



การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวก่ออิฐในโครงสร้างโบราณสถานด้วย  
เทคโนโลยีสามมิติจากภาพถ่าย

โดย

นายอภิชาติ บัวติก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวก่ออิฐในโครงสร้างโบราณสถานด้วย  
เทคโนโลยีสามมิติจากภาพถ่าย

โดย

นายอภิชาติ บัวติก



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ปีการศึกษา 2560

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

CHANGE DETECTION OF MASONRY SURFACE IN HISTORIC  
STRUCTURES FROM IMAGE-BASED PHOTOGRAMMETRY

BY

MR. APICHAT BUATIK



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS  
FOR THE DEGREE OF MASTER DEGREE OF ENGINEERING  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
THAMMASAT UNIVERSITY  
ACADEMIC YEAR 2017  
COPYRIGHT OF THAMMASAT UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

วิทยานิพนธ์

ของ

นายอภิชาติ บัวติก

เรื่อง

การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวก่อก้อนในโครงสร้างโบราณสถาน  
ด้วยเทคโนโลยีสามมิติจากภาพถ่าย

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)

เมื่อ วันที่ 8 สิงหาคม พ.ศ. 2561


ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
(รองศาสตราจารย์ ดร.นคร ภู่วโรดม)

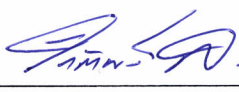
กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

  
(อาจารย์ ดร. กฤษฎา ไชยสาร)

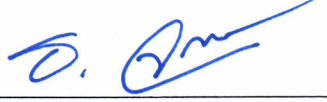
กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นเรศ ลิ้มสัมพันธุ์เจริญ)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รักติพงษ์ สหมิตรมงคล)

คณบดี

  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีร เจียศิริพงษ์กุล)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวก่ออิฐใน โครงสร้างโบราณสถานด้วยเทคโนโลยีสามมิติจาก ภาพถ่าย
ชื่อผู้เขียน	นายอภิชาติ บัวติก
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา)
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	อาจารย์ ดร.กฤษฎา ไชยสาร
ปีการศึกษา	2560

### บทคัดย่อ

ประเทศไทยมีโบราณสถานที่สำคัญทางประวัติศาสตร์มากมายหลายแห่งที่ได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง จนทำให้การเกิดการเสื่อมสภาพ พังทลาย แตกกร้าว และทรุดเอียง ซึ่งเป็นผลมาจากการเสื่อมสภาพตามกาลเวลาและปัจจัยจากสิ่งแวดล้อม วิธีการตรวจสอบด้วยการพินิจเป็นอีกหนึ่งวิธีการทั่วไปที่ใช้ในการตรวจสอบสภาพของระบบโครงสร้าง ซึ่งต้องมีการตรวจสอบเป็นระยะเพื่อตรวจหาความผิดปกติที่เกิดขึ้น เช่น การเปลี่ยนแปลงของรอยร้าวบนผิวโครงสร้างเมื่อเวลาผ่านไป ปัจจุบันได้เริ่มมีการนำเทคโนโลยีภาพถ่ายมาใช้ในการสำรวจและตรวจสอบอย่างแพร่หลาย วิธีการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงโดยใช้ภาพถ่ายจำเป็นต้องมีความถูกต้องแม่นยำของรูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้าง เพื่อลดความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นในกระบวนการตรวจสอบ แม้ว่าจะมีการนำเสนอวิธีการปรับแก้ข้อผิดพลาดทางด้านรูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้างไว้มากมาย แต่ไม่มีวิธีการใดสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดในขั้นตอนการปรับเทียบตำแหน่งภาพให้มีความถูกต้องได้ ส่งผลให้การตรวจสอบหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นไม่มีความแม่นยำ ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการนำเสนอวิธีการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงบนโครงสร้างโดยใช้ภาพถ่ายผ่านทางอากาศยานไร้คนขับเพื่อแก้ไขปัญหาซึ่งวิธีการในงานวิจัยสร้างแบบจำลองสามมิติโดยใช้ภาพถ่ายและตำแหน่งของกล้องถ่ายภาพมาปรับเทียบเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองสามมิติผ่านกระบวนการสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่าย (Structure From Motion) อีกทั้งยังสามารถใช้เส้นทางการบินเดิมที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับนำทางอากาศยานเพื่อกลับไปเก็บข้อมูลภาพถ่ายอีกครั้งในตำแหน่งเดิมสำหรับการตรวจสอบเป็นระยะ และสามารถใช้พารามิเตอร์จากตำแหน่งกล้องในแบบจำลองสามมิติเพื่อการสังเคราะห์ภาพสำหรับ

นำมาใช้ในกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลง วิธีการนี้ได้ทำการประยุกต์ใช้โดยทดสอบกับการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงรอยร้าวหรือความผิดปกติที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างโบราณสถานในวัดไชยวัฒนาราม จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าภาพถ่ายจากเครื่องบินอากาศยานไร้คนขับสามารถลดความผิดพลาดทางด้านรูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้างลงได้และสามารถให้ผลการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงผ่านการสังเคราะห์ภาพจากแบบจำลองสามมิติที่ดีขึ้น

**คำสำคัญ:** การตรวจสอบด้วยการพินิจ, การตรวจหาความเปลี่ยนแปลง, อากาศยานไร้คนขับ, การสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่าย, โครงสร้างโบราณสถาน



Thesis Title	CHANGE DETECTION OF MASONRY SURFACE IN HISTORIC STRUCTURES FROM IMAGE-BASED PHOTOGRAMMETRY
Author	Mr. Apichat Buatik
Degree	Master of Engineering (Civil Engineering)
Major Field/Faculty/University	Department of Civil Engineering Faculty of Engineering Thammasat University
Thesis Advisor	Krisada Chaiyasarn, Ph.D.
Academic Years	2017

## ABSTRACT

Thailand has many historical sites that are affected by the environment. It causes deterioration, collapse, rupture and tilt as a result of the deterioration of time and environmental factors. Visual Inspection is a common technique to detect and examine the state of health of structural system. Periodic Inspection is carried out to determine if anomalies, such as cracks and surface paint, found in previous visits have changed in appearance over time. The image-based change detection techniques require accurate Geometrical and Photometrical Corrections in Pre-Processing steps to minimize errors. Although several techniques have been proposed to remove geometrical errors, they still fail to align image correctly, which often results in inaccuracy in a Change Detection system. In this paper, a Change Detection system is proposed to tackle this problem. The system acquired images via an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). Then, the acquired images were manually processed to identify damages, such as cracks, which were used to guide a UAV to obtain more images of damages areas for monitoring purpose. The images were then used to obtain a 3D Surface Model and Camera Calibration through Structure From Motion (SFM), which were used in the Image Synthesis technique to obtain an image with identical camera parameters as a queried image for accurate Geometrical Adjustment. The synthesized

images were used to compare with the queried image to see if there were changes between them. In this research project, we showed that the drone can be used to monitor problematic areas and the Image Synthetic technique via 3D Modelling can be used in Geometrical Registration to provide better Change Detection results.

**Keywords:** Visual Inspection, Change Detection, UAVs, Structure From Motion, Historical Buildings





## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาและการชี้แนะที่เป็นประโยชน์จากกรรมการวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.นคร ภู่วโรดม ประธานกรรมการวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นเรศ ลิ้มสัมพันธ์เจริญ กรรมการวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รักติพงษ์ สหมิตรมงคล ที่ให้ความกรุณาสละเวลามาเป็นกรรมการและที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ภายนอก โดยเฉพาะ อาจารย์ ดร.กฤษฎา ไชยสาร กรรมการและที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ภายในที่คอยแนะนำ แก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ และชี้แนะให้คำปรึกษา ผู้ศึกษาขอกราบขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณกรมศิลปากร พร้อมทั้งหน่วยงานที่เกี่ยวข้องและรับผิดชอบ ในการดูแลสถานที่ทางประวัติศาสตร์ ที่ให้ความร่วมมือให้ใช้สถานที่และเก็บข้อมูลโดยรอบบริเวณองค์เจดีย์ปราสาทประธาน ในวัดไชยวัฒนาราม จังหวัดพระนครศรีอยุธยา และให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์สำหรับการศึกษาในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านในโครงการวิจัย ตึกคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และเพื่อน ๆ พี่ๆ น้องๆ ในตึกวิจัยชั้น 5 สำหรับมิตรภาพ ความรู้ ความเข้าใจ และคำแนะนำดี ๆ ตลอดจนพี่ ๆ เจ้าหน้าที่โครงการวิศวกรรมศาสตร์ และสาขาวิชาโยธาทุกท่านในความช่วยเหลือต่าง ๆ ที่ขาดเสียมิได้ ขอขอบคุณพี่ธนกร ศรีอุทัยวงศ์ ผู้ที่แนะนำแนวคิดทั้งในการทำงาน ในการศึกษา ให้ข้อคิดและข้อเสนอแนะดี ๆ และกำลังใจในการศึกษา ท้ายที่สุดขอขอบพระคุณครอบครัว ที่คอยสนับสนุนและเป็นกำลังใจ

หากผลการศึกษานี้มีข้อบกพร่องประการใด ผู้ศึกษาขอน้อมรับไว้เพื่อปรับปรุง แก้ไขในการศึกษาครั้งต่อไป

นายอภิชาติ บัวตึก

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(3)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญตาราง	(11)
สารบัญภาพ	(13)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	4
1.3 ขอบเขตการศึกษาวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ทบทวนวรรณกรรม	5
2.1.1 การใช้แบบจำลองสามมิติในงานตรวจสอบ	6
2.1.2 การหาความเปลี่ยนแปลงจากภาพถ่าย	15
2.1.3 สรุปทบทวนวรรณกรรม	25
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	26
2.2.1 แบบจำลองสามมิติจากภาพถ่าย	26
2.2.2 การหาความเปลี่ยนแปลงจากภาพถ่าย	27

2.2.2.1 การหาความเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิค Pixel Differencing Algorithm	27
2.2.2.2 การหาความเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิค Extended Image Differencing	28
2.2.2.3 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วยวิธีการใหม่ในงานวิจัยของ Günter Saur และ Wolfgang Krüger (2016)	29
2.2.3 การสร้างเมตริกซ์การแปลงเพื่อการสังเคราะห์ภาพในระบบ พิกัดสามมิติ	29
2.2.3.1 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของพิกัดใน 3 มิติด้วยเมตริกซ์ การแปลงภายใน	31
2.2.3.2 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของพิกัดใน 3 มิติด้วยเมตริกซ์ การแปลงภายนอก	33
2.2.3.3 สมการการแปลงพิกัดในสามมิติ	35
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	36
3.1 ประวัติและข้อมูลพื้นฐานวัดไชยวัฒนาราม	36
3.2 การสำรวจรูปทรงด้วยการถ่ายภาพ	39
3.2.1 อุปกรณ์การสำรวจด้วยภาพถ่าย	39
3.2.2 วิธีการบันทึกภาพถ่ายเพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติ	40
3.2.3 การประมวลผลแบบจำลอง 3 มิติ	42
3.3 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลง	48
3.3.1 Pre-Processing Steps	48
3.3.1.1 กระบวนการปรับเทียบตำแหน่งกล้อง (Camera Registration)	48
3.3.1.2 กระบวนการสังเคราะห์ภาพ (Image Synthesis)	49
3.3.1.3 Photometric Adjustment Algorithm	50
3.3.2 Change Detection	51
3.3.2.1 การตรวจวัดความคล้ายคลึงกัน	51
3.3.2.2 Change Mask	53

3.3.3 Receiver Operating Characteristic Curve	53
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	57
4.1 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงกับตัวอย่างทดสอบ	57
4.1.1 รายละเอียดข้อมูลภาพถ่ายของตัวอย่างทดสอบ	57
4.1.2 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วย Homography	58
4.1.2.1 การจับคู่จุดลักษณะเด่นและการบิดเบือนภาพด้วย Homography	58
4.1.2.2 การตรวจวัดความคล้ายคลึงกัน	61
4.1.2.3 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลง	62
4.1.3 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงผ่านแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่าย	66
4.1.3.1 การสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่าย	66
4.1.3.2 การปรับเทียบตำแหน่งกล้องและการสังเคราะห์ภาพ	67
4.1.3.3 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลง	68
4.1.3.4 วิจารณ์ผลการทดลอง	72
4.1.3.5 สรุปผลการทดลอง	72
4.2 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างโบราณสถาน จากข้อมูลภาพถ่าย	73
4.2.1 รายละเอียดข้อมูลภาพถ่าย	73
4.2.2 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วย Homography	74
4.2.2.1 การจับคู่จุดลักษณะเด่นและการบิดเบือนภาพด้วย Homography	75
4.2.2.2 การตรวจวัดความคล้ายคลึงกัน	76
4.2.2.3 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลง	77
4.2.2.4 สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	78
4.2.3 การจำลองสภาพการเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิคการซ่อมแซมภาพ	81
4.2.3.1 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วย Homography	83
4.2.3.2 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพจริงและภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติ	87

4.2.3.3 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพสังเคราะห์กับ ภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติ	91
4.2.3.4 การประเมินคุณภาพด้วย ROC Curve	96
4.2.3.5 สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	100
4.2.4 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงบนพื้นผิวโครงสร้าง โบราณสถาน	101
4.2.4.1 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วย Homography	103
4.2.4.2 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพจริงและภาพ สังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติ	106
4.2.4.3 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพสังเคราะห์กับ ภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติ	109
4.2.4.4 การประเมินคุณภาพด้วย ROC Curve	112
4.2.4.5 สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	116
4.3 การรายงานผลการเปลี่ยนแปลง	118
4.3.1 การรายงานผลการเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิคการซ้อนภาพ (Image Overlay)	118
4.3.2 การรายงานผลการเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิคการวางฟิกเซลบนภาพ	119
4.3.3 การรายงานผลการเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิคการกำหนด ขอบเขตสนใจ (Bounding Box)	121
4.3.4 การรายงานผลการเปลี่ยนแปลงด้วยแบบจำลองสามมิติ	122
4.3.5 การระบุขนาดในแบบจำลองสามมิติ	123
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	124
5.1 สรุปผลการศึกษา	124
5.1.1 การเก็บบันทึกภาพถ่ายเพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติ	125
5.1.2 การประมวลผลแบบจำลอง 3 มิติ	126
5.1.3 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลง	127
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	129

5.3 การต่อยอดในอนาคต	130
5.3.1 ปัญญาประดิษฐ์เพื่อการตรวจหาการเปลี่ยนแปลง	130
5.3.2 โลกเสมือนจริง	130
5.3.3 การพัฒนาระบบนำทางอากาศยานไร้คนขับแบบอัจฉริยะ	131
5.3.4 การขึ้นรูปแบบจำลองสามมิติเรขาคณิตแบบอัตโนมัติ	131
รายการอ้างอิง	132
ประวัติผู้เขียน	134



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 สรุปผลลัพธ์จากการกระบวนการปรับเทียบแกนพิกัดอ้างอิงระหว่างข้อมูลจากแบบจำลองสามมิติ VisualSFM และ เทคโนโลยี LiDAR	13
2.1 สรุปบททวนวรรณกรรมทั้งหมด	25
3.1 รายละเอียดของอุปกรณ์ในการบันทึกภาพถ่าย	39
3.2 สรุปการจำแนกประเภทของ Change Mask	55
4.1 รายละเอียดข้อมูลภาพถ่ายของตัวอย่างทดสอบ	58
4.2 ผลการจับคู่จุดลักษณะเด่นและการบิดเบือนภาพของตัวอย่างทดสอบ	60
4.3 ผลการตรวจวัดความคล้ายคลึงกันด้วยวิธี MSE และ SSIM ของภาพจากภาพที่ 4.2	61
4.4 ผลการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงของข้อมูลภาพจากตารางที่ 4.3	62
4.5 ผลการตรวจวัดความคล้ายคลึงกันด้วยวิธี MSE และ SSIM ของภาพจากภาพที่ 4.3	64
4.6 ผลการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงของข้อมูลภาพจากตารางที่ 4.5	65
4.7 รายละเอียดของแบบจำลองสามมิติตัวอย่างทดสอบในชุดข้อมูลภาพถ่ายต่างๆ	66
4.8 ตัวอย่างผลลัพธ์ของความคลาดเคลื่อนในกระบวนการปรับเทียบตำแหน่งกล้อง	68
4.9 ผลการตรวจวัดความคล้ายคลึงกันด้วยวิธี MSE และ SSIM ระหว่าง $I_q$ กับ $I_s$	70
4.10 ผลของ Change Mask จากตัวอย่างภาพจากตารางที่ 4.9 โดยใช้ค่าเกณฑ์เท่ากับ 55	71
4.11 รายละเอียดของข้อมูลภาพถ่ายของค้เจดีย์เล็ก	74
4.12 ตัวอย่างรายละเอียดข้อมูลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับจากการนำทางด้วย GPS	75
4.13 ผลการจับคู่จุดลักษณะเด่นและการบิดเบือนภาพของค้เจดีย์เล็ก	76
4.14 ผลการตรวจวัดความคล้ายคลึงกันด้วยวิธี MSE และ SSIM ของภาพจากตารางที่ 4.11	77

4.15 ผลการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงของข้อมูลภาพจากตารางที่ 4.14	78
4.16 ผลการจับคู่จุดลักษณะเด่นและการบิดเบือนภาพผ่าน Inpainting ในข้อมูล $S_1$	85
4.17 ผลการตรวจวัดความคล้ายคลึงกันด้วย MSE และ SSIM จากตารางที่ 4.16	85
4.18 ผลการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงข้อมูลภาพจากตารางที่ 4.17 (Threshold = 100)	87
4.19 ตัวอย่างผลลัพธ์ของความคลาดเคลื่อนในกระบวนการปรับเทียบตำแหน่ง กล้องของภาพ inpainting $S_0$ เข้าไปในแบบจำลองสามมิติ $S_t$	88
4.20 ผลการตรวจวัดค่า MSE และ SSIM ระหว่างภาพ Inpainting และภาพ สังเคราะห์ในแต่ละมุมมองทั้งหมด 4 มุมมอง ที่ความละเอียดของ ภาพสังเคราะห์ 3 ระดับ	89
4.21 ตัวอย่างผลลัพธ์ของความคลาดเคลื่อนในกระบวนการปรับเทียบตำแหน่ง กล้องของภาพจาก $M_1$ เข้าไปในแบบจำลองสามมิติ $M_2$	92
4.22 ผลการตรวจวัดค่า MSE และ SSIM ระหว่างภาพสังเคราะห์จาก $M_1$ และ $M_2$ ในตำแหน่งเดียวกันจากกระบวนการสร้างแบบจำลองสามมิติ ที่เหมือนกัน	93
4.23 สรุปผลการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงของกรณีศึกษาทั้งหมดผ่านการทำ Inpainting	100
4.24 ผลของการตรวจวัดค่า MSE และ SSIM ระหว่างภาพ $S_1$ กับ $S_3$	103
4.25 ตัวอย่างผลลัพธ์ของความคลาดเคลื่อนในกระบวนการปรับเทียบตำแหน่ง กล้องของภาพ $S_3$ เข้าไปในแบบจำลองสามมิติอ้างอิง $S_1$	106
4.26 ผลการตรวจวัดค่า MSE และ SSIM ระหว่างภาพ $S_3$ และภาพสังเคราะห์จาก แบบจำลองสามมิติ $S_1$ ในตำแหน่งเดียวกันทั้ง 4 มุมมองที่ความละเอียดของ ภาพสังเคราะห์ 3 ระดับ	107
4.27 ผลการตรวจวัดค่า MSE และ SSIM ระหว่างภาพสังเคราะห์จาก $S_1$ และ $S_3$ ในตำแหน่งกล้องเดียวกันจากแบบจำลองสามมิติเดียวกันที่มีพื้นผิวต่างกัน	109
4.28 สรุปผลการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงของกรณีศึกษาทั้งหมด	116



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 ภาพถ่ายโบราณสถานในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาจากเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ	2
1.2 แบบจำลอง 3 มิติของวัดไชยวัฒนาราม จังหวัดพระนครศรีอยุธยา	3
2.1 ข้อมูลภาพถ่ายภาพนำเข้า, ภาพระดับสีเทา, ภาพหาขอบด้วยแคนนี่ และภาพการแปลงฮัฟ	7
2.2 ตำแหน่งเสาไฟฟ้าที่สกัดได้ในแต่ละขั้นตอน $map_k$ , $map_p$ และ $map$	8
2.3 ตำแหน่งเสาไฟฟ้า	8
2.4 ข้อมูลจำลองเสาไฟฟ้า	9
2.5 โครงสร้างสะพานพลาซ่า ภาพสะพานก่อนชำรุดและภาพสะพานหลังชำรุด	10
2.6 แบบจำลอง 3 มิติที่แสดงผลเฉพาะแสงและเงาโดยตัดการแสดงผลของสีและพื้นผิวออก	11
2.7 แบบแปลน 3 มิติของสะพานพลาซ่าที่สภาวะชำรุดในปัจจุบันโดยใช้ซอฟต์แวร์ 3D Studio Max	11
2.8 โบราณสถานองค์เจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคล ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา	12
2.9 ผลลัพธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบฟังก์ชันอ้างอิงของแบบจำลองสามมิติระหว่างชุดข้อมูล VisualSFM และ เทคโนโลยี LiDAR	13
2.10 แบบจำลองสามมิติและตำแหน่งจุดศูนย์กลางฐานขององค์เจดีย์และการวัดมุมของชิ้นส่วนบนและล่างของโครงสร้างโบราณสถาน	14
2.11 ขั้นตอนกระบวนการทำ Change Detection	15
2.12 รูปภาพข้อมูลชุดเก่าที่ใช้สำหรับการเปรียบเทียบ (อ้างอิง), ภาพที่ได้จากการสังเคราะห์และภาพสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการปรับแสงให้เข้ากับภาพอ้างอิง	16
2.13 ภาพโมเสคจากปี 2005 และภาพโมเสคจากปี 2006	17
2.14 Change Mask ของการเปรียบเทียบระหว่างภาพสังเคราะห์, Change Mask ของการเปรียบเทียบระหว่างภาพอ้างอิง และผลของการรวมผลของ Change Mask	17
2.15 ภาพอ้างอิงและตำแหน่ง Change Mask ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง และภาพสังเคราะห์และตำแหน่ง Change Mask ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง	18

2.16	ภาพการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากการแทนที่ด้วยค่า Change Mask เมื่อนำเข้าสู่ระบบตรวจสอบหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น (บริเวณภายในวงกลมสีเหลืองคือ พื้นที่ที่เกิดความผิดพลาดในการตรวจหาความเปลี่ยนแปลง)	20
2.17	ภาพถ่ายทางเครื่องบินอากาศยานไร้คนขับ (ซ่าย) ช่วงเวลาที่มีแสงน้อย (ขวา) ช่วงเวลาแสงที่มีแสงมาก	21
2.18	ตัวอย่างการหาความเปลี่ยนแปลงของ Günter Saur และ Wolfgang Krüger	23
2.19	ผลลัพธ์ของการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงที่เวลาต่างกันเป็นหลักที่ 1 และ 2 (มีความแตกต่างกันเรื่องของแสง) โดยใช้ภาพถ่ายจากเครื่องบินอากาศยานไร้คนขับ โดยผลของความเปลี่ยนแปลงนี้จะแสดงบนภาพ Gray Scale	24
2.20	ผลของการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงในพื้นที่โดยรอบอื่น ๆ จากการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงแต่ละคู่ภาพแล้วเปลี่ยนคู่ภาพใหม่จนสามารถตรวจสอบได้ครอบคลุมพื้นที่ไปพร้อมกับกระบวนการ Mosaicking Process ในการสร้างแบบจำลองพื้นที่ขนาดใหญ่	24
2.21	ตัวอย่างกระบวนการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ โดยใช้ภาพถ่าย (Structure From Motion)	27
2.22	ความสัมพันธ์ระหว่างจุดบน 3 มิติ P และจุดบนระนาบ 2 มิติ P'	30
2.23	องค์ประกอบของเมตริกซ์การฉาย (Projection Matrix : K) จากระบบสมการที่ (2.11)	31
2.24	พารามิเตอร์ต่างๆในเมตริกซ์การแปลงภายใน	32
2.25	ตัวอย่างการเคลื่อนที่และการหมุนของกล้องในระบบการแปลงพิกัด 3 มิติ	33
2.26	ภาพตัวอย่างการหมุนรอบแกน Z ด้วยมุม $\gamma$ ในทิศทวนเข็มนาฬิกา	34
3.1	ขั้นตอนการศึกษาการตรวจหาความเปลี่ยนแปลง	36
3.2	ปราสาทประธาน วัดไชยวัฒนาราม จังหวัดพระนครศรีอยุธยา	37
3.3	พระพุทธรูปรายรอบระเบียงคด	38
3.4	ซากพระประธานปางสมาธิประดิษฐานอยู่บนฐานชุกชี	38
3.5	อุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกภาพถ่าย DJI Phantom 4	40
3.6	ตัวอย่างการซ้อนทับของภาพถ่าย	40
3.7	การบินแบบสแกน (The Scanning Flight)	41
3.8	การบินรอบวัตถุที่เป้าหมาย (The Circular POI Flight)	42
3.9	รายละเอียดของภาพถ่ายที่นำมาสร้างแบบจำลองทั้งหมด 192 รูป	43

3.10	จุดกลุ่มเมฆแบบห่าง (Sparse Point Cloud) และตำแหน่งของภาพถ่าย	44
3.11	กระบวนการสร้างแบบจำลอง 3 มิติกลุ่มจุดเมฆแบบห่างและแนวนของปราสาท ประธานวัดไชยวัฒนาราม จังหวัดพระนครศรีอยุธยา	45
3.12	แบบจำลองสามมิติแบบตาข่ายและลักษณะของตาข่ายบนแบบจำลอง	46
3.13	แบบจำลองสามมิติแบบพื้นผิวขององค์เจดีย์เล็ก	47
3.14	ขั้นตอนการใช้งานซอฟต์แวร์ Agisoft Photoscan Professional	47
3.15	ขั้นตอนกระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลง	48
3.16	ตัวอย่างหน้าต่างระบุตำแหน่ง Latitude และ Longitude ให้กับอากาศยาน ไร้คนขับ	49
3.17	เค้าโครงกระบวนการปรับเทียบตำแหน่งกล้องเพื่อนำเข้าไปในแบบจำลอง สามมิติ	49
3.18	รูปภาพใหม่ $I_q$ , รูปภาพใหม่ $I_q$ , หลังการปรับแสงและเปลี่ยนพื้นหลังด้วย กระบวนการ Photometric Adjustment และรูปภาพสังเคราะห์ $I_s$	51
3.19	Change Mask จากผลการเปลี่ยนแปลงที่สร้างด้วยมือและ Change Mask จากการทดลองกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลง	55
3.20	ตัวอย่าง ROC Curve โดยจากกราฟเส้นสีแดงคือเส้น ROC Curve ทั่วไปและ เส้นสีน้ำเงินคือ ROC Curve ในอุดมคติที่ดีที่สุด	56
4.1	รูปแบบการเก็บข้อมูลภาพถ่ายแบบรอบจุดสนใจ (POI) และตัวอย่าง ข้อมูลภาพถ่ายของตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีต	58
4.2	ภาพตัวอย่างทดสอบภาพอ้างอิงเริ่มต้น $S_0$ ที่ใช้ในการตรวจสอบ และภาพที่ ใช้ในการเปรียบเทียบหาความเปลี่ยนแปลงระหว่าง $S_0$ โดยแต่ละภาพคือ ข้อมูลภาพจาก (ซ้ายบน) $S_1$ , (ขวาบน) $S_2$ , (ซ้ายล่าง) $S_3$ และ (ขวาล่าง) $S_4$	59
4.3	ภาพตัวอย่างทดสอบภาพอ้างอิงเริ่มต้น $S_0$ ที่ใช้ในการตรวจสอบ และภาพที่ ใช้ในการเปรียบเทียบหาความเปลี่ยนแปลงระหว่าง $S_0$ โดยแต่ละภาพคือภาพ จาก (บน) $S_2$ และ (ล่าง) $S_4$	64
4.4	แบบจำลองสามมิติจุดกลุ่มเมฆแบบห่างของคานคอนกรีต และแบบจำลองสาม มิติจุดกลุ่มเมฆแบบหนาแน่นพร้อมทั้งแสดงตำแหน่งกล้องบนแบบจำลอง	67
4.5	แบบจำลองสามมิติแบบตาข่ายของคานคอนกรีต และแบบจำลองสามมิติแบบ พื้นผิวของคานคอนกรีต	67

4.6	ภาพตัวอย่างทดสอบภาพอ้างอิงหรือภาพใหม่ $I_q$ จากชุดข้อมูล $S_0$ , ภาพใหม่ $I_q$ ที่ผ่านกระบวนการ Photometrical Adjustment เพื่อปรับแสงและพื้นหลัง และภาพสังเคราะห์ $I_s$ จากชุดข้อมูล $S_1$ ที่มีพารามิเตอร์ของกล้องจากภาพใหม่ $I_q$	68
4.7	ขั้นตอนกระบวนการทั้งหมดของวิธีการที่นำเสนอ	73
4.8	แบบจำลองสามมิติจุดกลุ่มเมฆแบบห่างขององค์เจดีย์เล็ก และแบบจำลองสามมิติจุดกลุ่มเมฆแบบหนาแน่นและตำแหน่งกล้องบนแบบจำลอง	80
4.9	แบบจำลองสามมิติแบบตาข่ายขององค์เจดีย์เล็ก และแบบจำลองสามมิติแบบพื้นผิวขององค์เจดีย์เล็ก	80
4.10	ผลลัพธ์การปรับเทียบตำแหน่งกล้องของภาพชุดใหม่เข้าไปในแบบจำลองสามมิติอ้างอิง	80
4.11	ภาพตัวอย่างจากชุดข้อมูลอ้างอิง $S_1$ และภาพจากแบบจำลองสามมิติแบบพื้นผิวของชุดข้อมูล $S_1$ ในมุมมองภาพที่ใกล้เคียงกันของโบราณสถาน	81
4.12	ตัวอย่างภาพจริงก่อนการทำ Inpainting (ซ้าย) และตัวอย่างภาพจริงที่ผ่านการทำให้ Inpainting โดยการเลือกพื้นที่ของเขตการซ่อมแซมภาพด้วยมือ (ขวา)	83
4.13	ภาพตัวอย่างองค์เจดีย์เล็กตำแหน่งจุดที่ทำ Inpainting (ภาพก่อนทำ Inpainting) และตำแหน่งจุดที่ทำ Inpainting (ภาพหลังทำ Inpainting)	84
4.14	ตัวอย่างผลการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงทั้ง 4 มุมมองระหว่างภาพอ้างอิง $S_0$ กับภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติ $S_t$ ขององค์เจดีย์ที่ความละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองเท่ากับ 16,384 Texture Size/Count	91
4.15	ตัวอย่างภาพสังเคราะห์จาก $M_1$ (ซ้าย) และ $M_2$ (ขวา) ในตำแหน่งกล้องเดียวกันที่ความละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองสามมิติเท่ากับ 16,384 Texture Size/Count	94
4.16	ผลการเปลี่ยนแปลงและตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติ $M_1$ และ $M_2$ จาก 4 มุมมอง	95
4.17	(ซ้าย) ตัวอย่าง Change Mask ของข้อมูล Ground Truth จากการทำด้วยมือ (ขวา) ตัวอย่างภาพ Change Mask จากกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงในมุมมองภาพที่ 1 จากภาพที่ 4.16 ในมุมมองและตำแหน่งภาพเดียวกัน	96

4.18 ผลลัพธ์ของ ROC Curve ในมุมมองภาพที่ 1	98
4.19 ผลลัพธ์ของ ROC Curve ในมุมมองภาพที่ 2	98
4.20 ผลลัพธ์ของ ROC Curve ในมุมมองภาพที่ 3	99
4.21 ผลลัพธ์ของ ROC Curve ในมุมมองภาพที่ 4	99
4.22 ชุดข้อมูลภาพ $S_3$ ในมุมมองภาพที่แตกต่างกัน 4 มุมมอง	102
4.23 ผลการจับคู่จุดลักษณะเด่นและการบิดเบือนภาพ	104
4.24 ตัวอย่าง Change Masks จากกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติระหว่าง $S_1$ กับ $S_3$ (Threshold = 100)	105
4.25 ตัวอย่างผลการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงทั้ง 4 มุมมองระหว่างข้อมูลภาพ $S_3$ กับภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติ $S_1$ ที่ความละเอียดของพื้นผิว แบบจำลองเท่ากับ 16,384 Texture Size/Count	108
4.26 ตัวอย่างผลการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงทั้ง 4 มุมมองระหว่างภาพสังเคราะห์ $S_1$ กับ $S_3$ ในตำแหน่งกล้องเดียวกันขององค์เจดีย์ที่ความละเอียดของพื้นผิว แบบจำลองเท่ากับ 16,384 Texture Size/Count	111
4.27 ผลลัพธ์ของ ROC Curve ในมุมมองภาพที่ 1	114
4.28 ผลลัพธ์ของ ROC Curve ในมุมมองภาพที่ 2	114
4.29 ผลลัพธ์ของ ROC Curve ในมุมมองภาพที่ 3	115
4.30 ผลลัพธ์ของ ROC Curve ในมุมมองภาพที่ 4	115
4.31 ตัวอย่างผลการซ้อนภาพ	119
4.32 ตัวอย่างผลการวางฟิสิกเซลบนภาพ	120
4.33 ตัวอย่างผลการกำหนดขอบเขตสนใจ (Bounding Box)	121
4.34 ตัวอย่างการรายงานผลตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงด้วย Change Masks (สีเหลือง) ผ่านเทคนิคการรายงานผลด้วยแบบจำลองสามมิติ	122
4.35 ตัวอย่างการระบุขนาดความกว้างของรอยร้าวบนแบบจำลองสามมิติ	123

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

เทคโนโลยีการสำรวจและตรวจสอบในปัจจุบันเป็นเทคโนโลยีที่สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลายในงานวิศวกรรม ปัจจุบันได้มีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็วเพื่ออำนวยความสะดวกเป็นอย่างมากในการทำงาน ซึ่งเทคโนโลยีเหล่านี้เป็นที่ยอมรับและใช้กันอย่างแพร่หลายในงานสำรวจ เช่น เทคโนโลยีสแกนเนอร์ 3 มิติ (LiDAR หรือ Laser Scanning) และเทคโนโลยีการสำรวจด้วยภาพถ่าย ข้อมูลเหล่านี้สามารถนำไปสร้างเป็นแบบจำลอง 3 มิติ ซึ่งให้ข้อมูลเกี่ยวกับรูปทรงทางเรขาคณิตของโครงสร้างที่ครบถ้วนและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จริงในการบูรณะซ่อมแซมโครงสร้าง ตรวจสอบความก้าวหน้า ทำนายพฤติกรรม และวิเคราะห์โครงสร้างด้วย Finite Element Model (FEM) รวมไปถึงการจัดทำแบบแผนมาตรการความปลอดภัย เพื่อช่วยลดอัตราการสูญเสียชีวิตของแรงงาน ค่าใช้จ่ายที่ฟุ่มเฟือยและระยะเวลาในการตรวจสอบให้สามารถแก้ไขความผิดพลาดหรือการรายงานผลที่เกิดขึ้นเป็นระยะได้อย่างรวดเร็ว ด้วยประโยชน์และความสามารถของเทคโนโลยีเหล่านี้จึงได้มีแนวคิดที่จะนำไปใช้กับการตรวจสอบหาความผิดปกติหรือความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนตัวโครงสร้างโบราณสถานที่สำคัญในประเทศไทย

ประเทศไทยมีโบราณสถานที่สำคัญทางประวัติศาสตร์มากมายหลายแห่งที่มีคุณค่าทางประวัติศาสตร์สะท้อนถึงความเจริญรุ่งเรืองในอดีต เช่น อารยธรรม วัฒนธรรม ประเพณี อีกทั้งยังเป็นเอกลักษณ์ของประเทศที่รู้จักกันไปทั่วโลกในการดึงดูดนักท่องเที่ยวชาวต่างชาติช่วยสร้างรายได้แก่คนไทยและประเทศ โครงสร้างโบราณสถานมากมายในประเทศไทยที่ถูกสร้างมานานหลายร้อยปีได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง จนทำให้เกิดการเสื่อมสภาพ พังทลาย แตกกร้าว และทรุดเอียง ตัวอย่างเช่น องค์เจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ที่มีความสูงมากกว่า 60 เมตร มีการเอียงตัวอย่างชัดเจนสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและนอกจากนี้ยังมีรอยแตกกร้าวเกิดขึ้นบนตัวโครงสร้างโบราณสถานอยู่หลายแห่งซึ่งเป็นผลมาจากการเสื่อมสภาพตามกาลเวลาและปัจจัยจากสิ่งแวดล้อม

ปัญหาที่พบในการบูรณะรักษาสภาพโครงสร้างของโบราณสถานนั้นคือขาดข้อมูลที่ช่วยในการตัดสินใจและวางแผนในการดำเนินการอนุรักษ์ให้มีความมั่นคงต่อไป ข้อมูลในส่วนที่สำคัญที่ขาดหายไปส่วนหนึ่งได้แก่ ข้อมูลโครงสร้างพื้นฐาน เช่น ขนาด รูปทรง ความเอียง ปัญหาเรื่องรอยร้าวหรือความผิดปกติที่เกิดขึ้นบนโครงสร้าง ณ เวลาปัจจุบัน ซึ่งข้อมูลด้านโครงสร้างพื้นฐานมีความ

จำเป็นอย่างมากในการบอกถึงปัญหาหรือความผิดปกติที่เกิดขึ้น ซึ่งเทคโนโลยีในปัจจุบันสามารถที่จะศึกษาและรวบรวมข้อมูลเหล่านี้ได้โดยใช้กระบวนการและเทคนิคที่ทันสมัยมาประยุกต์ใช้กับความรู้ทางด้านวิศวกรรม



(ก)



(ข)

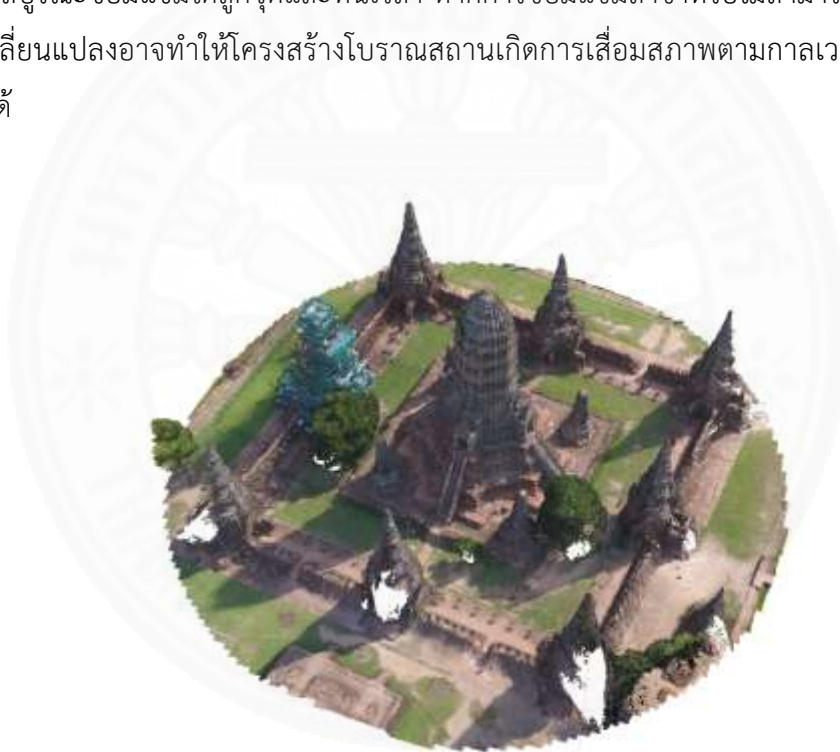
ภาพที่ 1.1 ภาพถ่ายโบราณสถานในจังหวัดพระนครศรีอยุธยาจากเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ

(ก) วัดใหญ่ชัยมงคล (ข) วัดไชยวัฒนาราม

ปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นประกอบกับภาพที่ 1.1 (ก)(ข) แสดงให้เห็นถึงสภาพโครงสร้างของโบราณสถานที่มีรอยแตกร้าว การทรุดตัวและเอียงตัว อีกทั้งมุมมองของภาพที่เห็นให้ความรู้สึกถึงการทรุดโทรมของสภาพโครงสร้าง เพื่อการรักษาและอนุรักษ์สภาพของโครงสร้างโบราณสถาน จึงทำให้เกิดแนวคิดที่นำความรู้ทางด้านเทคโนโลยีภาพถ่ายผ่านทางเครื่องบินอากาศยานไร้คนขับมาประยุกต์ใช้กับความรู้ด้านวิศวกรรมร่วมกับเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์วิชั่น (Computer Vision), ดิจิทัลโฟโตแกรมเมตรี (Digital Photogrammetry) และการประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing) ในการตรวจสอบหาความเปลี่ยนแปลงหรือความผิดปกติที่เกิดขึ้นบนผิวโครงสร้าง เพื่อให้เข้าถึงปัญหาได้ถูกต้องและแก้ไขปัญหาได้รวดเร็วอย่างมีประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาโบราณสถานให้มีความแข็งแรงและมั่นคงต่อไป

ในขั้นตอนการตรวจสอบหาความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นการนำเทคโนโลยีภาพถ่ายผ่านทางเครื่องบินอากาศยานไร้คนขับมาประยุกต์ใช้ในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ผ่านกระบวนการ Structure From Motion (SFM) เพื่อให้ได้แบบจำลอง 3 มิติที่มีองค์ประกอบของโบราณสถานแสดงดังภาพที่ 1.2 ในข้อมูลส่วนนี้ยังสามารถเห็นองค์ประกอบโดยภาพรวมของโบราณสถานและมี

ข้อมูลในส่วนของตำแหน่งกล้องที่จะใช้ในการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนต่อไป หลังจากที่ได้ข้อมูลแบบจำลอง 3 มิติของโครงสร้างโบราณสถานที่จะใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงหลักในการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น จากนั้นทำการตรวจหาความผิดปกติที่เกิดขึ้นบนตัวโครงสร้างโดยใช้ภาพถ่ายผ่านทางเครื่องบินอากาศยานไร้คนขับตรวจหาเป็นระยะ ซึ่งจะประหยัดทั้งเวลาและป้องกันการสูญเสียที่จะเกิดขึ้นโดยใช้แรงงานคน เมื่อตรวจพบความผิดปกติที่เกิดขึ้น เช่น รอยแตกร้าว นำข้อมูลภาพถ่ายชุดใหม่ไปทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลอ้างอิงชุดเดิมโดยผ่านทางกระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลง (Change Detection) ที่ใช้ทั้งข้อมูลภาพถ่ายและตำแหน่งของกล้องในการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น จากนั้นนำผลที่ได้มานำเสนอหาหนทางการแก้ไขโดยเร็วเพื่อที่จะสามารถบูรณะซ่อมแซมได้ถูกจุดและทันเวลา หากการซ่อมแซมล่าช้าหรือไม่สามารถระบุถึงจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอาจทำให้โครงสร้างโบราณสถานเกิดการเสื่อมสภาพตามกาลเวลาจนไม่สามารถแก้ไขได้



ภาพที่ 1.2 แบบจำลอง 3 มิติของวัดไชยวัฒนาราม จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

จากขั้นตอนกระบวนการทั้งหมดที่กล่าวมาเพื่อการอนุรักษ์และบำรุงรักษาโครงสร้างโบราณสถานให้มีความมั่นคงนั้น ขั้นตอนการศึกษานี้ยังไม่มีมีการการศึกษาเกี่ยวกับการหาความเปลี่ยนแปลงบนโครงสร้างโบราณสถานไว้อย่างเป็นระบบ จึงได้มุ่งเน้นศึกษาเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาและพัฒนาให้สามารถใช้กับโครงสร้างโบราณสถานในสถานที่อื่นๆ ของประเทศไทยต่อไป



## 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนาระบบการหาการเปลี่ยนแปลงของความผิดปกติที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างโบราณสถานแบบอัตโนมัติ โดยใช้เทคโนโลยีการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วยภาพถ่ายผ่านทางเครื่องอากาศยานไร้คนขับ

## 1.3 ขอบเขตการศึกษาวิจัย

1. พื้นที่ศึกษาโครงสร้างโบราณสถานในวัดไชยวัฒนาราม จังหวัดพระนครศรีอยุธยา
2. ข้อมูลที่ใช้เป็นภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับและกล้องดิจิทัล
3. ตรวจหาการเปลี่ยนแปลงของรอยรั่วบนโครงสร้างโบราณสถาน
4. สร้างแบบจำลอง 3 มิติด้วยภาพถ่ายผ่านกระบวนการ Structure From Motion
5. พัฒนาระบบการตรวจหาความเปลี่ยนแปลง (Change Detection) ด้วยเทคนิค Pixel Differencing Algorithm กับแบบจำลองสามมิติ

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถบอกถึงการเปลี่ยนแปลงหรือความผิดปกติที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างโบราณสถาน โดยใช้เทคโนโลยีภาพถ่ายจากเครื่องบินอากาศยานไร้คนขับ
2. สามารถบอกถึงปัญหาที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างโบราณสถานให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องรับทราบด้วยข้อมูลที่ได้ในงานวิจัย เพื่อแก้ไขปัญหาได้ถูกต้องและตรงจุด
3. สามารถประหยัดทั้งเวลา ลดความเสี่ยงต่อชีวิตและทรัพย์สินในการใช้แรงงานคนในการตรวจสอบในจุดที่เข้าถึงได้ยากและเป็นพื้นที่จำกัด อีกทั้งสามารถให้ผลของการตรวจสอบที่มีประสิทธิภาพได้
4. สามารถพัฒนาแนวทางการศึกษาเพื่อการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างโบราณสถานได้อย่างเหมาะสม และสามารถนำไปใช้กับโบราณสถานอื่นในประเทศ
5. สามารถใช้ในการวางแผนเพื่อบูรณะโครงสร้างโบราณสถานอย่างเป็นระบบโดยกรมศิลปากร

## บทที่ 2

### วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การตรวจสอบหาความเปลี่ยนแปลง (Change Detection) ด้วยเทคโนโลยีภาพถ่ายผ่านทางเครื่องบินอากาศยานไร้คนขับจำเป็นต้องวิเคราะห์จากข้อมูลภาพถ่าย 2 ชุด ได้แก่ ข้อมูลภาพถ่ายอ้างอิงที่เป็นข้อมูลเอาไว้ใช้เปรียบเทียบกับข้อมูลชุดใหม่ และข้อมูลภาพถ่ายชุดใหม่เป็นข้อมูลที่มีมุมมองภาพหรือลักษณะของภาพถ่ายที่คล้ายคลึงกับข้อมูลอ้างอิงเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงในเวลาต่อมา โดยที่ชุดข้อมูลภาพถ่ายที่นำมาใช้ในการอ้างอิงนำมาเข้าสู่กระบวนการการสร้างแบบจำลองสามมิติโดยใช้ภาพถ่าย (Structure From Motion : SFM) เพื่อสามารถเห็นรูปแบบของโครงสร้าง 3 มิติ องค์ประกอบที่ตั้งต่างๆของระบบโครงสร้างวัตถุที่กำลังทำการศึกษา ข้อมูลที่ได้จากกระบวนการ SFM จะให้ข้อมูลจุดเมฆ (Point Cloud) และตำแหน่งของกล้องที่สามารถนำไปทำการตรวจสอบหาความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ในขั้นตอนต่อไป จากนั้นนำข้อมูลภาพถ่ายชุดใหม่มาทำการรวมเข้ากับข้อมูลอ้างอิงในระบบแกน 3 มิติ เพื่อหาตำแหน่งที่ตั้งของกล้องและภาพถ่ายที่เหมือนหรือคล้ายคลึงกันที่สุด เมื่อสามารถจับคู่ภาพของข้อมูลทั้งสองชุดนำมาเข้าสู่กระบวนการประมวลผลภาพถ่าย (Image Processing) เพื่อนำไปสู่กระบวนการตรวจสอบหาความเปลี่ยนแปลง (Change Detection) ที่เกิดขึ้น โดยมีข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

#### 2.1 ทบทวนวรรณกรรม

การตรวจสอบด้วยการบินจึงเป็นวิธีการตรวจสอบทั่วไปที่สามารถใช้ในการตรวจสอบสภาพของโครงสร้างโดยอาศัยการมองเห็นความผิดปกติหรือการเปลี่ยนแปลงที่ปรากฏขึ้น ในกระบวนการตรวจสอบนี้ต้องอาศัยความชำนาญในการประเมินผลของผู้ตรวจสอบและมีความจำเป็นที่ผู้ตรวจสอบต้องเข้าถึงบริเวณพื้นที่ที่เกิดความผิดปกติได้ มักพบปัญหาในการเข้าถึงพื้นที่และมักเป็นปัญหาหลักในการตรวจสอบและต้องทำการบันทึกผลของความผิดปกติที่เกิดขึ้นบนโครงสร้าง ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ที่สำคัญต่อการระบุรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น เช่น รอยแตกร้าว ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ต้องมีการนำมาวิเคราะห์เพื่อแก้ไข้ปัญหา

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการตรวจสอบโดยใช้ภาพถ่ายเป็นอีกหนึ่งวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการเก็บข้อมูลความผิดปกติที่เกิดขึ้น ซึ่งข้อมูลที่ได้จากภาพถ่ายให้ข้อมูลในรูปแบบของพื้นผิว สี และองค์ประกอบสามมิติของโครงสร้างที่ได้ทำการตรวจสอบ และขั้นตอนของการเก็บข้อมูลค่อนข้างที่จะรวดเร็วสามารถรายงานผลได้รวดเร็วและสะดวกสบาย ยังมีวิธีการอื่นที่ใช้ในการตรวจสอบ เช่น

ระบบ LiDAR หรือ Laser Scanning ที่ให้ข้อมูลค่อนข้างที่จะมีประสิทธิภาพมากกว่า แต่ให้ข้อมูลในรูปแบบของสีที่ไม่หลากหลาย อีกทั้งยังค่อนข้างมีปัญหาเรื่องของการเก็บข้อมูลในมุมมองสูง เวลาติดตั้งอุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างมีราคาสูงมากเมื่อเทียบกับวิธีการตรวจสอบโดยใช้ภาพถ่าย การสำรวจโดยใช้ภาพถ่ายมีการประยุกต์ใช้ในงานด้านการสำรวจเพื่อนำข้อมูลภาพถ่ายมาช่วยในการศึกษาต่างๆ

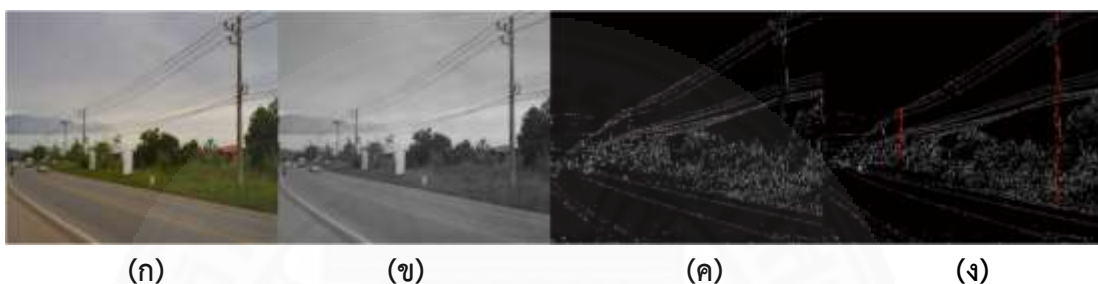
วิธีการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วยภาพถ่ายนั้นโดยทั่วไปเป็นกระบวนการตรวจสอบหาความเปลี่ยนแปลงระหว่างรูปภาพโดยให้ผู้ตรวจสอบทำการเปรียบเทียบชุดข้อมูลรูปภาพที่มีองค์ประกอบมากมายเป็นเรื่องยากในการตรวจสอบ เนื่องจากชุดข้อมูลรูปภาพแต่ละรูปนั้นมีข้อมูลของมุมมองจุดลักษณะเด่นและความเข้มของแสงที่หลากหลาย การตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงในส่วนของผู้ตรวจสอบยังมีความแตกต่างกันไปตามประสบการณ์และความชำนาญของแต่ละบุคคล กระบวนการทำงานจะมีความยุ่งยากมากยิ่งขึ้นเมื่อมีชุดข้อมูลรูปภาพที่มีองค์ประกอบของข้อมูลมากขึ้น ปัจจุบันได้มีการใช้เทคโนโลยีการประมวลผลภาพถ่าย (Image Processing) มาใช้ในการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นระหว่างภาพถ่าย 2 รูป ซึ่งได้มีการนำเสนอวิธีการตรวจสอบไว้มากมายในการตรวจหาความเปลี่ยนแปลง

### 2.1.1 การใช้แบบจำลองสามมิติในงานตรวจสอบ

สิทธิพร เถลิ้มพงศ์พิพัฒน์ และ คณะ (2013) ได้ทำการศึกษาการทำแผนที่เสาไฟฟ้าแบบกึ่งอัตโนมัติ เมื่อวันที่ 19 พฤษภาคม 2556 บริเวณอำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี ซึ่งได้ภาพทั้งหมดจำนวน 248 ภาพ รวมเป็นระยะทางประมาณ 550 เมตร ข้อมูลภาพถ่ายที่ได้เป็นภาพถ่ายทางพื้นดินและทำการถ่ายภาพตลอดระยะทาง ซึ่งข้อมูลที่ได้นำมาทำการศึกษาการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ และตรวจหาตำแหน่งที่เป็นเสาไฟฟ้าต่อไป ซึ่งกระบวนการเก็บข้อมูลเป็นลักษณะของการใช้คนในการถ่ายภาพ วิธีการนี้สามารถเกิดความคลาดเคลื่อนหรือความผิดพลาดได้ตลอดเวลาจากปัจจัยหลายอย่างเช่น การเปลี่ยนตำแหน่งการถ่ายภาพอาจทำให้เกิดความไม่ต่อเนื่องของภาพ ทำให้ข้อมูลที่นำไปใช้ในกระบวนการต่อไปยังไม่มีคุณภาพมากเท่าที่ควรและอาจทำให้กระบวนการตรวจหาตำแหน่งของเสาไฟฟ้าเกิดความคลาดเคลื่อนได้

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการทำแผนที่เสาไฟฟ้าแบบกึ่งอัตโนมัติด้วยเทคนิค Structure From Motion ในการคำนวณโครงสร้าง 3 มิติของภาพ โดยจะแบ่งกระบวนการทำวิจัยออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ การจำลองแผนที่ด้วยข้อมูลภาพเป็นข้อมูล 3 มิติ และการจำแนกหาขอบของเสาไฟฟ้า ในการทำงานโดยใช้เทคนิค SFM มาช่วยในการคำนวณตำแหน่งกล้องและจุดภาพสามมิติ และใช้เทคนิคทางด้านการประมวลผลภาพดิจิทัลเข้ามาช่วยในการสกัดเส้นตรงที่น่าจะเป็นเสาไฟฟ้า โดยหลังจากนั้นจึงรวมผลลัพธ์ของสองขั้นตอนเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้ตำแหน่งเสาไฟฟ้าที่ต้องการ

ขั้นตอนการหาขอบเสาไฟฟ้าขั้นตอนแรกจะเป็นการสกัดเส้น (Line) ที่น่าจะเป็นเสาไฟฟ้าจากภาพถ่าย ซึ่งทำโดยการแปลงภาพถ่ายดิจิทัลสีให้เป็นข้อมูลภาพระดับสีเทา (Gray Scale) หลังจากนั้นจึงสกัดขอบภาพ (Edge) ด้วยวิธีการตรวจหาขอบแคนนี (Canny Edge Detector) หลังจากนั้นจึงนำขอบภาพที่ได้มาหาเส้นตรงด้วยวิธีการแปลงฮัฟ (Hough Transformation) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์เป็นเซตของเส้นตรงที่ต้องการ และกำหนดว่าเส้นตรงที่สนใจนั้นจะต้องทำมุมเอียงจากแนวระดับมากกว่า 85 องศาแต่ไม่เกิน 95 องศา ดังภาพที่ 2.1



**ภาพที่ 2.1** ข้อมูลภาพถ่าย (ก) ภาพนำเข้า, (ข) ภาพระดับสีเทา, (ค) ภาพหาขอบด้วยแคนนีและ (ง) ภาพการแปลงฮัฟ จากภาพที่ 2.1 เมื่อนำเข้าข้อมูลภาพสี (ก) แล้วแปลงภาพให้เป็นภาพระดับสีเทา (ข) จากนั้นทำการคำนวณหาขอบภาพ (ค) ด้วยวิธีของแคนนี จะเห็นว่าข้อมูลขอบที่ได้ นั้นจะไม่ใช่เพียงเสาไฟฟ้าอย่างเดียว จึงจะต้องนำวิธีการแปลงฮัฟมาช่วยในการตรวจสอบเสาไฟฟ้า (ง) โดยเฉลี่ยแล้วพบว่าสามารถสกัดเส้นตรงที่คาดว่าจะเสาไฟฟ้าในแต่ละภาพได้แต่ยังมีส่วนที่ยังไม่สามารถสกัดว่าเป็นเสาไฟฟ้าได้ (สิทธิพร เฉลิมพงศ์พิพัฒน์ และ คณะ (2013))

