

การระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้างยิ่งยวด

POSITIONING TECHNIQUE USING ULTRA-WIDEBAND TECHNOLOGY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร และเกษตรอัจฉริยะ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2567

KMITL-2024-EN-M-117-307

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FIELD POSITIONING USING ULTRA-WIDEBAND TECHNOLOGY



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN FOOD AND AGRICULTURAL INTELLIGENCE
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2024
KMITL-2024-EN-M-117-307

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2024

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยีคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้างยิ่งยวด
นักศึกษา	นาย ชานน ธิติกุลวัฒน์
รหัสประจำตัว	66016025
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหาร และเกษตรอัจฉริยะ
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.วสุ อุดมเพทายกุล

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพเทคนิคการระบุตำแหน่งในพื้นที่เปิดโล่งโดยใช้เทคโนโลยีคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้างยิ่งยวด (Ultra-wideband, UWB) โดยมุ่งเน้นศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความแม่นยำในการวัดระยะทางและระบุตำแหน่ง ได้แก่ ระยะห่างระหว่างโมดูล UWB และมุมการวัดระยะ ระบบที่พัฒนาขึ้นใช้โมดูล MaUWB (Shenzhen Makerfabs Corp., China) ที่ความถี่ 6.5 GHz ทำการทดลองในพื้นที่ 2 ประเภท ได้แก่ สนามทดลอง (คอนกรีต) และแปลงเกษตร (สนามหญ้า) โดยใช้เครื่องรับ RTK GNSS เป็นวัดพิกัดอ้างอิง

ผลการศึกษาพบว่าเทคโนโลยี UWB สามารถให้ค่าความแม่นยำในการวัดระยะทางในระดับที่ยอมรับได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวัดในระยะไม่เกิน 200 เมตร โดยมีค่า RMSE ของการวัดระยะทางเท่ากับ 0.13 เมตร และความแม่นยำจะได้รับผลกระทบจากทิศทางการรับ-ส่งสัญญาณจากการเปรียบเทียบกับพิกัดอ้างอิงที่วัดด้วย RTK GNSS พบว่าเทคโนโลยี UWB ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งใกล้เคียงกับค่าจริง โดยมีค่า RMSE เท่ากับ 0.11 เมตร ในการระบุตำแหน่งแบบ 2 มิติ (x และ y) และ 1.91 เมตร ในการระบุตำแหน่งแบบ 3 มิติ (x, y และ z) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของเทคนิคนี้ในการระบุตำแหน่งในแนวตั้ง

งานวิจัยนี้มีส่วนช่วยในการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งที่มีความแม่นยำสำหรับการใช้งานทางการเกษตร ซึ่งมีประโยชน์ต่อภารกิจต่างๆ เช่น การนำทางอัตโนมัติและการควบคุมหุ่นยนต์ แนะนำให้มีการวิจัยเพิ่มเติมเพื่อตรวจสอบผลกระทบของสิ่งกีดขวางและสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน รวมถึงการพัฒนาเทคนิค หรืออัลกอริทึมในการระบุตำแหน่ง 3 มิติ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งในแนวตั้ง

คำสำคัญ: การระบุตำแหน่ง, Ultra-wideband, UWB, Trilateration, การประเมินความแม่นยำ, เกษตรแม่นยำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Positioning Technique using Ultra-Wideband Technology
Student	Mr. Chanon Thitikulwat
Student ID.	66016025
Degree	Master of Engineering
Program	Food and Agricultural Intelligence Engineering
Year	2024
Thesis Advisor	Assist. Prof. Dr. Vasu Udompetaikul

ABSTRACT

This study aims to develop and evaluate the performance of a positioning technique in open areas using Ultra-wideband (UWB) technology. The research focuses on investigating factors affecting the accuracy of distance measurement and positioning, such as the distance between UWB modules and the angle of measurement. The developed system utilizes MaUWB modules (Shenzhen Makerfabs Corp., China) operating at 6.5 GHz. Field experiments were conducted in two types of areas: a test field (concrete) and an agricultural field (grass). An RTK GNSS receiver served as a reference for coordinate measurements.

Results show that UWB technology can provide acceptable distance measurement accuracy, especially for distances within 200 m. Distance measurements had an RMSE of 0.13 meters. The accuracy is influenced by the direction between the transmitter and receiver. Compared to the RTK GNSS reference, the developed UWB technology showed comparable positioning performance. The system achieved an RMSE of 0.11 m for 2D positioning (x and y) and 1.91 m for 3D positioning (x, y, and z), highlighting limitations in vertical positioning using this technique.

This research contributes to developing accurate positioning systems for agricultural applications, with potential benefits for tasks such as autonomous navigation and robotic control. Further research is recommended to investigate the impact of obstacles and varying environmental conditions, as well as developing techniques or algorithms for 3D positioning to improve vertical accuracy.

Keywords: Positioning, Ultra-wideband, UWB, Trilateration, Accuracy evaluation, Precision Agriculture

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องการระบุตำแหน่งด้วยคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้างยิ่งยวดสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณา ความอนุเคราะห์ และคำปรึกษาจากบุคคลหลายท่าน ตลอดทั้งความรู้ต่างๆ อุปกรณ์ และสถานที่ในการทำงานวิจัยนี้ ข้าพระเจ้าขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ข้าพระเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.วสุ อุดมเพทายกุล อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำ ชี้แนะแนวทาง ตรวจสอบผลงานและแก้ไขข้อผิดพลาดในเอกสาร และงานวิจัยด้วยความเอาใจใส่ในงานวิจัยสามารถสำเร็จลุล่วงด้วยดี รวมถึงสนับสนุนต้นทุนงานวิจัย และให้ความช่วยเหลือเรื่องต่างๆอย่างเต็มที่ ข้าพระเจ้าขอแสดงความขอบพระคุณอย่างสูงในความตั้งใจ และความทุ่มเทของท่านอาจารย์อีกครั้ง ไฉน ที่นี้ ขอขอบพระคุณ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์พื้นที่การทดลองในงานวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณ วัดปลุกศรีทธา เขตลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร ที่ให้ความอนุเคราะห์พื้นที่การทดลองในงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ข้าพระเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวของข้าพระเจ้าที่ให้การเลี้ยงดูอบรมสั่งสอน และให้การศึกษาอย่างเต็มที่ ทั้งยังให้คำปรึกษา และกำลังใจ เป็นแรงผลักดันให้ข้าพระเจ้าทำสิ่งต่างๆได้สำเร็จลุล่วงเสมอมา หากมีสิ่งใดขาดตกบกพร่อง หรือผิดพลาดประการใด ข้าพระเจ้าขอกราบอภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ชานน ธิติกุลวัฒน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 คลื่นวิทยุแถบความถี่กว้างยิ่งยวด (Ultra-Wideband: UWB).....	3
2.1.1 หลักการวัดระยะด้วย UWB.....	7
2.1.2 Antenna Delay.....	10
2.2 Global Navigation Satellite System หรือ GNSS.....	11
2.2.1 หลักการทำงานของ GNSS เบื้องต้น.....	11
2.2.2 Real Time Kinematics: RTK.....	12
2.2.3 การอ่านข้อมูล GNSS.....	14
2.3 การสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์.....	14
2.3.1 การสื่อสารแบบขนาน (Parallel Communication).....	14
2.3.2 การสื่อสารแบบอนุกรม (Serial Communication).....	15
2.3.3 การสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless Communication).....	16
2.4 วิธีการระบุตำแหน่ง.....	16
2.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ.....	18
2.5.1 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error: RMSE).....	18
2.5.2 ค่าเฉลี่ย (mean: \bar{x}).....	19
2.5.3 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: SD).....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation).....	19
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 วิธีการทดลอง	23
3.1 การพัฒนาระบบสำหรับทดสอบการระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยี UWB.....	23
3.1.1 การพัฒนาฮาร์ดแวร์.....	23
3.1.2 การพัฒนาซอฟต์แวร์.....	27
3.1.3 การคำนวณตำแหน่งของ tag	29
3.2 การศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างโมดูล และทิศทางการวัดระยะ	30
3.2.1 วิธีการทดลอง.....	30
3.2.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	31
3.3 การทดลองการระบุตำแหน่งนอกรอาคาร.....	31
3.3.1 วิธีการทดลอง.....	32
3.3.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	32
3.4 การทดลองการระบุตำแหน่งในแปลงทดสอบ	33
3.4.1 วิธีการทดลอง.....	33
3.4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	33
บทที่ 4 ผลการศึกษา.....	35
4.1 การศึกษาอิทธิพลของระยะห่างและทิศทางการวัดระยะทางด้วยเทคนิค UWB	35
4.2 ความแม่นยำในการการระบุตำแหน่งนอกรอาคาร	41
4.3 ความแม่นยำในการการระบุตำแหน่งในแปลงทดสอบ	45
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	49
5.1 สรุปผลการวิจัย	49
บรรณานุกรม.....	51
ภาคผนวก ก ซอฟต์แวร์ และการคำนวณตำแหน่งด้วย MatLab R2022b	54
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง	56
ภาคผนวก ค ลักษณะจำเพาะของ RTK GNSS	89
ประวัติผู้เขียน.....	93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2.1 เวลาพัลส์ของคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้างในแต่ละช่องสัญญาณ	3
ตารางที่ 2.2 กำลังการส่งสัญญาณสูงสุดของสัญญาณ UWB ที่ความถี่สัญญาณต่างๆ [6].....	5
ตารางที่ 2.3 ช่องสัญญาณ ความถี่กึ่งกลาง และกลุ่มสัญญาณของสัญญาณ UWB [5].....	5
ตารางที่ 2.4 การแปลความหมายค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	20
ตารางที่ 3.1 การกำหนดค่าสถานะการทำงานของโมดูล MaUWB	28
ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยของ error ที่ระยะทางที่แตกต่างกัน	37
ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของ error ของ anchor ที่แตกต่างกัน	38
ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของ error ของมุมในการวัดที่แตกต่างกัน.....	38
ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยของ error ที่ระยะทางที่แตกต่างกัน (selected ranges).....	39
ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยของ error ของ anchor ที่แตกต่างกัน (selected ranges).....	39
ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยของ error ของมุมในการวัดที่แตกต่างกัน (selected ranges)	40
ตารางที่ 4.7 ค่า error และ RMSE ของการวัดระยะทาง การระบุพิกัด ด้วยเทคนิค UWB.....	44
ตารางที่ 4.8 ค่า error และ RMSE ของการวัดระยะทาง การระบุพิกัด ด้วยเทคนิค UWB.....	48
ตารางที่ 1x ผลการทดลองวัดระยะทางจาก tag ไปยัง anchor ทั้งสี่สถานี ที่ระยะ และมุมในการวัด ต่าง ๆ.....	57
ตารางที่ 2x ผลการคำนวณค่าพิกัดด้วยเทคนิค trilateration ทั้งแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ในการการระบุตำแหน่งนอกรอาคาร.....	71
ตารางที่ 3x ผลการคำนวณค่าพิกัดด้วยเทคนิค trilateration ทั้งแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ในการการระบุตำแหน่งนอกรอาคาร.....	75
ตารางที่ 4x พิกัด UTM และคุณภาพการระบุตำแหน่งด้วย RTK GNSS การศึกษาอิทธิพลของ ระยะห่างระหว่างโมดูล และทิศทางกรวัดระยะ.....	85
ตารางที่ 5x พิกัด UTM และคุณภาพการระบุตำแหน่งด้วย RTK GNSS การทดลอง การระบุตำแหน่งนอกรอาคาร.....	85
ตารางที่ 6x พิกัด UTM และคุณภาพการระบุตำแหน่งด้วย RTK GNSS การทดลอง การระบุตำแหน่งในแปลงทดสอบ.....	87
ตารางที่ 1ค ลักษณะจำเพาะของ RTK GNSS.....	91
ตารางที่ 2ค ลักษณะจำเพาะของ MaUWB.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 ตัวอย่างสัญญาณพัลส์ที่ช่องสัญญาณที่ 5 ($T_p = 2.00 \text{ ns}$ และ $\beta = 0.5$).....	4
รูปที่ 2.2 Pulse Position Modulation.....	6
รูปที่ 2.3 Pulse Amplitude Modulation	6
รูปที่ 2.4 Bi-Phase Modulation	7
รูปที่ 2.5 On-Off Keying	7
รูปที่ 2.6 ลักษณะการทำงานของวิธี SS-TWR	8
รูปที่ 2.7 ลักษณะการทำงานของ DS-TWR.....	9
รูปที่ 2.8 ลักษณะการทำงานของ DS-TWR with three message	9
รูปที่ 2.9 ความล่าช้าของเสาสัญญาณในการวัดระยะทาง	10
รูปที่ 2.10 หลักการทำงานของ GNSS เบื้องต้น.....	12
รูปที่ 2.11 หลักการทำงานของ RTK GNSS.....	13
รูปที่ 2.12 การสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์แบบขนาน และแบบอนุกรม.....	16
รูปที่ 3.1 โมดูล MaUWB ของ Shenzhen Makerfabs Corp.....	24
รูปที่ 3.2 MaUWB Block Diagram.....	24
รูปที่ 3.3 ลักษณะ และส่วนประกอบภายในของเสาส่งสัญญาณ UWB	25
รูปที่ 3.4 ลักษณะ และส่วนประกอบของเสารับสัญญาณ UWB.....	26
รูปที่ 3.5 การจัดวางโมดูลทดสอบ	27
รูปที่ 3.6 Flow chart ของซอฟต์แวร์ภายในโมดูล MaUWB.....	28
รูปที่ 3.7 การเตรียมการทดลอง และการทดลองวัดอิทธิพลของระยะทางแม่ขมูมการวัด.....	31
รูปที่ 3.8 แผนการทดลองการระบุตำแหน่งในสนามทดลอง.....	32
รูปที่ 3.9 แผนการทดลองการระบุตำแหน่งในแปลงทดสอบ จุดทดลอง (วงกลมขาว) และตำแหน่งของ anchor stations (สามเหลี่ยมเหลือง).....	34
รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริง (RTK GNSS) กับระยะทางที่วัดได้ด้วย UWB....	35
รูปที่ 4.2 แผนภาพกล่องค่าความคลาดเคลื่อนของระยะทางที่วัดได้ด้วยเทคโนโลยี UWB ที่ระยะต่างๆ (รวมทุก Anchor Station).....	36
รูปที่ 4.3 แผนภาพกล่องค่าความคลาดเคลื่อนของระยะทางที่วัดได้ด้วยเทคโนโลยี UWB ที่ระยะทางที่วัดที่แตกต่างกันของแต่ละ anchor: (ก) Anchor 1, (ข) Anchor 2, (ค) Anchor 3 และ (ง) Anchor 4	36
รูปที่ 4.4 แผนภาพกล่องค่าความคลาดเคลื่อนของระยะทางที่วัดด้วยเทคโนโลยี UWB ที่ระยะต่างๆ (selected ranges).....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 กราฟเชิงขั้วของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (ก) รวมทุก anchor, (ข) anchor 1, (ค) anchor 2, (ง) anchor 3 และ (จ) anchor 4 ในการวัดระยะที่แต่ละมุมการวัด	41
รูปที่ 4.6 ตำแหน่งของจุดวัดในพื้นที่ทดสอบนอกรอาคาร ที่ได้จากระบบ UWB เทียบกับพิกัดจริงที่วัดจากเครื่องรับ RTK GNSS (2D trilateration)	42
รูปที่ 4.7 ตำแหน่งของจุดวัดในพื้นที่ทดสอบนอกรอาคาร ที่ได้จากระบบ UWB เทียบกับพิกัดจริงที่วัดจากเครื่องรับ RTK GNSS (3D trilateration โดยแสดงเฉพาะแกน x และ y)	43
รูปที่ 4.8 ตำแหน่งของจุดวัดในพื้นที่ทดสอบนอกรอาคาร ที่ได้จากระบบ UWB เทียบกับพิกัดจริงที่วัดจากเครื่องรับ RTK GNSS (3D trilateration)	43
รูปที่ 4.9 ตำแหน่งของจุดวัดในแปลงทดสอบ ที่ได้จากระบบ UWB เทียบกับพิกัดจริง ที่วัดจากเครื่องรับ RTK GNSS (2D trilateration)	46
รูปที่ 4.10 ตำแหน่งของจุดวัดในแปลงทดสอบ ที่ได้จากระบบ UWB เทียบกับพิกัดจริงที่วัดจากเครื่องรับ RTK GNSS (3D trilateration โดยแสดงเฉพาะแกน x และ y)	46
รูปที่ 4.11 ตำแหน่งของจุดวัดในแปลงทดสอบ ที่ได้จากระบบ UWB เทียบกับพิกัดจริงที่วัดจากเครื่องรับ RTK GNSS (3D trilateration)	47
รูปที่ 1ค RTK Surveying Kit, Sparkfun Electronic Inc., Colorado, USA	90
รูปที่ 2ค เสืออากาศ GNSS L1/L2	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

ระบบการระบุตำแหน่ง และการนำทางมีบทบาทสำคัญในภาคการเกษตร โดยช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ลดต้นทุน และยกระดับผลผลิตทางการเกษตร ตัวอย่างการประยุกต์ใช้ เช่น การจัดการพื้นที่เพาะปลูก, การเก็บเกี่ยวผลผลิต, การติดตามปศุสัตว์, การควบคุมเครื่องจักรกลการเกษตร, และการนำทางรถแทรกเตอร์ ระบบการระบุตำแหน่งที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายคือ Global Navigation Satellite System (GNSS) หรือที่รู้จักโดยทั่วไปว่า GPS ซึ่งมีความแม่นยำแตกต่างกันไปตามประเภท ได้แก่ SPS GPS (Standard Positioning Service) มีความแม่นยำประมาณ 5-10 m, Differential (DGPS) มีความแม่นยำประมาณ 1-3 m และ Real-Time Kinematic (RTK) มีความแม่นยำประมาณ 0.01-0.02 m [1] โดย RTK เป็นที่นิยมในการระบุตำแหน่ง และการนำทางในภาคการเกษตรมากที่สุด อย่างไรก็ตามการใช้งาน RTK ยังมีข้อจำกัดด้านความแม่นยำในสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้อต่อการใช้งาน โดยเฉพาะในพื้นที่ที่สัญญาณดาวเทียมถูกบดบัง เช่น ต้นไม้ใหญ่ ในร่ม หรือบริเวณตึกสูง ซึ่งทำให้สัญญาณดาวเทียมถูกบดบัง สะท้อน และลดทอนกำลังลง [2]

จากปัญหาด้านความแม่นยำของ GNSS ที่กล่าวมา ได้มีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีเสริมต่างๆ เพื่อระบุตำแหน่ง, ช่วยเสริมความแม่นยำ และลดข้อผิดพลาดของการระบุตำแหน่ง เช่น Wi-Fi (ความแม่นยำ 1-10 m ในพื้นที่ Wi-Fi เข้าถึงได้), Bluetooth (ความแม่นยำ 1-10 m ที่ระยะวัด 10-100 m), Radio-frequency identification: RFID (ความแม่นยำ 1-10 m ที่ระยะวัดไม่เกิน 10 m), Infrared: IR (ความแม่นยำระดับเซนติเมตร ที่ระยะวัดไม่เกิน 10 m), Ultrasonic (ความแม่นยำระดับเซนติเมตรถึงระดับเมตร ที่ระยะวัดไม่เกิน 10 m) และ ZigBee (ความแม่นยำ 2-3 m ที่ระยะวัด 10-100 m) นอกจากนี้เทคโนโลยีที่กล่าวมาข้างต้นอีกหนึ่งเทคโนโลยีในการระบุตำแหน่งที่ได้รับความสนใจคือ คลื่นวิทยุแถบความถี่กว้างยิ่งยวด (Ultra-Wideband: UWB) โดย UWB มีความแม่นยำ 0.10-0.30 m ที่ระยะวัด 10-100 m [3] [4]

คลื่นวิทยุแถบความถี่กว้างยิ่งยวด (Ultra-Wideband: UWB) เป็นเทคโนโลยีคลื่นวิทยุที่ส่งสัญญาณเป็นพัลส์แคบขนาด 2 ns หรือน้อยกว่า ในย่านความถี่ 3.1-10.6 GHz โดยแต่ละช่องสัญญาณมีขนาด 499.2 MHz แบ่งเป็น 16 ช่องสัญญาณ และถูกจำกัดกำลังการกระจายสัญญาณตามมาตรฐาน IEEE 802.15.14 [5] โดยถูกจำกัดกำลังสัญญาณสูงสุดโดย Federal Communication Commission (FCC) [6] ด้วยลักษณะการส่งสัญญาณพิเศษนี้ทำให้การระบุตำแหน่งมีความแม่นยำสูง ด้วยหลักการวัดระยะแบบการหาระยะทางสองทิศทาง (Two-way Ranging: TWR) ซึ่งเป็นการคำนวณระยะเวลาที่สัญญาณส่งจากเครื่องส่งสัญญาณไปเครื่องรับสัญญาณ (Time of Flight: ToF)

และการคำนวณตำแหน่งด้วยวิธี Trilateration ให้ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งระดับเซนติเมตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[7] มีการบริโภคพลังงานต่ำ และสามารถทำงานได้ในพื้นที่ที่สัญญาณ GPS ไม่ดีนัก เช่น ในพื้นที่ที่อยู่ติดอาคาร ใต้ร่มไม้ หรือในโรงเรือน คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ UWB มีความน่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้ เพื่อระบุตำแหน่ง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเทคนิคการระบุตำแหน่งในแปลงเกษตร โดยใช้เทคโนโลยี UWB และเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยี UWB

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อพัฒนาเทคนิคการระบุตำแหน่งในแปลงเกษตรโดยใช้เทคโนโลยีคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้างยิ่งยวด (UWB)

2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการวัดระยะทาง และการระบุตำแหน่ง ได้แก่ ระยะห่างระหว่างโมดูล UWB และมุมการวัดระยะ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

การศึกษานี้มุ่งเน้นพัฒนาและประเมินประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่งในแปลงเกษตรแบบเปิดโล่ง โดยใช้เทคโนโลยี UWB โดยมีขอบเขตดังนี้:

1. การพัฒนาฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบ: ใช้โมดูล MaUWB (Shenzhen Makerfabs Corp., China) ที่ช่องสัญญาณ 5 (ความถี่ 6.5 GHz) และอัตราการรับส่งข้อมูล 850 kbps เพื่อทดสอบความแม่นยำในการระบุตำแหน่งในสภาพแวดล้อมเปิดโล่ง

2. การทดลองภาคสนาม: ทำการทดลองในพื้นที่ที่มีลักษณะพื้นผิวที่แตกต่างกัน ได้แก่ สนามทดลอง (คอนกรีต) และแปลงเกษตร (สนามหญ้า) โดยทดสอบระยะห่างและมุมการวัดหลายระยะ ตั้งแต่ 5 เมตรถึง 350 เมตร

3. การวัดค่าความแม่นยำและความเสถียร: ใช้เครื่องรับ RTK GNSS (RTK Surveying Kit, SparkFun Electronics Inc., Colorado, USA) ในการระบุพิกัดอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) และวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ

4. ข้อจำกัดของการศึกษา: การทดลองถูกจำกัดให้อยู่ในพื้นที่เปิดโล่ง และไม่ได้ศึกษาผลกระทบจากสิ่งกีดขวางในพื้นที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คลื่นวิทยุแถบความถี่กว้างยิ่งยวด (Ultra-Wideband: UWB)

คลื่นวิทยุแถบความถี่กว้างยิ่งยวด (Ultra-Wideband: UWB) เป็นเทคโนโลยีคลื่นวิทยุส่งสัญญาณที่ความถี่สัญญาณมากกว่า 500 MHz ด้วยพัลส์แคบขนาด 2 ns หรือน้อยกว่า ลักษณะของสัญญาณพัลส์ (Root Raised Cosine (RRC) pulse shape: $r(t)$) สามารถอธิบายได้ด้วยสมการที่ (2.1) ดังนี้ โดยมีเวลาพัลส์ (Pulse duration: T_p) และ roll-off factor สำหรับแต่ละช่องสัญญาณ ดังตารางที่ 2.1 [5]

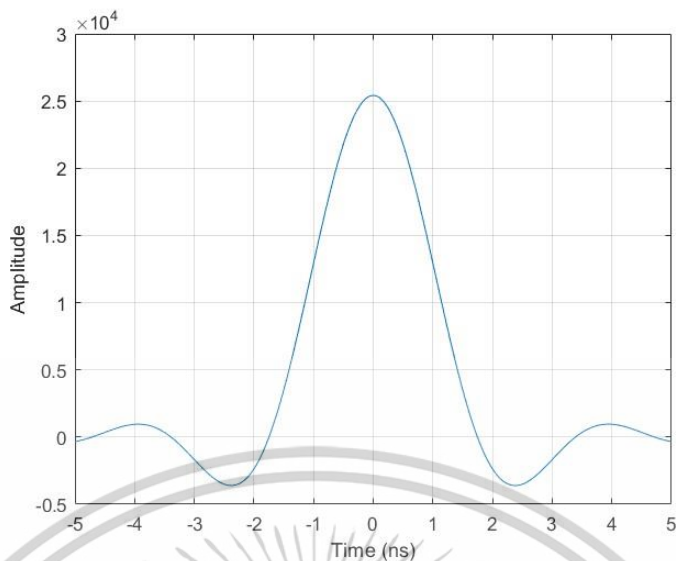
$$r(t) = \frac{4\beta}{\pi\sqrt{T_p}} \times \frac{\cos[(1 + \beta)\pi t/T_p] + \frac{\sin[(1 - \beta)\pi t/T_p]}{4\beta(t/T_p)}}{1 - (4\beta t/T_p)^2} \quad (2.1)$$

เมื่อ T_p คือ Pulse duration
 β คือ roll-off factor

ตารางที่ 2.1 เวลาพัลส์ของคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้างในแต่ละช่องสัญญาณ

Channel number	Pulse duration: T_p (ns)	Main lobe width: T_w (ns)
0-3, 5-6, 8-10, 12-14	2.00	0.5
7	0.92	0.2
4, 11	0.75	0.2
15	0.74	0.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างสัญญาณพัลส์ที่ช่องสัญญาณที่ 5 ($T_p = 2.00 \text{ ns}$ และ $\beta = 0.5$)

Federal Communication Commission (FCC) [6] ระบุค่าจำกัดความของสัญญาณ UWB ดังนี้

1. ขอบของความกว้างสัญญาณ (Bandwidth) จะต้องมีกำลังสัญญาณน้อยกว่ากำลังสัญญาณสูงสุด 10 dB ตามระบบการส่งสัญญาณทั้งหมด โดยกำหนดให้ความถี่ขอบบนสุดของสัญญาณคือ f_H ความถี่ขอบล่างสุดของสัญญาณคือ f_L และความถี่ที่กำลังสัญญาณสูงสุดคือ f_M

2. ความถี่ตำแหน่งศูนย์กลาง (f_c) เป็นไปตามสมการที่ (2.2)

$$f_c = \frac{(f_H + f_L)}{2} \quad (2.2)$$

3. เศษส่วนความกว้างแถบความถี่ (Fractional bandwidth) เป็นไปตามสมการที่ (2.3)

$$\text{Fractional bandwidth} = \frac{2 \times (f_H - f_L)}{(f_H + f_L)} \quad (2.3)$$

4. สัญญาณ UWB จะต้องมีเศษส่วนความกว้างแถบความถี่ (Fractional bandwidth) เท่ากับหรือมากกว่า 0.20 หรือมีความกว้างความถี่ (Bandwidth) เท่ากับหรือมากกว่า 500 MHz โดยไม่คำนึงถึงเศษส่วนความกว้างแถบความถี่

5. กำลังการส่งสัญญาณสูงสุดจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังตารางที่ 2.2

จากค่าจำกัดความของ FCC สำหรับสัญญาณ UWB แบ่งกลุ่มสัญญาณได้ 3 กลุ่มคือ Sub-gigahertz, Low band และ High band และแบ่ง Channel สัญญาณได้ 16 Channel ตาม

ข้อกำหนดดังตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 กำลังการส่งสัญญาณสูงสุดของสัญญาณ UWB ที่ความถี่สัญญาณต่างๆ [6]

Frequency Range (MHz)	960-1610	1610-1990	1990-3100	3100-10600	Above 10600	1164-1240 1559-1610
Ground penetrating radar, wall imaging	-65.3	-53.3	-51.3	-41.3	-51.3	-75.3
Through D-wall imaging systems:						
UWB bandwidth below 960 MHz	-65.3	-53.3	-51.3	-51.3	-51.3	-75.3
UWB bandwidth 1990-10600 MHz	-46.3	-41.3	-41.3	-41.3	-51.3	-56.3
Surveillance systems	-53.3	-51.3	-41.3	-41.3	-51.3	-63.3
Medical imaging systems	-65.3	-53.3	-51.3	-41.3	-51.3	-75.3/-53.3
Indoor UWB systems	-75.3	-53.3	-51.3	-41.3	-51.3	-85.3
Hand held UWB systems	-75.3	-63.3	-61.3	-41.3	-61.3	-85.3
Frequency Range (MHz)		1610-22000	22000-29000	29000-31000	Above 31000	
Vehicular radar systems	-75.3	-61.3	-41.3	-51.3	-61.3	-85.3

Emissions at 1164-1240 and 1559-1610 MHz to be measured using a resolution bandwidth no less than 1 kHz.
All other frequencies to be measured using a resolution bandwidth of 1 MHz.

