

การศึกษารวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบลูคของภาพถ่าย
ทางอากาศ



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2565
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL
PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

1st Lt. Thepparit Srirattanapaisarn



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 2022

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษากรรณวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ
โดย	ร.ท.เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
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
(อาจารย์ ดร.พลปริชา ชิตบุรี)

CHULALONGKORN UNIVERSITY

6372136021 : MAJOR SURVEY ENGINEERING

KEYWORD:

Thepparit Srirattanapaisam : A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK. Advisor: Assoc. Prof. PHISAN SANTITAMNONT, Dr.Ing.

Nowadays, Laser scanning or known as LiDAR is taking part in important role of surveying and mapping. Deploying a scanner on a smaller and more maneuverable aerial vehicle such as UAV is easier, making the LiDAR mapping is more convenient. Royal Thai Survey Department (RTSD) recognizes the benefits of using ULS (Unmanned aerial Laser Scanning) technology and has applied ULS to survey the topographical height data in the central watershed area of Thailand. The key outcome of this survey technology is point cloud data, which contains various specifications within each point cloud, such as the point's coordinate, RGB value obtained from the image pixel, intensity, flight line number, the reflection order, classification, etc. After inspecting the point clouds data of two adjacent flight lines in the overlapping area where are posing on the same height surface were found that the height value of point clouds is shifted in the range of 5 – 20 centimeters. If these inaccurate point clouds are used to create a digital elevation model (DEM), the model would be inaccurate and unreliable as well.

This research aim is studying of hybrid processing between UAV LiDAR mapping and aerial photogrammetric blocks by using RTSD point cloud and aerial image data. The study begins at the aerial image processing which has to do aerial triangulation (AT) by using photogrammetric computer vision (PCV). The key points are produced from image matching in this process and lead to point cloud densification by multiple-view geometry of aerial images in Structure-from-Motion (SfM) technique. For improving accurate of the coordinate of SfM point clouds, it requires ground control points (GCPs) with GNSS surveying in the NRTK method that provides high accuracy and precision coordinates in a short time. And the cause of point clouds and aerial images has been collected since the past 3 years, so GCPs must be the post-marking GCPs that using the prominent point in the environment where can be seen in aerial images. Then the SfM point cloud will be used to do strip adjustment for LiDAR point cloud instead of using LiDAR control points (LCPs) to adjust directly, because of using post-marking LCPs is too difficult due to the insufficient density of point cloud to specify the environment prominent point such as a corner of road line. The results of the research will examine the accuracy of LiDAR point clouds height values relative to check points (CPs) by calculating root mean square error of Z ($RMSE_z$). The LiDAR point clouds to be examined are 1) the unadjusted LiDAR point cloud 2) the strip adjusted LiDAR point cloud none of using SfM point cloud and 3) the strip adjusted LiDAR point cloud using SfM point cloud. Finally, compare the $RMSE_z$ error of the three different LiDAR point clouds.

The research's result was found that the strip adjusted LiDAR point cloud using SfM point cloud give the best height accuracy which $RMSE_z$ is 7.4 centimeters (At 95% confidence level of ASPRS standard is 14.5 centimeters) when compared to the unadjusted LiDAR point cloud which $RMSE_z$ is 8.3 centimeters (At 95% confidence level of ASPRS standard is 16.3 centimeters) and the strip adjusted LiDAR point cloud none using SfM point cloud which $RMSE_z$ is 9.2 centimeters (At 95% confidence level of ASPRS standard is 18.0 centimeters). So, it can be concluded that the hybrid processing between UAV LiDAR mapping and aerial photogrammetric block could provide a better vertical positioning accuracy of LiDAR point cloud.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Survey Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2022

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องมาจากคำปรึกษา คำแนะนำและการสนับสนุนจากหลายบุคคลและหลายฝ่ายด้วยกันโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล สันติธรรมนนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ได้ให้ความรู้ทางด้านทฤษฎีและการปฏิบัติทั้งในเรื่องการประมวลผลข้อมูล พอยต์คลาวด์และการรังวัดภาพถ่ายทางอากาศตามหลักการทางโฟโตแกรมเมตรี อีกทั้งยังให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่าง ๆ รวมถึงตรวจสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้ข้าพเจ้า นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย อาจารย์ ดร.ชัยโชค ไวกาษา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.พลปรีชา ชิตบุรี กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้ให้คำแนะนำต่าง ๆ เพื่อนำไปปรับปรุงให้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ตั้งแต่การสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบุคลากรทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยซึ่งประกอบด้วย อาจารย์ทุกท่านที่ให้การอบรมสั่งสอน ให้ความรู้ในด้านวิชาการและคำแนะนำต่าง ๆ แก่ข้าพเจ้า ตลอดจนเจ้าหน้าที่ที่ช่วยอำนวยความสะดวกด้านจัดการสอบและดำเนินงานด้านเอกสารในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ รวมถึงเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ นิสิตที่คอยให้ความช่วยเหลือสนับสนุน และให้กำลังใจในการทำงานวิจัย ตลอดจนเติมเต็มการใช้ชีวิตในรั้วมหาวิทยาลัยของข้าพเจ้าได้อย่างสมบูรณ์

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณกรมแผนที่ทหาร คณะผู้บังคับบัญชา ตลอดจนเจ้าหน้าที่ ที่ได้ให้การสนับสนุนและอนุเคราะห์ให้ข้าพเจ้าได้มีข้อมูล คอมพิวเตอร์ และซอฟต์แวร์ประมวลผล มาใช้ในการศึกษาวิจัย ซึ่งถือเป็นสิ่งที่มีคุณค่าอย่างยิ่ง

และทำยนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา รวมถึงคนในครอบครัวที่ให้การสนับสนุนในทุกด้าน และคอยเป็นกำลังใจให้กับข้าพเจ้าเสมอมา ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่องานทางด้านวิศวกรรมสำรวจของประเทศไทยและผู้ที่เกี่ยวข้องต่อไป และหากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ข้าพเจ้าขอน้อมรับและขอภัยเป็นอย่างสูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตการวิจัย	4
1.3.1 ขอบเขตของเนื้อหาที่ศึกษา.....	4
1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา.....	5
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	7
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	7
2.1.1 ไลดาร์ และการสแกนด้วยแสงเลเซอร์.....	7
2.1.2 การสแกนด้วยเลเซอร์ทางอากาศ.....	8
2.1.3 การกำหนดพิกัดตำแหน่งบนโลกด้วยวิธีตรงกับข้อมูลพอยต์คลาวด์.....	10
2.1.4 ความคลาดเคลื่อนของการสแกนด้วยแสงเลเซอร์ทางอากาศ	14

2.1.5	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวบิน.....	15
2.1.6	การสะท้อนกลับของเลเซอร์.....	18
2.1.7	การประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งของข้อมูลพอยต์คลาวด์.....	19
2.1.8	สมการสถานะร่วมเส้น (Collinearity equations).....	20
2.1.9	ข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ.....	23
2.1.10	การจับคู่จุดภาพด้วยการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ (Computer vision).....	25
2.1.11	การรังวัดจุดสามมิติด้วยภาพถ่ายทางอากาศหลายมุมมอง.....	26
2.1.12	การสำรวจโครงสร้างจากการเคลื่อนไหว.....	27
2.1.13	การประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งของการรังวัดค่าพิกัดบนภาพถ่าย.....	28
2.1.14	การรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐาน.....	30
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
2.2.1	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการรังวัดภาพถ่ายด้วยกระบวนการทางโฟโตแกรมเมตรี.....	31
2.2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปรียบเทียบความถูกต้องของข้อมูลพอยต์คลาวด์.....	32
2.2.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวบิน.....	32
บทที่ 3	วิธีดำเนินงานวิจัย.....	38
3.1	โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย.....	38
3.2	ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย.....	38
3.3	การดำเนินงานวิจัย.....	42
บทที่ 4	ผลการศึกษาวิจัย.....	60
4.1	ผลการประมวลผลข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ.....	60
4.2	ผลการสร้างข้อมูลพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่น.....	64
4.3	ผลการรังวัดข้อมูลเส้นจากข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM.....	65
4.4	ผลการจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์.....	67
4.5	ผลการสร้างเส้นกำกับกับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวบิน.....	68

4.6 ผลการประมวลผลหาความผันผวนของเส้นกำกับ	73
4.7 ผลการปรับแก้เส้นกำกับ	74
4.8 ผลการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวบิน	75
4.9 ผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์	77
บทที่ 5 อภิปรายผล สรุปผลการศึกษาวิจัย และข้อเสนอแนะ	87
5.1 อภิปรายผลการศึกษา	87
5.1.1 อภิปรายผลการประมวลผลถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ	89
5.1.2 อภิปรายผลการสร้างข้อมูลพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่น	90
5.1.3 การอภิปรายผลการรังวัดข้อมูลเส้นจากข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM	91
5.1.4 การอภิปรายผลการจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์	91
5.1.5 การเปรียบเทียบผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งของข้อมูลพอยต์ คลาวด์จากไลดาร์	92
5.2 สรุปผลการศึกษาวิจัย	93
5.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	96
บรรณานุกรม	98
ภาคผนวก	102
ภาคผนวก ก. แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ	103
ภาคผนวก ข. แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ	128
ภาคผนวก ค. นิยามศัพท์เทคนิคภายในงานวิจัย	147
ประวัติผู้เขียน	153

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 รายละเอียดข้อมูลจำเพาะที่สำคัญของกล้อง Cannon EOS รุ่น 5DSR.....	41
ตารางที่ 2 รายละเอียดค่าพิกัดของจุด LD61B034	41
ตารางที่ 3 ค่าพิกัดของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน จำนวน 25 จุด.....	45
ตารางที่ 4 ค่าพิกัดของจุดตรวจสอบ จำนวน 20 จุด.....	46
ตารางที่ 5 การแบ่งชุดจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน.....	49
ตารางที่ 6 ค่าสถิติของความคลาดเคลื่อนของแต่ละแกนพิกัด ได้แก่ Easting, Northing และ Height ของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินชุดที่ 1 ที่ใช้เป็นจุดควบคุม และจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน ชุดที่ 2 ที่ใช้เป็นจุดตรวจสอบ ในการประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ	61
ตารางที่ 7 ค่าสถิติของความคลาดเคลื่อนของแต่ละแกนพิกัด ได้แก่ Easting, Northing และ Height ของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินชุดที่ 2 ที่ใช้เป็นจุดควบคุม และจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน ชุดที่ 1 ที่ใช้เป็นจุดตรวจสอบ ในการประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ	62
ตารางที่ 8 ค่าสถิติของความคลาดเคลื่อนของแต่ละแกนพิกัด ได้แก่ Easting, Northing และ Height ของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินทั้ง 25 จุด ในการประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ.....	63
ตารางที่ 9 ผลการประมวลผลการสร้างข้อมูลพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่น	65
ตารางที่ 10 ผลการจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์	67
ตารางที่ 11 ผลการจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM.....	67
ตารางที่ 12 ค่าทางสถิติในการประเมินค่าต่างทางตำแหน่งในทางราบและทางตั้งของเส้นกำกับใน รูปแบบการปรับแก้ที่ 1.....	70
ตารางที่ 13 ค่าทางสถิติในการประเมินค่าต่างทางตำแหน่งในทางราบและทางตั้งของเส้นกำกับใน รูปแบบการปรับแก้ที่ 2.....	73
ตารางที่ 14 ค่าทางสถิติในการประมวลผลเพื่อคำนวณหาความผันผวนของเส้นกำกับกับการปรับแก้ใน รูปแบบที่ 1	73

ตารางที่ 15 ค่าทางสถิติในการประมวลผลเพื่อคำนวณหาความผันผวนของเส้นกำกับการปรับแก้ใน รูปแบบที่ 2	74
ตารางที่ 16 ผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวบิน.....	78
ตารางที่ 17 ผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ ผ่านการปรับแก้เป็นแนวบินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้.....	79
ตารางที่ 18 ผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ ผ่านการปรับแก้เป็นแนวบินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้.....	81
ตารางที่ 19 ผลการทดสอบแบบ ANOVA เพื่อทดสอบความแปรปรวนของค่าต่างทางความสูง ระหว่างจุดตรวจสอบและข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้ง ของทั้ง 3 ผลการตรวจสอบ	83
ตารางที่ 20 ผลการทดสอบหาความแตกต่างรายคู่ของผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่ง ในทางตั้งของทั้ง 3 ผลการตรวจสอบด้วยวิธีบอนเฟอร์โรนี แบบ t-Test ที่ตัวอย่างมีอิสระต่อกัน.....	84
ตารางที่ 21 ผลการทดสอบแบบ t-Test ของค่าเฉลี่ยคู่ตัวอย่างที่มีความสัมพันธ์เนื่องต่อกันของผล การตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ถูกปรับแก้ เป็นแนวบินไปสู่ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวบินของทั้ง 2 รูปแบบ	85

สารบัญรูปร่างภาพ

หน้า

รูปที่ 1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษาของบริเวณศูนย์เครือข่ายการเรียนรู้เพื่อภูมิภาค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี.....	6
รูปที่ 2 หลักการวัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์ (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2564)	7
รูปที่ 3 แสดงลักษณะการทำงานของสแกนด้วยเลเซอร์ทางอากาศ (Hillen, 2011).....	9
รูปที่ 4 การทำงานของระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ติดตั้งบนอากาศยาน (Hillen, 2011)	9
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของอุปกรณ์รังวัดต่าง ๆ ที่มีการติดตั้ง ในระบบการสแกนด้วยเลเซอร์ทางอากาศ (Glira, 2018).....	10
รูปที่ 6 ผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนของค่าพารามิเตอร์ในการวางตัวของเลเซอร์สแกนเนอร์ โดย ที่ 3 รูปด้านบน เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากมุม และ 3 รูปด้านล่าง เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิด จากระยะขดเซย (Glira, 2018)	14
รูปที่ 7 พฤติกรรมการสะท้อนกลับของเลเซอร์ที่ตกกระทบลงบนพื้นผิววัตถุต่าง ๆ ในภูมิประเทศ (Shin et al., 2022).....	19
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของจุดบนเส้นตรง 3 จุด ได้แก่ จุดศูนย์กลางการฉาย จุดบนภาพถ่าย และจุด บนพื้นดิน (กนก วีรวงศ์, 2564).....	21
รูปที่ 9 ตำแหน่งของจุดควบคุมภาพถ่ายชนิดต่าง ๆ (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2564).....	24
รูปที่ 10 การขยายจุดควบคุมที่ได้จากการคำนวณของบล็อกภาพถ่าย ที่มีการซ้อนกันอย่างเป็นระบบ และอ้างอิงระบบพิกัดภาคพื้นดินได้ด้วยจุดควบคุมภาคพื้นดิน (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2564).....	24
รูปที่ 11 แนวรังสีของการมองเห็นเพื่อรังวัดค่าพิกัดสามมิติ แบบภาพสเตอริโอ และแบบหลายมุมมอง (Strecha, 2014).....	27
รูปที่ 12 ลักษณะของการรังวัดค่าพิกัดของจุดที่สนใจด้วยเทคนิค SfM (Riel, 2016).....	28
รูปที่ 13 ไลดาร์แบบ LiDAR Swiss Micro VUX CE และกล้องถ่ายภาพดิจิทัล DSLR.....	39
รูปที่ 14 ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่แสดงสีด้วยค่าสี RGB ในจุดภาพของภาพถ่ายทางอากาศ	39
รูปที่ 15 ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่แสดงสีด้วยลำดับของแนวกบินที่แตกต่างกัน	39

รูปที่ 16 ภาพถ่ายทางอากาศที่ครอบคลุมขอบเขตพื้นที่ศึกษา	40
รูปที่ 17 ตัวอย่างภาพถ่ายทางอากาศที่ถ่ายจาก Cannon EOS 5DSR.....	40
รูปที่ 18 การติดตั้งอุปกรณ์การสำรวจด้วยไลดาร์และกล้องถ่ายภาพ เข้ากับอากาศยานไร้คนขับรุ่น SUD VTOL-60	42
รูปที่ 19 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	42
รูปที่ 20 จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (สามเหลี่ยมสีแดง) จำนวน 25 จุด ในพื้นที่ศึกษา.....	43
รูปที่ 21 จุดตรวจสอบ (วงกลมสีเขียว) จำนวน 20 จุด ในพื้นที่ศึกษา.....	44
รูปที่ 22 ตัวอย่างการสำรวจรังวัดค่าพิกัดของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน แบบเข้าภายหลัง ที่อาศัยเป้าธรรมชาติ (ก) และ (ข) และจุดตรวจสอบ (ค) และ (ง).....	45
รูปที่ 23 การประมวลผลทำชายสามเหลี่ยมทางอากาศของบล็อกภาพถ่าย จำนวน 140 ภาพ.....	48
รูปที่ 24 การแบ่งชุดจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน จำนวน 2 ชุด (ชุดที่ 1 สามเหลี่ยมสีแดง และ ชุดที่ 2 สามเหลี่ยมสีเหลือง).....	49
รูปที่ 25 ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่เป็นผลลัพธ์จากการสร้างพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่น.....	50
รูปที่ 26 (ก) การเลือกจุดเริ่มต้นและจุดปลายให้กับข้อมูลเส้นโดยเลือกจุดที่มีลักษณะเด่นชัด (ข) การรังวัดข้อมูลเส้นจากพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการทำ SfM.....	51
รูปที่ 27 การจำแนกประเภทของข้อมูลพอยต์คลาวด์ออกเป็น จุดบนพื้นดิน (สีส้ม) จุดบนอาคาร (สีแดง) จุดที่ไม่ระบุประเภท (สีขาว).....	52
รูปที่ 28 การใช้มุมมองภาพตัดขวางมาช่วยในการจำแนกประเภทของข้อมูลพอยต์คลาวด์ ให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น (สีส้ม เป็นจุดบนพื้นดิน และสีขาว เป็นจุดที่ไม่ระบุประเภท).....	53
รูปที่ 29 แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนในการประมวลผลเพื่อปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์.....	53
รูปที่ 30 ตัวอย่างการสร้าง Section line โดยการกำหนดจุดเริ่มต้นและจุดปลายในมุมมองภาพด้านบนและมุมมองภาพตัดขวาง เพื่อเป็นการกำหนดพิกัดทั้งในทางราบและทางตั้ง.....	54
รูปที่ 31 ข้อมูลเส้นจากการสร้าง Section line จะทำให้ทราบถึงค่าต่างทางความสูงระหว่างเส้นที่สร้างจากข้อมูลพอยต์คลาวด์ระหว่างแนวกบินที่ต่างกัน (สีเขียวและสีน้ำเงิน)	55
รูปที่ 32 องค์ประกอบที่ต้องระบุในการประมวลผลคำนวณหาความผันผวนของเส้นกำกับ เพื่อการปรับแก้ค่าทางตำแหน่งและค่าการวางตัวของเลเซอร์สแกนเนอร์.....	56

รูปที่ 33 (ก) การกำหนดรายละเอียดสำหรับการตรวจสอบค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งของข้อมูลพอยต์คลาวด์โดยใช้เครื่องมือ Output Control Report (ข) วิธีการตรวจสอบค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งของโปรแกรม Terra scan.....	58
รูปที่ 34 ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการสร้างพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่นในมุมมองด้านบน	65
รูปที่ 35 ตัวอย่างการรังวัดเส้น (Polyline) โดยใช้จุดเริ่มต้นและจุดปลายที่เป็นจุดเด่นชัด (ก) โดยใช้เส้นถนน (ข) โดยใช้แผงโซลาร์เซลล์บนหลังคาของอาคาร	66
รูปที่ 36 การรังวัดเส้น (Polyline) บนพื้นที่ราบเรียบ (ก) บริเวณลานจอดรถบรรทุกพื้นคอนกรีต (ข) บริเวณลานหน้าโกดัง.....	66
รูปที่ 37 ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการจำแนกประเภทแล้ว	67
รูปที่ 38 ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ที่ผ่านการจำแนกประเภทแล้ว	68
รูปที่ 39 ตัวอย่างเส้นกำกับการปรับแก้ที่สร้างขึ้นจากข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ (ก) บริเวณหลังคาของอาคาร (ข) บริเวณพื้นถนน โดยใช้เส้นนำสายตาจาก Polyline.....	69
รูปที่ 40 เส้นนำสายตาที่อยู่นอกบริเวณส่วนซ้อนของข้อมูลพอยต์คลาวด์ ระหว่างสองแนวบินที่ติดกัน (เส้นสีขาว) ทำให้ไม่สามารถสร้างเส้นกำกับได้	70
รูปที่ 41 ลักษณะการเรียงตัวของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ (สีแดง) และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM (สีเขียว) (Srirattanapaisarn et al., 2022).....	71
รูปที่ 42 เส้นกำกับที่สร้างขึ้นจากข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์จำนวน 1 แนวบิน (เส้นสีเขียว) และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM (เส้นสีฟ้า) โดยใช้เส้นนำสายตาจาก Polyline.....	71
รูปที่ 43 (ก) เส้นกำกับที่สร้างขึ้นบริเวณหลังคาของอาคารด้วยข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์จำนวน 2 แนวบิน (เส้นสีน้ำเงินและสีเขียว) และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM (เส้นสีฟ้า) (ข) เส้นกำกับที่สร้างขึ้นบริเวณพื้นถนนด้วยข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์จำนวน 2 แนวบิน (เส้นสีแดงและสีเขียว) และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM (เส้นสีฟ้า).....	72
รูปที่ 44 ตัวอย่างการปรับแก้เส้นกำกับของรูปแบบการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์แบบที่ 1 ที่แสดงลักษณะการวางตัวและค่าต่างทางความสูงของเส้นกำกับ (ก) ก่อนการปรับแก้ และ (ข) หลังการปรับแก้ ด้วยมุมมองภาพตัดขวาง.....	74

รูปที่ 45 ตัวอย่างการปรับแก้เส้นกำกับของรูปแบบการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์แบบที่ 2 ที่แสดง ลักษณะการวางตัวและค่าต่างทางความสูงของเส้นกำกับ (ก) ก่อนการปรับแก้ และ (ข) หลังการ ปรับแก้ ด้วยมุมมองภาพตัดขวาง.....	75
รูปที่ 46 ลักษณะการวางตัวของข้อมูลพอยต์คลาวด์ (ก) ก่อน และ (ข) หลัง การปรับแก้ข้อมูลพอยต์ คลาวด์ในรูปแบบการปรับแก้ที่ 1 ด้วยมุมมองภาพตัดขวาง	76
รูปที่ 47 ลักษณะการวางตัวของข้อมูลพอยต์คลาวด์ (ก) ก่อน และ (ข) หลัง การปรับแก้ข้อมูลพอยต์ คลาวด์ในรูปแบบการปรับแก้ที่ 2 ด้วยมุมมองภาพตัดขวาง	76
รูปที่ 48 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่า $RMSE_z$ ของข้อมูลพอยต์คลาวด์ในแต่ละรูปแบบ	82
รูปที่ 49 ตัวอย่างเป่าล่งหน้ารูปทรงจั่วหลังคาของการสำรวจด้วยไลดาร์ทางอากาศ (Davidson et al., 2019).....	97
รูปที่ 50 แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP01	103
รูปที่ 51 แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP02	104
รูปที่ 52 แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP03	105
รูปที่ 53 แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP04	106
รูปที่ 54 แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP05	107
รูปที่ 55 แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP06	108
รูปที่ 56 แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP07	109
รูปที่ 57 แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP08	110
รูปที่ 58 แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP09	111
รูปที่ 59 แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP10	112
รูปที่ 60 แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP11	113
รูปที่ 61 แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP12	114
รูปที่ 62 แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP13	115
รูปที่ 63 แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP14	116
รูปที่ 64 แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP15	117

รูปที่ 65 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP16	118
รูปที่ 66 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP17	119
รูปที่ 67 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP18	120
รูปที่ 68 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP19	121
รูปที่ 69 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP20	122
รูปที่ 70 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP21	123
รูปที่ 71 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP22	124
รูปที่ 72 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP23	125
รูปที่ 73 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP24	126
รูปที่ 74 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP25	127
รูปที่ 75 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP01	128
รูปที่ 76 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP02	129
รูปที่ 77 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP03	130
รูปที่ 78 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP04	131
รูปที่ 79 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP05	132
รูปที่ 80 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP06	133
รูปที่ 81 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP07	134
รูปที่ 82 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP08	135
รูปที่ 83 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP09	136
รูปที่ 84 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP10	137
รูปที่ 85 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP11	138
รูปที่ 86 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP12	139
รูปที่ 87 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP14	140
รูปที่ 88 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP15	141

รูปที่ 89 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP16	142
รูปที่ 90 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP17	143
รูปที่ 91 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP18	144
รูปที่ 92 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP19	145
รูปที่ 93 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP20	146



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ (พอยต์คลาวด์ : Point cloud) ที่ได้จากการสำรวจด้วยเครื่องมือไลดาร์ (Light Detection And Ranging : LiDAR) ทางอากาศ หรือที่รู้จักว่า การสแกนด้วยเลเซอร์ทางอากาศ (Airborne Laser Scanning : ALS) เป็นข้อมูลที่เริ่มได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นในประเทศไทยสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านการทำแผนที่และงานด้านวิศวกรรมต่าง ๆ ซึ่งเห็นได้จากการที่หน่วยงานของรัฐและเอกชนในประเทศไทยได้เริ่มนำข้อมูลจากเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ในการทำงาน โดยเฉพาะกรมแผนที่ทหารที่ได้นำอุปกรณ์ไลดาร์และกล้องถ่ายภาพดิจิทัลติดเข้ากับอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle : UAV) หรือที่เรียกการสำรวจนี้ว่า ULS (Unmanned aerial Laser Scanning) แล้วนำไปสำรวจข้อมูลความสูงภูมิประเทศบริเวณลุ่มน้ำภาคกลาง (เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล, 2563) เพื่อนำข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้มาจัดทำเป็นแบบจำลองความสูงภูมิประเทศ (Digital Elevation Model : DEM) ที่มีความละเอียดถูกต้องสูงกว่าการได้มาด้วยวิธีการทางโฟโตแกรมเมตรีและรวดเร็วกว่าการรังวัดในสนาม โดยเล็งเห็นถึงความสำคัญของเหตุอุทกภัยที่มักเกิดขึ้นอยู่บ่อยครั้ง ข้อมูลความสูงดังกล่าวจะช่วยให้หน่วยงานต่าง ๆ สามารถนำไปใช้ในการวางแผน บริหารจัดการ และแก้ปัญหาได้อย่างรวดเร็วและถูกต้อง อีกทั้งยังพร้อมให้การสนับสนุนข้อมูลดังกล่าวกับหน่วยงานภาครัฐและเอกชนสำหรับการนำไปใช้พัฒนาโครงสร้างด้านต่าง ๆ ของประเทศ

ในการบินสำรวจด้วยไลดาร์ของกรมแผนที่ทหาร จะทำการบินเป็นแนวบิน และจะบินให้มีการซ้อนกันของข้อมูลระหว่างแนวบินที่ติดกัน เพื่อให้จะให้ข้อมูลที่ได้มีการเชื่อมต่อและต่อเนื่องกันจนครอบคลุมเป็นพื้นที่ขนาดใหญ่ แต่เมื่อนำข้อมูลพอยต์คลาวด์มาตรวจสอบกลับพบว่า ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่อยู่ในบริเวณส่วนซ้อนระหว่างแนวบิน (Overlap) กลับมีค่าความสูงที่ไม่เท่ากัน อยู่ในระดับ 5 – 20 เซนติเมตร แม้ว่าจุดที่ตกกระทบนั้นจะเป็นจุดบนพื้นผิววัตถุเดียวกัน เช่น ถนน และหลังคาของอาคารบ้านเรือน เป็นต้น ผลที่ตามมาคือเมื่อนำข้อมูลพอยต์คลาวด์ไปจัดทำเป็นแบบจำลองความสูงภูมิประเทศแล้วจะพบรอยต่อที่ไม่ต่อเนื่องของแบบจำลอง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความไม่ถูกต้องและไม่น่าเชื่อถือของข้อมูลความสูงอันเป็นผลมาจากความคลาดเคลื่อนที่แฝงอยู่ในข้อมูลพอยต์คลาวด์ ซึ่งได้รับมาจากอุปกรณ์การสำรวจที่เป็นความคลาดเคลื่อนเป็นระบบ (Systematic error) เกิดจากการทำงานร่วมกันของระบบกำหนด

ตำแหน่งด้วยดาวเทียม (Global Navigation Satellite System : GNSS) และระบบนำทางด้วยความเฉื่อยเพื่อหาค่าการเอียงตัว (Inertial Navigation System : INS) (Chen et al., 2021) และอาจมาจากการดำเนินการสำรวจ หรือเพราะสาเหตุอื่น ๆ ที่ไม่อาจตรวจสอบได้

จากความคลาดเคลื่อนข้างต้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ก่อนที่จะนำไปใช้งานในขั้นตอนต่อ ๆ ไป โดยการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จะดำเนินการปรับแก้เป็นแนวนบิน (Strip adjustment) ซึ่งเป็นงานที่มีการศึกษาค้นคว้าวิจัยในต่างประเทศที่ทำกันมาอย่างต่อเนื่อง โดยมีการปรับแก้ในหลากหลายวิธี เช่น การปรับแก้ร่วมกับแบบจำลองของระบบที่ติดตั้งในอุปกรณ์ System driven model ของ Burman (2002) การปรับแก้โดยใช้แบบจำลอง Quadratic optimization models ของ Willers et al. (2008) และการปรับแก้ด้วยวิธี ICP (Iteration Closest Point) ของ Glira et al. (2015) เป็นต้น อีกทั้งยังมีการนำข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ เช่น งานวิจัยของ Zhang et al. (2013) ที่ได้ใช้จุดควบคุมภาพถ่ายที่เกิดจากระบบการถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ (Aerial Triangulation) ซึ่งเป็นกระบวนการขยายจุดควบคุมที่ทำให้มีจำนวนจุดควบคุมมากยิ่งขึ้น แล้วนำมาใช้เป็นจุดเชื่อมโยงกับข้อมูลพอยต์คลาวด์สำหรับการปรับแก้เป็นแนวนบิน Glira et al. (2019) ได้ใช้จุดควบคุมภาพถ่ายทางอากาศชนิดจุดโยงยึด (Tie point) และจุดผ่าน (Pass point) ที่ปรากฏอยู่บนพื้นผิวที่มีความสามารถในการสะท้อนแสงได้ดี มาปรับแก้ด้วยวิธี ICP ร่วมกับข้อมูลพอยต์คลาวด์ในบริเวณเดียวกัน ซึ่งจะทำให้ค่าพิกัดของจุดภาพในภาพถ่ายทางอากาศ แบบจำลองความสูง และข้อมูลพอยต์คลาวด์มีความสอดคล้องกัน และ Haala et al. (2022) ได้ต่อยอดงานวิจัยของ Glira et al. (2019) โดยต้องการให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์มีความละเอียดถูกต้องมากยิ่งขึ้นในระดับมิลลิเมตรเพื่อใช้ในการตรวจสอบค่าระดับที่เปลี่ยนแปลงไป โดยใช้กล้องถ่ายภาพดิจิทัลที่มีความละเอียดสูงกว่าเดิม เพื่อให้ได้ความละเอียดจุดภาพเชิงพื้นที่ (Ground Sampling Distance : GSD) ที่ละเอียดมากขึ้น ผลที่ได้จะทำให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์มีความละเอียดถูกต้องในระดับมิลลิเมตร

จากงานวิจัยที่ยกตัวอย่างไว้ข้างต้นจะพบว่าการนำข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศมาร่วมใช้ในการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวนบินจะช่วยให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ประกอบกับในโครงการสำรวจความสูงภูมิประเทศด้วยแสงเลเซอร์บริเวณลุ่มน้ำภาคกลางของกรมแผนที่ทหารนั้น นอกจากจะได้ข้อมูลพอยต์คลาวด์แล้ว ยังมีข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องถ่ายภาพดิจิทัลที่ติดตั้งบนอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งจะทำให้ได้

ภาพถ่ายทางอากาศที่มีความคมชัด และยังเป็นภาพถ่ายภาพเหนือพื้นทีสำรวจเดียวกันกับการสแกนด้วยเลเซอร์ ภาพถ่ายทางอากาศเหล่านี้จะถูกนำมาใช้ในการจัดทำภาพถ่ายออร์โธ (Orthophoto) โดยใช้คอมพิวเตอร์วิชั่นในการประมวลผลบล็อกภาพถ่ายทางอากาศตามกระบวนการทางโฟโตแกรมเมตรี (Photogrammetric Computer Vision : PCV) (Do, 2019) ซึ่งจะมีกระบวนการทำซ้ำสามเหลี่ยมทางอากาศ ที่จะต้องมีการรังวัดจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (Ground Control Point : GCP) เพื่อนำไปประมวลผลร่วมกับชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศด้วยเทคนิคการปรับแก้เป็นบล็อกลำแสงของภาพถ่าย (Bundle Block Adjustment : BBA) ซึ่งจะทำให้ภาพถ่ายทางอากาศมีการอ้างอิงกับระบบพิกัดภาคพื้นดินที่มีความถูกต้อง นอกจากนี้แล้วยังมีการรังวัดค่าพิกัดสามมิติของจุดสำคัญ (Key point) ที่เด่นชัดในภาพโดยการรังวัดภาพถ่ายทางอากาศหลายมุมมอง (Multiple View Geometry : MVG) ซึ่งจะช่วยทำให้สามารถสร้างข้อมูลพอยต์คลาวด์ขึ้นอย่างหนาแน่น (Point cloud densification) ได้ด้วยการตัดกันของรังสีของแสง (Intersecting viewing rays) ในเทคนิคการสำรวจโครงสร้างจากการเคลื่อนไหว (Structure-from-Motion : SfM) (Schönberger et al., 2014) โดยข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM เหล่านี้จะมีจำนวนมากและปรากฏอยู่ทั่วทั้งบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ ซึ่งจะสามารถนำมาใช้เป็นจุดอ้างอิงค่าความสูงของข้อมูลพอยต์คลาวด์ได้ และจะช่วยแก้ปัญหาในส่วนของการใช้จุดควบคุมข้อมูลพอยต์คลาวด์ภาคพื้นดินแบบใช้จุดเด่นชัดในภูมิประเทศ (Post-marking Control Point Cloud) ซึ่งทำได้ยากมากเมื่อข้อมูลพอยต์คลาวด์ไม่หนาแน่นและละเอียดมากพอ

ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จะทำการศึกษารูปแบบการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวบินโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจด้วยไลดาร์ทางอากาศของกรมแผนที่ทหาร ในการปรับแก้จะมีการใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการรังวัดด้วยเทคนิค SfM ประกอบการปรับแก้ เพื่อเป็นการผสมผสานการกำหนดตำแหน่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสำรวจด้วยไลดาร์ร่วมกับข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากกระบวนการทางโฟโตแกรมเมตรีของชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ จากนั้นจะทำการประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์ด้วยการคำนวณหาค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางดิ่งกำลังสอง (Root Mean Square Error (Z) : RMSE_Z) โดยเทียบกับจุดตรวจสอบ (Check point : CP) และทำการเปรียบเทียบผลการประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ได้รับการปรับแก้เป็นแนวบิน ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ได้รับการปรับแก้เป็นแนวบินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์

จากการทำ SfM ร่วมในการปรับแก้ และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ได้รับการปรับแก้เป็นแนวบินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ร่วมในการปรับแก้ เพื่อจะได้ทราบถึงความแตกต่าง และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทำงานต่อไปได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อลดค่าคลาดเคลื่อนที่มีอยู่ในข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสำรวจด้วยไลดาร์โดยอาศัยการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวบินและใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้
- 1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบผลการประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวบิน ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวบินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ร่วมในการปรับแก้ และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวบินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ร่วมในการปรับแก้ โดยใช้จุดตรวจสอบที่ได้จากการรังวัดค่าพิกัดด้วยระบบ GNSS เป็นค่าอ้างอิง

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ขอบเขตของเนื้อหาที่ศึกษา

ในการศึกษาของงานวิจัยครั้งนี้จะมีขอบเขตการศึกษา คือ การนำข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการสำรวจด้วยไลดาร์ทางอากาศของกรมแผนที่ทหารมาปรับแก้เป็นแนวบิน เพื่อที่จะลดค่าความคลาดเคลื่อนที่มีอยู่ โดยมีการใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ซึ่งเป็นจุดทราบค่าพิกัดสามมิติจากการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศหลายมุมมองมาร่วมในการปรับแก้ ซึ่งจะมีรายละเอียดดังนี้

1.3.1.1 ศึกษาทบทวนแนวทางการประมวลผลร่วมกันของบล็อคลิดาร์และบล็อกของการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศ เพื่อให้ข้อมูลของทั้งสองระบบมีความสัมพันธ์กัน

1.3.1.2 ศึกษาการจัดทำจุดควบคุมภาคภาพถ่ายพื้นดิน จำนวน 25 จุด แบบเป่าภายหลังการบิน เพื่อใช้สำหรับการทำถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศของบล็อกภาพถ่ายทางอากาศ โดยที่จำนวนจุดและตำแหน่งของจุดจะต้องกระจายทั่วทั้งบล็อกภาพถ่ายทางอากาศ และในการเลือกตำแหน่งให้กับจุดควบคุมนั้นจะใช้จุดที่เด่นชัดในภาพถ่ายทางอากาศและสามารถเข้าถึงได้ในภูมิประเทศ และการจัดทำจุดตรวจสอบ จำนวน 20 จุด ซึ่งจะต้องเป็นจุดที่อยู่บนพื้นผิวราบเรียบแล้วสะท้อนแสงได้ดีและกระจายอยู่ทั่วทั้งพื้นที่ศึกษา สำหรับนำไปตรวจสอบ

ความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์ ซึ่งจะต้องมีการรังวัดค่าพิกัดด้วยระบบ GNSS ในสนามด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐาน (Network-Based Real-Time Kinematics : NRTK) ของกรมแผนที่ทหาร

1.3.1.3 ศึกษาการรังวัดค่าพิกัดสามมิติของจุดเด่นชัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศหลายมุมมอง และการสร้างข้อมูลพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่นด้วยเทคนิค SfM เพื่อนำข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้ไปใช้เป็นจุดในการอ้างอิงค่าความสูง สำหรับใช้ในการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ทดแทนการใช้จุดควบคุมงานไลดาร์แบบเป่าภายหลังการบิน สืบเนื่องจากความหนาแน่นของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่เพียงพอ

1.3.1.4 ศึกษาการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวนอนโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ร่วมในการปรับแก้ และการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวนอนโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ร่วมในการปรับแก้

1.3.1.5 ศึกษาผลการปรับแก้โดยการประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนอน ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนอนโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ร่วมในการปรับแก้ และข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนอนโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ร่วมในการปรับแก้ โดยนำไปเปรียบเทียบกับจุดตรวจสอบ

1.3.2 ขอบเขตพื้นที่ศึกษา

สำหรับพื้นที่ศึกษาของงานวิจัยจะเลือกเป็นพื้นที่บริเวณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี และพื้นที่บริเวณโดยรอบ ในตำบลชำผักแพว อำเภอแก่งคอย จังหวัดสระบุรี ซึ่งเป็นพื้นที่ในบริเวณลุ่มน้ำภาคกลางตามโครงการของทางกรมแผนที่ทหาร โดยพื้นที่ดังกล่าว กรมแผนที่ทหารได้ทำการสำรวจไว้เมื่อวันที่ 7 ตุลาคม พ.ศ. 2562

พื้นที่ศึกษานี้มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนวางตัวไปตามทิศทางการบินสำรวจในแนวทิศตะวันออก - ตะวันตก มีขนาด 10 ตารางกิโลเมตร โดยประมาณ (กว้าง 4 กิโลเมตร, สูง 2.5 กิโลเมตร) (รูปที่ 1) ลักษณะภูมิประเทศเป็นพื้นที่ราบที่ติดกับภูเขาขนาดเล็ก ประกอบด้วยมีอาคาร บ้านเรือน ถนน ทุ่งนา และพื้นที่ป่า ซึ่งทำให้พื้นที่ศึกษานี้มีความหลากหลายของตัวอย่างพื้นผิววัตถุและภูมิประเทศที่มีการสะท้อนของเลเซอร์ที่แตกต่างกันออกไป อีกทั้งยังมีลักษณะภูมิประเทศคล้ายคลึงกับพื้นที่ส่วนใหญ่ที่สามารถพบเจอได้ในบริเวณลุ่มน้ำภาคกลาง

ของประเทศไทย พื้นที่ศึกษานี้จึงมีความเหมาะสมที่จะเป็นตัวอย่างในการศึกษาวิจัยเพื่อใช้เป็นแนวทางการปฏิบัติให้กับพื้นที่อื่น ๆ ของโครงการได้



รูปที่ 1 ขอบเขตพื้นที่ศึกษาของบริเวณศูนย์เครือข่ายการเรียนรู้เพื่อภูมิภาค
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัดสระบุรี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถลดค่าคลาดเคลื่อนที่แฝงอยู่ในข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสำรวจด้วยไลดาร์ให้เหลืออยู่น้อยที่สุดได้ โดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ที่ได้จากการประมวลผลบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศร่วมในการปรับแก้ และทำให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น เพื่อให้พร้อมสำหรับการนำไปใช้สร้างแบบจำลองความสูงภูมิประเทศ หรือการนำไปใช้วิเคราะห์ในงานด้านต่าง ๆ ได้
- 1.4.2 สามารถทราบถึงวิธีการประยุกต์ใช้ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศร่วมในการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวบิน ซึ่งจะสามารถใช้เป็นแนวทางในการปฏิบัติงานให้กับเจ้าหน้าที่ของกรมแผนที่ทหารและผู้ที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยนี้
- 1.4.3 สามารถเพิ่มความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์ได้ โดยจำเป็นต้องทำการบินสำรวจใหม่ ซึ่งจะเป็นการประหยัดเวลาและงบประมาณ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.1.1 ไลดาร์ และการสแกนด้วยแสงเลเซอร์

ในงานวิจัยนี้มีความเกี่ยวข้องกับข้อมูลพอยต์คลาวด์ ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการสแกนด้วยแสงเลเซอร์ที่เป็นเทคโนโลยีการสำรวจระยะไกลชนิดที่สามารถสร้างแหล่งพลังงานได้ด้วยตัวเอง (Active remote sensing) โดยพลังงานที่สร้างขึ้นจะอยู่ในรูปของแสงเลเซอร์ ซึ่งเกิดจากการที่แสงในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกกระตุ้นการปล่อยรังสีและควบแน่นจนเป็นลำแสงแล้วนำมาใช้ในการวัดระยะทางระหว่างอุปกรณ์รับวัด ไปยังพื้นผิวของวัตถุ โดยทั่วไปจะเรียกเทคนิคการสำรวจนี้ว่า ไลดาร์ (LiDAR) (Hillen, 2011)

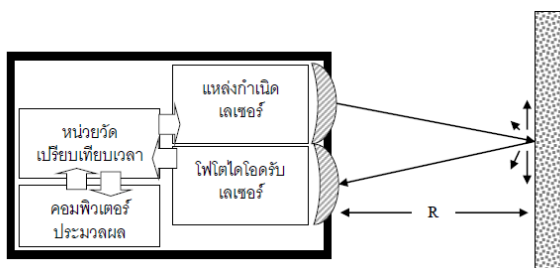
หลักการทำงานของระบบเลเซอร์สแกนเนอร์จะมีเครื่องวัดระยะทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ โดยเครื่องวัดระยะทางจะจับเวลาในการเดินทางของแสงเลเซอร์ด้วยหน่วยวัดเปรียบเทียบเวลา เมื่อแสงเลเซอร์เดินทางไปที่ตกกระทบพื้นผิวของวัตถุ และสะท้อนกลับมายังเครื่องรับ จะมีการเปรียบเทียบเวลาตั้งแต่ออกไปจนถึงกลับเข้ามา และเมื่อทราบเวลาที่แสงเลเซอร์ใช้เดินทางแล้วนำไปคูณเข้ากับความเร็วของแสง จะสามารถคำนวณระยะทางออกมาได้ แต่ระยะทางดังกล่าวจะเป็นระยะทาง 2 เท่า คือ ระยะทางของแสงที่เดินทางไปตกกระทบและระยะทางที่แสงสะท้อนแล้วเดินทางกลับมายังเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ (รูปที่ 2) (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2564) ดังความสัมพันธ์

$$R = \frac{v \cdot t}{2} \quad (2.1)$$

โดยที่ R คือ ระยะทางจากเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ไปยังวัตถุ

V คือ ความเร็วการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (แสงเลเซอร์)

t คือ ระยะเวลาที่แสงเลเซอร์ใช้ในการเดินทาง



รูปที่ 2 หลักการวัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์ (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2564)

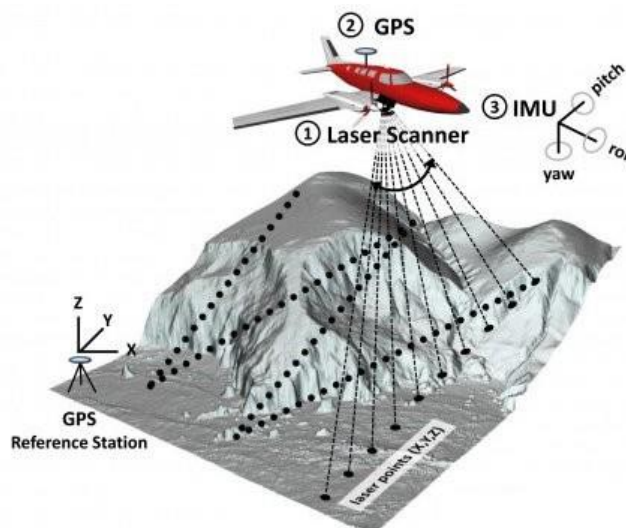
เพื่อให้เครื่องวัดระยะทางสามารถวัดระยะไปบนพื้นผิวของวัตถุหรือภูมิประเทศเป็นบริเวณกว้างได้ จึงมีการปรับให้การปล่อยลำแสงเลเซอร์มีการเบี่ยงเบนออกไปเป็นบริเวณกว้าง จะทำให้การกวาดของลำแสงเลเซอร์อยู่ในลักษณะของการกวาดเป็นพื้นที่ และได้มีการนำเทคโนโลยีนี้ไปประยุกต์ใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ อาทิเช่น การสแกนแบบการตั้งเครื่องอยู่กับที่ (Terrestrial Laser Scanning : TLS), การสแกนประกอบการเคลื่อนที่โดยการติดตั้งบนรถยนต์ (Mobile Mapping System : MMS) และการสแกนประกอบการเคลื่อนที่โดยการติดตั้งบนอากาศยาน (Airborne Laser Scanning)

2.1.2 การสแกนด้วยเลเซอร์ทางอากาศ

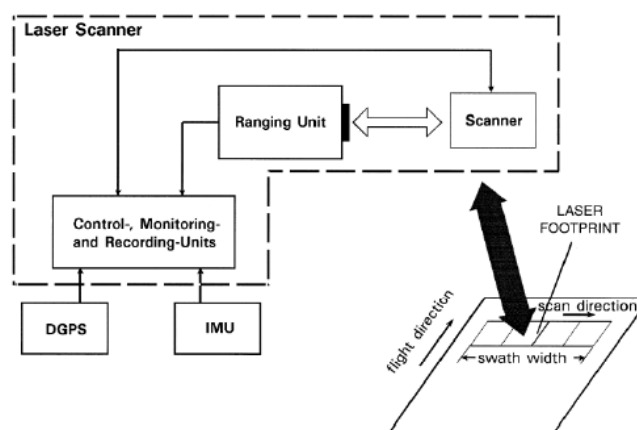
การสแกนด้วยเลเซอร์ทางอากาศ หรือการสำรวจด้วยไลดาร์ทางอากาศ มีวัตถุประสงค์หลักคือ การสำรวจเพื่อให้ได้มาซึ่งแบบจำลองความสูงภูมิประเทศ โดยต้องการให้พื้นที่ที่ทำการสำรวจมีจุดที่ทราบค่าความสูงอย่างละเอียดหนาแน่นที่มากกว่า 1 จุดต่อตารางเมตร ซึ่งจะทำให้ค่าความสูงที่ได้มีความละเอียดถูกต้องและน่าเชื่อถือสูงถึงระดับเดซิเมตร อีกทั้งค่าระดับที่ได้จะเป็นระดับของแบบจำลองพื้นผิว (Digital Surface Model : DSM) กล่าวคือ แบบจำลองที่แสดงถึงระดับความสูงของพื้นผิวที่ปกคลุมภูมิประเทศ ซึ่งจะปรากฏทั้งต้นไม้ อาคาร และ วัตถุอื่น ๆ ที่อยู่ในพื้นที่นั้น ๆ ของแบบจำลอง

