วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา
Engineering Journal of Research and Development
วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage

ปีที่ 34 ฉบับที่ 3 กรกฎาคม-กันยายน 2566
Volume 34 Issue 3 July-September 2023
Received 1 April 2023
Revised 24 July 2023
Accepted 8 September 2023

การปรับปรุงประสิทธิภาพและความถูกต้องเชิงตำแหน่งของข้อมูลดาวเทียมนำหนที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับสำหรับการประยุกต์ใช้ในการผลิตแผนที่

ENHANCING PERFORMANCE AND EVALUATING ACCURACY OF GNSS POSITIONING FOR UAV MAPPING

ถิรวัฒน์ บรรณกุลพิพัฒน์[1*] และไพศาล สันติธรรมนนท์[2]

[1*] นักวิจัย, สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[2] รองศาสตราจารย์, สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*Corresponding author, E-Mail: thirawat.bannakulpiphat@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การศึกษาแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพและประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่งของข้อมูลสัญญาณดาวเทียมที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับสำหรับการประยุกต์ใช้ในการผลิตแผนที่ งานวิจัยได้เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย RMSE ทางราบและทางดิ่งที่ได้จากการประมวลผลร่วมกับข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศจากภาพถ่ายยูเอวีโดยมีจุดบังคับภาพถ่ายทำหน้าที่เป็นจุดตรวจสอบโยงยึดไปยังค่าพิกัดของภาพถ่ายที่ได้มาจากวิธีการประมวลผลและซอฟต์แวร์ที่ใช้แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้มีการศึกษา 5 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 RTK on-board M300 กรณีที่ 2 PPK by scientific software กรณีที่ 3 PPK by commercial software กรณีที่ 4 PPK with precise clock and orbit และกรณีที่ 5 k-PPP with precise clock and orbit งานวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบผลต่างของข้อมูลวิถีการบินที่ได้มาจากวิธีการประมวลผลข้อมูลที่เป็นที่นิยมในการนำไปประมวลผลประยุกต์ใช้กับงานทางด้านการทำแผนที่เพื่อแสดงให้เห็นถึงคุณภาพของข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลในแต่ละกรณี งานวิจัยใช้ข้อมูลที่บันทึกมาจากอากาศยานไร้คนขับที่นิยมใช้ในปัจจุบันยี่ห้อ DJI รุ่น MATRICE 300 ติดตั้งกล้อง ZENMUSE P1 ความละเอียดจุดภาพบนกล้อง 45 ล้านจุดภาพ การบินบันทึกภาพบนสนามทดสอบขนาดประมาณ 1 ตารางกิโลเมตร มีจุดบังคับภาพถ่ายจำนวน 49 จุด ทำหน้าที่เป็นจุดตรวจสอบการประมวลผลข้อมูลข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศและผลิตข้อมูลแผนที่ใช้โปรแกรมประมวลผล PIX4Dmapper จากการศึกษาพบว่าความละเอียดถูกต้องของค่าพิกัดของจุดตรวจสอบจากกรณีที่ 3 PPK by commercial software ให้ผลลัพธ์ดีที่สุดอยู่ในระดับไม่เกิน 5.9 เซนติเมตร ในส่วนของการนำข้อมูลวงโคจรและค่าแก้นาฬิกาความถูกต้องสูงมาใช้ได้ผลการเปรียบเทียบผลต่างของข้อมูลวิถีการบิน พบว่าผลต่างของข้อมูลวิถีการบินระหว่างกรณีที่ 3 และกรณีที่ 4 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างใด และผลต่างของข้อมูลวิถีการบินระหว่างกรณีที่ 3 PPK by commercial software และกรณีที่ 5 k-PPP with precise clock and orbit พบว่าผลต่างทางราบมีความคลาดเคลื่อนอย่างเป็นระบบทางตะวันออก -0.4 เมตร ทางเหนือ 0.1 เมตร สำหรับผลต่างทางดิ่งพบว่าให้ความละเอียดถูกต้องในระดับเซนติเมตรเมื่อเทียบกับการประมวลผลในรูปแบบ PPK

Thirawat Bannakulpiphat[1*] and Phisan Santitamnont[2]

[1*] Researcher, Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

[2] Associate Professor, Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

คำสำคัญ: การทำแผนที่สามมิติด้วยภาพจากอากาศยานไร้คนขับ; การคำนวณปรับแก้ข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ; วิถีการบินของยูเอวีด้วยการรังวัดแบบจลน์ในทันที; วิถีการบินของยูเอวีด้วยการรังวัดแบบจลน์แล้วประมวลผลภายหลัง; วิถีการบินของยูเอวีด้วยการรังวัดแบบจุดเดี่ยวความละเอียดถูกต้องสูงรูปแบบจลน์

ABSTRACT

This research aims to improve the efficiency and accuracy of GNSS data obtained from Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for mapping. The study compares the Root-Mean-Square Error (RMSE) on the horizontal and vertical components processed by photogrammetric Aerial Triangulation (AT) with Ground Control Point (GCP) used as checkpoints obtained from different processing methods and software. Five cases are examined namely: case 1, RTK on-board M300; case 2, PPK using scientific software; case 3, PPK using commercial software; case 4, PPK with precise clock and orbit; and case 5, k-PPP with precise clock and orbit neglecting the base station. To demonstrate the quality of the data obtained from each case, the research compares the difference of the same flight trajectory obtained from commonly used GNSS processing software for map production. The aerial images were recorded from DJI MATRICE 300 UAV equipped with a ZENMUSE P1 camera with a 45-megapixel image resolution. The test flight captured images over an area of approximately 1 square kilometer, with 49 ground control points used as checkpoints for processing aerial triangulation by PIX4Dmapper software. The study found that the best accuracy of check points was achieved in case 3, PPK using commercial software, with maximum uncertainty less than 5,9 centimeters. In term of comparing differences of flight trajectory by applying precise orbit and clock, they showed that the difference between case 3 and case 4 was insignificant. Additionally, the difference in trajectory between case 3, PPK using commercial software, and case 5, k-PPP with precise clock and orbit neglecting the base station, showed a systematic error of -0.4 meters in the east and 0.1 meters in the north for the horizontal component. The vertical difference was found to be accurate to the centimeter level compared to prior PPK processing.

KEYWORDS: Unmanned Aerial Vehicle for 3D Mapping; Adjustment Computation for Aerial Triangulation (AT); Flight Trajectory by Real-time Kinematic (RTK); Flight Trajectory by Post-Processed Kinematic (PPK); Flight Trajectory by Kinematic Precise Point Positioning (k-PPP)

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการนำอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle; UAV) มาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านการสำรวจรังวัดทำแผนที่ การผลิตแผนที่ภาพออร์โธและการผลิตแบบจำลองภูมิประเทศเชิงตัวเลข ภาพถ่ายทางอากาศที่บันทึกได้จากกล้องที่ติดตั้งบนยูเอวีจะถูกนำมาประมวลผลผ่านโปรแกรมทางด้านโฟโตแกรมเมตรีเพื่อผลิตผลลัพธ์ในการนำไปใช้ในการบริหารจัดการเมือง การออกแบบก่อสร้างและการอ้างอิงพิกัดทางด้านภูมิศาสตร์ โดยในการประมวลผลภาพถ่ายจะมีการโยงยึดจุดบังคับภาพถ่าย (Ground Control Points; GCPs) เข้าไปด้วยเพื่อทำให้ผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องเชิงตำแหน่งที่ถูกต้อง ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่าการจัดทำจุดบังคับภาพถ่ายเป็นงานที่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายและเวลา และต้องได้รับความยินยอมของเจ้าของพื้นที่ที่ให้ปฏิบัติงาน การลงพื้นที่จะมีการปฏิบัติตั้งแต่การจัดทำจุดบังคับ การกำหนดตำแหน่งจุดบังคับทั่วพื้นที่การทำงาน และการรังวัดค่าพิกัดของจุดบังคับภาพถ่าย