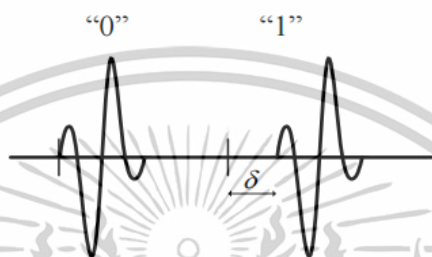
ตารางที่ 2.3 ช่องสัญญาณ ความถี่กึ่งกลาง และกลุ่มสัญญาณของสัญญาณ UWB [5]

Channel	Center frequency (MHz)	HRP UWB band/mandatory
0	499.2	Sub-gigahertz
1	3494.4	Low band
2	3993.6	
3	4492.8	
4	3993.6	
5	6489.6	
6	6988.8	
7	6489.6	
8	7488.0	
9	7987.2	
10	8486.4	
11	7987.2	
12	8985.6	
13	9484.8	
14	9984.0	
15	9484.8	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

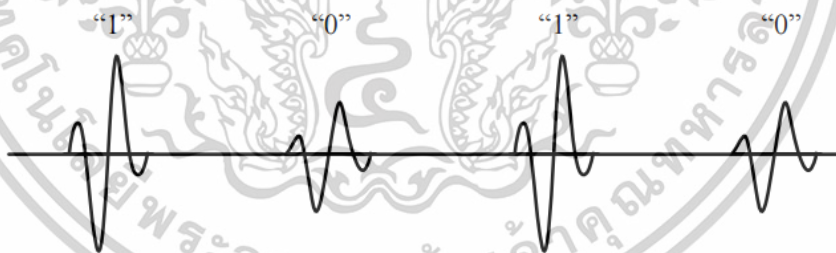
เนื่องจากเทคโนโลยี UWB เป็นการสื่อสารด้วยสัญญาณพัลส์ (pulse) ที่แถบความถี่กว้าง ซึ่งแตกต่างจากเทคโนโลยีคลื่นวิทยุแถบความถี่แคบ (Narrow band radio) ดังนั้นการกล้ำสัญญาณ (modulation) จะแตกต่างจากคลื่นวิทยุ Narrow band โดยวิธีการ Modulation สำหรับเทคโนโลยี UWB มีดังนี้ [8]

1. Pulse Position Modulation (PPM) เป็นเทคนิคการเข้ารหัส โดยการการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งเวลาของพัลส์ไปข้างหน้า หรือข้างหลังภายในกรอบเวลา (frame)



รูปที่ 2.2 Pulse Position Modulation

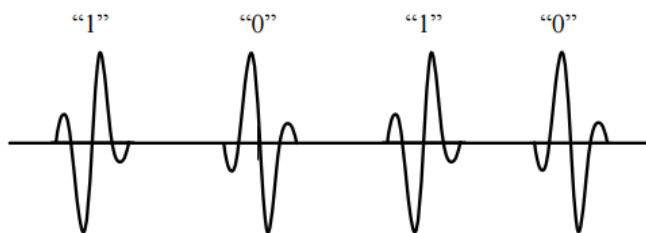
2. Pulse Amplitude Modulation (PAM) เป็นการเข้ารหัสข้อมูลด้วยการเปลี่ยนแปลง amplitude ของพัลส์ ให้สูงหรือต่ำ โดยไม่ต้องขยับตำแหน่งของพัลส์ ทำให้สามารถส่งข้อมูลได้ในอัตราที่สูงกว่า PPM แต่มีข้อเสียคือสัญญาณถูกรบกวนได้ง่ายกว่า



รูปที่ 2.3 Pulse Amplitude Modulation

3. Bi-Phase Modulation (BPSK) เป็นการเข้ารหัสข้อมูลโดยการเปลี่ยนเฟสของพัลส์ 180 องศา เพื่อแทนข้อมูล 0 หรือ 1 ข้อดีคือมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนในระดับปานกลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 Bi-Phase Modulation

4. On-Off Keying (OOK) เป็นเทคนิคการมอดูเลตที่ง่ายที่สุด โดยการส่งพัลส์เพื่อแทนข้อมูล 1 และไม่ส่งพัลส์เพื่อแทนข้อมูล 0 ข้อดีคือ มีความซับซ้อนน้อย แต่มีประสิทธิภาพน้อย และมีความไวต่อสัญญาณรบกวน



รูปที่ 2.5 On-Off Keying

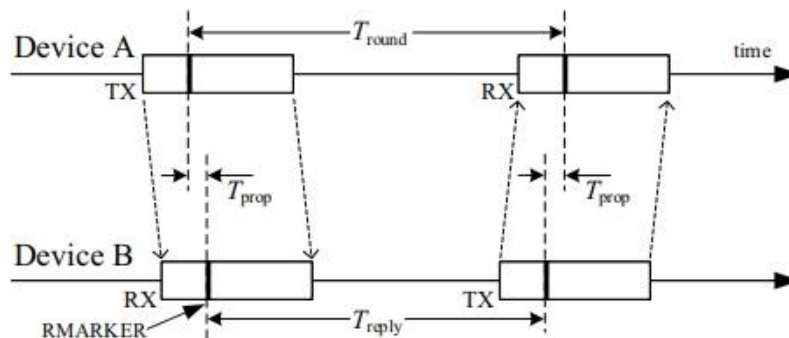
2.1.1 หลักการวัดระยะด้วย UWB [9]

การวัดระยะด้วย UWB ใช้เทคนิคการวัดระยะแบบสองทิศทาง (Two-way Ranging: TWR) เทคนิคนี้แบ่งออกได้เป็น 3 วิธีการ คือ Single-sided two-way ranging (SS-TWR), Double-sided two-way ranging (DS-TWR) และ DS-TWR with three messages ดังนี้

2.1.1.1 วิธีวัดระยะแบบ Single-sided two-way ranging (SS-TWR)

เป็นวิธีการวัดเวลาล่าช้าที่สัญญาณส่งออกจากเครื่องส่งสัญญาณไปยังเครื่องรับสัญญาณ และส่งกลับมายังเครื่องส่งอีกครั้ง ซึ่งเวลาล่าช้านี้รู้จักกันในชื่อ Time of Flight (ToF) ในที่นี้แทนด้วย T_{prop} มาจากเวลาในการแพร่กระจาย (Propagation time) รูปที่ 2.6 แสดงลักษณะการทำงานของวิธี SS-TWR โดย Device A คือ เครื่องเริ่มต้นการส่งสัญญาณ และ Device B คือ เครื่องรับและตอบกลับสัญญาณ โดยเวลาที่ Device A ส่งสัญญาณ และได้รับสัญญาณตอบกลับ แทนด้วย T_{round} และเวลาที่ Device B รับสัญญาณ และตอบกลับ แทนด้วย T_{reply}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 ลักษณะการทำงานของวิธี SS-TWR [9]

เวลาในการเดินทางของสัญญาณ (Time of Flight) สามารถประมาณได้ด้วย T_{prop} และคำนวณได้ดังสมการที่ (2.4)

$$T_{prop} = \frac{T_{round} - T_{reply}}{2} \quad (2.4)$$

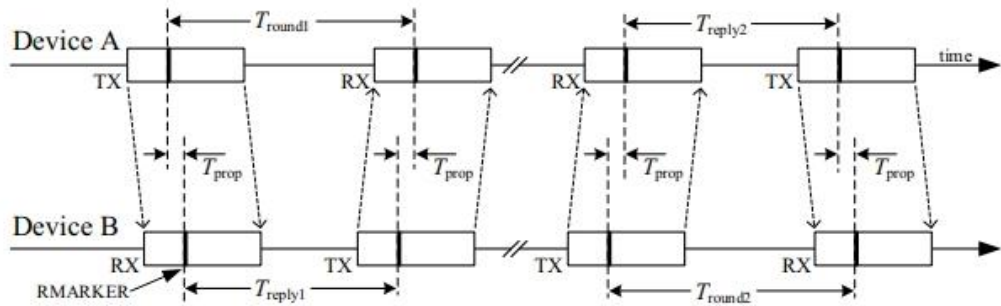
เนื่องจากทั้งสอง Device มีวงจรสัญญาณนาฬิกาเป็นของตัวเอง เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดความผิดพลาดของนาฬิกา (Clock offset: C_{off}) เป็นผลให้เกิดความผิดพลาด ดังนั้นสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังสมการที่ (2.5)

$$T_{prop} = \frac{T_{round} - T_{reply} - (1 - C_{off})}{2} \quad (2.5)$$

2.1.1.2 วิธีวัดระยะแบบ Double-sided two-way ranging (DS-TWR)

การวัดระยะด้วยวิธี DS-TWR เป็นการวัดที่พัฒนาต่อมาจาก SS-TWR โดยเวลาตั้งแต่ส่งสัญญาณออกไป และได้รับสัญญาณ (T_{round}) ทั้ง 2 ค่า จะถูกรวมกัน และคำนวณออกมาเป็นเวลาเดินทางของสัญญาณ (Time of Flight) โดย ToF ที่ได้นี้จะถูกตัดความผิดพลาดเนื่องจากอิทธิพลของเวลาใน Devices ที่เดินไม่เท่ากันเมื่อเวลานานขึ้น โดย Device A เริ่มต้นการส่งสัญญาณไปที่ Device B จากนั้น Device B รับสัญญาณ และตอบกลับ Device A จากนั้นส่งสัญญาณเช่นเดียวกันแต่ Device B จะเป็นเครื่องเริ่มต้นการส่งสัญญาณไปที่ Device A และ Device A รับสัญญาณ และส่งกลับ ถือเป็นการทำงานวิธี DS-TWR ซึ่งเป็นดังรูปที่ 2.7 เวลาที่ใช้ในการเดินทางระหว่าง Devices แทนด้วย T_{prop}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



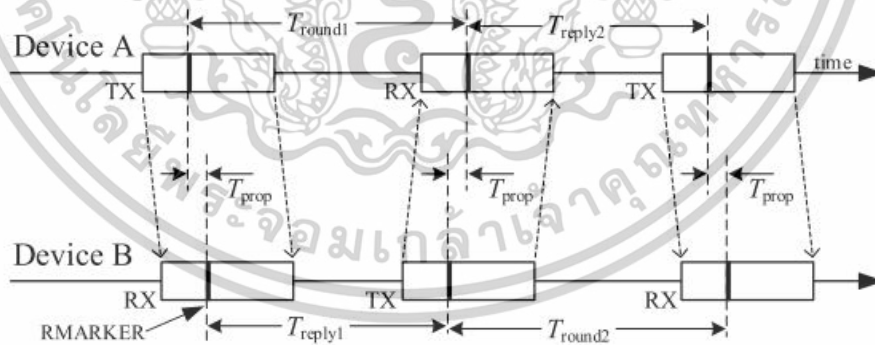
รูปที่ 2.7 ลักษณะการทำงานของ DS-TWR [9]

ด้วยวิธี DS-TWR ทั้งสอง Devices เป็นทั้งตัวส่งสัญญาณ และตัวรับสัญญาณ ซึ่งการหา ToF สามารถประมาณได้ด้วยสมการที่ (2.6)

$$T_{prop} = \frac{(T_{round1} \times T_{round2}) - (T_{reply1} \times T_{reply2})}{T_{round1} + T_{round2} + T_{reply1} + T_{reply2}} \quad (2.6)$$

2.1.1.3 วิธีวัดระยะแบบ (DS-TWR with three messages)

เนื่องจากวิธี DS-TWR ในหัวข้อก่อนหน้ามีการส่งสัญญาณระหว่าง Devices ซ้ำซ้อน ซึ่งสามารถลดการส่งสัญญาณระหว่าง Devices ได้โดยการกำหนดให้การส่งสัญญาณตอบกลับของเวลา รอบแรก เป็นการเริ่มส่งสัญญาณรอบที่สองได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะการทำงานของ DS-TWR with three message [9]

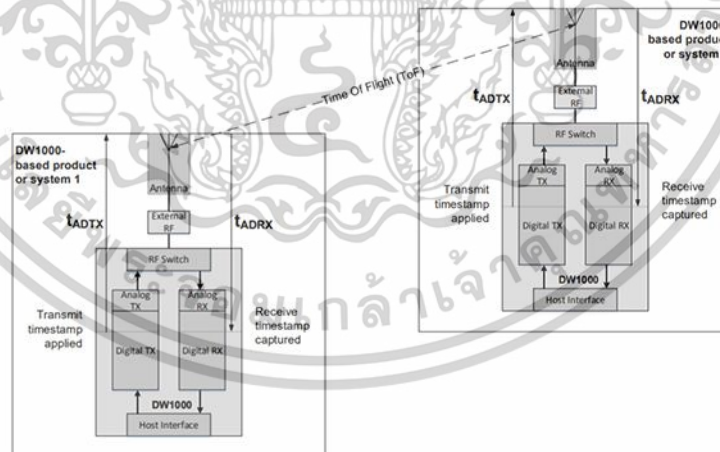
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 Antenna Delay [10]

Antenna Delay หรือ ความล่าช้าของเสาสัญญาณ คือ ระยะเวลาในการส่งผ่านสัญญาณ ตั้งแต่เริ่มบันทึกเวลาเพื่อส่งออกสัญญาณ (Timestamp) จนถึงเวลาที่สัญญาณถูกกระจายออกไปผ่านเสาสัญญาณ ความล่าช้าของเสาสัญญาณนี้เป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้การวัดระยะทางคลาดเคลื่อนไปจากความเป็นจริง โดยเวลาในการเดินทางของสัญญาณ (Time of Flight: ToF) เป็นเวลาที่สัญญาณถูกกระจายออกจากเสาอากาศของเสาส่งสัญญาณจนกระทั่งถึงเสาอากาศของเสารับสัญญาณ ซึ่งก่อนที่สัญญาณจะถูกกระจายออกไป อุปกรณ์จะบันทึกเวลา และแนบข้อมูลเวลานี้ไปกับสัญญาณเพื่อคำนวณหาระยะทาง ซึ่งระยะทางที่คำนวณได้นี้จะคลาดเคลื่อนเนื่องจากไม่ใช่เวลาที่สัญญาณเดินทางจากเสาอากาศถึงเสาอากาศ ดังนั้นจะต้องมีการชดเชยค่าความล่าช้าของเสาสัญญาณทั้งฝั่งส่งสัญญาณ (t_{ADTX}) และฝั่งรับสัญญาณ (t_{ADRX}) โดยทั่วไปค่า Antenna delay สำหรับ UWB จะมีหน่วยเป็น นาโนวินาที (nanoseconds)

$$\text{ToF} = t_{\text{measured}} - (t_{ADTX} - t_{ADRX}) \quad (2.7)$$

เมื่อ ToF คือ เวลาในการเดินทางของสัญญาณจากเสาอากาศถึงเสาอากาศ
 t_{measured} คือ ผลต่างเวลาที่อุปกรณ์วัดได้จากเครื่องส่ง ถึงเครื่องรับสัญญาณ
 t_{ADTX} คือ ความล่าช้าของเสาสัญญาณของเครื่องส่งสัญญาณ
 t_{ADRX} คือ ความล่าช้าของเสาสัญญาณของเครื่องรับสัญญาณ



รูปที่ 2.9 ความล่าช้าของเสาสัญญาณในการวัดระยะทาง

แหล่งที่มา: <https://www.makefab.com/article/esp32-ubw-antenna-delay-calibrating.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 Global Navigation Satellite System หรือ GNSS [2]

Global Navigation Satellite System หรือ GNSS คือ ระบบนำทางทั่วโลกที่ใช้ดาวเทียมในการระบุพิกัดที่ตั้งของผู้ใช้งานในพื้นที่ต่าง ๆ โดย GNSS จะประกอบด้วยดาวเทียมที่โคจรรอบโลก ซึ่งส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์รับสัญญาณ เช่น โทรศัพท์มือถือ หรือ นาฬิกา GPS เพื่อคำนวณตำแหน่ง โดยจะให้ข้อมูลตำแหน่ง และ ความเร็วแบบสามมิติ แก่ผู้ใช้งาน โดยตามเทียม GNSS สามารถให้ข้อมูลแก่ผู้ใช้งานได้ไม่จำกัดจำนวน เนื่องจากอุปกรณ์รับสัญญาณของผู้ใช้เป็นแบบรับข้อมูลอย่างเดียว (passively operation) แนวความคิดในการวัดระยะห่างจากผู้ใช้งานถึงดาวเทียมเป็นแบบ One-way time of arrival (TOA) ranging โดยการส่งสัญญาณอิงตามความถี่ของนาฬิกาอะตอม (Atomic Clock) ที่มีความแม่นยำสูงบนดาวเทียม ซึ่งถูกซิงโครไนซ์กับฐานเวลาดาวเทียม ดาวเทียมจะถ่ายทอดรหัสระบุระยะและข้อมูลการนำทางบนความถี่สองความถี่โดยใช้เทคนิคที่เรียกว่า code division multiple access (CDMA) โดยมีความถี่พาหะที่ใช้งาน 2 ความถี่ คือ ความถี่ L1 (1,575.42 MHz) และ L2 (1,227.6 MHz) ดาวเทียมแต่ละดวงจะส่งสัญญาณบนความถี่ L1 และ L2 โดยดาวเทียมแต่ละดวงจะมีความถี่ใช้งานที่ต่างกัน

สำหรับ GPS เป็นระบบที่ใช้ได้ทั้งในทางพลเรือนและทางทหาร ซึ่งมีบริการแยกต่างหากสำหรับผู้ใช้งานทั้งสองกลุ่ม โดยเรียกว่า Standard Positioning Service (SPS) และ Precise Positioning Service (PPS) SPS ถูกกำหนดให้กับพลเรือน หรือบุคคลทั่วไป ขณะที่ PPS มีไว้สำหรับผู้ใช้งานที่ได้รับอนุญาตจากทหารสหรัฐฯ และหน่วยงานรัฐบาลบางแห่ง การเข้าถึง GPS PPS จะถูกควบคุมผ่านการเข้ารหัส

Precise Positioning Service (PPS) ได้รับการกำหนดให้มีความแม่นยำที่คาดเดาได้อย่างน้อย 22 เมตร ในระนาบแนวนอนและ 27.7 เมตรในระนาบแนวตั้ง ความแม่นยำในการวัดความเร็วถูกกำหนดไว้ที่ 0.2 ม./วินาที ดังที่กล่าวไปก่อนหน้านี้ PPS มีไว้สำหรับผู้ใช้งานในกองทหารและหน่วยงานรัฐบาล โดยอนุญาตให้พลเรือนใช้ได้ แต่ต้องได้รับการอนุมัติก่อน

Standard Positioning Service (SPS) ให้บริการแก่ผู้ใช้ทั่วโลกโดยไม่มีค่าใช้จ่ายโดยตรง ไม่มีข้อจำกัดในการใช้งาน บริการนี้ได้รับการกำหนดให้มีความแม่นยำมากกว่า 13 เมตร (95%) ในระนาบแนวนอนและ 22 เมตร (95%) ในระนาบแนวตั้ง

2.2.1 หลักการทำงานของ GNSS เบื้องต้น

ดาวเทียม GNSS จะส่งสัญญาณวิทยุที่มีข้อมูลเวลาที่แม่นยำมาจาก atomic clock ไปยังเครื่องรับสัญญาณบนพื้นโลก จากนั้นเครื่องรับสัญญาณจะคำนวณเวลาที่สัญญาณใช้ในการเดินทางในอากาศ (Time of Flight) ซึ่งจะสามารถหารระยะห่างระหว่างเครื่องรับกับดาวเทียมได้ (Range 1, 2, 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 4) ด้วยคุณสมบัติของคลื่น เมื่อเครื่องรับสัญญาณได้รับสัญญาณจากดาวเทียมอย่างน้อย 4 ดวง จะสามารถหาตำแหน่งของเครื่องรับสัญญาณได้ด้วยหลักการ Trilateration



รูปที่ 2.10 หลักการทำงานของ GNSS เบื้องต้น

ที่มา: <https://www.calian.com/advanced-technologies/gnss/information-support/gnss-positioning-techniques/>

2.2.2 Real Time Kinematics: RTK [1]

RTK เป็นเทคนิคที่ใช้ในการปรับปรุงความแม่นยำของระบบ GNSS ให้สูงขึ้น โดยอาศัยการเปรียบเทียบสัญญาณจากดาวเทียมที่ได้รับจากเครื่องรับสัญญาณ 2 เครื่อง หรือมากกว่า เครื่องรับสัญญาณแรกคือ Base station โดย Base station จะตั้งอยู่ ณ จุดที่ทราบพิกัดแน่นอน อีกเครื่องหนึ่งคือ เครื่องรับสัญญาณของผู้ใช้งาน (Rover) ซึ่งต้องการหาตำแหน่ง

หลักการทำงาน เริ่มจาก Base station รับสัญญาณจากดาวเทียม และส่งข้อมูลการแก้ไขสัญญาณ ไปยัง Rover ผ่านทางวิทยุ หรือเครือข่ายสื่อสารอื่นๆ เช่น Wi-Fi จากนั้น Rover รับข้อมูลแก้ไขสัญญาณมาประมวลผลร่วมกับสัญญาณที่รับจากดาวเทียมเพื่อให้ได้ความแม่นยำที่มากขึ้น โดยคุณภาพการระบุตำแหน่ง แบ่งออกได้ดังนี้

1. DGPS fix

ใช้หลักการเดียวกันกับ RTK โดย Base station ซึ่งตั้งอยู่ ณ ตำแหน่งที่ทราบพิกัดแน่นอน คำนวณความคลาดเคลื่อนของสัญญาณ GPS แล้วส่งข้อมูลแก้ไขไปยัง Rover

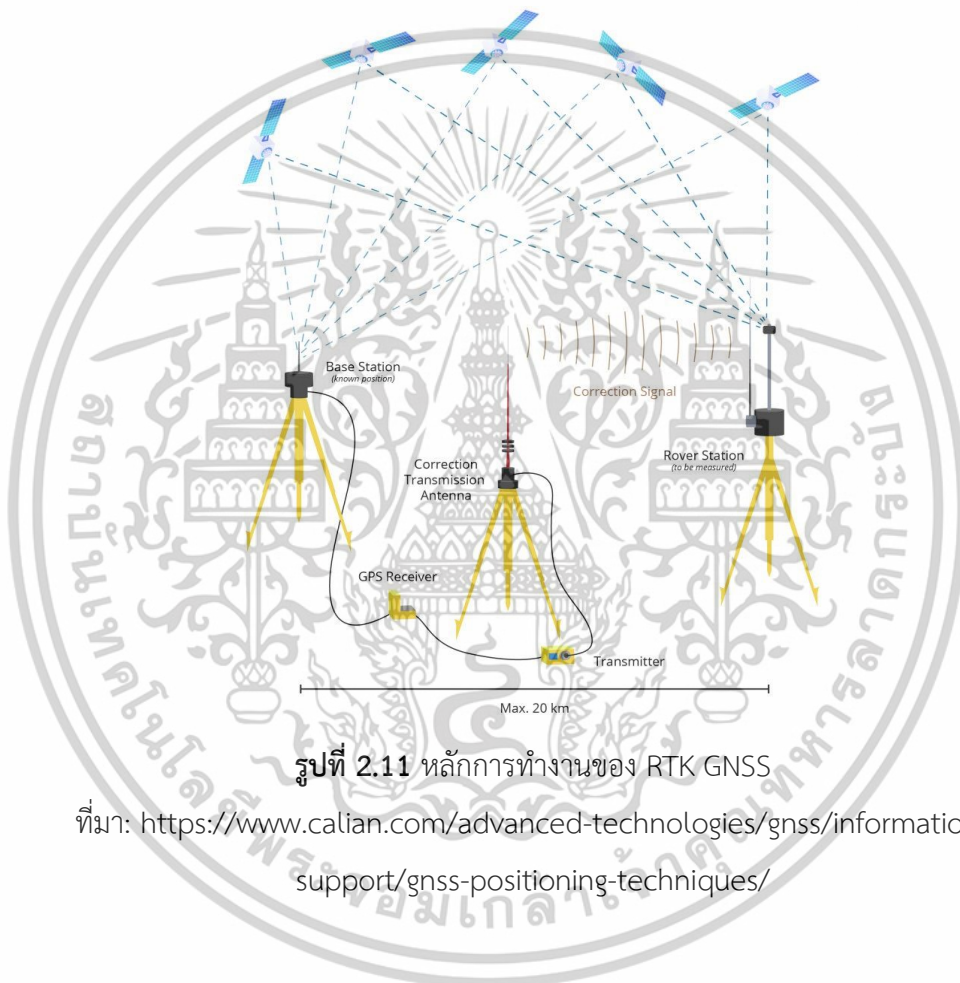
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. RTK float

เป็นสถานะเริ่มต้น หรือสถานะที่เครื่องรับสัญญาณกำลังค้นหาสัญญาณดาวเทียม และกำลังคำนวณตำแหน่งเบื้องต้น ความแม่นยำในสถานะนี้จะค่อนข้างต่ำ

3. RTK fix

เป็นสถานะที่มั่นคงที่สุด เครื่องรับสัญญาณได้ทำการแก้ไขค่าคลาดเคลื่อนต่างๆ และสามารถให้ตำแหน่งที่แม่นยำสูงมาก



รูปที่ 2.11 หลักการทำงานของ RTK GNSS

ที่มา: <https://www.calian.com/advanced-technologies/gnss/information-support/gnss-positioning-techniques/>

2.2.2.1 ความแม่นยำของ RTK GNSS [11]

จากงานวิจัยเรื่อง Performance of Network-Based RTK GNSS for the Cadastral Survey in Thailand ในปี 2561 ทำการทดลองประเมินความถูกต้องเชิงตำแหน่งทางราบของการรังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ของกรมที่ดิน โดยใช้หมุดทดสอบจำนวน 2,122 หมุด จากพื้นที่ให้บริการของโครงข่ายสามเหลี่ยมย่อยของสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิง (CORS) 143 จุด และแบ่งกลุ่มตามค่าเฉลี่ยระยะห่างจากสถานีรับสัญญาณดาวเทียมอ้างอิงเป็น 4 กลุ่ม คือ 30 – 50, 50 – 70, 70 – 90 และ 90 – 110 km ทำการรังวัดแบบสถิต (Static) จำนวน 90 นาที และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รังวัดด้วยโครงข่ายการรังวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ (RTK GNSS Network) พบว่า RTK GNSS Network ให้ความถูกต้องเชิงตำแหน่ง ไม่เกิน 4 cm

2.2.3 การอ่านข้อมูล GNSS [12]

การสื่อสารระหว่างดาวเทียมกับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมใช้ มาตรฐาน NMEA (NMEA Standard) เพื่อให้อุปกรณ์สามารถสื่อสารได้อย่างเข้าใจกัน โดยรูปแบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ GPGLGA ซึ่ง GPGLGA ใช้แสดงข้อมูล GNSS ที่เพียงพอต่อการแสดงพิกัดใน 3 มิติ เรียก Fix data ตัวอย่างข้อมูล และความหมายของข้อมูลเป็นดังนี้

ตัวอย่าง:

\$GPGLGA,172814.0,3723.46587704,N,12202.26957864,E,1,9,1.2,18.893,M,-25.669,M,*,45

ความหมาย:

\$GPGLGA	ชนิดข้อมูล
172814.0	เวลาที่เกิดการ Fix data (17:28:14 UTC)
3723.46587704,N	พิกัดค่าพิกัดละติจูด (Latitude) ด้านเหนือเส้นศูนย์สูตร
12202.26957864,E	พิกัดค่าพิกัดลองจิจูด (Longitude) ด้านตะวันออก
1	คุณภาพของการ Fix (ความหมาย 0:ข้อมูลไม่ถูกต้อง, 1:SPS, 2:DGPS, 3:PPS, 4:RTK fix, 5:RTK float และ 6:INS Dead reckoning)
9	จำนวนดาวเทียม
1.2	ค่าความคลาดเคลื่อนการระบุตำแหน่งแนวราบ
18.893,M	ค่าความสูงเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง
-25.669,M	ความสูงของจีโออยด์เหนือทรงรี (Geoid separation)
(ช่องว่าง)	วินาทีนับจากที่ได้รับค่า fix รูปแบบ DGPS (เมื่อใช้งาน DGPS)
(ช่องว่าง)	แสดงหมายเลขสถานีของ DGPS
45	ค่า checksum

2.3 การสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ [13]

การสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์แบ่งได้เป็น 3 ประเภทคือ การสื่อสารแบบอนุกรม, การสื่อสารแบบขนาน และ การสื่อสารผ่านเครือข่ายดังนี้

2.3.1 การสื่อสารแบบขนาน (Parallel Communication)

การสื่อสารแบบขนานเป็นการส่งข้อมูลพร้อมกันหลายบิตในหนึ่งรอบสัญญาณนาฬิกา โดยส่งข้อมูลบิต 0 และ 1 หลายๆตัวพร้อมกัน โดยถ้าส่งข้อมูลพร้อมกันครั้งละ n บิต ก็จะต้องมีสาย n เส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อรองรับบิตข้อมูล ซึ่งจะทำให้ส่งข้อมูลได้เร็ว อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายสำหรับการสื่อสารแบบขนานก็จะมากตามจำนวนสายไปที่ใช้รองรับบิตข้อมูลไปด้วย ซึ่งไม่เหมาะสมกับการสื่อสารระยะไกล ตัวอย่างเช่น การส่งข้อมูลภายในระบบบัสของคอมพิวเตอร์ (Bus system) และการเชื่อมต่อระหว่างหน่วยความจำในไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นต้น

2.3.2 การสื่อสารแบบอนุกรม (Serial Communication)

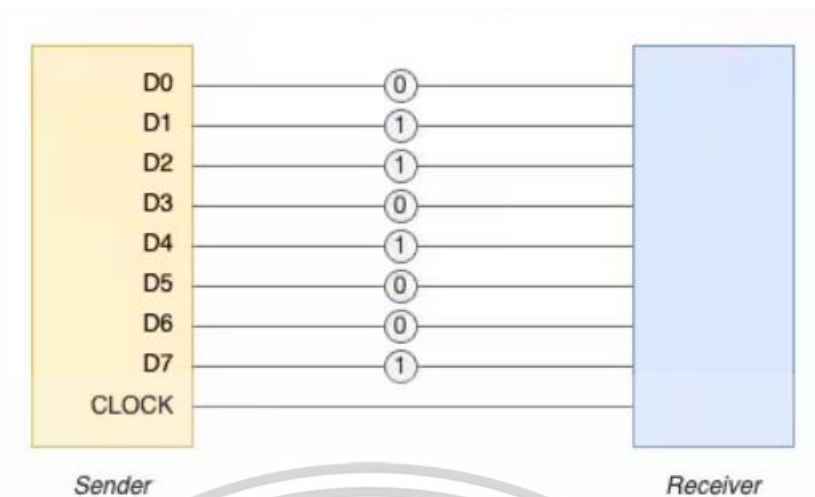
การสื่อสารแบบอนุกรมจะส่งข้อมูลที่ละ 1 บิตในหนึ่งรอบสัญญาณนาฬิกา ทำให้ใช้สายไฟเพียง 1 สายสำหรับการส่งข้อมูล อย่างไรก็ตามการใช้สายเพียง 1 เส้นทำให้ความเร็วการส่งข้อมูลต่ำเมื่อเทียบกับการส่งข้อมูลแบบขนาน โดยการสื่อสารแบบอนุกรมสามารถแบ่งได้ 2 แบบต่อไปนี้

2.3.2.1 การส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัส (asynchronous transmission)

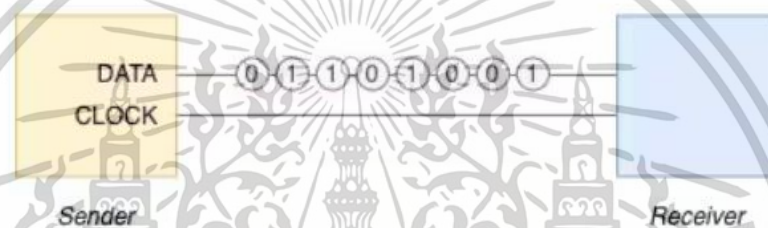
การส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัส คือการรับ และส่งข้อมูลแบบไม่อาศัยสัญญาณนาฬิกาเดียวกัน โดยข้อมูลถูกแปลงตามข้อกำหนดร่วมกัน เช่น อัตราการส่ง (Baud rate) การส่งข้อมูลลักษณะนี้ผู้รับจะไม่ทราบถึงการมาของข้อมูลจากผู้ส่ง ดังนั้นผู้ส่งข้อมูลต้องส่ง บิตเริ่มต้น (Start bit) และบิตสิ้นสุด (Stop bit) เป็นสัญญาณบอกว่าการส่งข้อมูล โดยบิตเริ่มต้นจะอยู่หน้าสุดของข้อมูลมักใช้บิต 0 และบิตจบอยู่ท้ายข้อมูลมักใช้บิต 1 นอกจากนี้แต่ละกลุ่มข้อมูลจะเว้นช่องว่างระหว่างกลุ่มข้อมูลด้วย ตัวอย่างเช่น Universal Asynchronous Receiver-Transmitter หรือ UART ที่จะมีสาย Tx หรือ Rx ในการรับส่งข้อมูล โดยไม่มีสายสัญญาณนาฬิกา

2.3.2.2 การส่งข้อมูลแบบซิงโครนัส (synchronous transmission)

การส่งข้อมูลแบบซิงโครนัส เป็นการส่งข้อมูลบิต 0 และ 1 ต่อเนื่องกันไป โดยมีการกำหนดจังหวะรับข้อมูลผ่านสายอีกเส้นหนึ่ง ดังนั้นจึงมีสายสัญญาณอย่างน้อย 2 สาย ตัวอย่างเช่น Inter-Integrated Circuit (I2C), Serial Peripheral Interface (SPI) ที่จะมีสาย Tx หรือ Rx ในการรับส่งข้อมูล และสาย SCK (Serial Clock) เป็นสัญญาณนาฬิกาสำหรับกำหนดการรับส่งข้อมูล



(ก) แบบขนาน



(ข) แบบอนุกรมแบบซิงโครนัส

รูปที่ 2.12 การสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์แบบขนาน และแบบอนุกรม

ที่มา: <https://www.digikey.pl/pl/maker/tutorials/2023/what-is-serial-communication-and-how-does-it-compare-to-parallel>

2.3.3 การสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless Communication) [14]

การสื่อสารแบบไร้สาย เป็นการส่งข้อมูลระหว่างผู้ส่งกับผู้รับ โดยไม่ใช่สายเคเบิล เช่น ดาวเทียม, Wi-Fi และ Bluetooth เป็นต้น โดยการสื่อสารแบบไร้สายสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ส่วนใหญ่เป็นประเภท เครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network: WPAN) และ เครือข่ายแลนไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN)

2.4 วิธีการระบุตำแหน่ง [15]

วิธีการระบุตำแหน่งสำหรับคลื่นวิทยุมีหลายวิธี หนึ่งในวิธีสำคัญสำหรับการระบุตำแหน่งคือ วิธี Trilateration ซึ่งจะต้องมีจุดอ้างอิงที่ทราบพิกัดอย่างน้อย 4 จุด เพื่อคำนวณหาตำแหน่งใน 3 มิติ โดยมีขั้นตอนการคำนวณตำแหน่งดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ จุดอ้างอิงที่ทราบพิกัดทั้ง 4 จุด แทนด้วย $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2, y_2, z_2)$, $P_3(x_3, y_3, z_3)$ และ $P_4(x_4, y_4, z_4)$ โดยมีระยะทางเป็น s_1, s_2, s_3 และ s_4 จากจุดเป้าหมายที่ต้องการทราบตำแหน่ง ตามลำดับ ความสัมพันธ์ของพิกัด และระยะทางของจุดต่างๆ ข้างต้น สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.8)

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = s_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = s_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = s_3^2 \end{cases} \quad (2.8)$$

จัดรูปสมการ ให้อยู่ในรูปทั่วไปของเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} 1 - 2x_1 & -2y_1 & -2z_1 \\ 1 - 2x_2 & -2y_2 & -2z_2 \\ 1 - 2x_3 & -2y_3 & -2z_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^2 + y^2 + z^2 \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1^2 - x_1^2 - y_1^2 - z_1^2 \\ S_2^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 \\ S_3^2 - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{B}$$

(2.10)

กำหนดให้ \mathbf{X} เป็นสมาชิกของ \mathbf{E} ($\mathbf{X} \in \mathbf{E}$)

เมื่อ $\mathbf{E} = \{(x_1, x_2, x_3, x_4)^T \in \mathbb{R}^4 \mid x_0 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2\}$

เนื่องจาก \mathbf{A} เป็นเมทริกซ์ 3×4 ถ้าจุดอ้างอิงไม่เรียงตัวกันเป็นเส้นตรง จะทำให้ rank ของเมทริกซ์ \mathbf{A} เท่ากับ 3 และ dimension of kernel เท่ากับ 1 ดังนั้นผลเฉลยของสมการที่ (2.11) จะเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_p + (t \cdot \mathbf{X}_h) \quad (2.11)$$

เมื่อ \mathbf{X}_p คือผลเฉลยจากสมการที่ (2.10)

\mathbf{X}_h คือเวกเตอร์ orthonormal ที่ทำให้ $\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{0}$

t คือความยาวของเวกเตอร์ orthonormal ที่เหมาะสม

เพื่อหาค่า t ที่เหมาะสม จาก $\mathbf{X} \in \mathbf{E}$ กระจายลงในสมการที่ (2.11) ได้ดังสมการที่ (2.12) แล้วแทนลงในสมการ $x_0 = x_1^2 + x_2^2 + x_3^2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= X_{p0} + t \cdot X_{h0} \\ X_1 &= X_{p1} + t \cdot X_{h1} \\ X_2 &= X_{p2} + t \cdot X_{h2} \\ X_3 &= X_{p3} + t \cdot X_{h3} \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

$$X_{p0} + (t \cdot X_{h0}) = (X_{p1} + (t \cdot X_{h1}))^2 + (X_{p2} + (t \cdot X_{h2}))^2 + (X_{p3} + (t \cdot X_{h3}))^2 \quad (2.13)$$

