



การเปรียบเทียบความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางตั้งของแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลจากการสำรวจด้วยภาพถ่าย
จากอากาศยานไร้คนขับ UAV ด้วยหมุดควบคุมที่สร้างจากการใช้แบบจำลองยี่ออยท้องถิ่นและแบบจำลองยี่ออย
สากล: ผลกระทบสำหรับการออกแบบการทางเบื้องต้นในพื้นที่ลาดเอียงและพื้นที่ลาดชันบนภูเขาของภาค
ตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย

COMPARISON OF THE VERTICAL POSITIONING ACCURACY OF DIGITAL SURFACE
MODELS DERIVED FROM UAV PHOTOGRAMMETRY WITH VERTICAL GROUND CONTROL
POINTS CREATED FROM LOCAL AND GLOBAL GEOID MODELS: IMPLICATIONS FOR
PRELIMINARY HIGHWAY DESIGN IN GENTLE AND MOUNTAINOUS SLOPE AREAS OF
NORTHEASTERN THAILAND

เทพนรินทร์ นาหนองตูม¹, ชาติชาย ไวยสุระสิงห์^{2*}, พงศกร พรณรัตน์ศิลป์³ และชุตินา ไวยสุระสิงห์³
¹นักศึกษาลัทธิวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
²รองศาสตราจารย์, ศูนย์วิจัยและพัฒนาโครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
³อาจารย์, คณะศิลปศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

* Corresponding Author, Tel 08 9712 8325, E-Mail: fceecws@kku.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มุ่งหวังที่จะเปรียบเทียบความถูกต้องทางตั้งของแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัล (DSMs) ที่ได้มาจากการสำรวจด้วยภาพถ่ายจาก
อากาศยานไร้คนขับ (UAV) ซึ่งได้ใช้หมุดควบคุมภาคพื้นดินทางตั้งที่สร้างขึ้นจากแบบจำลองยี่ออยท้องถิ่นและแบบจำลอง
ทั้งนี้แบบจำลองยี่ออยท้องถิ่นที่ใช้กันคือแบบจำลอง Thailand Geoid Model 2017 (TGM2017) ในขณะที่แบบจำลองยี่ออยสากล
ที่ใช้คือแบบจำลอง EGM96 และ EGM2008 โดยการศึกษาเน้นการภายใต้บริบทของการออกแบบเบื้องต้นของวิศวกรรมการ
ทาง ซึ่งวินิจฉัยความถูกต้องรูปแบบของภูมิประเทศ 2 ลักษณะที่แตกต่างกัน โดยเป็นพื้นที่ที่ตั้งในพื้นที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ
ของประเทศไทยดังนี้ (1) พื้นที่ความลาดเอียงต่ำซึ่งตั้งอยู่ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ณ จังหวัดขอนแก่น และ
(2) พื้นที่ลาดเอียงแบบทางลาดภูเขาที่ตั้งอยู่ในเขตบริเวณที่พักของเขื่อนจุฬาภรณ์ ณ จังหวัดชัยภูมิ หมุดบังคับภาคพื้นดินสร้างขึ้น
ด้วยการรังวัดด้วยวิธีดาวเทียมนำหนพิภพแบบสถิตย์ (Static Global Navigation Satellite System: Static GNSS) พร้อมการ
ประมวลผลปรับแก้แบบวิธีปรับแก้โครงข่าย ในขณะที่ข้อมูลตรวจสอบได้จากการรังวัดด้วยการสำรวจภูมิประเทศแบบดั้งเดิม ต่อมา

Thepnarin Nanongtoom¹, Chattichai Waisurasingha^{2*}, Pongsakorn Punrattanasin² and Chutima Waisurasingha³

¹Master Student in Civil Engineering Program, Faculty of Engineering, KhonKhon University, Thailand.

²Associate Professor, Sustainable Infrastructure Research and Development Center, Faculty of Engineering, KhonKhon University, Thailand.

³Lecturer, Faculty of Liberal Arts, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand.

DSMs ถูกสร้างขึ้นด้วยการประมวลผลภาพถ่ายที่ได้จาก UAV ซึ่งเป็นการประมวลผลด้วยค่าระดับที่ได้จากแบบจำลองยิอออยด์แต่ละแบบ ต่อจากนั้นเป็นการพิจารณาค่าความถูกต้องทางคิ่งพร้อมด้วยค่าความละเอียดของ DSMs แต่ละแบบ การศึกษาพบว่าความแตกต่างในมิติความถูกต้องทางคิ่งระหว่าง DSMs ที่สร้างขึ้นโดยใช้ TGM2017, EGM96 และ EGM2008 ที่น่าสังเกตคือ ความถูกต้องทางคิ่งของ DSMs ที่ได้จากแบบจำลอง TGM2017 นั้นไม่เกิน ± 0.5 เมตร ในขณะที่แบบจำลอง EGM96 และ EGM2008 มีค่าเกินกว่า ± 1.0 เมตรที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ผลลัพธ์จากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า DSMs ที่ใช้หมุดควบคุมที่สร้างขึ้นจากแบบจำลอง TGM2017 นั้นมีความถูกต้องทางคิ่งที่สอดคล้องกับความต้องการของงานด้านการออกแบบวิศวกรรมทางเบื้องต้นในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ข้อค้นพบจากการศึกษานี้ได้ให้ข้อมูลเชิงลึกที่มีประโยชน์อย่างยิ่งต่อวิธีการรังวัดด้วยระบบดาวเทียมนำหนพิภพ การสำรวจด้วยภาพถ่าย และวิศวกรรมทาง ด้วยการเน้นประสิทธิภาพที่เหนือกว่าของ TGM2017 ในการสำรวจด้วยภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับเพื่อใช้สำหรับการออกแบบการทางเบื้องต้น ได้แสดงให้เห็นถึงความต้องการแบบจำลองยิอออยด์ท้องถิ่นที่มีความถูกต้องสูง จะช่วยส่งผลให้ DSMs ที่ผลิตขึ้นมีความน่าเชื่อถือและมีความละเอียดสูงและเพียงพอต่อโครงการทางวิศวกรรมที่ต้องการข้อมูลที่มีความถูกต้องทางคิ่งตำแหน่ง ยิ่งไปกว่านั้น การศึกษานี้เน้นถึงความจำเป็นในการปรับปรุงวิธีการผลิตแผนที่ภูมิประเทศโดยใช้การใช้อากาศยานไร้คนขับที่ควรมีอยู่อย่างต่อเนื่องเพื่อให้สอดคล้องกับมาตรฐานอุตสาหกรรมงานก่อสร้างที่ดีขึ้นอย่างต่อเนื่องตามความก้าวหน้าของเทคโนโลยีที่เปลี่ยนแปลงไป

คำสำคัญ: แบบจำลองยิอออยด์; การรังวัดด้วยวิธีดาวเทียมนำหนพิภพแบบสถิตย; แบบจำลองระดับ

ABSTRACT

This study aimed to compare the vertical accuracy of digital surface models (DSMs) produced from unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry using vertical ground control points calculated from local and global geoid models. The local geoid model applied was the Thailand Geoid Model 2017 (TGM2017), whereas the global geoid models used were EGM96 and EGM2008. This research was conducted within the context of preliminary highway engineering design, scrutinizing the accuracy across two distinctive terrains located in the Northeastern region of Thailand: (1) a gently sloping area situated in the Faculty of Engineering at Khon Kaen University, Khon Kaen Province, and (2) a mountainous slope located in the residential area of Chulabhorn Dam, Chaiyaphum Province. Ground control points were created by measuring using the static Global Navigation Satellite System (Static GNSS) method, complemented with network adjustment processing. At the same time, verification data were obtained from conventional topographic surveying. After processing UAV-derived imagery using each geoid model, the vertical accuracy of the DSMs and their resolution were evaluated. The study discovered noticeable differences in vertical accuracy dimensions between DSMs generated using TGM2017, EGM96, and EGM2008. Notably, at a 95 percent confidence level, the vertical accuracy of DSMs derived from TGM2017 did not exceed ± 0.5 meters, while EGM96 and EGM2008 exceeded ± 1.0 meters. These results demonstrated that DSMs using control points created from the TGM2017 model meet the vertical accuracy requirements for preliminary highway engineering design in the construction industry. The findings from this study provide invaluable insights into GNSS, photogrammetric surveying, and highway engineering. By emphasizing the superior performance of TGM2017 in UAV photogrammetry for preliminary highway design, it revealed the need for highly accurate local geoid models. These can help

produce reliable and precise DSMs, sufficiently suitable for engineering projects that demand accurate positional data. Furthermore, this study underscores the need for continual refinement of UAV-based terrain mapping methods to keep up with improving construction industry standards amidst evolving technology.

