

การศึกษารูปแบบของจุดควบคุมภาพที่มีผลต่อความถูกต้องของแผนที่ จากการรังวัดด้วยอากาศยานไร้คนขับ

The Study of UAV-Photogrammetric Accuracy for Mapping Based on Variation of Ground Control Points

รัฐภูมิ ตั้งภูมิจิต¹ สรวุฑ์ ส่งแสง¹ อภิลิทธิ์ ภาสตา² คมศิลป์ ว่างยาว² และ วีระ ลาภิศขางกุล^{1,*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ

² บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ

*Corresponding author; E-mail address: theera.lap@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษารูปแบบและจำนวนของจุดควบคุมภาพที่ส่งผลต่อความถูกต้องเชิงตำแหน่งในการทำแผนที่บ่อฝังกลบขยะมูลฝอยแบบถูกหลักวิชาการของเทศบาลนครนครปฐม ขนาด 33 ไร่ ในการศึกษาได้กำหนดจุดควบคุมภาพและจุดตรวจสอบ ทั้งหมด 37 จุด กำหนดค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (Ground Sample Distance, GSD) เท่ากับ 5 ซม./จุดภาพ การซ้อนทับภาพด้านหน้าและด้านข้างเท่ากับร้อยละ 80 และ 75 ตามลำดับ โดยกำหนดรูปแบบจุดควบคุมภาพออกเป็น 6 แบบ ได้แก่ การกระจายตัวแบบขอบ แบบส่วนกลาง แบบมุม แบบแบ่งครึ่ง แบบไขว้ และแบบกริด จากการประมวลผลด้วยโปรแกรม Agisoft PhotoScan Professional V.1.4.4 เพื่อสร้างความหนาแน่นของจุดภาพ แบบจำลองระดับสูงเชิงเลข และภาพถ่ายตั้ง พบว่าในภาพรวมการกระจายตัวแบบกริดให้ความถูกต้องในแนวราบและแนวตั้งได้ดีที่สุด จากนั้นทำการศึกษานับจุดควบคุมภาพที่เหมาะสมตั้งแต่ 4, 6, 8, 10, 12, 14, และ 16 จุด ผลการศึกษาพบว่าความถูกต้องมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนจุดควบคุมภาพเพิ่มขึ้น และเริ่มคงที่เมื่อจุดควบคุมภาพตั้งแต่ 8 จุด สำหรับแนวราบและแนวตั้ง โดยเมื่อเทียบกับมาตรฐาน ASPRS 2014 พบว่าภาพถ่ายตั้งจริงที่ได้สามารถนำไปใช้สำหรับงานที่มีความถูกต้องสูงสุดได้และให้ผลความถูกต้องทางตั้งของแบบจำลองระดับสูงเชิงเลขอยู่ในชั้นความถูกต้องทางตั้งที่ 5 ซม.

คำสำคัญ: การรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศ, อากาศยานไร้คนขับ, จุดควบคุมภาพ, แผนที่บ่อฝังกลบขยะมูลฝอย

Abstract

This study focuses on the use of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry for assessing the influence of distribution and number of Ground Control Points (GCP) that affect the accuracy of mapping. The study site is final disposal site, which

located in Nakorn Pathom province, 33 rai (5.28 ha). This study specified total of the GCP and Check Points (CPs) at 37 points, Ground Sampling Distance (GSD) at 5 cm/pixel, and flight configurations of 80% - frontal overlap and 75% - side overlap. The Agisoft PhotoScan Professional V.1.4.4 program was used for generating densified point cloud, digital elevation model, and orthoimage. The distribution formats of GCP were set to Edge distribution, Central distribution, Corner distribution, Half distribution, X-distribution, and Grid distribution. The best accuracy for horizontal and vertical positions were obtained from Grid distribution format. After that, this research studied the appropriate amount of GCP at 4, 6, 8, 10, 12, 14, and 16, respectively. The results show increased accuracy in both horizontal and vertical direction as the number of GCP increases and begins to stabilize when there are more than 8 GCP. According to the ASPRS 2014 standard, the obtained digital orthophoto can be used for the highest accuracy work. The vertical accuracy is defined at 5 cm-vertical accuracy class.

Keywords: Photogrammetry, Unmanned Aerial Vehicle, Ground Control Points, Landfill Mapping

1. คำนำ

ที่ผ่านมามีการใช้เทคโนโลยีในการรังวัดเพื่อทำแผนที่บ่อฝังกลบขยะมูลฝอยอยู่หลายประเภท ขึ้นอยู่กับยุคสมัยและประสิทธิภาพของเทคโนโลยี ตั้งแต่กล้องระดับ (Optical Level) ที่ใช้ในการหาค่าระดับสูง-ต่ำของพื้นที่ โดยใช้การอ่านค่าจากไม้ระดับ ต่อมามีการใช้กล้อง Optical Theodolite โดยระบบการสะท้อนและหักเหของแสง จากนั้นได้มีการพัฒนาเป็นกล้องประมวลผลรวม (Total Station) ที่ใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์และไม่โครโพเรสเซชัน แต่ยังมีข้อจำกัดในการใช้เวลาดำเนินการหลายขั้นตอน และ