จัดรูปสมการใหม่ได้เป็นสมการ quadratic equation ($at^2 + bt + c = 0$) ดังสมการที่ (2.14) ดังนั้นผลเฉลยของสมการมี 2 คำตอบคือสมการที่ (2.15) และสมการที่ (2.16)

$$(x_{h1}^2 + x_{h2}^2)t^2 + (2 \cdot x_{p1}x_{h1} + 2 \cdot x_{p2}x_{h2} - x_{h0})t + x_{p1}^2 + x_{p2}^2 - x_{p0} = 0 \quad (2.14)$$

$$X_1 = X_p + (t_1 \cdot X_h) \quad (2.15)$$

$$X_2 = X_p + (t_2 \cdot X_h) \quad (2.16)$$

ใช้วิธี Least Squares ประมาณผลเฉลยจาก จุดอ้างอิงที่เหลือ และคำนวณระยะห่างระหว่าง จุดอ้างอิง กับผลเฉลยที่คำนวณได้ทั้งหมด จากนั้น เลือกผลเฉลยที่ระยะห่างคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด เทียบกับระยะห่างที่วัดได้

2.5 การวิเคราะห์ทางสถิติ

2.5.1 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square Error: RMSE) [16]

ค่า RMSE เป็นค่าสถิติพื้นฐานถูกใช้เพื่อประเมินสมรรถนะของแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบ ค่าทำนายกับค่าจริงยกกำลังสอง และถอดรากที่สองเพื่อให้หน่วยเป็นหน่วยเดียวกับค่าจริง และค่าทำนายดังสมการต่อไปนี้

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (2.17)$$

เมื่อ n คือจำนวนข้อมูลทั้งหมดในกลุ่มตัวอย่าง

y_i คือค่าจริงที่สังเกตได้ จากข้อมูลที่ i

\hat{y}_i คือค่าที่ทำนายได้ จากข้อมูลที่ i

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 ค่าเฉลี่ย (mean: \bar{x}) [17]

ค่าเฉลี่ย เป็นค่าสถิติที่นิยมใช้บอกถึงค่ากลางของข้อมูล โดยค่าเฉลี่ยจำแนกได้ 3 ชนิดคือ 1) ค่าเฉลี่ยเลขคณิต หรือมัชฌิมเลขคณิต, 2) ค่าเฉลี่ยเลขภาคคณิต และ 3) ค่าเฉลี่ยฮาร์โมนิค โดยค่าเฉลี่ยที่ใช้โดยทั่วไปคือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิตๆ โดยมีสมการดังนี้

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.18)$$

เมื่อ n คือจำนวนตัวอย่างทั้งหมดในกลุ่มตัวอย่าง
 x_i คือค่าของตัวอย่างที่ i

2.5.3 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation: SD) [18]

เป็นค่าที่แสดงถึงการกระจายตัวของข้อมูลจากค่าเฉลี่ย คือถ้าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมาก หมายถึงข้อมูลมีการกระจายตัวมาก ในทางกลับกันถ้าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อย หมายถึงข้อมูลใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ย โดยส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (2.19)$$

เมื่อ n คือจำนวนตัวอย่างทั้งหมดในกลุ่มตัวอย่าง
 x_i คือค่าของตัวอย่างที่ i
 \bar{x} คือค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง

2.5.4 สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation) [19]

สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน เป็นเทคนิคที่ใช้หาขนาดและทิศทางของความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง โดย r แทนค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ สำหรับกลุ่มตัวอย่าง มีสมการคำนวณดังสมการที่ (2.20) โดยมีสมมุติฐานว่าตัวแปรทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์กัน ($H_0: r = 0$) และใช้การทดสอบ T-test ในการทดสอบสมมุติฐาน เมื่อการทดสอบมีนัยสำคัญแปลว่าตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กัน และเทียบระดับความสัมพันธ์ได้จากตารางที่ 2.4

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.20)$$

เมื่อ n คือจำนวนตัวอย่างทั้งหมดในกลุ่มตัวอย่าง
 x_i คือค่าของตัวอย่างที่ i ในกลุ่มตัวอย่าง x
 y_i คือค่าของตัวอย่างที่ i ในกลุ่มตัวอย่าง y
 \bar{x} และ \bar{y} คือค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง x และ y ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 การแปลความหมายค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	ระดับความสัมพันธ์
0.81 - 1.00	มีความสัมพันธ์กันมาก
0.51 - 0.80	มีความสัมพันธ์กันปานกลาง
0.21 - 0.50	มีความสัมพันธ์กันน้อย หรือต่ำ
0.01 - 0.20	มีความสัมพันธ์กันน้อยมาก
0.00	ไม่มีความสัมพันธ์กัน

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Shah, Chaiwong [20] ทำการทดลองหาค่า antenna delay โดยทำการทดลองภายในอาคารบนพื้นราบ ด้วยโมดูล DW1000 UWB (Qorvo Inc., North Carolina, USA) วางโมดูล UWB โมดูลที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ไว้ที่ตำแหน่งต่างๆ ให้โมดูลที่ 5 เป็นโมดูลรับค่าระยะห่าง และปรับแก้ Antenna delay โดยทราบระยะห่างระหว่างโมดูลอื่นกับโมดูลที่ 5 อยู่แล้ว ทำการคำนวณค่า Antenna delay จากระยะห่างที่วัดได้ด้วย UWB กับระยะห่างจริงที่ทราบอยู่แล้ว ทดลองซ้ำ 100 ซ้ำ วัดระยะห่างด้วย UWB ที่ปรับแก้ค่าแล้วที่ระยะ 3, 6, 9 และ 12 m พบว่าค่า Antenna delay ของโมดูลที่ 1, 2, 3 และ 4 เท่ากับ 69, 20.2, 57.4 และ 15.5 time units (1 time unit = 15.65 picoseconds) ตามลำดับ และคำนวณเป็นระยะห่างสำหรับโมดูลที่ 1, 2, 3 และ 4 ได้ 32.4, 9.48, 26.94 และ 7.28 cm ตามลำดับ หลังจากปรับแก้ค่าแล้วทดลองวัดระยะห่าง ผลการทดลองชี้ให้เห็นความแม่นยำในการวัดระยะที่มากขึ้นจากเดิมโดย RMSE ก่อนแก้ไข Antenna delay และหลังแก้ไข Antenna delay เท่ากับ 42 cm และ 29.31 cm ตามลำดับ

Ding, Zhu [21] ศึกษาเทคนิคการระบุตำแหน่งใน 2 มิติ ด้วย UWB ภายในอาคาร ทำการทดลอง บนพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 10 x 6 m โดยวาง anchor ที่มุมของพื้นที่สี่เหลี่ยม ทำการทดลองหาค่าปรับแก้จากการสุ่มจุดตัด 8 จุด โดยค่าปรับแก้ได้ เท่ากับ ความแตกต่างระหว่าง ตำแหน่งจริง กับ ตำแหน่งที่คำนวณจาก UWB ด้วยวิธี Trilateration จากนั้นทำการทดลองระบุตำแหน่งที่ 8 จุดใหม่ พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งด้วย UWB ใน 2 มิติ หลังปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนเท่ากับ ± 0.3 m

ศากร ยิ่งขจร [22] ทำการศึกษาผลกระทบต่อการเคลื่อน UWB ในสภาพแวดล้อมที่เคลื่อนไม่มีการสะท้อนกับผิววัตถุก่อนเดินทางไปยังเสารับสัญญาณ (Line of Sight: LOS) และสภาพแวดล้อมที่เคลื่อนมีการสะท้อนกับผิววัตถุก่อนเดินทางไปยังเสารับสัญญาณ (Non-Line of Sight: NLOS) ทำการทดลองบนทางเดิน โดยทดลองวัดระยะที่ระยะห่างจริง 2 m และเพิ่มขึ้นทีละ 0.5 m จนถึงระยะ 7 m โดยเสาอากาศ (Antenna) สูงจากพื้น 1.5 m ใช้เครื่องมือวัด และวิเคราะห์โครงข่ายแบบเวกเตอร์

รุ่น HP-8510C ในการสร้าง และตรวจจับสัญญาณ UWB พบว่าค่าการสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss) ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่เหนือเว็บไซต์ของสถาบันการศึกษา
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาพแวดล้อมแบบ NLOS มากกว่าแบบ LOS เนื่องจากมีการสูญเสียกำลังงานจากการสะท้อนและการเลี้ยวเบนของสัญญาณ และค่าความล่าช้าของการมาถึงของสัญญาณ (delay spread) ที่สภาพแวดล้อมแบบ NLOS มากกว่า LOS โดยที่ระยะ 2 m ค่า delay spread ของ NLOS และ LOS เท่ากับ 14.58 ns และ 27.13 ns ตามลำดับ เมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้น ค่า delay spread ของ NLOS และ LOS จะใกล้เคียงกัน

Pino-Ortega, Los Arcos [23] ทำการศึกษาเรื่องอิทธิพลของความสูงของเสาอากาศ (Antenna) ต่อการวัดระยะด้วย UWB โดยในการทดลองแบบระยะคงที่ ทำการทดลองในสนามบาสเก็ตบอลขนาด $28 \times 15 \text{ m}^2$ ใช้โมดูล UBW 4 โมดูลเป็นจุดอ้างอิง ซึ่งถูกติดตั้งที่แต่ละมุมของสนามโดยโมดูลทั้ง 4 ตัววัดระยะห่างแต่ละด้านของสนามบาสเก็ตบอล ทำการทดลองที่ความสูงของโมดูล 0.15, 1.30 และ 2.00 m ผลการทดลองพบว่าที่ความสูงเสาอากาศ 1.30 m ให้ความแม่นยำในการวัดระยะได้ดีที่สุด และรองลงมาเป็น 2.00 m และ 0.15 m ตามลำดับ

Norrine [15] ประยุกต์หลักการ Trilateration ในการคำนวณตำแหน่งด้วย UWB และทำการทดสอบการประยุกต์ใช้หลักการดังกล่าว โดยวาง UWB tag (เสารับสัญญาณ) ไว้ที่ตำแหน่งที่ไม่ทราบพิกัด และวาง anchor (เสาส่งสัญญาณ) ที่ที่ทราบพิกัดที่แน่นอน จำนวน 6 เสา บนพื้นราบขนาด $15 \times 15 \text{ m}^2$ พบว่าผลการคำนวณตำแหน่งของ tag ใน 3 มิติให้ค่า RMSE สำหรับสมการ Trilateration เท่ากับ 0.0421 cm สำหรับ RLS (Recursive Least Square) ให้ค่า RMSE เท่ากับ 0.0485 cm, 0.0432 cm และ 0.0537 cm ซึ่งมีประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่ง และในค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ

Porto, Arcidiacono [24] ทำการศึกษาระบุตำแหน่งและการระบุตัวตนของวิวแบบเรียลไทม์ (RTLS) โดยใช้เทคโนโลยี UWB ภายในโรงวิวแบบกึ่งเปิด เตรียมการทดลองในโรงเรือนขนาด $55.6 \times 20.7 \text{ m}^2$ ติดตั้งโมดูล UWB 4 โมดูลในพื้นที่ สำหรับตำแหน่งอ้างอิง ทำการทดลองระบุตำแหน่งใน 2 มิติของ tag UWB ที่ติดที่หุ้ว 8 ตัว และ tag UWB อ้างอิง พบว่าการระบุตำแหน่งของ tag อ้างอิงมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.11 m และการระบุตำแหน่งของ tag ที่หุ้วมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.515 m

Cheng, He [25] ทำการศึกษาและพัฒนาหุ่นยนต์นำทางสำหรับการใช้งานในโรงเรือน ซึ่งมีลักษณะเป็นทางเดินแคบและมีพืชปลูกหนาแน่น โดยหุ่นยนต์ใช้เทคโนโลยีระบุตำแหน่งและนำทางประกอบด้วย UWB, inertial measurement unit (IMU), odometry (ODOM), และ laser rangefinder (RF) และพัฒนา อัลกอริทึม NLOS confidence optimization ทำการทดลองนำทางหุ่นยนต์ในโรงเรือนขนาดพื้นที่ $30 \times 5 \text{ m}^2$ พบว่าอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นสามารถปรับปรุงความแม่นยำในการระบุตำแหน่งด้วย UWB ได้ 60.05% โดยหุ่นยนต์เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 0.1 m/s มีค่าความคลาดเคลื่อนเคลื่อนที่ออกจากแนวการเคลื่อนที่ที่กำหนด (lateral deviation) แสดงด้วย RMSE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับ 0.038 m และมุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์คลาดเคลื่อนออกจากแนวการเคลื่อนที่แสดงด้วย RMSE เท่ากับ 4.030°

Liu, Yang [26] ทำการศึกษาอิทธิพลของระยะทาง, อุณหภูมิ และความชื้นต่อความคลาดเคลื่อนในการวัดระยะทางด้วย UWB โดยทดสอบวัดระยะทางที่ 3.03 m สำหรับการศึกษาอุณหภูมิ และความชื้น, ทดสอบวัดระยะที่ระยะห่างตั้งแต่ 1 ถึง 200 m สำหรับการศึกษาอิทธิพลระยะทาง และพัฒนาแบบจำลองเพื่อชดเชยอิทธิพลของระยะทาง, อุณหภูมิ และความชื้น พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความแม่นยำในการวัดระยะทางคืออุณหภูมิ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) เท่ากับ -0.8793 แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความแม่นยำในการวัดระยะทางลดลง แต่ความชื้นไม่มีปฏิสัมพันธ์กับความแม่นยำในการวัดระยะทาง (Correlation Coefficient = 0.0147) และระยะห่างระหว่างโมดูลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความคลาดเคลื่อนในการวัดระยะทางเพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นช่วยลดข้อผิดพลาดในการวัดระยะทางได้อย่างมีนัยสำคัญ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการทดลอง

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ในบทนี้จึงกล่าวถึงขั้นตอนการดำเนินงาน โดยแบ่งเป็นการพัฒนาระบบสำหรับการทดสอบเทคโนโลยี UWB ทั้งในส่วนของ anchor station และ tag (หัวข้อ 3.1) และรายละเอียดของทดสอบสมรรถนะในด้านต่าง ๆ ของระบบ (หัวข้อ 3.2–3.4) โดยแบ่งเป็น 2 ประเด็นหลัก คือ การทดสอบการวัดระยะทาง และการทดสอบการระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยี UWB โดยมีการทดลองย่อย ดังต่อไปนี้

1. การทดสอบการวัดระยะทางด้วย UWB
 - การศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างโมดูล และทิศทางการวัดระยะ (หัวข้อ 3.2)
2. การทดสอบการระบุตำแหน่งด้วย UWB
 - การทดลองการระบุตำแหน่งในสนามทดลอง (หัวข้อ 3.3)
 - การทดลองการระบุตำแหน่งในแปลงทดสอบ (หัวข้อ 3.4)

3.1 การพัฒนาระบบสำหรับทดสอบการระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยี UWB

3.1.1 การพัฒนาฮาร์ดแวร์

ในการศึกษานี้ใช้โมดูล MaUWB ของ Shenzhen Makerfabs Corp. (Shenzhen, China) (รูปที่ 3.1) เป็นอุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณ UWB เพื่อวัดระยะทางระหว่างโมดูล และคำนวณตำแหน่งของโมดูลเป้าหมาย ภายในโมดูล MaUWB ประกอบด้วย

- ESP32 WROVER (Espressif Systems Inc., Shanghai, China)
- STM32 (STMicroelectronics Inc., Geneva, Switzerland)
- DW3000 (Qorvo Inc., North Carolina, USA)

โดยโมดูล DW3000 เป็นโมดูลที่รองรับการสื่อสารด้วยเทคโนโลยี UWB บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 รองรับช่องสัญญาณ Channels 5 (ความถี่ 6.5 GHz) มีอัตราการรับ-ส่งข้อมูล 850 kb/s และ 6.8 Mb/s และรองรับระบบระบุตำแหน่งแบบการหาระยะทางสองทิศทาง (Single-sided two-way ranging)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

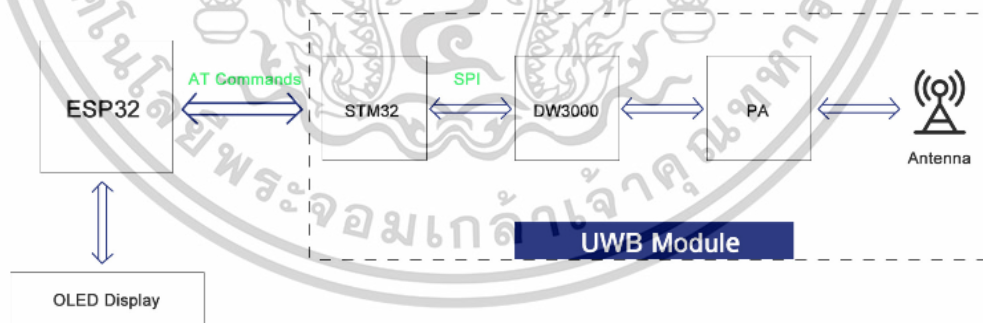


(ก) มุมมองด้านบน (Top view)

(ข) มุมมองด้านล่าง (Bottom view)

รูปที่ 3.1 โมดูล MaUWB ของ Shenzhen Makerfabs Corp.

โมดูล MaUWB ได้รับการออกแบบให้มีการทำงานร่วมกันระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 WROVER ซึ่งใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อเป็นแอปพลิเคชันในการทำงาน ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32 ซึ่งมีเฟิร์มแวร์ที่ถูกออกแบบมาเพื่อทำหน้าที่ในการสั่งการการรับส่งและประมวลผลสัญญาณ UWB จากโมดูล DW3000 ช่วยให้สามารถสื่อสารกับโมดูล UWB หลายตัวได้พร้อมกัน และสามารถสั่งการทำงานจาก ESP32 โดยใช้คำสั่ง AT Command เพื่อตั้งค่าและอ่านค่าสัญญาณได้โดยสะดวก ซึ่งเหมาะสำหรับการปรับแต่งสัญญาณ, การทดลอง และการพัฒนาต่อยอดเป็นอย่างมาก



รูปที่ 3.2 MaUWB Block Diagram.

แหล่งที่มา: <https://www.makerfabs.com/mauwb-dw3000-chipset.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.1 ชุดเสาส่งสัญญาณ (anchor station)

ชุดเสาส่งสัญญาณ หรือ anchor station เป็นอุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณแบบไร้สาย ซึ่งติดตั้ง ณ ตำแหน่งที่ทราบพิกัด UTM ที่แน่นอน โดยทำหน้าที่เป็นตำแหน่งอ้างอิง และรับ-ส่งสัญญาณเพื่อการคำนวณหาพิกัดของ tag โดย anchor station ประกอบด้วย

1. โมดูล MaUWB (Shenzhen Makerfabs Corp., China)
2. แบตเตอรี่สำรอง (portable battery) ขนาด 10,000 mAh
3. เสาอลูมิเนียม ปรับความสูงได้ สำหรับติดตั้งโมดูล

ในการศึกษานี้ ทำการติดตั้งเสาส่งสัญญาณ โดยให้โมดูลสูงจากพื้น 1.50 ± 0.05 m ดังรูปที่ 3.3(ข) และทำการวัดพิกัดที่ติดตั้งโดยใช้ เครื่องรับ RTK GNSS เพื่อใช้ในการคำนวณตำแหน่งต่อไป



(ก) ภายในเสาส่งสัญญาณ (ข) เสาส่งสัญญาณติดตั้งสูง 1.5 m
รูปที่ 3.3 ลักษณะ และส่วนประกอบภายในของเสาส่งสัญญาณ UWB

3.1.1.2 ชุดเสารับสัญญาณ (tag)

เสารับสัญญาณ หรือ tag เป็นอุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณแบบไร้สาย ทำหน้าที่รับสัญญาณจาก anchor station ในระบบเพื่อคำนวณระยะห่างระหว่าง tag กับ anchor station แต่ละตัว เพื่อคำนวณพิกัดของ tag โดยชุดเสารับสัญญาณประกอบด้วย

1. โมดูล MaUWB (Shenzhen Makerfabs Corp., China)
2. ระบบ RTK GNSS ประกอบด้วย เครื่องรับสัญญาณ GNSS (RTK Surveying Kit, Sparkfun Electronic Inc., Colorado, USA) และเสาอากาศ (GNSS L1/L2 Antenna Model: TOP106, Sparkfun Electronic Inc., Colorado, USA) โดยมีการปรับค่าปรับแก้สัญญาณจากระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการวิจัยวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ของกรมที่ดิน [1] ผ่านสมาร์ทโฟน (รายละเอียดเชิงเทคนิคของ RTK Surveying แสดงในตารางที่ 1ค)

3. เสาลูมิเนียม ปรับความสูงได้ สำหรับติดตั้งโมดูล

4. สมาร์ทโฟนระบบปฏิบัติการ Android เชื่อมต่อเข้ากับ โมดูล MaUWB ผ่านสายสัญญาณ USB ทำหน้าที่

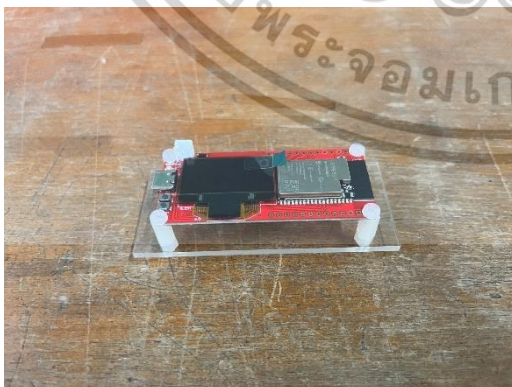
- รับข้อมูลการแสดงผลจากโมดูล MaUWB ผ่านสายสัญญาณ USB แล้วแสดงและบันทึกผลผ่านแอปพลิเคชัน Serial monitor
- เป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับโมดูล MaUWB
- รับค่าปรับแก้สัญญาณ RTK จากระบบโครงการวิจัยวัดด้วยดาวเทียมแบบจลน์ของกรมที่ดิน [1] ผ่านสัญญาณ 4G และส่งค่าปรับแก้ให้กับเครื่องรับสัญญาณ GNSS ผ่านสัญญาณ bluetooth



(ก) เสารับสัญญาณ ขณะเชื่อมต่อกับสมาร์ทโฟน



(ข) เสารับสัญญาณติดตั้งสูง 1.5 m



(ค) โมดูล UWB ตัวรับสัญญาณ



(ง) ชุด RTK GNSS

รูปที่ 3.4 ลักษณะ และส่วนประกอบของเสารับสัญญาณ UWB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.3 การจัดวางโมดูลทดสอบ

จากงานวิจัยเรื่อง Impact of UWB Antennas on Ranging Accuracy [27] ซึ่งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างมุมการรับสัญญาณกับความแม่นยำในการวัดระยะทางของ UWB พบว่า ความแม่นยำในการวัดระยะทางแตกต่างกันไปตามมุมการรับสัญญาณ เนื่องจากความสามารถในการรับสัญญาณพัลส์ของเสาอากาศ (Antenna) ที่ต่างกันในแต่ละมุม ซึ่งแสดงด้วย Fidelity Factor ดังนั้นเพื่อศึกษาความแม่นยำในการวัดระยะทางของ UWB จำเป็นต้องกำหนดมิติในการการจัดวางโมดูลให้เหมาะสม

ในการศึกษานี้มีการใช้งานโมดูล MaUWB ในลักษณะวางตั้ง โดยหันเสาอากาศของ UWB ขึ้นตั้งฉากกับพื้น และใช้เสาอากาศเป็นแกนหมุนของโมดูล (หมุนทวนเข็มนาฬิกา) กำหนดให้มุม 0 องศาคือทางด้านหน้าของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้านที่ติดตั้งเสาอากาศ และมุม 90 องศา คือด้านพอร์ต USB ของโมดูล (รูปที่ 3.5)



3.1.2 การพัฒนาซอฟต์แวร์

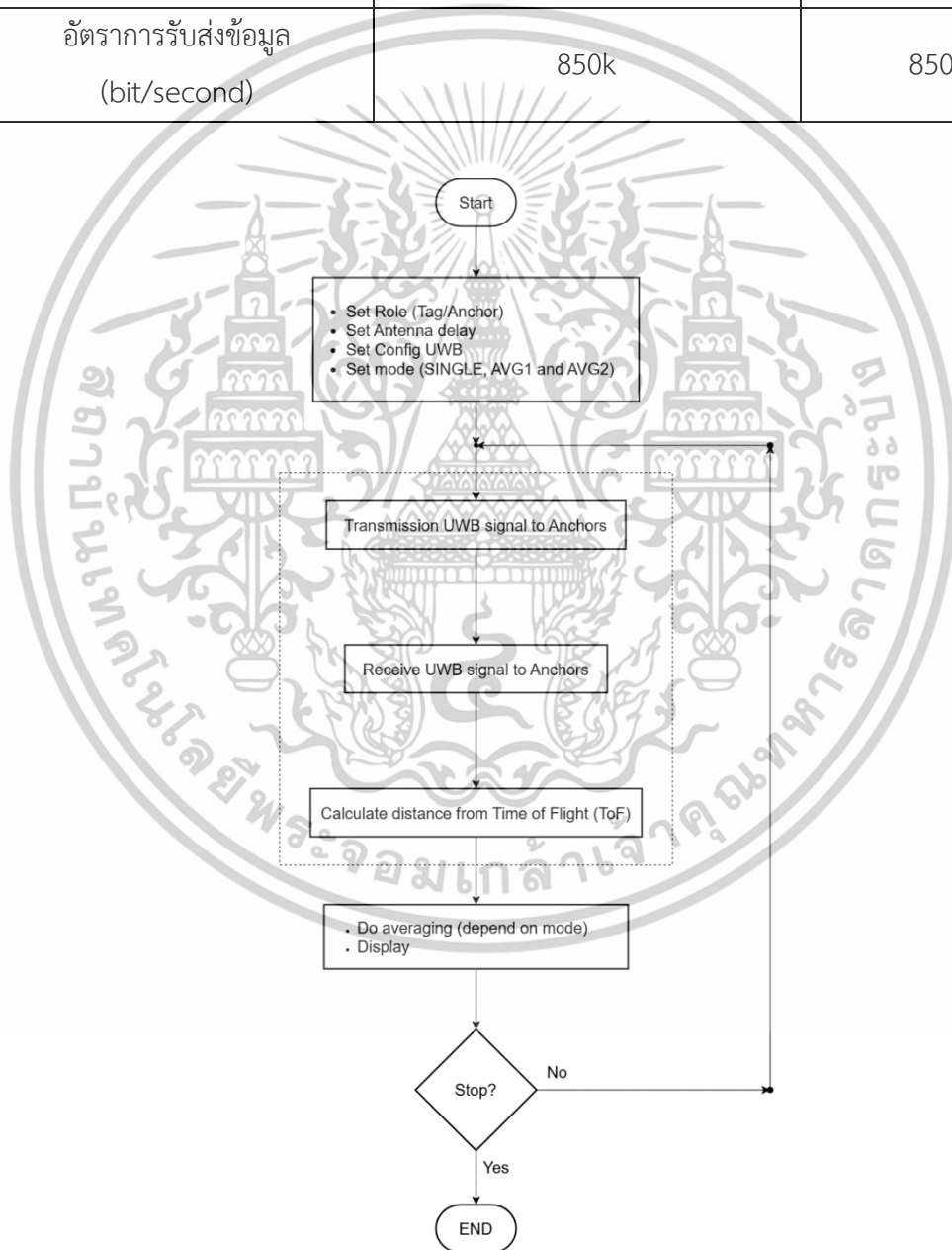
เพื่อกำหนดค่าสัญญาณ UWB และสถานะของโมดูล รวมถึงเพื่ออำนวยความสะดวกในการเก็บผลการทดลอง จึงได้พัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับการวัดระยะทางด้วย UWB ขึ้น โดยพัฒนาต่อยอดจากซอฟต์แวร์ของ Shenzhen Makerfabs Corp., China (https://github.com/Makerfabs/MaUWB_DW3000-with-STM32-AT-Command.git)

ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นเริ่มต้นการทำงานโดยตั้งค่าสถานะต่างๆของโมดูลตามตารางที่ 3.1 Antenna delay คือค่าความล่าช้าจากเสาอากาศของโมดูล ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.1.2 จากนั้นซอฟต์แวร์จะสั่งการ STM32 ผ่าน ESP32 ให้เริ่มส่ง และรับสัญญาณ UWB เพื่อวัดระยะทาง โดยทำงานตามโหมดที่กำหนดไว้คือ 1) SINGLE (เมื่อผู้ใช้สั่งวัด ส่งค่าระยะทางทันทีที่รับสัญญาณได้), เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AVG1 (เมื่อผู้ใช้สั่งวัด ทำการบันทึกระยะเวลาทาง 5 ค่า แล้วส่งค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่คำนวณได้) และ 3) AVG2 (ทำการบันทึกและส่งค่าเฉลี่ยของระยะเวลาที่คำนวณจากการวัด 5 ค่าอย่างต่อเนื่อง)

ตารางที่ 3.1 การกำหนดค่าสถานะการทำงานของโมดูล MaUWB

Role	เสาส่งสัญญาณ (anchor stations)	เสารับสัญญาณ (tag)
Antenna delay (nanosecond)	16,448	16,306
capacity of tag	32	32
อัตราการรับส่งข้อมูล (bit/second)	850k	850k



รูปที่ 3.6 Flow chart ของซอฟต์แวร์ภายในโมดูล MaUWB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การคำนวณตำแหน่งของ tag

ใช้วิธี Trilateration สำหรับการคำนวณตำแหน่ง โดยการคำนวณตำแหน่งในปริภูมิ 3 มิติใช้วิธีการคำนวณตำแหน่งของ Abdelmoumen Norrdine [15] สำหรับการคำนวณตำแหน่งในปริภูมิ 2 มิติ (ไม่พิจารณาความสูง หรือแกน Z) โดยประยุกต์ใช้วิธีการคำนวณตำแหน่งของ Abdelmoumen Norrdine ซึ่งสามารถเขียนสมการผลเฉลยสำหรับ ปริภูมิ 2 มิติได้เป็น

$$\begin{bmatrix} 1 & -2x_1 & -2y_1 \\ 1 & -2x_2 & -2y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^2 + y^2 \\ x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1^2 - x_1^2 - y_1^2 \\ S_2^2 - x_2^2 - y_2^2 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

เมื่อตำแหน่งของ anchor stations ที่ 1 และ 2 แสดงด้วย (x_1, y_1) และ (x_2, y_2) ตามลำดับ ระยะห่างจาก tag กับ anchor stations ที่ 1 และ 2 แสดงด้วย S_1 และ S_2 ตามลำดับ ตำแหน่งของ tag (ไม่ทราบตำแหน่ง) แสดงด้วย (x, y) ซึ่งจะสามารถเขียนในรูปทั่วไปของเมทริกซ์ได้ว่า

$$A \cdot X = B \quad (3.2)$$

เมื่อ $X \in E$ โดยที่ $E = \{(X_0, X_1, X_2)^T \in R^3 \text{ โดย } X_0 = X_1^2 + X_2^2\}$

จากทฤษฎีบท Rank-Nullity Theorem เมื่อเมทริกซ์คำตอบของสมการที่ (3.2) สามารถเขียนได้ใหม่ว่า

$$X = X_p + (t \cdot X_h) \quad (3.3)$$

เมื่อ X_p คือ ผลเฉลยจากสมการที่ (3.2)

X_h คือ ผลเฉลยจาก $A \cdot X = 0$

แก้สมการหาค่า t จากความสัมพันธ์ $X \in E$ และ $X_0 = X_1^2 + X_2^2$ แทนลงในสมการที่ (3.3) ได้ว่า

$$X_0 = X_{p0} + (t \cdot X_{h0}) \quad (3.4)$$

$$X_1 = X_{p1} + (t \cdot X_{h1}) \quad (3.5)$$

$$X_2 = X_{p2} + (t \cdot X_{h2}) \quad (3.6)$$

$$X_{p2} + (t \cdot X_{h2}) = (X_{p1} + (t \cdot X_{h1}))^2 + (X_{p2} + (t \cdot X_{h2}))^2 \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจัดรูปสมการที่ (3.7) เพื่อหาค่า t ได้สมการ quadratic equation ($at^2 + bt + c = 0$) ส่งผลให้ผลเฉลยของสมการมี 2 ผลเฉลยคือสมการที่ (3.9) และ (3.10)

$$(x_{h1}^2 + x_{h2}^2)t^2 + (2 \cdot x_{p1}x_{h1} + 2 \cdot x_{p2}x_{h2} - x_{h0})t + x_{p1}^2 + x_{p2}^2 - x_{p0} = 0 \quad (3.8)$$

$$\mathbf{X}_1 = \mathbf{X}_p + (t_1 \cdot \mathbf{X}_h) \quad (3.9)$$

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{X}_p + (t_2 \cdot \mathbf{X}_h) \quad (3.10)$$

การเลือกผลเฉลยเลือกจากผลเฉลยที่ให้ค่าความคลาดเคลื่อนจากระยะห่างที่วัดได้ด้วย MaUWB น้อยที่สุดตามวิธีการคำนวณตำแหน่งของ Abdelmoumen Norrdine

3.2 การศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างโมดูล และทิศทางการวัดระยะ

การทดลองนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อวัดความแม่นยำในการวัดระยะทาง และทดสอบระยะทางสูงสุดที่ UWB สามารถวัดได้ รวมถึงศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริง และระยะทางที่วัดได้ด้วย UWB โดยทำการทดลองบนพื้นถนนยาว 350 m ถนนลาดชันหน้า วัดปลุกศรัทธา เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร (พิกัด: 13.72434024°N, 100.76904631°E) และกำหนด Geometry ของโมดูลตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนหน้า

