

การเปรียบเทียบความถูกต้องของเทคนิคการระบุตำแหน่งและการทำแผนที่พร้อมกัน (SLAM) กับการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK) และกล้องสำรวจ ในการรังวัดตำแหน่งภายนอกและภายในอาคาร

Comparison of Accuracy Between Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) with Real-Time Kinematic (RTK) Satellite Surveying and Total Station for Indoor and Outdoor Positioning Surveys

วรรัตน์ รัตนพันธ์¹ อินทรา ขวัญคำ² ภูวิศ กัมตัน³ และ ตอลาก การปล้มจิตร^{4,*}

^{1,2,3,4} สาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.สงขลา

*Corresponding author; E-mail address: torlap_rmutsv@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของเทคนิคการระบุตำแหน่งและการทำแผนที่พร้อมกัน (Simultaneous Localization and Mapping, SLAM) กับการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์แบบทันที (Real Time Kinematics, RTK) และกล้องสำรวจโดยการรังวัดเก็บข้อมูลภูมิประเทศ โดยทำการกำหนดจุดตรวจสอบภายนอกอาคารจำนวน 15 จุด และภายในอาคารจำนวน 15 จุด การรังวัดเริ่มต้นจากการตั้งหมุดหลักฐาน BM1 ซึ่งอ้างอิงจากโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (NRTK) ของกรมที่ดิน และทำการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์แบบวิทยุ (Radio RTK) ไปยังหมุด BM2 ซึ่งจะใช้เป็นหมุดรองหลังในการรังวัดจุดตรวจสอบ ซึ่งมีทั้งภายนอกและภายในอาคารด้วยกล้องประมวลผลรวม (Total Station) และเปรียบเทียบกับจุดพิกัดสามมิติที่รังวัดได้จากระบบ SLAM การวิเคราะห์เปรียบเทียบความถูกต้องพิจารณาจากค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ในการระบุตำแหน่ง โดยประเมินผลความเหมาะสมในการใช้งานของแต่ละวิธีในบริบทที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า ค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่งของเทคนิค SLAM มีค่า RMSE เท่ากับ 0.023 เมตร (dxy) และ 0.019 เมตร (dz) สำหรับภายในอาคารและ 0.018 เมตร (dxy) และ 0.022 เมตร (dz) สำหรับภายนอกอาคาร ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จาก GNSS และ Total Station แสดงถึงศักยภาพของ SLAM ในการใช้งานในพื้นที่ที่ GNSS ไม่สามารถใช้งานได้เช่นพื้นที่ที่ไม่มีสัญญาณดาวเทียม ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการพัฒนางานสำรวจและการทำแผนที่ในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: การระบุตำแหน่งและการทำแผนที่พร้อมกัน, จุดพิกัดสามมิติ, การรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์แบบทันที

Abstract

This paper investigates the comparative positional accuracy of Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) technology

against Real-Time Kinematic (RTK) GNSS surveying and conventional total station methods through detailed topographic data acquisition. A total of 30 ground control points were established, comprising 15 outdoor and 15 indoor checkpoints. The surveying procedure commenced with the establishment of a primary benchmark (BM1) referenced to the Department of Lands' Network Real-Time Kinematic (NRTK) service. Subsequently, a secondary benchmark (BM2) was surveyed using Radio RTK and employed as the reference point for detailed checkpoint surveying. Both outdoor and indoor checkpoints were measured using a total station, and their three-dimensional coordinates were compared with those derived from the SLAM system. Positional accuracy was assessed based on the root mean square error (RMSE) values, and the applicability of each surveying method was evaluated within different environmental contexts. The results reveal that SLAM achieved RMSE values of 0.023 meters in the horizontal (dxy) and 0.019 meters in the vertical (dz) for indoor environments and 0.018 meters in the horizontal (dxy) and 0.022 meters in the vertical (dz) for outdoor environments, closely approximating the accuracy levels obtained from GNSS and total station measurements. These findings substantiate the potential of SLAM technology as a viable surveying and mapping solution in GNSS-denied environments, thereby offering significant implications for advancing future geospatial data acquisition methodologies.

Keywords: Simultaneous Localization and Mapping, 3D Point Cloud, Real Time Kinematics

1. คำนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการระบุตำแหน่งและการทำแผนที่ที่มีบทบาทสำคัญในการสำรวจและทำแผนที่ทั้งในพื้นที่ภายนอกและภายในอาคารหรือสถานที่ต่างๆ ระบบการใช้เทคนิคระบุตำแหน่งและการทำแผนที่พร้อมกัน (Simultaneous Localization and Mapping) หรือเร้าคูนเคย์กับการเรียกว่า SLAM ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น เนื่องจากสามารถนำมาใช้ในสภาพแวดล้อมที่มีโครงสร้างซับซ้อนหรือพื้นที่ที่มีสัญญาณดาวเทียมจำกัด เช่น ภายในอาคารหรือบริเวณที่มีสิ่งกีดขวางหนาแน่น เทคโนโลยี SLAM ทำงานโดยอาศัยเซ็นเซอร์ต่าง ๆ เช่น LiDAR และกล้อง เพื่อสร้างแผนที่และระบุตำแหน่งของตัวเองในสภาพแวดล้อมแบบเรียลไทม์ ซึ่งแตกต่างจากเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลนศาสตร์ (Real-Time Kinematic: RTK) และกล้องสำรวจ (Total Station) ที่ต้องพึ่งพาสัญญาณ GNSS หรือสถานีฐานที่มีความแม่นยำสูง เทคโนโลยีเหล่านี้มีข้อได้เปรียบและข้อจำกัดที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นที่และข้อกำหนดด้านความแม่นยำของงานสำรวจ [1]

