



การศึกษาแบบจำลองระบบกล้องหลายหัวบนอากาศยานไร้คนขับเพื่อการผลิตแผนที่สามมิติ

A CASE STUDY OF MULTI-HEAD CAMERA SYSTEMS ON UAV FOR THE GENERATION OF HIGH-QUALITY 3D MAPPING

ธีรวัฒน์ บรรณกุลพิพัฒน์^{1*}, ไพศาล สันติธรรมนนท์^{2,3} และธีรวัชร มณีนาถ³

^{1*}นิสิตปริญญาโท, ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²รองศาสตราจารย์, ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

³วิศวกรอาวุโส, ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านการจัดการ โครงสร้างพื้นฐาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกล้องหลายหัวสำหรับการทำแผนที่และแบบจำลองสามมิติชื่อ “FOXTECH 3DM V3” ประเด็นศึกษาระบบกล้องหลายหัวครอบคลุมการศึกษารูปแบบพารามิเตอร์ของเรขาคณิตการจับยึดกล้อง ระบบกล้องประกอบไปด้วยกล้องถ่ายภาพจำนวน 1 กล้อง และกล้องถ่ายภาพเฉียงในทิศทางขวางแนวนินและตามแนวนินโดยทำมุมจากแนวดิ่งประมาณ 45 องศาจำนวน 4 กล้อง การศึกษาวิจัยมุ่งเน้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และเทคนิคเชิงเลขในการกำหนดพารามิเตอร์ที่จะต้องบังคับให้ค่าเข้าใกล้ (Constraint) หรือปล่อยอิสระ (Free) พารามิเตอร์ของเรขาคณิตการจับยึดกล้องใดบ้าง โดยผลลัพธ์ที่ได้จะคำนึงถึงความสอดคล้องกับกายภาพของกล้องตามความเป็นจริง ผลการวิจัยพบว่ากำหนดพารามิเตอร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกล้องหลายหัว “3DM-V3” จำเป็นที่จะต้องทราบค่าพารามิเตอร์การเลื่อนแกนสัมพัทธ์จากกล้องอ้างอิงที่เป็นกล้องตั้ง ไปยังกล้องรองซึ่งเป็นกล้องเฉียงภายในระบบกล้องชื่อพารามิเตอร์ $(T_x, T_y, T_z)_{rel}^n$ โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 4 จำเป็นต้องบังคับพารามิเตอร์ให้เป็นค่าเข้าใกล้ (Constraint) สำหรับค่าพารามิเตอร์การหมุนแกนสัมพัทธ์ของกล้องอ้างอิงเทียบกับกล้องรองชื่อพารามิเตอร์ $(R_x, R_y, R_z)_{rel}^n$ โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 4 ต้องกำหนดให้เป็นค่าประมาณเริ่มต้นและปรับปรุงค่าได้อิสระ (Free) ผ่านกระบวนการเชิงเลข ส่วนค่าพารามิเตอร์การจัดภาพภายใน $(f, c_x, c_y, R_1, R_2, R_3, T_1, T_2)$ ของกล้องแต่ละตัวบนระบบกล้องหลายหัวสามารถปล่อยให้เป็นอิสระได้ตามที่นิยมปฏิบัติ ด้วยรูปแบบเรขาคณิตการจับยึดกล้องและรูปแบบการประมวลผลเชิงเลขที่คำนวณได้ส่งผลให้เรขาคณิตในภาพรวมของภาพถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศมีความละเอียดถูกต้องสูงได้ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนจากการฉายกลับ (Mean reprojection error) เป็น 0.225 จุดภาพ แบบจำลองและภาพถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศทั้งหมดเมื่อตรวจสอบในสนามวัดสอบที่มีจุดควบคุมภาคพื้นดิน 14 จุด ขนาดสนามประมาณ 0.8 ตารางกิโลเมตร พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย RMSE ทางราบเท่ากับ 0.023 เมตร และค่า RMSE ทางตั้งเท่ากับ 0.019 เมตร

Thirawat Bannakulpihat^{1*}, Phisan Santitamnont^{2,3} and Theeraruk Maneenart³

¹Master Student, Department of Survey Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

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

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

คำสำคัญ: การทำแผนที่สามมิติด้วยภาพจากอากาศยานไร้คนขับ; แบบจำลองกล้องหลายหัว; ระบบกล้องหลายหัว; สิ่งจับยึดกล้อง; การถ่ายภาพเฉียง; แผนที่สามมิติ

ABSTRACT

This research aims to present the geometrical model of camera-rig and numerical modeling of the “FOXTECH 3DM V3” multi-head camera system. The multi-head camera system consists of one nadir camera and four 45-degree oblique cameras. The final geometric model of the camera system should be consistent with physical camera geometry to confirm the correctness of the model. The research reveals the parameterization and numerical modeling of “3DM-V3” multi-head camera systems that all four sets of relative translation parameters between the reference camera and all four oblique cameras named $(T_X, T_Y, T_Z)_{rel}^n$, when n has a value from 1 to 4, have to be constraint of a nominal value. The other four sets of relative rotation parameters between the reference camera referred to the other four oblique cameras named $(R_X, R_Y, R_Z)_{rel}^n$, when n has a value from 1 to 4 could be initialized but set “free” during the further numerical process. Other conventional parameters representing all 5 internal camera models ($f, c_x, c_y, R_1, R_2, R_3, T_1, T_2$) could be set “free” as widely practice and they will be numerically adjusted with success. The final camera model resulting from adjustment computation for triangulation affirms precise geometry with a mean reprojection error of 0.225 pixels and the rig parameters are consistent with the physical characteristics of the multi-head camera system. In this research, the triangulation block is tied up with ground constraints and check-points using 14 signalized GCPs from Chulalongkorn UAV Test Field of size 0.8 square kilometers in Saraburi province. The final adjusted parameters for GCPs show RMSE 0.023 meter in horizontal and RMSE 0.019 meter for the vertical component.

KEYWORDS: Unmanned Aerial Vehicle for 3D Mapping; Multi-head Camera Model; Multi-head Camera systems; Camera-rig; Oblique photograph; 3D Mapping

1. บทนำ

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีระบบกล้องหลายหัว (Multi-head camera systems) ที่ประกอบด้วยกล้องบันทึกภาพถ่ายตั้งและบันทึกภาพถ่ายเฉียงในเวลาเดียวกันดังรูปที่ 1 บนอากาศยานไร้คนขับ เพื่อการทำแผนที่ซึ่งสอดคล้องกับทิศทางการพัฒนาการปฏิบัติงานสำรวจรังวัดด้วยภาพสมัยใหม่ [1-3] การบันทึกภาพถ่ายเฉียงจะทำให้เห็นข้อมูลในทิศทางการมองเห็นด้านข้างของสิ่งปลูกสร้างและพืชพรรณบนภูมิประเทศ การประมวลผลข้อมูลจะทำให้ภาพถ่ายที่บันทึกได้มีข้อมูลรายละเอียดเชิงเรขาคณิตครบถ้วนสมบูรณ์มากขึ้นอีกทั้งช่วยในการแปลตีความการจำแนกข้อมูลได้แม่นยำมากขึ้น การใช้ระบบกล้องหลายหัวทำแผนที่นอกจากจะสามารถบันทึกภาพถ่ายได้ครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้างแล้วยังมีความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพในการปฏิบัติการกิจการทำแผนที่ ตั้งแต่การออกแบบแผนการบิน ระยะเวลาที่ใช้ในการบินถ่ายภาพที่น้อยลง จำนวนภาพถ่ายที่ได้ในปริมาณที่มากขึ้นและได้ภาพสำหรับการรังวัดและผลผลิตพอยต์คลาวด์หลายมุมมอง ซึ่งส่งผลดีต่อการประมวลผลภาพถ่ายเนื่องจากมีภาพถ่ายที่จะใช้ผลิตจุดสำคัญที่ต้องนำไปใช้ในการจับคู่ภาพสำหรับผลิตแผนที่สามมิติและข้อมูลพอยต์คลาวด์ต่อไป [4]



รูปที่ 1 (ก) กล้องหลายหัว PSDK 102S V2 [5] (ข) กล้องหลายหัว Surveyor 5 Standard [6] (ค) กล้องหลายหัว FOXTECH 3DM V3 Oblique Camera for Mapping and Survey [7]

