



แนวปฏิบัติที่เป็นเลิศในการประมวลผลเพื่อผลิตข้อมูลแผนที่จากภาพถ่ายด้วยยูเอวี

BEST PRACTICE FOR MAPPING PRODUCTION FROM UAV IMAGERY

ธีรวัฒน์ บรรณกุลพิพัฒน์^{1*}, ไพศาล สันติธรรมนนท์^{2,3}, ธีรารักษ์ มณีนาถ³ และวีระชัย วงษ์วีระนิมิตร³

^{1*} นิสิตปริญญาโท, สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,

² รองศาสตราจารย์, สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,

³ วิศวกรอาวุโส, ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านการจัดการโครงสร้างพื้นฐาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้เสนอแนวปฏิบัติที่เป็นเลิศในการประมวลผลและการควบคุมคุณภาพผลผลิตข้อมูลแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศที่บันทึกข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับ โดยในงานวิจัยได้ใช้ตัวอย่างอากาศยานไร้คนขับที่นิยมอย่างแพร่หลายคือ DJI รุ่น MATRICE 300 ติดตั้งกล้อง ZENMUSE P1 ความละเอียดจุดภาพบนกล้อง 45 ล้านจุดภาพ บินบันทึกภาพบนสนามทดสอบขนาด 1.4 ตารางกิโลเมตร มีจุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวน 14 จุด การประมวลผลข้อมูลถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศและผลิตข้อมูลแผนที่ใช้โปรแกรมประมวลผลที่ได้รับความนิยมใช้ 2 โปรแกรม คือ โปรแกรม PIX4Dmapper และ โปรแกรม Agisoft Metashape ในงานวิจัยนี้ได้เสนอ แนวปฏิบัติที่เป็นเลิศในการประมวลผลควบคุมคุณภาพถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ 2 ขั้นตอนเรียกว่า “QC-1 และ QC-2” ที่มุ่งเน้นใช้ตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของข้อมูลที่รั้งวัดจุดควบคุมภาพในสนาม จุดที่รั้งวัดได้บนภาพ แบบจำลองกล้องและถ่ายสามเหลี่ยมเพื่อให้ได้ผลผลิตข้อมูลแผนที่นำไปใช้ในการกิจต่าง ๆ ที่หลากหลายได้ด้วยความมั่นใจว่าข้อมูลที่ถูกผลิตขึ้นจะสามารถนำไปใช้ได้อย่างต่อเนื่องจนถึงปลายทางโดยมีความละเอียดความถูกต้องสูงและน่าเชื่อถือ รูปแบบที่เสนอในงานวิจัยนี้เป็นการประมวลผลบล็อกภาพถ่ายทางอากาศรูปแบบ Bundle Block Adjustment (BBA) ร่วมกับจุดบังคับภาคพื้นดินจำนวนหนึ่ง พร้อมกับการคำนวณปรับแก้พารามิเตอร์การจัดภาพภายในของกล้อง และความเอนของเลนส์ ($f, c_x, c_y, R1, R2, R3, T1, T2$) ซึ่งจะถูกนำไปคำนวณปรับแก้ทุกครั้งสำหรับแต่ละบล็อกภายในโปรแกรม นอกจากนั้นในตอนท้ายของงานวิจัยได้สรุปรูปแบบฟอร์มแนะนำการปฏิบัติและแนวทางการประมวลผลผลิตข้อมูลแผนที่แบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (DEM) โดยการปรับเปลี่ยนความละเอียดจุดสุมและรูปแบบการจัดเก็บเพื่อให้สามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ปลายทางสำหรับลักษณะงานต่าง ๆ ในการปฏิบัติงานในโครงการทางวิศวกรรมใด ๆ ได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ: การทำแผนที่สามมิติด้วยภาพจากอากาศยานไร้คนขับ; การคำนวณปรับแก้ถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ; ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง; ความละเอียดจุดภาพ; การมองเห็นหลายมุมมอง

Thirawat Bannakulpiphat^{1*}, Phisan Santitamnont^{2,3}, Theerarak Maneenart³ and Weerachai Wongweeranimit³

^{1*} Master Student, Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

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

³ Senior Engineer, Center of Excellence in Infrastructure Management, Chulalongkorn University, Thailand.

ABSTRACT

This research defines the best practice of processing and measuring the quality of mapping data production from UAV. In this research, aerial images from the popular DJI M300, equipped with the 45 megapixel ZENMUSE P1 camera, were acquired over Chulalongkorn UAV Test Field. The test field covers 1.4 square kilometers and has 14 permanent signalized ground control points. Two software suites for UAV processing: PIX4Dmapper and Agisoft Metashape are used as processing and production platforms. By practicing and researching for years, we propose “the best practice for processing and measuring quality”. A scheme of in-situ quality control for aerial triangulation with camera interior and lens distortion parameters ($f, c_x, c_y, R1, R2, R3, T1, T2$) is called “QC-1 & QC-2”, which tangibly proposed here. The assured result of the aerial triangulation will help produce reliable and precise downstream data mapping. The UAV mapping scheme processed by using Bundle Block Adjustment (BBA) with optimal number of GCPs. In the last part of research, suggestions for data production by reducing GSD of the initial products are described. The pragmatic productions will provide convenience, speedy, and efficient workflow for downstream processes in a typical engineering project.

KEYWORDS: Unmanned Aerial Vehicle for Mapping Production; Adjustment Computation for Aerial Triangulation (AT); Root Mean Square Error (RMSE); Ground Sampling Distance (GSD); Multi View Geometry (MVG)

1. บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีด้านอากาศยานไร้คนขับ หรือ ยูเอวี (Unmanned Aerial Vehicle; UAV) ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับงานสำรวจรังวัดทำแผนที่ ภาพถ่ายรีโมทเซนซิงและผลิตแบบจำลองภูมิประเทศเชิงตัวเลข โดยภาพถ่ายที่บันทึกบนยูเอวีจะถูกนำมาประมวลผลผ่านโปรแกรมทางด้านโฟโตแกรมเมตรีเพื่อผลิตผลลัพธ์ในการนำไปใช้งาน ได้แก่ ภาพถ่ายรีโมทเซนซิง (Orthophoto) พอยต์คลาวด์ (Point cloud) แบบจำลองระดับสูงเชิงตัวเลข (Digital Elevation Model; DEM) และแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงตัวเลข (Digital Surface Model; DSM) เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบก่อสร้างและอ้างอิงทิศทางด้านภูมิศาสตร์ของภูมิประเทศ

งานวิจัยนี้ได้เสนอแนวปฏิบัติที่เป็นเลิศในการประมวลผลและการควบคุมคุณภาพผลผลิตข้อมูลแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศที่บันทึกข้อมูลมาจากอากาศยานไร้คนขับ โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ข้อมูลตัวอย่างเป็นภาพถ่ายทางอากาศที่บันทึกข้อมูลมาจากอากาศยานไร้คนขับ โดยใช้ตัวอย่างอากาศยานไร้คนขับที่นิยมอย่างแพร่หลายยี่ห้อ DJI รุ่น MATRICE 300 ที่ติดตั้งกล้อง ZENMUSE P1 ความละเอียดจุดภาพของเซนเซอร์รับภาพ 45 ล้านจุดภาพ แต่ละภาพมีจุดภาพ 8192×5460 จากนั้นจะนำเสนอการตรวจสอบควบคุมคุณภาพของผลผลิต เมื่อนำข้อมูลภาพถ่ายไปประมวลผลผ่านโปรแกรมทางด้านโฟโตแกรมเมตรีที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน 2 โปรแกรม คือ โปรแกรม PIX4Dmapper รุ่น 4.7.5 และโปรแกรม Agisoft Metashape 1.8.2

2. ทบทวนวรรณกรรม

บทความ [1] นี้ได้บรรยายแนวทางการปฏิบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้อากาศยานไร้คนขับสำหรับการสำรวจระยะไกลและการประยุกต์ใช้สำหรับภาคอุตสาหกรรมแผนที่สำหรับช่วงทศวรรษที่ 2020 นี้ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการปฏิบัติการกิจให้มีประสิทธิภาพและความถูกต้องสูงมีอยู่หลากหลายประเด็น ได้แก่ เรื่องการวัดสอบเครื่องมือและการคำนึงถึงระยะห่างระหว่าง

อุปกรณ์บนอากาศยานไร้คนขับ เนื่องจากบนอากาศยานไร้คนขับตำแหน่งของกล้องถ่ายภาพกับตำแหน่งที่ติดตั้งเสารับสัญญาณดาวเทียมนำหน้ติดตั้งคนละตำแหน่งกัน ดังนั้นจึงต้องมีการวัดระยะห่างระหว่างสองอุปกรณ์นี้ เพื่อให้ข้อมูลมีความถูกต้องที่มากยิ่งขึ้นสำหรับการประมวลผลเพื่อผลิตแผนที่ที่มีความถูกต้องแม่นยำในระดับเซนติเมตร เรื่องการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลค่าพิกัดที่รับวัดมาจากการรับสัญญาณจากดาวเทียมนำหน้ เนื่องจากการปฏิบัติการกิจบางครั้งมีการเลือกใช้อากาศยานไร้คนขับที่มีการรับวัดรับสัญญาณดาวเทียมหลากหลายวิธี เช่น วิธีการรับวัดแบบจลน์ในทันที วิธีการรับวัดแบบประมวลผลภายหลัง เป็นต้น ซึ่งวิธีการที่รับวัดรับสัญญาณมาแตกต่างกันส่งผลต่อการประมวลผลข้อมูลและผลลัพธ์ความถูกต้องความแม่นยำของข้อมูล โดยเฉพาะในส่วนของความละเอียดของข้อมูลตำแหน่งเวลาขณะบันทึกภาพบนอากาศยานไร้คนขับที่เป็นส่วนสำคัญในการนำไปประมวลเพื่อให้ได้ค่าพิกัดของตำแหน่งที่บันทึกภาพที่มีความถูกต้องสูง ดังนั้นความละเอียดของข้อมูลและรูปแบบการรับสัญญาณเป็นอีกหนึ่งประเด็นที่สามารถเพิ่มความถูกต้องให้กับแผนที่ได้ เรื่องการมีจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบสำหรับประมวลผลข้อมูล โดยการมีจุดควบคุมภาคพื้นดินจะช่วยให้การโยงยึดค่าพิกัดระหว่างข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศกับข้อมูลค่าพิกัดภาคพื้นดินให้สอดคล้องกันรวมถึงเพิ่มความถูกต้องในการทำแผนที่ สำหรับการมีจุดตรวจสอบจะช่วยตรวจสอบผลลัพธ์ที่ประมวลผลขึ้นมาได้ว่ามีความสอดคล้องหรือมีความถูกต้องอยู่ในระดับไหน ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยสนับสนุนการปฏิบัติการกิจโดยใช้อากาศยานไร้คนขับแบบวิธีการรับวัดแบบประมวลผลภายหลังมากกว่าวิธีการรับวัดแบบจลน์ในทันที โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมการทำงานที่เต็มไปด้วยสิ่งที่สามารถบดบังสัญญาณดาวเทียมนำหน้ เพื่อประโยชน์ต่อความปลอดภัยในการปฏิบัติงานของยูเอวีและบริเวณพื้นที่โดยรอบและเพื่อความถูกต้องของค่าพิกัดตำแหน่งที่ได้ ดังนั้นการผลิตแผนที่ความถูกต้องสูงจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงประเด็นต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาในข้างต้น

3. เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาและพื้นที่การศึกษา

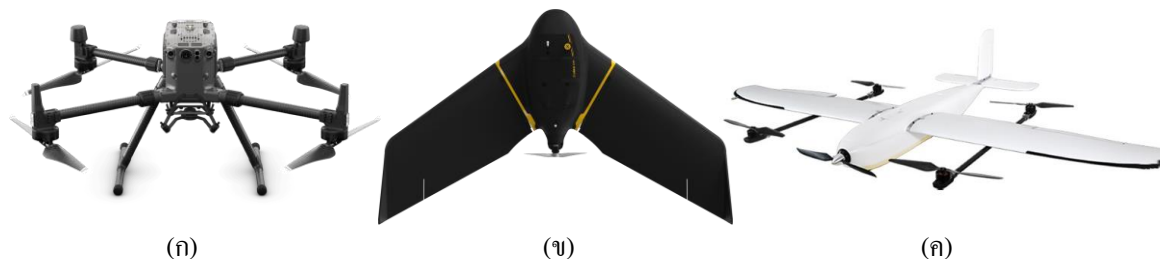
3.1 อากาศยานไร้คนขับยี่ห้อ DJI รุ่น MATRICE 300 RTK

การใช้อากาศยานไร้คนขับสำหรับถ่ายภาพทางอากาศเพื่อทำแผนที่ผู้ใช้อาจเลือกใช้อากาศยานไร้คนขับชนิดหลายปีกหมุน (Multicopter; MC) ชนิดปีกตรึง (Fixed-Wing ; FW) หรือชนิดลูกผสมเพื่อให้บินขึ้นลงแนวดิ่งพร้อมกับขับเคลื่อนไปข้างหน้าด้วยปีกยกที่เรียกว่า Vertical Take-off and Landing (VTOL) โดยที่ในแต่ละชนิดมีข้อเด่นและข้อด้อยดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อเด่นและข้อด้อยของอากาศยานไร้คนขับชนิดต่าง ๆ

คุณลักษณะ/ชนิดอากาศยาน	หลายปีกหมุน (MR)	ปีกตรึง (FW)	ลูกผสม (VTOL)
1. ระยะเวลาการบินทนนาน (Flight endurance)	กินไฟมากตามจำนวนใบพัด ประมาณรอบละ 20 นาที	ขับเคลื่อนด้วยแรงยกตัวของปีก ตรึงยี่ดขนาดใหญ่ ประมาณรอบละ 1 ชั่วโมง	ใช้ข้อดีทั้งสองเทคนิค อาจสูญเสียพลังงานในการยกตัวและลงจอด ประมาณ 30% หรือสามารถบินได้รอบละ 40 นาที
2. ความเร็วในการบิน (Flight speed) ซึ่งมีผลต่อการบินบนที่ภาพครอบคลุมพื้นที่เพื่อผลิตแผนที่	ความเร็วเฉลี่ยน้อยกว่า 10 เมตรต่อวินาที หรือ 36 กิโลเมตรต่อชั่วโมง	ความเร็วเฉลี่ยมากกว่า 20 เมตรต่อวินาที หรือ 72 กิโลเมตรต่อชั่วโมง	ความเร็วเฉลี่ยน้อยกว่า 15 เมตรต่อวินาที หรือ 53 กิโลเมตรต่อชั่วโมง
3. ความปลอดภัยในการขึ้นบินและลงจอด (Safety of takeoff and landing)	สะดวกมากในการนำเครื่องขึ้นและลงจอด ปฏิบัติภารกิจในเมืองได้	ทำงานได้รวดเร็ว เหมาะกับพื้นที่ขนาดใหญ่นอกเมือง การขึ้นบินและลงจอด ต้องเตรียมแนวพื้นที่โล่งกว้างและยาวมากกว่า 500 เมตร และมีความเสี่ยงต่อการที่กล้องตกกระแทกเสียหาย	ทำงานได้รวดเร็วใกล้เคียงกับระบบปีกตรึงยี่ดสามารถบินขึ้นลงสะดวกเข้าใกล้พื้นที่ปฏิบัติงาน ไม่มีความเสี่ยงต่อการที่กล้องตกกระแทกเสียหาย

อากาศยานไร้คนขับที่นำมาใช้สำหรับบันทึกภาพถ่ายทางอากาศคือ DJI รุ่น MATRICE 300 RTK ดังรูปที่ 1 (ก) เป็นยูเอวีชนิดหลายปีกหมุนจำนวน 4 ใบพัด การบินขึ้นลงและเข้าสู่เส้นทางการบินตามที่กำหนดเป็นรูปแบบแผนการบิน สามารถทำได้อัตโนมัติ และมีความน่าเชื่อถือสูงมาก ระบบมีเซนเซอร์ตรวจสอบการชนและการเลี่ยงการชนรอบตัว



รูปที่ 1 อากาศยานไร้คนขับชนิดต่าง ๆ (ก) หลายปีกหมุน ยี่ห้อ DJI รุ่น MATRICE 300 RTK [2] (ข) ปีกตรึงยี่ด ยี่ห้อ Sense Fly รุ่น eBee X [3] (ค) ลูกผสม ยี่ห้อ FOXTECH รุ่น Loong 2160 VTOL [4]

3.2 กล้องถ่ายภาพทางอากาศ

ปัจจุบันระบบอากาศยานไร้คนขับสามารถเลือกติดตั้งกล้องถ่ายภาพที่ออกแบบและผลิตมาเพื่อใช้ถ่ายภาพทางอากาศ โดยเฉพาะ กล้องถ่ายภาพทางอากาศสำหรับการทำแผนที่จะติดตั้งกล้องถ่ายภาพในทิศทางแนวดิ่ง (Nadir) ความละเอียดจุดภาพของกล้องอยู่ในช่วง 20 - 61 ล้านจุดภาพสามารถหาซื้อได้ทั่วไป หน่วยความจำของกล้องจะเป็นช่องเสียบการ์ดหน่วยความจำ (SD Card) สำหรับการออกแบบในสมัยใหม่มีแนวโน้มจะบรรจุหน่วยความจำชนิด Solid-State ภายในระบบของกล้อง ซึ่งทำให้การใช้งานกล้องมีความสะดวกมากขึ้น ประสิทธิภาพในการอ่านเขียนข้อมูลดีขึ้นและผลการบันทึกมีความน่าเชื่อถือสูง ในกรณีที่การบิน

ถ่ายภาพทางอากาศต้องการเน้นให้เห็นรายละเอียดด้านข้างอาคารและสิ่งปลูกสร้างมากขึ้น สามารถเลือกติดตั้งระบบกล้องหลายหัวที่ประกอบด้วยกล้องแนวตั้ง 1 ตัวและกล้องแนวเฉียง 4 ทิศทางตั้งฉากกันอีก 4 ตัว ในการปฏิบัติการกิจได้ดังรูปที่ 2 (ค)



รูปที่ 2 ตัวอย่างกล้อง (ก) กล้องถ่ายภาพแนวตั้ง ZENMUSE P1 [5] (ข) กล้องถ่ายภาพแนวตั้ง FOXTECH MAP-A7R [6]
(ค) กล้องถ่ายภาพหลายหัวชนิดกล้องตั้งและกล้องเฉียง 4 ทิศทาง FOXTECH 3DM V3 [7]

สำหรับกล้องถ่ายภาพทางอากาศที่มีราคาต่ำ เช่น กล้องที่ติดตั้งบน DJI Phantom 3/4 กลไกการเปิดรับภาพอาจเป็นชนิด Rolling Shutter กล่าวคือระหว่างการบันทึกหนึ่งเฟรมประกอบด้วยจุดภาพหลาย ๆ แฉว การอ่านแต่ละแถวให้จบสิ้นทั้งเซนเซอร์ใช้เวลา 30 - 74 มิลลิวินาที [8] ผลที่เกิดขึ้น คือ การบันทึกภาพจะมีการหน่วงคิดเป็นระยะทาง 0.30 – 2.22 เมตร หากอากาศยานไร้คนขับบินเร็วสัก 10 เมตรต่อวินาที ดังนั้นโปรแกรมประมวลผลจะต้องมีการสร้างแบบจำลองปรับแก้อาการ Rolling Shutter ด้วย ซึ่งโปรแกรมประมวลผลภาพยูเอวีทั้ง PIX4Dmapper และ Agisoft Metashape มีฟีเจอร์เหล่านี้ไว้ให้เลือกใช้แล้ว

ในงานวิจัยนี้ใช้อากาศยานไร้คนขับ DJI M300 ติดตั้งกล้อง ZENMUSE P1 มีเซนเซอร์รับภาพแบบฟูลเฟรม (Full frame) ขนาด 45 ล้านจุดภาพ ความละเอียดของจุดภาพ 4.4 ไมครอน ความยาวโฟกัส 35 มิลลิเมตร มีชัตเตอร์แบบเชิงกล (Mechanic shutter) แบบ Global shutter กล่าวคือการเปิดปิดรับแสงในการถ่ายภาพทุกครั้งถือว่ารวดเร็วมากจนสามารถบันทึกภาพทั้งเฟรมได้โดยไม่มี การขยับลำดับจุดภาพใด ๆ ในเฟรม นอกจากนี้ระบบอากาศยานมีการติดตั้ง Gimbal ที่เป็นกลไกยึดจับกล้องและรักษาทิศทางแนวเล็งกล้องเพื่อป้องกันอาการสั่นไหวของภาพขณะบันทึกภาพ ในการนำมาถ่ายภาพทางอากาศชนิดภาพถ่ายตั้งจะกำหนดมุมมองกล้องให้เป็น มุมก้ม 90 องศา

3.3 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส (Global Navigation Satellite System; GNSS)

เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้ยี่ห้อ STONEX รุ่น S900 สามารถรับสัญญาณได้หลายความถี่จากดาวเทียม GPS ดาวเทียม GLONASS ดาวเทียม GALILEO และดาวเทียม BEIDOU โดยเครื่องรับสัญญาณนี้นำไปใช้ในการสำรวจรังวัดเป็นสถานีฐานเพื่อบันทึกข้อมูลไว้ใช้ในประมวลผลร่วมกับภาพถ่ายทางอากาศในภายหลังด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์แล้วประมวลผลภายหลัง (Post-Processed Kinematic; PPK) รวมถึงนำไปใช้ในการรังวัดตำแหน่งจุดบังคับภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบในบริเวณพื้นที่การศึกษาด้วยวิธีการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ในทันที (Real-Time Kinematic; RTK) สำหรับการประยุกต์ใช้การรังวัดดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสสำหรับจุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Points; GCPs) หรือจุดตรวจสอบ (Check Points; CPs) ไม่ว่าจะเลือกใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมยี่ห้อใดและรูปแบบวิธีการรับสัญญาณประเภทไหน เช่น วิธีการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบ

จลน์ในทันที (Real-Time Kinematic; RTK) แบบสถิตอย่างเร็ว (Rapid Static) รวมถึงรูปแบบการให้บริการสถานีรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ถาวร (Continuously Operating Reference Stations ;CORS) ค่าพิกัดที่ได้ควรมีความละเอียดถูกต้องดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความละเอียดถูกต้องของการรังวัดด้วยดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสสำหรับค่าพิกัดจุดควบคุมภาคพื้นดิน

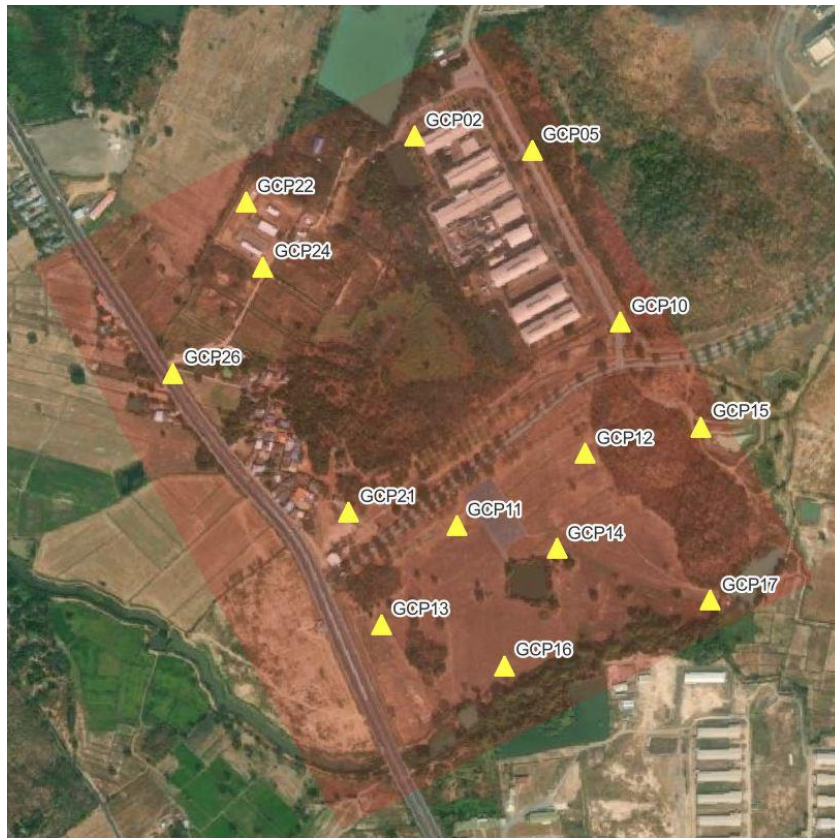
ความละเอียดถูกต้องทางราบ (Accuracy Horizontal)	+/-2 เซนติเมตร
ความละเอียดถูกต้องทางตั้ง (Accuracy Vertical)	+/-5 เซนติเมตร

3.4 โปรแกรมประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ PIX4Dmapper และ Agisoft Metashape

โปรแกรม PIX4Dmapper และ โปรแกรม Agisoft Metashape เป็นโปรแกรมทางด้านโฟโตแกรมเมตรีที่ใช้ในการประมวลผลบล็อกของข้อมูลภาพถ่ายที่มีส่วนซ้อนทับกัน ซึ่งโปรแกรมจะมีอัลกอริทึมในการประมวลผลจับคู่ภาพอัตโนมัติด้วยเทคนิค Structure from Motion (SfM) และมีอัลกอริทึมในการคำนวณปรับแก้ค่าพารามิเตอร์การจัดภาพภายนอกผ่านหลักการสถานะร่วมเส้นพร้อมกันทั้งบล็อกในลักษณะของข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศเป็นองค์ความรู้ในหลักวิชาการรังวัดด้วยภาพถ่ายเรียกว่า Bundle Block Adjustment (BBA) [9] โดยผลลัพธ์ที่ได้หลังจากประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายจะประกอบไปด้วยภาพออร์โธแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข เส้นชั้นความสูง และข้อมูลพอยต์คลาวด์

3.5 รายละเอียดพื้นที่ศึกษา

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้เลือกบริเวณศูนย์เครือข่ายการเรียนรู้เพื่อภูมิภาค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี เป็นพื้นที่สนามทดสอบจีเอ็นเอสเอสและยูเอวีสำหรับงานแผนที่ (Geodetic GNSS and UAV Testing Facility) ภายใต้โครงการวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ และศูนย์เชี่ยวชาญจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยบริเวณพื้นที่การวิจัยในครั้งนี้เมื่อบันทึกภาพแล้วนำมาประมวลผล ผลลัพธ์แผนที่ที่มีขนาด 1.488 ตารางกิโลเมตร มีจุดควบคุมภาคพื้นดินกระจายตัวรอบพื้นที่เป็นจำนวน 14 จุด ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การกระจายตัวของตำแหน่งจุดบังคับภาพถ่ายภาพพื้นดินบริเวณพื้นที่การศึกษา

4. กรรมวิธีในการดำเนินการ

วิธีปฏิบัติการเพื่อดำเนินการบินอากาศยานไร้คนขับติดกล้องถ่ายภาพเพื่อทำแผนที่และควบคุมคุณภาพการผลิตภาพออร์โธและแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศด้วยภาพจากอากาศยานไร้คนขับ แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 การออกแบบรูปแบบการบินอากาศยานไร้คนขับ ส่วนที่ 2 การเก็บข้อมูลภาคสนาม ส่วนที่ 3 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ และ ส่วนที่ 4 การประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่ง โดยจะมีรายละเอียดของส่วนต่าง ๆ ดังนี้

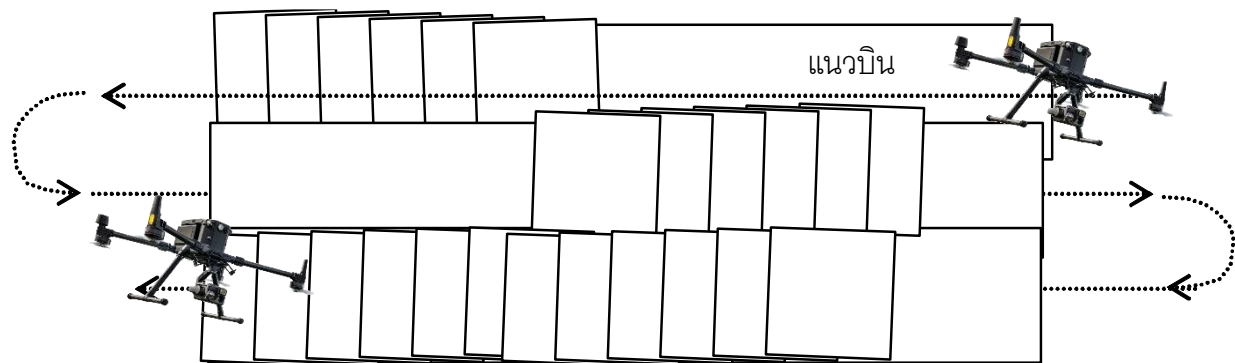
ส่วนที่ 1 การออกแบบรูปแบบการบินอากาศยานไร้คนขับ

หลักการออกแบบรูปแบบการบินอากาศยานไร้คนขับประกอบไปด้วยหลายปัจจัย ได้แก่ ตัวอากาศยาน ระบบควบคุมการบิน การสื่อสารจากเครื่องบินมายังนักบินภาคพื้นดิน และระบบกล้องถ่ายภาพ ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงปัจจัยทางด้านกล้องถ่ายภาพทางอากาศเป็นสำคัญ โดยปัจจัยที่ต้องพิจารณาเป็นลำดับแรก คือ การออกแบบแผนการบิน (Flight plan) ซึ่งประกอบไปด้วยองค์ประกอบต่าง ๆ ดังที่แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบรูปแบบการบินอากาศยานไร้คนขับ

ปัจจัยการออกแบบ	ค่าที่ควรเลือกใช้
1.รูปแบบการบิน	เลือกภารกิจการบินขึ้นต่ำ หรือ เพื่อชดเชยภาพเสียและเพิ่มคุณภาพมุมมอง 1. บินแบบเป็นกริด-ทิศทางเดียว ขึ้นต่ำสุด ประหยัดเวลาบินบันทึกภาพ 2. บินแบบเป็นกริด-สองทิศทางตั้งฉากกัน เพื่อป้องกันการสูญหายหรือคุณภาพบกพร่องในการถ่ายภาพ และเพิ่มความละเอียดมุมมองของภาพถ่าย
2. ความสูงบินเหนือภูมิประเทศ (Above Ground Level; AGL)	เลือกเพดานการบินสูงเพื่อความปลอดภัย 90 - 150 เมตร โดยอยู่ในเกณฑ์กำกับของสำนักงานการบินพลเรือน แห่งประเทศไทย ความสูงบินจะไปสัมพันธ์โดยตรงกับความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน
3. ความละเอียดจุดภาพบนพื้นดิน (Ground Sampling Distance; GSD)	ขนาดของ GSD ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะกล้องบันทึกภาพ ความกว้างมุมมอง (Field of View; FOV) และความ สูงบินเหนือภูมิประเทศ โดยทั่วไป GSD อาจอยู่ระหว่าง 1 ถึง 5 เซนติเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการใน การมองเห็นรายละเอียด (Detail) บนพื้นดิน
4. ส่วนซ้อนของภาพระหว่างแนวนบิน โดยการกำหนดจุดเปิดถ่ายภาพตาม ระยะทาง (Exposure by distance)	ส่วนซ้อนภาพในเส้นทางการบิน (Overlap) หรือค่า $p = 80\%$, ส่วนซ้อนภาพระหว่างแนวนบิน (Side lap) หรือค่า $q = 60\%$ ทั้งนี้เพื่อให้โปรแกรมประมวลผลสามารถตรวจจับจุดสำคัญ (Keypoint) แล้วจับคู่ระหว่าง ภาพได้ดีมีประสิทธิภาพ นำไปสู่การสร้างพอยต์คลาวด์ได้ดี
5. ช่วงเวลาในการบิน	ควรเลือกช่วงเวลาแสงสว่างเพียงพอ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของกล้องถ่ายภาพและการกำหนด พารามิเตอร์กล้อง โดยเป้าหมายคือ “ได้ภาพสว่างละเอียดคมชัดทั้งบล็อก”

ในภาพต่อไปนี้จะแสดงภาพถ่ายทางอากาศที่จะต้องครอบคลุมพื้นที่ที่จะทำแผนที่และมีส่วนซ้อนในแนวเส้นทางการบินและ ส่วนซ้อนด้านข้างระหว่างแนวนบินเพียงพอ ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การซ้อนทับกันระหว่างแนวนบิน

โดยในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ออกแบบแผนการบินเป็นแบบกริดทิศทางเดียว (Single Grid) ที่ความสูงบิน 150 เมตร (AGL) สำหรับภาพถ่ายจากยูเอวี DJI MATRICE 300 RTK มีค่าส่วนซ้อนของภาพตามแนวนบิน 80 % และค่าส่วนซ้อนของภาพระหว่างแนวนบิน 60% ได้ค่าความละเอียดจุดภาพบนพื้นดินประมาณ 1.87 เซนติเมตรต่อจุดภาพ มีจำนวน 1,071 ภาพ

ส่วนที่ 2 การจัดทำจุดควบคุมภาคพื้นดิน

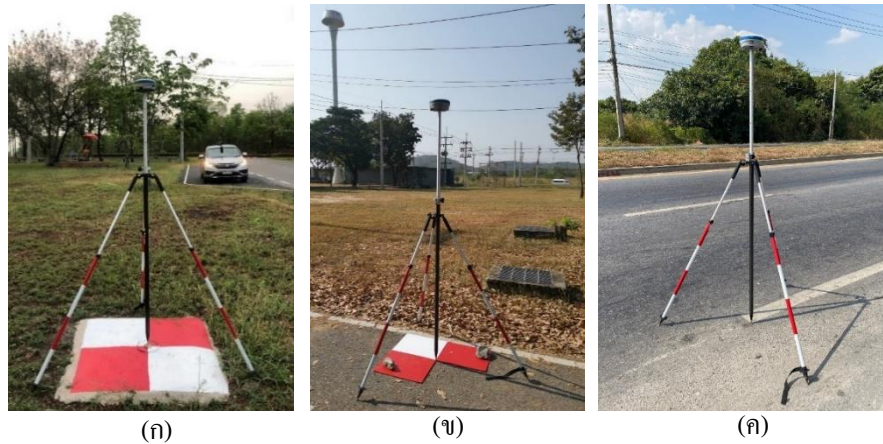
ข้อมูลการจัดทำจุดควบคุมภาคพื้นดินเป็นอีกหนึ่งส่วนที่สำคัญในการผลิตแผนที่ที่มีระบบพิกัดทั้งทางราบและทางตั้งอยู่ในระบบเดียวกันกับระบบพิกัดทำแผนที่ภาคพื้น ดังนั้นในแต่ละการปฏิบัติการกิจควรจะต้องคำนึงถึงการจัดสร้างหมุดค่าพิกัดจุดบังคับภาคพื้นดิน (GCPs) และจุดตรวจสอบ (CPs) ให้กระจายตัวอยู่ในพื้นที่ปฏิบัติงาน รวมถึงรูปแบบและวิธีการรังวัดจุดบังคับภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบให้มีความละเอียดถูกต้องตามเกณฑ์มาตรฐานชั้นงาน และสามารถสลับเปลี่ยนหน้าที่กันได้เมื่อนำมาใช้ในการประมวลผลล็อกถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ ดังนั้นบางครั้งจึงเรียกว่า จุดบังคับภาพ (Photo Control Point) โดยรูปแบบของจุดบังคับผู้ใช้สามารถเลือกใช้วัสดุและดำเนินการแตกต่างกันไปสรุปได้ดังตารางที่ 4 และรูปที่ 5

ตารางที่ 4 ชนิดและคุณลักษณะของจุดบังคับภาพ

ชนิดจุดบังคับภาพ	คุณลักษณะ
1.จุดบังคับภาพชนิดหมายไว้ล่วงหน้า (Pre-marking) หรือ จุดบังคับภาพชนิดให้สัญญาณ (Signalized)	ทำด้วยวัสดุแผ่นบางติดตั้งในสนามชั่วคราว มองเห็นได้ชัดเจนภาพถ่ายทางอากาศ เช่น แผ่นฟิวเจอร์บอร์ดมีขายในร้านเครื่องเขียนเป็นแผ่นแข็งมีสีต่าง ๆ ให้เลือกใช้ หรือใช้การทาสีบนพื้นแผ่นเรียบโดยตรง เช่น ถนน พื้น โดยทั่วไปจะต้องมีขนาดใหญ่กว่า 10 - 50 จุดภาพ
2.จุดบังคับภาพชนิดหมายไว้ภายหลัง (Postmarking) หรือ จุดบังคับภาพชนิดธรรมชาติ (Natural)	เป็นจุดหรือเครื่องหมายที่มีใช้ปรากฏอยู่แล้ว เช่น เส้นจราจร เส้นขอบสนามกีฬา สำหรับมุมหลังคาอาคารถือว่าไม่นับเนื่องจากยากต่อการรังวัดและมีลักษณะเป็นค่าที่มีการยกระดับต่างไปจากสภาพแวดล้อม ซึ่งอาจส่งผลให้การรังวัดผิดพลาดได้ง่าย

จากงานวิจัยภายใต้โครงการทางวิศวกรรมสำรวจสำหรับนิสิตวิศวกรรมบัณฑิตได้ทดสอบปริมาณจุดบังคับภาพขั้นต่ำสำหรับบล็อกภาพถ่ายทางอากาศทำแผนที่ขนาดน้อยกว่า 1 ตารางกิโลเมตร พบว่าจำนวนจุดบังคับภาพถ่ายที่เหมาะสมที่สุดคือ 5 จุด ซึ่งจะทำได้ความคลาดเคลื่อนถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศมีค่าขนาดที่เล็กลงโดยประเมินจากจุดบังคับภาพและจุดตรวจสอบ ดังรูปในภาคผนวก ก) [10] ดังนั้นจึงอาจสรุปเป็นแนวทางปฏิบัติที่ว่า สำหรับพื้นที่ 1 ตารางกิโลเมตร จำเป็นต้องมีจุดบังคับภาพอย่างน้อย 5 จุด และมีจุดตรวจสอบภาพอีกจำนวนเท่า ๆ กันคืออีก 5 จุด [11] ซึ่งจะได้กล่าวละเอียดใน แนวปฏิบัติประมวลผลควบคุมคุณภาพ 2 ขั้นตอน (QC-1 & QC-2) ภายหลังต่อไป

สำหรับการวิจัยในครั้งนี้สนามทดสอบที่เป็นพื้นที่ที่ทำการศึกษาในงานวิจัยมีหมุดบังคับภาคพื้นดินกระจายตัวทั่วพื้นที่เป็นจำนวน 14 หมุด การรังวัดเพื่อให้ได้มาของค่าพิกัดรังวัดมาจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันที เป็นจำนวน 3 นาที รังวัดเป็นจำนวน 2 ครั้ง การรังวัดแต่ละรอบห่างกันเป็นเวลาประมาณ 3 - 6 ชั่วโมง ทั้งนี้เพื่อให้งานโครงการดาวเทียมเปลี่ยนผ่านแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญต่อเรขาคณิตการรังวัดพิกัดดาวเทียม ค่าพิกัดที่ได้สองครั้งนำมาหาคำนวนหาค่าเฉลี่ยของค่าพิกัดที่รังวัดมาเพื่อใช้เป็นค่าพิกัดของหมุดบังคับภาคพื้นดินและคำนวณผลต่างเพื่อดูคุณภาพของการรังวัดอีกด้วย



รูปที่ 5 ลักษณะจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินที่กระจายตัวในพื้นที่การศึกษา (ก) และ (ข) เป้าแบบให้สัญญาณ (Signalized) (ค) เป้าแบบธรรมชาติ (Natural)

ส่วนที่ 3 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ

การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศร่วมกับจุดบังคับภาคพื้นดินใช้โปรแกรม PIX4Dmapper และ โปรแกรม Agisoft Metashape ในงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่มุ่งเน้นสรุปหากรรมวิธีการประมวลผลและการควบคุมคุณภาพจากบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศที่เป็นภาพถ่ายตั้ง (Nadir) ประกอบกับข้อมูลจุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวนหนึ่ง เพื่อผลิตข้อมูลแผนที่ภาพออร์โธและแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (DEM) ซึ่งเป็นงานที่มีความต้องการในการใช้งานในงานวิศวกรรมทั่วไป

ในโปรแกรมประมวลผลภาพยูเอวีสมัยใหม่มีการประเมินค่าการจัดภาพภายในของกล้อง สำหรับความเพี้ยนของเลนส์ทั้งความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมี (Radial lens distortion) และความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวเส้นสัมผัส (Tangential lens distortion) จะประเมินใหม่ทุกครั้งร่วมกับความยาวโฟกัส (Focal length) และค่าการเลื่อนของจุดमुख्यสำคัญ (Principle point) ไปพร้อม ๆ กับการคำนวณข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศด้วยเทคนิค Bundle Block Adjustment ดังนั้นอาจกำหนดหลักปฏิบัติได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ของกล้องจะต้องเลือกให้โปรแกรมดำเนินการคำนวณไปพร้อมกันทุกครั้งประกอบกับจุดยึดโยง (Tie point) ที่ตรวจบนภาพที่เรียกว่า In-Situ Calibration โดยสัญลักษณ์พารามิเตอร์การจัดภาพภายในของกล้องและความเพี้ยนของเลนส์แสดงดังตารางที่ 5 ในตัวอย่างข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้และโดยทั่วไป พบว่าการคำนวณปรับแก้แบบจำลองกล้องและความเพี้ยนของเลนส์โดยใช้โปรแกรมประมวลผลทั้งสองมีเสถียรภาพและได้ผลดี ประกอบในกรณีพื้นที่ศึกษามีจุดยึดโยง (Tie point) บนภาพมากถึง 10,263,890 จุดหรือคิดเป็นจำนวนค่าสังเกตมากถึง 20,527,780 ค่า ค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์มีอยู่ในฐานข้อมูลภายใน โปรแกรมทั้งสอง

ตารางที่ 5 สัญลักษณ์พารามิเตอร์การจัดภาพภายในของกล้องและความเพี้ยนของเลนส์

ความยาวโฟกัสและการเลื่อนของจุดमुख्यสำคัญ	ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมี	ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวเส้นสัมผัส
f, C_x, C_y	$K1, K2, K3$ หรือ $R1, R2, R3$	$P1, P2$ หรือ $T1, T2$

หลังจากไปปฏิบัติการกิจในภาคสนามแล้วภาพถ่ายทางอากาศที่ได้มักจะมีพิกัดของภาพฝั่งมาที่เรียกว่า Geotag photo โดยภายในตัวถ่ายของยูเอวีจะมีการติดตั้งเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส (GNSS) โดยระหว่างขณะบินบันทึกภาพจะมีการรับสัญญาณจีพีเอสชนิด Coarse-Acquisition (C/A) ด้วยทำให้ได้ค่าพิกัดที่มีความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ใช้งานทั่วไป สำหรับรูปแบบการประมวลผลนี้ค่าความแม่นยำของพิกัดภาพถ่ายยูเอวีและค่าทางสถิติที่จะใช้กำหนด โปรแกรมประมวลผลอาจสรุปได้ดังตารางที่ 6 ทั้งนี้เพื่อลดบทบาทให้จุดควบคุมภาคพื้นดินเป็นสำคัญ

ตารางที่ 6 ค่าความแม่นยำของพิกัดภาพถ่ายยูเอวีและค่าทางสถิติที่จะใช้กำหนดในโปรแกรมประมวลผล

