

Chulalongkorn University

## Chula Digital Collections

---

Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)

---

2022

การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการระบุตำแหน่งของวัตถุขนระนาบ 2 มิติ  
สำหรับระบบสัญญาณไร้สายที่ใช้เซนเซอร์คลื่นความถี่แถบกว้าง

พรพัฒน์ ชิวสุนทร  
คณะวิศวกรรมศาสตร์

Follow this and additional works at: <https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd>



Part of the [Applied Mechanics Commons](#), and the [Engineering Mechanics Commons](#)

---

### Recommended Citation

ชิวสุนทร, พรพัฒน์, "การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากการระบุตำแหน่งของวัตถุขนระนาบ 2 มิติ สำหรับระบบสัญญาณไร้สายที่ใช้เซนเซอร์คลื่นความถี่แถบกว้าง" (2022). *Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD)*. 6523.  
<https://digital.car.chula.ac.th/chulaetd/6523>

This Thesis is brought to you for free and open access by Chula Digital Collections. It has been accepted for inclusion in Chulalongkorn University Theses and Dissertations (Chula ETD) by an authorized administrator of Chula Digital Collections. For more information, please contact [ChulaDC@car.chula.ac.th](mailto:ChulaDC@car.chula.ac.th).

การปรับปรุงค่าความผิดพลาดจากการระบุตำแหน่งของวัตถุบนระนาบ 2 มิติ สำหรับระบบสัญญาณ  
ไร้สายที่ใช้เซนเซอร์คลื่นความถี่แถบกว้าง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2565  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Error Correction for 2D Indoor Wireless Positioning System Using Ultra-Wideband  
Sensor



Mr. Phornpat Chewasoonthorn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering  
Department of Mechanical Engineering  
FACULTY OF ENGINEERING  
Chulalongkorn University  
Academic Year 2022  
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงค่าความผิดพลาดจากการระบุตำแหน่งของวัตถุ
	บนระนาบ 2 มิติ สำหรับระบบสัญญาณไร้สายที่ใช้เซนเซอร์
	คลื่นความถี่แถบกว้าง
โดย	นายพรพัฒน์ ชิวสุนทร
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.สุรัฐ ขวัญเมือง

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วัฒนสุโขประสิทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(อาจารย์ ดร.สุรัฐ ขวัญเมือง)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษฏา พนมแข็ง)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศกร บำรุงไทย)

พรพัฒน์ ชีวสุนทร : การปรับปรุงค่าความผิดพลาดจากการระบุตำแหน่งของวัตถุบน  
ระนาบ 2 มิติ สำหรับระบบสัญญาณไร้สายที่ใช้เซนเซอร์คลื่นความถี่แถบกว้าง. ( Error  
Correction for 2D Indoor Wireless Positioning System Using Ultra-Wideband  
Sensor) อ.ที่ปรึกษาหลัก : อ. ดร.สุรัฐ ขวัญเมือง

ในปัจจุบันการระบุตำแหน่งภายในอาคารถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในวงกว้าง ใน  
งานวิจัยนี้นำเสนอถึงการปรับปรุงค่าความผิดพลาดของการระบุตำแหน่งในอาคารด้วยเซนเซอร์ที่ใช้  
คลื่นความถี่แถบกว้าง เซนเซอร์จะถูกติดตั้งอยู่ประจำจุดต่าง ๆ ในพื้นที่ทดลองและจะส่งสัญญาณ  
ไปหาเซนเซอร์ตัวที่ต้องการที่จะระบุตำแหน่งที่เคลื่อนที่ไปรอบ ๆ โดยใช้การสื่อสารแบบสองทาง  
ระหว่างเซนเซอร์เพื่อให้ได้ระยะห่างระหว่างเซนเซอร์ ค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์นั้นมีค่าความผิดพลาด  
อยู่ร่วม 1 เมตร เพื่อที่จะลดค่าความผิดพลาดและเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่งจึงได้มีการ  
ใช้การวิเคราะห์การถดถอยมาเพื่อหาสมการที่เข้ากับรูปแบบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากเซนเซอร์  
และใช้ตัวกรองคาลมานในการลดค่าความผิดพลาดแบบออนไลน์ ผลลัพธ์ที่ได้นั้นสามารถลดความ  
ผิดพลาดลงไปได้เหลือ 5 เซนติเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล  
ปีการศึกษา 2565

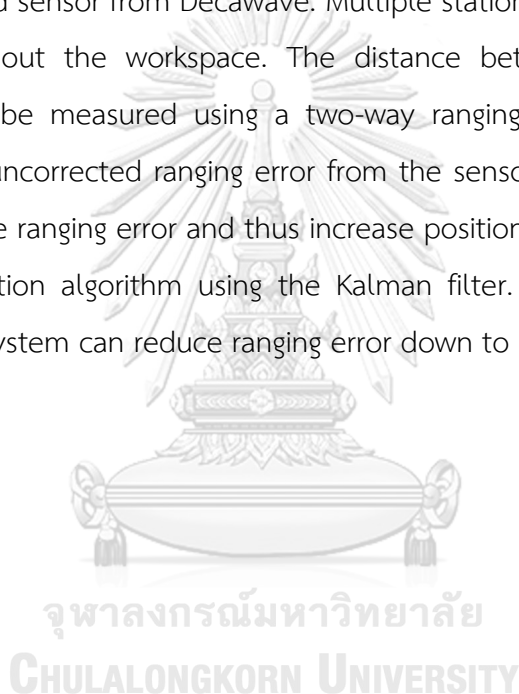
ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 6270175021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORD: Indoor Positioning, Ultra-Wideband, Error Correction, Kalman Filter

Phornpat Chewasoonthorn : Error Correction for 2D Indoor Wireless Positioning System Using Ultra-Wideband Sensor. Advisor: SURAT KWANMUANG, Ph.D.

Indoor positioning technologies have evolved rapidly. In this study, we developed an error correction method for an indoor positioning system based on an ultra-wideband sensor from Decawave. Multiple stationary nodes (anchors) were installed throughout the workspace. The distance between fixed and moving nodes (tag) can be measured using a two-way ranging scheme. The result has shown that the uncorrected ranging error from the sensor system can be as large as 1 m. To reduce ranging error and thus increase positioning accuracy, we propose an online correction algorithm using the Kalman filter. Experiment results have shown that the system can reduce ranging error down to 5 cm.



Field of Study: Mechanical Engineering

Student's Signature .....

Academic Year: 2022

Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

พรพัฒน์ ชีวสุนทร



## สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 การระบุตำแหน่งภายในอาคาร.....	4
2.2 เทคโนโลยีของเซนเซอร์คลื่นความถี่แถบกว้าง .....	9
2.3 เทคโนโลยีของการระบุตำแหน่งแบบไร้สายภายในอาคาร .....	10
2.4 การปรับปรุงค่าความผิดพลาดจากการระบุตำแหน่งของวัตถุโดยใช้เซนเซอร์คลื่นความถี่แถบ กว้างด้วยวิธีการต่าง ๆ .....	14
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	16
3.1 การวิเคราะห์การถดถอย .....	16



3.2 ตัวกรองกาลมาน .....	16
3.3 การระบุตำแหน่งของวัตถุบนระนาบ 2 มิติ .....	18
บทที่ 4 วิธีดำเนินการ .....	22
4.1 ฮาร์ดแวร์ .....	22
4.2 ระบบการทำงานของกรับข้อมูลในเครือข่ายของคลื่นความถี่แถบกว้าง .....	23
4.3 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากเซนเซอร์ .....	24
4.4 การหาค่าความผิดพลาดจากเซนเซอร์คลื่นความถี่แถบกว้างด้วยการวิเคราะห์การถดถอย....	25
4.5 การปรับปรุงค่าความผิดพลาดด้วยตัวกรองกาลมาน.....	28
บทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง .....	33
5.1 การปรับปรุงค่าความผิดพลาดของระยะห่างระหว่างเซนเซอร์แบบ Offline .....	33
5.2 การปรับปรุงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งวัตถุแบบ Online .....	37
บทที่ 6 สรุปผล .....	45
บรรณานุกรม.....	46
ประวัติผู้เขียน .....	51

## สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเทคโนโลยีในการระบุตำแหน่งโดยใช้สัญญาณไร้สาย ภายในอาคารชนิดต่าง ๆ .....	8
ตารางที่ 3.1 สมการตัวกรองคาลมานสำหรับหลายข้อมูลใน 1 ระบบ .....	18
ตารางที่ 5.1 ค่าคงที่ของตัวแปรภายในที่ได้จากการหาด้วยการวิเคราะห์การถดถอยในรูปแบบสมการ ต่าง ๆ.....	36
ตารางที่ 5.2 ตารางตำแหน่งของ Anchor Node ในการทดลองที่ 2.1.....	41
ตารางที่ 5.3 ตารางตำแหน่งของจุดอ้างอิงและจุดที่ได้จากการทดสอบในการทดลองที่ 2.1.....	41
ตารางที่ 5.4 ตารางตำแหน่งของ Anchor Node ในการทดลองที่ 2.2.....	43
ตารางที่ 5.5 ตารางตำแหน่งของจุดอ้างอิงและจุดที่ได้จากการทดสอบในการทดลองที่ 2.2.....	44