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกล้องหลายหัวชื่อ “3DM-V3” การวิจัยครอบคลุมการศึกษารูปแบบพารามิเตอร์ของการจับยึดกล้องซึ่งเป็นเรขาคณิตแสดงการยึดจับกล้องถ่ายภาพถึงจำนวน 1 กล้อง และกล้องถ่ายภาพเฉียงในทิศทางขวางแนวนอนและตามแนวนอนโดยทำมุมจากแนวดิ่งประมาณ 45 องศาจำนวน 4 กล้อง การวิจัยศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประกอบด้วยเทคนิคเชิงเลขในการกำหนดพารามิเตอร์ที่จะต้องบังคับให้ค่าเข้าใกล้ (Constraint) หรือปล่อยอิสระ (Free) สำหรับพารามิเตอร์ใดบ้าง ผลลัพธ์ที่ได้จะคำนึงถึงเรขาคณิตของกล้องที่ควรจะต้องสอดคล้องกับกายภาพของกล้องตามความเป็นจริง ผลการวิจัยมีการเปรียบเทียบความถูกต้องทางตำแหน่งด้วยค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (RMSE) ระหว่างข้อมูลที่ผลิตจากการประมวลผลจากกล้องถ่ายภาพนิ่งเท่านั้นและจากกล้องถ่ายภาพนิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

2. ระบบกล้องหลายหัว (Multi-head Camera Systems)

ระบบกล้องหลายหัว คือ อุปกรณ์ถ่ายภาพที่ประกอบไปด้วยกล้องมากกว่าหนึ่งตัว โดยที่กล้องแต่ละตัวจะถูกโยงยึดกันด้วยโครงสร้างจับยึดกล้อง (Camera-Rig) ซึ่งเป็นผลให้เกิดแบบจำลองเรขาคณิตการจับยึดที่ใช้ในการ โยงยึดกล้องถ่ายภาพจำนวนหลายกล้องเข้าด้วยกันและควบคุมให้แต่ละกล้องสามารถบันทึกภาพได้ในเวลาเดียวกัน โดยมักจะพบเห็นกับกล้องถ่ายภาพชนิดหลายช่วงคลื่น (Multi-spectral camera) ที่แต่ละกล้องทำหน้าที่บันทึกภาพในช่วงคลื่นที่มีความแตกต่างกันออกไป สำหรับการแสดงผลภาพถ่ายให้เป็นภาพเดี่ยวจำเป็นต้องรวมภาพที่บันทึกในแต่ละช่วงคลื่นที่แตกต่างกันออกไปทำให้ต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างกล้องถ่ายภาพแต่ละกล้องที่ถูกโยงยึดอยู่บนอุปกรณ์จับยึดกล้อง ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวประกอบไปด้วย ความสัมพันธ์ในเชิงการเลื่อนแกน (Translation) และความสัมพันธ์ในเชิงการหมุนแกน (Rotation)

ปัจจุบันอุปกรณ์จับยึดกล้องได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในขอบเขตที่กว้างมากขึ้น นอกเหนือจากกล้องถ่ายภาพชนิดหลายช่วงคลื่นแล้ว กล้องถ่ายภาพที่บันทึกภาพทั่วไปก็มีการนำอุปกรณ์โยงยึดกล้องมาใช้ โดยจะมีการปรับการวางตัวของกล้องทั้งการเคลื่อนที่ของตำแหน่งและมุมมองของการถ่ายภาพที่แตกต่างกันออกไป เพื่อให้การบันทึกภาพใช้เวลาในการบันทึกภาพที่ลดลงและให้ภาพถ่ายที่ครอบคลุมพื้นที่มากขึ้น รวมถึงเพิ่มมุมมองสำหรับการถ่ายภาพ โดยความสัมพันธ์ของระบบกล้องหลายหัวที่โยงยึดกันด้วยอุปกรณ์จับยึดกล้องนั้นจะมีลักษณะความสัมพันธ์ทางเรขาคณิต ดังต่อไปนี้

1. มีกล้องหนึ่งตัวจะถูกใช้เป็นกล้องหลักที่ใช้ในการอ้างอิงตำแหน่งให้กับกล้องตัวที่เหลือ โดยกำหนดให้กล้องหลักอ้างอิงมีตำแหน่งคือ T_m และมีการวางตัวของกล้อง R_m ในระบบพิกัดสามมิติของโลก

2. กล้องอื่น ๆ ที่ไม่ได้ถูกกำหนดให้เป็นกล้องอ้างอิงตำแหน่งจะถูกกำหนดให้เป็นกล้องรอง โดยมีค่าตำแหน่งคือ T_s และมีการวางตัวของกล้อง R_s ในระบบพิกัดสามมิติของโลก
3. สำหรับกล้องรองแต่ละตัวจะมีค่าการเลื่อนแกนและการหมุนแกนที่มีความสัมพันธ์กับกล้องหลักอ้างอิง โดยความสัมพันธ์ในการเลื่อนแกน (Relative translation) มีสัญลักษณ์คือ T_{rel} และความสัมพันธ์ในการหมุนแกน (Relative rotation) มีสัญลักษณ์คือ R_{rel}

โดยค่าพารามิเตอร์การจกภาพภายนอกของกล้องแต่ละตัว (Exterior orientation parameter) ในระบบอุปกรณ์ตัวจับยึดของกล้องที่ไม่ได้ถูกกำหนดให้เป็นกล้องหลักอ้างอิงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) และสมการที่ (2) ตามลำดับ

$$T_s = T_m + R_m T_{rel} \quad (1)$$

$$R_s = R_m R_{rel} \quad (2)$$

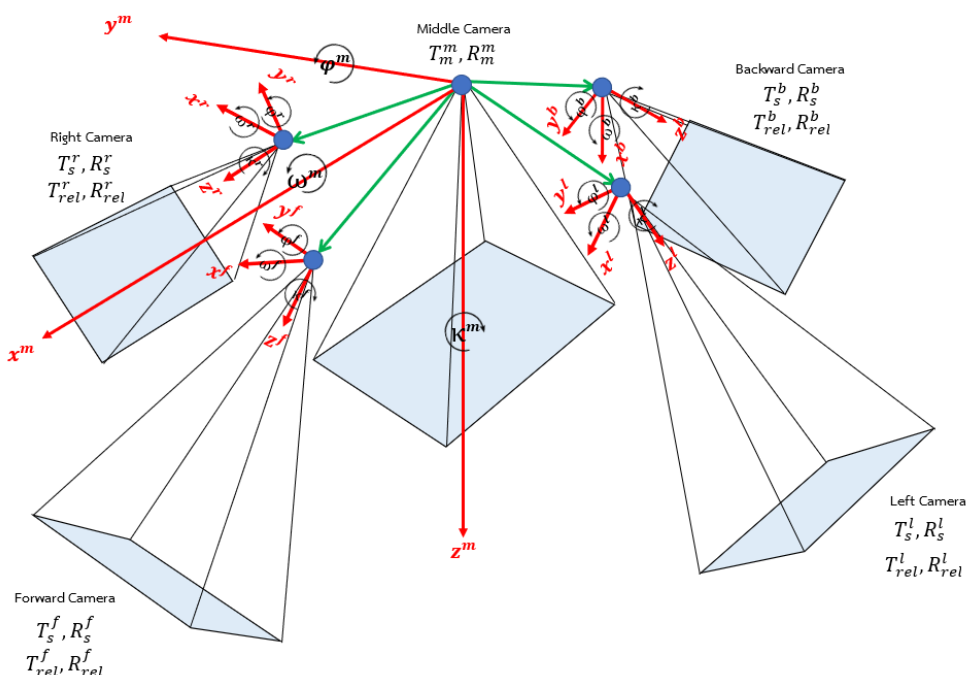
และตำแหน่งของจุดสามมิติใด ๆ ในระบบพิกัดของกล้องหลักอ้างอิงสามารถหาได้จากสมการที่ (3)

$$X' = R_m^T (X - T_m) \quad (3)$$

และตำแหน่งของจุดสามมิติใด ๆ ในระบบพิกัดของกล้องรองสามารถหาได้จากสมการที่ (4)

$$X' = R_{rel}^T [R_m^T (X - T_m) - T_{rel}] \quad (4)$$

หลังจากคำนวณหาค่าจุดสามมิติในระบบพิกัดกล้องได้แล้วการนำไปใช้งานต่อไปในลำดับถัดไปจะมีการใช้งานในลักษณะเดียวกันกับกล้องอื่น ๆ ตามที่ได้กล่าวไป [8]



รูปที่ 2 พารามิเตอร์การเลื่อนแกนและการหมุนแกนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกล้องหลายหัว

