

การประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อการสำรวจงานทางหลวง
กรณีศึกษา ทางหลวงหมายเลข 3574 แยกมาปู จังหวัดชลบุรี

Application of Unmanned Aerial Vehicles for highway surveying in
Case Study of highway No. 3574, Map Pu Intersection, Chonburi Province

ต่อลาภ การปลื้มจิตร์^{1,*} ณัฐพล แก้วทอง² พรนราณ์ บุญราศรี³ และ จิรวัดน์ จันทองพูน⁴

^{1,2,3,4} สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

*Corresponding author; E-mail address: torlap_rmutsv@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อการสำรวจทำแผนที่งานทางหลวง ขอบเขตพื้นที่โครงการอยู่บริเวณ บนทางหลวงหมายเลข 3574 ช่วง แยกมาปู อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี. ระยะทางประมาณ 5 กม. โดยบินถ่ายตามแนวเส้นทางหลวงและขยายพื้นที่ออกด้านข้าง มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ตำแหน่งและจำนวนจุดควบคุมภาคพื้นดินที่เหมาะสมกับงานทางหลวง และเพื่อตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของข้อมูลเชิงพื้นที่ที่ได้ โดยการศึกษาถ่ายภาพมีค่าจุดภาพอยู่ที่ 4.11 เซนติเมตร ส่วนซ้อนด้านหน้าตามแนวบินร้อยละ 85 และส่วนซ้อนด้านข้างระหว่างแนวบินร้อยละ 75 พื้นที่โครงการสำรวจทั้งหมดทำการบินทั้งหมดจำนวน 4 เที่ยวบิน ซึ่งจะได้ภาพถ่ายตั้งทั้งโครงการ 987 ภาพ จำนวนจุดควบคุม 17 จุด จุดตรวจสอบ 20 จุด โดยแยกสร้างวัดหมายจุดควบคุมภาคพื้นดิน 3 แบบ เพื่อประเมินค่าความถูกต้องของจุดตรวจสอบ ผลที่ได้คือการรังวัดหมายจุดควบคุมฯ แบบแบ่งเป็นบล็อก ๆ ละ 1 กม. จุดควบคุมภาพถ่ายฯ 5 จุด ระยะห่างระหว่างจุด 500 ม. ให้ค่าความคลาดเคลื่อนของจุดตรวจสอบที่ดีที่สุด คือค่าความคลาดเคลื่อนของการหมายจุดควบคุม ค่า RMSE x y และ z เท่ากับ 0.37 0.42 และ 0.80 มม. ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของ Projection error เท่ากับ 0.095 จุดภาพ ค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งจุดตรวจสอบ ค่า RMSE x y และ z เท่ากับ 5.43 5.25 และ 6.56 ซม. ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่องานวิศวกรรม และได้แผนที่ภาพถ่ายแนวตั้งและข้อมูลแบบจำลองระดับพื้นผิวเชิงเลข

คำสำคัญ: อากาศยานไร้คนขับ, จุดควบคุมภาคพื้นดิน, แผนที่งานทางหลวง

Abstract

This article presents the application of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for highway surveying in case study highway No. 3574, Map Pu Intersection, Chonburi Province. Distance of about 5 km., flying along the highway and expanding the area to the side. The purpose is to analyze the location and number of

ground control points that are suitable for highway works and to verify the positional accuracy of the obtained spatial data. In this study, the image has a pixel value of 4.11 cm., with 85% of the overlap and 75% of the side-lap flight time 4 flight and project take 987 images, 17 ground control points, 20 check points, by separately surveying 3 types of ground control points to evaluate the accuracy of the check points. The result is a survey of the ground control point divided into blocks, 1 km. each, 5 control points, 500 m. distance between points, giving the best of RMSE value of the check point, is the error of marking the ground control point, RMSE x of 0.37 mm., y of 0.42 mm. and z of 0.80 mm. The mean projection error is 0.095 pixel, the RMSE of the position of the check point is x of 5.43. cm., y of 5.25 cm. and z of 6.56 cm. which conforms to the Engineering UAV Survey Standard. and obtained Ortho-photo map and Digital Surface Model data.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle, Ground control points, Highway map

1. คำนำ

ความก้าวหน้าในการพัฒนาทางเทคโนโลยีด้านอากาศยานไร้คนขับหรือ UAV และการประมวลผลภาพเพื่อการถ่ายภาพแนวตั้งและแบบจำลองความสูงเชิงเลข ที่ทำให้การใช้งานง่าย สะดวก และมีความคล่องตัวมากขึ้นเมื่อเทียบกับวิธีการสำรวจด้วยภาพถ่ายทางอากาศแบบเดิม ให้ผลลัพธ์ที่มีรายละเอียดและความถูกต้อง แม่นยำสูง ในปัจจุบันผู้ประกอบการทำแผนที่หลายแห่งรับให้บริการจัดทำแผนที่ด้วย UAV มากขึ้น ซึ่งภาพถ่ายทางอากาศโดย UAV สามารถจัดการข้อจำกัดบางประการของภาพถ่ายทางอากาศจากเครื่องบินได้ เช่น ความละเอียดของภาพถ่าย เช่น ภาพถ่ายที่ได้จาก UAV สามารถให้ภาพที่มีความละเอียดดีกว่า 5 เซนติเมตร และจากการที่ UAV โดยทั่วไปนั้นจะมีระดับความสูงบินที่ต่ำกว่า

500 เมตร จึงทำให้ไม่มีเมฆบดบังในภาพถ่าย และสามารถถ่ายภาพทางอากาศได้ทันทีตามที่ตามความต้องการของผู้ใช้งาน ซึ่งภาพถ่ายทางอากาศไม่สามารถทำได้ เนื่องจากต้องรอการวางแผนการบิน

