# การศึกษาการตรวจสอบสะพานด้วยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ
# INVESTIGATION OF BRIDGE INSPECTION USING UNMANNED AERIAL VEHICLE

**บวรชนก มณีรัตน์[1,*] วิทิต ปานสุข[2] และ พชร เครือวิทย์[3*]**

*[1,2] ศูนย์เชี่ยวชาญเฉพาะทางนวัตกรรมวัสดุก่อสร้าง ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จังหวัด กรุงเทพฯ*
*[3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ จังหวัด กรุงเทพฯ*
**Corresponding author; E-mail address: 6372067421@student.chula.ac.th[1]*

## บทคัดย่อ

การตรวจสอบโครงสร้างสะพานนั้นเป็นหนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญที่ช่วยในการเพิ่มอายุการใช้งานของสะพาน โดยวิธีการตรวจสอบด้วยตาเปล่าเป็นขั้นแรกของการตรวจสอบ ที่จะต้องใช้กำลังคนในการเข้าถึงพื้นที่เพื่อตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้น ซึ่งเป็นหน้าที่วิศวกรหรือผู้ตรวจสอบที่จะต้องมีความรู้ ความเข้าใจวิธีการและพฤติกรรมของสะพานเพื่อทำการประเมินความเสียหายโครงสร้างสะพาน ซึ่งจะต้องใช้เวลา ค่าใช้จ่ายที่สูง รวมไปถึงความซับซ่อนของข้อมูล โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาและนำเสนอเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับหรือยูเอวี (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) ที่มีประสิทธิภาพในการเข้าถึง ลดอุบัติเหตุ รวมไปถึงความสามารถในการสร้างแบบจำลองสามมิติ โดยในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอหลักการโฟโตแกรมเมตรี (Photogrammetry) ในการสร้างแบบจำลองจุดก้อนเมฆ (Point Cloud) เพื่อประมวลผลสร้างภาพออร์โธร์ (Orthophoto) ที่มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบความเสียหายของสะพาน กำหนดค่าความละเอียดจุดพิกเซล (Ground Sample Distance: GSD) เท่ากับ 0.5 cm/pix การซ้อนทับส่วนทับซ้อน (Overlap) และ ส่วนเกย (Sidelap) 80 และ 80 ตามลำดับ รวมไปถึง การกำหนดจุดควบคุมภาพถ่ายและจุดตรวจสอบทั้งหมด 29 จุด โดยผลลัพธ์ที่ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของระยะแต่ละจุดแบบจำลองที่ได้กับพื้นที่จริง 38 จุด รวมไปถึงรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นบนแบบจำลองกับพื้นที่จริง 26จุด พบว่าผลลัพธ์ที่ได้เป็นอีกตัวเลือกนึงที่สามารถทดแทนการตรวจสอบแบบดั้งเดิม ช่วยในการเข้าถึง และ ลดความเสี่ยงที่อาจก่อให้เกิดอันตรายแก่ผู้ตรวจสอบ โดยระยะแต่ละจุดของภาพออร์โธมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.14 % และการตรวจสอบความเสียหายมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 12.37 % เปรียบเทียบกับความเสียหายที่เกิดขึ้นจริงบนสะพาน

คำสำคัญ: เทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ, โฟโตแกรมเมตรี, แบบจำลองจุดก้อนเมฆ, แบบจำลองสามมิติ, จุดควบคุมภาพถ่าย, ความละเอียดจุดภาพ

## Abstract

Inspecting the bridge structure is one of the important steps in increasing the service life of the bridge. Visual inspection is the first step of the inspection that requires manpower to access the area to check for damages. As a duty of an engineer or an inspector, it has been required for them to have knowledge and Understanding bridge methods and behaviors to assess structural damages to bridges. Time-consuming, high-cost and individual have been taken into account for consideration, including the concealment of information. This research studies have presented Unmanned Aerial Vehicle (UAV) technology that has the capability to reach and reduce accidents, as well as the ability to create 3D models. In this research, the principle of Photogrammetry has been presented to create a point cloud model (Point Cloud) to process Orthophotos that are effective in detecting bridge damages. The Ground Sample Distance (GSD) has been Configured resolution for 0.5 cm/pix, Overlap and Sidelap 80 and 80 are also respectively configured, including all 29 Ground Control Point (GCP) and Check Point (CP) assignments. The results have been validated for distances at each replicated point with 38 real areas, meanwhile damage patterns occur on the model versus 26 actual locations. The results have shown another alternative outcome that could replace traditional audits. It increases opportunity to access information and reduce the risks that may cause harm to the speculators. Each point of the Orthophotos have had an average percentage discrepancy of 1.14%, and the damaged inspection have an average percentage discrepancy of 12.37%, compared to the actual damages on the bridge

Keywords: Unmanned Aerial Vehicle, Photogrammetry, Point Cloud, 3D modeling, Ground Control Point, Ground Sample Distance

## 1. บทนำ

โครงสร้างสะพานนับเป็นโครงสร้างพื้นฐานที่ขับเคลื่อนเศรษฐกิจในประเทศไทยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยส่วนใหญ่สะพานในประเทศไทยจะเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก จึงทำให้มีการตรวจสอบและบำรุงรักษาเป็นประจำเพื่อช่วยป้องกันความเสียหายที่ส่งผลต่อในภายภาคหน้า อีกทั้งเป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของสะพาน โดยทั่วไปวิธีการตรวจสอบด้วยตาเปล่า (Visual Inspection) เป็นวิธีการประเมินขั้นแรกของการตรวจสอบโครงสร้าง [1] ซึ่งต้องอาศัยกำลังคนในการเข้าถึง เพื่อตรวจสอบสภาพความเสียหายจึงเป็นหน้าที่ของวิศวกรที่ต้องเป็นผู้ตรวจสอบเพื่อวิเคราะห์ และประเมินความเสียหายที่เกิดขึ้นให้ถูกต้องตามหลักวิศวกรรม [2] โดยวิธีการดังกล่าวอาจเป็นความอันตรายต่อผู้ตรวจสอบ ต้นทุนสูง และใช้เวลามาก [3]

รวมไปถึงความซับซ้อนในการรวบรวมข้อมูลหากเป็นสะพานขนาดใหญ่ ด้วยความสามารถในการเข้าถึงของอากาศยานไร้คนขับหรือโดรน ในการตรวจสอบความเสียหายเป็นอีกตัวเลือกหนึ่งที่ช่วยเพิ่มความปลอดภัย ลดระยะเวลาในการตรวจสอบ และลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการเมื่อเทียบกับวิธีแบบดั้งเดิม [4] ดังนั้นการนำอากาศยานไร้คนขับมาใช้เป็นเครื่องมือเป็นอีกหนึ่งวิธีในการตรวจสอบสะพานที่เหมาะสม

โดยในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาวิธีการตรวจสอบความเสียของสะพาน โดยใช้อากาศยานไร้คนขับทดแทนวิธีการตรวจสอบดั้งเดิมไม่ว่าจะเป็นการตรวจสอบประจำ และการตรวจสอบฉุกเฉินที่จะต้องทำการเข้าถึงพื้นที่ในการตรวจสอบความเสียหาย [5] ที่อาจก่อให้เกิดความอันตรายต่อผู้ตรวจสอบ ซึ่งอากาศยานไร้คนขับถือได้ว่าเป็นเครื่องมือที่นิยมอย่างแพร่หลายในด้านการตรวจสอบ เช่น การตรวจสอบเขื่อน [6] การตรวจสอบอาคาร [7] การตรวจสอบถนน [8] และการตรวจสอบสะพาน ด้วยความสามารถของอากาศยานไร้คนขับในการสร้างแบบจำลองสามมิติ โดยวิธี Photogrammetry ช่วยในการสำรวจและประมวลผลเป็นแบบจำลองจุดก้อนเมฆ (Point Cloud) เพื่อสร้างภาพออร์โธ (Orthophoto) ที่มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบความเสียหายที่เกิดขึ้น ซึ่งความแม่นยำและความถูกต้องของแบบจำลองนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ไม่ว่าจะเป็นความสูงในการบิน การทับซ้อนของภาพถ่าย ข้อมูลที่ครบถ้วนของภาพถ่าย รวมถึงจุดควบคุมภาพถ่าย [9] ทั้งนี้จุดควบคุมภาพถ่ายจะช่วยในการปรับแก้ค่าพิกัดภาพถ่ายให้แบบจำลองสะพานแม่นยำยิ่งขึ้น [10]

เพื่อศึกษาคุณภาพของแบบจำลองสามมิติจากอากาศยานไร้คนขับ ผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองจากภาพอากาศยานไร้คนขับเข้ามาประยุกต์ใช้ในการสำรวจและตรวจสอบสะพานธนะรัชต์ นำแบบจำลองสามมิติมาประมวลผลภาพออร์โธส่วนบน ส่วนข้าง และเสาตอม่อของสะพาน เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาแสดงผลในซอฟต์แวร์ GIS (Geographic Information System) ในการเปรียบเทียบความเสียหายและระยะแต่ละชิ้นส่วนจากภาพออร์โธและระยะจริงที่เข้าถึงได้ ทดแทนการเข้าถึงการตรวจสอบแบบดั้งเดิม ที่มีประสิทธิภาพ ลดอุบัติเหตุแก่ผู้ตรวจสอบ ลดกำลังคนและลดความซับซ้อนในการเก็บรวบรวมข้อมูล

## 2. ความสำคัญและหลักการตรวจสอบสะพาน

การตรวจสอบโครงสร้างสะพานเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการดูแลบำรุงรักษาสะพาน เพื่อประเมินความเสียหายก่อนทำการซ่อมแซมของสะพาน การวางแผนการตรวจสอบสะพานในแต่ละหน่วยงานมีความแตกต่างกันไม่มากก็น้อยขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพของสะพาน สภาพภูมิประเทศ สภาพภูมิอากาศ ปริมาณและลักษณะของการจราจรที่สะพานตองแบกรับ รวมถึงความสามารถในการเขาถึงพื้นที่ ตลอดจนขอจำกัดทางด้านงบประมาณและบุคลากร เป็นตน การวางแผนการตรวจสอบสามารถทำได้ในหลายระดับ ตั้งแต่ระดับนโยบายโดยผู้บริหาร ของหน่วยงาน ไปจนถึงระดับปฏิบัติการโดยทีมงานตรวจสอบ ซึ่งมีสิ่งที่ตองพิจารณาและมาตรการการดำเนินการต่าง ๆ แตกต่างกันในแต่ละระดับ เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของสะพานจึงต้องทำการตรวจสอบ เช่น การตรวจสอบประจำ (Routine Inspection) หรือ การตรวจสอบฉุกเฉิน (Emergency Inspection) [11] เนื่องจากการตรวจสอบจำเป็นที่จะตองใช้เวลา บุคลากรและเครื่องมือซึ่งในบางครั้งอาจจะมีจำนวนมาก จึงจำเป็นตองมีการวางแผนในการเข้าพื้นที่สำรวจ โดยตองคำนึงถึงชนิดของโครงสร้าง กำลังคน ระยะเวลา และความสามารถในการเขาถึง เพื่อใหเกิดประสิทธิภาพสูงสุด

### *2.1 การตรวจสอบประจำ (Routine Inspection)*

การตรวจสอบประจำ (Routine Inspection) เป็นการตรวจสอบตามชวงระยะเวลาที่กำหนด เชน การตรวจสอบประจำเดือน หรือการตรวจสอบประจำปี เป็นตน เพื่อใหทราบถึงสภาพโครงสร้างของสะพานในแต่ละชวงเวลาหากสะพานเริ่มเกิดความเสียหาย [11] โดยเป้าหมายหลักของการตรวจสอบประจำ เป็นการเก็บบันทึกข้อมูลที่สำคัญเพื่อใช้ในการประเมินและวัดระดับความเสียหายของสะพาน โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากจากการตรวจสอบด้วยสายตา (Visual Inspection) เป็นส่วนใหญ่

### *2.2 การตรวจสอบฉุกเฉิน (Emergency Inspection)*

การตรวจสอบฉุกเฉินเป็นการตรวจสอบเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน ที่เกิดจากภัยพิบัติต่าง ๆ หรืออุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้น เช่น อุบัติเหตุรถยนต์ แผ่นดินไหว และ เพลิงไหม้ เป็นต้น เพื่อใหทราบถึงความสามารถในการใชงานของสะพาน สามารถกำหนดการบำรุงรักษาและวางแผนการซอมแซมเมื่อเกิดความเสียหายได้ในทันทวงที [11] โดยความถี่ในการตรวจสอบสำหรับโครงสร้างทุกสวน และสวนประกอบขึ้นกับความเสียหายที่เกิดขึ้น [12] โดยวิธีการตรวจสอบนั้นอาศัยวิธีเดียวกันกับการตรวจสอบประจำ

