

การพัฒนาแบบจำลองระบบกล้องหลายหัวบนอากาศยานไร้คนขับสำหรับการผลิตแผนที่สามมิติและ
พอยต์คลาวด์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MODELING OF MULTI-HEAD CAMERA SYSTEMS ON UNMANNED AERIAL VEHICLE
FOR 3D MAPPING AND POINT CLOUDS GENERATION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Survey Engineering

Department of Survey Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาแบบจำลองระบบกล้องหลายหัวบนอากาศยานไร้คนขับสำหรับการผลิตแผนที่สามมิติและพอยต์คลาวด์
โดย	นายถิรวัฒน์ บรรณกุลพิพัฒน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสำรวจ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร.ชัยโชค ไวกาษา)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชาติชาย ไวยสุระสิงห์)	

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ถึรวิวัฒน์ บรรณกุลพิพัฒน์ : การพัฒนาแบบจำลองระบบกล้องหลายหัวบนอากาศยานไร้คนขับสำหรับการผลิตแผนที่สามมิติและพอยต์คลาวด์.
(MODELING OF MULTI-HEAD CAMERA SYSTEMS ON UNMANNED AERIAL VEHICLE FOR 3D MAPPING AND POINT CLOUDS
GENERATION) อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีระบบกล้องหลายหัว (Multi-head camera systems) ที่ประกอบด้วยกล้องบันทึกภาพถ่ายนิ่งและบันทึกภาพถ่ายเคลื่อนไหวในเวลาเดียวกันบนอากาศยานไร้คนขับเพื่อการทำแผนที่ซึ่งสอดคล้องกับทิศทางการพัฒนาการปฏิบัติงานสำรวจรังวัดด้วยภาพสมัยใหม่ การบันทึกภาพถ่ายนิ่งจะเปิดเผยให้เห็นข้อมูลในทิศทางการมองเห็นด้านข้างของสิ่งปลูกสร้างและพืชพรรณบนภูมิประเทศ การประมวลผลข้อมูลจะทำให้ภาพถ่ายที่บันทึกได้มีข้อมูลรายละเอียดเชิงเรขาคณิตครบถ้วนสมบูรณ์มากขึ้นอีกทั้งช่วยในการแปลตีความการจำแนกข้อมูลได้แม่นยำมากขึ้น การใช้ระบบกล้องหลายหัวทำหน้าที่นอกจากสามารถบันทึกภาพถ่ายได้ครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้างแล้วในงานวิจัยนี้มีประเด็นพิจารณาความสามารถในการเพิ่มประสิทธิภาพในการปฏิบัติการกิจการทำแผนที่ ตั้งแต่การออกแบบแผนการบิน ระยะเวลาที่ใช้ในการบินถ่ายภาพที่น้อยลง จำนวนภาพถ่ายที่ได้ในปริมาณที่มากขึ้นและได้ภาพสำหรับการรังวัดและผลิตพอยต์คลาวด์หลายมุมมอง ซึ่งส่งผลดีต่อการประมวลผลภาพถ่ายเนื่องจากมีภาพถ่ายที่จะใช้ผลิตจุดสำคัญที่ต้องนำไปใช้ในการจับคู่ภาพสำหรับผลิตแผนที่สามมิติและข้อมูลพอยต์คลาวด์ต่อไป

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกล้องหลายหัวชื่อ “3DM V3” การวิจัยครอบคลุมการศึกษาแบบพารามิเตอร์ของอุปกรณ์จับยึดกล้อง ทำหน้าที่ยึดจับกล้องถ่ายภาพตึ่จำนวน 1 กล้อง และกล้องถ่ายภาพเฉียงในทิศทางขวางแนวนอนและตามแนวนอน โดยทำมุมจากแนวตั้งประมาณ 45 องศาจำนวน 4 กล้อง การวิจัยศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ประกอบด้วยเทคนิคเชิงเลขในการกำหนดพารามิเตอร์ว่าจะต้องบังคับ (constraint) หรือปล่อยอิสระ (free) พารามิเตอร์ใดบ้าง ผลลัพธ์ที่ได้จะคำนึงถึงเรขาคณิตของกล้องที่ควรจะต้องสอดคล้องกับกายภาพของกล้องตามความจริง การวิจัยยังครอบคลุมการศึกษาระบบการผลิตข้อมูลแผนที่สามมิติและพอยต์คลาวด์โดยพิจารณาประสิทธิภาพเชิงเรขาคณิตทั้งคุณภาพและปริมาณที่ผลิตได้เพิ่มขึ้นอย่างไร ผลการวิจัยมีการเปรียบเทียบความถูกต้องทางด้านเง่ทั้งทางราบและทางตั้งด้วยค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ย (RMSE) ระหว่างข้อมูลที่ผลิตจากการประมวลผลจากกล้องถ่ายภาพตึ่ตั้งเท่านั้นและจากกล้องถ่ายภาพตึ่ตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

ผลการวิจัยพบว่าค่าพารามิเตอร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกล้องหลายหัว “3DM V3” จำเป็นที่จะต้องหาค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนสัมพันธ์จากกล้องอ้างอิงที่เป็นกล้องตั้งไปยังกล้องรองซึ่งเป็นกล้องเฉียงภายในระบบกล้องชื่อพารามิเตอร์ (T_x, T_y, T_z, rel) โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 4 จำเป็นต้องบังคับพารามิเตอร์ให้เป็นค่าเข้าใกล้ (constraint) สำหรับค่าพารามิเตอร์การหมุนสัมพันธ์ของกล้องอ้างอิงเทียบกับกล้องรองชื่อพารามิเตอร์ (R_x, R_y, R_z, rel) โดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 4 ต้องกำหนดให้เป็นค่าประมาณเริ่มต้นและปรับปรุงค่าได้อิสระ (free) ผ่านกระบวนการเชิงเลข จากผลลัพธ์ค่าพารามิเตอร์การจัดวางภายใน $(f, x_c, y_c, R1, R2, R3, T1, T2)$ ของกล้องแต่ละตัวบนระบบกล้องหลายหัวที่เป็นอิสระและรูปแบบการประมวลผลเชิงเลขที่คำนวณได้ส่งผลให้เรขาคณิตในภาพรวมของชายสามเหลี่ยมทางอากาศมีความละเอียดถูกต้องสูง แบบจำลองและชายสามเหลี่ยมทางอากาศทั้งหมดเมื่อตรวจสอบในสนามวัดสอบที่มีจุดควบคุมภาคพื้นดิน 14 จุด ขนาดสนามประมาณ 0.8 ตารางกิโลเมตรพบว่าค่า RMSE ทางราบเท่ากับ 0.023 เมตร และค่า RMSE ทางตั้งเท่ากับ 0.019 เมตร สำหรับผลลัพธ์ข้อมูลแผนที่ที่ผลิตขึ้นได้ในส่วนข้อมูลพอยต์คลาวด์เมื่อมีภาพถ่ายเฉียงช่วยเข้ามาช่วยในการผลิต ปริมาณพอยต์คลาวด์ที่ผลิตได้มีความหนาแน่นมากขึ้นและมีปริมาณมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญคิดเป็น 2.45 เท่าของปริมาณพอยต์คลาวด์ที่ประมวลผลจากกล้องถ่ายภาพตึ่ตั้งอย่างเดียว ในส่วนของแผนที่สามมิติและภาพออโรผลิตจากการมีภาพถ่ายเฉียงเข้ามาประมวลผลทำให้ความละเอียดถูกต้องทางด้านเง่ต่างจากรูปแบบการประมวลผลจากกล้องถ่ายภาพตึ่ตั้งเท่านั้นโดยมีค่า RMSE ทางราบ 0.105 เมตร พิจารณาความถูกต้องเชิงตำแหน่งจากจุดตัวอย่างบริเวณพื้นที่เปิดภายในพื้นที่การศึกษาจำนวนรวม 30 จุด

สาขาวิชา วิศวกรรมสำรวจ
ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6370430121 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

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

Thirawat Bannakulpihat : MODELING OF MULTI-HEAD CAMERA SYSTEMS ON UNMANNED AERIAL VEHICLE FOR 3D MAPPING AND POINT CLOUDS GENERATION. Advisor: Assoc. Prof. PHISAN SANTITAMNONT, Dr.Ing.

Using multi-head camera systems simultaneously with the nadir and oblique photographs from UAVs is being standardized in modern photogrammetry. Oblique photographs reveal side views of buildings and vegetation fields on the terrain. Thus, it induces more geometric detail information and also leads to precise interpretation and classification processes, compared with the view from nadir photographs as commonly practiced in traditional photogrammetry. From this research, multi-head camera systems increase the mapping coverage area significantly. The systems also provide efficient mapping missions, including flight plan designing, time-saving flight missions processing, and yielding a higher number of photos for multi-view geometry and point clouds. These advantages will further improve key point generating, which is crucial for processing photogrammetric computer vision software.

The research objectives are to determine the camera rig parameters and numerical modeling of the “3DM V3” multi-head camera system. The multi-head camera system consists of one nadir camera and four 45-degree oblique cameras. All cameras are rigged up in an enclosure. The study also covers the improvement of the processing of 3D mapping data and point clouds from multi-view photographs. The final geometric model of the camera system should be consistent with the actual camera geometry in order to confirm the correctness of the model. The results of 3D mapping data and point clouds show the comparison of RMSE results between the nadir photos block and the five-camera combination block.

The conclusion of parameterization and numerical modeling of “3DM-V3” multi-head camera systems are as follows. All 4 sets of relative translation parameters are called $(T_x, T_y, T_z)_{rel}^n$ when n has a value from 1 to 4, all offset values from four oblique cameras have to be constrained. The other 4 sets of relative rotation parameters at the reference camera referred to the other four oblique cameras $(R_x, R_y, R_z)_{rel}^n$ when n has a value from 1 to 4, the offset values must be set as an initial estimation and set “free” during numerical processing. Other conventional parameters that represent the value from all 5 internal camera models $(f, x_c, y_c, R1, R2, R3, T1, T2)$ as “free” and will finally be numerical adjusted. The result of the final camera model from computation adjustment for triangulation affirms the precise geometry and the consistent rig parameters with the physical characteristics of the multi-head camera systems. This research triangulation block is tied-up with constraints and check points from 14 GCPs in the test field size 0.8 square kilometers. The results from final fit parameters for GCPs are RMSE 0.023 meters in horizontal and RMSE 0.019 meters for the vertical component. For point clouds production, in the case of combined oblique photos block, the amount of point clouds increases significantly 2.45 times for both density and volume, compared to the nadir photo block case. The positioning accuracy in 3D mapping and orthophoto from oblique photos block processing gives RMSE at 0.105 meters, which are considered from 30 sample points in the open field within the study area.

Field of Study: Survey Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องมาจากคำปรึกษา คำแนะนำและการสนับสนุนจากหลายฝ่าย และหลายบุคคลด้วยกันโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล สันติธรรมนันท อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ให้ความรู้ทางด้านทฤษฎีและการปฏิบัติทางการรังวัดภาพถ่ายทางอากาศและการเขียนโปรแกรมภาษาไพธอน คำปรึกษา คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ รวมถึงตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ข้าพเจ้า นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย อาจารย์ ดร.ชัยโชค ไว ภาษา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ดร.ชาติชาย ไวยสุระสิงห์ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำต่าง ๆ เพื่อนำไปปรับปรุงให้มีความสมบูรณ์ขึ้นตั้งแต่การสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบุคลากรทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งประกอบด้วย อาจารย์ทุกท่านที่ให้การอบรมสั่งสอน ให้ความรู้ในด้านวิชาการและคำแนะนำต่าง ๆ แก่ข้าพเจ้าตลอดจนเจ้าหน้าที่ที่ช่วยอำนวยความสะดวกด้านจัดการสอบและดำเนินงานด้านเอกสารในการศึกษาวิจัยครั้งนี้รวมถึงเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ นิสิตที่คอยให้ความช่วยเหลือสนับสนุน ให้กำลังใจและช่วยเติมเต็มการใช้ชีวิตในรั้วมหาวิทยาลัยของข้าพเจ้าอย่างสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) บริษัท อินฟราพลัส จำกัด และศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางด้านการจัดการโครงสร้างพื้นฐาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งเป็นผู้สนับสนุนและอนุเคราะห์ให้ข้าพเจ้าได้มีข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ คอมพิวเตอร์ ซอฟต์แวร์ประมวลผล มาใช้ในการประมวลผลข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูล ซึ่งถือเป็นสิ่งที่มีคุณค่าอย่างยิ่ง

และท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงคนในครอบครัวที่ให้การสนับสนุนในทุกด้าน และคอยเป็นกำลังใจให้กับข้าพเจ้าเสมอมา โดยเฉพาะนางสาวเอื้อการย์ โรจนจิรไพศาล ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่องานทางด้านวิศวกรรมสำรวจของประเทศไทยและผู้ที่เกี่ยวข้องต่อไป และหากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าน้อมรับและขออภัยเป็นอย่างสูง

ธีรวัฒน์ บรรณกุลพิพัฒน์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.3.1 ขอบเขตพื้นที่การศึกษา.....	3
1.3.2 ขอบเขตเนื้อหาที่ใช้ในการศึกษา	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1.1 การจัดวางภาพภายในและการจัดวางภาพภายนอก (Interior orientation and Exterior orientation).....	6
2.1.2 ระบบกล้องหลายหัว (Multi-head camera systems).....	10
2.1.3 ประเภทของภาพถ่ายทางอากาศ (Type of aerial photographs).....	12
2.1.4 การจับคู่ภาพด้วยคอมพิวเตอร์วิชั่น (Computer vision).....	14
2.1.5 การมองเห็นหลายมุมมอง (Multiple View Geometry; MVG).....	15

2.1.6	อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle; UAV)	16
2.1.7	การประเมินความถูกต้องของการรังวัดค่าพิกัดบนภาพถ่าย	18
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	20
2.2.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้อากาศยานไร้คนขับในการทำแผนที่สามมิติ	20
2.2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบกล้องหลายหัว	21
2.2.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับภาพถ่ายเฉียง	22
บทที่ 3	วิธีดำเนินงานวิจัย	25
3.1	โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย	25
3.2	ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย	25
3.2.1	ข้อมูลภาพถ่ายของระบบกล้องหลายหัว	25
3.2.2	ข้อมูลค่าพิกัดจากสัญญาณดาวเทียมบนยูเอวี	27
3.2.3	ข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน	28
3.3	การประมวลผลข้อมูล	29
3.3.1	การวางแผนการบินและการบันทึกภาพถ่าย	30
3.3.2	การวัดระยะห่างของกล้องและเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส	31
3.3.3	การรังวัดจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน	34
3.3.4	การประมวลผลข้อมูลภาพถ่าย	36
3.3.5	การรังวัดค่าพิกัดสามมิติจากภาพถ่ายที่บันทึกจากระบบกล้องหลายหัว	41
3.3.6	การประเมินข้อมูลพอยต์คลาวด์	43
3.3.7	การเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่ง	45
บทที่ 4	ผลการศึกษาวิจัย	46
4.1	ผลการประมวลผลภาพถ่ายตั้งที่บันทึกมาจากระบบกล้องหลายหัว	47
4.2	ผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกล้องหลายหัว ..	49
4.3	ผลการประมวลผลภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงที่บันทึกมาจากระบบกล้องหลายหัว	57

4.3.1 ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลภาพถ่าย	57
4.3.2 ผลการคำนวณขยายสามเหลี่ยมทางอากาศ.....	57
4.4 ผลการประเมินประสิทธิภาพการรังวัดค่าพิกัดเพื่อทำแผนที่สามมิติ	60
4.4.1 ความคลาดเคลื่อนของการรังวัดบนบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง	61
4.4.2 การเปรียบเทียบผลการรังวัดที่วัดมาด้วยวิธีการหาค่าพิกัดสามมิติระหว่างบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง.....	64
4.5 ผลการประเมินประสิทธิภาพข้อมูลพอยต์คลาวด์.....	69
4.5.1 การเปรียบเทียบจำนวนข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ผลิตได้จากภาพถ่าย.....	69
4.5.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพข้อมูลพอยต์คลาวด์เชิงคุณภาพ.....	71
4.5.3 ผลการประเมินประสิทธิภาพข้อมูลพอยต์คลาวด์เชิงปริมาณ	73
4.6 ผลการเปรียบเทียบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพออร์โธ	74
4.6.1 การเปรียบเทียบผลการรังวัดที่รังวัดมาด้วยวิธีการรังวัดตำแหน่งบนภาพออร์โธระหว่างการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง	74
4.6.2 การเปรียบเทียบค่าพิกัดระหว่างวิธีการรังวัดตำแหน่งบนภาพออร์โธและวิธีการรังวัดค่าพิกัดสามมิติจากเทคนิคการมองเห็นหลายมุมมอง	74
บทที่ 5 อภิปรายผล สรุปผลการศึกษาวิจัย และข้อเสนอแนะ	79
5.1 อภิปรายผลการศึกษา	79
5.1.1 อภิปรายผลการเปรียบเทียบผลการศึกษากับงานวิจัยอื่น ๆ ที่มีความคล้ายคลึงกัน	79
5.1.2 อภิปรายผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์และแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบกล้องหลายหัว.....	81
5.1.3 อภิปรายการประมวลผลภาพถ่ายจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง	83

5.1.4 การเปรียบเทียบความถูกต้องทางตำแหน่งในการรังวัดค่าพิกัดสามมิติด้วยเทคนิคการ
มองเห็นหลายมุมมองระหว่างการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและจาก
บล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง..... 84

5.1.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพข้อมูลพอยต์คลาวด์ระหว่างการประมวลผลจากบล็อก
ภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง 85

5.1.6 การเปรียบเทียบความถูกต้องเชิงตำแหน่งในการรังวัดบนภาพออร์โธระหว่างการ
ประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่าย
เฉียง..... 86

5.1.7 การเปรียบเทียบความถูกต้องเชิงตำแหน่งระหว่างการรังวัดแบบหลายมุมมองและการ
รังวัดบนภาพออร์โธ 87

5.2 สรุปผลการศึกษาวิจัย 88

5.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ..... 90

บรรณานุกรม..... 94

ภาคผนวก..... 97

ภาคผนวก ก. ค่าพารามิเตอร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกล้องหลายหัว 98

ภาคผนวก ข. นิยามคำศัพท์เทคนิคภายในงานวิจัย 102

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1	ข้อดีและข้อเสียของอากาศยานไร้คนขับแต่ละประเภท	17
ตารางที่ 2	คุณลักษณะของระบบกล้องหลายหัว FOXTECH 3DM V3 ที่ใช้ในงานวิจัย.....	26
ตารางที่ 3	คุณลักษณะของอากาศยานไร้คนขับที่ใช้ในงานวิจัย	27
ตารางที่ 4	ค่าพิกัดและค่าระดับของสถานีฐานที่รังวัดมาจากวิธีการหาตำแหน่งจุดเดียวความละเอียดสูง (PPP).....	28
ตารางที่ 5	พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการวางแผนการบินในงานวิจัย	30
ตารางที่ 6	ระยะห่างระหว่างเสารับสัญญาณดาวเทียมกับระบบกล้องหลายหัว.....	32
ตารางที่ 7	ระยะห่างระหว่างกล้องตั้งตำแหน่งตรงกลางไปยังกล้องเฉียงอีก 4 กล้อง	33
ตารางที่ 8	พิกัดตำแหน่งของจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินบริเวณพื้นที่การศึกษา	35
ตารางที่ 9	ความคลาดเคลื่อนในแกนพิกัด Easting, Northing และ Height ของจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน (GCPs) และจุดตรวจสอบ (CPs) ในการประมวลผลจากบล็อกของภาพถ่ายตั้งเท่านั้น...	48
ตารางที่ 10	ความคลาดเคลื่อนในแกนพิกัด Easting, Northing และ Height ของจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน (GCPs) ในการประมวลผลจากบล็อกของภาพถ่ายตั้งเท่านั้น.....	49
ตารางที่ 11	ผลคำตอบค่าพารามิเตอร์การเลื่อนแกนและการหมุนแกนที่สัมพันธ์ระหว่างกล้องพร้อมความไม่แน่นอนของแบบจำลองกล้องแบบที่ 1 โดยกำหนดให้พารามิเตอร์มีการคำนวณเชิงเลขเป็นรูปแบบเชิงเลขอิสระ (free).....	50
ตารางที่ 12	ผลคำตอบค่าพารามิเตอร์การเลื่อนแกนและการหมุนแกนที่สัมพันธ์ระหว่างกล้องพร้อมความไม่แน่นอนของรูปแบบของแบบจำลองกล้องแบบที่ 2 โดยกำหนดให้พารามิเตอร์การหมุนมีการคำนวณเชิงเลขเป็นรูปแบบเชิงเลขอิสระ(free) เท่านั้น.....	52
ตารางที่ 13	ค่าพารามิเตอร์การจัดวางภายในที่โปรแกรมประมวลผลได้ของกล้องกลาง (Camera M)	55
ตารางที่ 14	ค่าพารามิเตอร์การจัดวางภายในที่โปรแกรมประมวลผลได้ของกล้องหลัง (Camera B).....	55
ตารางที่ 15	ค่าพารามิเตอร์การจัดวางภายในที่โปรแกรมประมวลผลได้ของกล้องหน้า (Camera F).....	56

ตารางที่ 16 ค่าพารามิเตอร์การจัดวางภายในที่โปรแกรมประมวลผลได้ของกล้องซ้าย (Camera L) 56

ตารางที่ 17 ค่าพารามิเตอร์การจัดวางภายในที่โปรแกรมประมวลผลได้ของกล้องขวา (Camera R) 56

ตารางที่ 18 เปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายระหว่างบล็อกของภาพถ่าย
 ดิ่งเท่านั้นและบล็อกของภาพถ่ายดิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง 57

ตารางที่ 19 ความคลาดเคลื่อนในแกนพิกัด Easting, Northing และ Height ของจุดบังคับภาพถ่าย
 ภาคพื้นดิน (GCPs) ในการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายดิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง 58

ตารางที่ 20 จำนวนจุดที่รังวัดในโปรแกรมทั้ง 3 กลุ่มจากทั้งรูปแบบการประมวลผลจากบล็อก
 ภาพถ่ายดิ่งเท่านั้นและรูปแบบการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายดิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง 60

ตารางที่ 21 (ก) ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการรังวัดพิกัดสามมิติบริเวณพื้นที่เปิดจากบล็อก
 ภาพถ่ายดิ่งเท่านั้น (ข) ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการรังวัดพิกัดสามมิติบริเวณพื้นที่เปิดจาก
 บล็อกภาพถ่ายดิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง 61

ตารางที่ 22 (ก) ค่าความคลาดเคลื่อนของการรังวัดพิกัดสามมิติบริเวณอาคารสิ่งปลูกสร้างจากบล็อก
 ภาพถ่ายดิ่งเท่านั้น (ข) ค่าความคลาดเคลื่อนของการรังวัดพิกัดสามมิติบริเวณพื้นที่เปิดจากบล็อก
 ภาพถ่ายดิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง 62

ตารางที่ 23 (ก) ค่าความคลาดเคลื่อนของการรังวัดพิกัดสามมิติบริเวณรอยพิมพ์ฐานและป้ายบนถนน
 จากบล็อกภาพถ่ายดิ่งเท่านั้น (ข) ค่าความคลาดเคลื่อนของการรังวัดพิกัดสามมิติบริเวณพื้นที่เปิดจาก
 บล็อกภาพถ่ายดิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง 63

ตารางที่ 24 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยของค่าพิกัดทางราบบริเวณพื้นที่
 เปิดที่ได้มาจากวิธีการหาค่าพิกัดสามมิติระหว่างระหว่างบล็อกภาพถ่ายดิ่งเท่านั้นและบล็อกภาพถ่าย
 ดิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง 65

ตารางที่ 25 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยของค่าพิกัดทางดิ่งบริเวณพื้นที่
 เปิดที่ได้มาจากวิธีการหาค่าพิกัดสามมิติระหว่างระหว่างบล็อกภาพถ่ายดิ่งเท่านั้นและบล็อกภาพถ่าย
 ดิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง 66

ตารางที่ 26 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยของค่าพิกัดทางราบบริเวณพื้นที่
 อาคารสิ่งปลูกสร้างที่ได้มาจากวิธีการหาค่าพิกัดสามมิติระหว่างบล็อกภาพถ่ายดิ่งเท่านั้นและบล็อก
 ภาพถ่ายดิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง 67

ตารางที่ 27 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยของค่าพิกัดทางดิ่งบริเวณพื้นที่
อาคารสิ่งปลูกสร้างที่ได้มาจากวิธีการหาค่าพิกัดสามมิติระหว่างบล็อกภาพถ่ายดิ่งเท่านั้นและบล็อก
ภาพถ่ายดิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง 68

ตารางที่ 28 เปรียบเทียบจำนวนจุดพอยต์คลาวด์ที่ผลิตได้ระหว่างรูปแบบประมวลจากบล็อกภาพถ่าย
ดิ่งเท่านั้นและประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายดิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง 70

ตารางที่ 29 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยของค่าพิกัดทางราบบริเวณพื้นที่
เปิดที่ได้มาจากวิธีการรังวัดบนภาพออร์โธระหว่างรูปแบบการประมวลจากบล็อกภาพถ่ายดิ่งเท่านั้น
และรูปแบบการประมวลจากบล็อกภาพถ่ายดิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง 75

ตารางที่ 30 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยของค่าพิกัดทางราบบริเวณพื้นที่
เปิดระหว่างการรังวัดที่วัดมาด้วยวิธีรังวัดตำแหน่งบนภาพออร์โธและการรังวัดค่าพิกัดสามมิติจาก
เทคนิคการมองเห็นหลายมุมมองของรูปแบบการประมวลจากบล็อกภาพถ่ายดิ่งเท่านั้น 76

ตารางที่ 31 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยของค่าพิกัดทางราบบริเวณพื้นที่
เปิดที่ระหว่างการรังวัดที่วัดมาด้วยวิธีรังวัดตำแหน่งบนภาพออร์โธและการรังวัดค่าพิกัดสามมิติจาก
เทคนิคการมองเห็นหลายมุมมองของรูปแบบการประมวลจากบล็อกภาพถ่ายดิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง
..... 77

ตารางที่ 32 สัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของกล้องแต่ละตัวบนระบบกล้องหลายหัว 101

ตารางที่ 33 ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรองบนระบบกล้อง
หลายหัว 101

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1 ขอบเขตพื้นที่การศึกษาที่ทำการบินถ่ายอากาศยานไร้คนขับและบันทึกภาพ.....	4
รูปที่ 2 เรขาคณิตของกล้อง.....	7
รูปที่ 3 เรขาคณิตสามมิติของค่าพารามิเตอร์ภายนอกของกล้อง.....	9
รูปที่ 4 พารามิเตอร์การเลื่อนแกนและการหมุนแกนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกล้องหลายหัว.....	11
รูปที่ 5 ประเภทของภาพถ่ายทางอากาศ.....	12
รูปที่ 6 จุดสำคัญ (Keypoint) ที่โยงยึดจากภาพถ่ายในบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง.....	13
รูปที่ 7 การสร้างคำอธิบายลักษณะเด่นของจุดสำคัญ (Keypoint descriptor).....	15
รูปที่ 8 การรังวัดค่าพิกัดสามมิติแบบภาพสเตอริโอและแบบหลายมุมมอง.....	16
รูปที่ 9 (ก) อากาศยานไร้คนขับชนิดปีกตรึง (ข) ชนิดปีกหมุน (ค) ชนิดปีกหมุนเดี่ยว (ง) ชนิดปีกตรึงขึ้นลงแนวตั้ง.....	17
รูปที่ 10 ตัวอย่างตำแหน่งภาพถ่ายที่บันทึกมาจากระบบกล้องหลายหัวที่ใช้ในงานวิจัย.....	25
รูปที่ 11 (ก) ยูเอวีลูกผสมชนิดปีกตรึงและหลายโรเตอร์ (VTOL) รุ่น Loong 2160 VTOL ใช้ในการบินปฏิบัติการกิจ (ข) กล้อง 3DM V3 ที่ใช้ในการบันทึกภาพถ่าย.....	26
รูปที่ 12 อุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียมที่ใช้บนยูเอวี.....	27
รูปที่ 13 การรับสัญญาณดาวเทียมบนหอดูดาวสถานีฐานและ ตัวอย่างหัวหมดทองเหลืองจุดบังคับภาพพื้นดิน.....	28
รูปที่ 14 แผนผังขั้นตอนการประมวลผลข้อมูล.....	29
รูปที่ 15 เส้นทางการบินของอากาศยานไร้คนขับที่บินบันทึกภาพถ่ายในงานวิจัย.....	31
รูปที่ 16 การวัดระยะห่างจากเสารับสัญญาณไปยังบริเวณตัวกล้อง.....	32
รูปที่ 17 (ก) รายละเอียดลักษณะส่วนประกอบและขนาดของเสารับสัญญาณ Tallyman HC871 (ข) ลักษณะความสัมพันธ์ของแกนพิกัดระหว่างเสารับสัญญาณกับระบบกล้องหลายหัว.....	32

รูปที่ 18 การวัดระยะห่างจากกล้องกลางไปยังกล้องอื่น ๆ บนระบบกล้องหลายหัว.....	33
รูปที่ 19 ลักษณะจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินที่กระจายตัวในพื้นที่การศึกษา (ก) และ (ข) เป้าแบบให้สัญญาณ (ค) เป้าแบบธรรมชาติ.....	34
รูปที่ 20 การกระจายตัวของตำแหน่งจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน ที่ใช้ในการประมวลผลภายในงานวิจัย.....	35
รูปที่ 21 ตำแหน่งของกล้องและการเอียงตัว (ก) บล็อกของภาพถ่ายดิ่งเท่านั้น (ข) บล็อกของภาพถ่ายดิ่งร่วมกับภาพถ่ายเอียง.....	37
รูปที่ 22 (ก) และ (ค) คือ ผลลัพธ์ข้อมูลพอยต์คลาวด์ก่อนและหลังประมวลผลขั้นตอนที่ 2 จากบล็อกของภาพถ่ายดิ่งเท่านั้น (ข) และ (ง) คือ ผลลัพธ์ข้อมูลพอยต์คลาวด์ก่อนและหลังประมวลผลขั้นตอนที่ 2 จากบล็อกของภาพถ่ายดิ่งร่วมกับภาพถ่ายเอียง	38
รูปที่ 23 (ก) และ (ค) คือ ภาพออร์โธและแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศจากการประมวลผลด้วยบล็อกของภาพถ่ายดิ่งเท่านั้น (ข) และ (ง) คือ ภาพออร์โธและแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศจากการประมวลผลด้วยบล็อกของภาพถ่ายดิ่งร่วมกับภาพถ่ายเอียง	39
รูปที่ 24 ค่าตั้งต้นของค่าพารามิเตอร์การเลื่อนแกนและค่าพารามิเตอร์การหมุนแกนของกล้องแต่ละตัวที่สัมพันธ์กับกล้องกลาง	40
รูปที่ 25 การรังวัดตำแหน่งค่าพิกัดสามมิติของของจุดที่สนใจแบบหลายมุมมอง (Multiple View) เพื่อใช้ในการทำแผนที่สามมิติ	41
รูปที่ 26 ตัวอย่างภาพที่ถูกใช้ในการรังวัดค่าสามมิติ (ก) บริเวณพื้นที่เปิดโล่ง (ข) บริเวณอาคารสิ่งปลูกสร้าง (ค) บริเวณรอยพิมพ์ฐานอาคาร (ง) บริเวณป้ายเสาบอกทาง.....	42
รูปที่ 27 (ก) บริเวณพื้นที่ส่วนกลางของผลลัพธ์ที่ประมวลผลจากบล็อกของภาพถ่ายดิ่งเท่านั้น คิดเป็น 65 เปอร์เซนต์ (ข) บริเวณพื้นที่ส่วนกลางของผลลัพธ์ที่ประมวลผลจากบล็อกของภาพถ่ายดิ่งร่วมกับภาพเอียงคิดเป็น 45เปอร์เซนต์.....	43
รูปที่ 28 จำนวนและลักษณะของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ผลิตขึ้นได้ (ก) ประมวลผลจากบล็อกของภาพถ่ายดิ่งเท่านั้น และ (ข) ประมวลผลจากบล็อกของภาพถ่ายดิ่งร่วมกับภาพถ่ายเอียง	44
รูปที่ 29 ตำแหน่งของจุดที่รังวัดบนภาพถ่ายออร์โธ (ก) ภาพออร์โธที่ประมวลผลจากบล็อกของภาพถ่ายดิ่งเท่านั้น และ (ข) ภาพออร์โธที่ประมวลผลจากบล็อกของภาพถ่ายดิ่งร่วมกับภาพถ่ายเอียง	45

รูปที่ 30 หัวข้อผลลัพธ์การศึกษาที่ศึกษาภายในงานวิจัย.....	46
รูปที่ 31 ตำแหน่งและการวางตัวของภาพแต่ละกล้องจากแบบจำลองของกล้องที่ออกแบบและ คำนวณได้ (ก) มุมมองด้านบน (Top view) และ (ข) มุมมองด้านข้าง (Side view).....	51
รูปที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรองบนอุปกรณ์จับยึดกล้อง	53
รูปที่ 33 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่า RMSE ของแต่ละแนวแกนระหว่างบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและ บล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง	59
รูปที่ 34 ตำแหน่งการกระจายตัวของจุดที่ใช้ในการรังวัดค่าพิกัดสามมิติเพื่อเปรียบเทียบ.....	60
รูปที่ 35 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่า RMSE ในแต่ละประเภทบริเวณด้วยวิธีการหาค่าพิกัดสามมิติ ระหว่างบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง.....	64
รูปที่ 36 เปรียบเทียบปริมาณพอยต์คลาวด์ระหว่างรูปแบบการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้น และรูปแบบการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง.....	69
รูปที่ 37 ลักษณะข้อมูลพอยต์คลาวด์ ณ บริเวณเดียวกัน (ก), (ค) และ (จ) ประมวลผลจากบล็อก ภาพถ่ายตั้งเท่านั้น (ข), (ง) และ (ฉ) ประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง	71
รูปที่ 38 ลักษณะข้อมูลพอยต์คลาวด์บริเวณผนังกำแพงของอาคารสิ่งปลูกสร้าง (ก) ประมวลผลจาก บล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้น (ข) ประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง.....	72
รูปที่ 39 ลักษณะข้อมูลพอยต์คลาวด์บริเวณอาคารสิ่งปลูกสร้างที่ประมวลผลมาจากบล็อกภาพถ่ายตั้ง เท่านั้นและจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงผ่านการแสดงผลด้วยการเขียนโปรแกรมภาษา ไพธอน.....	73
รูปที่ 40 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่า RMSE ในแต่ละกรณีศึกษา	78
รูปที่ 41 ลักษณะหน้าตัดตามขวางของข้อมูลพอยต์คลาวด์บริเวณอาคารสิ่งปลูกสร้างและบริเวณ พื้นผิวของถนน (ก) และ (ค) ประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้น (ข) และ (ง) ประมวลผลจาก บล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง	86
รูปที่ 42 ตัวอย่างภาพถ่ายจากบนหน้าจอโปรแกรมที่ใช้สำหรับการโยกยึดและรังวัด	90
รูปที่ 43 ตัวอย่างรายละเอียดข้อมูลภาพถ่ายจากทั้ง 5 กล้องของระบบกล้องหลายหัว ณ ตำแหน่งจุด ถ่ายภาพเดียวกัน โดยเส้นสีแดงแสดงถึงรายละเอียดของการบีบอัดข้อมูล	91
รูปที่ 44 (ก) ระบบกล้องหลายหัว PSDK 102S V2 (ข) ระบบกล้องหลายหัว Surveyor 5 Standard	92

รูปที่ 45 แผนที่สามมิติที่ได้มาจากประมวลผลด้วยภาพถ่ายที่บันทึกมาด้วยวิธีการบินบันทึกภาพแบบ
เฉียง 93

รูปที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรองบนอุปกรณ์จับยึดกล้อง 98



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อากาศยานไร้คนขับที่ติดตั้งระบบกล้องหลายหัว (Multi-head camera systems) หรือระบบกล้องที่ทำการบันทึกภาพถ่ายนิ่งและบันทึกภาพถ่ายเฉียงกำลังมีมากขึ้นและมีความสำคัญอย่างมากสำหรับการทำงานรังวัดด้วยภาพถ่ายสมัยใหม่ (Modern Photogrammetry) เนื่องจากการบันทึกภาพถ่ายเฉียงมีวัตถุประสงค์ที่ต้องการบันทึกข้อมูลในลักษณะทิศทางการมองด้านข้าง (Side-looking direction) ทำให้ภาพถ่ายที่บันทึกมามีความละเอียดเชิงพื้นที่ที่สูงและสามารถใช้ในการตีความวัตถุที่มองเห็นได้ยากจากมุมมองตั้งทั่วไปที่ได้จากการรังวัดด้วยภาพถ่ายสมัยดั้งเดิม (Traditional photogrammetry) ซึ่งถูกนำไปประยุกต์ใช้ในหลากหลายงาน เช่น สามารถบันทึกข้อมูลรอยพิมพ์ฐาน (Footprint) และข้อมูลองค์ประกอบภายนอกของอาคารได้ (Facade) (Jiang & Jiang, 2017; Remondino & Gerke, 2015) การตรวจสอบแนวสายส่ง (Transmission Line Inspection) (Jiang et al., 2017) การจัดการต้นไม้ในเมือง (Urban tree management) (Lin et al., 2015) เป็นต้น นอกจากนี้สามารถบันทึกภาพถ่ายข้อมูลได้ครอบคลุมพื้นที่เป็นบริเวณกว้างแล้วการติดตั้งระบบกล้องหลายหัวก็ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน ตั้งแต่การออกแบบแผนการบิน ระยะเวลาที่ใช้ในการบินถ่ายภาพที่น้อยลง จำนวนภาพถ่ายที่ได้ในปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งส่งผลดีต่อการประมวลผลภาพถ่ายเนื่องจากมีภาพที่ใช้ในการการจับคู่ภาพมากขึ้น (sUAS News, 2017)

ในอดีตอากาศยานไร้คนขับหรือยูเอวี (Unmanned Aerial Vehicle; UAV) ถูกพัฒนาโดยมีจุดประสงค์หลักในการใช้งานทางด้านทหาร (Colomina & de la Tecnologia, 2008; Eisenbeiß, 2009) ปัจจุบันอากาศยานไร้คนขับถูกนำมาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านต่าง ๆ มากมาย รวมถึงงานทางด้านวิศวกรรมในส่วนของการผลิตแผนที่สามมิติและพอยต์คลาวด์ของรูปทรงสิ่งปลูกสร้าง (Nex & Remondino, 2014; Remondino et al., 2011) เพื่อนำไปใช้ในการอ้างอิงตำแหน่งพิกัดทางภูมิศาสตร์ของภูมิประเทศและนำไปใช้ในการออกแบบ ซึ่งถือว่ามีบทบาทที่สำคัญและมีประโยชน์อย่างมาก โดยส่วนมากข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่นำมาใช้ในงานทางด้านโฟโตแกรมมาจากกล้องที่ติดตั้งบนยานหนะเพียงกล้องเดียว ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้นั้นมีความถูกต้องเชิงตำแหน่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจรังวัดวิธีการปฏิบัติการทั้งภาคสนามและสำนักงาน รวมถึงโปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผล จึงได้มี

งานวิจัยนำแนวคิดภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากกล้องมากกว่าหนึ่งกล้องหรือที่เรียกว่า กล้องหลายหัวมาประยุกต์ใช้กับงานในปัจจุบัน เนื่องจากภาพถ่ายที่ได้จากระบบกล้องนี้จะมีส่วนซ้อนทับด้านหน้าของภาพ (Overlap) และส่วนซ้อนด้านข้าง (Side lap) ที่มากขึ้น แต่ก็จะได้รับผลของความเฉียงที่มาจากระบบกล้องที่ทำมุมกันบนโครงสร้างของระบบกล้องหลายหัวที่ติดตั้ง (Jiang et al., 2017) บนยูเอวีที่ได้ผลิตขึ้นมาด้วย ซึ่งมุมของกล้องที่ทำมุมกันรวมถึงระยะห่างของกล้องแต่ละตัวก็มีขนาดและทิศทางที่คงที่ตามโครงสร้างของระบบกล้องหลายหัวที่เลือกใช้

จากการศึกษางานวิจัยและทบทวนวรรณกรรมพบว่ามีการนำระบบกล้องหลายหัวมาติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับ เนื่องมาจากแนวคิดการรังวัดภาพถ่ายทางอากาศด้วยภาพเฉียงกำลังพัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา Jiang & Jiang (2017) ได้ทำการศึกษามุมมองและลักษณะทางเรขาคณิตในการแยกคุณลักษณะและการจับคู่เป็นงานที่สำคัญในด้านการมองเห็นของคอมพิวเตอร์และการรังวัดด้วยภาพผ่านข้อมูลภาพถ่ายเฉียงร่วมกับข้อมูล GNSS / IMU (Global Navigation Satellite System / Inertial Measurement Unit) บนยูเอวี เพื่อให้เกิดการแยกคุณลักษณะที่มีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้ในการจับคู่ภาพถ่ายเฉียงทางอากาศจากยูเอวี Jiang et al. (2017) ได้ทำการศึกษาการสร้างแบบจำลองสามมิติในการตรวจสอบแนวสายส่งผ่านข้อมูลภาพถ่ายเฉียงที่ติดตั้งอยู่บนยูเอวีร่วมกับข้อมูล GNSS บนยูเอวีและมีการรังวัดจุดควบคุมภาคพื้นดิน เพื่อนำไปใช้ในการประมวลผลเพื่อให้ได้แบบจำลองสามมิติที่มีความถูกต้องและความแม่นยำในการอ้างอิงทางภูมิศาสตร์ Vacca et al. (2017) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองสามมิติในการพิจารณารอยพิมพ์ฐานและการวัดพื้นที่ รวมไปถึงปริมาตรของสิ่งปลูกสร้างที่ได้มาจากการประมวลผลด้วยภาพถ่ายตั้งและภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง จากการศึกษาพบว่าการบันทึกข้อมูลด้วยภาพถ่ายเฉียงช่วยเพิ่มความแม่นยำในการผลิตและการวัดพอยต์คลาวด์ของสิ่งปลูกสร้าง Wierzbicki (2018) ได้มีการศึกษาระบบกล้องหลายหัวที่ติดตั้งอยู่บนยูเอวีในการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงเรขาคณิตของภาพสำหรับการทำแผนที่ ซึ่งพบว่าช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแผนที่ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการรังวัดภาพถ่ายทางอากาศด้วยภาพเฉียง ภาพที่ถ่ายได้จะบันทึกข้อมูลทั้งพื้นผิวด้านบนและด้านข้างของวัตถุบนพื้น ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแม่นยำและความถูกต้องเชิงพื้นที่และเชิงเรขาคณิตในการผลิตแผนที่สามมิติและพอยต์คลาวด์ของรูปทรงสิ่งปลูกสร้าง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาแบบจำลองของกล้องหลายหัว (Multi-head cameras) ที่ทำการติดตั้งอยู่บนอากาศยานไร้คนขับลูกผสมชนิดปีกตรึงและหลายโรเตอร์