## สารบัญรูปภาพ

### หน้า

รูปที่ 2.1 ช่วงการทำงานของสัญญาณคลื่นความถี่ UWB และสัญญาณอื่น ๆ .....	6
รูปที่ 2.2 รูปแบบคลื่นที่แสดงการรับสัญญาณทางตรงและสัญญาณจากการสะท้อน [15].....	6
รูปที่ 2.3 รูปแบบคลื่นที่มีการแทรกของสัญญาณรบกวน [15] .....	6
รูปที่ 2.4 วิธีการระบุตำแหน่งของเซนเซอร์โดยใช้วิธี Time of Arrival [22].....	11
รูปที่ 2.5 วิธีการระบุตำแหน่งของเซนเซอร์โดยใช้วิธี Different Time of Arrival [22].....	12
รูปที่ 2.6 วิธีการหาระยะทางของเซนเซอร์โดยใช้วิธี SS-TWR [25] .....	13
รูปที่ 2.7 วิธีการหาระยะทางของเซนเซอร์โดยใช้วิธี DS-TWR [25] .....	14
รูปที่ 3.1 ผลของการประมาณค่าของข้อมูลด้วยตัวกรองคาลมานเทียบกับเวลา [30].....	17
รูปที่ 3.2 ตำแหน่งที่เกิดจากจุดตัดของเส้นรอบวงกลม 3 วง.....	18
รูปที่ 3.3 รูปแบบการเกิดจุดตัดของวงกลม 3 วงภายในพื้นที่ 3 เหลี่ยม [32].....	20
รูปที่ 3.4 รูปแบบการคลาดเคลื่อนของจุดตัดที่เกิดจากวงกลม 3 วง [33] .....	21
รูปที่ 3.5 พิกัดตำแหน่งที่เกิดจากจุดตัดของเส้นตรง 2 เส้นภายในวงกลม 2 วง [34] .....	21
รูปที่ 4.1 อุปกรณ์สำหรับการวัดระยะด้วยคลื่นความถี่แถบกว้าง .....	22
รูปที่ 4.2 เซนเซอร์คลื่นความถี่แถบกว้าง DWM1000 .....	22
รูปที่ 4.3 การทดสอบความเสถียรของเสาส่งสัญญาณ .....	23
รูปที่ 4.4 แผนผังการทำงานของ การรับ - ส่งข้อมูลของเซนเซอร์คลื่นความถี่แถบกว้าง .....	23
รูปที่ 4.5 การทดสอบระยะทางระหว่างเซนเซอร์ .....	24
รูปที่ 4.6 แผนภาพการทำงานของ การปรับปรุงค่าความผิดพลาดจากการระบุตำแหน่งของวัตถุ .....	32
รูปที่ 5.1 การทดสอบระยะทางระหว่างเซนเซอร์ .....	34
รูปที่ 5.2 กราฟแสดงตำแหน่งของระยะทางที่วัดได้เทียบกับระยะทางจริง .....	34
รูปที่ 5.3 ค่าความผิดพลาดของระยะทางที่ได้จากเซนเซอร์เทียบกับระยะทางจริง .....	35

รูปที่ 5.4 กราฟแสดงการใช้สมการถดถอยแบบเส้นตรง แบบกำลังสอง และแบบลอการิทึม ในการลดค่าความผิดพลาดของระยะที่เกิดขึ้นจากแต่ละเซนเซอร์.....	37
รูปที่ 5.5 เส้นทางการเคลื่อนที่ของ Tag node ใน Simulation.....	38
รูปที่ 5.6 ค่าความผิดพลาดที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับ Step การทำงานในโปรแกรมคำนวณ .....	38
รูปที่ 5.7 ค่าตัวแปรภายในของการทำงานภายใน 100 รอบ .....	39
รูปที่ 5.8 ค่าตัวแปรภายในของการทำงานภายใน 100,000 รอบ .....	39
รูปที่ 5.9 สถานที่ทดสอบการปรับปรุงค่าความผิดพลาดจากการระบุตำแหน่งบนระนาบ 2 มิติ .....	40
รูปที่ 5.10 ตำแหน่งที่ได้จากการปรับปรุงค่าความผิดพลาด .....	40
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของระยะระหว่างเซนเซอร์ทั้งก่อนและหลังการลดค่าความผิดพลาด.....	42
รูปที่ 5.12 เส้นทางและตำแหน่งของการเคลื่อนที่ของ Tag.....	43

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

การระบุตำแหน่ง (Positioning) ของวัตถุเป็นที่นิยมอย่างมากและเป็นความต้องการของโลกในยุคปัจจุบัน การระบุตำแหน่งได้ถูกใช้อย่างแพร่หลายทั้งในโรงงานอุตสาหกรรมหรือแม้แต่ในชีวิตประจำวันทั่วไปของมนุษย์ ตัวอย่างในโรงงานอุตสาหกรรมเช่น การทำให้หุ่นยนต์หยิบจับชิ้นงานรู้ตำแหน่งของปลายแขนในการหยิบชิ้นงานได้แม่นยำ หรือการระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่ใช้ขนส่งสินค้าในคลังสินค้า การใช้งานทั่วไปเช่นการติดตามตำแหน่งของยานพาหนะ ไม่ว่าจะเป็น รถยนต์, เรือ หรือเครื่องบิน การที่จะทราบพิกัดของจุดหรือตำแหน่งของวัตถุในระบบใด ๆ นั้น จะต้องมีข้อมูลจากหลายส่วนรวมเข้าด้วยกัน คือตำแหน่งของจุดอ้างอิงและระยะห่างระหว่างจุดอ้างอิงจนถึงวัตถุสนใจจะระบุตำแหน่ง ยกตัวอย่างเช่นการระบุตำแหน่งจุดในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian Coordinate System) ที่จำเป็นจะต้องรู้ค่าของแกนแนวนอน และแกนแนวตั้ง ที่เทียบกับจุดกำเนิด หรือ ระบบพิกัดเชิงมุม (Polar Coordinate System) ที่ต้องการค่าตัวแปรสองตัวในการหาตำแหน่ง คือ ระยะห่างจากจุดกำเนิดขึ้นไปถึงพิกัดนั้น ๆ และมุมระหว่างเส้นของจุดที่เราสนใจกับเส้นมาตรฐาน การระบุตำแหน่งแบ่งเป็นสองแบบหลัก ๆ คือ การระบุตำแหน่งโดยใช้สาย (Wired Sensor Network) และการระบุตำแหน่งแบบเครือข่ายไร้สาย (Wireless Sensor Network) ซึ่งการระบุตำแหน่งโดยใช้สายนั้นจะมีข้อจำกัดในการทำงานคือจะต้องมีการสื่อสารกันผ่านการใช้สาย หากมีวัตถุหลายชิ้นที่ต้องการระบุตำแหน่งจะทำให้ต้นทุนในการติดตั้งสูงและการทำงานจะยุ่งยาก ต่างจากการระบุตำแหน่งด้วยสัญญาณไร้สาย (Wireless Localization) ที่มีความยืดหยุ่นในการทำงานที่สูงกว่าเหมาะกับการใช้งานในโลกปัจจุบัน

การระบุตำแหน่งแบบเครือข่ายไร้สาย หรือ การระบุตำแหน่งด้วยสัญญาณไร้สาย คือ การระบุตำแหน่งโดยที่ไม่ต้องวัดระยะทางจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดที่สนใจด้วยตัวเอง สามารถแบ่งออกได้เป็นการระบุตำแหน่งภายนอกอาคาร (Outdoor Positioning System) และการระบุตำแหน่งภายในอาคาร (Indoor Positioning System: IPS) โดยการระบุตำแหน่งภายนอกอาคารด้วยสัญญาณไร้สาย ยกตัวอย่างเช่น การติดตามตำแหน่งด้วยสัญญาณระบบระบุตำแหน่งบนพื้นโลก หรือ Global Positioning System (GPS) ที่มีอยู่ในโทรศัพท์มือถือทั่วไป สามารถใช้ในการบอกเส้นทาง และ

สามารถคำนวณระยะเวลาจากตำแหน่งที่อยู่ปัจจุบันไปถึงตำแหน่งที่ต้องการได้ ซึ่งเส้นทางของสัญญาณจากตัวรับและตัวส่งสัญญาณจะต้องเป็นเส้นทางที่ปราศจากสิ่งกีดขวาง (Line of Sight: LOS) ถ้าหากตัวรับสัญญาณอยู่ภายในอาคารแล้ว สัญญาณของ GPS จะไม่สามารถเข้าไปถึงได้ ทำให้ตำแหน่งที่ได้นั้นมีความผิดพลาดจากตำแหน่งจริงอยู่มาก จึงต้องมีการระบุตำแหน่งภายในอาคารด้วยสัญญาณไร้สาย โดยการระบุตำแหน่งด้วยสัญญาณไร้สายภายในอาคารนั้นสามารถทำได้หลากหลายวิธีด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่นการใช้คลื่นเสียง Ultrasonic ที่ส่งคลื่นเสียงออกไปกระทบกับวัตถุและสะท้อนกลับมาทำให้คำนวณหาระยะทางได้ หรือการใช้แสง Infrared ที่จะทำงานคล้ายกับการส่งคลื่นเสียงแต่เปลี่ยนเป็นการใช้แสงแทน การใช้กล้องในการจับภาพเพื่อนำภาพมาระบุตำแหน่งหรือการใช้สัญญาณอินเทอร์เนตเครือข่ายไร้สายเพื่อนำความเข้มของสัญญาณมาระบุตำแหน่งก็สามารถทำได้เช่นกัน [1] ในปี 2001 ได้มีการสำรวจพฤติกรรมของประชากร 9,196 คนพบว่าพฤติกรรมของผู้คนเหล่านี้ได้ใช้เวลา 86.9 % ของเวลาทั้งหมดไปกับการอยู่ภายในอาคารบ้านเรือน [2] แต่เรื่องของตลาดการให้บริการในด้านการบอกตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ (Location Based Service: LBS) นั้นกลับยังไม่เป็นที่นิยมมากเท่าไร เนื่องจากคุณภาพและประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งของเทคโนโลยีการระบุตำแหน่งด้วยสัญญาณไร้สายนั้นยังไม่มากพอ ทำให้เกิดข้อกังวลเกี่ยวกับความปลอดภัยและความไม่แน่นอนของการระบุตำแหน่ง [3]