การสร้างแผนที่ 3 มิติด้วยเทคนิค SFM ผลลัพธ์ที่ได้จากเทคนิค SFM นั้นจะเป็นโครงสร้างสามมิติซึ่งอยู่ในกรอบอ้างอิงสัมพัทธ์ (Relative Frame) เทียบกับกล้องแรกที่ใช้ในการคำนวณโครงสร้าง ขั้นตอนต่อไปคือการปรับยึดกับโลก (Geo-Registration) เพื่อแปลงโครงสร้างนี้ให้มีพิกัดอยู่ในระบบยูทีเอ็ม (Universal Transverse Mercator : UTM) ซึ่งเป็นระบบพิกัดที่ใช้ในการทำแผนที่โดยทั่วไป จากนั้นทำการวิเคราะห์หาตำแหน่งที่น่าจะเป็นเสาไฟฟ้า โดยอาศัยแนวคิดที่ได้จากการสังเกตว่าจุดสามมิติที่เป็นภาพของเสาไฟฟ้านั้นมักจะอยู่รวมกันหนาแน่น โดยใช้เกณฑ์กำหนดขนาดเซลล์ขึ้นมาขนาดเป็น 1.0 เมตร มาวิเคราะห์หาเซลล์ที่มีความหนาแน่นมากๆ โดยกำหนดให้สกัดเอาเซลล์ที่มีจำนวนจุดสามมิติมากกว่า 40 จุดมาสร้างเป็นแผนที่เสาไฟฟ้า map<sub>p</sub> นั่นคือพิกัดที่คาดว่าจะตำแหน่งเสาไฟฟ้าที่ได้จากจุดสามมิติ

ขั้นตอนถัดมาสร้างแผนที่หนาแน่นของจุดจากข้อมูลสองมิติ ซึ่งในทำนองเดียวกับข้อมูลข้างต้นเมื่อเราได้ข้อมูลเส้นขอบที่มีโอกาสที่จะเป็นเสาไฟฟ้าแล้วในแต่ละภาพจากการแปลงฮัฟ

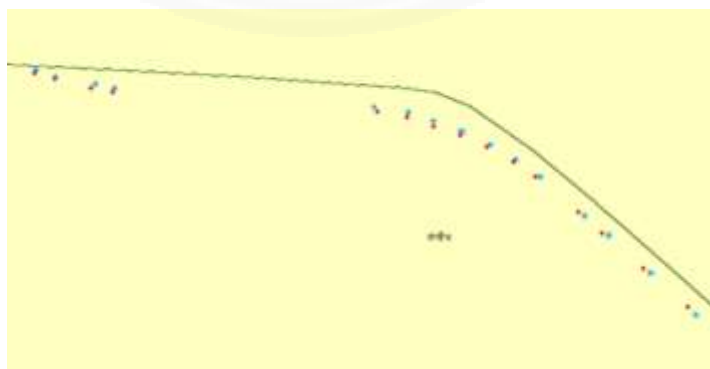
โดยวิธีการนี้ทำการวิเคราะห์และจับคู่เส้นขอบเหล่านี้ในทุกๆคู่ภาพ เพื่อกรองเส้นที่ไม่ใช่ทิ้งไปและเพื่อเป็นการแปลงข้อมูลเส้นขอบสองมิติให้เป็นเส้นตรงสามมิติ สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมที่ (สิทธิพร เถลิมพงศ์พิพัฒน์ และ คณะ (2013)) ซึ่งผลของขั้นตอนนี้จะได้แผนที่เสาไฟฟ้า  $map_k$

ขั้นตอนสุดท้ายจึงเป็นการนำข้อมูล  $map_p$  และ  $map_k$  มาวิเคราะห์หาตำแหน่งที่เป็นเสาไฟฟ้าที่ต้องการ ซึ่งทำได้โดยการกรองเอาเฉพาะเซลล์ที่มีค่าเหมือนกันทั้งสองชุดเพื่อสร้างเป็นข้อมูลแผนที่เสาไฟฟ้า  $map$  ดังภาพที่ 2.2 (ค) โดยเลือกเฉพาะจุดที่ทับซ้อนกัน

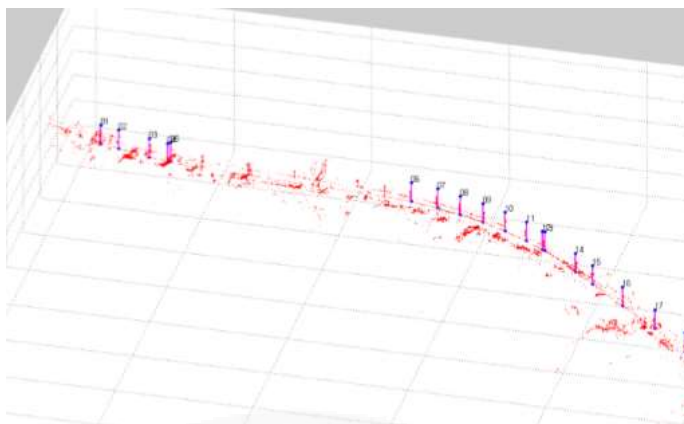


ภาพที่ 2.2 ตำแหน่งเสาไฟฟ้าที่สกัดได้ในแต่ละขั้นตอน (ซ้าย)  $map_k$ , (กลาง)  $map_p$  และ (ขวา)  $map$  (สิทธิพร เถลิมพงศ์พิพัฒน์ และ คณะ (2013))

จากผลการทดลองที่ได้ขั้นตอนถัดมาเป็นการนำข้อมูลภาพมาจับคู่เพื่อแปลงข้อมูลให้เป็นจุดสามมิติ ซึ่งทำโดยใช้โปรแกรมประยุกต์ VisualSFM (Wu, 2012) เพื่อแปลงข้อมูลภาพที่นำเข้ามาจำนวน 248 ภาพให้เป็นโครงสร้างสามมิติ แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งกล้องและข้อมูลจุดสามมิติที่คำนวณจากเทคนิค SFM จากนั้นจะนำข้อมูลจุดของ  $map_k$  และข้อมูลจุด  $map_p$  ที่หาได้จากความหนาแน่นของจุดจากขั้นตอนต่างๆ แล้วนำข้อมูลทั้งสองส่วนมาหาจุดที่มีเหมือนกัน เพื่อกรองจุดที่มีเหมือนกันสร้างเป็นข้อมูล  $map$  ใหม่เป็นข้อมูลเสาไฟฟ้าตามภาพที่ 2.3 และ 2.4



ภาพที่ 2.3 ตำแหน่งเสาไฟฟ้า (สิทธิพร เถลิมพงศ์พิพัฒน์ และ คณะ (2013))



ภาพที่ 2.4 ข้อมูลจำลองเสาไฟฟ้า (สิทธิพร เฉลิมพงศ์พิพัฒน์ และ คณะ (2013))

ความคลาดเคลื่อนของงานวิจัยนี้ คือ ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งเสาไฟฟ้าที่คำนวณได้แต่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้เมื่อเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องรับสัญญาณจีพีเอสที่มีความคลาดเคลื่อนมากกว่าซึ่งยังมีตำแหน่งเสาไฟฟ้านั้นเคลื่อนออกไปมากในบางช่วงอาจเกิดจากวิธีการถ่ายภาพและมุมมองของภาพทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนมากและการสกัดหาขอบด้วยการแปลงฮัฟยังมีผลคลาดเคลื่อน ทำให้ข้อมูลส่วนนี้จะไม่ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์เพราะข้อมูลที่ได้ไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

T. Kouimtzoğlu และ คณะ (2017) ได้ทำการศึกษาการนำข้อมูลภาพถ่ายมาใช้ในการบูรณะโครงสร้างสะพานพลาเก้า (Plaka Bridge) ที่ทำมาจากหินปูนก่อตัวเป็นโครงสร้างโค้งกลมแบบเดี่ยว (One-Arch) ดังภาพที่ 2.5 (ก) ซึ่งเป็นโครงสร้างสถาปัตยกรรมอันเก่าแก่และเป็นมรดกทางวัฒนธรรมในประเทศกรีซ ปัญหาที่เกิดขึ้นคือการพังทลายลงของตัวสะพานที่เกิดจากสภาพแวดล้อมและมลพิษทางสภาพอากาศอย่างหนัก เช่น ลม พายุ ฝน เป็นต้น เหลือเพียงฐานหลักที่ยังหลงเหลือไว้ ดังภาพที่ 2.5 (ข) และได้มีการบูรณะสร้างใหม่กันทุกครั้งเรื่อยมา ซึ่งข้อมูลภาพถ่ายที่นำมาเป็นกรณีศึกษาได้จากการข้อมูลสำรวจในพื้นที่จำนวน 826 รูปมาจากหน่วยงานในพื้นที่ที่เกี่ยวข้องโดยใช้อุปกรณ์กล้องถ่ายภาพ DSLR Canon EOS Mark III โดยลักษณะของข้อมูลภาพถ่ายที่ได้เป็นภาพถ่ายทางพื้นดิน กระบวนการเก็บข้อมูลยังเป็นลักษณะของการใช้คนในการถ่ายภาพ แม้ว่าการใช้จำนวนภาพถ่ายที่เยอะขึ้นจะเป็นการลดความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นในการนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไปก็ตาม ซึ่งยังเป็นวิธีการเก็บข้อมูลที่ยังไม่มีประสิทธิภาพมากนักและเสี่ยงต่อการใช้คนเข้าไปยังพื้นที่ตรวจสอบที่อันตราย



(ก)

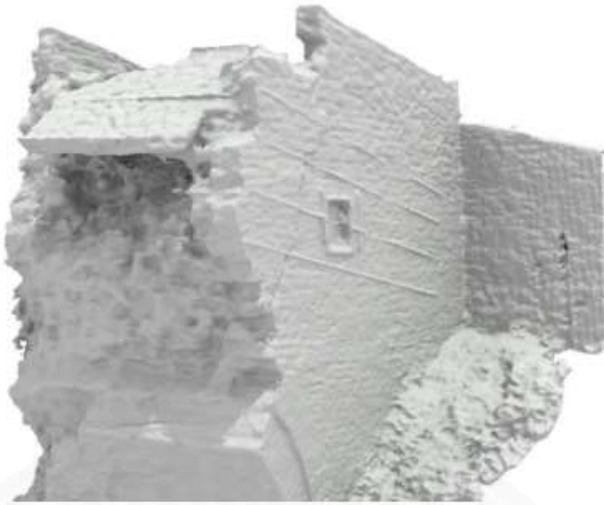


(ข)

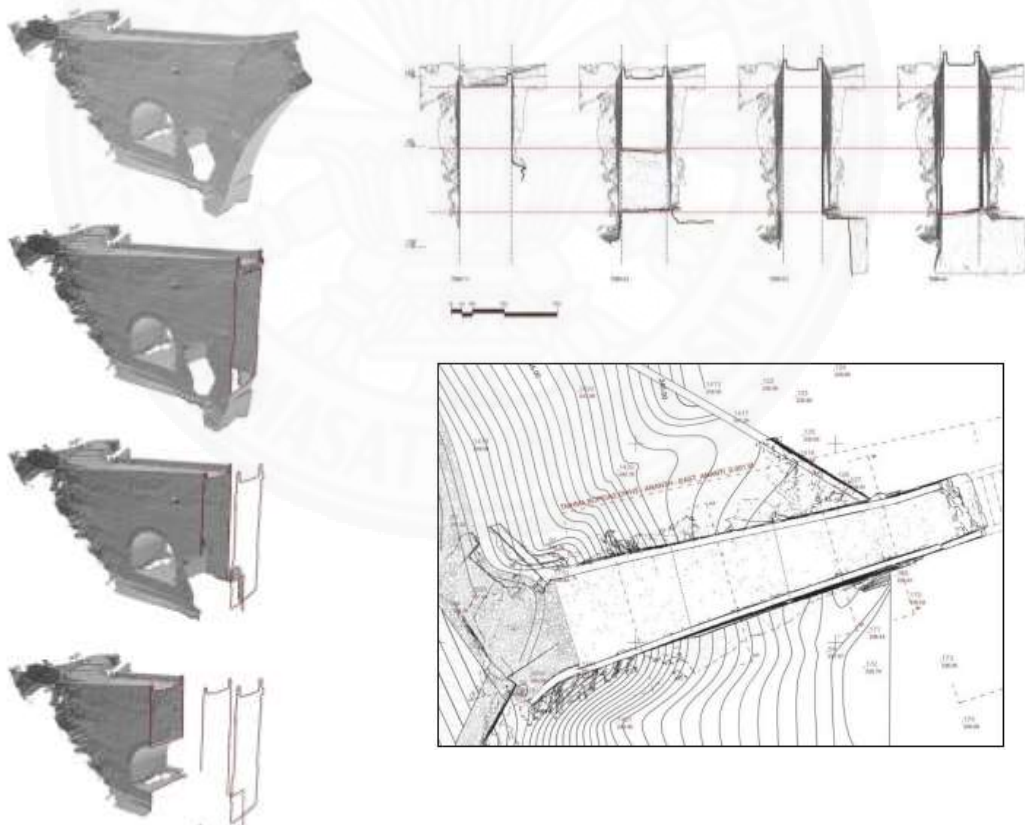
ภาพที่ 2.5 โครงสร้างสะพานพลาซ่า (ก) ภาพสะพานก่อนชำรุด (ข) ภาพสะพานหลังชำรุด

(T. Kouimtzoglou (2017))

งานวิจัยนี้นำรูปภาพที่ได้มาสร้างเป็นแบบจำลอง 3 มิติ ที่มีความละเอียดสูงโดยใช้โปรแกรม Agisoft Photoscan แล้วนำแบบจำลอง 3 มิตินี้มาปรับให้เป็นข้อมูลในระนาบ 2 มิติที่สามารถนำไปรวมกับแบบแปลนทางสถาปัตยกรรม อีกทั้งยังมีข้อมูลในส่วนของ 2D CAD Drawing มีรายละเอียดในส่วนของระดับ (Elevation) บอกในแบบซึ่งถูกทำขึ้นในปี ค.ศ. 1984, 2005 และ 2015 จากนั้นนำข้อมูลในส่วนของ แบบแปลนทางสถาปัตยกรรม แบบจำลอง 3 มิติที่มีความละเอียดสูง และ 2D CAD Drawing มารวมกันแล้วทำการปรับความละเอียดของแบบจำลอง 3 มิติ ให้แสดงผลเฉพาะแสงและเงาโดยตัดการแสดงผลในส่วนของสีและพื้นผิวออก ดังภาพที่ 2.6 เพื่อให้การแสดงผลข้อมูลทั้งหมดที่นำมารวมกันเห็นรายละเอียดและองค์ประกอบที่สำคัญในการบูรณะเด่นชัดที่สุดแล้วนำข้อมูลที่ได้มาเข้าซอฟต์แวร์ 3D Studio Max เพื่อสร้างรายละเอียดแบบแปลนทั้ง 3 มิติของสะพานที่มีสภาวะชำรุดในปัจจุบัน ดังภาพที่ 2.7 ข้อมูลในงานวิจัยนี้สามารถที่จะช่วยในการบอกรายละเอียดสำหรับบริเวณที่ต้องการบูรณะจากแบบแปลนที่ได้จากงานวิจัยที่สภาวะชำรุดในปัจจุบัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการบูรณะโครงสร้างสะพานได้อย่างเหมาะสม หลีกเลี่ยงความเสียหายที่จะเกิดขึ้นโดยใช้การสำรวจด้วยคนในสถานที่จริงในพื้นที่ที่เข้าถึงยากหรือพื้นที่บริเวณจำกัด และสามารถนำข้อมูลส่วนนี้ไปใช้ในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ยังเป็นการอนุรักษ์โครงสร้างที่มีความเก่าแก่และสำคัญในประเทศ อีกทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโครงสร้างอื่นๆได้



ภาพที่ 2.6 แบบจำลอง 3 มิติ ที่แสดงผลเฉพาะแสงและเงาโดยตัดการแสดงผลของสีและพื้นผิวออก  
(Kouimtzoğlu et. al. (2017))



ภาพที่ 2.7 แบบแปลน 3 มิติ ของสะพานพลาซ่าที่สภาวะชำรุดในปัจจุบันโดยใช้ซอฟต์แวร์  
3D Studio Max (Kouimtzoğlu et. al. (2017))



Bhadrakom (2016) ได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่ายผ่านกระบวนการ Structure From Motion โดยซอฟต์แวร์อัตโนมัติ VisualSFM กับข้อมูลแบบจำลองสามมิติที่ได้จากเทคโนโลยี LiDAR หรือ Laser Scanning เพื่อทำการประเมินการเสียรูปขององค์เจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา โดยการแบ่งชิ้นส่วนของแบบจำลองแล้วพิจารณาตามลำดับชิ้นส่วนตามแนวราบแต่ละชั้นจากจุดศูนย์กลางแล้วรวมผลที่ได้จากแต่ละชั้นเข้าด้วยกันเพื่อสร้างเส้นแสดงมุมเอียงของโครงสร้างทางประวัติศาสตร์ อีกทั้งเทคนิคเหล่านี้ยังได้ทดลองใช้กับข้อมูลจากห้องทดลองเพื่อหาความถูกต้องและเพิ่มประสิทธิภาพของวิธีการให้น่าเชื่อถือมากขึ้น ซึ่งพบว่า ตัวอย่างทดลองนั้นมีมุมเอียงเล็กน้อย (น้อยกว่า 4 องศา) โดยมีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 2.75 เปอร์เซ็นต์ และความคลาดเคลื่อนนี้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อโครงสร้างมีมุมเอียงมากขึ้น และเมื่อใช้เทคนิคนี้กับชุดข้อมูลของโครงสร้างโบราณสถาน พบว่า มุมเอียงน้อยกว่า 3 องศา ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สำหรับเทคนิคที่นำเสนอ นอกจากนี้ยังพบว่ามุมเอียงที่ได้จาก VisualSFM และ LIDAR เกือบเหมือนกัน ดังนั้นจากงานวิจัยนี้ยังสามารถสรุปได้อีกว่าแนะนำให้ใช้ จุดเมฆจากแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่ายแทน LiDAR เมื่อทำการประเมินความเสียหายในอาคารทางประวัติศาสตร์เนื่องจากมีราคาถูกและประหยัดเวลากว่าในขณะที่ให้ผลลัพธ์การประเมินความเสียหายเหมือนกัน ภาพที่ 2.8 แสดงตัวอย่างสถานที่ทางประวัติศาสตร์ที่เป็นกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้



ภาพที่ 2.8 โบราณสถานองค์เจดีย์วัดใหญ่ชัยมงคล ที่ใช้เป็นกรณีศึกษา (Bhadrakom (2016))

อย่างไรก็ตามแบบจำลองสามมิติที่ได้จากกระบวนการสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่ายและแบบจำลองสามมิติที่ได้จากข้อมูลเทคโนโลยี LiDAR นั้นจำเป็นต้องนำมาทำการเปรียบเทียบพิคัดแกนอ้างอิงให้เป็นพิคัดเดียวกันก่อน เพื่อให้การเปรียบเทียบวิธีการในการศึกษานี้มีประสิทธิภาพและแม่นยำ ภาพที่ 2.9 แสดงผลของแบบจำลองสามมิติที่ได้จากภาพถ่าย LiDAR และผลการเปรียบเทียบแบบจำลองสามมิติให้อยู่ในแกนพิคัดอ้างอิงเดียวกัน การเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองสามมิติจาก VisualSFM และ LiDAR ได้รับการเปรียบเทียบใน CloudCompare โดยใช้ อัลกอริธึม ICP (Iterative Spot Point) ที่สามารถบอกผลลัพธ์ของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นในกระบวนการเปรียบเทียบข้อมูลทั้งสองด้วยค่า RMS และใช้ระนาบอ้างอิงหลักคือส่วนของฐานองค์เจดีย์เป็นตัวเริ่มต้นการตรวจสอบ จากตารางที่ 1.1 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบแกนพิคัดอ้างอิงของแบบจำลองสามมิติจาก VisualSFM และ LiDAR

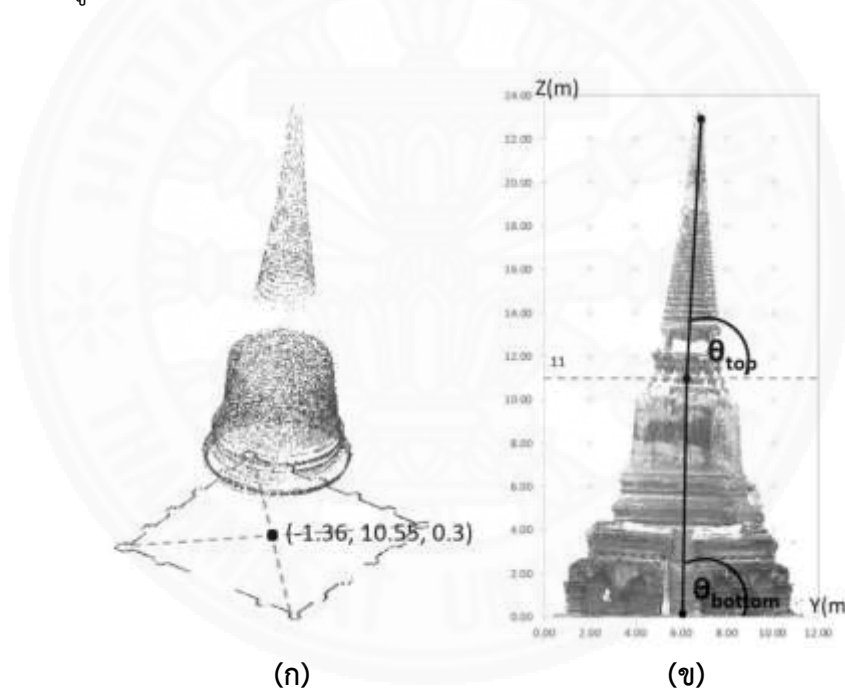


ภาพที่ 2.9 (ก) แบบจำลองสามมิติจากภาพถ่ายผ่าน VisualSFM (ข) แบบจำลองสามมิติจากเทคโนโลยี LiDAR (ค) ผลลัพธ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบพิคัดอ้างอิงของแบบจำลองสามมิติระหว่างชุดข้อมูล VisualSFM และ เทคโนโลยี LiDAR (Bhadrakom (2016))

ตารางที่ 1.1 สรุปผลลัพธ์จากการกระบวนการเปรียบเทียบแกนพิคัดอ้างอิงระหว่างข้อมูลจากแบบจำลองสามมิติ VisualSFM และ เทคโนโลยี LiDAR (Bhadrakom (2016))

ข้อมูล	องค์เจดีย์เล็ก
RMS	0.0902
จำนวนจุดกลุ่มเมฆของข้อมูล LiDAR	1,000,000
จำนวนจุดกลุ่มเมฆของข้อมูล VisualSFM	1,122,143
อัตราส่วนระหว่างจุดกลุ่มเมฆ	0.8911

ภาพที่ 2.10 แสดงผลของการประเมินความเสียหายที่เกิดจากการเอียงตัวของโครงสร้างองค์เจดีย์เล็ก จากภาพที่ 2.10 (ก) เส้นศูนย์กลางของโบราณสถานเริ่มต้นจากศูนย์กลางของฐานซึ่งพบได้โดยการตัดกันของเส้นทแยงมุมของฐาน ในการศึกษาครั้งนี้ตั้งสมมติฐานว่าโครงสร้างไม่เอียงต่อกันเป็นวัตถุชิ้นเดียว โดยแบ่งออกเป็นส่วนบนมีความสูงระหว่าง 11 ถึง 22 เมตรและส่วนล่างมีความสูงตั้งแต่ 0 ถึง 11 เมตร และตั้งสมมติฐานว่าด้านบนของโครงสร้างสามารถเคลื่อนที่ได้มากกว่าส่วนล่างและยังมีจุดเมฆในแบบจำลองสามมิติสมบูรณ์ที่ส่วนล่างมากกว่าส่วนบน ภาพที่ 2.10 (ข) เป็นการวัดมุมเอียงของสองชิ้นส่วนบนและล่าง จากผลลัพธ์ที่ได้จากการประเมินความเสียหายจากมุมเอียงแสดงให้เห็นว่าความถูกต้องของแบบจำลองจาก VisualSFM คล้ายกับแบบจำลองจาก LiDAR มุมเอียงอยู่ระหว่าง 1 ถึง 3 องศา และผลที่ได้จากการทดสอบกับตัวอย่างทดลองแสดงให้เห็นว่ามุมเอียงเหล่านี้อยู่ในช่วงความแม่นยำที่ยอมรับได้ว่าวิธีการที่นำเสนอสามารถให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแม่นยำ



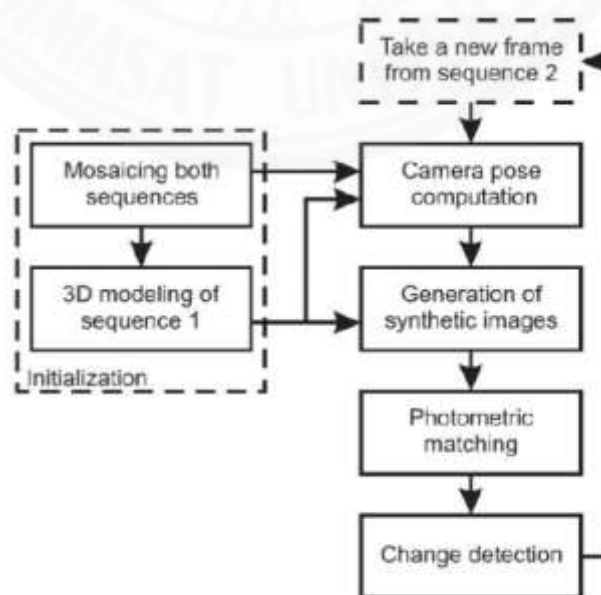
ภาพที่ 2.10 (ก) แบบจำลองสามมิติและตำแหน่งจุดศูนย์กลางฐานขององค์เจดีย์ (ข) การวัดมุมของชิ้นส่วนบนและล่างของโครงสร้างโบราณสถาน (Bhadrakom (2016))

ในการประเมินความเสียหายในโครงสร้างทางประวัติศาสตร์ควรใช้วิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย บทความนี้นำเสนอวิธีการประเมินความเสียหายต่อสิ่งปลูกสร้างในอดีตโดยการวัดมุมเอียงจากแบบจำลอง 3 มิติ วิธีที่เสนอเสนอความแม่นยำเพียงพอในการประมาณมุมเอียงของโครงสร้างโบราณสถานจริง ซึ่งมุมของการเอียงจะเหมือนกันสำหรับทั้งสองชุดข้อมูลจาก VisualSFM และ LiDAR ซึ่งสามารถแนะนำได้ว่าสามารถใช้แบบจำลองสามมิติจาก VisualSFM แทน

LiDAR ได้เนื่องจากมีความแม่นยำเหมือนกันสำหรับงานวิจัยนี้ อีกทั้งเทคโนโลยีนี้ใช้งานง่ายและราคาถูกลงกว่า วิธีการที่เสนอยังพบความไม่ถูกต้องบางประการในการประมาณเส้นศูนย์กลางเนื่องจากความไม่สม่ำเสมอในแบบจำลองสามมิติจุดกลุ่มเมฆแบบห่าง สิ่งนี้สามารถปรับปรุงได้โดยการทำให้แบบจำลองสามมิติจุดกลุ่มเมฆแบบห่างนั้นมีความหนาแน่นขึ้นหรือโดยการเปลี่ยนจุดกลุ่มเมฆให้เป็นแบบพื้นผิวราบเรียบ ซึ่งได้มีการวางแผนสำหรับการศึกษาต่อไป

### 2.1.2 การหาความเปลี่ยนแปลงจากภาพถ่าย

Delaunoy (2008) ได้เสนอวิธีการตรวจสอบหาความเปลี่ยนแปลงที่มีประสิทธิภาพกับงานตรวจสอบทั่วไปนำมาประยุกต์ใช้กับลำดับภาพจากใต้น้ำเพื่อตรวจหาความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นแบบอัตโนมัติ กรณีศึกษาเป็นพื้นที่ที่เกิดความเปลี่ยนแปลงขึ้นจากพายุหรือท้องเรือตามแนวเขตปะการัง วิธีการนี้ใช้ภาพถ่ายในพื้นที่บริเวณที่เราสนใจมาสร้างเป็นแบบจำลอง 3 มิติ จากนั้นใช้การสังเคราะห์ข้อมูลภาพถ่ายแต่ละลำดับภาพที่มีพื้นผิวและมุมมองของภาพที่สอดคล้องกัน จับคู่และแก้ไขให้เป็นภาพเดียวกันแล้วนำเข้าสู่กระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ในงานวิจัยยังแสดงให้เห็นถึงการตรวจจับที่ผิดพลาด ซึ่งเป็นผลมาจากวัตถุที่ทำการตรวจสอบเป็นวัตถุแบบ Non-Rigid แล้วใช้วิธีการตรวจสอบกับภาพก่อนหน้าเท่านั้น วิธีการที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถตรวจหาความเปลี่ยนแปลงระหว่างลำดับภาพที่มีความทำท่าย 2 รูป จากแนวปะการังที่ถ่ายกันคนละช่วงเวลาห่างกัน 1 ปี จากกล้อง 2 ตัวที่ไม่เหมือนกัน



ภาพที่ 2.11 ขั้นตอนกระบวนการทำ Change Detection (Delaunoy (2008))

ในงานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการที่ประกอบไปด้วย 6 ขั้นตอนดังภาพที่ 2.11 มุ่งเน้นการเปรียบเทียบลำดับคู่ภาพในบริเวณเดียวกันที่มาจากกล้องสองตัวที่แตกต่างกันที่คนละช่วงเวลา ตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบคือภาพสองภาพจากการสำรวจแนวปะการังซึ่งถ่ายที่ระยะเวลาห่างกัน 10 เดือนโดยใช้เซนเซอร์สองแบบที่แตกต่างกันอยู่ภายใต้การส่องสว่างที่แตกต่างกัน การบิดเบือนของภาพได้ถูกปรับปรุงแก้ไขและพารามิเตอร์ของกล้องถูกคำนวณได้อย่างถูกต้อง ในขั้นตอนแรกคือการทำภาพโมเสคที่เกิดจากการนำภาพถ่ายมาเรียงและทับซ้อนภาพจนกลายเป็นภาพเดียวกัน ขั้นตอนต่อมาสังเคราะห์ข้อมูลภาพของพื้นผิวใต้น้ำและตำแหน่งของกล้องและปรับแก้ข้อมูลที่ได้โดยใช้ Computer Vision ที่มีประสิทธิภาพในการปรับแก้ตำแหน่งกล้องให้มีความถูกต้องและเปลี่ยนให้ชุดข้อมูลจุดสามมิติมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ ขั้นตอนนี้ต้องใช้การซ้อนทับกันระหว่างภาพสูงและการปรับเทียบพารามิเตอร์ภายในที่เหมาะสมของกล้อง จากนั้นหลังจากที่จับคู่ภาพระหว่างภาพเก่าและใหม่ที่มีความทับซ้อนกันได้แล้วก็จะทำการประมาณตำแหน่งของกล้องได้ ในขั้นตอนที่สี่ประกอบด้วยการสร้างชุดข้อมูลภาพสังเคราะห์สำหรับภาพในชุดข้อมูลใหม่ ภาพสังเคราะห์เหล่านี้เป็นภาพจำลองที่บิดเบี้ยวในลักษณะที่พื้นผิวของภาพจะถูกมองจากตำแหน่งกล้องของชุดข้อมูลใหม่ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการลดผลกระทบในการสังเคราะห์ภาพจากแบบจำลองสามมิติและเพื่อให้การ Registration มีประสิทธิภาพมากขึ้น ถัดไปเทคนิคจับคู่ Photometric ใช้ในการแก้ไขความแตกต่างที่เกิดจากแสงหรือความแตกต่างที่เกิดจากการตรวจจับแสงของภาพระหว่างชุดข้อมูลสองชุด แสดงดังภาพที่ 2.12



(ก)

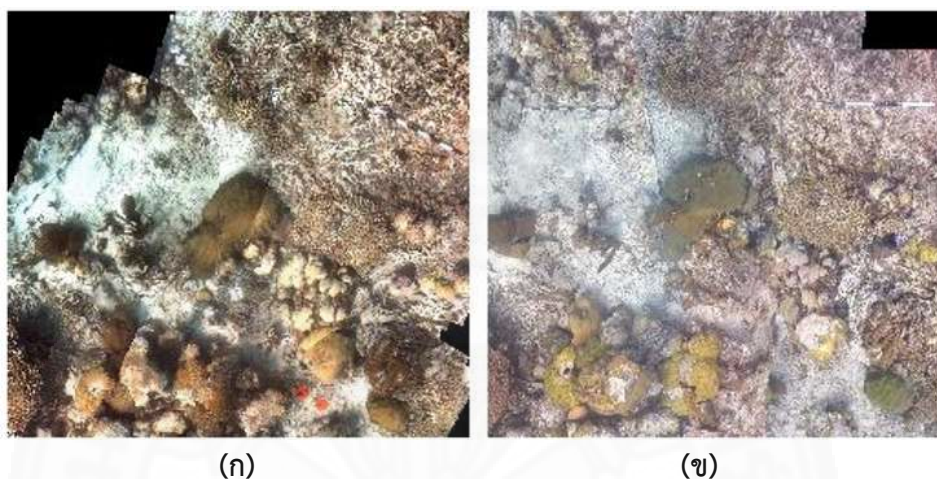
(ข)

(ค)

ภาพที่ 2.12 (ก) รูปภาพข้อมูลชุดเก่าที่ใช้สำหรับการเปรียบเทียบ (อ้างอิง) (ข) ภาพที่ได้จากการสังเคราะห์ (ค) ภาพสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการปรับแสงให้เข้ากับภาพอ้างอิง (DeLaunoy (2008))

ขั้นตอนสุดท้ายเมื่อภาพที่บริเวณเดียวกันและจากตำแหน่งเดียวกันระหว่างชุดข้อมูลเก่าและใหม่จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลง กระบวนการนี้ใช้กับทุกคู่ลำดับภาพและชุดภาพสังเคราะห์ที่สอดคล้องกัน ด้วยเหตุนี้จึงได้นำค่า Binary Change Mask สำหรับคู่ภาพแต่ละภาพใช้ในการระบุถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นว่ามีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ และ

สามารถที่จะรวมเข้ากับค่า Change Mask ของคู่ภาพอื่นๆ เพื่อแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงโดยรอบพื้นที่บริเวณสำรวจ ซึ่งสามารถทำได้อย่างง่ายดายเนื่องจากเรารู้ตำแหน่งของภาพที่สอดคล้องกันจากการทำโมเสค ภาพที่ 2.13 แสดงตัวอย่างภาพโมเสคของเขตแนวปะการังที่ 2 ช่วงเวลา จากนั้นระบุการเปลี่ยนแปลงต่างๆที่เกิดขึ้นในพื้นที่ด้วยค่า Change Mask แสดงดังภาพที่ 2.14

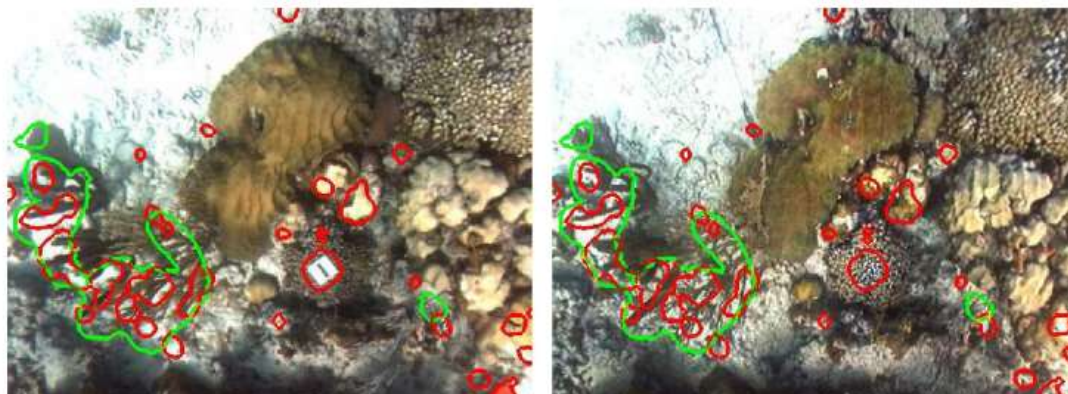


ภาพที่ 2.13 (ก) ภาพโมเสคจากปี 2005 (ข) ภาพโมเสคจากปี 2006 (Delaunoy (2008))



ภาพที่ 2.14 (ก) Change Mask ของการเปรียบเทียบระหว่างภาพสังเคราะห์ (ข) Change Mask ของการเปรียบเทียบระหว่างภาพอ้างอิง (ค) ผลของการรวมผลของ Change Mask (Delaunoy (2008))

สีแดงแสดงการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจพบในภาพเปรียบเทียบ สีเขียวการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจพบภายในลำดับของภาพสังเคราะห์ แสดงดังภาพที่ 2.15 การเปลี่ยนแปลงที่พบเป็นสีแดงและสีเขียวซึ่งเป็นบริเวณที่อาจจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงหรือเป็นบริเวณที่ไม่ต้องสนใจก็ได้



(ก)

(ข)

ภาพที่ 2.15 (ก) ภาพอ้างอิงและตำแหน่ง Change Mask ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (ข) ภาพสังเคราะห์และตำแหน่ง Change Mask ที่เกิดการเปลี่ยนแปลง (DeLaunoy (2008))

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีการจัดการกับข้อจำกัดของสภาพแวดล้อมใต้น้ำเพื่อให้สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงลำดับภาพได้ แม้ว่าเบื้องต้นบทความนี้จะนำเสนอผลลัพธ์ที่น่าสนใจซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาที่ถูกต้องยิ่งขึ้นต่อไป การสังเคราะห์ภาพจากแบบจำลอง 3 มิติแสดงข้อดีหลายประการ ซึ่งหลักๆคือการลดผลกระทบของการสังเคราะห์ในการปรับเทียบตำแหน่งกล้องซึ่งเป็นปัญหาหลักสำหรับขั้นตอนวิธีการตรวจหาการเปลี่ยนแปลง การเปลี่ยนแปลงของวัตถุในภาพหรือองค์ประกอบในภาพที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เช่น ปลาหรือสาหร่ายในพื้นที่ตรวจสอบ อาจทำให้กระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงนั้นมีความผิดพลาด ซึ่งอาจแก้ไขได้ด้วยการนำ Change Mask ของลำดับภาพสังเคราะห์มาหักล้างออกเพื่อให้ผลมีความถูกต้อง มีหลายวิธีในการปรับปรุงผลของวิธีการดังกล่าว ประการหนึ่งคือการปรับปรุงความถูกต้องของแบบจำลอง 3 มิติเนื่องจากมีผลกระทบโดยตรงต่อความถูกต้องของภาพสังเคราะห์ อัลกอริธึมการสร้างแบบจำลอง 3 มิติสามารถปรับปรุงได้โดยใช้วิธีการจับคู่แบบหนาแน่นเช่นการขยายหรือแพร่กระจายที่ตรงกัน (Match Propagation) เพื่อให้แบบจำลองสามมิติมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

Krisada (2011) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับตรวจหาความเปลี่ยนแปลงของรอยแตกร้าวในข้อมูลภาพถ่ายคานคอนกรีตภายใต้แรงกระทำที่มุมมองภาพเดียวกันที่เวลาต่างกันเมื่อได้รับแรงมากขึ้น ลักษณะของการเก็บข้อมูลภาพถ่ายเป็นภาพถ่ายทางพื้นดินในห้องทดลองที่ไม่มีปัจจัยภายนอกมารบกวนมากนัก และวัตถุที่ทำการศึกษาไม่ใหญ่มาก สามารถควบคุมเรื่องสิ่งรบกวนต่างๆที่สามารถสร้างความคลาดเคลื่อนให้แก่งานวิจัยได้ ซึ่งจากการเก็บข้อมูลภาพถ่ายในลักษณะนี้ทำให้ข้อมูลที่ได้นำไปทำการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงได้ดีมากขึ้นและได้ข้อมูลภาพถ่ายของทั้ง 2 ช่วงเวลาที่มีความใกล้เคียงกันในเรื่องของมุมมองภาพที่ต้องใช้ในการตรวจหาความ

เปลี่ยนแปลง แต่วิธีเก็บข้อมูลนี้ถ่ายในพื้นที่กว้างและวัตถุที่ใหญ่ขึ้นเช่น ตึก บ้าน อาคารต่างๆอาจเกิดความคลาดเคลื่อนและสิ่งรบกวนต่างๆจากสภาพภายนอกรวมถึงพื้นที่บริเวณที่ไม่สามารถเข้าถึง

ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยดังกล่าว คือ Change Mask ที่สามารถจะระบุจุดหรือบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแสดงดังภาพที่ 2.16 (ง) พื้นที่ที่เกิดความเปลี่ยนแปลงถูกระบายทับด้วยแถบสีแดงบนรูปภาพ แต่วิธีการนี้ไม่สามารถบอกถึงปริมาณการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ ภาพที่ 2.16 (ก)(ข) แสดงภาพที่เกิดความเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไปและภาพที่นำมาใช้เป็นภาพอ้างอิงตามลำดับ ภาพที่ 2.16 (ค) แสดงพื้นผิวของรูปภาพถูกปรับแก้ความเข้มของแสงและถูกแทนที่ด้วยค่า Change Mask เป็นแถบสีแดง ซึ่งผลของ Change Mask แสดงให้เห็นว่าบริเวณรอยแตกร้าวมีความกว้างขึ้นเมื่อเปรียบเทียบระหว่างภาพ (ก) และ (ข)

ในตัวอย่างนี้ผลลัพธ์ที่ได้จากการเสียรูปของคานภายใต้แรงกระทำ ดังภาพที่ 2.16 (ง) แสดงผลของการแทนที่ด้วยค่า Change Mask ที่ได้จากการศึกษาสามารถตรวจหาบางบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นจริง แม้ว่าวิธีการตรวจสอบที่ใช้จะมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นเนื่องจากข้อจำกัดของวิธีการที่ใช้ในระบบการตรวจสอบ เช่น แสงและเงา เป็นต้น แม้ว่าได้มีการนำเสนอระบบการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงไว้หลายวิธีการแต่ไม่มีวิธีการใดที่สามารถให้ผลลัพธ์ที่สมบูรณ์และมีประสิทธิภาพมากพอที่จะนำไปใช้งานได้จริง ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องมีการพัฒนาต่อไปในอนาคต





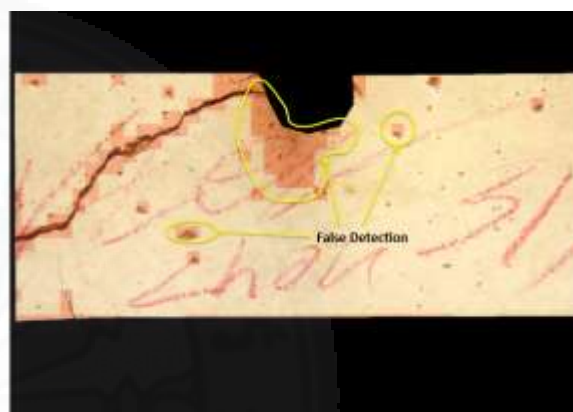
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ 2.16 (ก) รูปภาพที่เกิดความเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป, (ข) รูปภาพที่นำมาใช้เป็นภาพอ้างอิง, (ค) รูปภาพที่เกิดความเปลี่ยนแปลงซึ่งถูกแก้ไขโดยการแทนที่ด้วยค่า Change Mask, และ (ง) ภาพการเปลี่ยนแปลงที่ได้จากการแทนที่ด้วยค่า Change Mask เมื่อนำเข้าสู่ระบบตรวจสอบหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น (บริเวณภายในวงกลมสีเหลือง คือ พื้นที่ที่เกิดความผิดพลาดในการตรวจหาความเปลี่ยนแปลง) (Krisada (2011))

Günter Saur และ Wolfgang Krüger (2016) ได้ทำการศึกษาการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงโดยใช้ภาพจากวิดีโอที่ได้จากเครื่องบินอากาศยานไร้คนขับที่ช่วงเวลาต่างกัน ในบริเวณพื้นที่ลานจอดรถและถนนโดยรอบ แบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือ ภาพอ้างอิง และภาพปัจจุบันที่เกิดจากการเก็บข้อมูลภาพถ่ายที่บริเวณเดียวกันที่เวลาต่างกัน ดังภาพที่ 2.17 (ก)(ข) การนำเครื่องบินอากาศยานไร้คนขับมาใช้ในการเก็บข้อมูลภาพถ่ายเป็นวิธีการที่มีประโยชน์มากในการเก็บข้อมูลมุมสูงหรือพื้นที่บริเวณที่เข้าถึงยากรวมถึงไม่จำเป็นต้องนำคนไปตรวจสอบในพื้นที่ประหยัดทั้งเวลา ปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สินของผู้ทำการตรวจสอบอีกด้วย อีกทั้งภาพถ่ายที่ได้จากเครื่องบินอากาศยานนั้นสามารถระบุตำแหน่งบนโลกได้ด้วยตำแหน่ง GPS สามารถบอกตำแหน่งที่ตั้งของวัตถุที่อยู่บนรูปภาพและสามารถสร้างหรือระบุภารกิจให้แก่เทคโนโลยีนี้ในการบินเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติได้

อีกทั้งสามารถนำข้อมูลภาพถ่ายที่ได้จากเครื่องบินอากาศยานไร้คนขับไปประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีอื่นๆได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ข้อเสียที่ยังเป็นปัญหาของการใช้เครื่องบินอากาศยานไร้คนขับในการทำการสำรวจด้วยภาพถ่ายคือค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับเทคโนโลยีนี้ที่เพิ่มเข้ามาและสิ่งรบกวนภายนอกต่างๆจากภาพถ่ายทางอากาศ



ภาพที่ 2.17 ภาพถ่ายทางเครื่องบินอากาศยานไร้คนขับ (ซ้าย) ช่วงเวลาที่มีแสงน้อย (ขวา) ช่วงเวลาที่มีแสงมาก (Günter Saur และ Wolfgang Krüger (2016))

การศึกษาการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงโดยใช้ภาพจากวิดีโอที่ได้จากเครื่องบินอากาศยานไร้คนขับที่ช่วงเวลาต่างกันบริเวณลานจอด แบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือ ภาพอ้างอิงและภาพปัจจุบันที่เกิดจากการเก็บข้อมูลภาพถ่ายที่บริเวณเดียวกันที่เวลาต่างกัน การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นมักเกิดจากการจอดหรือการย้ายยานพาหนะและการเปลี่ยนแปลงที่ไม่เกี่ยวข้องอื่นๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงของแสง สี และเงาของพื้นผิววัตถุเมื่อกล้องถ่ายที่คนละตำแหน่งหรือที่เวลาต่างกัน

วิธีการศึกษาได้แบ่งออกเป็น 3 วิธี คือ วิธีการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงแบบใหม่, วิธี Differencing Mask หรือ Pixel Differencing Algorithm (ในหัวข้อของ (Krisada (2011)) และวิธี Extended image Differencing อีกทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้กับลำดับของภาพวิดีโอด้วย ซึ่งผลที่ได้จากวิธีการใหม่สามารถเปรียบเทียบคุณลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่ปรากฏบนรูปทั้ง 2 ช่วงเวลาพิจารณาจาก การระบุตำแหน่งของวัตถุใหม่ คือ ปรากฏบนภาพปัจจุบันแต่ไม่ปรากฏหรือปรากฏไม่ชัดเจนในภาพอ้างอิง และการระบุตำแหน่งของวัตถุที่หายไป คือ ปรากฏบนภาพอ้างอิงแต่ไม่ปรากฏหรือปรากฏไม่ชัดเจนในภาพปัจจุบัน ซึ่งลักษณะการเปลี่ยนแปลงทั้ง 2 แบบทำให้เกิดวิธีการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงแบบใหม่ที่ให้การเปลี่ยนแปลงเป็น 2 กลุ่ม และสามารถที่จะนำมารวมกับวิธี Differencing Mask ที่ให้ค่าการเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะเดียว เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงที่ดีขึ้นโดยผ่านวิธีการทางการประมวลผลภาพถ่าย (Image Processing) ซึ่งการใช้ภาพถ่ายจากเครื่องบินอากาศยานไร้คนขับยังมีปัญหาในการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงของ

รูปใน 2 ช่วงเวลาที่ยังมีความไม่แม่นยำอยู่บ้างเนื่องจากตำแหน่งการบินที่ไม่คงที่และสิ่งรบกวนต่างๆ ในภาพ

กระบวนการดำเนินการ ขั้นตอนแรกทำการกำหนดพื้นที่บริเวณสำรวจในการเก็บข้อมูลและเก็บข้อมูลภาพถ่ายมาทำเป็นข้อมูลอ้างอิงแผนที่บริเวณโดยรอบด้วยกระบวนการ Mosaicking Process และบินซ้ำอีกรอบโดยบินที่เส้นทางเดิมโดยอาศัยเส้นทางการบินที่เหมือนกัน และถ่ายในมุมมองที่ใกล้เคียงกัน ขั้นตอนที่สองจับคู่ภาพที่เหมือนกันในแต่ละ Frame ของข้อมูลทั้ง 2 ชุด ในแต่ละ Frame ที่จับคู่กัน ทำการวางแนวภาพให้สอดคล้องกัน (Alignment) ของรูปปัจจุบันให้มีมุมมองหรือลักษณะเหมือนกันกับรูปอ้างอิงจากจุดที่เหมือนกัน แล้วทำการปรับแสงด้วยกระบวนการทาง Image Processing เพื่อเข้าสู่กระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงในแต่ละคู่ภาพเป็นข้อมูลใบารี่ Change Mask มาแทนที่ข้อมูลอ้างอิงเพื่อเป็นการทำข้อมูลให้เป็นปัจจุบัน ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจะถูกรวบรวมและกรองจนทำให้ได้แบบจำลองพื้นที่บริเวณโดยรอบทั้งหมด

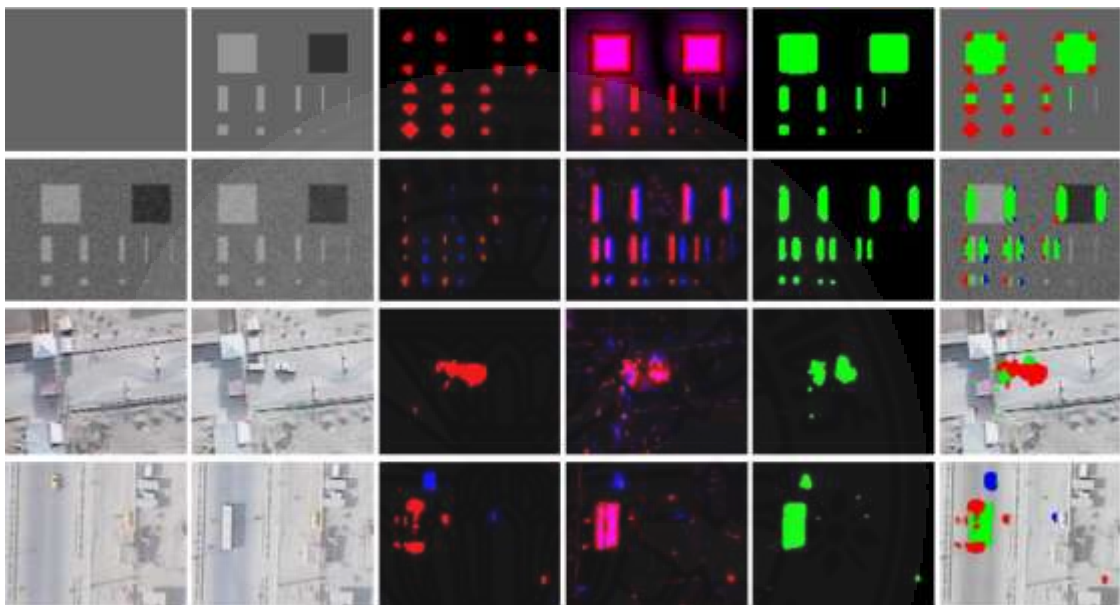
กระบวนการดังกล่าวเหมือนกับการหาค่า Change Mask ด้วยวิธี Pixel Differencing Algorithm จะได้ค่า Differencing Mask หรือ  $M_i$  ซึ่งเป็นวิธีทั่วไปที่ใช้ในการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงผลของการทำกระบวนการ Change Detection ของวิธี Differencing Mask และ Extended Image Differencing ให้ผลดังภาพที่ 2.18 ผลจากการรวมวิธีการใหม่จากงานวิจัยและ Differencing Mask ในภาพที่ 2.18 หลักที่ 6 ให้ผลดังนี้

1. บริเวณสีเขียวและสีแดงที่ทับกันคือวัตถุปรากฏขึ้นมาใหม่ (มีการเปลี่ยนแปลง)
2. บริเวณสีฟ้าและสีแดงที่ทับกันคือวัตถุปรากฏที่หายไป (มีการเปลี่ยนแปลง)
3. ทั้ง 3 สีรวมกัน (มีการเปลี่ยนแปลง)
4. สีส่วนเล็กๆที่ไม่ทับกัน (ไม่สามารถระบุได้แน่นอน)
5. สีเขียวอย่างเดียว (ไม่มีการเปลี่ยนแปลง)

นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้กับกรณีศึกษาอื่นๆได้ดังภาพที่ 2.19 และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับภาพวิดีโอ Mosaic เพื่อสร้างเป็นพื้นที่แบบจำลองขนาดใหญ่ด้วยเทคนิค Mosaicking Process แล้วใช้กระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงนี้ในการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงของแต่ละคู่ภาพเพื่อแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นทั่วทั้งแผนที่ได้ ดังภาพที่ 2.20

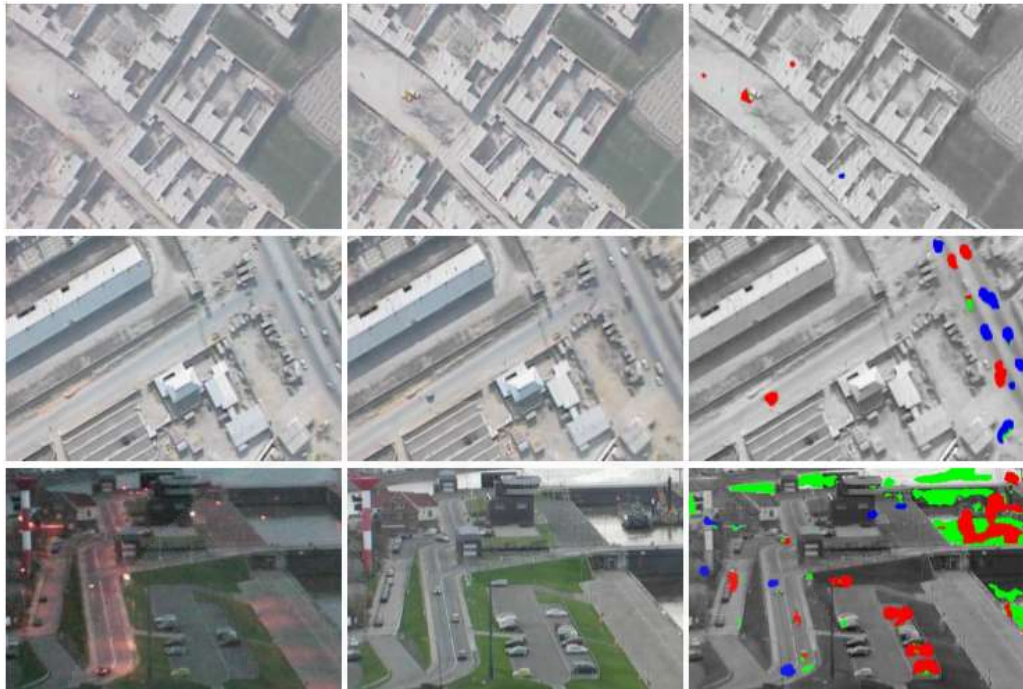
การศึกษานี้มีประโยชน์มากเมื่อประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีภาพถ่ายจากเครื่องบิน อากาศยานไร้คนขับในการบินเก็บข้อมูลภาพถ่ายได้ทุกสถานที่ทุกเวลาทุกสถานการณ์โดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้คนในการเก็บข้อมูล นอกจากนี้ยังสามารถแยกการเปลี่ยนแปลงระหว่างวัตถุที่ปรากฏใหม่หรือวัตถุที่หายไปและบริเวณที่วัตถุมีการเปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีประโยชน์มาก