### *2.3 การตรวจสอบด้วยตาเปล่า (Visual Inspection)*

การตรวจสอบด้วยตาเปล่านั้นเป็นวิธีการประเมินขั้นแรกของการตรวจสอบโครงสร้างแต่ถือได้ว่ามีความสำคัญมากที่สุดในขั้นตอนหนึ่งก่อนที่จะทำการประเมินเพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำยิ่งขึ้น โดยประสิทธิภาพในการตรวจสอบจะขึ้นอยู่กับดุลพินิจความรู้ ความสามารถและประสบการณ์ของผู้ตรวจสอบเพื่อบ่งบอกถึงความเสียหายของโครงสร้างโดยภาพรวม[1] อย่างไรก็ตามการตรวจสอบด้วยตาเปล่าสามารถตรวจสอบวัสดุหรือพื้นผิวที่สามารถเข้าถึงและมองเห็นได้ เช่น รอยแตกร้าว การหลุดล่อน คราบสนิม และ อื่น ๆ

โดยการตรวจสอบด้วยตาเปล่าของสะพานนั้นจะต้องอาศัยกำลังคนในการเข้าถึงหากต้องวัดความเสียหายที่เกิดขึ้น เช่น การโรยตัว การใช้รถกระเช้า การใช้นั่งร้าน การนั่งเรือ เป็นต้น [2] ซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ตรวจสอบ โดยผู้ตรวจสอบจะต้องสังเกตเห็นถึงความเสียหายขนาดใหญ่จนถึงความเสียหายเล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดการละเลยได้ง่ายหากเข้าถึงได้ยากและอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ตรวจสอบ



รูปที่ 1 แสดงการตรวจสอบโครงสร้างสะพานโดยการใช้รถกระเช้าพิเศษ [2]

## 3. การตรวจสอบอากาศยานไร้คนขับ

ด้วยความสามารถในการเข้าถึงรวมไปถึงความสามารถในการสร้างแบบจำลองสามมิติที่มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบของอากาศยานไร้คนขับ สามารถแก้ไขปัญหาในอันตรายที่อาจก่อให้เกิดกับผู้ตรวจสอบรวมถึงความซับซ้อนในการตรวจสอบ

*3.1 การวางแผนการบิน*

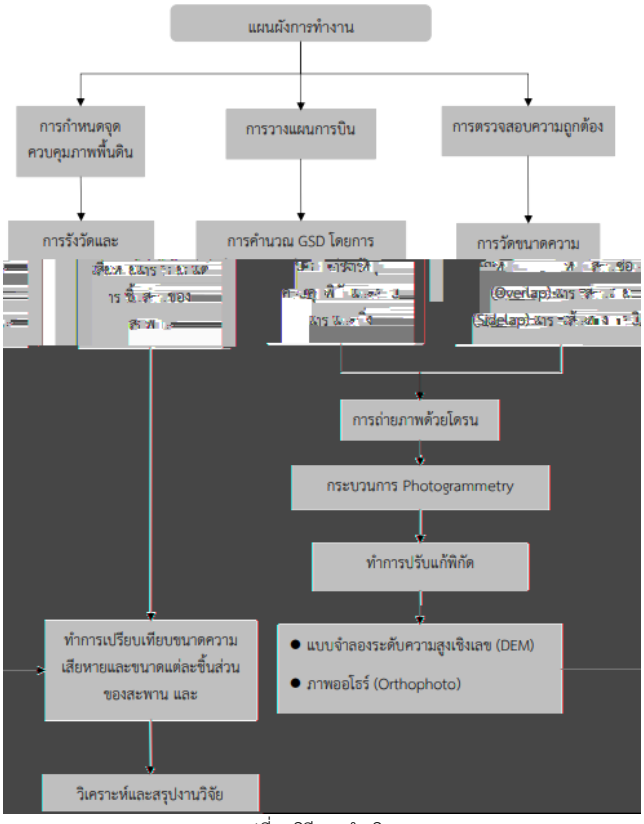
การวางแผนการบินเพื่อให้ได้ภาพถ่ายที่มีประสิทธิภาพเหมาะสมกับการตรวจสอบสะพาน ควรคำนึงถึงความละเอียดและความถูกต้องของข้อมูลที่ต้องการ โดยสามารถวางแผนการบินโดยโปรแกรมวางแผนการบิน DJI GS Pro เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองสามมิติ คุณภาพของแบบจำลองขึ้นอยู่กับความละเอียดจุด (Ground Sample Distance: GSD) ที่เป็นตัวบ่งบอกถึงความละเอียดของแบบจำลอง หากความสูงในการบินต่ำความละเอียดจุดก็จะสูง ทำให้จำนวนภาพที่ถ่ายและระยะเวลาในการบินเพิ่มมากขึ้น ซึ่งต้องทำการกำหนดความสูงที่เหมาะกับความละเอียดที่ต้องการสำหรับการตรวจสอบสะพาน อีกทั้งการกำหนดส่วนทับซ้อนไม่ว่าจะเป็น ส่วนซ้อน (Overlap) และส่วนเกย (Sidelap) เพื่อที่จะไม่ให้เกิดช่องโหว่ระหว่างการบินและครอบคลุมพื้นที่ทับซ้อนในการจับคู่รูปภาพในการประมวลผลสร้างแบบจำลองสามมิติ

*3.2 จุดควบคุมภาพถ่าย*

การกำหนดจุดควบคุมภาพถ่ายมีความสำคัญต่อคุณภาพเชิงตำแหน่งที่ช่วยในการประมวลผลปรับแก้ คำนวณค่าองค์ประกอบภายนอกของภาพและค่าการวางตัวของภาพถ่าย ซึ่งต้องมีลักษณะเห็นได้เด่นชัดบนภาพ มีการกระจายตัวอย่างที่เพียงพอครอบคลุมบริเวณที่ตรวจสอบ อีกทั้งตำแหน่งและการกระจายตัวของจุดควบคุมภาพถ่ายต้องเป็นไปตามการแบ่งประเภทกล้องถ่ายภาพและความถูกต้องเชิงตำแหน่งของพิกัดจุดถ่ายภาพ [9] ซึ่งตำแหน่งและความถูกต้องของพิกัดจุดควบคุมภาพถ่ายระบบนำทางด้วยดาวเทียม GNSS (Global Navigation Satellite System) โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นตัวรับสัญญาณเพื่อแสดงผลหรือพิกัดตำแหน่งที่ตัวรับสัญญาณตั้งอยู่ ซึ่ง GPS (Global poisoning system) เป็นระบบหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาของ GNSS โดยค่าพิกัดในระบบพิกัดภูมิประเทศเป็นตัวกลางที่ทำให้สามารถจัดภาพให้มีความสัมพันธ์อ้างอิงกับพื้นที่ภูมิประเทศ