ในงานวิจัยนี้นำเสนอวิธีการระบุตำแหน่งด้วยคลื่นความถี่แถบกว้างหรือเรียกอีกอย่างว่า Ultra-Wideband (UWB) ซึ่งเป็นการระบุตำแหน่งแบบไร้สายภายในอาคารและสามารถนำไปปรับใช้ภายนอกอาคารได้เช่นกัน ความสามารถในการระบุตำแหน่งโดยใช้ UWB คือสามารถระบุตำแหน่งวัตถุหรือบุคคลได้อย่างรวดเร็วและค่าที่ได้จะมีความเที่ยงตรงสูงเนื่องจาก UWB คือคลื่นความถี่แถบกว้าง จะไม่โดนสัญญาณชนิดอื่น ๆ หรือสิ่งกีดขวางภายในอาคารมารบกวน ทำให้ทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีสิ่งกีดขวางได้ (Non-Line of Sight: NLOS) ตัวเซนเซอร์ที่ใช้เทคโนโลยี UWB นั้นใช้พลังงานต่ำ, ขนาดเล็ก และมีการส่งข้อมูลระหว่างเซนเซอร์ที่รวดเร็ว ทำให้มีความคล่องตัวและประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้งาน ในงานวิจัยนี้ทดลองการระบุตำแหน่งของวัตถุในปริภูมิ 2 มิติเท่านั้น โดยความสูงของตัวเซนเซอร์ที่วัดจากพื้นเรียบขึ้นมาจะเท่ากันทั้งหมด แต่การจะนำข้อมูลจากเซนเซอร์ UWB มาใช้งานโดยทันทีนั้นไม่สามารถทำได้ เนื่องจากระยะที่ได้จากเซนเซอร์นั้นมีค่าความผิดพลาดเมื่อเทียบกับระยะที่วัดจากพื้นจริง แต่ในการใช้งานนั้นจะไม่สามารถวัดระยะจากพื้นจริงเพื่อมา

เทียบกับค่าของเซนเซอร์ได้ จึงต้องมีการปรับปรุงค่าความผิดพลาดของข้อมูลที่ได้มาจากเซนเซอร์ เพื่อนำระยะที่ได้หลังการปรับปรุงไประบุตำแหน่งของวัตถุได้อย่างแม่นยำมากที่สุด

## 1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาและออกแบบวิธีการในการลดค่าความผิดพลาดของระยะทางที่เกิดจากเซนเซอร์ เพื่อปรับปรุงตำแหน่งของวัตถุจากการหาระยะห่างจากเซนเซอร์ โดยใช้ระบบสัญญาณไร้สายด้วยคลื่นความถี่แถบกว้างให้มีความแม่นยำมากขึ้น

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ออกแบบวิธีการในการปรับปรุงตำแหน่งของวัตถุในพื้นที่ 2 มิติเพื่อให้ตำแหน่งของวัตถุมีความแม่นยำมากขึ้น
- 2) ทดสอบในพื้นที่เรียบขนาดไม่เกิน 10x10 m
- 3) เซนเซอร์รับ - ส่งสัญญาณจะต้องอยู่ในระนาบเดียวกัน

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ลดค่าความผิดพลาดของระยะที่เกิดขึ้นจากเซนเซอร์
- 2) ลดค่าความผิดพลาดของตำแหน่งของวัตถุและระบุตำแหน่งของวัตถุได้แม่นยำมากขึ้น

## บทที่ 2

### วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 การระบุตำแหน่งภายในอาคาร

เทคโนโลยีในการระบุตำแหน่งโดยใช้สัญญาณไร้สายภายในอาคาร มีด้วยกันอยู่หลายประเภท ดังที่ได้กล่าวไว้ในส่วนของบทนำ โดยในแต่ละชนิดของการระบุตำแหน่งจะมีจุดประสงค์ในการทำงานที่ต่างกันออกไป รายละเอียดของเทคโนโลยีในการระบุตำแหน่งแต่ละชนิดจะถูกนำมาอธิบายให้ละเอียดมากขึ้นในบทนี้ รวมถึงการนำเอาไปใช้ในการศึกษาวิจัยหรือการใช้งานจริงต่าง ๆ

(1) **คลื่นเสียง** คือเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 kHz ขึ้นไป ซึ่งมากกว่าที่มนุษย์ได้ยิน (20 Hz – 15 kHz) ยิ่งคลื่นเสียงมีความถี่ที่สูงจะยิ่งลดการกระจายทิศทางของคลื่นนั้น ทำให้สามารถควบคุมทิศทางของคลื่นได้ จึงสามารถนำเอาคุณสมบัตินี้มาใช้ร่วมกับการสะท้อนของเสียงเมื่อกระทบกับวัตถุได้เป็นการวัดระยะทาง โดยคำนวณจากความถี่ของคลื่นเสียงที่กำหนดจากตัวกำเนิดคลื่นและระยะเวลาเมื่อคลื่นเสียงมีการสะท้อนกลับมาจากวัตถุจะได้เป็นระยะทาง [4] ซึ่งสามารถนำมาหาตำแหน่งของวัตถุได้ถ้าหากใช้เซนเซอร์หลายตัวและรู้จุดอ้างอิงของตำแหน่งเซนเซอร์ที่ติดตั้งไว้ เช่น การหาตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับหรือโดรน [5] ซึ่งความแม่นยำในการระบุตำแหน่งโดยใช้คลื่นเสียงนั้นยังไม่เป็นที่น่าเชื่อถือมากนัก เนื่องจากคุณสมบัติในการสะท้อนของคลื่นเสียงนั้นไม่สามารถสะท้อนกับวัสดุที่มีรูปทรงต่าง ๆ ซึ่งทำให้การคำนวณหาระยะของเซนเซอร์มีความผิดพลาด และยังมีปัจจัยอื่น ๆ รวมด้วย เช่น อุณหภูมิ ความชื้น หรือฝุ่นในอากาศ

(2) **อินฟราเรด** เป็นคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่างช่วง 700 nm ถึง 1 mm ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาของมนุษย์ ใช้งานจำพวกการตรวจจับความร้อนและการหาระยะทาง การทำงานจะใช้หลักการสะท้อนของคลื่นแสงและคำนวณมุมที่ตกกระทบกลับมาเพื่อหาระยะทาง (Angle of Arrival: AOA) มีการนำเทคโนโลยีการใช้คลื่นแสงนั้นไปใช้ระบุตำแหน่งในงานวิจัยต่าง ๆ [6] ความแม่นยำในการระบุตำแหน่งโดยใช้คลื่นแสงนั้นที่ค่าความผิดพลาดอยู่ประมาณ 8-16 cm แต่ในพื้นที่ 100 ตารางเมตร

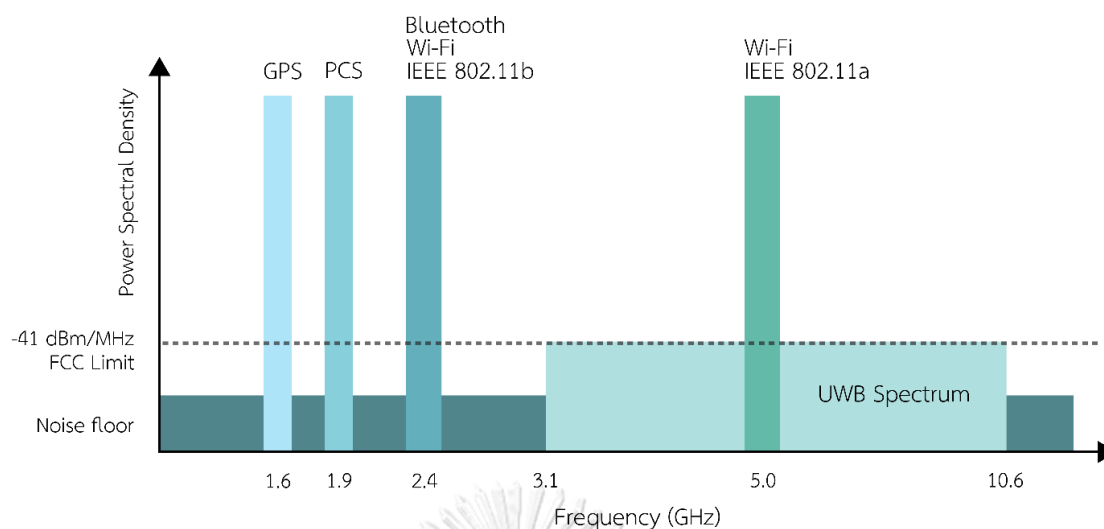
(3) **กล้อง** กล้องหรือการจับภาพเพื่อนำมาระบุตำแหน่งมีข้อได้เปรียบมากกว่าการระบุตำแหน่งแบบอื่น ๆ เพราะการใช้กล้องจับภาพจะมีการประมวลผลภาพนั้น ๆ ด้วย ซึ่งนอกจากระบุตำแหน่งได้แล้ว



