

การประเมินความถูกต้องกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติจากระบบ การทำแผนที่แบบเคลื่อนที่

Accuracy Assessment of 3D-Point Clouds with Mobile Mapping System

สรศักดิ์ ชัยทวี¹ ธงทิศ ฉายากุล² และสุรเชษ ศรีนารา³

ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย^{1,2}

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา³

E-mail: Sorasak.rlee@gmail.com¹, Thongthit.c@chula.ac.th², Surachet.sr@up.ac.th³

บทคัดย่อ

ระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ที่เป็นเทคโนโลยีการสำรวจแบบใหม่ รวบรวมข้อมูลสภาพแวดล้อมของถนนในรูปแบบสามมิติ ซึ่งก่อนหน้านี้การเก็บข้อมูลสภาพแวดล้อมของถนนมีความลำบากและเสี่ยงอันตรายที่อาจเกิดจากการสัญจรของรถ การสำรวจด้วยระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ที่มีการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวดเร็ว ประหยัดเวลาและมีความแม่นยำ อย่างไรก็ตามส่วนประกอบของระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ที่มีหลายเซ็นเซอร์ อีกทั้งการเก็บข้อมูลในขณะที่เคลื่อนที่ ทำให้ข้อมูลมีความคลาดเคลื่อนจากหลายปัจจัย ดังนั้นในงานวิจัยนี้ศึกษาประเมินความถูกต้องกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติที่ได้จากการสำรวจด้วยระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ โดยตรวจสอบความถูกต้องด้วยจุดตรวจสอบที่ได้จากการกำหนดตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียม GNSS วิธี RTK ผลทดสอบความถูกต้องกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติก่อนปรับแก้ด้วยจุด GCP มีค่า RMSE_r ทางราบเท่ากับ 0.084 เมตร และ RMSE_d ทางตั้งเท่ากับ 0.123 เมตร ค่าระดับความเชื่อมั่นที่ 95% แบบสามมิติเท่ากับ 0.241 เมตร อยู่ในเกณฑ์งานชั้นที่ 3 ของมาตรฐาน NSSDA และผลทดสอบความถูกต้องกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติหลังจากปรับแก้ด้วยจุด GCP ผลปรากฏว่า RMSE_r ทางราบเท่ากับ 0.076 เมตร และ RMSE_d ทางตั้งเท่ากับ 0.046 เมตร ค่าระดับความเชื่อมั่นที่ 95% แบบสามมิติเท่ากับ 0.089 เมตร อยู่ในเกณฑ์งานชั้นที่ 2 ของมาตรฐาน NSSDA ข้อมูลกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติมีความคลาดเคลื่อนสูงในทางตั้ง เมื่อปรับแก้ด้วยจุด GCP ผลปรากฏว่าความคลาดเคลื่อนมีค่าลดลง

 **คำสำคัญ :** ระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่; กลุ่มของจุดพิกัดสามมิติ; การประเมินความถูกต้อง

Abstract

Mobile Mapping System (MMS) is well-known as a modern surveying technology that utilizes to acquire the environmental data of roads in the form of three-dimensional (3D). Previously, receiving the environmental data on the road was difficult and unsafe due to the traffic on the road. Surveying with MMS provides more capability, fast, time-saving, and precision. However, the

component of MMS combines with numerous sensors and acquiring data while MMS is moving; the data may contaminate with errors due to several factors. Therefore, this research investigates the accuracy assessment of 3D-point clouds surveyed from MMS by verifying the positioning accuracy using the checking points (CPs) with global navigation satellite system (GNSS)-based positioning through the real-time kinematic (RTK) technique. The examined results of 3D-point clouds before adjusting by ground control points (GCPs) show that the RMSE_r in horizontal is about 0.084 m, and the RMSE in vertical is about 0.123 m. The 3D-RMSE at a 95% confidence level is approximate 0.241 m and falls within Class 3 of NSSDA. And the examined results of 3D-point clouds after adjusting by GCPs indicate that the RMSE_r in horizontal is about 0.076 m and the RMSE in vertical is about 0.046 m. At the same time, the 3D-RMSE at a 95% confidence level is only 0.089 m and falls within Class 2 of NSSDA. The 3D-point clouds have a significant amount of error in vertical, but after adjusting with GCPs, the obtained result shows that the error is significantly decreased



Keywords: Mobile mapping system; 3D-point clouds; Accuracy assessment



1. บทนำ

ระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ (Mobile Mapping System) เป็นเทคโนโลยีการสำรวจแบบใหม่ที่รวบรวมข้อมูลสภาพแวดล้อมบนท้องถนนแบบสามมิติได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งก่อนหน้านี้การสำรวจเก็บรวบรวมข้อมูลบนท้องถนนมีความลำบากและเป็นอันตรายสำหรับเจ้าหน้าที่ การสำรวจด้วยระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ที่สามารถเก็บข้อมูลได้รวดเร็ว ครบถ้วน ใช้เวลาน้อย ลดการปิดเส้นทางจราจร สามารถทำงานได้ทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน และลดความเสี่ยงอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับผู้สำรวจ [1] ข้อมูลจากระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ของสภาพแวดล้อมถนน ทำให้เทคโนโลยีการสำรวจด้วยระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน

ระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ใช้อุปกรณ์ที่ติดตั้งบนยานพาหนะเพื่อจัดเก็บข้อมูลในขณะที่เคลื่อนที่ ตัวระบบจะประกอบด้วยอุปกรณ์หลายชิ้นเซอร์ ได้แก่ เครื่องกำหนดตำแหน่งด้วยระบบดาวเทียม (GNSS) เครื่องสแกนด้วยเลเซอร์ (LiDAR) เครื่องเซ็นเซอร์วัดความเฉื่อย (IMU) เครื่องวัดระยะทาง (DMI) และกล้องพาโนรามา 360 องศา และระบบควบคุมเซ็นเซอร์ [2] ข้อมูลจากประมวลผลแสดงในลักษณะกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ ค่าพิกัดของจุดอ้างอิงตามระบบแผนที่ กลุ่มของจุดพิกัดสามมิติสามารถจำแนกวัตถุต่าง ๆ ในสภาพแวดล้อมของถนนได้ เช่น พื้นผิวถนน เสาไฟฟ้า ต้นไม้ รถ อาคารและป้ายจราจร [3], [4], [5]

ความถูกต้องข้อมูลกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติจากระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่เป็นสิ่งสำคัญในการตัดสินใจ นำข้อมูลมาใช้ในการงานทางด้านวิศวกรรม ความคลาดเคลื่อนโดยรวมของระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับผลลัพธ์จากเซ็นเซอร์ GNSS, LiDAR, IMU และ DMI ซึ่งความคลาดเคลื่อนโดยรวมของระบบมีสาเหตุหลักมาจาก GNSS เนื่องจากขณยานพาหนะเคลื่อนที่ในเขตเมืองจะเกิดคลื่นหลายวิถีและการสูญเสียสัญญาณดาวเทียมในบางช่วง ทำให้ความถูกต้องของข้อมูลลดลง [6] ดังนั้นการประมวลผลในภายหลัง (Post-Processing) เป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มความถูกต้องของข้อมูล

อย่างไรก็ตาม ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากระบบการทำงานของเซ็นเซอร์ต่าง ๆ ส่งผลให้ข้อมูลกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติที่ได้จากการประมวลผลมีความคลาดเคลื่อนสะสม การนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้งานมีความจำเป็นต้องทราบเกณฑ์ความถูกต้องของข้อมูลกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบความถูกต้องของข้อมูลกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติจากระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ โดยใช้อุปกรณ์ทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ Topcon IP-S3 และตรวจสอบความถูกต้องด้วยการกำหนดตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS วิธี Real Time Kinematic (RTK)

2. ระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่

ระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ ประกอบด้วยอุปกรณ์เซ็นเซอร์ต่าง ๆ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 LiDAR (Light Detection and Ranging)

LiDAR เป็นเซ็นเซอร์สแกนด้วยเลเซอร์โดยการส่งคลื่นแสงออกมาแบบต่อเนื่อง โดยคลื่นจะตกกระทบกับวัตถุต่าง ๆ และสัญญาณจะสะท้อนกลับมา ระยะเวลาในการเดินทางของแสงได้รับการคำนวณเป็นระยะทางระหว่างเซ็นเซอร์กับวัตถุที่ตกกระทบ ซึ่งการทราบระยะดังกล่าวสามารถคำนวณเป็นค่าพิกัดและค่าสัญญาณ [7]

2.2 กล้องถ่ายภาพ (Digital cameras)

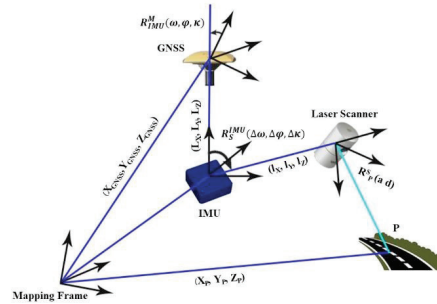
กล้องถ่ายภาพในระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ปัจจุบันนิยมใช้เป็นกล้องถ่ายภาพแบบพาโนรามา 360 องศา เพื่อเก็บข้อมูลได้ครอบคลุมรอบทิศทาง ทำให้การแสดงผลกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติมีสีที่สมจริง นอกจากนี้รูปทรงเรขาคณิตของภาพและความละเอียดของภาพช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติ [8] อย่างไรก็ตามกล้องถ่ายภาพเป็นเซ็นเซอร์เพิ่มเติมเพื่อให้ข้อมูลมีความสมจริง

2.3 อุปกรณ์กำหนดตำแหน่งและทิศทาง

อุปกรณ์เซ็นเซอร์ในการกำหนดตำแหน่งให้กับระบบ ได้แก่ GNSS, IMU, DMI ทั้งสามเซ็นเซอร์ทำงานร่วมกันทำให้การกำหนดตำแหน่งมีความถูกต้องสูงในระดับเซนติเมตร [7] ถึงแม้ว่าความถูกต้องจะลดลงเมื่อสัญญาณ GNSS ถูกล้อมรอบด้วยอาคารหรือโดนบดบังสัญญาณ ทำให้เกิดการแพร่กระจายของคลื่นหลายวิถีและเมื่อ GNSS ไม่สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ IMU และ DMI สามารถช่วยเพิ่มความถูกต้องของข้อมูลได้ [9] โดย IMU และ DMI จะรักษาความเสถียรและความต่อเนื่องของตำแหน่งไว้

2.4 ระบบควบคุมส่วนกลาง

ระบบควบคุมส่วนกลางเป็นการควบคุมและจัดการเซ็นเซอร์ด้วยซอฟต์แวร์ที่มีความซับซ้อนในการบริหารจัดการเซ็นเซอร์ทั้งหมดให้ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพจะทำหน้าที่รวบรวม วิเคราะห์ ประมวลผล จัดเก็บข้อมูล ระบุตำแหน่งและการปรับแก้ทิศทางของเซ็นเซอร์ทั้งหมด



ภาพที่ 1 หลักอ้างอิงระบบพิกัดแผนที่

3. การอ้างอิงระบบพิกัดแผนที่

การอ้างอิงระบบพิกัดของอุปกรณ์ระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ เครื่องสแกนด้วยเลเซอร์สแกนระยะ d และขนาดของมุม a ของจุด P ซึ่งเป็นจุดใด ๆ ในพื้นที่จริง ตำแหน่งจะถูกจัดเก็บไว้ในระบบพิกัดของตัวระบบ ซึ่งตำแหน่งนี้สามารถย้ายไปอยู่ในเฟรมแผนที่ได้จากการกำหนดตำแหน่งด้วย GNSS [10] ดังแสดงในภาพที่ 1

ในตารางที่ 1 ได้แสดงรายการคำอธิบายและแหล่งที่มาของค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการหาตำแหน่งพิกัดในระบบแผนที่ของจุด P โดยมีการคำนวณโดยใช้สมการที่ (1) [3] ค่าพารามิเตอร์ที่แสดงในสมการ $[X_P, Y_P, Z_P]^T$ เป็นตำแหน่งพิกัดในระบบแผนที่ของจุด P และ $[X_{GNSS}, Y_{GNSS}, Z_{GNSS}]^T$ แสดงถึงค่าพิกัดตำแหน่งแผนที่ของระบบ GNSS ส่วนค่า (ω, ϕ, κ) คือค่าทิศทาง roll, pitch, yaw ของเซ็นเซอร์ IMU และ $(\Delta \omega, \Delta \phi, \Delta \kappa)$ เป็นค่าแก้ทิศทางของเครื่องสแกนด้วยเลเซอร์

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = R_{IMU}^M(\omega, \phi, \kappa) \cdot \left(\begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix} + r_P^S(a, d) \cdot R_{IMU}^S(\Delta \omega, \Delta \phi, \Delta \kappa) \right) + \begin{bmatrix} X_{GNSS} \\ Y_{GNSS} \\ Z_{GNSS} \end{bmatrix} \quad (1)$$

ตารางที่ 1 แสดงรายการพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในการแปลงค่าการอ้างอิงระบบพิกัดแผนที่ [3] คำนวณโดยใช้สมการที่ (1)

Parameters	Representation	Source
(X_P, Y_P, Z_P)	พิกัดจากการสแกนด้วยเลเซอร์ของจุด P ในระบบพิกัดแผนที่	Mapping frame
$R_{IMU}^M(\omega, \phi, \kappa)$	ข้อมูลการหมุนเพื่อจัดตำแหน่ง IMU ให้ตรงกับเฟรมแผนที่	IMU
$R_S^{IMU}(\Delta \omega, \Delta \phi, \Delta \kappa)$	พารามิเตอร์ปรับทิศทางของเครื่องสแกนด้วยเลเซอร์	System calibration
$R_P^S(a, d)$	ตำแหน่งของจุด P ในระบบพิกัดเครื่องสแกนด้วยเลเซอร์	Laser scanners
l_x, l_y, l_z	ระยะขจัดของ IMU กับเครื่องสแกนด้วยเลเซอร์	System calibration
L_x, L_y, L_z	ระยะขจัดของ GNSS กับ IMU	System calibration
$(X_{GNSS}, Y_{GNSS}, Z_{GNSS})$	ตำแหน่งของเครื่อง GNSS ในเฟรมแผนที่	GNSS antenna

4. ความคลาดเคลื่อนระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่

ค่าความคลาดเคลื่อนกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติจากระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ที่เป็นความคลาดเคลื่อนสะสมจากเซ็นเซอร์ต่าง ๆ ในการเก็บข้อมูลเข้าสู่การคำนวณตามค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ (1) ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนจากหลายเซ็นเซอร์และหลายพารามิเตอร์ส่งผลให้กลุ่มของจุดพิกัดสามมิติมีความถูกต้องน้อยลง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ความคลาดเคลื่อนของเครื่องสแกนด้วย

