

ข้อมูลการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์แบบภาคพื้นดินสำหรับการติดตามและตรวจสอบสภาพสะพานพระราม 9

TERRESTRIAL LASER SCANNING DATA FOR MONITORING AND INSPECTION OF RAMA IX CABLE-STAYED BRIDGE

ชานาธิป บินซาอิส^{1*}, พีรสิทธิ์ มหาสุวรรณชัย¹, ชัยณรงค์ อธิสกุล¹ และสุทัศน์ ลีลาพิวัฒน์¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

*Corresponding author address: Chanatip.binz@mail.kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์สำหรับการติดตามและตรวจสอบสภาพสะพานซึ่ง กรณีศึกษา สะพานพระราม 9 ซึ่งเป็นหนึ่งในสะพานที่เชื่อมต่อระหว่างฝั่งกรุงเทพและธนบุรีที่มีความสำคัญ และเป็นส่วนหนึ่งของทางพิเศษเฉลิมมหานคร โดยเปิดใช้งานครั้งแรกตั้งแต่ปีพ.ศ. 2530 การติดตามสภาพโครงสร้างและการตรวจสอบอย่างเหมาะสมเป็นหนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญในการยืนยันเสถียรภาพของสะพานรวมทั้งความปลอดภัยของผู้ใช้งาน งานวิจัยนี้ใช้เครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยเลเซอร์แบบภาคพื้นดินในการเก็บข้อมูลพิกัดสภาพพื้นผิวปัจจุบันของสะพานพระราม 9 และนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลและสร้างเป็นแบบจำลองสภาพปัจจุบันในรูปแบบของข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติของสะพานพระราม 9 จากนั้นนำมาวิเคราะห์เพื่อประเมินขนาดมิติ ค่าระดับ ความชัน ภาพตัดของสะพานพระราม 9 โดยในท้ายที่สุดจะแสดงศักยภาพของการใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุด้วยแสงเลเซอร์ในการวัดเส้นโค้งหย่อนตัวของเคเบิลเป็นประเด็นสำคัญ

คำสำคัญ: ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ, การติดตามและตรวจสอบสภาพ, เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์แบบภาคพื้นดิน, สะพานซึ่ง, สะพานพระราม 9

Abstract

This research presents the application of the 3D Laser Scanning Technology for monitoring and inspection of Cable-stayed bridge. The Rama IX bridge is selected as the case study. The Rama IX bridge is the main connector bridge between Thonburi and Bangkok sides, as a part of the first Expressway in Thailand since 1987. The structure health monitoring and inspection is an essential process to ensure the bridge's safety and serviceability. This research applied the terrestrial laser scanner to collect the current three-dimensional surface configurations of the Rama IX bridge. According to the scanning data, the 3D point cloud model of the bridge can be developed. The current dimensions, elevations, slope, and the bridge's cross-section are then presented. Finally, the potential of using laser scanning data for cable configuration measurement is also highlighted.

Keywords: 3D point cloud model, Cable-stayed bridge, Monitoring and Inspection, RAMA IX bridge, Terrestrial Laser Scanning

1. บทนำ

สะพานพระราม 9 (RAMA IX Bridge) เป็นหนึ่งในสัญลักษณ์สำคัญของกรุงเทพมหานคร โดยเป็นส่วนหนึ่งของทางพิเศษเฉลิมมหานครซึ่งเป็นทางพิเศษสายแรกของประเทศไทยในสวนดาวคะนอง-ท่าเรือ เปิดบริการตั้งแต่ปีพ.ศ. 2530 ทำหน้าเป็นสะพานเชื่อมต่อ 2 ฝั่งของกรุงเทพมหานคร โดยสะพานพระราม 9 เป็นสะพานซึ่งชนิดระนาบเดียวแบบสมมาตร โดยมีความยาวช่วง 782 เมตร และมีความสูงระยะลอด 41 เมตรจากระดับน้ำทะเลสูงสุด แบ่งออกเป็นช่วงกลางสะพานเป็นโครงสร้างเหล็กแบบกล่อง (Box Girder) ที่ยึดตั้งด้วยเคเบิลจำนวน 68 เส้นและยึดกับเสาซึ่ง (Pylon) จำนวน 2 ต้น มีความยาว 450 เมตร ส่วนเชิงสะพานเป็นโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีความยาว 166 เมตร [1]

เนื่องจากสภาพการจราจรที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องสะพานพระราม 9 ซึ่งเป็นหนึ่งในเส้นทางหลักในกรุงเทพมหานครนั้นจึงมีสภาพการจราจรที่หนาแน่น อีกทั้งอายุการใช้งานที่เพิ่มมากขึ้น ทำ

ให้จำเป็นต้องมีการตรวจสอบและติดตามสภาพของโครงสร้าง รวมถึงบำรุงรักษาอย่างต่อเนื่อง เพื่อเป็นการยืนยันเสถียรภาพและ ความปลอดภัยของผู้ใช้บริการ

เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์เป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพอย่างสูงในด้านการเก็บข้อมูลสภาพปัจจุบันของโครงสร้างในรูปแบบข้อมูล 3 มิติ การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุด้วยแสงเลเซอร์ในงานด้านวิศวกรรมโยธามีจำนวนเพิ่มขึ้นในหลากหลายมิติ [2] ทั้งในด้านการติดตามและประเมินสภาพโครงสร้างที่มีความสำคัญทางประวัติศาสตร์ เช่น มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ประเทศเยอรมัน[3], หอคอย Shukhov Hyperboloid Tower ประเทศรัสเซีย[4] และโบราณสถานของไทย[5] เป็นต้น งานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเก็บข้อมูลของโครงสร้างขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อนและมีความสำคัญทางประวัติศาสตร์ และสามารถนำมาใช้เป็นฐานข้อมูลประกอบการบำรุงรักษาในอนาคตต่อไป อีกทั้งยังมีความละเอียดสูงสามารถนำมาให้เป็นแบบจำลองใน

การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์

สำหรับงานโครงสร้างสะพานพบว่ามีการใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติเก็บข้อมูลของสะพานต่าง ๆ เช่น สะพานเหล็กโบราณในประเทศโปแลนด์ และวิเคราะห์ขนาดมิติเทียบกับกล้องประมวลผลรวม [6] การเก็บข้อมูล 3 มิติของสะพานเดินเท้าแบบสะพานซิงและนำมาสร้างเป็นโมเดล 3 มิติสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ [7]

จากตัวอย่างงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติมีประสิทธิภาพในด้านการเก็บข้อมูลสภาพปัจจุบันของโครงสร้างเพื่อติดตามและตรวจสอบสภาพโครงสร้างรวมถึงสะพานได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเทคนิคเพื่อใช้ตรวจสอบรอยแตกของสะพานคอนกรีต การหลุดร่อนของผิวคอนกรีต ประเมินการเสียวรูปของสะพาน ตลอดจนนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองในการวิเคราะห์ผลตอบสนองของโครงสร้างในสภาวะใช้งานได้ [2], [6] - [8]

ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติมาใช้เก็บข้อมูลสภาพปัจจุบันของโครงสร้างสะพานซึ่งในประเทศไทย ด้วยความอนุเคราะห์จากการทางพิเศษแห่งประเทศไทยทำให้คณะผู้วิจัยสามารถเก็บข้อมูลของสะพานพระราม 9 บางส่วนได้เป็นกรณีศึกษา โดยการศึกษาครั้งนี้จะนำเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์มาประยุกต์ใช้ในการติดตามและตรวจสอบสภาพของสะพานพระราม 9 ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ โดยมีเป้าหมายในการศึกษาวิธีการจัดทำและวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มจุดได้จากเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์แบบภาคพื้นดิน เพื่อการประเมินสภาพปัจจุบันของโครงสร้างประเภทสะพานซิง โดยจะแสดงผลการตรวจสอบขนาดมิติต่าง ๆ ค่าระดับ ความชัน และตำแหน่งพิกัดบนเส้นโค้งสายเคเบิล ซึ่งวิธีการและข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อการประเมินและติดตามสภาพโครงสร้างสะพานพระราม 9 ในระยะยาว

2. เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์

เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ ด้วยแสงเลเซอร์เป็นเทคโนโลยีที่ใช้หลักการเดินทางและการสะท้อนกลับของแสงเลเซอร์ที่กระทบผิววัตถุในการเก็บข้อมูลพิกัดพื้นผิวของวัตถุเทียบกับตำแหน่งจุดตั้งเครื่องมือ โดยข้อมูลที่ได้จะเป็นข้อมูลดิจิทัลในรูปแบบของจุดบนพิกัด 3 มิติ (x, y, z) ที่สัมพันธ์กับตำแหน่งของเครื่องมือ ทำให้ได้ข้อมูลพิกัดของพื้นที่และวัตถุที่สนใจจำนวนมากในระยะเวลาอันสั้น โดยข้อมูลที่ได้จากเทคโนโลยีนี้เมื่อนำมาประมวลผลและวิเคราะห์ข้อมูลอย่างถูกต้องแล้วจะให้ผลการสำรวจที่เที่ยงตรงและแม่นยำ [9]

การศึกษานี้จะใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติแบบภาคพื้นดิน (Terrestrial Laser Scanning; TLS) ดังรูปที่ 1 เป็นเครื่องมือในการสำรวจสะพานพระราม 9 โดยเครื่องมือนี้จะทำการเก็บข้อมูลโดยรอบจุดตั้งเครื่องมือ 360 องศาในทิศทางแนวราบ

และ 300 องศาในทิศทางแนวตั้ง โดยการเก็บข้อมูลพื้นที่หรือส่วนต่าง ๆ ของวัตถุที่สนใจให้ครบถ้วนนั้นจำเป็นต้องมีกำหนดจุดตั้งเครื่องมือให้เป็นโครงข่ายเชื่อมต่อกันอย่างเหมาะสม ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของข้อมูล ได้แก่ สภาพแวดล้อมของวัตถุ สมบัติของวัตถุ ทั้งรูปทรงและวัสดุที่ใช้ ประสิทธิภาพของเครื่องมือ พารามิเตอร์ด้านความละเอียดและคุณภาพของการเก็บข้อมูลที่กำหนดขึ้นสำหรับแต่ละงาน ตำแหน่งที่ตั้งเครื่องมือ และจำนวนจุดที่ตั้งข้อมูล เป็นต้น [10] - [11]



รูปที่ 1 เครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์แบบภาคพื้นดิน ยี่ห้อ FARO รุ่น Focus 3Dx330

3. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การศึกษานี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์แบบภาคพื้นดินในการสำรวจและเก็บข้อมูลสภาพปัจจุบันของสะพานพระราม 9 และประเมินประสิทธิภาพของข้อมูลที่ได้จากเทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติ เพื่อการตรวจสอบและติดตามสภาพของโครงสร้างสะพานซิง พร้อมทั้งจัดเก็บเป็นฐานข้อมูลสภาพปัจจุบันในรูปแบบของแบบจำลองกลุ่มจุด 3 มิติ ซึ่งสามารถแบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ขั้นตอนการสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนาม ขั้นตอนการประมวลผลข้อมูลกลุ่มเพื่อสร้างเป็นแบบจำลองของสะพานพระราม 9 ในรูปแบบข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ และขั้นการวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มจุดของสะพานพระราม 9