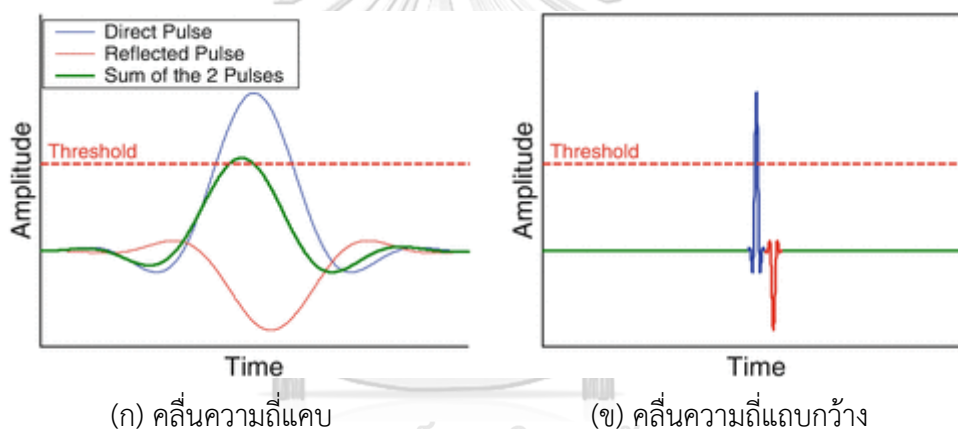
ยังสามารถระบุลักษณะของวัตถุหรือท่าทางของสิ่งที่เราสนใจได้อีกด้วย [7] จึงเป็นที่นิยมในการนำมาใช้ระบุตำแหน่งของวัตถุที่สามารถมองเห็นได้ในระยะการทำงาน

**(4) สัญญาณอินเทอร์เนต** การใช้สัญญาณอินเทอร์เนตแบบเครือข่ายไร้สายนั้นสามารถรับ - ส่งสัญญาณระหว่างตัวรับและส่งได้โดยไม่ต้องใช้การสะท้อนของคลื่น ใช้มาตรฐานการสื่อสาร IEEE 802.11 มีย่านสัญญาณอยู่ที่ 2.4 kHz และ 5 kHz [8] จึงสามารถระบุตำแหน่งของวัตถุได้แม้เซนเซอร์จะไม่ได้อยู่ในระยะของการมองเห็นก็ตาม ซึ่งวิธีระบุตำแหน่งที่ได้กล่าวมาก่อนหน้าไม่สามารถทำได้ นิยมใช้กับตลาดการให้บริการในด้านการบอกตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ เช่น การระบุตำแหน่งด้วยโทรศัพท์มือถือ [9] หรือการระบุตำแหน่งยานพาหนะแทนการใช้การติดตามตำแหน่งด้วยสัญญาณระบบระบุตำแหน่งบนพื้นโลก [10] การระบุตำแหน่งโดยใช้ Wi-Fi สามารถทำได้โดยการรับความเข้มของสัญญาณมาประมวลผลเป็นระยะทางระหว่างตัวรับและตัวส่งสัญญาณ (Received Signal Strength: RSS) ซึ่งตำแหน่งที่คำนวณได้จะมีความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งจริงอยู่บ้างเนื่องจากความเสถียรของสัญญาณอินเทอร์เนต

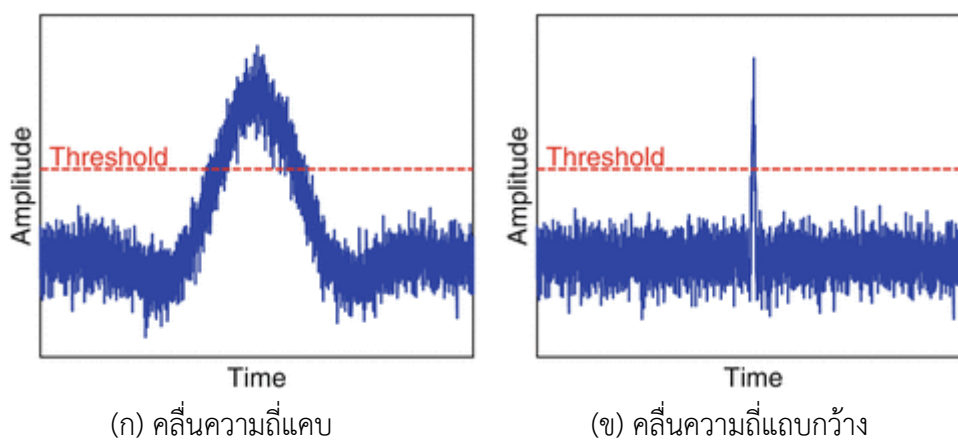
**(5) สัญญาณคลื่นความถี่แถบกว้าง** การส่งสัญญาณด้วยคลื่นความถี่แถบกว้างเป็นหนึ่งในวิธีการส่งสัญญาณด้วยคลื่นวิทยุ จึงทำให้สามารถระบุตำแหน่งของวัตถุได้แม้เซนเซอร์จะไม่ได้อยู่ในระยะของการมองเห็นเช่นเดียวกับ Wi-Fi โดย Federal Communications Commission (FCC) ในสหรัฐอเมริกากำหนดให้การระบุตำแหน่งด้วย UWB อยู่ในประเภทของระบบการสื่อสารและการวัดระยะทาง จะมีข้อกำหนดหลักคือ (1) ความถี่ในการปฏิบัติการจะอยู่ในช่วงระหว่าง 3.1 GHz ถึง 10.6 GHz และ (2) กำลังในการส่งสัญญาณออกจากตัวส่งสัญญาณนั้นจะต้องมีกำลังไม่เกิน -41.3 dBm ในความถี่แถบกว้างที่มากกว่า 500 MHz ดังรูปที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าคลื่นความถี่แถบกว้างนั้นมีความแตกต่างจากสัญญาณคลื่นความถี่ไร้สายชนิดอื่น ๆ ทั้งการใช้พลังงานที่ต่ำและช่วงคลื่นความถี่ที่กว้าง



รูปที่ 2.1 ช่วงการทำงานของสัญญาณคลื่นความถี่ UWB และสัญญาณอื่น ๆ



รูปที่ 2.2 รูปแบบคลื่นที่แสดงการรับสัญญาณทางตรงและสัญญาณจากการสะท้อน [15]



รูปที่ 2.3 รูปแบบคลื่นที่มีการแทรกของสัญญาณรบกวน [15]

เทคโนโลยีการส่งสัญญาณด้วยคลื่นความถี่แถบกว้างสามารถส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูง ทำให้สื่อสารข้อมูลได้จำนวนมากภายในเวลาอันสั้น รูปคลื่นของสัญญาณจึงมีความคมชัดและแคบมากกว่า การส่งสัญญาณของความถี่ในย่านอื่น ๆ เทคโนโลยี UWB จึงมีความแม่นยำสูงในการใช้ระบุตำแหน่ง รูปที่ 2.2 (ก) และ (ข) แสดงถึงรูปแบบคลื่นที่ส่งออกมาจากตัวส่งสัญญาณ (เส้นสีน้ำเงิน) และมีการสะท้อนในสภาพแวดล้อม (เส้นสีแดง) ทำให้ตัวรับสัญญาณนั้นได้รับคลื่นสัญญาณทั้ง 2 เข้ามาและรวมให้เป็นคลื่นเส้นเดียว (เส้นสีเขียว) ในกรณีที่ไม่มีสัญญาณอื่นมารบกวน รูปที่ 2.2 (ก) แสดงถึงสัญญาณของคลื่นความถี่แคบซึ่งสัญญาณรวมนั้นมีความผิดพลาดไปจากสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากตัวส่งสัญญาณจริง ๆ แต่ในรูปที่ 2.2 (ข) เห็นได้ชัดว่าสัญญาณที่สะท้อนกลับมาไม่มีผลต่อเทคโนโลยี UWB เนื่องจากการส่งสัญญาณสัญญาณที่แคบของ UWB ทำให้ตัวรับสัญญาณมองเห็นสัญญาณแยกออกจากกัน และสามารถระบุได้ว่าสัญญาณไหนคือสัญญาณที่แท้จริง รูปที่ 2.3 (ก) และ (ข) แสดงถึงคลื่นความถี่แคบและคลื่นความถี่แถบกว้างที่มีการแทรกแซงของสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบ รูปที่ 2.3 (ก) พบว่ามีความไม่แน่นอนบริเวณขอบขาขึ้นของคลื่นเนื่องจากสัญญาณที่มีความถี่ต่ำจะถูกรบกวนจากสิ่งแวดล้อมได้ง่าย แตกต่างจากเทคโนโลยี UWB ที่สามารถระบุสัญญาณขาขึ้นของรูปคลื่นได้ดังรูปที่ 2.3 (ข) ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ของเทคโนโลยี UWB ทำให้สามารถทำงานร่วมกับสัญญาณ Wi-Fi หรือสัญญาณวิทยุอื่น ๆ ได้อย่างไม่มีปัญหาและสามารถส่งข้อมูลผ่านสิ่งแวดล้อมที่มีอุปสรรค เช่น เสาปูน ไม้ หรือกระจกได้ เนื่องจากการใช้พลังงานเพื่อส่งสัญญาณต่ำทำให้คลื่นสัญญาณจะไม่ถูกรบกวนจากอุปกรณ์อื่น ๆ และสามารถส่งสัญญาณทะลุผ่านสิ่งกีดขวางได้ จึงทำให้ UWB เป็นที่นิยมในการศึกษาค้นคว้าเพื่อใช้เป็นเทคโนโลยีในการระบุตำแหน่งเป็นอย่างมาก [11], [12], [13], [14], [15] โดยคุณสมบัติของเทคโนโลยีทั้งหมดที่ได้กล่าวมาในข้างต้นจะนำไปสรุปในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเทคโนโลยีในการระบุตำแหน่งโดยใช้สัญญาณไร้สายภายในอาคารชนิดต่าง ๆ