จากรูปที่ 2 สามารถนำมาเขียนให้อยู่ในรูปของสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ โดยกำหนดให้กล้องถ่ายภาพหรือกล้องกลาง (Middle Camera) เป็นกล้องหลักอ้างอิง (Reference camera) มีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการเลื่อนแกน คือ T_m^m และมีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการหมุนแกน คือ R_m^m ในส่วนของกล้องที่เหลืออีก 4 กล้องจะถูกกำหนดให้เป็นกล้องรอง (Secondary camera) สำหรับกล้องรองแต่ละตัวจะมีพารามิเตอร์การเลื่อนแกนและการหมุนแกนที่มีความสัมพันธ์กับกล้องหลักอ้างอิง โดยความสัมพันธ์ในเชิงการเลื่อนแกนมีสัญลักษณ์คือ T_{rel} และความสัมพันธ์ในเชิงการหมุนแกนมีสัญลักษณ์คือ R_{rel} ดังนั้นกล้องแต่ละกล้องจะมีสัญลักษณ์เมทริกซ์ที่แสดงความสัมพันธ์ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของกล้องแต่ละตัวบนระบบกล้องหลายหัว

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์เมทริกซ์			
	กล้องหน้า (Forward Camera; FWD)	กล้องหลัง (Backward Camera; BWD)	กล้องซ้าย (Left Camera; LFT)	กล้องขวา (Right Camera; RIT)
การเลื่อนแกน	T_s^f	T_s^b	T_s^l	T_s^r
การหมุนแกน	R_s^f	R_s^b	R_s^l	R_s^r
การเลื่อนแกนสัมพันธ์	T_{rel}^f	T_{rel}^b	T_{rel}^l	T_{rel}^r
การหมุนแกนสัมพันธ์	R_{rel}^f	R_{rel}^b	R_{rel}^l	R_{rel}^r

จากสมการ (1) และ (2) สามารถนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรองได้ดังตารางที่ 2

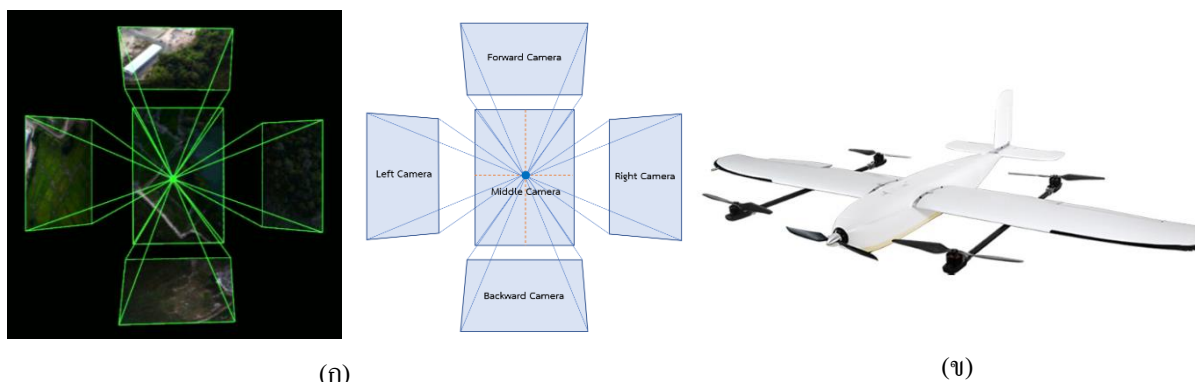
ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรองบนระบบกล้องหลายหัว

		ความสัมพันธ์ทางการเลื่อนแกน	ความสัมพันธ์ทางการหมุนแกน
กล้องหลักอ้างอิง	กล้องกลาง (MID)	$[(T_x, T_y, T_z)]_m^m$	$[R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^m$
กล้องรอง	กล้องหน้า (FWD)	$[(T_x, T_y, T_z)]_m^m + [R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^m [(T_x, T_y, T_z)]_m^f$	$[R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^m [R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^f$
	กล้องหลัง (BWD)	$[(T_x, T_y, T_z)]_m^m + [R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^m [(T_x, T_y, T_z)]_m^b$	$[R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^m [R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^b$
	กล้องซ้าย (LFT)	$[(T_x, T_y, T_z)]_m^m + [R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^m [(T_x, T_y, T_z)]_m^l$	$[R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^m [R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^l$
	กล้องขวา (RIT)	$[(T_x, T_y, T_z)]_m^m + [R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^m [(T_x, T_y, T_z)]_m^r$	$[R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^m [R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^r$

3. ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัย

3.1 ข้อมูลภาพถ่ายของระบบกล้องหลายหัว

ภาพถ่ายที่ใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ได้จากการบันทึกด้วยระบบกล้องหลายหัวที่ติดตั้งบนยูเอวีลูกผสมชนิดปีกตรึงและหลายโรเตอร์ยี่ห้อ FOXTECH รุ่น Loong 2160 VTOL ดังรูปที่ 3 โดยกล้องที่ใช้ในการบันทึกภาพ คือ กล้อง FOXTECH 3DM V3 Oblique Camera for Mapping and Survey ที่ประกอบไปด้วยกล้องตั้งจำนวน 1 กล้องและกล้องเฉียงจำนวน 4 กล้อง โดยขนาดความละเอียดของภาพแต่ละภาพที่บันทึกได้มีขนาด 6000 x 4000 จุดภาพ ทำให้ได้ภาพ จำนวน 5 ภาพหรือ 120 ล้านจุดภาพต่อหนึ่งจุดที่ทำการบันทึกภาพถ่ายขณะบินปฏิบัติการ บริเวณพื้นที่ศูนย์เครือข่ายการเรียนรู้เพื่อภูมิภาคจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี เป็นพื้นที่สนามทดสอบจีเอเอ็นเอสเอสและยูเอวีสำหรับงานแผนที่ (Geodetic GNSS and UAV Testing Facility) ภายใต้โครงการวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

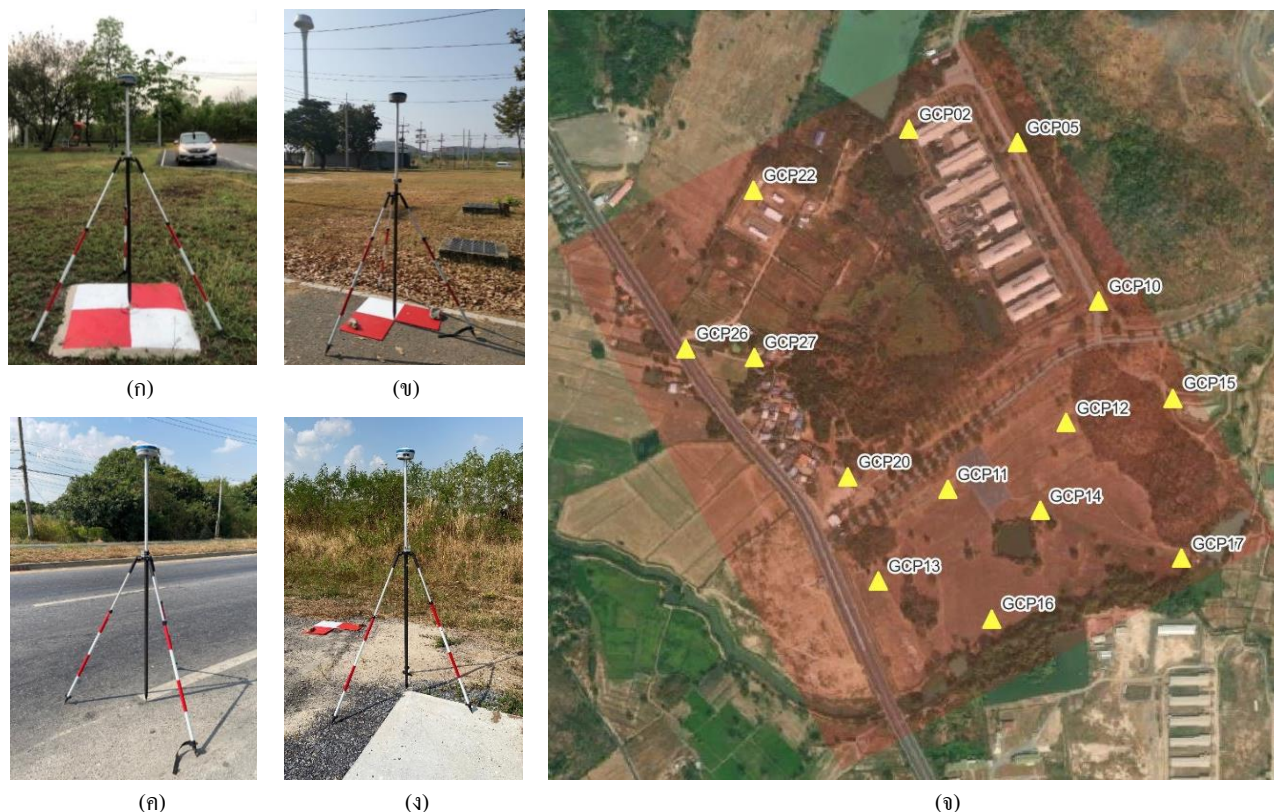


รูปที่ 3 (ก) ตัวอย่างตำแหน่งภาพถ่ายที่บันทึกมาจากระบบกล้องหลายหัว (ข) อากาศยานไร้คนขับ รุ่น Loong 2160 VTOL เป็นยูเอวีลูกผสมชนิดปีกตรึงและหลายโรเตอร์ [9]