## 4. วิธีการดำเนินงาน

ภาพรวมของงานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการตรวจสอบสะพานโดยใช้อากาศยานไร้คนขับเริ่มจากทำการวางจุดควบคุมภาพถ่าย ที่เหมาะสำหรับการสร้างแบบจำลองสามมิติของสะพานธนะรัชต์ การเปรียบเทียบขนาดหรือระยะต่าง ๆ ในส่วนบนของสะพานของแบบจำลองกับพื้นที่จริงที่วัดได้ ความเสียหายที่วัดได้ในพื้นที่จริงกับแบบจำลอง ซึ่งผังการทำงานมีขั้นตอนการดำเนินงานและรายละเอียดดังต่อไปนี้

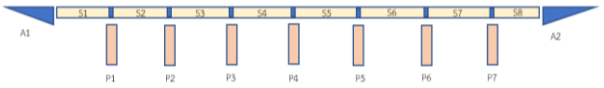



รูปที่ 2 วิธีการดำเนินงาน

*4.1 การตรวจสอบสะพาน*

*4.1.1 การกำหนดทิศทางและชิ้นส่วนของสะพาน*

สะพานจะถูกแบ่งออกเป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่เล็กลง เพื่อให้ง่ายต่อการอ้างอิงตำแหน่งต่าง ๆในสะพาน เช่น การระบุตำแหน่งความเสียหายที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นส่วนของสะพาน ซึ่งสะพานธนะรัชต์เป็นสะพานย่อยประกอบไปด้วยบริเวณต่าง ๆ เรียงต่อกันประกอบไปด้วย บริเวณเชิงลาดสะพาน (Approach: A) บริเวณช่วงสะพาน (Span: S) และ บริเวณตอม่อ (Pier: P) แสดงดังรูปที่ 3 และ 4




รูปที่ 3 ส่วนประกอบของสะพานธนะรัชต์




รูปที่ 4 การกำหนดรหัสส่วนประกอบด้านบนของสะพาน

*4.1.2 การวัดระยะความยาวและความกว้างสะพาน*

เนื่องจากความยากในการเข้าถึงพื้นที่เพื่อวัดระยะของสะพาน จึงทำให้ความสามารถในการเข้าถึงพื้นที่มีอย่างจำกัด ทำการวัดระยะความยาวและความกว้างชิ้นส่วนส่วนบนของสะพานด้วยเทปวัดระยะทั้งหมด 38 จุด แสดงดังรูปที่ 5



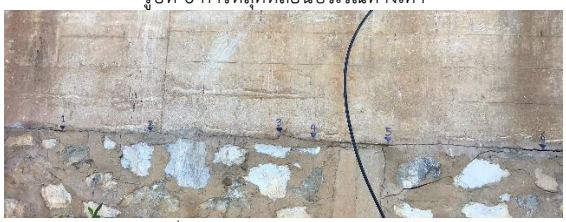
รูปที่ 5 ตำแหน่งระยะที่การวัดระยะเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง

*4.1.3 การวัดขนาดความเสียหาย*

เนื่องจากความสามารถในการเข้าถึงพื้นที่นั้นมีอย่างจำกัด ทำการวัดขนาดความเสียหายที่สามารถเข้าถึงเพื่อเปรียบเทียบความเสียหายที่วัดได้จากแบบจำลองกับพื้นที่จริง จึงสามารถทำการวัดความเสียหายที่เกิดขึ้นได้ในบริเวณ ทางเท้าและเสาตอม่อลำดับที่1 เป็นต้น



รูปที่ 6 การหลุดหล่อนบริเวณทางเท้า



รูปที่ 7 การแตกร้าวบริเวณเสาตอม่อ

*4.2 การตรวจสอบสะพานโดยอากาศยานไร้คนขับ*

*4.2.1 การรังวัดค่าพิกัดจุดควบคุมภาคพื้นดิน*

ในขั้นตอนนี้จะทำการวางจุดควบคุมภาพถ่ายโดยมีขนาด 30x30 เซนติเมตร วางบริเวณกึ่งกลางทางเดินเท้า ประกอบไปด้วยจุดควบคุมภาพถ่าย (Ground Control Point: GCP) และ จุดตรวจสอบ (Check Point: CP) รวมทั้งสิ้น 29 จุด มีจุดควบคุมภาพถ่าย 14 จุด และ จุดตรวจสอบ 15 จุด โดยจุดควบคุมภาพถ่ายจะมีการกระจ่ายสม่ำเสมอเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่การศึกษา ดังแสดงในรูปที่ 8




รูปที่ 8 ตำแหน่งจุดควบคุมภาคพื้นดิน

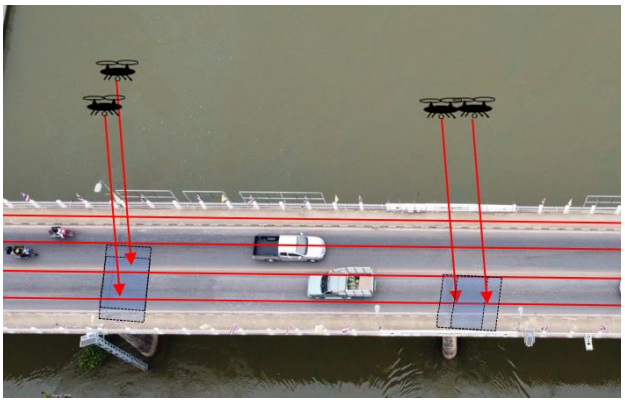
การรังวัดค่าพิกัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธี RTK โดยสถานีฐานจะถูกยึดไว้โดยพิกัดแนวราบจะถูกอ้างอิงตำแหน่งจากหมุดกรมแผนที่ทหาร และพิกัดแนวดิ่งจะถูกอ้างอิงที่ระดับน้ำทะเลปานกลาง



รูปที่ 9 การรังวัดค่าพิกัดจุดควบคุมภาคพื้นดินด้วยวิธีการ RTK

*4.2.2 การวางแผนการบินส่วนบนของสะพาน*

ใช้โปรแกรม DJI GS Pro เพื่อประมาณจำนวนเส้นทางการบินเบื้องต้น เนื่องจากสะพานธนะรัชต์ โดยปรับค่า Front Overlap Ratio : 80 % , Side Overlap Ratio : 80 % , Height : 20 m , Resolution : 0.5 cm/px , Camera model : Phantom 4 Pro V2 Camera