เทคนิค RTK GNSS เป็นที่แพร่หลายสำหรับการสำรวจภาคสนาม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่เปิดโล่งที่สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ดี การรังวัดด้วย RTK GNSS สามารถให้ค่าพิกัดที่มีความแม่นยำในระดับเซนติเมตร เมื่อเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิง [2] อย่างไรก็ตาม การทำงานของ RTK GNSS อาจถูกจำกัดเมื่ออยู่ภายในอาคารหรือพื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวางสูง เช่น ใต้แนวดันไม้หรือระหว่างตึกสูง ซึ่งเป็นข้อจำกัดที่สำคัญสำหรับงานสำรวจที่ต้องการข้อมูลตำแหน่งที่แม่นยำในทุกสภาพแวดล้อม ในขณะที่การรังวัดด้วยกล้องสำรวจสามารถให้ความแม่นยำสูงมาก แต่จำเป็นต้องใช้การตั้งสถานีตั้งกล้องและมีข้อจำกัดด้านระยะทางและมุมมองของอุปกรณ์ [3] ข้อจำกัดเหล่านี้ทำให้เกิดความท้าทายในการเลือกใช้เทคนิคการรังวัดที่เหมาะสมกับลักษณะงานและสภาพแวดล้อมของพื้นที่ที่ต้องการสำรวจ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของเทคนิค SLAM กับ RTK GNSS และกล้องสำรวจในการรังวัดตำแหน่งทั้งภายนอกและภายในอาคาร โดยใช้เกณฑ์ด้านความแม่นยำ ความสะดวกในการใช้งาน และความเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน การศึกษานี้จะช่วยให้เข้าใจถึงข้อดีและข้อจำกัดของแต่ละเทคนิค รวมถึงเป็นแนวทางในการเลือกใช้วิธีการรังวัดที่เหมาะสมสำหรับงานสำรวจในบริบทที่แตกต่างกัน การเปรียบเทียบดังกล่าวจะอาศัยการทดสอบในพื้นที่ตัวอย่างที่มีลักษณะต่างกัน [5] ทั้งในสภาพแวดล้อมกลางแจ้งที่เปิดโล่งและสภาพแวดล้อมภายในอาคารที่มีสิ่งกีดขวาง เพื่อประเมินความแม่นยำของแต่ละเทคนิคภายใต้สภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน

2. เทคนิคการระบุตำแหน่งและการทำแผนที่พร้อมกัน

การระบุตำแหน่งและการทำแผนที่พร้อมกัน (Simultaneous Localization and Mapping) หรือ SLAM เป็นเทคโนโลยีที่ช่วยให้อุปกรณ์สามารถสร้างแผนที่ของสภาพแวดล้อมที่ไม่รู้จักได้พร้อมๆ กับระบุตำแหน่งของตนเองภายในสภาพแวดล้อมนั้น [7] เทคโนโลยีนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในระบบนำทางอัตโนมัติ เนื่องจากช่วยให้สามารถทำงานในสภาพแวดล้อมที่

ไม่คุ้นเคยหรือซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ หลักการทำงานของ SLAM ประกอบด้วยสองกระบวนการหลัก คือ การระบุตำแหน่ง (Localization) และการทำแผนที่ (Mapping) ในกระบวนการระบุตำแหน่งจะใช้เซ็นเซอร์ต่างๆ เช่น LiDAR กล้อง หรือ IMU (Inertial Measurement Unit) เพื่อรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับสภาพแวดล้อมรอบตัว [8] SLAM ช่วยให้เราระบุตำแหน่งและสร้างแผนที่ได้พร้อมกันดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ข้อมูลจุด 3 มิติ ที่ได้จาก SLAM [5]

ซึ่งมีประโยชน์อย่างยิ่งในสถานการณ์ที่การระบุตำแหน่งเบื้องต้นเป็นเรื่องท้าทายหรือเมื่อสัญญาณ GPS ไม่พร้อมใช้งาน ทำให้เราสามารถสำรวจและสร้างแผนที่ในสภาพแวดล้อมที่ไม่รู้จักได้ [5] จากนั้นจะใช้ข้อมูลเหล่านี้ในการคำนวณตำแหน่งและทิศทางของตนเอง ในขณะเดียวกัน กระบวนการทำแผนที่จะใช้ข้อมูลที่รวบรวมได้ในการสร้างแผนที่ของสภาพแวดล้อม โดยการรวมข้อมูลจากเซ็นเซอร์ต่างๆ จนสามารถสร้างแผนที่ที่แม่นยำและระบุตำแหน่งของตนเองได้อย่างต่อเนื่อง

ความท้าทายหลักของ SLAM คือ การจัดการกับความไม่แน่นอนและข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการวัดของเซ็นเซอร์ เพื่อแก้ไขปัญหานี้ มีการใช้เทคนิคการประมาณค่า เช่น Extended Kalman Filter (EKF) หรือ Particle Filter เพื่อปรับปรุงความแม่นยำของการระบุตำแหน่งและการทำแผนที่ นอกจากนี้ การตรวจจับและจัดการกับการปิดลูป (Loop Closure) ก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยลดข้อผิดพลาดที่สะสมและปรับปรุงความถูกต้องของแผนที่ SLAM สำหรับการสำรวจ SLAM ช่วยในการสร้างแผนที่ของพื้นที่ที่ไม่เคยถูกสำรวจมาก่อน ในระบบอัตโนมัติ SLAM ช่วยในการนำทางและหลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน อย่างไรก็ตาม SLAM ยังมีข้อจำกัดบางประการ เช่น ความต้องการทรัพยากรการประมวลผลที่สูง และความไวต่อสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว การวิจัยและพัฒนาในปัจจุบันมุ่งเน้นไปที่การปรับปรุงความทนทานและความยืดหยุ่นของอัลกอริทึม SLAM เพื่อให้สามารถทำงานได้ในสภาพแวดล้อมที่หลากหลายและท้าทายมากขึ้น สรุปได้ว่า SLAM เป็นเทคโนโลยีที่มีความสำคัญและมีการประยุกต์ใช้ในหลากหลายด้าน ด้วยความสามารถในการระบุตำแหน่งและทำแผนที่พร้อมกันในสภาพแวดล้อมที่ไม่คุ้นเคยหรือซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพดังตัวอย่าง SLAM ดังรูปที่ 2 [7]



