

แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากอากาศยานไร้คนขับเพื่อช่วยติดตามงานดินซุดและถมใน
โครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2561
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DIGITAL TERRAIN MODEL FROM DRONE FOR INFRASTRUCTURE EARTHWORK
MONITORING



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

Department of Civil Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2018

Copyright of Chulalongkorn University

วรพจน์ สีนสวัสดิ์ : แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากอากาศยานไร้คนขับเพื่อช่วยติดตามงานดินขุดและถมในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน. (DIGITAL TERRAIN MODEL FROM DRONE FOR INFRASTRUCTURE EARTHWORK MONITORING)
 อ.ที่ปรึกษาหลัก : รศ. ดร.ธนิต ธงทอง, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร.วัชรระ เพียรสุภาพ

กระบวนการสำคัญของงานก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน คือการปรับสภาพภูมิประเทศให้เป็นไปตามที่ออกแบบไว้ ซึ่งกระบวนการปรับสภาพพื้นที่ระหว่างกระบวนการก่อสร้างเหล่านี้ โดยปกติไม่สามารถติดตามตรวจสอบได้ ทำให้เกิดการดำเนินงานล่าช้าและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายโดยไม่จำเป็น เนื่องจากขาดระบบติดตามตรวจสอบที่เหมาะสมและสามารถสะท้อนสภาพพื้นที่จริงได้อย่างครบถ้วน ปัจจุบันอากาศยานไร้คนขับและวิธีการจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศได้พัฒนาขึ้นมา สามารถสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขความละเอียดสูงของพื้นที่โครงการก่อสร้างได้ง่าย ใช้เวลาและค่าใช้จ่ายน้อย งานวิจัยนี้นำเสนอแนวคิดการพัฒนาระบบติดตามการทำงานล่าช้าของงานดินขุดและถมระหว่างกระบวนการก่อสร้างในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน ประกอบด้วย 1) ระบบสำหรับเก็บข้อมูลภาคสนาม 2) ระบบสำหรับประมวลผลภาพถ่าย 3) ระบบสำหรับใช้วิเคราะห์ข้อมูลการทำงานล่าช้า กรณีศึกษาที่ใช้ทดสอบระบบเป็นโครงการก่อสร้างถนนทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองพื้นที่ก่อสร้างอยู่ในภูมิประเทศที่เป็นเนินเขาและมีพื้นที่ก่อสร้างจำกัด ผลการทดสอบระบบในกรณีศึกษา สามารถตรวจวิเคราะห์การทำงานล่าช้าทั้งในส่วนของกิจกรรมงานขุดดินและกิจกรรมงานถมดินที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาที่ทำการศึกษา อย่างไรก็ตามจากการทดสอบปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความถูกต้องแม่นยำเชิงปริมาณในพื้นที่ทดสอบขึ้นอยู่กับระบบสำหรับเก็บข้อมูลภาคสนาม

สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

5970300021 : MAJOR CIVIL ENGINEERING

KEYWORD: Rework, DTM, Drone, Photogrammetry

Vorapod Sinsawad :

DIGITAL TERRAIN MODEL FROM DRONE FOR INFRASTRUCTURE EARTHWORK MONITORING. Advisor: Assoc. Prof. Tanit Tongthong, Ph.D. Co-advisor: Asst. Prof. Vachara Peansupap, Ph.D.

One of the important procedures in an infrastructure construction project is to build a geographical area as designed. The process of adjusting a construction geometry during the construction is typically difficult to monitor, resulting in rework and unnecessary expenses. This problem happens due to the fact that there is no appropriate monitoring system that can be used to demonstrate a real site condition. Recently, a drone and photogrammetry methodology have been significantly upgraded and thus, high-resolution Digital Terrain Model (DTM) of site condition can be easily constructed with reducing amount of time and expenses. In this research, the monitoring system for rework in land excavation and backfilling during earthwork construction is developed. This research proposes three main modules, namely fieldwork monitoring system, image processing system, and analytical rework system. The highway project connected between cities was selected as a case study in this research since it is located in mountainous and limited area. The results in this study show that the rework in land excavation and backfilling during the construction of the project can be detected. However, the accuracy of the data depends on the precision of the fieldwork monitoring system.

Field of Study: Civil Engineering

Academic Year: 2018

Student's Signature

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ธนิต ธงทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ วัชระ เพียรสุภาพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาแนะนำและตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ดียิ่ง ตลอดระยะเวลาที่ได้ศึกษา หลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอกราบขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้สละเวลาอันมีค่าของแต่ละท่านมาช่วยตรวจสอบและ ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร.นพดล จอกแก้ว (ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์) อาจารย์ ดร.นคร กกแก้ว (กรรมการสอบวิทยานิพนธ์) และ อาจารย์ ดร.เพชรรัตน์ ลิ้มสุปรีย์รัตน์ (กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย)

นอกจากนี้ขอขอบคุณวิศวกรในโครงการที่ใช้เป็นกรณีศึกษาทุกท่านที่ได้เอื้อเฟื้อข้อมูล และอำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลเพื่อใช้ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณปิยะดิษฐ์ อัครศิริสุข รวมถึงนายธีรพล จิรธรรมคุณ ที่ช่วยเหลือในด้านต่างๆ ด้วยความเต็มใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่สนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วรพจน์ สิ้นสวัสดิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ปัญหาของงานวิจัย.....	3
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	5
1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	6
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	6
บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 วิศวกรรมก่อสร้าง.....	8
2.2 การควบคุมต้นทุนก่อสร้าง.....	8
2.3 บัญชีต้นทุนโครงการ.....	10
2.4 การติดตามความก้าวหน้าโครงการก่อสร้าง.....	11
2.4.1 การคำนวณจากค่าพิกัด (Co-ordinate Method).....	11
2.4.2 วิธีเฉลี่ยหน้าตัดทั้งหมด (Mean Area).....	12
2.5 ปัญหาการทำงานซ้ำซ้อนในโครงการก่อสร้าง.....	15

2.6	แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข (Digital Terrain Model)	16
2.6.1	การสำรวจและทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศ (Photogrammetry)	16
2.6.2	การสำรวจและทำแผนที่จากภาพถ่ายด้วยเทคนิค Structure from Motion (SfM)	16
2.6.3	การสำรวจด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Altimetry)	18
2.7	การศึกษาการจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขด้วยภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ ในสาขาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย.....	19
2.7.1	การประเมินผลความถูกต้องของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากการประมวลผลด้วยวิธี Indirect Geo-Referencing	19
2.7.2	การประเมินผลความถูกต้องของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากการประมวลผลด้วยวิธี Direct geo-referencing	19
2.7.3	การใช้แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขด้วยภาพถ่ายทางอากาศเพื่อหาปริมาณดินในงานก่อสร้างระบบถนนและราง	20
2.7.4	การใช้แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขด้วยภาพถ่ายทางอากาศเพื่อติดตามสภาพถนนในพื้นที่ชนบท.....	22
2.8	สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต.....	22
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	24
3.1	รายละเอียดโครงการที่ใช้ในกรณีศึกษา	24
3.1.1	วัตถุประสงค์ของโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 6 สายบางปะอิน-สระบุรี-นครราชสีมา	24
3.1.2	ลักษณะของโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 6 สายบางปะอิน-สระบุรี-นครราชสีมา.....	25
3.1.3	ลักษณะของพื้นที่ก่อสร้างที่ใช้ในกรณีศึกษา	25
3.2	ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	27
3.2.1	ศึกษาและเก็บข้อมูลปัญหาของการทำงานซ้ำซ้อน	27
3.2.2	วิเคราะห์ปัญหาสาเหตุและแนวทางแก้ไขปัญหาการทำงานซ้ำซ้อน	27

3.2.3 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	27
3.2.4 การพัฒนาระบบ	28
3.2.4.1 การเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศภาคสนาม	28
3.2.4.2 การการสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากการประมวลผล ภาพถ่ายทางอากาศด้วยเทคนิค (SfM)	29
3.2.4.3 ประเมินคุณภาพแบบจำลองมีความถูกต้องแม่นยำเพียงพอสำหรับใช้ วิเคราะห์เพื่อติดตามความก้าวหน้างาน	31
3.2.4.4 วิเคราะห์และทดสอบปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความถูกต้องแม่นยำของ แบบจำลอง	31
3.2.5 การวิเคราะห์เพื่อระบุกิจกรรมงานขุดดินและงานถมดินที่เกิดขึ้นจริง	32
3.2.6 วิเคราะห์กระบวนการทำงานเพื่อระบุความก้าวหน้าหรือการทำงานช้าซ้อน	33
3.2.7 สรุปผลการวิจัยและข้อจำกัดต่างๆ ของระบบติดตามการทำงานช้าซ้อน	33
3.3 สรุปวิธีการดำเนินงานวิจัย	34
บทที่ 4 แนวคิดการใช้ระบบติดตามการทำงานช้าซ้อนงานดินขุดและถม	35
4.1 ปัญหาการและสาเหตุการทำงานช้าซ้อนของงานดินขุดและถมในปัจจุบัน	35
4.2 แนวทางแก้ปัญหาเรื่องการเก็บข้อมูลงานดินขุดและถมที่ใช้ในปัจจุบัน	37
4.3 แนวคิดการพัฒนาระบบติดตามการทำงานช้าซ้อนงานดินขุดและถม	37
4.3.1 การตรวจสอบเบื้องต้น	38
4.3.2 การเก็บข้อมูลภาคสนาม	38
4.3.3 การประมวลภาพถ่ายทางอากาศ	39
4.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อระบุกิจกรรมงานและการหาปริมาณงานช้าซ้อนที่เกิดขึ้น	40
4.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากระบบติดตามการทำงานช้าซ้อนงานดินขุดและถม	43
4.5 สรุปแนวคิดการพัฒนาระบบ	43
บทที่ 5 การออกแบบและพัฒนาระบบติดตามการทำงานช้าซ้อนงานดินขุดและถม	45
5.1 การออกแบบระบบติดตามการทำงานช้าซ้อนงานดินขุดและถม	45

5.2 การพัฒนาระบบ.....	49
5.2.1 ระบบย่อยสำหรับเก็บข้อมูลภาคสนาม	49
5.2.2 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ	50
5.2.3 การวิเคราะห์ข้อมูลพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน.....	51
5.3 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับพัฒนาระบบ	51
5.3.1 อุปกรณ์ประเภทฮาร์ดแวร์ (Hardware).....	52
5.3.2 อุปกรณ์ประเภทซอฟต์แวร์ (Software).....	57
5.3.3 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศด้วยเทคนิค SfM.....	62
5.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลพื้นผิวแบบจำลอง.....	65
5.4 การทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอ	68
5.4.1 การทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องเชิงปริมาณของแบบจำลอง.....	69
5.4.2 การประเมินประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอเพื่อนำไปใช้ติดตามงานดินซุดและ ถมในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน.....	80
5.4.3 ข้อจำกัดในการทดสอบ.....	88
5.5 สรุปผลการออกแบบและพัฒนาระบบ	90
บทที่ 6 การใช้งานจริงระบบติดตามการทำงานเข้าช้อนงานดินซุดและถม	92
6.1 การเก็บข้อมูลภาคสนามและการสร้างแบบจำลองพื้นที่ก่อสร้างในกรณีศึกษา	92
6.1.1 รายละเอียดพื้นที่ก่อสร้างที่ใช้ในกรณีศึกษา.....	92
6.1.2 การสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากอากาศยานไร้คนขับในพื้นที่ กรณีศึกษา	96
6.2 การวิเคราะห์ปริมาณงานเข้าช้อนของงานดินซุดและถม.....	101
6.3 สรุปผลการใช้งานจริง.....	112
บทที่ 7 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	114
7.1 สรุปผลงานวิจัย	114

7.2 การประยุกต์ใช้และประโยชน์ของระบบที่นำเสนอ.....	116
7.3 ผลการวิจัย	117
7.4 ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ	117
7.5 แนวทางพัฒนางานวิจัยในอนาคต	118
บรรณานุกรม.....	119
ประวัติผู้เขียน.....	123



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 5.1 ตารางเปรียบเทียบการสำรวจด้วยวิธีการทั่วไปและวิธีการที่นำเสนอ	47
ตารางที่ 5.2 ข้อมูลของอากาศยานไร้คนบังคับ รีโมตคอนโทรล และ Gimbal ของ DJI Marvic Pro	52
ตารางที่ 5.3 ข้อมูลกล้องถ่ายภาพที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้	53
ตารางที่ 5.4 ข้อมูลแท็บเล็ตคอมพิวเตอร์ ยี่ห้อ Apple รุ่น iPad 9.7" 2017	54
ตารางที่ 5.5 ข้อมูลของอุปกรณ์วัดความสว่างยี่ห้อ PEAK METER รุ่น PM6612	56
ตารางที่ 5.6 ข้อมูลของกล้องประมวลผลรวมยี่ห้อ Leica รุ่น Viva TS11	56
ตารางที่ 5.7 ข้อมูลของคอมพิวเตอร์ Desktop ที่ใช้ประมวลผลในงานวิจัยชิ้นนี้	57
ตารางที่ 5.8 การตั้งค่าปัจจัยระหว่างการใช้อากาศยานไร้คนขับบินเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศและความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศที่สร้างขึ้น	69
ตารางที่ 5.9 รายละเอียดจำนวนจุดสำรวจด้วยวิธีการใช้กล้องประมวลผลรวม	70
ตารางที่ 5.10 รายละเอียดแบบจำลองที่สร้างจากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศเพื่อใช้ทดสอบปัจจัยทิศทางการบินเพื่อถ่ายภาพทางอากาศที่เพดานบินสูง 50 เมตร	72
ตารางที่ 5.11 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณการทดสอบปัจจัยเรื่องทิศทางการบินที่ระดับเพดานบิน 50 เมตร	73
ตารางที่ 5.12 รายละเอียดแบบจำลองที่สร้างจากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศเพื่อใช้ทดสอบปัจจัยทิศทางการบินเพื่อถ่ายภาพทางอากาศที่เพดานบินสูง 70 เมตร	75
ตารางที่ 5.13 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณการทดสอบปัจจัยเรื่องทิศทางการบินที่ระดับเพดานบิน 70 เมตร	76
ตารางที่ 5.14 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณการทดสอบปัจจัยสภาพแสงสว่างและความเร็วชัดเตอร์กล้องถ่ายภาพที่เพดานบินสูง 70 เมตร	78
ตารางที่ 6.1 การตั้งค่าปัจจัยการบินในพื้นที่ก่อสร้างที่ใช้เป็นกรณีศึกษา	97
ตารางที่ 6.2 สภาพแสงสว่างระหว่างการบินเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศในพื้นที่กรณีศึกษาครั้งที่ 2	98
ตารางที่ 6.3 สภาพแสงสว่างระหว่างการบินเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศในพื้นที่กรณีศึกษาครั้งที่ 3	99
ตารางที่ 6.4 รายละเอียดข้อมูลที่ใช้สร้างและได้รับจากแบบจำลองในพื้นที่ก่อสร้างที่ใช้เป็นกรณีศึกษา	99

ตารางที่ 6.5 การเปรียบเทียบพื้นผิวดระดับพื้นดินตามลำดับช่วงเวลาก่อสร้าง 3 ช่วงเวลา 5 ชุด
ข้อมูลการสำรวจจากระบบที่นำเสนอ 110

ตารางที่ 6.6 ตัวอย่างการนำปริมาณงานที่คำนวณได้จากระบบที่นำเสนอไปคิดเป็นค่าใช้จ่ายของ
การทำงานเข้าซ้อนงานขุดดินและงานถมดิน 111



สารบัญรูปร่างภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณดินซุดและถมในโครงการก่อสร้าง	5
รูปที่ 2.1 ระบบควบคุมต้นทุนโครงการ (Halpin and Bolivar, 2012)	10
รูปที่ 2.2 การคำนวณพื้นที่หน้าตัดโดยวิธีพิภักจุดมม (คู่มือการควบคุมงานก่อสร้างทางหลวง, 2550)	12
รูปที่ 2.3 การคำนวณปริมาตรวิธีหน้าตัดเฉลี่ย	13
รูปที่ 2.4 กลุ่มเทคโนโลยีที่ใช้เก็บข้อมูลภาคสนามในปัจจุบัน	14
รูปที่ 2.5 การหาค่าความสูงที่จุด P_{xyz} บนพื้นผิวโลกจากการสำรวจด้วยวิธี Photogrammetry (Linder, 2009)	17
รูปที่ 3.1 แนวเส้นทางก่อสร้างทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 6 และจุดก่อสร้างที่ ทำการศึกษา	25
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	26
รูปที่ 4.1 แนวคิดการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเพื่อช่วยตรวจหาปริมาณงานขนย้ายดินที่เกิดขึ้นจริง	36
รูปที่ 4.2 แนวคิดการพัฒนาระบบติดตามการทำงานเข้าสู่งานดินซุดและถมในโครงการ ก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน	37
รูปที่ 4.3 ตัวแปรในแต่ละช่วงเวลาประกอบการคำนวณปริมาณงานเข้าสู่งาน	40
รูปที่ 4.4 อธิบายการคิดปริมาณงานเข้าสู่งานช่วงเวลาที 1	41
รูปที่ 4.5 อธิบายการคิดปริมาณงานเข้าสู่งานช่วงเวลาที 2	42
รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการทำงานของระบบที่นำเสนอ	48
รูปที่ 5.2 การกำหนดพื้นที่และเส้นทางการบินสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนบังคับ	50
รูปที่ 5.3 อากาศยานไร้คนขับยี่ห้อ DJI Marvic Pro ติดตั้งกล้องถ่ายภาพดิจิทัลความละเอียด สูง 12 Mega Pixels	52
รูปที่ 5.4 แท็บเล็ตคอมพิวเตอร์ยี่ห้อ Apple รุ่น iPad 9.7” 2017	54
รูปที่ 5.5 ลักษณะหมุดควบคุมภาคพื้นดินทั้ง 2 แบบ	55
รูปที่ 5.6 อุปกรณ์สำหรับใช้วัดสภาพแสงสว่าง ยี่ห้อ PEAK METER รุ่น PM6612	55
รูปที่ 5.7 กล้องประมวลผลรวม ยี่ห้อ Leica รุ่น Viva TS11	56
รูปที่ 5.8 ตัวอย่างคอมพิวเตอร์ Desktop และอุปกรณ์ต่อพ่วงพื้นฐาน	57
รูปที่ 5.9 หน้าต่างการทำงานของโปรแกรมประยุกต์ GSP Pro	58
รูปที่ 5.10 หน้าต่างการตั้งค่าปัจจัยแผนการบินขั้นพื้นฐานและขั้นสูง	59

รูปที่ 5.11 หน้าตาการทำงานของซอฟต์แวร์ Agisoft PhotoScan Professional.....	60
รูปที่ 5.12 หน้าตาการทำงานของซอฟต์แวร์ Autodesk AutoCAD Civil3D (2018)	61
รูปที่ 5.13 การทำงานของการประมวลผลภาพถ่ายด้วยเทคนิค SfM (ดัดแปลงมาจาก (Westoby et al., 2012)).....	62
รูปที่ 5.14 วิธีและขั้นตอนการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศเพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิ ประเทศเชิงเลข	63
รูปที่ 5.15 ตัวอย่างการเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติด้านหน้า) จากข้อมูล การสำรวจจาก 2 ครั้ง.....	65
รูปที่ 5.16 ตัวอย่างการเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติ) จากข้อมูลการ สำรวจจาก 2 ครั้ง	66
รูปที่ 5.17 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดดิน Sta. 134+055 และ Sta. 134+060.....	66
รูปที่ 5.18 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดดิน Sta. 134+065 และ Sta. 134+070.....	67
รูปที่ 5.19 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดดิน Sta. 134+075 และ Sta. 134+080.....	67
รูปที่ 5.20 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดดินตั้งแต่การสำรวจ 3 ครั้งขึ้นไป.....	68
รูปที่ 5.21 พื้นที่ทดสอบระบบและรูปทรงของพื้นที่ทดสอบ (บันได).....	69
รูปที่ 5.22 การสร้างพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ด้วยซอฟต์แวร์ Autodesk Civil3D จากข้อมูลจุด สำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวม	71
รูปที่ 5.23 ตัวอย่างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขของพื้นที่ทดสอบที่ได้จากการ ประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศที่ระดับเพดานบิน 50 ม.	71
รูปที่ 5.24 ร้อยละความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณระหว่างการสำรวจทั่วไปด้วยกล้องประมวล ผลรวมเปรียบเทียบกับแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากภาพถ่ายทางอากาศ จากอากาศยานไร้คนขับ	74
รูปที่ 5.25 ร้อยละความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณระหว่างการสำรวจทั่วไปเปรียบเทียบกับ แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ	76
รูปที่ 5.26 ร้อยละความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณระหว่างการสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวม เปรียบเทียบกับแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขเพื่อทดสอบปัจจัยเรื่องสภาพแสง สว่างและความเร็วชัตเตอร์กล้องถ่ายภาพที่เพดานบินสูง 70 เมตร	79
รูปที่ 5.27 การเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติที่ 1) ระหว่างกล้องประมวล ผลรวมกับแบบจำลองที่ 1.....	81
รูปที่ 5.28 การเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติที่ 2) ระหว่างกล้องประมวล ผลรวมกับแบบจำลองที่ 1.....	81

รูปที่ 5.29 การเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติที่ 1) ระหว่างกล้องประมวลผลรวมกับแบบจำลองที่ 2.....	82
รูปที่ 5.30 การเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติที่ 1) ระหว่างกล้องประมวลผลรวมกับแบบจำลองที่ 2.....	82
รูปที่ 5.31 การเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติที่ 1) ระหว่างกล้องประมวลผลรวมกับแบบจำลองที่ 3.....	83
รูปที่ 5.32 การเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติที่ 1) ระหว่างกล้องประมวลผลรวมกับแบบจำลองที่ 3.....	83
รูปที่ 5.33 การเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติที่ 1) ระหว่างกล้องประมวลผลรวมกับแบบจำลองที่ 1 และแบบจำลองที่ 2.....	84
รูปที่ 5.34 การเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติที่ 2) ระหว่างกล้องประมวลผลรวมกับแบบจำลองที่ 1 และแบบจำลองที่ 2.....	84
รูปที่ 5.35 การเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติที่ 1) ระหว่างกล้องประมวลผลรวมกับแบบจำลองที่ 1 แบบจำลองที่ 2 และแบบจำลองที่ 3.....	85
รูปที่ 5.36 การเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติที่ 2) ระหว่างกล้องประมวลผลรวมกับแบบจำลองที่ 1 แบบจำลองที่ 2 และแบบจำลองที่ 3.....	85
รูปที่ 5.37 ภาพตัดขวางของพื้นที่ทดสอบ(บันได) ที่สร้างจากการสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวม.....	86
รูปที่ 5.38 การเปรียบเทียบภาพเส้น Profiles ระหว่างการสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวมกับแบบจำลอง 1 แบบจำลอง 2 และ แบบจำลอง 3 ตามลำดับ.....	87
รูปที่ 5.39 การนำเส้น Profiles จากการสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวม มาเปรียบเทียบกับเส้น Profiles ที่สร้างจากระบบที่นำเสนอทั้ง 3 แบบจำลอง.....	88
รูปที่ 6.1 สภาพภูมิประเทศพื้นในกรณีศึกษา.....	93
รูปที่ 6.2 การปรับพื้นที่เพื่อให้เครื่องจักรขนาดใหญ่ทำงานได้ในกรณีศึกษา.....	93
รูปที่ 6.3 ตัวอย่างแบบแปลนพื้นที่ก่อสร้างที่ใช้ในปัจจุบัน.....	94
รูปที่ 6.4 ตัวอย่างภาพตัดขวางแสดงสภาพพื้นที่ก่อสร้างที่ใช้ในปัจจุบัน.....	94
รูปที่ 6.5 พื้นที่ก่อสร้างทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 6 สายบางปะอิน-สระบุรี-นครราชสีมา บริเวณพื้นที่ก่อสร้างถนนวางบนดิน.....	95
รูปที่ 6.6 แบบภาพตัดขวางของแบบก่อสร้างถนนวางบนดินในพื้นที่กรณีศึกษา.....	96
รูปที่ 6.7 ตัวอย่างจุด BM ของโครงการก่อสร้างที่หาสีขาวชั่วคราวในพื้นที่กรณีศึกษา.....	97

รูปที่ 6.8 ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศในพื้นที่กรณีศึกษาที่สภาพแสงสว่างมีส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐานจากเงาเมฆ	98
รูปที่ 6.9 ส่วนหนึ่งของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากระบบที่นำเสนอจากการเก็บ ข้อมูลครั้งที่ 1	100
รูปที่ 6.10 ส่วนหนึ่งของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากระบบที่นำเสนอจากการเก็บ ข้อมูลครั้งที่ 2	100
รูปที่ 6.11 ส่วนหนึ่งของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากระบบที่นำเสนอจากการเก็บ ข้อมูลครั้งที่ 3	101
รูปที่ 6.12 แบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดินก่อนเริ่มการก่อสร้าง (ก) Plan View และ (ข) Front View.....	102
รูปที่ 6.13 แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขในกรณีศึกษาที่ได้จากระบบที่นำเสนอจากการ สำรวจ ครั้งที่ 1 (ก) Plan View และ (ข) Front View	103
รูปที่ 6.14 แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขในกรณีศึกษาที่ได้จากระบบที่นำเสนอจากการ สำรวจ ครั้งที่ 2 (ก) Plan View และ (ข) Front View	104
รูปที่ 6.15 แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขในกรณีศึกษาที่ได้จากระบบที่นำเสนอจากการ สำรวจ ครั้งที่ 3 (ก) Plan View และ (ข) Front View	104
รูปที่ 6.16 แบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน จากการแปลงค่าระดับที่ปรากฏในแบบก่อสร้าง (ก) Plan View และ (ข) Front View	105
รูปที่ 6.17 การเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ระหว่างก่อนเริ่มงานก่อสร้าง (สี น้ำเงิน) และตามแบบก่อสร้าง (สีแดง).....	106
รูปที่ 6.18 การเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ระหว่างก่อนเริ่มงานก่อสร้าง (สี น้ำเงิน) และจากการสำรวจครั้งที่ 1 (สีส้ม).....	107
รูปที่ 6.19 การเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ระหว่างการสำรวจ ครั้งที่ 1 (สี ส้ม) และตามแบบก่อสร้าง (สีแดง)	107
รูปที่ 6.20 การเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ระหว่างการสำรวจครั้งที่ 1 (สี น้ำส้ม) และการสำรวจครั้งที่ 2 (สีม่วง).....	108
รูปที่ 6.21 การเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ระหว่างการสำรวจครั้งที่ 2 (สี ม่วง) และตามแบบก่อสร้าง (สีแดง).....	108
รูปที่ 6.22 การเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ระหว่างการสำรวจครั้งที่ 2 (สี ม่วง) และการสำรวจครั้งที่ 3 (สีเขียว)	109

รูปที่ 6.23 การเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ระหว่างการสำรวจครั้งที่ 3 (สีเขียว) และตามแบบก่อสร้าง (สีแดง) 109



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยมีโครงการก่อสร้างเพื่อขยายโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ ของประเทศ ทั้งที่กำลังก่อสร้างอยู่ในปัจจุบัน และมีแผนที่จะก่อสร้างในอนาคต เพื่อเชื่อมต่อไปยังตัวเมืองสำคัญในภูมิภาคต่างๆ ของประเทศ เพื่อรองรับการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและการขยายตัวของเมืองไปยังภูมิภาคต่างๆ ของประเทศในอนาคต

ลักษณะโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน (ถนน) คือ มีพื้นที่ก่อสร้างขนาดใหญ่ทอดยาวไปตามสภาพภูมิประเทศที่ตั้งของโครงการนั้นๆ และมีบางช่วงที่ต้องมีการทำงานในพื้นที่ภูมิประเทศที่เป็นภูเขาหรือเนินเขาซึ่งสภาพภูมิประเทศมีความสลับซับซ้อนและพื้นที่ก่อสร้างมีจำกัดเนื่องจากพื้นที่ข้างเคียงแนวก่อสร้างมีโครงสร้างพื้นฐานเดิมเปิดใช้งานอยู่ด้วย ประกอบกับการทำงานระหว่างกระบวนการก่อสร้างต้องมีการขนย้ายวัสดุหินขุดและถมเพื่อทำการปรับสภาพพื้นที่แบบชั่วคราวหลายครั้ง เพื่อให้การทำงานในขั้นตอนต่างๆ สามารถดำเนินการได้สะดวก โดยใช้เครื่องจักรกลเป็นหลัก ทำให้สภาพพื้นที่ภายในโครงการก่อสร้างมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว (Dynamic site condition)

ทั้งนี้การปรับสภาพภูมิประเทศภายในพื้นที่ก่อสร้างเพื่ออำนวยความสะดวกในขั้นตอนการทำงานต่าง ๆ นั้น หากขาดการวางแผนการทำงานอย่างละเอียดครบถ้วน ย่อมก่อให้เกิดการทำงานซ้ำซ้อนของกิจกรรมงานดินขุดและถมเกิดขึ้น

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อเก็บข้อมูลภาพถ่ายวิดีโอ (Video) สำหรับใช้รายงานความก้าวหน้าในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน ซึ่งสามารถแสดงความก้าวหน้าเชิงจำนวนที่นับได้แต่ไม่สามารถแสดงจำนวนเชิงปริมาณ เช่น ปริมาณการทำงานขุดดินและถมดินได้

การสำรวจเพื่อจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขของพื้นที่ก่อสร้างเพื่อใช้วางแผนการทำงานและติดตามความก้าวหน้าหรือการทำงานซ้ำซ้อนของงานดินขุดและถม ในปัจจุบันใช้วิธีการสำรวจด้วยวิธีทั่วไป เป็นการสำรวจที่ใช้แรงงานคนเป็นหลักซึ่งเป็นวิธีการสำรวจที่ต้องใช้เวลาและแรงงานในการสำรวจมาก และไม่ทันการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิประเทศในพื้นที่ก่อสร้าง

นอกจากนี้ในปัจจุบันอุตสาหกรรมก่อสร้างในประเทศไทยยังมี “ปัญหาขาดแคลนแรงงานในภาคอสังหาริมทรัพย์โดยเฉพาะใน ธุรกิจก่อสร้าง กำลังเป็นปัญหาใหญ่เข้าขั้นวิกฤติโดยมีภาวะขาดแคลนแรงงานในทุกส่วน ทั้งแรงงานระดับหัวหน้าคุมงาน แรงงานระดับช่างฝีมือและ ผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้าน และแม้กระทั่งแรงงานไร้ฝีมือ ถึงขั้นต้องแย่งตัวแรงงานต่างด้าวที่ประจำในแต่ละโครงการ

เสี่ยงผิดพลาด แต่หลายบริษัทก็ต้องรับสภาพเนื่องจากมีภาวะขาดแคลนแรงงานอย่างหนัก” (อรรรรณ หอยจันทร์, 2556)

จากปัญหาที่กล่าวมาทำให้การก่อสร้างในปัจจุบันควรต้องมีการพัฒนาจากการใช้แรงงานคน เป็นหลักอย่างเช่นในอดีตเปลี่ยนมาใช้เครื่องจักรกล วิทยาการคอมพิวเตอร์ การสำรวจระยะไกลด้วย อากาศยานไร้คนขับ และอุปกรณ์เซ็นเซอร์ต่างๆ ในธุรกิจก่อสร้างมากขึ้น

อากาศยานไร้คนขับและวิธีการจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากการ ประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศที่พัฒนาขึ้นเมื่อเร็ว ๆ นี้ สามารถสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศ เชิงเลขความละเอียดสูง ได้ง่ายด้วยค่าใช้จ่ายที่ไม่แพง (Omar and Nehdi, 2016)

อากาศยานไร้คนขับหรือ Drone สามารถแบ่งตามลักษณะของปีกได้ 2 ประเภท (นิค จ่านง, 2555) คือ

- 1) ชนิดปีกตรึง (Fixed Wing) มีข้อดีคือ มีระยะปฏิบัติการไกล สามารถอยู่ในอากาศได้ เป็นเวลานาน แต่มีข้อจำกัดในเรื่องความต้องการพื้นที่เพื่อทำการขึ้นบินหรือลงจอด (Take-off and Landing) และขาดความคล่องตัวในพื้นที่จำกัด
- 2) ชนิดปีกหมุน (Multi-Rotors) มีข้อดีคือ มีความคล่องตัวในพื้นที่จำกัดและสามารถ ขึ้นลงในพื้นที่แคบๆ ได้ (ขึ้น-ลง แนวตั้ง) แต่มีข้อจำกัดในเรื่องของเวลาและระยะทาง ในการปฏิบัติการ

ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้งานอากาศยานไร้คนขับที่หลากหลาย ทั้งทางด้านทหาร การสำรวจทางธรณีวิทยา การสำรวจสิ่งแวดล้อม การสำรวจทางเกษตรกรรม การสำรวจและกู้ภัย งาน ถ่ายทำภาพยนตร์หรือแม้กระทั่งเป็นงานอดิเรกเป็นต้น เนื่องจากปัจจุบันอากาศยานไร้คนขับ มีราคา ถูกสามารถหาซื้อได้ง่าย ติดตั้งกล้องดิจิตอลความละเอียดสูงพร้อมอุปกรณ์ช่วยพยุงให้ตัวกล้องมีความ เสถียรหรือ Gimbal มาด้วยและมีซอฟต์แวร์ช่วยควบคุมการบินอัตโนมัติ ซึ่งคุณสมบัติตามที่กล่าวมา มีความเหมาะสมเพียงพอที่จะนำมาใช้เก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศเพื่อใช้ในการจัดทำแบบจำลอง พื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขด้วยวิธีการประมวลผลจากภาพถ่าย (Photogrammetry) ได้

วิธีการสำรวจเพื่อเก็บข้อมูลภาคสนามเพื่อจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขหรือ DTM (Digital Terrain Model) ในงานสำรวจทางภาคพื้นดินสามารถเก็บได้หลายวิธีดังต่อไปนี้ (Florinsky, 2016)

- 1) การสำรวจโดยใช้กล้องระดับ(Leveling) และกล้อง Theodolite หรือกล้อง ประมวลผลรวม (Total Station) ประกอบด้วย 1) การวัดระยะทาง ด้วยวิธีสเต เตีย (Stadia) วัดด้วยเทปวัดระยะ หรือเครื่องวัดระยะอิเล็กทรอนิกส์ 2) การระดับ (Leveling) ด้วยเทปวัดระยะวัดจุดที่ไม่สูงมากนัก หรือการวัดด้วยกล้องระดับ (Level) และ 3) การวัดมุม ด้วยกล้องวัดมุม (Theodolite)

- 2) การสำรวจโดยใช้ค่าพิกัดจากดาวเทียม (Kinematic GNSS Surveys)
- 3) การสำรวจโดยใช้การประมวลผลจากภาพถ่าย (Photogrammetry)
- 4) การสำรวจโดยใช้การประมวลผลจากภาพถ่าย (Photogrammetry) ด้วยเทคนิค Structure-From-Motion (SfM)
- 5) การสำรวจโดยใช้แสงเลเซอร์ (Laser Altimetry)
- 6) การสำรวจด้วยคลื่นไมโครเวฟ (SAR Techniques)

การจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขด้วยวิธีการประมวลผลจากภาพถ่าย ทางอากาศ (Photogrammetry) ด้วยเทคนิค SfM (Structure-from-Motion) เริ่มต้นพัฒนามาจาก คอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Vision) ด้วยวิธีการเรียงซ้อนภาพถ่ายที่มีมุมมองต่างกัน ตำแหน่งของ กล้องและวัตถุในภาพถ่ายจะถูกระบุและจับคู่จุดที่เหมือนกันไปพร้อมกัน ทำการคำนวณซ้ำด้วย ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ เพื่อประมาณการหาตำแหน่งกล้องและสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศ เชิงเลขขึ้นมาใหม่ เทคนิคนี้สามารถใช้อากาศยานไร้คนขับในการเก็บข้อมูลในรูปแบบที่ต้องการได้ง่าย ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลไม่นาน ต้นทุนค่าอุปกรณ์และซอฟต์แวร์ไม่สูงมาก แต่ก็ยังมีข้อจำกัดด้าน ปัจจัยอื่นๆ อยู่เช่น สภาพอากาศ ความสั่นสะเทือน การบิดเบี้ยวจากเลนส์ (Lens distortions) และ ความถูกต้องของแบบจำลองจากการประมวลผลด้วยภาพถ่าย (Uysal et al., 2015)

1.2 ปัญหาของงานวิจัย

การก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ อาจมีช่วงที่ต้องก่อสร้างผ่านบริเวณเนินเขา ซึ่ง สภาพภูมิประเทศมีความสลับซับซ้อนสูง ผู้รับเหมาก่อสร้างจำเป็นต้องปรับสภาพภูมิประเทศให้มีความลาดชันลดลงเพื่อให้สามารถทำการก่อสร้างได้ เช่น การปรับสภาพภูมิประเทศเพื่อให้เครื่องจักร ขนาดใหญ่สามารถทำงานได้ ปรับสภาพภูมิประเทศเพื่อทำทางขนส่งวัสดุก่อสร้างดังแสดงในรูปที่ 1.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณดินขุดและถมในโครงการก่อสร้างระหว่างวันที่ 11 ธันวาคม 2560 ถึง 22 มกราคม 2561 ปรับสภาพภูมิประเทศเพื่อกองเก็บวัสดุและชิ้นงาน ฯลฯ ที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงาน ก่อสร้างและต้นทุนค่าก่อสร้างโดยตรง ในบางกรณีอาจมีการปรับสภาพพื้นที่ซ้ำซ้อนเพื่ออำนวยความสะดวกในกระบวนการก่อสร้างกิจกรรมใดกิจกรรมหนึ่งโดยเฉพาะ ทั้งส่วนที่แสดงอยู่ในแบบก่อสร้าง สามารถกำหนดรายการงานและมีรายละเอียดของงานในระบบบัญชีต้นทุนโครงการก่อสร้าง และส่วน งานชั่วคราวที่ไม่แสดงในแบบก่อสร้าง และไม่มีกำหนดรายการงานในระบบบัญชีต้นทุนโครงการก่อสร้าง

การสำรวจเพื่อหาปริมาณงานดินขุดและถมของงานปรับสภาพภูมิประเทศดังกล่าวด้วย วิธีการวัดระยะทาง การระดับและการวัดมุมด้วยการสำรวจทั่วไปไม่เพียงพอและทันการ เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริง เนื่องจากทำได้ยากลำบากและอันตราย ใช้เวลาและแรงงานในการเก็บ ข้อมูลภาคสนามมากเนื่องจากสภาพภูมิประเทศมีความสลับซับซ้อน ความหนาแน่นกลุ่มจุดสำรวจต่อ

พื้นที่ต่ำเนื่องจากเป็นเพียงการสำรวจเพื่อหาข้อมูลค่าพิกัดจุดที่ทำการวัดอย่างไม่ต่อเนื่อง และไม่สามารถแสดงสภาพพื้นผิวภูมิประเทศจริงได้ ทำให้การหาปริมาณงานดินขุดและถมภายในโครงการก่อสร้างด้วยวิธีการสำรวจทั่วไป ถูกละเอียดการติดตามปริมาณงานในส่วนนี้้อย่างเหมาะสมและสม่าเสมอเพียงพอสำหรับนำข้อมูลไปใช้วิเคราะห์กิจกรรมและปริมาณงาน เพื่อวิเคราะห์ความก้าวหน้าและการทำงานล่าช้าที่เกิดขึ้นจริงหน้างาน และไม่สามารถนำข้อมูลการทำงานที่เกิดขึ้นจริงเหล่านั้นบันทึกในบัญชีต้นทุนโครงการก่อสร้างได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต ผลกระทบของการทำงานล่าช้าในโครงการก่อสร้างประเภทโครงสร้างพื้นฐาน คิดเป็น 5.7% ของต้นทุนรวมทั้งโครงการ (Hwang et al., 2009)

จากที่กล่าวมาข้างต้น การจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขด้วยการประมวลผลจากภาพถ่ายทางอากาศด้วยเทคนิค SfM อาจมีข้อจำกัดอยู่บ้าง อย่างไรก็ตามการจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขด้วยวิธีดังกล่าวน่าจะมีคามเหมาะสมสำหรับนำมาพัฒนาใช้เพื่อเก็บข้อมูลของปริมาณงานดินขุดและถมในโครงการก่อสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นจริงหน้างานเพื่อวิเคราะห์ความก้าวหน้าและการทำงานล่าช้า และเป็นแหล่งข้อมูลสำหรับใช้ในบัญชีต้นทุนโครงการก่อสร้างต่อไป

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยเพื่อพัฒนาระบบติดตามการทำงานล่าช้าของงานดินขุดและถมระหว่างกระบวนการก่อสร้างในโครงการก่อสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่
- 2) วัตถุประสงค์ย่อยของงานวิจัยประกอบด้วย
 - 2.1) จัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากอากาศยานไร้คนขับเพื่อตรวจหาปริมาณงานดินระหว่างกระบวนการก่อสร้างในพื้นที่กรณีศึกษา
 - 2.2) เพื่อศึกษาปัจจัยและข้อจำกัดของการใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อเก็บข้อมูลภาพถ่ายและใช้เทคนิคการประมวลผลภาพถ่ายเพื่อจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขในโครงการก่อสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่



รูปที่ 1.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาณดินขุดและถมในโครงการก่อสร้าง

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

กรณีศึกษา การจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขด้วยภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงสภาพพื้นดินภายในโครงการก่อสร้าง ด้วยการสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขซึ่งแสดงสภาพภูมิประเทศจริงในแต่ละช่วงเวลา เพื่อนำมาเปรียบเทียบหาปริมาณงานดินขุดและถมที่เปลี่ยนแปลงในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 6 บริเวณที่เป็นภูเขาและสภาพภูมิประเทศมี

ความสลับซับซ้อนทั้งในส่วนของงานก่อสร้างชั่วคราวและงานก่อสร้างตามแบบก่อสร้างจริง เพื่อติดตามปริมาณงานดินขุดและถมที่เกิดขึ้นจริงระหว่างกระบวนการก่อสร้างเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณงานดินขุดและถมที่มีการทำงานในลักษณะซ้ำซ้อน

1.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย

- 1) ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต ประกอบด้วย การควบคุมต้นทุนการก่อสร้าง บัญชีต้นทุนโครงการ การติดตามความก้าวหน้าโครงการก่อสร้าง การคำนวณเพื่อคิดปริมาณงานดินขุดและถม การทำงานซ้ำซ้อน
- 2) การลงพื้นที่โครงการก่อสร้างเพื่อสัมภาษณ์ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องกับการวางแผนการทำงาน การสำรวจ และการเก็บข้อมูลเพื่อรายงานความก้าวหน้าในโครงการก่อสร้าง รวมถึงการสำรวจสภาพภูมิประเทศและสภาพแวดล้อมบริเวณพื้นที่ก่อสร้างที่จะใช้เป็นพื้นที่กรณีศึกษา
- 3) วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในโครงการก่อสร้างที่ใช้เป็นกรณีศึกษาในปัจจุบัน และแนวทางแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นดังกล่าว
- 4) พัฒนาระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนของงานดินขุดและถม ประกอบด้วย
 - วิธีการสำรวจเพื่อจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขที่มีใช้ในปัจจุบัน
 - นำเสนอแนวคิดการพัฒนาระบบติดตามงานดินขุดและถม
 - ทดลองสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากชุดเครื่องมือที่นำเสนอในพื้นที่ทดสอบ
- 5) ทดลองใช้ในกรณีศึกษา
 - สร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขในพื้นที่กรณีศึกษา
 - วิเคราะห์การทำงานซ้ำซ้อนของงานดินขุดและถมจากระบบที่นำเสนอ
- 6) เรียบเรียงและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ระบบที่สามารถติดตามและตรวจสอบการทำงานซ้ำซ้อนของงานดินขุดและถมที่เกิดขึ้นจริง ในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานได้ทันการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจากการใช้เครื่องจักรกลในการทำงาน

- 2) ระบบที่สามารถสำรวจเพื่อจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขของพื้นที่ภูเขาหรือเนินเขาที่มีความสลับซับซ้อน ใช้แรงงานในการดำเนินการในขั้นตอนต่างๆ น้อย และชุดเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับใช้วิเคราะห์หากิจกรรมงานและปริมาณการทำงานซ้ำซ้อนของงานดินซุดและถม จากข้อมูลที่ได้รับจากแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข ระหว่างกระบวนการก่อสร้าง
- 3) ปัจจัยและข้อจำกัดต่างๆ ของระบบที่ใช้เก็บข้อมูลภาคสนาม ที่ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 วิศวกรรมก่อสร้าง

การศึกษาในสาขาวิศวกรรมก่อสร้าง (Construction Engineering) สามารถแบ่งออกในลักษณะกว้างๆ ได้ 2 แบบ

- 1) เทคโนโลยีงานก่อสร้าง
- 2) การบริหารงานก่อสร้าง

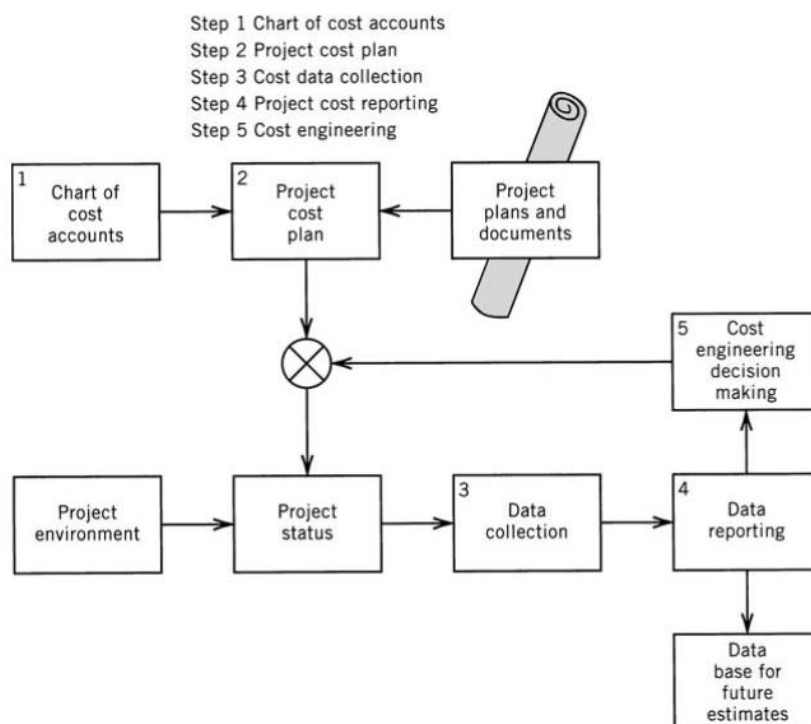
คำว่าเทคโนโลยีก่อสร้าง สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ เทคโนโลยี (Techno) หมายถึง ความรู้การนำเทคโนโลยีมาใช้งาน และโลจิก (Logic) หมายถึง แนวคิดของลำดับขั้นตอน (Sequence) และกระบวนการ (Procedure) การใช้เทคโนโลยีในขั้นตอนต่างๆ เช่น เทคโนโลยีการเทคอนกรีต ผนังหุ้มอาคาร งานขุดดิน และอื่นๆ เมื่อโครงการก่อสร้างถูกกำหนดขึ้นมา หนึ่งในคำถามสำคัญที่ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องต้องพบคือ ควรเลือกใช้เทคนิคก่อสร้างแบบไหนในโครงการก่อสร้าง ในขณะที่การบริหารงานก่อสร้าง มุ่งเน้นการบริหารทรัพยากรเพื่อประยุกต์ใช้ในโครงการให้ดีที่สุด โดยทั่วไปทรัพยากรหลักในงานก่อสร้างมี 4 ชนิด (4M) ได้แก่ คนงาน (Man power) เครื่องจักร (Machines) วัสดุ (Materials) และ เงิน (Money) ดังนั้นการบริหารงานก่อสร้างจึงเป็นการวางแผนการใช้ทรัพยากรต่างๆ ในเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด (Halpin and Bolivar, 2012)

2.2 การควบคุมต้นทุนก่อสร้าง

ต้นทุนงานก่อสร้างอาจแบ่งได้ 2 ประเภท ได้แก่ ต้นทุนประมาณ (Estimated cost) ได้จากการประมาณต้นทุนก่อนงานก่อสร้างจะเริ่มขึ้นเพื่อทราบค่าใช้จ่ายที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเมื่อทำการก่อสร้างจริง และต้นทุนจริง (Actual cost) คือ ค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่เกิดขึ้นจริงระหว่างกระบวนการก่อสร้าง การควบคุมต้นทุนก่อสร้างอาศัยการเปรียบเทียบข้อมูล 2 ส่วน จากข้อมูลการประมาณต้นทุน เช่น ค่าประมาณของปริมาณงาน อัตราผลผลิต ต้นทุนต่อหน่วย กับข้อมูลที่เก็บรวบรวมจากหน้างาน เช่น ความก้าวหน้าของงาน อัตราผลผลิตจริง ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจริง

การตรวจพบปัญหาการใช้ต้นทุนเกินในแต่ละกิจกรรมก่อสร้างอย่างรวดเร็วตั้งแต่ระยะเริ่มต้นของปัญหาจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากในการบริหารงานก่อสร้าง เพื่อให้ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องมีทางเลือกในการปฏิบัติเพื่อลดหรือกำจัดผลกระทบที่เกิดจากการใช้ต้นทุนเกิน (Halpin and Bolivar, 2012)

ต้นทุนก่อสร้างอาจแบ่งตามลักษณะความสัมพันธ์กับงานได้ดังนี้ (Carr, 1989)



รูปที่ 2.1 ระบบควบคุมต้นทุนโครงการ (Halpin and Bolivar, 2012)

2.3 บัญชีต้นทุนโครงการ

ขั้นตอนแรกในการสร้างระบบบัญชีต้นทุนสำหรับโครงการก่อสร้างคือการกำหนด ศูนย์ข้อมูลระดับโครงการ การใช้งานเบื้องต้นของบัญชีต้นทุนโครงการคือการแยกระดับงานในโครงการให้อยู่ในหน่วยที่ควบคุมได้อย่างเหมาะสม แต่ละหน่วยงานสามารถวัดผลงานหน้างานได้ ในโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อน การแตกหน่วยงานตามกลุ่มโครงสร้างจะมีประโยชน์ในแง่ของการควบคุมเวลาและต้นทุน แนวคิดการแตกงาน (Work breakdown) ในลักษณะที่รวมแผนงานก่อสร้างและการควบคุมต้นทุนเป็นวิธีแตกงานออกตามชุดงาน (Work package) การเก็บข้อมูลเวลาและต้นทุนเพื่อรายงานสถานะของโครงการ กลุ่มชุดงานก่อสร้างเป็นส่วนประกอบของโครงสร้างการแตกงาน (Work Breakdown Structure) ที่ระดับต่ำที่สุดในลำดับชั้นงานคือกิจกรรมงานย่อย เช่น งานเทคอนกรีต ฐานราก งานเข้าแบบฐานราก และงานขุดดินฐานราก เป็นต้น (Halpin and Bolivar, 2012)

อย่างไรก็ตามในโครงการก่อสร้างที่ขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อน อาจมีหมวดงานบางประเภท เช่น หมวดงานชั่วคราว ที่จัดอยู่ในประเภทต้นทุนทางอ้อมซึ่งผู้รับเหมาส่วนมากนิยมใช้วิธีคิดปริมาณด้วยการคูณเป็นเปอร์เซ็นต์เข้าไปในต้นทุนทางตรง ทำให้ไม่มีการแบ่งกลุ่มกิจกรรมงานต่างๆ ตั้งแต่ช่วงต้นของการประมาณราคาเพื่อจัดทำบัญชีต้นทุนโครงการ และไม่มีการคิดเพื่อแจกแจงปริมาณงานหรือต้นทุนของงานที่ต้องทำจริงที่จะเกิดขึ้นในหน่วยงานก่อสร้าง เป็นสาเหตุให้การทำงานในลักษณะงานชั่วคราวอาจมีการทำงานซ้ำซ้อนเนื่องจากขาดการวางแผนงานที่ดี หรือขาดการติดตามผลการ

ทำงานจริงเพื่อเปรียบเทียบกับต้นทุนที่วางแผนไว้ เนื่องจากทำได้ยากและระบุไว้ในบัญชีต้นทุนโครงการไม่ชัดเจน และเป็นสาเหตุให้เกิดการใช้งบประมาณเกินในส่วนนี้ได้ง่าย