เทคโนโลยีการสแกนด้วยเลเซอร์ทางอากาศ จะทำการวัดระยะทางด้วยเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ โดยการวัดระยะทางจะเป็นไปอย่างต่อเนื่องออกไปในแนวตั้งฉากกับแนวบินพร้อมกับการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าของอากาศยาน ระยะทางที่ได้จะสามารถนำไปคำนวณให้เป็นค่าพิกัดสามมิติจำนวนมากของจุดบนพื้นผิววัตถุหรือภูมิประเทศ ซึ่งจะเรียกว่าข้อมูลพอยต์คลาวด์ โดยในการรังวัดด้วยเทคโนโลยีไลดาร์โดยตรงจากอากาศยาน จะทำให้ค่าระดับที่ได้จะมีความละเอียดถูกต้องสูงในช่วง 10 – 30 เซนติเมตร ทั้งนี้เนื่องจากความละเอียดถูกต้องของการรังวัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์เอง ประกอบกับตำแหน่งของอากาศยานที่สามารถตรวจจับด้วยความละเอียดถูกต้องสูงด้วยการกำหนดพิกัดตำแหน่งบนโลกด้วยวิธีตรง (Direct Georeferencing : DG) โดยอาศัยการบูรณาการร่วมกันของระบบรังวัดพิกัดตำแหน่งด้วย GNSS และหน่วยตรวจจับการเคลื่อนไหวภายใน (Inertial Measurement Unit : IMU) ดังรูปที่ 3 และ 4 ซึ่งจะทำให้ได้วิถีการเคลื่อนที่ของอากาศยาน ในรูปแบบตำแหน่ง (Position) ความเร็ว (Velocity) และการเอียงตัว (Attitude) ของอากาศยานและเซนเซอร์ ด้วยเหตุนี้จึง

ทำให้ระบบไลดาร์เกิดความยืดหยุ่นและสามารถติดตั้งเข้ากับอากาศยานได้ในหลากหลายชนิด ทั้งชนิดปีกยัด (Fixed wing type) และปีกหมุน (Helicopter) (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2564)



รูปที่ 3 แสดงลักษณะการทำงานของระบบการสแกนด้วยเลเซอร์ทางอากาศ (Hillen, 2011)



รูปที่ 4 การทำงานของระบบเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ติดตั้งบนอากาศยาน (Hillen, 2011)

ในรูปที่ 4 เป็นการอธิบายถึงระบบที่เกี่ยวข้องกับการสแกนด้วยแสงเลเซอร์ทางอากาศ ซึ่งจะประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ๆ (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2564) ได้แก่

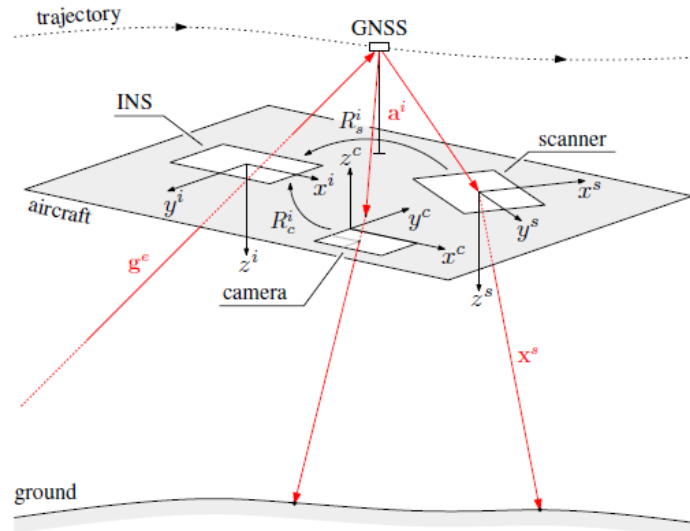
1) ส่วนบันทึกข้อมูล (Airborne data acquisition) เป็นส่วนเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ควบคุม โดยมีการควบคุมจังหวะของการปล่อยลำแสง และบันทึกการอ้างอิงตำแหน่งและการเอียงตัวของระบบ GNSS/IMU ดังนั้นข้อมูลที่บันทึกได้จะมี 2 ส่วน คือ ข้อมูลที่ได้จากการวัดระยะทางด้วยแสงเลเซอร์ซึ่งจะต้องมีค่ามุมกวาดของลำแสงเทียบกับระบบเลเซอร์ และอีกส่วนหนึ่งคือสัญญาณ GNSS และ IMU เพื่อนำมาประมวลผลภายหลัง ร่วมกับสัญญาณจีพีเอส บนพื้นดิน

2) ส่วนสนับสนุนการกำหนดตำแหน่งโดยตรง (GPS reference acquisition) ซึ่งจะมีการตั้งเครื่องรับสัญญาณ GNSS บนพื้นดิน พร้อมกับอากาศยานที่ทำการบินสำรวจ เพื่อให้การกำหนดตำแหน่งมีความละเอียดถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ ซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลมาประมวลผลในภายหลังร่วมกับสัญญาณจากบนอากาศยาน

3) ส่วนประมวลผล (Data processing) เป็นการประมวลผลข้อมูลและสัญญาณต่าง ๆ ที่บันทึกได้จากทั้งอากาศยานและบนภาคพื้นดิน ในส่วนของการกำหนดตำแหน่งโดยตรงจะประมวลผลแบบ phase differential และคำนึงถึงความต่อเนื่องของการรับสัญญาณที่เสาสัญญาณเคลื่อนที่ไปพร้อมกับอากาศยาน ดังนั้นจึงเรียกว่าเป็น post-processed kinematic differential

2.1.3 การกำหนดพิกัดตำแหน่งบนโลกด้วยวิธีตรงกับข้อมูลพอยต์คลาวด์

การที่ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการสำรวจด้วยไลดาร์ทางอากาศจะมีค่าพิกัดสามมิติของระบบพิกัดอ้างอิงนั้น จะต้องมีการคำนวณโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความสัมพันธ์ร่วมกับอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ติดตั้งบนอากาศยาน ทั้ง GNSS และ IMU จึงจะสามารถคำนวณค่าพิกัดของจุดที่แสงเลเซอร์ตกกระทบได้



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของอุปกรณ์รังวัดต่าง ๆ ที่มีการติดตั้งในระบบการสแกนด้วยเลเซอร์ทางอากาศ (Glira, 2018)

Glira (2018) ได้ระบุว่า ในสมการของการกำหนดพิกัดตำแหน่งบนโลกที่จะใช้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์ ที่ได้จากการสำรวจด้วยไลดาร์ จะต้องใช้ข้อมูล 3 ส่วน สำหรับการคำนวณ

ซึ่งได้แก่ 1) ข้อมูลระยะทางและมุมแสงออกที่วัดได้ของเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ 2) ข้อมูลวิถีการบินของอากาศยาน (Flight trajectory) และ 3) พารามิเตอร์ของการวางตัวของเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ (Mounting calibration parameters) (รูปที่ 5) โดยเมื่อนำข้อมูลทั้งหมดมารวมกัน จะสามารถคำนวณหาค่าพิกัดของจุดที่ตกกระทบกับวัตถุ [t] ที่ได้จากการสแกนด้วยเลเซอร์ [I] ณ ขณะเวลา t ได้ดังสมการที่ 2.2

$$x_{[t]}^e(t) = g^e(t) + R_n^e(t)R_i^n(t)(a_{[I]}^i + R_{s[I]}^i x_{[t]}^s) \quad (2.2)$$

ในสมการ 2.2 ได้มีการระบุเวกเตอร์เป็นด้วยกตามหลังตัวอักษรเพื่อระบุถึงระบบพิกัดที่อ้างอิงตามอุปกรณ์และเครื่องมือวัดนั้น ๆ โดยมีลักษณะเป็น R_{source}^{target} ซึ่งแสดงถึงการแปลงระบบพิกัดจากข้อมูลเดิม (Source) ไปยังระบบพิกัดของข้อมูลเป้าหมาย (Target) ซึ่งในสมการที่ 2.2 ได้ปรากฏระบบพิกัดอ้างอิงอยู่ 4 ระบบพิกัด ได้แก่

ระบบพิกัด s แสดงถึง ระบบพิกัดของเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ (Scanner)

ระบบพิกัด i แสดงถึง ระบบพิกัดของ INS ซึ่งโดยทั่วไปมักเป็นระบบพิกัดเดียวกับอากาศยาน

ระบบพิกัด n แสดงถึง ระบบพิกัดของการนำหนด้วยดาวเทียม (Navigation)

ระบบพิกัด e แสดงถึง ระบบพิกัดที่อ้างอิงจุดกำเนิดอยู่ที่จุดกึ่งกลางของโลก

(Earth-Centered, Earth-Fixed : ECEF)

โดยที่ $x_{[t]}^s$ คือ เวกเตอร์ ขนาด 3x1 ที่มีค่าพิกัดของจุดตกกระทบของแสงเลเซอร์ [t] ในระบบพิกัดของเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ (ระบบพิกัด s) โดยทั่วไปแล้วค่าพิกัดเหล่านี้จะสามารถแสดงในรูปแบบของฟังก์ชันระหว่างระยะทาง ($\rho_{[t]}$) และมุม 2 มุม ($\alpha_{[t]}, \beta_{[t]}$)

$$x_{[t]}^s(t) = x_{[t]}^s(\rho_{[t]}, \alpha_{[t]}, \beta_{[t]}) \quad (2.3)$$

$R_{s[I]}^i$ คือ เมทริกซ์การหมุน ขนาด 3x3 ที่ทำหน้าที่ในการหมุนแกนระหว่างระบบพิกัดของเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ [I] (ระบบพิกัด s) และระบบพิกัดของ INS (ระบบพิกัด i) โดยทั่วไปแล้วจะเรียกเมทริกซ์การหมุนนี้ว่า Boresight misalignment โดยมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องคือมุมของออยเลอร์ (Euler angles) ทั้งสามมุม

$$R_{s[I]}^i = R_{s[I]}^i(\alpha_{1[I]}, \alpha_{2[I]}, \alpha_{3[I]}) \quad (2.4)$$

$a_{[i]}^i$ คือ เวกเตอร์ ขนาด 3×1 ที่แสดงถึงค่าระยะขดเซย (Offset) ระหว่างเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียม GNSS และจุดกำเนิดของระบบพิกัดเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ (ระบบพิกัด s) โดยปกติเวกเตอร์นี้จะเรียกว่า lever-arm

$$a_{[i]}^i = [a_{x[i]}^i \ a_{y[i]}^i \ a_{z[i]}^i]^T \quad (2.5)$$

$R_i^n(t)$ คือ เมทริกซ์การหมุน ขนาด 3×3 ที่ทำหน้าที่ในการหมุนแกนระหว่างระบบพิกัดของ INS (ระบบพิกัด i) ไปยังระบบพิกัดของการนำหนด้วยดาวเทียม (ระบบพิกัด n) ซึ่งถือเป็นส่วนแรกของข้อมูลวิถีการบิน (Trajectory data) โดยค่ามุมในการหมุนสามารถประมาณได้จากค่ารังวัดของ GNSS/IMU โดยมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องคือมุมออยเลอร์ ได้แก่ roll (ϕ), pitch (θ) และ yaw (ψ)

$$R_i^n(t) = R_i^n(\phi(t), \theta(t), \psi(t)) \quad (2.6)$$

$R_n^e(t)$ คือ เมทริกซ์การหมุนขนาด 3×3 ที่ทำหน้าที่ในการหมุนแกนระหว่างระบบพิกัดของการนำหนด้วยดาวเทียม (ระบบพิกัด n) ไปยังระบบพิกัด ECEF (ระบบพิกัด e) โดยที่มุมการหมุนนี้ไม่ได้ได้มาจากการรังวัด แต่ได้มาจากการแปลงค่าจากลองจิจูด (λ) และละติจูด (φ) ตามลำดับ เมื่อคำนวณแล้วจะได้ค่า $g^e(t)$

$$R_n^e(t) = R_n^e(\lambda(t), \varphi(t)) \quad (2.7)$$

$g^e(t)$ คือ เวกเตอร์ ขนาด 3×1 ที่แสดงถึงตำแหน่งของงานรับสัญญาณดาวเทียมในระบบพิกัด ECEF (ระบบพิกัด e) นับเป็นส่วนที่สองของข้อมูลวิถีการบิน

$$g^e(t) = [g_x^e(t) \ g_y^e(t) \ g_z^e(t)]^T \quad (2.8)$$

ข้อมูลที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการกำหนดตำแหน่งบนโลกด้วยวิธีตรงนี้จะเป็ค่าพิกัดในระบบพิกัด ECEF (ระบบพิกัด e) ซึ่งหลังจากได้ค่าพิกัดแล้วจะต้องนำไปคำนวณเพื่อแปลงระบบพิกัดให้เป็นระบบพิกัดของการฉายแผนที่ (ระบบพิกัด m) เช่น ระบบพิกัด UTM เป็นต้น โดยมีข้อควรคำนึงคือการฉายแผนที่อาจทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของข้อมูลไป แต่ในการคำนวณด้วยสมการข้างต้นจะยังไม่ได้คำนึงถึงจุด ๆ นี้

โดยส่วนใหญ่แล้วข้อมูลวิถีการบินมักจะถูกคำนวณให้อยู่ในระบบพิกัดของเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์แล้ว (ระบบพิกัด s) ซึ่งจะมีความแตกต่างจากรายละเอียดที่ได้ให้ไว้ข้างต้น โดยในกรณีนี้จะเป็น

- มุม roll (ϕ), pitch (θ) และ yaw (Ψ) จะเป็นมุมที่ทำหน้าที่หมุนเทียบแกนระหว่างระบบพิกัดของเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ [l] (ระบบพิกัด s) กับระบบพิกัดของการนำหนด้วยดาวเทียม (ระบบพิกัด n)

$$R_{s[l]}^n(t) = R_i^n(t)R_{s[l]}^i = R_{s[l]}^n(\phi(t), \theta(t), \Psi(t)) \quad (2.9)$$

- $g^e(t)$ จะกลายเป็นจุดกำเนิดของระบบพิกัดของเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ (ระบบพิกัด s)
- ค่าระยะขจัดเขยระหว่างเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียม GNSS กับจุดกำหนดของระบบพิกัดเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ (Lever-arm) $a_{[l]}^i$ ในสมการ 2.2 สามารถตัดออกไปได้

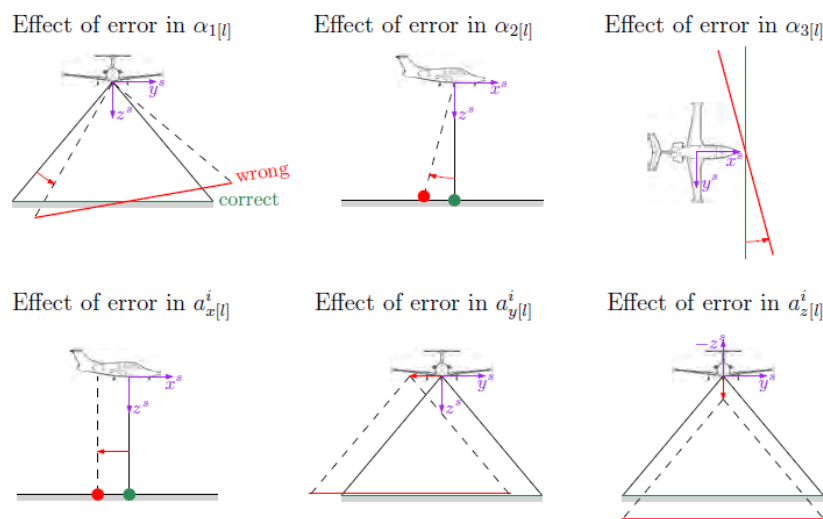
ดังนั้นจากสมการ 2.1 จะถูกแก้ไขให้ดูง่ายขึ้น โดยจะได้เป็น

$$x_{[l]}^e(t) = g^e(t) + R_n^e(t) R_{s[l]}^n(t) x_{[l]}^s \quad (2.10)$$

ในทุกการคำนวณโดยใช้สมการที่ 2.2 จะมีค่าคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (Systematic errors) แฝงอยู่ ซึ่งจะก่อให้เกิดการผิดเพี้ยนของผลลัพธ์ในการคำนวณ นั่นคือข้อมูลพอยต์คลาวด์ของแนวบินนั้น ๆ ในการคำนวณปรับแก้เพื่อลดขนาดของค่าคลาดเคลื่อนจะต้องอาศัยการวัดสอบและปรับแก้ค่าพารามิเตอร์เพิ่มเติมเข้าไปในสมการที่ 2.2

ในส่วนของ พารามิเตอร์ของการวางตัวของเลเซอร์สแกนเนอร์ จะมีอยู่ 6 ตัว ด้วยกัน (ในสมการที่ 2.2) ซึ่ง 3 ตัวแรกจะอยู่ในส่วนของเมทริกซ์การหมุน $R_{s[l]}^i$ ในรูปแบบของมุม $\alpha_{1[l]}, \alpha_{2[l]}, \alpha_{3[l]}$ และอีก 3 ตัวจะอยู่ในส่วนของเวกเตอร์ค่าระยะขจัดเขยระหว่างเสาอากาศรับสัญญาณดาวเทียม GNSS กับจุดกำเนิดของระบบพิกัดเครื่องเลเซอร์สแกนเนอร์ (Lever-arm) $a_{[l]}^i$ ในรูปแบบ $a_{x[l]}^i, a_{y[l]}^i, a_{z[l]}^i$ โดยปกติแล้วพารามิเตอร์เหล่านี้จะทราบได้จากการวัดสอบและการติดตั้งอุปกรณ์อยู่แล้ว แต่อย่างไรก็ตามค่าของพารามิเตอร์อาจไม่ถูกต้องเสมอไป หากไม่ได้ทำการวัดสอบอยู่เสมอ โดยผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนของค่าพารามิเตอร์ในการวางตัวของเลเซอร์สแกนเนอร์ จะแสดงให้เห็นรูปที่ 6 ความคลาดเคลื่อนของค่าการวางตัวนี้จะส่งผลถึงการรังวัดค่าพิกัดภาคพื้นดิน เช่น ความผิดเพี้ยนของมุมการวางตัว จะส่งผลถึงระยะของวัตถุที่วัดได้ และด้วยเหตุนี้เองการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ในแต่ละแนวบิน จึงมีความพยายามที่จะทำการปรับแก้และคำนวณค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ และละเลยพารามิเตอร์ของส่วนอื่น ๆ ในความพยายามที่จะปรับแก้พารามิเตอร์เหล่านี้ควรจะทำ

การปรับแก้ทั้งระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนที่มีความเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ดังกล่าว คือ ข้อมูลวิถีการบิน ในการปรับแก้ค่าพารามิเตอร์การวางตัวของเลเซอร์สแกนเนอร์ในแต่ละแนวบิน จะไม่มีผลส่งต่อแนวบินอื่น ๆ



รูปที่ 6 ผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนของค่าพารามิเตอร์ในการวางตัวของเลเซอร์สแกนเนอร์ โดยที่ 3 รูปด้านบน เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากมุม และ 3 รูปด้านล่าง เป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากระยะขดเซซ (Glira, 2018)

2.1.4 ความคลาดเคลื่อนของการสแกนด้วยแสงเลเซอร์ทางอากาศ

การที่ข้อมูลพอยต์คลาวด์บริเวณส่วนซ้อนระหว่างแนวบินมีความแตกต่างทางความสูง แม้จุดตกกระทบนั้นจะเป็นจุดบนพื้นผิวเดียวกันก็ตาม เกิดจากการที่มีค่าคลาดเคลื่อนแฝงอยู่ ซึ่งมีเหตุและปัจจัยหลาย ๆ อย่าง โดย Burman (2002) กล่าวว่า ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการรังวัดด้วยแสงเลเซอร์จะมีรูปแบบและที่มาที่หลากหลาย เช่น อาจเกิดจากการที่วัตถุนั้น ๆ ไม่สะท้อนรังสีของแสงเลเซอร์ หรืออาจสะท้อนแล้วส่งผลให้ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์เปลี่ยนแปลงไป รวมไปถึงการเบี่ยงเบนมุมสะท้อนที่ทำให้แสงเลเซอร์ไม่สะท้อนกลับเข้าเครื่องตรวจจับ โดยความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเหล่านี้ยังมีที่มาจากเหตุปัจจัยอื่น ๆ ได้อีกมาก

Willers et al. (2008) ได้ระบุสาเหตุของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในข้อมูลไลดาร์ โดยได้ทำการจัดกลุ่มที่ออกมาออกเป็น 3 สาเหตุ ได้แก่

1) สาเหตุจากความผิดพลาดในการรังวัด (Mistake or blunders)

การเกิดความผิดพลาดในการรังวัดจะถือว่าเป็นความคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่ที่อาจเกิดจากความไม่ระมัดระวังในการรังวัดหรือเกิดจากความสับสน ซึ่งโดยปกติแล้วความผิดพลาดจะสามารถตรวจสอบได้และแยกไว้เพื่อขจัดออก แล้วจึงทำการรังวัดใหม่

2) สาเหตุจากความคลาดเคลื่อนแบบมีระบบของการรังวัด (Systematic error)

โดยธรรมชาติของการรังวัดย่อมมีความคลาดเคลื่อนเชิงระบบอยู่ ซึ่งสามารถแสดงได้โดยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ถ้ามีเงื่อนไขที่ทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนจะถูกวัดค่าเพื่อนำไปปรับแก้ซึ่งจะทำให้ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบนี้ถูกขจัดออกไป เช่น ค่า Drift ตามอายุการใช้งานของอุปกรณ์, ค่าคลาดเคลื่อนของการรังวัดด้วยระบบ GNSS ที่เกิดจากวงโคจรดาวเทียม การเดินทางของคลื่นผ่านชั้นบรรยากาศ และนาฬิกาของดาวเทียมและเครื่องรับที่สามารถขจัดออกไปได้โดยการใช้แบบจำลองและเทคนิคการหาค่าต่าง, การวัดสอบค่าระยะเขตเซชและการวางตัวระหว่างอุปกรณ์ GNSS, IMU และเลเซอร์สแกนเนอร์, การปรับเวลาในการบันทึกข้อมูลของระบบรังวัดต่าง ๆ ให้ตรงกัน (Time synchronization) และการแปลงค่าพิกัดไปสู่ระบบพิกัดท้องถิ่น เช่น การแปลงค่าพิกัดละติจูดและลองจิจูดไปเป็นค่าพิกัดในระบบ UTM เป็นต้น (กรีธา สุวรรณสะอาด, 2553)

3) สาเหตุจากความคลาดเคลื่อนสุ่ม (Random error)

นอกจากความผิดพลาดและความคลาดเคลื่อนแบบมีระบบแล้ว ยังจะมีความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มซึ่งมีขนาดเล็กหลงเหลืออยู่ โดยอาจเกิดขึ้นจากการที่มีคลื่นสะท้อนและสัญญาณรบกวน หรือสัญญาณหลุดหายจากสภาพอากาศขณะรับสัญญาณดาวเทียมจากระบบ GNSS เป็นต้น

นอกจากความคลาดเคลื่อนที่กล่าวมาในข้างต้นแล้ว ยังสามารถเกิดได้จากการที่เลเซอร์เดินทางมาจากแหล่งกำเนิดที่มีระยะไกล โดยเฉพาะการบินสำรวจด้วยอากาศยาน ในขณะที่เลเซอร์เดินทางผ่านชั้นบรรยากาศจะมีการกระเจิง (Disperse) เกิดขึ้น ซึ่งส่งผลให้ลำแสงเลเซอร์ที่ปลายทางขยายใหญ่ขึ้น (Beam divergence) การขยายของเลเซอร์นี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11 (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2564)

$$D = H \cdot \tau \quad (2.11)$$

โดย D คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายลำแสงเลเซอร์

H คือ ค่าปลายบานของลำแสงเลเซอร์ (Beam divergence)

τ คือ ระยะทางห่างของแหล่งกำเนิด หรือความสูงบิน

2.1.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวบิน

จากความคลาดเคลื่อนที่แฝงอยู่ในข้อมูลพอยต์คลาวด์ซึ่งสามารถตรวจพบได้ในบริเวณส่วนซ้อนของแนวบินนั้น ทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวบิน

เพื่อให้มีความถูกต้องทางตำแหน่งเพิ่มมากขึ้น โดยในงานวิจัยของ Pfeifer (2005) ได้ระบุถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวบิน โดยแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่

1) Data driven model

เป็นการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์โดยอาศัยการวัดค่าความคลาดเคลื่อนจากข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่พบได้ในส่วนซ้อนของแนวบิน ซึ่งฟังก์ชันในการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ประเภทนี้จะถูกกำหนดไว้สำหรับแต่ละแนวบินโดยเฉพาะ และมีการเลือกพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของฟังก์ชัน เช่น ค่า Shift และมุมหมุนระหว่างข้อมูลพอยต์คลาวด์ของ 2 แนวบิน เป็นต้น

2) Sensor system model

เป็นการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ยึดโยงกับแบบจำลองจากระบบรังวัดต่าง ๆ ที่ติดตั้งอยู่กับเครื่องมือสำรวจ ซึ่งมีความเชื่อมโยงกับจุดพอยต์คลาวด์แต่ละจุดที่รังวัดได้

สำหรับระบบที่มีการติดตั้งอยู่ในเครื่องมือสำรวจ ได้แก่ ระบบนำหนด้วยการตรวจวัดความเฉื่อย (INS) ที่จะเกี่ยวข้องกับค่าการเอียงตัวของเครื่องมือขณะทำการสำรวจ และระบบดาวเทียมนำหน (GNSS) ที่จะเกี่ยวข้องกับค่าพิกัดตำแหน่งของเครื่องมือขณะทำการสำรวจ

$$p_{i,j} = f(O(t_i), R(t_i), r_i, \alpha_i, s) \quad (2.12)$$

โดยที่ t คือ เวลา ณ ขณะที่รังวัดจุดพอยต์คลาวด์นั้น ๆ

$O(t_i)$ คือ จุดกำเนิดของระบบพิกัดอ้างอิง

$R(t_i)$ คือ แนวการวางตัวของระบบพิกัดอ้างอิง

r_i คือ ระยะทางที่เลเซอร์วัดระยะได้

α_i คือ มุมที่เลเซอร์ปล่อยออกไปกระทบกับวัตถุ

s คือ เวกเตอร์ของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับระบบการรังวัด เช่น

ระยะขดเซย (offset) จากตำแหน่งของเสาอากาศรับสัญญาณถึงเลเซอร์สแกนเนอร์ เป็นต้น

ในการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวบินของ Chen et al. (2012) ได้ใช้วิธีการปรับแก้แบบ Sensor system model ซึ่งเป็นรูปแบบการปรับแก้ในโปรแกรม Terra match และได้มีการระบุไว้ว่าอัลกอริทึมในการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวบินของโปรแกรม Terra match สามารถเทียบเคียงได้จากทฤษฎีของ Burman (2002) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การรังวัดระยะทางด้วยเลเซอร์ (l , length) จะสามารถทำให้เกิดความสัมพันธ์กับค่าพิกัดภาคพื้นดินได้ด้วยการทราบตำแหน่งและทิศทางของลำแสงเลเซอร์ที่ถูกปล่อยออกมาจากอุปกรณ์ ดังสมการที่ 2.13

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_G = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + R_{IMU} R_{IMU}^{LRF} R_M \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ l \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

โดยที่ $(X, Y, Z)_G$ คือ ค่าพิกัดของจุดบนพื้นดิน

(X_0, Y_0, Z_0) คือ ค่าพิกัดของเลเซอร์สแกนเนอร์ (ทราบได้จากการรังวัดค่าพิกัดด้วยระบบ GNSS โดยมีการวัดระยะชดเชยจากเลเซอร์สแกนเนอร์จนถึงงานรับสัญญาณ)

R_{IMU} คือ เมทริกซ์การหมุนของมุมระหว่าง IMU เทียบกับแกนอ้างอิงของระบบพิกัดฉากภาคพื้นดิน

R_{IMU}^{LRF} คือ เมทริกซ์การหมุนของมุมระหว่างเลเซอร์สแกนเนอร์ และ IMU

R_M คือ เมทริกซ์การหมุนของกระจกสะท้อนแสงเลเซอร์ที่ติดอยู่ในอุปกรณ์ไลดาร์ (มุมกวาด, Scanning angle)

เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ จะแสดงรูปแบบของเมทริกซ์การหมุนที่กระทำระหว่าง IMU, เลเซอร์สแกนเนอร์ และแกนระบบพิกัดอ้างอิง ได้เป็น

$$\bar{R} = R_{IMU} \cdot \bar{R}_{IMU}^{LRF} \quad (2.14)$$

โดยที่ \bar{R} คือ เมทริกซ์การหมุนของมุมระหว่างเลเซอร์สแกนเนอร์กับแกนอ้างอิงของระบบพิกัด

จากการสแกนด้วยแสงเลเซอร์ถือเป็นเทคนิคในการสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศ ซึ่งจะสมมติว่าได้รับค่าความสูงจากพื้นผิวของ TIN (Triangulated Irregular Network) ที่สร้างจากพอยต์คลาวด์ จะได้ว่า

$$Z_{i,j} = f_z(X, Y) \quad (2.15)$$

ในทุก ๆ จุดบนพื้นลาดของพื้นผิว TIN ที่สร้างจากพอยต์คลาวด์จะมีค่าความสูง (Z) ที่มีค่าพิกัดในทาง X และ Y

$$\begin{aligned} Z'_X &= \frac{\partial f_z}{\partial X} \\ Z'_Y &= \frac{\partial f_z}{\partial Y} \end{aligned} \quad (2.16)$$

จุดที่เลเซอร์ตกกระทบ $(X, Y, Z)_l$ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพื้นผิวของ TIN จากการประมาณค่าของจุด (Node) 3 จุด ที่อยู่ล้อมรอบ จะทำให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์สามารถนำมาใช้เป็น Node ได้ อีกทั้งยังหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากการประมาณค่าในรูปแบบกริดได้

เมื่อนำสมการที่ 2.13 รวมกับ 2.16 แล้วทำให้เป็นเชิงเส้น จะได้สมการค่ารังวัดสำหรับการรังวัดค่าความสูง ดังสมการที่ 2.17

$$\begin{aligned} \lambda_{Z_l} = & Z'_X \cdot dX_0 + Z'_Y \cdot dY_0 - dZ_0 + \\ & + \left(Z'_X \frac{\partial R_X}{\partial r} + Z'_Y \frac{\partial R_Y}{\partial r} - \frac{\partial R_Z}{\partial r} \right) \cdot \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix} \cdot dr + \\ & + \left(Z'_X \frac{\partial R_X}{\partial p} + Z'_Y \frac{\partial R_Y}{\partial p} - \frac{\partial R_Z}{\partial p} \right) \cdot \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix} \cdot dp + \\ & + \left(Z'_X \frac{\partial R_X}{\partial h} + Z'_Y \frac{\partial R_Y}{\partial h} - \frac{\partial R_Z}{\partial h} \right) \cdot \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix} \cdot dh \end{aligned} \quad (2.17)$$

โดยที่ λ_{Z_l} คือ ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าของจุดที่วัดได้และค่าของจุดตรวจสอบ

$(dX_0, dY_0, dZ_0)^T$ คือ ค่า Shift ของการแปลงเป็นระบบพิกัดอ้างอิง ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าตลอดการวนซ้ำ (Iteratively)

(r, p, h) คือ ค่า Roll, Pitch, Heading

(dr, dp, dh) คือ ค่ามุมของการแปลงเทียบกับระบบพิกัดอ้างอิง ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงค่าตลอดการวนซ้ำ (Iteratively)

2.1.6 การสะท้อนกลับของเลเซอร์

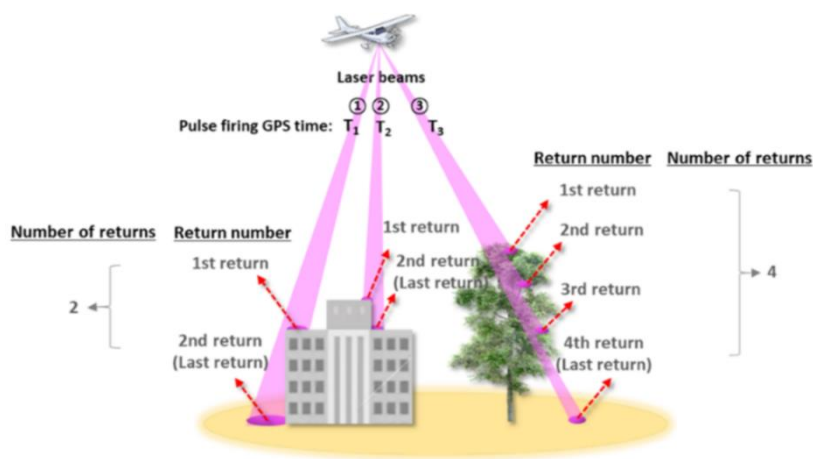
การสแกนด้วยเลเซอร์ทางอากาศ อุปกรณ์เลเซอร์สแกนเนอร์จะปล่อยเลเซอร์ให้ไปตกกระทบลงบนพื้นผิวของวัตถุและสะท้อนกลับ แต่เนื่องด้วยวัตถุที่อยู่บนพื้นผิวโลกมีความหลากหลายและยังมีความสามารถในการสะท้อนที่แตกต่างกัน (Brenner, 2006) ทำให้เลเซอร์ที่สะท้อนกลับไปยังอุปกรณ์เลเซอร์สแกนเนอร์มีการบันทึกสัญญาณในหลายลูกคลื่น

ในกรณีที่คลื่นของเลเซอร์เดินทางผ่านพุ่มไม้ที่ปกคลุมพื้นผิวภูมิประเทศ หากพุ่มไม้ไม่หนาแน่นมากนัก คลื่นบางส่วนอาจตกกระทบบนยอดไม้ บางส่วนอาจตกกระทบที่กิ่งก้านสาขา

ของต้นไม้และส่วนอื่น ๆ ในทรงพุ่ม (Canopy) และลูกคลื่นของเลเซอร์นั้นอาจเดินทางต่อไป ตกกระทบบนพื้นดิน หากระบบมีความสามารถในการสะท้อนกลับของลูกคลื่นเหล่านี้ โดยการสังเกตเวลาที่ลูกคลื่นเดินทางไปแล้วกลับ จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับในหลายลูกคลื่น (Multiple-returns) โดยข้อมูลเหล่านี้จะถูกบันทึกไว้ในข้อมูลจำเพาะของพอยต์คลาวด์แต่ละจุด ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการจำแนกสิ่งที่ปกคลุมบนพื้นผิวภูมิประเทศเป็นอย่างมาก

สำหรับการเดินทางของลูกคลื่นของเลเซอร์ผ่านต้นไม้ หากใช้เวลาเดินทางไปและกลับสั้นที่สุดจะสันนิษฐานได้ว่าเป็นสัญญาณที่ตกกระทบบนที่ยอดไม้ และจะเรียกว่า First return และผลการบันทึกเวลาของลูกคลื่นที่ใช้เวลาเดินทางนานที่สุดจะเรียกว่า Last return และหากมีการบันทึกเวลาของลูกคลื่นที่สะท้อนกลับมาระหว่าง First และ Last return จะใช้การไล่ลำดับการใช้เวลาจากน้อยไปมากเป็น 2nd return, 3rd return ไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะถึง Last return แต่ในบางครั้งลูกคลื่นอาจเกิดการสะท้อนกลับเพียงครั้งเดียว (Single return) หากไปตกกระทบบนพื้นแข็ง เช่น พื้นถนน หลังคาของอาคาร เป็นต้น

จากการบันทึกการสะท้อนกลับของลูกคลื่นนี้ จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการจำแนกประเภทของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่เป็นจุดบนพื้นดิน ออกจากจุดที่ไม่ได้ตกกระทบบนพื้นดินได้อย่างง่ายดาย



รูปที่ 7 พฤติกรรมการสะท้อนกลับของเลเซอร์ที่ตกกระทบบนพื้นผิววัตถุต่าง ๆ

ในภูมิประเทศ (Shin et al., 2022)

2.1.7 การประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งของข้อมูลพอยต์คลาวด์

สำหรับการประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการสำรวจด้วยไลดาร์ ได้อ้างอิงตามแนวทางการตรวจสอบตามมาตรฐานของ NSSDA (National Standards for Spatial Data Accuracy) ซึ่งได้มีการกำหนดมาตรฐานในการ

คำนวณค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งไว้ โดยจะคำนวณหาค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางตั้งกำลังสอง ($RMSE_z$) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{test_i} - Z_{independent_i})^2}{n}} \quad (2.18)$$

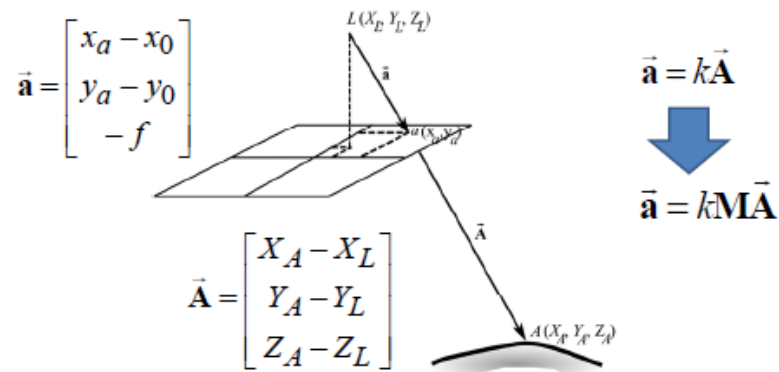
โดยที่	Z_{test}	เป็น	ค่าพิกัดในทางแกน Z ของจุดที่ต้องการจะตรวจสอบ
	$Z_{independent}$	เป็น	ค่าพิกัดอ้างอิงในทางแกน Z ของจุดทราบค่าที่เป็นอิสระกับข้อมูล (จุดตรวจสอบ)
	n	เป็น	จำนวนจุดตรวจสอบทั้งหมด
	i	เป็น	เลขลำดับของจุดตรวจสอบซึ่งเป็นจำนวนเต็มตั้งแต่ 1- n

การประเมินความละเอียดถูกต้องของค่าความสูงของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสำรวจด้วยไลดาร์หากไม่มีความคลาดเคลื่อนเป็นระบบแฝงอยู่หรือมีการแจกแจงปกติ ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งของการรังวัดตามมาตรฐานของ NSSDA ในทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยจะใช้ค่าแฟกเตอร์ 1.9600 มาคูณเข้ากับค่า $RMSE_z$ ที่คำนวณมาได้ ซึ่งเป็นเกณฑ์มาตรฐานสำหรับทุก ๆ ลักษณะพื้นผิวของภูมิประเทศที่ทำการสำรวจ (ASPRS Lidar committee, 2004; Liu, 2011) ดังสมการที่ 2.19

$$Accuracy_z = 1.9600 \times RMSE_z \quad (2.19)$$

2.1.8 สมการสภาวะร่วมเส้น (Collinearity equations)

ในการที่จะทำให้ทราบค่าพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายนอก (Exterior Orientation Parameters : EOP) ของภาพถ่ายทางอากาศ ซึ่งมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับความต้องการที่จะทราบว่าจุดที่สนใจในภาพถ่ายทางอากาศนั้นจะมีค่าพิกัดภาคพื้นดินเป็นเท่าใด จะต้องอาศัยสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณ โดยจะต้องศึกษาจากทฤษฎีของสภาวะร่วมเส้น โดยสภาวะร่วมเส้นเป็นความสัมพันธ์ของเส้นตรงที่เกิดจากจุด 3 จุด ได้แก่ จุดศูนย์กลางการฉาย จุดบนภาพถ่ายในระบบพิกัด 2 มิติ และจุดบนพื้นดินในระบบพิกัด 3 มิติ โดยความสัมพันธ์ของทั้ง 3 จุด สามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ แต่ต้องอาศัยหลักการของการแปลงระบบพิกัด 3 มิติ แบบคงรูป 7 พารามิเตอร์ (3D Conformal Transformation) เพื่อเชื่อมความสัมพันธ์ของทั้ง 3 จุดเข้าด้วยกัน ดังรูปที่ 8 ซึ่งจะเรียกว่า สมการสภาวะร่วมเส้น (กนก วีรวงศ์, 2564)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ของจุดบนเส้นตรง 3 จุด ได้แก่

จุดศูนย์กลางการฉาย จุดบนภาพถ่าย และจุดบนพื้นดิน (กนก วีรวงศ์, 2564)

โดยความสัมพันธ์ของจุดทั้ง 3 จุดนี้ สามารถเขียนได้ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$\vec{a} = kM\vec{A} \quad (2.20)$$

- โดยที่ \vec{a} คือ เวกเตอร์จากจุดเปิดถ่าย ถึงจุดบนภาพถ่าย
- \vec{A} คือ เวกเตอร์จากจุดเปิดถ่าย ถึงจุดบนพื้นดิน
- M คือ เมทริกซ์การหมุนของการทำมุมรอบแกน X, Y, Z ของระบบพิกัดอ้างอิง ได้แก่มุม ω , φ , K ตามลำดับ เพื่อใช้ในการแปลงระบบพิกัดจากระบบพิกัด 2 มิติ ไปสู่ระบบพิกัด 3 มิติ
- k คือ มาตรการส่วนระหว่างเวกเตอร์ \vec{a} กับ \vec{A}

และหากเขียนความสัมพันธ์ของแบบจำลองให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ จะได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x_a - x_0 \\ y_a - y_0 \\ -f \end{bmatrix} = kM \begin{bmatrix} X_A - X_L \\ Y_L - Y_L \\ Z_L - Z_L \end{bmatrix}$$

โดยที่ เมทริกซ์การหมุน (M) จะมีที่มาดังนี้

$$M = M_K \cdot M_\varphi \cdot M_\omega$$

$$M = \begin{bmatrix} \cos K & \sin K & 0 \\ -\sin K & \cos K & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} \cos K \cos \varphi & \sin K \cos \omega + \cos K \sin \varphi \sin \omega & \sin K \sin \omega - \cos K \sin \varphi \cos \omega \\ -\sin K \cos \varphi & \cos K \cos \omega - \sin K \sin \varphi \sin \omega & \cos K \sin \omega + \sin K \sin \varphi \cos \omega \\ \sin \varphi & -\cos \varphi \sin \omega & \cos \varphi \cos \omega \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

แต่เพื่อให้่ายและสะดวกต่อการคำนวณ จึงได้มีการกำหนดให้ค่าในแต่ละตำแหน่งของเมทริกซ์ (2.21) มีสัญลักษณ์ดังนี้

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}$$

และเมื่อจัดให้อยู่ในรูปแบบสมการ จะได้เป็น

$$x_a = x_0 - f \frac{[m_{11}(X_A - X_L) + m_{12}(Y_A - Y_L) + m_{13}(Z_A - Z_L)]}{[m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)]} \quad (2.22)$$

$$y_a = y_0 - f \frac{[m_{21}(X_A - X_L) + m_{22}(Y_A - Y_L) + m_{23}(Z_A - Z_L)]}{[m_{31}(X_A - X_L) + m_{32}(Y_A - Y_L) + m_{33}(Z_A - Z_L)]} \quad (2.23)$$

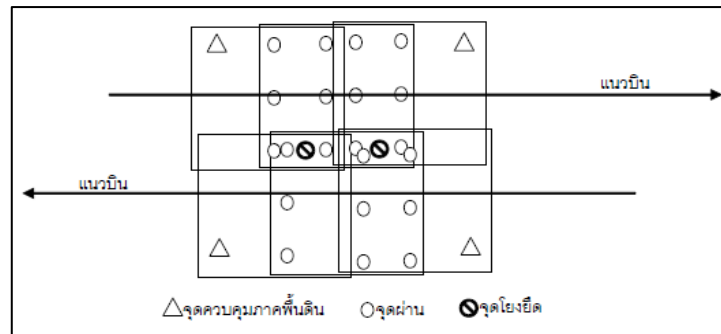
โดยที่	x_a	คือ	ค่าพิกัดภาพถ่ายของจุด a ในทางแกนนอน
	y_a	คือ	ค่าพิกัดภาพถ่ายของจุด a ในทางแกนตั้ง
	x_0	คือ	ค่าพิกัดภาพถ่ายของการเลื่อนจุดกำเนิดในทางแกน x ที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์กล้องถ่ายภาพ
	y_0	คือ	ค่าพิกัดภาพถ่ายของการเลื่อนจุดกำเนิดในทางแกน y ที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์กล้องถ่ายภาพ
	f	คือ	ระยะโฟกัสของเลนส์ที่ใช้ในการถ่ายภาพ (Principal distance)
	X_A	คือ	ค่าพิกัดภาคพื้นดินของจุด A ในทางแกน X ของระบบพิกัดอ้างอิง
	Y_A	คือ	ค่าพิกัดภาคพื้นดินของจุด A ในทางแกน Y ของระบบพิกัดอ้างอิง
	Z_A	คือ	ค่าพิกัดภาคพื้นดินของจุด A ในทางแกน Z ของระบบพิกัดอ้างอิง
	X_L	คือ	ค่าพิกัดภาคพื้นดินของจุดศูนย์กลางการฉายในทางแกน X ของระบบพิกัดอ้างอิง
	Y_L	คือ	ค่าพิกัดภาคพื้นดินของจุดศูนย์กลางการฉายในทางแกน Y ของระบบพิกัดอ้างอิง
	Z_L	คือ	ค่าพิกัดภาคพื้นดินของจุดศูนย์กลางการฉายในทางแกน Z ของระบบพิกัดอ้างอิง
	M	คือ	เมทริกซ์การหมุนของการทำมุมรอบแกน X, Y, Z ของระบบพิกัดอ้างอิง ได้แก่ ω, φ, K ตามลำดับ

2.1.9 ข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ

สืบเนื่องจากความสำคัญของทฤษฎีสมการสภาวะร่วมเส้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสมการในการคำนวณหาค่าพิกัดภาคพื้นดินของจุดที่ต้องการทราบในภาพถ่าย แต่ในการคำนวณสมการสภาวะร่วมเส้นแบบสกัดตรง (Intersection) ซึ่งทราบค่าพิกัดและการวางตัวของจุดศูนย์กลางการฉาย จะพบว่าหากต้องการรังวัดค่าพิกัดของจุดที่สนใจบนพื้นดิน 1 จุด จะทำให้ได้สมการค่ารังวัดเพียง 2 สมการ ซึ่งไม่เพียงพอต่อการคำนวณหาค่าพิกัด X, Y, Z ของจุดพื้นดินได้ และด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องใช้ภาพถ่ายทางอากาศที่มีการถ่ายภาพให้เห็นจุดสนใจจุดเดียวกัน เพื่อนำมาสร้างสมการค่ารังวัดเพิ่มอีก 2 สมการ จึงจะเพียงพอต่อการคำนวณหาค่าพิกัดบนพื้นดินของจุดที่สนใจได้ แต่ในทางปฏิบัติแล้วควรจะต้องมีจำนวนสมการที่มากเพื่อให้การคำนวณค่าพิกัดนั้นมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะสอดคล้องกับการบินถ่ายภาพทางอากาศเป็นบล็อกบินที่มีการวางแผนให้มีการบินถ่ายภาพให้เกิดส่วนซ้อน และส่วนเกย ในการคำนวณเป็นบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศนี้จะเรียกว่า Bundle Block Adjustment (BBA) ซึ่งมีการนำวิธีการทำข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศที่เป็นกระบวนการคำนวณเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของการจัดวางภาพถ่ายนอก มาประยุกต์ใช้กับบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ ซึ่งจะเป็นบล็อกของภาพถ่ายตั้งที่มีแกนของกล้องถ่ายภาพขนานไปในทิศทางเดียวกัน มีการจัดเรียงแนวบินอย่างมีระบบ และเป็นการคำนวณปรับแก้ที่นิยมใช้ในปัจจุบันที่ให้ความละเอียดถูกต้องและความน่าเชื่อถือสูง ซึ่งจะนำมาใช้ในการแก้ปัญหาสำหรับการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของการจัดวางภาพถ่ายนอก ของการรังวัดย้อนบนภาพถ่ายเดี่ยว (Single image resection) ที่จะต้องอาศัยจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินที่ปรากฏบนภาพถ่ายอย่างน้อย 3 จุด ของทุกภาพในบล็อก ซึ่งนับเป็นความสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายเกินความจำเป็น อีกทั้งจะไม่มีการใช้ประโยชน์จากการที่ภาพถ่ายทางอากาศในบล็อกมีการซ้อนและเกยกันอย่างเป็นระบบ ดังนั้นด้วยพื้นที่ส่วนซ้อนของภาพถ่ายที่มีถึง 60 – 80% ทำให้จุดที่สนใจในภาพถ่ายจะปรากฏให้เห็นบนภาพถ่ายมากกว่า 2 รูปขึ้นไป ซึ่งสามารถที่จะใช้ในการรังวัดค่าพิกัดของจุดในภาพถ่ายได้โดยไม่ต้องลงไปรังวัดในสนาม ยิ่งถือเป็นการเพิ่มจำนวนจุดควบคุมภาพถ่ายในบล็อกของทุกภาพให้มีจำนวนมาก โดยจะนิยมเรียกว่า การขยายจุดควบคุม (Photo control extension)