ในการนำมาใช้งานสำรวจและตรวจสอบในปัจจุบัน แต่ยังมีข้อผิดพลาดเมื่อใช้กับวัตถุที่มีการเคลื่อนที่ และการสร้างแบบจำลอง 3 มิติจากภาพถ่าย เนื่องจากภาพถ่ายที่ได้จากเครื่องบินอากาศยานไร้คนขับ อาจจะได้มุมมองของภาพที่ไม่ดีนักและการนำมาสร้างเป็นแผนที่อาจมีสิ่งรบกวนในแบบจำลองได้ และยังมีข้อจำกัดในเรื่องของระยะทางการถ่ายภาพที่ถ้าหากถ่ายในมุมมองที่สูงหรือไกลมาก อาจจะทำให้การตรวจสอบหาความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นผิดพลาดได้

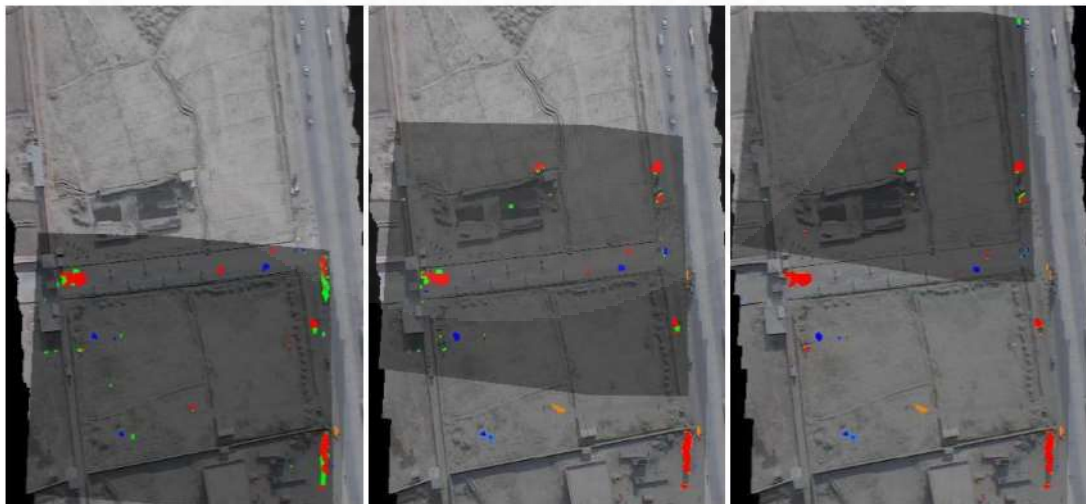


ภาพที่ 2.18 ตัวอย่างการหาความเปลี่ยนแปลงในแถวที่ 1-4 : ภาพอ้างอิง (หลักที่ 1), ภาพปัจจุบัน (หลักที่ 2), วิธีการใหม่จากงานวิจัย (หลักที่ 3), Extended Image Differencing พื้นที่ใกล้เคียงที่นำมาเปรียบเทียบเป็นขนาดพิกเซล 7x7 (หลักที่ 4), Differencing Mask (หลักที่ 5), รวมวิธีการของงานวิจัยกับ Differencing Mask แสดงผลบนรูปภาพในหลักที่ 2 (หลักที่ 6) หมายเหตุ : ตัวอย่างรูปในแถวที่ 2 หลักที่ 1 และ 2 เป็นตัวอย่างภาพจากรูปแถวที่ 1 หลักที่ 2 เพิ่มสิ่งรบกวน

(Günter Saur และ Wolfgang Krüger (2016))



ภาพที่ 2.19 ผลลัพธ์ของการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงที่เวลาต่างกันเป็นหลักที่ 1 และ 2 (มีความแตกต่างกันเรื่องของแสง) โดยใช้ภาพถ่ายจากเครื่องบินอากาศยานไร้คนขับ โดยผลของความเปลี่ยนแปลงนี้จะแสดงบนภาพ Gray Scale (Günter Saur และ Wolfgang Krüger (2016))



ภาพที่ 2.20 ผลของการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงในพื้นที่โดยรอบอื่น ๆ จากการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงแต่ละคู่ภาพแล้วเปลี่ยนคู่ภาพใหม่จนสามารถตรวจสอบได้ครอบคลุมพื้นที่ไปพร้อมกับกระบวนการ Mosaicking Process ในการสร้างแบบจำลองพื้นที่ขนาดใหญ่ (Günter Saur และ Wolfgang Krüger (2016))

### 2.1.3 สรุปบททวนวรรณกรรม

ตารางที่ 2.1 สรุปบททวนวรรณกรรมทั้งหมด

ผู้วิจัย	หัวข้อที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย			หมายเหตุ
	Visual Inspection	SFM	Change Detection	
สิทธิพร (2013)	✓	✓	-	ใช้ข้อมูลภาพถ่ายภาคพื้นดินสร้างแบบจำลอง 3 มิติในการประมาณหาตำแหน่งเสาไฟฟ้า
T. Kouimtzoğlu (2017)	✓	✓	-	ใช้ข้อมูลภาพถ่ายภาคพื้นดินสร้างแบบจำลอง 3 มิติ รวมกับข้อมูลแบบแปลนสถาปัตยกรรม และ 2D CAD Drawing สร้างแบบแปลน 3 มิติเพื่อนำมาใช้ในการซ่อมแซมโครงสร้าง
Bhadrakom (2016)	✓	✓	-	ใช้ข้อมูลภาพถ่ายภาคพื้นดินสร้างแบบจำลอง 3 มิติ รวมกับข้อมูลจากเลเซอร์สแกน เพื่อตรวจวัดมุมเอียงของโครงสร้างโบราณสถาน
Delaunoy (2008)	✓	✓	✓	ใช้ข้อมูลภาพถ่ายใต้น้ำสร้างแบบจำลอง 3 มิติ เพื่อตรวจหาความเปลี่ยนแปลงแนวเขตปะการังที่ช่วงเวลาผ่านไป 1 ปี
Krisada (2011)	✓	✓	✓	ใช้ข้อมูลภาพถ่ายภาคพื้นดินในการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิค Pixel Differencing Algorithm
Günter Saur (2016)	✓	-	✓	ใช้ข้อมูลภาพถ่ายจากเครื่องบินอากาศยานไร้คนขับในการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงจากกระบวนการ Mosaicking Process เป็นบริเวณวงกว้างด้วยเทคนิคใหม่

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงบนผิวของโครงสร้างโบราณสถานในวัดไชยวัฒนาราม จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งเป็นกรณีศึกษาที่มีพื้นผิวของโครงสร้างแตกต่างจากโครงสร้างทั่วไปและเป็นโครงสร้างที่แตกต่างจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ โดยใช้ภาพถ่ายจากเครื่องบินอากาศยานไร้คนขับในการบินเก็บข้อมูลเพื่อนำภาพถ่ายที่ได้มาสร้าง

แบบจำลอง 3 มิติผ่านกระบวนการ Structure From Motion ซึ่งเป็นการนำมาต่อยอดจากงานวิจัยของ Günter Saur (2016) และ Delaunoy (2008) ในด้านของการนำข้อมูลภาพถ่ายมาสร้างเป็นแบบจำลองสามมิติ จากนั้นทำการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นด้วยการต่อยอดจากงานวิจัยของ Delaunoy (2008) และ Krisada (2011) ในการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นด้วยเทคนิค Pixel Differencing Algorithm บนแบบจำลองสามมิติจากตำแหน่งของภาพและกล้อง เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการตรวจหาความผิดปกติที่เกิดขึ้นและสามารถระบุจุดควรทำการบูรณะโครงสร้างโบราณสถานในจังหวัดพระนครศรีอยุธยา อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโบราณสถานอื่น รวมถึงโครงสร้างทั่วไปได้

## 2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.2.1 แบบจำลองสามมิติจากภาพถ่าย

งานวิจัยนี้ทำการวิธีการสำรวจลักษณะรูปทรงและลักษณะทางกายภาพภายนอกของโครงสร้าง โดยใช้เทคโนโลยีการสำรวจด้วยภาพถ่ายประยุกต์ร่วมกับเทคโนโลยี Structure From Motion (SFM) เพื่อสร้างเป็นแบบจำลอง 3 มิติ โดยผลการวิเคราะห์ทั้งสองผ่านกระบวนการประมวลผลจะอยู่ในรูปของพิกัด 3 มิติ ที่เรียกว่าจุดเมฆ (Point Cloud) ซึ่งสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบลักษณะของโครงสร้าง เช่น การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงของรอยแตกร้าว รวมถึงนำเอาข้อมูลดังกล่าวไปใช้ร่วมกับวิธีการสร้างแบบจำลองโครงสร้างทางวิศวกรรม

หลักการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ จากภาพถ่าย (SFM) เป็นวิธีการประมาณค่าพิกัดใน 3 มิติ จากรูปภาพดิจิทัลโดยการประยุกต์ใช้ความรู้ทางด้านเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์วิชัน (Computer Vision), ดิจิทัลโฟโตแกรมเมตรี (Digital Photogrammetry) และการประมวลผลภาพดิจิทัล (Digital Image Processing) รวมเข้าด้วยกัน จนสามารถคำนวณพิกัด 3 มิติของแบบจำลองและตำแหน่งของกล้องถ่ายภาพได้ ดังภาพที่ 2.21 ภาพแสดงกระบวนการของ Structure From Motion (SFM) โดยสังเขป ในส่วนของการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ มีกระบวนการ 3 ขั้นตอนหลักคือ

1. Keypoint Matching หรือการจับคู่พิกัดจากภาพถ่ายโดยอัตโนมัติ โดยพิกัดจากภาพถ่ายนี้เป็นพิกัดที่มีลักษณะเฉพาะซึ่งได้ผ่านขั้นตอนทาง Image Processing หลายขั้นตอนจนได้พิกัดที่มีลักษณะเฉพาะหรือ Keypoint และสามารถจับคู่กับพิกัดที่เหมือนกับภาพถ่ายอื่นๆได้ โดยอัตโนมัติ อัลกอริทึมที่ใช้ในการหา Keypoint ที่ใช้ส่วนใหญ่คือ Scale Invariant Feature Transform หรือ SIFT ซึ่งได้ถูกสร้างขึ้นโดย Lowe (2004) ซึ่ง Keypoint ชนิดนี้สามารถใช้จับคู่กับ Keypoint อันเดียวกันในทุกภาพที่อยู่ในฐานข้อมูลเพื่อสร้างเป็น Track สำหรับแต่ละ Keypoint

2. Triangulation หลังจากที่ได้ Track จากขั้นตอนที่หนึ่งแล้ว Track จะถูกนำมาสร้างพิกัดสามมิติโดยหลักการทาง Triangulation ซึ่งวิธีการ Triangulation นี้สามารถสร้างพิกัดสามมิติไปพร้อมกันกับสร้างตำแหน่งของภาพถ่ายแต่ละภาพได้

3. Bundle Adjustment เป็นขั้นตอนสุดท้ายในการเพิ่มประสิทธิภาพที่สามารถปรับตำแหน่งพิกัด 3 มิติและตำแหน่งของกล้องถ่ายภาพให้มีความละเอียดมากขึ้น กระบวนการนี้จำเป็นที่จะต้องทำสืบเนื่องมาจากขั้นตอนกระบวนการ Triangulation ในข้อที่ 2 ที่ให้ผลลัพธ์ยังไม่ดีมากนัก จึงทำให้ต้องมีการปรับแก้ให้มีความถูกต้องมากขึ้น สำหรับขั้นตอนโดยละเอียดของเทคโนโลยี SFM สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ที่ Szeliski (2010)



ภาพที่ 2.21 กระบวนการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ โดยใช้ภาพถ่าย (Structure From Motion)

## 2.2.2 การหาความเปลี่ยนแปลงจากภาพถ่าย

การตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยภาพถ่ายเป็นการระบุบริเวณหรือตำแหน่งที่เกิดความผิดปกติจากชุดข้อมูลภาพถ่ายที่มุมมองหรือตำแหน่งภาพเดียวกันในช่วงเวลาต่างกัน ซึ่งผู้ตรวจสอบต้องนำข้อมูลที่ได้ในช่วงเวลาต่าง ๆ มาเปรียบเทียบหาความผิดปกติที่เกิดขึ้น ข้อมูลที่ได้รับจากภาพถ่ายสามารถระบุจุดหรือตำแหน่งที่ควรได้รับการซ่อมแซมที่ถูกต้องและนำไปสู่วิธีการแก้ไขที่เหมาะสม

### 2.2.2.1 การหาความเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิค Pixel Differencing

#### Algorithm

เทคนิค Pixel Differencing Algorithm ใช้ในการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงของข้อมูลภาพ 2 รูป ที่มุมมองเดียวกันที่เวลาต่างกันเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งแบ่งข้อมูลชุดภาพถ่ายออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นภาพถ่ายที่เวลาเริ่มต้น ( $t = t_0$ ) และส่วนที่สองเป็นภาพถ่ายที่เวลาเปลี่ยนไปหลังจากมีการเปลี่ยนแปลง ( $t_1 > t_0$ ) จากนั้นทำการตรวจหาการ



เปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นโดยใช้กระบวนการหาความแตกต่างของพิกเซล (Pixel Differencing Algorithm) ของภาพทั้งสองชุด จนได้ค่า Change Mask ในการแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงเป็นไบนารีบนรูปภาพดังสมการที่ (2.1)

$$B(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } |D(x)| > \tau \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $B(x)$  คือ ค่า Change Mask ที่ตำแหน่งพิกเซลที่  $x$   
 $D(x)$  คือ ผลต่างระหว่างค่าพิกเซลที่ตำแหน่ง  $x$  ของข้อมูลภาพถ่าย 2 รูป  
 $\tau$  คือ ค่าที่ใช้เป็นเกณฑ์ (Threshold) ในการทดสอบจนได้ค่า Change Mask ที่มีคุณภาพสูงสำหรับข้อมูลชุดนั้น

การหาผลต่างระหว่าง Pixel แสดงดังสมการที่ (2.2) ใช้ในการหาค่า Change Mask  $B(x)$  เพื่อนำมาระบุถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น  $I_1(x)$  และ  $I_2(x)$  คือค่าพิกเซลใน Gray Scale ของรูปปัจจุบันและอ้างอิง ตามลำดับ นำค่า  $D(x)$  จากสมการที่ (2.2) ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ใช้เป็นเกณฑ์ (Threshold) และหาค่า Change Mask ที่ให้ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงที่ดีที่สุดออกมา

$$D(x) = |I_1(x) - I_2(x)| \quad (2.2)$$

### 2.2.2.2 การหาความเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิค Extended Image Differencing

Extended Image Differencing เป็นวิธีที่นำวิธี Pixel Differencing Algorithm มาประยุกต์ใช้ใหม่ โดยจะได้ตัวแปรที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลง 2 ชนิดได้แก่  $D_{I1}(x)$  (Red) และ  $D_{I2}(x)$  (Blue) โดยวิธีการนี้แสดงผลของการหาผลต่างระหว่างพิกเซลที่น้อยที่สุดหลังจากผ่านกระบวนการคำนวณ โดยทั่วไปใช้พื้นที่ใกล้เคียงที่นำมาเปรียบเทียบเป็นขนาดพิกเซล  $7 \times 7$  ซึ่งหาผลของการเปลี่ยนแปลงได้จากสมการ (2.3) และ (2.4)

$$D_{I1}(x) = \min_{\Delta x \in N} |I_1(x) - I_2(x + \Delta x)| \quad (2.3)$$

$$D_{I2}(x) = \min_{\Delta x \in N} |I_2(x) - I_1(x + \Delta x)| \quad (2.4)$$

ซึ่งผลจากวิธี Extended Image Differencing สามารถได้ค่าของ  $D_I(x)$  หาจากสมการ (2.5) ไปใช้เป็นผลในการหา Differencing Mask  $M_I$

$$D_I(x) = \max(D_{I1}(x), D_{I2}(x)) \quad (2.5)$$

### 2.2.2.3 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วยวิธีการใหม่ในงานวิจัยของ

Günter Saur และ Wolfgang Krüger (2016)

วิธีการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงแบบใหม่นี้จะเป็นการหา Binary Change Mask ถึง 2 ค่าคือ ความเปลี่ยนแปลงที่ปรากฏบนภาพปัจจุบันแต่ไม่ปรากฏหรือปรากฏไม่ชัดเจนในภาพอ้างอิง  $C_{12}$  และ ความเปลี่ยนแปลงที่ปรากฏบนภาพอ้างอิงแต่ไม่ปรากฏหรือปรากฏไม่ชัดเจนในภาพปัจจุบัน  $C_{21}$  ซึ่งกระบวนการแบบนี้จะแตกต่างกับวิธี Differencing Mask ที่ให้ผลเหมือนกับใช้คนทำการตรวจสอบโดยมี Change Mask เพียงแค่ตัวเดียวคือ  $D(x)$  และวิธีการใหม่นี้ยังเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการโดยเพิ่มค่าที่ใช้เป็นเกณฑ์ (Threshold) ถึง 2 ตัวคือ เกณฑ์ลักษณะจุดเด่นภายในภาพ  $t_0$  และเกณฑ์ค่าสัมพัทธ์ซึ่งใช้ในการเปรียบเทียบค่าความสัมพันธ์ระหว่างภาพสองภาพ  $t_r$  โดยใช้ค่าลักษณะเด่นของภาพทั้ง  $F_1(x)$  และ  $F_2(x)$  ที่ตำแหน่งพิกเซลที่  $x$  และค่าซึ่งได้จากสมการ (2.6) (2.7) (2.8) อ่านรายละเอียดเพิ่มเติมที่ Günter Saur และ Wolfgang Krüger (2016) ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 2.18 ในหลักที่ 3

$$C_{12}(x) = (F_1(x) > t_0 \wedge t_r F_2(x)) \quad (2.6)$$

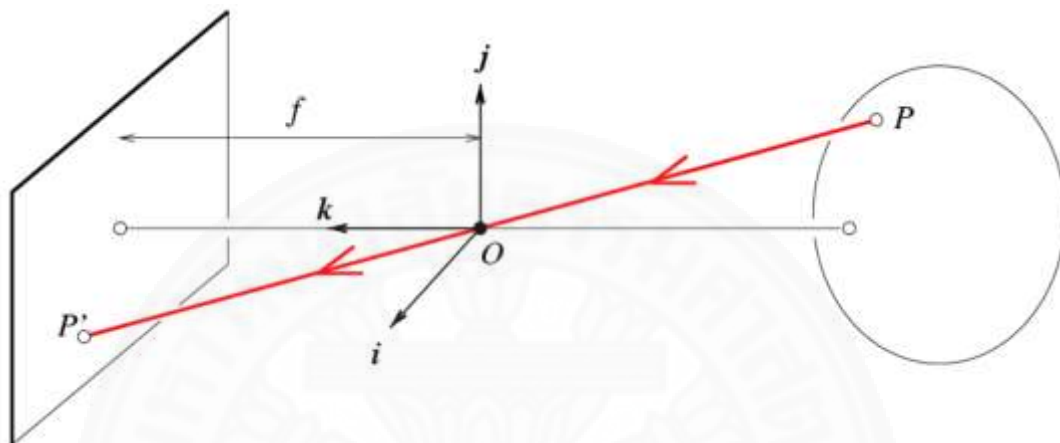
$$C_{21}(x) = (F_2(x) > t_0 \wedge t_r F_1(x)) \quad (2.7)$$

$$F(x) = \overline{I_x(x)I_x(x)} \overline{I_y(x)I_y(x)} - \overline{I_x(x)I_y(x)} \overline{I_x(x)I_y(x)} \quad (2.8)$$

### 2.2.3 การสร้างเมตริกซ์การแปลงเพื่อการสังเคราะห์ภาพในระบบพิกัดสามมิติ

กระบวนการนี้เป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่มีความสำคัญในการหาตำแหน่งของกล้องในแบบจำลองสามมิติโดยการประมาณค่าพารามิเตอร์จากภาพถ่าย 2 มิติ นอกจากประโยชน์ในเรื่องของการประมาณหาตำแหน่งกล้องแล้วยังสามารถสังเคราะห์ภาพออกมาด้วยพารามิเตอร์ของกล้องได้อีกด้วย ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้จึงได้มีการประยุกต์ใช้ความรู้เกี่ยวกับการปรับเทียบตำแหน่งกล้องเข้ามาช่วยในกระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพถ่ายจริงและภาพสังเคราะห์

จากแบบจำลองสามมิติ โดยความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของภาพและตำแหน่งของกล้องเป็นส่วนสำคัญที่ใช้การตรวจหาการเปลี่ยนแปลงในงานวิจัย ซึ่งได้มีการประยุกต์ใช้ความสัมพันธ์ของการมองเห็นและการมีอยู่ของวัตถุใน 3 มิติให้สามารถสังเคราะห์ออกมาเป็นภาพ 2 มิติได้โดยใช้หลักการของการมองเห็นวัตถุ แสดงดังภาพที่ 2.22



ภาพที่ 2.22 ความสัมพันธ์ระหว่างจุดบน 3 มิติ P และจุดบนระนาบ 2 มิติ P'

จากภาพที่ 2.22 แสดงถึงการประมาณหาจุด P' ในระบบภาพ 2 มิติ จากจุด P ซึ่งอยู่ในระบบแกน 3 มิติ (ประกอบด้วยแกน i, j และ k) โดยจุด O คือจุดศูนย์กลางของกล้องหรือที่เรียกกันว่าจุดโฟกัส (Focus) และค่า f คือระยะห่างระหว่างจุดโฟกัสไปจนถึงระนาบของภาพ 2 มิติ เรียกว่า ทางยาวโฟกัส (Focal Length) จากความสัมพันธ์เหล่านี้ทำให้ได้วิธีการในการหาจุดพิกัดบนระบบแกน 3 มิติ จากจุดบนภาพ 2 มิติหรือหาจุดพิกัดบนภาพ 2 มิติจากระบบพิกัดแกน 3 มิติ แสดงดังสมการที่ (2.9)

$$P = (x, y, z) \rightarrow P' = \left( f \frac{x}{z}, f \frac{y}{z} \right) \quad (2.9)$$

จากสมการที่ (2.9) กล่าวได้ว่าเป็นรูปแบบพิกัดเอกพันธ์ (Homogeneous Coordinate) ที่มีจำนวนนับไม่ถ้วนสำหรับการเขียนแทนจุดพิกัดใดๆ ซึ่งทำให้ไม่ใช่สมการเส้นตรง และเพื่อให้สะดวกในการคำนวณแต่ละตำแหน่ง 3 มิติจะถูกเขียนในพิกัดเอกพันธ์ได้เป็น  $(x, y, z, 1)$  และการแสดงตำแหน่งในพิกัดเอกพันธ์ช่วยให้เราสามารถแสดงสมการการแปลงรูปทางเรขาคณิตทั้งหมดได้ในรูปของการคูณกันของเมตริกซ์ โดยพิกัดจะถูกแทนด้วย Column Vectors

ที่มีสมาชิก 4 ตัวและการแปลงรูปจะถูกเขียนในรูปเมตริกซ์ขนาด  $3 \times 4$  แสดงดังสมการที่ (2.10) เป็นสมการในพิกัดเอกพจน์โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายแสดงดังสมการที่ (2.11) ซึ่งตัวแปร  $M$  เรียกว่าเมตริกซ์การฉาย (Projection Matrix) ในอุดมคติ (Ideal World)

$$P' = \begin{bmatrix} fx \\ fy \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$P' = MP \quad (2.11)$$

เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 2.22 ในระบบสมการดังที่กล่าวมา  $M$  เป็นเพียงเมตริกซ์การฉายในอุดมคติ ซึ่งไม่ได้คิดผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงมุมมองและองค์ประกอบต่างๆ ของภาพและกล้อง โดยสามารถแบ่งสมมติฐานการเปลี่ยนแปลงของเมตริกซ์การฉาย (Projection Matrix) ออกเป็น 2 องค์ประกอบ แสดงดังภาพที่ 2.23

$$P' = K [I \ 0] P = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$K$  : Intrinsic       $[I \ 0]$  : Extrinsic

ภาพที่ 2.23 องค์ประกอบของเมตริกซ์การฉาย (Projection Matrix :  $K$ ) จากระบบสมการที่ (2.11)

จากภาพที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงในระบบสมการการแปลงพิกัด 3 มิติของเมตริกซ์การฉายจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ เมตริกซ์การแปลงภายใน (Intrinsic Matrix) และเมตริกซ์การแปลงภายนอก (Extrinsic Matrix) การเปลี่ยนแปลงลักษณะของพิกัดต่างๆ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.2.3.1 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของพิกัดใน 3 มิติด้วยเมตริกซ์

#### การแปลงภายใน

เมื่อจุดศูนย์กลางของเลนส์กล้องที่ทำให้เกิดภาพ (Optical Center) ไม่ได้อยู่ที่พิกัด  $(0,0)$  ทำให้ต้องมีการปรับระบบสมการเพื่อการแปลงพิกัดใน 3 มิติให้มีความถูกต้องแสดงดังสมการที่ (2.12) โดย  $(u_0, v_0)$  เป็นพิกัดของ Optical Center ของเลนส์กล้องที่ห่างจากจุด

ศูนย์กลางกำเนิด (0,0) นอกจากนี้หากกล้องให้ขนาดของภาพเป็นพิกเซลที่มีขนาดไม่ใช่สี่เหลี่ยมจัตุรัส (Rectangular Pixels) ระบบสมการที่ (2.12) จะถูกปรับให้พิกัด 3 มิติมีความถูกต้องตรงตามขนาดของภาพจากกล้องด้วยการเปลี่ยนทางยาวโฟกัส (Focal Length : f) ให้ตรงตามขนาดของภาพจากกล้อง ( $\alpha \times \beta$ ) แสดงดังสมการที่ (2.13) และหากองค์ประกอบของภาพมีการบิดเบี้ยวหรือได้รับผลของการบิดเบี้ยว (Skew) สมการที่ (2.13) จะถูกเพิ่มผลของการบิดเบี้ยวนี้เข้าไปด้วยค่า  $s$  แสดงดังสมการที่ (2.14) จากผลลัพธ์ที่ได้นี้เมตริกซ์การฉายจะต้องค้ประกอบแบ่งออกเป็นเมตริกซ์การแปลงภายในแสดงดังภาพที่ 2.24

$$P' = \begin{bmatrix} fx \\ fy \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$P' = \begin{bmatrix} fx \\ fy \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \beta & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$P' = \begin{bmatrix} fx \\ fy \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & s & u_0 & 0 \\ 0 & \beta & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Intrinsic parameters

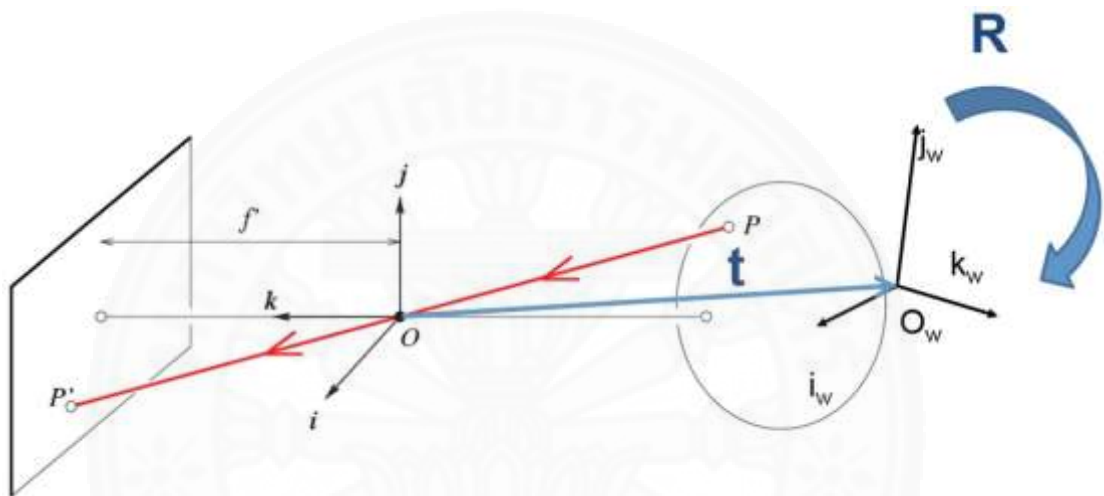
$$\begin{bmatrix} \alpha & s & u_0 & 0 \\ 0 & \beta & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

ภาพที่ 2.24 พารามิเตอร์ต่างๆในเมตริกซ์การแปลงภายใน

### 2.2.3.2 การเปลี่ยนแปลงลักษณะของพิกัดใน 3 มิติด้วยเมตริกซ์

#### การแปลงภายนอก

นอกจากพารามิเตอร์ของเมตริกซ์การแปลงภายในยังมีการแปลงพิกัดใน 3 มิติของภาพหรือวัตถุที่เกิดจากการเคลื่อนที่ (Translation) และการหมุน (Rotation) ของกล้อง ซึ่งการแปลงพิกัดใน 3 มิติที่กล่าวมาเหล่านี้เกิดจากเมตริกซ์การแปลงภายนอก (Extrinsic Matrix) ภาพที่ 2.25 แสดงตัวอย่างการเคลื่อนที่และการหมุนของกล้องในระบบการแปลงพิกัด 3 มิติ



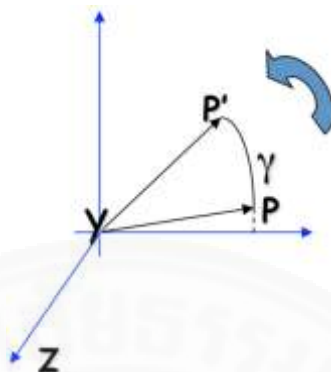
ภาพที่ 2.25 ตัวอย่างการเคลื่อนที่และการหมุนของกล้องในระบบการแปลงพิกัด 3 มิติ

จากภาพที่ 2.25 เมื่อแทนพารามิเตอร์ต่างๆของเมตริกซ์การแปลงภายใน (Intrinsic Matrix) และผลที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของตำแหน่งกล้องจนก่อให้เกิดเป็นระยะจากจุดศูนย์กลางเดิมในแนวแกน  $x, y, z$  ในระบบพิกัด 3 มิติ เป็นระยะ  $\bar{t}$  ซึ่งประกอบด้วย  $t_x, t_y, t_z$  ตามลำดับ สามารถเขียนสมการใหม่แสดงดังสมการที่ (2.15)

$$P' = K [I \quad \bar{t}] P = \begin{bmatrix} \alpha & s & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

นอกจากนี้ผลของการหมุนยังสามารถอธิบายด้วยหลักการของการหมุนในระบบพิกัดสามมิติรอบแกนใดๆในทิศทางเข็มนาฬิกา แสดงตัวอย่างภาพการหมุนรอบแกน  $Z$  ด้วยมุม  $\gamma$  ดังภาพที่ 2.26 จากความสัมพันธ์ในการหมุนรอบแกนจะพิจารณาเฉพาะการหมุนรอบจุด

กำเนิดอย่างเดียวกันในลักษณะเดียวกันกับสองมิติการหมุนในสามมิติสามารถเขียนได้เป็นเมทริกซ์การหมุน โดยในกรณีนี้เมทริกซ์การหมุนจะมีขนาดสามคูณสาม



ภาพที่ 2.26 ภาพตัวอย่างการหมุนรอบแกน Z ด้วยมุม  $\gamma$  ในทิศทางเข็มนาฬิกา

การสร้างเมทริกซ์การหมุนรอบแกนใดๆสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.16), (2.17) และ (2.18) ซึ่งเป็นเมทริกซ์การหมุนรอบแกน x ด้วยมุม  $\alpha$ , หมุนรอบแกน y ด้วยมุม  $\beta$  และหมุนรอบแกน z ด้วยมุม  $\gamma$  ตามลำดับ

$$R_x(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$R_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

การหมุนรอบแกนหลักนี้สามารถนำมาเขียนเรียงต่อกันเป็นการหมุนที่มีมุมมองศรทั้งสามเขียนจากขวาไปซ้ายเป็นการหมุนเฟรมวัตถุเทียบกับเฟรมหลักที่อยู่นิ่ง โดยจะหมุนรอบแกน x ก่อนแล้วหมุนรอบแกน y จากนั้นหมุนรอบแกน z การหมุนแบบนี้ถูกเรียกว่า X-Y-Z Fixed Angles ซึ่งจะได้เมทริกซ์การหมุนแสดงดังสมการที่ (2.19) ซึ่งเขียนให้อยู่ในรูปผลรวมจากการ

คูณเมตริกซ์แสดงดังสมการที่ (2.20) และสามารถเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายแสดงดังสมการที่ (2.21) โดยสมการที่ (2.20) และ (2.21) เป็นสมการเดียวกัน

$$R_{xyz}(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$R_{xyz}(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta & \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha - \sin \gamma \cos \alpha & \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha + \sin \gamma \sin \alpha \\ \sin \gamma \cos \beta & \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha + \cos \gamma \cos \alpha & \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha - \cos \gamma \sin \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$R_{xyz}(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

### 2.2.3.3 สมการการแปลงพิกัดในสามมิติ

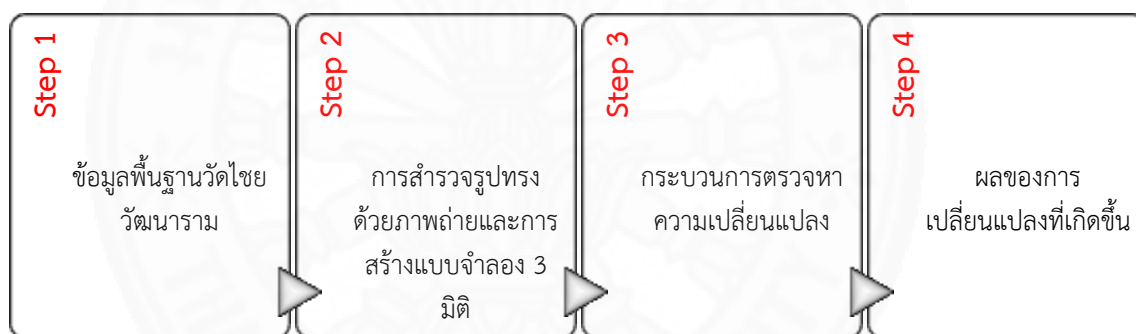
จากหัวข้อที่กล่าวมาข้างต้นนำผลจากสมการที่ (2.21) รวมเข้ากับสมการที่ (2.15) จะก่อให้เกิดสมการการฉายหรือ Projection Equation แสดงดังสมการที่ (2.22) ซึ่งเป็นสมการทั่วไปที่ใช้สำหรับการแปลงรูปทางเรขาคณิต 3 มิติให้เป็นภาพ 2 มิติ และเป็นอีกหนึ่งในสมการที่ทำให้งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการสังเคราะห์ภาพจากแบบจำลองสามมิติ เพื่อให้ได้ภาพสังเคราะห์ที่มีมุมมองเดียวกันกับภาพอ้างอิงผ่านกระบวนการปรับเทียบตำแหน่งกล้องโดยใช้หลักการที่กล่าวมาข้างต้นเพื่อการตรวจสอบความเปลี่ยนแปลง

$$P' = K [R \quad \bar{t}] P = \begin{bmatrix} \alpha & s & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$



### บทที่ 3 วิธีการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงของกรณีศึกษาโบราณสถานในวัดไชยวัฒนาราม โดยวิธีการหาความเปลี่ยนแปลงนี้ใช้ข้อมูลภาพถ่ายผ่านทางเครื่องบินอากาศยานไร้คนขับนำมาสร้างแบบจำลอง 3 มิติด้วยภาพถ่ายผ่านกระบวนการ Structure From motion (SfM) ข้อมูลที่ได้จากกระบวนการนี้คือ จุดเมฆ (Point Cloud) และตำแหน่งของกล้องนำมาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง จากนั้นเก็บข้อมูลภาพถ่ายอีกครั้งเป็นระยะๆ เพื่อหาความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นแล้วนำข้อมูลภาพถ่ายที่เกิดความเปลี่ยนแปลงที่ได้มาเข้ากระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลง (Change Detection) เทียบกับข้อมูลอ้างอิง ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนหลัก (ภาพที่ 3.1) รายละเอียดในแต่ละขั้นตอนได้อธิบายไว้ในบทนี้



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการศึกษาการตรวจหาความเปลี่ยนแปลง

#### 3.1 ประวัติและข้อมูลพื้นฐานวัดไชยวัฒนาราม

วัดไชยวัฒนาราม ตั้งอยู่ที่ ต.บ้านป้อม อ.พระนครศรีอยุธยา ซึ่งตั้งอยู่ริมแม่น้ำเจ้าพระยาทางฝั่งตะวันตกของเกาะเมือง วัดไชยวัฒนาราม เป็นวัดหนึ่งที่มีสถาปัตยกรรมการก่อสร้างไม่เหมือนวัดอื่นๆ ในอยุธยาและเนื่องจากกรมศิลปากรได้ดำเนินการบูรณะตลอดมาจนปัจจุบันนักท่องเที่ยวยังคงมองเห็นความสวยงามยิ่งใหญ่ตระการตา วัดไชยวัฒนารามสร้างบนพื้นที่ 160 เมตรยาว 310 เมตร โดยหันหน้าไปทางทิศตะวันออกกล่าวได้ว่าวัดนี้ตั้งตรงกับทิศทางคตินิยมในการสร้างวัดที่ปฏิบัติเป็นประเพณีสืบกันมา นอกจากนี้ยังสอดคล้องกับเหตุการณ์ในพุทธประวัติที่กล่าวว่า พระโพธิสัตว์ทรงประทับภายใต้ต้นพระศรีมหาโพธิ์ หันพระพักตร์ไปทางทิศตะวันออกสู่แม่น้ำเนรัญชรา ทรงบำเพ็ญสมาธิจนบรรลุพระสัมมาสัมโพธิญาณ พระพุทธรูปซึ่งเป็นหลักของวัดก็สร้างแทนองค์ประพุทธร

เจ้าคือพระประธานในพระอุโบสถเป็นพระพุทธรูปปางสมาธิ ซึ่งเป็นปางที่แสดงเหตุการณ์ตอนพระพุทธรองค์ตรัสรู้

วัดไชยวัฒนารามบางครั้งเรียกว่า “วัดไชยาราม” และ “วัดไชยชนะการาม” เป็นพระอารามหลวงในสมัยอยุธยา ซึ่งเป็นวัดที่สมเด็จพระเจ้าปราสาททอง โปรดให้สถาปนาขึ้นเป็นวัดอรัญวาสี ณ บริเวณที่ดินซึ่งเป็นนิวาสสถานของพระราชชนนีในปีที่ขึ้นครองราชย์ คือปีมะเมีย พ.ศ. 2173 สันนิษฐานว่าเป็นวัดประจำรัชกาลด้วย ต่อมาในรัชสมัยของพระเจ้าอยู่หัวบรมโกศได้ใช้วัดนี้ในฐานะเป็นวัดฝ่ายอรัญวาสีสำหรับพระราชทานเพลิงศพของพระราชวงศ์และขุนนางผู้สูงศักดิ์ในปี พ.ศ. 2299 กรมพระราชวังบวรสถานมงคล เจ้าฟ้าธรรมธิเบศร (เจ้าฟ้ากุ้ง) กวีเอกสมัยอยุธยาตอนปลาย ได้ถูกกล่าวโทษว่าเสด็จเข้ามาทำชู้กับเจ้าฟ้าสังวาลย์ในพระราชวังหลายครั้ง สืบสวนได้ความเป็นสัตย์จริง จึงลงพระราชอาญาเขียนทั้งสองพระองค์จันดับสูญแล้วนำศพไปฝังไว้ ณ วัดไชยวัฒนารามทั้งสองพระองค์

ซึ่งวัดไชยวัฒนารามได้มีจุดที่น่าสนใจต่างๆมากมายที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะและเป็นมรดกทางวัฒนธรรมในประเทศ ที่ทรงคุณค่าและควรค่าแก่การอนุรักษ์ไว้ โดยมีจุดที่น่าสนใจต่างๆ ดังนี้

ปราสาทประธาน ตั้งอยู่บริเวณตรงกลางของพื้นที่ฐานประทักษิณ ซึ่งฐานประทักษิณได้ยกสูงขึ้นมาจากพื้น 1.5 เมตร มีลักษณะเป็นปราสาทจัตุรมุข(มีมุขยื่นออกมาทั้ง 4 ด้าน) ในส่วนของมุขด้านตะวันออกจะเจาะมุขทะลุเข้าสู่เรือนธาตุ ซึ่งภายในจะประดิษฐานพระพุทธรูปนั่ง (ปัจจุบันไม่พบแล้ว) ยอดขององค์ปราสาท ทำเป็นรัตประคดซ้อนกัน 7 ชั้นแต่ละชั้นเป็นลวดลายใบขนุน กลีบขนุนส่วนบนสุดเป็นทรงดอกบัวตูม ปราสาทแบบนี้มีลักษณะเหมือนปราสาทในสมัยอยุธยาตอนต้น ซึ่งวัดไชยวัฒนารามนั้นสร้างในสมัยอยุธยาตอนกลาง จึงอาจกล่าวได้ว่าเป็นการนำเอาพระปราสาทที่นิยมสร้างในสมัยอยุธยาตอนต้นมาก่อสร้างอีกครั้งหนึ่ง



ภาพที่ 3.2 ปราสาทประธาน วัดไชยวัฒนาราม จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

ปราสาทบรีวาร คือปราสาทองค์เล็กลงมาที่อยู่รายล้อม ปราสาทประธาน มีทั้งหมด 4 องค์ ลักษณะจะเปรียบกว่าปราสาทประธาน

เมรุ คืออาคารทรงยอดแหลมที่อยู่รายรอบระเบียงคด ทั้ง 8 ทิศ ภายในคูหาจะประดิษฐานพระพุทธรูปทรงเครื่องปางมารวิชัยเอาไว้ที่เมรุทิศเมรุละ 1 องค์ เมรุมุมเมรุละ 2 องค์ ภายในคูหาไม้ภาพจิตรกรรมฝาผนังหลงเหลือร่องรอยอยู่เล็กน้อย

ระเบียงคด คือส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างเมรุแต่ละเมรุเอาไว้ โดยรอบฐานประทักษิณ ซึ่งแต่เดิมจะมีหลังคารอบๆที่บริเวณระเบียงคดนี้จะมีพระพุทธรูปปางมารวิชัยประดิษฐานอยู่รวมทั้งหมด 120 องค์ แกนในทำจากไม้พอกปูนที่ละชั้นจนได้สัดส่วน ส่วนนี้ใช้โลหะสำริดตัดขึ้นรูปปัจจุบันเหลือที่ยังมีพระเศียรอยู่ 2 องค์



ภาพที่ 3.3 พระพุทธรูปรายรอบระเบียงคด

พระอุโบสถ อยู่ทางด้านทิศตะวันออกนอก ระเบียงคด มีซากพระประธานปางสมาธิประดิษฐานอยู่บนฐานชุกชี สถาปัตยกรรมที่เหลือเพียงฐานเสาอุโบสถและรอยฐานเสมา อีกทั้งยังมีภาพปูนปั้น อยู่บริเวณด้านนอกของเมรุทั้ง 8 องค์ จะเป็นภาพเกี่ยวกับพุทธประวัติ



ภาพที่ 3.4 ซากพระประธานปางสมาธิประดิษฐานอยู่บนฐานชุกชี

### 3.2 การสำรวจรูปทรงด้วยการถ่ายภาพ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาวิธีการสำรวจลักษณะรูปทรงและลักษณะทางกายภาพภายนอกของโครงสร้างโบราณสถาน โดยใช้เทคโนโลยีการสำรวจด้วยภาพถ่ายประยุกต์ร่วมกับเทคโนโลยี Structure From Motion (SFM) เพื่อสร้างเป็นแบบจำลอง 3 มิติ ซึ่งหลักการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ได้อธิบายในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.2.1 ซึ่งกระบวนการเก็บข้อมูล และการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ จะกล่าวในขั้นต่อไป

#### 3.2.1 อุปกรณ์การสำรวจด้วยภาพถ่าย

การสำรวจโครงสร้างโบราณสถานด้วยการถ่ายภาพ เพื่อนำไปใช้สร้างแบบจำลอง 3 มิติโดยทั่วไปแล้วการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ของโครงสร้างให้สมบูรณ์นั้นขึ้นอยู่กับข้อมูลภาพถ่ายที่สามารถเก็บรายละเอียดได้ครบทั้งโครงสร้างที่สนใจ แต่โครงสร้างโบราณสถานขนาดใหญ่ในวัดไชยวัฒนารามมีความสูงมาก อีกทั้งยังมีชั้นองค์เจดีย์ที่สามารถเดินได้โดยรอบ จึงทำให้การถ่ายภาพจากพื้นไม่สามารถเก็บข้อมูลบริเวณยอดและพื้นชั้นดังกล่าวได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการถ่ายภาพจากมุมสูง เพื่อบันทึกภาพถ่ายของส่วนที่ไม่สามารถเข้าถึงได้ ในงานวิจัยนี้จึงนำเอาเทคโนโลยีการบินแบบ อากาศยานไร้คนขับ (UAV : Unmanned Aerial Vehicle) เพื่อที่บันทึกข้อมูลของโครงสร้างได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์ โดยอุปกรณ์ที่นำมาใช้เพื่อการสำรวจภาพถ่ายดิจิทัล ได้แก่ เครื่องบินอากาศยานไร้คนขับจาก DJI รุ่น Phantom 4 (DJI, 2559) แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ดังภาพที่ 3.5 และตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของอุปกรณ์ในการบันทึกภาพถ่าย

รายละเอียด	Phantom 4	หมายเหตุ
เซนเซอร์	1/2.3	CMOS
ขนาดภาพสูงสุด	12.4	ล้านพิกเซล
ระยะภาพ	20 มม.	บนขนาด 35 มม.
GPS	มี GPS/GLONASS	-



ภาพที่ 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกภาพถ่าย DJI Phantom 4

### 3.2.2 วิธีการบันทึกภาพถ่ายเพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติ

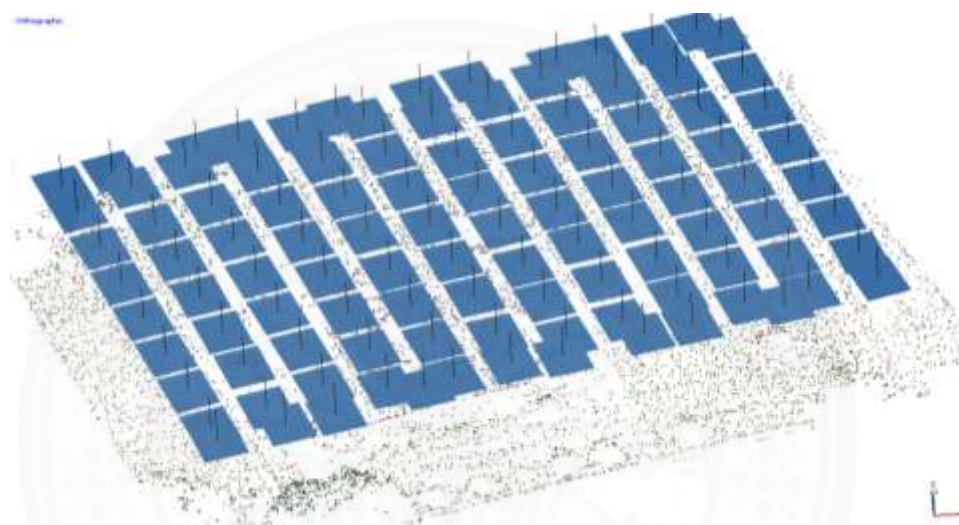
วิธีการบันทึกภาพถ่ายเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญส่งผลโดยตรงกับการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ หากภาพถ่ายดิจิทัลที่นำมาใช้มีคุณภาพต่ำอาจส่งผลให้ไม่สามารถนำไปสร้างแบบจำลอง 3 มิติ หรือ วิธีการบันทึกภาพถ่ายไม่ถูกลักษณะจะทำให้ได้องค์ประกอบของแบบจำลองและรายละเอียด 3 มิติ ไม่ดีอย่างที่ควร โดยในหัวข้อนี้สรุปวิธีการบันทึกภาพถ่ายจากเครื่องบินอากาศยานไร้คนขับเป็นพื้นฐานของการสร้างแบบ 3 มิติ จากภาพถ่าย สิ่งสำคัญประการแรกคือ ภาพถ่ายที่นำมาสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ควรที่จะต้องมีพื้นที่ซ้อนทับระหว่างภาพอย่างน้อยร้อยละ 50 ถึง 70 และไม่ควรถ่ายภาพที่ตำแหน่งเดิมเพื่อบันทึกภาพหลาย ๆ มุมมอง แต่ควรมีการเคลื่อนตัวหรือขยับตำแหน่งกล้องจากจุดเดิมแล้วบันทึกภาพถ่าย โดยเทคโนโลยีเครื่องบินอากาศยานไร้คนขับสามารถที่จะสั่งการบินแบบอัตโนมัติได้ ซึ่งสิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นพื้นฐานเบื้องต้นในการถ่ายภาพ เพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติ



ภาพที่ 3.6 ตัวอย่างการซ้อนทับของภาพถ่าย

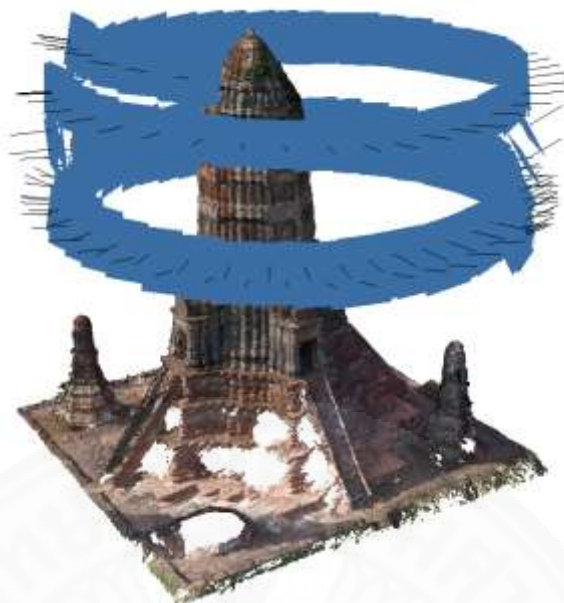
การบันทึกภาพถ่ายทางอากาศเพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติ โดยทั่วไปสามารถแบ่งเทคนิคการถ่ายภาพออกเป็น 2 ส่วนคือ 1. การบินแบบสแกน (The Scanning Flight) 2. การบินรอบวัตถุที่สนใจ (The Circular POI Flight) ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของงานที่นำไปใช้ โดยมีลักษณะดังต่อไปนี้

1. การบินแบบสแกน (The Scanning Flight) เหมาะกับการสำรวจพื้นที่ที่ต้องสร้างแบบจำลองเป็นขนาดใหญ่ เทคโนโลยีนี้เหมาะกับการทำแผนที่ทางอากาศ เช่น การสำรวจของ การพัฒนาการเกษตร การวางแผนที่ดินและการพัฒนา การวางผังเมืองและวิศวกรรม เป็นต้น การบินในลักษณะดังกล่าวนั้นเป็นการบินตามแนวระดับสลับไปมาเป็นรูปตัวเอส (S) ซึ่งการถ่ายในลักษณะนี้ไม่เหมาะกับการสำรวจโครงสร้างเพราะไม่สามารถให้รายละเอียดที่ครบถ้วนของโครงสร้างที่สนใจได้ แต่จะเหมาะกับการสำรวจพื้นที่ขนาดใหญ่เพื่อใช้ในการสร้างแผนที่เป็นหลัก



ภาพที่ 3.7 การบินแบบสแกน (The Scanning Flight)

2. การบินรอบวัตถุที่สนใจ (The Circular POI Flight) การบินในลักษณะนี้เป็นการบินรอบวัตถุเป็นวงกลมกับโครงสร้างที่สนใจ วิธีนี้เหมาะกับการบันทึกภาพโครงสร้างขนาดใหญ่และปราศจากสิ่งก่อสร้างที่มีขนาดความสูงระดับเดียวกับโครงสร้างที่ต้องการถ่าย เนื่องจากวิธีการบินลักษณะดังกล่าวอาศัยพื้นที่รัศมีของขอบเขตการบินเป็นบริเวณกว้าง หากหลีกเลี่ยงไม่ได้จำเป็นบันทึกข้อมูลควรที่จะต้องมีการหาความสูงโดยรอบก่อนการบิน เช่น ต้นไม้ เสาไฟ เป็นต้น ในขณะที่การบินยังสามารถเลือกปรับตำแหน่งกล้องตามระยะความสูงขณะกำลังบินได้ ในการบันทึกภาพถ่ายนั้นสามารถอัดภาพเป็นวิดีโอหรือถ่ายภาพเป็นช่วงเวลาก็ได้ งานวิจัยนี้เลือกตั้งค่าโดยกำหนดให้เป็นการถ่ายเป็นแบบช่วงตามที่กำหนด เนื่องจากอากาศยานไร้คนขับของ DJI รุ่น Phantom 4 โดยสามารถบันทึกพิกัด GPS ลงแต่ละภาพที่ทำการถ่ายภาพ ดังภาพที่ 3.8 แสดงให้เห็นตำแหน่งของกล้องมีลักษณะเป็นวงกลมรอบโครงสร้าง และยังแสดงระดับความสูงของ จากการถ่ายภาพมุมสูงทำให้ภาพถ่ายที่บริเวณยอดของโครงสร้างนั้น มีรายละเอียดเหมาะสมที่จะนำสร้างแบบจำลอง 3 มิติ



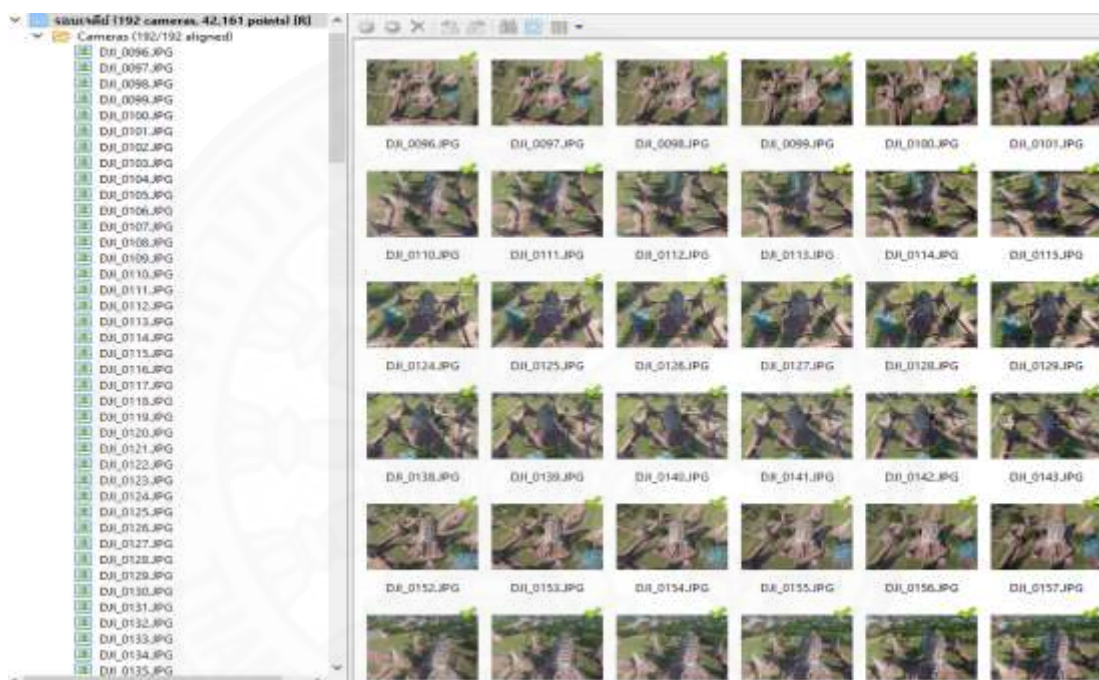
ภาพที่ 3.8 การบินรอบวัตถุที่เป้าหมาย (The Circular POI Flight)

ภาพที่ 3.8 แสดงตำแหน่งของรูปภาพที่ได้จากพิกัด GPS และจุดกลุ่มเมฆจากการประมวลผล ซึ่งข้อมูลดังกล่าวเป็นผลที่ได้จากการบินแบบรอบองค์เจดีย์เป็นวงกลมหลายระดับ ความสูง การบินลักษณะดังกล่าวนี้ต้องบินในระดับความสูงที่ไม่แตกต่างกันเกินไปหรือควรบินให้อยู่ในระดับเดียวกับโครงสร้าง

