

การประเมินความถูกต้องของพอยต์คลาวด์จากระบบทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ สำหรับพีเจอาร์แผนที่บนผิวถนนและข้างถนน

Accuracy Assessment of Point Cloud from Mobile Mapping Systems applied to Feature Mapping on Road-surface and Road-side

พลวัต สันติธรรมนนท์^{1,*} กฤษฎาน อินทรรัตน์² และ ชัยยุทธ เจริญผล³

^{1,3} ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพมหานคร

² ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี

*Corresponding author; E-mail address: fanta2544@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอการประเมินความถูกต้องของพอยต์คลาวด์จากระบบทำแผนที่เคลื่อนที่สามชนิด โดยแบ่งการประเมินเป็นสองกลุ่ม: กลุ่มแรกคือการประเมินความถูกต้องเบื้องต้นซึ่งมีเพียงการประเมินความถูกต้องของค่าพิกัดและความหนาแน่นบนจุดควบคุมภาคพื้นดินซึ่งมีค่าพิกัดอ้างอิงจากการรังวัดจลนในทันที กลุ่มที่สองคือการประเมินความถูกต้องเพิ่มเติมซึ่งประกอบไปด้วยการประเมินความถูกต้องของพีเจอาร์โดยเปรียบเทียบค่าพิกัดสัมพัทธ์กับระบบ MMS-I และเปรียบเทียบกับมาตรฐาน พ.ร.บ.ควบคุมต่างๆ พีเจอาร์ที่นำมาประเมิน ได้แก่ ป้ายจราจร ป้ายโฆษณา และเส้นประจราจร ประเมินความถูกต้องของตำแหน่งพีเจอาร์แบบสมบูรณ์ด้วยวิธีการเปรียบเทียบความเหมือนของแนวของพีเจอาร์ เช่น แนวสายส่งไฟฟ้า แนวเส้นประจราจร โดยใช้ค่าความละเอียดถูกต้อง RMSE2D ระยะห่างแบบยูคลิเดียน ระยะห่างแบบแฮสซอร์ฟและระยะห่างแบบเฟรเชต โดยมีระบบ MMS-I เป็นค่าหลักในการเปรียบเทียบพิกัดสัมพัทธ์ ผลการทดลองพบว่าพอยต์คลาวด์ที่ "ความเร็วต่ำ" ให้ความถูกต้องทางตำแหน่งและความหนาแน่นที่ดีกว่าพอยต์คลาวด์ที่ "ความเร็วสูง" ทั้งนี้การประเมินในกลุ่มที่สองไม่เหมาะที่จะใช้เกณฑ์ทางตำแหน่งเดียวกับกลุ่มแรก แต่สามารถนำไปประยุกต์กับมาตรฐานหรือ พ.ร.บ. ควบคุมต่างๆ ได้ จุดประสงค์หลักของบทความนี้อยู่ที่การประยุกต์กับมาตรฐานความละเอียดถูกต้อง TAICS TR-0016(E) V1.0:2021 สำหรับการสร้างแผนที่ความละเอียดสูงและสนับสนุนงานวิศวกรรมเมืองอัจฉริยะ

คำสำคัญ: ระบบทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ เลเซอร์สแกนเนอร์, พอยต์คลาวด์, ความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่ง, ความหนาแน่นของพอยต์คลาวด์

Abstract

This article investigates the evaluation of point clouds from three Mobile Mapping Systems (MMS) by categorizing methods into two groups: 1) assessing general product quality (positional

accuracy and point density) via comparison with Ground Control Points (GCP) measured by Real-Time Kinematics (RTK), and 2) applying feature assessments to evaluate the positional accuracy of road features (lane markings, traffic signs, billboards) against the HD Map standard, while considering compliance with relevant standards and regulations. Linear feature positioning accuracy is assessed using similarity comparisons of feature alignments based on point-wise coordinate differences and feature-to-feature distances (Hausdorff, Euclidean, and Fréchet). The study observed a potential negative correlation between vehicle speed and positional accuracy/point cloud density. The MMS-II system shows mapping capabilities comparable to the MMS-I system, but the MMS-III system exhibits abnormal behavior requiring further verification for mapping applications. The main purpose is the application of the TAICS TR-0016(E) V1.0:2021 HD map standard to support smart city engineering.

Keywords: Mobile Mapping System, Laser Scanner, Point cloud, Positional accuracy, Point cloud Density

1. คำนำ

การสำรวจทำแผนที่พีเจอาร์บนผิวถนนและพีเจอาร์ปรากฏข้างทางมีวิวัฒนาการต่อเนื่องมาหลายช่วงยุคสมัยตั้งแต่การตั้งกล้องสำรวจซึ่งเก็บข้อมูลซ้ำมาก สัมผัสโดยตรง และเสี่ยงต่ออันตราย อีกทั้งข้อมูลอาจไม่สามารถบันทึกให้มีความละเอียดได้เนื่องจากข้อจำกัดของการทำงานสนามข้อมูลเพื่อใช้ประโยชน์ในงานประยุกต์ อีกทั้งต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายอย่างมาก ยิ่งไปกว่านั้นแล้วในปัจจุบัน กล้องสำรวจไม่สามารถตอบโต้ความต้องการข้อมูลที่มากขึ้นเช่น การทำแผนที่สำหรับเมืองอัจฉริยะ การทำแผนที่ความละเอียดสูงหรือ High Definition Map (HD map) ซึ่ง

เป็นส่วนสำคัญของการบริหารจัดการเมืองสมัยใหม่ มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ส่งเสริมการใช้งานยานยนต์ไฟฟ้าและยานยนต์อัตโนมัติ, อินเทอร์เน็ตประสาทรสพรั่ง, บริการต่างที่ต้องพึ่งพาตำแหน่ง [1] ด้วยเหตุนี้ อุปกรณ์ที่เกิดขึ้นใหม่ในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมาอย่าง ระบบทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ติดตั้งเลเซอร์สแกนความละเอียดสูงมีความถี่เลเซอร์สแกน Pulse Repetition Frequency (PRF) 500 kHz ที่ส่งผลให้พีเอชดีกล่าวปรากฏเป็นรูปร่างให้ตรงจับได้ จึงมีบทบาทอย่างมากในการสำรวจทำแผนที่บนท้องถนนและข้างถนนเพราะสามารถตอบรับความต้องการที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ นอกจากนี้แล้วยังมีประโยชน์ในเรื่องความปลอดภัยในการทำงานและไม่จำเป็นต้องปิดกั้นจราจรอีกด้วย แม้ว่าระบบทำแผนที่เคลื่อนที่ได้มักจะมีกล้องรอบทิศทาง (360 panoramic camera) มาด้วยเสมอ ในงานวิจัยนี้ เป็นการประยุกต์การรังวัดที่ใช้พอยต์คลาวด์ (point cloud) เท่านั้น

พอยต์คลาวด์มีความสำคัญอย่างมากในการสร้างแผนที่สามมิติ ก่อนที่จะถูกนำไปพัฒนาสู่แผนที่ความละเอียดสูง อีกทั้งพอยต์คลาวด์เป็นส่วนที่นิยมในการประเมินความถูกต้องมากที่สุดอันเพราะเป็นข้อสรุปของผลลัพธ์ทั้งหมด [2] แนวทางในการประเมินความถูกต้องถูกออกแบบไว้ในรูปแบบที่หลากหลายมากแต่ก็จะมีรูปแบบการประเมินความถูกต้องที่ทุกแนวทางใช้เนื่องจากแนวทางดังกล่าวเป็นพื้นฐานความถูกต้องของผลลัพธ์สุดท้ายที่ได้ โดยเฉพาะเรื่องของความถูกต้องที่เกิดแบบสมบูรณ์บนจุดควบคุมภาคพื้นดินอย่างงานวิจัยที่ต้องการประเมินความถูกต้องวิถีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะโดยใช้คุณภาพพอยต์คลาวด์เพื่อประเมินวิถีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะ [3] ทั้งนี้การประเมินความถูกต้องด้วยพอยต์คลาวด์นั้นถูกออกแบบให้รองรับความต้องการต่างๆของงานประยุกต์ จำเป็นต้องประเมินความถูกต้องที่เกิดแบบสัมพัทธ์เพื่อดูขนาดและตำแหน่งจากสิ่งอ้างอิงในกรอบนั้น อีกทั้งความต้องการที่จะดูรายละเอียดของพีเอชดี (feature) อย่าง ป้ายจราจร ผิวถนน ป้ายโฆษณา เป็นต้น ก็เพิ่มสูงขึ้นจนทำให้มีหลายครั้งที่ต้องการความหนาแน่นพอยต์คลาวด์ [4]