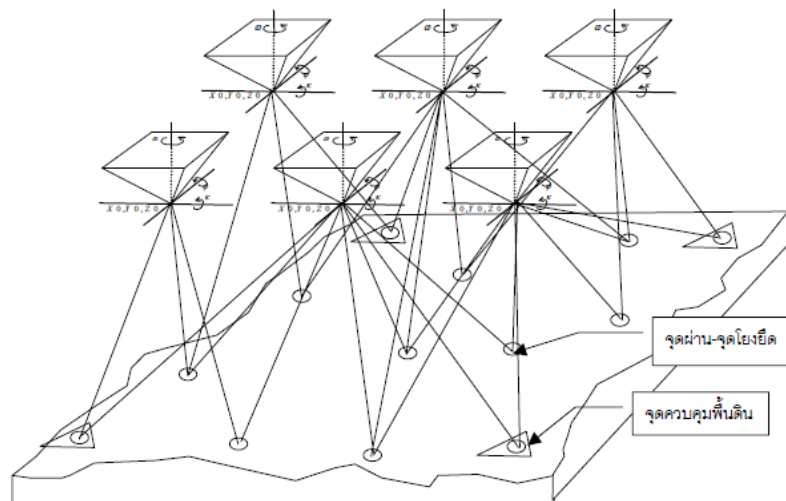
ในการขยายจุดควบคุมนี้จะเกิดจากการคำนวณหาค่าพิกัดภาคพื้นดินของจุดสนใจในภาพถ่าย ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น ซึ่งจุด ๆ เดียวกันที่ปรากฏให้เห็นในทั้ง 2 ภาพ หรือมากกว่านั้น

จะมีชื่อเรียกว่า จุดผ่าน เมื่อเป็นจุดที่วัดบนภาพที่ซ้อนกันในแนวบิน และจุดโยงยึด เมื่อเป็นการวัดบนภาพที่เกยกันระหว่างแนวบิน ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ตำแหน่งของจุดควบคุมภาพถ่ายชนิดต่าง ๆ (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2564)

เมื่อภาพถ่ายมีการโยงยึดกัน แต่ในแต่ละระบบพิกัดนั้นยังเป็นระบบพิกัดของตนเอง ดังนั้นจะต้องมีการจัดวางแบบจำลองให้สัมพันธ์กับระบบพิกัดภาคพื้นดิน ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างแบบจำลองสามมิติในอากาศกับระบบพิกัดภาคพื้นดิน สามารถทำได้โดยการนำระบบพิกัดของแบบจำลองที่เกิดจากการโยงยึดบล็อกของภาพถ่ายที่มีค่าพิกัดเป็นพิกัดของแบบจำลองที่ลอยอิสระอยู่ในอากาศ มาเปรียบเทียบกับจุดที่ทราบค่าพิกัดภาคพื้นดิน ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (รูปที่ 10) ซึ่งจะทราบค่าพิกัดภาคพื้นดินได้ด้วยการรังวัดในสนาม เช่น การรังวัดด้วยระบบ GNSS



รูปที่ 10 การขยายจุดควบคุมที่ได้จากการคำนวณของบล็อกภาพถ่ายที่มีการซ้อนกันอย่างเป็นระบบ และอ้างอิงระบบพิกัดภาคพื้นดินได้ด้วยจุดควบคุมภาคพื้นดิน (ไพศาล สันติธรรมนนท์, 2564)

2.1.10 การจับคู่จุดภาพด้วยการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ (Computer vision)

ในการรังวัดจุดผ่านและจุดโยงยึดที่อยู่ในส่วนซ้อนและส่วนเกยของภาพถ่ายนั้น ปัจจุบันนิยมใช้วิธีการรังวัดโดยอัตโนมัติด้วยซอฟต์แวร์ด้านโฟโตแกรมเมตรีในการประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายโดยใช้คอมพิวเตอร์ที่มีสมรรถนะสูง โดยจะเรียกวิธีการรังวัดนี้ว่า การจับคู่ภาพ (Image matching) (อิรวัดน์ บรรณกุลพิพัฒน์, 2564) ในการจับคู่จุดภาพจะแบ่งออกเป็น 2 เทคนิค คือ เทคนิคการจับคู่ภาพด้วยวิธีเปรียบเทียบเป็นพื้นที่ (Area-based matching) และเทคนิคการจับคู่ภาพด้วยวิธีการใช้คุณลักษณะเด่น (Feature based matching) โดยในวิธีการหลังจะเป็นที่นิยมในปัจจุบัน ซึ่งจะใช้การจับคู่ภาพด้วยการอาศัยคุณลักษณะเด่นชัดที่เห็นได้บนภาพถ่ายที่มีจุดนี้ปรากฏอยู่ อาจมีมากกว่า 2 ภาพขึ้นไป โดยจุดนี้จะเรียกว่า Key point หรือ จุดสำคัญบนภาพ ในการประมวลผลภาพ (Image processing) ด้วยคอมพิวเตอร์วิชันนั้น คอมพิวเตอร์จะทำการตัดสินใจว่าจุดใดบนภาพมีความโดดเด่น และจะนิยมเรียกจุด ๆ นี้ว่าเป็น จุดลักษณะเฉพาะ (Image feature) และด้วยปัจจุบันที่มีความก้าวหน้าของอัลกอริทึมที่ใช้ในการรังวัดจุดภาพนั้นทำให้จุดสำคัญบนภาพมักจะถูกรวบรวมได้ง่ายและมีจำนวนมากตามคุณลักษณะที่โดดเด่น อัลกอริทึมจะมีการกำหนดสิ่งที่ย่อยถึงคุณลักษณะเฉพาะที่เรียกว่า Feature descriptor เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบความสอดคล้องกันของจุดสำคัญบนภาพถ่ายที่ต่อเนื่องกัน

ในกระบวนการรังวัดจับคู่จุดภาพด้วยคอมพิวเตอร์วิชันนั้นจะมีการใช้อัลกอริทึมเพื่อการจับคู่โดยอัตโนมัติ เช่น อัลกอริทึม Least square image matching (LSM) ที่จะเป็นการใช้วิธีการปรับแก้กำลังสองน้อยที่สุดมาคำนวณเพื่อหาจุดภาพที่สอดคล้องกัน แต่มักจะพบปัญหาการคำนวณที่ได้ค่าบานออก (Diverge) อันเกิดจากการประมาณค่าเริ่มต้นที่ไม่ดีจากภาพถ่ายที่มีความแตกต่างกันมาก และไม่สามารถสกัดจุดที่ไม่สอดคล้อง (Outlier) ออกไปได้ (Li & Wang, 2014) โดยปัญหาที่พบบ่อยคือ มาตรฐาน ทิศทางการวางตัว และความเข้มหรือสว่างของภาพที่มีความแตกต่างกัน ในทางคอมพิวเตอร์วิชันความแตกต่างนี้เกิดจากมุมมองของกล้องขณะที่ถ่ายภาพ ระยะห่างระหว่างเลนส์ของกล้องและวัตถุ รวมถึงความสว่างของแสงขณะถ่ายภาพ โดยปัญหาดังกล่าวได้มีความพยายามในการพัฒนาองค์ความรู้ทางด้านคอมพิวเตอร์วิชันในการแก้ไขปัญหานี้ โดยมีการคิดค้นในอัลกอริทึมที่จะช่วยให้คอมพิวเตอร์วิชันสามารถจับคู่จุดภาพได้รวดเร็วและแม่นยำ อาทิเช่น วิธีการ SIFT (Scale Invariant Feature Transformation) และ วิธีการ SURF (Speeded Up Robust Feature) เป็นต้น

สำหรับวิธีการ SIFT เป็นวิธีการจับคู่จุดที่สนใจที่พบเห็นในภาพถ่ายหลาย ๆ ภาพ โดยการสร้างจุดสำคัญ (Key point) และตัวกำหนดสิ่งที่บรรยายคุณลักษณะ (Descriptor) ขึ้นมา เพื่อเป็นการแทนการจับคู่ระหว่างจุดภาพโดยตรง ในวิธีการ SIFT นี้จะสามารถจัดอธิพจน์ของมาตราส่วนภาพที่แตกต่างกัน ทิศทางการหมุนและการเอียงของภาพ (การวางตัวของภาพ) การเปลี่ยนมุมมองของกล้องถ่ายภาพอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงความสว่างของภาพ ทำให้การจับคู่ภาพมีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น และทำให้ได้จำนวนของจุดของการจับคู่ภาพเป็นจำนวนมาก (ถิรวัดน์ บรรณกุลพิพัฒน์, 2564)

ในวิธีการ SURF จะเป็นการนำภาพเดิมมาผสมผสานให้เกิดเป็นภาพผสม (Integral image) จากนั้นจะทำการกำหนดขนาดพื้นที่ของจุดภาพที่เลือกเป็นจุดสำคัญในภาพถ่าย สำหรับการจับคู่จุดภาพที่สอดคล้องกันในขอบเขตพื้นที่ที่กำหนดขึ้น วิธีการดังกล่าวจะสามารถจัดอธิพจน์ของมาตราส่วนภาพที่แตกต่างกัน ได้โดยใช้การกรองเพื่อเพิ่มความละเอียดของจุดภาพ (Up sampling filters) สำหรับภาพที่มีมาตราส่วนไม่เท่ากัน รวมไปถึงทิศทางการหมุนและการเอียงของภาพ อีกทั้งวิธีการนี้ยังให้ความรวดเร็วและความแม่นยำในการจับคู่จุดภาพที่สูงด้วยเช่นเดียวกัน

ในการเปรียบเทียบการจับคู่จุดภาพระหว่างวิธีการ SIFT และ SURF ของ Mistry and Banerjee (2017) พบว่า วิธีการ SIFT และ SURF นั้นเป็นวิธีการที่มีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการจับคู่จุดภาพ เนื่องจากเป็นวิธีการที่สามารถจัดการกับอธิพจน์ของ มาตราส่วน การหมุน การเอียง ความสว่าง และความไม่ชัด (blur) ของภาพได้ และเมื่อนำวิธีการทั้งสองมาเปรียบเทียบกันแล้วพบว่า วิธีการ SURF สามารถจับคู่จุดภาพได้ดีกว่า SIFT ตรงที่ สามารถจับคู่จุดภาพที่มีการหมุนเปลี่ยนทิศทาง ความไม่ชัด และภาพที่มีความผิดเพี้ยนทางรูปร่าง (Warp image) ได้มีประสิทธิภาพมากกว่า ในส่วนวิธีการ SIFT สามารถจับคู่จุดภาพได้ดีกว่า SURF ตรงที่ การจับคู่จุดภาพที่มีมาตราส่วนที่แตกต่างกันทำได้ดีกว่า แต่ทั้งสองวิธีการสามารถจับคู่จุดภาพที่มีความสว่างแตกต่างกันได้ดีพอ ๆ กัน นอกจากนี้แล้ววิธีการ SURF ยังสามารถจับคู่ได้เร็วกว่าวิธีการ SIFT ถึง 3 เท่า

2.1.11 การรังวัดจุดสามมิติด้วยภาพถ่ายทางอากาศหลายมุมมอง

ในกระบวนการทำงานด้านโฟโตแกรมเมตรีที่เกี่ยวข้องกับการรังวัดด้วยภาพแบบดั้งเดิม จะใช้การรังวัดภาพถ่ายทางอากาศที่เป็นคู่ภาพสเตอริโอ (Stereophotogrammetry) ในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายนอก ซึ่งมีส่วนเกี่ยวข้องกับการรังวัดค่าพิกัดสาม

มิติของจุดที่สนใจในภาพ โดยจะใช้หลักการตัดกันของแนวรังสีที่มาจากคู่ภาพสเตอริโอ ความถูกต้องและความแม่นยำในการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายนอกของ กล้องถ่ายภาพจะส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของระยะฐาน (Base) ของจุดเปิดถ่ายภาพ และ จะส่งผลกระทบต่อไปถึงการรังวัดหาค่าพิกัดสามมิติด้วย ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นแนวคิดเรื่อง การมองเห็นในหลายมุมมองเข้ามาช่วยแก้ปัญหาในงานด้านการรังวัดด้วยภาพสมัยใหม่ที่ใช้ อัลกอริทึมของคอมพิวเตอร์วิชั่นเป็นหลัก โดยการมองเห็นในหลาย ๆ มุมมองจะเป็นการเพิ่ม แนวรังสีที่มาตัดกันให้มากกว่า 2 แนวรังสี ซึ่งสามารถทำได้โดยการเพิ่มส่วนซ้อนทับของ ภาพถ่ายหรือการเพิ่มมุมมองของวัตถุที่สนใจบนภาพถ่ายให้มากยิ่งขึ้น จากการทำมีแนวรังสีเพิ่ม มากขึ้นและมาจากภาพถ่ายที่มีระยะฐานที่ยาวขึ้นนั้นจะส่งผลให้การรังวัดค่าพิกัดสามมิติของ จุดสนใจในภาพถ่ายมีความถูกต้องและแม่นยำมากยิ่งขึ้น (Strecha, 2014)

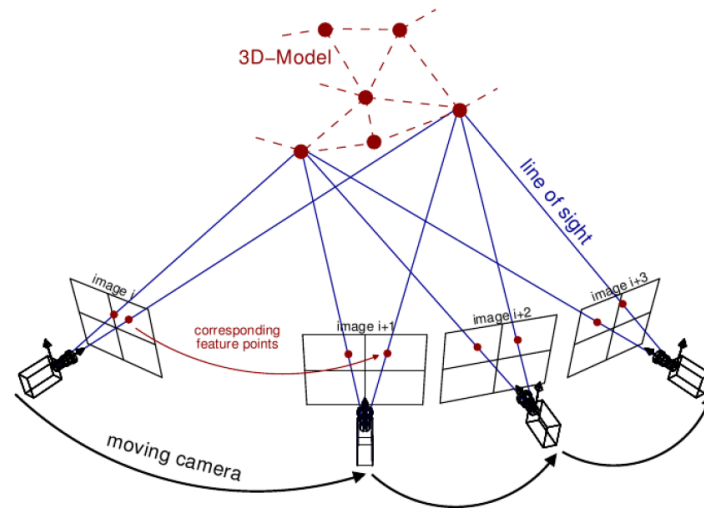


รูปที่ 11 แนวรังสีของการมองเห็นเพื่อรังวัดค่าพิกัดสามมิติ แบบภาพสเตอริโอ และแบบหลายมุมมอง (Strecha, 2014)

2.1.12 การสำรวจโครงสร้างจากการเคลื่อนไหว

การสำรวจโครงสร้างจากการเคลื่อนไหว (Structure-from-Motion) เป็นอัลกอริทึมของคอมพิวเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับงานด้านโฟโตแกรมเมตรี สำหรับการรังวัดจุดที่สนใจด้วยภาพถ่ายในหลาย ๆ มุมมอง ที่เกิดจากการเคลื่อนไหวเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและทิศทางของ กล้องถ่ายภาพ โดยการรังวัดจุดสนใจจะทำในทุกภาพที่จุดปรากฏอยู่ ซึ่งจะทำให้เกิดการ คำนวณด้วยแนวตัดของรังสีจากกล้องถ่ายภาพในหลายมุมมองและมีการปรับแก้ระหว่างพิกัด และการวางตัวของกล้องถ่ายภาพและเรขาคณิตของภาพถ่าย ซึ่งจะได้ออกมาเป็นค่าพิกัดสาม มิติของจุด ๆ นั้น โดยหากภาพถ่ายที่ใช้ในการประมวลผลเป็นภาพถ่ายทางอากาศ จะเปรียบได้ กับการทำ BBA ของบล็อกภาพถ่ายทางอากาศ ซึ่งมีการรังวัดจุดผ่านและจุดโยงยึดที่มี คุณสมบัติเป็นจุดสำคัญซึ่งปรากฏในส่วนซ้อนระหว่างภาพถ่ายหรือระหว่างแนวจานที่ ต่อเนื่องกัน หลังจากการคำนวณปรับแก้บล็อกลำแสงของภาพถ่ายทางอากาศแล้วจะทำให้ได้

ค่าพิกัดภาคพื้นดินของจุดสำคัญเหล่านี้ และเมื่อมีการรังวัดจุดจำนวนมาก จะได้เป็นข้อมูลกลุ่มจุดสามมิติ หรือข้อมูลพอยต์คลาวด์ ที่เรียงตัวให้เห็นเป็นลักษณะโครงสร้างของวัตถุ



รูปที่ 12 ลักษณะของการรังวัดค่าพิกัดของจุดที่สนใจด้วยเทคนิค SfM (Riel, 2016)

2.1.13 การประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งของการรังวัดค่าพิกัดบนภาพถ่าย

ในการประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งของการรังวัดค่าพิกัดบนภาพถ่ายทางอากาศ จะอ้างอิงตามแนวทางการตรวจสอบตามมาตรฐานของ NSSDA โดยจะคำนวณหาค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งกำลังสอง ตามมาตรฐานของ ASPRS 1990 (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing Standard 1990) และจะนำค่าที่คำนวณได้ไปคูณเข้ากับค่าแฟกเตอร์เพื่อให้เป็นไปตามหลักการทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (ASPRS, 2015)

สำหรับค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งกำลังสอง จะมีการตรวจสอบใน 2 ส่วน ได้แก่ ค่าทางราบของแกน X และ Y ($RMSE_X$ และ $RMSE_Y$) และค่าทางตั้ง ($RMSE_Z$) โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

- ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในทางราบกำลังสอง

$$RMSE_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{test_i} - X_{independent_i})^2}{n}} \quad (2.24)$$

$$RMSE_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{test_i} - Y_{independent_i})^2}{n}} \quad (2.25)$$

โดยที่ X_{test} คือ ค่าพิกัดในทางแกน X ของจุดที่ต้องการจะตรวจสอบบนภาพถ่ายทางอากาศ

$X_{independent}$	คือ	ค่าพิกัดอ้างอิงในทางแกน X ของจุดทราบค่าที่เป็นอิสระกับข้อมูล (จุดตรวจสอบ)
Y_{test}	คือ	ค่าพิกัดในทางแกน Y ของจุดที่ต้องการจะตรวจสอบบนภาพถ่ายทางอากาศ
$Y_{independent}$	คือ	ค่าพิกัดอ้างอิงในทางแกน Y ของจุดทราบค่าที่เป็นอิสระกับข้อมูล (จุดตรวจสอบ)
n	คือ	จำนวนจุดตรวจสอบทั้งหมด
i	คือ	ลำดับของจุดตรวจสอบซึ่งเป็นจำนวนเต็มตั้งแต่ 1- n

จากนั้นจะนำค่า $RMSE_x$ และ $RMSE_y$ ไปคำนวณเป็นค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในทางราบกำลังสอง ดังนี้

$$RMSE_r = \sqrt{(RMSE_x)^2 + (RMSE_y)^2} \quad (2.26)$$

โดยที่ $RMSE_r$ คือ ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในทางราบกำลังสอง

ถ้าหากว่าไม่มีค่าคลาดเคลื่อนในระบบแฝงอยู่และค่าคลาดเคลื่อนนี้มีลักษณะการแจกแจงเป็นปกติ โดยที่ค่าคลาดเคลื่อนทางแกน X เป็นอิสระจากความคลาดเคลื่อนทางแกน Y แล้วค่าความถูกต้องทางราบของการรังวัดตามมาตรฐานของ NSSDA ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 % สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Accuracy_r = 1.7308 * RMSE_r \quad (2.27)$$

- ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในทางตั้งกำลังสอง

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{test_i} - Z_{independent_i})^2}{n}} \quad (2.28)$$

โดยที่ Z_{test}	คือ	ค่าพิกัดในทางแกน Z ของจุดที่ต้องการจะตรวจสอบ
$Z_{independent}$	คือ	ค่าพิกัดอ้างอิงในทางแกน Z ของจุดทราบค่าที่เป็นอิสระกับข้อมูล (จุดตรวจสอบ)
n	คือ	จำนวนจุดตรวจสอบทั้งหมด
i	คือ	ลำดับของจุดตรวจสอบซึ่งเป็นจำนวนเต็มตั้งแต่ 1- n

ถ้าหากไม่มีค่าคลาดเคลื่อนในระบบแฝงอยู่และค่าคลาดเคลื่อนนี้มีลักษณะการแจกแจงเป็นปกติ ค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งของการรังวัดตามมาตรฐานของ NSSDA ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$Accuracy_Z = 1.9600 * RMSE_Z \quad (2.29)$$

2.1.14 การรังวัดแบบจลนในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐาน

ในการจัดทำจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินนั้นจะต้องทำการรังวัดค่าพิกัดในสนาม โดยค่าพิกัดที่ได้จะต้องมีความละเอียดถูกต้องสูง และเมื่อนำไปใช้โยงยึดค่าพิกัดในกระบวนการถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศจะทำให้ภาพถ่ายทางอากาศในบล็อคบินมีการอ้างอิงกับระบบพิกัดภาคพื้นดินได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น ในปัจจุบันจะใช้วิธีการรังวัดโดยการรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ซึ่งจะให้ค่าพิกัดที่มีความละเอียดถูกต้องสูงและยังมีเทคนิคการรังวัดที่จะทำให้ได้ค่าพิกัดมาอย่างรวดเร็ว เทคนิคดังกล่าวคือ การรังวัดแบบจลนในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวร (NRTK)

ในการรังวัดด้วยเทคนิคนี้จะต้องอาศัยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม 1 เครื่อง ซึ่งจะนำไปตั้ง ณ จุดที่ต้องการทราบค่าพิกัด และเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมนี้อาจจะทำการเชื่อมต่อเข้ากับโครงข่ายสถานีฐานถาวรที่มีการรับสัญญาณ GNSS อย่างต่อเนื่อง (Continuously Operating Reference Station : CORS) โดยอาศัยระบบอินเทอร์เน็ต เพื่อให้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่ทำหน้าที่เป็นสถานีจรสามารถเชื่อมต่อได้แม้มีการเคลื่อนย้ายไปยังจุดอื่น ๆ โดยหลักการการทำงานของเทคนิคการรังวัดดังกล่าว จะเริ่มจากการที่มีสถานีฐานถาวรอย่างน้อย 3 สถานีในโครงข่าย โดยทั้งหมดจะต้องทำการเชื่อมต่อระบบอินเทอร์เน็ตเพื่อใช้ในการส่งข้อมูลไปยังศูนย์ควบคุมส่วนกลางได้ในทันที และเมื่อศูนย์ควบคุมส่วนกลางได้รับข้อมูลจากทุกสถานีฐานถาวรแล้วจะทำการประมวลผลข้อมูลที่ได้รับ เพื่อคำนวณหาค่าแก้ความคลาดเคลื่อนชนิดต่าง ๆ เพื่อส่งไปให้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมของผู้ใช้ เพียงเท่านี้ผู้ใช้จะทราบค่าพิกัดของจุดที่เครื่องรับสัญญาณตั้งอยู่ (เจนพีธกร สุนทรรัตน์, 2560) โดยค่าความถูกต้องทางตำแหน่งที่ได้ที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ของการใช้งานเครื่องรับ Geodetic ในแบบ Real-Time ด้วยวิธีการรับค่าแก้ด้วยเทคนิค VRS ที่สามารถทำงานได้ในโครงข่ายที่มีเส้นฐานถึง 100 กิโลเมตร ด้วยค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในทางราบ 2 – 8 เซนติเมตร และในทางดิ่ง 5 – 12 เซนติเมตร (Dabove et al., 2012)

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการรังวัดภาพถ่ายด้วยกระบวนการทางโฟโตแกรมเมตรี

Schönberger et al. (2014) ต้องการที่จะสร้างแบบจำลองสามมิติจากการใช้พอยต์คลาวด์ที่สร้างจากกระบวนการทางโฟโตแกรมเมตรีด้วยการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ (PCV) โดยเป็นการนำภาพถ่ายมาประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ในคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ได้ผลผลิตที่เป็นข้อมูลพอยต์คลาวด์ เพื่อนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองสามมิติ จากการที่ปัจจุบันคอมพิวเตอร์มีสมรรถนะที่สูงขึ้น รวมไปถึงซอฟต์แวร์ที่ถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้การรังวัดค่าพิกัดสามมิติในภาพถ่ายตามกระบวนการทางโฟโตแกรมเมตรีมีความเป็นอัตโนมัติมากยิ่งขึ้น โดยในงานวิจัยมีการอธิบายถึงขั้นตอนต่าง ๆ เริ่มต้นที่การมีกล้องถ่ายภาพที่ทราบค่าพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายใน (Interior Orientation Parameters : IOP) โดยได้จากการวัดสอบเทียบด้วยความละเอียดสูง (In-situ Calibration) จากนั้นเป็นการจัดภาพสัมพัทธ์ (Relative Orientation : RO) ระหว่างภาพถ่ายที่มีอยู่ในบล็อกการสำรวจทั้งหมด โดยเป็นการจับคู่จุดภาพ (Image matching) ที่สอดคล้องกันระหว่างภาพถ่ายทางอากาศที่มีส่วนซ้อนหรือส่วนเกยที่ต่อเนื่องกัน (Key point) โดยใช้อัลกอริทึม SURF ในการจับคู่จุดภาพ พร้อมกับการสกัดจุดภาพที่ไม่สอดคล้องกัน (Outlier) ออกไป ให้คงไว้แต่จุดที่สอดคล้องกันสำหรับการสร้างความสัมพันธ์ของการจัดภาพ ซึ่งจะช่วยลดความผิดพลาดที่จะส่งผลถึงการประมวลผลในขั้นตอนต่อ ๆ ไป โดยคอมพิวเตอร์สามารถทำได้โดยอัตโนมัติด้วยอัลกอริทึม RANSAC (Random Sample Consensus) ต่อมาคือการจัดภาพสัมบูรณ์ (Absolute Orientation : AO) โดยจะมีขั้นตอนสำคัญที่เกี่ยวข้องคือการกำหนดค่าพิกัดภาคพื้นดินจากจุดที่ทราบค่าโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน โดยจุดเหล่านี้จะเป็นจุดควบคุมในการปรับแก้บล็อกคำสั่งของภาพถ่ายทางอากาศ (BBA) ขณะทำการประมวลผลคอมพิวเตอร์จะมีการคำนวณค่าพารามิเตอร์การจัดภาพภายนอก (EOP) ของกล้องถ่ายภาพ ณ ขณะที่ทำการถ่าย (จุดเปิดถ่าย) ให้สอดคล้องกับจุดภาพที่ตรงกับจุดทราบค่าพิกัดของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน และจุดภาพที่สอดคล้องกับภาพถ่ายที่ต่อเนื่องกันในแนวบินเดียวกันหรือแนวบินข้างเคียง ซึ่งจะส่งผลไปถึงพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายนอกของกล้องนั้น ๆ ด้วย โดยคอมพิวเตอร์จะทำเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ แบบวนซ้ำเพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งจะทำให้รังสีของแสงจากกล้องถ่ายภาพ 2 กล้อง (หรือมากกว่า) มีการตัดกันที่จุดในภูมิประเทศที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น เหมือนเป็นการรังวัดค่าพิกัดสามมิติของจุดสนใจด้วยภาพถ่ายทางอากาศหลายมุมมอง (MVG)

ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนไหวที่เปลี่ยนมุมมองการถ่ายภาพออกไปเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของอากาศยาน และสุดท้ายผลลัพธ์ที่ได้คือค่าพิกัดสามมิติของจุดสนใจในภูมิภาคจากการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศที่ดีที่สุด และเมื่อคอมพิวเตอร์ทำการจัดภาพสัมพันธ์อย่างต่อเนื่องกับภาพถ่ายทั้งหมดในบล็อก (Simultaneous Absolute Orientation) จะทำให้ได้พอยต์คลาวด์ของจุด key point ทั่วทั้งพื้นที่การสำรวจ โดยเทคนิคการได้มาซึ่งข้อมูลพอยต์คลาวด์ดังกล่าวจะมีชื่อเรียกว่า Structure-from-Motion (SfM)

2.2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปรียบเทียบความถูกต้องของข้อมูลพอยต์คลาวด์

Ressl et al. (2016) ทำการเปรียบเทียบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งระหว่างข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการสำรวจด้วยไลดาร์ทางอากาศ กับข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการประมวลผลบล็อกภาพถ่ายทางอากาศ (Dense Image Matching) โดยมีการบินสำรวจข้อมูลในพื้นที่ที่มีพืชรกทึบ และลานสนามหญ้า โดยที่ภาพถ่ายทางอากาศที่นำมาใช้มีความละเอียดจุดภาพเชิงพื้นที่ที่ 10 เซนติเมตร และ 6 เซนติเมตร ตามลำดับ หลังจากได้นำข้อมูลทั้งสองมาเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งพบว่า ในพื้นที่ลานสนามหญ้า ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการประมวลผลบล็อกภาพถ่ายทางอากาศมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทางค่าความสูงที่น้อยกว่าข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการสำรวจด้วยไลดาร์ทางอากาศเพียงเล็กน้อย กล่าวคือมีค่าอยู่ที่ 6.5 เซนติเมตร กับ 4.5 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งต่างกันเพียง 2 เซนติเมตร เท่านั้น ซึ่งเกิดจากการที่แสงเลเซอร์ของการสำรวจด้วยไลดาร์มีความสามารถในการทะลุทะลวงไปตกกระทบกับพื้นผิวดินได้ จึงได้ค่าความสูงที่พื้นผิวดิน แต่เมื่อเป็นภาพถ่ายจะไม่สามารถทำได้ โดยเมื่อประมวลผลแล้วจะทำให้ค่าความสูงที่บริเวณยอดหญ้า โดยทางผู้วิจัยได้สรุปไว้ว่าความแตกต่างเพียงเล็กน้อยของทั้ง 2 ข้อมูลนี้สามารถนำไปต่อยอดในการสำรวจพื้นที่โล่ง หรือการสำรวจพื้นผิวน้ำที่แสงเลเซอร์ไม่สามารถเก็บข้อมูลได้

2.2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวบิน

Chen et al. (2012) ได้นำการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวบินมาใช้เพื่อลดความคลาดเคลื่อนเชิงระบบของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ตรวจพบได้บริเวณส่วนซ้อนระหว่าง 2 แนวบิน และด้วยความต้องการในการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ให้มีความถูกต้องทางตำแหน่งที่มากขึ้น จึงต้องการจะใช้จุดทราบค่าบนพื้นดินมาร่วมใช้ในการปรับแก้ แต่เนื่องจากว่าพื้นที่ศึกษาอยู่ในประเทศได้หวัน ซึ่งมีลักษณะภูมิประเทศเป็นภูเขาสูง จึงเป็นเรื่องที่ยากมากที่จะจัดทำจุดทราบค่าบนพื้นดินที่เป็นส่วนสำคัญสำหรับการปรับแก้ จึงได้ทำการศึกษาผลของการปรับแก้

ข้อมูลพอยต์คลาวด์แบบที่ไม่ใช้จุดทราบค่าบนพื้นดินร่วมในการปรับแก้ เทียบกับการปรับแก้แบบใช้จุดทราบค่าบนพื้นดิน โดยที่ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่นำมาใช้นั้นจะต้องผ่านการจำแนกและคัดเลือกเฉพาะจุดบนพื้นดิน (Ground point) สำหรับพื้นที่ศึกษาของงานวิจัย มีขนาด 7.23 ตารางกิโลเมตร และเลือกสถานที่ไว้เป็นบริเวณพื้นที่ภูเขาทางตอนใต้ของประเทศไต้หวัน โดยการบินสำรวจได้ทำการบินทั้งหมด 7 แนวบิน และมีส่วนซ้อนระหว่างแนวบินร้อยละ 50 ความสูงบินที่ 3,000 เมตร ในส่วนของเลเซอร์สแกนเนอร์ได้ใช้เครื่อง LEICA ALS 60 มีมุมกว้างของการถ่ายภาพ (Field of view : FOV) ที่ 35 องศา จากการสำรวจทำให้ได้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จำนวนประมาณ 3 ล้านจุด และมีความหนาแน่นที่ 1.8 จุดต่อตารางเมตร และมีการใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินจำนวน 24 จุดในการปรับแก้ และมีจุดตรวจสอบอีกจำนวน 50 จุดครอบคลุมบริเวณพื้นที่ทำการสำรวจ จากผลการวิจัยพบว่าเมื่อนำข้อมูลดิบ (Raw data) ของพอยต์คลาวด์ไปตรวจสอบกับจุดตรวจสอบ พบว่ามีค่าต่างทางความสูง สูงถึง 19.5 เซนติเมตร และเมื่อทำการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวบินแล้ว โดยยังไม่ได้ใช้จุดทราบค่าบนพื้นดินร่วมในการปรับแก้ พบว่ามีค่าต่างทางความสูงโดยเฉลี่ยเมื่อนำไปตรวจสอบกับจุดตรวจสอบแล้ว มีค่าต่างอยู่ที่ 3.1 เซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในระดับที่ดีพอสำหรับความถูกต้องทางตำแหน่งของการสำรวจด้วยไลดาร์ แต่เมื่อตรวจสอบค่าต่างทางความสูงของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ผ่านปรับแก้เป็นแนวบินโดยใช้จุดทราบค่าบนพื้นดินร่วมปรับแก้แล้วพบว่า มีค่าต่างทางความสูงเฉลี่ยเพียง 1.9 เซนติเมตร แสดงให้เห็นว่าการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวบินโดยมีจุดทราบค่าพิักัดบนพื้นดินร่วมปรับแก้จะทำให้ได้ความถูกต้องทางความสูงที่ดีกว่า

Mandlbarger et al. (2017) ได้นำข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการสำรวจด้วยไลดาร์ทางอากาศ และข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากระบบการประมวลผลผลลือภาพถ่ายทางอากาศมาผสมผสานเพื่อร่วมกันพัฒนาแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเพื่อให้มีความละเอียดถูกต้องที่สูงขึ้น โดยในกระบวนการผสมผสานจะมีการกำหนดพิักัดตำแหน่งบนโลกด้วยวิธีตรงให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์ และข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ ก่อนที่จะมีการปรับแก้ข้อมูลทั้งสองร่วมกับจุดควบคุมภาคพื้นดิน เพื่อเพิ่มความถูกต้องให้กับข้อมูล และมีการปรับแก้ข้อมูลทั้งสองร่วมกันอีกครั้งเพื่อเป็นการทำให้ข้อมูลมีความสัมพันธ์กันทางตำแหน่ง โดยข้อดีของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการประมวลผลลือภาพถ่ายทางอากาศจะมีความหนาแน่นสูง จากการที่มีความละเอียดจุดภาพเชิงพื้นที่ที่ 6 เซนติเมตร ทำให้ในพื้นที่ 1 ตารางเมตร จะปรากฏข้อมูลพอยต์คลาวด์มากถึง 280 จุด และมากกว่าข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการสำรวจด้วยไลดาร์ทางอากาศ ที่มีเพียง

14 จุดต่อตารางเมตร และเมื่อนำข้อมูลทั้งสองมารวมเข้ากันแล้วพบว่า ค่าเบี่ยงเบนในทางตั้งของการรวมกันของข้อมูลอยู่ที่ประมาณ 10 เซนติเมตร โดยความคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่จะเกิดกับบริเวณที่มีต้นไม้ พืชพรรณ แต่ในภาพรวมแล้วสามารถสรุปได้ว่า การรวมข้อมูลพอยต์คลาวด์จากทั้งสองระบบจะสามารถทำให้มีความละเอียดของข้อมูลเพิ่มมากขึ้น และเมื่อนำไปสร้างเป็นแบบจำลองความสูงพื้นผิวภูมิประเทศ (Digital Surface Model : DSM) จะมีความครบถ้วนสมบูรณ์ของวัตถุที่ปรากฏ ซึ่งมากพอที่จะสามารถนำไปต่อยอดในการสร้างภาพออร์โธที่แท้จริงได้ (True Orthophoto)

Kwon et al. (2017) ได้เห็นถึงจุดอ่อนของความถูกต้องทางตำแหน่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศจากการสำรวจที่ติดตั้งกับอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งจะส่งผลถึงการนำข้อมูลไปใช้สำหรับงานด้านการก่อสร้างที่อาจส่งผลเสียต่อผลลัพธ์ของงานที่จะตามมา โดยได้ระบุว่า ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการสแกนด้วยเลเซอร์ภาคพื้นดิน (Terrain Laser Scanner : TLS) จะมีข้อได้เปรียบตรงที่มีความถูกต้องทางตำแหน่งที่สูงกว่า แต่ก็ยังมีข้อเสียอยู่บ้างเช่น จุดอับแสง ที่เกิดจากสภาพแวดล้อมในพื้นที่สำรวจที่ไม่เอื้ออำนวย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการสแกนแบบผสมผสาน คือการนำข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการสแกนด้วยเลเซอร์ภาคพื้นดิน มาผสมผสานร่วมกับข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ โดยในงานวิจัยได้มีการนำเสนอวิธีการผสมผสาน (Merging) การสำรวจและข้อมูลที่เป็นผลลัพธ์จากทั้งสองระบบให้เข้ากันได้ โดยในวิธีการผสมผสานการสำรวจ จะเป็นการใช้การสแกนด้วยเลเซอร์ภาคพื้นดินสำรวจเป็นหลัก และนำการถ่ายภาพทางอากาศติดตั้งกับ UAV มาถ่ายในจุดที่เครื่องเลเซอร์สแกนไม่สามารถสำรวจได้ ประกอบกับในการบินสำรวจจะมีการตั้งเป้ารังวัดเพื่อใช้เป็นจุดควบคุมเพื่อเพิ่มความถูกต้องทางตำแหน่ง และจะต้องมีการสำรวจให้เกิดการซ้อนทับกันของข้อมูลทั้งสอง ซึ่งจะต้องมีส่วนซ้อนระหว่างข้อมูลอย่างน้อยที่ร้อยละ 30 จากนั้นจะทำการประมวลผลข้อมูลพอยต์คลาวด์ และทำการรวมข้อมูลเข้าด้วยกันโดยจะยึดถือข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการสแกนด้วยเลเซอร์ภาคพื้นดินเป็นหลัก (Laser scanner-based referencing) จากผลการรวมกันของข้อมูลพอยต์คลาวด์ทั้งสองเข้าด้วยกันพบว่า มีค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งที่ต่างกันของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากทั้งสองระบบที่ตรวจพบในส่วนซ้อนมากที่สุดอยู่ที่ 60 มิลลิเมตร โดยทางคณะผู้วิจัยได้สรุปไว้ว่า การรวมกันของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากทั้งสองระบบ จะช่วยให้สามารถจัดทำ

แบบจำลองสามมิติของพื้นที่ก่อสร้างได้ เพื่อนำไปใช้ในการวางแผนการก่อสร้าง แต่อย่างไรก็ตาม ก็เพิ่มคุณภาพของความถูกต้องทางตำแหน่งจะยังต้องพัฒนาให้มากยิ่งขึ้น

Glira (2018) ได้ทำงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการสำรวจด้วยไลดาร์ทางอากาศ โดยมีการนำข้อมูลที่ได้จากการถ่ายภาพทางอากาศซึ่งผ่านกระบวนการทางโฟโตแกรมเมตรีมาร่วมประยุกต์ใช้เข้ากับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ ซึ่งเป็นการนำผลผลิตที่ได้จากการสำรวจที่แตกต่างกัน มาทำการปรับแก้ให้ข้อมูลทั้งสองมีความสอดคล้องกัน โดยปกติแล้วการสำรวจด้วยไลดาร์ทางอากาศจะมีการติดตั้งอุปกรณ์เลเซอร์สแกนเนอร์และกล้องถ่ายภาพทางอากาศเข้ากับอากาศยาน เพื่อให้เมื่อทำการสำรวจแล้วจะได้รับข้อมูลทั้งสองอย่างไปพร้อมกัน แต่ในขั้นตอนการประมวลผลของข้อมูลทั้งสองจะมีความแตกต่างกันอยู่ สำหรับภาพถ่ายทางอากาศจะใช้กระบวนการช่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ เพื่อให้มีการขยายจุดควบคุมภาพถ่ายชนิดจุดผ่านและจุดโยงยึด และจะทำให้ภาพถ่ายมีการอ้างอิงกับระบบพิกัดภาคพื้นดิน ส่วนข้อมูลพอยต์คลาวด์จะใช้วิธีการกำหนดพิกัดตำแหน่งด้วยวิธีตรง โดยอาศัยข้อมูลระยะทางและมุมที่แสงเดินทางประกอบกับข้อมูลวิถีการบินเพื่อทำให้พอยต์คลาวด์แต่ละจุดมีค่าพิกัดภาคพื้นดิน ทางผู้วิจัยจึงได้นำจุดโยงยึด ที่ได้จากการทำช่ายสามเหลี่ยมทางอากาศของกระบวนการโฟโตแกรมเมตรี มาคัดเลือก (Selection) เอาเฉพาะจุดโยงยึดที่อยู่บนพื้นผิวที่มีการสะท้อนพลังงานได้ดี เช่น พื้นถนน, หลังคา เป็นต้น และทำการจับคู่ (Matching) กับข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการสแกนด้วยแสงเลเซอร์ โดยใช้วิธีการเลือกจุดแบบ MLS (Maximum Leverage Sampling) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่มีการให้ค่าน้ำหนักกับข้อมูล เพื่อจะได้เลือกจุดพอยต์คลาวด์อื่น ๆ ที่ไม่ได้อยู่ใกล้เคียงกับจุดโยงยึด และเมื่อจับคู่ได้แล้วจะต้องมีการคัดออก (Rejection) อีกครั้ง เพื่อคัดเอาจุดที่ไม่ได้มีการจับคู่ออกไป รวมถึงจุดที่จับคู่แล้วแต่ไม่อยู่ในระยะที่เหมาะสมก็จะถูกคัดออกเช่นเดียวกัน ในขั้นตอนการประมวลผล จะเริ่มจากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศโดยการทำช่ายสามเหลี่ยมทางอากาศก่อน เพื่อเป็นการขยายจุดควบคุมภาพถ่ายให้ได้มาซึ่งจุดโยงยึด จากนั้นจะนำไปเข้าสู่กระบวนการคัดเลือก จับคู่ และคัดออก กับข้อมูลพอยต์คลาวด์ โดยข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่จะนำมาใช้จะต้องมีการปรับแก้ความคลาดเคลื่อนระหว่างแนวบิน โดยใช้อัลกอริทึมของ ICP ในการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ของแนวบินที่อยู่ติดกันก่อน เพื่อให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ของทั้งสองแนวบินที่มีการซ้อนทับกัน มีความสอดคล้องกันในค่าพิกัดก่อน จากนั้นถึงจะนำไปปรับแก้ร่วมกับจุดโยงยึด ซึ่งจะเป็นการนำข้อมูลทั้งสองชนิดมาปรับแก้ร่วมกัน แล้วจะทำให้ได้ค่าพิกัดของจุดโยงยึดและพอยต์

คลาวด์ที่สอดคล้องกัน สำหรับเครื่องมือที่ใช้ในการสำรวจ ได้แก่ อากาศยานไร้คนขับชนิด Riegl RiCopter UAV และเลเซอร์สแกนเนอร์แบบ Riegl VUX-1LR ซึ่งมีค่าเฉลี่ยความหนาแน่นของพอยต์คลาวด์อยู่ที่ประมาณ 350 จุดต่อตารางเมตร และมีการติดตั้งระบบกำหนดตำแหน่งด้วยดาวเทียมนำหน GNSS รวมไปถึงอุปกรณ์วัดค่าการเอียงตัว INS รุ่น APX-20 ที่มีความถูกต้องในระดับ 2 – 5 เซนติเมตร ทางตำแหน่ง, 0.015 องศาของมุมหมุน roll และ pitch และ 0.035 องศาของมุมหมุน yaw การบินสำรวจจะทำการบินเหนือพื้นดินที่ 40 เมตร ที่ความเร็ว 8 เมตรต่อวินาที สำหรับกล้องถ่ายภาพทางอากาศจะใช้เป็นกล้องถ่ายภาพมุมเอียง (Oblique imagery) รุ่น Sony Alpha 6000 ที่มีความละเอียดจุดภาพเชิงพื้นที่ (GSD) ที่ 20 มิลลิเมตร ในการสำรวจได้มีการตั้งจุดควบคุมภาคพื้นดินที่ใช้สำหรับพอยต์คลาวด์ (Control point clouds : CPC) และภาพถ่ายทางอากาศ (GCP) และผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลพบว่า การใช้ข้อมูลจากการสำรวจทั้งสองแบบมาปรับแก้ร่วมกันจะทำให้มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 6 มิลลิเมตร ซึ่งดีกว่าเมื่อเทียบกับการปรับแก้โดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เพียงอย่างเดียวที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 9 มิลลิเมตร ในส่วนของการทำสามเหลี่ยมทางอากาศจะทำให้ค่าพิกัดในภาพถ่ายมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ 0.35 พิกเซล ทั้งทางแกน x และแกน y ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า การใช้จุดผ่านและจุดโยงยึดที่ได้จากการทำสามเหลี่ยมทางอากาศมาร่วมปรับแก้ให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จะทำให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์มีความถูกต้องทางตำแหน่งเพิ่มมากขึ้น

Haala et al. (2022) ได้มีการวิจัยต่อยอดจาก Glira et al. (2019) โดยยังคงเป็นรูปแบบการเพิ่มความถูกต้องให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่มีการผสมผสานระหว่างข้อมูลพอยต์คลาวด์ร่วมกับภาพถ่ายทางอากาศ ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับจุดผ่านและจุดโยงยึด โดยที่ในงานวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์หลักคือการติดตามการเปลี่ยนแปลงของประตูละลอกน้ำ และพื้นที่โดยรอบ ซึ่งมีการทรุดตัวของแผ่นดินราว 6-10 มิลลิเมตร ต่อปี โดยทราบมาจากการรังวัดในสนามเป็นช่วงเวลาหลายปี ด้วยเหตุผลดังกล่าวทำให้ทีมผู้วิจัยจึงมีความต้องการที่จะได้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่มีความละเอียดถูกต้องในระดับมิลลิเมตรเพื่อจะให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น จึงได้มีการปรับเปลี่ยนกล้องถ่ายภาพทางอากาศไปใช้แบบ Phase One iXM-RS150F โดยภาพที่ได้จากการบินถ่ายภาพด้วยกล้องดังกล่าวที่ความสูง 53 เมตร จะทำให้ได้ GSD ที่ 4 มิลลิเมตร ซึ่งมีความละเอียดมากกว่ารุ่น Sony Alpha 6000 และในงานวิจัยยังคงใช้การปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวนอนด้วยวิธี ICP ซึ่งมีการใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน ทั้งแบบที่ใช้สำหรับไลดาร์ LCP (Lidar Control Plane) และ แบบที่ใช้กับภาพถ่ายทางอากาศ PCP (Photogrammetric

Control Plane) เพื่อสามารถใช้เป็นจุดควบคุมของแต่ละข้อมูล โดยภาพถ่ายทางอากาศ จะนำไปทำข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศเพื่อให้ได้มาซึ่งจุดผ่านและจุดโยงยึดสำหรับการนำมาใช้ ร่วมกับการปรับแก้ด้วย และเมื่อนำข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ปรับแก้แล้วมาตรวจสอบกับจุด ตรวจสอบแล้วพบว่า ข้อมูลพอยต์คลาวด์แบบที่ไม่ได้มีการผสมผสานร่วมกับการใช้จุดโยงยึดและ จุดผ่านในการปรับแก้จะมีค่า RMSE ที่ 0.99 เซนติเมตร และเมื่อเทียบกับจุดตรวจสอบทางดิ่งมี ค่า $RMSE_z$ ที่ 1.90 เซนติเมตร ซึ่งจะแตกต่างกับ ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่มีการปรับแก้แบบ ผสมผสานกับจุดผ่านและจุดโยงยึด ที่มีค่า RMSE อยู่ที่ 0.58 เซนติเมตร และ $RMSE_z$ ที่ 0.61 เซนติเมตร ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มคุณภาพของภาพถ่ายทางอากาศให้มีความละเอียดที่สูง ส่งผลต่อจุดผ่านและจุดโยงยึดที่มีความถูกต้องมากขึ้น และเมื่อนำไปปรับแก้ร่วมกับข้อมูลพอยต์ คลาวด์แล้วจะส่งผลให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์มีความถูกต้องทางตำแหน่งมากยิ่งขึ้น



บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 โปรแกรม Terra solid เป็นโปรแกรมที่จะนำมาใช้ในการประมวลผลข้อมูลพอยต์คลาวด์ โดยจะมีโปรแกรมลูกที่มีเครื่องมือในการจัดการข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งจะประกอบไปด้วย

- Terra scan ที่จะใช้ในการจัดการกับข้อมูลพอยต์คลาวด์ เช่น การเรียกดูข้อมูลพอยต์คลาวด์ (View) และการจำแนกประเภทของพอยต์คลาวด์ (Classify) เป็นต้น
- Terra match ใช้สำหรับการปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลพอยต์คลาวด์ ซึ่งมีเครื่องมือสำหรับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวนอน โดยมีเครื่องมือที่ชื่อว่า Tie line ซึ่งเป็นการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์โดยอาศัยเส้นที่วาดขึ้นจากข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่มีการซ้อนทับกันระหว่างแนวนอน ซึ่งเส้นที่วาดนั้นโปรแกรมสามารถวาดได้โดยอัตโนมัติ หรือจะเป็นการวาดโดยผู้ใช้โปรแกรมได้ด้วยเช่นเดียวกัน

3.1.2 โปรแกรม PIX4Dmapper เวอร์ชัน 4.5.6 จะนำไปใช้ในการประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ โดยโปรแกรมดังกล่าว มีคำสั่งสำหรับการปรับแก้สื่อคล่าแสงของภาพถ่ายทางอากาศ (BBA) เพื่อให้ภาพมีค่าพิกัดภาคพื้นดิน รวมถึงสามารถจับคู่จุดภาพที่เป็นจุดเด่นชัด (Key point) ที่เกิดจากการตัดกันของเส้นรังสีของแสง (Multi-ray Cloud) โดยอาศัยหลักการ Multiple View Geometry ในการคำนวณหาค่าพิกัดตำแหน่งของจุดเด่นชัดนั้น ๆ และนอกจากนี้โปรแกรมยังสามารถสร้างข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายอย่างหนาแน่นได้ โดยการทำ Point Cloud Densification

3.2 ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์และภาพถ่ายทางอากาศ ในโครงการสำรวจข้อมูลความสูงภูมิประเทศด้วยแสงเลเซอร์บริเวณลุ่มน้ำภาคกลางของกรมแผนที่ทหาร

3.2.1 ชุดข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสำรวจด้วยไลดาร์

ชุดข้อมูลพอยต์คลาวด์ได้จากการสำรวจด้วยไลดาร์ แบบ LiDAR Swiss Micro VUX CE (รูปที่ 13) โดยในพื้นที่ศึกษามีข้อมูลพอยต์คลาวด์ทั้งหมด 34,496,009 จุด ได้จากการบินสำรวจทั้งหมด 5 แนวนอน ปรากฏส่วนซ้อนระหว่างแนวนอน 4 แนว กำหนดให้มีส่วนซ้อน

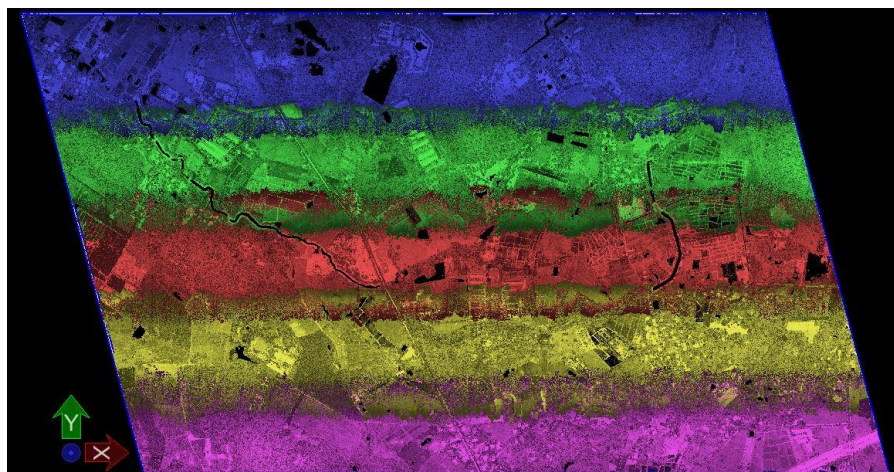
ระหว่างแนวจินที่ร้อยละ 30 (รูปที่ 14 – 15) และข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่นำมาใช้ได้ผ่านกระบวนการในการอ้างอิงระบบพิกัดแล้ว โดยใช้ระบบพิกัด UTM พื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 และค่าความสูงเป็นค่าความสูงเหนือพื้นผิวทรงรี (Ellipsoidal height)



รูปที่ 13 ไลดาร์แบบ LiDAR Swiss Micro VUX CE และกล้องถ่ายภาพดิจิทัล DSLR



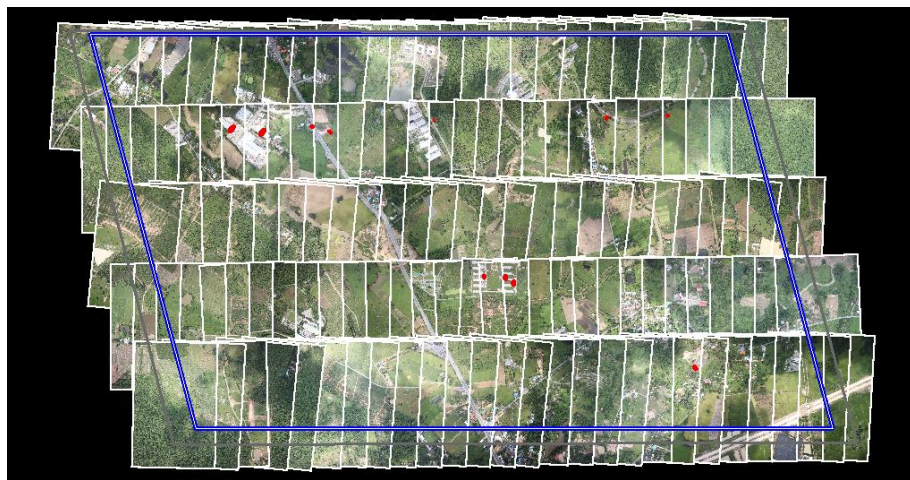
รูปที่ 14 ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่แสดงสีด้วยค่าสี RGB ในจุดภาพของภาพถ่ายทางอากาศ



รูปที่ 15 ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่แสดงสีด้วยลำดับของแนวจินที่แตกต่างกัน

3.2.2 ชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ

ชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศได้จากการถ่ายภาพด้วยกล้องดิจิทัล Cannon EOS รุ่น 5DSR (รูปที่ 13) แบบ Full-frame มีเซ็นเซอร์ชนิด CMOS ขนาด 50 ล้านพิกเซล โดยภาพถ่ายทางอากาศที่ครอบคลุมขอบเขตพื้นที่ศึกษา มีจำนวน 140 ภาพ เป็นภาพถ่ายตั้ง (รูปที่ 16 - 17) ที่มีความละเอียดจุดภาพเชิงพื้นที่ 10 เซนติเมตร จากการบินสำรวจที่ความสูง 400 เมตร เหนือภูมิประเทศ และถ่ายภาพให้มีส่วนซ้อนระหว่างภาพถ่ายในแนวนอนเดียวกันที่ ร้อยละ 60 และส่วนเกยของภาพระหว่างแนวนอนที่ติดกันที่ร้อยละ 30



รูปที่ 16 ภาพถ่ายทางอากาศที่ครอบคลุมขอบเขตพื้นที่ศึกษา



รูปที่ 17 ตัวอย่างภาพถ่ายทางอากาศที่ถ่ายจาก Cannon EOS 5DSR

ตารางที่ 1 รายละเอียดข้อมูลจำเพาะที่สำคัญของกล้อง Cannon EOS รุ่น 5DSR

ข้อมูลจำเพาะของกล้อง Cannon EOS รุ่น 5DSR	
ความยาวโฟกัส (Focal length)	18 มม. หรือ 4,390.24 พิกเซล
ความกว้างของเซนเซอร์ (Sensor width)	35.6208 มม.
ความสูงของเซนเซอร์ (Sensor height)	23.7472 มม.
ความกว้างของภาพ (Image width)	8,688 พิกเซล
ความสูงของภาพ (Image height)	5,792 พิกเซล
ขนาดจุดภาพ (Pixel size)	4.1 ไมโครเมตร (ไมครอน)

3.2.3 ข้อมูลวิธีการบิน

ข้อมูลวิธีการบิน จะได้จากข้อมูลการกำหนดตำแหน่งและหาค่าการเอียงตัว (GNSS/IMU) ของอุปกรณ์ขณะทำการสำรวจ ซึ่งได้มีการติดตั้งอยู่ภายในชุดอุปกรณ์การสำรวจ และขณะทำการสำรวจได้มีการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS บนพื้นดินอีก 1 เครื่อง เพื่อนำข้อมูลมาประมวลผลในภายหลัง (Post-processed kinematic differential) โดยตั้งบนจุด LD61B034 ซึ่งเป็นจุดทราบค่าพิกัดโดยการรังวัดด้วยระบบ GNSS จัดทำโดยกรมแผนที่ทหาร

ตารางที่ 2 รายละเอียดค่าพิกัดของจุด LD61B034

ค่าพิกัดของจุด LD61B034		
ค่าพิกัดในระบบพิกัดภูมิศาสตร์บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS 84	ลองจิจูด (Longitude)	101° 03' 27.88268" E
	ละติจูด (Latitude)	14° 26' 34.17132" N
ค่าพิกัดในระบบ UTM zone 47N	Easting	721,827.433 ม.
	Northing	1,597,695.322 ม.
WGS 84	ค่าความสูงเหนือทรงรีอ้างอิง (h)	31.43 ม.
TGM 2017 Geoid model	ความสูงเหนือพื้นผิวฮัยออยด์ (H)	60.89 ม.

3.2.4 อากาศยานไร้คนขับ

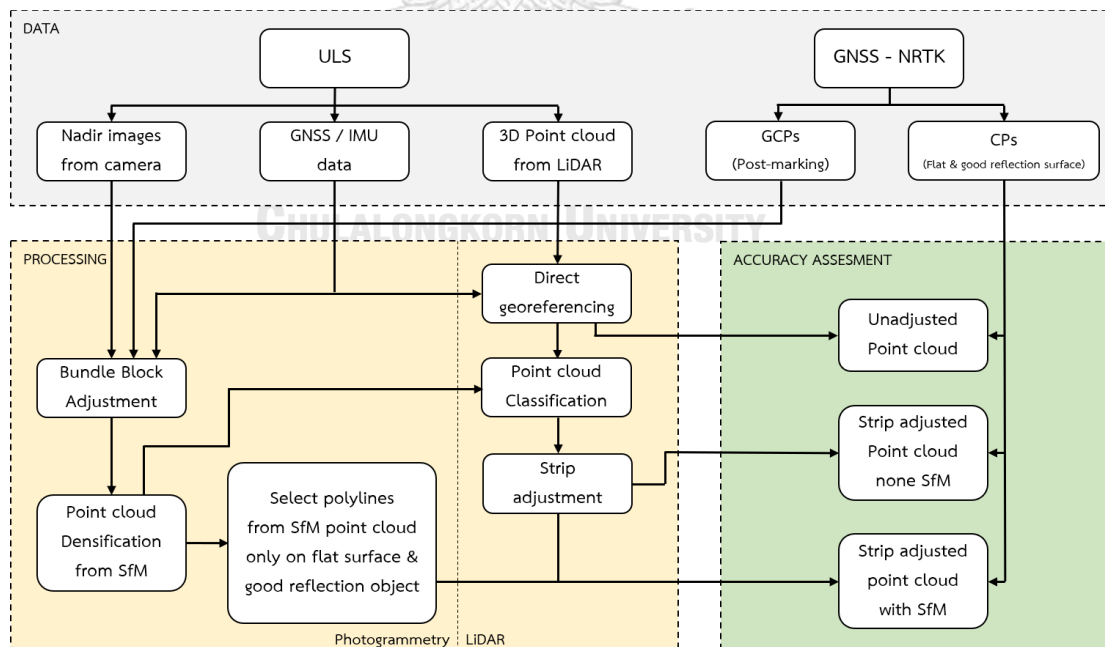
อุปกรณ์การสำรวจถูกติดตั้งเข้ากับอากาศยานไร้คนขับชนิดขึ้นบินและลงจอดในแนวตั้งและทำการบินในแนวระนาบด้วยปีกติดลำตัว รุ่น SUD VTOL-60 (รูปที่ 18)



รูปที่ 18 การติดตั้งอุปกรณ์การสำรวจด้วยไลดาร์และกล้องถ่ายภาพ
เข้ากับอากาศยานไร้คนขับรุ่น SUD VTOL-60

3.3 การดำเนินงานวิจัย

เพื่อให้สามารถเข้าใจกระบวนการของการดำเนินงานวิจัยได้โดยง่าย จึงจัดทำแผนผังแสดงกระบวนการขั้นตอนของการดำเนินงานวิจัยก่อนแล้วจะอธิบายรายละเอียดเพิ่มเติมในลำดับขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการวิจัย โดยแผนผังแสดงกระบวนการขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยมีลำดับขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 19 แผนผังแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

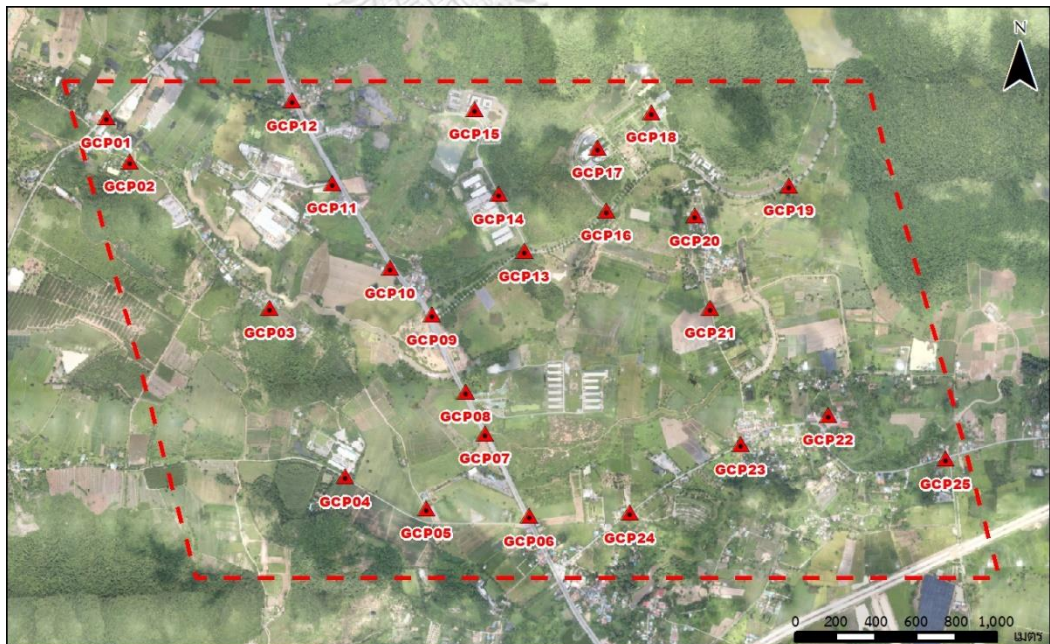
โดยรายละเอียดขั้นตอนของกระบวนการในการดำเนินงานวิจัยในรูปที่ 19 มีดังนี้

3.3.1 การสำรวจจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน และจุดตรวจสอบ

เนื่องจากความต้องการที่จะทำให้ชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่จะนำไปประมวลผลในกระบวนการทางโฟโตแกรมเมตรีมีความถูกต้องทางตำแหน่งมากยิ่งขึ้น เพื่อที่จะสามารถนำข้อมูลไปใช้ปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสำรวจด้วยไลดาร์ได้ จึงจำเป็นที่จะต้องจัดทำจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (GCP) แต่เนื่องด้วยชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศของกรมแผนที่ทหารที่นำมาใช้นั้น ได้มีการสำรวจเสร็จสิ้นไปก่อนหน้านี้แล้ว (เมื่อ 7 ต.ค.62) จึงทำให้การจัดทำจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน ต้องใช้เป็นการจัดทำเข้าภายหลัง (Post-marking GCP) ที่ต้องอาศัยจุดเด่นชัดในภาพถ่ายและต้องเข้าถึงได้ในภูมิประเทศ หรืออาจเรียกว่าเป็นเป้าธรรมชาติ (รูปที่ 22 ก. และ ข.)

ในการกำหนดพื้นที่และวางตำแหน่งของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน จะต้องวางจุดให้กระจายอยู่ทั่วทั้งพื้นที่ศึกษา และควรอยู่ในพื้นที่ของส่วนซ้อนระหว่างภาพถ่ายหรือส่วนเกยระหว่างแนวนบินของชุดข้อมูลภาพถ่ายเพื่อให้ได้เกิดประสิทธิภาพมากที่สุดในการปรับแก้บล็อกลำแสงของภาพถ่ายทางอากาศ

จากการวางแผนและเลือกพื้นที่สำหรับการวางตำแหน่งของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินในพื้นที่ศึกษา พบว่ามีตำแหน่งที่เหมาะสมจำนวน 25 จุด ดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน (สามเหลี่ยมสีแดง) จำนวน 25 จุด ในพื้นที่ศึกษา

จุดควบคุมแบบเป้าภายหลังการบินนี้มีข้อจำกัดในส่วนของจำนวนจุดและตำแหน่งของจุด สืบเนื่องจากระยะเวลาการบินสำรวจและการจัดทำจุดควบคุมที่ห่างมากเกือบ 3 ปี ทำหน้าสภาพภูมิประเทศจริงในปัจจุบันและสิ่งที่ปรากฏในภาพมีการเปลี่ยนแปลงไปพอสมควร อาทิ เช่น การเปลี่ยนแปลงสภาพพื้นผิวถนน เส้นจราจร เป็นต้น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้องทางตำแหน่งในการรังวัดค่าพิกัดในภาพถ่ายทางอากาศ ซึ่งผู้วิจัยได้มีความพยายามเลือกตำแหน่งของจุดให้มีผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด เช่น แนวขอบถนนตัดกับแนวกึ่งกลางเสาไฟ เป็นต้น เพื่อให้การรังวัดด้วยภาพที่อาศัยจุดควบคุมแบบเป้าภายหลังการบินมีความถูกต้องทางตำแหน่งที่ดีที่สุด

สำหรับจุดตรวจสอบ (CP) นั้น จะจัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์ ดังนั้นในการเลือกพื้นที่และวางตำแหน่งของจุดตรวจสอบจะเลือกเป็นพื้นที่ที่มีพื้นผิวราบเรียบและสามารถสะท้อนแสงได้ดี เช่น พื้นคอนกรีต ถนนแอสฟัลท์ เป็นต้น (รูปที่ 22 ค. และ ง.)

จากการวางแผนและเลือกพื้นที่สำหรับการวางตำแหน่งของจุดตรวจสอบให้กระจายอยู่ทั่วทั้งพื้นที่ศึกษานั้น พบว่า มีตำแหน่งที่เหมาะสมจำนวน 20 จุด ดังรูปที่ 21



รูปที่ 21 จุดตรวจสอบ (วงกลมสีเขียว) จำนวน 20 จุด ในพื้นที่ศึกษา

สำหรับการรังวัดค่าพิกัดของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบ จะใช้การรังวัดค่าพิกัดด้วยระบบ GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลนในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐาน

ถาวร (Network-based Real-Time Kinematics : NRTK) ของกรมแผนที่ทหาร โดยในการ
 รั้งวัดนั้นจะใช้การรั้งวัดจำนวน 2 ครั้ง ครั้งละ 3 นาที (180 Epochs) เพื่อเป็นการตรวจสอบซ้ำ
 ของค่าพิกัดที่รั้งวัดได้ หากมีค่าพิกัดที่ใกล้เคียงกัน จะนำค่าพิกัดที่ได้จากการรั้งวัดทั้ง 2 ครั้ง มา
 เฉลี่ยกัน แต่ถ้าหากค่าพิกัดที่ได้จากการรั้งวัด 2 ครั้ง แตกต่างกันมาก จะทำการรั้งวัดใหม่ใน
 ครั้งที่ 3 เพื่อตรวจสอบว่าค่าพิกัดที่ได้จากการรั้งวัดครั้งใดมีค่าพิกัดที่ใกล้เคียงกันมากกว่า
 แล้วจึงเลือกค่านั้นมาใช้ในการเฉลี่ย



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 22 ตัวอย่างการสำรวจรั้งวัดค่าพิกัดของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน แบบเป่าภายหลัง
 ที่อาศัยเป่าธรรมชาติ (ก) และ (ข) และจุดตรวจสอบ (ค) และ (ง)

จากการรั้งวัดค่าพิกัดของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบทำให้ได้ค่าพิกัดของ
 จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน ดังตารางที่ 3 และค่าพิกัดของจุดตรวจสอบ ดังตารางที่ 4
 ตารางที่ 3 ค่าพิกัดของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน จำนวน 25 จุด

ชื่อจุด	พิกัดทางตะวันออก (ม.)	พิกัดทางเหนือ (ม.)	ความสูงเหนือทรวงรีอ้างอิง (ม.)
GCP01	715,663.554	1,606,774.373	-1.7957
GCP02	715,782.038	1,606,557.665	0.6067
GCP03	716,477.642	1,605,830.848	2.3345
GCP04	716,847.177	1,604,993.833	7.4244

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ชื่อจุด	พิกัดทางตะวันออก (ม.)	พิกัดทางเหนือ (ม.)	ความสูงเหนือทรงรีอ้างอิง (ม.)
GCP05	717,256.768	1,604,833.758	3.2613
GCP06	717,771.771	1,604,791.135	2.9859
GCP07	717,548.409	1,605,206.562	2.8345
GCP08	717,453.251	1,605,414.107	2.1191
GCP09	717,283.206	1,605,794.733	1.6374
GCP10	717,075.408	1,606,027.061	0.3788
GCP11	716,787.746	1,606,449.503	-1.2669
GCP12	716,587.523	1,606,859.519	-0.8952
GCP13	717,744.247	1,606,111.792	10.9536
GCP14	717,615.339	1,606,395.615	6.1139
GCP15	717,498.039	1,606,819.382	9.5336
GCP16	718,151.896	1,606,313.381	8.0205
GCP17	718,108.357	1,606,624.869	11.6172
GCP18	718,375.971	1,606,802.114	10.1725
GCP19	719,059.325	1,606,437.704	12.0230
GCP20	718,589.883	1,606,286.324	9.1396
GCP21	718,669.368	1,605,829.716	8.0826
GCP22	719,251.571	1,605,281.885	6.6862
GCP23	718,821.708	1,605,152.563	6.3005
GCP24	718,268.410	1,604,811.651	4.8962
GCP25	719,856.339	1,605,091.977	9.8285

ตารางที่ 4 ค่าพิกัดของจุดตรวจสอบ จำนวน 20 จุด

ชื่อจุด	พิกัดทางตะวันออก (ม.)	พิกัดทางเหนือ (ม.)	ความสูงเหนือทรงรีอ้างอิง (ม.)
CP01	715,888.948	1,606,762.844	-27923
CP02	716,609.176	1,606,862.631	-1.2790
CP03	717,508.743	1,606,825.385	9.6839
CP04	718,357.941	1,606,814.941	10.0994
CP05	719,068.024	1,606,445.419	12.0240
CP06	718,125.980	1,606,336.866	9.2178
CP07	717,472.919	1,606,308.043	3.6498
CP08	716,884.350	1,606,322.962	-0.3443
CP09	716,466.406	1,605,846.344	1.0985
CP10	717,304.110	1,605,764.438	1.4826
CP11	718,667.162	1,605,848.700	8.1522

ตารางที่ 4 (ต่อ)

ชื่อจุด	พิกัดทางตะวันออก (ม.)	พิกัดทางเหนือ (ม.)	ความสูงเหนือทรวงรีอ้างอิง (ม.)
CP12	718,830.725	1,605,368.566	6.3983
CP13	718,485.555	1,605,368.817	2.0922
CP14	716,852.345	1,604,995.194	7.4813
CP15	717,542.315	1,605,216.009	2.8262
CP16	717,770.599	1,604,790.573	3.0156
CP17	717,856.850	1,604,595.615	3.8437
CP18	718,354.400	1,604,873.617	5.1075
CP19	718,871.639	1,605,185.240	6.6398
CP20	719,269.396	1,605,270.311	6.7035

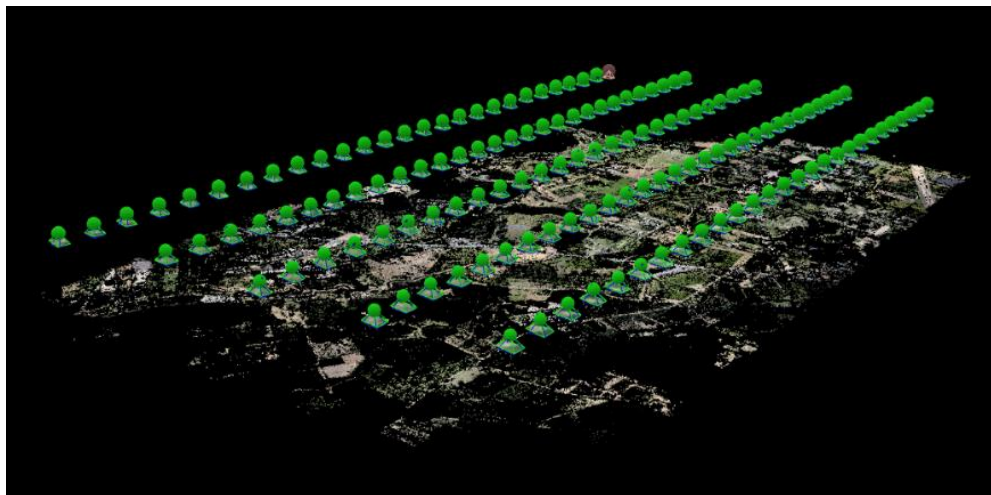
3.3.2 การประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ

ในการประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศจะประมวลผลด้วยโปรแกรม PIX4Dmapper ซึ่งเป็นโปรแกรมทางด้านโฟโตแกรมเมตรีที่สามารถประมวลผลทำภาพถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศของบล็อกภาพถ่ายทางอากาศ และการสร้างพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่นจากภาพถ่ายทางอากาศได้ โดยจะมีขั้นตอนในการประมวลผลอยู่ 2 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การทำภาพถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศโดยใช้การคำนวณปรับแก้บล็อกคำสั่งของภาพถ่ายทางอากาศ (BBA) เป็นการคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดภาพถ่ายและแบบจำลองของกล้องถ่ายภาพเพื่อเชื่อมโยงไปยังค่าพิกัดของจุดในภาพที่ปรากฏเด่นชัดในลักษณะของจุดสำคัญ โดยใช้ความสามารถของคอมพิวเตอร์วิชั่นในการสร้าง Automatic tie points เพื่อการสกัดหาจุดสำคัญที่ทำหน้าที่เป็นจุดผ่านและจุดโยงยึดบนภาพถ่ายที่ต่อเนื่องกัน และเชื่อมโยงกับระบบพิกัดภาคพื้นดินที่มีความถูกต้องโดยอาศัยจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินที่มีการรังวัดค่าพิกัดที่แม่นยำในสนาม ในกระบวนการทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจากความสัมพันธ์ข้างต้นจะมีการคำนวณเพื่อปรับแก้ค่าพารามิเตอร์ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทั้งหมดให้มีค่าเศษเหลือรวมน้อยที่สุดด้วยเทคนิค Least square adjustment computation

โดยในขั้นตอนที่ 1 นี้จะมีการปรับแก้พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของบล็อกภาพถ่ายทางอากาศจำนวน 140 ภาพ ในส่วนของค่าพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายใน (IOP) ของกล้องถ่ายภาพ จะใช้ค่าจำเพาะของกล้อง Cannon EOS 5DSR ที่มีการกำหนดอยู่ในโปรแกรม ส่วนค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการจัดภาพภายนอก (EOP) จะได้จากข้อมูลวิถีการบินของอากาศยานไร้คนขับ ณ เวลาที่ทำการ

ถ่ายภาพแต่ละภาพ และในการกำหนดตำแหน่งของจุดควบคุมในภาพถ่ายจะใช้ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจรังวัดจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินที่ได้ไปสำรวจมาในขั้นตอนที่ 3.3.1

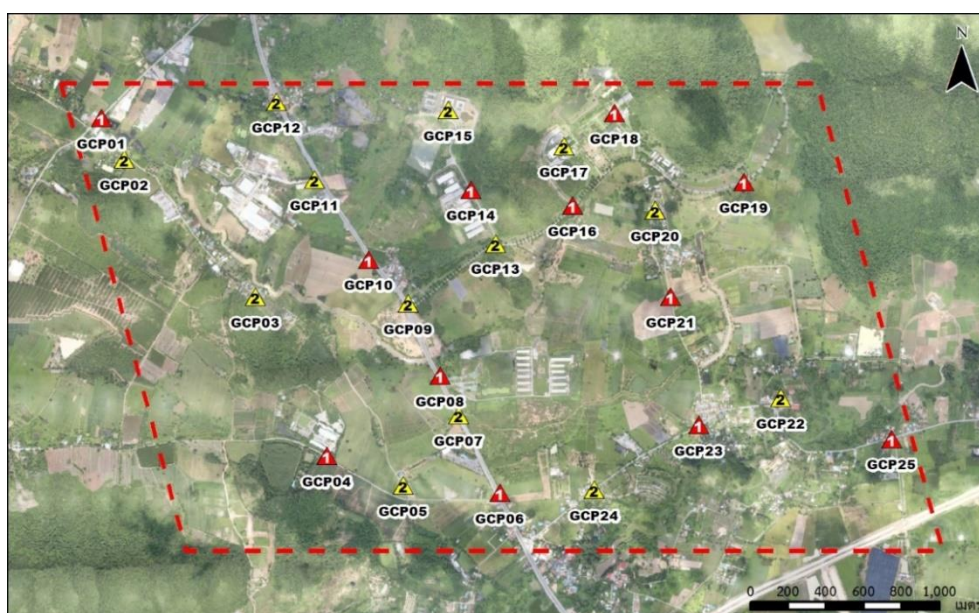


รูปที่ 23 การประมวลผลทำชายสามเหลี่ยมทางอากาศของบล็อภาพถ่าย จำนวน 140 ภาพ

ในการประมวลผลในขั้นตอนที่ 1 จะแบ่งการประมวลผลออกเป็น 3 รูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ 1 จะดำเนินการตามแนวปฏิบัติการประมวลผลควบคุมคุณภาพ 2 ขั้นตอน (QC-1 & QC-2) (Bannakulpiphat et al., 2023) กล่าวคือจะใช้ข้อมูลจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินชุดที่ 1 เป็นจุดควบคุม และใช้ชุดที่ 2 เป็นจุดตรวจสอบคุณภาพหลังการปรับแก้ ในส่วนของรูปแบบที่ 2 จะยังคงยึดแนวปฏิบัติการประมวลผลควบคุมคุณภาพ แต่จะสลับชุดกันระหว่างจุดควบคุมและจุดตรวจสอบกล่าวคือ จะใช้ข้อมูลจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินชุดที่ 2 เป็นจุดควบคุม และใช้ชุดที่ 1 เป็นจุดตรวจสอบคุณภาพหลังการปรับแก้ เพื่อให้เป็นการตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินซึ่งกันและกัน ในการควบคุมคุณภาพจะใช้การตรวจสอบเปรียบเทียบค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) ทั้งในทางราบและทางตั้ง ของทั้งจุดควบคุมและจุดตรวจสอบ ซึ่งทั้ง 2 ชุดข้อมูลนั้นจะต้องมีค่าที่ไม่แตกต่างกันมาก สำหรับการแบ่งชุดของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินจำเป็นต้องคำนึงถึงจำนวนของจุดและการกระจายตัวของจุดที่จะต้องปรากฏอยู่ทั่วทั้งบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ เพื่อให้การตรวจสอบมีความน่าเชื่อถือมากที่สุด โดยการแบ่งชุดสามารถดูได้ในตารางที่ 5 และรูปที่ 24 และสำหรับรูปแบบที่ 3 จะนำจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินทั้งหมด 25 จุด มาใช้เป็นจุดควบคุมในการปรับแก้เพื่อให้ได้ความถูกต้องของค่าพิกัดภาคพื้นดินที่คำนวณจากบล็อภาพถ่ายทางอากาศมีความถูกต้องที่ดีที่สุด

ตารางที่ 5 การแบ่งชุดจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน

ชุดที่ 1	ชื่อจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน	จำนวน (จุด)
1	GCP01, GCP04, GCP06, GCP08, GCP10, GCP14, GCP16, GCP18, GCP19, GCP21, GCP23 และ GCP25	12
2	GCP02, GCP03, GCP05, GCP07, GCP09, GCP11, GCP12, GCP13, GCP15, GCP17, GCP20, GCP22 และ GCP24	13

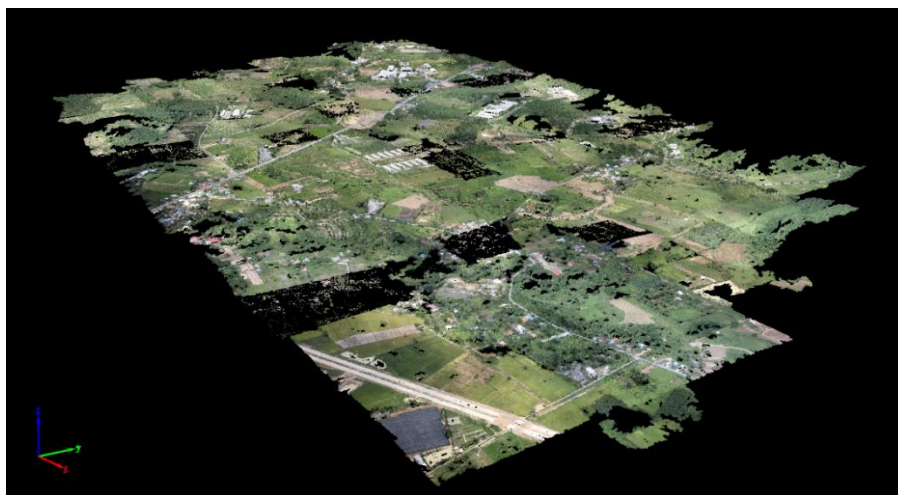


รูปที่ 24 การแบ่งชุดจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน จำนวน 2 ชุด
(ชุดที่ 1 สามเหลี่ยมสีแดง และ ชุดที่ 2 สามเหลี่ยมสีเหลือง)

การประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศในขั้นตอนที่ 1 ได้มีการกำหนดค่าความถูกต้อง (Accuracy) ซึ่งจะมีบทบาทการเป็นค่านำหนักให้กับค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณปรับแก้ระหว่างการประมวลผล โดยเป็นการระบุถึงเกณฑ์การยอมรับได้ที่จะให้มีการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในระหว่างการคำนวณตามความเชื่อถือได้ของอุปกรณ์ในระบบรังวัดต่าง ๆ โดยผู้วิจัยได้กำหนดค่าความถูกต้องของค่าพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายนอก (EOP) ไว้ดังนี้ ค่าความถูกต้องในทางราบที่ 0.05 เมตร และในทางตั้งที่ 0.10 เมตร และกำหนดค่าความถูกต้องของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินในทางราบที่ 0.03 เมตร และในทางตั้งที่ 0.05 เมตร

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการผลิตข้อมูลพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่น (Point cloud densification) ในการประมวลผลในขั้นตอนนี้โปรแกรมจะเพิ่มจำนวนจุดผ่านและจุดโยงยึด

โดยใช้เทคนิค SfM จากการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศหลายมุมมองด้วยคอมพิวเตอร์วิชั่น ซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลจุดเป็นจำนวนมากและในแต่ละจุดจะมีค่าพิกัดสามมิติของระบบพิกัดภาคพื้นดิน หรือที่เรียกว่า พอยต์คลาวด์

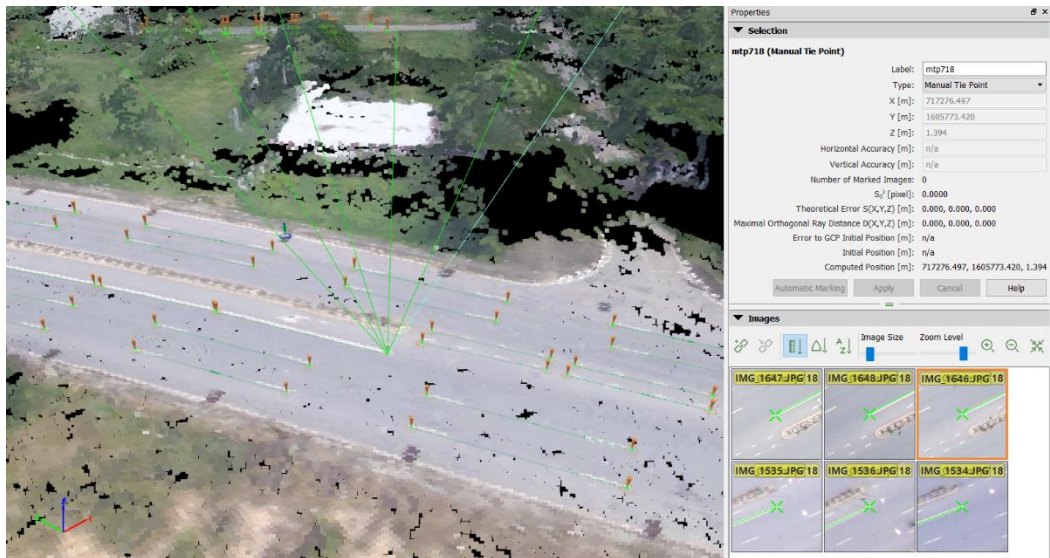


รูปที่ 25 ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่เป็นผลลัพธ์จากการสร้างพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่น

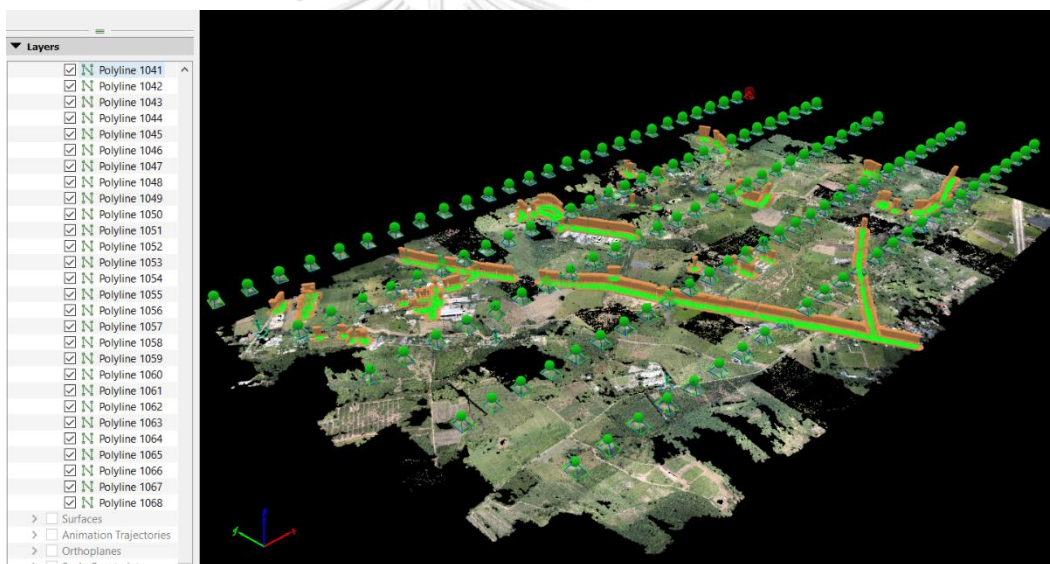
3.3.3 การรังวัดข้อมูลเส้นจากพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ

การรังวัดข้อมูลเส้นจากข้อมูลพอยต์คลาวด์ จะใช้โปรแกรม PIX4Dmapper โดยใช้เครื่องมือ New polyline ซึ่งจะใช้การเลือกจุดจากข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการรังวัดด้วยเทคนิค SfM เพื่อกำหนดจุดเริ่มต้นและจุดปลาย ซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลเวกเตอร์ (Vector) แบบเส้น (Polyline) เพื่อที่จะนำไปใช้เป็นเส้นนำสายตาในการเลือกแนวเส้นกำกับ (Tie Line) สำหรับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการสำรวจด้วยไลดาร์

ในการเลือกข้อมูลพอยต์คลาวด์เพื่อใช้จุดเริ่มต้นและจุดปลายให้เกิดเป็นข้อมูลเส้นนั้น จะเลือกจากจุดของพอยต์คลาวด์ที่เป็นจุดเด่นชัดในภาพถ่าย เช่น เส้นถนน เป็นต้น (รูปที่ 26 ก.) เนื่องจากเส้นถนนมีสีที่แตกต่างอย่างชัดเจนกับพื้นถนน ซึ่งจะทำให้ค่าพิกัดของจุดภาพบนเส้นถนนที่ได้จากการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศหลายมุมมองมีความถูกต้องที่ดีกว่าจุดภาพบนพื้นผิววัตถุที่มีสีเหมือนกันหรือใกล้เคียงกัน ตามเทคนิคการจับคู่จุดภาพด้วยวิธีการใช้คุณลักษณะเด่น (Feature based matching) ดังนั้นจากการเลือกจุดที่มีลักษณะเด่นชัดนี้จะส่งผลให้ข้อมูลเส้นที่ได้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ



(ก)



(ข)

รูปที่ 26 (ก) การเลือกจุดเริ่มต้นและจุดปลายให้กับข้อมูลเส้นโดยเลือกจุดที่มีลักษณะเด่นชัด

(ข) การรังวัดข้อมูลเส้นจากพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการทำ SfM

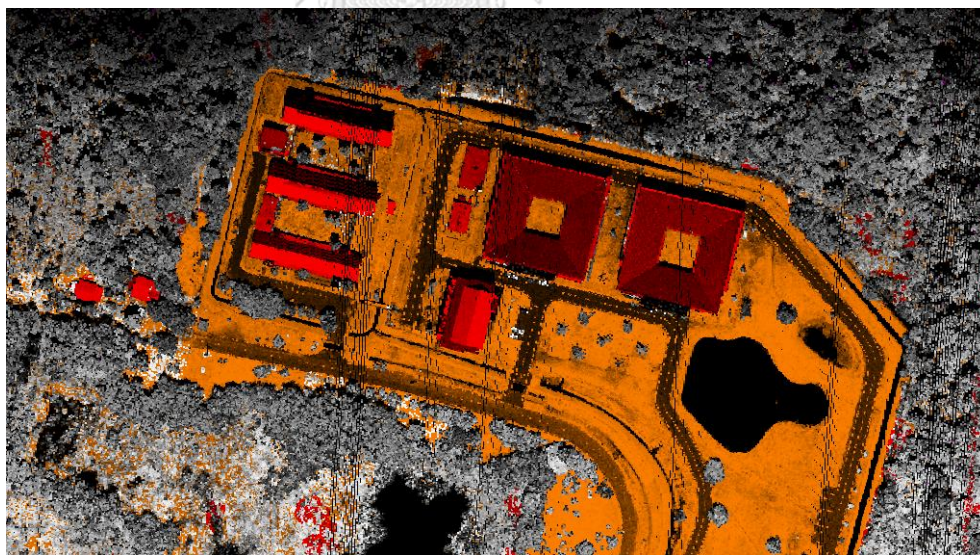
3.3.4 การจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์ (Point cloud classification)

การจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จะใช้โปรแกรม Terra scan โดยโปรแกรมจะสามารถจำแนกประเภทให้กับจุดทุกจุดในข้อมูลพอยต์คลาวด์ได้ ทั้งแบบอัตโนมัติและแบบกำหนดเอง (Manual) อีกทั้งสามารถจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์ได้หลายประเภท เช่น จุดบนพื้นดิน (Ground points) จุดบนอาคาร (Building) เป็นต้น โดยใช้เครื่องมือที่ชื่อว่า Classify ซึ่งโปรแกรมจะใช้หลักการของจำนวนการสะท้อนกลับของเลเซอร์

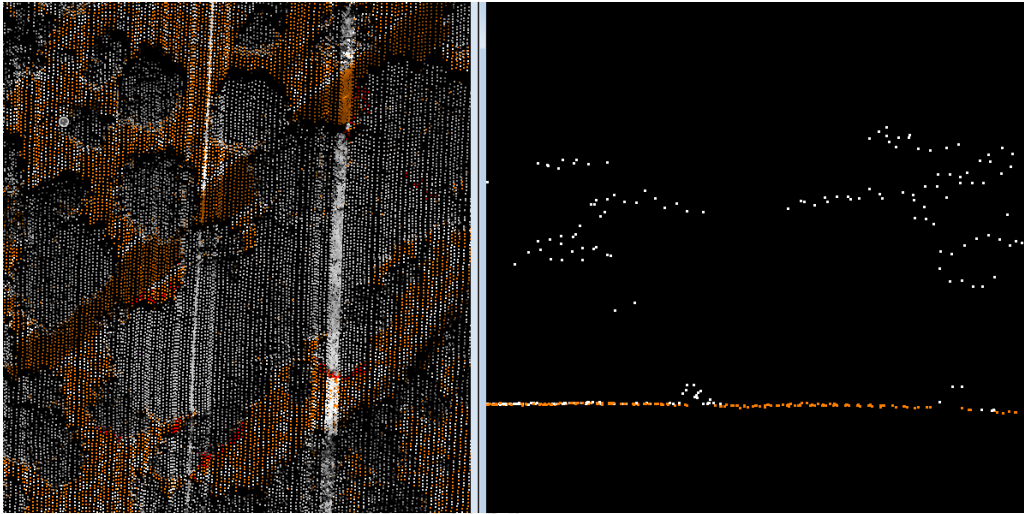
ในการจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์ โดยในขั้นตอนนี้จะประกอบด้วยขั้นตอนย่อยอีก 2 ขั้นตอน ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 การใช้การประมวลผลโดยอัตโนมัติด้วยเครื่องมือ Classify ของโปรแกรม Terra scan โดยจะทำการจำแนกประเภทของจุดออกเป็น จุดบนพื้นดิน (Classify ground) และจุดบนอาคาร (Classify building) สำหรับขั้นตอนย่อยที่ 1 นี้จะสามารถใช้ประมวลผลได้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสำรวจด้วยไลดาร์เท่านั้น เนื่องจากมีการบันทึกลำดับการสะท้อนของเลเซอร์ แต่ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM จะไม่สามารถทำได้

ขั้นตอนที่ 2 การจำแนกประเภทโดยการกำหนดเองด้วยเครื่องมือ Classify fence ซึ่งจะเป็นการใช้การตีกรอบพื้นที่เพื่อกำหนดประเภทให้กับจุดของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่อยู่ในกรอบ โดยในขั้นตอนนี้จะเป็นการแก้ปัญหาให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่มีการจำแนกประเภทไม่ถูกต้องอันเนื่องมาจากการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์แบบอัตโนมัติ รวมถึงการใช้จำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ที่ไม่สามารถใช้การประมวลผลอัตโนมัติได้ ในการจำแนกแบบกำหนดเองจะมีการจำแนกโดยใช้มุมมองภาพด้านบนและภาพตัดขวางเพื่อช่วยให้สามารถจำแนกประเภทให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น (รูปที่28)



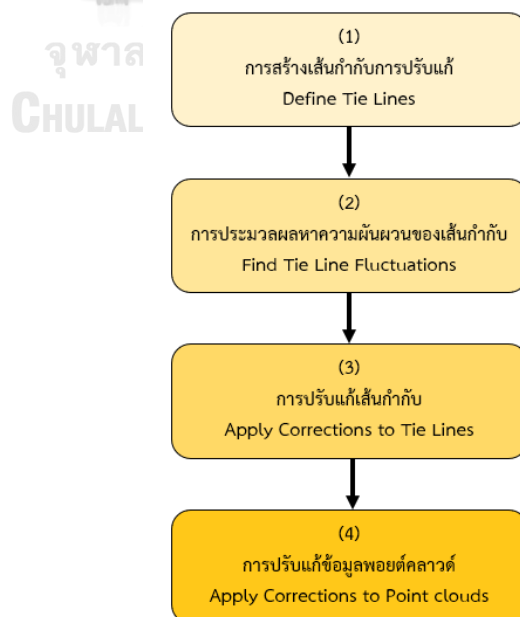
รูปที่ 27 การจำแนกประเภทของข้อมูลพอยต์คลาวด์ออกเป็น จุดบนพื้นดิน (สีส้ม)
จุดบนอาคาร (สีแดง) จุดที่ไม่ระบุประเภท (สีขาว)