### 3.2.3 การประมวลผลแบบจำลอง 3 มิติ

ปัจจุบันเทคโนโลยีการสร้างแบบจำลอง 3 มิติจากภาพถ่ายนั้นได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก จึงทำให้มีหลากหลายองค์กรรวมถึงสถาบันการศึกษาที่ให้ความสนใจและพัฒนา จึงทำให้มีซอฟต์แวร์ที่มีทั้งเสียค่าใช้จ่ายในการนำมาใช้งาน หรือ สามารถนำไปใช้งานได้ฟรี ซึ่งความสามารถในการประมวลผลก็แตกต่างกันออกไป โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้ซอฟต์แวร์ Agisoft Photoscan Professional (Agisoft LLC, 2559) เป็นซอฟต์แวร์สร้างแบบจำลอง 3 มิติที่ถูกพัฒนาโดยบริษัทในประเทศไทย โดยหลักการพื้นฐานวิธีการของ SFM เป็นหลักแต่จะเพิ่มเติมในส่วนของการสร้างพื้นผิวและสร้างโครงตาข่ายสามเหลี่ยม เหล่านี้เป็นการนำเอาเทคโนโลยีสมัยใหม่เข้ามาช่วยในการสำรวจรูปทรงของโครงสร้างโบราณสถาน ในหัวข้อที่ผ่านมาได้อธิบายถึงหลักการและวิธีการถ่ายภาพเพื่อนำมาสร้างเป็นแบบจำลอง 3 มิติ ส่วนในหัวข้อนี้จะแสดงขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง 3 มิติ จากภาพถ่ายของปราสาทประธาน วัดไชยวัฒนาราม จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ซึ่งขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองนั้นมีดังต่อไปนี้

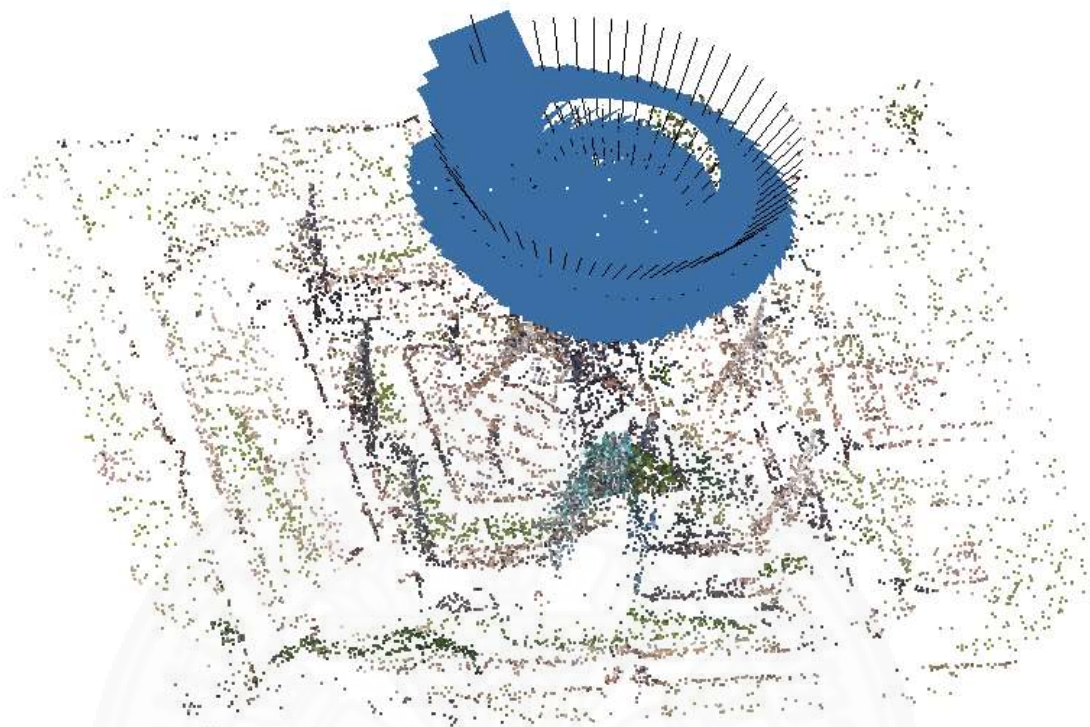
1. เลือกภาพถ่าย (Loading Photos) ขั้นตอนแรกในการใช้งานเพื่อสร้างแบบจำลองคือ การคัดกรองภาพถ่ายที่จะสามารถเอามาใช้งานได้ โดยเลือกภาพที่มีความสมบูรณ์เช่นสามารถเก็บรายละเอียดในส่วนที่ต้องการเอาไว้ได้ มีความชัดเพียงพอและสภาพแสงไม่มีมืดเกินไป จากนั้นป้อนภาพที่เลือกสู่ซอฟต์แวร์ จากภาพที่ 3.9 แสดงภาพถ่ายทั้งหมดที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติของโครงสร้างทั้งหมด 192 รูปและทุกภาพมีพิกัด GPS ระบุตำแหน่งไว้ เพื่อนำไปคำนวณขนาดและระยะของแบบจำลองในขั้นตอนต่อไป



ภาพที่ 3.9 รายละเอียดของภาพถ่ายที่นำมาสร้างแบบจำลองทั้งหมด 192 รูป

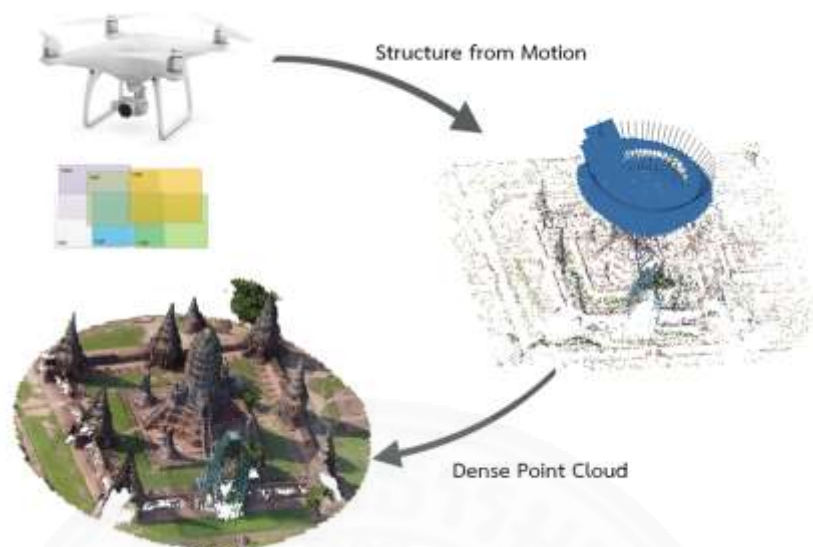
2. การวางแนวภาพถ่าย (Align Photos) ขั้นตอนนี้เป็นการประมวลผลโดยใช้หลักการ SFM หาความสัมพันธ์ระหว่างภาพถ่าย เริ่มจากการหาจุดสำคัญที่เรียกว่า Key Point จากการคำนวณด้วย Sift Detector อัลกอริทึมของทุกภาพโดยจุดสำคัญดังกล่าวมีลักษณะเป็นแนวเส้นตรง ขอบและมุม เมื่อแล้วเสร็จขั้นตอนต่อมาเป็นการหาความสัมพันธ์การจับคู่กันของภาพถ่าย เรียกว่า Matching Feature ขั้นตอนที่ไปเป็นการคำนวณสร้างแบบจำลองจุดกลุ่มเมฆแบบห่าง (Sparse Point Cloud) และตำแหน่งกล้องดังภาพที่ 3.10 โดยใช้ตำแหน่งพิกัด GPS ที่บันทึกลงบนภาพถ่ายแต่ละภาพนำมาคำนวณหาระยะของแบบจำลอง 3 มิติ การที่มีพิกัด GPS เข้ามาช่วยในการประมวลผลทำให้สามารถลดระยะเวลาในการคำนวณตำแหน่งของจุดเมฆได้อย่างมีประสิทธิภาพ





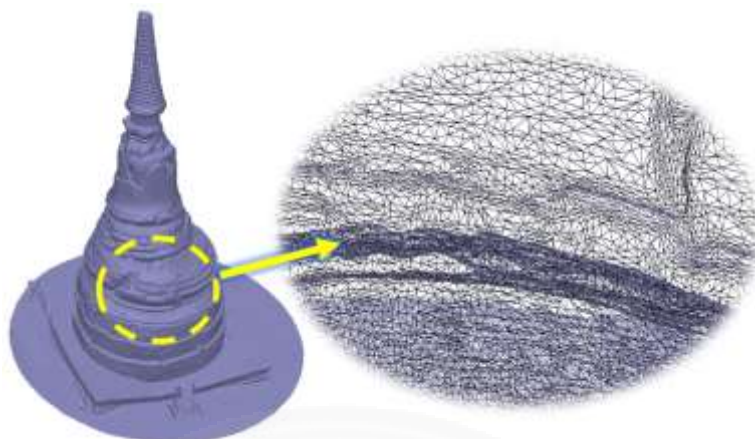
ภาพที่ 3.10 จุดกลุ่มเมฆแบบห่าง (Sparse Point Cloud) และตำแหน่งของภาพถ่าย

3. การประมวลผลจุดกลุ่มเมฆแบบแน่น (Build Dense Cloud) ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างรายละเอียดของจุดกลุ่มเมฆให้มีรายละเอียดสูงและมีความเหมือนจริงกว่าจุดกลุ่มเมฆแบบห่าง (Sparse Point Cloud) สิ่งที่ต้องให้ความสำคัญในขั้นตอนนี้คือเรื่องของคุณภาพ คุณภาพของจุดกลุ่มเมฆมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อเวลา สามารถเลือกปรับได้ทั้งสิ้น 5 ระดับ คือ คุณภาพสูงสุดจนไปถึงคุณภาพต่ำ การสร้างจุดกลุ่มเมฆแบบแน่นด้วยคุณภาพสูงสุดจะใช้ภาพถ่ายดั้งเดิมโดยที่ไม่ลดความละเอียดลง และหากลดคุณภาพลงจะลดขนาดภาพลง 4 เท่าจากความละเอียดตั้งต้น ในทำนองเดียวกันหากใช้ความละเอียดสูงสุดจะทำให้คอมพิวเตอร์ใช้พลังงานในการประมวลผลทั้งหน่วยความจำ (RAM) หน่วยประมวลผล (CPU) และการ์ดจอแสดงผล (GPU) สูงตามไปด้วย โดยภาพที่ 3.11 แสดงกระบวนการโดยสรุปในการสร้างแบบจำลอง 3 มิติจุดกลุ่มเมฆแบบหนาแน่นของปราสาทประธาน วัดไชยวัฒนาราม จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ระหว่างจุดกลุ่มเมฆแบบห่างและแบบแน่นเห็นได้ว่าจุดกลุ่มเมฆแบบแน่นนั้นให้รายละเอียดของโครงสร้างเป็นอย่างดีสามารถแสดงรายละเอียดบริเวณยอดของเจดีย์ได้อย่างชัดเจน แต่ก็ยังมีส่วนที่ไม่สามารถสร้างจุดแบบแน่นได้คือบริเวณผิวบางส่วนของเจดีย์โดยรอบ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวไม่สามารถถ่ายภาพได้ จึงส่งผลให้ไม่สามารถสร้างจุดเมฆได้



ภาพที่ 3.11 กระบวนการสร้างแบบจำลอง 3 มิติกลุ่มจุดเมฆแบบท่งและแน่นของปราสาทประธาน วัดไชยวัฒนาราม จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

4. การประมวลผลตาข่าย (Build Mesh) ขั้นตอนนี้เป็นวิธีการขั้นต้นเพื่อปรับปรุงแบบจำลองสามมิติให้มีผิวจากการเปลี่ยนจุดกลุ่มเมฆแบบแน่น (Dense Point Cloud) ให้กลายเป็นตาข่าย (Mesh) ซึ่งเกิดจากกระบวนการของระบบ Polygon Base ที่สร้างตาข่ายขึ้นมาโดยมีองค์ประกอบคือ จุด เส้นขอบ และผิวรวมกันเป็นเป็นสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมหลายแผ่นมาเรียงต่อกัน จนกลายเป็นแบบจำลองตาข่ายที่ยังไม่มีสีหรือพื้นผิวจริงของวัตถุ ดังนั้นแบบจำลองตาข่ายเมื่อสร้างรูปทรงกลมหรือพื้นผิวส่วนโค้งต่างๆจะเป็นรูปทรงที่แสดงผลใกล้เคียงกับเส้นโค้งโดยในความเป็นจริงไม่ใช่ทรงกลมแต่เป็นแผ่นสี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยมหลายแผ่นมาต่อกัน ยิ่งจำนวนตาข่ายที่มาต่อกันมากขึ้นความละเอียดของวัตถุก็จะเพิ่มมากขึ้น ซอฟต์แวร์ Agisoft Photoscan Professional สามารถสร้างแบบจำลองสามมิติแบบตาข่ายจากแบบจำลองสามมิติจุดกลุ่มเมฆแบบแน่น อีกทั้งการสร้างแบบจำลองสามมิติแบบตาข่ายสามารถเลือกปรับคุณภาพได้ทั้งสิ้น 5 ระดับ คือ คุณภาพสูงสุดจนไปถึงคุณภาพต่ำ ซึ่งยิ่งคุณภาพสูงจำนวนตาข่ายที่เรียงต่อกันก็จะมากขึ้นเห็นรายละเอียดต่างๆได้ชัดเจนขึ้นและส่งผลต่อการสร้างแบบจำลองสามมิติในขั้นตอนต่อไปให้มีคุณภาพมากขึ้น ภาพที่ 3.12 แสดงตัวอย่างของแบบจำลองสามมิติแบบตาข่ายขององค์เจดีย์เล็ก วัดไชยวัฒนาราม จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

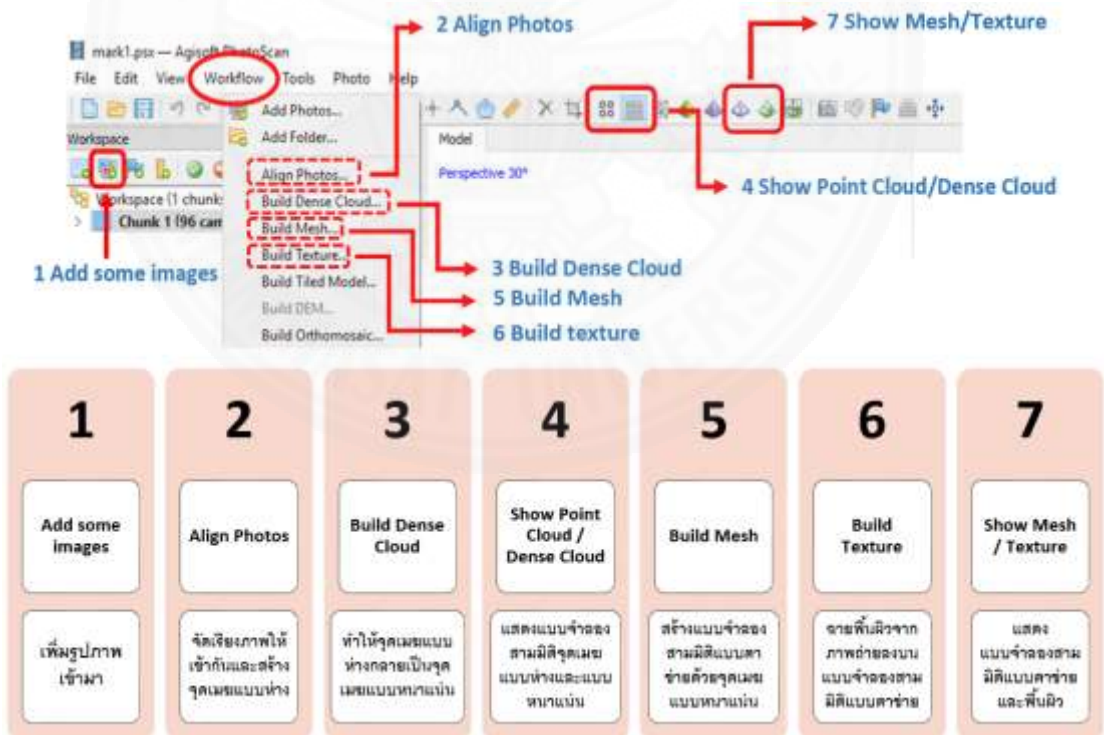


ภาพที่ 3.12 แบบจำลองสามมิติแบบตาข่ายและลักษณะของตาข่ายบนแบบจำลอง

5. การประมวลผลพื้นผิว (Build Texture) เป็นกระบวนการสุดท้ายในการศึกษาวิธีการสำรวจรูปทรงด้วยการถ่ายภาพ ขั้นตอนนี้เป็นการปรับปรุงแบบจำลองสามมิติแบบตาข่ายให้มีพื้นผิวของโครงสร้างโดยการนำข้อมูลพิกเซลของภาพจากตำแหน่งกล้องบนแบบจำลองสามมิติมาทำการฉายพื้นผิวลงบนตาข่ายด้วยพารามิเตอร์ปรับเทียบกล้องจนได้เป็นแบบจำลองสามมิติแบบพื้นผิว เนื่องจากแบบจำลองสามมิติแบบพื้นผิวเป็นข้อมูลสำคัญที่จะใช้ในกระบวนการต่อไปเพื่อการตรวจสอบจึงจำเป็นที่ควรจะได้รับข้อมูลที่มีคุณภาพที่สุดสำหรับกระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลง ซอฟต์แวร์ Agisoft Photoscan Professional สามารถสร้างแบบจำลองสามมิติแบบพื้นผิวที่สามารถกำหนดคุณภาพได้ ซึ่งหลักในการกำหนดคุณภาพของพื้นผิวบนแบบจำลองนั้นขึ้นอยู่กับข้อกำหนดรายละเอียดขนาดพิกเซลที่จะฉายบนตาข่ายแต่ละผิวให้มีความละเอียดเท่าไรและหากกำหนดค่าที่สูงขึ้นจะส่งผลให้แบบจำลองสามมิติแบบพื้นผิวมีความเหมือนจริงกับโครงสร้างมากขึ้น ถ้าการกำหนดความละเอียดของพื้นผิวมีค่าที่สูงเกินกว่าความละเอียดที่สามารถสร้างได้จะส่งผลให้แบบจำลองที่จะแสดงผลนั้นไม่สามารถแสดงพื้นผิวและการกำหนดความละเอียดสูงจะทำให้คอมพิวเตอร์ใช้พลังงานในการประมวลผลทั้ง หน่วยความจำ (RAM) หน่วยประมวลผล (CPU) และการ์ดจอแสดงผล (GPU) สูงตามไปด้วย ภาพที่ 3.13 แสดงตัวอย่างของแบบจำลองสามมิติแบบพื้นผิวขององค์เจดีย์เล็ก วัดไชยวัฒนาราม จังหวัดพระนครศรีอยุธยาที่ความละเอียดขนาดพิกเซลต่อตาข่ายเท่ากับ 4,096 (Texture Size/Count) และภาพที่ 3.14 แสดงขั้นตอนการใช้งานซอฟต์แวร์ Agisoft Photoscan Professional (Agisoft LLC, 2559) โดยสรุปเพื่อให้เห็นภาพรวมและสามารถใช้งานได้จริง



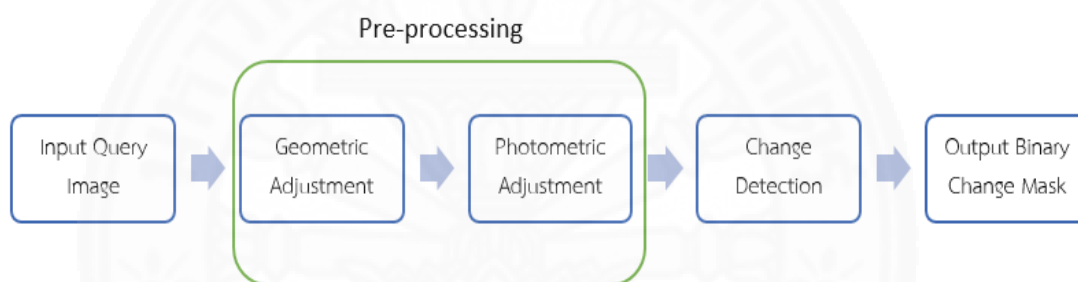
ภาพที่ 3.13 แบบจำลองสามมิติแบบพื้นผิวขององค์เจดีย์เล็ก



ภาพที่ 3.14 ขั้นตอนการใช้งานซอฟต์แวร์ Agisoft Photoscan Professional

### 3.3 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลง

หลังจากที่สามารถสร้างแบบจำลอง 3 มิติได้จากหัวข้อมก่อนหน้านี้ จากนั้นภาพถ่ายจะถูกเก็บเป็นระยะๆ เพื่อตรวจหาความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นโดยให้ข้อมูลภาพถ่าย ตำแหน่งกล้อง และข้อมูลแบบจำลอง 3 มิติที่ได้สร้างไว้ในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นข้อมูลอ้างอิงหรือแบบจำลองสามมิติอ้างอิง (Reference Model) ที่จะนำมาทำการตรวจหาความเปลี่ยนแปลง หลังจากที่ได้ข้อมูลภาพชุดใหม่ที่ถ่ายจากคนละช่วงเวลาหรือมีความเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น (Query Image) นำข้อมูลชุดใหม่ดังกล่าวมาเข้าสู่กระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงต่อไป ภาพที่ 3.15 แสดงขั้นตอนกระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงทั้งหมดโดยสรุป



ภาพที่ 3.15 ขั้นตอนกระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลง

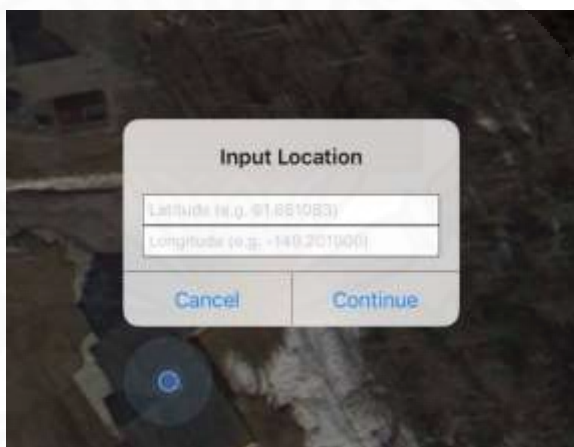
#### 3.3.1 Pre-processing steps

ข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการนี้คือ แบบจำลองสามมิติแบบพื้นผิวและตำแหน่งของกล้องที่มีอยู่ในแบบจำลองสามมิติอ้างอิงกับข้อมูลภาพชุดใหม่ของโครงสร้างเดียวกันที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป นำเข้าสู่กระบวนการต่อไปนี้เพื่อทำการสังเคราะห์ข้อมูลภาพที่มีมุมมองเดียวกันและตำแหน่งเดียวกันที่เวลาต่างกันเพื่อใช้ในการตรวจหาความเปลี่ยนแปลง

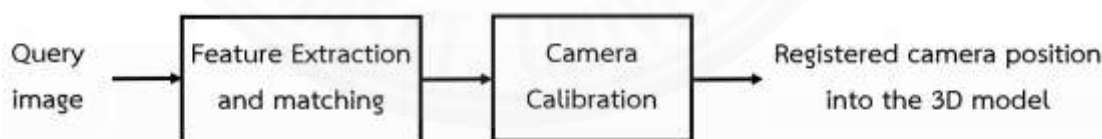
##### 3.3.1.1 กระบวนการปรับเทียบตำแหน่งกล้อง (Camera Registration)

กระบวนการนี้เป็นหนึ่งในกระบวนการของ Geometric Adjustment ซึ่งภาพถ่ายชุดใหม่หรือภาพที่ได้จากการสำรวจเมื่อเวลาผ่านไป (Query Image) จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการปรับเทียบตำแหน่งกล้องเพื่อระบุถึงตำแหน่งและมุมมองของกล้องในแบบจำลองสามมิติอ้างอิง (Reference Model) โดยใช้วิธีการตรวจวัดหาจุดที่มีลักษณะเหมือนกัน (Matching Similarity Measure) ระหว่างภาพในแบบจำลองสามมิติอ้างอิงกับภาพใหม่จากนั้นใช้จุดที่มีลักษณะเหมือนกันนี้ในการปรับเทียบหาตำแหน่งกล้อง ภาพถ่ายชุดใหม่คือข้อมูลที่ตรวจพบพื้นที่หรือตำแหน่ง

ในโครงสร้างเกิดความเสียหายหรือมีการเปลี่ยนแปลง โดยข้อมูลภาพถ่ายชุดใหม่ในการศึกษานี้ใช้วิธีเก็บข้อมูลด้วยการตั้งค่าแบบอัตโนมัติให้อากาศยานไร้คนขับบินกลับไปตำแหน่งเดิมที่ต้องการทำการตรวจสอบจากข้อมูล GPS ที่ระบุไว้ในชุดข้อมูลภาพถ่ายอ้างอิงที่ได้จากอากาศยานด้วยตำแหน่ง Latitude และ Longitude ของภาพ ภาพที่ 3.16 แสดงตัวอย่างหน้าต่างระบุตำแหน่ง Latitude และ Longitude ให้กับอากาศยานไร้คนขับ จากนั้นทำการเก็บข้อมูลหรือควบคุมด้วยตนเองให้อากาศยานเข้าไปเก็บข้อมูลให้ใกล้กับโครงสร้างมากขึ้นเพื่อเพิ่มรายละเอียดของแบบจำลองให้ชัดเจนและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้ผลลัพธ์ของกระบวนการ Change Detection มีประสิทธิภาพมากขึ้น ภาพที่ 3.17 แสดงเค้าโครงกระบวนการปรับเทียบตำแหน่งกล้องเพื่อนำเข้าไปในแบบจำลองสามมิติอ้างอิง



ภาพที่ 3.16 ตัวอย่างหน้าต่างระบุตำแหน่ง Latitude และ Longitude ให้กับอากาศยานไร้คนขับ



ภาพที่ 3.17 เค้าโครงกระบวนการปรับเทียบตำแหน่งกล้องเพื่อนำเข้าไปในแบบจำลองสามมิติ

### 3.3.1.2 กระบวนการสังเคราะห์ภาพ (Image Synthesis)

เป็นอีกหนึ่งในกระบวนการของ Geometric Adjustment หลังจากที้นำภาพถ่ายใหม่ผ่านกระบวนการปรับเทียบตำแหน่งกล้องให้เข้าไปอยู่บนแบบจำลองสามมิติอ้างอิง จากนั้นเป็นการสังเคราะห์ข้อมูลของภาพจากตำแหน่งกล้องของภาพถ่ายใหม่ออกมาจากแบบจำลองสามมิติอ้างอิงซึ่งจะได้ภาพสังเคราะห์ที่มีมุมมองและตำแหน่งภาพเหมือนกันกับภาพถ่ายใหม่ (Query

Image) โดยใช้กระบวนการทาง Surface Estimation ด้วยสมการ Projection ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.2.3.3 สมการที่ (2.45) เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับวิธีการนี้สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (3.1) เรียกภาพที่ได้จากการสังเคราะห์นี้ว่าภาพสังเคราะห์ (Synthetic Image)

$$I_s = K_q [ R_q \ t_q ] P_r \quad (3.1)$$

เมื่อปรับเทียบตำแหน่งกล้องของภาพชุดใหม่เข้ากับแบบจำลองสามมิติอ้างอิงจะได้เมทริกซ์การหมุน  $R_q$  และเวกเตอร์ระยะ  $t_q$  และเมทริกซ์การปรับเทียบ  $K_q$  โดยที่  $P_r$  คือ พื้นผิวบนแบบจำลองสามมิติอ้างอิงที่ได้จากการฉายมุมมองจากพารามิเตอร์ในสมการที่ (3.1) เพื่อสังเคราะห์ผลลัพธ์ออกมาเป็นภาพสังเคราะห์  $I_s$  (Synthetic Image) แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 3.18(ค) จากกระบวนการนี้ได้ภาพสังเคราะห์ที่อยู่ในแบบจำลองสามมิติอ้างอิงก่อนมีการเปลี่ยนแปลงที่มีมุมมองและตำแหน่งภาพเหมือนกันกับภาพชุดใหม่ที่มีการเปลี่ยนแปลง (Query Image) ในการศึกษา นี้เรียกภาพชุดใหม่ว่า  $I_q$  แล้วนำทั้งสองภาพเข้าสู่กระบวนการต่อไป ข้อจำกัดของกระบวนการนี้คือ ข้อมูลของแบบจำลองสามมิติอ้างอิง (Reference Model) นั้นเป็นข้อมูลการประมาณรูปทรงแล้วสร้างเป็นพื้นผิวดังนั้นการสังเคราะห์ภาพออกมานั้นเหมาะสำหรับรูปทรงที่ไม่มีความซับซ้อนมาก ซึ่งในการศึกษานี้โครงสร้างโบราณสถานเป็นโครงสร้างที่มีความซับซ้อน

### 3.3.1.3 Photometric Adjustment Algorithm

เป็นวิธีการกำจัดความหลากหลายหรือความแตกต่างที่เกิดจากแสงหรือพื้นหลังที่มีความแตกต่างกันของทั้งสองรูปซึ่งในการศึกษานี้คือภาพใหม่  $I_q$  แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 3.18(ก) กับภาพสังเคราะห์  $I_s$  แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 3.18(ค) โดยปัญหาที่เกิดจากแสงนั้นใช้การปรับคุณลักษณะของภาพใหม่  $I_q$  ให้มีความคล้ายคลึงกันกับภาพสังเคราะห์  $I_s$  ด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพถ่ายดิจิทัล เช่น Intensity Normalization หรือ Homomorphic Filtering หรือ Histogram Matching เป็นต้น ซึ่งทั้งสามกระบวนการเป็นการปรับข้อมูลเกี่ยวกับแสงของข้อมูลภาพทั้งสองให้มีความแตกต่างกันน้อยที่สุดหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด และปัญหาที่เกิดจากพื้นหลังที่มีความแตกต่างกันแก้ไขด้วยการใช้ Mask สีดำของภาพสังเคราะห์  $I_s$  มาแทนที่พื้นหลังของภาพใหม่  $I_q$  ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการนี้เพื่อจัดการกับความแตกต่างให้มีความเหมือนกันมากที่สุด ภาพที่ 3.18(ข) แสดงตัวอย่างภาพใหม่  $I_q$  ที่ถูกปรับแสงและเปลี่ยนพื้นหลังด้วยกระบวนการ Photometric Adjustment



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพที่ 3.18 (ก) รูปภาพใหม่  $I_q$  (ข) รูปภาพใหม่  $I_q$  หลังการปรับแสงและเปลี่ยนพื้นหลังด้วย  
กระบวนการ Photometric Adjustment (ค) รูปภาพสังเคราะห์  $I_s$

### 3.3.2 Change Detection

ภาพที่จะนำมาเปรียบเทียบในกระบวนการนี้จำเป็นที่จะต้องลดความหลากหลายของสีในพิกเซลก่อน ซึ่งในแต่ละพิกเซลของภาพมีแม่สีอยู่ 3 สีคือ แดง เขียวและน้ำเงิน (RGB) และในแต่ละสีนั้นสามารถมีเฉดสีที่แตกต่างกันไปถึง 256 เฉดสี ดังนั้นรูปแบบของสีที่สามารถเกิดได้ในแต่ละพิกเซลสามารถมีได้ถึง  $256^3$  สี ข้อมูลภาพที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้กระบวนการตรวจวัดและตรวจหาความเปลี่ยนแปลงมีประสิทธิภาพคือการเปลี่ยนข้อมูลภาพให้เป็นภาพขาวดำ (Grayscale) ซึ่งเป็นโหมดสีที่มีการไล่เฉดสีของสีเทาจากเทาอ่อนไปจนถึงสีเทาแก่ได้ 256 สี (0 คือ สีดำ, 255 คือ สีขาว) ทำให้ความหลากหลายที่เกิดจากสีในแต่ละพิกเซลจากเดิมมี  $256^3$  สี เหลือเพียง 256 สี แล้วใช้ข้อมูลภาพที่ลดความหลากหลายในรูปแบบของสีนี้ในกระบวนการต่อไป

จากกระบวนการข้างต้นจะได้ข้อมูลที่ได้ผ่านการปรับเทียบ สังเคราะห์ และกำจัดความแตกต่างระหว่างภาพออกไปให้มากที่สุดเพื่อนำเข้าสู่กระบวนการ Change Detection ซึ่งงานวิจัยนี้ในขั้นตอนของ Change Detection เป็นการนำคู่ภาพที่ต้องการตรวจสอบได้แก่ ภาพใหม่  $I_q$  และภาพสังเคราะห์  $I_s$  ที่มีรูปแบบเป็นภาพขาวดำมาทำการตรวจวัดความคล้ายคลึงกันของภาพด้วยวิธี Mean Squared Error (MSE) และ Structure Similarity Index Measure (SSIM) และกระบวนการสุดท้ายเพื่อตรวจหาความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนภาพด้วยวิธี Pixel Differencing Algorithm ซึ่งเป็นการต่อยอดจากงานวิจัยของ Krisada (2011) สามารถศึกษาขั้นตอนต่างๆในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.2.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงจะแสดงในรูปแบบของค่า Binary Change Mask เพื่อมาใช้ในการบอกถึงความเปลี่ยนแปลงและระบุตำแหน่งที่เกิดความเสียหายบนโครงสร้างโบราณสถานวัดไชยวัฒนาราม จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

#### 3.3.2.1 การตรวจวัดความคล้ายคลึงกัน

ในการศึกษารั้วนี้ใช้วิธีการตรวจวัดอยู่ 2 วิธีในการแสดงผลความคล้ายคลึงกันระหว่างภาพใหม่  $I_q$  และภาพสังเคราะห์  $I_s$  ได้แก่ 1) Mean Squared Error (MSE)



เป็นวิธีการที่ใช้งานง่ายแต่ไม่ได้บ่งบอกถึงความคล้ายคลึงกันของภาพซึ่งในทางตรงกันข้ามค่านี้บอกถึงความแตกต่างของภาพสองภาพ ข้อที่ควรระวังเป็นอย่างมากคือเรื่องของพิกเซลที่โดนรบกวนด้วยความเข้มแสงจนทำให้ระบบตรวจจับว่ามีความแตกต่างทั้งที่ความเป็นจริงพิกเซลจุดนั้นอาจคล้ายคลึงกัน สิ่งสำคัญที่ควรทราบคือค่า MSE เท่ากับ 0 แสดงถึงความคล้ายคลึงกันอย่างสมบูรณ์แบบหรือไม่มี ความแตกต่างกันและที่ค่ามากขึ้นหมายถึงความคล้ายคลึงกันน้อยลงหรือเริ่มมีความแตกต่างกันแสดงดังสมการที่ (3.2) ซึ่งค่านี้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความแตกต่างโดยเฉลี่ยระหว่างความเข้มของสีในพิกเซลเพิ่มขึ้น 2) Structural Similarity Measure (SSIM) เป็นวิธีการที่บ่งบอกถึงความคล้ายคลึงกันของภาพถ่ายได้ดีกว่าวิธี MSE ซึ่งประเด็นสำคัญคือ SSIM พยายามประเมินจากการรับรู้การเปลี่ยนแปลงในองค์ประกอบหลายประการของข้อมูลโครงสร้างภาพในขณะที่ MSE เป็นเพียงการประเมินความผิดพลาดหรือผลความแตกต่างที่ทราบจากข้อมูลของภาพเท่านั้น ซึ่งทั้งสองกระบวนการมีการบ่งบอกค่าความคล้ายคลึงกันและความเหมาะสมในการใช้ที่แตกต่างกันไป วิธีการของ SSIM แสดงดังสมการที่ (3.3) ซึ่งจะให้ผลลัพธ์ที่อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงด้วยความคล้ายคลึงกันของภาพอย่างมีประสิทธิภาพได้

$$\text{MSE}(x,y) = \frac{1}{m n} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [ I(i,j) - K(i,j) ]^2 \quad (3.2)$$

เมื่อ  $I(i,j)$  คือ ค่าของพิกเซลที่ตำแหน่ง  $i,j$  ของภาพที่ 1 และ  $K(i,j)$  คือ ค่าของพิกเซลที่ตำแหน่ง  $i,j$  ของภาพที่ 2 ซึ่งภาพทั้งสองรูปมีขนาด  $m \times n$

$$\text{SSIM}(x,y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (3.3)$$

กระบวนการ SSIM จะเปรียบเทียบพิกเซลของภาพ  $x$  และ  $y$  ที่ตำแหน่งเดียวกันโดยในแต่ละตำแหน่งพิกเซลจะคิดผลของพิกเซลในพื้นที่รอบข้างเป็นหน้าต่างพิกเซลขนาด  $N \times N$  (โดยทั่วไปใช้  $11 \times 11$ ) ซึ่ง  $\mu_x$  และ  $\mu_y$  คือค่าเฉลี่ยของข้อมูลพิกเซลในหน้าต่างพิกเซลของ  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ  $\sigma_x^2$  และ  $\sigma_y^2$  คือ ค่าความแปรปรวน (Variance) ของข้อมูลพิกเซลในหน้าต่างพิกเซลของ  $x$  และ  $y$  ตามลำดับ  $\sigma_{xy}$  คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Covariance) ของข้อมูลพิกเซลในหน้าต่างพิกเซลของ  $x$  รวมกับ  $y$  นอกจากนี้ยังมีตัวแปร  $C_1 = (k_1L)^2$  และ  $C_2 = (k_2L)^2$  ที่ควบคุมไม่ให้เกิดข้อผิดพลาดในระบบสมการโดยเป็นค่าคงที่ที่ทั่วไปกำหนดให้  $k_1 = 0.01$  และ  $k_2 = 0.03$  ซึ่ง  $L$  คือ ค่าไดนามิกเรนจ์ (Dynamic Range) ของข้อมูลภาพที่บ่งบอกถึงความแตกต่างหรือความหลากหลาย

ของค่าพิกเซลภาพที่เป็นไปได้ในการตรวจสอบ ซึ่งในการศึกษานี้ใช้ภาพขาวดำ (Grayscale) ที่มีค่าความแตกต่างระหว่างสีของพิกเซลที่เป็นไปได้ตั้งแต่ 0-255 และเมื่อได้ค่า SSIM ในแต่ละตำแหน่งพิกเซลนำมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อบอกถึงค่าความคล้ายคลึงกันโดยภาพรวมทั้งหมด หากค่า SSIM มีค่าเข้าใกล้หรือเท่ากับ 1 หมายถึงภาพทั้งสองที่ทำการเปรียบเทียบนั้นมีความคล้ายคลึงกันมากหรือเป็นภาพเดียวกัน

### 3.3.2.2 Change Mask

ภาพชุดใหม่  $I_S$  กับภาพสังเคราะห์  $I_q$  ที่เป็นภาพขาวดำ (Grayscale) จะถูกนำเข้าสู่กระบวนการ Pixel Differencing Algorithm เพื่อหาผลต่างของพิกเซลแต่ละพิกเซลที่ตำแหน่งเดียวกัน สามารถอ่านเพิ่มเติมได้ในบทที่ 2 หัวข้อที่ 2.2.2 จากนั้นจะนำค่าผลต่างของทุกพิกเซลเหล่านั้นมาเปรียบเทียบกับค่าเกณฑ์ (Threshold) แสดงดังสมการที่ (3.4)

$$B(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } |I_q(x) - I_S(x)| > \tau \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.4)$$

ผลที่ได้จะเป็นภาพ Binary Masks ที่ปรากฏสีขาวคือมีการเปลี่ยนแปลง และสีดำคือไม่มีการเปลี่ยนแปลง โดยเทียบจนกว่าจะได้ค่าเกณฑ์ที่เหมาะสมกับชุดข้อมูลนั้นเพื่อแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตามภาพชุดใหม่  $I_q$  เป็นภาพจริงที่แตกต่างจากภาพสังเคราะห์  $I_S$  ที่เกิดจากการสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติ ซึ่งเป็นไปได้ยากมากที่ภาพทั้งสองจะมีองค์ประกอบทางเรขาคณิตที่เหมือนกันและกรณีศึกษาเป็นโบราณสถานที่มีโครงสร้างซับซ้อนจึงมีความเป็นไปได้ว่าผลการเปลี่ยนแปลงนั้นจะมีความผิดพลาด อย่างไรก็ตามจากการศึกษานี้ได้พยายามลดความแตกต่างให้ข้อมูลที่ที่สุดสำหรับการตรวจสอบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลง เมื่อได้ภาพ Change Mask สามารถนำไปแสดงผลบนภาพอ้างอิง (Reference Image) เพื่อระบุตำแหน่งและบอกถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างได้

### 3.3.3 Receiver Operating Characteristic Curve

ผลลัพธ์จากกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงในงานวิจัยนี้เป็นค่าการเปลี่ยนแปลงที่ระบุเป็น Binary Change Mask หรือ พิกเซลการเปลี่ยนแปลงโดยแสดงผลเป็นสีขาวคือเกิดการเปลี่ยนแปลงและแสดงผลเป็นสีดำคือไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งผลการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดจากการสมมติเกณฑ์ที่ใช้ในการบอกถึงการเปลี่ยนแปลงที่ดีที่สุดในชุดข้อมูล การบอกถึงประสิทธิภาพของข้อมูล Binary Change Mask จากกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงในงานวิจัย

นี้สามารถประเมินคุณภาพเชิงปริมาณของข้อมูลจากวิธีการดังกล่าวได้ด้วย Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve

ROC Curve คือ กราฟที่พล็อตความสัมพันธ์ระหว่างค่า True Positive Rate (TPR) และ False Positive Rate (FPR) ซึ่งได้มาจากการคำนวณหาจำนวนพิกเซลสะสมของ Change Mask โดยการเปรียบเทียบระหว่าง Change Mask จากข้อมูล 2 ชุดประกอบด้วย Change Mask จากกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ และ Change Mask จากผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริง แสดงดังภาพที่ 3.19 ในการเปรียบเทียบครั้งนี้สามารถพบรูปแบบของผลการทำนายปัญหาที่สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งหมด 2 รูปแบบ จากผลที่เป็นไปได้ทั้งหมด 4 ค่า ประกอบด้วย True Positive (TP), False Positive (FP), False Negative (FN) และ True Negative (TN) ซึ่งก่อให้เกิดค่า TPR และ FPR แสดงดังสมการที่ (3.4) และ (3.5)

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3.5)$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \quad (3.6)$$

เมื่อกำหนดให้  $i_g(x)$  และ  $i_p(x)$  คือค่าพิกเซล Binary Change Mask ของผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงและผลจากกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ตามลำดับ ซึ่งค่าของ Binary Mask ดังกล่าวประกอบไปด้วย ค่าเท่ากับ 1 (คือ พิกเซลที่เกิดการเปลี่ยนแปลง) หรือ ค่าเท่ากับ 0 (คือ พิกเซลที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง) ซึ่งผลของ TP, FP, FN และ TN สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3.2

- พิกเซลจะให้ผลเป็น TP ถ้า  $i_g(x) = 1$  และ  $i_p(x) = 1$  ซึ่งเป็นการทำนายผลของพิกเซลที่ตรวจพบว่ามี การเปลี่ยนแปลงและเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นจริง
- พิกเซลจะให้ผลเป็น FP ถ้า  $i_g(x) = 0$  และ  $i_p(x) = 1$  ซึ่งเป็นการทำนายผลของพิกเซลที่ตรวจพบว่ามี การเปลี่ยนแปลงแต่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นจริง ซึ่งเป็นลักษณะของการส่งสัญญาณเตือนหรือการรายงานผลการเปลี่ยนแปลงเท็จ
- พิกเซลจะให้ผลเป็น FN ถ้า  $i_g(x) = 1$  และ  $i_p(x) = 0$  ซึ่งเป็นการทำนายผลของพิกเซลที่ตรวจพบว่ามี การเปลี่ยนแปลงแต่เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นจริง ซึ่งเป็นการรายงานผลที่ผิดพลาดและร้ายแรง
- พิกเซลจะให้ผลเป็น TN ถ้า  $i_g(x) = 0$  และ  $i_p(x) = 0$  ซึ่งเป็นการทำนายผลของพิกเซลที่ตรวจพบว่ามี การเปลี่ยนแปลงและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นจริง

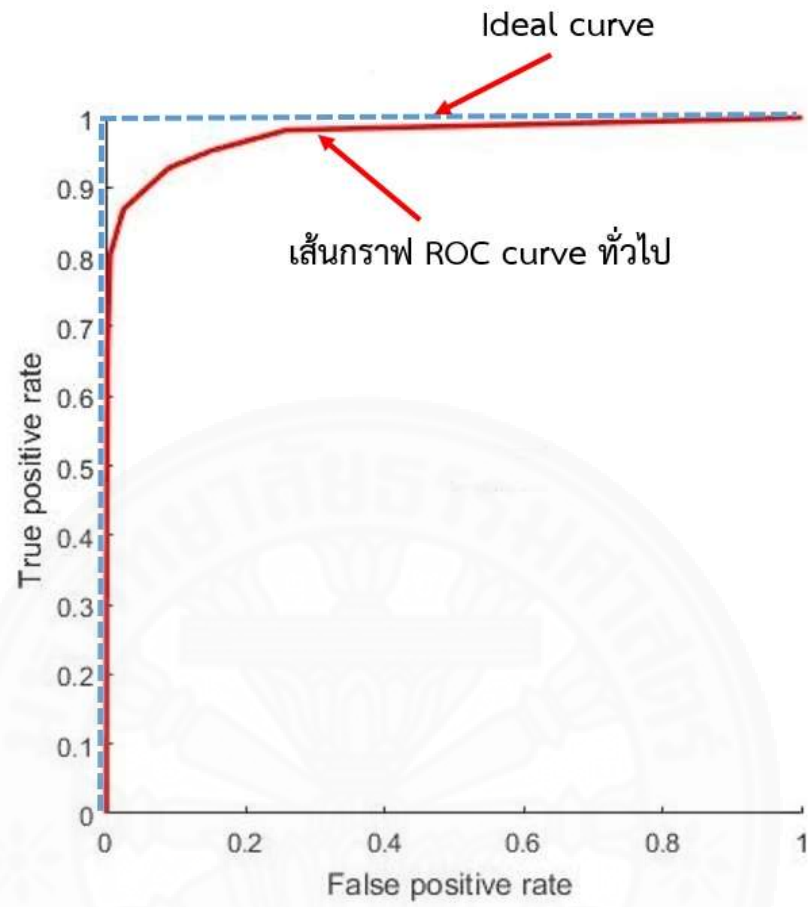


ภาพที่ 3.19 (ก) Change Mask จากผลการเปลี่ยนแปลงที่สร้างด้วยมือ (ข) Change Mask จาก  
การทดลองกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 3.2 สรุปการจำแนกประเภทของ Change Mask

พิกเซลการเปลี่ยนแปลงจากผล ของกระบวนการในงานวิจัย ( $i_p$ )	พิกเซลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริง ( $i_g$ )		
		1	0
1	TP	FP	
0	FN	TN	

ลักษณะของกราฟ ROC Curve ในอุดมคติ แสดงดังภาพที่ 3.20 ซึ่งเส้น Ideal Curve (เส้นสีน้ำเงิน) เป็นลักษณะของกราฟที่ดีที่สุดหรือบอกได้ว่าชุดข้อมูลหรือผลลัพธ์จากกระบวนการที่นำเสนอมีประสิทธิภาพในการทำนายถึงปัญหาที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงสุด 100 เปอร์เซ็นต์ หรือสามารถกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าได้ผลของ FPR เท่ากับ 0 เปอร์เซ็นต์ และได้ผลของ TPR เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วเส้น Ideal Curve นี้ไม่สามารถที่จะเกิดขึ้นจริงได้แม้ว่าจะมีระบบหรือกระบวนการที่มีคุณภาพสูงมากก็ตามเนื่องจากทุกระบบนั้นมีความคลาดเคลื่อนในตัวเองแม้จะมีเพียงเล็กน้อย เส้นกราฟ ROC Curve โดยทั่วไปจะมีมุมโค้งมนและมีแนวโน้มที่มุมของกราฟนั้นจะอยู่ที่มุมซ้ายบน แสดงดังภาพที่ 3.20



ภาพที่ 3.20 ตัวอย่าง ROC Curve โดยจากกราฟเส้นสีแดงคือเส้น ROC Curve ทัวไปและเส้นสีน้ำเงินคือ ROC Curve ในอุดมคติที่ดีที่สุด

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการทดลองกับตัวอย่างทดสอบซึ่งเป็นข้อมูลภาพถ่ายคานคอนกรีต ณ สภาวะมีการเปลี่ยนแปลงที่ช่วงเวลาต่างๆภายใต้แรงกระทำ ในขณะที่เดียวกันก็อยู่ในระหว่างการทำการศึกษา เก็บข้อมูล และทดสอบกระบวนการกับภาพถ่ายของโครงสร้างองค์เจ็ดยี่เล็ก วัดไชยวัฒนาราม จังหวัดพระนครศรีอยุธยา จากอากาศยานไร้คนขับที่มีสภาพโครงสร้างทรงแทนมและมีความเสียหายปรากฏบนผิวโครงสร้างเพื่อทำการตรวจสอบความเปลี่ยนแปลง ข้อมูลภาพถ่ายคานคอนกรีตได้รับจาก Krisada (2011) เพื่อเป็นกรณีศึกษาและตัวอย่างเปรียบเทียบผลการตรวจสอบที่ได้จากโครงสร้างคอนกรีตกับโครงสร้างโบราณสถาน โดยมีผลการทดลองเบื้องต้นดังนี้

#### 4.1 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงกับตัวอย่างทดสอบ

ตัวอย่างทดสอบนี้เป็นข้อมูลที่ได้จาก Krisada (2011) ที่ได้ทำการเก็บข้อมูลภาพถ่ายคานคอนกรีตภายใต้แรงกระทำด้วยกล้องถ่ายภาพรูปทั่วไปที่มุมมองกล้องต่างๆที่เวลาต่างกันเมื่อได้รับแรงมากขึ้น ซึ่งแบ่งข้อมูลชุดภาพถ่ายออกเป็น 5 ส่วน ตามช่วงเวลาที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเจน คือ ส่วนที่หนึ่งเป็นภาพถ่ายที่เวลาเริ่มต้นให้เป็นชุดข้อมูล  $S_0$  และส่วนที่ 2, 3, 4 และ 5 เป็นชุดข้อมูลภาพถ่ายที่เวลาเปลี่ยนไปหลังจากมีการเปลี่ยนแปลงของ 4 ช่วงเวลาให้เป็นชุดข้อมูล  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  และ  $S_4$  ตามลำดับ จากนั้นผู้ทำการศึกษาได้ทำการทดสอบวิธีการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงกับข้อมูลทั้ง 5 ชุด โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 4.1.1 รายละเอียดข้อมูลภาพถ่ายของตัวอย่างทดสอบ

ชุดข้อมูลภาพถ่ายที่ช่วงเวลาเริ่มต้นเป็นชุดข้อมูลอ้างอิง  $S_0$  ที่ใช้สำหรับเป็นข้อมูลหลักในการนำไปเปรียบเทียบกับชุดข้อมูลใหม่ ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  และ  $S_4$ ) เพื่อหาความเปลี่ยนแปลง โดยลักษณะการเก็บข้อมูลภาพถ่ายจะใช้วิธีเก็บแบบรอบจุดสนใจ (Point Of Interest: POI) และให้แน่ใจว่าภาพถ่ายเหล่านี้สามารถเห็นองค์ประกอบของโครงสร้างครอบคลุมพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบอย่างครบถ้วนและควรมีความเหลื่อมกันระหว่างภาพ (Overlap) อย่างน้อย 50 เปอร์เซ็นต์ แสดงตัวอย่างการเก็บข้อมูลดังภาพที่ 4.1 โดยมีรายละเอียดของชุดข้อมูลภาพถ่ายแสดงดังตารางที่ 4.1



ภาพที่ 4.1 (ก) รูปแบบการเก็บข้อมูลภาพถ่ายแบบรอบจุดสนใจ (POI) (ข) ตัวอย่างข้อมูลภาพถ่ายของตัวอย่างทดสอบคานคอนกรีต

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดข้อมูลภาพถ่ายของตัวอย่างทดสอบ

Data Set	Pictures (images)	Image size (pixel <sup>2</sup> )
$S_0$	6	3456 × 2304
$S_1$	19	3456 × 2304
$S_2$	33	3456 × 2304
$S_3$	29	3456 × 2304
$S_4$	26	3456 × 2304

#### 4.1.2 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วย Homography

ขั้นตอนนี้เป็นวิธีการทั่วไปที่นิยมใช้ในการหาความแตกต่างของภาพถ่ายด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพถ่ายดิจิทัล ในวิธีการนี้ต้องการภาพที่มีมุมมองและตำแหน่งเดียวกันในการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงแต่ในทางปฏิบัติไม่สามารถที่จะเก็บข้อมูลที่ตำแหน่งเดิมและมุมมองเดิมที่เวลาต่างกันได้ซึ่งทำได้เพียงเก็บภาพที่มีมุมมองและตำแหน่งที่ใกล้เคียงกันเท่านั้นหรือสามารถทำการตั้งกล้องไว้ตำแหน่งเดิมโดยไม่เคลื่อนย้ายหรือรบกวนกับกล้องทำให้มีความยุ่งยากในการปฏิบัติ จึงได้เกิดแนวคิดในการใช้เทคนิคการประมวลผลภาพถ่ายดิจิทัลเพื่อลดความแตกต่างของมุมมองและตำแหน่งที่ต่างกันของภาพลง

##### 4.1.2.1 การจับคู่จุดลักษณะเด่นและการบิดเบือนภาพด้วย Homography

โดยการหาจุดลักษณะเด่น (Feature) ของทั้งสองภาพ จากนั้นใช้จุดลักษณะเด่นนี้ในการหาเวกเตอร์พรรณนา (Feature Descriptors) ของจุดลักษณะเด่นในแต่ละจุดของภาพทั้งสองเพื่อที่จะสามารถจับคู่จุดลักษณะเด่นของทั้งสองรูปได้ โดยเรียกวิธีนี้ว่า วิธีจับคู่แล้วถือ

(Putative Matching) ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการหาว่าจุดใดมีลักษณะที่คล้ายคลึงหรือเป็นจุดเดียวกัน โดยสิ่งสำคัญของกระบวนการนี้คือต้องเปลี่ยนข้อมูลภาพทั้งสองให้เป็นภาพขาวดำ (Grayscale) ทุกครั้งก่อนเข้ากระบวนการ ในบางครั้งรูปภาพที่เรานำมาเปรียบเทียบกันการหาจุดลักษณะเด่นและเวกเตอร์พรรณนาอาจจะเป็นไปได้ว่ามีจุดที่จับคู่ผิดเนื่องจากมีข้อมูลของสีที่ใกล้เคียงกัน ดังนั้นในการจับคู่จุดที่เหมือนกันนั้นหลังจากที่จับคู่ด้วยวิธี Putative Matching แล้วเรายังสามารถที่จะลดจุดที่ผิดพลาดออกไปด้วยการสร้างเมทริกซ์จำแลง (Transformation Matrix) มาช่วยในการลดข้อผิดพลาดหรือกรองข้อมูลที่ไม่ถูกต้องออกไปในการจับคู่ได้โดยเรียกกระบวนการเหล่านี้โดยรวมว่าการจับคู่จุดลักษณะเด่นระหว่างภาพ (Point Feature Matching) จากนั้นทำการบิดเบือน (Warp) ภาพจากอีกภาพหนึ่งให้เข้ากับอีกภาพหนึ่งด้วยผลลัพธ์ที่ได้จาก Putative Matching มาใช้ในการย้ายจุดที่เหมือนกันให้ไปอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันซึ่งจะทำให้ได้ภาพสองภาพที่ถูกลดความแตกต่างของมุมมองลง หากผู้อ่านสนใจสามารถศึกษารายละเอียดของกระบวนการได้ที่ Szeliski (2010)

จากการศึกษานี้ได้ทำการทดลองนำชุดข้อมูลภาพ  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  และ  $S_4$  มาเข้าสู่กระบวนการ Feature Matching เพื่อจับคู่จุดลักษณะเด่นระหว่างภาพกับ  $S_0$  จากนั้นทำการบิดเบือนภาพให้เข้ากับชุดข้อมูลภาพ  $S_0$  และเปลี่ยนพื้นหลังให้เหมือนกันจากนั้นตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วยวิธีการศึกษาในเอกสารฉบับนี้



(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.2 ภาพตัวอย่างทดสอบ (ก) ภาพอ้างอิงเริ่มต้น  $S_0$  ที่ใช้ในการตรวจสอบ (ข) ภาพที่ใช้ในการเปรียบเทียบหาความเปลี่ยนแปลงระหว่าง  $S_0$  โดยแต่ละภาพคือข้อมูลภาพจาก (ซ้ายบน)  $S_1$ , (ขวาบน)  $S_2$ , (ซ้ายล่าง)  $S_3$  และ (ขวาล่าง)  $S_4$


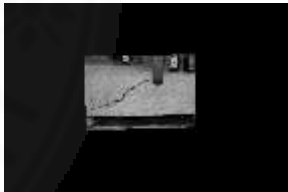






จากภาพที่ 4.2 เพื่อเป็นการลดความแตกต่างของภาพให้ได้มากที่สุดจึงได้ทดสอบเลือกใช้ภาพที่จะนำมาเปรียบเทียบกับ  $S_0$  เป็นมุมมองระยะใกล้กับวัตถุและครอบคลุมพื้นที่ที่พบการเปลี่ยนแปลงของรอยร้าวใน  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  และ  $S_4$  มาทดสอบใช้กับกระบวนการบิดเบือน