รูปที่ 10 ตัวอย่างการทับซ้อนและเส้นทางการบินส่วนบนของสะพาน




รูปที่ 11 การปรับค่า DJI GS Pro

*4.2.3 การวางแผนการบินส่วนล่างของสะพาน*

เมื่อสำรวจสะพานหน้างานจริงพบว่าอากาศยานไร้คนขับไม่สามารถทำการบินแบบอัตโนมัติได้ ผู้สำรวจต้องคอยควบคุมการบิน โดยในส่วนของด้านข้างสะพานจะแบ่งเส้นการบิน 6 เส้น แสดงในรูปที่ โดยระยะห่างระหว่างกล้องกับตัวสะพาน 8 เมตร ทำการบินด้วยความเร็วคงที่ที่ 2 เมตรต่อวินาที ทำการถ่ายรูปอัตโนมัติทุก ๆ 1 รูปต่อวินาที ระยะห่างแต่ละเส้นเส้นการบินอยู่ที่ 2.5 เมตร ซึ่ง 2 เส้นบนทำการปรับมุมกล้องลง 45 องศากับระนาบพื้น 2 เส้นล่างทำการปรับมุมกล้องขึ้น 10 องศากับระนาบพื้น เนื่องจากหากปรับองศาขึ้นมากกว่า 10 องศา ใบพัดอาจบดบังภาพถ่ายได้ ในส่วนของเสาตอม่อของสะพานเพื่อสร้างแบบจำลองจำเป็นต้องบิน 2 ด้านของเสาโดยแต่ละด้านมีเส้นการบิน 5 เส้น ไม่สามารถบินอัตโนมัติเช่นกัน ตัวอย่างการทับซ้อนและเส้นทางการบินส่วนข้างและเสาตอม่อของสะพานแสดงในรูปที่ 12 และ 13




รูปที่ 12 ตัวอย่างการทับซ้อนและเส้นทางการบินส่วนข้างของสะพาน

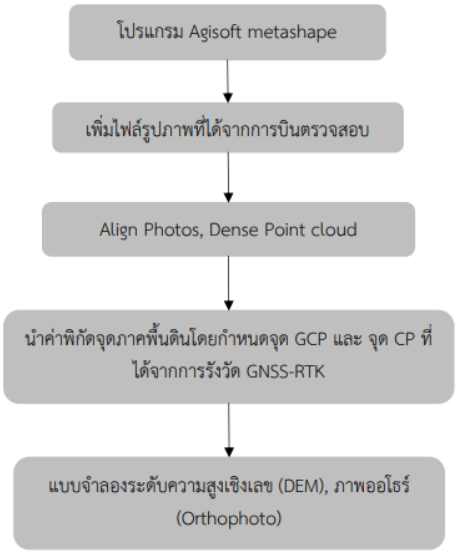


รูปที่ 13 ตัวอย่างการทับซ้อนและเส้นทางการบินส่วนเสาตอม่อของสะพาน

*4.2.4 การประมวลผล*

การสร้างแบบจำลองสามมิติของสะพานในงานวิจัยนี้ใช้ซอฟต์แวร์ Agisoft Meta Shape Professional ประมวลผลภาพจากการเก็บข้อมูลด้วยอากาศยานไร้คนขับ โดยใช้หลักการ Photogrammetry ในการจับคู่รูปภาพ Tie point เป็นรูปภาพที่มีความทับซ้อนในแนวดิ่ง และ ความทับซ้อนในแนวราบ อยู่ที่ 80% และ 80% ตามลำดับ ซึ่งจะได้ข้อมูลพิกัดจุดในรูปแบบจุดแบบก้อนเมฆสามมิติ (3D Point Cloud) จากนั้นทำการประมวลผลข้อมูลเชิงลึกของแต่ละรูปภาพที่มีจุดเมฆหนาแน่นมากขึ้น (Dense point Cloud) โดยในขั้นตอนนี้สามารถช่วยในการทราบถึงตำแหน่งของความเสียหายที่เกิดขึ้นกับสะพานได้ จากนั้นทำการใส่ค่าพิกัดจุดควบคุมภาพถ่าย (Ground Control Point: GCP) และ จุดตรวจสอบ (Check Point: CP) เพื่อตึงแบบจำลองให้มีขนาดและพิกัดใกล้เคียงกับความเป็นจริง

จากนั้นทำการสร้างแบบจำลองระดับความสูงเชิงตัวเลข (DEM) เพื่อสร้างภาพออร์โธ (Orthophoto) โดยส่วนบนและส่วนข้างของสะพานมีความละเอียดเท่ากับ 4.57 mm/pix และ ส่วน เสาตอม่อที่ 1 มีความละเอียดสูงเท่ากับ 2.49 mm/pix ใช้ในการตรวจสอบด้วยตาเปล่า (Visual Inspection) โดยสามารถหาความกว้างหรือปริมาณความเสียหาย โดยเลือกใช้โปรแกรม QGIS เป็นโปรแกรมด้านสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) โดยเครื่องมือ Measure เพื่อวัดขนาดความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยอิงตำแหน่งพิกัด GIS ในภาพ และความสามารถในการจัดเก็บข้อมูลเพื่อใช้พิจารณาในการตรวจสอบ

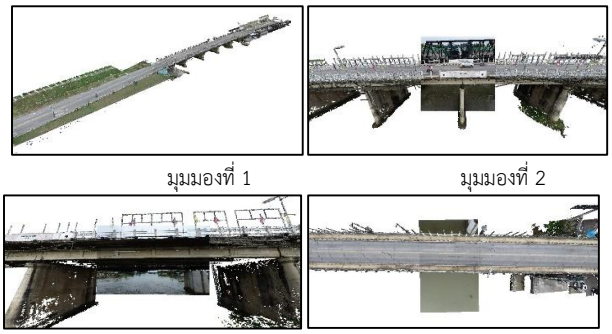



รูปที่ 14 การประมวลผล Agisoft Meta Shape Professional

## 5. ผลการศึกษา

*5.1 ผลการสร้างแบบจำลอง*

แบบจำลองจุดเมฆหนาแน่นสามารถใช้ในการสำรวจความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวสะพานด้วยคำสั่ง Show Images ดังแสดงในรูปที่ ในส่วนบนและส่วนข้างของสะพาน มีค่า Root Mean Square Error (RMSE) ในแนวราบและแนวดิ่ง เท่ากับ 0.851 และ 0.992 cm ตามลำดับ