3.2 ข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน

ข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินที่ใช้ในการประมวลผลในพื้นที่ศึกษามีทั้งหมดจำนวน 14 จุด กระจายตัวครอบคลุมทั่วพื้นที่ดังรูปที่ 4 ลักษณะของจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินประกอบไปด้วยจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินแบบหมุดเป้าให้สัญญาณที่เป็นหัวหมุดทองเหลืองและฟิวเจอร์บอร์ดขนาดมาตรฐานกว้าง 35 เซนติเมตร ยาว 81 เซนติเมตร และแบบเป้าธรรมชาติ ซึ่งวิธีการรังวัดค่าพิกัด ทำการรังวัดสัญญาณดาวเทียมด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันที (Real Time Kinematic; RTK) เป็นเวลา 3 นาที (180

Epoch) ซึ่งสถานีฐานที่ใช้ในการเป็นหมุดที่ทราบค่าพิกัด เป็นหัวหมุดทองเหลืองฝังอยู่บนศาลฟ้าอาคารสระบุรี 4 ได้ค่าพิกัดมาจากการรังวัดด้วยวิธีการหาตำแหน่งจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning; PPP) รังวัดสัญญาณเป็นเวลา 14 ชั่วโมง



รูปที่ 4 ลักษณะจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินที่กระจายตัวในพื้นที่การศึกษา (ก) และ (ข) เป็นแบบให้สัญญาณ (Signalized) (ค) และ (ง) เป็นแบบธรรมชาติ (Natural) และ (จ) การกระจายตัวของตำแหน่งจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินที่ใช้ในการประมวลผล

4. ระเบียบวิธีการปฏิบัติงานวิจัย

4.1 การวางแผนการบินและการบันทึกภาพถ่าย

รูปแบบการบินที่ทำการบินบันทึกภาพถ่ายจะบินในรูปแบบกริดบล็อกเดียว (Single-strip block or Grid flight) ดังรูปที่ 5 ตามหลักการทางโฟโตแกรมเมตรี โดยทำการวางแผนการบินด้วยซอฟต์แวร์ ARDUPILOT ทำการบินถ่ายที่ระดับความสูงเฉลี่ย 150 เมตร กำหนดให้มีส่วนซ้อนด้านหน้า (Forward overlap) 80% และส่วนซ้อนด้านข้างระหว่างแนวลิน (Side overlap) 60% ประกอบด้วยแนวลินจำนวน 12 แนวลิน จำนวนรูปภาพ 2,995 ภาพ



รูปที่ 5 เส้นทางการบินของอากาศยานไร้คนขับที่บินบันทึกภาพภายในงานวิจัย

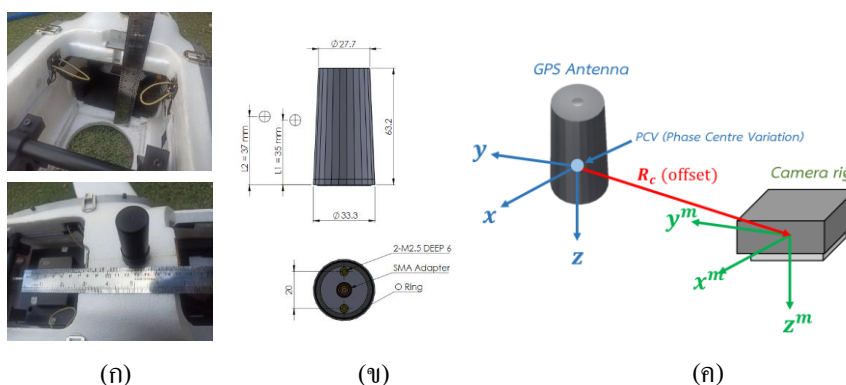
4.2 การวัดระยะห่างของกล้องและเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส

4.2.1 การวัดระยะห่างระหว่างจุดเปิดถ่ายกับเสารับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส

เนื่องจากจุดถ่ายภาพของกล้องและเสารับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสบนอากาศยานไร้คนขับไม่ได้อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน ดังนั้นจึงได้มีการวัดระยะห่างระหว่างตัวกล้องและเสารับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส (Camera - GNSS Antenna Offset) ดังรูปที่ 6 โดยค่าระยะห่างมีค่าดังตารางที่ 3 โดยระยะห่างทางแกน Z คือ ระยะที่ได้ทำการบวกไปให้ถึงบริเวณตำแหน่งการแปรเปลี่ยนของจุดศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศ (Phase Centre Variation; PCV) ของ L1 แล้ว

ตารางที่ 3 ระยะห่างระหว่างเสารับสัญญาณดาวเทียมกับระบบกล้องหลายหัว

ระยะห่างจากเสารับสัญญาณกับระบบกล้องหลายหัว	ขนาด [ม.]
ระยะห่างทางแกน X	-0.130
ระยะห่างทางแกน Y	0.000
ระยะห่างทางแกน Z	-0.175



รูปที่ 6 (ก) การวัดระยะห่างจากเสารับสัญญาณไปยังบริเวณตัวกล้อง (ข) รายละเอียดลักษณะส่วนประกอบและขนาดของเสารับสัญญาณ Tallyman HC871 [10] (ค) ลักษณะความสัมพันธ์ของแกนพิกัดระหว่างเสารับสัญญาณกับระบบกล้องหลายหัว

4.2.2 การวัดระยะห่างระหว่างกล้องแต่ละตัว

ในการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายจากระบบกล้องหลายหัวจำเป็นต้องทราบพารามิเตอร์การเลื่อนแกน (Translation) และพารามิเตอร์การหมุนแกน (Rotation) ระหว่างกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรอง ดังนั้นจึงได้ทำการวัดระยะห่างระหว่างกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรองดังรูปที่ 7 รวมถึงพิจารณาค่าระยะห่างผ่านลักษณะทางกายภาพความเป็นจริงของระบบกล้องหลายหัว พบว่าระยะห่างในแต่ละกล้องมีค่าระยะห่างดังตารางที่ 4



รูปที่ 7 การวัดระยะห่างจากกล้องกลางไปยังกล้องอื่น ๆ บนระบบกล้องหลายหัว

ตารางที่ 4 ระยะห่างระหว่างกล้องตั้งตำแหน่งตรงกลางไปยังกล้องเฉียงอีก 4 กล้อง

ระบบกล้องหลายหัว	ระยะห่างในแกน X [มม.]	ระยะห่างในแกน Y [มม.]	ระยะห่างในแกน Z [มม.]
กล้องกลาง (MID)	กล้องอ้างอิง		
กล้องหลัง (BWD)	-30	0	20
กล้องหน้า (FWD)	30	0	20
กล้องซ้าย (LFT)	0	-30	20
กล้องขวา (RIT)	0	30	20

