	0.04	-0.05	0.05	-0.00	0.30
B1	61.185	0.32				1.00	-0.01	0.01	0.00	-0.04	0.09	0.29
B2	-3.55552	0.27					1.00	0.01	-0.01	0.01	0.05	-0.22
K1	-0.00965922	7.2e-05						1.00	-0.96	0.91	0.04	0.02
K2	0.01035	0.00017							1.00	-0.98	-0.05	-0.01
K3	0.00893538	0.00012								1.00	0.07	-0.00
P1	-9.93926e-05	3.2e-05									1.00	0.02
P2	-0.000374802	4.4e-06										1.00

โดยที่

Cx Cy คือ จุดมูขยสำคัญ

B๑ และ B๒ คือ สัมประสิทธิ์ความต่างของมาตราส่วน

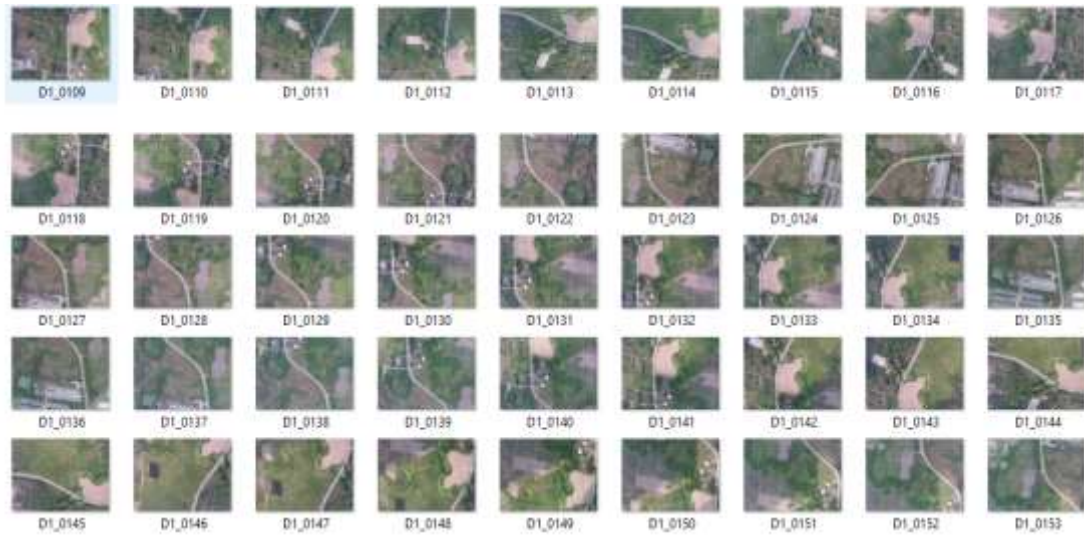
K๑ K๒ และ K๓ คือ สัมประสิทธิ์ของความเพี้ยนตามแนวรัศมี

P๑ และ P๒ คือ สัมประสิทธิ์ของความเพี้ยนตามแนวเส้นสัมผัส

รูปที่ ๕๔ แสดงความคลาดเคลื่อนของเลนส์และพารามิเตอร์ในการปรับแก้

๕.๓.๒ การสกัดหาข้อมูลจุดสำคัญ การจับคู่ภาพ และการสร้าง Auto tie points จากสมการสภาวะร่วมเส้น

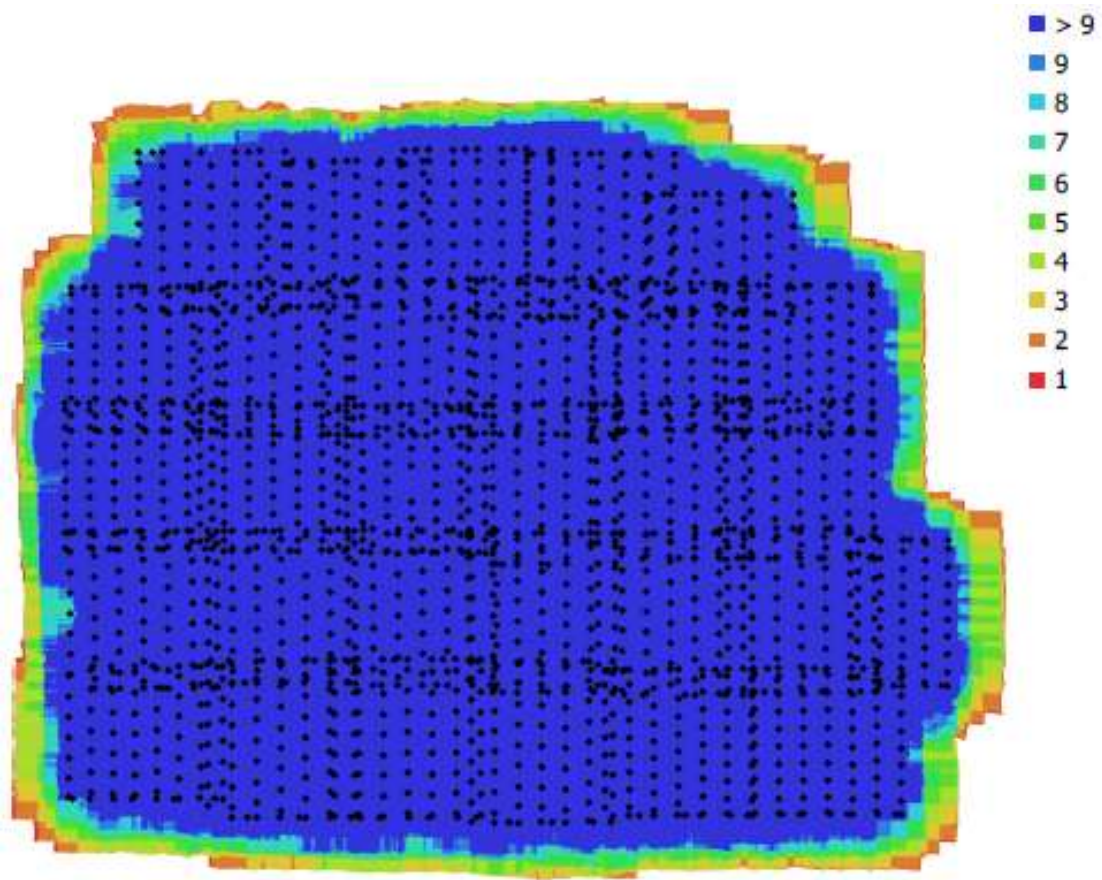
การสกัดหาข้อมูลจุดสำคัญ ใช้เทคนิคการค้นหาลักษณะเด่นของภาพแต่ละภาพ โดยคอมพิวเตอร์สามารถเข้าใจทัศนียภาพหรือแยกแยะวัตถุภายในภาพได้ ภาพที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับในโครงการมีความละเอียดของภาพสูงมากทำให้คอมพิวเตอร์สามารถระบุข้อมูลวัตถุได้อย่างชัดเจน และการจับคู่ภาพ (image matching) ได้อย่างถูกต้อง



รูปที่ ๕๕ แสดงตัวอย่างภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ (UAV)

การจับคู่ภาพคือนำข้อมูลจุดสำคัญ (จุดเดียวกันบนภาพแต่ละภาพที่นำมาจับคู่) จากการสกัดหาวัตถุภายในภาพ ซึ่งข้อมูลจุดสำคัญที่สร้างขึ้นมาจะต้องไม่ขึ้นอยู่กับขนาดภาพ การหมุน และมุมมอง เพื่อนำมาใช้จับคู่ภาพและหาความสัมพันธ์ของวัตถุระหว่างภาพถ่ายได้อย่างแม่นยำ วิธีการประมวลผลการจับคู่ภาพจะใช้คอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผลหาปริมาณค่าในมิติขนาดและระยะทาง คำนวณหาตำแหน่งของข้อมูล จุดสำคัญ และกำหนดทิศทางให้กับข้อมูลจุดสำคัญ เพื่อนำไปใช้ในการแทนค่าในสมการสภาวะร่วมเส้นเพื่อสร้าง สร้าง Auto tie points ต่อไป

เพื่อควบคุมคุณภาพของข้อมูลควรมีการจัดข้อมูล Tie point ที่ได้จากการประมวลผลจับคู่ภาพถ่ายในจำนวนที่น้อยกว่า ๓ ภาพ ผลของการจับคู่ภาพถ่ายในโครงการนี้มีการจับคู่ภาพส่วนใหญ่อยู่ที่ประมาณมากกว่าหรือเท่ากับ ๙ ภาพ แสดงถึงการจับคู่ภาพมีคุณภาพที่ดี ดังรายละเอียดในรูปที่ ๕๖