KEYWORDS: Geoid model; Static GNSS; GNSS network processing; Digital surface model

1. บทนำ

เป็นเวลากว่าหลายปีที่ได้มีการนำเทคโนโลยีเกี่ยวกับอากาศยานไร้คนขับ UAV[1] มาประยุกต์ใช้กับงานในด้านวิศวกรรมในหลากหลายมิติ เช่น การทำแผนที่ความละเอียดสูง การทำแผนที่เพื่อการสำรวจและออกแบบ รวมถึงการต่อยอดไปในการทำงานด้านเกษตรอัจฉริยะ ส่งผลให้ทีมงานวิจัยจำนวนมากออกแบบและทดสอบระบบการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับในการทำการสำรวจด้วยภาพถ่าย ซึ่งจะทำได้เป็นข้อมูลแผนที่ภูมิประเทศในรูปแบบดิจิทัลซึ่งสามารถนำไปต่อยอดในงานสารสนเทศภูมิศาสตร์ได้ ทั้งนี้ในช่วงแรกของการพัฒนาระบบอากาศยานไร้คนขับนั้นยังคงมีค่าใช้จ่ายในการพัฒนาเครื่องมือที่นำมาใช้งานซึ่งมีราคาสูงมากพร้อมกันนี้ระบบการถ่ายภาพดิจิทัล ณ ขณะนั้นยังมีข้อจำกัดในเรื่องของความละเอียด แต่ในปัจจุบันนั้นอากาศยานไร้คนขับได้ถูกพัฒนาขึ้นให้มีขนาดเล็กและราคาที่ถูกลงจึงมีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ดังนั้น การศึกษาวิเคราะห์ถึงความถูกต้องที่เป็นผลผลิตจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายที่ได้จากอากาศยานไร้คนขับเพื่อนำมาใช้งานในเชิงวิศวกรรมจึงเป็นสิ่งจำเป็น

งานศึกษาที่ผ่านมา[2][3][4] ได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพการใช้ UAV ในงาน Photogrammetry เพื่อการทำแผนที่โดยได้ให้ผลลัพธ์ในรูปแบบของแผนที่ภาพถ่ายออร์โท (Orthophoto) และแผนที่แบบจำลองระดับพื้นผิว (Digital Surface Model: DSM) แต่ทว่าระดับของความถูกต้องที่ได้รับจากงานรังวัดด้วยภาพถ่ายจาก UAV จะมีความถูกต้องอยู่หลายระดับ[5] ขึ้นอยู่กับการออกแบบงานรังวัดควบคุมภาพถ่าย โดยการศึกษาเชิงวินิจัยของงานรังวัดบนภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับเพื่อการทำแผนที่ในเขตเมืองพบว่าความคลาดเคลื่อนทั้งราบและตั้งที่เป็นผลผลิตของงานสำรวจด้วยภาพถ่ายจาก UAV นั้นอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำมาใช้ในการออกแบบเพื่อการปรับปรุงแนวเส้นทางในเชิงวิศวกรรมทั้งในส่วนของการออกแบบเชิงแนวคิด (Conceptual Design) และ การออกแบบเบื้องต้น (Preliminary Design) โดยในปัจจุบันได้มีการกำหนดระเบียบของกรมที่ดินว่าด้วยเรื่องการทำแผนที่ภาพถ่ายทางอากาศด้วยอากาศยานไร้คนขับ UAV พ.ศ.2564 ออกมาเพื่อเป็นมาตรฐานตามหลักวิชาการ อย่างไรก็ตาม ระเบียบกรมที่ดินไม่ได้เน้นในประเด็นเรื่องของที่มาของค่าระดับ ทั้งนี้เพราะพันธกิจของกรมที่ดินที่เน้นเฉพาะรายละเอียดทางราบ ในขณะที่มาตรฐานการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับเพื่องานวิศวกรรม ที่ผลิตขึ้นจากเกิดจากความร่วมมือระหว่าง วสท. กับสภาวิศวกร[6] ก็ได้ระบุให้การได้มาซึ่งค่าระดับอ้างอิงตามมาตรฐานการปฏิบัติวิชาชีพ (Code of practice) เกณฑ์การปฏิบัติงานด้านสำรวจเพื่องานวิศวกรรม [7]ทั้งนี้ผลการศึกษาดังกล่าวเป็นการใช้ค่าระดับความสูงที่ใช้การถ่วงระดับด้วยกล้องระดับ (leveling) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ถึงแม้ว่าจะมีความถูกต้องสูง หากแต่อาจเป็นวิธีที่ใช้กำลังคน เวลา และงบประมาณที่ค่อนข้างสูงมาก โดยเหตุนี้เอง การศึกษาถึงแนวในการประยุกต์ใช้การรังวัดด้วยระบบดาวเทียมนำหนพิภพ (Global Navigation Satellite System: GNSS) สำหรับการทำการระดับจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ อย่างไรก็ตาม ค่าความสูงได้จากการรังวัดด้วยระบบ GNSS ก็จะมีค่าความสูงของภูมิประเทศเป็นความสูงเหนือรูปทรงรี (Ellipsoidal Height) ที่หากจะนำมาใช้ในการออกจะต้องมีการปรับแก้ด้วยแบบจำลองฮิอยอดส์ให้กลายเป็นความสูงออร์โทเมตริก ซึ่งเป็นค่าความสูงที่เทียบเคียงได้กับความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง โดยแบบจำลองฮิอยอดส์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายใน

ปัจจุบัน คือ EGM96 และ EGM2008 โดยคำว่า EGM นี้ย่อมาจาก Earth Gravitational Model ซึ่งแบบจำลองย็อยด์เหล่านี้มีความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน [8][9] ประมาณ ± 50 และ $\pm 10-25$ เซนติเมตร ตามลำดับ โดยแบบจำลอง EGM96 มีความหยาบมากกว่าแต่ได้รับความนิยมที่แพร่หลายกว่าแบบจำลอง EGM2008 เนื่องจากมีการเผยแพร่มานานกว่า อย่างไรก็ตาม แบบจำลองย็อยด์ทั้งสองนี้มีความใกล้เคียงกับภูมิประเทศของประเทศไทยค่อนข้างน้อย [10] โดยเหตุนี้เอง การพัฒนาแบบจำลองย็อยด์ท้องถิ่นซึ่งมีความสอดคล้องกับประเทศไทยจึงเป็นสิ่งจำเป็น และที่ผ่านมา โดยความร่วมมือกันของกรมแผนที่ทหารและมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ แบบจำลองย็อยด์ Thailand Geoid Model 2017 (TGM2017) [11] จึงได้ถูกพัฒนาขึ้น ทั้งนี้แบบจำลองย็อยด์ดังกล่าวนี้มีความครอบคลุมพื้นที่ของราชอาณาจักรไทยและมีการประเมินค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของข้อมูลอยู่ที่ประมาณ ± 5 เซนติเมตร [12] โดยค่าความคลาดเคลื่อนทางระดับเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับพื้นที่และลักษณะภูมิประเทศในแต่ละแบบดั่งนั้น จึงเป็นที่น่าสนใจอย่างยิ่งที่จะทำการศึกษาถึงความถูกต้องของแบบจำลอง TGM2017 ในการนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับการสำรวจด้วยภาพถ่าย เพื่อประเมินความถูกต้องทางดิ่งโดยในการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกพื้นที่ภูมิประเทศ 2 แบบคือพื้นที่ภูมิประเทศแบบราบเรียบซึ่งได้เลือกบริเวณพื้นที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และพื้นที่ภูมิประเทศแบบภูเขาซึ่งได้เลือกพื้นที่บริเวณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเขื่อนจุฬาภรณ์ มาเป็นกรณีศึกษาโดยจะมุ่งเน้นไปยังพื้นที่ที่เป็นแนวเส้นทางถนนและพื้นที่โล่ง

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบแบบจำลองพื้นผิวระดับที่มาจากผลการประมวลผลด้วยการสำรวจด้วยภาพจาก UAV โดยการใช้ค่าระดับของหมุดควบคุมภาพถ่ายแบบต่าง ๆ ที่ได้จากแบบจำลองย็อยด์ได้แก่ EGM96 EGM2008 และ TGM2017 โดยหมุดบังคับภาคพื้นดินสร้างขึ้นด้วยการรังวัดด้วยวิธีดาวเทียมนำหนพิภพแบบสถิตย์ (Static Global Navigation Satellite System: Static GNSS) ที่มีการประมวลผลแบบโครงข่าย (Network Processing)

3. แบบจำลองย็อยด์

ย็อยด์เป็นพื้นผิวครอบคลุมโลกซึ่งทุกจุดบนพื้นผิวย็อยด์มีพลังงานศักย์เนื่องจากแรงโน้มถ่วงเท่ากัน เมื่อพื้นผิวพาดผ่านมหาสมุทร โดยสมมุติให้ระดับน้ำทะเลปานกลางคือพื้นผิวย็อยด์ซึ่งเป็นผิวโค้งเพราะมีค่าที่ต่างกันไม่มาก อย่างไรก็ตาม เมื่อพาดผ่านส่วนที่เป็นพื้นทวีปซึ่งประกอบด้วยวัสดุส่วนที่เป็นของแข็งเป็นส่วนใหญ่ ภูเขาที่มีมวลและความสูงแตกต่างกันไปพื้นผิวย็อยด์ก็จะมีความคดโค้งมากขึ้น โดยปกติแล้ว วิธีในการหารูปทรงย็อยด์ ได้จากการสำรวจสนามแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity survey) ซึ่งมีทั้งรูปแบบการตั้งรังวัดปกติ หรือติดตั้งเครื่องรังวัดบนยานพาหนะเช่นเครื่องบิน หรือกระทั่งการใช้การสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมในการหาค่าสนามความถ่วง ทั้งนี้การรังวัดด้วยเครื่องบินจะทำให้ได้ข้อมูลที่มีความละเอียดสูงแต่ก็มีข้อจำกัดคือทำได้เฉพาะกรอบพื้นที่ที่ค่อนข้างจำกัด ซึ่งลักษณะแบบนี้จะเรียกว่า การสร้างแบบจำลองย็อยด์ท้องถิ่น (Local geoid) ในขณะที่การสำรวจรังวัดด้วยดาวเทียมจะช่วยให้การสร้างแบบจำลองย็อยด์สากล (Global geoid) ซึ่งแบบจำลองย็อยด์แต่ละแบบมีรายละเอียดดังนี้

1. แบบจำลองย็อยด์สากล (Earth gravity model, EGM) ได้รับการพัฒนาโดยหน่วยงาน USA National Geospatial-Intelligence แห่งสหรัฐอเมริกาอย่างต่อเนื่อง เป็นแบบจำลองหาพลังงานศักย์ของสนามความโน้มถ่วง (Earth gravity field)

ประกอบด้วยสัมประสิทธิ์ฮาร์มอนิกทรงกลม (Spherical harmonics) ที่มีการขยายจำนวนพจน์แบบอนุกรมมีความสมบูรณ์ด้วยระดับชั้น (Degree) และอันดับ (Order) ที่เป็นตัวเลข แบบจำลองความโน้มถ่วงจึงใช้วิเคราะห์พื้นผิวฮัยออยด์ของโลก ดังนั้น จึงใช้คำนวณหาความสูงฮัยออยด์ ณ ตำแหน่งบนผิวโลกที่ต้องการ ปัจจุบัน แบบจำลองความโน้มถ่วงแบบทั่วโลกซึ่งถูกพัฒนาโดยสหรัฐอเมริกาอย่างต่อเนื่อง ปัจจุบันได้แก่ EGM2008 ซึ่งมาแทนที่ EGM96 แบบจำลอง EGM2008 มีความถูกต้องสูงกว่าเนื่องจากมีการเก็บข้อมูลความโน้มถ่วงที่กระจายทั่วโลกมากกว่า EGM96 เนื่องจากให้ข้อมูลความสูงฮัยออยด์ด้วยตารางกริดที่มีขนาดเล็กกว่า

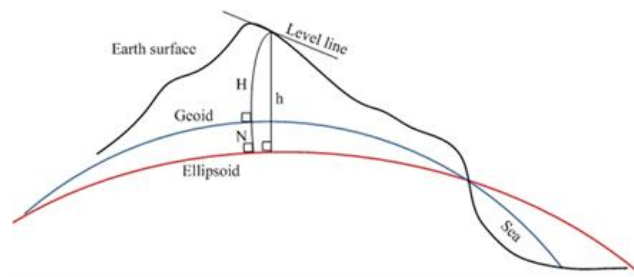
2. แบบจำลองฮัยออยด์ท้องถิ่น TGM2017 (Thailand geoid model 2017) จัดสร้างโดยความร่วมมือระหว่างกรมแผนที่ทหารกับมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สร้างแบบจำลองฮัยออยด์ชนิดความโน้มถ่วงพิภพ (Gravimetric geoid model) โดยคำนวณข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพภาคพื้นดินมากกว่า 10,000 หนูด ครอบคลุมพื้นที่ทุกภูมิภาคของประเทศไทย ร่วมกับข้อมูลความโน้มถ่วงพิภพจากการสำรวจทางอากาศ และทำการปรับปรุงข้อมูลให้มีความสัมพันธ์กับโครงข่ายค่าพิกัดทางดิ่งกรมแผนที่ทหาร อ้างอิงค่าระดับสูงจากเกาะหลัก จังหวัดประจวบคีรีขันธ์เพื่อให้แบบจำลองฮัยออยด์มีความเหมาะสมกับพื้นที่ประเทศไทย

ทั้งนี้แบบจำลองฮัยออยด์ท้องถิ่นมีจุดเด่นในเรื่องของความถูกต้องทางดิ่งที่สูงกว่าแบบจำลองฮัยออยด์สากล แต่ในขณะเดียวกันแบบจำลองฮัยออยด์สากลมีจุดเด่นในมิติของความครอบคลุมที่มีทั่วทั้งโลกที่ดีกว่าแบบจำลองฮัยออยด์ท้องถิ่น