รูปแบบการประมวลผล	ความแม่นยำทางราบ	ความแม่นยำทางตั้ง
ค่าความแม่นยำของค่าพิกัดภาพถ่าย (C/A GPS Accuracy)	± 10 เมตร	± 30 เมตร
ค่าทางสถิติของค่าพิกัดภาพถ่ายที่ใช้ในการประมวลผล (Standard deviation หรือ Weight)	± 50 เมตร	± 100 เมตร

ในงานวิจัยข้อเสนอ แนวปฏิบัติประมวลผลควบคุมคุณภาพ 2 ขั้นตอน (QC-1 & QC-2) ในแนวปฏิบัตินี้จะประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนคือ QC-1 และ QC-2 ในขั้นแรก QC-1 จะต้องมีการแบ่งจุดควบคุมภาคพื้นดิน n จุด ออกเป็นสองส่วน คือ n_1 และ n_2 ก่อนที่จะดำเนินการประมวลผลถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศโดยส่วนที่ 1 จะถูกกำหนดให้เป็นจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินเหมือนเดิมจำนวน n_1 จุด และส่วนที่ 2 จะถูกกำหนดให้เป็นจุดตรวจสอบจำนวน n_2 จุด โดยที่จำนวนจุดของ n_1 มีจำนวนไม่น้อยกว่า 5 จุด และจำนวนจุดของ n_2 มีค่าเท่ากับ $n - n_1$ จากนั้นนำทั้งสองส่วนประมวลผลผ่านโปรแกรมร่วมกับข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ

จากงานวิจัย [10] ที่ผ่านมามีจำนวนจุดควบคุมภาคพื้นดินขั้นต่ำที่ต้องใช้ต่อตารางกิโลเมตร คือ 5 จุด เพราะฉะนั้นอาจสรุปปริมาณข้อมูลจุดควบคุมภาคพื้นดินตามแนวทางปฏิบัติ (QC-1 & QC-2) ได้ดังตารางที่ 7

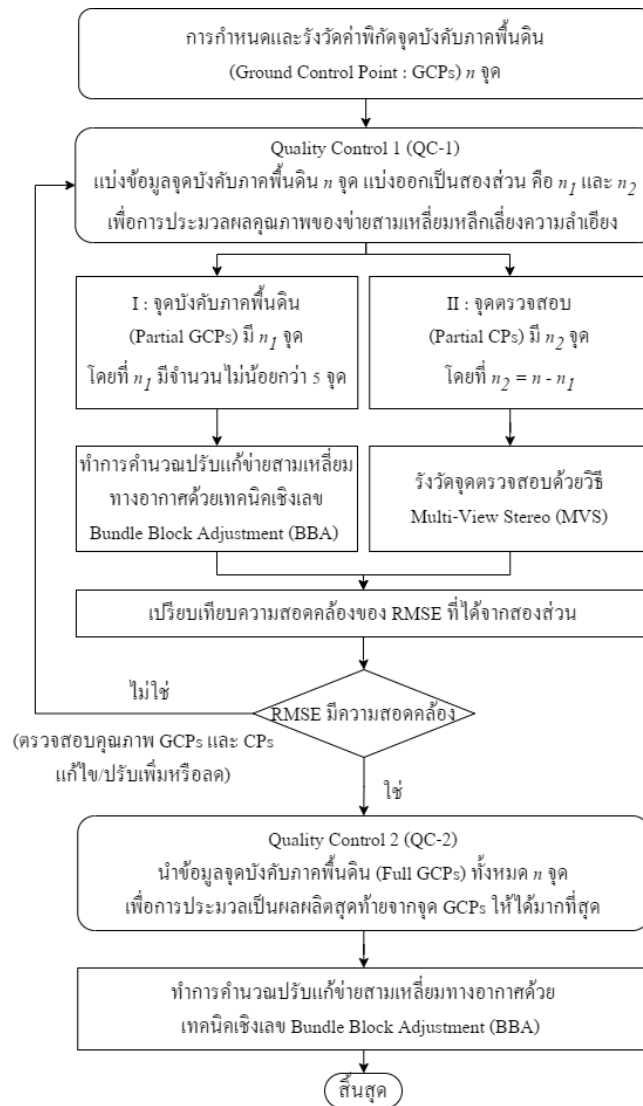
ตารางที่ 7 จำนวนจุดควบคุมภาคพื้นดินในแต่ละรูปแบบการประมวลผลที่ต้องใช้ต่อตารางกิโลเมตร

รูปแบบการประมวลผล	จำนวนจุดควบคุมภาคพื้นดิน
1. การประมวลผลประเมินคุณภาพมาตรฐาน (QC-1)	5 จุด
2. การประมวลผลประเมินคุณภาพขั้นสูง สามารถวิเคราะห์และหลีกเลี่ยงความลำเอียง (QC-2)	10 จุด

หลังจากประมวลผลจนเสร็จสิ้น ทำการพิจารณาเปรียบเทียบความแตกต่างของค่า RMSE ระหว่างจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบ โดยผลจากการคำนวณถ่ายสามเหลี่ยมบังคับด้วยพิกัดจากส่วนที่ 1 จำนวน n_1 จุด เรียกว่า RMSE_PARTIAL_GCP และสำหรับส่วนที่ 2 จำนวน n_2 จุด ที่ได้จากการรังวัดด้วยวิธีมัลติวิวสเตอริโอ (Multi-View Stereo; MVS) เรียกว่า RMSE_PARTIAL_CP โดยหลักการแล้วค่าต่างระหว่าง RMSE_PARTIAL_GCP และ RMSE_PARTIAL_CP ควรจะอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องจากทั้งสองส่วนปฏิบัติตามด้วยกระบวนการ วิธีการรังวัด พร้อม ๆ กันในสนาม

แนวปฏิบัติประมวลผลควบคุมคุณภาพ 2 ขั้นตอน (QC-1 & QC-2) ในขั้นตอนที่ 2 เรียกว่า QC-2 จะประมวลผลข้อมูลโดยนำจุด GCP ทั้งหมดมาใช้งานร่วมกัน ทั้งนี้เพื่อให้การบังคับเกิดผลมากที่สุด ให้คู่กับภาระงานสนามที่ได้จัดทำ GCP ขึ้นมาจำนวนมาก ผลที่ได้เรียกว่า RMSE_FULL_GCP ซึ่งควรจะมีค่าไม่ต่างไปจาก RMSE_PARTIAL_GCP และ RMSE_PARTIAL_CP

สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 6 โดยความละเอียดถูกต้องของการประมวลผลภาพถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศอาจพิจารณาว่า ค่า RMSE ไม่เกิน 2 เท่าของความละเอียดถูกต้องของการรังวัดด้วยดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสสำหรับค่าพิกัดจุดควบคุมภาพที่กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 6 แผนผังแนวปฏิบัติประมวลผลควบคุมคุณภาพ 2 ขั้นตอน (QC-1 & QC-2)

ในงานวิจัยนี้ได้จัดทำ GCP เป็นจำนวนทั้งสิ้น 14 จุด ดังนั้นสำหรับแนวปฏิบัติประมวลผลควบคุมคุณภาพขั้นตอนที่ 1 (QC-1) จึงทำการแบ่ง GCP ทั้งหมดออกเป็น 2 ส่วน โดยที่เป็น GCP 7 จุด (ส่วนที่ 1) และเป็น CP อีก 7 จุด (ส่วนที่ 2) หลังจากการประมวลภาพถ่ายสามเหลี่ยมด้วยโปรแกรม PIX4Dmapper และ Agisoft MetaShape จากนั้นปฏิบัติตาม แนวปฏิบัติประมวลผลควบคุมคุณภาพขั้นตอนที่ 2 (QC-2) คือ การใช้ GCP ทั้งหมดในการประมวลผลข้อมูล พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่คำนวณได้จากทั้งสองขั้นตอนได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 8 และตารางที่ 9 หากนำค่าความคลาดเคลื่อนมาแสดงผลเปรียบเทียบผ่านแผนภูมิแท่งจะได้ดังรูปที่ 7

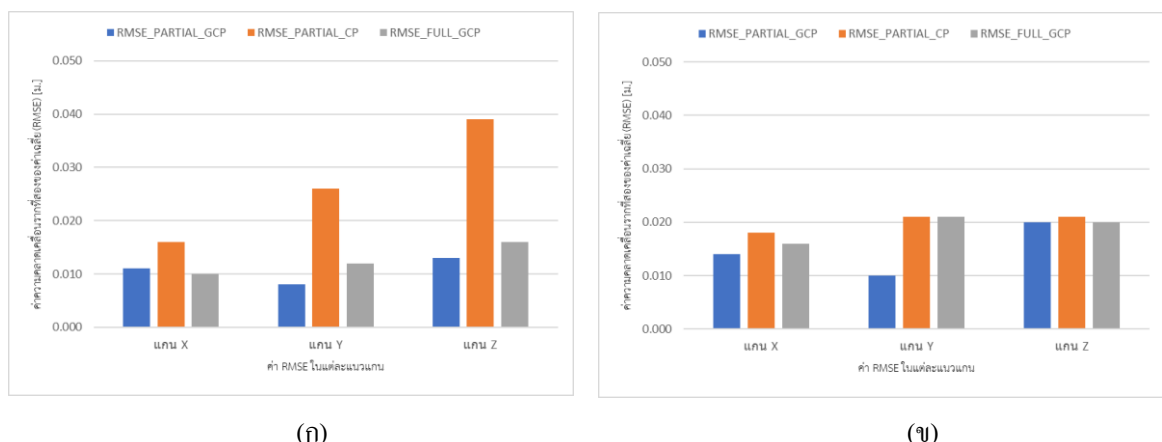
ตารางที่ 8 ความคลาดเคลื่อนของค่าสามเหลี่ยมที่ใช้พิจารณาการควบคุมคุณภาพ 2 ขั้นตอน สำหรับโปรแกรม PIX4Dmapper

RMSE	ความคลาดเคลื่อน			
	แกน X [ม.]	แกน Y [ม.]	แกน Z [ม.]	การฉายกลับ [จุดภาพ]
RMSE_PARTIAL_GCP	0.011	0.008	0.013	0.147
RMSE_PARTIAL_CP	0.016	0.026	0.039	0.180
RMSE_FULL_GCP	0.010	0.012	0.016	0.164

ตารางที่ 9 ความคลาดเคลื่อนของค่าสามเหลี่ยมที่ใช้พิจารณาการควบคุมคุณภาพ 2 ขั้นตอน สำหรับโปรแกรม Agisoft Metashape

RMSE	ความคลาดเคลื่อน			
	แกน X [ม.]	แกน Y [ม.]	แกน Z [ม.]	การฉายกลับ [จุดภาพ]
RMSE_PARTIAL_GCP	0.014	0.010	0.020	0.157
RMSE_PARTIAL_CP	0.018	0.021	0.021	0.183
RMSE_FULL_GCP	0.016	0.016	0.020	0.172

หากการตรวจสอบคุณภาพที่กล่าวข้างต้นผ่านเกณฑ์เป็นที่น่าสนใจ ผู้ใช้สามารถเริ่มดำเนินการผลิตข้อมูลแผนที่ต่าง ๆ ต่อไป
ได้