รูปที่ ๕๖ แสดงการจับคู่ภาพโดยใช้ข้อมูลจุดสำคัญจากการสกัดหาวัตถุภายในภาพ

การสร้าง Auto tie points จากสมการสภาวะร่วมเส้น เป็นกระบวนการที่นำข้อมูลลำแสงที่ฉายลงบนภาพถ่ายที่ถูกบันทึกโดยกล้อง ถ่ายภาพทางอากาศในจำนวนมาก มาทำการประมวลผลในการคำนวณทั้งการเล็งสกัดยอนและ กระบวนการเล็งสกัด ซึ่งการเล็งสกัดยอนคือกระบวนการในการหาค่าองค์ประกอบการจัดภาพภายนอก ทำให้ทราบตำแหน่งและการวางตัวของภาพถ่ายเทียบกับระบบพิกัดภาคพื้นดิน และในส่วนของการทำกระบวนการเล็งสกัดจะเป็นกระบวนการในการคำนวณตำแหน่งและการวางตัวของ ภาพถ่ายคู่ซ้อนสามมิติ รวมไปถึงกระบวนการเล็งสกัดนี้ยังใช้หาค่าพิกัด

บนพื้นหลักฐานจริง ทั้งนี้การประมวลผลโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศจะทำการประมวลผลทั้งการ
เล็งสกัดย้อนและการเล็งสกัด โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สมการสถานะร่วมเส้นนำมาใช้ใน
การปรับแก้และคำนวณค่าพิกัดภาคพื้นดินที่ไม่ทราบค่าซึ่งได้จากกระบวนการเล็งสกัด รวมไปถึง
คำนวณปรับแก้ค่าองค์ประกอบการจัดภาพภายนอกในแต่ละภาพถ่าย

จากการประมวลผลตามโครงการในครั้งนี้ ได้จำนวน Tie point ทั้งหมด ๖๘๖,๙๗๑ จุด
แสดงผลตามรูปที่ ๕๗



รูปที่ ๕๗ แสดงจำนวน tie points ที่ได้จากการประมวลผล

๕.๓.๓ การปรับแก้ค่าพิกัดด้วยจุดควบคุมภาพถ่าย

การปรับแก้ค่าพิกัดตำแหน่งด้วยจุดควบคุมภาพถ่าย คือ การนำเข้าและรังวัดจุดควบคุมภาพถ่ายเพื่อใช้ในปรับแก้ และทำการคำนวณค่าองค์ประกอบภายนอกของภาพ (Exterior orientation) ค่าการวางตัวของภาพถ่ายใหม่ เมื่อปรับแก้ค่าพิกัดด้วยจุดควบคุมภาพถ่ายแล้ว จะทำให้ Auto tie points มีความถูกต้องเชิงตำแหน่งสูง และสามารถนำไปประมวลผลในขั้นตอนต่อไปได้ ซึ่งในโครงการนี้มีการวางหมุดควบคุมภาพ (GCP) จำนวน ๑๖ หมุด ดังแสดงในรูปที่ ๕๘ และดำเนินการรังวัดค่าพิกัดด้วยวิธีจิงคิน ณ เวลาจริง (Real Time Kinematic: RTK) โดยใช้หมุดของโครงการบริหารทรัพยากรธรรมชาติและทรัพยากรสิ่งแวดล้อมของกระทรวงเกษตร หมายเลข A๑๐๔๕๓๐ เป็นสถานีฐาน ผลการคำนวณปรับแก้ค่าพิกัดด้วยหมุดควบคุมภาพ แสดงในตารางที่ ๒



รูปที่ ๕๘ แสดงที่ตั้งของหมุดควบคุมภาพของโครงการ

ตารางที่ ๒ แสดงผลการคำนวณปรับแก้ค่าพิกัดด้วยหมุดควบคุมภาพ

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
gcp07	0.335852	-0.0934495	-0.67132	0.756439	0.009 (16)
gcp09	0.13775	-0.0235224	-0.379497	0.404409	0.015 (20)
gcp10	-0.133193	-0.075641	-0.182826	0.23851	0.011 (19)
gcp11	-0.0122362	0.146852	-0.140976	0.203935	0.013 (17)
gcp12	0.179857	-0.039163	0.455648	0.491424	0.009 (19)
gcp01	0.000397756	0.113557	-0.595198	0.605934	0.009 (17)
gcp02	0.0121194	0.0840609	-0.474774	0.482311	0.013 (35)
gcp03	0.0459946	-0.125649	0.445292	0.464961	0.010 (13)
gcp04	0.39697	-0.0432193	0.819561	0.911665	0.008 (23)
gcp05	-0.494217	0.0302361	0.284134	0.570874	0.013 (21)
gcp06	-0.135036	0.0184251	-0.966012	0.975579	0.015 (19)
gcp14	0.145905	0.0643673	0.361409	0.395029	0.015 (24)
gcp15	0.0689954	-0.250227	-0.550445	0.608575	0.014 (38)
gcp16	0.09245	0.139745	0.0575801	0.177175	0.018 (40)
gcp13	0.201577	-0.184807	1.06914	1.10356	0.015 (20)
Total	0.212849	0.114722	0.571497	0.620544	0.013

๕.๓.๔ การสร้างพอยท์คลาวด์แบบหนาแน่น (Dense Point Cloud)

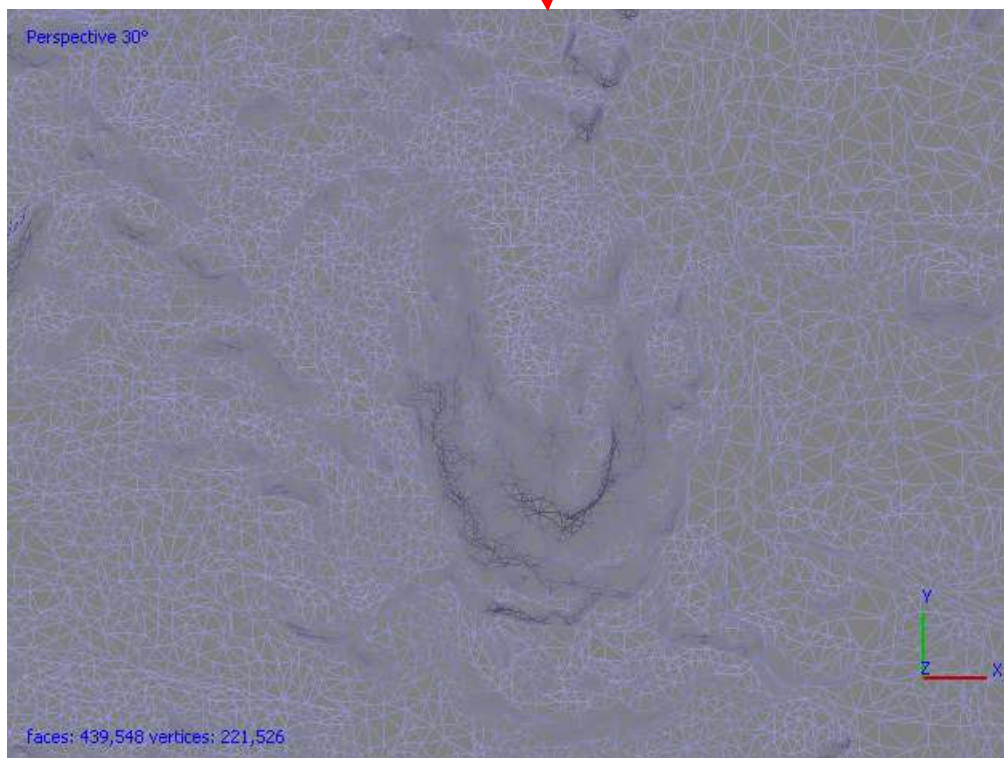
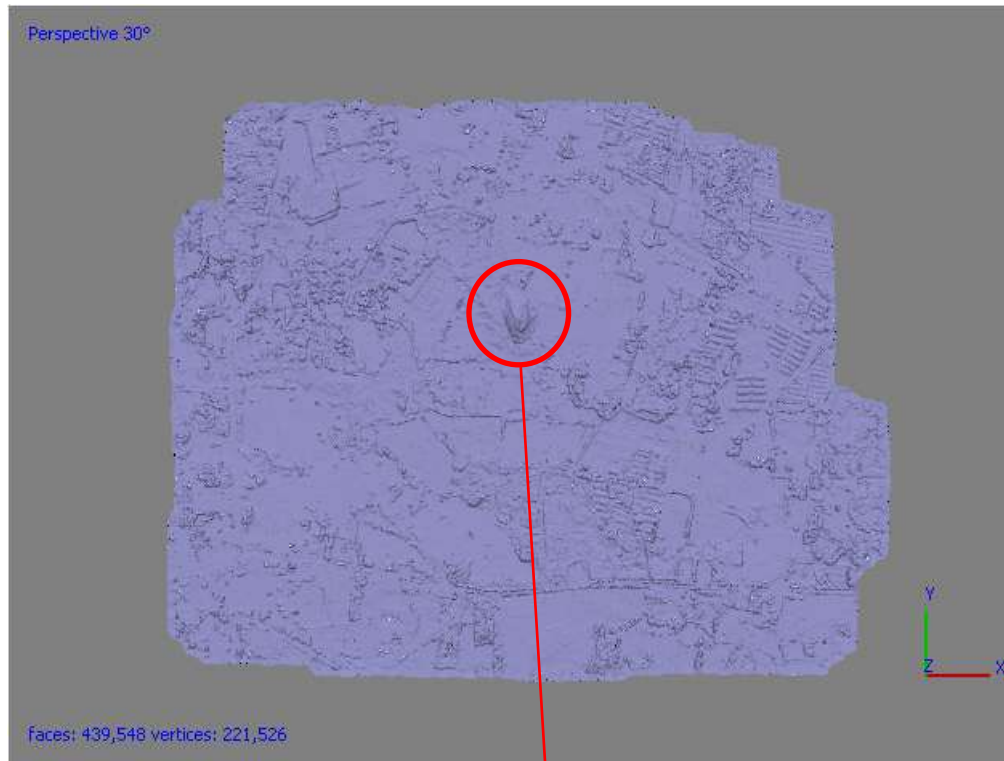
เป็นการเพิ่มจำนวน Tie Point ซึ่งหากทำการตั้งค่าพารามิเตอร์ในการประมวลผลในระดับสูง หรือตั้งค่าความละเอียดในการประมวลผลที่ระดับสูง จะทำให้ข้อมูลมีองค์ประกอบรายละเอียดที่หนาแน่น รวมไปถึงส่งผลให้ผลลัพธ์มีค่าความถูกต้องเชิงเรขาคณิตที่แม่นยำ จากการประมวลผลตามโครงการในครั้งนี้ได้ตั้งค่าความละเอียดในระดับสูงส่งผลให้เกิดจำนวน Dense Point Cloud ทั้งหมด ๑๙,๗๗๙,๖๘๕ จุด