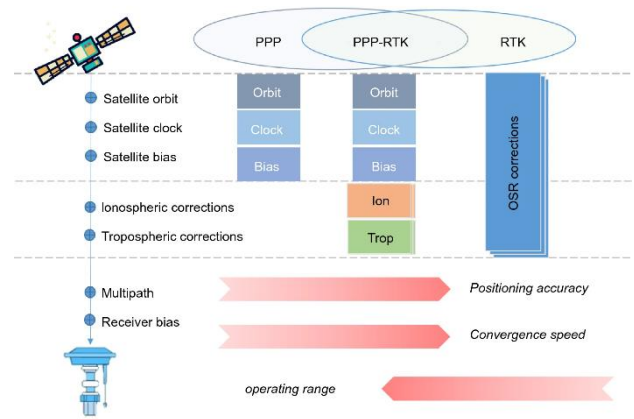
รูปที่ 2 เครื่องระบุตำแหน่งและการทำแผนที่พร้อมกันหรือ SLAM [7]

3. การสำรวจจริงวัดเพื่อการก่อสร้าง

การสำรวจเพื่อการก่อสร้างเป็นกระบวนการที่สำคัญในการกำหนดตำแหน่งทั้งภายนอกและภายในอาคาร การวางแผนแนวเส้น และตรวจสอบความถูกต้องของโครงสร้างต่าง ๆ เช่น อาคาร ถนน สะพาน และโครงสร้างพื้นฐานอื่น ๆ การดำเนินการสำรวจจริงวัดที่แม่นยำช่วยให้การก่อสร้างเป็นไปตามแผน ลดความผิดพลาด และเพิ่มประสิทธิภาพในการดำเนินงาน โดยการสำรวจเพื่อก่อสร้างมีหลายชนิด [4] ตั้งแต่ การสำรวจเพื่อการออกแบบ (Design Survey) เป็นการรวบรวมข้อมูลภูมิประเทศและลักษณะพื้นที่เพื่อใช้ในการออกแบบโครงการก่อสร้าง ข้อมูลที่ได้จะช่วยให้การวางแผนและออกแบบโครงสร้างให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ การสำรวจเพื่อการวางผัง (Setting Out) เป็นการกำหนดตำแหน่งจริงของโครงสร้างในพื้นที่ก่อสร้างตามแบบที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อให้การก่อสร้างเป็นไปตามตำแหน่งและขนาดที่กำหนด การสำรวจควบคุม (Control Survey) เป็นการสร้างจุดควบคุมที่มีความแม่นยำสูงในพื้นที่ก่อสร้าง เพื่อใช้เป็นจุดอ้างอิงในการสำรวจอื่น ๆ การสำรวจตรวจสอบ (As-Built Survey) เป็นการตรวจสอบและบันทึกตำแหน่งจริงของโครงสร้างที่ได้ก่อสร้างเสร็จแล้ว เพื่อเปรียบเทียบกับแบบที่ได้ออกแบบไว้

3.1 การรังวัดตำแหน่งภายนอกอาคาร

โดยทั่วไปเราจะทำการรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม (Global Navigation Satellite System; GNSS) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการรังวัดตำแหน่งภายนอกอาคาร โดยอาศัยสัญญาณจากเครือข่ายดาวเทียมเพื่อกำหนดค่าพิกัดของจุดที่ต้องการรังวัด เทคโนโลยีนี้สามารถให้ค่าพิกัดที่มีความแม่นยำสูง โดยเฉพาะเมื่อใช้ร่วมกับเทคนิค Real-Time Kinematic (RTK) เทคนิค RTK GNSS ใช้หลักการวัดความแตกต่างของเฟสสัญญาณจากดาวเทียม โดยอาศัยสถานีฐาน (Base Station) ที่มีค่าพิกัดที่ทราบแน่นอน และเครื่องรับสัญญาณเคลื่อนที่ (Rover) ที่ทำการรังวัดในสนาม เทคนิคนี้ช่วยให้สามารถกำหนดค่าพิกัดได้ในระดับความแม่นยำ 1-3 เซนติเมตรสำหรับค่าระยะทางราบ (Planimetric Accuracy) และ 4-6 เซนติเมตร สำหรับค่าความสูง (Vertical Accuracy) ดังรูปที่ 3 แสดงความแตกต่างระหว่าง RTK และ PPP [10] ดังรูปที่ 3 และเมื่อมีการใช้ GNSS และ กล้องประมวลผลรวม (Total Station) ร่วมกันสามารถช่วยให้ได้ค่าพิกัดที่แม่นยำในบริเวณที่ต้องการตำแหน่งได้ โดยใช้ GNSS ในการกำหนดค่าพิกัดจุดควบคุมหลัก (Control Points) ภายนอกอาคาร และใช้ Total Station ในการเก็บค่าพิกัด



รูปที่ 3 ความแตกต่างการรับสัญญาณระหว่าง PPP กับ NRTK [10]

3.2 การรังวัดตำแหน่งภายในอาคาร

สำหรับการรังวัดในพื้นที่ที่ GNSS ใช้งานไม่ได้ เช่น ภายในอาคาร อุโมงค์ หรือบริเวณที่มีสิ่งกีดขวางหนาแน่น มักนิยมใช้กล้องประมวลผลรวม (Total Station) ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การสำรวจภายในอาคาร [11]

ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดระยะทางและมุมเพื่อคำนวณค่าพิกัดของจุดที่ต้องการรังวัด โดยหลักการทำงานของ Total Station ทำงานโดยอาศัยการส่งสัญญาณเลเซอร์ไปยังเป้าหมาย เช่น ปริซึมสะท้อนแสง (Reflector Prism) หรือพื้นผิวที่สะท้อนสัญญาณได้ดี แล้วคำนวณระยะทางโดยใช้หลักการ Time-of-Flight หรือ Phase Shift นอกจากนี้ ยังสามารถวัดค่ามุมราบ (Horizontal Angle) และมุมตั้ง (Vertical Angle) เพื่อใช้ในการคำนวณค่าพิกัดของจุดเป้าหมาย [7]

4. วิธีการดำเนินงาน

4.1 วัตถุประสงค์และพื้นที่ศึกษา

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งของเทคนิคการระบุตำแหน่งและการทำแผนที่พร้อมกัน (Simultaneous Localization and Mapping) หรือ SLAM กับวิธีการรังวัด

ด้วยโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์แบบทันที (Network Real Time Kinematics, NRTK) และกล้องสำรวจโดยการรังวัดเก็บข้อมูลภูมิประเทศ โดยพื้นที่ศึกษาจะตั้งอยู่ที่ อาคาร ดี อินดัสตรี ตำบลบางกระสอ อำเภอเมืองนนทบุรี จังหวัดนนทบุรี และบริเวณโดยรอบ ซึ่งเป็นพื้นที่สำหรับทดสอบเครื่องมือทั้งภายในและภายนอกอาคาร โดยมีจุดตรวจสอบกระจายตัวอยู่ 30 จุดทั่วพื้นที่ศึกษา

4.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทำการศึกษา

4.2.1 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS

เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ครึ่งนี้ใช้ยี่ห้อ CHC รุ่น i93 ดังรูปที่ 5 ซึ่งทำงานร่วมกับเครื่องควบคุม (Controller) ใช้ควบคุมการทำงานของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS (Receiver) โดยภายในเครื่องควบคุมจะมีแอปพลิเคชันที่ใช้ควบคุมการทำงาน ในงานครั้งนี้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมนี้จะทำหน้าที่เป็นสถานีเคลื่อนที่ (Rover station) ใช้สำหรับทำงานรังวัดด้วยวิธีแบบ RTK Network และทำเป็นหมุดอ้างอิง (Control Point) เพื่อเก็บรายละเอียดข้อมูลภูมิประเทศด้วยกล้องประมวลผลรวมรังวัดจุดละ 1 นาที จำนวน 3 ครั้ง นำข้อมูลค่าพิกัดจำนวน 3 ชุดแล้วนำค่ามาเฉลี่ย โดยอ้างอิงจากระเบียบกรมที่ดินว่าด้วยการรังวัดทำแผนที่ชั้นหนึ่งด้วยระบบโครงข่ายการรังวัดดาวเทียมแบบจลน์ [6]



รูปที่ 5 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS

4.2.2 เทคโนโลยีการทำงานระบุตำแหน่งและการทำแผนที่พร้อมกัน (SLAM)

เทคโนโลยีการทำงานระบุตำแหน่งและการทำแผนที่พร้อมกัน (SLAM) พร้อมด้วยเครื่องควบคุม (Controller) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ใช้ควบคุมการทำงานของเทคโนโลยี SLAM ประมวลผลในระบบปฏิบัติการ Android 12 โดยใช้เป็นยี่ห้อ CHC รุ่น RS10 ดังรูปที่ 6 เป็นเครื่องมือสร้างแผนที่รูปแบบ 3 มิติ และ ระบุตำแหน่งไปพร้อม ๆ กับการทำแผนที่ โดยทำงานแบบทันที (Real-

Time) สำหรับใช้ในการตรวจจับวัดจากระยะไกลโดยใช้แสงเลเซอร์ ในการระบุตำแหน่งในพิกัด 3 มิติทั้งที่พิกัดในทางราบและทางตั้ง



รูปที่ 6 เครื่อง SLAM ยี่ห้อ CHC รุ่น RS10

4.2.3 กล้องประมวลผลรวม (Total station)

กล้องประมวลผลรวม ครึ่งนี้ใช้ยี่ห้อ CHCnav รุ่น CTS112R โดยรังวัดโดยอ้างอิงจากหมุด BM ที่รังวัดโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (NRTK) ของกรมที่ดิน และหมุด BM2 ซึ่งจะใช้เป็นหมุดตรงหลังในการรังวัดจุดตรวจสอบซึ่งใช้ในการรังวัดจุดควบคุม ซึ่งมีทั้งภายนอกและภายในอาคาร

4.3 การกำหนดหมุดหลักฐานและจุดตรวจสอบ

การดำเนินงานเริ่มต้นด้วยการกำหนดพื้นที่ศึกษาและเลือกจุดตรวจสอบทั้งหมด 30 จุด โดยแบ่งเป็นจุดตรวจสอบภายนอกอาคารจำนวน 15 จุด และภายในอาคารจำนวน 15 จุด จุดตรวจสอบเหล่านี้ได้รับการจัดวางในตำแหน่งที่ครอบคลุมพื้นที่ศึกษา เพื่อให้สามารถประเมินความถูกต้องของแต่ละวิธีการรังวัดได้อย่างครอบคลุมและเที่ยงตรง การกำหนดตำแหน่งของจุดตรวจสอบคำนึงถึงความหลากหลายของสภาพแวดล้อม เช่น บริเวณโค้งงอ พื้นที่ที่มีสิ่งกีดขวาง และพื้นที่ภายในอาคารที่มีข้อจำกัดด้านสัญญาณ GNSS จากนั้นกำหนดหมุดหลักฐาน BM1 ดังรูปที่ 7 ซึ่งอ้างอิงจากโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (NRTK) ของกรมที่ดิน เพื่อใช้เป็นจุดเริ่มต้นในการรังวัด โดยตรวจสอบค่าพิกัดของ BM1 ให้มีความถูกต้องสูงสุดก่อนเริ่มการเก็บข้อมูล