เลเซอร์

การวัดตำแหน่งด้วยเครื่องสแกนด้วยเลเซอร์มีความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัดระยะทางและค่ามุมของคลื่น LiDAR ซึ่งเกิดจากการส่งและรับสัญญาณของคลื่นไปกระทบกับวัตถุและความไม่คงที่ของเซ็นเซอร์ทำให้ค่ามุมและระยะทางมีความคลาดเคลื่อน [7]

4.2 ความคลาดเคลื่อนของ IMU

IMU เป็นเซ็นเซอร์วัดค่า 2 ส่วนคือ มาตรวัดทิศทางสามทิศทาง เป็นการรักษาทิศทางของมุมอ้างอิงแบบสัมบูรณ์และมาตรวัดความเร่งเชิงมุมสามทิศทางที่ใช้ชี้วัดอัตราการเปลี่ยนแปลงตามแนวแกน ค่าความคลาดเคลื่อนของ IMU เกิดจากตัว Accelerometer และ Gyroscope เกิดการเยื้องศูนย์จากแรงโน้มถ่วง ซึ่งมาตรฐานของความคลาดเคลื่อนจะระบุไว้ในข้อกำหนดคุณสมบัติของผู้ผลิต

4.3 ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่ง

ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งส่วนใหญ่เกิดจาก GNSS ในระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ ที่เกิดความคลาดเคลื่อนในชั้นบรรยากาศหรือคลื่นหลายวิถีและความคลาดเคลื่อนจากระยะเส้นฐานระหว่างสถานีฐานกับ GNSS ของระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ [6]

4.4 ความคลาดเคลื่อนของระยะชดเชยระหว่างเซ็นเซอร์ (Lever-arm offset errors)

ความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ในการวัดค่าชดเชยของระยะระหว่างเซ็นเซอร์เป็นสิ่งที่เกิดขึ้นได้ ดังนั้นการสอบเทียบและปรับแก้ค่าชดเชยของระยะระหว่างเซ็นเซอร์ให้มีความถูกต้องมากที่สุด สามารถลดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติได้

5. มาตรฐานการทดสอบความถูกต้อง

National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA) ใช้วิธีการทางสถิติทดสอบความถูกต้องที่มีประสิทธิภาพ สำหรับตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลเชิงตำแหน่งและความถูกต้องของข้อมูลเชิงพื้นที่ ซึ่งได้มาจากแหล่งข้อมูลต่าง ๆ เช่น ภาพถ่ายทางอากาศ ภาพถ่ายดาวเทียม การกำหนดตำแหน่งด้วย GNSS การสแกนด้วยเลเซอร์ LiDAR และแผนที่ เพื่อเป็นมาตรฐานกลางในการระบุความถูกต้องเชิงตำแหน่งของข้อมูลเชิงพื้นที่ [11] ความถูกต้องเชิงตำแหน่งตามสมมติฐานและวิธีการที่กำหนดตามมาตรฐานของ NSSDA สามารถคำนวณความคลาดเคลื่อนและทดสอบความถูกต้องได้ดังนี้ [12]

5.1 ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (Mean Errors)

ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของข้อมูลสุ่มคำนวณดังสมการที่ (2) [12]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

เมื่อ

x_i คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

n คือ จำนวนจุดตรวจสอบ

i คือ ตัวเลขระหว่าง 1 ถึง n

5.2 ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อน (Standard Deviation)

การคำนวณค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความคลาดเคลื่อนใช้สมการที่ (3) [12]

$$S_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

เมื่อ

x_i คือ ค่าความคลาดเคลื่อน

$\bar{x}$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย

n คือ จำนวนจุดตรวจสอบ

i คือ ตัวเลขระหว่าง 1 ถึง n

5.3 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Squares Error)

ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองเป็นการหารากที่สองเฉลี่ยของชุดข้อมูลผลต่างของจุดพิกัดที่สำรวจกับจุดพิกัดอ้างอิงที่ความถูกต้องสูงกว่าสามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ (4) [12]

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i(MMS)} - x_{i(GNSS)})^2} \quad (4)$$

เมื่อ

$x_{i(MMS)}$ คือ ค่าพิกัดของจุดสำรวจด้วย MMS

$x_{i(GNSS)}$ คือ ค่าพิกัดของจุดตรวจสอบที่มีความถูกต้องสูงกว่าจาก GNSS วิธี RTK

n คือ จำนวนจุดตรวจสอบ

i คือ ตัวเลขระหว่าง 1 ถึง n

5.4 ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ของความถูกต้อง NSSDA (NSSDA Accuracy at 95% Confidence Level)

เป็นค่ามาตรฐานการทดสอบในการหาความเชื่อมั่นของข้อมูลที่ 95 เปอร์เซนต์ ซึ่งจะใช้ค่าคงที่คูณกับค่า RMSE ทางราบแสดงในสมการที่ (5) และคูณด้วย RMSE ทางตั้งตามสูตรสมการที่ (6) [12]

$$95\% \text{ confidence Horizontal} = 1.7308(RMSE) \quad (5)$$

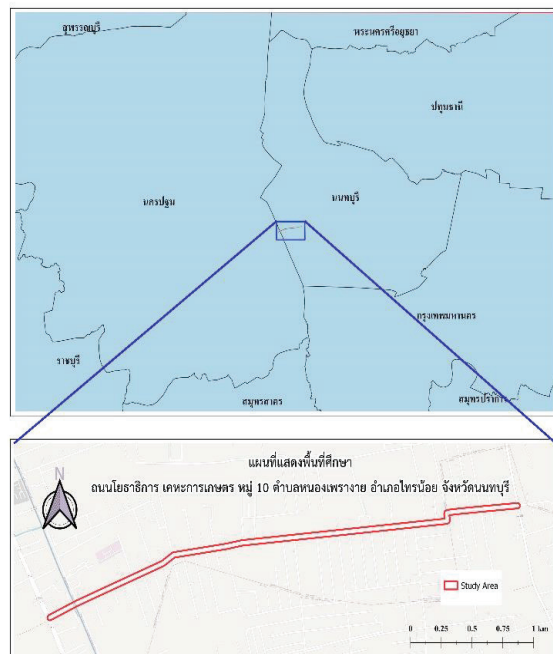
$$95\% \text{ confidence Vertical} = 1.9600(RMSE) \quad (6)$$

6. การดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้ คือ 1) การสำรวจเก็บข้อมูลด้วยระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ (MMS) 2) การประมวลผลข้อมูล MMS และการปรับแก้ข้อมูล 3) การทดสอบความถูกต้องกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติ

6.1 การสำรวจเก็บข้อมูลภาคสนาม

ก่อนใช้ระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่สำรวจเก็บข้อมูล จำเป็นต้องสำรวจพื้นที่และวางแผนการทำงาน รวมถึงหาข้อมูลหมุดหลักฐานอ้างอิงในพื้นที่ใกล้เคียงกับพื้นที่สำรวจ ในงานศึกษานี้ได้เลือกพื้นที่เส้นทางถนนโยธาธิการ เคหะการเกษตร หมู่ 10 ตำบลหนองเพรางาย อำเภอไทรน้อย จังหวัดนนทบุรี ที่ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แผนที่แสดงที่ตั้งพื้นที่ศึกษา