(Vertical Take-off and Landing; VTOL) ซึ่งประกอบไปด้วยกล้องถ่ายภาพตั้ง 1 กล้องและกล้องถ่ายภาพเฉียงจำนวน 4 กล้อง (ด้านหน้า-ด้านหลัง-ด้านซ้าย-ด้านขวาของกล้องถ่ายตั้ง) ที่ทำการบินถ่ายภาพตามหลักการทางโฟโตแกรมเมตรีและบันทึกภาพจากทั้งห้ากล้องพร้อมกัน จากนั้นนำภาพที่ได้ทั้งหมดมาศึกษาหาค่าพารามิเตอร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกล้องหลายหัว วิธีการประมวลผลภาพถ่ายและวิเคราะห์ผลลัพธ์ด้วยค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ย (Root Mean Square Error; RMSE) รวมถึงประเมินประสิทธิภาพในเชิงเรขาคณิต (Geometry) สำหรับการพัฒนาคุณภาพในการผลิตแผนที่สามมิติและพอยต์คลาวด์ให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องเชิงพื้นที่ที่สูง เพื่อให้ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาวิธีการหาค่าพารามิเตอร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกล้องหลายหัวที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลภาพถ่าย
- 1.2.2 เพื่อศึกษากระบวนการผลิตแผนที่สามมิติและพอยต์คลาวด์ที่ประมวลผลจากข้อมูลภาพถ่ายที่บันทึกจากระบบกล้องหลายหัวในการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงเรขาคณิต

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ขอบเขตพื้นที่การศึกษา

พื้นที่การศึกษาที่ทำการบินอากาศยานไร้คนขับและบันทึกภาพถ่ายทางอากาศจากระบบกล้องหลายหัว คือ บริเวณศูนย์เครือข่ายการเรียนรู้เพื่อภูมิภาค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี เป็นพื้นที่สนามทดสอบจีเอ็นเอสเอสและยูเอวีสำหรับงานแผนที่ (Geodetic GNSS and UAV Testing Facility) ภายใต้โครงการวิจัยของคณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีขนาดพื้นที่ประมาณ 0.8 ตารางกิโลเมตร มีหมุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินกระจายตัวทั่วพื้นที่เป็นจำนวน 14 หมุด



รูปที่ 1 ขอบเขตพื้นที่การศึกษาที่ทำการบินถ่ายอากาศยานไร้คนขับและบันทึกภาพ

1.3.2 ขอบเขตเนื้อหาที่ใช้ในการศึกษา

ในการศึกษางานวิจัยครั้งนี้ขอบเขตการศึกษา คือ การนำภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการบินถ่ายภาพตามหลักโฟโตแกรมเมตรีด้วยอากาศยานไร้คนขับชนิด VTOL ที่ติดตั้งระบบกล้องหลายหัว ซึ่งประกอบไปด้วยกล้องถ่ายภาพตั้ง 1 กล้องและกล้องถ่ายภาพเฉียงจำนวน 4 กล้อง (ด้านหน้า-ด้านหลัง-ด้านซ้าย-ด้านขวาของกล้องถ่ายตั้ง) รวมไปถึงข้อมูลดาวเทียมนำหน (GNSS Multi-frequency) ที่ได้มาทำการประมวลผลข้อมูลด้วยโปรแกรมทางด้านโฟโตแกรมเมตรี โดยมีการใช้จุดบ่งคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน ซึ่งประกอบไปด้วยการศึกษาดังนี้

- ศึกษาพารามิเตอร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกล้องถ่ายภาพในระบบกล้องหลายหัว
- ศึกษาวิธีการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับที่ติดตั้งระบบกล้องหลายหัวในการผลิตแผนที่สามมิติและพอยต์คลาวด์ให้มีความถูกต้องเชิงพื้นที่สูงและมีประสิทธิภาพในเชิงเรขาคณิต

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกล้องที่ได้มาจากอากาศยานไร้คนขับที่ติดตั้งระบบกล้องหลายหัวได้
- 1.4.2 สามารถประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายตั้งและภาพถ่ายเฉียงที่มาจากระบบกล้องหลายหัวได้อย่างมีประสิทธิภาพในเชิงเรขาคณิต
- 1.4.3 สามารถผลิตแผนที่สามมิติและพอยต์คลาวด์ให้มีประสิทธิภาพเชิงเรขาคณิตความถูกต้องเชิงพื้นที่สูงจากภาพถ่ายที่ได้มาจากระบบกล้องหลายหัว
- 1.4.4 สามารถหาค่าพิกัดของตำแหน่งที่สนใจและสนับสนุนการสร้างแบบจำลองสิ่งปลูกสร้างจากแผนที่สามมิติและพอยต์คลาวด์ที่ผลิตจากภาพถ่ายที่ได้มาจากระบบกล้องหลายหัวได้



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การจัดวางภาพภายในและการจัดวางภาพภายนอก (Interior orientation and Exterior orientation)

2.1.1.1 การจัดวางภาพภายใน (Interior orientation)

การจัดวางภาพภายในของภาพถ่ายทางอากาศ เป็นการกำหนดรูปแบบของกลุ่มลำแสงที่ออกจากจุดศูนย์ทิวทัศน์ (perspective center) ไปสู่จุดในระบบพิกัดของวัตถุ ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดจุดตั้งขึ้นบนเครื่องวัดหรือพิกัดจุดตั้งขึ้นบนจอภาพกับระบบพิกัดภาพถ่าย โดยตำแหน่งของจุดศูนย์ทิวทัศน์ (x_0, y_0, f) ในระบบพิกัดภาพถ่ายจะเป็นตัวกำหนดเรขาคณิตของการจัดภาพภายใน ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่ได้จากการวัดสอบกล้องถ่ายภาพภายในห้องปฏิบัติการโดยผู้ผลิตกล้อง

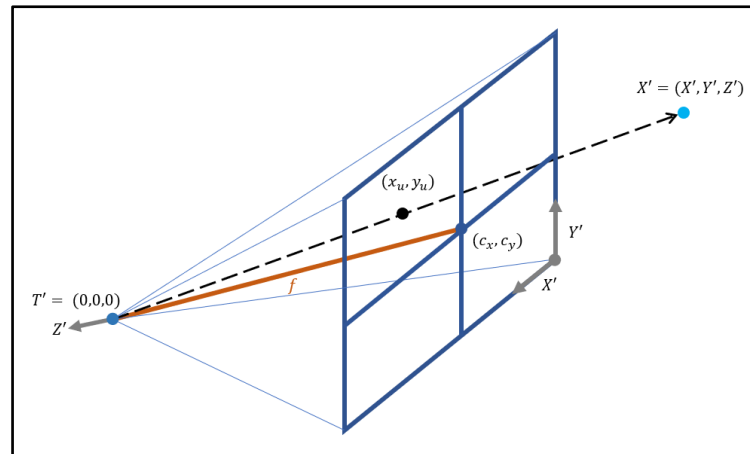
ค่าพารามิเตอร์การจัดวางภาพภายในกล้อง (Interior orientation parameters) แบ่งได้เป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ไม่คำนึงถึงความผิดเพี้ยนของเลนส์และกรณีคำนึงถึงความผิดเพี้ยนของเลนส์

1. กรณีไม่คำนึงถึงความผิดเพี้ยนของเลนส์

กำหนดให้ u คือ พิกัดของจุดบนภาพถ่ายที่ได้จากการโปรเจกชันจุดสามมิติ กรณีที่ไม่คำนึงถึงความผิดเพี้ยนของเลนส์ พิกัดของ u สามารถคำนวณหาค่าได้จากสมการที่ (1)

$$\begin{pmatrix} x_u \\ y_u \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{fX'}{Z'} \\ \frac{fY'}{Z'} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_x \\ c_y \end{pmatrix} \quad (1)$$

เมื่อ f คือ ระยะโฟกัสของกล้องและค่าพิกัดของ c คือค่าพิกัดของจุด principal point



รูปที่ 2 เรขาคณิตของกล้อง

(ดัดแปลงจาก Support.pix4d.com, 2011)

2. กรณีคำนึงถึงความผิดเพี้ยนของเลนส์

ความผิดเพี้ยนของเลนส์ (Lens distortion) ภายใน แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. ความผิดเพี้ยนของเลนส์ในแนวรัศมี (Radial lens distortion) คือ ค่าความเพี้ยนตามแนวรัศมีของเลนส์จากจุด principal point (PP) มีสาเหตุมาจากการขัดผิวของเลนส์ที่ไม่ตรงตามความโค้งที่ออกแบบไว้ ทำให้จุดภาพเกิดผิดตำแหน่ง

2. ความผิดเพี้ยนของเลนส์ในแนวสัมผัส (Tangential lens distortion) คือ ค่าความเพี้ยนของเลนส์ตามแนวที่ตั้งฉากกับแนวรัศมี เนื่องจากกล้องหนึ่งตัว ประกอบไปด้วยเลนส์หลายเลนส์ ซึ่งเลนส์แต่ละเลนส์จะถูกนำมาซ้อนทับกัน ความเพี้ยนนี้จึงเป็นความเพี้ยนที่เกิดจากการซ้อนทับของเลนส์ที่ไม่อยู่ในแนว center เดียวกัน

ซึ่งความผิดเพี้ยนของเลนส์ทั้งสองประเภทเป็นสิ่งที่ต้องนำไปประมวลผลเพื่อขจัดค่าความผิดเพี้ยนให้น้อยลง

กำหนดให้ h คือ พิกัดของจุดบนภาพถ่าย สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่

(2)

$$\begin{pmatrix} x_h \\ y_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{X'}{Z'} \\ \frac{Y'}{Z'} \end{pmatrix}$$

(2)

ซึ่งสามารถหาความสัมพันธ์ทางรัศมีแบบสองมิติได้จากสมการที่ (3)

$$r^2 = x_h^2 + y_h^2 \quad (3)$$

เนื่องจากได้รับผลกระทบจากความผิดพลาดของเลนส์ซึ่งประกอบไปด้วย ความผิดพลาดทางรัศมี ได้แก่ ตัวแปร R_1, R_2, R_3 และความผิดพลาดในแนวสัมผัส ได้แก่ ตัวแปร T_1, T_2 โดยกำหนดให้จุดที่ได้รับผลกระทบจากความผิดพลาดคือจุด (x_{hd}, y_{hd}) ซึ่งคำนวณหาได้จากสมการที่ (4)

$$\begin{pmatrix} x_{hd} \\ y_{hd} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1 + R_1 r^2 + R_2 r^4 + R_3 r^6)x_h + 2T_1 x_h y_h + T_2 (r^2 + 2(x_h)^2) \\ (1 + R_1 r^2 + R_2 r^4 + R_3 r^6)y_h + 2T_2 x_h y_h + T_1 (r^2 + 2(y_h)^2) \end{pmatrix} \quad (4)$$

โดย (x_d, y_d) คือ พิกัดของจุดบนภาพถ่ายที่ได้จากการโปรเจกชันจุดสาม มิติ โดยที่ได้รับผลกระทบทางความผิดพลาดของเลนส์ เพราะฉะนั้นจึงสามารถ คำนวณหาได้จากสมการที่ (5)

$$\begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} f x_{hd} \\ f y_{hd} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_x \\ c_y \end{pmatrix} \quad (5)$$

เมื่อ f คือ ระยะโฟกัสของกล้องและค่าพิกัดของ c คือค่าพิกัดของจุด principal point

2.1.1.2 การจัดวางภาพภายนอก (Exterior orientation)

การจัดวางภาพภายนอกของภาพถ่ายทางอากาศ เป็นการกำหนดตำแหน่ง (Position) และการเอียง (Orientation) ของภาพถ่าย ซึ่งใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ระบบพิกัดสามมิติภาคพื้นดินกับระบบพิกัดภาพถ่าย

ค่าพารามิเตอร์การจัดวางภาพภายนอก (Exterior orientation parameter) ของกล้องมีความแตกต่างกันไป ในแต่ละภาพ ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ค่าพารามิเตอร์ ได้แก่

1. ค่าพารามิเตอร์การเลื่อนแกน (Transition)

ค่าพารามิเตอร์การเลื่อนแกน คือ ค่าตำแหน่งของศูนย์กลางภาพของกล้องใน ระบบพิกัดของโลก ใช้สัญลักษณ์แทนด้วยตัวอักษร T ดังแสดงในสมการที่ (6)

$$T = (T_x, T_y, T_z) \quad (6)$$

2. ค่าพารามิเตอร์การหมุนแกน (Rotation)

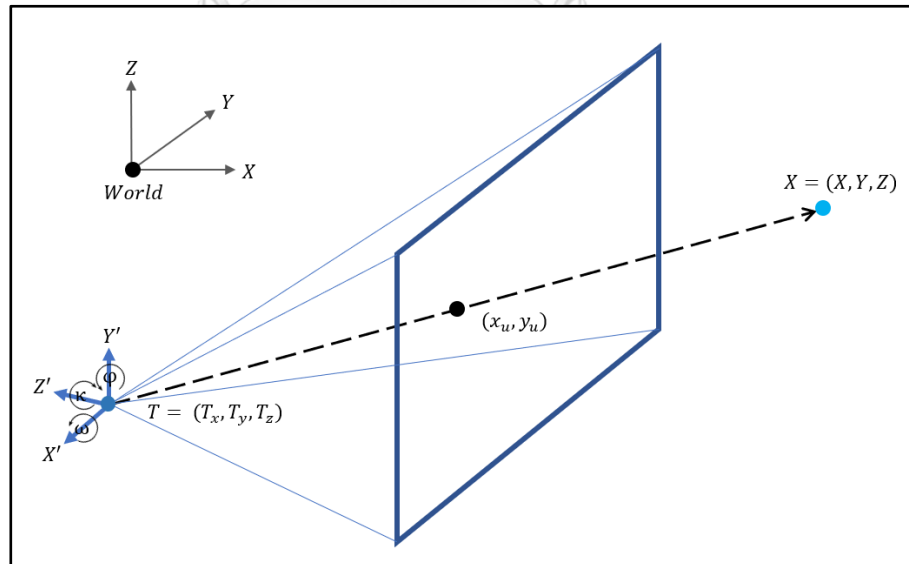
ค่าพารามิเตอร์การหมุนแกน คือ ค่าที่กำหนดการวางแนวของกล้องด้วยมุม ω, φ, κ โดยที่ ω คือ ค่ามุมที่กระทำรอบแกน X , φ คือ ค่ามุมที่กระทำรอบแกน Y และ κ คือค่ามุมที่กระทำรอบแกน Z ซึ่งค่ามุมทั้งสามจะแสดงค่าผ่านเมทริกซ์การหมุนแกน โดยใช้สัญลักษณ์แทนด้วยตัวอักษร R ดังแสดงในสมการที่ (7)

$$\begin{aligned} R &= R_X(\omega)R_Y(\varphi)R_Z(\kappa) \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & -\sin(\omega) \\ 0 & \sin(\omega) & \cos(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & 0 & \sin(\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\varphi) & 0 & \cos(\varphi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\kappa) & -\sin(\kappa) & 0 \\ \sin(\kappa) & \cos(\kappa) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos(\kappa)\cos(\varphi) & -\sin(\kappa)\cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ \cos(\kappa)\sin(\omega)\sin(\varphi) + \sin(\kappa)\cos(\omega) & \cos(\kappa)\cos(\omega) - \sin(\kappa)\sin(\omega)\sin(\varphi) & -\sin(\omega)\cos(\varphi) \\ \sin(\kappa)\sin(\omega) - \cos(\kappa)\cos(\omega)\sin(\varphi) & \sin(\kappa)\sin(\omega)\sin(\varphi) + \cos(\kappa)\sin(\omega) & \cos(\omega)\cos(\varphi) \end{pmatrix} \quad (7) \end{aligned}$$

ถ้าหาก X คือพิกัดจุดสามมิติในระบบพิกัดของโลกที่มีค่า $X = (X, Y, Z)$ แล้วตำแหน่งของจุดนี้ในระบบพิกัดกล้องคือ $X' = (X', Y', Z')$ สามารถคำนวณหา ค่าได้จากสมการที่ (8)

$$X' = R^T(X - T) \quad (8)$$

(Support.pix4d.com, 2011)



รูปที่ 3 เรขาคณิตสามมิติของค่าพารามิเตอร์ภายนอกของกล้อง

(ดัดแปลงจาก Support.pix4d.com, 2011)

2.1.2 ระบบกล้องหลายหัว (Multi-head camera systems)

ระบบกล้องหลายหัว คือ อุปกรณ์ถ่ายภาพที่ประกอบไปด้วยกล้องมากกว่าหนึ่งตัว โดยที่กล้องแต่ละตัวจะถูกโยยยึดกันด้วยอุปกรณ์จับยึดกล้อง (Camera-rig) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่ใช้ในการโยยยึดกล้องถ่ายภาพจำนวนหลายกล้องเข้าด้วยกันและควบคุมให้แต่ละกล้องสามารถบันทึกภาพได้ในเวลาเดียวกัน โดยมักจะพบเห็นกับกล้องถ่ายภาพชนิดหลายช่วงคลื่น (Multi-spectral camera) ที่แต่ละกล้องทำหน้าที่บันทึกภาพในช่วงคลื่นที่มีความแตกต่างกันออกไป สำหรับการแสดงผลภาพถ่ายให้เป็นภาพเดียวจำเป็นต้องรวมภาพที่บันทึกในแต่ละช่วงคลื่นที่แตกต่างกันออกไปทำให้ต้องทราบความสัมพันธ์ระหว่างกล้องถ่ายภาพแต่ละกล้องที่ถูกโยยยึดอยู่บนอุปกรณ์จับยึดกล้อง ซึ่งความสัมพันธ์ดังกล่าวประกอบไปด้วย ความสัมพันธ์ในเชิงการเลื่อนแกน (Translation) และความสัมพันธ์ในเชิงการหมุนแกน (Rotation)

ปัจจุบันอุปกรณ์จับยึดกล้องได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในขอบเขตที่กว้างมากขึ้น นอกเหนือจากกล้องถ่ายภาพชนิดหลายช่วงคลื่นแล้ว กล้องถ่ายภาพที่บันทึกภาพทั่วไปก็มีการนำอุปกรณ์โยยยึดกล้องมาใช้ โดยจะมีการปรับการวางตัวของกล้องทั้งการเคลื่อนที่ของตำแหน่งและมุมมองของการถ่ายภาพที่แตกต่างกันออกไป เพื่อให้การบันทึกภาพใช้เวลาในการบันทึกภาพที่ลดลงและให้ภาพถ่ายที่ครอบคลุมพื้นที่มากขึ้น รวมถึงเพิ่มมุมมองสำหรับการถ่ายภาพ โดยความสัมพันธ์ของระบบกล้องหลายหัวที่โยยยึดกันด้วยอุปกรณ์จับยึดกล้องนั้นจะมีลักษณะความสัมพันธ์ทางเรขาคณิต ดังต่อไปนี้

1. มีกล้องหนึ่งตัวจะถูกใช้เป็นกล้องหลักที่ใช้ในการอ้างอิงตำแหน่งให้กับกล้องตัวที่เหลือ โดยกำหนดให้กล้องหลักอ้างอิงมีตำแหน่งคือ T_m และมีการวางตัวของกล้อง R_m ในระบบพิกัดสามมิติของโลก
2. กล้องอื่น ๆ ที่ไม่ได้ถูกกำหนดให้เป็นกล้องหลักอ้างอิงตำแหน่งจะถูกกำหนดให้เป็นกล้องรอง โดยมีค่าตำแหน่งคือ T_s และมีค่าการวางตัวของกล้อง R_s ในระบบพิกัดสามมิติของโลก
3. สำหรับกล้องรองแต่ละตัวจะมีค่าการเลื่อนแกนและการหมุนแกนที่มีความสัมพันธ์กับกล้องหลักอ้างอิง โดยความสัมพันธ์ในเชิงการเลื่อนแกนของตำแหน่ง (Relative translation) มีสัญลักษณ์คือ T_{rel} และความสัมพันธ์ในเชิงการหมุนแกน (Relative rotation) มีสัญลักษณ์คือ R_{rel}

โดยค่าพารามิเตอร์การจัดวางภาพภายนอกของกล้องแต่ละตัว (Exterior orientation parameter) ในระบบอุปกรณ์ตัวจับยึดของกล้องที่ไม่ได้ถูกกำหนดให้เป็นกล้องหลักอ้างอิงสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (9) และสมการที่ (10) ตามลำดับ

$$T_s = T_m + R_m T_{rel} \tag{9}$$

$$R_s = R_m R_{rel} \tag{10}$$

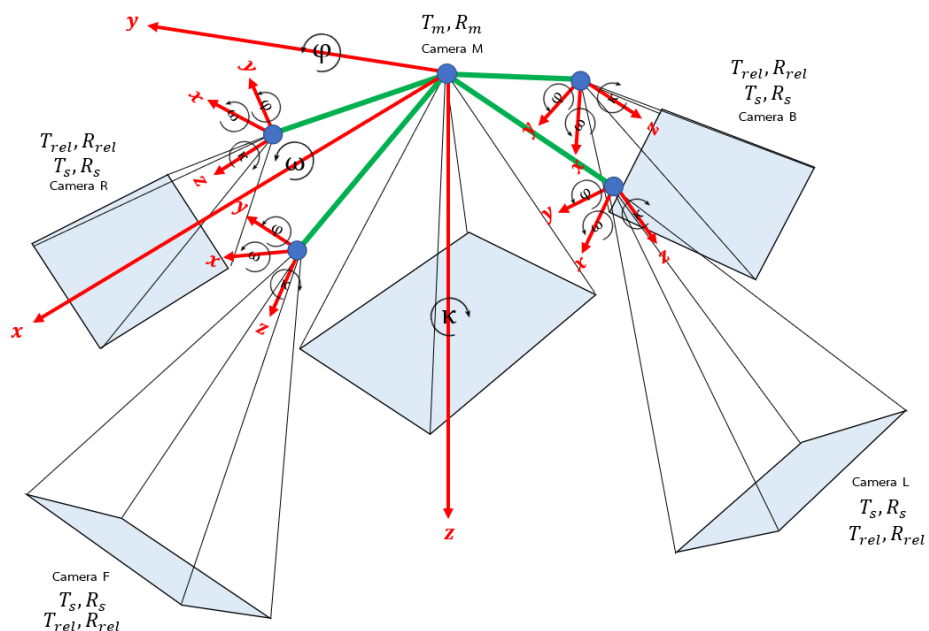
และตำแหน่งของจุดสามมิติใด ๆ ในระบบพิกัดของกล้องหลักอ้างอิงสามารถหาได้จากสมการที่ (11)

$$X' = R_m^T (X - T_m) \tag{11}$$

และตำแหน่งของจุดสามมิติใด ๆ ในระบบพิกัดของกล้องรองสามารถหาได้จากสมการที่ (12)

$$X' = R_{rel}^T [R_m^T (X - T_m) - T_{rel}] \tag{12}$$

หลังจากคำนวณค่าหาจุดสามมิติในระบบพิกัดกล้องได้แล้วการนำไปใช้งานต่อในลำดับถัดไปจะมีการใช้งานในลักษณะเดียวกันกับกล้องอื่น ๆ ตามที่ได้กล่าวไป (Support.pix4d.com, 2011)



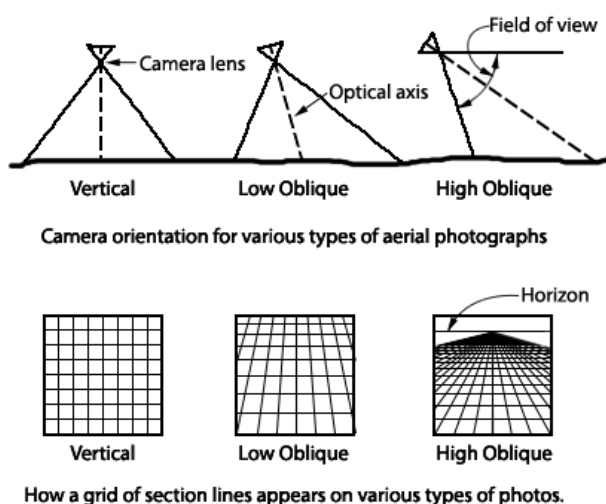
รูปที่ 4 พารามิเตอร์การเลื่อนแกนและการหมุนแกนของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกล้องหลายหัว

2.1.3 ประเภทของภาพถ่ายทางอากาศ (Type of aerial photographs)

ประเภทของภาพถ่ายทางอากาศโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ภาพถ่ายดิ่ง (Vertical aerial photograph) และ ภาพถ่ายเฉียง (Oblique aerial photograph)

1. ภาพถ่ายดิ่ง (Vertical aerial photograph) คือ ภาพที่ถ่ายโดยให้แกนของกล้องอยู่ในแนวตั้งมากที่สุด ซึ่งเป็นเรื่องที่ยากในความเป็นจริงเนื่องจากได้รับผลมาจากการที่เครื่องบินเอียงในขณะที่ถ่ายภาพ ดังนั้นในการปฏิบัติงานจะมีการกำหนดเพิ่มเติม เพื่อเป็นตัวแทนของภาพถ่ายดิ่ง คือ ภาพที่ถ่ายได้ควรมีขนาดที่เบี่ยงเบนไปจากแนวตั้งไม่เกิน 3 องศา ซึ่งภาพถ่ายดิ่งถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางสำหรับงานผลิตแผนที่มาตราส่วนใหญ่ไปจนถึงมาตราส่วนเล็ก รวมไปถึงการประยุกต์ใช้ในงานด้านอื่น ๆ ที่ต่อเนื่อง เช่น การคำนวณหาพื้นที่ การศึกษาชนิดพืชพรรณธรรมชาติ การแปลความหมายเพื่อใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ

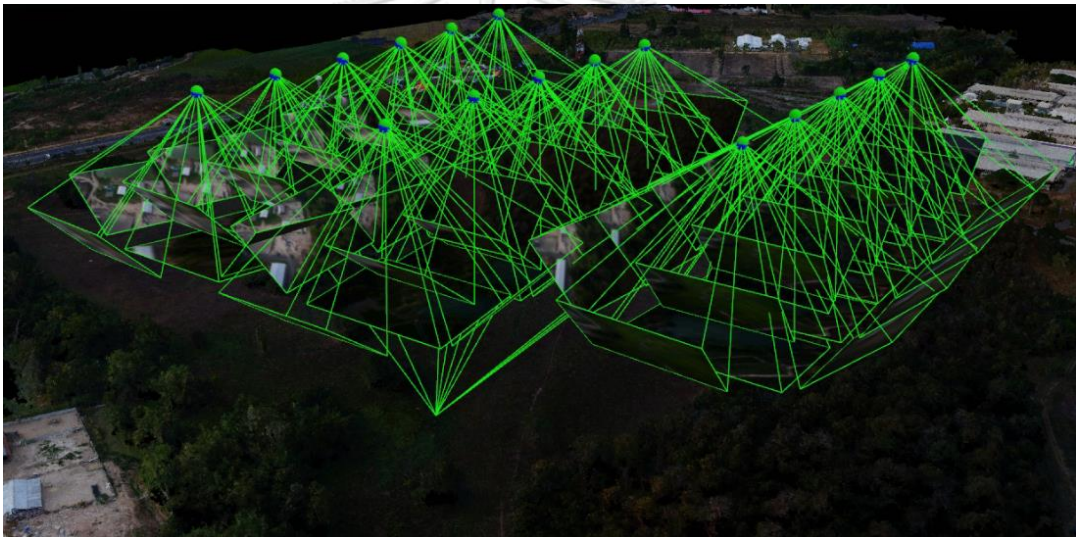
2. ภาพถ่ายเฉียง (Oblique aerial photograph) คือ ภาพที่ถ่ายโดยให้แกนของกล้องเอียงออกไปจากแนวตั้ง แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ 1. ภาพถ่ายเฉียงต่ำ (Low oblique aerial photograph) คือ ภาพถ่ายที่ไม่ปรากฏเส้นขอบฟ้าบนภาพถ่าย 2. ภาพถ่ายเฉียงสูง (High oblique aerial photograph) คือ ภาพถ่ายที่ปรากฏเส้นขอบฟ้าบนภาพถ่าย



รูปที่ 5 ประเภทของภาพถ่ายทางอากาศ

(Wolf et al., 2014)

เนื่องจากภาพถ่ายเฉียงมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นมากทำให้กรรมวิธีในการประมวลผลทำได้ยุ่งยากประกอบกับเทคโนโลยี เครื่องมือ คอมพิวเตอร์ ยังไม่พร้อม ในอดีตจึงไม่นิยมนำมาใช้ในการคำนวณรังวัดจากภาพถ่ายแต่นำมาใช้ในงานแปลความหมาย ปัจจุบันได้มีการนำภาพถ่ายเฉียงมาใช้ในการรังวัดซึ่งเป็นประเภทภาพถ่ายเฉียงต่ำ โดยจะนำภาพถ่ายเฉียงมารังวัดไปยังจุดบังคับภาคพื้นดินและในส่วนของภาพถ่ายที่ซ้อนทับกันจะมีการรังวัดจุดโยงยึด (Tie points) เช่นเดียวกับการรังวัดเพื่อคำนวณค่าสามเหลี่ยมของภาพถ่ายทางอากาศ ซึ่งจำนวนของจุดโยงยึดที่ใช้ในการรังวัดบนภาพเฉียงที่ได้มาจากระบบกล้องหลายหัวจะมีจำนวนจุดรังวัดที่มากกว่าจุดรังวัดที่ได้มาจากรังวัดเพียงภาพเดียว เนื่องจากมีส่วนที่ซ้อนทับที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากทั้งระหว่างภาพถ่ายเฉียงและภาพถ่ายตั้ง (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2557)



CHULALONGKORN UNIVERSITY

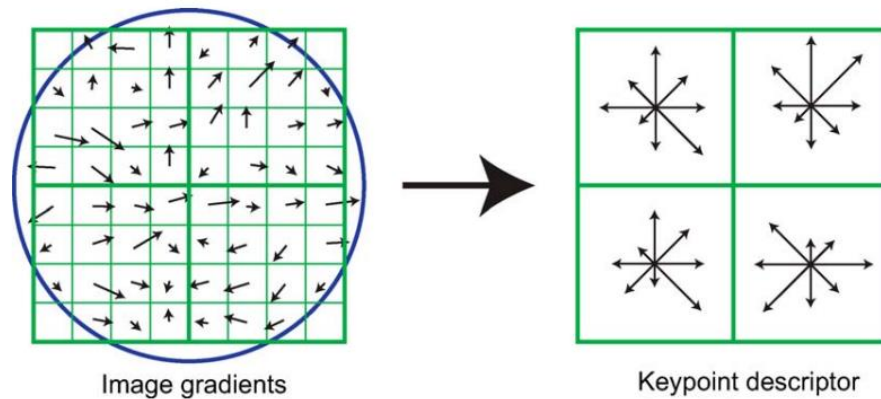
รูปที่ 6 จุดสำคัญ (Keypoint) ที่โยงยึดจากภาพถ่ายในบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

2.1.4 การจับคู่ภาพด้วยคอมพิวเตอร์วิชั่น (Computer vision)

กระบวนการจับคู่จุดโยงยึด (Tie points) ที่สอดคล้องกันนั้น ในปัจจุบันนิยมใช้วิธีการแบบอัตโนมัติด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ประมวลผลภาพ นิยมเรียกโดยรวมว่า Image matching หรือการจับคู่ภาพ ซึ่งช่วยให้ได้จำนวนจุดโยงยึดเป็นจำนวนมาก โดยสามารถแบ่งได้เป็น 2 เทคนิค คือ เทคนิคการจับคู่ภาพด้วยวิธีเปรียบเทียบพื้นที่ (Area-based matching) และเทคนิคการจับคู่ภาพด้วยวิธีการใช้คุณลักษณะเด่น (Feature based matching) ซึ่งในปัจจุบันเทคนิคการจับคู่ภาพด้วยวิธีการใช้คุณลักษณะเด่นจะได้รับความนิยมมากกว่า ซึ่งเทคนิคการจับคู่ภาพด้วยวิธีการใช้คุณลักษณะเด่นเป็นการพิจารณาจุดที่เห็นเด่นชัดบนทั้งสองภาพที่เรียกว่า จุดสำคัญ (Keypoint) บนภาพ ซึ่งเป็นวิธีการที่มีการใช้งานทางด้านคอมพิวเตอร์วิชั่น (Computer vision) และการประมวลผลภาพ (Image processing) เป็นจำนวนมาก เพื่อใช้ในการตัดสินใจว่าจุดใด ๆ บนภาพมี “ความโดดเด่น” และนิยมเรียกจุดนี้ว่าเป็นจุดลักษณะเฉพาะ (Image feature)

ด้วยความก้าวหน้าของอัลกอริธึมทำให้จุดสำคัญบนภาพมักจะถูกตรวจพบได้ง่ายและมีจำนวนมากตามคุณลักษณะที่โดดเด่น อัลกอริธึมจะกำหนดสิ่งที่บรรยายคุณลักษณะเฉพาะที่เรียกว่า Feature descriptor ในการเปรียบเทียบความสอดคล้องกันของจุดสำคัญบนสองภาพ ปัญหาอีกประการหนึ่งที่พบบ่อยคือ มาตรฐานและทิศทางของภาพมีความแตกต่างกัน ในทางคอมพิวเตอร์วิชั่นความแตกต่างนี้เกิดจากมุมมองของกล้องที่ใช้ในการบันทึก รวมไปถึงระยะห่างระหว่างกล้องถ่ายภาพกับตัววัตถุ

ซึ่งปัญหาดังกล่าวในช่วง 2 ทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาและพัฒนาองค์ความรู้ทางด้านคอมพิวเตอร์วิชั่นในการแก้ไขปัญหานี้ โดยมีผู้ที่ได้ตีพิมพ์อัลกอริธึมที่มีประสิทธิภาพและเป็นรากฐานของอัลกอริธึม คือ Lowe (2004) ที่กล่าวถึงการหาจุดสำคัญที่ไม่ขึ้นกับมาตราส่วน เรียกว่า Scale-invariant feature transformation (SIFT) วิธีการนี้เป็นการจับคู่ของวัตถุหรือจุดที่สนใจระหว่างภาพหลาย ๆ ภาพโดยการสร้างจุดสำคัญ (Keypoint) และตัวกำหนดสิ่งที่บรรยายคุณลักษณะ (Descriptor) ขึ้นมาเหมือนการแทนการจับคู่ระหว่างจุดภาพโดยตรง ซึ่งกระบวนการดังกล่าวสามารถจัดอธิพลของการย่อขยายภาพ การหมุนหรือการเอียงของภาพ การเปลี่ยนมุมมองของกล้องถ่ายภาพอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงความสว่างบนภาพ ทำให้การจับคู่ภาพมีความถูกต้องและความแม่นยำที่รวดเร็วยิ่งขึ้นและได้จำนวนของจุดที่สามารถจับคู่ได้เป็นจำนวนมาก

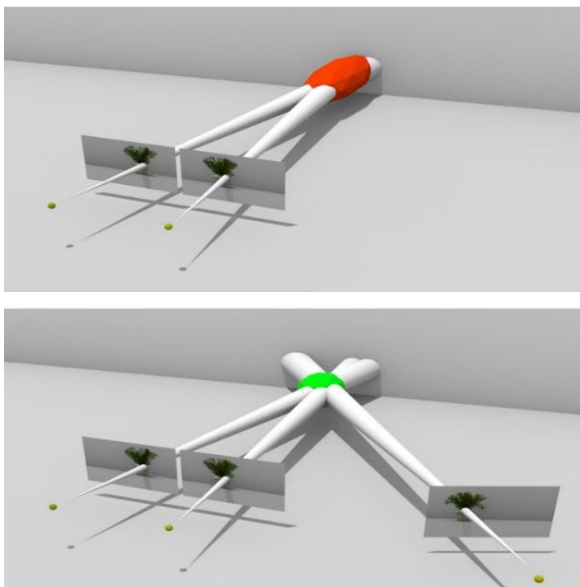


รูปที่ 7 การสร้างคำอธิบายลักษณะเด่นของจุดสำคัญ (Keypoint descriptor)

(Lowe, 2004)

2.1.5 การมองเห็นหลายมุมมอง (Multiple View Geometry; MVG)

กรรมวิธีของงานทางด้าน การรังวัดด้วยภาพแบบดั้งเดิมอาศัยภาพถ่ายทางอากาศที่เป็นคู่ภาพสเตอริโอ (Stereophotogrammetry) ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การจัดวางภาพภายนอกของกล้องถ่ายภาพ ในส่วนของการคำนวณหาค่าพิกัดสามมิติจะใช้หลักการตัดกันของแนวรังสีที่มาจากรูปภาพสเตอริโอ ความถูกต้องและความแม่นยำในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การจัดวางภาพภายนอกของกล้องถ่ายภาพส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของระยะฐาน (Base) ของจุดเปิดถ่ายภาพ รวมถึงส่งผลกระทบต่อ การรังวัดหาค่าพิกัดสามมิติด้วย จึงได้มีการคิดค้นแนวคิดเรื่อง การมองเห็นหลายมุมมองเข้ามาช่วยแก้ปัญหาในงานทางด้าน การรังวัดด้วยภาพสมัยใหม่ที่ใช้อัลกอริทึมของคอมพิวเตอร์วิชันเป็นหลัก โดยการมองเห็นหลาย มุมมองเป็นการเพิ่มแนวรังสีที่มาตัดกันให้มากกว่า 2 แนวรังสี ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่ม ส่วนซ้อนทับภาพถ่ายหรือเพิ่มมุมมองของวัตถุที่สนใจบนภาพถ่ายให้มากขึ้น จากการที่แนวรังสี มีจำนวนมากขึ้นและมาจากภาพถ่ายที่มีระยะฐานที่ยาวขึ้นนั้นจะส่งผลให้การรังวัดค่าพิกัดสาม มิติมีความถูกต้องและความแม่นยำมากขึ้น (Strecha, 2014)



รูปที่ 8 การรังวัดค่าพิกัดสามมิติแบบภาพสเตอริโอและแบบหลายมุมมอง
(Chen, 2015)

2.1.6 อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle; UAV)

การถ่ายภาพทางอากาศเพื่อทำแผนที่ในปัจจุบันสำหรับพื้นที่ขนาดเล็กไปจนถึงพื้นที่ขนาดกลางหลายสิบล้านตารางกิโลเมตร ได้มีการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับที่ติดตั้งกล้องในการปฏิบัติการกิจ โดยอากาศยานไร้คนขับหรือยูเอวีสำหรับงานสำรวจด้วยภาพถ่ายสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท ได้แก่

1. อากาศยานไร้คนขับชนิดปีกตรึง (Fixed Wing)
2. อากาศยานไร้คนขับชนิดปีกหมุน (Multirotor)
3. อากาศยานไร้คนขับชนิดปีกหมุนเดี่ยว (Single-Rotor Helicopter)
4. อากาศยานไร้คนขับชนิดปีกตรึงขึ้นลงแนวตั้ง (Fixed-Wing Hybrid) หรือ (Vertical take-off and landing; VTOL)

ซึ่งอากาศยานไร้คนขับแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันทั้งลักษณะทางกายภาพและความเหมาะสมในการปฏิบัติงาน รวมถึงข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันไป ดังข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 1



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 9 (ก) อากาศยานไร้คนขับชนิดปีกตรึง (ข) ชนิดปีกหมุน
(ค) ชนิดปีกหมุนเดี่ยว (ง) ชนิดปีกตรึงขึ้นลงแนวตั้ง
(ดัดแปลงจาก สภาวิศวกร, 2561)

ตารางที่ 1 ข้อดีและข้อเสียของอากาศยานไร้คนขับแต่ละประเภท

(ดัดแปลงจาก สภาวิศวกร, 2561)

ประเภทของอากาศยานไร้คนขับ	ข้อดี	ข้อเสีย
อากาศยานไร้คนขับชนิดปีกตรึง	<ul style="list-style-type: none"> - ระยะเวลาในการบินได้นาน - ครอบคลุมพื้นที่ได้กว้าง - บินด้วยความเร็วสูง - ทนต่อแรงลม 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้พื้นที่ขึ้นลงมาก - ราคาสูง - ใช้งานยาก
อากาศยานไร้คนขับชนิดปีกหมุน	<ul style="list-style-type: none"> - ง่ายต่อการใช้งาน - ใช้พื้นที่ขึ้นลงน้อย - ราคาถูก 	<ul style="list-style-type: none"> - บินช้า - ระยะเวลาในการบินน้อย