4.4 การรังวัดค่าหมุดตรงหลังเพื่อการรังวัดจุดตรวจสอบ

การรังวัดด้วยเทคนิค Radio RTK การรังวัดค่าพิกัดของหมุด BM2 ใช้เทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ผ่านสัญญาณวิทยุ (Radio RTK) ซึ่งเป็นวิธีการที่สามารถให้ค่าพิกัดแบบเรียลไทม์ที่มีความแม่นยำสูง โดยการเชื่อมต่อกับสถานีอ้างอิงใกล้เคียงเพื่อรับค่าพิกัดปรับแก้ การรังวัดนี้เริ่มจาก BM1 ไปยัง BM2 เพื่อสร้างหมุดตรงหลังสำหรับการรังวัดจุดตรวจสอบ จุดตรวจสอบทั้งหมดถูกวัดค่าพิกัดแบบสามมิติ โดยคำนึงถึงความต่อเนื่องของ

สัญญาณ GNSS และการลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นจากการรับสัญญาณสะท้อนหรือการบังสัญญาณ



รูปที่ 7 การรับวัด GNSS ที่หมุดหลักฐาน

ตารางที่ 1 ค่าพิกัดและค่าระดับหมุด Base โดยใช้วิธีการรับวัดแบบ RTK

Name	Northing (m.)	Easting (m.)	Elevation (m.)
BM1	1,534,657.093	660,403.502	3.131
BM2	1,534,634.953	660,370.608	2.924

4.5 การรับวัดจุดตรวจสอบด้วยกล้อง

การเก็บข้อมูลด้วยกล้อง Total Station การเก็บข้อมูลพิกัดสามมิติของจุดตรวจสอบทั้งภายนอกและภายในอาคารดำเนินการด้วยเครื่องกล้องประมวลผลรวม (Total Station) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีความแม่นยำสูงในการวัดระยะทางและมุม การตั้งกล้องเริ่มจากหมุด BM2 ส่วน BM3 และ BM4 เพื่อใช้สำหรับการวัดจุดตรวจสอบภายในอาคารดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 หมุด BM3 สำหรับวัดจุดตรวจสอบภายในอาคาร

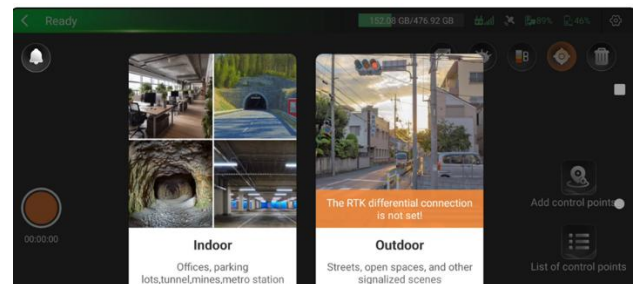
โดยใช้วิธีการรับวัดแบบวงรอบ (Traverse) เพื่อควบคุมความถูกต้องของค่าพิกัด จุดตรวจสอบแต่ละจุดถูกวัดและบันทึกข้อมูลระยะทาง แนวราบ แนวตั้ง และค่ามุมอย่างละเอียด เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการเปรียบเทียบกับข้อมูลจากเทคนิค SLAM

ตารางที่ 2 ค่าพิกัดและค่าระดับหมุด Base โดยใช้วิธีการรับวัดด้วยกล้อง

Name	Northing (m.)	Easting (m.)	Elevation (m.)
BM3	1,534,651.629	660,420.847	3.727
BM4	1,534,643.538	660,417.084	3.730

4.6 การเก็บข้อมูลด้วยเทคนิค SLAM ร่วมกับวิธี PPK

การเก็บข้อมูลด้วยเทคนิค SLAM การเก็บข้อมูลด้วยเทคนิค SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) ใช้เครื่องเลเซอร์สแกนแบบมือถือที่มีระบบ SLAM ในการระบุตำแหน่งและสร้างแผนที่พร้อมกัน อุปกรณ์นี้เหมาะสำหรับการเก็บข้อมูลในพื้นที่ที่สัญญาณ GNSS ไม่ครอบคลุม ใช้รูปแบบการรับวัดแบบ PPK (Post-Processing Kinematic) โดยตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่หมุด BM2 เชื่อมต่อตัวเครื่อง RS10 กับ Controller สร้างโปรเจกต์และเลือกโหมดการรับวัดแบบ Outdoor ทำการเดินรับวัดเก็บข้อมูลบริเวณภายนอกอาคาร สำหรับภายในอาคารการเก็บข้อมูลความละเอียดแบบ 3 มิติ (3D Point cloud) ก็เชื่อมต่อตัวเครื่อง RS10 กับ Controller เลือกโหมดการรับวัดแบบ Indoor ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 การเลือกโหมดรับวัด

การเดินเก็บข้อมูลดำเนินการโดยรอบภายในอาคารดังรูปที่ 10 โดยจะนำไปสร้างข้อมูลแผนที่สามมิติ (3D Point Cloud) ที่มีความละเอียดสูงและสามารถนำไปใช้ในการประมวลผลเชิงพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