4.3 การประมวลผลข้อมูลภาพถ่าย

การประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายจะประมวลผลด้วยโปรแกรม PIX4Dmapper ซึ่งเป็นโปรแกรมทางด้านโฟโตแกรมที่คำนวณความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดภาพถ่ายและแบบจำลองของกล้องถ่ายภาพเชื่อมโยงไปยังค่าพิกัดจุดควบคุมภาพบนพื้นดินที่ปรากฏเด่นชัดในรูปลักษณะของจุดสำคัญและจุดควบคุมภาคพื้นดินที่มีการรังวัดค่าพิกัดภาคพื้นดินที่แม่นยำ กระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจะถูกปรับปรุงค่า (Optimize) จนมีค่าเศษเหลือรวมน้อยที่สุดด้วยเทคนิค Least square adjustment computation และการประยุกต์ใช้การเพิ่มประสิทธิภาพการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศที่เรียกว่า Bundle Block Adjustment (BBA) นอกจากนั้น โปรแกรม PIX4Dmapper ยังมีความสามารถในการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายที่คำนวณความสัมพันธ์ของอุปกรณ์จับยึดกล้องได้ ซึ่งใช้หลักการคำนวณแบบตำแหน่งที่สัมพันธ์ (Relative position) กันระหว่างกล้องที่ทราบค่าพารามิเตอร์ (กล้องหลักอ้างอิง) กับกล้องที่ไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ (กล้องรอง) โดยในส่วนของผลการประมวลผลจะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 ประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายดังที่นั่นที่บันทึกมาจากระบบกล้องหลายหัว และรูปแบบที่ 2 ประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายดังร่วมกับภาพถ่ายเฉียงที่บันทึกมาจากระบบกล้องหลายหัว โดยการประมวลผลข้อมูลทั้ง 2 รูปแบบประกอบไปด้วยขั้นตอน 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้ ขั้นตอนที่ 1 การคำนวณปรับแก้บล็อกแสง (Bundle Block Adjustment) ขั้นตอนที่ 2 การผลิตข้อมูลพอยต์คลาวด์ (Dense Cloud Generation) ขั้นตอนที่ 3 การผลิตแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศหรือภาพออร์โธ (Orthomosaic Generation)

ทั้งรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 จะประมวลผลตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 จนถึงขั้นตอนที่ 3 แต่สำหรับรูปแบบที่ 2 การประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายดังร่วมกับภาพถ่ายเฉียง จะมีการตั้งค่าการประมวลผลเพิ่มเติมที่คำนึงถึงอุปกรณ์จับยึดกล้องที่ทำการโยงยึดกล้องภาพถ่ายเอาไว้ด้วยกันในขั้นตอนที่ 1 สำหรับการประมวลผลอุปกรณ์จับยึดกล้องนั้นจะมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง 2 พารามิเตอร์ คือ พารามิเตอร์การเลื่อนแกน (Translation) ในทิศทาง XYZ ของกล้องถ่ายภาพรองที่สัมพันธ์กับกล้องหลักอ้างอิง และพารามิเตอร์การหมุนแกน (Rotation) รอบแกน XYZ ของกล้องถ่ายภาพรองที่สัมพันธ์กับกล้องหลักอ้างอิง โดยอุปกรณ์จับยึดกล้องที่ใช้สำหรับการโยงยึดระบบกล้องหลายหัวในการวิจัยครั้งนี้ พารามิเตอร์การเลื่อนแกนสามารถวัดค่าระยะห่างของกล้องแต่ละกล้องที่สัมพันธ์และประเมินตามลักษณะทางกายภาพความเป็นจริงได้ ในส่วนพารามิเตอร์การหมุนรอบแกน XYZ ไม่สามารถทราบค่าสัมพัทธ์ที่แน่ชัดได้เนื่องจากระบบกล้องเป็นกล้องปิดและโรงงานผู้ผลิตไม่ได้ให้ค่าของแบบจำลองกล้องไว้ ผู้วิจัยจึงใช้วิธีการวัดค่าประมาณเริ่มต้น (Initial value) โดยมีค่าตั้งต้นดังตารางที่ 5 แล้วให้โปรแกรมคำนวณปรับปรุงค่าผลลัพธ์ด้วยวิธีการเชิงเลข (Numerical method)

ตารางที่ 5 ค่าตั้งต้นของค่าพารามิเตอร์การเลื่อนแกนและค่าพารามิเตอร์การหมุนแกนของกล้องแต่ละตัวที่สัมพันธ์กับกล้องกลาง

Rig Model Name	Model_CameraRig_3DM_V3												
Number of cameras	5												
Reference Camera	1												
Processing Mode	Optimize Relative Rotation												
Camera Model	Directory	Translation [mm]			Rotation [Degree]			Accuracy Trans [mm]			Accuracy Rot [Degree]		
		T_X	T_Y	T_Z	R_X	R_Y	R_Z	X	Y	Z	X	Y	Z
3DM_V3_MID_25.2mm_6000x4000 (RGB)	Camera_M												
3DM_V3_BWD_35.7mm_6000x4000 (RGB)	Camera_B	-30.0	0.0	20.0	-0.3677	44.4498	90.3863	5.0	5.0	5.0	5.0000	5.0000	5.0000
3DM_V3_FWD_35.7mm_6000x4000 (RGB)	Camera_F	30.0	0.0	20.0	0.4523	-46.4834	-89.7471	5.0	5.0	5.0	5.0000	5.0000	5.0000
3DM_V3_LFT_35.7mm_6000x4000 (RGB)	Camera_L	0.0	-30.0	20.0	-43.6290	-0.3066	-179.8441	5.0	5.0	5.0	5.0000	5.0000	5.0000
3DM_V3_RIT_35.7mm_6000x4000 (RGB)	Camera_R	0.0	30.0	20.0	44.6187	0.9216	-0.4059	5.0	5.0	5.0	5.0000	5.0000	5.0000

โดยในการประมวลผลครั้งนี้ได้มีการกำหนดค่าความถูกต้อง (Accuracy) ซึ่งจะมีบทบาทเป็นค่าน้ำหนักให้กับค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณปรับแก้ในโปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผล การกำหนดค่าความถูกต้องนี้เป็นการบอกถึงความแม่นยำของค่าที่ต้องการกำหนดให้โปรแกรมประมวลผลตามแบบจำลองตามที่ผู้วิจัยเชื่อมั่น สำหรับพารามิเตอร์การเลื่อนแกนในทิศทาง XYZ กำหนดความถูกต้อง 5.0 มิลลิเมตร เนื่องจากค่าการเลื่อนแกนผู้วิจัยเชื่อมั่นผลการวัดและต้องการให้ค่าพารามิเตอร์คงตัวไม่เปลี่ยนแปลงระหว่างที่โปรแกรมคำนวณปรับแก้ และสำหรับพารามิเตอร์การหมุนรอบแกน XYZ กำหนดความถูกต้อง 5.0 องศา เนื่องจากค่าการหมุนรอบแกนผู้วิจัยทราบเพียงค่าประมาณของมุมที่กล้องทำมุมระหว่างกัน ดังนั้นจึงเลือกให้โปรแกรมประมวลผลด้วยวิธีการเชิงเลขปรับค่าให้เหมาะสมที่สุดและสอดคล้องกับผลการปรับแก้ของการรังวัดทั้งหมดภายในบล็อก โดยเป้าหมายคือให้ผลรวมของค่าเศษเหลือยกกำลังสองมีค่าน้อยที่สุด [11]