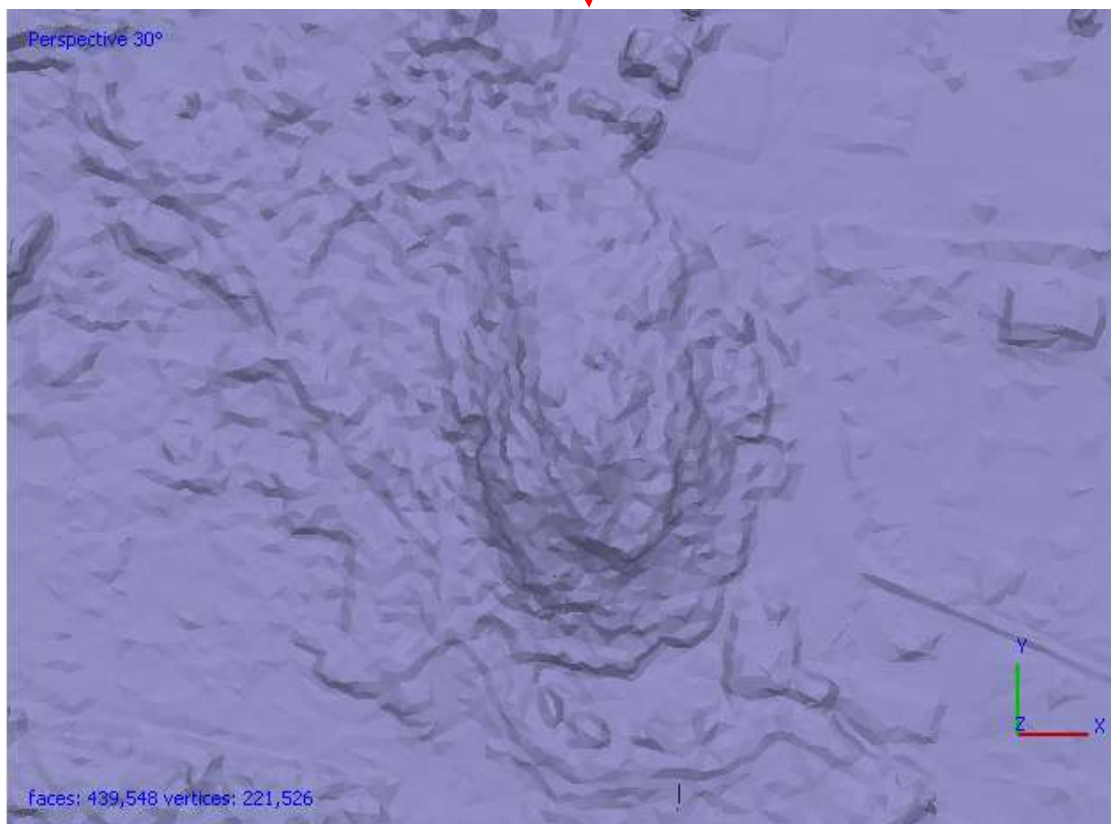
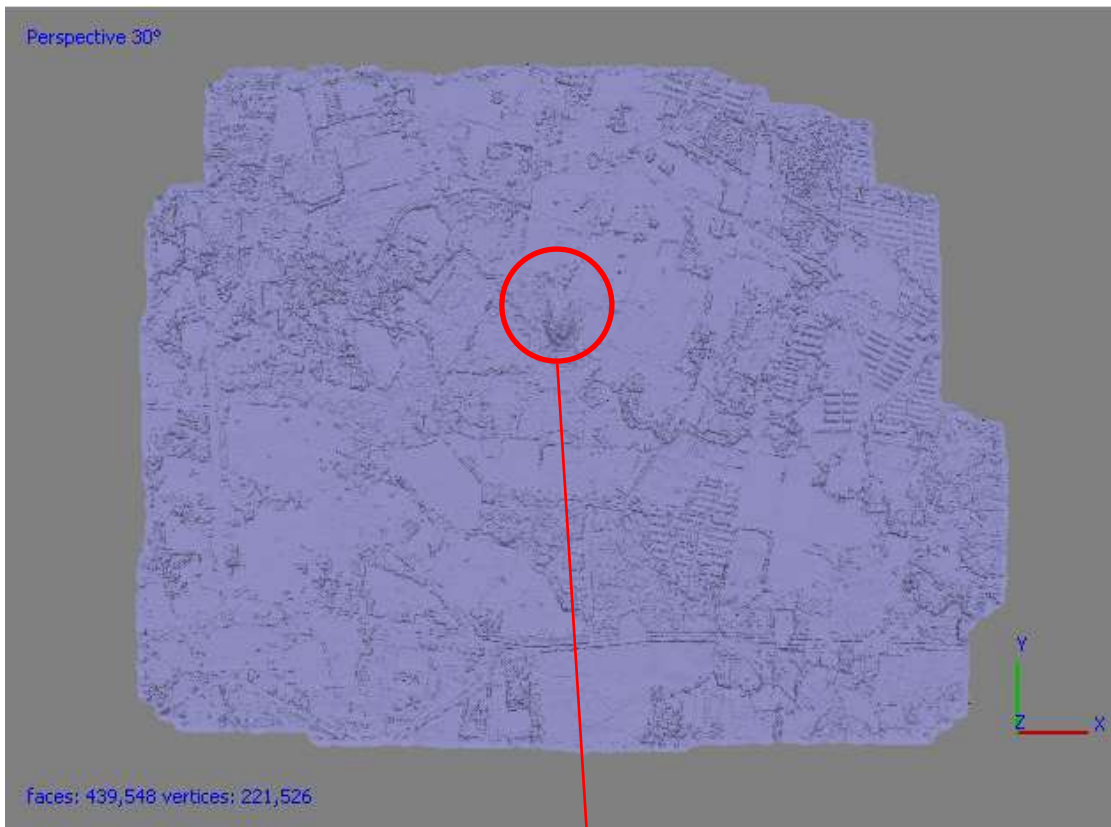
รูปที่ ๕๙ แสดงจำนวน Dense Point Cloud ที่ได้จากการประมวลผล