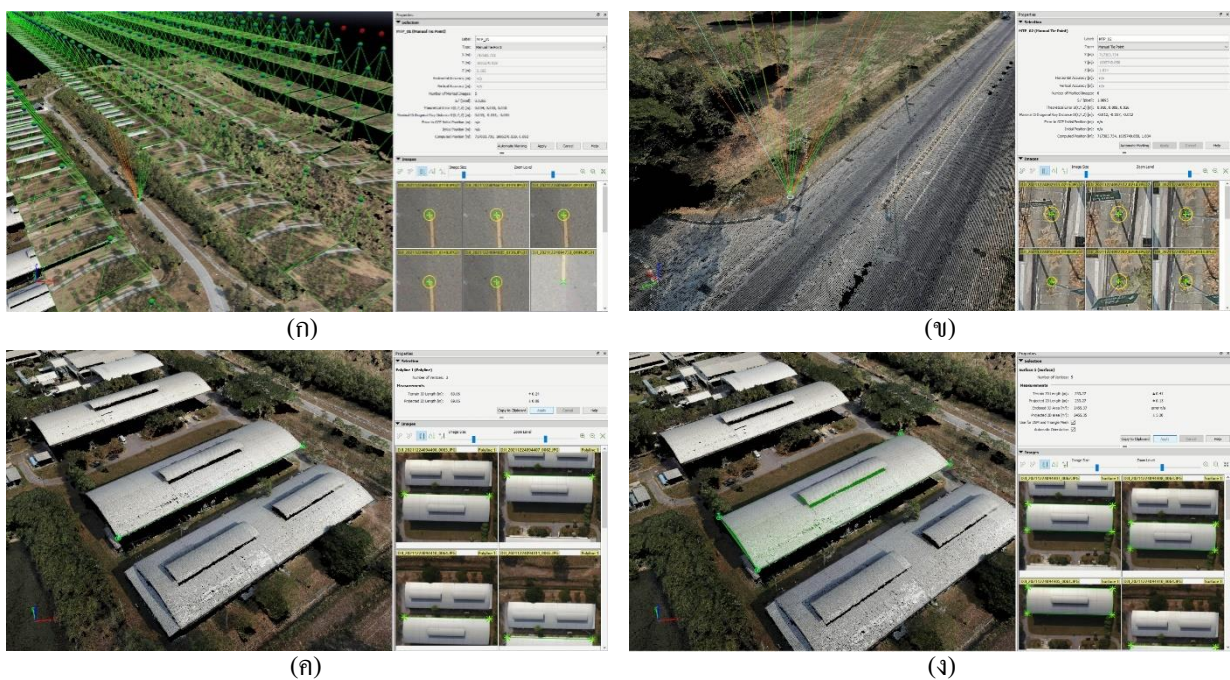


รูปที่ 7 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่า RMSE ของแต่ละแนวแกน (ก) ประมวลผลจากโปรแกรม PIX4Dmapper
(ข) ประมวลผลจากโปรแกรม Agisoft Metashape

5. การผลิตข้อมูลแผนที่เพื่อการประยุกต์ใช้ที่เป็นเลิศ

เมื่อได้ทำการประมวลผลค่าสามเหลี่ยมทางอากาศ และได้ทำการควบคุมคุณภาพแล้ว ผู้ใช้สามารถที่จะผลิตข้อมูลแผนที่และแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (DEM) ได้ ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้หลาย ๆ แนวทาง โดยปกติข้อมูลต้นน้ำจากงานสำรวจจะถูกนำไปใช้อย่างหลากหลาย เช่น โครงการสำรวจเส้นทางเพื่อการออกแบบโครงสร้างคมนาคม กลุ่มผู้ใช้งานสำรวจจะใช้ข้อมูลละเอียดสูงสุด กลุ่มงานวิศวกรออกแบบมักจะใช้ข้อมูลละเอียดปานกลางและใช้ระบบคอมพิวเตอร์ช่วยเขียนซึ่ง

อาจเปิดอ่านข้อมูลภาพขนาดใหญ่ไม่สะดวก กลุ่มงานบริหารโครงการและการประชาสัมพันธ์การมีส่วนร่วมมักจะใช้ข้อมูลละเอียดน้อยแต่ต้องการชุดข้อมูลหลากหลายแหล่ง โดยในทางปฏิบัติงานในโครงการทางวิศวกรรมบ่อยครั้งที่ข้อมูลแผนที่เหล่านี้มีความละเอียดคุณภาพสูงเกินไปในขั้นตอนของงานวิศวกรรม เช่น การออกแบบ ดังนั้นจึงอาจมีข้อเสนอแนะการประยุกต์ใช้ผลผลิตข้อมูลแผนที่ตามแนวทางปฏิบัติที่เป็นเลิศ การแสดงรายละเอียดชนิดข้อมูล ค่าแฟกเตอร์ลดทอนความละเอียดคุณภาพ (reduced GSD factor) กรรมวิธีการผลิต และรูปแบบการบันทึกข้อมูลในแต่ละชนิด เพื่อเป็นแนวทางการนำไปใช้ดังตารางที่ 10 นอกจากนี้ชุดข้อมูล ข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศประมวลผลพร้อมใช้ (Ready-to-use AT) สามารถทำการรังวัดค่าพิกัดรายจุด รายเส้น รายรูปปิด ดังรูปที่ 8 เพื่อการได้มาของข้อมูลตำแหน่งค่าพิกัด ปริมาณ โดยไม่ได้ลดทอนความละเอียดถูกต้องของข้อมูล



รูปที่ 8 การรังวัดข้อมูลสามมิติผ่านเทคนิคการรังวัดหลายมุมมองด้วยโปรแกรม PIX4Dmapper (ก) และ (ข) รังวัดค่าพิกัดรายจุด (ค) รังวัดข้อมูลเส้น (ง) รังวัดข้อมูลพื้นที่ปิด

ตารางที่ 10 รายละเอียดชนิดข้อมูล แฟกเตอร์ลดทอน กรรมวิธีการผลิต และรูปแบบการบันทึกข้อมูลในแต่ละชนิด

ชนิดข้อมูล	อัตราลดทอน	กรรมวิธีการผลิต	รูปแบบและความละเอียด
1. ภาพถ่ายทางอากาศ (Raw Image)	GSD 2 เซนติเมตร	ในงานวิจัยบินถ่ายภาพ (RGB) มาแล้วได้ความละเอียดคุณภาพ 1.87 เซนติเมตร ภาพดิบจะคงความละเอียดถูกต้องสูงสุด	พิเศษเป็น GSD = 2 เซนติเมตร
2. แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข (Digital Surface Model) ในรูปแบบพอยต์คลาวด์	1X GSD ~ 2 เซนติเมตร	เพิ่มขั้นตอนการ Densify point-cloud เพื่อแสดงภูมิประเทศและสิ่งปลูกสร้าง และพืชพรรณปกคลุม	LAS/LAZ ความหนาแน่นจุดภาพตามที่ระบบผลิตได้ 100 - 500 จุดต่อตารางเมตร

ตารางที่ 10 รายละเอียดชนิดข้อมูล แพลตฟอร์มอากาศยาน การวิธีการผลิต และรูปแบบการบันทึกข้อมูลในแต่ละชนิด (ต่อ)

ชนิดข้อมูล	อัตราลดทอน	กรรมวิธีการผลิต	รูปแบบและความละเอียด
3. แบบจำลองระดับสูงเชิงเลขแบบละเอียด (Fine Digital Elevation Model)	5X GSD~10 เซนติเมตร	ต้องนำข้อมูลพอยต์คลาวด์มาจำแนกเป็น Ground/ Non- ground ก่อน จากนั้นจึง Resampling ให้เป็นกริดราสเตอร์ขนาด 5 เท่าของ GSD	LZW-compression GeoTIFF (lossless) ใช้สำหรับงานเขียนแผนที่
4. แบบจำลองระดับสูงเชิงเลขแบบหยาบ (Course Digital Elevation Model)	10X - 50X GSD ~ 20 เซนติเมตร ~1 เมตร	นำ DEM มา Resampling ให้หยาบขึ้นเพื่อให้ใช้งานได้คล่องมากขึ้น เช่น การนำไปเปิดบนโปรแกรมเขียนแบบเขียนแผนที่ หรือสร้างเส้นชั้นความสูง	LZW-compression GeoTIFF (lossless) สำหรับงานเขียนแผนที่หรืองานทางด้านภูมิสารสนเทศ (GIS) งานบริหารจัดการระบายน้ำ
5. แผนที่ภาพถ่ายออร์โธสัณฐานละเอียด (Fine Orthophoto)	1X GSD ~ 2 เซนติเมตร	ทำการสร้างจากภาพถ่ายทางอากาศปรับแก้ด้วยแบบเรขาคณิต	JP2K- compression GeoTIFF (lossy rate 1:20-1:50) ใช้สำหรับการเขียนแผนที่ภูมิประเทศโดยละเอียดด้วย GIS
6. แผนที่ภาพถ่ายออร์โธสัณฐานหยาบ (Course Orthophoto)	25X ~ 50 เซนติเมตร	ทำการสร้างจากภาพถ่ายทางอากาศปรับแก้ด้วยแบบเรขาคณิต แล้ว Resampling หยาบขึ้นเพื่อให้โอนย้ายได้เร็ว และใช้งานทั่ว ๆ ไปได้สะดวก	JP2K- compression GeoTIFF (lossy rate 1:20-1:50) ใช้สำหรับงานวางแผน งานการจัดกาสิ่งแวดล้อมและการมีส่วนร่วม
7. การรังวัดรายจุด ข้อมูลเส้นข้อมูลพื้นที่ปิด เพื่อการประเมินพิภค ปริมาณ ความละเอียดถูกต้องสูง	ไม่ลดทอน / ความละเอียด ถูกต้องสูงสุด	ถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศประมวลผลพร้อมใช้ (Ready-to-use AT) พร้อมซอฟต์แวร์โมดูล Multi- View Geometry เช่น PIX4Dmapper / Ray Cloud	ความแม่นยำของรายจุดสูงถึง ทางราบ : 5 เซนติเมตร ทางตั้ง : 10 เซนติเมตร

6. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางการปฏิบัติที่เป็นเลิศในการประมวลผลและแนวทางการควบคุมคุณภาพผลผลิตข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่บันทึกข้อมูลมาจากอากาศยานไร้คนขับ โดยในงานวิจัยได้ใช้ตัวอย่างอากาศยานไร้คนขับที่นิยมอย่างแพร่หลายคือ DJI รุ่น MATRICE 300 ติดตั้งกล้อง ZENMUSE P1 บินบันทึกภาพบนสนามทดสอบพื้นที่เป้าหมายจะผลิตข้อมูลแผนที่ 1.4 ตารางกิโลเมตร ในพื้นที่ทดสอบมีจุดควบคุมภาคพื้นดินชนิดหมายไว้ล่วงหน้าและชนิดจุดธรรมชาติ รวมกันจำนวน 14 จุด การประมวลผลข้อมูลใช้โปรแกรมประมวลผลที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน 2 โปรแกรม คือ โปรแกรม PIX4Dmapper รุ่น 4.7.5 และโปรแกรม Agisoft Metashape รุ่น 1.8.2