2.4 การติดตามความก้าวหน้าโครงการก่อสร้าง

วัตถุประสงค์หลักในการบริหารโครงการก่อสร้าง (Project management) ประกอบด้วย การบริหารเวลา ต้นทุน ความปลอดภัยในการทำงาน และคุณภาพของงานก่อสร้างให้เป็นไปตามกำหนด เช่น โครงการก่อสร้างต้องเสร็จภายในระยะเวลาที่กำหนดไว้ ค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างอยู่ในงบประมาณที่ตั้งไว้ ไม่มีอุบัติเหตุขณะดำเนินการก่อสร้าง และการก่อสร้างได้ตามมาตรฐานงานนั้นๆ

การบริหารโครงการก่อสร้างให้บรรลุวัตถุประสงค์ตามที่กล่าวมาข้างต้นนั้น อาศัยการทำงานที่เป็นวัตรจักร ประกอบด้วย 1) การวางแผนงาน 2) การควบคุมงบประมาณหรือต้นทุน 3) การวางแผนงาน 4) การใช้ทรัพยากรที่มีอย่างเหมาะสม 5) การติดตามตรวจสอบ และ 6) การประเมินผลงาน เพื่อนำไปปรับแก้ในการวางแผนครั้งต่อไป

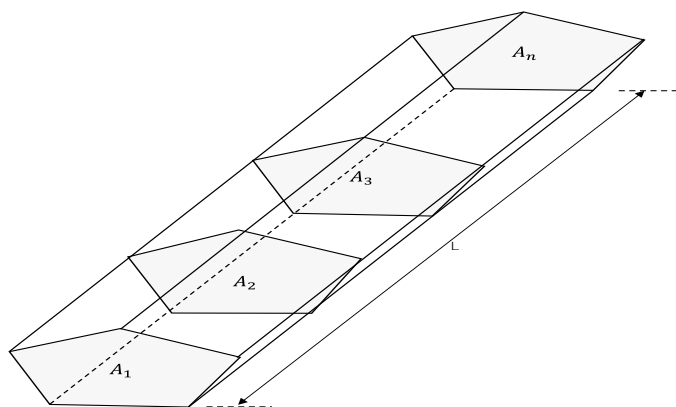
ในระหว่างดำเนินการก่อสร้างกระบวนการที่สำคัญคือการควบคุมและตรวจสอบงานก่อสร้าง (Monitoring) เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้วิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ของงานที่เกิดขึ้นจริงกับแผนงานที่วางไว้ วิธีการเก็บข้อมูลโดยทั่วไปใช้แรงงานคนเป็นหลักซึ่งเพียงพอสำหรับโครงการก่อสร้างโดยทั่วไป

สำหรับงานก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานโดยเฉพาะอย่างยิ่งการก่อสร้างถนนมูลค่างานส่วนมากเป็นการทำงานปรับระดับพื้นผิวภูมิประเทศและการขนย้ายวัสดุดินซุดและถมตามข้อกำหนดคุณลักษณะดินชั้นต่างๆ ตามแบบก่อสร้างในพื้นที่ขนาดใหญ่และใช้เครื่องจักรกลทำงานเป็นหลัก ในขณะที่การสำรวจเพื่อเก็บข้อมูลปริมาณการทำงาน ใช้วิธีการสำรวจทั่วไปเพื่อหาค่าพิกัดจุดยอดของการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดดินและใช้วิธีการเฉลี่ยหน้าตัดเพื่อหาปริมาณการทำงานต่อไป

ตัวอย่างการเก็บข้อมูลเพื่อคำนวณหาปริมาณงานดิน (คู่มือการควบคุมงานก่อสร้างทางหลวง, 2550) ตามรายละเอียดและข้อกำหนดการก่อสร้างทางหลวงให้ใช้การคำนวณพื้นที่ด้วยวิธีคูณไขว้ (Co-ordinate Method) ทุกๆ ระยะ 25 เมตรและใช้วิธีเฉลี่ยพื้นที่หน้าตัด (Average End Area Method) ในการคำนวณหาปริมาณงานดิน

2.4.1 การคำนวณจากค่าพิกัด (Co-ordinate Method)

กรณีที่รูปปิดเป็นรูปเหลี่ยมและทราบค่าพิกัดของจุดมุม การคำนวณพื้นที่ของรูปปิดใดๆ



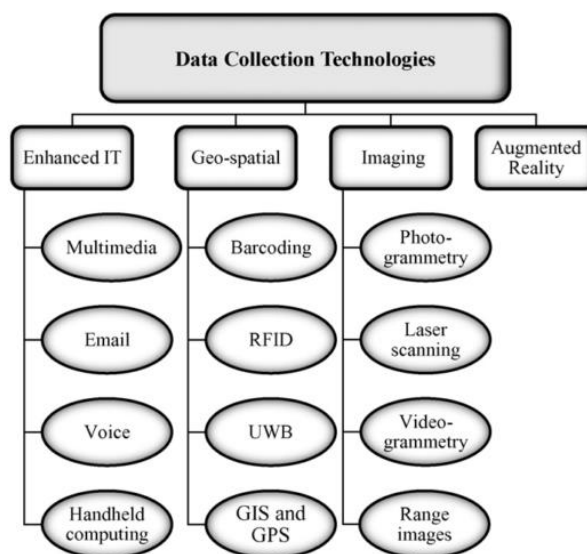
รูปที่ 2.3 การคำนวณปริมาตรวิธีหน้าตัดเฉลี่ย

อย่างไรก็ตามในโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่มีกระบวนการทำงานที่ทำให้สภาพพื้นที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา (Dynamic process) การใช้แรงงานคนเพื่อติดตามความก้าวหน้าและเก็บข้อมูลต้นทุนของกิจกรรมงานก่อสร้างในลักษณะนี้อาจมีความไม่เหมาะสมเนื่องจากพื้นที่ก่อสร้างมีขนาดใหญ่ ต้องใช้เวลาและแรงงานในการเก็บข้อมูลมาก ความไม่ปลอดภัยเนื่องจากการทำงานใกล้เครื่องจักรและไม่ทันการเปลี่ยนแปลงสภาพหน้างานที่เกิดขึ้นจริง

Omar และ Nehdi (2016) ทำการสำรวจและรวบรวมเทคโนโลยีอัตโนมัติที่ใช้เก็บข้อมูลเพื่อติดตามความก้าวหน้าในอุตสาหกรรมก่อสร้างที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันและใช้ข้อมูลมีอายุไม่เกิน 5 ปี มาทำการศึกษา โดยแบ่งวิธีการเก็บข้อมูลออกเป็น 4 กลุ่มหลัก ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ประกอบด้วย

- 1) กลุ่มเทคโนโลยีสารสนเทศ (Enhanced IT)
- 2) กลุ่มเทคโนโลยีสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (Geo-spatial)
- 3) กลุ่มเทคโนโลยีภาพถ่ายดิจิทัล (Imaging)
- 4) กลุ่มเทคโนโลยีการรวมสภาพแวดล้อมจริงกับวัตถุเสมือนเข้าด้วยกันในเวลาเดียวกัน (Augmented reality)

ผลการเปรียบเทียบเทคโนโลยีที่ใช้เก็บข้อมูลเพื่อจัดทำแบบจำลองกลุ่มจุด 3 มิติ (3D point cloud) พบว่าการเก็บข้อมูลด้วยเครื่อง 3D เลเซอร์สแกนเป็นวิธีที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากความถูกต้องแม่นยำ และความเร็วในการเก็บข้อมูลในหน่วยงานก่อสร้าง เมื่อเทียบกับวิธีเก็บข้อมูลด้วยภาพถ่ายทางอากาศและประมวลผลด้วยภาพถ่าย เป็นวิธีที่ไม่แพง ใช้งานง่าย ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลที่รวดเร็วกว่า 3D เลเซอร์สแกน แต่มีความถูกต้องแม่นยำน้อยกว่า



รูปที่ 2.4 กลุ่มเทคโนโลยีที่ใช้เก็บข้อมูลภาคสนามในปัจจุบัน

(Omar and Nehdi, 2016)

Alizadehsalehi และ Yitmen (2016) ศึกษาผลกระทบของเทคโนโลยีที่ใช้เก็บข้อมูลในหน่วยงานก่อสร้างในหัวข้อการเก็บข้อมูลความก้าวหน้าโครงการก่อสร้างแบบอัตโนมัติ (Automated Construction Project Progress Monitoring, ACPPM) เฉพาะบริษัทผู้รับเหมาก่อสร้างและบริษัทที่ปรึกษาโครงการที่ดำเนินธุรกิจทางด้านก่อสร้างทั่วไปและระบบสาธารณูปโภคพื้นฐานที่ดำเนินงานในภูมิภาคต่างๆของโลก ประกอบด้วยภูมิภาค ตะวันออกกลาง เอเชียกลาง ยุโรป อเมริกาเหนือ และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้จำนวน 326 โครงการ มีเทคโนโลยีต่างๆ ประกอบด้วย

- 1) การจัดทำแบบจำลองจากภาพถ่าย (Image-based modelling)
- 2) 3D เลเซอร์สแกน (3D Laser Scanning, LS)
- 3) Radio Frequency Identification (RFID)
- 4) รหัสแท่ง หรือ Barcodes
- 5) Ultra-Wideband (UWB)
- 6) ระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก (Global Positioning System, GPS)
- 7) เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network, WSN)

ผลการศึกษาพบว่า คะแนนดัชนีความสำคัญในด้านปัจจัยการเก็บข้อมูลทางกายภาพและการแสดงภาพความก้าวหน้าแบบคงที่/เปลี่ยนแปลง นั้น คะแนนอันดับ 1 คือเทคโนโลยี 3D เลเซอร์สแกน คะแนนอันดับ 2 คือเทคโนโลยีการจัดทำแบบจำลองจากภาพถ่าย จากการสังเกตการณ์และสัมภาษณ์พบว่าเทคโนโลยีการจัดทำแบบจำลองจากภาพถ่าย เป็นวิธีการเก็บข้อมูลที่ใช้งานได้ง่ายและใช้มากที่สุดอีกทั้งยังเก็บข้อมูลจำนวนมากได้อย่างถูกต้องและประหยัด

จากที่กล่าวมาข้างต้นพบว่าการติดตามเพื่อเก็บข้อมูลปริมาณงานดินขุดและถมในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานนั้นเป็นงานที่สำคัญและต้องทำสม่ำเสมอเพื่อใช้เป็นข้อมูลติดตามความก้าวหน้าและการใช้งบประมาณในโครงการก่อสร้าง แต่การเก็บข้อมูลดังกล่าวด้วยวิธีการสำรวจทั่วไปในโครงการที่มีขนาดใหญ่ นั้นไม่เพียงพอในการเก็บข้อมูลดังกล่าว จากการค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้เทคโนโลยีมาช่วยเก็บข้อมูลในโครงการก่อสร้างนั้น พบว่าเทคโนโลยี 3D เลเซอร์สแกนมีความถูกต้องแม่นยำสูง ใช้เวลาและแรงงานในการเก็บข้อมูลน้อย สามารถใช้ทดแทนการเก็บข้อมูลด้วยวิธีการสำรวจโดยใช้แรงงานคนเป็นหลักได้ แต่ก็ยังมีราคาค่าอุปกรณ์ค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีการจัดเก็บข้อมูลเพื่อจัดทำแบบจำลองจากภาพถ่ายทางอากาศอาจมีความถูกต้องแม่นยำน้อยกว่าเทคโนโลยีการเก็บข้อมูลแบบ 3D เลเซอร์สแกน แต่จากการสำรวจล่าสุดพบว่าเทคโนโลยีการจัดเก็บข้อมูลเพื่อจัดทำแบบจำลองจากภาพถ่ายทางอากาศเป็นวิธีการที่นิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากราคาไม่แพงใช้งานได้ง่าย สามารถเก็บข้อมูลได้มากและรวดเร็วกว่า

2.5 ปัญหาการทำงานล่าช้าในโครงการก่อสร้าง

โครงการก่อสร้างมักจะประสบปัญหาต้นทุนเกินและก่อสร้างไม่ทันตามระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งมีสาเหตุสำคัญมาจากการทำงานล่าช้า (Hwang et al., 2009) ข้อมูลจากการศึกษาโดย Construction Industry Institute (CSI, 2016) แสดงร้อยละของการทำงานล่าช้าที่เกิดขึ้นหน้างานคิดเป็น 4.4% ของต้นทุนค่าก่อสร้างทั้งหมด ในขณะที่โครงการก่อสร้างถนนถนนในประเทศไทยนั้นมักจะประสบปัญหาค่าใช้จ่ายและแผนการทำงานเกินมากกว่า 10% เป็นประจำ (Forcada et al., 2014)

นิยามของการทำงานล่าช้า อาจมีหลายความหมายแต่ที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้คือ “กิจกรรมงานที่ทำที่หน้างานมากกว่าหนึ่งครั้งจึงแล้วเสร็จ หรือกิจกรรมงานที่ต้องรื้องานที่ทำไปแล้วโดยที่ไม่มีรายการงานเพิ่ม-ลดจากเจ้าของโครงการ” (Dougherty et al., 2012)

O'Connor และ Tucker (1986) อธิบายการทำงานล่าช้าที่เกิดจากขั้นตอนการเตรียมเอกสารมีสาเหตุจากเจ้าของงานและการเปลี่ยนแปลงข้อกำหนดการก่อสร้าง การออกแบบผิดพลาดหรือเกิดจากขั้นตอนการจัดซื้อ การทำงานล่าช้าที่เกิดในขั้นตอนการก่อสร้างเกิดจากเทคนิคก่อสร้างที่ไม่ดีหรือนโยบายการบริหารจัดการไม่ดี

แหล่งกำเนิดของการทำงานล่าช้ามี 5 แหล่งกำเนิด ประกอบด้วย เจ้าของโครงการ ผู้ออกแบบ รั้วขายวัสดุก่อสร้าง บริษัทขนส่ง และผู้รับเหมาก่อสร้าง (Kent et al., 1989)

ปัจจัยที่ทำให้เกิดการทำงานล่าช้าประกอบด้วย การออกแบบ การก่อสร้าง การผลิตชิ้นส่วน การขนส่ง และการปฏิบัติ แต่ละปัจจัยยังสามารถแยกย่อยออกเป็นปัจจัยย่อยด้านความคลาดเคลื่อน ความผิดพลาด การเปลี่ยนแปลง และการละเลย (Burati et al., 1992)

ผลกระทบของการทำงานซ้ำซ้อนหลักที่สำคัญเป็นสาเหตุให้ต้นทุนค่าก่อสร้างเพิ่มขึ้น เพิ่มระยะเวลาก่อสร้าง เพิ่มแรงกดดันในการทำงานให้เสร็จ เพิ่มงาน และลดทรัพยากรที่มีภายในหน่วยงาน (Forcada et al., 2014)

วิธีการที่ช่วยลดการทำงานซ้ำซ้อนอาจมีหลายวิธี หนึ่งในวิธีการเหล่านั้นคือ มีระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อน (Josephson et al., 2002) และ (D. Zhang et al., 2012)

2.6 แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข (Digital Terrain Model)

การทำงานและการใช้ประโยชน์ด้านแผนที่ได้อาศัยเทคโนโลยีทางด้านคอมพิวเตอร์กราฟิกมาช่วยในการสร้างภาพเหมือนจริงของพื้นผิว ที่เรียกว่าแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข (Digital Terrain Model) คำย่อ DTM หมายความว่า กลุ่มของข้อมูลที่ทราบค่าพิกัด 3 มิติ (X, Y, Z) ซึ่งแสดงให้เห็นภาพพื้นผิวพื้นดินอย่างต่อเนื่องด้วยสัมพันธ์ทางสถิติหรือคณิตศาสตร์ (วิชัย เยี่ยงวีรชน, 2558)

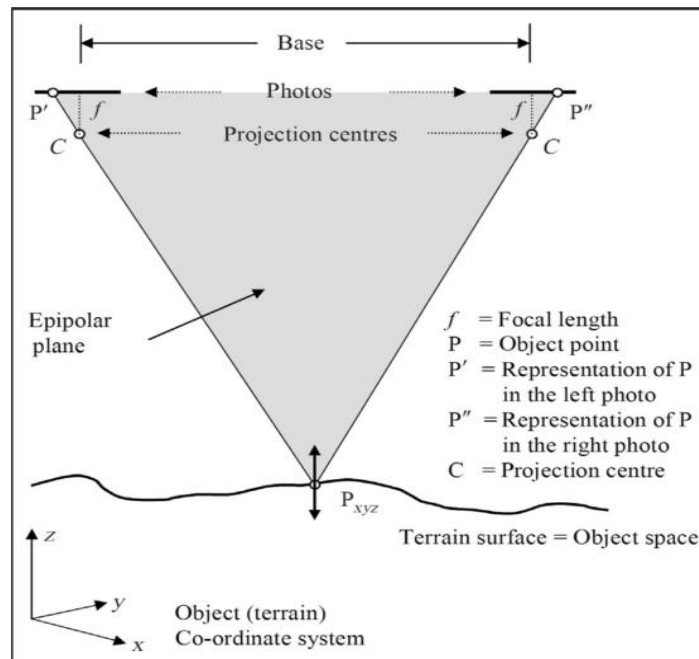
เทคนิคการจัดเก็บข้อมูลที่ใช้สำหรับจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขในส่วนของเป็นแผนที่นั้น วิธีที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป มี 6 วิธี (Florinsky, 2016) วิธีการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยชิ้นนี้มี 3 วิธีประกอบด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้

2.6.1 การสำรวจและทำแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศ (Photogrammetry)

เป็นการสำรวจเพื่อจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขโดยใช้เทคนิคการวัดระยะวัตถุต่างๆ จากภาพถ่ายทางอากาศ ภาพถ่ายจากดาวเทียม หรือภาพถ่ายจากภาคพื้นดิน โดยอาศัยหลักการคำนวณภาพถ่ายที่วัตถุเดียวกัน แต่จุดถ่ายภาพต่างกันตั้งแต่ 2 จุดขึ้นไป เพื่อใช้องค์ประกอบในภาพถ่าย (เช่นค่าความยาวโฟกัสกล้องถ่ายรูป ตำแหน่งกล้องถ่ายรูปและตำแหน่งจุดที่ใช้อ้างอิงในรูป) มาคำนวณหาระยะพิกัดในระนาบ 3 มิติ (X, Y, Z) (Florinsky, 2016) รูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างการหาค่าความสูงที่จุด P_{XYZ} บนพื้นผิวโลกด้วยการ ย้ายจุดถ่ายภาพจากซ้ายไปทางขวาในการสำรวจด้วยวิธี Photogrammetry (Linder, 2009)

2.6.2 การสำรวจและทำแผนที่จากภาพถ่ายด้วยเทคนิค Structure from Motion (SfM)

เป็นการจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากการประมวลผลภาพถ่าย (Photogrammetry) ด้วยเทคนิค Structure-From-Motion (SfM) มีจุดเริ่มต้นพัฒนามาจากคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Computer Vision) ด้วยวิธีการเรียงซ้อนภาพถ่ายที่มีมุมมองต่างกัน ตำแหน่งของกล้องและวัตถุในภาพถ่ายจะถูกระบุและจับคู่จุดที่เหมือนกันไปพร้อมกัน ทำการคำนวณซ้ำโดยใช้สมการคณิตศาสตร์ (Nonlinear least-square) เพื่อประมาณการหาค่าตำแหน่งกล้องและสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข (รวมถึงแบบจำลอง 3 มิติอื่นๆ) เทคนิคนี้สามารถใช้อากาศยานไร้คนขับราคาประหยัดในการเก็บข้อมูลในรูปแบบที่ต้องการได้ง่าย



รูปที่ 2.5 การหาค่าความสูงที่จุด P_{xyz} บนพื้นผิวโลกจากการสำรวจด้วยวิธี Photogrammetry (Linder, 2009)

หลักการทำงานของ Structure-From-Motion (SfM) โดยทั่วไปประกอบด้วยกระบวนการทำงานตามลำดับดังนี้ (Smith et al., 2015)

- 1) Feature Detection คือ การระบุ Keypoint ที่ปรากฏอยู่ในภาพถ่ายแต่ละภาพ และทำการจำแนกลักษณะเฉพาะ โดยไม่คำนึงถึง มุมมองหรืออัตราส่วนของภาพถ่าย ซอฟต์แวร์ส่วนมากนิยมใช้วิธีการระบุ Keypoint ด้วยวิธี Scale Invariant Feature Transform (SIFT)
- 2) Keypoint Correspondence ขั้นต่อมาคือการพิสูจน์ความสัมพันธ์ของ Keypoint ที่ปรากฏในภาพถ่ายหลายๆภาพ เช่น การใช้อัตราส่วนการวัดระยะทางในปริภูมิแบบยูคลิด Euclidean Distance (โดยทั่วไปใช้ค่าที่อยู่ในช่วง 0.6-0.8 ในการจับคู่จุด) (Snavely et al., 2008)
- 3) Identifying geometrically consistent matches คือตัวกรองลำดับถัดมาที่ใช้พิสูจน์และกำจัดการจับคู่ Keypoint ที่ผิดพลาดที่เหลืออยู่ในภาพถ่าย ด้วยการคำนวณค่า Fundamental Matrix (F-matrix) ของ Keypoint ด้วย Eight-point algorithm การประเมินค่า F-matrix ของ Keypoint ต้องอยู่ในช่วง 95% จึงจะใช้เป็นตัวกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างภาพถ่าย 2 ภาพ และสร้างภาพขึ้นมาใหม่

- 4) Structure from Motion (SfM) ใช้ Bundle Adjustment Algorithm (ด้วยการ Optimization cost function ระหว่างค่าพารามิเตอร์ Extrinsic และ Intrinsic ของกล้องถ่ายรูป) ที่ใช้ทั้งค่า Extrinsic และ Intrinsic Parameter เพื่อประมาณ รูปทรง 3 มิติจากภาพในข้อ 3) ในขณะที่เทคนิคการประมวลผลด้วยภาพถ่าย โดยทั่วไปใช้ค่า Parameter ร่วมกัน
- 5) Scale and Georeferencing ผลลัพธ์ที่ได้จาก SfM คือ กลุ่มจุดที่มีขนาดและระยะ ตามค่า Parameter ของกล้องถ่ายรูปและตำแหน่งการวางตัวของวัตถุในภาพถ่าย ในขั้นตอนนี้ต้องการจุดควบคุมค่าพิกัด (X, Y, Z) อย่างน้อย 3 จุด เพื่อใช้อ้างอิงในการปรับขนาดและตำแหน่งตามความเป็นจริง
- 6) Refinement of parameter values ค่าพิกัดของ GCPs ที่ใส่เพิ่มเข้าไปใน Model จะช่วยเป็นข้อจำกัดในขั้น Minimization non-linear cost function ในขั้นตอน Bundle adjustment ด้วยแหล่งข้อมูลเหล่านี้ กระบวนการ Bundle adjustment สามารถคำนวณซ้ำเพื่อทำการ Optimization ในขั้นตอนที่ 4) ได้อีก
- 7) Multi-view stereo image matching algorithms ซึ่งเป็นกระบวนการสุดท้าย ด้วย MVS algorithms เพื่อเพิ่มความหนาแน่นของ Point cloud (Dense point cloud)

2.6.3 การสำรวจด้วยแสงเลเซอร์ (Laser Altimetry)

เป็นการวัดระยะโดยใช้แสงเลเซอร์ จัดเป็นวิธีการสำรวจระยะไกลแบบใช้พลังงานในตัวเอง (Active remote sensing) ตัวอุปกรณ์จะส่งสัญญาณพัลส์ (Laser pulse) ออกมา เพื่อสะท้อนพื้นผิวที่จะวัดกลับมายังอุปกรณ์รับสัญญาณ สามารถคำนวณระยะทางได้จากความเร็วแสง การสำรวจและรังวัดด้วยแสงเลเซอร์ มีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ ได้แก่

- 1) Light Detection and Ranging (LiDAR) ทางอากาศ นิยมใช้เพื่อจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขบนพื้นดินและพื้นผิวดินใต้น้ำที่ลึกไม่เกิน 70 เมตร
- 2) Light Detection and Ranging (LiDAR) ภาคพื้นดินใช้เพื่อจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขหรือแบบจำลอง 3 มิติทางธรณีวิทยาของหิน หรือวัตถุอื่นๆ ที่โผล่พื้นดินออกมา (Outcrop)
- 3) การสำรวจและรังวัดด้วยแสงเลเซอร์ผ่านดาวเทียม เช่นการทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขบนดวงจันทร์ เป็นต้น

2.7 การศึกษาการจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขด้วยภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ ในสาขาที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

2.7.1 การประเมินผลความถูกต้องของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากการประมวลผลด้วยวิธี Indirect Geo-Referencing

Santise และคณะฯ (2014) ทำการประเมินความถูกต้องแม่นยำและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขด้วยภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ ที่ความสูง 70 เมตร และ 140 เมตรด้วยซอฟต์แวร์ Agisoft PhotoScan ในพื้นที่ทดลองภายในมหาวิทยาลัยปาร์มา (University Campus of Parma) ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มจำนวน GCPs จาก 9 เป็น 28 จุดของชุดภาพถ่ายที่ความสูง 140 เมตร ช่วยเพิ่มความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองได้ การติดตั้ง GCPs บนหลังคาอาคารช่วยเพิ่มความถูกต้องแม่นยำของค่าระดับได้เล็กน้อยและการประมวลผลภาพถ่ายที่เพดานบินต่ำจะทำได้ยากเมื่อสภาพพื้นผิวภูมิประเทศมีการเปลี่ยนแปลงความสูงแบบทันทีทันใดอันเนื่องมาจากความสูงของอาคาร

Uysal และคณะฯ (2015) ทำการประเมินผลแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขด้วยภาพถ่ายทางอากาศ เปรียบเทียบกับแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากการสำรวจด้วยสัญญาณดาวเทียม ผลสรุปว่าความแม่นยำของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากวิธีการทั้ง 2 แบบมีความถูกต้องใกล้เคียงกัน

Ruzgiene และคณะฯ (2015) ทำการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับจำนวนจุดอ้างอิง GCPs ที่มีผลต่อความแม่นยำของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากการประมวลผลด้วยภาพถ่ายทางอากาศประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ Pix4D ผลจากงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าคุณภาพของแผนที่จากแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขที่ถูกต้องแม่นยำต้องมีจำนวนจุดอ้างอิง GCPs ที่เหมาะสม

Krsak และคณะฯ (2016) ทำการวิเคราะห์ความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขด้วยภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับราคาประหยัด ด้วยซอฟต์แวร์ Agisoft PhotoScan กรณีศึกษาใช้พื้นที่เหมือง Jastraba ประเทศสโลวาเกีย ผลการวิจัยแสดงแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขที่ได้มีความถูกต้องแม่นยำในระดับที่สอดคล้องกับกฎหมายภายในประเทศ

2.7.2 การประเมินผลความถูกต้องของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากการประมวลผลด้วยวิธี Direct geo-referencing

Gabrlik (2015) วิเคราะห์หาความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากภาพถ่าย 8 จุดถ่ายจากบนอาคารเรียนสูง 30 เมตร มายังพื้นดินด้านล่างที่มีหมุดทดสอบจำนวน 3 หมุด ด้วยวิธี Direct Geo-referencing เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการสำรวจด้วยสัญญาณดาวเทียม ผลการศึกษาพบค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ของจุดทดสอบที่ 1 มีค่าความ

คลาดเคลื่อนทางทิศเหนือประมาณ 9 ซม. ทิศตะวันออกประมาณ 18 ซม. และค่าระดับความสูงประมาณ 1.7 เมตร

2.7.3 การใช้แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขด้วยภาพถ่ายทางอากาศเพื่อหาปริมาณดินในงานก่อสร้างระบบถนนและราง

Siebert และ Teizer (2014) ศึกษาประสิทธิภาพของการใช้ระบบอากาศยานไร้คนขับเพื่อสำรวจและจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขแบบ 3 มิติ โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

- 1) ออกแบบอุปกรณ์สำหรับระบบอากาศยานไร้คนขับเพื่อใช้สำหรับงานสำรวจและจัดทำแผนที่โดยเฉพาะ เลือกใช้อากาศยานไร้คนขับชนิดปีกหมุนแบบ 4 ใบพัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอากาศยาน 1 เมตร เนื่องจากมีข้อดีคือ ค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อการใช้งาน และการบำรุงรักษาอุปกรณ์ต่ำ มีความคล่องตัวในพื้นที่แคบ
- 2) วางแผนการบินสำหรับจัดเก็บข้อมูลภาพถ่าย ด้วยการปรับปรุงซอฟต์แวร์ช่วยควบคุมการบิน Mikrokopter Flight Planning Tool (MK FPT) เพื่อให้มีระยะซ้อนภาพถ่ายสอดคล้องกับการประมวลผลด้วยภาพถ่ายทางอากาศ คือ ระยะซ้อนภาพตามยาว 70% ตามขวาง 40% กำหนดเขตการบินของอากาศยานอยู่ที่ระดับความสูง 50 เมตร จากพื้นดินและกำหนดเส้นทางการบินเพื่อเก็บข้อมูลด้วยภาพถ่าย
- 3) การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศเพื่อทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข มี 2 วิธีได้แก่
 - Direct Geo-referencing คือการใช้ข้อมูลค่าพิกัด GPS และเวลาที่บันทึกอยู่ในภาพถ่ายมาใช้เป็นแหล่งข้อมูลอ้างอิงในระหว่างการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ ข้อดีคือความเร็วในการสำรวจเนื่องจากไม่ต้องทำการสำรวจภาคพื้นดินเพื่อจัดทำหมุดควบคุมภาคพื้นดิน
 - Indirect Geo-referencing คือการใช้ข้อมูลค่าพิกัดจากหมุดควบคุมภาคพื้นดิน GCPs เป็นแหล่งข้อมูลอ้างอิงในการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ ข้อดีคือความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขมีความถูกต้องแม่นยำมากกว่าวิธีที่ Direct Geo-referencing
- 4) วิเคราะห์และประเมินผลความคลาดเคลื่อนของระบบในพื้นที่ทดลอง ลานจอดรถขนาด 100X150 เมตร เพื่อวิเคราะห์หาค่าความคลาดเคลื่อนสมบูรณ์ เปรียบเทียบกับจุดที่ทำการสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวม (Total Station) เกือบ 500 จุด

ด้วยระบบค่าพิกัดแบบ UTM WGS84 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนแนวราบที่ 0.6 เซนติเมตรและแนวตั้งที่ 1.1 เซนติเมตร ค่าความคลาดเคลื่อนต่อจุดมากที่สุดแนวราบที่ 4.9 เซนติเมตรและแนวตั้งที่ 6.4 เซนติเมตร

- ทดสอบประสิทธิภาพของระบบอากาศยานไร้คนขับและผลลัพธ์ การประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับในเชิงเศรษฐศาสตร์ นอกจากประเด็นเรื่องความปลอดภัยและความมั่นคงแล้ว ประโยชน์หลักของการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับสำหรับงานสำรวจ คือ ประหยัดต้นทุน และมีความถูกต้องแม่นยำสูง ทดสอบในพื้นที่ดินถม ขนาด 200X300 เมตร ใกล้เมือง Magdeburg ด้วยการเก็บข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับ เพื่อจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจำนวน 3 ครั้ง พื้นที่สำรวจ 60,000 ตร.ม. เวลารวมที่ใช้ในการสำรวจ 150 นาที จำนวนจุดสำรวจ 5,500,000 จุด ความหนาแน่นจุดสำรวจ 92 จุด/ตร.ม. เปรียบเทียบข้อมูลกับการสำรวจภาคพื้นดินจากสัญญาณดาวเทียม (RTK GPS) พื้นที่สำรวจ 60,000 ตร.ม. เวลารวมที่ใช้ในการสำรวจ 630 นาที จำนวนจุดสำรวจ 1,800 จุด ความหนาแน่นจุดสำรวจ 0.03 จุด/ตร.ม.
- นำไปทดลองใช้ในงานขนย้ายดินระหว่างงานก่อสร้างถนนทดสอบประสิทธิภาพของระบบอากาศยานไร้คนขับในการนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมของการทำงานจริง และทดลองสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขความหนาแน่นจุดสำรวจสูง สถานที่ทดสอบหน่วยงานก่อสร้างเพื่อขยายถนน Friedewald ประเทศเยอรมัน งานขนย้ายดิน พื้นที่สำรวจ 24,900 ตร.ม. เวลารวมที่ใช้ในการสำรวจ 165 นาที จำนวนจุดสำรวจ มากกว่า 2,000,000 จุด ความหนาแน่นจุดสำรวจ 561 จุด/ตร.ม. เปรียบเทียบข้อมูลกับการสำรวจภาคพื้นดินจากสัญญาณดาวเทียม (RTK GPS) และกล้องสำรวจพื้นที่สำรวจ 14,330 ตร.ม. เวลารวมที่ใช้ในการสำรวจ 660 นาที จำนวนจุดสำรวจ 350 จุด ความหนาแน่นจุดสำรวจ 0.02 จุด/ตร.ม. สร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากการสำรวจทั้ง 2 วิธีแล้วนำมาวางซ้อนทับกัน พื้นที่ 7,761 ตร.ม. พบว่ามีปริมาณดินต่างกัน 149 ลบ.ม. หรือเฉลี่ยแบบจำลองจากอากาศยานไร้คนขับสูงกว่าแบบจำลองจากการสำรวจภาคพื้นดิน 1.9 เซนติเมตร เฉลี่ยความสูงคลาดเคลื่อนจุดสำรวจของ 2 วิธีคือ 4.2 เซนติเมตร และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 5.9 เซนติเมตร

- นำไปทดลองใช้ในงานก่อสร้างทางรถไฟความเร็วสูงและพื้นที่พักดิน ทดลองสำรวจเพื่อจัดเก็บข้อมูลระดับความสูงดินระหว่างการก่อสร้างโครงการรถไฟความเร็วสูงของประเทศเยอรมันช่วงงานก่อสร้างระหว่างเมือง Erfurt ถึง Nuremburg ความยาว 300 เมตรงานขุดดินประมาณ 700,000 ลบ.ม. พื้นที่พักดิน กว้าง 170 เมตร ยาว 570 เมตร สามารถพักดินได้ประมาณ 2,000,000 ลบ.ม. สามารถสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากอากาศยานไร้คนขับของงานปรับพื้นที่จริงและนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองตามแบบก่อสร้างสามารถวิเคราะห์ปริมาณงานที่เหลืออยู่ได้ ด้วยข้อมูลเหล่านี้ทำให้ผู้จัดการโครงการมีข้อมูลเพียงพอที่จะนำไปวางแผนในการทำงานที่เหลืออยู่ได้

2.7.4 การใช้แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขด้วยภาพถ่ายทางอากาศเพื่อติดตามสภาพถนนในพื้นที่ชนบท

Zhang และ Elaksher (2012) ได้ทำการทดลองจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขด้วยภาพถ่ายทางอากาศของถนนในเขตชนบทเพื่อติดตามความเสียหายของพื้นผิวจราจรจากการสัญจรของยานพาหนะ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขด้วยภาพถ่ายทางอากาศมีความน่าเชื่อถือและถูกต้องแม่นยำสูง

2.8 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีต

ในบทนี้ได้ทำการศึกษา ค้นคว้า และทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดทำบัญชีต้นทุนเพื่อควบคุมต้นทุนโครงการก่อสร้าง การติดตามความก้าวหน้าโครงการ การทำงานซ้ำซ้อนและเทคโนโลยีการจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขที่นิยมใช้ในปัจจุบัน เพื่อนำมาเป็นข้อมูลพื้นฐานและแนวทางในการดำเนินงานวิจัย โดยมีประเด็นหลักที่ทำการศึกษา ดังนี้

การแบ่งประเภทของต้นทุนตามช่วงเวลาโครงการก่อสร้างมี 2 ประเภท คือ ต้นทุนประมาณเป็นการประมาณต้นทุนงานก่อสร้างก่อนเริ่มดำเนินการจริง และต้นทุนจริง คือค่าใช้จ่ายต่างๆระหว่างกระบวนการก่อสร้าง หรือแบ่งตามความสัมพันธ์กับงานประกอบด้วย ต้นทุนทางตรงสามารถคำนวณได้จากการแตกหมวดงานต่างๆ ออกเป็นหน่วยย่อยที่สามารถวัดได้ที่หน่วยงานก่อสร้าง และ ต้นทุนทางอ้อมอาจเป็นต้นทุนขนาดใหญ่หรือเล็กมากๆ ที่ไม่สามารถคิดแตกงานไปไว้ในกิจกรรมงานใดกิจกรรมหนึ่งได้ ต้นทุนทางอ้อมยังสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ค่าดำเนินการโครงการ หมายถึง ต้นทุนค่าดำเนินการเฉพาะในโครงการนั้นๆ และ ค่าดำเนินการทั่วไป หมายถึง ต้นทุนค่าดำเนินการธุรกิจก่อสร้างที่ไม่เฉพาะเจาะจงในโครงการใดโครงการหนึ่ง

ระบบควบคุมต้นทุนโครงการก่อสร้าง ประกอบด้วย 5 ขั้นตอนได้แก่ 1) ฝังบัญชีต้นทุน 2) แผนต้นทุนโครงการ 3) การเก็บรวบรวมต้นทุน 4) การรายงานต้นทุนโครงการ และ 5) วิเคราะห์ต้นทุน ระหว่างดำเนินการก่อสร้างการติดตามตรวจสอบเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลต้นทุนเป็นงานที่มีความสำคัญและต้องทำอย่างสม่ำเสมอเพื่อนำมาวิเคราะห์หาความก้าวหน้าของงานและการใช้ต้นทุนจริงเปรียบเทียบกับแผนงานการใช้ต้นทุนที่วางไว้

การติดตามความก้าวหน้าของงานดินซุดและถมในโครงการก่อสร้างประกอบด้วยภาระบุกิจกรรมงาน และการคำนวณหาปริมาณงานในแต่ละกิจกรรมที่ดำเนินการแล้วเสร็จ

การทำงานซ้ำซ้อน หมายถึง “กิจกรรมงานที่ทำที่หน้างานมากกว่าหนึ่งครั้งจึงแล้วเสร็จ หรือกิจกรรมงานที่ต้องรื้องานที่ทำไปแล้วโดยที่ไม่มีรายการงานเพิ่ม-ลดจากเจ้าของโครงการ” ผลกระทบหลักของการทำงานซ้ำซ้อนคือการเพิ่มต้นทุน และเวลาที่ใช้ในการก่อสร้าง วิธีการหนึ่งที่สามารถช่วยลดการทำงานซ้ำซ้อนได้คือ มีระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อน

ปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีการสำรวจด้วยเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ทันสมัยเพื่อใช้จัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขมาใช้ในการก่อสร้างมากขึ้น เช่น การจัดทำแบบจำลองด้วยเครื่อง 3D เลเซอร์สแกนซึ่งมีความถูกต้องแม่นยำเชิงมิติ X Y Z เป็นที่ยอมรับแต่อุปกรณ์ที่ใช้ยังมีราคาค่อนข้างแพง และการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ ซึ่งมีความถูกต้องแม่นยำเชิงมิติ X Y Z ใกล้เคียงกับเครื่อง 3D เลเซอร์สแกน แต่ต้องมีการควบคุมปัจจัยในการใช้งานหลายปัจจัย มีข้อดีคือ มีต้นทุนค่าดำเนินการสำรวจน้อยกว่าเครื่อง 3D เลเซอร์สแกนและการสำรวจด้วยแรงงานคน (Smith et al., 2015) ซึ่งข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขสามารถนำมาคำนวณหาพื้นที่และปริมาณงาน เพื่อใช้ติดตามความก้าวหน้าในโครงการก่อสร้างได้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบติดตามการทำงานเข้าช้อนงานดินขุดและถมในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการก่อสร้าง ด้วยการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับแทนการสำรวจด้วยวิธีการทั่วไปที่ใช้แรงงานคนเป็นหลัก ในช่วงที่การก่อสร้างตั้งอยู่ในบริเวณภูเขาและภูมิประเทศมีความสลับซับซ้อนสูง โดยมีขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยต่างๆประกอบด้วย 1) กำหนดพื้นที่ใช้เป็นกรณีศึกษา 2) ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย และ 3) สรุปขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.1 รายละเอียดโครงการที่ใช้ในกรณีศึกษา

การพิจารณาเลือกกรณีศึกษา จำเป็นต้องเลือกโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานที่ทำการก่อสร้างในบริเวณพื้นที่ภูเขาหรือเนินเขาและมีสภาพภูมิประเทศสลับซับซ้อนเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ได้กำหนดไว้ จึงเลือกใช้กรณีศึกษาโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 6 สายบางปะอิน-สระบุรี-นครราชสีมา โดยมีแผนที่แสดงที่ตั้งโครงการตามรูปที่ 3.1 และมีรายละเอียดของโครงการดังนี้

3.1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 6 สายบางปะอิน-สระบุรี-นครราชสีมา

- 1) เพื่อกำหนดโครงข่ายแผนการก่อสร้างทางหลวงที่มีมาตรฐานสูงสำหรับเสริมสร้างสมรรถนะทางเศรษฐกิจของประเทศไทยให้ยั่งยืนในอนาคต
- 2) เพื่อเป็นระบบโครงสร้างพื้นฐานหลักในการสนับสนุนนโยบายกระจายความเจริญไปสู่ภูมิภาคอย่างทั่วถึง
- 3) เพื่อส่งเสริมให้ประชาชนมีคุณภาพชีวิตที่ดี ช่วยลดอุบัติเหตุและลดมลภาวะจากการเดินทางและขนส่งสินค้าในชีวิตประจำวัน
- 4) เพื่อเป็นการสนับสนุนการพัฒนาเมืองหลักในภูมิภาค ทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองเป็นทางหลวงมาตรฐานสูง มีลักษณะเด่นคือ เป็นทางที่มีการควบคุมทางเข้าออกที่สมบูรณ์มีรั้วกั้นตลอดแนวทาง สามารถใช้ความเร็วได้ตามที่ออกแบบคือ 120 - 140 กิโลเมตรต่อชั่วโมงบนทางราบและ 80 กิโลเมตรต่อชั่วโมงบนทางภูเขา บริเวณทางแยกเป็นทางแยกต่างระดับทุกแห่งโดยไม่มีสัญญาณไฟจราจร มีสถานีบริการ (Service Area) ที่มีสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ เช่น ร้านอาหาร สถานีบริการ

น้ำมัน ห้องสุขา เป็นต้น ไว้บริการแก่ผู้ใช้ทางตามจุดที่กำหนด ระบบการเก็บค่าธรรมเนียมผ่านทางจะจัดเก็บตามระยะทางการใช้งานจริง



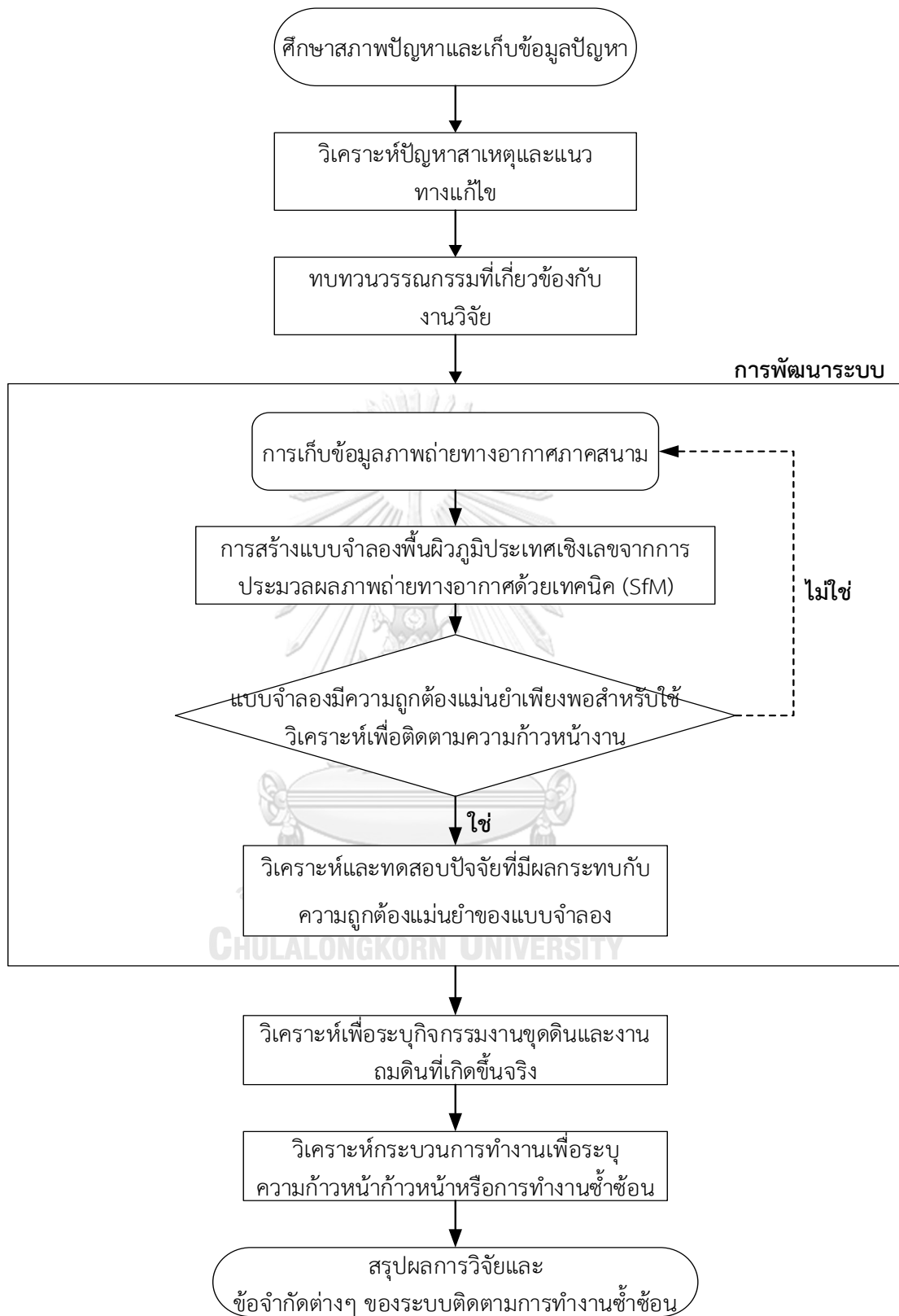
รูปที่ 3.1 แนวเส้นทางก่อสร้างทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 6 และจุดก่อสร้างที่
ทำการศึกษา

3.1.2 ลักษณะของโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 6 สายบางปะอิน-สระบุรี-นครราชสีมา

รูปแบบการก่อสร้างส่วนใหญ่เป็นทางระดับพื้น มีทางยกระดับ 4 ช่วง ได้แก่ ช่วงทางเลี้ยวเมืองสระบุรี (ระหว่าง กม. 40+300 ถึง กม. 47+000) ระยะทาง 7 กิโลเมตร ช่วงพื้นที่สัมปทานปูนซีเมนต์ TPI (ระหว่าง กม. 69+000 ถึง กม. 75+700) ระยะทาง 5.5 กิโลเมตร ช่วงเขาตาแป้น (ระหว่าง กม. 81+600 ถึง กม. 85+250) ระยะทาง 2.3 กิโลเมตร และช่วงเลียบบ้างเก็บน้ำลำตะคอง (ระหว่าง กม. 125+400 ถึง กม. 143+040) ระยะทาง 17.3 กิโลเมตร รวมระยะทางที่ก่อสร้างเป็นทางยกระดับทั้งสิ้น 32.1 กิโลเมตร ทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 6 นั้นจะมีเขตแนวเขตทาง 70 เมตร ความกว้างช่องจราจร ช่องละ 3.60 เมตร ขนาด 4 ช่องจราจรและ 6 ช่องจราจรมีการควบคุมการเข้า-ออกแบบสมบูรณ์ (รั้วกั้น) ตลอดทาง

3.1.3 ลักษณะของพื้นที่ก่อสร้างที่ใช้ในกรณีศึกษา

พื้นที่ก่อสร้างเป็นช่วงก่อสร้างถนนชนิดวางบนดินบนภูเขาช่วงสั้นๆ ต่อเนื่องไปถึงถนนยกระดับที่ต้องก่อสร้างผ่านลักษณะภูมิประเทศเป็นแนวนินเขาที่ระดับพื้นดินเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงการก่อสร้าง



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการวิจัยแสดงในรูปที่ 3.2 ประกอบด้วย 1) ศึกษาสภาพปัญหาและเก็บข้อมูลปัญหา 2) วิเคราะห์ปัญหาสาเหตุและแนวทางแก้ไข 3) ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย 4) การพัฒนาระบบ ประกอบด้วย 4.1) การเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศภาคสนาม 4.2) การสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ 4.3) วิเคราะห์ความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองเพียงพอสำหรับใช้วิเคราะห์เพื่อติดตามความก้าวหน้างาน 4.4) วิเคราะห์และทดสอบปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลอง 5) การวิเคราะห์เพื่อระบุกิจกรรมงานขุดดินและงานถมดินที่เกิดขึ้นจริง 6) วิเคราะห์กระบวนการทำงานเพื่อระบุความก้าวหน้าก้าวหน้าหรือการทำงานซ้ำซ้อน 7) สรุปผลการวิจัยและข้อจำกัดต่างๆ

3.2.1 ศึกษาและเก็บข้อมูลปัญหาของการทำงานซ้ำซ้อน

เป็นการสำรวจเบื้องต้นเกี่ยวกับวิธีการทำงานและแนวทางปฏิบัติที่ใช้ในปัจจุบันของงานดินขุดและถมในโครงการก่อสร้างพื้นฐานจริงในประเทศไทย ทั้งในส่วนที่อยู่ในเขตกรุงเทพมหานครและต่างจังหวัด ว่ามีวิธีการทำงานและแนวทางปฏิบัติงานเป็นอย่างไร และลงพื้นที่เพื่อเก็บข้อมูลปัญหาการทำงานซ้ำซ้อนในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานจริง

3.2.2 วิเคราะห์ปัญหาสาเหตุและแนวทางแก้ไขปัญหาการทำงานซ้ำซ้อน

จากการศึกษาสภาพปัญหาและการลงเก็บข้อมูลภาคสนามทำให้ทราบสาเหตุของการเกิดปัญหาการทำงานซ้ำซ้อนเนื่องจากสภาพพื้นที่ก่อสร้างที่ตั้งอยู่บริเวณภูเขาหรือเนินเขาและสภาพภูมิประเทศมีความสลับซับซ้อน การสำรวจด้วยวิธีการทั่วไปไม่สามารถแสดงรายละเอียดสภาพพื้นที่ภูมิประเทศจริงได้อย่างครบถ้วน ทำให้ผู้บริหารโครงการขาดข้อมูลที่เหมาะสมและครบถ้วนในการวางแผนการทำงานในแต่ละขั้นตอนการทำงานระหว่างกระบวนการก่อสร้าง และติดตามความก้าวหน้าหรือการทำงานซ้ำการทำงานที่เกิดขึ้นจริงในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน แนวทางแก้ปัญหาคือ การพัฒนาระบบที่สามารถเก็บข้อมูลและสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขได้อย่างรวดเร็วและแสดงรายละเอียดต่างๆ ที่ปรากฏในโครงการก่อสร้างได้อย่างเพียงพอสำหรับใช้วางแผนการทำงานและติดตามความก้าวหน้าหรือการทำงานซ้ำซ้อนที่เกิดขึ้นจริงระหว่างกระบวนการก่อสร้าง

3.2.3 ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

เป็นการทบทวนวรรณกรรมทั้งในส่วนของเอกสารงานวิจัย ตำราเรียน บทความทางวิชาการ และสิ่งตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมต้นทุนการก่อสร้าง บัญชีต้นทุนโครงการ การติดตามความก้าวหน้าโครงการก่อสร้าง การคำนวณเพื่อคิดปริมาณงานดินขุดและถม การทำงานซ้ำซ้อน

วิธีการสำรวจเพื่อจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขที่มีใช้ในปัจจุบัน วิธีการสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากอากาศยานไร้คนขับและการนำไปประยุกต์ใช้งานในสาขาต่างๆ เป็นต้น

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยทำให้ทราบว่าในปัจจุบันมีเทคโนโลยีการสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากอากาศยานไร้คนขับ เป็นวิธีการที่ไม่แพง ใช้งานง่าย ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลที่รวดเร็ว จึงนำไปสู่การพัฒนาระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อน

3.2.4 การพัฒนาระบบ

ระบบสำหรับเก็บข้อมูลภาคสนามเป็นการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับ เก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศและใช้การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศเพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขขึ้นมาโดยมีขั้นตอนการทำงานต่างๆ ดังนี้

3.2.4.1 การเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศภาคสนาม

เป็นขั้นตอนการเลือกใช้อุปกรณ์เครื่องมือและซอฟต์แวร์ต่างๆ สำหรับใช้เก็บข้อมูลการทำงานภายในหน่วยงานก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน ได้ครบถ้วนชัดเจนและทันการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ที่เกิดขึ้นจริงภายในหน่วยงานก่อสร้าง ในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการเก็บข้อมูลด้วยภาพถ่ายทางอากาศ และการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศเพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข เพื่อใช้ค้นหาและระบุกิจกรรมงานและปริมาณงานดินขุดและถมที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกระบวนการก่อสร้างตามช่วงเวลาต่างๆ โดยมีอุปกรณ์เครื่องมือและซอฟต์แวร์ใช้สำหรับเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศประกอบด้วย