การรังวัดด้วยภาพจาก UAV นั้นไม่ได้เป็นการวัดโดยตรง ทำให้มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากมายที่กระทบต่อคุณภาพความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้ จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องนั้นพบว่า ส่วนใหญ่ของงานวิจัยที่ต้องการศึกษาค่าความถูกต้องของผลผลิตที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ ไม่ว่าจะเป็น การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความถูกต้องจากการรังวัดด้วยอากาศยานไร้คนขับกับระดับความสูงบิน หรือการศึกษาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องกับงานแผนที่ [1] และการศึกษาเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของภาพถ่ายที่ใช้รูปแบบการบินแบบกริดกับการบินแบบทั่วไป [2] จากการศึกษาทฤษฎีการรังวัดภาพ หนึ่งในตัวแปรสำคัญที่ทำให้แผนที่ภาพถ่ายที่ได้จาก UAV มีค่าความถูกต้องมากขึ้นนั้น คือ จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (GCPs : ground control points) แน่ใจว่าจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายมากจะทำให้มีค่าความถูกต้องสูง แต่ต้องเสียค่าใช้จ่ายมากขึ้น หรือ ตำแหน่งและการกระจายตัวของจุดควบคุมภาพถ่ายต้องเป็นไปตามการแบ่งประเภทกล้องถ่ายภาพ และความถูกต้องเชิงตำแหน่งของพิกัดจุดถ่ายภาพ เมื่อใช้อากาศยานไร้คนขับในการถ่ายรูปที่มีคุณภาพสูงและพิกัดจุดถ่ายภาพมีความถูกต้องต่ำ จะต้องใช้จุดควบคุมภาพถ่ายอย่างน้อย 5 จุด ต่อบล็อกการประมวลผลภาพถ่าย และจุดควบคุมภาพถ่ายจะต้องกระจายอย่างสม่ำเสมอ โดยมีระยะห่างโดยประมาณไม่เกิน 500 เมตร [3] ดังนั้นงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาถึงการวางตัวของตำแหน่งและจำนวนของจุดควบคุมภาคพื้นดินของงานบินถ่ายภาพตามแนวทางหลวงเพื่อประโยชน์ต่อการทำโครงการชนิดนี้ต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

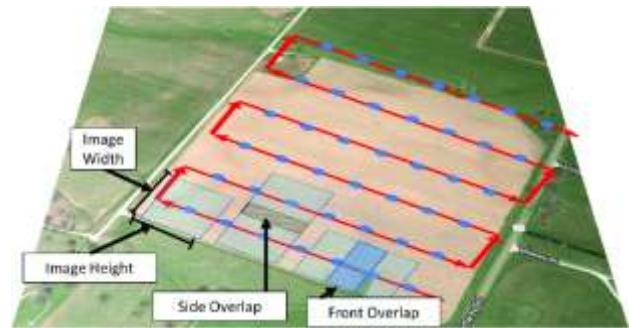
2.1 การรังวัดภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ (UAV Photogrammetry)

เป็นการรังวัดที่ประยุกต์มาจากการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศ (photogrammetry) โดยนำเอาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และการประมวลผลภาพเชิงเลขมาใช้ เทคโนโลยีในการประมวลผลภาพถ่ายแบบอัตโนมัติถูกนำมาประยุกต์ใช้ มีหลักการในการประมวลผลเบื้องต้นที่สำคัญ คือ การสร้างจุดโยงยึดอัตโนมัติ การทำโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ (Aerial Triangulation, AT) ซึ่งเป็นกระบวนการที่นำข้อมูลลำแสงที่ฉายลงบนภาพถ่าย มาทำการประมวลผลในการคำนวณทั้งการเล็งสัดยอนและกระบวนการเล็งสัด ซึ่งการเล็งสัดยอนคือการบวนการในการหาค่าองค์ประกอบการจัดภาพภายนอก ทำให้ทราบตำแหน่งและการวางตัวของภาพถ่ายเทียบกับระบบพิกัดภาคพื้นดิน [4] ซึ่งการรังวัดภาพถ่ายจาก UAV มีลำดับขั้นตอนที่สำคัญดังนี้

2.1.1 การวางแผนการบิน

การกำหนดจากลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ ขนาดจุดภาพ (GSD) ของภาพถ่าย รวมทั้งพิจารณาความละเอียดและความถูกต้องของข้อมูลที่ต้องการเพื่อกำหนดความสูงบิน และรูปแบบการบินที่เหมาะสม พร้อมทั้งกำหนดส่วนซ้อนระหว่างภาพ (overlap) และส่วนซ้อนระหว่างแนวนบิน (side-lap) ดังรูปที่ 1 กำหนดให้มีส่วนซ้อนมากกว่าการบินถ่ายภาพปกติ

เนื่องจากอากาศยานไร้คนขับใช้หลักการประมวลผลจุดภาพ เป็นการจับคู่จุดที่เหมือนกันบนคู่ภาพมาพิจารณา หรือการจับคู่ภาพ (image matching) โดยจะตรวจจับคู่จุดที่เหมือนกันบนพื้นจุดถึงต้องมีส่วนซ้อนระหว่างภาพสูงถึงร้อยละ 80 หรือมากกว่าและส่วนซ้อนระหว่างแนวนบินสูงถึงร้อยละ 60 หรือมากกว่า [5] เพื่อเป็นการให้มีเรขาคณิตของภาพในการคำนวณโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ ถูกต้องมีผลที่ดี



รูปที่ 1 ส่วนซ้อนระหว่างภาพและส่วนซ้อนระหว่างแนวนบิน

2.1.2 ความสูงการบิน

ระดับความสูงการบินของ UAV เป็นส่วนสำคัญของการสำรวจด้วยภาพถ่าย เนื่องจากความสูงบินที่ต่ำกว่าจะให้ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดินของภาพถ่ายหรือค่า GSD สูงขึ้น สามารถผลิตข้อมูลเชิงตำแหน่งที่มีความละเอียดได้มากขึ้น แต่ต้องแลกกับการใช้เวลาบินนานขึ้นเพื่อให้ได้ภาพที่มีส่วนซ้อนและส่วนเกยเท่าเดิมและยังเสี่ยงต่อการที่ภาพไม่สามารถจับคู่จุดโยงยึดได้บริเวณที่ภาพมีรายละเอียดในภาพไม่ต่างกัน เช่น แม่น้ำหรือทะเล นอกจากระยะเวลาในการบินเพิ่มขึ้นแล้วยังต้องคำนึงถึงจำนวนภาพที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อระยะเวลาในการประมวลผลภาพ ข้อจำกัดประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลภาพ ดังนั้นนอกจากจะต้องพิจารณาเรื่องความสูงต่างของสภาพพื้นที่แล้ว ระดับสูงบินมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ โดยสามารถคำนวณระดับสูงบินได้จากสมการที่ (1)