6.1.1 การสำรวจจุดควบคุมและจุดตรวจสอบ

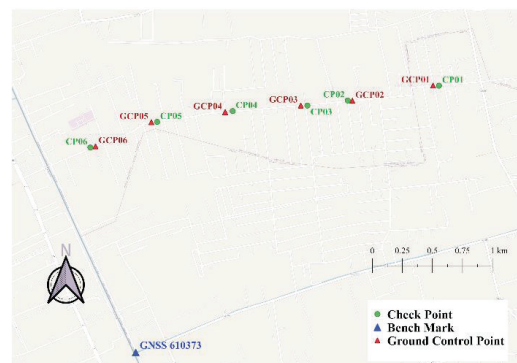
ก่อนเริ่มงานสำรวจด้วยระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ที่มีความจำเป็นที่ต้องสำรวจจุดควบคุมภาคพื้นดิน (GCP) และจุดตรวจสอบ (CP) เพื่อใช้ในการปรับแก้และตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติ โดยการใช้เทคนิคการกำหนดตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ด้วยวิธี Real Time Kinematic (RTK) ซึ่งจะกำหนดสถานีฐานคือหมุดควบคุมของกรมชลประทานชื่อหมุด GNSS 610373 ดังแสดงในภาพที่ 3 มีระบบพิกัดแผนที่ UTM WGS 84 Zone 47N มีค่าพิกัดทางทิศเหนือเท่ากับ 1527509.770 เมตร ค่าพิกัดทางทิศตะวันออกเท่ากับ 643081.373 เมตร และค่าระดับ 4.052 เมตรจากระดับทะเลปานกลาง

สถานีฐานที่ทำการติดตั้งเพื่อเป็นจุดอ้างอิงให้กับ การสำรวจจุด GCP และ CP สามารถทำงานเป็นสถานีฐานให้กับระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ได้เช่นกัน ดังนั้นการกำหนดตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS ของระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่กับการกำหนดตำแหน่งของจุด GCP และ CP อ้างอิงด้วยสถานีฐานเดียวกัน



ภาพที่ 3 ตำแหน่งหมุด GNSS 610373 เป็นสถานีฐาน GNSS วิธี RTK และวิธี Post process Kinematic (PPK)

การสำรวจจุด GCP และ CP ในพื้นที่สำรวจระยะทางประมาณ 4 กิโลเมตร ใช้จุด GCP จำนวน 6 จุด และ CP จำนวน 6 จุด ดังแสดงในภาพที่ 4 โดยจุด GCP จะทำเครื่องหมายกากบาทสีเหลืองเพื่อให้เห็นได้ชัดเจน ในข้อมูลของระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ ดังแสดงในภาพที่ 5 โดยวางสลับฝั่งซ้ายและฝั่งขวาของถนน ซึ่งความห่างแต่ละจุดประมาณ 500 เมตร เนื่องจากหาต้องการความถูกต้องของงานในระดับงานชั้นที่ 2 หรือดีกว่า ต้องมีจุด GCP ห่างกันไม่เกิน 700 เมตร [7] ส่วนจุด CP ใช้มุมของสัญลักษณ์เครื่องหมายเส้นจราจรตรงกลางถนนเป็นจุดตรวจสอบ โดยกำหนดจำนวนจุดตรวจสอบจำนวน 6 จุดเพื่อให้มีระยะห่างสอดคล้องกับจุด GCP



ภาพที่ 4 แสดงที่ตั้งหมุดอ้างอิง จุด GCP และจุด CP



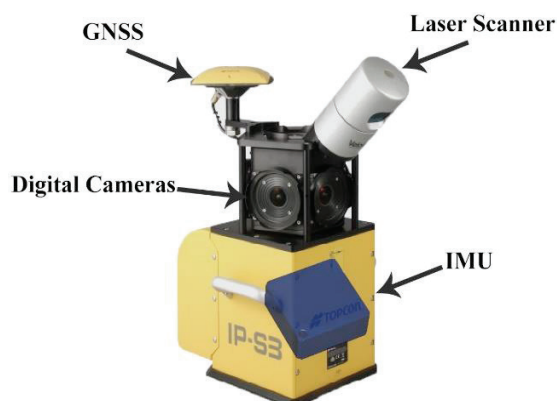
ภาพที่ 5 แสดงการกำหนดตำแหน่งของจุด GCP

6.1.2 การสำรวจด้วยระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่

การสำรวจภาคสนามด้วยระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ใช้อุปกรณ์ Topcon IP-S3 HD ซึ่งคุณสมบัติเฉพาะของอุปกรณ์แสดงในตารางที่ 2 ส่วนประกอบของเซ็นเซอร์ของระบบที่อยู่ในชุดอุปกรณ์หลักจะมีตัวรับสัญญาณ (Antenna) ของระบบ GNSS เครื่องสแกนด้วยเลเซอร์ กล้องถ่ายภาพ 360 องศาและ IMU ที่ติดตั้งเก็บไว้ในตัวอุปกรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 6 ส่วน DMI จะติดตั้งไว้ที่ล้อรถและส่วนตัวควบคุมจะประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่เชื่อมต่อกับระบบควบคุมเพื่อสั่งการและบันทึกข้อมูลผ่านซอฟต์แวร์

ตารางที่ 2 คุณสมบัติเฉพาะของอุปกรณ์ IP-S3 HD [13]

GNSS Receiver	
จำนวนช่องสัญญาณ	226 ช่อง
GPS	L1 / L2 carrier, L1P, L2P
GLONASS	L1 / L2 carrier, L1P, L2P
อัตราการส่งข้อมูล	10Hz
ความถูกต้องของการสำรวจ รังวัดแบบสถิติ	H : $\pm 3.0\text{mm} + 0.5\text{mm}$ V : $\pm 3.0\text{mm} + 0.5\text{mm}$
ความถูกต้องของการสำรวจ รังวัดแบบจลน์	H : $\pm 10\text{mm} + 1\text{mm}$ V : $\pm 15\text{mm} + 1\text{mm}$
ระบบกันน้ำ	IP67
IMU	
ความเสถียรของ Gyro	1°/hr
ความเสถียรของอัตราเร่ง	7.5 mg
Laser scanner	
ความหนาแน่นจุด	700000 จุด/วินาที
ระยะสแกน	100 เมตร
กันน้ำ	IP67
กล้องถ่ายภาพรอบทิศทาง	
จำนวนกล้องถ่ายภาพ	6 ตัว รอบทิศทาง
ความละเอียดภาพสูงสุด	8000x4000 จุดภาพ
อัตราการบันทึกภาพ	10 เฟรมต่อวินาที



ภาพที่ 6 ส่วนประกอบเซ็นเซอร์ของอุปกรณ์ Topcon IP-S3 HD ภาพดัดแปลงมาจาก Topcon [13]

การจัดเก็บข้อมูลของระบบจะควบคุมด้วยซอฟต์แวร์ Mobile Master Field (MMF) ทำงานบนระบบปฏิบัติการ Windows ซอฟต์แวร์จะใช้ควบคุมการทำงานของเซ็นเซอร์ต่าง ๆ ของอุปกรณ์ ใช้บันทึกข้อมูลลงในหน่วยความจำและแสดงสถานะการทำงานของเซ็นเซอร์โดยสถานะขั้นตอนการทำงานของอุปกรณ์ Topcon IP-S3 HD ผ่านซอฟต์แวร์ Mobile Master Field มีรายละเอียดขั้นตอนดังต่อไปนี้ [14]

- การตรวจสอบระบบการทำงาน (Operation Check) เป็นการตรวจสอบความพร้อมของเซ็นเซอร์
- กำหนดตำแหน่งพื้นที่จัดเก็บข้อมูลจากทุกเซ็นเซอร์ลงในระบบคอมพิวเตอร์
- การสอบเทียบเซ็นเซอร์ IMU และการทำ Initialization ของ GNSS วิธี PPK ขณะที่ยานพาหนะหยุดนิ่ง
- การสอบเทียบเซ็นเซอร์ IMU และ GNSS ในขณะที่ยานพาหนะเคลื่อนที่
- การเริ่มบันทึกข้อมูลจากทุกเซ็นเซอร์เข้าสู่พื้นที่จัดเก็บในระบบคอมพิวเตอร์
- การสอบเทียบเซ็นเซอร์ IMU และ GNSS หลังจากเก็บข้อมูลเสร็จสิ้น