- 1) อากาศยานไร้คนขับ ยี่ห้อ DJI รุ่น Marvic Pro 1 เครื่องยนต์ 4 ใบพัดน้ำหนัก 0.743 กิโลกรัม ติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายภาพแบบเคลื่อนไหวพร้อมพร้อมอุปกรณ์ช่วยพยุงให้ตัวกล้องมีความเสถียรหรือ Gimbal มาจากโรงงาน เพดานบินสูงสุด 500 เมตรอุปกรณ์ควบคุมระยะไกลด้วยคลื่นความถี่ 2.4 GHz ถึง 2.43GHz สามารถทำการบินต่อเนื่องบินประมาณ 21 นาที(ด้วยข้อจำกัดด้านแบตเตอรี่) เนื่องจากอากาศยานไร้คนขับรุ่นนี้มีน้ำหนักเบา พกพาได้สะดวก มีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการสำรวจภาคสนาม
- 2) แท็บเล็ตคอมพิวเตอร์คอมพิวเตอร์เพื่อใช้ช่วยควบคุมการบินของอากาศยานไร้คนขับ ยี่ห้อ Apple รุ่น Ipad 2017 เนื่องจากราคาประหยัด และมีความเสถียรของอุปกรณ์สูงเพื่อป้องกันอากาศยานไร้คนขับตก
- 3) ซอฟต์แวร์สำหรับช่วยควบคุมการบินของอากาศยานไร้คนขับเพื่อเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ ใช้ซอฟต์แวร์ DJI GS Pro เนื่องจากมีฟังก์ชันควบคุมการบินของอากาศยานไร้คนขับสำหรับใช้เก็บภาพถ่ายทางอากาศที่เหมาะสมสำหรับ

นำไปใช้ประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ และสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขต่อไป

- 4) กล้องประมวลผลรวม (Total Station) ยี่ห้อ Leica รุ่น TS11 มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดสำหรับการวัดระยะทางไม่เกิน 500 เมตรและไม่ใช้เป้ารับปริซึม $\pm (2 \text{ มม.} + 2 \text{ ppm.})$ พร้อมขาตั้งและเป้าปริซึม สำหรับสำรวจเพื่อจัดทำจุดควบคุมภาคพื้นดิน ในระบบค่าพิกัด WGS84 UTM โซน 47N
- 5) อุปกรณ์วัดค่าความเข้มแสง ยี่ห้อ PEAKMETER รุ่น MS6612 ค่าความคลาดเคลื่อนในการวัด $\pm 6\%$ เมื่อวัดในแหล่งกำเนิดแสงทั่วไป
- 6) จุดควบคุมภาคพื้นดิน ใช้แผ่นพลาสติกบอร์ดหนา ขนาด $30.5 \times 32.4 \times 0.3$ มม. สีดำหรือสีแดง ทาทับบด้วยสีขาวเป็นตารางสี่เหลี่ยม เพื่อให้มองเห็นได้ชัดเจนในภาพถ่ายทางอากาศ

3.2.4.2 การการสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศด้วยเทคนิค (SfM)

การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศใช้ซอฟต์แวร์ Agisoft PhotoScan Professional เพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข ด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่มีประสิทธิภาพไม่น้อยกว่าความต้องการขั้นต่ำของซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการประมวลผล มีอุปกรณ์หลักประกอบด้วย

- 1) Octa-Core CPU AMD Ryzen 1700 3.00 GHz.
- 2) RAM DDR4-2133 2 X 16 GB (32 GB total)
- 3) การ์ดแสดงผลหน้าจอ Nvidia GeForce GTX 1080 Ti

ระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผลจะเพิ่มขึ้นแบบสมการยกกำลังสอง(Exponential) ตามจำนวนภาพถ่าย ระดับชั้นความละเอียดและความถูกต้องที่เลือกใช้ในการประมวลผล ในงานวิจัยครั้งนี้มีขั้นตอนในการประมวลผลภาพถ่ายดังนี้

- 1) นำเข้าภาพถ่ายที่ต้องการประมวลผลลงในซอฟต์แวร์ Agisoft PhotoScan Professional ในขั้นตอนนี้ต้องทำการเลือกภาพถ่ายที่ไม่ชัดเจนออก เนื่องจากภาพถ่ายที่ไม่ชัดเจนมีผลกระทบต่อกระบวนการประมวลผลภาพถ่ายทำให้ความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขที่สร้างได้ลดลง
- 2) Aligning Photos เป็นขั้นตอนแรกในการประมวลผลภาพถ่าย ซอฟต์แวร์จะทำการประมวลผลเพื่อหาตำแหน่งกล้องถ่ายภาพ ตำแหน่งวัตถุในภาพถ่ายในรูปแบบทรง 3 มิติ และจับคู่จุดภายในภาพถ่ายบริเวณที่ซ้อนทับกัน เพื่อสร้าง

Sparse Point Cloud Model สามารถตั้งค่าความถูกต้องในการประมวลผลได้ 5 ระดับจากระดับต่ำสุด ไปจนถึงระดับสูงสุดและสามารถเลือกตั้งค่าจำกัดจำนวนจุด Key Point และ Tie Point ได้ โดยจะมีผลโดยตรงต่อระยะเวลาในการประมวลผล ในงานวิจัยนี้จะตั้งค่าความถูกต้องในขั้นตอนนี้ที่ระดับสูงที่สุด (Highest)

- 3) เมื่อได้ Sparse Point Cloud แล้วจึงทำการใส่ค่าพิกัดจุดควบคุมภาคพื้นดินที่ได้ทำการสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวม ในระบบพิกัด WGS 84 UTM Zone 47N สำหรับการประมวลผลด้วยวิธี Indirect Georeferencing แล้วจึงทำการ Optimize ค่าพารามิเตอร์ของกล้องถ่ายรูป เพื่อช่วยให้แบบจำลองที่จะทำการประมวลผลในขั้นถัดไปมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น
- 4) Build Dense Cloud เป็นการประมวลผลภาพถ่ายเพื่อสร้างแบบจำลองกลุ่มจุดความหนาแน่นสูง Dense Point Cloud ขึ้นมา สามารถเลือกความหนาแน่นของกลุ่มจุดจากการประมวลผลได้ 5 ระดับจากระดับต่ำสุดไปจนถึงระดับสูงที่สุด แต่จะมีเพียงระดับสูงที่สุดเท่านั้นที่ใช้ค่าพารามิเตอร์จากภาพถ่ายต้นฉบับในการประมวลผลส่วนระดับความหนาแน่นอื่นๆจะเป็นการลดค่าพารามิเตอร์จากภาพถ่ายลงระดับละ 4 เท่าจากระดับที่อยู่สูงกว่าที่อยู่ติดกัน ในการประมวลผล ในงานวิจัยนี้ตั้งค่าความถูกต้องในขั้นตอนนี้ที่ระดับ 3 (Medium) เนื่องจาก ผู้วิจัยใช้วิธีการประมวลผลแบบ Indirect Georeferencing เป็นวิธีที่ใช้ค่าพิกัดหมุดควบคุมภาคพื้นดินเป็นจุดอ้างอิงในการประมวลผล สาเหตุที่ไม่ใช้ค่าพารามิเตอร์จากภาพถ่าย เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวจากกล้องถ่ายภาพที่ใช้มีความคลาดเคลื่อนสูงในระดับ 10 เมตร
- 5) Building Mesh เป็นขั้นตอนการประมวลผลเพื่อสร้างพื้นผิวของรูปทรง 3 มิติ จาก Point Cloud Model ที่ได้มาจากกระบวนการ 2) หรือ 4) ตัวซอฟต์แวร์สามารถเลือกสร้างพื้นผิวได้ 2 แบบ แบบที่ 1 Arbitrary จะเป็นการสร้างพื้นผิวรูปทรง 3 มิติต่างๆ เช่น รูปทรง 3 มิติของบ้านหรืออาคาร แบบที่ 2 Height Field เหมาะสำหรับการสร้างพื้นผิวรูปทรง 3 มิติที่มีลักษณะแบนราบ เช่น รูปทรง 3 มิติของสภาพภูมิประเทศ ในงานวิจัยนี้เลือกแบบ Height Field
- 6) Building Digital Elevation Model เป็นการสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข สามารถเลือกสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข จาก Dense Point Cloud, Sparse Point Cloud หรือ Mesh แบบจำลองพื้นผิว

ภูมิประเทศเชิงเลขที่สร้างจาก Dense Point Cloud จะให้ความถูกต้องมากที่สุด

7) Building Orthomosaic เป็นการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศเพื่อสร้างภาพถ่ายออร์โธ

3.2.4.3 ประเมินคุณภาพแบบจำลองมีความถูกต้องแม่นยำเพียงพอสำหรับใช้วิเคราะห์ เพื่อติดตามความก้าวหน้างาน

เป็นการประเมินคุณภาพความถูกต้องเชิงมิติของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากภาพถ่ายทางอากาศที่สร้างขึ้นมาว่ามีความถูกต้องแม่นยำเพียงพอสำหรับนำไปใช้งานต่อหรือไม่ ในงานวิจัยชิ้นนี้ใช้วิธีการวัดค่าพิคที่จุดควบคุมภาคพื้นดินที่ปรากฏในภาพถ่ายออร์โธ และกำหนดเกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อนต่อจุด ไม่เกิน 7 ซม.

3.2.4.4 วิเคราะห์และทดสอบปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลอง

ก่อนเริ่มต้นเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศด้วยอากาศยานไร้คนขับปัจจัยการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับอากาศยานไร้คนขับและกล้องถ่ายภาพถูกบันทึกในข้อมูลภาพถ่ายและถูกนำไปใช้ระหว่างการประมวลผล การตั้งค่าเหล่านี้จะส่งผลต่อความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขที่สร้างขึ้นจากชุดข้อมูลภาพถ่ายนั้นๆ ซึ่งปัจจัยการตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ อาจแบ่งได้ 2 ชนิด คือ

ปัจจัยที่ควบคุมได้ ประกอบด้วยทิศทางและเส้นทางการบินเก็บข้อมูล ความเร็วในการบินเก็บข้อมูล ความสูงเพดานบินเพื่อเก็บข้อมูล มุมเอียงกล้องที่ทำกับระนาบพื้นโลกขณะบินเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศและจำนวนจุดควบคุมภาคพื้นดิน

ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ประกอบด้วยสภาพอากาศ ความเข้มแสงหรือความสว่างระหว่างบินเก็บข้อมูล สภาพอากาศ ความสั่นสะเทือน ความเร็วลมและทิศทางลมขณะบินเก็บข้อมูล เป็นต้น

เพื่อศึกษาปัจจัยดังกล่าวข้างต้น จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาในพื้นที่ทดสอบที่มีความเหมาะสม มีจุดสังเกตหรือลวดลายที่สามารถมองเห็นจากภาพถ่ายทางอากาศได้ชัดเจน พื้นที่มีรูปทรงเลขาคณิตเพื่อใช้วัดปริมาณได้อย่างถูกต้องแม่นยำด้วยการสำรวจภาคพื้นดินทั่วไปเพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงเลือกใช้พื้นที่ทดสอบบริเวณบันไดบริเวณด้านหน้าอนุสาวรีย์ 2 รัชกาล ภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเป็นพื้นที่ทดสอบเพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขเนื่องจากพื้นที่บริเวณดังกล่าวมีลักษณะเหมาะสม กล่าวคือ เป็นพื้นที่เปิดโล่งตั้งอยู่ในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยสามารถมองเห็นจากภาพถ่ายทางอากาศได้ชัดเจนโดยไม่มีวัตถุ หรือเงาของวัตถุต่างๆ บดบัง มีหมุดหลักฐานทางราบในระบบค่าพิคที่ WGS84 UTM โซน 47N บริเวณใกล้เคียง ตัวบันไดมี

รูปทรงเลขาคณิตสามารถวัดด้วยวิธีการสำรวจทั่วไปเพื่อคำนวณหาปริมาณได้ง่าย และมีรูปทรงใกล้เคียงกับกองดินที่อยู่ในโครงการก่อสร้าง

การเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศด้วยอากาศยานไร้คนขับ ตามปัจจัยที่ต้องการศึกษา เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข และวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงปริมาณระหว่างปริมาณพื้นที่ทดสอบ (บันได) ที่คำนวณได้จากแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศเปรียบเทียบกับปริมาณพื้นที่ทดสอบ (บันได) จากวิธีการสำรวจทั่วไป ด้วยกล้องประมวลผลรวม (Leica รุ่น TS11) ที่ใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง

วิธีการที่ใช้คำนวณปริมาณดินซุดและถมในงานวิจัยชิ้นนี้ใช้วิธีการคำนวณด้วยการเปรียบเทียบพื้นผิวระหว่างพื้นผิวที่ใช้เป็นฐาน (Base surface) กับพื้นผิวที่ต้องการวัด (Measure surface) ด้วยซอฟต์แวร์ Agisoft PhotoScan Professional และ Autodesk AutoCAD Civil3D

ในกรณีงานดินซุดและถม ถ้าผลลัพธ์เป็นบวก (+) หมายถึงปริมาณงานถมดิน ถ้าผลลัพธ์เป็นลบ (-) หมายถึงปริมาณงานซุดดิน

การเปรียบเทียบเชิงปริมาณของพื้นที่ทดสอบ (บันได) ระหว่างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ กับข้อมูลที่ได้จากการสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวม เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องแม่นยำเชิงปริมาณ ของระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินซุดและถม

ค่าความคลาดเคลื่อนเป็นร้อยละของปริมาณ จะเป็นใช้เป็นดัชนีชี้วัดว่า แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขที่สร้างจากการประมวลผลจากภาพถ่ายทางอากาศ ที่เก็บข้อมูลตามการตั้งค่าปัจจัยที่ศึกษานั้นมีความถูกต้องเพียงพอกับการนำไปใช้งานในโครงการก่อสร้างหรือไม่ ถ้าผลการวิเคราะห์ค่าถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองมีความแม่นยำเพียงพอ จึงนำการตั้งค่าปัจจัยนั้นๆ ไปใช้เก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศในพื้นที่ แต่ถ้าผลการวิเคราะห์ความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองมีความแม่นยำไม่เพียงพอ ต้องทดสอบปัจจัยที่มีผลกระทบกับความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองเพิ่มเติมเพื่อนำการตั้งค่าปัจจัยการบินที่เหมาะสมที่สุดไปใช้ในพื้นที่กรณีศึกษา

3.2.5 การวิเคราะห์เพื่อระบุกิจกรรมงานซุดดินและงานถมดินที่เกิดขึ้นจริง

การระบุกิจกรรมและปริมาณของการทำงานซุดดินและถมดินในปัจจุบันใช้วิธีการเปรียบเทียบเส้น Profiles เพื่อหาพื้นที่หน้าตัดดินที่มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างช่วงเวลาการสำรวจ 2 ครั้ง และใช้วิธีการเฉลี่ยพื้นที่หน้าตัดดินตาม Sta. การสำรวจทุกๆ ระยะ 25 เมตร วิธีการดังกล่าวอาจมีความเหมาะสมเพียงพอสำหรับใช้เพื่อระบุกิจกรรมงานระหว่างช่วงเวลาก่อนเริ่มงานและส่งมอบงาน เนื่องจากสภาพพื้นที่มีสภาพราบเรียบและคงที่เนื่องจากปรับพื้นที่การทำงานเสร็จสิ้นแล้ว แต่ในระหว่างกระบวนการก่อสร้างที่ต้องมีการปรับสภาพพื้นที่ก่อสร้างตามกิจกรรมงานต่าง ๆ นั้น วิธีการดังกล่าวสามารถระบุกิจกรรมงานที่เกิดขึ้นตาม Sta. การสำรวจทุกๆ ระยะ 25 เมตร แต่ส่วนอื่น

นอกเหนือจากนี้ไม่สามารถระบุกิจกรรมที่เกิดขึ้นจริงได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ทำให้การใช้ข้อมูลนี้ไปใช้วางแผนหรือวิเคราะห์การทำงานเกิดความผิดพลาดได้ง่าย

สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ใช้ข้อมูลจากแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขที่สร้างขึ้นจากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ ระหว่างช่วงเวลาการสำรวจ 2 ครั้งมาเปรียบเทียบกันเพื่อวิเคราะห์และระบุถึงกิจกรรมงานขุดดินและงานถมดินที่เกิดขึ้นในพื้นที่นั้นๆ เพื่อการแสดงผลที่เข้าใจได้ง่ายและการจัดทำเป็นเอกสารแบบ 2 มิติ อาจสร้างเส้น Profiles แสดงระดับดินในพื้นที่จุดที่สนใจใดๆในแบบจำลอง ด้วยวิธีการนี้ทำให้สามารถวิเคราะห์หาปริมาณการทำงานจริงของกิจกรรมงานขุดดินและงานถมดินที่เกิดขึ้นในพื้นที่ก่อสร้างได้อย่างถูกต้องครบถ้วน

3.2.6 วิเคราะห์กระบวนการทำงานเพื่อระบุความก้าวหน้าหรือการทำงานซ้ำซ้อน

เนื่องจากวิธีการสำรวจเพื่อติดตามความก้าวหน้าในปัจจุบันใช้วิธีการสำรวจทั่วไป จะทำการสำรวจเพื่อเก็บข้อมูลดินขุดและถมเพียงก่อนเริ่มงานและช่วงเวลาที่ทำการเบิกผลงานหรืองวดงาน เพื่อหาปริมาณงานขุดดินและงานถมดินที่ทำได้จริงระหว่างช่วงเวลาดังกล่าว แต่ระหว่างกระบวนการทำงานตั้งแต่เริ่มต้นการทำงานจนถึงช่วงก่อนเบิกผลงานหรืองวดงาน ไม่นิยมเก็บข้อมูลงานในส่วนนี้ จึงไม่มีข้อมูลให้ผู้บริหารโครงการก่อสร้างสำหรับใช้วางแผนการทำงานหรือนำไปใช้วิเคราะห์หากการทำงานซ้ำซ้อนที่เกิดขึ้นจริงได้ ด้วยเหตุนี้จึงไม่สามารถทราบได้เลยว่าระหว่างกระบวนการก่อสร้างมีการทำงานซ้ำซ้อนมากน้อยเท่าไร และไม่สามารถป้องกันหรือลดผลกระทบของการทำงานซ้ำซ้อนได้ตั้งแต่ระยะเริ่มต้น

สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ใช้ข้อมูลจากแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขที่สร้างขึ้นจากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศตั้งแต่ 2 ช่วงเวลาขึ้นไปมาเปรียบเทียบการทำงานตามลำดับช่วงเวลาเพื่อวิเคราะห์หาความก้าวหน้าและการทำงานซ้ำซ้อนที่เกิดขึ้นจริงในโครงการก่อสร้าง เพื่อการแสดงผลที่เข้าใจได้ง่ายและการจัดทำเป็นเอกสารแบบ 2 มิติ อาจสร้างเส้น Profiles แสดงระดับดินในพื้นที่จุดที่สนใจใดๆในแบบจำลองมาเปรียบเทียบตามช่วงเวลา ด้วยวิธีการนี้ผู้จัดการโครงการก่อสร้างสามารถทราบถึงความก้าวหน้าและการทำงานซ้ำซ้อนของการทำงานดินขุดและถมที่เกิดขึ้นจริงได้อย่างรวดเร็วโดยไม่ต้องรอให้ถึงช่วงเวลาเบิกผลงานหรืองวดงาน สามารถหาแนวทางแก้ไขหรือลดผลกระทบที่เกิดจากการทำงานซ้ำซ้อนได้ตั้งแต่ระยะเริ่มต้น

นอกจากนี้ยังมีแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขที่มีความละเอียดเพียงพอสำหรับใช้วางแผนการทำงานในขั้นตอนต่างๆ ต่อไป

3.2.7 สรุปผลการวิจัยและข้อจำกัดต่างๆ ของระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อน

เป็นการสรุปผลงานวิจัยในภาพรวม การประยุกต์ใช้และประโยชน์ของระบบที่นำเสนอ ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ที่สนใจนำไปใช้งานหรือนำไปพัฒนาต่อ

3.3 สรุปวิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้แสดงรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินการวิจัย รายละเอียดโครงการที่ใช้เป็นกรณีศึกษา และขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยเริ่มจากการศึกษาและเก็บข้อมูลปัญหาของการทำงานซ้ำซ้อนของงานดินซุดและถมในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน เพื่อนำมาวิเคราะห์ถึงสาเหตุของการเกิดปัญหาการทำงานซ้ำซ้อนพบว่าการสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากการสำรวจด้วยวิธีการทั่วไปต้องใช้เวลาแรงงานและค่าใช้จ่าย จำนวนมากอีกทั้งยังไม่สามารถแสดงข้อมูลสภาพภูมิประเทศจริงได้เพียงพอสำหรับให้ผู้บริหารโครงการก่อสร้างนำข้อมูลมาใช้ติดตามความก้าวหน้าหรือวางแผนการทำงานได้ แนวทางแก้ไขปัญหาการพัฒนาระบบที่สามารถสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขในพื้นที่ก่อสร้างได้อย่าง รวดเร็ว ประหยัด และสามารถแสดงรายละเอียดสภาพภูมิประเทศได้อย่างเพียงพอสำหรับให้ผู้บริหารโครงการก่อสร้างสามารถนำไปใช้งานได้

การเลือกใช้ซอฟต์แวร์และอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ต่างๆ เพื่อพัฒนาระบบสำหรับเก็บข้อมูลภาคสนาม จากการศึกษาการเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศด้วยอากาศยานไร้คนขับเบื้องต้น พบว่ามีหลายปัจจัยที่ต้องควบคุมและอยู่ในกระบวนการเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ เนื่องจากการตั้งค่าปัจจัยต่างๆ ถูกบันทึกข้อมูลในภาพถ่าย และจะส่งผลกระทบต่อความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศที่สร้างขึ้น เช่น เพดานบิน สภาพความสว่างระหว่างบินเก็บข้อมูล จำนวนจุดควบคุมทางพื้นดิน เป็นต้น การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศเพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข การประเมินคุณภาพแบบจำลองที่สร้างขึ้น ตลอดจนวิธีการวิเคราะห์เพื่อระบุกิจกรรมงานและความก้าวหน้าของงานซุดดินและงานถมดินจากระบบที่นำเสนอ ในบทต่อไปแสดงแนวคิดการใช้ระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินซุดและถม

บทที่ 4

แนวคิดการใช้ระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินชุดและถม

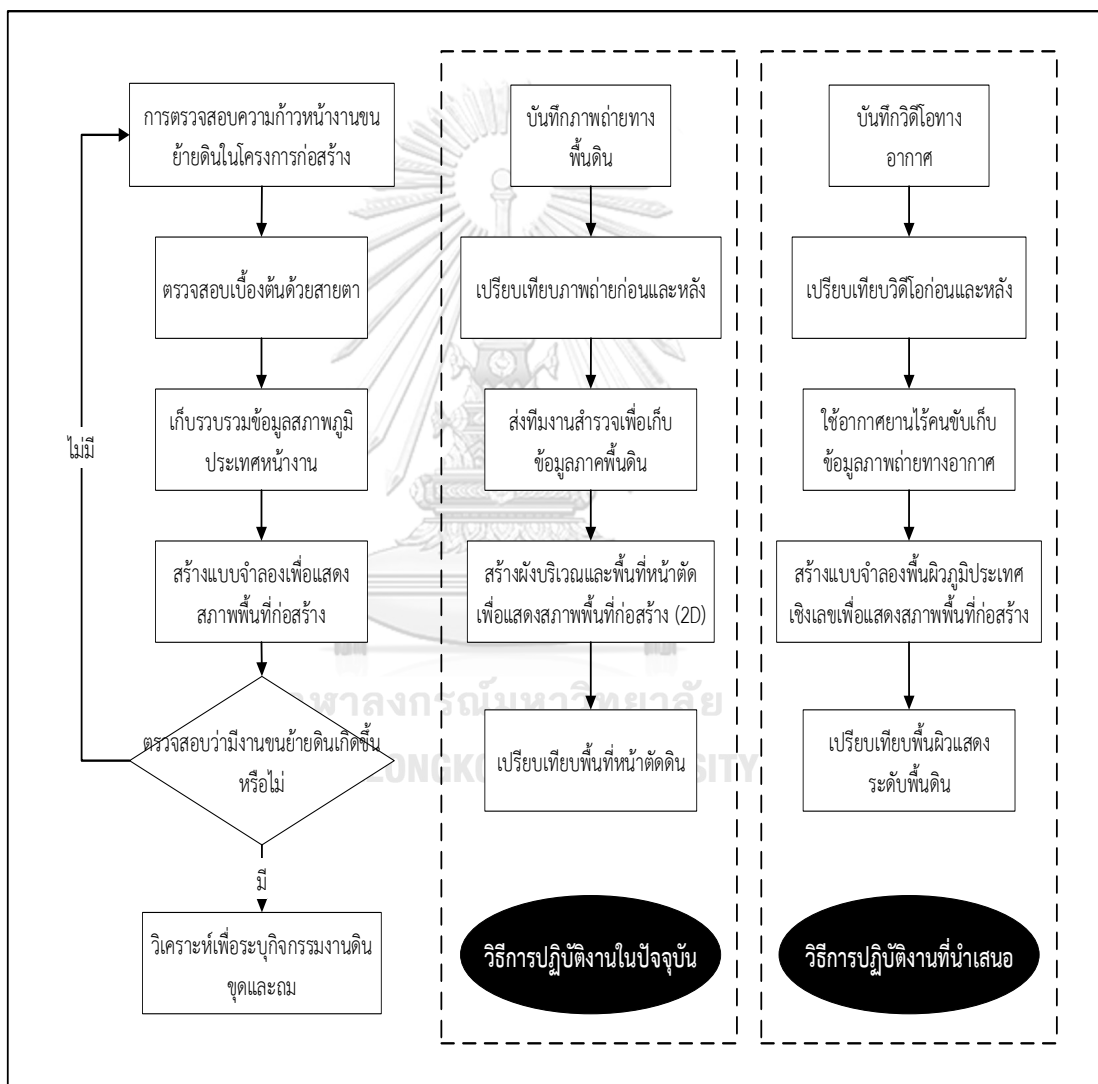
ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอแนวคิดการใช้ระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินชุดและถมสำหรับติดตามปริมาณการทำงานที่เกิดขึ้นจริงของงานดินชุดและถมในกระบวนการก่อสร้าง ระบบนี้ออกแบบมาเพื่อช่วยลดเวลา แรงงาน และต้นทุนการเก็บข้อมูลงานดินชุดและถมระหว่างกระบวนการก่อสร้าง เนื้อหาในบทนี้จะอธิบายปัญหาการเก็บข้อมูลงานดินชุดและถมที่ใช้ในปัจจุบัน แนวทางแก้ปัญหาด้วยการใช้ระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินชุดและถม เพื่อช่วยเก็บข้อมูลภาคสนามและการวิเคราะห์ปริมาณงานที่เกิดขึ้นจริง และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการใช้ระบบที่พัฒนาขึ้นมา

4.1 ปัญหาการและสาเหตุการทำงานซ้ำซ้อนของงานดินชุดและถมในปัจจุบัน

จากการสำรวจข้อมูลเบื้องต้น จากโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง การก่อสร้างรถไฟฟ้าทางคู่ หรือแม้กระทั่งการก่อสร้างอุโมงค์ลอดทางแยก การสำรวจเพื่อเก็บข้อมูลที่ใช้ในโครงการก่อสร้างเป็นการเก็บข้อมูลตามสัญญาก่อสร้าง กล่าวคือ ทำการเก็บข้อมูลค่าระดับเพื่อหาพื้นที่หน้าตัดดินตาม Sta. ที่ได้แบ่งไว้แล้ว โดยทั่วไปอยู่ที่ Sta. ละ 25 เมตร ความถี่ในการเก็บข้อมูลคือ ก่อนเริ่มงาน ตามการเบิกงวดงานดินและเมื่อเสร็จงาน แต่ในระหว่างกระบวนการก่อสร้างที่มีการขนย้ายดินไป-มานั้น ไม่มีการสำรวจเพื่อเก็บรายการงานในส่วนนี้ สาเหตุหลักที่ไม่มีการเก็บข้อมูลระหว่างกระบวนการก่อสร้าง เนื่องจากวิธีการสำรวจที่ใช้ในปัจจุบันเพื่อเก็บข้อมูลนั้น ใช้เวลาและแรงงานคนค่อนข้างมาก อีกทั้งสภาพระดับพื้นผิวดินระหว่างกระบวนการก่อสร้างมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากใช้เครื่องจักรกลในการทำงานเป็นหลัก การจัดทำเอกสารนิยมจัดทำในรูปแบบผังบริเวณที่แสดงพื้นที่ก่อสร้าง สัญลักษณ์แสดงรายละเอียดสิ่งของที่อยู่ในบริเวณก่อสร้างอย่างคร่าวๆ และรูปตัดดินตาม sta. ต่างๆ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้อาจเพียงพอสำหรับโครงการก่อสร้างที่ตั้งอยู่ในบริเวณพื้นที่ราบ สภาพภูมิประเทศไม่สลับซับซ้อน แต่สำหรับโครงการก่อสร้างที่ตั้งอยู่บริเวณภูเขา ที่พื้นที่โครงการมีความสลับซับซ้อน รายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากการสำรวจด้วยกล้องสำรวจทั่วไปไม่สามารถสะท้อนสภาพพื้นที่จริงได้ เนื่องจากเป็นเพียงการสำรวจเพื่อเก็บข้อมูลจุดค่าพิกัดภูมิศาสตร์ และสร้างสัญลักษณ์ต่างๆ แสดงสภาพพื้นที่จริงเท่านั้นซึ่งยากต่อการทำความเข้าใจในรายละเอียดส่งผลให้ในระหว่างกระบวนการก่อสร้างขาดการเก็บข้อมูลงานดินชุดและถมในภาคสนาม ทีมผู้บริหารโครงการไม่มีข้อมูลใช้สำหรับการติดตามตรวจสอบงานในส่วนนี้โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำงานใน

ลักษณะซ้ำซ้อนที่เกิดขึ้นจริงในโครงการก่อสร้างและส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายในโครงการก่อสร้างโดยตรง แต่ไม่สามารถติดตามและวางแผนป้องกันได้ อีกทั้งยังขาดข้อมูลสภาพภูมิประเทศจริงที่จำเป็นต้องนำไปใช้วางแผนสำหรับการขนส่งวัสดุ การกองเก็บวัสดุ และการประกอบติดตั้งชิ้นส่วนต่างๆภายในโครงการก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เพื่อลดผลกระทบจากปัญหาเหล่านี้ จำเป็นต้องหาเครื่องมือที่สามารถช่วยแก้ปัญหาเรื่องการเก็บข้อมูลงานดินขุดและถมที่ใช้ในปัจจุบัน ในหัวข้อถัดไปจะอธิบายแนวคิดการประยุกต์ใช้เครื่องมือเพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้



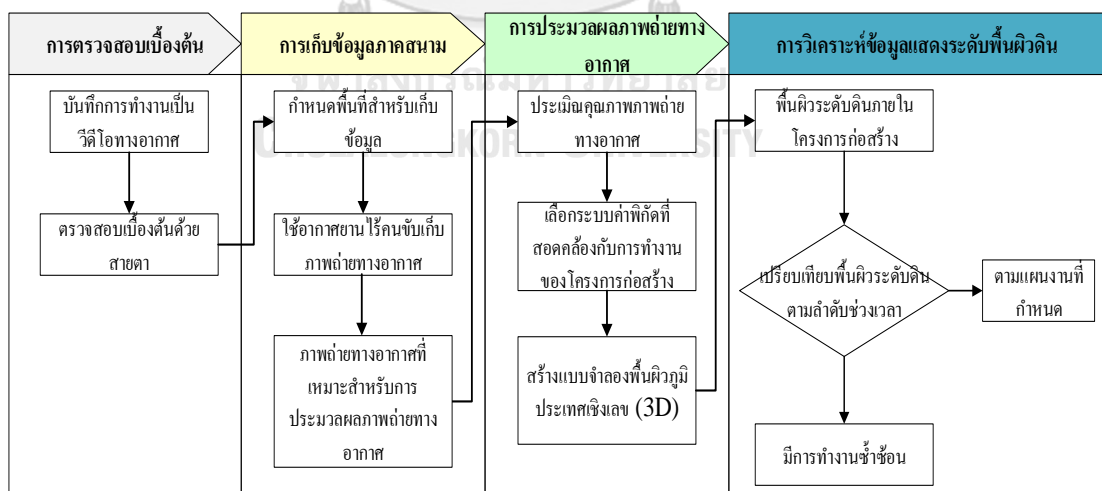
รูปที่ 4.1 แนวคิดการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเพื่อช่วยตรวจสอบปริมาณงานขุดดินที่เกิดขึ้นจริง

4.2 แนวทางแก้ปัญหาเรื่องการเก็บข้อมูลงานดินซุดและถมที่ใช้ในปัจจุบัน

จากการศึกษางานเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 ทำให้เข้าใจเทคนิควิธีการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ ที่เหมาะสำหรับใช้ประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศเพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข รวมถึงความคลาดเคลื่อนจากการสำรวจด้วยวิธีการนี้ รูปที่ 4.1 อธิบายแนวความคิดการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเพื่อช่วยตรวจหาปริมาณงานขย่ายดินที่เกิดขึ้นจริงและสามารถระบุถึงการทำงานซ้ำซ้อนระหว่างกระบวนการก่อสร้าง อาศัยกระบวนการภายใต้แนวคิดนี้เพื่อใช้ออกแบบและพัฒนาระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินซุดและถม

4.3 แนวคิดการพัฒนาระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินซุดและถม

จากแนวความคิดการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเพื่อตรวจหาปริมาณงานขย่ายดินที่เกิดขึ้นจริงและสามารถระบุถึงการทำงานซ้ำซ้อนระหว่างกระบวนการก่อสร้างในข้อ 4.2 นำไปสู่การนำเสนอแนวความคิดพัฒนาระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินซุดและถมในโครงการก่อสร้างพื้นฐาน จากการวิเคราะห์หากิจกรรมงานดินซุดและถมที่เกิดขึ้นจริง ณ.ตำแหน่งที่สนใจในโครงการก่อสร้างด้วยการเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับดิน ตลอดช่วงเวลาการทำงานเป็นระยะๆ ตามพัฒนาการของโครงการก่อสร้าง โดยใช้แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขที่สร้างขึ้นจากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศอย่างสม่ำเสมอ และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หากการทำงานที่ซ้ำซ้อนและค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการก่อสร้าง



รูปที่ 4.2 แนวคิดการพัฒนาระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินซุดและถมในโครงการก่อสร้าง

โครงสร้างพื้นฐาน

รูปที่ 4.2 แสดงแนวคิดการพัฒนาระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินซุดและถมในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน ซึ่งแสดงกระบวนการทำงานของระบบที่นำเสนอ แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนที่สำคัญประกอบด้วย 1) การตรวจสอบเบื้องต้น 2) การเก็บข้อมูลภาคสนาม 3) การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ และ 4) การวิเคราะห์ข้อมูลแสดงระดับพื้นผิวดิน

4.3.1 การตรวจสอบเบื้องต้น

ขั้นตอนแรกเป็นการตรวจสอบการทำงานเบื้องต้น ต้องการเครื่องมือที่สามารถเก็บข้อมูลภายในโครงการก่อสร้างได้อย่างรวดเร็วและครอบคลุมพื้นที่การทำงานทั้งหมด จึงใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อบันทึกข้อมูลภาพถ่ายวิดีโอมุมสูงภายในหน่วยงานก่อสร้างเป็นประจำ นำข้อมูลภาพถ่ายวิดีโอเหล่านี้มาตรวจสอบด้วยสายตาเพื่อตรวจสอบความก้าวหน้าของโครงการก่อสร้างตามแผนงานก่อสร้างและสังเกตพื้นที่ที่อาจมีการทำงานในลักษณะซ้ำซ้อน เนื่องจากการใช้อากาศยานไร้คนขับเป็นวิธีการที่ประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายอีกทั้งยังสามารถเก็บข้อมูลภาพถ่ายวิดีโอได้อย่างรวดเร็ว วิธีการนี้สามารถใช้ตรวจสอบสิ่งปลูกสร้างที่สามารถนับเป็นจำนวนชั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ไม่สามารถตรวจสอบความก้าวหน้าเชิงปริมาณ เช่น งานดินซุดและถมได้ จึงจำเป็นต้องประยุกต์ใช้เครื่องมือและเทคนิคต่างๆเพิ่มเติมเพื่อสามารถวัดปริมาณงานในลักษณะนี้ได้ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศด้วยเทคนิค SfM เพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากอากาศยานไร้คนขับ

4.3.2 การเก็บข้อมูลภาคสนาม

ขั้นตอนที่สองเป็นการเก็บข้อมูลภาคสนามที่เหมาะสมสอดคล้องกับการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ โดยใช้อากาศยานไร้คนขับควบคุมการบินด้วยซอฟต์แวร์เฉพาะเพื่อบันทึกภาพถ่ายทางอากาศ ทั้งนี้อาจแบ่งขั้นตอนย่อยได้สองส่วน ได้แก่

1) กำหนดพื้นที่สำหรับเก็บข้อมูล

เป็นการสำรวจบริเวณพื้นที่บริเวณโดยรอบเพื่อตรวจสอบอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างต่างๆ ที่กีดขวางเส้นทางการบินของอากาศยานไร้คนขับที่ความสูงต่างๆ ก่อนการใช้อากาศยานไร้คนขับบินเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศรวมถึงการสำรวจและติดตั้งจุดควบคุมภาคพื้นดินสำหรับการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศด้วยวิธี Indirect Georeferencing เสร็จแล้วจึงสร้างแผนการบินและกำหนดเส้นทางบินของอากาศยานไร้คนขับในซอฟต์แวร์ที่ใช้ควบคุมการอากาศยานไร้คนขับให้มีทิศทางการบินสอดคล้องกับพื้นที่นั้นๆ

2) การใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อเก็บภาพถ่ายทางอากาศ

ทำการปล่อยอากาศยานไร้คนขับเพื่อบินเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศในพื้นที่ก่อสร้างที่กำหนดไว้แล้ว ก่อนทำการบินทุกครั้งต้องตรวจสอบอุปกรณ์ต่างๆของอากาศยานไร้คนขับให้อยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ เสร็จแล้วจึงตั้งค่าปัจจัยการบินต่างๆ สำหรับการบินเก็บข้อมูล ประกอบด้วยปัจจัยทิศทางการบิน ความสูงเพดานบิน ความเร็วของอากาศยานขณะบินเก็บภาพถ่ายทางอากาศ ทิศทางและองศาหมุนเอียงของกล้องถ่ายภาพ ความเร็วชัตเตอร์ กล้องถ่ายภาพและ ระยะช้อนภาพด้านหน้า และด้านข้างของภาพถ่าย เป็นต้น ระหว่างทำการบินเพื่อเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ อากาศยานไร้คนขับต้องอยู่ในระยะที่สายตามองเห็น ตามที่กฎหมายกำหนด

เมื่อทำการบินเก็บข้อมูลเสร็จเรียบร้อยแล้ว เราจะได้ชุดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่เหมาะสมเพื่อนำไปประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศเพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศ ในขั้นตอนถัดไป

4.3.3 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ

ขั้นตอนที่สามเป็นการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศด้วยซอฟต์แวร์ที่เหมาะสม เพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากภาพถ่ายทางอากาศ สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนย่อยได้ 3 ขั้นตอน ประกอบด้วย

- 1) ประเมินคุณภาพของภาพถ่ายทางอากาศ
เป็นขั้นตอนการคัดกรองข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศเบื้องต้นด้วยสายตาหรือซอฟต์แวร์ เพื่อค้นหาภาพถ่ายที่ไม่ชัดเจน (Blur) เพื่อนำออกจากชุดข้อมูลภาพถ่ายก่อนนำไปใช้ประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ เนื่องจากภาพถ่ายที่ไม่ชัดเจนเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อคุณภาพของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศที่สร้างขึ้นทำให้มีคุณภาพลดลง
- 2) เลือกระบบค่าพิกัดที่สอดคล้องกับการทำงานของโครงการก่อสร้าง
เป็นการเลือกการตั้งค่าระบบค่าพิกัดที่ปรากฏในแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขที่สร้างขึ้นใหม่ให้สอดคล้องกับการเอาไปใช้งานต่อไปในท้องถิ่นนั้นๆ เช่น ระบบพิกัดฉาก ระบบพิกัด UTM หรือระบบพิกัดจีโอดेटิก หากไม่เลือกการตั้งค่าในส่วนนี้ระบบค่าพิกัดที่ปรากฏในแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศที่สร้างขึ้น จะเป็นไปตามระบบค่าพิกัดที่ถูกทึกอยู่ในภาพถ่ายทางอากาศ หากเลือกใช้การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศด้วยวิธี Indirect Georeferencing ต้องทำการใส่ค่าพิกัดหมุดควบคุมภาคพื้นดินในขั้นตอนนี้ด้วย
- 3) สร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข
เป็นขั้นตอนการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศด้วยเทคนิค(SfM) เพื่อสร้างกลุ่มจุด 3 มิติ (point cloud model) แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข และภาพถ่ายออร์โธ

โธ (Orthomosaic) ชุดข้อมูลเหล่านี้สามารถส่งออกไปใช้ร่วมกับซอฟต์แวร์ออกแบบอื่นๆ เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลด้านต่างๆได้ ในงานวิจัยนี้ส่งออกข้อมูลที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศออกไปวิเคราะห์ ด้วยชุดซอฟต์แวร์ Autodesk AutoCAD Civil3D ต่อไป

4.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อระบุกิจกรรมงานและการหาปริมาณงานซ้ำซ้อนที่เกิดขึ้น

ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลที่เป็นผลลัพธ์จากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศเพื่อระบุหาปริมาณและกิจกรรมของงานที่เกิดขึ้นว่าเป็นกิจกรรมงานขุดดินหรือกิจกรรมงานถมดิน และวิเคราะห์การทำงานซ้ำซ้อน ด้วยการใช้ข้อมูลค่าพิกัดจุดที่ได้จากการสำรวจด้วยวิธีการทั่วไป และจากระบบที่นำเสนอ มาสร้างแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ด้วยซอฟต์แวร์ Autodesk AutoCAD Civil3D ทำการเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ตามลำดับช่วงเวลา การวิเคราะห์ข้อมูลนี้อาจแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อย ได้แก่

1) การหาปริมาณและระบุกิจกรรมงานขุดดินและกิจกรรมงานถมดิน

ใช้แบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ของช่วงเวลาการสำรวจ 2 ครั้งมาทำการเปรียบเทียบกันปริมาณงานขุดดินมาจากค่าระดับความสูงของพื้นผิวที่มีระดับลดลงจากครั้งก่อนหน้า ในขณะที่ปริมาณงานถมดินเกิดจากค่าระดับความสูงของพื้นผิวที่มีระดับเพิ่มขึ้นจากครั้งก่อนหน้า เพื่อความเข้าใจได้ง่ายอาจใช้เส้น Profiles แสดงค่าระดับพื้นผิวดินมาทำการเปรียบเทียบเพื่อให้เห็นภาพได้ชัดเจน



รูปที่ 4.3 ตัวแปรในแต่ละช่วงเวลาประกอบการคำนวณปริมาณงานซ้ำซ้อน

2) การวิเคราะห์การทำงานซ้ำซ้อนของงานดินขุดและถม

วิธีการคิดปริมาณงานซ้ำซ้อนจากระบบที่นำเสนอ สามารถคิดได้จากสมการ

$$\text{ปริมาณงานซ้ำซ้อน} = \sum_{i=1}^n \{(AW_i + WR_i) - WP_i\}$$

i = ช่วงเวลาระหว่างการสำรวจ 2 ครั้ง

n = จำนวนช่วงเวลาที่ต้องการหาปริมาณ

AW = ปริมาณงานที่ทำจริงในช่วงเวลานั้น

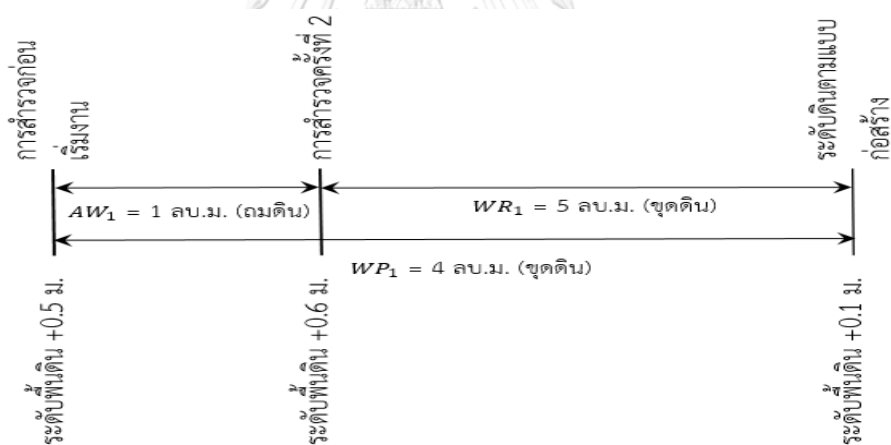
WR = ปริมาณงานที่เหลืออยู่และต้องทำให้เสร็จตามแบบในครั้งเดียว

WP = ปริมาณงานที่ต้องทำให้เสร็จตามแบบในครั้งเดียวตั้งแต่แรก

รูปที่ 4.3 ตัวแปรในแต่ละช่วงเวลาประกอบการคำนวณปริมาณงานเข้าซ้อนจากระบบนำเสนอ เพื่อให้เข้าใจได้ง่าย ปริมาณงานเข้าซ้อนสามารถหาได้จากผลรวมของงานที่ทำจริงระหว่างช่วงเวลาการสำรวจ (AW_i) กับงานที่เหลืออยู่และต้องทำให้เสร็จตามแบบในครั้งเดียว (WR_i) ลบด้วยงานที่ต้องทำให้เสร็จในครั้งเดียวตั้งแต่ช่วงต้นของการสำรวจในช่วงเวลานั้นๆ (WP_i)

ตัวอย่าง การคิดปริมาณงานปริมาณงานเข้าซ้อนจากระบบที่นำเสนอ

สมมุติให้พื้นที่สำรวจ 10 ตร.ม. ระดับพื้นดินจากการสำรวจครั้งที่ 1 ก่อนเริ่มงานก่อสร้างอยู่ที่ระดับ +0.5 เมตร ระดับพื้นดินตามแบบก่อสร้างแล้วเสร็จที่ระดับ +0.1 เมตร ระหว่างการก่อสร้างมีการสำรวจระดับพื้นดินครั้งที่ 2 มีค่าระดับ +0.6 เมตร และการสำรวจครั้งที่ 3 มีค่าระดับพื้นดิน +0.3 เมตร ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 อธิบายการคิดปริมาณงานเข้าซ้อนช่วงเวลาที่ 1

สามารถคิดปริมาณงานเข้าซ้อนระหว่างช่วงเวลาการสำรวจครั้งที่ 1 ได้ดังนี้

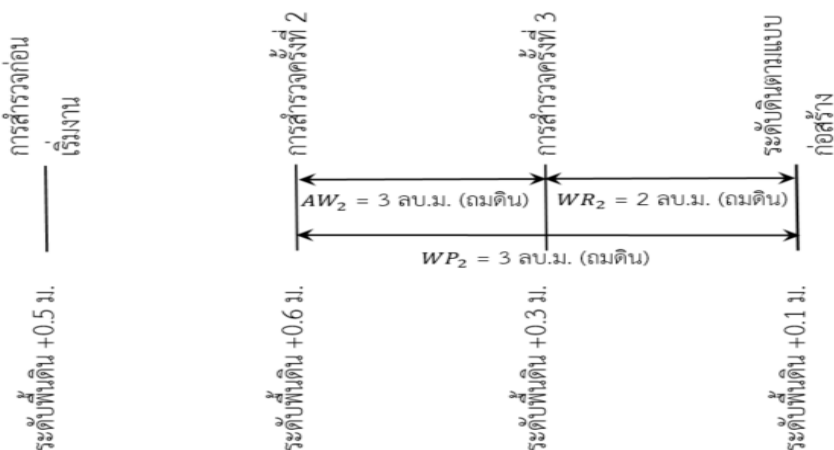
$$AW_1 = 10 \times (0.6 - 0.5) = 1 \text{ ลบ.ม. (งานถมดิน) เนื่องจากระดับดินเพิ่มขึ้นมา}$$

$$WR_1 = 10 \times (0.1 - 0.6) = 5 \text{ ลบ.ม. (งานขุดดิน) เนื่องจากระดับดินลดลงไป}$$

$$WP_1 = 10 \times (0.5 - 0.1) = 4 \text{ ลบ.ม. (งานขุดดิน) เนื่องจากระดับดินลดลงไป}$$

งานเข้าซ้อนที่เกิดระหว่างช่วงเวลาการสำรวจครั้งที่ 1 และการสำรวจครั้งที่ 2 คิดได้เป็น

$$\begin{aligned} \text{งานซ้ำซ้อน} &= (\text{งานถมดิน 1 ลบ.ม.} + \text{งานขุดดิน 5 ลบ.ม.}) - \text{งานขุดดิน 4 ลบ.ม.} \\ &= \text{ถมดิน 1 ลบ.ม. และขุดดิน 1 ลบ.ม.} \end{aligned}$$



รูปที่ 4.5 อธิบายการคิดปริมาณงานซ้ำซ้อนช่วงเวลา 2

และสามารถคิดปริมาณงานซ้ำซ้อนระหว่างช่วงเวลาการสำรวจครั้งที่ 2 ได้ดังนี้

$$AW_2 = 10 \times (0.3 - 0.6) = 3 \text{ ลบ.ม. (งานขุดดิน) เนื่องจากระดับดินลดลงไป}$$

$$WR_2 = 10 \times (0.1 - 0.3) = 2 \text{ ลบ.ม. (งานขุดดิน) เนื่องจากระดับดินลดลงไป}$$

$$WP_2 = 10 \times (0.6 - 0.1) = 5 \text{ ลบ.ม. (งานขุดดิน) เนื่องจากระดับดินลดลงไป}$$

งานซ้ำซ้อนที่เกิดระหว่างช่วงเวลาการสำรวจครั้งที่ 1 และการสำรวจครั้งที่ 2 คิดได้เป็น

$$\begin{aligned} \text{งานซ้ำซ้อน} &= (\text{งานขุดดิน 3 ลบ.ม.} + \text{งานขุดดิน 2 ลบ.ม.}) - \text{งานขุดดิน 5 ลบ.ม.} \\ &= \text{ถมดิน 0 ลบ.ม. และขุดดิน 0 ลบ.ม.} \end{aligned}$$

ดังนั้นในในพื้นที่ 10 ตร.ม. สามารถตรวจพบการทำงานซ้ำซ้อนของงานขุดดินในช่วงเวลาการสำรวจครั้งที่ 1 ระหว่างการสำรวจครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 คิดเป็นงานขุดดิน 1 ลบ.ม. และงานถมดิน 1 ลบ.ม. และการการทำงานซ้ำซ้อนของงานขุดดินในช่วงเวลาการสำรวจครั้งที่ 2 ระหว่างการสำรวจครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 คิดเป็นงานขุดดิน 0 ลบ.ม. และงานถมดิน 0 ลบ.ม. ตามลำดับโดยมีรูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 อธิบายการคิดปริมาณงานซ้ำซ้อนตลอด 2 ช่วงเวลาดังกล่าว

จากการสมการคิดปริมาณการทำงานซ้ำซ้อนที่นำเสนอ งานที่เหลืออยู่และต้องทำให้เสร็จตามแบบในช่วงเวลาที่ 1 (WR_1) จะเปลี่ยนมาเป็นงานที่ต้องทำให้เสร็จในครั้งเดียวตั้งแต่ช่วงต้นของการสำรวจในช่วงเวลาที่ 2 (WR_2) เนื่องจากเป็นวิธีการคิดตามการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลา

4.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากระบบติดตามการทำงานเข้าช้อนงานดินชุดและถม

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการใช้งานระบบติดตามการทำงานเข้าช้อนงานดินชุดและถมมี 3 ประการ

ประการแรก คือ ช่วยลดเวลาแรงงานและค่าใช้จ่ายในการเก็บข้อมูลดินชุดและถมในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ เนื่องจากชุดอุปกรณ์ที่นำเสนอในระบบเป็นการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับ ทำให้สามารถเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศได้อย่างรวดเร็ว แม้ในพื้นที่สำรวจเป็นบริเวณภูเขาสภาพภูมิประเทศมีความสลับซับซ้อน ยากต่อการสำรวจโดยใช้แรงงานคนและการสำรวจด้วยวิธีการทั่วไปโดยใช้กล้องสำรวจที่มีใช้โดยทั่วไป