3.2 ค่าระดับสูงจากแบบจำลองฮัยออยด์

เนื่องจากการศึกษาวิจัยนี้ ได้ตั้งวัตถุประสงค์ให้ใช้หาค่าระดับสูงจากภาคพื้นดินสร้างขึ้นด้วยการรังวัดด้วยวิธีดาวเทียมนำหนพิภพแบบสถิตย์ ดังนั้น ค่าความสูงที่ได้จากวิธีรังวัดแบบนี้จะเป็นความสูงเหนือรูปทรงรี (Ellipsoidal height) ที่เป็นการอ้างอิงค่าระดับอยู่กับพื้นผิวทรงรี ซึ่งในการศึกษาวิจัยได้อ้างอิงอยู่พื้นฐาน World Geodetic System 1984 (WGS84) อย่างไรก็ตาม ค่าระดับที่ใช้ในงานวิศวกรรมทางจะเน้นไปที่การอ้างอิงเหนือระดับทะเลปานกลาง ที่เรียกว่า ความสูงออร์โธเมตริก (Orthometric height) จากรูปที่ 1 จะเห็นว่า การแปลงค่าจากความสูงเหนือรูปทรงรีให้เป็นความสูงออร์โธเมตริกนั้นจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลองฮัยออยด์ซึ่งจะให้ค่าความสูงฮัยออยด์ (Geoid-ellipsoid separation or N-value or geoidal height) คือระยะห่างระหว่างพื้นผิวฮัยออยด์และพื้นผิวทรงรีใช้สัญลักษณ์ N ในสมการที่ 1 ทั้งค่า N ที่ได้จากแบบจำลองฮัยออยด์ ทั้งนี้ค่า N นี้คือค่าที่เกิดจากการวัดตั้งฉากกับพื้นผิวทั้งสองเป็นระยะห่างที่เกิดภายหลังการได้แบบกระชับ (Fitting) ทรงรีกับพื้นผิวฮัยออยด์ถ้าหากพื้นผิวฮัยออยด์อยู่ด้านนอกของผิวทรงรี N มีค่าเป็นบวกแต่ถ้าหากพื้นผิวฮัยออยด์อยู่ด้านใน N มีค่าเป็นลบ ระยะห่างนี้ใช้เป็นตัวบ่งชี้การแนบกระชับ(Fitting)ของทรงรีเรขาคณิตกับพื้นผิวฮัยออยด์ที่ไม่เป็นภาพทรงเรขาคณิต

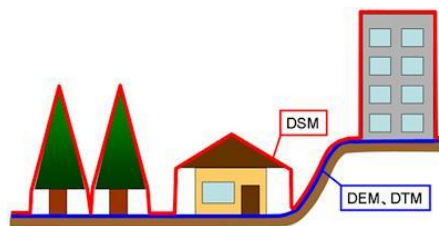
$$H = h - N \quad (1)$$



รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่างความสูงออร์โทเมตริก ความสูงทรงรีและความสูงซีออยด์

3.3 แบบจำลองพื้นผิว (Digital Surface Model: DSM)

แบบจำลองระดับพื้นผิว (Digital Surface Model: DSM) เป็นผลผลิตโดยตรงที่ได้จากการประมวลผลในงานสำรวจด้วยภาพถ่าย ซึ่งเป็นความสูงของสิ่งต่าง ๆ บนพื้นผิวโลกเหนือระดับอ้างอิง ทั้งนี้เมื่อนำเอา DSM ไปหักลบกับสิ่งปลูกสร้าง ความสูงต้นไม้และพืชพรรณต่าง ๆ ที่อยู่บนพื้นผิวโลกก็จะได้เป็นแบบจำลองความสูงเชิงตัวเลข (Digital Elevation Model: DEM) หรือแบบจำลองลักษณะภูมิประเทศ (Digital Terrain Model: DTM) ที่เป็นข้อมูลที่บรรจุเอาเฉพาะค่าความสูงต่ำและลักษณะภูมิประเทศไว้เท่านั้น ทั้งนี้ข้อมูล DSM, DEM หรือกระทั่ง DTM ต่างก็บรรจุอยู่ในรูปแบบของตารางกริดที่เรียกว่าข้อมูลราสเตอร์ (Raster Data)



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่าง DSM ซึ่งมีการหักลบความสูงเพื่อผลิต DEM และ DTM

3.4 การรังวัดด้วยวิธีดาวเทียมนำหนพิภพแบบสถิตย์ (Static Global Navigation Satellite System: Static GNSS)

การรังวัดด้วยวิธีดาวเทียมนำหนพิภพแบบสถิตย์เป็นเทคนิคหาตำแหน่งของจุดใด ๆ โดยใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมอย่างน้อย 2 เครื่อง เครื่องหนึ่งติดตั้งที่สถานีฐานและส่วนที่เหลือติดตั้งที่จุดที่ต้องการหาพิกัด ระยะระหว่างจานรับสัญญาณที่สถานีฐานและจานรับสัญญาณของเครื่อง ณ ตำแหน่งที่ต้องการหาค่าพิกัดแต่ละเครื่องเรียกว่าความยาวเส้นฐาน (Baseline length) เปิดเครื่องให้ทุกเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมพร้อมกันโดยไม่มีการเคลื่อนย้ายเครื่องเป็นเวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง ระยะเวลาการวัดขึ้นอยู่กับความยาวเส้นฐาน ถ้าความยาวเส้นฐานมากก็จะใช้เวลานานขึ้น จำไว้เสมอว่าเฉพาะกลุ่มดาวเทียมจำนวนอย่างน้อย 4 ดวงเหมือนกัน ที่รับรู้โดยเครื่องรับทุกเครื่องจึงจะนำไปประมวลผลได้ เครื่องควบคุม (Controllers) จะมีหน่วยความจำภายในซึ่งใช้บันทึกข้อมูลการรังวัดหรืออาจจะบันทึกโดยใช้แผ่นบันทึกข้อมูลซึ่งใส่เข้าไปในเครื่องควบคุมสำหรับเทคนิคนี้ โดยทั่วไปอัตราการบันทึก (Recording rate) ข้อมูลทุก 15-60 วินาที จากนั้น ปิดเครื่องแล้วย้ายเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมทั้งหมดรวมทั้งที่สถานีฐานโดยเหลือไว้เพียงหนึ่งเครื่องซึ่งจะไว้เป็นสถานีฐานไปยังตำแหน่งใหม่ที่ต้องการหาพิกัด ทำเช่นนั้นจนกว่าจะวัดหมดทุกจุดเทคนิคนี้จะให้ความถูกต้องของตำแหน่งสูงสุด ความถูกต้องสัมพัทธ์ (Relative accuracy) ประมาณ $\pm (3 \text{ mm.} + 1 \text{ ppm})$ เทคนิคนี้สามารถใช้ได้กับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมทั้งแบบความถี่เดียวและความถี่คู่ เป็นการรังวัดแบบสัมพัทธ์ โดยการวัดเฟสของคลื่นส่ง โดยจะใช้เครื่องรับสัญญาณ