แนวทางการประเมินความถูกต้องนั้นจึงถูกออกแบบไว้หลายแบบในช่วงที่ผ่านมาไม่ว่าจะเป็นงานวิจัยแนวทางการประเมินความถูกต้องทั้งสามแบบที่ได้กล่าวไปตามมาตรฐานนั้น [1], งานวิจัยแนวทางการประเมินความถูกต้องพอยต์คลาวด์โดยตรวจสอบพิกัดเบื้องต้นแล้วไปตรวจสอบทรัพย์สินทางพอยต์คลาวด์ [5], งานวิจัยแนวทางการประเมินความถูกต้องพอยต์คลาวด์ที่ใช้จุดควบคุมหลายชนิดเพื่อตรวจสอบความถูกต้องในแบบต่างๆ [6], งานวิจัยแนวทางการประเมินความถูกต้องแบบสมบูรณ์อย่างเดียวที่เกิดขึ้นในประเทศไทยโดยใช้มาตรฐาน National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA) โดยตอบเป็นค่าความละเอียดถูกต้อง RMSE ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ [7] ฯลฯ

ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความถูกต้องของพอยต์คลาวด์ที่ได้จากระบบทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่แบบเลเซอร์สแกน 3 ระบบ ในด้านค่าพิกัดและความหนาแน่นพอยต์คลาวด์ รวมถึงความถูกต้องในการรังวัดพีเอชดีที่ปรากฏบนผิวถนนและข้างถนน เพื่อเปรียบเทียบกับ

มาตรฐานการสร้างแผนที่ความละเอียดสูง (HD map) ตามเกณฑ์ TAICS TR-0016(E) V1.0:2021

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

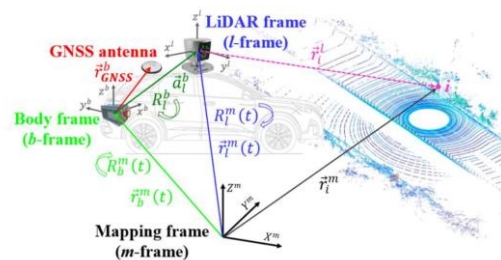
วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ได้แก่

1. เพื่อประเมินความถูกต้องค่าพิกัดและความหนาแน่นพอยต์คลาวด์จากระบบ MMS ทั้ง 3 ระบบ
2. เพื่อวิเคราะห์ความแม่นยำของการตรวจจับพีเอชดีบนผิวถนนและข้างถนน
3. เพื่อเปรียบเทียบตำแหน่งของพีเอชดีจากแต่ละระบบกับเกณฑ์มาตรฐานแผนที่ความละเอียดสูงและสนับสนุนงานวิศวกรรมเมืองอัจฉริยะ

3. อุปกรณ์

3.1 การเตรียมระบบทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่แบบเลเซอร์สแกนเพื่อการสำรวจทำแผนที่บนท้องถนน

ระบบทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่แบบเลเซอร์สแกนที่มีลักษณะดังรูปที่ 1 นำมาทดสอบอาจจะได้รับผลกระทบจากสถานที่ทดลองจึงอาจส่งผลต่อการสร้างแผนที่ได้ อีกทั้งรูปแบบอุปกรณ์ที่ใช้งานจะส่งผลโดยตรงต่อผลลัพธ์ จึงอาจทำให้การตัดสินใจในรายงานนี้ไม่เป็นธรรม



รูปที่ 1 เรขาคณิตของพิกัดวัตถุที่ได้จากวิธีการระบบทำแผนที่เคลื่อนที่ได้ [1]

ระบบทำแผนที่เคลื่อนที่ได้ทั้ง 3 ระบบ เรียกในนี้ว่าระบบ MMS-I, ระบบ MMS-II และระบบ MMS-III มีคุณลักษณะการออกแบบและติดตั้งแตกต่างกัน โดยเฉพาะความถี่ในการสแกนสูงสุดที่ทำได้ตั้งแต่ 640 kHz ไปจนถึง 2 MHz แต่ในการประยุกต์ใช้ทำแผนที่ของพีเอชดีบนผิวถนนและพีเอชดีข้างถนน ในเบื้องต้นพบว่า หากระบบเลเซอร์ทำการกวาดด้วยความถี่ ค่า Pulse Repetition Frequency (PRF) มี 300 kHz เป็นต้นไป ผู้ใช้สามารถชี้ชัดพีเอชดีต่างๆได้ตามวัตถุประสงค์การทำแผนที่ เครื่องที่นำมาทดสอบนั้นจำเป็นต้องถูกศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์ในรูปแบบตารางที่ 1 ในงานวิจัยนี้ จึงกำหนดให้ทุกระบบปรับค่า Pulse Repetition Frequency (PRF) ให้เป็น 300 kHz ทั้งนี้เพื่อให้ผลลัพธ์จากการกวาดสามารถเปรียบเทียบสมรรถนะกันได้ นอกจากนี้การปรับเลเซอร์ให้มีความถี่น้อยลง มักจะทำให้ระยะวัดระยะได้ไกลมากขึ้น ผลการสะท้อนกลับบนเป้า

ได้ความหนาแน่นมากขึ้นอีกด้วย ตลอดจนแนวโน้มความละเอียดถูกต้องทางตำแหน่งรายจุดมักจะแม่นยำมากขึ้นด้วย

ตารางที่ 1 ระบบทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ชนิดเลเซอร์สแกนในงานวิจัยนี้

อุปกรณ์	รูปแบบการทำงาน		
	MMS-I	MMS-II	MMS-III
ความถี่เลเซอร์สแกนสูงสุด	1 MHz	2 MHz	640 kHz
ลักษณะของเลเซอร์สแกน	Dual laser	Single laser	Single laser
ค่าความแม่นยำ R-P-H ของ IMU	0.008°/0.020°	0.020°/0.090°	0.0029°/0.0102
รูปแบบของ IMU	FOGS	MEMS	MEMS
น้ำหนักของ IMU	0.750 kg	1.850 kg	0.070 kg
กำลังไฟของ IMU	42 Watt	0.1 Watt	0.8 Watt
ลักษณะของกล้อง	Spherical Camera	Spherical Camera	Spherical Camera
ความละเอียดกล้องรอบทิศ	30MP	30MP	30 MP
ค่าความละเอียดถูกต้อง RMSE ในการรังวัดตำแหน่ง PPK Tightly Coupled	0.02-0.05 m	0.01-0.02 m	0.02-0.04 m

จากตารางที่ 1 พบว่าระบบ MMS-I มีคุณภาพอุปกรณ์ที่สูงที่สุดในระบบทำแผนที่เคลื่อนที่ หากต้องการให้งานมีคุณภาพมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ การเลือก MMS-I ย่อมเป็นทางเลือกที่ดีที่สุด ระบบ MMS-III เป็นแบบที่มีราคาที่ถูกที่สุดเนื่องจากอุปกรณ์คุณภาพน้อยที่สุดและเป็นรูปแบบที่ไม่ได้เป็นอุปกรณ์ติดตั้งรวมกันที่จุดเดียว ติดตั้งและจะต้องจำเป็นวัดสอบอย่างมากเนื่องจากต้องระวังค่าความคลาดเคลื่อนของแขนเชื่อมของแต่ละอุปกรณ์ แต่ถ้ามีผู้ชำนาญในการติดตั้ง ก็สามารถทำแผนที่ในคุณภาพที่ดีเพียงพอด้วยทุนทรัพย์ที่น้อยที่สุดในกลุ่ม ส่วนระบบ MMS-II เป็นรูปร่างโดยทั่วไปที่คล้ายกับระบบ MMS-I แต่เลเซอร์สแกนเนอร์ที่มีหนึ่งตัวกับไอเอ็มยูที่แยกกว่า ระบบ MMS-II เป็นทางเลือกที่อยู่ตรงกลางของปัจจัย อย่าง ราคาและคุณภาพ

4. ข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย

4.1 การออกแบบความเร็วที่ออกแบบให้สัมพันธ์กับงานประยุกต์

ในงานวิจัยนี้มีความพยายามที่จะกำหนดความเร็วรถสำรวจให้สอดคล้องกับความต้องการในการสำรวจจริง แต่อย่างไรก็ตามในการปฏิบัติพบว่า อาจไม่สามารถควบคุมได้ทั้งหมดตามสภาพการจราจรในพื้นที่ทดสอบจริง ความเร็วที่ออกแบบสำหรับการใช้ระบบทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่เป็นดังนี้