๕.๓.๕ การสร้าง Mesh Model

Mesh เป็นข้อมูลพื้นผิวที่มีโครงสร้างแบบเวกเตอร์ ที่ใช้แสดงลักษณะของรูปร่างของแบบจำลองที่ประกอบด้วยพื้นผิว ยอดมุม และขอบมุม โดยจะนำพอยท์คลาวด์แบบหนาแน่นมาประมวลผลเพื่อสร้าง Mesh ซึ่งจะนำไปใช้ในการประมวลผลแบบจำลองระดับสูงต่อไป ซึ่งในโครงการนี้สามารถสร้าง Mesh ที่มีพื้นผิวรวม ๔๓๙,๕๔๘ พื้นผิว และมียอดมุมทั้งสิ้น ๒๒๑,๕๒๖ มุม



รูปที่ ๖๐ แสดง Mesh Model ในรูปแบบ Wireframe



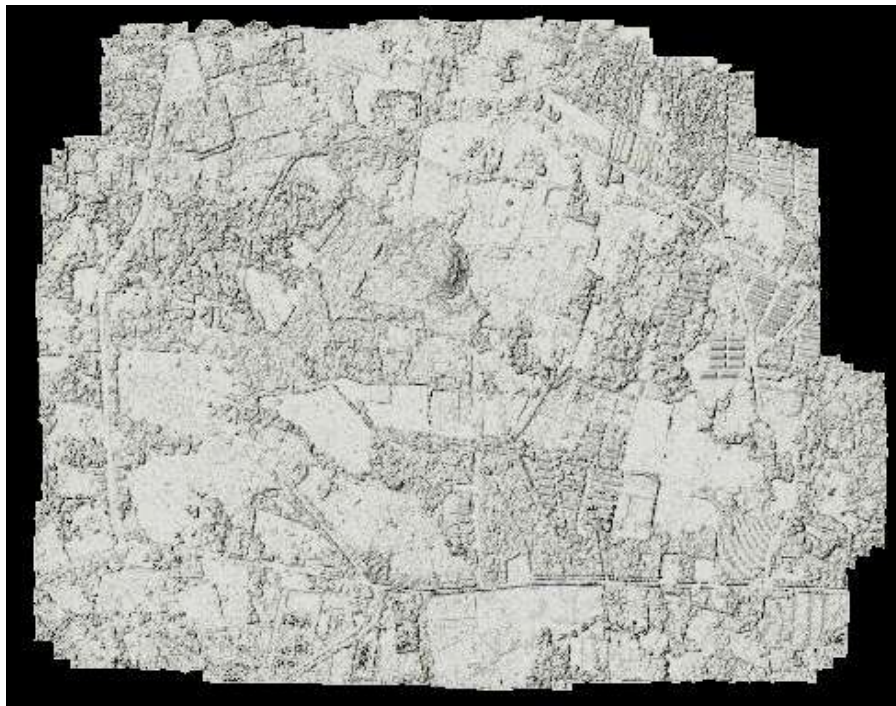
รูปที่ ๖๑ แสดงการ Render ในรูปแบบ Solid



รูปที่ ๖๒ แสดงการ Render ในรูปแบบ Shade

๕.๓.๖ การสร้างแบบจำลองระดับสูง (Digital Surface Model: DSM)

โปรแกรมจะทำการประมวลผลโดยอาศัย Mesh ที่ได้ทำการสร้างไว้แล้ว และความสัมพันธ์ของภาพถ่าย (image correlation) โดยทำการ Interpolate ข้อมูลทั้งหมดออกมาในรูปข้อมูลราสเตอร์พื้นผิวภูมิประเทศ ซึ่งในโครงการนี้สามารถประมวลผลเพื่อสร้างแบบจำลองระดับสูง (Digital Surface Model: DSM) ได้ผลลัพธ์ที่ความละเอียด ๕๐ เซนติเมตร



รูปที่ ๖๓ แสดงแบบจำลองระดับสูง และมุมมองแบบ Hill shade

๕.๓.๗ การจัดทำข้อมูลออร์โธรีจริง (True Orthophoto)

เมื่อได้แบบจำลองระดับสูง (Digital Surface Model: DSM) จากข้อ ๕.๓.๖ นำมาประมวลผลแก้ไขความผิดพลาดทางเรขาคณิต และตัดแก้ภาพเนื่องจากความสูงต่ำของภูมิประเทศ (Relief displacement) แล้วได้เป็นภาพออร์โธรีจริง ในโครงการนี้สามารถผลิตภาพออร์โธรีจริง (True orthophoto) ที่ความละเอียดจุดภาพ ๙ เซนติเมตร แล้วจึงนำมาผ่านขั้นตอนแปลงความละเอียดจุดภาพเพื่อให้เท่ากับขนาดของความละเอียดจุดภาพต่อพื้นที่ (GSD) อยู่ที่ ๑๐ เซนติเมตร ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของโครงการ



รูปที่ ๖๔ แสดงข้อมูลออร์โธรีจริง (True Orthophoto)

๕.๔ การตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพถ่ายออร์โธรีที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ

วิธีการในการตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่ภาพถ่ายจะอ้างอิงตามมาตรฐาน Federal Geographic Data Committee: FGDC

๕.๔.๑ มาตรฐาน National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA) ของ Federal Geographic Data Committee (FGDC)

๑) ค่าความละเอียดถูกต้องทางราบใช้ค่าสถิติของความถูกต้องเชิงตำแหน่ง ได้ดังนี้

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

$$= 0.057 \text{ เมตร}$$

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

$$= 0.042 \text{ เมตร}$$

RMSE ทางราบ คือ

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

$$= 0.070 \text{ เมตร}$$

๒) การคำนวณความละเอียดถูกต้อง (Accuracy) เชิงตำแหน่งตามมาตรฐาน NSSDA สามารถคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$Accuracy_r = 1.7608 \times RMSE_r$$

$$= 0.121 \text{ เมตร}$$

ตารางที่ ๓ แสดงการคำนวณในการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของจุดตรวจสอบจำนวน ๒๐ จุด

Point_ID	Map Derived Values (m)		Survey Check Point Values (m)		Residuals (Errors) (m)	
	E	N	E	N	Δ X	Δ Y
CHK01	568222.864	1495086.763	568222.922	1495086.815	-0.058	-0.052
CHK02	567596.208	1494799.141	567596.226	1494799.172	-0.017	-0.031
CHK03	567207.417	1495095.396	567207.436	1495095.418	-0.019	-0.022
CHK04	568168.950	1494580.730	568168.878	1494580.794	0.072	-0.064
CHK05	567268.108	1494651.600	567268.212	1494651.669	-0.103	-0.069
CHK06	567539.015	1495701.597	567539.046	1495701.633	-0.030	-0.036
CHK07	567933.358	1495722.999	567933.423	1495723.026	-0.065	-0.027
CHK08	567956.859	1495433.030	567956.821	1495433.008	0.038	0.022
CHK09	567089.760	1495530.113	567089.699	1495530.071	0.061	0.042
CHK10	567289.383	1495928.185	567289.435	1495928.217	-0.052	-0.032
CHK11	569363.749	1494397.025	569363.699	1494397.098	0.050	-0.073
CHK12	568411.830	1494859.978	568411.912	1494859.923	-0.082	0.055
CHK13	569457.595	1494965.836	569457.571	1494965.836	0.024	0.000
CHK14	568794.101	1495169.088	568794.189	1495169.125	-0.088	-0.037
CHK15	569245.661	1494622.045	569245.588	1494622.078	0.074	-0.033
CHK16	568788.299	1495870.888	568788.371	1495870.847	-0.072	0.041
CHK17	568855.305	1495558.523	568855.279	1495558.545	0.026	-0.022
CHK18	569210.339	1495617.293	569210.359	1495617.302	-0.021	-0.009
CHK19	568412.633	1495929.169	568412.612	1495929.116	0.021	0.053
CHK20	568380.022	1495653.487	568380.057	1495653.512	-0.035	-0.025
Number of Check Points					20	
RMSE (m)					0.057	
RMSEr (m)					0.070	
NSSDA Horizontal Accuracyr (ACCr) at 95% Conference Level					0.121	

๕.๔.๒ มาตรฐาน the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)

จากผลการคำนวณความละเอียดถูกต้อง (Accuracy) เปรียบเทียบตามมาตรฐาน NSSDA ตามข้อ ๕.๔.๑ ได้ค่า Accuracy_r = ๐.๑๒๑ เมตร เมื่อนำมาเทียบกับมาตราส่วนแผนที่ ตามมาตรฐาน ASPRS จะได้ว่าภาพออร์โธรีจริงที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ (UAV) มีมาตราส่วนแผนที่อยู่ที่ ๑:๕๐๐