ประเภทของอากาศยานไร้คนขับ	ข้อดี	ข้อเสีย
อากาศยานไร้คนขับชนิดปีกหมุนเดี่ยว	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้พื้นที่ขึ้นลงน้อย - ระยะเวลาในการบินได้นาน 	<ul style="list-style-type: none"> - ราคาสูง - ใช้งานยาก - กลไกขับเคลื่อนและซอฟต์แวร์ควบคุมการบินมีความซับซ้อนและละเอียดอ่อนมาก
อากาศยานไร้คนขับชนิดปีกตรึงขึ้นลงแนวตั้ง	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้พื้นที่ขึ้นลงน้อย - ระยะเวลาในการบินได้นาน - ครอบคลุมพื้นที่ได้กว้าง - บินด้วยความเร็วสูง - ทนต่อแรงลม 	<ul style="list-style-type: none"> - ราคาสูง - ใช้งานยาก

2.1.7 การประเมินความถูกต้องของการรังวัดค่าพิกัดบนภาพถ่าย

สำหรับการประเมินความถูกต้องของการรังวัดค่าพิกัดบนภาพถ่ายนั้น ได้อ้างอิงตามแนวทางการตรวจสอบตามมาตรฐาน NSSDA (National Standard for Spatial Data Accuracy) ซึ่งกำหนดขึ้นโดย FGDC (Federal Geographic Data Committee) โดยจะคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยตามมาตรฐาน ASPRS 1990 (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing Standard 1990) ซึ่งจะนำค่าที่ได้ไปคิดตามหลักการทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ย (Root Mean Square Error; RMSE) ใช้ประมาณค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่ง ซึ่งมีค่าเท่ากับรากที่สองของค่าเฉลี่ยของผลรวมกำลังสองของค่าต่างค่าที่วัดได้กับค่าตรวจสอบที่มีความถูกต้องสูงกว่า ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

2.1.4.1 ค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยทาง X ($RMSE_X$) และ Y ($RMSE_Y$)

$$RMSE_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{test_i} - X_{independent_i})^2}{n}} \quad (13)$$

$$RMSE_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{test_i} - Y_{independent_i})^2}{n}} \quad (14)$$

เมื่อ X_{test} คือ ค่าพิกัด X ของจุดตรวจสอบบนแผนที่

$X_{independent}$ คือ ค่าพิกัดอ้างอิง X ของจุดตรวจสอบ

Y_{test} คือ ค่าพิกัด Y ของจุดตรวจสอบบนแผนที่

$Y_{independent}$	คือ ค่าพิกัดอ้างอิง Y ของจุดตรวจสอบ
n	คือ จำนวนของจุดตรวจสอบทั้งหมด
i	คือ เลขจำนวนเต็มตั้งแต่ 1 ถึง n

2.1.4.2 ค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยทางราบ ($RMSE_r$)

$$RMSE_r = \sqrt{(RMSE_x)^2 + (RMSE_y)^2} \quad (15)$$

ถ้าหากว่าไม่มีค่าคลาดเคลื่อนระบบแฝงอยู่และค่าคลาดเคลื่อนนี้มีลักษณะการแจกแจงเป็นปกติ โดยที่ค่าคลาดเคลื่อนทางแกน x เป็นอิสระจากความคลาดเคลื่อนทางแกน y แล้วค่าความถูกต้องทางราบของการรังวัดตามมาตรฐานของ NSSDA ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$NSSDA = 1.7308 * RMSE_r \quad (16)$$

2.1.4.3 ค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยทางตั้ง ($RMSE_z$)

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{test_i} - Z_{independent_i})^2}{n}} \quad (17)$$

เมื่อ Z_{test}	คือ ค่าพิกัด Z ของจุดตรวจสอบบนแผนที่
$Z_{independent}$	คือ ค่าพิกัดอ้างอิง Z ของจุดตรวจสอบ
n	คือ จำนวนของจุดตรวจสอบทั้งหมด
i	คือ เลขจำนวนเต็มตั้งแต่ 1 ถึง n

ถ้าหากว่าไม่มีค่าคลาดเคลื่อนระบบแฝงอยู่และค่าคลาดเคลื่อนนี้มีลักษณะการแจกแจงเป็นปกติ ค่าความถูกต้องทางตั้งของการรังวัดตามมาตรฐานของ NSSDA ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$NSSDA = 1.9600 * RMSE_z \quad (18)$$

(Minnesota Planning Land Management Information Center, 1999; วิชัย เยี่ยงวีร

ชน, 2557)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้อากาศยานไร้คนขับในการทำแผนที่สามมิติ

Nex et al. (2022) บทความนี้ได้บรรยายแนวทางการปฏิบัติที่เหมาะสมสำหรับการใช้อากาศยานไร้คนขับสำหรับการสำรวจระยะไกลและการประยุกต์ใช้สำหรับภาคอุตสาหกรรมแผนที่สำหรับช่วงทศวรรษที่ 2020 นี้ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการปฏิบัติภารกิจให้มีประสิทธิภาพและความถูกต้องสูงมีอยู่หลากหลายประเด็น ได้แก่ เรื่องการวัดสอบเครื่องมือและการคำนึงถึงระยะห่างระหว่างอุปกรณ์บนอากาศยานไร้คนขับ เนื่องจากบนอากาศยานไร้คนขับตำแหน่งของกล้องถ่ายภาพกับตำแหน่งที่ติดตั้งเสารับสัญญาณดาวเทียมนำหนติดตั้งคนละตำแหน่งกัน ดังนั้นจึงต้องมีการวัดระยะห่างระหว่างสองอุปกรณ์นี้ เพื่อให้ข้อมูลมีความถูกต้องที่มากยิ่งขึ้นสำหรับการใช้การประมวลผลเพื่อผลิตแผนที่ที่มีความถูกต้องที่แม่นยำในระดับเซนติเมตร เรื่องการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลค่าพิกัดที่รับวัดมาจากการรับสัญญาณจากดาวเทียมนำหนเนื่องจากในการปฏิบัติภารกิจบางครั้งมีการเลือกใช้อากาศยานไร้คนขับที่มีการรับสัญญาณดาวเทียมหลากหลายวิธี เช่น วิธีการรับวัดแบบจลนในทันที วิธีการรับวัดแบบจลนแล้วประมวลผลภายหลัง เป็นต้น ซึ่งวิธีการที่รับวัดรับสัญญาณมาแตกต่างกันส่งผลต่อการประมวลผลข้อมูลและผลลัพธ์ความถูกต้องความแม่นยำของข้อมูล โดยเฉพาะในส่วนของความละเอียดของข้อมูลตำแหน่งเวลาขณะบันทึกภาพบนอากาศยานไร้คนขับที่เป็นส่วนสำคัญในการนำไปประมวลผลให้ได้ค่าพิกัดของตำแหน่งที่บันทึกภาพที่มีความถูกต้องสูง ดังนั้นความละเอียดของข้อมูลและรูปแบบการรับสัญญาณเป็นอีกหนึ่งประเด็นที่สามารถเพิ่มความถูกต้องให้กับแผนที่ได้ เรื่องการมีจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบสำหรับประมวลผลข้อมูล โดยการมีจุดควบคุมภาคพื้นดินจะช่วยในการโยยียดค่าพิกัดระหว่างข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศกับข้อมูลค่าพิกัดภาคพื้นดินให้สอดคล้องกันรวมถึงเพิ่มความถูกต้องในการทำแผนที่ สำหรับการมีจุดตรวจสอบจะช่วยตรวจสอบผลลัพธ์ที่ประมวลผลขึ้นมาได้ว่ามีความสอดคล้องหรือมีความถูกต้องอยู่ในระดับไหน ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยนั้นสนับสนุนการปฏิบัติภารกิจโดยใช้อากาศยานไร้คนขับแบบวิธีการรับวัดแบบจลนแล้วประมวลผลภายหลังมากกว่าวิธีการรับวัดแบบจลนในทันที โดยเฉพาะในสภาพแวดล้อมการทำงานที่เต็มไปด้วยสิ่งที่สามารถบดบังสัญญาณดาวเทียมนำหน เพื่อประโยชน์ต่อความปลอดภัยในการปฏิบัติงานของยูเอวีและบริเวณพื้นที่โดยรอบ ความถูกต้องของค่าพิกัดตำแหน่งที่ได้ ดังนั้นการผลิตแผนที่ความถูกต้องสูงจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงประเด็นต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาในข้างต้น

2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบกล้องหลายหัว

Moe et al. (2016) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตแผนที่ที่ประมวลผลมาจากภาพที่บันทึกมาจากระบบกล้องหลายหัว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพลักษณะของอาคารสิ่งปลูกสร้าง รวมไปถึงลักษณะพื้นผิวของน้ำ โดยข้อมูลภาพถ่ายที่ใช้ในการศึกษาบันทึกมาจากกล้อง UltraCam Osprey Prime ซึ่งประกอบไปด้วยกล้องถ่ายภาพนิ่ง 1 กล้องและกล้องเฉียง 4 กล้อง โดยออกแบบให้ภาพถ่ายนิ่งมีขนาดของ GSD ประมาณ 6 เซนติเมตร บันทึกภาพตามหลักการทางโฟโตแกรมเมตรี มีส่วนซ้อนทับด้านหน้า 75% และส่วนซ้อนด้านข้าง 60% ประกอบไปด้วย 5 แนวบิน ได้ภาพถ่ายทั้งหมด 780 ภาพ มีการใช้จุดบังคับภาคพื้นดินที่รังวัดค่าพิกัดด้วยเครื่องรับสัญญาณ GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลนในทันทีเป็นจำนวน 6 จุด และจุดตรวจสอบ 14 จุด ซึ่งได้ทำการศึกษาวิธีการประมวลผล 4 แบบ ได้แก่ แบบ Forward Intersection ใช้ภาพถ่ายนิ่งเท่านั้น, แบบ Forward Intersection ใช้ภาพถ่ายนิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง, แบบ Aerial Triangulation ใช้ภาพถ่ายนิ่งเท่านั้น, แบบ Aerial Triangulation ใช้ภาพถ่ายนิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง ผลการศึกษาพบว่าเมื่อทำการประมวลผลและตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อนเทียบกับจุดตรวจสอบ พบว่าค่า RMSE ทางราบของแบบ Forward Intersection ทั้งกรณีที่ใช้ภาพถ่ายนิ่งเท่านั้นและภาพถ่ายนิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงมีค่าประมาณ 20 เซนติเมตร และมีค่า RMSE ทางตั้ง 40 เซนติเมตรและ 23 เซนติเมตรในกรณีใช้ภาพถ่ายนิ่งเท่านั้นและภาพถ่ายนิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง ตามลำดับ สำหรับแบบ Aerial Triangulation ให้ค่า RMSE ทางราบ 3 ถึง 4 เซนติเมตร ทั้งกรณีใช้ภาพถ่ายนิ่งเท่านั้นและภาพถ่ายนิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง แต่ให้ค่า RMSE ทางตั้งที่มีความแตกต่างกัน คือ 9 เซนติเมตร สำหรับกรณีใช้ภาพถ่ายนิ่งเท่านั้น และ 6 เซนติเมตร สำหรับกรณีใช้ภาพถ่ายนิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง ในส่วนของพอยต์คลาวด์สิ่งปลูกสร้างที่ผลิตขึ้นมาจากภาพถ่ายที่บันทึกมาได้มีการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากข้อมูลภาพถ่ายนิ่งเท่านั้นและภาพถ่ายนิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง พบว่าความหนาแน่นเฉลี่ยของจุดมีค่าเท่ากับ 8.93 จุดต่อลูกบาศก์เมตรในกรณีของภาพถ่ายนิ่ง และมีค่าเท่ากับ 10.88 จุดต่อลูกบาศก์เมตรในกรณีภาพถ่ายนิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง จากการศึกษาทำให้ทราบว่ากรณีที่มีภาพถ่ายเฉียงมาร่วมประมวลผลภาพถ่ายด้วยจะช่วยให้รายละเอียดเรขาคณิตของภาพถ่ายได้ดีขึ้นส่งผลให้ความถูกต้องเชิงตำแหน่งมีความแม่นยำตามไปด้วย รวมไปถึงทำให้พอยต์คลาวด์สิ่งปลูกสร้างมีความหนาแน่นมากขึ้นและมีลักษณะตรงกับความเป็นจริง

จเด็จ ไพศาลสิทธิกันต์ & ไพศาล สันติธรรมนนท์ (2563) ได้ทำการศึกษาการนำภาพถ่ายเฉียงที่ได้จากระบบกล้องชุดถ่ายภาพที่ติดตั้งอยู่อากาศยานไร้คนขับชนิด VTOL (Vertical Take-off and Landing) เพื่อรังวัดรอยพิมพ์ฐานอาคารสำหรับงานออกแบบทางด้านวิศวกรรมโยธาและผังเมือง โดยระบบกล้องถ่ายภาพที่ใช้ประกอบไปด้วยกล้องถ่ายภาพจำนวน 2 กล้องวางตัวในแนวเฉียงทำมุมกับแนวตั้งและแนวของการบินถ่าย ซึ่งกล้องทั้งสองจะถูกโยงยึดกันด้วยอุปกรณ์จับยึดกล้อง (Camera-rig) โดยมีความสัมพันธ์ในเชิงการเลื่อนแกนและความสัมพันธ์ในเชิงการหมุนแกนที่มีความสัมพันธ์ต่อกัน โดยมีรูปแบบการบินถ่ายภาพแบบกริดตามหลักการทางโฟโตแกรมเมตรี มีส่วนซ้อนทับด้านหน้า (Overlap) 80% และส่วนซ้อนด้านข้าง (Side lap) 60% และกล้องทั้งสองทำการบันทึกภาพทั้งสองพร้อมกัน ผลการวิจัยพบว่าการใช้ภาพถ่ายเฉียงเข้าไปช่วยในการรังวัดรอยพิมพ์ฐานอาคารมีความถูกต้องใกล้เคียงกับวิธีการรังวัดภาคพื้นดินด้วยกล้องสำรวจแบบประมวลผลรวม (Total Station) และมีความถูกต้องเพียงพอที่จะแสดงผลลัพธ์ลงบนแผนที่มาตราส่วน 1:1,000 ไปจนถึงมาตราส่วนที่เล็กกว่า ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการมีภาพถ่ายเฉียงไปช่วยในการรังวัดสามารถช่วยเพิ่มความถูกต้องและความแม่นยำเชิงพื้นที่ได้

2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับภาพถ่ายเฉียง

Aicardi et al. (2016) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศ(DSM) ที่ผลิตมาจากภาพถ่ายเฉียงร่วมกับภาพถ่ายตั้งกับข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่รังวัดมาจากเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (Terrestrial Laser Scanner; TLS) ที่มีความถูกต้องแม่นยำในระดับ ± 0.002 เมตร ในการศึกษาวิจัยนี้ได้ใช้อากาศยานไร้คนขับชนิดปีกหมุนที่ทำการติดตั้งกล้องถ่ายภาพยี่ห้อ Sony รุ่น ILCE-5100 มีความละเอียด 24.3 ล้านจุดภาพ ความยาวโฟกัส 20 มิลลิเมตร ทำการบินบันทึกภาพบริเวณโบสถ์ S. Maria's Chapel ในประเทศอิตาลี โดยในงานวิจัยได้บินบันทึกภาพถ่ายทางอากาศ 2 ครั้ง สำหรับครั้งที่ 1 บินบันทึกภาพในลักษณะเป็นแนวเส้นตรงเหมือนการบินบันทึกภาพทางอากาศทั่วไป โดยที่กล้องถ่ายภาพที่ติดตั้งอยู่บนอากาศยานไร้คนขับถ่ายภาพในแนวตั้ง สำหรับครั้งที่ 2 บินถ่ายภาพในลักษณะเป็นวงกลมรอบโบสถ์และมีการปรับกล้องถ่ายภาพบนอากาศยานไร้คนขับให้มีมุมเอียง 45 องศา ขณะทำการบินบันทึกภาพ การบินทั้งสองครั้งบินที่ระดับความสูง 20 เมตร ส่งผลให้ภาพถ่ายที่ได้มีความละเอียดต่อจุดภาพ 0.5 เซนติเมตร และได้มีการติดตั้งจุดบังคับภาพถ่ายและจุดอ้างอิงค่าพิกัดสำหรับเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดินบริเวณรอบ ๆ โบสถ์และบนผนังกำแพงด้านข้างของโบสถ์ ในส่วนของการประมวลผลภาพถ่ายได้ทำการประมวลผลด้วยโปรแกรมหลายยี่ห้อ ได้แก่ โปรแกรม Agisoft Photoscan Professional,

โปรแกรม PIX4Dmapper, โปรแกรม 3Df Zephyr, โปรแกรม SURE, โปรแกรม MicMac, โปรแกรม Visual SFM และโปรแกรม Context Capture โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ผลิตขึ้นมาได้เปรียบเทียบกับโปรแกรม CloudCompare ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศที่ผลิตได้จากโปรแกรมประมวลผลภาพถ่ายเกือบทุกโปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผลให้ความถูกต้องและรายละเอียดของข้อมูลที่สมบูรณ์ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานประมาณ 0.02 เมตร ยกเว้นโปรแกรม SURE ที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานประมาณ 0.04 เมตร จากการศึกษาทำให้ทราบว่า การมีภาพถ่ายเฉียงมาประมวลผลร่วมกับภาพถ่ายตั้งช่วยทำให้พอยต์คลาวด์ที่ผลิตขึ้นมาได้มีความหนาแน่นมากขึ้นและมีความถูกต้องเชิงตำแหน่งที่มีความแม่นยำสูง

Vacca et al. (2017) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของแบบจำลองสามมิติที่ประมวลผลมาจากภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง เพื่อใช้ในการพิจารณารอยพิมพ์ฐาน การคำนวณหาพื้นที่ ความสูงและปริมาตรของสิ่งปลูกสร้างของแบบจำลองสามมิติที่ผลิตขึ้นได้ โดยได้ทำการศึกษา 2 กรณีศึกษา คือ กรณีศึกษาที่ 1 ใช้ข้อมูลภาพถ่ายเป็นภาพถ่ายอย่างเดียว มีขนาดของ GSD 2.20 เซนติเมตร บินถ่ายภาพแบบกริดตามหลักการทางโฟโตแกรมเมตรีด้วยมีส่วนซ้อนทับด้านหน้า 80% และส่วนซ้อนด้านข้าง 73% มีการใช้จุดบังคับภาคพื้นดินที่รังวัดค่าพิกัดด้วยเครื่องรับสัญญาณ GNSS เป็นจำนวน 4 จุด โดยภายในพื้นที่การศึกษามีอาคารสิ่งปลูกสร้างอยู่ 30 หลัง ทำการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายด้วยโปรแกรม Agisoft Photoscan Professional และโปรแกรม PIX4Dmapper โดยในกรณีศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาขนาดของพื้นที่และปริมาตรของอาคารสิ่งปลูกสร้างที่ได้จากข้อมูลพอยต์คลาวด์เปรียบเทียบกับข้อมูลจากแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:2,000 และข้อมูลค่ารังวัดที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมบางส่วน กรณีศึกษาที่ 2 ใช้ข้อมูลภาพถ่ายเฉียงร่วมกับข้อมูลภาพถ่ายตั้งที่ได้ทำการบันทึกมา โดยการบันทึกภาพจะมุ่งเน้นไปที่อาคารสิ่งปลูกสร้างเพียงหลังเดียวที่ต้องการศึกษา เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากมาจากการรังวัดด้วยเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน (TLS) ผ่านโปรแกรม CloudCompare ในการบินถ่ายภาพแนวตั้งมีขนาดของ GSD 2.20 เซนติเมตร ส่วนการบินถ่ายภาพเฉียงมุมกล้องเอียง 45 องศา มีขนาดของ GSD 1.20 เซนติเมตร ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาทั้ง 2 กรณีศึกษา พบว่ากรณีศึกษาที่ 1 เมื่อทำการวัดเปรียบเทียบระยะเส้นฐานที่เชื่อมระหว่างจุดบังคับภาพถ่ายที่รังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม พบว่าโปรแกรม Agisoft Photoscan Professional ให้ค่า RMSE 0.05 เมตร และโปรแกรม

PIX4Dmapper ให้ค่า RMSE 0.04 เมตร ในส่วนของวัดขนาดพื้นที่ของสิ่งปลูกสร้างเปรียบเทียบกับข้อมูลแผนที่ ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:2,000 พบว่าโปรแกรม Agisoft Photoscan Professional ให้ค่า RMSE 4.62 ตารางเมตรและโปรแกรม PIX4Dmapper ให้ค่า RMSE 6.05 ตารางเมตร ในส่วนของวัดขนาดปริมาตรของสิ่งปลูกสร้างเปรียบเทียบกับข้อมูลแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:2,000 พบว่าโปรแกรม Agisoft Photoscan Professional ให้ค่า RMSE 74.13 ลูกบาศก์เมตรและโปรแกรม PIX4Dmapper ให้ค่า RMSE 68.55 ลูกบาศก์เมตร สำหรับกรณีศึกษาที่ 2 พบว่าเมื่อนำข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายดิ่งไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จาก TLS โปรแกรม Agisoft Photoscan Professional ให้ค่า RMSE 0.057 เมตรและโปรแกรม PIX4Dmapper ให้ค่า RMSE 0.031 เมตร แต่เมื่อนำข้อมูลภาพถ่ายเฉียงเข้าไปประมวลผลร่วมด้วยพบว่า โปรแกรม Agisoft Photoscan Professional ให้ค่า RMSE 0.068 เมตรและโปรแกรม Pix4D ให้ค่า RMSE 0.025 เมตร จากการศึกษากรณีศึกษาทั้ง 2 กรณี พบว่าในกรณีศึกษาที่ 1 ไม่สามารถสรุปผลได้เนื่องจากข้อมูลแผนที่ภูมิประเทศมาตราส่วน 1:2,000 ที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบมีค่าความคลาดเคลื่อนเกินกว่าที่จะยอมรับได้และไม่ทราบแหล่งข้อมูลที่แน่ชัดของข้อมูลสำรวจ ในส่วนของกรณีที่ 2 นั้นสามารถบอกได้อย่างชัดเจนว่าภาพถ่ายเฉียงที่นำมาใช้ในการประมวลผลร่วมกับข้อมูลภาพถ่ายดิ่งนั้นช่วยเพิ่มความถูกต้องเชิงพื้นที่ให้การรังวัดได้ดีกว่าการใช้ภาพถ่ายดิ่งเพียงอย่างเดียว

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

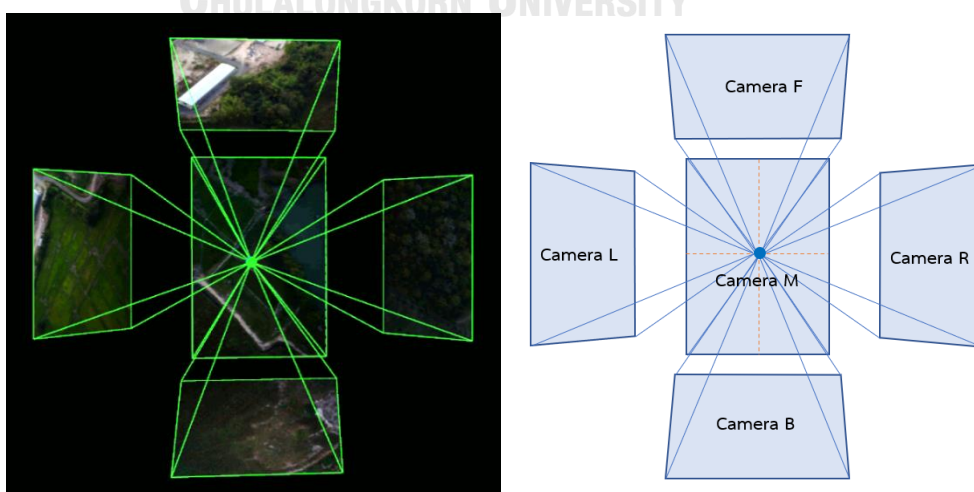
3.1.1 โปรแกรม PIX4Dmapper เวอร์ชัน 4.7.5 ใช้ในการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่ทำการบันทึกภาพจากระบบกล้องหลายหัวผ่านคำสั่งพื้นฐานต่าง ๆ และใช้ชุดคำสั่งเสริม ได้แก่ คำสั่งสำหรับการประมวลผลภาพถ่ายที่คำนวณค่าของอุปกรณ์จับยึดกล้องที่ใช้หลักการ Relative Position of the Camera Rig, คำสั่ง Multi-ray Cloud ที่ใช้หลักการ Multiple View Geometry ในการคำนวณหาตำแหน่งของจุดที่สนใจ

3.1.2 ซอฟต์แวร์ Python เวอร์ชัน 3.7.3 ใช้ในการแสดงผลข้อมูลและตรวจสอบข้อมูล โดย Library ที่ใช้ในการวิจัย ประกอบไปด้วย pandas, geopandas, pyLAS และ matplotlib

3.2 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 ข้อมูลภาพถ่ายของระบบกล้องหลายหัว

ภาพถ่ายที่ได้จากการบันทึกด้วยระบบกล้องหลายหัวที่ติดตั้งบนยูเอวีลูกผสมชนิดปีกตรึงและหลายโรเตอร์ยี่ห้อ (VTOL) FOXTECH รุ่น Loong 2160 VTOL ที่บันทึกภาพครอบคลุมทั้งพื้นที่ที่ใช้ในการศึกษา โดยกล้องที่ใช้ในการบันทึกภาพ คือ กล้อง FOXTECH 3DM V3 Oblique Camera for Mapping and Survey ที่ ประกอบไปด้วยกล้องตั้งจำนวน 1 กล้องและกล้องเฉียงจำนวน 4 กล้อง ทำให้ได้ภาพจำนวน 5 ภาพต่อหนึ่งจุดที่ทำการบันทึกภาพถ่ายขณะบินปฏิบัติการกิจ



รูปที่ 10 ตัวอย่างตำแหน่งภาพถ่ายที่บันทึกมาจากระบบกล้องหลายหัวที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 11 (ก) ยูเอวีลูกผสมชนิดปีกตรึงและหลายโรเตอร์ (VTOL) รุ่น Loong 2160 VTOL
 ใช้ในการบินปฏิบัติภารกิจ (ข) กล้อง 3DM V3 ที่ใช้ในการบันทึกภาพถ่าย
 ((ก) ดัดแปลงจาก Foxtechfpv.com, 2020 และ (ข) ดัดแปลงจาก Foxtechfpv.com,
 2019)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของระบบกล้องหลายหัว FOXTECH 3DM V3 ที่ใช้ในงานวิจัย
 (ดัดแปลงจาก Foxtechfpv.com, 2020)

รายละเอียดคุณลักษณะ	
รุ่น	FOXTECH 3DM V1 Oblique Camera for Mapping and Survey
ขนาดของตัวกล้อง	132x132x90 มิลลิเมตร
น้ำหนัก	683 กรัม
ชนิดและขนาดของเซนเซอร์รับภาพ	APS-C CMOS (23.5X15.6 มิลลิเมตร)
ความยาวโฟกัสเลนส์	25.2 มิลลิเมตร (กล้องตั้ง) / 35.7 มิลลิเมตร (กล้องเอียง)
ความละเอียดของกล้อง	24 ล้านจุดภาพ (รวม 5 กล้อง 120 ล้านจุดภาพ)
ขนาดของภาพ	6000 x 4000 จุดภาพ
มุมมองของกล้อง	45 องศา
อุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงาน	-10 องศาเซลเซียส ถึง 40 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 3 คุณสมบัติของอากาศยานไร้คนขับที่ใช้ในงานวิจัย
(ดัดแปลงจาก Foxtechfpv.com, 2019)

รายละเอียดคุณลักษณะ	
รุ่น	Loong 2160 VTOL
ความกว้างของปีก	2160 มิลลิเมตร
ความยาวของตัวลำ	1200 มิลลิเมตร
วัสดุ	EPO, ฟิโบลอนไนไมด์-พลาสติก, PVC
น้ำหนักของตัวลำ	1 กิโลกรัม
น้ำหนักบรรทุกสูงสุด	8 กิโลกรัม
ความสามารถในการต้านทานลม	5.5 เมตร/วินาที - 7.9 เมตร/วินาที

3.2.2 ข้อมูลค่าพิกัดจากสัญญาณดาวเทียมบนยูเอวี

ข้อมูลค่าพิกัดตำแหน่งจุดบันทึกภาพได้มาจากอุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียมบนตัวลำ VTOL ยี่ห้อ Emlid รุ่น REACH M2 ภายในอุปกรณ์ใช้ชิป UBlox ZED-F9P ที่ได้มีการพัฒนาประสิทธิภาพให้สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้หลายความถี่ (Multi-frequency) จากดาวเทียม GPS/QZSS, GLONASS, BeiDou, Galileo สามารถรับช่องสัญญาณได้ 184 ช่อง มีหน่วยความจำที่สามารถบันทึกข้อมูล Raw GNSS แบบไฟล์ RINEX ได้ และมีระบบการเชื่อมโยงข้อมูลภาพถ่ายเข้ากับค่าพิกัดจากอุปกรณ์ ทำให้สามารถทำการประมวลผลภายหลัง (Post-Process) ร่วมกับข้อมูลจากสถานีฐาน GNSS เพื่อให้ได้มาซึ่งพิกัดของภาพที่แม่นยำและมีความถูกต้องสูงได้



รูปที่ 12 อุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียมที่ใช้บนยูเอวี
(ดัดแปลงจาก Mapgear.com, 2020)

3.2.3 ข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน

ข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินที่ใช้ในการประมวลผลในพื้นที่ศึกษามีทั้งหมดจำนวน 14 จุด กระจายตัวครอบคลุมทั่วพื้นที่ สำหรับวิธีการรังวัดค่าพิกัดทำการรังวัดสัญญาณดาวเทียมด้วยวิธีการหาค่าพิกัดแบบสัมพัทธ์ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันที (Real Time Kinematic; RTK) เป็นเวลา 3 นาที ซึ่งสถานนีฐานที่ใช้ในการเป็นหมุดที่ทราบค่าพิกัด เป็นหัวหมุดทองเหลืองฝังอยู่บนตาดฟ้าอาคารสระบุรี 4 ได้ค่าพิกัดมาจากการรังวัดด้วยวิธีการหาตำแหน่งจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (Precise Point Positioning; PPP) รังวัดรับสัญญาณเป็นเวลา 14 ชั่วโมง



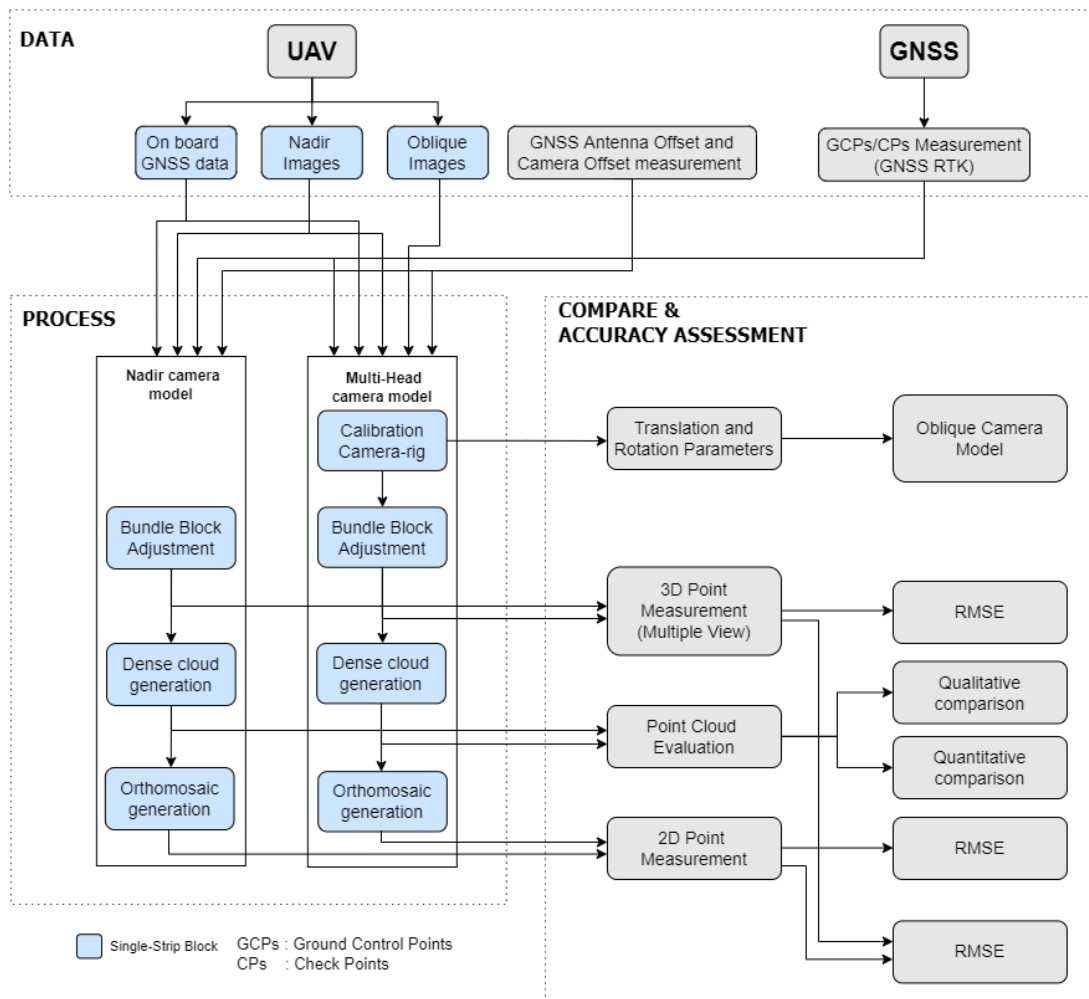
รูปที่ 13 การรับสัญญาณดาวเทียมบนหมุดสถานีฐานและตัวอย่างหัวหมุดทองเหลืองจุดบังคับภาพพื้นดิน

ตารางที่ 4 ค่าพิกัดและค่าระดับของสถานีฐานที่รังวัดมาจากการหาตำแหน่งจุดเดี่ยวความละเอียดสูง (PPP)

ชื่อจุด	พิกัดทางเหนือ [ม.]	พิกัดทางตะวันออก [ม.]	ความสูงออร์โทเมตริก [ม.]
SBR-01	1606595.794	718098.485	56.780

3.3 การประมวลผลข้อมูล

เพื่อให้สามารถเข้าใจกระบวนการประมวลผลข้อมูลได้โดยง่าย จึงขอแนะนำเสนอแผนผังขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลก่อนแล้วจึงตามด้วยหัวข้อการอธิบายรายละเอียดของขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการวิจัย โดยแผนผังแสดงขั้นตอนการประมวลผลมีลำดับและขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 14 แผนผังขั้นตอนการประมวลผลข้อมูล

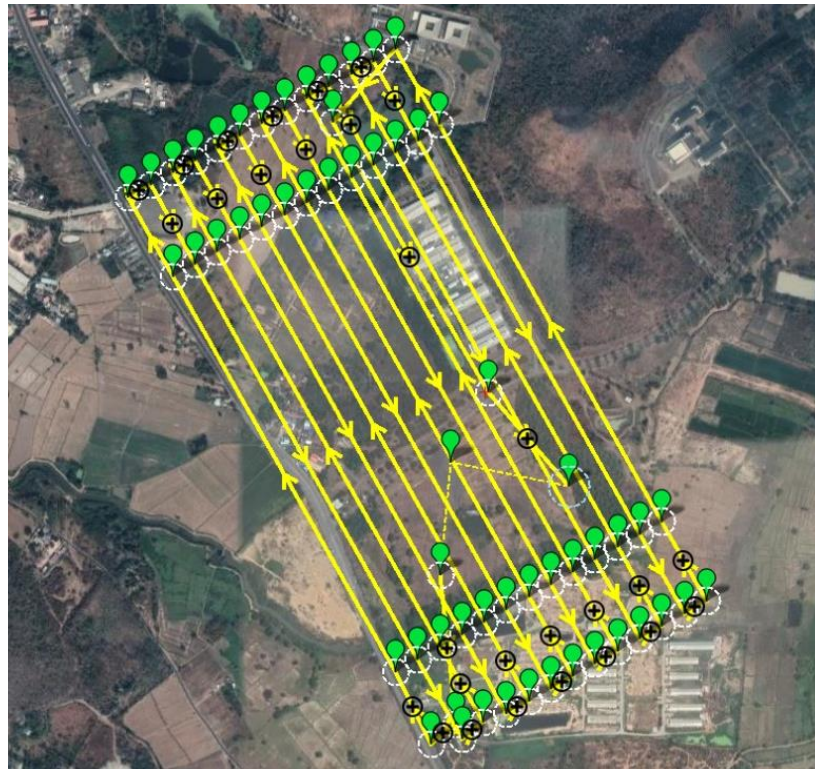
โดยรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลในรูปที่ 14 มีดังต่อไปนี้

3.3.1 การวางแผนการบินและการบันทึกภาพถ่าย

รูปแบบการบินที่ทำการบินบันทึกภาพถ่ายจะบินในรูปแบบกริดบล็อกแถบเดียว (Single-strip Block or Grid flight) ตามหลักการทางโฟโตแกรมเมตรี โดยทำการวางแผนการบินด้วยโปรแกรม ARDUPILOT ซึ่งมีการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ตามตารางที่ 3.1 ภาพถ่ายที่บันทึกได้จากระบบกล้องหลายหัวสามารถบันทึกครอบคลุมพื้นที่ออกไปได้ไกลกว่าตำแหน่งจุดเปิดถ่ายภาพเป็นอย่างมาก โดยสามารถครอบคลุมพื้นที่ได้ถึง 1.2 ตารางกิโลเมตร ตัวรับภาพที่ใช้เป็นกล้องถ่ายภาพ 3DM V3 มีขนาด 3.92 ไมโครเมตรต่อจุดภาพ ในส่วนของกล้องตั้งมีความยาวโฟกัสของเลนส์ถ่ายภาพ 25.2 มิลลิเมตร ในส่วนของกล้องเฉียงอีก 4 กล้องมีความยาวโฟกัสของเลนส์ถ่ายภาพ 35.7 มิลลิเมตร ดังนั้นการบินบันทึกภาพถ่ายที่ระดับความสูงเฉลี่ย 150 เมตรนี้สามารถประมาณค่าความละเอียดของจุดภาพ (Ground Sample Distance; GSD) ได้ประมาณ 2.5 เซนติเมตร

ตารางที่ 5 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการวางแผนการบินในงานวิจัย

พารามิเตอร์สำหรับการบินบันทึกภาพถ่าย	รายละเอียดข้อมูล
ครอบคลุมพื้นที่ (Area covered by the images)	1.2 ตารางกิโลเมตร
ระดับความสูงเฉลี่ยในการบิน (Flight height)	150 เมตร
ส่วนซ้อนด้านหน้า (Forward overlap)	80%
ส่วนซ้อนด้านข้างระหว่างแนวนบิน (Side overlap)	60%
ความละเอียดของจุดภาพ (Ground Sampling Distance; GSD)	2.5 เซนติเมตร
จำนวนแนวนบิน (Number of strips)	12
จำนวนรูปภาพ (Number of images)	2995



รูปที่ 15 เส้นทางการบินของอากาศยานไร้คนขับที่บินบันทึกภาพภายในงานวิจัย

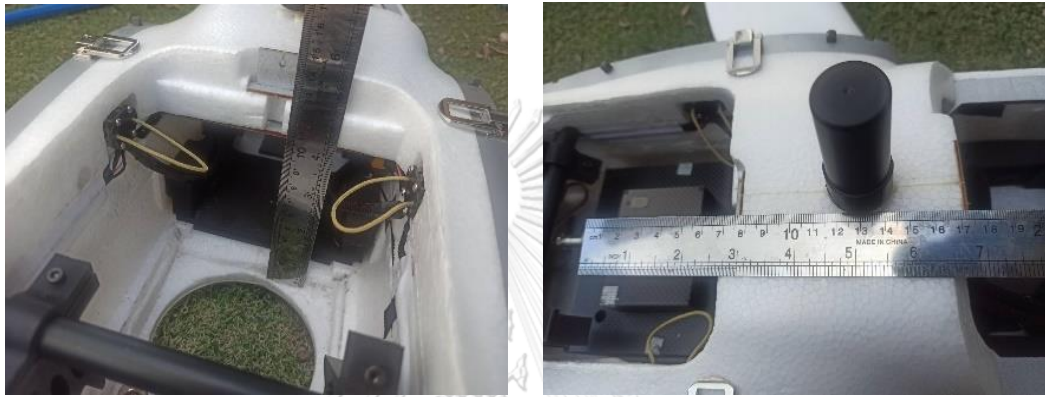
3.3.2 การวัดระยะห่างของกล้องและเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส

3.3.2.1 การวัดระยะห่างระหว่างจุดเปิดถ่ายกับเสารับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส

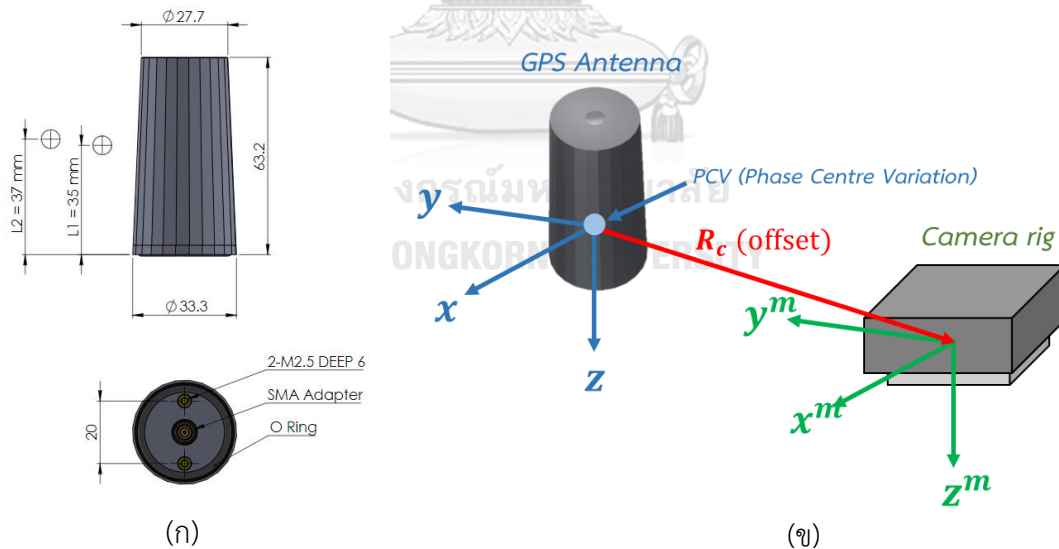
เนื่องจากจุดถ่ายภาพของกล้องและเสารับสัญญาณบนอากาศยานไร้คนขับ ไม่ได้อยู่ในตำแหน่งเดียวกัน ดังนั้นจึงได้มีการวัดระยะห่างระหว่างตัวกล้องและเสารับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส (Camera - GNSS Antenna Offset) พบว่าระยะห่างระหว่างเสารับสัญญาณและกล้องมีระยะห่างทางแกน X เท่ากับ -0.130 เมตร, ระยะห่างทางแกน Y เท่ากับ 0.000 เมตร และระยะห่างทางแกน Z เท่ากับ -0.175 เมตร โดยระยะห่างทางแกน Z คือ ระยะที่ได้ทำการบวกไปให้ถึงบริเวณตำแหน่งการแปรเปลี่ยนของจุดศูนย์กลางเฟสของเสาอากาศ (Phase Centre Variation; PCV) ของ L1 แล้ว