เพื่อใช้เป็นจุดที่ทราบค่าพิกัดสำหรับใช้ในการโยงยึดภายในโครงการ ดังนั้นหากมีวิธีทางเลือก เช่น การอ้างอิงค่าพิกัดภูมิศาสตร์โดยตรง (Direct Georeferencing; DG) ด้วยตำแหน่งจุดเปิดถ่ายของกล้องเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่จะช่วยลดปริมาณจำนวนจุดบังคับภาพถ่ายที่ใช้ในการประมวลผลได้ และยังได้รับผลผลิตแผนที่ที่มีความละเอียดถูกต้องแม่นยำเช่นเดียวกับการวางจุดบังคับภาพถ่าย แนวทางดังกล่าวคือวิธีการประมวลผลข้อมูลสัญญาณจีเอ็นเอสเอสเพื่อให้ได้มาซึ่งค่าพิกัด ได้แก่ วิธีการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ในทันที (Real-Time Kinematic; RTK), วิธีการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์แล้วประมวลผลภายหลัง (Post-Processed Kinematic; PPK) และวิธีการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงรูปแบบจลน์ (Kinematic-Precise Point Positioning; ในบทความนี้จะขอเรียกว่า k-PPP) เป็นต้น ซึ่งขั้นตอนในการประมวลผลเพื่อให้ได้ความถูกต้องเชิงตำแหน่งที่มีคุณภาพมีรายละเอียดและขั้นตอนที่ซับซ้อนตามซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอสที่เลือกใช้ [1]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้เสนอการใช้ซอฟต์แวร์ภาษาไพธอนเป็นเครื่องมือในการประมวลผลและเพิ่มประสิทธิภาพในการปรับปรุงวิธีการประมวลผลและประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่งของข้อมูลสัญญาณดาวเทียมที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ ซอฟต์แวร์ภาษาไพธอนจะวิเคราะห์เวลาขณะที่กล้องบันทึกภาพ (Timestamp) ที่ไม่สอดคล้องกับเวลาที่ได้จากการรังวัดข้อมูลสัญญาณดาวเทียม (GNSS epoch) จึงต้องมีการประมาณค่าช่วง (Interpolation) ให้สอดคล้องกับเวลาที่บันทึกภาพ นอกจากนั้นซอฟต์แวร์ยังครอบคลุมส่วนที่เกี่ยวข้องกับการวัดระยะห่างระหว่างตัวกล้องและเสารับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส (Camera-GNSS Antenna Offset) เนื่องจากจุดถ่ายภาพของกล้องและเสารับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสบนอากาศยานไร้คนขับไม่ได้อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งเป็นระยะที่ได้ทำการออฟเซทไปให้ถึงตำแหน่งการแปรเปลี่ยนของจุดศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศ (Phase Centre Variation; PCV) โดยภายในงานวิจัยจะทำการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ย (RMSE) ที่ได้มาจากความแตกต่างของค่าพิกัดจุดบังคับภาพถ่ายเทียบกับผลการรังวัดจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินที่ทำหน้าที่เป็นจุดตรวจสอบผ่านโปรแกรมทางด้านโฟโตแกรมเมตรีที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน คือ โปรแกรม PIX4Dmapper โดยเปรียบเทียบวิธีการได้มาซึ่งค่าพิกัดสำหรับนำไปประมวลผลภาพถ่ายที่เป็นรูปแบบการประมวลที่นิยมในการนำไปประยุกต์ใช้ในการทำงานทางด้านการสำรวจผ่านซอฟต์แวร์เชิงวิจัย (Scientific software) และซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ (Commercial software) ซึ่งจะได้กล่าวถึงอย่างละเอียดต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

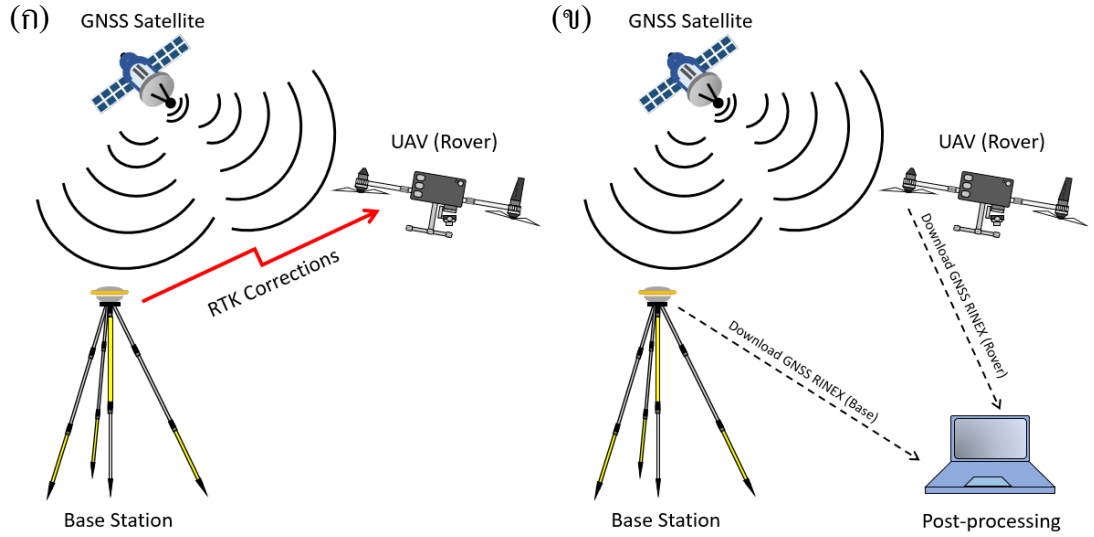
2.1 การรังวัดแบบจลน์ในทันที (Real Time Kinematic; RTK)

การรังวัดแบบจลน์ในทันทีเป็นเทคนิคหนึ่งในการระบุตำแหน่งที่อาศัยค่าแก้จากสถานีฐานที่ตั้งอยู่ใกล้การรังวัด ช่วยให้วิถีการบินมีความถูกต้องแม่นยำสูง สำหรับอากาศยานไร้คนขับที่สามารถประมวลผลค่าพิกัดในรูปแบบการรังวัดแบบจลน์ในทันทีได้จะให้ค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งในระดับเซนติเมตร ขั้นตอนการประมวลผลเพื่อให้ได้ค่าพิกัดจะเกี่ยวข้องกับ 2 องค์ประกอบ คือ (1) สถานีฐาน (Base Station) และ (2) สถานีจลน์ (Rover) ดังรูปที่ 1 (ก) สถานีฐานจะตั้งอยู่บนหมุดที่ทราบค่าพิกัดและทำการรับสัญญาณดาวเทียมประมวลผลให้มีความแม่นยำเพื่อส่งไปที่สถานีจลน์ กรณีนี้คือส่งไปที่อากาศยานไร้คนขับเพื่อปรับปรุงความแม่นยำในการระบุตำแหน่งให้อยู่ในระดับเซนติเมตร

2.2 การรังวัดแบบจลน์แล้วประมวลผลภายหลัง (Post-Processed Kinematic; PPK)

การรังวัดแบบจลน์แล้วประมวลผลภายหลังเป็นอีกหนึ่งวิธีการที่ใช้ผลการรับสัญญาณข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสบนยูเอวี (Rover) พร้อม ๆ กับการรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสจากสถานีฐาน (Base Station) ค่าพิกัดตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับจะสามารถประมวลผลได้หลังจากบินปฏิบัติภารกิจเสร็จแล้ว (Post-processed) การนำข้อมูลจีเอ็นเอสเอสที่รับสัญญาณมาประมวลผลร่วมกันและใช้ประโยชน์จากข้อมูลที่มีความต่อเนื่องจะช่วยเพิ่มความถูกต้องแม่นยำในการระบุตำแหน่ง