ประการที่สองคือรายละเอียดของข้อมูลมีความชัดเจนครบถ้วนสมบูรณ์และมีความต่อเนื่องผลลัพธ์ที่ได้จากระบบนี้ประกอบด้วยแบบจำลองกลุ่มจุดสามมิติความละเอียดสูง แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข และภาพถ่ายออร์โธ (Orthomosaic) ซึ่งเป็นการจำลองรายละเอียดสภาพพื้นผิวที่ปรากฏในพื้นที่ที่ทำการบินเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ และจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบดิจิทัลสามารถเรียกใช้งานได้ง่าย

ประการที่สามคือสามารถระบุกิจกรรมงานดินชุดและถม รวมถึงปริมาณงานที่เกิดขึ้นจริงหน้างาน ทำให้สามารถตรวจสอบความก้าวหน้าของงานตลอดจนถึงระบุการทำงานเข้าช้อนที่เกิดขึ้นจริงเชิงปริมาณระหว่างช่วงเวลาที่มีการเก็บข้อมูลหน้างานเพื่อนำไปใช้คำนวณหาค่าใช้จ่ายจากการทำงานเข้าช้อน ทั้งนี้ปริมาณงานเข้าช้อนที่ระบบตรวจพบเป็นเพียงปริมาณงาน ณ วันที่สำรวจเท่านั้น ไม่ได้แสดงถึงงานเข้าช้อนที่เกิดขึ้นจริงทั้งหมดที่อยู่ในช่วงเวลาการวัดนั้นๆ เนื่องจากในช่วงเวลาระหว่างการสำรวจเพื่อเก็บข้อมูลอาจมีการทำงานเข้าช้อนที่เกิดขึ้นและแก้ไขแล้วเสร็จก่อนการใส่ระบบที่นำเสนอสำรวจเพื่อเก็บข้อมูล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.5 สรุปแนวคิดการพัฒนาระบบ

ปัจจุบันการสำรวจเพื่อเก็บข้อมูลงานดินชุดและถมระหว่างกระบวนการทำงาน ยังไม่นิยมเก็บกันมากนักเนื่องจากข้อมูลที่เก็บได้ไม่สามารถแสดงรายละเอียดสภาพพื้นที่จริงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่ก่อสร้างที่ตั้งอยู่บริเวณภูเขาที่มีสภาพภูมิประเทศสลับซับซ้อน นอกจากนี้การเก็บข้อมูลแต่ละครั้งใช้เวลา แรงงานและค่าใช้จ่ายมาก จึงเป็นที่มาของการนำเสนอแนวคิดการใช้ระบบติดตามการทำงานเข้าช้อนงานดินชุดและถมในบพนี้ ที่สามารถลดข้อจำกัดด้านเวลา แรงงานและค่าใช้จ่ายสำหรับใช้เป็นเครื่องมือติดตามความก้าวหน้างานของทีมนักบริหารโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ ระบบที่นำเสนอเสนอในงานวิจัยชิ้นนี้เป็นการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับสำหรับเก็บข้อมูลในโครงการก่อสร้างเพื่อลดอุปสรรคด้านภูมิประเทศ การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศด้วยเทคนิค SfM เพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขและใช้เป็นฐานข้อมูลสร้างพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ในส่วน

การวิเคราะห์หากิจกรรมงานที่เกิดขึ้นใช้วิธีการเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดินระหว่างช่วงเวลาการสำรวจ 2 ครั้งเพื่อระบุกิจกรรมงานขุดดินหรือกิจกรรมงานถมดิน

การหาปริมาณงานเข้าซ้อนใช้วิธีการเปรียบเทียบปริมาณระหว่างผลรวมของงานที่ทำจริงระหว่างช่วงเวลาการสำรวจกับงานที่เหลืออยู่หลังจบช่วงเวลาการสำรวจ ลบด้วยงานที่ต้องทำให้เสร็จตามแบบในครั้งเดียวตั้งแต่แรก เพื่อหาส่วนต่างของงานที่เกิดขึ้น ทั้งนี้เพื่อความเข้าใจได้ง่ายและการจัดทำเอกสารแบบ 2 มิติ อาจใช้การเปรียบเทียบ เส้น Profiles แสดงระดับพื้นดินตั้งแต่ 3 ช่วงเวลาขึ้นไปเพื่อระบุหาการทำงานเข้าซ้อนที่เกิดขึ้น ณ.จุดที่มีการสร้างพื้นที่หน้าตัดดินนั้นๆ การเปรียบเทียบข้างต้นใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk AutoCAD Civil3D เป็นหลัก



บทที่ 5

การออกแบบและพัฒนาระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินชุดและถม

จากบทที่ 4 ได้ชี้ให้เห็นถึงปัญหาในการเก็บข้อมูลเพื่อใช้ติดตามความก้าวหน้าของงานดินชุดและถมในโครงการก่อสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ที่ตั้งอยู่บริเวณเนินเขาที่มีสภาพภูมิประเทศสลับซับซ้อนเพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากสภาพภูมิประเทศ ส่งผลให้การสำรวจด้วยวิธีการปกติล่าช้า และไม่สามารถแสดงสภาพพื้นที่การทำงานจริงให้ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องเข้าใจได้ง่าย จำเป็นต้องพัฒนาชุดเครื่องมือที่มีความสามารถเก็บข้อมูลในพื้นที่ก่อสร้างได้อย่างรวดเร็ว ไม่มีข้อจำกัดด้านสภาพภูมิประเทศ และสามารถแสดงรายละเอียดของสภาพภูมิประเทศจริงภายในโครงการก่อสร้าง รวมถึงระบุกิจกรรมงานดินชุดและถมสำหรับใช้ติดตามงานที่มีลักษณะซ้ำซ้อนเพื่อติดตามค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจริง ในงานวิจัยชิ้นนี้จึงนำเสนอชุดเครื่องมือที่ประกอบด้วยอากาศยานไร้คนขับ การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศด้วยเทคนิค SfM เพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข และ Autodesk AutoCAD Civil3D ซอฟต์แวร์เพื่อใช้วิเคราะห์ภาพตัดขวางและเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดินเพื่อหาปริมาณงานชุดดินและงานถมดิน

อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับและการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศด้วยเทคนิค SfM เพื่อใช้ติดตามความก้าวหน้างานในโครงการก่อสร้างนั้น ปัจจุบันมีการศึกษาเพียงเพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องแม่นยำของระบบในลักษณะดังกล่าว ด้วยการเปรียบเทียบความถูกต้องของจุดทดสอบและปริมาณ เปรียบเทียบกับวิธีการสำรวจแบบอื่นๆ ทางภาคพื้นดิน แต่ยังคงขาดการศึกษาและพัฒนาระบบสำหรับใช้ติดตามการทำงานที่มีลักษณะซ้ำซ้อนเพื่อปริมาณการทำงานซ้ำซ้อนที่เกิดขึ้นจริงระหว่างกระบวนการทำงานดินชุดและถมในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน

ในบทนี้จึงเป็นการนำเสนอการออกแบบและพัฒนาระบบ ตามแนวคิดการพัฒนาระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินชุดและถมในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ ประกอบด้วย การออกแบบระบบ การพัฒนาระบบ รายการอุปกรณ์ทั้งในส่วนฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ประยุกต์ใช้ในระบบ และการทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอ

5.1 การออกแบบระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินชุดและถม

การออกแบบระบบ เป็นไปตามแนวคิดระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินชุดและถมที่เสนอในบทที่ 4 เริ่มจากการสัมภาษณ์วิศวกรผู้ควบคุมงานสำรวจประจำโครงการก่อสร้างที่ใช้ในกรณีศึกษาเพื่อเปรียบเทียบการสำรวจด้วยวิธีการทั่วไปที่ใช้จริงในโครงการก่อสร้างกับวิธีที่นำเสนอใน

ประเด็นต่างๆ สรุปในตารางที่ 5.1 ตารางเปรียบเทียบการสำรวจด้วยวิธีการทั่วไปและวิธีการที่นำเสนอในบริเวณพื้นที่เนินเขา พื้นที่สำรวจประมาณ 60,000 ตร.ม.

ตารางสรุปพบว่า การสำรวจเพื่อเก็บข้อมูลค่าระดับพื้นดินภาคสนามเพื่อจัดทำภาพตัดขวางงานดินขุดและถมระหว่างกระบวนการทำงานก่อสร้างภายในโครงการก่อสร้างจริงที่ตั้งอยู่บริเวณเนินเขาที่มีความกว้างโครงการ 60 เมตร และยาว 1,000 เมตร ทุกๆ ระยะ 25 เมตร ต้องใช้แรงงานครั้งละ 10 คน-วัน หลังจากได้รับข้อมูลภาคสนามแล้วต้องใช้เวลาเพื่อจัดทำเอกสารอีก 1 วัน จึงจะได้เอกสารแบบแปลน 2 มิติและภาพตัดขวางของงานดินขุดและถมหากต้องการหาความก้าวหน้าของงานดินขุดและถม ต้องการสำรวจที่ตำแหน่ง Sta. เดิมซ้ำทุกครั้งจึงจะสามารถหาความก้าวหน้างานดินขุดและถมได้ จากข้อมูลการสัมภาษณ์นี้ทำให้ทราบว่า การสำรวจด้วยวิธีการทั่วไปนี้ ใ้รายละเอียดไม่เพียงพอสำหรับใช้ระบุการทำงานดินขุดและถมที่มีลักษณะซ้ำซ้อนได้ เนื่องจากข้อมูลที่ไ้จากการสำรวจไม่ละเอียดเพียงพอที่ผู้จัดการโครงการจะสามารถเห็นภาพการทำงานที่เกิดขึ้นจริงได้ จึงทำให้ขาดการติดตามงานในลักษณะนี้ในโครงการก่อสร้างจริง

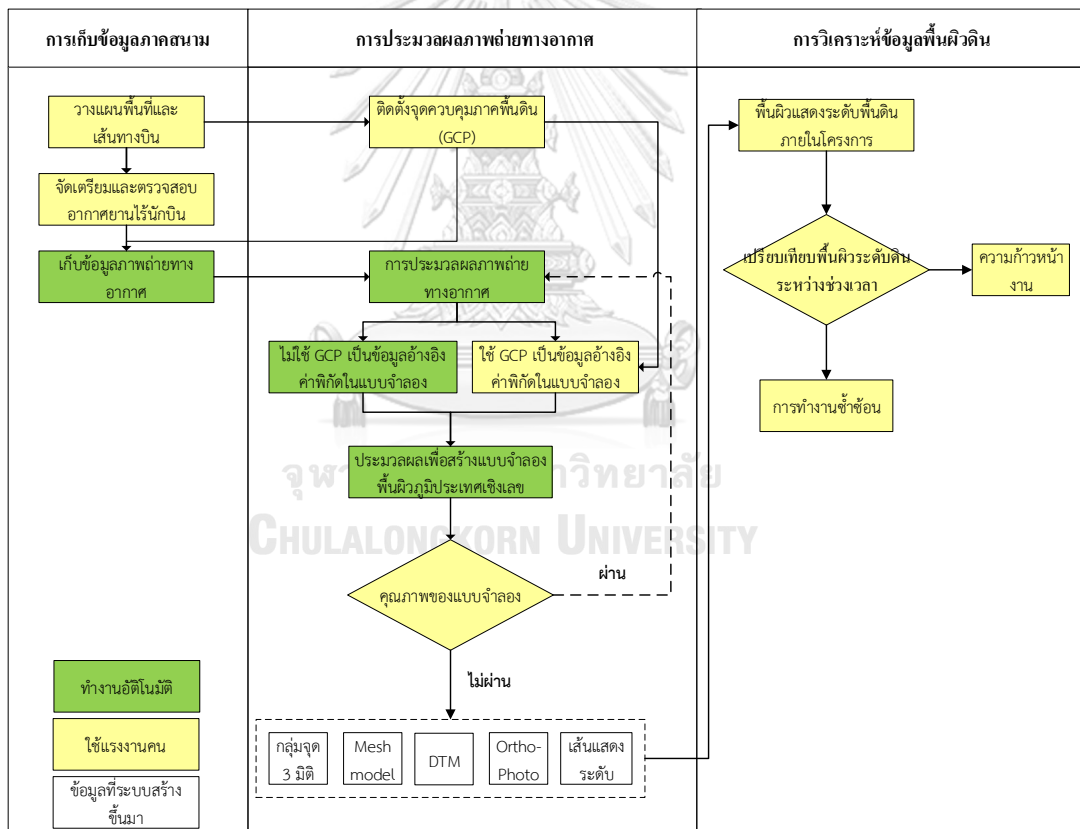
เพื่อแก้ปัญหาเรื่องความละเอียดของข้อมูลงานสำรวจภาคสนาม รวมถึงการลดทรัพยากรในโครงการก่อสร้างทั้งด้านเวลา แรงงานและค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการสำรวจด้วยวิธีการทั่วไปและเพื่อให้ได้ชุดข้อมูลงานสำรวจที่สามารถใช้ติดตามงานดินขุดและถมระหว่างกระบวนการก่อสร้าง ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงนำเสนอ การสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขด้วยการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศด้วยเทคนิค SfM สำหรับใช้เป็นระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินขุดและถมในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน โดยระบบที่นำเสนอนี้สามารถลดเวลาที่ใช้ในการเก็บข้อมูลได้ถึง 20 เท่า ในขณะที่มีค่าใช้จ่ายรวมของระบบประมาณ 585,000 บาท แพงกว่าระบบที่ใช้ในการสำรวจด้วยวิธีการทั่วไปอยู่ประมาณ 275,000 บาท และแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขที่สร้างได้มีความละเอียดเพียงพอสามารถนำไประบุกิจกรรมงานขุดดินและงานถมดินที่เกิดขึ้นตามจุดต่างๆในโครงการก่อสร้างเพื่อค้นหาการทำงานซ้ำซ้อนในรูปแบบปริมาณงาน เพื่อนำไปใช้คิดเป็นต้นทุนค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการทำงานซ้ำซ้อนต่อไป ขั้นตอนการทำงานของระบบที่นำเสนอแสดงในรูปที่ 5.1

ระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินขุดและถมถูกออกแบบมาสำหรับใช้ตรวจหากิจกรรมการทำงานที่ซ้ำซ้อนของงานขุดดินและงานถมดิน รวมถึงปริมาณงานเพื่อนำไปใช้คำนวณหาต้นทุนค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการทำงานซ้ำซ้อนในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน ขั้นตอนการทำงานของระบบแสดงในรูปที่ 5.1 แสดงลำดับการทำงานของระบบ ทั้งนี้ระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินขุดและถมประกอบด้วย 3 กระบวนการทำงานที่สำคัญ ประกอบด้วย 1) การเก็บข้อมูลภาคสนามเป็นขั้นตอนการใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อเก็บภาพถ่ายทางอากาศที่เหมาะสมสำหรับนำไปประมวลผลภาพถ่ายด้วยเทคนิค SfM 2) การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ เป็นการนำภาพถ่ายทางอากาศมา

ตารางที่ 5.1 ตารางเปรียบเทียบการสำรวจด้วยวิธีการทั่วไปและวิธีการที่นำเสนอ

หัวข้อ	รายการเปรียบเทียบ	วิธีการสำรวจทั่วไป	วิธีการสำรวจที่นำเสนอ
1	ระยะเวลาที่ใช้เก็บข้อมูล	2 วัน	2 ชั่วโมง
2	แรงงานที่ใช้เก็บข้อมูล	5 คนต่อวัน	1 คน
3	รวมแรงงานที่ใช้เก็บข้อมูลครั้ง	10 man-day	0.25 man-day
4	ค่าใช้จ่ายค่าอุปกรณ์และซอฟต์แวร์	4.1 กล้องระดับ	4.1 อากาศยานไร้คนขับและอุปกรณ์ต่อพ่วง
		4.2 กล้องประมวลผลรวม (Total Station)	4.2 กล้องประมวลผลรวม (Total Station)
		4.3 ซอฟต์แวร์ AutoCad	4.3 ซอฟต์แวร์ Civil3D
		4.4 ซอฟต์แวร์ PhotoScan	4.4 ซอฟต์แวร์ PhotoScan
	รวมค่าใช้จ่าย	310,000.00 บาท	รวมค่าใช้จ่าย 585,000.00 บาท
5	รายละเอียดของข้อมูลที่เก็บได้	จุดและค่าพิกัดจุด	ภาพถ่ายทางอากาศ
6	ระยะเวลาการจัดทำเอกสารการสำรวจ	1 วัน	6 ชั่วโมง
7	รายละเอียดของเอกสารที่ได้จากการสำรวจ	แปลนพื้นที่และสัญลักษณ์ต่างๆ และภาพถ่ายดัดแปลงงาน ดินทุกๆ ระยะ 25 ม.	แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข 3 มิติ และ ภาพถ่ายวางงานดินทุกพื้นที่แบบจำลอง

ใช้เป็นข้อมูลสำหรับประมวลผลด้วยภาพถ่ายเพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข ข้อมูลที่ได้รับจากขั้นตอนนี้ ประกอบด้วย กลุ่มจุด 3 มิติ แบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข ภาพถ่ายออร์โธ (Orthomosaic) และเส้น Profiles แสดงระดับพื้นดิน และ 3) การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อระบุกิจกรรมงานที่เกิดขึ้นและหาปริมาณการทำงานซ้ำซ้อนที่เกิดขึ้น ด้วยการใช้อัตราข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ ที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศมาสร้างแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ในซอฟต์แวร์ CAD Civil3D สามารถระบุกิจกรรมงานขุดดินและงานถมดินที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 ช่วงเวลาสำรวจด้วยการเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ของ 2 ช่วงเวลาการสำรวจนั้นๆ หากแบบจำลองพื้นผิวมีระดับลดลง แสดงว่ามีงานขุดดินเกิดขึ้นในทางตรงข้าม หากแบบจำลองพื้นผิวมีระดับเพิ่มขึ้น แสดงว่ามีงานถมดินเกิดขึ้น ส่วนคิดปริมาณงานซ้ำซ้อนคิดจากส่วนต่างระหว่าง ปริมาณการทำงานให้แล้วเสร็จตามแบบ กับการทำงานจริงในช่วงเวลานั้นๆ



รูปที่ 5.1 ขั้นตอนการทำงานของระบบที่นำเสนอ

5.2 การพัฒนาระบบ

การพัฒนาระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินซุดและถม ประกอบด้วย 1) การเก็บข้อมูลภาคสนาม 2) การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ และ 3) การวิเคราะห์ข้อมูลพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน โดยมีรายละเอียด ดังนี้

5.2.1 ระบบย่อยสำหรับเก็บข้อมูลภาคสนาม

ระบบย่อยสำหรับเก็บข้อมูลภาคสนามของระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินซุดและถม ที่นำเสนอ ในงานวิจัยนี้ใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อเก็บภาพถ่ายทางอากาศในพื้นที่บริเวณที่ต้องการสำรวจ แบ่งเป็นขั้นตอนการทำงานย่อย 3 ขั้นตอน ประกอบด้วย

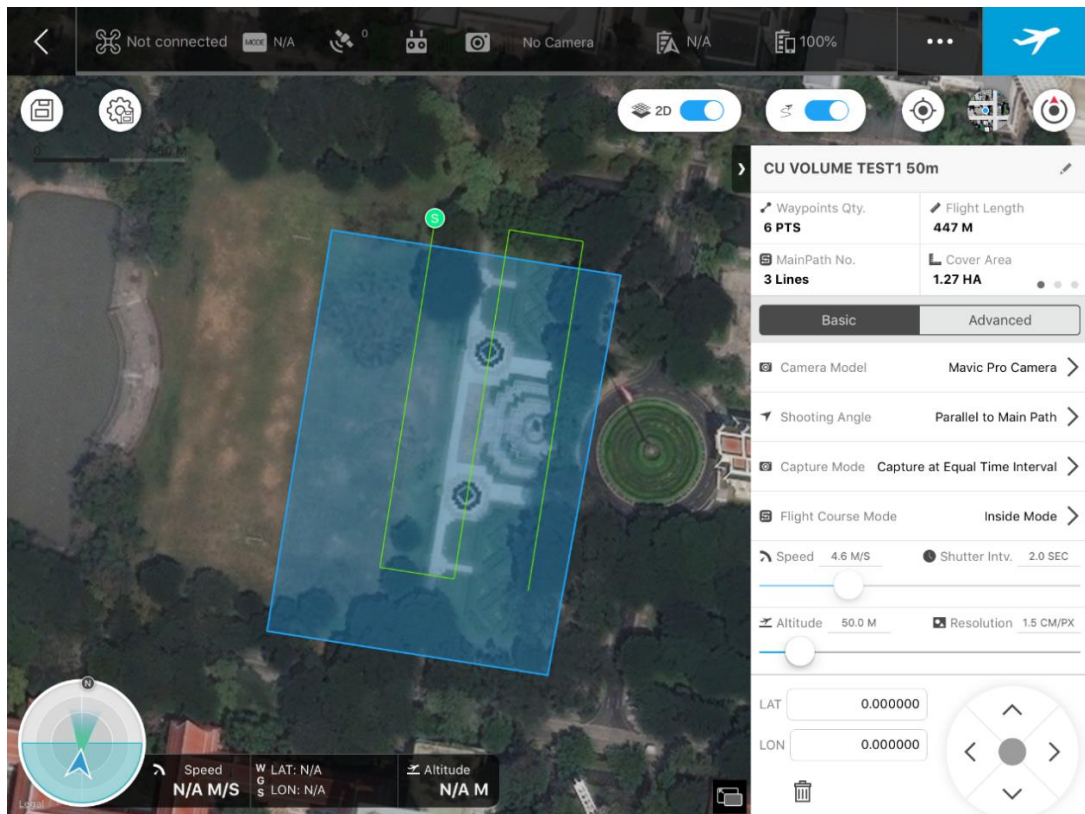
- 1) การวางแผนพื้นที่และเส้นทางการบิน ในขั้นตอนนี้ผู้ควบคุมอากาศยานไร้คนขับต้องทำการสำรวจพื้นที่ ที่จะทำการบินเก็บข้อมูลเพื่อศึกษาและระบุสิ่งกีดขวางที่อาจมีอยู่ในเส้นทางการบิน การประมาณความสูงสิ่งกีดขวางต่างๆ อาจใช้อากาศยานไร้คนขับ บินขึ้นแนวดิ่งเพื่อวัดความสูงและสำรวจในมุมสูงผ่านกล้องถ่ายภาพของอากาศยานไร้คนขับก่อน แล้วจึงกำหนดเพดานบินที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่นั้นๆ หากต้องการใช้ค่าพิกัดจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCPs) เป็นข้อมูลอ้างอิงระหว่างประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศต้องทำการติดตั้งจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCPs) ก่อนเริ่มทำการบินเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ และต้องสำรวจเพื่อระบุค่าพิกัดอ้างอิงเหล่านั้นด้วยวิธีการสำรวจที่มีความแม่นยำสูงกว่า เช่น การสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวม หรือ RTK เป็นต้น

การกำหนดพื้นที่เป้าหมายที่ต้องการสำรวจและแนวเส้นทางการบินสามารถทำในแผนที่ออนไลน์ที่มีอยู่ในซอฟต์แวร์ที่ใช้ควบคุมผ่านอากาศยานไร้คนขับ ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 5.2 นอกจากนี้ผู้ควบคุมอากาศยานไร้คนขับ ยังต้องตั้งค่าความสูงเพดานบิน ระยะซ้อนภาพถ่ายด้านหน้าและด้านข้าง และมุมเอียงกล้องถ่ายภาพที่ทำกับระนาบพื้นโลกก่อนทำการบิน ส่วนภาพถ่ายทางอากาศเลือกวิธีการบันทึกข้อมูลแบบ JPEG

- 2) การจัดเตรียมและตรวจสอบอากาศยานไร้คนขับ ในขั้นตอนนี้มีอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมดประกอบด้วย อากาศยานไร้คนขับ รีโมทคอนโทรลสำหรับควบคุมอากาศยานไร้คนขับและแท็บเล็ตคอมพิวเตอร์ที่ติดตั้งซอฟต์แวร์เพื่อตั้งค่าปัจจัยการบินที่เหมาะสมสอดคล้องกับการนำไปประมวลผลด้วยภาพถ่ายทางอากาศ

การตรวจเช็คสภาพความพร้อมของอากาศยานไร้คนขับก่อนทำการบิน ประกอบด้วยการตรวจสอบสภาพใบพัดและจุดยึดใบพัดต้องอยู่ในสภาพที่สมบูรณ์ ไม่มีฉีกขาดหรือหลวม แบตเตอรี่สำหรับอากาศยานไร้คนขับ รีโมทคอนโทรล และ

แท็บเล็ตคอมพิวเตอร์ควรมีมากกว่า 50% ทุกครั้งก่อนปล่อยอากาศยานขึ้นบิน เมื่อตรวจเช็คอุปกรณ์ทุกชิ้นมีความสมบูรณ์เรียบร้อย จึงทำการปล่อยอากาศยานไร้คนขับเพื่อเก็บข้อมูลต่อไป



รูปที่ 5.2 การกำหนดพื้นที่และเส้นทางการบินสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนบังคับ

- 3) การเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ เมื่อทำการอัปเดตปัจจัยการตั้งค่าการบินของอากาศยานไร้คนขับเรียบร้อยแล้ว อากาศยานไร้คนขับจะบินเก็บภาพถ่ายทางอากาศตามเส้นทางที่ตั้งค่าไว้เองอัตโนมัติ ในระหว่างทำการบินผู้ควบคุมอากาศยานไร้คนขับอาจตั้งค่าความเร็วขัตเตอร์ของกล้องถ่ายภาพตามสภาพแสงสว่างหรือเลือกแบบอัตโนมัติก็ได้ หลังจากการบินเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศเสร็จเรียบร้อยแล้วสามารถเรียกอากาศยานไร้คนขับให้กลับมาจุดเดิมที่ใช้ปล่อยอากาศยานไร้คนขับได้ ส่วนภาพถ่ายทางอากาศเมื่อถ่ายภาพครบตามที่ต้องการแล้ว จึงนำไปประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศต่อไป

5.2.2 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ

ในปัจจุบันมีซอฟต์แวร์สำหรับประมวลผลภาพถ่ายด้วยเทคนิค SfM ทั้งชนิดที่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซื้อลิขสิทธิ์ และชนิดที่เปิดให้ใช้งานฟรี จากข้อมูลงานวิจัยของ (Sona et al., 2014)

เรื่องการทดลองวิเคราะห์ซอฟต์แวร์ที่ใช้ประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศเพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศ ด้านการแสดงผลและความถูกต้อง จำนวน 5 ซอฟต์แวร์ ประกอบด้วย 1) EyeDEA (University of Parma), 2) Erdas Leica Photogrammetry Suite 2011(LPS), 3) Pix4D UAV Desktop, 4) Agisoft PhotoScan Professional และ 5) PhotoModeler Scanner V.7.2012.2.1 ผลการทดสอบพบว่าซอฟต์แวร์ Agisoft PhotoScan Professional สามารถสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากที่สุดและให้การแสดงผลที่ดีที่สุด

นอกจากนี้การศึกษางานวิจัยในอดีตทำให้ทราบว่า ในขั้นตอนการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศสามารถเลือกใช้หมุดควบคุมภาคพื้นดิน เป็นข้อมูลการอ้างอิง (Indirect Georeferencing) ในการสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข ซึ่งช่วยให้แบบจำลองมีความถูกต้องแม่นยำกว่าวิธีการไม่ใช้หมุดควบคุมภาคพื้นดินเป็นข้อมูลการอ้างอิง (Direct Georeferencing)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ซอฟต์แวร์ Agisoft PhotoScan Professional และใช้หมุดควบคุมภาคพื้นดิน เป็นข้อมูลการอ้างอิง (Indirect Georeferencing) เพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข เพื่อให้แบบจำลองที่สร้างขึ้นมีความถูกต้องมากที่สุด

5.2.3 การวิเคราะห์ข้อมูลพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน

การวิเคราะห์ข้อมูลของระบบที่นำเสนอเป็นการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบข้อมูลพื้นผิวแสดงระดับพื้นดินที่ได้มาจากระบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศจากการประมวลผลภาพถ่ายระหว่าง 2 ช่วงเวลา การสำรวจขึ้นไป และมีลักษณะเป็นกลุ่มจุด 3 มิติ ดังนั้นซอฟต์แวร์ที่ใช้จึงต้องมีฟังก์ชันการทำงานที่สามารถรองรับกลุ่มจุดสำรวจ เพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ได้และสามารถทำการเปรียบเทียบพื้นผิวเพื่อหาปริมาณที่เกิดจากการแปลงจากระดับพื้นผิวในแบบจำลองได้ ซึ่งฟังก์ชันการทำงานตามที่กล่าวมา มีอยู่ในซอฟต์แวร์ Autodesk AutoCAD Civil3D ซึ่งเป็นชุดซอฟต์แวร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในโครงการก่อสร้างในปัจจุบัน สามารถแสดงผลได้ทั้ง แบบจำลอง 3 มิติ และการทำพื้นที่ภาพตัดขวาง เพื่อเปรียบเทียบเส้น Profiles แสดงค่าระดับดินในแบบเอกสารแบบ 2 มิติได้ง่าย

5.3 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับพัฒนาระบบ

การพัฒนาระบบติดตามการทำงานเข้าช้อนงานดินชุดและถม มีอุปกรณ์ที่จำเป็นในการพัฒนาระบบข้างมาก โดยเฉพาะระบบย่อยที่ใช้เก็บข้อมูลภาคสนาม จำเป็นต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ที่เหมาะสมสำหรับการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ ทั้งในส่วนที่เป็นประเภทฮาร์ดแวร์ (Hardware) และในส่วนที่เป็นประเภทซอฟต์แวร์ (Software) โดยมีรายการต่างๆ ดังนี้

5.3.1 อุปกรณ์ประเภทฮาร์ดแวร์ (Hardware)

อุปกรณ์ประเภทฮาร์ดแวร์ที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้อาจแบ่งออกตามสถานที่ใช้งานเป็น อุปกรณ์สำหรับใช้เก็บข้อมูลหน้างานและอุปกรณ์สำหรับใช้ประมวลผลในสำนักงาน



รูปที่ 5.3 อากาศยานไร้คนขับยี่ห้อ DJI Mavic Pro ติดตั้งกล้องถ่ายภาพดิจิทัลความละเอียดสูง 12 Mega Pixels

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลของอากาศยานไร้คนบังคับ รีโมตคอนโทรล และ Gimbal ของ DJI Mavic Pro

รายการ	รายละเอียด
Aircraft	
Folded	H 83 mm. x W 83 mm. x L 198 mm.
Diagonal Size (Propellers Excluded)	335 mm.
Weight (Battery & Propellers Included)	734 g. (exclude gimbal cover)
Max Ascent Speed	5 m/s (in Sport mode)
Max Descent Speed	(3 m/s)
Max Speed	65 kph (in Sport mode without wind)
Max Service Ceiling Above Sea Level	5,000 m
Overall Flight Time	21 minutes (In normal flight, 15% remaining battery level)
Max Total Travel Distance (One Full Battery)	13 km (no wind)
Operating Temperature Range	0° to 40° C
Satellite Positioning Systems	GPS / GLONASS
REMOTE CONTROLLER	
Operating Frequency	2.4 GHz to 2.483 GHz
Operating Temperature Range	0° to 40° C
Battery	2,970 mAh
Operating Current/Voltage	950mA @ 3.7V
GIMBAL	
Controllable Range	Pitch: -90° to +30°
	Roll: 0° or 90° (Horizontally and vertically)
Stabilization	3-axis (pitch, roll, yaw)

อุปกรณ์สำหรับใช้เก็บข้อมูลหน้างาน

- 1) อากาศยานไร้คนขับและรีโมตคอนโทรลเป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้สำหรับเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ งานวิจัยนี้เลือกใช้อากาศยานไร้คนขับ ยี่ห้อ DJI รุ่น Mavic Pro ตามรูปที่ 5.3 ซึ่งจัดเป็นรุ่นเริ่มต้นสำหรับงานเก็บภาพถ่ายทางอากาศเพื่อประมวลผลและสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข อากาศยานรุ่นนี้สามารถพับเก็บปีกได้ทำให้สามารถพกพาไปตามสถานที่ก่อสร้างได้สะดวก อีกทั้งยังติดตั้งกล้องถ่ายภาพพร้อมทั้งอุปกรณ์ช่วยให้กล้องมีความเสถียรหรือ Gimbal มาด้วย Gimbal มีหน้าที่สำคัญ 2 ประการ ประการแรกคือลดความสั่นสะเทือนของกล้องถ่ายภาพช่วยให้ถ่ายได้ชัดเจนในขณะที่อากาศยานกำลังบินอยู่ ประการที่สองช่วยปรับมุมเอียงกล้องที่ทำกับระนาบพื้นโลกระหว่างบินถ่ายภาพตามการตั้งค่านุมเอียงกล้อง สำหรับรายละเอียดด้านเทคนิคต่างๆ ของอากาศยานไร้คนขับและรีโมตคอนโทรลรุ่นนี้แสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.3 ข้อมูลกล้องถ่ายภาพที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้

รายการ	รายละเอียด
CAMERA	
Sensor	1/2.3" (CMOS), Effective pixels:12.35 M (Total pixels:12.71M)
Lens	FOV 78.8° 26 mm (35 mm format equivalent) f/2.2 Distortion < 1.5% Focus from 0.5 m to ∞
ISO Range	video: 100-3200 photo: 100-1600
Electronic Shutter Speed	8s -1/8000 s
Image Size	4000x3000
Photo	JPEG, DNG
Supported SD Cards	Micro SD™
Operating Temperature Range	0° to 40° C

- 2) กล้องถ่ายภาพ ใช้กล้องที่ติดตั้งมาพร้อมกับอากาศยานไร้คนขับเนื่องจากอากาศยานที่เลือกใช้มีขนาดเล็ก ไม่สามารถติดตั้งกล้องถ่ายภาพที่มีขนาดใหญ่ได้ รายละเอียดและคุณสมบัติของกล้องถ่ายภาพนี้แสดงในตารางที่ 5.3



รูปที่ 5.4 แท็บเล็ตคอมพิวเตอร์ยี่ห้อ Apple รุ่น iPad 9.7" 2017

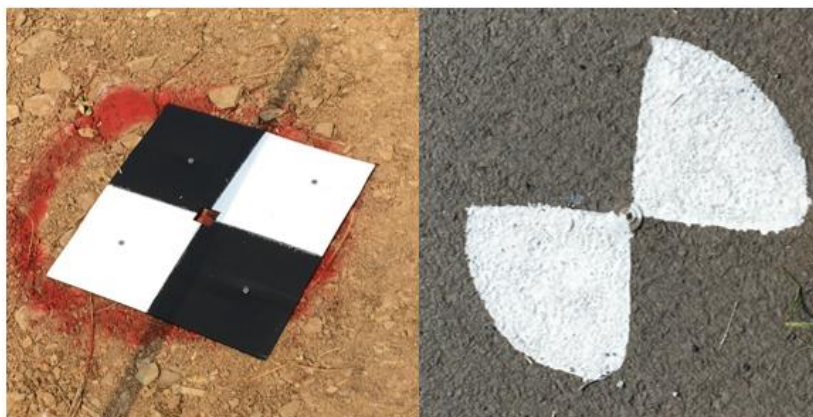
- 3) แท็บเล็ตคอมพิวเตอร์ใช้สำหรับควบคุมอากาศยานไร้คนขับผ่านโปรแกรมประยุกต์ที่ออกแบบเฉพาะใช้ถ่ายภาพทางอากาศที่เหมาะสมสำหรับนำไปประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ ในงานวิจัยนี้เลือกใช้แท็บเล็ตคอมพิวเตอร์ ยี่ห้อ Apple รุ่น iPad 9.7 2017 ตามรูปที่ 5.4 เพื่อความปลอดภัยในการควบคุมอากาศยานไร้คนขับเนื่องจากมีความเสถียรของอุปกรณ์สูง โดยมีรายละเอียดทางด้านเทคนิคต่างๆ แสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ข้อมูลแท็บเล็ตคอมพิวเตอร์ ยี่ห้อ Apple รุ่น iPad 9.7" 2017

รายการ	รายละเอียด
CPU	1.85 GHz dual-core 64-bit ARMv8-A "Twister"
Chipset	Apple A9
Operation	from iOS 10.2.1 to iOS 12.0.1 (present)
Graphic Card	PowerVR GT7600
Display	size 9.7" resolution 2048 x 1536 px with a 4:3 aspect ratio
Memory	2 GB LPDDR4
Storage	128 GB
Connection	Wi-Fi 802.11 a/b/g/n/ac at 2.4 GHz and 5 GHz and MIMO Bluetooth 4.2
Battery	Built-in rechargeable Li-Po battery 8,827 mAh 3.7 V 32.9 Wh

- 4) หมุดควบคุมภาคพื้นดิน ใช้สำหรับการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศด้วยวิธี Indirect Georeferencing หน้าที่ของหมุดควบคุมภาคพื้นดินถูกใช้เพื่อระบุค่าพิกัดระหว่างการประมวลผล การออกแบบควรออกแบบให้มองเห็นได้ชัดเจนจาก

ภาพถ่ายทางอากาศ ในงานวิจัยชิ้นนี้ออกแบบและใช้จุดควบคุมภาคพื้นดิน 2 แบบ แบบแรกทำมาจากแผ่นพลาสติกขนาด 30.5 x 32.4 x 0.3 ซม. โดยประมาณ ทาสีขาว-ดำและขาว-แดง ใช้สำหรับวางชั่วคราวในจุดที่ไม่สามารถทาสีจริงลงบนพื้นที่หน้างานได้ และแบบที่สองเป็นแบบทาสีจริงลงบนพื้น(สีขาว)ในที่สามารถทาสีจริงลงบนพื้นที่สำรวจหน้างานได้ มีขนาดประมาณ 30 x 30 ซม. ตามรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 ลักษณะหมุดควบคุมภาคพื้นดินทั้ง 2 แบบ

- 5) อุปกรณ์วัดความสว่างแสง (Lux Meter) ใช้สำหรับตรวจวัดสภาพแสงสว่างขณะทำการบินอากาศยานไร้คนขับเพื่อเก็บภาพถ่ายทางอากาศ เนื่องจากสภาพแสงสว่างในธรรมชาติมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาและทุกวัน สาเหตุมาจาก ช่วงเวลาระหว่างวัน เมฆ หมอกควัน ฤดูกาล เป็นต้น จึงมีความจำเป็นต้องวัดค่าความสว่างเพื่อปรับความเร็วชัตเตอร์กล้องถ่ายภาพให้สอดคล้องกับสภาพแสงสว่าง ณ เวลานั้นๆ ในงานวิจัยนี้ใช้อุปกรณ์วัดความสว่าง ยี่ห้อ PEAK METER รุ่น PM6612 ตามรูปที่ 5.6 และรายละเอียดด้านเทคนิคของอุปกรณ์ แสดงในตารางที่ 5.5



รูปที่ 5.6 อุปกรณ์สำหรับใช้วัดสภาพแสงสว่าง ยี่ห้อ PEAK METER รุ่น PM6612

ตารางที่ 5.5 ข้อมูลของอุปกรณ์วัดความสว่างยี่ห้อ PEAK METER รุ่น PM6612

รายการ	รายละเอียด
Measurement range	0~200000Lux/ 0~20000FC
Accuracy	+3%
Resolution	0.01Lux/0.01FC
Power Supply	9V 6F22 Battery

- 6) กล้องประมวลผลรวม ใช้เพื่อสำรวจหาค่าพิกัดหมุดควบคุมภาคพื้นดิน ในงานวิจัย
 ชี้นี้ใช้กล้องประมวลผลรวม ยี่ห้อ Leica รุ่น Viva TS11 ดังแสดงในรูปที่ 5.7 โดยมี
 ข้อมูลด้านเทคนิคของกล้องประมวลผลรวมแสดงใน ตารางที่ 5.6



รูปที่ 5.7 กล้องประมวลผลรวม ยี่ห้อ Leica รุ่น Viva TS11

ตารางที่ 5.6 ข้อมูลของกล้องประมวลผลรวมยี่ห้อ Leica รุ่น Viva TS11

รายการ	รายละเอียด
CPU	Freescale i.MX31 533 MHz ARM Core
Operating System	Windows CE 6.0
Display	640 x 480 pixel (VGA) color TFT with LED backlight and touch screen.
Telescope	Magnification 30 x, Free object aperture 40 mm., Focusing range 1.7 m to infinity
Storage	Internal 1 GB/ SD card, USB stick
Connection	RS232, Bluetooth® Wireless-Technology, USB mini AB OTG
Battery	Lithium Ion 7.4 V/4.4 Ah
Accuracy	Max. errors 5 mm.

อุปกรณ์สำหรับใช้ประมวลผลในสำนักงาน

- 7) คอมพิวเตอร์ใช้ในระบย่อยสำหรับการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศและใช้ในระบย่อยสำหรับใช้วิเคราะห์ข้อมูลดิน สามารถเลือกใช้ได้ทั้งประเภท Laptop และ Desktop ในงานวิจัยนี้ใช้คอมพิวเตอร์ประเภท Desktop ดังแสดงในรูปที่ 5.8 เนื่องจากมีประสิทธิภาพในการประมวลผลสูงในราคาที่ไม่แพงมากนักและสามารถ Upgrade อุปกรณ์ต่างๆ เพิ่มเติมได้ง่าย สำหรับรายละเอียดทางเทคนิคของคอมพิวเตอร์ที่ใช้แสดงในตารางที่ 5.7



รูปที่ 5.8 ตัวอย่างคอมพิวเตอร์ Desktop และอุปกรณ์ต่อพ่วงพื้นฐาน

ตารางที่ 5.7 ข้อมูลของคอมพิวเตอร์ Desktop ที่ใช้ประมวลผลในงานวิจัยชิ้นนี้

รายการ	รายละเอียด
CPU	AMD Ryzen 7 1700 Eight-core Processor (3.0 GHz upTo 3.7 GHz) 768 KB L1 Cache, 4 MB L2 Cache, 16 MB L3 Cache
Chipset	AMD B350
Operating System	Microsoft Windows 10 Education
Graphic Card	Nvidia Geforce GTX 1080Ti
Display	size 17.6" resolution 1440 x 900 px with a 16:10 aspect ratio
Memory	32 GB (2133 MHz) DDR4
Storage	SSD 480 GB, SATA-III 2 TB
Connection	AMD USB 3.0 and AMD USB 3.10

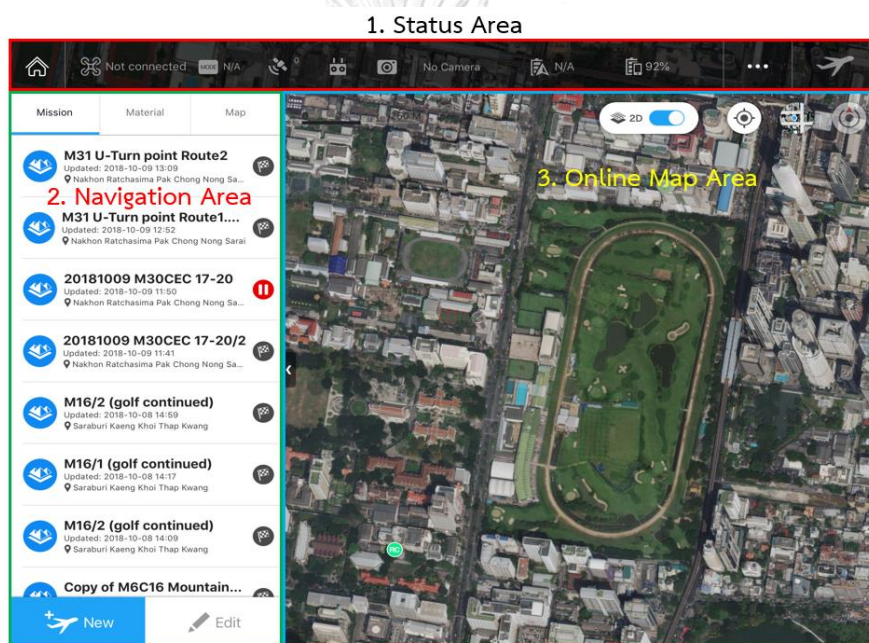
5.3.2 อุปกรณ์ประเภทซอฟต์แวร์ (Software)

อุปกรณ์ประเภทซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับพัฒนาระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินชุดและถมในงานวิจัยชิ้นนี้ ประกอบด้วย

- 1) โปรแกรมประยุกต์ DJI Ground Station Pro (GS Pro) ติดตั้งในแท็บเล็ตคอมพิวเตอร์คอมพิวเตอร์ Apple iPad ใช้สำหรับควบคุมอากาศยานไร้คนขับ เพื่อบินเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศในพื้นที่และเส้นทางการบินที่กำหนด รูปที่ 5.9

แสดงหน้าการทำงานของโปรแกรมประยุกต์เมื่อเริ่มเปิดใช้งาน แบ่งพื้นที่การทำงานที่แสดงในหน้าจอออกเป็น 3 ส่วนประกอบด้วย

ส่วนที่ 1 Status Area เป็นพื้นที่ที่แสดง สถานะ การเชื่อมต่อของอุปกรณ์ต่างๆประกอบด้วย การเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรมประยุกต์กับอากาศยานไร้คนขับ โหมดการบินของอากาศยานไร้คนขับ ความเข้มของสัญญาณจากระบบดาวเทียมนำทางและจำนวนดาวเทียมที่ต่อเชื่อม ความเข้มของสัญญาณต่อเชื่อมระหว่างรีโมตคอนโทรลกับอากาศยานไร้คนขับ สถานะแบตเตอรี่ของอากาศยานไร้คนขับ สถานะแบตเตอรี่ของแท็บเล็ตคอมพิวเตอร์ ปุ่มเรียกการตั้งค่าพื้นฐานการบิน และปุ่มคำสั่งเริ่มการบินของอากาศยาน



รูปที่ 5.9 หน้าต่างการทำงานของโปรแกรมประยุกต์ GSP Pro

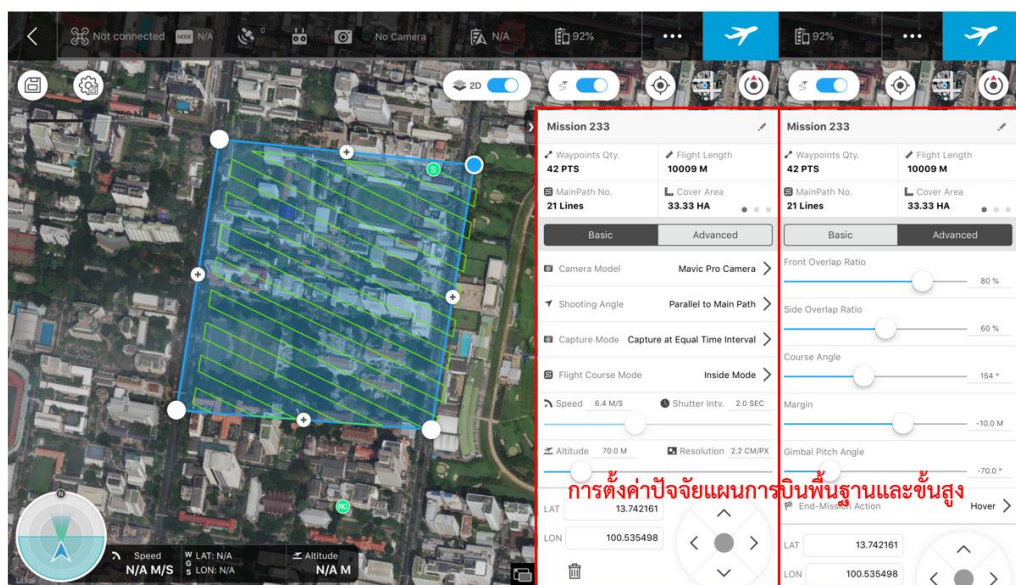
ส่วนที่ 2 Navigation Area เป็นพื้นที่สำหรับปุ่มสร้างและแก้ไขแผนการบินใหม่และแสดงแผนการบินในอดีตที่ได้ทำการบันทึกไว้

ส่วนที่ 3 Online Map Area เป็นพื้นที่แสดงแผนที่ออนไลน์แสดงตำแหน่งจริงของรีโมตคอนโทรลและอากาศยานไร้คนขับ

การทำงานเริ่มต้นด้วยการสร้างแผนการบินใหม่ เลือกโหมดการบินเพื่อสร้างแผนที่แบบ 3 มิติ กำหนดพื้นที่ที่ต้องเก็บภาพถ่ายทางอากาศเพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขในแผนที่ออนไลน์และทำการตั้งค่าปัจจัยสำหรับแผนการบินดังแสดงในรูปที่ 5.10 ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือ

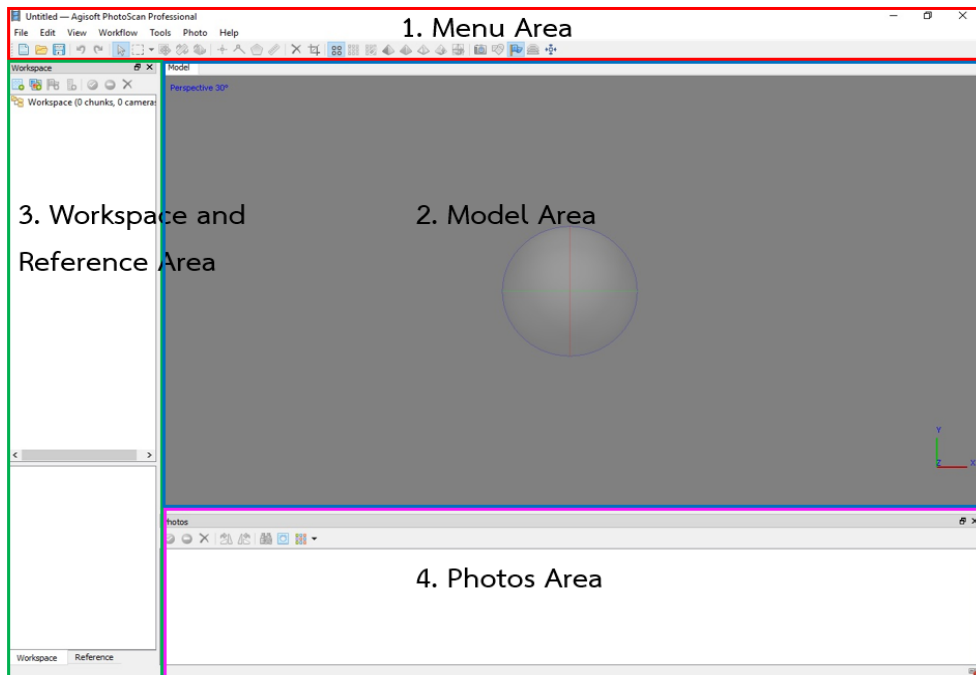
ปัจจัยการบินขั้นพื้นฐานประกอบด้วย เลือกรุ่นกล้องถ่ายภาพ มุมเอียงระหว่างกล้องถ่ายภาพกับเส้นทางการบิน โหมดการบินระหว่างถ่ายภาพ ความเร็วและความสูงของอากาศยานขณะบินถ่ายภาพ

ปัจจัยการบินขั้นสูงประกอบด้วย ร้อยละของการซ้อนทับภาพด้านหน้าและด้านข้าง แนวทิศทางการบินของอากาศยานไร้คนขับ ขอบเขตการบินภายในแผนที่ การบินที่สร้างขึ้น มุมเอียงระหว่างกล้องถ่ายภาพกับระนาบพื้นผิวโลก และคำสั่งเมื่ออากาศยานไร้คนขับบินเก็บข้อมูลเสร็จ



รูปที่ 5.10 หน้าต่างการตั้งค่าปัจจัยแผนการบินขั้นพื้นฐานและขั้นสูง

เมื่อตั้งค่าแผนการบินต่างๆ ครบถ้วนสมบูรณ์แล้ว จึงทำการเตรียมและตรวจสอบสภาพของอากาศยานไร้คนขับ ทำการเชื่อมต่อรีโมตคอนโทรลเข้ากับแท็บเล็ตคอมพิวเตอร์คอมพิวเตอร์ผ่านสายสัญญาณ ทำการเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างรีโมตคอนโทรลและอากาศยานไร้คนขับผ่านสัญญาณ Wifi เสร็จแล้วจึงนำอากาศยานขึ้นบินด้วยปุ่มคำสั่งเริ่มการบิน เพื่อดำเนินเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศต่อไป