ตารางที่ ๔ แสดงผลการเปรียบเทียบค่า RMSE กับ Map Scale ตามมาตรฐาน ASPRS

ค่าขีดจำกัดความถูกต้องสูงสุดของ RMSE (เมตร) Accuracy limiting RMSE (meters)	มาตราส่วนแผนที่ (Map Scale)
๐.๐๑๒๕	๑:๕๐
๐.๐๒๕	๑:๑๐๐
๐.๐๕๐	๑:๒๐๐
๐.๑๒๕	๑:๕๐๐
๐.๒๕	๑:๑,๐๐๐
๐.๕๐	๑:๒,๐๐๐
๑.๐๐	๑:๔,๐๐๐
๑.๒๕	๑:๕,๐๐๐
๒.๕๐	๑:๑๐,๐๐๐
๕.๐๐	๑:๒๐,๐๐๐

บทที่ ๖ สรุปผลการดำเนินการและข้อเสนอแนะ

๖.๑ ข้อมูลออร์โธรีจริง (True Orthophoto)

ผลของการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศจากเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ ทำให้ได้ข้อมูลออร์โธรีจริง (True Orthophoto) มีขนาดจุดภาพ (Pixel size) ๐.๑๐ เมตร เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับภาพถ่ายออร์โธรีเชิงเลขของกรมพัฒนาที่ดิน มาตรฐาน ๑: ๔,๐๐๐ ขนาดจุดภาพ ๐.๕ เมตร พบว่าข้อมูลออร์โธรีจริงจากเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ มีความละเอียด ความคมชัด และความเป็นปัจจุบันมากกว่าภาพถ่ายออร์โธรีเชิงเลขของกรมพัฒนาที่ดิน ทำให้สามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงข้อมูลการปลูกพืช และการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินได้เป็นอย่างดี



รูปที่ ๖๕ แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลออร์โธรีจริงปี ๒๕๖๑ และภาพถ่ายออร์โธรี ปี ๒๕๔๕ ที่มาตรฐาน ๑:๔๐๐๐



รูปที่ ๖๖ แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลออร์โธรีจริงปี ๒๕๖๑ และภาพถ่ายออร์โธรี ปี ๒๕๔๕
ที่มาตราส่วน ๑:๑๐๐๐



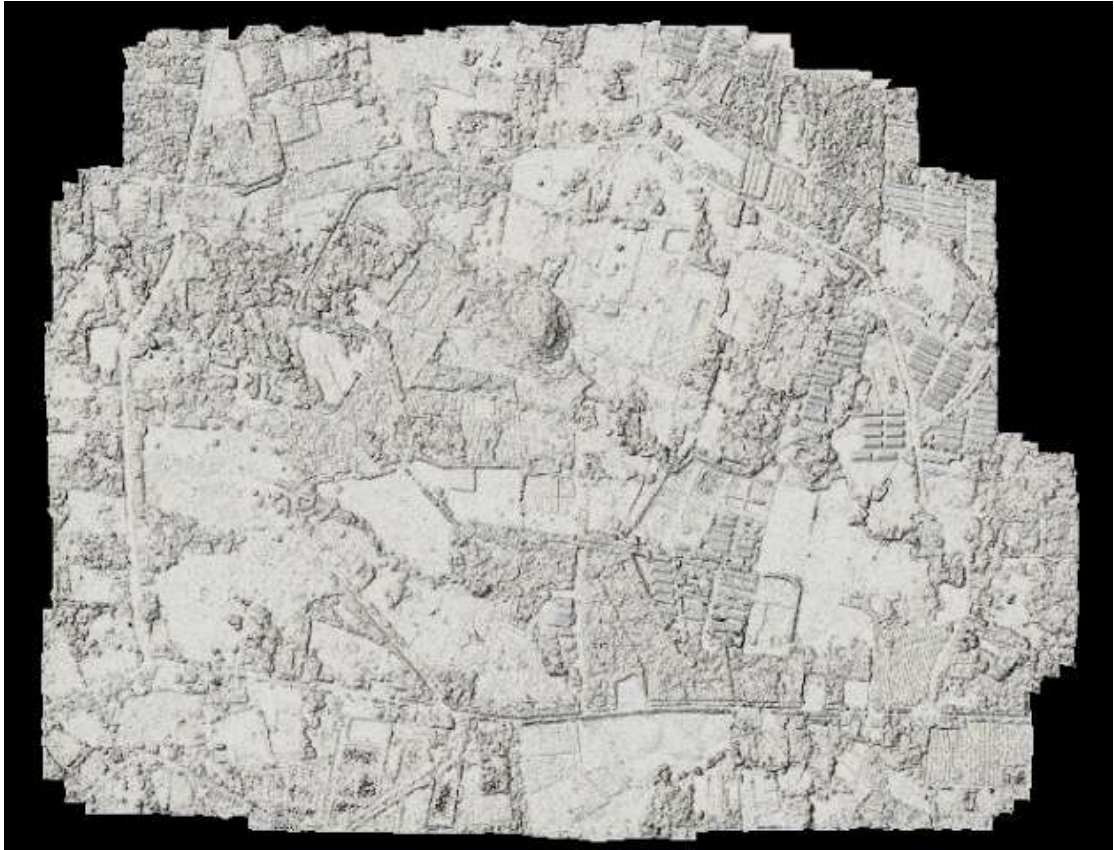
รูปที่ ๖๗ แสดงการเปรียบเทียบข้อมูลออร์โธรีจริงปี ๒๕๖๑ และภาพถ่ายออร์โธรี ปี ๒๕๔๕
ที่มาตราส่วน ๑:๕๐๐

๖.๒ แบบจำลองระดับสูง (Digital Surface Model: DSM)

ในส่วนของแบบจำลองระดับสูง (Digital Surface Model: DSM) ที่ผลิตจากเทคโนโลยีการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ซึ่งมีขนาดจุดภาพ (Pixel size) ๐.๕๐ เมตร เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model: DEM) ของกรมพัฒนาที่ดิน มาตราส่วน ๑:๔,๐๐๐ ขนาดจุดภาพ ๕ เมตร พบว่าแบบจำลองระดับสูงที่ผลิตจากเทคโนโลยีการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับแสดงรายละเอียดภูมิประเทศได้ชัดเจนมากกว่าแบบจำลองระดับสูงเชิงเลขของกรมพัฒนาที่ดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อนำแบบจำลองระดับสูงดังกล่าวผ่านกระบวนการ hill shade จะพบว่ารายละเอียดของพื้นที่ เช่น คันทนา แปลงนา บ่อน้ำ และอาคารจะปรากฏอย่างชัดเจน ข้อมูลแบบจำลองระดับสูงที่มีขนาดจุดภาพละเอียดจะสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทิศทางการไหลของน้ำ (Flow direction) หรือนำไปวิเคราะห์ความลาดชัน (Slope) ของพื้นที่ ซึ่งจะนำไปประโยชน์ต่อการวางแผนออกแบบระบบอนุรักษ์ดินและน้ำ หรือการป้องกันการชะล้างพังทลายของดิน (soil erosion)



รูปที่ ๖๘ แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองระดับสูง ปี ๒๕๖๑ (บน) กับแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข ปี ๒๕๔๕ (ล่าง)



รูปที่ ๖๙ แสดงการเปรียบเทียบ hill shade ที่ได้จากแบบจำลองระดับสูง ปี ๒๕๖๑ (บน)
กับแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข ปี ๒๕๕๖ (ล่าง)

๖.๓ การตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่ง

ผลการตรวจสอบความถูกต้องตามมาตรฐาน FGDC ของภาพถ่ายออร์โธรีที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ตรวจสอบโดยใช้วิธีเปรียบเทียบกับจุดตรวจสอบ มีค่าเท่ากับ ๐.๐๗๐ เมตร หรือประมาณ ๗ เซนติเมตร มีความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่ง ๐.๑๒๑ เมตร หรือประมาณ ๑๒ เซนติเมตร ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ ๙๕ และค่า RMSE มีความสัมพันธ์กับมาตราส่วนของแผนที่ตามมาตรฐาน ASPRS (FGDC, ๑๙๙๘) เปรียบเทียบได้กับแผนที่มาตราส่วน ๑:๕๐๐

๖.๔ ข้อเสนอแนะ

๖.๔.๑ การเปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดระหว่างอากาศยานไร้คนขับ (UAV) และดาวเทียมสำรวจทรัพยากร