ความแตกต่างระหว่างการรังวัดแบบจลน์ในทันทีและการรังวัดแบบจลน์แล้วประมวลผลภายหลัง แสดงดังรูปที่ 1

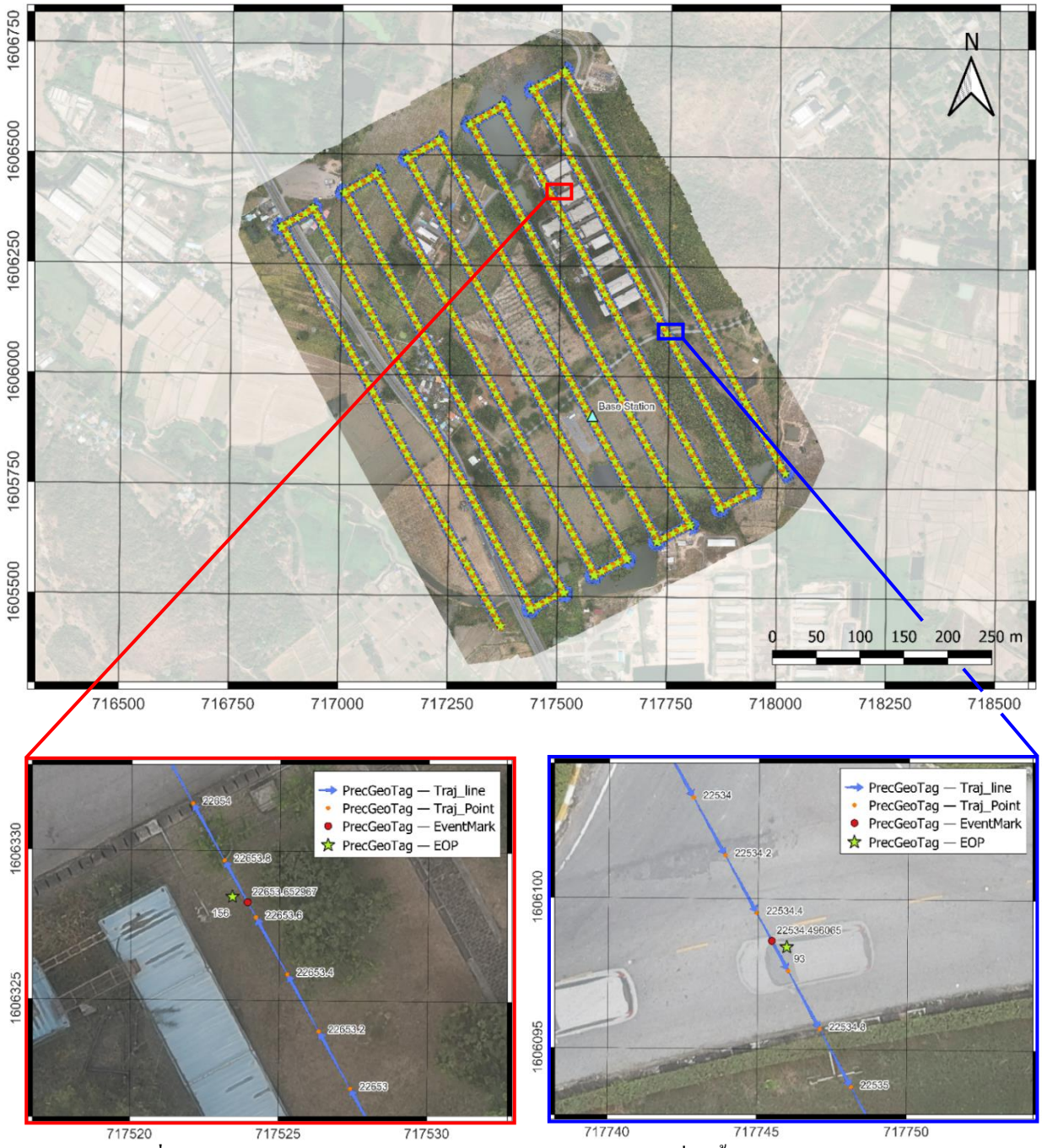


รูปที่ 1 การรังวัดรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส (ก) การรังวัดแบบจลน์ในทันที (ข) การรังวัดแบบจลน์แล้วประมวลผลภายหลัง

2.3 การประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงแบบจลน์ (Kinematic Precise Point Positioning; k-PPP)

การประมวลผลจุดเดี่ยวความละเอียดสูงเป็นรูปแบบการประมวลผลที่อาศัยการรับสัญญาณดาวเทียมเพียงเครื่องรับสัญญาณเพียงเครื่องเดียวในการประมวลผลเพื่อหาตำแหน่งโดยให้ค่าความถูกต้องในระดับเดซิเมตรไปจนถึงเซนติเมตร ทั้งในรูปแบบการประมวลผลแบบสถิตและแบบจลน์ โดยจะใช้ทั้งข้อมูลซูโดเรนจ์และเฟสของคลื่นส่งประมวลผลรวมกับค่าแก้วงโคจรดาวเทียมแม่นยำสูงและค่าแก้นาฬิกาดาวเทียมแม่นยำสูงที่เป็นผลจากวงโคจรดาวเทียมผ่านซ้ำ ๆ หลาย ๆ รอบในห้วงเวลาที่ทำการรังวัดอยู่ ทั้งนี้เพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนอย่างเป็นระบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น [2] สำหรับการนำรูปแบบการประมวลผลนี้ไปประยุกต์ใช้กับการทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศจะถูกนำไปใช้ในการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงรูปแบบจลน์ (Kinematic Precise Point Positioning; k-PPP) ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในกรณีที่ปฏิบัติภารกิจในพื้นที่ที่ไม่สามารถนำเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมไปตั้งเป็นสถานีฐานใกล้พื้นที่ปฏิบัติงานได้

หลักการประมวลผลค่าพิกัดของจุดเปิดถ่ายภาพของกล้องที่ติดตั้งบนยูเอวีจากวิถีการบินแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 หลักการประมวลผลค่าพิกัดของจุดเปิดถ่ายภาพของกล้องที่ติดตั้งบนยูเอวีจากวิถีการบิน

จากรูปแบบการกำหนดตำแหน่งวิถีการบินทั้งสามวิธี ในงานวิจัยนี้ได้มีการรังวัดประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอสเพื่อใช้ในงานทางด้านการทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศ สามารถสรุปความแตกต่างของแต่ละวิธีการประมวลผลได้ดังตารางที่ 1 โดยที่สถานีฐาน หมายถึง เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมตั้งบนหมุดที่ทราบค่าพิกัด และสถานีจลน์ หมายถึง อากาศยานไร้คนขับที่รับสัญญาณดาวเทียมผ่านอุปกรณ์บันทึกข้อมูลจีเอ็นเอสเอสที่ติดตั้งบนอากาศยาน

ตารางที่ 1 ความแตกต่างของวิธีการรังวัดประมวลผลข้อมูลระหว่างการรังวัดแบบจลน์ในทันที (RTK) การรังวัดแบบจลน์แล้วประมวลผลภายหลัง (PPK) และการประมวลผลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงรูปแบบจลน์ (k-PPP)

วิธีการประมวลผล	RTK	PPK	k-PPP
ความถูกต้อง	ระดับเดซิเมตรถึงเซนติเมตร	ระดับเซนติเมตร	ระดับหลายสิบเซนติเมตร
ค่าพิกัดของข้อมูล	ทันทีหลังการบิน	ประมวลผลภายหลังการบิน	ประมวลผลภายหลังการบิน
ข้อมูลค่าแก้	ข้อมูลค่าแก้จากสถานีฐาน	คำนวณจากข้อมูลวิถีการบินที่ต่อเนื่องก่อนตลอดเส้นทาง อาจนำค่าแก้ precise clock and orbit มาร่วมด้วยได้	คำนวนจากข้อมูลวิถีการบินที่ต่อเนื่องก่อนตลอดเส้นทาง ใช้ค่าแก้ precise clock and orbit มาร่วมด้วย ไม่ต้องการข้อมูลจากสถานีฐานใกล้ ๆ ได้
อุปกรณ์ที่ใช้	สถานีฐานและสถานีจลน์	สถานีฐานและสถานีจลน์	สถานีจลน์เท่านั้น