3.1. การสำรวจและเก็บข้อมูลภาคสนาม

การลงพื้นที่สำรวจและเก็บข้อมูลสะพานพระราม 9 จะอาศัยเครื่องสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์แบบภาคพื้นดินยี่ห้อ FARO รุ่น Focus 3Dx330 โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ ค่าความละเอียดของจุด (Resolution) ไว้ที่ประมาณ 28 ล้านจุดต่อจำนวน 1 จุดตั้งกล้อง ค่าความเร็วที่ใช้ในการเก็บข้อมูลอยู่ที่ 122,000 จุดต่อวินาที และระยะห่างระหว่างจุด 2 จุดที่ ระยะ 10 เมตร อยู่ที่ระยะ 7.67 มิลลิเมตร โดยได้ทำการเก็บข้อมูลบนสะพานพระราม 9 บริเวณเกาะกลางสะพานตั้งแต่จุดยึดเคเบิลเส้นที่ 1 ฝั่งกรุงเทพฯ จนถึงเคเบิลเส้นที่ 43 ก่อนถึงเสาซึ่งฝั่งธนบุรี รูปที่ 2 แสดงภาพการ

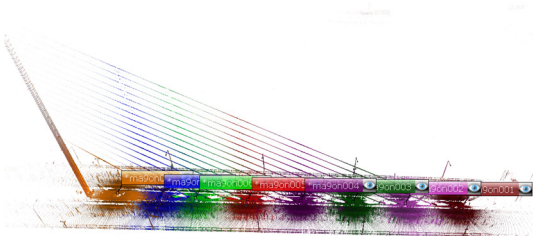
เก็บข้อมูลบนสะพานพระราม 9 บริเวณเกาะกลางสะพานใกล้กับเสา
ชิงตันที่ 1 ฟังกรูเทพมหานคร



รูปที่ 2 การลงพื้นที่เก็บข้อมูล ณ สะพานพระราม 9

3.2. การประมวลผลรวมข้อมูล

ในการประมวลผลเพื่อสร้างแบบจำลองข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติของ
สะพานพระราม 9 ในครั้งนี้เลือกวิธีการประมวลผลข้อมูลโดยอาศัย
การซ้อนทับการของภาพ เนื่องจากการทำงานบนสะพานพระราม 9
ไม่เหมาะสมกับการจัดวางอุปกรณ์เป้าต่าง ๆ เพิ่มเติม โดยจะนำ
ข้อมูลที่ได้มาประมวลผลด้วยโปรแกรมเฉพาะทางที่เกี่ยวข้องกับการ
จัดการและประมวลผลเชื่อมต่อข้อมูลกลุ่มจุดพิกัด 3 มิติ ซึ่ง
การศึกษานี้ใช้โปรแกรม FARO SCENE ในการประมวลผล



รูปที่ 3 การลงพื้นที่เก็บข้อมูล ณ สะพานพระราม 9

รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างภาพการประมวลเพื่อเชื่อมต่อข้อมูลกลุ่ม
จุดในโปรแกรม FARO SCENE บริเวณจุดยึดเคเบิลเส้นที่ 1 - 17
ก่อนถึงเสาชิงตันฟังกูเทพมหานคร หลังจากทำการเชื่อมต่อข้อมูลและ
สร้างแบบจำลองในรูปแบบข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ จะทำการตรวจสอบ
ความถูกต้องของข้อมูลกลุ่มจุด โดยจะทำการตรวจสอบการเชื่อมต่อกัน
ของข้อมูลว่าถูกต้องหรือไม่ ซึ่งผลลัพธ์ความคลาดเคลื่อนจากการ
เชื่อมต่อข้อมูลแต่ละส่วนเข้าด้วยกันที่รายงานจากโปรแกรมจะต้องมี
ค่าไม่มากกว่า 8 มิลลิเมตร และทำการตรวจสอบขนาดมิติของข้อมูล
กลุ่มอีกครั้งโดยทำการเปรียบเทียบกับขนาดมิติที่วัดได้จาก
ภาคสนาม

3.3. การวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่ม

การวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติของสะพานพระราม 9 จะทำ
การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประเมินขนาดมิติ ค่าระดับ และค่าความชัน

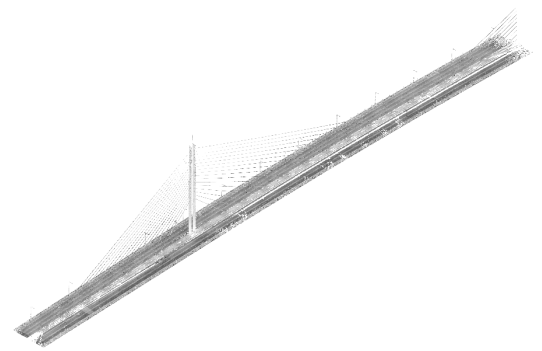
รวมถึงการประเมินเส้นโค้งการหย่อนตัวของสายเคเบิล โดยอาศัย
โปรแกรมที่เกี่ยวข้องกับการจัดทำและวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มจุด ได้แก่
โปรแกรม Autodesk Recap และโปรแกรม Autodesk Revit

4. ผลการศึกษา

ผลการศึกษาที่ได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกแสดง
ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติของสะพานพระราม 9 ส่วนที่สองแสดงผลการ
วิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติของสะพานพระราม 9 และส่วนที่สาม
แสดงแนวทางและผลการวัดเส้นโค้งการหย่อนตัวของสายเคเบิล

4.1. ข้อมูลการสแกนวัดจุด 3 มิติของสะพานพระราม 9

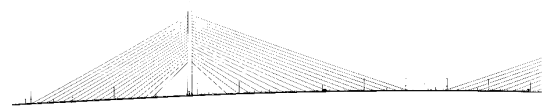
รูปที่ 4 ถึงรูปที่ 6 แสดงข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติของสะพาน
พระราม 9 ที่ผ่านการประมวลผลข้อมูลเสร็จสิ้นในมุมมองต่าง และ
ในรูปที่ 5 แสดงข้อมูลกลุ่มจุดพร้อมกับสัญลักษณ์บอกทิศเหนือ และ
สัญลักษณ์บอกทิศทางมุมมองที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลใน
งานวิจัยครั้งนี้