มุมมองที่ 1 มุมมองที่ 2

มุมมองที่ 3 มุมมองที่ 4

รูปที่ 15 แบบจำลองจุดเมฆหนาแน่น (Dense Point Cloud)

ภาพออโธร์ส่วนบนและข้างของสะพานมีความละเอียดสูงถึง 4.57 mm/pix ซึ่งสามารถตรวจสอบความเสียหายไม่ว่าจะเป็น การหลุดหล่อนของคอนกรีต การสึกกร่อนของคอนกรีต การสูญเสียหน้าตัดผิวทางแอสฟัลต์ระยะรอยต่อเคลื่อนขยาย โดยในรูปที่ 16 และ ตารางที่ 1 แสดงถึงตำแหน่งและรายละเอียดความเสียหายของส่วนบนของสะพาน




ฝั่งค่ายภาณุรังสี ฝั่งตลาดราชบุรี

รูปที่ 16 ตัวอย่างตำแหน่งความเสียหายแต่ละรูปแบบส่วนบนของสะพาน

ตารางที่ 1 ตัวอย่างรายละเอียดความเสียหายของส่วนบนของสะพาน

| ลำดับ | ตำแหน่ง | รูปความเสียหาย | ลักษณะความเสียหาย |
|---|---|---|---|
| 1 | A1-EJ1 |  | มีรอยแตกบิ่นกะเทาะกว้างเฉลี่ย 22 มิลลิเมตรตามคู่มือการตรวจสอบและประเมินสภาพความเสียหายของผิวทาง [13] มีระดับความรุนแรงสูง ควรทำการขุดซ่อม |
| 2 | P5-EJ1 |  | รอยต่อเผื่อขยายThe Strip Seal เป็นรอยต่อขนาดกลางสามารถขยายตัวได้สูงสุด 125 มิลลิเมตร [14] เป็นโดยสามารถวัดได้การขยายตัวสูงสุด 14 มิลลิเมตร |
| 3 | S7-WS2 |  | เกิดการหลุดล่อนเล็กน้อยไม่เห็นเหล็กเสริมขนาด 0.11และ 0.173 ตารางเมตร อยู่ในเกณฑ์พอใช้ทำการซ่อมบำรุงตามกำหนดเวลาตามคู่มือการตรวจสอบสะพาน [2] |
| 4 | AP2-SW1 |  | มีการสูญเสียหน้าตัดคิดเป็น 13 %ของหน้าตัดทั้งหมดอยู่ในเกณฑ์พอใช้ทำการซ่อมบำรุงตามกำหนดเวลาตามคู่มือการตรวจสอบสะพาน [2] |

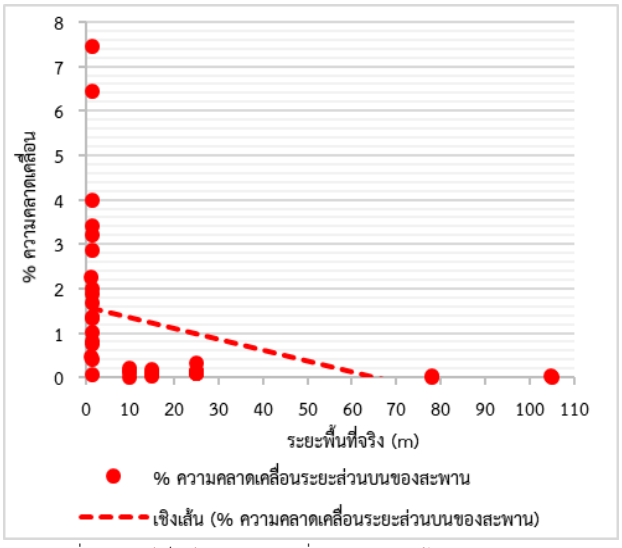
| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 18 | 24.996 | 25.033 | 0.037 | 0.148 |
| 19 | 1.291 | 1.285 | 0.006 | 0.464 |
| 20 | 1.326 | 1.296 | 0.030 | 2.262 |
| 21 | 24.964 | 24.986 | 0.022 | 0.088 |
| 22 | 24.954 | 24.987 | 0.033 | 0.132 |
| 23 | 1.463 | 1.513 | 0.050 | 3.417 |
| 24 | 1.509 | 1.412 | 0.097 | 6.428 |
| 25 | 24.936 | 24.958 | 0.022 | 0.088 |
| 26 | 24.91 | 24.94 | 0.030 | 0.120 |
| 27 | 1.458 | 1.47 | 0.012 | 0.823 |
| 28 | 1.501 | 1.389 | 0.112 | 7.461 |
| 29 | 15.02 | 15.045 | 0.025 | 0.166 |
| 30 | 15.02 | 15.038 | 0.018 | 0.119 |
| 31 | 1.487 | 1.459 | 0.028 | 1.882 |
| 32 | 1.498 | 1.478 | 0.020 | 1.335 |
| 33 | 9.972 | 9.984 | 0.012 | 0.120 |
| 34 | 9.984 | 10 | 0.016 | 0.160 |
| 35 | 1.485 | 1.47 | 0.015 | 1.010 |
| 36 | 1.502 | 1.454 | 0.048 | 3.195 |
| 37 | 78.072 | 78.095 | 0.023 | 0.029 |
| 38 | 78.066 | 78.073 | 0.007 | 0.008 |
| Max | | | | 7.461 |
| Min | | | | 0.008 |
| Average | | | | 1.143 |

*5.2 ความคลาดเคลื่อนการวัดระยะแต่ละจุดของส่วนบน*

จากการวัดระยะในโปรแกรม QGIS เทียบกับระยะพื้นที่จริงวัดด้วยเทปวัดระยะ โดยมีทั้งหมด 38 จุด มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 7.461% เปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนน้อยสุดเท่ากับ 0.008 % และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 1.143 % โดยค่าความเคลื่อนที่วัดได้จากโปรแกรม QGIS กับระยะพื้นที่จริงแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความกว้างและยาวส่วนบนสะพาน จากโปรแกรม **QGIS** กับ พื้นที่จริง

| ลำดับ | ระยะพื้นที่จริง (m) | UAV-QGIS (m) | Error (m) | %Error |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 104.95 | 104.98 | 0.030 | 0.028 |
| 2 | 105.1 | 105.119 | 0.019 | 0.018 |
| 3 | 1.498 | 1.492 | 0.006 | 0.400 |
| 4 | 1.478 | 1.503 | 0.025 | 1.691 |
| 5 | 10.02 | 9.999 | 0.021 | 0.209 |
| 6 | 9.97 | 9.971 | 0.001 | 0.010 |
| 7 | 1.47 | 1.469 | 0.001 | 0.068 |
| 8 | 1.494 | 1.464 | 0.030 | 2.008 |
| 9 | 14.985 | 14.977 | 0.008 | 0.053 |
| 10 | 14.962 | 14.967 | 0.005 | 0.033 |
| 11 | 1.474 | 1.485 | 0.011 | 0.746 |
| 12 | 1.482 | 1.423 | 0.059 | 3.981 |
| 13 | 24.906 | 24.939 | 0.033 | 0.132 |
| 14 | 24.91 | 24.99 | 0.080 | 0.321 |
| 15 | 1.463 | 1.505 | 0.042 | 2.870 |
| 16 | 1.483 | 1.463 | 0.020 | 1.348 |
| 17 | 24.99 | 25.013 | 0.023 | 0.092 |