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

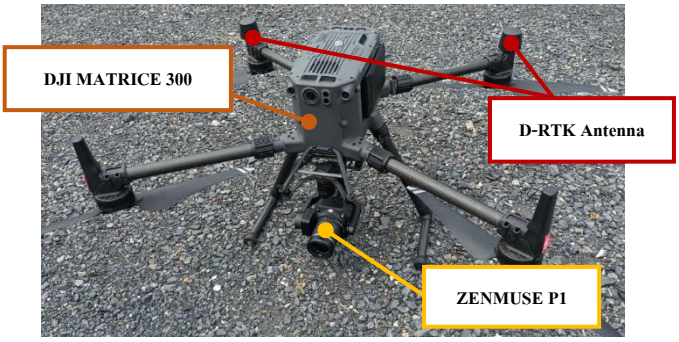
ในส่วนนี้จะเป็นการบรรยายถึงรายละเอียดของเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย รายละเอียดพื้นที่ และกระบวนการดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาวิจัยประกอบไปด้วย (1) อากาศยานไร้คนขับยี่ห้อ DJI รุ่น MATRICE 300 RTK ติดตั้งกล้อง ZENMUSE P1 (2) เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS (3) ซอฟต์แวร์สำหรับใช้ในการศึกษาวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1.1 อากาศยานไร้คนขับยี่ห้อ DJI รุ่น MATRICE 300 RTK ติดตั้งกล้อง ZENMUSE P1

ในงานวิจัยใช้อากาศยานไร้คนขับ DJI รุ่น MATRICE 300 RTK ดังรูปที่ 3 เป็นยูเอวีชนิดหลายปีกหมุนจำนวน 4 ใบพัดและติดตั้งกล้อง ZENMUSE P1 เพื่อใช้สำหรับถ่ายภาพ โดยกล้องมีเซนเซอร์รับภาพแบบฟูลเฟรมขนาด 45 ล้านจุดภาพ ความละเอียดของจุดภาพ 4.4 ไมครอน ความยาวโฟกัส 35 มิลลิเมตร มีชัตเตอร์แบบเชิงกล Global shutter มีการติดตั้ง Gimbal ที่เป็นกลไกยึดจับกล้องและรักษาทิศทางแนวเล็งกล้องเพื่อป้องกันอาการสั่นไหวของภาพขณะบันทึกภาพ นอกจากนั้น MATRICE 300 RTK มี GNSS on-board จำนวนช่องรับสัญญาณ 72 ช่องและสามารถรับสัญญาณดาวเทียมและค่าแก้เพื่อประมวลผลค่าพิกัดแบบทันที รวมถึงสามารถบันทึกข้อมูลสัญญาณดาวเทียมเพื่อนำมาประมวลผลในภายหลังสำหรับคำนวณหาเส้นวิถีการบินของพาหนะได้



รูปที่ 3 อากาศยานไร้คนขับชนิดหลายปีกหมุน ยี่ห้อ DJI รุ่น MATRICE 300 RTK ติดตั้งกล้องถ่ายภาพ ZENMUSE P1

3.1.2 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS

เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้คือ เครื่องรับสัญญาณยี่ห้อ STONEX รุ่น S900 สามารถรับสัญญาณได้หลายความถี่จากดาวเทียม GPS ดาวเทียม GLONASS ดาวเทียม GALILEO และดาวเทียม BEIDOU มีจำนวนช่องรับสัญญาณ 800 ช่อง โดยสามารถสรุปรายละเอียดของคุณลักษณะระหว่าง GNSS on-board ของ DJI M300 RTK กับ STONEX S900 ได้ดังตารางที่ 2 โดยเครื่องรับสัญญาณนี้จะตั้งไว้บนหมุดที่ทราบค่าพิกัดภายในพื้นที่การศึกษาและทำการรับสัญญาณดาวเทียมเพื่อใช้เป็นสถานีฐานในการประมวลผลข้อมูลภายในงานวิจัย

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบคุณลักษณะ (Specification) ของคุณภาพจีเอ็นเอสเอสระหว่าง GNSS On-board ของ DJI MATRICE 300 RTK กับ STONEX S900

ยี่ห้อ / รุ่น	DJI MATRICE 300 RTK	STONEX S900
ประเภทเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม	On-board	Geodetic GNSS Receiver
ระบบจีเอ็นเอสเอสที่รับสัญญาณได้	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS
จำนวนช่องรับสัญญาณดาวเทียม	72 ช่อง	800 ช่อง

3.1.3 ซอฟต์แวร์สำหรับใช้ในการศึกษาวิจัย

1. ซอฟต์แวร์ Emlid Studio เป็นซอฟต์แวร์สำหรับประมวลผลสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส โดยรองรับการประมวลผลแบบสถิตและแบบจลน์ รวมถึงสามารถประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอสที่มีการประมวลผลระยะออฟเซทจากเสารับสัญญาณไปที่ตำแหน่งการแปรเปลี่ยนของจุดศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศได้ ซึ่งเบื้องหลังซอฟต์แวร์ Emlid Studio ผนวกเอาซอฟต์แวร์เชิงวิจัย RTKLIB ในการประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอส เข้าไปใช้งาน และในบทความนี้ซอฟต์แวร์ Emlid Studio จะเป็นตัวแทนของซอฟต์แวร์เชิงวิจัย (Scientific software)

2. ซอฟต์แวร์ GrafNav เป็นซอฟต์แวร์ประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอสที่ได้รับความนิยมในระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ได้ (Mobile Mapping System; MMS) ซึ่งรองรับการประมวลผลสัญญาณดาวเทียมทั้งในรูปแบบสถิตและแบบจลน์ที่มีความซับซ้อนของข้อมูลผ่านอัลกอริทึมภายในโปรแกรมและแสดงผลวิเคราะห์ให้ผู้ใช้งานทราบ สามารถผลิตข้อมูลวิถีการบินของยานพาหนะในรูปแบบต่าง ๆ ได้ ดังนั้นในบทความนี้ซอฟต์แวร์ GrafNav จะเป็นตัวแทนของซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ (Commercial software)

โดยสามารถเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างซอฟต์แวร์เชิงวิจัยและซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบคุณลักษณะ (Specification) ของชุดซอฟต์แวร์ประมวลผลระหว่างระหว่างซอฟต์แวร์เชิงวิจัยและซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์

คุณลักษณะ	ชุดซอฟต์แวร์ประมวลผล	
	Emlid Studio (RTKLIB)	**GrafNav**
การให้บริการ	ซอฟต์แวร์เชิงวิจัย	ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์
จุดประสงค์หลัก	การประมวลผลข้อมูล GNSS RTK	การจัดการข้อมูล GNSS
ฟังก์ชั่นการทำงานที่มีให้ใช้	- การวางแผนเส้นทาง - การจัดการข้อมูล GNSS - การวิเคราะห์ข้อมูล	- การประมวลข้อมูล Raw GNSS - การประมวลผลคำนวณจุดเดี่ยวความละเอียดสูง - การสร้างข้อมูล RTCM