ความเร็วที่ออกแบบในตารางที่ 2 ทำไปเพื่อให้เหมาะกับสถานการณ์ในรูปแบบที่แตกต่างกันสำหรับงานประยุกต์นั้นๆ โดยการวิเคราะห์ในส่วนความเร็วเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อคุณภาพของพอยต์คลาวด์โดยตรง[1]

ตารางที่ 2 ความเร็วที่ออกแบบสำหรับการใช้ระบบทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่

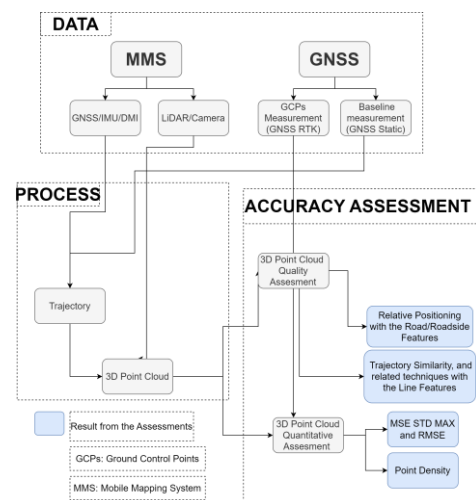
ความเร็ว (km/hr)	สมมติฐานงานประยุกต์
30 “ความเร็วต่ำ”	บริเวณที่เสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุอย่างเช่น อุโมงค์ ถนนที่มีผู้สัญจรทั้งยานยนต์และเดินเท้า อีกทั้งต้องการความหนาแน่นของพอยต์คลาวด์จำนวนมาก
60 “ความเร็วสูง”	บริเวณที่ไม่ค่อยมีสิ่งกีดขวาง ปลดภัยต่อการทำงาน อย่างเช่น ถนนชนบท อีกทั้งไม่ได้ต้องการความหนาแน่นพอยต์คลาวด์ที่สูง

4.2 การกำหนดระบบพิกัดพอยต์คลาวด์

ในงานวิจัยนี้ข้อมูลค่าพิกัดพอยต์คลาวด์ในโครงสร้าง ASPRS LAS Specification 1.4 ที่ได้จากระบบทำแผนที่เคลื่อนที่ได้ทั้งสามระบบนั้นอยู่ในรูปแบบการฉายแผนที่ UTM โซน 47 อ้างอิงบนพื้นหลักฐานทางราบ WGS84 เรียกชื่อตามรหัสสากล EPSG : 32647 ส่วนการอ้างอิงทางตั้งมักจะอ้างอิงความสูงเหนือทรีหรือในทางงานวิศวกรรมมักจะอ้างอิงความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง โดยในงานวิจัยนี้แบบจำลองยี่ห้อ Thai Geoid Model 2017 (TGM2017) ทั้งนี้การประมวลผลจีเอ็นเอสเอสใช้สถานีฐานโครงการที่จัดตั้งโดยประมวลผลเส้นฐานจีเอ็นเอสเอสจากสถานีอ้างอิงจีเอ็นเอสเอสถาวร SBKK เพื่อให้มีสถานีฐานไว้อ้างอิงค่าพิกัดและลดผลกระทบจากความยาวเส้นฐานจีเอ็นเอสเอส

5. วิธีการที่ใช้ในการวิจัย

ในงานวิจัยมีการดำเนินการแบ่งออกเป็นสองกลุ่มหลักคือ การประเมินความถูกต้องเบื้องต้นซึ่งเป็นกลุ่มที่นิยมในการประเมินความถูกต้องในหลายแนวทาง กลุ่มที่สองคือกลุ่มประเมินความถูกต้องเพิ่มเติมซึ่งออกแบบตามความต้องการของงานนั้นๆซึ่งอาจจะเป็นการทดสอบสมมติฐานของการตั้งค่าบางอย่างที่ส่งผลต่อคุณภาพของพอยต์คลาวด์การประเมินคุณภาพพีเจอร์นั้น เป็นต้น โดยกลุ่มที่สองใช้ข้อมูลที่ดีที่สุดในที่นี้ซึ่งก็คือการเก็บข้อมูลจากระบบทำแผนที่เคลื่อนที่ที่วิ่งด้วย “ความเร็วต่ำ” เท่านั้น โดยแสดงออกเป็นแผนผังในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภาพการทดลองแบบสรุปรวม

พื้นที่ทดลองอยู่ที่ปลายถนนประเสริฐนุกิจไปถึงสุดถนนบรรจบนวงแหวนตะวันออกซึ่งมีความยาวเป็น 3.3 กิโลเมตร (รถวิ่งไป 6.6 กิโลเมตร) ในพื้นที่แขวงรามอินทรา เขตคันนายาว จังหวัดกรุงเทพมหานคร ในวันศุกร์ที่ 21 มิ.ย. พ.ศ. 2568 เวลา 8.00-12.00 น. ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 พื้นที่ทดลองและตำแหน่งจุดควบคุมภาคพื้นดิน

การคัดเลือกพื้นที่ดังรูปที่ 3 และช่วงเวลาดังกล่าวเป็นเพราะเป็นช่วงที่มีการสัญจรน้อย ไม่มีรถอื่นมารบกวนและไม่ไฟจราจรมาบังคับให้ระบบทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่หยุด การหยุดรถส่งผลทางลบต่อไอเอ็มยูอย่างมากจนต้องเริ่มต้นใหม่ อีกทั้งเป็นพื้นที่เหมาะสมรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส

5.1 การประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่งและความหนาแน่นพอยต์คลาวด์

การประเมินความถูกต้องค่าพิกัดและความหนาแน่นพอยต์คลาวด์จากระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่นั้นสามารถทำได้โดยรังวัดบนจุดควบคุมภาคพื้นดินจากพอยต์คลาวด์ที่ได้จากเลเซอร์สแกน

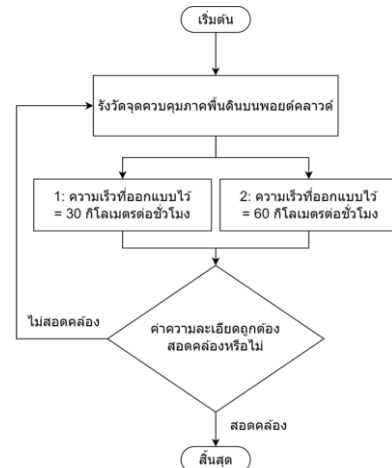
การวิเคราะห์ค่าพิกัดนั้นสามารถคำนึงออกเป็นค่าความละเอียดถูกต้อง RMSE2D และค่าความละเอียดถูกต้อง RMSE3D ซึ่งสามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าสถิติที่ใช้ประเมินความละเอียดถูกต้อง

ค่าสถิติ	สูตร
Root Mean Square Error horizontal: RMSE2D	$\sqrt{\frac{\sum(\hat{x} - \bar{x})^2 + \sum(\hat{y} - \bar{y})^2}{N}}$
Root Mean Square Error 3D space: RMSE3D	$\sqrt{\frac{\sum(\hat{x} - \bar{x})^2 + \sum(\hat{y} - \bar{y})^2 + \sum(\hat{z} - \bar{z})^2}{N}}$

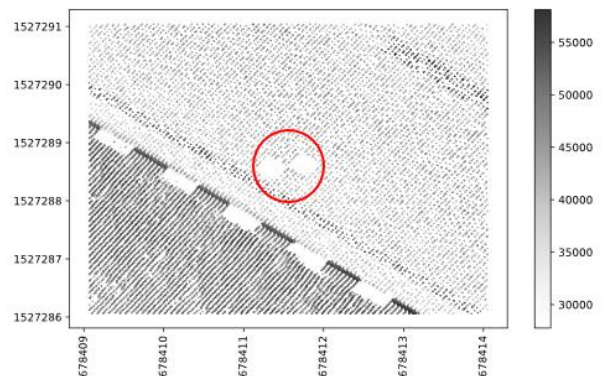
จากตารางที่ 3 ค่าความละเอียดถูกต้อง RMSE2D และ RMSE3D ใช้เป็นดัชนีชี้วัดคุณภาพของพอยต์คลาวด์ในหลายมาตรฐานโดยเฉพาะ TAICS TR-0016(E) V1.0:2021