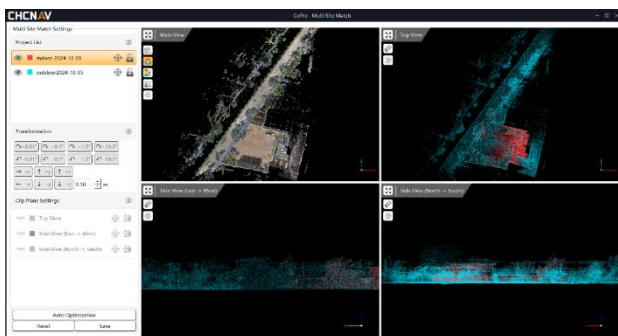


รูปที่ 10 การเก็บข้อมูลด้วย SLAM

หลังจากการเก็บข้อมูลแล้ว นำข้อมูล SLAM มาผ่านกระบวนการประมวลผลด้วยวิธี Post-Processed Kinematic (PPK) โดยใช้ข้อมูล GNSS อ้างอิงจากสถานีฐานใกล้เคียง เพื่อปรับแก้ค่าพิกัดให้มีความถูกต้องสูงสุด การประมวลผลนี้ช่วยลดความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากสัญญาณสะท้อนหรือการบังสัญญาณ ทำให้ข้อมูลพิกัดที่ได้จาก SLAM มีความแม่นยำเชิงตำแหน่งที่ดียิ่งขึ้นซึ่งใช้ในการรังวัดจุดควบคุม

4.7 การนำข้อมูลภายนอกอาคารและภายในอาคารมาเชื่อมต่อกัน

การนำข้อมูลจากการรังวัด SLAM ทั้งภายนอกและภายในอาคารมาเชื่อมต่อกันโดยใช้กระบวนการ Registration ดังรูปที่ 11 เพื่อรวมข้อมูลให้เป็นชุดข้อมูลสามมิติที่มีความต่อเนื่องและสอดคล้องกัน การใช้จุดควบคุมร่วม (Control Points) ในการปรับแนวและการประสานตำแหน่งช่วยให้ข้อมูลจากทั้งสองบริเวณมีการเชื่อมโยงกันอย่างถูกต้องและแม่นยำดังรูปที่ 12 การตรวจสอบความถูกต้องของการเชื่อมต่อดำเนินการโดยเปรียบเทียบค่าพิกัดและรูปทรงของข้อมูล เพื่อให้มั่นใจว่าการรวมข้อมูลมีความสอดคล้องกันทั้งในเชิงตำแหน่งและโครงสร้างโดยให้เลือกให้ชุดข้อมูลภายนอกอาคารเป็นหลักใช้คำสั่ง Registration เพื่อเป็นการขยับชุดข้อมูลให้เชื่อมต่อกัน

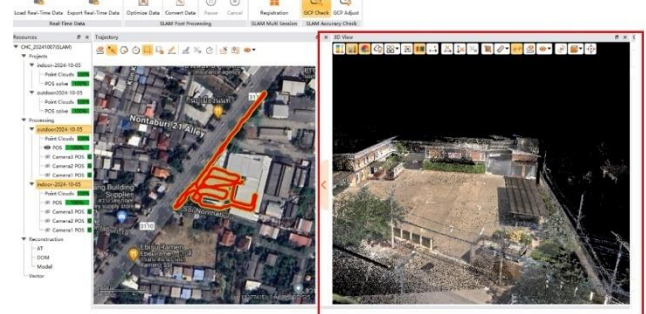


รูปที่ 11 การทำ Registration ให้ข้อมูลเชื่อมต่อกัน

4.8 การประมวลผลและการเปรียบเทียบข้อมูล

การประมวลผลข้อมูลพิกัดสามมิติจากเทคนิค SLAM ร่วมกับ PPK, Radio RTK และ Total Station ใช้ซอฟต์แวร์เฉพาะทางในการจัดการ

ข้อมูลและตรวจสอบความถูกต้อง เป็นการตรวจสอบค่าพิกัดที่รังวัดด้วย SLAM RS10 เปรียบเทียบกับค่าพิกัดจุดหมุดตรวจสอบ (Check point) ที่ได้จากการรังวัดเก็บรายละเอียดภูมิประเทศ (Topographic Survey) ด้วยกล้อง Total Station กับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS โดยนำเข้าไฟล์ที่เป็นค่าพิกัดของจุดตรวจสอบทั้งภายในอาคารและนอกอาคารที่รังวัดได้จาก SLAM แล้วจึงนำเข้าข้อมูลค่าพิกัดจุดตรวจสอบจากกล้อง แล้วจึงทำการเปรียบเทียบค่าพิกัดดำเนินการโดยใช้ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error: RMSE) เพื่อประเมินความแม่นยำเชิงตำแหน่งของแต่ละเทคนิค โดยคำนวณ RMSE สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนทางราบ (dxy) และค่าความคลาดเคลื่อนทางตั้ง (dz) แยกกัน เพื่อให้สามารถประเมินประสิทธิภาพของแต่ละวิธีได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ความเหมาะสมในการใช้งานของแต่ละวิธีในบริบทที่แตกต่างกัน เช่น การรังวัดภายในอาคาร การสำรวจภูมิประเทศ และการจัดทำข้อมูลเชิงพื้นที่ เพื่อเลือกใช้เทคโนโลยีที่ตอบสนองความต้องการของงานรังวัดและทำแผนที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ทำการตรวจสอบค่าความถูกต้องของข้อมูลรายละเอียด 3 มิติ (Point cloud) โดยตรวจสอบว่าค่าอยู่ในเกณฑ์



รูปที่ 12 ข้อมูลที่ได้จาก SLAM ที่รวมเรียบร้อยแล้ว

5. ผลการศึกษา

ในการตรวจสอบค่าความถูกต้องของข้อมูลรายละเอียดแบบสามมิติ (Point Cloud) เมื่อเทียบกับค่าพิกัดจุดตรวจสอบ (Check Point) ที่รังวัดด้วยกล้อง Total Station และการรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 ความถูกต้องข้อมูลภายในอาคาร