3.2.1 วิธีการทดลอง

การทดลองวัดระยะทางระหว่าง tag กับ anchor stations ดำเนินการดังนี้

1. ติดตั้ง anchor stations (ทั้ง 4 ชุด) บนถนน โดยให้มุม 0 องศาของโมดูลหันตามแนวถนน ชี้เข้าหาโมดูล tag และบันทึกพิกัดด้วยเครื่องรับ RTK GNSS (รูปที่ 3.7)
2. วาง tag ที่ระยะห่างประมาณ 5 m จาก anchor stations และบันทึกพิกัดด้วย RTK GNSS
3. จัดวาง tag โดยให้มุม 0 องศาของโมดูลหันตามแนวถนนชี้ไปทาง anchor stations จากนั้นบันทึกระยะห่างระหว่าง tag กับแต่ละ anchor station
4. หมุน tag ทีละ 22.5 องศา และบันทึกระยะห่างระหว่าง tag กับ anchor stations ทำซ้ำจนครบ 360 องศา เพื่อทดสอบอิทธิพลของทิศทางการรับส่งสัญญาณ
5. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3 และ 4 ทั้งหมด 3 ซ้ำ
6. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 3 ถึง 5 โดยเปลี่ยนระยะห่างระหว่าง tag กับ anchor stations เป็น 10 m, 25 m, 50 m, 75 m, 100 m, 150 m, 200 m, 250 m, 300 m และ 350 m ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1. คำนวณค่าความคลาดเคลื่อน (Distance error) ของการวัดระยะทางด้วย UWB เทียบกับการวัดด้วย RTK
2. คำนวณค่าชดเชย (offset) ระยะทางสำหรับแต่ละ anchor stations
3. ทดสอบ ANOVA test สำหรับแต่ละมุมการรับสัญญาณ



(ก) การติดตั้งเสาสูงและรับสัญญาณที่ความสูง 1.5 m (ข) การทดลองวัดระยะที่ระยะห่าง 50 m



(ค) สถานที่ทดลอง

รูปที่ 3.7 การเตรียมการทดลอง และการทดลองวัดอิทธิพลของระยะทางแม่มุมการวัด

3.3 การทดลองการระบุตำแหน่งนอกรอาคาร

การทดลองนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อทดลองระบุตำแหน่งด้วย UWB นอกรอาคาร และการเลือกใช้ค่าชดเชยเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง โดยทำการทดลองบนบนดาดฟ้าอาคาร CCA คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (พิกัด: 13.72659705°N, 100.77227246°E) และเตรียมการทดลอง โดยติดตั้ง anchor stations จำนวน 4 เสา เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 15 x 15 m² หัน anchor stations เข้าหาสนามทดสอบ และบันทึกพิกัด anchor station แต่ละตัวด้วยเครื่องรับ RTK GNSS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 วิธีการทดลอง

การทดลองวัดระยะทางระหว่าง tag กับ anchor stations ดำเนินการดังนี้

1. กำหนดตำแหน่งทดลองโดยประมาณภายในพื้นที่ทดลอง จำนวน 16 ตำแหน่งทดลอง
2. บันทึกข้อมูลจาก tag ประกอบด้วย ระยะห่างของ tag กับแต่ละ anchor station และ พิกัด RTK ของ tag (มีการบันทึกพิกัด tag ใหม่ทุกครั้ง)
3. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 โดยเปลี่ยนตำแหน่งทดลอง จนครบ 16 ตำแหน่ง
4. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 ทั้งหมด 3 ซ้ำ
5. คำนวณตำแหน่งด้วยวิธี Trilateration

3.3.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1. คำนวณค่าความคลาดเคลื่อน (Distance error) ของการระบุตำแหน่งด้วย UWB เทียบกับการระบุตำแหน่งด้วย RTK
2. เปรียบเทียบ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ของการระบุตำแหน่งด้วย UWB เทียบกับการระบุตำแหน่งด้วย RTK



(ก) จุดทดลอง (วงกลม) และตำแหน่ง

(ข) ภาพพื้นที่ทดลอง

เสาส่งสัญญาณ (สามเหลี่ยม)

รูปที่ 3.8 แผนการทดลองการระบุตำแหน่งในสนามทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การทดลองการระบุตำแหน่งในแปลงทดสอบ

การทดลองนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อทดลองระบุตำแหน่งบนแปลงเกษตรด้วย UWB และการเลือกใช้ค่าชดเชยเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง โดยทำการทดลองบนแปลงทดสอบ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (พิกัด: 13.72512347°N, 100.77243097°E) และเตรียมการทดลอง โดยติดตั้ง anchor stations จำนวน 4 เสา เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 35 x 35 m² และจัดวาง anchor stations ให้มุม 0 องศาของโมดูลหันตามแนวทิศเหนือ และบันทึกพิกัด anchor station แต่ละตัวด้วย RTK GNSS

3.4.1 วิธีการทดลอง

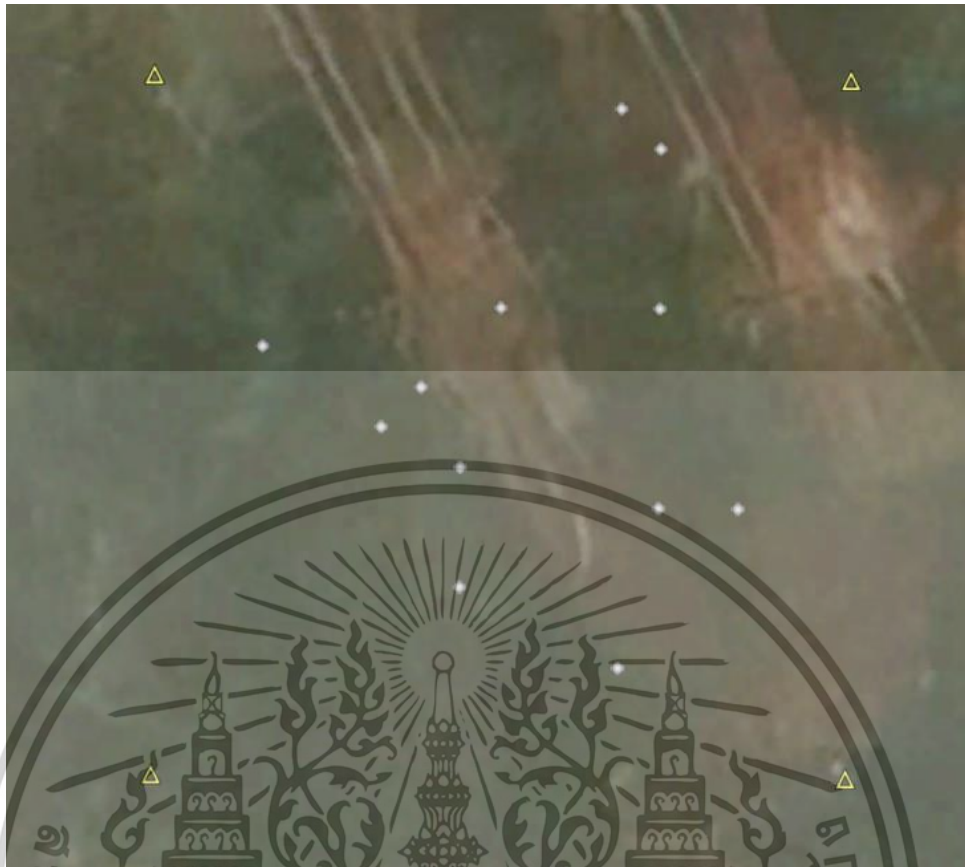
การทดลองวัดระยะทางระหว่าง tag กับ anchor stations ดำเนินการดังนี้

1. สุ่มตำแหน่งทดสอบภายในพื้นที่ทดลอง จำนวน 12 ตำแหน่ง
2. วาง tag ที่ตำแหน่งทดลองแรก บันทึกพิกัด UTM ของ tag และระยะห่างจาก tag ถึงแต่ละ anchor station
3. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2 โดยเปลี่ยนตำแหน่งทดลอง จนครบ 12 ตำแหน่ง
4. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1 ถึง 3 ทั้งหมด 3 ซ้ำ
5. คำนวณตำแหน่งด้วยวิธี Trilateration

3.4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

1. คำนวณค่าความคลาดเคลื่อน (Distance error) ของการระบุตำแหน่งด้วย UWB เทียบกับการระบุตำแหน่งด้วย RTK
2. เปรียบเทียบ ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ของการระบุตำแหน่งด้วย UWB เทียบกับการระบุตำแหน่งด้วย RTK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แผนการทดลองการระบุตำแหน่งในแปลงทดสอบ
จุดทดลอง (วงกลมขาว) และตำแหน่งของ anchor stations (สามเหลี่ยมเหลือง)

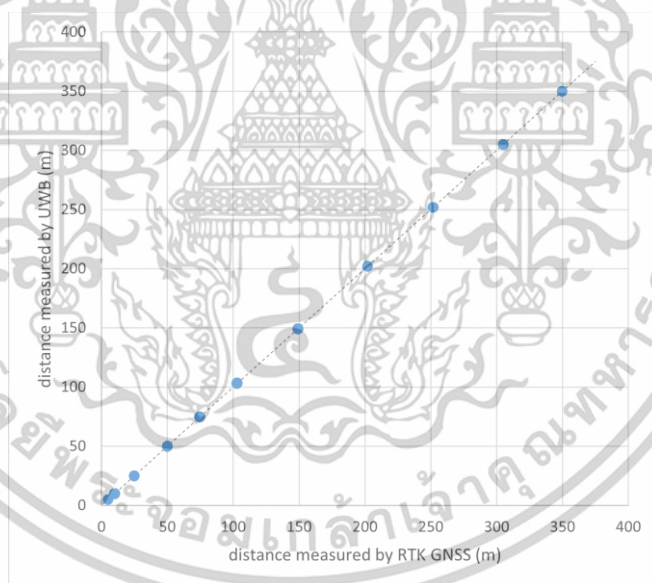
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการศึกษา

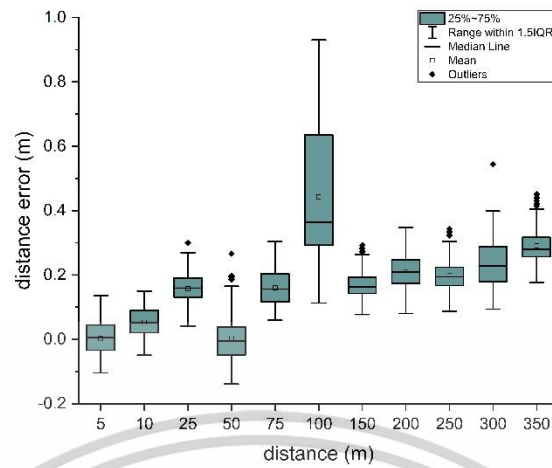
4.1 การศึกษาอิทธิพลของระยะห่างและทิศทางการวัดระยะทางด้วยเทคนิค UWB

จากการทดลองในข้อ 3.2 ผลการวัดระยะทางจาก tag ไปยัง anchors ทั้งสี่สถานี โดยเปรียบเทียบกับระยะทางที่วัดโดยใช้เครื่องรับ RTK GNSS แสดงในตารางผนวก 1ข, 4ข และรูปที่ 4.1 พบว่าโดยภาพรวมแล้ว เทคนิค UWB สามารถใช้ในการวัดระยะทางได้เป็นอย่างดี โดยการวัดระยะทางด้วย UWB กับการวัดระยะทางด้วย RTK มีปฏิสัมพันธ์ (Correlation) อย่างมากแสดงด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) เท่ากับ 1.00 อย่างไรก็ตาม หากนำมาแสดงเป็นค่าความผิดพลาดดังรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่า ค่าความผิดพลาดของการวัดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 0.162 ± 0.141 m และมีความแปรปรวนที่สูง จึงทำการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติมโดยการทดสอบความแปรปรวน (ANOVA)

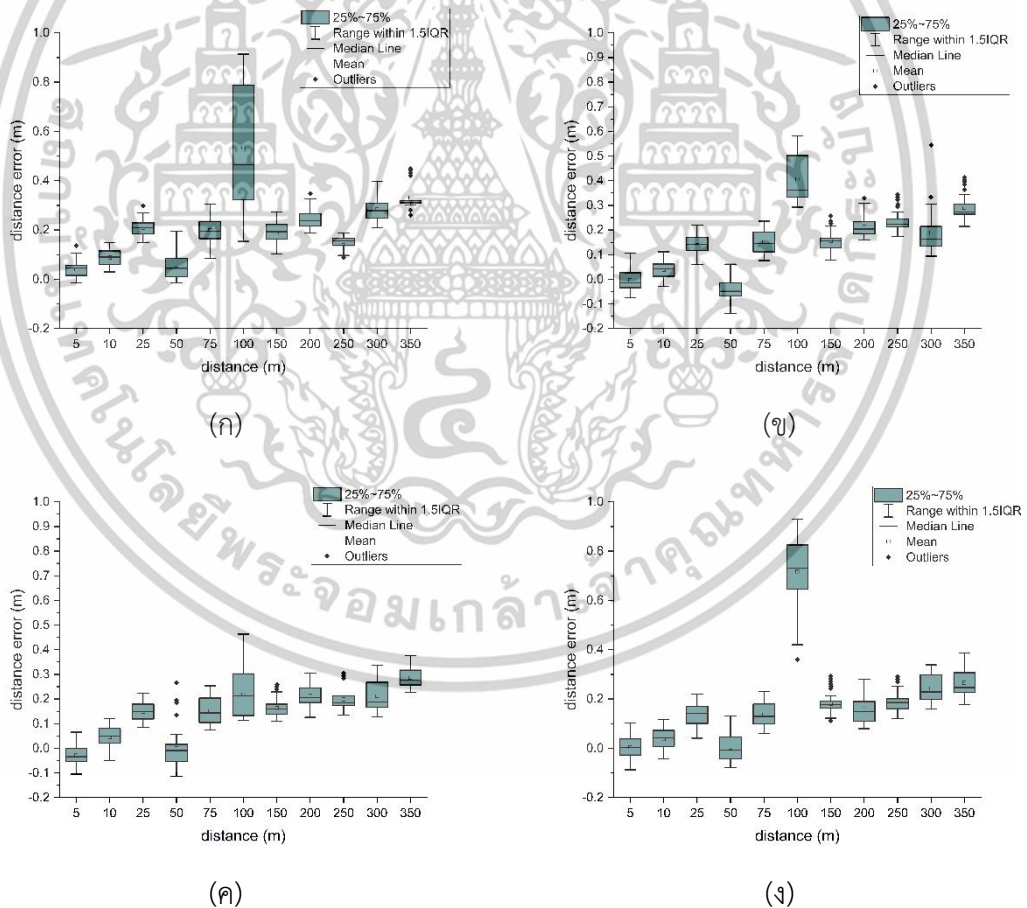


รูปที่ 4.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริง (RTK GNSS) กับระยะทางที่วัดได้ด้วย UWB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 แผนภาพกล่องค่าความคลาดเคลื่อนของระยะทางที่วัดได้ด้วยเทคโนโลยี UWB ที่ระยะต่างๆ (รวมทุก Anchor Station)



รูปที่ 4.3 แผนภาพกล่องค่าความคลาดเคลื่อนของระยะทางที่วัดได้ด้วยเทคโนโลยี UWB ที่ระยะทางที่วัดที่แตกต่างกันของแต่ละ anchor: (ก) Anchor 1, (ข) Anchor 2, (ค) Anchor 3 และ (ง) Anchor 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ถึง 4.3 แสดงผลการทดสอบความแปรปรวน (ANOVA) ของค่าความผิดพลาด (error) ที่มีต่อปัจจัย 3 ปัจจัย คือ 1) ระยะทาง, 2) anchor ที่แตกต่างกัน และ 3) มุมในการวัดตามลำดับ โดยพบว่าปัจจัยทั้งสามมีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 และ 4.3 พบว่าที่ระยะทางการวัด 100 m มีค่า error ที่สูงกว่าระยะอื่นอย่างชัดเจน โดยจากการสังเกตจากการทดลองพบว่าพื้นที่ที่เลือกทดลองในช่วง 0-100 m ถูกขนาบข้างด้วยกำแพง และต้นไม้มีความกว้างประมาณ 8 m จากนั้นพื้นที่ขยายเปิดออกเป็นลานกว้างประมาณ 20 m จึงอาจส่งผลต่อการทดสอบในครั้งนี้ โดยเฉพาะจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะพื้นที่ที่ระยะ 100 m (รูปที่ 3.7) ในการทดลองได้มีการบันทึกข้อมูลสภาพอากาศจาก Weather station ของภาควิชาวิศวกรรมเกษตร ที่อยู่ห่างจากพื้นที่ทดลอง 430 m โดยความชื้นในช่วงที่ทำการทดลองอยู่ในช่วง 59-70% ซึ่งไม่มีผลต่อระยะทางที่วัด ส่วนอุณหภูมิอยู่ในช่วง 30-33 °C และจากงานวิจัยของ Liu, Yang [26] ช่วงอุณหภูมิดังกล่าวมีค่าความคลาดเคลื่อนการวัดระยะทางในการทดลองประมาณ 3.5 cm นอกจากนี้ ที่ระยะทางตั้งแต่ 250 m ขึ้นไป พบว่าความสามารถในการรับสัญญาณของโมดูลลดลงอย่างชัดเจน (ตารางผนวก 1ข)

ดังนั้นในการศึกษาต่อไปจึงควรตัดข้อมูล error ในช่วงดังกล่าว (100 m และตั้งแต่ 250 m ขึ้นไป) ออกจากการวิเคราะห์ เนื่องจากไม่มีการบันทึกอุณหภูมิอากาศ และความชื้น เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลอย่างถูกต้อง และเพื่อให้ได้ค่า error ที่ถูกต้องของการวัดระยะทางด้วยโมดูล UWB

ส่วน error จากโมดูลที่ต่างกัน (ตารางที่ 4.2) และมุมการวัดที่ต่างกัน (ตารางที่ 4.3) ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทั้งสองปัจจัย จะยังไม่นำมาอภิปรายในขั้นนี้ เนื่องจากสามารถนำ error ข้างต้นของแต่ละ anchor มาใช้เป็นค่า offset ซึ่งสามารถช่วยลดค่า error ของปัจจัยต่างๆ และในภาพรวมของระบบลงได้

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยของ error ที่ระยะทางที่แตกต่างกัน

Distance (m)	Error (m)
5	0.0035 ^a
10	0.0526 ^b
25	0.1579 ^c
50	0.0036 ^a
75	0.1602 ^c
100	0.4426 ^h
150	0.172 ^{cd}
200	0.21 ^{ef}
250	0.199 ^{de}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Distance (m)	Error (m)
300	0.2327 ^f
350	0.2902 ^g

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยของ error ของ anchor ที่แตกต่างกัน

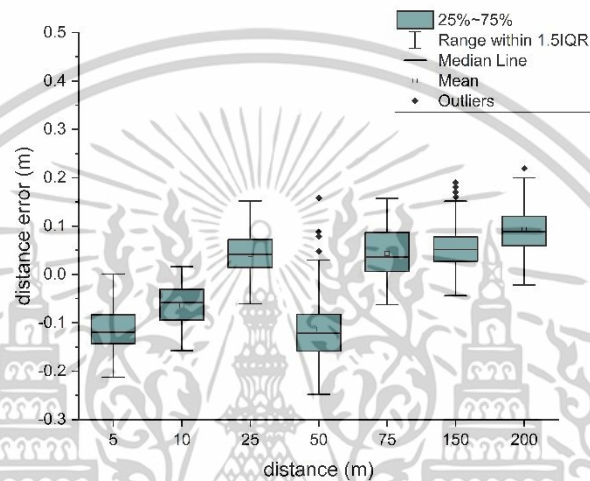
Anchor ID	error (m)
1	0.1835 ^c
2	0.157 ^{ab}
3	0.1425 ^a
4	0.1678 ^{bc}

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของ error ของมุมในการวัดที่ต่างกัน

Reception angle (°)	error (m)
0	0.1518 ^{ab}
22.5	0.1559 ^{ab}
45	0.1517 ^{ab}
67.5	0.1342 ^{ab}
90	0.1077 ^a
112.5	0.1007 ^a
135	0.1075 ^a
157.5	0.1493 ^{ab}
180	0.1731 ^{bc}
202.5	0.1816 ^{bc}
225	0.1901 ^{bc}
247.5	0.1776 ^{bc}
270	0.1811 ^{bc}
292.5	0.2184 ^c
315	0.2247 ^c
337.5	0.1825 ^{bc}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Offset ที่คำนวณได้จากค่า error ที่เกิดขึ้นของ anchor ทั้งสี่ เท่ากับ 0.147, 0.110, 0.108 และ 0.102 m ตามลำดับ โดยเมื่อทำการคำนวณค่า error ใหม่ จะได้ค่า error ที่ระยะทางต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.4 ที่ระยะทางการวัด 50 m มีค่า error ที่ต่ำกว่าระยะอื่นอย่างชัดเจน จากการสังเกตจากการทดลอง เป็นไปได้ว่ามีอิทธิพลจากสภาพแวดล้อมโดยรอบ และเมื่อทำการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัยต่าง ๆ อีกครั้ง ได้ผลการวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของปัจจัย ระยะทาง, anchor ที่แตกต่างกัน และ มุมในการวัด ดังตารางที่ 4.4 ถึง 4.6 ตามลำดับ



รูปที่ 4.4 แผนภาพกล่องค่าความคลาดเคลื่อนของระยะทางที่วัดด้วยเทคโนโลยี UWB ที่ระยะต่างๆ (selected ranges)

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยของ error ที่ระยะทางที่แตกต่างกัน (selected ranges)

Distance (m)	error (m)
5	-0.0483 ^a
10	0.0984 ^c
25	0.0388 ^b
50	-0.0219 ^a
75	0.1536 ^e
150	0.0276 ^b
200	0.0991 ^c

ตารางที่ 4.5 ค่าเฉลี่ยของ error ของ anchor ที่แตกต่างกัน (selected ranges)

Anchor ID	error (m)
1	0.0435 ^a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

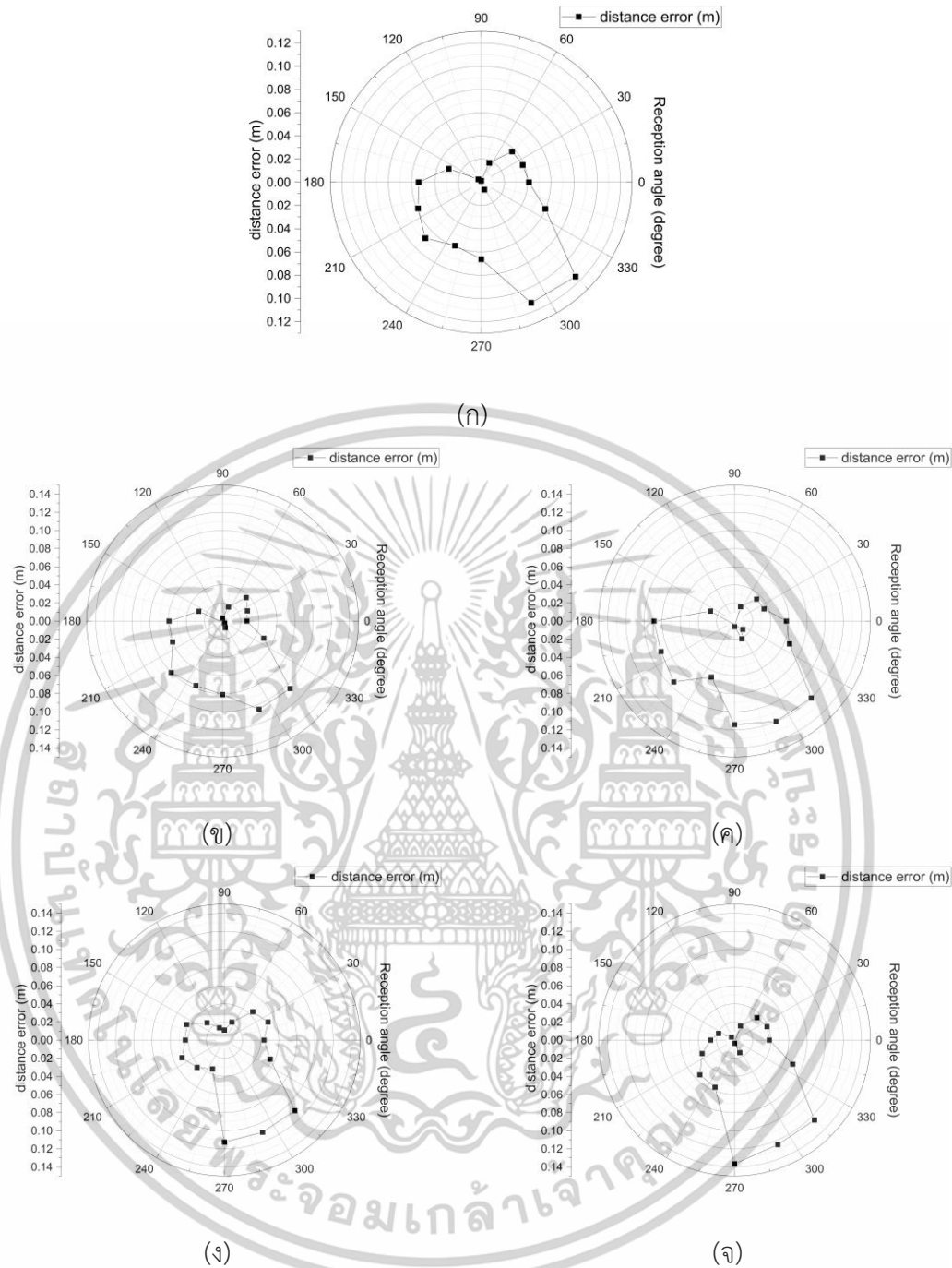
2	0.0509 ^a
3	0.0483 ^a
4	0.0461 ^a

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยของ error ของมุมในการวัดที่แตกต่างกัน (selected ranges)

Reception angle (°)	error (m)
0	0.0411 ^{abc}
22.5	0.0387 ^{abc}
45	0.0375 ^{abc}
67.5	0.0181 ^{abc}
90	0.0013 ^{ab}
112.5	-0.0069 ^a
135	0.0035 ^{abc}
157.5	0.0304 ^{abc}
180	0.054 ^{abcd}
202.5	0.059 ^{bcd}
225	0.0681 ^{cd}
247.5	0.0591 ^{bcd}
270	0.0663 ^{bcd}
292.5	0.1124 ^d
315	0.1149 ^d
337.5	0.0598 ^{bcd}

หลังจากมีการใช้ค่า offset ที่เหมาะสมเพื่อปรับแก้ค่าระยะทางที่อ่านได้จากแต่ละ anchor แล้ว ถึงแม้ว่า มุมการวัด ยังคงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ error ของปัจจัยต่าง ๆ และของระบบ มีค่าลดลงอย่างชัดเจน โดย error สูงสุดจากปัจจัยระยะทางเท่ากับ 15.36 cm ที่ระยะทาง 75 m error สูงสุดจากปัจจัย anchor ที่แตกต่างกัน เท่ากับ 5.09 cm ที่ระยะทาง 75 m เป็นของ anchor 1 และ error สูงสุดจากปัจจัยมุมในการวัดเท่ากับ 11.49 cm ที่มุม 315 องศา ซึ่งมีค่าที่ต่ำมีศักยภาพในการนำไปใช้ในการระบุตำแหน่งต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

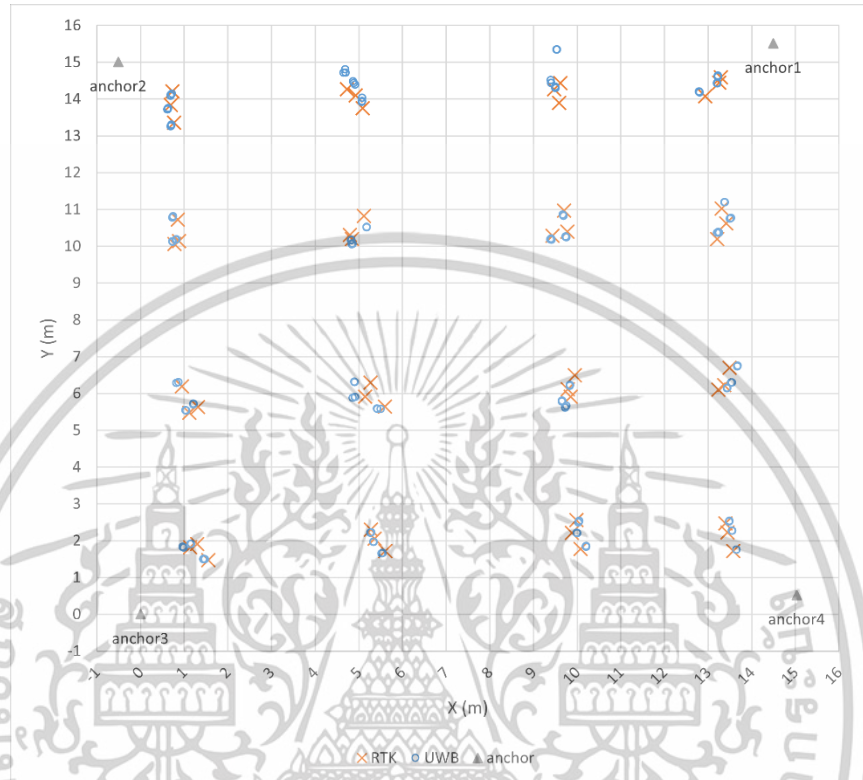


รูปที่ 4.5 กราฟเชิงขั้วของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (ก) รวมทุก anchor, (ข) anchor 1, (ค) anchor 2, (ง) anchor 3 และ (จ) anchor 4 ในการวัดระยะที่แต่ละมุมการวัด

4.2 ความแม่นยำในการการระบุตำแหน่งนอกอาคาร

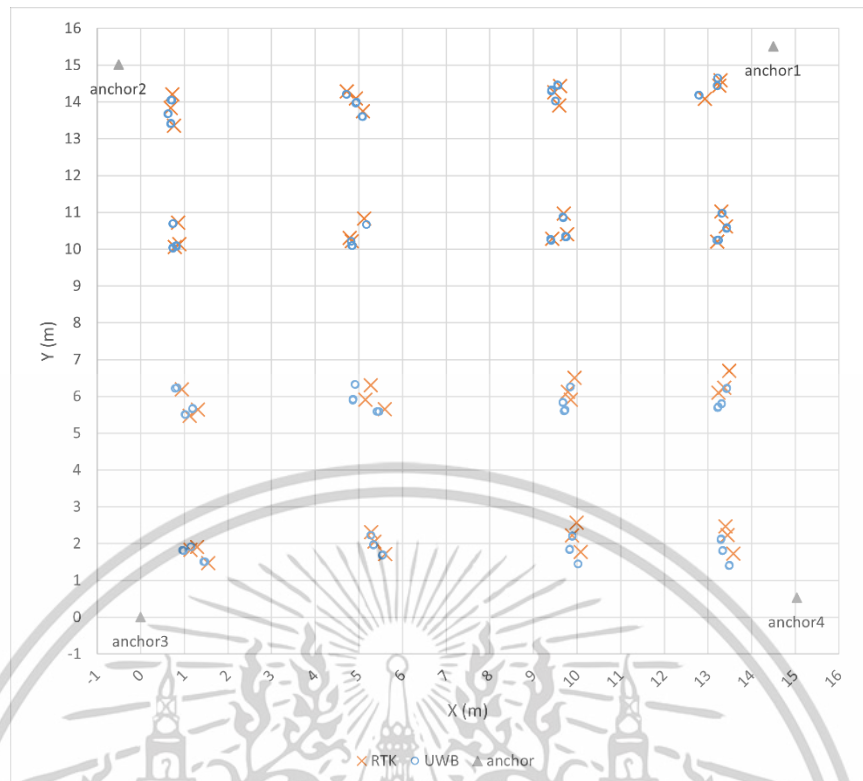
จากการทดลองในข้อ 3.2 ผลการวัดระยะทางจาก tag ไปยัง anchors ทั้งสี่สถานที่ติดตั้งอยู่รอบพื้นที่ทดสอบขนาด 15 x 15 ตารางเมตร แล้วนำมาคำนวณค่าพิกัดด้วยเทคนิค trilateration ทั้งแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ (หัวข้อที่ 3.1.3 และหัวข้อที่ 2.4 ตามลำดับ) แล้วเปรียบเทียบกับพิกัดและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะทางที่วัดโดยใช้เครื่องรับ RTK GNSS แสดงในตารางผนวก 2ข และ รูปที่ 4.5 ถึง 4.6 พิกัดที่วัดได้ด้วย RTK GNSS และคุณภาพของการวัดพิกัดแสดงในตารางที่ 5ข โดยคุณภาพของการวัดด้วย RTK แสดงด้วยค่าเฉลี่ยของ PDOP, HDOP และ VDOP เท่ากับ 1.01, 0.61 และ 0.80 ตามลำดับ

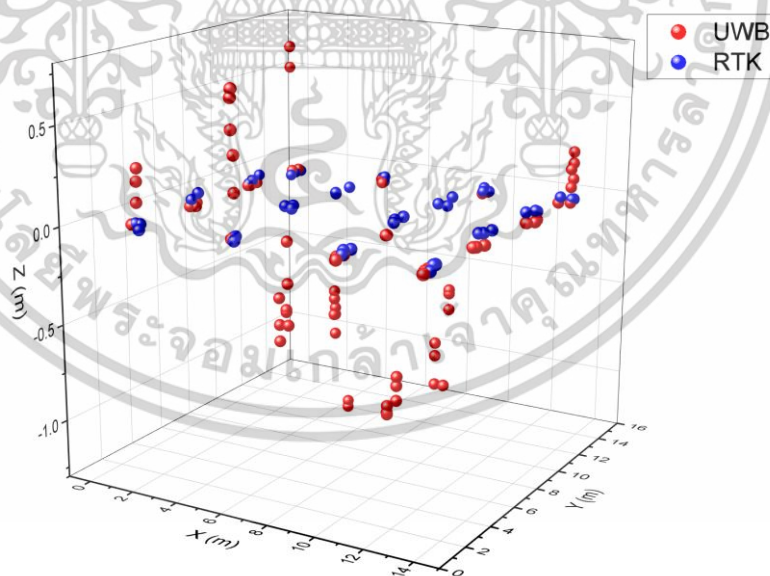


รูปที่ 4.6 ตำแหน่งของจุดวัดในพื้นที่ทดสอบนอกอาคาร ที่ได้จากระบบ UWB เทียบกับพิกัดจริงที่วัดจากเครื่องรับ RTK GNSS (2D trilateration)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งของจุดวัดในพื้นที่ทดสอบนอกรอาคาร ที่ได้จากระบบ UWB เทียบกับพิกัดจริงที่วัดจากเครื่องรับ RTK GNSS (3D trilateration โดยแสดงเฉพาะแกน x และ y)