รูปที่ 4 ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติของสะพานพระราม 9

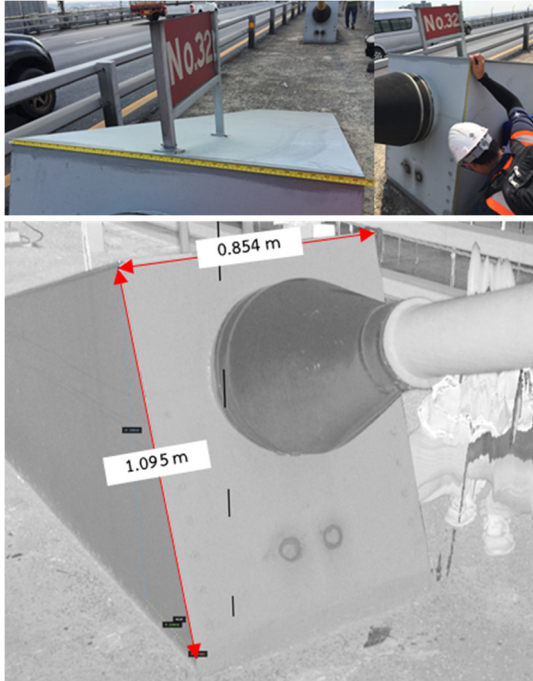


รูปที่ 5 ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ มุมมองด้านบน



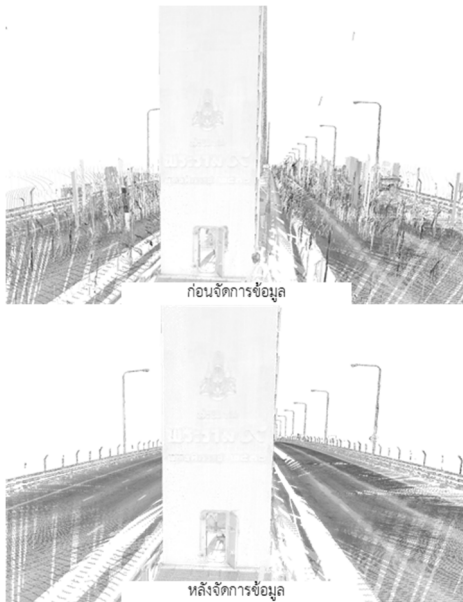
รูปที่ 6 ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ มุมมองที่ 1

เมื่อข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติผ่านการประมวลผลแล้ว ทำการ
ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล รูปที่ 7 แสดงตัวอย่างการ
เปรียบเทียบขนาดมิติข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติและขนาดมิติจากการวัด
ภาคสนาม โดยขนาดมิติที่วัดได้จากข้อมูลกลุ่มของตัวครอบจุดยึด
เคเบิลเส้นที่ 32 มีค่าเท่ากับ 0.854 เมตร และ 1.095 เมตร และ
ขนาดมิติที่วัดได้จากภาคสนามมีค่า 0.854 เมตร และ 1.098 เมตร
ตามลำดับ ซึ่งมีความใกล้เคียงกันมาก



รูปที่ 7 การตรวจสอบขนาดมิติของข้อมูลกลุ่มจุด

หลังจากทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติเสร็จสิ้น จะลบข้อมูลที่ไม่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างสะพานเช่น รถของผู้ที่ใช้สะพาน เป็นต้น รูปที่ 8 ผ่านกระบวนการลบข้อมูลที่ไม่เกี่ยวข้องและข้อมูลชุดที่ผ่านกระบวนการแล้ว

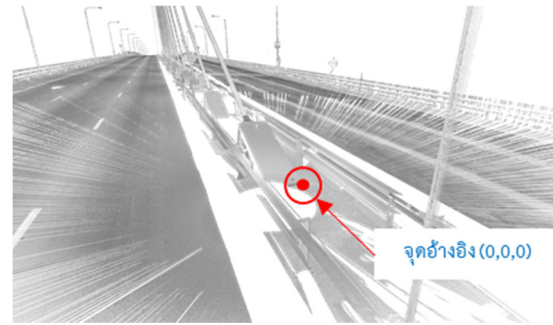


รูปที่ 8 การตรวจสอบขนาดมิติของข้อมูลกลุ่มจุด

4.2. ผลการวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ

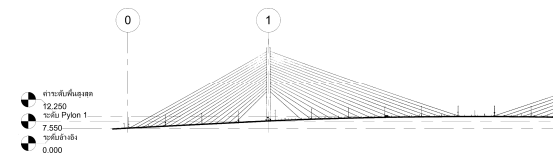
เมื่อข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติผ่านกระบวนการตรวจสอบ และการลบข้อมูลที่ไม่เกี่ยวข้องออกเสร็จสิ้นแล้ว จะส่งออกข้อมูลจากโปรแกรม FARO SCENE ในรูปแบบนามสกุล .rcp เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ข้อมูล

ด้วยโปรแกรมอื่นต่อไป โดยทำการกำหนดจุดยึดเคเบิลเส้นที่ 1 ฝั่งกรุงเทพมหานครเป็นจุดพิกัดอ้างอิง (0,0,0) ดังรูปที่ 9 เพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มจุดในครั้งนี้



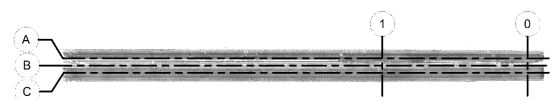
รูปที่ 9 การตรวจสอบขนาดมิติของข้อมูลกลุ่มจุด

ทำการนำข้อมูลกลุ่มจุดเข้าสู่โปรแกรม Autodesk Revit และทำการใส่เส้นกริดและเส้นระดับ โดยรูปที่ 10 แสดงตัวอย่างข้อมูลกลุ่มจุดในมุมมองที่ 1 พร้อมเส้นกริดและเส้นระดับ โดยเส้นกริดที่ 0 อยู่ตำแหน่ง จุดอ้างอิงพิกัด (0,0,0) กำหนดให้เป็น STA+0.000 เส้นกริดที่ 1 อยู่ตำแหน่งเสาซึ่งต้นที่ 1