รูปที่ 5.11 หน้าต่างการทำงานของซอฟต์แวร์ Agisoft PhotoScan Professional

- 2) ซอฟต์แวร์ Agisoft PhotoScan Professional ดังแสดงในรูปที่ 5.11 ใช้สำหรับการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศเพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข และสามารถใช้สร้างเส้น Profiles แสดงระดับพื้นผิวดินที่ปรากฏในแบบจำลองได้ ซอฟต์แวร์มีการจัดแบ่งหน้าจอการทำงาน ดังนี้

พื้นที่ส่วนที่ 1 Menu Area เป็นพื้นที่ส่วนที่แสดงรายการเครื่องมือและการตั้งค่าต่างๆ ทั้งหมดของซอฟต์แวร์นี้

พื้นที่ส่วนที่ 2 Model Area เป็นส่วนที่แสดง ภาพถ่าย รวมถึงแบบจำลองชนิดต่างๆ ที่สร้างจากการประมวลผลภาพถ่าย

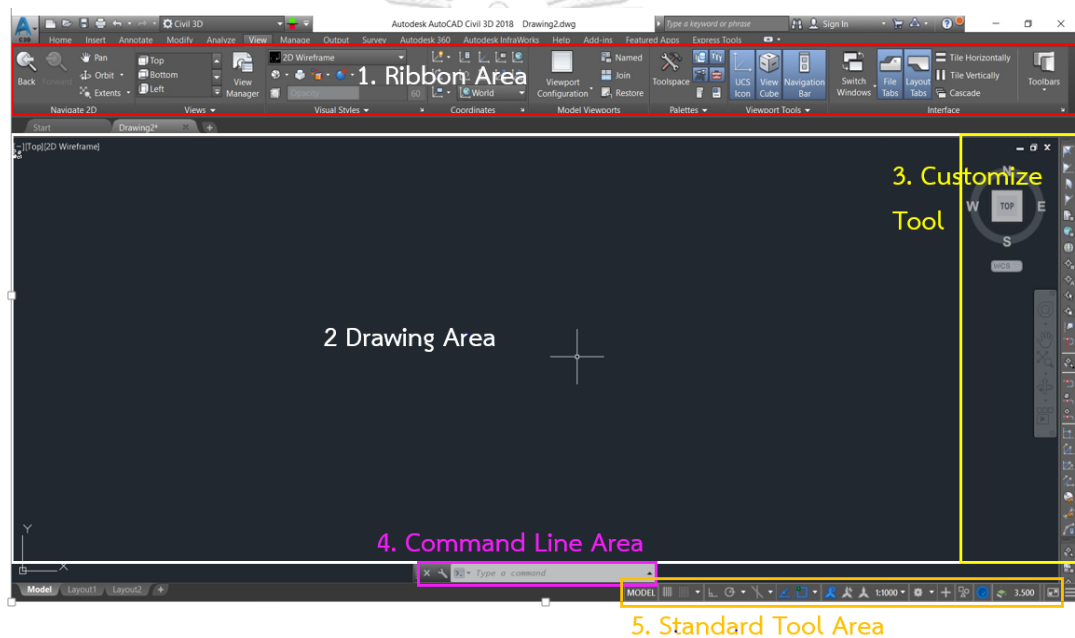
พื้นที่ส่วนที่ 3 Workspace and Reference area เป็นหน้าต่างส่วนที่สามารถปรับการจัดวางในรูปแบบต่างๆ สามารถเลือกเปิด-ปิดตามความต้องการได้ ในส่วนของ Workspace ใช้แสดงและเรียกดูชุดข้อมูลภาพถ่ายรวมถึงแบบจำลองชนิดต่างๆ ที่สร้างขึ้นมา หากปรับไปที่ปุ่ม Reference ด้านล่างจะแสดงชุดข้อมูลค่าพิกัดที่บันทึกในภาพถ่าย รายการจุดควบคุมภาคพื้นดินและค่าพิกัดของจุดควบคุมภาคพื้นดิน การแปลงระบบค่าพิกัดที่ต้องการในแบบจำลอง รวมถึงการ Optimize ค่าปัจจัยภายในและปัจจัยภายนอกของกล้องถ่ายภาพ

พื้นที่ส่วนที่ 4 Photos Area เป็นหน้าต่างส่วนที่สามารถปรับการจัดวางในรูปแบบต่างๆ หรือเลือกเปิด-ปิดตามความต้องการได้เช่นเดียวกับพื้นที่ส่วนที่ 3 โดย

ในพื้นที่นี้จะแสดงรายละเอียดข้อมูลต่างๆ ที่บันทึกในภาพถ่าย การจัดการภาพถ่าย รวมถึงการใช้คำสั่งเพื่อประเมินคุณภาพของภาพถ่ายเป็นต้น

ส่วนรายละเอียดขั้นตอนการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศเพื่อจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขด้วยซอฟต์แวร์นี้ แสดงในหัวข้อ 5.3.3 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศด้วยเทคนิค SfM

- 3) ซอฟต์แวร์ Autodesk AutoCAD Civil3D (2018) เป็นซอฟต์แวร์ที่นิยมใช้แพร่หลายสำหรับงานก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานในปัจจุบัน เนื่องจากมีฟังก์ชันการทำงานที่มีประโยชน์หลากหลายรูปแบบและเป็นที่ยอมรับกันทั่วไป ช่วยให้การจัดการข้อมูลทั้งในรูปแบบ 2 มิติ และ แบบ 3 มิติทำได้ง่าย รูปที่ 5.12 แสดงหน้าการทำงานของซอฟต์แวร์ Autodesk AutoCAD Civil3D (2018)



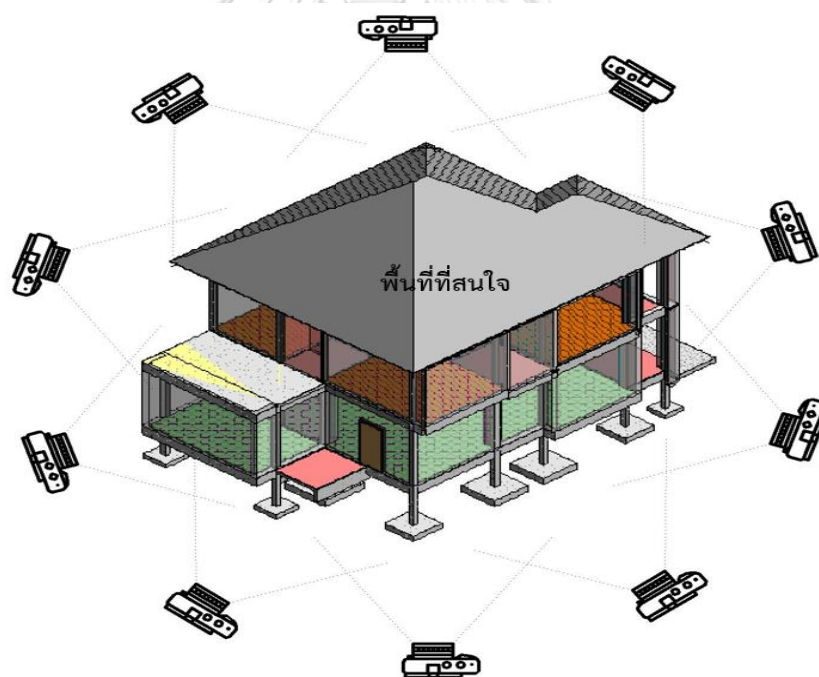
รูปที่ 5.12 หน้าการทำงานของซอฟต์แวร์ Autodesk AutoCAD Civil3D (2018)

ตัวอย่างฟังก์ชันที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เช่น การสร้างแบบจำลองพื้นผิวแบบ Mesh จากกลุ่มจุด 3 มิติที่นำเข้ามาในซอฟต์แวร์ การสร้าง Profiles ระดับดินทั้งตามแนวยาวและแนวขวาง การหาปริมาณดินที่เปลี่ยนแปลงจากการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ของข้อมูลที่ได้จากการสำรวจของ 2 ช่วงเวลาการสำรวจ รวมถึงการสร้างและใช้สร้างแบบภาพตัดดินเพื่อวิเคราะห์หากิจกรรมงานดินขุดและถมที่เกิดขึ้นจริง

5.3.3 การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศด้วยเทคนิค SfM

หลักการทำงานของการประมวลผลภาพถ่ายด้วยเทคนิค SfM อาศัยการประมวลผลชุดภาพถ่ายที่มีระยะซ้อนภาพที่เพียงพอ เพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติของวัตถุที่สนใจขึ้นมาใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 5.13 การทำงานของการประมวลผลภาพถ่ายด้วยเทคนิค SfM (ดัดแปลงมาจาก (Westoby et al., 2012)) สำหรับงานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการและขั้นตอนการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศอย่างละเอียด แสดงในรูปที่ 5.14 โดยมีรายละเอียดดังนี้

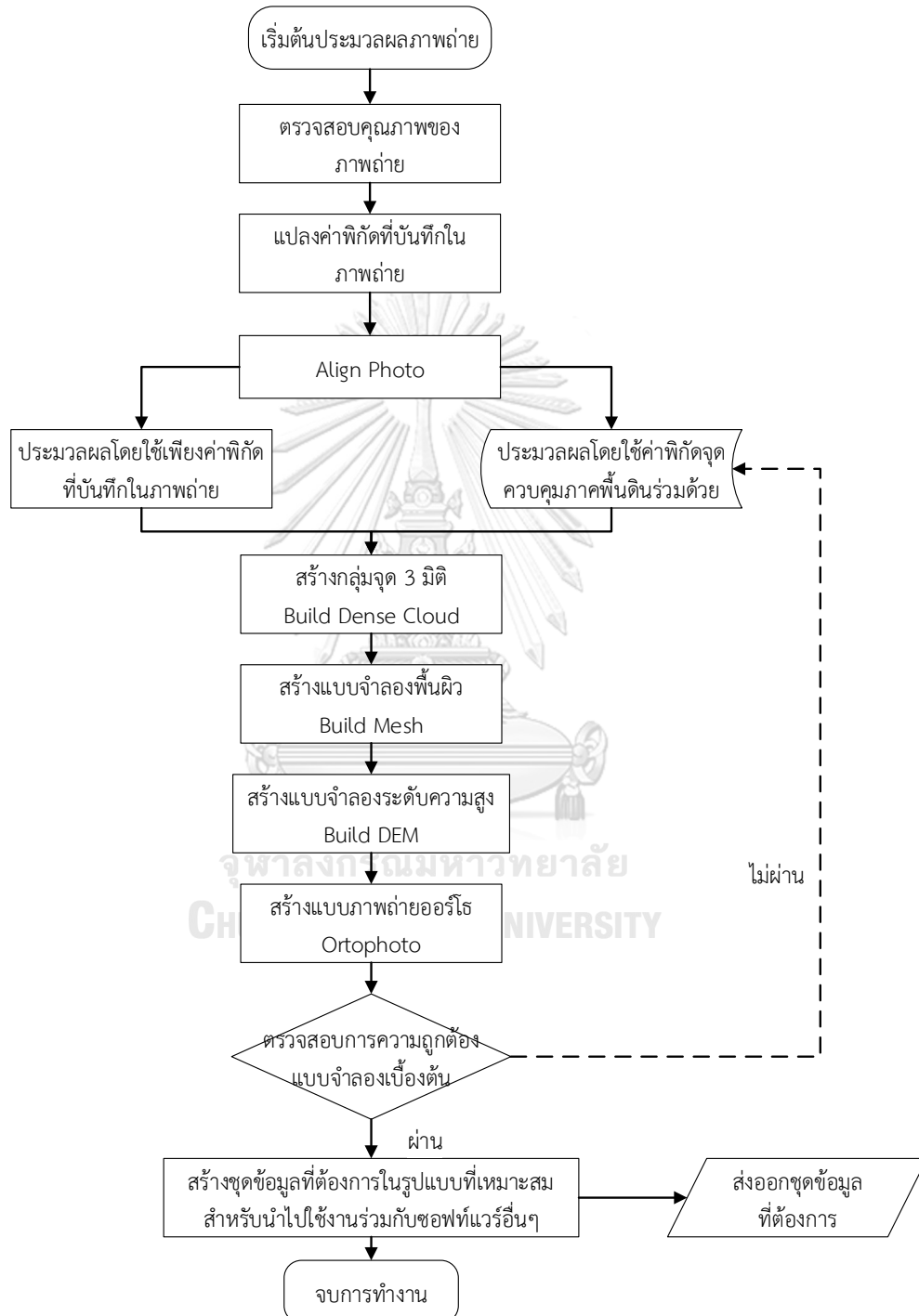
- 1) การตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่าย เป็นขั้นตอนแรกสำหรับการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ เริ่มจากการอัปโหลดภาพถ่ายเข้าสู่ซอฟต์แวร์ที่เลือกใช้ เสร็จแล้วจึงทำการตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายด้วยสายตาเพื่อเลือกภาพถ่ายที่ไม่ชัดเจนออกจากชุดข้อมูลภาพถ่ายที่จะใช้ประมวลผลในขั้นตอนต่อไป หรืออาจใช้ฟังก์ชันที่มีในซอฟต์แวร์เพื่อช่วยประเมินคุณภาพของภาพถ่าย สำหรับงานวิจัยชิ้นนี้ กำหนดเกณฑ์ของภาพถ่ายที่ประเมินคุณภาพด้วยซอฟต์แวร์แล้ว มีคะแนนมากกว่า 0.75 ขึ้นไปเพื่อนำไปประมวลผลในขั้นถัดไป



รูปที่ 5.13 การทำงานของการประมวลผลภาพถ่ายด้วยเทคนิค SfM (ดัดแปลงมาจาก (Westoby et al., 2012))

- 2) การแปลงค่าพิกัดที่บันทึกในภาพถ่าย เป็นการแปลงค่าพิกัดภูมิศาสตร์ที่บันทึกอยู่ในภาพถ่าย ให้ตรงกับค่าพิกัดที่ต้องการให้แสดงผลในแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาใหม่ว่า

ต้องการค่าพิกัดเป็นระบบใด เนื่องจากค่าพิกัดที่บันทึกในภาพถ่ายเป็นค่าพิกัดที่ได้รับมาจากระบบนำทาง GPS ที่ติดตั้งอยู่ในอากาศยานไร้คนขับซึ่งใช้ระบบละติจูดและลองติจูดเป็นหลัก



รูปที่ 5.14 วิธีและขั้นตอนการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศเพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศ

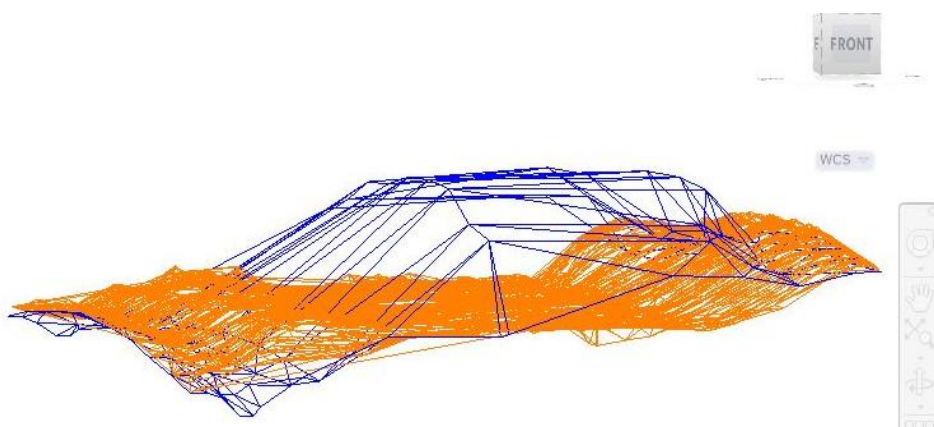
เชิงเลข

- 3) Align Photos เป็นขั้นตอนการเรียงซ้อนภาพถ่ายที่มีมุมมองต่างกัน ตำแหน่งของกล้องและวัตถุในภาพถ่ายจะถูกระบุและจับคู่จุดที่เหมือนกันไปพร้อมกัน (Tie Points) ในงานวิจัยนี้ตั้งค่าความถูกต้องแบบ มากที่สุด ตั้งค่า Key point limit ที่ 40,000 และ ค่า Tie point limit ที่ 4,000
- 4) การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศแบบ Indirect Georeferencing เป็นการใช้อ้างอิงค่าพิกัดจุดควบคุมภาคพื้นดินเป็นข้อมูลอ้างอิงในกระบวนการสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขขึ้นมาใหม่ ต้องนำเข้าชุดข้อมูลจุดควบคุมภาคพื้นดินและค่าพิกัดที่ต้องการใช้ เสร็จแล้วจึง Optimized ค่าพารามิเตอร์ ต่างๆ ของกล้องถ่ายภาพด้วยซอฟต์แวร์ที่ใช้ประมวลผลภาพถ่าย
- 5) การสร้างกลุ่มจุด 3 มิติ (Build dense cloud) เป็นการเพิ่มความหนาแน่นของกลุ่มจุด 3 มิติ ด้วย MVS algorithms ในงานวิจัยนี้ใช้การตั้งค่าคุณภาพที่ระดับปานกลาง และ Depth filtering ที่ระดับสูง (Aggressive) เมื่อสร้างเสร็จแล้ว สามารถแยกประเภทกลุ่มจุด 3 มิติ ตามหมวดหมู่ (Point classes) เพื่อความสะดวกในการเลือกใช้ในขั้นตอนถัดไป
- 6) การสร้างแบบจำลองพื้นผิว (Build Mesh) เลือกการตั้งค่าชนิดพื้นผิว (Surface type) แบบ Height field ตั้งค่าแหล่งข้อมูล (Source data) แบบ Dense cloud ตั้งค่า Face count แบบ Medium เสร็จแล้วเลือกหมวดหมู่กลุ่มจุด 3 มิติ ที่ต้องการเพื่อเริ่มการประมวลผลเพื่อสร้างแบบจำลอง Mesh
- 7) การสร้างแบบจำลองระดับสูง (Build DEM) เลือกการตั้งค่า Projection type แบบ Geographic ตั้งค่าแหล่งที่มาของข้อมูลจากแบบจำลองแสดงระดับพื้นดิน เสร็จแล้วจึงทำการประมวลผลเพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข 3 มิติ เมื่อเสร็จสิ้นการประมวลผลในขั้นตอนนี้จะสามารถวัดระยะและปริมาตรในแบบจำลองที่สร้างขึ้นมาได้ แต่ยังคงขาดภาพถ่ายออร์โธ งานวิจัยนี้ประมวลผลเพื่อสร้างภาพถ่ายออร์โธด้วย
- 8) การสร้างภาพถ่ายออร์โธ (Build Orthophoto) เป็นกระบวนการปรับแก้ความผิดเพี้ยนเนื่องจากเรขาคณิตของการถ่ายภาพและความสูงต่างของภูมิประเทศ (Relief displacement) อ้างอิงตามระบบค่าพิกัด เมื่อสร้างเสร็จแล้ว สามารถวัดค่าพิกัด ทิศทาง ระยะและขนาดของวัตถุได้ (ที่มากรมแผนที่ทหาร) ในงานวิจัยนี้เลือกการตั้งค่าการฉายภาพแบบภูมิศาสตร์ และเลือกพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน เป็นข้อมูลตั้งต้นในการสร้างภาพถ่ายออร์โธ

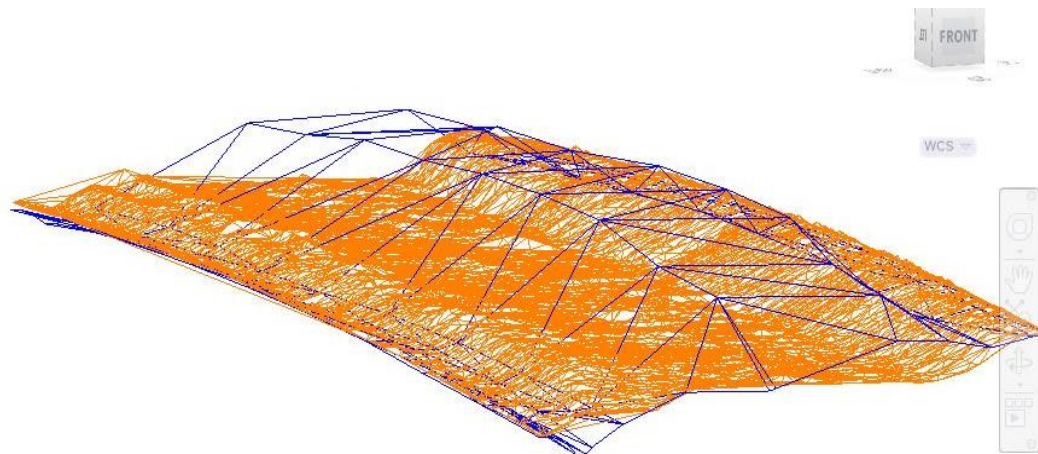
- 9) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเบื้องต้น เป็นการวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบคุณภาพของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขที่สร้างขึ้นมาว่ามีความถูกต้องแม่นยำเพียงพอสำหรับนำไปใช้งานต่อหรือไม่ ในงานวิจัยชิ้นนี้ใช้วิธีการตรวจสอบค่าพิกัดที่จุดควบคุมภาคพื้นดินที่ปรากฏในภาพถ่ายออร์โธ และกำหนดเกณฑ์ค่าความคลาดเคลื่อนต่อจุด ไม่เกิน 7 ซม.
- 10) เมื่อแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขที่สร้างขึ้นผ่านเกณฑ์ความถูกต้องที่กำหนดไว้ สามารถวัดปริมาณวัตถุที่ปรากฏในแบบจำลองนั้นๆได้ นำไปใช้สร้างเส้น Profiles แสดงระดับพื้นผิวดินที่ต้องการได้ และส่งออกข้อมูลแบบจำลองกลุ่มจุด 3 มิติ เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ด้วยการเปรียบเทียบความแตกต่างของระดับพื้นผิวต่อไป

5.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลพื้นผิวแบบจำลอง

เป็นการหาปริมาณงานดินขุดและดินถมจากแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ที่สร้างจากข้อมูลช่วงเวลาการสำรวจ 2 ครั้งนำมาเปรียบเทียบกันตามลำดับเวลาในระบบย่อยสำหรับใช้วิเคราะห์ข้อมูล หากระดับพื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงลดลงแสดงถึงมีกิจกรรมงานขุดดินเกิดขึ้น ในทางตรงกันข้ามหากระดับพื้นผิวมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นแสดงถึงมีกิจกรรมงานถมดินเกิดขึ้นดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 5.15 และรูปที่ 5.16 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติ ด้านหน้า) จากข้อมูลการสำรวจจาก 2 ครั้ง เส้นสีน้ำเงินแสดงการสร้างพื้นผิวจากข้อมูลจุดสำรวจที่มาจากการสำรวจด้วยวิธีการทั่วไปก่อนเริ่มงานก่อสร้าง และสีส้มแสดงการสร้างพื้นผิวจากข้อมูลจุดสำรวจที่มาจากระบบย่อยสำหรับเก็บข้อมูลภาคสนามเมื่อวันที่ 17 กุมภาพันธ์ 2561 นอกจากนี้ระบบยังสามารถแสดงมุมมองอื่นๆ ได้อีกหากต้องการเนื่องจากเป็นแบบจำลอง 3 มิติสามารถดูได้ทุกทิศทาง

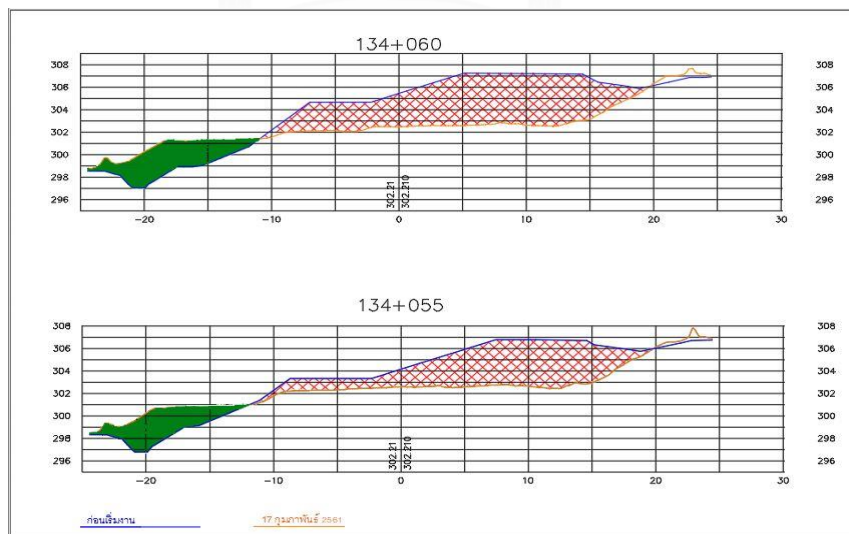


รูปที่ 5.15 ตัวอย่างการเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติ ด้านหน้า) จากข้อมูลการสำรวจจาก 2 ครั้ง

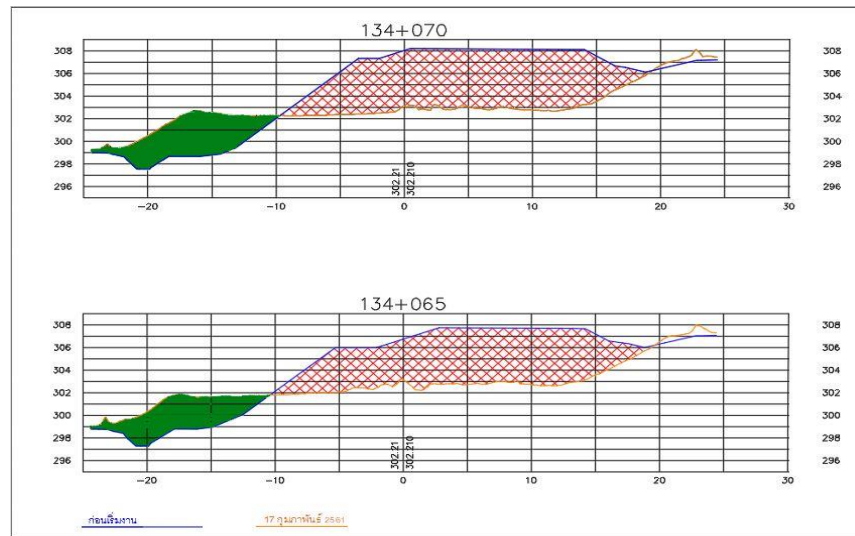


รูปที่ 5.16 ตัวอย่างการเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติ) จากข้อมูลการสำรวจ จาก 2 ครั้ง

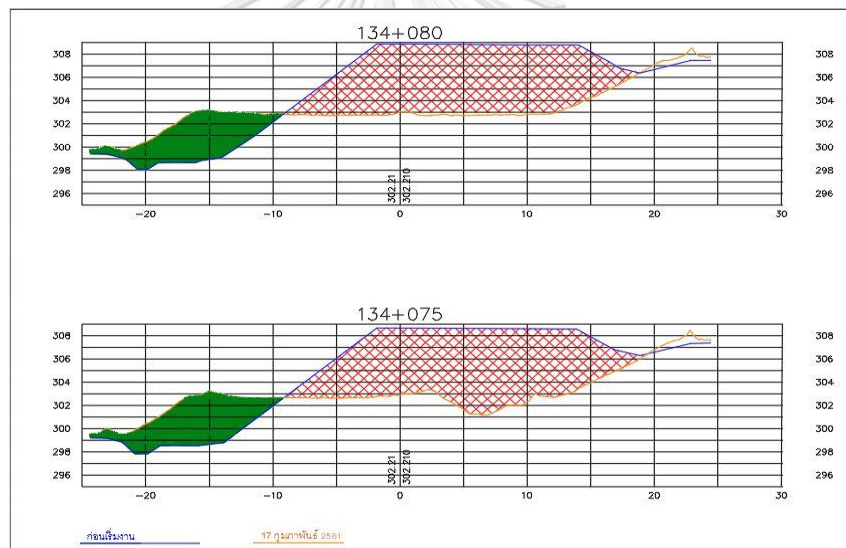
เพื่อให้เข้าใจได้ง่าย สามารถใช้เส้น Profiles แสดงระดับพื้นดินช่วงเวลาการสำรวจ 2 ครั้ง ดังกล่าวมาเปรียบเทียบกัน เพื่อระบุกิจกรรมงานดินขุดและถมที่เกิดขึ้นระหว่างช่วงเวลาการสำรวจ 2 ครั้งสำรวจนั้นๆ ทั้งนี้ระบบที่เสนอสามารถสร้างเส้น Profiles แสดงระดับพื้นดินได้ทุกๆ พื้นที่ในแบบจำลอง ตัวอย่างการใช้เส้น Profiles แสดงระดับพื้นดินทุกๆ 5 เมตร แสดงในรูปที่ 5.17 รูปที่ 5.18 และรูปที่ 5.19 แสดงการเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดดินที่ Sta. 134+055 ถึง Sta. 134+080 ระหว่างพื้นที่หน้าตัดดินก่อนเริ่มงาน (เส้นสีน้ำเงิน) กับพื้นที่หน้าตัดดินที่เก็บข้อมูล ณ.วันที่ 17 ก.พ. 2561 (เส้นสีส้ม) พื้นที่ระบายสีเขียวแสดงถึงบริเวณที่มีกิจกรรมงานถมดิน และพื้นที่ตารางสีเหลี่ยมสีแดงแสดงถึงบริเวณที่มีกิจกรรมงานดินขุด



รูปที่ 5.17 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดดิน Sta. 134+055 และ Sta. 134+060



รูปที่ 5.18 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดดิน Sta. 134+065 และ Sta. 134+070



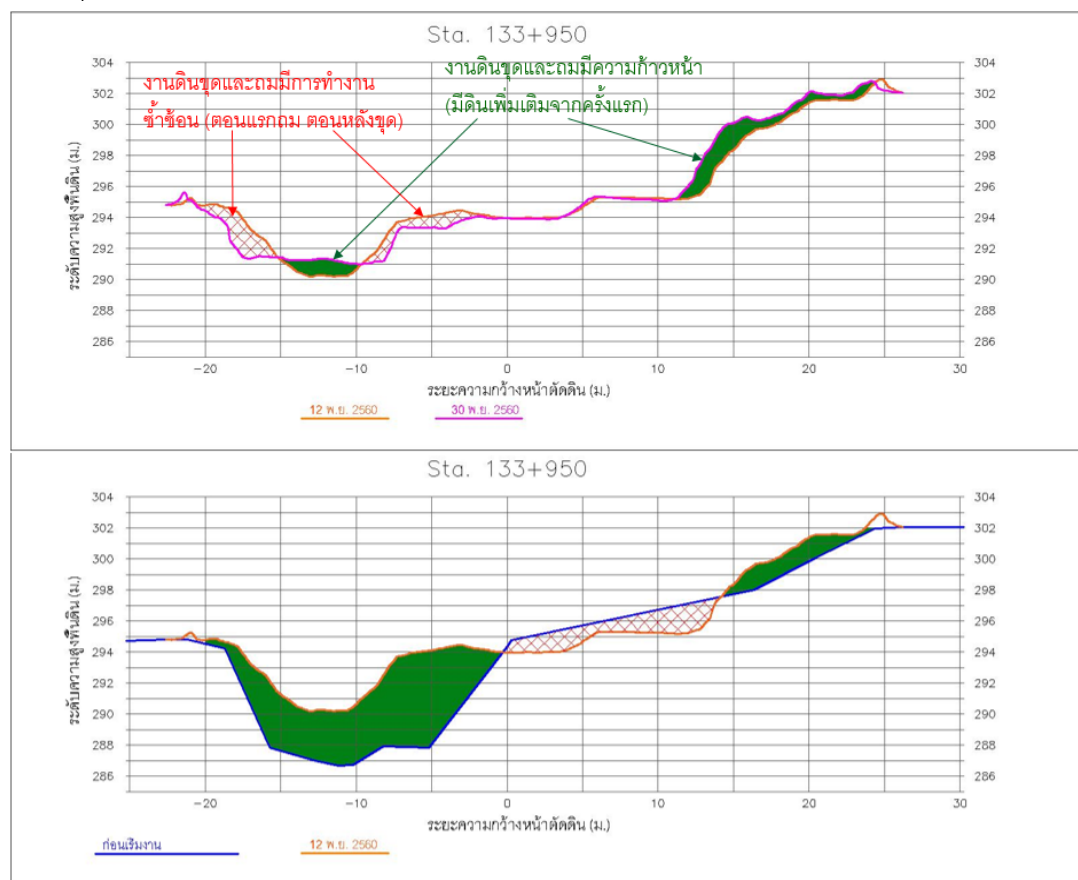
รูปที่ 5.19 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดดิน Sta. 134+075 และ Sta. 134+080

หากนำเส้น Profiles แสดงระดับพื้นดินตั้งแต่การสำรวจ 3 ครั้งขึ้นไปมาเปรียบเทียบกัน สามารถแสดงความก้าวหน้า หรือการทำงานซ้ำซ้อนที่เกิดขึ้นระหว่างช่วงเวลาที่นำมาวิเคราะห์ได้ แสดงในตัวอย่างการเปรียบเทียบตามรูปที่ 5.20 แสดงการเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดดินของการสำรวจ 3 ครั้ง เริ่มจากรูปภาพด้านล่างแสดงการเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดดินของ Sta. 133+950 ระหว่างช่วงเวลาก่อนเริ่มงาน (เส้นสีน้ำเงิน) กับช่วงเวลา ณ. วันที่ 12 พฤศจิกายน 2560 (เส้นสีส้ม) ซึ่งสามารถระบุกิจกรรมงานที่เกิดขึ้นได้ตามที่อธิบายด้านบน ส่วนรูปด้านบนแสดงการเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดดินของ Sta. 133+950 ระหว่างช่วงเวลา ณ. วันที่ 12 พฤศจิกายน 2560 (เส้นสีส้ม) กับ

ช่วงเวลา ณ วันที่ 30 พฤศจิกายน 2560 (เส้นสีม่วง) ระบบที่นำเสนอสมาสามารถระบุกิจกรรมงานถมดิน บริเวณพื้นที่ระบายสีเขียวและตรวจพบกิจกรรมขุดดินที่พื้นที่ตารางสี่เหลี่ยมสีแดง

เมื่อนำพื้นที่หน้าตัดดินทั้งสองภาพมาวิเคราะห์ หากพบว่างานถมดินเกิดขึ้นในพื้นที่เดียวกัน ทั้งช่วงเวลา 1 และช่วงเวลา 2 อาจแสดงได้ถึงความก้าวหน้างาน หากพบว่าพื้นที่งานขุดดินใน ช่วงเวลา 2 เกิดขึ้นในบริเวณที่มีงานถมดินในช่วงเวลา 1 อาจแสดงได้ถึงการมีการทำงานผิดพลาด ต้องแก้ไข เป็นต้น

สำหรับการหาปริมาณการทำงานเข้าซ้อนสามารถหาได้ตามหัวข้อ 4.3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อระบุกิจกรรมงานและการหาปริมาณงานเข้าซ้อนที่เกิดขึ้น



รูปที่ 5.20 การเปรียบเทียบพื้นที่หน้าตัดดินตั้งแต่การสำรวจ 3 ครั้งขึ้นไป

5.4 การทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอ

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบติดตามการทำงานเข้าซ้อนงานดินขุดและถมที่นำเสนอ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากระบบที่นำเสนอ ภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยเลือกใช้พื้นที่ชั้นบันได บริเวณด้านหน้าอนุสาวรีย์สองรัชกาลเป็นพื้นที่ทดสอบดังแสดงในรูปที่ 5.21 เนื่องจากพื้นที่บริเวณดังกล่าวเป็นพื้นที่เปิดโล่งสามารถถ่ายภาพทาง

อากาศโดยไม่มีอาคารหรือต้นไม้มาบดบังวัตถุที่ต้องการถ่ายภาพ บริเวณโดยรอบไม่มีอาคารสูงซึ่งอาจกีดขวางเส้นทางการบินของอากาศยาน และนอกจากรูปทรงของบันไดเป็นรูปทรงเรขาคณิตสามารถวัดเพื่อคำนวณเชิงปริมาณได้ง่าย ยังมีสีและลักษณะคล้ายกองดินที่อยู่ในโครงการก่อสร้างทั่วไป อีกทั้งบริเวณดังกล่าวมีหมุดหลักฐานทางราบ CU01 CU08 และ CU09 ทำให้สามารถใช้ในการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศด้วยวิธี Indirect Georeferencing ได้



รูปที่ 5.21 พื้นที่ทดสอบระบบและรูปทรงของพื้นที่ทดสอบ (บันได)

5.4.1 การทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องเชิงปริมาณของแบบจำลอง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องในอดีตพบการตั้งค่าปัจจัยระหว่างการใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อเก็บข้อมูลภาพถ่ายตั้งสรุปในตารางที่ 5.8 แสดงการตั้งค่าปัจจัยระหว่างการใช้อากาศยานไร้คนขับเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศและความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศที่สร้างขึ้น สามารถสรุปผลการวิจัยที่ผ่านมาได้ว่า ทั้งหมดใช้ปัจจัยการบินเรื่องทิศทางการบินเพียง 1 ทิศทาง ปัจจัยเรื่องระดับเพดานบินมีความหลากหลาย ปัจจัยเรื่องมุมเอียงกล้องถ่ายภาพไม่ได้ระบุไว้อย่างชัดเจน ปัจจัยเรื่องระยะซ้อนภาพส่วนมากระบุ ระยะซ้อนภาพด้านหน้า 80% และระยะซ้อนภาพด้านข้าง 60%

ตารางที่ 5.8 การตั้งค่าปัจจัยระหว่างการใช้อากาศยานไร้คนขับเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศและความถูกต้องแม่นยำของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศที่สร้างขึ้น

แหล่งที่มา	ทิศทางการบิน	ระดับเพดานบิน	มุมเอียงกล้องถ่ายภาพ	ระยะซ้อนภาพด้านหน้า	ระยะซ้อนภาพด้านข้าง	ความแม่นยำของแบบจำลอง
Agisoft PhotoScan User Manual	-	-	เอียง	80%	60%	-
Kršák et al. (2016)	1	35 m.	-	80%	60%	RMSE 4.79 ซม.
Siebert and Teizer (2014)	1	50 m.	-	70%	40%	Z (เฉลี่ย) = -1.1 ซม.
Uysal et al. (2015)	1	60 m.	-	-	-	RMSE 6.62 ซม.
Santise et al., (2014)	1	70 m.	-	80%	60%	X = 2 ซม. Y = 2.1 ซม. Z = 4.9 ซม.
Ruzgiene et al., (2015)	1	150 m.	-	80%	80%	X = 10 ซม. Y = 16 ซม. Z = 16 ซม.

ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงทดลองสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากระบบที่นำเสนอ โดยศึกษาปัจจัยทดสอบเรื่อง ทิศทางการบินเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ และ ความสูงเพดานบิน ของอากาศยานขณะทำการบินเก็บภาพถ่ายทางอากาศ โดยมีปัจจัยควบคุมประกอบด้วย ปัจจัยเรื่อง มุมเอียงกล้องถ่ายภาพที่ทำกับระนาบพื้นโลกใช้การตั้งค่ามุมเอียงไว้ที่ 70° ปัจจัยเรื่อง ระยะช้อนภาพ ด้านหน้า 80% และด้านข้าง 60% และใช้จำนวนจุดควบคุมภาคพื้นดินทั้งสิ้น 4 จุด โดยมีรายละเอียด การทดลองต่างๆ ดังนี้

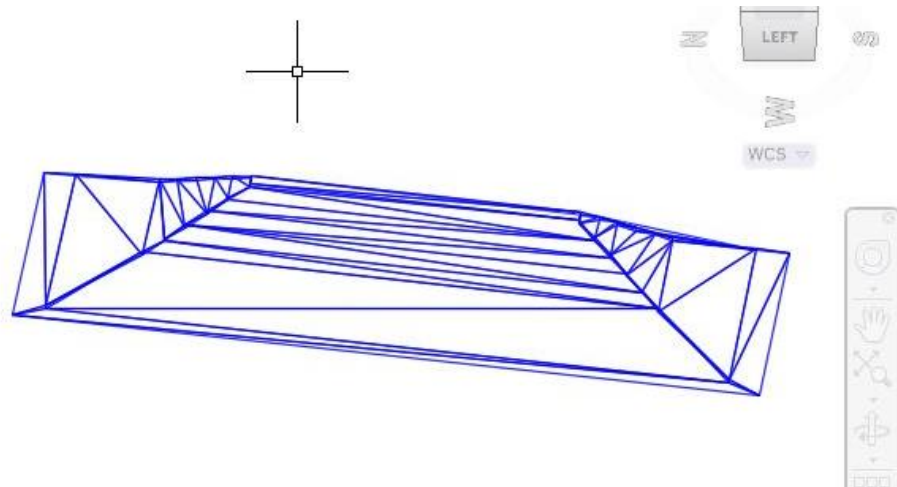
- 1) การทดลองสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขตามปัจจัยทดสอบเรื่องทิศทางการบิน ที่ระดับเพดานบินสูง 50 เมตร

ปัจจัยเรื่องทิศทางการบินเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศที่ทดลองในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ทิศทาง ประกอบด้วย 1) ทิศทางการบินตามแนวขวางของพื้นที่สำรวจ 2) ทิศทางการบินตามยาวของพื้นที่สำรวจ และ 3) การใช้ทิศทางการตามยาวและตามขวางรวมกัน จำนวนอย่างละ 6 ชุดข้อมูล

ตารางที่ 5.9 รายละเอียดจำนวนจุดสำรวจด้วยวิธีการใช้กล้องประมวลผลรวม

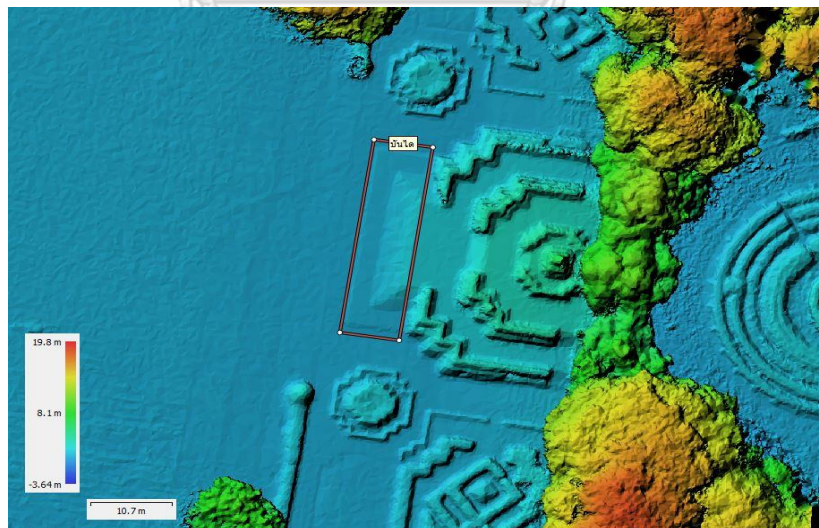
รายการสำรวจ	พื้นที่ทดสอบ (บันได)
ระบบค่าพิกัดใช้ในการสำรวจ	WGS84 UTM zone 47N
จำนวนจุดสำรวจเพื่อใช้หาปริมาณวัตถุที่สนใจ	56 จุด
จำนวนจุดสำรวจเพื่อใช้เป็นพื้นผิวเปรียบเทียบ	4 จุด
ระยะเวลาที่เก็บข้อมูล	1.5 ชั่วโมง

เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบเชิงปริมาณของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขที่สร้างขึ้นด้วยการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ การสำรวจด้วยวิธีการทั่วไปด้วยกล้องประมวลผลรวมถูกใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ เพื่อเก็บข้อมูลค่าพิกัดจุดยอดของรูปทรงบันไดดังแสดงในตารางที่ 5.9 และใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk AutoCAD Civil3D เพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ดังแสดงในรูปที่ 5.22 สำหรับใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงเชิงปริมาณของพื้นที่ทดสอบต่อไป



รูปที่ 5.22 การสร้างพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ด้วยซอฟต์แวร์ Autodesk Civil3D จากข้อมูลจุดสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวม

เมื่อเก็บข้อมูลเสร็จแล้วจึงนำภาพถ่ายทั้งหมดมาประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ Agisoft PhotoScan Professional โดยมีรายละเอียดข้อมูลที่ใช้และข้อมูลที่ได้รับจากการประมวลผลแบบจำลองที่ความสูงเพดานบิน 50 เมตร แสดงในตารางที่ 5.10 และตัวอย่างแบบพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 5.23



รูปที่ 5.23 ตัวอย่างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขของพื้นที่ทดสอบที่ได้จากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศที่ระดับเพดานบิน 50 ม.

การเปรียบเทียบเชิงปริมาณทำโดยการนำจุดสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวมมาสร้างพื้นผิวเพื่อคำนวณหาปริมาณด้วยซอฟต์แวร์ Autodesk Civil3D และใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง เพื่อเปรียบเทียบกับปริมาณที่ได้แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศดังข้อมูลในตารางที่ 5.11

ร้อยละความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณสามารถหาได้จากสมการที่ (1) และรูปภาพแสดงร้อยละความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณระหว่างข้อมูลอ้างอิงจากการสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวมกับแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากอากาศยานไร้คนขับ ตามปัจจัยทดสอบเรื่องทิศทางการบินที่ความสูงเพดานบิน 50 เมตร แสดงในรูปที่ 5.24

ตารางที่ 5.10 รายละเอียดแบบจำลองที่สร้างจากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศเพื่อใช้ทดสอบปัจจัยทิศทางการบินเพื่อถ่ายภาพทางอากาศที่เพดานบินสูง 50 เมตร

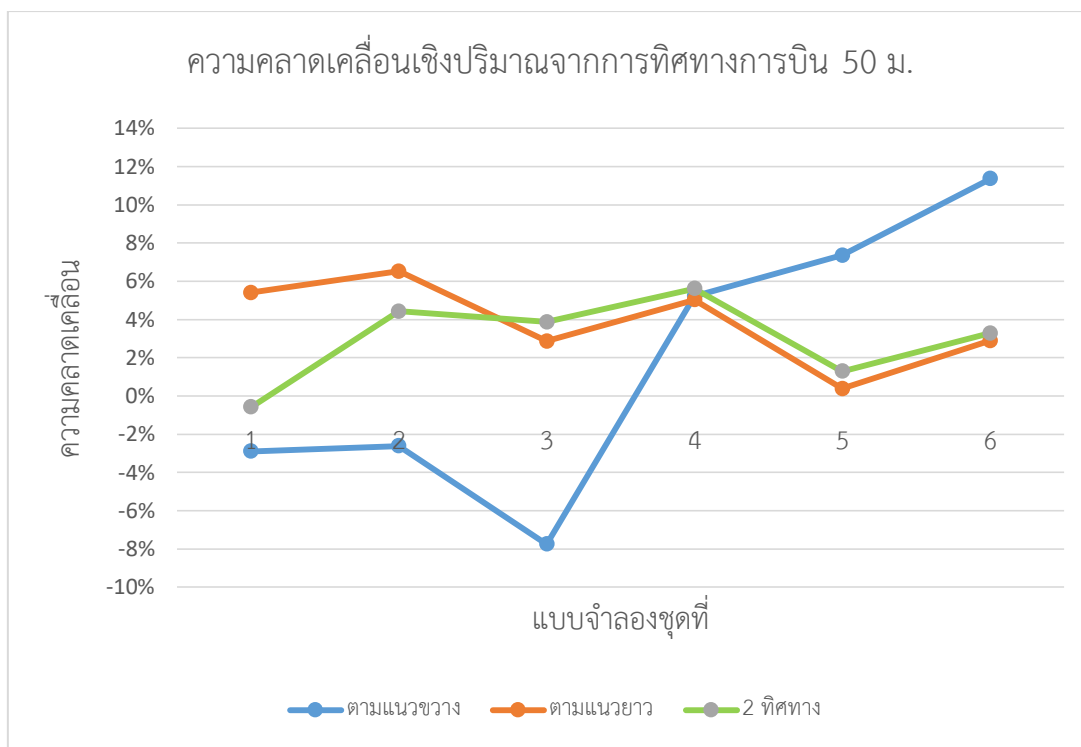
ทดสอบที่เพดานบิน 50 ม.		จำนวนภาพถ่ายที่ใช้ประมวลผล	ระบบค่าพิกัดที่กำหนดในแบบจำลอง	จำนวนจุดยึดโยง (Tie Point)	จำนวนกลุ่มจุด 3 มิติ (dense cloud)	ค่าความละเอียดแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข
แบบจำลองชุดที่ 1	บินตามขวาง	52 ภาพ	WGS84 UTM 47N	59,168 จุด	6,716,349 จุด	6.55 ซม./pix
	บินตามยาว	45 ภาพ		46,356 จุด	5,532,047 จุด	6.34 ซม./pix
	บินตามขวาง + ยาว	117 ภาพ		88,718 จุด	7,821,597 จุด	6.46 ซม./pix
แบบจำลองชุดที่ 2	บินตามขวาง	51 ภาพ	WGS84 UTM 47N	44,881 จุด	5,685,670 จุด	6.91 ซม./pix
	บินตามยาว	45 ภาพ		48,616 จุด	5,588,449 จุด	6.56 ซม./pix
	บินตามขวาง + ยาว	96 ภาพ		81,798 จุด	7,185,723 จุด	6.75 ซม./pix
แบบจำลองชุดที่ 3	บินตามขวาง	64 ภาพ	WGS84 UTM 47N	59,260 จุด	6,381,570 จุด	6.47 ซม./pix
	บินตามยาว	49 ภาพ		41,523 จุด	4,459,749 จุด	6.40 ซม./pix
	บินตามขวาง + ยาว	113 ภาพ		82,848 จุด	7,318,280 จุด	6.40 ซม./pix
แบบจำลองชุดที่ 4	บินตามขวาง	58 ภาพ	WGS84 UTM 47N	54,127 จุด	5,653,951 จุด	7.18 ซม./pix
	บินตามยาว	45 ภาพ		49,407 จุด	5,335,687 จุด	6.79 ซม./pix
	บินตามขวาง + ยาว	104 ภาพ		82,964 จุด	7,483,932 จุด	6.74 ซม./pix
แบบจำลองชุดที่ 5	บินตามขวาง	57 ภาพ	WGS84 UTM 47N	56,632 จุด	6,306,387 จุด	6.64 ซม./pix
	บินตามยาว	52 ภาพ		48,160 จุด	5,630,162 จุด	6.37 ซม./pix
	บินตามขวาง + ยาว	112 ภาพ		87,949 จุด	7,872,779 จุด	6.48 ซม./pix
แบบจำลองชุดที่ 6	บินตามขวาง	57 ภาพ	WGS84 UTM 47N	53,662 จุด	5,930,370 จุด	6.77 ซม./pix
	บินตามยาว	52 ภาพ		48,160 จุด	5,630,162 จุด	6.37 ซม./pix
	บินตามขวาง + ยาว	112 ภาพ		87,949 จุด	7,872,779 จุด	6.48 ซม./pix

$$\% \text{ความคลาดเคลื่อน} = \left(\frac{V_{\text{อากาศยานไร้คนขับ}} - V_{\text{กล้องประมวลผลรวม}}}{V_{\text{กล้องประมวลผลรวม}}} \right) 100 \quad (1)$$

จากกราฟแสดงร้อยละความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณ พบว่าความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณของแบบจำลองทั้ง 6 ชุด พบว่าปัจจัยการบินแบบ 2 ทิศทางมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน +3.0% และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความคลาดเคลื่อนที่ 2.3% มากกว่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความคลาดเคลื่อนจากปัจจัยทิศทางบินตามยาวอยู่ 0.1%

ตารางที่ 5.11 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณการทดสอบปัจจัยเรื่องทิศทางการบินที่ระดับเพดานบิน 50 เมตร

รายการ	ปริมาณอ้างอิงจาก Total Station (m ³)	ทิศทางการบิน (ความสูงเพดานบิน 50 ม.)					
		ตามแนวขวาง		ตามแนวยาว		2 ทิศทาง	
		ปริมาณ (m ³)	ความคลาดเคลื่อน (%)	ปริมาณ (m ³)	ความคลาดเคลื่อน (%)	ปริมาณ (m ³)	ความคลาดเคลื่อน (%)
แบบจำลองชุดที่ 1	60.25	58.504	-2.9%	63.506	5.4%	59.903	-0.6%
แบบจำลองชุดที่ 2		58.674	-2.6%	64.178	6.5%	62.917	4.4%
แบบจำลองชุดที่ 3		55.582	-7.7%	61.975	2.9%	62.58	3.9%
แบบจำลองชุดที่ 4		63.396	5.2%	63.277	5.0%	63.638	5.6%
แบบจำลองชุดที่ 5		64.684	7.4%	60.479	0.4%	61.032	1.3%
แบบจำลองชุดที่ 6		67.096	11.4%	61.998	2.9%	62.227	3.3%
ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน			1.8%		3.8%		3.0%
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความคลาดเคลื่อน			7.3%		2.2%		2.3%



รูปที่ 5.24 ร้อยละความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณระหว่างการสำรวจทั่วไปด้วยกล้องประมวลผลรวม เปรียบเทียบกับแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ

- 2) การทดลองสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขตามปัจจัยทดสอบเรื่องทิศทางการบิน ที่ระดับเพดานบินสูง 70 เมตร

ทำการบินเพื่อเก็บข้อมูลเพื่อทดสอบปัจจัยเรื่องทิศทางการบินเหมือนที่เพดานบินสูง 50 เมตร เมื่อเก็บข้อมูลเสร็จแล้วจึงนำภาพถ่ายทั้งหมดมาประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ Agisoft PhotoScan Professional โดยมีรายละเอียดข้อมูลที่ใช้และข้อมูลที่ได้รับจากการประมวลผลแบบจำลองที่ความสูงเพดานบิน 70 เมตร แสดงใน ตารางที่ 5.12

การเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณ ใช้วิธีการเดียวกับการทดสอบที่ความสูงเพดานบิน 50 เมตร ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนแสดงในตารางที่ 5.13 แสดงการเปรียบเทียบเชิงปริมาณการทดสอบปัจจัยเรื่องทิศทางการบินที่ระดับเพดานบิน 70 เมตร

ตารางที่ 5.12 รายละเอียดแบบจำลองที่สร้างจากการประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศเพื่อใช้ทดสอบ ปัจจัยทิศทางการบินเพื่อถ่ายภาพทางอากาศที่เพดานบินสูง 70 เมตร

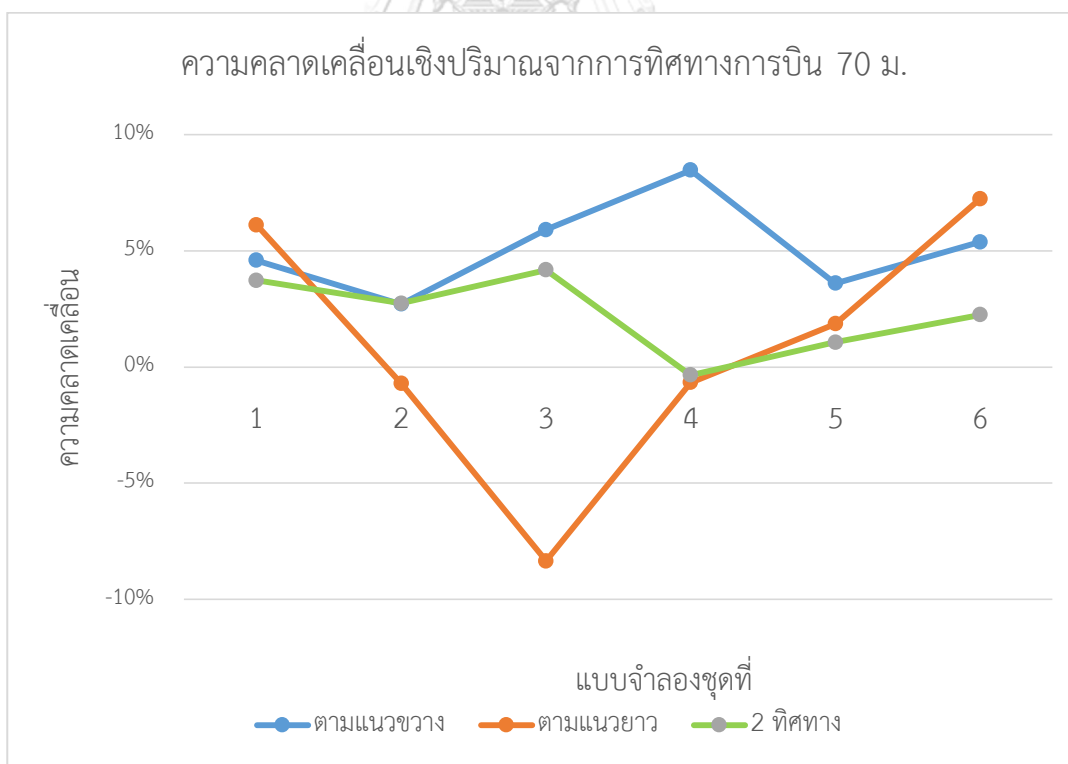
ทดสอบที่เพดานบิน 70 ม.		จำนวนภาพถ่ายที่ใช้ประมวลผล	ระบบค่าพิกัดที่กำหนดในแบบจำลอง	จำนวนจุดยึดโยง (Tie Point)	จำนวนกลุ่มจุด 3 มิติ (dense cloud)	ค่าความละเอียดแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข
แบบจำลองชุดที่ 1	บินตามขวาง	110 ภาพ	WGS84 UTM 47N	122,118 จุด	12,285,422 จุด	9.37 ซม./pix
	บินตามยาว	121 ภาพ		131,733 จุด	12,553,597 จุด	9.28 ซม./pix
	บินตามขวาง + ยาว	231 ภาพ		216,914 จุด	15,525,944 จุด	9.31 ซม./pix
แบบจำลองชุดที่ 2	บินตามขวาง	115 ภาพ	WGS84 UTM 47N	104,482 จุด	12,331,828 จุด	9.34 ซม./pix
	บินตามยาว	121 ภาพ		104,523 จุด	11,880,463 จุด	9.44 ซม./pix
	บินตามขวาง + ยาว	226 ภาพ		201,084 จุด	15,087,599 จุด	9.38 ซม./pix
แบบจำลองชุดที่ 3	บินตามขวาง	43 ภาพ	WGS84 UTM 47N	42,958 จุด	4,828,824 จุด	9.32 ซม./pix
	บินตามยาว	27 ภาพ		33,016 จุด	3,929,046 จุด	9.10 ซม./pix
	บินตามขวาง + ยาว	70 ภาพ		65,150 จุด	5,790,122 จุด	9.23 ซม./pix
แบบจำลองชุดที่ 4	บินตามขวาง	45 ภาพ	WGS84 UTM 47N	43,793 จุด	5,014,009 จุด	9.31 ซม./pix
	บินตามยาว	29 ภาพ		31,603 จุด	3,904,992 จุด	8.61 ซม./pix
	บินตามขวาง + ยาว	74 ภาพ		64,266 จุด	5,997,317 จุด	9.01 ซม./pix
แบบจำลองชุดที่ 5	บินตามขวาง	45 ภาพ	WGS84 UTM 47N	44,160 จุด	5,001,761 จุด	9.31 ซม./pix
	บินตามยาว	29 ภาพ		31,634 จุด	3,911,790 จุด	8.60 ซม./pix
	บินตามขวาง + ยาว	72 ภาพ		64,343 จุด	5,991,859 จุด	9.02 ซม./pix
แบบจำลองชุดที่ 6	บินตามขวาง	44 ภาพ	WGS84 UTM 47N	42,270 จุด	5,287,729 จุด	9.26 ซม./pix
	บินตามยาว	42 ภาพ		45,800 จุด	5,043,680 จุด	9.30 ซม./pix
	บินตามขวาง + ยาว	86 ภาพ		71,432 จุด	6,340,084 จุด	9.27 ซม./pix

กราฟแสดงร้อยละความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณระหว่างข้อมูลอ้างอิงจากการสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวมกับแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากอากาศยานไร้คนขับตามปัจจัยทดสอบเรื่องทิศทางการบินที่ความสูงเพดานบิน 70 เมตร แสดงในรูปที่ 5.25

จากกราฟแสดงร้อยละความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณ พบว่าความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณของแบบจำลองทั้ง 6 ชุด พบว่าปัจจัยการบินแบบ 2 ทิศทางมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนที่ +2.3% และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดที่ 1.7%

ตารางที่ 5.13 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณการทดสอบปัจจัยเรื่องทิศทางการบินที่ระดับเพดานบิน 70 เมตร

รายการ	ปริมาณอ้างอิง จาก Total Station (m ³)	ทิศทางการบิน (ความสูงเพดานบิน 70 ม.)					
		ตามแนวขวาง		ตามแนวยาว		2 ทิศทาง	
		ปริมาณ (m ³)	ความคลาดเคลื่อน (%)	ปริมาณ (m ³)	ความคลาดเคลื่อน (%)	ปริมาณ (m ³)	ความคลาดเคลื่อน (%)
แบบจำลองชุดที่ 1	60.25	63.013	4.6%	63.939	6.1%	62.496	3.7%
แบบจำลองชุดที่ 2		61.880	2.7%	59.824	-0.7%	61.904	2.7%
แบบจำลองชุดที่ 3		63.813	5.9%	55.212	-8.4%	62.763	4.2%
แบบจำลองชุดที่ 4		65.355	8.5%	59.844	-0.7%	60.041	-0.3%
แบบจำลองชุดที่ 5		62.420	3.6%	61.365	1.9%	60.893	1.1%
แบบจำลองชุดที่ 6		63.492	5.4%	64.614	7.2%	61.601	2.2%
ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน			5.1%		0.9%		2.3%
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความคลาดเคลื่อน			2.0%		5.6%		1.7%



รูปที่ 5.25 ร้อยละความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณระหว่างการสำรวจทั่วไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากภาพถ่ายทางอากาศจากอากาศยานไร้คนขับ

- 3) การทดลองสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขตามปัจจัยทดสอบ (เพิ่มเติม) สภาพแสงสว่างและความเร็วชัตเตอร์กล้องถ่ายภาพ ระหว่างการเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ ที่ระดับเพดานบินสูง 70 เมตร

เป็นปัจจัยที่พบระหว่างการเก็บข้อมูลภาคสนามที่หน่วยงานก่อสร้าง เนื่องจากช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศอยู่ในช่วงเวลา 10.00 – 14.00 น. เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาเรื่องแสงและเงาที่ปรากฏในภาพถ่าย ในการเก็บข้อมูลแต่ละครั้งต้องใช้เวลา 20 – 40 นาที พบว่าสภาพแสงสว่างมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเนื่องจากมีเงาเมฆรบกวนขณะเก็บข้อมูลภาพถ่ายอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

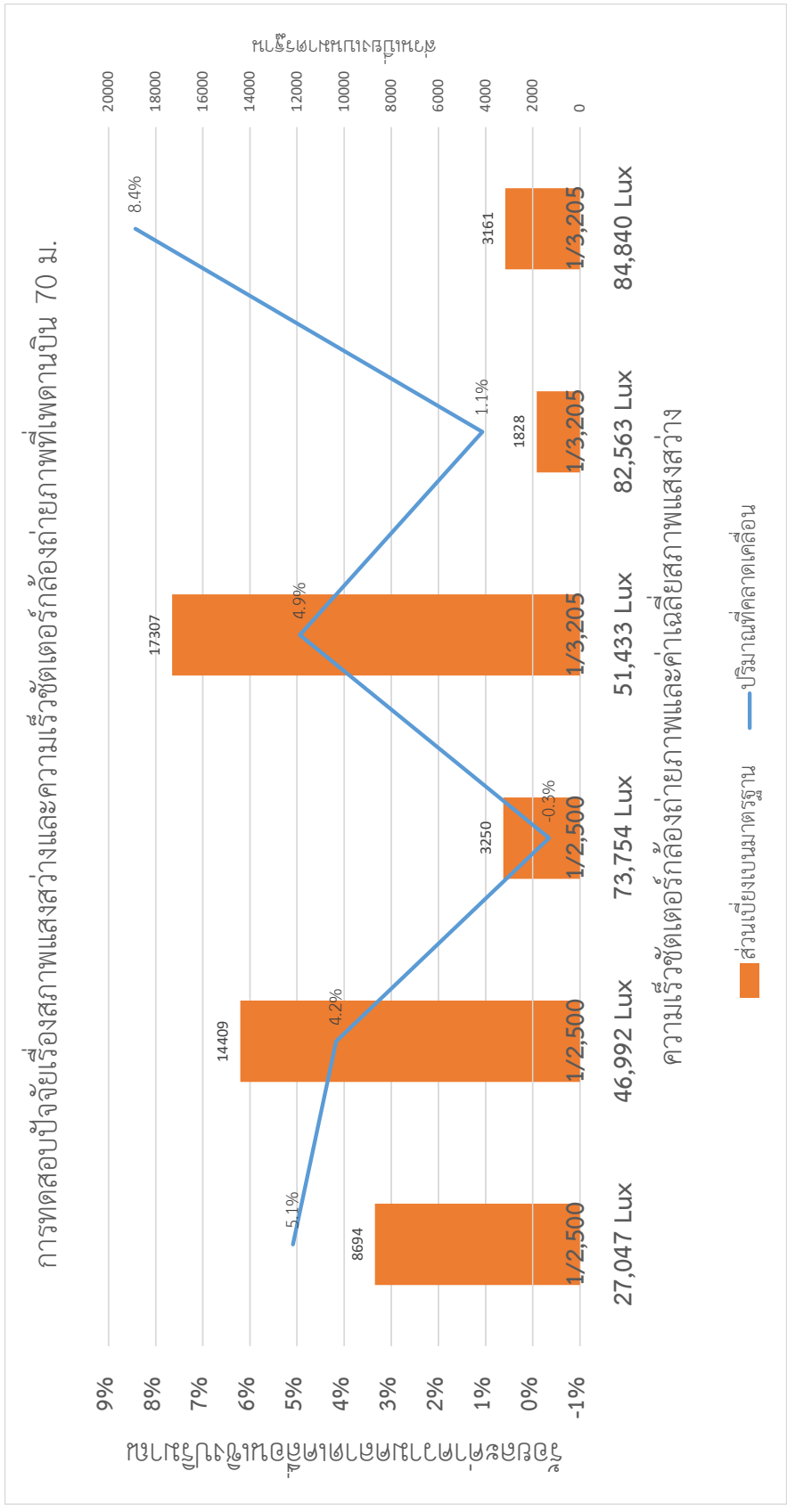
จากข้อมูลสภาพแสงสว่างและความเร็วชัตเตอร์กล้องถ่ายภาพที่บันทึกสภาพแสงสว่างระหว่างการเก็บข้อมูลครั้งที่ 2 เมื่อวันที่ 27 เมษายน 2561 มีสภาพแสงสว่างเฉลี่ยตลอดช่วงเวลากการเก็บข้อมูล ที่ 79,243 Lux ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแสงสว่าง ที่ 24,912 Lux ความเร็วชัตเตอร์กล้องถ่ายภาพที่ใช้ขณะเก็บข้อมูลภาพถ่ายที่ 1/3,205 วินาที และสภาพแสงสว่างระหว่างการเก็บข้อมูลครั้งที่ 3 เมื่อวันที่ 9 ตุลาคม 2561 มีสภาพแสงสว่างเฉลี่ยตลอดช่วงเวลากการเก็บข้อมูล ที่ 69,500 Lux ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแสงสว่าง ที่ 19,074 Lux ความเร็วชัตเตอร์กล้องถ่ายภาพที่ใช้ขณะเก็บข้อมูลภาพถ่าย 1/2,500 วินาที

เพื่อทดสอบปัจจัยดังกล่าว จึงทำการทดสอบปัจจัยเรื่องสภาพแสงสว่างและความเร็วชัตเตอร์กล้องถ่ายภาพ ภายในบริเวณพื้นที่ทดสอบภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เนื่องจากต้องทำการบินในช่วงที่สภาพแสงสว่างมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้บันทึกหน้างานมากที่สุด โดยแบ่งเป็นการสร้างแบบจำลองตามความเร็วชัตเตอร์กล้องถ่ายภาพ 1/2,500 วินาที จำนวน 3 แบบจำลอง และ 1/3,205 วินาที จำนวน 3 แบบจำลอง มีปัจจัยควบคุมเพิ่มเติม คือ ความสูงเพดานบินที่ 70 เมตร และทิศทางการบิน 2 ทิศทาง (ตามแนวขวาง + ตามแนวยาว) เมื่อเก็บข้อมูลเสร็จแล้วจึงนำภาพถ่ายทั้งหมดมาประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ Agisoft PhotoScan Professional โดยมีรายละเอียดการประมวลผลแบบจำลองแสดงในตารางที่ 5.14

กราฟแสดงร้อยละความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณระหว่างข้อมูลอ้างอิงจากการสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวมกับแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากอากาศยานไร้คนขับตามปัจจัยทดสอบสภาพแสงสว่างและความเร็วชัตเตอร์กล้องถ่ายภาพที่ความสูงเพดานบิน 70 เมตรแสดงในรูปที่ 5.26

ตารางที่ 5.14 การเปรียบเทียบเชิงปริมาณการทดลองปัจจัยสภาพแสงสว่างและความเร็วซีเตอร์กล้องถ่ายภาพที่เพดานบินสูง 70 เมตร

รายการ	สภาพแสงสว่างขณะบินเก็บข้อมูล		ความเร็วซีเตอร์ กล้องถ่ายภาพที่ใช้	ปริมาณอ้างอิงจาก Total Station (ม ³)	จากแบบจำลองพื้นผิว ภูมิประเทศเชิงเลข (ม ³)	ร้อยละความ คลาดเคลื่อน
	ค่าเฉลี่ยความสว่าง (Lux)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความสว่าง (Lux)				
แบบจำลอง 1	27,047	8,694	1/2500	60.25	63.316	5.1%
แบบจำลอง 2	46,992	14,409			62.763	4.2%
แบบจำลอง 3	73,754	3,250	60.041		-0.3%	
แบบจำลอง 4	51,433	17,307	63.227		4.9%	
แบบจำลอง 5	82,563	1,828	60.893		1.1%	
แบบจำลอง 6	84,800	3,161	65.329		8.4%	
ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน						
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความคลาดเคลื่อน						
3.9%						
3.1%						



รูปที่ 5.26 ร้อยละความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณระหว่างการสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวมเปรียบเทียบกับแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศ
 เซิงเลขเพื่อทดสอบปัจจัยเรื่องสภาพแสงสว่างและความเร็วซีทีเตอร์กล้องถ่ายภาพที่เพดานบินสูง 70 เมตร

จากกราฟแสดงร้อยละความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณ พบว่าความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณของแบบจำลองทั้ง 6 ชุด มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย +3.9% มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความคลาดเคลื่อน 3.1% (ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง -0.3% ถึง +8.4%)

ทั้งนี้ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณของแบบจำลองที่ 3 มีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนลดต่ำผิดปกติ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากปัจจัยอื่นๆ นอกเหนือจากปัจจัยที่ใช้ทดสอบและปัจจัยที่ใช้ควบคุม เช่น ปัจจัยความสั่นสะเทือนของกล้องถ่ายภาพหรือปัจจัยจากตัวกล้องถ่ายภาพและเลนส์ เป็นต้น

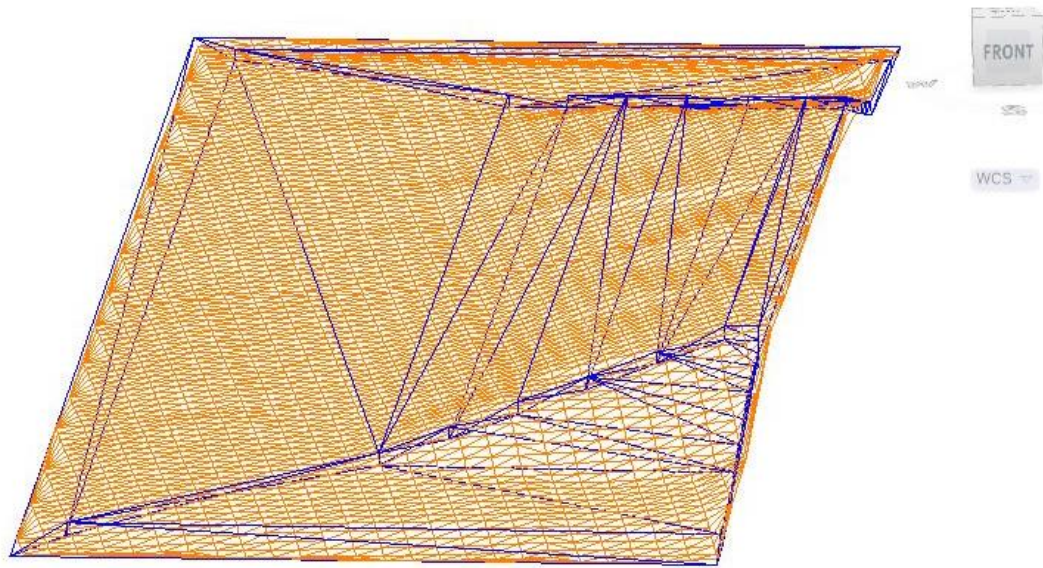
5.4.2 การประเมินประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอเพื่อนำไปใช้ติดตามงานดินชุดและ ถมในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน

หลังจากการทดลองสร้างแบบจำลองเพื่อทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องเชิงปริมาณของระบบที่นำเสนอแล้ว แบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดินถูกนำมาใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบติดตามการทำงานเข้าซ้อนงานดินชุดและถมในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานด้วยการนำมาเปรียบเทียบเพื่อวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของระบบที่นำเสนอ

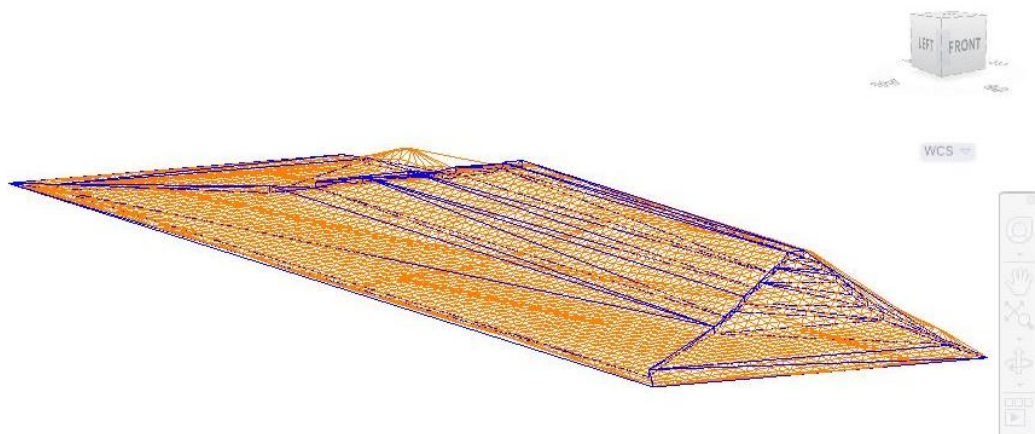
พื้นผิวแสดงระดับพื้นดินจากการสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวมได้ถูกสร้างจากการนำค่าพิกัดจุดที่สำรวจได้มาประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ Autodesk AutoCAD Civil3D เพื่อสร้างแบบพื้นผิวแบบ Mesh รูปที่ 5.22 พื้นผิวแสดงระดับพื้นดินของระบบที่นำเสนอ ถูกสร้างจากแบบจำลองเรื่องปัจจัยทิศทางการบิน 2 ทิศทาง ที่ระดับเพดานบินสูง 70 เมตร จำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อเป็นตัวแทนของการประเมินประสิทธิภาพในครั้งนี้ถูกสร้างและนำมาเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดินที่มาจากกล้องประมวลผลรวมด้วยซอฟต์แวร์ Autodesk AutoCAD Civil3D

แบบจำลองที่ 1 จากระบบที่นำเสนอมาจากแบบจำลองที่มีร้อยละความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณน้อยที่สุด แบบจำลองที่ 2 จากระบบที่นำเสนอมาจากแบบจำลองที่มีร้อยละความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณปานกลางและแบบจำลองที่ 3 จากระบบที่นำเสนอมาจากแบบจำลองที่มีร้อยละความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณมากที่สุด จากการทดสอบปัจจัยเพดานบินสูง 70 เมตร

รูปที่ 5.27 และ รูปที่ 5.28 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติ) แบบหลายมุมมอง ระหว่างกล้องประมวลผลรวมกับแบบจำลองที่ 1 จากระบบที่นำเสนอ (เส้นสีฟ้า) แสดงพื้นผิวแบบ Mesh ที่สร้างจากข้อมูลการสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวม และ (เส้นสีส้ม) แสดงพื้นผิวแบบ Mesh ที่สร้างจากข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ จากระบบที่นำเสนอ

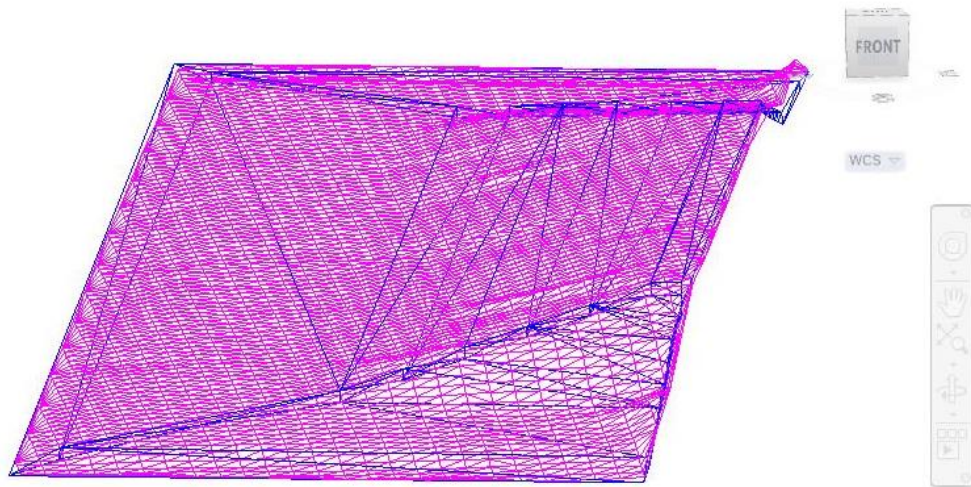


รูปที่ 5.27 การเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติที่ 1) ระหว่างกล่องประมวลผลรวมกับแบบจำลองที่ 1

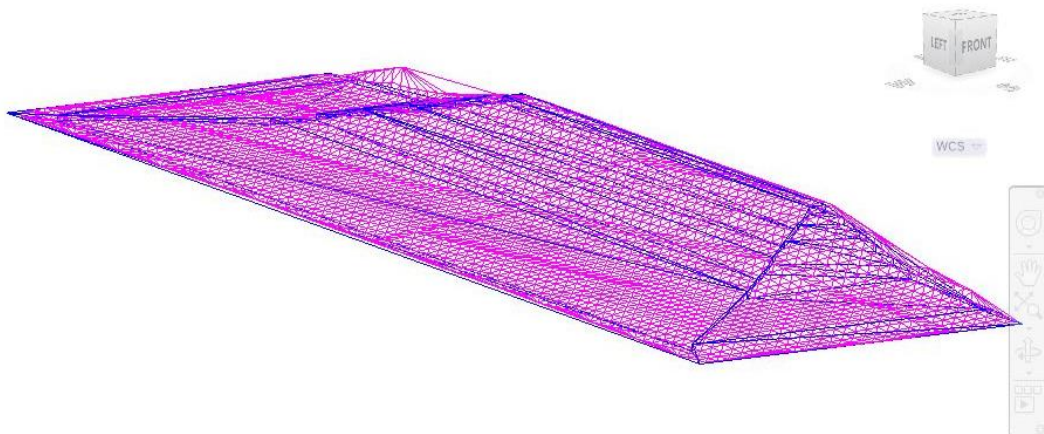


รูปที่ 5.28 การเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติที่ 2) ระหว่างกล่องประมวลผลรวมกับแบบจำลองที่ 1

รูปที่ 5.29 และ รูปที่ 5.30 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติ) แบบหลายมุมมอง ระหว่างกล่องประมวลผลรวมกับแบบจำลองที่ 2 จากระบบที่นำเสนอ (เส้นสีฟ้า) แสดงพื้นผิวแบบ Mesh ที่สร้างจากข้อมูลการสำรวจด้วยกล่องประมวลผลรวม และ (เส้นสีม่วง) แสดงพื้นผิวแบบ Mesh ที่สร้างจากข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ จากระบบที่นำเสนอ

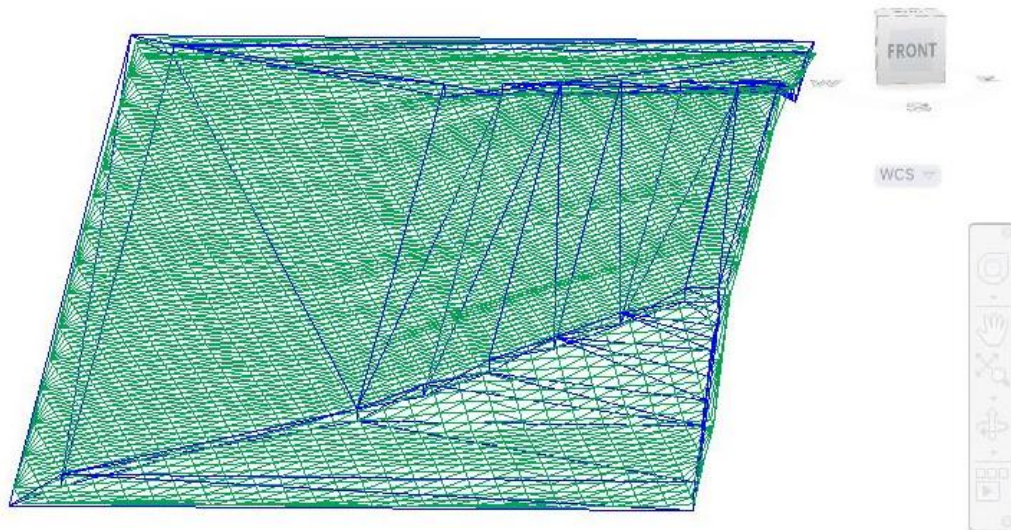


รูปที่ 5.29 การเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติที่ 1) ระหว่างกล่องประมวล
ผลรวมกับแบบจำลองที่ 2

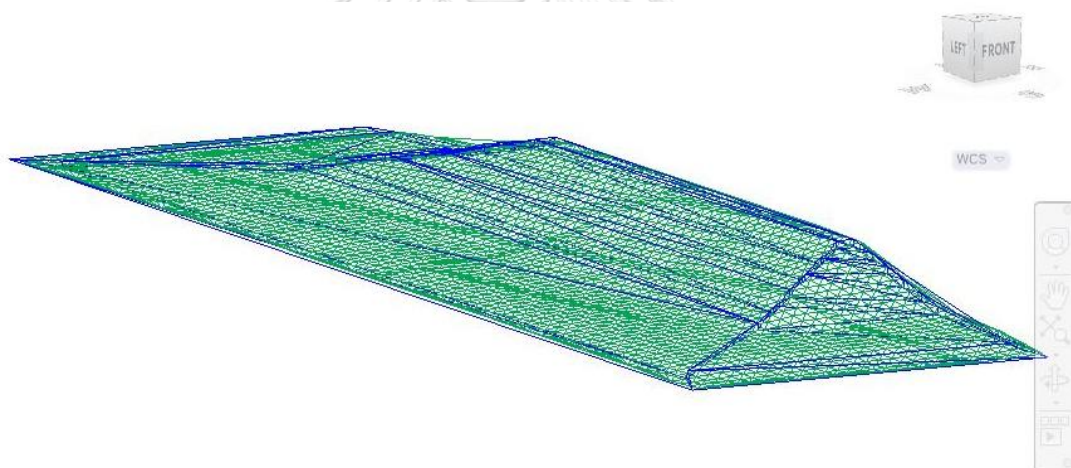


รูปที่ 5.30 การเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติที่ 1) ระหว่างกล่องประมวล
ผลรวมกับแบบจำลองที่ 2

รูปที่ 5.31 และ รูปที่ 5.32 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติ) แบบหลายมุมมอง ระหว่างกล่องประมวลผลรวมกับแบบจำลองที่ 3 จากระบบที่นำเสนอ (เส้นสีฟ้า) แสดงพื้นผิวแบบ Mesh ที่สร้างจากข้อมูลการสำรวจด้วยกล่องประมวลผลรวม และ (เส้นเขียว) แสดงพื้นผิวแบบ Mesh ที่สร้างจากข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ จากระบบที่นำเสนอ

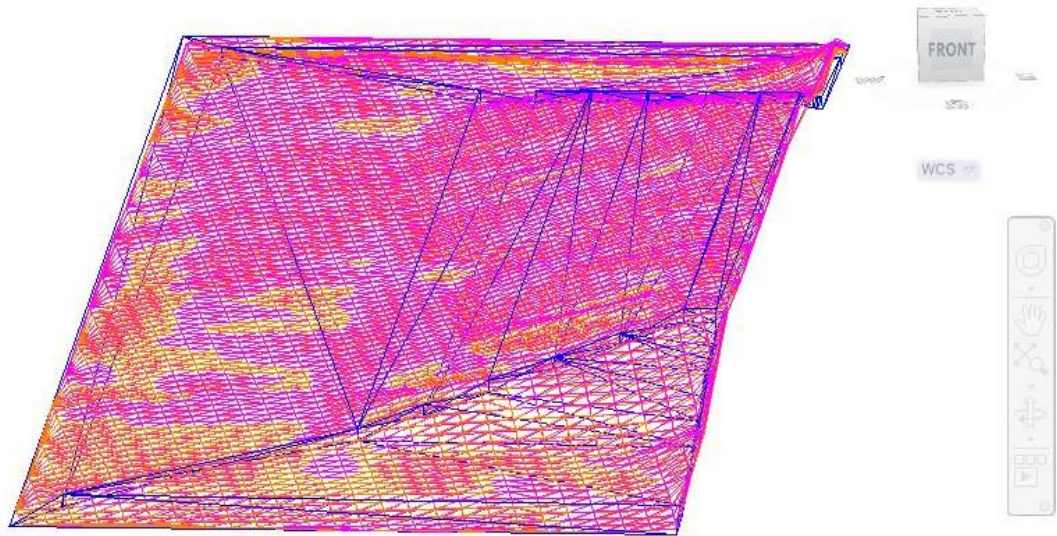


รูปที่ 5.31 การเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติที่ 1) ระหว่างกล้องประมวลผลรวมกับแบบจำลองที่ 3

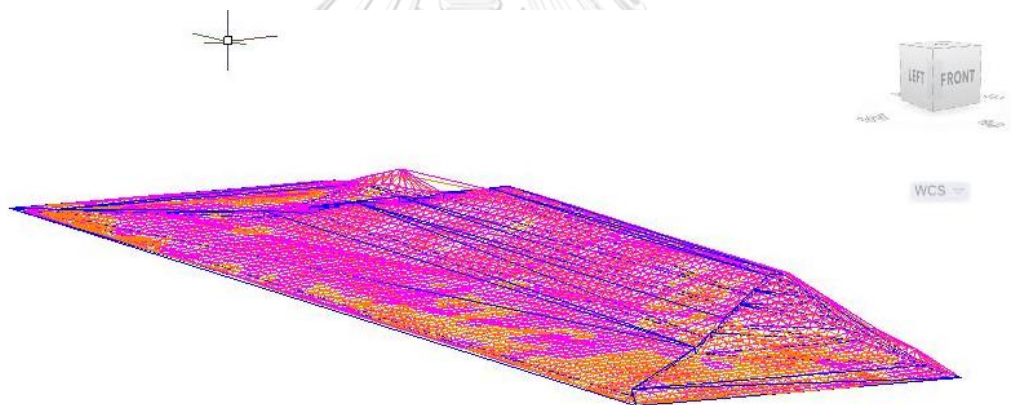


รูปที่ 5.32 การเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติที่ 1) ระหว่างกล้องประมวลผลรวมกับแบบจำลองที่ 3

รูปที่ 5.33 และ รูปที่ 5.34 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติ) แบบหลายมุมมอง ระหว่างกล้องประมวลผลรวมกับแบบจำลองที่ 1 จากระบบที่นำเสนอ (เส้นสีฟ้า) แสดงพื้นผิวแบบ Mesh ที่สร้างจากข้อมูลการสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวมกับ (เส้นสีส้ม) แสดงพื้นผิวแบบ Mesh ที่สร้างจากข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ จากระบบที่นำเสนอของแบบจำลองที่ 1 และ (เส้นสีม่วง) แสดงพื้นผิวแบบ Mesh ที่สร้างจากข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ จากระบบที่นำเสนอของแบบจำลองที่ 2

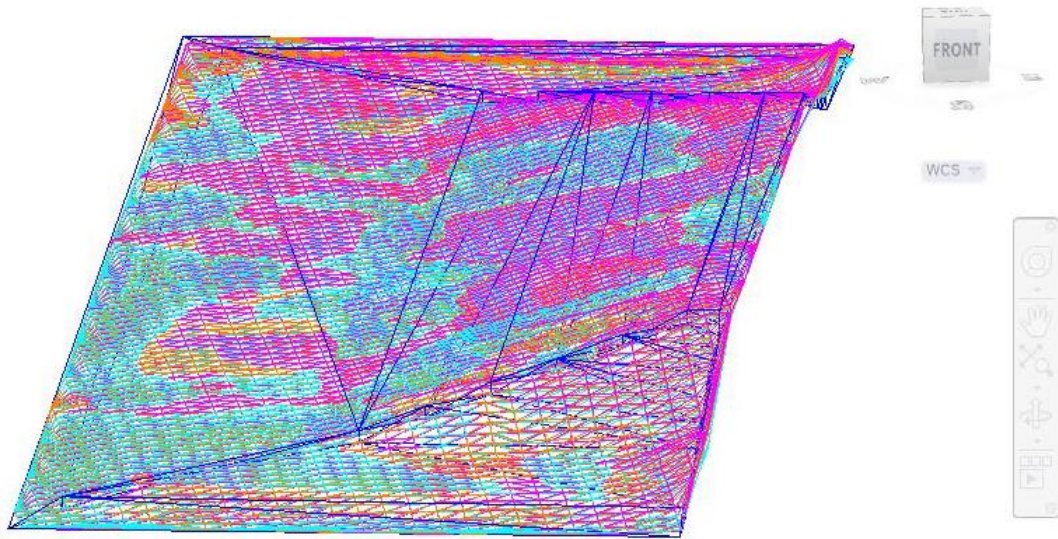


รูปที่ 5.33 การเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติที่ 1) ระหว่างกล้องประมวลผลรวมกับแบบจำลองที่ 1 และแบบจำลองที่ 2

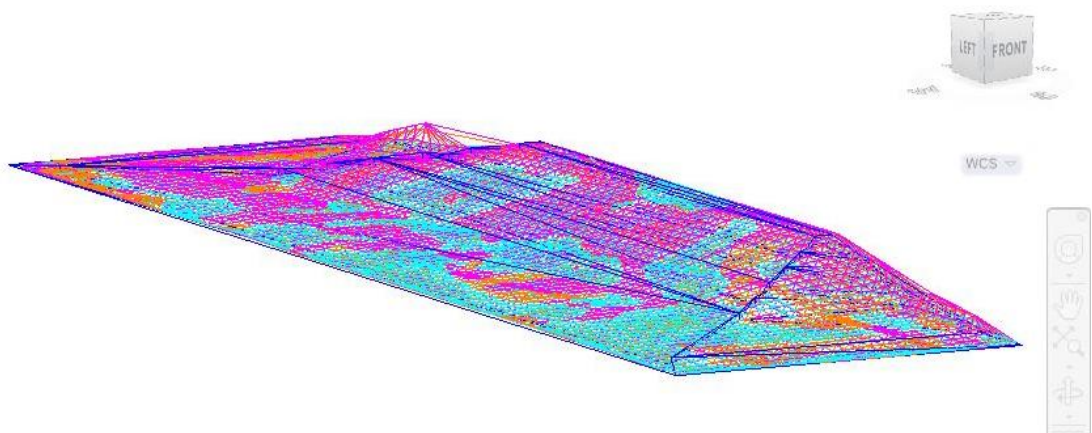


รูปที่ 5.34 การเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติที่ 2) ระหว่างกล้องประมวลผลรวมกับแบบจำลองที่ 1 และแบบจำลองที่ 2

รูปที่ 5.27 และ รูปที่ 5.28 แสดงการเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติ) แบบหลายมุมมอง ระหว่างกล้องประมวลผลรวมกับแบบจำลองที่ 1 จากระบบที่นำเสนอ (เส้นสีฟ้า) แสดงพื้นผิวแบบ Mesh ที่สร้างจากข้อมูลการสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวมกับ (เส้นสีส้ม) แสดงพื้นผิวแบบ Mesh ที่สร้างจากข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ จากระบบที่นำเสนอของแบบจำลองที่ 1 (เส้นสีม่วง) แสดงพื้นผิวแบบ Mesh ที่สร้างจากข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ จากระบบที่นำเสนอของแบบจำลองที่ 2 (เส้นสีเขียว) แสดงพื้นผิวแบบ Mesh ที่สร้างจากข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ จากระบบที่นำเสนอของแบบจำลองที่ 3



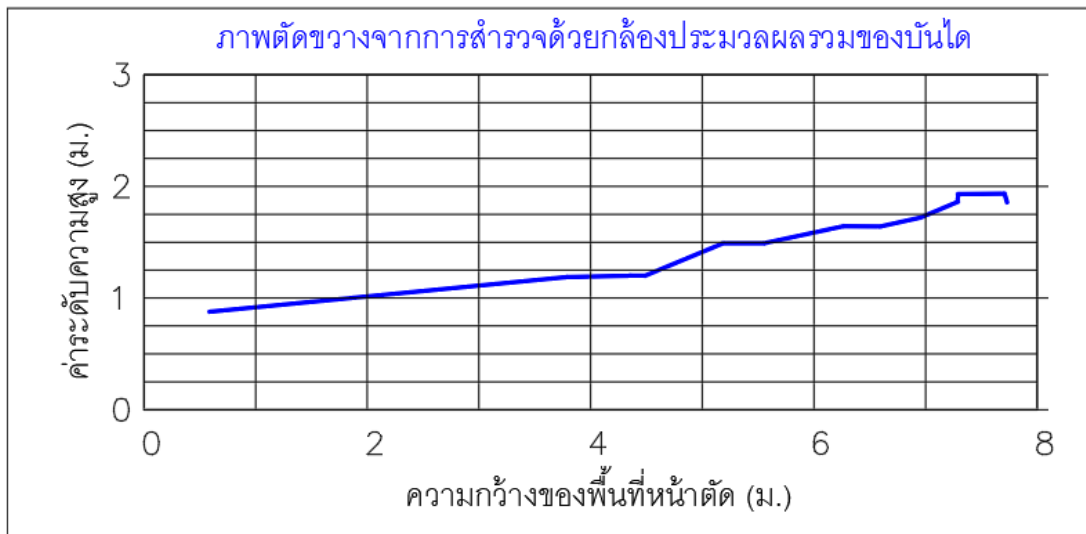
รูปที่ 5.35 การเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติที่ 1) ระหว่างกล่องประมวลผลรวมกับแบบจำลองที่ 1 แบบจำลองที่ 2 และแบบจำลองที่ 3



รูปที่ 5.36 การเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน (มุมมอง 3 มิติที่ 2) ระหว่างกล่องประมวลผลรวมกับแบบจำลองที่ 1 แบบจำลองที่ 2 และแบบจำลองที่ 3

เพื่อความเข้าใจได้ง่ายเส้น Profiles แสดงระดับพื้นดินจากระบบที่นำเสนอถูกนำมาใช้เปรียบเทียบเพื่อช่วยวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนของระบบที่นำเสนอ

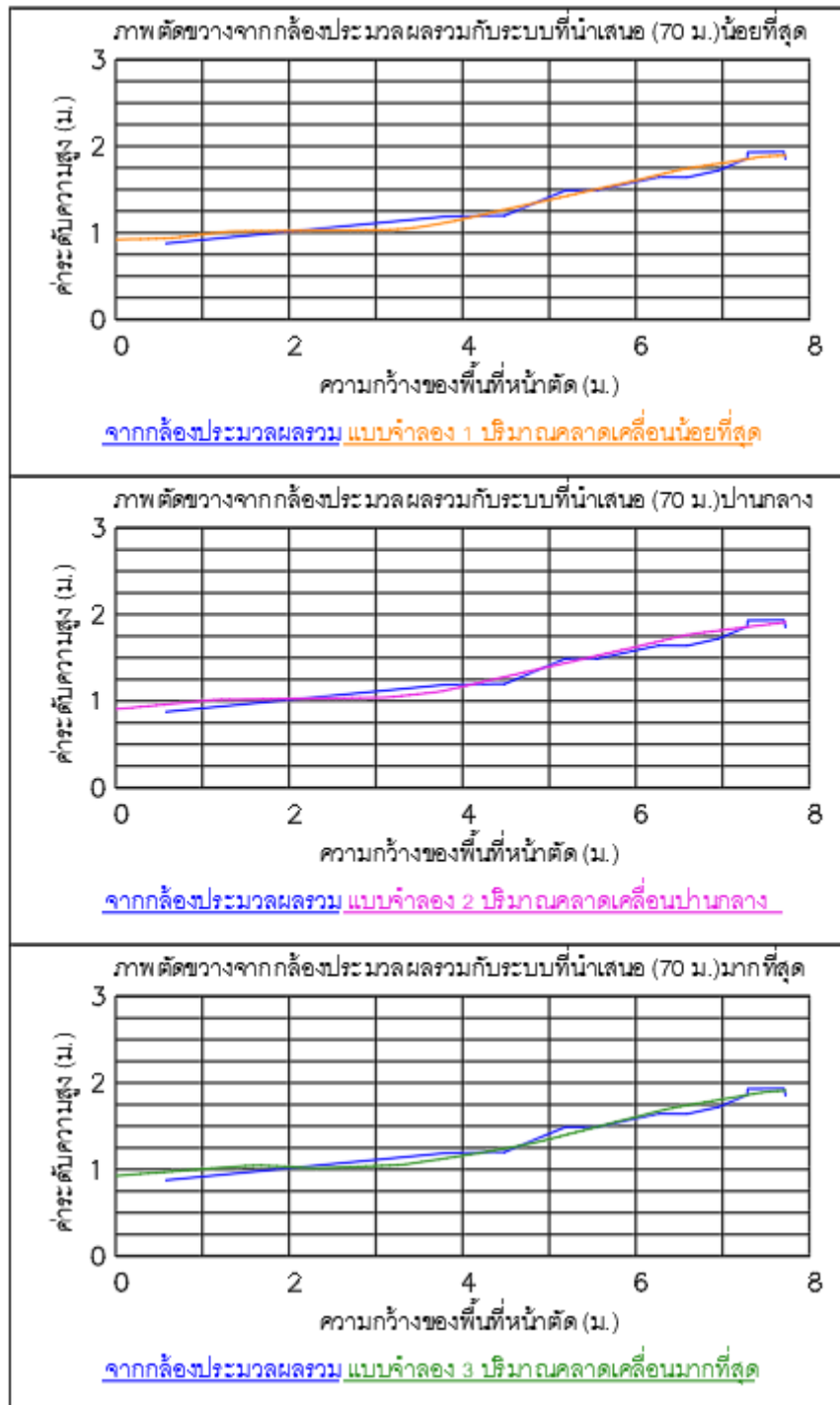
เส้น Profiles จากการสำรวจด้วยกล่องประมวลผลรวมแสดงในรูปที่ 5.37 เส้น Profiles ที่สร้างจากแบบจำลองที่ 1 แบบจำลองที่ 2 และแบบจำลองที่ 3 จากระบบที่นำเสนอถูกนำไปเปรียบเทียบกับเส้น Profiles จากการสำรวจด้วยกล่องประมวลผลรวมตามลำดับดังแสดงในรูปที่



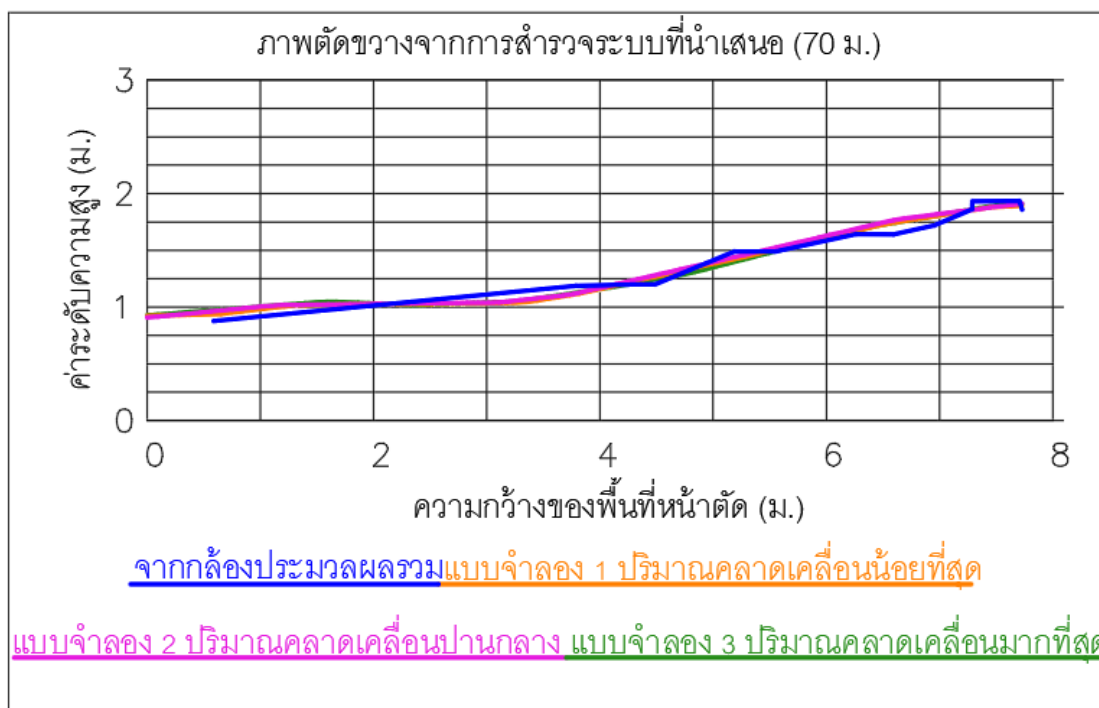
รูปที่ 5.37 ภาพตัดขวางของพื้นที่ทดสอบ(บันได) ที่สร้างจากการสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวม

รูปที่ 5.39 แสดงการนำ เส้น Profiles จากการสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวม มาเปรียบเทียบกับ เส้น Profiles ที่สร้างจากระบบที่นำเสนอทั้ง 3 แบบจำลอง

จากการเปรียบเทียบเส้น Profiles ที่มาจากแบบจำลองตัวอย่าง 3 ตัวอย่างในรูปที่ 5.39 พบว่าเส้น Profiles แสดงระดับพื้นดินของแบบจำลองที่ 1 แบบจำลองที่ 2 และแบบจำลองที่ 3 ซ้อนทับสนิทเกือบทั้งเส้น แสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนของเส้น Profiles แสดงระดับพื้นที่มาจากระบบที่นำเสนอมีความคลาดเคลื่อนน้อยมาก ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบที่นำเสนอว่ามีความน่าเชื่อถือ และจากคุณสมบัตินี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์หากิจกรรมงานดินชุดและถมได้ที่ปรากฏในแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศจากการสำรวจด้วยระบบที่นำเสนอจากหลายช่วงเวลาการสำรวจ



รูปที่ 5.38 การเปรียบเทียบภาพเส้น Profiles ระหว่างการสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวมกับแบบจำลอง 1 แบบจำลอง 2 และ แบบจำลอง 3 ตามลำดับ



รูปที่ 5.39 การนำเส้น Profiles จากการสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวม มาเปรียบเทียบกับ เส้น Profiles ที่สร้างจากระบบที่นำเสนอทั้ง 3 แบบจำลอง

5.4.3 ข้อจำกัดในการทดสอบ

เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นเรื่องการนำเสนอแนวคิดระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนของงานดินซุดและถม โดยประยุกต์ใช้การสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเป็นหลัก จึงมีข้อจำกัดด้านการทดสอบปัจจัยต่างๆ ประกอบด้วย

1) ข้อจำกัดด้านอุปกรณ์ ประกอบด้วย

- อากาศยานไร้คนขับรุ่นที่ใช้ เป็นเพียงรุ่นเริ่มต้นที่มีอุปกรณ์ต่างๆ เหมาะสำหรับการใช้ถ่ายรูปลูกที่เหมาะสมสำหรับการประมวลผลด้วยภาพถ่ายทางอากาศ โดยที่อุปกรณ์รับสัญญาณดาวเทียม และอุปกรณ์วัดความสูง (Altimeter) ยังมีความคลาดเคลื่อนมาก ± 10 m.
- เนื่องจากช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับบินเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศอยู่ในช่วงเวลา 10.00 – 14.00 น. สำหรับประเทศไทยซึ่งตั้งอยู่ในเขตร้อนมีอุณหภูมิภายนอกสูง (37-40 องศาเซลเซียส) ทำให้อากาศยานไร้คนขับไร้คนขับไม่สามารถบินต่อเนื่องได้นานมากนัก(บินต่อเนื่องนานเกิน 40 นาที) เนื่องจากตัว