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ทำให้ผู้ใช้งานสามารถกำหนดพื้นที่สำรวจและความละเอียดของภาพที่ต้องการได้ นอกจากนี้ยังสามารถส่งภาพมายังผู้ใช้งานได้แบบเป็นปัจจุบัน (Real time) ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการตรวจสอบ สถานการณ์ภัยพิบัติ หรือพื้นที่อันตรายที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าไปได้ เช่น หน้าผา พื้นที่น้ำท่วม และพื้นที่ดินถล่ม เป็นต้น ทั้งนี้ด้วยขนาดและลักษณะของอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ทำให้สามารถบินต่ำและถ่ายภาพได้ชัดเจนกว่าเครื่องบินหรือดาวเทียมโดยไม่มีเมฆบัง อย่างไรก็ตามการใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับมีข้อดี และข้อจำกัดดังแสดงในตารางที่ ๒ ดังนี้

ตารางที่ ๕ แสดงข้อดีและข้อจำกัดของอากาศยานไร้คนขับ (UAV)

ข้อดี	ข้อจำกัด
น้ำหนักเบา เคลื่อนย้ายง่าย	ระยะเวลาในการบินมีจำกัด
ราคาถูกและได้ภาพถ่ายที่มีความละเอียดสูง	มีข้อจำกัดในการบรรทุกกล้องและอุปกรณ์อื่นๆ
ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำ	กฎหมายและข้อกำหนดการใช้โดรนของประเทศ
สามารถบินได้ในความสูงหลายระดับ	ถูกจำกัดความสามารถการบินด้วยความเร็วลม
ถ่ายภาพในพื้นที่ที่คนหรือยานพาหนะอื่นไม่สามารถเข้าไปได้ตามกำหนดเวลาที่ต้องการ	โปรแกรมที่ใช้ควบคุมโดรนที่เหมาะสมมีจำกัด
สามารถถ่ายวิดีโอได้	ต้องอาศัยความรู้ทางด้านการสำรวจและทำแผนที่ รวมถึงการบินถ่ายภาพและการประมวลผล เพื่อให้ได้ภาพที่มีความถูกต้องเชิงตำแหน่ง
ให้ข้อมูล ณ ปัจจุบัน (Real time)	เนื่องจากภาพที่ถ่ายได้ครอบคลุมพื้นที่ได้น้อย จึงต้องใช้ภาพถ่ายจำนวนมากเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ของโครงการ

ในส่วนของการใช้ประโยชน์จากภาพถ่ายดาวเทียม เช่น ดาวเทียม Landsat Quickbird หรือไทยโชต ถึงแม้ว่าจะสามารถครอบคลุมพื้นที่ได้มากกว่า และมีการเก็บข้อมูลได้หลายช่วงคลื่นที่ตาของมนุษย์ไม่สามารถมองเห็นได้ แต่ด้วยข้อจำกัดของความละเอียดของภาพ การสั่งเก็บข้อมูลภาพต้องครอบคลุมพื้นที่ขั้นต่ำเกินกว่าพื้นที่ที่ต้องการ หรือภาพที่ต้องการอาจมีราคาสูง ทำให้ไม่สามารถตอบสนองทุกภารกิจได้ ดังรายละเอียดตามตารางที่ ๖

ตารางที่ ๖ แสดงข้อดีและข้อจำกัดของดาวเทียมสำรวจทรัพยากร

ข้อดี	ข้อจำกัด
ครอบคลุมพื้นที่ได้เป็นบริเวณกว้าง ทำให้มองภาพรวมได้ง่าย และได้ข้อมูลที่ค่อนข้างทันต่อเหตุการณ์	ต้องใช้งบลงทุนในเบื้องต้นและงบดำเนินการสูง โดยเฉพาะในการจัดหาสถานีติดตั้งและการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัด เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีระดับสูง
ตรวจวัดได้ในหลายระดับของความละเอียด ทั้งความละเอียดเชิงพื้นที่และความละเอียดเชิงรังสี ขึ้นอยู่กับความสามารถของอุปกรณ์ และระดับความสูงของสถานีติดตั้ง	ต้องใช้บุคลากรที่ได้รับการฝึกฝนมาโดยเฉพาะในการดำเนินงาน เนื่องจากต้องการผู้ที่มีความรู้พื้นฐานที่ดีมากพอสำหรับการบริหารจัดการระบบ และการใช้ประโยชน์จากข้อมูลที่ได้
ตรวจวัดได้อย่างต่อเนื่อง ทั้งในช่วงกลางวันและช่วงกลางคืน โดยเฉพาะการตรวจวัดในช่วงเทอร์มอลอินฟราเรด และ ไมโครเวฟ ซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้แสงอาทิตย์ช่วยในการสำรวจ	ข้อมูลที่ได้บางครั้งยังขาดความละเอียดเชิงพื้นที่มากพอ เนื่องจากเป็นการสำรวจจากระยะไกลทำให้การศึกษาในบางเรื่องมีข้อจำกัด
ตรวจวัดได้ในหลายช่วงคลื่น โดยเฉพาะในช่วงแสงขาวที่ตามนุษย์มองเห็นเท่านั้น ทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุหรือพื้นที่ที่ศึกษาได้มากกว่า การรับรู้ด้วยตามนุษย์ตามปกติ	ข้อมูลที่ได้บางครั้งยังมีความคลาดเคลื่อนสูง ซึ่งเกิดมาได้จากหลายสาเหตุ ทั้งส่วนที่เกิดจากความบกพร่องของตัวระบบเอง และส่วนที่เกิดมาจากสภาวะแวดล้อมขณะทำการตรวจวัด
ตรวจวัดข้อมูลในพื้นที่ที่เข้าถึงทางพื้นดินลำบากได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ต้องการเพียงสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาจากพื้นที่ที่ศึกษาเท่านั้น	

ดังนั้น การเลือกใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) หรือ ดาวเทียมสำรวจทรัพยากร จึงต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ในการใช้งาน เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดและประหยัดงบประมาณ โดยมีรายละเอียดการเปรียบเทียบคุณสมบัติและข้อจำกัดระหว่างอากาศยานไร้คนขับ (UAV) และ ดาวเทียมสำรวจทรัพยากร ดังตารางที่ ๗

ตารางที่ ๗ แสดงการเปรียบเทียบระหว่างภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดจุดภาพต่ำกว่า ๑ เมตร และภาพถ่ายความละเอียดสูงจากอากาศยานไร้คนขับ (UAV)

ภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดจุดภาพต่ำกว่า ๑ เมตร	ภาพถ่ายความละเอียดสูงจากอากาศยานไร้คนขับ (UAV)
เมฆ และอนุภาคของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศ ส่งผลต่อคุณภาพของภาพ	เมฆ และอนุภาคของฝุ่นละอองในชั้นบรรยากาศ ไม่มีผลกระทบต่อภาพถ่าย
ใช้เวลาในการประมวลผลภาพอย่างน้อย ๑ สัปดาห์	ใช้เวลาในการประมวลผลภาพในระดับชั่วโมง ขึ้นกับขนาดของพื้นที่
การถ่ายภาพต้องอยู่ในช่วงเวลาที่จำกัดขึ้นกับความถี่ของวงโคจรที่จะวนกลับมาในพื้นที่เดิม	สามารถถ่ายภาพได้ในช่วงเวลาตามที่ต้องการ
ความละเอียดจุดภาพของภาพขาวดำ (panchromatic) ที่ดีที่สุดประมาณ ๓๐ เซนติเมตร และภาพสี (multi-spectral) อยู่ที่ ๑ - ๓๐ เมตร	ความละเอียดจุดภาพอยู่ในระดับเซนติเมตร
การส่งถ่ายภาพต้องมีเนื้อที่ขั้นต่ำ ๑๐ - ๒๕ ตารางกิโลเมตร	สามารถจัดทำภาพถ่ายในพื้นที่เล็ก ซึ่งมีต้นทุนต่ำกว่า ภาพถ่ายดาวเทียม
ได้ภาพในแนวตั้งเท่านั้น	สามารถถ่ายภาพพื้นที่เดียวกันได้จากหลายๆ มุม ซึ่งจะมีประโยชน์มากกว่า



รูปที่ ๗๐ แสดงการเปรียบเทียบระหว่างภาพถ่ายดาวเทียมที่ใช้โปรแกรม google earth (ซ้าย) ภาพที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ (UAV) (ขวา)

๖.๔.๒ การบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ UAV ทั้งในพื้นที่ที่มีสภาพภูมิประเทศแบบที่ราบและมีความลาดชันสูง ซึ่งทำให้ได้ภาพถ่ายออร์โธรีเพื่อรองรับ และสนับสนุนภารกิจของกรมพัฒนาที่ดิน ในการวางแผนการปฏิบัติงาน จึงควรทำการบินถ่ายภาพในบริเวณอื่น ๆ ที่ต้องการภาพถ่ายความละเอียดสูงที่มีความถูกต้องและเป็นปัจจุบัน เช่น บริเวณเขตพัฒนาที่ดิน หรือ บริเวณที่จะประกาศเป็นเขตอนุรักษ์ดินและน้ำตามพระราชบัญญัติพัฒนาที่ดิน พ.ศ. ๒๕๕๑