Technology	Environment	Advantage	Disadvantage
Ultrasonic	LOS	ไม่รบกวนการทำงานของสัญญาณคลื่นวิทยุอื่น ๆ	ใช้ได้เฉพาะบางงาน เนื่องจากข้อจำกัดด้านคุณสมบัติในการดูดซับคลื่นเสียง
Infrared	LOS	สามารถทำงานได้ดีในพื้นที่ที่ควบคุมปัจจัยต่าง ๆ ได้	ประสิทธิภาพในการทำงานจะลดลงเมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มีแสงมากเกินไป
Camera	LOS	ปรับเปลี่ยนการใช้งานได้หลากหลาย	ใช้งานได้เฉพาะระยะการมองเห็นของกล้องเท่านั้น
Wi-Fi	LOS/NLOS	ใช้งานกับสัญญาณอินเทอร์เน็ตแบบเครือข่ายไร้สายภายในอาคารได้	การระบุตำแหน่งจะไม่เสถียร ขึ้นอยู่กับความแรงของสัญญาณเครือข่าย ณ. ขณะนั้น
Ultra-Wideband	LOS/NLOS	สามารถระบุตำแหน่งได้อย่างแม่นยำในทุก ๆ สภาพแวดล้อม	เทคโนโลยียังไม่ค่อยแพร่หลายและราคาของอุปกรณ์ค่อนข้างสูง

## 2.2 เทคโนโลยีของเซนเซอร์คลื่นความถี่แถบกว้าง

ความน่าสนใจของเทคโนโลยีการส่งสัญญาณด้วยคลื่นความถี่แถบกว้างนั้นจะเห็นได้ว่าความโดดเด่นมีมากกว่าเทคโนโลยีชนิดอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด โดยในส่วนนี้จะกล่าวถึงผู้พัฒนาเทคโนโลยีชนิดนี้จากหลากหลายแหล่งเพื่อที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

(1) **Ubisense** เป็นหนึ่งในบริษัทที่เป็นที่รู้จักหากพูดถึงเทคโนโลยี UWB โดย Ubisense นั้นได้ทำอุปกรณ์การระบุตำแหน่งโดยใช้สัญญาณคลื่นความถี่แถบกว้างออกมาเพื่อใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยตัวอุปกรณ์นั้นสามารถที่จะช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถควบคุมสายการผลิตและลดความผิดพลาดที่อาจจะเกิดในสายการผลิตได้ เช่น การนำไปใช้ในกระบวนการการผลิตรถยนต์ [16] โดยความแม่นยำของอุปกรณ์อยู่ที่ 15 cm [17]

(2) **Alereon** บริษัทนี้ได้ผลิตอุปกรณ์การระบุตำแหน่งโดยใช้สัญญาณคลื่นความถี่แถบกว้างออกมาเพื่อการใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์, การแพทย์และกองทัพ โดย Alereon ได้ผลิตระบบเหล่านี้ให้กับการใช้งานของกองทัพสหรัฐอเมริกา [18]

(3) **Decawave** คือบริษัทที่ผลิตทั้งอุปกรณ์, เซนเซอร์, หน่วยประมวลผลและซอฟต์แวร์ที่มีประสิทธิภาพ, มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือให้กับผู้บริโภค การใช้งานในผลิตภัณฑ์ของบริษัทนี้มีส่วนด้วยกันในหลากหลายประเภท ยกตัวอย่างเช่น การจัดการเกี่ยวกับการจัดเก็บสินค้า, การตรวจเช็คสายการผลิต หรือ การติดตามวัตถุ [19] ซึ่งตัวหน่วยประมวลผลของ Decawave นั้นได้ถูกนำมาติดตั้งเป็น Tag ในโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยอีกบริษัทที่มีชื่อว่า BeSpoon เนื่องจากเป็นเทคโนโลยี UWB สัญญาณจึงไม่ไปรบกวนสัญญาณของโทรศัพท์ ทำให้การระบุตำแหน่งของโทรศัพท์ภายในอาคารนั้นมีความแม่นยำและสะดวกต่อการใช้งานมากยิ่งขึ้น [20] ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกเซนเซอร์ของ Decawave มาใช้งาน เนื่องจากมีการเข้าถึงการใช้งานอุปกรณ์ได้ง่ายมากกว่าอีก 2 บริษัทที่กล่าวมาข้างต้น และสามารถปรับเปลี่ยนการใช้งานได้หลากหลาย รวมถึงราคาที่สามารถเข้าถึงได้ง่าย โดยรายละเอียดในส่วนของตัวเซนเซอร์จะถูกอธิบายให้ละเอียดยิ่งขึ้นในบทต่อไป

## 2.3 เทคโนโลยีของการระบุตำแหน่งแบบไร้สายภายในอาคาร

ระบบการระบุตำแหน่งแบบเรียลไทม์ที่ใช้กับการระบุตำแหน่งแบบไร้สายภายในอาคารนั้น มีอยู่หลายประเภทด้วยกัน ในส่วนนี้จะกล่าวถึงระบบที่ใช้เฉพาะกับ UWB ซึ่งระบบแบบเรียลไทม์นั้น ต้องการการวัดค่าสัญญาณระหว่างเซนเซอร์ตัวรับและตัวส่งสัญญาณที่รู้เวลาอย่างแม่นยำ เพื่อนำไปประมวลผลหาระยะระหว่างเซนเซอร์แต่ละตัว โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการระบุตำแหน่งนั้นประกอบไปด้วยเซนเซอร์ที่เป็นจุดเชื่อมต่อกันเพื่อรับและส่งสัญญาณ เซนเซอร์ที่ติดตั้งไว้ประจำที่และรู้ตำแหน่งจะถูกเรียกว่า Anchor node และเซนเซอร์ที่ผู้ใช้งานต้องการระบุตำแหน่งจะถูกเรียกว่า Tag node สามารถแบ่งระบบการระบุตำแหน่งแบบเรียลไทม์ออกได้เป็น 3 ชนิด คือ (1) Time of arrival (TOA), (2) Time Different of Arrival (TDOA) และ (3) Two Way Ranging (TWR)

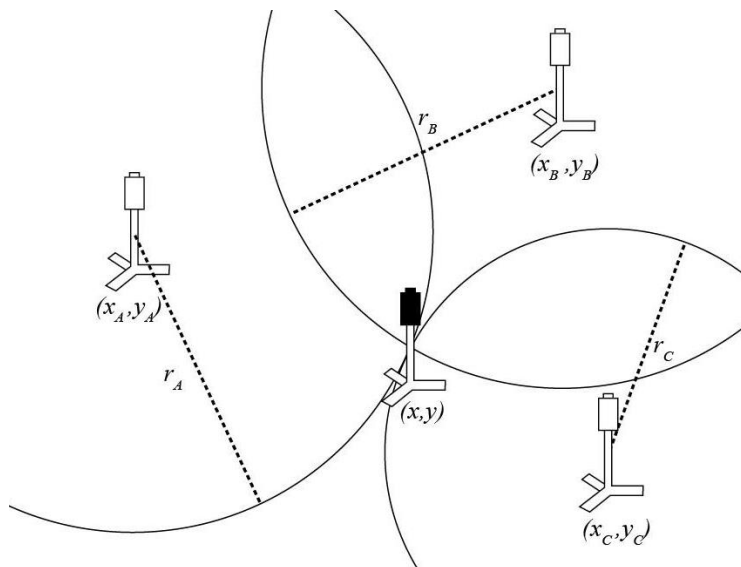
### 2.3.1 Time of Arrival

ในกรณีที่เซนเซอร์ตัวรับสัญญาณและตัวส่งสัญญาณมีการใช้สัญญาณเวลาเดียวกัน ดังนั้นเวลาที่เริ่มมีการส่งสัญญาณจากตัวส่งสัญญาณจะถูกบันทึกไว้ที่ตัวรับสัญญาณพร้อมกับเวลาที่ตัวรับสัญญาณได้รับสัญญาณนั้นมา จากนั้นจะนำผลต่างของเวลาที่ถูกบันทึกในสองช่วงมาคูณด้วยความเร็วของคลื่นสัญญาณที่เดินทางในอากาศได้เป็นระยะทางของเซนเซอร์ที่รับและส่งสัญญาณกันในคู่นั้น ๆ [21] ถ้าหากรู้ตำแหน่งของเซนเซอร์ตัวใดตัวหนึ่งและยึดตำแหน่งนั้นเป็นตำแหน่งอ้างอิงจะสามารถรู้ระยะของเซนเซอร์อีกตัวได้ และหากมีเซนเซอร์ที่รู้ตำแหน่ง 3 ตัว จะทราบตำแหน่งของเซนเซอร์หรือวัตถุที่เราสนใจได้จากระยะของเซนเซอร์แต่ละตัวที่เป็นรัศมีของวงกลมโดยมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ตำแหน่งของ Anchor node แต่ละตัว โดยสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการได้ดังนี้

$$r_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}, i = 1, 2, 3 \dots \quad (2.1)$$