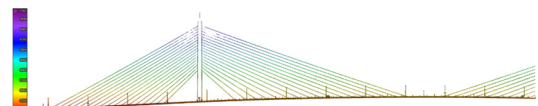
รูปที่ 10 ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ มุมมองที่ 1 พร้อมเส้นกริด

รูปที่ 11 แสดงข้อมูลกลุ่มจุดมุมมองด้านบนพร้อมเส้นกริด โดยเส้นกริดที่ A อยู่บริเวณกึ่งกลางถนนมุ่งหน้าฝั่งกรุงเทพฯ เส้นกริดที่ B อยู่บริเวณกึ่งกลางสะพาน และเส้นกริดที่ C อยู่บริเวณกึ่งกลางถนนมุ่งหน้าฝั่งธนบุรี



รูปที่ 11 ข้อมูลกลุ่มจุดมุมมองด้านบนพร้อมเส้นกริด

เมื่อนำเข้าข้อมูลกลุ่มจุดสู่โปรแกรม Autodesk Recap สามารถวิเคราะห์ค่าระดับและแสดงข้อมูลกลุ่มจุดในรูปแบบของเดสท็อปได้ดังรูปที่ 12 และรูปที่ 13



รูปที่ 12 ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ มุมมองที่ 1 ซึ่งแสดงค่าระดับในรูปแบบของเดสท็อป

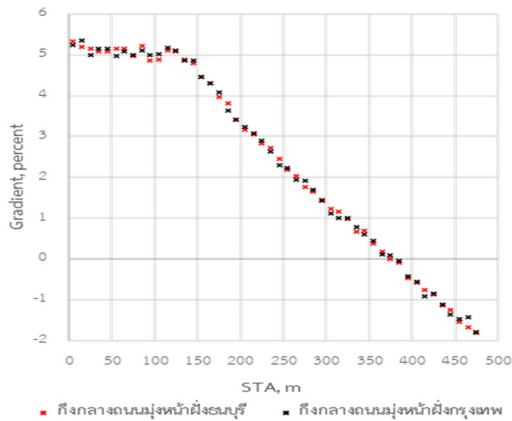
รูปที่ 12 แสดงข้อมูลจุดกลุ่ม 3 มิติในรูปแบบของเดสท็อปตามค่า

ระดับต่าง ๆ โดยแสดงระดับของสะพานพระราม 9 ในช่วง -6 เมตร จนถึง +115 เมตร



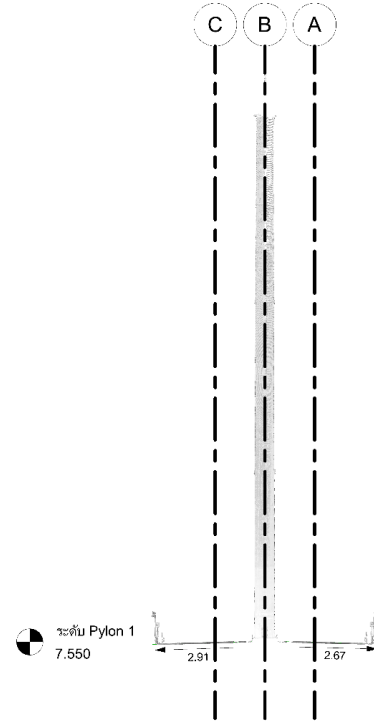
รูปที่ 13 ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ มุมมองด้านบนซึ่งแสดงค่าระดับในรูปแบบของเฉดสี

รูปที่ 13 แสดงค่าระดับพื้นถนนของสะพานพระราม 9 โดยมีค่าระดับของพื้นอยู่ในช่วง -1 เมตรจนถึง +13 เมตร เมื่อทำการวัดค่าระดับใน STA ต่าง ๆ ณ บริเวณกึ่งกลางถนนทั้งสองฝั่ง และนำมาวิเคราะห์ความชันในแต่ละช่วง โดยแสดงข้อมูลความชันในแต่ละช่วงตาม STA ต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 14 โดยค่าความชันเป็นบวกแสดงทิศทางขึ้น ค่าความชันเป็นลบแสดงทิศทางลง เส้นสีแดงแสดงค่าความชันของกึ่งกลางถนนมุ่งหน้าฝั่งกรุงเทพฯ และเส้นสีแดงแสดงค่าความชันของกึ่งกลางถนนมุ่งหน้าฝั่งธนบุรี โดยค่าความชันในช่วง STA +0.00 ถึง +130.00 มีค่าประมาณร้อยละ 5 และมีค่าแนวโน้มลดลงจนกระทั่งมีค่าเป็นศูนย์บริเวณ STA +370.00



รูปที่ 14 แสดงความชันของพื้นตามแนวยาว

รูปที่ 15 แสดงมุมมองที่เส้นกริดที่ 1 ณ ตำแหน่งเสาซึ่งเชิงสะพานฝั่งกรุงเทพฯ แสดงการวัดความชันในแนวขวางของสะพานได้ โดยความชันของสะพานฝั่งมุ่งหน้าธนบุรี และฝั่งมุ่งหน้ากรุงเทพฯ มีค่าเท่ากับร้อยละ 2.91 และ 2.67 ตามลำดับ



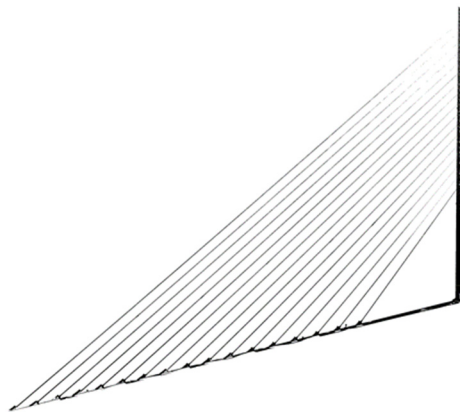
รูปที่ 15 ภาพตัด ณ ตำแหน่งเสาซึ่งที่ 1

4.3. กระบวนการวัดเส้นโค้งหย่อนตัวของเคเบิล

กระบวนการวัดเส้นโค้งหย่อนตัวของเคเบิลจากข้อมูลกลุ่มจุดที่เก็บด้วยเทคโนโลยีการสแกนวัดจุด 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์แบบภาคพื้นดิน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