๖.๔.๓ ควรขยายผลเพื่อทำการบินถ่ายภาพโครงการต่าง ๆ ของกรมพัฒนาที่ดิน ที่มีการปฏิบัติงานอยู่ทางภาคต่างๆ ของประเทศไทย เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินภายในโครงการอย่างต่อเนื่อง ให้มีการใช้ประโยชน์ที่ดินตามแผนการใช้ที่ดินที่วางไว้ ซึ่งต้องอาศัยแผนที่ที่มีรายละเอียดสูง มีความถูกต้องตามมาตรฐาน และมีความทันสมัย ในการดำเนินการ การขยายผลศึกษาดังกล่าวจะช่วยพัฒนาและสนับสนุนงานตามโครงการเหล่านี้ ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

๖.๔.๔ ความสูงในการบินถ่ายและอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพ เช่น คุณลักษณะ ความละเอียดของกล้อง ระบบนำร่อง (GPS/GNSS) ระบบรับรู้การทรงตัว (IMU) และแบตเตอรี่ เป็นตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อความคมชัด และความละเอียดถูกต้องเชิงตำแหน่ง จึงควรมีการทดสอบอุปกรณ์ และระดับของการบินถ่ายภาพ เพื่อศึกษาความเหมาะสมและจุดคุ้มทุนที่สุดในการนำมาประยุกต์ใช้กับภารกิจของกรมพัฒนาที่ดิน

๖.๔.๕ ในการถ่ายภาพจาก UAV มีส่วนซ้อน (Overlap) และส่วนเกย (Sidelap) ซึ่งสามารถนำมา

จัดทำแบบจำลองระดับสูงเชิงเลขได้ จึงควรมีการศึกษาถึงความละเอียดถูกต้องและความเป็นไปได้ในการนำแบบจำลองระดับสูงที่ได้จากการถ่ายภาพด้วย UAV ดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับงานของกรมพัฒนาที่ดิน เช่น การประมาณค่าการเกิดการชะล้างพังทลายของดิน เพื่อประโยชน์ในการวางแผนและออกแบบระบบอนุรักษ์ดินและน้ำ การตรวจสอบพื้นที่ความลาดชันเกินร้อยละ ๓๕ เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- เฉลิมชนม์ สติระพจน์. ๒๕๖๑. งานรังวัดจีพีเอสขั้นสูง. เอกสารประกอบการฝึกอบรมเชิงปฏิบัติการ หลักสูตร “การรังวัดด้วยระบบดาวเทียม GNSS และการประยุกต์ใช้ในงานรังวัดความสูงร่วมกับแบบจำลอง TGM๒๐๑๗”, กรมพัฒนาที่ดิน ๑๗ ธันวาคม ๒๕๖๑.
- ณัฐพร เห็นเจริญเลิศ และ ขจิตพรรณ กฤตพลวิมาน. ๒๕๕๖. เทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ แห่งชาติประจำปี ๒๕๕๖ *GeoInfoTech ๒๐๑๓*. ออนไลน์. สืบค้นจากอินเทอร์เน็ต, <http://www.stou.ac.th/Schools/sst/main/KM/KM%๒๐Post/๕๖/GeoInfoTech๒๐๑๓.pdf>, สืบค้นเมื่อ ๑๒ พฤษภาคม ๒๕๕๗.
- ไพศาล สันติธรรมนนท์. ๒๕๕๓. การรังวัดด้วยภาพดิจิทัล. พิมพ์ครั้งที่ ๑. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไพศาล สันติธรรมนนท์. ๒๐๑๒. การทำแผนที่และข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับชนิดเบา. ออนไลน์. สืบค้นจากอินเทอร์เน็ต, <https://docs.google.com/file/d/๐B๔๓F๒๐JQnMOMeHowTolGTEFyZGc/edit?pli=๑>, สืบค้นเมื่อ ๑๒ พฤษภาคม ๒๕๕๗.
- ไพศาล สันติธรรมนนท์, ภาณุ อุทัยศรีและธีรภัทร ชื่นชม. ๒๐๑๒. *A Test Field for UAV Mapping ๒๐๑๒*. ออนไลน์. สืบค้นจากอินเทอร์เน็ต, <https://docs.google.com/file/d/๐B๔๓F๒๐jQnMOMaDRBcURDMUNBeVE/edit?pli=๑>, สืบค้นเมื่อ ๑๒ พฤษภาคม ๒๕๕๗.
- อารมณ์ พลเสน. ๒๐๑๑. รู้จักกับอากาศยานไร้คนขับหรือยูเอวี (*Unmanned Aerial Vehicle: UAV*). สถาบันเทคโนโลยีป้องกันประเทศ (องค์การมหาชน) กระทรวงกลาโหม. ออนไลน์. สืบค้นจากอินเทอร์เน็ต, http://dtad.dti.or.th/index.php?option=com_content&view=article&id=๑๒๙:nmanned-aerial-vehicle-intro&catid=๘:special-article&Itemid=๑๐, สืบค้นเมื่อ ๒๔ เมษายน ๒๕๕๗.
- Ahmad, A. ๒๐๑๑. *Digital Mapping Using Low Altitude UAV*. *Pertanika J. Sci. & Technol.* ๑๙ (June):๕๑ – ๕๘.
- Canadian Aviation Regulations (CARs). *Unmanned Air Vehicle (UAV)[Online]*. ๒๐๐๕. Available from : [http://www.tc.gc.ca/civilaviation/general/recavi/Brochures/uav.htm#Definition\[๒๐๐๖, June ๒๔\]](http://www.tc.gc.ca/civilaviation/general/recavi/Brochures/uav.htm#Definition[๒๐๐๖, June ๒๔])
- Eisenbeiss, H. ๒๐๐๔. A mini unmanned aerial vehicle (UAV): System overview and image acquisition. *International Workshop on Processing and Visualization Using High-Resolution Imagery*. Pitsanulok, Thailand, ๑๘-๒๐ November ๒๐๐๔.
- Federal Geographic Data Committee. ๑๙๙๘. *Geospatial Positioning Accuracy Standards, FGDC-STD-๐๐๗.๓-๑๙๙๘*. ออนไลน์. สืบค้นจากอินเทอร์เน็ต, <http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-Standards-projects/accuracy/part๓/chapter๓> , สืบค้นเมื่อ ๘ พฤษภาคม ๒๕๕๗.

- Grant, M S., Katzberg, S. J., & Lawrence, R. W. ๒๐๐๕. *GPS Remote Sensing Measurements Using Aerosonde UAV*. AIAA ๒๐๐๕-๗๐๐๕, Arlington, VA.
- Herwitz, S. R., Johnson, L. F., Higgins, R. G., Leung, J. G., & Dunagan, S. E. ๒๐๐๒. *Precision agriculture as a commercial application for solar-powered unmanned aerial vehicles*. AIAA ๒๐๐๒-๓๔๐๔. Portsmouth, VA.
- Mills, J. P., & Newton, I. (๑๙๙๖). *A new approach to the verification and revision of Large scale mapping*. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, ๕๑, ๑๗-๒๗.
- Siebert S, Teizer J.(๒๐๑๔). *Mobile ๓D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system*. Automation in Construction ๔๑, ๑-๑๔.
- Rokhmana, C.A.(๒๐๑๕). *The potential of UAV-based remote sensing for supporting precision agriculture in Indonesia*. Procedia Environmental Science ๒๔, ๒๔๕-๒๕๓.
- Xi Chao-jian, Guo San-xue (๒๐๑๑). *Image Target Identification of UAV Based on SIFT*. Procedia Engineering ๑๕, ๓๒๐๕-๓๒๐๘.