รูปที่ 28 การใช้มุมมองภาพตัดขวางมาช่วยในการจำแนกประเภทของข้อมูลพอยต์คลาวด์
ให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น (สีส้ม เป็นจุดบนพื้นดิน และสีขาว เป็นจุดที่ไม่ระบุประเภท)

3.3.5 การประมวลผลการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสำรวจด้วยไลดาร์เป็นแนวนบิน

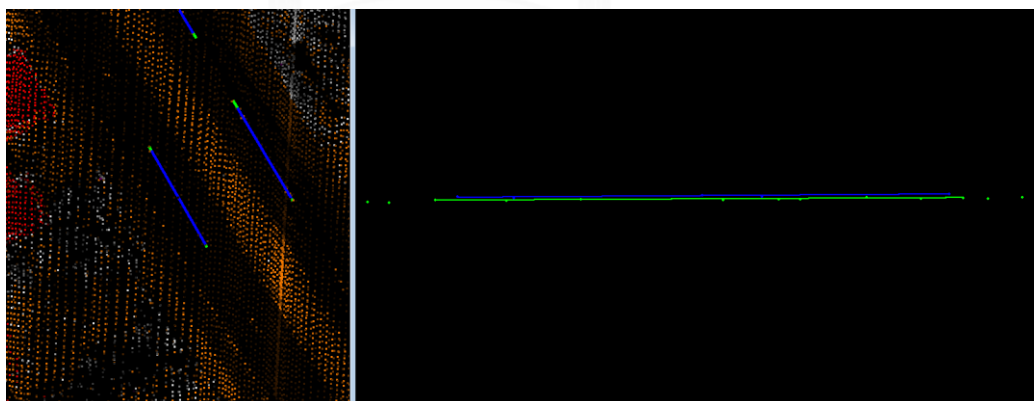
ในการประมวลผลเพื่อทำการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการสำรวจด้วยไลดาร์เป็นแนวนบิน จะใช้โปรแกรม Terra match ซึ่งมีเครื่องมือสำหรับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวนบินในแบบที่เป็นอัตโนมัติและแบบกำหนดเอง โดยในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องมือการปรับแก้แบบกำหนดเอง ซึ่งจะมีขั้นตอนย่อยอยู่ 4 ขั้นตอน โดยจะขออธิบายด้วยรูปแผนผังขั้นตอน (รูปที่ 29)



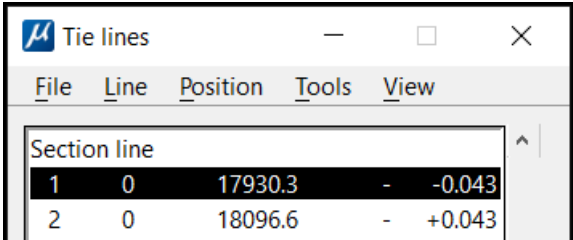
รูปที่ 29 แผนผังแสดงลำดับขั้นตอนในการประมวลผลเพื่อปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์

ขั้นตอนที่ 1 การสร้างเส้นกำกับกับการปรับแก้ (Define Tie Lines) เป็นเครื่องมือในโปรแกรมแบบที่เป็นกึ่งอัตโนมัติ กล่าวคือสามารถสั่งการให้โปรแกรมสร้างเส้นกำกับได้โดยอัตโนมัติ หรือผู้ใช้สามารถสร้างเส้นกำกับขึ้นเองก็ได้ ในงานวิจัยนี้จะใช้การสร้างเส้นกำกับโดยการกำหนดขึ้นเอง การสร้างเส้นกำกับนี้จะต้องกำหนดจุดเริ่มต้นและจุดปลายจากข้อมูลพอยต์คลาวด์บริเวณส่วนซ้อนระหว่างแนวบิน หากเส้นที่สร้างขึ้นเกิดจากข้อมูลพอยต์คลาวด์เพียงแนวบินเดียว โปรแกรมจะไม่อนุญาตให้สร้างเส้น อีกทั้งข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่จะนำมาใช้นั้นจะต้องถูกจำแนกประเภทแล้ว และข้อมูลเส้นที่เกิดจากการกำหนดเองของผู้ใช้ (User) จะมีชื่อว่า Section line

ในการกำหนด Section line จะต้องกำหนดจุดเริ่มต้นและจุดปลาย ด้วยมุมมองภาพด้านบน (Top view) ก่อนเป็นลำดับแรก ซึ่งเป็นการสร้างเส้นจากพิกัดในแนวระนาบ ในลำดับถัดมาโปรแกรมจะให้กำหนดจุดเริ่มต้นและจุดปลายอีกครั้ง ด้วยมุมมองภาพตัดขวาง (Side view) ซึ่งเป็นการสร้างเส้นจากพิกัดในแนวตั้ง แต่ในขั้นตอนนี้จะต้องมีการสร้างเส้น 2 ครั้ง นั่นคือ เส้นที่สร้างจากข้อมูลพอยต์คลาวด์ในแนวบินที่ 1 และเส้นที่สร้างจากข้อมูลพอยต์คลาวด์ในแนวบินที่ 2 (รูปที่ 30) เมื่อสร้าง Section line นี้เสร็จแล้วจะทำให้ทราบถึงค่าต่างทางความสูงระหว่างเส้น 2 เส้น ที่เกิดจากข้อมูลพอยต์คลาวด์ 2 แนวบินนั่นเอง (รูปที่ 31) และหากโปรแกรมพบว่าในบริเวณดังกล่าวมีข้อมูลพอยต์คลาวด์มากกว่า 2 แนวบิน ผู้ใช้จะต้องทำการสร้างเส้นตามจำนวนแนวบินของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่โปรแกรมตรวจพบ



รูปที่ 30 ตัวอย่างการสร้าง Section line โดยการกำหนดจุดเริ่มต้นและจุดปลายในมุมมองภาพด้านบนและมุมมองภาพตัดขวาง เพื่อเป็นการกำหนดพิกัดทั้งในทางราบและทางตั้ง



Section line	Line	Position	Tools	View
1	0	17930.3	-	-0.043
2	0	18096.6	-	+0.043

รูปที่ 31 ข้อมูลเส้นจากการสร้าง Section line จะทำให้ทราบถึงค่าต่างทางความสูงระหว่างเส้นที่สร้างจากข้อมูลพอยต์คลาวด์ระหว่างแนวบินที่ต่างกัน (สีเขียวและสีน้ำเงิน)

ในงานวิจัยนี้จะมีการเปรียบเทียบระหว่างการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวบินทั้งแบบที่ไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ และแบบที่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ ดังนั้นในการสร้างเส้น Section line ของการปรับแก้ทั้ง 2 แบบ จะนำข้อมูลเส้นจาก Polyline ที่สร้างไว้ในขั้นตอนที่ 3.3.3 มาใช้เป็นเส้นนำสายตาเพื่อให้เส้นที่จะสร้างเพื่อปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ในทั้ง 2 แบบไม่แตกต่างกัน โดยในการสร้างเส้นกำกับเพื่อปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวบินทั้ง 2 แบบนั้น จะแยกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1) การสร้างเส้นกำกับกับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวบินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้

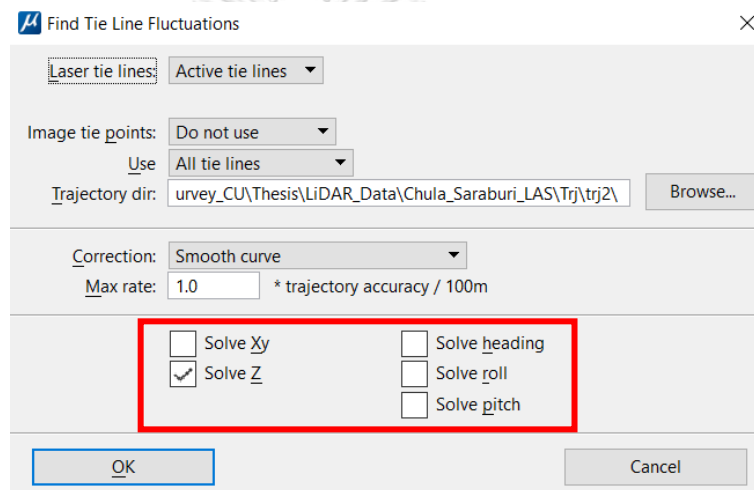
การสร้างเส้นกำกับกับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวบินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM มาประกอบการปรับแก้ นี้ จะสร้าง Section line ได้เฉพาะบริเวณที่มีการซ้อนกันของข้อมูลพอยต์คลาวด์ระหว่างแนวบินเท่านั้น กล่าวคือในงานวิจัยนี้มีข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสำรวจด้วยไลดาร์ทั้งหมด 5 แนวบิน ดังนั้นจะสร้าง Section line ได้บนส่วนซ้อน 4 แนว เท่านั้น

2) การสร้างเส้นกำกับกับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวบินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้

การสร้างเส้นกำกับกับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวบินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM มาประกอบการปรับแก้ นี้ จะสามารถสร้าง Section line ได้ทั่วทั้งบล็อก เนื่องจากข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM เกิดจากการประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศทั้งบล็อกซึ่งครอบคลุมอยู่ทั่วทั้งขอบเขตพื้นที่ศึกษา จึงทำให้เกิดการซ้อนกันของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์และจาก SfM ใน

ทุก ๆ พื้นที่ ซึ่งจะสามารถสร้าง Section line ในบริเวณใดก็ได้ที่อยู่ในขอบเขตพื้นที่ศึกษา

ขั้นตอนที่ 2 การประมวลผลหาความผันผวนของเส้นกำกับ โดยใช้เครื่องมือในโปรแกรมที่ชื่อว่า Find Tie Line Fluctuations โดยโปรแกรมจะทำการคำนวณหาค่าความผันผวนทางตำแหน่งของเส้น Section line ที่สร้างขึ้นในขั้นตอนที่ 1 ที่ปรากฏอยู่ในส่วนซ้อนของข้อมูลพอยต์คลาวด์ในแนวบินที่แตกต่างกัน และโปรแกรมจะให้ระบุความต้องการในการคำนวณหาความผันผวนเพื่อทำการปรับแก้ค่าทางตำแหน่งและค่าการวางตัวของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่ทราบจากข้อมูลวิถีการบิน ดังรูปที่ 32



รูปที่ 32 องค์ประกอบที่ต้องระบุในการประมวลผลคำนวณหาความผันผวนของเส้นกำกับ เพื่อการปรับแก้ค่าทางตำแหน่งและค่าการวางตัวของเลเซอร์สแกนเนอร์

จะพบว่าโปรแกรมสามารถให้ผู้ใช้งานระบุองค์ประกอบในการปรับแก้ได้ในหลายรูปแบบทั้งค่าทางตำแหน่งในทางราบและทางตั้ง และค่าการวางตัวของเลเซอร์สแกนเนอร์ที่กระทำกับทุกแกนระบบพิกัดอ้างอิง แต่เนื่องจากความหนาแน่นของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ไม่เพียงพอต่อการสร้าง Section line โดยใช้จุดที่มีลักษณะเด่นชัด (เป้าธรรมชาติ) จากข้อมูลพอยต์คลาวด์ (Post-marking Point cloud) ได้ เช่น เส้นถนน และจั่วหลังคา เป็นต้น ทำให้การปรับแก้ค่าทางตำแหน่งในทางราบและค่าการวางตัวของเลเซอร์สแกนเนอร์ทำได้ยาก และอาจส่งผลให้เกิดความผิดพลาดได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะคำนวณหาความผันผวนของเส้นกำกับเพื่อปรับแก้เฉพาะค่าทางตั้งเท่านั้น (Solve Z)

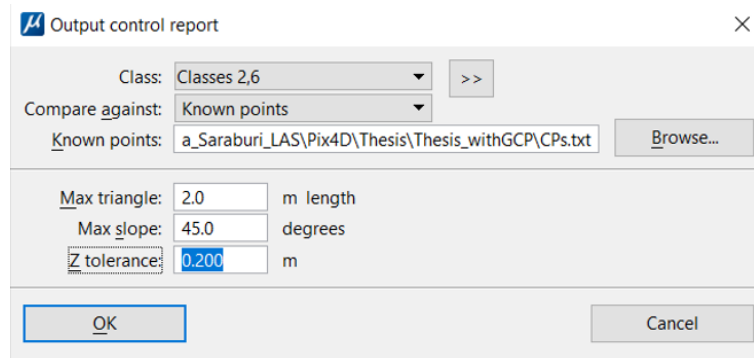
ขั้นตอนที่ 3 การปรับแก้เส้นกำกับ จะใช้ผลลัพธ์จากการคำนวณหาความผันผวนของเส้นกำกับในขั้นตอนที่ 2 ซึ่งจะเป็นการปรับแก้เฉพาะค่าทางตั้งของเส้นกำกับที่สร้างขึ้นเท่านั้น

และขั้นตอนที่ 4 เป็นการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสำรวจด้วยไลดาร์ โดยจะใช้ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณหาความผันผวนของเส้นกำกับในขั้นตอนที่ 2 สำหรับการปรับแก้ค่าทางตั้งให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์

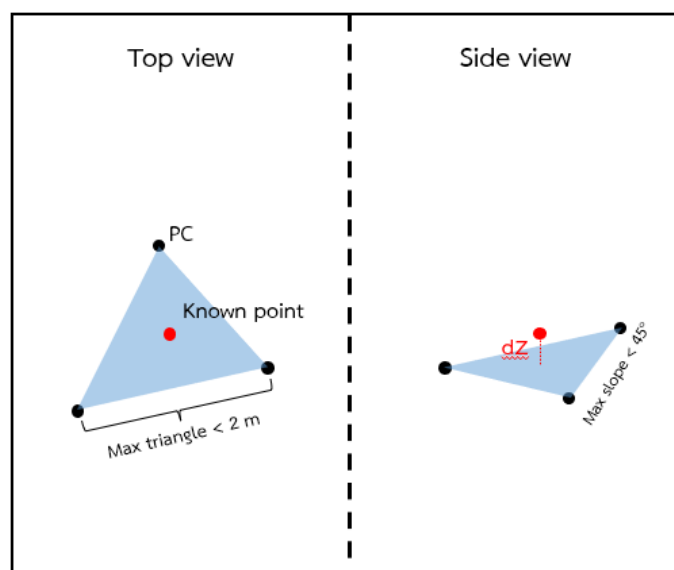
3.3.6 การตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์

ในการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ จะนำข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ไปตรวจสอบกับจุดตรวจสอบที่ได้จากการรังวัดด้วยระบบ GNSS ในขั้นตอนที่ 3.3.1 โดยงานวิจัยนี้จะตรวจสอบเฉพาะค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เท่านั้น เนื่องจากความหนาแน่นของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ไม่เพียงพอต่อการระบุจุดเด่นชัดในภูมิประเทศได้ ทำให้ยากต่อการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางราบ และด้วยเหตุผลนี้ทำให้การตรวจสอบค่าทางตั้งของจุดตรวจสอบเทียบกับจุดของพอยต์คลาวด์นั้นมีความยากที่จะเป็นจุดในตำแหน่งเดียวกัน จึงเลือกที่จะกำหนดตำแหน่งของจุดตรวจสอบให้อยู่บนพื้นผิวนราบเรียบและสะท้อนแสงเลเซอร์ได้ดี เพื่อให้ค่าความสูงบริเวณโดยรอบมีค่าความสูงเดียวกันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด

ในโปรแกรม Terra scan จะมีเครื่องมือสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งของข้อมูลพอยต์คลาวด์เทียบกับจุดตรวจสอบที่สำรวจมา เครื่องมือดังกล่าวมีชื่อว่า Output Control Report โดยโปรแกรมจะให้กำหนดประเภทของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ต้องการจะตรวจสอบ เช่น จุดบนพื้นดิน และจุดบนอาคาร เป็นต้น เพื่อนำไปตรวจสอบกับจุดตรวจสอบ และจะต้องกำหนดค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ของความยาวด้านของสามเหลี่ยมที่จะสร้างขึ้นจากพอยต์คลาวด์จำนวน 3 จุด (Max triangle) ที่อยู่ใกล้กับจุดตรวจสอบ รวมถึงค่ามุมสูงสุดที่ยอมรับได้ในความลาดชันที่เกิดจากการสร้างสามเหลี่ยม (Max slope) และค่าต่างทางความสูงที่มากที่สุดที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับจุดตรวจสอบ ดังรูปที่ 33 (ก)



(ก)



(ข)

รูปที่ 33 (ก) การกำหนดรายละเอียดสำหรับการตรวจสอบค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในทาง
 ดิ่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์โดยใช้เครื่องมือ Output Control Report

(ข) วิธีการตรวจสอบค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งของโปรแกรม Terra scan

ในการคำนวณหาค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางดิ่งกำลังสอง ($RMSE_z$) นั้น จะต้องหาค่าต่างทางความสูง (dZ) ระหว่างจุดตรวจสอบและข้อมูลที่น่ามาตรวจสอบ ในที่นี้คือข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ แต่ด้วยเหตุผลที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ทำให้การตรวจสอบข้อมูลพอยต์คลาวด์จะต้องใช้การตรวจสอบเทียบกับพื้นผิวสามเหลี่ยมที่สร้างขึ้นจากจุดของพอยต์คลาวด์ 3 จุด โดยจะเป็นการหาค่าต่างระหว่างค่าความสูงของจุดตรวจสอบเทียบกับค่าความสูงของพื้นผิวสามเหลี่ยม ณ ตำแหน่งทางราบเดียวกัน ดังรูปที่ 33 (ข)

ในงานวิจัยนี้จะมีการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์อยู่ 3 แบบ นั่นคือ ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสำรวจด้วยไลดาร์ที่ไม่ได้รับการปรับแก้เป็นแนวบิน ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสำรวจด้วยไลดาร์ที่ได้รับการปรับแก้เป็นแนวบินโดยไม่ได้ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จาก SfM ประกอบการปรับแก้ และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสำรวจด้วยไลดาร์ที่ได้รับการปรับแก้เป็นแนวบินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จาก SfM ประกอบการปรับแก้ ดังนั้นในการดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์จะต้องตรวจสอบจำนวน 3 ครั้ง

หลังจากตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ทั้ง 3 แบบเสร็จสิ้นแล้ว จะนำผลการตรวจสอบทั้งหมดมาเปรียบเทียบกันเพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของคุณภาพของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสำรวจด้วยไลดาร์ที่ผ่านกระบวนการขั้นตอนที่แตกต่างกันออกไป



บทที่ 4

ผลการศึกษาวิจัย

ในบทนี้จะแสดงผลการศึกษาวิจัยที่ได้จากการประมวลผลในขั้นตอนต่าง ๆ ในบทที่ 3 ซึ่งผลลัพธ์ของการศึกษาวิจัยมีอยู่หลายประเด็น ได้แก่ ผลการประมวลผลถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ ชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ ผลการสร้างข้อมูลพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่น ผลการรังวัดข้อมูลเส้นจากพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ผลการจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์ ผลการสร้างเส้นกำกับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวมิน ผลการประมวลผลหาความผันผวนของเส้นกำกับ ผลการปรับแก้เส้นกำกับ ผลการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวมิน และผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลการประมวลผลถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ

ในการประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ ได้แบ่งเป็นรูปแบบการประมวลผลออกเป็น 3 รูปแบบ โดยในรูปแบบที่ 1 และ 2 เป็นการประเมินคุณภาพของจุดควบคุมภาคพื้นดินตามแนวปฏิบัติการประมวลผลควบคุมคุณภาพ 2 ขั้นตอน (QC-1 & QC-2) โดยการแบ่งจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินออกเป็น 2 ชุด เพื่อใช้เป็นชุดควบคุม (GCP) และชุดตรวจสอบ (CP) แล้วทำการประมวลผลสลับชุดกัน และรูปแบบที่ 3 คือการนำจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินมาประมวลผลโดยกำหนดให้เป็นจุดควบคุมทั้งหมด เมื่อทำการประมวลผลข้อมูลแล้วจะประเมินคุณภาพของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินโดยการพิจารณาค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (RMSE) ทั้งในระยะทางตะวันออก (Easting) ระยะทางเหนือ (Northing) และค่าความสูงเหนือพื้นผิวทรงรีอ้างอิง WGS84 (Ellipsoidal height) โดยมีการกำหนดค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของค่าพิกัดจุดเปิดถ่ายจากพารามิเตอร์การจัดภาพภายนอกที่ได้จากการประมวลผลแบบ PPK ในทางราบที่ 0.05 เมตร และทางตั้ง 0.10 เมตร และค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินด้วยระบบ GNSS ในวิธี NRTK ในทางราบ 0.03 เมตร และทางตั้ง 0.05 เมตร สุดท้ายผลการศึกษาของการประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศจะได้ 3 ผลการศึกษา ตามรูปแบบการประมวลผล 3 รูปแบบ ได้แก่

4.1.1 ผลการประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ โดยการใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินชุดที่ 1 เป็นจุดควบคุม และจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินชุดที่ 2 เป็นจุดตรวจสอบ ได้ผลดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าสถิติของความคลาดเคลื่อนของแต่ละแกนพิกัด ได้แก่ Easting, Northing และ Height ของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินชุดที่ 1 ที่ใช้เป็นจุดควบคุม และจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินชุดที่ 2 ที่ใช้เป็นจุดตรวจสอบ ในการประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ

จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน						
ชื่อจุด	ค่าความถูกต้อง XY / Z (ม.)	ค่าความคลาดเคลื่อน				ใช้ตรวจสอบ / ทำเครื่องหมาย
		ทางแกน X (ม.)	ทางแกน Y (ม.)	ทางแกน Z (ม.)	การฉายจุดภาพ (จุดภาพ)	
GCP01	0.03 / 0.05	-0.006	-0.005	0.000	0.279	3/3
GCP04	0.03 / 0.05	0.009	-0.008	0.065	0.340	4/4
GCP06	0.03 / 0.05	0.024	0.015	-0.006	0.401	6/6
GCP08	0.03 / 0.05	-0.013	-0.006	0.003	0.512	6/6
GCP10	0.03 / 0.05	-0.021	0.026	0.032	0.138	4/4
GCP14	0.03 / 0.05	0.012	-0.006	0.006	0.130	7/7
GCP16	0.03 / 0.05	0.003	-0.001	0.015	0.158	6/6
GCP18	0.03 / 0.05	0.006	0.006	-0.008	0.184	4/4
GCP19	0.03 / 0.05	-0.015	-0.028	-0.053	0.268	6/6
GCP21	0.03 / 0.05	-0.030	0.074	0.025	0.448	7/7
GCP23	0.03 / 0.05	0.046	-0.070	0.001	0.304	4/4
GCP25	0.03 / 0.05	-0.004	0.014	0.005	0.421	5/5
ค่าเฉลี่ย (ม.)		0.001	0.001	0.007		
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ม.)		0.020	0.032	0.027		
RMSE (ม.)		0.020	0.032	0.027		

จุดตรวจสอบ						
ชื่อจุด	ค่าความถูกต้อง XY / Z (ม.)	ค่าความคลาดเคลื่อน				ใช้ตรวจสอบ / ทำเครื่องหมาย
		ทางแกน X (ม.)	ทางแกน Y (ม.)	ทางแกน Z (ม.)	การฉายจุดภาพ (จุดภาพ)	
GCP02		-0.082	-0.002	0.309	0.153	3/3
GCP03		0.007	-0.012	0.027	0.229	3/3
GCP05		-0.014	0.097	0.321	0.689	4/4
GCP07		-0.023	0.054	0.272	0.533	4/4
GCP09		0.009	0.036	0.092	0.444	6/6
GCP11		-0.125	-0.138	-0.065	0.335	7/7
GCP12		-0.063	0.016	-0.224	0.077	3/3
GCP13		-0.017	-0.026	0.037	0.401	3/3

ตารางที่ 6 (ต่อ)

จุดตรวจสอบ						
ชื่อจุด	ค่าความถูกต้อง XY / Z (ม.)	ค่าความคลาดเคลื่อน				ใช้ตรวจสอบ / ทำเครื่องหมาย
		ทางแกน X (ม.)	ทางแกน Y (ม.)	ทางแกน Z (ม.)	การฉายจุดภาพ (จุดภาพ)	
GCP15		-0.155	-0.166	0.347	0.151	3/3
GCP17		-0.009	0.018	0.196	0.157	3/3
GCP20		0.139	-0.161	0.155	0.460	3/3
GCP22		0.062	0.105	0.167	0.689	4/4
GCP24		-0.097	0.099	0.105	0.463	8/8
ค่าเฉลี่ย (ม.)		-0.028	-0.006	0.134		
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ม.)		0.075	0.091	0.159		
RMSE (ม.)		0.081	0.091	0.207		

4.1.2 ผลการประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ โดยการใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินชุดที่ 2 เป็นจุดควบคุม และจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินชุดที่ 1 เป็นจุดตรวจสอบ ได้ผลดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่าสถิติของความคลาดเคลื่อนของแต่ละแกนพิกัด ได้แก่ Easting, Northing และ Height ของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินชุดที่ 2 ที่ใช้เป็นจุดควบคุม และจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินชุดที่ 1 ที่ใช้เป็นจุดตรวจสอบ ในการประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ

จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน						
ชื่อจุด	ค่าความถูกต้อง XY / Z (ม.)	ค่าความคลาดเคลื่อน				ใช้ตรวจสอบ / ทำเครื่องหมาย
		ทางแกน X (ม.)	ทางแกน Y (ม.)	ทางแกน Z (ม.)	การฉายจุดภาพ (จุดภาพ)	
GCP02	0.03 / 0.05	-0.013	0.015	0.055	0.202	3/3
GCP03	0.03 / 0.05	0.024	0.022	-0.028	0.226	3/3
GCP05	0.03 / 0.05	-0.012	0.007	0.061	0.641	4/4
GCP07	0.03 / 0.05	0.005	0.005	0.017	0.543	4/4
GCP09	0.03 / 0.05	0.001	0.026	-0.014	0.400	6/6
GCP11	0.03 / 0.05	-0.029	-0.019	-0.028	0.397	7/7
GCP12	0.03 / 0.05	0.007	0.025	-0.083	0.036	3/3
GCP13	0.03 / 0.05	0.008	-0.012	-0.036	0.372	3/3
GCP15	0.03 / 0.05	-0.007	-0.037	0.082	0.126	3/3
GCP17	0.03 / 0.05	-0.001	-0.001	0.111	0.181	3/3
GCP20	0.03 / 0.05	0.049	-0.066	0.044	0.415	3/3
GCP22	0.03 / 0.05	0.019	0.011	0.031	0.665	4/4
GCP24	0.03 / 0.05	-0.010	0.012	0.009	0.428	8/8

ตารางที่ 7 (ต่อ)

ค่าเฉลี่ย (ม.)	0.003	-0.001	0.017		
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ม.)	0.019	0.026	0.052		
RMSE (ม.)	0.019	0.026	0.055		

จุดตรวจสอบ						
ชื่อจุด	ค่าความถูกต้อง XY / Z (ม.)	ค่าความคลาดเคลื่อน				ใช้ตรวจสอบ / ทำเครื่องหมาย
		ทางแกน X (ม.)	ทางแกน Y (ม.)	ทางแกน Z (ม.)	การฉายจุดภาพ (จุดภาพ)	
GCP01		-0.032	0.065	-0.264	0.277	3/3
GCP04		0.000	-0.031	0.073	0.289	4/4
GCP06		0.120	-0.051	-0.184	0.407	6/6
GCP08		-0.014	-0.059	-0.185	0.484	6/6
GCP10		-0.012	0.081	0.036	0.141	4/4
GCP14		0.054	0.011	-0.038	0.129	7/7
GCP16		0.001	0.009	0.026	0.130	6/6
GCP18		-0.017	-0.051	-0.031	0.183	4/4
GCP19		-0.078	-0.023	-0.251	0.264	6/6
GCP21		-0.105	0.248	-0.072	0.437	7/7
GCP23		0.118	-0.236	-0.021	0.251	4/4
GCP25		-0.019	0.040	-0.048	0.399	5/5
ค่าเฉลี่ย (ม.)		0.001	0.004	-0.080		
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ม.)		0.065	0.108	0.109		
RMSE (ม.)		0.065	0.108	0.135		

4.1.3 ผลการประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ โดยการใช้จุดควบคุมภาพถ่าย ภาคพื้นดินทั้งหมดจำนวน 25 จุด เป็นจุดควบคุม ได้ผลดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ค่าสถิติของความคลาดเคลื่อนของแต่ละแกนพิกัด ได้แก่ Easting, Northing และ Height ของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินทั้ง 25 จุด ในการประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ

จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน						
ชื่อจุด	ค่าความถูกต้อง XY / Z (ม.)	ค่าความคลาดเคลื่อน				ใช้ตรวจสอบ / ทำเครื่องหมาย
		ทางแกน X (ม.)	ทางแกน Y (ม.)	ทางแกน Z (ม.)	การฉายจุดภาพ (จุดภาพ)	
GCP01	0.03 / 0.05	0.005	0.027	-0.067	0.349	3/3
GCP02	0.03 / 0.05	-0.021	0.019	0.108	0.172	3/3
GCP03	0.03 / 0.05	0.015	0.008	-0.006	0.217	3/3
GCP04	0.03 / 0.05	-0.011	0.013	0.082	0.745	4/4
GCP05	0.03 / 0.05	-0.009	-0.008	0.028	0.406	4/4

ตารางที่ 8 (ต่อ)

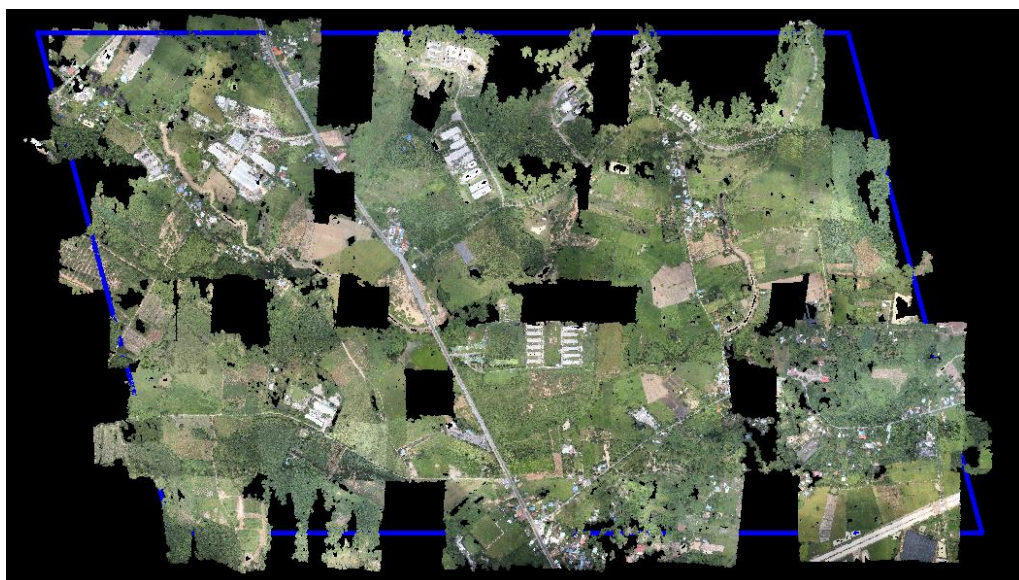
จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน						
ชื่อจุด	ค่าความถูกต้อง XY / Z (ม.)	ค่าความคลาดเคลื่อน				ใช้ตรวจสอบ / ทำเครื่องหมาย
		ทางแกน X (ม.)	ทางแกน Y (ม.)	ทางแกน Z (ม.)	การฉายจุดภาพ (จุดภาพ)	
GCP06	0.03 / 0.05	0.047	-0.015	-0.052	0.446	6/6
GCP07	0.03 / 0.05	-0.011	0.028	0.128	0.542	4/4
GCP08	0.03 / 0.05	-0.009	-0.031	-0.044	0.501	6/6
GCP09	0.03 / 0.05	0.007	0.015	0.020	0.409	6/6
GCP10	0.03 / 0.05	-0.013	0.046	0.037	0.130	4/4
GCP11	0.03 / 0.05	-0.031	-0.026	-0.017	0.402	7/7
GCP12	0.03 / 0.05	0.003	0.031	-0.073	0.100	3/3
GCP13	0.03 / 0.05	-0.011	-0.021	-0.008	0.420	3/3
GCP14	0.03 / 0.05	0.020	0.001	0.002	0.130	7/7
GCP15	0.03 / 0.05	-0.013	-0.044	0.110	0.141	3/3
GCP16	0.03 / 0.05	0.006	-0.004	0.013	0.146	6/6
GCP17	0.03 / 0.05	0.005	-0.004	-0.012	0.199	4/4
GCP18	0.03 / 0.05	-0.021	-0.019	-0.048	0.290	6/6
GCP19	0.03 / 0.05	-0.006	0.009	0.103	0.182	3/3
GCP20	0.03 / 0.05	0.075	-0.108	0.105	0.434	3/3
GCP21	0.03 / 0.05	-0.039	0.089	-0.001	0.461	7/7
GCP22	0.03 / 0.05	0.050	-0.095	0.000	0.323	4/4
GCP23	0.03 / 0.05	0.032	0.045	0.071	0.688	4/4
GCP24	0.03 / 0.05	-0.025	0.018	0.018	0.472	8/8
GCP25	0.03 / 0.05	-0.005	0.007	-0.004	0.405	5/5
ค่าเฉลี่ย (ม.)		0.002	-0.001	0.020		
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ม.)		0.026	0.041	0.058		
RMSE (ม.)		0.026	0.041	0.061		

4.2 ผลการสร้างข้อมูลพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่น

ภายหลังจากการประมวลผลถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศให้กับชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ จะเป็นกระบวนการในการประมวลผลเพื่อสร้างข้อมูลพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่นด้วยเทคนิค SfM จากการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศหลายมุมมอง โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างข้อมูลพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่น ได้ผลดังตารางที่ 9 และรูปที่ 34

ตารางที่ 9 ผลการประมวลผลการสร้างข้อมูลพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่น

จำนวนบล็อกของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่สร้างได้ (Number of Generated Tiles)	4
จำนวนจุดของพอยต์คลาวด์ที่สร้างได้ (Number of 3D Densified Points)	62,318,337
ความหนาแน่นเฉลี่ยของข้อมูลพอยต์คลาวด์ (Average Density) (จุด ต่อ ลบ.ม.)	3.19



รูปที่ 34 ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการสร้างพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่นในมุมมองด้านบน

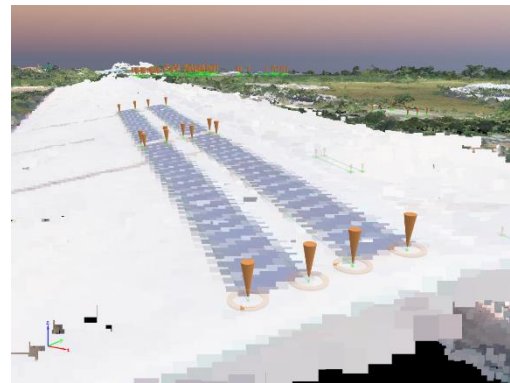
4.3 ผลการรังวัดข้อมูลเส้นจากข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM

การรังวัดข้อมูลเส้น (Polyline) ในโปรแกรม PIX4Dmapper โดยการกำหนดจุดเริ่มต้นและจุดปลายด้วยข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM เพื่อใช้เป็นเส้นนำสายตาในการกำหนดเส้นกำกับกับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวบินนั้น สามารถรังวัดข้อมูลเส้นได้ทั้งหมด 1,068 เส้น โดยเกิดจากจุดเริ่มต้นและจุดปลายจำนวน 2,136 จุด ในการรังวัดเส้นจะใช้รูปแบบในการเลือกอยู่รังวัดอยู่ 2 ลักษณะ ได้แก่

1) เส้นที่ปรากฏอยู่บนจุดเด่นชัดในภาพถ่าย (รูปที่ 35) เพื่อให้จุดเริ่มต้นและจุดปลายที่ใช้ในการสร้างเส้นนั้นเป็นจุดที่เกิดจากการจับคู่จุดภาพที่มีคุณลักษณะเด่นชัด (Feature based matching) ซึ่งจะทำให้ได้ค่าพิกัดภาคพื้นดินที่เกิดจากการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศหลายมุมมองมีความถูกต้องทางตำแหน่งที่สูงกว่าจุดภาพอื่น ๆ ที่ไม่ใช่จุดภาพที่มีลักษณะเด่นชัด โดยข้อมูลเส้นที่รังวัดโดยใช้จุดเด่นชัดมีจำนวน 979 เส้น แบ่งเป็นเป็นเส้นบนพื้นดิน 953 เส้น และเส้นบนหลังคารของอาคาร 26 เส้น



(ก)

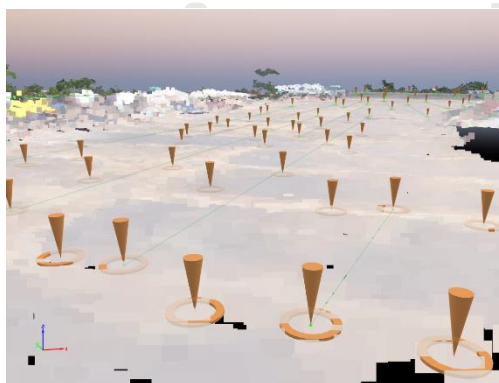


(ข)

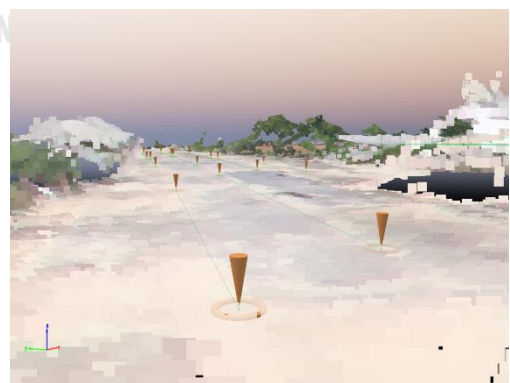
รูปที่ 35 ตัวอย่างการรังวัดเส้น (Polyline) โดยใช้จุดเริ่มต้นและจุดปลายที่เป็นจุดเด่นชัด

(ก) โดยใช้เส้นถนน (ข) โดยใช้แผงโซลาร์เซลล์บนหลังคาของอาคาร

2) เส้นที่รังวัดอยู่บนพื้นที่ราบเรียบที่สามารถตีความได้จากภาพถ่ายทางอากาศ (รูปที่ 36) กล่าวคือ พื้นที่ราบเรียบที่ไม่มีอาคาร สิ่งปลูกสร้าง และต้นไม้ อยู่ในบริเวณนั้น และสีของพื้นผิวเป็นสีที่มีความเหมือนหรือใกล้เคียงกัน เช่น ลานจอดรถขนาดใหญ่ที่เป็นพื้นคอนกรีต เป็นต้น โดยข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ที่ได้ในบริเวณนี้จะมีลักษณะการเรียงตัวที่ราบเรียบมากกว่าบริเวณอื่น ๆ อาทิเช่น พื้นถนน ที่แม้จะเป็นพื้นผิวที่ราบเรียบจริง แต่เนื่องจากถนนมีความลาดชันอยู่ อีกทั้งยังมีเส้นถนนที่เป็นจุดเด่นชัดที่ทำให้การจับคู่จุดภาพด้วยคอมพิวเตอร์วิชั่นอาจมองพื้นถนนบริเวณอื่น ๆ มีความแตกต่างทางความสูงอยู่ ซึ่งอาจส่งผลต่อความผิดพลาดทางตำแหน่งหากนำไปใช้ในการสร้างเส้นกำกับกับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ โดยเส้นที่รังวัดด้วยลักษณะดังกล่าวมีจำนวน 89 เส้น



(ก)



(ข)

รูปที่ 36 การรังวัดเส้น (Polyline) บนพื้นที่ราบเรียบ

(ก) บริเวณลานจอดรถบรรทุกทุกพื้นคอนกรีต (ข) บริเวณลานหน้าโกดัง

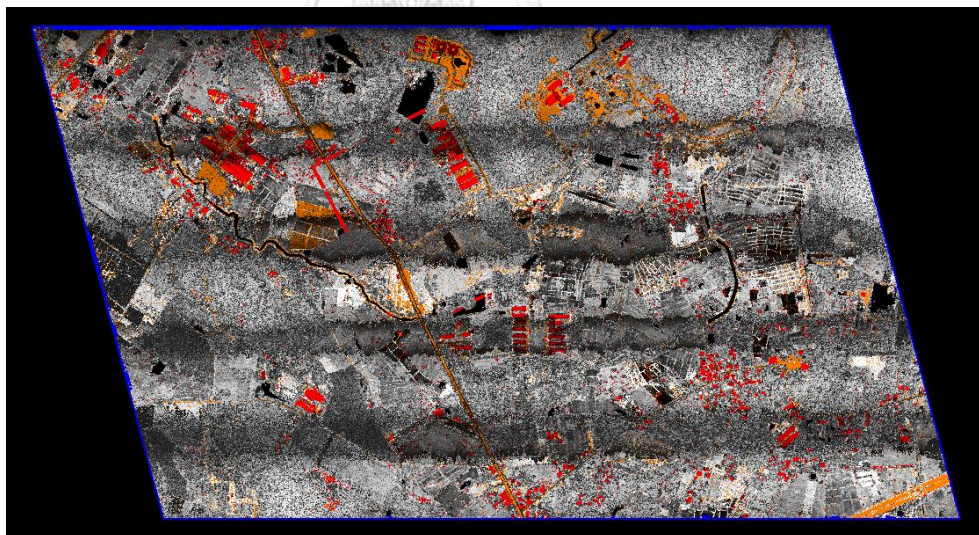
4.4 ผลการจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์

ในการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ด้วยโปรแกรม Terra match จำเป็นต้องมีการจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์ก่อน โดยจะต้องจำแนกประเภทเป็น จุดบนพื้นดิน (Ground) และจุดบนอาคาร (Building) โดยใช้เครื่องมือ Classify ground และ Classify building ซึ่งเป็นเครื่องมือจำแนกประเภทโดยอัตโนมัติ จากนั้นจะต้องจำแนกประเภทด้วยตนเองอีกครั้ง เพื่อเป็นการจำแนกโดยละเอียดด้วยเครื่องมือ Classify fence

สำหรับผลการจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จะแบ่งออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ ผลการจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ (ตารางที่ 10 และรูปที่ 37) และผลการจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM (ตารางที่ 11 และรูปที่ 38)

ตารางที่ 10 ผลการจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์

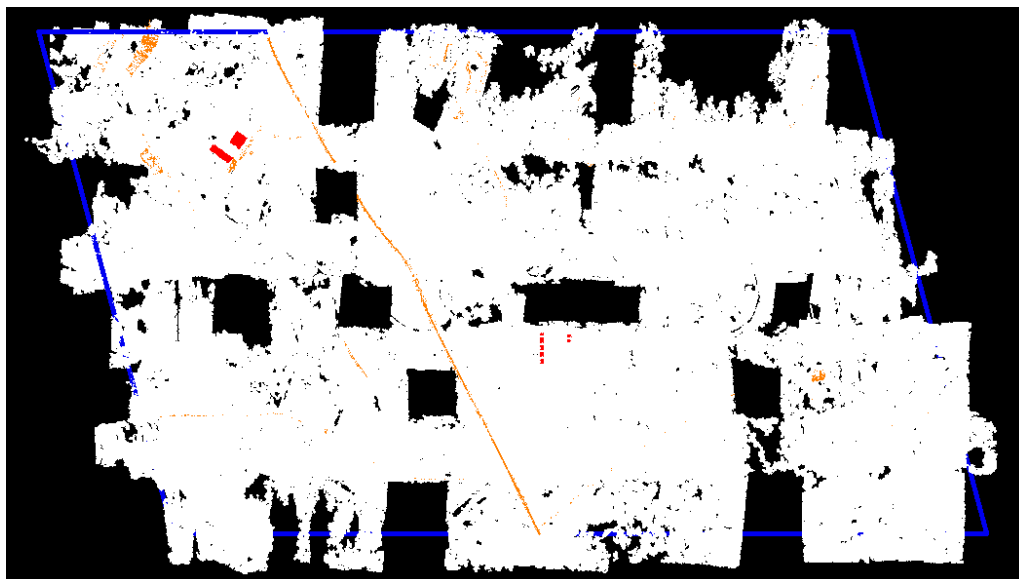
จำนวนจุดพอยต์คลาวด์ทั้งหมด	34,445,027
จำนวนจุดพอยต์คลาวด์บนพื้นดิน (Ground)	9,167,010
จำนวนจุดพอยต์คลาวด์บนอาคาร (Building)	1,865,050
จำนวนจุดพอยต์คลาวด์ที่ไม่ระบุประเภท (Default)	23,412,967



รูปที่ 37 ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการจำแนกประเภทแล้ว

ตารางที่ 11 ผลการจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM

จำนวนจุดพอยต์คลาวด์ทั้งหมด	62,318,337
จำนวนจุดพอยต์คลาวด์บนพื้นดิน (Ground)	765,269
จำนวนจุดพอยต์คลาวด์บนอาคาร (Building)	88,006
จำนวนจุดพอยต์คลาวด์ที่ไม่ระบุประเภท (Default)	61,465,062



รูปที่ 38 ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ที่ผ่านการจำแนกประเภทแล้ว

4.5 ผลการสร้างเส้นกำกับกับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวนิน

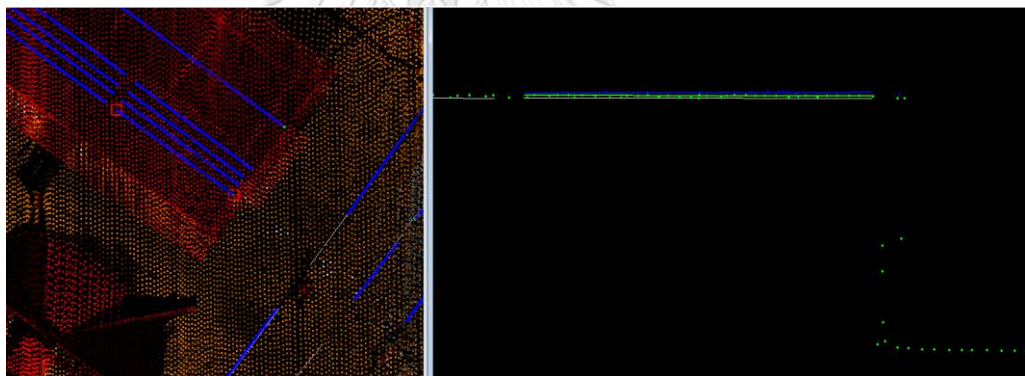
ในกระบวนการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวนินด้วยเครื่องมือ Define Tie Lines ในโปรแกรม Terra match แบบกึ่งอัตโนมัติ ที่จะต้องมีการสร้างเส้นกำกับกับการปรับแก้ (Section line) ด้วยตนเอง โดยใช้ข้อมูลเส้น (Polyline) ที่สร้างจากโปรแกรม PIX4Dmapper มาเป็นเส้นนำสายตา

เนื่องจากในงานวิจัยจะมีการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์อยู่ 2 รูปแบบ กล่าวคือ การปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวนินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ และการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวนินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ ดังนั้นในการสร้างเส้นกำกับจึงต้องสร้าง 2 ครั้ง ตามรูปแบบการปรับแก้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

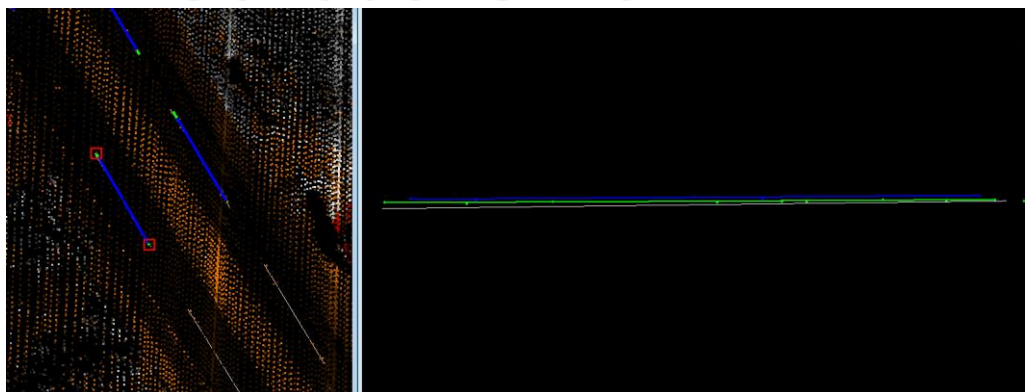
4.5.1 การสร้างเส้นกำกับกับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวนินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้