$$H = \frac{GSD \times f \times IW}{SW \times 100} \quad (1)$$

โดย H คือ ความสูงการบินเหนือจุดขึ้นบิน

GSD คือ ระยะพื้นที่ต่อจุดภาพ

SW คือ ระยะด้านกว้างของเซนเซอร์

f คือ ความยาวโฟกัสของเลนส์

IW คือ จำนวนจุดภาพด้านกว้าง

2.1.3 การถ่ายภาพ

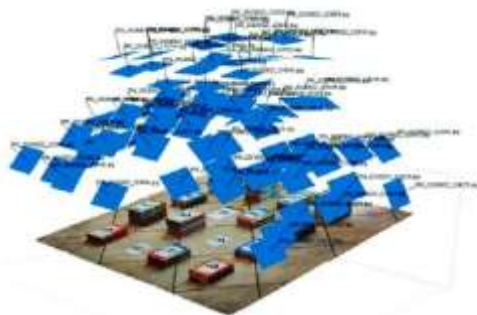
การถ่ายภาพทางอากาศเพื่อใช้ประมวลผลภาพจะต้องมีคุณภาพและคุณสมบัติที่สำคัญ จะต้องตั้งค่าพารามิเตอร์การถ่ายภาพที่เหมาะสมกับสภาวะแวดล้อมของพื้นที่ โดยทั่วไปการตั้งค่าการถ่ายภาพประกอบด้วย

รูรับแสงมีผลต่อความชัดลึกของภาพ และปริมาณแสงที่ได้รับ โดยการสำรวจด้วย UAV ที่ต้องถ่ายภาพที่มีการเปลี่ยนแปลงของความสูงในพื้นที่โครงการมากจะต้องคำนึงถึงขนาดของรูรับแสงมาก [6] สำหรับรูรับแสงที่เหมาะสมกับการถ่ายภาพทางอากาศไม่ควรน้อยกว่า $f/5.6$ ความเร็วชัตเตอร์จะต้องมีค่ามากพอที่จะไม่ทำให้เกิดความเบลอของภาพเนื่องจาก UAV เคลื่อนที่ การตั้งค่าความไวแสงคือการเพิ่มหรือลดค่าปริมาณแสงที่เข้าสู่กล้องจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนกับภาพที่บันทึก ซึ่งมีผลกับการประมวลผลภาพถ่าย

2.1.4 การประมวลผลภาพถ่ายจาก UAV

การประมวลผลภาพเป็นการประมวลผลด้วยโปรแกรมประยุกต์สำหรับประมวลผลภาพถ่ายจาก UAV โดยเฉพาะ โดยจะเป็นไปแบบอัตโนมัติใช้เทคนิคประมวลผลจุดภาพและคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (computer vision) ประกอบด้วยทฤษฎีการจับคู่ภาพ (image matching) ในขั้นตอนจับคู่จุดโยงยึด (auto tie point) ด้วยอัลกอริธึม “Scale-Invariant Feature Transform” (SIFT) ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีหนึ่งในคอมพิวเตอร์วิทัศน์สำหรับคำนวณหาจุดสนใจ (keypoints) ในรูปภาพหนึ่งๆ และคำนวณหาคุณลักษณะของจุดสนใจหนึ่งๆ [7] ที่ทำได้ขั้นตอนนี้คือการเอาจุดสนใจในรูปแบบที่ไม่ขึ้นอยู่กับมาตราส่วน การกำหนดทิศทาง ตำแหน่ง มุมการมองของแสงเงา ซึ่งจะทำให้สามารถนำมาใช้ในการเปรียบเทียบจุดเด่นในรูปอื่นๆ ได้ถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

คือเป็นการระบุตำแหน่งจุดพิกัดบนพื้นดิน ซึ่งเกิดจากแสงจากจุดเปิดถ่าย ผ่านจุดภาพจากภาพถ่ายหลายใบมาตัดกันหรือเรียกว่า การเล็งสกัด (photo intersection) มาร่วมกับการคำนวณปรับแก้เพื่อให้ได้ตำแหน่งจุดตัดกันของลำแสง หรือเรียกว่าการปรับแก้บล็อกลำแสง (bundle block adjustment) [1] แล้วสร้างโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศอัตโนมัติใช้ในการคำนวณหาองค์ประกอบการจัดวางภายนอก (exterior orientation parameters) ของทุกภาพ ข้อมูลจุดโยงยึดแบบหนาแน่นดังรูปที่ 2 จะเป็นการช่วยเพิ่มจำนวนจุดพิกัดสามมิติที่ได้จากการประมวลผล ซึ่งในขั้นตอนนี้จะต้องสร้างจากภาพอย่างน้อย 3 ใบ เพื่อควบคุมคุณภาพความถูกต้องเชิงตำแหน่งของจุดดังกล่าวเพื่อให้ได้ผลผลิตมาเป็นภาพตัดแก้เชิงเลข (orthophoto) แบบจำลองความสูงพื้นผิวเชิงเลข (DSM) และข้อมูลกลุ่มจุดพิกัดสามมิติ (point cloud) [6] ความถูกต้องของการจับคู่จุดภาพในขั้นตอนการทำจับคู่จุดโยงยึดถือเป็นส่วนที่สำคัญในการกำหนดความถูกต้องทางตำแหน่งของผลลัพธ์ที่ได้จาก UAV

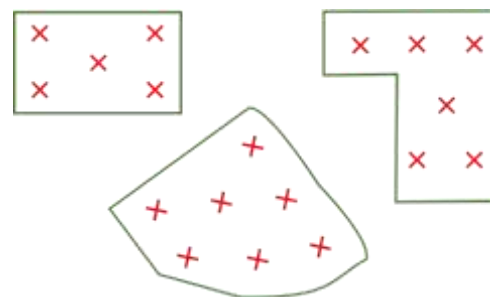


รูปที่ 2 องค์ประกอบการจัดวางภายนอกของภาพถ่าย UAV [5]

2.2 จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (Ground Control Points)

จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินเป็นจุดบังคับภาพถ่ายที่เห็นเด่นชัดบนภาพถ่ายและชี้ชัดได้บนภาคพื้นดิน จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินมีค่าพิกัดในทั้งสามมิติ มีการไปรังวัดในสนามด้วยเครื่องมือและวิธีการที่ให้ความละเอียดถูกต้องสูงในระดับที่สามารถนำมาควบคุมงานถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศในแง่ของการคำนวณปรับแก้ถ่ายสามเหลี่ยม หากว่าจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน ปรากฏบนภาพถ่ายมากกว่า 2 ภาพ ยิ่งเป็นผลดีเนื่องจากทำให้สามารถวัดค่าพิกัดภาพถ่ายได้เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้สามารถสร้างสมการค่าสังเกตเพิ่มขึ้นได้อีก 2 สมการ ต่อการวัดค่าพิกัดบนภาพที่เพิ่มขึ้นหนึ่งภาพเสมอ การมีจำนวนสมการค่าสังเกตเพิ่มขึ้นจะทำให้ผลการคำนวณปรับแก้มีความละเอียดถูกต้องและน่าเชื่อถือมากขึ้น

สามารถนำจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินนี้ไปทำโครงข่ายรังวัดโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ โดยเป็นจุดที่เห็นได้ชัดเจนทั้งในภูมิประเทศโดยใช้ป้ายล่วงหน้า (pre - mark) ค่าความถูกต้องพิกัดของจุดที่กวดควบคุมภาคพื้นดินจะถูกถ่ายทอดเข้าไปในระบบสมการของการคำนวณปรับแก้ในบล็อกของภาพถ่าย จำนวนจุดพิกัดควบคุมภาคพื้นดินที่เหมาะสมก็จะทำให้ผลลัพธ์มีความถูกต้องน่าเชื่อถือ นอกจากนี้เรขาคณิตของจุดควบคุมภาคพื้นดินในบล็อกยังมีความสำคัญต่อความละเอียดถูกต้องที่ได้จากตำแหน่งที่ตั้งของจุดพิกัดควบคุมภาคพื้นดินก็มีความสำคัญเช่นกัน การจัดวางตำแหน่งของจุดบังคับภาคพื้นดินและจำนวนที่เหมาะสมสำหรับงานประมวลผลภาพถ่าย UAV กำหนดไม่ให้น้อยกว่า 5 จุดต่อหนึ่งบล็อก [3] และมีตำแหน่งที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับการใช้งานของแผนที่นั้น การปฏิบัติงานขึ้นอยู่กับแบบจำลองสามมิติและระบบปฏิบัติการรังวัดภาพถ่ายทางอากาศ คือ จุดควบคุมแต่ละจุดควรมีระยะห่างไม่เกิน 500 เมตร และไม่ควรเรียงตัวเป็นเส้นตรงและควรอยู่ตรงกลางแบบจำลองเพื่อควบคุมคุณภาพของแบบจำลอง ส่วนมากจะใช้เทคนิคการขยายจุดบังคับภาพถ่ายจะใช้การวางตัวของจุดควบคุมภาคพื้นดินตามตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ตำแหน่งของจุดควบคุมภาพถ่ายตามทฤษฎี [3]

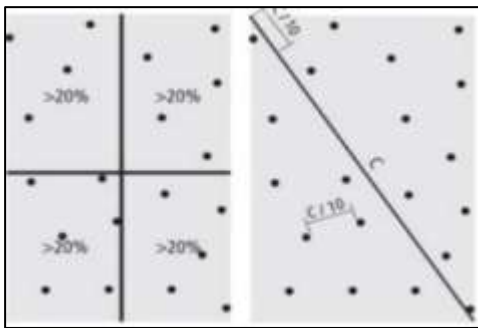
2.3 การประเมินความถูกต้องของข้อมูลเชิงพื้นที่

ค่าความถูกต้อง (accuracy) คือค่าที่บ่งบอกถึงความถูกต้องของค่าที่วัดได้ว่าใกล้เคียงค่าจริงเพียงใด การวัดค่าความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากกระบวนการประมวลผลภาพถ่าย 2 แบบ คือ ความถูกต้องทางราบ หมายถึง ค่าความถูกต้องที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าพิกัดทางราบจุดตรวจสอบและค่าพิกัดอ้างอิงของจุดตรวจสอบ ความถูกต้องทางราบจะแสดงในรูปแบบของค่า

รัศมีวงกลมที่เรียกว่า ความคลาดเคลื่อนวงกลม (CE :Circular Error) [8] และความถูกต้องทางตั้ง หมายถึง ค่าความถูกต้องที่ได้จากการเปรียบเทียบค่าระดับจุดตรวจสอบที่อ่านได้จากชุดข้อมูลและค่าระดับอ้างอิงของจุดตรวจสอบ

2.3.1 จุดตรวจสอบ (Check Point)

จุดตรวจสอบเป็นจุดที่มองเห็นชัดเจนในภาพและสามารถที่จะระบุจุดในภาพได้ ตามวิธีการแนวทางของ Federal Geographic Data Committee (FGDC) คือ จุดที่นำมาใช้การตรวจสอบ (check point) จะต้องไม่ใช่จุดเดียวกับจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (GCPs) ตำแหน่งจุดตรวจสอบต้องกระจายทั่วทั้งภาพ จะใช้จุดตรวจสอบอย่างน้อย 20 จุด โดยแบ่งภาพเป็น 4 ส่วน ในแต่ละส่วนจะต้องมีจุดไม่น้อยกว่า 20 % ระยะห่างของแต่ละจุดให้ใช้ระยะประมาณ 1 ใน 10 ส่วนของเส้นทแยงมุมดังรูปที่ 4 หากต้องการประเมินที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ แสดงว่า ยอมให้ค่าพิสัยของจุดตรวจสอบที่วัดได้จากภาพมีความผิดพลาดได้ไม่เกิน 1 จุด จากการวัดตรวจสอบ 20 จุด [9]



รูปที่ 4 ตำแหน่งของจุดตรวจสอบ [2]