6.2 การประมวลผลและการปรับแก้ข้อมูล MMS

การจัดเก็บข้อมูลในระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ ได้รับข้อมูลจากหลายเซ็นเซอร์และมีระยะทางรวมประมาณ 4 กิโลเมตร การประมวลผลข้อมูลมีความจำเป็นต้องใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์ค่อนข้างสูง การประมวลผลใช้ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ Magnet Collage ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์เฉพาะในการประมวลผลอุปกรณ์ IP-S3 HD โดยขั้นตอนการประมวลผลมีดังนี้ [15]

6.2.1 การประมาณค่าตำแหน่งเส้นทาง (Vehicle trajectory estimation)

เป็นการประมวลผลเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบ ซึ่งใช้ค่า GNSS ประมวลผลแบบ PPK โดยอ้างอิงจากสถานีฐาน GNSS 610373 และประมวลผลร่วมกับค่าได้จาก IMU กับ DMI ทำให้ค่าตำแหน่งเส้นทางมีความถูกต้องสูงและขจัดปัญหาตำแหน่งที่ความคลาดเคลื่อนสูงเนื่องจาก GNSS รับสัญญาณไม่ได้

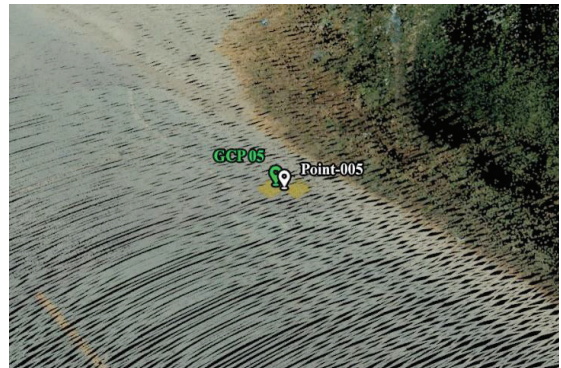
6.2.2 การปรับแก้ข้อมูลจากหลายเส้นทาง (Align multiple passes)

การสร้างข้อมูลจากการสแกนถ้าหากตำแหน่งเส้นทางมีความคลาดเคลื่อนสูง จะทำให้จุดสแกนที่อ้างอิงจากตำแหน่งเส้นทางมีความคลาดเคลื่อน ซอฟต์แวร์จะใช้อัลกอริทึมในการตรวจหาจุดสแกนที่เป็นวัตถุเดียวกัน ทำการปรับแก้ข้อมูลให้เข้ากัน จากนั้นใช้จุดสแกนอ้างอิงเพื่อปรับแก้ย้อนกลับไปยังตำแหน่งเส้นทาง

6.2.3 การปรับแก้ตำแหน่งเส้นทางด้วย GCP (Align trajectory with GCPs)

หลังจากปรับแก้ตำแหน่งจากการปรับแก้จุดสแกนให้เข้ากันแล้ว ถ้าหากต้องการความถูกต้องตามระบบพิกัดแผนที่ จำเป็นต้องปรับแก้ด้วยจุดควบคุมภาคพื้นดิน GCP ที่รังวัดด้วยวิธีที่มีความถูกต้องสูงกว่าในการศึกษานี้ใช้จุด GCP จากการกำหนดตำแหน่งด้วย GNSS วิธี RTK จำนวน 6 จุด กลุ่มของจุดพิกัด

สามมิติหากมีความถูกต้องสูง ตำแหน่งของจุด GCP จะอยู่ใกล้กับจุดกึ่งกลางเครื่องหมายในภาคพื้นดิน ดังแสดงในภาพที่ 7 จุด GCP05 คือจุดที่ได้จาก GNSS วิธี RTK ส่วนจุด Point-005 คือจุดเดียวกันที่ได้จากกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติ การปรับแก้เป็นการปรับกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติเข้าหาจุด GCP ทั้ง 6 จุด โดยใช้ อัลกอริทึมของซอฟต์แวร์ปรับกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติ เพื่อให้เข้ากันกับจุด GCP ทั้งระบบ



ภาพที่ 7 แสดงจุดปรับแก้ด้วย GCP

6.2.4 การเชื่อมต่อภาพถ่ายแบบพาโนรามา (Stitch Panoramic image)

เป็นการประมวลผลภาพถ่ายจากกล้องถ่ายภาพรอบทิศทาง ซึ่งในระบบนี้มีกล้องจำนวน 6 กล้อง ถ่ายภาพพร้อมกันในทุกระยะ 5 เมตร ซอฟต์แวร์จะประมวลผลให้เป็นภาพพาโนรามาต่อกันแบบ 360 องศา

6.2.5 การสร้างกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติ (Cloud generation)

เป็นการสร้างกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติจากข้อมูลสแกน การประมวลผลจะรวมสีภาพถ่ายพาโนรามา 360 องศา ไปยังกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติที่อยู่ในมุมมองที่สอดคล้องกัน กลุ่มของจุดพิกัดสามมิติเป็นข้อมูลสุดท้ายในการประมวลผลก่อนนำไปใช้งาน

6.2.6 การกรองข้อมูลกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติ (Filter cloud)

เป็นการกรองข้อมูลกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติ ถ้าหากผู้ใช้งานเห็นว่าข้อมูลมีจุดที่เกิดจากสัญญาณรบกวนมากเกินไปสามารถทำการกรองให้ข้อมูลเบาบางลง

6.3 การตรวจสอบความถูกต้อง

การตรวจสอบความถูกต้องกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติ แบ่งเป็นการตรวจสอบความถูกต้องกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติที่ได้จากการประมวลผลเฉพาะเซ็นเซอร์ของระบบ เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของเซ็นเซอร์ในระบบให้ค่าความถูกต้องในระดับใด และการตรวจสอบความถูกต้องกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติจากข้อมูลที่ถูกรับแก้ด้วย GCP โดยใช้จุด CP ในการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล โดยการตรวจสอบความถูกต้องจะใช้มาตรฐานของ National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA)



7. ผลการดำเนินงานวิจัย

7.1 ผลการสำรวจจุดควบคุมและจุดตรวจสอบ

ผลการสำรวจจุด GCP และจุด CP ทั้งหมด 12 จุด โดยแบ่งเป็นจุด GCP 6 จุด และจุด CP 6 จุด สำรวจด้วย GNSS วิธี RTK ค่าพิกัดตำแหน่งแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งจะแสดงค่าพิกัดตำแหน่งแบบสามมิติมีค่า Easting (E), Northing (N) และค่าระดับความสูงจากระดับทะเลปานกลาง (Elevation : Z) ที่อ้างอิงจากหมุด GNSS 610373 ค่าระดับที่ได้จากวิธี RTK เป็นการหาค่าระดับแบบสัมพัทธ์ เนื่องจากทราบค่าระดับทะเลปานกลางของจุดอ้างอิงคือ HA จากนั้นหาค่าระดับของจุดที่ต้องการทราบค่าคือ HB โดยคำนวณค่าระดับตามสมการที่ (7) [16] โดยค่า N ได้จากแบบจำลองความสูงจีออยด์ TGM2017 และค่า h ความสูง

เหนือทรงรีคำนวณจากการรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ทำให้จุด GCP และจุด CP มีค่าระดับความสูงจากระดับทะเลปานกลาง

$$H_B = H_A + \Delta H_{AB} \text{ โดย } \Delta H_{AB} = \Delta h_{AB} - \Delta N_{AB} \quad (7)$$