การตรวจสอบค่าพิกัดจากการรังวัดรายละเอียดสามมิติ เทียบกับข้อมูลค่าพิกัดหมุดตรวจสอบภายในอาคารทั้ง 15 จุด พบว่าค่าคลาดเคลื่อนทางราบ (dxy) มีค่า RMSE เท่ากับ 0.023 เมตร และค่าคลาดเคลื่อนทางตั้ง (dz) มีค่า RMSE เท่ากับ 0.019 เมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ตามสเปคของเครื่องมือและเทียบเท่ากับความแม่นยำของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของข้อมูลรายละเอียดแบบ 3 มิติและข้อมูลค่าพิกัดหมุดตรวจสอบภายในอาคาร

Name	dy(m.)	dx(m.)	dz(m.)	dxy(m.)
CP1	-0.008	0.009	0.001	0.012
CP2	0.008	0.005	-0.005	0.009
CP3	-0.011	0.013	0.003	0.017
CP4	0.004	0.002	-0.006	0.005
CP5	0.021	0.001	0.013	0.021
CP6	-0.004	-0.005	-0.008	0.006
CP7	-0.025	-0.012	-0.016	0.028
CP8	0.002	0.017	-0.014	0.017
CP9	-0.01	0.035	0.002	0.037
CP10	0.019	0.004	-0.019	0.02
CP11	-0.013	-0.005	0.003	0.014
CP12	-0.029	-0.009	0.017	0.03
CP13	-0.016	0.037	-0.015	0.041
CP14	0.002	-0.006	-0.041	0.007
CP15	-0.005	0.001	0.009	0.005
RMSE			0.019	0.023

5.2 ความถูกต้องข้อมูลภายนอกอาคาร

การตรวจสอบค่าพิกัดจากการรังวัดรายละเอียดสามมิติ เทียบกับข้อมูลค่าพิกัดหมุดตรวจสอบภายนอกอาคารทั้ง 15 จุด พบว่าค่าคลาดเคลื่อนทางราบ (dxy) มีค่า RMSE เท่ากับ 0.018 เมตร และค่าคลาดเคลื่อนทางตั้ง (dz) มีค่า RMSE เท่ากับ 0.022 เมตร ซึ่งยังคงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและสเปคของเครื่องมือ

ข้อมูลที่ได้จากการศึกษารังวัดนี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงของอุปกรณ์ SLAM ยี่ห้อ CHC รุ่น RS10 ให้แก่ผู้สนใจได้ โดยเป็นการยืนยันประสิทธิภาพและคุณภาพ ว่าสามารถสร้างข้อมูลเชิงพื้นที่ที่มีความแม่นยำเทียบเท่ากับการรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการสร้างความเชื่อมั่นและความพึงพอใจให้กับผู้ใช้ได้

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของข้อมูลรายละเอียดแบบ 3 มิติและข้อมูลค่าพิกัดหมุดตรวจสอบภายนอกอาคาร

Name	dy(m.)	dx(m.)	dz(m.)	dxy(m.)
CP01	-0.002	0.012	-0.028	0.012
CP02	-0.002	-0.003	-0.020	0.004
CP03	0.006	0.017	0.044	0.018
CP04	-0.02	-0.027	-0.031	0.033
CP05	-0.003	0.001	0.006	0.003
CP06	0.017	-0.029	-0.045	0.033
CP07	-0.012	0.010	-0.035	0.016
CP08	0.007	0.001	0.003	0.007
CP09	0.022	0.007	-0.029	0.023
CP010	-0.009	0.004	-0.027	0.01
CP011	0.007	0.003	-0.035	0.008
CP012	0.003	0.003	0.039	0.004

CP013	-0.004	0.001	-0.026	0.005
CP014	0.019	0.023	-0.005	0.03
CP015	0.005	0.011	-0.051	0.012
RMSE			0.022	0.018

6. สรุปผลและอภิปราย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความถูกต้องของข้อมูลรายละเอียดสามมิติ (Point Cloud) ที่ได้จากเทคนิค SLAM โดยใช้เครื่องมือ SLAM เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลค่าพิกัดจากการรังวัดด้วยกล้องสำรวจ Total Station และเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS โดยทำการตรวจสอบทั้งภายในและภายนอกอาคารผ่านจุดตรวจสอบ (Check Point) จำนวน 15 จุดในแต่ละพื้นที่ สำหรับการรังวัดภายในอาคาร พบว่าค่าคลาดเคลื่อนทางราบ (dxy) มีค่า RMSE เท่ากับ 0.023 เมตร และค่าคลาดเคลื่อนทางตั้ง (dz) มีค่า RMSE เท่ากับ 0.019 เมตร ข้อมูลที่ได้อยู่ในเกณฑ์ตามสเปคของเครื่องมือและมีความแม่นยำเทียบเท่ากับการรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ในส่วนของการรังวัดภายนอกอาคาร ค่าคลาดเคลื่อนทางราบ (dxy) มีค่า RMSE เท่ากับ 0.018 เมตร และค่าคลาดเคลื่อนทางตั้ง (dz) มีค่า RMSE เท่ากับ 0.022 เมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานและสเปคของเครื่องมือเช่นเดียวกัน ผลการศึกษานี้ยืนยันประสิทธิภาพและคุณภาพของเทคนิค SLAM ว่าสามารถสร้างข้อมูลเชิงพื้นที่ที่มีความแม่นยำเทียบเท่ากับการรังวัดด้วย GNSS จึงสามารถนำข้อมูลที่ได้มาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงเพื่อเสริมสร้างความมั่นใจให้กับผู้ใช้เครื่องมือและวิศวกรสำรวจได้