ดาวเทียมตั้งแต่ 2 เครื่องขึ้นไป โดยสถานีหลัก (Base station) จะตั้งอยู่บนตำแหน่งที่มีค่าพิกัดที่ถูกต้อง และสถานีเคลื่อนที่ (Roving station) ตั้งอยู่บนตำแหน่งที่ต้องการจะทราบค่า วิธีนี้เครื่องรับสัญญาณทั้งสองสถานีจะต้องรับข้อมูล จากดาวเทียมกลุ่มเดียวกันและช่วงเวลาเดียวกันอย่างน้อย 4 ดวง และต้องตั้งอยู่กับที่เป็นระยะเวลาหนึ่ง โดย ใช้เวลา ทำการรังวัดไม่น้อยกว่า 30 นาที เพื่อให้ได้ข้อมูลการรังวัดที่เพียงพอสำหรับการประมวลผลค่า Ambiguity ด้วยซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์มาประมวลผลจะให้ค่าความถูกต้องตั้งแต่ 5 มิลลิเมตร ถึง 2.5 เซนติเมตร (สำหรับเส้นทางที่มีความยาวไม่เกิน 20 กิโลเมตร) ทั้งนี้ระยะเวลาการทำการรังวัดจะมากขึ้นเมื่อระยะทางระหว่างสถานี หลักและสถานีเคลื่อนที่มากขึ้น โดยระยะเส้นทางที่มากที่สุดที่ยังคงผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถืออยู่ราว 20-30 กิโลเมตร (สำหรับเครื่องรับสัญญาณแบบสองความถี่) ระยะเวลาในการรังวัดแบบ Static สำหรับเครื่อง Single Frequency (ดาวเทียมไม่น้อยกว่า 5 ดวง, มุมสูงของดาวเทียม ไม่น้อยกว่า 15° และ PDOP น้อยกว่า 7)

3.5. การประเมินความถูกต้อง

การวิเคราะห์ผลข้อมูลจะทำด้วยซอฟต์แวร์ และแสดงผลในรูปของค่าความคลาดเคลื่อนเชิงตำแหน่ง Root Mean Square Error (RMSE) ของหมุดตรวจสอบเพื่อประเมินความละเอียดที่ถูกต้องเชิงตำแหน่งของค่าพิกัดทางราบและทางตั้ง ที่ได้จากขั้นตอนการประมวลผลของซอฟต์แวร์ ซึ่งการวิเคราะห์ผลข้อมูลทำให้ทราบค่าพิกัดที่มีความถูกต้องยอมรับได้ โดยนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐาน American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Accuracy Standards 2014 (ASPRS 2014) ซึ่งผลที่ได้สามารถระบุคุณภาพความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางตั้งของแผนที่ โดยในการวิเคราะห์ผลจะอาศัยสมการที่ 2 อย่างไรก็ตาม ในการศึกษาวิจัยนี้ได้เลือกใช้การวิเคราะห์ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % (E_{Z95}) ซึ่งเป็นระดับความเชื่อมั่นที่แสดงความเป็นค่าจริงของพารามิเตอร์ได้ [13] โดยสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ 3

$$RMSE_Z = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Z_i - Z_{check})^2 / n} \quad (2)$$

$$E_{Z95} = 1.96 RMSE_Z \quad (3)$$

4. วิธีการวิจัย

4.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ประกอบด้วย (1) อากาศยานไร้คนขับ, (2) เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมความละเอียดสูง และ (3) กล้องระดับ ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ จะมีดังนี้



รูปที่ 2 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมความละเอียดสูงกับอากาศยานไร้คนขับ

4.1.1 อากาศยานไร้คนขับ

อากาศยานไร้คนขับที่นำมาใช้สำรวจข้อมูลเป็นยี่ห้อ DJI รุ่น Phantom 4 Professional ที่เป็นแบบปีกหมุนจำนวน 4 ใบพัด พร้อมกับกล้องขนาด 20 ล้านจุดภาพ ความยาวโฟกัส 8.6 มิลลิเมตร เซนเซอร์รับภาพแบบ CMOS มีความละเอียดจุดภาพขนาด 2.3 ไมครอน กล้องสามารถปรับค่ารับแสง ได้ ตั้งแต่ F/2.8 – F/11 และ ความเร็ว shutter 1/8000 – 8 วินาที

4.1.2 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม

เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมยี่ห้อ Leica รุ่น Viva GS10 และ GS16 ที่มีขีดความสามารถในการรับสัญญาณในหลายความถี่จากดาวเทียม GPS ดาวเทียม GLONASS และดาวเทียม BDS มีขีดความสามารถเครื่องมือในการรังวัดตำแหน่งด้วยวิธีสถิตอย่างรวดเร็ว (rapid static) ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้ในการรังวัดค่าพิกัดหมุดบังคับภาพภาคพื้นดิน และจุดตรวจสอบที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ โดยให้ค่าความถูกต้อง (accuracy) ทางราบ $\pm (3 \text{ mm} + 0.5\text{ppm})$ และทางตั้ง $\pm (5 \text{ mm} + 0.5\text{ppm})$

4.1.3 กล้องระดับ

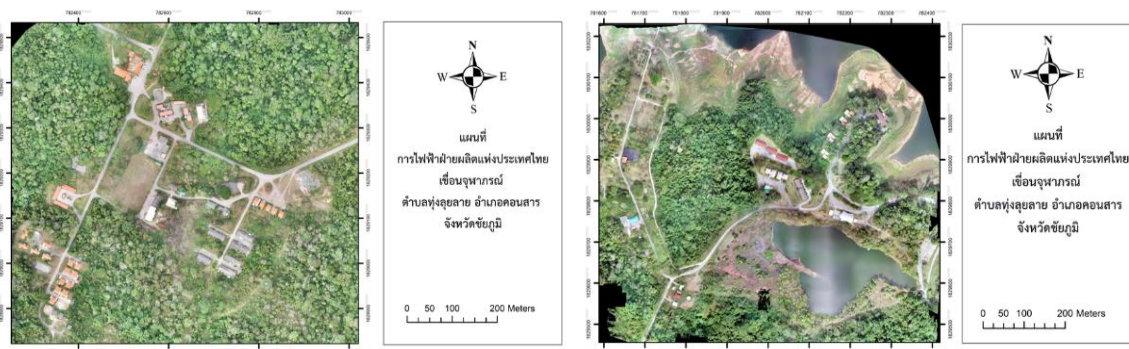
กล้องระดับที่จะใช้ในการศึกษาเป็นกล้องดิจิทัลยี่ห้อ Leica รุ่น Sprinter 150M กล้องเป็นระบบเห็นภาพตั้งตรงตามธรรมชาติ กำลังขยาย (Optical) 24 เท่า ช่วงระยะการรังวัดอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Measurements) 2 – 100 เมตรมีระบบปรับระดับอัตโนมัติโดยใช้ COMPENSATOR (Magnet Damped pendulum) ความคลาดเคลื่อนในการทำระดับมาตรฐาน (DOUBLE RUN) แบบ Electronic measurement ที่ระยะทาง 1 กิโลเมตร มีความคลาดเคลื่อน $\pm 0.7 - 1.0$ มิลลิเมตร

4.2 พื้นที่ศึกษา

พื้นที่การศึกษาวิจัยได้แบ่งออกเป็น 2 แบบคือแบบคือพื้นที่ภูมิประเทศแบบลาดเอียงซึ่งได้เลือกบริเวณพื้นที่ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น โดยมีค่าระดับความสูงอยู่ที่ประมาณ 200 เมตรเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง มีค่าความสูงขี้อยอดเฉลี่ยอยู่ที่ -29.049 เมตรและมีขนาดพื้นที่อยู่ที่ประมาณ 200 ไร่และพื้นที่ภูมิประเทศแบบลาดชันบนภูเขาซึ่งได้เลือกพื้นที่บริเวณการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเขื่อนจุฬาภรณ์ พื้นที่ที่ทำการศึกษาค่าระดับความสูงอยู่ที่ประมาณ 790 เมตรเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง มีค่าความสูงขี้อยอดเฉลี่ยอยู่ที่ -29.880 เมตรและมีขนาดพื้นที่ที่ใช้ศึกษาประมาณ 170 ไร่



(ก) ภูมิประเทศแบบลาดเอียง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น



(ข) ภูมิประเทศแบบลาดชันบนภูเขา การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยเขื่อนจุฬาภรณ์