ภาคผนวก ก

ตำแหน่งของหมุดควบคุมภาพและหมุดตรวจสอบ
งานบินถ่ายภาพและจัดทำแผนที่ภาพถ่ายออร์โธรี

ตำแหน่งของหมุดควบคุมภาพ งานบินถ่ายภาพและจัดทำแผนที่ภาพถ่ายออร์โธรี
 โครงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) กับแผนที่ภาพถ่ายออร์โธรี

Ground Control Point (GCP) Coordinate System

WGS ๘๔ / UTM zone ๔๗N

ITEM	NAME	EASTING	NORTHING	ELEVATION
๑	GCP-๐๑	๕๖๙๕๖๑.๒๗๒	๑๔๙๔๒๙๗.๕๑๓	๕๓.๒๗๕
๒	GCP-๐๒	๕๖๙๖๓๕.๔๔๒	๑๔๙๔๘๙๒.๓๒๒	๕๐.๓๐๗
๓	GCP-๐๓	๕๖๙๕๙๓.๑๗๓	๑๔๙๕๒๖๕.๖๖๒	๕๓.๙๗๖
๔	GCP-๐๔	๕๖๙๑๕๖.๒๔	๑๔๙๖๐๕๔.๓๙๑	๕๙.๘๖๒
๕	GCP-๐๕	๕๖๘๕๗๖.๕๕๒	๑๔๙๖๑๕๕.๓๘๖	๖๐.๔๔๑
๖	GCP-๐๖	๕๖๙๘๗๒.๓๔๖	๑๔๙๖๑๓๖.๔๑๔	๕๘.๙๔๓
๗	GCP-๐๗	๕๖๙๒๕๕.๙๓๓	๑๔๙๖๒๑๗.๒๖๙	๖๙.๓๓๔
๘	GCP-๐๘	๕๖๖๙๓๒.๗๖๔	๑๔๙๕๓๕๙.๑๖๔	๖๗.๕๗๖
๙	GCP-๐๙	๕๖๖๙๓๘.๓๘๖	๑๔๙๔๔๑๙.๐๗๑	๖๖.๒๒๔
๑๐	GCP-๑๐	๕๖๗๖๑๘.๔๕๔	๑๔๙๔๓๗๘.๑๙	๖๒.๒๑
๑๑	GCP-๑๑	๕๖๗๙๘๗.๐๒๓	๑๔๙๔๓๑๔.๒๔	๖๑.๐๑๕
๑๒	GCP-๑๒	๕๖๘๙๕๔.๕๙	๑๔๙๔๓๐๘.๓๓๔	๕๔.๗๒๘
๑๓	GCP-๑๓	๕๖๘๖๕๕.๓๖๑	๑๔๙๔๘๓๑.๗๐๘	๕๔.๘๙๓
๑๔	GCP-๑๔	๕๖๘๒๐๑.๖๑๔	๑๔๙๕๙๗๕.๘๔๖	๕๙.๙๕
๑๕	GCP-๑๕	๕๖๘๑๔๓.๖๘๕	๑๔๙๕๗๗๖.๖๑๕	๕๕.๗๐๗

ตำแหน่งของหมุดตรวจสอบ งานบินถ่ายภาพและจัดทำแผนที่ภาพถ่ายออร์โธสตี
 โครงการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ (UAV) กับแผนที่ภาพถ่ายออร์โธสตี

Check Points Coordinate System
 WGS ๘๔ / UTM zone ๔๗N

ITEM	NAME	EASTING	NORTHING
๑	CHK๐๑	๕๖๘๒๒๒.๘๖๓๘๘	๑๔๙๕๐๘๖.๗๖๒๖๓
๒	CHK๐๒	๕๖๗๕๙๖.๒๐๘๑๘	๑๔๙๔๗๙๙.๑๔๑๑๘
๓	CHK๐๓	๕๖๗๒๐๗.๔๑๖๙๐	๑๔๙๕๐๙๕.๓๙๖๔๘
๔	CHK๐๔	๕๖๘๑๖๘.๙๔๙๗๑	๑๔๙๔๕๕๐.๗๓๐๒๖
๕	CHK๐๕	๕๖๗๒๖๘.๑๐๘๒๙	๑๔๙๔๖๕๑.๕๙๙๘๔
๖	CHK๐๖	๕๖๗๕๓๙.๐๑๕๑๙	๑๔๙๕๗๐๑.๕๙๗๒๐
๗	CHK๐๗	๕๖๗๙๓๓.๓๕๗๘๗	๑๔๙๕๗๒๒.๙๙๙๔๖
๘	CHK๐๘	๕๖๗๙๕๖.๘๕๙๐๓	๑๔๙๕๔๓๓.๐๓๐๑๗
๙	CHK๐๙	๕๖๗๐๘๙.๗๖๐๐๙	๑๔๙๕๕๓๐.๑๑๓๒๐
๑๐	CHK๑๐	๕๖๗๒๘๙.๓๘๒๙๘	๑๔๙๕๙๒๘.๑๘๔๗๑
๑๑	CHK๑๑	๕๖๙๓๖๓.๗๔๙๓๒	๑๔๙๔๓๙๗.๐๒๕๔๕
๑๒	CHK๑๒	๕๖๘๔๑๑.๘๒๙๙๗	๑๔๙๔๘๕๕.๙๗๗๘๑
๑๓	CHK๑๓	๕๖๘๔๕๗.๕๙๕๑๖	๑๔๙๔๙๖๕.๘๓๕๙๗
๑๔	CHK๑๔	๕๖๘๗๙๔.๑๐๑๑๖	๑๔๙๕๑๖๙.๐๘๗๕๘
๑๕	CHK๑๕	๕๖๙๒๔๕.๖๖๑๓๑	๑๔๙๔๖๒๒.๐๔๔๙๔
๑๖	CHK๑๖	๕๖๘๗๘๘.๒๒๘๗๐	๑๔๙๕๘๗๐.๘๘๘๑๑
๑๗	CHK๑๗	๕๖๘๘๕๕.๓๐๔๖๙	๑๔๙๕๕๕๘.๕๒๒๙๒
๑๘	CHK๑๘	๕๖๙๒๑๐.๓๓๘๗๗	๑๔๙๕๖๑๗.๒๙๒๗๙
๑๙	CHK๑๙	๕๖๘๔๑๒.๖๓๒๙๕	๑๔๙๕๙๒๙.๑๖๙๐๑
๒๐	CHK๒๐	๕๖๘๓๘๐.๐๒๑๕๕	๑๔๙๕๖๕๓.๔๘๗๓๙

ภาคผนวก ข
คุณลักษณะที่สำคัญของ
อากาศยานไร้คนขับประเภทปีกหมุน
รุ่น DJI Phantom ๓ professional

AIRCRAFT

Weight (Battery & Propellers Included)	๑๒๘๐ g
Diagonal Size (Propellers Excluded)	๓๕๐ mm
Max Ascent Speed	๕ m/s
Max Descent Speed	๓ m/s
Max Speed	๑๖ m/s (ATTI mode)
Max Tilt Angle	๓๕°
Max Angular Speed	๑๕๐°/s
Max Service Ceiling Above Sea Level	๑๙๖๘๕ feet (๖๐๐๐ m)
Max Flight Time	Approx. ๒๓ minutes
Operating Temperature Range	๓๒° to ๑๐๔°F (๐° to ๔๐°C)
Satellite Positioning Systems	GPS/GLONASS
Hover Accuracy Range	Vertical: ±๐.๑ m (with Vision Positioning) ±๐.๕ m (with GPS Positioning) Horizontal: ±๐.๓ m (with Vision Positioning) ±๑.๕ m (with GPS Positioning)

CAMERA

Sensor	๑/๒.๓" CMOS Effective pixels: ๑๒.๔ M (total pixels: ๑๒.๗๖ M)
Lens	FOV ๙๔° ๒๐ mm (๓๕ mm format equivalent) f/๒.๘ focus at ∞
ISO Range	๑๐๐-๓๒๐๐ (video) ๑๐๐-๑๖๐๐ (photo)
Electronic Shutter Speed	๘ - ๑/๘๐๐๐ s
Image Size	๔๐๐๐x๓๐๐๐
Still Photography Modes	Single Shot Burst Shooting: ๓/๕/๗ frames Auto Exposure Bracketing (AEB): ๓/๕ bracketed frames at ๐.๗ EV Bias Timelapse
Video Recording Modes	UHD: ๔๐๙๖x๒๑๖๐p ๒๔/๒๕, ๓๘๔๐x๒๑๖๐p ๒๔/๒๕/๓๐ FHD: ๑๙๒๐x๑๐๘๐p ๒๔/๒๕/๓๐/๔๘/๕๐/๖๐ HD: ๑๒๘๐x๗๒๐p ๒๔/๒๕/๓๐/๔๘/๕๐/๖๐
Max Video Bitrate	๖๐ Mbps
Supported File Systems	FAT๓๒ (≤๓๒ GB); exFAT (>๓๒ GB)
Photo	JPEG, DNG (RAW)
Video	MP๔, MOV (MPEG-๔ AVC/H.๒๖๔)
Supported SD Cards	Micro SD Max capacity: ๖๔ GB Class ๑๐ or UHS-๑ rating required
Operating Temperature Range	๓๒° to ๑๐๔°F (๐° to ๔๐°C)