5. ผลการศึกษา

5.1 ผลขยายสามเหลี่ยมของบล็อกภาพถ่ายดิ่งเท่านั้นที่บันทึกมาจากระบบกล้องหลายหัว

ในการคำนวณขยายสามเหลี่ยมทางอากาศ ก่อนที่จะประมวลผลด้วยการใช้จุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินทั้งหมด 14 จุด ได้มีการประเมินคุณภาพของจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินตามแนวปฏิบัติประมวลผลควบคุมคุณภาพ 2 ขั้นตอน (QC-1 & QC-2) ในขั้นแรก QC-1 จะต้องมีการแบ่งจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินออกเป็น 2 ส่วน ก่อนที่จะดำเนินการประมวลผลขยายสามเหลี่ยมทางอากาศโดยส่วนที่ 1 จะถูกกำหนดให้เป็นจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน (GCP) และส่วนที่ 2 จะถูกกำหนดให้เป็นจุดตรวจสอบ (CP) จากนั้นนำทั้งสองส่วนประมวลผลผ่านโปรแกรมร่วมกับข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ หลังจากประมวลผลจนเสร็จสิ้น ทำการพิจารณาเปรียบเทียบความแตกต่างของค่า RMSE ระหว่างจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบ โดยหลักการแล้วค่า RMSE จะอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องจากทั้ง 2 ส่วนปฏิบัติตามด้วยกระบวนการ วิธีการรังวัด พร้อม ๆ กันในสนาม ในขั้นตอนที่ 2 เรียกว่า QC-2 จะประมวลผลข้อมูลโดยนำจุด GCP ทั้งหมดมาใช้งานร่วมกัน ทั้งนี้เพื่อให้การบังคับเกิดผลมากที่สุด ให้คู่ค้ำกับภาระงานสนามที่ได้จัดทำขึ้นมาจำนวนมาก ซึ่งผลลัพธ์ควรจะมีค่าไม่แตกต่างไปจากการประมวลผลในขั้น QC-1 โดยความละเอียดถูกต้องของการประมวลผลขยายสามเหลี่ยมทางอากาศอาจพิจารณาว่า ค่า RMSE ไม่เกิน 2 เท่าของความละเอียดถูกต้องของการรังวัดด้วยดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสสำหรับค่าพิกัดจุดควบคุมภาพ [12] ดังนั้นจึงได้ทำการแบ่งจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มละ 7 จุด โดยกลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มของจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน (Ground Control Points; GCPs) และกลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มของจุดตรวจสอบ (Check Points; CPs) แล้วทำการประมวลผลข้อมูลเพื่อประเมินคุณภาพของจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินผ่านการพิจารณาค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (RMSE) ในระยะตะวันออก (Easting), ระยะเหนือ (Northing), และความสูงออร์โธเมตริก (Orthometric Height) โดยมีการกำหนดค่าความถูกต้อง (Accuracy) ที่ได้จากการรังวัดภาคสนามด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ทางราบ 0.02 เมตร ทางดิ่ง 0.05 เมตร ทำการคำนวณร่วมกับจุดยึดโยง (Tie points) ที่ได้จากการจับคู่ภาพแบบอัตโนมัติ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 6 เมื่อพิจารณาผลต่างของค่า RMSE ของทั้งสองกลุ่มพบมีความแตกต่างในระยะตะวันออก (Easting) เท่ากับ 0.030 เมตร, ระยะเหนือ (Northing) เท่ากับ 0.035 เมตร และทางความสูง (Height) เท่ากับ 0.020 เมตร ดังนั้นจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินทั้ง 14 จุดนี้เป็นข้อมูลที่มีคุณภาพและมีความแตกต่างกันไม่มาก

จากนั้นทำการคำนวณค่าสามเหลี่ยมทางอากาศ โดยใช้จุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินทั้งหมด 14 จุดในการประมวลผลผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 7 โดยมีค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (RMSE) ในระยะตะวันออก (Easting) เท่ากับ 0.032 เมตร, ระยะเหนือ (Northing) เท่ากับ 0.033 เมตร และทางความสูง (Height) เท่ากับ 0.053 เมตร

ตารางที่ 6 ค่าสถิติของความคลาดเคลื่อนในแกนพิกัด Easting, Northing และ Height ของ (ก) จุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินและ (ข) จุดตรวจสอบ ในการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นร่วมกับจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน 7 จุดและจุดตรวจสอบ 7 จุด

(ก)				(ข)			
GCPs 7 จุด	ค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละแกนพิกัด [ม.]			CPs 7 จุด	ค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละแกนพิกัด [ม.]		
	Easting	Northing	Height		Easting	Northing	Height
ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.001	ค่าเฉลี่ย	-0.017	0.005	0.035
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.033	0.026	0.055	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.060	0.060	0.067
RMSE	0.033	0.026	0.055	RMSE	0.063	0.061	0.075

ตารางที่ 7 ค่าสถิติของความคลาดเคลื่อนในแกนพิกัด Easting, Northing และ Height ของจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินในการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นร่วมกับจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน 14 จุด

GCPs 14 จุด	ค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละแกนพิกัด [ม.]		
	Easting	Northing	Height
ค่าเฉลี่ย	0.000	0.000	0.001
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.032	0.033	0.053
RMSE	0.032	0.033	0.053

5.2 ผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกล้องหลายหัว

ในงานวิจัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกล้องหลายหัวผู้วิจัยได้กำหนดแบบจำลองของกล้องด้วยการกำหนดตำแหน่งกล้องหลักอ้างอิง (Reference camera) และกล้องรอง (Secondary cameras) ดังนั้นในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงเป็นการกำหนดพารามิเตอร์การวางตัวของกล้องรองที่อ้างอิงสัมพันธ์กับกล้องหลักตั้งที่กล่าวมาแล้ว ซึ่งจะเป็นค่าพารามิเตอร์ตามลักษณะกายภาพการเลื่อนแกน (T_x, T_y, T_z) และการหมุนแกน (R_x, R_y, R_z) ในการวัดสอบกล้องในการหาค่าพารามิเตอร์การจัดภาพภายนอกที่สัมพันธ์กันระหว่างกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรองบนอุปกรณ์จับยึดกล้อง โดยทั่วไปการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จำเป็นที่จะต้องทราบค่าสังเกตในระบบที่มากพอต่อการคำนวณปรับแก้เชิงเลข เช่นในงานวิจัยนี้ที่มีการรังวัดแบบจำลองข่ายสามเหลี่ยมขนาดกลางจำนวนภาพถ่ายตั้งและภาพถ่ายเฉียงรวมกัน 2,995 ภาพ โดยมีการรังวัดไปยังจุดภาพที่อยู่บนส่วนซ้อนทับกันเพื่อสร้างความสัมพันธ์ข่ายสามเหลี่ยมทั้งบล็อกเป็นจำนวน 5,274,337 จุดหรือ 10,548,674 ค่าสังเกต (Observations) ซึ่งในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกล้องหลายหัวผู้วิจัยเลือกใช้โปรแกรม PIX4Dmapper เนื่องจากมีคำสั่งสำหรับใช้ในการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศที่ประกอบไปด้วยกล้องมากกว่า 1 กล้องได้ คือ คำสั่ง New projects with Camera Rigs

โดยสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องบนระบบกล้องหลายหัวให้โปรแกรมใช้สำหรับประมวลผลได้และสามารถตรวจสอบผลลัพธ์ของค่าพารามิเตอร์และแบบจำลองได้จากรายงานการประมวลผลหรือคำสั่ง Image Properties Editor แล้วเลือกพิจารณาแบบจำลองของระบบกล้องที่ใช้ในการประมวลผล ดังนั้นในขั้นแรกจึงกำหนดให้ตัวแปรที่ไม่ทราบค่าของการจับยึดกล้องทั้ง 4 ตัว จำนวน 24 พารามิเตอร์ กำหนดให้มีความอิสระ (Free) ในการคำนวณปรับแก้เชิงเลข เรียกในที่นี้ว่า “แบบจำลองกล้องแบบที่ 1” แล้วทำการประมวลข้อมูลภาพถ่ายจากระบบกล้องหลายหัวร่วมกับข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินพร้อมกันในคราวเดียว ผลคำตอบของการคำนวณปรับแก้พบว่าพารามิเตอร์การเลื่อนแกนมีค่ากระจายกระจายไม่เป็นระบบ ขนาดของการเลื่อนไม่สอดคล้องกับกายภาพของกล้องบางค่าใหญ่มากถึง 14.535 เมตร ส่วนพารามิเตอร์การหมุนดูเหมือนจะได้ผลดี กล่าวคือมีค่าอยู่ประมาณมุม ± 45 องศา ซึ่งสอดคล้องใกล้เคียงกับลักษณะการจับยึดของมุมการหมุนสัมพัทธ์ระหว่างกล้องรองไปยังกล้องหลักอ้างอิง โดยตารางที่ 8 แสดงค่าพารามิเตอร์สำหรับเรขาคณิตการยึดจับกล้อง 3DM-V3 ที่คำนวณปรับแก้ได้ในขั้นต้น

ตารางที่ 8 ผลคำตอบค่าพารามิเตอร์การเลื่อนแกนและการหมุนแกนที่สัมพัทธ์ระหว่างกล้องพร้อมความไม่แน่นอนของแบบจำลองกล้องแบบที่ 1 โดยกำหนดให้พารามิเตอร์มีการคำนวณเชิงเลขเป็นรูปแบบเชิงเลขอิสระ (Free)

	T_X [m.]	T_Y [m.]	T_Z [m.]	R_X [deg.]	R_Y [deg.]	R_Z [deg.]
3DM_V3_MID_25.2mm_6000x4000 (RGB)	Reference Camera					
3DM_V3_BWD_35.7mm_6000x4000 (RGB)	0.092	-0.301	0.009	-0.3520	44.1820	90.3790
Uncertainties (sigma)				0.006	0.007	0.009
3DM_V3_FWD_35.7mm_6000x4000 (RGB)	-0.229	0.269	-0.007	0.1820	-44.0710	-89.9520
Uncertainties (sigma)				0.006	0.007	0.009
3DM_V3_LFT_35.7mm_6000x4000 (RGB)	0.496	-14.535	-14.147	-48.4910	0.0790	-179.9520
Uncertainties (sigma)				0.006	0.007	0.009
3DM_V3_RIT_35.7mm_6000x4000 (RGB)	-0.351	0.897	-3.269	45.9500	1.2900	-0.4950
Uncertainties (sigma)				0.006	0.007	0.009

ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการกำหนดแบบจำลองกล้องหลายหัวให้สอดคล้องกับแบบจำลองในขั้นต้น โดยมีสมมติฐานว่าค่าพารามิเตอร์ของการเลื่อนแกนอาจมีความไวต่อค่าสังเกตในข่ายสามเหลี่ยมที่กำเนิดจากกล้องถ่ายภาพเฉียง 4 กล้องที่บันทึกภาพเฉียงจำนวนมากถึง 2,396 ภาพ ช่วยเพิ่มจุดค่าสังเกตภายในระบบประมาณ 3,084,688 ค่าสังเกต เมื่อเทียบกับจำนวนค่าสังเกตของการประมวลผลด้วยภาพถ่ายตั้งเท่านั้น ผู้วิจัยจึงกำหนดแบบจำลองการยึดจับกล้องหลายหัวเป็นการกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์การเลื่อนแกนเป็นค่าบังคับให้ใกล้เคียงค่าคงที่ (Constraint) และให้ค่าเข้าใกล้นี้มีค่าตามลักษณะทางกายภาพความเป็นจริงของระบบกล้องโดยการรังวัดตรวจสอบว่าค่าการเลื่อนแกนทางแกน X และแกน Y (T_X, T_Y) มีค่า ± 30 มิลลิเมตร การเลื่อนแกนทางแกน Z (T_Z) มีค่า ± 20 มิลลิเมตร พร้อมกับกำหนดน้ำหนักในรูปแบบความถูกต้องเป็น 5 มิลลิเมตร ในส่วนค่าพารามิเตอร์การหมุนแกน ไม่สามารถตรวจวัดค่าที่แน่ชัดได้ แต่สามารถวัดค่าประมาณแล้วนำมาใช้เป็นค่าเริ่มต้นเป็น ± 45 องศา พร้อมกำหนดน้ำหนักในรูปแบบความถูกต้องเป็น 5 องศา (แบบจำลองกล้องแบบที่ 2) ทั้งนี้เพื่อให้ระบบซอฟต์แวร์ข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศประมวลผลปรับปรุงหาค่าพารามิเตอร์เป็นผลคำตอบ (Solution) ด้วยวิธีการเชิงเลข (Numerical method) ซึ่งหลังจากประมวลผลจนเสร็จ พบว่า

ค่าพารามิเตอร์การจัดวางภายนอกที่สัมพันธ์กันระหว่างกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรองบนอุปกรณ์จับยึดกล้องสำหรับค่าการเลื่อนแกนสัมพันธ์ (T_X, T_Y, T_Z) ของกล้องทั้ง 4 ตัว ได้ค่าเป็นค่าบังคับที่เข้าใกล้ตามที่กำหนด ส่วนค่าพารามิเตอร์การหมุนแกนสัมพันธ์ (R_X, R_Y, R_Z) ที่กำหนดให้มีความอิสระ (Free) เมื่อคำนวณปรับแก้แล้วได้ค่าผลคำตอบของการหมุนแกนเป็นค่าใกล้เคียงของกล้องนี้คือ +/-0 องศา +/-45 องศา +/-90 องศา และ +/-180 องศา โดยเบี่ยงเบนไม่เกิน 1.47 องศา ดังปรากฏรายละเอียดในตารางที่ 9 ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดที่เกิดจากการรังวัดและประมวลผลภายในพื้นที่สนามทดสอบจีเอ็นเอสเอสและยูเอวีสำหรับงานแผนที่

ตารางที่ 9 ผลคำตอบค่าพารามิเตอร์การเลื่อนแกนและการหมุนแกนที่สัมพันธ์ระหว่างกล้องพร้อมความไม่แน่นอนของรูปแบบของแบบจำลองกล้องแบบที่ 2 โดยกำหนดให้พารามิเตอร์การหมุนมีการคำนวณเชิงเลขเป็นรูปแบบเชิงเลขอิสระ (Free) เท่านั้น

	T_X [m.]	T_Y [m.]	T_Z [m.]	R_X [deg.]	R_Y [deg.]	R_Z [deg.]
3DM_V3_MID_25.2mm_6000x4000 (RGB)	Reference Camera					
3DM_V3_BWD_35.7mm_6000x4000 (RGB)						
Initial Values	-0.030	0.000	0.020	0.0000	45.0000	90.0000
Optimized values	-0.030	0.000	0.020	-0.4672	44.4599	90.4823
Uncertainties (sigma)				0.013	0.027	0.016
3DM_V3_FWD_35.7mm_6000x4000 (RGB)						
Initial Values	0.030	0.000	0.020	0.0000	-45.0000	-90.0000
Optimized values	0.030	0.000	0.020	0.1368	-45.1517	-89.9893
Uncertainties (sigma)				0.013	0.002	0.019
3DM_V3_LFT_35.7mm_6000x4000 (RGB)						
Initial Values	0.000	-0.030	0.020	-45.0000	0.0000	-180.0000
Optimized values	0.000	-0.030	0.020	-43.5275	0.1859	-179.7811
Uncertainties (sigma)				0.013	0.027	0.037
3DM_V3_RIT_35.7mm_6000x4000 (RGB)						
Initial Values	0.000	0.030	0.020	45.0000	0.0000	0.0000
Optimized values	0.000	0.030	0.020	44.3343	0.9347	-0.4073
Uncertainties (sigma)				0.013	0.026	0.037

นอกจากค่าพารามิเตอร์การเลื่อนแกนและการหมุนแกนที่สัมพันธ์ของระบบกล้องหลายหัวที่ได้จากโปรแกรมประมวลผลข้อมูลแล้ว โปรแกรม PIX4Dmapper ยังสามารถประมวลค่าพารามิเตอร์การจัดภาพภายในในแต่ละกล้องบนระบบกล้องหลายหัวได้อย่างอิสระ (Free) กล่าวคือ สามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้กับโปรแกรมที่ประมวลผลข้อมูล จากนั้นโปรแกรมจะทำการประมวลผลและคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ผ่านวิธีการเชิงเลขเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผล ซึ่งประกอบไปด้วยค่าความยาวโฟกัส (f), ค่าการเลื่อนของจุดमुखสำคัญแกน X และแกน Y (c_x, c_y), ค่าสัมประสิทธิ์ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวรัศมี ($R1, R2, R3$) และค่าสัมประสิทธิ์ความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวเส้นสัมผัส ($T1, T2$) โดยการประมวลผลและการคำนวณนี้เรียกว่า การวัดสอบภายในพื้นที่ (In-Situ Calibration)

5.3 ผลถ่ายสามเหลี่ยมของบล็อกภาพถ่ายดึงร่วมกับภาพถ่ายเฉียงที่บันทึกมาจากระบบกล้องหลายหัว

ในการคำนวณถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ ใช้จุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินทั้งหมด 14 จุด โดยมีการกำหนดค่าความถูกต้อง (Accuracy) ที่ได้จากการรังวัดภาคสนามด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ทางราบ 0.02 เมตร ทางตั้ง 0.05 เมตร ทำการคำนวณร่วมกับกับจุดยึดโยง (Tie points) ที่ได้จากการจับคู่ภาพแบบอัตโนมัติ ผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 10 โดยมีค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนยกกำลังสอง (RMSE) ในระยะตะวันออก (Easting) และระยะเหนือ (Northing) เท่ากับ 0.016 เมตร และทางความสูง (Height) เท่ากับ 0.019 เมตร

ตารางที่ 10 ค่าสถิติของความคลาดเคลื่อนในแกนพิกัด Easting, Northing และ Height ของจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินในการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายดึงร่วมกับภาพถ่ายเฉียงร่วมกับจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน 14 จุด

GCPs 14 จุด	ค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละแกนพิกัด [ม.]		
	Easting	Northing	Height
ค่าเฉลี่ย	0.009	-0.007	-0.013
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.014	0.015	0.014
RMSE	0.016	0.016	0.019