3. ซอฟต์แวร์ PIX4Dmapper เป็นซอฟต์แวร์ทางด้านโฟโตแกรมเมตรีที่ใช้ในการประมวลผลบล็อกของข้อมูลภาพถ่ายยูเอวีที่มีส่วนซ้อนทับกันมาก ๆ ตั้งแต่ 60% ถึง 85% ซอฟต์แวร์ PIX4Dmapper จะมีอัลกอริทึมในการประมวลผลสร้างจุดสำคัญจับคู่จุดสำคัญข้ามภาพถ่ายโดยอัตโนมัติด้วยเทคนิคโครงสร้างจากการเคลื่อนที่ (Structure from Motion : SfM) ซอฟต์แวร์ PIX4Dmapper มีอัลกอริทึมในการคำนวณปรับแก้หาค่าพารามิเตอร์การจัดภาพภายนอกผ่านหลักการสภาวะร่วมเส้นพร้อมกันทั้งบล็อก พร้อมการจำลองแบบค่าพารามิเตอร์การจัดภาพภายในและแบบจำลองความผิดเพี้ยนของเลนส์ ในลักษณะของข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศตามหลักการของความเชื่อมโยงของลำแสงระหว่างพิกัดวัตถุที่ปรากฏในภาพและพิกัดวัตถุบนภาคพื้นดินโดยที่กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า Bundle Block Adjustment (BBA) [3]

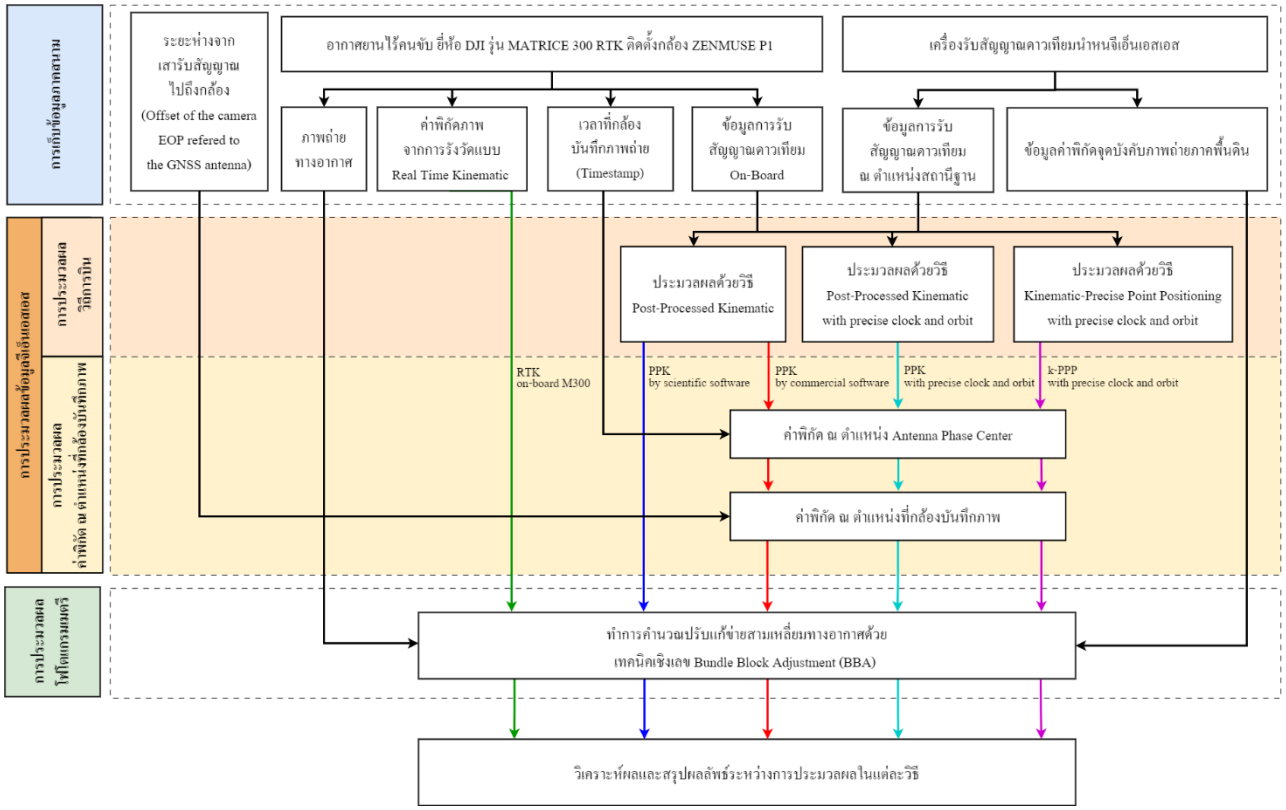
3.2 รายละเอียดพื้นที่ศึกษา

ในการศึกษาวิจัยได้เลือกบริเวณศูนย์เครือข่ายการเรียนรู้เพื่อภูมิภาค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี เป็นพื้นที่สนามทดสอบจีเอ็นเอสเอสและยูเอวีสำหรับงานแผนที่ (Geodetic GNSS and UAV Testing Facility) ภายใต้โครงการวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ และศูนย์เชี่ยวชาญการจัดการโครงสร้างพื้นฐานจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยบริเวณพื้นที่การวิจัยในครั้งนี้มีจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินกระจายตัวรอบพื้นที่เป็นจำนวน 49 จุด โดยจัดทำขึ้นภายใต้งานวิจัยการศึกษาการจัดทำจุดเป้าบังคับบนพื้นดินสำหรับยูเอวีเลเซอร์สแกน ดังรูปที่ 4

รูปที่ 4 การกระจายตัวของตำแหน่งจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินบริเวณพื้นที่การศึกษา

3.3 กระบวนการดำเนินงานวิจัย

กระบวนการดำเนินงานวิจัยนี้ได้แบ่งขั้นตอนออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนที่ 1 การเก็บข้อมูลภาคสนาม ส่วนที่ 2 การประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอส และ ส่วนที่ 3 การประมวลผลโฟโตแกรมเมตรี จากนั้นทำการประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่ง ซึ่งสามารถแสดงเป็นแผนผังการทำงานได้ดังรูปที่ 5 และสามารถอธิบายโดยสรุปได้ดังนี้



รูปที่ 5 แผนผังกระบวนการดำเนินงานวิจัย

ส่วนที่ 1 การเก็บข้อมูลภาคสนาม

ข้อมูลภาคสนามที่ทำการเก็บข้อมูลมาจาก 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 ข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับ DJI MATRICE 300 RTK ที่ติดตั้งกล้อง ZENMUSE P1 ที่ประกอบไปด้วยภาพถ่ายทางอากาศที่ได้ทำการบันทึกขณะบินปฏิบัติภารกิจ เวลาที่กล้องใช้ในการบันทึกภาพถ่าย ข้อมูลสัญญาณจีเอ็นเอสเอสที่รังวัดข้อมูลมาในขณะบินปฏิบัติภารกิจ ระยะออฟเซทระหว่างเสารับสัญญาณไปยังกล้อง นอกจากนั้นอากาศยานไร้คนขับที่ใช้สามารถบันทึกค่าพิกัดของตำแหน่งเปิดถ่ายภาพในรูปแบบวิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันทีได้ ส่วนที่ 2 ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS โดยข้อมูลในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยข้อมูลการรังวัดรับสัญญาณดาวเทียมที่สถานีฐานบนหมุดที่ทราบค่าพิกัดและข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายที่ใช้ในการประมวลผลทั้งหมดจำนวน 49 จุด ซึ่งวิธีการรังวัดค่าพิกัดได้มาจากวิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันที (RTK) เป็นเวลา 1 นาที (60 Epoch)