ตารางที่ 3 แสดงค่าพิกัดจุด GCP และ CP

Point Name	Easting	Northing	Elevation	Status
GCP01	643014.067	1535060.476	2.464	GCP
GCP02	642343.200	1534931.149	2.427	GCP
GCP03	641915.275	1534889.441	2.411	GCP
GCP04	641285.618	1534831.523	2.435	GCP
GCP05	640672.423	1534745.304	2.425	GCP
GCP06	640208.819	1534543.590	2.370	GCP
CP01	643023.257	1535057.394	2.384	CP
CP02	642339.195	1534934.387	2.286	CP
CP03	641918.922	1534885.807	2.347	CP
CP04	641288.220	1534835.517	2.326	CP
CP05	640719.840	1534748.531	2.253	CP
CP06	640204.969	1534546.029	2.290	CP

7.2 ผลการสำรวจด้วยระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่

การประมวลผลของระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ ผลลัพธ์แสดงอยู่ในรูปแบบกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติ ที่ทุกจุดคือตัวแทนตำแหน่งของวัตถุต่าง ๆ ในพื้นที่ และแสดงผลในลักษณะสีจริง ดังแสดงในภาพที่ 8 ข้อมูลกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติสามารถประมวลผลในระยะใกล้สุดที่ 100 เมตรจากเซ็นเซอร์ แต่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การประมวลผลที่ระยะ 20 เมตร เนื่องด้วยต้องการให้ประหยัดเวลาและให้เพียงพอกับพื้นที่จัดเก็บข้อมูล ในระยะทางประมาณ 4 กิโลเมตร กลุ่มของจุดพิกัดสามมิติที่ได้จากระบบมีประมาณ 282 ล้านจุด แสดงรายละเอียดเชิงพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะพื้นผิวถนน



ภาพที่ 8 แสดงกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติ
ตามคำสีจากภาพถ่าย

ข้อมูลกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติที่มีตำแหน่งตามระบบพิกัดแผนที่ สามารถประยุกต์ใช้งานร่วมกับวิธีสำรวจแบบอื่น ๆ เช่น การสำรวจด้วยกล้องประมวลผลรวม (Total Station) การกำหนดตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS การอ้างอิงหมุดหลักฐานเดียวกันในการทำงานทำให้ข้อมูลอยู่ในระบบพิกัดแผนที่เดียวกัน

7.3 ผลการทดสอบความถูกต้อง

การทดสอบความถูกต้องของระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ เป็นการทดสอบความถูกต้องของตำแหน่งตามระบบพิกัดแผนที่ งานวิจัยได้ใช้การกำหนดตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS วิธี RTK สร้างจุดควบคุมภาคพื้นดินและจุดตรวจสอบความถูกต้อง งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบความถูกต้องข้อมูล 3 กรณีคือ ความถูกต้องกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติก่อนปรับแก้ด้วย GCP และหลังปรับแก้ด้วย GCP โดยผลทดสอบก่อนการปรับแก้จะใช้ข้อมูลจุด GCP และ CP ทั้งหมดเป็นจุดตรวจสอบและหลังจากปรับแก้ด้วย GCP จะใช้เพียงจุด CP ในการตรวจสอบความถูกต้องเท่านั้น และสุดท้ายเป็นการตรวจสอบความเข้ากันของจุด GCP ที่ได้รับการปรับแก้

เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของการปรับแก้ ซึ่งเป็นการประเมินจุดที่ถูกรับแก้ เพื่อตรวจสอบความเข้ากันของจุด GCP กับกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติ

7.3.1 การทดสอบความถูกต้องก่อนการปรับแก้

ผลการทดสอบความถูกต้องก่อนการปรับแก้ของข้อมูลกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติที่ได้จากระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ที่แสดงในตารางที่ 4 ความถูกต้องของระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ก่อนปรับแก้ด้วย GCP ผลจากการทดสอบทั้งหมด 12 จุด ผลปรากฏว่าค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในทาง Easting เท่ากับ 0.035 เมตร ในทาง Northing เท่ากับ 0.029 เมตร และในทางดิ่งเท่ากับ 0.065 เมตร ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยส่วนใหญ่มีค่าเป็นบวก

ส่วนค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองในทางราบมีค่า $RMSE_r$ อยู่ที่ 0.084 เมตร และค่า $RMSE$ ทางดิ่งอยู่ที่ 0.123 เมตร ค่าระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ในทางราบเท่ากับ 0.145 เมตร และค่าระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ในทางดิ่งเท่ากับ 0.240 เมตร จะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนในทางดิ่งมีค่าที่สูง เนื่องจากระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ที่ถูกติดตั้งบนยานพาหนะที่มีการเคลื่อนที่ การกำหนดตำแหน่งด้วย GNSS วิธี PPK อาจทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนในทางดิ่งที่สูงกว่าการกำหนดตำแหน่งแบบอยู่กับที่ และการที่ยานพาหนะมีการเปลี่ยนแปลง ค่าระดับในบางช่วง จากแรงกดทับของตัวรถในสภาพถนนที่ไม่ราบเรียบ อาจเป็นอีกสาเหตุที่ทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนที่สูง

ตารางที่ 4 แสดงผลทดสอบความถูกต้องกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติก่อนปรับแก้ด้วย GCP

MMS Point	E	N	Z	Check Point	E	N	Z	ΔE	ΔN	ΔZ
Point-001	643014.027	1535060.560	2.617	GCP01	643014.067	1535060.476	2.464	-0.040	0.084	0.153
Point-002	642343.320	1534931.105	2.564	GCP02	642343.200	1534931.149	2.427	0.120	-0.044	0.137
Point-003	641915.274	1534889.492	2.498	GCP03	641915.275	1534889.441	2.411	-0.001	0.051	0.087
Point-004	641285.648	1534831.553	2.485	GCP04	641285.618	1534831.523	2.435	0.030	0.030	0.050
Point-005	640672.489	1534745.297	2.313	GCP05	640672.423	1534745.304	2.425	0.066	-0.007	-0.112
Point-006	640208.842	1534543.623	2.482	GCP06	640208.819	1534543.590	2.370	0.023	0.033	0.112
Point-007	643023.178	1535057.515	2.521	CP01	643023.257	1535057.394	2.384	-0.079	0.121	0.137
Point-008	642339.279	1534934.383	2.477	CP02	642339.195	1534934.387	2.286	0.084	-0.004	0.191
Point-009	641918.932	1534885.868	2.422	CP03	641918.922	1534885.807	2.347	0.010	0.061	0.075
Point-010	641288.313	1534835.496	2.379	CP04	641288.220	1534835.517	2.326	0.093	-0.021	0.053
Point-011	640719.895	1534748.538	2.073	CP05	640719.840	1534748.531	2.253	0.055	0.007	-0.180
Point-012	640205.029	1534546.069	2.372	CP06	640204.969	1534546.029	2.290	0.060	0.040	0.082
Mean Error (m)								0.035	0.029	0.065
Standard Deviation (m)								0.057	0.047	0.108
RMSE (m)								0.065	0.053	0.123
RMSE _r (m)								0.084		
NSSDA Horizontal Accuracy at 95% Confidence Level								0.145		
NSSDA Vertical Accuracy at 95% Confidence Level								0.240		
NSSDA Horizontal and Vertical Accuracy at 95% Confidence Level								0.241		