2.3.2 วิธีการประเมินความถูกต้อง

ความถูกต้องเชิงพื้นที่สามารถอธิบายด้วยค่าที่คลาดเคลื่อนไปจากค่าที่คิดว่า การที่ลักษณะทางตำแหน่งของข้อมูลคลาดเคลื่อนไปจากค่าที่คิดว่า ถือว่าเป็นความผิดพลาดทางเรขาคณิตของข้อมูล ซึ่งอาจมีผลมาจากการสำรวจและการประมวลผลภาพ การประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่งของข้อมูลเป็นการสร้างความเชื่อมั่นของการนำข้อมูลไปใช้ ตัววัดความถูกต้องเชิงตำแหน่งของข้อมูลคือ ค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ย (RMSE : Root Mean Square Error) มีค่าเท่ากับ รากที่สองของค่าเฉลี่ยผลรวมกำลังสองของค่าต่างค่าที่วัดได้กับค่าตรวจสอบที่มีความถูกต้องสูงกว่า

3. วิธีการดำเนินงาน

การสำรวจและทำแผนที่ด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่อการสำรวจทำแผนที่งานทางหลวง ขอบเขตพื้นที่โครงการอยู่บริเวณ บนทางหลวงหมายเลข 3574 ช่วง แยกมาปู อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี พื้นที่ยาวประมาณ 5 กิโลเมตรดังรูปที่ 5 โดยบินถ่ายตามแนวเส้นทางและขยายพื้นที่บริเวณแยกมีวัตถุประสงค์คือ เพื่อวิเคราะห์จำนวนและตำแหน่งของจุดควบคุม

ภาพถ่ายภาคพื้นดินให้เหมาะสมกับงานทางหลวง และเพื่อตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของแผนที่ภาพถ่ายแนวดิ่ง



รูปที่ 5 พื้นที่ดำเนินงาน

โดยเริ่มจากการสำรวจลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ การวางแผนการบินถ่ายภาพและจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน การสำรวจจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบด้วยการรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS การบินถ่ายภาพตามแผนการบิน การประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ และการประเมินความถูกต้องของข้อมูลเชิงพื้นที่ได้แก่ผลผลิตคือ แบบจำลองระดับความสูงพื้นผิวเชิงเลขและภาพตัดแก้เชิงเลข โดยแสดงแผนวิธีการดำเนินงานนี้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 วิธีการดำเนินงาน

3.1 การสำรวจจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบ

ใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS เพื่อใช้ในการรังวัดเพื่อสร้างค่าพิกัดสามมิติของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินนำไปติดตั้งเพื่อรังวัดโดยไปวางบริเวณเป้าสว่างหน้า (pre-marking) ที่ใช้การพ่นสีบริเวณเป้าเพื่อให้มองเห็นได้จากการถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับ บริเวณจุดทั้งหมดใน

โครงการ 37 จุด เป็นจุดควบคุมภาพถ่าย 17 จุด จุดตรวจสอบ 20 จุด ก่อนทำการบินสำรวจแผนที่ด้วย UAV เพื่อให้ภาพถ่ายที่ได้สามารถมองเห็นจุด GCP ได้ชัดเจนในภาพถ่าย และก่อนที่จะมีการหาค่าพิกัดรายละเอียดสูงด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS เพื่อที่จะเป็นพิกัดอ้างอิงที่ใช้สำหรับการตรึงค่าพิกัดบนจุดเดียวกันที่เห็นในภาพถ่ายด้วยโปรแกรมประมวลผลภาพถ่าย

ในการจัดทำโครงการสำรวจในโครงการนี้ได้มีการระบบพิกัดอ้างอิงทางราบเป็น พื้นหลักฐาน WGS 84 พิกัดฉากเป็น UTM zone 47N โดยรังวัดเทียบกับหมุดหลักฐานของกรมโยธาธิการและผังเมือง ค่าพิกัดทางตั้งในโครงการนี้ได้มีการแปลงค่าพิกัดจาก Ellipsoidal height ที่ได้จากการรังวัดด้วยสัญญาณดาวเทียม GNSS เป็นค่าระดับทะเลปานกลาง (MSL) ในระบบพิกัดอ้างอิงทางตั้ง Thailand Geoid Model 2017 (TGM2017) การถ่ายโอนข้อมูลพิกัดตำแหน่งทางราบและทางตั้งโดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมรายละเอียดสูง GNSS มายังหมุด BM แล้วจึงใช้หมุด BM นี้สำหรับออกงานด้วยวิธีการรังวัดแบบ RTK ใช้สัญญาณวิทยุหรือสัญญาณ 4G ในการถ่ายโอนค่าแก่พิกัดตำแหน่งฐาน Base point ตั้งอยู่หมุดอ้างอิง BM ที่มีค่าพิกัดที่ตรวจสอบแล้วตั้งรูปที่ 7 ไปยังตำแหน่งจอร์ Rover point ตั้งอยู่ที่จุดควบคุมที่จะจัดตั้งขึ้นตั้งรูปที่ 8 ให้ความถูกต้องทางราบ ± 10 มิลลิเมตร และทางตั้ง ± 30 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับระยะทางระหว่าง Base และ Rover โดยที่ค่าพิกัดที่ได้ของตำแหน่งสถานีจอร์ Rover ขึ้นอยู่กับค่าความถูกต้องของพิกัดตำแหน่งของสถานีฐานหลัก



รูปที่ 7 การรังวัดค่าพิกัด GCPs และ CPs ส่วนของการตั้งที่สถานีฐานหลัก



รูปที่ 8 การรังวัดค่าพิกัด GCPs โดยวิธีการแบบ RTK ส่วนของ Rover

3.2 บินถ่ายภาพโดยอากาศยานไร้คนขับ

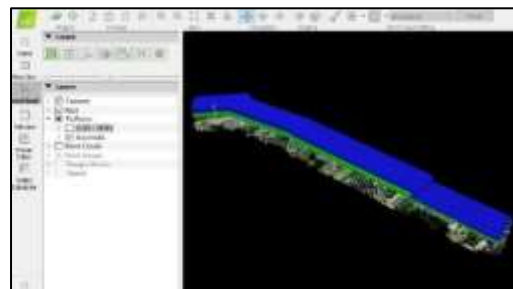
การสำรวจครั้งนี้ใช้อากาศยานไร้คนขับยี่ห้อ DJI รุ่น Phantom 4 pro V 2 ตั้งรูปที่ 9 ที่ติดตั้งกล้องถ่ายภาพ FC6310 ซึ่งมีความยาวโฟกัส 8.8 มิลลิเมตร ขนาดจุดภาพมีขนาด 2.41 ไมครอน ขนาดของเซ็นเซอร์ CCD มีขนาด 13.2 x 8.8 มิลลิเมตร ขนาดของภาพ 5,472 x 3,648 จุดภาพ บินที่ความสูง 150 เมตร ได้ค่าขนาดจุดภาพบนพื้นดิน (ground sampling distance : GSD) เท่ากับ 4.11 เซนติเมตร โดยกำหนดให้มีส่วนซ้อนระหว่างภาพ (overlap) ร้อยละ 85 และส่วนซ้อนระหว่างแนวบิน (side-lap) ร้อยละ 75 ได้ภาพถ่ายถูกถ่ายด้วยแอปพลิเคชัน Pix4D capture ที่ติดตั้งในอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมอากาศยานฯ ด้วยการถ่ายภาพถ่ายภาพตั้งมุมถ่ายภาพ 90 องศา จากการบินถ่ายภาพด้วยอากาศยานไร้คนขับตามแผนการบินได้ภาพทั้งหมด 987 ภาพ ทั้งหมด 4 เที่ยวบิน