ส่วนที่ 2 การประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอส

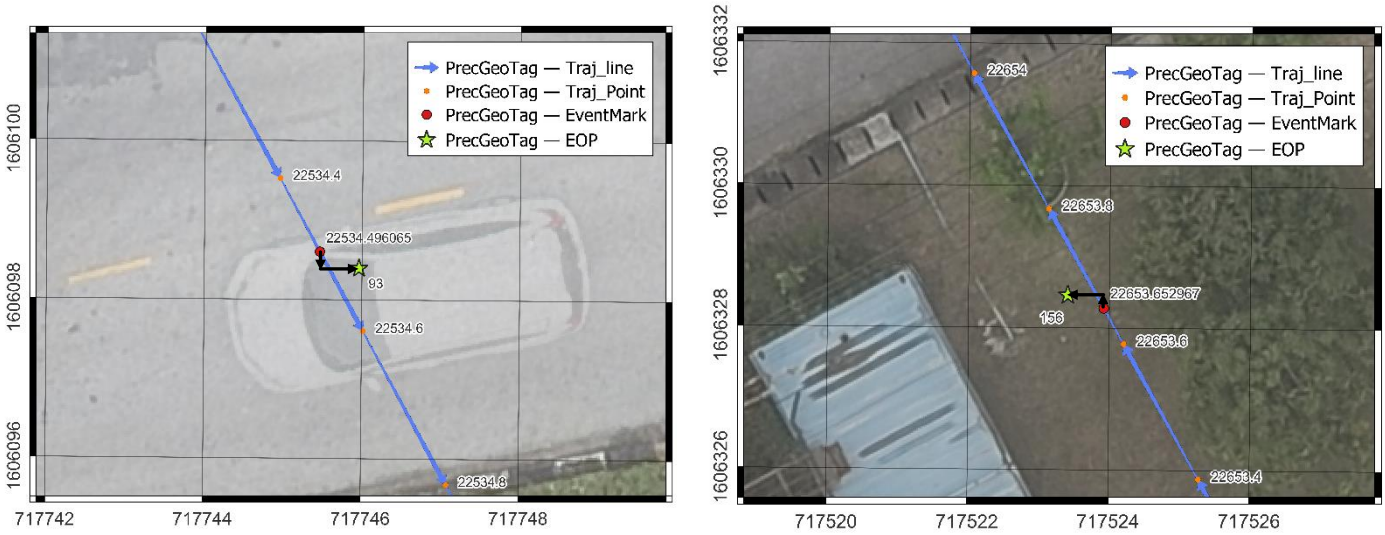
สำหรับการประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอสได้แบ่งขั้นตอนการประมวลผลเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1 การประมวลผลวิถีการบิน และขั้นตอนที่ 2 การประมวลผลค่าพิกัด ณ ตำแหน่งที่กล้องบันทึกภาพ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การประมวลผลวิถีการบิน เป็นหนึ่งในขั้นตอนที่ต้องปฏิบัติเพื่อเตรียมข้อมูลให้พร้อมกับการประมาณค่าช่วงของข้อมูล (Interpolation) โดยการประมวลผลวิถีการบินจะใช้ข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียม ณ ตำแหน่งที่ทราบค่าพิกัดหรือสถานีฐานประมวลผลร่วมกับข้อมูลการรับสัญญาณดาวเทียมของพาหนะที่ต้องการคำนวณหาวิถีการบินโดยในงานวิจัยนี้คืออากาศยานไร้

ถิรวัฒน์ บรรณกุลพิพัฒน์[1*] และไพศาล สันติธรรมนนท์[2]

คนขับ ผลลัพธ์ที่ได้คือวิถีการบินตลอดการบินปฏิบัติภารกิจ โดยความละเอียดความถูกต้องของข้อมูลขึ้นอยู่กับรูปแบบวิธีการประมวลผลและซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผล

ขั้นตอนที่ 2 การประมวลผลค่าพิกัด ณ ตำแหน่งที่กล้องบันทึกภาพ จากผลลัพธ์ในขั้นก่อนหน้าทำให้ทราบค่าพิกัดของวิถีการบินของพาหนะตลอดการบินปฏิบัติภารกิจ แต่สำหรับการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศต้องการทราบค่าพิกัดของภาพถ่าย ณ ตำแหน่งจุดเปิดถ่าย ดังนั้นจึงทำการประมวลผลเพื่อหาค่าพิกัดของภาพถ่ายโดยใช้ข้อมูลเวลาที่กล้องบันทึกภาพ (Timestamp) มาประมาณค่าหาค่าพิกัดจากข้อมูลวิถีการบินที่มีค่าพิกัดของตำแหน่งทุก ๆ เวลาที่ตั้งรับสัญญาณ โดยค่าพิกัดที่คำนวณได้เป็นค่าพิกัด ณ เสารับสัญญาณ จึงต้องมีการคำนวณค่าพิกัดจากเสารับสัญญาณไปยังตำแหน่งที่กล้องเปิดถ่าย ดังรูปที่ 6 เพื่อให้ได้ค่าพิกัดที่สามารถนำไปใช้ในการประมวลผลข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ ระยะห่างระหว่างเสารับสัญญาณ GNSS และศูนย์กลางของกล้อง ZENMUSE P1 เรียกว่า ค่าจีเอ็นเอสเอสออฟเซท (GNSS Offset) โดยได้มาจากไฟล์ DJI Marker (.mrk) ที่จะให้มาพร้อมผลการรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสในรูปแบบ RINEX ซึ่งปรากฏในยูเอวี DJI รุ่น MATRICE 300 RTK ที่มีเฟิร์มแวร์รุ่น v03.00 .01.0 1 เป็นต้นไป สำหรับในส่วนนี้ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาซอฟต์แวร์ภาษาไพธอนมาใช้ในการอ่านข้อมูลสำหรับใช้ในการประมวลผล การประมาณค่าตำแหน่งพิกัด รวมถึงการคำนวณค่าพิกัดจากเสารับสัญญาณไปยังกล้องถ่ายภาพ [4]



รูปที่ 6 ผลลัพธ์จากการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ภาษาไพธอน โดยจุดสีส้ม คือ ตำแหน่งของค่าพิกัดที่รับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสมา จุดสีแดง คือ ตำแหน่ง ณ เวลาที่กล้องทำการบันทึกภาพ และดาวสีเขียว คือ ตำแหน่งที่ทำการคำนวณจากเสารับสัญญาณไปยังตำแหน่งของที่กล้องเปิดถ่าย

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้แบ่งกรณีศึกษาออกเป็น 5 กรณีตามวิธีการประมวลผลข้อมูลและซอฟต์แวร์ที่ใช้ประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอส ซึ่งในบทความจะขอใช้คำเรียกแต่ละกรณีดังนี้ กรณีที่ 1 RTK on-board M300 กรณีที่ 2 PPK by scientific software กรณีที่ 3 PPK by commercial software กรณีที่ 4 PPK with precise clock and orbit และกรณีที่ 5 k-PPP with precise clock and orbit โดยกรณีที่ 1 RTK on-board M300 และกรณีที่ 2 PPK by scientific software ค่าพิกัดที่ได้จะเป็นค่าพิกัด ณ ตำแหน่งที่กล้องเปิดถ่ายแล้ว สำหรับกรณีที่ 3 PPK by commercial software กรณีที่ 4 PPK with precise clock and orbit และกรณีที่ 5 k-PPP with precise clock

and orbit หลังจากประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอสผ่านซอฟต์แวร์แล้วจะมีการประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ภาษาไพธอนต่อเพื่อให้ค่าพิกัดที่ได้เป็นค่าพิกัด ณ ตำแหน่งที่กล้องเปิดถ่าย