ภาพและใช้พื้นหลังของภาพ  $S_0$  เป็นพื้นหลังเดิม กระบวนการดังกล่าวเชื่อมภาพด้วยจุดลักษณะเด่น จาก  $S_1, S_2, S_3$  และ  $S_4$  ลงบนภาพ  $S_0$  ด้วยวิธีการนี้ทำให้กระบวนการของ Photometric Adjustment ไม่สามารถใช้ในการปรับเทียบแสงโดยอัตโนมัติด้วย Histogram Matching ได้ เนื่องจากองค์ประกอบของภาพทั้งสองมีความแตกต่างกันมากเกินไปเนื่องจากการปรับแสงของภาพระยะใกล้กับไกล ผลของการจับคู่จุดลักษณะเด่น (Feature Matching) แสดงดังตารางที่ 4.2 และผลของการปรับเทียบภาพจาก  $S_1, S_2, S_3$  และ  $S_4$  ลงบนภาพ  $S_0$  แสดงดังตารางที่ 4.3 คอลัมน์ที่ 3

จากการทดลองนี้สามารถใช้ภาพถ่าย 2 มิติ ของโครงสร้างคอนกรีต ร่วมกับเทคโนโลยีประมวลผลภาพถ่ายเพื่อจับคู่จุดที่มีความคล้ายคลึงกันหรือจุดเดียวกันได้ โดยข้อจำกัดที่สำคัญคือภาพต้องมีมุมมองที่เหมือนหรือคล้ายคลึงกัน









ตารางที่ 4.2 ผลการจับคู่จุดลักษณะเด่นและการบิดเบือนภาพของตัวอย่างทดสอบ

เปรียบเทียบ $S_0$ กับ $S_n$	ผลของการจับคู่จุดลักษณะเด่น (Feature Matching)	ภาพบิดเบือนจุดลักษณะ เด่นของ $S_n$ ให้เข้ากับ $S_0$
$S_0$ กับ $S_1$		
$S_0$ กับ $S_2$		
$S_0$ กับ $S_3$		
$S_0$ กับ $S_4$		

#### 4.1.2.2 การตรวจวัดความคล้ายคลึงกัน

ตารางที่ 4.3 แสดงผลของการเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความคล้ายคลึงกันระหว่างชุดข้อมูลภาพ  $S_0$  กับ  $S_1, S_2, S_3$  และ  $S_4$  ที่ผ่านการบิดเบือนและเชื่อมต่อกับภาพลงบนภาพ  $S_0$  ซึ่งแสดงผลในรูปแบบของค่า MSE และ SSIM โดยเมื่อเทียบชุดข้อมูล  $S_0$  กับภาพบิดเบือนจุดลักษณะเด่นดังกล่าวจะเห็นได้ว่า MSE มีค่าเพิ่มมากขึ้นความหมายคือเกิดความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป SSIM มีค่าน้อยลงความหมายคือโครงสร้างมีความคล้ายคลึงกันน้อยลงหรือโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น

ตารางที่ 4.3 ผลการตรวจวัดความคล้ายคลึงกันด้วยวิธี MSE และ SSIM ของภาพจากภาพที่ 4.2

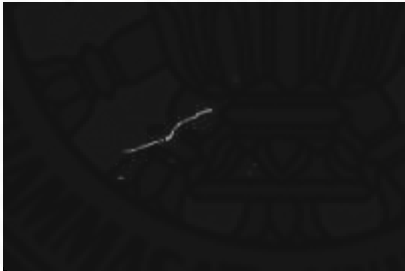



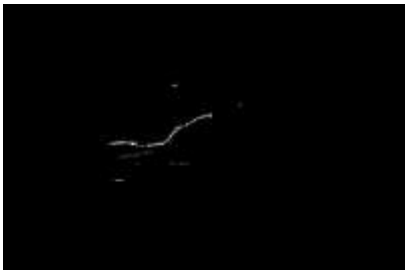

เปรียบเทียบ $S_0$ กับ $S_n$	ภาพสีขาวดำ (Grayscale) ของชุดข้อมูลภาพ $S_0$	ภาพบิดเบือนจุดลักษณะเด่นของ $S_n$ ให้เข้ากับ $S_0$	MSE (pixel <sup>2</sup> )	SSIM
$S_0$ กับ $S_1$			158.76	0.91
$S_0$ กับ $S_2$			260.15	0.89
$S_0$ กับ $S_3$			334.04	0.88
$S_0$ กับ $S_4$			482.13	0.87

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงด้วยการตรวจวัดความคล้ายคลึงกันผ่านการแสดงผลค่า MSE และ SSIM สามารถนำมาใช้ในการอธิบายความแตกต่างหรือความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ จากตารางที่ 4.3 ถ้าค่า MSE เพิ่มมากขึ้นหรือค่า SSIM เริ่มลดน้อยลงสรุปได้ว่าภาพทั้งสองเริ่มมีความแตกต่างเกิดขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป



#### 4.1.2.3 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลง

หลังจากที่ได้ผลลัพธ์จากกระบวนการข้างต้นนำภาพทั้งสองเข้าสู่กระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิค Pixel Differencing Algorithm เพื่อหาความแตกต่างระหว่างพิกเซลจากสมการที่ (3.4) และใช้เกณฑ์ที่เหมาะสมในการแสดงผลการเปลี่ยนแปลงจากสมการที่ (2.1) เพื่อระบุตำแหน่งของรอยร้าวด้วย Change Mask บนภาพโครงสร้างคอนกรีต  $S_0$  แสดงดังตารางที่ 4.4 ซึ่งเกณฑ์ (Threshold) ที่ใช้ในการแสดงผลการเปลี่ยนแปลงนี้มีค่าอยู่ที่ 140 (คงที่)

ตารางที่ 4.4 ผลการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงของข้อมูลภาพจากตารางที่ 4.3

เปรียบเทียบ $S_0$ กับ $S_n$	Change Mask (สีขาว)	ระบุตำแหน่ง Change Mask บน ภาพอ้างอิง $S_0$ (สีเหลือง)
$S_0$ กับ $S_1$		
$S_0$ กับ $S_2$		
$S_0$ กับ $S_3$		

ตารางที่ 4.4 ผลการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงของข้อมูลภาพจากรายการที่ 4.3 (ต่อ)

เปรียบเทียบ $S_0$ กับ $S_n$	Change Mask (สีขาว)	ระบุตำแหน่ง Change Mask บน ภาพอ้างอิง $S_0$ (สีเหลือง)
$S_0$ กับ $S_4$		

ผลที่ได้จากรายการที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นสามารถระบุและแสดงตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงของรอยร้าวเมื่อเวลาผ่านไปได้ ซึ่งการใช้เกณฑ์ที่มีค่าสูงจะทำให้สามารถกำจัดจุดที่ทำให้ผลการเปลี่ยนแปลงที่ผิดพลาดแต่ข้อเสียคือจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงบางจุดอาจหายไปทำให้รายละเอียดในส่วนของการเปลี่ยนแปลงนั้นลดลง อีกทั้งผลลัพธ์ในครั้งนี่ยังมีบางจุดที่ตรวจจับว่ามีการเปลี่ยนแปลงผิดพลาดเนื่องจากมุมมองภาพที่แตกต่างกันทำให้การบิดเบือนภาพไม่สามารถทำให้ภาพนั้นซ้อนทับกันได้อย่างสมบูรณ์หรือการตรวจจับจุดลักษณะเฉพาะที่เหมือนกันไม่สามารถตรวจจับครบทุกจุดได้แต่ผลลัพธ์ที่ออกมาสามารถลดปัญหาเหล่านี้ให้เบาบางลงโดยการปรับเกณฑ์ให้สูงขึ้น เนื่องจากข้อมูลภาพถ่ายของตัวอย่างทดสอบนี้มีมุมมองที่ค่อนข้างง่ายต่อการตรวจสอบและภาพถ่ายระยะใกล้สามารถให้รายละเอียดในการตรวจจับจุดลักษณะเฉพาะที่เหมือนกันได้ดีจึงทำให้ผลการทดลองนี้ประสบความสำเร็จ อย่างไรก็ตามหากข้อจำกัดในการเก็บข้อมูลภาพถ่ายไม่สามารถถ่ายภาพในตำแหน่งที่ใกล้กับพื้นที่ที่ทำการศึกษาหรือไม่สามารถเก็บข้อมูลบริเวณที่สำคัญในการให้รายละเอียดความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอาจก่อให้เกิดปัญหา

ผู้ทำการศึกษาได้ทดสอบกระบวนการศึกษากับตัวอย่างทดสอบด้วยข้อมูลภาพถ่ายของ  $S_2$  และ  $S_4$  ในมุมมองที่ไกลจากเดิม (มุมมองเดียวกับภาพ  $S_0$ ) เพื่อต้องการทดสอบว่าผลของมุมมองภาพที่มีข้อจำกัดและรายละเอียดที่เยอะขึ้นสามารถใช้ในกระบวนการนี้ได้หรือไม่ ภาพที่ 4.3 แสดงภาพถ่าย  $S_0$ ,  $S_2$  และ  $S_4$  มุมมองระยะใกล้เดียวกัน และนำข้อมูลเหล่านี้มาใช้ในการตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงว่าจะให้ผลลัพธ์อย่างไร







(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.3 ตัวอย่างทดสอบ (ก) ภาพอ้างอิงเริ่มต้น  $S_0$  ที่ใช้ในการตรวจสอบ (ข) ภาพที่ใช้ในการเปรียบเทียบหาความเปลี่ยนแปลงระหว่าง  $S_0$  โดยแต่ละภาพคือภาพจาก (บน)  $S_2$  และ (ล่าง)  $S_4$

ตารางที่ 4.5 ผลการตรวจวัดความคล้ายคลึงกันด้วยวิธี MSE และ SSIM ของภาพจากภาพที่ 4.3





เปรียบเทียบ $S_0$ กับ $S_n$	ภาพสีขาวดำ (Grayscale) ของชุดข้อมูลภาพ $S_0$	ภาพปิดเป็นจุดลักษณะเด่นของ $S_n$ ให้เข้ากับ $S_0$	MSE (pixel <sup>2</sup> )	SSIM
$S_0$ กับ $S_2$			1552.16	0.63
$S_0$ กับ $S_4$			1285.04	0.67

จากตารางที่ 4.5 ภาพถ่าย  $S_2$  และ  $S_4$  ถูกนำเข้าสู่กระบวนการ Photometric Adjustment เพื่อลดความแตกต่างในเรื่องของแสงและพื้นหลังให้มีองค์ประกอบโดยรวมคล้ายคลึงกับ  $S_0$  มากที่สุดจากนั้นทำการปิดเป็นภาพด้วยการจับคู่จุดลักษณะเด่นเข้าด้วยกันได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.5 คอลัมน์ที่ 3 จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการที่ภาพถ่าย  $S_2$  และ  $S_4$  นั้นมีองค์ประกอบของภาพเยอะมากขึ้นส่งผลต่อการตรวจจับคู่จุดลักษณะเด่นที่ไม่ครอบคลุมทำให้การปิดเป็นภาพเพื่อซ้อนทับกันไม่มีประสิทธิภาพและก่อให้เกิดความแตกต่างของภาพนั้นเยอะมากขึ้นตามไปด้วย เมื่อเปรียบเทียบผลจากตารางที่ 4.3 และ 4.5 ค่า MSE และ SSIM มีความ

แตกต่างกันเป็นอย่างมากโดยที่ค่า MSE และค่า SSIM จากตารางที่ 4.5 จะมากกว่าและน้อยกว่า ตารางที่ 4.3 ตามลำดับ บ่งบอกถึงความสำคัญของแสง มุมมองและระยะของภาพที่มีผลต่อการ ตรวจวัดค่าความคล้ายคลึงกัน ซึ่งผลที่ได้จากตารางที่ 4.5 นั้นให้ค่า MSE ที่มากและ SSIM ที่น้อยลง จนเกือบจะบอกได้ว่าภาพนั้นไม่เหมาะต่อการนำมาตรวจหาความเปลี่ยนแปลงเนื่องจากองค์ประกอบ ของภาพที่แท้จริงมีการเปลี่ยนแปลงเฉพาะบริเวณคานคอนกรีตที่เกิดรอยแตกร้าวเท่านั้น ซึ่งผลที่ได้ จากกระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงมีจุดที่ระบุตำแหน่งของการเปลี่ยนแปลงที่ผิดพลาดแม้ว่า จะใช้เกณฑ์ที่สูง (Constant Threshold = 140) เพื่อลดข้อผิดพลาดต่างๆแล้วก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้ยังไม่สามารถปรับปรุงให้แสดงผลการเปลี่ยนแปลงที่ดีขึ้นได้แสดงดังตารางที่ 4.6

จากผลการทดลองสรุปได้ว่ากระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วย ภาพ 2 มิติ ควรให้ความสำคัญกับแสง เงา ระยะ และมุมมองหรือองค์ประกอบของภาพสองภาพที่จะ นำมาตรวจหาความเปลี่ยนแปลงให้มีความแตกต่างกันน้อยที่สุดก่อนนำมาเข้าสู่กระบวนการ Photometric Adjustment เพื่อลดความต่างต่างนั้นตั้งแต่การเก็บข้อมูลภาพถ่ายก่อนเข้าสู่ กระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลง จากการศึกษาและทดลองวิธีการนี้มีข้อจำกัดและความ ผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้มากเกินไป อีกทั้งตัวอย่างทดสอบเป็นคานคอนกรีตที่ถูกควบคุมข้อจำกัดให้ ไม่ถูกรบกวนจากสภาพแวดล้อมภายนอก หากนำมาใช้กับโครงสร้างที่มีความซับซ้อนในพื้นที่แบบเปิด เช่น โครงสร้างโบราณสถาน อาจให้ผลลัพธ์ในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงที่ไม่มีประสิทธิภาพได้

ตารางที่ 4.6 ผลการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงของข้อมูลภาพจากตารางที่ 4.5

เปรียบเทียบ $S_0$ กับ $S_n$	Change Mask (สีขาว)	ระบุตำแหน่ง Change Mask บน ภาพอ้างอิง $S_0$ (สีเหลือง)
$S_0$ กับ $S_2$		
$S_0$ กับ $S_4$		

### 4.1.3 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงผ่านแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่าย

ในการทดลองนี้ได้แบ่งชุดข้อมูลภาพถ่ายออกเป็น 2 กลุ่มคือ  $S_0$  เป็นชุดข้อมูลอ้างอิงสำหรับใช้ในการตรวจสอบกับ  $S_1, S_2, S_3$  และ  $S_4$  เป็นชุดข้อมูล 4 ชุด สำหรับสร้างแบบจำลองสามมิติ โดยองค์ประกอบของชุดข้อมูลภาพที่นำมาสร้างเป็นแบบจำลองสามมิตินั้นต้องให้แน่ใจว่าข้อมูลมีความเหมือนกันระหว่างภาพอย่างน้อย 50 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้สามารถสร้างแบบจำลองสามมิติได้ ซึ่งรายละเอียดของข้อมูลภาพถ่ายได้กล่าวไปแล้วในตารางที่ 4.1

#### 4.1.3.1 การสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่าย

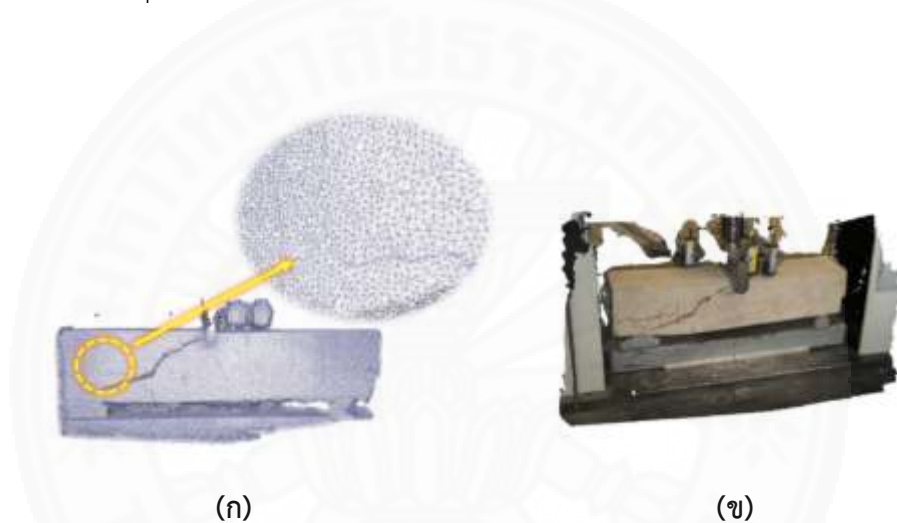
แบบจำลองสามมิติจากชุดข้อมูล  $S_1, S_2, S_3$  และ  $S_4$  มีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.7 ซึ่งภาพที่ 4.4 และ 4.5 แสดงตัวอย่างของแบบจำลองสามมิติของชุดข้อมูล  $S_1$  ประกอบด้วย แบบจำลองสามมิติจุดกลุ่มเมฆแบบห่าง แบบจำลองสามมิติจุดกลุ่มเมฆแบบหนาแน่น แบบจำลองสามมิติแบบตาข่าย และแบบจำลองสามมิติแบบพื้นผิวที่ความละเอียดของ Texture Size/Count = 4,096 ซึ่งให้รายละเอียดของคานคองกรีตครบถ้วน โดยข้อมูลภาพจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่ายโดยอาศัยหลักการ Structure From Motion (SFM) เพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติกลุ่มจุดเมฆแบบห่าง (Sparse Point Cloud Model) แสดงดังภาพที่ 4.4 (ก) และปรับปรุงให้เป็นจำลองสามมิติกลุ่มจุดเมฆแบบหนาแน่น (Dense Point Cloud Model) แสดงดังภาพที่ 4.4 (ข) จากนั้นจุดเมฆจะถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบของแบบจำลองสามมิติให้มีพื้นผิวจากการเปลี่ยนจุดเมฆ (Point Cloud) ให้เป็นตาข่าย (Mesh) แสดงดังภาพที่ 4.5 (ก) จากนั้นแบบจำลองสามมิติแบบตาข่ายจะถูกฉายพื้นผิวลงบนตาข่ายจากภาพถ่ายสองมิติในตำแหน่งกล้องบนแบบจำลองเพื่อให้ได้เป็นแบบจำลองสามมิติแบบพื้นผิว (Texture Model) แสดงดังภาพที่ 4.4 (ข)

ตารางที่ 4.7 รายละเอียดของแบบจำลองสามมิติตัวอย่างทดสอบในชุดข้อมูลภาพถ่ายต่างๆ

ชุดข้อมูล	จำนวนภาพ (รูป)	จุดเมฆแบบห่าง (จุด)	จุดเมฆแบบหนาแน่น (จุด)	ตาข่าย (พื้นผิว)
$S_1$	19	15,524	3,756,465	83,475
$S_2$	33	13,762	5,278,751	117,302
$S_3$	29	8,342	5,104,802	113,438
$S_4$	26	7,650	4,758,724	105,746



ภาพที่ 4.4 (ก) แบบจำลองสามมิติจุดกลุ่มเมฆแบบห่างของคานคองกรีต (ข) แบบจำลองสามมิติจุดกลุ่มเมฆแบบหนาแน่นพร้อมทั้งแสดงตำแหน่งกล้องบนแบบจำลอง



ภาพที่ 4.5 (ก) แบบจำลองสามมิติแบบตาข่ายของคานคองกรีต (ข) แบบจำลองสามมิติแบบพื้นผิวของคานคองกรีต

#### 4.1.3.2 การปรับเทียบตำแหน่งกล้องและการสังเคราะห์ภาพ

การปรับเทียบตำแหน่งกล้องจะใช้วิธีการนำภาพจากชุดข้อมูล  $S_0$  ปรับเทียบหาตำแหน่งของภาพเพื่อระบุตำแหน่งของกล้องในแบบจำลองสามมิติ  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  และ  $S_4$  ตามที่ได้อธิบายขั้นตอนไว้ในหัวข้อที่ 3.3.1.1 ตารางที่ 4.8 แสดงตัวอย่างผลลัพธ์ของความคลาดเคลื่อน (Error) ที่เกิดจากระบวนการปรับเทียบตำแหน่งกล้องในแบบจำลองสามมิติของ  $S_1$  ซึ่งผลที่ได้จากตารางแสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนจากภาพของ  $S_0$  ในแบบจำลองสามมิติมีค่าน้อยและมีค่าเทียบเท่ากับกับความคลาดเคลื่อนในกลุ่มของชุดข้อมูล  $S_1$  สรุปได้ว่ากระบวนการปรับเทียบตำแหน่งกล้องสามารถใช้งานตำแหน่งกล้องของ  $S_0$  ในแบบจำลองสามมิติของ  $S_1$  เพื่อการสังเคราะห์ภาพจากหัวข้อที่ 3.3.1.2 แสดงดังภาพที่ 4.6 มาเข้าสู่กระบวนการ Photometrical



Adjustment เพื่อปรับแสงและพื้นหลังก่อนเข้าสู่กระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนต่อไปได้

ตารางที่ 4.8 ตัวอย่างผลลัพธ์ของความคลาดเคลื่อนในกระบวนการปรับเทียบตำแหน่งกล้อง

ตัวอย่างจากชุดข้อมูล	ชื่อของภาพ	ความคลาดเคลื่อน (พิกเซล)
$S_1$	IMG_2581	2.020
$S_1$	IMG_2582	2.338
$S_1$	IMG_2583	2.335
$S_1$	IMG_2584	2.105
$S_0$	IMG_2493	1.706



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพที่ 4.6 ภาพตัวอย่างทดสอบ (ก) ภาพอ้างอิงหรือภาพใหม่  $I_q$  จากชุดข้อมูล  $S_0$  (ข) ภาพใหม่  $I_q$  ที่ผ่านกระบวนการ Photometrical Adjustment เพื่อปรับแสงและพื้นหลัง (ค) ภาพสังเคราะห์  $I_s$  จากชุดข้อมูล  $S_1$  ที่มีพารามิเตอร์ของกล้องจากภาพใหม่  $I_q$



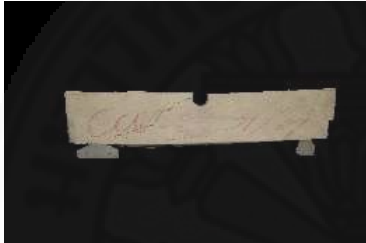
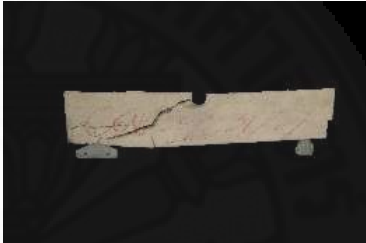




#### 4.1.3.3 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลง

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพอ้างอิง  $S_0$  กับภาพสังเคราะห์ที่ได้จากชุดข้อมูลที่แตกต่างกันทั้ง 4 ชุด ได้แก่  $S_1, S_2, S_3$  และ  $S_4$  โดยภาพอ้างอิงคือภาพใหม่  $I_q$  ที่ใช้ในการปรับเทียบตำแหน่งกล้องกับชุดข้อมูลอื่นๆ และภาพสังเคราะห์  $I_s$  คือภาพที่ถูกสังเคราะห์ออกมาจาก  $S_1, S_2, S_3$  และ  $S_4$  ในตำแหน่งกล้องที่มีพารามิเตอร์เดียวกันกับ  $I_q$  ซึ่งคำนวณกริดถูกแรงกระทำเพื่อจำลองความเสียหายที่เพิ่มขึ้น เพื่อให้เกิดความแตกต่างระหว่างชุดข้อมูลอ้างอิง  $S_0$  กับ  $S_1, S_2, S_3$  และ  $S_4$  ปรากฏขึ้นอย่างชัดเจนจนสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพได้ ตารางที่ 4.9 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากภาพ

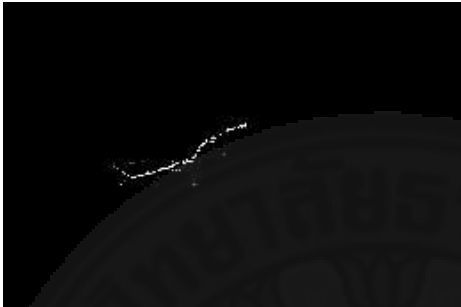







ตัวอย่างทดสอบพบว่าทุกคู่ภาพมีค่า MSE ที่ใกล้เคียงกันโดยเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปจาก  $S_1$  ถึง  $S_4$  เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของรอยแตกร้าวเกิดขึ้น ค่า SSIM ของทุกคู่ภาพมีค่าเกือบจะเท่ากันและทุกกรณีมีค่าเข้าใกล้ 1 บ่งบอกถึงความแตกต่างระหว่างคู่ภาพนั้นมีความผิดพลาดเนื่องจากองค์ประกอบของภาพน้อย ซึ่งค่า MSE มีค่าน้อยและค่า SSIM มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่าเมื่อเทียบกับตารางที่ 4.3 และ 4.5 สรุปว่ากระบวนการนี้มีประสิทธิภาพในเรื่องการกำจัดและลดความแตกต่างของภาพที่ไม่พึงประสงค์ออกไปเพื่อให้การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงมีคุณภาพ

ตารางที่ 4.10 แสดงผลของ Change Mask ระหว่างคู่ภาพทั้งหมด ซึ่งเกณฑ์ (Threshold) แสดงผลของ Change Mask ในครั้งนี้คือ 55 โดยพิกเซลที่มีการเปลี่ยนแปลงจะปรากฏเป็นสีขาวและพิกเซลที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงจะปรากฏเป็นสีดำ จากผลการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงนี้สามารถแสดงให้เห็นได้ด้วยตาเปล่าถึงการเปลี่ยนแปลงและมีความถูกต้องและแม่นยำสูงมากในทุกคู่ภาพ โดยปราศจากการตรวจสอบที่ผิดพลาดต่างๆที่เคยพบในการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติ ซึ่งหมายความว่าวิธีการนี้สามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงรอยแตกร้าวระหว่างภาพของโครงสร้างคานคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากตารางที่ 4.10 คอลัมน์สุดท้ายแสดงผลของ Change Mask บนภาพอ้างอิง  $I_q$  เพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงรอยแตกในภาพต้นฉบับเพื่อการตรวจสอบและระบุความเสียหายที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของโครงสร้างคานคอนกรีต

ตารางที่ 4.9 ผลการตรวจวัดความคล้ายคลึงกันด้วยวิธี MSE และ SSIM ระหว่าง  $I_q$  กับ  $I_s$

ชุดข้อมูล	ภาพ $I_q$ ที่ผ่านกระบวนการ Photometrical Adjustment เพื่อปรับแสงและพื้นหลัง	ภาพสังเคราะห์ $I_s$	MSE (pixel <sup>2</sup> )	SSIM
$S_1$			64.20	0.94
$S_2$			80.39	0.93
$S_3$			125.52	0.93
$S_4$			187.24	0.92

ตารางที่ 4.10 ผลของ Change Mask จากตัวอย่างภาพจากตารางที่ 4.9 โดยใช้ค่าเกณฑ์เท่ากับ 55

ชุดข้อมูล	Change Mask (สีขาว)	ระบุตำแหน่ง Change Mask (สีเหลือง) บนภาพอ้างอิง $S_0$
$S_1$		
$S_2$		
$S_3$		
$S_4$		

#### 4.1.3.4 วิจารณ์ผลการทดลอง

ขั้นตอนศึกษาในหัวข้อนี้ต้องการนำเสนอวิธีการตรวจสอบพื้นที่ที่ประสบปัญหาความเสียหายในโครงสร้างด้วยเทคนิคการตรวจหาความเปลี่ยนแปลง ซึ่งได้เสนอวิธีการในการลดข้อผิดพลาดในการตรวจสอบที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนขององค์ประกอบทางเรขาคณิตในกระบวนการตรวจสอบความเปลี่ยนแปลง โดยใช้กระบวนการสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่ายที่สามารถทำการตรวจสอบได้เป็นระยะ อีกทั้งยังสามารถใช้ภาพถ่ายที่เก็บมาจากคนละช่วงเวลาในการอัปเดตให้แบบจำลองสามมิตินั้นมีรายละเอียดที่ดีขึ้นส่งผลให้ภาพสังเคราะห์นั้นมีความสมจริงมากขึ้นตามไปด้วยและเพื่อให้ได้แบบจำลองสามมิติที่แม่นยำยิ่งขึ้นควรเก็บภาพถ่ายเพิ่มเติม อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ได้แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้การปรับเทียบตำแหน่งกล้องในกระบวนการสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่ายเพื่อตรวจสอบพื้นที่ที่มีปัญหาได้

ในการศึกษาคั้งนี้สามารถแสดงให้เห็นถึงวิธีการสังเคราะห์ภาพจากแบบจำลองสามมิติที่สามารถจัดข้อผิดพลาดทางเรขาคณิตในระบบตรวจจัดการเปลี่ยนแปลง แต่บางกรณีศึกษาอาจจำเป็นต้องปรับปรุงผลลัพธ์แบบจำลองสามมิติแบบพื้นผิวให้ดีกว่าเดิม ซึ่งแบบจำลองสามมิติแบบพื้นผิวในปัจจุบันที่ใช้ในการศึกษานี้อาจไม่เพียงพอที่จะให้ภาพสังเคราะห์สมจริงหากใช้กับตัวอย่างการศึกษาที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อน เช่น โครงสร้างโบราณสถาน เป็นต้น ในการปรับปรุงแบบจำลองสามมิติอาจจำเป็นต้องใช้ภาพมากขึ้นและเก็บข้อมูลภาพแบบระยะใกล้เพิ่มขึ้นเพื่อจัดการกับปัญหาความละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองสามมิติที่ไม่เพียงพอ เพื่อเพิ่มรายละเอียดของพื้นผิวให้ดีและมีคุณภาพมากกว่าเดิม อีกทั้งในกระบวนการปรับเทียบตำแหน่งกล้องเข้าไปสังเคราะห์ภาพจากแบบจำลองสามมิติสามารถแก้ไขปัญหารื่องมุมมองภาพที่แตกต่างกันได้เป็นอย่างดี แต่หากการเก็บข้อมูลภาพถ่ายมีข้อมูลที่ไม่ครอบคลุมพื้นที่ที่ทำการศึกษามากพออาจทำให้การปรับเทียบตำแหน่งกล้องนั้นมีความคลาดเคลื่อนจนไม่สามารถนำมาใช้ในการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงได้ นอกจากนี้กระบวนการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงที่นำเสนออาจไม่เหมาะสมกับพื้นผิวที่ซับซ้อน อย่างไรก็ตามวิธีการที่ได้นำเสนอสามารถใช้งานได้ดีและประสิทธิภาพกับพื้นผิวที่เรียบง่าย เช่น พื้นผิวของคานคอนกรีต

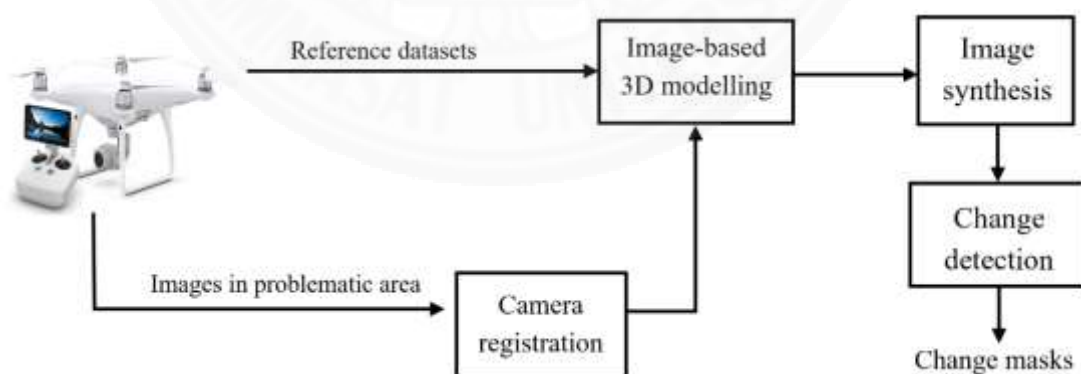
#### 4.1.3.5 สรุปผลการทดลอง

ข้อมูลภาพถ่ายสามารถนำมาสร้างเป็นแบบจำลองสามมิติที่ให้รายละเอียดของรูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้างที่ครบถ้วนและยังสามารถเก็บข้อมูลภาพชุดใหม่สำหรับนำมาทำการปรับปรุงแบบจำลองให้มีรายละเอียดมากขึ้น เพื่อการสังเคราะห์ภาพจากแบบจำลองออกมาให้มีความสมจริงมากที่สุดและผลของการตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงสามารถทำการตรวจสอบพื้นที่ที่พบปัญหาได้เป็นระยะ

การศึกษานี้ได้เสนอวิธีการปรับปรุงรูปทรงเรขาคณิตที่ถูกต้องในระบบตรวจสอบการเปลี่ยนแปลง วิธีการปรับปรุงนั้นทำได้ด้วยการสร้างภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติ ผลลัพธ์จากภาพสังเคราะห์ให้ผลลัพธ์ที่สามารถช่วยในการลบข้อผิดพลาดทางเรขาคณิตที่ดีกว่าการตรวจสอบด้วยภาพ 2 มิติ แม้ว่าควรต้องมีการปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อให้แบบจำลองสามมิติดีขึ้นเพื่อให้ภาพสังเคราะห์สามารถให้รายละเอียดที่ดีกว่าเดิมสำหรับระบบตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างที่ซับซ้อนขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าวิธีการที่ได้อ้างอิงสามารถให้ผลลัพธ์ของการเปลี่ยนแปลงได้ดีและมีประสิทธิภาพกับโครงสร้างทั่วไปได้ เช่น โครงสร้างคอนกรีต เป็นต้น

#### 4.2 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างโบราณสถานจากข้อมูลภาพถ่าย

กระบวนการศึกษาในหัวข้อนี้เป็นกระบวนการหลักที่ทำให้เกิดงานวิจัยนี้ขึ้น ซึ่งโครงสร้างที่จะทำการตรวจสอบในงานวิจัยฉบับนี้ คือ องค์เจดีย์เล็ก ในวัดไชยวัฒนาราม จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ที่มีสภาพเสื่อมโทรมตามกาลเวลาและสามารถพบความเสียหาย เช่น รอยแตกร้าวบนตัวโครงสร้างได้ชัดเจน ตัวโครงสร้างองค์เจดีย์เล็กมีความซับซ้อนของรูปทรงเป็นอย่างมากและมีความหนาของโครงสร้างที่ใหญ่เกินกว่าจะใช้คนเดินตรวจสอบ อีกทั้งความเสียหายที่อยู่บนยอดเจดีย์ไม่สามารถที่จะทำการตรวจสอบด้วยคนได้ จึงได้มีแนวคิดนำเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับเข้ามาช่วยในการแก้ไขปัญหาของพื้นที่บริเวณที่เข้าถึงยาก เพื่อนำข้อมูลภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับนี้มาใช้ในกระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงต่อไป ภาพที่ 4.7 แสดงกระบวนการศึกษาทั้งหมดโดยสรุป



ภาพที่ 4.7 ขั้นตอนกระบวนการทั้งหมดของวิธีการที่นำเสนอ

##### 4.2.1 รายละเอียดข้อมูลภาพถ่าย

ในการทดลองนี้ผู้ทำการศึกษาได้การเก็บข้อมูลภาพถ่ายขององค์เจดีย์เล็กโดยใช้อากาศยานไร้คนขับบินเก็บข้อมูลแบบรอบจุดสนใจ (POI) ที่ระดับความสูงต่างๆเพื่อให้ได้ภาพถ่ายที่มี

องค์ประกอบของโครงสร้างครบถ้วน ซึ่งสามารถแบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ ชุดข้อมูลอ้างอิง  $S_1$  ถ่ายที่เวลาเริ่มต้น  $t_1$  และ ชุดข้อมูลใหม่  $S_2$  ถ่ายเฉพาะบริเวณที่สนใจทำการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงถ่ายที่เวลาต่อมา  $t_2$  โดยทั้ง 2 ชุดข้อมูลถ่ายที่เวลาห่างกัน 48 ชั่วโมง (2 วัน) ซึ่งในการบินเก็บชุดข้อมูลใหม่  $S_2$  ผู้ทำการศึกษาได้ใช้ตำแหน่ง GPS จากชุดข้อมูลอ้างอิง  $S_1$  ที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับเพื่อนำทางโดยอัตโนมัติกลับไปตำแหน่งเดิมที่สนใจทำการตรวจสอบแล้วเก็บข้อมูลภาพถ่ายในมุมมองภาพระยะใกล้กับตัวโครงสร้างด้วยตนเองเพื่อการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.11 อากาศยานไร้คนขับถูกตั้งค่าการถ่ายภาพแบบอัตโนมัติทุกๆ 2 วินาที เพื่อให้แน่ใจว่าภาพถ่ายมีความเหลื่อมกัน (overlap) ระหว่างภาพอย่างน้อย 50 เปอร์เซ็นต์ ในการศึกษานี้เก็บข้อมูลภาพถ่ายของเคเจดีทีเล็กในวัดไชยวัฒนารามทั้งหมด 546 รูป ซึ่งแบ่งออกเป็น  $S_1$  ทั้งหมด 520 รูป และ  $S_2$  ทั้งหมด 26 รูป ที่ตำแหน่งเดียวกันกับภาพระยะใกล้ของ  $S_1$  ในตำแหน่งพื้นที่บริเวณที่ต้องการทำการตรวจสอบความเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4.11 รายละเอียดของข้อมูลภาพถ่ายของเคเจดีทีเล็ก



ชุดข้อมูล	จำนวนภาพ (รูป)			ขนาดภาพ (พิกเซล <sup>2</sup> )
	ระยะใกล้	ระยะกลาง	ระยะไกล	
$S_1$	96	298	126	5472 x 3642
$S_2$	26	-	-	5472 x 3642

#### 4.2.2 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วย Homography

ผู้ทำการศึกษาได้มีแนวคิดที่จะทำการทดสอบใช้ข้อมูลภาพถ่ายจาก  $S_1$  และ  $S_2$  ในมุมมองภาพระยะต่างๆที่ตำแหน่งเดียวกันมาทำการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติจากการใช้ตำแหน่ง GPS เข้ามาใช้ในการนำทางการบินเพื่อเก็บข้อมูล จากการศึกษาตำแหน่ง GPS สามารถนำทางการบินไปที่ตำแหน่งเดิมได้และหากพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการนำทางเพื่อบินไปที่ตำแหน่งเดิมแล้วสามารถสรุปได้ว่า อากาศยานไร้คนขับสามารถบินกลับไปตำแหน่งเดิมจากการนำทางด้วยตำแหน่ง GPS ได้อย่างแม่นยำและมีประสิทธิภาพ แม้ว่าจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้างเล็กน้อยแต่เมื่อแสดงผลให้เห็นแล้วถือว่าเทคโนโลยีเหล่านี้เป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพในการสำรวจและตรวจสอบเป็นอย่างมาก แสดงดังตารางที่ 4.12 ซึ่งปัญหาหลักอย่างเดียวในการนำทางด้วยตำแหน่ง GPS คือต้องกำหนดความสูง (Altitude) ด้วยตนเอง การทำงานบางสถานการณ์อาจ

จำเป็นต้องเริ่มต้นบินขึ้นที่จุดบินขึ้นจุดเดิมเพื่อกำหนดความสูงตอนบินให้ไปที่ตำแหน่งเดิมได้โดยอัตโนมัติหากต้องการภาพที่ได้มุมมองที่ใช้เคียงกันที่สุดและยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการปรับมุมมองกล้องที่ยังต้องทำการปรับด้วยตนเอง อย่างไรก็ตามการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วยภาพถ่าย 2 มิติ มีข้อจำกัดมากมายหากต้องการได้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพที่สุด

ตารางที่ 4.12 ตัวอย่างรายละเอียดข้อมูลภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับจากการนำทางด้วย GPS

ตัวอย่างภาพจากชุดข้อมูล	ชื่อภาพถ่าย	Latitude (m)	Longitude (m)	ตัวอย่างภาพถ่าย
$S_1$ วันที่เก็บข้อมูล 15/12/2560	DJI_0585	14.343344	100.541844	
$S_2$ วันที่เก็บข้อมูล 17/12/2560	DJI_0639	14.343338	100.541841	

เมื่อได้ข้อมูลภาพถ่ายที่ตำแหน่งเดียวกันจากนั้นเข้าสู่กระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วยภาพถ่าย 2 มิติ ซึ่งจากการศึกษานี้ภาพถ่ายที่ได้ยังมีความแตกต่างเรื่องมุมมองแม้ว่าบางกรณีจะมีความแตกต่างในเรื่องมุมมองของภาพเพียงเล็กน้อย แต่ความแตกต่างนั้นสำหรับวิธีการนี้อาจทำให้ไม่สามารถใช้ในการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงก็เป็นได้ เพื่อเป็นการพิสูจน์ถึงผลลัพธ์ที่เกิดจากการตั้งสมมติฐานนี้จึงได้มีการทดสอบหาความเปลี่ยนแปลงระหว่างตัวอย่างภาพที่เกิดจากการนำทางอากาศยานไร้คนขับไปบินเก็บภาพถ่าย  $S_2$  ด้วย GPS ที่ตำแหน่งเดียวกันกับข้อมูลภาพ  $S_1$





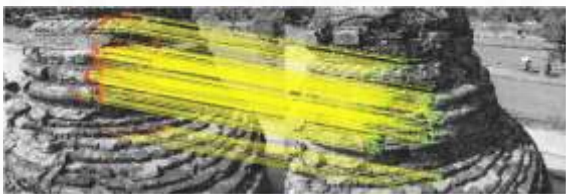

#### 4.2.2.1 การจับคู่จุดลักษณะเด่นและการบิดเบือนภาพด้วย Homography

องค์เจดีย์เล็กในวัดไชยวัฒนารามนั้นเป็นโครงสร้างที่มีความซับซ้อนเป็นอย่างมากและอยู่ในพื้นที่แบบเปิด ซึ่งความแตกต่างของมุมมองภาพเพียงเล็กน้อยนั้นเป็นข้อจำกัดที่



ก่อให้เกิดความผิดพลาดในการบิดเบือนภาพให้เข้ากันได้ จากตารางที่ 4.13 แสดงผลลัพธ์ของการจับคู่ลักษณะเด่นและบิดเบือนภาพให้เข้ากันในตัวอย่างภาพที่ระยะห่างจากวัตถุที่ระยะต่างๆ

ตารางที่ 4.13 ผลการจับคู่จุดลักษณะเด่นและการบิดเบือนภาพขององค์เจดีย์เล็ก

เปรียบเทียบ $S_1$ กับ $S_2$	ผลของการจับคู่จุดลักษณะเด่น (Feature matching)	ภาพบิดเบือนจุดลักษณะ เด่นของ $S_2$ ให้เข้ากับ $S_1$
ระยะไกล		
ระยะกลาง		
ระยะใกล้		

ภาพที่นำมาทำการจับคู่จุดลักษณะเด่นเพื่อทำการบิดเบือนภาพนั้นมีองค์ประกอบของภาพมากมายทั้งองค์ประกอบที่ไม่เกี่ยวข้องกับตัวโครงสร้างเช่น กำแพง ถนน ต้นไม้ เป็นต้น ซึ่งสิ่งเหล่านี้เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการจับคู่จุดลักษณะเด่นที่อาจส่งผลให้การบิดเบือนภาพให้เข้ากันนั้นไม่มีประสิทธิภาพ อีกทั้งผลกระทบของเงามีผลต่อการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการจับคู่จุดลักษณะเด่นดังกล่าวไม่สามารถแก้ไขปัญหาในจุดนี้ได้







#### 4.2.2.2 การตรวจวัดความคล้ายคลึงกัน

ตารางที่ 4.14 แสดงผลของการเปรียบเทียบเพื่อหาค่าความคล้ายคลึงกันระหว่างชุดข้อมูลภาพ  $S_1$  กับ  $S_2$  ที่ผ่านการบิดเบือนและเชื่อมต่อภาพลงบนภาพ  $S_1$  ซึ่งแสดงผลในรูปแบบของค่า MSE และ SSIM โดยเมื่อเทียบชุดข้อมูล  $S_1$  กับภาพบิดเบือนจุดลักษณะเด่นดังกล่าวจะเห็นได้ว่า MSE ในแต่ละคู่ภาพมีค่ามากซึ่งสามารถบอกได้ว่าภาพทั้งสองมีความแตกต่างกันมาก

และ SSIM มีค่าน้อยมากซึ่งหมายถึงโครงสร้างของภาพมีความคล้ายคลึงกันน้อยและผลของ MSE และ SSIM ในแต่ละคู่จะมีค่าเพิ่มขึ้นและน้อยลง ตามลำดับ เมื่อยิ่งเข้าใกล้วัตถุมากขึ้น

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าค่า MSE และ SSIM ให้ผลลัพธ์ว่าแต่ละคู่ภาพมีความแตกต่างกันเป็นอย่างมาก ซึ่งไม่ได้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างแต่เนื่องจากด้วยกระบวนการจับคู่จุดลักษณะเด่นและบิดเบือนภาพนั้นไม่มีประสิทธิภาพ ภาพที่ถูกบิดเบือนนั้นมียังค์ประกอบมากมายและมุมมองของกล้องก็แตกต่างกันทำให้องค์ประกอบของภาพทั้งหมดไม่สามารถทำการบิดเบือนภาพให้เหมือนกันอย่างสมบูรณ์ได้

ตารางที่ 4.14 ผลการตรวจวัดความคล้ายคลึงกันด้วยวิธี MSE และ SSIM ของภาพจากตารางที่ 4.11

เปรียบเทียบ $S_1$ กับ $S_2$	ภาพสีขาวดำ (Grayscale) ของชุดข้อมูลภาพ $S_1$	ภาพบิดเบือนจุดลักษณะเด่นของ $S_2$ ให้เข้ากับ $S_1$	MSE (pixel <sup>2</sup> )	SSIM
ระยะไกล			995.52	0.45
ระยะกลาง			2,972.6	0.25
ระยะใกล้			3,768.6	0.39

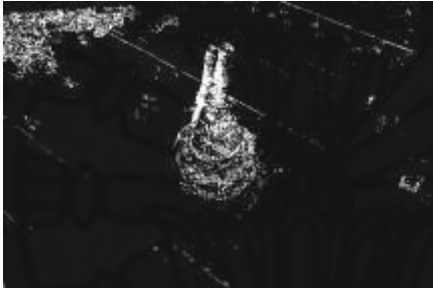





#### 4.2.2.3 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลง

จากตารางที่ 4.14 นำภาพในแต่ละคู่เข้าสู่กระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิค Pixel Differencing Algorithm เพื่อหาความแตกต่างระหว่างพิกเซลและใช้เกณฑ์ที่เหมาะสมในการแสดงผลการเปลี่ยนแปลงและระบุตำแหน่งของรอยร้าวด้วย Change Mask

บนภาพอ้างอิง  $S_1$  แสดงดังตารางที่ 4.15 ซึ่งเกณฑ์ (Threshold) ที่ใช้ในการแสดงผลการเปลี่ยนแปลงนี้มีค่าอยู่ที่ 90 (คงที่)

ผลที่ได้จากตารางที่ 4.15 แสดงให้เห็นว่าความเปลี่ยนแปลงที่แสดงนั้นมี ความผิดพลาด ซึ่งสรุปได้ว่าวิธีการการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติ จากข้อมูลภาพถ่าย ของอากาศยานไร้คนขับ ไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงบนโครงสร้างที่ มีความซับซ้อน เช่น โครงสร้างโบราณสถาน

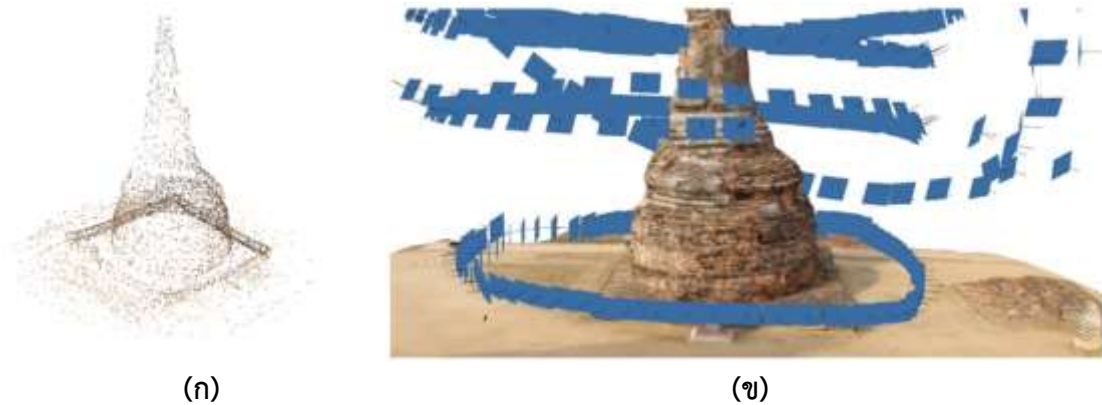
ตารางที่ 4.15 ผลการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงของข้อมูลภาพจากตารางที่ 4.14

เปรียบเทียบ $S_1$ กับ $S_2$	Change Mask (สีขาว)	ระบุตำแหน่ง Change Mask บน ภาพอ้างอิง $S_1$ (สีเหลือง)
ระยะไกล		
ระยะกลาง		
ระยะใกล้		

#### 4.2.2.4 สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากตารางที่ 4.14 ภาพถ่าย  $S_2$  ถูกนำเข้าสู่กระบวนการ Photometric Adjustment เพื่อลดความแตกต่างในเรื่องของแสงและพื้นหลังให้ม้องค์ประกอบโดยรวมคล้ายคลึงกับ  $S_1$  มากที่สุดจากนั้นทำการบิดเบือนภาพด้วยการจับคู่จุดลักษณะเด่นเข้าด้วยกันได้ผลแสดงดังตารางที่ 4.14 คอลัมน์ที่ 3 จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการที่ภาพถ่าย  $S_1$  และ  $S_2$  นั้นมีองค์ประกอบของภาพมากมายส่งผลต่อการตรวจจับคู่จุดลักษณะเด่นที่ไม่ครอบคลุมทำให้การบิดเบือนภาพเพื่อซ้อนทับกันไม่มีประสิทธิภาพและก่อให้เกิดความแตกต่างของภาพเกิดขึ้นตามไปด้วย ทั้งๆที่ภาพทั้งสองไม่มีความแตกต่างกัน อีกทั้งมุมมองภาพที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยนั้นสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพได้มากมาย แม้ว่าจะใช้วิธีการนำตำแหน่ง GPS มา นำทางอากาศยานไร้คนขับในการเก็บข้อมูลที่ตำแหน่งเดียวกันแล้วก็ตาม ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งและมุมมองภาพที่เกิดขึ้นแม้เพียงเล็กน้อยยังส่งผลให้วิธีการนี้ไม่มีประสิทธิภาพมากพอ ค่า MSE และ SSIM บ่งบอกว่าภาพแต่ละคู่มีความแตกต่างกันมากกว่าครึ่ง ซึ่งผลของแสง มุมมองและระยะของภาพเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการตรวจวัดค่าความคล้ายคลึงกัน ซึ่งผลที่ได้จากตารางที่ 4.14 นั้นให้ค่า MSE ที่สูงมากและ SSIM ที่น้อยมากจนเกือบจะบอกได้ว่าภาพนั้นมีความแตกต่างกันจึงไม่เหมาะต่อการนำมาตรวจหาความเปลี่ยนแปลงเนื่องจากองค์ประกอบของภาพทั้ง 2 ชุด ถูกเก็บข้อมูลห่างกัน 48 ชั่วโมง ซึ่งยังไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงบนโครงสร้างเกิดขึ้น ซึ่งผลที่ได้จากกระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงมีจุดที่ระบุตำแหน่งของการเปลี่ยนแปลงที่ผิดพลาดทั้งบนโครงสร้างและไม่ใช้บนโครงสร้าง (เป็นสิ่งที่ในการศึกษานี้ไม่ต้องการ) แม้ว่าจะใช้เกณฑ์ที่สูงขึ้นก็ไม่สามารถลดข้อผิดพลาดต่าง ๆ นั้นลงได้

จากผลการทดลองสรุปได้ว่ากระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติ ไม่เหมาะสมนำมาใช้ในการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงบนโครงสร้างโบราณสถาน แม้ว่าจะใช้ภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับนำทางด้วยตำแหน่ง GPS เพื่อกลับไปตำแหน่งเดิมแล้วก็ตาม จากการศึกษาและทดลองวิธีการนี้มีข้อจำกัดและความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้มากเกินไป ซึ่งไม่สามารถให้การระบุตำแหน่งของความเสียหายที่แม่นยำได้ หากนำมาใช้นำมาใช้งานจริงอาจให้ผลลัพธ์ในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงที่ไม่มีประสิทธิภาพ



(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.8 (ก) แบบจำลองสามมิติจุดกลุ่มเมฆแบบห่างขององค์เจดีย์เล็ก (ข) แบบจำลองสามมิติจุดกลุ่มเมฆแบบหนาแน่นและตำแหน่งกล้องบนแบบจำลอง



(ก)

(ข)

ภาพที่ 4.9 (ก) แบบจำลองสามมิติแบบตาข่ายขององค์เจดีย์เล็ก (ข) แบบจำลองสามมิติแบบพื้นผิวขององค์เจดีย์เล็ก



ภาพที่ 4.10 ผลลัพธ์การปรับเทียบตำแหน่งกล้องของภาพชุดใหม่เข้าไปในแบบจำลองสามมิติอ้างอิง

จากการศึกษาและทดลองนี้ได้พบกับปัญหาใหม่ที่เป็นปัจจัยสำคัญในการตรวจหาความเปลี่ยนแปลง คือ แบบจำลองสามมิติแบบพื้นผิวที่ได้มานั้นมีพื้นผิวที่แตกต่างจากโครงสร้างจริง ที่มมองพื้นผิวแบบใกล้เคียงกับลักษณะของพื้นผิวที่ยากต่อการนำมาตรวจสอบหาความเปลี่ยนแปลงกับภาพจริง แสดงดังภาพที่ 4.11 ซึ่งหากไม่สามารถทำให้ภาพจากกระบวนการสังเคราะห์ภาพนั้นได้ภาพที่มีความคล้ายคลึงหรือความสมจริงเทียบเท่ากับภาพจริงได้ก็ไม่สามารถที่จะให้ผลของการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงที่มีประสิทธิภาพ หากใช้ภาพที่ได้จากแบบจำลองสามมิตินี้ทำการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงจะให้ผลลัพธ์ที่ไม่เหมาะสม คือ แสดงผลของการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวของโครงสร้างทุกจุดเนื่องจากพื้นผิวของแบบจำลองสามมิติมีความแตกต่างกับของจริง อีกทั้งโครงสร้างขององค์เจ็ทเล็กมีพื้นผิวและโครงสร้างที่มีความซับซ้อนและยากในการสร้างแบบจำลองสามมิติแบบพื้นผิวให้มีความคล้ายคลึงหรือสมจริงพอสำหรับการนำมาตรวจหาความเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ด้วยการเก็บข้อมูลภาพถ่ายของทั้ง 2 ชุดข้อมูลมีเวลาห่างกันเพียง 2 วัน ส่งผลให้การเปลี่ยนแปลงบนผิวโครงสร้างไม่เกิดขึ้นและเป็นหนึ่งปัจจัยที่สำคัญที่สุดในการศึกษาครั้งนี้

จากปัญหาที่กล่าวมาจึงทำให้เกิดแนวคิดในการหาวิธีการจำลองการเปลี่ยนแปลงที่มีคุณภาพเพื่อให้เกิดความแตกต่างหรือความเปลี่ยนแปลงระหว่างชุดข้อมูลภาพที่นำมาตรวจสอบและสามารถใช้สำหรับการทดสอบประสิทธิภาพของกระบวนการในงานวิจัยระหว่างการรอผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริง อีกทั้งยังสามารถใช้ผลของการจำลองการเปลี่ยนแปลงนี้เสนอเป็นวิธีการใหม่ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงได้ และสามารถนำมาเปรียบเทียบกับผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการในงานวิจัยให้มีความน่าเชื่อถือและแม่นยำมากยิ่งขึ้น ซึ่งปัญหาที่กล่าวมาเป็นอุปสรรคที่ทำให้การพัฒนากระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลง เพื่อให้สำเร็จตามวัตถุประสงค์และสามารถให้ผลลัพธ์ของการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงมีประสิทธิภาพและสามารถนำไปใช้งานได้จริงในการซ่อมแซมบูรณะโครงสร้างโบราณสถาน



ภาพที่ 4.11 (ก) ภาพตัวอย่างจากชุดข้อมูลอ้างอิง  $S_1$  (ข) ภาพจากแบบจำลองสามมิติแบบพื้นผิวของชุดข้อมูล  $S_1$  ในมุมมองภาพที่ใกล้เคียงกันของโบราณสถาน