รูปที่ 4.8 ตำแหน่งของจุดวัดในพื้นที่ทดสอบนอกรอาคาร ที่ได้จากระบบ UWB เทียบกับพิกัดจริงที่วัดจากเครื่องรับ RTK GNSS (3D trilateration)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการวัดระยะทางของแต่ละตำแหน่งของ tag ไปยังแต่ละ anchor ในตารางที่ 4.7 แสดงค่า error และ RMSE ของการวัดระยะทางจาก tag ไปยังแต่ละ anchor และ error ของการการระบุพิกัด ด้วยเทคโนโลยี UWB พบว่า มีค่า error เฉลี่ย 0.015 ± 0.133 m และมี RMSE 0.134 m ซึ่งใกล้เคียงกับผลการศึกษาในหัวข้อ 4.1

เมื่อใช้เทคนิค trilateration ในการคำนวณตำแหน่ง พบว่าการระบุตำแหน่งเมื่อคำนวณแบบ 2D มี RMSE เท่ากับ 0.236 m ส่วนการคำนวณแบบ 3D มี RMSE 0.467 m เนื่องจากผลการคำนวณค่าในแกน Z ยังมีค่า error ที่สูง โดยหากนำเพียงพิกัดในส่วนของ x และ y มาใช้ จะมี RMSE เท่ากับ 0.221 m ซึ่งใกล้เคียงกับการคำนวณแบบ 2D

สาเหตุที่ค่า error ของแกน z มีค่าที่สูงกว่า แกนอื่น เนื่องจากค่าความสูงของแต่ละ anchor และ tag ในการศึกษานี้มีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้เกิด Vertical Dilution of Precision (VDOP) ทำให้ความสามารถในการประมาณค่าในแนวตั้งได้ไม่ดี ซึ่งเป็นเหตุผลเดียวกันกับที่ ค่า error ในแนวตั้งของระบบ GNSS สูงกว่า error ในแนวราบ จากงานวิจัยของ Hu, Yang [28] ได้ศึกษาอิทธิพลของการจัดวาง anchor ต่อความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการวางตัวของ anchor โดยทำการทดลองการจัดวาง anchor ที่ความสูงต่างๆ การจัดวาง anchor ที่ระยะห่างต่างๆ และ การจัดวาง anchor ที่ลักษณะต่างๆ โดย tag มีความสูงคงที่ ผลการทดลองพบว่า ความสูงของ anchor ที่มากขึ้น จะทำให้ค่า HDOP มากขึ้น แต่ค่า VDOP และ PDOP จะลดลง, ระยะห่างของ anchor ที่มากขึ้นส่งผลให้ความค่าสูงสุด และต่ำสุดของ HDOP น้อยลง และลักษณะการจัดวาง anchor แบบสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีค่า PDOP น้อยที่สุด จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการจัดวาง anchor ที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งได้เป็นอย่างดี

ตารางที่ 4.7 ค่า error และ RMSE ของการวัดระยะทาง การระบุพิกัด ด้วยเทคนิค UWB

	distance from anchor stations (m)				
	anchor 1	anchor 2	anchor 3	anchor 4	overall
min	-0.210	-0.149	-0.181	-0.138	-0.210
max	0.316	0.342	0.069	0.406	0.406
mean	0.038	0.040	-0.092	0.056	0.015
S.D.	0.115	0.133	0.059	0.134	0.133
RMSE	0.121	0.139	0.110	0.146	0.134
2D RMSE					
3D RMSE					

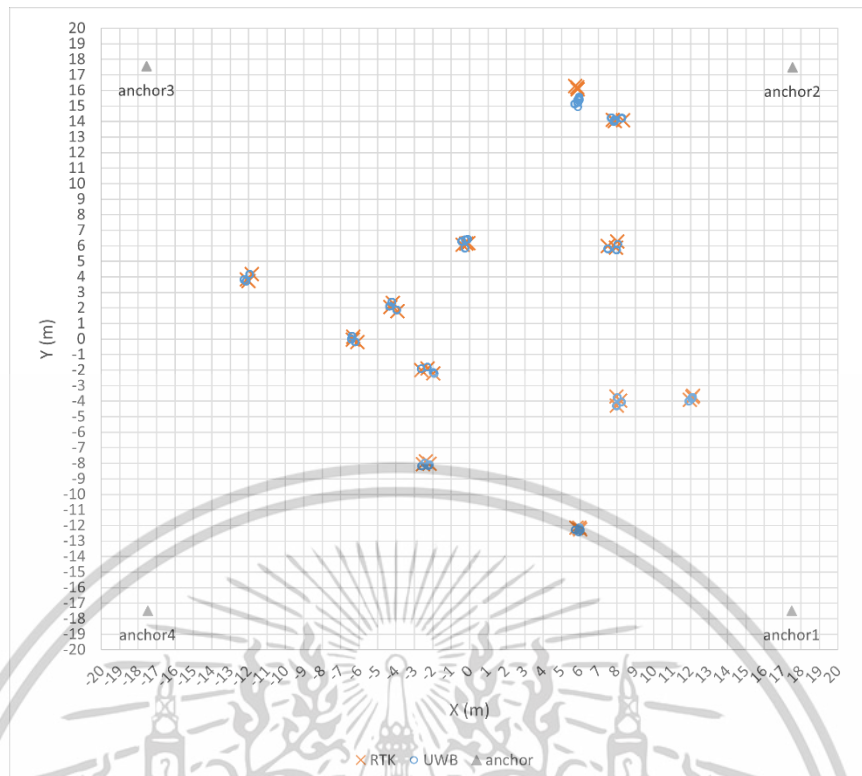
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7(ต่อ) ค่า error และ RMSE ของการวัดระยะทาง การระบุพิกัด ด้วยเทคนิค UWB

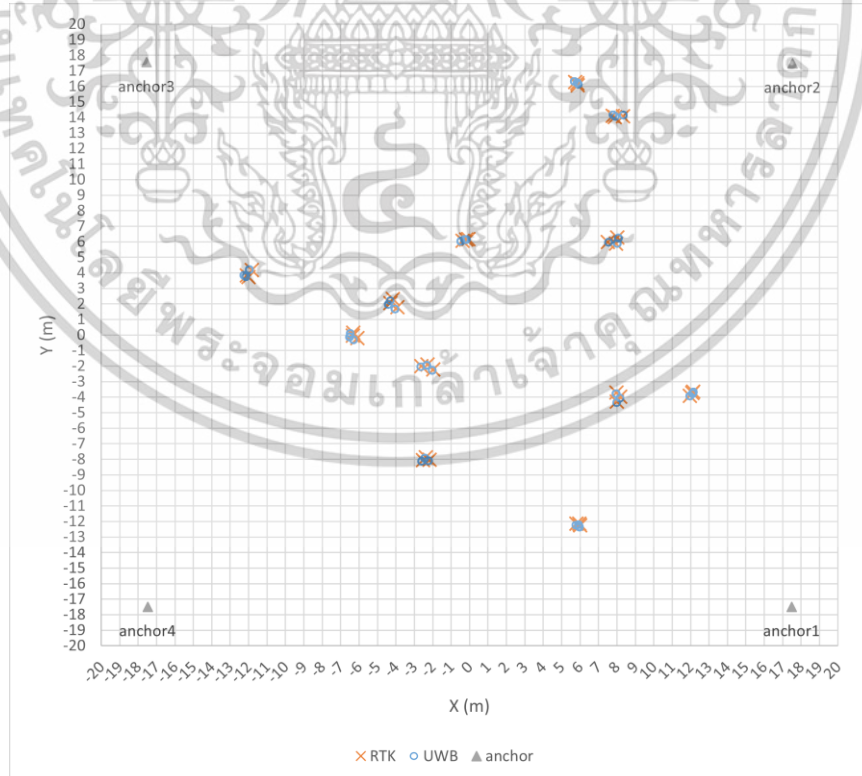
	2D Trilateration (m)		3D Trilateration (m)		
	X	Y	X	Y	Z
min	-0.369	-0.335	-0.362	-0.494	-1.223
max	0.203	0.913	0.064	0.113	0.730
mean	-0.031	0.028	-0.068	-0.117	-0.142
S.D.	0.109	0.205	0.075	0.158	0.386
RMSE	0.113	0.207	0.101	0.197	0.411
2D RMSE	0.236		0.221		
3D RMSE			0.467		

4.3 ความแม่นยำในการการระบุตำแหน่งในแปลงทดสอบ

จากการทดลองในข้อ 3.4 ผลการวัดระยะทางจาก tag ไปยัง anchors ทั้งสี่สถานที่ติดตั้งอยู่รอบแปลงทดสอบขนาด 35 x 35 ตารางเมตร แล้วนำมาคำนวณค่าพิกัดด้วยเทคนิค trilateration ทั้งแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ แล้วเปรียบเทียบกับพิกัดและระยะทางที่วัดโดยใช้เครื่องรับ RTK GNSS แสดงในตารางผนวก 3x และ รูปที่ 4.8 ถึง 4.9 พิกัดที่วัดได้ด้วย RTK GNSS และคุณภาพของการวัดพิกัดแสดงในตารางที่ 6x โดยคุณภาพของการวัดด้วย RTK แสดงด้วยค่าเฉลี่ยของ PDOP, HDOP และ VDOP เท่ากับ 1.12, 0.61 และ 0.94 ตามลำดับ

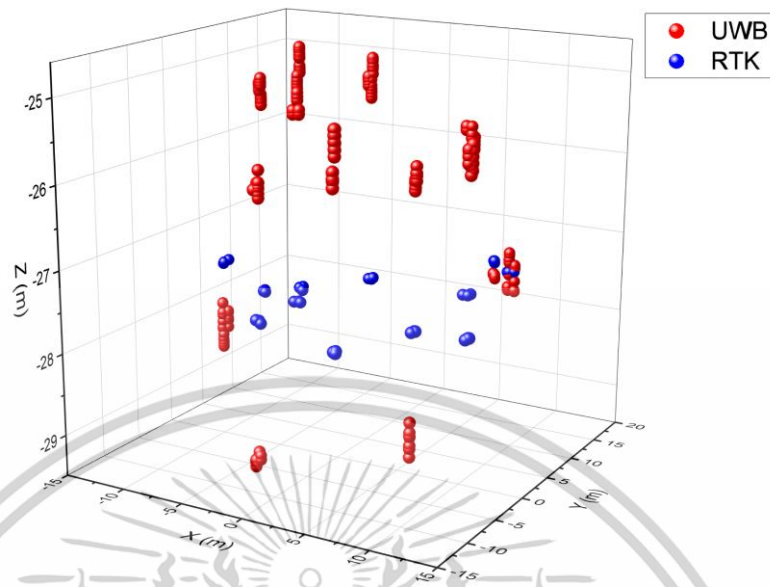


รูปที่ 4.9 ตำแหน่งของจุดวัดในแปลงทดสอบ ที่ได้จากระบบ UWB เทียบกับพิกัดจริงที่วัดจากเครื่องรับ RTK GNSS (2D trilateration)



รูปที่ 4.10 ตำแหน่งของจุดวัดในแปลงทดสอบ ที่ได้จากระบบ UWB เทียบกับพิกัดจริงที่วัดจาก

เครื่องรับ RTK GNSS (3D trilateration โดยแสดงเฉพาะแกน x และ y)
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ตำแหน่งของจุดวัดในแปลงทดสอบ ที่ได้จากระบบ UWB เทียบกับพิกัดจริงที่วัดจากเครื่องรับ RTK GNSS (3D trilateration)

ผลการวัดระยะทางของแต่ละตำแหน่งของ tag ไปยังแต่ละ anchor ในตารางที่ 4.8 แสดงค่า error และ RMSE ของการวัดระยะทางจาก tag ไปยังแต่ละ anchor และ error ของการการระบุพิกัด ด้วยเทคนิค UWB พบว่า มีค่า error เฉลี่ย 0.062 ± 0.083 m และมี RMSE 0.104 m ซึ่งใกล้เคียงกับผลการศึกษาในหัวข้อก่อนหน้า

เมื่อใช้เทคนิค trilateration ในการคำนวณตำแหน่ง พบว่าการระบุตำแหน่งเมื่อคำนวณแบบ 2D มี RMSE เท่ากับ 0.281 m ส่วนการคำนวณแบบ 3D มี RMSE 1.906 m โดยหากนำเพียงพิกัดในส่วนของ x และ y มาใช้ จะมี RMSE เท่ากับ 0.112 m

การคำนวณแบบ 2D ให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกับการทดลองในพื้นที่ทดสอบก่อนหน้า แต่ในการคำนวณแบบ 3D พบว่ามี error ในแกน z สูงกว่าค่อนข้างมาก (1.304 ± 1.385 m) ในขณะที่ error ในแกน x และ y มีค่าน้อย (-0.045 ± 0.073 m และ -0.047 ± 0.055 m) แสดงถึงความสามารถในการคำนวณในแนวราบที่ดีขึ้นเมื่อพื้นที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ในขณะเดียวกันความแปรปรวนของความสูงที่ลดลง (เมื่อเทียบกับขนาดพื้นที่) ก็ส่งผลให้มี error ที่มากขึ้นในแนวดิ่ง

การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มที่ดีในการเอามาใช้งานในพื้นที่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ในขณะเดียวกันอาจต้องพิจารณาศึกษาเพิ่มเติมถึงการติดตั้ง anchor หรือการเลือกใช้เทคนิคการคำนวณที่มีความแม่นยำสูงขึ้น รวมถึงการเสี่ยงการใช้งานในพื้นที่ที่มีความสูงต่ำของพื้นที่ที่ไม่สม่ำเสมอ แม้การระบุตำแหน่งแบบ 3 มิติยังไม่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้มากนัก แต่การระบุ

ตำแหน่งแบบ 2 มิติ สามารถนำไปใช้ได้ที่มีความแม่นยำระดับเซนติเมตร เช่น การทำการเกษตร และเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาดเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำแผนที่ของพื้นที่การเกษตรในพื้นที่ไม่เกิน $200 \times 200 \text{ m}^2$ การติดตามปลูกล้วย การนำทางหุ่นยนต์ในโรงเรียน เป็นต้น

ตารางที่ 4.8 ค่า error และ RMSE ของการวัดระยะทาง การระบุพิกัด ด้วยเทคนิค UWB

	distance from anchor stations (m)				
	anchor 1	anchor 2	anchor 3	anchor 4	overall
min	-0.064	-0.100	-0.034	-0.073	-0.100
max	0.394	0.141	0.125	0.152	0.394
mean	0.157	0.047	0.035	0.036	0.062
S.D.	0.117	0.061	0.036	0.059	0.083
RMSE	0.195	0.077	0.050	0.069	0.104
2D RMSE					
3D RMSE					

ตารางที่ 4.10(ต่อ) ค่า error และ RMSE ของการวัดระยะทาง การระบุพิกัด ด้วยเทคนิค UWB

	2D Trilateration (m)		3D Trilateration (m)		
	X	Y	X	Y	Z
min	-0.178	-1.256	-0.213	-0.134	-1.786
max	0.113	0.252	0.084	0.072	2.956
mean	-0.024	-0.101	-0.045	-0.047	1.304
S.D.	0.057	0.275	0.073	0.055	1.385
RMSE	0.062	0.293	0.085	0.072	1.902
2D RMSE	0.281		0.112		
3D RMSE	1.906				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษานี้ได้ทำการพัฒนาและประเมินเทคนิคการระบุตำแหน่งในแปลงเกษตรโดยใช้เทคโนโลยีคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้างยิ่งยวด (UWB) โดยมีเป้าหมายเพื่อเพื่อพัฒนาเทคนิคการระบุตำแหน่งโดยใช้ UWB และประเมินความแม่นยำในการวัดระยะทางและระบุตำแหน่งในพื้นที่เกษตรที่ไม่มีสิ่งกีดขวาง การวิจัยนี้ได้ดำเนินการภายใต้ขอบเขตที่ระบุ และผลการศึกษสามารถสรุปได้ดังนี้:

1. การพัฒนาและทดสอบระบบระบุตำแหน่งด้วยเทคโนโลยี UWB

จากการพัฒนาและทดสอบระบบพบว่าเทคโนโลยี UWB ที่ใช้โมดูล MaUWB บนช่องสัญญาณ 5 (ความถี่ 6.5 GHz) และอัตราการรับส่งข้อมูล 850 kbps สามารถให้ค่าความแม่นยำในการวัดระยะทางในระดับที่ยอมรับได้ โดยเฉพาะในการวัดในระยะไม่เกิน 200 เมตร ผลการทดสอบในพื้นที่เปิดโล่ง ในการวัดระยะทางค่าความผิดพลาดของการวัดระยะทางเฉลี่ยเท่ากับ 0.162 ± 0.141 เมตร และระบบสามารถระบุตำแหน่งได้ใกล้เคียงกับค่าจริง โดยค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (RMSE) ของการวัดระยะทางเท่ากับ 10 เซนติเมตร และการระบุตำแหน่งใน 2 มิติเท่ากับ 11 เซนติเมตร

2. ปัจจัยที่มีผลต่อความแม่นยำในการวัดระยะทางและระบุตำแหน่ง

การวิเคราะห์ผลการทดสอบระบุว่า ระยะห่างระหว่างโมดูล UWB และมุมการวัดระยะทางมีผลต่อความแม่นยำของการวัด โดยพบว่าในระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ มีเสถียรภาพในการวัดระยะทางที่ระยะไม่เกิน 200 เมตร

3. ประสิทธิภาพและความเสถียรของระบบ

จากการเปรียบเทียบกับพิกัดอ้างอิง RTK GNSS พบว่าเทคโนโลยี UWB ที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับค่าจริง โดยมี RMSE สำหรับการระบุตำแหน่งใน 2 มิติ (11 เซนติเมตร) แต่มีข้อจำกัดเมื่อระบุตำแหน่งใน 3 มิติ (1.91 เมตร) และเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ระยะทางเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของ UWB ในการระบุตำแหน่งในพื้นที่เปิดโล่งมีความเสถียรในช่วงไม่เกิน 200 เมตร สามารถใช้งานได้ในพื้นที่เกษตรที่ต้องการความแม่นยำระดับเซนติเมตรได้ในบางระยะทาง เช่น การทำการเกษตรในพื้นที่ไม่เกิน 200 เมตร การทำแผนที่แปลงเกษตรขนาดเล็ก รวมถึงการติดตามปศุสัตว์ เป็นต้น

4. ข้อจำกัดของการศึกษาและข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

งานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในเรื่องของขนาดพื้นที่ และมีการทดลองในพื้นที่เปิดโล่งเท่านั้น และยังไม่ได้ครอบคลุมถึงผลกระทบจากสิ่งกีดขวาง แนะนำว่าการวิจัยในอนาคตควรขยายขอบเขตการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดลองให้ครอบคลุมสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวาง เช่น ต้นไม้หรืออาคาร และทดสอบการทำงานของ UWB ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน (ความชื้นของอากาศ และอุณหภูมิของอากาศ) รวมถึงการเลือกใช้ค่าสถานะต่างๆของ UWB (อัตราการรับส่งข้อมูล ความถี่ในการสื่อสาร และอื่นๆ) ที่เหมาะสมกับการใช้งาน (จากการศึกษาเพิ่มเติมความถี่ในการสื่อสารที่มากขึ้นจะสามารถวัดระยะทางได้แม่นยำมากขึ้น แต่สัญญาณจะอ่อนกำลังลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น) นอกจากนี้การศึกษาเทคนิคปรับปรุงค่าความคลาดเคลื่อน เช่น การจัดวาง anchor ที่เหมาะสม และการพัฒนาเทคนิคในการชดเชยค่าความคลาดเคลื่อนการวัดระยะทางที่เกิดจากสภาพแวดล้อม (อุณหภูมิในอากาศ และระยะทาง) อาจช่วยเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งให้ดียิ่งขึ้น

โดยสรุปแล้ว จากการศึกษานี้พบว่าเทคโนโลยี UWB มีศักยภาพที่ดีในการนำมาใช้ระบุตำแหน่งในแปลงเกษตรแบบเปิดโล่งโดยมีความแม่นยำระดับเซนติเมตรในบางระยะ อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาเน้นถึงข้อจำกัดในบางระยะและมุมการวัดที่ส่งผลต่อความแม่นยำ ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งในแปลงเกษตรต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] กรมที่ดินกระทรวงมหาดไทย. แนวทางการรังวัด โดยระบบโครงข่ายการรังวัดดาวเทียมแยกจลน์. กองเทคโนโลยีทำแผนที่ กองฝึกรวม กรมที่ดิน กระทรวงมหาดไทย. 2563. แหล่งที่มา:<https://www.dol.go.th/km2/Documents/book%20km%202563/63KTP.pdf>. เข้าถึงเมื่อ 10 มกราคม 2567.
- [2] Kaplan, E.D. and C. Hegarty, *Understanding GPS/GNSS: principles and applications*. 2017: Artech house.
- [3] Liu, H., et al., *Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 2007. 37(6): p. 1067-1080.
- [4] Kim Geok, T., et al., *Review of indoor positioning: Radio wave technology*. Applied Sciences, 2020. 11(1): p. 279.
- [5] *IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks*, in *IEEE Std 802.15.4™-2020*. 2020. p. 430-431.
- [6] Breed, G., *A summary of FCC rules for ultra wideband communications*. High Frequency Electronics, 2005. 4(1): p. 42-44.
- [7] Malajner, M., P. Planinsic, and D. Gleich. *UWB ranging accuracy*. in *Proceedings of the Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, London, UK. 2015.
- [8] Lee, W., *Ultra-wideband systems*. Naresuan University Engineering Journal, 2010. 5(2): p. 63-77.
- [9] *IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks--Amendment 1: Enhanced Ultra Wideband (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques*, in *IEEE Std 802.15.4z-2020*. 2020. p. 19-21.
- [10] Makerfabs. *Makerfabs IoT. ESP32 UWB Antenna Delay Calibrating*. 2022. แหล่งที่มา:<https://www.makerfabs.cc/article/esp32-uwband-antenna-delay-calibrating.html>. เข้าถึงเมื่อ 6 มีนาคม 2567.
- [11] Charoenkalunyuta, T., et al., *Performance of Network-Based RTK GNSS for the Cadastral Survey in Thailand*. International journal of geoinformatics, 2019. 15(3).
- [12] Darakai, W. *GPS : โพรโตคอล NMEA ของ GPS. ฮาร์ดล๊อค, Hardlock, Software Protection, Sentinel, การป้องกันลิขสิทธิ์ซอฟต์แวร์*. 2544. แหล่งที่มา: <https://darakai.blogspot.com/2011/11/nmea-gps.html>. เข้าถึงเมื่อ 4 มิถุนายน 2567.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] น้ำทิพย์ รัตนวงษ์ไชยยา, สุมาลี โสณน้ำเที่ยง, and ธรรมบุญ ดิษเจริญ. เครือข่ายคอมพิวเตอร์. Institute for Innovation and Development of Learning Process. 2004. แหล่งที่มา: https://il.mahidol.ac.th/e-media/computer/network/net_datacom3.htm. เข้าถึงเมื่อ 25 กันยายน 2567.
- [14] ปริญา น้อยดอนไพร. ระบบเครือข่ายไร้สาย. การสื่อสารข้อมูลและเครือข่าย Data Communication and Network. 2556. แหล่งที่มา: <https://frebsd.sru.ac.th/course/4012702-Data-Communication/parinya-book>. เข้าถึงเมื่อ 2 ตุลาคม 2567.
- [15] Norrdine, A. *An algebraic solution to the multilateration problem*. in *Proceedings of the 15th international conference on indoor positioning and indoor navigation, Sydney, Australia*. 2012.
- [16] Hodson, T.O., *Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not*. *Geosci. Model Dev.*, 2022. 15(14): p. 5481-5487.
- [17] นายอนุภักดิ์ พุกาธร. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสถิติ. 2563. แหล่งที่มา: https://planning.anamai.moph.go.th/km05/download?id=39014&mid=31845&mkey=m_document&lang=th&did=13529. เข้าถึงเมื่อ 2 ตุลาคม 2567.
- [18] ภัสราภรณ์ ห้อยกรุด. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับสถิติ. 2563. แหล่งที่มา: https://planning.anamai.moph.go.th/km05/download?id=39014&mid=31845&mkey=m_document&lang=th&did=13529. เข้าถึงเมื่อ 1 ตุลาคม 2567.
- [19] ภามาส อังศ์โชติ. เทคนิคการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร. 2560. แหล่งที่มา: <https://www.stou.ac.th/offices/ore/info/cae/uploads/pdf/636366560441132172.pdf>. เข้าถึงเมื่อ 1 ตุลาคม 2567.
- [20] Shah, S., et al., *Antenna Delay Calibration of UWB Nodes*. *IEEE Access*, 2021. 9: p. 63294-63305.
- [21] Ding, L., et al. *Research on UWB-Based Indoor Ranging Positioning Technology and a Method to Improve Accuracy*. in *2018 IEEE Region Ten Symposium (Tensymp)*. 2018.
- [22] ศากร ยิ่งขจร, การศึกษาการแพร่กระจายคลื่นวิทยุแถบกว้างยิ่ง, in *วิศวกรรมสารสนเทศ*. 2550, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. p. 1-94.
- [23] Pino-Ortega, J., et al., *The influence of antenna height on the measurement of collective variables using an ultra-wide band based local positioning system in team sports*. *Sensors*, 2021. 21(7): p. 2424.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] Porto, S.M.C., et al., *Localisation and identification performances of a real-time location system based on ultra wide band technology for monitoring and tracking dairy cow behaviour in a semi-open free-stall barn*. Computers and Electronics in Agriculture, 2014. 108: p. 221-229.
- [25] Cheng, B., et al. *Research on Positioning and Navigation System of Greenhouse Mobile Robot Based on Multi-Sensor Fusion*. Sensors, 2024. 24, DOI: 10.3390/s24154998.
- [26] Liu, S., et al., *Ultra-wideband high accuracy distance measurement based on hybrid compensation of temperature and distance error*. Measurement, 2023. 206: p. 112276.
- [27] Veit, D., M. Gadringer, and E. Leitgeb. *Impact of UWB Antennas on Ranging Accuracy*. in *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. 2020.
- [28] Hu, H., et al. *Study on the Deployment of Ultra-Wideband Positioning Base Stations in Pig Farms*. Applied Sciences, 2024. 14, DOI: 10.3390/app14020501.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซอฟต์แวร์โมดูล MaUWB ที่พัฒนาขึ้น

https://drive.google.com/drive/folders/1NvJ8wf1yPGP_dYS6qg-N7D-lqXdRNkSb?usp=drive_link

การคำนวณตำแหน่ง 2 มิติด้วย MatLab R2022b

https://drive.google.com/drive/folders/1Dj7FZ5cEAxpbqhcZ-HSZcXPKosNJ-Zt2?usp=drive_link

การคำนวณตำแหน่ง 3 มิติด้วย MatLab R2022b

https://drive.google.com/drive/folders/1LeD9T09YAOaJ2fvytx44hoCgqcukrB87?usp=drive_link



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1ข ผลการทดลองวัดระยะทางจาก tag ไปยัง anchor ทั้งสี่สถานี ที่ระยะ และมุมในการวัดต่าง ๆ

Angle	distance measured (m)							
	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB
0	4.934	4.940	9.910	10.010	24.821	25.010	50.005	50.090
	4.934	4.940	9.910	10.000	24.821	25.010	50.005	50.100
	4.934	4.990	9.910	10.010	24.821	25.000	50.005	50.100
	4.874	4.850	9.868	9.900	24.799	24.930	49.968	49.970
	4.874	4.860	9.868	9.890	24.799	24.940	49.968	49.960
	4.874	4.870	9.868	9.900	24.799	24.890	49.968	49.960
	4.914	4.870	9.909	9.920	24.846	24.980	49.954	49.980
	4.914	4.880	9.909	9.950	24.846	24.990	49.954	49.980
	4.914	4.880	9.909	9.970	24.846	24.980	49.954	49.980
	4.907	4.880	9.892	9.910	24.829	24.960	49.978	50.030
	4.907	4.890	9.892	9.890	24.829	24.950	49.978	50.020
	4.907	4.870	9.892	9.920	24.829	24.940	49.978	50.030
22.5	4.934	4.950	9.910	10.000	24.821	25.030	50.005	50.090
	4.934	4.950	9.910	9.990	24.821	25.020	50.005	50.100
	4.934	4.950	9.910	10.000	24.821	25.030	50.005	50.110
	4.874	4.870	9.868	9.900	24.799	24.930	49.968	49.960
	4.874	4.850	9.868	9.890	24.799	24.920	49.968	49.980
	4.874	4.860	9.868	9.900	24.799	24.920	49.968	49.980
	4.914	4.840	9.909	9.960	24.846	25.000	49.954	49.950
	4.914	4.870	9.909	9.930	24.846	24.980	49.954	49.960
	4.914	4.820	9.909	9.940	24.846	24.960	49.954	49.950
	4.907	4.890	9.892	9.930	24.829	24.950	49.978	49.990
	4.907	4.900	9.892	9.910	24.829	24.940	49.978	50.020
	4.907	4.880	9.892	9.940	24.829	24.940	49.978	50.030
45	4.934	5.000	9.910	9.970	24.821	25.010	50.005	50.080
	4.934	4.980	9.910	9.970	24.821	25.010	50.005	50.070
	4.934	4.990	9.910	9.980	24.821	25.010	50.005	50.080
	4.874	4.860	9.868	9.880	24.799	24.920	49.968	49.950
	4.874	4.850	9.868	9.870	24.799	24.910	49.968	49.950
	4.874	4.860	9.868	9.890	24.799	24.880	49.968	49.960
	4.914	4.850	9.909	9.950	24.846	24.980	49.954	49.970
	4.914	4.870	9.909	9.930	24.846	24.960	49.954	49.970
	4.914	4.860	9.909	9.940	24.846	24.950	49.954	49.970
	4.907	4.890	9.892	9.900	24.829	24.920	49.978	49.970
	4.907	4.890	9.892	9.910	24.829	24.920	49.978	49.960
	4.907	4.890	9.892	9.910	24.829	24.900	49.978	49.970
67.5	4.934	4.980	9.910	9.960	24.821	24.980	50.005	50.050
	4.934	4.960	9.910	9.980	24.821	24.990	50.005	50.040

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Angle	distance measured (m)							
	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB
	4.934	4.970	9.910	9.950	24.821	24.980	50.005	50.050
	4.874	4.840	9.868	9.860	24.799	24.900	49.968	49.910
	4.874	4.840	9.868	9.860	24.799	24.890	49.968	49.930
	4.874	4.840	9.868	9.850	24.799	24.870	49.968	49.940
	4.914	4.860	9.909	9.930	24.846	24.950	49.954	49.960
	4.914	4.880	9.909	9.910	24.846	24.970	49.954	49.960
	4.914	4.870	9.909	9.930	24.846	24.930	49.954	49.970
	4.907	4.850	9.892	9.900	24.829	24.890	49.978	49.930
	4.907	4.870	9.892	9.900	24.829	24.900	49.978	49.930
	4.907	4.870	9.892	9.860	24.829	24.880	49.978	49.950
90	4.934	4.960	9.910	9.940	24.821	24.990	50.005	50.030
	4.934	4.930	9.910	9.950	24.821	24.980	50.005	50.040
	4.934	4.960	9.910	9.940	24.821	24.970	50.005	50.030
	4.874	4.810	9.868	9.860	24.799	24.880	49.968	49.920
	4.874	4.800	9.868	9.850	24.799	24.870	49.968	49.920
	4.874	4.800	9.868	9.850	24.799	24.860	49.968	49.920
	4.914	4.820	9.909	9.910	24.846	24.940	49.954	49.940
	4.914	4.840	9.909	9.900	24.846	24.960	49.954	49.960
	4.914	4.820	9.909	9.900	24.846	24.930	49.954	49.950
	4.907	4.820	9.892	9.870	24.829	24.890	49.978	49.940
	4.907	4.850	9.892	9.890	24.829	24.890	49.978	49.950
	4.907	4.830	9.892	9.860	24.829	24.870	49.978	49.940
112.5	4.934	4.940	9.910	9.940	24.821	25.000	50.005	50.000
	4.934	4.920	9.910	9.940	24.821	24.980	50.005	50.010
	4.934	4.920	9.910	9.940	24.821	25.000	50.005	50.000
	4.874	4.810	9.868	9.840	24.799	24.890	49.968	49.900
	4.874	4.810	9.868	9.840	24.799	24.870	49.968	49.900
	4.874	4.800	9.868	9.840	24.799	24.870	49.968	49.900
	4.914	4.820	9.909	9.880	24.846	24.950	49.954	49.880
	4.914	4.820	9.909	9.880	24.846	24.940	49.954	49.910
	4.914	4.810	9.909	9.860	24.846	24.930	49.954	49.910
	4.907	4.820	9.892	9.870	24.829	24.900	49.978	49.910
	4.907	4.840	9.892	9.870	24.829	24.890	49.978	49.920
	4.907	4.840	9.892	9.850	24.829	24.900	49.978	49.900
135	4.934	4.980	9.910	9.960	24.821	25.120	50.005	50.000
	4.934	4.930	9.910	9.960	24.821	25.050	50.005	50.070
	4.934	4.920	9.910	9.950	24.821	25.050	50.005	49.990
	4.874	4.850	9.868	9.850	24.799	24.940	49.968	49.930
	4.874	4.830	9.868	9.880	24.799	24.930	49.968	49.900
	4.874	4.830	9.868	9.880	24.799	24.920	49.968	49.900
	4.914	4.870	9.909	9.870	24.846	25.010	49.954	49.920