รูปที่ 9 อากาศยานไร้คนขับยี่ห้อ DJI รุ่น Phantom 4 pro V 2

3.3 การประมวลผลภาพก่อนรังวัดค่าจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน

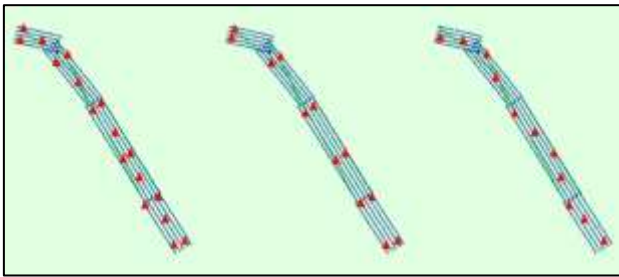
การประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ ด้วยโปรแกรมประยุกต์ Pix4D Mapper นำภาพถ่ายจำนวน 987 ภาพ เข้าเพื่อทำการเชื่อมโยงภาพแต่ละภาพรังวัดด้วยจุดโยงยึด (tie point หรือ key points) ที่สร้างขึ้นโดยอัตโนมัติจากหลักของ SIFT และสมการสภาวะร่วมเส้นตรงเดียวกัน โดยขั้นตอนเริ่มต้นนี้จะเป็นส่วนสำคัญที่สุดตั้งรูปที่ 10 ก่อนที่จะทำการผลิตข้อมูลจุดพิกัดสามมิติเพื่อสร้างแผนที่ภาพตัดแก้และแบบจำลองระดับพื้นผิวเชิงเลข โดยการที่เลือก key point image scale เป็น 1 key point จะถูกดึงออกมาเพิ่มขึ้นเนื่องจากโปรแกรมจะมีพื้นที่การค้นหาที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งจะส่งผลดีต่อความแม่นยำของจุดพิกัดสามมิติ (point cloud) และส่งผลต่อความแม่นยำของผลลัพธ์ทั้งหมด



รูปที่ 10 ผลจากการรังวัด key points

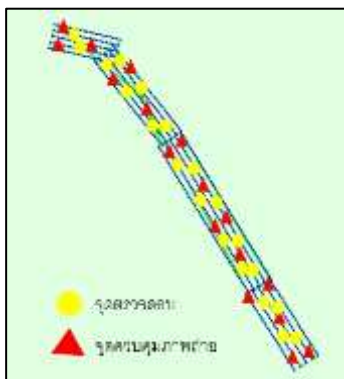
3.4 การประมวลผลภาพหลังการรังวัดจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน

ซึ่งกระบวนการนี้จะแยกโปรเจกต์ออกเป็น 3 แบบ เพื่อวางจุดควบคุมภาพถ่ายแต่ละแบบทั้ง 3 แบบ โดยโปรเจกต์แบบที่ 1 รังวัดจุดควบคุมฯ ตามแบบบล็อกแบ่งพื้นที่ออกเป็นบล็อก ๆ ระยะห่างระหว่างจุด 500 เมตรและบล็อกละ 1 กิโลเมตร วางจุดควบคุมฯ 5 จุด รวมทั้งสิ้น 17 จุด แบบที่ 2 รังวัดจุดควบคุมแบบคู่ระยะห่างระหว่างคู่ ๆ ละประมาณ 1 กิโลเมตรทั้งหมดรวมทั้งสิ้น 12 จุด และแบบที่ 3 รังวัดจุดควบคุมเป็นแนวทแยงมุมสลับไปมารวมทั้งสิ้น 11 จุด ดังรูปที่ 11

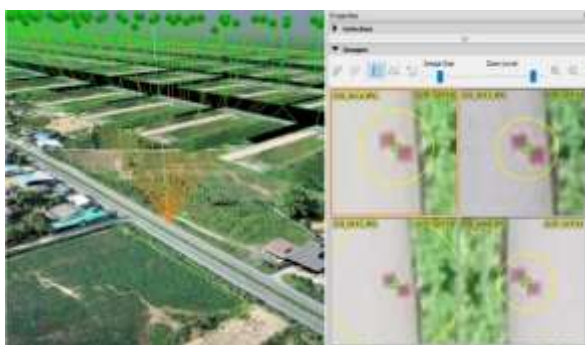


รูปที่ 11 รูปแบบการวางจุดควบคุมภาพถ่ายทั้ง 3 แบบ

หลังจากได้จุดโยงยึดแล้วจะทำให้การรังวัดจุดควบคุมฯ ที่ได้จากการสำรวจภาคสนามโดยนำเข้าค่าพิกัดจุดควบคุมฯ และจุดตรวจสอบจำนวน 20 จุดตามตำแหน่งในรูปที่ 12 และหมายพิกัดภาพที่ปรากฏทุกภาพดังรูปที่ 13



รูปที่ 12 ตำแหน่งของจุดตรวจสอบ



รูปที่ 13 การรังวัดตำแหน่งของจุดควบคุมฯ และจุดตรวจสอบ

3.5 วิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนของจุดควบคุมภาพถ่ายและจุดตรวจสอบวัดความถูกต้องเชิงตำแหน่งของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบด้วยค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ย (RMSE : Root Mean Square Error) ทั้งค่าทางราบคือ x y ค่าทางตั้งคือ z โดยผลของความคลาดเคลื่อนของจุดตรวจสอบจะบอกค่าความถูกต้องของข้อมูล