แนวทางการปฏิบัติเพื่อประเมินความถูกต้องของค่าพิกัดนั้นเป็นไปตามแผนภาพในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่ง

ในส่วนของการประเมินความหนาแน่นพอยต์คลาวด์ กำหนดให้รังวัดบนพื้นที่ขนาด 5 เมตร x 5 เมตรและมีตำแหน่งศูนย์กลางบนจุดควบคุมภาคพื้นดินดังรูปที่ 5 คำนวณค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นพอยต์คลาวด์ทั้งหมดเพื่อเป็นตัวแทนด้านคุณภาพของพอยต์คลาวด์ อีกทั้งมีการวางตำแหน่งจุดควบคุมพอยต์คลาวด์ไว้ตามรูปที่ 3



รูปที่ 5 การตรวจสอบความหนาแน่นพอยต์คลาวด์

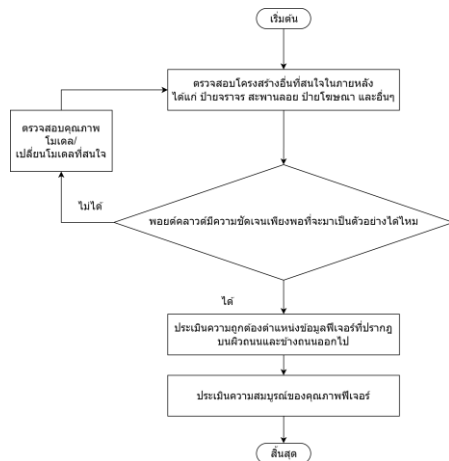
5.2 การประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่งข้อมูลฟีเจอร์ที่ปรากฏบนผิวถนนและข้างถนนออกไป

การประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่งข้อมูลฟีเจอร์ที่ปรากฏบนผิวถนนและข้างถนนออกไปฟีเจอร์กลุ่มนี้มีมาตรฐานการก่อสร้างหรือกฎหมายรองรับ มีการศึกษาป้ายจราจรและสัญลักษณ์จราจรจะมีคู่มือและมาตรฐานเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางโดยสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.), กระทรวงคมนาคม อีกทั้งป้ายโฆษณาที่มีพรบ. ควบคุมอาคารคุ้มครองอยู่ เพื่อดูความต้องการในการจะทำแผนที่หรือรังวัดเพื่อสนับสนุนงานบำรุงรักษาหรือการตรวจสอบบังคับใช้ตามกฎหมาย

ในลักษณะการตรวจสอบบังคับใช้จะเป็นการประเมินความถูกต้องเป็นแบบสัมพัทธ์ได้แก่ การรังวัดขนาด การรังวัดระยะทาง การอ้างอิงระบบ

พิกัดนั้นไม่จำเป็นต้องใช้งาน เนื่องจากกำหนดจุดอ้างอิงที่ใกล้เคียงแล้ววัดออกไปก็อาจสามารถได้ข้อมูลเพียงพอแล้ว

แนวทางปฏิบัติเพื่อการประเมินความถูกต้องของตำแหน่งพีจีเอ็นั้นสามารถถูกออกแบบให้เป็นดังแผนภาพในรูปที่ 6

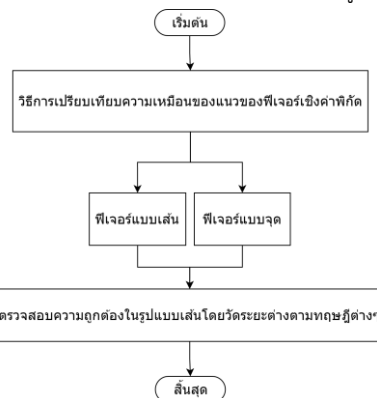


รูปที่ 6 การตรวจสอบพีจีเอ็นต่างๆจากพอยต์คลาวด์

5.3 การประเมินความถูกต้องของตำแหน่งพีจีเอ็นด้วยวิธีการเปรียบเทียบความเหมือนของแนวของพีจีเอ็น

การประเมินความถูกต้องนี้จัดทำไปเพื่อนำเสนอวิธีการรังวัดแนวพีจีเอ็นที่มีลักษณะแบบเส้นซึ่งใช้ตามเส้นทางที่ตรงและโค้ง แนวพีจีเอ็นที่ถูกประเมินได้แก่ แนวสายส่งไฟฟ้า แนวเส้นประจราจร

Sousa, et al. [8] ได้กล่าวไว้ว่าวิธีการเปรียบเทียบความเหมือนของวิถีการเคลื่อนที่ของยานพาหนะคือการคำนวณระยะห่างตัวแทน โดยมีทฤษฎีที่บรรยายได้ 3 แบบ ได้แก่ วิธีแฮสโดร์ฟ (Hausdorff distance) และวิธียูคลิเดียน (Euclidean distance) เพื่อตรวจสอบว่ามีการซ้อนทับกันหรือไม่ ในส่วนระยะห่างแบบเฟรเชต (Fréchet distance) มีความคล้ายคลึงกับระยะห่างแบบแฮสโดร์ฟและนิยมใช้ในการเปรียบเทียบแบบนี้ จึงนำมาทดสอบด้วย ทั้งนี้ระยะห่างในแต่ละแบบนี้จะเหมาะสมกับเหตุการณ์ที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถทำออกเป็นแผนภาพดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การตรวจสอบความถูกต้องของพีจีเอ็นด้วยข้อมูลระหว่างอุปกรณ์ผ่านพอยต์คลาวด์

6. เกณฑ์มาตรฐาน

6.1 เกณฑ์ชิ้นงานของ TAICS TR-0016 “Verification and validation guidelines for HD Maps” v1.0 (TAICS TR-0016(E) V1.0:2021)

ในงานวิจัยนี้ได้มีการนำมาตรฐานความละเอียดถูกต้องสำหรับการประยุกต์ทำแผนที่ความละเอียดสูงมาร่วมพิจารณา โดยมาตรฐานนี้มีไว้เพื่อให้สามารถสร้างแผนที่ที่มีความละเอียดถูกต้องสูงพอไปประยุกต์เป็นแผนที่ความละเอียดสูง (HD Map) สำหรับการประยุกต์ในการนำหนของยานยนต์อัตโนมัติ โดยรายละเอียดได้แสดงไว้ในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 มาตรฐานความละเอียดถูกต้อง TAICS TR-0016(E) V1.0:2021

เงื่อนไข	จำนวน	หน่วย
ความถูกต้องเชิงตำแหน่งสมบูรณ์ทางราบ	< 20	เมตร
ความถูกต้องเชิงตำแหน่งสมบูรณ์สามมิติ	< 30	เมตร
ความหนาแน่นพอยต์คลาวด์ (ระดับสองขึ้นไป)	> 400	จุดต่อตารางเมตร

6.2 มาตรฐานป้ายจราจรจากสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร

ป้ายจราจรถูกประเมินตามมาตรฐานต่อไปนีตามตารางที่ 5 ซึ่งโดยจะมีการวิเคราะห์ออกเป็นด้านความสูงและด้านขนาดซึ่งเป็นด้านที่สำคัญต่อการตรวจสอบความสมบูรณ์ของป้ายจราจร

ตารางที่ 5 มาตรฐานป้ายจราจรจากสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร

ความสูง	≥ 1.50 เมตร
ขนาด	$\geq 0.75 \times 2.00$ เมตร

6.3 เงื่อนไขป้ายโฆษณาตามพรบ.ควบคุมอาคาร พ.ศ.2522

ความถูกต้องของป้ายโฆษณาจะถูกประเมินตามพรบ. ที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้โดยมีรายละเอียดตามตารางที่ 6 ซึ่งให้ความสำคัญไปที่ความยาวขนาดพื้นที่หน้าตัดและความสูงซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการพิจารณาความถูกต้องตามพรบ. ควบคุมอาคาร

ตารางที่ 6 เงื่อนไขป้ายโฆษณาตามพรบ.ควบคุมอาคาร พ.ศ.2522

ความยาว	≤ 32 เมตร
ขนาดหน้าตัดพื้นที่โฆษณาที่กฎหมายเข้าควบคุม	≥ 5000 ตารางเซนติเมตร
ความสูง	[10,30] เมตร

6.4 มาตรฐานเส้นประจราจรจากคู่มือและมาตรฐานเครื่องหมายจราจรบนพื้นทางโดย สนข., กระทรวงคมนาคม