ในงานวิจัยได้เสนอ แนวปฏิบัติประมวลผลควบคุมคุณภาพ 2 ขั้นตอนเรียกว่า QC-1 & QC-2 ที่เป็นแนวทางปฏิบัติที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของการคำนวณสามเหลี่ยมด้วยเทคนิค Bundle Block Adjustment (BBA) ทั้งนี้เพื่อให้ผลผลิตข้อมูลแผนที่ที่ผลิตขึ้นสามารถนำไปใช้ในการกิจต่าง ๆ ได้อย่างมีความละเอียดถูกต้องสูงและน่าเชื่อถือ การกำหนดแนวทางที่เป็นเลิศในที่นี้เป็นการดำเนินการและประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศครอบคลุมแนวทางการประมวลผลสามเหลี่ยมทางอากาศร่วมกับจุดบังคับภาคพื้นดินจำนวน 10 จุดต่อตารางกิโลเมตร พร้อมกับการคำนวณปรับแก้พารามิเตอร์การจัดภาพภายในของกล้องและแบบจำลองความเพี้ยนของเลนส์ ($f, c_x, c_y, R1, R2, R3, T1, T2$) ซึ่งการประมวลผลข้อมูลจะถูกนำไปคำนวณปรับแก้ทุกครั้งสำหรับแต่ละบล็อกในรอบการบิน (In-Situ Calibration)

ในตอนท้ายของงานวิจัยได้เสนอแนวทางการประมวลผลผลิตข้อมูลแผนที่และแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (DEM) เพื่อให้สามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ปลายทางสำหรับกลุ่มงานต่าง ๆ ได้ โดยการลดความละเอียดจุดภาพ (reduce GSD) ลงไปมากที่สุด 50 เท่า (50X) และแนะนำรูปแบบการจัดเก็บและการบีบอัดภาพที่เหมาะสม ทั้งนี้เพื่อให้กลุ่มงานที่ปฏิบัติการกิจที่สืบเนื่องในโครงการทางวิศวกรรมใด ๆ ได้ทำงานได้ถูกต้องแม่นยำ เรียกใช้ข้อมูลได้สะดวกรวดเร็ว และได้ใช้ข้อมูลสืบเนื่องอย่างมีประสิทธิภาพ

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

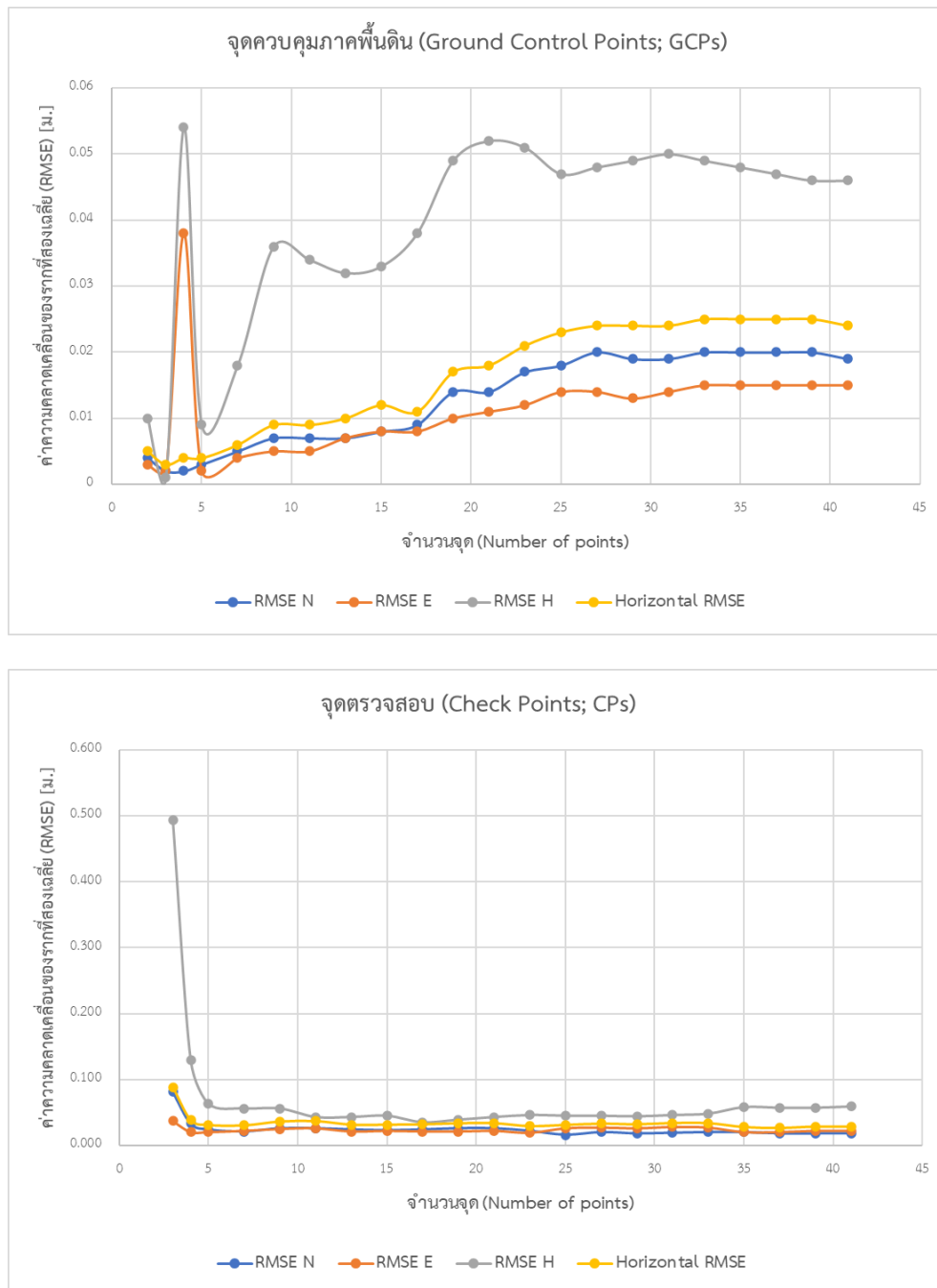
กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ศูนย์เชี่ยวชาญการจัดการโครงสร้างพื้นฐานแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย บริษัท อินฟราพลัส จำกัด ซึ่งเป็นผู้สนับสนุนและอนุเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ คอมพิวเตอร์ ซอฟต์แวร์ประมวลผล มาใช้ในการประมวลผลข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล ในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Nex, F. et al. UAV in the advent of the twenties: Where we stand and what is next. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 184, pp.215-242. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2021.12.006.
- [2] DJI. *DJI Matrice 300 RTK*, 2022. Available from: <https://www.dji.com/matrice-300> [Accessed 15 March 2022].
- [3] Sensefly. *senseFly eBee X*, 2022. Available from: <https://www.sensefly.com/drone/ebee-x-fixed-wing-drone/> [Accessed 15 March 2022].
- [4] Foxtechfpv. *Foxtech Loong 2160 VTOL*, 2022. Available from: <https://www.foxtechfpv.com/foxtech-loong-2160-vtol.html> [Accessed 15 March 2022].
- [5] DJI. *Zenmuse P1 - Full-frame Aerial Surveying*, 2022. Available from: <https://www.dji.com/zenmuse-p1> [Accessed 15 March 2022].
- [6] Foxtechfpv. *FOXTECH MAP-A7R*, 2022. Available from: <https://www.foxtechfpv.com/foxtech-map-a7r-full-frame-mapping-camera.html> [Accessed on 15 March 2022].
- [7] Foxtechfpv. *FOXTECH 3DM V3 Oblique Camera for Mapping and Survey*, 2022. Available from: <https://www.foxtechfpv.com/foxtech-3dm-v3-oblique-camera-for-mapping-and-survey.html> [Accessed 15 March 2022].
- [8] Vautherin, J. et al. Photogrammetric accuracy and modeling of rolling shutter cameras. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 2016, III-3, pp.139-146. DOI: 10.5194/isprs-annals-III-3-139-2016.
- [9] Santitamont, P. *Digital Photogrammetry*, 2th ed. Bangkok: Chulalongkorn University Press, 2010.
- [10] Tiptepin, N. *A study of the efficacy of ground control points and checkpoints for 3D mapping from UAV*. Survey Engineering Project, Chulalongkorn University, 2017.
- [11] Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., and Martínez-Carricondo, P. Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. *Measurement*, 2017, 98, pp.221-227. DOI: 10.1016/j.measurement.2016.12.002.

ภาคผนวก ก) การศึกษาประสิทธิภาพของจุดบังคับภาพและจุดตรวจสอบสำหรับการทำแผนที่สามมิติจากโดรน



รูปที่ 8 ค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองเฉลี่ยในแต่ละแกนสำหรับกรณีของจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบ

ภาคผนวก ข) แนวปฏิบัติประมวลผลควบคุมคุณภาพ 2 ขั้นตอน (QC-1 & QC-2) สำหรับรายงานจาก PIX4Dmapper

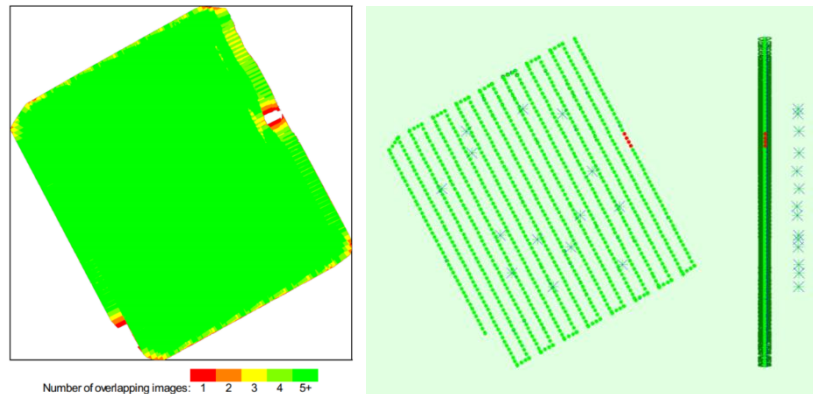
1. โครงการ การประมวลผลเพื่อผลิตข้อมูลแผนที่จากภาพถ่ายด้วยยูเอวี

ชื่อทีม	ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านการจัดการ โครงสร้างพื้นฐาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	ผู้รับผิดชอบ	-
ชื่อกล้องภาพ	CU-SBR_DJI_M300	วัน/เดือน/ปี	25/12/2564
ยูเอวี	DJI MATRICE 300 RTK	หมายเลข	-
กล้องถ่ายภาพ	ZenmuseP1	หมายเลข	-

2. ภาพรวมบล็อกภาพถ่าย

Project	CU_SBR_M300_PPK
Processed	2022-01-31 12:17:43
Camera Model Name(s)	ZenmuseP1_35.0_8192x5460 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.87 cm / 0.74 in
Area Covered	1.488 km ² / 148.8017 ha / 0.57 sq. mi. / 367.8873 acres

3. จำนวนภาพที่ซ้อนกันและแผนที่แสดงตำแหน่งภาพและตำแหน่งของจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน



4. ผลการคำนวณปรับแก้แบบจำลองกล้อง

แบบจำลองกล้องประเภท [✓] Global shutter [....] Rolling shutter with delay milliseconds.