4. ผลการดำเนินงาน

4.1 ความคลาดเคลื่อนจากการหามยจุดควบคุมภาคพื้นดิน

จากการดำเนินการประมวลผลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ การปรับแก้ด้วยโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ เป็นการทำให้จุดโยงยึดอยู่ในระบบพิกัดเช่นเดียวกับจุดควบคุมภาคพื้นดิน ควบคุมมาตรฐานการปรับแก้ด้วยค่าความคลาดเคลื่อนจากการรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดิน (RMSE) ซึ่งได้จากการหามยจุดควบคุมเหล่านี้ลงในโปรแกรม Pix4D Mapper จะแสดงผลออกมาดังแสดงตัวอย่างของแบบที่ 1 ดังรูปที่ 14

GCP Name	Accuracy XY Z (m)	Rms X (m)	Rms Y (m)	Rms Z (m)	Projection Error (pixel)	With/Without
GCP1 (G1)	0.020 0.020	0.004	0.002	0.006	0.081	4:4
GCP2 (G1)	0.020 0.020	-0.003	-0.001	-0.008	0.152	25:25
GCP3 (G1)	0.020 0.020	0.003	-0.001	0.006	0.152	22:22
GCP4 (G1)	0.020 0.020	-0.006	0.001	-0.008	0.174	15:15
GCP5 (G1)	0.020 0.020	0.007	0.008	-0.009	0.273	25:25
GCP6 (G1)	0.020 0.020	-0.006	-0.009	-0.001	0.142	28:28
GCP7 (G1)	0.020 0.020	0.000	0.001	-0.001	0.126	21:21
GCP8 (G1)	0.020 0.020	0.006	0.004	0.016	0.226	21:21
GCP9 (G1)	0.020 0.020	-0.006	-0.006	-0.015	0.254	21:21
GCP10 (G1)	0.020 0.020	-0.006	0.006	-0.002	0.182	21:21
GCP11 (G1)	0.020 0.020	0.001	0.004	-0.006	0.487	21:21
GCP12 (G1)	0.020 0.020	-0.001	-0.004	-0.011	0.323	24:25
GCP13 (G1)	0.020 0.020	0.000	-0.001		0.325	28:28
Mean (m)		0.00282	0.00115	0.00270		
Stdev (m)		0.00075	0.00108	0.00026		
RMS Error (m)		0.00367	0.00168	0.00281		

รูปที่ 14 การแสดงผลความคลาดเคลื่อนจาก Pix4D mapper

ซึ่งความคลาดเคลื่อนจากการรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดินของทั้งการวางตำแหน่งของจุดควบคุมฯ 3 แบบได้ค่าความคลาดเคลื่อนสรุปออกมาได้คือการรังวัดจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินแบบที่ 1 คือรังวัดจุดควบคุมฯ ตามแบบบล็อกแบ่งพื้นที่ออกเป็นบล็อก ๆ ระยะห่างระหว่างจุด 500 เมตรให้ค่าความคลาดเคลื่อนจากการรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดินน้อยที่สุดคือค่า RMSE x y และ z เท่ากับ 0.37, 0.42 และ 0.80 มม. ตามลำดับ และแบบที่ 3 รังวัดจุดควบคุมฯ เป็นแนวทแยงมุมสลับไปมาให้ค่าความคลาดเคลื่อนจากการรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดินมากที่สุดคือค่า RMSE x y และ z เท่ากับ 1.27, 2.01 และ 3.08 มม. ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 GCP Root Mean Square error

GCP type	Projection error (pixel)	RMSE X (mm)	RMSE Y (mm)	RMSE Z (mm)
1	0.095	0.37	0.42	0.80
2	0.092	0.52	1.33	1.78
3	0.093	1.27	2.01	3.08

4.2 ความคลาดเคลื่อนของจุดตรวจสอบ

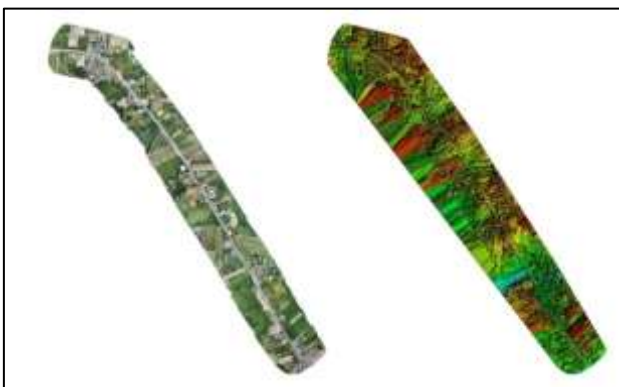
การปรับแก้ด้วยโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศของทุกแบบ ค่าความคลาดเคลื่อนจากการรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดินอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ส่วนความคลาดเคลื่อนของข้อมูลเชิงพื้นที่ที่ได้โดยดูจากความคลาดเคลื่อน (RMSE) จากการรังวัดจุดตรวจสอบคือผลต่างจากที่รังวัดจุดในพื้นที่จริงด้วย GNSS กับข้อมูลเชิงพื้นที่คือภาพตัดแก้และข้อมูลแบบจำลองความสูงพื้นผิวเชิงเลข ของการรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดินแบบที่ 1 คือรังวัดจุดควบคุมฯ ตามแบบบล็อกแบ่งพื้นที่ออกเป็นบล็อก ๆ ระยะห่างระหว่างจุด 500 เมตร ได้ค่าความต่างของจุดตรวจสอบกับที่รังวัดภาคสนามน้อยที่สุดคือค่า RMSE x y และ z ของจุดตรวจสอบ เท่ากับ 5.43, 5.25 และ 6.56 ซม. ตามลำดับ และของการรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดินแบบที่ 2 ได้ค่าความต่างของจุดตรวจสอบกับที่รังวัดภาคสนามมากที่สุดคือค่า RMSE x y และ z ของจุดตรวจสอบ เท่ากับ 28.34, 21.16 และ 40.33 ซม. ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 CP Root Mean Square error

GCP type	RMSE X (cm)	RMSE Y (cm)	RMSE Z (cm)
1	5.43	5.25	6.56
2	28.34	21.16	40.33
3	10.39	9.53	15.32