ตารางที่ 6 ระยะห่างระหว่างเสารับสัญญาณดาวเทียมกับระบบกล้องหลายหัว

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



รูปที่ 16 การวัดระยะห่างจากเสารับสัญญาณไปยังบริเวณตัวกล้อง



รูปที่ 17 (ก) รายละเอียดลักษณะส่วนประกอบและขนาดของเสารับสัญญาณ Tallyman HC871

(ข) ลักษณะความสัมพันธ์ของแกนพิกัดระหว่างเสารับสัญญาณกับระบบกล้องหลายหัว

(ดัดแปลงจาก Tallysman.com, 2019)

3.3.2.2 การวัดระยะห่างระหว่างกล้องแต่ละตัว

ในการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายจากระบบกล้องหลายหัวจำเป็นต้องทราบพารามิเตอร์การเลื่อนแกน (Translation) และพารามิเตอร์การหมุนแกน (Rotation) ระหว่างกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรอง ดังนั้นจึงได้ทำการวัดระยะห่างระหว่างกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรองและพิจารณาค่าระยะห่างผ่านลักษณะทางกายภาพความเป็นจริงของระบบกล้องหลายหัว พบว่าระยะห่างในแต่ละกล้องมีค่าระยะห่างตามตารางที่ 7



รูปที่ 18 การวัดระยะห่างจากกล้องกลางไปยังกล้องอื่น ๆ บนระบบกล้องหลายหัว

ตารางที่ 7 ระยะห่างระหว่างกล้องตั้งตำแหน่งตรงกลางไปยังกล้องเฉียงอีก 4 กล้อง

ระบบกล้องหลายหัว	ระยะห่างในแกน X [มม.]	ระยะห่างในแกน Y [มม.]	ระยะห่างในแกน Z [มม.]
กล้องกลาง (Camera M)	กล้องหลักอ้างอิง		
กล้องหลัง (Camera B)	-30	0	20
กล้องหน้า (Camera F)	30	0	20
กล้องซ้าย (Camera L)	0	-30	20
กล้องขวา (Camera R)	0	30	20

3.3.3 การรังวัดจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน

ข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินที่ใช้ในการประมวลผลในพื้นที่ศึกษามีทั้งหมดจำนวน 14 จุด กระจายตัวครอบคลุมทั่วพื้นที่ ลักษณะของจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินประกอบไปด้วยจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินแบบหมุดเป้าให้สัญญาณที่เป็นหัวหมุดทองเหลืองและพีวเจอร์บอร์ดขนาดมาตรฐานกว้าง 35 เซนติเมตร ยาว 81 เซนติเมตร และแบบเป้าธรรมชาติ ซึ่งวิธีการรังวัดค่าพิกัด ทำการรังวัดสัญญาณดาวเทียมด้วยวิธีการรังวัดแบบจลนในทันที (RTK) เป็นเวลา 3 นาที (180 epoch) หลักการทำงาน คือ ต้องมีเครื่องรับสัญญาณอย่างน้อย 2 เครื่อง โดยเครื่องรับสัญญาณเครื่องที่หนึ่งจะถูกวางไว้บนหมุดที่ทราบค่าพิกัดแล้ว (สถานีฐาน) ส่วนเครื่องรับสัญญาณเครื่องที่สองจะถูกนำไปวางตามจุดที่ต้องการทราบค่าพิกัดหรือติดตั้งบนอากาศยาน (สถานีจร) การหาค่าพิกัดของตำแหน่งจุดต่าง ๆ ด้วยวิธีนี้ เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่สถานีฐานและสถานีจรจะต้องรับข้อมูลจากดาวเทียมกลุ่มเดียวกันและช่วงเวลาเดียวกันอย่างน้อย 5 ดวง วิธีนี้สามารถให้ค่าความถูกต้องในระดับ 1-3 เซนติเมตร (สำหรับเส้นฐานที่ยาวไม่เกิน 15 กิโลเมตร) ซึ่งสถานีฐานที่ใช้ในการเป็นหมุดที่ทราบค่าพิกัด เป็นหัวหมุดทองเหลืองฝังอยู่บนดาดฟ้าอาคารสระบุรี 4 ได้ค่าพิกัดมาจากการรังวัดด้วยวิธีการหาตำแหน่งจุดเดียวความละเอียดสูง (PPP) รังวัดสัญญาณเป็นเวลา 14 ชั่วโมง



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 19 ลักษณะจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินที่กระจายตัวในพื้นที่การศึกษา

(ก) และ (ข) เป้าแบบให้สัญญาณ (ค) เป้าแบบธรรมชาติ



รูปที่ 20 การกระจายตัวของตำแหน่งจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน
ที่ใช้ในการประมวลผลภายในงานวิจัย

ตารางที่ 8 พิกัดตำแหน่งของจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินบริเวณพื้นที่การศึกษา

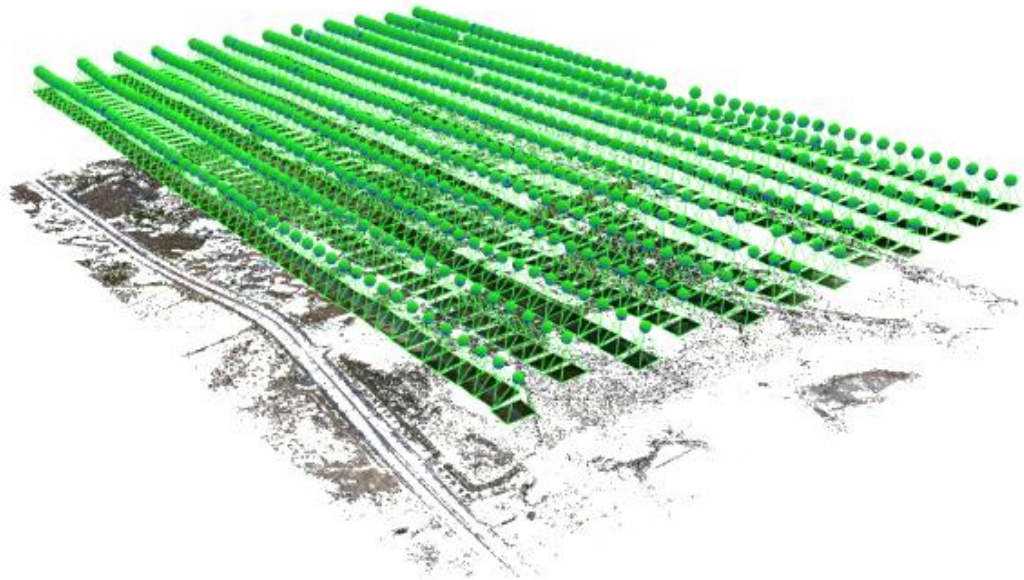
ชื่อจุด	พิกัดทางเหนือ [ม.]	พิกัดทางตะวันออก [ม.]	ความสูงออร์โธเมตริก [ม.]
GCP-02	1,606,454.237	717,429.126	33.204
GCP-05	1,606,432.529	717,609.396	35.333
GCP-10	1,606,169.321	717,745.533	39.620
GCP-11	1,605,856.965	717,493.825	32.934
GCP-12	1,605,967.607	717,691.281	37.686
GCP-13	1,605,704.940	717,378.247	30.606
GCP-14	1,605,821.834	717,647.443	33.485
GCP-16	1,605,642.458	717,567.045	31.976
GCP-17	1,605,742.571	717,883.363	31.911
GCP-20	1,605,877.703	717,328.303	31.574
GCP-22	1,606,353.122	717,170.806	30.124
GCP-23	1,606,352.295	717,168.737	29.987
GCP-26	1,606,090.715	717,058.756	29.554
GCP-27	1,606,076.198	717,172.322	29.450

3.3.4 การประมวลผลข้อมูลภาพถ่าย

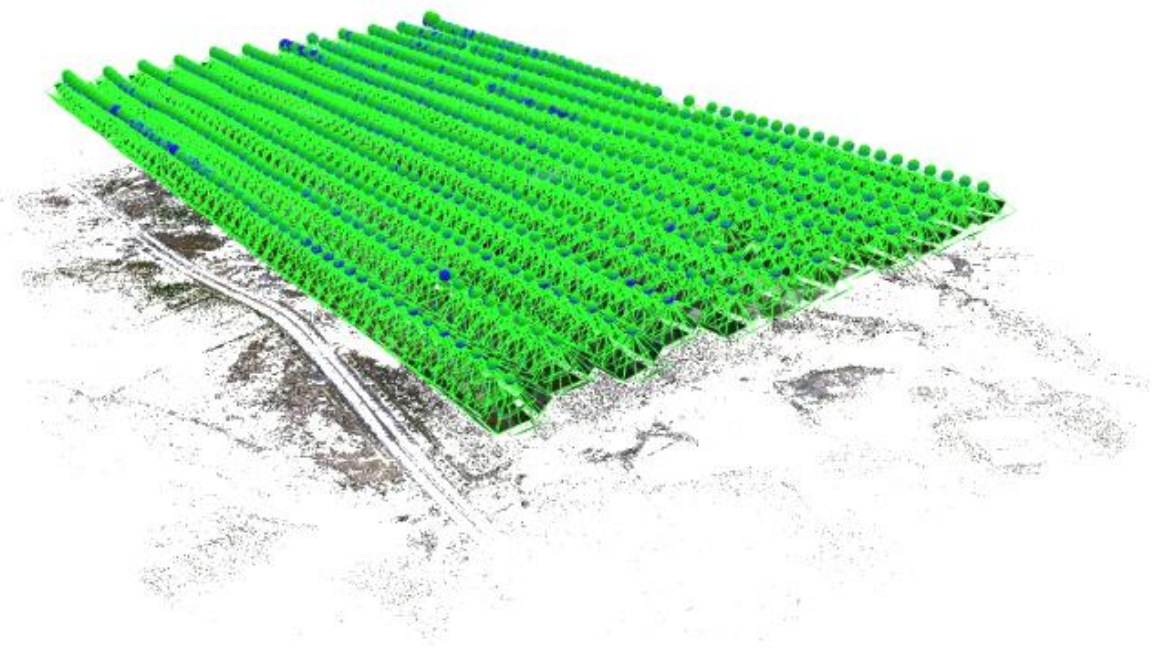
การประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายจะประมวลผลด้วยโปรแกรม PIX4Dmapper ซึ่งเป็นโปรแกรมทางด้านโฟโตแกรมที่คำนวณความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดภาพถ่ายและแบบจำลองของกล้องถ่ายภาพเชื่อมโยงไปยังค่าพิกัดจุดควบคุมภาพบนพื้นดินที่ปรากฏเด่นชัดในรูปลักษณะของจุดสำคัญและจุดควบคุมภาคพื้นดินที่มีการรังวัดค่าพิกัดภาคพื้นดินที่แม่นยำ กระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจะถูกปรับปรุงค่า (Optimize) จนมีค่าเศษเหลือรวม น้อยที่สุดด้วยเทคนิค Least square adjustment computation และการประยุกต์ใช้การเพิ่มประสิทธิภาพการปรับปรุงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศที่ เรียกว่า Bundle Block Adjustment (BBA) นอกจากนี้โปรแกรม PIX4Dmapper ยังมีความสามารถในการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายที่คำนวณความสัมพันธ์ของอุปกรณ์จับยึดกล้องได้ ซึ่งใช้หลักการคำนวณแบบตำแหน่งที่สัมพันธ์ (Relative position) กันระหว่างกล้องที่ทราบค่าพารามิเตอร์ (กล้องหลักอ้างอิง) กับกล้องที่ไม่ทราบค่าพารามิเตอร์ (กล้องรอง) โดยในส่วนของผลการประมวลผลจะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ คือ รูปแบบที่ 1 ประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายตั้งเท่านั้นที่บันทึกมาจากระบบกล้องหลายหัว และรูปแบบที่ 2 ประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงที่บันทึกมาจากระบบกล้องหลายหัว โดยการประมวลผลข้อมูลทั้ง 2 รูปแบบ ประกอบไปด้วยขั้นตอน 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การคำนวณปรับแก้บล็อกลำแสง (Bundle Block Adjustment) เป็นการคำนวณโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ (Aerial Triangulation) ซึ่งจะเป็นการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การจัดวางภาพภายนอก รวมถึงมีการวัดสอบค่าพารามิเตอร์ในการปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนทางเลนส์ด้วยกระบวนการวัดสอบด้วยตัวเอง (Self-calibration) ในขั้นตอนนี้ด้วย โดยกระบวนการทางคอมพิวเตอร์วิชั่นจะมีการจับคู่ภาพเพื่อสร้าง Automatic Tie points ผ่านการสกัดหาข้อมูลจุดสำคัญที่เปรียบเสมือนจุดโยงยึดบนภาพถ่ายที่เป็นสองมิติ ซึ่งจะมีการโยงยึดค่าพิกัดจุดควบคุมภาคพื้นดินเข้าไปช่วยในการควบคุมคุณภาพค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่ง

(ก)

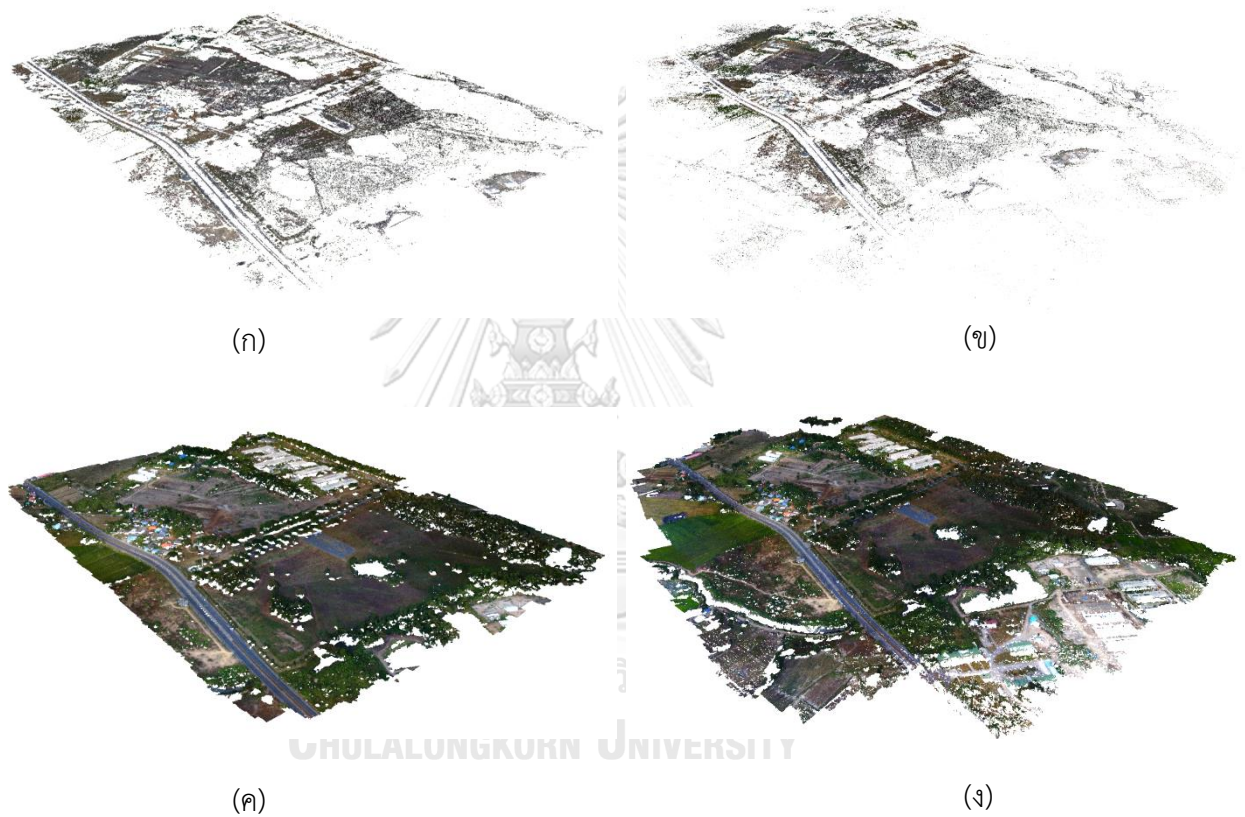


(ข)



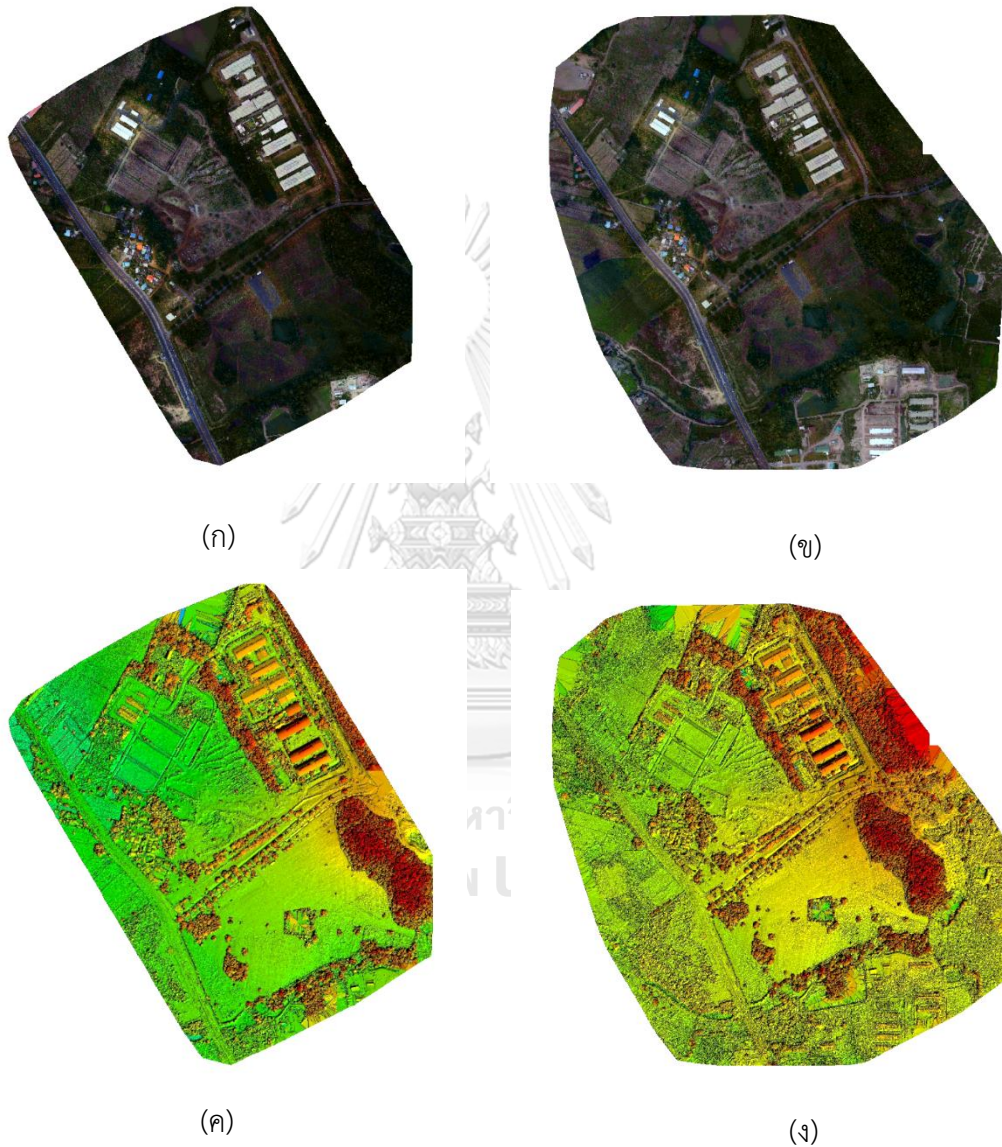
รูปที่ 21 ตำแหน่งของกล้องและการเอียงตัว (ก) บล็อกของภาพถ่ายตั้งเท่านั้น
(ข) บล็อกของภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

ขั้นตอนที่ 2 การผลิตข้อมูลพอยต์คลาวด์ (Dense Cloud Generation) เป็นขั้นตอนในการสร้างข้อมูลพื้นผิวที่แสดงลักษณะของรูปร่างในพื้นที่ โดยเป็นการเพิ่มจำนวนจุดโดยยึดช่วยให้ข้อมูลมีองค์ประกอบรายละเอียดหนาแน่นมากขึ้นและช่วยให้ค่าความถูกต้องเชิงเรขาคณิตที่แม่นยำ ซึ่งมีความสำคัญต่อการนำไปประมวลผลสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศขั้นต่อไป



รูปที่ 22 (ก) และ (ค) คือ ผลลัพธ์ข้อมูลพอยต์คลาวด์ก่อนและหลังประมวลผลขั้นตอนที่ 2 จากบล็อกของภาพถ่ายตั้งเท่านั้น (ข) และ (ง) คือ ผลลัพธ์ข้อมูลพอยต์คลาวด์ก่อนและหลังประมวลผลขั้นตอนที่ 2 จากบล็อกของภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

ขั้นตอนที่ 3 การผลิตแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศหรือภาพออร์โธ (Orthomosaic Generation) เป็นขั้นตอนการประมวลผลผลิตผลลัพธ์ไปใช้งาน โดยภาพออร์โธที่ได้จะถูกแก้ไขและขจัดความผิดเพี้ยนทางลักษณะเรขาคณิตของวัตถุทั้งหมด รวมถึงสามารถผลิตแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศและแบบจำลองค่าระดับความสูงเชิงเลขไปใช้งานได้



รูปที่ 23 (ก) และ (ค) คือ ภาพออร์โธและแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศจากการประมวลผลด้วยบล็อกของภาพถ่ายตั้งเท่านั้น (ข) และ (ง) คือ ภาพออร์โธและแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศจากการประมวลผลด้วยบล็อกของภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

ทั้งรูปแบบที่ 1 และรูปแบบที่ 2 จะประมวลผลตั้งแต่ขั้นตอนที่ 1 จนถึงขั้นตอนที่ 3 แต่สำหรับรูปแบบที่ 2 การประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายดึงร่วมกับภาพถ่ายเฉียง (ภาพจากทั้ง ห้ากล้อง) จะมีการตั้งค่าการประมวลผลเพิ่มเติมที่คำนึงถึงอุปกรณ์จับยึดกล้อง (Camera-rig) ที่ทำการโยนยึดกล้องภาพถ่ายเอาไว้ด้วยกันในขั้นตอนที่ 1 สำหรับการประมวลผลอุปกรณ์จับยึดกล้องนั้น จะมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง 2 พารามิเตอร์ คือ พารามิเตอร์การเลื่อนแกน (Translation) ในทิศทาง XYZ ของกล้องถ่ายภาพรองที่สัมพันธ์กับกล้องหลักอ้างอิง และ พารามิเตอร์การหมุนแกน (Rotation) รอบแกน XYZ ของกล้องถ่ายภาพรองที่สัมพันธ์กับกล้องหลักอ้างอิง โดยอุปกรณ์จับยึดกล้องที่ใช้สำหรับการโยนยึดระบบกล้องหลายหัวในการวิจัยครั้งนี้ พารามิเตอร์การเลื่อนแกนสามารถวัดค่าระยะห่างของกล้องแต่ละกล้องที่สัมพันธ์และประเมินตามลักษณะทางกายภาพความเป็นจริงได้ ในส่วนพารามิเตอร์การหมุนแกนรอบแกน XYZ ไม่สามารถทราบค่าสัมพันธ์ที่แน่ชัดได้ เนื่องจากระบบกล้องเป็นกล้องปิดและโรงงานผู้ผลิตไม่ได้ให้ค่าของแบบจำลองกล้องไว้ ผู้วิจัยจึงใช้วิธีการวัดค่าประมาณเริ่มต้น (Initial value) แล้วให้โปรแกรมคำนวณปรับปรุงค่าผลลัพธ์ด้วยวิธีการเชิงเลข (Numerical method)

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	

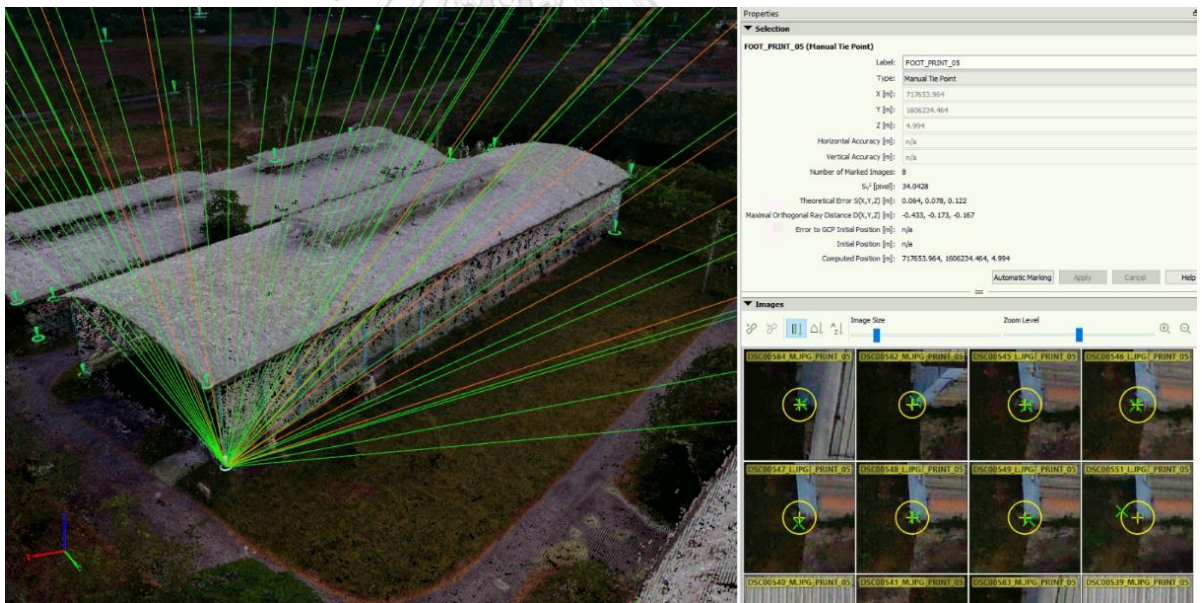
รูปที่ 24 ค่าตั้งต้นของค่าพารามิเตอร์การเลื่อนแกนและค่าพารามิเตอร์การหมุนแกนของกล้องแต่ละตัวที่สัมพันธ์กับกล้องกลาง

โดยในการประมวลผลครั้งนี้ได้มีการกำหนดค่าความถูกต้อง (Accuracy) ซึ่งจะมีบทบาทเป็นค่านำหนักให้กับค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณปรับแก้ในโปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผล การกำหนดค่าความถูกต้องนี้เป็นการบอกถึงความแม่นยำของค่าที่ต้องการกำหนดให้โปรแกรมประมวลผลตามแบบจำลองตามที่ใช้มีความเชื่อมั่น สำหรับพารามิเตอร์การเลื่อนแกนในทิศทาง XYZ กำหนดความถูกต้อง 5.0 มิลลิเมตร หมายถึงการที่ผู้วิจัย

เชื่อมั่นผลการวัดและโปรแกรมคำนวณปรับแก้และต้องการให้พารามิเตอร์คงตัวไม่เปลี่ยนแปลง และสำหรับพารามิเตอร์การหมุนรอบแกน XYZ กำหนดความถูกต้อง 5.0 องศา ซึ่งหมายถึงการยอมให้โปรแกรมประมวลผลด้วยวิธีการเชิงเลขปรับค่าให้เหมาะสมที่สุดและสอดคล้องกับกับผลการปรับแก้ของการรังวัดทั้งหมดภายในบล็อก โดยเป้าหมายคือให้ผลรวมของค่าเศษเหลือยกกำลังสองมีค่าน้อยที่สุด

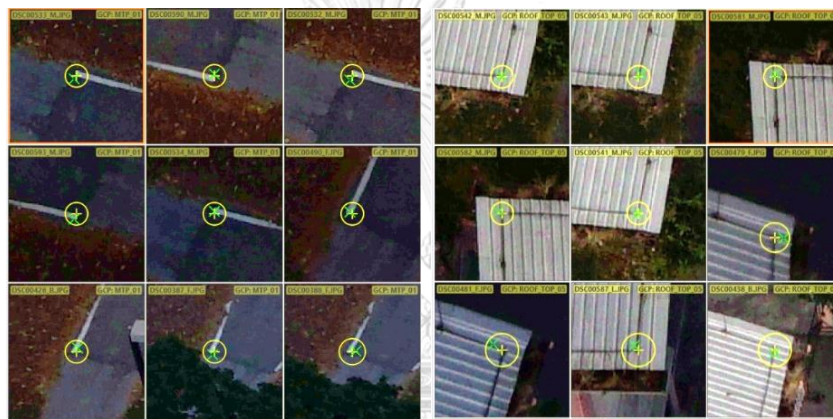
3.3.5 การรังวัดค่าพิกัดสามมิติจากภาพถ่ายที่บันทึกจากระบบกล้องหลายหัว

การรังวัดค่าพิกัดสามมิติจะใช้หลักการรังวัดแบบหลายมุมมอง (Multiple View) ซึ่งโปรแกรม PIX4Dmapper มีคำสั่งเสริมที่สามารถให้ผู้รังวัดสามารถรังวัดค่าพิกัดตำแหน่งของจุดที่สนใจจากมุมมองต่าง ๆ ที่ปรากฏบนภาพถ่ายหลาย ๆ ภาพได้ในเวลาเดียวกัน และแสดงค่าความแปรปรวน รวมถึงค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานทางตำแหน่งของจุดรังวัดได้ทันทีในขณะที่ทำการรังวัด ทำให้สามารถรังวัดจุดบนภาพได้อย่างมีคุณภาพ



รูปที่ 25 การรังวัดตำแหน่งค่าพิกัดสามมิติของจุดที่สนใจแบบหลายมุมมอง (Multiple View) เพื่อใช้ในการทำแผนที่สามมิติ

สำหรับการรังวัดจุดสามมิติหรือจุด Manual Tie Point จะทำการรังวัดโดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 คือ บริเวณพื้นที่เปิดโล่ง (Open area) กลุ่มที่ 2 คือ บริเวณอาคารสิ่งปลูกสร้าง (Buildings area) และกลุ่มที่ 3 บริเวณรอยพิมพ์ฐานอาคารและป้ายเสาบอกทาง (Footprint and Mast) ซึ่งทั้งสามกลุ่มจะมีตำแหน่งอยู่บริเวณภายในพื้นที่ส่วนกลางของภาพ (Neat area) ซึ่งแสดงพื้นที่ขอบเขตด้วยรูปสี่เหลี่ยมฟ้าอ่อนดังรูปที่ 27 โดยค่าพิกัดที่รังวัดได้จะนำไปเปรียบเทียบระหว่างค่าพิกัดที่รังวัดมาจากรูปแบบที่ 1 ประมวลผลจากภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและรูปแบบที่ 2 ประมวลผลจากภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงผ่านการพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ย (RMSE)



(ก)

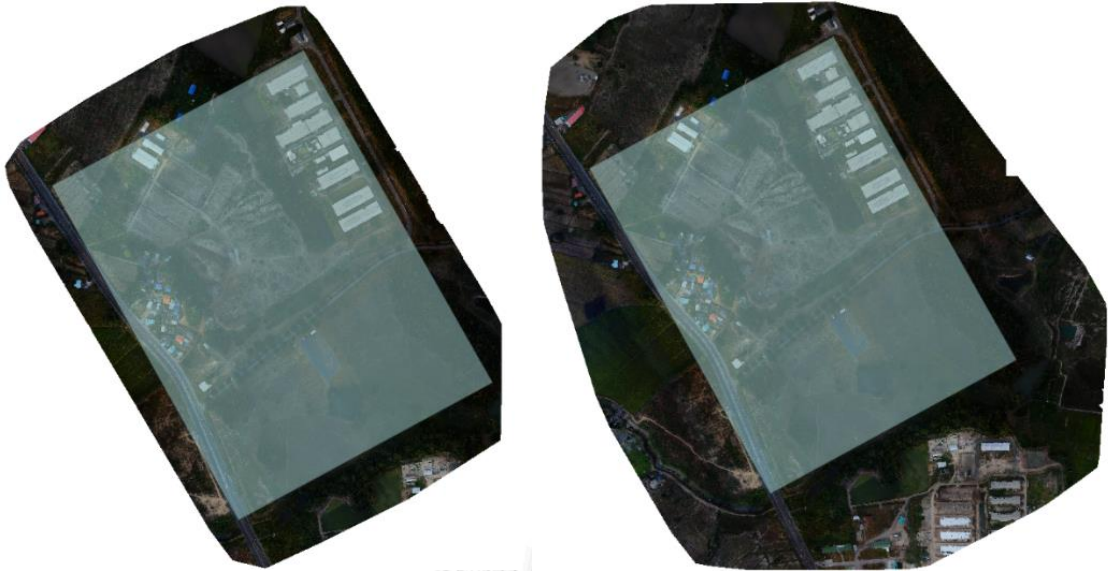
(ข)



(ค)

(ง)

รูปที่ 26 ตัวอย่างภาพที่ถูกใช้ในการรังวัดค่าสามมิติ (ก) บริเวณพื้นที่เปิดโล่ง
(ข) บริเวณอาคารสิ่งปลูกสร้าง (ค) บริเวณรอยพิมพ์ฐานอาคาร (ง) บริเวณป้ายเสาบอกทาง



(ก)

(ข)

รูปที่ 27 (ก) บริเวณพื้นที่ส่วนกลางของผลลัพธ์ที่ประมวลผลจากบล็อกของภาพถ่ายตั้งเท่านั้น คิดเป็น 65 เปอร์เซ็นต์ (ข) บริเวณพื้นที่ส่วนกลางของผลลัพธ์ที่ประมวลผลจากบล็อกของภาพถ่ายตั้งร่วมกับ ภาพเฉียงคิดเป็น 45 เปอร์เซ็นต์

3.3.6 การประเมินข้อมูลพอยต์คลาวด์

ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้มาจากการประมวลผลทั้งสองรูปแบบ จะถูกนำมาเปรียบเทียบในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณผ่านโปรแกรม PIX4Dmapper และผ่านการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาไพธอน ในส่วนของการเปรียบเทียบเชิงคุณภาพจะพิจารณารายละเอียดของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ปรากฏบนบริเวณพื้นที่เดียวกันผ่านการมองด้วยตา และในส่วนของเชิงปริมาณจะพิจารณาผ่านการเขียนโปรแกรม เพื่อเลือกบริเวณพื้นที่ที่สนใจและทำการนับจำนวนจุดพอยต์คลาวด์ที่ปรากฏเพื่อเปรียบเทียบจำนวนจุดพอยต์คลาวด์ที่ทั้งสองรูปแบบ การประมวลผลดีขึ้นมาได้

(ก)



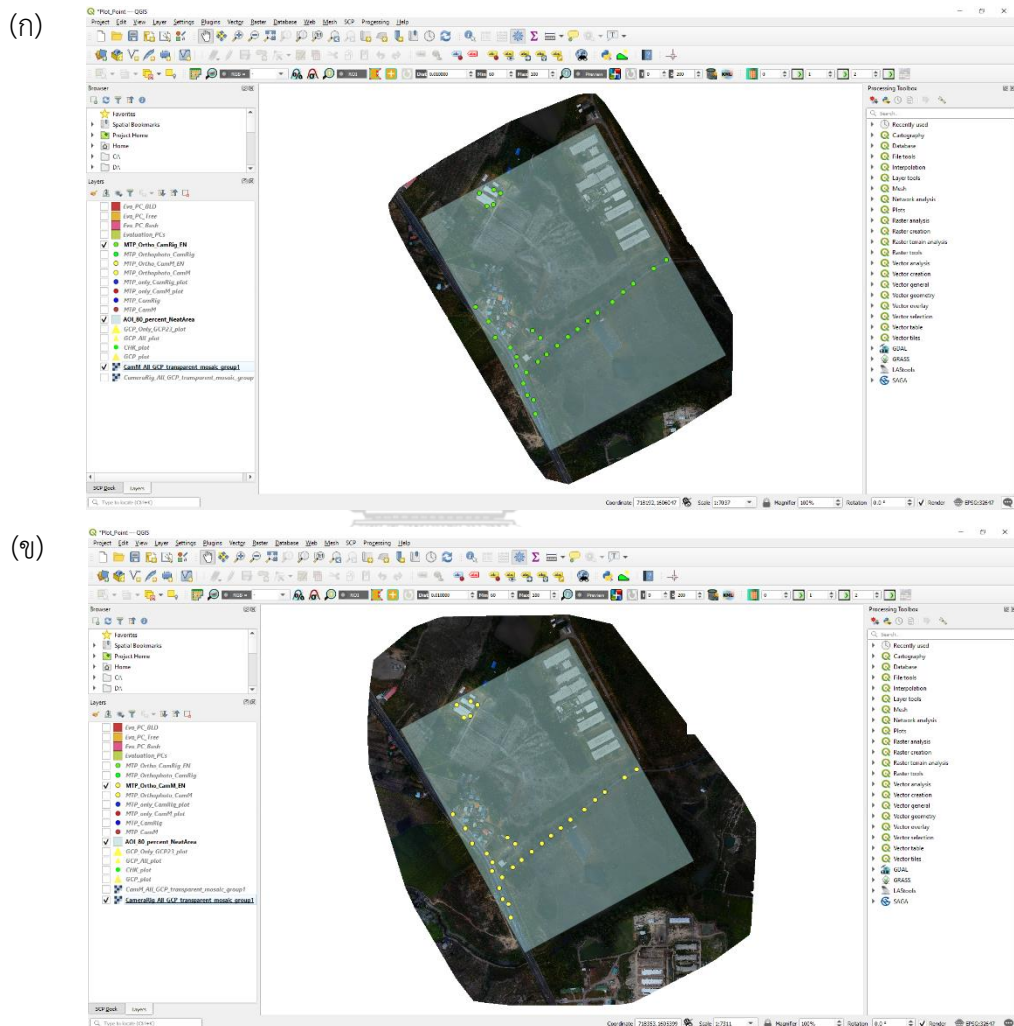
(ข)



รูปที่ 28 จำนวนและลักษณะของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ผลิตขึ้นได้ (ก) ประมวลผลจากบล็อกของ
ภาพถ่ายตั้งเท่านั้น และ (ข) ประมวลผลจากบล็อกของภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

3.3.7 การเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่ง

ภาพออร์โธที่ผลิตขึ้นมาได้จากทั้งสองรูปแบบการประมวลผล จะถูกนำมารังวัดตำแหน่งบนภาพ ณ บริเวณพื้นที่เปิดโล่ง (Open area) ที่เป็นบริเวณตำแหน่งเดียวกับกลุ่มที่ 1 ที่รังวัดค่าพิกัดด้วยวิธีการรังวัดสามมิติจากภาพถ่ายตามหัวข้อ 3.3.5 บนโปรแกรมทางด้านภูมิสารสนเทศ (GIS) และนำค่าพิกัดที่รังวัดได้จากภาพออร์โธทั้งสองรูปแบบการประมวลผลไปเปรียบเทียบผ่านการพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ย (RMSE)