โดยที่  $r_i$  คือระยะระหว่างเซนเซอร์ที่รู้ตำแหน่งทั้ง 3 ตัวและเซนเซอร์ที่ไม่รู้ตำแหน่ง  $(x, y)$  คือพิกัดของเซนเซอร์ที่ไม่รู้ตำแหน่งหรือวัตถุที่เราสนใจจะหาตำแหน่งและ  $(x_i, y_i)$  คือพิกัดอ้างอิงจากเซนเซอร์ที่รู้ตำแหน่งที่แน่นอน ถ้าต้องการหาตำแหน่งของเซนเซอร์ที่ต้องการในปริภูมิ 2 มิติ จะต้องใช้เซนเซอร์ที่เป็นจุดอ้างอิงอย่างน้อย 3 จุดดังรูปที่ 2.4 และหาจุดตัดร่วมกันของเส้นรอบรูปวงกลมหรือวิธีการ Trilateration ซึ่งจะกล่าวถึงอีกในบทต่อไป ระบบการระบุตำแหน่งแบบเรียลไทม์

ชนิดนี้มีความเป็นไปได้ที่สัญญาณเวลาอาจเกิดการหน่วง ทำให้การคำนวณระยะของเซนเซอร์มีความคลาดเคลื่อนได้



รูปที่ 2.4 วิธีการระบุตำแหน่งของเซนเซอร์โดยใช้วิธี Time of Arrival [22]

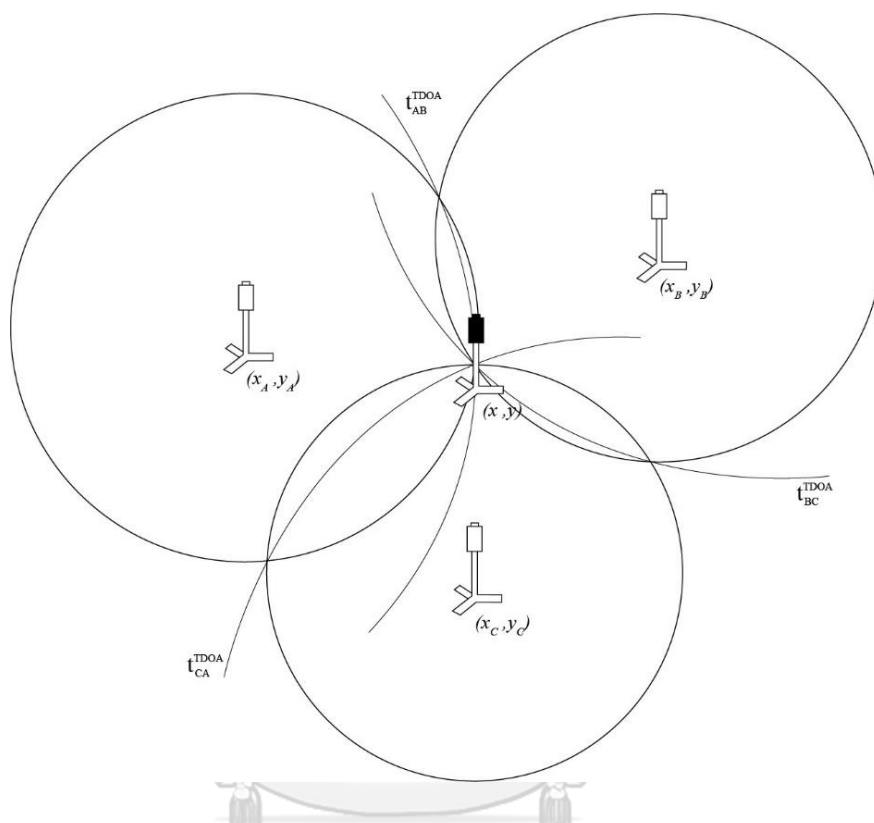
### 2.3.2 Time Difference of Arrival

ถ้าหากไม่มีการใช้สัญญาณเวลาร่วมกันระหว่างเซนเซอร์ ทำให้การรับและส่งสัญญาณของเซนเซอร์แต่ละตัวมีเวลาที่แตกต่างกันออกไป วิธี (Time Different of Arrival: TDOA) [23] สามารถนำมาใช้หาระยะทางระหว่างเซนเซอร์ได้ถ้าหากมีการทำงานที่ประสานกันระหว่างเซนเซอร์อ้างอิงอยู่ตลอดโดยที่ไม่ต้องสนใจการใช้สัญญาณเวลาร่วมกัน หากมีพิกัดที่ต้องการระบุตำแหน่งและจุดอ้างอิง 2 จุดจะสามารถประมาณค่าผลต่างของเวลาของเซนเซอร์แต่ละตัวที่ไม่ได้ใช้ร่วมกันได้ และนำค่าผลต่างของเวลามาใช้เพื่อคำนวณหาระยะทางหรือตำแหน่งที่สนใจให้แม่นยำยิ่งขึ้นต่อไป โดยสามารถแสดงในรูปของสมการได้ดังนี้

$$t_{AB}^{TDOA} \times C = r_A - r_B = \sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2} - \sqrt{(x - x_B)^2 + (y - y_B)^2} \quad (2.2)$$

$t_{ab}^{TDOA}$  คือผลต่างของเวลาของเซนเซอร์จากจุดอ้างอิง 2 จุดถึงจุดที่สนใจคุณด้วย  $C$  หรือความเร็วของคลื่นสัญญาณที่เดินทางในอากาศ จะได้ผลต่างของระยะทางจากเซนเซอร์แต่ละคู่ โดยที่  $r_A$  และ  $r_B$  คือระยะทางระหว่างตำแหน่งอ้างอิงที่ 1 และตำแหน่งอ้างอิงที่ 2 ไปถึงตำแหน่งของ

เซนเซอร์ที่ไม่รู้ตำแหน่งหรือวัตถุที่เราสนใจจะหาตำแหน่งที่สนใจนั้นก็คือพิกัด  $(x, y)$  ส่วน  $(x_A, y_A)$  และ  $(x_B, y_B)$  คือพิกัดอ้างอิงจากเซนเซอร์ที่รู้ตำแหน่งที่แน่นอน รูปที่ 2.5 แสดงถึงการระบุตำแหน่งโดยใช้วิธี TDOA ของเซนเซอร์อ้างอิง 3 ตัวในปริภูมิ 2 มิติ



รูปที่ 2.5 วิธีการระบุตำแหน่งของเซนเซอร์โดยใช้วิธี Different Time of Arrival [22]

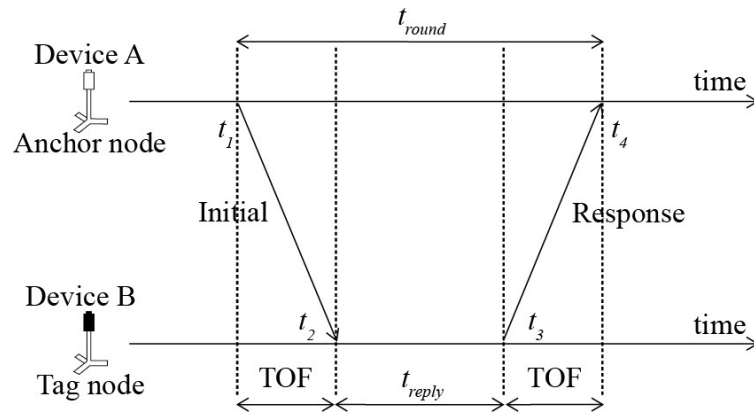
### 2.3.3 Two Ways Ranging

วิธีการ (Two Ways Ranging: TWR) จะนำมาใช้หาระยะระหว่างเซนเซอร์เมื่อไม่มีการใช้สัญญาณของเวลาร่วมกันระหว่างเซนเซอร์และไม่มีการทำงานที่ประสานกันระหว่างเซนเซอร์ที่ใช้ อ้างอิง TWR สามารถคำนวณหาระยะทางระหว่างเซนเซอร์ได้จากการแลกเปลี่ยนข้อมูลเวลาเมื่อมีการส่งข้อมูลไปและกลับระหว่างเซนเซอร์คู่ นั้น ๆ ได้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี

(1) **Single Sided TWR (SS-TWR)** คือการส่งข้อมูลของเวลาไปและกลับระหว่างเซนเซอร์ คู่ นั้น ๆ เพียงรอบเดียว [24] รูปที่ 2.6 แสดงให้เห็นถึงการส่งข้อมูลจากเซนเซอร์ A ไปยังเซนเซอร์ B และกลับมายังเซนเซอร์ A โดยที่  $T_1$  คือเวลาที่เซนเซอร์ A เริ่มส่งสัญญาณออกไป  $T_2$  คือเวลาที่สัญญาณจากเซนเซอร์ A มาถึงยังเซนเซอร์ B ต่อมาที่เซนเซอร์ B เมื่อได้รับสัญญาณแล้วก็จะ



ประมวลผลข้อมูลที่ได้รับจึงมีการหน่วงเวลาเล็กน้อยก่อนจะส่งสัญญาณกลับไปที่เซนเซอร์ A โดยเริ่มส่งที่เวลา  $T_3$  และเซนเซอร์ A จะได้รับข้อมูลทั้งหมดที่เวลา  $T_4$  โดยเวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณไป-กลับของเซนเซอร์จะเรียกว่า Time of Flight (TOF)

