การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสแบบยีออเดติก ที่มีเซนเซอร์ MEMS และ IMU โดยวิธีการโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ในทันที

PERFORMANCE TEST OF GEODETIC GNSS RECEIVER WITH MEMS AND IMU SENSORS USING NETWORK-BASED GNSS RTK METHOD

จิตรานุช พัสดุธาร[1,*] พุทธิพล ดำรงชัย[2] และ เฉลิมชนม์ สถิระพจน์[3]

[1,3] ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
[2] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จ.เชียงใหม่
**Corresponding author; E-mail address: 6370042321@student.chula.ac.th*

บทคัดย่อ

บทความนี้นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและทดสอบประสิทธิภาพเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบยีออเดติกที่มีเซนเซอร์ MEMS และ IMU ในการกำหนดตำแหน่งทางราบและทางดิ่งเมื่อรังวัดขณะเอียงเสาเครื่องรับด้วยมุม 15°, 25°, 35° และ 45° โดยวิธีการรังวัดโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ในทันที กรณีแรกทดสอบในสภาพแวดล้อมที่มีการควบคุมโดยการทดสอบเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสในพื้นที่เปิดโล่งและบนดาดฟ้าอาคาร ซึ่งจุดทดสอบอยู่ห่างจากผนัง 2 เมตร กรณีที่สองดำเนินการทดสอบบนหมุดดาวเทียม RTK ของกรมที่ดิน ซึ่งทดสอบเก็บข้อมูลทั้งหมด 20 จุดต่อกรณี รวมเป็น 60 จุด โดยการสุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง และเปรียบเทียบความถูกต้องระหว่างค่าพิกัดอ้างอิงกับเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสที่มีเซนเซอร์ MEMS และเซนเซอร์ IMU การเปรียบเทียบความถูกต้องนั้น ทำการเปรียบเทียบค่าพิกัดทั้งทางราบและทางดิ่ง จากการศึกษาพบว่าเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสแบบยีออเดติกที่มีเซนเซอร์ IMU ให้ผลลัพธ์ในการกำหนดตำแหน่งถูกต้องสูงกว่าเครื่องรับที่มีเซนเซอร์ MEMS สำหรับการทดสอบในพื้นที่เปิดโล่งที่มีสัญญาณชัดเจนและสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งบดบัง แม้ว่าเครื่องรับสัญญาณที่มีเซนเซอร์ IMU จะมีผลลัพธ์ในการกำหนดตำแหน่งถูกต้องสูงกว่าเครื่องรับที่มีเซนเซอร์ MEMS แต่ผลค่าความถูกต้องทางตำแหน่งโดยเฉพาะตำแหน่งในทางราบยังไม่สามารถยอมรับได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นผู้ใช้งานจะต้องมีความตระหนักในการนำเครื่องรับสัญญาณไปรังวัดรับสัญญาณด้วยการเอียงเสาในงานรังวัดจริง และสุดท้ายนี้สำหรับงานวิจัยในอนาคตควรมีการเปรียบเทียบความถูกต้องการกำหนดตำแหน่งทางราบและทางดิ่ง ในขณะที่เสาเอียง กับเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสยี่ห้อต่างๆ

คำสำคัญ: MEMS, IMU, การรังวัดโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ในทันที, รังวัดขณะเอียงเสา (pole)

Abstract

This article aims to study and test the performance of the geodetic GNSS receiver equipped with MEMS and IMU sensors for determining horizontal and vertical positions. The antenna tilt was measured at 15°, 25°, 35° and 45° using Network-based GNSS RTK method. It was firstly tested in controlled environment in which the GNSS receiver was set up in an open space and on the roof that the points were two meters away from the wall. For the second case, was tested on RTK survey marks of the Department of Lands. Data was collected up to twenty points per case with a total of sixty points using a purposive sampling technique. By comparing between the reference coordinates and the GNSS receiver with MEMS and GNSS receiver with IMU, the accuracy comparison was made in both horizontal and vertical components. This study found that GNSS receiver with IMU produced the more accurate positioning results than GNSS receiver with MEMS for both the open area with clear signal and the obstructed environment. Although GNSS receiver with IMU have higher positioning accuracy results than GNSS receiver with MEMS but horizontal positioning accuracy results are practically unacceptable. Therefore, the user must be aware of bringing the receiver to the survey by tilting the antenna in the actual surveying. Finally, the future researches will focus on a comparison of horizontal and vertical positioning accuracy while the pole is tilted with different GNSS receiver brands.

Keywords: MEMS, IMU, NETWORK-BASED GNSS RTK METHOD, tilt pole

1. บทนำ

การรังวัดโดยเทคนิคการรังวัดแบบจลน์ในทันที (Real Time Kinematic : RTK) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในงานรังวัด เนื่องจากได้ค่าพิกัดในทันทีณ ที่รังวัด [1] โดยไม่ต้องประมวลผลภายหลัง ต่อมาได้มีการพัฒนา RTK เป็นเทคนิคการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอสระบบเครือข่ายแบบจลน์ในทันที (Network-Based RTK : NRTK) มีข้อดีคือ มีความถูกต้องทางตำแหน่งใน

ระดับเซนติเมตรเช่นกัน และมีความน่าเชื่อถือของค่าพิกัดสูงโดยความถูกต้องและความน่าเชื่อถือ ของค่าพิกัดตลอดจนขอบเขตในการทำงานนั้นเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันตลอดทั้งโครงข่ายจีพีเอส ทำให้มีพื้นที่ในการทำงานเพิ่มมากขึ้น [2] ในขณะเดียวกันบริษัทผู้ผลิตเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมได้มีการพัฒนาเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมให้มีความสามารถรองรับการใช้งานภายใต้เทคนิคการรังวัดดาวเทียมระบบ NRTK ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนส่วนใหญ่จะเกิดอันเนื่องมาจากระบบ เช่น เกิดจากระบบดาวเทียม การส่งสัญญาณ การรับสัญญาณ และสถานีฐาน หรือเกิดจากตัวผู้รังวัด เช่น การวางตำแหน่งของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม การเลือกสถานีอ้างอิง การวัดความสูงของเสาอากาศ ซึ่งค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากตัวผู้รังวัด จะทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนขนาดใหญ่มากกว่าค่าคลาดเคลื่อนจากระบบ ในงานรังวัดจริงบางจุดไม่สามารถรังวัดให้เสาตั้งตรงได้ เนื่องจากข้อจำกัดของภูมิประเทศและเครื่องมือ [3] ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการหาวิธีสำหรับการคำนวณค่าพิกัดเมื่อรังวัดรับสัญญาณขณะเอียงเสา (pole) จากนักวิจัยและมีการพัฒนาเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจากบริษัทผู้ผลิตให้สามารถรังวัดโดยการเอียงเสาของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมได้

เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่สามารถรังวัดแบบเอียงเสาเริ่มแรกนั้นจะมีระบบชดเชยการเอียงจากเซนเซอร์เฉื่อยในตัว (Microelectromechanical system: MEMS) และมีฟองกลมอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งใช้งานแทนฟองกลมแบบเดิม ทำงานร่วมกับเข็มทิศอิเล็กทรอนิกส์เพื่อรังวัดให้ได้มุมเอียงไม่เกินตามที่เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมกำหนดไว้สูงสุด [3] โดยมากจะกำหนดให้สามารถเอียงเสาได้ไม่เกิน 30 องศา โดยมีงานวิจัยทดสอบความแม่นยำในการกำหนดตำแหน่งของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมยี่ห้อ Topcon รุ่น Hiper HR ซึ่งเป็นเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแบบ MEMS โดยใช้เทคนิค Single base RTK กับ Network base RTK ทำการรังวัดในแนวดิ่ง และรังวัดในแนวเอียงสี่ทิศทางได้แก่ ทิศเหนือ ทิศใต้ ทิศตะวันออก และทิศตะวันตก และนำค่าพิกัดที่รังวัดได้ไปเปรียบเทียบกับค่าพิกัดอ้างอิงที่ได้มาจากการถ่ายค่าพิกัดโดยวิธี total station [1] เครื่องรับประเภทนี้มีข้อเสียคือ ต้องมีการสอบเทียบก่อนรังวัดซึ่งใช้เวลานาน และไวต่อการรบกวนของแม่เหล็กที่เกิดจากโลหะ รวมไปถึงการรบกวนของกระแสไฟฟ้าเพื่อหลีกเลี่ยงข้อเสียข้างต้น ได้มีการนำเทคโนโลยีที่ใช้ในการบินและการเดินเรือทางทะเลมาใช้ โดยนำข้อดีจากการประมาณตำแหน่งและความเร็วของ GNSS ทำงานร่วมกับ INS ซึ่งมีเซนเซอร์ IMU ทำหน้าที่บอกความเร่งและอัตราการหมุน โดยมีการทดสอบประสิทธิภาพการรังวัดของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม Leica รุ่น GST18 T ซึ่งเป็นเครื่องรับที่มีเซนเซอร์ IMU โดยทำการทดสอบเปรียบเทียบความแม่นยำในการกำหนดตำแหน่งจากการรังวัดโดยเทคนิค static กับ RTK และรังวัดด้วยเทคนิค RTK ตั้งเสาตรงในแนวดิ่งเทียบกับการรังวัดแบบเอียงเสาโดยเปรียบเทียบระหว่างเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม Leica รุ่น GS18 T กับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมทั่วไปภายใต้ท้องฟ้าเปิดโล่ง และนำไปทดสอบรังวัดกับสภาพแวดล้อมที่มีผลต่อการรบกวนสัญญาณสูง เช่น ใกล้กับอาคารที่เป็นโครงสร้างเหล็ก การรบกวนสัญญาณจากรถยนต์ เป็นต้น [4]

งานวิจัยที่ผ่านมานั้นล้วนแล้วแต่ทดสอบความถูกต้องในทางราบจากการรังวัดขณะเอียงเสาของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่มีเซนเซอร์ชดเชยการเอียงชนิดเดียวกัน และทดสอบเพียงแค่ในพื้นที่เปิดโล่ง พื้นที่รับสัญญาณได้ยาก และพื้นที่ใกล้ multipath แต่ไม่ได้มีการทดสอบประสิทธิภาพในการกำหนดตำแหน่งทั้งในทางราบและทางดิ่งเปรียบเทียบกับเครื่องรับที่มีเซนเซอร์ชดเชยการเอียงต่างชนิดกัน ในปัจจุบันเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่มีเซนเซอร์ชดเชยการเอียงที่รองรับระบบ NRTK มีหลายบริษัทที่เปิดตัวรุ่นล่าสุด ซึ่งเป็นเครื่องรับสัญญาณที่มีเซนเซอร์ IMU และสามารถรังวัดโดยการเอียงเสาได้มากกว่า 30°

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการทดสอบประสิทธิภาพความถูกต้องในการกำหนดตำแหน่งทางราบและทางดิ่งของเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสแบบยืออเดติกที่มีเซนเซอร์ MEMS และ IMU จากการรังวัดด้วยระบบ NRTK โดยเทคนิค VRS (Virtual Reference Station) และใช้สถานีฐานถาวรของกรมที่ดินรับสัญญาณด้วยเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสแบบยืออเดติกในพื้นที่ศึกษาอำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี ในกรณีสภาพแวดล้อมควบคุมจะทดสอบบนดาดฟ้าอาคาร โดยรังวัดขณะเสาตรงมีมุมจากแนวดิ่ง 0° และรังวัดขณะเอียงเสาจากแนวดิ่งด้วยมุม 15°, 25°, 35° และ 45° ทั้งหมดสี่ทิศทาง ได้แก่ ทิศเหนือ ทิศตะวันออก ทิศใต้ และทิศตะวันตก จากเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบยืออเดติกที่มีเซนเซอร์สองชนิด ได้แก่ เครื่องรับสัญญาณที่มีเซนเซอร์ MEMS และ IMU ซึ่งจะรังวัดในสภาพแวดล้อมสองกรณี ได้แก่ บริเวณที่มีสิ่งบดบังโดยทดสอบห่างจากผนังดาดฟ้า 2 เมตร และบริเวณที่โล่ง โดยจะทดสอบกรณีละ 20 หมุด ซึ่งค่าพิกัดอ้างอิงของหมุดทดสอบได้มาจากการรังวัดด้วยเทคนิค static เป็นเวลาหมุดละ 35 นาที สำหรับหมุดที่ทดสอบบริเวณที่โล่ง และ 45 นาที สำหรับหมุดที่ทดสอบห่างจากผนังดาดฟ้า เพื่อเป็นค่าพิกัดอ้างอิงในการเปรียบเทียบกับค่าพิกัดที่ได้จากการทดสอบ จากนั้นนำเครื่องรับสัญญาณที่มีเซนเซอร์เซนเซอร์ทั้งสองชนิด ไปทดสอบรังวัดโดยตรงบนหมุดดาวเทียม RTK ของกรมที่ดิน ดำเนินการรังวัดขณะเอียงเสาจากแนวดิ่งด้วยมุม 15°, 25°, 35° และ 45° จำนวน 20 หมุด และใช้ค่าพิกัดของหมุดดาวเทียม RTK เป็นค่าพิกัดอ้างอิง โดยผลการทดสอบการรังวัดขณะเอียงเสาต้องมีค่าความเคลื่อนทางราบไม่เกิน 4 เซนติเมตร [5] และความคลาดเคลื่อนทางดิ่งไม่เกิน 10 เซนติเมตร [6]

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาและทดสอบประสิทธิภาพในการกำหนดตำแหน่งทางราบและทางดิ่งของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบยืออเดติกที่มีเซนเซอร์ MEMS และ IMU โดยวิธีการรังวัดโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ในทันที ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ได้แก่ ทดสอบบนหมุดที่อยู่ในสภาพแวดล้อมควบคุม และบนหมุดดาวเทียม RTK ของกรมที่ดิน

3. ขอบเขตการวิจัย

3.1 พื้นที่ศึกษาวิจัย

ขอบเขตพื้นที่การศึกษาแบ่งพื้นที่ทดสอบเป็น 2 ส่วน ได้แก่ บริเวณดาดฟ้าอาคาร 9 ชั้น อาคารรังวัดและทำแผนที่ กรมที่ดิน และบริเวณที่มีหมุดดาวเทียม RTK ของกรมที่ดิน ซึ่งอยู่ในเขตพื้นที่อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี

3.2 เครื่องมือสำรวจรังวัดที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบยีออเดติกที่มีเซนเซอร์แบบ MEMS (CHC รุ่น i80) และ IMU (CHC รุ่น i90)



รูปที่ 1 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมยี่ห้อ CHC รุ่น i80

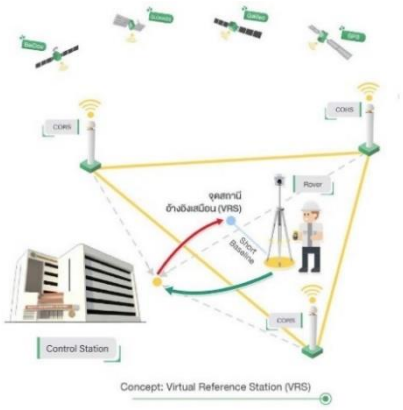


รูปที่ 2 เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมยี่ห้อ CHC รุ่น i90

4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

4.1 วิธีการรังวัดโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) เทคนิค สถานีอ้างอิงเสมือน (Virtual Reference Station : VRS)

เป็นเทคนิควิธีหนึ่งในการรังวัด RTK GNSS Network ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วน คือ 1) สถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิง (Continuously Operating Reference : CORS) เป็นสถานีรับสัญญาณดาวเทียมติดตั้งถาวร โดยจะรับสัญญาณตลอด 24 ชั่วโมง และส่งสัญญาณที่รับได้ไปยังสถานีควบคุมผ่านระบบสื่อสารหรือระบบอินเทอร์เน็ต 2) สถานีควบคุม (Control Station) ประกอบไปด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์แม่ข่าย (Server) ทำหน้าที่ประมวลผลข้อมูลสัญญาณดาวเทียมที่ส่งมาจากสถานีรับอ้างอิง (CORS) รวมไปถึงตรวจสอบสิทธิ์การใช้งาน สำรองข้อมูล และให้บริการดาวน์โหลดข้อมูลสัญญาณดาวเทียมสำหรับใช้คำนวณค่าพิกัด และ 3) ระบบสื่อสาร (Communication System) เป็นระบบสื่อสารที่ใช้ในการติดต่อรับส่งข้อมูลระหว่างสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิง กับสถานีควบคุม และระหว่างสถานีควบคุมกับผู้ใช้งาน โดยมากมักจะใช้ระบบอินเทอร์เน็ตพื้นฐานในการสื่อสาร [6]

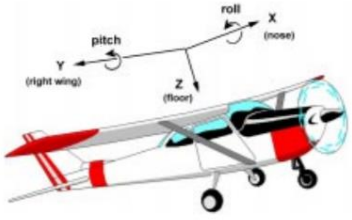


รูปที่ 3 หลักการทำงานของระบบสถานีอ้างอิงเสมือนโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) [6]

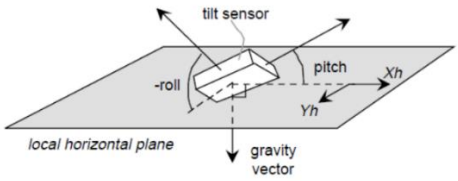
ข้อดีของระบบ VRS คือ ใช้เวลาการรังวัดค่อนข้างเร็ว และได้ค่าพิกัดในทันที สถานีผู้ใช้งานไม่ต้องใช้อุปกรณ์พิเศษหรือซอฟต์แวร์เพิ่มเติม เนื่องจากระบบ VRS จะใช้ซอฟต์แวร์ของสถานีผู้ใช้งานในกระบวนการประมวลผลเส้นฐานเพื่อหาค่าตำแหน่งที่ถูกต้องของสถานีผู้ใช้งาน ในส่วนของข้อจำกัดของระบบ VRS นั้นคือประสิทธิภาพของการรังวัดจะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างสถานีฐานเพิ่มขึ้นโดยสาเหตุเกิดจากค่าคลาดเคลื่อนชนิดต่างๆ และระบบการทำงานของ VRS จำเป็นต้องใช้การสื่อสารแบบสองทาง (Two Way Communication) และใช้ส่วนควบคุมที่มี Server ที่มีประสิทธิภาพในการรองรับการทำงาน รวมถึงระบบเครือข่ายสัญญาณในส่วนของระบบการติดต่อสื่อสารที่มีความเสถียร เพื่อลดข้อจำกัดในด้านของความผิดพลาด [7]

4.2 เครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสแบบยีออเดติกที่มีเซนเซอร์ MEMS

MEMS (Microelectromechanical system : ระบบเครื่องกลไฟฟ้าขนาดเล็ก) คือ เซนเซอร์สนามแม่เหล็กขนาดเล็กเป็นอุปกรณ์สำหรับการตรวจสอบ และการวัดสนามแม่เหล็กซึ่งจะเป็นตัวให้ข้อมูลเข็มทิศและใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการวางแนวการนำทาง และการจัดตำแหน่งของวัตถุ [8] เซนเซอร์ MEMS เป็นเซนเซอร์ที่ใช้ในเทคโนโลยีการบิน ซึ่งมีทิศทางพิกัดและการวางแนวของเครื่องบินดังรูปที่ 4 และมุมของเซนเซอร์เมื่อเครื่องบินเอียงกับระนาบแนวนอนโดยแรงโน้มถ่วง ดังรูปที่ 5

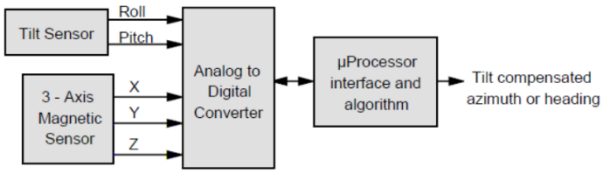


รูปที่ 4 ทิศทางพิกัด (X, Y, Z) และ การวางแนวของเครื่องบิน (roll, pitch) [9]



รูปที่ 5 มุมของเซนเซอร์เอียงอ้างอิงกับระนาบแนวนอนโดยแรงโน้มถ่วง [9]

ระยะ pitch และ roll เป็นมุมอ้างอิงระนาบแนวนอนเฉพาะที่วัดตามเข็มนาฬิกาจากทิศทางเหนือจริง ระยะ pitch กำหนดให้เป็นมุมระหว่างแกนตามยาวของเครื่องบินกับระนาบแนวนอน และ roll เป็นมุมเกี่ยวกับแกนตามยาวระหว่างแนวนอนท้องถิ่นและทิศทางการบินจริง ในการกำหนดมุม roll และ ระยะ pitch จะใช้เซนเซอร์ในการตรวจจับทิศทางของแรงโน้มถ่วง ซึ่งได้แก่ มาตรวัดความเร่ง กับ ไจโรสโคป ซึ่งระบบเข็มทิศจะมีเซนเซอร์แม่เหล็กสามแกนและการเอียงแบบสองแกน และมีการคำนวณชดเชยการเอียงดังรูปที่ 6

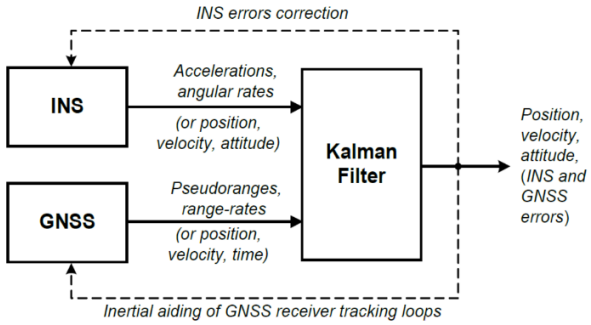


รูปที่ 6 แผนภาพระบบเข็มทิศ [9]

ในเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมแต่ละรุ่นจะเลือกใช้เซนเซอร์ MEMS ที่มีการทำงานแตกต่างกันซึ่งจะทำงานร่วมกับเครื่องวัดค่าความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก ช่วยให้สามารถวัดมุมเอียงโดยใช้วิธีการวัดจุดที่มีการชดเชยโดยใช้เซนเซอร์ชดเชยการเอียงและเครื่องมือวัดค่าความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กในเครื่องรับเพื่อคำนวณตำแหน่งปลายขั้ว แต่ข้อเสียของเครื่องรับประเภทนี้คือหากบริเวณโดยรอบเครื่องรับมีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวนค่าความถูกต้องทางตำแหน่งจะลดลง จึงต้องมีการสอบเทียบก่อนการใช้งาน ซึ่งในเครื่องรับสัญญาณมี electronic bubble เพื่อแทนที่ฟองอากาศแบบเดิมเพื่อแสดงมุมเอียงของเครื่องรับและใช้ร่วมกับเข็มทิศอิเล็กทรอนิกส์ เรียกว่า eBubble (ฟองกลมอิเล็กทรอนิกส์) ซึ่งสร้างมาจากเซนเซอร์ที่ใช้ MEMS [3]

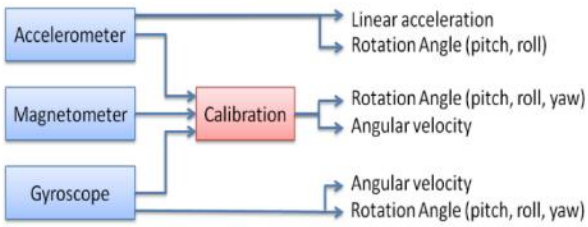
4.3 เครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสแบบยืออเดติกที่มีเซนเซอร์ IMU

IMU (Inertial Measurement Unit : หน่วยวัดแรงเฉื่อย) คือ อุปกรณ์หลักที่ใช้ใน INS (Inertial Navigation System) ซึ่งอยู่ในเทคโนโลยีที่ใช้ในเครื่องบิน ยานอวกาศ และเรือ ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักได้แก่ มาตรความเร่ง (accelerometers) 3 ทิศทางและไจโรสโคป (gyroscopes) 3 ทิศทาง ซึ่งจะทำงานโดยการตรวจจับอัตราการเร่ง รวมไปถึงการเปลี่ยนแปลงการหมุน pitch, roll และ yaw [10] เทคโนโลยีการบินจะเป็นการทำงานร่วมกันของระบบ GNSS และ INS โดย GNSS จะใช้สัญญาณจากดาวเทียมเพื่อคำนวณตำแหน่ง เวลา และความเร็ว ซึ่งมีความแม่นยำสูง เมื่อรับสัญญาณจากดาวเทียมได้มากกว่า 4 ดวงขึ้นไป แต่ถ้าหากสัญญาณดาวเทียมขาดหายอันเกิดจากสิ่งบดบังเช่น ต้นไม้ อาคาร จะทำให้ค่าพิกัดไม่น่าเชื่อถือและไม่สามารถนำทางได้ ด้วยเหตุนี้จึงได้นำระบบ INS มาทำงานร่วมกับระบบ GNSS ซึ่งระบบ INS จะใช้ข้อมูลการหมุนและเร่งความเร็วจาก IMU ซึ่งจะประกอบด้วยเซนเซอร์เสริมที่จัดเรียงบนมุมฉากสามแกน ในแต่ละแกนทั้งสามจะมีมาตรวัดความเร่ง (accelerometers) เพื่อวัดความเร่งเชิงเส้น และไจโรสโคป (gyroscopes) วัดความเร่งในการหมุน ถ้าหากสัญญาณดาวเทียมระบบ GNSS ขาดหายระบบ INS จะรับสัญญาณที่หายไปแปลงเป็นพิกัดเชิงมุม roll, pitch, yaw (azimuth) ทำให้สามารถนำทางต่อได้จนกว่า GNSS จะดีขึ้น แต่ในขั้นตอนเริ่มต้นจะต้องใช้ข้อมูลจากระบบ GNSS ที่มีข้อมูลที่ถูกต้องแม่นยำระบุตำแหน่งให้กับระบบ INS ก่อน ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แผนภาพการทำงานร่วมกันของระบบ INS/GNSS และตัวกรองคาลมานในระบบ [11]

ในเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมระบบ tilt sensor แบบ IMU ได้พัฒนามาจากเทคโนโลยีการบินและเดินเรือทางทะเล [4] และปัจจุบัน IMU ถูกพัฒนาให้ทำงานร่วมกับเครื่องวัดค่าความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก (Magnetometer) เพื่อวัดทิศทางสนามแม่เหล็กแบริ่ง ทำให้สามารถช่วยปรับปรุงการทำงานของไจโรสโคปได้ ซึ่ง IMU ประเภทนี้จะประกอบไปด้วยมาตรวัดความเร่ง ไจโรสโคป และเครื่องวัดค่าความเข้มข้นของสนามแม่เหล็ก ทำให้พัฒนาจาก 3 แกน เป็น 9 แกน ซึ่งเครื่องวัดค่าความเข้มข้นของสนามแม่เหล็กจะนำไปใช้ในการวัดการหมุนของมุมเอียง ดังนั้นจึงสามารถปรับเทียบข้อมูลดังกล่าวกับไจโรสโคปได้เพื่อลดความคลาดเคลื่อนจากการเคลื่อนที่ [10] ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การทำงานของ IMU ที่มีเซนเซอร์สามประเภทในระบบ [12]

IMU ประเภทนี้เหมาะสำหรับการใช้งานแบบเคลื่อนที่ มีข้อเสียคือการนำไปใช้งานสภาพแวดล้อมที่มีโลหะ อาจจะได้รับผลกระทบเนื่องจากการรบกวนของสนามแม่เหล็ก [12]

5. วิธีดำเนินการวิจัย

5.1 การทดสอบในสนาม

2.2.1 พื้นที่ดาดฟ้าอาคาร 9 ชั้น อาคารรังวัดและทำแผนที่ กรมที่ดิน

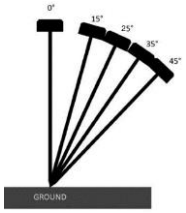
บริเวณดาดฟ้าดำเนินการรังวัดด้วยวิธี Network RTK เทคนิค VRS จากเครื่องรับที่มีเซนเซอร์แบบ IMU (CHC i90) และเครื่องรับที่มีเซนเซอร์ MEMS (CHC i80) บนหมุดทดสอบที่มีค่าพิกัดอ้างอิงจากการรังวัด static โดยการตั้งเสา สูง 2 เมตร กับ Bipod บนหมุดทดสอบและรังวัดด้วยการเปิดโหมดเอียงในเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมและดำเนินการการเอียงเสาด้วย มุม 0°, 15°, 25°, 35° และ 45° ดังรูปที่ 9 และบันทึกข้อมูลทุกๆ 1 วินาที รับสัญญาณดาวเทียมทั้งหมด 60 วินาที 3 ครั้ง และต้อง Fixed Ambiguity ตามระเบียบการรังวัดของกรมที่ดิน [5] โดยรังวัดทั้งหมด 4 ทิศทาง ได้แก่ ทิศเหนือ ทิศตะวันออก ทิศใต้ และทิศตะวันตก



รูปที่ 9 การรังวัดขณะเอียงเสาบนดาดฟ้า 0°, 15°, 25°, 35° และ 45° (รูปเรียงจากซ้ายไปขวาตามลำดับ)

2.2.2 บริเวณหมุดดาวเทียม RTK ของกรมที่ดินในเขตอำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี

ทดสอบบนหมุดดาวเทียม RTK ของกรมที่ดิน และรังวัดด้วยวิธี Network RTK เทคนิค VRS จากเครื่องรับที่มีเซนเซอร์แบบ IMU (CHC i90) และแบบ MEMS (CHC i80) โดยการตั้ง pole สูง 2 เมตร บนหมุดดาวเทียม และรังวัดโดยเปิดโหมดเอียงในเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมด้วยการเอียงเสามุม 15°, 25°, 35° และ 45° บันทึกข้อมูลทุกๆ 1 วินาที รับสัญญาณดาวเทียม 60 วินาที 3 ครั้ง และต้อง Fixed Ambiguity ตามระเบียบของกรมที่ดิน [5] ทั้งนี้การเอียงเสาขณะทดสอบรับสัญญาณจะเป็นการเอียงเสาในทิศทางที่ผู้วิจัยสะดวกต่อการรับสัญญาณ และทิศทางนั้นต้องเป็นทิศทางที่หลีกเลี่ยงการเกิด multipath และเกิดการรบกวนของสัญญาณขณะรังวัด โดยพิจารณาทิศทางการเอียงเสาตามวิจารณญาณของผู้วิจัย



รูปที่ 10 การรังวัดโดยการเอียงเสาด้วยมุมขนาด 0°, 15°, 25°, 35° และ 45°

5.2 การหาค่าต่างรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error - RMSE)

นำผลที่ได้จากการรังวัดในสนามมาคำนวณค่าความถูกต้องในตำแหน่งทางราบซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1 และความถูกต้องทางดิ่งคำนวณได้จากสมการ

$$RMSE_H = sqrt\left[\sum H_{data,i} - H_{check,i}{}^2 / n\right] \quad (1)$$

$$RMSE_Z = sqrt\left[\sum Z_{data,i} - Z_{check,i}{}^2 / n\right] \quad (2)$$

เมื่อ

$H_{data,i}$ และ $Z_{data,i}$ คือ ค่าพิกัดอ้างอิงในการตรวจสอบข้อมูล

$H_{check,i}$ และ $Z_{check,i}$ คือ ค่าพิกัดของจุดทดสอบ

n คือ จำนวนจุดทดสอบทั้งหมด

i คือ จำนวนจุดทดสอบตั้งแต่จุดที่ 1 ถึง n

5.3 เปรียบเทียบความถูกต้องทางตำแหน่งทางราบและทางดิ่ง

หลังจากคำนวณค่าต่างรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) เรียบร้อยแล้วจากนั้นนำไปเปรียบเทียบความถูกต้องในการกำหนดตำแหน่งทางราบและทางดิ่ง ระหว่างค่าพิกัดอ้างอิงที่ได้จากการรับสัญญาณด้วยวิธี static นาน 35 นาทีสำหรับทดสอบในที่โล่ง และ 45 นาทีสำหรับทดสอบห่างจากผนัง 2 เมตร กับค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดด้วยวิธี Network RTK เทคนิค VRS สำหรับกรณีรับสัญญาณบนดาดฟ้า ซึ่งการประมวลผลค่าพิกัดอ้างอิงจากการรังวัดด้วยวิธี static จะประมวลผลโดยวิธี Single base static โดยใช้สถานีฐานถาวร PKKT เป็น Base station เนื่องจากระยะห่างของสถานีฐานถาวรดังกล่าวห่างจากบริเวณที่ทดสอบเพียง 5 ถึง 30 เมตร ส่วนการทดสอบบนหมุดดาวเทียม RTK ของกรมที่ดินนั้นจะเปรียบเทียบค่า RMSE ในทางราบและทางดิ่ง ระหว่างค่าพิกัดจริงของหมุดดาวเทียม RTK ของกรมที่ดินที่ทำการรังวัดในปี พ.ศ. 2559, พ.ศ. 2564 และ พ.ศ. 2565 กับค่าพิกัดที่ได้จากการรังวัดด้วยวิธี Network RTK เทคนิค VRS ระหว่างเครื่องรับที่มีเซนเซอร์ MEMS และ IMU ในขณะเอียงเสาโดยการทดสอบทั้งหมดทดสอบภายใต้กรอบพิกัดอ้างอิง ITRF2005

ซึ่งทั้งสองการทดสอบจะเปรียบเทียบผลความถูกต้องของค่า RMSE ทั้งในทางราบและทางดิ่ง ขณะที่มุมการรังวัดขณะเอียงเสามีขนาดเพิ่มมากขึ้นจาก 0° และมีการเปลี่ยนทิศทางการรังวัดในกรณีทดสอบบนดาดฟ้า นอกจากนี้จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณที่มีเซนเซอร์ MEMS และ IMU จากเกณฑ์ค่าความถูกต้องซึ่งกำหนดให้ในทางราบต้องไม่เกิน 4 เซนติเมตร [5] และในทางดิ่งต้องไม่เกิน 10 เซนติเมตร [6]

6. ผลการวิจัย

จากการหาค่าความถูกต้องในตำแหน่งทางราบและทางดิ่งที่ได้จากคำนวณค่าต่างรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ในสมการที่ 1 และ 2 และการหาร้อยละของข้อมูลรายจุดที่มีความถูกต้องในทางราบไม่เกิน 4 เซนติเมตร และความถูกต้องในทางดิ่งไม่เกิน 10 เซนติเมตร มีผลดังนี้

6.1 พื้นที่ดาดฟ้าอาคาร 9 ชั้น อาคารรังวัดและทำแผนที่ กรมที่ดิน

การทดสอบการเอียงเสาเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสแบบยืออเดติกที่มีเซนเซอร์ MEMS และ IMU ด้วยมุม 15°, 25°, 35°, และ 45° บนหมุดทดสอบที่สร้างขึ้นบนดาดฟ้าโดยแบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วนได้แก่ ทดสอบในพื้นที่โล่ง และทดสอบห่างจากผนังเป็นระยะ 2 เมตร ทดสอบรับสัญญาณตั้งแต่วันที่ 7 ธันวาคม 2564 ถึงวันที่ 13 มกราคม 2565 ในช่วงเวลา 8.30 ถึงเวลา 15.00 น. มีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

6.1.1 การทดสอบในที่โล่ง

ตารางที่ 1 ค่าต่างรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ทางราบ กรณีทดสอบในที่โล่ง

ค่า RMSE ทางราบ หน่วย เมตร					
ทิศการรังวัด	ชนิดเครื่องรับ	มุมรังวัด			
		15°	25°	35°	45°
เหนือ	MEMS (i80)	0.061	0.095	0.123	0.148
	IMU (i90)	0.040	0.067	0.103	0.098
ตะวันออก	MEMS (i80)	0.037	0.060	0.091	0.124
	IMU (i90)	0.038	0.101	0.116	0.096
ใต้	MEMS (i80)	0.059	0.084	0.110	0.134
	IMU (i90)	0.072	0.148	0.110	0.134
ตะวันตก	MEMS (i80)	0.105	0.164	0.214	0.249
	IMU (i90)	0.026	0.049	0.088	0.081

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบร้อยละความถูกต้องทางราบรายจุด กรณีทดสอบในที่โล่งบนดาดฟ้า ระหว่างเครื่องรับสัญญาณที่ที่มีเซนเซอร์ MEMS และ IMU

มุมรังวัด	ชนิดเครื่องรับ	Horizontal < 4 เซนติเมตร			
		เหนือ (%)	ตะวันออก (%)	ใต้ (%)	ตะวันตก (%)
15°	MEMS (i80)	17	63	32	0
	IMU (i90)	72	75	88	92
25°	MEMS (i80)	7	32	17	0
	IMU (i90)	60	63	63	68
35°	MEMS (i80)	10	5	13	0
	IMU (i90)	60	65	58	52
45°	MEMS (i80)	10	5	8	7
	IMU (i90)	58	53	55	52

ตารางที่ 3 ค่าต่างรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ทางดิ่ง กรณีทดสอบในที่โล่ง

ค่า RMSE ทางดิ่ง หน่วย เมตร					
ทิศการรังวัด	ชนิดเครื่องรับ	มุมรังวัด			
		15°	25°	35°	45°
เหนือ	MEMS (i80)	0.016	0.016	0.010	0.012
	IMU (i90)	0.026	0.021	0.022	0.031
ตะวันออก	MEMS (i80)	0.015	0.010	0.014	0.019
	IMU (i90)	0.018	0.020	0.033	0.031
ใต้	MEMS (i80)	0.017	0.012	0.010	0.016
	IMU (i90)	0.016	0.018	0.021	0.025
ตะวันตก	MEMS (i80)	0.021	0.017	0.013	0.016
	IMU (i90)	0.016	0.020	0.023	0.028

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบร้อยละความถูกต้องทางดิ่งรายจุดกรณีทดสอบในที่โล่งบนดาดฟ้า ระหว่างเครื่องรับสัญญาณที่ที่มีเซนเซอร์ MEMS และ IMU

มุมรังวัด	ชนิดเครื่องรับ	Vertical < 10 เซนติเมตร			
		ทิศเหนือ (%)	ทิศตะวันออก (%)	ทิศใต้ (%)	ทิศตะวันตก (%)
15°	MEMS (i80)	100	100	100	100
	IMU (i90)	98	100	100	100
25°	MEMS (i80)	100	100	100	100
	IMU (i90)	100	100	100	100
35°	MEMS (i80)	100	100	100	100
	IMU (i90)	100	98	100	100
45°	MEMS (i80)	100	100	100	100
	IMU (i90)	100	100	100	100

6.1.2 การทดสอบห่างจากผนัง 2 เมตร

ตารางที่ 5 ค่าต่างรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ทางราบ กรณีทดสอบห่างจากผนัง 2 เมตร

ค่า RMSE ทางราบ หน่วย เมตร					
ทิศการรังวัด	ชนิดเครื่องรับ	มุมรังวัด			
		15°	25°	35°	45°
หันเข้าผนัง	MEMS (i80)	0.118	0.211	0.293	0.387
	IMU (i90)	0.069	0.090	0.057	0.211
หันออกผนัง	MEMS (i80)	0.119	0.195	0.265	0.329
	IMU (i90)	0.035	0.058	0.043	0.033
หันขนานผนังด้านที่ 1	MEMS (i80)	0.068	0.109	0.160	0.200
	IMU (i90)	0.053	0.094	0.043	0.049
หันขนานผนังด้านที่ 2	MEMS (i80)	0.143	0.230	0.318	0.395
	IMU (i90)	0.028	0.048	0.047	0.043

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบร้อยละความถูกต้องทางราบรายจุดกรณีทดสอบห่างจากผนังสองเมตร ระหว่างเครื่องรับสัญญาณที่ที่มีเซนเซอร์ MEMS และ IMU

มุมรังวัด	ชนิดเครื่องรับ	Horizontal < 4 เซนติเมตร			
		หันเข้าผนัง (%)	หันออกผนัง (%)	หันขนานผนัง 1 (%)	หันขนานผนัง 2 (%)
15°	MEMS (i80)	12	30	50	25
	IMU (i90)	72	90	85	85
25°	MEMS (i80)	7	25	50	22
	IMU (i90)	59	75	68	73
35°	MEMS (i80)	2	25	35	21
	IMU (i90)	50	73	80	73
45°	MEMS (i80)	0	25	27	21
	IMU (i90)	27	84	80	57

ตารางที่ 7 ค่าต่างรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ทางดิ่ง กรณีทดสอบห่างจากผนัง 2 เมตร

ค่า RMSE ทางดิ่ง หน่วย เมตร					
ทิศการรังวัด	ชนิดเครื่องรับ	มุมรังวัด			
		15°	25°	35°	45°
หันเข้าผนัง	MEMS (i80)	0.051	0.044	0.052	0.055
	IMU (i90)	0.042	0.048	0.071	0.387
หันออกผนัง	MEMS (i80)	0.019	0.017	0.017	0.024
	IMU (i90)	0.032	0.029	0.024	0.027
หันขนานผนัง ด้านที่ 1	MEMS (i80)	0.026	0.022	0.023	0.036
	IMU (i90)	0.025	0.025	0.029	0.035
หันขนานผนัง ด้านที่ 2	MEMS (i80)	0.034	0.031	0.030	0.035
	IMU (i90)	0.020	0.033	0.037	0.041

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบร้อยละความถูกต้องทางดิ่งรายจุด กรณีทดสอบห่างจากผนังสองเมตร ระหว่างเครื่องรับสัญญาณที่ที่มีเซนเซอร์ MEMS และ IMU

มุมรังวัด	ชนิดเครื่องรับ	Vertical < 10 เซนติเมตร			
		หันเข้าผนัง (%)	หันออกผนัง (%)	หันขนานผนัง 1 (%)	หันขนานผนัง 2 (%)
15°	MEMS (i80)	100	100	100	100
	IMU (i90)	98	100	100	100
25°	MEMS (i80)	100	100	100	100
	IMU (i90)	100	100	100	100
35°	MEMS (i80)	100	100	100	100
	IMU (i90)	100	98	100	100
45°	MEMS (i80)	100	100	100	100
	IMU (i90)	100	100	100	100

6.2 บริเวณหมุดดาวเทียม RTK ของกรมที่ดินในเขตอำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี

การทดสอบการเอียงเสาเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสยีออเดติกที่มีเซนเซอร์ MEMS และ IMU ด้วยมุม 15°, 25°, 35°, และ 45° บนหมุดดาวเทียม RTK ของกรมที่ดิน ทดสอบรับสัญญาณตั้งแต่วันที่ 18 เมษายน 2565 ถึง วันที่ 23 เมษายน 2565 ในช่วงเวลา 8.30 ถึงเวลา 17.00 น. มีผลการทดสอบดังต่อไปนี้

ตารางที่ 9 ค่า RMSE ทางราบและทางดิ่ง กรณีทดสอบบนหมุดดาวเทียม RTK ระหว่างเครื่องรับสัญญาณที่มีเซนเซอร์ MEMS และ IMU

มุมรังวัด	ชนิดเครื่องรับ	RMSE Horizontal (เมตร)	RMSE Vertical (เมตร)
15°	MEMS (i80)	0.297	0.253
	IMU (i90)	0.056	0.233
25°	MEMS (i80)	0.257	0.244
	IMU (i90)	0.096	0.236
35°	MEMS (i80)	0.290	0.242
	IMU (i90)	0.121	0.201
45°	MEMS (i80)	0.424	0.231
	IMU (i90)	0.145	0.254

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบร้อยละความถูกต้องทางราบและทางดิ่งรายจุด กรณีทดสอบบนหมุดดาวเทียม RTK ระหว่างเครื่องรับสัญญาณที่มีเซนเซอร์ MEMS และ IMU

มุมรังวัด	ชนิดเครื่องรับ	Horizontal น้อยกว่า 4 cm. (%)	Vertical น้อยกว่า 10 cm. (%)
15°	MEMS (i80)	18	49
	IMU (i90)	39	53
25°	MEMS (i80)	5	54
	IMU (i90)	14	53
35°	MEMS (i80)	11	56
	IMU (i90)	32	47
45°	MEMS (i80)	5	54
	IMU (i90)	26	47

7. สรุปผลการวิจัย ข้อจำกัด และข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาและทดสอบประสิทธิภาพในการกำหนดตำแหน่งทางราบและทางดิ่งของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบยีออเดติกที่มีเซนเซอร์ MEMS และ IMU โดยวิธีการรังวัดโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ในทันที (NRTK) โดยการทดสอบบนหมุดที่อยู่ในที่โล่ง หมุดที่อยู่ห่างจากผนังสองเมตร และหมุดดาวเทียม RTK ของกรมที่ดิน ทดสอบภายใต้กรอบพิกัดอ้างอิง ITRF2005 พบว่า

การทดสอบบนดาดฟ้าบริเวณที่โล่งไม่มีการบดบังสัญญาณและทดสอบห่างจากผนังสองเมตรในขณะรังวัดด้วยการเอียงเสา เครื่องรับที่มีเซนเซอร์ IMU มีความถูกต้องในการกำหนดตำแหน่งทางราบสูงกว่าเซนเซอร์ MEMS ซึ่งพิจารณาจากค่าต่างรากที่สองของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ให้ค่า RMSE ทางราบไม่เกิน 4 เซนติเมตร ขณะเอียงเสาด้วยมุม 15° คิดเป็นร้อยละค่าความถูกต้องในทางราบที่มีค่าไม่เกิน 4 เซนติเมตรเฉลี่ยเท่ากับ 82% ซึ่งการเพิ่มมุมรังวัดขณะเอียงเสา การเปลี่ยนทิศทางการรังวัด และ multipath ใกล้กับหมุดทดสอบจะมีผลต่อค่าความถูกต้องในทางราบ แต่ไม่มีผลโดยตรงต่อค่าความถูกต้องในทางดิ่งเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมเดียวกัน สอดคล้องกับงานวิจัยของ [13] ซึ่งค่าความถูกต้องในทางดิ่ง เครื่องรับที่มีเซนเซอร์ IMU และ MEMS มีค่า RMSE ทางดิ่งใกล้เคียงกัน และมีค่าไม่เกิน 10 เซนติเมตร คิดเป็นร้อยละค่าความถูกต้องในทางดิ่งที่มีค่าไม่เกิน 10 เซนติเมตรจะอยู่ในช่วง 98% ถึง 100% แต่เมื่อนำเครื่องรับสัญญาณที่มีเซนเซอร์ทั้งสองแบบไปทดสอบบนหมุดดาวเทียม RTK ของกรมที่ดินซึ่งอยู่ริมถนนทำให้สภาพแวดล้อมโดยรอบมีการรบกวนสัญญาณสูง เนื่องจากการรบกวนสัญญาณจากรถยนต์โดยเฉพาะบางจุดที่สภาพแวดล้อมโดยรอบมีการสัญจรไปมาของรถยนต์ตลอดเวลา และในบางจุดอยู่ใกล้กับอาคารคอนกรีตและเสาไฟฟ้า ทำให้ค่าความถูกต้องในทางราบมีค่ามากกว่า 4 เซนติเมตรและในทางดิ่งมี

แต่ค่าความถูกต้องในทางดิ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ [14] กรณีที่มีสิ่งปกคลุมหนาแน่น จากการทดสอบด้วยระบบ NRTK เทคนิค VRS โดยตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมอยู่บนสามขาในแนวดิ่ง ให้ค่าความถูกต้องในทางดิ่งมากกว่า 19 เซนติเมตร และกรณีทดสอบโดยตรงที่หัวหมุดหลักเขตที่ดิน ที่มีอุปสรรคจากสิ่งปลูกสร้างโดยรอบหมุดหลักเขตที่ดิน มีค่าความถูกต้องทางดิ่งมากกว่า 20 เซนติเมตร

แม้ว่าประสิทธิภาพโดยรวมการใช้งานจริงในสนามของเครื่องรับสัญญาณที่มีเซนเซอร์ IMU สามารถ Fixed Ambiguity ได้รวดเร็วและให้ผลค่าความถูกต้องในการกำหนดตำแหน่งทางราบและทางดิ่งที่มีความถูกต้องสูงกว่าเครื่องรับที่มีเซนเซอร์ MEMS แต่ผลค่าความถูกต้องทางตำแหน่งโดยเฉพาะในทางราบ ส่วนใหญ่มีค่าการกำหนดตำแหน่งทางราบมากกว่า 4 เซนติเมตร ซึ่งไม่เป็นไปตามเกณฑ์ของกรมที่ดิน แม้ว่าจะเอียงเสาด้วยมุมน้อยที่สุดในการทดสอบ คือ 15° บนดาดฟ้าอาคารยังมีความถูกต้องทางราบผ่านเกณฑ์ไม่ถึง 95% ตามที่คาดหวังซึ่งข้อมูลจากการทดสอบมีการคุมตัวแปรผลการรังวัดในสนามตามเกณฑ์การรับสัญญาณในสนามของกรมที่ดิน ซึ่งตามคุณลักษณะของเครื่องรับสัญญาณเมื่อนำไปใช้งานรับสัญญาณด้วยการเอียงเสาจะต้องมีค่าความถูกต้องทางราบน้อยกว่า 3 เซนติเมตร แต่ผลการทดสอบการรังวัดด้วยการเอียงเสาในที่โล่งจากงานวิจัยมีค่ามากกว่าที่กำหนด และโดยเฉพาะการทดสอบบนหมุดดาวเทียม RTK ซึ่งเป็นสภาพแวดล้อมการใช้งานจริง เมื่อพิจารณาที่มุม 15° จะมีความถูกต้องทางราบผ่านเกณฑ์มากที่สุดเพียง 39% ซึ่งยอมรับไม่ได้ในทางปฏิบัติ เพราะฉะนั้นจึงยังไม่แนะนำให้รับสัญญาณด้วยการเอียงเสาเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่มีเซนเซอร์ IMU และ MEMS ในสภาพแวดล้อมที่มีต้นไม้และสิ่งก่อสร้างบดบัง หรือหมุดอยู่ชิดริมกำแพง ควรจะรับสัญญาณในที่โล่งและทำการถ่ายค่าพิกัดไปยังหมุดที่อยู่ในพื้นที่ ๆ ต้องการรับสัญญาณ ทั้งนี้ผู้ใช้งานควรจะต้องมีความตระหนักในการนำเครื่องรับสัญญาณไปรังวัดด้วยการเอียงเสาในงานรังวัดจริงด้วย

7.2 ข้อจำกัด

7.2.1 เครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสแบบยีออเดติกที่มีเซนเซอร์ MEMS (i80) ขณะรับสัญญาณด้วยการเอียงเสาโดยหน้าจออยู่ใน Compensate mode จะปรากฏเพียงฟองกลมอิเล็กทรอนิกส์เท่านั้น แต่จะไม่ปรากฏค่ามุมขณะที่กำลังเอียง เหมือนกับเครื่องรับที่มีเซนเซอร์ IMU (i90) ผู้วิจัยต้องเปิดดูค่ามุมใน project และต้องเปิดดูค่ามุมหลังจากการรับสัญญาณทุกครั้งให้ตรงตามที่กำหนดในงานวิจัยทำให้เกิดความล่าช้าในสนาม

7.2.2 เครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสแบบยีออเดติกที่มีเซนเซอร์ IMU (i90) เป็นเครื่องรับที่ขณะใช้งานในโหมดการเอียง จะต้องมีการสั่นของหัวเครื่องรับเล็กน้อยถ้าหากมีการหยุดนิ่งเครื่องรับจะฟ้องในหน้าจอให้ทำการปรับเทียบใหม่ ซึ่งการปรับเทียบเพียงโยกเสาไปมาสามสิบองศาจนสัญลักษณ์โหมดการเอียงเป็นสีเขียวก็เป็นอันใช้งานได้ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เมื่อรังวัดบนดาดฟ้าโดยการติดตั้งบน Tripod จะต้องมีการสั่นสะเทือนหัวของเครื่องรับเบา ๆ อย่างต่อเนื่อง

7.2.3 การทดสอบบนหมุดดาวเทียม RTK เนื่องจากเป็นทองเหลืองค่อนข้างเรียบไม่มีจุดกึ่งกลางสำหรับยึดกับปลายเสา เมื่อรังวัดบนหมุดในบางครั้งทำให้เสาลื่นหลุดออกจากหมุดได้

7.2.4 การทดสอบในแต่ละกรณีนั้น ไม่ได้ทดสอบในช่วงวันและเวลาเดียวกัน ซึ่งแต่ละวันมีการเปลี่ยนแปลงในเรื่องของสภาพอากาศ และอุณหภูมิ รวมไปถึงจำนวนดาวเทียมที่เครื่องสามารถรับได้ ซึ่งส่งผลต่อค่าความคลาดเคลื่อนในแต่ละหมุด

7.3 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาในอนาคตควรมีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำหนดตำแหน่งทางราบและทางดิ่งในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ระหว่างเครื่องรับที่มีเซนเซอร์แบบ MEMS และ IMU จากบริษัทผู้ผลิตยี่ห้ออื่น เพื่อเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องรับสัญญาณต่างยี่ห้อกัน และควรมีเกณฑ์แบ่งพื้นที่ศึกษาให้ชัดเจน ทั้งนี้อาจจะแบ่งเกณฑ์ตามจำนวนดาวเทียมที่สามารถรับได้หรือสร้างสภาพแวดล้อมจำลองขึ้นมา เนื่องจากความแตกต่างในการใช้วิจารณญาณของแต่ละบุคคลมีความแตกต่างกัน

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณกองเทคโนโลยีทำแผนที่ กรมที่ดิน ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการเข้าใช้ระบบโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ในทันทีและเครื่องมือสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบพระคุณเจ้าพนักงานที่ดินสำนักงานที่ดินจังหวัดนนทบุรี สาขาปากเกร็ด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการติดตามช่างรังวัดเข้าไปทดสอบรังวัดบนหมุดหลักเขตที่ดินในแปลงที่ดิน

เอกสารอ้างอิง

[1] Šugar, D., Zalović, L., and Ž. Bači (2018). Analysis of Positioning Results Obtained by a Single Base Rtk with Autonomous Base Start and Tilt Option. , vol. 13, no. 1, doi: 10.7251/stp1813231z.

[2] ธีรทัต เจริญกาลัญญตา และ เฉลิมชนม์ สถิระพจน์ (2552). การประเมินค่าความถูกต้องจากการรังวัดด้วยดาวเทียมจีพีเอส แบบจลน์ในทันทีโดยอาศัยระบบเครือข่ายสถานีฐานจีพีเอสระบบแรกในประเทศไทย : ผลการทดสอบเบื้องต้น. *วิศวกรรมสาร มก.,* ปีที่ 22, ฉบับที่ 70, หน้า 45-56

[3] Nie, B., Chen, G. and Liu, B. (2019). Research on RTK tilt position measurement method based on UKF. *IET Radar, Sonar & Navigation,* 13, pp. 2102-2106, doi: 10.1049/iet-rsn.2019.0128.

[4] LUO, X., SCHAUFLER, S., CARRERA, M. and CELEBI, I. (2018). High-Precision RTK Positioning with Calibration-Free Tilt Compensation. *the Embracing our smart world where the continents connect: enhancing the geospatial maturity of societies*, Istanbul, Turkey

[5] กรมที่ดิน (2562). *ระเบียบกรมที่ดินว่าด้วยการรังวัดทำแผนที่โดยวิธีแผนที่ชั้นหนึ่งด้วยระบบโครงข่ายการรังวัดดาวเทียมแบบจลน์ (*RTK GNSS Network) *พ.ศ.๒๕๖๒*, หน้า 10 - 12

[6] กรมที่ดิน (2563). *แนวทางการรังวัดโดยระบบโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (*RTK GNSS Network). กองการพิมพ์ กรมที่ดิน, หน้า 22 - 60

[7] นำพล ศักดิ์สนิท (2562). *การประเมินระยะเวลาและค่าความถูกต้องที่ได้จากสถานีอ้างอิงเสมือน สำหรับการรังวัดด้วยโครงข่ายดาวเทียมแบบจลน์ในเวลาจริง สำหรับประเทศไทย*. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ

[8] Henkel, P. (2017). Calibration of Magnetometers with GNSS Receivers and Magnetometer-Aided GNSS Ambiguity Fixing. *Sensors (Basel),* vol. 17, no. 6, doi: 10.3390/s17061324.

[9] Caruso, M. J. (2000). Applications of Magnetic Sensors for Low Cost Compass Systems. *IEEE* 2000. *Position Location and Navigation Symposium (Cat. No.00CH37062),* San Diego, CA, USA, 13-16 March 2000, pp. 177-184. doi: 10.1109/PLANS.2000.838300.

[10] Hazry, D., Sofian, M., and Zul Azfar, A. (2009). Study of Inertial Measurement Unit Sensor. *Proceedings of the International Conference on Man-Machine Systems (ICoMMS),* Batu Ferringhi, Penang, MALAYSIA, 11 – 13 October 2009, pp. 5A8-1 - 5A8-4.

[11] KANIEWSKI, P. (2006). AIRCRAFT POSITIONING WITH INS/GNSS INTEGRATED SYSTEM. *Molecular and Quantum Acoustics,* 27, pp. 149 - 168

[12] Ahmad, N., Ghazilla, R. A. R., Khairi, N. M. and Kasi, V. (2013) .Reviews on Various Inertial Measurement Unit (IMU) Sensor Applications. *International Journal of Signal Processing Systems,* pp. 256-262, doi: 10.12720/ijsps.1.2.256-262.

[13] Mekik, C. and Can, O. (2010). Multipath Effects in RTK GPS and A Case Study. *Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation,* 42, pp. 231 - 240.

[14] เจนพิธีกร สุนทรรัตน์ (2560). *การทดสอบประสิทธิภาพระบบโครงข่ายดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบจลน์ในทันทีสำหรับงานรังวัดที่ดิน*. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