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 8 ลักษณะข้อมูลพอยต์คลาวด์ ณ บริเวณเดียวกัน (ก) และ (ค) ประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายดึงเท่านั้น (ข) และ (ง) ประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายดึงร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

6. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายเคียงร่วมกับภาพถ่ายเฉียงที่บันทึกมาจากระบบกล้องหลายหัวในงานวิจัยนี้ พบว่า การกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์การเลื่อนแกนจากกล้องหลักอ้างอิง (กล้องกลาง) ไปยังกล้องรอง (กล้องหน้า, กล้องหลัง, กล้องซ้าย และกล้องขวา) เป็นค่าบังคับให้ใกล้เคียงค่าคงที่ (Constraint) และให้ค่าเข้าใกล้นี้มีค่าตามลักษณะทางกายภาพที่สอดคล้องกับความเป็นจริง โดยมีค่าการเลื่อนแกนทางแกน X และแกน Y (T_X, T_Y) เท่ากับ ± 30 มิลลิเมตร และการเลื่อนแกนทางแกน Z (T_Z) มีค่า ± 20 มิลลิเมตร พร้อมกับกำหนดน้ำหนักในรูปแบบความถูกต้องเป็น 5 มิลลิเมตร สำหรับค่าพารามิเตอร์การหมุนแกนที่สัมพันธ์ของแต่ละกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรอง ไม่สามารถตรวจวัดค่าที่แน่ชัดได้ แต่สามารถวัดค่าประมาณแล้วนำมาใช้เป็นค่าเริ่มต้นเป็น ± 45 องศา พร้อมกำหนดน้ำหนักในรูปแบบความถูกต้องเป็น 5 องศา หลังจากโปรแกรมถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศประมวลผลปรับปรุงหาค่าพารามิเตอร์เป็นผลคำตอบ (Solution) ด้วยวิธีการเชิงเลข (Numerical method) ตามลักษณะดังกล่าว พบว่า ค่าพารามิเตอร์การจัดภาพภายนอกที่สัมพันธ์กันระหว่างกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรองบนอุปกรณ์จับยึดกล้องสำหรับค่าการเลื่อนแกนสัมพันธ์ (T_X, T_Y, T_Z) ของกล้องทั้ง 4 กล้องได้ค่าเป็นค่าบังคับที่เข้าใกล้ตามที่กำหนด ส่วนค่าพารามิเตอร์การหมุนแกนสัมพันธ์ (R_X, R_Y, R_Z) ที่กำหนดให้มีความอิสระ (Free) เมื่อคำนวณปรับแก้แล้วได้ค่าผลคำตอบของการหมุนแกนเป็นค่าใกล้เคียงปกติ (Nominal) ของกล้องนี้คือ ± 0 องศา ± 45 องศา ± 90 องศา และ ± 180 องศา โดยมีขนาดของการเบี่ยงเบนไม่เกิน 1.47 องศา ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดที่เกิดจากการรังวัดและประมวลผลภายในพื้นที่สนามทดสอบจีเอ็นเอสเอสและยูเอวีสำหรับงานแผนที่และเมื่อนำไปคำนวณปรับแก้ร่วมกับค่าพารามิเตอร์การจัดภาพภายในของกล้องแต่ละตัวในระบบกล้องหลายหัว พบว่าการคำนวณเชิงเลขและการคำนวณปรับแก้ให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพ ผลที่ได้ทำให้ได้แบบจำลองถ่ายสามเหลี่ยมที่มีความละเอียดถูกต้องสูง ได้ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของการฉายกลับ (Mean reprojection error) เป็น 0.225 จุดภาพ และความคลาดเคลื่อนรวมสำหรับจุดควบคุมภาคพื้นดินมีค่า RMSE Easting และ RMSE Northing เท่ากับ 0.016 เมตร และค่า RMSE Height เท่ากับ 0.019 เมตร เมื่อนำค่า RMSE ที่ประมวลผลได้จากงานวิจัยไปพิจารณากับค่า RMSE ของความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับของการผลิตแผนที่ Class 1 ที่มาตราส่วนต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ASPRS [13] พบว่าเพียงพอต่อการทำแผนที่มาตราส่วน 1:500 ขึ้นไป ดังนั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมบางประเภทได้เป็นอย่างดีสำหรับงานที่ต้องการทราบตำแหน่งของข้อมูลเพิ่มเติม รวมไปถึงงานทางระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) นอกจากนั้นการมีภาพถ่ายเฉียงเข้ามาประมวลผลข้อมูลจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเชิงเรขาคณิตในการผลิตแผนที่สามมิติและพอยต์คลาวด์ โดยพอยต์คลาวด์ที่ผลิตได้มีความหนาแน่นและปริมาณพอยต์คลาวด์ที่มากขึ้นดังรูปที่ 8 ซึ่งช่วยเติมเต็มลักษณะของข้อมูลบางประเภทให้สอดคล้องกับลักษณะความเป็นจริงได้มากยิ่งขึ้น ได้แก่ บริเวณอาคารสิ่งปลูกสร้างและบริเวณพุ่มไม้ เป็นต้น

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ไพศาล สันติธรรมนนท์ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ทางด้านทฤษฎีและการปฏิบัติทางด้านการรังวัดภาพถ่ายทางอากาศและการเขียนโปรแกรมภาษาไพธอน คำปรึกษา คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ และผู้เขียนขอขอบพระคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) และ บริษัท อินฟราพลัส จำกัด ซึ่งเป็นผู้สนับสนุนและอนุเคราะห์ให้ข้าพเจ้าได้มีข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ คอมพิวเตอร์ ซอฟต์แวร์ประมวลผล มาใช้ในการประมวลผลข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งถือเป็นสิ่งที่มีคุณค่าอย่างยิ่ง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Jiang, S. and Jiang, W. On-board GNSS/IMU assisted feature extraction and matching for oblique UAV images. *Remote Sensing*, 2017, 9(8), pp. 813. DOI: 10.3390/rs9080813
- [2] Remondino, F. and Gerke, M. Oblique aerial imagery—a review, In: 55th. *Photogrammetric week*, Stuttgart, 7–11 September 2015, pp. 75-83.
- [3] Jiang, S. et al. UAV-based oblique photogrammetry for outdoor data acquisition and offsite visual inspection of transmission line. *Remote Sensing*, 2017, 9(3), pp. 278. DOI: 10.3390/rs9030278
- [4] sUAS News. *Ultra-Efficient Photogrammetry with Pix4Dmapper Pro's Multi Camera Rig Processing*, 2017. Available from: <https://www.suasnews.com/2017/03/ultra-efficient-photogrammetry-pix4dmapper-pros-multi-camera-rig-processing/> [Accessed 3 February 2022].
- [5] Geo-matching. *Shenzhen Share UAV Technology Co., Ltd 5 Lenses Oblique Aerial Camera PSDK 102S V2*, 2022. Available from: <https://geo-matching.com/digital-aerial-cameras/5-lenses-oblique-aerial-camera-psdk-102s-v2> [Accessed 3 February 2022].
- [6] Unmannedrc. *Surveyor 5 Standard Professional Mapping Oblique Camera for UAV Aerial Mapping (120MP)*, 2022. Available from: <https://unmannedrc.com/products/evolution-oblique-camera-system> [Accessed 3 February 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 3 February 2022].
- [8] Pix4D. *How are the Internal and External Camera Parameters defined*, 2022. Available from: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559089-How-are-the-Internal-and-External-Camera-Parameters-defined> [Accessed 3 February 2022].
- [9] Foxtechfpv. *Foxtech Loong 2160 VTOL*, 2022. Available from: <https://www.foxtechfpv.com/foxtech-loong-2160-vtol.html> [Accessed 3 February 2022].
- [10] Tallysman. *HC871 Dual-Band Helical Antenna*, 2022. Available from: <https://www.tallysman.com/product/hc871-dual-band-helical-antenna/> [Accessed 3 February 2022].
- [11] Santitamont, P. *pyBundleBlock*. Bangkok: GitHub, 2022. Available from: <https://github.com/phisan-chula/pyBundleBlock> [Accessed 7 March 2022].
- [12] Bannakulpiphat, T. et al. Best practice for Mapping Production from UAV Imagery. *Engineering Journal of Research and Development*, 2023, 34(1).
- [13] American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. *ASPRS ACCURACY STANDARDS FOR LARGE-SCALE MAPS*, 1990. Available from: http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/1990_jul_1068-1070.pdf [Accessed 20 February 2022].