อากาศยานมีความร้อนสะสมภายในทำให้ระบบต่างๆ ของอากาศยานทำงานผิดปกติได้

- อุปกรณ์เรื่องกล้องและเลนส์ถ่ายภาพไม่ได้ผ่านการวัดสอบ (Pre-calibrated) ก่อนทำการทดลองและใช้เก็บข้อมูลภาคสนาม
- ความสั่นสะเทือนระหว่างการบินเก็บภาพถ่ายทางอากาศอาจเป็นสาเหตุให้ลดประสิทธิภาพการทำงานของกล้องถ่ายภาพ

2) ข้อจำกัดเรื่องเวลาและสภาพอากาศที่เหมาะสม

- ช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับทำการบินเพื่อเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศอยู่ในช่วงเวลา 10.00 – 14.00 ณ. เพื่อลดผลกระทบเรื่องแสงและเงาที่ปรากฏในภาพถ่าย
- สภาพอากาศที่ไม่เหมาะสมสำหรับการปล่อยอากาศยานไร้คนขับเพื่อเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ จากเมฆฝน ที่อาจเป็นอันตรายต่ออากาศยานไร้คนขับ เป็นต้น
- ปัจจัยเรื่องทิศทางและความเร็วลมที่มากกระทำต่ออากาศยานไร้คนขับขณะบินเก็บข้อมูลไม่ได้นำมาใช้วิเคราะห์ร่วมในงานวิจัยชิ้นนี้
- ในบางช่วงฤดูกาล อาจมีหมอก ฝุ่น และควันไฟต่างๆ มาดบังทัศนวิสัยในการมองเห็น ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพความคมชัดของภาพถ่ายทางอากาศ

3) ข้อจำกัดการทดสอบปัจจัยการตั้งค่าอากาศยานไร้คนขับในพื้นที่ทดสอบ

เนื่องจากข้อจำกัดต่างๆ ตามที่กล่าวในข้อ 1) และ 2) ประกอบกับข้อจำกัดด้านระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษา งานวิจัยนี้จึงไม่สามารถทำการทดสอบปัจจัยการตั้งค่าต่างๆ ของอากาศยานไร้คนขับได้อย่างครบถ้วน โดยเลือกทดสอบปัจจัยที่จำเป็นเพื่อให้สามารถนำเอาผลการทดสอบดังกล่าวไปใช้ในพื้นที่กรณีศึกษาได้อย่างถูกต้อง ประกอบด้วย ปัจจัยเรื่องทิศทางการบิน และระดับเพดานบินของอากาศยานไร้คนขับ และปัจจัยเพิ่มเติมเรื่องสภาพแสงสว่างและความเร็วชัดเตอร์กล้องถ่ายภาพที่พบระหว่างการเก็บข้อมูลในพื้นที่กรณีศึกษาเท่านั้น ซึ่งยังไม่ครอบคลุมปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความถูกต้องแม่นยำเชิงปริมาณของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศอย่างครบถ้วนทุกปัจจัย

5.5 สรุปผลการออกแบบและพัฒนาระบบ

ในบทนี้ได้แสดงถึงการออกแบบและขั้นตอนการพัฒนาระบบติดตามการทำงานเข้าช้อนงาน ดินชุดและถมที่ แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบทั้งในส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์ (Hardware) และส่วนซอฟต์แวร์ (Software) อธิบายกระบวนการและขั้นตอนการทำงานต่างๆ ของระบบที่นำเสนอ รวมถึงการทดสอบระบบที่นำเสนอในพื้นที่ทดสอบ (บันได) เพื่อศึกษาปัจจัยเรื่องทิศทางการบิน ที่ระดับเพดานบินสูง 50 เมตร และ 70 เมตร ตามลำดับ โดยใช้เกณฑ์ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลในการพิจารณา

การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณที่ระดับเพดานบินสูง 50 เมตร พบว่าปัจจัยเรื่องทิศทางการบินแบบ 2 ทิศทาง (ตามขวาง + ตามยาว) มีค่าความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณ +3.0% น้อยกว่าการเลือกใช้ปัจจัยการบินเพียงทิศทางเดียว แต่มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อน 2.3% มากกว่าปัจจัยทิศทางบินตามแนวยาว อยู่ที่ 0.1%

การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณที่ระดับเพดานบินสูง 70 เมตร พบว่าปัจจัยเรื่องทิศทางการบินแบบ 2 ทิศทาง (ตามขวาง + ตามยาว) มีค่าความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณ +2.3% มากกว่าปัจจัยทิศทางบินตามแนวยาว 0.9% แต่มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดที่ 1.7%

จากการทดลองครั้งนี้พบว่าปัจจัยการบินที่ระดับเพดานบินสูง 70 เมตรมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าปัจจัยการบินที่ระดับเพดานบินสูง 50 เมตร

การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณจากปัจจัย(เพิ่มเติม) เรื่องสภาพแสงสว่างและความเร็วชัตเตอร์กล้องถ่ายภาพ ทำให้ความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณของแบบจำลองมีค่ามากขึ้น จากการทดสอบปัจจัยเรื่องทิศทางการบินและความสูงเพดานบินของอากาศยานไร้คนขับ โดยมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย +3.9% มีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความคลาดเคลื่อน 3.1% (ค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง -0.3% ถึง +8.4%)

ผลการทดสอบปัจจัยทดสอบ ประกอบด้วย ปัจจัยทิศทางการบิน ปัจจัยความสูงเพดานบิน และปัจจัยเรื่องสภาพแสงสว่างและความเร็วชัตเตอร์กล้องถ่ายภาพ และปัจจัยควบคุมที่ใช้ทดสอบ พบว่าความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณของแบบจำลองอยู่ระหว่าง -0.3% ถึง +8.4% ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงดังกล่าว จัดอยู่ในการประมาณราคาอย่างละเอียด โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 10\%$ (พงษ์สยาม กันจันะ, 2556)

ทั้งนี้ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณของระบบติดตามการทำงานเข้าช้อนที่ได้จากทดลองในพื้นที่ทดสอบเป็นเพียงข้อมูลความคลาดเคลื่อนเบื้องต้นที่เกิดจากการเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ

ตามปัจจัยการทดสอบ ในสภาพอากาศและสภาพแวดล้อมของสถานที่ทดสอบเท่านั้นซึ่งอาจแตกต่างจากสภาพอากาศและสภาพแวดล้อมในพื้นที่การศึกษา ไม่สามารถเอาข้อมูลความคลาดเคลื่อนดังกล่าวไปใช้อ้างอิงในพื้นที่การศึกษาได้

การประเมินประสิทธิภาพของระบบด้วยการเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดินและภาพตัดขวางจากเส้น Profiles แสดงระดับพื้นที่ทดสอบที่มาจากการสำรวจด้วยวิธีการสำรวจทั่วไปด้วยกล้องประมวลผลรวม กับระบบที่นำเสนอ พบว่าเส้น Profiles แสดงระดับพื้นที่มาจากการสำรวจ มีความคลาดเคลื่อนเมื่อวิเคราะห์แบบรูปกราฟ ในขณะที่เส้น Profiles แสดงระดับพื้นที่ได้มาจากการสำรวจ 2 ช่วงเวลา 3 ครั้งการสำรวจ เพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากระบบที่นำเสนอ มีความคลาดเคลื่อนน้อยมากเมื่อวิเคราะห์ในแบบรูปกราฟ แสดงถึงระบบที่นำเสนอมีประสิทธิภาพเพียงพอสำหรับนำไปใช้เปรียบเทียบเพื่อหากิจกรรมงานที่เกิดขึ้นระหว่างช่วงเวลาการสำรวจหลายครั้ง



บทที่ 6

การใช้งานจริงระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินชุดและถม

ในบทนี้เป็นการใช้งานจริงระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินชุดและถมที่นำเสนอ ในพื้นที่กรณีศึกษาทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 6 สายบางปะอิน-สระบุรี-นครราชสีมา เพื่อแสดงให้เห็นว่าระบบที่นำเสนอสามารถใช้งานได้ในโครงการก่อสร้างจริงประกอบด้วย 1) การทดสอบระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินชุดและถมในพื้นที่กรณีศึกษา 2) การหาปริมาณงานซ้ำซ้อนของงานดินชุดและถม และ 3) สรุปผลการทดสอบและการใช้งานจริง

6.1 การเก็บข้อมูลภาคสนามและการสร้างแบบจำลองพื้นที่ก่อสร้างในกรณีศึกษา

จากการประเมินประสิทธิภาพของระบบด้วยการเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดินและภาพตัดขวางจากเส้น Profiles แสดงระดับพื้นที่ทดสอบที่มาจากการสำรวจด้วยวิธีการสำรวจทั่วไปด้วยกล้องประมวลผลรวม กับระบบที่นำเสนอ แสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากระบบที่นำเสนอจากการสำรวจภาคสนามหลายช่วงเวลามีความคลาดเคลื่อนน้อย ในหัวข้อนี้แสดงการเก็บข้อมูลภาคสนามและการสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขพื้นที่ก่อสร้างในกรณีศึกษา จากการเก็บข้อมูลภาคสนามหลายช่วงเวลาเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณการทำงานซ้ำซ้อนของกิจกรรมงานชุดดินและงานถมดินที่เกิดขึ้นระหว่างช่วงเวลาการสำรวจ 2 ครั้ง

6.1.1 รายละเอียดพื้นที่ก่อสร้างที่ใช้ในกรณีศึกษา

พื้นที่ก่อสร้างที่เป็นในกรณีศึกษาดังอยู่ในภูมิภาคที่เป็นเนินเขา งานก่อสร้างส่วนใหญ่ในช่วงบริเวณนี้เป็นการก่อสร้างถนนยกระดับ เพื่อควบคุมทางโค้งของถนน (ทางโค้งแนวราบและทางโค้งแนวตั้ง) เพื่อให้การสัญจรของพาหนะต่างๆ ทำได้อย่างสะดวกรวดเร็วและปลอดภัย แนวพื้นที่ก่อสร้างเป็นบริเวณพื้นที่ว่างตรงกลางของแนวถนนเดิม มีความกว้างสำหรับงานก่อสร้างอยู่ระหว่าง 20.0 เมตร ถึง 45.0 เมตร ระดับถนนทั้งสองฝั่งมีระดับความสูงผิวถนนไม่เท่ากัน บางช่วงอาจมีระดับต่างกันถึง 10 เมตร นอกจากนี้พื้นที่ว่างระหว่างถนนที่เป็นพื้นที่ก่อสร้างยังมีระดับพื้นดินสูง-ต่ำๆ ตลอดช่วงที่ทอดผ่านภูมิภาคเนินเขาดังกล่าวดังแสดงในรูปที่ 6.1 ด้วยเหตุนี้ผู้รับเหมาก่อสร้างจึงต้องทำการปรับสภาพพื้นดิน เพื่อให้เครื่องจักรขนาดใหญ่ทำงานได้ ทำทางขนส่งวัสดุ และพื้นที่สำหรับประกอบหรือกองเก็บชิ้นงานเป็นต้น รูปที่ 6.2 แสดงการปรับพื้นที่เพื่อให้เครื่องจักรขนาดใหญ่ทำงานได้ในกรณีศึกษา



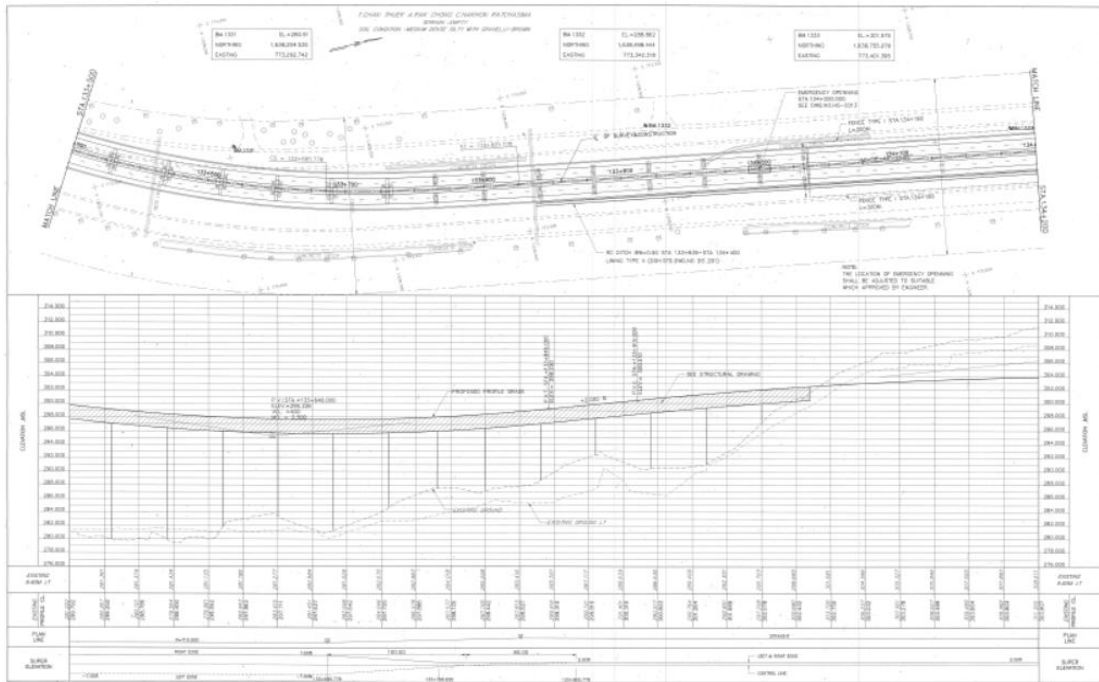
รูปที่ 6.1 สภาพภูมิประเทศพื้นที่ในกรณีศึกษา



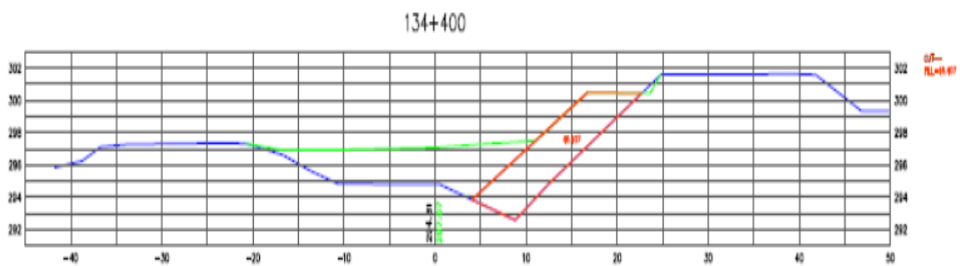
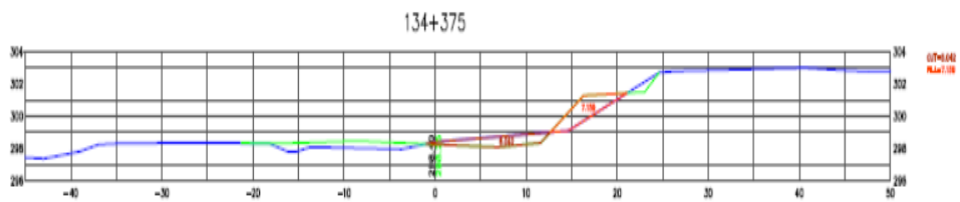
รูปที่ 6.2 การปรับพื้นที่เพื่อให้เครื่องจักรขนาดใหญ่ทำงานได้ในกรณีศึกษา

ในปัจจุบันแบบก่อสร้างที่มีใช้งานจริงในโครงการก่อสร้างเป็นภาพลายเส้นและสัญลักษณ์ แสดงรายละเอียดต่างๆ ที่มีความถูกต้องเชิงตำแหน่งของวัตถุต่างๆ ในระบบ 3 มิติ แสดงในแบบ 2 มิติ เช่น ตัวอย่างแบบแปลนพื้นที่ก่อสร้างและภาพตัดขวางแสดงระดับพื้นดินทุกๆ 25 เมตรดังแสดง ในรูปที่ 6.3 และ รูปที่ 6.4 ตามลำดับ ทั้งนี้แบบก่อสร้างดังกล่าวอาจเพียงพอสำหรับแสดงสภาพพื้นที่

ก่อสร้างที่ตั้งอยู่ในเขตพื้นราบ แต่ไม่เพียงพอสำหรับพื้นที่ก่อสร้างที่มีสภาพภูมิประเทศเป็นเนินเขา เช่น พื้นที่ในกรณีศึกษา



รูปที่ 6.3 ตัวอย่างแบบแปลนพื้นที่ก่อสร้างที่ใช้ในปัจจุบัน



รูปที่ 6.4 ตัวอย่างภาพตัดขวางแสดงสภาพพื้นที่ก่อสร้างที่ใช้ในปัจจุบัน

จากที่ข้อมูลข้างที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ทราบว่าข้อมูลและเอกสารที่ใช้ในงานก่อสร้างในปัจจุบันยังมีข้อจำกัดอยู่มาก ทำให้ผู้จัดการโครงการไม่มีข้อมูลที่เพียงพอสำหรับใช้วางแผนกระบวนการทำงานเพื่อให้การทำงานมีประสิทธิภาพสูงสุด และเป็นการทำงานโดยใช้ประสบการณ์ทำงานเป็นส่วนมากทำให้อาจมีการหลงลืม และเกิดการตัดสินใจผิดพลาดได้ง่าย เป็นสาเหตุให้เกิดการทำงานซ้ำซ้อนของงานดินชุดและถมในโครงการก่อสร้าง

นอกจากนี้การสำรวจเพื่อติดตามความก้าวหน้าของกิจกรรมงานดินชุดและถมในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานทำเพียงช่วงก่อนเริ่มงานและเมื่อต้องการเบิกงวดงานหรือผลงาน แต่ระหว่างกระบวนการก่อสร้างที่ต้องมีการปรับพื้นที่ไปมานั้นไม่นิยมเก็บข้อมูลเพื่อติดตามงานในลักษณะนี้ หากเป็นโครงการที่มีระยะเวลาก่อสร้างไม่นานนัก หรือมีการเบิกผลงานเป็นรายเดือน ผู้จัดการโครงการยังมีข้อมูลเพื่อติดตามการทำงานซ้ำซ้อนที่เกิดขึ้นได้บ้าง แต่ในโครงการที่มีระยะเวลาก่อสร้างนาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงการการก่อสร้างในกรณีศึกษาข้างจากระบบที่เหมาะสมสำหรับใช้ติดตามและวิเคราะห์การทำงานซ้ำซ้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการก่อสร้าง

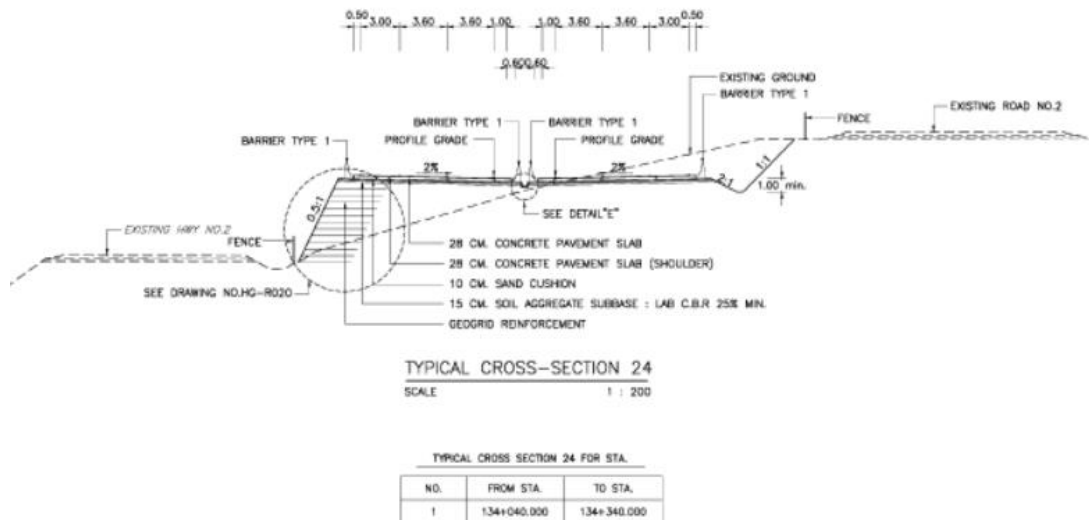
การประยุกต์ใช้แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณและระบุกิจกรรมงานชุดดินหรืองานถมดินในพื้นที่ก่อสร้าง ใช้พื้นที่กรณีศึกษาในโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 6 สายบางปะอิน-สระบุรี-นครราชสีมา ในบริเวณพื้นที่ก่อสร้างถนนส่วนที่วางบนดิน ดังแสดงในรูปที่ 6.5

ลักษณะของพื้นที่กรณีศึกษาตามแบบก่อสร้างเป็นพื้นที่มีระดับพื้นดินเดิมสูงที่สุดในโครงการก่อสร้างทางยกระดับ การก่อสร้างถนนบนพื้นบริเวณนี้มีทั้งงานชุดดินและถมดินเพื่อก่อสร้างถนนขนาด 3+3 (6) ช่องจราจรดังแสดงในรูปที่ 6.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 6.5 พื้นที่ก่อสร้างทางหลวงพิเศษระหว่างเมืองหมายเลข 6 สายบางปะอิน-สระบุรี-นครราชสีมา บริเวณพื้นที่ก่อสร้างถนนวางบนดิน



รูปที่ 6.6 แบบภาพตัดขวางของแบบก่อสร้างถนนวางบนดินในพื้นที่กรณีศึกษา

6.1.2 การสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากอากาศยานไร้คนขับในพื้นที่กรณีศึกษา

การเก็บข้อมูลภาคสนาม

การตั้งค่าปัจจัยการบินเป็นไปตามการทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อความถูกต้องแม่นยำเชิงปริมาณของแบบจำลอง ประกอบด้วย ปัจจัยทิศทางการบิน 2 ทิศทาง ปัจจัยความสูงเพดานบินของอากาศยานไร้คนขับที่ความสูง 70 เมตร จากระดับพื้นดินที่เป็นจุดปล่อยอากาศยาน ปัจจัยมุมเอียงกล้องถ่ายภาพที่ทำกับระนาบพื้นโลก 70° และปัจจัยระยะซ้อนภาพด้านหน้า 80% และด้านข้าง 60%

ปัจจัยจุดควบคุมภาคพื้นดินที่ใช้สำหรับการประมวลผลด้วยวิธี Indirect Georeferencing ใช้ตำแหน่งจุด BM ที่ใช้ในโครงการก่อสร้าง มีระยะห่างต่อจุดประมาณ 100 เมตร และมีตำแหน่งการวางตัวอยู่บริเวณขอบถนนฝั่งขวาออกไปทางโคราช เพื่อให้จุดควบคุมภาคพื้นดินที่ใช้นี้สามารถมองเห็นได้จากภาพถ่ายทางอากาศจึงต้องทาสีขาวชั่วคราวลงบนพื้นถนนดังแสดงในรูปที่ 6.7



รูปที่ 6.7 ตัวอย่างจุด BM ของโครงการก่อสร้างที่ทาสีขาวชั่วคราวในพื้นที่กรณีศึกษา

การเก็บข้อมูลภาคสนามเพื่อนำใช้วิเคราะห์หาการทำงานซ้ำซ้อนที่เกิดขึ้นในกรณีศึกษา จำนวนทั้งสิ้น 3 ครั้ง ประกอบด้วย ครั้งที่ 1 เมื่อวันที่ 17 กุมภาพันธ์ 2561 ครั้งที่ 2 เมื่อวันที่ 27 เมษายน 2561 และครั้งที่ 3 เมื่อวันที่ 9 ตุลาคม 2561 การตั้งค่าปัจจัยการบินของอากาศยานไร้คนขับสำหรับเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศเพื่อใช้วิเคราะห์หาปริมาณและระบุกิจกรรมงานขุดดินหรืองานถมดินในกรณีศึกษาแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 การตั้งค่าปัจจัยการบินในพื้นที่ก่อสร้างที่ใช้เป็นกรณีศึกษา

ปัจจัยการตั้งค่าอากาศยานไร้คนขับ	วันที่เก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ/การตั้งค่า		
	17 ก.พ. 61	27 เม.ย. 61	9 ต.ค. 61
เพดานบินของอากาศยานไร้คนขับ	70 ม.	70 ม.	70 ม.
ระยะซ้อนภาพด้านหน้า	80%	80%	80%
ระยะซ้อนภาพด้านข้าง	60%	60%	60%
มุมเอียงกล้องถ่ายภาพกับระนาบพื้นโลก	70°	70°	70°
จำนวนจุดควบคุมภาคพื้นดิน	6 จุด	7 จุด	4 จุด

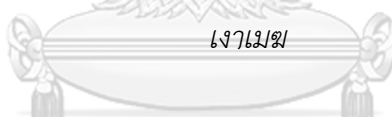
ปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการบินเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ

ช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับปล่อยอากาศยานไร้คนขับเพื่อเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศคือ ช่วงเวลา 10.00 – 14.00 น. เพื่อลดปัญหาเรื่องแสงเงาที่เกิดขึ้นในภาพถ่าย การใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อเก็บข้อมูลภาคสนามแต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 20-40 นาที พบว่าสภาพแสงสว่างมีส่วน

เบี่ยงเบนมาตรฐานเนื่องจากมีเงาเมฆรบกวนขณะเก็บข้อมูลภาพถ่ายอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ เพื่อแก้ปัญหาในลักษณะดังกล่าว ผู้วิจัยจึงทำการจดบันทึกสภาพแสงสว่างขณะทำการเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศครั้งที่ 2 เมื่อวันที่ 27 เมษายน 2561 ดังแสดงในตารางที่ 6.2 และรูปตัวอย่างแสดงสภาพแสงสว่างที่มีเมฆรบกวนดังตัวอย่างในรูปที่ 6.8 และข้อมูลสภาพแสงสว่างระหว่างการเก็บข้อมูลครั้งที่ 3 เมื่อวันที่ 9 ตุลาคม 2561 ดังแสดงในตารางที่ 6.3 เพื่อนำไปทดสอบปัจจัยสภาพแสงสว่างและความเร็วซีดเตอร์กล้องถ่ายภาพเพิ่มเติมในพื้นที่ทดสอบต่อไป



รูปที่ 6.8 ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศในพื้นที่กรณีศึกษาที่สภาพแสงสว่างมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจาก



ตารางที่ 6.2 สภาพแสงสว่างระหว่างการเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศในพื้นที่กรณีศึกษาครั้งที่ 2

ลำดับที่	เวลาบันทึกข้อมูล	สภาพความสว่าง (Lux)			ความสว่าง (Lux)	เตอร์ที่ใช้ถ่ายภาพ	พื้นที่จดบันทึกค่าความสว่าง
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
27 เม.ย. 61							
1	11:20:00	92,400	91,000	93,900	92,433	1/3,205	สวนท้าวสุรนารี
2	11:25:00	42,700	43,000	45,000	43,567	1/3,205	
3	11:30:00	38,400	38,500	38,300	38,400	1/3,205	
4	11:35:00	94,800	94,900	94,100	94,600	1/3,205	
5	11:40:00	98,600	98,300	97,300	98,067	1/3,205	
6	11:45:00	96,400	93,400	95,300	95,033	1/3,205	
7	11:50:00	92,900	92,300	92,600	92,600	1/3,205	
ค่าเฉลี่ยความสว่างตลอดการบันทึกข้อมูล					79,243		
ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน					24,912		

ตารางที่ 6.3 สภาพแสงสว่างระหว่างการเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศในพื้นที่กรณีศึกษาครั้งที่ 3

ลำดับที่	เวลาบันทึกข้อมูล	สภาพความสว่าง (Lux)			ความสว่าง (Lux)	เดอริที่ใช้ถ่ายภาพ	พื้นที่จุดบันทึกค่าความสว่าง
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3			
9 ต.ค. 61							
1	11:30:00	80,400	78,200	78,000	78,867	1/2,500	
2	11:35:00	37,800	33,300	27,700	32,933	1/2,500	
3	11:40:00	80,300	79,600	79,200	79,700	1/2,500	บริเวณ sta. 133+950
4	11:45:00	80,000	76,000	80,400	78,800	1/2,500	
5	11:50:00	76,900	76,400	78,300	77,200	1/2,500	
ค่าเฉลี่ยความสว่างตลอดการบินเก็บข้อมูล					69,500		
ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน					19,074		

ข้อจำกัดที่พบเพิ่มเติมระหว่างการเก็บข้อมูลภาคสนาม

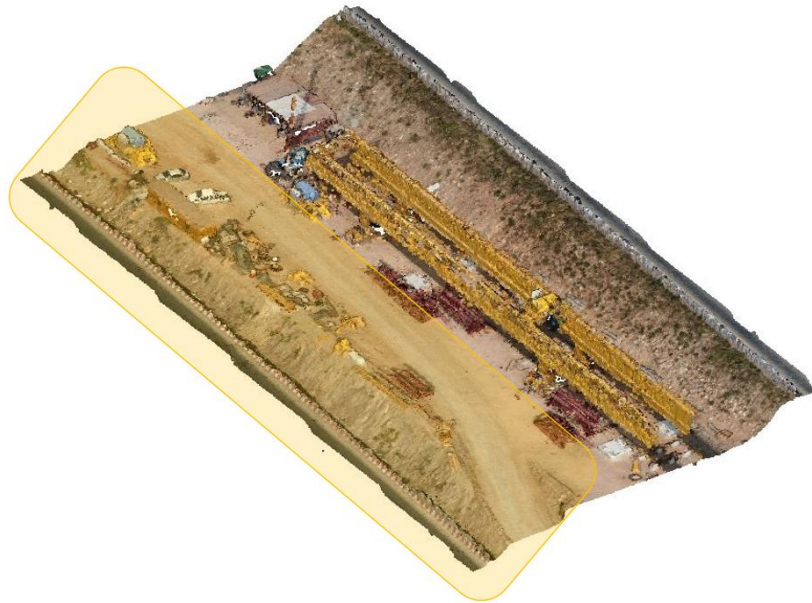
เนื่องจากต้นไม้สูงสองข้างทางถนน ทำให้มีปัญหาเรื่องเงาต้นไม้ที่มากจากต้นไม้ ครอบคลุมจุดที่ใช้เป็นหมุดควบคุมภาคพื้นดิน และการตั้งค่าปัจจัยมุมเอียงกล้องถ่ายภาพน้อยกว่า 70° จะทำให้พื้นที่ที่ต้องการสำรวจโดนบังโดยต้นไม้

การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ

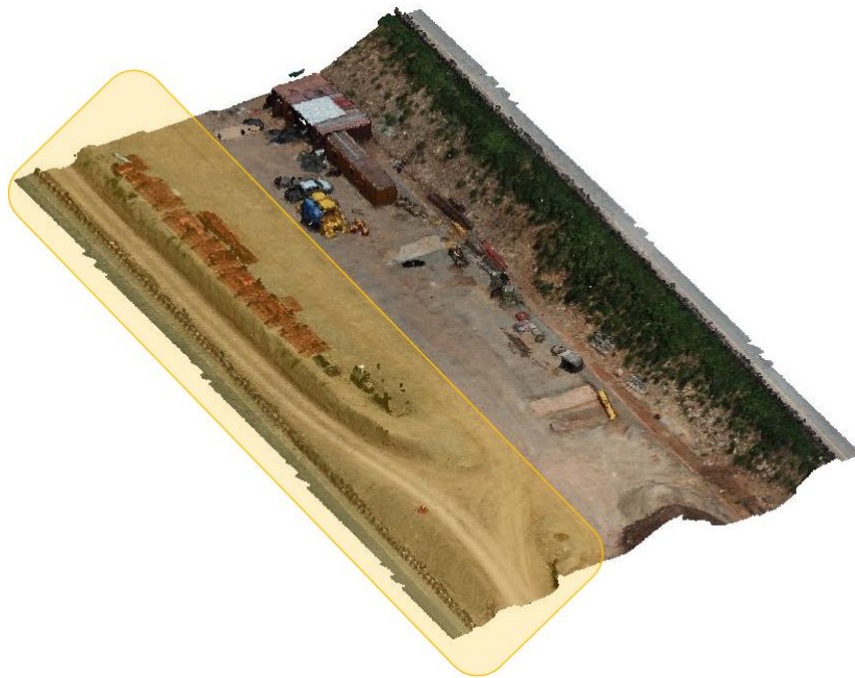
รายละเอียดข้อมูลที่ใช้สร้างและข้อมูลที่ได้รับจากการประมวลผลเพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากภาพถ่ายทางอากาศในพื้นที่ก่อสร้างที่ใช้เป็นกรณีศึกษาแสดงในตารางที่ 6.4 ส่วนหนึ่งของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากการสำรวจครั้งที่ 1 เมื่อวันที่ 17 กุมภาพันธ์ 2561 แสดงในรูปที่ 6.9 ส่วนหนึ่งของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากการสำรวจครั้งที่ 2 เมื่อวันที่ 27 เมษายน 2561 แสดงในรูปที่ 6.10 และ ส่วนหนึ่งของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากการสำรวจครั้งที่ 3 เมื่อวันที่ 9 ตุลาคม 2561 แสดงในรูปที่ 6.11 โดยพื้นที่สี่เหลี่ยมสีส้มที่ปรากฏในทั้ง 3 แบบจำลองเป็นพื้นที่สำหรับแสดงการหาปริมาณการทำงานเข้าซ้อนในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 6.4 รายละเอียดข้อมูลที่ใช้สร้างและได้รับจากแบบจำลองในพื้นที่ก่อสร้างที่ใช้ในกรณีศึกษา

รายการ	วันที่เก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ/ข้อมูลของแบบจำลอง		
	17 ก.พ. 61	27 เม.ย. 61	9 ต.ค. 61
จำนวนภาพถ่ายที่ใช้ประมวลผล	363 ภาพ	431 ภาพ	246 ภาพ
ระบบค่าพิกัดที่กำหนดในแบบจำลอง	WGS84 UTM zone 47N	WGS84 UTM zone 47N	WGS84 UTM zone 47N
จำนวนจุดยึดโยง (Tie Point)	354,839 จุด	380,693 จุด	197,337 จุด
จำนวนกลุ่มจุด 3 มิติ (dense cloud)	27,053,851	31,761,618 จุด	15,706,662 จุด
ค่าความละเอียดแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข	8.91 ซม./pix	8.00 ซม./pix	8.75 ซม./pix
พื้นที่สำรวจที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับ	191,000 ตร.ม.	182,000 ตร.ม.	103,000 ตร.ม.



รูปที่ 6.9 ส่วนหนึ่งของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากระบบที่นำเสนอจากการเก็บข้อมูล
ครั้งที่ 1



รูปที่ 6.10 ส่วนหนึ่งของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากระบบที่นำเสนอจากการเก็บข้อมูล
ครั้งที่ 2



รูปที่ 6.11 ส่วนหนึ่งของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากระบบที่นำเสนอจากการเก็บข้อมูลครั้งที่ 3

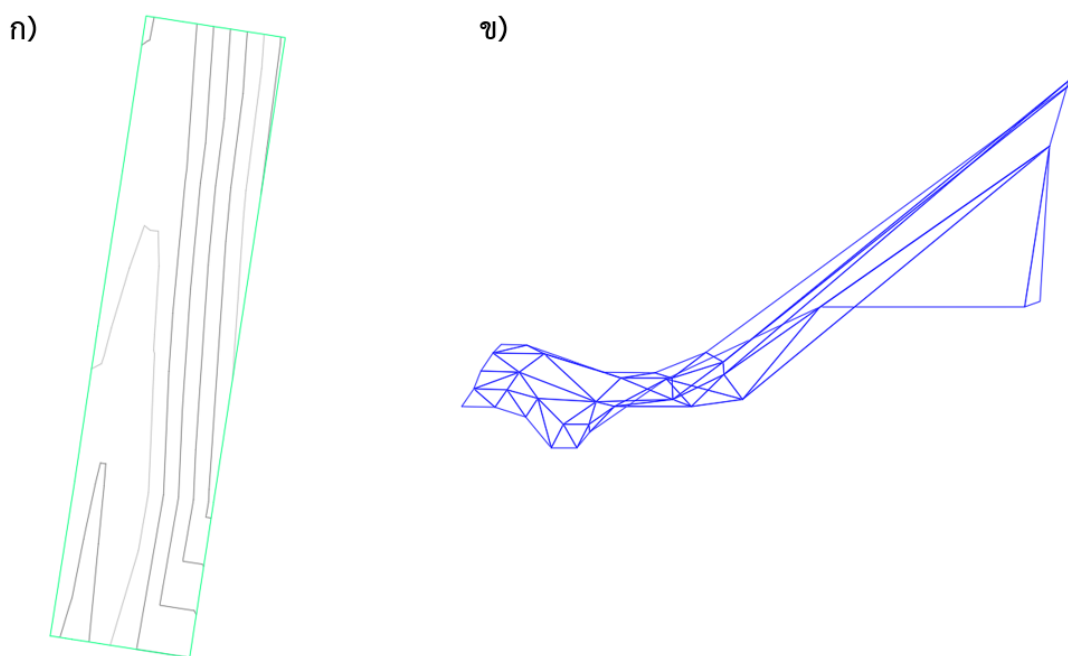
จากข้อมูลแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศที่สร้างได้ พบว่าในส่วนที่อยู่ในพื้นที่สีส้มมีระดับพื้นดินเปลี่ยนแปลงตลอดการเก็บข้อมูลภาคสนามทั้ง 3 ครั้ง จึงนำส่วนนี้ไปวิเคราะห์เพื่อตรวจสอบปริมาณของการทำงานซ้ำซ้อนที่เกิดขึ้นต่อไป

6.2 การวิเคราะห์ปริมาณงานซ้ำซ้อนของงานดินขุดและถม

วิธีการคิดความก้าวหน้าเพื่อเบิกผลงานของงานดินขุดและถมในโครงการก่อสร้างที่ใช้เป็นกรณีศึกษา มีวิธีการคิดโดยใช้ค่าระดับดินเดิมก่อนเริ่มงานก่อสร้างเปรียบเทียบกับค่าระดับดินตามแบบก่อสร้างเมื่องานแล้วเสร็จเพียงครั้งเดียว แต่ระหว่างกระบวนการก่อสร้างตั้งแต่เริ่มต้นโครงการก่อสร้างถึงช่วงเวลาตรวจรับและส่งมอบค่าระดับงานดินขุดและถม ผู้รับเหมาก่อสร้างปรับระดับดินภายในโครงการก่อสร้างเป็นระยะๆ ให้สอดคล้องกับกิจกรรมงานต่างๆ ที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลาของกระบวนการก่อสร้าง เนื่องจากสาเหตุต่างๆ ดังนั้นการหาปริมาณงานดินขุดและถมที่ผู้รับเหมาก่อสร้างทำงานจริงในโครงการก่อสร้างจึงมีความจำเป็น เพื่อสะท้อนค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจริงและเพื่อใช้เป็นฐานข้อมูลงานสำหรับการเสนอราคางานในลักษณะเดียวกันนี้ที่อาจมีในอนาคต

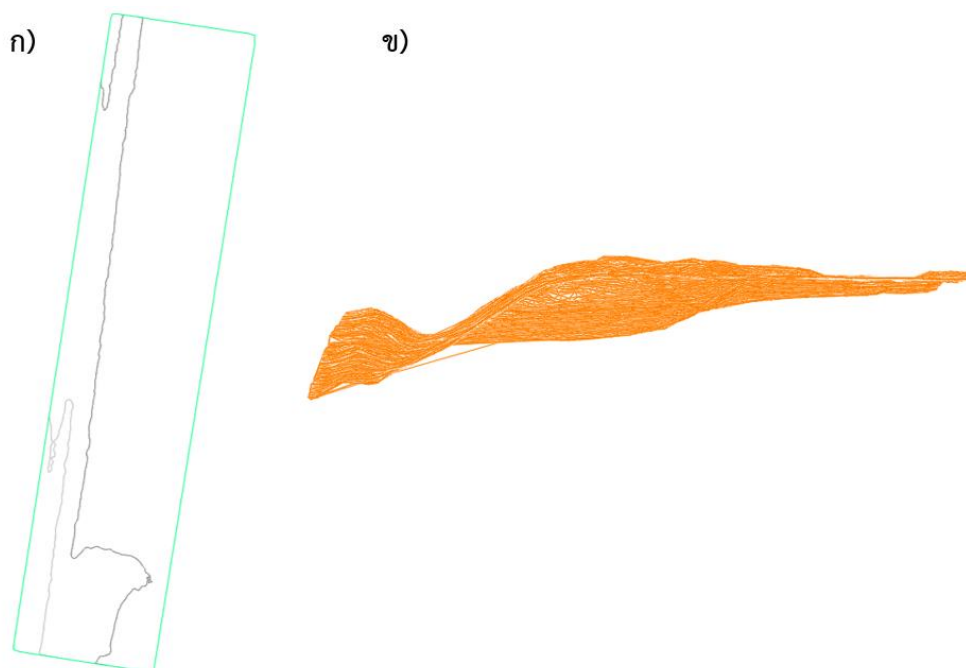
นอกจากนี้ยังสามารถนำไปวิเคราะห์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานขนย้ายดินระหว่างกระบวนการก่อสร้างให้เกิดขึ้นน้อยที่สุด

ในงานวิจัยนี้แสดงตัวอย่างการคิดปริมาณการทำงานเข้าซ้อนของงานดินชุดและถมบริเวณ Sta. 134+050 ถึง Sta. 134+150 มีระยะห่างแต่ละ Sta. 25 เมตร รวมทั้งหมด 5 Sta. คิดเป็นระยะทาง ยาว 100 เมตร และคิดเป็นพื้นที่ การทำงาน 1,885 ตร.ม. โดยใช้ข้อมูลจากการสำรวจ 5 ครั้ง เพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน และนำมาจับคู่เปรียบเทียบหาปริมาณการทำงานที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา ประกอบด้วย



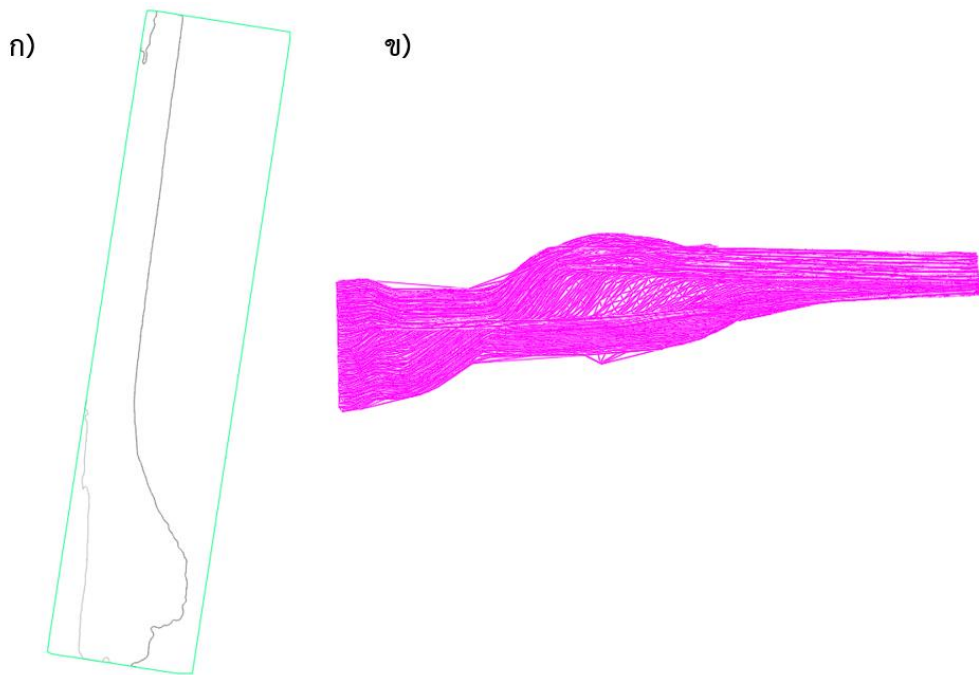
รูปที่ 6.12 แบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดินก่อนเริ่มการก่อสร้าง (ก) Plan View และ (ข) Front View

- 1) ช่วงก่อนเริ่มงานใช้ข้อมูลการสำรวจจากด้วยวิธีการทั่วไปเพื่อสร้างเส้น Profiles แสดงภาพตัดขวางทุกๆ 25 เมตร จากข้อมูลดังกล่าวสามารถสร้างแบบจำลองแสดงระดับพื้นดินเดิมก่อนเริ่มงานจากการสำรวจด้วยวิธีการทั่วไป รูปที่ 6.12 แสดงแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดินก่อนเริ่มการก่อสร้าง รูป (ก) แสดง Plan View และรูป (ข) แสดง Front View ของแบบจำลอง เส้นสีน้ำเงินแสดงพื้นผิวแบบแสดงระดับพื้นดินแบบ Mesh

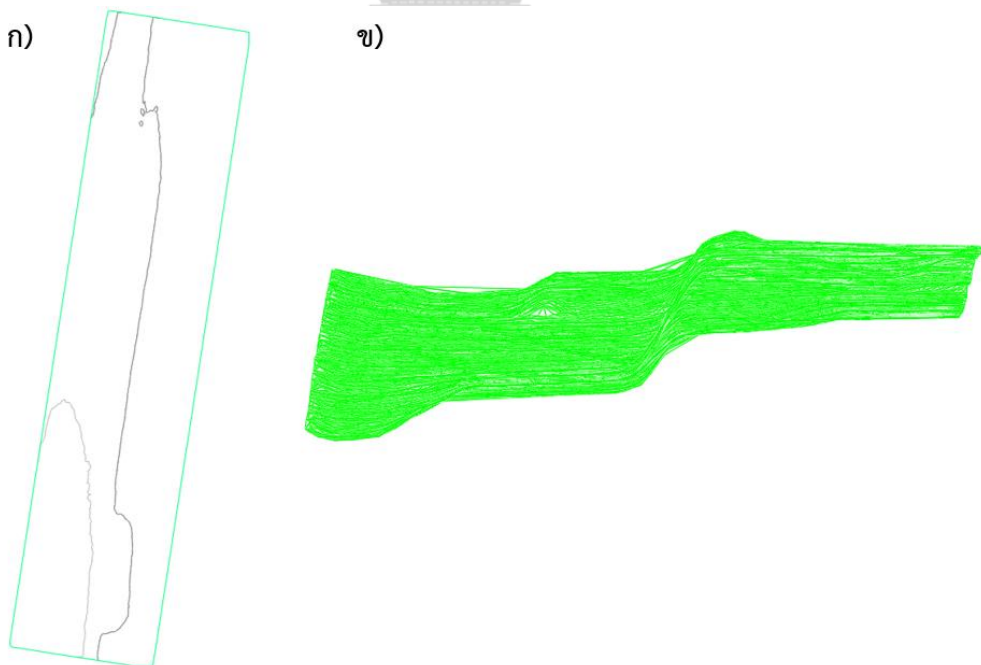


รูปที่ 6.13 แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขในกรณีศึกษาที่ได้จากระบบที่นำเสนอจากการสำรวจครั้งที่ 1 (ก) Plan View และ (ข) Front View

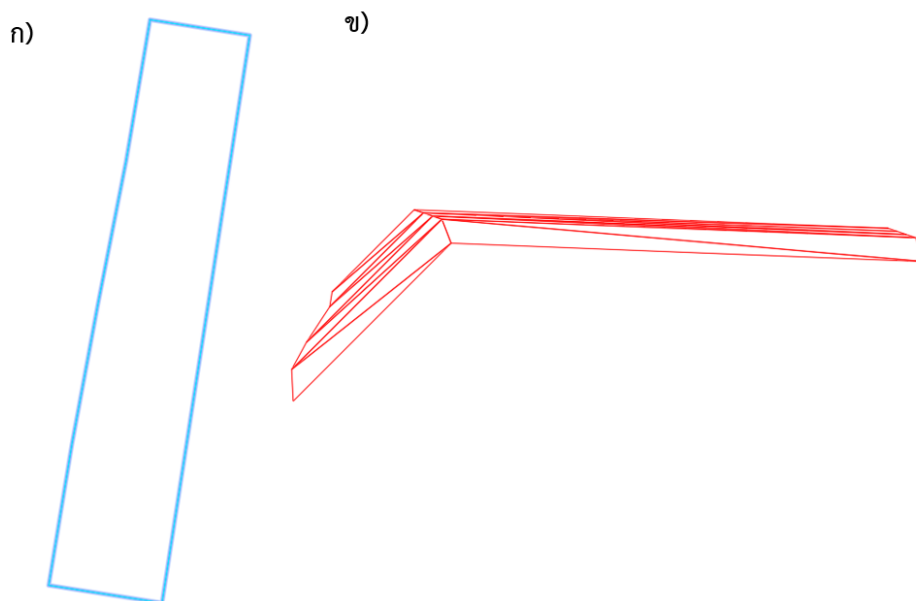
- 2) ช่วงวันที่ 17 กุมภาพันธ์ 2561 สามารถสร้างแบบจำลองแสดงระดับพื้นดิน แสดงระดับพื้นดิน จากกลุ่มจุด 3 มิติ ที่ได้จากแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากอากาศยานไร้คนขับ ดังแสดงในรูปที่ 6.13 รูป (ก) แสดง Plan View และรูป (ข) แสดง Front View ของแบบจำลอง เส้นสีส้มแสดงพื้นผิวแบบแสดงระดับพื้นดินแบบ Mesh ของแบบจำลองครั้งที่ 1
- 3) ช่วงวันที่ 27 เมษายน 2561 สามารถสร้างแบบจำลองแสดงระดับพื้นดิน แสดงระดับพื้นดิน จากกลุ่มจุด 3 มิติ ที่ได้จากแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากอากาศยานไร้คนขับ ดังแสดงในรูปที่ 6.14 (ก) แสดง Plan View และรูป (ข) แสดง Front View ของแบบจำลอง เส้นสีม่วงแสดงพื้นผิวแบบแสดงระดับพื้นดินแบบ Mesh ของแบบจำลองครั้งที่ 2



รูปที่ 6.14 แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขในกรณีศึกษาที่ได้จากระบบที่นำเสนอจากการสำรวจครั้งที่ 2 (ก) Plan View และ (ข) Front View



รูปที่ 6.15 แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขในกรณีศึกษาที่ได้จากระบบที่นำเสนอจากการสำรวจครั้งที่ 3 (ก) Plan View และ (ข) Front View



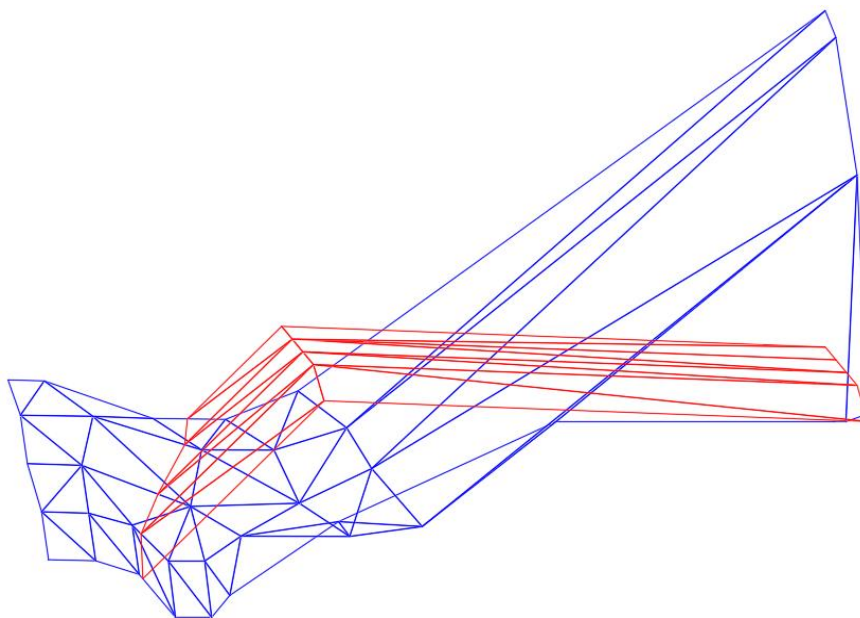
รูปที่ 6.16 แบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน จากการแปลงค่าระดับที่ปรากฏในแบบก่อสร้าง (ก) Plan View และ (ข) Front View

- 4) ช่วงวันที่ 9 ตุลาคม 2561 สามารถสร้างแบบจำลองแสดงระดับพื้นดิน แสดงระดับพื้นดิน จากกลุ่มจุด 3 มิติ ที่ได้จากแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากอากาศยานไร้คนขับ ดังแสดงในรูปที่ 6.15 (ก) แสดง Plan View และรูป (ข) แสดง Front View ของแบบจำลอง เส้นสีเขียวแสดงพื้นผิวแบบแสดงระดับพื้นดินแบบ Mesh ของแบบจำลองครั้งที่ 3
- 5) แบบค่าระดับพื้นดินสำหรับส่งมอบงานตามแบบก่อสร้าง สามารถสร้างได้จากการแปลงค่าระดับที่ปรากฏในแบบก่อสร้างเป็นค่าพิกัดจุดยอดที่มีการเปลี่ยนระดับพื้นดิน โดยใช้ระยะห่างตาม sta. ที่ได้จากการสำรวจก่อนเริ่มงานก่อสร้าง ทุกๆ ระยะ 25 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 6.16 (ก) แสดง Plan View และรูป (ข) แสดง Front View ของแบบจำลอง เส้นสีแดงแสดงพื้นผิวแบบแสดงระดับพื้นดินแบบ Mesh ของแบบจำลองครั้งที่ 3

วิธีการที่ใช้คำนวณหาปริมาณระหว่างช่วงเวลาการสำรวจ 2 ครั้ง ใช้วิธีการเปรียบเทียบพื้นผิวแบบจำลองตามหัวข้อ 5.3.4 ส่วนการคำนวณหาปริมาณการทำงานซ้ำซ้อน สามารถหาได้จากสมการสำหรับ หาปริมาณงานซ้ำซ้อน ในหัวข้อ 4.3.4

ตัวอย่างการหาปริมาณงานซ้ำซ้อนที่เกิดในช่วงเวลาการสำรวจครั้งที่ 1 ระหว่างก่อนเริ่มงานถึงวันที่เก็บข้อมูลภาคสนามครั้งที่ 1 วันที่ 17 กุมภาพันธ์ 2561 เริ่มจากการเปรียบเทียบแบบจำลอง

พื้นผิวค่าระดับพื้นดินก่อนเริ่มงาน กับ แบบจำลองพื้นผิวค่าระดับดินตามแบบก่อสร้างเพื่อหาปริมาณงานดินขุดและถมที่ต้องทำตามแบบก่อสร้างของช่วงเวลาที่ 1 (WP_1) แบ่งเป็นงานขุดดิน 3,378.07 ลบ.ม. และงานถมดิน 2,186.65 ลบ.ม. ดังแสดงในรูปที่ 6.17



รูปที่ 6.17 การเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ระหว่างก่อนเริ่มงานก่อสร้าง (สีน้ำเงิน) และตามแบบก่อสร้าง (สีแดง)

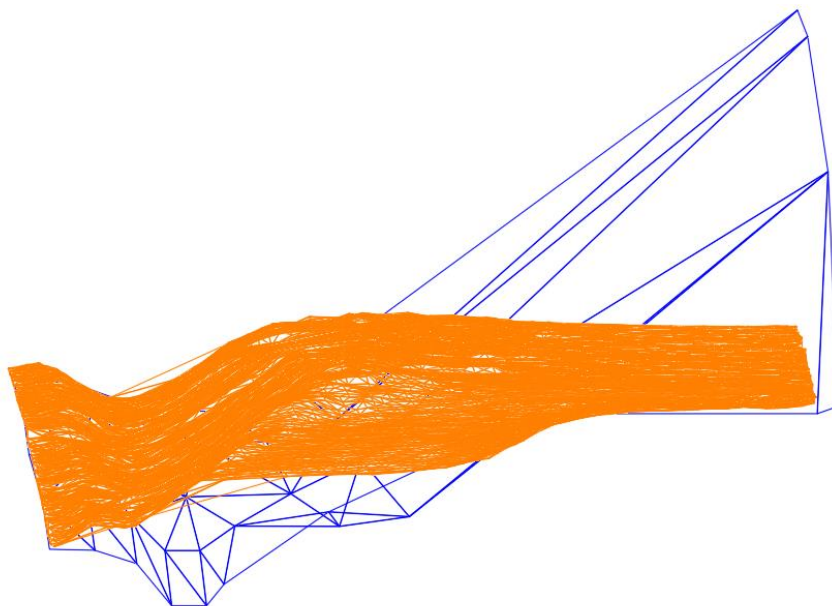
ถัดมาเป็นการเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวค่าระดับพื้นดินก่อนเริ่มงาน กับ แบบจำลองพื้นผิวค่าระดับดินที่ได้จากระบบที่นำเสนอครั้งที่ 1 เมื่อวันที่ 17 กุมภาพันธ์ 2561 เพื่อหาปริมาณงานดินขุดและถมที่แท้จริงระหว่างช่วงเวลาที่ 1 (AW_1) แบ่งเป็นงานขุดดิน 3,196.98 ลบ.ม. และงานถมดิน 2,218.80 ลบ.ม. ดังแสดงในรูปที่ 6.18

สุดท้ายเป็นการแบบจำลองพื้นผิวค่าระดับดินที่ได้จากระบบที่นำเสนอครั้งที่ 1 เมื่อวันที่ 17 กุมภาพันธ์ 2561 กับแบบจำลองพื้นผิวค่าระดับดินตามแบบก่อสร้าง เพื่อหาปริมาณงานดินขุดและถมที่เหลืออยู่ให้แล้วเสร็จตามแบบก่อสร้างของช่วงเวลาที่ 1 (WR_1) แบ่งเป็นงานขุดดิน 253.21 ลบ.ม. และงานถมดิน 394.26 ลบ.ม. ดังแสดงในรูปที่ 6.18 ทั้งนี้เมื่อจบช่วงเวลาที่ 1 แล้วและเริ่มการทำงานช่วงเวลาที่ 2 งานดินขุดและถมที่เหลืออยู่ของช่วงเวลาที่ 1 (WR_1) จะเปลี่ยนเป็นงานที่ต้องทำตามแบบก่อสร้างของช่วงเวลาที่ 2 (WP_2) แทน

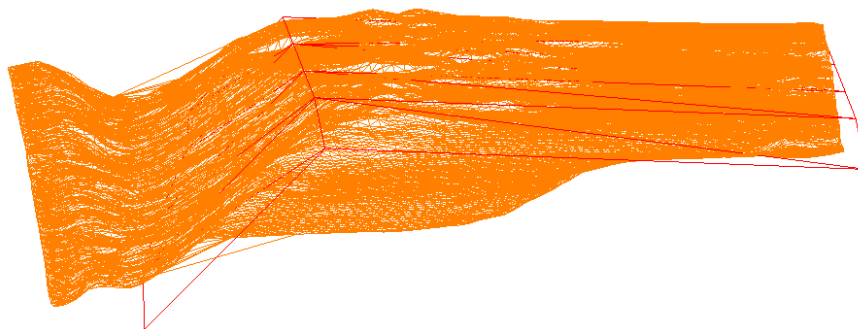
จากสมการหาปริมาณงานซ้ำซ้อนในหัวข้อ 4.3.4 ปริมาณงานดินขุดและถมที่ทำซ้ำซ้อนตั้งแต่ออกก่อนเริ่มงานถึงวันที่ 17 กุมภาพันธ์ 2561

$$\text{คิดเป็นงานขุดดิน} = (253.21 + 3,196.98) - 3,378.07 = 72.12 \text{ ลบ.ม.}$$

คิดเป็นงานถมดิน = $(394.26 + 2,218.80) - 2,186.65 = 426.41$ ลบ.ม.