มาตรฐานเส้นจราจรจะถูกระบุไว้เป็นตารางที่ 7 ซึ่งจะแสดงถึงเงื่อนไขที่เส้นจราจรควรจะเป็นโดยมีเรื่องของความกว้าง ความยาวและระยะห่างระหว่างเส้นประสองเส้น

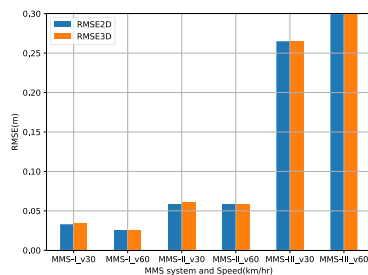
ตารางที่ 8 มาตรฐานเส้นประจากรจากคู่มือและมาตรฐานเครื่องหมายจราจรบน
พื้นทางโดย สนข., กระทรวงคมนาคม

ความกว้าง	[0.20,0.40] เมตร
ความยาว	2 เมตร
ระยะการเว้นช่อง	4 เมตร

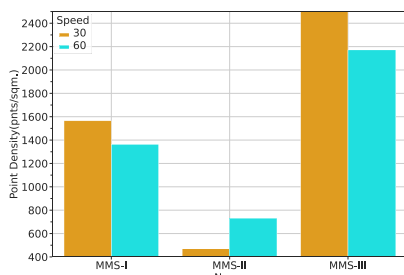
7. ผลการศึกษาวิจัยและอภิปรายผล

7.1 ผลการประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่งและความหนาแน่น พอยต์คลาวด์

จากการประเมินความถูกต้องค่าพิกัดและความหนาแน่นของ
พอยต์คลาวด์ที่มาจากระบบทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่แบบเลเซอร์สแกนโดยมี
ความเร็วที่ออกแบบแตกต่างกัน



รูปที่ 8 การเปรียบเทียบความถูกต้องค่าพิกัด



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบความถูกต้องของความหนาแน่นพอยต์คลาวด์

ในรูปที่ 7 และรูปที่ 9 มีกำหนดการแสดงผล อ้างอิงตามเกณฑ์ชั้นงาน
ของ TAICS TR-0016(E) V1.0:2021 ให้แกนตั้งมีค่าระยะห่างสูงสุดเป็น 30
เซนติเมตรซึ่งอยู่ในเงื่อนไขค่าความละเอียดถูกต้องตำแหน่งสามมิติและความ
หนาแน่นพอยต์คลาวด์อยู่ในช่วง [400,2500] จุดต่อตารางเมตร

ค่าความละเอียดถูกต้อง RMSE2D และค่าความละเอียดถูกต้อง
RMSE3D มีค่าที่ใกล้เคียงกันมาก อีกทั้งความเร็วที่ออกแบบไว้ 30 กิโลเมตร
ต่อชั่วโมงส่งผลให้พอยต์คลาวด์มีค่าความละเอียดถูกต้อง RMSE2D และ
RMSE3D ดีกว่า ซึ่งสอดคล้องกับความหนาแน่นพอยต์คลาวด์ที่ความเร็วที่
ออกแบบไว้ 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมงให้ค่าความหนาแน่นพอยต์คลาวด์
มากกว่า

จากข้อมูลที่รูปที่ 8 และรูปที่ 9 สามารถประยุกต์ระบบทำแผนที่ชนิด
เคลื่อนที่แบบเลเซอร์สแกนให้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามเกณฑ์
มาตรฐานต่างๆ

ตารางที่ 9 สรุปการผ่านเกณฑ์ชั้นงานของ TAICS TR-0016(E) V1.0:2021
สำหรับข้อมูลวิ่งด้วยความเร็วที่ออกแบบไว้ 30 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

เงื่อนไข	รูปแบบการทำงาน		
	MMS-I	MMS-II	MMS-III
ค่าความละเอียดถูกต้อง RMSE2D < 20 cm	☒	☒	☐
ค่าความละเอียดถูกต้อง RMSE3D < 30 cm	☒	☒	☒
ความหนาแน่นพอยต์คลาวด์ > 400 จุดต่อตาราง เมตร	☒	☒	☒

ตารางที่ 10 สรุปการผ่านเกณฑ์ชั้นงานของ TAICS TR-0016(E) V1.0:2021
สำหรับข้อมูลวิ่งด้วยความเร็วที่ออกแบบไว้ 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

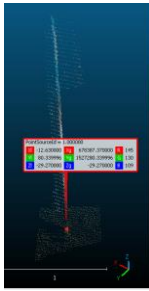
เงื่อนไข	รูปแบบการทำงาน		
	MMS-I	MMS-II	MMS-III
ค่าความละเอียดถูกต้อง RMSE2D < 20 cm	☒	☒	☐
ค่าความละเอียดถูกต้อง RMSE3D < 30 cm	☒	☒	☐
ความหนาแน่นพอยต์คลาวด์ > 400 จุดต่อตาราง เมตร	☒	☒	☒

ตามข้อมูลในตารางที่ 9 และตารางที่ 10 การนำเกณฑ์ชั้นงานของ
TAICS TR-0016(E) V1.0:2021 มาประยุกต์ใช้จะพบว่า มีระบบ MMS-III ไม่
ผ่านเกณฑ์เพียงรูปแบบเดียว แต่อย่างไรก็ตาม การทำงานให้ผ่านเกณฑ์ก็
เพียงพอแล้ว เนื่องจากในปัจจุบันมีตัวเลือกอุปกรณ์มากมายหลายแบบซึ่งให้
คุณภาพที่แตกต่างกัน อีกทั้งการสำรวจทำแผนที่บนท้องถนนถูกจำกัดด้วย
เวลาและทุนทรัพย์ นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดด้านสถานที่ ความเชี่ยวชาญ
และอื่นๆ ดังนั้นต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆเหล่านี้เพื่อให้บรรลุเกณฑ์ชั้นงานที่
วางไว้

7.2 ผลการประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่งข้อมูลพิกัดที่ปรากฏ บนผิวถนนและข้างถนนออกไป

7.2.1 ป้ายจราจร

ตัวอย่างป้ายจราจรที่คัดเลือกมา 1 ป้ายที่ใช้ในการประเมินความ
ถูกต้องได้แสดงไว้ดังรูปที่ 10 เนื่องจากความต้องการที่จะนำไปวิเคราะห์
ความถูกต้องเชิงตำแหน่งตามมาตรฐาน TAICS TR-0016(E) V1.0:2021 ลง
ในตารางที่ 11 และประเมินรูปร่างลักษณะตามคู่มือและมาตรฐาน
เครื่องหมายจราจรบนพื้นทางโดยสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและ
จราจร (สนข.), กระทรวงคมนาคมลงในตารางที่ 12 อีกทั้งทดสอบ
สมมติฐานบางอย่างเพื่อเป็นการนำเสนอวิธีการประยุกต์อื่นๆ



ก) พอยต์คลาวด์ของป้ายจราจร



ข) รูปป้ายจราจร

รูปที่ 10 ตัวอย่างป้ายจราจร

ระยะห่างของป้ายจราจรมีค่าผิดปกติอาจมาจากระบบ MMS-I แล้วให้ระบบ MMS-II และระบบ MMS-III มาเปรียบเทียบกับระบบ MMS-I ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 สรุปค่าระยะห่างของป้ายจราจร

ประเภท	รูปแบบการทำงาน			หน่วย
	MMS-I	MMS-II	MMS-III	
ตำแหน่งของฐานทางราบ	0.000	0.062	0.291	เมตร
ตำแหน่งป้ายทางราบ	0.000	0.143	0.252	เมตร
ตำแหน่งของฐานสามมิติ	0.000	0.070	0.293	เมตร
ตำแหน่งป้ายสามมิติ	0.000	0.147	0.254	เมตร

จากตารางที่ 11 ค่าที่ได้จากระบบ MMS-II ที่มีค่าระยะห่างทางราบ 0.062, 0.070 เมตร ต่ำกว่า 20 เซนติเมตร และ 0.143, 0.147 เมตร ต่ำกว่า 30 เซนติเมตร ตามมาตรฐาน TAICS TR-0016(E) V1.0:2021 จึงถือว่าป้ายจราจรจากระบบ MMS-II จึงผ่านเกณฑ์ขั้นต่ำดังกล่าว ป้ายจราจรนี้สามารถใช้ในงานแผนที่ความละเอียดสูงได้ การวิเคราะห์นี้ถือเป็นตัวอย่างในการประเมินตำแหน่งสัมพัทธ์ที่ดำเนินการในการประเมินความถูกต้องเพิ่มเติม