การใช้งานในพื้นที่ที่มีภูมิประเทศต่างระดับกันมาก ๆ ทำให้เป็นอุปสรรคต่อ การตั้งขาค้าง [12] ทั้งนี้ได้มีการประยุกต์ระบบสัญญาณดาวเทียมมาใช้ในการ รังวัด (Global Navigation Satellite System, GNSS) เทคโนโลยี ดังกล่าวได้เข้ามามีบทบาทในการสำรวจมากขึ้น เนื่องจากมีระบบส่งข้อมูล จากสถานีฐาน (Base Station) ไปยังจุดที่ต้องการทราบค่าพิกัดได้ แต่มี ข้อจำกัดการส่งสัญญาณของระบบดาวเทียม [11] จากเทคโนโลยีการรังวัด บ่อขยะมูลฝอยดังกล่าวข้างต้น ส่งผลให้ขั้นตอนในการดำเนินการทำแผนที่ มีความยุ่งยากซับซ้อน ใช้เวลานาน และมีค่าดำเนินการสูง จึงถูกจัดเป็นเป็น วิธีการสำรวจแบบดั้งเดิม (Traditional Technology) [8] นอกจากนี้การ นำเทคโนโลยีแบบดั้งเดิมมาใช้ในบ่อฝังกลบขยะมูลฝอย ที่มีลักษณะภูมิ ประเทศซับซ้อน (Complex Terrain) และมีการเปลี่ยนแปลงของ สภาพแวดล้อมอยู่ตลอดเวลา เช่น พื้นที่ที่มีการดำเนินการฝังกลบขยะอย่าง ต่อเนื่อง พื้นที่ที่มีการทรุดตัวของกองขยะจากการย่อยสลายของขยะมูลฝอย เป็นน้ำชะมูลฝอยและแก๊ส พื้นที่ที่มีสิ่งขีดขวางและลาดชัน ทำให้ยากต่อการ ทำสำรวจ ทั้งการติดตั้งอุปกรณ์ในพื้นที่ และการรังวัด ส่งผลให้ต้นทุนและ เวลาดำเนินการสูงขึ้น อีกทั้งมลพิษจากกองขยะยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพของ ผู้สำรวจอีกด้วย ปัจจุบันเทคโนโลยีในการรังวัดบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยมีการ พัฒนาไปอย่างต่อเนื่อง อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) เป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายสำหรับ งานด้านการรังวัด เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ให้ภาพถ่ายความละเอียดสูง สามารถเข้าถึงพื้นที่ได้ทุกสภาพภูมิประเทศ และผู้สำรวจไม่จำเป็นต้องเข้า ไปในพื้นที่นั้น ๆ โดยการรังวัดด้วยอากาศยานไร้คนขับใช้หลักการรังวัดด้วย Photogrammetry ซึ่งอาศัยจุดควบคุมภาพ (Ground Control Point, GCP) เป็นจุดอ้างอิงตำแหน่งจากภาพที่ไม่มีพิกัดให้ตรงกับจุดควบคุมภาพที่ ทราบค่าพิกัด (Georeferencing) [9] เพื่อให้ได้ค่าพิกัดที่ถูกต้องในการวาง จุดควบคุมภาพให้ครอบคลุมทั่วพื้นที่การรังวัด อย่างไรก็ตามการกำหนด รูปแบบและจำนวนของจุดควบคุมภาพที่ให้ค่าความถูกต้องที่ยอมรับได้และ เหมาะสมกับพื้นที่บ่อฝังกลบขยะมูลฝอยที่มีการฝังกลบขยะอย่างต่อเนื่อง ยังคงไม่มีการรายงานในปัจจุบัน ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ทำการศึกษารูปแบบและจำนวนของจุดควบคุมภาพที่เหมาะสม โดยให้ ความถูกต้องสูงสุดสำหรับการทำแผนที่บ่อฝังกลบขยะมูลฝอยแบบถูกหลัก สุขาภิบาลด้วยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ

2. พื้นที่การศึกษา

งานวิจัยนี้ศึกษาในพื้นที่บ่อฝังกลบขยะมูลฝอยแบบถูกหลักสุขาภิบาล ของเทศบาลนครนครปฐม ตำบลตาก้อง อำเภอเมืองนครปฐม จังหวัด นครปฐม (13°52'11.9"N 100°02'44.6"E) ครอบคลุมพื้นที่ประมาณ 33 ไร่ ห่างจากชุมชนประมาณ 1 กิโลเมตร ลักษณะภูมิประเทศมีความลาดชัน และมีความต่างระดับความสูง เนื่องจากปริมาณกองขยะมูลฝอยจากชุมชน ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 บ่อฝังกลบขยะมูลฝอยแบบถูกหลักสุขาภิบาล (Landfill)

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการศึกษาเพื่อเก็บข้อมูลประกอบด้วยดังนี้

3.1 จุดภาคพื้นดิน (Ground Points)

จุดภาคพื้นดิน (Ground Points) ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้เป็นจุดควบคุม ภาพ (GCP) และจุดตรวจสอบ (Check Points, CP) ซึ่ง GCP สร้างโดยใช้ แผ่นไวโอลิน สีดำ-ขาว สลับเป็นตารางหมากรุก ขนาด 1.20x1.20 ม. (รูปที่ 2 ก) และ CP ใช้แผ่นพีทีบอร์ด สีส้ม-ดำ เป็นวงกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาด 0.20 ม. (รูปที่ 2 ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 จุดภาคพื้นดิน (ก) GCP และ (ข) CP

3.2 การรังวัดภาคพื้นดิน

การรังวัดพิกัดของจุด GCP และ CP โดยงานวิจัยนี้ใช้ระบบโครงข่าย การรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK-GNSS Network) ด้วยอุปกรณ์ยี่ห้อ Hi-Target รุ่น V100 ที่มีค่าความคลาดเคลื่อนทางแนวราบ 8 มม.+1 ppmRMS และแนวตั้ง 15 มม.+1 ppmRMS (รูปที่ 3)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3 ชุด RTK-GNSS ยี่ห้อ Hi-Target รุ่น V100 โดยอุปกรณ์ชุดนี้ประกอบด้วย (ก) สถานีฐาน (Base station) และ (ข) สถานีเคลื่อนที่ (Rover Station)

3.3 เทคโนโลยีการถ่ายภาพ

การรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศใช้อากาศยานไร้คนขับ ประเภท Low-Cost UAV ยี่ห้อ DJI รุ่น Phantom 3 Professional ที่มาพร้อมกับกล้องถ่ายภาพความละเอียด 12 ล้านจุดภาพ ใช้เก็บข้อมูลภาพถ่ายเพื่อนำไปประมวลผลเป็นแผนที่สองมิติและสามมิติ (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 ชุด DJI Phantom 3 Professional

3.4 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูล

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Agisoft PhotoScan Professional Version 1.4.4 ในการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศเป็นแผนที่ 2D, 3D, และภาพถ่ายตั้งจริง (Orthophoto) โดยโปรแกรมจะคำนวณค่าความถูกต้องของตำแหน่งและแสดงค่าความคลาดเคลื่อนออกมาในรูปของ Root Mean Square Error (RMSE) ทั้งในแนวราบและแนวตั้ง