#### 4.2.3 การจำลองสภาพการเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิคการซ่อมแซมภาพ

เนื่องจากการเก็บข้อมูลภาพถ่ายระหว่าง  $S_1$  กับ  $S_2$  มีระยะเวลาเก็บห่างกันเพียง 2 วัน ทำให้ผลการเปลี่ยนแปลงนั้นไม่เกิดขึ้น ระหว่างที่ทำการตรวจสอบเพื่อหาการเปลี่ยนแปลงเป็นระยะผู้วิจัยจึงได้เกิดแนวคิดการนำเทคนิคการซ่อมแซมภาพ (Image Inpainting) มาใช้ในการจำลองสภาพของโครงสร้างองค์เจตีย์ในข้อมูลภาพถ่ายระยะใกล้บริเวณจุดที่ต้องการทำการศึกษาคำนวณ 12 ภาพ ในชุดข้อมูลภาพ  $S_1$  ให้สามารถจำลองสภาพของโครงสร้างขณะที่ไม่เกิดรอยร้าวบางจุดบนโครงสร้างเพื่อทดสอบระบบการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงในงานวิจัยให้มีประสิทธิภาพและความแม่นยำเพิ่มมากขึ้นก่อนไปทดสอบกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริง

ประเด็นหนึ่งที่สำคัญทางด้านการประมวลผลภาพ คือ การลบวัตถุออกจากภาพ โดยคงรายละเอียดของภาพเดิมไว้หรือซ่อมแซมบางส่วนที่เสียหายของภาพให้กลับคืนสู่สภาพเดิม ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีการนี้ว่าการทำ Inpainting ซึ่งหมายถึงเทคนิคของการตกแต่งภาพส่วนที่สูญหายด้วยการเติมข้อมูลที่สังเคราะห์จากข้อมูลที่มีอยู่ภายในภาพอันเกิดจากความเสียหายในกรณีต่างๆ เช่น เกิดจากการเสื่อมของภาพ เช่น จุดบนภาพ รอยพับ รอยขีดข่วน หรือเกิดจากการเพิ่มเติมบางอย่างในภาพ เช่น ข้อความ วันที่ ลายน้ำ เพื่อให้ได้ภาพที่สมบูรณ์และมีรายละเอียดในภาพครบถ้วนตามเดิม การทำงานทั้งหมดจะถูกดำเนินการขึ้นภายใต้การกำหนดขอบเขตของการทำงานด้วย หน้ากากหรือพื้นที่ที่สนใจจะทำ Inpainting เพื่อบ่งบอกถึงบริเวณที่ต้องการดำเนินการ โดยทั่วไปการกำหนดขอบเขตยังเป็นการกำหนดด้วยมือ

การทำ Inpainting มีหลักการทำงานคือใช้การคำนวณและประมาณค่าส่วนที่เสียหายด้วยการสังเคราะห์พื้นผิว (Texture Synthesis) โดยใช้วิธีการพิจารณาพื้นที่โดยรอบส่วนที่เสียหายเพื่อนำมาเป็นข้อมูลที่สังเคราะห์ตรงส่วนที่เสียหายด้วยการค้นหาและจับคู่จุดที่มีบริเวณล้อมรอบคล้ายกันมากที่สุดระหว่างจุดที่เสียหายกับจุดที่สมบูรณ์ เพื่อนำค่าที่ถูกจับคู่ได้มาใช้ซ่อมแซมส่วนที่เสียหาย โดยเริ่มทำงานจากรอบนอกของส่วนที่เสียหายก่อนและขยับเข้าไปยังใจกลางบริเวณที่เสียหาย จนกระทั่งทุกจุดที่เสียหายถูกซ่อมแซมจนหมด แสดงตัวอย่างการทำ Inpainting ดังภาพที่ 4.12 โดยทดสอบกับโครงสร้างโบราณสถานองค์เจตีย์เล็กซึ่งเป็นโครงสร้างที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ ผู้อ่านสามารถหารายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่ Rohit T. Pushpalwar (2016)

การจำลองสภาพการเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิคการซ่อมแซมภาพหรือการทำ Inpainting ได้รับการช่วยเหลือจากนักศึกษาปริญญาเอก นายลูกมาน อาลี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ในการให้ความรู้และสร้างสภาพจำลองของโครงสร้างก่อนเกิดรอยแตกร้าวด้วยเทคนิคการทำ Inpainting ให้สามารถนำมาใช้งานได้จริง สำหรับการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยวิธีการในงานวิจัยนี้



(ก)

(ข)

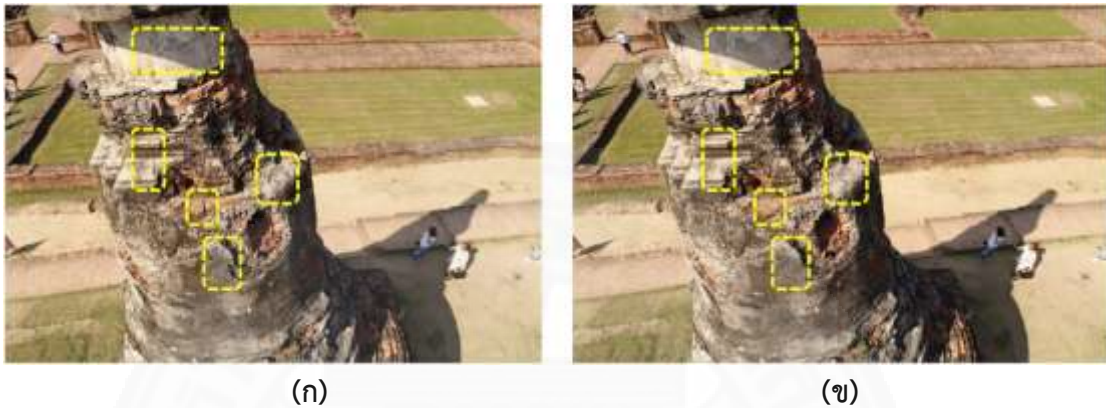
ภาพที่ 4.12 (ก) ตัวอย่างภาพจริงก่อนการทำ Inpainting (ซ้าย) (ข) ตัวอย่างภาพจริงที่ผ่านการทำ Inpainting โดยการเลือกพื้นที่ของเขตการซ่อมแซมภาพด้วยมือ (ขวา)

#### 4.2.3.1 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วย Homography

การใช้ข้อมูลการทำ Inpainting ในการทดสอบกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงได้ทดสอบกับข้อมูลภาพถ่ายระยะใกล้ในชุดข้อมูล  $S_1$  ในพื้นที่บริเวณที่ต้องการทำการตรวจสอบทั้งหมด 12 ภาพ ซึ่งเลือกจุดหรือพื้นที่ที่ต้องการทำ Inpainting เหมือนกันทุกภาพแสดงตัวอย่างดังภาพที่ 4.13 และได้นำ 4 ภาพจาก 12 ภาพนี้มาทำการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติ กับข้อมูลภาพถ่าย  $S_2$  ในตำแหน่งของภาพที่ใกล้เคียงกันโดยใช้การนำทางไปที่ตำแหน่งเดิมด้วย GPS ให้กับอากาศยานไร้คนขับ ตารางที่ 4.16 แสดงผลของการจับคู่จุดลักษณะเด่นและการบิดเบือนภาพ  $S_2$  (ภาพจริงที่มีรอยร้าว) ให้เข้ากับภาพ  $S_1$  (ภาพจริงที่ผ่านการทำ Inpainting เพื่อลบรอยร้าว)



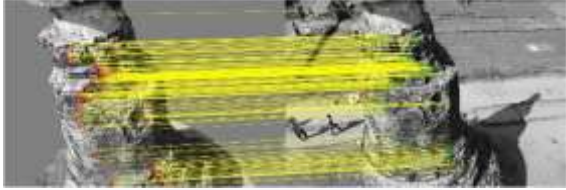



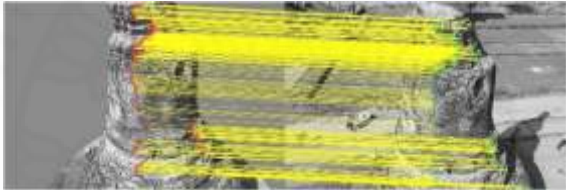



จากภาพทั้ง 4 มุมมอง ข้อสังเกตในระหว่างการตรวจจับจุดที่มีลักษณะเหมือนกันคือ ภาพมีรายละเอียดมากเกินไปทำให้การตรวจจับจุดที่เหมือนกันนั้นโดยส่วนมากไม่ตรวจจับตัวองค์เจดีแต่เป็นบริเวณโดยรอบแทนทำให้ผู้วิจัยจึงได้เลือกวิธีการแทนพื้นที่สีเทาออกไปในภาพ  $S_1$  โดยคงไว้เฉพาะตัวองค์เจดีที่ต้องการทำการการศึกษา





ภาพที่ 4.13 ภาพตัวอย่างองค์เจดีเล็ก (ก) ตำแหน่งจุดที่ทำ Inpainting (ภาพก่อนทำ Inpainting)  
(ข) ตำแหน่งจุดที่ทำ Inpainting (ภาพหลังทำ Inpainting)

ตารางที่ 4.17 แสดงผลของการตรวจวัดความคล้ายคลึงกันด้วยวิธี MSE และ SSIM ของภาพจากตารางที่ 4.16 โดยในความเป็นจริงค่าที่ควรจะเป็นคือภาพแต่ละคู่ควรมี MSE ที่น้อยและ SSIM ที่เข้าใกล้ 1 เนื่องจากการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงนี้มีความแตกต่างกันในโครงสร้างเฉพาะรอยร้าวในตำแหน่งที่ได้ทำ Inpainting เท่านั้น โดยคิดเป็นสัดส่วนในภาพทั้งหมดน้อยมาก ซึ่งผลของ MSE และ SSIM ควรเป็นไปตามที่ได้กล่าวมา ในขั้นตอนนี้เพื่อตรวจหาการเปลี่ยนแปลงภาพแต่ละคู่จะถูกปรับแสงและปรับพื้นหลังให้มีความคล้ายคลึงกันและตัดองค์ประกอบของภาพที่ไม่จำเป็นที่ไม่ใช่พื้นที่ที่ทำการตรวจสอบออกด้วยกระบวนการ Photometric Adjustment เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลง ผลที่ได้จากตารางที่ 4.17 ค่า MSE และ SSIM ให้ผลความผิดพลาดที่สูงมาก ในแต่ละคู่ภาพมีค่า MSE ที่เยอะเกินกว่าความเป็นจริงและค่า SSIM ที่น้อยกว่า 1 จนเกือบบอกได้ว่าภาพแต่ละคู่มีความเหมือนกันเพียง 70 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นทั้งที่โครงสร้างนั้นมีความเหมือนกันเกือบทุกประการซึ่งเกิดจากการบิดเบือนภาพที่ไม่สมบูรณ์แม้ว่าการกลับไปเก็บข้อมูลที่ตำแหน่งเดิมด้วยอากาศยานไร้คนขับจะให้ผลที่มีความแม่นยำที่สูงแต่ความคลาดเคลื่อนแม้เพียงเล็กน้อยในมุมมองภาพที่แตกต่างกันที่คนละช่วงเวลานั้นส่งผลให้เกิดการบิดเบือนภาพให้เข้ากันที่ไม่มีประสิทธิภาพได้







ตารางที่ 4.16 ผลการจับคู่จุดลักษณะเด่นและการปิดเป็นภาพผ่าน Inpainting ในข้อมูล  $S_1$

เปรียบเทียบ $S_1$ กับ $S_2$	ผลของการจับคู่จุดลักษณะเด่น (Feature Matching)	ภาพปิดเป็นจุดลักษณะ เด่นของ $S_2$ ให้เข้ากับ $S_1$
มุมมองที่ 1		
มุมมองที่ 2		
มุมมองที่ 3		
มุมมองที่ 4		

ตารางที่ 4.17 ผลการตรวจวัดความคล้ายคลึงกันด้วย MSE และ SSIM จากตารางที่ 4.16

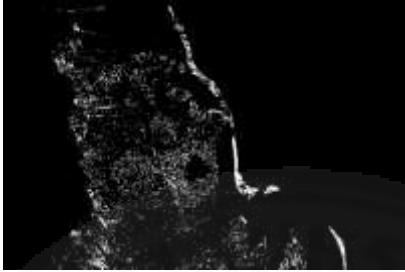

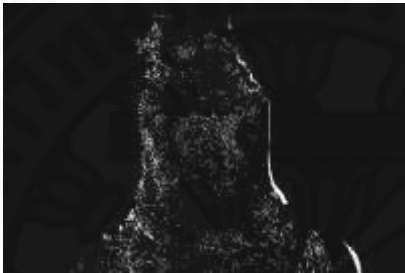





เปรียบเทียบ $S_1$ กับ $S_2$	ภาพสีเทา (Grayscale) ของชุดข้อมูลภาพ $S_1$	ภาพปิดเป็นจุดลักษณะเด่น ของ $S_2$ ให้เข้ากับ $S_1$	MSE ( $\text{pixel}^2$ )	SSIM
มุมมองที่ 1			1,421.8	0.64

ตารางที่ 4.17 ผลการตรวจวัดความคล้ายคลึงกันด้วย MSE และ SSIM จากตารางที่ 4.16 (ต่อ)

เปรียบเทียบ $S_1$ กับ $S_2$	ภาพสีเทา (Grayscale) ของชุดข้อมูลภาพ $S_1$	ภาพปิดเป็นจุดลักษณะเด่น ของ $S_2$ ให้เข้ากับ $S_1$	MSE (pixel <sup>2</sup> )	SSIM
มุมมองที่ 2			998.67	0.72
มุมมองที่ 3			1,291.5	0.70
มุมมองที่ 4			834.04	0.73

ตารางที่ 4.18 แสดงผลการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงของข้อมูลภาพ จากตารางที่ 4.17 ซึ่งผลการเปลี่ยนแปลงที่แสดงผลนี้มีความผิดพลาดสูงในการแสดง Change Mask (สีเหลือง) บนภาพ  $S_1$  ที่บอกถึงจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ถูกต้องมากมายจุด ซึ่งสอดคล้องกับค่า MSE และ SSIM จากตารางที่ 4.17 ที่บอกถึงคุณภาพของวิธีการปิดเป็นภาพที่ไม่เหมาะสมนำมาทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลง จากผลการทดลองที่ผ่านมาซึ่งสรุปได้ว่าวิธีการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติ ไม่เหมาะสมนำมาทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงในพื้นที่เปิดที่มีข้อจำกัดในกระบวนการเก็บข้อมูลภาพให้มีมุมมองที่เหมือนกัน อีกทั้งตัวอย่างการศึกษาเป็นโครงสร้างที่มีความซับซ้อนและมีรายละเอียดองค์ประกอบของโครงสร้างที่ยากต่อการตรวจสอบด้วยภาพ 2 มิติ และวิธีการปิดเป็นภาพนั้นไม่สามารถตรวจจับจุดลักษณะที่เหมาะสมในการทำการปิดเป็นภาพให้เข้ากันอย่างมีประสิทธิภาพได้ ซึ่งปัญหาของการจับคู่จุดลักษณะเด่นนี้เป็นปัจจัยหลักที่สำคัญที่ทำให้กระบวนการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติ ไม่สามารถให้ผลลัพธ์ที่เพียงพอต่อการใช้งานได้จริง

ตารางที่ 4.18 ผลการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงข้อมูลภาพจากรายการที่ 4.17 (Threshold = 100)

เปรียบเทียบ $S_1$ กับ $S_2$	Change Mask (สีขาว)	ระบุตำแหน่ง Change Mask บน ภาพอ้างอิง $S_1$ (สีเหลือง)
มุมมองที่ 1		
มุมมองที่ 2		
มุมมองที่ 3		
มุมมองที่ 4		

#### 4.2.3.2 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพจริงและภาพสังเคราะห์ จากแบบจำลองสามมิติ

กระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนนี้หลังจากที่ได้ทดสอบการสังเคราะห์ภาพจากแบบจำลองสามมิติแล้วพบว่า ภาพสังเคราะห์โดยทั่วไปจากแบบจำลองสามมิติจะได้รับความละเอียดของพื้นผิวบนแบบจำลองเท่ากับ 4,096 Texture Size/Count ซึ่งที่ความละเอียด

นี่เป็นความละเอียดที่เพียงพอต่อการตรวจสอบโครงสร้างทั่วไปแสดงดังหัวข้อที่ 4.1.3 ในการทดสอบกับคานคอนกรีตสามารถแสดงผลการตรวจสอบความเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพจริงกับภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติได้ดี แต่เมื่อทดสอบสังเคราะห์ภาพจากแบบจำลองสามมิติโบราณสถานองค์เจดีย์เล็กที่สนใจทำการศึกษาให้ผลที่ไม่เหมาะสมต่อการนำมาตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงแสดงดังภาพที่ 4.11 ผู้ทำการศึกษาก็ได้ทำการปรับความละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองให้สูงขึ้นและใช้ความละเอียดที่ระดับต่างๆในการนำมาตรวจสอบการเปลี่ยนแปลง โดยใช้ความละเอียดของ Texture Size/Count ทั้งหมด 3 ระดับ ได้แก่ 4,096 8,192 และ 16,384 Texture Size/Count

ภาพที่ผ่านการทำ Inpainting เพื่อลบตำแหน่งรอยร้าวบางจุดออกเป็นการจำลองสภาพก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงในมุมมองภาพระยะใกล้บริเวณที่ต้องการทำการตรวจสอบทั้งหมด 12 ภาพ ของ  $S_1$  ซึ่งเป็นบริเวณตำแหน่งเดียวกันกับภาพ  $S_2$  ทั้งหมดตามที่ได้กล่าวมาข้างต้นและข้อมูลในตารางที่ 4.11 จากนั้นแยกภาพที่ทำ Inpainting เหล่านี้ออกจาก  $S_1$  แล้วสร้างเป็นชุดข้อมูลอ้างอิงหรือภาพจริง  $S_0$  เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติ จากนั้นนำภาพระยะใกล้ทั้งหมดของ  $S_2$  มารวมกับภาพระยะใกล้ กลาง และระยะใกล้ที่เหลือของ  $S_1$  เป็นชุดข้อมูล  $S_t$  เพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติที่สภาวะมีรอยร้าว โดยมีภาพที่ทำ Inpainting  $S_0$  เป็นสภาวะโครงสร้างที่ไม่เกิดรอยร้าว จากนั้นนำภาพที่ทำ Inpainting โดยเลือกมา 4 ภาพที่มุมมองแตกต่างกันทำการปรับเทียบตำแหน่งกล้องเข้าไปในแบบจำลองสามมิติเพื่อสังเคราะห์ภาพนำมาตรวจสอบคุณสมบัติความคล้ายคลึงกันและตรวจสอบการเปลี่ยนแปลง ตารางที่ 4.19 แสดงตัวอย่างผลของความคลาดเคลื่อนในกระบวนการปรับเทียบตำแหน่งกล้องของการนำภาพ Inpainting  $S_0$  ปรับเทียบหาตำแหน่งเข้าไปในแบบจำลองสามมิติ  $S_t$  ซึ่งให้ผลของตำแหน่งกล้อง  $S_0$  ที่ปรับเทียบเข้าไปในแบบจำลองสามมิตินั้นมีความคลาดเคลื่อนที่น้อยและมีค่าใกล้เคียงกันกับชุดข้อมูลภาพของแบบจำลองสามมิติ  $S_t$  ดังนั้นภาพสังเคราะห์ที่ได้จากแบบจำลองสามมิตินี้สามารถนำมาใช้ในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งและมุมมองภาพเดียวกันได้

**ตารางที่ 4.19** ตัวอย่างผลลัพธ์ของความคลาดเคลื่อนในกระบวนการปรับเทียบตำแหน่งกล้องของภาพ Inpainting  $S_0$  เข้าไปในแบบจำลองสามมิติ  $S_t$

ตัวอย่างจากชุดข้อมูล	ชื่อของภาพ	ความคลาดเคลื่อน (พิกเซล)
$S_t$	DJI_0193	1.463
$S_t$	DJI_0194	1.227
$S_t$	DJI_0195	1.158
$S_0$	DJI_0211	1.993

ตารางที่ 4.20 ผลการตรวจวัดค่า MSE และ SSIM ระหว่างภาพ Inpainting และภาพสังเคราะห์ในแต่ละมุมมองทั้งหมด 4 มุมมอง ที่ความละเอียดของภาพสังเคราะห์ 3 ระดับ

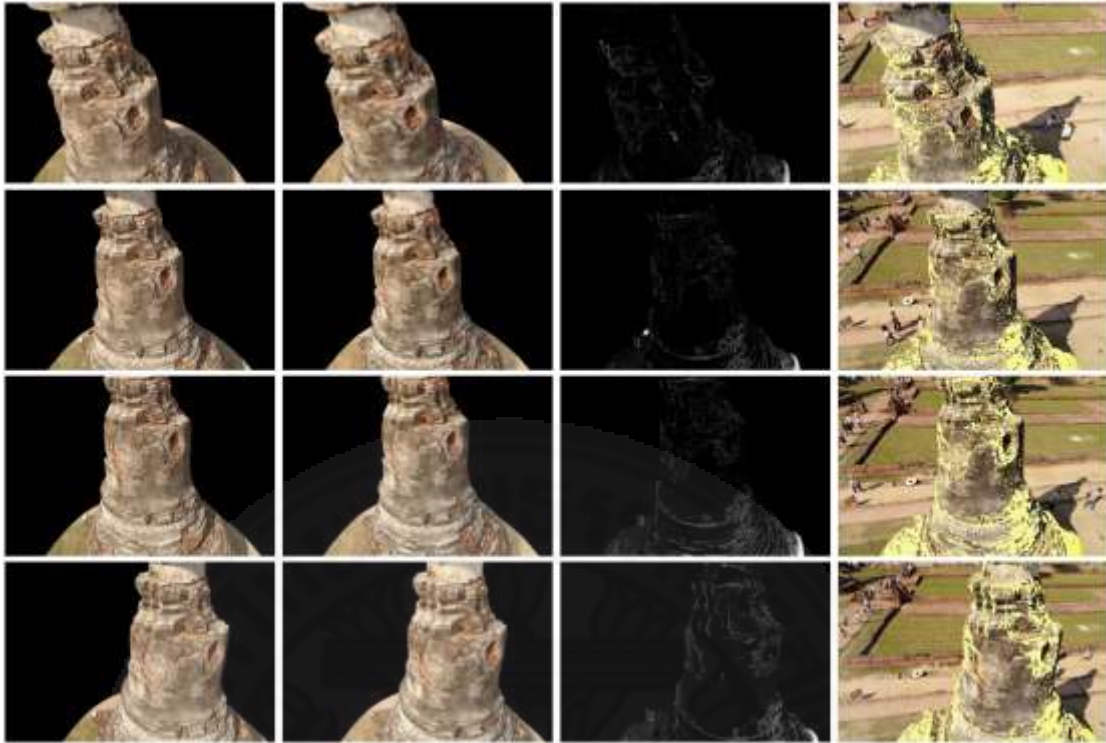
เปรียบเทียบ $S_0$ กับ $S_t$	ความละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองสามมิติ $S_t$ (Texture Size/Count)	MSE (pixel <sup>2</sup> )	SSIM
มุมมองที่ 1	4,096	516.66	0.7
	8,192	449.44	0.75
	16,384	430.97	0.8
มุมมองที่ 2	4,096	410.81	0.77
	8,192	358.79	0.81
	16,384	323.46	0.84
มุมมองที่ 3	4,096	459.25	0.74
	8,192	415.17	0.79
	16,384	403.07	0.8
มุมมองที่ 4	4,096	460.27	0.74
	8,192	390.48	0.8
	16,384	374.46	0.83

ตารางที่ 4.20 แสดงรายละเอียดของการตรวจวัดความคล้ายคลึงกันของภาพในแต่ละมุมมองทั้งหมด 4 ภาพ ที่ความละเอียดของภาพสังเคราะห์ 3 ระดับ แสดงให้เห็นว่าการปรับคุณภาพความละเอียดของแบบจำลองสามมิติให้สูงขึ้นจนถึง 16,384 Texture Size/Count ซึ่งเป็นความละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองที่สูงและให้ความเหมือนจริงมากที่สุด สามารถที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของการลดความแตกต่างของภาพสังเคราะห์กับภาพจริงให้มีความเหมือนกันมากยิ่งขึ้น โดยยิ่งเพิ่มความละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองให้สูงขึ้นค่า MSE ก็จะลดน้อยลงและ SSIM จะมีค่าสูงหรือเข้าใกล้ 1 มากขึ้นในแต่ละมุมมองภาพ ซึ่งสามารถบอกได้ว่าภาพมีความแตกต่างกันน้อยลงและเหมือนกันมากขึ้นด้วยค่า MSE และ SSIM ตามลำดับ

อย่างไรก็ตามคุณภาพของข้อมูลที่น่ามาตรวจหาการเปลี่ยนแปลงแม้ว่าจะมีคุณภาพที่ดีขึ้นก็ยังไม่เพียงพอต่อการนำมาตรวจสอบเนื่องจากตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในภาพคิดเป็นสัดส่วนของภาพทั้งหมดนั้นน้อยมากหรืออาจพูดได้ว่าค่า MSE ควรมีค่าที่น้อยมากและ SSIM ควรมีค่าเข้าใกล้กับ 1 มากกว่านี้ ซึ่งเมื่อนำผลของความละเอียดที่ 16,384 Texture

Size/Count ของมุมมองภาพทั้ง 4 มุมมอง มาทำการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงระหว่างชุดข้อมูลภาพอ้างอิงที่ทำ Inpainting  $S_0$  กับภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติ  $S_t$  ที่ตำแหน่งกล้องเดียวกันจากการปรับเทียบตำแหน่งกล้อง  $S_0$  เข้าไปในแบบจำลองสามมิติ  $S_t$  ให้ผลแสดงดังภาพที่ 4.14

ภาพที่ 4.14 แสดงผลของ Change Mask (สีเหลือง) โดยใช้เกณฑ์เท่ากับ 70 ในการระบุถึงจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงบนภาพจริงนั้นยังมีข้อผิดพลาดมากมายเนื่องจากพื้นผิวของแบบจำลองสามมิติยังขาดความเหมือนกันกับภาพจริงไม่ว่าจะเป็น องค์ประกอบของโครงสร้างที่ไม่ครบถ้วน เงา และวัตถุสิ่งรบกวนต่างๆที่ไม่ต้องการ แม้ว่าผลของความผิดพลาดนี้จะน้อยกว่าวิธีการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติ แต่ก็ยังไม่สามารถให้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพและสามารถนำไปใช้งานได้จริงได้ ซึ่งข้อผิดพลาดเหล่านี้ยังเป็นปัญหาหลักที่ทำให้ระบบการตรวจสอบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ยังให้ผลลัพธ์ที่ไม่มีประสิทธิภาพ อีกทั้งการทำให้องค์ประกอบทุกอย่างของแบบจำลองสามมิติเหมือนกันกับภาพจริงทุกประการนั้นในทางปฏิบัติยังเป็นเรื่องที่เป็นไปได้ยาก จึงสามารถสรุปได้ว่า วิธีการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพจริงและภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติในโครงสร้างโบราณสถานที่มีความซับซ้อนนั้นยังไม่สามารถให้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพพอ



ภาพที่ 4.14 ตัวอย่างผลการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงทั้ง 4 มุมมองระหว่างภาพอ้างอิง  $S_0$  กับภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติ  $S_t$  ขององค์เจดีย์ที่ความละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองเท่ากับ 16,384 Texture Size/Count (หลักที่ 1) ภาพอ้างอิง  $S_0$  ที่ทำ Inpainting หลังจากผ่านกระบวนการ Photometric Adjustment เพื่อปรับให้แสงและพื้นหลังเหมือนกันกับภาพสังเคราะห์ในหลักที่ 2 (หลักที่ 2) ภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติ  $S_t$  ในตำแหน่งเดียวกันกับ  $S_0$  (หลักที่ 3) Change Masks การเปลี่ยนแปลงระหว่างหลักที่ 1 และ 2 โดยใช้เกณฑ์เท่ากับ 70 (หลักที่ 4) ระบุตำแหน่ง Change Mask บนภาพอ้างอิง  $S_0$  (สีเหลือง)

#### 4.2.3.3 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพสังเคราะห์กับภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติ

จากปัญหาที่พบในขั้นตอนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงที่ผ่านมายังไม่มีวิธีการใดให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพได้เนื่องจากภาพสังเคราะห์นั้นไม่สามารถให้ความครบถ้วนขององค์ประกอบโครงสร้างและพื้นผิวที่เหมือนกับชุดข้อมูลอ้างอิงที่ใช้สำหรับการตรวจสอบได้ ผู้ทำวิจัยจึงได้เลือกวิธีการใหม่โดยการนำภาพสังเคราะห์กับภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติ 2 ชุด ได้แก่

1. แบบจำลองสามมิติที่สภาวะโครงสร้างก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยใช้ภาพระยะใกล้ทำ Inpainting ลบตำแหน่งรอยร้าวออกจำนวน 12 ภาพจาก  $S_1$  ในบริเวณที่ต้องการตรวจหาการเปลี่ยนแปลง จากนั้นนำมารวมกับข้อมูลภาพถ่าย



ระยะใกล้ กลาง และไกลที่เหลือใน  $S_1$  เพื่อสร้างเป็นแบบจำลองสามมิติที่สถานะก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงในจุดที่ต้องการตรวจสอบ เรียกว่า แบบจำลองสามมิติอ้างอิง หรือ  $M_1$

2. แบบจำลองสามมิติที่สถานะโครงสร้างเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยการนำ  $M_1$  มาปรับปรุงแบบจำลองให้เป็นปัจจุบันโดยใช้ภาพระยะใกล้จาก  $S_2$  ทั้งหมด 12 ภาพนำมาแทนที่ภาพที่ทำ Inpainting จำนวน 12 ภาพจาก  $S_1$  ในบริเวณพื้นที่ที่ต้องการตรวจสอบตำแหน่งเดียวกัน เพื่อสร้างเป็นแบบจำลองสามมิติที่สถานะเกิดการเปลี่ยนแปลง เรียกว่า แบบจำลองสามมิติใหม่ หรือ  $M_2$

วิธีการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการลดความแตกต่างระหว่างคู่ภาพที่จะนำมาตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยการควบคุมคุณภาพในการสร้างแบบจำลองสามมิติของทั้งสองแบบจำลองให้เหมือนกันซึ่งเป็นสิ่งเดียวที่สามารถควบคุมให้เหมือนกันได้ โดยรายละเอียดของแบบจำลองสามมิติทั้งสองจะเหมือนกันทุกประการซึ่งแตกต่างกันเฉพาะพื้นผิวที่แสดงให้เห็นจะเกิดจากข้อมูลภาพที่ถ่ายกันคนละช่วงเวลา โดยกระบวนการสร้างแบบจำลองสามมิติดังกล่าวจะสร้างรายละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองทั้งสองมีค่าเท่ากับ 16,384 Texture Size/Count เพื่อให้ประสิทธิภาพพื้นผิวแบบจำลองเหมาะสมต่อการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงที่สุด จากนั้นนำภาพจาก  $M_1$  จำนวน 4 ภาพในตำแหน่งที่ต้องการตรวจสอบเปรียบเทียบเข้าไปในแบบจำลองสามมิติ  $M_2$  และทำการสังเคราะห์ภาพจากตำแหน่งกล้องของภาพทั้ง 4 ภาพดังกล่าวจากแบบจำลองทั้งสองเพื่อใช้สำหรับการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงที่ตำแหน่งเดียวกันต่อไป ตารางที่ 4.21 แสดงตัวอย่างค่าความคลาดเคลื่อนในการเปรียบเทียบตำแหน่งกล้องของภาพจาก  $M_1$  เข้าไปในแบบจำลองสามมิติ  $M_2$

**ตารางที่ 4.21** ตัวอย่างผลลัพธ์ของความคลาดเคลื่อนในกระบวนการเปรียบเทียบตำแหน่งกล้องของภาพจาก  $M_1$  เข้าไปในแบบจำลองสามมิติ  $M_2$

ตัวอย่างจากชุดข้อมูล	ชื่อของภาพ	ความคลาดเคลื่อน (พิกเซล)
$M_2$	DJI_0192	1.550
$M_2$	DJI_0193	1.463
$M_2$	DJI_0194	1.227
$M_2$	DJI_0195	1.158
$M_1$	DJI_0213	2.031

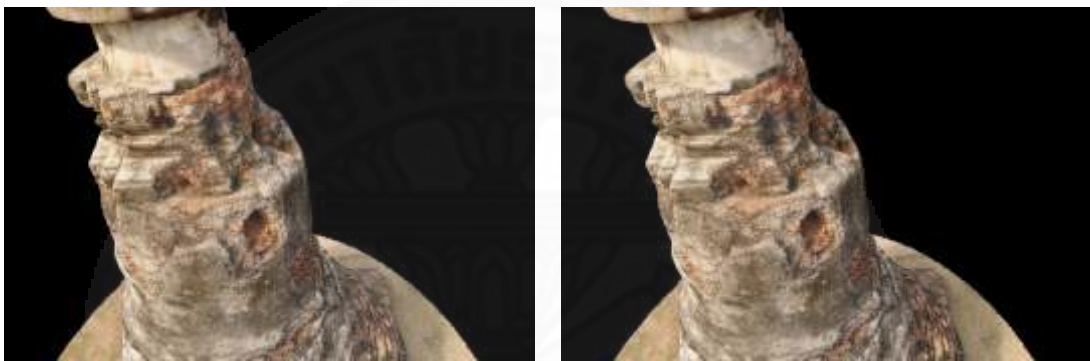
ตารางที่ 4.22 ผลการตรวจวัดค่า MSE และ SSIM ระหว่างภาพสังเคราะห์จาก  $M_1$  และ  $M_2$  ในตำแหน่งเดียวกันจากกระบวนการสร้างแบบจำลองสามมิติที่เหมือนกัน

เปรียบเทียบ $M_1$ กับ $M_2$	ความละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองสามมิติ (Texture Size/Count)	MSE (pixel <sup>2</sup> )	SSIM
มุมมองที่ 1	16,384	29.71	0.97
มุมมองที่ 2	16,384	25.28	0.98
มุมมองที่ 3	16,384	26.05	0.98
มุมมองที่ 4	16,384	25.81	0.97

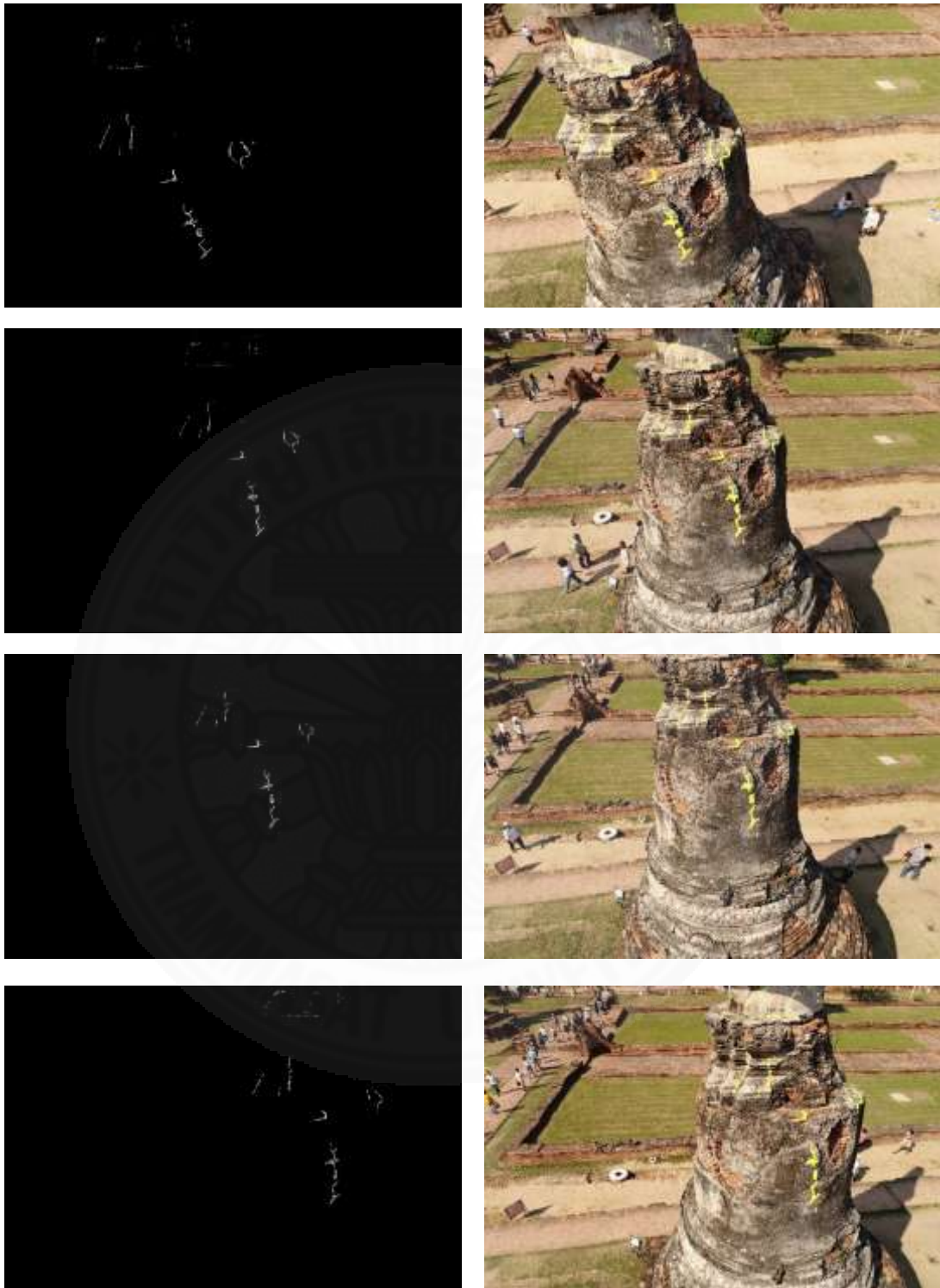
จากตารางที่ 4.22 แสดงให้เห็นว่าผลของค่า MSE และ SSIM ให้ค่าดีขึ้นและสมเหตุสมผลมากขึ้น โดยค่า MSE มีค่าน้อยมากและค่า SSIM มีค่าเข้าใกล้ 1 มาก ซึ่งมีความถูกต้องของผลลัพธ์เหล่านี้สูง สามารถบอกได้ว่าวิธีการดังกล่าวให้ผลลัพธ์ของข้อมูลที่มีประสิทธิภาพและเพียงพอต่อการนำเข้าสู่กระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลง ภาพที่ 4.15 แสดงตัวอย่างภาพสังเคราะห์จาก  $M_1$  และ  $M_2$  ในตำแหน่งเดียวกัน ภาพที่ 4.16 แสดงผลของการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงโดยใช้เกณฑ์เท่ากับ 30 และแสดงผลของ Change Masks (สีเหลือง) บนภาพอ้างอิงใน  $S_1$  เพื่อระบุจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลง จากผลดังกล่าวให้ผลของจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความผิดพลาดน้อย ดังนั้นการใช้ภาพสังเคราะห์กับภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติทั้งสองมาตรวจหาการเปลี่ยนแปลงนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงให้ผลที่มีความแม่นยำและสามารถใช้งานได้จริง ผลที่แสดงให้เห็นนี้เป็นผลที่มีความถูกต้องสูงมากเมื่อเทียบกับทุกวิธีการที่ผ่านมา ซึ่งสามารถบอกจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงได้อย่างถูกต้องได้ใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริง

อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของกระบวนการนี้คือการเก็บข้อมูลภาพถ่ายในระยะใกล้เพื่อให้ได้รายละเอียดได้อย่างชัดเจนในบริเวณที่ต้องการตรวจสอบและข้อมูลสองชุดที่นำมาทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงต้องมีการเก็บข้อมูลภาพถ่ายระยะใกล้ในตำแหน่งเดียวกัน ซึ่งการนำเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับมาช่วยในการแก้ไขปัญหาก็เป็นการช่วยลดข้อผิดพลาดในการเก็บข้อมูลที่ตำแหน่งเดิมได้เป็นอย่างดี อีกทั้งแบบจำลองสามมิติยังสามารถให้รายละเอียดของโครงสร้างโบราณสถานเหมือนจริงและเพียงพอต่อการตรวจสอบได้ แม้ว่าบางส่วนหรือบางองค์ประกอบของโครงสร้างจะไม่สามารถสร้างให้เหมือนจริงเนื่องจากไม่สามารถเก็บข้อมูลให้ครบทุกองค์ประกอบได้

และเป็นเรื่องที่ยาก ดังนั้นการนำภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติทั้งสองมาใช้สำหรับการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงถือเป็นอีกหนึ่งวิธีการที่มีประสิทธิภาพแม้ว่าความผิดพลาดที่เกิดจากองค์ประกอบของแบบจำลองสามมิติจะมีข้อผิดพลาดบ้างเล็กน้อย ซึ่งการใช้ภาพสังเคราะห์ทั้งสองมาตรวจสอบนั้นช่วยลดความผิดพลาดดังกล่าวลงไปได้และกระบวนการปรับเทียบตำแหน่งกล้องก็สามารถให้ผลความคลาดเคลื่อนที่น้อยและเหมาะสมต่อการสังเคราะห์ภาพจากแบบจำลอง อีกทั้งผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการนี้สามารถบอกถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างโบราณสถานที่มีความซับซ้อนได้เป็นอย่างดี



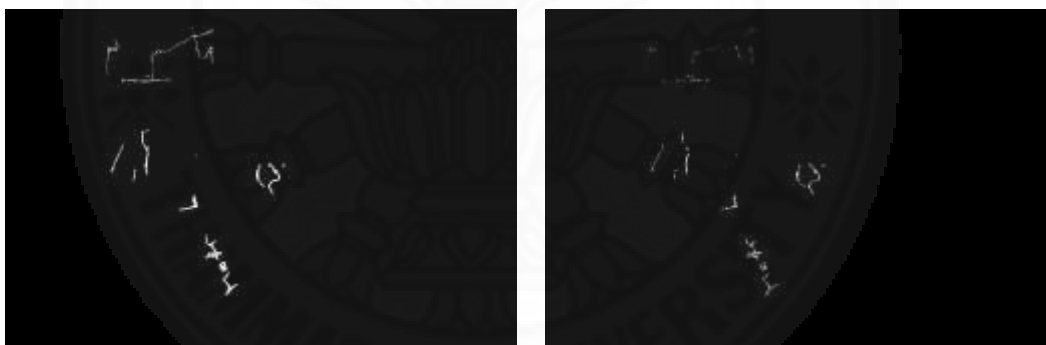
ภาพที่ 4.15 ตัวอย่างภาพสังเคราะห์จาก  $M_1$  (ซ้าย) และ  $M_2$  (ขวา) ในตำแหน่งกล้องเดียวกันที่ความละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองสามมิติเท่ากับ 16,384 Texture Size/Count



ภาพที่ 4.16 ผลการเปลี่ยนแปลงและตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพสีเกราะห้จากแบบจำลองสามมิติ  $M_1$  และ  $M_2$  จาก 4 มุมมอง (หลักที่ 1) Change Masks จากกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงโดยใช้เกณฑ์เท่ากับ 30 (หลักที่ 2) ระบุตำแหน่ง Change Mask บนภาพอ้างอิง  $S_1$  (สีเหลือง)

#### 4.2.3.4 การประเมินคุณภาพด้วย ROC curve

จากกระบวนการตรวจวัดความคล้ายคลึงกันด้วยค่า MSE และ SSIM ที่เป็นตัวบ่งบอกถึงคุณภาพของข้อมูลคู่ภาพที่นำมาตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงว่าเหมาะสมมากน้อยเพียงใด อย่างไรก็ตามในวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถบอกถึงคุณภาพของกระบวนการและผลลัพธ์ที่ได้ทั้งหมดได้ด้วย Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve สามารถอ่านเพิ่มเติมได้ในบทที่ 3 หัวข้อ 3.3.3 ในขั้นตอนนี้จะเป็นการนำผล Change Masks จากกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงที่เป็นไปได้ทั้งหมดตั้งแต่การใช้เกณฑ์ (Threshold) ตามผลต่างของพิกเซลตั้งแต่ 0 ไปจนถึงค่าผลต่างที่มากที่สุดในช่วงข้อมูลของคู่ภาพที่ทำการเปรียบเทียบกัน โดยนำมาพิจารณากับค่า Change Masks จากข้อมูลที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นจริง (Ground Truth) ตามขั้นตอนการสร้าง ROC curve ว่าผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการนี้มีความถูกต้องและมีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด ซึ่งการสรุปผลจะเป็นการระบุจากลักษณะกราฟว่าเข้าใกล้หรือมีความคล้ายคลึงกับ Ideal Curve หรือไม่ หรือค่าพื้นที่ใต้กราฟ (AUC) มีค่าเข้าใกล้ 1 มากน้อยอย่างไร โดยหาก AUC เข้าใกล้ 1 มากหมายถึงผลลัพธ์และกระบวนการที่ได้แนะนำไปเป็นข้อมูลที่ทำให้ผลการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงที่มีคุณภาพ



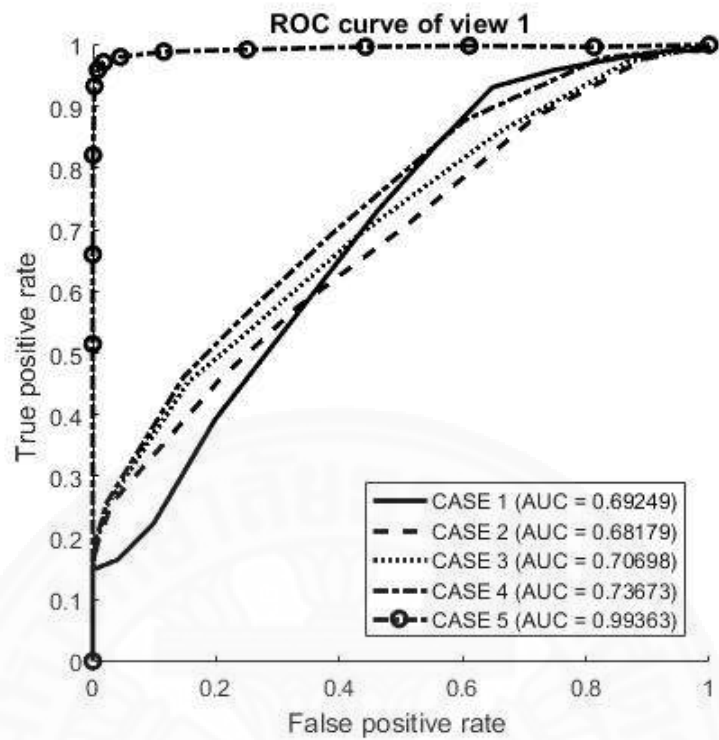
ภาพที่ 4.17 (ซ้าย) ตัวอย่าง Change Mask ของข้อมูล Ground Truth จากการทำด้วยมือ (ขวา) ตัวอย่างภาพ Change Mask จากกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงในมุมมองภาพที่ 1 จากภาพที่ 4.16 ในมุมมองและตำแหน่งภาพเดียวกัน

การทำ Change Masks ของข้อมูล Ground Truth เป็นการทำด้วยมือ เนื่องจากปัจจุบันยังให้วิธีการระบุจากผู้ตรวจสอบเป็นวิธีที่เชื่อถือได้ที่สุด ภาพที่ 4.17 แสดงตัวอย่าง Change Masks ของข้อมูล Ground Truth (ภาพทางซ้าย) จากการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นด้วยการพินิจจากผู้ทำวิจัยระหว่างภาพที่ผ่านกระบวนการทำ Inpainting และภาพเดียวกันก่อนทำ Inpainting ในข้อมูลภาพ  $S_1$  ทำให้กระบวนการสร้าง Change Masks ของข้อมูล Ground Truth นั้นง่ายขึ้น เนื่องจากผู้วิจัยเป็นคนกำหนดพื้นที่บริเวณการจำลองสภาวะการเปลี่ยนแปลงด้วยตนเอง จึงเป็นเรื่องที่ง่ายต่อการสร้าง Change Masks ด้วยมือจากข้อมูลภาพถ่าย ภาพที่ 4.18, 4.19,

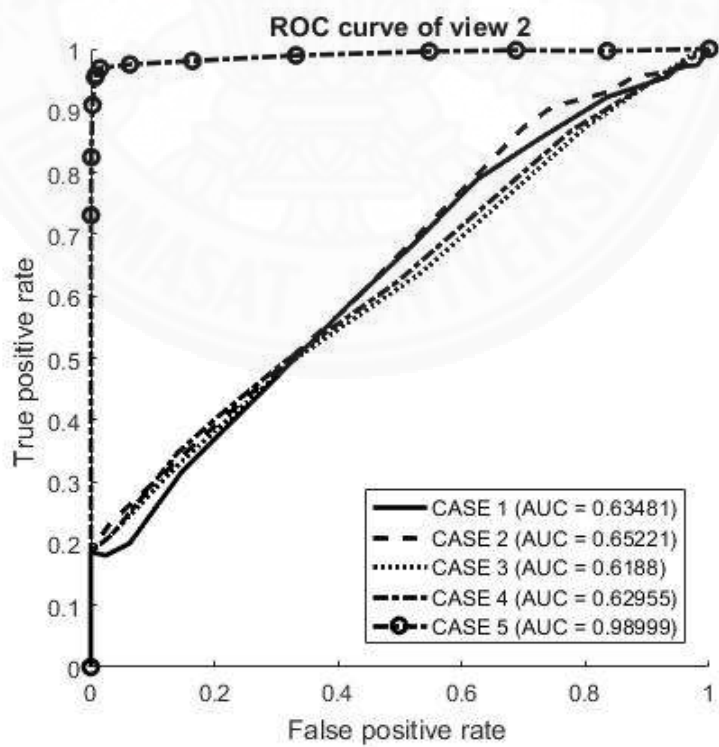
4.20 และ 4.21 แสดงผลลัพธ์ของ ROC Curve ในมุมมองภาพทั้ง 4 มุมมองตามลำดับ ซึ่งในแต่ละรูปทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลง โดยใช้ข้อมูลภาพที่นำมาตรวจหาการเปลี่ยนแปลงจากวิธีการศึกษาที่แตกต่างกันไปทั้งหมด 5 วิธีการที่ผ่านมาประกอบด้วย

1. การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติ ผ่านกระบวนการจับคู่จุดลักษณะเด่นและการบิดเบือนภาพ (CASE 1)
2. การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพจริงและภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติที่ความละเอียด 4,096 Texture Size/Count (CASE 2)
3. การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพจริงและภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติที่ความละเอียด 8,192 Texture Size/Count (CASE 3)
4. การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพจริงและภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติที่ความละเอียด 16,384 Texture Size/Count (CASE 4)
5. การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพสังเคราะห์และภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติที่ความละเอียด 16,384 Texture Size/Count (CASE 5)

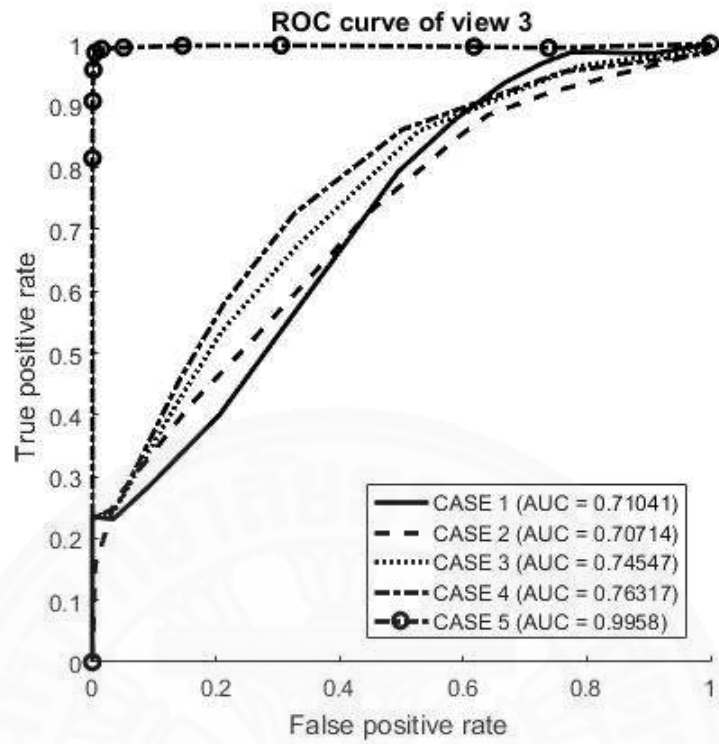
จากค่าพื้นที่ใต้กราฟ AUC รวมถึงลักษณะของกราฟจากผลลัพธ์ที่ได้จาก ROC Curve แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกระบวนการและคุณภาพของผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงในแต่ละมุมมองภาพ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า CASE 1, CASE 2, CASE 3 และ CASE 4 ให้ผลลัพธ์ของกราฟ ROC Curve ที่มีลักษณะของกราฟและค่า AUC ที่ใกล้เคียงกัน และให้ผลลัพธ์ที่บ่งบอกว่ากระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงในกรณีเหล่านี้ยังไม่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากยังมีความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในช่วงประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งยังถือว่ามีความถูกต้องที่น้อยเกินไป แตกต่างจากกรณีของ CASE 5 ซึ่งให้ค่าพื้นที่ใต้กราฟ AUC มีค่าเข้าใกล้ 1 รวมถึงลักษณะของกราฟจากผลลัพธ์ที่ได้จาก ROC Curve มีความคล้ายคลึงกับ Ideal Curve บ่งบอกถึงความถูกต้องที่สูงและมีประสิทธิภาพเป็นอย่างมาก อย่างไรก็ตามการทดสอบใน CASE 5 ไม่ใช่ผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริง แต่เป็นการจำลองสภาพการเปลี่ยนแปลงโดยการทำ Inpainting ซึ่งอาจมีความน่าเชื่อถือไม่มากเพียงพอเนื่องจากข้อมูลดังกล่าวไม่ได้มาจากสภาพแวดล้อมจริง



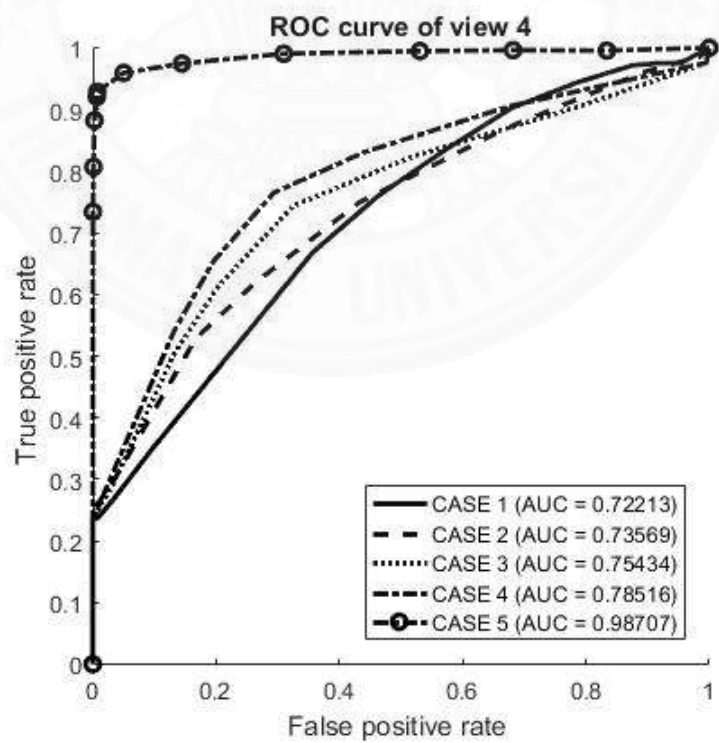
ภาพที่ 4.18 ผลลัพธ์ของ ROC Curve ในมุมมองภาพที่ 1



ภาพที่ 4.19 ผลลัพธ์ของ ROC Curve ในมุมมองภาพที่ 2



ภาพที่ 4.20 ผลลัพธ์ของ ROC Curve ในมุมมองภาพที่ 3



ภาพที่ 4.21 ผลลัพธ์ของ ROC Curve ในมุมมองภาพที่ 4



#### 4.2.3.5 สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการศึกษาและทดลองในการประยุกต์ใช้การจำลองสภาพการเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิคการซ่อมแซมภาพหรือ Inpainting สามารถสรุปผลการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยการประเมินคุณภาพของข้อมูลและวิธีการผ่านการแสดงผลด้วยค่า MSE SSIM และ AUC ดังตารางที่ 4.23

ตารางที่ 4.23 สรุปผลการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงของกรณีศึกษาทั้งหมดผ่านการทำ inpainting

เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงผ่านเทคนิคการซ่อมแซมภาพ	ข้อมูลภาพจากวิธีการศึกษาในแต่ละกรณี	MSE (pixel <sup>2</sup> )	SSIM	AUC
มุมมองที่ 1	CASE 1	1,421.8	0.64	0.69249
	CASE 2	516.66	0.7	0.68179
	CASE 3	449.44	0.75	0.70698
	CASE 4	430.97	0.8	0.73673
	CASE 5	29.71	0.97	0.99363
มุมมองที่ 2	CASE 1	998.67	0.72	0.63481
	CASE 2	410.81	0.77	0.65221
	CASE 3	358.79	0.81	0.6188
	CASE 4	323.46	0.84	0.62955
	CASE 5	25.28	0.98	0.98999
มุมมองที่ 3	CASE 1	1,291.5	0.70	0.71041
	CASE 2	459.25	0.74	0.70714
	CASE 3	415.17	0.79	0.74547
	CASE 4	403.07	0.8	0.76317
	CASE 5	26.05	0.98	0.9958
มุมมองที่ 4	CASE 1	834.04	0.73	0.72213
	CASE 2	460.27	0.74	0.73569
	CASE 3	390.48	0.8	0.75434
	CASE 4	374.46	0.83	0.78516
	CASE 5	25.81	0.97	0.98707

จากตารางที่ 4.23 มุมมองภาพทั้ง 4 มุมมองให้ผลลัพธ์ของกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงที่มีแนวโน้มเหมือนกัน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ดังกล่าวสามารถแสดงให้เห็นถึงกระบวนการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดของกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงที่ผ่านมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งสามารถนำผลการตรวจสอบนี้ไปใช้งานได้จริงในการรายงานผลความเสียหายที่เกิดขึ้น แม้ว่าการทดลองดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการทำ Inpainting ซึ่งเป็นการจำลองสภาพความเสียหายในภาพถ่ายที่ให้ความสมจริงเป็นอย่างมาก โดยการประยุกต์ใช้เทคนิค Inpainting สามารถจำลองสภาพก่อนเกิดการเปลี่ยนแปลงจากภาพถ่ายของอากาศยานไร้คนขับ เพื่อให้ข้อมูลในช่วงเวลาต่างกันที่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงให้มีความแตกต่าง

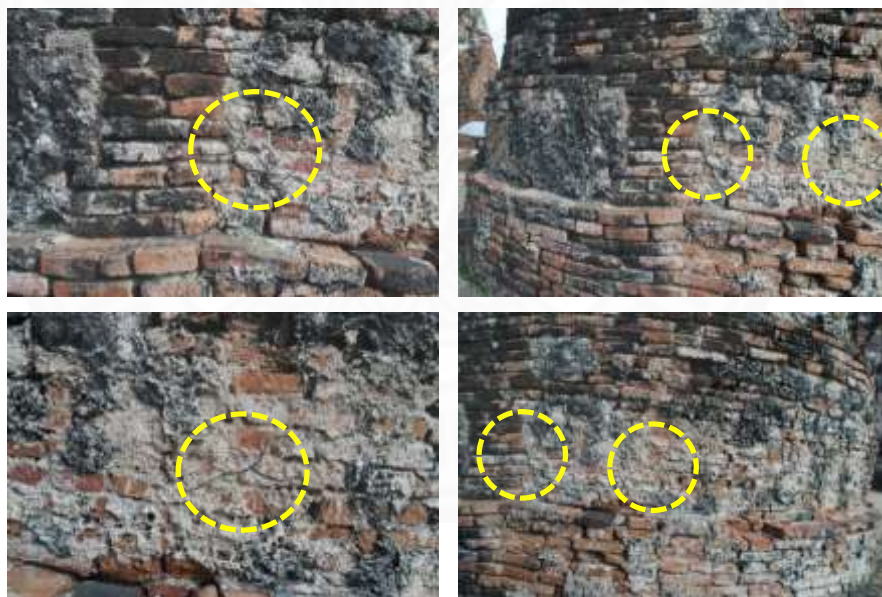
จากตารางที่ 4.23 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของผลลัพธ์การตรวจหาการเปลี่ยนแปลงในทุกมุมมองภาพมีความคล้ายคลึงกัน โดยที่ค่า MSE ควรจะมีค่าน้อยลง SSIM และ AUC ควรจะมีค่าเข้าใกล้ 1 มากขึ้นตามลำดับเมื่อมีการปรับปรุงวิธีการตรวจสอบให้ดีขึ้น ซึ่ง CASE 1 เป็นกรณีการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติผ่านกระบวนการจับคู่จุดลักษณะเด่นและการบิดเบือนภาพ พบว่าเป็นกระบวนการที่ไม่มีประสิทธิภาพที่สุดจากการพิจารณาภาพรวมในทุกมุมมอง เนื่องจากการที่มุมมองภาพมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยส่งผลให้ค่า MSE สูงและค่า SSIM กับ AUC น้อยกว่า 1 ค่อนข้างมาก จึงสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติไม่มีประสิทธิภาพและไม่เหมาะต่อการนำมาใช้งานจริง จากปัญหาดังกล่าวจึงได้พัฒนาวิธีการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงเป็นการตรวจสอบระหว่างภาพจริงกับภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติใน CASE 2, 3 และ 4 ที่ความละเอียดของพื้นผิวแบบจำลอง 4,096 8,192 และ 16,384 Texture Size/Count ตามลำดับ โดยที่ความละเอียดสูงขึ้นไปจะเห็นได้ว่าค่า MSE มีค่าลดลง SSIM กับ AUC มีค่าเข้าใกล้ 1 มากขึ้น แต่วิธีการดังกล่าวยังให้ผลลัพธ์ที่มีความถูกต้องแม่นยำน้อยกว่าจะสามารถนำไปใช้งานจริงได้ จึงได้พัฒนาเป็นการตรวจสอบด้วยภาพสังเคราะห์กับภาพสังเคราะห์ใน CASE 5 ที่ความละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองเท่ากันคือ 16,384 Texture Size/Count ให้ผลลัพธ์ของการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงที่ดีมากและสามารถบอกจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงได้แม่นยำ

อย่างไรก็ตามการจำลองสภาพการเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิคการซ่อมแซมภาพหรือ Inpainting เป็นเพียงการจำลองแบบสมมติขึ้นเท่านั้น อีกทั้งชุดข้อมูลภาพถ่ายมีช่วงเวลาห่างกันเพียง 2 วัน โดยการตรวจสอบดังกล่าวอาจยังไม่เพียงพอต่อการยืนยันถึงประสิทธิภาพในกระบวนการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ซึ่งยังจำเป็นต้องทดสอบกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงต่อไป

#### 4.2.4 การตรวจหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงบนพื้นผิวโครงสร้างโบราณสถาน

จากผลการทดลองที่ผ่านมาช่วงระยะเวลาของการเก็บข้อมูลเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่สำคัญต่อการตรวจหาการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากโครงสร้างโดยทั่วไปนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น

จำเป็นต้องใช้ระยะเวลาที่นานและอาจมีความไม่แน่นอนว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ ผู้วิจัยจึงได้เก็บข้อมูลใหม่อีกครั้งที่ระยะเวลาต่อมาอีก 6 เดือนจากชุดข้อมูลอ้างอิง  $S_1$  โดยการเก็บข้อมูลครั้งนี้จะเก็บเป็นภาพถ่ายระยะใกล้ (0.5 เมตร) จำนวน 2 ภาพและระยะกลาง (3 เมตร) จำนวน 2 ภาพจากพื้นผิวโครงสร้างในตำแหน่งที่จะตรวจสอบจุดใหม่ ซึ่งข้อมูลภาพชุดใหม่นี้เป็นการถ่ายเก็บข้อมูลเพื่อทำการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงเฉพาะจุดจำนวน 4 ภาพที่มุมมองแตกต่างกันโดยเรียกชุดข้อมูลนี้ว่า  $S_3$  แสดงดังภาพที่ 4.22 ซึ่งข้อมูลภาพดังกล่าวจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการปรับเทียบตำแหน่งกล้องเพื่อระบุตำแหน่งกล้องของ  $S_3$  บนแบบจำลองสามมิติอ้างอิง  $S_1$  สำหรับเข้าสู่กระบวนการสังเคราะห์ภาพจากแบบจำลองสามมิติ จากนั้นนำภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติอ้างอิง  $S_1$  ในตำแหน่งกล้อง  $S_3$  มาทำการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงกับภาพจริง  $S_3$  ซึ่งเป็นมุมมองภาพเดียวกัน อย่างไรก็ตามเพื่อการพิสูจน์ถึงประสิทธิภาพของกระบวนการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ จึงได้ทำการทดสอบทุกกระบวนการที่ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับข้อมูลภาพชุดใหม่  $S_3$  ว่าสามารถบอกถึงการเปลี่ยนแปลงด้วยกระบวนการในงานวิจัยนี้ได้หรือไม่



ภาพที่ 4.22 ชุดข้อมูลภาพ  $S_3$  ในมุมมองภาพที่แตกต่างกัน 4 มุมมอง (มุมมองที่ 1) ซ้ายบน, (มุมมองที่ 2) ขวาบน, (มุมมองที่ 3) ซ้ายล่างและ (มุมมองที่ 4) ขวาล่าง, วงกลมสีเหลืองคือตำแหน่งที่เกิดรอยแตกร้าวขึ้นใหม่ที่มีขนาดความกว้างประมาณ 3 ถึง 5 มิลลิเมตร

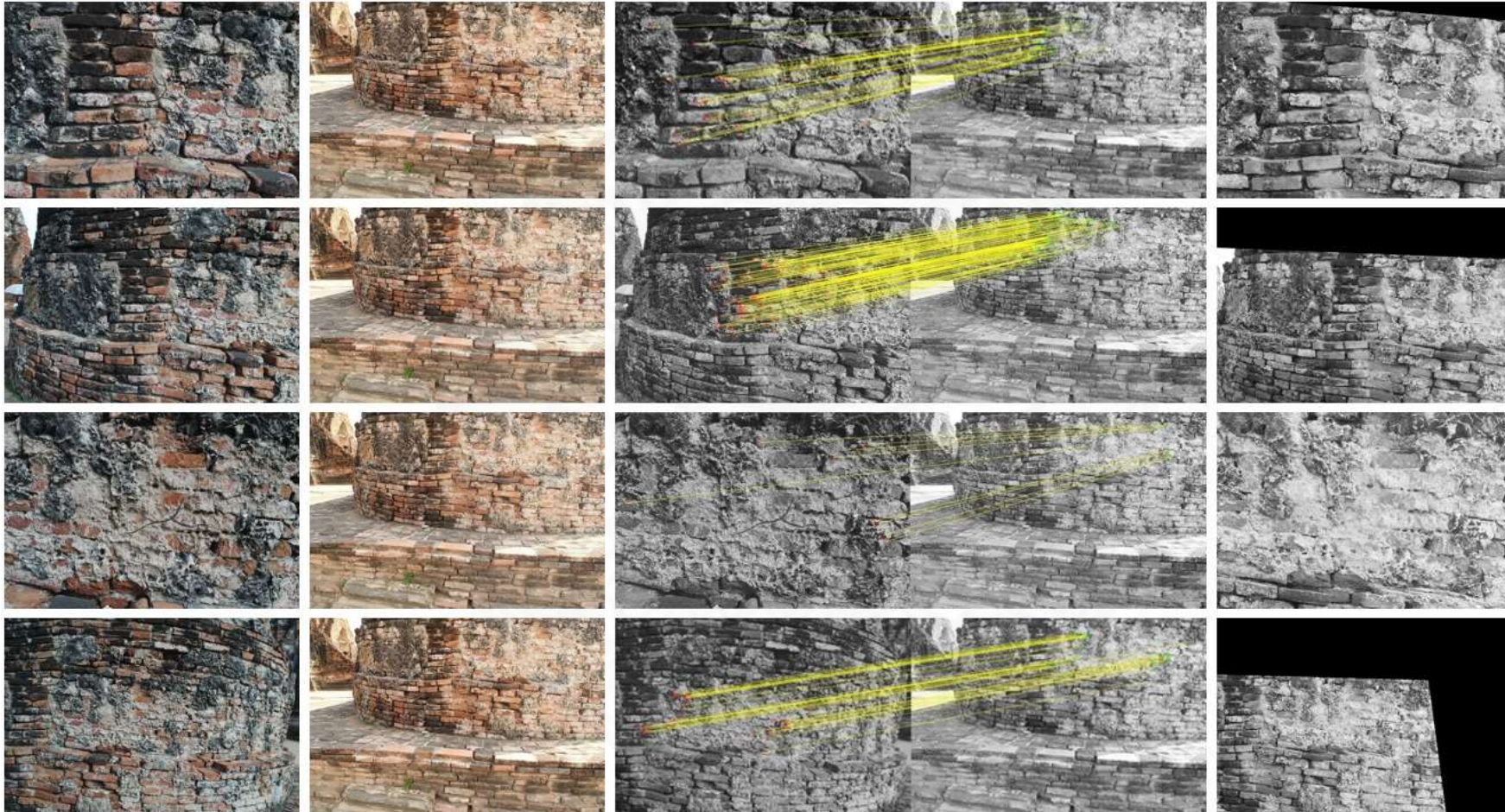
#### 4.2.4.1 การตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วย Homography

กระบวนการนี้เป็นการนำภาพถ่ายในชุดข้อมูล  $S_1$  ที่มีมุมมองใกล้เคียงกับภาพใน  $S_3$  ที่สุ่มมาทำการตรวจหาจุดลักษณะเด่นและเชื่อมจุดที่เหมือนกันเข้าด้วยการผ่านการ

บิดเบือนภาพ จากนั้นทำการตรวจวัดความคล้ายคลึงกันของข้อมูลคู่ภาพแต่ละคู่ด้วยค่า MSE และ SSIM ทำเช่นเดียวกันกับการทดลองที่ผ่านมาแสดงผลของค่า MSE และ SSIM ดังตารางที่ 4.24 และผลการตรวจจับลักษณะเด่นและการบิดเบือนภาพแสดงดังภาพที่ 4.23 อย่างไรก็ตามกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติจากการทดลองที่ผ่านมาเป็นกระบวนการที่ให้ผลการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงที่ไม่มีประสิทธิภาพที่สุด และผลการทดสอบในขั้นตอนนี้เป็นารเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงในช่วงเวลาต่างกัน ซึ่งสามารถเป็นผลยืนยันประสิทธิภาพในกระบวนการตรวจสอบที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ว่าดีกว่างานวิจัยที่ผ่านมา รวมไปถึงกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนด้วยภาพ 2 มิติผ่านเทคนิคการตรวจจับจุดลักษณะเด่นและการบิดเบือนภาพที่เป็นกระบวนการทั่วไปในการมวผลภาพถ่ายดิจิทัล อย่างไรก็ตามแม้ว่าอากาศยานไร้คนขับจะสามารถบินกลับไปตำแหน่งเดิมได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ความแตกต่างเพียงเล็กน้อยในมุมมองภาพถ่ายยังเป็นปัญหาหลักและข้อจำกัดของกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติ ที่ทำให้ผลการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงนั้นไม่มีประสิทธิภาพและไม่สามารถนำไปใช้งานได้จริง

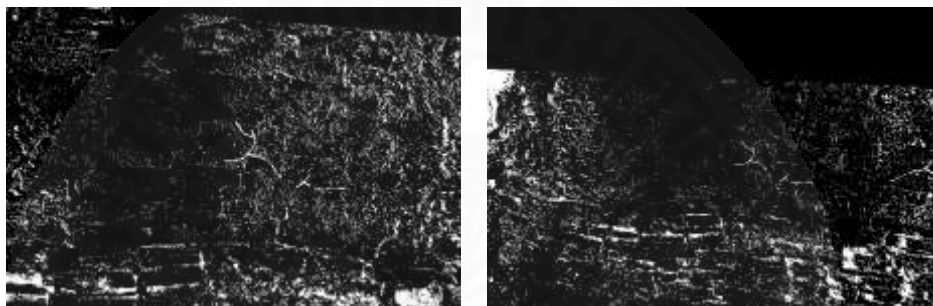
ตารางที่ 4.24 ผลของการตรวจวัดค่า MSE และ SSIM ระหว่างภาพ  $S_1$  กับ  $S_3$

เปรียบเทียบ $S_1$ กับ $S_3$	MSE (pixel <sup>2</sup> )	SSIM
มุมมองที่ 1	3,863.78	0.17
มุมมองที่ 2	3,124.88	0.26
มุมมองที่ 3	6,920.79	0.07
มุมมองที่ 4	2,673.00	0.22



ภาพที่ 4.23 ผลการจับคู่จุดลักษณะเด่นและการบิดเบือนภาพ (หลักที่ 1) ชุดข้อมูลภาพถ่าย  $S_3$ , (หลักที่ 2) ภาพถ่าย  $S_1$  ที่มีมุมมองใกล้เคียงกับ  $S_3$ , (หลักที่ 3) ผลการจับคู่จุดลักษณะเด่น, (หลักที่ 4) การบิดเบือนภาพ  $S_1$  ให้เข้ากับ  $S_3$  และแต่ละแถวเป็นภาพในมุมมองที่ 1 2 3 และ 4 ตามลำดับ

ผลที่ได้จากตารางที่ 4.24 แสดงให้เห็นถึงความไม่เหมาะสมของค่า MSE และ SSIM ที่เกิดขึ้น ซึ่งมีความแตกต่างระหว่างคู่ภาพโดยบ่งบอกผ่านค่า MSE ที่สูงเกินไป และค่า MSE ที่สูงมากเหล่านี้สามารถบอกได้ว่าภาพแต่ละคู่มีความแตกต่างกันมากทั้งที่แต่ละคู่ภาพมีความคล้ายคลึงกันหลายส่วน อีกทั้งค่า SSIM มีค่าน้อยกว่า 1 มากเกินกว่าที่ควรจะเป็นและบอกได้ว่าภาพเหล่านี้ไม่เหมือนกันซึ่งเป็นการบ่งบอกที่ผิดพลาดตามที่ได้กล่าวมา เมื่อนำผล Change Masks ที่ได้จากการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงมารายงานผลแสดงดังภาพที่ 4.24 ผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นมีความผิดพลาดเยอะและระบุตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงผิดพลาดหลายจุด ซึ่งผลดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดและปัญหาของกระบวนการนี้ว่าไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน



ภาพที่ 4.24 ตัวอย่าง Change Masks จากกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติ ระหว่าง  $S_1$  กับ  $S_3$  (Threshold = 100)

จากผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่ากระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติยังเป็นวิธีการที่มีข้อจำกัดและปัญหาที่ไม่สามารถแก้ไขได้ โดยภาพที่นำเข้าสู่กระบวนการนี้จำเป็นต้องมีความแตกต่างของมุมมองภาพน้อยที่สุด เพื่อลดความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นในกระบวนการบิดเบือนภาพให้เข้ากันด้วยการจับคู่จุดลักษณะเด่น ซึ่งข้อจำกัดเหล่านี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้การเก็บข้อมูลภาพถ่ายไม่สามารถทำได้ในสถานที่แบบเปิดและโครงสร้างขนาดใหญ่ อีกทั้งโครงสร้างโบราณสถานมีพื้นผิวที่มีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก ทำให้กระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติต้องการภาพที่มีมุมมองเดียวกัน แม้ว่าการแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อบินกลับไปตำแหน่งเดิมจะมีประสิทธิภาพ แต่ยังไม่สามารถให้มุมมองภาพเหมือนเดิมโดยปราศจากความคลาดเคลื่อนได้ ด้วยเหตุผลเหล่านี้การตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติจึงไม่สามารถนำมาใช้สำหรับการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงกับโครงสร้างโบราณสถาน

#### 4.2.4.2 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพจริงและภาพสังเคราะห์ จากแบบจำลองสามมิติ

ขั้นตอนนี้เป็นการพัฒนากระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติในหัวข้อก่อนหน้านี้ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วยการใช้ภาพจริงจากชุดข้อมูลภาพ  $S_3$  ทำการปรับเทียบตำแหน่งกล้องเข้าไปในแบบจำลองสามมิติ  $S_1$  จากนั้นทำการสังเคราะห์ภาพจากแบบจำลองสามมิติออกมาเพื่อให้ได้ภาพที่มุมมองกล้องเดียวกันแต่ถ่ายกันคนละช่วงเวลา อย่างไรก็ตามการที่ภาพสังเคราะห์นั้นมีองค์ประกอบของภาพไม่เหมือนกับภาพจริงอาจทำให้กระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงเกิดข้อผิดพลาดได้ในหลายตำแหน่ง จึงได้ทำการปรับปรุงคุณภาพพื้นผิวของแบบจำลองสามมิติให้มีความละเอียดสูงขึ้น 3 ระดับเพื่อให้ภาพสังเคราะห์นั้นมีองค์ประกอบของภาพเหมือนกับภาพจริงมากที่สุด ตารางที่ 4.25 แสดงผลของความคลาดเคลื่อนในกระบวนการปรับเทียบตำแหน่งกล้องของภาพ  $S_3$  เข้าไปในแบบจำลองสามมิติอ้างอิง  $S_1$  โดยแสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนนั้นมีค่าน้อยมากและห่างกันเพียงเล็กน้อย ซึ่งสามารถบอกได้ว่าภาพสังเคราะห์จากกระบวนการปรับเทียบตำแหน่งกล้องมีมุมมองภาพที่เหมือนกันและสามารถนำมาใช้ในกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงได้

**ตารางที่ 4.25** ตัวอย่างผลลัพธ์ของความคลาดเคลื่อนในกระบวนการปรับเทียบตำแหน่งกล้องของภาพ  $S_3$  เข้าไปในแบบจำลองสามมิติอ้างอิง  $S_1$

ตัวอย่างจากชุดข้อมูล	ชื่อของภาพ	ความคลาดเคลื่อน (พิกเซล)
$S_1$	DJI_0552	1.897
$S_1$	DJI_0553	1.542
$S_1$	DJI_0554	1.601
$S_3$	DJI_0189	2.108

ผลจากตารางที่ 4.26 การปรับปรุงคุณภาพความละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองสามมิติให้สูงขึ้นสามารถช่วยให้ได้ภาพสังเคราะห์ที่ลดความผิดพลาดเนื่องจากองค์ประกอบของภาพที่ไม่เหมือนกันได้ โดยค่า MSE มีค่าน้อยลงกว่าเดิมค่อนข้างมากเมื่อเทียบกับตารางที่ 4.24 จากวิธีการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติ และค่า SSIM มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับตารางที่ 4.24 ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่ากระบวนการนี้สามารถลดข้อผิดพลาดของความแตกต่างที่ไม่เป็นจริงได้

ตารางที่ 4.26 ผลการตรวจวัดค่า MSE และ SSIM ระหว่างภาพ  $S_3$  และภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติ  $S_1$  ในตำแหน่งเดียวกันทั้ง 4 มุมมองที่ความละเอียดของภาพสังเคราะห์ 3 ระดับ

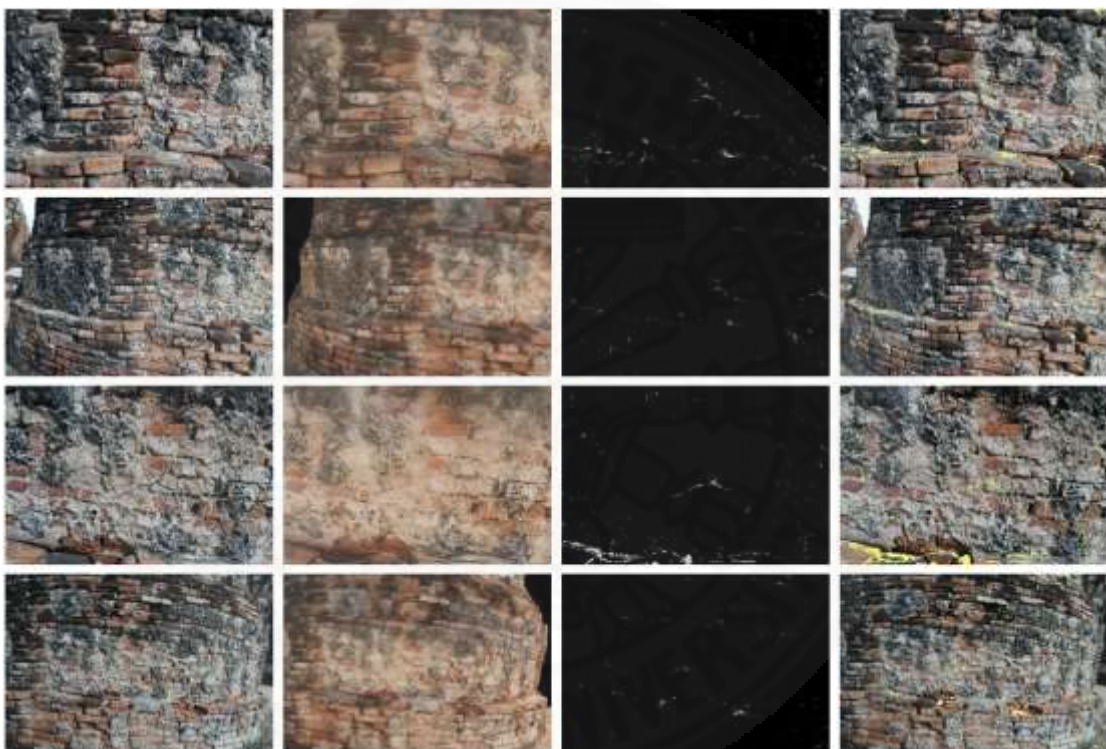
เปรียบเทียบ $S_1$ กับ $S_3$	ความละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองสามมิติ $S_1$ (Texture Size/Count)	MSE (pixel <sup>2</sup> )	SSIM
มุมมองที่ 1	4,096	1,076.48	0.24
	8,192	1,024.56	0.26
	16,384	1,014.21	0.27
มุมมองที่ 2	4,096	857.16	0.33
	8,192	790.24	0.38
	16,384	733.93	0.41
มุมมองที่ 3	4,096	1,020.25	0.24
	8,192	920.47	0.26
	16,384	918.96	0.28
มุมมองที่ 4	4,096	983.95	0.32
	8,192	921.61	0.37
	16,384	918.57	0.40

แม้ว่าคุณภาพของระบบการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงจะมีคุณภาพที่ดีขึ้น ก็ยังไม่เพียงพอต่อการนำมาใช้งานจริง เนื่องจากตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นจริงในภาพนั้นน้อยมากหรือสามารถบอกได้ว่าค่า MSE ควรมีค่าที่น้อยมากและ SSIM ควรมีค่าเข้าใกล้กับ 1 มากกว่านี้ ซึ่งเมื่อนำผลของความละเอียดที่ 16,384 Texture Size/Count ของมุมมองภาพทั้ง 4 มุมมอง มาทำการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงระหว่างชุดข้อมูลภาพจริง  $S_3$  กับภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติ  $S_1$  ที่ตำแหน่งกล้องเดียวกัน ให้ผลแสดงดังภาพที่ 4.25

ภาพที่ 4.25 แสดงผลของ Change Mask (สีเหลือง) โดยใช้เกณฑ์เท่ากับ 70 เพื่อระบุถึงจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงบนภาพจริง จากผลลัพธ์ดังกล่าวยังมีข้อผิดพลาดเนื่องจากพื้นผิวของแบบจำลองสามมิติยังมีความแตกต่างกันกับภาพจริง ซึ่งการที่ข้อมูลภาพ  $S_3$  เป็นการถ่ายในระยะที่ค่อนข้างใกล้กับตัวโครงสร้างและเฉพาะจุดจึงทำให้ช่วยลดความแตกต่างในบริเวณที่ไม่เกี่ยวข้องลงไปได้ แม้ว่าความผิดพลาดนี้จะน้อยกว่าวิธีการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติ แต่ก็ยังไม่สามารถบอกได้ว่าผลลัพธ์นั้นมีคุณภาพมากเพียงพอ เนื่องจากยังมีจุดที่ตรวจจับว่าเกิดการ



เปลี่ยนแปลงผิดพลาดอยู่บางจุดแม้เพียงเล็กน้อย ซึ่งยังเป็นปัญหาหลักของระบบการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพจริงและภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติ อีกทั้งการทำให้องค์ประกอบของแบบจำลองสามมิติเหมือนกันกับภาพจริงทุกประการนั้นในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยาก ดังนั้นวิธีการในขั้นตอนนี้ยังไม่สามารถบอกได้ว่าให้ผลลัพธ์ที่มีคุณภาพเพียงพอในการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวก่ออิฐในโครงสร้างโบราณสถาน อย่างไรก็ตามการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่ผิดพลาดนี้มีเพียงเล็กน้อยและเป็นบางจุด ซึ่งผลที่ตรวจจับผิดพลาดว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงอาจไม่ใช่ข้อเสียสำหรับการเตือนภัยว่าเกิดความเสียหาย แต่ควรระวังคือการเกิดความเสียหายที่ตรวจจับไม่ได้



ภาพที่ 4.25 ตัวอย่างผลการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงทั้ง 4 มุมมองระหว่างข้อมูลภาพ  $S_3$  กับภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติ  $S_1$  ที่ความละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองเท่ากับ 16,384 Texture Size/Count (หลักที่ 1) ข้อมูลภาพ  $S_3$  ทั้ง 4 มุมมองและนำเข้าสู่กระบวนการ Photometric Adjustment เพื่อปรับให้แสงและพื้นหลังเหมือนกันกับภาพสังเคราะห์ในหลักที่ 2 ต่อไป, (หลักที่ 2) ภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติ  $S_1$  ในตำแหน่งเดียวกันกับ  $S_3$ , (หลักที่ 3) Change Masks การเปลี่ยนแปลงระหว่างหลักที่ 1 และ 2 โดยใช้เกณฑ์เท่ากับ 70 (หลักที่ 4) ระบุตำแหน่ง Change Mask บนภาพจริง  $S_3$  (สีเหลือง)

#### 4.2.4.3 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพสังเคราะห์กับภาพ

##### สังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติ

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการปรับปรุงวิธีการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นจากวิธีการก่อนหน้าโดยการใช้ภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติทั้ง  $S_1$  และ  $S_3$  ในตำแหน่งกล้องเดียวกัน เพื่อให้องค์ประกอบโครงสร้างและพื้นผิวในภาพสังเคราะห์ทั้งสองเหมือนกันมากที่สุด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการลดความแตกต่างระหว่างคู่ภาพที่จะนำมาตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยการสังเคราะห์ภาพจากแบบจำลองสามมิติ  $S_1$  จากนั้นนำภาพถ่ายระยะใกล้ในพื้นที่ที่ต้องการตรวจสอบของ  $S_1$  ออกไปแล้วแทนที่ด้วยภาพถ่าย  $S_3$  ในพื้นที่บริเวณเดียวกัน หลังจากนั้นทำการฉายพื้นผิวของภาพ  $S_3$  เข้าไปในแบบจำลองสามมิติ  $S_1$  เพื่อเป็นการแทนที่และทำให้พื้นผิวในบริเวณนั้นเป็นสภาพโครงสร้างปัจจุบันเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงในเวลาต่อมา

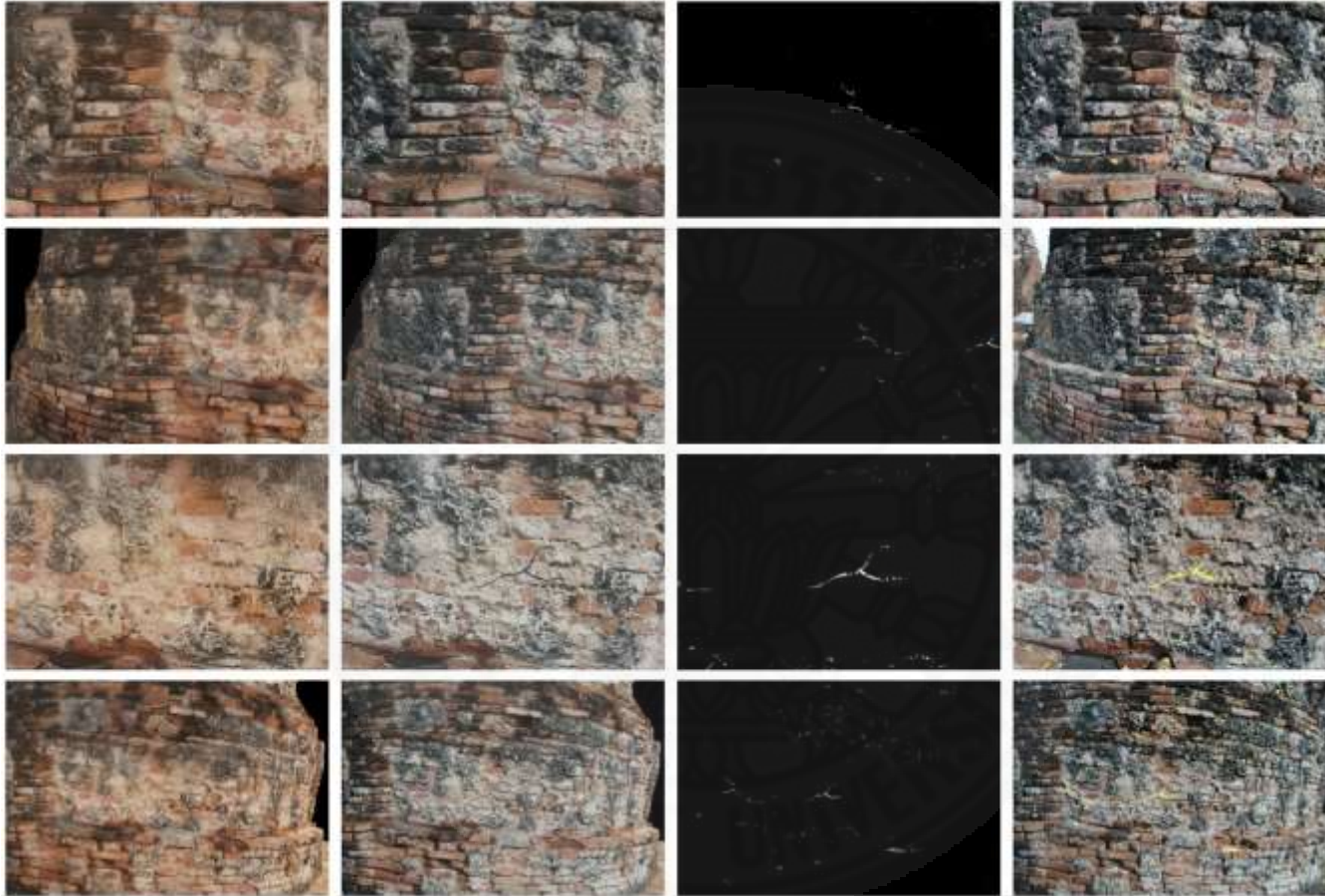
โดยรายละเอียดของแบบจำลองสามมิติทั้งสองจะเหมือนกันทุกประการ ซึ่งแตกต่างกันเฉพาะพื้นผิวที่แสดงให้เห็นจะเกิดจากข้อมูลภาพที่ถ่ายกันคนละช่วงเวลา แบบจำลองสามมิติดังกล่าวจะให้รายละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 16,384 Texture Size/Count ซึ่งเป็นคุณภาพของพื้นผิวแบบจำลองที่ดีที่สุดต่อการตรวจหาการเปลี่ยนแปลง จากนั้นนำภาพสังเคราะห์ในแต่ละคู่เข้าสู่กระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงต่อไป ซึ่งผลลัพธ์ของความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากกระบวนการปรับเทียบตำแหน่งกล้องแสดงดังตารางที่ 4.25 และจากข้อมูลดังกล่าวที่ได้กล่าวไว้พบว่าภาพสังเคราะห์ในแต่ละคู่มีผลความคลาดในแต่ละมุมมองที่น้อยมากและสามารถนำมาใช้สำหรับกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงต่อไป

**ตารางที่ 4.27** ผลการตรวจวัดค่า MSE และ SSIM ระหว่างภาพสังเคราะห์จาก  $S_1$  และ  $S_3$  ในตำแหน่งกล้องเดียวกันจากแบบจำลองสามมิติเดียวกันที่มีพื้นผิวต่างกัน

เปรียบเทียบ $S_1$ กับ $S_3$	ความละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองสามมิติ (Texture Size/Count)	MSE (pixel <sup>2</sup> )	SSIM
มุมมองที่ 1	16,384	676.13	0.60
มุมมองที่ 2	16,384	643.19	0.57
มุมมองที่ 3	16,384	761.68	0.57
มุมมองที่ 4	16,384	669.96	0.53

จากตารางที่ 4.27 ผลของค่า MSE และ SSIM ให้ค่าที่ดีขึ้นกว่าขั้นตอนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพจริงและภาพสังเคราะห์ โดยค่า MSE มีค่าน้อยลงและค่า SSIM มีค่าเข้าใกล้ 1 มากขึ้น อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวยังคงบ่งบอกถึงความแตกต่างระหว่างภาพถ่ายอยู่ ซึ่งความแตกต่างเหล่านี้มีมากขึ้นเมื่อข้อมูลภาพถ่ายที่นำมาตรวจหาการเปลี่ยนแปลงนั้นมีมุมมองภาพที่ถ่ายใกล้กับพื้นผิววัตถุ โดยการใช้ภาพมุมมองใกล้กับพื้นผิวโครงสร้างนี้จะทำให้เห็นรายละเอียดของภาพที่มีความแตกต่างกันชัดเจนมากขึ้น หากการเก็บข้อมูลเพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติหรือข้อมูลภาพที่ใช้สร้างแบบจำลองสามมิติในบริเวณดังกล่าวไม่เพียงพอจะทำให้เห็นความแตกต่างนั้นปรากฏ ภาพที่ 4.26 แสดงผลของการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงโดยใช้เกณฑ์เท่ากับ 60 และแสดงผลของ Change Masks (สีเหลือง) บนภาพ  $S_3$  เพื่อระบุจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลง จากผลดังกล่าวให้ผลของจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความผิดพลาดน้อย จึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้ภาพสังเคราะห์กับภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติมาตรวจหาการเปลี่ยนแปลงนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงให้มีความแม่นยำมากขึ้นได้ อีกทั้งยังสามารถบอกจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงได้อย่างถูกต้องได้ใกล้เคียงกับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริง

ปัจจัยหนึ่งที่สำคัญคือการเก็บข้อมูลภาพถ่ายในระยะใกล้เพื่อให้ได้รายละเอียดได้อย่างชัดเจนในบริเวณที่ต้องการตรวจสอบ หากต้องการข้อมูลที่มีคุณภาพเพียงพอต่อการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงนั้นจำเป็นที่ข้อมูลทั้งสองชุดต้องถ่ายภาพเก็บข้อมูลในบริเวณเดียวกัน ซึ่งการนำเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับมาช่วยในการนำทางกลับไปตำแหน่งเดิมสามารถที่จะช่วยลดความผิดพลาดเหล่านั้นลงไปได้ แม้ว่าบางส่วนของแบบจำลองจะไม่สามารถสร้างให้เหมือนจริงแต่การนำภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติทั้งสองมาใช้สำหรับการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงถือเป็นอีกหนึ่งวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการช่วยจัดการกับองค์ประกอบของแบบจำลองที่ไม่สมบูรณ์ อีกทั้งกระบวนการปรับเทียบตำแหน่งกล้องสามารถให้ผลความคลาดเคลื่อนที่น้อยและเหมาะสมต่อการสังเคราะห์ภาพจากแบบจำลอง ผลลัพธ์การเปลี่ยนแปลงที่ได้จากกระบวนการนี้สามารถบอกถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างโบราณสถานที่มีความซับซ้อนได้



ภาพที่ 4.26 ตัวอย่างผลการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงทั้ง 4 มุมมองระหว่างภาพสังเคราะห์  $S_1$  กับ  $S_3$  ในตำแหน่งกล้องเดียวกันขององค์เจดีย์ที่ความละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองเท่ากับ 16,384 Texture Size/Count (หลักที่ 1) ภาพสังเคราะห์  $S_1$ , (หลักที่ 2) ภาพสังเคราะห์  $S_3$  ในตำแหน่งเดียวกันกับ  $S_1$  และ (หลักที่ 3) Change Masks การเปลี่ยนแปลงระหว่างหลักที่ 1 และ 2 โดยใช้เกณฑ์เท่ากับ 60 (หลักที่ 4) ระบุตำแหน่ง Change Mask บนภาพจริง  $S_1$  (สีเหลือง)

#### 4.2.4.4 การประเมินคุณภาพด้วย ROC curve

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการนำผล Change Masks จากกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงที่เป็นไปได้ทั้งหมดตั้งแต่การใช้เกณฑ์ตามผลต่างของพิกเซลตั้งแต่ 0 ไปจนถึงค่าผลต่างที่มากที่สุดในช่วงข้อมูลของคู่ภาพที่ทำการเปรียบเทียบกัน โดยวิธีการดังกล่าวทำเหมือนกันกับหัวข้อที่ 4.2.4.4 นำมาพิจารณากับค่า Change Masks จากข้อมูลที่เกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นจริง (Ground Truth) การสรุปผลจะเป็นการระบุจากลักษณะกราฟหรือค่าพื้นที่ใต้กราฟ (AUC) มีค่าเข้าใกล้ 1 มากหมายถึงผลลัพธ์และกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงที่ได้นำเสนอมีความถูกต้องแม่นยำสูง

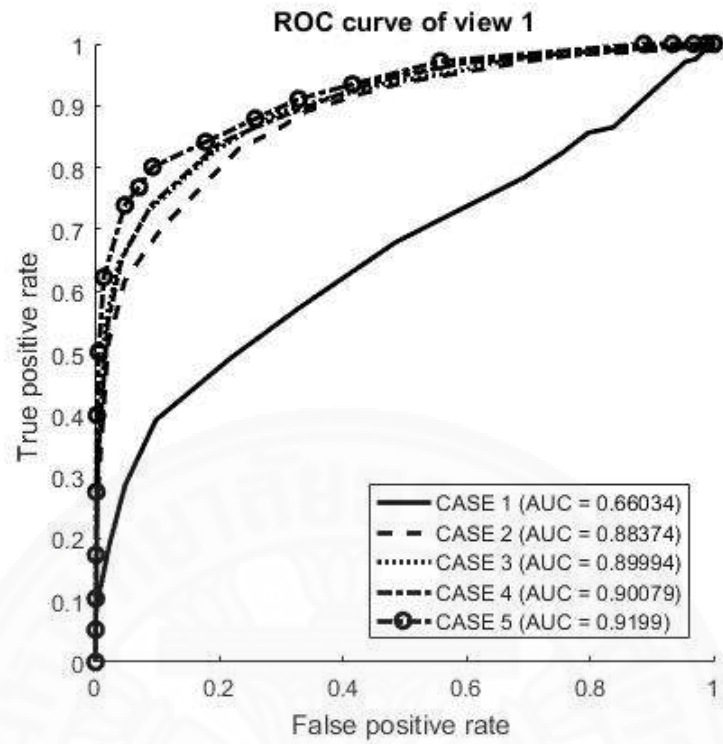
การทำ Change Masks ของข้อมูล Ground Truth เป็นการทำได้ด้วยมือซึ่งในตัวอย่างการศึกษานี้ผู้วิจัยเก็บข้อมูลที่เป็นการเปลี่ยนแปลงจริงจากการพินิจและจดบันทึกไว้เพื่อใช้ในการสร้าง Ground Truth ภาพที่ 4.17 แสดงตัวอย่าง Change Masks ของข้อมูล Ground Truth (ภาพทางซ้าย) อย่างไรก็ตามความถูกต้องของข้อมูล Ground Truth ค่อนข้างที่จะเก็บข้อมูลยากเนื่องจากผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงนั้นมีหลายรูปแบบที่อาจไม่เกี่ยวข้องและส่งผลโดยตรงกับตัวโครงสร้าง เช่น เศษก้อนหิน ต้นหญ้าขนาดเล็ก เป็นต้น ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้เป็นปัญหาในการทำข้อมูล Ground Truth ที่ผู้วิจัยต้องใช้เวลาที่ค่อนข้างนานในการพิจารณาว่าส่วนใดไม่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างจริง ภาพที่ 4.27, 4.28, 4.29 และ 4.30 แสดงผลลัพธ์ของ ROC Curve ในมุมมองภาพทั้ง 4 มุมมองตามลำดับ

ในหัวข้อนี้แบ่งกรณีศึกษาเหมือนกันกับหัวข้อที่ 4.2.4.4 ได้แก่ (CASE 1) การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติ ผ่านกระบวนการจับคู่จุดลักษณะเด่นและการบิดเบือนภาพ, (CASE 2) การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพจริงและภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติที่ความละเอียด 4,096 Texture Size/Count, (CASE 3) การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพจริงและภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติที่ความละเอียด 8,192 Texture Size/Count, (CASE 4) การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพจริงและภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติที่ความละเอียด 16,384 Texture Size/Count และ (CASE 5) การตรวจหาความเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพสังเคราะห์และภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติที่ความละเอียด 16,384 Texture Size/Count

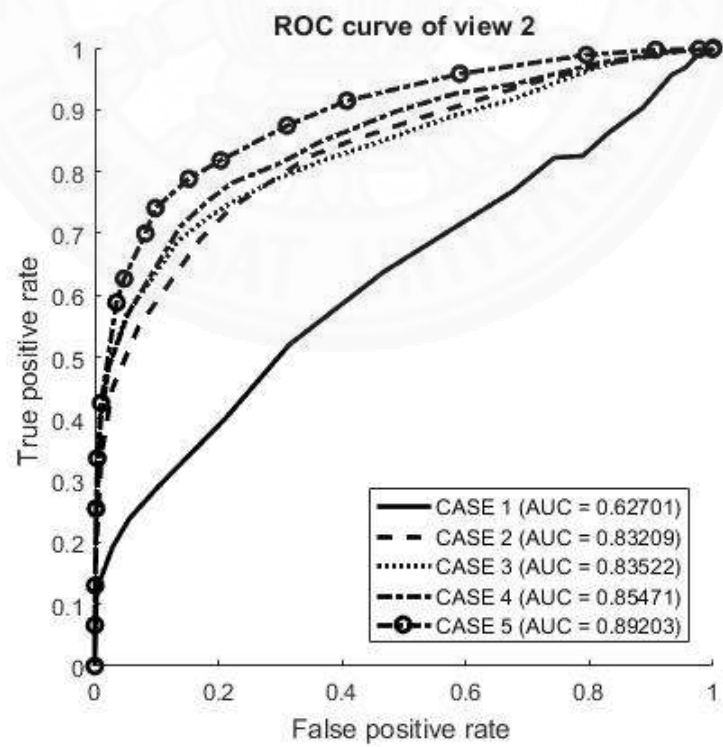
ผลลัพธ์ที่ได้จาก ROC Curve แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของกระบวนการและคุณภาพของผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงในแต่ละมุมมองภาพ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในทุกมุมมองภาพนั้น CASE 1 เป็นขั้นตอนวิธีการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงที่ให้ผลลัพธ์ที่ไม่มีประสิทธิภาพที่สุดและเป็นขั้นตอนทั่วไปที่ใช้ในการตรวจสอบด้วยภาพ 2 มิติ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เสนอขั้นตอนการพัฒนากระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลง CASE 2, CASE 3 และ

CASE 4 ให้ผลลัพธ์ของกราฟ ROC Curve ที่มีลักษณะของกราฟและค่า AUC ที่ใกล้เคียงกัน และให้ผลลัพธ์ที่บ่งบอกว่ากระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงในกรณีเหล่านี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้ดีกว่า CASE 1 ได้เป็นอย่างมาก ผลลัพธ์ที่ได้อยู่ในช่วงมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่ามีความถูกต้องที่ค่อนข้างสูง อีกทั้งยังสามารถพัฒนาวิธีการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงให้ดียิ่งขึ้นอีกจากกรณีของ CASE 5 ซึ่งให้ค่าพื้นที่ใต้กราฟ AUC มีค่าเข้าใกล้ 1 มากขึ้น บ่งบอกถึงความถูกต้องแม่นยำที่สูงและมีประสิทธิภาพมากขึ้นในการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงบนพื้นผิวโครงสร้างโบราณสถาน

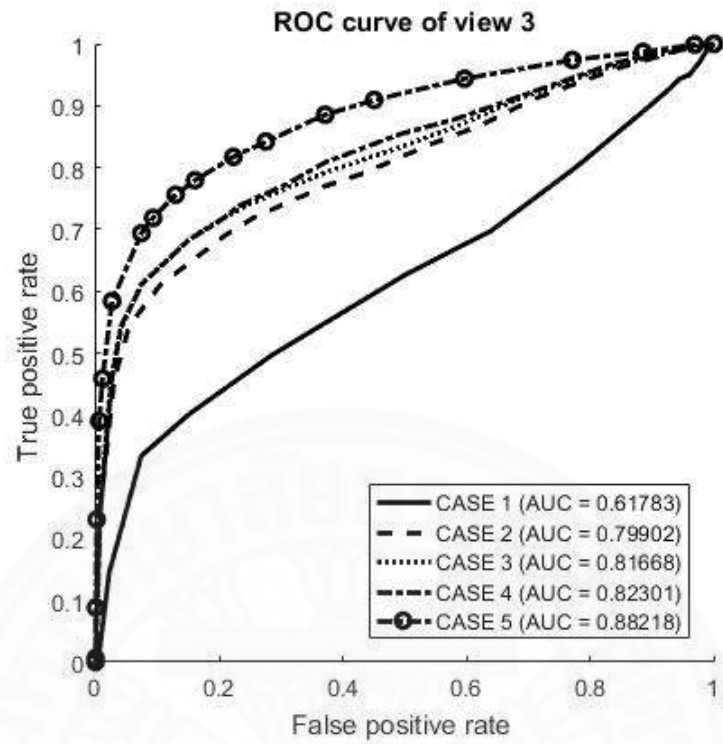
ข้อสังเกตที่น่าสนใจจากกราฟ ROC Curve ในภาพที่ 4.30 ค่า AUC ที่ดีที่สุดคือค่าจาก CASE 5 ซึ่งเป็นวิธีการตรวจสอบที่ผู้วิจัยพัฒนาและให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในแต่ละกรณีศึกษา แต่ผลลัพธ์ที่ได้นั้นมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 78 เปอร์เซ็นต์ เหตุผลที่เป็นเช่นนี้เพราะว่ายังมี Change Masks ที่ตรวจจับผิดพลาดเนื่องจากในรูปถ่ายติดบริเวณที่ไม่ต้องการตรวจสอบและในบริเวณดังกล่าวไม่ได้มีการเก็บข้อมูลเฉพาะจุดนั้นไว้ ทำให้แบบจำลองสามมิติในจุดนั้นมีรายละเอียดไม่เพียงพอทำให้เกิดความแตกต่างที่ผิดพลาดเกิดขึ้น ดังนั้นจากผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่าหากต้องการความถูกต้องในกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยภาพจากแบบจำลองสามมิติที่มีความถูกต้องแม่นยำและมีประสิทธิภาพสูงนั้น ควรจะเก็บข้อมูลในส่วนของภาพถ่ายระยะใกล้กับโครงสร้างทุกจุดที่สามารถตรวจสอบได้เพื่อลดข้อผิดพลาด ซึ่งวิธีการดังกล่าวสามารถทำให้ตรวจสอบได้ทุกจุดบนตัวโครงสร้างอีกด้วย ซึ่งปัญหาหลักที่สำคัญคือปัจจุบันนั้นการเก็บข้อมูลภาพถ่ายระยะใกล้ด้วยอากาศยานไร้คนขับยังคงเป็นวิธีการเก็บด้วยตนเองและเป็นการเก็บข้อมูลที่ยากลำบากต้องอาศัยประสบการณ์และความชำนาญของผู้ควบคุม อีกทั้งการเก็บข้อมูลระยะใกล้กับโครงสร้างต้องระมัดระวังอันตรายในการชนกับสิ่งกีดขวางซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นได้



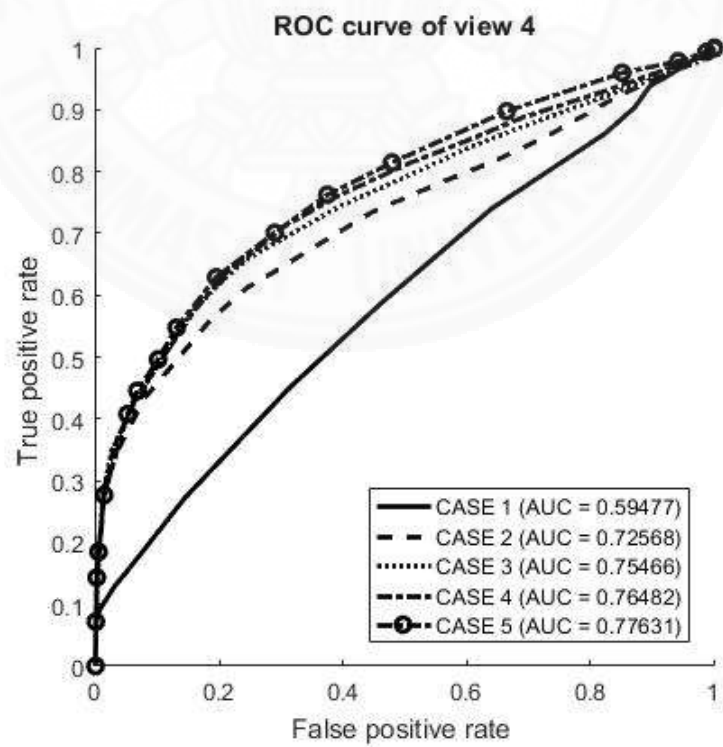
ภาพที่ 4.27 ผลลัพธ์ของ ROC Curve ในมุมมองภาพที่ 1



ภาพที่ 4.28 ผลลัพธ์ของ ROC Curve ในมุมมองภาพที่ 2



ภาพที่ 4.29 ผลลัพธ์ของ ROC Curve ในมุมมองภาพที่ 3



ภาพที่ 4.30 ผลลัพธ์ของ ROC Curve ในมุมมองภาพที่ 4



#### 4.2.4.5 สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปผลการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยการประเมินผลลัพธ์ต่างๆที่ได้จากวิธีการในงานวิจัยนี้ เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงบนพื้นผิวโครงสร้างโบราณสถานผ่านการแสดงผลด้วยค่า MSE SSIM และ AUC ดังตารางที่ 4.28

ตารางที่ 4.28 สรุปผลการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงของกรณีศึกษาทั้งหมด

เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลง	ข้อมูลภาพจากวิธีการศึกษาในแต่ละกรณี	MSE (pixel <sup>2</sup> )	SSIM	AUC
มุมมองที่ 1	CASE 1	3,863.78	0.17	0.66034
	CASE 2	1,076.48	0.24	0.88374
	CASE 3	1,024.56	0.26	0.89994
	CASE 4	1,014.21	0.27	0.90079
	CASE 5	676.13	0.60	0.91990
มุมมองที่ 2	CASE 1	3,124.88	0.26	0.62701
	CASE 2	857.16	0.33	0.83209
	CASE 3	790.24	0.38	0.83522
	CASE 4	733.93	0.41	0.85471
	CASE 5	643.19	0.57	0.89203
มุมมองที่ 3	CASE 1	6,920.79	0.07	0.61783
	CASE 2	1,020.25	0.24	0.79902
	CASE 3	920.47	0.26	0.81668
	CASE 4	918.96	0.28	0.82301
	CASE 5	761.68	0.57	0.88218
มุมมองที่ 4	CASE 1	2,673.00	0.22	0.59477
	CASE 2	983.95	0.32	0.72568
	CASE 3	921.61	0.37	0.75466
	CASE 4	918.57	0.40	0.76482
	CASE 5	669.96	0.53	0.77631

จากตารางที่ 4.28 ลักษณะของผลลัพธ์จากภาพทั้ง 4 มุมมองมีแนวโน้มของผลการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงที่เหมือนกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงกระบวนการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถปรับปรุงผลลัพธ์การตรวจหาการเปลี่ยนแปลงให้ดีขึ้นได้ และสามารถนำไปใช้งานได้จริงในการรายงานผลความเสียหายที่เกิดขึ้น อีกทั้งปัญหาในเรื่องของการเก็บข้อมูลที่ไม่สามารถเข้าถึงได้ เช่น ภาพถ่ายทางอากาศ ถูกแก้ไขด้วยการนำเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับเข้ามาช่วยในการเก็บข้อมูลในจุดที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าถึงได้ อีกทั้งยังสามารถกลับไปตำแหน่งเดิมเพื่อการตรวจสอบเฉพาะจุดเพื่อตรวจหาการเปลี่ยนแปลงในเวลาต่อมา