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Angle	distance measured (m)							
	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB
	4.914	4.870	9.909	9.890	24.846	24.980	49.954	49.900
	4.914	4.870	9.909	9.900	24.846	24.960	49.954	49.920
	4.907	4.930	9.892	9.890	24.829	24.990	49.978	49.900
	4.907	4.920	9.892	9.900	24.829	24.970	49.978	49.910
	4.907	4.860	9.892	9.870	24.829	24.960	49.978	49.920
157.5	4.934	4.990	9.910	10.000	24.821	25.040	50.005	50.010
	4.934	4.950	9.910	9.970	24.821	25.040	50.005	50.040
	4.934	4.980	9.910	9.990	24.821	25.030	50.005	50.000
	4.874	4.860	9.868	9.900	24.799	24.930	49.968	49.930
	4.874	4.860	9.868	9.910	24.799	24.940	49.968	49.930
	4.874	4.860	9.868	9.890	24.799	24.930	49.968	49.870
	4.914	4.860	9.909	9.940	24.846	24.990	49.954	49.920
	4.914	4.910	9.909	9.930	24.846	25.000	49.954	49.910
	4.914	4.910	9.909	9.930	24.846	24.980	49.954	49.880
	4.907	4.960	9.892	9.940	24.829	24.970	49.978	49.930
	4.907	4.970	9.892	9.910	24.829	24.980	49.978	49.940
	4.907	4.920	9.892	9.910	24.829	24.990	49.978	49.920
180	4.934	4.980	9.910	10.010	24.821	25.030	50.005	50.030
	4.934	4.970	9.910	10.000	24.821	25.030	50.005	50.010
	4.934	4.960	9.910	10.010	24.821	25.000	50.005	50.020
	4.874	4.900	9.868	9.920	24.799	24.950	49.968	49.890
	4.874	4.880	9.868	9.920	24.799	24.970	49.968	49.870
	4.874	4.890	9.868	9.920	24.799	24.930	49.968	49.860
	4.914	4.890	9.909	9.970	24.846	25.010	49.954	49.880
	4.914	4.900	9.909	9.960	24.846	25.020	49.954	49.850
	4.914	4.900	9.909	9.960	24.846	24.980	49.954	49.870
	4.907	4.930	9.892	9.960	24.829	24.980	49.978	49.960
	4.907	4.930	9.892	9.920	24.829	25.000	49.978	49.940
	4.907	4.890	9.892	9.950	24.829	24.970	49.978	49.980
202.5	4.934	4.960	9.910	10.000	24.821	25.050	50.005	50.060
	4.934	4.950	9.910	10.000	24.821	25.060	50.005	50.040
	4.934	4.960	9.910	10.020	24.821	25.000	50.005	50.060
	4.874	4.880	9.868	9.920	24.799	24.960	49.968	49.920
	4.874	4.880	9.868	9.910	24.799	24.980	49.968	49.900
	4.874	4.820	9.868	9.920	24.799	24.940	49.968	49.900
	4.914	4.910	9.909	9.980	24.846	25.020	49.954	49.930
	4.914	4.920	9.909	9.960	24.846	25.050	49.954	49.890
	4.914	4.830	9.909	9.970	24.846	25.000	49.954	49.900
	4.907	4.960	9.892	9.970	24.829	25.000	49.978	50.030
	4.907	4.920	9.892	9.930	24.829	25.030	49.978	50.000
	4.907	4.910	9.892	9.950	24.829	24.970	49.978	50.010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางสถาบัน

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Angle	distance measured (m)							
	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB
225	4.934	4.980	9.910	10.010	24.821	25.040	50.005	50.040
	4.934	4.940	9.910	10.010	24.821	25.060	50.005	50.030
	4.934	4.970	9.910	10.040	24.821	25.030	50.005	50.000
	4.874	4.900	9.868	9.930	24.799	24.950	49.968	49.910
	4.874	4.900	9.868	9.920	24.799	24.970	49.968	49.940
	4.874	4.850	9.868	9.940	24.799	24.950	49.968	49.900
	4.914	4.920	9.909	10.010	24.846	25.000	49.954	49.920
	4.914	4.950	9.909	9.990	24.846	25.020	49.954	49.950
	4.914	4.890	9.909	10.000	24.846	25.000	49.954	49.890
	4.907	5.000	9.892	10.000	24.829	24.950	49.978	49.990
	4.907	4.960	9.892	9.970	24.829	25.010	49.978	50.050
	4.907	4.910	9.892	9.980	24.829	24.980	49.978	50.020
247.5	4.934	4.980	9.910	10.020	24.821	25.020	50.005	50.000
	4.934	4.980	9.910	10.010	24.821	25.030	50.005	50.000
	4.934	4.990	9.910	10.030	24.821	25.020	50.005	49.990
	4.874	4.920	9.868	9.920	24.799	24.950	49.968	49.880
	4.874	4.870	9.868	9.910	24.799	24.960	49.968	49.880
	4.874	4.810	9.868	9.920	24.799	24.940	49.968	49.860
	4.914	4.910	9.909	9.980	24.846	24.990	49.954	49.860
	4.914	4.920	9.909	9.970	24.846	25.010	49.954	49.900
	4.914	4.860	9.909	10.000	24.846	24.980	49.954	49.840
	4.907	4.910	9.892	9.960	24.829	24.980	49.978	49.950
	4.907	4.970	9.892	9.970	24.829	24.980	49.978	49.980
	4.907	4.890	9.892	9.950	24.829	24.980	49.978	49.960
270	4.934	5.030	9.910	10.030	24.821	25.070	50.005	50.130
	4.934	5.030	9.910	10.050	24.821	25.040	50.005	50.170
	4.934	5.000	9.910	10.020	24.821	25.060	50.005	50.030
	4.874	4.900	9.868	9.930	24.799	24.990	49.968	49.870
	4.874	4.900	9.868	9.950	24.799	24.970	49.968	49.950
	4.874	4.830	9.868	9.920	24.799	24.980	49.968	49.830
	4.914	4.910	9.909	9.990	24.846	25.030	49.954	49.930
	4.914	4.920	9.909	9.990	24.846	25.030	49.954	49.860
	4.914	4.880	9.909	9.980	24.846	25.050	49.954	49.860
	4.907	4.940	9.892	9.950	24.829	25.010	49.978	49.970
	4.907	4.950	9.892	9.970	24.829	25.010	49.978	49.920
	4.907	4.930	9.892	9.940	24.829	25.000	49.978	49.930
292.5	4.934	5.040	9.910	10.030	24.821	25.060	50.005	50.200
	4.934	5.070	9.910	10.030	24.821	25.070	50.005	50.170
	4.934	5.010	9.910	10.040	24.821	25.060	50.005	50.200
	4.874	4.930	9.868	9.960	24.799	24.970	49.968	49.990
	4.874	4.940	9.868	9.960	24.799	25.010	49.968	50.030

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Angle	distance measured (m)							
	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB
	4.874	4.920	9.868	9.960	24.799	24.990	49.968	49.960
	4.914	4.930	9.909	10.000	24.846	25.030	49.954	50.150
	4.914	4.970	9.909	10.030	24.846	25.070	49.954	50.090
	4.914	4.920	9.909	10.000	24.846	25.030	49.954	50.220
	4.907	4.940	9.892	9.970	24.829	25.010	49.978	50.110
	4.907	4.980	9.892	9.980	24.829	25.050	49.978	50.080
	4.907	4.920	9.892	9.960	24.829	25.010	49.978	50.080
315	4.934	5.020	9.910	10.040	24.821	25.090	50.005	50.150
	4.934	5.020	9.910	10.060	24.821	25.050	50.005	50.130
	4.934	5.010	9.910	10.060	24.821	25.090	50.005	50.080
	4.874	4.970	9.868	9.980	24.799	25.020	49.968	49.960
	4.874	4.980	9.868	9.970	24.799	24.990	49.968	49.980
	4.874	4.950	9.868	9.970	24.799	25.010	49.968	49.950
	4.914	4.980	9.909	10.010	24.846	25.060	49.954	50.140
	4.914	4.980	9.909	10.030	24.846	25.060	49.954	50.140
	4.914	4.930	9.909	10.000	24.846	25.040	49.954	50.150
	4.907	5.010	9.892	9.970	24.829	25.050	49.978	50.080
	4.907	4.980	9.892	10.010	24.829	25.020	49.978	50.080
	4.907	4.940	9.892	9.970	24.829	25.030	49.978	50.030
337.5	4.934	4.980	9.910	10.020	24.821	25.050	50.005	50.080
	4.934	4.990	9.910	10.040	24.821	25.040	50.005	50.070
	4.934	4.990	9.910	10.050	24.821	25.020	50.005	50.070
	4.874	4.960	9.868	9.930	24.799	24.990	49.968	49.910
	4.874	4.920	9.868	9.970	24.799	24.960	49.968	49.920
	4.874	4.930	9.868	9.970	24.799	24.960	49.968	49.920
	4.914	4.950	9.909	9.990	24.846	25.030	49.954	49.980
	4.914	4.900	9.909	10.010	24.846	25.030	49.954	50.010
	4.914	4.890	9.909	10.010	24.846	25.000	49.954	49.970
	4.907	4.990	9.892	9.960	24.829	25.020	49.978	50.070
	4.907	4.950	9.892	9.970	24.829	24.990	49.978	49.970
	4.907	4.890	9.892	9.960	24.829	24.970	49.978	49.980

ตารางที่ 1ข(ต่อ) ผลการทดลองวัดระยะทางจาก tag ไปยัง anchor ทั้งสี่สถานี ที่ระยะ และมุมในการวัด ต่าง ๆ

Angle	distance measured (m)							
	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB
0	74.585	74.750	102.806		149.107	149.270	201.873	202.120
	74.585	74.750	102.806	103.320	149.107	149.300	201.873	202.120
	74.585	74.760	102.806		149.107	149.300	201.873	202.130
	74.544	74.680	102.778	103.110	149.063	149.220	201.851	202.070

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Angle	distance measured (m)							
	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB
	74.544	74.660	102.778	103.090	149.063	149.230	201.851	202.070
	74.544	74.660	102.778	103.100	149.063	149.230	201.851	202.090
	74.576	74.680	102.817	102.950	149.041	149.220	201.894	202.110
	74.576	74.690	102.817	102.960	149.041	149.200	201.894	202.150
	74.576	74.700	102.817	103.000	149.041	149.200	201.894	202.140
	74.541	74.660	102.789		149.058	149.220	201.870	202.040
	74.541	74.670	102.789	103.560	149.058	149.240	201.870	202.020
	74.541	74.660	102.789		149.058	149.240	201.870	202.050
22.5	74.585	74.750	102.806	102.960	149.107	149.310	201.873	202.120
	74.585	74.750	102.806	103.090	149.107	149.330	201.873	202.130
	74.585	74.750	102.806		149.107	149.310	201.873	202.140
	74.544	74.660	102.778	103.120	149.063	149.230	201.851	202.050
	74.544	74.660	102.778	103.140	149.063	149.230	201.851	202.060
	74.544	74.650	102.778	103.130	149.063	149.240	201.851	202.050
	74.576	74.680	102.817	102.960	149.041	149.200	201.894	202.080
	74.576	74.700	102.817	102.960	149.041	149.200	201.894	202.100
	74.576	74.690	102.817	102.950	149.041	149.200	201.894	202.100
	74.541	74.660	102.789	103.440	149.058	149.240	201.870	202.020
	74.541	74.650	102.789	103.470	149.058	149.230	201.870	202.030
	74.541	74.650	102.789	103.420	149.058	149.250	201.870	202.040
45	74.585	74.750	102.806	102.960	149.107	149.320	201.873	202.110
	74.585	74.740	102.806	103.100	149.107	149.330	201.873	202.110
	74.585	74.750	102.806		149.107	149.320	201.873	202.110
	74.544	74.660	102.778	103.180	149.063	149.230	201.851	202.040
	74.544	74.640	102.778	103.150	149.063	149.230	201.851	202.050
	74.544	74.650	102.778	103.150	149.063	149.250	201.851	202.050
	74.576	74.680	102.817	102.950	149.041	149.210	201.894	202.090
	74.576	74.680	102.817	102.980	149.041	149.200	201.894	202.100
	74.576	74.680	102.817	102.970	149.041	149.200	201.894	202.090
	74.541	74.640	102.789	103.410	149.058	149.240	201.870	202.010
	74.541	74.640	102.789	103.390	149.058	149.240	201.870	202.000
	74.541	74.640	102.789	103.450	149.058	149.250	201.870	202.000
67.5	74.585	74.730	102.806		149.107	149.290	201.873	202.090
	74.585	74.740	102.806		149.107	149.300	201.873	202.100
	74.585	74.740	102.806		149.107	149.300	201.873	202.100
	74.544	74.640	102.778	103.140	149.063	149.200	201.851	202.030
	74.544	74.650	102.778	103.120	149.063	149.220	201.851	202.040
	74.544	74.650	102.778	103.140	149.063	149.220	201.851	202.040
	74.576	74.660	102.817	102.980	149.041	149.190	201.894	202.080
	74.576	74.660	102.817	102.950	149.041	149.180	201.894	202.120
	74.576	74.670	102.817	102.950	149.041	149.170	201.894	202.090

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Angle	distance measured (m)							
	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB
	74.541	74.620	102.789	103.350	149.058	149.220	201.870	201.970
	74.541	74.630	102.789	103.320	149.058	149.230	201.870	201.970
	74.541	74.630	102.789	103.430	149.058	149.220	201.870	201.980
90	74.585	74.720	102.806		149.107	149.270	201.873	202.090
	74.585	74.720	102.806		149.107	149.280	201.873	202.090
	74.585	74.720	102.806		149.107	149.260	201.873	202.080
	74.544	74.620	102.778	103.110	149.063	149.190	201.851	202.010
	74.544	74.620	102.778	103.110	149.063	149.200	201.851	202.020
	74.544	74.620	102.778	103.120	149.063	149.200	201.851	202.020
	74.576	74.650	102.817	102.930	149.041	149.180	201.894	202.040
	74.576	74.660	102.817	102.930	149.041	149.170	201.894	202.050
	74.576	74.660	102.817	102.950	149.041	149.170	201.894	202.060
	74.541	74.630	102.789		149.058	149.210	201.870	201.960
	74.541	74.630	102.789		149.058	149.220	201.870	201.950
	74.541	74.630	102.789		149.058	149.200	201.870	201.980
112.5	74.585	74.740	102.806		149.107	149.210	201.873	202.070
	74.585	74.750	102.806		149.107	149.240	201.873	202.060
	74.585	74.750	102.806		149.107	149.230	201.873	202.070
	74.544	74.630	102.778	103.070	149.063	149.180	201.851	202.020
	74.544	74.630	102.778	103.090	149.063	149.180	201.851	202.010
	74.544	74.630	102.778	103.100	149.063	149.200	201.851	202.020
	74.576	74.670	102.817	102.950	149.041	149.160	201.894	202.020
	74.576	74.690	102.817		149.041	149.160	201.894	202.030
	74.576	74.670	102.817	102.930	149.041	149.170	201.894	202.020
	74.541	74.630	102.789		149.058	149.200	201.870	201.960
	74.541	74.650	102.789		149.058	149.200	201.870	201.950
	74.541	74.640	102.789		149.058	149.200	201.870	201.980
135	74.585	74.730	102.806		149.107		201.873	202.060
	74.585	74.720	102.806		149.107		201.873	202.090
	74.585	74.670	102.806		149.107		201.873	202.070
	74.544	74.680	102.778	103.070	149.063	149.220	201.851	202.010
	74.544	74.680	102.778	103.080	149.063	149.200	201.851	202.010
	74.544	74.690	102.778	103.110	149.063	149.210	201.851	202.020
	74.576	74.700	102.817	103.220	149.041		201.894	
	74.576	74.720	102.817		149.041		201.894	
	74.576	74.710	102.817		149.041		201.894	
	74.541	74.620	102.789		149.058	149.170	201.870	
	74.541	74.610	102.789		149.058	149.180	201.870	
	74.541	74.600	102.789		149.058	149.170	201.870	
157.5	74.585	74.760	102.806	103.180	149.107	149.260	201.873	202.110
	74.585	74.780	102.806	103.170	149.107	149.280	201.873	202.090

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Angle	distance measured (m)							
	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB
	74.585	74.780	102.806		149.107	149.310	201.873	202.080
	74.544	74.700	102.778		149.063	149.210	201.851	202.050
	74.544	74.730	102.778	103.100	149.063	149.220	201.851	202.050
	74.544	74.730	102.778	103.190	149.063	149.250	201.851	202.020
	74.576	74.720	102.817	103.060	149.041	149.180	201.894	202.060
	74.576	74.760	102.817		149.041	149.190	201.894	202.080
	74.576	74.720	102.817		149.041	149.220	201.894	202.050
	74.541	74.630	102.789	103.440	149.058	149.220	201.870	
	74.541	74.670	102.789	103.210	149.058	149.250	201.870	201.960
	74.541	74.660	102.789	103.440	149.058	149.230	201.870	
180	74.585	74.800	102.806	103.660	149.107	149.280	201.873	202.120
	74.585	74.800	102.806	103.720	149.107	149.260	201.873	202.090
	74.585	74.790	102.806		149.107	149.280	201.873	202.090
	74.544	74.680	102.778	103.130	149.063	149.220	201.851	202.070
	74.544	74.700	102.778	103.250	149.063	149.200	201.851	202.050
	74.544	74.690	102.778	103.250	149.063	149.200	201.851	202.040
	74.576	74.720	102.817	103.040	149.041	149.220	201.894	202.090
	74.576	74.750	102.817	103.030	149.041	149.200	201.894	202.080
	74.576	74.730	102.817	102.930	149.041	149.230	201.894	202.090
	74.541	74.670	102.789	103.620	149.058	149.250	201.870	202.010
	74.541	74.680	102.789	103.640	149.058	149.260	201.870	201.980
	74.541	74.680	102.789	103.610	149.058	149.240	201.870	201.980
202.5	74.585	74.780	102.806		149.107	149.280	201.873	202.100
	74.585	74.810	102.806	103.590	149.107	149.260	201.873	202.110
	74.585	74.800	102.806	103.600	149.107	149.270	201.873	202.100
	74.544	74.680	102.778	103.240	149.063	149.220	201.851	202.060
	74.544	74.700	102.778	103.250	149.063	149.190	201.851	202.070
	74.544	74.680	102.778	103.290	149.063	149.170	201.851	202.060
	74.576	74.710	102.817	103.030	149.041	149.220	201.894	202.090
	74.576	74.750	102.817	103.050	149.041	149.200	201.894	202.110
	74.576	74.720	102.817	103.010	149.041	149.180	201.894	202.090
	74.541	74.660	102.789	103.690	149.058	149.270	201.870	202.000
	74.541	74.700	102.789	103.680	149.058	149.250	201.870	202.010
	74.541	74.700	102.789	103.560	149.058	149.220	201.870	202.000
225	74.585	74.810	102.806	103.160	149.107	149.220	201.873	202.150
	74.585	74.800	102.806	103.570	149.107	149.210	201.873	202.130
	74.585	74.820	102.806	103.520	149.107	149.260	201.873	202.120
	74.544	74.720	102.778	103.320	149.063	149.140	201.851	202.100
	74.544	74.710	102.778	103.280	149.063	149.150	201.851	202.070
	74.544	74.740	102.778	103.300	149.063	149.250	201.851	202.080
	74.576	74.730	102.817	103.070	149.041	149.170	201.894	202.110

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Angle	distance measured (m)							
	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB
	74.576	74.780	102.817	103.070	149.041	149.190	201.894	202.090
	74.576	74.780	102.817	103.080	149.041	149.230	201.894	202.100
	74.541	74.690	102.789	103.720	149.058	149.190	201.870	202.010
	74.541	74.720	102.789	103.600	149.058	149.200	201.870	202.030
	74.541		102.789	103.620	149.058	149.220	201.870	202.020
247.5	74.585	74.840	102.806	103.220	149.107	149.300	201.873	202.130
	74.585	74.830	102.806		149.107	149.330	201.873	202.110
	74.585	74.830	102.806	103.630	149.107	149.270	201.873	202.100
	74.544	74.750	102.778	103.340	149.063	149.170	201.851	202.070
	74.544	74.720	102.778	103.280	149.063	149.160	201.851	202.030
	74.544	74.730	102.778	103.290	149.063	149.160	201.851	202.040
	74.576	74.760	102.817	103.280	149.041	149.160	201.894	202.100
	74.576	74.740	102.817	103.070	149.041	149.150	201.894	202.110
	74.576	74.740	102.817	103.140	149.041	149.160	201.894	202.080
	74.541	74.720	102.789	103.670	149.058	149.220	201.870	202.060
	74.541	74.670	102.789		149.058	149.220	201.870	202.080
	74.541	74.710	102.789	103.630	149.058	149.190	201.870	202.050
270	74.585	74.850	102.806		149.107	149.320	201.873	202.180
	74.585	74.860	102.806		149.107	149.300	201.873	202.170
	74.585	74.860	102.806		149.107	149.330	201.873	202.140
	74.544	74.740	102.778	103.110	149.063	149.190	201.851	202.110
	74.544	74.740	102.778		149.063	149.180	201.851	202.100
	74.544	74.740	102.778	103.320	149.063	149.190	201.851	202.090
	74.576	74.780	102.817	103.120	149.041	149.200	201.894	202.160
	74.576	74.780	102.817	103.120	149.041	149.200	201.894	202.160
	74.576	74.760	102.817	103.150	149.041	149.150	201.894	202.160
	74.541	74.740	102.789	103.150	149.058	149.260	201.870	202.080
	74.541	74.720	102.789	103.580	149.058	149.250	201.870	202.100
	74.541	74.730	102.789		149.058	149.240	201.870	202.110
292.5	74.585	74.890	102.806		149.107	149.380	201.873	202.180
	74.585	74.890	102.806		149.107	149.370	201.873	202.200
	74.585	74.870	102.806		149.107	149.360	201.873	202.170
	74.544	74.760	102.778	103.210	149.063	149.320	201.851	202.140
	74.544	74.770	102.778		149.063	149.320	201.851	202.150
	74.544	74.770	102.778		149.063	149.290	201.851	202.130
	74.576	74.800	102.817	103.130	149.041	149.270	201.894	202.190
	74.576	74.820	102.817	103.110	149.041	149.260	201.894	202.190
	74.576	74.790	102.817	103.140	149.041	149.290	201.894	202.180
	74.541	74.760	102.789		149.058	149.350	201.870	202.120
	74.541	74.770	102.789		149.058	149.340	201.870	202.130
	74.541	74.760	102.789	103.600	149.058	149.330	201.870	202.140

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ใช้ไปจะขอคืนค่า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Angle	distance measured (m)							
	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB
315	74.585	74.820	102.806		149.107	149.360	201.873	202.200
	74.585	74.860	102.806		149.107	149.330	201.873	202.180
	74.585	74.820	102.806		149.107	149.330	201.873	202.220
	74.544	74.780	102.778	103.360	149.063	149.320	201.851	202.160
	74.544	74.780	102.778	103.330	149.063	149.300	201.851	202.150
	74.544	74.770	102.778		149.063	149.280	201.851	202.180
	74.576	74.810	102.817		149.041	149.280	201.894	202.200
	74.576	74.830	102.817	103.120	149.041	149.300	201.894	202.200
	74.576	74.810	102.817	103.140	149.041	149.300	201.894	202.200
	74.541	74.740	102.789		149.058	149.310	201.870	202.120
	74.541	74.770	102.789	103.560	149.058	149.320	201.870	202.110
	74.541	74.740	102.789	103.520	149.058	149.300	201.870	202.150
337.5	74.585	74.820	102.806		149.107	149.340	201.873	202.140
	74.585	74.820	102.806		149.107	149.330	201.873	202.140
	74.585	74.790	102.806		149.107	149.320	201.873	202.150
	74.544	74.720	102.778	103.280	149.063	149.260	201.851	202.080
	74.544	74.750	102.778		149.063	149.210	201.851	202.080
	74.544	74.720	102.778		149.063	149.220	201.851	202.090
	74.576	74.780	102.817		149.041	149.220	201.894	202.140
	74.576	74.800	102.817		149.041	149.230	201.894	202.140
	74.576	74.780	102.817		149.041	149.210	201.894	202.130
	74.541	74.720	102.789	103.440	149.058	149.260	201.870	202.040
	74.541	74.740	102.789	103.520	149.058	149.230	201.870	202.060
	74.541	74.740	102.789	103.470	149.058	149.250	201.870	202.060

ตารางที่ 1ข(ต่อ) ผลการทดลองวัดระยะทางจาก tag ไปยัง anchor ทั้งสี่สถานี ที่ระยะ และมุมในการวัด ต่าง ๆ

Angle	distance measured (m)					
	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB
0	251.773	251.930	304.792	305.030	349.600	349.910
	251.773	251.940	304.792	305.070	349.600	
	251.773	251.940	304.792	305.080	349.600	
	251.706	251.950	304.776	304.910	349.586	349.880
	251.706	251.940	304.776	304.960	349.586	349.870
	251.706	251.940	304.776	304.970	349.586	349.860
	251.666	251.860	304.822	304.970	349.633	349.900
	251.666	251.850	304.822	305.040	349.633	349.890
	251.666	251.870	304.822	305.040	349.633	349.900
	251.669	251.870	304.801	305.000	349.613	349.880

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Angle	distance measured (m)					
	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB
	251.669	251.870	304.801	305.020	349.613	349.810
	251.669	251.860	304.801	304.990	349.613	349.890
22.5	251.773	251.940	304.792	305.070	349.600	349.910
	251.773	251.950	304.792	305.070	349.600	
	251.773	251.950	304.792	305.080	349.600	
	251.706	251.950	304.776	304.920	349.586	349.890
	251.706	251.960	304.776		349.586	349.840
	251.706	251.970	304.776	304.940	349.586	349.880
	251.666	251.880	304.822	305.010	349.633	349.920
	251.666	251.880	304.822	305.030	349.633	349.860
	251.666	251.880	304.822	305.010	349.633	349.950
	251.669	251.870	304.801	305.020	349.613	349.880
	251.669	251.870	304.801	305.040	349.613	
	251.669	251.890	304.801	305.000	349.613	
45	251.773	251.960	304.792	305.080	349.600	349.910
	251.773	251.960	304.792	305.080	349.600	
	251.773	251.960	304.792	305.100	349.600	
	251.706	251.970	304.776	304.930	349.586	349.890
	251.706	251.980	304.776	304.930	349.586	349.830
	251.706	251.960	304.776	304.940	349.586	349.890
	251.666	251.870	304.822	305.010	349.633	349.930
	251.666	251.880	304.822	305.030	349.633	349.860
	251.666	251.880	304.822	305.030	349.633	349.940
	251.669	251.870	304.801	305.020	349.613	349.880
	251.669	251.870	304.801	305.040	349.613	
	251.669	251.870	304.801	305.020	349.613	
67.5	251.773	251.940	304.792	305.060	349.600	349.920
	251.773	251.940	304.792	305.070	349.600	
	251.773	251.930	304.792	305.070	349.600	
	251.706	251.940	304.776	304.930	349.586	349.860
	251.706	251.930	304.776	304.930	349.586	349.830
	251.706	251.920	304.776	304.940	349.586	349.910
	251.666	251.840	304.822	304.990	349.633	349.900
	251.666	251.840	304.822	305.010	349.633	349.860
	251.666	251.830	304.822	305.020	349.633	349.970
	251.669	251.850	304.801	305.020	349.613	349.860
	251.669	251.840	304.801	305.030	349.613	
	251.669	251.850	304.801	305.010	349.613	349.930
90	251.773	251.930	304.792	305.040	349.600	349.910
	251.773	251.920	304.792	305.040	349.600	
	251.773	251.900	304.792	305.040	349.600	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Angle	distance measured (m)					
	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB
	251.706	251.910	304.776	304.910	349.586	349.850
	251.706	251.910	304.776	304.910	349.586	349.830
	251.706	251.920	304.776	304.920	349.586	349.910
	251.666	251.840	304.822	304.980	349.633	349.890
	251.666	251.840	304.822	305.000	349.633	349.860
	251.666	251.830	304.822	304.990	349.633	349.980
	251.669	251.830	304.801	305.000	349.613	349.840
	251.669	251.830	304.801	305.010	349.613	
	251.669	251.820	304.801	304.990	349.613	349.920
112.5	251.773	251.890	304.792	305.030	349.600	349.910
	251.773		304.792	305.040	349.600	
	251.773	251.860	304.792	305.030	349.600	350.020
	251.706	251.900	304.776	304.900	349.586	349.840
	251.706	251.890	304.776	304.910	349.586	349.850
	251.706	251.890	304.776	304.900	349.586	349.950
	251.666	251.810	304.822	304.970	349.633	349.890
	251.666	251.800	304.822	304.970	349.633	349.910
	251.666	251.800	304.822	304.990	349.633	350.000
	251.669	251.810	304.801	304.990	349.613	349.830
	251.669	251.790	304.801	305.000	349.613	
	251.669	251.800	304.801	304.980	349.613	349.940
135	251.773	251.860	304.792	305.040	349.600	349.910
	251.773		304.792	305.000	349.600	
	251.773		304.792	305.020	349.600	
	251.706	251.890	304.776	304.910	349.586	349.840
	251.706		304.776	304.870	349.586	349.860
	251.706		304.776	304.910	349.586	349.930
	251.666	251.800	304.822	304.970	349.633	349.920
	251.666		304.822	304.970	349.633	
	251.666		304.822	304.990	349.633	349.980
	251.669	251.800	304.801	305.000	349.613	349.840
	251.669		304.801	304.980	349.613	
	251.669		304.801	305.000	349.613	
157.5	251.773		304.792	305.040	349.600	349.920
	251.773		304.792	305.000	349.600	
	251.773		304.792	305.010	349.600	350.030
	251.706	251.930	304.776	304.910	349.586	349.850
	251.706	251.940	304.776	304.880	349.586	349.850
	251.706	251.940	304.776	304.900	349.586	349.950
	251.666		304.822		349.633	349.920
	251.666		304.822		349.633	349.920

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Angle	distance measured (m)					
	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB
	251.666		304.822		349.633	349.980
	251.669		304.801	305.020	349.613	349.840
	251.669		304.801		349.613	
	251.669		304.801	304.960	349.613	349.980
180	251.773		304.792	305.090	349.600	349.920
	251.773	251.870	304.792	305.070	349.600	
	251.773		304.792	305.050	349.600	350.040
	251.706	251.920	304.776	304.910	349.586	349.850
	251.706	251.930	304.776	304.910	349.586	349.870
	251.706	251.920	304.776	304.960	349.586	349.970
	251.666	251.850	304.822	304.970	349.633	349.920
	251.666	251.840	304.822	304.950	349.633	349.890
	251.666	251.840	304.822	304.990	349.633	349.990
	251.669	251.830	304.801	305.060	349.613	349.850
	251.669	251.820	304.801	304.980	349.613	
	251.669	251.830	304.801	305.010	349.613	349.980
202.5	251.773	251.910	304.792	305.080	349.600	349.910
	251.773	251.910	304.792	305.100	349.600	
	251.773	251.910	304.792	305.060	349.600	350.050
	251.706	251.920	304.776	304.920	349.586	349.850
	251.706	251.930	304.776	304.990	349.586	349.870
	251.706	251.930	304.776	304.980	349.586	350.000
	251.666	251.860	304.822	305.010	349.633	349.910
	251.666	251.840	304.822	305.050	349.633	349.870
	251.666	251.830	304.822	305.000	349.633	350.010
	251.669	251.850	304.801	305.070	349.613	349.840
	251.669	251.830	304.801	305.040	349.613	
	251.669	251.820	304.801	305.030	349.613	350.000
225	251.773		304.792	305.120	349.600	349.910
	251.773		304.792	305.120	349.600	
	251.773		304.792	305.090	349.600	
	251.706	251.910	304.776	304.980	349.586	349.850
	251.706	251.920	304.776	305.030	349.586	349.850
	251.706	251.910	304.776	304.980	349.586	349.990
	251.666	251.850	304.822	305.050	349.633	349.910
	251.666	251.840	304.822	305.080	349.633	349.860
	251.666	251.840	304.822	304.980	349.633	350.000
	251.669		304.801	305.110	349.613	349.840
	251.669		304.801	305.090	349.613	349.860
	251.669		304.801	305.030	349.613	
247.5	251.773		304.792	305.170	349.600	349.910

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Angle	distance measured (m)					
	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB
	251.773		304.792	305.100	349.600	349.900
	251.773		304.792	305.090	349.600	
	251.706	251.920	304.776		349.586	349.850
	251.706	251.910	304.776		349.586	349.870
	251.706	251.880	304.776	305.000	349.586	349.990
	251.666		304.822		349.633	349.910
	251.666		304.822	305.110	349.633	349.900
	251.666		304.822	304.990	349.633	350.000
	251.669		304.801	305.140	349.613	349.840
	251.669		304.801	305.100	349.613	349.860
	251.669		304.801	305.130	349.613	
270	251.773		304.792		349.600	349.910
	251.773		304.792	305.120	349.600	349.910
	251.773		304.792	305.080	349.600	
	251.706	251.930	304.776		349.586	349.810
	251.706	251.940	304.776	305.020	349.586	349.890
	251.706	251.930	304.776	304.990	349.586	349.980
	251.666		304.822	305.090	349.633	349.880
	251.666	251.850	304.822	305.130	349.633	349.920
	251.666		304.822	305.060	349.633	349.990
	251.669		304.801	305.120	349.613	349.820
	251.669		304.801	305.130	349.613	349.860
251.669		304.801	305.100	349.613	350.000	
292.5	251.773		304.792	305.190	349.600	349.880
	251.773	251.920	304.792		349.600	
	251.773		304.792		349.600	
	251.706	252.040	304.776	305.050	349.586	349.800
	251.706	252.030	304.776	305.010	349.586	349.890
	251.706	252.050	304.776	304.990	349.586	349.910
	251.666	251.960	304.822	305.140	349.633	349.860
	251.666	251.960	304.822	305.140	349.633	349.920
	251.666	251.970	304.822	305.100	349.633	349.950
	251.669	251.940	304.801	305.110	349.613	349.810
	251.669	251.950	304.801	305.110	349.613	349.870
251.669	251.960	304.801	305.110	349.613		
315	251.773	251.920	304.792		349.600	349.860
	251.773		304.792	305.190	349.600	
	251.773		304.792		349.600	
	251.706	252.000	304.776	305.110	349.586	349.800
	251.706	252.010	304.776	305.070	349.586	349.850
	251.706	252.010	304.776	305.320	349.586	349.850