ในการสร้างเส้นกำกับของการปรับแก้ในรูปแบบนี้จะสามารถสร้างเส้นกำกับได้ เฉพาะบริเวณที่มีการซ้อนกันของข้อมูลพอยต์คลาวด์ระหว่างแนวนินเท่านั้น ทำให้การสร้างเส้นกำกับสามารถสร้างได้เพียง 342 เส้น โดยแบ่งเป็นเส้นที่อยู่บนพื้นถนน และพื้นผิวราบเรียบที่สะท้อนเลเซอร์ได้เพียงครั้งเดียว (Single return) จำนวน 263 เส้น

และเส้นที่อยู่บนหลังคาของอาคารจำนวน 79 เส้น (รูปที่ 39) โดยในจำนวน 79 เส้นนี้มีเส้นที่ไม่ได้สร้างโดยใช้เส้นนำสายตาจำนวน 61 เส้น เนื่องจากข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM มีลักษณะการเรียงตัวที่ไม่ถูกต้องตามโครงสร้างหลังคาของอาคาร ทำให้ไม่สามารถสร้างข้อมูลเส้นได้ ยกเว้นหลังคาที่มีสิ่งให้เห็นเด่นชัด เช่น รูป 34 (ข) ที่มีแผงโซลาร์เซลล์ติดตั้งอยู่บนหลังคาซึ่งมีลักษณะเด่นชัดบนหลังคาทำให้การสร้างพอยต์คลาวด์ด้วยเทคนิค SfM มีความถูกต้องเพิ่มขึ้น ซึ่งแตกต่างจากข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่มีลักษณะการเรียงตัวถูกต้องตามโครงสร้างหลังคาของอาคาร (Srirattanapaisarn et al., 2022) ทำให้สามารถสร้างเส้นกำกับได้ โดยไม่ต้องใช้เส้นนำสายตา ในการสร้างเส้นกำกับบนหลังคาจะสร้างขึ้นบริเวณกึ่งกลางของผืนหลังคาเพื่อให้เกิดการเปรียบเทียบระหว่างค่าความสูงของเส้นกำกับจากการสร้างขึ้นด้วยข้อมูลพอยต์คลาวด์ของทั้ง 2 แนวบิน และในส่วนของเส้นนำสายตาที่เหลือที่ไม่ได้ถูกเลือกใช้ เนื่องจากเป็นเส้นที่อยู่นอกบริเวณส่วนซ้อนระหว่างแนวบิน (รูปที่ 40)

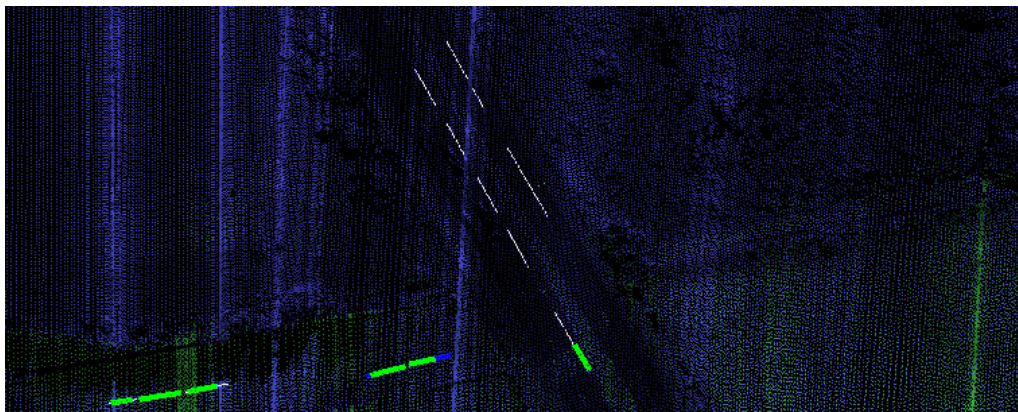


CHULALONGKORN UNIVERSITY (ก)



(ข)

รูปที่ 39 ตัวอย่างเส้นกำกับการปรับแก้ที่สร้างขึ้นจากข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์
(ก) บริเวณหลังคาของอาคาร (ข) บริเวณพื้นถนน โดยใช้เส้นนำสายตาจาก Polyline



รูปที่ 40 เส้นนำสายตาที่อยู่นอกบริเวณส่วนซ้อนของข้อมูลพอยต์คลาวด์ ระหว่างสองแนวบินที่ติดกัน (เส้นสีขาว) ทำให้ไม่สามารถสร้างเส้นกำกับได้

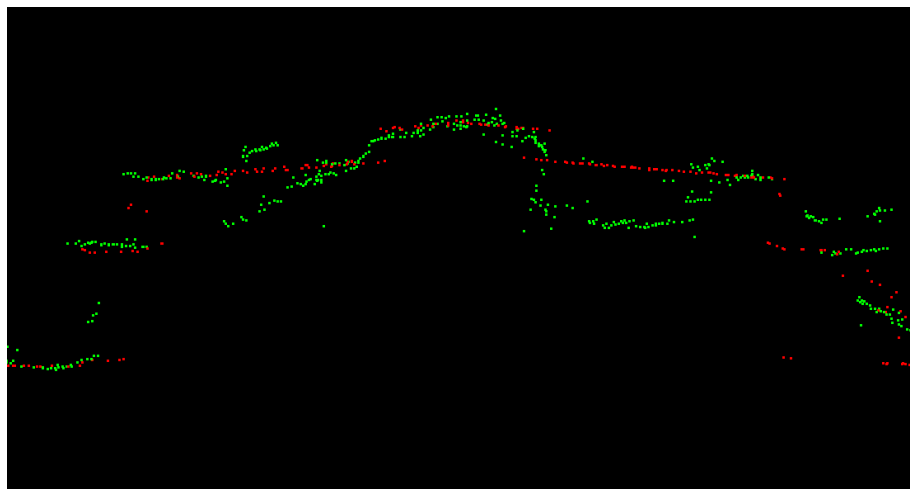
ในการประเมินค่าทางสถิติของเส้นกำกับที่เป็นการเปรียบเทียบค่าต่างทางตำแหน่งระหว่างเส้นที่สร้างจากข้อมูลพอยต์คลาวด์ต่างแนวบินกัน จะประเมินเพียงค่าทางตั้ง (Z) เท่านั้น เนื่องมาจากความหนาแน่นของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่เพียงพอต่อการปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนในทางราบ ที่จะต้องอาศัยการสร้างเส้นกำกับที่บริเวณจั่วหลังคา หรือกำแพงของอาคาร เป็นต้น ซึ่งจะได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 12 ตารางที่ 12 ค่าทางสถิติในการประเมินค่าต่างทางตำแหน่งในทางราบและทางตั้งของเส้นกำกับในรูปแบบการปรับแก้ที่ 1

ค่าทางสถิติ	ทางแกน X (ม.)	ทางแกน Y (ม.)	ทางแกน Z (ม.)
ขนาดโดยเฉลี่ย (Average magnitude)	0.000	0.000	0.035
ค่า RMSE	0.000	0.000	0.041
ค่าสูงสุด (Maximum value)	0.000	0.000	0.120

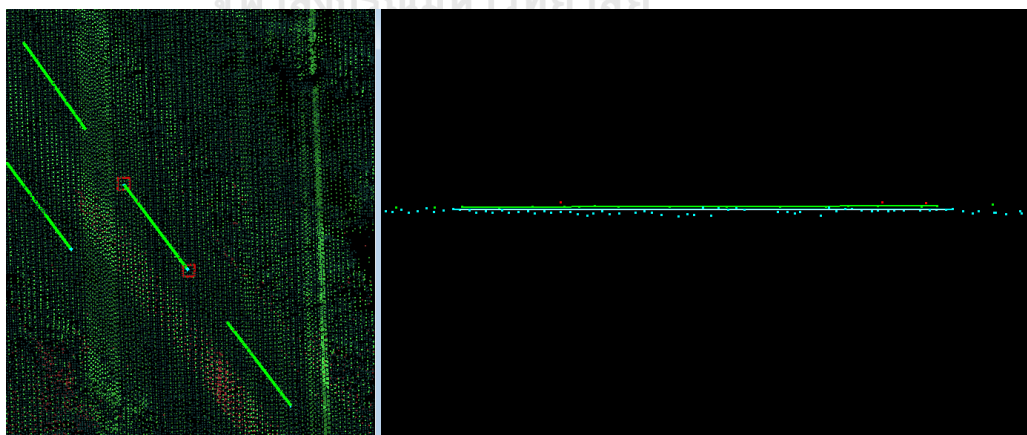
4.5.2 การสร้างเส้นกำกับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวบินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้

ในการสร้างเส้นกำกับของการปรับแก้ในรูปแบบนี้จะสามารถสร้างเส้นกำกับได้ทั่วทั้งพื้นที่ศึกษา เนื่องจากข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM เกิดจากการประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศทั้งบล็อก ทำให้เกิดการซ้อนทับกันระหว่างข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ทั้งขอบเขตพื้นที่ศึกษา จึงส่งผลให้สามารถสร้างเส้นกำกับได้ทั้งหมด 456 เส้น (รูปที่ 42 และ 43) โดยใน 456 เส้นนี้ จะมีเส้นที่สร้างขึ้นบนหลังคาของอาคารเพียง 19 เส้นเท่านั้น

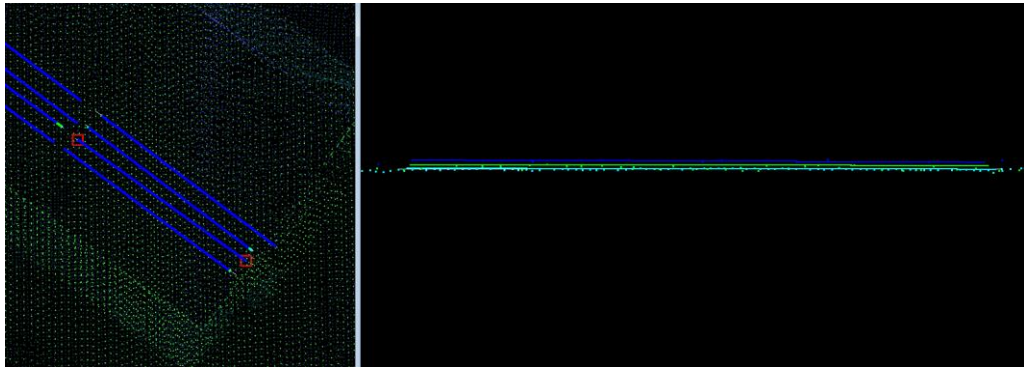
เนื่องมาจากข้อมูลพอยต์คลาวด์บริเวณพื้นผิวของอาคารขนาดใหญ่ที่ได้จากการทำ SfM มีลักษณะการเรียงตัวที่ไม่สอดคล้องไปกับโครงสร้างหลังคาของอาคาร (รูปที่ 41) จึงทำให้การสร้างเส้นกำกับบนพื้นผิวหลังคาของอาคารในขั้นตอนนี้ทำได้ยาก และอีก 437 เส้น เป็นเส้นที่อยู่บนพื้นถนน และพื้นผิวราบเรียบสะท้อนแสงได้ดี โดยใช้การสร้างเส้นกำกับอ้างอิงตามเส้นนำสายตา และเนื่องมาจากเส้นนำสายตาที่สร้างขึ้นอยู่ในบริเวณเดียวกันและมีตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันไม่จำเป็นต้องสร้างเส้นกำกับให้เยอะจนเกินความจำเป็น จึงไม่ได้สร้างเส้นกำกับตามเส้นนำสายตาทั้ง 1,068 เส้น



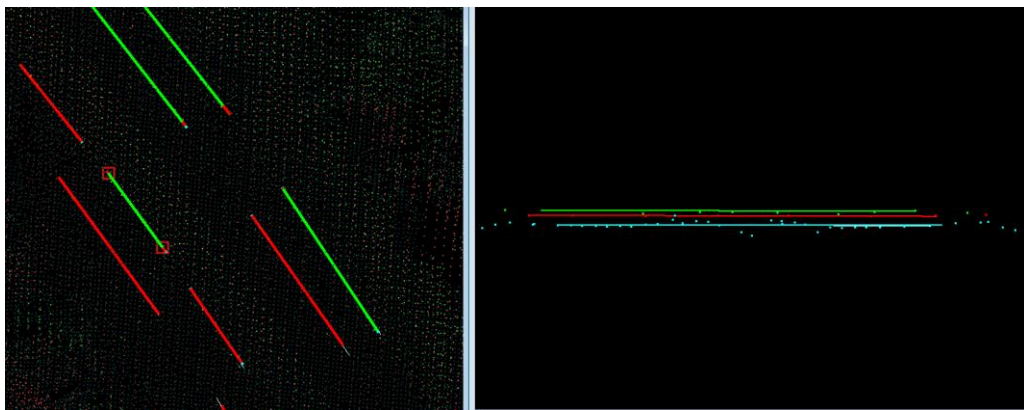
รูปที่ 41 ลักษณะการเรียงตัวของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ (สีแดง) และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM (สีเขียว) (Srirattanapaisarn et al., 2022)



รูปที่ 42 เส้นกำกับที่สร้างขึ้นจากข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์จำนวน 1 แนวบิน (เส้นสีเขียว) และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM (เส้นสีฟ้า) โดยใช้เส้นนำสายตาจาก Polyline



(ก)



(ข)

- รูปที่ 43 (ก) เส้นกำกับที่สร้างขึ้นบริเวณหลังคาของอาคารด้วยข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์จำนวน 2 แนวบิน (เส้นสีน้ำเงินและสีเขียว) และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM (เส้นสีฟ้า)
- (ข) เส้นกำกับที่สร้างขึ้นบริเวณพื้นถนนด้วยข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์จำนวน 2 แนวบิน (เส้นสีแดงและสีเขียว) และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM (เส้นสีฟ้า)

จะพบว่าในเส้นกำกับที่สร้างขึ้นจากข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์จำนวน 2 แนวบิน และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM นั้นจะทำให้เกิดเส้นกำกับซ้อนกันจำนวน 3 เส้น ได้แก่ เส้นกำกับที่สร้างจากข้อมูลพอยต์คลาวด์ในแนวบินที่ 1 เส้นกำกับที่สร้างจากข้อมูลพอยต์คลาวด์ในแนวบินที่ 2 และเส้นกำกับที่สร้างขึ้นจากข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ซึ่งจะทำให้เกิดการปรับแก้เส้นกำกับร่วมกันระหว่าง 3 เส้น ที่เกิดจากข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้มาด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน

สำหรับการประเมินค่าทางสถิติของเส้นกำกับที่เป็นการเปรียบเทียบค่าต่างทางด้านในในรูปแบบการปรับแก้ดังกล่าว จะได้ผลลัพธ์ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ค่าทางสถิติในการประเมินค่าต่างทางตำแหน่งในทางราบและทางตั้งของเส้นกำกับ
ในรูปแบบการปรับแก้ที่ 2

ค่าทางสถิติ	ทางแกน X (ม.)	ทางแกน Y (ม.)	ทางแกน Z (ม.)
ขนาดโดยเฉลี่ย (Average magnitude)	0.000	0.000	0.042
ค่า RMSE	0.000	0.000	0.054
ค่าสูงสุด (Maximum value)	0.000	0.000	0.219

4.6 ผลการประมวลผลหาความผันผวนของเส้นกำกับ

หลังจากผ่านกระบวนการในการสร้างเส้นกำกับการปรับแก้แล้ว ในขั้นตอนต่อมาจะเป็น
การประมวลผลเพื่อคำนวณหาความผันผวนของเส้นกำกับ (Find Tie Line Fluctuations)
โดยจะทำการประมวลผลแยกออกเป็น 2 รูปแบบ ตามรูปแบบการปรับแก้ของงานวิจัย ซึ่ง
ผลลัพธ์ของการประมวลผลในขั้นตอนนี้มีรายละเอียดดังนี้

4.6.1 การประมวลผลหาความผันผวนของเส้นกำกับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ เป็นแนวนอนโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้

การประมวลผลเพื่อคำนวณหาความผันผวนของเส้นกำกับของรูปแบบการ
ปรับแก้นี้ จะใช้ข้อมูลเส้นกำกับที่ได้จากการสร้างใน 4.5.1 จำนวน 342 เส้น โดยได้
ผลลัพธ์เป็นค่าทางสถิติดังนี้

ตารางที่ 14 ค่าทางสถิติในการประมวลผลเพื่อคำนวณหาความผันผวนของเส้นกำกับการ
ปรับแก้ในรูปแบบที่ 1

ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในสามมิติเริ่มต้น (Starting AVG 3D mismatch) (ม.)	0.0351
ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในทางตั้งเริ่มต้น (Starting AVG Z mismatch) (ม.)	0.0351
ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในสามมิติสุดท้าย (Final AVG 3D mismatch) (ม.)	0.0172
ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในทางตั้งสุดท้าย (Final AVG Z mismatch) (ม.)	0.0172
เวลาในการดำเนินการ (วินาที)	1
จำนวนการวนซ้ำ (รอบ)	6

4.6.2 การประมวลผลหาความผันผวนของเส้นกำกับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ เป็นแนวนอนโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้

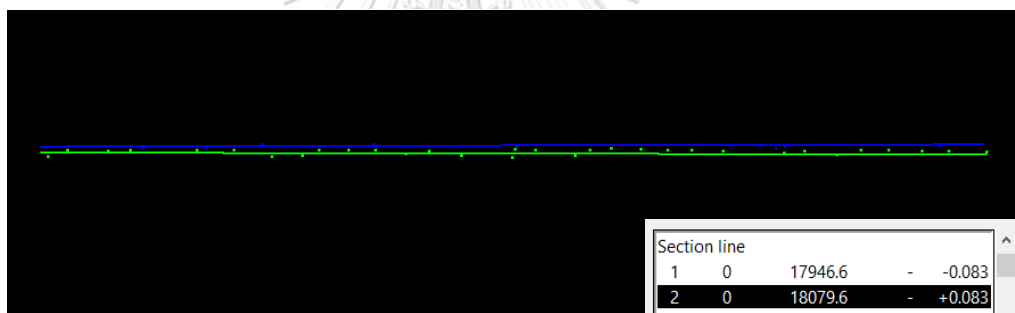
การประมวลผลเพื่อคำนวณหาความผันผวนของเส้นกำกับของรูปแบบการ
ปรับแก้นี้ จะใช้ข้อมูลเส้นกำกับที่ได้จากการสร้างใน 4.5.2 จำนวน 456 เส้น โดยได้
ผลลัพธ์เป็นค่าทางสถิติดังนี้

ตารางที่ 15 ค่าทางสถิติในการประมวลผลเพื่อคำนวณหาความผันผวนของเส้นกำกับการปรับแก้ในรูปแบบที่ 2

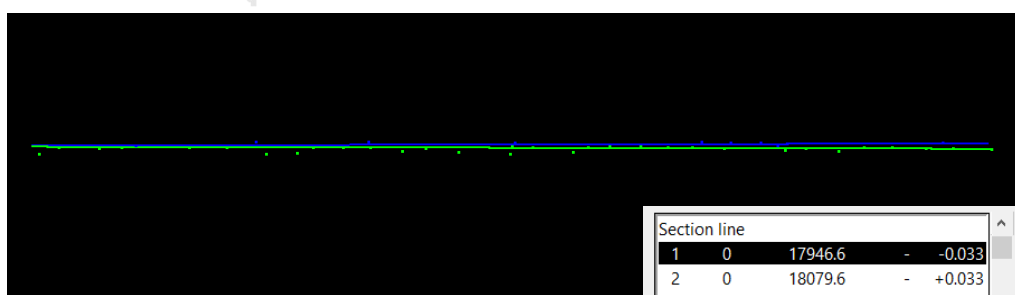
ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในสามมิติเริ่มต้น (Starting AVG 3D mismatch) (ม.)	0.0416
ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในทางตั้งเริ่มต้น (Starting AVG Z mismatch) (ม.)	0.0416
ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในสามมิติสุดท้าย (Final AVG 3D mismatch) (ม.)	0.0136
ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งในทางตั้งสุดท้าย (Final AVG Z mismatch) (ม.)	0.0136
เวลาในการดำเนินการ (วินาที)	1.2
จำนวนการวนซ้ำ (รอบ)	9

4.7 ผลการปรับแก้เส้นกำกับ

กระบวนการปรับแก้เส้นกำกับนี้ จะเป็นการนำค่าความผันผวนของเส้นกำกับใน 4.6 มาใช้เพื่อปรับแก้ โดยทำการปรับแก้ให้กับเส้นกำกับในรูปแบบการปรับแก้ทั้ง 2 รูปแบบ ผลที่ได้จากการปรับแก้จะทำให้ค่าต่างทางความสูงของเส้นกำกับที่สร้างไว้ลดลง ดังรูปที่ 44 (ก) และ (ข) และรูปที่ 45 (ก) และ (ข)

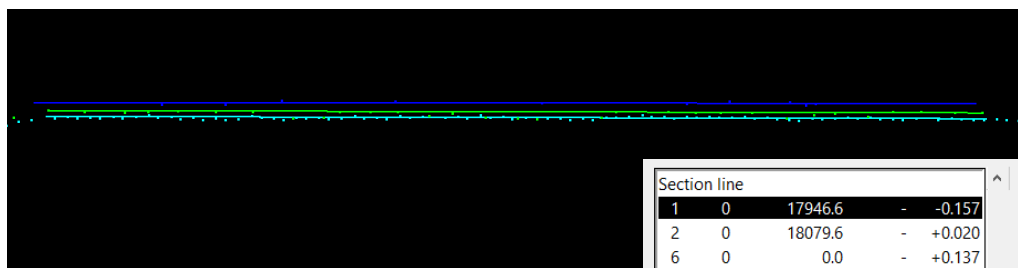


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (ก)

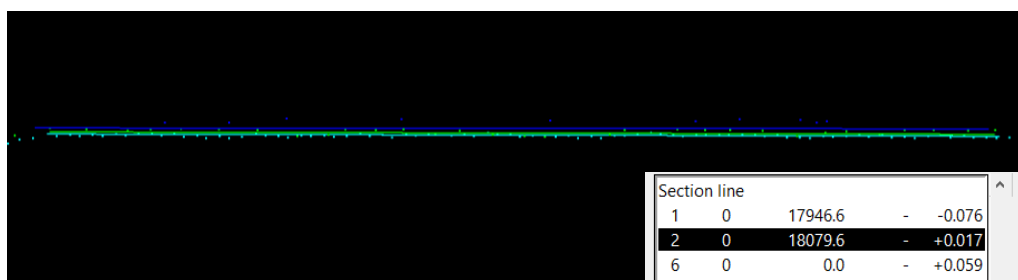


(ข)

รูปที่ 44 ตัวอย่างการปรับแก้เส้นกำกับของรูปแบบการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์แบบที่ 1 ที่แสดงลักษณะการวางตัวและค่าต่างทางความสูงของเส้นกำกับ (ก) ก่อนการปรับแก้ และ (ข) หลังการปรับแก้ ด้วยมุมมองภาพตัดขวาง



(ก)



(ข)

รูปที่ 45 ตัวอย่างการปรับแก้เส้นกำกับของรูปแบบการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์แบบที่ 2 ที่แสดงลักษณะการวางตัวและค่าต่างทางความสูงของเส้นกำกับ (ก) ก่อนการปรับแก้ และ (ข) หลังการปรับแก้ ด้วยมุมมองภาพตัดขวาง

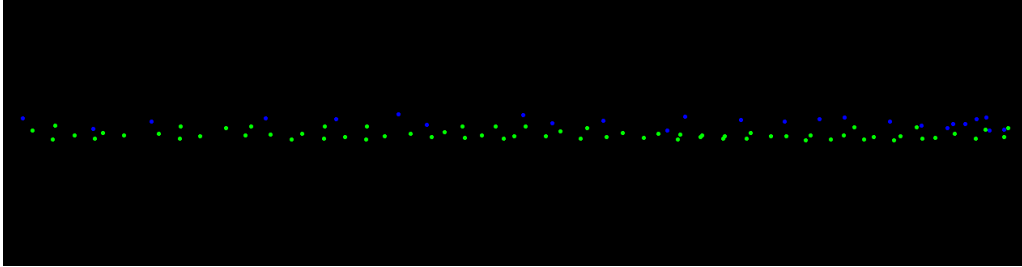
จากภาพแสดงให้เห็นได้ว่า หลังจากการประมวลผลเพื่อปรับแก้เส้นกำกับ จะส่งผลให้เส้นกำกับมีการขยับเข้าหากันในทางตั้ง ซึ่งจะถ่ายทอดไปยังการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ในขั้นตอนต่อไป

4.8 ผลการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวบิน

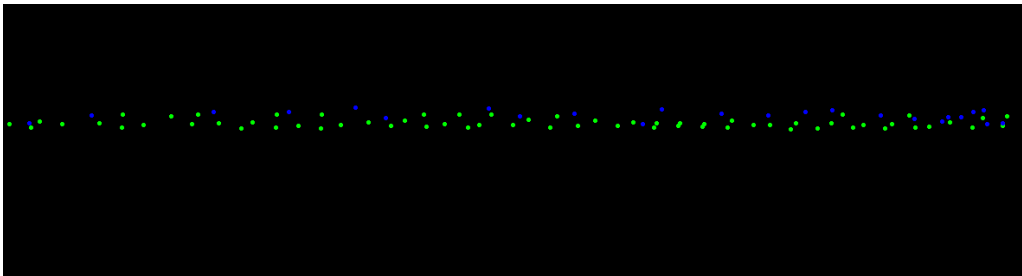
กระบวนการในการประมวลผลเพื่อปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวบินนี้ จะเป็นการนำค่าความผันผวนของเส้นกำกับใน 4.6 มาใช้เพื่อปรับแก้ โดยทำการปรับแก้ให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์ในรูปแบบการปรับแก้ทั้ง 2 รูปแบบ นั่นคือ 1) การปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวบินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ และ 2) การปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวบินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้

โดยผลลัพธ์ที่ได้ในรูปแบบการปรับแก้ที่ 1 จะทำให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ต่างแนวบินกัน มีการปรับแก้ค่าความสูงให้เข้าหากันตามความผันผวนของเส้นกำกับที่คำนวณได้ใน 4.6.1 ดังรูปที่ 46 (ก) และ (ข) และผลลัพธ์ที่ได้ในรูปแบบการปรับแก้ที่ 2 จะทำให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ต่างแนวบินกัน รวมไปถึงข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM มีการปรับแก้

ค่าความสูงให้เข้าหากันตามความผันผวนของเส้นกำกับที่คำนวณได้ใน 4.6.2 ดังรูปที่ 47 (ก) และ (ข)

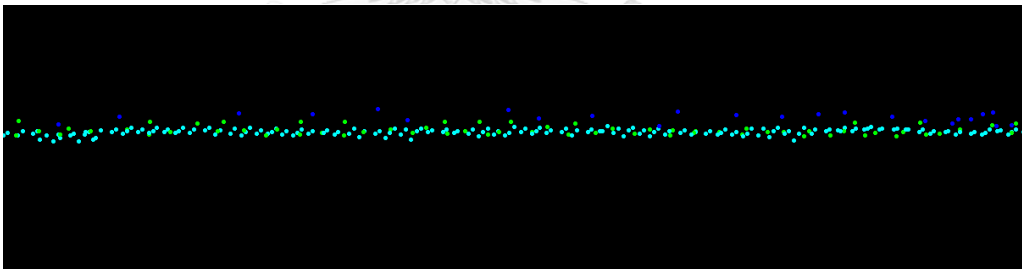


(ก)

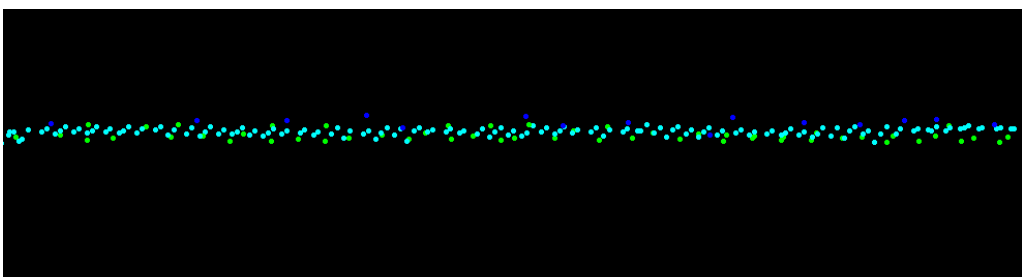


(ข)

รูปที่ 46 ลักษณะการวางตัวของข้อมูลพอยต์คลาวด์ (ก) ก่อน และ (ข) หลัง การปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ในรูปแบบการปรับแก้ที่ 1 ด้วยมุมมองภาพตัดขวาง



(ก)



(ข)

รูปที่ 47 ลักษณะการวางตัวของข้อมูลพอยต์คลาวด์ (ก) ก่อน และ (ข) หลัง การปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ในรูปแบบการปรับแก้ที่ 2 ด้วยมุมมองภาพตัดขวาง

จากภาพแสดงให้เห็นว่าข้อมูลพอยต์คลาวด์มีลักษณะการวางตัวที่เปลี่ยนไปหลังผ่านกระบวนการปรับแก้แล้ว โดยเห็นได้จากความสูงต่างของข้อมูลพอยต์คลาวด์ก่อนการปรับแก้ นั้นลดลงเมื่อผ่านการปรับแก้ไปเรียบร้อยแล้ว ทั้งการปรับแก้ใน 2 รูปแบบ ซึ่งจะทำให้รอย เหลื่อมของความต่างทางความสูงของข้อมูลพอยต์คลาวด์ต่างแนวบินที่มักพบเจอได้บริเวณส่วน ซ้อนระหว่างแนวบินนั้นลดลง

4.9 ผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์

เมื่อข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ได้รับการปรับแก้เป็นแนวบินแล้ว ทั้งในรูปแบบที่ใช้ และไม่ใช่ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ ลำดับต่อมาจะเป็นการ ตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์ โดยการนำไป ตรวจสอบกับจุดตรวจสอบที่ได้มีการรังวัดค่าพิกัดด้วยระบบ GNSS ไว้แล้วใน 3.3.1 โดยในการ ตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งนี้ จะดำเนินการตรวจสอบ 3 รูปแบบ ได้แก่ 1) ตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้ เป็นแนวบิน 2) ตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จาก ไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวบินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการ ปรับแก้ และ 3) ตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จาก ไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวบินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการ ปรับแก้ โดยหากได้ผลลัพธ์จากการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งของข้อมูล พอยต์คลาวด์ทั้ง 3 รูปแบบแล้ว จะสามารถนำมาเปรียบเทียบเพื่อให้เห็นถึงความถูกต้องทาง ตำแหน่งในทางดิ่งที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะสื่อถึงคุณภาพของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่แตกต่างกัน ออกไปทั้งก่อนและหลังการปรับแก้

4.9.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวบิน

ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่นำมาตรวจสอบจะเป็นข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสำรวจ ด้วยไลดาร์ที่ผ่านกระบวนการกำหนดพิกัดตำแหน่งบนโลกด้วยวิธีตรง (Direct Georeferencing) มาแล้ว เพื่อให้ทราบถึงคุณภาพของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ ยังไม่ผ่านการปรับแก้ โดยผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในดิ่งของข้อมูล พอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวบินเป็นไปดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนิน

จุดที่	Easting (ม.)	Northing (ม.)	ค่าความสูง (ม.)		
			จุดตรวจสอบ	พอยต์คลาวด์	ค่าต่าง
1	715,888.948	1,606,762.844	-2.792	-2.800	-0.008
2	716,609.176	1,606,862.631	-1.279	-1.315	-0.036
3	717,508.743	1,606,825.385	9.684	9.737	0.053
4	718,357.941	1,606,814.941	10.099	10.027	-0.072
5	719,608.024	1,606,445.419	12.024	12.121	0.097
6	718,125.980	1,606,336.866	9.218	9.316	0.098
7	717,472.919	1,606,308.043	3.650	3.695	0.045
8	716,884.350	1,606,322.962	-0.344	-0.395	-0.051
9	716,466.406	1,605,846.344	1.099	1.084	-0.014
10	717,304.110	1,605,764.438	1.483	1.444	-0.039
11	718,667.162	1,605,848.700	8.152	8.288	0.136
12	718,830.725	1,605,368.566	6.398	6.534	0.136
13	717,485.555	1,605,368.817	2.092	2.212	0.120
14	716,852.345	1,604,995.194	7.481	7.562	0.081
15	717,542.315	1,605,216.009	2.826	2.891	0.065
16	717,770.599	1,604,790.573	3.016	3.066	0.050
17	717,856.850	1,604,595.615	3.844	3.824	-0.020
18	718,354.400	1,604,873.617	5.107	5.247	0.139
19	718,871.639	1,605,185.240	6.640	6.724	0.084
20	719,269.396	1,605,270.311	6.703	6.592	-0.111
ค่าความสูงต่างโดยเฉลี่ย (Average dZ)					0.038
ค่าความสูงต่างที่ต่ำที่สุด (Minimum dZ)					-0.111
ค่าความสูงต่างที่สูงที่สุด (Maximum dZ)					0.139
ขนาดของค่าความสูงต่างโดยเฉลี่ย (Average magnitude)					0.073
ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางตั้งกำลังสอง (RMSE _Z)					0.083
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)					0.076

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งโดยการอ้างอิงกับค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางตั้งกำลังสอง (RMSE_Z) มีค่าเท่ากับ 0.083 และหากคูณเข้ากับค่าแฟกเตอร์ 1.9600 เพื่อให้ได้ค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตามมาตรฐานของ ASPRS จะได้เป็น 0.163 เมตร

4.9.2 ผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้

ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่นำมาตรวจสอบจะเป็นข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสำรวจด้วยไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินมาแล้ว แต่ในการปรับแก้จะไม่มีการนำข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM มาร่วมปรับแก้ด้วย โดยในการปรับแก้เป็นแนวนินให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ในรูปแบบนี้จะเป็นการปรับแก้โดยไม่มีการอ้างอิงกับจุดควบคุมที่ทราบค่าพิกัดบนพื้นโลกเลย เป็นการปรับแก้เป็นแนวนินด้วยข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ด้วยกันเท่านั้น โดยผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในดิ่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้เป็นไปดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้

จุดที่	Easting (ม.)	Northing (ม.)	ค่าความสูง (ม.)		
			จุดตรวจสอบ	พอยต์คลาวด์	ค่าต่าง
1	715,888.948	1,606,762.844	-2.792	-2.802	-0.010
2	716,609.176	1,606,862.631	-1.279	-1.311	-0.032
3	717,508.743	1,606,825.385	9.684	9.751	0.067
4	718,357.941	1,606,814.941	10.099	10.059	-0.040
5	719,608.024	1,606,445.419	12.024	12.130	0.106
6	718,125.980	1,606,336.866	9.218	9.275	0.057
7	717,472.919	1,606,308.043	3.650	3.690	0.040
8	716,884.350	1,606,322.962	-0.344	-0.373	-0.029
9	716,466.406	1,605,846.344	1.099	1.056	-0.042
10	717,304.110	1,605,764.438	1.483	1.490	0.007
11	718,667.162	1,605,848.700	8.152	8.275	0.123
12	718,830.725	1,605,368.566	6.398	6.552	0.154
13	717,485.555	1,605,368.817	2.092	2.223	0.131
14	716,852.345	1,604,995.194	7.481	7.604	0.123
15	717,542.315	1,605,216.009	2.826	2.887	0.061
16	717,770.599	1,604,790.573	3.016	3.145	0.129
17	717,856.850	1,604,595.615	3.844	3.898	0.054
18	718,354.400	1,604,873.617	5.107	5.272	0.165

ตารางที่ 17 (ต่อ)

จุดที่	Easting (ม.)	Northing (ม.)	ค่าความสูง (ม.)		
			จุดตรวจสอบ	พอยต์คลาวด์	ค่าต่าง
19	718,871.639	1,605,185.240	6.640	6.732	0.092
20	719,269.396	1,605,270.311	6.703	6.581	-0.122
ค่าความสูงต่างโดยเฉลี่ย (Average dZ)					0.052
ค่าความสูงต่างที่ต่ำที่สุด (Minimum dZ)					-0.122
ค่าความสูงต่างที่สูงที่สุด (Maximum dZ)					0.165
ขนาดของค่าความสูงต่างโดยเฉลี่ย (Average magnitude)					0.079
ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางดิ่งกำลังสอง (RMSE _Z)					0.092
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)					0.079

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งโดยการอ้างอิงกับค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางดิ่งกำลังสอง (RMSE_Z) มีค่าเท่ากับ 0.092 และหากคูณเข้ากับค่าแฟกเตอร์ 1.9600 เพื่อให้ได้ค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตามมาตรฐานของ ASPRS จะได้เป็น 0.180 เมตร

4.9.3 ผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนอนโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้

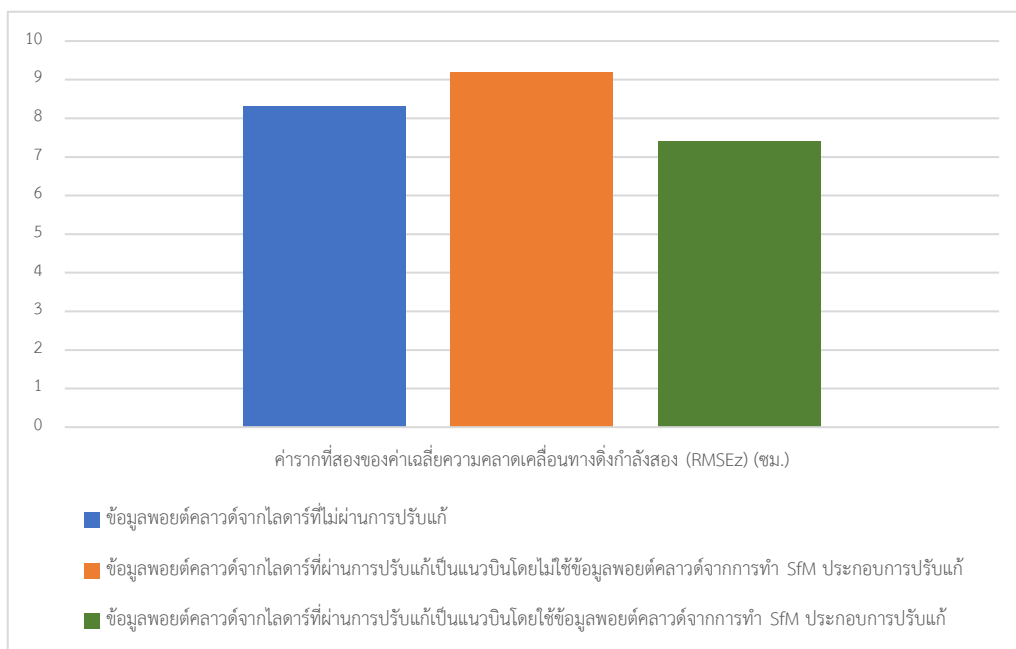
ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่นำมาตรวจสอบจะเป็นข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสำรวจด้วยไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนอนมาแล้ว โดยในการปรับแก้จะมีการนำข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM มาร่วมปรับแก้ด้วย ซึ่งเป็นการปรับแก้เป็นแนวนอนด้วยข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ร่วมกับข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศหลายมุมมองที่มีการโยงยึดค่าพิกัดภาคพื้นดินด้วยจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน โดยผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในดิ่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนอนโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้เป็นไปดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวจินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้

จุดที่	Easting (ม.)	Northing (ม.)	ค่าความสูง (ม.)		
			จุดตรวจสอบ	พอยต์คลาวด์	ค่าต่าง
1	715,888.948	1,606,762.844	-2.792	-2.846	-0.054
2	716,609.176	1,606,862.631	-1.279	1.377	-0.098
3	717,508.743	1,606,825.385	9.684	9.730	0.046
4	718,357.941	1,606,814.941	10.099	9.993	-0.106
5	719,608.024	1,606,445.419	12.024	11.981	-0.043
6	718,125.980	1,606,336.866	9.218	9.325	0.107
7	717,472.919	1,606,308.043	3.650	3.656	0.006
8	716,884.350	1,606,322.962	-0.344	-0.440	-0.096
9	716,466.406	1,605,846.344	1.099	0.974	-0.125
10	717,304.110	1,605,764.438	1.483	1.368	-0.115
11	718,667.162	1,605,848.700	8.152	8.186	0.034
12	718,830.725	1,605,368.566	6.398	6.462	0.064
13	717,485.555	1,605,368.817	2.092	2.068	-0.024
14	716,852.345	1,604,995.194	7.481	7.449	-0.032
15	717,542.315	1,605,216.009	2.826	2.800	-0.026
16	717,770.599	1,604,790.573	3.016	2.966	-0.050
17	717,856.850	1,604,595.615	3.844	2.966	-0.050
18	718,354.400	1,604,873.617	5.107	5.176	0.069
19	718,871.639	1,605,185.240	6.640	6.751	0.111
20	719,269.396	1,605,270.311	6.703	6.647	-0.056
ค่าความสูงต่างโดยเฉลี่ย (Average dZ)					-0.022
ค่าความสูงต่างที่ต่ำที่สุด (Minimum dZ)					-0.125
ค่าความสูงต่างที่สูงที่สุด (Maximum dZ)					0.111
ขนาดของค่าความสูงต่างโดยเฉลี่ย (Average magnitude)					0.066
ค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางตั้งกำลังสอง (RMSE _Z)					0.074
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)					0.073

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งโดยการอ้างอิงกับค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนทางตั้งกำลังสอง (RMSE_Z) มีค่าเท่ากับ 0.074

และหากคูณเข้ากับค่าแฟกเตอร์ 1.9600 เพื่อให้ได้ค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตามมาตรฐานของ ASPRS จะได้เป็น 0.145 เมตร



รูปที่ 48 แผนภูมิแท่งเปรียบเทียบค่า RMSE_z ของข้อมูลพอยต์คลาวด์ในแต่ละรูปแบบ

4.9.4 ผลการทดสอบค่าทางสถิติของผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้ง

เพื่อเป็นการทดสอบความน่าเชื่อถือของผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้ง จะใช้การทดสอบด้วยค่าทางสถิติได้แก่ การทดสอบแบบ ANOVA (Analysis of Variance) เป็นการทดสอบความแปรปรวนของค่าต่างทางความสูงที่ได้จากการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งของทั้ง 3 ผลการตรวจสอบ และจากนั้นจะทดสอบหาความแตกต่างเป็นรายคู่ด้วยวิธีการบอนเฟอร์โรนี แบบ t-Test ที่ตัวอย่างเป็นอิสระต่อกัน (Bonferroni correction independent t-Test) และการทดสอบค่าทางสถิติอีกรูปแบบจะเป็นการทดสอบแบบ t-Test ของค่าเฉลี่ยคู่ตัวอย่างที่มีความสัมพันธ์กัน (t-Test : Paired Two Sample for Means) โดยได้ผลลัพธ์ดังนี้

การทดสอบแบบ ANOVA เพื่อหาความแปรปรวนของค่าต่างทางความสูงระหว่างจุดตรวจสอบและข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งของทั้ง 3 ผลการตรวจสอบ โดยมีการกำหนดค่านัยสำคัญที่ 0.05 ได้ผลดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ผลการทดสอบแบบ ANOVA เพื่อทดสอบความแปรปรวนของค่าต่างทางความสูงระหว่างจุดตรวจสอบและข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งของทั้ง 3 ผลการตรวจสอบ

Source of Variation	SS	Df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	0.063	2	0.031	5.509	0.006	3.159
Within Groups	0.325	57	0.006			
Total	0.388	59				

จากตารางจะพบว่า ค่า P-Value มีค่า 0.006 ซึ่งมีค่าที่ต่ำกว่าค่านัยสำคัญที่ได้กำหนดไว้ในตอนแรกคือ 0.05 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าต่างทางความสูงระหว่างจุดตรวจสอบและข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งของทั้ง 3 ผลการตรวจสอบมีความแปรปรวนระหว่างกันอยู่ ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบหาความแตกต่างระหว่างเป็นรายคู่ด้วยวิธีบอนเฟอร์โรนี แบบ t-Test ที่ตัวอย่างมีอิสระต่อกัน ซึ่งเป็นการตรวจสอบเทียบเป็นคู่ของผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางตั้งทั้ง 3 ผลการตรวจสอบ ได้แก่ คู่ที่ 1 ระหว่างผลของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนอนและข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนอนโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จาก SfM ประกอบการปรับแก้ คู่ที่ 2 ระหว่างผลของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนอนและข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนอนโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ และคู่สุดท้าย คู่ที่ 3 ระหว่างผลของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนอนโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จาก SfM ประกอบการปรับแก้และผลของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนอนโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ โดยมีการกำหนดให้ค่านัยสำคัญของการทดสอบมีค่าเป็น 0.017 (ค่านัยสำคัญเดิมหารด้วยจำนวนคู่การทดสอบ : $\frac{0.05}{3}$) โดยผลการทดสอบได้ผลดังตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ผลการทดสอบหาความแตกต่างรายคู่ของผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่ง ในทางตั้งของทั้ง 3 ผลการตรวจสอบด้วยวิธีบนเฟอร์โรนี แบบ t-Test ที่ตัวอย่างมีอิสระต่อกัน

	No adjust	Adjusted no SfM	No adjust	Adjusted with SfM	Adjusted no SfM	Adjusted with SfM
Mean	0.040	0.052	0.040	-0.022	0.052	-0.022
Variance	0.006	0.006	0.006	0.005	0.006	0.005
Observation	20	20	20	20	20	20
Hypothesized Mean	0		0		0	
df	38		38		38	
t Stat	-0.496		2.645		3.083	
P (T<=t) one-tail	0.311		0.006		0.002	
T Critical one-tail	2.199		2.199		2.199	
P (T<=t) two-tail	0.623		0.012		0.004	
T Critical two-tail	2.496		2.496		2.496	

จากผลการทดสอบหาความแตกต่างรายคู่ด้วยวิธีบนเฟอร์โรนี แบบ t-Test ที่ตัวอย่างมีอิสระต่อกัน พบว่า ค่า P two-tail ของคู่ที่ 1 ระหว่างผลของข้อมูลพอยต์ คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวบินและข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวบินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ นั้นมีค่าเป็น 0.623 ซึ่งมีความมากกว่าค่านัยสำคัญคือ 0.017 ซึ่งแสดงว่าผลการทดสอบของข้อมูลจากผลการตรวจสอบคู่นี้ไม่มีความแตกต่างในระดับนัยสำคัญ แต่เมื่อสังเกตที่ค่า P two-tail ของคู่ที่ 2 ระหว่างผลของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวบินและข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวบินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ มีค่าเป็น 0.012 และคู่ที่ 3 ระหว่างผลของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวบินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จาก SfM ประกอบการปรับแก้และผลของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวบินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ มีค่าเป็น 0.004 ซึ่งทั้ง 2 คู่นี้มีค่าน้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ แสดงว่าผลการทดสอบของข้อมูลทั้ง 2 คู่นี้ มีความแตกต่างกันในระดับนัยสำคัญ

ต่อมาเป็นการทดสอบแบบ t-Test ของค่าเฉลี่ยของคู่ตัวอย่างที่มีความสัมพันธ์กัน โดยจะเป็นการทดสอบค่าทางสถิติของผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่ง ในทางตั้งเป็นคู่ที่มีความสัมพันธ์สืบเนื่องต่อกัน กล่าวคือ คู่ที่ 1 เป็นความสัมพันธ์ของค่า

ความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งที่เปลี่ยนแปลงไปของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินไปสู่ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ และคู่ที่ 2 เป็นความสัมพันธ์ของค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งที่เปลี่ยนแปลงไปของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินไปสู่ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ ได้ผลดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 ผลการทดสอบแบบ t-Test ของค่าเฉลี่ยคู่ตัวอย่างที่มีความสัมพันธ์สืบเนื่องต่อกันของผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ถูกปรับแก้เป็นแนวนินไปสู่ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินของทั้ง 2 รูปแบบ

	No adjust (Dz ₁)	Adjusted no SfM (Dz ₂)	No adjust (Dz ₁)	Adjusted with SfM (Dz ₃)
Mean	0.040	0.052	0.040	-0.022
Variance	0.006	0.006	0.006	0.005
Observation	20	20	20	20
Pearson Correlation	0.938		0.742	
Hypothesized Mean Difference	0		0	
df	19		19	
t Stat	-1.974		5.199	
P (T<=t) one-tail	0.032		0.000	
T Critical one-tail	1.729		1.729	
P (T<=t) two-tail	0.063		0.000	
T Critical two-tail	2.093		2.093	