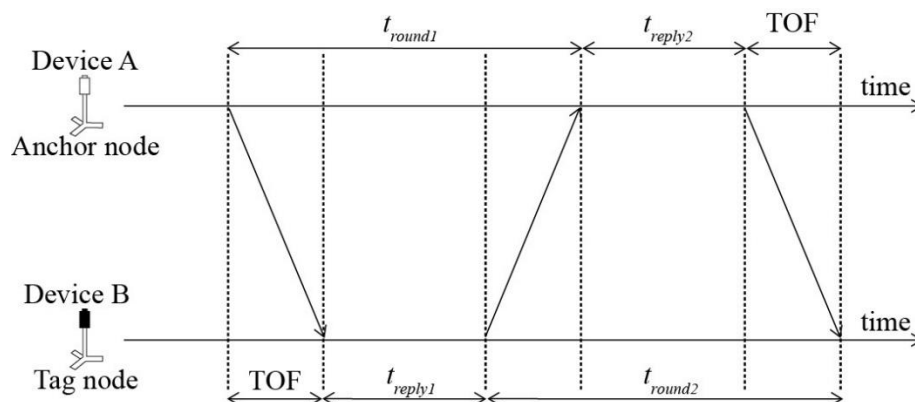


รูปที่ 2.6 วิธีการหาระยะทางของเซนเซอร์โดยใช้วิธี SS-TWR [25]

เวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูลไปและกลับระหว่างเซนเซอร์ภายใน 1 รอบคือ  $T_{round}$  ได้มาจาก  $T_4 - T_1$  และเวลาที่เซนเซอร์ B มีการหน่วงเวลาคือ  $T_{reply} = T_3 - T_2$  ซึ่งทั้ง  $T_{round}$  และ  $T_{reply}$  นั้นสามารถคำนวณได้ภายในภายในแต่ละเซนเซอร์ จึงไม่ต้องการสัญญาณเวลาที่ใช้ร่วมกัน ซึ่งเวลาในการรับส่งสัญญาณระหว่างเซนเซอร์นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการ 2.3 และเมื่อนำไปคูณกับความเร็วจนของคลื่นสัญญาณที่เดินทางในอากาศก็จะได้ระยะทางระหว่างเซนเซอร์เพื่อนำไปใช้ในการระบุตำแหน่งของวัตถุต่อไป

$$T_{AB} = \frac{T_{round} - T_{reply}}{2} = \frac{(T_4 - T_1) - (T_3 - T_2)}{2} \quad (2.3)$$

(2) Double Sided TWR (DS-TWR) ถ้าหากเวลาที่เดินอยู่ภายในแต่ละเซนเซอร์มีการนับเวลาที่เยื้องกันอยู่มาก [25] อาจจะทำให้การส่งข้อมูลไปกลับเพียงแค่ครั้งเดียวเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ แต่เมื่อมีการส่งข้อมูลไปกลับ 2 รอบจะสามารถมั่นใจในชุดข้อมูลที่ได้รับมากยิ่งขึ้นเพราะว่ามีข้อมูลมากกว่าการส่งแบบรอบเดียวถึงสองเท่าดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วิธีการหาระยะทางของเซนเซอร์โดยใช้วิธี DS-TWR [25]

โดยเวลาในการรับส่งสัญญาณระหว่างเซนเซอร์นั้นสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$T_{AB} = \frac{(T_{round1} - T_{reply1}) + (T_{round2} - T_{reply2})}{4} \quad (2.4)$$

สรุปได้ว่าวิธี TWR ทั้ง 2 วิธีนั้นสามารถคำนวณหาระยะทางระหว่างเซนเซอร์ได้โดยทันทีโดยไม่ต้องผ่านหน่วยประมวลผลหลักและไม่ต้องการใช้งานสัญญาณเวลาที่ต่อเนื่องกันระหว่างเซนเซอร์ ด้วย จึงมีความคล่องตัวในการทำงานที่สูงกว่าอีก 2 วิธีก่อนหน้านี้ การจะคำนวณระยะทางภายในเซนเซอร์ได้นั้นจะต้องมีหน่วยประมวลผลอยู่ภายในเซนเซอร์ทุกตัวเพื่อทำการรับส่งข้อมูลและคำนวณตลอดเวลา

#### 2.4 การปรับปรุงค่าความผิดพลาดจากการระบุตำแหน่งของวัตถุโดยใช้เซนเซอร์คลื่นความถี่แถบกว้างด้วยวิธีการต่าง ๆ

ในส่วนนี้จะเป็นการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการระบุตำแหน่งโดยเทคโนโลยีการส่งสัญญาณด้วยคลื่นความถี่แถบกว้าง ซึ่งเริ่มพบได้มากขึ้นในปัจจุบัน ซึ่งมีการนำเซนเซอร์ UWB ไปใช้งานอย่างหลากหลาย Huang et al. [26] นำการระบุตำแหน่งแบบไร้สายภายในอาคารมาใช้ระบุตำแหน่งของห้องปฏิบัติการ ซึ่งมีการใช้ UWB ที่มีวิธีการของ TOA ในการระบุตำแหน่งภายในพื้นที่ 2 ล้อในการเคลื่อนย้ายเซนเซอร์ที่เป็น Tag ไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ภายในพื้นที่ พบว่ามีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ 18.3 cm ภายในห้องขนาด 4 m x 7 m มีการรับส่งข้อมูลแบบเรียลไทม์ที่มีความเร็วในการตอบสนองของระบบไม่เกิน 0.5 วินาที Hindermann et al. [27] ใช้เทคโนโลยี UWB

ของ Decawave มาการระบุตำแหน่งของสัตว์ในโรงปศุสัตว์จำลองขนาด  $21 \text{ m} \times 21 \text{ m}$  ซึ่งการทดลองนี้ระบุตำแหน่งในปริภูมิ 2 มิติ Anchor และ Tag นั้นจะอยู่ทั้ง LOS และ NLOS ในสนามจำลอง TDOA ได้ถูกนำมาใช้ในการหาตำแหน่งของ tag ที่ไม่รู้ตำแหน่ง โดยมีค่าความผิดพลาดที่กึ่งกลางของการคำนวณค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยอยู่ที่ 10 cm และ 15 cm Fresk et al. [28] ใช้ชิพ DW1000 จากบริษัท Decawave มาระบุตำแหน่งของอากาศยานไร้คนขับในพื้นที่ปริภูมิ 3 มิติขนาด  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 2.8 \text{ m}$  วิธีการ TWR ได้ถูกนำมาใช้ในการหาระยะระหว่าง Anchor node 4 จุดและโดรนที่อยู่ในสภาพแวดล้อมแบบ LOS จากการทดลองมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในแนวแกน  $x = 6.4 \text{ cm}$ ,  $y = 5.4 \text{ cm}$  และ  $z = 3.5 \text{ cm}$  จะเห็นว่างานวิจัยเหล่านี้ได้มีการนำเอาเทคโนโลยี UWB มาใช้ในการระบุตำแหน่งและได้มีการใช้วิธีการต่าง ๆ ในการลดค่าความผิดพลาดจากการหาระยะระหว่างเซนเซอร์เพื่อให้ได้พิกัดตำแหน่งที่แม่นยำมากขึ้น โดยจะส่วนใหญ่จะใช้อุปกรณ์การส่งสัญญาณด้วยคลื่นความถี่แถบกว้างของ Decawave เพราะมีการเข้าถึงการใช้งานของอุปกรณ์ที่ง่ายจึงทำให้ใช้งานได้หลากหลายรูปแบบ ส่วนระบบการระบุตำแหน่งแบบเรียลไทม์แบบ TWR นั้นจะสามารถลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้มากที่สุด

### บทที่ 3

#### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

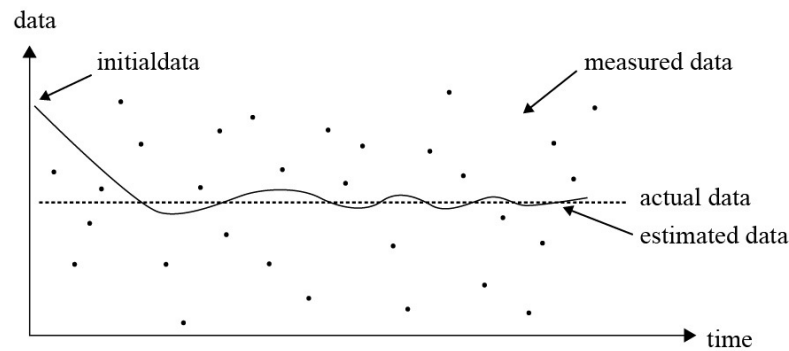
##### 3.1 การวิเคราะห์การถดถอย

การวิเคราะห์การถดถอย [29] คือการประมาณค่าของข้อมูลชุดหนึ่งที่มีการกระจายตัวกันอยู่ หากเราหาฟังก์ชันความสัมพันธ์ของข้อมูลชุดนี้ได้ ก็จะเป็นการหาค่าของข้อมูลในชุดต่อ ๆ ไปได้โดยการนำตัวแปรที่ไม่คลาดเคลื่อนมาใส่ในฟังก์ชันเพื่อหาค่าประมาณของตัวแปรที่คลาดเคลื่อนต่อไป การวิเคราะห์การถดถอยนั้นมีอยู่หลายประเภท เช่น การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น จะใช้เมื่อเราต้องการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัวแปร และความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรดังกล่าวจะต้องเป็นในลักษณะเชิงเส้น และวิเคราะห์การถดถอยแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งความสัมพันธ์แบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นนั้นจะใช้ฟังก์ชันของสมการที่แตกต่างกันออกไป เช่น สมการกำลังสอง หรือ สมการลอการิทึม โดยการจะได้ฟังก์ชันความสัมพันธ์ของข้อมูลชุดหนึ่งนั้นจำเป็นต้องมีข้อมูลตัวอย่างในจำนวนที่มากพอ เพื่อที่จะสร้างฟังก์ชันการประมาณที่มีความแน่นอนในการประมาณค่าข้อมูลชุดใหม่ได้