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Angle	distance measured (m)					
	RTK	UWB	RTK	UWB	RTK	UWB
	251.666	251.970	304.822	305.160	349.633	349.860
	251.666	251.970	304.822	305.130	349.633	349.910
	251.666	251.950	304.822		349.633	349.920
	251.669	251.920	304.801	305.110	349.613	349.790
	251.669	251.910	304.801	305.130	349.613	
	251.669	251.900	304.801		349.613	
337.5	251.773		304.792	305.120	349.600	
	251.773	251.940	304.792	305.160	349.600	
	251.773	251.960	304.792	305.080	349.600	
	251.706	251.920	304.776	305.070	349.586	349.820
	251.706	251.920	304.776		349.586	349.830
	251.706	251.900	304.776	305.080	349.586	349.860
	251.666		304.822	305.100	349.633	349.900
	251.666	251.860	304.822	305.150	349.633	349.890
	251.666	251.840	304.822	305.090	349.633	349.920
	251.669	251.880	304.801	305.060	349.613	
	251.669	251.860	304.801	305.090	349.613	
	251.669	251.830	304.801	305.080	349.613	349.960

ตารางที่ 2ข ผลการคำนวณค่าพิกัดด้วยเทคนิค trilateration ทั้งแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ในการการระบุตำแหน่งนอกอาคาร

Repeat	Point ID	Position in Coordinate Cartesian system (m)								
		RTK			UWB 2D Trilateration		UWB 3D Trilateration			
		X	Y	Z	X	Y	X	Y	Z	
1	1	13.292	14.591	-0.031	13.227	14.616	13.226	14.643	0.160	
		13.292	14.591	-0.031	13.226	14.600	13.225	14.643	0.219	
		13.292	14.591	-0.031	13.227	14.633	13.227	14.643	0.075	
	2	9.615	14.433	-0.046	9.539	15.346	9.569	14.445	-0.050	
		9.615	14.433	-0.046	9.526	15.346	9.555	14.469	-0.050	
		9.615	14.433	-0.046	9.536	15.346	9.566	14.451	-0.050	
	3	4.725	14.281	-0.043	4.704	14.720	4.722	14.193	-0.051	
		4.725	14.281	-0.043	4.649	14.718	4.711	14.206	-0.051	
		4.725	14.281	-0.043	4.686	14.799	4.718	14.206	-0.051	
	4	0.729	14.213	-0.065	0.720	14.148	0.723	14.041	-0.052	
		0.729	14.213	-0.065	0.693	14.111	0.695	14.049	-0.052	
		0.729	14.213	-0.065	0.696	14.082	0.697	14.057	-0.052	
	5	0.777	10.064	-0.027	0.742	10.117	0.746	10.015	-0.037	
		0.777	10.064	-0.027	0.739	10.126	0.742	10.032	-0.037	
		0.777	10.064	-0.027	0.729	10.124	0.732	10.038	-0.037	
	6	4.794	10.306	-0.024	4.825	10.158	4.824	10.212	-0.792	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Repeat	Point ID	Position in Coordinate Cartesian system (m)								
		RTK			UWB 2D Trilateration		UWB 3D Trilateration			
		X	Y	Z	X	Y	X	Y	Z	
	7	4.794	10.306	-0.024	4.833	10.166	4.831	10.206	-0.685	
		4.794	10.306	-0.024	4.827	10.175	4.826	10.210	-0.648	
		9.772	10.402	-0.008	9.737	10.265	9.734	10.350	-0.978	
	8	9.772	10.402	-0.008	9.740	10.249	9.738	10.333	-0.978	
		9.772	10.402	-0.008	9.760	10.244	9.758	10.328	-0.976	
		13.412	10.625	0.023	13.512	10.760	13.433	10.561	-0.034	
	9	13.412	10.625	0.023	13.525	10.767	13.433	10.552	-0.034	
		13.412	10.625	0.023	13.496	10.743	13.443	10.583	-0.034	
		13.487	6.697	0.042	13.682	6.750	13.433	6.203	-0.018	
	10	13.487	6.697	0.042	13.668	6.741	13.429	6.214	-0.018	
		13.487	6.697	0.042	13.669	6.732	13.438	6.225	-0.018	
		9.942	6.504	0.052	9.840	6.229	9.855	6.258	-0.763	
	11	9.942	6.504	0.052	9.830	6.209	9.850	6.248	-0.889	
		9.942	6.504	0.052	9.831	6.226	9.847	6.258	-0.811	
		5.270	6.299	0.035	4.912	6.302	4.919	6.315	-0.533	
	12	5.270	6.299	0.035	4.904	6.310	4.911	6.322	-0.521	
		5.270	6.299	0.035	4.901	6.315	4.908	6.327	-0.524	
		0.944	6.196	0.031	0.825	6.281	0.793	6.210	-0.023	
	13	0.944	6.196	0.031	0.827	6.281	0.797	6.214	-0.023	
		0.944	6.196	0.031	0.867	6.302	0.839	6.240	-0.023	
		1.140	1.827	0.001	0.962	1.832	0.963	1.819	-0.006	
	14	1.140	1.827	0.001	0.962	1.832	0.963	1.820	-0.006	
		1.140	1.827	0.001	0.990	1.804	0.990	1.793	-0.006	
		5.281	2.315	-0.004	5.285	2.224	5.286	2.227	0.211	
	15	5.281	2.315	-0.004	5.270	2.219	5.272	2.227	0.394	
		5.281	2.315	-0.004	5.284	2.221	5.283	2.220	-0.006	
		9.986	2.568	0.013	10.030	2.495	9.895	2.199	-0.004	
	16	9.986	2.568	0.013	10.050	2.528	9.895	2.188	-0.004	
		9.986	2.568	0.013	10.046	2.540	9.894	2.205	-0.004	
		13.398	2.466	0.009	13.488	2.536	13.306	2.137	-0.003	
	2	1	13.398	2.466	0.009	13.489	2.526	13.307	2.125	-0.003
			13.398	2.466	0.009	13.485	2.515	13.297	2.103	-0.003
			13.579	1.724	0.004	13.648	1.748	13.485	1.391	0.000
		2	13.579	1.724	0.004	13.654	1.749	13.495	1.400	0.000
			13.579	1.724	0.004	13.652	1.749	13.498	1.409	0.000
			10.080	1.771	0.014	10.209	1.829	10.030	1.434	-0.002
3		10.080	1.771	0.014	10.205	1.847	10.023	1.445	-0.002	
		10.080	1.771	0.014	10.215	1.855	10.029	1.446	-0.002	
		5.603	1.721	-0.003	5.548	1.668	5.556	1.691	0.727	
		5.603	1.721	-0.003	5.541	1.668	5.550	1.690	0.727	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Repeat	Point ID	Position in Coordinate Cartesian system (m)								
		RTK			UWB 2D Trilateration		UWB 3D Trilateration			
		X	Y	Z	X	Y	X	Y	Z	
		5.603	1.721	-0.003	5.527	1.656	5.534	1.676	0.685	
	4	1.552	1.475	-0.014	1.451	1.502	1.452	1.505	0.225	
		1.552	1.475	-0.014	1.440	1.500	1.440	1.501	0.120	
		1.552	1.475	-0.014	1.476	1.500	1.477	1.505	0.292	
	5	1.312	5.644	0.051	1.209	5.703	1.186	5.654	-0.021	
		1.312	5.644	0.051	1.213	5.719	1.193	5.675	-0.021	
		1.312	5.644	0.051	1.219	5.711	1.196	5.661	-0.021	
	6	5.147	5.908	0.041	4.858	5.878	4.863	5.886	-0.445	
		5.147	5.908	0.041	4.921	5.905	4.872	5.925	-0.676	
		5.147	5.908	0.041	4.905	5.907	4.861	5.921	-0.588	
	7	9.787	6.119	0.046	9.657	5.784	9.678	5.826	-0.937	
		9.787	6.119	0.046	9.656	5.802	9.678	5.844	-0.947	
		9.787	6.119	0.046	9.663	5.797	9.683	5.836	-0.903	
	8	13.369	6.233	0.040	13.543	6.290	13.312	5.783	-0.016	
		13.369	6.233	0.040	13.544	6.290	13.318	5.793	-0.016	
		13.369	6.233	0.040	13.533	6.293	13.311	5.805	-0.016	
	9	13.309	11.021	0.006	13.389	11.199	13.318	10.973	-0.036	
		13.309	11.021	0.006	13.377	11.191	13.331	10.983	-0.036	
		13.309	11.021	0.006	13.377	11.191	13.320	10.971	-0.036	
	10	9.697	10.972	0.021	9.687	10.827	9.687	10.858	-0.580	
		9.697	10.972	0.021	9.687	10.827	9.687	10.848	-0.493	
		9.697	10.972	0.021	9.676	10.853	9.676	10.872	-0.474	
	11	5.117	10.832	0.002	5.179	10.513	5.174	10.660	-1.221	
		5.117	10.832	0.002	5.186	10.521	5.181	10.660	-1.187	
		5.117	10.832	0.002	5.186	10.521	5.181	10.660	-1.187	
	12	0.854	10.726	0.004	0.743	10.781	0.746	10.685	-0.039	
		0.854	10.726	0.004	0.753	10.815	0.757	10.694	-0.039	
		0.854	10.726	0.004	0.734	10.778	0.737	10.685	-0.039	
	13	0.767	13.361	-0.067	0.709	13.298	0.705	13.403	0.541	
		0.767	13.361	-0.067	0.696	13.253	0.691	13.398	0.654	
		0.767	13.361	-0.067	0.703	13.270	0.698	13.418	0.656	
	14	5.092	13.750	-0.046	5.066	13.917	5.077	13.597	-0.049	
		5.092	13.750	-0.046	5.082	13.945	5.093	13.594	-0.049	
		5.092	13.750	-0.046	5.077	14.033	5.092	13.601	-0.049	
	15	9.591	13.910	-0.032	9.499	14.333	9.510	14.023	-0.048	
		9.591	13.910	-0.032	9.497	14.300	9.506	14.023	-0.048	
		9.591	13.910	-0.032	9.507	14.301	9.517	14.017	-0.048	
	16	12.929	14.081	-0.012	12.788	14.201	12.788	14.191	-0.048	
		12.929	14.081	-0.012	12.798	14.204	12.799	14.182	-0.048	
		12.929	14.081	-0.012	12.806	14.177	12.806	14.174	-0.048	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Repeat	Point ID	Position in Coordinate Cartesian system (m)								
		RTK			UWB 2D Trilateration		UWB 3D Trilateration			
		X	Y	Z	X	Y	X	Y	Z	
3	1	13.258	14.444	-0.028	13.210	14.426	13.209	14.442	0.131	
		13.258	14.444	-0.028	13.210	14.440	13.211	14.428	-0.048	
		13.258	14.444	-0.028	13.220	14.429	13.220	14.433	0.035	
	2	9.475	14.267	-0.023	9.405	14.432	9.423	14.302	-0.049	
		9.475	14.267	-0.023	9.405	14.432	9.410	14.290	-0.049	
		9.475	14.267	-0.023	9.400	14.510	9.425	14.331	-0.050	
	3	4.928	14.097	-0.031	4.874	14.484	4.954	13.993	-0.050	
		4.928	14.097	-0.031	4.917	14.393	4.932	13.956	-0.050	
		4.928	14.097	-0.031	4.890	14.437	4.928	13.970	-0.050	
	4	0.689	13.837	-0.065	0.628	13.718	0.629	13.681	-0.051	
		0.689	13.837	-0.065	0.617	13.722	0.619	13.673	-0.051	
		0.689	13.837	-0.065	0.634	13.750	0.636	13.684	-0.051	
	5	0.882	10.141	-0.010	0.825	10.180	0.828	10.091	-0.037	
		0.882	10.141	-0.010	0.806	10.175	0.808	10.091	-0.037	
		0.882	10.141	-0.010	0.825	10.180	0.829	10.071	-0.037	
	6	4.838	10.211	-0.014	4.838	10.053	4.837	10.092	-0.683	
		4.838	10.211	-0.014	4.857	10.060	4.857	10.088	-0.594	
		4.838	10.211	-0.014	4.852	10.069	4.852	10.093	-0.551	
	7	9.431	10.286	0.001	9.392	10.191	9.389	10.274	-0.975	
		9.431	10.286	0.001	9.408	10.203	9.407	10.250	-0.748	
		9.431	10.286	0.001	9.414	10.169	9.413	10.226	-0.815	
	8	13.209	10.210	0.023	13.208	10.368	13.201	10.235	-0.033	
		13.209	10.210	0.023	13.234	10.382	13.238	10.250	-0.033	
		13.209	10.210	0.023	13.250	10.368	13.254	10.243	-0.033	
	9	13.238	6.100	0.041	13.431	6.151	13.220	5.687	-0.016	
		13.238	6.100	0.041	13.441	6.150	13.230	5.686	-0.016	
		13.238	6.100	0.041	13.432	6.143	13.238	5.718	-0.016	
	10	9.854	5.914	0.038	9.733	5.616	9.726	5.603	-0.017	
		9.854	5.914	0.038	9.752	5.672	9.733	5.629	-0.017	
		9.854	5.914	0.038	9.729	5.639	9.709	5.595	-0.017	
	11	5.597	5.652	0.043	5.504	5.572	5.472	5.585	-0.566	
		5.597	5.652	0.043	5.432	5.579	5.435	5.583	-0.348	
		5.597	5.652	0.043	5.415	5.585	5.415	5.586	-0.128	
	12	1.119	5.473	0.018	1.048	5.532	1.034	5.501	-0.020	
		1.119	5.473	0.018	1.031	5.541	1.017	5.510	-0.020	
		1.119	5.473	0.018	1.029	5.540	1.014	5.507	-0.020	
	13	1.296	1.911	-0.002	1.149	1.914	1.149	1.908	-0.007	
		1.296	1.911	-0.002	1.149	1.914	1.149	1.905	-0.007	
		1.296	1.911	-0.002	1.162	1.916	1.162	1.909	-0.007	
	14	5.360	2.057	-0.001	5.334	1.965	5.339	1.977	0.523	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Repeat	Point ID	Position in Coordinate Cartesian system (m)								
		RTK			UWB 2D Trilateration		UWB 3D Trilateration			
		X	Y	Z	X	Y	X	Y	Z	
	15	5.360	2.057	-0.001	5.341	1.962	5.339	1.959	-0.005	
		5.360	2.057	-0.001	5.339	1.962	5.335	1.955	-0.005	
		9.884	2.219	0.017	10.001	2.197	9.835	1.832	-0.003	
		9.884	2.219	0.017	9.997	2.212	9.834	1.855	-0.003	
		9.884	2.219	0.017	10.004	2.204	9.832	1.826	-0.003	
	16	13.446	2.228	0.015	13.550	2.269	13.346	1.822	-0.002	
		13.446	2.228	0.015	13.550	2.268	13.337	1.799	-0.002	
		13.446	2.228	0.015	13.553	2.268	13.344	1.809	-0.002	

ตารางที่ 3ข ผลการคำนวณค่าพิกัดด้วยเทคนิค trilateration ทั้งแบบ 2 มิติ และ 3 มิติ ในการการ
ระบุตำแหน่งนอกอาคาร

Repeat	Point ID	Position in Coordinate Cartesian system (m)								
		RTK			UWB 2D Trilateration		UWB 3D Trilateration			
		X	Y	Z	X	Y	X	Y	Z	
1	1	8.337	14.078	-27.464	8.293	14.190	8.359	14.139	-27.390	
		8.337	14.078	-27.464	8.293	14.190	8.355	14.144	-27.383	
		8.337	14.078	-27.464	8.293	14.190	8.355	14.144	-27.383	
		8.337	14.078	-27.464	8.290	14.206	8.361	14.141	-27.714	
		8.337	14.078	-27.464	8.286	14.211	8.360	14.150	-27.422	
		8.337	14.078	-27.464	8.286	14.211	8.355	14.144	-27.589	
		8.337	14.078	-27.464	8.269	14.213	8.357	14.145	-27.719	
		8.337	14.078	-27.464	8.269	14.213	8.352	14.149	-27.712	
		8.337	14.078	-27.464	8.246	14.190	8.346	14.132	-27.703	
	8.337	14.078	-27.464	8.246	14.190	8.346	14.132	-27.703		
	2	2	5.736	16.283	-27.46	5.738	15.116	5.704	16.311	-27.644
			5.736	16.283	-27.46	5.726	15.104	5.699	16.304	-27.636
			5.736	16.283	-27.46	5.716	15.114	5.694	16.309	-27.629
			5.736	16.283	-27.46	5.716	15.114	5.694	16.309	-27.629
			5.736	16.283	-27.46	5.716	15.114	5.694	16.309	-27.629
5.736			16.283	-27.46	5.716	15.114	5.694	16.309	-27.629	
3	3	7.51	5.994	-27.481	7.527	5.785	7.567	5.960	-25.448	
		7.51	5.994	-27.481	7.519	5.792	7.558	5.959	-25.492	
		7.51	5.994	-27.481	7.512	5.798	7.554	5.963	-25.492	
		7.51	5.994	-27.481	7.512	5.798	7.554	5.963	-25.492	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Repeat	Point ID	Position in Coordinate Cartesian system (m)								
		RTK			UWB 2D Trilateration		UWB 3D Trilateration			
		X	Y	Z	X	Y	X	Y	Z	
		7.51	5.994	-27.481	7.512	5.798	7.554	5.963	-25.492	
		7.51	5.994	-27.481	7.519	5.792	7.555	5.962	-25.487	
		7.51	5.994	-27.481	7.519	5.792	7.558	5.959	-25.492	
		7.51	5.994	-27.481	7.515	5.782	7.556	5.957	-25.446	
		7.51	5.994	-27.481	7.519	5.792	7.558	5.959	-25.492	
		7.51	5.994	-27.481	7.519	5.792	7.558	5.959	-25.492	
		7.51	5.994	-27.481	7.519	5.792	7.558	5.959	-25.492	
	4	-4.157	2.323	-27.54	-4.203	2.360	-4.303	2.198	-24.922	
		-4.157	2.323	-27.54	-4.211	2.367	-4.311	2.198	-24.886	
		-4.157	2.323	-27.54	-4.211	2.369	-4.307	2.195	-24.868	
		-4.157	2.323	-27.54	-4.211	2.368	-4.312	2.192	-24.839	
		-4.157	2.323	-27.54	-4.218	2.363	-4.310	2.192	-24.900	
		-4.157	2.323	-27.54	-4.211	2.367	-4.311	2.198	-24.886	
		-4.157	2.323	-27.54	-4.218	2.363	-4.310	2.192	-24.900	
		-4.157	2.323	-27.54	-4.211	2.367	-4.311	2.198	-24.886	
		-4.157	2.323	-27.54	-4.203	2.359	-4.307	2.195	-24.892	
		-4.157	2.323	-27.54	-4.203	2.361	-4.304	2.192	-24.874	
	5	-0.064	6.171	-27.464	-0.224	5.845	-0.163	6.125	-24.897	
		-0.064	6.171	-27.464	-0.090	6.414	-0.163	6.133	-24.864	
		-0.064	6.171	-27.464	-0.099	6.415	-0.170	6.120	-24.809	
		-0.064	6.171	-27.464	-0.099	6.409	-0.170	6.126	-24.858	
		-0.064	6.171	-27.464	-0.236	5.827	-0.170	6.128	-24.799	
		-0.064	6.171	-27.464	-0.242	5.818	-0.173	6.125	-24.768	
		-0.064	6.171	-27.464	-0.242	5.818	-0.173	6.125	-24.768	
		-0.064	6.171	-27.464	-0.107	6.423	-0.181	6.124	-24.788	
		-0.064	6.171	-27.464	-0.107	6.414	-0.171	6.133	-24.885	
		-0.064	6.171	-27.464	-0.099	6.400	-0.160	6.134	-24.959	
	6	-11.829	4.178	-27.447	-11.917	4.144	-11.944	4.194	-28.333	
		-11.829	4.178	-27.447	-11.921	4.153	-11.946	4.196	-28.244	
		-11.829	4.178	-27.447	-11.925	4.162	-11.948	4.198	-28.140	
		-11.829	4.178	-27.447	-11.934	4.158	-11.953	4.194	-28.231	
		-11.829	4.178	-27.447	-11.934	4.158	-11.953	4.194	-28.231	
		-11.829	4.178	-27.447	-11.934	4.158	-11.949	4.189	-28.238	
		-11.829	4.178	-27.447	-11.938	4.167	-11.951	4.191	-28.130	
		-11.829	4.178	-27.447	-11.938	4.167	-11.955	4.196	-28.122	
		-11.829	4.178	-27.447	-11.938	4.167	-11.955	4.196	-28.122	
		-11.829	4.178	-27.447	-11.948	4.163	-11.961	4.192	-28.216	
	7	-2.383	-7.88	-27.532	-2.419	-7.999	-2.418	-7.945	-25.944	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Repeat	Point ID	Position in Coordinate Cartesian system (m)								
		RTK			UWB 2D Trilateration		UWB 3D Trilateration			
		X	Y	Z	X	Y	X	Y	Z	
		-2.383	-7.88	-27.532	-2.427	-7.993	-2.426	-7.937	-25.919	
		-2.383	-7.88	-27.532	-2.427	-7.993	-2.426	-7.937	-25.919	
		-2.383	-7.88	-27.532	-2.418	-7.987	-2.424	-7.932	-29.215	
		-2.383	-7.88	-27.532	-2.418	-7.987	-2.424	-7.932	-29.215	
		-2.383	-7.88	-27.532	-2.418	-7.987	-2.424	-7.932	-29.215	
		-2.383	-7.88	-27.532	-2.418	-7.987	-2.426	-7.934	-29.126	
		-2.383	-7.88	-27.532	-2.427	-7.993	-2.431	-7.938	-29.224	
		-2.383	-7.88	-27.532	-2.427	-7.993	-2.431	-7.938	-29.224	
		-2.383	-7.88	-27.532	-2.436	-7.998	-2.435	-7.947	-25.990	
	8	5.966	-12.127	-27.49	5.987	-12.178	5.923	-12.226	-25.207	
		5.966	-12.127	-27.49	5.987	-12.178	5.923	-12.226	-25.207	
		5.966	-12.127	-27.49	5.987	-12.178	5.923	-12.226	-25.207	
		5.966	-12.127	-27.49	5.987	-12.184	5.929	-12.232	-25.278	
		5.966	-12.127	-27.49	5.983	-12.174	5.922	-12.224	-25.205	
		5.966	-12.127	-27.49	5.980	-12.171	5.920	-12.222	-25.202	
		5.966	-12.127	-27.49	5.987	-12.164	5.922	-12.217	-25.125	
		5.966	-12.127	-27.49	5.980	-12.171	5.919	-12.221	-25.200	
		5.966	-12.127	-27.49	5.983	-12.153	5.914	-12.210	-25.057	
		5.966	-12.127	-27.49	5.983	-12.153	5.914	-12.210	-25.057	
	9	7.97	-3.689	-27.541	8.022	-3.777	7.955	-3.791	-25.828	
		7.97	-3.689	-27.541	8.014	-3.785	7.951	-3.795	-25.921	
		7.97	-3.689	-27.541	8.021	-3.777	7.960	-3.790	-25.922	
		7.97	-3.689	-27.541	8.029	-3.768	7.964	-3.785	-25.829	
		7.97	-3.689	-27.541	8.029	-3.768	7.964	-3.785	-25.829	
		7.97	-3.689	-27.541	8.033	-3.778	7.969	-3.791	-25.884	
		7.97	-3.689	-27.541	8.033	-3.778	7.969	-3.791	-25.884	
		7.97	-3.689	-27.541	8.033	-3.778	7.969	-3.791	-25.884	
		7.97	-3.689	-27.541	8.035	-3.778	7.964	-3.792	-25.792	
		7.97	-3.689	-27.541	8.035	-3.778	7.964	-3.792	-25.792	
	10	12.145	-3.646	-27.51	12.105	-3.762	12.161	-3.680	-25.321	
		12.145	-3.646	-27.51	12.105	-3.762	12.161	-3.680	-25.321	
		12.145	-3.646	-27.51	12.116	-3.764	12.166	-3.686	-25.382	
		12.145	-3.646	-27.51	12.116	-3.764	12.166	-3.686	-25.382	
		12.145	-3.646	-27.51	12.116	-3.764	12.166	-3.686	-25.382	
		12.145	-3.646	-27.51	12.116	-3.764	12.162	-3.691	-25.461	
		12.145	-3.646	-27.51	12.116	-3.764	12.162	-3.691	-25.461	
		12.145	-3.646	-27.51	12.116	-3.764	12.158	-3.696	-25.543	
		12.145	-3.646	-27.51	12.126	-3.767	12.165	-3.704	-25.615	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Repeat	Point ID	Position in Coordinate Cartesian system (m)								
		RTK			UWB 2D Trilateration		UWB 3D Trilateration			
		X	Y	Z	X	Y	X	Y	Z	
	11	12.145	-3.646	-27.51	12.126	-3.767	12.172	-3.700	-25.533	
		-2.632	-1.998	-27.53	-2.631	-1.922	-2.651	-2.053	-25.240	
		-2.632	-1.998	-27.53	-2.631	-1.922	-2.651	-2.053	-25.240	
		-2.632	-1.998	-27.53	-2.631	-1.922	-2.651	-2.053	-25.240	
		-2.632	-1.998	-27.53	-2.631	-1.922	-2.651	-2.053	-25.240	
		-2.632	-1.998	-27.53	-2.624	-1.929	-2.647	-2.057	-25.245	
		-2.632	-1.998	-27.53	-2.631	-1.920	-2.650	-2.046	-25.291	
		-2.632	-1.998	-27.53	-2.631	-1.922	-2.655	-2.050	-25.247	
		-2.632	-1.998	-27.53	-2.631	-1.920	-2.646	-2.050	-25.284	
	12	-6.315	0.16	-27.559	-6.376	0.167	-6.473	0.082	-25.235	
		-6.315	0.16	-27.559	-6.376	0.164	-6.478	0.078	-25.204	
		-6.315	0.16	-27.559	-6.373	0.164	-6.469	0.078	-25.241	
		-6.315	0.16	-27.559	-6.373	0.164	-6.469	0.078	-25.241	
		-6.315	0.16	-27.559	-6.381	0.170	-6.476	0.085	-25.255	
		-6.315	0.16	-27.559	-6.378	0.170	-6.468	0.085	-25.293	
		-6.315	0.16	-27.559	-6.375	0.176	-6.470	0.085	-25.224	
		-6.315	0.16	-27.559	-6.378	0.176	-6.474	0.081	-25.194	
		-6.315	0.16	-27.559	-6.381	0.176	-6.479	0.077	-25.164	
		-6.315	0.16	-27.559	-6.378	0.176	-6.474	0.081	-25.194	
2	1	-1.981	-2.225	-27.514	-1.914	-2.237	-2.026	-2.281	-25.232	
		-1.981	-2.225	-27.514	-1.912	-2.237	-2.021	-2.278	-25.277	
		-1.981	-2.225	-27.514	-1.905	-2.245	-2.017	-2.282	-25.273	
		-1.981	-2.225	-27.514	-1.983	-2.167	-2.016	-2.282	-25.263	
		-1.981	-2.225	-27.514	-1.970	-2.168	-2.010	-2.282	-25.222	
		-1.981	-2.225	-27.514	-1.976	-2.174	-2.013	-2.286	-25.268	
		-1.981	-2.225	-27.514	-1.970	-2.168	-2.010	-2.282	-25.222	
		-1.981	-2.225	-27.514	-1.970	-2.168	-2.010	-2.282	-25.222	
		-1.981	-2.225	-27.514	-1.971	-2.152	-2.010	-2.268	-25.220	
	2	8.178	-3.975	-27.526	8.248	-4.053	8.178	-4.071	-25.745	
		8.178	-3.975	-27.526	8.246	-4.071	8.174	-4.082	-25.799	
		8.178	-3.975	-27.526	8.247	-4.071	8.168	-4.083	-25.710	
		8.178	-3.975	-27.526	8.246	-4.071	8.172	-4.080	-25.795	
		8.178	-3.975	-27.526	8.254	-4.062	8.178	-4.077	-25.711	
		8.178	-3.975	-27.526	8.246	-4.071	8.174	-4.082	-25.799	
		8.178	-3.975	-27.526	8.246	-4.071	8.174	-4.082	-25.799	
		8.178	-3.975	-27.526	8.246	-4.071	8.174	-4.082	-25.799	
		8.178	-3.975	-27.526	8.246	-4.071	8.174	-4.082	-25.799	
		8.178	-3.975	-27.526	8.246	-4.071	8.174	-4.082	-25.799	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Repeat	Point ID	Position in Coordinate Cartesian system (m)								
		RTK			UWB 2D Trilateration		UWB 3D Trilateration			
		X	Y	Z	X	Y	X	Y	Z	
		8.178	-3.975	-27.526	8.255	-4.062	8.176	-4.082	-25.633	
		8.178	-3.975	-27.526	8.254	-4.062	8.180	-4.079	-25.714	
		8.178	-3.975	-27.526	8.253	-4.062	8.184	-4.076	-25.800	
	3	12.103	-3.73	-27.507	12.069	-3.846	12.106	-3.785	-25.665	
		12.103	-3.73	-27.507	12.059	-3.843	12.104	-3.774	-25.509	
		12.103	-3.73	-27.507	12.069	-3.846	12.110	-3.780	-25.577	
		12.103	-3.73	-27.507	12.069	-3.846	12.114	-3.775	-25.493	
		12.103	-3.73	-27.507	12.069	-3.846	12.114	-3.775	-25.493	
		12.103	-3.73	-27.507	12.080	-3.848	12.124	-3.775	-25.477	
		12.103	-3.73	-27.507	12.076	-3.837	12.122	-3.767	-25.490	
		12.103	-3.73	-27.507	12.080	-3.848	12.126	-3.777	-25.480	
		12.103	-3.73	-27.507	12.080	-3.848	12.130	-3.772	-25.400	
		12.103	-3.73	-27.507	12.080	-3.848	12.130	-3.772	-25.400	
	4	-11.998	3.736	-27.466	-12.122	3.705	-12.139	3.748	-28.423	
		-11.998	3.736	-27.466	-12.122	3.705	-12.139	3.748	-28.423	
		-11.998	3.736	-27.466	-12.128	3.692	-12.142	3.741	-28.556	
		-11.998	3.736	-27.466	-12.128	3.692	-12.142	3.741	-28.556	
		-11.998	3.736	-27.466	-12.128	3.692	-12.142	3.741	-28.556	
		-11.998	3.736	-27.466	-12.132	3.701	-12.149	3.748	-28.480	
		-11.998	3.736	-27.466	-12.132	3.701	-12.141	3.747	-28.583	
		-11.998	3.736	-27.466	-12.122	3.705	-12.136	3.751	-28.524	
		-11.998	3.736	-27.466	-12.132	3.701	-12.141	3.747	-28.583	
		-11.998	3.736	-27.466	-12.128	3.692	-12.142	3.741	-28.556	
	5	-3.915	1.783	-27.56	-3.944	1.857	-4.040	1.659	-24.699	
		-3.915	1.783	-27.56	-3.953	1.866	-4.045	1.656	-24.649	
		-3.915	1.783	-27.56	-3.946	1.874	-4.038	1.657	-24.604	
		-3.915	1.783	-27.56	-3.944	1.856	-4.045	1.649	-24.627	
		-3.915	1.783	-27.56	-3.938	1.864	-4.038	1.656	-24.626	
		-3.915	1.783	-27.56	-3.936	1.850	-4.033	1.652	-24.689	
		-3.915	1.783	-27.56	-3.936	1.850	-4.032	1.659	-24.734	
		-3.915	1.783	-27.56	-3.936	1.848	-4.036	1.656	-24.705	
		-3.915	1.783	-27.56	-3.936	1.848	-4.036	1.656	-24.705	
		-3.915	1.783	-27.56	-3.951	1.850	-4.043	1.656	-24.730	
	6	5.878	16.07	-27.449	5.956	15.540	5.904	16.110	-27.667	
		5.878	16.07	-27.449	5.956	15.443	5.906	16.112	-27.665	
		5.878	16.07	-27.449	5.957	15.465	5.907	16.123	-27.666	
		5.878	16.07	-27.449	5.947	15.362	5.904	16.129	-27.656	
		5.878	16.07	-27.449	5.947	15.568	5.906	16.124	-27.654	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Repeat	Point ID	Position in Coordinate Cartesian system (m)								
		RTK			UWB 2D Trilateration		UWB 3D Trilateration			
		X	Y	Z	X	Y	X	Y	Z	
		5.878	16.07	-27.449	5.947	15.568	5.906	16.124	-27.654	
		5.878	16.07	-27.449	5.959	15.487	5.908	16.134	-27.667	
		5.878	16.07	-27.449	5.959	15.487	5.908	16.134	-27.667	
		5.878	16.07	-27.449	5.959	15.487	5.908	16.134	-27.667	
		5.878	16.07	-27.449	5.981	15.379	5.914	16.140	-27.687	
	7	-2.534	-8.05	-27.521	-2.583	-8.188	-2.587	-8.132	-29.268	
		-2.534	-8.05	-27.521	-2.583	-8.188	-2.590	-8.129	-29.263	
		-2.534	-8.05	-27.521	-2.591	-8.182	-2.594	-8.130	-29.218	
		-2.534	-8.05	-27.521	-2.601	-8.187	-2.602	-8.131	-29.307	
		-2.534	-8.05	-27.521	-2.601	-8.187	-2.602	-8.131	-29.307	
		-2.534	-8.05	-27.521	-2.601	-8.187	-2.602	-8.131	-29.307	
		-2.534	-8.05	-27.521	-2.601	-8.187	-2.604	-8.134	-29.223	
		-2.534	-8.05	-27.521	-2.610	-8.192	-2.608	-8.143	-25.994	
		-2.534	-8.05	-27.521	-2.610	-8.192	-2.608	-8.143	-25.994	
		-2.534	-8.05	-27.521	-2.610	-8.192	-2.605	-8.145	-25.999	
	8	-6.085	-0.205	-27.564	-6.194	-0.193	-6.290	-0.316	-25.023	
		-6.085	-0.205	-27.564	-6.197	-0.193	-6.295	-0.320	-24.995	
		-6.085	-0.205	-27.564	-6.203	-0.199	-6.294	-0.327	-25.034	
		-6.085	-0.205	-27.564	-6.200	-0.199	-6.293	-0.320	-25.057	
		-6.085	-0.205	-27.564	-6.205	-0.187	-6.298	-0.317	-25.013	
		-6.085	-0.205	-27.564	-6.194	-0.193	-6.290	-0.316	-25.023	
		-6.085	-0.205	-27.564	-6.203	-0.199	-6.298	-0.323	-25.029	
		-6.085	-0.205	-27.564	-6.191	-0.187	-6.292	-0.317	-24.962	
		-6.085	-0.205	-27.564	-6.194	-0.193	-6.290	-0.316	-25.023	
		-6.085	-0.205	-27.564	-6.194	-0.193	-6.290	-0.316	-25.023	
	9	5.999	-12.249	-27.506	5.922	-12.418	5.969	-12.358	-25.193	
		5.999	-12.249	-27.506	6.029	-12.303	5.960	-12.358	-25.053	
		5.999	-12.249	-27.506	6.029	-12.309	5.964	-12.363	-25.117	
		5.999	-12.249	-27.506	6.029	-12.309	5.966	-12.364	-25.120	
		5.999	-12.249	-27.506	5.922	-12.418	5.969	-12.358	-25.193	
		5.999	-12.249	-27.506	5.933	-12.422	5.977	-12.366	-25.267	
		5.999	-12.249	-27.506	5.923	-12.429	5.972	-12.370	-25.188	
		5.999	-12.249	-27.506	5.933	-12.422	5.977	-12.366	-25.267	
		5.999	-12.249	-27.506	6.035	-12.320	5.978	-12.368	-25.270	
		5.999	-12.249	-27.506	5.943	-12.426	5.984	-12.373	-25.343	
	10	-0.376	6.054	-27.479	-0.418	6.278	-0.476	6.021	-24.990	
		-0.376	6.054	-27.479	-0.418	6.278	-0.476	6.021	-24.990	
		-0.376	6.054	-27.479	-0.418	6.275	-0.473	6.024	-25.025	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Repeat	Point ID	Position in Coordinate Cartesian system (m)								
		RTK			UWB 2D Trilateration		UWB 3D Trilateration			
		X	Y	Z	X	Y	X	Y	Z	
	11	-0.376	6.054	-27.479	-0.418	6.278	-0.476	6.021	-24.990	
		-0.376	6.054	-27.479	-0.418	6.275	-0.473	6.024	-25.025	
		-0.376	6.054	-27.479	-0.409	6.270	-0.473	6.017	-24.996	
		-0.376	6.054	-27.479	-0.409	6.267	-0.469	6.020	-25.030	
		-0.376	6.054	-27.479	-0.409	6.262	-0.463	6.025	-25.102	
		-0.376	6.054	-27.479	-0.409	6.262	-0.463	6.025	-25.102	
		-0.376	6.054	-27.479	-0.401	6.270	-0.459	6.030	-25.071	
		8.016	6.281	-27.472	8.059	6.082	8.100	6.237	-25.574	
		8.016	6.281	-27.472	8.051	6.088	8.088	6.239	-25.615	
		8.016	6.281	-27.472	8.059	6.082	8.093	6.235	-25.616	
		8.016	6.281	-27.472	8.064	6.091	8.095	6.237	-25.666	
		8.016	6.281	-27.472	8.064	6.091	8.094	6.228	-25.721	
	8.016	6.281	-27.472	8.064	6.091	8.094	6.228	-25.721		
	8.016	6.281	-27.472	8.064	6.091	8.094	6.228	-25.721		
	8.016	6.281	-27.472	8.064	6.091	8.094	6.228	-25.721		
	8.016	6.281	-27.472	8.064	6.091	8.094	6.228	-25.721		
	8.016	6.281	-27.472	8.064	6.091	8.091	6.231	-25.716		
	8.016	6.281	-27.472	8.064	6.091	8.091	6.231	-25.716		
	12	7.894	14.035	-27.472	7.893	14.062	7.922	14.049	-27.316	
	7.894	14.035	-27.472	7.885	14.083	7.923	14.049	-27.510		
	7.894	14.035	-27.472	7.885	14.083	7.928	14.056	-27.354		
	7.894	14.035	-27.472	7.893	14.062	7.932	14.051	-27.229		
	7.894	14.035	-27.472	7.885	14.083	7.928	14.056	-27.354		
	7.894	14.035	-27.472	7.885	14.083	7.933	14.062	-27.258		
7.894	14.035	-27.472	7.885	14.083	7.928	14.056	-27.354			
7.894	14.035	-27.472	7.885	14.083	7.933	14.062	-27.258			
7.894	14.035	-27.472	7.885	14.083	7.928	14.056	-27.354			
7.894	14.035	-27.472	7.888	14.105	7.935	14.064	-27.498			
3	1	-12.107	3.825	-27.49	-12.224	3.805	-12.246	3.839	-28.135	
		-12.107	3.825	-27.49	-12.233	3.801	-12.249	3.839	-28.349	
		-12.107	3.825	-27.49	-12.233	3.801	-12.249	3.839	-28.349	
		-12.107	3.825	-27.49	-12.247	3.807	-12.256	3.837	-28.334	
		-12.107	3.825	-27.49	-12.237	3.810	-12.251	3.841	-28.258	
		-12.107	3.825	-27.49	-12.228	3.814	-12.246	3.845	-28.174	
		-12.107	3.825	-27.49	-12.228	3.814	-12.244	3.837	-28.010	
		-12.107	3.825	-27.49	-12.228	3.814	-12.239	3.832	-28.017	
		-12.107	3.825	-27.49	-12.228	3.814	-12.239	3.832	-28.017	
		-12.107	3.825	-27.49	-12.228	3.814	-12.244	3.837	-28.010	
	2	7.775	14.114	-27.481	7.865	13.982	7.804	14.154	-27.688	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Repeat	Point ID	Position in Coordinate Cartesian system (m)								
		RTK			UWB 2D Trilateration		UWB 3D Trilateration			
		X	Y	Z	X	Y	X	Y	Z	
		7.775	14.114	-27.481	7.844	13.980	7.794	14.152	-27.673	
		7.775	14.114	-27.481	7.865	14.017	7.806	14.149	-27.685	
		7.775	14.114	-27.481	7.844	14.015	7.797	14.147	-27.670	
		7.775	14.114	-27.481	7.865	14.002	7.802	14.153	-27.690	
		7.775	14.114	-27.481	7.856	13.997	7.794	14.161	-27.689	
		7.775	14.114	-27.481	7.673	14.222	7.801	14.162	-27.705	
		7.775	14.114	-27.481	7.888	14.010	7.808	14.170	-27.711	
		7.775	14.114	-27.481	7.719	14.238	7.816	14.171	-27.717	
		7.775	14.114	-27.481	7.888	14.010	7.808	14.170	-27.711	
	3	7.985	-4.272	-27.534	7.976	-4.321	7.994	-4.366	-28.767	
		7.985	-4.272	-27.534	7.985	-4.313	7.998	-4.362	-28.922	
		7.985	-4.272	-27.534	7.985	-4.313	7.998	-4.362	-28.922	
		7.985	-4.272	-27.534	7.985	-4.314	8.001	-4.359	-28.772	
		7.985	-4.272	-27.534	7.985	-4.308	7.996	-4.353	-28.880	
		7.985	-4.272	-27.534	7.989	-4.312	7.994	-4.358	-29.022	
		7.985	-4.272	-27.534	7.981	-4.321	7.995	-4.360	-28.721	
		7.985	-4.272	-27.534	7.986	-4.331	8.002	-4.368	-28.601	
		7.985	-4.272	-27.534	7.989	-4.319	8.004	-4.361	-28.776	
		7.985	-4.272	-27.534	7.989	-4.319	8.004	-4.361	-28.776	
	4	11.952	-3.903	-27.525	11.916	-4.023	11.963	-3.942	-25.377	
		11.952	-3.903	-27.525	11.916	-4.023	11.963	-3.942	-25.377	
		11.952	-3.903	-27.525	11.922	-4.014	11.968	-3.941	-25.456	
		11.952	-3.903	-27.525	11.929	-4.005	11.976	-3.933	-25.453	
		11.952	-3.903	-27.525	11.912	-4.011	11.963	-3.936	-25.393	
		11.952	-3.903	-27.525	11.929	-4.005	11.976	-3.933	-25.453	
		11.952	-3.903	-27.525	11.929	-4.005	11.976	-3.933	-25.453	
		11.952	-3.903	-27.525	11.929	-4.005	11.972	-3.938	-25.535	
		11.952	-3.903	-27.525	11.929	-4.005	11.978	-3.935	-25.456	
		11.952	-3.903	-27.525	11.929	-4.005	11.974	-3.940	-25.538	
	5	-4.306	2.05	-27.546	-4.312	2.124	-4.392	1.957	-24.954	
		-4.306	2.05	-27.546	-4.319	2.115	-4.398	1.956	-25.006	
		-4.306	2.05	-27.546	-4.326	2.108	-4.401	1.953	-25.040	
		-4.306	2.05	-27.546	-4.332	2.102	-4.404	1.949	-25.075	
		-4.306	2.05	-27.546	-4.332	2.103	-4.400	1.952	-25.108	
		-4.306	2.05	-27.546	-4.332	2.103	-4.400	1.952	-25.108	
		-4.306	2.05	-27.546	-4.332	2.103	-4.400	1.952	-25.108	
		-4.306	2.05	-27.546	-4.332	2.103	-4.400	1.952	-25.108	
		-4.306	2.05	-27.546	-4.332	2.103	-4.400	1.952	-25.108	
		-4.306	2.05	-27.546	-4.339	2.096	-4.403	1.949	-25.144	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Repeat	Point ID	Position in Coordinate Cartesian system (m)								
		RTK			UWB 2D Trilateration		UWB 3D Trilateration			
		X	Y	Z	X	Y	X	Y	Z	
6		-4.306	2.05	-27.546	-4.353	2.083	-4.409	1.941	-25.218	
		-2.166	-8.024	-27.553	-2.163	-8.086	-2.225	-8.096	-25.765	
		-2.166	-8.024	-27.553	-2.224	-8.151	-2.219	-8.098	-25.909	
		-2.166	-8.024	-27.553	-2.233	-8.157	-2.227	-8.105	-25.907	
		-2.166	-8.024	-27.553	-2.233	-8.157	-2.229	-8.107	-25.980	
		-2.166	-8.024	-27.553	-2.185	-8.093	-2.231	-8.105	-25.961	
		-2.166	-8.024	-27.553	-2.190	-8.098	-2.233	-8.108	-26.037	
		-2.166	-8.024	-27.553	-2.224	-8.151	-2.224	-8.105	-29.159	
		-2.166	-8.024	-27.553	-2.215	-8.158	-2.217	-8.107	-29.210	
		-2.166	-8.024	-27.553	-2.224	-8.163	-2.224	-8.118	-26.087	
7		-0.182	6.154	-27.483	-0.217	6.378	-0.276	6.128	-25.032	
		-0.182	6.154	-27.483	-0.225	6.387	-0.280	6.132	-25.026	
		-0.182	6.154	-27.483	-0.225	6.381	-0.273	6.138	-25.097	
		-0.182	6.154	-27.483	-0.217	6.370	-0.266	6.137	-25.140	
		-0.182	6.154	-27.483	-0.217	6.367	-0.263	6.139	-25.177	
		-0.182	6.154	-27.483	-0.225	6.361	-0.270	6.132	-25.172	
		-0.182	6.154	-27.483	-0.225	6.364	-0.273	6.129	-25.135	
		-0.182	6.154	-27.483	-0.225	6.361	-0.270	6.132	-25.172	
		-0.182	6.154	-27.483	-0.225	6.356	-0.263	6.138	-25.249	
		-0.182	6.154	-27.483	-0.217	6.350	-0.263	6.131	-25.216	
8		5.804	-12.137	-27.502	5.740	-12.293	5.771	-12.245	-25.522	
		5.804	-12.137	-27.502	5.751	-12.297	5.777	-12.250	-25.604	
		5.804	-12.137	-27.502	5.751	-12.297	5.777	-12.250	-25.604	
		5.804	-12.137	-27.502	5.751	-12.297	5.780	-12.247	-25.515	
		5.804	-12.137	-27.502	5.751	-12.297	5.777	-12.250	-25.604	
		5.804	-12.137	-27.502	5.750	-12.286	5.778	-12.242	-25.617	
		5.804	-12.137	-27.502	5.751	-12.297	5.779	-12.252	-25.607	
		5.804	-12.137	-27.502	5.762	-12.302	5.786	-12.253	-25.597	
		5.804	-12.137	-27.502	5.762	-12.302	5.783	-12.256	-25.691	
		5.804	-12.137	-27.502	5.753	-12.309	5.776	-12.259	-25.592	
9		-2.276	-1.899	-27.522	-2.287	-1.825	-2.314	-1.966	-25.121	
		-2.276	-1.899	-27.522	-2.288	-1.814	-2.318	-1.963	-25.032	
		-2.276	-1.899	-27.522	-2.288	-1.814	-2.322	-1.959	-25.038	
		-2.276	-1.899	-27.522	-2.287	-1.827	-2.318	-1.970	-25.079	
		-2.276	-1.899	-27.522	-2.288	-1.814	-2.322	-1.959	-25.038	
		-2.276	-1.899	-27.522	-2.280	-1.819	-2.315	-1.959	-25.084	
		-2.276	-1.899	-27.522	-2.280	-1.819	-2.315	-1.959	-25.084	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Repeat	Point ID	Position in Coordinate Cartesian system (m)								
		RTK			UWB 2D Trilateration		UWB 3D Trilateration			
		X	Y	Z	X	Y	X	Y	Z	
	10	-2.276	-1.899	-27.522	-2.287	-1.825	-2.317	-1.962	-25.127	
		-2.276	-1.899	-27.522	-2.287	-1.825	-2.314	-1.966	-25.121	
		-2.276	-1.899	-27.522	-2.288	-1.814	-2.318	-1.963	-25.032	
		7.954	5.892	-27.475	7.978	5.734	8.024	5.888	-25.533	
		7.954	5.892	-27.475	7.986	5.728	8.024	5.878	-25.582	
		7.954	5.892	-27.475	7.986	5.728	8.021	5.881	-25.577	
		7.954	5.892	-27.475	7.994	5.721	8.029	5.882	-25.532	
		7.954	5.892	-27.475	7.986	5.728	8.028	5.883	-25.535	
		7.954	5.892	-27.475	7.986	5.728	8.028	5.883	-25.535	
		7.954	5.892	-27.475	7.994	5.721	8.033	5.879	-25.537	
		7.954	5.892	-27.475	7.986	5.728	8.028	5.883	-25.535	
		7.954	5.892	-27.475	7.982	5.718	8.030	5.887	-25.443	
		7.954	5.892	-27.475	7.986	5.728	8.025	5.887	-25.530	
	11	-6.335	-0.034	-27.565	-6.406	-0.034	-6.509	-0.143	-25.030	
		-6.335	-0.034	-27.565	-6.415	-0.025	-6.513	-0.139	-25.024	
		-6.335	-0.034	-27.565	-6.415	-0.022	-6.508	-0.135	-25.052	
		-6.335	-0.034	-27.565	-6.406	-0.029	-6.503	-0.132	-25.106	
		-6.335	-0.034	-27.565	-6.409	-0.015	-6.504	-0.125	-25.065	
		-6.335	-0.034	-27.565	-6.409	-0.015	-6.504	-0.125	-25.065	
		-6.335	-0.034	-27.565	-6.400	-0.020	-6.496	-0.124	-25.100	
		-6.335	-0.034	-27.565	-6.409	-0.006	-6.491	-0.120	-25.105	
		-6.335	-0.034	-27.565	-6.409	-0.006	-6.491	-0.120	-25.105	
		-6.335	-0.034	-27.565	-6.409	-0.008	-6.495	-0.117	-25.124	
	12	5.845	16.192	-27.481	5.882	14.936	5.853	16.220	-27.638	
		5.845	16.192	-27.481	5.896	15.217	5.857	16.236	-27.650	
		5.845	16.192	-27.481	5.884	15.415	5.856	16.226	-27.637	
		5.845	16.192	-27.481	5.884	15.205	5.852	16.230	-27.642	
		5.845	16.192	-27.481	5.884	15.205	5.852	16.230	-27.642	
		5.845	16.192	-27.481	5.872	15.193	5.847	16.223	-27.633	
		5.845	16.192	-27.481	5.884	15.205	5.852	16.230	-27.642	
		5.845	16.192	-27.481	5.884	15.415	5.856	16.226	-27.637	
		5.845	16.192	-27.481	5.884	15.415	5.856	16.226	-27.637	
		5.845	16.192	-27.481	5.884	15.415	5.856	16.226	-27.637	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4ข พิกัด UTM และคุณภาพการระบุตำแหน่งด้วย RTK GNSS การศึกษาอิทธิพลของระยะห่างระหว่างโมดูล และทิศทางการวัดระยะ