7.3.2 การทดสอบความถูกต้องหลังการปรับแก้

หลังจากกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติได้รับการปรับแก้จากจุด GCP จำนวน 6 จุด การตรวจสอบได้ใช้ข้อมูลจุด CP จำนวน 6 จุดในการตรวจสอบความถูกต้องโดยรายละเอียดการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 5 ผลปรากฏว่า ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในทาง Easting เท่ากับ 0.039 เมตร ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยทาง Northing 0.010 เมตร และความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยทางดิ่งเท่ากับ -0.011 เมตร จะเห็นได้ว่าหลังจากปรับด้วย GCP ทั้ง 6 จุด ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยลดลงในทุกทิศทาง

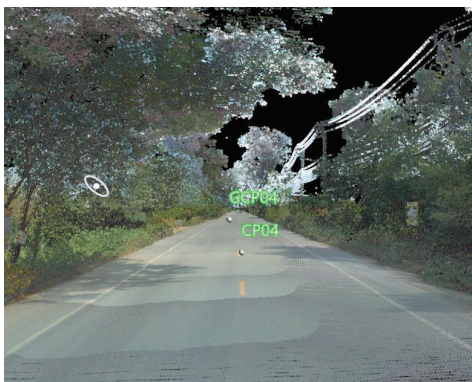
ส่วนค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองในทางราบมีค่า RMSE_r อยู่ที่ 0.076 เมตร และค่า RMSE ทางดิ่งอยู่ที่ 0.046 เมตร ค่าระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ในทางราบเท่ากับ 0.132 เมตร และค่าระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซนต์ในทางดิ่งเท่ากับ 0.090 เมตร แสดงให้เห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติหลังได้รับการปรับแก้แล้ว ค่าความคลาดเคลื่อนลดลง โดยเฉพาะค่าความคลาดเคลื่อนในทางดิ่งจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ส่วนค่าความคลาดเคลื่อนในทางราบได้รับการปรับแก้ดีขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่พบว่ามีบางจุดหลังจากปรับแก้แล้ว มีค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มขึ้นคือตำแหน่งจุดตรวจสอบ

CP04 จะเห็นได้ว่าเมื่อคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนทางราบของจุด CP04 ตามตารางที่ 4 ได้ค่าเป็น 0.095 เมตร หลังจากปรับแก้ด้วย GCP ค่าความคลาดเคลื่อนทางราบเพิ่มขึ้นเป็น 0.131 เมตร ซึ่งปัญหานี้ถ้าสังเกตค่าความคลาดเคลื่อนของจุดนี้ในตารางที่ 4 ค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง และหลังจากปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนเพิ่มสูงขึ้นสาเหตุอาจเกิดจากผลกระทบจากดาวเทียมไม่สามารถรับสัญญาณได้ต่อเนื่อง สาเหตุจากการถูกบดบัง

สัญญาณจากสภาพแวดล้อม โดยเฉพาะต้นไม้ในบริเวณดังกล่าว ดังแสดงในภาพที่ 9 ทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนอาจเกิดขึ้นได้จากทั้งจุด CP04 และจาก MMS ทำให้หลังจากปรับแก้ค่าความคลาดเคลื่อนในจุดดังกล่าวยังมีค่าที่สูง แต่ในภาพรวมค่าความคลาดเคลื่อนของจุดอื่น ๆ มีค่าลดลงจะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนในทางตั้งหลังจากปรับแก้ด้วย GCP ค่า RMSE ทางตั้งมีค่าน้อยกว่าค่า RMSE_r ในทางราบ

ตารางที่ 5 แสดงผลทดสอบความถูกต้องกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติหลังปรับแก้ด้วย GCP

MMS Point	E	N	Z	Check Point	E	N	Z	ΔE	ΔN	ΔZ
Point-013	643023.195	1535057.431	2.367	CP01	643023.257	1535057.394	2.384	-0.062	0.037	-0.017
Point-014	642339.206	1534934.426	2.351	CP02	642339.195	1534934.387	2.286	0.011	0.039	0.065
Point-015	641918.978	1534885.825	2.337	CP03	641918.922	1534885.807	2.347	0.056	0.018	-0.010
Point-016	641288.337	1534835.458	2.331	CP04	641288.220	1534835.517	2.326	0.117	-0.059	0.005
Point-017	640719.879	1534748.542	2.167	CP05	640719.840	1534748.531	2.253	0.039	0.011	-0.086
Point-018	640205.043	1534546.042	2.268	CP06	640204.969	1534546.029	2.290	0.074	0.013	-0.022
Mean Error (m)								0.039	0.010	-0.011
Standard Deviation (m)								0.061	0.036	0.049
RMSE (m)								0.068	0.034	0.046
RMSE _r (m)								0.076		
NSSDA Horizontal Accuracy at 95% Confidence Level								0.132		
NSSDA Vertical Accuracy at 95% Confidence Level								0.090		
NSSDA Horizontal and Vertical Accuracy at 95% Confidence Level								0.089		



ภาพที่ 9 แสดงจุด CP04 ที่อยู่ใกล้กับบริเวณบดบังสัญญาณดาวเทียม

7.3.3 การทดสอบความถูกต้องจุดที่ปรับแก้ด้วย GCP

การทดสอบความถูกต้องตามมาตรฐาน NSSDA ไม่สามารถใช้จุด GCP ที่ได้ปรับแก้แล้วเพื่อประเมินความถูกต้องและความเชื่อมั่นของข้อมูลกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติได้ แต่ในงานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบความเข้ากันได้ของข้อมูลจุดที่ได้รับการปรับแก้ด้วย GCP เพื่อประเมินประสิทธิภาพของการปรับแก้ข้อมูลและความถูกต้องของจุดที่ถูกปรับแก้

จุด GCP ทั้ง 6 จุดหลังจากได้รับการปรับแก้ เมื่อตรวจสอบผลซ้ำที่จุดเดิม ผลความคลาดเคลื่อน ดังแสดงในตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนของจุดที่ถูกปรับแก้ มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในทาง Easting เท่ากับ 0.018 เมตร ในทาง

Northing เท่ากับ 0.001 เมตร และในทางตั้ง เท่ากับ 0.006 เมตร RMSE_r ในทางราบเท่ากับ 0.029 เมตร และค่า RMSE เท่ากับ 0.009 เมตรในทางตั้ง ซึ่งผลของจุดที่ถูกปรับแก้ยังเหลือความคลาดเคลื่อนอยู่เล็กน้อย

ตารางที่ 6 แสดงผลทดสอบความถูกต้องกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติของจุดที่ถูกปรับแก้ด้วย GCP

MMS Point	E	N	Z	Check Point	E	N	Z	ΔE	ΔN	ΔZ
Point-019	643014.043	1535060.469	2.472	GCP01	643014.067	1535060.486	2.464	-0.024	-0.007	0.008
Point-020	642343.250	1534931.151	2.434	GCP02	642343.200	1534931.159	2.427	0.050	0.002	0.007
Point-021	641915.303	1534889.436	2.428	GCP03	641915.275	1534889.441	2.411	0.028	-0.005	0.017
Point-022	641285.637	1534831.523	2.435	GCP04	641285.618	1534831.523	2.435	0.019	0.000	0.000
Point-023	640672.444	1534745.310	2.421	GCP05	640672.423	1534745.34	2.425	0.021	0.006	-0.004
Point-024	640208.835	1534543.601	2.376	GCP06	640208.819	1534543.590	2.37	0.016	0.011	0.006
Mean Error (m)								0.018	0.001	0.006
Standard Deviation (m)								0.024	0.007	0.007
RMSE (m)								0.029	0.006	0.009
RMSE _r (m)								0.029		



8. สรุปผลการดำเนินงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

หากต้องการทราบระดับความถูกต้องข้อมูลกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติจากระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ ความถูกต้องชั้นที่ 1 (Accuracy Level 1) ต้องการความถูกต้องแบบสามมิติเท่ากับ 0.050 เมตรที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และมีความละเอียดเชิงพื้นที่ของจุดไม่น้อยกว่า 100 จุดต่อตารางเมตร และความถูกต้องในงานชั้นที่ 2 (Accuracy Level 2) ต้องการความถูกต้องแบบสามมิติเท่ากับ 0.200 เมตรที่ความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และมีความละเอียดเชิงพื้นที่ของจุดไม่น้อยกว่า 30 จุดต่อตารางเมตร จำนวนโดยใช้สูตรสมการที่ (7) [7]

$$3D \ 95\% \ confidence = RMSE \times 1.6166 \quad (7)$$

การทดสอบความถูกต้องกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติก่อนปรับแก้ด้วย GCP เมื่อคำนวณค่าความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์แบบสามมิติตามสูตรสมการที่ 7 ค่าความถูกต้องเท่ากับ 0.241 เมตร ซึ่งความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์อยู่ในเกณฑ์งานชั้นที่ 3 จะเห็นได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนของค่าระดับที่สูงทำให้เกณฑ์ของงานอยู่ในชั้นที่ 3 ซึ่งข้อมูลกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติตามมาตรฐานสามารถนำไปใช้ในงานทางด้านสำรวจ สิ้นทรัพย์ งานวางแผน การสร้างเมืองแบบสามมิติ และการประเมินปัญหาของสภาพถนน [7]

การทดสอบความถูกต้องกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติหลังปรับแก้ด้วย GCP ค่าความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์แบบสามมิติเท่ากับ 0.089 เมตร ทำให้ความถูกต้อง

กลุ่มของจุดพิกัดสามมิติอยู่ในเกณฑ์งานชั้นที่ 2 ซึ่งตามมาตรฐานสามารถนำไปใช้งานทางด้านแผนที่ การช่วยเหลือการขับขี การจำแนกวัตถุด้วยวิธีอัตโนมัติ หรือกึ่งอัตโนมัติ การหาแนวสายไฟและวิเคราะห์ความปลอดภัยหรืออุบัติเหตุ [7]

การสำรวจด้วยระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่ อ้างอิงตำแหน่งพิกัดแผนที่จากการกำหนดตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS การเคลื่อนที่ของยานพาหนะในสภาพแวดล้อมแตกต่างกัน การถูกบดบังการรับสัญญาณ GNSS จากอาคารและต้นไม้เป็นสาเหตุทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนจากคลื่นหลายวิถี (Multipath error) และความไม่แน่นอนในองค์ประกอบด้านเรขาคณิตของดาวเทียม Geometric Dilution of Precision (GDOP) ดังนั้นความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากสภาพแวดล้อมเป็นสิ่งที่ควบคุมได้ยาก

ข้อเสนอแนะจากงานวิจัยเห็นว่าการวัดค่าชดเชยให้มีความแม่นยำควรทำก่อนการเริ่มงานทุกครั้งเพราะเป็นความคลาดเคลื่อนที่สามารถควบคุมได้ การศึกษาครั้งต่อไปควรเลือกพื้นที่ที่มีสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันและมีระยะทางที่ไกลมากยิ่งขึ้น เพื่อจะได้เห็นปัญหาของความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากผลกระทบของสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน เช่น พื้นที่ตึกสูง เส้นทางตามแนวรถไฟฟ้าที่มีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนสูง และพื้นที่การจราจรติดขัด เพื่อให้ทราบผลกระทบของความถูกต้องที่เกิดจากสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน

ถ้าหากต้องการความถูกต้องของข้อมูลให้อยู่ในเกณฑ์ชั้นที่ 1 มีความจำเป็นต้องลดระยะห่างของจุด GCP ให้อยู่ในระยะ 100 – 300 เมตร [7] และต้องมีความประณีตและความระมัดระวังในการทำงาน มีการวางแผนให้รอบคอบในการกำจัดค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากระบบ เช่น การวัดความสูงของระบบให้มีความสอดคล้องกับน้ำหนักบรรทุกจริง การขับขี

พาหนะที่ไม่เร็วเกินไป ซึ่งค่าความสูงอาจเปลี่ยนแปลงเนื่องจากน้ำหนักกดทับของยานพาหนะ และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้อย่างปัญหาสภาพแวดล้อมของถนน มีผลกับการรับสัญญาณของระบบ GNSS และการเลือกใช้อุปกรณ์ MMS คุณภาพสูงจะช่วยให้ความถูกต้องของข้อมูลดีขึ้น

9. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท ท็อปคอน อินสตรูเมนต์ ไทยแลนด์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ Topcon IP-S3 HD พร้อมกับยานพาหนะ เครื่องกำหนดตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS และเจ้าหน้าที่ของบริษัทที่ช่วยเก็บข้อมูลภาคสนาม

10. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kukko A, A Jaakkola, M Lehtomaki, H Kaartinen, and Y Chen (2009). Mobile mapping system and computing methods for modelling of road environment. In 2009 Joint Urban Remote Sensing Event. of Conference.
- [2] Puente I, H González-Jorge, J Martínez-Sánchez, and P Arias (2013). Review of mobile mapping and surveying technologies. Measurement, 46(7): 2127-2145.
- [3] Ma L, Y Li, J Li, C Wang, R Wang, and M A Chapman (2018). Mobile Laser Scanned Point-Clouds for Road Object Detection and Extraction: A Review. Remote Sensing, 10(10).
- [4] Xiang B, J Yao, X Lu, L Li, R Xie, and J Li (2018). Segmentation-based classification for 3D point clouds in the road environment. International Journal of Remote Sensing, 39: 1-31.



- [5] Yang M, X Liu, K Jiang, J Xu, P Sheng, and D Yang (2019). Automatic Extraction of Structural and Non-Structural Road Edges from Mobile Laser Scanning Data. *Sensors*, 19(22).
- [6] McCormac J C, W Sarasua, and W Davis (2012) *Surveying*, 6th Edition. Wiley.
- [7] Olsen M, G Roe, C Glennie, F Persi, M Reedy, D Hurwitz, K Williams, H Tuss, A Squellati, and M Knodler (2013). *Guidelines for the Use of Mobile LIDAR in Transportation Applications*.
- [8] Toth C K (2009). R&D of mobile LIDAR mapping and future trends. In *Proceeding of ASPRS 2009 Annual Conference*.
- [9] Guan H, J Li, S Cao, and Y Yu (2016). Use of mobile LiDAR in road information inventory: A review. *International Journal of Image and Data Fusion*, 7: 219-242.
- [10] Guan H, J Li, Y Yu, M Chapman, H Wang, C Wang, and R Zhai (2015). Iterative Tensor Voting for Pavement Crack Extraction Using Mobile Laser Scanning Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(3): 1527-1537.
- [11] Authority T V (1998). *Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy*. National Aeronautics and Space Administration: Virginia, NV, USA.
- [12] American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) (2014). *ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data*, p. A1-A26.
- [13] Topcon (2021). IP-S3 HD1 Compact, High-Density 3D Mobile Mapping System. [cited Access 29 October 2021]; Available from: <https://www.topconpositioning.com/scanning/mobile-mapping/ip-s3>.
- [14] Topcon (2015). *Instruction Manual Application Software Mobile Master Field*. Topcon Corporation.
- [15] Topcon (2017). *Instruction Manual Post-Processing MAGNET Collage*. Topcon Corporation.
- [16] Sussanna V, V Janssen, and P Gibbings (2016). Relative performance of AUSGeoid09 in mountainous terrain. *Journal of Geodetic Science*, 6.