รูปที่ 17 เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความกว้างและยาวแต่ละช่วงของสะพาน

*5.3 ความคลาดเคลื่อนความเสียหาย*

จากการวัดระยะความเสียหายในโปรแกรม QGIS เทียบกับระยะที่เกิดขึ้นจริงด้วยเวอร์เนียร์และตลับเมตร โดยมีความเสียหายทั้งหมด 26 จุด แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ความเสียหายที่เกิดขึ้นบนเสาตอม่อที่ 1 โดยภาพออร์โธมีความละเอียด 2.49 pix/mm โดยค่าความเคลื่อนที่วัดได้จากโปรแกรม QGIS กับความเสียหายพื้นที่จริงแสดงในตารางที่ 3 และ ความเสียหายที่เกิดขึ้นส่วนบนของสะพานโดยภาพออร์โธมีความละเอียด 4.57 pix/mm โดยค่าความเคลื่อนที่วัดได้จากโปรแกรม QGIS กับความเสียหายพื้นที่จริงแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนความเสียหายส่วนเสาตอม่อที่ 1 ที่วัดได้จากโปรแกรม QGIS กับ พื้นที่จริง

| GSD (mm/pix) | ตำแหน่ง | รูปแบบความเสียหาย | ระยะพื้นที่จริง (cm) | UAV-QGIS (cm) | %Error |
|---|---|---|---|---|---|
| 2.49 | P1-BC1(1) | รอยแตก | 0.85 | 0.6 | 29.41 |
| | P1-BC1(2) | รอยแตก | 0.43 | 0.5 | 16.28 |
| | P1-BC1(3) | รอยแตก | 0.39 | 0.5 | 28.21 |
| | P1-BC1(4) | รอยแตก | 1.52 | 1.3 | 14.47 |
| | P1-BC1(5) | รอยแตก | 1.17 | 1 | 14.53 |
| | P1-BC1(6) | รอยแตก | 0.74 | 0.6 | 18.92 |
| Max | | | | | 29.41 |
| Min | | | | | 14.47 |
| Average | | | | | 20.30 |

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบความคลาดเคลื่อนความเสียหายส่วนบนของสะพานที่วัดได้จากโปรแกรม QGIS กับ พื้นที่จริง

| GSD (mm/pix) | ตำแหน่ง | รูปแบบความเสียหาย | ระยะพื้นที่จริง (cm) | UAV-QGIS (cm) | %Error |
|---|---|---|---|---|---|
| 4.57 | S8-WS2(L) | หลุดหล่อน | 54.7 | 54.2 | 0.91 |
| | S8-WS2(W) | หลุดหล่อน | 29.5 | 27.9 | 5.42 |
| | S8-WS2(L) | หลุดหล่อน | 104 | 104.8 | 0.77 |
| | S8-WS2(W) | หลุดหล่อน | 24.6 | 22 | 10.57 |
| | A2-WS2(L) | หลุดหล่อน | 44.7 | 46.5 | 4.03 |
| | A2-WS2(W) | หลุดหล่อน | 24.3 | 25.4 | 4.53 |
| | P1-SW1 | ระยะห่างรอยต่อ | 0.72 | 0.8 | 11.11 |
| | P2-SW1 | ระยะห่างรอยต่อ | 1.13 | 0.8 | 29.20 |
| | P3-SW1 | ระยะห่างรอยต่อ | 2.16 | 1.9 | 12.04 |
| | P4-SW1 | ระยะห่างรอยต่อ | 1.45 | 1.4 | 3.45 |
| | P5-SW1 | ระยะห่างรอยต่อ | 1.62 | 2.1 | 29.63 |
| | P6-SW1 | ระยะห่างรอยต่อ | 1.97 | 1.6 | 18.78 |
| | P7-SW1 | ระยะห่างรอยต่อ | 1.29 | 1.3 | 0.78 |
| | P1-SW2 | ระยะห่างรอยต่อ | 0.475 | 0.5 | 5.26 |
| | P2-SW2 | ระยะห่างรอยต่อ | 1.35 | 1.4 | 3.70 |
| | P3-SW2 | ระยะห่างรอยต่อ | 0.96 | 1.1 | 14.58 |
| | P4-SW2 | ระยะห่างรอยต่อ | 1.74 | 1.4 | 19.54 |
| | P5-SW2 | ระยะห่างรอยต่อ | 2.38 | 2.2 | 7.56 |
| | P6-SW2 | ระยะห่างรอยต่อ | 2.185 | 1.9 | 13.04 |
| | P7-SW2 | ระยะห่างรอยต่อ | 1.62 | 1.7 | 4.94 |
| Max | | | | | 29.63 |
| Min | | | | | 0.77 |
| Average | | | | | 9.99 |

หมายเหตุ: L หมายถึง ความยาวของความเสียหาย
W หมายถึง ความกว้างของความเสียหาย

พบว่าในการตรวจสอบความเสียหายขนาดใหญ่ในส่วนของการหลุดหล่อนของคอนกรีตทั้งหมด 6 จุด มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 10.57% เปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนน้อยสุดเท่ากับ 0.77 % และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 4.37 % และ ในการตรวจสอบความเสียหายขนาดเล็ก ไม่ว่าจะเป็น รอยแตกร้าวของคอนกรีต และ ระยะห่างรอยต่อทางเท้าทั้งหมด 23 จุด มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 29.63 % เปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนน้อยสุดเท่ากับ 0.78 % และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 14.53 % โดยความเสียหายทั้งหมดมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 12.37 % เปรียบเทียบกับความเสียหายที่เกิดขึ้นจริงบนสะพาน