ID Point	UTM			PDOP	HDOP	VDOP
	E	N	Elevation			
anchor 1	691292.725	1517935.961	-27.025	1.25	0.59	1.10
anchor 2	691293.198	1517935.982	-27.051	1.25	0.59	1.10
anchor 3	691293.477	1517935.939	-27.105	1.26	0.61	1.11
anchor 4	691293.782	1517935.964	-27.026	1.31	0.60	1.16
tag 5 m	691293.363	1517940.852	-27.137	1.12	0.60	0.95
tag 10 m	691293.393	1517945.848	-27.095	1.07	0.59	0.89
tag 25 m	691292.994	1517960.780	-27.145	1.22	0.62	1.05
tag 50 m	691295.688	1517988.556	-27.077	1.19	0.61	1.03
tag 75 m	691296.204	1518010.465	-27.182	1.08	0.59	0.91
tag 100 m	691294.597	1518038.750	-27.251	1.23	0.58	1.08
tag 150 m	691294.114	1518087.649	-27.305	1.29	0.66	1.11
tag 200 m	691293.211	1518137.833	-27.259	1.09	0.56	0.93
tag 250 m	691282.220	1518189.961	-27.433	1.26	0.67	1.07
tag 300 m	691289.609	1518240.736	-27.699	1.10	0.61	0.92
tag 350 m	691287.735	1518285.524	-27.836	1.02	0.59	0.84

ตารางที่ 5ข พิกัด UTM และคุณภาพการระบุตำแหน่งด้วย RTK GNSS การทดลองการระบุตำแหน่งนอกอาคาร

ID Point	UTM			PDOP	HDOP	VDOP
	E	N	Elevation			
anchor 1	691641.021	1518178.117	-18.881	1.1	0.7	0.8
anchor 2	691625.989	1518177.592	-18.889	1.1	0.7	0.8
anchor 3	691625.481	1518192.602	-18.945	1.1	0.7	0.8
anchor 4	691640.484	1518193.104	-18.941	1.1	0.7	0.8
tag 1	691639.281	1518192.183	-18.92	1	0.6	0.8
tag 2	691635.604	1518192.025	-18.935	1	0.6	0.8
tag 3	691630.714	1518191.873	-18.932	1	0.6	0.8
tag 4	691626.718	1518191.805	-18.954	1	0.6	0.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ID Point	UTM			PDOP	HDOP	VDOP
	E	N	Elevation			
tag 5	691626.766	1518187.656	-18.916	1	0.6	0.8
tag 6	691630.783	1518187.898	-18.913	1	0.6	0.8
tag 7	691635.761	1518187.994	-18.897	1	0.6	0.8
tag 8	691639.401	1518188.217	-18.866	1	0.6	0.8
tag 9	691639.476	1518184.289	-18.847	1	0.6	0.8
tag 10	691635.931	1518184.096	-18.837	1	0.6	0.8
tag 11	691631.259	1518183.891	-18.854	1	0.6	0.8
tag 12	691626.933	1518183.788	-18.858	1	0.6	0.8
tag 13	691627.129	1518179.419	-18.888	1	0.6	0.8
tag 14	691631.27	1518179.907	-18.893	1	0.6	0.8
tag 15	691635.975	1518180.16	-18.876	1	0.6	0.8
tag 16	691639.387	1518180.058	-18.88	1	0.6	0.8
tag 17	691639.568	1518179.316	-18.885	1	0.6	0.8
tag 18	691636.069	1518179.363	-18.875	1	0.6	0.8
tag 19	691631.592	1518179.313	-18.892	1	0.6	0.8
tag 20	691627.541	1518179.067	-18.903	1	0.6	0.8
tag 21	691627.301	1518183.236	-18.838	1	0.6	0.8
tag 22	691631.136	1518183.5	-18.848	1	0.6	0.8
tag 23	691635.776	1518183.711	-18.843	1	0.6	0.8
tag 24	691639.358	1518183.825	-18.849	1	0.6	0.8
tag 25	691639.298	1518188.613	-18.883	1	0.6	0.8
tag 26	691635.686	1518188.564	-18.868	1	0.6	0.8
tag 27	691631.106	1518188.424	-18.887	1	0.6	0.8
tag 28	691626.843	1518188.318	-18.885	1	0.6	0.8
tag 29	691626.756	1518190.953	-18.956	1	0.6	0.8
tag 30	691631.081	1518191.342	-18.935	1	0.6	0.8
tag 31	691635.58	1518191.502	-18.921	1	0.6	0.8
tag 32	691638.918	1518191.673	-18.901	1	0.6	0.8
tag 33	691639.247	1518192.036	-18.917	1	0.6	0.8
tag 34	691635.464	1518191.859	-18.912	1	0.6	0.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ID Point	UTM			PDOP	HDOP	VDOP
	E	N	Elevation			
tag 35	691630.917	1518191.689	-18.92	1	0.6	0.8
tag 36	691626.678	1518191.429	-18.954	1	0.6	0.8
tag 37	691626.871	1518187.733	-18.899	1	0.6	0.8
tag 38	691630.827	1518187.803	-18.903	1	0.6	0.8
tag 39	691635.42	1518187.878	-18.888	1	0.6	0.8
tag 40	691639.198	1518187.802	-18.866	1	0.6	0.8
tag 41	691639.227	1518183.692	-18.848	1	0.6	0.8
tag 42	691635.843	1518183.506	-18.851	1	0.6	0.8
tag 43	691631.586	1518183.244	-18.846	1	0.6	0.8
tag 44	691627.108	1518183.065	-18.871	1	0.6	0.8
tag 45	691627.285	1518179.503	-18.891	1	0.6	0.8
tag 46	691631.349	1518179.649	-18.89	1	0.6	0.8
tag 47	691635.873	1518179.811	-18.872	1	0.6	0.8
tag 48	691639.435	1518179.82	-18.874	1	0.6	0.8

ตารางที่ 6ข พิกัด UTM และคุณภาพการระบุตำแหน่งด้วย RTK GNSS การทดลองการระบุตำแหน่ง
ในแปลงทดสอบ

ID Point	UTM			PDOP	HDOP	VDOP
	E	N	Elevation			
anchor 1	691676.360	1518047.671	-27.619	1	0.56	0.83
anchor 2	691641.291	1518047.740	-27.556	1.01	0.57	0.83
anchor 3	691641.343	1518012.704	-27.651	1.06	0.6	0.87
anchor 4	691676.314	1518012.704	-27.602	0.97	0.55	0.8
tag 1	691667.158	1518044.272	-27.564	0.99	0.56	0.82
tag 2	691664.557	1518046.477	-27.56	1	0.57	0.82
tag 3	691666.331	1518036.188	-27.581	0.97	0.56	0.79
tag 4	691654.664	1518032.517	-27.64	1.13	0.64	0.93
tag 5	691658.757	1518036.365	-27.564	1.13	0.64	0.93
tag 6	691646.992	1518034.372	-27.547	1.05	0.59	0.86
tag 7	691656.438	1518022.314	-27.632	1.04	0.59	0.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ID Point	UTM			PDOP	HDOP	VDOP
	E	N	Elevation			
tag 8	691664.787	1518018.067	-27.59	1.13	0.64	0.93
tag 9	691666.791	1518026.505	-27.641	1.04	0.59	0.86
tag 10	691670.966	1518026.548	-27.61	1.1	0.6	0.92
tag 11	691656.189	1518028.196	-27.63	1.1	0.6	0.92
tag 12	691652.506	1518030.354	-27.659	1.1	0.6	0.92
tag 13	691656.84	1518027.969	-27.614	1.05	0.6	0.87
tag 14	691666.999	1518026.219	-27.626	1.1	0.6	0.92
tag 15	691670.924	1518026.464	-27.607	1.04	0.58	0.86
tag 16	691646.823	1518033.93	-27.566	1.03	0.56	0.86
tag 17	691654.906	1518031.977	-27.66	1.02	0.57	0.85
tag 18	691664.699	1518046.264	-27.549	1.13	0.61	0.95
tag 19	691656.287	1518022.144	-27.621	1.13	0.61	0.95
tag 20	691652.736	1518029.989	-27.664	1.14	0.61	0.96
tag 21	691664.82	1518017.945	-27.606	1.12	0.59	0.95
tag 22	691658.445	1518036.248	-27.579	1.14	0.62	0.96
tag 23	691666.837	1518036.475	-27.572	1.22	0.64	1.04
tag 24	691666.715	1518044.229	-27.572	1.15	0.63	0.96
tag 25	691646.714	1518034.019	-27.59	1.23	0.64	1.05
tag 26	691666.596	1518044.308	-27.581	1.24	0.64	1.06
tag 27	691666.806	1518025.922	-27.634	1.21	0.64	1.02
tag 28	691670.773	1518026.291	-27.625	1.27	0.68	1.08
tag 29	691654.515	1518032.244	-27.646	1.16	0.61	0.98
tag 30	691656.655	1518022.17	-27.653	1.11	0.61	0.92
tag 31	691658.639	1518036.348	-27.583	1.16	0.61	0.98
tag 32	691664.625	1518018.057	-27.602	1.28	0.68	1.09
tag 33	691656.545	1518028.295	-27.622	1.28	0.68	1.09
tag 34	691666.775	1518036.086	-27.575	1.29	0.68	1.09
tag 35	691652.486	1518030.16	-27.665	1.29	0.68	1.09
tag 36	691664.666	1518046.386	-27.581	1.15	0.62	0.97

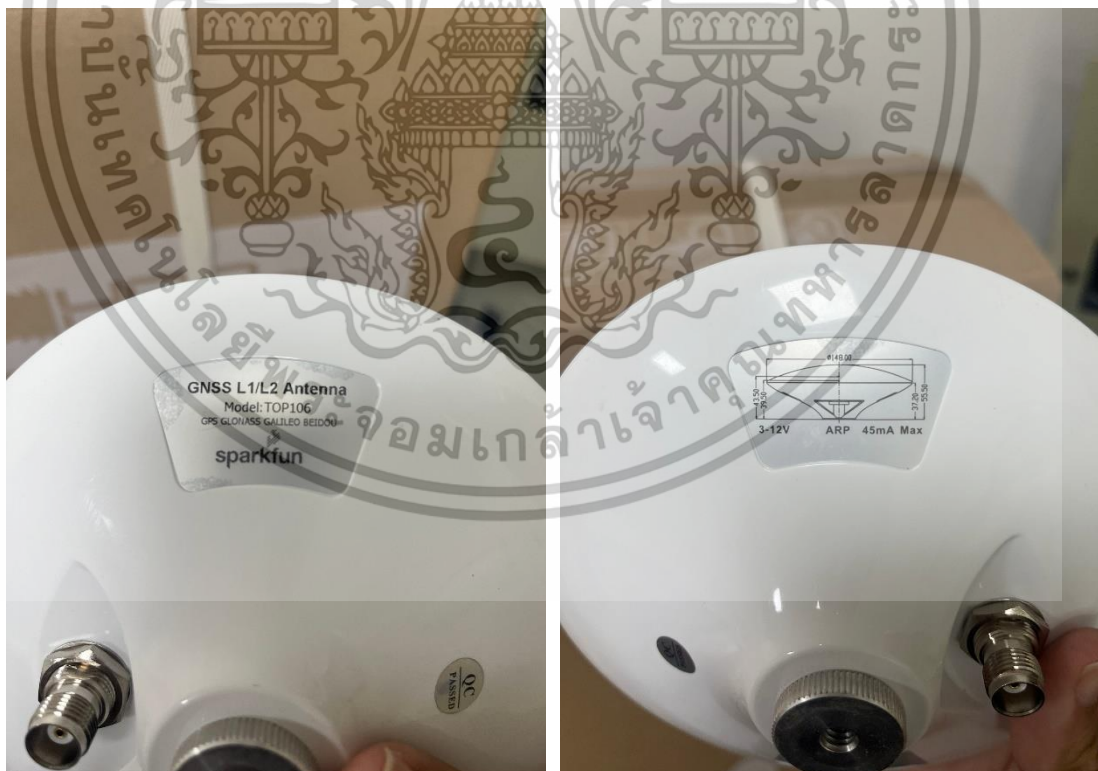
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1ค RTK Surveying Kit, Sparkfun Electronic Inc., Colorado, USA



รูปที่ 2ค เส้าอากาศ GNSS L1/L2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1ค ลักษณะจำเพาะของ RTK GNSS

คุณสมบัติ	รายละเอียด
GNSS Receiver	ZED-F9P
ระบบดาวเทียม	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou
ย่านความถี่	L1C/A, L2C
ความแม่นยำของตำแหน่ง แนวนอน	2.5 ม. (standalone), 1.4 ซม. (RTK)
อัตราการนำทางสูงสุด	25Hz (PVT), 20Hz (RTK), 25Hz (Raw)
เวลาในการรับตำแหน่งครั้งแรก	25 วินาที (cold start), 2 วินาที (hot start)
Bluetooth Transceiver	ESP32 WROOM
ไมโครโพรเซสเซอร์	Xtensa® dual-core 32-bit LX6
ความเร็วสัญญาณนาฬิกา	สูงสุด 240MHz
หน่วยความจำแฟลช	16MB
SRAM ภายใน	520kB
คุณสมบัติทั่วไป	
แบตเตอรี่ภายใน	LiPo 1000mAh (ชาร์จ 500mA)
พอร์ตวิทยุ	3.3V TTL Serial (57600bps RTCM TX/RX)
พอร์ตข้อมูล	3.3V TTL Serial (115200bps NMEA)
น้ำหนัก	132 กรัม (รวมแบตเตอรี่)
ขนาด	118 x 79 x 30 มม.
อื่นๆ	ช่องเสียบ Qwiic, ช่องเสียบ microSD, รองรับซอฟต์แวร์ GIS ทั่วไป

ตารางที่ 2ค ลักษณะจำเพาะของ MaUWB

คุณสมบัติ	รายละเอียด
โมดูล UWB	Decawave DW3000
ไมโครคอนโทรลเลอร์	STM32 และ ESP32
การเชื่อมต่อ	UART (ผ่าน RX/TX)
เสาอากาศ	เสาอากาศแบบ PCB บนบอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติ	รายละเอียด
ช่วงการวัดระยะทาง	สูงสุด 500 เมตร (ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อม)
ความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง	ประมาณ 0.5 เมตร (ในระยะ 100 เมตร)
จำนวนโมดูลที่รองรับ	8 Anchors + 64 Tags
การจัดการสัญญาณรบกวน	มีการจัดการสัญญาณรบกวนระหว่าง Anchor และ Tag หลายตัว
แรงดันไฟฟ้า	3.3V - 5V
อัตราการส่งข้อมูล	สูงสุด 6.8 Mbps
คุณสมบัติอื่นๆ	รองรับโหมด Sleep เพื่อประหยัดพลังงาน มีไฟ LED แสดงสถานะการทำงาน ใช้งานสะดวกด้วยชุดคำสั่ง AT command เหมาะสำหรับการใช้งานในอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นาย ชานน ธิติกุลวัฒน์
วัน เดือน ปีเกิด	25 มิถุนายน 2543 ที่จังหวัดตราด
ที่อยู่	359/1 หมู่ 1 ตำบลแสนตุง อำเภอเขาสมิง จังหวัดตราด รหัสไปรษณีย์ 23150
โทรศัพท์	+66 9826 71760
E-mail	66016025@kmitl.ac.th
ประวัติการศึกษา:	
2565	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร (เกียรตินิยมอันดับ 1) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย:	
2564	ส่งผลงานเข้าร่วมการประชุม The 14 th TSAE International Conference and The 22 nd TSAE National Conference: TSAE 2021 วันที่ 12-12 พฤษภาคม 2564 เรื่อง การออกแบบและพัฒนาเครื่องหั่นมันสำปะหลังแบบเต๋า (Design and Development of Cassava Cube Cutting Machine)
2567	ส่งผลงานเข้าร่วมการประชุม The 17 th TSAE International Conference and The 25 nd TSAE National Conference: TSAE 2024 วันที่ 22-24 พฤษภาคม 2567 เรื่อง การระบุตำแหน่งในแปลงเกษตรด้วยเทคโนโลยีคลื่นวิทยุแถบความถี่กว้างยิ่งยวด (Field Position using Ultra-Wideband Technology)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้