จากตารางที่ 11 ค่าระยะห่างทางราบของป้ายจราจรจาก MMS-II มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ 20 เซนติเมตรและระยะห่างสามมิติน้อยกว่า 30 เซนติเมตรจึงถือว่าผ่านเกณฑ์ แต่ค่าระยะห่างของระบบ MMS-III ไม่ผ่านเกณฑ์เพราะว่าระยะห่างทางราบเกินที่กำหนด แต่ในความเป็นจริง ในการประยุกต์ใช้งานดูแลที่เจอรันนั้นไม่ได้ต้องให้ทางราบถูกต้องในระดับเซนติเมตร แต่อาจสูงถึงระดับเมตร

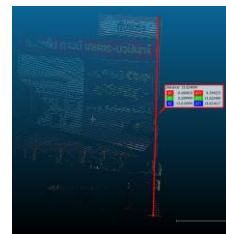
ตารางที่ 12 สรุปผลการประเมินป้ายจราจร

เงื่อนไข	รูปแบบการทำงาน			หน่วย
	MMS-I	MMS-II	MMS-III	
ความสูง	1.83	1.82	1.67	เมตร
ขนาด	0.56 x 0.99	ไม่ สามารถ รังวัดได้	0.56 x 0.99	เมตร

จากข้อมูลในตารางที่ 12 พบว่ามีเพียงระบบ MMS-II ที่การสแกนมีความผิดปกติที่ป้ายนี้ รูปร่างบดงไม่สามารถวัดขนาดได้ แต่ป้ายจราจรที่มีอยู่ในระบบ MMS-I ระบบ MMS-II และระบบ MMS-III ไม่ผ่านเงื่อนไขด้านขนาดของมาตรฐานป้ายจราจรดังกล่าว แต่อย่างไรก็ตามนี้เป็นเพียงการนำเสนอการประยุกต์ในการรังวัดป้ายจราจรให้เข้ากับมาตรฐานนี้เพื่อเป็นหลักฐานวิทยาศาสตร์ ส่วนในเรื่องของป้ายจราจรนี้ทำตามมาตรฐานใด ๆ นั้น จำเป็นต้องศึกษาต่อไป

7.2.2 ป้ายโฆษณา

ป้ายโฆษณาจำนวนหนึ่งป้ายเท่านั้นที่คัดมาเป็นตัวอย่างซึ่งได้แสดงไว้ดังรูปที่ 11 ข้อสรุปที่แสดงออกเป็นดังตารางที่ 13 ซึ่งทำตามเกณฑ์ขั้นต่ำงาน TAICS TR-0016(E) V1.0:2021 ในเรื่องของตำแหน่ง และตารางที่ 14 ซึ่งมาจากการรังวัดรูปร่างเพื่อเปรียบเทียบกับเกณฑ์ในพรบ. ควบคุมอาคารที่กำหนดความยาว ความสูงและขนาดพื้นที่หน้าตัดของป้ายโฆษณา ที่จะต้องถูกเข้าควบคุมโดยหน่วยงานรัฐ



ก) พอยต์คลาวด์ของป้ายโฆษณา



ข) รูปป้ายโฆษณา

รูปที่ 11 ตัวอย่างป้ายโฆษณา

ระยะห่างของป้ายโฆษณาระหว่างสามเครื่องมือถูกบันทึกดังตารางที่ 13 โดยอ้างอิงระบบ MMS-I และให้ที่เหลื่อมมาเปรียบเทียบ

ตารางที่ 13 สรุปค่าระยะห่างของป้ายโฆษณา

ประเภท	รูปแบบการทำงาน			หน่วย
	MMS-I	MMS-II	MMS-III	
ตำแหน่งป้ายทางราบ	0.000	0.684	0.834	เมตร
ตำแหน่งป้ายสามมิติ	0.000	0.738	0.943	เมตร

ในกรณีนี้ ตำแหน่งสัมพัทธ์ของป้ายโฆษณาในระบบ MMS-II และระบบ MMS-III ไม่ผ่านมาตรฐานของ TAICS TR-0016(E) V1.0:2021 ซึ่งเป็นผลมาจากการรังวัดที่ไม่ดีเพียงพอโดยเฉพาะรังวัดไม่ตรงจุดเดียวกัน

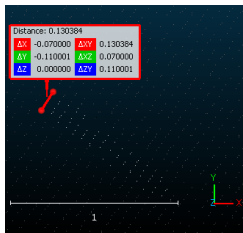
ตารางที่ 14 สรุปผลการประเมินป้ายโฆษณา

เงื่อนไข	รูปแบบการทำงาน			หน่วย
	MMS-I	MMS-II	MMS-III	
ความยาว	11.18	11.34	11.19	เมตร
ความสูง	> 9.76	13.62	13.47	เมตร
ขนาดพื้นที่หน้าตัด	976604	973617	936812	ตารางเซนติเมตร

เป็นป้ายนี้ที่ถูกบังคับใช้ในทางกฎหมายโดยยืนยันผ่านการรังวัดด้วยข้อมูลที่ได้จากระบบ MMS-I ระบบ MMS-II และระบบ MMS-III แต่อย่างไรก็ตาม กฎหมายนี้อาจจะไม่ได้ใช้กับป้ายโฆษณา

7.2.3 เส้นประจากร

ผลการประเมินตัวอย่างเส้นประจากร 1 เส้นประจากรที่มีลักษณะดังรูปที่ 12 สามารถสรุปออกเป็นตารางที่ 15 ซึ่งเปรียบเทียบตำแหน่งสัมพัทธ์โดยอ้างอิงพิกัดจากระบบ MMS-I และใช้เกณฑ์ชั้นงานของ TAICS TR-0016(E) V1.0:2021 และตารางที่ 16 ซึ่งได้รังวัดขนาดและรูปร่างเพื่อตรวจสอบกับเงื่อนไขตามคู่มือและมาตรฐานเครื่องหมายจราจรบนพื้นทาง โดยสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจร (สนข.), กระทรวงคมนาคม



ก) พอยต์คลาวด์ของเส้นประจากร



ข) รูปเส้นประจากร

รูปที่ 12 ตัวอย่างเส้นประจากร

ตารางที่ 15 สรุปค่าระยะห่างของเส้นประจากร

ประเภท	รูปแบบการทำงาน			หน่วย
	MMS-I	MMS-II	MMS-III	
ตำแหน่งเส้นประจากร พิกัดทางราบ	0.000	0.076	0.251	เมตร
ตำแหน่งเส้นประจากร พิกัดสามมิติ	0.000	0.098	0.252	เมตร

ในรูปแบบนี้จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับตารางที่ 11 อย่างเช่น ระบบ MMS-II นั้นมีค่าระยะห่างทางราบและค่าระยะห่างสามมิติผ่านเกณฑ์ทั้งหมด แต่ระบบ MMS-III ไม่ผ่านเกณฑ์ค่าระยะห่างไม่ว่ารูปแบบใดก็ตาม

ตารางที่ 16 สรุปผลการประเมินเส้นประจากร

เงื่อนไข	รูปแบบการทำงาน			หน่วย
	MMS-I	MMS-II	MMS-III	
ความกว้าง	0.13	0.14	0.13	เมตร
ความยาว	0.89	0.87	0.85	เมตร
ระยะการเว้นช่อง	3.11	3.06	3.15	เมตร

ค่ารังวัดรูปร่างของเส้นจราจรของระบบ MMS-I ระบบ MMS-II และระบบ MMS-III ไม่ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดไว้จนเป็นผลมาจากสภาพถนนบริเวณนั้นอาจจะไม่เหมาะสมต่อเกณฑ์ที่ตั้งไว้ อีกทั้งทั้งเกณฑ์เส้นจราจรนั้นมีความ

ยืดหยุ่นและดัดแปลงไปตามความเร็วของการสัญจรที่ออกแบบไว้สำหรับพื้นที่บริเวณนั้นๆ

7.3 ผลการประเมินความถูกต้องของตำแหน่งพีเจอรด้วยวิธีการเปรียบเทียบความเหมือนของแนวของพีเจอร