4.3.1. เตรียมข้อมูลกลุ่มจุดของเคเบิล

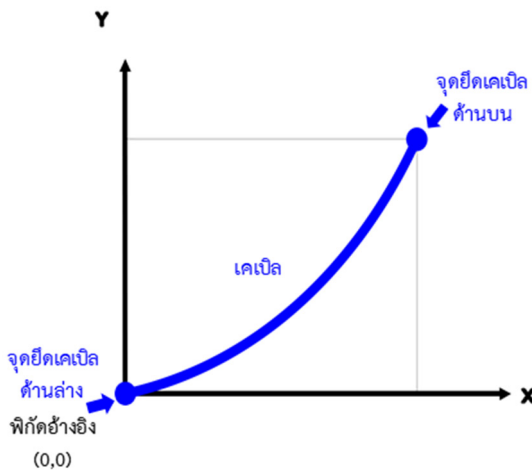
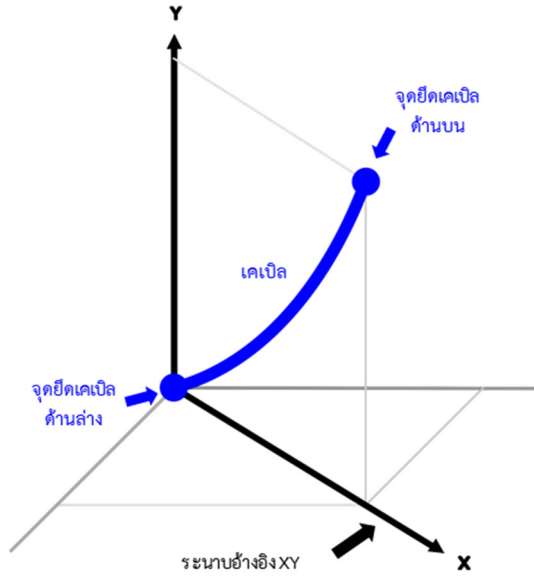
ในขั้นตอนนี้จะทำการลบข้อมูลจุดอื่น ๆ ที่ไม่จำเป็น หรือไม่เกี่ยวข้องออกเพื่อให้ได้เฉพาะข้อมูลกลุ่มของเคเบิล รูปที่ 16 แสดงตัวอย่างข้อมูลกลุ่มจุดของเคเบิลที่ใช้สำหรับการวัดเส้นโค้งหย่อนตัวหลังจากจัดการข้อมูลเสร็จสิ้น



รูปที่ 16 ข้อมูลกลุ่มจุดของเคเบิลเส้นที่ 1-17

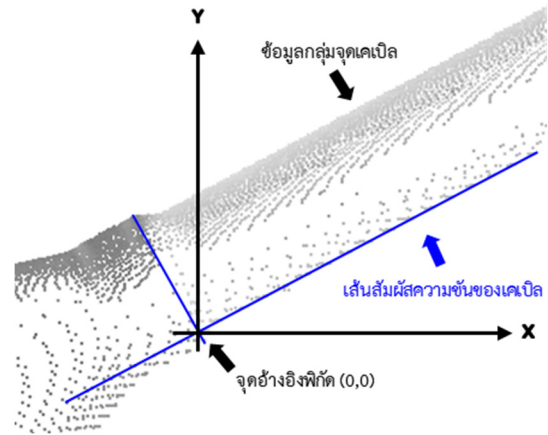
4.3.2. กำหนดระบบอ้างอิง

ในขั้นตอนนี้จะทำการกำหนดระนาบอ้างอิงของเคเบิลแต่ละเส้น เพื่อใช้ในการวัดเส้นโค้งหย่อนตัวของเคเบิลแต่ละเส้น โดยจะเลือกระนาบอ้างอิงผ่านจุดยึดเคเบิลทั้งสองฝั่ง ดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 17 ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ มุมมองที่ 1 ซึ่งแสดงค่าระดับในรูปแบบข้อเฉดสี

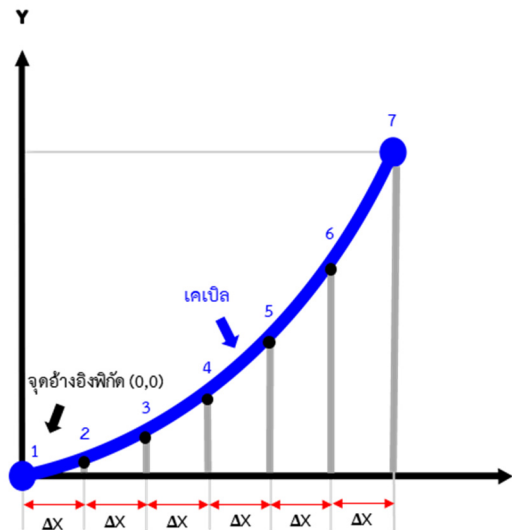
ต่อมาทำการกำหนดจุดรองรับด้านล่างเป็นจุดอ้างอิง (0,0) ในระนาบอ้างอิง ดังแสดงในรูปที่ 18 แสดงวิธีการกำหนดจุดอ้างอิง โดยทำการสร้างเส้นสัมผัสความชันของเคเบิล และทำการสร้างเส้นอ้างอิงตรงจุดยึดเพื่อใช้เป็นพิกัดอ้างอิงสำหรับการวัดตำแหน่งของสายเคเบิล