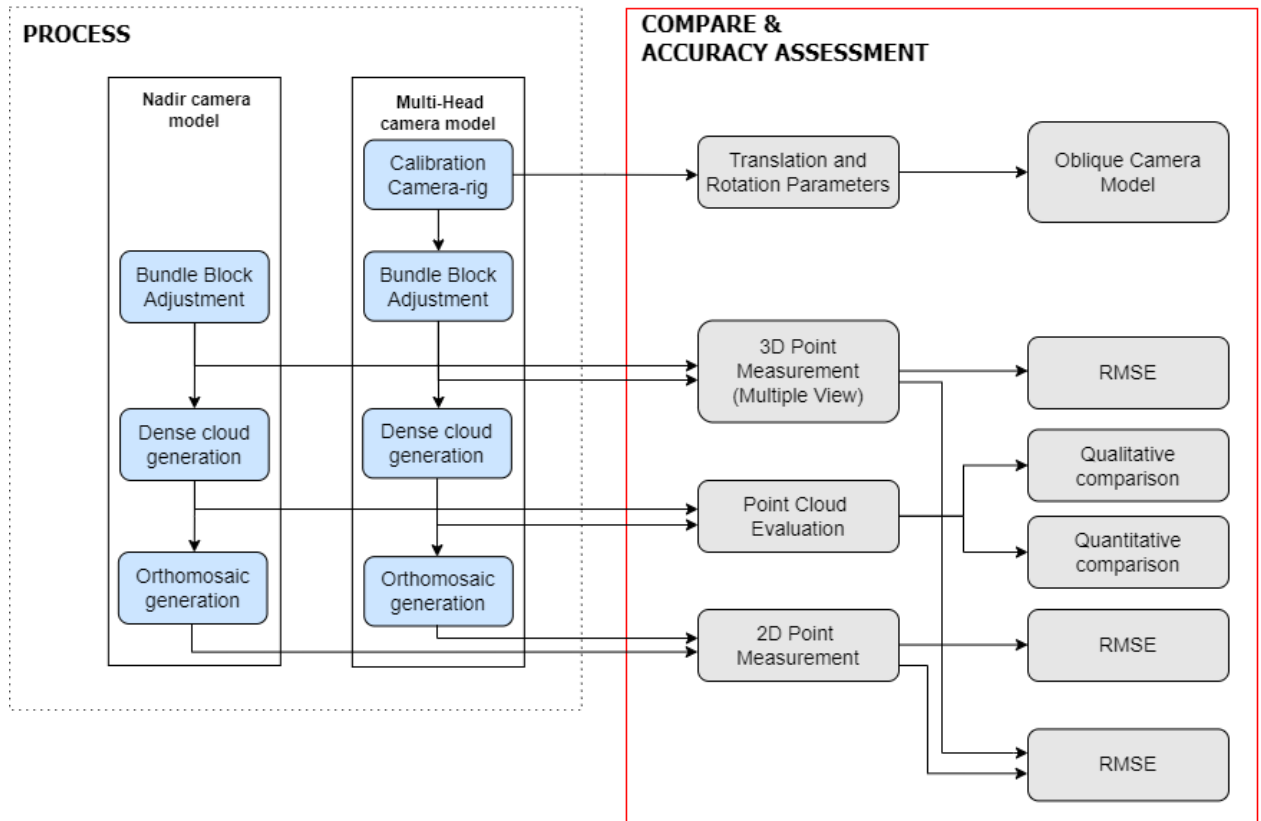


รูปที่ 29 ตำแหน่งของจุดที่รังวัดบนภาพถ่ายออร์โธ (ก) ภาพออร์โธที่ประมวลผลจากบล็อกของภาพถ่ายตั้งเท่านั้น และ (ข) ภาพออร์โธที่ประมวลผลจากบล็อกของภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

บทที่ 4

ผลการศึกษาวิจัย

ในบทนี้จะแสดงผลการศึกษาวิจัยที่ได้จากการประมวลผลตามขั้นตอนในบทที่ 3 ซึ่งผลลัพธ์การศึกษามีอยู่หลายประเด็นตามที่แสดงในรูปที่ 30 (กรอบสีแดง)



CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 30 หัวข้อผลลัพธ์การศึกษาที่ศึกษาภายในงานวิจัย

4.1 ผลการประมวลผลภาพถ่ายตั้งที่บันทึกมาจากระบบกล้องหลายหัว

ในการคำนวณข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ ก่อนที่จะประมวลผลโดยใช้จุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินทั้งหมด 14 จุด ได้มีการประเมินคุณภาพของจุดบังคับภาคพื้นดินตามแนวปฏิบัติประมวลผลควบคุมคุณภาพ 2 ขั้นตอน (QC-1 & QC-2) ตามงานวิจัยของ ธิรววัฒน์ บรรณกุลพิพัฒน์ และคณะ (2565) โดยทำการแบ่งจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มละ 7 จุด โดยกลุ่มที่ 1 เป็นกลุ่มของจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน (Ground Control Points; GCPs) และกลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มของจุดตรวจสอบ (Check Points; CPs) แล้วทำการประมวลผลข้อมูลเพื่อประเมินคุณภาพของจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินผ่านการพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ย (RMSE) ในระยะตะวันออก (Easting), ระยะเหนือ (North), และความสูงออร์โทเมตริก (Orthometric Height) โดยมีการกำหนดค่าความถูกต้อง (Accuracy) ที่ได้จากการรังวัดภาคสนามด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ทางราบ 0.02 เมตร ทางตั้ง 0.05 เมตร ทำการคำนวณร่วมกับกับจุดโยงยึดภาพที่ได้จากการจับคู่ภาพแบบอัตโนมัติ พบว่าค่า RMSE ของทั้งสองกลุ่มมีความแตกต่างในระยะตะวันออก (Easting) เท่ากับ 0.030 เมตร ระยะเหนือ (North) เท่ากับ 0.035 เมตร ทางความสูง (Height) เท่ากับ 0.020 เมตร ดังนั้นจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินทั้ง 14 จุดนี้เป็นข้อมูลที่มีคุณภาพและมีความแตกต่างกันไม่มาก

จากนั้นทำการคำนวณข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ โดยใช้จุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินทั้งหมด 14 จุดในการประมวลผล โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ย ดังต่อไปนี้

- RMSE Easting = 0.032 เมตร
- RMSE Northing = 0.033 เมตร
- RMSE Height = 0.053 เมตร

ตารางที่ 9 ความคลาดเคลื่อนในแกนพิกัด Easting, Northing และ Height ของจุดบังคับถ่ายภาพถ่ายภาคพื้นดิน (GCPs) และจุดตรวจสอบ (CPs) ในการประมวลผลจากบล็อกของภาพถ่ายดังกล่าว

ชื่อจุดควบคุมภาคพื้นดิน	ค่าความถูกต้อง XY/Z [ม.]	ค่าความคลาดเคลื่อน				ใช้ตรวจสอบ/ ทำเครื่องหมาย
		ทางแกน X [ม.]	ทางแกน Y [ม.]	ทางแกน Z [ม.]	การฉายจุดภาพและจุดรังวัด [จุดภาพ]	
GCP02 (3D)	0.020/ 0.050	0.047	-0.021	-0.045	0.344	10/10
GCP10 (3D)	0.020/ 0.050	0.047	0.024	0.067	0.213	4/4
GCP12 (3D)	0.020/ 0.050	-0.005	0.036	-0.066	0.327	10/10
GCP13 (3D)	0.020/ 0.050	-0.047	-0.002	0.071	0.355	9/9
GCP17 (3D)	0.020/ 0.050	-0.003	0.013	-0.027	0.297	8/8
GCP23 (3D)	0.020/ 0.050	-0.005	-0.047	-0.044	0.329	10/10
GCP26 (3D)	0.020/ 0.050	-0.031	-0.002	0.054	0.459	8/8
ค่าเฉลี่ย [ม.]		0.000	0.000	0.001		
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน [ม.]		0.033	0.026	0.055		
RMSE [ม.]		0.033	0.026	0.055		
ชื่อจุดตรวจสอบ	ค่าความถูกต้อง XY/Z [ม.]	ค่าความคลาดเคลื่อน				ใช้ตรวจสอบ/ ทำเครื่องหมาย
		ทางแกน X [ม.]	ทางแกน Y [ม.]	ทางแกน Z [ม.]	การฉายจุดภาพและจุดรังวัด [จุดภาพ]	
GCP05		0.115	0.079	0.164	0.305	3/3
GCP11		-0.025	0.009	-0.023	0.408	8/8
GCP14		-0.020	0.055	-0.012	0.370	10/10
GCP16		-0.045	0.073	0.081	0.219	10/10
GCP20		-0.069	-0.061	-0.048	0.293	10/10
GCP27		-0.080	-0.067	0.048	0.325	10/10
GCP22		0.005	-0.054	0.031	0.332	8/8
ค่าเฉลี่ย [ม.]		-0.017	0.005	0.035		
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน [ม.]		0.060	0.060	0.067		
RMSE [ม.]		0.063	0.061	0.075		

ตารางที่ 10 ความคลาดเคลื่อนในแกนพิกัด Easting, Northing และ Height ของจุดบังคับภาพถ่ายภาพพื้นดิน (GCPs) ในการประมวลผลจากบล็อกของภาพถ่ายดังกล่าว

ชื่อจุดควบคุมภาคพื้นดิน	ค่าความถูกต้อง XY/Z [ม.]	ค่าความคลาดเคลื่อน				ใช้ตรวจสอบ/ทำเครื่องหมาย
		ทางแกน X [ม.]	ทางแกน Y [ม.]	ทางแกน Z [ม.]	การฉายจุดภาพและจุดจริงวัด [จุดภาพ]	
GCP02 (3D)	0.020/ 0.050	0.054	-0.048	-0.045	0.340	10/10
GCP05 (3D)	0.020/ 0.050	0.044	0.033	0.122	0.344	3/3
GCP10 (3D)	0.020/ 0.050	0.050	0.037	0.045	0.199	4/4
GCP11 (3D)	0.020/ 0.050	-0.006	0.007	-0.033	0.398	8/8
GCP12 (3D)	0.020/ 0.050	0.008	0.038	-0.085	0.318	10/10
GCP13 (3D)	0.020/ 0.050	-0.050	-0.001	0.053	0.365	9/9
GCP14 (3D)	0.020/ 0.050	0.001	0.039	-0.022	0.383	10/10
GCP16 (3D)	0.020/ 0.050	-0.017	0.031	0.020	0.234	10/10
GCP17 (3D)	0.020/ 0.050	0.004	0.014	-0.020	0.302	8/8
GCP20 (3D)	0.020/ 0.050	-0.043	-0.037	-0.036	0.315	10/10
GCP23 (3D)	0.020/ 0.050	0.004	-0.029	-0.068	0.327	10/10
GCP26 (3D)	0.020/ 0.050	-0.010	0.002	0.036	0.461	8/8
GCP27 (3D)	0.020/ 0.050	-0.050	-0.049	0.038	0.332	10/10
GCP22 (3D)	0.020/ 0.050	0.014	-0.036	0.007	0.323	8/8
ค่าเฉลี่ย [ม.]		0.000	0.000	0.001		
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน [ม.]		0.032	0.033	0.053		
RMSE [ม.]		0.032	0.033	0.053		

4.2 ผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกล้องหลายหัว

เนื่องจากโปรแกรม PIX4Dmapper มีความสามารถในการรองรับระบบกล้องหลายหัวโดยผู้ใช้งานสามารถออกแบบแบบจำลองของกล้องด้วยการกำหนดตำแหน่งกล้องหลักอ้างอิง (Reference camera) และกล้องรอง (Secondary cameras) นอกจากนั้นยังสามารถกำหนดพารามิเตอร์การวางตัวของกล้องรองที่อ้างอิงสัมพันธ์กับกล้องหลักดังที่กล่าวมาแล้วได้ ซึ่งจะเป็นค่าพารามิเตอร์ในการวัดสอบกล้องในการหาค่าพารามิเตอร์การจัดวางภายนอกที่สัมพันธ์กันระหว่างกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรองบนอุปกรณ์จับยึดกล้อง ดังนั้นจึงได้ทำการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายจากระบบกล้องหลายหัวร่วมกับข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายภาพพื้นดิน เรียกแบบจำลองนี้ว่า “แบบจำลองกล้องแบบที่ 1” หลังจากโปรแกรมประมวลผลจนเสร็จ ผลคำตอบของการคำนวณปรับแก้พารามิเตอร์การเลื่อนแกนมีค่ากระจายไม่เป็นระบบ ขนาดของการเลื่อนไม่สอดคล้องกับกายภาพของกล้องบางค่า

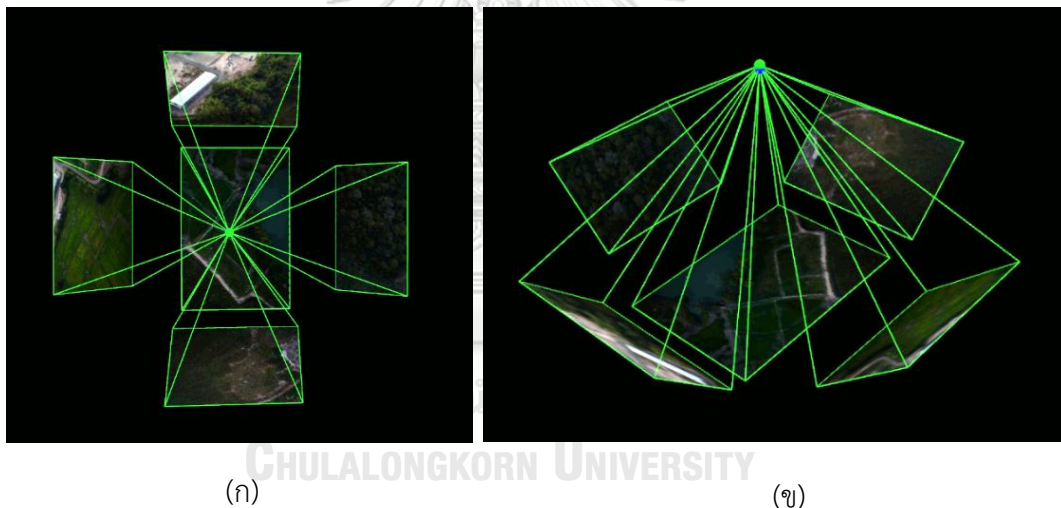
ใหญ่มากถึง 14.565 เมตร ส่วนพารามิเตอร์การหมุนดูเหมือนจะได้ผลดี กล่าวคือมีค่าอยู่ประมาณมุม +/-45 องศา ซึ่งสอดคล้องใกล้เคียงกับลักษณะการจับยึดของมุมการหมุนสัมพัทธ์ระหว่างกล้องรองไปยังกล้องหลักอ้างอิง โดยตารางที่ 11 แสดงค่าพารามิเตอร์สำหรับเรขาคณิตการยึดจับกล้อง 3DM ที่คำนวณปรับแก้ได้ในขั้นต้น

ตารางที่ 11 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

ดังนั้นจึงทำการกำหนดแบบจำลองกล้องหลายหัวใหม่ให้สอดคล้องกับแบบจำลองในขั้นต้น โดยมีสมมติฐานว่าค่าพารามิเตอร์ของการเลื่อนแกนอาจมีความไวต่อค่าสังเกตในชายสามเหลี่ยมที่กำหนดจากกล้องถ่ายภาพเฉียงทั้ง 4 กล้องที่บันทึกภาพเฉียงจำนวนมากถึง 2,396 ภาพ ซึ่งช่วยเพิ่มจุดค่าสังเกตภายในระบบประมาณ 3,084,688 ค่าสังเกต เมื่อเทียบกับจำนวนค่าสังเกตของการประมวลผลด้วยภาพถ่ายตั้งเท่านั้น ผู้วิจัยจึงกำหนดแบบจำลองการยึดจับกล้องหลายหัวเป็นการกำหนดให้ค่าพารามิเตอร์การเลื่อนแกนเป็นค่าบังคับให้ใกล้เคียงตามค่าคงที่ (constraint) และให้ค่าเข้าใกล้นี้มีค่าตามลักษณะทางกายภาพความเป็นจริงของระบบกล้อง จากการรังวัดตรวจพบว่าค่าการเลื่อนแกนทางแกน X และแกน Y (T_X, T_Y) มีค่า +/-30 มิลลิเมตร การเลื่อนแกนทางแกน Z (T_Z) มีค่า +20 มิลลิเมตร พร้อมกับกำหนดน้ำหนักในรูปแบบความถูกต้องเป็น 5 มิลลิเมตร ในส่วนค่าพารามิเตอร์การหมุนแกนไม่สามารถตรวจวัดค่าที่แน่ชัดได้ แต่สามารถวัดค่าประมาณแล้วนำมาใช้เป็นค่าเริ่มต้นเป็น +/- 45 องศา พร้อมกำหนดน้ำหนักในรูปแบบความถูกต้องเป็น 5 องศา (แบบจำลองกล้องแบบที่

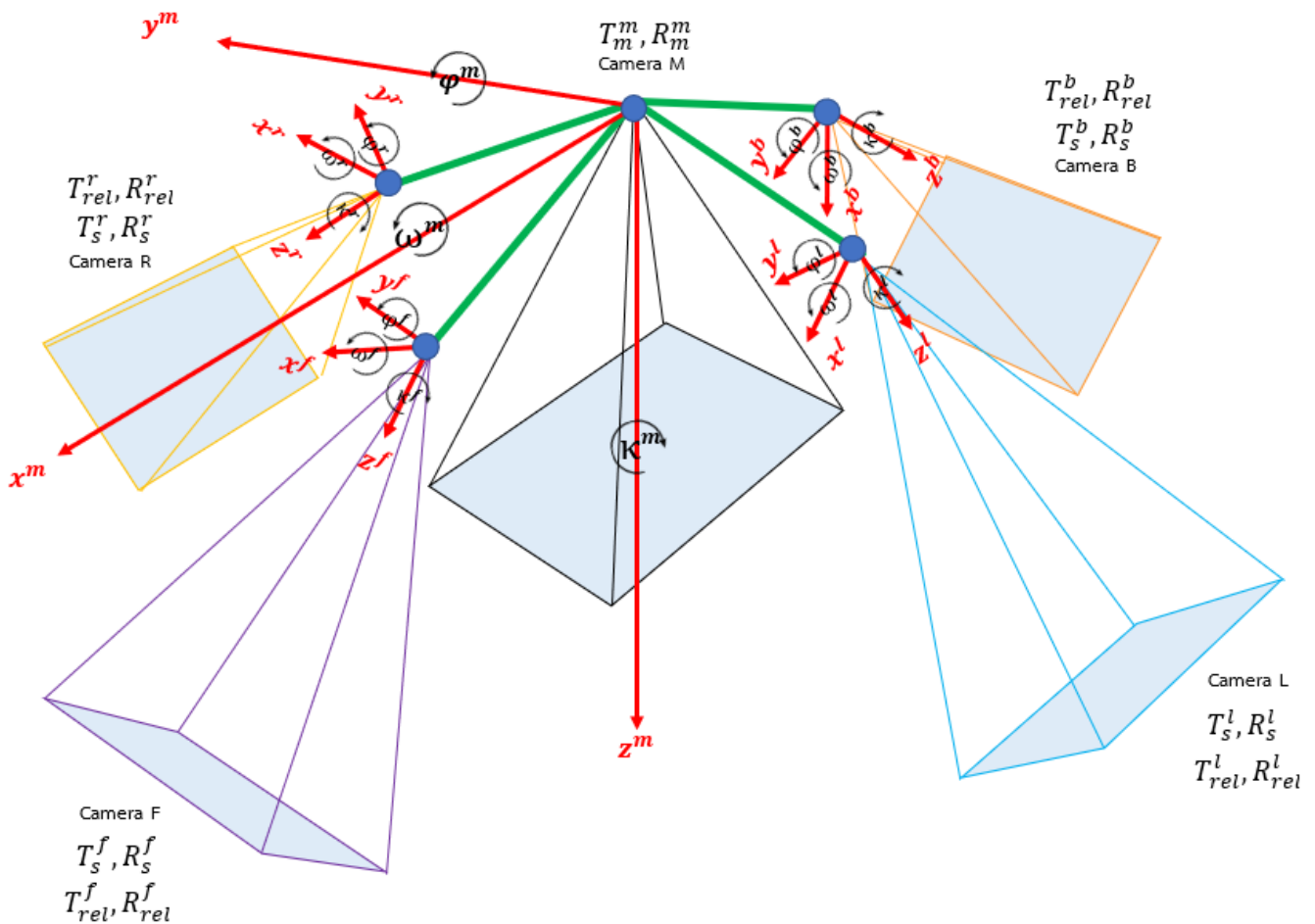
2) ทั้งนี้เพื่อให้ระบบซอฟต์แวร์ถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศประมวลผลปรับปรุงหาค่าพารามิเตอร์เป็นผลคำตอบ (solution) ด้วยวิธีการเชิงเลข (Numerical method) ซึ่งหลังจากประมวลผลจนเสร็จ พบว่าค่าพารามิเตอร์การจัดวางภายนอกที่สัมพันธ์กันระหว่างกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรองบนอุปกรณ์จับยึดกล้องสำหรับค่าการเลื่อนแกนสัมพันธ์ (T_x, T_y, T_z) ของกล้องทั้ง 4 ตัว ได้ค่าเป็นค่าบังคับที่เข้าใกล้ตามที่กำหนด ส่วนค่าพารามิเตอร์การหมุนแกนสัมพันธ์ (R_x, R_y, R_z) ที่กำหนดให้มีความอิสระ (free) เมื่อคำนวณปรับแก้แล้วได้คำตอบคำตอบของการหมุนแกนเป็นค่าใกล้เคียงค่าปกติของกล้องนี้คือ +/-0 องศา +/-45 องศา +/-90 องศา และ +/-180 องศา โดยเบี่ยงเบนไม่เกิน 1.47 องศา ดังปรากฏรายละเอียดในตารางที่ 12 ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดที่เกิดจากการรังวัดและประมวลผลภายในพื้นที่สนามทดสอบจีเอ็นเอสเอสและยูเอวีสำหรับงานแผนที่



รูปที่ 31 ตำแหน่งและการวางตัวของภาพแต่ละกล้องจากแบบจำลองของกล้องที่ออกแบบและคำนวณได้ (ก) มุมมองด้านบน (Top view) และ (ข) มุมมองด้านข้าง (Side view)

ตารางที่ 12 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



รูปที่ 32 ความสัมพันธ์ระหว่างกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรองบนอุปกรณ์จับยึดกล้อง

จากรูปที่ 32 สามารถนำมาเขียนให้อยู่ในรูปของสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ โดยกำหนดให้กล้องถ่ายตังหรือกล้องกลาง (Camera M) เป็นกล้องหลักอ้างอิง (Reference camera) มีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการเลื่อนแกน คือ T_m^m และมีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการหมุนแกน คือ R_m^m ในส่วนของกล้องที่เหลืออีก 4 กล้องจะถูกกำหนดให้เป็นกล้องรอง (Secondary camera) ซึ่งกล้องแต่ละกล้องจะมีสัญลักษณ์เมทริกซ์ที่ใช้ดังต่อไปนี้

- กล้องหน้า (Camera F) มีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการเลื่อนแกน คือ T_s^f และมีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการหมุนแกน คือ R_s^f

- กล้องหลัง (Camera B) มีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการเลื่อนแกน คือ T_S^b และมีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการหมุนแกน คือ R_S^b
- กล้องซ้าย (Camera L) มีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการเลื่อนแกน คือ T_S^l และมีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการหมุนแกน คือ R_S^l
- กล้องขวา (Camera R) มีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการเลื่อนแกน คือ T_S^r และมีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการหมุนแกน คือ R_S^r

สำหรับกล้องรองแต่ละตัวจะมีพารามิเตอร์การเลื่อนแกนและการหมุนแกนที่มีความสัมพันธ์กับกล้องหลักอ้างอิง โดยความสัมพันธ์ในเชิงการเลื่อนแกนของตำแหน่ง (Relative Translation) มีสัญลักษณ์คือ T_{rel} และความสัมพันธ์ในเชิงการหมุนแกน (Relative Rotation) มีสัญลักษณ์คือ R_{rel} ดังนั้นกล้องแต่ละกล้องจะมีสัญลักษณ์เมทริกซ์ที่แสดงความสัมพันธ์กับกล้องหลักอ้างอิงดังต่อไปนี้

- กล้องหน้า (Camera F) มีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการเลื่อนแกนสัมพันธ์ คือ T_{rel}^f และมีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการหมุนแกนสัมพันธ์ คือ R_{rel}^f
- กล้องหลัง (Camera B) มีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการเลื่อนแกนสัมพันธ์ คือ T_{rel}^b และมีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการหมุนแกนสัมพันธ์ คือ R_{rel}^b
- กล้องซ้าย (Camera L) มีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการเลื่อนแกนสัมพันธ์ คือ T_{rel}^l และมีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการหมุนแกนสัมพันธ์ คือ R_{rel}^l
- กล้องขวา (Camera R) มีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการเลื่อนแกนสัมพันธ์ คือ T_{rel}^r และมีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการหมุนแกนสัมพันธ์ คือ R_{rel}^r

จากสมการ (9) และ (10) ในบทที่ 2

$$T_S = T_m + R_m T_{rel} \quad (9)$$

$$R_S = R_m R_{rel} \quad (10)$$

สามารถนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรองได้ดังต่อไปนี้ โดยจะแสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างกล้องกลางและกล้องซ้าย สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างกล้องกลางและกล้องอื่น ๆ อยู่ในภาคผนวก ก.

กล้องหลักอ้างอิง (กล้องกลาง) มีเมทริกซ์การเลื่อนแกนและเมทริกซ์การหมุนแกนตามสมการที่ 19 และสมการที่ 20 ตามลำดับ

$$T_m^m = [(T_x, T_y, T_z)]_m^m \quad (19)$$

$$R_m^m = [R_X(\omega)R_Y(\varphi)R_Z(\kappa)]_m^m \quad (20)$$

กล้องรอง (กล้องซ้าย) มีเมทริกซ์การเลื่อนแกนและเมทริกซ์การหมุนแกนตามสมการที่ 21 และสมการที่ 22 ตามลำดับ

$$\begin{aligned} T_S^l &= T_m^m + R_m^m T_{rel}^l \\ &= [(T_x, T_y, T_z)]_m^m + [R_X(\omega)R_Y(\varphi)R_Z(\kappa)]_m^m [(T_x, T_y, T_z)]_m^l \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} R_S^l &= R_m^m R_{rel}^l \\ &= [R_X(\omega)R_Y(\varphi)R_Z(\kappa)]_m^m [R_X(\omega)R_Y(\varphi)R_Z(\kappa)]_m^l \end{aligned} \quad (22)$$

นอกจากค่าพารามิเตอร์การเลื่อนแกนและการหมุนแกนที่สัมพันธ์ของระบบกล้องหลายหัวที่ได้จากโปรแกรมประมวลผลข้อมูลแล้ว โปรแกรม PIX4Dmapper ยังให้ข้อมูลเกี่ยวกับแบบจำลองความผิดเพี้ยนของเลนส์ที่ประมวลผลได้ในแต่ละกล้องบนระบบกล้องหลายหัว ดังตารางที่ 13 ถึง 17 โดยที่ R1, R2 และ R3 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดเพี้ยนในแนวรัศมี (Radial lens distortion) และ T1 และ T2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดเพี้ยนในแนวตั้งฉากกับรัศมี (Tangential lens distortion) ตารางที่ 13 ค่าพารามิเตอร์การจัดวางภายในที่โปรแกรมประมวลผลได้ของกล้องกลาง (Camera M)

	ความยาวโฟกัส	จุดมูขยสำคัญแกน X	จุดมูขยสำคัญแกน Y	R1	R2	R3	T1	T2
ค่าเริ่มต้น	6428.570 [pixel]	3000.000 [pixel]	2000.000 [pixel]	-0.048	0.037	-0.011	0.000	-0.001
	25.200 [mm]	11.760 [mm]	7.840 [mm]					
ค่าที่เหมาะสม	6452.167 [pixel]	3047.648 [pixel]	1994.950 [pixel]	-0.037	0.059	-0.012	0.000	0.000
	25.292 [mm]	11.947 [mm]	7.808 [mm]					
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.420 [pixel]	0.210 [pixel]	0.252 [pixel]	0.000	0.002	0.004	0.000	0.000
	0.002 [mm]	0.001 [mm]	0.001 [mm]					

ตารางที่ 14 ค่าพารามิเตอร์การจัดวางภายในที่โปรแกรมประมวลผลได้ของกล้องหลัง (Camera B)

	ความยาวโฟกัส	จุดมูขยสำคัญแกน X	จุดมูขยสำคัญแกน Y	R1	R2	R3	T1	T2
ค่าเริ่มต้น	9107.140 [pixel]	3000.000 [pixel]	2000.000 [pixel]	-0.048	0.037	-0.011	0.000	-0.001
	35.700 [mm]	11.760 [mm]	7.840 [mm]					
ค่าที่เหมาะสม	9077.591 [pixel]	3064.145 [pixel]	1998.092 [pixel]	0.000	-0.128	0.001	0.001	0.001
	35.584 [mm]	12.011 [mm]	7.833 [mm]					
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.635 [pixel]	2.980 [pixel]	2.012 [pixel]	0.003	0.048	0.000	0.000	0.000
	0.002 [mm]	0.012 [mm]	0.008 [mm]					

ตารางที่ 15 ค่าพารามิเตอร์การจัดวางภายในที่โปรแกรมประมวลผลได้ของกล้องหน้า (Camera F)

	ความยาวโฟกัส	จุดมูขยสำคัญแกน X	จุดมูขยสำคัญแกน Y	R1	R2	R3	T1	T2
ค่าเริ่มต้น	9107.140 [pixel] 35.700 [mm]	3000.000 [pixel] 11.760 [mm]	2000.000 [pixel] 7.840 [mm]	-0.048	0.037	-0.011	0.000	-0.001
ค่าที่ เหมาะสม	9011.304 [pixel] 35.324 [mm]	3016.442 [pixel] 11.824 [mm]	1807.709 [pixel] 7.086 [mm]	-0.006	-0.037	0.059	-0.004	0.000
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.677 [pixel] 0.003 [mm]	0.255 [pixel] 0.001 [mm]	0.413 [pixel] 0.002 [mm]	0.003	0.043	0.187	0.000	0.000

ตารางที่ 16 ค่าพารามิเตอร์การจัดวางภายในที่โปรแกรมประมวลผลได้ของกล้องซ้าย (Camera L)

	ความยาวโฟกัส	จุดมูขยสำคัญแกน X	จุดมูขยสำคัญแกน Y	R1	R2	R3	T1	T2
ค่าเริ่มต้น	9107.140 [pixel] 35.700 [mm]	3000.000 [pixel] 11.760 [mm]	2000.000 [pixel] 7.840 [mm]	-0.048	0.037	-0.011	0.000	-0.001
ค่าที่ เหมาะสม	9020.245 [pixel] 35.359 [mm]	2928.629 [pixel] 11.480 [mm]	2133.709 [pixel] 8.364 [mm]	-0.009	-0.201	1.277	0.002	-0.002
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.720 [pixel] 0.003 [mm]	0.209 [pixel] 0.001 [mm]	0.395 [pixel] 0.002 [mm]	0.003	0.050	0.221	0.000	0.000

ตารางที่ 17 ค่าพารามิเตอร์การจัดวางภายในที่โปรแกรมประมวลผลได้ของกล้องขวา (Camera R)

	ความยาวโฟกัส	จุดมูขยสำคัญแกน X	จุดมูขยสำคัญแกน Y	R1	R2	R3	T1	T2
ค่าเริ่มต้น	9107.140 [pixel] 35.700 [mm]	3000.000 [pixel] 11.760 [mm]	2000.000 [pixel] 7.840 [mm]	-0.048	0.037	-0.011	0.000	-0.001
ค่าที่ เหมาะสม	9160.422 [pixel] 35.909 [mm]	2959.593 [pixel] 11.602 [mm]	1951.780 [pixel] 7.651 [mm]	0.074	-1.057	4.513	0.001	-0.002
ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	0.989 [pixel] 0.004 [mm]	0.308 [pixel] 0.001 [mm]	0.484 [pixel] 0.002 [mm]	0.005	0.085	0.394	0.000	0.000

4.3 ผลการประมวลผลภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงที่บันทึกมาจากระบบกล้องหลายหัว

4.3.1 ผลการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลภาพถ่าย

ในการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายผ่านโปรแกรมทางด้านโฟโตแกรมเมตรี PIX4Dmapper มีระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผลแต่ละขั้นตอนที่แตกต่างกัน โดยในงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้คอมพิวเตอร์ที่มีหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) คือ Intel® Core™ i9-10900F 2.80GHz มีหน่วยความจำหลักที่จำเป็น (RAM) เท่ากับ 64 GB มีหน่วยประมวลผลกราฟิกส์ (GPU) คือ NVIDIA GeForce RTX 2070 SUPER หลังจากได้ประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายทั้งแบบใช้ข้อมูลภาพถ่ายตั้งเท่านั้นกับใช้ข้อมูลภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง พบว่าในแต่ละรูปแบบของการประมวลผลใช้เวลาในการประมวลผลดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 เปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายระหว่างบล็อกของภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและบล็อกของภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

การประมวลผลภายในโปรแกรม PIX4Dmapper	เวลาในการประมวลผล [ชั่วโมง : นาที : วินาที]	
	บล็อกของภาพถ่ายตั้งเท่านั้น	บล็อกของภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง
ขั้นตอนที่ 1. การประมวลผลเริ่มต้น (Initial Processing)	00:35:39	07:50:09
ขั้นตอนที่ 2. พอยต์คลาวด์และเมช (Point Cloud and Mesh)	00:58:11	01:49:17
ขั้นตอนที่ 3. แบบจำลองพื้นผิวเชิงเลข, ออร์โธโมเสก และดัชนี (DSM, Orthomosaic and Index)	05:45:06	07:12:04
รวม	07:18:56	16:51:31
จำนวนรูปภาพ	599	2995 (599 x 5)

4.3.2 ผลการคำนวณสามเหลี่ยมทางอากาศ

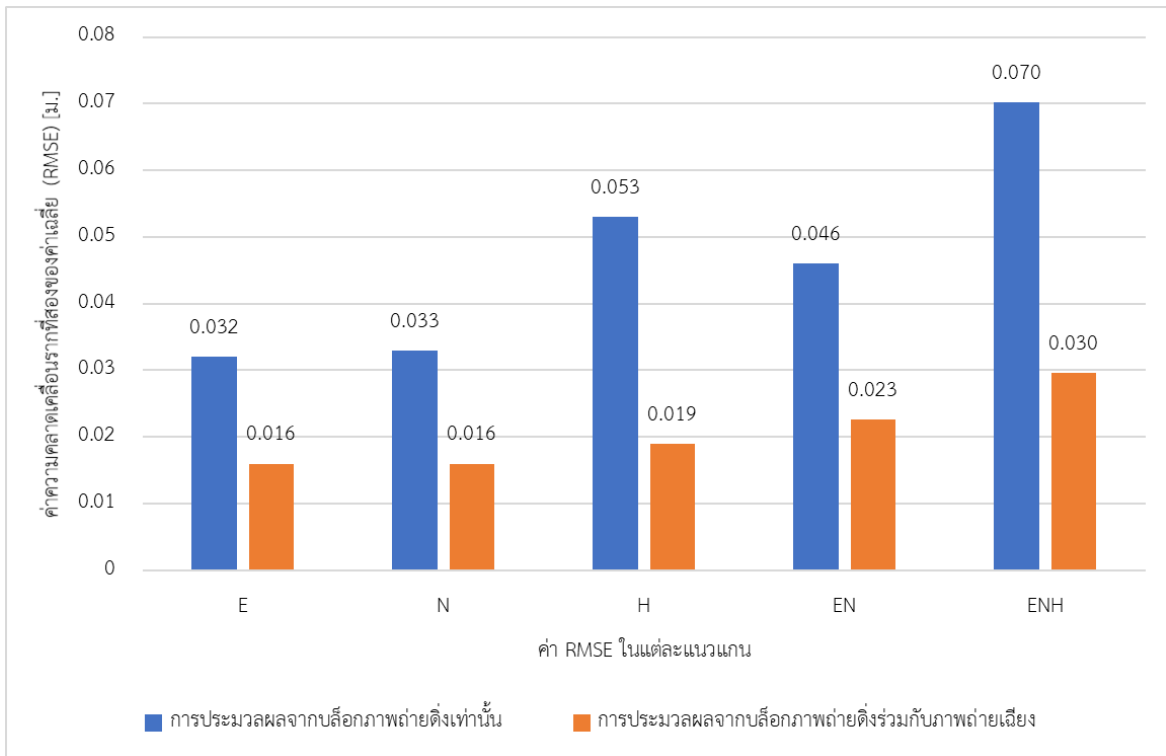
ในการคำนวณสามเหลี่ยมทางอากาศ ใช้จุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินทั้งหมด 14 จุด โดยมีการกำหนดค่าความถูกต้อง (Accuracy) ที่ได้จากการรังวัดภาคสนามด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ทางราบ 0.02 เมตร ทางตั้ง 0.05 เมตร ทำการคำนวณร่วมกับกับจุดโยงยึดภาพได้จากการจับคู่ภาพแบบอัตโนมัติ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนราก

ที่สองของค่าเฉลี่ย (RMSE) ในระยะตะวันออก (Easting), ระยะเหนือ (North), และความสูง (Height) ของจุดบังคับภาพถ่าย ดังต่อไปนี้

- RMSE Easting = 0.016 เมตร
- RMSE Northing = 0.016 เมตร
- RMSE Height = 0.019 เมตร

ตารางที่ 19 ความคลาดเคลื่อนในแกนพิกัด Easting, Northing และ Height ของจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดิน (GCPs) ในการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

ชื่อจุดควบคุมภาคพื้นดิน	ค่าความถูกต้อง XY/Z [ม.]	ค่าความคลาดเคลื่อน				ใช้ตรวจสอบ/ทำเครื่องหมาย
		ทางแกน X [ม.]	ทางแกน Y [ม.]	ทางแกน Z [ม.]	การฉายจุดภาพและจุดรังวัด [จุดภาพ]	
GCP02 (3D)	0.020/ 0.050	0.017	-0.018	-0.003	1.334	19 / 19
GCP05 (3D)	0.020/ 0.050	0.015	-0.011	0.002	1.438	15 / 15
GCP10 (3D)	0.020/ 0.050	0.037	-0.016	-0.008	1.263	18 / 18
GCP11 (3D)	0.020/ 0.050	0.009	-0.012	-0.010	0.865	21 / 21
GCP12 (3D)	0.020/ 0.050	0.008	-0.017	0.008	1.006	24 / 24
GCP13 (3D)	0.020/ 0.050	0.008	-0.022	-0.015	1.053	22 / 23
GCP14 (3D)	0.020/ 0.050	0.010	-0.006	-0.004	1.234	26 / 26
GCP16 (3D)	0.020/ 0.050	0.018	-0.010	-0.009	0.883	25 / 25
GCP17 (3D)	0.020/ 0.050	0.007	0.040	-0.002	0.564	23 / 23
GCP22 (3D)	0.020/ 0.050	0.013	-0.007	-0.026	0.601	20 / 20
GCP23 (3D)	0.020/ 0.050	0.013	-0.007	-0.026	0.907	24 / 24
GCP20 (3D)	0.020/ 0.050	0.003	-0.015	-0.018	0.603	19 / 19
GCP26 (3D)	0.020/ 0.050	-0.029	0.006	-0.046	0.523	18 / 18
GCP27 (3D)	0.020/ 0.050	-0.005	-0.004	-0.029	0.776	16 / 16
ค่าเฉลี่ย [ม.]		0.009	-0.007	-0.013		
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน [ม.]		0.014	0.015	0.014		
RMSE [ม.]		0.016	0.016	0.019		



รูปที่ 33 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่า RMSE ของแต่ละแนวแกนระหว่างบล็อกภาพถ่ายนิ่งเท่านั้นและบล็อกภาพถ่ายนิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉย

4.4 ผลการประเมินประสิทธิภาพการรังวัดค่าพิกัดเพื่อทำแผนที่สามมิติ

ในการวิจัยครั้งนี้ได้มีการแบ่งกลุ่มบริเวณที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพในการรังวัดค่าพิกัดสามมิติออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 คือ บริเวณพื้นที่เปิดโล่ง (Open area) ตำแหน่งจุดสีเหลือง กลุ่มที่ 2 คือ บริเวณอาคารสิ่งปลูกสร้าง (Buildings area) ตำแหน่งจุดสีแดง และกลุ่มที่ 3 บริเวณรอยพิมพ์ฐานอาคารและป้ายเสาบอกทาง (Footprint and Mast) ตำแหน่งจุดสีเขียว โดยในแต่ละกลุ่มได้ทำการรังวัดค่าพิกัดสามมิติจากทั้งรูปแบบที่ประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและรูปแบบที่ประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง ซึ่งมีจำนวนและการกระจายตัวของตำแหน่งตามตารางที่ 20 และรูปที่ 34

ตารางที่ 20 จำนวนจุดที่รังวัดในโปรแกรมทั้ง 3 กลุ่มจากทั้งรูปแบบการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและรูปแบบการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

กลุ่ม	จำนวนจุดที่รังวัดในโปรแกรม	
	แบบประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้น	แบบประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง
1. บริเวณพื้นที่เปิดโล่ง	30	30
2. บริเวณอาคารสิ่งปลูกสร้าง	18	18
3. บริเวณรอยพิมพ์ฐานและป้ายเสาบอกทาง	3	6



รูปที่ 34 ตำแหน่งการกระจายตัวของจุดที่ใช้ในการรังวัดค่าพิกัดสามมิติเพื่อเปรียบเทียบ

4.4.1 ความคลาดเคลื่อนของการรังวัดบนบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

ในการรังวัดค่าพิกัดบริเวณต่าง ๆ บนบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงด้วยวิธีการรังวัดแบบหลายมุมมองสามารถระบุความคลาดเคลื่อนทั้ง 3 แกน ดังแสดงในตารางที่ 21 ถึง 23

ตารางที่ 21 (ก) ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการรังวัดพิกัดสามมิติบริเวณพื้นที่เปิดจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้น (ข) ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการรังวัดพิกัดสามมิติบริเวณพื้นที่เปิดจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

(ก)

ชื่อจุด	จำนวนภาพที่ หมายตำแหน่ง	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน		
		E (m.)	N (m.)	H (m.)
POI01	5	0.004	0.004	0.015
POI02	5	0.004	0.004	0.018
POI03	5	0.004	0.004	0.018
POI04	5	0.004	0.004	0.020
POI05	5	0.005	0.004	0.020
POI06	5	0.007	0.008	0.032
POI07	5	0.007	0.007	0.029
POI08	5	0.006	0.006	0.026
POI09	5	0.007	0.007	0.031
POI10	5	0.003	0.003	0.013
POI11	5	0.004	0.004	0.017
POI12	5	0.008	0.008	0.038
POI13	5	0.008	0.008	0.038
POI14	5	0.010	0.012	0.046
POI15	5	0.003	0.003	0.015
POI16	5	0.006	0.008	0.035
POI17	5	0.008	0.009	0.038
POI18	5	0.006	0.006	0.027
POI19	5	0.006	0.006	0.029
POI20	5	0.006	0.007	0.029

(ข)