4. วิธีการดำเนินงาน

วิธีการดำเนินงานประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 4 ขั้นตอน ได้แก่

4.1 การเตรียมการก่อนออกภาคสนาม

ในขั้นต้นจะทำการบินสำรวจในพื้นที่จริงด้วยอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งมีระยะเวลาในการบินถ่ายภาพได้ไม่เกิน 20 นาที ดังนั้นจึงต้องแบ่งแผนการบินเป็นช่วง ๆ โดยใช้โปรแกรม Pix4D Capture เพื่อออกแบบแผนการบิน ทั้งลักษณะและเงื่อนไขของการบิน โดยนำมาใช้ร่วมกับแอปพลิเคชัน DJI GO 4 ในการแสดงภาพระหว่างการบินอัตโนมัติบนแท็บเล็ต และควบคุมการบินด้วยรีโมทคอนโทรล หลังจากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มาเปรียบเทียบเพื่อกำหนดตำแหน่งของ GCP และ CP ที่เหมาะสม โดยตำแหน่งดังกล่าวจะอยู่บนพื้นผิวของบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยที่ทราบตำแหน่งพิกัดทั้งแนวราบและแนวตั้ง การศึกษานี้กำหนดการซ้อนทับกันของภาพถ่ายทางด้านหน้าและด้านข้างเท่ากับร้อยละ 80 และ 75 ตามลำดับ และค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (Ground Sampling Distance, GSD) เท่ากับ 5 ซม./จุดภาพ

4.2 การทำงานในภาคสนาม

ในขั้นตอนนี้เริ่มจากการวางตำแหน่งจุดภาคพื้นดิน ประกอบไปด้วยจำนวน GCP และ CP รวมทั้งสิ้น 37 จุด โดยครอบคลุมพื้นที่การศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 5



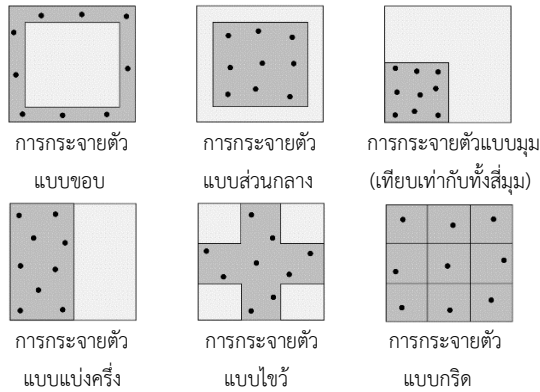
รูปที่ 5 ตำแหน่งจุดภาคพื้นดิน (Ground Points)

สำหรับการหาพิกัดตำแหน่งจุดภาคพื้นดินใช้ RTK-GNSS โดยสถานีฐานจะถูกยึดไว้เพื่ออ้างอิงตำแหน่งจากหมุดกรมที่ดิน (พิกัด N, E, และ EL เท่ากับ 1,533,036.016 ม., 612,932,832 ม., และ 4.140 ม.) ที่ระดับน้ำทะเลปานกลาง ตามลำดับ และสถานีเคลื่อนที่จะบันทึกค่าพิกัดในแต่ละจุดที่ต้องการทราบ หลังจากนั้นจะทำการบินสำรวจเพื่อบันทึกภาพและพิกัดตำแหน่งตามเส้นทางการบินที่วางไว้ก่อนลงภาคสนาม

4.3 การประมวลผลข้อมูล

การประมวลผลภาพถ่ายด้วยอากาศยานไร้คนขับใช้โปรแกรม Agisoft PhotoScan Professional V.1.4.4 มีขั้นตอนดังนี้ (1) จัดแนวภาพถ่าย (Aligning Photos) (2) สร้างกลุ่มข้อมูลจุดพิกัดเชิงพื้นผิว (Digital Surface Point Cloud Model, DSM) (3) สร้างแผนที่ภาพออร์โธ (Orthophoto Mapping) (4) นำเข้าค่าพิกัดจุดภาคพื้นดินโดยกำหนดให้เป็นจุด GCP และ CP ที่ได้จากการรังวัดด้วย RTK-GNSS (5) กำหนดรูปแบบและจำนวนของจุด GCP และ CP

สำหรับขั้นตอนการกำหนดรูปแบบและจำนวนของจุด GCP และ CP เพื่อศึกษาถึงความเหมาะสมในการนำมาสำรวจพื้นที่กรณีศึกษา แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ (1) การศึกษารูปแบบการวาง GCP ที่เหมาะสมในพื้นที่ศึกษา (Distribution of GCP Adjustment) สำหรับรูปแบบตำแหน่ง GCP ที่ศึกษาเพื่อระบุรูปแบบการกระจายตัวที่ดีที่สุด มีทั้งสิ้น 6 รูปแบบ โดยพื้นที่แรกแสดงบริเวณที่มีการวางตำแหน่ง GCP (รูปที่ 6) ซึ่งประกอบด้วยจำนวน GCP และ CP รวมทั้งหมด 37 จุด (ตารางที่ 1) และ (2) การศึกษาจำนวนจุดควบคุมภาพที่มีผลต่อความถูกต้องเชิงพิกัด (Number of GCP Adjustment) ขั้นตอนนี้เป็นการนำรูปแบบการกระจายตัวที่ดีที่สุดจากขั้นตอนที่ 1 มาศึกษาจำนวนจุดควบคุมภาพที่มีผลต่อความถูกต้องเชิงพิกัด โดยการปรับลดจำนวน GCP ให้มีความถูกต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้มากขึ้น โดยเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASPRS 2014



รูปที่ 6 รูปแบบการกระจายตัวของจุดควบคุมภาพ ทั้ง 6 แบบ

ตารางที่ 1 จำนวน GCP และ CP ของการกระจายตัวที่แตกต่างทั้ง 6 แบบ

รูปแบบการกระจายตัว	GSD (ชม./จุดภาพ)	จำนวน GCP	จำนวน CP
การกระจายตัวแบบขอบ	5.52	20	17
การกระจายตัวแบบส่วนกลาง	5.54	17	20
การกระจายตัวแบบมุม (เทียบกับทั้งสี่มุม)	5.54	11	26
การกระจายตัวแบบแบ่งครึ่ง	5.54	18	19
การกระจายตัวแบบไขว้	5.53	14	23
การกระจายตัวแบบกริด	5.54	16	21