รูปที่ 18 จุดอ้างอิงพิกัด (0,0) ในระนาบการวัด

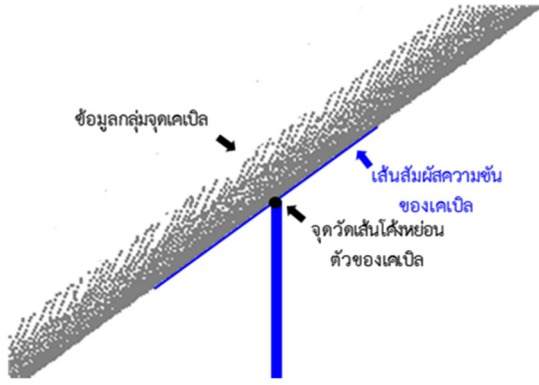
4.3.3. การวัดเส้นโค้งหย่อนตัว

ในการวัดเส้นโค้งหย่อนตัวจะทำการวัดระยะ X และระยะ Y ของบริเวณท้องของเคเบิล โดยเริ่มจากการแบ่งเคเบิลระยะเท่า ๆ กันตามแนวแกน X เป็นจำนวน 6 ชิ้น 7 จุดเป็นดังแสดงในรูปที่ 19



รูปที่ 19 ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ มุมมองที่ 1 ซึ่งแสดงค่าระดับในรูปแบบข้อเฉดสี

ต่อมาการสร้างเส้นสัมผัสความชันของเคเบิล ณ จุดที่ทำการวัด และทำการวัดค่าพิกัดในทิศทาง Y ของเส้นโค้งหย่อนตัว ดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 ข้อมูลกลุ่มจุด 3 มิติ มุมมองที่ 1 ซึ่งแสดงค่าระดับในรูปแบบข้อเฉดสี

ในการเลือกจุดวัดเส้นโค้งการหย่อนตัวของสายเคเบิลพบปัญหาในการเลือกจุดอ้างอิงบริเวณจุดยึดบริเวณเสาซึ่งด้านบนที่อยู่สูงเนื่องด้วยจำนวนข้อมูลที่มีจำนวนน้อย แม้ว่าข้อมูลที่ได้ในการศึกษานี้จะยังเพียงพอต่อการกำหนดจุดอ้างอิงด้านบนได้ แต่จะมีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนสำหรับผู้ที่ไม่ชำนาญในการวิเคราะห์ข้อมูลกลุ่มจุด โดยคาดว่าปัญหาดังกล่าวจะสามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มจำนวนจุดตั้งเครื่องมือบริเวณใกล้กับเสาซึ่งให้มากขึ้น นอกจากนี้การปรับค่าตัวแปรในการเก็บข้อมูลให้มีความละเอียดมากยิ่งขึ้นก็น่าจะช่วยแก้ปัญหานี้ได้เช่นกัน ซึ่งคณะผู้วิจัยจะดำเนินการศึกษาและการปรับปรุงข้อมูลส่วนนี้ในอนาคตต่อไป

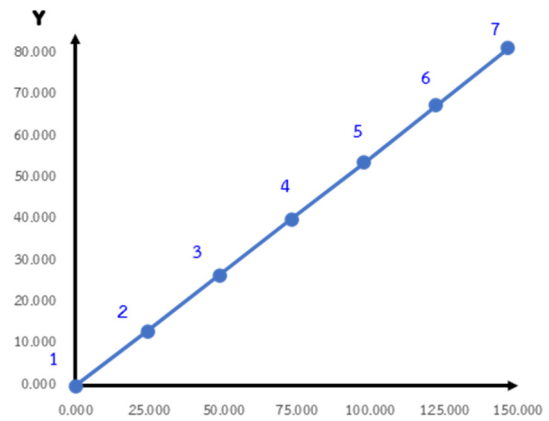
4.3.4. ผลการวัดเส้นโค้งการหย่อนตัวของเคเบิล

เมื่อทำการวัดเส้นโค้งการหย่อนตัวของเคเบิลเสร็จสิ้น จะได้ค่าพิกัดที่จุดบนเส้นโค้งการหย่อนตัวของเคเบิล ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงผลการวัดเส้นโค้งการหย่อนตัวของเคเบิลเส้นที่ 1

Node	พิกัด (เมตร)	
	ทิศทาง x	ทิศทาง y
1	0.000	0.000
2	24.395	13.262
3	48.789	26.657
4	73.184	40.176
5	97.579	53.837
6	121.973	67.620
7	146.368	81.507

จากข้อมูลพิกัดในตารางที่ 1 สามารถนำมาสร้างกราฟแสดงตัวอย่างเส้นโค้งการหย่อนตัวของสายเคเบิลได้ โดยรูปที่ 21 แสดงตัวอย่างเส้นโค้งการหย่อนตัวของเคเบิลเส้นที่ 1



รูปที่ 21 เส้นโค้งการหย่อนตัวของเคเบิลเส้นที่ 1

ความยาวส่วนโค้งของเส้นโค้งการหย่อนตัวของเคเบิล สามารถประมาณโดยอาศัยวิธีรวมความยาวของชิ้นส่วนย่อยซึ่งคำนวณด้วยวิธีใช้ระยะห่างระหว่างจุดสองจุด เมื่อนำระยะห่างระหว่างจุดมารวมกันทุกส่วนจะทำให้ประมาณค่าความยาวของเส้นโค้งของสายเคเบิลได้ โดยค่าตัวอย่างระยะระหว่างจุดยึดทั้งสองกับค่าความยาวส่วนโค้งของสายเคเบิลแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงผลความยาวช่วงและความยาวส่วนโค้งของเคเบิล

Cable No.	Span Length	Arc Length	Cable No.	Span Length	Arc Length
1	167.532	167.536	18	42.672	42.672
2	159.823	159.827	19	52.657	52.657
3	152.147	152.150	20	62.977	62.977
4	144.368	144.371	21	73.316	73.316
5	136.627	136.630	22	83.977	83.978
6	128.825	128.828	23	94.517	94.518
7	121.275	121.277	24	105.331	105.333
8	113.415	113.416	25	116.187	116.188
9	105.601	105.602	26	126.836	126.839
10	97.922	97.923	27	137.777	137.781
11	90.235	90.235	28	148.737	148.742
12	82.537	82.537	29	159.532	159.537
13	74.902	74.902	30	170.530	170.536
14	67.230	67.231	31	181.494	181.501
15	59.623	59.623	32	192.744	192.752
16	52.093	52.093	33	203.758	203.767
17	44.634	44.634	34	214.899	214.909

5. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

บทความนี้นำเสนอแนวทางการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัด 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์แบบภาคพื้นดิน ในการติดตามและตรวจสอบสภาพของสะพานซึ่งโดยอาศัยสะพานพระราม 9 เป็นกรณีศึกษา ซึ่งได้นำเสนอขั้นตอนการเก็บข้อมูลและการสร้าง

แบบจำลอง 3 มิติในรูปแบบข้อมูลกลุ่มจุด จากนั้นแสดงวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อประเมินค่าระดับพื้นผิวสะพาน พร้อมทั้งศึกษากระบวนการวัดเส้นโค้งหย่อนตัวของเคเบิลจากข้อมูลกลุ่มจุด ซึ่งพบว่าการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติด้วยแสงเลเซอร์แบบภาคพื้นดินเก็บข้อมูลสภาพปัจจุบันของสะพานพระราม 9 ให้ผลค่ามิติขนาดของสะพานพร้อมทั้งค่าระดับพื้นผิวของสะพานได้อย่างแม่นยำ สามารถนำมาให้ประเมินค่าระดับหรือจัดทำแผนผังเส้นชั้นความสูงซึ่งแสดงให้เห็นบริเวณที่ค่าระดับสูงสุดและต่ำสุดของสะพานได้อย่างดี ตลอดจนสามารถประเมินค่าความชันของสะพานทั้งในแนวยาวและแนวขวางได้ สำหรับการประเมินเส้นโค้งการหย่อนตัวของสายเคเบิลพบว่าสามารถทำได้เป็นอย่างดี โดยผู้เก็บข้อมูลควรต้องเพิ่มความละเอียดของการเก็บข้อมูลหรือจำนวนจุดตั้งเครื่องมือให้มากขึ้นในบริเวณเสาเชิง โดยข้อมูลที่ได้จากการศึกษาี้สามารถใช้เป็นข้อมูลประกอบการประเมินเสถียรภาพของตัวสะพานและสายเคเบิลของสะพานได้ต่อไปในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากสำนักคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) และหน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคน และทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม (บพค.) ขอขอบคุณทางพิเศษแห่งประเทศไทย (EXAT) สำหรับการอนุเคราะห์ข้อมูลต่าง ๆ และอำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูลของสะพานพระราม 9 และได้รับการสนับสนุนเครื่องมือและสถานที่ในการวิจัยจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

7. การอ้างอิง

- [1] Gregory, F. H., Freeman, R. A. (1987). *The Bangkok Cable-Stayed Bridge*. Maeda Construction Co., Ltd,
- [2] Rashidi M., Mohammadi M., Kiv S. S. i, Abdolvand M. M., Truong-Hong L., Samali B. (2020). A decade of modern bridge monitoring using terrestrial laser scanning: Review and future directions, *Remote Sens* 12(22). 1–34, doi: 10.3390/rs12223796.
- [3] Pritchard D., Spemer J., Hoepner S., Tenschert R. (2017). Terrestrial laser scanning for heritage conservation: The Cologne Cathedral documentation

project, ISPRS Ann. Photogram. *Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 4(2W2), 213–220. doi: 10.5194/isprs-annals-IV-2-W2-213-2017.

- [4] Leonov A. V., Anikushkin M. N., Ivanov A. V., Ovcharov S. V., Bobkov A. E., Baturin Y. M. (2015) Laser scanning and 3D modeling of the Shukhov hyperboloid tower in Moscow, *J. Cult. Herit.* 16(4), 551–559. doi: 10.1016/j.culher.2014.09.014.
- [5] สุทัศน์ ลีลาทวิวัฒน์, วิรัชชาติ ตั้งจิรังภัทร, ชัยณรงค์ อธิสกุล, รัตติพงษ์ สหมิตรมงคล. (2562). *โครงการพัฒนาฐานข้อมูลทางวิศวกรรมเพื่อการประเมินและติดตามสภาพโครงสร้างโบราณสถานของไทย*. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
- [6] Kwiatkowski J., Anigacz W., Beben D. (2020). A case study on the noncontact inventory of the oldest european cast-iron bridge using terrestrial laser scanning and photogrammetric techniques. *Remote Sens.*12(17). doi: 10.3390/RS12172745.
- [7] Conde-Carnero B., Riveiro B., Arias P., Caamaño J. C. (2016). Exploitation of Geometric Data provided by Laser Scanning to Create FEM Structural Models of Bridges, *J. Perform. Constr. Facil.* 30(3). doi: 10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000807.
- [8] Berényi A., Lovas T., Barsi Á., Dunai L. (2009) Potential of terrestrial laserscanning in load test measurements of bridges. *Period. Polytech. Civ. Eng.* 53(1). 25–33. doi: 10.3311/pp.ci.2009-1.04.
- [9] M. Ebrahim. (2016). *3D Laser Scanners: History, Applications and Future*. L. LAMBERT Acad. Publ., (104)
- [10] กันตภณ จินทราคำ, พีรสิทธิ์ มหาสุวรรณชัย, ก้องภพ วัชรเสวี, ชัยณรงค์ อธิสกุล, พรเกษม จงประดิษฐ์, สุทัศน์ ลีลาทวิวัฒน์. (2563). เทคโนโลยีการสแกนวัตถุ 3 มิติและวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับป้อมกออิฐโบราณของไทย:กรณีศึกษาป้อมมหากาฬ, *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 25*, 15-17 กรกฎาคม, ชลบุรี, ไทย
- [11] FARO Technologies, Inc. (2015). FARO Laser Scanner Focus3D x 330 Manual. *FARO Technologies, Inc*, Lake Mary, FL, USA., 42-45