ชื่อจุด	จำนวนภาพที่ หมายตำแหน่ง	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน		
		E (m.)	N (m.)	H (m.)
POI01	11	0.024	0.022	0.042
POI02	11	0.015	0.011	0.026
POI03	11	0.008	0.008	0.015
POI04	11	0.008	0.007	0.014
POI05	11	0.022	0.019	0.038
POI06	11	0.014	0.013	0.030
POI07	11	0.009	0.009	0.020
POI08	11	0.014	0.013	0.027
POI09	11	0.009	0.009	0.020
POI10	11	0.007	0.007	0.014
POI11	11	0.009	0.009	0.020
POI12	11	0.009	0.008	0.019
POI13	11	0.018	0.017	0.034
POI14	11	0.008	0.008	0.016
POI15	11	0.048	0.042	0.102
POI16	11	0.011	0.009	0.018
POI17	11	0.010	0.009	0.017
POI18	11	0.007	0.006	0.015
POI19	11	0.018	0.017	0.033
POI20	11	0.014	0.013	0.024

ชื่อจุด	จำนวนภาพที่ หมายตำแหน่ง	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน		
		E (m.)	N (m.)	H (m.)
POI21	5	0.005	0.005	0.023
POI22	5	0.007	0.008	0.035
POI23	5	0.007	0.007	0.033
POI24	5	0.017	0.018	0.076
POI25	5	0.006	0.006	0.027
POI26	5	0.007	0.007	0.032
POI27	5	0.009	0.010	0.045
POI28	5	0.007	0.007	0.032
POI29	5	0.006	0.006	0.028
POI30	5	0.008	0.007	0.036
	ค่าต่ำสุด	0.003	0.003	0.013
	ค่าสูงสุด	0.017	0.018	0.076
	ค่าเฉลี่ย	0.007	0.007	0.032

ชื่อจุด	จำนวนภาพที่ หมายตำแหน่ง	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน		
		E (m.)	N (m.)	H (m.)
POI21	11	0.047	0.047	0.090
POI22	11	0.046	0.041	0.083
POI23	11	0.066	0.060	0.138
POI24	11	0.074	0.073	0.127
POI25	11	0.044	0.049	0.117
POI26	11	0.010	0.010	0.023
POI27	11	0.029	0.028	0.059
POI28	11	0.047	0.045	0.106
POI29	11	0.014	0.014	0.034
POI30	11	0.012	0.011	0.025
	ค่าต่ำสุด	0.007	0.006	0.014
	ค่าสูงสุด	0.074	0.073	0.138
	ค่าเฉลี่ย	0.024	0.023	0.048

ตารางที่ 22 (ก) ค่าความคลาดเคลื่อนของการรังวัดพิกัดสามมิติบริเวณอาคารสิ่งปลูกสร้างจากบลิ๊ก
ภาพถ่ายตั้งเท่านั้น (ข) ค่าความคลาดเคลื่อนของการรังวัดพิกัดสามมิติบริเวณพื้นที่เปิดจากบลิ๊ก
ภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

(ก)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ข)

ชื่อจุด	จำนวนภาพที่ หมายตำแหน่ง	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน		
		E (m.)	N (m.)	H (m.)
ROL01	5	0.005	0.005	0.022
ROL02	5	0.004	0.004	0.016
ROL03	5	0.003	0.003	0.013
ROL04	5	0.010	0.010	0.045
ROL05	5	0.004	0.004	0.017
ROL06	5	0.011	0.010	0.040
ROL07	5	0.005	0.005	0.024
ROL08	5	0.006	0.006	0.027
ROL09	5	0.004	0.004	0.018
ROL10	5	0.003	0.003	0.014

ชื่อจุด	จำนวนภาพที่ หมายตำแหน่ง	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน		
		E (m.)	N (m.)	H (m.)
ROL01	11	0.008	0.008	0.015
ROL02	11	0.005	0.004	0.008
ROL03	11	0.009	0.010	0.018
ROL04	11	0.040	0.034	0.075
ROL05	11	0.025	0.026	0.050
ROL06	11	0.042	0.041	0.072
ROL07	11	0.014	0.013	0.023
ROL08	11	0.013	0.014	0.026
ROL09	11	0.019	0.018	0.033
ROL10	11	0.015	0.014	0.031

ชื่อจุด	จำนวนภาพที่ หมายตำแหน่ง	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน		
		E (m.)	N (m.)	H (m.)
ROL11	5	0.005	0.005	0.026
ROL12	5	0.005	0.005	0.020
ROL13	5	0.008	0.008	0.034
ROL14	5	0.006	0.006	0.031
ROL15	5	0.003	0.003	0.019
ROL16	5	0.011	0.011	0.052
ROL17	5	0.008	0.006	0.030
ROL18	5	0.005	0.005	0.024
	ค่าต่ำสุด	0.003	0.003	0.013
	ค่าสูงสุด	0.011	0.018	0.076
	ค่าเฉลี่ย	0.006	0.007	0.030

ชื่อจุด	จำนวนภาพที่ หมายตำแหน่ง	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน		
		E (m.)	N (m.)	H (m.)
ROL11	11	0.005	0.005	0.009
ROL12	11	0.011	0.010	0.020
ROL13	11	0.035	0.033	0.061
ROL14	11	0.036	0.035	0.070
ROL15	11	0.036	0.033	0.067
ROL16	11	0.031	0.032	0.063
ROL17	11	0.054	0.050	0.092
ROL18	11	0.035	0.035	0.066
	ค่าต่ำสุด	0.005	0.004	0.008
	ค่าสูงสุด	0.054	0.073	0.138
	ค่าเฉลี่ย	0.025	0.026	0.051

ตารางที่ 23 (ก) ค่าความคลาดเคลื่อนของการรังวัดพิกัดสามมิติบริเวณรอยพิมพ์ฐานและป้ายบนถนน จากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้น (ข) ค่าความคลาดเคลื่อนของการรังวัดพิกัดสามมิติบริเวณพื้นที่เปิด จากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

(ก)

ชื่อจุด	จำนวนภาพที่ หมายตำแหน่ง	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน		
		E (m.)	N (m.)	H (m.)
SIG01	5	0.008	0.007	0.025
FOP01	4	0.020	0.018	0.063
FOP02	4	0.005	0.004	0.017

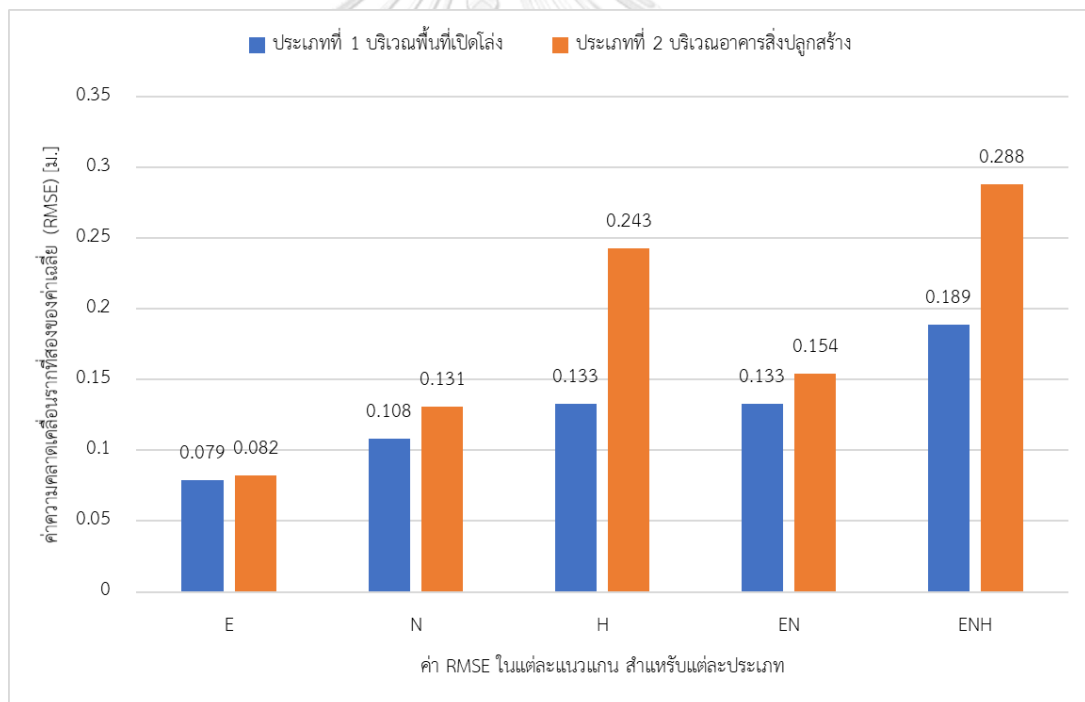
(ข)

ชื่อจุด	จำนวนภาพที่ หมายตำแหน่ง	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน		
		E (m.)	N (m.)	H (m.)
SIG01	11	0.066	0.057	0.125
FOP01	11	0.104	0.074	0.179
FOP02	11	0.022	0.021	0.045
FOP03	8	0.065	0.105	0.117
FOP04	8	0.064	0.078	0.122
FOP05	6	0.029	0.036	0.074

4.4.2 การเปรียบเทียบผลการรังวัดที่วัดมาด้วยวิธีการหาค่าพิกัดสามมิติระหว่างบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

ผลการเปรียบเทียบค่าพิกัดบริเวณพื้นที่เปิดโล่งที่รังวัดมาจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง จำนวน 30 จุด พบว่าค่า RMSE ทางราบ เท่ากับ 0.133 เมตร และค่า RMSE ทางตั้ง เท่ากับ 0.133 เมตร แสดงวิธีการคำนวณในตารางที่ 24 และตารางที่ 25 ตามลำดับ

ผลการเปรียบเทียบค่าพิกัดบริเวณอาคารสิ่งปลูกสร้างที่รังวัดมาจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง จำนวน 18 จุด พบว่าค่า RMSE ทางราบ เท่ากับ 0.154 เมตร และค่า RMSE ทางตั้ง เท่ากับ 0.243 เมตร แสดงวิธีการคำนวณในตารางที่ 26 และตารางที่ 27 ตามลำดับ



รูปที่ 35 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่า RMSE ในแต่ละประเภทบริเวณด้วยวิธีการหาค่าพิกัดสามมิติระหว่างบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

ตารางที่ 25 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยของค่าพิกัดทางตั้งบริเวณพื้นที่เปิดที่ได้มาจากวิธีการหาค่าพิกัดสามมิติระหว่างระหว่างบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่ากันและบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

Point label	Measured H on Nadir Camera	Measured H on Multi-head Camera	ΔH	ΔH^2
POI01	10.978	10.834	0.144	0.021
POI02	9.695	9.742	-0.047	0.002
POI03	7.207	7.124	0.083	0.007
POI04	5.999	5.993	0.006	0.000
POI05	5.246	5.110	0.136	0.018
POI06	4.496	4.476	0.020	0.000
POI07	4.203	4.318	-0.115	0.013
POI08	3.954	4.024	-0.070	0.005
POI09	3.416	3.573	-0.157	0.025
POI10	2.809	2.910	-0.101	0.010
POI11	2.291	2.292	-0.001	0.000
POI12	1.630	1.763	-0.133	0.018
POI13	2.256	2.239	0.017	0.000
POI14	1.873	2.003	-0.130	0.017
POI15	1.320	1.149	0.171	0.029
POI16	1.818	1.978	-0.160	0.026
POI17	1.625	1.727	-0.102	0.010
POI18	1.667	1.623	0.044	0.002
POI19	1.775	1.804	-0.029	0.001
POI20	1.515	1.590	-0.075	0.006
POI21	1.785	1.763	0.022	0.000
POI22	1.820	1.882	-0.062	0.004
POI23	1.054	1.296	-0.242	0.059
POI24	1.079	0.967	0.112	0.013
POI25	0.320	0.139	0.181	0.033
POI26	0.114	0.301	-0.187	0.035
POI27	0.521	0.802	-0.281	0.079
POI28	0.397	0.181	0.216	0.047
POI29	0.430	0.598	-0.168	0.028
POI30	0.170	0.326	-0.156	0.024
			Sum	0.532
			Average	0.018
			RMSE H (m.)	0.133

ตารางที่ 26 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยของค่าพิกัดทางราบบริเวณพื้นที่อาคารสิ่งปลูกสร้างที่ได้มาจากวิธีการหาค่าพิกัดสามมิติระหว่างบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่ากันและบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

Point label	Measured E on Nadir Camera	Measured E on Multi-head Camera	ΔE	ΔE^2	Measured N on Nadir Camera	Measured N on Multi-head Camera	ΔN	ΔN^2	$\Delta E^2 + \Delta N^2$
ROL01	717685.540	717685.461	0.079	0.006	1606179.390	1606179.493	-0.103	0.011	0.017
ROL02	717595.082	717595.007	0.075	0.006	1606161.120	1606161.227	-0.107	0.011	0.017
ROL03	717546.463	717546.399	0.064	0.004	1606250.930	1606251.001	-0.071	0.005	0.009
ROL04	717623.940	717623.949	-0.009	0.000	1606292.821	1606292.970	-0.149	0.022	0.022
ROL05	717636.758	717636.715	0.043	0.002	1606269.093	1606269.216	-0.123	0.015	0.017
ROL06	717559.375	717559.259	0.116	0.013	1606227.179	1606227.351	-0.172	0.030	0.043
ROL07	717460.652	717460.595	0.057	0.003	1606339.604	1606339.743	-0.139	0.019	0.023
ROL08	717565.620	717565.536	0.084	0.007	1606396.507	1606396.639	-0.132	0.017	0.024
ROL09	717577.162	717577.059	0.103	0.011	1606375.216	1606375.364	-0.148	0.022	0.033
ROL10	717472.241	717472.165	0.076	0.006	1606318.284	1606318.418	-0.134	0.018	0.024
ROL11	717440.555	717440.523	0.032	0.001	1606451.919	1606452.023	-0.104	0.011	0.012
ROL12	717525.576	717525.494	0.082	0.007	1606470.503	1606470.604	-0.101	0.010	0.017
ROL13	717206.827	717206.932	-0.105	0.011	1605979.778	1605979.850	-0.072	0.005	0.016
ROL14	717249.234	717249.251	-0.017	0.000	1605959.038	1605959.137	-0.099	0.010	0.010
ROL15	717221.012	717221.138	-0.126	0.016	1605929.465	1605929.691	-0.226	0.051	0.067
ROL16	717256.753	717256.813	-0.060	0.004	1605900.921	1605901.146	-0.225	0.051	0.054
ROL17	717202.810	717202.676	0.134	0.018	1606341.769	1606341.788	-0.019	0.000	0.018
ROL18	717220.547	717220.470	0.077	0.006	1606334.796	1606334.810	-0.014	0.000	0.006
								Sum	0.429
								Average	0.024
								RMSE EN (m.)	0.154

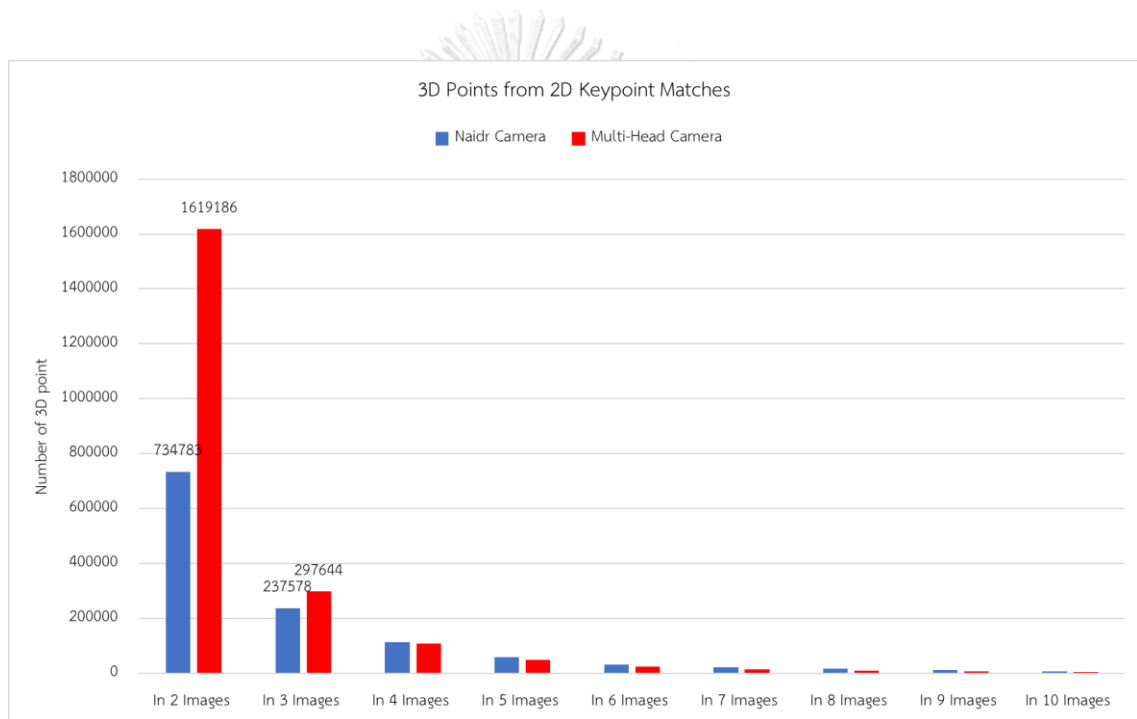
ตารางที่ 27 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยของค่าพิกัดทางตั้งบริเวณพื้นที่อาคารสิ่งปลูกสร้างที่ได้มาจากวิธีการหาค่าพิกัดสามมิติระหว่างบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่ากันและบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

Point label	Measured H on Nadir Camera	Measured H on Multi-head Camera	ΔH	ΔH^2
ROL01	11.272	11.373	-0.101	0.010
ROL02	11.403	11.424	-0.021	0.000
ROL03	15.405	15.496	-0.091	0.008
ROL04	15.434	15.373	0.061	0.004
ROL05	15.347	15.340	0.007	0.000
ROL06	15.376	15.580	-0.204	0.042
ROL07	10.796	10.796	0.000	0.000
ROL08	10.789	10.752	0.037	0.001
ROL09	10.746	10.821	-0.075	0.006
ROL10	10.793	10.822	-0.029	0.001
ROL11	10.729	10.723	0.006	0.000
ROL12	10.760	10.763	-0.003	0.000
ROL13	6.212	6.754	-0.542	0.294
ROL14	3.858	4.208	-0.350	0.123
ROL15	3.482	4.057	-0.575	0.331
ROL16	5.166	5.614	-0.448	0.201
ROL17	5.293	5.087	0.206	0.042
ROL18	4.910	4.866	0.044	0.002
			Sum	1.064
			Average	0.059
			RMSE H (m.)	0.243

4.5 ผลการประเมินประสิทธิภาพข้อมูลพอยต์คลาวด์

4.5.1 การเปรียบเทียบจำนวนข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ผลิตได้จากภาพถ่าย

ผลการเปรียบเทียบจำนวนจุดพอยต์คลาวด์ที่ถูกผลิตขึ้นจากจุดสำคัญ (Keypoint) ที่ปรากฏบนภาพตั้งแต่ 2 ภาพขึ้นไปที่ใช้ในการประมวลผลระหว่างการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงให้ผลดังรูปที่ 34 โดยมีรายละเอียดจำนวนพอยต์คลาวด์ ดังแสดงในตารางที่ 28 เมื่อคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์พบว่าบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงมีปริมาณพอยต์คลาวด์เพิ่มขึ้น 220 % เมื่อเทียบกับบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้น



รูปที่ 36 เปรียบเทียบปริมาณพอยต์คลาวด์ระหว่างรูปแบบการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้น และรูปแบบการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

ตารางที่ 28 เปรียบเทียบจำนวนจุดพอยต์คลาวด์ที่ผลิตได้ระหว่างรูปแบบประมวลผลจากบล็อกภาพถ่าย
ตั้งเท่านั้นและประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

	Number of 3D point	
	Nadir Camera	Multi-Head Camera
In 2 Images	734783	1619186
In 3 Images	237578	297644
In 4 Images	112479	108435
In 5 Images	58332	49697
In 6 Images	31747	25028
In 7 Images	22928	15016
In 8 Images	17471	9528
In 9 Images	12685	6486
In 10 Images	7574	4011
In 11 Images	3593	2150
In 12 Images	2791	1549
In 13 Images	2045	1037
In 14 Images	1271	718
In 15 Images	632	421
In 16 Images	37	188

4.5.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพข้อมูลพอยต์คลาวด์เชิงคุณภาพ

ลักษณะข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ถูกผลิตขึ้นจากโปรแกรมทั้งแบบประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและแบบประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง ดังแสดงในรูปที่ 37 และ 38



(ก)



(ข)



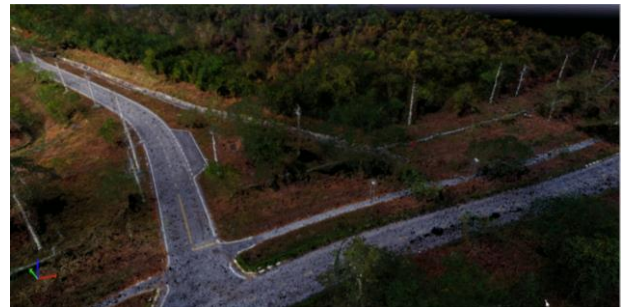
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 37 ลักษณะข้อมูลพอยต์คลาวด์ ณ บริเวณเดียวกัน (ก), (ค) และ (จ) ประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้น (ข), (ง) และ (ฉ) ประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

(ก)



(ข)



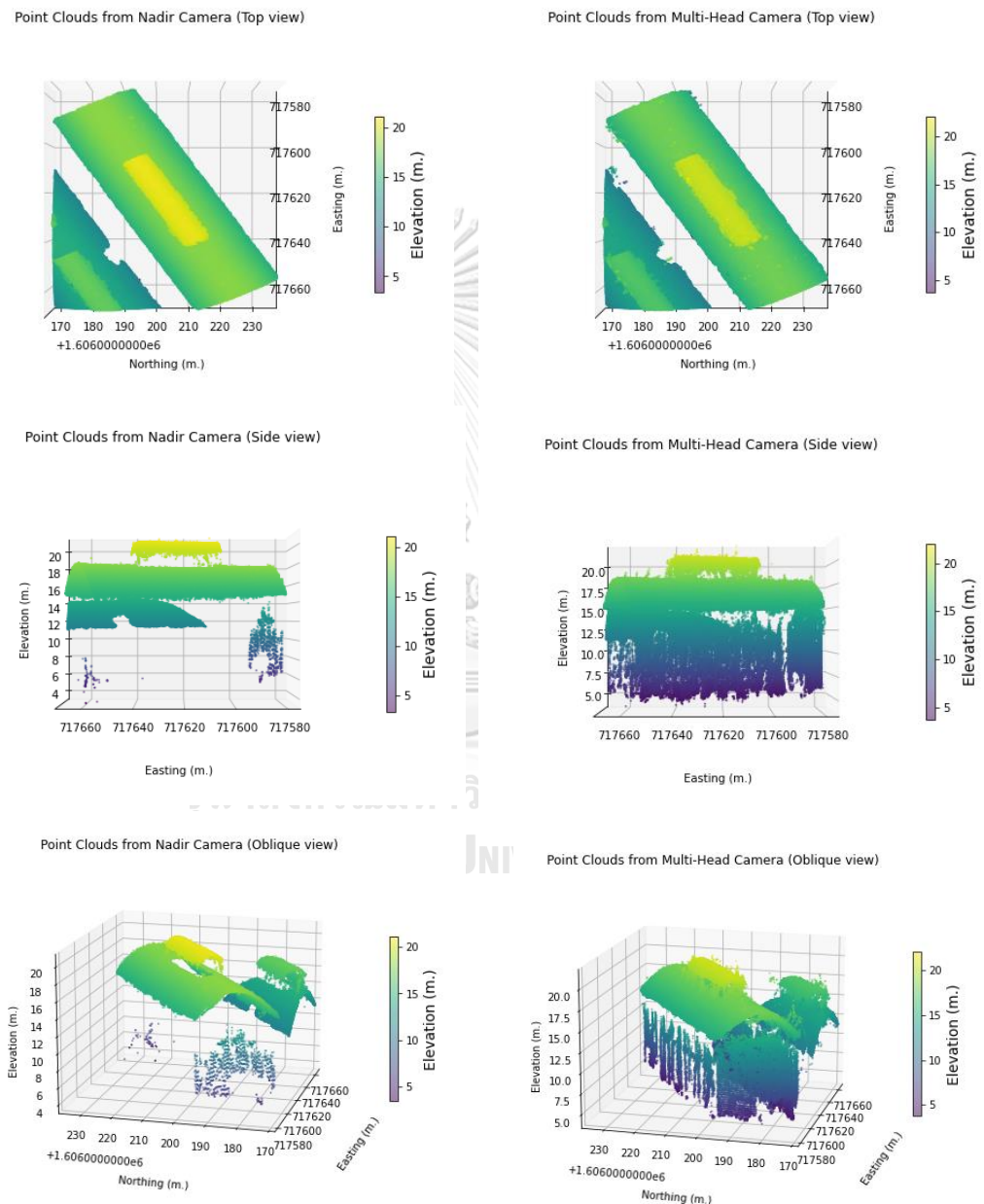
รูปที่ 38 ลักษณะข้อมูลพอยต์คลาวด์บริเวณผนังกำแพงของอาคารสิ่งปลูกสร้าง
 (ก) ประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้น (ข) ประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่าย

เชียงใหม่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5.3 ผลการประเมินประสิทธิภาพข้อมูลพอยต์คลาวด์เชิงปริมาณ

จากการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาไพธอนในการช่วยนับจำนวนข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ถูกผลิตขึ้นจากโปรแกรมทั้งแบบประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและแบบประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 39



รูปที่ 39 ลักษณะข้อมูลพอยต์คลาวด์บริเวณอาคารสิ่งปลูกสร้างที่ประมวลผลมาจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงผ่านการแสดงผลด้วยการเขียนโปรแกรมภาษาไพธอน

จากการเขียนโปรแกรมภาษาไพธอนในการช่วยนับจำนวนข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้มาจากการประมวลผลด้วยโปรแกรม PIX4Dmapper พบว่าข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้มาจากการประมวลผลจากบล็อกรูปถ่ายตั้งเท่านั้นมีจำนวนพอยต์คลาวด์เท่ากับ 26,161,790 จุด ที่ได้มาจากการประมวลผลจากบล็อกรูปถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงมีจำนวนพอยต์คลาวด์เท่ากับ 64,558,990 จุด สำหรับจำนวนพอยต์คลาวด์ในรูปที่ 37 บริเวณอาคารสิ่งปลูกสร้าง พบว่าข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้มาจากการประมวลผลจากบล็อกรูปถ่ายตั้งเท่านั้นมีจำนวนพอยต์คลาวด์เท่ากับ 147,691 จุด ที่ได้มาจากการประมวลผลจากบล็อกรูปถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงมีจำนวนพอยต์คลาวด์เท่ากับ 361,614 จุด

4.6 ผลการเปรียบเทียบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของภาพออร์โธ

4.6.1 การเปรียบเทียบผลการรังวัดที่รังวัดมาด้วยวิธีการรังวัดตำแหน่งบนภาพออร์โธระหว่างการประมวลผลจากบล็อกรูปถ่ายตั้งเท่านั้นและการประมวลผลจากบล็อกรูปถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

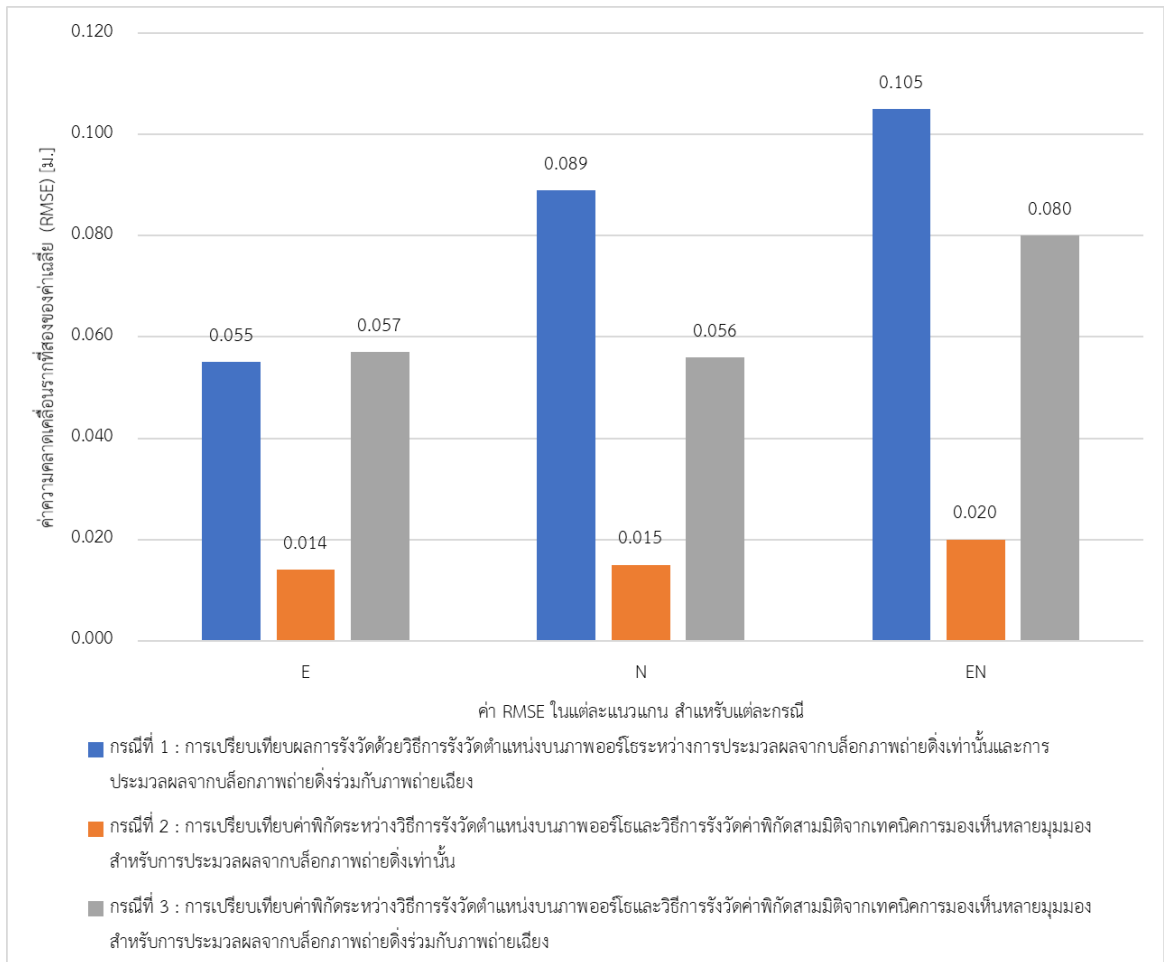
ผลการเปรียบเทียบค่าพิกัดบริเวณพื้นที่เปิดโล่งที่รังวัดตำแหน่งบนภาพออร์โธระหว่างแบบการประมวลผลจากบล็อกรูปถ่ายตั้งเท่านั้นและแบบการประมวลผลจากบล็อกรูปถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงจำนวน 30 จุด พบว่าค่า RMSE ทางราบ เท่ากับ 0.105 เมตร แสดงวิธีการคำนวณในตารางที่ 29

4.6.2 การเปรียบเทียบค่าพิกัดระหว่างวิธีการรังวัดตำแหน่งบนภาพออร์โธและวิธีการรังวัดค่าพิกัดสามมิติจากเทคนิคการมองเห็นหลายมุมมอง

ผลการเปรียบเทียบค่าพิกัดบริเวณพื้นที่เปิดโล่งที่รังวัดจากตำแหน่งบนภาพออร์โธและการรังวัดค่าพิกัดสามมิติจากเทคนิคการมองเห็นหลายมุมมองสำหรับการประมวลผลจากบล็อกรูปถ่ายตั้งเท่านั้น ค่า RMSE ทางราบ เท่ากับ 0.020 เมตร สำหรับการประมวลผลจากบล็อกรูปถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงค่า RMSE ทางราบ เท่ากับ 0.080 เมตร แสดงวิธีการคำนวณในตารางที่ 30 และตารางที่ 31 ตามลำดับ

ตารางที่ 30 การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนรากที่สองของค่าเฉลี่ยของค่าพิกัดทางราบบริเวณพื้นที่
เปิดระหว่างการรังวัดที่วัดมาด้วยวิธีรังวัดตำแหน่งบนภาพออร์โธและการรังวัดค่าพิกัดสามมิติจาก
เทคนิคการมองเห็นหลายมุมมองของรูปแบบการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายดังกล่าว

Point label	Measured E on 3D measurement	Measured E on 2D measurement	ΔE	ΔE^2	Measured N on 3D measurement	Measured N on 2D measurement	ΔN	ΔN^2	$\Delta E^2 + \Delta N^2$
POI01	717736.649	717736.648	0.001	0.000	1606107.648	1606107.649	-0.001	0.000	0.000
POI02	717697.751	717697.742	0.009	0.000	1606081.452	1606081.45	0.002	0.000	0.000
POI03	717634.249	717634.235	0.014	0.000	1606035.268	1606035.291	-0.023	0.001	0.001
POI04	717603.333	717603.328	0.005	0.000	1606009.891	1606009.898	-0.007	0.000	0.000
POI05	717570.202	717570.193	0.009	0.000	1605978.050	1605978.057	-0.007	0.000	0.000
POI06	717525.127	717525.113	0.014	0.000	1605945.749	1605945.734	0.015	0.000	0.000
POI07	717494.251	717494.256	-0.005	0.000	1605920.290	1605920.287	0.003	0.000	0.000
POI08	717463.356	717463.334	0.022	0.000	1605895.045	1605895.023	0.022	0.000	0.001
POI09	717433.428	717433.418	0.010	0.000	1605870.332	1605870.331	0.001	0.000	0.000
POI10	717401.729	717401.7120	0.009	0.000	1605844.299	1605844.301	-0.002	0.000	0.000
POI11	717368.729	717368.719	0.010	0.000	1605817.297	1605817.305	-0.008	0.000	0.000
POI12	717341.008	717341.019	-0.011	0.000	1605794.433	1605794.449	-0.016	0.000	0.000
POI13	717348.244	717348.22	0.021	0.000	1605868.513	1605868.53	-0.017	0.000	0.001
POI14	717324.384	717324.372	0.012	0.000	1605889.750	1605889.749	0.001	0.000	0.000
POI15	717306.475	717306.488	-0.013	0.000	1605762.326	1605762.327	-0.001	0.000	0.000
POI16	717334.733	717334.712	0.021	0.000	1605634.405	1605634.396	0.009	0.000	0.001
POI17	717327.436	717327.418	0.018	0.000	1605676.796	1605676.776	0.020	0.000	0.001
POI18	717308.567	717308.581	-0.014	0.000	1605691.784	1605691.809	-0.025	0.001	0.001
POI19	717297.111	717297.117	-0.006	0.000	1605728.428	1605728.407	0.021	0.000	0.000
POI20	717274.948	717274.957	-0.009	0.000	1605781.950	1605781.949	0.001	0.000	0.000
POI21	717276.456	717276.474	-0.018	0.000	1605809.753	1605809.747	0.006	0.000	0.000
POI22	717256.749	717256.747	0.002	0.000	1605838.381	1605838.37	0.011	0.000	0.000
POI23	717211.095	717211.088	0.007	0.000	1605869.960	1605869.953	0.007	0.000	0.000
POI24	717189.336	717189.373	-0.037	0.001	1605918.693	1605918.74	-0.047	0.002	0.004
POI25	717149.478	717149.455	0.023	0.001	1605963.878	1605963.892	-0.014	0.000	0.001
POI26	717185.201	717185.190	0.012	0.000	1606273.367	1606273.368	-0.001	0.000	0.000
POI27	717204.602	717204.596	0.006	0.000	1606277.233	1606277.229	0.004	0.000	0.000
POI28	717227.245	717227.244	0.001	0.000	1606312.736	1606312.742	-0.006	0.000	0.000
POI29	717206.647	717206.641	0.006	0.000	1606324.338	1606324.35	-0.012	0.000	0.000
POI30	717161.859	717161.864	-0.005	0.000	1606313.052	1606313.036	0.016	0.000	0.000
								Sum	0.013
								Average	0.000
								RMSE EN (m.)	0.020



รูปที่ 40 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่า RMSE ในแต่ละกรณีศึกษา

บทที่ 5

อภิปรายผล สรุปผลการศึกษาวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการอภิปรายผลการศึกษาวิจัย สรุปผลการศึกษาในหัวข้อต่าง ๆ ข้อจำกัด และข้อเสนอแนะในการนำผลการศึกษาหรือเทคนิควิธีการในงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้งานหรือใช้ประโยชน์ในการศึกษางานวิจัยในอนาคตต่อไป

5.1 อภิปรายผลการศึกษา

จากผลการวิจัยที่ได้นำเสนอไปในบทที่ 3 และบทที่ 4 แล้วนั้น มีประเด็นที่สามารถนำมาอภิปรายได้ดังต่อไปนี้

5.1.1 อภิปรายผลการเปรียบเทียบผลการศึกษากับงานวิจัยอื่น ๆ ที่มีความคล้ายคลึงกัน

การรังวัดภาพถ่ายจากภาพถ่ายเฉียง รวมถึงการบันทึกข้อมูลภาพถ่ายจากระบบกล้องหลายหัวในปัจจุบันกำลังมีบทบาทมากขึ้น เนื่องจากผลการศึกษาจากงานวิจัยหลายงานวิจัยได้แสดงให้เห็นว่าภาพถ่ายเฉียงสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทั้งในส่วนของการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายและประสิทธิภาพในการรังวัดค่าพิกต์จากภาพถ่าย ดังนั้นในหัวข้อนี้จะเป็นการอภิปรายวิธีการดำเนินงานวิจัยและผลการศึกษาจากงานวิจัยระบบกล้องหลายหัวที่ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับสำหรับการผลิตแผนที่สามมิติและพอยต์คลาวด์เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่คล้ายคลึงกันดังต่อไปนี้

- 1) งานวิจัยของ Moe et al. (2016) เป็นงานวิจัยที่ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตแผนที่ที่ประมวลผลมาจากภาพถ่ายที่ได้มาจากระบบกล้องหลายหัวเหมือนกับงานวิจัยนี้ แต่มีความแตกต่างกันของยี่ห้อของระบบกล้องหลายหัวที่ใช้ในการบันทึกภาพและระดับความสูงบินที่ใช้ในการบันทึกภาพ โดยในงานวิจัยของ Moe et al. (2016) มีขนาด GSD ประมาณ 6 เซนติเมตร ซึ่งแตกต่างจากงานวิจัยนี้ที่ภาพถ่ายมีขนาด GSD ประมาณ 2.5 เซนติเมตร สำหรับผลการศึกษาจากงานวิจัยของ Moe et al. (2016) ให้ผลสรุปว่าการมีภาพถ่ายเฉียงมาประมวลผลร่วมกับภาพถ่ายตั้งจะช่วยให้เรขาคณิตของโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศมีความแข็งแรงส่งผลให้ความถูกต้องเชิงตำแหน่งมีความละเอียดความถูกต้องสูงตามไปด้วย โดยผลการศึกษาที่ได้กล่าวไปสอดคล้องกับผลการศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้ นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงการกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องบนระบบกล้องหลายหัวให้กับโปรแกรมที่ใช้

ในการประมวลผลเพื่อให้โปรแกรมประมวลผลภาพถ่ายสามารถประมวลผลภาพได้ สอดคล้องกับลักษณะความเป็นจริงทางกายภาพของระบบกล้องหลายหัว ซึ่งในงานวิจัยของ Moe et al. (2016) ไม่ได้กล่าวไว้

- 2) งานวิจัยของ Aicardi et al. (2016) เป็นงานวิจัยที่ศึกษาแบบจำลองสามมิติของอาคาร สิ่งปลูกสร้างที่ผลิตมาจากภาพถ่ายเฉียงร่วมกับภาพถ่ายตั้งเปรียบเทียบกับข้อมูลที่รังวัด มาจากเครื่องสแกนเลเซอร์ภาคพื้นดิน โดยผลการศึกษากิจงานวิจัยพบว่าความหนาแน่นของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ผลิตได้และความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากทั้งสองวิธีการมีค่าที่ใกล้เคียงกันมากอยู่ในระดับ 0.020 เมตร สำหรับงานวิจัยของ Aicardi et al. (2016) ในแง่ของวิธีการดำเนินงานวิจัยมีความแตกต่างเมื่อเทียบกับงานวิจัยในครั้งนี้ คือ การบินบันทึกภาพถ่ายบินที่ระดับความสูงที่ต่ำมาก คือ บินที่ระดับความสูงเฉลี่ย 20 เมตรเหนือพื้นดิน ซึ่งการบินในระดับนี้ภาพถ่ายที่บันทึกได้จะให้ความละเอียดของข้อมูลที่ค่อนข้างสูงมาก โดยในงานวิจัยสามารถบันทึกภาพถ่ายที่มีค่า GSD ที่ละเอียดถึง 0.5 เซนติเมตร นอกจากการบินถ่ายภาพถ่ายตั้งตามหลักการทางโฟโตแกรมเมตรีทั่วไปแล้วยังมีการบินบันทึกภาพถ่ายเฉียงของอาคารสิ่งปลูกสร้างในลักษณะเป็นวงกลมรอบอาคารที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งการบินในลักษณะนี้จะช่วยให้ข้อมูลที่บันทึกมาสามารถบันทึกรายละเอียดของมุมมองสิ่งปลูกสร้างและพืชพรรณได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น
- 3) งานวิจัยของ Vacca et al. (2017) ได้ทำการศึกษาวิจัยโดยมีวิธีการดำเนินงานคล้ายกับงานวิจัยของ Aicardi et al. (2016) โดยมีความแตกต่างกันเพียงรุ่นของกล้องถ่ายภาพที่ใช้ในการบินบันทึกภาพและความสูงของการบินถ่ายภาพถ่ายตั้งและภาพถ่ายเฉียง คือ ได้ทำการบินบันทึกภาพถ่ายตั้งที่ระดับความสูงเฉลี่ย 90 เมตร ทำให้ภาพที่บันทึกได้มีขนาดของ GSD 2.2 เซนติเมตรและทำการบินบันทึกภาพถ่ายเฉียงที่ระดับความสูงเฉลี่ย 50 เมตร ทำให้ภาพที่บันทึกได้มีขนาดของ GSD 1.2 เซนติเมตร โดยในการประมวลผลภาพถ่ายใช้ภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงส่งผลให้มีส่วนซ้อนทับกันของภาพเป็นจำนวนมากทำให้การโยงยึดโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศมีความแข็งแรงและสามารถบันทึกข้อมูลได้ละเอียดครอบคลุม จากผลการวิจัยแบบจำลองสามมิติที่ผลิตได้จากการประมวลผลด้วยภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงมีความถูกต้องประมาณ 0.030 เมตร ซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกับผลงานวิจัยของ Aicardi et al. (2016) ดังนั้นข้อเปรียบเทียบระหว่างงานวิจัยของ Vacca et al. (2017) กับงานวิจัยนี้จึงมีข้อเปรียบเทียบไปใน