โดยในการทดสอบ t-Test ของค่าเฉลี่ยคู่ตัวอย่างที่มีความสัมพันธ์สืบเนื่องต่อกัน มีการตั้งสมมติฐานการทดสอบไว้ดังนี้

$$H_0: Dz_1 \leq Dz_2 \text{ หรือ } \Delta Dz \leq 0$$

$$H_1: Dz_1 > Dz_2 \text{ หรือ } \Delta Dz > 0$$

จากสมมติฐานที่ 1 (H_0) มีความหมายว่า ผลต่างของค่าความสูงระหว่างจุดตรวจสอบเทียบกับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินจะน้อยกว่าหรือเท่ากับผลต่างของค่าความสูงระหว่างจุดตรวจสอบเทียบกับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินแล้ว

และสมมติฐานที่ 2 (H_1) มีความหมายว่า ผลต่างของค่าความสูงระหว่างจุดตรวจสอบเทียบกับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินจะมีค่ามากกว่าผลต่างของค่าความสูงระหว่างจุดตรวจสอบเทียบกับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินแล้ว

จากผลการทดสอบในตารางที่ 21 พบว่า ค่า P two-tail ของคู่มือที่ 1 ระหว่างความสัมพันธ์ของค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งที่เปลี่ยนแปลงไปของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินไปสู่ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ มีค่าอยู่ที่ 0.063 ซึ่งสูงกว่าค่าระดับนัยสำคัญคือ 0.05 แสดงว่าการทดสอบในคู่มือที่ 1 นี้ ยอมรับสมมติฐานที่ 1 นั่นหมายความว่า ผลต่างของค่าความสูงระหว่างจุดตรวจสอบเทียบกับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ก่อนการปรับแก้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับหลังการปรับแก้ แต่ในค่า P two-tail ของคู่มือที่ 2 ระหว่างความสัมพันธ์ของค่าความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งที่เปลี่ยนแปลงไปของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินไปสู่ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ มีค่าอยู่ที่ 0.000 ซึ่งต่ำกว่าค่าระดับนัยสำคัญคือ 0.05 แสดงว่าผลการทดสอบในคู่มือที่ 2 นี้ ปฏิเสธสมมติฐานที่ 1 และยอมรับสมมติฐานที่ 2 นั่นหมายความว่า ผลต่างของค่าความสูงระหว่างจุดตรวจสอบเทียบกับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ก่อนการปรับแก้มีค่ามากกว่าหลังการปรับแก้

จากการทดสอบค่าทางสถิติด้วย 2 วิธี แสดงให้เห็นว่าการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวนินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ส่งผลให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์มีความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งที่ดียิ่งขึ้นได้ และยังเป็นวิธีที่การที่มีความน่าเชื่อถือจากผลลัพธ์ที่ตรวจสอบได้

บทที่ 5

อภิปรายผล สรุปผลการศึกษาวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการอภิปรายผลการศึกษาวิจัย สรุปผลการศึกษาในหัวข้อต่าง ๆ รวมไปถึงข้อจำกัด และข้อเสนอแนะในการนำผลการศึกษาหรือเทคนิควิธีการในงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้งาน หรือใช้ประโยชน์การศึกษางานวิจัยในอนาคตต่อไป

5.1 อภิปรายผลการศึกษา

จากผลการวิจัยที่ได้นำเสนอไปในบทที่ 3 และ 4 นั้น จะมีประเด็นที่สามารถนำมาอภิปรายได้ดังนี้

ด้วยที่มาและปัญหาเริ่มต้นจากการตรวจพบการเสื่อมกันของค่าความสูงของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ของกรมแผนที่ทหารที่พบได้บริเวณส่วนซ้อนระหว่างแนวบิน แสดงให้เห็นถึงความไม่ถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งและการขาดความน่าเชื่อถือของข้อมูลพอยต์คลาวด์ อีกทั้งการไม่สามารถสืบหาต้นตอของปัญหาซึ่งเป็นที่มาความคลาดเคลื่อนได้ ทำให้จำเป็นต้องมีการแก้ปัญหาที่ปลายเหตุเพื่อให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์มีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้น จึงทำให้เกิดการศึกษาวิจัยที่ต้องการจะปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวบิน เพื่อให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์มีความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งเพิ่มมากยิ่งขึ้น กอปรกับการทำให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ซ้อนกันระหว่างแนวบินไม่เกิดการเสื่อมกัน ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่สำรวจมาได้ ในการจะปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ของกรมแผนที่ทหารนั้นมีข้อจำกัดต่างๆ ที่พบเจอ อาทิเช่น ความไม่หนาแน่นของข้อมูลพอยต์คลาวด์ การไม่ได้จัดทำจุดควบคุมภาพถ่ายและไลดาร์แบบเป่าลวงหน้า เป็นต้น ทำให้การปรับแก้จึงจำเป็นต้องประยุกต์ใช้ข้อมูลจากสิ่งที่มีอยู่นั้นคือ ภาพถ่ายทางอากาศ ซึ่งสามารถนำมาจัดทำเป็นข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ได้ และมีการเพิ่มความถูกต้องทางตำแหน่งให้ด้วยการจัดทำจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินแบบเป่าภายหลังการบิน โดยใช้เป่าธรรมชาติ คือจุดที่มองเห็นเด่นชัดในภาพถ่ายและเข้าถึงได้ในภูมิประเทศ แต่ข้อจำกัดในเรื่องระยะเวลาที่บินถ่ายภาพกับการจัดทำจุดควบคุมที่มีช่วงห่างกันถึง 3 ปี ยังเป็นอีกส่วนหนึ่งที่ส่งผลต่อความถูกต้องทางตำแหน่งของภาพถ่ายทางอากาศในการประมวลผลถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศด้วยกระบวนการทางโฟโตแกรมเมตรีแบบคอมพิวเตอร์วิชัน แต่สุดท้ายด้วยผลสำเร็จของการศึกษาวิจัยเป็นการยืนยันได้ว่า การนำภาพถ่ายทางอากาศมาร่วมใช้ในการ

ปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวมินนั้นช่วยให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์มีความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งที่ดียิ่งขึ้นได้

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้เป็นการประยุกต์ใช้ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศมาร่วมในการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ให้มีความถูกต้องทางตำแหน่งที่ดียิ่งขึ้น โดยในงานวิจัยของ Glira et al. (2019) และ Haala et al. (2022) ได้มีการดำเนินการศึกษาวิจัยในลักษณะเดียวกัน แต่จะแตกต่างกันตรงที่ทั้งสองงานวิจัยได้จัดทำเป็นเป่าล่วงหน้าก่อนทำการบิน โดยมีการจัดทำทั้งเป่าสำหรับจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน และเป่าไลดาร์ ซึ่งทำให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ทั้งที่ได้จากไลดาร์และการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศมีความถูกต้องที่ดีมาก ก่อนจะมีการนำมาประมวลผลผสมผสานร่วมกัน โดยเฉพาะงานวิจัยของ Haala et al. (2022) ที่มีการปรับเปลี่ยนกล้องถ่ายภาพให้มีความละเอียดที่สูง โดยบินที่ความสูง 53 เมตร แต่ได้ GSD ที่ 4 มิลลิเมตร ซึ่งทำให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่มีการประมวลผลผสมผสานร่วมกับภาพถ่ายทางอากาศสามารถใช้ในการตรวจสอบค่าระดับที่เปลี่ยนแปลงไปในพื้นที่ได้เลย โดยที่มี RMSE ในทางราบ (X, Y) ที่ระดับ 0.58 เซนติเมตร และในทางดิ่ง (Z) ที่ระดับ 0.61 เซนติเมตร โดยหากมีการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Haala et al. (2022) กับงานวิจัยเล่มนี้มีความแตกต่างกันหลายจุดทั้งการจัดทำเป่าของจุดควบคุม เป็นการจัดทำเป่าภายหลังการบินที่อาศัยจุดเด่นชัดในภาพถ่าย ซึ่งมีระดับความถูกต้องทางตำแหน่งที่ไม่เทียบเท่ากับเป่าล่วงหน้า อีกทั้งความละเอียดของภาพถ่ายเชิงพื้นที่ (GSD) ความสูงบิน ตลอดจนปริมาณส่วนซ้อนและส่วนเกยของภาพถ่าย รวมถึงความละเอียดของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่สำรวจเพื่อใช้สำหรับจัดทำแผนที่มาตราส่วนขนาดกลาง ทำให้มีความละเอียดถูกต้องไม่สูงมากนัก แต่ด้วยวิธีการดำเนินงานวิจัยเดียวกัน คือการประมวลผลผสมผสานร่วมกันระหว่างข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ สามารถช่วยให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์มีความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งที่ดียิ่งขึ้นได้ โดยยืนยันได้จากค่า $RMSE_z$ ของข้อมูลพอยต์คลาวด์ก่อนการปรับแก้ที่อยู่ 8.3 เซนติเมตร หลังผ่านการปรับแก้โดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ทำให้ลดลงมาอยู่ที่ 7.4 เซนติเมตร

ในความต้องการที่จะให้ได้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสำรวจด้วยไลดาร์มีคุณภาพที่ดีมากยิ่งขึ้น จำเป็นจะต้องมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบแผนการสำรวจ เช่น การจัดทำจุดควบคุมภายหลังการบินที่ไม่ควรทิ้งระยะเวลาให้นานห่างจากการบินสำรวจที่นานเกินไป หรือควรเปลี่ยนเป็นการจัดทำเป่าล่วงหน้าสำหรับไลดาร์และภาพถ่ายทางอากาศ การเพิ่มปริมาณส่วน

ซ้อนและส่วนเกยทั้งของไลดาร์และภาพถ่ายที่จะช่วยให้ความละเอียดของข้อมูลพอยต์คลาวด์ทั้งจากไลดาร์และการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศมีเพิ่มมากยิ่งขึ้น เป็นต้น เหตุปัจจัยเหล่านี้จะเป็นตัวช่วยที่จะทำให้คุณภาพของข้อมูลพอยต์คลาวด์ดียิ่งขึ้นได้ โดยจะอภิปรายชี้แจงความเกี่ยวข้องของเหตุต่างๆ ดังนี้

5.1.1 อภิปรายผลการประมวลผลถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ

จากการประมวลผลชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศตามแนวปฏิบัติการประมวลผลควบคุมคุณภาพ 2 ขั้นตอน (QC-1 & QC-2) โดยการแบ่งจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินออกเป็น 2 ชุด เพื่อใช้เป็นจุดควบคุม (GCP) และจุดตรวจสอบ (CP) โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลใน 4.1.1 พบว่า จุดควบคุมภาคพื้นดินชุดที่ 2 ที่ใช้ทำหน้าที่เป็นจุดตรวจสอบมีค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งกำลังสอง (RMSE) ในทางราบ แกน X ที่ 8.1 เซนติเมตร และแกน Y ที่ 9.1 เซนติเมตร และในทางตั้ง แกน Z ที่ 20.7 เซนติเมตร และผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลใน 4.1.2 พบว่าจุดควบคุมภาคพื้นดินชุดที่ 1 ที่ใช้ทำหน้าที่เป็นจุดตรวจสอบมีค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งกำลังสอง ในทางราบ แกน X ที่ 6.5 เซนติเมตร และแกน Y ที่ 10.8 เซนติเมตร และในทางตั้ง แกน Z ที่ 13.5 เซนติเมตร จะพบว่าการประมวลผลตามแนวปฏิบัติ QC-1 & QC-2 ให้ผล RMSE ในทางราบที่ใกล้เคียงกัน ในทางแกน X ต่างกัน 1.6 เซนติเมตร และทางแกน Y ต่างกัน 1.7 เซนติเมตร แต่ทางตั้งมีความแตกต่างกันอยู่ถึง 7.2 เซนติเมตร ซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการที่บล็อคของชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศนั้นมีขนาดใหญ่ และมีขนาดของส่วนซ้อนและส่วนเกยที่มีเพียงร้อยละ 60 / 30 รวมทั้งลักษณะภูมิประเทศในพื้นที่ศึกษามีการผสมผสานระหว่างพื้นราบและภูเขา นอกจากนี้ยังอาจเกิดได้จากขั้นตอนการทำจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินแบบเป่าภายหลังการบิน (Post-marking GCP) ที่มีระยะเวลาห่างกันประมาณ 3 ปี (บินสำรวจ เมื่อ 7 ต.ค.62 และจัดทำ GCP เมื่อ 6-7 ก.ค.65) จึงมีการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิประเทศ เช่น การทำถนนและการตีเส้นถนนใหม่ เป็นต้น ดังนั้นด้วยเหตุปัจจัยต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ย่อมจะส่งผลทำให้การประมวลผลถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศของชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น และส่งผลถึงความถูกต้องทางตำแหน่งของค่าพิกัดภาคพื้นดินของจุดสนใจในภาพถ่ายอีกด้วย แต่เมื่อนำจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน 25 จุด มาประมวลผลเป็นจุดควบคุมร่วมกันทั้งหมดใน

4.1.3 ได้ผล RMSE ในทางแกน X ที่ 2.6 เซนติเมตร ทางแกน Y ที่ 4.1 เซนติเมตร และในทางแกน Z ที่ 6.1 เซนติเมตร โดยหากตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนของจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินแต่ละจุดแล้วพบว่าทุกจุดไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิน 3 เท่าของค่า RMSE ในทุกแกนอ้างอิงเลย ดังนั้นจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินที่ใช้ในการประมวลผลถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศให้กับชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศนั้นมีคุณภาพที่ดีและส่งผลให้ชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศมีค่าพิกัดภาคพื้นดินที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

5.1.2 อภิปรายผลการสร้างข้อมูลพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่น

ผลลัพธ์จากการสร้างข้อมูลพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่นด้วยการรังวัดภาพถ่ายทางอากาศหลายมุมมองด้วยการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ในเทคนิค SfM ทำให้ได้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จำนวน 62,318,337 จุด และมีความแน่น 3.19 จุดต่อลูกบาศก์เมตร จะพบว่าความหนาแน่นของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้นั้นมีจำนวนที่ไม่น้อย อีกทั้งในรูปที่ 34 ยังแสดงให้เห็นถึงความไม่ต่อเนื่องและขาดแหว่งไปของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการประมวลผล อาจเกิดจากการที่คอมพิวเตอร์มีสมรรถนะที่ไม่สูงเพียงพอ ทำให้ประสิทธิภาพในการประมวลผลลดน้อยลงไป และนอกจากนี้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ยังมีความไม่ถูกต้องในทางตำแหน่งซึ่งเห็นได้จากการขัดกับความเป็นจริงของสภาพภูมิประเทศ เช่น ข้อมูลพอยต์คลาวด์บริเวณพื้นผิวถนนที่ควรมีการเรียงตัวที่ราบเรียบ แต่กลับมีการเรียงตัวกันอย่างขรุขระ หรือบริเวณหลังคาของอาคารที่มีลักษณะการเรียงตัวที่ผิดแปลกไปจากโครงสร้างหลังคาของอาคาร เป็นต้น ถึงแม้คอมพิวเตอร์วิชั่นจะถูกพัฒนาและมีการคิดค้นอัลกอริทึมสำหรับการจับคู่จุดภาพที่ให้ ความถูกต้องมากยิ่งขึ้น แต่ก็ยังแสดงให้เห็นว่าหากจำนวนภาพถ่าย และขนาดของส่วนซ้อนและส่วนเกยที่น้อยจนเกินไป อีกทั้งการที่สีและความสว่างของจุดภาพในพื้นที่บริเวณเดียวกันมีความใกล้เคียงกันมาก ก็จะส่งผลไปยังกระบวนการประมวลผลของคอมพิวเตอร์ที่เกิดความคลาดเคลื่อนและผิดพลาดขึ้น และถึงแม้ว่าจำนวนจุดพอยต์คลาวด์ของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM จะมีมากกว่าจำนวนข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ แต่คุณภาพยังไม่ดีพอที่จะมาทดแทนหรือนำมาใช้เพิ่มความหนาแน่นให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ได้ ซึ่งเมื่อหากเทียบกับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM โดยใช้กล้อง Zenmuse P1 (Bannakulpihat et al., 2023) ที่ถ่ายให้มีส่วนซ้อน

และส่วนเกย ร้อยละ 80 / 60 ตามลำดับ และมี GSD ที่ 2 เซนติเมตร บินที่ความสูง 150 เมตร จะทำให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์มีความหนาแน่นของจุดสูงถึง 100 – 500 จุดต่อตารางเมตร อีกทั้งการเรียงตัวของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM นี้ที่มีความแม่นยำใกล้เคียงกับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์อีกด้วย (Srirattanapaisam et al., 2022)

5.1.3 การอภิปรายผลการรังวัดข้อมูลเส้นจากข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM

จากการรังวัดข้อมูลเส้นจากข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM จำนวน 1,068 เส้นนั้น เป็นเส้นที่เกิดจากจุดเริ่มต้นและจุดปลายจำนวน 2,136 จุด ซึ่งเป็นจุดที่มีคุณลักษณะเด่นชัดในภาพถ่าย รวมถึงเป็นจุดที่อยู่บนพื้นผิวราบเรียบที่สามารถตีความได้จากภาพถ่ายทางอากาศ โดยเหตุผลสำหรับการเลือกจุดต้นและจุดปลายด้วย 2 คุณสมบัตินี้ได้ชี้แจงไว้ในข้อ 4.3 แล้ว แต่ในการอภิปรายจะขอกล่าวถึงข้อมูลพอยต์คลาวด์ในบริเวณอื่น ๆ ที่ไม่ถูกนำมาใช้สร้างเป็นข้อมูลเส้น เนื่องมาจากการที่ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ได้จากการทำ SfM มีลักษณะการเรียงตัวที่ไม่สอดคล้องกับลักษณะพื้นผิวของภูมิประเทศ กล่าวคือแม้ว่าพื้นที่บริเวณนั้นจะเป็นพื้นราบ แต่ข้อมูลพอยต์คลาวด์กลับมีการเรียงตัวที่ไม่ราบเรียบ เช่น พื้นถนน และหลังคาของอาคาร เป็นต้น ซึ่งข้อมูลเส้นที่สร้างขึ้นจากข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM เหล่านี้จะถูกนำไปใช้เป็นส่วนนำสายตาในการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ ดังนั้นหากข้อมูลเส้นที่จะสร้างขึ้นเกิดมาจากจุดพอยต์คลาวด์ที่ไม่ถูกต้อง ย่อมจะส่งผลกระทบต่อผลการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ จึงจำเป็นต้องใช้คุณสมบัติ 2 ข้อ ของการเลือกจุดต้นและจุดปลายในการสร้างข้อมูลเส้นตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นเพื่อให้ได้ข้อมูลเส้นที่เกิดจากจุดพอยต์คลาวด์ที่มีคุณภาพที่ดีกว่า

5.1.4 การอภิปรายผลการจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์

สำหรับการจำแนกประเภทของข้อมูลพอยต์คลาวด์ทั้งจากไลดาร์ และจากการทำ SfM มีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยสังเกตได้จากผลลัพธ์จากการจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ ที่ได้ข้อมูลจุดบนพื้นดินถึง 9,167,010 จุด จุดบนอาคาร 1,865,050 จุด จากทั้งหมด 34,445,027 จุด เปรียบเทียบกับผลลัพธ์การจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ที่ได้ข้อมูลจุดบนพื้นดินเพียง 765,269 จุด และจุดบนอาคาร 88,006 จุด จากทั้งหมด 62,318,337 จุด โดยจะพบว่า

การจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ทำได้ดีกว่าการจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM เนื่องจากข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์มีข้อมูลจำเพาะอื่น ๆ ที่จะเป็นตัวช่วยในการจำแนก ไม่ว่าจะเป็น ค่าความเข้มข้นในการสะท้อน (Intensity) ลำดับการสะท้อนของเลขเซอร์ (Return number) ซึ่งจะเป็นตัวช่วยในการจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์ได้ถูกต้องและง่ายยิ่งขึ้น นอกจากนี้ การที่ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์มีการเก็บค่าสี RGB จากจุดภาพในภาพถ่ายทางอากาศ อีกทั้งมีการเรียงตัวที่สอดคล้องกับลักษณะโครงสร้างของวัตถุต่าง ๆ เช่น พื้นราบเรียบ พื้นถนน หลังคาของอาคาร ทำให้การจำแนกประเภทด้วยการกำหนดเอง (Manual) สามารถทำได้โดยง่าย และเมื่อทำการจำแนกโดยประกอบการใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากมุมมองด้านบนและมุมมองภาพตัดขวางจะยิ่งทำให้การจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นอีกด้วย และเมื่อเปรียบเทียบกับ การจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ที่ไม่มีข้อมูลจำเพาะอื่น ๆ นอกจากเพียงค่าพิกัดสามมิติและค่าสี RGB ที่ฝังอยู่ในพอยต์คลาวด์แต่ละจุด ดังนั้นการจำแนกประเภทให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM จึงไม่สามารถทำได้โดยอัตโนมัติ ประกอบกับการที่ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM มีลักษณะการเรียงตัวที่ไม่สอดคล้องไปกับโครงสร้างของวัตถุ ไม่ว่าจะเป็นพื้นราบ พื้นถนน และหลังคาของอาคาร ทำให้การจำแนกประเภทโดยการกำหนดเองทำได้ยาก แม้จะใช้การมองด้วยมุมมองภาพด้านบนและมุมมองภาพตัดขวางก็ตาม ทำให้จำนวนจุดบนพื้นดิน และจุดบนอาคารของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM มีจำนวนที่น้อย ดังนั้นแม้ว่าจำนวนข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM จะมีจำนวนมากเพียงใด ก็ไม่มีผลต่อการนำไปใช้สำหรับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์

5.1.5 การเปรียบเทียบผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์

จากผลการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ทั้ง 3 รูปแบบ ในข้อ 4.9 โดยจะพบว่าค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนในทางดิ่งกำลังสอง (RMSE_Z) ของ 1) ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ได้ผ่านการปรับแก้เป็นแนวบิน มีค่าเป็น 8.3 เซนติเมตร และจะมีค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตามมาตรฐานของ ASPRS ที่ 16.3 เซนติเมตร 2) ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่

ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ มีค่าเป็น 9.2 เซนติเมตร และจะมีค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตามมาตรฐานของ ASPRS ที่ 18.0 เซนติเมตร และ 3) ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ มีค่าเป็น 7.4 เซนติเมตร และจะมีค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตามมาตรฐานของ ASPRS ที่ 14.5 เซนติเมตร ซึ่งจะสังเกตได้ว่าการปรับแก้เป็นแนวนินให้กับข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์โดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM มาประกอบการปรับแก้ นั้นมีความถูกต้องทางตำแหน่งที่แย่งกว่าข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนิน เนื่องมาจากการปรับแก้ในรูปแบบที่ 2 ไม่มีการใช้จุดควบคุมที่มีการโยงยึดกับค่าพิกัดภาคพื้นดินที่เป็นจุดทราบค่า ทำให้การปรับแก้เป็นการเคลื่อนค่าความคลาดเคลื่อนให้กระจายไปยังจุดอื่น ๆ ส่งผลให้ค่า $RMSE_z$ เพิ่มขึ้นนั่นเอง แต่จะแตกต่างกับการปรับแก้ในรูปแบบที่ 3 เนื่องจากมีการใช้เส้นกำกับที่สร้างจากข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ที่มีการประมวลผลถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศร่วมกับจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินซึ่งเป็นจุดที่มีการรังวัดในสนามด้วยวิธีการที่ให้ความถูกต้องทางตำแหน่งที่สูง ทำให้ผลของค่า $RMSE_z$ ของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ มีค่าลดลง และส่งผลให้มีความถูกต้องทางตำแหน่งมากกว่าข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินและข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้

5.2 สรุปผลการศึกษาวิจัย

จากการอภิปรายผลการศึกษาวิจัยข้างต้นในการศึกษารวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ เพื่อให้ได้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่มีความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งที่ดียิ่งขึ้น โดยการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวนินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้

สามารถสรุปได้ว่าการที่จะทำให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสำรวจด้วยไลดาร์ทางอากาศมีความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งมากยิ่งขึ้นสามารถทำได้โดยใช้การปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวนินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ โดยข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM จะได้มาจากกระบวนการทางโฟโตแกรมเมตรีด้วยการ

ประมวลผลถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศของบล็อกภาพถ่ายทางอากาศ ที่มีการใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินจำนวน 25 จุด กระจายอยู่ทั่วทั้งพื้นที่ศึกษา โดยจุดควบคุมนี้เป็นการจัดทำขึ้นภายหลังจากการบิน เนื่องมาจากข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์และชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศได้ทำการบินสำรวจไว้แล้วตั้งแต่วันที่ 7 ตุลาคม พ.ศ. 2562 ในการจัดทำเข้าภายหลังจากการบินจะต้องใช้จุดที่มีลักษณะเด่นชัดในภาพถ่ายและเข้าถึงได้ในภูมิประเทศ จากการประมวลผลถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศของบล็อกภาพถ่ายทางอากาศโดยใช้จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินทั้งหมดมีค่า RMSE ที่แสดงถึงความถูกต้องทางตำแหน่งของจุดควบคุม ได้แก่ ค่าทางแกน X ที่ 2.6 เซนติเมตร ค่าทางแกน Y ที่ 4.1 เซนติเมตร และค่าทางแกน Z ที่ 6.1 เซนติเมตร ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องทางตำแหน่งของค่าพิกัดภาคพื้นดินของภาพถ่าย ซึ่งจะส่งผลต่อจุดผ่านและจุดโยงยึดที่จะมีค่าพิกัดภาคพื้นดินที่มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ เพื่อนำไปใช้ในการสร้างพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่นด้วยการรังวัดภาพถ่ายทางอากาศหลายมุมมองโดยการมองเห็นของคอมพิวเตอร์ด้วยเทคนิค SfM และเมื่อสร้างข้อมูลพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่นออกมาแล้ว จะนำไปสร้างข้อมูลเส้นเพื่อใช้เป็นเส้นนำสายตาในการกำหนดเส้นกำกับกับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ โดยข้อมูลเส้นที่สร้างขึ้นจะต้องกำหนดจุดเริ่มต้นและจุดปลายด้วยพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ที่มีลักษณะเด่นชัดในภาพถ่าย เช่น เส้นถนน และแผงโซลาร์เซลล์บนหลังคาของอาคาร เป็นต้น นอกจากการเลือกจุดเด่นชัดในภาพถ่ายแล้วยังเลือกจุดที่อยู่บนพื้นผิวที่ราบเรียบที่แปลความได้จากภาพถ่าย เช่น ลานจอดรถบรรทุกทุกพื้นคอนกรีต ซึ่งจะมีสีของพื้นที่ใกล้เคียงกันและไม่มีสิ่งปลูกสร้างมาบดบัง โดยการใช้จุดเด่นชัดหรือจุดบนพื้นผิวราบเรียบเหล่านี้จะช่วยให้การจับคู่จุดภาพในการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศหลายมุมมองนั้นจะทำให้ได้ค่าพิกัดภาคพื้นดินที่มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น และเมื่อสร้างข้อมูลเส้นได้แล้วจะนำไปใช้ในการสร้างเส้นกำกับกับการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวนอนโดยการกำหนดด้วยตนเอง การสร้างเส้นกำกับด้วยตนเองนี้จะทำให้สามารถสร้างเส้นกำกับตามข้อมูลเส้นที่ใช้เป็นเส้นนำสายตาได้ โดยเส้นกำกับที่สร้างจะต้องเกิดจากข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่มีการซ้อนกันอย่างน้อย 2 ชุดข้อมูล กล่าวคือ บริเวณส่วนซ้อนระหว่างแนวนอนของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ หรือหากนำข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM มาประกอบการปรับแก้ก็จะสามารถสร้างได้ทั่วทั้งขอบเขตพื้นที่ศึกษาเนื่องจากเกิดการซ้อนทับกันทั่วทั้งบล็อก แต่ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่จะนำมาปรับแก้จะต้องผ่านกระบวนการของการจำแนกประเภทก่อน โดยการจำแนกเป็นจุดบนพื้นดินและจุดบนอาคาร จึงจะสามารถนำไป

ปรับแก้ได้ โดยในการสร้างเส้นกำกับกับการปรับแก้จะแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ตามแนวทางการศึกษาวิจัย กล่าวคือ การปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวนินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ และการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์เป็นแนวนินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ โดยในรูปแบบแรกจะสามารถสร้างเส้นกำกับกับการปรับแก้ได้ทั้งหมด 342 เส้น และในรูปแบบที่สองจะสร้างได้ 456 เส้น แต่ในการสร้างเส้นกำกับใน 2 รูปแบบจะมีความแตกต่างกันอยู่ตรงที่ในรูปแบบแรกจะสามารถสร้างเส้นกำกับที่อยู่บนหลังคาของอาคารได้มากกว่าเนื่องจากการที่ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์มีการเรียงตัวเป็นไปตามโครงสร้างหลังคาของอาคาร แต่ในรูปแบบที่สองจะสร้างเส้นกำกับบนหลังคาได้น้อย เนื่องจากข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM มีลักษณะการเรียงตัวของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ไม่เป็นไปตามโครงสร้างหลังคาของอาคาร เมื่อสร้างเส้นกำกับเสร็จแล้วจะเป็นการประมวลผลเพื่อหาความผันผวนของเส้นกำกับที่มีการคำนวณเฉพาะค่าทางดิ่งเท่านั้น เนื่องมาจากความหนาแน่นที่ไม่เพียงพอของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ส่งผลให้การสร้างเส้นกำกับเพื่อการปรับแก้ค่าทางราบรวมไปถึงค่าการวางตัวของเครื่องบินนั้นเป็นไปได้ยาก หลังจากการประมวลผลเพื่อคำนวณหาความผันผวนของเส้นกำกับได้แล้ว จะนำค่าดังกล่าวไปปรับแก้เส้นกำกับและข้อมูลพอยต์คลาวด์ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้จะทำให้เส้นกำกับและข้อมูลพอยต์คลาวด์ต่างแนวนินมีการขยับเข้าหากัน ส่งผลให้รอยเหลี่ยมของข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่พบได้ในส่วนซอระหว่างแนวนินนั้นลดลง และเมื่อนำข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ไปตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งแล้วพบว่า ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ไม่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนิน มีค่า RMSEZ ที่ 8.3 เซนติเมตร และมีค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตามมาตรฐานของ ASPRS ที่ 16.3 เซนติเมตร ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินโดยไม่ใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ มีค่าเป็น 9.2 เซนติเมตร และมีค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตามมาตรฐานของ ASPRS ที่ 18.0 เซนติเมตร และข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ที่ผ่านการปรับแก้เป็นแนวนินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้ มีค่าเป็น 7.4 เซนติเมตร และมีค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ตามมาตรฐานของ ASPRS ที่ 14.5 เซนติเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นได้ว่าการปรับแก้ข้อมูลพอยต์คลาวด์เป็นแนวนินโดยใช้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM ประกอบการปรับแก้จะทำให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการสำรวจด้วยไลดาร์มีความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดิ่งที่ดียิ่งขึ้น ดังนั้นการประมวลผลผสมผสาน

ร่วมกันระหว่างข้อมูลไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศสามารถช่วยให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นได้ อีกทั้งการที่ไม่มีรอยต่อระหว่างแนวนบินที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนทางความสูงจะทำให้ข้อมูลพอยต์คลาวด์มีความน่าเชื่อถือเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย การศึกษานี้จึงสามารถนำไปใช้ต่อยอดสำหรับการปรับปรุงข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่สำรวจไว้ก่อนหน้านี้ให้มีความถูกต้องทางตำแหน่งดียิ่งขึ้นได้ โดยที่ไม่จำเป็นต้องทำการสำรวจใหม่

5.3 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

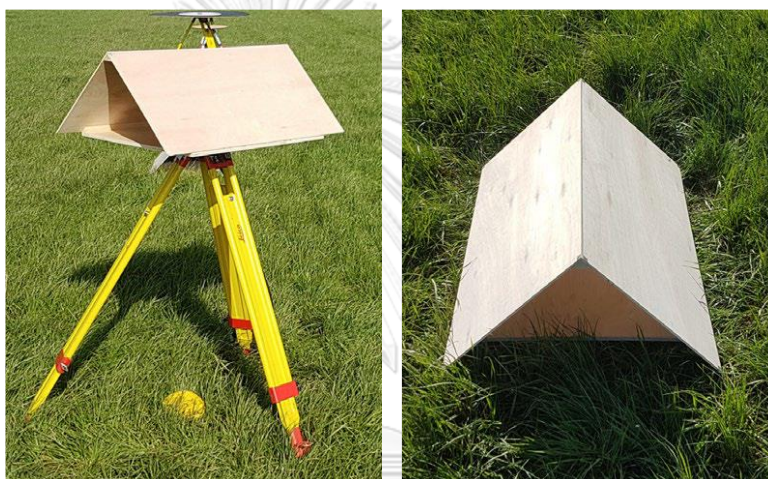
จากข้อสรุปข้างต้นมีสิ่งที่ต้องการจะเสนอแนะเพื่อปรับปรุงและพัฒนาให้ผลของการศึกษาวิจัยต่อเนื่องที่อาจเกิดขึ้นในอนาคตให้มีผลลัพธ์ที่ดีขึ้นได้ดังต่อไปนี้

5.3.1 การจัดทำจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินแบบเป่าภายหลังการบินที่มีระยะเวลาห่างจากการบินสำรวจที่นาน ส่งผลให้การวางแผนเลือกตำแหน่งของจุดควบคุมในภาพถ่ายอาจไม่ตรงตามสิ่งที่ปรากฏในภูมิประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเลือกตำแหน่งของจุดควบคุมที่ต้องอาศัยเป้าธรรมชาติ เช่น เส้นถนน แยกถนน เนื่องจากเมื่อลงไปรังวัดค่าพิกัดในสนามแล้วพบว่า ถนนมีการปรับปรุงใหม่ และทาสีเส้นถนนใหม่ ทำให้สิ่งที่เห็นในภาพกับสิ่งที่ปรากฏในภูมิประเทศไม่ตรงกัน ซึ่งจะส่งผลให้ค่าพิกัดของจุดควบคุมที่รังวัดได้ในสนามอาจไม่ตรงกับจุดในภาพ และยังจะเกิดความสับสนในการระบุตำแหน่งของจุดควบคุมในภาพอีกด้วย ดังนั้นจึงควรที่จะสำรวจจุดทำจุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดินแบบเป่าก่อนการบิน (Pre-marking GCP) เพื่อให้เป้าที่ตั้งไว้ในสนามปรากฏเด่นชัดในภาพและค่าพิกัดที่รังวัดได้จะถูกระบุลงในภาพได้อย่างถูกต้อง หรือหากจำเป็นต้องจัดทำเป้าภายหลังการบินก็ไม่ควรทิ้งระยะเวลาที่นานจนเกินไป

5.3.2 ชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นภาพที่มีความละเอียดสูงแต่จะมีข้อเสียตรงที่มีขนาดของส่วนซ้อนและส่วนเกยที่น้อย (Overlap 60% / 30%) ซึ่งจะส่งผลต่อการประมวลผลถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศเพื่อการปรับแก้กล้องลำแสงของภาพถ่ายทางอากาศ และการสร้างข้อมูลพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่นด้วยการรังวัดด้วยภาพถ่ายทางอากาศหลายมุมมองด้วยเทคนิค SfM โดยผลที่พบได้อย่างชัดเจนคือข้อมูลพอยต์คลาวด์จากการทำ SfM มีการเรียงตัวที่ยังไม่เป็นไปตามโครงสร้างหลังคาของอาคาร หรือการเรียงตัวที่ไม่ราบเรียบบริเวณพื้นผิวถนนหรือลานคอนกรีต ดังนั้นการเพิ่มขนาดของส่วนซ้อนและส่วนเกยจะช่วยให้ภาพที่ต่อเนื่องกันมีความสัมพันธ์กันมากยิ่งขึ้น รวมไปถึงจุดผ่านและจุดโยงยึดที่เพิ่มจำนวนมากยิ่งขึ้นและปรากฏอยู่ในหลาย ๆ

ภาพพร้อมกัน และในการสร้างพอยต์คลาวด์อย่างหนาแน่นจะมีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้นจากการที่มีมุมมองจากภาพถ่ายที่เพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

- 5.3.3 สืบเนื่องจากการที่ไม่สามารถปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนทางตำแหน่งของข้อมูลพอยต์คลาวด์ในทางราบและค่าการเอียงตัวของอุปกรณ์ขณะสำรวจได้นั้น หากมีการจัดทำเป้าไลดาร์ล่วงหน้าแบบรูปทรงจั่วหลังคาที่ทราบถึงลักษณะโครงสร้าง ขนาดเป้า และการวางตัว ประกอบกับข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ละเอียดหนาแน่นมากยิ่งขึ้น จะทำให้สามารถปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนในทางตำแหน่งในทางราบ ทางตั้ง และค่าการเอียงตัวของอุปกรณ์ขณะรังวัดได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น (Davidson et al., 2019)



รูปที่ 49 ตัวอย่างเป้าล่วงหน้ารูปทรงจั่วหลังคาของการสำรวจด้วยไลดาร์ทางอากาศ (Davidson et al., 2019)

บรรณานุกรม

- ASPRS. (2015). ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 81(3), 1-26. <https://doi.org/10.14358/pers.81.3.A1-a26>
- ASPRS Lidar committee. (2004). *Vertical Accuracy Reporting for Lidar Data* (M. Flood, Ed.).
- Bannakulpiphat, T., Santitamnont, P., Maneenart, T., & Wongweeranimit, W. (2023). Best practice for mapping production from UAV imagery. *Engineering journal of research and development*, 34(1).
- Brenner, C. (2006). *Aerial Laser Scanning*. Institute of Cartography and Geoinformatics University of Hannover, Germany.
- Burman, H. (2002). Laser Strip Adjustment for Data Calibration of Verification.
- Chen, H.-P., Chang, K.-T., & Liu, J.-K. (2012). Stripe Adjustment of Airborne Lidar Data Using Ground Points.
- Chen, Z., Li, J., & Yang, B. (2021). A Strip Adjustment Method of UAV-Borne LiDAR Point Cloud Based on DEM Features for Mountainous Area. *Sensors (Basel)*, 21(8). <https://doi.org/10.3390/s21082782>
- Dabove, P., De Agostino, M., & Manzano, A. (2012). Achievable positioning accuracies in a Network of GNSS Reference Stations.
- Davidson, L., Mills, J. P., Haynes, I., Augarde, C., Bryan, P., & Douglas, M. (2019). Airborne to Uas Lidar: An Analysis of Uas Lidar Ground Control Targets. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W13, 255-262. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-255-2019>
- Do, P. N. B. (2019). A Review of Stereo-Photogrammetry Method for 3-D Reconstruction in Computer Vision. *19th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*.
- Gkira, P. (2018). *Hybrid Orientation of LiDAR Point Clouds and Aerial Images* [TU Wien]. Germany.

- Glira, P., Pfeifer, N., Briese, C., & Ressel, C. (2015). Rigorous Strip Adjustment of Airborne Laserscanning Data Based on the lcp Algorithm. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-3/W5, 73-80. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-3-W5-73-2015>
- Glira, P., Pfeifer, N., & Mandlbürger, G. (2019). Hybrid Orientation of Airborne Lidar Point Clouds and Aerial Images. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2/W5, 567-574. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-567-2019>
- Haala, N., Kölle, M., Cramer, M., Laupheimer, D., & Zimmermann, F. (2022). Hybrid georeferencing of images and LiDAR data for UAV-based point cloud collection at millimetre accuracy. *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2022.100014>
- Hillen, F. (2011). *Optimization of LiDAR data line of sight analysis in service-oriented architectures using the OGC Web Processing Service* [The University of Osnabrück]. Germany.
- Kwon, S., Park, J.-W., Moon, D., Jung, S., & Park, H. (2017). Smart Merging Method for Hybrid Point Cloud Data using UAV and LIDAR in Earthwork Construction. *Procedia Engineering*, 196, 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.168>
- Li, Z., & Wang, J. (2014). Least squares image matching: A comparison of the performance of robust estimators. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-1, 37-44. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-1-37-2014>
- Liu, X. (2011). ACCURACY ASSESSMENT OF LIDAR ELEVATION DATA USING SURVEY MARKS.
- Mandlbürger, G., Wenzel, K., Spitzer, A., Haala, N., Glira, P., & Pfeifer, N. (2017). Improved Topographic Models Via Concurrent Airborne Lidar and Dense Image Matching. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, IV-2/W4, 259-266. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W4-259-2017>
- Mistry, D., & Banerjee, A. (2017). Comparison of Feature Detection and Matching

- Approaches : SIFT and SURF. *GRD Journal for Engineering*, 2(4).
- Pfeifer, N. (2005). Airborne Laser Scanning Strip Adjustment and Automation of Tie Surface Measurement.
- Ressl, C., Brockmann, H., Mandlbürger, G., & Pfeifer, N. (2016). Dense Image Matching vs. Airborne Laser Scanning – Comparison of two methods for deriving terrain models. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*, 2016(2), 57-73. <https://doi.org/10.1127/pfg/2016/0288>
- Riel, v. S. (2016). *Exploring the use of 3D GIS as an analytical tool in archaeological excavation practice* [Lund University].
- Schönberger, J. L., Fraundorfer, F., & Frahm, J. M. (2014). Structure-from-motion for MAV image sequence analysis with photogrammetric applications. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-3, 305-312. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-305-2014>
- Shin, Y.-H., Son, K.-W., & Lee, D.-C. (2022). Semantic Segmentation and Building Extraction from Airborne LiDAR Data with Multiple Return Using PointNet++. *Applied Sciences*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/app12041975>
- Srirattanapaisarn, T., Santitamnont, P., & Bannakulpiphat, T. (2022). A Qualitative Study of The Point-Cloud from UAV Laser Scanning and Photogrammetric Computer Vision. *Engineering journal of research and development*.
- Strecha, C. (2014). The rayCloud—a vision beyond the point cloud.
- Willers, J., Jin, M., Eksioğlu, B., Zusmanis, A., O’Hara, C., & Jenkins, J. (2008). A post-processing step error correction algorithm for overlapping LiDAR strips from agricultural landscapes. *Computers and Electronics in Agriculture*, 64(2), 183-193. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.04.013>
- Zhang, Y. J., Xiong, X. D., & Hu, X. Y. (2013). Rigorous LiDAR Strip Adjustment with Triangulated Aerial Imagery. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W2, 361-366. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W2-361-2013>
- กนก วีรวงศ์. (2564). เอกสารคำสอนวิชา 2108627 *Geoimage Processing* การประมวลผลภาพเชิงภูมิศาสตร์. ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- กรีธา สุวรรณสะอาด. (2553). การปรับแก้ข้อมูลไลดาร์ระหว่างแนวนอนโดยอาศัยจุดควบคุมจากภาพถ่าย

ทางอากาศ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย].

เจนพีธีกร สุนทรรัตน์. (2560). การทดสอบประสิทธิภาพระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์
ในทันทีสำหรับงานรังวัดที่ดิน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย].

ถิรวัดน์ บรรณกุลพิพัฒน์. (2564). การพัฒนาแบบจำลองระบบกล้องหลายหัวบนอากาศยานไร้คนขับ
สำหรับการผลิตแผนที่สามมิติและพอยต์คลาวด์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]. กรุงเทพมหานคร.

เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล. (2563). การสำรวจความสูงภูมิประเทศด้วยแสงเลเซอร์ (LiDAR). วรสารแผนที่
(*Royal Thai Survey Department Journal*), ฉบับที่ 1 ปีที่ 40, 12 - 28.