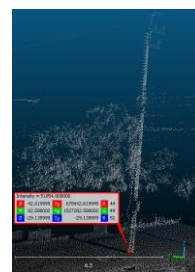
ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดให้ขอบเขตการประเมินความถูกต้องของตำแหน่งพีเจอรด้วยวิธีการเปรียบเทียบความเหมือนของแนวของพีเจอรโดยเลือกพื้นที่การทดลองไว้ 700 เมตรบริเวณโค้งกลับรถยนต์ที่ติดกับสี่แยกเป็นต้นไป ยาวไปจนถึงสามเสาสายไฟฟ้าที่อยู่ตรงป้ายบอกขอยประเสริฐมุนิจ 43 และเลือกใช้เฉพาะฝั่งที่รถยนต์วิ่งเข้าหาขอยนี้เท่านั้น

7.3.1 แนวสายส่งไฟฟ้า

แนวสายส่งไฟฟ้าสามารถทราบได้จากเสาไฟฟ้าที่มีสายส่งไฟฟ้าผาดอยู่ โดยตำแหน่งจะอ้างอิงไปบนเสาซึ่งมีทั้งหมด 24 ต้นดังรูปที่ 13 และมีลักษณะแบบรูปที่ 14



รูปที่ 13 ตำแหน่งแนวสายส่งไฟฟ้าที่เสา



ก) พอยต์คลาวด์ของป้ายจราจร



ข) รูปป้ายจราจร

รูปที่ 14 ลักษณะของตัวอย่างและตำแหน่งที่รังวัด

ตำแหน่งที่ใช้ทำแนวเสาสายส่งไฟฟ้าทั้งหมดเพื่อประเมินความถูกต้องนั้นคือฐานฝั่งที่รถวิ่งเข้าหาแต่แรก แล้วสร้างไปเส้นแล้วเปรียบเทียบกับอ้างอิงระบบ MMS-I แล้วเทียบกับทฤษฎีความแตกต่างตามตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ได้แสดงให้เห็นว่า ไม่ผ่านเกณฑ์ระยะห่างในทางราบไม่เกิน 20 เซนติเมตรตามเกณฑ์ชั้นงานของ TAICS TR-0016(E) V1.0:2021 หากคำนึงด้วยระยะห่างแบบแฮสคอร์ท ส่วนระยะห่างแบบยูคลิเดียนนั้นระบุไว้

ว่ามีส่วนที่ติดกัน ระยะห่างแบบเฟรเซตเป็นเพียงค่าทางเลือกที่น่าสนใจและมีเงื่อนไขคล้ายระยะห่างแบบแฮสเตอร์ฟ แต่อย่างไรก็ตาม ในกรณีนี้ที่เส้นไม่ค่อยผาดกั้น ระยะห่างแบบแฮสเตอร์ฟได้เปรียบกว่าระยะห่างแบบเฟรเซต

ตารางที่ 17 สรุปผลการรังวัดตำแหน่งแนวเสาสายส่งไฟฟ้า

ระยะห่างตามทฤษฎี	รูปแบบการทำงาน			หน่วย
	MMS-I	MMS-II	MMS-III	
ยูคลิดียัน	0.000	0.000	0.000	เมตร
แฮสเตอร์ฟ	0.000	0.225	0.288	เมตร
เฟรเซต	0.000	0.301	0.313	เมตร

นอกจากนี้ สามารถใช้รูปแบบดั้งเดิมที่วัดระยะห่างระหว่างพิกัดจุดต่อจุดแล้วใช้เกณฑ์ชั้นงาน TAICS TR-0016(E) V1.0:2021 ในตารางที่ 18 โดยอ้างอิงค่าพิกัดระบบ MMS-I

ตารางที่ 18 เปรียบเทียบระยะห่างระหว่างพิกัดจุดต่อจุดของแนวสายส่งไฟฟ้า

MODEL	hor_mean	hor_std	hor_max	RMSE2D
MMS-I	0.000	0.000	0.000	0.000
MMS-II	0.045	0.043	0.222	0.061
MMS-III	0.072	0.061	0.288	0.094

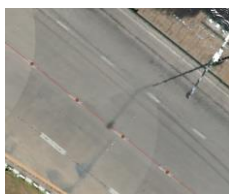
ตารางที่ 18 พบว่าค่าความละเอียดถูกต้อง RMSE2D ของระบบ MMS-II และระบบ MMS-III ไม่เกิน 20 เซนติเมตรตามเกณฑ์ชั้นงาน TAICS TR-0016(E) v1.0:2021

7.3.2 แนวเส้นประจากร

รูปที่ 15 ได้แสดงแนวเส้นประจากรามีทั้งหมด 157 เส้นโดยจุดที่อ้างอิงนั้นจะอยู่บนจุดศูนย์กลางของเส้นประจากรเหล่านั้นที่มีลักษณะดังรูปที่ 16



รูปที่ 15 ตำแหน่งแนวเส้นประจากร



ก) พอยต์คลาวด์ของเส้นประจากร



ข) รูปเส้นประจากร

รูปที่ 16 ก) พอยต์คลาวด์ของเส้นประจากร ข) รูปเส้นประจากร

แนวเส้นประจากรเป็นหนึ่งในตัวอย่างที่ดีในการคำนวณวิธีการเปรียบเทียบความเหมือนของพิกัดเนื่องจากวางตัวตามเส้นทางและใช้พิกัดค่าเฉลี่ยของแต่ละเส้นประมาณสร้างเป็นแนวพิกัดแล้วนำมาเปรียบเทียบโดยอ้างอิงค่าพิกัดที่ได้จากระบบ MMS-I

ตารางที่ 19 สรุปผลการรังวัดตำแหน่งแนวเส้นประจากร

ระยะห่างตามทฤษฎี	รูปแบบการทำงาน			หน่วย
	MMS-I	MMS-II	MMS-III	
ยูคลิดียัน	0.000	0.000	0.000	เมตร
แฮสเตอร์ฟ	0.000	0.111	0.244	เมตร
เฟรเซต	0.000	3.996	3.565	เมตร

ค่ารังวัดเหล่านี้ในตารางที่ 19 บ่งบอกถึงความสามารถที่ระบบ MMS-II เข้าเกณฑ์ชั้นงานของ TAICS TR-0016(E) V1.0:2021 ที่ระยะห่าง 20 เซนติเมตรทางราบ อีกทั้งระยะห่างแบบเฟรเซตให้ค่าที่อยู่ในระดับเป็นเมตร โดยที่เกิดจากความไม่เหมาะสมของลักษณะพิกัดที่นำมาคำนวณระยะห่างแบบเฟรเซตกับแนวเส้นประจากรดังกล่าว

นอกจากนี้ มีตารางหนึ่งซึ่งแสดงการเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างพิกัดจุดต่อจุดและอ้างอิงค่าพิกัดไปยังระบบ MMS-I เช่นเดิม

ตารางที่ 20 เปรียบเทียบระยะห่างระหว่างพิกัดจุดต่อจุดของแนวเส้นประจากร

MODEL	hor_mean	hor_std	hor_max	RMSE2D
MMS-I	0.000	0.000	0.000	0.000
MMS-II	0.037	0.024	0.111	0.044
MMS-III	0.062	0.040	0.231	0.074

จากตารางที่ 20 พบว่าค่าความละเอียดถูกต้อง RMSE2D ทั้งระบบ MMS-II และระบบ MMS-III ผ่านเกณฑ์ชั้นงานของ TAICS TR-0016(E) V1.0:2021 ที่กำหนดว่าระยะห่างทางราบไม่เกิน 20 เซนติเมตร

จากผลลัพธ์ที่ผ่าน แสดงให้เห็นว่าระบบ MMS-II ให้ผลลัพธ์ที่ดีในทุกตัวชี้วัด ทั้งค่าความละเอียดถูกต้อง RMSE และความหนาแน่นพอยต์คลาวด์ แม้ใช้กล้องและไอเอ็มยู ที่คุณภาพรองกว่าระบบ MMS-I แต่ออกแบบการติดตั้งได้เหมาะสม ส่วนระบบ MMS-III ไม่ผ่านเกณฑ์ชั้นงานในหลายกรณีเนื่องจากมีปัญหาในการตั้งค่าอย่าง PRF ที่สามารถปรับลดลงเพื่อให้ความถูกต้องทางตำแหน่งดีขึ้นได้โดยแลกกับความหนาแน่นพอยต์คลาวด์ที่มีมากเพียงพอแล้ว ขาดความชำนาญอุปกรณ์ กับขาดความชำนาญในการทำงานด้วยระบบทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่เพื่อให้บรรลุเกณฑ์ที่กำหนด