ทิศทางเดียวกับข้อเปรียบเทียบที่งานวิจัยของ Aicardi et al. (2016) ที่ได้กล่าวไปก่อนหน้า

- 4) งานวิจัยของ จเด็จ ไพศาลสิทธิกันต์ & ไพศาล สันติธรรมนนท์ (2563) ได้ทำการศึกษาวิจัยระบบกล้องชุดถ่ายภาพสำหรับการรังวัดรอยพิมพ์ฐานอาคารสำหรับงานออกแบบทางด้านวิศวกรรมโยธาและผังเมือง โดยในงานวิจัยนี้ใช้ระบบกล้องถ่ายภาพที่ประกอบไปด้วยกล้องถ่ายภาพจำนวน 2 กล้องวางตัวในแนวเฉียงทำมุมกับแนวดิ่งและแนวของการบินถ่าย ซึ่งกล้องทั้งสองจะถูกโยกยึดกันด้วยอุปกรณ์จับยึดกล้องโดยมีความสัมพันธ์ในเชิงการเลื่อนแกนและความสัมพันธ์ในเชิงการหมุนแกนที่มีความสัมพันธ์ต่อกัน ซึ่งมีความแตกต่างกับงานวิจัยนี้ที่นอกจากจะมีภาพถ่ายเฉียงจากทั้ง 4 ทิศทางแล้วยังมีภาพถ่ายตั้งซึ่งส่งผลดีต่อการประมวลผลภาพถ่าย เพราะภาพถ่ายตั้งจะเปรียบเสมือนแกนกลางให้ภาพถ่ายเฉียงมายึดเกาะและช่วยเพิ่มส่วนซ้อนทับด้านหน้าและส่วนซ้อนทับด้านหลังให้มีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มมุมมองต่อวัตถุมากขึ้นและช่วยเพิ่มคุณภาพของภาพออร์โธที่ผลิตให้มีความสวยงามมากยิ่งขึ้น ดังนั้นผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับงานวิจัยของจเด็จ ไพศาลสิทธิกันต์ & ไพศาล สันติธรรมนนท์ (2563) ที่สรุปไว้ว่าการมีภาพถ่ายเฉียงจะช่วยให้การได้มาของข้อมูลที่ต้องการรังวัดได้มาอย่างรวดเร็ว รวมไปถึงการหลีกเลี่ยงการเข้าถึงตำแหน่งของข้อมูลที่อยู่ในจุดที่เข้าถึงได้ยาก ซึ่งถือว่าเป็นจุดเด่นที่สำคัญของระบบกล้องหลายหัวที่จะช่วยลดระยะเวลาและต้นทุนในการรังวัดจัดทำแผนที่

5.1.2 อภิปรายผลการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์และแบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบกล้องหลายหัว

จากการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงที่บันทึกมาจากระบบกล้องหลายหัวในการหาค่าพารามิเตอร์การเลื่อนแกนและพารามิเตอร์การหมุนแกนของกล้องแต่ละกล้อง ในการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายหากไม่คำนึงถึงค่าพารามิเตอร์และแบบจำลองของระบบกล้องหลายหัวผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายอาจทำให้การวางตัวของภาพถ่ายจากระบบกล้องหลายหัวมีลักษณะที่ไม่สอดคล้องกับลักษณะความเป็นจริงของตัวกล้อง ซึ่งสาเหตุของการเกิดอาจเกิดมาจากการที่คุณลักษณะของภาพถ่ายที่บันทึกได้มีลักษณะที่คล้ายคลึงกันจนไม่มีข้อมูลที่เห็นเด่นชัดทำให้การประมวลผลจับคู่ภาพทำได้ไม่ดีพอ หรือขณะการปฏิบัติการก็มีปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้เกิดขึ้น เช่น สภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลง

ทิศทางของลม แสงแดด เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อคุณภาพของภาพถ่ายที่บันทึกได้ ดังนั้นจึงได้มีการกำหนดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกล้องหลายหัวให้กับโปรแกรม สำหรับใช้ในการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายด้วยวิธีการประมาณค่าเริ่มต้นให้กับพารามิเตอร์ที่มีความสัมพันธ์ในระบบกล้องหลายหัวแล้วให้โปรแกรมคำนวณผ่านวิธีการเชิงเลขได้อย่างอิสระ (free) หลังจากโปรแกรมประมวลผลคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ พบว่าค่าพารามิเตอร์ การเลื่อนแกนที่ได้จากการคำนวณมีขนาดที่ไม่สอดคล้องกับลักษณะความเป็นจริงทางกายภาพ กล่าวคือ ค่าพารามิเตอร์การเลื่อนแกนมีค่าสูงที่สุดถึง 14 เมตร ดังนั้นจึงเปลี่ยนวิธีการประมวลผลเป็นค่าบังคับให้ใกล้เคียงค่าคงที่ (constraint) ด้วยการกำหนดค่าพารามิเตอร์การเลื่อนแกนผ่านการวัดระยะห่างจากกล้องหลักอ้างอิง (กล้องกลาง) ไปยังกล้องรอง (กล้องหน้า, กล้องหลัง, กล้องซ้ายและกล้องขวา) โดยมีค่าการเลื่อนแกนทางแกน X และแกน Y (T_X, T_Y) เท่ากับ ± 30 มิลลิเมตร และการเลื่อนแกนทางแกน Z (T_Z) มีค่า $+20$ มิลลิเมตร พร้อมกับกำหนดน้ำหนักในรูปแบบความถูกต้องเป็น 5 มิลลิเมตร สำหรับพารามิเตอร์การหมุนแกนที่สัมพันธ์ของแต่ละกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรองไม่สามารถตรวจวัดค่าที่แน่ชัดได้ แต่สามารถวัดค่าประมาณแล้วนำมาใช้เป็นค่าเริ่มต้นเป็น ± 45 องศา พร้อมกำหนดน้ำหนักในรูปแบบความถูกต้องเป็น 5 องศา ให้โปรแกรมปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ได้อย่างอิสระ (free) หลังจากโปรแกรมขยายสามเหลี่ยมทางอากาศประมวลผลปรับปรุงหาค่าพารามิเตอร์เป็นผลคำตอบ (solution) ด้วยวิธีการเชิงเลข (Numerical method) ตามลักษณะดังกล่าว พบว่าค่าพารามิเตอร์การจัดวางภายนอกที่สัมพันธ์กันระหว่างกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรองบนอุปกรณ์จับยึดกล้องสำหรับค่าการเลื่อนแกนสัมพันธ์ (T_X, T_Y, T_Z) ของกล้องทั้ง 4 กล้องได้ค่าเป็นค่าบังคับที่เข้าใกล้ตามที่กำหนด ส่วนค่าพารามิเตอร์การหมุนแกนสัมพันธ์ (R_X, R_Y, R_Z) มีลักษณะสอดคล้องกับความเป็นจริงทางกายภาพของระบบกล้องหลายหัว โดยค่าที่โปรแกรมประมวลผลได้สำหรับกล้องหน้ามีค่าเท่ากับ 44.4599 องศา กล้องหลังมีค่าเท่ากับ -45.1517 องศา กล้องซ้ายมีค่าเท่ากับ -43.5275 องศา และกล้องขวามีค่าเท่ากับ 44.3343 องศา นอกจากนั้นในส่วนของค่าพารามิเตอร์การจัดวางภายใน ได้แก่ ค่าความยาวโฟกัส, ค่าการเลื่อนของจุดมูขยสำคัญแกน X และแกน Y, ค่าสัมประสิทธิ์ความผิดเพี้ยนในแนวรัศมีและค่าสัมประสิทธิ์ความผิดเพี้ยนในแนวตั้งฉากกับรัศมี สามารถปล่อยให้มีความอิสระ (free) ได้เช่นกัน กล่าวคือสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้กับโปรแกรมที่ประมวลผลข้อมูล จากนั้นโปรแกรมจะทำ

การประมวลผลและคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ผ่านวิธีการเชิงเลขเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผล ซึ่งการประมวลผลและการคำนวณนี้เรียกว่า การวัดสอบภายในพื้นที่ (In-Situ Calibration) โดยค่าที่ประมวลผลได้มีค่าใกล้เคียงกับความยาวโฟกัสในแต่ละกล้อง กล้องกลางมีค่าเท่ากับ 25.292 มิลลิเมตร กล้องหน้ามีค่าเท่ากับ 35.324 มิลลิเมตร กล้องหลังมีค่าเท่ากับ 35.584 มิลลิเมตร กล้องซ้ายมีค่าเท่ากับ 35.359 มิลลิเมตร และกล้องขวามีค่าเท่ากับ 35.909 มิลลิเมตร และเมื่อนำไปคำนวณปรับแก้ร่วมกับค่าพารามิเตอร์ของระบบกล้องหลายหัว ทั้งค่าพารามิเตอร์การเลื่อนที่สัมพัทธ์และค่าพารามิเตอร์การหมุนสัมพัทธ์ของกล้องเฉียง (กล้องรอง) ทั้ง 4 ที่เทียบกับกล้องตั้ง (กล้องหลักอ้างอิง) พบว่าการคำนวณเชิงเลขและการคำนวณปรับแก้ให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพ ผลที่ได้ทำให้ได้แบบจำลองข่ายสามเหลี่ยมที่มีความละเอียดถูกต้องสูง คือ ค่า RMSE Easting และ RMSE Northing เท่ากับ 0.016 เมตร และค่า RMSE Height เท่ากับ 0.019 เมตร

5.1.3 อภิปรายการประมวลผลภาพถ่ายจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ค่า RMSE หลังจากประมวลคำนวณข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศร่วมกับข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายภาคพื้นดินแล้ว พบว่าการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นมีค่า RMSE Easting เท่ากับ 0.032 เมตร, ค่า RMSE Northing เท่ากับ 0.033 เมตร และค่า RMSE Height เท่ากับ 0.053 เมตร และมีค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนการฉายจุดภาพและจุดรังวัด (Mean projection error) เท่ากับ 0.332 จุดภาพ และสำหรับการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงมีค่า RMSE Easting เท่ากับ 0.016 เมตร, ค่า RMSE Northing เท่ากับ 0.016 เมตร และค่า RMSE Height เท่ากับ 0.019 เมตร และมีค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนการฉายจุดภาพและจุดรังวัดเท่ากับ 0.932 จุดภาพ สำหรับในส่วนของระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผลตั้งแต่คำนวณข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศจนถึงผลิตภาพออร์โธของทั้งสองรูปแบบการประมวลผลพบว่า การประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้น (จำนวน 599 ภาพ) ใช้ระยะเวลาประมาณ 7 ชั่วโมง 20 นาที ในขณะที่การประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง (จำนวน 2995 ภาพ คิดมาจาก 599 ภาพ คูณ 5 กล้อง) ใช้ระยะเวลาประมาณ 16 ชั่วโมง 50 นาที

5.1.4 การเปรียบเทียบความถูกต้องทางตำแหน่งในการรังวัดค่าพิกัดสามมิติด้วยเทคนิคการมองเห็นหลายมุมมองระหว่างการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

จากการเปรียบเทียบความถูกต้องทางตำแหน่งในการรังวัดค่าพิกัดสามมิติด้วยเทคนิคการมองเห็นหลายมุมมอง โดยพิจารณาข้อมูล 3 ประเภทด้วยกัน ซึ่งพบได้บ่อยและมีความสำคัญต่อการผลิตภาพออร์โธและแผนที่สามมิติ โดยในงานวิจัยนี้ความละเอียดของจุดภาพของภาพถ่ายมีค่าเท่ากับ 2 เซนติเมตร พิจารณาจากภาพที่บันทึกมาจากกล้องตั้งสามารถสรุปได้ดังนี้

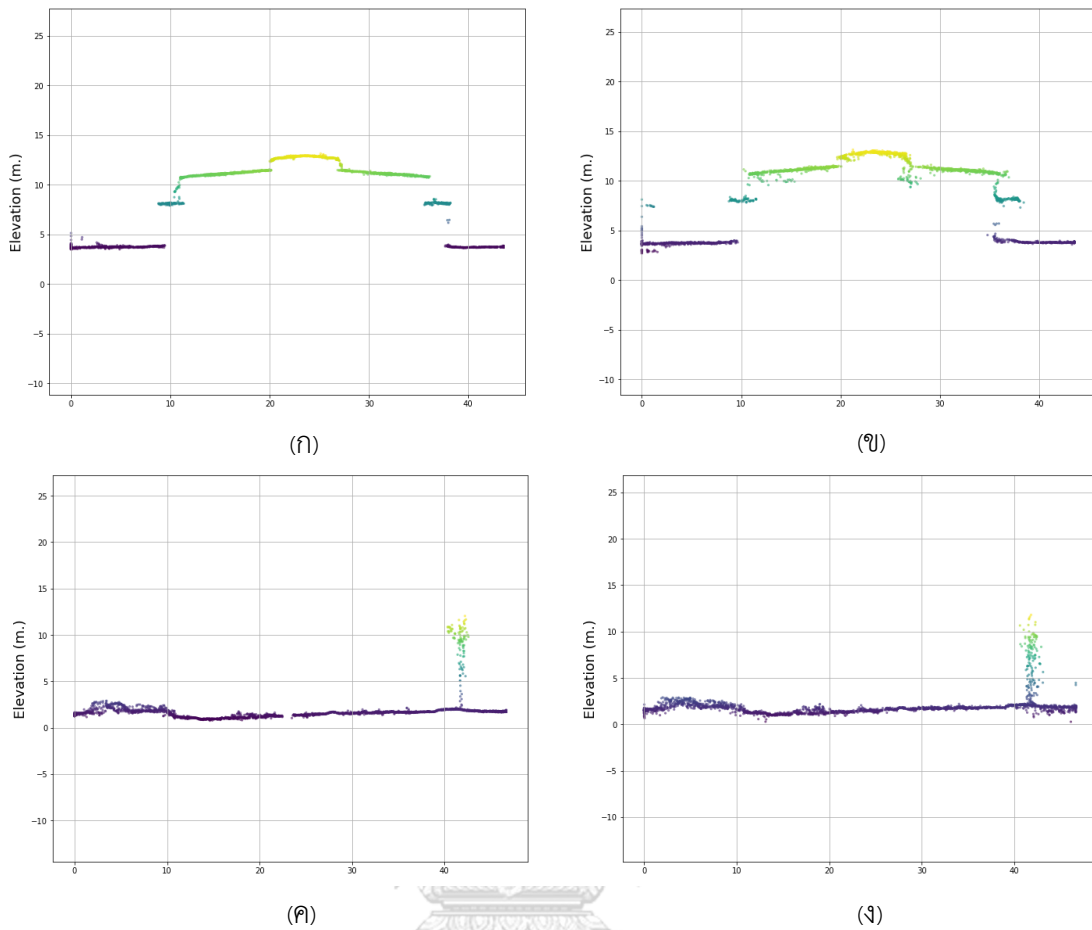
1. การรังวัดเพื่อทำแผนที่สามมิติบริเวณพื้นที่เปิดโล่ง จำนวน 30 จุด สำหรับการรังวัดสามมิติบนบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นรังวัดแต่ละจุดด้วยภาพจำนวน 5 ภาพ มีค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานโดยเฉลี่ย Easting และ Northing มีค่าเท่ากัน คือ 0.007 เมตร และ Height เท่ากับ 0.032 เมตร สำหรับการรังวัดสามมิติบนบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงรังวัดแต่ละจุดด้วยภาพจำนวน 11 ภาพ มีค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานโดยเฉลี่ย Easting เท่ากับ 0.024 เมตร, Northing เท่ากับ 0.007 เมตร และ Height เท่ากับ 0.048 เมตร และเมื่อนำค่าพิกัดจากทั้งสองรูปแบบไปคำนวณหาค่า RMSE พบว่า RMSE ทางราบและค่า RMSE ทางตั้งมีค่าเท่ากัน คือ 0.133 เมตร

2. การรังวัดเพื่อทำแผนที่สามมิติบริเวณอาคารสิ่งปลูกสร้าง จำนวน 18 จุด สำหรับการรังวัดสามมิติบนบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นรังวัดแต่ละจุดด้วยภาพจำนวน 5 ภาพ มีค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานโดยเฉลี่ย Easting เท่ากับ 0.006 เมตร, Northing เท่ากับ 0.007 เมตร และ Height เท่ากับ 0.030 เมตร สำหรับการรังวัดสามมิติบนบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงรังวัดแต่ละจุดด้วยภาพจำนวน 11 ภาพ มีค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานโดยเฉลี่ย Easting เท่ากับ 0.025 เมตร, Northing เท่ากับ 0.026 เมตร และ Height เท่ากับ 0.051 เมตร และเมื่อนำค่าพิกัดจากทั้งสองรูปแบบไปคำนวณหาค่า RMSE พบว่า RMSE ทางราบเท่ากับ 0.154 เมตร และค่า RMSE ทางตั้งเท่ากับ 0.243 เมตร

3. การรังวัดเพื่อทำแผนที่สามมิติบริเวณรอยพิมพ์ฐานและป้ายเสาบอกทาง สำหรับกรณีนี้ต้องการอธิบายถึงการมีภาพถ่ายเฉียงมาร่วมประมวลผลจะช่วยให้การรังวัดข้อมูลบางประเภทสามารถรังวัดได้และมีประสิทธิภาพมากกว่าการประมวลผลด้วยบล็อกภาพถ่ายตั้งเพียงเท่านั้น

5.1.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพข้อมูลพอยต์คลาวด์ระหว่างการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นและจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

จากผลลัพธ์ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากทั้งสองรูปแบบการประมวลผลพบว่า การประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงปริมาณพอยต์คลาวด์ที่ถูกผลิตขึ้นจากภาพถ่าย 2 ภาพถูกผลิตขึ้นได้มากกว่าการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้น หากเปรียบเทียบร้อยละปริมาณพอยต์คลาวด์ต่างกัน 55 % และตั้งแต่จำนวนภาพถ่าย 3 ภาพขึ้นไป ทั้งสองรูปแบบการประมวลผลผลิตพอยต์คลาวด์ออกมาได้ปริมาณใกล้เคียงกัน หากเปรียบเทียบร้อยละปริมาณพอยต์คลาวด์ต่างกัน 2 % ในส่วนการประเมินประสิทธิภาพข้อมูลพอยต์คลาวด์เชิงปริมาณ พบว่าพอยต์คลาวด์ที่ประมวลผลมาจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงมีปริมาณมากกว่าการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้นอยู่ 2.45 เท่า สำหรับเชิงคุณภาพ พบว่าพอยต์คลาวด์บริเวณส่วนกลางของพื้นที่การศึกษา (Neat area) จากรูปแบบการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงสามารถผลิตรายละเอียดของพอยต์คลาวด์ได้หนาแน่นและสอดคล้องกับลักษณะความเป็นจริงมากกว่าบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้น โดยหากพิจารณาเรื่องของการไม่ลงรอยกันของปริมาณพอยต์คลาวด์ที่มีจำนวนมากขึ้นผ่านการตัดหน้าตัดตามแนวขวางบริเวณตำแหน่งที่มีโอกาสเกิดการไม่ลงรอยกันของข้อมูลที่สูง เช่น บริเวณหลังคาของอาคารสิ่งปลูกสร้างและบริเวณพื้นผิวของถนน พบว่าข้อมูลหน้าตัดของทั้งสองบริเวณที่ประมวลผลได้มาจากโปรแกรมด้วยวิธีการจับคู่ภาพอัตโนมัติมีการฟุ้งกระจายของพอยต์คลาวด์ โดยมีค่าประมาณ 10 – 30 เซนติเมตร ซึ่งถือว่าเป็นค่าคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม (Random error) จากคุณภาพของข้อมูลและวิธีการที่เลือกใช้ในการผลิตข้อมูลผลลัพธ์ ดังรูปที่ 41 สำหรับงานวิจัยในอนาคตอาจมีการเลือกใช้วิธีการวัดจุดร่วมแบบใช้มือปรับ (Manual tie point) เพื่อนำมาเปรียบเทียบยืนยันผลลัพธ์ระหว่างวิธีการทั้งสองรูปแบบในการประเมินประสิทธิภาพของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ผลิตได้จากภาพถ่ายที่ได้มาจากระบบกล้องหลายหัว



รูปที่ 41 ลักษณะหน้าตัดตามขวางของข้อมูลพอยต์คลาวด์บริเวณอาคารสิ่งปลูกสร้างและบริเวณพื้นผิวของถนน (ก) และ (ค) ประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายนิ่งเท่านั้น (ข) และ (ง) ประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายนิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

5.1.6 การเปรียบเทียบความถูกต้องเชิงตำแหน่งในการรังวัดบนภาพออร์โธระหว่างการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายนิ่งเท่านั้นและจากบล็อกภาพถ่ายนิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง

จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ค่าพิกัดตำแหน่งที่รังวัดบนภาพถ่ายออร์โธพิจารณาบริเวณพื้นที่เปิดโล่ง จำนวน 30 จุด ด้วยค่า RMSE ระหว่างการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายนิ่งเท่านั้นและจากบล็อกภาพถ่ายนิ่งร่วมกับภาพถ่ายเฉียง พบว่าค่า RMSE ทางราบเท่ากับ 0.105 เมตร มีความหมายว่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งระหว่างสองรูปแบบการประมวลผลมีความแตกต่างกันประมาณ 11 เซนติเมตร นอกจากนี้ประเด็นความคมชัดของภาพออร์โธที่ผลิตขึ้นได้ก็เป็นสิ่งสำคัญสำหรับงานทางด้านวิศวกรรมโดยเฉพาะการติดตามความก้าวหน้าของงานก่อสร้างผ่านการพิจารณาผลลัพธ์บนภาพออร์โธ ซึ่งวิธีการเพิ่มความคมชัดเพิ่มประสิทธิภาพของภาพออร์โธมีด้วยกันหลากหลายวิธี เช่น การเพิ่มส่วนซ้อนทับ

ด้านหน้า (overlap) ให้มากขึ้น เพราะจะช่วยลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความแตกต่างกันในระดับความสูงของวัตถุหรือสภาพภูมิประเทศ (Relief displacement) นอกจากนี้ การใช้ระบบกล้องหลายหัวก็เป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการเพิ่มประสิทธิภาพของภาพออร์โธที่ผลิตขึ้นได้ เนื่องจากการบินบันทึกภาพถ่ายในหนึ่งรอบการบินสามารถบันทึกภาพถ่ายหลายมุมมองและครอบคลุมบริเวณพื้นที่ปฏิบัติในมุมมองที่กว้างทำให้ลักษณะข้อมูลที่เป็นอาคารสิ่งปลูกสร้างที่มีลักษณะสูงหรือการทำงานที่มีลักษณะทางยาว (Corridor) ขณะบันทึกภาพถ่ายนั้นแสงเงาที่ตกกระทบที่ปรากฏบนภาพมีความคงที่ ซึ่งการที่เงาไม่คงที่เป็นอุปสรรคอย่างมากในการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายและส่งผลไปถึงความผิดเพี้ยน (Distortion) ที่เกิดขึ้นบนภาพออร์โธด้วย รวมถึงเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติภารกิจการบินบันทึกภาพถ่ายด้วยกล้องถ่ายภาพตั้งเพียงกล้องเดียวจำนวน 5 รอบเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับการบินด้วยระบบกล้องหลายหัวในกรณีนี้เป็นชนิด 5 กล้องเพียงการบินรอบเดียว ระยะเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงานมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่สิ่งที่จะต้องคำนึงถึงสำหรับกรณีการใช้ระบบกล้องหลายหัว คือการติดตั้งระบบกล้องบนอากาศยานไร้คนขับ เพราะระบบกล้องหลายหัวส่วนใหญ่มีน้ำหนักที่ค่อนข้างมากทำให้อากาศยานไร้คนขับที่เหมาะสมกับการติดตั้งจะเป็นอากาศยานไร้คนขับชนิดปีกตรึงหรืออากาศยานไร้คนขับชนิดลูกผสม ซึ่งอากาศยานไร้คนขับทั้งสองชนิดมีขนาดที่ค่อนข้างใหญ่ทำให้การบินยกตัวปฏิบัติภารกิจและการลงจอดต้องการพื้นที่ในการปฏิบัติงาน

5.1.7 การเปรียบเทียบความถูกต้องเชิงตำแหน่งระหว่างการรังวัดแบบหลายมุมมองและการรังวัดบนภาพออร์โธ

จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ค่าพิกัดตำแหน่งที่รังวัดภาพถ่ายออร์โธและการรังวัดค่าพิกัดสามมิติแบบหลายมุมมอง พิจารณابริเวณพื้นที่เปิดโล่ง จำนวน 30 จุด สำหรับการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่านั้น ค่า RMSE ทางราบ เท่ากับ 0.020 เมตร มีความหมายว่าการรังวัดค่าพิกัดแบบสองมิติหรือรังวัดบนภาพออร์โธและการรังวัดค่าพิกัดแบบสามมิติมีความแตกต่างกัน 2 เซนติเมตร ซึ่งถือว่าไม่มีนัยสำคัญสามารถเลือกวิธีการรังวัดแบบใดแบบหนึ่งในการหาค่าพิกัดของจุดที่สนใจได้ สำหรับการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงค่า RMSE ทางราบ เท่ากับ 0.080 เมตร มีความหมายว่าการรังวัดค่าพิกัดแบบสองมิติหรือรังวัดบนภาพออร์โธและการรังวัดค่าพิกัดแบบสามมิติมีความแตกต่างกัน 8 เซนติเมตร ซึ่งมีค่าที่มากกว่ารูปแบบประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้ง

เท่านั้น แต่ถือว่ามีค่าแตกต่างกันไม่มาก นอกจากนั้นการประมวลผลด้วยบล็อกภาพตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงมีจำนวนภาพที่มากกว่า ซึ่งส่งผลดีต่อการประมวลผลภาพถ่ายทำให้โครงข่ายมีความหนาแน่น แข็งแรงและช่วยในการรังวัดค่าพิกัดสามมิติเนื่องจากมีข้อมูลรังวัด (ภาพถ่ายเฉียง) ที่มากขึ้น

5.2 สรุปผลการศึกษาวิจัย

จากอภิปรายผลการศึกษาวิจัยข้างต้นในการศึกษาวิธีหาค่าพารามิเตอร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกล้องหลายหัว FOXTECH 3DM V3 ที่ประกอบด้วยกล้องถ่ายภาพตั้ง 1 กล้อง และกล้องถ่ายภาพเฉียง 4 ทิศทาง 4 กล้อง และศึกษากระบวนการผลิตแผนที่สามมิติและพอยต์คลาวด์ในการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงเรขาคณิตจากข้อมูลภาพถ่ายตั้งและภาพถ่ายเฉียงที่บ้านทีกจากระบบกล้องหลายหัว

สรุปได้ว่าการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกล้องหลายหัวจำเป็นที่จะต้องทราบค่าพารามิเตอร์เบื้องต้นภายในระบบกล้องหลายหัว สำหรับพารามิเตอร์การเลื่อนแกนที่สัมพันธ์กำหนดให้เป็นค่าบังคับให้ใกล้เคียงตามค่าคงที่ (Constraint) และให้ค่าเข้าใกล้นี้มีค่าตามลักษณะทางกายภาพที่สอดคล้องกับความเป็นจริงผ่านการวัดระยะห่างจากกล้องหลักอ้างอิงไปยังกล้องรองภายในระบบกล้อง โดยมีค่าการเลื่อนแกนทางแกน X และแกน Y (T_x, T_y) เท่ากับ ± 30 มิลลิเมตร และการเลื่อนแกนทางแกน Z (T_z) มีค่า $+20$ มิลลิเมตร พร้อมกับกำหนดน้ำหนักรูปแบบความถูกต้องเป็น 5 มิลลิเมตร สำหรับค่าพารามิเตอร์การหมุนแกนที่สัมพันธ์ของแต่ละกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรอง ไม่สามารถตรวจวัดค่าที่แน่ชัดได้ แต่สามารถวัดค่าประมาณแล้วนำมาใช้เป็นค่าเริ่มต้นเป็น ± 45 องศา พร้อมกำหนดน้ำหนักรูปแบบความถูกต้องเป็น 5 องศา และให้โปรแกรมปรับปรุงค่าพารามิเตอร์อย่างอิสระ (free) ผ่านกระบวนการเชิงเลข ผลสรุปจากการวิจัยในครั้งนี้จะใช้การกำหนดค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวให้กับโปรแกรมประมวลผลภาพถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ เพื่อให้การประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายมีความสอดคล้องกับลักษณะความเป็นจริงทางกายภาพของระบบกล้องหลายหัว ซึ่งส่งผลให้เรขาคณิตในภาพรวมของภาพถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศมีความละเอียดถูกต้องสูง สำหรับกระบวนการผลิตแผนที่สามมิติและพอยต์คลาวด์ในการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงเรขาคณิตการมีข้อมูลภาพถ่ายเฉียงเข้ามาร่วมประมวลผลข้อมูลกับภาพถ่ายตั้ง พอยต์คลาวด์ที่ผลิตได้ในเชิงคุณภาพ พอยต์คลาวด์มีความหนาแน่นมากขึ้นและสามารถช่วยเติมเต็มลักษณะของข้อมูลบางประเภทได้สอดคล้องกับลักษณะความเป็นจริงได้มากยิ่งขึ้น ได้แก่ บริเวณอาคารสิ่งปลูกสร้างและบริเวณพุ่มไม้ สำหรับเชิงปริมาณพอยต์คลาวด์ที่ผลิตขึ้นได้มีปริมาณพอยต์คลาวด์มากขึ้นอย่างมี

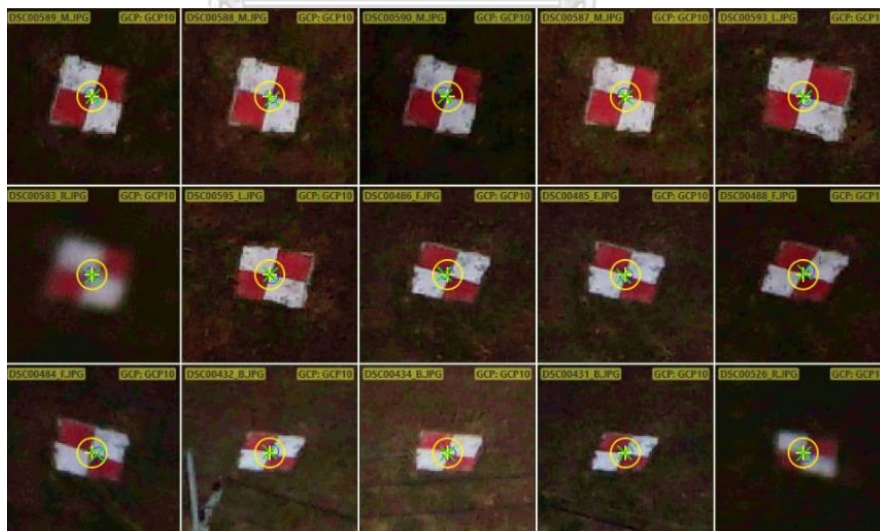
นัยสำคัญ แต่ในส่วนของ การจับคู่ภาพเพื่อผลิตพอยต์คลาวด์การมีจำนวนภาพที่มากขึ้น พอยต์คลาวด์ส่วนใหญ่ที่ถูกผลิตขึ้นจากโปรแกรมผลิตมาจากสองคู่ภาพอยู่ดี สำหรับความถูกต้องเชิงตำแหน่งของแผนที่สามมิติและภาพออร์โธที่ผลิตขึ้นได้พบว่าค่า RMSE ทางราบระหว่างการประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งเท่ากันและจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงเท่ากับ 0.105 เมตร ถือว่าไม่ได้มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในเชิงตำแหน่ง เมื่อพิจารณาเทียบกับความละเอียดของภาพที่ใช้ประมวลผลในครั้งนี้ (GSD 2 เซนติเมตร) และสำหรับค่า RMSE ทางราบระหว่างวิธีการรังวัดค่าพิกัดสามมิติด้วยเทคนิคการมองเห็นหลายมุมมองกับวิธีการรังวัดบนภาพออร์โธ (แบบสองมิติ) ที่ประมวลผลจากบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงมีค่าเท่ากับ 0.080 เมตร ทำให้ทราบว่าค่าที่รังวัดระหว่างสองวิธีในการหาค่าพิกัดตำแหน่งของวัตถุไม่ได้มีความแตกต่างกันมาก ดังนั้นผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้วิธีการใดวิธีการหนึ่งในการหาค่าตำแหน่งของวัตถุที่สนใจได้ แต่การประมวลผลด้วยบล็อกภาพถ่ายตั้งร่วมกับภาพถ่ายเฉียงมีประโยชน์เพิ่มเติม คือ ให้จำนวนภาพถ่ายที่มากยิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลดีต่อการประมวลผลภาพถ่ายและช่วยในการรังวัดค่าพิกัดสามมิติเนื่องจากมีข้อมูลรังวัด (ภาพถ่ายเฉียง) ที่มากขึ้น เมื่อนำค่า RMSE ที่ประมวลผลได้จากงานวิจัยไปพิจารณากับค่า RMSE ของความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับของการผลิตแผนที่ Class 1 ที่มาตราส่วนต่าง ๆ ตามมาตรฐาน ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), 1990) พบว่าเพียงพอต่อการทำแผนที่มาตราส่วน 1:500 ขึ้นไป ดังนั้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมบางประเภทได้เป็นอย่างดีสำหรับงานที่ต้องการทราบตำแหน่งของข้อมูลเพิ่มเติม รวมไปถึงงานทางระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) นอกจากนั้นการมีภาพถ่ายเฉียงเข้ามาช่วยในการประมวลผลส่งผลดีต่อการประมวลผลถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศทำให้โครงข่ายมีความหนาแน่นของข้อมูล ช่วยให้การรังวัดค่าพิกัดสามมิติมีข้อมูลค่ารังวัดบนภาพที่มีจำนวนมากขึ้นและหลายมุมมอง ซึ่งช่วยให้สามารถรังวัดข้อมูลบางประเภทที่การรังวัดพิกัดบนภาพออร์โธไม่สามารถรังวัดได้ เช่น รอยพิมพ์ฐานของอาคาร ป้ายจราจร เส้า เป็นต้น แต่ยังคงมีข้อจำกัดบางประการในการรังวัดภาพถ่ายเฉียงถ้าหากบริเวณที่รังวัดมีสิ่งแวดล้อมบดบังรอบ ๆ วัตถุที่ต้องการรังวัด ผลลัพธ์ของค่าพิกัดที่ได้อาจจะมีความถูกต้องที่ลดน้อยลง

5.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

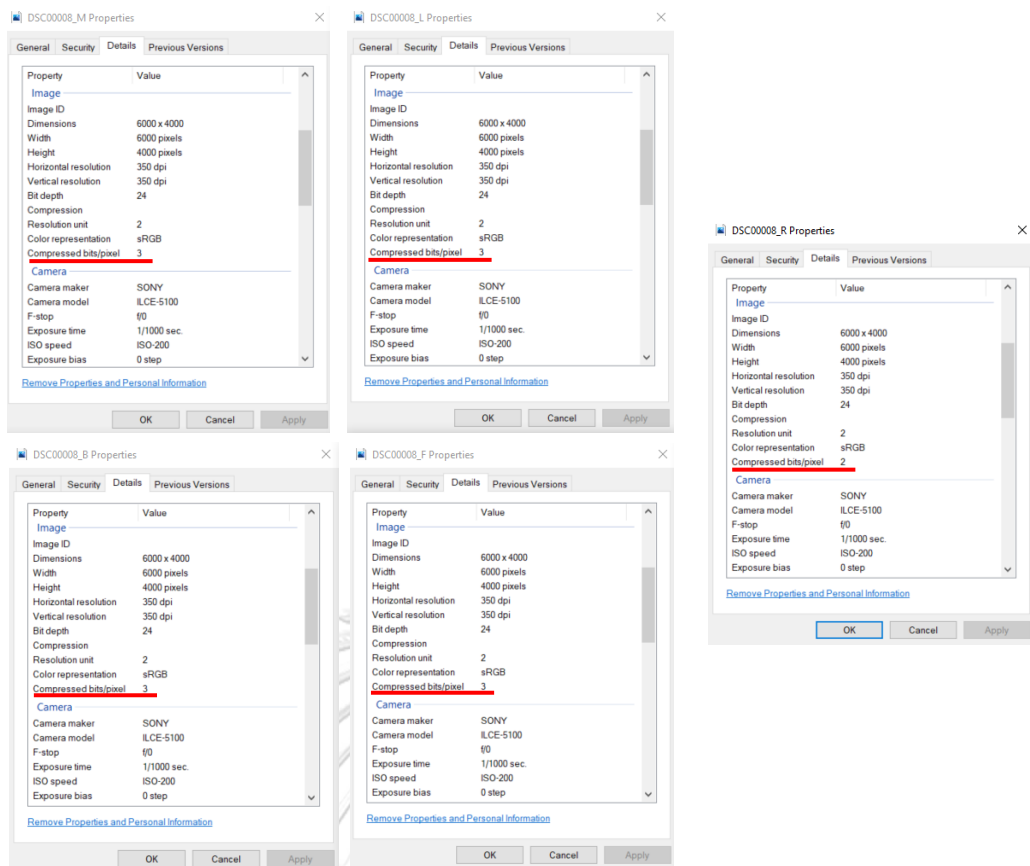
จากข้อสรุปข้างต้นมีสิ่งที่ต้องการจะเสนอแนะเพื่อปรับปรุงและพัฒนาให้ผลของการศึกษาวิจัยต่อเนื่องที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้นได้ดังต่อไปนี้

5.3.1 แม้ว่าการบินถ่ายภาพด้วยระบบกล้องหลายหัวจะได้ภาพถ่ายเฉียงครบใน 4 ทิศทาง แต่สำหรับงานวิจัยการวัดสอระบบกล้องหลายหัว อาจจำเป็นที่จะต้องเพิ่มแนวบินในทิศทางที่ตั้งฉากหรือที่เรียกว่า Double Direction เนื่องจากงานวิจัยนี้ต้องการประมวลผลข้อมูลภาพถ่าย เพื่อต้องการทราบค่าพารามิเตอร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกล้องหลายหัว การมีแนวบินที่มากขึ้นส่งผลต่อการมีข้อมูลภาพถ่ายที่มากขึ้น เพื่อช่วยในการโยยียดโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศของข้อมูลให้มีความแข็งแรงและหนาแน่น นอกจากนั้นยังช่วยเพิ่มมุมมองในการมองเห็นเรขาคณิตของภูมิประเทศที่ต้องการศึกษามากยิ่งขึ้น

5.3.2 ข้อมูลที่ใช้ในการประมวลผลในงานวิจัยนี้มีข้อมูลภาพถ่ายจากระบบกล้องหลายหัวบริเวณตำแหน่งกล้องขวา (กล้องเฉียง) มีความเบลอและไม่ชัดเมื่อเทียบกับกล้องตัวอื่น ๆ ที่เหลือภายในระบบกล้อง เนื่องจากภาพจากกล้องมีปัญหาไฟล์ภาพมีการบีบอัดข้อมูลมาตั้งแต่ขณะบันทึกภาพ ดังนั้นการที่ภาพมีความไม่คมชัดจะส่งผลต่อการประมวลผลในขั้นตอนการโยยียดจุดบังคับภาคพื้นดินร่วมกับภาพจากกล้องนั้น รวมถึงการรังวัดค่าพิกัดบนภาพจากกล้องนั้นด้วย



รูปที่ 42 ตัวอย่างภาพถ่ายจากบนหน้าจอโปรแกรมที่ใช้สำหรับการโยยียดและรังวัด



รูปที่ 43 ตัวอย่างรายละเอียดข้อมูลภาพถ่ายจากทั้ง 5 กล้องของระบบกล้องหลายหัว ณ ตำแหน่งจุดถ่ายภาพเดียวกัน โดยเส้นสีแดงแสดงถึงรายละเอียดของการบีบอัดข้อมูล

5.3.3 เนื่องจากบริเวณพื้นที่การศึกษาในงานวิจัยนี้ไม่มีอาคารสิ่งปลูกสร้างที่เป็นอาคารสูงหรือเต็มไปด้วยอาคารหลาย ๆ หลัง ในบริเวณเดียวกัน การมีพื้นที่ทดสอบในรูปแบบนี้จะช่วยยืนยันประสิทธิภาพของการมีภาพถ่ายเฉียงมาช่วยในการประมวลผลข้อมูลภาพถ่าย สำหรับในอนาคตหากมีการต่อยอดงานวิจัยนี้ผู้วิจัยอาจทดลองเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแผนที่สามมิติที่ผลิตมาจากระหว่างแนวทางการเลือกใช้ระบบกล้องหลายหัวกับการเลือกใช้กล้องเพียงกล้องเดียว แต่สามารถปรับเปลี่ยนองศาของกล้องในการบันทึกภาพถ่ายได้ เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ประมวลผลได้ รวมถึงประเมินในส่วนของระยะเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงานและความซับซ้อนในแต่ละรูปแบบการปฏิบัติงาน