4.4 การตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่

การวิเคราะห์ผลข้อมูลจะทำด้วยโปรแกรม และแสดงผลในรูปแบบของความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่ง Root Mean Square Error (RMSE) ของ GCP และ CP โดยในการวิเคราะห์ผลจะอาศัยสมการพื้นฐาน (สมการที่ 1 - 5) เพื่อประเมินความละเอียดที่ถูกต้องเชิงตำแหน่งของค่าพิกัด ที่ได้จากการปรับแก้รูปแบบตำแหน่ง ซึ่งการวิเคราะห์ผลข้อมูลทำให้ทราบค่าพิกัดที่มีความถูกต้องยอมรับได้ โดยความถูกต้องได้มาจากการแปลงค่า RMSE เป็น RMSE/GSD ของทั้ง GCP และ CP สำหรับความถูกต้องของ GCP เป็นการบ่งบอกว่า รูปแบบการกระจายตัวของ GCP มีคุณภาพและให้ค่าพิกัดที่มีความถูกต้องเหมาะสมของแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศ ในขณะที่ความถูกต้องของ CP เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของพิกัดสำหรับการนำไปใช้จัดทำแผนที่ ซึ่งผลที่ได้เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Accuracy Standards 2014 (ASPRS 2014) สามารถระบุคุณภาพความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบและทางตั้งของแผนที่บ่งชี้ถึงผลผลิตได้

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

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

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

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

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

กำหนดให้

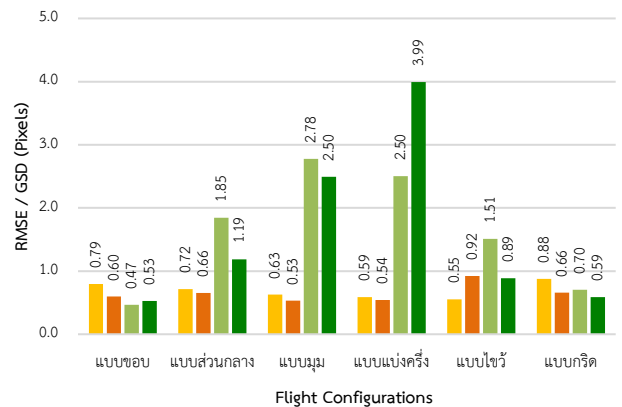
n คือจำนวนจุด GCP หรือ CP ที่ใช้ในการทดสอบทั้งหมด

X_{oi} , Y_{oi} และ Z_{oi} คือค่าพิกัด X, Y และ Z ตามลำดับ ที่ได้จากการประมวลผลด้วยภาพ

X_{GNSSi} , Y_{GNSSi} และ Z_{GNSSi} คือค่าพิกัด X, Y และ Z ตามลำดับ ที่ได้จากการรังวัดด้วย RTK-GNSS

5. ผลการศึกษา

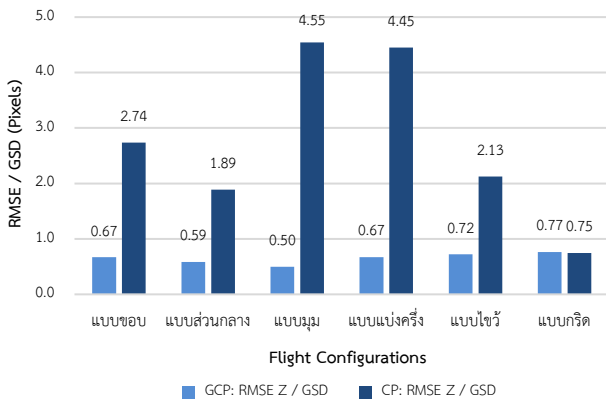
งานวิจัยนี้ศึกษาเกี่ยวกับคุณภาพงานของแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศ โดยดูจากความถูกต้องของจุดควบคุมภาพ และความถูกต้องของจุดตรวจสอบที่ต่างกันทั้ง 6 รูปแบบ ซึ่งได้มาจากการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนแนวราบและแนวตั้ง ผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงในหน่วย จุดภาพ (Pixels) บ่งบอกถึงค่าความคลาดเคลื่อนเปรียบเทียบกับค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน หรือ RMSE/GSD ตามมาตรฐานการเปรียบเทียบของ ASPRS 2014



รูปที่ 7 ความความถูกต้องในแนวราบของ GCP และ CP แต่ละรูปแบบ

ความถูกต้องในแนวแกน X และแกน Y ของ GCP และ CP ที่มีค่าความถูกต้องน้อยกว่า 1 จุดภาพ ถือได้ว่าเป็นรูปแบบที่มีความถูกต้องยอมรับได้ ตามมาตรฐาน ASPRS 2014 จากรูปที่ 7 พบว่า รูปแบบที่ให้ ความถูกต้องยอมรับได้มี 2 แบบ คือ การกระจายตัวแบบขอบ และการกระจายตัวแบบกริด โดยรูปแบบการกระจายตัวแบบขอบ ให้ความถูกต้องของ GCP ในพิกัดแกน X และแกน Y เท่ากับ 0.79 และ 0.60 จุดภาพ ตามลำดับ ในขณะที่ความถูกต้องของ CP ในพิกัดแกน X และแกน Y เท่ากับ 0.47 และ 0.53 จุดภาพ ตามลำดับ สำหรับการกระจายตัวแบบกริด ให้ค่าความถูกต้องของ GCP ในพิกัดแกน X และแกน Y เท่ากับ 0.88

และ 0.66 จุดภาพ ตามลำดับ ในขณะที่ความถูกต้องของ CP ในพิกัดแกน X และแกน Y เท่ากับ 0.70 และ 0.59 จุดภาพ ตามลำดับ