8. อภิปรายและสรุปผล

การประเมินพอยต์คลาวด์ออกเป็นสองกลุ่มหลักคือกลุ่มการประเมินความถูกต้องเบื้องต้นซึ่งมีเพียงการประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่งและความหนาแน่นพอยต์คลาวด์ที่สามารถสรุปผลการรังวัดบนจุดควบคุมภาคพื้นดินที่ได้จากระบบทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่เปรียบเทียบกับผลการรังวัดลงในพื้นที่แล้วเปรียบเทียบกับเกณฑ์ชั้นงาน TR-0016(E) V1.0:2021 เมื่อมีทรัพยากรจำกัดในเรื่องของเวลาและงบประมาณ การคำนึงถึงทางเลือกที่เหมาะสมในการใช้ระบบทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ จากข้อมูลใน ตารางที่ 9 และตารางที่ 10 สามารถสังเกตได้ว่าระบบ MMS-II

เหมาะกับการทำงานในสภาพแวดล้อมเช่นนี้มากที่สุด ลำดับรองลงมาคือระบบ MMS-I ลำดับท้ายที่สุดคือระบบ MMS-III หากต้องการประหยัดเวลาในการติดตั้งและวัดสอบอุปกรณ์ในรูปแบบต่างๆ ควรใช้ระบบ MMS-I และระบบ MMS-II หากมีงบประมาณที่จำกัดมาก ระบบ MMS-III เป็นทางเลือกที่ดีพอสำหรับการทำงานซึ่งอาจต้องพึ่งพาผู้เชี่ยวชาญ อีกทั้งใช้เวลาติดตั้งและวัดสอบนานกว่าระบบที่วางแผนที่ชนิดเคลื่อนที่อื่นๆ นอกจากนี้หากต้องการความหนาแน่นพอยต์คลาวด์ที่สูงขึ้นและสามารถวัดได้ใกล้เคียงกับระบบ MMS-II ควรใช้ระบบ MMS-I ซึ่งใช้งบประมาณสูงสุดในกลุ่มแต่สามารถวัดพอยต์คลาวด์ที่ประยุกต์กับแผนที่ความละเอียดสูงได้ดีกว่าระบบ MMS-II

ต่อมา กลุ่มการประเมินความถูกต้องเพิ่มเติมประกอบไปด้วยการประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่งข้อมูลพอยต์คลาวด์ที่ปรากฏบนผิวถนนและข้างถนนออกไปโดยเปรียบเทียบกับระบบ MMS-I ที่มีอุปกรณ์คุณภาพสูงสุดในข้อมูลตามตารางที่ 11 ตารางที่ 13 และตารางที่ 15 พบว่าระบบ MMS-II วัดตำแหน่งพอยต์คลาวด์ได้ใกล้เคียงกับระบบ MMS-I โดยส่วนมากและป้ายโฆษณาเป็นพอยต์คลาวด์ที่วัดได้ยากที่สุดเนื่องจากหาจุดตัดที่เหมือนกันในทุกพอยต์คลาวด์ไม่ได้ นอกจากนี้ ตามข้อมูลใน ตารางที่ 12 ตารางที่ 14 และตารางที่ 16 พบว่าค่ารั้งวัดในเส้นประจางจรและค่ารั้งวัดในป้ายจางจรที่ไม่เข้าเกณฑ์ที่กำหนด เนื่องจากองค์กรท้องถิ่นอาจจะไม่ได้ปฏิบัติตามข้อตกลงของกระทรวง จำเป็นต้องมีเกณฑ์ขององค์กรท้องถิ่นมาเปรียบเทียบ

อีกทั้ง กลุ่มการประเมินเพิ่มเติมมีการประเมินความถูกต้องของตำแหน่งพอยต์คลาวด์ด้วยวิธีการเปรียบเทียบความเหมือนของแนวของพอยต์คลาวด์โดยเปรียบเทียบกับระบบ MMS-I จากข้อมูลในตารางที่ 17 ตารางที่ 18 ตารางที่ 19 และตารางที่ 20 พบว่าแนวพอยต์คลาวด์ที่แตกต่างกันจะให้ผลลัพธ์ไปในทางที่ต่างกัน การเลือกใช้เกณฑ์ระยะห่างต้องเลือกตามพอยต์คลาวด์ อีกทั้งระบบ MMS-II มีโอกาสที่ผ่านเกณฑ์ระยะห่างในรูปแบบอื่นกว่าระบบ MMS-III

9. ข้อเสนอแนะ

9.1 การนำไปใช้ในเชิงปฏิบัติ

การกำหนดความสูงควรใช้เป็นความสูงประเภทเดียวกันเพื่ออำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์ การสร้างไฟล์พอยต์คลาวด์ต้องมีความเข้มสัญญาณและเวลาจีพีเอสซึ่งต้องบอกวิธีการแปลงเป็นเวลาสากล กำหนดค่า PRF ตามความเหมาะสมของแต่ละระบบที่ชนิดเคลื่อนที่เพื่อให้บรรลุเงื่อนไขของมาตรฐานต่างๆ หากต้องการใช้จุดควบคุมภาคพื้นดินนั้นซ้ำควรคำนึงถึงปัจจัยที่ทำให้จุดควบคุมภาคพื้นดินใช้งานไม่ได้ อย่าง การสัญญาณของรถยนต์ข้ามสี่ การมีสิ่งบดบังจุดควบคุมภาคพื้นดิน

9.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยในอนาคต

ควรมีไฟล์ระบุการตั้งจุดควบคุมภาคพื้นดินกับจุดตรวจสอบ (Check Point : CP) หากมีการปรับเปลี่ยนก่อนประมวลผล ทั้งนี้ควรกำหนดให้เป็น

จุดตรวจสอบทั้งหมดไปก่อนเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบกันได้ แต่หากจะปรับแต่งก็ควรปรับให้ตรงกันก่อนเปรียบเทียบเพราะผลกระทบจากการกระทำนี้ส่งผลต่อการทดลองโดยตรง ทั้งนี้ควรมีพอยต์คลาวด์ที่ใช้เป็นจุดตรวจสอบเพื่อให้การประเมินความถูกต้องทางตำแหน่งเข้ากับพอยต์คลาวด์ในพื้นที่มากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณ คณะทำงานจากหน่วยงานสามแห่งนี้ที่ให้ความรู้และข้อมูลสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ อีกทั้งที่ปรึกษาและกรรมการนอกที่คอยให้คำแนะนำ

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Chiang *et al.*, "Creation and Verification of High-Definition Point Cloud Maps for Autonomous Vehicle Navigation," *IEEE Internet of Things Journal*, pp. 1-1, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3435344.
- [2] A. Dreier, J. Janßen, H. Kuhlmann, and L. Klingbeil, "Quality Analysis of Direct Georeferencing in Aspects of Absolute Accuracy and Precision for a UAV-Based Laser Scanning System," *Remote Sensing*, vol. 13, no. 18, doi: 10.3390/rs13183564.
- [3] ชนเชล ไพจิตรประภาภรณ์, "การตรวจสอบวิธีของยานพาหนะจากระบบการทำแผนที่ชนิดเคลื่อนที่ด้วยการประมวลผลข้อมูลจีเอ็นเอสเอสแบบจลนศาสตร์ภายหลัง," 2021.
- [4] M. Elhashash, H. Albanwan, and R. Qin, "A review of mobile mapping systems: From sensors to applications," *Sensors*, vol. 22, no. 11, p. 4262, 2022.
- [5] Y. Ahn, R. Munjy, and Z. Li, "Traffic Sign Extraction from Mobile LiDAR Point Cloud," *Mineta Transportation Institute*, 2024.
- [6] S. D. Johnson, J. S. Bethel, C. Supunychotsakul, and S. Peterson, "Laser mobile mapping standards and applications in transportation," *Purdue University. Joint Transportation Research Program*, 2015.
- [7] สรศักดิ์ ชัยทวี, "การประเมินความถูกต้องกลุ่มของจุดพิกัดสามมิติจากระบบการทำแผนที่แบบเคลื่อนที่," *Kasetsart Engineering Journal*, vol. 34, no. 111, 2021.
- [8] R. S. D. Sousa, A. Boukerche, and A. A. Loureiro, "Vehicle trajectory similarity: Models, methods, and applications," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 53, no. 5, pp. 1-32, 2020.