รูปที่ 3 แผนที่พื้นที่การศึกษา

4.3 กระบวนการดำเนินงานวิจัย

4.3.1 ข้อมูลทางราบ ได้ข้อมูลจากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่นำไปรังวัดหาค่าพิกัดโดยการนำเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมไปตั้งที่หมุดที่ทราบค่าซึ่งเป็นหมุดหลักที่ใช้อ้างอิงทั้งพิกัดทางราบและพิกัดทางตั้ง แล้วจะใช้อีกสองเครื่องไปตั้งรับสัญญาณดาวเทียมที่หมุดที่ต้องการทราบค่าเป็นโครงข่ายสามเหลี่ยม โดยมีหมุดควบคุมจำนวนพื้นที่ละ 10 หมุด ใช้วิธีการรังวัดแบบสถิตที่รังวัดเป็นโครงข่ายสามเหลี่ยมใช้เวลาหมุดละมากกว่า 45 นาที

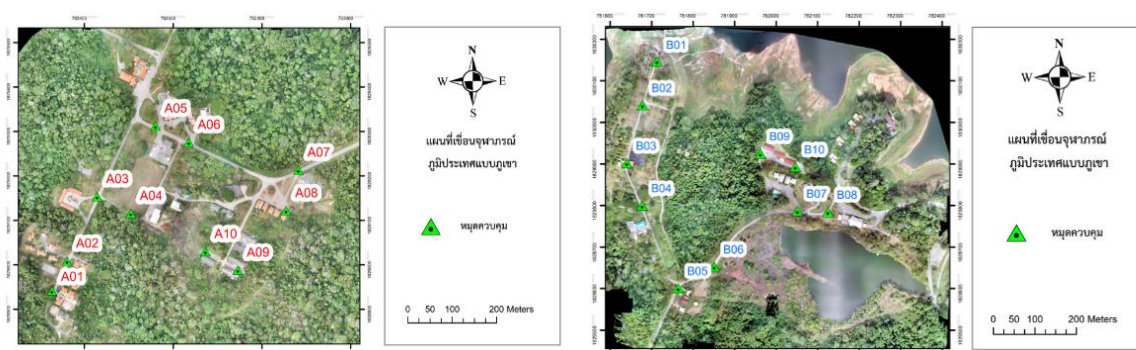
4.3.2 ข้อมูลทางตั้ง ได้ข้อมูลจากกล้องระดับและจากแบบจำลองยี่ห้อ โดยจากกล้องกล้องระดับนั้นใช้การถ่ายระดับความสูงจากหมุดที่ทราบค่าระดับความสูงแล้วไปยังหมุดที่ต้องการทราบค่าระดับความสูงใหม่ด้วยวิธี Close circuit direct differential leveling และจากแบบจำลองยี่ห้อจะนำค่าพิกัดทางราบที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมไปประมวลผลร่วมกับแบบจำลองยี่ห้อ เพื่อให้ได้ค่าระดับความสูง

4.3.3 ข้อมูลภาพถ่าย ได้ข้อมูลจากอากาศยานไร้คนขับในการถ่ายภาพได้ใช้แอปพลิเคชัน Pix4dCapture ในการออกแบบและควบคุมการถ่ายภาพซึ่งเป็นการถ่ายภาพแบบอัตโนมัติ ในการออกแบบภาพถ่ายทางอากาศ ในการออกแบบแนวนบินได้ทำการแบบ Double

Grid แนวการบินนั้น ได้ตั้งค่าดังนี้ ค่าความสูงบินเท่ากับ 90 เมตร มุมกล้องตั้งฉากกับพื้นที่ 90 องศา ค่าพื้นที่เหลื่อมกันตามแนวนอน และค่าการเหลื่อมกันของแต่ละแนวนอนอยู่ที่ร้อยละ 80 และค่าความละเอียดของจุดภาพต่อพื้นที่อยู่ที่ 3.0 เซนติเมตร



(ก) ตำแหน่งหมุดควบคุมพื้นที่ภูมิประเทศลาดเอียง



(ข) ตำแหน่งหมุดควบคุมพื้นที่ภูมิประเทศลาดชันบนภูเขา

รูปที่ 4 แผนที่ตำแหน่งหมุดควบคุม

5. ผลการวิจัย

5.1 ข้อมูลผลลัพธ์ของการรังวัดหมุดควบคุม

ข้อมูลจากการรังวัดด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมได้นำไปปรับแก้ค่าพิกัดของหมุดควบคุมจากการรังวัดแบบสถิตที่รังวัดเป็นโครงข่ายสามเหลี่ยมจากหมุดอ้างอิงไปยังหมุดควบคุมพื้นที่ภูมิประเทศลาดเอียงแสดงในตารางที่ 1 และพื้นที่ภูมิประเทศลาดชันบนภูเขาแสดงในตารางที่ 2 และข้อมูลค่าความถูกต้องที่ได้นำไปสร้างแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัลซึ่งได้กำหนดไว้ว่าค่าความถูกต้องทางดิ่งมีค่าเป็นสองเท่าของความถูกต้องทางราบโดยแสดงค่าดังตารางที่ 3

ตารางที่ 1 ข้อมูล Loops and Misclosures ของหมุดควบคุมพื้นที่ภูมิประเทศลาดเอียง

Loop			Misclosure Error (m.)	Loop Length (m.)	Loop Misclosure Error (PPM)	Accuracy Ratio
GNSS00	EN01	EN10	± 0.003	278.846	9.0	1/110,000
GNSS00	EN02	EN03	± 0.003	559.428	6.0	1/167,000
GNSS00	EN04	EN05	± 0.002	828.141	3.0	1/336,000
GNSS00	EN07	EN09	± 0.005	531.324	9.2	1/108,000
GNSS00	EN06	EN08	± 0.004	806.345	4.6	1/217,000

ตารางที่ 2 ข้อมูล Loops and Misclosures ของหมุดควบคุมพื้นที่ภูมิประเทศลาดชันบนภูเขา

Loop			Misclosure Error (m.)	Loop Length (m.)	Loop Misclosure Error (PPM)	Accuracy Ratio
GPS35555	A01	B01	± 0.010	3824.201	2.5	1/404,000
GPS35555	A02	B02	± 0.000	3534.305	0.1	1/7,379,000
GPS35555	A03	B03	± 0.012	3188.397	3.9	1/257,000
GPS35555	A04	B04	± 0.012	3232.374	3.8	1/263,000
GPS35555	A05	B05	± 0.010	2699.974	3.8	1/263,000
GPS35555	A06	B06	± 0.001	2659.186	0.5	1/1,857,000
GPS35555	A07	B07	± 0.003	2641.329	1.0	1/992,000
GPS35555	A08	B08	± 0.001	2608.699	0.3	1/3,782,000
GPS35555	A09	B09	± 0.010	3121.766	3.1	1/323,000
GPS35555	A10	B10	± 0.002	2836.860	0.7	1/1,514,000

ตารางที่ 3 ข้อมูลค่าความถูกต้องทางราบและทางตั้งของหมุดควบคุม

ภูมิประเทศลาดเอียง			ภูมิประเทศลาดชันบนภูเขา					
GCP	Accuracy Horizontal (m.)	Accuracy Vertical (m.)	GCP	Accuracy Horizontal (m.)	Accuracy Vertical (m.)	GCP	Accuracy Horizontal (m.)	Accuracy Vertical (m.)
EN01	0.003	0.006	A01	0.010	0.019	B01	0.010	0.019
EN02	0.003	0.006	A02	0.001	0.002	B02	0.001	0.002
EN03	0.003	0.006	A03	0.012	0.025	B03	0.012	0.025
EN04	0.002	0.004	A04	0.012	0.025	B04	0.012	0.025
EN05	0.002	0.004	A05	0.010	0.021	B05	0.010	0.021
EN06	0.004	0.008	A06	0.001	0.003	B06	0.001	0.003
EN07	0.005	0.010	A07	0.003	0.005	B07	0.003	0.005
EN08	0.004	0.008	A08	0.001	0.002	B08	0.001	0.002
EN09	0.005	0.010	A09	0.010	0.019	B09	0.010	0.019
EN10	0.003	0.006	A10	0.002	0.004	B10	0.002	0.004