รูปที่ 8 ความถูกต้องในแนวตั้งของ GCP และ CP แต่ละรูปแบบ

ความถูกต้องในแนวตั้งของ GCP และ CP ที่มีความถูกต้องยอมรับได้ (ค่าความถูกต้องน้อยกว่า 1 จุดภาพ) (รูปที่ 8) พบว่ามีเพียงการกระจายตัวแบบกริดเท่านั้น โดยมีความถูกต้องของ GCP และ CP เท่ากับ 0.77 และ 0.75 จุดภาพ ตามลำดับ

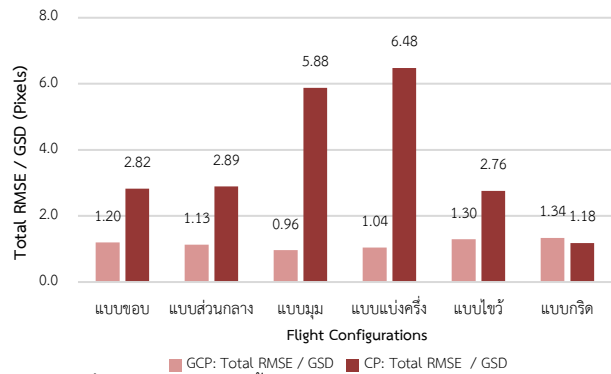
เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน ASPRS 2014 [3] พบว่าคุณภาพแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศแบบภาพออร์โธเรซิเจนซ์ โดยเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อน (RMSE) และความถูกต้องในหน่วยจุดภาพ สามารถแบ่งระดับชั้นความถูกต้องในแนวราบและแนวตั้งของแต่ละรูปแบบ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การจำแนกคุณภาพระดับชั้นความถูกต้องของแต่ละรูปแบบ

รูปแบบการกระจายตัว	Horizontal Accuracy Class				Vertical Accuracy Class	
	Accuracy Class of GCP		Accuracy Class of CP		GCP (cm)	CP (cm)
	RMSE _x /GSD (pixels)	RMSE _y /GSD (pixels)	RMSE _x /GSD (pixels)	RMSE _y /GSD (pixels)		
แบบขอบ	≤1	≤1	≤1	≤1	5	20
แบบส่วนกลาง	≤1	≤1	2	2	5	15
แบบมุม	≤1	≤1	≥3	≥3	5	33.3
แบบแบ่งครึ่ง	≤1	≤1	≥3	≥3	5	33.3
แบบไขว้	≤1	≤1	2	2	5	10
แบบกริด	≤1	≤1	≤1	≤1	5	5

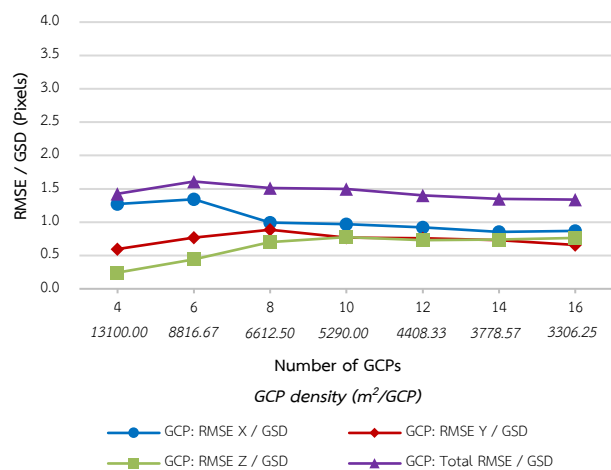
เมื่อพิจารณาคุณภาพระดับชั้นความถูกต้องที่เกิดขึ้นจากทั้ง 6 แบบ พบว่าความถูกต้องในแนวราบของ GCP และ CP ทั้งแกน X และแกน Y ที่ไม่เกิน 1 จุดภาพ ซึ่งภาพถ่ายที่ตั้งที่สามารถนำไปใช้ในงานที่มีความถูกต้องสูงสุด (Highest accuracy work) ได้ มีเพียงการกระจายตัวแบบขอบ และการกระจายตัวแบบกริด โดยการกระจายตัวแบบกริดมีระดับความถูกต้อง

ในแนวตั้งของ GCP และ CP อยู่ในระดับ 5 ซม. ในขณะที่ การกระจายตัวแบบขอบมีระดับความถูกต้องในแนวตั้งของ GCP อยู่ในระดับ 5 ซม. และ CP อยู่ในระดับ 20 ซม. และเมื่อเปรียบเทียบความถูกต้องกับมาตรฐาน ASPRS 2014 รูปแบบการกระจายตัวแบบกริดให้ความถูกต้องในแนวราบและแนวตั้งดีที่สุด นอกจากนี้แนวโน้มของความถูกต้องรวม (Total accuracy) ยังแสดงให้เห็นว่า มีเพียงการกระจายตัวแบบกริดที่มีความถูกต้องรวมมากที่สุด (รูปที่ 9)



รูปที่ 9 ความถูกต้องรวมทั้งหมดของ GCP และ CP แต่ละรูปแบบ

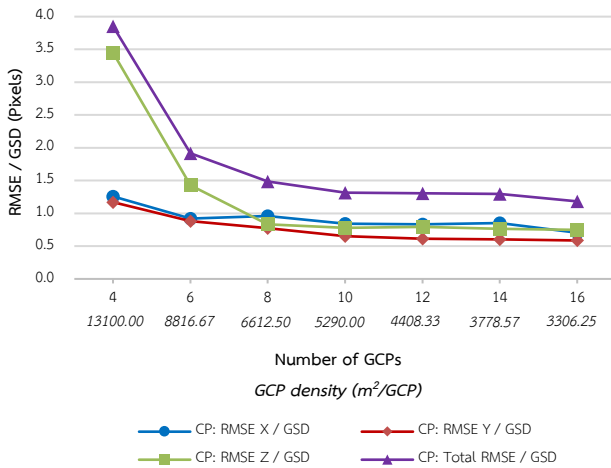
ดังนั้นจึงนำรูปแบบการกระจายตัวแบบกริด มาศึกษาการปรับลดจำนวน GCP (จำนวน 4, 6, 8, 10, 12, 14, และ 16 จุด) เพื่อลดขั้นตอนการเข้าถึงพื้นที่บ่อฝังกลบขยะมูลฝอยแบบเทกอง ที่มีลักษณะภูมิประเทศซับซ้อนและมีการเปลี่ยนแปลงของสภาพพื้นที่อยู่ตลอดเวลา หลังจากที่มีการปรับลดจำนวน GCP จะได้ผลความถูกต้อง ดังแสดงในรูปที่ 10 และรูปที่ 11