จากตารางที่ 4.28 แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของผลลัพธ์การตรวจหาการเปลี่ยนแปลงในทุกมุมมอง ค่า MSE มีแนวโน้มลดน้อยลง อีกทั้งค่า SSIM และ AUC ควรจะมีค่าเข้าใกล้ 1 มากขึ้นเมื่อมีการปรับปรุงวิธีการตรวจสอบให้ดีขึ้น ซึ่ง CASE 1 เป็นกรณีการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติผ่านกระบวนการจับคู่จุดลักษณะเด่นและการบิดเบือนภาพ พบว่าเป็นกระบวนการที่ไม่มีประสิทธิภาพเช่นเคยเหมือนกับผลการทดลองทั้งหมดที่ผ่านมา โดยมีค่า MSE สูง และค่า SSIM กับ AUC น้อยกว่า 1 ค่อนข้างมาก สามารถสรุปได้ว่าเป็นวิธีการที่ไม่มีประสิทธิภาพสำหรับการนำมาตรวจสอบการเปลี่ยนแปลง จากปัญหาดังกล่าวจึงได้พัฒนาวิธีการให้ดีขึ้นด้วยการตรวจสอบระหว่างภาพจริงกับภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติใน CASE 2, 3 และ 4 ที่ความละเอียดของพื้นผิวแบบจำลอง 4,096 8,192 และ 16,384 Texture Size/Count สูงขึ้นตามลำดับ โดยที่ความละเอียดสูงขึ้นจะเห็นได้ว่าค่า MSE มีค่าลดลง SSIM กับ AUC มีค่าเข้าใกล้ 1 มากขึ้น

ผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับความละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองใน CASE 2, 3 และ 4 สามารถให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพและสามารถนำมาใช้งานได้จริง ซึ่งวิธีการดังกล่าวมีความผิดพลาดเล็กน้อยและสามารถที่จะพัฒนาปรับปรุงให้ดีขึ้นได้ จึงพัฒนาเป็นการตรวจสอบด้วยภาพสังเคราะห์กับภาพสังเคราะห์ใน CASE 5 ที่ความละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองเท่ากันคือ 16,384 Texture Size/Count ให้ผลลัพธ์ของการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงที่ดีขึ้นและสามารถบอกจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงได้อย่างถูกต้อง แม้ว่าพื้นผิวบางจุดบนแบบจำลองสามมิติมีความแตกต่างของพื้นผิวเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของแบบจำลองอยู่จึงทำให้เกิดการระบุว่าการเปลี่ยนแปลงขึ้นซึ่งมีเพียงไม่กี่จุด จากที่กล่าวมาปัญหาในเรื่องของพื้นผิวแบบจำลองสามมิติไม่เหมือนกันนั้นสามารถแก้ไขด้วยการเก็บข้อมูลภาพถ่ายให้ใกล้และครอบคลุมพื้นที่ให้มากขึ้น ซึ่งการเก็บข้อมูลระยะใกล้และครอบคลุมทั่วพื้นผิวของโครงสร้างนั้นยังช่วยให้การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงมีประสิทธิภาพและแม่นยำมากขึ้น

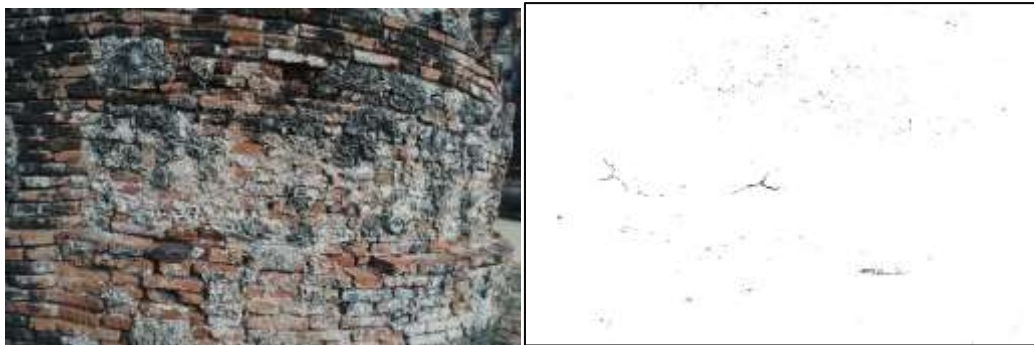
### 4.3 การรายงานผลการเปลี่ยนแปลง

ขั้นตอนนี้จะเป็นการนำเสนอรูปแบบการรายงานผลของตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจากผลลัพธ์ที่ได้เสนอไว้ในงานวิจัยนี้ โดยการรายงานผลการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะเป็นการนำผลของ Change Masks ที่ได้จากกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงในแต่ละคู่ภาพใส่ลงไปในการถ่ายภาพจริงของมุมมองภาพนั้น เพื่อให้ทราบถึงตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจน ซึ่งการระบุจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงจะรายงานผลได้หลายรูปแบบขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของลักษณะภาพและสีที่เลือก เพื่อสื่อให้ผู้อ่านเข้าใจด้วยการมองภาพว่าตำแหน่งใดเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยมีวิธีการนำเสนอผลของการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้

#### 4.3.1 การรายงานผลการเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิคการซ้อนภาพ (Image Overlay)

วิธีการนี้เป็นที่นิยมในกระบวนการทางการประมวลผลภาพถ่าย (Image Processing) โดยในงานวิจัยนี้จะใช้เพื่อการแสดงผลที่สามารถกำหนดให้มีความชัดมากขึ้นหรือจางหายไปของภาพที่นำมาซ้อนกันได้ ซึ่งจะใช้ภาพจริงหรือภาพอ้างอิงที่ต้องการระบุตำแหน่งของการเปลี่ยนแปลงนำมาเป็นภาพพื้นหลัง จากนั้นนำ Change Masks ของภาพพื้นหลังที่มีผลของพิกเซลที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสีดำและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสีขาวมาวางทับแล้วใช้เทคนิคการซ้อนภาพ (Image Overlay) กำหนดความชัดของ change masks โดยในงานวิจัยนี้ให้ความชัดของภาพที่นำมาซ้อนนั้นเหลือเพียงครึ่งเดียวหรือจางลง 50 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังภาพที่ 4.31

เทคนิคการซ้อนภาพนี้เป็นวิธีการทั่วไปที่นิยมใช้กันเนื่องจากการแสดงผลที่ง่าย โดยในงานวิจัยนี้เลือกการนำ Change Masks ในรูปแบบดังภาพที่ 4.31 (ขวาบน) มาใช้ในการทำการซ้อนภาพ เนื่องจากเมื่อซ้อนทับลงไปบนภาพพื้นหลังแสดงดังภาพที่ 4.31 (ล่าง) ทำให้ดูง่ายและเห็นตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงชัดเจน ซึ่งท่อนี้ดังกล่าวเหมาะต่อการนำไปใช้เพื่อระบุจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือทำให้ข้อมูลภาพนั้นสูญเสียรายละเอียดของโครงสร้างไป ทำให้การดูรายละเอียดในส่วนอื่นๆ โดยเฉพาะเจาะจงนั้นไม่มีประสิทธิภาพได้



ภาพที่ 4.31 ตัวอย่างผลการซ้อนภาพ (ซ้ายบน) ภาพอ้างอิง, (ขวาบน) Change Masks ของมุมมองภาพอ้างอิงและ (ล่าง) ภาพอ้างอิงหลังผ่านเทคนิคการซ้อนภาพด้วยภาพ Change Masks โดยลดความชัดของ Change Masks ให้จางลง 50 เปอร์เซ็นต์

#### 4.3.2 การรายงานผลการเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิคการวางพิกเซลบนภาพ

วิธีการนี้เป็นการนำพิกเซลเฉพาะส่วนที่เป็น Change Masks โดยตัดส่วนที่ไม่ใช่ออกไป ซึ่งพื้นที่ที่ไม่เกี่ยวข้องดังกล่าวจะกลายเป็นพิกเซลที่ไม่มีสี จากนั้นใส่ลงไปในภาพจริงที่มุมมองเดียวกันเพื่อให้สามารถแสดงผลของการเปลี่ยนแปลงที่ยังคงองค์ประกอบเดิมของภาพจริงไว้ แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 4.32 นอกจากนี้ยังสามารถที่จะเปลี่ยนแปลงสีของ Change Masks ได้ตามต้องการ ซึ่งขึ้นอยู่กับการองค์ประกอบของภาพว่าควรเลือกสีใดให้แสดงผลเห็นได้ชัดเจนที่สุด

ผลที่ได้จากวิธีการนี้จะให้ผลที่สามารถแสดงรายละเอียดต่างๆของโครงสร้างได้ชัดเจนรวมถึงตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่เนื่องจากการคงไว้ซึ่งองค์ประกอบของภาพดังกล่าว

อาจทำให้การมองหาจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงบนภาพนั้นนั้นไม่ถนัด ซึ่งการเลือกสีในการแสดงผลของ Change Masks บนภาพจริงจำเป็นที่จะต้องเลือกให้เหมาะสมในการแสดงผลเพื่อให้สามารถเห็นได้ชัดเจน หากเป็นภาพที่มีองค์ประกอบของสีที่หลากหลายอาจทำให้การแสดงผลการเปลี่ยนแปลงนั้นยากลำบากต่อการพินิจ

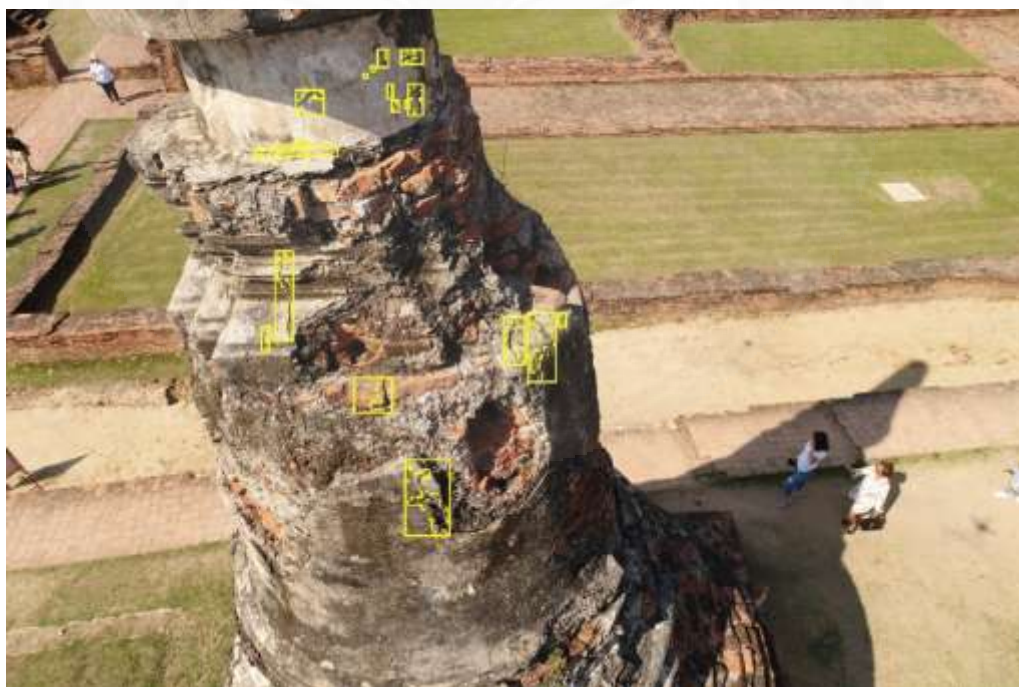


ภาพที่ 4.32 ตัวอย่างผลการวางพิกเซลบนภาพ (ซ้ายบน) ภาพอ้างอิง, (ขวาบน) Change Masks (สีเหลือง) และ (ล่าง) ภาพอ้างอิงหลังผ่านการใส่พิกเซล Change Masks ลงบนภาพ

### 4.3.3 การรายงานผลการเปลี่ยนแปลงด้วยเทคนิคการกำหนดขอบเขตสนใจ (Bounding Box)

วิธีการนี้เป็นการนำผลของ Change Masks มาประยุกต์ใช้ในการระบุตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงด้วยพื้นที่กรอบสี่เหลี่ยม ซึ่งกรอบสี่เหลี่ยมดังกล่าวเกิดจากแนวคิดการนำข้อมูลพิกเซล Change Masks ที่เกาะกลุ่มติดกันมาหาพื้นที่ขอบเขตตามแนวนอนและแนวตั้งมากที่สุดซึ่งต่อมากลายเป็นขอบเขตของกลุ่มพิกเซล และใช้ความกว้างยาวของกรอบสี่เหลี่ยมที่ได้มาสร้างเป็นขอบเขตสนใจ (Bounding Box) จากนั้นนำใส่กลับเข้าไปในรูปภาพจริงที่มุมมองเดียวกันเพื่อระบุตำแหน่งพื้นที่บริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลง

วิธีการดังกล่าวเป็นที่นิยมเป็นอย่างมากในการแสดงผลการตรวจจับวัตถุหรือสิ่งของในงานต่างๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้สามารถช่วยในการระบุตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงให้เห็นได้ชัดเจนเพราะแสดงให้เห็นเหมือนเป็นจุดสำคัญบนภาพได้ แต่วิธีการนี้เป็นการระบุตำแหน่งในเชิงพื้นที่ที่ไม่ใช่ลักษณะการเปลี่ยนแปลงแสดงดังภาพที่ 4.33 ดังนั้นจะเป็นการแสดงผลที่เหมาะสมกับความต้องการที่จะทราบเพียงตำแหน่งเท่านั้น ซึ่งไม่สามารถที่จะดูการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงบนภาพได้

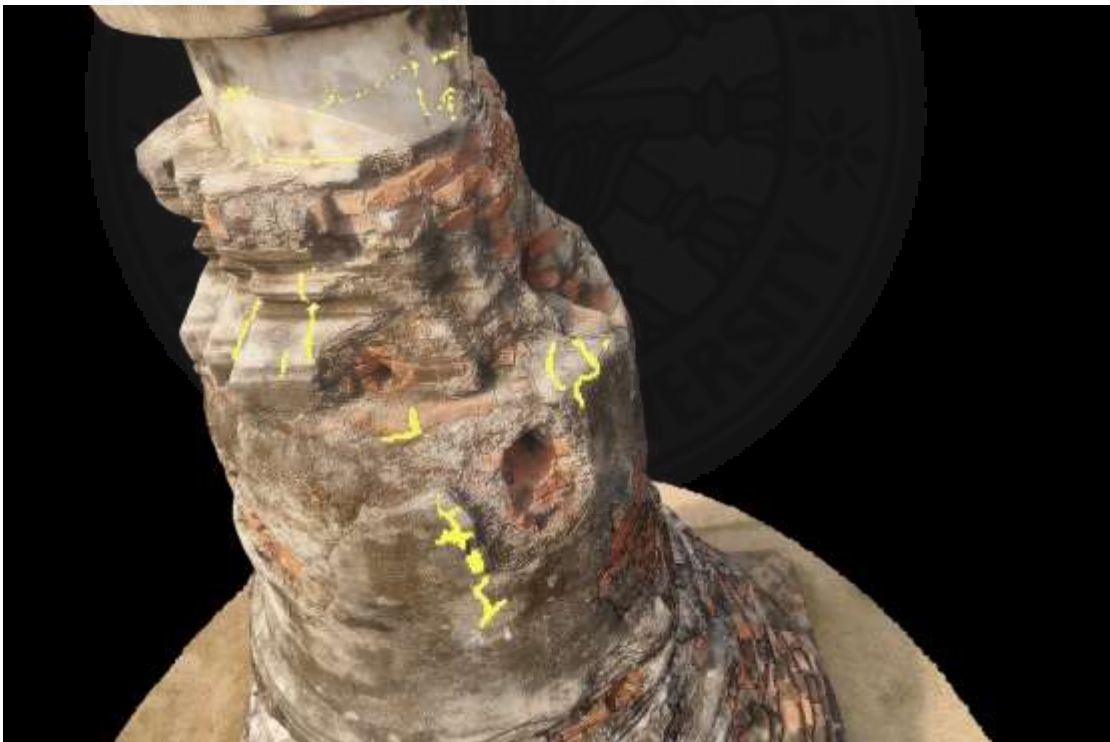


ภาพที่ 4.33 ตัวอย่างผลการกำหนดขอบเขตสนใจ (Bounding Box) โดยนำข้อมูลจากภาพที่ 4.32 มาขยายผลให้แสดงผลในรูปแบบของการกำหนดขอบเขตที่เกิดการเปลี่ยนแปลง

#### 4.3.4 การรายงานผลการเปลี่ยนแปลงด้วยแบบจำลองสามมิติ

จากวิธีการที่ผ่านมาเป็นการแสดงผลในรูปแบบของภาพ 2 มิติ นอกจากนี้ยังมีอีกหนึ่งวิธีการที่สามารถรายงานผลการเปลี่ยนแปลงคือการแสดงผลดังกล่าวบนแบบจำลองสามมิติ ซึ่งเป็นอีกหนึ่งวิธีการใหม่ที่จะนำเสนอในงานวิจัยนี้ โดยการนำผล Change Masks (สีเหลือง) จากกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงมารายงานผลผ่านเทคนิคการวางพิกเซลบนภาพในหัวข้อที่ 4.2.6.2 จากมุมมองภาพหลายมุมมองในพื้นที่บริเวณที่ต้องการตรวจสอบมาทำการแทนที่พื้นผิวของแบบจำลองสามมิติเดิม ซึ่งทำให้ได้แบบจำลองสามมิติใหม่ที่มีพื้นผิวระบุตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงด้วย Change Masks แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 4.34

จากกระบวนการนี้ทำให้ได้แบบจำลองสามมิติเสมือนจริงที่สามารถระบุตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงได้บนแบบจำลอง ซึ่งความสามารถและประโยชน์ของวิธีการนี้คือสามารถมองเห็นการเปลี่ยนแปลงและรายละเอียดต่างๆของตัวโครงสร้างไปพร้อมๆกับตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ ทำให้สามารถรู้ถึงตำแหน่งและลักษณะของการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ทั่วโครงสร้าง



ภาพที่ 4.34 ตัวอย่างการรายงานผลตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงด้วย Change Masks (สีเหลือง) ผ่านเทคนิคการรายงานผลด้วยแบบจำลองสามมิติ

#### 4.3.5 การระบุขนาดในแบบจำลองสามมิติ

ในแบบจำลองสามมิตินอกจากการแสดงผลองค์ประกอบของโครงสร้างและผลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ยังสามารถที่จะวัดขนาดของสิ่งที่มองเห็นได้บนพื้นผิวของแบบจำลองสามมิติ ซึ่งนับเป็นคุณสมบัติที่มีประโยชน์เป็นอย่างมากเนื่องจากการมองเห็นเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอต่อการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงหรือประเมินความเสียหาย โดยความสามารถในการระบุขนาดในแบบจำลองสามมิตินี้เกิดจากระบวนการสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่าย สามารถอ่านรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่หัวข้อ 2.2.1 ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะสามารถประมาณหาระยะต่างๆบนแบบจำลองจากพารามิเตอร์ที่ได้จากระบวนการสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่าย แม้ว่าระยะดังกล่าวอาจไม่ใช่ระยะจริงของโครงสร้างแต่สามารถที่จะทำการหาอัตราส่วนระหว่างระยะในแบบจำลองสามมิติกับระยะจริงที่ได้จากการตรวจวัดในสถานที่จริง จากนั้นนำอัตราส่วนดังกล่าวมาปรับเทียบระยะในแบบจำลองสามมิติให้มีขนาดเท่ากับขนาดจริงของโครงสร้าง

การที่สามารถระบุขนาดต่างๆบนแบบจำลองสามมิติให้ได้เหมือนกันกับโครงสร้างจริงนั้นมีประโยชน์มากมายสำหรับงานตรวจสอบเพื่อการประเมินสภาพโครงสร้างได้อย่างแม่นยำ อีกทั้งยังสามารถระบุขนาดของรอยร้าวที่มีขนาดเล็กบนโครงสร้างได้แสดงดังภาพที่ 4.35 ผู้วิจัยได้ทำการทดลองจนได้ข้อสรุปว่ากระบวนการนี้สามารถวัดความกว้างรอยร้าวได้เล็กถึง 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณภาพของกระบวนการเก็บข้อมูลภาพถ่ายและกระบวนการสร้างแบบจำลองสามมิติเพื่อให้การรายงานผลต่างๆมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้หากใช้ตำแหน่ง GPS ในการสร้างแบบจำลองสามมิติจะช่วยให้ขนาดของแบบจำลองสามมิติมีความใกล้เคียงกับขนาดของจริงได้โดยไม่ต้องทำการปรับเทียบกับขนาดจริง อย่างไรก็ตาม GPS อาจให้ข้อมูลที่มีความคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นควรตรวจวัดขนาดจริงในสนามทุกครั้งเพื่อการตรวจสอบที่ถูกต้อง



ภาพที่ 4.35 ตัวอย่างการระบุขนาดความกว้างของรอยร้าวบนแบบจำลองสามมิติ



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการศึกษา

กระบวนการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงมีบทบาทสำคัญในการช่วยดูแลรักษาสภาพโครงสร้างทางประวัติศาสตร์รวมถึงโครงสร้างพื้นฐานทั่วไป ซึ่งสามารถช่วยในการติดตามสภาพโครงสร้างเพื่อประเมินความเสียหายที่เกิดจากความเปลี่ยนแปลงได้เป็นระยะ อีกทั้งในการนำเสนอกระบวนการดังกล่าวเพื่อพัฒนาและพิสูจน์ว่ากระบวนการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้งานได้จริงตามวัตถุประสงค์หรือไม่ ซึ่งปัญหาในปัจจุบันคือการตรวจสอบด้วยการพินิจโดยทั่วไปใช้ผู้ตรวจสอบเข้าไปในพื้นที่ที่พบปัญหาเพื่อเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลง โดยวิธีการดังกล่าวมีข้อจำกัดมากมาย เช่น ค่าใช้จ่ายแรงงานที่สูง ความเสี่ยงต่อชีวิตแรงงานในพื้นที่ที่เข้าถึงยาก และความถูกต้องแม่นยำที่ไม่แน่นอนซึ่งขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ตรวจสอบ กระบวนการตรวจสอบด้วยการพินิจเพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงบนโครงสร้างโบราณสถานมีงานวิจัยมากมายที่ได้เสนอและพัฒนาวิธีการตรวจสอบเพื่อปรับปรุงและแก้ไขข้อผิดพลาดจากการตรวจสอบด้วยคน ซึ่งได้มีการนำกระบวนการประมวลผลภาพถ่ายดิจิทัล (Image Processing) มาใช้เพื่อลดข้อผิดพลาดดังกล่าว แต่ยังไม่มีการใดที่สามารถแก้ไขความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากองค์ประกอบของภาพหรือกระบวนการปรับแก้รูปทรงทางเรขาคณิตของโครงสร้างให้มีประสิทธิภาพได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาเริ่มมีการนำเทคโนโลยีภาพถ่ายมาใช้ในการสำรวจโครงสร้างมากมายและยังสามารถนำข้อมูลภาพถ่ายดังกล่าวมาเข้าสู่กระบวนการ Structure From Motion (SFM) เพื่อสร้างเป็นแบบจำลองสามมิติที่ให้รายละเอียดขององค์ประกอบของโครงสร้างได้ครบถ้วน อีกทั้งยังนำข้อมูลภาพถ่ายและข้อมูลจากแบบจำลองสามมิติดังกล่าวมาใช้ในการงานด้านการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างได้ Bhadrakom (2016) ใช้ข้อมูลภาพถ่ายภาคพื้นดินสร้างแบบจำลอง 3 มิติ ร่วมกับข้อมูลจากเลเซอร์สแกนเพื่อตรวจวัดมุมเอียงของโครงสร้างโบราณสถาน Delaunoy (2008) ใช้ข้อมูลภาพถ่ายได้นำสร้างแบบจำลอง 3 มิติ เพื่อตรวจหาความเปลี่ยนแปลงแนวเขตปะการังที่ช่วงเวลาผ่านไป 1 ปี Krisada (2011) ใช้ข้อมูลภาพถ่ายตรวจหาความเปลี่ยนแปลงโครงสร้างคานคอนกรีตที่มีแรงกระทำจนเกิดรอยแตกร้าวด้วยเทคนิค Pixel Differencing Algorithm และ Günter Saur (2016) ใช้ข้อมูลภาพถ่ายจากเครื่องบินอากาศยานไร้คนขับในการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงจากกระบวนการ Mosaicking Process เป็นบริเวณวงกว้างด้วยเทคนิคใหม่ ปัจจุบันเริ่มมีการนำเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับเข้ามามีส่วนร่วมในการเก็บข้อมูลภาพถ่าย ซึ่งช่วยให้ได้รับ

ข้อมูลภาพถ่ายที่มีคุณภาพและเพียงพอต่อการสร้างแบบจำลองสามมิติ อีกทั้งยังสามารถเข้าถึงจุดที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าถึงได้และสามารถสั่งการรูปแบบการเก็บข้อมูลได้แบบอัตโนมัติ อย่างไรก็ตามยังไม่มีระบบใดที่สามารถแก้ปัญหาได้อย่างครบถ้วนและยังคงต้องพัฒนาเพื่อสร้างระบบตรวจหาการเปลี่ยนแปลงเพื่อใช้สำหรับการตรวจสอบโครงสร้างโบราณสถานแบบอัตโนมัติ

ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีภาพถ่ายมีความเป็นไปได้ในการสร้างระบบอัตโนมัติสำหรับการตรวจสอบความเปลี่ยนแปลง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้มีแนวคิดในการใช้เทคโนโลยีภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับเพื่อการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงของความผิดปกติที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างโบราณสถานแบบอัตโนมัติ โดยใช้เทคโนโลยีการตรวจหาความเปลี่ยนแปลงด้วยภาพถ่ายซึ่งกระบวนการในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อพัฒนาและนำเสนอกระบวนการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงโดยสามารถสรุปได้ดังหัวข้อต่อไปนี้

### 5.1.1 การเก็บบันทึกภาพถ่ายเพื่อสร้างแบบจำลอง 3 มิติ

เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับสามารถช่วยในการเก็บข้อมูลภาพถ่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.2 ได้มีการอธิบายถึงความสามารถในการเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติซึ่งสามารถช่วยลดระยะเวลาในการเก็บข้อมูลด้วยคนและการได้มาของข้อมูลที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าถึงได้ ซึ่งเทคโนโลยีนี้ยังสามารถที่จะนำทางแบบอัตโนมัติในการกลับไปตำแหน่งเดิมด้วยระบบตำแหน่ง GPS เพื่อการตรวจสอบเฉพาะจุดที่สนใจหรือในบริเวณที่พบปัญหาความเสียหาย รายละเอียดของผลการศึกษาในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.2.2 แม้วางยังมีความคลาดเคลื่อนในการใช้ตำแหน่ง GPS แต่ความผิดพลาดดังกล่าวอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนที่น้อยมาก ด้วยประโยชน์และความสามารถของเทคโนโลยีนี้สามารถที่จะได้รับข้อมูลภาพถ่ายที่มีประสิทธิภาพและมีคุณสมบัติครบถ้วนในการนำไปใช้ในกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนต่อไป

ข้อจำกัดของเทคโนโลยีนี้คือการบินเก็บข้อมูลในที่ร่ม พื้นที่จำกัด และพื้นที่ที่สัญญาณ GPS เข้าไม่ถึงอาจทำให้ระบบนำทางของอากาศยานไร้คนขับนั้นไม่สามารถใช้งานได้ ปัญหาดังกล่าวอาจก่อให้เกิดความจำที่ต้องควบคุมด้วยมือซึ่งต้องอาศัยประสบการณ์ของผู้ควบคุมการบินที่สูงมาก อีกทั้งหากพื้นที่ที่ต้องการตรวจสอบมีสิ่งกีดขวางที่ยากต่อการควบคุมอาจทำให้เกิดอุบัติเหตุ การชนกับสิ่งกีดขวางได้ง่าย ในปัจจุบันระบบอัตโนมัติต่างๆในอากาศยานไร้คนขับยังสามารถที่จะพัฒนาต่อได้ ซึ่งข้อผิดพลาดหรือความไม่สมบูรณ์ในระบบการสำรวจต่างๆในเทคโนโลยีนี้ยังมีข้อจำกัดอยู่มากมายที่ยังเป็นปัญหาและต้องคำนึงถึงอันตรายที่จะเกิดขึ้นทุกครั้งที่ใช้งาน

### 5.1.2 การประมวลผลแบบจำลอง 3 มิติ

ในกระบวนการสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่ายผ่านกระบวนการ SFM นั้นสามารถที่จะให้รายละเอียดขององค์ประกอบโครงสร้างได้อย่างครบถ้วนแสดงในบทที่ 4 หัวข้อที่ 4.2.3 ซึ่งแบบจำลองสามมิติดังกล่าวสามารถที่จะปรับปรุงคุณภาพของพื้นผิวแบบจำลองให้มีความเหมือนจริงได้ขึ้นอยู่กับกระบวนการปรับความละเอียดของ Texture ในแต่ละพื้นผิว Mesh ให้สูงขึ้นโดยยิ่งปรับให้สูงมากก็ยิ่งได้ความเหมือนจริงมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งความเหมือนจริงนั้นมีประโยชน์และความจำเป็นอย่างมากในกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลง อีกทั้งหากต้องการให้แบบจำลองสามมิติมีความเหมือนจริงมากยิ่งขึ้นควรใช้ข้อมูลภาพถ่ายระยะใกล้ในการสร้างแบบจำลองสามมิติ เนื่องจากจะสามารถให้รายละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้สามารถบอกรายละเอียดของขนาดบนพื้นผิวแบบจำลองสามมิติได้ แม้ว่าบางกรณีในพื้นที่ตรวจสอบที่สัญญาณ GPS เข้าไม่ถึงอาจทำให้การระบุขนาดนั้นไม่ใช่ขนาดของจริง แต่สามารถปรับเทียบให้เท่ากับขนาดของจริงได้ด้วยการวัดจุดอ้างอิงในสถานที่จริงมาใช้ในการปรับเทียบ ซึ่งเทคโนโลยีการสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่ายสามารถที่จะใช้ในการตรวจสอบสภาพโครงสร้างได้เป็นอย่างดี

ข้อจำกัดและข้อที่ควรพึงระวังของกระบวนการสร้างแบบจำลองสามมิติคือ วัตถุที่จะสามารถสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่ายได้ไม่ควรมีพื้นมันเงาหรือแสงสะท้อนบนผิวโครงสร้าง เนื่องจากเงาสะท้อนดังกล่าวจะทำให้กระบวนการตรวจจับจุดลักษณะเด่นที่เป็นจุดเดียวกันระหว่างรูปนั้นไม่สามารถตรวจจับได้ อีกทั้งในขั้นตอนกระบวนการเก็บข้อมูลหากต้องการภาพถ่ายระยะใกล้ควรคำนึงถึงความเหมือนกันระหว่างภาพเพราะยิ่งถ่ายใกล้มากขึ้นกระบวนการเก็บข้อมูลนั้นต้องถ่ายภาพให้เคลื่อนที่ช้าลงหลายเท่า เพื่อให้ภาพที่ถ่ายออกมาที่มีความเหมือนกันมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์

ในบางกรณีที่ไม่สามารถสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่ายได้คือพื้นที่มีดหรือแสงน้อย ซึ่งจะทำให้ข้อมูลภาพถ่ายที่ได้นั้นไม่สามารถมองเห็นองค์ประกอบของโครงสร้างได้อย่างชัดเจน อีกหนึ่งปัญหาคือกรณีโครงสร้างเหล็กที่มีพื้นผิวมันวาวจะทำให้กระบวนการตรวจจับจุดที่เหมือนกันนั้นไม่สามารถตรวจจับได้ และกับกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้คือโครงสร้างโบราณสถานที่มีลักษณะของพื้นผิวโครงสร้างที่ซับซ้อนซึ่งทำให้ยากต่อการสร้างแบบจำลองสามมิติให้มีความเหมือนจริง โดยหากต้องการให้แบบจำลองสามมิติมีความเหมือนจริงจำเป็นต้องเก็บข้อมูลภาพถ่ายระยะใกล้ให้ครอบคลุมทั่วทุกส่วนของโครงสร้าง ด้วยเหตุนี้จึงเป็นปัญหาในเรื่องของการเก็บข้อมูลภาพถ่ายแบบอัตโนมัติซึ่งยังไม่มีประสิทธิภาพมากนักในการเก็บข้อมูลภาพถ่ายเฉพาะจุดในระยะใกล้ได้

### 5.1.3 การตรวจหาความเปลี่ยนแปลง

กระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงในวิจัยนี้สามารถให้ผลลัพธ์ที่มีความน่าเชื่อถือและให้คุณภาพที่ดีขึ้น อีกทั้งสามารถนำผลลัพธ์ที่ได้มารายงานถึงตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถนำไปใช้งานได้จริง ซึ่งกระบวนการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าวิธีการทั่วไปและสามารถพัฒนาปรับปรุงให้ดีขึ้นกว่าเดิมได้ด้วยการเพิ่มความละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองสามมิติให้สูงขึ้น มากไปกว่านั้นสามารถที่จะแก้ไขปัญหาความแตกต่างระหว่างภาพจริงและภาพสังเคราะห์ที่ได้ด้วยการใช้ภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติทั้ง 2 ช่วงเวลามาทำการตรวจหาการเปลี่ยนแปลง และผลลัพธ์ที่ได้สามารถทำให้ผลของการระบุจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น จากผลการศึกษาที่ผ่านมาสรุปได้ว่าวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถพัฒนาระบบการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงของความผิดปกติที่เกิดขึ้นบนโครงสร้างโบราณสถานแบบอัตโนมัติให้มีประสิทธิภาพได้

กระบวนการสังเคราะห์ภาพถ่ายจากแบบจำลองสามมิติจะมีความถูกต้องของมุมมองภาพมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความคลาดเคลื่อนในกระบวนการปรับเทียบตำแหน่งกล้องว่ามีมุมมองต่างจากภาพจริงมากน้อยอย่างไร แสดงตัวอย่างดังตารางที่ 4.8 หากค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าน้อยมากและค่านั้นเกาะกลุ่มกับความคลาดเคลื่อนของชุดข้อมูลภาพในแบบจำลองที่ปรับเทียบเข้าไป แสดงว่าตำแหน่งกล้องที่ทำการปรับเทียบนั้นสามารถสังเคราะห์ภาพเพื่อนำมาใช้ในการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงได้ ซึ่งผลที่ได้คือการปรับเทียบตำแหน่งกล้องสามารถให้ค่าของความคลาดเคลื่อนที่น้อย และสามารถนำมาใช้กับชุดข้อมูลของแบบจำลองสามมิติที่ทำการปรับเทียบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กระบวนการ Pre-Processing เป็นอีกหนึ่งกระบวนการที่สำคัญก่อนเข้าสู่การตรวจหาการเปลี่ยนแปลง ในบทที่ 4 ขั้นตอนนี้จะเป็นการปรับแสงและพื้นหลังของภาพสังเคราะห์หรือภาพอ้างอิงเพื่อให้ทั้งสองภาพมีองค์ประกอบโดยรวมที่เหมือนกันมากที่สุดก่อนการนำเข้าสู่กระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลง ซึ่งผลที่ได้คือกระบวนการ Pre-Processing สามารถที่จะช่วยลดความแตกต่างของภาพทั้งในส่วนที่เกี่ยวข้องและไม่เกี่ยวข้องกับบริเวณที่ต้องการตรวจสอบให้น้อยลงไปได้

การประเมินผลคู่ภาพก่อนนำเข้าสู่การตรวจหาการเปลี่ยนแปลงว่ามีคุณภาพดีหรือไม่ ในบทที่ 4 งานวิจัยนี้จะใช้การประเมินค่าความคล้ายคลึงกันของคู่ภาพที่นำมาตรวจหาการเปลี่ยนแปลง ค่าความคล้ายคลึงกันจะบอกในลักษณะของค่า MSE (ค่าความแตกต่าง) และ SSIM (ค่าความคล้ายคลึงกัน) โดยถ้าค่า MSE เท่ากับ 0 หมายถึงคู่ภาพนั้นไม่มีความแตกต่างกัน ซึ่งหากมีค่ามากขึ้นหมายถึงคู่ภาพนั้นมีความแตกต่างกันมากขึ้นตามไปด้วย โดยหากความแตกต่างดังกล่าวมีค่าเกินความเป็นจริงสามารถบอกได้ว่าคู่ภาพนั้นไม่เหมาะสมในการนำมาตรวจหาการเปลี่ยนแปลง ใน

ส่วนของค่า SSIM หากมีค่าเท่ากับ 1 หมายถึงคู่ภาพนั้นเหมือนกันทุกประการ ซึ่งหากมีค่าลดลง หมายถึงภาพนั้นเริ่มมีความแตกต่างกัน โดยหากเท่ากับ 0 หมายถึงคู่ภาพนั้นไม่มีความเหมือนกันเลย ในงานวิจัยนี้การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นควรมีเพียงเล็กน้อยเนื่องจากเป็นการเปลี่ยนแปลงเล็กๆ เช่น รอยร้าว ดังนั้นค่า MSE ควรจะมีค่าเข้าใกล้ 0 และค่า SSIM ควรจะมีค่าเข้าใกล้ 1 ซึ่งหากข้อมูลที่นำมาทำการตรวจสอบมีค่าไม่ตรงกับสมมติฐานที่กล่าวมาสามารถบอกได้ข้อมูลคู่ภาพนั้นไม่เหมาะสมต่อการนำมาตรวจหาการเปลี่ยนแปลง ผลที่ได้จากการศึกษานี้กระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยภาพ 2 มิติ เป็นกระบวนการที่ให้ค่า MSE และ SSIM ที่ไม่มีประสิทธิภาพที่สุดเนื่องจากภาพมีมุมมองแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้ผลการตรวจสอบไม่มีคุณภาพได้ จึงก่อให้เกิดแนวคิดในการนำภาพจากการสังเคราะห์ในแบบจำลองสามมิติมาใช้ในการตรวจสอบกับภาพจริง โดยเมื่อปรับความละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองสามมิติให้เหมือนจริงมากขึ้นสามารถที่จะให้ผลค่า MSE และ SSIM ที่เหมาะสมมากขึ้นและดีขึ้น นอกจากนี้ผู้วิจัยได้มีแนวคิดในการใช้ภาพสังเคราะห์กับภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติมาใช้ในการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงซึ่งทำให้ได้ผลของค่า MSE และ SSIM ที่ดีมากขึ้นและมีประสิทธิภาพที่สุด ซึ่งสามารถช่วยลดข้อผิดพลาดที่เกิดจากความแตกต่างขององค์ประกอบภาพที่ไม่ถูกต้องออกไปได้

กระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงในงานวิจัยนี้เป็นการหาผลต่างระหว่างพิกเซลภาพจากนั้นนำมาพิจารณากับเกณฑ์เพื่อหาผลของพิกเซลการเปลี่ยนแปลงหรือ Change Masks ที่ดีที่สุดออกมา ซึ่งการเลือกเกณฑ์นั้นยังคงเป็นการกำหนดด้วยตนเอง ในบทที่ 4 แสดงให้เห็นถึงผลการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงโดยการแสดงผลผ่าน Change Masks ซึ่งผลที่ได้คือกระบวนการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จากการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงโดยใช้ภาพสังเคราะห์ที่ผ่านการปรับความละเอียดของพื้นผิวแบบจำลองสามมิติให้ดีขึ้นนั้น สามารถพัฒนาและปรับปรุงผลจากกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยภาพถ่ายให้มีความถูกต้องแม่นยำและมีประสิทธิภาพมากขึ้นได้

ขั้นตอนสุดท้ายของการศึกษาคือการประเมินคุณภาพของกระบวนการศึกษาที่ได้นำเสนอด้วย ROC Curve ซึ่งเป็นการนำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นจริงจากการเก็บข้อมูลด้วยมือมาเปรียบเทียบกับผลการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัย โดยการเปรียบเทียบดังกล่าวสามารถแสดงผลให้อยู่ในรูปแบบของค่าพื้นที่ใต้กราฟ AUC ที่สามารถสรุปผลได้ว่าถ้า AUC เข้าใกล้ 1 หมายถึงกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงจากการฝึกศึกษานั้นสามารถให้ผลที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งจากผลการศึกษาสามารถสรุปผลได้ว่าวิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงด้วยภาพถ่ายให้มีความถูกต้องแม่นยำและมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นได้

## 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ขั้นตอนการเก็บข้อมูลภาพถ่ายนั้นถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากในงานวิจัยนี้ เนื่องจากมุมมองภาพที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าถึงได้นั้นมีความจำเป็นเพื่อให้ได้มาซึ่งองค์ประกอบของแบบจำลองสามมิติในโครงสร้างโบราณสถานที่ครบถ้วน ซึ่งอากาศยานไร้คนขับสามารถเก็บข้อมูลภาพถ่ายที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าถึงได้และมีระบบนำทางแบบอัตโนมัติจากตำแหน่ง GPS ทำให้การตรวจสอบเป็นระยะนั้นมีประสิทธิภาพ แต่ยังมีข้อเสียที่มนุษย์สามารถทำได้ดีกว่าคือการเก็บข้อมูลภาพถ่ายในพื้นที่ปิดหรือพื้นที่ขนาดเล็กและภาพถ่ายระยะใกล้ ซึ่งปัญหาที่กล่าวมาอากาศยานไร้คนขับเหมาะกับการใช้งานในพื้นที่เปิดหรือพื้นที่ขนาดใหญ่จะมีประสิทธิภาพเป็นอย่างมาก เมื่อนำมาใช้ในงานพื้นที่ปิดหรือพื้นที่จำกัดที่ต้องการภาพระยะใกล้ขณะที่มนุษย์ก็สามารถเข้าถึงได้ อากาศยานไร้คนขับจะมีการทำงานที่ช้ากว่า หรือถ้าเร็วกว่าข้อมูลที่ได้จะมีคุณภาพที่ไม่ดีนักและเสี่ยงต่อการชนกับสิ่งกีดขวางที่อาจก่อให้เกิดอันตราย ซึ่งหนทางที่ดีที่สุดของอากาศยานไร้คนขับในกรณีดังกล่าวคือการควบคุมการบินด้วยมือโดยปราศจากการบินแบบอัตโนมัติ อย่างไรก็ตามการบินด้วยมือจำเป็นต้องการประสบการณ์ของผู้บินที่สูงและคุ้นเคยกับลักษณะงานในการบินแต่ละที่ที่สำรวจ

การสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่ายนั้นค่อนข้างจะมีปัญหาในเรื่องของการสร้างพื้นผิวแบบจำลองให้มีความเหมือนจริง ซึ่งการสร้างแบบจำลองสามมิติให้มีพื้นผิวเหมือนจริงนั้นขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลภาพถ่ายที่ได้มา ซึ่งหากต้องการแบบจำลองที่มีคุณภาพสูงนั้นจำเป็นต้องมีภาพถ่ายระยะใกล้และมีความเหลื่อมกันระหว่างภาพที่เหมาะสม ในกระบวนการเก็บข้อมูลระยะใกล้เพื่อให้ได้แบบจำลองสามมิติที่มีคุณภาพสูงนั้นจึงเป็นเรื่องที่ยากเป็นอย่างมากจากหัวข้อที่ผ่านมา และการเก็บข้อมูลภาพระยะใกล้หากมีความเหลื่อมกันระหว่างภาพที่ไม่เหมาะสมอาจทำให้ข้อมูลภาพชุดนั้นไม่สามารถสร้างแบบจำลองสามมิติได้ อีกทั้งการปรับความละเอียดพื้นผิวแบบจำลองให้สูงขึ้นยังไม่สามารถทราบได้ว่าต้องปรับมากถึงเท่าไรให้เพียงพอต่อการใช้งานกับภาพจริง ซึ่งเป็นปัญหาหลักที่ทำให้ระบบการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงระหว่างภาพจริงกับภาพสังเคราะห์ยังมีข้อผิดพลาด จนก่อให้เกิดแนวคิดในการใช้ภาพสังเคราะห์กับภาพสังเคราะห์จากแบบจำลองสามมิติมาช่วยในการแก้ไขปัญหานี้

การตรวจหาการเปลี่ยนแปลงเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในงานวิจัยนี้ เพื่อให้สามารถทำตามวัตถุประสงค์ในการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงบนโครงสร้างโบราณสถานได้ ปัญหาที่พบและเป็นปัญหาหลักที่ปัจจุบันยังไม่สามารถแก้ไขได้คือตำแหน่งที่ระบุว่าการเปลี่ยนแปลงที่ผิดพลาด ซึ่งแม้ว่าผลจากงานวิจัยนี้จะสามารถกำจัดผลการเปลี่ยนแปลงที่ผิดพลาดไปได้บางส่วนจากการกำหนดเกณฑ์ให้สูงขึ้นแต่ยังมีบางส่วนเพียงเล็กน้อยที่ไม่สามารถกำจัดไปได้ ซึ่งยังคงเป็นปัญหาที่ไม่อาจ

จำแนกส่วนที่ผิดพลาดนี้ออกจากผลที่ถูกต้อง ผลความผิดพลาดดังกล่าวเกิดได้จากหลายส่วนในวิธีการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ เช่น จากกระบวนการเก็บข้อมูลภาพถ่ายหรือจากกระบวนการสร้างแบบจำลองสามมิติเพื่อการสังเคราะห์ภาพมาตรวจหาการเปลี่ยนแปลง การรายงานผลที่ผิดพลาดเล็กน้อยนี้ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบโครงสร้างเนื่องจากการระบุว่าการเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งในโครงสร้างจริงไม่มีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะปรับปรุงวิธีการตรวจหาการเปลี่ยนแปลงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในอนาคต

### 5.3 การต่อยอดในอนาคต

#### 5.3.1 ปัญญาประดิษฐ์เพื่อการตรวจหาการเปลี่ยนแปลง

แนวคิดนี้เป็นแนวคิดที่ผู้วิจัยมีความคิดเห็นว่าจะสามารถทำได้จริงจากกระบวนการพัฒนาระบบการเรียนรู้ปัญญาประดิษฐ์ให้สามารถตรวจจับตำแหน่งบนภาพถ่ายแบบอัตโนมัติโดยให้ระบุจุดที่สนใจ เช่น รอยแตกร้าว ปัจจุบันมีการนำปัญญาประดิษฐ์มาใช้ในการเรียนรู้เพื่อระบุวัตถุสิ่งของต่างๆมากมายตามการใช้งานของผู้พัฒนา ซึ่งแนวคิดนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทในกรณีศึกษาที่สนใจรอยแตกร้าว ได้แก่ การระบุตำแหน่งรอยแตกร้าวจาก 2 สภาวะที่มุมมองภาพเดียวกันเพื่อการตรวจหาการเปลี่ยนแปลง และการตรวจจับบริเวณที่เป็นรอยร้าวเพื่อการกำจัดบริเวณไม่ใช่รอยร้าวสำหรับการตรวจหาการเปลี่ยนแปลง โดยทั้ง 2 ประเภทถือเป็นการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่เข้ามาประยุกต์ใช้กับงานทางด้านวิศวกรรมโยธาเพื่อการตรวจสอบและประเมินความเสียหาย อย่างไรก็ตามหากเป็นกรณีศึกษารอยร้าวบนโครงสร้างโบราณสถานอาจเป็นเรื่องที่ยากต่อการสอนปัญญาประดิษฐ์ให้เรียนรู้เกี่ยวกับรอยร้าว เนื่องจากพื้นผิวบนโครงสร้างโบราณสถานมีความซับซ้อน แม้แต่มนุษย์ยังยากที่จะแยกรอยร้าวกับจุดที่ไม่ใช่รอยร้าว เช่น รอยร้าวกับรอยต่อของอิฐ เป็นต้น ซึ่งถือเป็นความท้าทายในการพัฒนาเทคโนโลยีนี้ให้สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้

#### 5.3.2 โลกเสมือนจริง

แบบจำลองสามมิติจากภาพถ่ายมีความสามารถในการสร้างวัตถุบนโลกแห่งความจริงให้ไปอยู่บนคอมพิวเตอร์ได้ ซึ่งจากงานวิจัยนี้พื้นผิวแบบจำลองสามมิติสามารถสร้างให้มีความละเอียดสูงเทียบเท่ากับพื้นผิวของวัตถุจริงตามคุณภาพของภาพถ่ายที่เห็นได้ และอากาศยานไร้คนขับสามารถเก็บข้อมูลภาพถ่ายในพื้นที่เปิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งการสร้างแผนที่ วัตถุโครงสร้างอาคาร รวมไปถึงพาหนะ เช่น รถยนต์ เครื่องบิน เป็นต้น トラバได้ก็ตามที่ภาพถ่ายเห็นจะสามารถสร้างแบบจำลองสามมิติสิ่งนั้นขึ้นมาได้ โลกเสมือนจริงที่ถูกสร้างจากแบบจำลองสามมิติเมื่อ

ประยุกต์ใช้กับระบบ Visual Reality (VR) จะสามารถเข้าไปชมหรืออยู่ในโลกเสมือนจริงได้อย่างอิสระ ซึ่งหากสามารถทำได้จริงจะเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ประโยชน์ได้มากมาย เช่น การตรวจงานก่อสร้างในโลกเสมือนจริง การเยี่ยมชมโครงสร้างทางประวัติศาสตร์ในโลกเสมือนจริง รวมไปถึงการตรวจวัดขนาดของความเสียหายในโลกเสมือนจริงที่มีขนาดเท่ากับความเป็นจริง เป็นต้น ซึ่งปัจจุบันยังคงต้องมีการปรับปรุงวิธีการเก็บข้อมูลภาพถ่ายเพื่อสร้างแบบจำลองสามมิติให้ง่ายและดีขึ้นต่อไป

### 5.3.3 การพัฒนาระบบนำทางอากาศยานไร้คนขับแบบอัจฉริยะ

เป็นอีกหนึ่งแนวคิดที่อาจช่วยให้อากาศยานไร้คนขับเป็นสุดยอดเทคโนโลยีการสำรวจที่ดีที่สุด ในปัจจุบันการเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติในงานสำรวจ ยังไม่ครอบคลุมรูปแบบการเก็บข้อมูลได้ทุกกรณี และหนึ่งในกรณีที่เป็นปัญหาที่สุดในปัจจุบันคือการเก็บข้อมูลในพื้นที่แคบ พื้นที่ ปิด พื้นที่ไม่มีแสง และพื้นที่ที่ไม่มีสัญญาณ GPS หรือการเก็บข้อมูลภาพถ่ายระยะใกล้ เป็นต้น ซึ่งหากแก้ไขหรือพัฒนาระบบอากาศยานไร้คนขับให้สามารถเก็บข้อมูลแบบอัตโนมัติในกรณีศึกษาดังกล่าวได้ จะทำให้งานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จและทำงานได้รวดเร็วขึ้นเป็นอย่างมาก รวมไปถึงแนวคิดในการสร้างโลกเสมือนจริงที่จำเป็นจะต้องมีกระบวนการเก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันระบบการนำทางแบบอัตโนมัติในอากาศยานไร้คนขับกำลังอยู่ในช่วงพัฒนาและมีแนวโน้มการเจริญเติบโตด้านการพัฒนาที่ไม่สิ้นสุด ซึ่งหากสามารถแก้ไขปัญหาในการเก็บข้อมูลภาพถ่ายระยะใกล้แบบอัตโนมัติได้จะสามารถช่วยให้งานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จได้ง่ายและเร็วขึ้น

### 5.3.4 การขึ้นรูปแบบจำลองสามมิติเรขาคณิตแบบอัตโนมัติ

ปัจจุบันงานด้านวิศวกรรมโยธาได้มีการพัฒนาระบบการสร้างแบบจำลองสามมิติเรขาคณิตเพื่อการวิเคราะห์โครงสร้างด้วย Finite Element Model ซึ่งการสร้างแบบจำลองสามมิติเรขาคณิตของโครงสร้างในสภาวะปัจจุบันได้มีการประยุกต์ใช้การสร้างแบบจำลองสามมิติจากภาพถ่ายเพื่อนำจุดกลุ่มเมฆมาเป็นแบบเค้าโครงของตัวโครงสร้างเพื่อขึ้นรูปเรขาคณิตด้วยมือ ซึ่งใช้เวลาค่อนข้างมากและยุ่งยากในการขึ้นรูป แม้ว่าจะมีผู้นำเสนอวิธีการขึ้นรูปแบบอัตโนมัติโดยใช้พารามิเตอร์จากจุดกลุ่มเมฆ แต่ก็ยังไม่มีวิธีการใดสามารถให้ผลที่มีประสิทธิภาพได้เนื่องจากจุดกลุ่มเมฆไม่สามารถให้ระนาบที่แน่นอน ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะใช้พารามิเตอร์จากแบบจำลองสามมิติแบบพื้นผิวมาใช้แทนจุดกลุ่มเมฆที่สามารถให้ความเป็นพื้นผิวระนาบได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามการใช้พารามิเตอร์เพื่อขึ้นรูปแบบอัตโนมัติยังต้องมีการศึกษาเพื่อให้สามารถใช้งานได้จริงต่อไป



## รายการอ้างอิง

- สิทธิพร เฉลิมพงศ์พิพัฒน์,คัมภีร์ ชีระเวช,วีระศักดิ์ ปรีกษา (2013), การทำแผนที่เสาไฟฟ้าแบบ กึ่งอัตโนมัติด้วยเทคนิคเอสเอฟเอ็ม , RMUTP Research Journal Special Issue ,The 5th Rajamangala University of Technology National Conference.
- Agisoft LLC, (2016). Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.2  
downloads: [http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro\\_1\\_2\\_en.pdf](http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_en.pdf)
- DJI, (2016), PHANTOM 4 User Manual v1.0 downloads:  
[https://dl.djicdn.com/downloads/phantom\\_4/en/Phantom\\_4\\_User\\_Manual\\_en\\_v1.0.pdf](https://dl.djicdn.com/downloads/phantom_4/en/Phantom_4_User_Manual_en_v1.0.pdf)
- Saur, G. and Kruger, W., change detection in UAV video mosaics combining a feature based approach and extended image differenceing. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B7, 2016.
- Krisada Chaiyasarn (2011), Damage Detection and Monitoring for Tunnel Inspection based on Computer Vision. Doctor of Philosophy, Christ’s College University of Cambridge.
- Lowe, D. ( 2004) , “ Distinctive image features from scale- invariant keypoints. ” International Journal of Computer Vision, 60(2), 91–110.
- Szeliski, R. (2010), Computer vision: algorithms and applications. Springer-Verlag New York, Inc.
- Kouimtzoğlu, T., Stathopoulou, E. K., Agrafiotis, P. and Georgopoulos, A. (2017), image- based 3D reconstruction data as an analysis and documentation tool for architects: the case for Plaka Bridge in Greece, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W3, 2017, 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, 1–3 March, Nafplio, Greece.

- Wu, C. VisualSFM: A Visual Structure from Motion System. [Online]. Available: <http://homes.cs.washington.edu/~ccwu/vsfm/>. 2012.
- Donald Hearn and M. Pauline Baker, Computer Graphics: C Version, 2nd Ed., Prentice Hall, 1997.
- Chen, Z., Chang, B., and Hutchinson, T. (2008). "Image-based monitoring of structural damage: concrete surface cracks." Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 6933, 30.
- Bhadrakom, B. and Chaiyasarn, K., "As-built 3D modelling based on structure from motion from deformation assessment of historical buildings", International Journal of GEOMATE, 11(24), 2016, 2378 – 2384.
- Delaunoy, O., Gracias, N. and Garcia, R., Towards detecting changes in underwater image sequences. In OCEANS 2008-MTS/IEEE Kobe Techno-Ocean, pages 1–8, 2008.
- Swati A.Gandhi and C.V. Kulkarni. "MSE Vs SSIM", International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, Issue 7, July-2013, ISSN 2229-5518.
- Zhou Wang, Alan Conrad Bovik, Hamid Rahim Sheikh and Eero P. Simoncelli. "Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity", IEEE Transactions on Image Processing, VOL. 13, NO. 4, April 2004.
- Wang, Z., Li, L., Wu, S., Xia, Y., Wan, Z., and Cai, C., "A New Image Quality Assessment Algorithm based on SSIM and Multiple Regressions", International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition Vol.8, No.11 (2015), pp.221-230.
- Zeng, K. and Wang, Z., "3D-SSIM video quality assessment", IEEE International on Image Processing (ICIP12), Orlando, FL, Sept. 2012.
- Rohit T. Pushpalwar and Smriti H. Bhandari. "Image Inpainting Approaches – A Review", IEEE 6th International Conference on Advanced Computing, 2016.
- Byung-Gook Lee, Bumseok Ko, Sukho Lee, and Donghak Shin. "Computational Integral Imaging Reconstruction of a Partially Occluded Three-Dimensional Object Using an Image Inpainting Technique", Journal of the Optical Society of Korea Vol. 19, No. 3, June 2015, pp. 248-254.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายอภิชาติ บัวติก
วันเดือนปีเกิด	2 กันยายน 2536
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2558: วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ทุนการศึกษา	ปีงบประมาณ 2559: ทุนผู้ช่วยสอน มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, ทุนการศึกษาระดับ บัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

## ผลงานทางวิชาการ

Chaiyasarn, K., Bhadrakom, B., Buatik, A., and Poovarodom, N., “THE STRUCTURAL ANALYSIS OF HISTORICAL STRUCTURES BASED ON IMAGE-BASED AS-BUILT 3D MODELLING USING UNMANNED AERIAL VEHICLES”, 3rd International Conference on PROTECTION OF HISTORICAL CONSTRUCTIONS Lisbon, Portugal, 12 – 15 July, 2017.