5.3.4 ข้อจำกัดด้านประสิทธิภาพของระบบกล้องหลายหัวที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เนื่องจากเป็นแบบจำลองแรก ๆ ที่มีการผลิตออกมา ทำให้การออกแบบเรื่องการระบายความร้อนยังทำได้ไม่ดัดนัก ทำให้บางครั้งขณะทำการถ่ายภาพเกิดความร้อนสะสมจากการเปิดเซนเซอร์เพื่อรับแสงผ่านม่านชัตเตอร์ ดังนั้นจึงอาจพบปัญหาหากกล้องหยุดทำงานจากการใช้งานต่อเนื่อง หรือในบางช่วงอุณหภูมิโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออากาศร้อน ดังนั้นหากมีการปรับเปลี่ยนชุดกล้องให้มระบบในการระบายความ

ร้อนที่ดีจะทำให้การทำงานสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความต่อเนื่องยิ่งขึ้น อีกทั้งระบบกล้องหลายหัวที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีการจัดเรียงในกล่องสี่เหลี่ยมกะทัดรัด แต่ผู้ใช้จะต้องนำหน่วยความจำ (Memory card) 5 แผ่นเสียบเข้าไปกับกล้องทั้ง 5 กล้อง ปัจจุบันระบบกล้องหลายหัวได้มีการพัฒนารุ่นใหม่ ดังรูปที่ 44 กล่าวคือมีการออกแบบระบบระบายความร้อนที่ดีขึ้น มีการรวมหน่วยความจำของทั้งกล้องไปเป็นหน่วยความจำรวม หน่วยความจำเป็นชนิด Solid State Drive(SSD) เมื่อบินบันทึกข้อมูลมาแล้ว ผู้ใช้จะใช้สายเชื่อมต่อสัญญาณ USB เสียบกล้องเข้ากับ Host computer แล้วจะสามารถมองเห็นหน่วยความจำเป็นไดรฟ์ 5 ตัวแยกจากกัน ทำให้ผู้ใช้สามารถย้ายไฟล์ภาพไปยัง Host-computer ได้อย่างสะดวก รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพ ดังนั้นในอนาคตอาจเลือกใช้ระบบกล้องหลายหัวที่เป็นแบบจำลองกล้องรุ่นใหม่ ๆ ที่มีประสิทธิภาพและความคงทนเพื่อให้การปฏิบัติงานเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 44 (ก) ระบบกล้องหลายหัว PSDK 102S V2 (ข) ระบบกล้องหลายหัว Surveyor 5 Standard

((ก) ดัดแปลงจาก Geo-matching.com, 2020 และ (ข) Unmannedrc.com, 2020)

5.3.5 สำหรับการทำงานที่ต้องการผลิตข้อมูลแผนที่สามมิติหรือแบบจำลองข้อมูลอาคารสิ่งปลูกสร้างตามความต้องการของภาคอุตสาหกรรมแผนที่ สามารถเลือกใช้วิธีการบินเฉยเพื่อบันทึกข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศแทนการใช้ระบบกล้องหลายหัวได้ แต่สิ่งที่เพิ่มเติมขึ้นมา คือ การออกแบบรูปแบบการบินให้บันทึกภาพถ่ายได้ครอบคลุมวัตถุที่ต้องการจะทำแผนที่สามมิติ รวมถึงอาจมีระยะเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงานภาคสนามที่มากกว่า



รูปที่ 45 แผนที่สามมิติที่ได้มาจากประมวลผลด้วยภาพถ่ายที่บันทึกมาด้วยวิธีการบินบันทึกภาพแบบ
เฉียง

(ดัดแปลงจาก โครงการวิจัยของสำนักงานจัดการทรัพย์สินจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2564)

5.3.6 สำหรับงานวิจัยในอนาคตอาจพิจารณาถึงความจำเป็นในการเลือกใช้ข้อมูลภาพถ่ายให้น้อยลงจากระบบกล้องหลายหัวที่บันทึกข้อมูลมาได้ ในงานวิจัยนี้ระบบกล้องหลายหัวที่ใช้เป็นระบบกล้องที่ประกอบไปด้วยกล้องถ่ายภาพตั้งจำนวน 1 กล้องและกล้องถ่ายภาพเฉียงจำนวน 4 กล้อง ซึ่งในการประมวลผลหากใช้ข้อมูลจากทั้ง 5 กล้องจะได้จำนวนภาพถ่ายที่ใช้ในการประมวลผลเป็นจำนวนมากแต่ก็จะส่งผลต่อการใช้เวลาในการประมวลผลเช่นกัน ดังนั้นอาจพิจารณาเลือกใช้ข้อมูลจากกล้องแค่บางกล้องมาประมวลผล เช่น ประมวลผลข้อมูลจาก 3 กล้อง ในรูปแบบกล้องกลาง (กล้องถ่ายภาพตั้ง) ร่วมกับกล้องซ้ายและกล้องขวา (กล้องถ่ายภาพเฉียง) หรือในรูปแบบกล้องกลาง (กล้องถ่ายภาพตั้ง) ร่วมกับกล้องหน้าและกล้องหลัง (กล้องถ่ายภาพเฉียง) เพื่อศึกษาผลลัพธ์ประสิทธิภาพในแง่ต่าง ๆ เช่น เวลาที่ใช้การประมวลผลข้อมูล ความแข็งแรงของโครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ ความถูกต้องเชิงตำแหน่งของข้อมูล โดยนำผลลัพธ์มาเปรียบเทียบกับกรณีที่ใช้ข้อมูลภาพถ่ายจากทั้ง 5 กล้อง

บรรณานุกรม

- Aicardi, I., Chiabrando, F., Grasso, N., Lingua, A. M., Noardo, F., & Spanó, A. (2016). UAV photogrammetry with oblique images: First analysis on data acquisition and processing. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). (1990). *ASPRS ACCURACY STANDARDS FOR LARGE-SCALE MAPS*.
http://www.asprs.org/a/society/committees/standards/1990_jul_1068-1070.pdf
- Chen, L. (2015). *An Oblique-imagery Case with Pix4Dmapper*. Retrieved from http://www.eurosdrr.net/sites/default/files/images/inline/09_pix4d-eurosdrr_isprs-southampton2015.pdf
- Colomina, I., & de la Tecnologia, P. M. (2008). Towards a new paradigm for high-resolution low-cost photogrammetry and remote sensing. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Congress, Beijing, China, XXXVII. Part B*,
- Eisenbeiß, H. (2009). *UAV photogrammetry* [ETH Zurich].
- Foxttechfpv.com. (2019). *FOXTECH 3DM V3 Oblique Camera for Mapping and Survey*. Retrieved from <https://www.foxttechfpv.com/foxttech-3dm-v3-oblique-camera-for-mapping-and-survey.html>
- Foxttechfpv.com. (2020). *FOXTECH Loong 2160 VTOL*. Retrieved from https://www.foxttechfpv.com/foxttech-loong-2160-vtol.html#yt_tab_products1
- Geo-matching.com. (2020). *Shenzhen Share UAV Technology Co., Ltd 5 Lenses Oblique Aerial Camera PSDK 102S V2*. Retrieved from <https://geo-matching.com/digital-aerial-cameras/5-lenses-oblique-aerial-camera-psdk-102s-v2>
- Jiang, S., & Jiang, W. (2017). On-board GNSS/IMU assisted feature extraction and matching for oblique UAV images. *Remote Sensing*, 9(8), 813.
- Jiang, S., Jiang, W., Huang, W., & Yang, L. (2017). UAV-based oblique photogrammetry for outdoor data acquisition and offsite visual inspection of transmission line. *Remote Sensing*, 9(3), 278.

- Lin, Y., Jiang, M., Yao, Y., Zhang, L., & Lin, J. (2015). Use of UAV oblique imaging for the detection of individual trees in residential environments. *Urban forestry & urban greening*, 14(2), 404-412.
- Lowe, D. G. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2), 91-110.
<https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
- Mapgear.com. (2020). *Emlid Reach M2 with GNSS Antenna*. Retrieved from <https://www.mapgear.com.au/product/emlid-reach-m2-with-gnss-antenna/>
- Minnesota Planning Land Management Information Center. (1999). *Positional Accuracy Handbook*.
- Moe, K., Toschi, I., Poli, D., Lago, F., Schreiner, C., Legat, K., & Remondino, F. (2016). Changing the production pipeline—use of oblique aerial cameras for mapping purposes. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 631.
- Nex, F., Armenakis, C., Cramer, M., Cucci, D. A., Gerke, M., Honkavaara, E., Kukko, A., Persello, C., & Skaloud, J. (2022). UAV in the advent of the twenties: Where we stand and what is next [Short survey]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 184, 215-242. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.12.006>
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied geomatics*, 6(1), 1-15.
- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., & Sarazzi, D. (2011). UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling—current status and future perspectives. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 38(1), C22.
- Remondino, F., & Gerke, M. (2015). Oblique aerial imagery—a review. *Photogrammetric week*,
- Strecha, C. (2014). The rayCloud—a vision beyond the point cloud. FIG Congress, sUAS News. (2017). *Ultra-Efficient Photogrammetry with Pix4Dmapper Pro's Multi-Camera Rig Processing*. Retrieved from <https://www.suasnews.com/2017/03/ultra-efficient-photogrammetry-pix4dmapper-pros-multi-camera-rig-processing/>

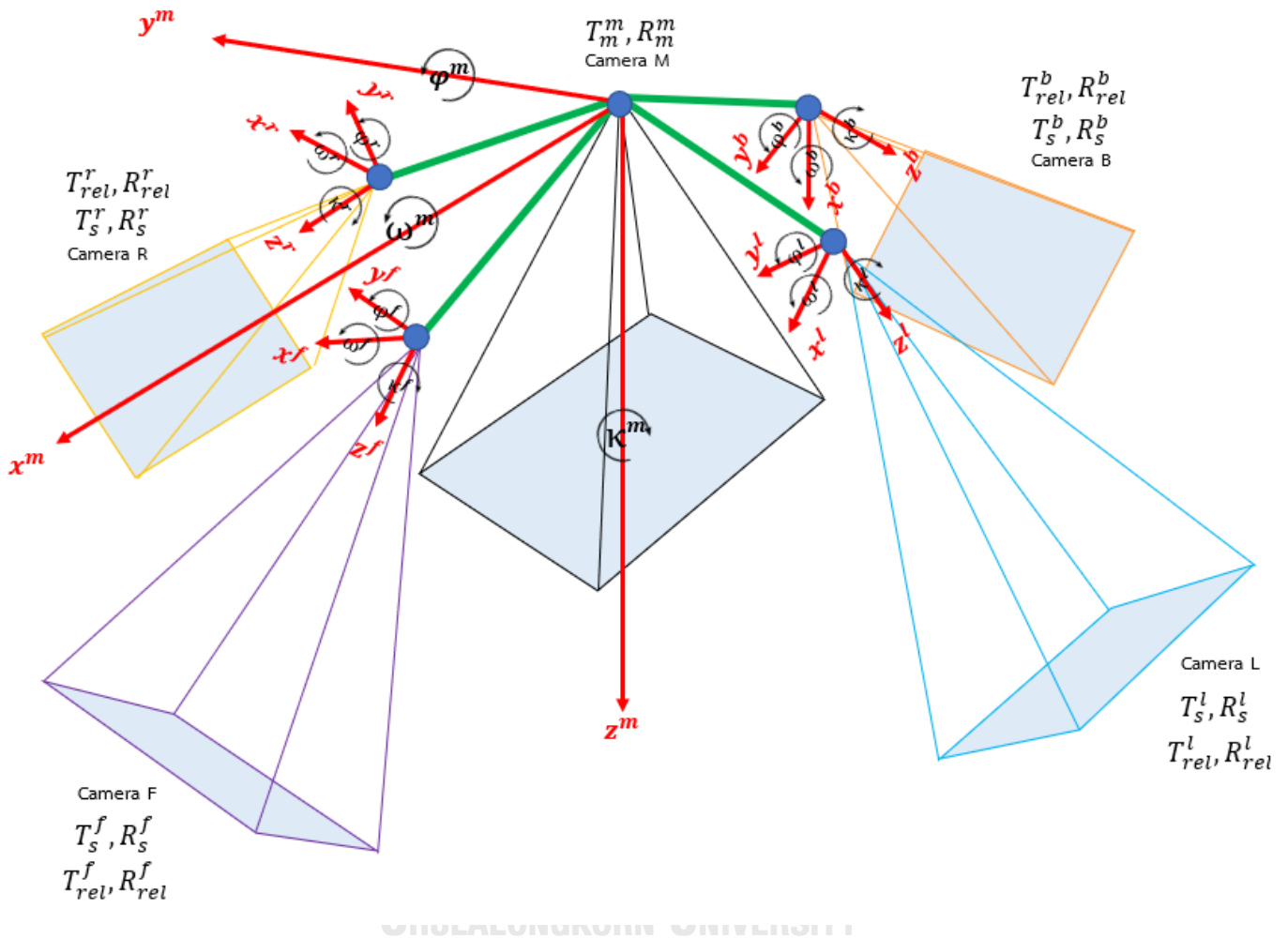
- Support.pix4d.com. (2011). *How are the Internal and External Camera Parameters defined*. Retrieved from <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559089-How-are-the-Internal-and-External-Camera-Parameters-defined>
- Tallysman.com. (2019). *HC871 Dual-Band Helical Antenna*. Retrieved from <https://www.tallysman.com/product/hc871-dual-band-helical-antenna/>
- Unmannedrc.com. (2020). *Professional Mapping Oblique Camera for UAV Aerial Mapping (120MP)*. Retrieved from <https://unmannedrc.com/products/evolution-oblique-camera-system>
- Vacca, G., Dessì, A., & Sacco, A. (2017). The use of nadir and oblique UAV images for building knowledge. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(12), 393.
- Wierzbicki, D. (2018). Multi-camera imaging system for UAV photogrammetry. *Sensors*, 18(8), 2433.
- Wolf, P., DeWitt, B., & Wilkinson, B. (2014). *Elements of photogrammetry with application in GIS* (4th, Ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- โครงการวิจัยของสำนักงานจัดการทรัพย์สินจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. (2564). *CU-point cloud*. Retrieved from <https://cu-pointcloud.web.app/viewer/CU-UAV/CU-pointcloud?x=665175.6&y=1518388.49&z=600&yaw=50&pitch=-0.75>
- ไพศาล สันติธรรมนนท์. (2557). เอกสารประกอบคำสอนวิชาการรังวัดด้วยภาพสมัยใหม่ (*Modern Photogrammetry*).
- จเด็จ ไพศาลสิทธิกันต์, & ไพศาล สันติธรรมนนท์. (2563, 15-17 กรกฎาคม 2563). การประยุกต์ใช้ระบบกล้องชุดถ่ายภาพเฉียงบนอากาศยานไร้คนขับเพื่อรังวัดรอยพิมพ์ฐานอาคาร การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25, ชลบุรี, ประเทศไทย.
- ถิรวัดน์ บรรณกุลพิพัฒน์, ไพศาล สันติธรรมนนท์, อธิราช มณีนาถ, & วีระชัย วงษ์วีระนิมิตร. (2565). แนวปฏิบัติที่เป็นเลิศในการประมวลผลเพื่อผลิตข้อมูลแผนที่จากภาพถ่ายด้วยยูเอวี. วารสารวิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา (กำลังเสนอตีพิมพ์).
- วิชัย เยี่ยงวีรชน. (2557). การสำรวจทางวิศวกรรม 1 (พิมพ์ครั้งที่ 2 ed.). สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สภาวิศวกร. (2561). มาตรฐานการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่องานวิศวกรรม. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.

ภาคผนวก



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก. ค่าพารามิเตอร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบกล้องหลายหัว



รูปที่ 46 ความสัมพันธ์ระหว่างกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรองบนอุปกรณ์จับยึดกล้อง

กำหนดให้กล้องถ่ายตั้งหรือกล้องกลาง (Camera M) เป็นกล้องหลักอ้างอิง (Reference camera) มีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการเลื่อนแกน คือ T_m^m และมีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการหมุนแกน คือ R_m^m ในส่วนของกล้องที่เหลืออีก 4 กล้องจะถูกกำหนดให้เป็นกล้องรอง (Secondary camera) ซึ่งกล้องแต่ละกล้องจะมีสัญลักษณ์เมทริกซ์ที่ใช้ดังต่อไปนี้

- กล้องหน้า (Camera F) มีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการเลื่อนแกน คือ T_s^f และมีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการหมุนแกน คือ R_s^f

- กล้องหลัง (Camera B) มีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการเลื่อนแกน คือ T_S^b และมีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการหมุนแกน คือ R_S^b
- กล้องซ้าย (Camera L) มีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการเลื่อนแกน คือ T_S^l และมีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการหมุนแกน คือ R_S^l
- กล้องขวา (Camera R) มีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการเลื่อนแกน คือ T_S^r และมีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการหมุนแกน คือ R_S^r

สำหรับกล้องรองแต่ละตัวจะมีพารามิเตอร์การเลื่อนแกนและการหมุนแกนที่มีความสัมพันธ์กับกล้องหลักอ้างอิง โดยความสัมพันธ์ในเชิงการเลื่อนแกนของตำแหน่ง (Relative Translation) มีสัญลักษณ์คือ T_{rel} และความสัมพันธ์ในเชิงการหมุน (Relative Rotation) มีสัญลักษณ์คือ R_{rel} ดังนั้นกล้องแต่ละกล้องจะมีสัญลักษณ์เมทริกซ์ที่แสดงความสัมพันธ์กับกล้องอ้างอิงดังต่อไปนี้

- กล้องหน้า (Camera F) มีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการเลื่อนแกนสัมพันธ์ คือ T_{rel}^f และมีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการหมุนแกนสัมพันธ์ คือ R_{rel}^f
- กล้องหลัง (Camera B) มีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการเลื่อนแกนสัมพันธ์ คือ T_{rel}^b และมีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการหมุนแกนสัมพันธ์ คือ R_{rel}^b
- กล้องซ้าย (Camera L) มีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการเลื่อนแกนสัมพันธ์ คือ T_{rel}^l และมีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการหมุนแกนสัมพันธ์ คือ R_{rel}^l
- กล้องขวา (Camera R) มีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการเลื่อนแกนสัมพันธ์ คือ T_{rel}^r และมีสัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของการหมุนแกนสัมพันธ์ คือ R_{rel}^r

จากสมการ (9) และ (10) ในบทที่ 2

$$T_S = T_m + R_m T_{rel} \quad (9)$$

$$R_S = R_m R_{rel} \quad (10)$$

สามารถนำมาแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรองในดังต่อไปนี้

กล้องกลาง (กล้องหลักอ้างอิง) มีเมทริกซ์การเลื่อนแกนและเมทริกซ์การหมุนแกนตามสมการที่ 19 และสมการที่ 20 ตามลำดับ

$$T_m^m = [(T_x, T_y, T_z)]_m^m \quad (19)$$

$$R_m^m = [R_X(\omega)R_Y(\varphi)R_Z(\kappa)]_m^m \quad (20)$$

กล้องซ้าย (กล้องรอง) มีเมทริกซ์การเลื่อนแกนและเมทริกซ์การหมุนแกนตามสมการที่ 21 และสมการที่ 22 ตามลำดับ

$$\begin{aligned} T_S^l &= T_m^m + R_m^m T_{rel}^l \\ &= [(T_x, T_y, T_z)]_m^m + [R_X(\omega)R_Y(\varphi)R_Z(\kappa)]_m^m [(T_x, T_y, T_z)]_m^l \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} R_S^l &= R_m^m R_{rel}^l \\ &= [R_X(\omega)R_Y(\varphi)R_Z(\kappa)]_m^m [R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^l \end{aligned} \quad (22)$$

กล้องขวา (กล้องรอง) มีเมทริกซ์การเลื่อนแกนและเมทริกซ์การหมุนแกนตามสมการที่ 23 และสมการที่ 24 ตามลำดับ

$$\begin{aligned} T_S^r &= T_m^m + R_m^m T_{rel}^r \\ &= [(T_x, T_y, T_z)]_m^m + [R_X(\omega)R_Y(\varphi)R_Z(\kappa)]_m^m [(T_x, T_y, T_z)]_m^r \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} R_S^r &= R_m^m R_{rel}^r \\ &= [R_X(\omega)R_Y(\varphi)R_Z(\kappa)]_m^m [R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^r \end{aligned} \quad (24)$$

กล้องหน้า (กล้องรอง) มีเมทริกซ์การเลื่อนแกนและเมทริกซ์การหมุนแกนตามสมการที่ 25 และสมการที่ 26 ตามลำดับ

$$\begin{aligned} T_S^f &= T_m^m + R_m^m T_{rel}^f \\ &= [(T_x, T_y, T_z)]_m^m + [R_X(\omega)R_Y(\varphi)R_Z(\kappa)]_m^m [(T_x, T_y, T_z)]_m^f \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} R_S^f &= R_m^m R_{rel}^f \\ &= [R_X(\omega)R_Y(\varphi)R_Z(\kappa)]_m^m [R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^f \end{aligned} \quad (26)$$

กล้องหลัง (กล้องรอง) มีเมทริกซ์การเลื่อนแกนและเมทริกซ์การหมุนแกนตามสมการที่ 27 และสมการที่ 28 ตามลำดับ

$$\begin{aligned} T_S^b &= T_m^m + R_m^m T_{rel}^b \\ &= [(T_x, T_y, T_z)]_m^m + [R_X(\omega)R_Y(\varphi)R_Z(\kappa)]_m^m [(T_x, T_y, T_z)]_m^b \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} R_S^b &= R_m^m R_{rel}^b \\ &= [R_X(\omega)R_Y(\varphi)R_Z(\kappa)]_m^m [R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^b \end{aligned} \quad (28)$$

สามารถสรุปสัญลักษณ์พารามิเตอร์ของกล้องแต่ละตัวบนระบบกล้องหลายหัวได้ดังตารางที่ 32 และสามารถสรุปความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรองบนระบบกล้องหลายหัวของพารามิเตอร์การเลื่อนแกนและพารามิเตอร์การหมุนได้ดังตารางที่ 33

ตารางที่ 32 สัญลักษณ์เมทริกซ์พารามิเตอร์ของกล้องแต่ละตัวบนระบบกล้องหลายหัว

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์เมทริกซ์			
	กล้องหน้า (Camera F)	กล้องหลัง (Camera B)	กล้องซ้าย (Camera L)	กล้องขวา (Camera R)
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

ตารางที่ 33 ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างกล้องหลักอ้างอิงและกล้องรองบนระบบกล้องหลายหัว

กล้องหลักอ้างอิง	กล้องกลาง (Camera M)	ความสัมพันธ์ทางการเลื่อนแกน	ความสัมพันธ์ทางการหมุนแกน
		$[(T_x, T_y, T_z)]_m^m$	$[R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^m$
กล้องรอง	กล้องหน้า (Camera F)	$[(T_x, T_y, T_z)]_m^m + [R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^m [(T_x, T_y, T_z)]_m^f$	$[R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^m [R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^f$
	กล้องหลัง (Camera B)	$[(T_x, T_y, T_z)]_m^m + [R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^m [(T_x, T_y, T_z)]_m^b$	$[R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^m [R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^b$
	กล้องซ้าย (Camera L)	$[(T_x, T_y, T_z)]_m^m + [R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^m [(T_x, T_y, T_z)]_m^l$	$[R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^m [R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^l$
	กล้องขวา (Camera R)	$[(T_x, T_y, T_z)]_m^m + [R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^m [(T_x, T_y, T_z)]_m^r$	$[R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^m [R_x(\omega)R_y(\varphi)R_z(\kappa)]_m^r$

ภาคผนวก ข. นิยามคำศัพท์เทคนิคภายในงานวิจัย

เนื่องจากการวิจัยครั้งนี้มีการกล่าวถึงและใช้คำศัพท์เทคนิคตลอดทั้งเล่มวิทยานิพนธ์ ผู้เขียนจึงขออธิบายนิยามของศัพท์เทคนิคไว้ในบทความนี้ เพื่อที่จะสามารถอ่านเนื้อหาภายในเล่มได้อย่างเข้าใจ

ศัพท์เทคนิค ภาษาอังกฤษ	คำย่อ	ศัพท์เทคนิค ภาษาไทย	ความหมาย
Aerial Photograph*	-	ภาพถ่ายทางอากาศ	ภาพถ่ายทางอากาศโดยใช้กล้องถ่ายภาพติดตั้งบนอากาศยาน หรือ อากาศยานไร้คนขับ ผลการบันทึกภาพที่ได้จะใช้ประโยชน์ในการทำแผนที่ในขั้นตอนต่อไปหรือใช้ในการตรวจการ
Aerial Triangulation*	AT	โครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ	กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดทางคณิตศาสตร์ประยุกต์ใช้สำหรับการคำนวณการปรับแก้ภาพภายนอกของภาพ (Exterior orientation parameter) ทุกใบในบล็อก และยังเป็นกรขยายจุดบังคับภาพ (Photo control) เพิ่มเติมในบล็อกภาพถ่าย ซึ่งจุดเหล่านี้เกิดจากการกำหนดจุดโยงยึด (Tie point) ที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงเรขาคณิตระหว่างพิกัดวัตถุบนพื้นดิน พิกัดภาพที่ปรากฏ และองค์ประกอบการจัดภาพภายนอกของภาพทุกใบในบล็อก
Bundle Block Adjustment*	BBA	การปรับแก้โครงข่ายบล็อกลำแสงของภาพถ่าย	กระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) เป็นการสร้างระบบสมการร่วมเส้นของจุดควบคุมภาพถ่าย จุดโยงยึด เพื่อทำการหาค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า ได้แก่ พารามิเตอร์การจัดภาพภายนอกของภาพถ่าย และ ค่าพิกัดบนภูมิประเทศของจุดโยงยึด โดยการคำนวณปรับแก้โครงข่ายบล็อกลำแสงของภาพถ่ายจะทำการสร้างสมการร่วมเส้นตามจำนวนของจุดควบคุมและจุดโยงยึดในแต่ละภาพ และอาจมีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดขอแบบจำลองของกล้องถ่ายภาพไปพร้อมกันในคราวเดียว การคำนวณแก้ปัญหจะใช้เทคนิคการปรับแก้ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุดด้วยเทคนิค Gauss-Markov ในปัจจุบันเทคนิคเชิงเลขหันมา

			นิยมใช้อัลกอริธึม Levenberg-Marquardt Algorithm (LMA) ซึ่งเหมาะสมสำหรับปัญหาขนาดใหญ่ ที่การคำนวณจะมีเสถียรภาพดีกว่า และมีความไวต่ำสำหรับค่าประมาณเริ่มต้นที่ อาจกำหนดให้มีค่าห่างออกไปจากผลคำตอบมาก
Camera-rig	-	สิ่งจับยึดกล้อง	โครงสร้างสิ่งจับยึดกล้องที่ใช้ในการโยกยึดกล้องถ่ายภาพจำนวนหลายกล้องเข้าด้วยกันและควบคุมให้แต่ละกล้องสามารถบันทึกภาพได้ในเวลาเดียวกัน
Camera Calibration*	-	การวัดสอบกล้องถ่ายภาพ	การวัดสอบกล้องถ่ายภาพ คือการวัดสอบทางเรขาคณิตที่ทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์สำหรับการจัดภาพภายในของกล้องถ่ายภาพ ได้แก่ ตำแหน่งของจุดมุมขยสำคัญ (C_x, C_y), ความยาวโฟกัส (f) และ ความผิดเพี้ยนของเลนส์ทั้งในแนวรัศมี (R_1, R_2, R_3) และแนวตั้งฉากภาพ (T_1, T_2)
Check Point*	CP	จุดตรวจสอบ	จุดตรวจสอบสำหรับการประเมินคุณภาพของแผนที่ โดยทั่วไปจุดตรวจสอบจะต้องเป็นจุดที่ทำการรังวัดค่าพิกัดด้วยวิธีการและคุณภาพที่เหนือกว่า เทียบกับค่าพิกัดที่ได้มาจากอีกแผนที่ชุดหนึ่ง เพื่อที่จะตรวจสอบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผล
Constraint	-	ค่าบังคับเข้าใกล้	ในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) โดยเทคนิคเชิงเลข จะมีการกำหนดค่าตัวเลขให้การคำนวณเป็นค่าที่ใกล้กับค่าคงที่ที่ต้องการบังคับ เพื่อให้เป็นพารามิเตอร์ที่ต้องการในแบบจำลอง การบังคับให้ค่าเข้าใกล้ มักจะกำหนดน้ำหนักตามสมมติฐานที่ต้องการ
Digital Elevation Model	DEM	แบบจำลองระดับความสูง	กรรมวิธีและรูปแบบการจัดเก็บค่าระดับบนพื้นผิวใด ๆ ในลักษณะแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ที่เป็นระบบ
Digital Surface Model	DSM	แบบจำลองพื้นผิวเหนือภูมิประเทศ	แบบจำลองพื้นผิวเหนือภูมิประเทศที่จัดเก็บข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบตารางกริดหรือข้อมูลราสเตอร์ โดยรวมความสูงของสิ่งปกคลุมพื้นผิวทางกายภาพของโลกด้วย เช่น อาคารสิ่งปลูกสร้าง ต้นไม้และพุ่มไม้ เป็นต้น

Digital Terrain Model	DTM	แบบจำลองระดับภูมิประเทศ	แบบจำลองความสูงของภูมิประเทศ และจัดเก็บให้อยู่ในรูปแบบตารางกริดหรือข้อมูลราสเตอร์ โดยที่กำจัดข้อมูลความสูงของสิ่งปกคลุมพื้นผิวทางกายภาพของโลกออกจากแบบจำลองพื้นผิวเหนือภูมิประเทศแล้ว เพื่อแสดงระดับของภูมิประเทศ
Exterior Orientation*	EO	ค่าพารามิเตอร์การจัดภาพภายนอก	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการบรรยายตำแหน่งและการวางตัวของเซนเซอร์บันทึกข้อมูล
Field of View*	FOV	มุมรับภาพและองศารับภาพ	ค่าขอบเขตของการมองเห็น ซึ่งเป็นสิ่งที่แสดงถึงพื้นที่การมองเห็นวัตถุของกล้องถ่ายภาพ
Free constraint	-	ค่าบังคับอิสระ	ในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) โดยเทคนิคเชิงเลข สำหรับพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ไม่ทราบค่ามาก่อน จะมีการกำหนดค่าตัวเลขเริ่มต้นให้ แล้วปล่อยให้การคำนวณเชิงเลขประมวลผลเชิงเลขได้อย่างอิสระ
Global Navigation Satellite System*	GNSS	ระบบโครงข่ายการรับวัดด้วยดาวเทียม	ระบบนำทางด้วยดาวเทียม เป็นค่ามาตรฐานทั่วไปที่ใช้เรียกแทนคำว่า Satellite Navigation System (Sat Nav) ซึ่งทำหน้าที่ให้ข้อมูลค่าพิกัดบนผิวโลก โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวรับสัญญาณเพื่อคำนวณและแสดงพิกัดตำแหน่ง ณ จุดที่ตัวรับสัญญาณตั้งอยู่
Ground Control Point*	GCP	จุดควบคุมภาคพื้นดิน	จุดที่ทราบค่าพิกัดในระบบพิกัดภูมิประเทศ เพื่อเป็นตัวกลางที่ทำให้สามารถประมวลผลจัดภาพให้มีความสัมพันธ์อ้างอิงกับพื้น ภูมิประเทศ
Ground Sample Distance*	GSD	ความละเอียดของจุดภาพ	ตัวเลขระยะที่บอกขนาดของตัวอย่างบนพื้นดินคิดที่ 1 จุดภาพ
Interior Orientation*	IO	ค่าพารามิเตอร์การจัดภาพภายใน	ค่าคงที่ของกล้องถ่ายภาพ ได้แก่ ค่าพารามิเตอร์ของค่าความคลาดเคลื่อนของเลนส์, ตำแหน่งจุดมูขยที่สำคัญของภาพถ่าย เป็นต้น ซึ่งค่าพารามิเตอร์จัดภาพภายใน จะถูกนำมาคำนวณในการแปลงระบบพิกัดจากระบบภาพถ่าย 2 มิติ เป็นระบบพิกัด 3 มิติ
Keypoint	-	จุดสำคัญ	คุณลักษณะของจุดที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่าย โดยพิจารณาจากสถิติของกลุ่มจุดภาพ

			และคุณลักษณะนี้จะค่อนข้างเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แม้ว่า จะประเมินจากภาพที่บันทึกมาจากกล้องที่ ถ่ายหลายครั้งหลายมุมมอง ซึ่งอาจทำให้ขนาด รูปร่างและทิศทางเปลี่ยนไป จุดสำคัญที่ได้นี้จะ เป็นข้อมูลจุดสำคัญที่จะใช้ในวิเคราะห์จับคู่ภาพ เพื่อนำไปกำหนดเป็นจุดโยงยึดภาพ (Tie point) ต่อไป อัลกอริธึมในการบรรยายคุณลักษณะนี้ที่ นิยมเช่น SIFT, SURF, ORB, BRIEF เป็นต้น
Lens Distortion*	-	ความผิดเพี้ยนของ เลนส์	ความผิดเพี้ยนของเลนส์ที่อาจเกิดขึ้นในขั้นตอน กระบวนการผลิตเลนส์ภาพถ่ายของกล้อง ซึ่ง จะต้องทำการวัดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ค่าแก้ ความผิดเพี้ยนของเลนส์ ประกอบไปด้วยความ ผิดเพี้ยนของเลนส์ในแนวรัศมี (R1,R2,R3) และ แนวตั้งฉากภาพ (T1,T2)
Multi View Geometry	MVG	เรขาคณิตจากหลาย มุมมอง	การมองเห็นวัตถุและจุดที่สนใจโดยมาจากการรังวัด มากกว่าสองมุมมอง ซึ่งช่วยทำให้มีแนวรังสีที่มา ตัดกันมากขึ้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มส่วน ซ้อนทับภาพถ่ายหรือเพิ่มมุมมองของวัตถุที่สนใจ บนภาพถ่ายให้มากขึ้น นิยมนำไปช่วยแก้ปัญหาใน งานทางด้าน การรังวัดด้วยภาพสมัยใหม่ที่ใช้ อัลกอริทึมของคอมพิวเตอร์วิชั่น
Multi-head camera systems	-	ระบบกล้องหลาย หัว	อุปกรณ์ถ่ายภาพที่ประกอบไปด้วยกล้องมากกว่า หนึ่งตัว โดยที่กล้องแต่ละตัวจะถูกโยงยึดกันด้วย สิ่งจับยึดกล้อง
Nadir Aerial Photograph*	-	ภาพถ่ายทางอากาศ ดิ่ง	ภาพถ่ายทางอากาศโดยใช้กล้องถ่ายภาพติดตั้ง บนอากาศยาน หรือ อากาศยานไร้คนขับ แกน ศูนย์กลางของกล้องจะติดตั้งให้อยู่ในแนวตั้ง โดย ความเอียงของแกนกล้องนี้ปกติจะน้อยกว่า 1 องศา และ ไม่เกิน 3 องศา การบันทึกภาพเกือบ ดิ่งนี้เพื่อให้มาตราส่วนของภาพที่บันทึกภาพได้มี คุณภาพใกล้เคียงกัน ทำให้ผลผลิตแผนที่ และ ข้อมูลที่ได้มีความสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ทำปฏิบัติการ
Oblique Aerial Photograph	-	ภาพถ่ายทางอากาศ เอียง	ภาพถ่ายทางอากาศโดยใช้กล้องถ่ายภาพติดตั้ง บนอากาศยาน หรือ อากาศยานไร้คนขับ โดย

			ภาพถ่ายที่ได้จะมีแกนของกล้องเอียง เพื่อให้บันทึกภาพด้านข้างของวัตถุ อาคารสิ่งปลูกสร้าง และพืชพรรณยืนต้น ได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ถ้าหากเป็นการบันทึกภาพด้านข้างได้หลากหลายทิศทาง ภาพที่ได้จะมีส่วนช่วยทำให้การแปลตีความภาพ การรังวัดเรขาคณิตบนภาพ มีคุณภาพและมีความครบถ้วนสมบูรณ์ยิ่งขึ้น
Orthophoto*	-	ภาพออร์โธ	ภาพของภูมิประเทศที่สร้างจากภาพถ่ายทางอากาศที่ทราบค่าพารามิเตอร์การจัดวางภาพ ภายในและการจัดวางภาพภายนอกพร้อมกับทราบถึงข้อมูลแบบจำลองภูมิประเทศ การผลิตแผนที่ภาพออร์โธจะอาศัยกระบวนการย้อนรอยรังสี (Ray tracing) ภาพออร์โธสามารถนำมาใช้ได้ ในลักษณะเดียวกับแผนที่ทางราบ เนื่องจากมีมาตราส่วนคงที่ทั่วทั้งภาพและจุดภาพมีการจัดเรียงสอดคล้องกับระบบแกนพิกัดแผนที่ที่เลือกใช้
Optimization	-	การค่าเหมาะสม	กระบวนการทางคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์ประยุกต์เพื่อการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแบบจำลองใด ๆ ที่สนใจ
Overlap*	-	ส่วนซ้อนด้านหน้า	ส่วนซ้อนของภาพถ่ายทางอากาศที่อยู่ในแนวบินเดียวกัน
Side lap*	-	ส่วนซ้อนด้านข้าง	ส่วนซ้อนของภาพถ่ายทางอากาศที่อยู่ประชิดกันในแต่ละแนวบิน
Tie points	-	จุดโยงยึด	ในกระบวนการถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ จะมีการกำหนดจุดพิกัดบนภูมิประเทศตามที่ปรากฏเห็นเด่นชัดบนภาพถ่าย จุดโยงยึดจะเป็นจุดที่ไม่มี การรังวัดค่าพิกัดในภาพสนาม และในกระบวนการปรับแก้โครงข่ายบล็อกลำแสงของภาพถ่าย (BBA) จะถือได้ว่าทุกจุดโยงยึดที่กำหนดใหม่จะเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าพิกัด 3 ตัวแปร (X,Y,Z) จุดที่ปรากฏเด่นชัดบนภาพจะต้องมีการรังวัดค่าพิกัดอย่างน้อย 2 จุดบน 2 ภาพ ทั้งนี้ เพื่อให้มีค่าสังเกตอย่างน้อย 4 ค่า จึงจะสามารถคำนวณหาค่าพิกัดได้ในที่สุด

Pixel Size*	-	ขนาดของจุดภาพ	ขนาดจุดภาพบนภาพถ่ายที่มีค่าจุดภาพ (Pixel value) เพียงค่าเดียว ขนาดจุดภาพมักจะระบุหน่วยเป็น ไมครอน
-------------	---	---------------	---

* (ดัดแปลงจาก สภาวิศวกร, 2561)



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ธีรวัฒน์ บรรณกุลพิพัฒน์
วัน เดือน ปี เกิด	7 ธันวาคม 2540
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2559 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนยอแซฟอุปถัมภ์ จังหวัดนครปฐม พ.ศ. 2563 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) เกียรตินิยมอันดับสอง สาขาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	เลขที่ 81/71 ซอย 6 หมู่บ้านกัลป์ใต้ ซอยทวีวัฒนา9 ถนนเลียบบคลองทวีวัฒนา แขวงทวีวัฒนา เขตทวีวัฒนา จังหวัดกรุงเทพฯ 10170
ผลงานตีพิมพ์	1. ธีรวัฒน์ บรรณกุลพิพัฒน์. (2563). การวิเคราะห์ระบบกล้องคู่ยูเอวีเพื่อใช้ทำแผนที่และแบบจำลองอาคาร. วารสารอินทานิษฐ์ ลำดับที่ 124 ปีที่ 25 ฉบับที่ 2 เมษายน-มิถุนายน 2563 หน้า 58 คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2. ไพศาล สันติธรรมนนท์ ธีรวัฒน์ บรรณกุลพิพัฒน์ และ บดินทร์ จุลนาถ (2565): "หลักการออกแบบการฉายแผนที่ความคลาดเคลื่อนต่ำสำหรับโครงการ" วารสารวิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ISSN:0857- 7951 (กำลังเสนอตีพิมพ์). 3. ธีรวัฒน์ บรรณกุลพิพัฒน์ ไพศาล สันติธรรมนนท์ ชีระรัช มณีนาถ และ วีระชัย วงษ์วีระนิมิตร (2565): "แนวปฏิบัติที่เป็นเลิศในการประมวลผลเพื่อผลิตข้อมูลแผนที่จากภาพถ่ายด้วยยูเอวี" วารสารวิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ISSN:0857- 7951 (กำลังเสนอตีพิมพ์). 4. ธีรวัฒน์ บรรณกุลพิพัฒน์ ไพศาล สันติธรรมนนท์ และ ชีระรัช มณีนาถ (2565): "การศึกษาแบบจำลองระบบกล้องหลายหัวบนอากาศยานไร้คนขับเพื่อการผลิตแผนที่สามมิติ" วารสารวิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ISSN:0857- 7951 (กำลังเสนอตีพิมพ์).
รางวัลที่ได้รับ	1. ได้รับรางวัลผลงานเชิงสร้างสรรค์ของนักศึกษาฝึกงาน (ประเภทเดี่ยว) ประเภทผลงานเชิงวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่อการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ประจำปี 2562 ภายใต้หัวข้อ "การพัฒนางานประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศและการสร้างข้อมูลแบบจำลองค่าระดับความสูงจากข้อมูลพอยต์คลาวด์". 2. ได้รับรางวัลชนะเลิศ MGA award ในการแข่งขัน Rapid Prototype Development (RPD) Challenge 2020 ที่จัดโดย Multi-GNSS Asia (MGA) ภายใต้ชื่อทีม CULFEWS (ChULalongkorn Flooding Early Warning System). 3. ได้รับทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่จัดสรรให้กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ตามความต้องการของกระทรวง กรม หรือหน่วยงานของรัฐ ประจำปี 2564 (ทุนบุคคลทั่วไป ระดับปริญญา) ภายใต้ต้นสังกัดของภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.