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างความถูกต้องของ GCP กับจำนวนของ GCP ในแนวราบและแนวตั้ง

จากการปรับลดจำนวนของ GCP ตั้งแต่ 4 ถึง 16 จุด พบว่าความถูกต้องที่ได้มีความแตกต่างกัน (รูปที่ 10) เริ่มคงที่เมื่อมีจำนวน GCP ตั้งแต่ 8 จุด โดยความถูกต้องในแนวราบและแนวตั้งของ GCP ที่ไม่เกิน 1 จุดภาพ พบว่าจำนวน GCP เท่ากับ 8 จุด เป็นจำนวนที่น้อยที่สุดที่ให้ความถูกต้องที่

ยอมรับได้ทั้งแนวราบและแนวตั้ง โดยมีความถูกต้องของ GCP ในพิกัดแกน X, แกน Y, และแกน Z เท่ากับ 0.99, 0.89, และ 0.70 จุดภาพ ตามลำดับ



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างความถูกต้องของ CP กับจำนวนของ GCP ในแนวราบและแนวตั้ง

สำหรับความถูกต้องของ CP ที่เกิดจากการปรับลดจำนวน GCP ดังกล่าว มีความถูกต้องที่ต่างกัน (รูปที่ 11) โดยความถูกต้องที่ได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามจำนวน GCP ที่เพิ่มมากขึ้น และเริ่มคงที่เมื่อจำนวน GCP ตั้งแต่ 8 จุด ในขณะเดียวกัน ที่จำนวน GCP เท่ากับ 8 จุด เป็นจำนวนที่น้อยที่สุดที่ทำให้ความถูกต้องที่ยอมรับได้ทั้งแนวราบและแนวตั้ง เนื่องจากมีความถูกต้องในแนวราบและแนวตั้งของ CP ไม่เกิน 1 จุดภาพ โดยความถูกต้องของ CP ในพิกัดแกน X, แกน Y, และแกน Z เท่ากับ 0.96, 0.77, และ 0.83 จุดภาพ ตามลำดับ

จากผลการศึกษาดังกล่าว เมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน ASPRS 2014 ที่รายงานความถูกต้องในแนวราบน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 จุดภาพ จัดเป็นคุณภาพประเภทงานที่มีความถูกต้องสูงสุด ความถูกต้องในแนวราบมากกว่า 1 จุดภาพแต่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 จุดภาพจัดเป็นคุณภาพประเภทงานทั่วไปและงาน GIS (Standard Mapping and GIS work) และความถูกต้องมากกว่า 2 จุดภาพขึ้นไปจัดเป็นงานคุณภาพต่ำ (Lowest accuracy) ในส่วนของความถูกต้องในแนวตั้งจะแบ่งจากระดับความถูกต้องที่เกิดขึ้นในแนวตั้ง (Vertical accuracy class) [3] พบว่าความถูกต้องที่เกิดขึ้นจากจำนวน GCP ตั้งแต่ 8 ถึง 16 จุด มีระดับความถูกต้องที่สามารถนำไปใช้สำหรับงานที่มีความถูกต้องสูงสุดในแนวราบ และระดับความถูกต้องในแนวตั้งอยู่ที่ระดับ 5 ซม.

นอกจากนี้ การใช้รูปแบบการวางตำแหน่งและปรับลดจำนวน GCP ที่เหมาะสม สามารถลดขั้นตอนในการดำเนินการภาคสนาม ที่จำเป็นต้องใช้เวลานานและมีค่าดำเนินการสูงได้ โดยเมื่อพิจารณาตามมาตรฐาน ASPRS 2014 สามารถรายงานได้ว่า การกำหนดสัดส่วนจำนวน GCP ที่จำนวน 8 จุด (ความหนาแน่นของจุด GCP เท่ากับ 6,612.50 ตร.ม./จุดควบคุมภาพ) เป็นจำนวนที่น้อยที่สุดที่ทำให้ความถูกต้องยอมรับได้ โดยสามารถระบุคุณภาพความถูกต้องของ GCP และ CP ในแนวราบ ที่ตรงกับมาตราส่วน 1:300

(Class 1) และ 1:200 (Class 1) ตามลำดับ [3] และคุณภาพความถูกต้องในแนวตั้ง ที่ให้ระยะห่างระหว่างเส้นชั้นความสูงเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ASPRS 1990 ของ GCP และ CP เท่ากับ 15 ซม. (Class 1) [2]

6. อภิปรายผลการศึกษา

โดยจากการศึกษาพบว่า รูปแบบที่ต่างกันของการวางตำแหน่ง GCP ไม่ได้ส่งผลต่อความถูกต้องของการ Georeferencing สังเกตได้จากรูปที่ 7-9 ความถูกต้องของ GCP ทั้ง 6 รูปแบบนั้น ไม่มีความแตกต่างกันมาก ซึ่งตรงข้ามกับความถูกต้องทางพิกัดของ CP ที่ส่งผลโดยตรงอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่ารูปแบบของการวาง GCP เป็นสิ่งสำคัญที่นักสำรวจต้องคำนึงถึง จะสังเกตเห็นได้ว่า การกระจายตัวแบบขอบ มีความถูกต้องของ CP สูงสุดในแนวราบ ในทางกลับกันการกระจายตัวแบบมุม แบบแบ่งครึ่ง และแบบไขว้ มีความถูกต้องของ CP ต่ำสุดในแนวราบ โดยการกระจายตัวแบบขอบมีการวางจุด GCP ที่ครอบคลุมพื้นที่ที่ศึกษามากที่สุด กล่าวคือเมื่อลากเส้นโยงยึดแต่ละจุดของ GCP ที่อยู่ในบริเวณพื้นที่ที่ศึกษาแล้ว สามารถทราบถึงขอบเขตพื้นที่ที่ศึกษาได้อย่างชัดเจน (รูปที่ 6) ต่างจากการวางจุด GCP ในรูปแบบการกระจายตัวแบบมุม แบบแบ่งครึ่ง และแบบไขว้ ที่มีรูปแบบการกระจายตัวของจุด GCP กระจุกอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของพื้นที่ศึกษา ซึ่งไม่สามารถแสดงถึงขอบเขตพื้นที่ที่ศึกษาได้อย่างชัดเจน (รูปที่ 6) สำหรับความถูกต้องในแนวตั้ง รูปแบบการกระจายตัวของ GCP ที่สม่ำเสมอและลักษณะของพื้นที่ที่ศึกษาที่มีความซับซ้อนและลาดชัน ส่งผลต่อความถูกต้องในแนวตั้งอย่างเห็นได้ชัด [10] โดยจากการศึกษาพบว่า การกระจายตัวแบบกริดมีความถูกต้องของ CP สูงสุด สัมพันธ์กับการวางตำแหน่งของ GCP ที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและยังคงครอบคลุมพื้นที่ที่ศึกษา [7] ต่างจากการกระจายตัวแบบมุมและแบบแบ่งครึ่งที่มีความถูกต้องของ CP ต่ำสุด (รูปที่ 8)