4.3 แบบจำลองความสูงพื้นผิวเชิงเลขและภาพตัดแก้เชิงเลข

การสร้างข้อมูลเชิงพื้นที่จากการประมวลผลภาพถ่ายโดยเอาผลการประมวลผลภาพถ่ายที่ดีที่สุดคือการวางตำแหน่งของจุดควบคุมภาพถ่ายแบบที่ 1 มาสร้างข้อมูลภาพตัดแก้เชิงเลข (Orthophoto) และข้อมูลแบบจำลองระดับพื้นผิวเชิงเลข (Digital Surface Model : DSM) มีความละเอียดจุดภาพเท่ากับ 4.11 เซนติเมตร ดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 แบบจำลองความสูงพื้นผิวเชิงเลขและภาพตัดแก้เชิงเลข

5. บทสรุป

การประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อการสำรวจทำแผนที่งานทางหลวงเพื่อวิเคราะห์จำนวนและตำแหน่งของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินให้เหมาะสมกับงานทางหลวงจากที่ได้แบ่งชนิดของการวางตำแหน่งของจุดควบคุมเป็น 3 แบบ แบบที่ 1 รังวัดจุดควบคุมฯ ตามแบบบล็อกแบ่งพื้นที่ออกเป็นบล็อก ๆ ละ 1 กิโลเมตร ระยะห่างระหว่างจุด 500 เมตรและวางจุดควบคุมฯ 5 จุด แบบที่ 2 รังวัดจุดควบคุมแบบคู่ระยะห่างระหว่างคู่ ๆ ละประมาณ 1 กิโลเมตรทั้งหมด และแบบที่ 3 รังวัดจุดควบคุมเป็นแนวทแยงมุมสลับไปมา ผลปรากฏว่าแบบที่ 1 คือรังวัดจุดควบคุมฯ ตามแบบบล็อกให้ค่าความถูกต้องของจุดตรวจสอบดีที่สุดคือต่ำกว่า 10 เซนติเมตร ทั้ง 3 แกนซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่องานวิศวกรรม รองลงมาคือแบบที่ 3 ค่าความถูกต้องทางราบอยู่ประมาณ 10 เซนติเมตรแต่ทางตั้งเกิน 10 เซนติเมตร ถ้าต้องการใช้ภาพตัดแก้เพียงอย่างเดียวก็สามารถใช้งานได้ ส่วนแบบที่ 2 จุดควบคุมแบบคู่ ทั้งทางราบและทางตั้งมากกว่า 20 เซนติเมตร

จากผลที่ได้การรังวัดจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินแบบที่ 2 ค่า RMSE ของจุดตรวจสอบอยู่สูงเกิน 20 ซม. เนื่องจากระยะต่อคู่ของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินอยู่ไกลกันเกินไปทำให้แบบจำลองของการรังวัดภาพถ่ายบิดตัวทำให้จุดตรวจสอบที่อยู่ตรงกลางบล็อกเกิดความคลาดเคลื่อนสูง ทำให้ไม่สามารถใช้งานข้อมูลภาพตัดแก้เชิงเลขและข้อมูลแบบจำลองความสูงพื้นผิวเชิงเลขในทางวิศวกรรมทางได้ ส่วนการรังวัดจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินแบบที่ 1 ซึ่งออกแบบตามมาตรฐานการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่องานวิศวกรรมสำหรับงานเป็นบล็อกซึ่งนำมาใช้ในงานที่บล็อกมีขนาดความกว้างของบล็อกแคบหรืองานตามแนวทางหลวงก็สามารถใช้งานได้ดีค่าความคลาดเคลื่อนของจุดตรวจสอบต่ำสามารถนำข้อมูลภาพตัดแก้เชิงเลขและข้อมูลแบบจำลองความสูงพื้นผิวเชิงเลขไปใช้งานในทางวิศวกรรมทางต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท คอนซัลแทนท์ ออฟ เทคโนโลยี จำกัด (COT) และกรมทางหลวงในฐานะเจ้าของพื้นที่ทำกรวิจัย บริษัทดอท พีเอ็นจี จำกัด ในส่วนของการรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มทร.ศรีวิชัย ที่สนับสนุนเครื่องมือในการดำเนินโครงการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] วิชัย เยี่ยงวีรชน. (2560). เอกสารการอบรมการทำแผนที่คุณภาพสูงด้วยอากาศยานไร้คนขับสำรวจรังวัด 2560. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- [2] เนติศรีหามู, และ ศิวาแก้วปลั่ง. (2560). การประเมินความถูกต้องของการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศด้วยอากาศยานไร้คนขับต้นทุ่นต่ำ. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

- [3] คณะอนุกรรมการมาตรฐานการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่องานวิศวกรรม. (2561). มาตรฐานการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่องานวิศวกรรม. การประชุมกรอบโครงสร้างงานสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ, วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์. กรุงเทพฯ.
- [4] ไพศาล สันติธรรมนนท์. (2555). การรังวัดด้วยภาพดิจิทัล Digital photogrammetry (พิมพ์ครั้งที่ 2 ฉบับปรับปรุงแก้ไข). กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [5] ไพศาล สันติธรรมนนท์. (2555). การทำแผนที่และข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับชนิดเบา Mapping and Geodata Survey using light-weight UAV. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [6] อัจฉริยะ มีชัยพิทักษ์สกุล และคณะ. (2558). เอกสารสรุปผลการศึกษาค้นคว้าวิจัยกลุ่มรายวิชา โฟโตแกรมเมตรี (โฟโตแกรมเมตรีเชิงเลข) เรื่อง อากาศยานไร้คนขับกับงานโฟโตแกรมเมตรี. กรุงเทพฯ.
- [7] ชัชวาล วรวิทย์รัตนกุล. (2557). การหาลักษณะเด่นที่เหมาะสมของอัลกอริทึม SIFT สำหรับการวิเคราะห์ภาพถ่ายเซ็นเซอร์”, การประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยศรีปทุม.
- [8] วิชัย เยี่ยงวีรชน. (2558). การสำรวจรังวัด : ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้ (พิมพ์ครั้งที่7). กรุงเทพฯ: กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [9] Federal Geographic Data Committee Secretariat. (1998). Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy. In: National Aeronautics and Space Administration.