ส่วนที่ 3 การประมวลผลโฟโตแกรมเมตรี

การประมวลผลโฟโตแกรมเมตรีโดยการประมวลผลข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศในที่นี้ คือ การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างค่าพิกัดภาพถ่ายและแบบจำลองของกล้องถ่ายภาพเพื่อเชื่อมโยงไปยังค่าพิกัดจุดบังคับภาพถ่ายที่ปรากฏเด่นชัดในลักษณะของจุดสำคัญและจุดบังคับภาพถ่ายที่มีการรังวัดค่าพิกัดภาคพื้นดินที่มีความแม่นยำ พร้อมการจำลองค่าพารามิเตอร์การจัดภาพภายในและแบบจำลองความผิดเพี้ยนของเลนส์ การคำนวณผ่านกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจะถูกปรับปรุงค่าจนมีค่าเศษเหลือรวมของระบบน้อยที่สุดด้วยเทคนิค Least square adjustment computation และการประยุกต์ใช้การเพิ่มประสิทธิภาพการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศที่เรียกว่า Bundle Block Adjustment (BBA) โดยในงานวิจัยนี้ประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายร่วมกับข้อมูลค่าพิกัด ณ ตำแหน่งเปิดถ่ายที่ได้จากในส่วนก่อนหน้าและข้อมูลค่าพิกัดจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินด้วยโปรแกรม PIX4Dmapper หลังจากประมวลผลข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศเสร็จแล้วในส่วนถัดไปคือ การวิเคราะห์และสรุปผลลัพธ์ในแต่ละวิธี

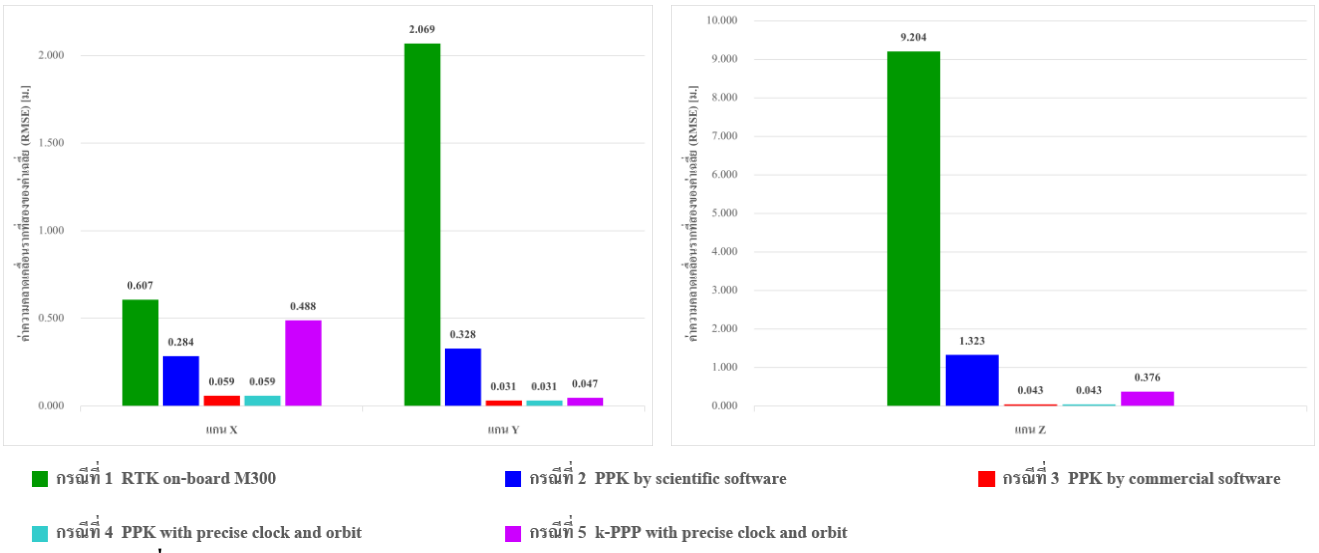
4. ผลการวิจัย

4.1 ผลข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศระหว่างแต่ละกรณีการประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอส

ในการคำนวณข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศได้ใช้ข้อมูลค่าพิกัดของภาพที่ได้มาจากแต่ละวิธีการประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอสร่วมกับจุดบังคับภาพถ่ายทั้งหมด 49 จุด ที่ทำหน้าที่เป็นจุดตรวจสอบ (Check Points; CPs) ขณะประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศและคำนวณร่วมกับจุดยึดโยงที่ได้จากการจับคู่ภาพแบบอัตโนมัติ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 4 และรูปที่ 7

ตารางที่ 4 ค่าความคลาดเคลื่อนของจุดตรวจสอบที่ได้จากการประมวลผลข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศของแต่ละกรณีการประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอสในแต่ละแกนพิกัด

กรณีที่	วิธีการประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอส	ค่าความคลาดเคลื่อนของแต่ละแกนพิกัด [ม.]		
		ทางตะวันออก (E)	ทางเหนือ (N)	ทางดิ่ง (H)
1	RTK on-board M300	0.607	2.069	9.204
2	PPK by scientific software	0.284	0.328	1.323
3	PPK by commercial software	0.059	0.031	0.043
4	PPK with precise clock and orbit	0.059	0.031	0.043
5	k-PPP with precise clock and orbit	0.488	0.047	0.376



รูปที่ 7 ค่า RMSE ของจุดตรวจสอบในแต่ละแนวแกนสำหรับแต่ละเทคนิคการประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอส

4.2 ผลการเปรียบเทียบข้อมูลวิถีการบิน

การเปรียบเทียบข้อมูลวิถีการบินในการวิจัยครั้งนี้เลือกพิจารณากรณีที่ 3, 4 และ 5 เนื่องจากกรณีที่ 1 RTK on-board M300 ไม่ได้ให้ข้อมูลวิถีการบินที่ดี และกรณีที่ 2 PPK by scientific software มีวิธีการประมวลผลข้อมูลคล้ายกับกรณีที่ 3 PPK by commercial software และหากพิจารณาค่า RMSE พบว่ากรณีที่ 3 PPK by commercial software ให้ความถูกต้องดีกว่าและน่าเชื่อถือกว่ากรณีที่ 2 PPK by scientific software อย่างมาก

ต่อจากนั้นงานวิจัยจึงใช้กรณีที่ 3 PPK by commercial software เป็นตัวแทนในการเปรียบเทียบข้อมูลวิถีการบิน โดยจะทำการคำนวณหาผลต่างของข้อมูลวิถีการบินระหว่างกรณีที่ 3 PPK by commercial software กับกรณีที่ 4 PPK with precise clock and orbit และระหว่างกรณีที่ 3 PPK by commercial software กับกรณีที่ 5 k-PPK with precise clock and orbit ซึ่งแสดงผลลัพธ์เป็นค่าทางสถิติของผลต่างได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าทางสถิติของผลต่างการคำนวณข้อมูลวิถีการบินยูเอวี (ก) ระหว่างกรณีที่ 3 PPK by commercial software กับกรณีที่ 4 PPK with precise clock and orbit (ข) ระหว่างกรณีที่ 3 PPK by commercial software กับกรณีที่ 5 k-PPP with precise clock and orbit

(ก)

ค่าทางสถิติ	ผลต่าง (Δ) [ม.]		
	ทางตะวันออก (E)	ทางเหนือ (N)	ทางดิ่ง (U)
จำนวนข้อมูล	18602	18602	18602
ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.000
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.000	0.000	0.000
ค่าต่ำสุด	0.000	0.000	-0.001
เปอร์เซ็นไทล์ที่ 25	0.000	0.000	0.000
เปอร์เซ็นไทล์ที่ 50	0.000	0.000	0.000
เปอร์เซ็นไทล์ที่ 75	0.000	0.000	0.000
ค่าสูงสุด	0.000	0.000	0.001

(ข)

ค่าทางสถิติ	ผลต่าง (Δ) [ม.]		
	ทางตะวันออก (E)	ทางเหนือ (N)	ทางดิ่ง (U)
จำนวนข้อมูล	18595	18595	18595
ค่าเฉลี่ย	-0.438	0.086	0.014
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.030	0.023	0.040
ค่าต่ำสุด	-0.543	-0.035	-0.943
เปอร์เซ็นไทล์ที่ 25	-0.454	0.077	0.000
เปอร์เซ็นไทล์ที่ 50	-0.438	0.089	0.017
เปอร์เซ็นไทล์ที่ 75	-0.422	0.100	0.036
ค่าสูงสุด	0.491	0.353	0.128

5. อภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาวิธีการรังวัดข้อมูลจีเอ็นเอสเอสและการประมวลผลข้อมูลผ่านซอฟต์แวร์เชิงวิจัยและซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์สำหรับใช้ในการประมวลผลร่วมกับข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับสำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตแผนที่ ทั้งหมด 5 กรณี ได้แก่ กรณีที่ 1 RTK on-board M300 กรณีที่ 2 PPK by scientific software กรณีที่ 3 PPK by commercial software กรณีที่ 4 PPK with precise clock and orbit และกรณีที่ 5 k-PPP with precise clock and orbit พบว่าในกรณีที่ 1 RTK on-board M300 ค่า RMSE ของจุดตรวจสอบภายในพื้นที่การศึกษามีค่า RMSE ในทางตะวันออกประมาณ 60 เซนติเมตร ทางเหนือ 2 เมตรและทางดิ่งประมาณ 9 เมตร ซึ่งถึงว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนที่สูงมาก ดังนั้นจึงนำไปสู่วิธีการประมวลผลข้อมูลในรูปแบบ PPK โดยในกรณีที่ 2 และกรณีที่ 3 จะเป็นการประมวลผลด้วยวิธี PPK แต่มีความแตกต่างกันคือ ใช้ซอฟต์แวร์เชิงวิจัยและซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ในการประมวลผลข้อมูล จากการพิจารณาค่า RMSE พบว่าซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ให้ค่า RMSE ทางราบและทางดิ่งอยู่ในระดับ 3 – 6 เซนติเมตร ซึ่งแตกต่างกับผลลัพธ์ที่ใช้ค่าจากซอฟต์แวร์เชิงวิจัยในการนำไปประมวลผลร่วมกับภาพถ่ายให้ค่า RMSE ทางราบอยู่ในระดับ 30 เซนติเมตร ทางดิ่งประมาณ 1.3 เมตร ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอัลกอริทึมภายในซอฟต์แวร์เชิงวิจัย “RTKLIB” อาจมีอัลกอริทึมออกแบบไว้ใช้งานสำหรับพื้นที่จำกัดหรือมีพารามิเตอร์ที่ต้องปรับแต่งมาก ซึ่งในงานปฏิบัติไม่อาจเรียนรู้ได้ครบถ้วนและนำมาใช้ได้อย่างถูกต้อง นอกจากนั้นได้ทำการศึกษาผลลัพธ์ที่ประมวลผลข้อมูลในรูปแบบ PPK ร่วมกับค่าแก้วงโคจรดาวเทียมและค่าแก้นาฬิกาดาวเทียมโดยใช้ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ หรือก็คือ กรณีที่ 4 ค่า RMSE ของจุดตรวจสอบที่ได้จากการประมวลผลในกรณีนี้ พบว่ามีค่า RMSE เท่ากับกรณีที่ 3 ที่ไม่ได้มีการใช้ค่าแก้วงโคจรดาวเทียมและค่าแก้นาฬิกาดาวเทียม ดังนั้นอาจสรุปได้ว่าในการประมวลผลข้อมูลพื้นที่ประมาณ 1 ตารางกิโลเมตร การประมวลผลในรูปแบบ PPK ให้ผลลัพธ์เท่ากับการประมวลผลในรูปแบบ PPK ร่วมกับค่าแก้วงโคจรดาวเทียมและค่าแก้นาฬิกาดาวเทียม จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการวิจัยในกรณีที่ 5 คือการประมวลผลข้อมูลแบบจุดเดี่ยวความละเอียดสูงรูปแบบจลน์ เนื่องจากในบางครั้งของการทำงานผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถตั้งเครื่องรับสัญญาณเป็นสถานีฐานให้กับอากาศยานไร้คนขับได้ หรือในกรณีที่การรับสัญญาณที่สถานีฐานมีปัญหารับสัญญาณไม่ได้

ผู้วิจัยจึงได้ศึกษากรณีที่ 5 นี้ หลังจากประมวลผลผ่านโปรแกรมพบว่ามีค่า RMSE ทางตะวันออกประมาณ 50 เซนติเมตร ทางเหนือ 5 เซนติเมตรและทางดิ่งประมาณ 40 เซนติเมตร

นอกจากนั้นในงานวิจัยได้ทำการเปรียบเทียบข้อมูลวิถีการบินโดยเลือกข้อมูลที่ได้จากในกรณีที่ 3, 4 และ 5 มาทำการเปรียบเทียบหาผลต่างของข้อมูลวิถีการบิน โดยได้ทำการเปรียบเทียบ 2 คู่กรณี ได้แก่ คู่กรณีที่ 1 ระหว่างกรณีที่ 3 และกรณีที่ 4 เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของการประมวลผลข้อมูลที่มีและไม่มีค่าแก้วงโคจรดาวเทียมและค่าแก้นาฬิกาดาวเทียม พบว่าความละเอียดถูกต้องของวิถีการบินมีการเปลี่ยนแปลงในระดับน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร ซึ่งถือได้ว่าพิกัดเส้นทางวิถีการบินเท่ากัน ดังนั้นการประมวลผลข้อมูลวิถีการบินในรูปแบบ PPK สำหรับพื้นที่ประมาณ 1 ตารางกิโลเมตรอาจไม่จำเป็นต้องประมวลผลร่วมกับค่าแก้วงโคจรดาวเทียมและค่าแก้นาฬิกาดาวเทียม สำหรับคู่กรณีที่ 2 ระหว่างกรณีที่ 3 และกรณีที่ 5 เพื่อประเมินประสิทธิภาพระหว่างการปฏิบัติภารกิจที่มีการตั้งสถานีฐานกับกรณีที่ไม่สามารถตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่สถานีฐานได้ พบว่าผลต่างทางราบมีความคลาดเคลื่อนอย่างเป็นระบบทางตะวันออก -0.4 เมตร ทางเหนือ 0.1 เมตรสำหรับทางดิ่งมีความคลาดเคลื่อน 0.01 เมตร แต่อย่างไรก็ตามความต่างของพิกัดนี้เป็นความคลาดเคลื่อนอย่างเป็นระบบ และอนุมานได้ว่าเป็นขีดความสามารถของชุดข้อมูลจากจีเอ็นเอสเอส on-board M300 และจากเครื่องรับสัญญาณจีออเดติกส์ STONEX S900 ในการปฏิบัติงานทำแผนที่จากยูเอวีในพื้นที่จำกัดการเข้าพื้นที่ได้อย่างดี

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ศูนย์เชี่ยวชาญการจัดการโครงสร้างพื้นฐานแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย บริษัท อินฟราพลัส จำกัด ซึ่งเป็นผู้สนับสนุนและอนุเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศและข้อมูลสัญญาณจีเอ็นเอสเอส มาใช้ในการประมวลผลข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล และงานวิจัยการศึกษาการจัดทำจุดเป้าบังคับบนพื้นดินสำหรับยูเอวีเลเซอร์สแกน (A Study on Ground Control Targeting for UAV Laser Scanning)

เอกสารอ้างอิง

[1] European GNSS Agency. *PPP-RTK market and technology report*, 2019. Available from: https://www.euspa.europa.eu/sites/default/files/calls_for_proposals/rd.03_-_ppp-rtk_market_and_technology_report.pdf [Accessed 1 February 2023].

[2] Kouba, J. and Héroux, P. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. *GPS Solutions*, 2001, 5, pp.12-28. DOI: 10.1007/PL00012883.

[3] Santitamnont, P. *Digital Photogrammetry*, 2th ed. Bangkok: Chulalongkorn University Press, 2010.

[4] Santitamnont, P. *PrecisePPKM300*. Bangkok: GitHub, 2022. Available from: https://github.com/phisan-chula/UAV_Research/tree/main/PrecisePPK_M300 [Accessed 1 February 2023].