สำหรับการศึกษาจำนวนของ GCP งานวิจัยนี้ศึกษาการปรับลดจำนวน GCP จากรูปแบบที่มีความถูกต้องยอมรับได้ โดยการเทียบกับมาตรฐาน ASPRS 2014 ซึ่งอยู่ในคุณภาพระดับ Highest accuracy work (ความถูกต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 จุดภาพ) แตกต่างจากงานวิจัยอื่น ๆ ที่แนะนำจำนวนจุด GCP โดยอาศัยค่า RMSE ที่ต่ำที่สุด ซึ่งเมื่อเทียบความถูกต้องกับมาตรฐานแล้ว พบว่ายังคงมีความถูกต้องที่มากกว่า 1 จุดภาพ [4][5][6][7][10][14] โดยงานวิจัยนี้รายงานว่าการปรับลดจำนวน GCP ตามที่กำหนด พบว่าไม่ส่งผลต่อความถูกต้องของการ Georeferencing ทั้งแนวราบและแนวตั้ง (รูปที่ 10) แต่ส่งผลโดยตรงต่อความถูกต้องของ CP โดยความถูกต้องในแนวราบเริ่มคงที่ตั้งแต่ 6 จุด สัมพันธ์กับการวางจุด GCP ที่ครอบคลุมในพื้นที่ศึกษา และความถูกต้องในแนวตั้งเริ่มคงที่ตั้งแต่ 8 จุด สอดคล้องกับการวางจุด GCP ในพื้นที่ศึกษาที่สม่ำเสมอ นอกจากนี้ ความถูกต้องในแนวราบและแนวตั้ง จะมีความถูกต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 จุดภาพที่การวางจำนวน GCP ตั้งแต่ 8 จุด ขึ้นไป หรือความหนาแน่นเท่ากับ 6,612.50 ตร.ม./จุดควบคุมภาพ (รูปที่ 11) ซึ่งถือได้ว่าเป็นจำนวนที่น้อยที่สุดที่ทำให้ความถูกต้องที่ยอมรับได้ [5][6][14]

อีกทั้งในระยะ 10 ปีที่ผ่านมา งานวิจัยที่ศึกษาผลกระทบของรูปแบบการกระจายตัวและจำนวนของ GCP เพื่อทำแผนที่ภาพออร์โธ โดยการใช้ UAV มีไม่มากนัก รูปแบบของพื้นที่ที่ศึกษาในอดีต มักเป็นพื้นที่ที่มีความสมมาตร ง่ายต่อการกำหนดรูปแบบการวางตำแหน่ง GCP [6] ต่างจากงานวิจัยนี้ที่ศึกษารูปแบบการวางตำแหน่งและจำนวน GCP บนพื้นที่ศึกษาที่ไม่สมมาตร และมีภูมิประเทศซับซ้อน ด้วยบริบทรูปแบบและจำนวนที่เสนอในงานวิจัยนี้ จึงสามารถใช้เป็นข้อมูลสำหรับการทำแผนที่ในพื้นที่ที่มีภูมิประเทศซับซ้อน เช่น พื้นที่บ่อฝังกลบขยะที่ยังคงมีการดำเนินงานฝังกลบขยะอยู่ โดยงานวิจัยนี้อาจกล่าวได้ว่าความแตกต่างของลักษณะพื้นที่ศึกษาไม่ใช่ปัจจัยสำคัญ ที่ส่งผลต่อการแนะนำรูปแบบการกระจายตัวของ GCP ที่เหมาะสม การศึกษานี้พบว่า การวางตำแหน่ง GCP แบบขอบ ซึ่งเป็นการวางตำแหน่งที่ครอบคลุมพื้นที่ศึกษา ให้ความถูกต้องในแนวราบของ CP สูงที่สุดที่ 0.70 จุดภาพ ในขณะที่การวางตำแหน่ง GCP แบบกริด ซึ่งเป็นการวางตำแหน่งที่มีความสม่ำเสมอ ให้ความถูกต้องในแนวตั้งของ CP สูงที่สุดที่ 0.75 จุดภาพ คล้ายกับงานวิจัยของ Patricio และคณะที่แนะนำว่า การวางตำแหน่ง GCP แบบขอบ ให้ความถูกต้องของ CP สูงที่สุดในแนวราบที่ 1.06 จุดภาพ และการวาง GCP แบบกริดให้ค่าความถูกต้องของ CP ดีที่สุดในแนวตั้งที่ 1.43 จุดภาพ [4] โดยจะเห็นได้ว่าพื้นที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ เป็นพื้นที่บ่อฝังกลบขยะมูลฝอย ประกอบด้วยวางระบายน้ำขยะมูลฝอยรอบ ๆ มีภูเขาขยสูงกว่า 15 เมตร อยู่บริเวณตรงกลางของพื้นที่ศึกษา อีกทั้งยังมีวัชพืชปกคลุม ต่างจากพื้นที่ศึกษาของ Patricio และคณะที่มีลักษณะภูมิประเทศไม่ซับซ้อน เป็นพื้นที่โล่งกว้าง สมมาตร และไม่มีพืชปกคลุม [4]