5.2 ข้อมูลผลลัพธ์การประเมินความถูกต้องแนวเส้นตามยาว

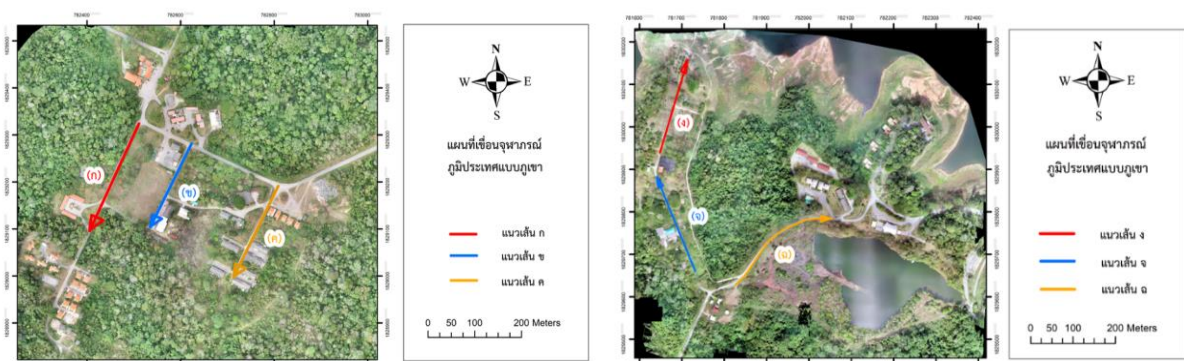
ในการวิเคราะห์เปรียบเทียบได้ทำการเลือกแนวเส้นพื้นถนนที่ไม่มีสิ่งกีดขวางมาดัดแปลงจากด้านบนเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนให้น้อยที่สุดในการนำมาวิเคราะห์ค่าต่างระดับความสูงแนวยาวจากแบบจำลองพื้นผิวระดับกับแผนที่ภูมิประเทศ โดยได้ทำการเลือกแนวเส้นพื้นที่จำนวนละ 3 แนวคือแนวเส้น แสดงในรูปที่ 5 เมื่อนำค่าที่จากแผนที่ได้เปรียบเทียบกับในรูปแบบของแผนภูมิเส้นดังแสดงในรูปที่ 6 และแสดงค่าเปรียบเทียบในตารางที่ 3

ตารางที่ 4 ข้อมูลค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยการเปรียบเทียบของแนวเส้นตามยาวของพื้นที่ภูมิประเทศลาดเอียงและภูมิประเทศลาดชันบนภูเขา

ภูมิประเทศ	TGM2017 (m.)	EGM2008 (m.)	EGM96 (m.)
ลาดเอียง	± 0.206	± 0.965	± 1.075
ลาดชันบนภูเขา	± 0.332	± 1.210	± 1.470