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของเทคนิค SLAM ในการสร้างข้อมูลรายละเอียดสามมิติที่มีความถูกต้องสูง ทั้งในพื้นที่ภายในและภายนอกอาคาร การที่ค่าคลาดเคลื่อนอยู่ในระดับเซนติเมตรและใกล้เคียงกับมาตรฐานของการรังวัดด้วย GNSS และ Total Station แสดงให้เห็นถึงความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของเครื่องมือ SLAM ซึ่งมีข้อดีในด้านความรวดเร็วและความสะดวกในการเก็บข้อมูลเมื่อเทียบกับวิธีการรังวัดแบบดั้งเดิม นอกจากนี้การที่ผลการศึกษาระบุว่าความคลาดเคลื่อนทางราบและทางตั้งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน ยังเป็นการยืนยันว่าการนำเทคนิค SLAM มาใช้ในการสำรวจและจัดทำแผนที่สามมิติเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีข้อจำกัดด้านเวลาและการเข้าถึง การใช้ SLAM ช่วยลดระยะเวลาในการสำรวจและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานโดยไม่ลดทอนความถูกต้องของข้อมูล

โดยการศึกษาครั้งนี้ต่างจากงานวิจัยที่ใกล้เคียงกันคืองานวิจัยของ Shuran Zheng และคณะ ได้ทดสอบความคลาดเคลื่อนในลักษณะที่เป็นเส้นทางบนถนน โดยขับรถจากมหาวิทยาลัยนิวเซาท์เวลส์ (UNSW) ไปยังลาเพอรัส จากนั้นขับกลับมายัง UNSW เพื่อสร้างแผนที่ถนนแบบข้อมูลรายละเอียดสามมิติ 3 มิติที่มีความแม่นยำสูงซึ่งลักษณะข้อมูลเป็นตามแนวเส้นทาง [7] แต่การศึกษานี้เป็นแบบอาคาร อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาต่อยอดในประเด็นต่าง ๆ เช่น การประเมินประสิทธิภาพของ SLAM ในพื้นที่ที่มีโครงสร้างซับซ้อน หรือสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวางจำนวนมาก เพื่อ

ทดสอบความแม่นยำในสถานการณ์ที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ การเปรียบเทียบกับเครื่องมือ SLAM รุ่นอื่น ๆ หรือเทคนิคการรังวัดที่แตกต่างกันจะช่วยเสริมสร้างข้อมูลเชิงเปรียบเทียบที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น โดยสรุปผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการใช้เทคนิค SLAM ในการสร้างข้อมูลรายละเอียดสามมิติเป็นทางเลือกที่น่าสนใจและมีศักยภาพสูง เนื่องจากสามารถให้ข้อมูลที่มีความแม่นยำเทียบเท่ากับการรังวัดด้วย GNSS และกล้องสำรวจ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานและลดระยะเวลาในการสำรวจ จึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการสำรวจและทำแผนที่ในปัจจุบัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท ซีเอ็ชซี นาฟเทค (ประเทศไทย) จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และสนับสนุนเครื่องมือในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ รวมถึงสาขาวิชาวิศวกรรมสำรวจ สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่ให้การสนับสนุนและส่งเสริมการทำงานของนักศึกษาวิชาวิศวกรรมสำรวจ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการสำรวจด้วยดาวเทียมและระบบ SLAM ความร่วมมือและความทุ่มเทของทุกฝ่ายมีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อความสำเร็จของโครงการนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] กองเทคโนโลยีทำแผนที่ (2563). องค์ประกอบและหลักการรังวัดด้วยระบบโครงข่ายการรังวัด ด้วยดาวเทียมแบบจลน์. แนวทางการรังวัดโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network). กรมที่ดิน. หน้า 3-1.
- [2] พรชัย พรชัยพลทวี, พุทธิพล ดำรงชัย และ เขตโสภณ ภิญโญการ (2566). การประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่งของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ต้นทุนต่ำ สำหรับนำมาใช้ในการเฝ้าติดตามแผ่นดินถล่ม. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28*, ภูเก็ต, 24-26 พฤษภาคม 2566, หน้า 105-1-105-6.
- [3] วิชัย เยี่ยงวีรชน (2557). *การสำรวจ 1*. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 10-11.
- [4] ยรรยง ทรัพย์สุขอำนวย (2557). *การสำรวจเพื่อการก่อสร้าง*. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, หน้า 210-215.
- [5] มศวรรณ เสนาสวัสดิ์ และ ไพจิตร ผาวาน (2566). การศึกษาความแม่นยำของวิธีการสำรวจแบบต่างๆ เพื่อการก่อสร้าง. *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28*, ภูเก็ต, 24-26 พฤษภาคม 2566, หน้า 36-1 – 36-9.
- [6] ระเบียบกรมที่ดินว่าด้วยการรังวัดทำแผนที่โดยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งด้วยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) พ.ศ. 2562. (2562). *ราชกิจจานุเบกษา*. เล่มที่ 136 ตอนพิเศษ 270 ง. หน้า 2 – 4.
- [7] Wuhan Geosun Navigation Technology. (2024). SLAM สำหรับเครื่องสแกน LiDAR แบบพกพา. GEOSUN. <https://thai.geosunlidar.com/news>.
- [8] Shuran Zheng, Jinling Wang, Chris Rizos, Weidong Ding and Ahmed El-Mowafy. (2023). Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) for Autonomous Driving: Concept and Analysis. *Remote Sens*, Volume 15, Issue 4, pp. 1-41.
- [9] Cadena, C., Carlone, L., Carrillo, H., Latif, Y., Scaramuzza, D., Neira, J., ... & Leonard, J. J. (2016). Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(6), 1309-1332.
- [10] Rizos, C., Janssen, V., Roberts, C., & Grinter, T. (2012). "Precise Point Positioning: Is the era of differential GNSS over?" *Survey Review*, 44(325), 301-310.
- [11] T.R.S. Surveying & Consultant. (2024). *Indoor SURVEYING*. <https://www.justdial.com/jdmart/Delhi/R-S-Surveying-Consultant-Saket-Metro-Saket>.