7. สรุปผลการศึกษา

การสำรวจบ่อฝังกลบขยะมูลฝอยด้วยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับชนิดราคาถูก ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่าย ระยะเวลาในการสำรวจ และลดโอกาสการสัมผัสมลพิษที่เกิดขึ้นจากขยะของนักสำรวจ อย่างไรก็ตาม การสำรวจด้วยวิธีการนี้ควรมีการจัดรูปแบบการกำหนดจุดควบคุมภาพ (GCP) เพื่อให้เกิดความถูกต้องแม่นยำของตำแหน่งทางภูมิศาสตร์สูงสุด โดยงานวิจัยนี้พบว่า ความถูกต้องของ Orthophoto และ DSM ที่ได้จากการวางตำแหน่งของ GCP ด้วยวิธีการกระจายตัวแบบกริด จำนวนตั้งแต่ 8 จุดขึ้นไป มีความถูกต้องทางพิกัดของ CP และความถูกต้องของการ Georeferencing ในแนวราบสำหรับงานที่มีความถูกต้องสูงสุด ในขณะที่ความถูกต้องในแนวตั้งอยู่ในชั้นความถูกต้องทางตั้งที่ 5 ซม. โดยเปรียบเทียบระดับชั้นความถูกต้องตามมาตรฐาน ASPRS 2014 และมีความหนาแน่นที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่งานวิจัยนี้เท่ากับ 6,612.50 ตร.ม./จุดควบคุมภาพ โดย Orthophoto ที่ได้สามารถนำไปใช้กับงานที่ต้องการความถูกต้องสูงสุดได้ อีกทั้งยังเพิ่มความน่าเชื่อถือของ DSM สำหรับการประยุกต์ใช้ในงานสำรวจ ซึ่งครอบคลุมทั้งการแสดงลักษณะพื้นผิวและคำนวณปริมาตรของพื้นที่บ่อฝังกลบขยะมูลฝอย นอกจากนี้งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นความสำคัญของการกระจายตัวเชิงพื้นที่ของ GCP ซึ่งจำเป็นต้องมี

การกระจายตัวที่ครอบคลุมและสม่ำเสมอทั่วพื้นที่สำรวจ อีกทั้งต้องมีจำนวนที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลความถูกต้องที่ดีที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากคณาจารย์ และผู้ที่เกี่ยวข้องผู้หลายท่านที่ช่วยในการลงพื้นที่ และให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์

ขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์สนับสนุนทุนการวิจัยนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณเทศบาลนครนครปฐม ตำบลตาก้อง องค์การบริหารส่วนจังหวัดนครปฐม ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการลงพื้นที่ภาคสนาม

เอกสารอ้างอิง

- [1] Agisoft LLC, 2018. *Agisoft PhotoScan User Manual Professional*, 121 pp.
- [2] American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), 1990. *ASPRS accuracy standards for large-scale maps*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 56(7), pp.1068-1070.
- [3] American Society for Photogrammetric Engineering and Remote Sensing (ASPRS), (2015). *ASPRS positional accuracy standards for digital geospatial data (Edition 1, Version 1.0., November, 2014)*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 81(3), A1-A26 pp.
- [4] Martinez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramirez, F., Mesas-Carrascosa, F. J., Garcia-Ferrer, A. and Pérez-Porras, F. J., 2018. *Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points*, International journal of applied earth observation and geoinformation, 10 pp.
- [5] Oniga, V. E., Breaban, A. I. and Statescu, F., 2018. Determining the optimum number of ground control points for obtaining high precision results based on UAS images, *In Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 11 pp.
- [6] Tahar, K. N., 2013. *An evaluation on different number of ground control points in unmanned aerial vehicle photogrammetric block*, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci, pp. 93-98.
- [7] Villanueva, J.K.S., Blanco, A.C. 2018. "Optimization of ground control point (GCP) configuration for unmanned aerial vehicle (UAV) survey using structure from motion (SfM)", *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, October 10-11, Casablanca, Morocco.

- [8] Wangyao, K., Bhatsada, A., Wungsumpow, C., Ngamket, K., Payomthi, P. and Laphitchayangkul, T., 2018. "Evaluation of sUAS Photogrammetry Accuracy for Landfill Mapping", *The 10th Asia-Pacific Landfill Symposium*, November 24-26, Tokyo, Japan.
- [9] ชีระ ลาภิศขยงกุล, การตรึงข้อมูลบนพื้นดิน Georeferencing [Online], Available: <https://km.lib.kmutt.ac.th/index.php/22-special/524-what-is-georeferencing> [1 มีนาคม 2563].
- [10] นักสุวรรณ บุญทวีสวัสดิ์, พันทิพย์ ปิยะทัศน์านนท์, สุชาติพิชญ์ ชวนะเวสสกุล, 2562. ความถูกต้องเชิงพื้นที่ของการใช้อากาศยานไร้คนขับ เพื่อผลิตแผนที่ภาพถ่ายรายละเอียดสูง, *วารสารสมาคมสำรวจข้อมูลระยะไกลและสารสนเทศภูมิศาสตร์แห่งประเทศไทย ปีที่ 20 ฉบับพิเศษ*, หน้า 41-53.
- [11] วัลลพ ตาเขียว, เทคนิคการรังวัดหาค่าพิกัดดาวเทียมด้วยระบบ GNSS [Online], Available: <http://kqgnss.blogspot.com/2018/05/gnss.html> [1 มีนาคม 2563].
- [12] วิชัย เยี่ยงวีรชน, 2555. การสำรวจรังวัด: ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, หน้า 111-154.
- [13] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย, 2561, มาตรฐานการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่องานวิศวกรรม, 86 หน้า
- [14] ศิวา แก้วหลัง, 2561. การประเมินจำนวนจุดควบคุมภาพภาคพื้นดินที่เหมาะสมสำหรับการทำแผนที่ภูมิประเทศ จากภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ, *การประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยมหาสารคาม, ครั้งที่ 14, 6-7 กันยายน 2561, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, หน้า 245-251