ไพศาล สันติธรรมนนท์. (2564). การรังวัดด้วยภาพดิจิทัล *Digital photogrammetry*.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก. แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดบังคับถ่ายภาพทางอากาศ

แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดบังคับถ่ายภาพทางอากาศ

GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวิร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP01 สถานที่ตั้ง : ถนนทางหลวงชนบท สบ. 4035 ต.ห้วยแห้ง อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 31' 31.28399" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 00' 04.78052" E Zone 47N
 Northing = 1,606,774.373 m Easting = 715,663.554 m
 ค่าความสูงเหนือทรีรี (h) = -1.7957 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 28.0143 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP01



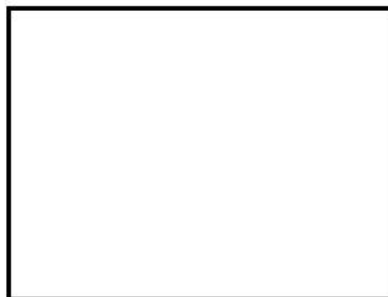
ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตั้งตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐนไพศาล
 สำรวจเมื่อ : 6 ก.ค. 2565

รูปที่ 50 แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดบังคับถ่ายภาพทางอากาศ จุด GCP01

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ
GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวิร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP02 สถานที่ตั้ง : บ้านนาดี ต.ห้วยแห้ง อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 31' 24.20035" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 00' 08.67354" E Zone 47N
Northing = 1,606,557.665 m Easting = 715,782.038 m
ค่าความสูงเหนือทรงรี (h) = 0.6067 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 30.3932 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP02



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตั้งตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
สำรวจเมื่อ : 6 ก.ค. 2565

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวิร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP03 สถานที่ตั้ง : บ้านนาดี ต.ห้วยแห้ง อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 31' 00.35872" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 00' 31.68818" E Zone 47N
 Northing = 1,605,830.848 m Easting = 716,477.642 m
 ค่าความสูงเหนือทรีนิง (h) = 2.3345 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 32.1204 m

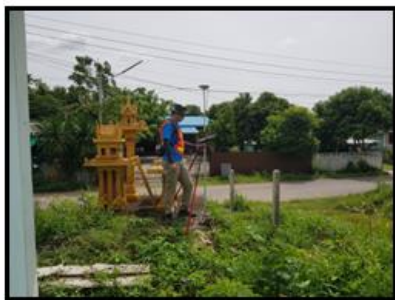
ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP03



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตั้งตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
 สำรวจเมื่อ : 6 ก.ค. 2565

รูปที่ 52 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP03

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ
GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวิร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP04 สถานที่ตั้ง : หน้าโรงงาน ปี.เค.เค. เทอร์รัสบำ ต.ห้วยแห้ง อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 30' 33.02554" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 00' 43.78140" E Zone 47N
Northing = 1,604,993.833 m Easting = 716,847.177 m
ค่าความสูงเหนือทรวงรี (h) = 7.4244 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 37.1268 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP04



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
สำรวจเมื่อ : 6 ก.ค. 2565

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ

GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวิร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP05 สถานที่ตั้ง : ต. ขำผักแพว อ. แก่งคอย จ. สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 30' 27.70078" N	ลองจิจูด (Longitude) : 101° 00' 57.41110" E	Zone 47N
Northing = 1,604,833.758 m	Easting = 717,256.768 m	
ค่าความสูงเหนือทรงรี (h) = 3.2613 m	ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 32.9576 m	

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP05



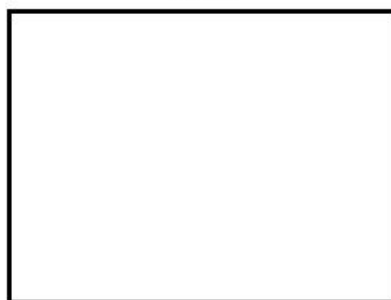
ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตั้งตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
สำรวจเมื่อ : 6 ก.ค. 2565

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ

GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

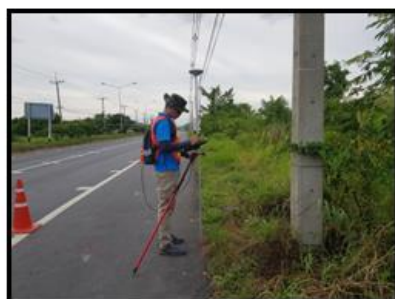
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวอร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP06 สถานที่ตั้ง : ถนนบ้านนา – แก่งคอย 3222 กม.7-8 ต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 30' 26.16657" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 00' 14.59451" E Zone 47N
 Northing = 1,604,791.135 m Easting = 717,771.771 m
 ค่าความสูงเหนือทรี (h) = 2.9859 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 32.6888 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP06



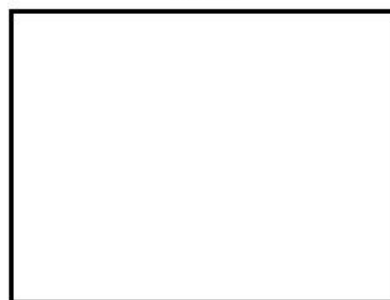
ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐนไพศาล
 สำรวจเมื่อ : 6 ก.ค. 2565

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ
GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์โมโนทันที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานสเวอร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geiod model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP07 สถานที่ตั้ง : ถนนบ้านนา – แก่งคอย 3222 กม.7-8 ต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 30' 39.74429" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 07.25854" E Zone 47N
Northing = 1,605,206.562 m Easting = 717,548.409 m
ค่าความสูงเหนือทรวงรี (h) = 2.8345 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 32.5384 m

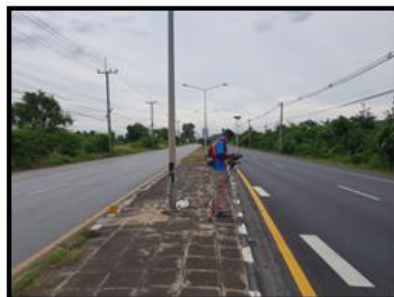
ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP07



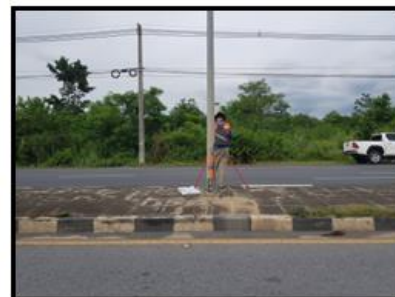
ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐนไพศาล
สำรวจเมื่อ : 6 ก.ค. 2565

แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดบังคับถ่ายภาพทางอากาศ
GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานสเวอร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geiod model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP08 สถานที่ตั้ง : ถนนบ้านนา – แก่งคอย 3222 กม.7 ต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 30' 46.52240" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 04.14213" E Zone 47N
Northing = 1,605,414.107 m Easting = 717,453.251 m
ค่าความสูงเหนือทรี (h) = 2.1192 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 31.8280 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP08



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตั้งตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
สำรวจเมื่อ : 6 ก.ค. 2565

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ

GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวอร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP09 สถานที่ตั้ง : ถนนบ้านนา – แก่งคอย 3222 กม.6-7 ต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 30' 58.95216" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 00' 58.57735" E Zone 47N
 Northing = 1,605,794.733 m Easting = 717,283.206 m
 ค่าความสูงเหนือทรี (h) = 1.6374 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 31.3366 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP09



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตั้งตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐนไพศาล
 สำรวจเมื่อ : 6 ก.ค. 2565

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ
GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์โมโนทันที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานสเวอร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geiod model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP10 สถานที่ตั้ง : ถนนบ้านนา – แก่งคอย 3222 กม.6-7 ต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 31' 06.57152" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 00' 51.70634" E Zone 47N
Northing = 1,606,027.061 m Easting = 717,075.408 m
ค่าความสูงเหนือทรงรี (h) = 0.3788 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 30.1063 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP10



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐนไพศาล
สำรวจเมื่อ : 6 ก.ค. 2565

รูปที่ 59 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP10

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ

GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

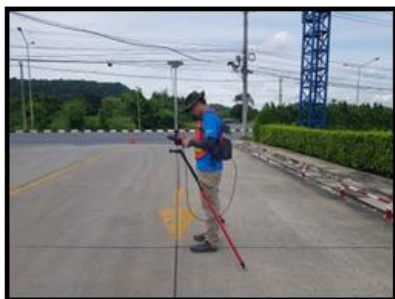
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์โมโนทันที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวอร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP11 สถานที่ตั้ง : ถนนทางเข้า สี่พระยาก่อสร้าง ต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 31' 20.39470" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 00' 42.22533" E Zone 47N
 Northing = 1,606,449.503 m Easting = 716,787.746 m
 ค่าความสูงเหนือทรวงรี (h) = -1.2669 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 28.4855 m

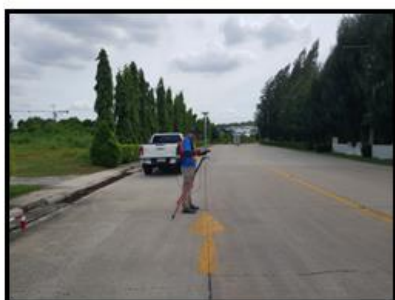
ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP11



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตั้งตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐนไพศาล
 สำรวจเมื่อ : 6 ก.ค. 2565

รูปที่ 60 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP11

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ
GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวอร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP12 สถานที่ตั้ง : ถนนบ้านนา – แก่งคอย 3222 กม.5-6 ต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 31' 27.96190" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 00' 39.44402" E Zone 47N
Northing = 1,606,859.519 m Easting = 716,587.523 m
ค่าความสูงเหนือทรีซ (h) = -0.8952 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 28.0166 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP12



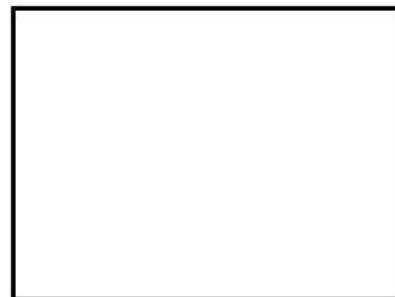
ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐนไพศาล
สำรวจเมื่อ : 6 ก.ค. 2565

รูปที่ 61 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP12

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ

GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวิร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP13 สถานที่ตั้ง : ภายในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สระบุรี) ต. ขำผักแพว อ. แก่งคอย จ. สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 31' 09.13439" N	ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 14.06460" E	Zone 47N
Northing = 1,606,111.792 m	Easting = 717,744.247 m	
ค่าความสูงเหนือทรี (h) = 10.9536 m	ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 40.6237 m	

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP13



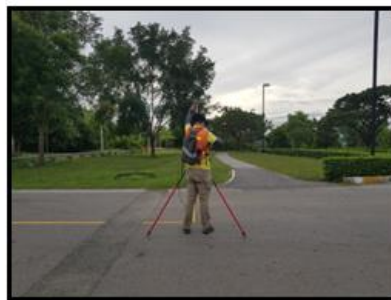
ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
สำรวจเมื่อ : 7 ก.ค. 2565

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ
GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการกำหนดที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์โมโนที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวอร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP14 สถานที่ตั้ง : ภายในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สระบุรี) ต. ขำผักแพว อ. แก่งคอย จ. สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 31' 18.40409" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 09.84460" E Zone 47N
Northing = 1,606,395.615 m Easting = 717,615.339 m
ค่าความสูงเหนือทรวงี (h) = 6.1139 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 35.8293 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP14



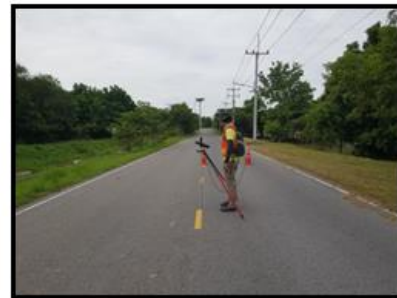
ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
สำรวจเมื่อ : 7 ก.ค. 2565

แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ
GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวิร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP15 สถานที่ตั้ง : ภายในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สระบุรี) ต. ขำผักแพว อ. แก่งคอย จ. สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 31' 32.2202" N	ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 06.05217" E	Zone 47N
Northing = 1,606,819.382 m	Easting = 717,498.039 m	
ค่าความสูงเหนือทรีซ (h) = 9.5336 m	ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 39.2032 m	

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP15



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐนไพศาล
สำรวจเมื่อ : 7 ก.ค. 2565

แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ

GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

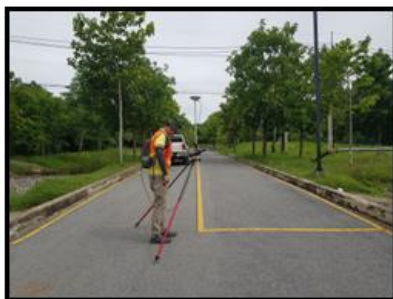
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวิร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP16 สถานที่ตั้ง : ภายในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สระบุรี) ต. ขำผักแพว อ. แก่งคอย จ. สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 31' 15.57121" N	ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 27.73520" E	Zone 47N
Northing = 1,606,313.381 m	Easting = 718,151.896 m	
ค่าความสูงเหนือทรี (h) = 8.0205 m	ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 37.6827 m	

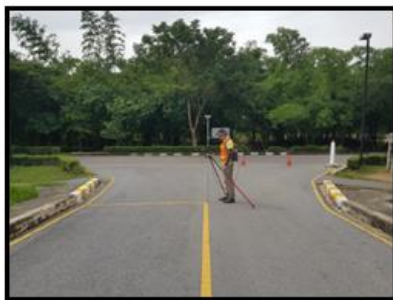
ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP16



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
สำรวจเมื่อ : 7 ก.ค. 2565

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ

GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวิร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP17 สถานที่ตั้ง : ภายในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สระบุรี) ต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 31' 25.71972" N	ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 26.37411" E	Zone 47N
Northing = 1,606,624.869 m	Easting = 718,108.357 m	
ค่าความสูงเหนือทรงรี (h) = 11.6172 m	ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 41.3122 m	

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP17



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตั้งตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
สำรวจเมื่อ : 7 ก.ค. 2565

รูปที่ 66 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP17

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ

GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

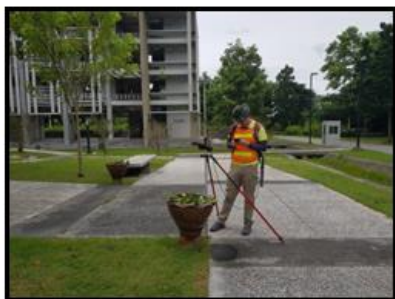
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานสเวอร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP18 สถานที่ตั้ง : ภายในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สระบุรี) ต. ขำผักแพว อ. แก่งคอย จ. สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 31' 31.40840" N	ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 35.36388" E	Zone 47N
Northing = 1,606,802.114 m	Easting = 718,375.971 m	
ค่าความสูงเหนือทรี (h) = 10.1725 m	ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 39.8368 m	

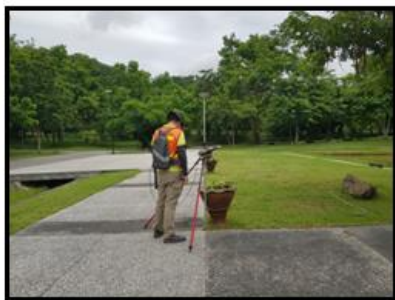
ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP18



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐนไพศาล
สำรวจเมื่อ : 7 ก.ค. 2565

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ
GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์โมโนทันที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานสเวอร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP19 สถานที่ตั้ง : ภายในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สระบุรี) ต. ขำผักแพว อ. แก่งคอย จ. สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 31' 19.35658" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 58.07415" E Zone 47N
Northing = 1,606,437.704 m Easting = 719,059.325 m
ค่าความสูงเหนือทรงรี (h) = 12.0230 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 41.6654 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP19



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตั้งตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐนไพศาล
สำรวจเมื่อ : 7 ก.ค. 2565

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ

GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์โมโนทันที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวอร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP20 สถานที่ตั้ง : บ้านวังแพต. ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 31' 14.56801" N	ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 42.35382" E	Zone 47N
Northing = 1,606,286.324 m	Easting = 718,589.883 m	
ค่าความสูงเหนือทรงรี (h) = 9.1396 m	ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 38.7851 m	

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP20



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตั้งตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
สำรวจเมื่อ : 7 ก.ค. 2565

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ
GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ
 A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
 ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวอร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP21 สถานที่ตั้ง : บ้านวังแพต. ชำผักแพว. แก่งคอยจ. สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 30' 59.68713" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 44.87248" E Zone 47N
 Northing = 1,605,829.716 m Easting = 718,669.368 m
 ค่าความสูงเหนือทรวงรี (h) = 8.0826 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 37.7503 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP21



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐนไพศาล
 สำรวจเมื่อ : 7 ก.ค. 2565

รูปที่ 70 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP21

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ
GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวิร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP22 สถานที่ตั้ง : วัดวังแพต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 30' 41.70119" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 02' 04.14877" E Zone 47N
Northing = 1,605,281.885 m Easting = 719,251.571 m
ค่าความสูงเหนือทรีซึ (h) = 6.6862 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 36.1798 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP22



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
สำรวจเมื่อ : 7 ก.ค. 2565

รูปที่ 71 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP22

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ
GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานสเวอร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP23 สถานที่ตั้ง : ถนน สป.4011 ต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 30' 37.6215" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 49.75821" E Zone 47N
Northing = 1,605,152.563 m Easting = 718,821.708 m
ค่าความสูงเหนือทรีซึ (h) = 6.3005 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 35.9654 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP23



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตั้งตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
สำรวจเมื่อ : 7 ก.ค. 2565

รูปที่ 72 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP23

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ
GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวิร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

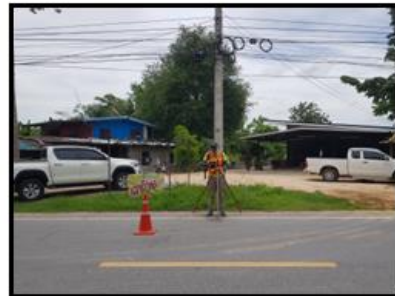
ชื่อจุด : GCP24 สถานที่ตั้ง : ถนน สป.4011 ต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 30' 26.71273" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 31.18184" E Zone 47N
Northing = 1,604,811.651 m Easting = 718,268.410 m
ค่าความสูงเหนือทรีซ (h) = 4.8962 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 34.5042 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP24



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตั้งตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
สำรวจเมื่อ : 7 ก.ค. 2565

รูปที่ 73 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ จุด GCP24

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดบังคับภาพถ่ายทางอากาศ
GROUND CONTROL POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวอร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : GCP25 สถานที่ตั้ง : ถนน สป.4011 ต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 30' 35.35033" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 02' 24.29565" E Zone 47N
Northing = 1,605,091.977 m Easting = 719,856.339 m
ค่าความสูงเหนือทรงรี (h) = 9.8285 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 39.4487 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด GCP25



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
สำรวจเมื่อ : 7 ก.ค. 2565

ภาคผนวก ข. แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ

แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ

CHECK POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานดาวของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวิร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

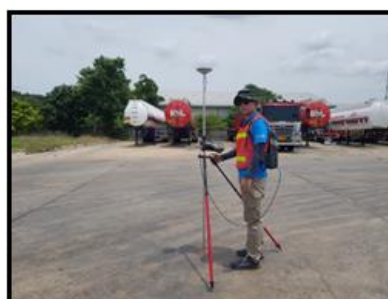
ชื่อจุด : CP01 สถานที่ตั้ง : บริษัท บุญส่งเสริม ทรานสปอร์ต จำกัด ต.ห้วยแห้ง อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 31' 30.84466" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 00' 12.30382" E Zone 47N
Northing = 1,606,762.844 m Easting = 715,888.948 m
ค่าความสูงเหนือทรีรี (h) = -2.7923 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 26.9780 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด CP01



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2

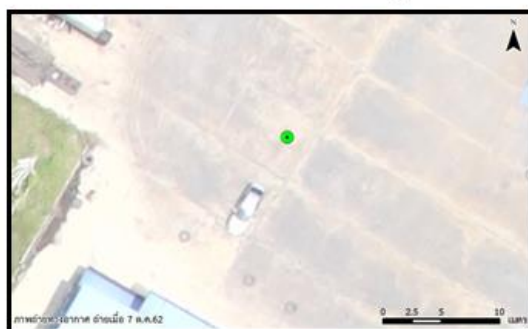


ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
สำรวจเมื่อ : 6 ก.ค. 2565

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ
CHECK POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษากระบวนการประมวลผลผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวอร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

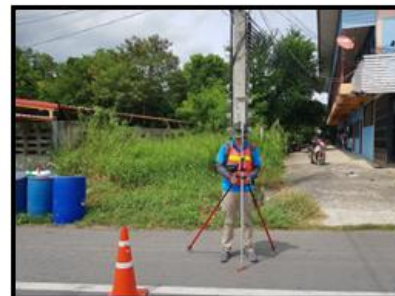
ชื่อจุด : CP02 สถานที่ตั้ง : ถนนบ้านนา – แก่งคอย 3222 กม.5-6 ต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 31' 33.88482" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 00' 36.38397" E Zone 47N
Northing = 1,606,862.631 m Easting = 716,609.176 m
ค่าความสูงเหนือทรงรี (h) = -1.2790 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 28.4384 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด CP02



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
สำรวจเมื่อ : 6 ก.ค. 2565

รูปที่ 76 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP02

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ
CHECK POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวิร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : CP03 สถานที่ตั้ง : ภายในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สระบุรี) ต. ขำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 31' 32.41525" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 06.41252" E Zone 47N
Northing = 1,606,825.385 m Easting = 717,508.743 m
ค่าความสูงเหนือทรงรี (h) = 9.6839 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 39.3730 m

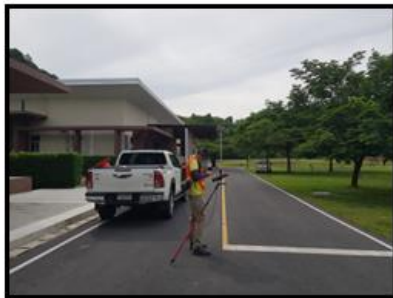
ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด CP03



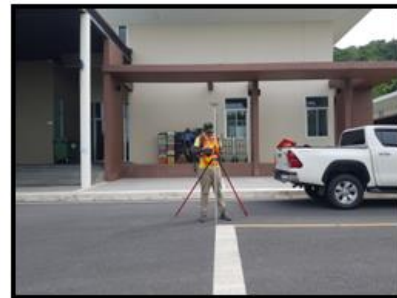
ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
สำรวจเมื่อ : 7 ก.ค. 2565

แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ

CHECK POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษากระบวนการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

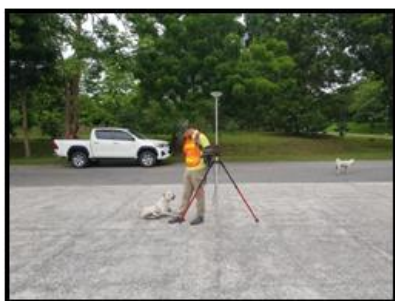
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานสเวอร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : CP04 สถานที่ตั้ง : ภายในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สระบุรี) ต. ขำผักแพว อ. แก่งคอย จ. สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 31' 31.83184" N	ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 34.76570" E	Zone 47N
Northing = 1,606,814.941 m	Easting = 718,357.941 m	
ค่าความสูงเหนือทรีซรี (h) = 10.0994 m	ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 39.7916 m	

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด CP04



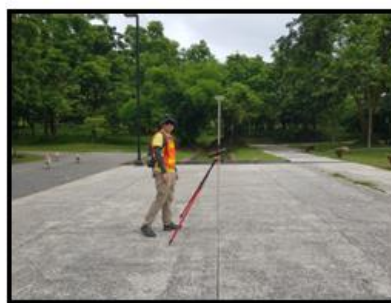
ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
สำรวจเมื่อ : 7 ก.ค. 2565

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ

CHECK POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวิร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : CP05 สถานที่ตั้ง : ภายในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สระบุรี) ต. ขำผักแพว อ. แก่งคอย จ. สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 31' 19.60514" N	ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 58.36702" E	Zone 47N
Northing = 1,606,445.419 m	Easting = 719,068.024 m	
ค่าความสูงเหนือทรงรี (h) = 12.0240 m	ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 41.6529 m	

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด CP05



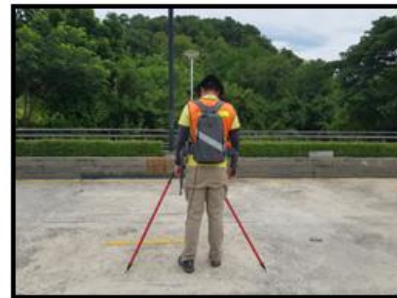
ภาพที่ 1



ภาพที่ 2

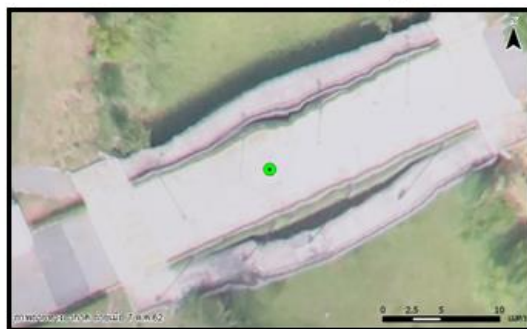


ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐนไพศาล
สำรวจเมื่อ : 7 ก.ค. 2565

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ

CHECK POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวิร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : CP06 สถานที่ตั้ง : ภายในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สระบุรี) ต. ขำผักแพว อ. แก่งคอย จ. สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 31' 16.34644" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 26.87875" E Zone 47N
 Northing = 1,606,336.866 m Easting = 718,125.980 m
 ค่าความสูงเหนือทรี (h) = 9.2178 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 38.8989 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด CP06



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
 สำรวจเมื่อ : 7 ก.ค. 2565

รูปที่ 80 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP06

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ
CHECK POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษากระบวนการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวิร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : CP07 สถานที่ตั้ง : ภายในพื้นที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (สระบุรี) ต. ขำผักแพว อ. แก่งคอย จ. สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 31' 16.34644" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 26.87875" E Zone 47N
Northing = 1,606,308.043 m Easting = 717,472.919 m
ค่าความสูงเหนือทรงรี (h) = 3.6498 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 33.3206 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด CP07



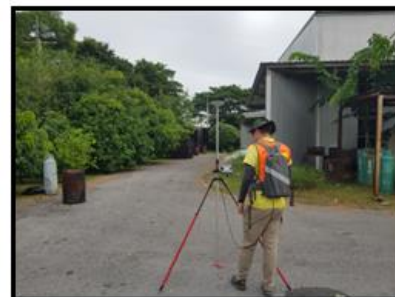
ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
สำรวจเมื่อ : 7 ก.ค. 2565

แบบจุดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ
CHECK POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

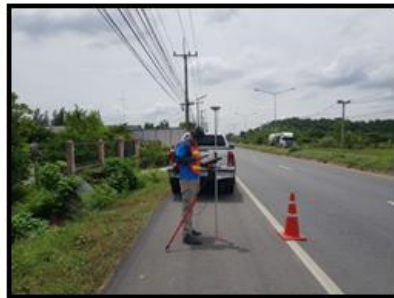
การศึกษากระบวนการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ
 A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
 ในระบบยูนิเวอร์แซลเทรานสเวอร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : CP08 สถานที่ตั้ง : ถนนบ้านนา – แก่งคอย 3222 กม.5-6 ต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 31' 16.25041" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 00' 45.41384" E Zone 47N
 Northing = 1,606,322.962 m Easting = 716,884.350 m
 ค่าความสูงเหนือทรงรี (h) = -0.3443 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 29.3757 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด CP08



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐนไพศาล
 สำรวจเมื่อ : 6 ก.ค. 2565

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ

CHECK POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษากระบวนการประมวลผลผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวิร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : CP09 สถานที่ตั้ง : บ้านนาดี ต.ข่าฝักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 31' 00.86624" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 00' 31.31752" E Zone 47N
 Northing = 1,605,846.344 m Easting = 716,466.406 m
 ค่าความสูงเหนือทรงรี (h) = 1.0985 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 30.8803 m

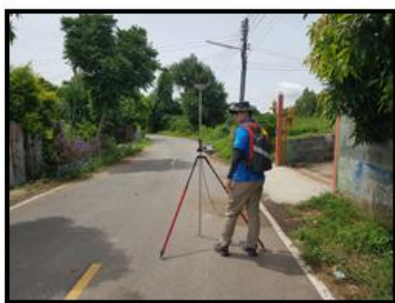
ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด CP09



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
 สำรวจเมื่อ : 6 ก.ค. 2565

แบบจุดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ

CHECK POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษากระบวนการประมวลผลผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

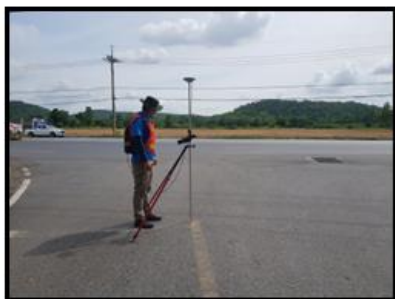
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวิร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : CP10 สถานที่ตั้ง : ถนนบ้านนา – แก่งคอย 3222 กม.6-7 ต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 30' 57.96188" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 00' 59.26543" E Zone 47N
 Northing = 1,605,764.438 m Easting = 717,304.110 m
 ค่าความสูงเหนือทรงรี (h) = 1.4826 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 31.1548 m

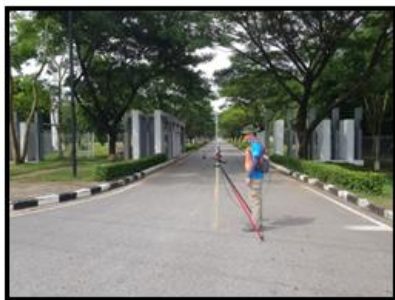
ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด CP10



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
 สำรวจเมื่อ : 6 ก.ค. 2565

รูปที่ 84 แบบจุดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP10

แบบจัดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ

CHECK POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษากระบวนการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวอร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : CP13 สถานที่ตั้ง : ด้านหน้าศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์ 4 ต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 30' 45.07299" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 05.22365" E Zone 47N
 Northing = 1,605,368.817 m Easting = 718,485.555 m
 ค่าความสูงเหนือทรงรี (h) = 2.0922 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 31.8037 m

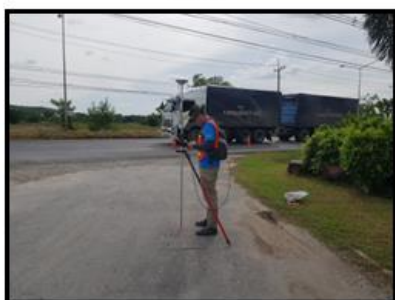
ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด CP13



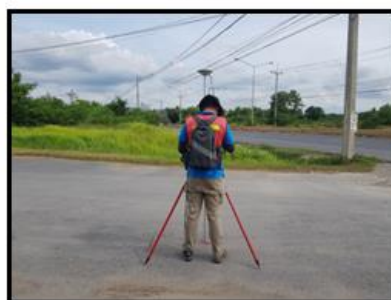
ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
 สำรวจเมื่อ : 6 ก.ค. 2565

แบบจุดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ

CHECK POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษากระบวนการประมวลผลผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวิร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : CP15 สถานที่ตั้ง : ถนนบ้านนา – แก่งคอย 3222 กม.7-8 ต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 30' 40.05310" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 07.05800" E Zone 47N
 Northing = 1,605,216.009 m Easting = 717,542.315 m
 ค่าความสูงเหนือทรีซึ (h) = 2.8262 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 32.5336 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด CP15



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐนไพศาล
 สำรวจเมื่อ : 6 ก.ค. 2565

แบบจุดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ

CHECK POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษากระบวนการประมวลผลผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวอร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : CP16 สถานที่ตั้ง : ถนนบ้านนา – แก่งคอย 3222 กม.7-8 ต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 30' 26.14826" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 14.55474" E Zone 47N
 Northing = 1,604,790.573 m Easting = 717,770.599 m
 ค่าความสูงเหนือทรีซึ (h) = 3.0156 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 32.7102m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด CP16



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตั้งตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
 สำรวจเมื่อ : 6 ก.ค. 2565

แบบจุดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ

CHECK POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษากระบวนการประมวลผลผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานสเวอร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : CP17 สถานที่ตั้ง : ถนนบ้านนา – แก่งคอย 3222 กม.7-8 ต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 30' 19.78167" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 17.37703" E Zone 47N
 Northing = 1,604,595.615 m Easting = 717,856.850 m
 ค่าความสูงเหนือทรงรี (h) = 3.8437 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 33.5269 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด CP17



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
 สำรวจเมื่อ : 6 ก.ค. 2565

รูปที่ 90 แบบจุดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP17

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ
CHECK POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษากระบวนการประมวลผลผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ
A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวิร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : CP18 สถานที่ตั้ง : ถนน สป.4011 ต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 30' 28.68105" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 34.07217" E Zone 47N
Northing = 1,604,873.617 m Easting = 718,354.400 m
ค่าความสูงเหนือทรวงี (h) = 5.1075 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 34.7930 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด CP18



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐณไพศาล
สำรวจเมื่อ : 7 ก.ค. 2565

รูปที่ 91 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP18

แบบจุดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ

CHECK POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษากระบวนการประมวลผลผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในพื้นที่โดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวิร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : CP19 สถานที่ตั้ง : สามแยกทางเข้าบ้านวังแพตัดกับ ถนน สป.4011 ต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 30' 38.66884" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 01' 51.43569" E Zone 47N
 Northing = 1,605,185.240 m Easting = 718,871.639 m
 ค่าความสูงเหนือทรวงี (h) = 6.6398 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 36.2711 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด CP19



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐนไพศาล
 สำรวจเมื่อ : 7 ก.ค. 2565

แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ

CHECK POINT DESCRIPTION

สำหรับใช้ในวิทยานิพนธ์ เรื่อง

การศึกษาการรวมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ

A STUDY OF HYBRID PROCESSING BETWEEN UAV LIDAR MAPPING AND AERIAL PHOTOGRAMMETRIC BLOCK

งานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธีการรังวัดแบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐานถาวรของกรมแผนที่ทหาร
ในระบบยูนิเวอร์แซลทรานส์เวิร์ส เมอร์เคเตอร์ (UTM) บนพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 TGM 2017 Geoid model (ITRF2008)

ชื่อจุด : CP20 สถานที่ตั้ง : วัดวังแพต.ชำผักแพว อ.แก่งคอย จ.สระบุรี

ละติจูด (Latitude) : 14° 30' 41.32172" N ลองจิจูด (Longitude) : 101° 02' 04.74149" E Zone 47N
 Northing = 1,605,270.311 m Easting = 719,269.396 m
 ค่าความสูงเหนือทรวงี (h) = 6.7035 m ค่าความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (H) = 36.1164 m

ภาพถ่ายการตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่จุด CP20



ภาพที่ 1



ภาพที่ 2



ภาพที่ 3



ภาพที่ 4

แผนที่ภาพถ่าย แสดงที่ตำแหน่งของจุด



มาตราส่วน 1 : 500

QR code แผนที่ออนไลน์



สำรวจโดย : ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐนไพศาล
 สำรวจเมื่อ : 7 ก.ค. 2565

รูปที่ 93 แบบจดบันทึกข้อมูลจุดตรวจสอบ จุด CP20

ภาคผนวก ค. นิยามศัพท์เทคนิคภายในงานวิจัย

เนื่องจากการวิจัยครั้งนี้มีการกล่าวถึงและใช้คำศัพท์เทคนิคตลอดทั้งเล่มวิทยานิพนธ์ ผู้เขียนจึงขออธิบายนิยามศัพท์เทคนิคไว้ในบทความนี้ เพื่อให้จะสามารถอ่านเนื้อหาภายในเล่มได้อย่างเข้าใจ

ศัพท์เทคนิคภาษาอังกฤษ	คำย่อ	ศัพท์เทคนิคภาษาไทย	ความหมาย
Active remote sensing	-	การสำรวจระยะไกลที่สร้างแหล่งพลังงานได้	ชนิดของการสำรวจระยะไกลที่สามารถสร้างแหล่งพลังงานเพื่อใช้สำหรับสำรวจและรังวัดได้ด้วยตนเอง
Airborne Laser Scanning	ALS	การสแกนด้วยเลเซอร์ทางอากาศ	วิธีการสำรวจค่าพิกัดของจุดที่แสงเลเซอร์ตกกระทบโดยการสแกนและกวาดของลำแสงเลเซอร์เป็นจำนวนมากด้วยอุปกรณ์เลเซอร์สแกนเนอร์ที่ติดตั้งบนอากาศยาน
Aerial Triangulation	AT	โครงข่ายสามเหลี่ยมทางอากาศ	กระบวนการทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับองค์ประกอบพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายนอก (Exterior Orientation parameters) ในทุกภาพของบล็อกบิน นอกจากนี้แล้วยังเป็นการขยายจุดควบคุมภาพเพิ่มเติมในบล็อกภาพถ่ายอีกด้วยทั้งจุดผ่านและจุดโยงยึดที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงกันระหว่างพิกัดวัตถุบนพื้นดินและพิกัดภาพที่ปรากฏ
Bundle Block Adjustment	BBA	การปรับแก้บล็อกลำแสงของภาพถ่ายทางอากาศ	กระบวนการทางคณิตศาสตร์ในการสร้างระบบสมการสถานะร่วมเส้นที่เกิดจากความสัมพันธ์ระหว่างจุดควบคุม จุดบนภาพถ่าย และจุดศูนย์กลางการฉาย ซึ่งอยู่บนเส้นตรงของลำแสงเดียวกัน เพื่อใช้สำหรับการคำนวณหาพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายนอกของภาพถ่ายโดยการคำนวณปรับแก้โครงข่ายบล็อกลำแสงจากภาพถ่ายทางอากาศในบล็อกทั้งหมด ซึ่งจะมีจุดควบคุมและจุดโยงยึดกระจายอยู่ในแต่ละภาพเพื่อทำให้เกิดการเชื่อมโยงและปรับแก้ที่ได้ค่าออกมาเหมาะสมที่สุด

Check point	CP	จุดตรวจสอบ	จุดตรวจสอบสำหรับใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องทางตำแหน่งในทางดึงของข้อมูลพอยต์คลาวด์จากไลดาร์ โดยจุดตรวจสอบจะจัดเป็นจุดที่ทำการรังวัดค่าพิกัดด้วยวิธีการและคุณภาพที่ดีกว่า เมื่อเทียบกับค่าพิกัดที่จะนำมาเปรียบเทียบด้วย
Digital Elevation Model	DEM	แบบจำลองความสูงภูมิประเทศ	แบบจำลองที่เก็บค่าข้อมูลความสูงของภูมิประเทศไว้ในรูปแบบเชิงเลขสำหรับใช้ในคอมพิวเตอร์ โดยจะเก็บข้อมูลในรูปแบบของกริดเซลล์
Digital Surface Model	DSM	แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศ	แบบจำลองพื้นผิวเหนือภูมิประเทศที่มีการจัดเก็บค่าความสูงไว้ในแต่ละกริดเซลล์ โดยจะรวมความสูงของวัตถุและสิ่งปกคลุมพื้นผิวทางกายภาพของโลกด้วย เช่น อาคาร บ้านเรือน สิ่งปลูกสร้าง ต้นไม้ เป็นต้น
Direct Georeferencing	DG	การกำหนดพิกัดตำแหน่งบนโลกด้วยวิธีตรง	การคำนวณเพื่อหาตำแหน่งพิกัดภาคพื้นดินของจุดที่สนใจในระบบพิกัดอ้างอิงของโลก โดยใช้ข้อมูลที่เกิดจากระบบรังวัดต่าง ๆ ในการช่วยให้สมการทางคณิตศาสตร์ในการคำนวณหาพิกัดตำแหน่งมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น เช่น ข้อมูลพิกัดตำแหน่งจากระบบ GNSS, ข้อมูลการวางตัวของอุปกรณ์รังวัด เป็นต้น
Earth-centered, Earth-fixed	ECEF	ระบบพิกัดฉากทางภูมิศาสตร์	เป็นระบบพิกัดทางภูมิศาสตร์ โดยใช้ระบบพิกัดคาร์ทีเซียนในการระบุพิกัดของจุดสนใจบนพื้นผิวโลกอ้างอิง ซึ่งจะกำหนดให้จุดศูนย์กลางของโลกอ้างอิงมีค่าพิกัดเป็น (0,0,0) และค่าพิกัดที่ได้จะเกิดจากระยะห่างจากจุดศูนย์กลางเมื่อคำนวณจากค่าระยะในแต่ละแกน
Exterior Orientation Parameters	EOP	พารามิเตอร์ของการจัดภาพภายนอก	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการระบุตำแหน่งและการวางตัวของกล้องถ่ายภาพ

Global Navigation Satellite System	GNSS	ระบบรังวัดพิกัดตำแหน่งด้วยดาวเทียม	ระบบรังวัดพิกัดตำแหน่ง และนำทางด้วยกลุ่มโคจรขั้วดาวเทียมนานาชาติ โดยใช้อุปกรณ์เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมเพื่อคำนวณและแสดงค่าพิกัด ณ จุดที่เครื่องรับสัญญาณตั้งอยู่
Ground Control Point	GCP	จุดควบคุมภาพถ่ายภาคพื้นดิน	จุดที่ทราบค่าพิกัดภาคพื้นดินที่อ้างอิงกับระบบพิกัดของโลก โดยทำหน้าที่เป็นตัวกลางสำหรับการประมวลผลจัดภาพให้มีความสัมพันธ์กับระบบพิกัดภาคพื้นดิน
Ground Sample Distance	GSD	ความละเอียดจุดภาพเชิงพื้นที่	ตัวเลขที่แสดงถึงขนาดของจุดภาพในระยະบนภูมิประเทศ
Inertial Measurement Unit	IMU	หน่วยวัดการเคลื่อนไหวของอุปกรณ์	หน่วยของการตรวจวัดการเคลื่อนไหวภายในอุปกรณ์ โดยจะเป็นการตรวจวัดมุมการเคลื่อนไหวที่กำกับแกนระบบพิกัดอ้างอิง เพื่อให้ทราบถึงลักษณะการเอียงตัวของอุปกรณ์ขณะทำการรังวัด
Inertial Navigation System	INS	ระบบนำทางด้วยความเฉื่อย	อุปกรณ์ที่ทำงานอย่างเป็นระบบโดยใช้การประมวลผลร่วมกัน ระหว่างคอมพิวเตอร์ เซ็นเซอร์จับการเคลื่อนไหว และเซ็นเซอร์ของการหมุน เพื่อการคำนวณตำแหน่ง การวางตัว และความเร็วของการเคลื่อนไหวของวัตถุ
Interior Orientation Parameters	IOP	พารามิเตอร์ของการจัดภาพภายใน	ค่าคงที่ของอุปกรณ์ภายในกล้องถ่ายภาพ ได้แก่ ค่าพารามิเตอร์ของความคลาดเคลื่อนของเลนส์, ค่าระยะโฟกัสของเลนส์, ตำแหน่งจุดมูขยสำคัญของภาพ เป็นต้น ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะถูกนำมาคำนวณในสมการสภาวะร่วมเส้นร่วมกับระบบพิกัดภาพถ่ายและระบบพิกัดภาคพื้นดิน
Key point	-	จุดสำคัญ	จุดที่มีคุณลักษณะเด่นชัดที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายโดยพิจารณาจากสถิติของกลุ่มจุดภาพ และคุณลักษณะนี้จะเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก แม้ว่าจะประเมินจากภาพหลายภาพและถ่ายใน

			หลายมุมมองก็ตาม โดยจุดสำคัญที่ได้นี้จะใช้สำหรับการจับคู่จุดภาพร่วมกับภาพถ่ายที่มีส่วนซ้อนหรือส่วนเกยกันเพื่อกำหนดให้เป็นจุดผ่านและจุดโยงยึดสำหรับอัลกอริทึมที่ใช้ในการพิจารณาจุดสำคัญ ได้แก่ SIFT, SURF เป็นต้น
Light Detection And Ranging	LiDAR	ไลดาร์	เทคนิคการสำรวจระยะไกลชนิดที่สามารถสร้างแหล่งพลังงานในรูปของเลเซอร์ โดยนำมาใช้ในการวัดระยะทางระหว่างอุปกรณ์รังวัดไปยังพื้นผิวของวัตถุ
Mobile Mapping System	MMS	การสำรวจเพื่อทำแผนที่โดยใช้ยานพาหนะ	การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนด้วยเลเซอร์เพื่อสำรวจและจัดทำแผนที่ประกอบการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องโดยการติดตั้งบนยานพาหนะขับเคลื่อนด้วยล้อ เช่น รถยนต์ เป็นต้น
Multi View Geometry	MVG	การรังวัดค่าพิกัดสามมิติด้วยภาพถ่ายหลายมุมมอง	การมองเห็นจุดสนใจหรือวัตถุในภาพถ่ายที่มาจากกรังวัดด้วยภาพที่มากกว่าสองมุมมอง จะเกิดเป็นแนวรังสีของแสงที่มาตัดกัน ณ จุดสนใจนั้น ๆ โดยแนวรังสีจะมีจำนวนเพิ่มขึ้นได้จากการเพิ่มส่วนซ้อนทับกันของภาพถ่ายให้มากยิ่งขึ้น โดยวิธีการรังวัดนี้จะนิยมนำไปใช้ในงานด้านการรังวัดด้วยภาพสมัยใหม่ที่อาศัยการมองเห็นด้วยคอมพิวเตอร์
Network-Based Real-Time Kinematics	NRTK	วิธีการรังวัดแบบจลนในทันทีโดยอาศัยโครงข่ายสถานีฐาน	หนึ่งในวิธีการรังวัดค่าพิกัดด้วยระบบดาวเทียม GNSS ที่ให้ความละเอียดถูกต้องสูง และมีความรวดเร็ว โดยอาศัยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม 1 เครื่อง และโครงข่ายสถานีฐานถาวรที่มีการรับสัญญาณ GNSS อย่างต่อเนื่อง เพื่อทำการคำนวณปรับแก้ให้ได้ค่าพิกัดที่มีความถูกต้องที่ดีที่สุด โดยมีความถูกต้องทางตำแหน่งในทางราบ 2 – 8 ซม. และในทางตั้งที่ 5 – 12 ซม. ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ที่เส้นฐานไม่เกิด 100 กม.

Orthophoto	-	ภาพถ่ายออร์โธ	ภาพถ่ายภูมิประเทศที่สร้างจากภาพถ่ายทางอากาศที่ทราบค่าพารามิเตอร์ของการจัดวางภาพภายในและภายนอก พร้อมกับทราบถึงข้อมูลแบบจำลองภูมิประเทศ ภาพดังกล่าวจะถูกสร้างขึ้นใหม่จากกระบวนการย้อนรอยรังสี (Ray tracing) ซึ่งจะทำให้ภาพถ่ายออร์โธนี้ถูกทำให้มีมาตราส่วนที่เท่ากันทั่วทั้งภาพและจุดภาพมีการจัดเรียงสอดคล้องกับระบบพิกัดอ้างอิงที่เลือกใช้ ซึ่งสามารถนำมาใช้งานในลักษณะเดียวกับแผนที่ได้
Overlap	-	<ul style="list-style-type: none"> - ส่วนซ้อนระหว่างภาพถ่ายในแนวนอนเดียวกัน (ภาพถ่ายทางอากาศ) - ส่วนซ้อนของข้อมูลพอยต์คลาวด์ระหว่างแนวนอน (ข้อมูลพอยต์คลาวด์) 	<p>ภาพถ่ายทางอากาศ : เป็นส่วนซ้อนของภาพถ่ายทางอากาศที่อยู่ในแนวนอนเดียวกัน</p> <p>ข้อมูลพอยต์คลาวด์ : เป็นส่วนซ้อนของข้อมูลพอยต์คลาวด์ระหว่างแนวนอนที่ติดกัน ซึ่งได้จากการสแกนด้วยเลเซอร์ทางอากาศ</p>
Photogrammetric Computer Vision	PCV	การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศตามหลักการทางโฟโตแกรมเมตรีด้วยการมองเห็นของคอมพิวเตอร์	การรังวัดค่าพิกัดของจุดสนใจในภาพถ่าย โดยการประมวลผลบล็อกภาพถ่ายทางอากาศตามหลักการทางโฟโตแกรมเมตรี โดยอาศัยการทำงานของคอมพิวเตอร์ที่จะวิเคราะห์ด้วยอัลกอริทึมในซอฟต์แวร์ที่สามารถทำงานด้านโฟโตแกรมเมตรีได้
Pass point	-	จุดผ่าน	จุดที่เกิดจากกระบวนการถ่ายสามเหลี่ยมทางอากาศในการขยายจุดควบคุม ซึ่งเป็นจุดที่เกิดบนส่วนซ้อนระหว่างภาพถ่ายในแนวนอนเดียวกัน จุดผ่านนี้จะจุดที่ได้ค่าพิกัดสามมิติจากการคำนวณโดยไม่จำเป็นต้องลงไปรังวัดในสนาม ค่าพิกัดสามมิตินี้จะได้จากกระบวนการปรับแก้บล็อกลำแสงของภาพถ่ายทางอากาศ
Sidelap	-	ส่วนเกยระหว่างภาพถ่ายในแนวนอนที่ติดกัน	ส่วนที่เกยกันของภาพถ่ายทางอากาศที่อยู่ในแนวนอนที่ติดกัน

Structure-from-Motion	SfM	การสำรวจโครงสร้างจากการเคลื่อนไหว	เป็นเทคนิคการสำรวจโครงสร้างของวัตถุด้วยการเคลื่อนไหวไปในทิศทางต่าง ๆ เพื่อให้เกิดมุมมองของการมองเห็นที่เปลี่ยนแปลงไปในหลาย ๆ มุม ในที่นี้สามารถเปรียบเสมือนกับการรังวัดค่าพิกัดสามมิติจากภาพถ่ายทางอากาศหลายมุมมอง (MVG)
Terrestrial Laser Scanning	TLS	การสแกนด้วยเลเซอร์บนพื้นโลก	เทคนิคการรังวัดที่ใช้เลเซอร์สแกนเนอร์ในการรังวัดค่าพิกัดสามมิติบนพื้นผิววัตถุ โดยการติดตั้งอุปกรณ์ไว้บนพื้นดิน ณ ตำแหน่งที่ทราบค่าพิกัด หลังการคำนวณจะทำให้ได้ข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่เกิดจากการสแกนเป็นรูปทรงของวัตถุ วิธีการดังกล่าวจะมีความละเอียดถูกต้องสูงกว่าการสแกนด้วยเลเซอร์ประกอบการเคลื่อนที่ แต่มีข้อเสียที่จะต้องปรับเปลี่ยนมุมในการรังวัดอยู่เสมอ เพื่อให้ได้ข้อมูลของวัตถุที่ครบถ้วน
Tie point	-	จุดโยงยึด	จุดที่เกิดจากกระบวนการถ่ายภาพสามเหลี่ยมทางอากาศในการขยายจุดควบคุม ซึ่งเป็นจุดที่เกิดบนส่วนเกยของภาพถ่ายระหว่างแนวบินที่ติดกัน จุดโยงยึดนี้จะได้ค่าพิกัดสามมิติจากการคำนวณโดยไม่จำเป็นต้องลงไปรังวัดในสนาม ค่าพิกัดสามมิตินี้จะได้จากกระบวนการปรับแก้ลิโธคล่าแสงของภาพถ่ายทางอากาศ
Unmanned Aerial Vehicle	UAV	อากาศยานไร้คนขับ	อากาศยานชนิดที่ไม่ต้องใช้นักบินในการบังคับและควบคุมภายในตัวเครื่อง แต่จะสามารถควบคุมได้ผ่านการส่งสัญญาณด้วยเครื่องบังคับบนภาคพื้นดิน
A Vertical Take-Off and Landing	VTOL	อากาศยานชนิดขึ้นลงทางตั้ง	เป็นประเภทของอากาศยานที่มีลักษณะเป็นเครื่องบินปีกติดลำตัว แต่สามารถทำการขึ้นบินและลงจอดในทางตั้งได้ ซึ่งมีข้อดีที่ไม่ต้องใช้พื้นที่ขนาดใหญ่หรือรันเวย์ในการขึ้นบินและลงจอด

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ร.ท. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐธำไพศาล
วัน เดือน ปี เกิด	19 พฤษภาคม 2537
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2555 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเตรียมทหาร สถาบันวิชาการป้องกันประเทศ พ.ศ. 2561 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมแผนที่ โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
ที่อยู่ปัจจุบัน	404/654 คอนโด แอทโมซุ ซอย ลาดพร้าว 71 ถนน นาคินवास แขวง ลาดพร้าว เขต ลาดพร้าว กรุงเทพมหานคร 10230
ผลงานตีพิมพ์	1. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐธำไพศาล. (2563). การสำรวจความสูงภูมิประเทศด้วยแสงเลเซอร์ (LiDAR). วารสารแผนที่ (Royal Thai Survey Department Journal), ฉบับที่ 1 ปีที่ 40 หน้า 12 - 28 2. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐธำไพศาล ไพศาล สันติธรรมนนท์ และ ธีรวัฒน์ บรรณกุล พิพัฒน์ (2565). "การศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพของพอยต์คลาวด์จากวิธีการสแกนด้วยเลเซอร์และวิธีการมองเห็นของคอมพิวเตอร์จากภาพถ่ายทางอากาศ" วารสารวิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ISSN:0857- 7951 (กำลังเสนอตีพิมพ์) 3. เทพฤทธิ์ ศรีรัฐธำไพศาล (2565). "การศึกษากิจกรรมวิธีการประมวลผลผสมผสานระหว่างการทำแผนที่ด้วยไลดาร์และบล็อกของภาพถ่ายทางอากาศ" วารสารวิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา, ISSN:0857- 7951 (กำลังเสนอตีพิมพ์)