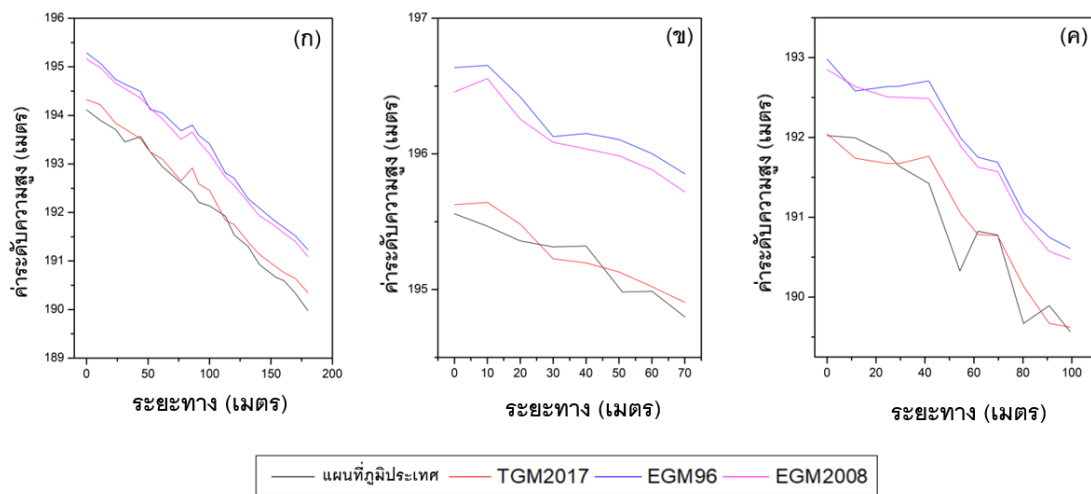


(ก) ตำแหน่งแนวเส้นตามยาวของพื้นที่ภูมิประเทศลาดเอียง

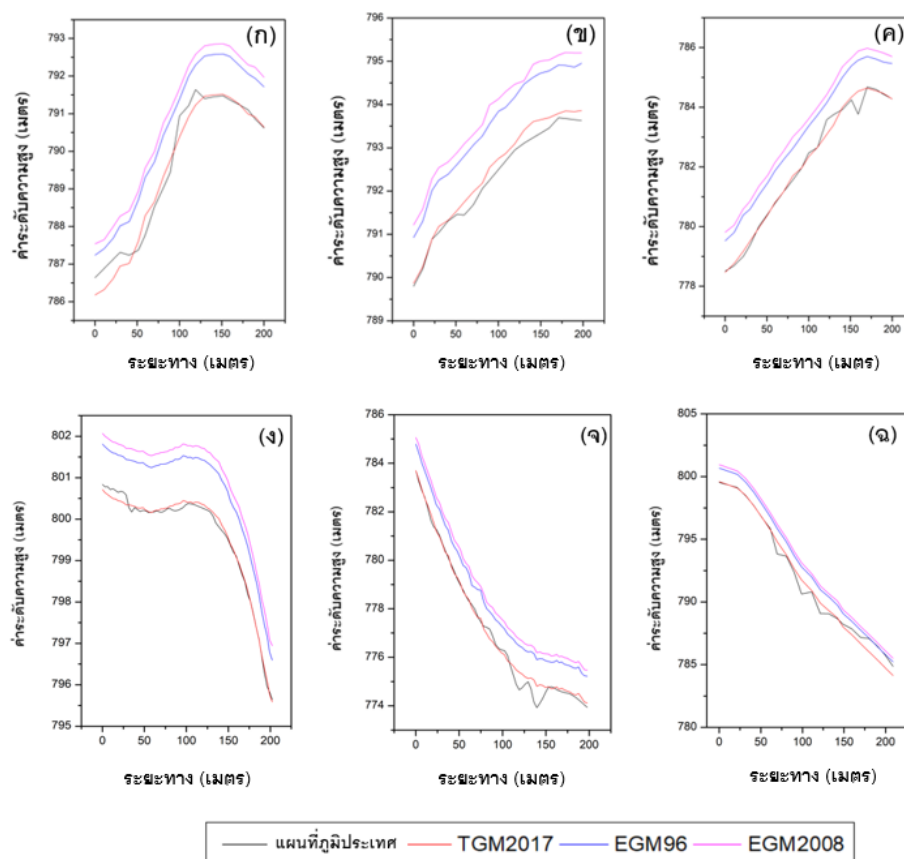


(ข) ตำแหน่งหมุดควบคุมพื้นที่ภูมิประเทศลาดชันบนภูเขา

รูปที่ 5 แผนที่ตำแหน่งแนวเส้นตามยาว



(ก) แผนภูมิเส้นตามยาวของพื้นที่ภูมิประเทศลาดเอียง



(ข) แผนภูมิเส้นตามยาวของพื้นที่ภูมิประเทศลาดชันบนภูเขา

รูปที่ 6 แผนภูมิเส้นตามยาว

6. อภิปรายผลการวิจัย

จากการศึกษาพบว่าผลลัพธ์ข้อมูล Loops and Misclosures ของหมุดควบคุมเมื่อนำไปเทียบกับมาตรฐานของ Standards and Specifications for Geodetic Control Networks 1989 (FGCC1989) ค่ามาตรฐานความถูกต้องทางตำแหน่งสัมพัทธ์ที่ความเชื่อมั่น 95% พบว่าค่าที่ได้นั้นอยู่ในช่วงเท่ากับหรือดีกว่า $1 : 50,000$ or 20 ppm. อยู่ตามเกณฑ์ Order C2-I เมื่อนำไปสร้างหมุดควบคุมทางดิ่งในการสร้างแบบจำลองพื้นผิวดิจิทัล แล้วนำค่าไปเปรียบเทียบกับแผนที่ภูมิประเทศที่อ้างอิงค่าระดับความสูงจากค่าพิกัดทางดิ่งด้วยการเดินระดับโดยตรงของกล้องระดับซึ่งเป็นค่าระดับความสูงที่ผ่านการปรับแก้อยู่ในเกณฑ์งานชั้น 3 ตามมาตรฐาน Standards and Specifications for Geodetic Control Networks 1949 (FGCC1949) และจากผลการศึกษาพบว่าค่าความถูกต้องของ DSM ในทางดิ่งของทั้ง 2 พื้นที่ค่าที่ได้จากแบบจำลองยิออซด์ TGM2017 นั้นน้อยกว่า ± 0.5 เมตร ในขณะที่ EGM96 และ EGM2008 นั้นเกิน ± 1.0 เมตร แสดงให้เห็นว่ายิออซด์ที่เหมาะสมกับพื้นที่ศึกษาที่สามารถนำมาสร้างหมุดควบคุมภาพถ่ายคือแบบจำลองยิออซด์ TGM2017 เพราะว่าเป็นยิออซด์ที่สร้างขึ้นโดยเน้นพื้นที่ในประเทศไทยทำให้เมื่อนำค่าความสูงยิออซด์จากแบบจำลองมาคำนวณหาค่าระดับความสูงออร์โธเมตริกค่าที่ได้จึงมีความใกล้เคียงกับค่าจากระดับน้ำทะเลปานกลางที่ใช้การเดินระดับโดยตรง และเมื่อเทียบที่ความเชื่อมั่นที่ 95 (E_{95} หรือประมาณ 2σ) จะพบว่าค่าของแบบจำลองยิออซด์ TGM2017 อยู่ที่ไม่เกิน ± 1.0 เมตร ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ความต้องการของงานด้านการออกแบบวิศวกรรมทางเบื้องต้นในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง

7. สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ได้แสดงให้เห็นถึงขีดความสามารถของแผนที่ที่สร้างจากอากาศยานไร้คนขับที่ผสมผสานกับค่าระดับที่ได้จากการรังวัดด้วยวิธีดาวเทียมนำหนพิภพแบบสถิติประมวลผลร่วมกับแบบจำลองยิออซด์ โดยผลการวิจัยพบว่าค่าทางราบของแผนที่อยู่ไม่เกิน ± 3.0 เซนติเมตร และในทางดิ่งอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ในวงการวิศวกรรมด้วยความคลาดเคลื่อนที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อยู่ในระดับไม่เกิน ± 1.0 เมตร ระดับชั้นของค่า Contour interval อยู่ที่ 1 เมตร ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการสร้างแผนที่ภูมิประเทศได้ซึ่งจะช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายได้ค่อนข้างมาก สามารถใช้งานการทำแผนที่ภูมิประเทศเบื้องต้น การวิเคราะห์เชิงพื้นที่เพื่อการคำนวณ หรือแม้กระทั่งทำแผนที่แสดงความลาดชันเพื่อช่วยในการศึกษาธรณีสัณฐานได้เป็นอย่างดี และจากผลลัพธ์นี้ทำให้ทราบถึงขีดความสามารถว่ากรังวัดสร้างหมุดควบคุมภาพถ่ายด้วยวิธีแบบสถิติที่รังวัดเป็นโครงข่ายสามเหลี่ยมยังทำได้เพียงแต่ออกแบบเชิงแนวคิดเบื้องต้นได้เท่านั้น

ผลประโยชน์ทับซ้อน

ผู้เขียนขอประกาศว่าบทความนี้ไม่มีผลประโยชน์ทับซ้อน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุนอุดหนุนงานวิทยานิพนธ์จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น และขอกราบขอบพระคุณผู้บริหาร คณาจารย์ เจ้าหน้าที่ นักศึกษา ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เชื้อนจุฬารักษ์ และคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ สถานที่ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] H, Eisenbeiß. et al. *UAV photogrammetry*, 2009, 18515.
- [2] I, Colomina. and P, Molina. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 2014, 92, pp.79–97. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013.
- [3] I, Elkhachy. Accuracy Assessment of Low-Cost Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry. *Alexandria Eng. J.*, 2021, 60 (6), pp.5579–5590, 2021, doi: 10.1016/j.aej.2021.04.011.
- [4] F, Agüera-Vega. et al. Accuracy of digital surface models and orthophotos derived from unmanned aerial vehicle photogrammetry. *J. Surv. Eng.*, 2017, 143 (2). doi: 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000206.
- [5] Federal Geographical Data Committee. Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3 : National Standard for Spatial Data Accuracy, *Natl. Spat. Data Infrastruct.*, 1998, p.28. [Online]. Available: <http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/chapter3>.
- [6] คณะอนุกรรมการมาตรฐานการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนเพื่องานวิศวกรรม. มาตรฐานการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนเพื่องานวิศวกรรม, พิมพ์ครั้งที่ 1, 2565.
- [7] สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการศึกษาเพื่อการพัฒนาวิชาชีพวิศวกรรม งบประมาณประจำปี 2558 โครงการศึกษาและจัดทำเกณฑ์การปฏิบัติงานวิชาชีพวิศวกรรมสำรวจ (*The Study and Development of Code of Practices for Survey Engineer*), 2558.
- [8] N, K. Pavlis. et al. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2012, 117 (4). doi: 10.1029/2011JB008916.
- [9] F, G. Lemoine. et al. The Development of the NASA GSFC and NIMA Joint Geopotential Model, 1997, July, pp. 461–469. doi: 10.1007/978-3-662-03482-8_62.
- [10] P, Dumrongchai. International Transaction Journal of Engineering. Management , & Applied Sciences & Technologies Evaluation Of Tgm2017 For Height System Using Gnss / Leveling Data In Thailand, 2019, 10 (10), pp. 1–10. doi: 10.14456/ITJEMAST.2019.135.
- [11] มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. รายงานฉบับสมบูรณ์โครงการการพัฒนาแบบจำลองขี้อายุความละเอียดสูงของประเทศไทย, (Development of Precise Geoid Model of Thailand) สิงหาคม, 2560.
- [12] P, Dumrongchai. and N, Duangdee. Evaluation Of Tgm2017 For Height System Using Gnss/Leveling Data In Thailand, 2019. doi: 10.14456/ITJEMAST.2019.135.
- [13] D. V. H. D.R. Cox, *Theoretical Statistics*, 1st Edition, 1974.