## 6. สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาการตรวจสอบสะพานด้วยเทคโนโลยีอากาศยานไร้คนขับ พบว่า สามารถสร้างแบบจำลองสามมิติ มีค่า Root Mean Square Error (RMSE) ในแนวราบและแนวดิ่ง เท่ากับ 0.851 cm และ 0.992 cm ตามลำดับ ในส่วนของการประเมินความถูกต้องของระยะแต่ละจุดของแบบจำลองที่วัดจากภาพออร์โธด้วยโปรแกรม QGIS กับพื้นที่จริงพบว่า มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 1.14 % โดยในรูปที่ 17 แสดงถึงแนวโน้มของระยะของสะพานที่วัดจากภาพออร์โธกับพื้นที่จริงหากระยะยิ่งมากเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนยิ่งน้อย ในส่วนของการประเมินความถูกต้องของความเสียหายของสะพานที่วัดจากภาพออร์โธด้วยโปรแกรม QGIS กับความเสียหายพื้นที่จริง พบว่าความเสียหายที่เกิดขึ้นบนเสาตอม่อที่ 1 โดยภาพออร์โธความละเอียด 2.49 pix/mm มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 20.30 % และ ความเสียหายที่เกิดขึ้นส่วนบนของสะพานโดยภาพออร์โธร์ความละเอียด 4.57 pix/mm มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 9.99 % พบว่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนในการตรวจสอบความเสียหายนั้นมีความสัมพันธ์กับขนาดความเสียหายที่เกิดขึ้นจริง สามารถวัดความเสียหายที่มีขนาดใหญ่ได้ใกล้เคียงกับพื้นจริง โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความเสียหายขนาดใหญ่เฉลี่ยอยู่ที่ 4.37 % ซึ่งความเสียหายขนาดเล็กไม่ว่าจะเป็น รอยแตกร้าวของคอนกรีตและระยะห่างรอยต่อ มีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของความเสียหายขนาดเล็กเฉลี่ยอยู่ที่ 14.53 % โดยความเสียหายทั้งหมดมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 12.37 % เปรียบเทียบกับความเสียหายที่เกิดขึ้นจริงบนสะพาน ดังนั้นการตรวจสอบสะพานด้วยอากาศยานไร้คนขับสามารถตอบโจทย์ในการเข้าถึงพื้นที่ที่ยากจะเข้าถึงและการสร้างแบบจำลองสามมิติที่ช่วยในการตรวจสอบอีกทั้งการสร้างภาพออร์โธของส่วนบนของสะพาน ส่วนข้างของสะพาน และเสาตอม่อของสะพาน ที่สามารถวัดขนาดความเสียหายทดแทนการใช้กำลังคนในการเข้าถึง แต่อย่างไรก็ตามการวัดความเสียหายขนาดเล็กอาจมีความคลาดเคลื่อนที่สูงเนื่องจากหลายสาเหตุ ไม่ว่าจะเป็นการไม่กำหนดจุดควบคุมภาพถ่าย (Ground Control Point: GCP) ในส่วนล่างของสะพาน ข้อจำกัดความสูงในการบินเนื่องจากมีการจราจรบนถนนตลอดเวลา แสงสว่างในพื้นที่ไม่เพียงพอ ส่งผลให้ขนาดความละเอียดจุด (Ground Sample Distance: GSD) มีขนาดสูงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการตรวจสอบ หากทำการแก้ไขปัจจัยดังกล่าวสามารถเพิ่มคุณภาพของแบบจำลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบให้ความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูงที่สละเวลาและช่วยเหลือให้คำปรึกษาสำหรับใช้ในการศึกษาวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้และผู้ที่เกี่ยวข้องหลายท่านที่ช่วยในการลงพื้นที่และให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์

ขอขอบคุณแขวงทางหลวงราชบุรี กรมทางหลวงที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการบินอากาศยานไร้คนขับเพื่อตรวจสอบสะพาน

## เอกสารอ้างอิง

[1] กรมโยธาธิการและผังเมืองกระทรวงมหาดไทย. (2551). มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย มยผ. 1501-51, หน้า 1-6.

[2] มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. (2555). คู่มือการสำรวจและตรวจสอบสะพานโครงการศึกษาและพัฒนาระบบการบริหารงานบำรุงรักษาสะพาน, หน้า 41-288.

[3] Ayele, Y.Z., et al.. (2020). Automatic crack segmentation for UAV-assisted bridge inspection. Energies, 13(23): p. 6250.

[4] Seo, J., L. Duque, and J. Wacker. (2020). *Drone-enabled bridge inspection methodology and application.* Automation in Construction, 94: p. 112-126.

[5] อนุกรรมการพัฒนาระบบประกันคุณภาพของกรมทางหลวงชนบทด้านบำรุงรักษาและอำนวยความปลอดภัย. (2560). คู่มือระบบประกันคุณภาพ (*Quality Assurance)* ของกรมทางหลวงชนบทด้านบำรุงรักษาและอำนวยความปลอดภัย, หน้า 3-43.

[6] Zhao, S., et al.. (2021). Structural health monitoring and inspection of dams based on UAV photogrammetry with image 3D reconstruction. Automation in Construction, 130: p. 103832.

[7] Rakha, T. and A. Gorodetsky. (2020). Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones. Automation in Construction, 93: p. 252-264.

[8] Varbla, S., A. Ellmann, and R. Puust. (2021). *Centimetre-range deformations of built environment revealed by drone-based photogrammetry.* Automation in Construction, 128: p. 103787.

[9] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2561). มาตรฐานการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่องานวิศวกรรม, หน้า 55-72.

[10] Mandirola, M., et al.. (2022). *Use of UAS for damage inspection and assessment of bridge infrastructures.* International Journal of Disaster Risk Reduction, 72: p. 102824.

[11] กรมทางหลวง. (2549). คู่มือการตรวจสอบ วิเคราะห์และประเมินกำลังรับน้ำหนักของสะพาน (Bridge Inspection Analysis and Evaluation Manual), หน้า 6-8.

[12] กระทรวงมหาดไทย. (2549). มาตรฐานสะพาน กรมส่งเสริมการปกครองท้องถิ่น, หน้า 109-132.

[13] กรมทางหลวง, คู่มือตรวจสอบและประเมินสภาพความเสียหายของผิวทาง (Pavement distress identification manual), หน้า 6-37.

[14] Limited, S.I. *Strip Seal (Single Seal) Joints*. Available from: https://sanfieldindia.in/browse/page/SingleSealjoints.