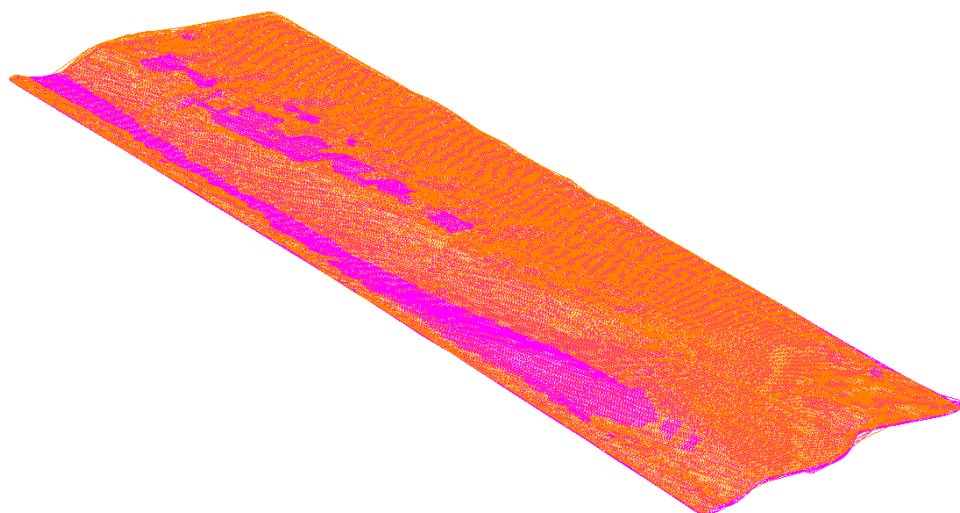
รูปที่ 6.18 การเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ระหว่างก่อนเริ่มงานก่อสร้าง (สีน้ำเงิน) และจากการสำรวจครั้งที่ 1 (สีส้ม)



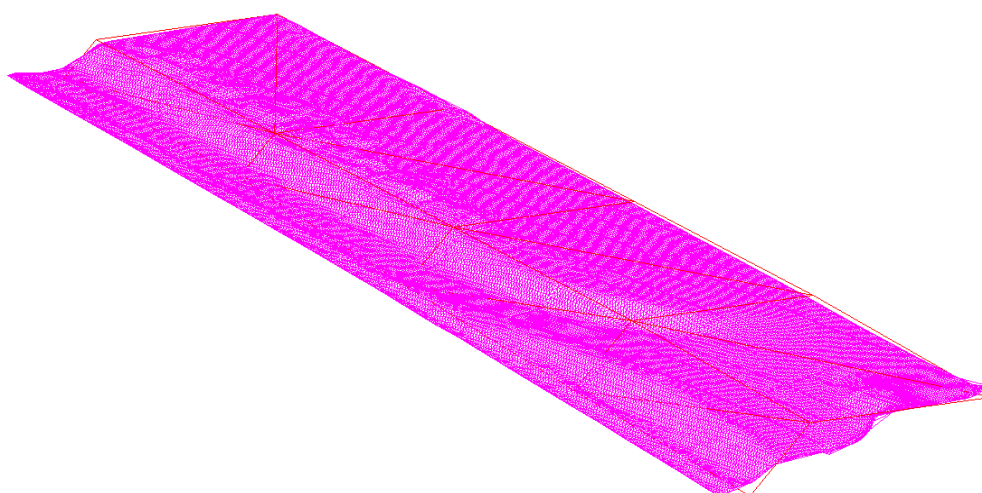
รูปที่ 6.19 การเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ระหว่างการสำรวจ ครั้งที่ 1 (สีส้ม) และตามแบบก่อสร้าง (สีแดง)

ปริมาณงานซ้ำซ้อนของช่วงเวลาที่ 2 ระหว่าง การเก็บข้อมูลภาคสนามครั้งที่ 1 วันที่ 17 กุมภาพันธ์ 2561 และการเก็บข้อมูลภาคสนามครั้งที่ 2 วันที่ 27 เมษายน 2561 เริ่มจากการเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดินเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณงานดินขุดและถมที่แท้จริงระหว่างช่วงเวลา 2 (AW₂) แบ่งเป็นงานขุดดิน 658.12 ลบ.ม. และงานถมดิน 86.96 ลบ.ม. ดังแสดงในรูปที่ 6.20 และการเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดินเพื่อ วิเคราะห์ปริมาณงานดิน

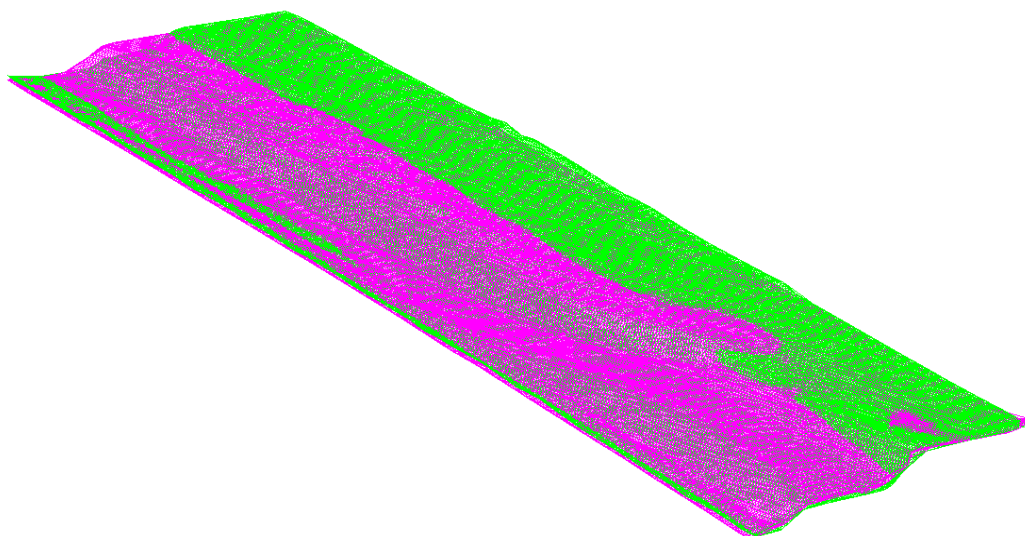
จุดและถมที่เหลืออยู่ให้แล้วเสร็จตามแบบก่อสร้างของช่วงเวลาที่ 2 (WR_2) แบ่งเป็นงานขุดดิน 121.12 ลบ.ม. และงานถมดิน 852.0 ลบ.ม. ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 6.21 ทั้งนี้เมื่อจบช่วงเวลาที่ 2 แล้วและเริ่มการทำงานช่วงเวลาที่ 3 งานดินขุดและถมที่เหลืออยู่ของช่วงเวลาที่ 2 (WR_2) จะเปลี่ยนเป็นงานที่ต้องทำตามแบบก่อสร้างของช่วงเวลาที่ 3 (WP_3) แทน ปริมาณงานซ้ำซ้อนของช่วงเวลาที่ 2 แสดงในตารางที่ 6.5



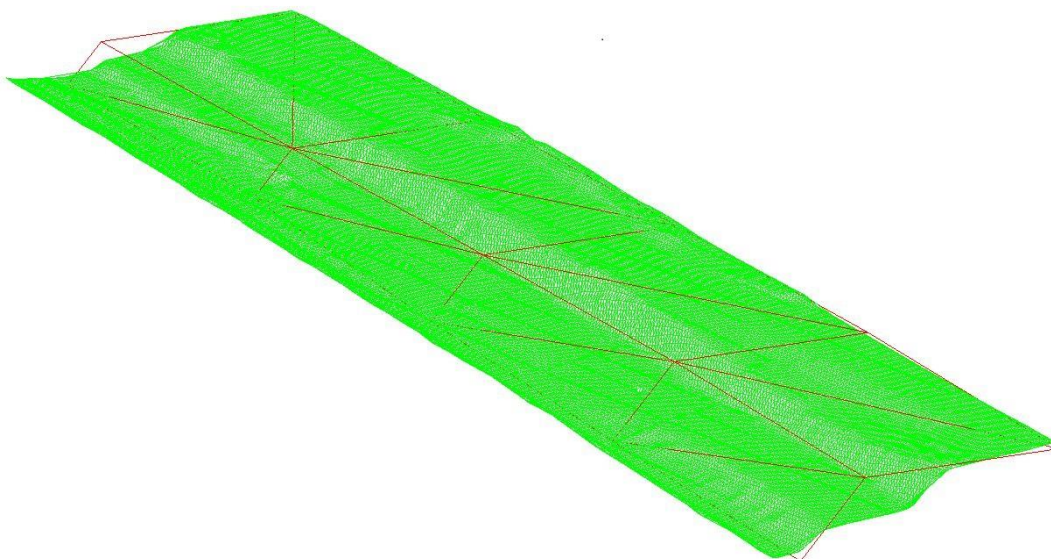
รูปที่ 6.20 การเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ระหว่างการสำรวจครั้งที่ 1 (สีน้ำส้ม) และการสำรวจครั้งที่ 2 (สีม่วง)



รูปที่ 6.21 การเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ระหว่างการสำรวจครั้งที่ 2 (สีม่วง) และตามแบบก่อสร้าง (สีแดง)



รูปที่ 6.22 การเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ระหว่างการสำรวจครั้งที่ 2 (สีม่วง) และการสำรวจครั้งที่ 3 (สีเขียว)



รูปที่ 6.23 การเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน ระหว่างการสำรวจครั้งที่ 3 (สีเขียว) และตามแบบก่อสร้าง (สีแดง)

และปริมาณงานขุดของช่วงเวลาที่ 3 ระหว่างการเก็บข้อมูลภาคสนามครั้งที่ 2 วันที่ 27 เมษายน 2561 และการเก็บข้อมูลภาคสนามครั้งที่ 3 วันที่ 9 ตุลาคม 2561 เริ่มจากการเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดินเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณงานดินขุดและถมที่แท้จริงระหว่างช่วงเวลาที่ 3 (AW_3) แบ่งเป็นงานขุดดิน 1,213.74 ลบ.ม. และงานถมดิน 200.75 ลบ.ม. ดังแสดงในรูป

ที่ 6.22 และการเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดินเพื่อ วิเคราะห์ปริมาณงานดินขุดและถมที่เหลืออยู่ให้แล้วเสร็จตามแบบก่อสร้างของช่วงเวลาที่ 3 (WR_3) แบ่งเป็นงานขุดดิน 83.73 ลบ.ม. และงานถมดิน 1,782.73 ลบ.ม. ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 6.23 ปริมาณงานเข้าซ้อนของช่วงเวลาที่ 3 แสดงในตารางที่ 6.5

ตารางที่ 6.5 การเปรียบเทียบพื้นผิวดระดับพื้นดินตามลำดับช่วงเวลาก่อสร้าง 3 ช่วงเวลา 5 ชุดข้อมูล การสำรวจจากระบบที่นำเสนอ

รายการงานขุดดิน	วันที่เก็บข้อมูล					ปริมาณงานที่ทำซ้ำซ้อน
	ก่อนเริ่มการก่อสร้าง	17 ก.พ. 61	27 เม.ย. 61	9 ต.ค. 61	ค่าระดับส่งงาน	
START TO COMPLETE WP1	งานขุดดิน (ลบ.ม) = 3,378.07					
	งานถมดิน (ลบ.ม) = 2,186.65					
Survey 1 to Survey 2 AW1	งานขุดดิน (ลบ.ม) = 3,196.98					ขุดดินเกิน 72.12 (ลบ.ม.)
	งานถมดิน (ลบ.ม) = 2,218.80					ถมดินเกิน 426.41 (ลบ.ม.)
Survey 2 to COMPLETE WF1/WP2					งานขุดดิน (ลบ.ม) = 253.21	
					งานถมดิน (ลบ.ม.) = 394.26	
Survey 2 to Survey 3 AW2					งานขุดดิน (ลบ.ม) = 658.12	ขุดดินเกิน 526.03 (ลบ.ม.)
					งานถมดิน (ลบ.ม) = 86.96	ถมดินเกิน 544.70 (ลบ.ม.)
Survey 3 to COMPLETE WF2/WP3					งานขุดดิน (ลบ.ม) = 121.12	
					งานถมดิน (ลบ.ม.) = 852.00	
Survey 3 to Survey 4 AW3					งานขุดดิน (ลบ.ม) = 1,213.74	ขุดดินเกิน 1175.35 (ลบ.ม.)
					งานถมดิน (ลบ.ม) = 200.75	ถมดินเกิน 1,131.48 (ลบ.ม.)
Survey 4 to COMPLETE WF3/WP4					งานขุดดิน (ลบ.ม) = 83.73	
					งานถมดิน (ลบ.ม) = 1,782.73	
					ปริมาณงานซ้ำซ้อนทั้งหมด	ขุดดินเกิน 1,773.50 (ลบ.ม.)
						ถมดินเกิน 2,102.59 (ลบ.ม.)

ตารางที่ 6.5 แสดงรายการเปรียบเทียบพื้นผิวดระดับพื้นดินเพื่อหาปริมาณงานดินขุดและถมตามลำดับช่วงเวลาก่อสร้างทั้งหมด 3 ช่วงเวลา 5 ชุดข้อมูลการสำรวจจากระบบที่นำเสนอ รายการงานที่ต้องทำตามแบบก่อสร้าง(WP_i) รายการงานที่ทำได้จริง (AW_i) และรายการงานที่เหลืออยู่ (WR_i) ระหว่างช่วงเวลาต่างๆ ถูกลนำมาแสดงในลักษณะ Gantt Chart ตามลำดับช่วงเวลาการทำงานเพื่อความเข้าใจได้ง่าย

ปริมาณงานซ้ำซ้อนของงานขุดดินและงานถมดินที่ตรวจพบจากระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนที่นำเสนอเป็นเพียงปริมาณงานซ้ำซ้อนที่ตรวจพบ ณ.วันที่สำรวจเท่านั้น ไม่ได้แสดงถึงงานซ้ำซ้อนที่เกิดขึ้นจริงทั้งหมดที่อยู่ในช่วงเวลาการวัดนั้นๆ เนื่องจากช่วงเวลาระหว่างการสำรวจเพื่อเก็บข้อมูลในพื้นที่กรณีศึกษาห่างกันมาก หากผู้สนใจนำไปใช้งานควรต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมของช่วงเวลาที่ใช้สำหรับเก็บข้อมูลการสำรวจตามความละเอียดที่ต้องการนำไปใช้งาน

นอกจากนี้ปริมาณงานซ้ำซ้อนที่ได้จากระบบที่นำเสนอ ยังเป็นเพียงการระบุการทำงานซ้ำซ้อนตามแบบก่อสร้างเท่านั้น ไม่รวมถึงการปรับสภาพพื้นที่เพื่อให้กิจกรรมงานอื่นๆ ดำเนินการได้หรืองานดินขุดและถมที่อยู่ในหมวดงานชั่วคราวต่างๆ เนื่องจากขาดแบบและแผนการทำงานดินขุดและถมของงานชั่วคราว เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ร่วมกับการทำงานตามแบบก่อสร้าง ทั้งนี้หากมีการนำแบบและแผนการทำงานชั่วคราวของงานดินขุดและถมมาร่วมในการวิเคราะห์การทำงานซ้ำซ้อนด้วย จะทำให้สามารถแยกรายละเอียดของปริมาณงานชั่วคราวที่ทำจริงออกจากปริมาณงานซ้ำซ้อนได้

ตารางที่ 6.6 ตัวอย่างการนำปริมาณงานที่คำนวณได้จากระบบที่นำเสนอไปคิดเป็นค่าใช้จ่ายของการทำงานซ้ำซ้อนงานขุดดินและงานถมดิน

ลำดับที่	รายการงาน	ปริมาณงาน (ลบ. ม.)	ต้นทุนงาน (บาท)	คิดเป็นต้นทุนงาน (บาท)
	ช่วงเริ่มต้นงานถึงวันที่ 17 กุมภาพันธ์ 2561			
1	งานขุดดิน	72.12	100.00	7,212.00
2	งานถมดิน	426.41	120.00	51,169.20
	ช่วง 17 กุมภาพันธ์ 2561 ถึงวันที่ 27 เมษายน 2561			
3	งานขุดดิน	526.03	100.00	52,603.00
4	งานถมดิน	544.7	120.00	65,364.00
	ช่วง 27 เมษายน 2561 ถึงวันที่ 9 ตุลาคม 2561			
5	งานขุดดิน	1,175.35	100.00	117,535.00
6	งานถมดิน	1,131.48	120.00	135,777.60
	รวมงานขุดดินสะสมถึง 9 ตุลาคม 2561	1,773.50		177,350.00
	รวมงานถมดินสะสมถึง 9 ตุลาคม 2562	2,102.59		252,310.80
			TOTAL REWORK COST	429,660.80

ปริมาณงานซ้ำซ้อนของงานดินขุดและถมที่ตรวจพบจากระบบที่นำเสนอในกรณีศึกษา จากการสำรวจเพื่อเก็บข้อมูล 3 ครั้งตามที่ได้แสดงในตารางที่ 6.5 สามารถนำมาแสดงตัวอย่างการคิดเป็นค่าใช้จ่ายของการทำงานซ้ำซ้อนได้ หากผู้รับเหมาก่อสร้างมีการเก็บรวบรวมข้อมูลค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานในอดีตเพื่อนำมาคิดเป็นค่าใช้จ่ายต่อหน่วยของงานขุดดินและงานถมดิน ด้วยข้อมูลค่าใช้จ่ายต่อหน่วยเหล่านี้คุณกับปริมาณงานที่วิเคราะห์ได้จากระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนของงานดินขุดและถม ตัวอย่างเช่น หากผู้รับเหมาก่อสร้างมีค่าใช้จ่ายงานขุดดิน 100 บาท/ลบ.ม. และมีค่าใช้จ่ายงานถมดิน 120 บาท/ลบ.ม. เมื่อนำมาคำนวณค่าใช้จ่ายของการทำงานซ้ำซ้อนของงานดินขุดและถมเฉพาะในส่วนของงานที่ต้องทำตามแบบก่อสร้าง (ไม่รวมถึงการทำงานชั่วคราวต่างๆ ที่อยู่ในหมวดงานเตรียมการ) ที่ตรวจพบบริเวณ Sta. 134+050 ถึง Sta. 134+150 พื้นที่การสำรวจ

1,885 ตร.ม. แสดงในตารางที่ 6.6 คิดเป็นค่าใช้จ่ายของการทำงานซ้ำซ้อนที่ตรวจพบจากระบบที่นำเสนอตั้งแต่เริ่มต้นงานก่อสร้างสะสมถึงวันที่ 9 ตุลาคม 2561 เป็นการทำงานซ้ำซ้อนงานขุดดินจำนวน 177,350 บาทและการทำงานซ้ำซ้อนของงานถมดินเป็นจำนวน 252,310 บาท เป็นต้น

6.3 สรุปผลการใช้งานจริง

ผลการใช้งานจริงระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินขุดและถมในโครงการก่อสร้างที่ใช้เป็นกรณีศึกษา ระบบที่นำเสนอสามารถนำไปใช้ในโครงการก่อสร้างจริง เพื่อทดแทนการสำรวจด้วยวิธีการทั่วไปที่ใช้แรงงานคนเป็นหลัก ใช้เวลาในการเก็บข้อมูลมากแต่รายละเอียดข้อมูลที่ได้จากการสำรวจน้อย ไม่สามารถแสดงสภาพภูมิประเทศที่มีความสลับซับซ้อนจริงได้

วิธีการคำนวณปริมาณงานขุดดินและงานถมดินเพื่อนำไปคำนวณเป็นค่าใช้จ่ายงานดินขุดและถม ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน แทนวิธีเฉลี่ยหน้าตัดทั้งหมด เนื่องจากแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขมีความหนาแน่นและการกระจายตัวของกลุ่มจุดสำรวจมากกว่าวิธีการสำรวจทั่วไปอย่างมาก จึงเป็นการไม่สมควรหากยังใช้วิธีการคิดเพื่อหาปริมาณด้วยวิธีเฉลี่ยหน้าตัดทั้งหมด

ปริมาณงานซ้ำซ้อนของระบบที่นำเสนอ สามารถวิเคราะห์ด้วยการสร้างและนำแบบจำลองแสดงระดับพื้นดินมาเปรียบเทียบตามลำดับช่วงเวลาทีละคู่ เพื่อระบุกิจกรรมงานดินขุดและถม การวิเคราะห์การทำงานซ้ำซ้อนระหว่างกระบวนการก่อสร้างสามารถวิเคราะห์กิจกรรมงานขุดดินและงานถมดินที่เกิดขึ้นจริงด้วยวิธีการเปรียบเทียบแบบจำลองแสดงระดับพื้นดิน ตามลำดับช่วงเวลาการสำรวจ ทำการเปรียบเทียบเพื่อระบุกิจกรรมงานขุดดินและงานถมดินตามลำดับช่วงเวลาทีละคู่ เพื่อหาปริมาณงานของที่ทำจริง งานที่เหลืออยู่ และงานที่ต้องทำตามแบบก่อสร้าง ของแต่ละกิจกรรม ปริมาณงานซ้ำซ้อนสามารถวิเคราะห์ได้จาก ผลรวมระหว่างงานที่ทำจริงกับงานที่เหลืออยู่ลบด้วยงานที่ต้องทำตามแผนงาน

ปริมาณงานซ้ำซ้อนของงานขุดดินและงานถมดินที่ตรวจพบจากระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนที่นำเสนอเป็นเพียงปริมาณงานซ้ำซ้อนที่ตรวจพบ ณ.วันที่สำรวจเท่านั้น ไม่ได้แสดงถึงงานซ้ำซ้อนที่เกิดขึ้นจริงทั้งหมดที่อยู่ในช่วงเวลาการวัดนั้นๆ เนื่องจากช่วงเวลาระหว่างการสำรวจเพื่อเก็บข้อมูลในพื้นที่กรณีศึกษาห่างกันมาก หากผู้สนใจนำไปใช้งานควรต้องพิจารณาถึงความเหมาะสมของช่วงเวลาที่ใช้สำหรับเก็บข้อมูลการสำรวจตามความละเอียดที่ต้องการนำไปใช้งาน

นอกจากนี้ปริมาณงานซ้ำซ้อนที่ได้จากระบบที่นำเสนอ ยังเป็นเพียงการระบุการทำงานซ้ำซ้อนตามแบบก่อสร้างเท่านั้น ไม่รวมถึงการปรับสภาพพื้นที่เพื่อให้กิจกรรมงานอื่นๆ ดำเนินการได้หรืองานดินขุดและถมที่อยู่ในหมวดงานชั่วคราวต่างๆ เนื่องจากขาดแบบและแผนการทำงานดินขุดและถมของงานชั่วคราว เพื่อนำมาใช้วิเคราะห์ร่วมกับการทำงานตามแบบก่อสร้าง ทั้งนี้หากมีการนำ

แบบและแผนการทำงานชั่วคราวของงานดินชุดและถมมาร่วมในการวิเคราะห์การทำงานซ้ำซ้อนด้วย จะทำให้สามารถแยกรายละเอียดของปริมาณงานชั่วคราวที่ทำจริงออกจากปริมาณงานซ้ำซ้อนได้



บทที่ 7

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลงานวิจัย

การก่อสร้างงานโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ อาจมีช่วงที่ต้องก่อสร้างผ่านบริเวณเนินเขา ซึ่งสภาพภูมิประเทศมีความสลับซับซ้อนสูง ผู้รับเหมาก่อสร้างจำเป็นต้องปรับสภาพภูมิประเทศให้มีความลาดชันลดลงเพื่อให้สามารถทำการก่อสร้างได้ เช่น การปรับสภาพภูมิประเทศเพื่อให้เครื่องจักรขนาดใหญ่สามารถทำงานได้ ปรับสภาพภูมิประเทศเพื่อทำทางขนส่งวัสดุก่อสร้าง ปรับสภาพภูมิประเทศเพื่อกองเก็บวัสดุและชิ้นงาน ฯลฯ ที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานก่อสร้างและต้นทุนค่าก่อสร้างโดยตรง ในบางกรณีอาจมีการปรับสภาพพื้นที่ที่เป็นการทำงานซ้ำซ้อนเพื่ออำนวยความสะดวกในกระบวนการก่อสร้างกิจกรรมใดกิจกรรมหนึ่งโดยเฉพาะ ทั้งส่วนที่แสดงอยู่ในแบบ และส่วนงานชั่วคราวที่ไม่แสดงในแบบก่อสร้าง

จากการสำรวจข้อมูลเบื้องต้นการก่อสร้างโครงการก่อสร้างทางหลวงพิเศษระหว่างเมือง การก่อสร้างรถไฟทางคู่ หรือการก่อสร้างอุโมงค์ลอดทางแยกในเขตกรุงเทพมหานคร การสำรวจเพื่อเก็บข้อมูลที่ใช้ในโครงการก่อสร้างเป็นการเก็บข้อมูลตามสัญญาก่อสร้าง กล่าวคือ ทำการเก็บข้อมูลค่าระดับเพื่อหาพื้นที่หน้าตัดดินตาม Sta. ที่ได้แบ่งไว้แล้ว โดยทั่วไปอยู่ที่ Sta. ละ 25 เมตร ความถี่ในการเก็บข้อมูลคือ ก่อนเริ่มงาน ตามการเบี่ยงวดงานดิน และเมื่องานแล้วเสร็จ แต่ในระหว่างกระบวนการก่อสร้างที่มีการขนย้ายดินไปมานั้น ไม่มีการสำรวจเพื่อเก็บรายการงานในส่วนนี้ สาเหตุหลักที่ไม่มีการเก็บข้อมูลระหว่างกระบวนการก่อสร้าง เนื่องจากวิธีการสำรวจที่ใช้เพื่อเก็บข้อมูลในปัจจุบันนั้น ใช้เวลาและแรงงานคนค่อนข้างมาก อีกทั้งสภาพระดับพื้นผิวดินระหว่างกระบวนการก่อสร้างมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากใช้เครื่องจักรกลในการทำงานเป็นหลัก การหาปริมาณงานดินขุดและถมภายในโครงการก่อสร้างระหว่างกระบวนการก่อสร้างด้วยวิธีการสำรวจทั่วไปไม่สามารถทำได้ทันการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงได้ เป็นสาเหตุให้ขาดเครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับการติดตามการทำงานในส่วนนี้ได้เหมาะสมและสม่าเสมอเพียงพอ เพื่อสามารถตรวจวิเคราะห์หาการทำงานซ้ำซ้อนที่อาจปรากฏอยู่ในโครงการก่อสร้างได้

งานวิจัยชิ้นนี้นำเสนอแนวคิดการพัฒนาระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินขุดและถมเพื่อลดเวลาและแรงงานในขั้นตอนการสำรวจด้วยการใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศและใช้การประมวลผลภาพถ่ายด้วยเทคนิค (SfM) เพื่อสร้างแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขของพื้นที่สำรวจแทนการสำรวจด้วยวิธีการทั่วไป พื้นที่ทดสอบบริเวณบันไดด้านหน้าอนุสาวรีย์สองรัชกาลภายในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยถูกเลือกใช้เป็นพื้นที่พัฒนาและทดสอบระบบที่นำเสนอ

การพัฒนาระบบติดตามการทำงานเข้าช้อนงานดินขุดและถมที่นำเสนอ มี 3 ระบบย่อย ประกอบด้วย 1) ระบบย่อยสำหรับเก็บข้อมูลภาคสนาม 2) ระบบย่อยสำหรับประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศ และ 3) ระบบย่อยสำหรับวิเคราะห์ข้อมูล อากาศยานไร้คนขับยี่ห้อ DJI รุ่น Marvic Pro และโปรแกรมประยุกต์ GS Pro ติดตั้งในแท็บเล็ตคอมพิวเตอร์ iPad สำหรับควบคุมอากาศยานไร้คนขับ เป็นเครื่องมือหลักที่ใช้เก็บข้อมูลภาพถ่ายภาคสนาม การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศใช้ซอฟต์แวร์ Agisoft PhotoScan Professional และสุดท้ายการวิเคราะห์ข้อมูลพื้นที่หน้าตัดดินใช้ซอฟต์แวร์ Autodesk AutoCAD Civil3D

เพื่อประเมินประสิทธิภาพและปัจจัยที่ส่งผลต่อความถูกต้องแม่นยำของระบบที่นำเสนอ ในงานวิจัยขั้นนี้ศึกษาปัจจัยเรื่อง 1) ทิศทางการบินเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ 2) ระดับเพดานบินของอากาศยานไร้คนขับ 3) (ปัจจัยเพิ่มเติม) สภาพแสงสว่างและความเร็วชัตเตอร์กล้องถ่ายภาพขณะบินเก็บข้อมูลภาพถ่าย พบว่าปัจจัยการบิน 2 ทิศทางมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณน้อยกว่าการเลือกใช้ปัจจัยทิศทางบินเพียงทิศทางเดียว ปัจจัยระดับเพดานบินสูง 70 เมตรมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าที่ระดับเพดานบิน 50 เมตร ปัจจัยเรื่องสภาพแสงสว่างและความเร็วชัตเตอร์กล้องถ่ายภาพส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณของแบบจำลองเพิ่มสูงขึ้น โดยมีค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน +3.9% ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความคลาดเคลื่อน 3.1% (ค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด -0.3% และค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุด +8.4%)

ผลการทดสอบปัจจัยทดสอบ ประกอบด้วย ปัจจัยทิศทางการบิน ปัจจัยความสูงเพดานบิน และปัจจัยเรื่องสภาพแสงสว่างและความเร็วชัตเตอร์กล้องถ่ายภาพ และปัจจัยควบคุมที่ใช้ทดสอบ พบว่าความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาณของแบบจำลองอยู่ระหว่าง -0.3% ถึง +8.4% ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนในช่วงดังกล่าว จัดอยู่ในการประมาณราคาอย่างละเอียด โดยมีค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 10\%$

การประเมินประสิทธิภาพของระบบที่นำเสนอเพื่อนำไปใช้ติดตามปริมาณงานเข้าช้อนของงานดินขุดและถมในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานด้วยการเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวแสดงระดับพื้นดินและภาพตัดขวางจากเส้น Profiles แสดงระดับพื้นที่ทดสอบที่มาจากการสำรวจด้วยวิธีการสำรวจทั่วไปด้วยกล้องประมวลผลรวมระบบที่นำเสนอ

สาเหตุที่งานวิจัยนี้ไม่เลือกทดสอบระบบในพื้นที่ก่อสร้างจริง เนื่องจากในกระบวนการทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบนั้น จำเป็นต้องทำในพื้นที่ที่มีสภาพคงที่เนื่องจากใช้เวลาค่อนข้างนาน ในขณะที่พื้นที่ก่อสร้างจริงที่ใช้เป็นพื้นที่กรณีศึกษามีพื้นที่จำกัด พื้นที่ก่อสร้างมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเนื่องจากมีการทำงานอยู่ตลอดเวลาและไม่สามารถหยุดการทำงานเป็นเวลานานเพื่อทำการทดสอบระบบที่ในเสนอนี้ได้

จากการเปรียบเทียบเส้น Profiles ในรูปที่ 5.39 แสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนของเส้น Profiles แสดงระดับพื้นผิวดินที่ได้รับจากระบบที่นำเสนอจากช่วงเวลาการสำรวจหลายครั้งมีความคลาดเคลื่อนน้อย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระบบที่นำเสนอว่ามีความน่าเชื่อถือ และจากคุณสมบัตินี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์หากิจกรรมงานดินซุดและถมที่ใช้การเปรียบเทียบแบบจำลองแสดงระดับพื้นผิวดินจากช่วงเวลาการสำรวจหลายครั้ง

การประยุกต์ใช้เส้น Profiles แสดงระดับพื้นดินเพื่อระบุกิจกรรมงานดินซุดและถม และแสดงความก้าวหน้าหรือการทำงานซ้ำซ้อนระหว่างกระบวนการก่อสร้างเบื้องต้น สามารถวิเคราะห์กิจกรรมงานซุดดินและงานถมดินที่เกิดขึ้นจริงได้ด้วยวิธีการเปรียบเทียบเส้น Profiles แสดงระดับดินระหว่างช่วงเวลาการสำรวจ 2 ครั้ง ส่วนการวิเคราะห์ความก้าวหน้าหรือการทำงานซ้ำซ้อน ใช้วิธีการเปรียบเทียบเส้น Profiles แสดงระดับดินตั้งแต่ 2 ช่วงเวลาการสำรวจ 3 ครั้งขึ้นไป ทำการเปรียบเทียบเพื่อระบุกิจกรรมงานซุดดินและงานถมดินระหว่าง 2 ช่วงเวลาที่ละคู่ตามลำดับเวลา เสร็จแล้วนำแผนภูมิรูปภาพที่ระบุกิจกรรมงานซุดดินและงานถมดินตามลำดับเวลามาเปรียบเทียบกันเพื่อวิเคราะห์กระบวนการทำงานที่เกิดขึ้นจริงหน้างาน

การหาปริมาณงานซุดดินและงานถมดินเพื่อนำไปคำนวณเป็นปริมาณการทำงานซ้ำซ้อนของงานดินซุดและถม ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการเปรียบเทียบพื้นผิวแสดงระดับพื้นดิน แทนวิธีเฉลี่ยหน้าตัดทั้งหมด เนื่องจากแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขที่สร้างขึ้นมาจากระบบที่นำเสนอมีความหนาแน่นและการกระจายตัวของกลุ่มจุดสำรวจมากกว่าวิธีการสำรวจทั่วไปสูงมาก

งานวิจัยชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินซุดและถมที่นำเสนอสามารถนำไปใช้งานได้จริงในโครงการก่อสร้างจริง อย่างไรก็ตามจากการทดสอบปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความถูกต้องแม่นยำเชิงปริมาณในพื้นที่ทดสอบ พบว่าอยู่ในระบบย่อยสำหรับเก็บข้อมูลภาคสนาม

7.2 การประยุกต์ใช้และประโยชน์ของระบบที่นำเสนอ

ระบบที่นำเสนอสามารถนำไปประยุกต์ใช้แทนการสำรวจด้วยวิธีทั่วไปเพื่อติดตามกิจกรรมงานและปริมาณงานซุดดินและงานถมดินในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานโดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่ก่อสร้างที่ตั้งอยู่บริเวณเนินเขาได้อย่างรวดเร็วทันการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการทำงานโดยใช้เครื่องจักรกลเป็นหลัก ทำให้ผู้บริหารโครงการมีข้อมูลเพียงพอสำหรับใช้ติดตามตรวจสอบความก้าวหน้าหรือการทำงานซ้ำซ้อนที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการก่อสร้างเพื่อช่วยลดความเสียหายที่เกิดจากการทำงานซ้ำซ้อนให้น้อยที่สุด นอกจากนี้แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศที่ได้จากระบบที่นำเสนอยังมีรายละเอียดของข้อมูลเพียงพอให้ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในโครงการก่อสร้างสามารถนำไปใช้วางแผนบริเวณพื้นที่ก่อสร้าง ถนนชั่วคราว หรือที่จัดกองวัสดุได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมถึงการนำไปวิเคราะห์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพงานขนย้ายวัสดุต่างๆภายในหน่วยงานก่อสร้าง

7.3 ผลการวิจัย

- 1) แนวคิดใหม่การประยุกต์ใช้อากาศยานไร้คนขับ การประมวลผลภาพถ่ายทางอากาศด้วยเทคนิค (SfM) และ การวิเคราะห์ข้อมูลพื้นที่หน้าตัดดิน เพื่อพัฒนาเป็นระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินชุดและถมในโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐาน
- 2) ระบบสำหรับเก็บข้อมูลภาคสนามและจัดทำแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขได้อย่างรวดเร็ว ใช้เวลาและแรงงานในการดำเนินการน้อยกว่าวิธีการที่ใช้ในปัจจุบัน ในขณะที่แบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขที่ได้มีรายละเอียดมากกว่าการสำรวจด้วยวิธีการสำรวจทั่วไป
- 3) ระบบสำหรับใช้วิเคราะห์ข้อมูลการทำงานซ้ำซ้อน จากข้อมูลที่ได้รับจากแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลขจากอากาศยานไร้คนขับ ระหว่างกระบวนการก่อสร้าง

7.4 ข้อจำกัดและข้อเสนอแนะ

- 1) ปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อความถูกต้องแม่นยำของระบบที่นำเสนออยู่ในระบบย่อยที่ใช้เก็บข้อมูลภาคสนามเป็นส่วนมาก ผู้ที่สนใจนำระบบนี้ไปใช้ในอนาคต ควรตรวจสอบปัจจัยต่างๆ ระหว่างการเก็บข้อมูลให้ถูกต้องและครบถ้วน
- 2) ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงปริมาตรของระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนที่ได้จากทดลองในพื้นที่ทดสอบเป็นเพียงข้อมูลความคลาดเคลื่อนเบื้องต้นที่เกิดจากการเก็บข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศตามปัจจัยการทดสอบ ในสภาพอากาศและสภาพแวดล้อมของสถานที่ทดสอบเท่านั้น ซึ่งอาจแตกต่างจากสภาพอากาศและสภาพแวดล้อมในพื้นที่กรณีศึกษาจึงไม่สามารถเอาข้อมูลความคลาดเคลื่อนดังกล่าวไปใช้อ้างอิงในพื้นที่กรณีศึกษาได้
- 3) ปริมาณงานซ้ำซ้อนที่ระบบตรวจพบเป็นเพียงปริมาณงาน ณ วันที่สำรวจเท่านั้น ไม่ได้แสดงถึงงานซ้ำซ้อนที่เกิดขึ้นจริงทั้งหมดที่อยู่ในช่วงเวลาการวัดนั้นๆ เนื่องจากช่วงเวลาระหว่างการสำรวจเพื่อเก็บข้อมูลในพื้นที่กรณีศึกษาห่างกันมาก ดังนั้นความครบถ้วนของปริมาณการทำงานซ้ำซ้อนขึ้นอยู่กับความถี่ของช่วงเวลาที่ใช้สำหรับเก็บข้อมูลภาคสนาม ผู้ที่สนใจนำระบบนี้ไปใช้ควรต้องพิจารณาความถี่ที่เหมาะสมสำหรับเก็บข้อมูลตามรายละเอียดที่ต้องการนำไปใช้งาน
- 4) ตำแหน่งหมุดควบคุมภาคพื้นดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้ในกรณีศึกษาเป็นการประยุกต์ใช้จุด BM ของโครงการก่อสร้าง ซึ่งมีตำแหน่งการวางค่อนข้างห่างและไม่ครอบคลุมพื้นที่ก่อสร้าง การวางหมุดควบคุมภาคพื้นดินชั่วคราวเพิ่มเติมนั้นเป็นงานที่ต้องใช้

เวลามาก และด้วยสภาพการทำงานที่ใช้เครื่องจักรกลเป็นหลักทำให้ การวางหมดควบคุมภาคพื้นดินชั่วคราวอาจขัดขวางการทำงานได้ ดังนั้นหากต้องการนำระบบที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้งาน เพื่อรักษาประสิทธิภาพความแม่นยำของแบบจำลองพื้นผิวภูมิประเทศเชิงเลข จึงควรพิจารณาติดตั้งในพื้นที่ที่เหมาะสมในลักษณะถาวรเพื่อใช้ซ้ำได้หลายๆครั้ง

- 5) ปัจจุบันประเทศไทยมีกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับอากาศยานไร้คนขับที่กำหนดเพดานบินของอากาศยานไร้คนขับที่ความสูง 90 เมตร และในหลายพื้นที่ เช่น ในพื้นที่รอบสนามหลวงรัศมีโดยรอบ 19 กิโลเมตร และพื้นที่รอบสนามบินรัศมี 5 กิโลเมตร ต้องแจ้งเจ้าพนักงานก่อนทำการปล่อยอากาศยานไร้คนขับ ผู้ที่สนใจจะใช้ระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จึงควรตรวจสอบพื้นที่ห้ามบินดังกล่าวก่อนทำการปล่อยอากาศยานไร้คนขับทุกครั้ง

7.5 แนวทางพัฒนางานวิจัยในอนาคต

- 1) พัฒนาระบบการทำงานของระบบติดตามการทำงานซ้ำซ้อนงานดินขุดและถมให้เป็นระบบอัตโนมัติมากยิ่งขึ้น เนื่องจากกระบวนการทำงานส่วนใหญ่ยังต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญควบคุมการทำงาน เช่น ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลพื้นที่หน้าตัดดินเป็นต้น
- 2) เนื่องจากประสิทธิภาพและศักยภาพของอากาศยานไร้คนขับที่พัฒนาขึ้นเรื่อยๆ การประยุกต์ใช้ภาพถ่ายทางอากาศหรือภาพถ่ายวิดีโอทางอากาศ ร่วมกับโปรแกรมประยุกต์จำพวก Image Recognition ร่วมกับแบบจำลอง BIM และการจำลองแผนการทำงาน เพื่อพัฒนาระบบติดตามความก้าวหน้างานแบบ Real-Time

บรรณานุกรม

- Alizadehsalehi, S. and Yitmen, I. (2016). The Impact of Field Data Capturing Technologies on Automated Construction Project Progress Monitoring. *Procedia Engineering*. (Journal Article)
- Burati, J. L., Farrington, J. J. and Ledbetter, W. B. (1992). Causes of Quality Deviations in Design and Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*. (Journal Article)
- Carr, R. I. (1989). Cost-Estimating Principles. *Journal of Construction Engineering and Management*. (Journal Article)
- CSI. (2016). MasterFormat ® Numbers & Titles. (Journal Article)
- Dougherty, J. M., Hughes, N. and Zack, J. G. (2012). The impact of rework on construction & some practical remedies. (Journal Article)
- Florinsky, I. V. (2016). Chapter 3 - Digital Elevation Models *Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology (Second Edition)* (pp. 77-108): Academic Press.
- Forcada, N., Rusinol, G., MacArulla, M. and Love, P. E. D. (2014). Rework in highway projects. *Journal of Civil Engineering and Management*. (Journal Article)
- Gabrlik, P. (2015). The Use of Direct Georeferencing in Aerial Photogrammetry with Micro UAV. *IFAC-PapersOnLine*. (Journal Article)
- Halpin, D. W. and Bolivar, S. A. (2012). *Construction management*: Hoboken , NJ : Wiley, 2012.4th ed. (Book)
- Hwang, B.-G., Thomas, S. R., Haas, C. T. and Caldas, C. H. (2009). Measuring the Impact of Rework on Construction Cost Performance. *Journal of Construction Engineering and Management*. (Journal Article)
- Josephson, P.-E., Larsson, B. and Li, H. (2002). Illustrative Benchmarking Rework and Rework Costs in Swedish Construction Industry. *Journal of Management in Engineering*. (Journal Article)
- Kent, D., Ledbetter, W. B. and Burati, J. L. (1989). Measuring Design and Construction Quality Costs. *Journal of Construction Engineering and Management*. (Journal Article)

- Krsak, B., Blistan, P., Paulikova, A., Puskarova, P., Kavanic, L., Palkova, J. and Zeliznakova, V. (2016). Use of low-cost UAV photogrammetry to analyze the accuracy of a digital elevation model in a case study. *Measurement*. (Journal Article)
- Linder, W. (2009). *Digital Photogrammetry. [electronic resource] : A Practical Course*: Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg : Imprint: Springer, 2009.402Third Edition. (Book)
- O'Connor, J. T. and Tucker, R. L. (1986). Industrial Project Constructability Improvement. *Journal of Construction Engineering and Management*. (Journal Article)
- Omar, T. and Nehdi, M. L. (2016). Data acquisition technologies for construction progress tracking. *Automation in Construction*. (Journal Article)
- Ruzgiene, B., Berteska, T., Gecyte, S., Jukubauskiene, E. and Aksamitauskas, V. C. (2015). The surface modelling based on UAV Photogrammetry and qualitative estimation. [Article]. *Measurement*. (Journal Article)
- Santise, M., Fornari, M., Forlani, G. and Roncella, R. (2014). Evaluation of DEM generation accuracy from UAS imagery. [article]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol XL-5, Pp 529-536 (2014)*. (Journal Article)
- Siebert, S. and Teizer, J. (2014). Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. *Automation in Construction*. (Journal Article)
- Smith, M. W., Carrivick, J. L. and Quincey, D. J. (2015). Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography*. (Journal Article)
- Snavely, N., Seitz, S. M. and Szeliski, R. (2008). Modeling the World from Internet Photo Collections. [Report]. *International Journal of Computer Vision*. (Journal Article)
- Sona, G., Pinto, L., Pagliari, D., Passoni, D. and Gini, R. (2014). Experimental analysis of different software packages for orientation and digital surface modelling from UAV images. *Earth Science Informatics*. (Journal Article)
- Uysal, M., Toprak, A. S. and Polat, N. (2015). DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. *Measurement*. (Journal Article)
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J. and Reynolds, J. M. (2012).

‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*. (Journal Article)

Zhang, C. and Elaksher, A. (2012). An Unmanned Aerial Vehicle-Based Imaging System for 3D Measurement of Unpaved Road Surface Distresses1. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. (Journal Article)

Zhang, D., Haas, C., Goodrum, P., Caldas, C. and Granger, R. (2012). Construction Small-Projects Rework Reduction for Capital Facilities. *Journal of Construction Engineering and Management*. (Journal Article)

ภาษาไทย

คู่มือการควบคุมงานก่อสร้างทางหลวง. (2550). การควบคุมงานก่อสร้างทาง เล่มที่2: กรมทางหลวง.

นิค จำนง. (2555). การวัดระยะทางแบบสามมิติด้วยภาพในการนำร่องแบบทันการสำหรับระบบอากาศยานไร้คนขับประเภทขึ้นลงแนวดิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555.

พงษ์สยาม กันจันะ. (2556). แบบจำลองการประมาณราคาอาคารพักอาศัยคอนกรีตเสริมเหล็กโดยวิเคราะห์ตามสัดส่วนชนิดพื้นที่ใช้สอย. การค้นคว้าอิสระวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

วิชัย เยี่ยงวีรชน. (2558). การสำรวจรังวัด : ทฤษฎีและการประยุกต์ใช้: กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2558. พิมพ์ครั้งที่ 7.

อรรธรณ หอยจันทร์. (2556). จับตาส่งหาฯ-ก่อสร้างวิกฤติขาดแรงงาน. Retrieved from bangkokbiznews.com website: <http://www.bangkokbiznews.com>.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	วรพจน์ สิ้นสวัสดิ์
วัน เดือน ปี เกิด	2 เมษายน 2522
สถานที่เกิด	จ. เพชรบุรี
วุฒิการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพรหมานุสรณ์ จ.เพชรบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จากสถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมก่อสร้างและการบริหารภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ที่อยู่ปัจจุบัน	กรุงเทพมหานคร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY