



รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การประยุกต์ใช้งานระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียมราคาถูกลำหรับ
กระบวนการเพาะปลูกอ้อยในประเทศไทย”

โดย

ศาสตราจารย์ ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ

พฤษภาคม 2561

สัญญาเลขที่ RDG60T0171

รายงานฉบับสมบูรณ์

โครงการ “การประยุกต์ใช้งานระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียมราคาถูกลง
สำหรับกระบวนการเพาะปลูกอ้อยในประเทศไทย”

คณะผู้วิจัย

- 1 ศ.ดร.พรชัย ทรัพย์นิธิ
- 2 ดร.ศราวุฒิ รุ่งเรืองวชิเอก
- 3 ดร.เวธิต ภาคย์พิสุทธิ
- 4 ดร.วสุ อุดมเพทายกุล

สังกัด

- สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สำนักงานการบินพลเรือนแห่งประเทศไทย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พฤษภาคม 2561

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติและสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ผู้ซึ่งเป็นฝ่ายสนับสนุนทุนการวิจัยในโครงการนี้ ทางผู้จัดทำต้องขอขอบคุณผู้ร่วมงานที่คอยให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวคิดและวิธีการแก้ปัญหาในการทำงาน รวมถึงข้อคิดเห็นต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดทำโครงการเป็นอย่างยิ่ง ขอขอบคุณนายณัฐณรงค์ นิลจันทร์ นายณัฐพล โพธิ์ไพจิตร นายณัฐดนัย งามประเสริฐ นักศึกษาปริญญาตรี และนายจิรภูมิ บุตรโท นักศึกษาปริญญาเอก ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความร่วมมือออกแบบโปรแกรม และสร้างอุปกรณ์ต้นแบบเครื่องรับดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสในโครงการนี้ขึ้นมา ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ได้อนุเคราะห์ข้อมูลเครื่องรับจีเอ็นเอสเอส เพื่อเป็นฐานอ้างอิงในการออกแบบและพัฒนาเครื่องรับดาวเทียมที่ใช้ในโครงการ และสุดท้ายนี้ ขอขอบคุณทางภาควิชาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุเคราะห์ยานพาหนะทางการเกษตร เพื่อใช้ทดสอบระบบแนะนำเส้นทางในการเดินรถนี้

บทสรุปผู้บริหาร

ชื่อโครงการ : การประยุกต์ใช้งานระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียมราคาถูกลำหรับกระบวนการเพาะปลูกอ้อยในประเทศไทย
หัวหน้าโครงการ : ศ.ดร. พรชัย ทรัพย์นิธิ
ปีที่ทำการวิจัย : 2561
แหล่งทุน : สำนักกองทุนวิจัยแห่งชาติ (สกว.)

ภายหลังการเปิดตลาดการค้าน้ำตาลอย่างเสรีของประเทศไทยประมาณต้นปี 2561 ทำให้อุตสาหกรรมน้ำตาลของไทยต้องมีการปรับตัวในการพัฒนาการผลิตอ้อยให้มีคุณภาพและปริมาณที่เหมาะสมเพื่อส่งเสริมการค้าน้ำตาลของประเทศในเวทีการค้าระดับโลก เนื่องจากพื้นที่ทางเกษตรกรรมของประเทศมีอยู่อย่างจำกัด จึงต้องมีการจัดสรรพื้นที่สำหรับเพาะปลูกอ้อยโดยใช้เทคโนโลยีจีเอ็นเอสเอสความแม่นยำสูงสำหรับการทำเกษตรกรรมความแม่นยำสูง (precision agriculture) เข้ามาช่วย เพื่อให้เกิดความคุ้มค่า และได้ผลผลิตอ้อยที่มีคุณภาพ

แม้ว่าในปัจจุบัน เทคโนโลยีดังกล่าวได้ถูกพัฒนาให้มีความแม่นยำไปถึงระดับเซนติเมตรแล้ว แต่เนื่องจากเทคโนโลยีนี้จะต้องใช้เครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสชนิด 2 ความถี่ ซึ่งมีราคาสูงและต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ดังนั้น ในโครงการนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญ คือ เพื่อพัฒนาอุปกรณ์สำหรับระบุตำแหน่ง โดยใช้เครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสชนิดความถี่เดียว (หรือชนิด 1 ความถี่) ร่วมกับการใช้เทคนิค Real Time Kinematics (RTK) เพื่อลดต้นทุนการผลิตและการนำเข้าอุปกรณ์จากต่างประเทศ โดยยังคงมีความแม่นยำในการระบุตำแหน่งในระดับเซนติเมตร และช่วยยกระดับอุตสาหกรรมน้ำตาลของไทยได้

ในอุปกรณ์สำหรับระบุตำแหน่ง 1 ชุด จะประกอบไปด้วยสถานีฐาน (Base Station) และสถานีจร (Rover Station) แต่ละสถานีจะประกอบไปด้วยส่วนที่เหมือนกัน คือ สายอากาศสำหรับรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสชนิดความถี่เดียว ชิพจีเอ็นเอสเอสชนิดความถี่เดียว บอร์ดประมวลผล Raspberry pi โมดูล 3G Air-card และแบตเตอรี่ ในกรณีของสถานีจรจะเพิ่มเซ็นเซอร์วัดความเอียงของสายอากาศ และจอแสดงผลขนาดเล็กพร้อม GUI เพื่อตั้งค่าก่อนการใช้งานรวมทั้งการแสดงผลตำแหน่งของสถานีจรเข้ามาด้วย ในการใช้งานจริง สถานีฐานจะถูกติดตั้งอยู่กับที่พร้อมกับทราบตำแหน่งที่แน่นอนแล้ว เพื่อส่งค่าปรับแก้พิกัด (Correction) ผ่านเครือข่าย 3G ไปยังสถานีจรซึ่งจะถูกติดตั้งเข้ากับรถทางเกษตรกรรม จากนั้นสถานีจรจะทำการคำนวณตำแหน่งร่วมกับค่าปรับแก้ที่ได้รับด้วยโปรแกรม RTKLIB พร้อมกับแสดงผลพิกัดของสถานีจรผ่าน GUI เพื่อให้ผู้ขับขี่ทราบและสามารถควบคุมตำแหน่งของรถให้ตรงตามเส้นทางที่กำหนดไว้ แล้วบันทึกผลการทดลองรวมทั้งเส้นทางการเดินรถลงในหน่วยความจำ SD Card ของ Raspberry pi เพื่อนำไปวิเคราะห์ความแม่นยำด้วยโปรแกรม Matlab ต่อไปอีกด้วย

สรุปผลการวิจัย

ผลจากทดสอบและการวิเคราะห์ข้อมูลการใช้งานอุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนาขึ้น สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความคลื่อนในการระบุตำแหน่งของสถานีจรในพื้นที่โล่งแจ้ง โดยใช้ระบบดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสขณะวิ่งบนพื้นราบ มีค่าประมาณ 3 เซนติเมตร และมีความแม่นยำในการระบุตำแหน่งขณะวิ่งบนพื้นเอียงประมาณ 4 เซนติเมตร ดังปรากฏในตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.5 ซึ่งน้อยกว่า 30 เซนติเมตร ตามที่ระบุไว้สัญญาโครงการปี 2561

2. ในกรณีที่สถานีจลน์ตั้งอยู่ในพื้นที่โล่งแจ้ง และใช้ระบบดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส จะมีเวลาน้อยที่สุดที่ใช้ในการหาผลเฉลยพิกัดที่มีสถานะเป็น Fixed (เป็นการคำนวณลูกคลื่นสัญญาณได้เต็มคลื่น ทำให้พิกัดที่ได้มีความน่าเชื่อถือสูงที่สุด) มีค่าประมาณ 7 วินาที ซึ่งใช้เวลาไม่เกิน 5 นาที

3. ผู้ขับสามารถสร้างเส้นทางการเดินทางโดยการป้อนจุดปักหมุดที่มุมของพื้นที่เป็นจำนวน 4 จุดสำหรับสร้างเส้นทางการเดินทางได้

4. ผู้ขับสามารถตั้งค่าเริ่มต้นสำหรับการทดสอบ และติดตามตำแหน่งของสถานีจลน์รวมทั้งการควบคุมตำแหน่งของรถทางเกษตรกรรมให้วิ่งได้ตรงตามเส้นทางที่กำหนดโดยการสังเกตระยะห่างจากเส้นทางที่แจ้งเตือนผ่านหน้าจอแสดงผล GUI ได้ดังรูปที่ 4.19

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการนำผลวิจัยไปใช้

1. ในการระบุตำแหน่งรถทางเกษตรกรรมให้มีความแม่นยำที่ใกล้เคียงกับการใช้เครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสชนิด 2 ความถี่ สามารถใช้เครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสชนิดความถี่เดียวร่วมกับการใช้เทคนิค RTK แทนได้ โดยจะต้องทดสอบในพื้นที่โล่งแจ้ง และมีระยะขจัดระหว่างสถานีฐานกับสถานีจลน์ที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ ทำให้มีต้นทุนต่อชุดไม่เกิน 100,000 บาท ดังที่ประเมินไว้ในหัวข้อที่ 4.6

2. หากต้องการนำงานวิจัยนี้ไปใช้อ้างอิง โปรดใช้วิจารณญาณ เนื่องจากงานวิจัยนี้ เป็นเพียงการทดสอบอุปกรณ์ต้นแบบเฉพาะบริเวณ ซึ่งหากนำไปใช้งานจริงในพื้นที่อื่นๆ จะต้องมีการปรับปรุงอุปกรณ์ให้มีความเสถียรในการใช้งานมากขึ้น เนื่องจากสภาพภูมิประเทศและระยะขจัดระหว่างสถานีฐานและสถานีจลน์ที่แตกต่างกัน อาจมีผลทำให้ได้ความแม่นยำในการทดสอบแตกต่างจากงานวิจัยนี้ได้

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยต่อไป

1. ในปัจจุบัน ภายในประเทศไทยเริ่มมีการจัดตั้งสถานีฐานโครงข่ายจีเอ็นเอสเอสชนิด 2 ความถี่ สำหรับให้บริการการทำรังวัดที่มีความแม่นยำสูงถึงระดับมิลลิเมตร จึงควรมีการพัฒนาสถานีฐานและสถานีจลน์ให้สามารถเชื่อมต่อกับสถานีฐานเหล่านั้นเพื่อประยุกต์ใช้เทคนิค RTK ในการติดตามควบคุมตำแหน่งรถทางเกษตรกรรมได้

2. ควรมีการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับการสร้าง บันทึก และแก้ไขเส้นทางเดินทางในพื้นที่ทางเกษตรกรรมให้ครอบคลุมกับพื้นที่หลากหลายรูปแบบได้ และในกรณีที่สถานีจลน์ขาดความเสถียรในแสดงพิกัด ควรมีการพัฒนาการใช้เซนเซอร์ IMU มาช่วยทำนายตำแหน่งของสถานีจลน์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการติดตามพิกัดของสถานีจลน์ และง่ายต่อการควบคุมการจราจรบนพื้นที่ทางเกษตรกรรม

3. ในบางช่วงเวลาที่เครือข่าย 3G มีปริมาณผู้ใช้งานมาก หรือมีสัญญาณขัดข้อง อาจส่งผลให้เกิดความไม่เสถียรในการรับค่าปรับแก้ของสถานีจลน์ได้ จึงควรมีการพัฒนาการสร้างเครือข่ายเชื่อมต่อแบบส่วนตัวระหว่างสถานีฐานและสถานีจลน์ โดยใช้เทคโนโลยี WIFI หรือ Lora เพื่อเพิ่มความเสถียรในการสื่อสารระหว่างสถานีฐานและสถานีจลน์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้เทคนิค RTK

4. ในช่วง 1 ปีที่ผ่านมา ราคาของเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสชนิด 2 ความถี่มีแนวโน้มลดลง จึงควรมีการศึกษาและทดสอบการนำเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสชนิด 2 ความถี่ มาประยุกต์ใช้กับการทำเกษตรกรรมแม่นยำสูง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งของรถทางเกษตรกรรม รวมไปถึงการควบคุมการจราจรบนพื้นที่ทางเกษตรกรรมเพื่อเพิ่มผลผลิตทางเกษตรกรรมต่อไป

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการพัฒนาระบบนำร่องทางเกษตรกรรม รวมถึงการระบุพิกัดตำแหน่งบนพื้นโลกโดยใช้เทคโนโลยีจีเอ็นเอสเอสเพื่อทำให้เกิดความแม่นยำมากยิ่งขึ้น พร้อมทั้งแสดงผลการนำร่องผ่านทางส่วนประสานงานกราฟิกผู้ใช้ (GUI) เพื่ออำนวยความสะดวกให้กับผู้ขับขี่ในการบังคับการเดินรถทางเกษตรกรรมให้เดินทางไปในทิศทางที่ถูกต้อง อุปกรณ์ของระบบนำร่องที่พัฒนาขึ้นนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ อุปกรณ์สถานีฐาน และอุปกรณ์สถานีจลน์ ทั้งสองสถานีจะประกอบไปด้วยสายอากาศรับสัญญาณที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ Raspberry pi และโมดูล 3G เพื่อรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในการระบุพิกัดตำแหน่งจากสถานีฐานสำหรับใช้เป็นค่าอ้างอิงในการระบุพิกัดตำแหน่งให้กับอุปกรณ์สถานีจลน์ โดยมีการเชื่อมต่อกันผ่านโมดูล 3G และส่งข้อมูลมายังอุปกรณ์ Raspberry pi เพื่อประมวลผลค่าพิกัดตำแหน่งและแสดงผลพิกัดบนแผนที่ พร้อมกับการแสดงเส้นทางเดินรถทางเกษตรกรรมผ่านหน้าต่างส่วนประสานงานกราฟิกผู้ใช้ (GUI) ทางจอแสดงผล ทำให้ผู้ใช้งานสามารถควบคุมรถทางเกษตรกรรมให้เคลื่อนที่ได้ตรงตามเส้นทางที่ออกแบบไว้ ผลการทดลองเบื้องต้นทำให้ทราบว่า รูปแบบกลุ่มดาวเทียม (Constellation) และความเสถียรในการรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสของเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสมีอิทธิพลต่อความแม่นยำมากกว่าระยะห่างระหว่างสถานีฐานและสถานีจลน์ (ระยะ Baseline) ที่ใช้ทดสอบ โดยมีความแม่นยำในการระบุตำแหน่งประมาณ 2.9 เซนติเมตร และระยะเวลาที่ใช้ในการหาพิกัดแม่นยำสูงประมาณ 7 วินาที ขณะที่รถวิ่งออกจากเส้นทางเกินระยะที่กำหนด ระบบมีการแจ้งเตือนระยะห่างแก่ผู้ขับขี่ และสามารถปรับตำแหน่งของรถเข้าสู่เส้นทางเดิมได้อย่างถูกต้อง สุดท้ายนี้ในส่วนของส่วนประสานงานกราฟิกผู้ใช้ โปรแกรมที่สร้างขึ้นสามารถสร้างเส้นทางเดินรถทางเกษตรกรรมได้โดยป้อนเพียงค่าพิกัดมุมของพื้นที่ที่สนใจจำนวน 4 มุม แล้วโปรแกรมจะสามารถคำนวณเส้นทางให้โดยอัตโนมัติ พร้อมกับแสดงลงบนแผนที่เพื่อนำร่องรถทางเกษตรกรรมได้

Abstract

This project develops the navigation system for agricultural vehicles using the global navigation satellite system (GNSS) technology which give precise position estimation. The Graphic User Interface (GUI) helps drivers to control agricultural vehicles on the correct path. There are two main parts in this project: base station, and rover station. Both stations consist of an antenna connected to Raspberry Pi and 3G module. This kit receives the parameters obtaining the coordinates from the base station to estimate a position of rover station more accurately. With the assistance of 3G modules to transfer data between both stations, the obtained positions from Raspberry Pi are displayed on the map with the moving path via Graphic User Interface (GUI). Drivers can control agricultural vehicles precisely by instruction on the monitor. The results show that the number of constellations of the GNSS satellites has more influence than the baseline on the accuracy in RTK testing with precision about 2.9 centimeters. The time to get a high precision position is about 7 seconds. While the driver runs out of the path, The systems offers warning to the driver and can be adjusted the position to the path correctly. Finally, on the part of Graphic User Interface, the developed program can create the pathway for agricultural vehicles by entering just four-cornered points of the affected area. Then it calculates the pathway automatically and displays on the map for navigations of agricultural vehicles.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	
บทสรุปผู้บริหาร	
บทคัดย่อ (ไทย-อังกฤษ)	
สารบัญ	ก
สารบัญตาราง	ค
สารบัญภาพ	ง
บทที่ 1 บทนำ	1-1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1-1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1-1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	1-2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	1-2
บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	2-1
2.1 ระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS (GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM)	2-1
2.2 เทคนิคการระบุตำแหน่งแบบ RTK (REAL-TIME KINEMATIC)	2-6
2.3 การประยุกต์ใช้งานการระบุตำแหน่งแบบ RTK สำหรับการเกษตรแม่นยำสูงในประเทศไทย	2-7
บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย	3-1
3.1 การออกแบบอุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม	3-1
3.1.1 โปรแกรมประมวลผล RTK	3-2
3.1.2 การคำนวณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK โดยใช้โปรแกรม RTKLIB	3-2
3.1.3 อุปกรณ์รับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส	3-4
3.1.4 ระบบการสื่อสารผ่านเครือข่ายโทรศัพท์	3-5
3.1.5 การอ่านค่ามุมที่แสดงการเคลื่อนที่ของวัตถุโดยใช้ IMU เซ็นเซอร์ รุ่น GY-85	3-7
3.1.6 การเก็บพิกัดจากโปรแกรม RTKRCV ไปคำนวณใน Rotation Matrix	3-8
3.2 การต่ออุปกรณ์ใช้งานจริง	3-9
3.3 การหน้าจอแสดงผลแจ้งเตือนผู้ใช้งาน	3-12
3.3.1 หน้าจอการสร้างเส้นทาง	3-12
3.3.2 หน้าจอการตั้งค่าการรับดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส	3-14
3.3.3 หน้าจอการแนะนำเส้นทางผู้ใช้งานขณะเดินบนเส้นทางแบบเวลาจริง	3-14
3.4 การออกแบบการทดลอง	3-15
3.4.1 การหาประสิทธิภาพของการคำนวณตำแหน่งสถานีฐาน	3-15
3.4.2 การหาประสิทธิภาพของสถานีจลน์เมื่อใช้สถานีฐานแบบต่างๆ	3-16
3.4.3 ออกแบบการทดลองการแก้ไขพิกัดที่เกิดจากความเอียงของสายอากาศ	3-17
บทที่ 4 ผลการศึกษาและอภิปรายผล	4-1
4.1 ผลการทดลองเพื่อหาระยะเวลาในการคำนวณตำแหน่งสถานีฐาน	4-1

4.2 ผลการประมาณตำแหน่งเครื่องรับสถานีจลน์ด้วยเทคนิค RTK	4-2
4.2.1 ระยะห่างระหว่างสถานีฐานและสถานีจลน์ 1 กิโลเมตร	4-2
4.2.2 ระยะห่างระหว่างสถานีฐานและสถานีจลน์ 3 กิโลเมตร	4-4
4.2.3 ระยะห่างระหว่างสถานีฐานและสถานีจลน์ 6 กิโลเมตร	4-6
4.3 ผลการทดสอบการอ่านค่ามุมที่แสดงการเคลื่อนที่ของวัตถุโดยใช้เซนเซอร์ IMU รุ่น GY-85	4-8
4.4 ผลการทดสอบการจำลองการแก้ไขพิกัดที่เกิดจากความเอียงของสายอากาศในโปรแกรม	4-10
4.4.1 ผลการจำลองเอียงสายอากาศด้วยมุม Roll จากมุม -45° จนถึง 45°	4-10
4.4.2 ผลการจำลองเอียงสายอากาศด้วยมุม Pitch จากมุม -45° จนถึง 45°	4-11
4.4.3 ผลการจำลองเอียงสายอากาศด้วยมุม Yaw จากมุม 1° จนถึง 360°	4-12
4.5 ผลการทดสอบอุปกรณ์บนรถทางเกษตรกรรม	4-13
4.6 การประเมินราคาออกแบบอุปกรณ์	4-16
4.7 ตัวอย่างการนำไปใช้ประโยชน์	4-17
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	5-1
ภาคผนวก ก บทความสำหรับการเผยแพร่	ก-1
ภาคผนวก ข ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์โครงการ	ข-1
ภาคผนวก ค ตารางการเปรียบเทียบกิจกรรมที่เสนอในข้อเสนอโครงการ และกิจกรรมที่ทำจริง	ค-1

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3-1 การเปิดใช้งานความถี่แต่ละประเภทสำหรับการประมาณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK	3-16
ตารางที่ 4-1 ผลการทดลองประสิทธิภาพในการประมาณตำแหน่งที่ระยะ baseline ต่างๆ	4-7
ตารางที่ 4-2 ผลการวัดมุม Roll ด้วยเซนเซอร์ รุ่น GY-85	4-8
ตารางที่ 4-3 ผลการวัดมุม Pitch ตามมุมที่กำหนด	4-8
ตารางที่ 4-4 ผลการวัดมุม Yaw ด้วย GY-85	4-9
ตารางที่ 4-5 ผลต่างระยะเอียงที่ได้จากโปรแกรมเทียบกับระยะเอียงทางตรีโกณมิติ	4-13
ตารางที่ 4-6 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่ง	4-16

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1-1 โครงสร้างของระบบระบุตำแหน่ง RTK ราคาถูกเมื่อทำการติดตั้งบนรถไถ	1-2
รูปที่ 2-1 สาเหตุความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งของ GNSS	2-2
รูปที่ 2-2 หลักการระบุตำแหน่งโดยใช้ดาวเทียม GNSS	2-3
รูปที่ 2-3 หลักการทำงานของระบบระบุตำแหน่งแบบ RTK	2-6
รูปที่ 2-4 การใช้งานระบบ RTK ในทางปฏิบัติ	2-7
รูปที่ 2-5 สถานีฐานสำหรับใช้งานการระบุตำแหน่งแบบ RTK ในประเทศไทย	2-8
รูปที่ 3-1 บล็อกไดอะแกรมแสดงภาพรวมของระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียมด้วยเทคนิค RTK	3-1
รูปที่ 3-2 แผนภาพการเชื่อมต่อ Raspberry pi กับอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง	3-2
รูปที่ 3-3 การใช้งานโปรแกรม RTKLIB ในการคำนวณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK	3-3
รูปที่ 3-4 ขั้นตอนการทดสอบระยะ Baseline ที่มีผลต่อความแม่นยำในการทำ RTK	3-4
รูปที่ 3-5 อุปกรณ์รับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส Ublox NEO M8T GNSS Receiver	3-4
รูปที่ 3-6 สายอากาศ TW 3710	3-5
รูปที่ 3-7 อุปกรณ์ Huawei E3131	3-5
รูปที่ 3-8 อุปกรณ์ Huawei E173s-3	3-6
รูปที่ 3-9 แผนการสื่อสารระหว่างสถานีฐานกับสถานีจลน์ผ่านเครือข่าย 3G	3-6
รูปที่ 3-10 การต่อเซ็นเซอร์ รุ่น GY-85 เพื่อส่งข้อมูลให้ Raspberry Pi	3-7
รูปที่ 3-11 การวัดมุม Roll โดยการวัดรอบแกน X ของเซ็นเซอร์ รุ่น GY-85	3-7
รูปที่ 3-12 การวัดมุม Pitch โดยการวัดรอบแกน Y ของเซ็นเซอร์ รุ่น GY-85	3-8
รูปที่ 3-13 การวัดมุม Yaw โดยการวัดรอบแกน Z ของเซ็นเซอร์ รุ่น GY-85	3-8
รูปที่ 3-14 การนำพิกัดจากโปรแกรม RTKRCV ไปคำนวณใน Rotation Matrix	3-9
รูปที่ 3-15 แผนภาพการต่อวงจรสวิตช์เครื่องรับดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส	3-9
รูปที่ 3-16 ภาพการต่อวงจรจริง	3-10
รูปที่ 3-17 บรรจุภัณฑ์ที่ประกอบเข้ากับอุปกรณ์สำรวจของสถานีฐานและจลน์แล้ว	3-10
รูปที่ 3-18 นำแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ ใส่เข้าไปในบรรจุภัณฑ์พร้อมกับเสียบขั้วแบตเตอรี่ให้ถูกต้อง	3-11
รูปที่ 3-19 อุปกรณ์สำรวจของสถานีฐาน ถูกติดตั้งบริเวณดาดฟ้าเพื่อรอการทดสอบใช้งานจริง	3-11
รูปที่ 3-20 ภาพการติดตั้งอุปกรณ์สถานีจลน์บนรถทางเกษตรกรรม	3-12
รูปที่ 3-21 หน้าจอรับอินพุตตำแหน่งมุมทั้งสี่ ของพื้นสำหรับการนำทาง	3-13
รูปที่ 3-22 หน้าจอตั้งค่าจำนวนเส้นทางการเดินในพื้นที่	3-13
รูปที่ 3-23 หน้าจอแสดงเส้นทางการเดินรถตามข้อกำหนดของผู้ใช้	3-14

รูปที่ 3-24 ตำแหน่งพิกัดสำหรับเดินบนเส้นทางที่กำหนดไว้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Octave	3-14
รูปที่ 3-25 หน้าจอการตั้งค่าเครื่องรับและสถานีฐานเพื่อคำนวณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK	3-14
รูปที่ 3-26 หน้าจอแสดงการนำทางแบบเวลาจริง	3-15
รูปที่ 3-27 ตำแหน่งสถานีที่ใช้จำลองคำนวณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK แบบ 1 ความถี่	3-15
รูปที่ 3-28 พื้นที่ทดสอบเพื่อกำหนดจุดอ้างอิงสำหรับการประมาณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK	3-17
รูปที่ 3-29 ตำแหน่งการวางจุดอ้างอิงสำหรับทดสอบการประมาณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK	3-17
รูปที่ 4-1 ผลการหาระยะเวลาในการคำนวณสถานีฐาน	4-1
รูปที่ 4-2 ความคลาดเคลื่อนการคำนวณตำแหน่งแต่ละช่วงเวลาเมื่อสถานีฐานอยู่ห่างออกไป 1 กิโลเมตร	4-2
รูปที่ 4-3 ร้อยละความคลาดเคลื่อนในการคำนวณตำแหน่งเมื่อสถานีฐานอยู่ห่างออกไป 1 กิโลเมตร	4-3
รูปที่ 4-4 ความคลาดเคลื่อนการคำนวณตำแหน่งแต่ละช่วงเวลาเมื่อสถานีฐานอยู่ห่างออกไป 3 กิโลเมตร	4-4
รูปที่ 4-5 ร้อยละความคลาดเคลื่อนในการคำนวณตำแหน่งเมื่อสถานีฐานอยู่ห่างออกไป 3 กิโลเมตร	4-5
รูปที่ 4-6 ความคลาดเคลื่อนการคำนวณตำแหน่งแต่ละช่วงเวลาเมื่อสถานีฐานอยู่ห่างออกไป 6 กิโลเมตร	4-6
รูปที่ 4-7 ร้อยละความคลาดเคลื่อนในการคำนวณตำแหน่งเมื่อสถานีฐานอยู่ห่างออกไป 6 กิโลเมตร	4-7
รูปที่ 4-8 ระยะเอียงของสายอากาศด้วยมุม Roll	4-10
รูปที่ 4-9 ผลต่างของระยะเอียงของสายอากาศด้วยมุม Roll เทียบกับระยะเอียงตามสมการที่ 2.37	4-11
รูปที่ 4-10 ระยะเอียงของสายอากาศด้วยมุม Pitch	4-11
รูปที่ 4-11 ผลต่างของระยะเอียงของสายอากาศด้วยมุม Pitch เทียบกับระยะเอียงตามสมการที่ 2.37	4-12
รูปที่ 4-12 ระยะเอียงของสายอากาศด้วยมุม Yaw	4-12
รูปที่ 4-13 ผลต่างของระยะเอียงของสายอากาศด้วยมุม Yaw เทียบกับค่าศูนย์	4-13
รูปที่ 4-14 การติดตั้งอุปกรณ์บนรถทางเกษตรกรรม	4-14
รูปที่ 4-15 เส้นทางทดสอบของรถทางเกษตรกรรม	4-14
รูปที่ 4-16 ผลการทดสอบบนรถทางเกษตรกรรม	4-15
รูปที่ 4-17 ภาพเปรียบเทียบในการระบุตำแหน่งระหว่างระบบดั้งเดิม และใช้ค่าแก้จากสถานีฐาน	4-15
รูปที่ 4-18 การติดตั้งอุปกรณ์ต้นแบบกับรถทางเกษตรกรรม	4-17
รูปที่ 4-19 การแสดงตำแหน่งและเส้นทางเดินรถทางเกษตรกรรมของผู้ขับขี่	4-18

บทที่ 1

บทนำ

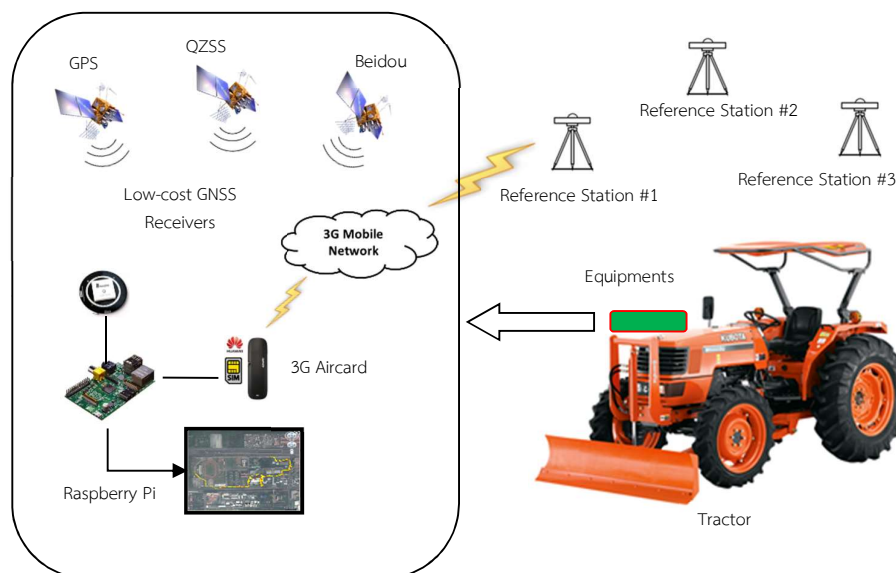
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงการ

การเพิ่มปริมาณผลผลิตและประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวอ้อยในปัจจุบันสามารถทำได้โดยใช้ระบบเกษตรกรรมความแม่นยำสูง (Precision Farming) ซึ่งอาศัยระบบตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS (Global Navigation Satellite System) หรือระบบ GPS (Global Positioning System) ที่รู้จักกันดีเข้ามาช่วยในกระบวนการผลิตอ้อยตั้งแต่ การจัดรูปแบบแปลงปลูก การปรับพื้นที่ การกำหนดแนวร่องปลูก การเก็บผลผลิต โดยจะอาศัยเครื่องรับ GNSS ที่ติดตั้งอยู่ที่รถไถและรถปลูกมาช่วยในการระบุตำแหน่งที่แม่นยำ แต่อย่างไรก็ตาม อุปกรณ์ดังกล่าวจำเป็นต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาสูง ทำให้การเพิ่มปริมาณผลผลิตและประสิทธิภาพในการเก็บเกี่ยวอ้อยสำหรับเกษตรกรผู้ปลูกอ้อยรายย่อยในประเทศไทยทำได้ยาก ด้วยเหตุนี้ทางคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะพัฒนาชุดระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียมความแม่นยำสูงที่มีราคาถูก เหมาะสมสำหรับเกษตรกรรายย่อยสามารถนำไปติดตั้งบนรถไถและรถปลูกได้ทันที เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของเกษตรกรผู้ปลูกอ้อยรายย่อยในประเทศไทย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

ในการพัฒนาชุดอุปกรณ์ระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียมความแม่นยำสูงราคาถูกสำหรับติดตั้งบนรถไถหรือรถปลูกสำหรับเกษตรกรผู้ปลูกอ้อยรายย่อยนั้นจะอาศัยเครื่องรับ GNSS ราคาถูกซึ่งจะมีประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งต่ำ ทำให้ โครงการวิจัยนี้จะทำการปรับปรุงประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งของเครื่องรับ GNSS ด้วยวิธีการระบุตำแหน่งแบบความแม่นยำสูงด้วยเทคนิค RTK (Real-Time Kinematic) ส่งผลให้อุปกรณ์ระบุตำแหน่งที่พัฒนาขึ้นมีความแม่นยำสูง โดยติดตั้งเป็นสถานีฐาน 3 ถึง 4 สถานี กระจายรอบๆ บริเวณแปลงปลูก ซึ่งข้อมูลการวัดเฟสคลื่นพาห์จะส่งผ่านเครือข่ายผู้ให้บริการ 3G เครื่องรับ GNSS ที่ติดตั้งอยู่บนรถไถหรือรถปลูกจะทำการรับค่าการวัดเฟสคลื่นพาห์จากทุกๆ สถานีฐาน เพื่อทำการประมาณค่าตำแหน่งด้วยวิธี RTK และตัดสินใจเลือกค่าตำแหน่งที่มีความแม่นยำมากที่สุด โดยจะแสดงผลผ่านทางจอภาพเพื่อเป็นข้อมูลในการบังคับรถไถหรือรถปลูก โดยมีความผิดพลาดในระดับประมาณ 30 เซนติเมตร นอกจากนี้มีการนำ gyro เข้ามาใช้งานร่วมด้วย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย



รูปที่ 1-1 โครงสร้างของระบบระบุตำแหน่ง RTK ราคาถูกเมื่อทำการติดตั้งบนรถไถ

ในส่วนระบบเครื่องรับที่ติดตั้งกับรถไถจะประกอบไปด้วยเครื่องรับ GNSS ราคาถูกที่เชื่อมต่อกับบอร์ดสมองกลฝังตัว Raspberry Pi ซึ่งได้มีการเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตผ่าน 3G Aircard เพื่อรับค่าการวัดเฟสคลื่นพาห์จากสถานีฐาน หลังจากนั้นจะทำการประมาณค่าตำแหน่งเครื่องรับและแสดงผลผ่านทางจอภาพเพื่อเป็นข้อมูลในการบังคับรถไถหรือรถปลูก นอกจากนี้จะมีการใช้งาน gyro ควบคู่ไปด้วย ในกรณีที่ดินผิวไม่สม่ำเสมอ

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. เพิ่มทางเลือกของอุปกรณ์เครื่องจักรกลเพื่อการเกษตร
2. พัฒนาความรู้ทางด้านการระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียมสำหรับการประยุกต์ใช้งานในการเกษตรความแม่นยำสูง
3. ส่งเสริมและสนับสนุนเกษตรกรและภาคอุตสาหกรรมการเพาะปลูกอ้อยในการนำเอาระบบเกษตรความแม่นยำสูงมาช่วยในการเพิ่มผลผลิตและลดเวลาในการเก็บเกี่ยว

บทที่ 2

ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS (Global Navigation Satellite System)

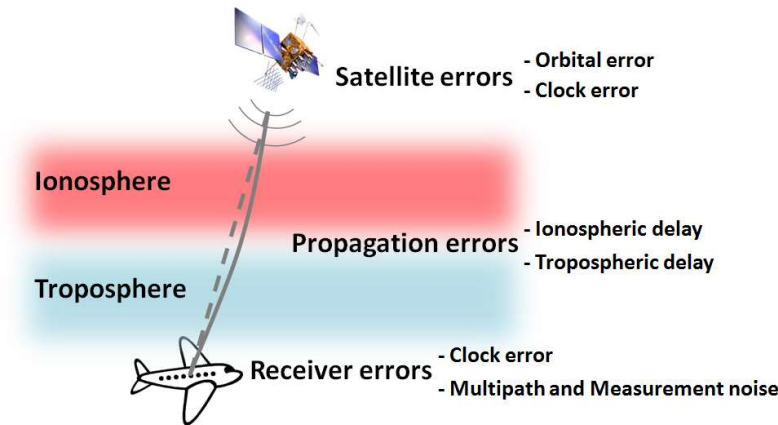
ในปัจจุบัน มีการประยุกต์ใช้งานระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS หรือระบบ GPS (Global Positioning System) โดยทั่วไป ที่รู้จักกันดีมาใช้งานในด้านเกษตรกรรมความแม่นยำสูง (Precision Farming) โดยหลักการทำงานของเครื่องรับ GNSS โดยทั่วไปนั้นจะทำการวัดระยะทางระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับ GNSS โดยวัดจากการเดินทางของสัญญาณจากดาวเทียมถึงเครื่องรับ โดยที่เครื่องรับจะทำการสร้างรหัสสัญญาณสุ่มเทียม (Pseudo Random Noise) ที่มีรูปแบบเดียวกันกับดาวเทียมที่กำลังรับสัญญาณ ซึ่งเวลาที่สัญญาณเดินทางจากดาวเทียมจนถึงเครื่องรับนั้นจะหาได้จากผลต่างเวลาที่รับสัญญาณกับเวลาในการส่งสัญญาณจากดาวเทียม โดยที่เวลาที่รับสัญญาณนั้นหาได้จากเวลาที่รหัสทั้งสอง (จากที่เครื่องรับสร้างขึ้นกับสัญญาณที่ส่งมาจากดาวเทียม) นั้นมีรูปแบบที่ตรงกัน โดยวิธีดังกล่าวจะเรียกว่าการทำอัตสหสัมพันธ์ (Auto-Correlation) ส่วนเวลาที่ส่งสัญญาณมาจากดาวเทียมนั้นสามารถหาได้จากข้อมูลที่อยู่ใน Navigation Message ที่ส่งมากับสัญญาณดาวเทียม หลังจากนั้นระยะทางจากเครื่องรับถึงดาวเทียมจะสามารถหาได้จากสมการที่ 1

$$\rho = c \times \Delta t \quad (1)$$

โดยที่ ρ คือระยะทางจากเครื่องรับถึงดาวเทียม (เมตร) c คือค่าความเร็วแสงในสุญญากาศ (299,792,458 เมตร/วินาที) และ Δt คือผลต่างเวลาที่รับสัญญาณกับเวลาในการส่งสัญญาณจากดาวเทียม (วินาที) ซึ่งการวัดระยะทางแบบดังกล่าวจะเรียกว่า "การวัดระยะทางเทียม" (pseudorange) สำหรับเครื่องรับ GNSS บางชนิด เช่น ที่ใช้งานในการทำรังวัดและการเกษตรกรรมความแม่นยำสูงนั้น จะสามารถทำการวัดระยะทางในอีกรูปแบบหนึ่งซึ่งจะมีความแม่นยำกว่าแบบการวัดระยะทางเทียม โดยจะอาศัยผลรวมการวัดผลต่างระหว่างเฟสของคลื่นพาห์ของสัญญาณ GPS กับสัญญาณที่สร้างขึ้นโดยเครื่องรับเอง โดยเรียกการวัดดังกล่าวว่า "การวัดเฟสคลื่นพาห์" (carrier phase) ซึ่งจะสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบสมการได้ดังนี้

$$\phi = \frac{\lambda}{2\pi}(\theta + N) \quad (2)$$

โดยที่ ϕ คือระยะทางจากเครื่องรับถึงดาวเทียม (เมตร) λ คือค่าความยาวคลื่นของสัญญาณ GNSS ที่ใช้ (ยกตัวอย่างเช่นในระบบ GPS นั้นจะมีค่าความยาวคลื่น 19.0 เซนติเมตรสำหรับความถี่ L1 (1,575.42 MHz) และ 24.4 เซนติเมตรสำหรับความถี่ L2 (1,227.60 MHz) เป็นต้น) θ คือค่าผลรวมการวัดผลต่างเฟสของคลื่นพาห์ของสัญญาณ GNSS และ N คือค่าเฟสเริ่มต้นซึ่งไม่ทราบค่า (Initial phase ambiguity) (เรเดียน) อย่างไรก็ตามพบว่ากระบวนการระบุตำแหน่งโดยเครื่องรับ GNSS นั้น ยังคงมีความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งอยู่ โดยสามารถจำแนกสาเหตุในการเกิดความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งได้ 3 สาเหตุหลักซึ่งแสดงดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 สาเหตุความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งของ GNSS

1). ค่าความผิดพลาดอันเนื่องมาจากดาวเทียม (Satellite Errors) ได้แก่ ความผิดพลาดในการคำนวณตำแหน่งของดาวเทียม (Orbital Error) และความคลาดเคลื่อนของสัญญาณนาฬิกาของดาวเทียม (Satellite Clock Error)

2). ค่าความผิดพลาดอันเนื่องมาจากสัญญาณเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศของโลก (Signal Propagation Errors) ได้แก่ ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์ ตามลำดับ

3). ค่าความผิดพลาดอันเนื่องมาจากเครื่องรับ GPS (Receiver Errors) ได้แก่ ความคลาดเคลื่อนของสัญญาณนาฬิกาของเครื่องรับ รวมไปถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดจากปรากฏการณ์ multipath เป็นต้น

โดยจะสามารถเขียนสมการการวัดระยะทางเทียมและเฟสคลื่นพาห์รวมกับผลของความผิดพลาดต่างๆ ได้ดังนี้

$$\rho_i^k = R^k + c(\Delta t - \Delta T^k) + I_i^k + T^k + \varepsilon_{\rho_i}^k \quad (3)$$

และ

$$\phi_i^k = R^k + c(\Delta t - \Delta T^k) - I_i^k + T^k + \lambda_i N_i^k + \varepsilon_{\phi_i}^k \quad (4)$$

โดยที่ ρ_i^k และ ϕ_i^k คือการวัดระยะทางเทียมและเฟสคลื่นพาห์ของความถี่ i จากดาวเทียมดวงที่ k (เมตร)

R^k คือระยะทางจริงจากดาวเทียม k ถึงเครื่องรับ (เมตร)

Δt คือความคลาดเคลื่อนของสัญญาณนาฬิกาเครื่องรับ (วินาที)

ΔT^k คือความคลาดเคลื่อนของสัญญาณนาฬิกาดาวเทียม k (วินาที)

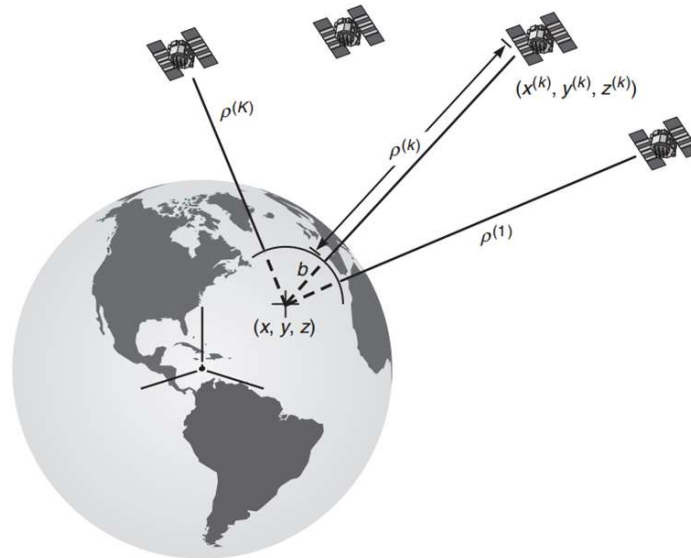
I_i^k คือค่าความผิดพลาดอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ (เมตร)

T^k คือค่าความผิดพลาดอันเนื่องมาจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (เมตร)

$\varepsilon_{\rho_i}^k$ และ $\varepsilon_{\phi_i}^k$ คือค่าความผิดพลาดอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนที่เกิดจากปรากฏการณ์ multipath และอื่นๆ ของการวัดระยะทางเทียมและเฟสคลื่นพาห์ของความถี่ i จากดาวเทียมดวงที่ k (เมตร)

ในการคำนวณหาตำแหน่งของเครื่องรับ GNSS โดยทั่วไป (ชนิดความถี่เดียว) นั้นจะใช้หลักการสามเหลี่ยมระยะ (Trilateration) ซึ่งเป็นวิธีการระบุพิกัดจากจุดตัดของรูปทรงเรขาคณิต โดยจะต้องทราบข้อมูลพิกัดของจุดอ้างอิงและระยะทางจากจุดอ้างอิงถึงพิกัดที่ต้องการจะหา โดยรูปที่ 2 จะแสดงถึงหลักการระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม GNSS โดยที่ (x, y, z) คือตำแหน่งพิกัดของเครื่องรับที่ต้องการหาและ $(x^{(k)}, y^{(k)}, z^{(k)})$ คือค่าตำแหน่งพิกัดของดาวเทียมดวงที่ (k) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากข้อมูล Ephemeris ที่ส่งมาใน Navigation Message (ตำแหน่งพิกัดจะอ้างอิงอยู่ในรูปแบบ ECEF (Earth-Centered, Earth-Fixed)) โดยจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างค่าการวัดระยะทางเทียมที่วัดได้จากเครื่องรับและตำแหน่งพิกัดของเครื่องรับ GNSS (เมื่อไม่ได้พิจารณาค่าความผิดพลาดอื่นๆ) ได้ดังนี้

$$\rho_c^{(k)} = \sqrt{(x^{(k)} - x)^2 + (y^{(k)} - y)^2 + (z^{(k)} - z)^2} + b \quad (5)$$



รูปที่ 2-2 หลักการระบุตำแหน่งโดยใช้ดาวเทียม GNSS

โดยที่ $\rho_c^{(k)}$ คือค่าการวัดระยะทางเทียมที่วัดได้จากดาวเทียม GNSS (ดวงที่ $k = 1, 2, 3, \dots, N$) (เมตร) (x, y, z) คือตำแหน่งพิกัดของเครื่องรับที่ต้องการหาค่าและ b คือค่าไบอัสที่เกิดจากสัญญาณนาฬิกาที่เกิดจากเครื่องรับ (เมตร) (เนื่องจากสัญญาณนาฬิกาของเครื่องรับ GNSS ส่วนใหญ่นั้นได้มาจากวงจรกำเนิดสัญญาณจากผลึกควอตซ์ (Quartz Oscillator) เนื่องจากมีราคาถูก ซึ่งจะมีค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าความถี่จริงอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ) จะสังเกตได้ว่าจากสมการที่ (5) นั้นจะมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าอยู่ทั้งหมด 4 ตัว ได้แก่ (x, y, z) และ b โดยในการหาค่าตัวแปรดังกล่าวนี้ จำเป็นต้องการค่าวัดระยะทางเทียมที่วัดจากดาวเทียม GNSS อย่างน้อย 4 ดวงขึ้นไป (4 ตัวแปรไม่ทราบค่า 4 สมการ) แต่เนื่องจากสมการที่ (5) นั้นเป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งในการแก้สมการนั้นจะนิยมใช้วิธีของ Newton-Raphson โดยจะทำการประมาณค่าสมการให้เป็นสมการเชิงเส้นโดยใช้อนุกรม Taylor ซึ่งจะกำหนดค่าตัวแปรเริ่มต้นที่เหมาะสม (initial guess) ให้กับเครื่องรับ GNSS หลังจากนั้นระบบจะทำการวนหาคำตอบซ้ำ (Iteration) ซึ่งคำตอบของ

สมการนั้นจะใส่ค่าจริงของตัวแปรเมื่อเวลาผ่านไป โดยการประมาณค่าของอนุกรม Taylor นั้นสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 6 ดังนี้

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x - x_0)^2 + \dots \quad (6)$$

โดยที่ $f(x)$ คือฟังก์ชันที่ไม่เป็นเชิงเส้นใดๆ และ x_0 คือค่าเริ่มต้นที่เหมาะสม โดยสามารถประมาณค่าของฟังก์ชันได้โดยทำการพิจารณาค่าของผลรวมถึงแค่อนุพันธ์อันดับที่หนึ่งจะได้ว่า

$$f(x) \approx f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) \quad (7)$$

โดยเมื่อทำการประมาณค่าในสมการที่ 2.5 จะได้ว่า

$$\rho_c^{(k)}(x_1, y_1, z_1, b_1) = \rho_c^{(k)}(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y, z_0 + \Delta z, b_0 + \Delta b) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \rho_c^{(k)}(x_1, y_1, z_1, b_1) = & \rho_c^{(k)}(x_0, y_0, z_0, b_0) + \frac{\partial \rho_c^{(k)}(x_0, y_0, z_0, b_0)}{\partial x_0} \Delta x + \frac{\partial \rho_c^{(k)}(x_0, y_0, z_0, b_0)}{\partial y_0} \Delta y \\ & + \frac{\partial \rho_c^{(k)}(x_0, y_0, z_0, b_0)}{\partial z_0} \Delta z + \frac{\partial \rho_c^{(k)}(x_0, y_0, z_0, b_0)}{\partial b_0} \Delta b \\ & + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 \rho_c^{(k)}(x_0, y_0, z_0)}{\partial x_0^2} \Delta x^2 + \dots \end{aligned} \quad (9)$$

$$\rho_c^{(k)}(x_1, y_1, z_1, b_1) \approx \rho_0^{(k)} - \frac{x^{(k)} - x_0}{\rho_0^{(k)}} \Delta x - \frac{y^{(k)} - y_0}{\rho_0^{(k)}} \Delta y - \frac{z^{(k)} - z_0}{\rho_0^{(k)}} \Delta z + \Delta b \quad (10)$$

โดยที่ค่า (x_0, y_0, z_0, b_0) คือค่าเริ่มต้นที่เหมาะสมของพิกัดและไบอัสที่เกิดจากสัญญาณนาฬิกาของเครื่องรับและ $\rho_0^{(k)}$ จะมีค่าเท่ากับ $\sqrt{(x^{(k)} - x_0)^2 + (y^{(k)} - y_0)^2 + (z^{(k)} - z_0)^2} + b_0$ ซึ่งในกรณีที่รับสัญญาณดาวเทียมได้มากกว่าหนึ่งดวงนั้นจะสามารถเขียนอยู่ในรูปแบบเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\delta \mathbf{p} = \begin{bmatrix} \rho_c^1 - \rho_0^1 \\ \rho_c^2 - \rho_0^2 \\ \mathbf{M} \\ \rho_c^k - \rho_0^k \end{bmatrix} = \mathbf{G} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta b \end{bmatrix} \quad (11)$$

โดยที่เมทริกซ์ $\mathbf{G}$ จะมีค่าดังนี้

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -\frac{x^1 - x_0}{\rho_0^1} & -\frac{y^1 - y_0}{\rho_0^1} & -\frac{z^1 - z_0}{\rho_0^1} & 1 \\ -\frac{x^2 - x_0}{\rho_0^2} & -\frac{y^2 - y_0}{\rho_0^2} & -\frac{z^2 - z_0}{\rho_0^2} & 1 \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{M} \\ -\frac{x^k - x_0}{\rho_0^k} & -\frac{y^k - y_0}{\rho_0^k} & -\frac{z^k - z_0}{\rho_0^k} & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

สำหรับในกรณีที่ค่าวัดระยะทางเทียมที่วัดจากดาวเทียมมากกว่า 4 ดวงนั้น จะใช้การหาคำตอบแบบวิธีการกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก (Weighted Least Squares) ในการคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของตัวแปรจะได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta b \end{bmatrix} = (\mathbf{G}^T \mathbf{W} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W} \delta \mathbf{p} \quad (13)$$

โดยเพื่อความง่ายจะนิยามให้

$$\mathbf{S} \equiv (\mathbf{G}^T \mathbf{W} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W} \quad (14)$$

โดยที่ $\mathbf{S}$ จะเรียกว่าเมทริกซ์โปรเจกชัน (Projection Matrix) ซึ่งเป็นเมทริกซ์ที่นำไปคูณกับระยะทางเทียม แล้วได้เป็นค่าพิกัดและไบอัสที่เกิดจากสัญญาณนาฬิกาของเครื่องรับ GPS แต่เนื่องจากค่าระยะทางเทียมที่วัดได้จากเครื่องรับ GPS นั้นยังมีความผิดพลาดหลงเหลืออยู่ จึงจำเป็นต้องมีการถ่วงน้ำหนักค่าระยะทางเทียมที่วัดได้ โดยสมมติให้ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับดาวเทียมแต่ละดวงนั้นไม่มีความสัมพันธ์กัน (uncorrelated) และมีลักษณะการกระจายตัวเป็นแบบเกาส์ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์โดยที่เมทริกซ์ $\mathbf{W}$ คือเมทริกซ์ถ่วงน้ำหนักซึ่งจะมีค่าดังนี้

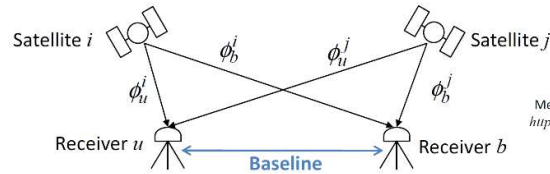
$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & 0 & \mathbf{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_2^2} & \mathbf{L} & 0 \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sigma_k^2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

โดยที่ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานนั้นจะขึ้นอยู่กับแบบจำลองของความผิดพลาดต่างๆ ซึ่งเรียกค่าความผิดพลาดในการวัดระยะทางเทียมว่า User range error (URE) ในกรณีสำหรับเครื่องรับ GPS ชนิดความถี่เดียว (L1) นั้น ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ URE จะมีค่าประมาณ 6 เมตร โดยจะเห็นได้ว่าการประมาณค่า

พิกัดของเครื่องรับ GPS นั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยสองอย่างได้แก่ ค่าข้อมูลการวัดระยะทางเทียมและเมทริกซ์โปรเจกชัน (S) โดยที่ค่าของเมทริกซ์โปรเจกชันนั้นจะขึ้นอยู่กับจำนวนดาวเทียมและการกระจายตัวของดาวเทียมบนท้องฟ้า ซึ่งสำหรับความผิดพลาดในการคาดคะเนค่าตำแหน่งดาวเทียมจากข้อมูล Ephemeris นั้นจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 2 เมตร (rms) โดยที่ความผิดพลาดของการประมาณค่าพิกัดของเครื่องรับ GPS นั้นจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของข้อมูลการวัดระยะทางเทียมเป็นส่วนใหญ่

2.2 เทคนิคการระบุตำแหน่งแบบ RTK (Real-Time Kinematic)

จากหัวข้อที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าเครื่องรับ GNSS ที่ใช้งานกันโดยทั่วไปนั้นยังคงมีความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งอยู่ โดยที่ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งจะมีค่าประมาณ 3 เมตร (rms) ในแนวราบและ 5 เมตร (rms) ในแนวตั้ง (ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่ จำนวนดาวเทียมที่รับสัญญาณได้ การกระจายตัวของดาวเทียมในท้องฟ้า การรบกวนของปรากฏการณ์ multipath และประสิทธิภาพในการลดสัญญาณรบกวนของเครื่องรับ เป็นต้น) วิธีการหนึ่งที่ยอมรับใช้ในการเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งคือวิธีการ RTK (Real-Time Kinematic) โดยจะอาศัยสถานีฐาน (Base Station) ในการช่วยแก้ไขค่าความผิดพลาดอันเนื่องมาจากสัญญาณเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศของโลก โดยจะอาศัยการวัดเฟสคลื่นพาห์ซึ่งจะมีความแม่นยำกว่าการวัดระยะทางเทียมมาใช้ในการคำนวณตำแหน่งของเครื่องรับ โดยหลักการทำงานของวิธี RTK จะแสดงอยู่ในรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 หลักการทำงานของวิธีการระบุตำแหน่งแบบ RTK

ซึ่งในการคำนวณตำแหน่งของเครื่องรับจะอาศัยผลต่างของการวัดระยะทางของคู่ดาวเทียม (Double Difference) โดยเมื่อใช้การวัดเฟสคลื่นพาห์จะได้ว่า

$$\phi_{ub}^{ij} = (\phi_u^i - \phi_b^i) - (\phi_u^j - \phi_b^j) \quad (16)$$

$$\phi_{ub}^{ij} = R_{ub}^{ij} + c(\Delta t_{ub}^{ij} - \Delta T_{ub}^{ij}) - I_{ub}^{ij} + T_{ub}^{ij} + \lambda N_{ub}^{ij} + \varepsilon_\phi \quad (17)$$

ซึ่งในกรณีที่ระยะห่างระหว่างสถานีฐานกับเครื่องรับอยู่ไม่ไกลจากกันจะพบว่าค่าดีเลย์ในเชิงระยะทางที่เกิดจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์และโทรโพสเฟียร์ทั้งสองจุดนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้ผลกระทบดังกล่าวออกไปจากสมการการคำนวณหาตำแหน่งได้ นอกจากนี้ค่าความคลาดเคลื่อนของสัญญาณนาฬิกาของดาวเทียมและเครื่องรับก็จะถูกหักล้างไปด้วยเช่นเดียวกัน โดยในสมการที่ 17 จะสามารถประมาณค่าได้ดังนี้

$$\phi_{ub}^{ij} \approx R_{ub}^{ij} + \lambda N_{ub}^{ij} + \varepsilon_\phi \quad (18)$$

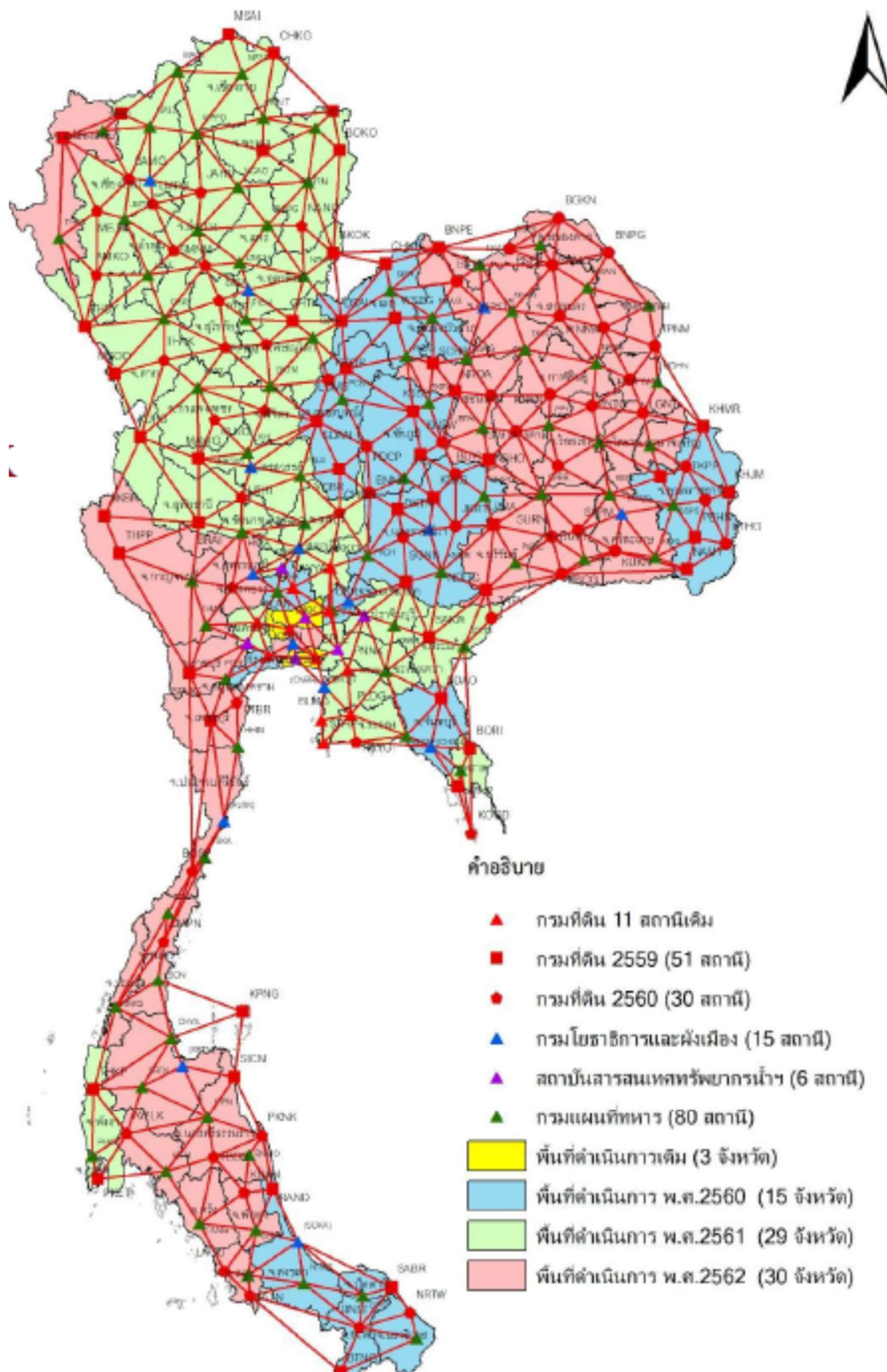
โดยในการประมาณค่าตำแหน่งของเครื่องรับนั้นจะใช้วิธีการเหมือนกับในหัวข้อ 10.1 ซึ่งค่าผลต่างเฟสเริ่มต้น (N_{ub}^j) ที่ประมาณค่าได้จากวิธีการกำลังสองน้อยที่สุดแบบถ่วงน้ำหนักนั้นจะมีค่าเป็นจำนวนจริง (ซึ่งในความเป็นจริงจะมีค่าเป็นจำนวนเต็ม) โดยในการประมาณค่าผลต่างเฟสเริ่มต้นในกรณีมีสมมติฐานว่าเป็นจำนวนเต็มนั้นจะอาศัยวิธีการ LAMBDA (Least-Square Ambiguity Decorrelation Adjustment) ซึ่งค่าผลต่างเฟสเริ่มต้นที่หาได้นั้นจะถูกนำมาใช้ในการปรับปรุงค่าตำแหน่งของเครื่องรับอีกครั้ง เพื่อให้คำตอบของสมการนั้นสอดคล้องกับความเป็นจริง โดยที่ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK นั้นจะอยู่ที่ระดับเซนติเมตร (rms) ในแนวราบ (ความแม่นยำจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างสถานีฐานกับเครื่องรับ) ด้วยเหตุนี้เทคนิคการระบุตำแหน่งแบบ RTK จึงได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น การสำรวจรังวัด การศึกษาการเคลื่อนตัวของเปลือกโลก การเกษตรความแม่นยำสูง เป็นต้น โดยในทางปฏิบัตินั้นข้อมูลการวัดเฟสคลื่นพาห์ของสถานีฐานจะถูกส่งไปยังเครื่องรับผ่านระบบสื่อสารต่างๆ เช่น คลื่นวิทยุ โมเด็ม อินเทอร์เน็ต เป็นต้น



รูปที่ 2-4 การใช้งานระบบ RTK ในทางปฏิบัติ

2.3 การประยุกต์ใช้งานการระบุตำแหน่งแบบ RTK สำหรับการเกษตรแม่นยำสูงในประเทศไทย

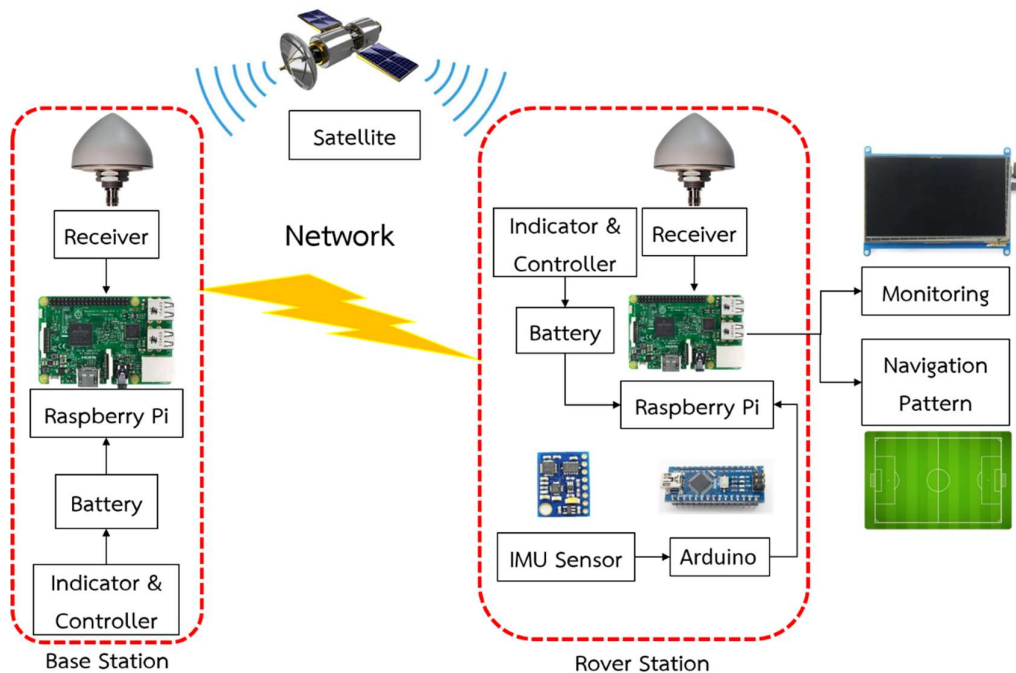
สำหรับประเทศไทยนั้นได้มีการติดตั้งสถานีฐานที่รองรับการใช้งานการระบุตำแหน่งแบบ RTK โดยกรมโยธาธิการและผังเมือง ซึ่งในปัจจุบันจะมีอยู่ทั้งหมด 15 สถานีใน 15 จังหวัดดังรูปที่ 2-5 เนื่องจากประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งแบบ RTK นั้นจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างสถานีฐานกับเครื่องรับ ซึ่งสถานีฐานที่ติดตั้งโดยกรมโยธาธิการและผังเมืองอาจจะยังไม่ครอบคลุมการประยุกต์ใช้งานในพื้นที่การเกษตร (ระยะห่างระหว่างสถานีฐานกับเครื่องรับควรมีค่าไม่เกิน 20 กิโลเมตร) โดยในทางปฏิบัตินั้นยังจำเป็นที่จะต้องมีการติดตั้งสถานีฐานขึ้นมาใหม่ในบริเวณที่ต้องการใช้งานการระบุตำแหน่งแบบ RTK ซึ่งราคาชุดเครื่องรับ GNSS พร้อมใช้งาน (สถานีฐานและเครื่องลูกข่าย) จะมีราคาอยู่ที่ประมาณหนึ่งล้านบาท และในกรณีที่มีการติดตั้งมากับรถไถหรือรถปลูกพร้อมใช้งานก็จะมีราคาหลายล้านบาท ทำให้การประยุกต์ใช้งานด้านการเกษตรแม่นยำสูงนั้นจำกัดอยู่แค่ในแวดวงบริษัทเกษตรรายใหญ่ๆ ด้วยเหตุนี้ทางคณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะพัฒนาระบบระบุตำแหน่งที่มีราคาถูกเหมาะสมสำหรับเกษตรกรรายย่อยสำหรับการประยุกต์ใช้งานสำหรับการเกษตรความแม่นยำสูง โดยจะสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้งานในกระบวนการผลิตอ้อยเนื่องจากเป็นพืชเศรษฐกิจที่ต้องใช้พื้นที่ในการเพาะปลูกจำนวนมาก



รูปที่ 2-5 สถานีฐานสำหรับใช้งานการระบุตำแหน่งแบบ RTK ในประเทศไทย

บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย

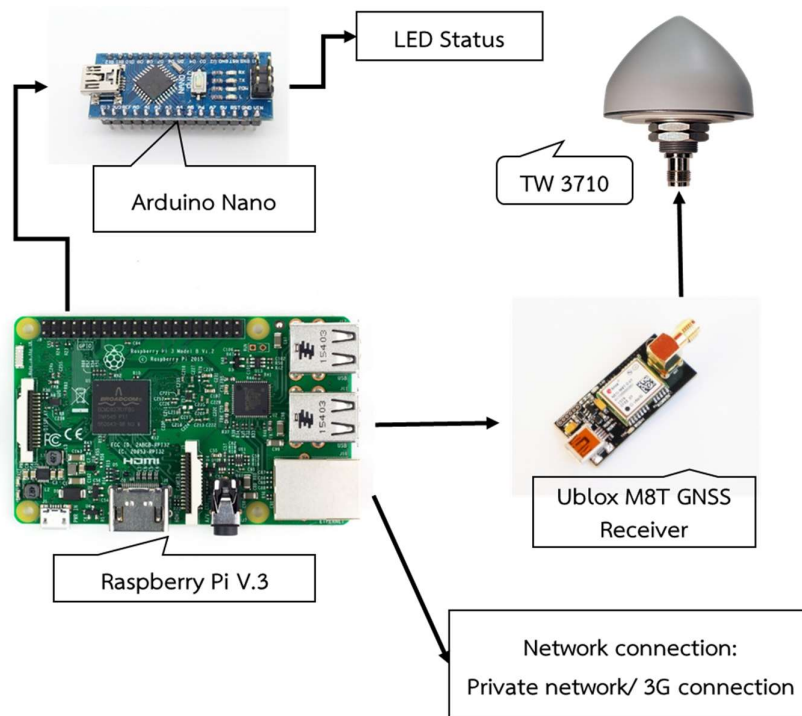
3.1 การออกแบบอุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียม



รูปที่ 3-1 บล็อกไดอะแกรมแสดงภาพรวมของระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียมด้วยเทคนิค RTK

ในโครงการนี้จะใช้การระบุตำแหน่งจากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสเพื่อการเฝ้าสังเกตและติดตามตำแหน่งของสถานีจรวด (Rover) ให้มีความแม่นยำ เพื่อสร้างรูปแบบแนวการทำเกษตรกรรมบนแปลงเพาะปลูก (Navigation Pattern) โดยใช้เทคนิค RTK (Real Time Kinematic) มีหลักการคือสถานีฐาน (Base Station หรือ Base) และ Rover ต้องตั้งอยู่ในพื้นที่ที่สามารถมองเห็นดาวเทียมดวงเดียวกันได้ และมีการเชื่อมต่อกันผ่านโครงข่ายส่วนตัว (Network) เพื่อส่งค่าแก่จากสถานีฐานไปยังสถานีจรวดให้ประมวลผลหาพิกัดของตนเองด้วย Raspberry Pi นอกจากนี้ใน Rover ยังมี IMU (Inertial Measurement Unit) ช่วยวัดความเอียงของสายอากาศที่ใช้รับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส เพื่อหาระยะที่เกิดจากการเอียงดังกล่าว แล้วนำไปลดความผิดพลาดพิกัดสายอากาศขณะออกสำรวจในภูมิประเทศจริง และเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานจึงมีระบบการเฝ้าสังเกตแบบหน้าจอในการเฝ้าสังเกต และติดตามสถานีจรวด

อุปกรณ์ที่ติดตั้งอยู่ในทั้งสถานีฐานและสถานีจรวดในโครงการนี้จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ Raspberry Pi, Arduino nano, Ublox M8T GNSS และ TW 3710 ซึ่งมีการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ไว้ดังรูปที่ 3-2 การใช้งาน Raspberry Pi ให้สามารถระบุตำแหน่งด้วยวิธี RTK จะประกอบไปด้วย 6 ส่วนหลักได้แก่ 1.โปรแกรมประมวลผล RTK 2.โปรแกรม RTKLIB 3.อุปกรณ์รับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส 4.ระบบเครือข่าย 5.เซ็นเซอร์ GY-85 และ 6. Rotation matrix โดยมีรายละเอียดของแต่ละองค์ประกอบดังนี้



รูปที่ 3-2 แผนภาพการเชื่อมต่อ Raspberry pi กับอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

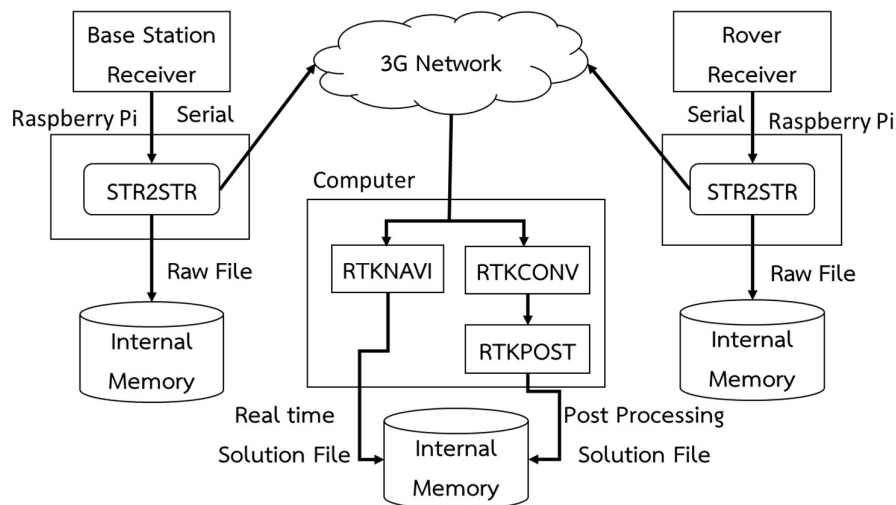
3.1.1 โปรแกรมประมวลผล RTK

สำหรับโปรแกรมประมวลผล RTK จะถูกติดตั้งในอุปกรณ์ Raspberry Pi (รูปที่ 1) ในโครงการนี้เลือกใช้โปรแกรมโอเพนซอร์ส (Open source) ที่เปิดเผยต่อสาธารณะขององค์กร Research and Development of Precise Positioning Technology by Global Navigation Satellite System ตัวโปรแกรมมีชื่อว่า RTKLIB สามารถใช้งานได้ 2 ลักษณะ ได้แก่ แบบที่ 1 เป็นโปรแกรมที่สามารถใช้งานได้ผ่านส่วนต่อประสานกราฟิกกับผู้ใช้ หรือ Graphic user interface (GUI) และแบบที่ 2 เป็นการใช้งานโปรแกรมผ่านส่วนต่ออักขระกับผู้ใช้ หรือ Character user interface (CUI) สำหรับโครงการนี้ได้ใช้โปรแกรม RTK ในแบบ CUI ซึ่งง่ายต่อการเขียนโปรแกรมควบคุมการใช้งานทั้งอัตโนมัติและควบคุมการทำงานได้ทั้งหมด

โปรแกรมน้อยในโปรแกรม RTKLIB ประกอบไปด้วยโปรแกรมน้อยจำนวน 2 โปรแกรม ได้แก่ โปรแกรมย่อย STR2STR ใช้สำหรับรับสัญญาณดาวเทียมเพื่อแปลงให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลไบนารีและเก็บเป็นไฟล์ไว้สำหรับประมวลผลในภายหลัง และยังสามารถส่งสัญญาณดาวเทียมเพื่อประมวลผลตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK แบบเรียลไทม์ โปรแกรมย่อยอีกหนึ่งตัว คือ โปรแกรม RTKRCV ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับการประมวลผลตำแหน่งด้วยวิธี RTK การทำงานของโปรแกรมจะเริ่มจากรับข้อมูลไบนารีจากเครื่องรับหรือรับข้อมูลไบนารีจากสถานีฐานเพื่อคำนวณค่าแก้ ตำแหน่งพิกัดที่คำนวณได้จากโปรแกรมจะสามารถเก็บเป็นไฟล์และยังแสดงผลไปยังผู้ใช้งาน

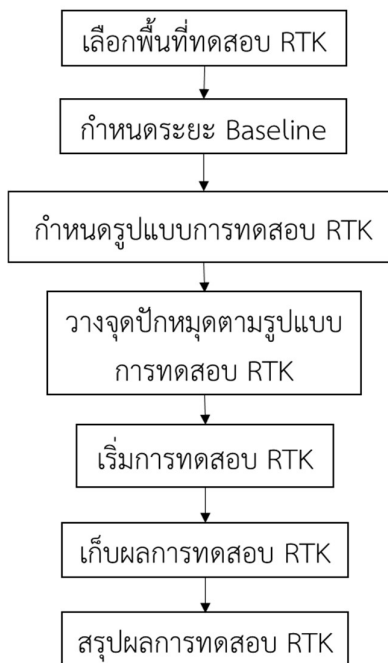
3.1.2 การคำนวณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK โดยใช้โปรแกรม RTKLIB

ในโครงการนี้จะใช้โปรแกรม RTKNAVI โปรแกรม STR2STR โปรแกรม RTKCONV และโปรแกรม RTKPOST ซึ่งเป็นโปรแกรมน้อยในโปรแกรม RTKLIB โดยการใช้งานแต่ละโปรแกรมเพื่อการคำนวณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK สามารถแสดงรูปแบบการทำงานได้ดังรูปที่ 3-3



รูปที่ 3-3 การใช้งานโปรแกรม RTKLIB ในการคำนวณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK

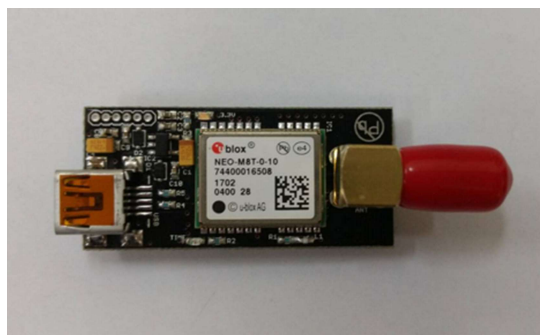
การคำนวณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK จะใช้ต้องสั่งโปรแกรม STR2STR ใน Raspberry Pi ของสถานีฐานและสถานีจั่นทำงาน เพื่อส่งข้อมูลดิบที่ได้รับจากเครื่องรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสไปยังเครือข่าย 3G โดยส่งไปครั้งละ 1 วินาที จากนั้นจึงให้คอมพิวเตอร์เชื่อมต่อกับเครือข่าย 3G ให้ดึงข้อมูลดังกล่าวมาประมวลผลในโปรแกรม RTKNAVI เพื่อดูผลการคำนวณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK ในคอมพิวเตอร์แบบเวลาจริง โดยดึงมาในอัตราที่เท่ากับสถานีฐานส่งมา และสามารถบันทึกผลการทดสอบไว้ในที่จัดเก็บภายในตัวเครื่องได้ หากต้องการจำลองการคำนวณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK ในภายหลังเพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อความแม่นยำในการคำนวณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK สามารถใช้โปรแกรม RTKCONV เพื่อแปลงข้อมูลดิบจากโปรแกรม STR2STR ให้ได้รูปแบบที่เหมาะสม จากนั้นจึงเรียกใช้งานโปรแกรม RTKPOST มาประมวลผลข้อมูลที่แปลงรูปแบบแล้วไปวิเคราะห์ผลต่อไป โดยมีขั้นตอนในการคำนวณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK แสดงได้ดังรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-4 ขั้นตอนการทดสอบระยะ Baseline ที่มีผลต่อความแม่นยำในการทำ RTK

3.1.3 อุปกรณ์รับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส

ในการใช้งานระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียมราคาถูกลงนั้น จะใช้ Ublox NEO M8T GNSS Receiver ซึ่งเป็นอุปกรณ์รับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส แสดงดังรูปที่ 3-5 ร่วมกับสายอากาศ TW 3710 ซึ่งเป็นสายอากาศที่มีประสิทธิภาพในการดักสัญญาณรบกวนประเภทสัญญาณพหุวิถีและมีอัตราการขยายสูงดังรูปที่ 3-6 มาช่วยในการรับสัญญาณจากดาวเทียม



รูปที่ 3-5 อุปกรณ์รับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส Ublox NEO M8T GNSS Receiver



รูปที่ 3-6 สายอากาศ TW 3710

3.1.4 ระบบการสื่อสารผ่านเครือข่ายโทรศัพท์

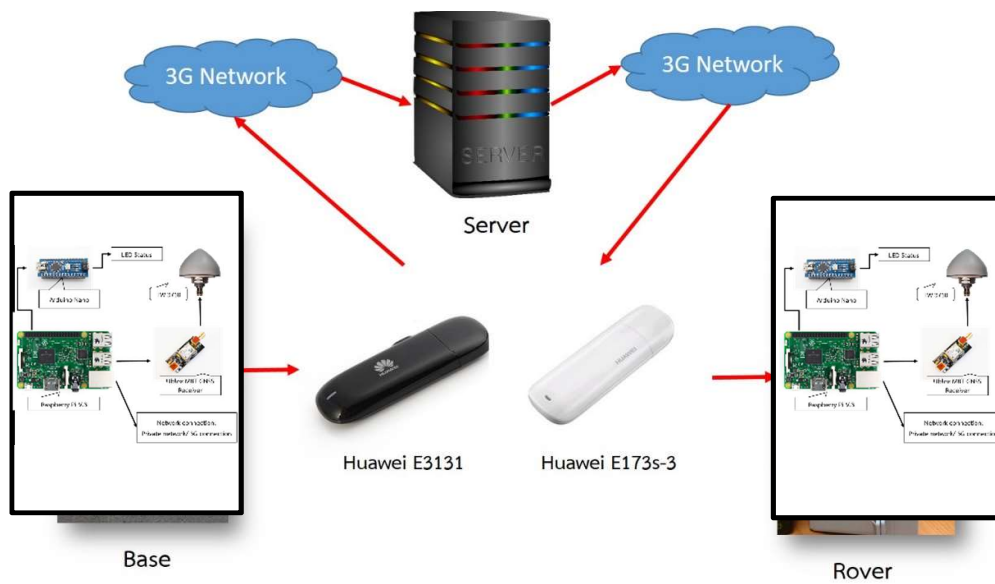
ในการสื่อสารรูปแบบนี้ จะใช้อุปกรณ์ Huawei E3131 และ Huawei E173s-3 ดังรูปที่ 3-7 และรูปที่ 3-8 กับสถานีฐานและสถานีจลน์ตามลำดับในการสื่อสาร โดยจะมีแผนการสื่อสารดังรูปที่ 3-9



รูปที่ 3-7 อุปกรณ์ Huawei E3131



รูปที่ 3-8 อุปกรณ์ Huawei E173s-3



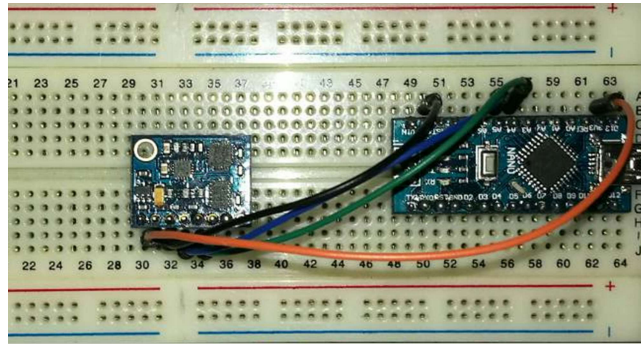
รูปที่ 3-9 แผนการสื่อสารระหว่างสถานีฐานกับสถานีจลน์ผ่านเครือข่าย 3G

จากรูปจะเห็นได้ว่าการเชื่อมต่อระบบผ่านเครือข่ายระหว่างสถานีฐานและสถานีจลน์จำเป็นต้องมี server กลาง เนื่องจากการใช้งาน RTK จำเป็นที่จะต้องส่งข้อมูลจากสถานีฐานไปยังสถานีจลน์ และเมื่อทั้งคู่เชื่อมต่อผ่านเครือข่าย 3G พบว่าไม่สามารถยืนยันที่อยู่ผ่านทางไอพีจริงแบบสาธารณะได้ (Public IP) จึงไม่สามารถเชื่อมต่อเพื่อส่งข้อมูลจากเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสได้โดยตรง

ปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยมี เซิร์ฟเวอร์กลางที่มีที่อยู่ไอพีจริง ตั้งอยู่ที่ใดก็ได้ โดยทำการรับค่าจากสถานีฐานและให้สถานีจันมาเชื่อมต่อ เพื่อรับค่าสำหรับการประมวลผล RTK จึงจะสามารถใช้งานได้ สำหรับโปรแกรมที่ใช้ติดตั้งใน server กลางจะใช้โปรแกรม STR2STR ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางในการรับค่าจากสถานีฐาน และส่งออกไปที่สถานีจัน

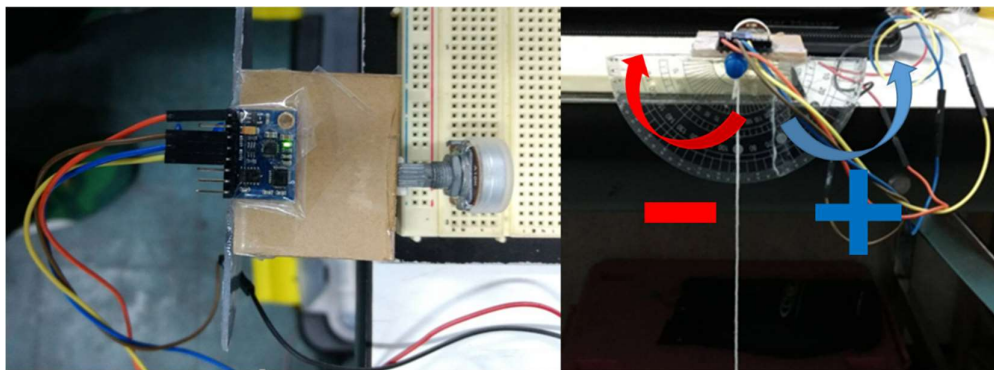
3.1.5 การอ่านค่ามุมที่แสดงการเคลื่อนที่ของวัตถุโดยใช้ IMU เซ็นเซอร์ รุ่น GY-85

ในการอ่านค่ามุม Roll Pitch และ Yaw ให้ต่อ Arduino ซึ่งเป็นหน่วยประมวลผลเข้ากับ เซ็นเซอร์ รุ่น GY-85 ดังรูปที่ 3-10



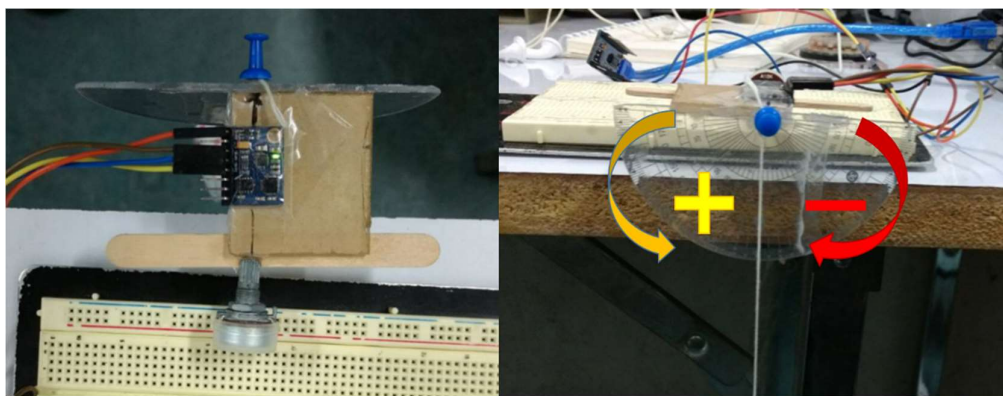
รูปที่ 3-10 การต่อเซ็นเซอร์ รุ่น GY-85 เพื่อส่งข้อมูลให้ Raspberry Pi

จากรูปที่ 3-10 เป็นการต่อ Arduino เข้ากับ เซ็นเซอร์ รุ่น GY-85 ลงบนบอร์ด และส่งค่าที่อ่านได้ไปยังบอร์ดประมวลผล Raspberry pi จากนั้นอัปโหลดโปรแกรม Total_Sensor.ino แล้วทำการวัดมุม Roll Pitch และ Yaw ตามรูปที่ 3-11 ถึงรูปที่ 3-13



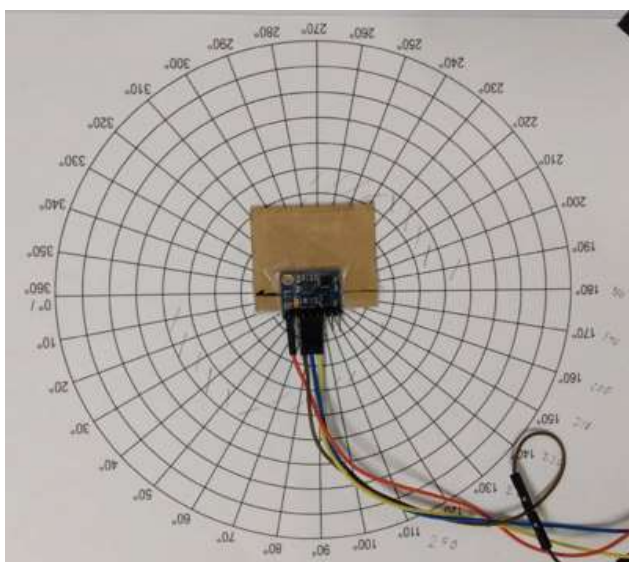
รูปที่ 3-11 การวัดมุม Roll โดยการวัดรอบแกน X ของเซ็นเซอร์ รุ่น GY-85

จากรูปที่ 3-11 ในการวัดมุม Roll จะวัดเทียบกับมุมไม้ครึ่งวงกลมโดยใช้ด้ายที่ถูกถ่วงน้ำหนักในการเล็งมุม วิธีการวัด ให้ปรับมุมการวาง เซ็นเซอร์ รุ่น GY-85 จนได้มุมที่ต้องการ จากนั้นจึงทำการบันทึกค่ามุม Roll ที่อ่านได้ แล้วหาค่าความผิดพลาดในการอ่านค่ามุม



รูปที่ 3-12 การวัดมุม Pitch โดยการวัดรอบแกน Y ของเซ็นเซอร์ รุ่น GY-85

จากรูปที่ 3-12 ในการวัดมุม Pitch จะวัดเทียบกับมุมไม้เครื่องวงกลมโดยใช้ด้ายที่ถูกถ่วงน้ำหนักในการเล็งมุม วิธีการวัด ให้ปรับมุมการวางเซ็นเซอร์ รุ่น GY-85 จนได้มุมที่ต้องการ จากนั้นจึงทำการบันทึกค่ามุม Pitch ที่อ่านได้ แล้วหาค่าความผิดพลาดในการอ่านค่ามุม Pitch



รูปที่ 3-13 การวัดมุม Yaw โดยการวัดรอบแกน Z ของเซ็นเซอร์ รุ่น GY-85

จากรูปที่ 3-13 ในการวัดมุม Yaw เป็นการวัดทิศ โดยใช้กระดาษวัดทิศวางบนโต๊ะราบแล้ววัดให้มุม 0° ของแผ่นกระดาษชี้ไปทิศเหนือจริง โดยการวัดด้วยเข็มทิศแม่เหล็กจริงก่อน จากนั้นจึงปรับมุม Yaw ในทิศตามเข็มนาฬิกาไปทีละ 10° จนถึงมุม 350° แล้วบันทึกค่าจนครบแล้วหาค่าความผิดพลาดในการวัดมุม Yaw

3.1.6 การเก็บพิกัดจากโปรแกรม RTKRCV ไปคำนวณใน Rotation Matrix

กรณีที่ต้องการให้ Raspberry Pi เป็นตัวประมวลผลการคำนวณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK จะมีโปรแกรม RTKRCV ซึ่งเป็นโปรแกรมย่อยของโปรแกรม RTKLIB ที่มีการทำงานคล้ายกับ RTKNAVI บนคอมพิวเตอร์ แต่โปรแกรมนี้อาจทำงานได้บนระบบปฏิบัติการแบบ Linux ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ใน Raspberry Pi มาประมวลผลการคำนวณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK ขณะลงสำรวจพื้นที่จริง พื้นที่อาจมีความเอียงหรือขรุขระ

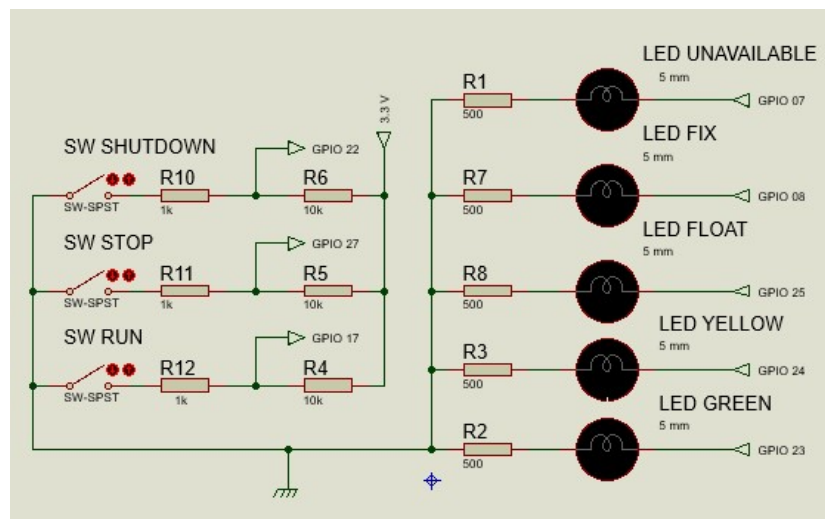
ซึ่งส่งผลให้สายอากาศที่รับสัญญาณจีเอ็นเอสเอสอยู่นั้นเกิดความเอียงและให้พิกัดที่ผิดพลาด จึงต้องนำพิกัดเหล่านั้น มาคำนวณค่าแก้ความเอียงใน Rotation Matrix ร่วมกับมุม Roll Pitch Yaw ที่วัดได้จาก Arduino โดยสามารถแสดงขั้นตอนการทำงานได้ดังรูปที่ 3-14



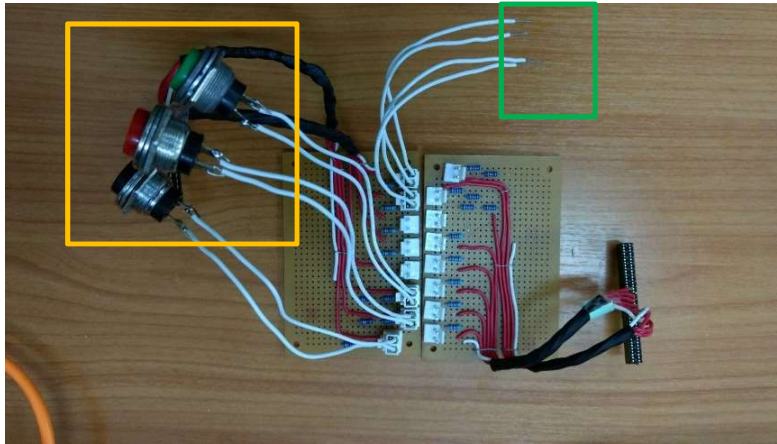
รูปที่ 3-14 การนำพิกัดจากโปรแกรม RTKRCV ไปคำนวณใน Rotation Matrix

3.2 การต่ออุปกรณ์ใช้งานจริง

จากรายการอุปกรณ์ในหัวข้อที่ 3.1 จะถูกนำมาออกแบบวงจรสวิตช์ควบคุมอุปกรณ์เครื่องรับดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส และไฟแสดงสถานะจากวงจรที่ออกแบบไว้ดังรูปที่ 3-15 และผลการเชื่อมต่อจริงดังรูปที่ 3-16



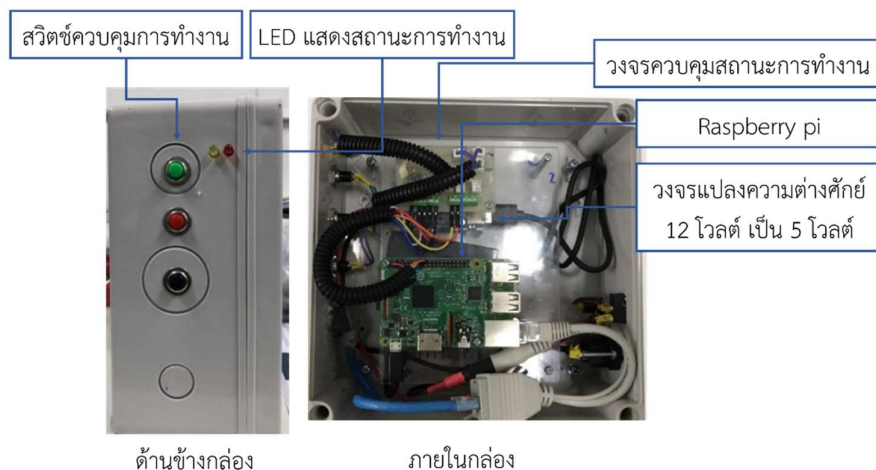
รูปที่ 3-15 แผนภาพการต่อวงจรสวิตช์เครื่องรับดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส



รูปที่ 3-16 ภาพการต่อวงจรจริง

จากภาพการต่อวงจรรูปที่ 3-15 จะแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ส่วนของไฟแสดงสถานะและส่วนของปุ่มควบคุมอุปกรณ์ โดยส่วนของไฟแสดงสถานะจะแสดงด้วยกรอบสีเขียว สามารถนำไปต่อกับไฟแสดงผล LED ได้โดยตรง หรือสามารถต่อเข้ากับรีเลย์ได้ในอนาคต สำหรับในส่วนของปุ่มควบคุมอุปกรณ์นั้น จะแสดงอยู่ในกรอบสีเหลือง จะประกอบไปด้วยปุ่มสั่งการทำงาน 3 ชนิด ได้แก่ ปุ่มเริ่มการทำงานของโปรแกรมรับสัญญาณจีเอ็นเอสเอส ปุ่มปิดการทำงานของโปรแกรมรับสัญญาณ และปุ่มปิดเครื่อง Raspberry pi

เมื่อทำการออกแบบระบบเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ก็ทำการติดตั้งอุปกรณ์ทั้งหมดลงในกล่องพลาสติกที่มีคุณสมบัติในการกันน้ำ และมีการเว้นช่องสำหรับบรรจุแบตเตอรี่ลงไปเพื่อสำหรับการทดสอบระบบ แสดงดังรูปที่ 3-17



รูปที่ 3-17 บรรจุภัณฑ์ที่ประกอบเข้ากับอุปกรณ์สำรวจของสถานีฐานและจอแล้ว

ถัดมาจะเป็นการทดสอบการใช้งาน โดยนำกล่องที่ติดตั้งอุปกรณ์รับดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสไปประกอบเข้ากับฐานตั้งแบบสามขา มีการติดตั้งสายอากาศรับสัญญาณดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้านบน พร้อมกับใส่แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์เข้าไป แล้วนำไปติดตั้งบนในพื้นที่ทดสอบกลางแจ้ง ดังรูปที่ 3-18 และรูปที่ 3-19



รูปที่ 3-18 นำแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ ใส่เข้าไปในบรรจุภัณฑ์พร้อมกับสายแบตเตอรี่ให้ถูกต้อง



รูปที่ 3-19 อุปกรณ์สำรวจของสถานีฐาน ถูกติดตั้งบริเวณคาตฟ้าเพื่อรอการทดสอบใช้งานจริง

ในขั้นตอนสุดท้าย เมื่อต้องการให้ระบบนำทางรถบนพื้นที่เพาะปลูก สามารถนำไปติดตั้งไว้ที่ตัวรถ โดยจำเป็นต้องให้สายอากาศอยู่ด้านบนสุดของตัวรถ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรับสัญญาณดาวเทียมที่ดี ดังรูปที่ 3-20



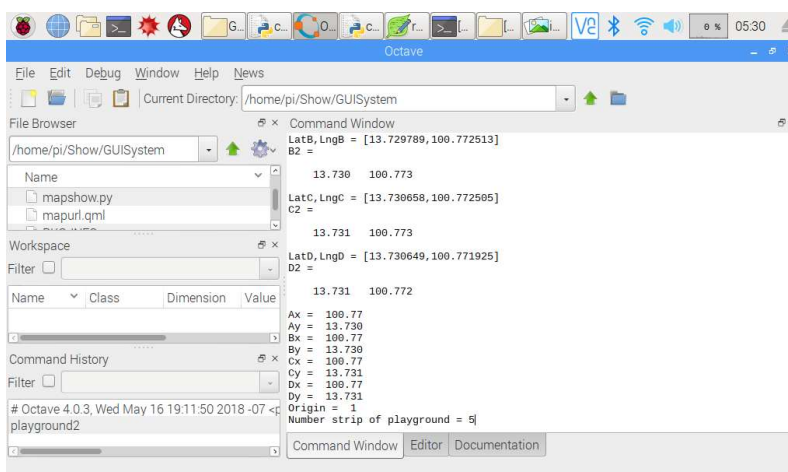
รูปที่ 3-20 ภาพการติดตั้งอุปกรณ์สถานีจลน์บนรถทางเกษตรกรรม

3.3 การนำเสนอแสดงผลแจ้งเตือนผู้ใช้งาน

หน้าจอแสดงผลในระหว่างการใช้งานจะออกแบบไว้เพื่ออำนวยความสะดวกแก่ผู้ใช้งาน ประกอบไปด้วย 3 หน้าจอหลักได้แก่ 1. หน้าจอสำหรับสร้างเส้นทางเดิน 2. หน้าจอการตั้งค่าเครื่องรับดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส 3. หน้าจอแสดงเส้นทางแบบเวลาจริง

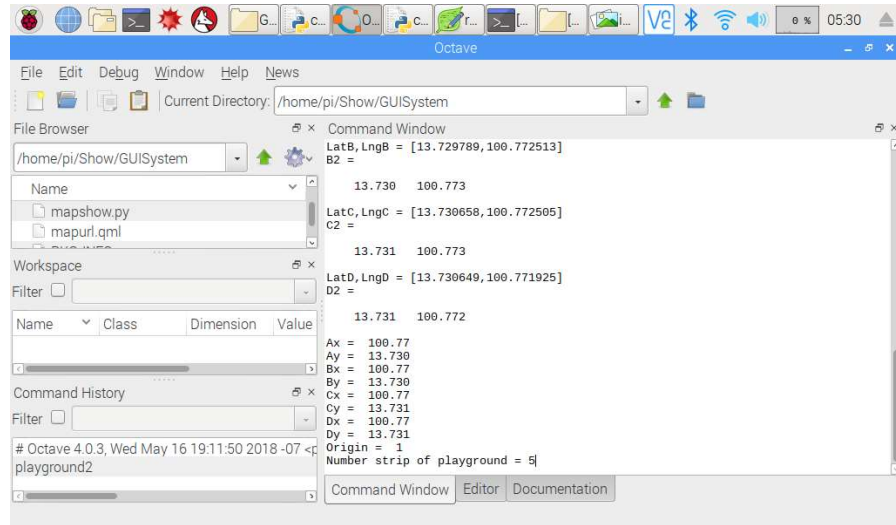
3.3.1 หน้าจอการสร้างเส้นทาง

จากการออกแบบอุปกรณ์ทั้งสถานีฐานและสถานีจลน์ในหัวข้อข้างต้น เมื่อนำระบบนำทางใช้งานการบอกตำแหน่งของผู้ใช้ จะเป็นที่จะต้องทราบเส้นทางในเบื้องต้นเพื่อให้ระบบสามารถนำทางไปได้ โดยในขั้นตอนแรกจะเป็นโปรแกรมการคำนวณเส้นทางโดยรับอินพุตมาจากการปักหมุดที่มุมทั้งสี่มุมของพื้นที่ แสดงได้ดังรูปที่ 3-21



รูปที่ 3-21 หน้าจอร์บอินพุตตำแหน่งมุมทั้งสี่ของพื้นที่สำหรับการนำทาง

ในระหว่างการใช้งาน ผู้ใช้จำเป็นต้องทราบตำแหน่งพิกัดของมุมทั้งสี่ของพื้นที่ก่อน โดยอาจจะดำเนินการป้อนค่าโดยใช้เทคนิค RTK ทั้งแบบ 1 หรือ 2 ความถี่ก็ได้ จากนั้นเมื่อกรอกมุมทั้ง 4 มุมเรียบร้อยแล้ว ก็จะเป็นการกำหนดจำนวนเส้นทางในการเดินในหน้าจอโปรแกรมดังรูปที่ 3-22

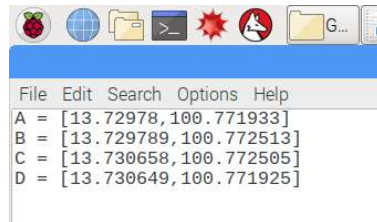


รูปที่ 3-22 หน้าจอตั้งค่าจำนวนเส้นทางเดินในพื้นที่

หน้าจอตั้งค่าจำนวนเส้นทางเดินในรูปที่ 3-22 นี้จะเป็นการกำหนดระยะห่างระหว่างเส้นแต่ละเส้นที่ใช้เดินในพื้นที่ โดยสามารถกำหนดให้เส้นทางให้มีความใกล้กันหรือห่างกันได้ตามผู้ใช้งานต้องการผ่านโปรแกรม Octave โดยภายหลังจากการตั้งค่าทั้งหมดแล้วโปรแกรมจะแสดงจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดในแต่ละเส้นทางดังรูปที่ 3-23 และตัวเลขพิกัดสำหรับการนำทางด้วยโปรแกรมนำทางดังรูปที่ 3-24



รูปที่ 3-23 หน้าจอแสดงเส้นทางการเดินรถตามข้อกำหนดของผู้ใช้

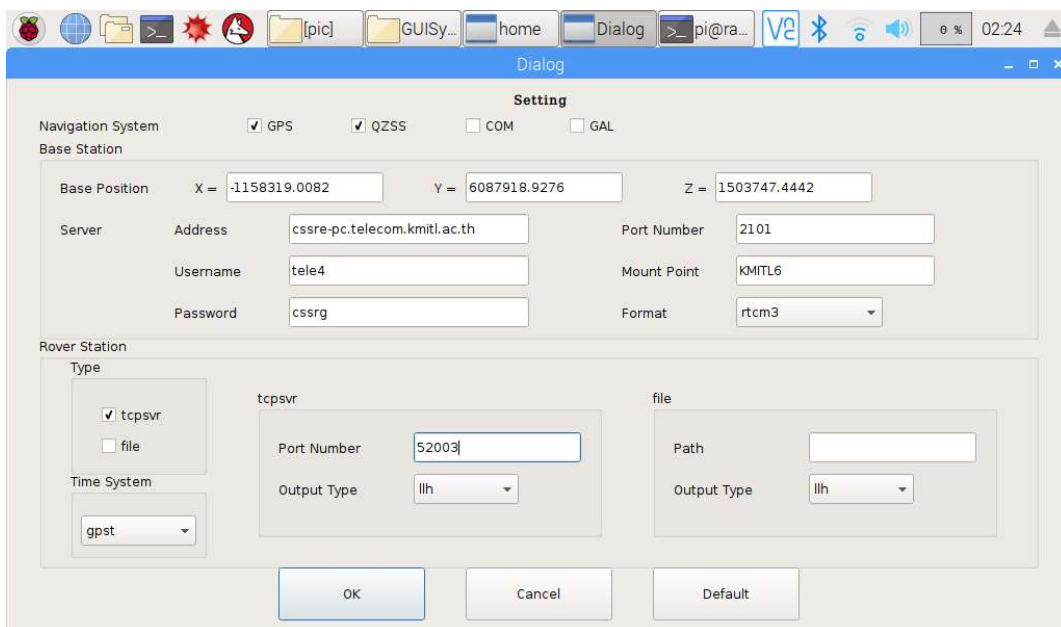


รูปที่ 3-24 ตำแหน่งพิกัดสำหรับเดินบนเส้นทางที่กำหนดไว้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Octave

ภายหลังจากการตั้งค่าในส่วนนี้แล้ว โปรแกรมจะดำเนินการบันทึกพิกัดที่ใช้ในการเดินรถ เพื่อให้โปรแกรมนำทางสามารถแจ้งเตือนทิศทางการเดินรถต่อไปได้

3.3.2 หน้าจอการตั้งค่าการรับดาวเทียมจีเอ็นเอสเอส

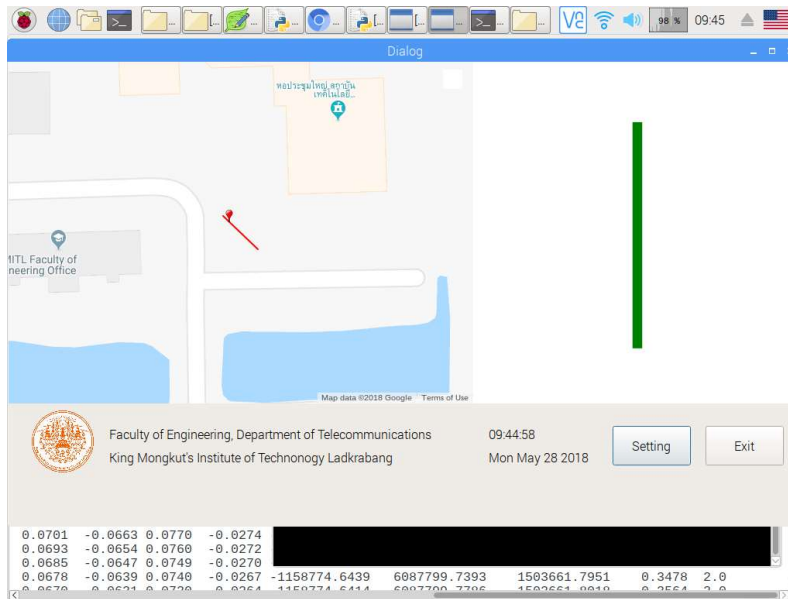
ในขั้นตอนนี้จะเป็นการตั้งค่าให้เครื่องรับดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสเลือกรับระบบดาวเทียมชนิดต่างๆ ได้ดังรูปที่ 3-25 และเพื่อให้สามารถดำเนินการคำนวณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK และระยะทางได้อย่างถูกต้องนั้น ในหน้าจอนี้จะเป็นการให้ผู้ใช้กรอกชนิดและตำแหน่งของสถานีฐานได้ด้วย



รูปที่ 3-25 หน้าจอการตั้งค่าเครื่องรับและสถานีฐานเพื่อคำนวณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK

3.3.3 หน้าจอการแนะนำเส้นทางผู้ใช้งานขณะเดินบนเส้นทางแบบเวลาจริง

ในเมื่อดำเนินการออกแบบเส้นทาง และเลิกระบบสำหรับการนำทางแล้ว เมื่อผู้ใช้งานต้องการเริ่มเดินบนเส้นทาง ให้กดปุ่มเริ่มต้นหลังจากนั้นโปรแกรมจะเข้าสู่โหมดการบอกเส้นทางที่ต้องใช้ รวมไปถึงระยะทางแบบเวลาจริง โดยจะแสดงดังได้ดังรูปที่ 3-26

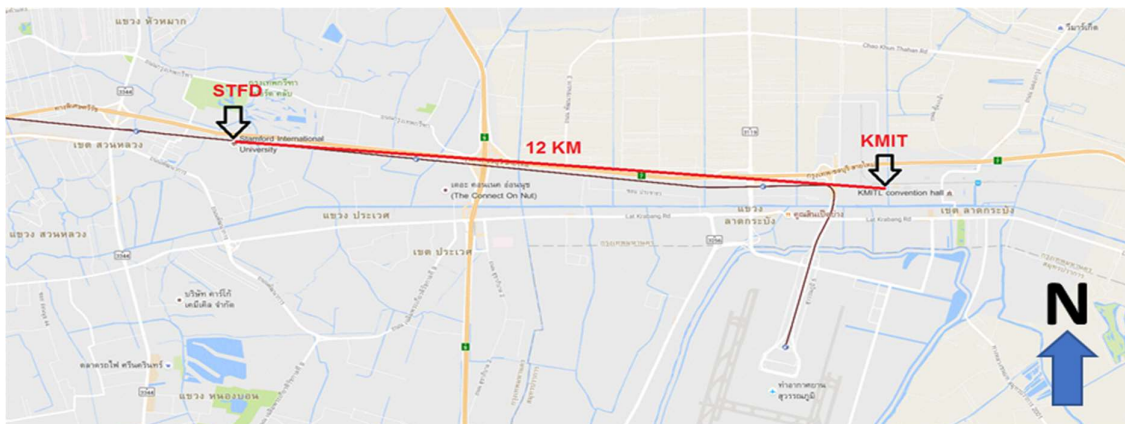


รูปที่ 3-26 หน้าจอแสดงการนำทางแบบเวลาจริง

3.4 การออกแบบการทดลอง

3.4.1 การหาประสิทธิภาพของการคำนวณตำแหน่งสถานีฐาน

การออกแบบการทดลองในหัวข้อนี้ จะเป็นการหาระยะเวลาที่ใช้คำนวณตำแหน่ง และระยะทางที่คลาดเคลื่อนในการคำนวณตำแหน่งของสถานีฐานด้วยเทคนิค RTK เนื่องจากโครงการนี้จะพัฒนาเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสความถี่เดียว ซึ่งเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสความถี่เดียวนั้นจะไม่สามารถคำนวณตำแหน่งที่มีความแม่นยำสูงโดยอาศัยเพียงข้อมูลที่ได้รับของตัวเองเหมือนเครื่องรับจีเอ็นเอสเอสสองความถี่ ดังนั้นเครื่องรับความถี่เดียวจำเป็นต้องได้รับค่าแก้จากเครื่องรับสองความถี่จากสถานีฐานอื่นๆ ทำให้ต้องออกแบบการทดลองคำนวณความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์เครื่องรับความถี่เดียวที่ใช้ข้อมูลจากเครื่องรับสองความถี่อื่นๆ เทียบกับสถานีฐานที่ใช้ระบบสองความถี่



รูปที่ 3-27 ตำแหน่งสถานีที่ใช้จำลองคำนวณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK แบบ 1 ความถี่

รูปที่ 3-27 แสดงการออกแบบการทดลองเพื่อคำนวณความคลาดเคลื่อนโดยกำหนดให้สถานที่ STFD เป็นสถานที่ใช้ในการคำนวณตำแหน่ง และสถานที่ KMIT เป็นสถานที่ใช้ในการส่งค่าแก้ เมื่อมีการเลือกใช้ ความถี่ที่แตกต่างกันทั้งสองสถานียังตารางที่ 3-1

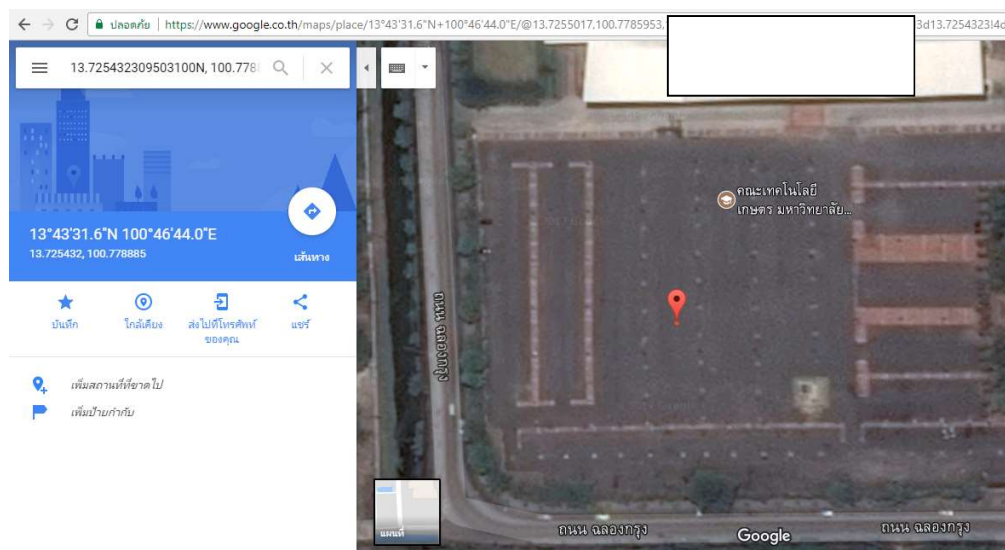
ตารางที่ 3-1 การเปิดใช้งานความถี่แต่ละประเภทสำหรับการประมาณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK

ลำดับการทดลอง	สถานีส่งค่าแก้ (จำนวนความถี่ที่ใช้)	สถานีที่ใช้ประมาณตำแหน่ง (จำนวนความถี่ที่ใช้)
1	2	2
2	2	1
3	1	1

จากตารางที่ 1 แบ่งออกเป็น 3 การทดลองเพื่อใช้สำหรับเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการประมาณ ตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK โดยการทดลองที่ 1 เป็นการนำประโยชน์จากเครื่องรับ 2 ความถี่ทั้งจากสถานีฐานที่ใช้ ส่งค่าแก้ และสถานีฐานที่ใช้ในการคำนวณตำแหน่งซึ่งเป็นวิธีในการคำนวณตำแหน่งที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ถัดมาจะเป็นการลดประสิทธิภาพเครื่องรับฝั่งสถานีฐานที่ใช้ในการประมาณตำแหน่งให้เหลือ 1 ความถี่ สำหรับกรณีที่ต้องการตั้งสถานีฐานจากเครื่องรับ 1 ความถี่ แต่ต้องพึ่งข้อมูลจากเครื่องรับ 2 ความถี่จากสถานี ฐานอื่นๆ ในการประมาณตำแหน่งก่อนที่จะใช้ส่งค่าแก้ไปได้ ส่วนการทดลองสุดท้าย จะเป็นการประมาณ ตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK จากเครื่องรับทั้งสถานีฐานส่งค่าแก้และสถานีฐานที่ใช้คำนวณตำแหน่งเป็นแบบ ความถี่เดียวดังที่โครงการนี้ออกแบบไว้

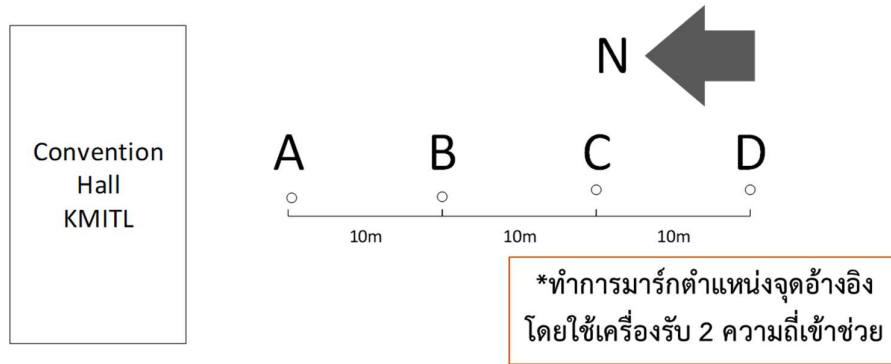
3.4.2 การหาประสิทธิภาพของสถานีจลน์เมื่อใช้สถานีฐานแบบต่างๆ

ในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบสถานีจลน์เมื่อใช้สถานีฐาน 1 ความถี่ที่ได้รับค่าแก้จากสถานีฐานอื่นที่ใช้ 2 ความถี่ การทดสอบสถานีจลน์ 1 ความถี่ในโครงการนี้ในโครงการนี้จะใช้พื้นที่ทดสอบ คือ บริเวณลานจอดรถ หน้า Convention hall ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และทำการวาง จุดอ้างอิงสำหรับทดสอบความคลาดเคลื่อนในการประมาณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK ที่ได้ออกแบบไว้



รูปที่ 3-28 พื้นที่ทดสอบเพื่อกำหนดจุดอ้างอิงสำหรับการประมาณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK

จากรูปที่ 3-28 จะกำหนดจุดอ้างอิงทั้งหมด 4 จุด ได้แก่จุด A B C และ D เพื่อเป็นพิกัดอ้างอิงสำหรับการประมาณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK



รูปที่ 3-29 ตำแหน่งการวางจุดอ้างอิงสำหรับทดสอบการประมาณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK

จากรูปที่ 3-29 จุดอ้างอิงทั้งสี่จุดจะวางเรียงตัวในแนวทิศเหนือ-ใต้ อยู่ในพื้นที่ตรงกลางของลานจอดรถ เพื่อลดผลกระทบการเกิดสัญญาณสะท้อนหลายทิศทางให้ได้มากที่สุด สำหรับการทดลองจะเริ่มต้นโดยหยุดที่จุด A เป็นเวลาหนึ่งเพื่อให้เครื่องรับสามารถหาตำแหน่งได้ในลักษณะจำนวนเต็มหรือเกิดค่า Fix ขึ้น เมื่อสามารถหาตำแหน่งได้แล้ว ก็จะหยุดอยู่กับที่เพื่อเก็บพิกัดเป็นระยะเวลาประมาณ 30 วินาที จากนั้นจึงเริ่มเดินย้ายไปยังจุด B และเก็บผลเป็นเวลา 30 วินาทีเช่นเดียวกัน โดยทำซ้ำเช่นนี้จนกระทั่งถึงจุด D ก็จะย้ายจุดไปในเส้นทางเดิม เพื่อเก็บผลที่จุด A ใหม่ โดยจะเดินกลับไปตามประมาณ 3 รอบจึงจะยุติการทดลอง และทำเช่นนี้ใหม่โดยมีระยะทางระหว่างสถานีจันและสถานีฐานที่ออกแบบไว้ตั้งแต่ 1 3 และ 6 กิโลเมตรตามลำดับ เพื่อนำผลการทดลองดังกล่าวมาเปรียบเทียบกัน

สำหรับตำแหน่งเครื่องรับที่ประมาณได้จากเทคนิค RTK นั้นจะเก็บผลเฉพาะที่จุดที่ได้หาตำแหน่งไว้ก่อนหน้า 4 จุดเท่านั้น โดยจะไม่นำพิกัดในระหว่างการเดินทางมาคำนวณผลต่างเพราะจะได้ค่าความผิดพลาดที่ไม่ต้องการรวมอยู่ด้วย โดยจะแบ่งผลการทดลองออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะเป็นผลความคลาดเคลื่อนในแต่ละเวลาเพื่อดูลักษณะที่เกิดขึ้นตามเวลาจริง และส่วนที่สองจะเป็นการนำผลการทดลองมาเรียงจากน้อยไปหามาก และทำการหาตำแหน่งที่ 95 เปอร์เซนต์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพความคลาดเคลื่อนโดยรวมระหว่างระยะของสถานีฐานและสถานีจันที่แตกต่างกันออกไป

3.4.3 ออกแบบการทดลองการแก้ไขพิกัดที่เกิดจากความเอียงของสายอากาศ

ในการจัดเก็บผลการทดสอบ จะใช้โปรแกรม Matlab เพื่อจำลอง และบันทึกผลการแก้ไขพิกัดของสายอากาศ โดยกำหนดให้ความสูงของสายอากาศจากพื้นดินเท่ากับ 2 เมตร ($h = 2 \text{ m.}$) และกำหนดพิกัดสายอากาศที่ปลายเสาสำหรับติดตั้งสายอากาศเป็น $[13.725704257792572^\circ, 100.7788757714733^\circ, 2 \text{ m.}]$ จากนั้นสมมุติสายอากาศเอียงด้วยมุม Roll (แกนหมุนของมุม Roll ชี้ไปทางทิศเหนือ) มุม Pitch (แกนหมุนของมุม Pitch ชี้ไปทางทิศตะวันออก) และมุม Yaw (แกนหมุนของมุม Yaw ชี้ในทิศพุ่งขึ้นจากผิวโลก)

เพื่อดูระยะห่างที่เกิดจากการเอียงของสายอากาศ จากนั้นนำไปหาผลต่างกับระยะเอียงเพื่อคำนวณความผิดพลาดต่อไป

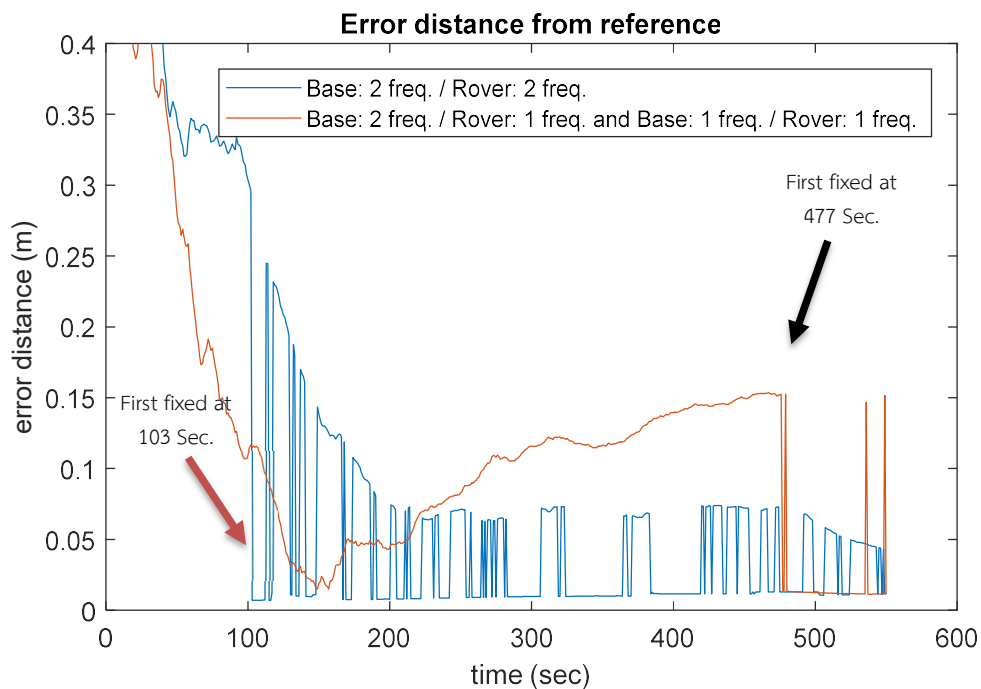
บทที่ 4

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการทดสอบจะแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อ ดังนี้ 1. ผลการทดลองเพื่อหาระยะเวลาในการคำนวณตำแหน่งสถานีฐาน และ 2. ผลการประมาณตำแหน่งเครื่องรับสถานีจลน์ด้วยเทคนิค RTK สำหรับสถานีฐานที่มีระยะห่างแตกต่างกัน 3. ผลทดสอบการวัดมุมจากเซ็นเซอร์ GY-85 4. ผลการแก้ไขตำแหน่งจากความเอียงของสายอากาศ 5. ผลการทดสอบติดตั้งบนรถทางเกษตรกรรม

4.1 ผลการทดลองเพื่อหาระยะเวลาในการคำนวณตำแหน่งสถานีฐาน

ผลการทดลองนี้จะเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการหาตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK ระหว่างเครื่องรับที่มีการเลือกใช้ความถี่ที่แตกต่างกัน ได้แก่ เครื่องรับที่ใช้งานค่าแก้จากสถานีฐาน 2 ความถี่ จับคู่กับสถานีฐานที่ใช้ประมาณตำแหน่งแบบ 2 ความถี่ ถัดมาเป็นเครื่องรับที่ใช้งานค่าแก้จากสถานีฐาน 2 ความถี่ จับคู่กับสถานีฐานที่ใช้ประมาณตำแหน่งแบบ 1 ความถี่ และสุดท้ายเป็นเครื่องรับที่ใช้งานค่าแก้จากสถานีฐาน 1 ความถี่ จับคู่กับสถานีฐานที่ใช้ประมาณตำแหน่งแบบ 1 ความถี่ แสดงดังรูปที่ 4-1



รูปที่ 4-1 ผลการหาระยะเวลาในการคำนวณตำแหน่งสถานีฐาน

จากผลการทดลองหาระยะเวลาคำนวณตำแหน่งสถานีฐานรูปที่ 4-1 พบว่า เมื่อคำนวณโดยใช้สถานีที่ส่งค่าแก้เป็นแบบ 2 ความถี่ และสถานีที่ใช้ประมาณตำแหน่งแบบ 2 ความถี่ จะมีระยะเวลาในการประมาณตำแหน่งแบบ Fixed ครั้งแรกที่ 103 วินาที เริ่มตั้งแต่เริ่มเก็บผล โดยมีความเร็วกว่าสองกรณีหลังที่มีระยะเวลาในการคำนวณตำแหน่งโดยใช้สถานีส่งค่าแก้ที่ 1 และ 2 ความถี่ จับคู่กับจับคู่กับสถานีฐานที่ใช้

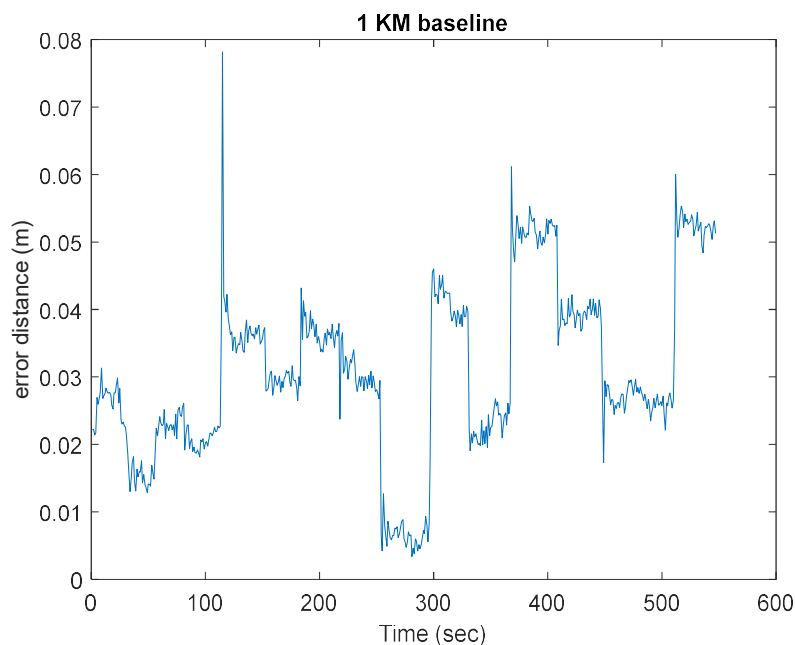
ประมาณตำแหน่งแบบ 1 ความถี่ซึ่งมีระยะเวลาในการประมาณตำแหน่งเท่ากันที่ 477 วินาที แสดงว่าหากเครื่องที่ใช้ประมาณตำแหน่งเป็นเครื่องรับ 1 ความถี่ สถานีฐานที่ส่งค่าแก้ไขไม่ว่าจะเป็นแบบ 1 ความถี่ หรือ 2 ความถี่ จะมีประสิทธิภาพเท่ากันทุกประการ

สำหรับความคลาดเคลื่อนของวิธีในการประมาณตำแหน่งแบบ RTK โดยใช้สถานีฐาน 2 ความถี่จับคู่กับสถานีฐานที่ใช้ประมาณตำแหน่งแบบ 2 ความถี่ เมื่อเริ่มประมาณตำแหน่งได้แบบ Fixed แล้ว พบว่ามีระยะห่างระหว่างจุดอ้างอิงที่ได้กำหนดไว้กับการประมาณด้วยเทคนิค RTK เท่ากับ 0.71 เซนติเมตร ส่วนระยะห่างจากการใช้สถานีฐาน 2 ความถี่จับคู่กับสถานีฐานที่ใช้ประมาณตำแหน่งแบบ 1 และ 2 ความถี่ค่าเท่ากันที่ 1.36 เซนติเมตรซึ่งมีประสิทธิภาพอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้ และมีความน่าเชื่อถือสูงพอสำหรับการนำตำแหน่งที่ประมาณได้มาเป็นสถานีฐานสำหรับส่งค่าแก้ไขให้สถานีจลน์ต่อไป

4.2 ผลการประมาณตำแหน่งเครื่องรับสถานีจลน์ด้วยเทคนิค RTK

ผลการทดลองในส่วนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการประมาณตำแหน่งของสถานีจลน์ด้วยเทคนิค RTK เมื่อได้รับค่าแก้ไขจากสถานีฐานที่อยู่ห่างออกไปเป็นระยะทางตั้งแต่ 1 3 และ 6 กิโลเมตรว่ามีประสิทธิภาพลดลงไปอย่างไร โดยจะวัดผลในรูปแบบระยะทางที่คลาดเคลื่อนไปจากพิกัดที่ได้วางไว้ก่อนหน้านี้ทั้ง 4 จุด และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยใช้ความคลาดเคลื่อนที่ร้อยละ 95 ว่ามีระยะทางมากขึ้นหรือน้อยลงอย่างไร

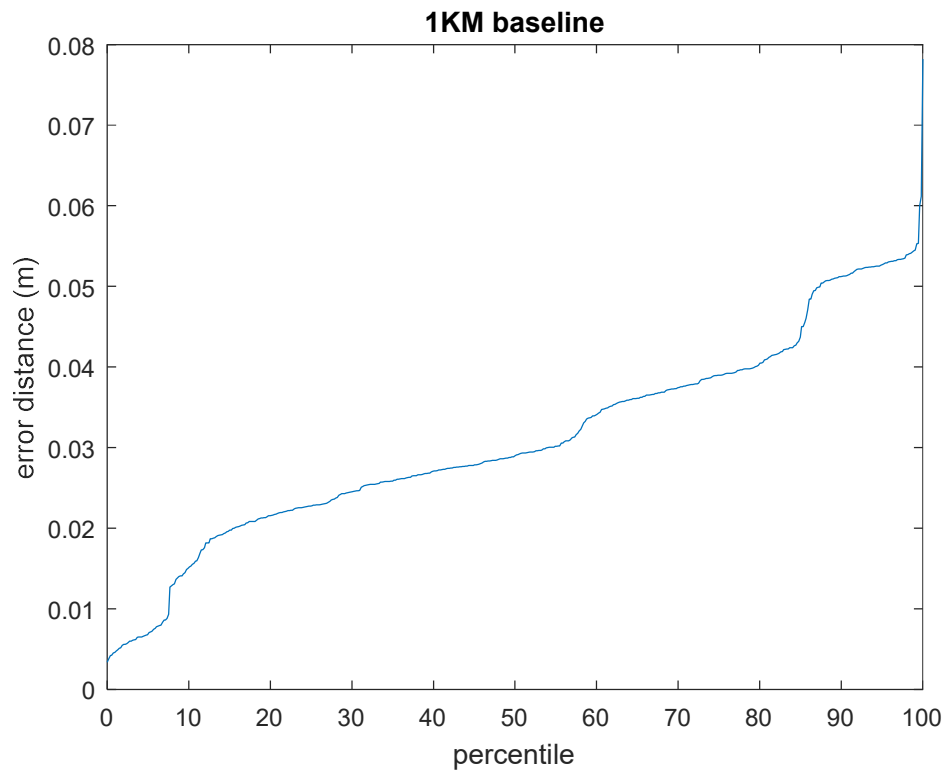
4.2.1 ระยะห่างระหว่างสถานีฐานและสถานีจลน์ 1 กิโลเมตร



รูปที่ 4-2 ความคลาดเคลื่อนการคำนวณตำแหน่งแต่ละช่วงเวลาเมื่อสถานีฐานอยู่ห่างออกไป 1 กิโลเมตร

จากผลการทดลองคำนวณตำแหน่งสถานีจลน์รูปที่ 4-2 เมื่อรับค่าแก้ไขจากสถานีฐานที่มีระยะห่าง 1 กิโลเมตรพบว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงตั้งแต่ 1 – 8 เซนติเมตร เมื่อเทียบกับตำแหน่งที่คำนวณไว้อย่าง

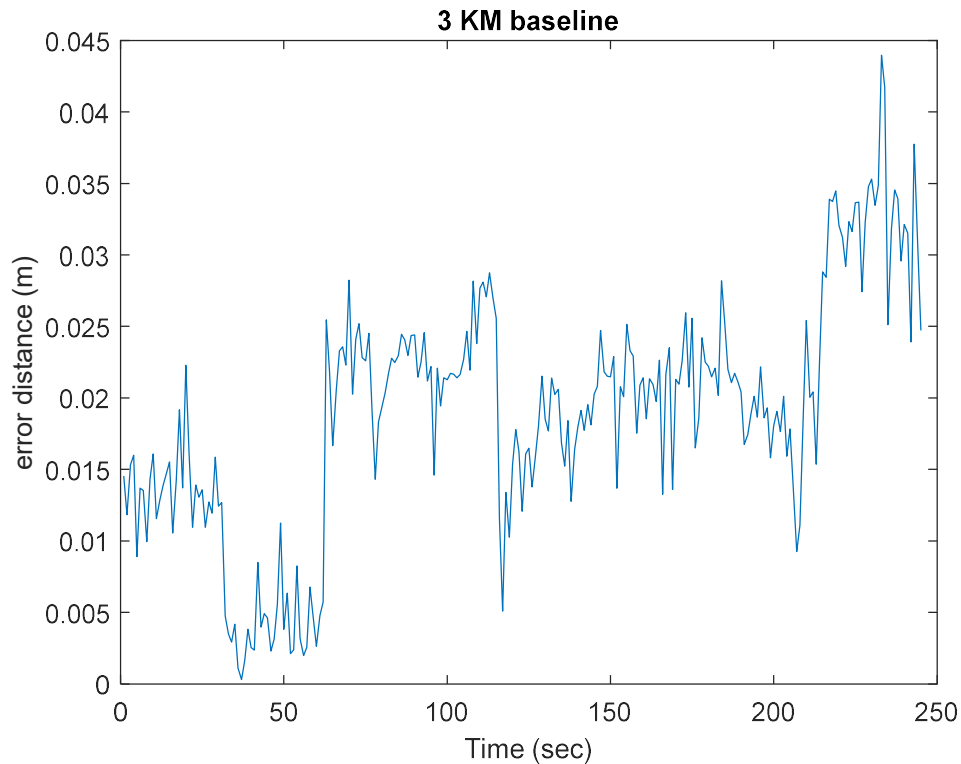
แม่นยำจากจุด A ถึง D โดยจากผลการทดลองนี้ จะนำไปเรียงใหม่โดยเริ่มจากค่าที่น้อย ไปจนถึงค่าที่มาก เพื่อสามารถนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับระยะห่างจากสถานีฐานอื่นได้ดังรูปที่ 4-3



รูปที่ 4-3 ร้อยละความคลาดเคลื่อนในการคำนวณตำแหน่งเมื่อสถานีฐานอยู่ห่างออกไป 1 กิโลเมตร

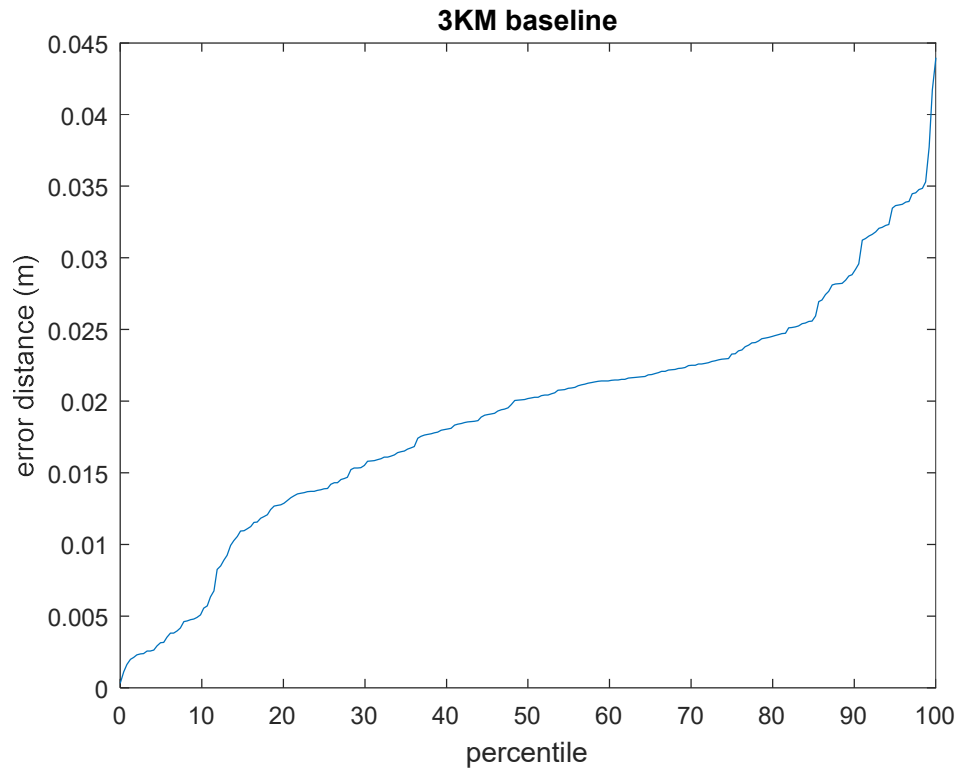
จากผลการเรียงร้อยละความผิดพลาดค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณตำแหน่งของสถานีจลน์ เมื่อสถานีฐานอยู่ห่างออกไป 1 กิโลเมตร พบว่าที่ร้อยละ 95 มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 5.27 เซนติเมตร โดยอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ไม่เกิน 30 เซนติเมตรตามจุดประสงค์ของโครงการนี้ โดยจะเปรียบเทียบกับระยะทางระหว่างสถานีฐานและสถานีจลน์ค่าอื่นๆ ในหัวข้อต่อไป

4.2.2 ระยะห่างระหว่างสถานีฐานและสถานีจลน์ 3 กิโลเมตร



รูปที่ 4-4 ความคลาดเคลื่อนการคำนวณตำแหน่งแต่ละช่วงเวลาเมื่อสถานีฐานอยู่ห่างออกไป 3 กิโลเมตร

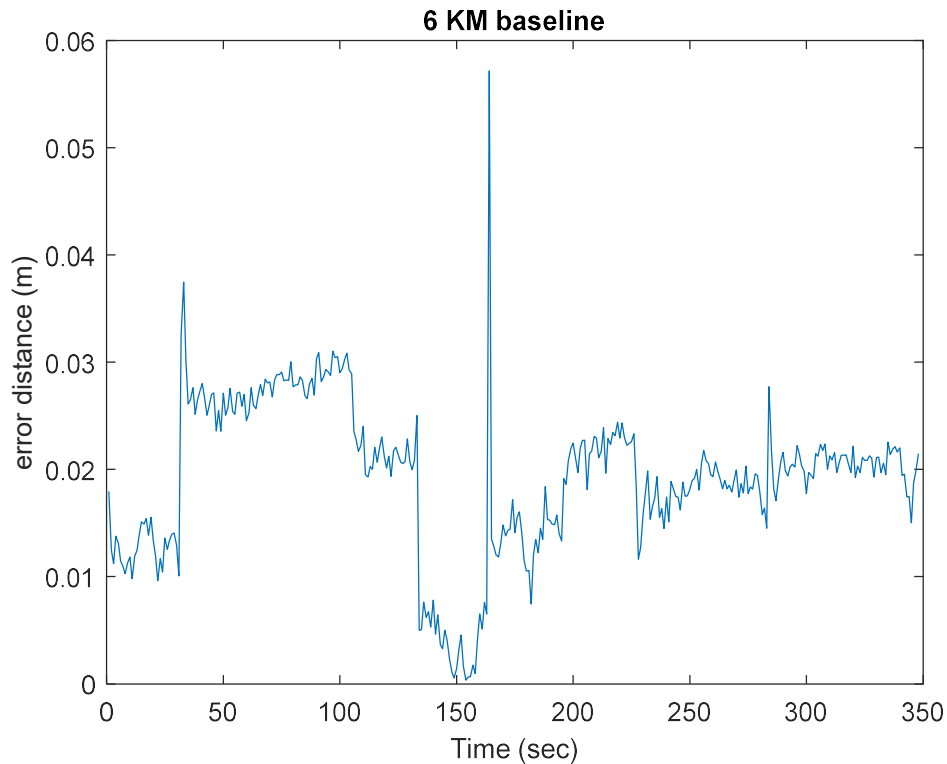
จากผลการทดลองคำนวณตำแหน่งสถานีจลน์รูปที่ 4-4 เมื่อรับค่าแก้จากสถานีฐานที่มีระยะห่าง 3 กิโลเมตรพบว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 – 5 เซนติเมตร เมื่อเทียบกับตำแหน่งที่คำนวณไว้อย่างแม่นยำจากจุด A ถึง D โดยมีค่าที่ใกล้เคียงกันกับผลการทดลองระยะห่างเท่ากับ 1 กิโลเมตร โดยจากผลการทดลองนี้จะนำไปเรียงใหม่โดยเริ่มจากค่าที่น้อย ไปจนถึงค่าที่มาก เพื่อสามารถนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับระยะห่างจากสถานีฐานอื่นได้ดังรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 ร้อยละความคลาดเคลื่อนในการคำนวณตำแหน่งเมื่อสถานีฐานอยู่ห่างออกไป 3 กิโลเมตร

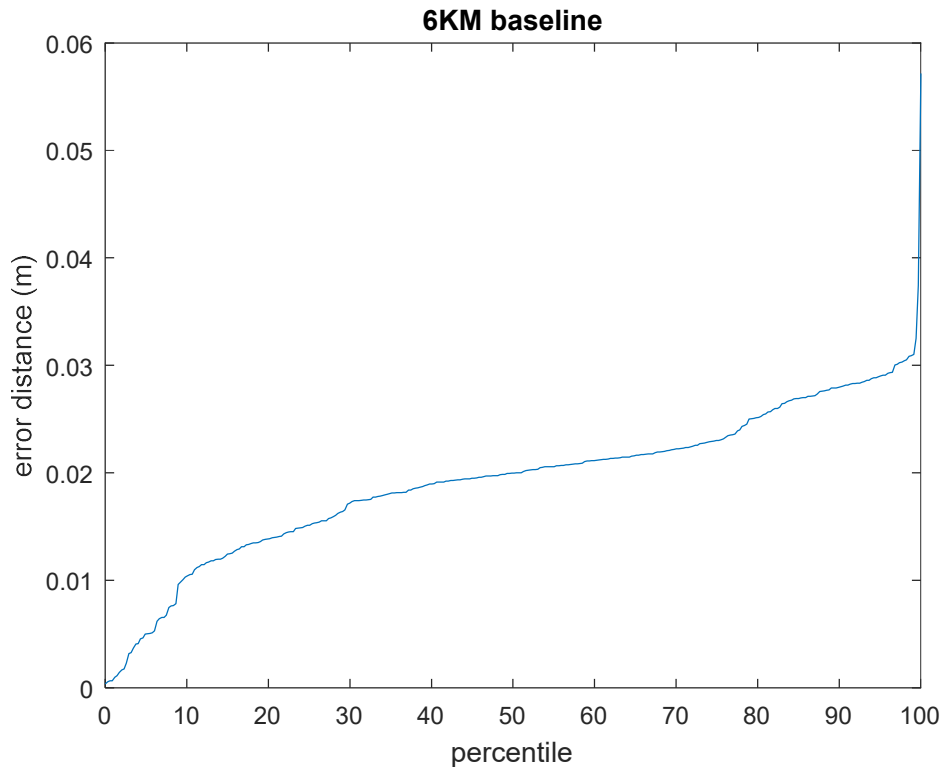
จากผลการเรียงร้อยละความผิดพลาดค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณตำแหน่งของสถานีจลน์เมื่อสถานีฐานอยู่ห่างออกไป 3 กิโลเมตร พบว่าที่ร้อยละ 95 มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 3.36 เซนติเมตร โดยอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ไม่เกิน 30 เซนติเมตรตามจุดประสงค์ของโครงการนี้ โดยจะเปรียบเทียบกับระยะทางระหว่างสถานีฐานและสถานีจลน์ค่าอื่นๆ ในหัวข้อต่อไป

4.2.3 ระยะห่างระหว่างสถานีฐานและสถานีจลน์ 6 กิโลเมตร



รูปที่ 4-6 ความคลาดเคลื่อนการคำนวณตำแหน่งแต่ละช่วงเวลาเมื่อสถานีฐานอยู่ห่างออกไป 6 กิโลเมตร

จากผลการทดลองคำนวณตำแหน่งสถานีจลน์รูปที่ 4-6 เมื่อรับค่าแก้จากสถานีฐานที่มีระยะห่าง 6 กิโลเมตรพบว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงตั้งแต่ 0 – 3 เซนติเมตร เมื่อเทียบกับตำแหน่งที่คำนวณไว้อย่างแม่นยำจากจุด A ถึง D โดยที่มีบางช่วงที่เกิดความผิดพลาดพุ่งสูงขึ้นไปจากปกติที่ 6 เซนติเมตร และกลับลงมาเท่ากับค่าโดยเฉลี่ย ผลการทดลองนี้มีค่าที่ใกล้เคียงกันกับผลการทดลองระยะห่างเท่ากับ 1 และ 3 กิโลเมตร และถัดมาจะนำไปเรียงใหม่โดยเริ่มจากค่าที่น้อย ไปจนถึงค่าที่มาก เพื่อสามารถนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับระยะห่างจากสถานีฐานอื่นได้ดังรูปที่ 4-7



รูปที่ 4-7 ร้อยละความคลาดเคลื่อนในการคำนวณตำแหน่งเมื่อสถานีฐานอยู่ห่างออกไป 6 กิโลเมตร

จากผลการเรียงร้อยละความผิดพลาดค่าความคลาดเคลื่อนในการประมาณตำแหน่งของสถานีจลน์เมื่อสถานีฐานอยู่ห่างออกไป 3 กิโลเมตร พบว่าที่ร้อยละ 95 มีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2.9 เซนติเมตร โดยอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ไม่เกิน 30 เซนติเมตรตามจุดประสงค์ของโครงการนี้ โดยถัดไปจะสรุปผลการทดลองไว้ดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ผลการทดลองประสิทธิภาพในการประมาณตำแหน่งที่ระยะ baseline ต่างๆ

	1KM (cm)	3KM (cm)	6KM (cm)
GPS	19.2	3.7	11.8
GNSS	5.27	3.36	2.9

จากผลการทดลองระยะห่างระหว่างสถานีฐานและสถานีจลน์ตั้งแต่ 1 ถึง 6 กิโลเมตร พบว่าที่ตำแหน่งความคลาดเคลื่อนในการประมาณตำแหน่งด้วยเทคนิค RTK เมื่อใช้ระบบอื่นๆ นอกเหนือจากระบบ GPS มาร่วมประมาณตำแหน่งจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงตั้งแต่ 3 ถึง 5 เซนติเมตร ซึ่งมีความใกล้เคียงกัน และทั้งหมดอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้คือไม่เกิน 30 เซนติเมตรถึงแม้ว่าระบบจะมีบางช่วงเวลาเกิดความคลาดผิดพลาดในการเชื่อมต่อกัน ทำให้ความผิดพลาดในการประมาณตำแหน่งพุ่งสูงขึ้นมา แต่ความผิดพลาดนี้สามารถออกแบบระบบแจ้งเตือน เพื่อไม่ให้ระบบที่เชื่อมต่ออยู่นำไปใช้การควบคุมอุปกรณ์การเดินทางในภายหลังได้

4.3 ผลการทดสอบการอ่านค่ามุมที่แสดงการเคลื่อนที่ของวัตถุโดยใช้เซนเซอร์ IMU รุ่น GY-85

การวัดความแม่นยำในการวัดมุม Roll Pitch และ Yaw จะใช้การบอกร้อยละความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าที่กำหนด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 19

$$\text{ร้อยละความแตกต่างในการวัดมุม} = \frac{2(a-b)}{(a+b)} \times 100 \quad (19)$$

โดยที่ a = มุมที่กำหนดในหน่วยองศา

b = มุมที่อุปกรณ์เซนเซอร์ รุ่น GY-85 วัดได้ในหน่วยองศา

ผลการวัดมุม Roll ด้วยเซนเซอร์ รุ่น GY-85 จากมุม -15° ถึงมุม 15° โดยเปลี่ยนมุมไปครั้งละ 5° จะเป็นดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 ผลการวัดมุม Roll ด้วยเซนเซอร์ รุ่น GY-85

ค่า Roll ที่กำหนด	ค่า Roll ที่วัดได้จริง	ร้อยละความแตกต่างในการวัด
-15	-15.17	-1.13
-10	-10.06	-0.60
-5	-4.95	1.01
0	0.08	-200.00
5	5.18	-3.54
10	10.1	-1.00
15	15.17	-1.13

จากผลการทดลองพบว่าค่าร้อยละความแตกต่างของมุม Roll จากการวัดด้วยอุปกรณ์เซนเซอร์ รุ่น GY-85 กับมุม Roll ที่กำหนดนั้นค่อนข้างน้อย โดยมีค่าต่ำสุดที่ร้อยละ -0.60 แต่ที่มุม 0 องศา จะพบว่าค่า a ตามสมการที่ 4.1 จะเท่ากับ 0 ส่งผลให้การคำนวณมีร้อยละความแตกต่างในการวัดที่มุมดังกล่าว มีค่าเท่ากับร้อยละ -200 เสมอ

ผลการวัดมุม Pitch ด้วยเซนเซอร์ รุ่น GY-85 จากมุม -15° ถึงมุม 15° โดยเปลี่ยนมุมไปครั้งละ 5° จะเป็นดังตารางที่ 4-3

ตารางที่ 4-3 ผลการวัดมุม Pitch ตามมุมที่กำหนด

ค่า Pitch ที่กำหนด	ค่า Pitch ที่วัดได้จริง	ร้อยละความแตกต่างในการวัด
-15	-15.32	-2.11
-10	-10.14	-1.39
-5	-5.21	-4.11
0	0.3	-200.00
5	5.19	-3.73

ค่า Pitch ที่กำหนด	ค่า Pitch ที่วัดได้จริง	ร้อยละความแตกต่างในการวัด
10	10.06	-0.60
15	14.86	0.94

จากตารางที่ 4-3 ค่าความแตกต่างระหว่างมุม Pitch ที่วัดได้จากอุปกรณ์เซนเซอร์ รุ่น GY-85 และมุม Pitch ที่กำหนด มีค่าค่อนข้างน้อย โดยมีร้อยละความแตกต่างต่ำสุดเท่ากับร้อยละ -0.60 และที่มุม 0 องศา มีค่าร้อยละความแตกต่างในการวัดเท่ากับร้อยละ -200 สามารถอธิบายได้จากสมการที่ 19

จากผลการทดลองวัดมุม Roll และมุม Pitch ค่าร้อยละความแตกต่างเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ได้แก่ ความผิดพลาดของตัวประกอบในการวัด ไม่วัดมุมมีเส้นเล็งมุมที่เล็ก รวมทั้งความละเอียดในการแปลงสัญญาณแอนาล็อกเป็นดิจิทัลบนตัวอุปกรณ์เซนเซอร์ รุ่น GY-85 มีผลต่อการคำนวณหามุม Roll และมุม Pitch ด้วย

ในการวัดมุม Yaw จะเริ่มวัดจากมุม 0° ในทิศตามเข็มนาฬิกา 10° ไปจนถึงมุม 350° มีผลการวัดดังตารางที่ 4-4

ตารางที่ 4-4 ผลการวัดมุม Yaw ด้วย GY-85

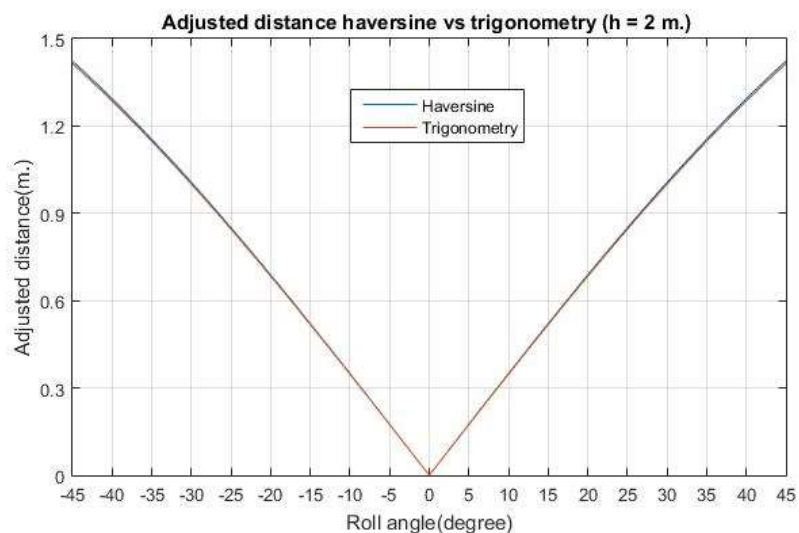
ค่า Yaw ที่กำหนด	ค่า Yaw ที่วัดได้จริง	ร้อยละความแตกต่างในการวัด
0	0	-
10	10	0.00
20	20	0.00
30	31	-3.28
40	40	0.00
50	51	-1.98
60	61	-1.65
70	71	-1.42
80	81	-1.24
90	91	-1.10
100	101	-1.00
110	111	-0.90
120	121	-0.83
130	131	-0.77
140	141	-0.71
150	150	0.00
160	160	0.00
170	170	0.00
180	180	0.00
190	190	0.00
200	201	-0.50
210	211	-0.48

ค่า Yaw ที่กำหนด	ค่า Yaw ที่วัดได้จริง	ร้อยละความแตกต่างในการวัด
220	220	0.00
230	232	-0.87
240	242	-0.83
250	252	-0.80
260	263	-1.15
270	272	-0.74
280	283	-1.07
290	293	-1.03
300	302	-0.66
310	312	-0.64
320	322	-0.62
330	332	-0.60
340	342	-0.59
350	351	-0.29

ผลจากการวัดมุม Yaw ตามตารางที่ 4-4 พบว่ามีค่าร้อยละความแตกต่างมีค่าไม่เกินร้อยละ 3.28 หรือมีความแม่นยำไม่เกิน 3° ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานสำหรับระบบทิศทางบนพื้นที่เพาะปลูกทางการเกษตร

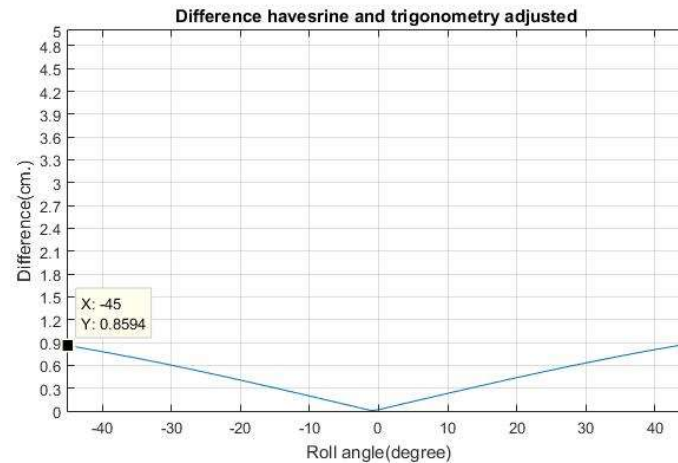
4.4 ผลการทดสอบการจำลองการแก้ไขพิกัดที่เกิดจากความเอียงของสายอากาศในโปรแกรม

4.4.1 ผลการจำลองเอียงสายอากาศด้วยมุม Roll จากมุม -45° จนถึง 45°



รูปที่ 4-8 ระยะเอียงของสายอากาศด้วยมุม Roll

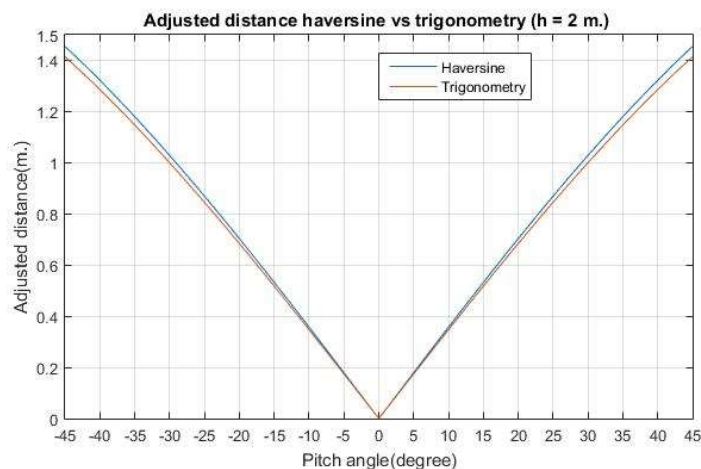
จากรูปที่ 4-8 พบว่าระยะเอียงของสายอากาศจากสมการ Haversine จะมีระยะห่างระหว่างพิกัดของสายอากาศตั้งตรงกับสายอากาศที่ถูกเอียง ใกล้เคียงกับระยะเอียงทาง Trigonometry และสามารถหาความแตกต่างของระยะได้ดังรูปที่ 4-9



รูปที่ 4-9 ผลต่างของระยะเอียงของสายอากาศด้วยมุม Roll เทียบกับระยะเอียงตามสมการที่ 2.37

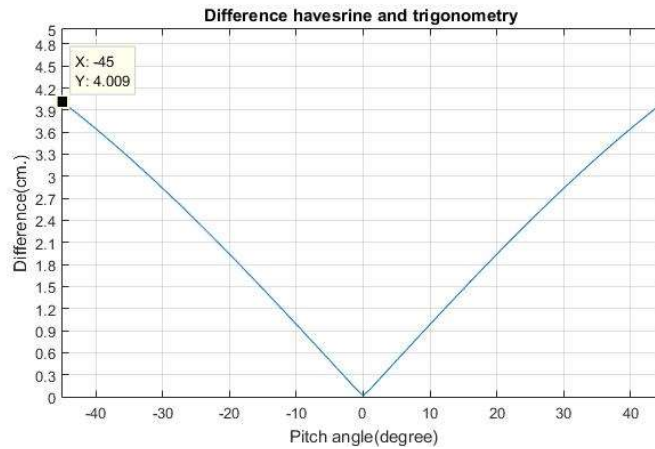
จากรูปที่ 4-9 พบว่าระยะเอียงของสายอากาศ มีความใกล้เคียงกับระยะเอียงในทางทฤษฎี โดยมีค่าต่างกันประมาณ 8.6 มิลลิเมตร สรุปได้ว่าสมการทางคณิตศาสตร์สามารถแก้ไขพิกัดของสายอากาศที่เอียงด้วยมุม Roll ได้อย่างถูกต้อง

4.4.2 ผลการจำลองเอียงสายอากาศด้วยมุม Pitch จากมุม -45° จนถึง 45°



รูปที่ 4-10 ระยะเอียงของสายอากาศด้วยมุม Pitch

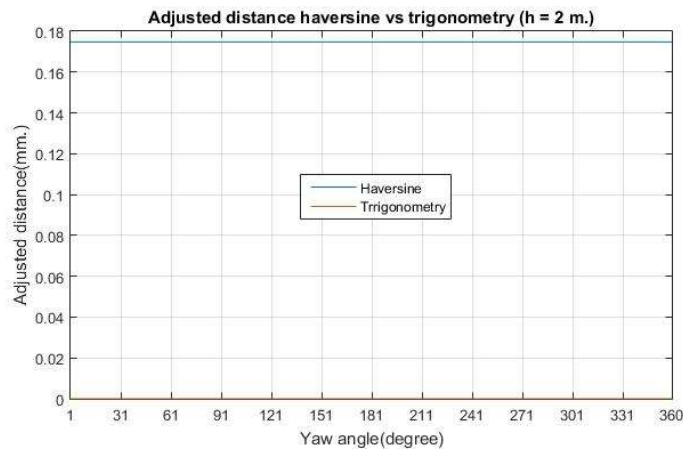
จากรูปที่ 4-10 พบว่าระยะเอียงของสายอากาศ (เส้น Haversine) มีความใกล้เคียงกับระยะเอียงทาง Trigonometry จากนั้นนำไปหาความแตกต่างด้วยกันจะได้ผลดังรูปที่ 4-11



รูปที่ 4-11 ผลต่างของระยะเอียงของสายอากาศด้วยมุม Pitch เทียบกับระยะเอียงตามสมการที่ 2.37

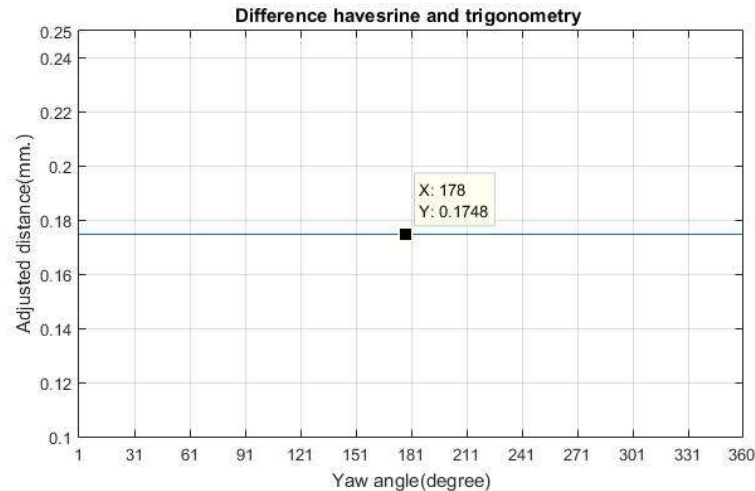
จากรูปที่ 4-11 พบว่าระยะเอียงของสายอากาศ มีความใกล้เคียงกับระยะเอียงในทางทฤษฎี โดยมีค่าประมาณ 4.01 เซนติเมตร สรุปได้ว่าสมการทางคณิตศาสตร์สามารถแก้ไขพิกัดของสายอากาศที่เอียงด้วยมุม Pitch ได้

4.4.3 ผลการจำลองเอียงสายอากาศด้วยมุม Yaw จากมุม 1° จนถึง 360°



รูปที่ 4-12 ระยะเอียงของสายอากาศด้วยมุม Yaw

จากรูปที่ 4-12 พบว่าระยะเอียงของสายอากาศด้วยมุม Yaw (เส้น Haversine) มีความแตกต่างกับระยะเอียงทาง Trigonometry ไม่เกิน 0.18 มิลลิเมตร สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4-13



รูปที่ 4-13 ผลต่างของระยะเอียงของอากาศด้วยมุม Yaw เทียบกับค่าศูนย์

จากรูปที่ 4-13 พบว่าระยะเอียงที่ได้จากการเอียงสายอากาศ มีความใกล้เคียงศูนย์ โดยมีค่าประมาณ 0.17 มิลลิเมตร สรุปโปรแกรมที่ออกแบบไว้สามารถแก้ไขพิกัดของสายอากาศที่เอียงด้วยมุม Yaw ได้ เมื่อนำผลต่างระยะเอียงของสายอากาศที่ได้จากการโปรแกรมที่ออกแบบเทียบกับระยะเอียงทางตรีโกณมิติ (กำหนดให้เป็น Delta1) มาแสดง จะได้ผลดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ผลต่างระยะเอียงที่ได้จากโปรแกรมเทียบกับระยะเอียงทางตรีโกณมิติ

ผลต่างระยะเอียงสูงสุด(m.)	Delta1
Roll [-45,45]	0.0086
Pitch [-45,45]	0.0401
Yaw [1,360]	0.0002

จากตารางที่ 4-5 โปรแกรมแก้ไขความคลาดเคลื่อนสายอากาศมีความคลาดเคลื่อนในการแก้ไขพิกัดสูงสุดประมาณ 4.01 เซนติเมตร สรุปได้ว่าผลการจำลองใช้โปรแกรมสามารถแก้ไขพิกัดที่เกิดจากความเอียงของสายอากาศได้ค่อนข้างถูกต้อง

4.5 ผลการทดสอบอุปกรณ์บนรถทางเกษตรกรรม

เมื่อได้ผลการทดลองจากหัวข้อที่ 4.1 และหัวข้อที่ 4.4 แล้ว จึงนำอุปกรณ์ที่ออกแบบขึ้นไปทดสอบบนรถทางเกษตรกรรมที่ถูกใช้งานจริง เพื่อทดสอบความแม่นยำในการระบุค่าพิกัดตำแหน่ง ลักษณะการเอียงของสายอากาศ การขับเคลื่อนของตัวรถและอุปกรณ์ที่ถูกติดตั้ง รวมถึงเสถียรภาพการทำงานของอุปกรณ์โดยรวม โดยตำแหน่งของการติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ บนรถทางเกษตรกรรม แสดงดังรูปที่ 4-14



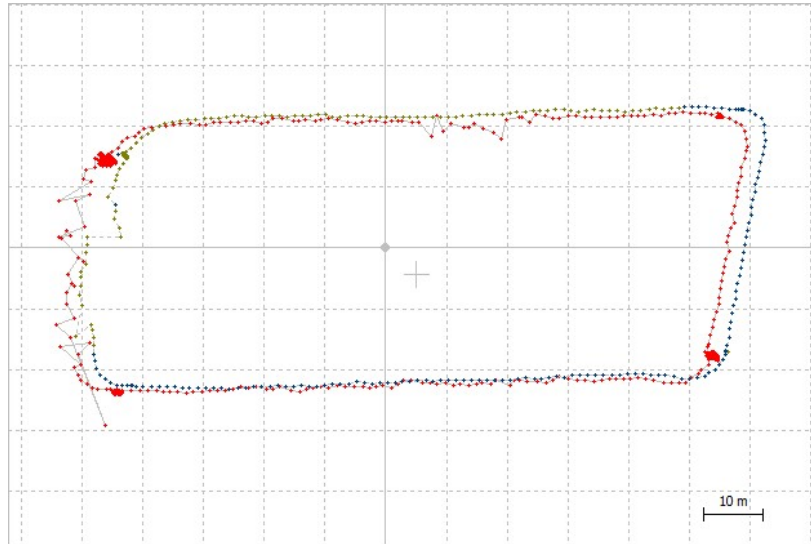
รูปที่ 4-14 การติดตั้งอุปกรณ์บนรถทางเกษตรกรรม

จากรูปที่ 4-14 จะเป็นการติดตั้งสายอากาศไว้บริเวณหลังคาร์ถ เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ Ublox M8T เข้ามายังกล่องอุปกรณ์หลัก และถูกติดตั้งไว้บริเวณเบาะนั่งของคนขับ เมื่อติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ เสร็จเรียบร้อยแล้ว จะทำการเคลื่อนที่รถทางเกษตรกรรมไปบนเส้นทางแปลงเกษตรกรรมจำลองรูปสี่เหลี่ยมที่มีขอบของพื้นที่เป็นเส้นตรง และตรวจสอบว่าผลการทดสอบการระบุค่าพิกัดตำแหน่งเป็นไปตามเส้นทางที่ได้ออกแบบไว้หรือไม่ โดยตัวอย่างของเส้นทางที่ใช้ทดสอบแสดงดังรูปที่ 4-15



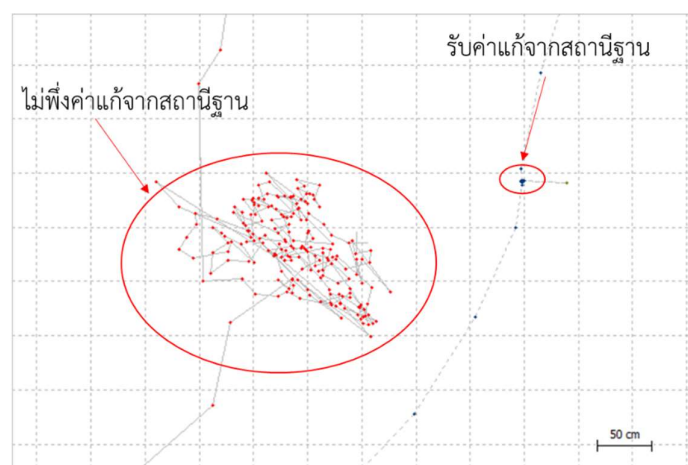
รูปที่ 4-15 เส้นทางทดสอบของรถทางเกษตรกรรม

เมื่อทำการทดสอบตามรูปที่ 4-14 และรูปที่ 4-15 เสร็จเรียบร้อยแล้วจึงนำค่าพิกัดตำแหน่งที่บันทึกไว้มาแสดงบนโปรแกรม RTKPLOT เพื่อดูผลการทดสอบการรับค่าพิกัดตำแหน่งตามเส้นทาง แสดงดังรูปที่ 4-16



รูปที่ 4-16 ผลการทดสอบบนรถทางเกษตรกรรม

จากผลการทดสอบบนเส้นทางในแปลงเกษตรกรรม ค่าพิกัดตำแหน่งที่ได้มีความใกล้เคียงกับเส้นทางรูปสี่เหลี่ยมที่มีขอบของพื้นที่เป็นเส้นตรง โดยช่วงจุดสีน้ำเงินแสดงสถานะ Fixed Solution ซึ่งให้ความแม่นยำในการระบุพิกัดตำแหน่งที่สูง ช่วงจุดสีเขียวแสดงสถานะ Float Solution ซึ่งมีความแม่นยำในการระบุพิกัดตำแหน่งน้อยกว่าช่วงจุดสีน้ำเงิน ซึ่งอาจเกิดจากการมีวัตถุบดบังการรับสัญญาณของสายอากาศ หรือจำนวนดาวเทียมที่รับสัญญาณได้มีจำนวนน้อยเกินไป และจะมีในบางช่วงของเส้นทางที่ไม่ปรากฏจุดพิกัดตำแหน่ง (ขอบขอบพื้นที่ทางด้านซ้าย) ซึ่งมีสาเหตุเนื่องจากพื้นที่ในช่วงนั้นมีต้นไม้สูงบดบังจำนวนมาก ทำให้สายอากาศไม่สามารถรับสัญญาณดาวเทียมได้ โดยผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการระบุตำแหน่งโดยไม่อาศัยค่าแก้จากสถานีฐาน (จุดสีแดง) พบว่ามีประสิทธิภาพในการนำทางที่ดีกว่า โดยทำการเปรียบเทียบในขณะหยุดนิ่งเป็นเวลา 30 วินาที ดังรูปที่ 4-17



รูปที่ 4-17 ภาพเปรียบเทียบในการระบุตำแหน่งระหว่างระบบดั้งเดิม และใช้ค่าแก้จากสถานีฐาน

จากผลการเปรียบเทียบพบว่าหากไม่ใช้ค่าแก้จากสถานีฐาน ตำแหน่งที่ได้จะกระจายกระจายอยู่ในพื้นที่รัศมีประมาณ 2 เมตร แต่เมื่อได้รับค่าแก้จากสถานีฐานแล้ว ค่าความผิดพลาดที่ได้ จะอยู่ในกลุ่มรัศมีประมาณ 2 เซนติเมตร ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการประมาณตำแหน่งโดยได้รับค่าแก้จากสถานีฐานมารวมด้วยนั้น สามารถลดความผิดพลาดให้อยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำกว่า 30 เซนติเมตรได้

เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งด้วยเครื่องรับดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสแบบหนึ่งความถี่ที่ผู้ออกแบบได้สร้างไว้ จึงนำผลการทดลองทั้งหมดมาสรุปเป็นตารางเปรียบเทียบผลการทดสอบระบบต่างๆ ไว้ดังตารางที่ 4-6 โดยมีตัวชี้วัดประสิทธิภาพได้แก่ 1. จำนวนดาวเทียมในระบบ (Number of satellites) 2. เปอร์เซ็นต์ข้อมูลผลเฉลยแบบฟิกซ์ (Fixed rate by the ratio test) 3. เวลาที่ใช้ในการหาผลเฉลยแบบฟิกซ์ (Time to first fix: TTFF)

ตารางที่ 4-6 ผลการเปรียบเทียบการทดสอบประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่ง

ตัวชี้วัดประสิทธิภาพ		1 KM	3 KM	6 KM
Number of satellites	GPS	8	8	8
	GNSS	25	27	26
Fixed rate by the ratio test	GPS	88.67%	100.00%	27.81%
	GNSS	100.00%	100.00%	100.00%
Time to first fixed	GPS	34.55 min.	7.42 min.	34.55 min.
	GNSS	7 sec.	175 sec.	73 sec.