Internal Camera parameters								
ZenmuseP1_35.0_8192x5460 (RGB). Sensor Dimension: 35.000 [mm] x 23.358 [mm]								
EXIF ID: ZenmusePa_35.0_8192x5460								
	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	8194.340 [pixel]	4096.001 [pixel]	2729.996 [pixel]	-0.048	0.021	-0.097	0.002	-0.001
	35.010 [mm]	17.500 [mm]	11.664 [mm]					
Optimized Values	8200.470 [pixel]	4074.243 [pixel]	2748.611 [pixel]	-0.049	0.017	-0.094	0.001	-0.001
	35.036 [mm]	17.407 [mm]	11.743 [mm]					
Uncertainties (Sigma)	3.115 [pixel]	0.136 [pixel]	0.118 [pixel]	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000
	0.013 [mm]	0.001 [mm]	0.001 [mm]					

5. ผลการคำนวณปรับแก้จุดบังคับภาพถ่าย (QC-1)

5.1 จุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Points; GCPs) จำนวน 7 จุด

GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
GCP05 (3D)	0.020/ 0.050	0.021	-0.013	0.019	0.149	10/10
GCP13 (3D)	0.020/ 0.050	-0.009	0.010	0.009	0.153	10/10
GCP14 (3D)	0.020/ 0.050	0.007	0.002	-0.026	0.168	10/10
GCP15 (3D)	0.020/ 0.050	0.003	0.004	0.000	0.095	10/10
GCP17 (3D)	0.020/ 0.050	0.001	-0.001	-0.008	0.152	10/10
GCP22 (3D)	0.020/ 0.050	-0.013	-0.009	0.007	0.139	10/10
GCP26 (3D)	0.020/ 0.050	-0.010	0.007	0.000	0.175	10/10
Mean [m]		0.000	0.000	0.000		
Sigma [m]		0.011	0.008	0.013		
RMS Error [m]		0.011	0.008	0.013		

5.2 จุดตรวจสอบ (Check Points; CPs) จำนวน 7 จุด

CP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
GCP02		0.019	0.017	0.078	0.156	10/10
GCP10		0.028	-0.019	-0.035	0.260	9/9
GCP11		0.014	0.016	-0.053	0.224	10/10
GCP12		-0.008	0.001	-0.019	0.113	10/10
GCP16		-0.015	-0.001	-0.012	0.131	10/10
GCP21		-0.011	0.061	0.013	0.221	10/10
GCP24		0.006	0.004	0.005	0.156	10/10
Mean [m]		0.005	0.011	-0.003		
Sigma [m]		0.015	0.023	0.039		
RMS Error [m]		0.016	0.026	0.039		

5.3 ผลการเปรียบเทียบ RMSE จาก GCPs กับ CPs (RMSE_PARTIAL_GCP vs RMS_PARTIAL_CP)

	DIFF RMSE X [m]	DIFF RMSE Y [m]	DIFF RMSE Z [m]
Difference	0.005	0.018	0.026

6. ผลการคำนวณปรับแก้จุดบังคับภาพนำไปใช้ผลิต (QC-2)

จุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Points; GCPs) จำนวน 14 จุด

GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
GCP02 (3D)	0.020/ 0.050	0.006	0.007	0.037	0.135	10/10
GCP05 (3D)	0.020/ 0.050	0.019	-0.018	0.015	0.153	10/10
GCP10 (3D)	0.020/ 0.050	0.011	-0.011	-0.008	0.260	9/9
GCP11 (3D)	0.020/ 0.050	0.011	0.005	-0.032	0.229	10/10
GCP12 (3D)	0.020/ 0.050	-0.005	0.000	-0.006	0.113	10/10
GCP13 (3D)	0.020/ 0.050	-0.006	0.002	0.012	0.149	10/10
GCP14 (3D)	0.020/ 0.050	0.007	-0.001	-0.021	0.172	10/10
GCP15 (3D)	0.020/ 0.050	0.001	0.005	0.000	0.096	10/10
GCP16 (3D)	0.020/ 0.050	-0.008	-0.004	-0.003	0.136	10/10
GCP17 (3D)	0.020/ 0.050	0.000	-0.003	-0.006	0.153	10/10
GCP21 (3D)	0.020/ 0.050	-0.009	0.036	0.009	0.226	10/10
GCP22 (3D)	0.020/ 0.050	-0.017	-0.013	0.006	0.140	10/10
GCP24 (3D)	0.020/ 0.050	0.006	-0.006	0.002	0.156	10/10
GCP26 (3D)	0.020/ 0.050	-0.016	0.002	-0.005	0.175	10/10
Mean [m]		0.000	0.000	0.000		
Sigma [m]		0.010	0.012	0.016		
RMS Error [m]		0.010	0.012	0.016		

ภาคผนวก ค) แนวปฏิบัติประมวลผลควบคุมคุณภาพ 2 ขั้นตอน (QC-1 & QC-2) สำหรับรายงานจาก Agisoft Metashape

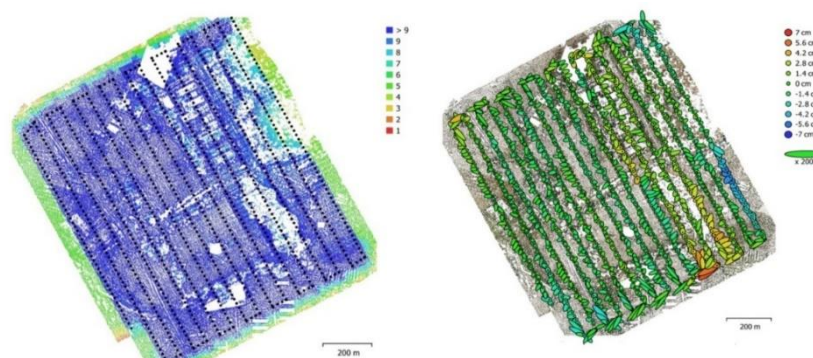
1. โครงการ การประมวลผลเพื่อผลิตข้อมูลแผนที่จากภาพถ่ายด้วยยูเอวี

ชื่อทีม	ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านการจัดการ โครงสร้างพื้นฐาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	ผู้รับผิดชอบ	-
ชื่อกล้องภาพ	CU-SBR_DJI_M300	วัน/เดือน/ปี	25/12/2564
ยูเอวี	DJI MATRICE 300 RTK	หมายเลข	-
กล้องภาพถ่าย	ZenmuseP1	หมายเลข	-

2. ภาพรวมบล็อกภาพถ่าย

Number of images	1,071	Camera stations	1,071
Flying altitude	157 m	Tie points	889,992
Ground resolution	1.92 cm/pix	Projections	3,850,104
Coverage area	0.844 square kilometers	Reprojection error	1.16 pix

3. จำนวนภาพที่ซ้อนกันและแผนที่แสดงตำแหน่งภาพและตำแหน่งของจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน



4. ผลการคำนวณปรับแก้แบบจำลองกล้อง

แบบจำลองกล้องประเภท [✓] Global shutter [....] Rolling shutter with delay milliseconds.

ZenmuseP1 (35mm)						1071 images				
Type		Resolution				Focal Length			Pixel Size	
Frame		8192 x 5460				35 mm			4.39 x 4.39	
	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	8184.08	0.084	1.00	0.00	0.04	-0.14	0.10	-0.11	-0.01	0.01
Cx	-21.3963	0.025	1.00	0.00	0.01	0.02	-0.02	0.76	0.00	
Cy	19.6826	0.025	1.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.83		
K1	-0.049086	2.30E-05	1.00	-0.97	0.92					
K2	0.0181091	0.00014	1.00	-0.98	0.03					
K3	-0.094961	0.00025	1.00	-0.03	0.01					
P1	-0.000976	9.90E-07	1.00	0.00						
P2	0.0009592	1.00E-06	1.00							

5. ผลการคำนวณปรับแก้จุดบังคับภาพถ่าย (QC-1)

5.1 จุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Points; GCPs) จำนวน 7 จุด

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total (m)	Image (pix)
GCP05	-0.031	-0.002	-0.039	0.049	0.156 (10)
GCP13	0.005	-0.005	-0.012	0.014	0.154 (10)
GCP14	-0.011	-0.004	-0.009	0.015	0.179 (10)
GCP15	-0.014	-0.020	-0.010	0.026	0.155 (10)
GCP17	-0.006	-0.017	0.025	0.031	0.173 (10)
GCP22	-0.006	0.002	0.018	0.019	0.153 (10)
GCP26	0.008	0.003	-0.006	0.010	0.124 (10)
Total	0.014	0.010	0.020	0.027	0.157

5.2 จุดตรวจสอบ (Check Points; CPs) จำนวน 7 จุด

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total (m)	Image (pix)
GCP02	-0.005	-0.006	0.011	0.014	0.168 (10)
GCP10	-0.037	0.001	-0.035	0.051	0.177 (9)
GCP11	-0.006	0.004	0.008	0.011	0.198 (10)
GCP12	-0.019	-0.011	0.034	0.041	0.168 (9)
GCP16	0.010	-0.012	0.003	0.016	0.197 (10)
GCP21	-0.007	-0.051	0.014	0.054	0.215 (10)
GCP24	-0.017	0.012	0.015	0.026	0.148 (10)
Total	0.018	0.021	0.021	0.035	0.183

5.3 ผลการเปรียบเทียบ RMSE จาก GCPs กับ CPs (RMSE_PARTIAL_GCP vs RMS_PARTIAL_CP)

	DIFF RMSE X [m]	DIFF RMSE Y [m]	DIFF RMSE Z [m]
Difference	0.004	0.011	0.001

6. ผลการคำนวณปรับแก้จุดบังคับภาพ นำไปใช้ผลิต (QC-2)

จุดควบคุมภาคพื้นดิน (Ground Control Points; GCPs) จำนวน 14 จุด

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Total (m)	Image (pix)
GCP02	-0.005	-0.006	0.011	0.014	0.168 (10)
GCP05	-0.031	-0.002	-0.039	0.049	0.156 (10)
GCP10	-0.036	0.001	-0.034	0.049	0.184 (9)
GCP11	-0.005	0.004	0.008	0.010	0.198 (10)
GCP12	-0.019	-0.011	0.033	0.040	0.171 (9)
GCP13	0.005	-0.005	-0.012	0.014	0.154 (10)
GCP14	-0.011	-0.004	-0.009	0.015	0.179 (10)
GCP15	-0.014	-0.020	-0.010	0.026	0.155 (10)
GCP16	0.010	-0.012	0.003	0.016	0.197 (10)
GCP17	-0.006	-0.017	0.025	0.031	0.173 (10)
GCP21	-0.007	-0.050	0.014	0.053	0.223 (10)
GCP22	-0.006	0.002	0.018	0.019	0.153 (10)
GCP24	-0.017	0.011	0.015	0.025	0.150 (10)
GCP26	0.008	0.003	-0.006	0.010	0.124 (10)
Total	0.016	0.016	0.020	0.030	0.172