จากผลการทดลองจากตารางที่ 4-6 พบว่าเมื่อเพิ่มระบบดาวเทียมดวงอื่นๆ เข้ามาช่วยในการประมาณตำแหน่ง พบว่าจำนวนดาวเทียมจากเดิมอยู่ที่ประมาณ 8 ดวงในระบบ GPS สามารถเพิ่มมาเป็นประมาณ 25 – 27 ดวงแล้วแต่ช่วงเวลาได้ โดยผลของการเพิ่มจำนวนดาวเทียมขึ้น ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการประมาณตำแหน่งเช่นค่า Fixed rate by the ratio test ที่สามารถให้ผลเฉลยแบบฟิกซ์ได้มากขึ้น กล่าวคือสามารถประมาณตำแหน่งได้อย่างต่อเนื่องโดยที่ยังมีค่าความต้องการของตำแหน่งที่สูง แม้จะอยู่ห่างจากสถานีฐานประมาณ 6 กิโลเมตรได้ และสุดท้ายนี้ ข้อดีในการเพิ่มจำนวนดาวเทียมในการประมาณตำแหน่งนั้น ยังส่งผลต่อเวลาในการรอให้ระบบพร้อมใช้งานหรือ Time to first fixed โดยลดลงจากประมาณครึ่งชั่วโมง เหลือมาอยู่ที่ประมาณไม่เกิน 3 นาทีได้

4.6 การประเมินราคาออกแบบอุปกรณ์

สำหรับในส่วนการประเมินราคาต้นทุนต่ออุปกรณ์ 1 ชุดที่สร้างนี้ จะประกอบไปด้วยรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

- Raspberry Pi 3 Model B จำนวน 2 ชุด x 1,500 บาท	= 3,000	บาท
- อุปกรณ์สมองกลฝังตัว จำนวน 2 ชุด x 150 บาท	= 300	บาท
- หน่วยความจำ SD Card จำนวน 2 ชิ้น x 500 บาท	= 1,000	บาท
- โมดูลรับสัญญาณ GNSS จำนวน 2 ชุด x 2,500 บาท	= 5,000	บาท
- เสาคอากาศรุ่น TW-3740 จำนวน 2 ต้น x 4,200 บาท	= 8,400	บาท
- สาย Mini USB จำนวน 6 เส้น x 50 บาท	= 300	บาท

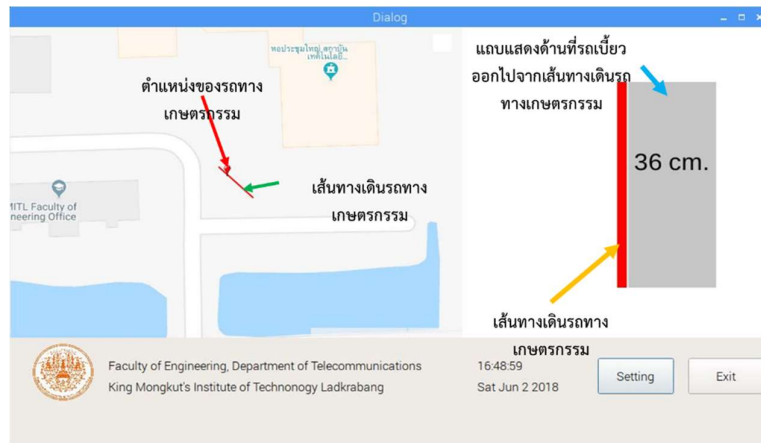
- สาย Micro USB จำนวน 4 เส้น x 50 บาท	= 200	บาท
- สายนำสัญญาณ TNC-SMA จำนวน 2 เส้น x 500 บาท	= 1,000	บาท
- ค่าออกแบบซอฟต์แวร์	= 10,000	บาท
- วงจรแปลงแรงดันไฟฟ้า	= 570	บาท
- หน้าจอแสดงผล	= 2,200	บาท
- โมดูล Wifi จำนวน 2 เครื่อง x 3500 บาท	= 7,000	บาท
- aircard จำนวน 2 เครื่อง x 740 บาท	= 1,480	บาท
- ถังกักน้ำจำนวน 2 ถัง x 450 บาท	= 900	บาท
- battery จำนวน 2 ก้อน x 800 บาท	= 1,600	บาท
- Tripod	= 1,500	บาท
รวมต้นทุนที่ใช้ทั้งสิ้น	44,450	บาทต่อชุด

4.7 ตัวอย่างการนำไปใช้ประโยชน์

อุปกรณ์ต้นแบบที่พัฒนาขึ้น จะนำไปติดตั้งกับรถทางเกษตรกรรม ดังรูปที่ 4-18 โดยสามารถระบุตำแหน่งด้วยความแม่นยำในระดับเซนติเมตรได้ และยังสามารถพัฒนาการสร้างเส้นทางจราจรในพื้นที่ทางเกษตรกรรม สามารถบันทึกเส้นทางไว้ใช้งานในครั้งถัดไป รวมทั้งบอกระยะที่เบี่ยงจากเส้นทางดังรูปที่ 4-19 เพื่อแจ้งเตือนให้ผู้ขับขี่ ควบคุมรถให้เดินตรงเส้นทางเดิมได้ตลอดเวลา และสุดท้ายนี้ยังสามารถประยุกต์เข้ากับการรับค่าข้อมูลต่างๆ จากผู้ใช้ เพื่อสามารถเพิ่มเติมข้อมูลลงไปในแผนที่ได้



รูปที่ 4-18 การติดตั้งอุปกรณ์ต้นแบบกับรถทางเกษตรกรรม



รูปที่ 4-19 การแสดงตำแหน่งและเส้นทางการเดินรถทางเกษตรกรรมของผู้ขับขี่

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

จากผลการออกแบบระบบระบุตำแหน่งจากดาวเทียมจีเอ็นเอสเอสด้วยวิธี RTK (Real-Time Kinematic) โดยใช้อุปกรณ์ Raspberry Pi, Arduino nano, Ublox M8T GNSS และ TW 3710 พบว่าระบบทั้งหมดสามารถเชื่อมต่อกันได้ โดยได้เพิ่มปุ่มควบคุมอุปกรณ์และไฟแสดงสถานะของระบบ เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถทำงานได้โดยไม่ต้องตั้งค่าและเชื่อมต่อกับ Raspberry pi ได้โดยตรง

ถัดมาเป็นขั้นตอนในการหาตำแหน่งของสถานีฐานโดยเปรียบเทียบระหว่างการเลือกใช้เครื่องรับ 1 และ 2 ความถี่ รับค่าแก้ม้าจากเครื่องรับบนสถานีฐานอีกทอดหนึ่ง พบว่าเมื่อเลือกใช้สถานีฐานส่งค่าแก่ 2 ความถี่และสถานีฐานที่ใช้คำนวณตำแหน่ง 2 ความถี่เช่นกันจะมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.71 เซนติเมตร โดยใช้เวลาในการคำนวณ 103 วินาที โดยเมื่อเปลี่ยนเครื่องรับจากสถานีฐานที่ใช้ในการคำนวณตำแหน่งเป็นแบบ 1 ความถี่ ไม่ว่าสถานีฐานที่ส่งค่าแก่เป็น 1 หรือ 2 ความถี่ พบว่ามีความคลาดเคลื่อนในการประมาณตำแหน่งเท่ากันที่ 1.36 เซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าที่ไม่แตกต่างไปจากกรณีแรกมากนัก แต่พบว่าใช้เวลาในการคำนวณตำแหน่งเพิ่มขึ้นเป็น 477 วินาที โดยระยะเวลาที่ทดลองนี้ จะเป็นค่าโดยเฉลี่ยสำหรับเครื่องรับ 1 ความถี่ที่ใช้ในโครงการนี้ต่อไป

สำหรับผลการทดลองระยะห่างระหว่างสถานีฐานและสถานีจลน์ตั้งแต่ 1 ถึง 6 กิโลเมตร พบว่าเมื่อวัดประสิทธิภาพในการคำนวณตำแหน่งเครื่องรับโดยใช้เกณฑ์ร้อยละ 95 พบว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้คือไม่เกิน 30 เซนติเมตรถึงแม้ว่าระบบจะมีบางช่วงเวลาเกิดความคลาดผิดพลาดในการเชื่อมต่อกัน ทำให้ความผิดพลาดในการประมาณตำแหน่งพุ่งสูงขึ้นมา แต่ความผิดพลาดนี้สามารถออกแบบระบบแจ้งเตือนเพื่อไม่ให้ระบบที่เชื่อมต่ออยู่นำไปใช้ในการควบคุมอุปกรณ์การเดินทางในภายหลังได้

ภาคผนวก ก
บทความสำหรับการเผยแพร่

หน้าปกบทความการเผยแพร่



สารบัญของบทความการเผยแพร่

PID 61 : The Improvement of Airborne Gravity Data in Chao Phraya Basin using Cross-over Adjustment

Chawis Srimanee, Puttipol Dumrongchai, Nuttanon Duangdee,
Chiangmai University, Royal Thai Survey Department, Thailand

pp. 643-646

PID 69 : Monitoring Precipitable Water Vapor in Real-Time using Kinematic GPS Precise Point Positioning in Thailand

Chaiyut Charoenphon, Chalermchon Satirapod,
Chulalongkorn University, Thailand

pp. 647-650

PID 85 : Investigation of Backscattering Mechanism Extraction from Sentinel-1 Dual Polarization SAR data

Anuphao Aobpaet,
Kasetsart University, Thailand

pp. 651-654

PID 124 : Study on the Stochastic Model for VRS Network-based GNSS Positioning

Thanate Jongrujanin, Chalermchon Satirapod,
Chulalongkorn University, Thailand

pp. 655-658

SS-10-2

Room : 1101

Saturday, 7 July 2018 : 11.00-12.30

PID 267 : Airborne Gravimetric Geoid Determination in Thailand

Puttipol Dumrongchai, Chawis Srimanee, Nuttanon Duangdee,
Chiangmai University, Royal Thai Survey Department, Thailand

pp. 659-662

PID 279 : Thai GNSS and Space Weather Information Center

Acharaporn Bumrungrkit, Pornchai Supnithi,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL), Thailand

pp. 663-665

PID 280 : The Analysis of Positioning Accuracy from the Usage of Multi-Constellation in Single-Frequency RTK Technique in Bangkok

Jirapoom Budtho, Nattananong Nilchan, Natthaphon Popaichit, Natdanai Ngamprasert, Watid Phakphisut,
Pornchai Supnithi,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMUTL), Thailand

pp. 666-668

SS-11

Room : 1102

Friday, 6 July 2018 : 14.45-15.30

PID 66 : Oblique Decision Tree Algorithm with Minority Entropy for Class Imbalanced Problem

Artit Sagoolmuang, Krung Sinapiromsaran,
Chulalongkorn University, Thailand

pp. 669-672

SS-12-1

Room : 1101

Friday, 6 July 2018 : 8.30-10.30

PID 125 : Evaluating the Steering Entropy as a Function of Drowsiness Subjected to Whole-body Vibration

A. Azizan, Husna Padil, Noor Hafidzah Jabarullah,
Universiti Kuala Lumpur, Malaysia

pp. 673-676

PID 135 : The Incremental Analysis for Management Decision Making: Repair or Replace of the Hydraulic Landing Gear Trainer

The analysis of positioning accuracy from the usage of multi-constellation in single-frequency RTK technique in Bangkok.

Jirapoom Budtho, Nattanon Nilchan, Natthaphon Popaichit, Natdanai Ngamprasert, Watid Phakphisut and Pornchai Supnithi

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok 10520, Thailand.

60601161@kmitl.ac.th, 57010397@kmitl.ac.th, 57010400@kmitl.ac.th, 57010421@kmitl.ac.th,
watid.ph@kmitl.ac.th, pornchai.su@kmitl.ac.th

Abstract

The real-time kinematic (RTK) technique is key to reduce the errors of rover station positioning to sub-meter levels with the aid of base stations. When using the Global Navigation Satellite Systems (GNSS) with single-frequency receivers, some issues affect the positioning performances such as the high positioning errors, low fixed rates and long Time-to-first-fix (TTFF). Hence, this paper analyzes the usage of the multiple GNSS such as QZSS, Galileo and BDS system in Bangkok, Thailand. There are three parameters which are used to compare the positioning improvements. The results show that the system with the lowest number of satellites, the GPS+QZSS system, can still be useful to improve the positioning error below 10 cm. Finally, from all the parameters of positioning performance, the BDS system gives the most improvement of positioning.

Keywords: single-frequency RTK, multiple GNSS positioning, positioning performance

1. Introduction

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) play an essential role in modern-day positioning technology. With the help of the carrier-phase, Real-Time Kinematic (RTK) technique and dual-frequency GPS receivers, the rover station can achieve sub-meter levels in positioning. Nevertheless, when using the GPS system with the single-frequency receivers, the positioning issues such as the high positioning errors, low fixed rates by the ratio test and longtime of the first fix occurs. Nowadays, more positioning satellites are launched to improve the positioning ability such as the Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) [1], European GNSS (Galileo) [2] and Beidou navigation system from China [3]. The improvement of positioning with the aid of GNSS system was studied in Japan [4] and China region [5]. Hence, to analyze the performance in the Bangkok region, this paper investigates the aid of these systems to improve the performance of single-frequency positioning. The methodology of obtaining the position is reviewed in

Section 2. The experimental setup and the parameters of positioning improvement are described in Section 3. The compared results are shown in Section 4. Finally, the conclusions are made in Section 5.

2. Methodology

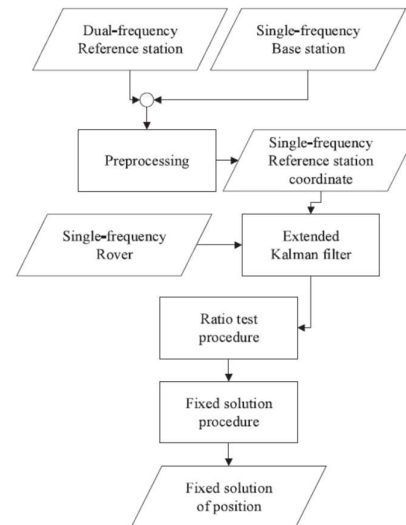


Figure 1. The flowchart in the RTKLIB GNSS data processing software.

We use the RTKLIB software [6] for the multi-GNSS data processing to obtain the positioning solutions as shown in Fig. 1. By using the Extended Kalman filter [7], a state vector for unknown model parameters and its covariance matrix can be estimated with a measurement vector at each epoch. The double-difference and the Least Square AMBIGUITY Decorrelation Adjustment (LAMBDA) method [8] are used to obtain the appropriate solution of the integer ambiguity vector $\hat{\mathbf{N}}$, i. e.,

$$\hat{\mathbf{N}} = \arg \min_{\mathbf{N} \in \mathbf{Z}} \left((\mathbf{N} - \hat{\mathbf{N}})^T \mathbf{Q}_N^{-1} (\mathbf{N} - \hat{\mathbf{N}}) \right), \quad (1)$$

where $\hat{\mathbf{N}}$ is the vector of float-solution integer ambiguities obtained from the extended Kalman filter, $\mathbf{N}$ is a candidate vector of the integer ambiguity in the search space $\mathbf{Z}$ and $\mathbf{Q}_N$ is the covariance matrix.

To validate the reliability of the integer ambiguity solution, the ratio test procedure chooses the best and the second candidates from the LAMBDA to compute the reliability value and then compare it with the threshold β , i. e.,

$$\frac{(\hat{\mathbf{N}} - \hat{\mathbf{N}}_{2nd})^T \mathbf{Q}_N^{-1} (\hat{\mathbf{N}} - \hat{\mathbf{N}}_{2nd})}{(\hat{\mathbf{N}} - \hat{\mathbf{N}}_{1st})^T \mathbf{Q}_N^{-1} (\hat{\mathbf{N}} - \hat{\mathbf{N}}_{1st})} > \beta. \quad (1)$$

Finally, if the solution of integer ambiguities pass the ratio test, the fixed solution of position vector will be obtained from the fixed solution procedure.

3. Experimental setup

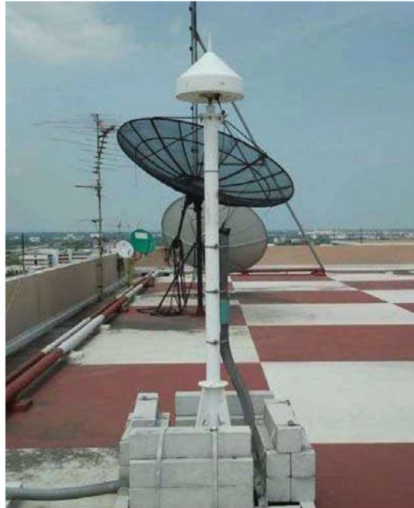


Figure 2. The dual-frequency GNSS reference station located on KMITL.

The permanent reference station with the dual-frequency GNSS antenna (Fig. 2) is used to obtain the precise position of the single-frequency base station (Fig. 3), which is located away from the rover testing area (Fig. 4). The baselines between the single-frequency receivers are 1 km (DOY 265 2017), 3 km (DOY272 2017) and 6 km (DOY 019 2018).



Figure 3. Portable single-frequency base station.



Figure 4. The rover testing area.

The reference points in the rover testing area are marked using dual-frequency receivers, located on a parking lot of the convention hall at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL) as shown in Fig. 5.

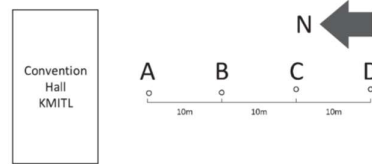


Figure 5. The reference points of the rover station.

Once the positioning solution of the rover is obtained and fixed, the rover station is moved to other reference points of interest (A to D) and held for at least 30 seconds. These positioning solutions are compared with the reference one, and then the performances of the positioning system are evaluated. The satellite systems used in this paper are divided into three groups, GPS only (reference), GPS+QZSS and GPS+BDS.

4. Results and discussions

4.1 The average number of satellites.

The average number of satellites from each constellation is shown in Table 1. These results show that when we use only GPS system, the number of satellites in the RTK position estimation is approximately eight satellites. The QZSS system is designed to use in a specific region, and it can see a few satellites. However, for the Compass (BeiDou) from China, there are five geostationary satellites which can be seen in Thailand region. When included with the rest of this system, the number of the visible satellite is about 12 satellites, which can be used in positioning without using the GPS system.

Table 1. Number of visible global positioning satellites.

	1 KM	3 KM	6 KM
GPS	8	8	8
GPS+QZSS	9	10	10
GPS+BDS	21	21	19

4.2 Positioning errors.

The 95% error from each considered constellation is shown in Table 2. These results show that when using only GPS in the RTK positioning, the float solution can reduce the positioning error to almost 20 cm. When including the other systems, the error can be achieved below 10 cm. The most improvement is the BDS which can decrease the error to about 5 cm. in all baseline.

Table 2. The 95% error from the reference point.

	1KM (cm)	3KM (cm)	6KM (cm)
GPS	19.2	3.7	11.8
GPS+QZSS	8.4	3.7	3.5
GPS+BDS	5.3	5.2	4.1

4.3 The time to first fix (TTFF).

The time to first fix from each considered constellation is shown in Table 3. The results show that more satellites lead to lower initiating time of positioning. Typically, the time to the first fix of single-frequency RTK positioning is about half an hour. When using twice number of satellites such as GPS + BDS, the TTFF is lower than 200 seconds or in 10 seconds for the 1km baseline.

Table 3. Comparison of time to first fix for the considered system.

	1KM(sec.)	3KM(sec.)	6KM(sec.)
GPS	2073	445	2073
GPS+QZSS	400	313	400
GPS+BDS	10	199	106

5. Conclusion

This work investigates the benefits of aiding of the other global positioning satellites in the single-frequency RTK positioning system. The results show that the lowest number of the satellites such as the GPS+QZSS system can be useful to improve the positioning error below 10 cm. Finally, from all the parameters of positioning performance, the BDS system gives the most improvement of positioning.

Acknowledgment

This work is partially funded by The Thailand Research Fund (TRF) (grant number RDG60T0171). The authors are sincerely thankful to King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for providing the GNSS reference base station data and the rover testing area. In addition, the authors thank Dr. Vasu Udompetaiikul for technical discussions on many occasions

References

- [1] N. Inaba, A. Matsumoto, H. Hase, S. Kogure, M. Sawabe, and K. Terada, "Design concept of Quasi Zenith Satellite System," *Acta Astronaut.*, vol. 65, no. 7–8, pp. 1068–1075, 2009.
- [2] European Space Agency, "European GNSS (Galileo) Open Service Signal In Space Interface Control Document," *Eur. Union*, no. 1, 2010.
- [3] C. Han, Y. Yang, and Z. Cai, "BeiDou Navigation Satellite System and its time scales," *Metrologia*, vol. 48, no. 4, 2011.
- [4] H. Namie, N. Tanaka, and A. Yasuda, "RTK-GPS positioning in Japan by GPS-based control station via DMCA mobile radio communication system," in *Proceedings of 1999 National Technical Meeting ION*, 1999, pp. 495–503.
- [5] L. Lau, H. Tateshita, and K. Sato, "Impact of Multi-GNSS on Positioning Accuracy and Multipath Errors in High-Precision Single-Epoch Solutions—A Case Study in Ningbo China," *J. Navig.*, vol. 68, no. 5, pp. 999–1017, 2015.
- [6] T. Takasu and A. Yasuda, "Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB," *Int. Symp. GPS/GNSS*, pp. 4–6, 2009.
- [7] A. Gelb, *Applied Optimal Estimation*. The M.I.T. Press, 1974.
- [8] P. De Jonge and C. Tiberius, "The LAMBDA method for integer ambiguity estimation: implementation aspects," *Publ. Delft Comput. Centre, LGR-Series*, vol. 12, no. 12, pp. 1–47, 1996.

ภาคผนวก ข
ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์โครงการ

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์โครงการ

กิจกรรมในข้อเสนอโครงการ/หรือจาก การปรับแผน	ผลสำเร็จ (%)	ในกรณีล่าช้า (ผลสำเร็จไม่ถึง 100%) ให้ ระบุสาเหตุและการแก้ไขที่ท่านดำเนินการ
ติดตั้งซอฟต์แวร์ประมวลผล GNSS ลงบน บอร์ดสมองกลฝังตัว Raspberry pi	100%	
ทดสอบซอฟต์แวร์ประมวลผล GNSS	100%	
ติดตั้งเครือข่าย 3G ลงบนบอร์ดสมองกล ฝังตัว Raspberry pi	100%	
ทดสอบระบบเครือข่าย 3G	100%	
ออกแบบอุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยตาม เทียม	100%	
ทำการทดลองภายในพื้นที่ของสถาบัน	100%	
ออกแบบหน้าต่าง GUI เพื่ออำนวยความสะดวก สะดวกแก่ผู้ใช้งาน	100%	

ภาคผนวก ค

ตารางการเปรียบเทียบกิจกรรมที่เสนอในข้อเสนอโครงการ และกิจกรรมที่ทำจริง

ตารางการเปรียบเทียบกิจกรรมที่เสนอในข้อเสนอโครงการ และกิจกรรมที่ทำจริง

ลำดับที่	กิจกรรม	ช่วงระยะเวลา ตามแผน	ช่วงระยะเวลาที่ ทำจริง	ข้อ ชี้แจง
1	ติดตั้งซอฟต์แวร์ประมวลผล GNSS ลงบน บอร์ดสมองกลฝังตัว Raspberry pi	เดือนที่ 1	เดือนที่ 1	
2	ทดสอบซอฟต์แวร์ประมวลผล GNSS	เดือนที่ 2	เดือนที่ 2	
3	ติดตั้งเครือข่าย 3G ลงบนบอร์ดสมองกลฝัง ตัว Raspberry pi	เดือนที่ 1	เดือนที่ 1	
4	ทดสอบระบบเครือข่าย 3G	เดือนที่ 2	เดือนที่ 2	
5	ออกแบบอุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยตามเทียม	เดือนที่ 3-6	เดือนที่ 3-6	
6	ทำการทดลองภายในพื้นที่ของสถาบัน	เดือนที่ 7-9	เดือนที่ 3-6	
7	ออกแบบอุปกรณ์ระบุตำแหน่งด้วยตามเทียม	เดือนที่ 3-6	เดือนที่ 3-6	
8	ทำการทดลองภายในพื้นที่ของสถาบัน	เดือนที่ 7-9	เดือนที่ 3-6	
9	ออกแบบระบบ GUI เพื่ออำนวยความสะดวก แก่ผู้ใช้งาน	เดือนที่ 9-12	เดือนที่ 7-12	