เนื่องจากค่าความผิดพลาดของระยะทางระหว่างเซนเซอร์มีค่ามาก การลดค่าความผิดพลาดจึงมีส่วนสำคัญในการที่จะบอกได้ว่าระยะทางจริงระหว่างเซนเซอร์เป็นเท่าไร เพื่อจะนำระยะที่ได้ไปหาตำแหน่งของวัตถุต่อไป โดยเริ่มจากการลดค่าความผิดพลาดของเซนเซอร์ในประมุข 1 มิติ ซึ่งก็คือการลดค่าความผิดพลาดของระยะทางระหว่างเซนเซอร์นั่นเอง

##### 3.2 ตัวกรองคาลมาน

ตัวกรองคาลมาน [30] คือหนึ่งในวิธีการที่จะลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้จากเซนเซอร์ ซึ่งจะมีชุดสมการที่เป็นตัวทำหน้าที่กรองค่าความผิดพลาดออกไปจากค่าที่รับมาจากเซนเซอร์ และทำการประมาณค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจริงมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปเรื่อย ๆ ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ผลของการประมาณค่าของข้อมูลด้วยตัวกรองคาลมานเทียบกับเวลา [30]

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการอย่างง่ายได้ดังสมการที่ 3.1 ถึง 3.3

$$KG = \frac{E_{EST}}{E_{EST} + E_{MEA}} \quad (3.1)$$

$$EST_t = EST_{t-1} + KG[MEA - EST_{t-1}] \quad (3.2)$$

$$E_{EST_t} = [1 - KG](E_{EST_{t-1}}) \quad (3.3)$$

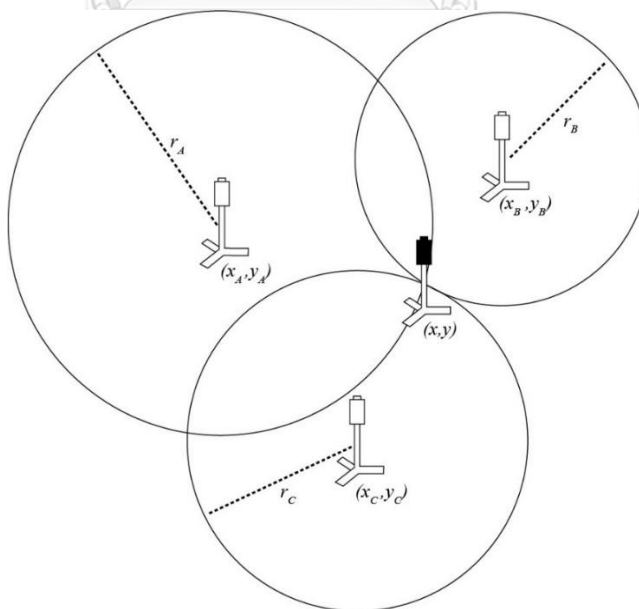
โดย  $KG$  คือตัวแปรความน่าเชื่อถือของข้อมูลจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ได้มาจากค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่า  $E_{EST}$  และค่าความผิดพลาดภายในของเซนเซอร์  $E_{MEA}$  ค่า  $KG$  มีเพื่อนำไปใช้กำหนดข้อมูลใหม่จากตัวกรองคาลมานว่าเราควรเลือกใช้ข้อมูลที่วัดค่าได้ ณ ขณะนั้น  $MEA$  หรือข้อมูลที่ได้ถูกประมาณค่าด้วยตัวกรองคาลมานเอาไว้ก่อนหน้านี้  $EST$  ในอัตราส่วนเท่าไร รวมถึงนำไปหาค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าใหม่เพื่อนำไปใช้ต่อไป ซึ่งสมการข้างต้นนั้นเป็นตัวกรองคาลมานแบบที่มีข้อมูลที่ต้องการประมาณเพียงชนิดเดียวในระบบ หากมีข้อมูลมากกว่า 1 ชนิดนั้นจะต้องใช้สมการที่มีความซับซ้อนขึ้นโดยจะประกอบไปด้วย 2 ส่วนการทำงานคือ การทำงานปรับปรุงข้อมูลตามเวลา (Time Update) และ การปรับปรุงค่าของตัววัดข้อมูล (Measurement Update) ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมการตัวกรองคาลมานสำหรับหลายข้อมูลใน 1 ระบบ

Time Update	Measurement Update
(1) Project the state ahead $\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_k$	(1) Compute the Kalman gain $K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1}$
(2) Project the error covariance ahead $P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q$	(2) Update estimate with measurement $z_k$ $\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H\hat{x}_k^-)$
	(3) Update the error covariance $P_k = (I - K_k H) P_k^-$

### 3.3 การระบุตำแหน่งของวัตถุบนระนาบ 2 มิติ

การหาตำแหน่งจากจุดตัดของวงกลม 3 วง [31] คือการที่เรารู้พิกัดตำแหน่งของจุดศูนย์กลางของ anchor node ทั้ง 3 ตัว และระยะทางของ anchor node แต่ละตัวไปยัง tag node ที่เป็นตำแหน่งที่เราสนใจจะทราบ ทำให้เกิดเป็นวงกลม 3 วงที่มีเส้นรอบรูปที่ตัดกัน ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ตำแหน่งที่เกิดจากจุดตัดของเส้นรอบวงกลม 3 วง

กำหนดให้  $(x, y)$  เป็นตำแหน่งของวัตถุที่ต้องการจะหา และ  $x_i, y_i, r_i$  เมื่อ  $i = A, B, C$  เป็นตำแหน่งและรัศมีของวงกลมแต่ละวง สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการที่ 2.1 ในบทที่ 2.3.1 ได้ แล้วทำการกระจายกำลังออกมาจากสมการของวงกลมที่ 1, 2 และ 3 ได้ดังนี้

$$x^2 - 2x_1x + x_1^2 + y^2 - 2y_1y + y_1^2 = r_1^2 \quad (3.4)$$

$$x^2 - 2x_2x + x_2^2 + y^2 - 2y_2y + y_2^2 = r_2^2 \quad (3.5)$$

$$x^2 - 2x_3x + x_3^2 + y^2 - 2y_3y + y_3^2 = r_3^2 \quad (3.6)$$

นำสมการ 3.4 และสมการ 3.5 ลบกับสมการ 3.6 จะได้

$$2(x_3 + x_1)x + 2(y_3 - y_1)y = (r_1^2 - r_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \quad (3.7)$$

$$2(x_3 + x_2)x + 2(y_3 - y_2)y = (r_2^2 - r_3^2) - (x_2^2 - x_3^2) - (y_2^2 - y_3^2) \quad (3.8)$$

หากมองสมการที่ 3.7 และ 3.8 ให้อยู่ในรูปของตัวแปร  $A, B, C, D, E, F$  จะสามารถเขียนใหม่ได้เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$Ax + By = C \quad (3.9)$$

$$Dx + Ey = F \quad (3.10)$$

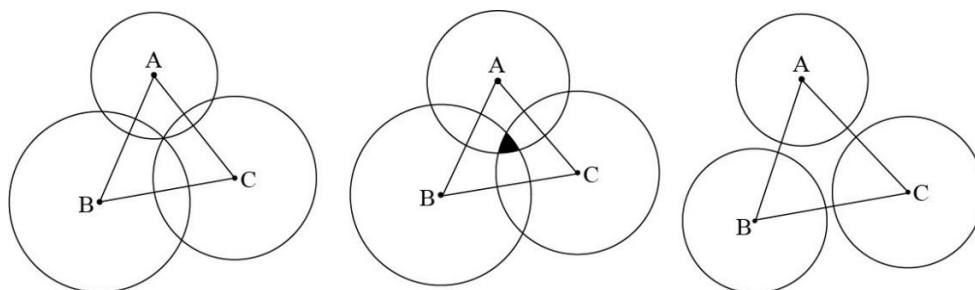
จะสามารถหา  $x$  และ  $y$  ที่เป็นพิกัดตำแหน่งของวัตถุที่เราสนใจได้ดังนี้

$$x = \frac{CE - BF}{AE - BD} \quad (3.11)$$

$$y = \frac{CD - AF}{BD - AE} \quad (3.12)$$

การหาตำแหน่งของวัตถุโดยใช้วิธี Trilateration นั้นจะมีเงื่อนไขในการใช้งานคือ การที่วงกลมทั้ง 3 วงจะต้องมีจุดตัดร่วมกันที่ตรงกลางเพียงจุดเดียวเพื่อที่จะได้ตำแหน่งที่แน่นอน หากระยะทางจาก tag node ไปยัง anchor node ตัวใดตัวหนึ่งเกิดค่าผิดพลาดขึ้นจะทำให้จุดตัดของวงกลมนั้นไม่ร่วมกัน ตำแหน่งที่คำนวณออกมาได้จะมีความไม่แม่นยำ Aiqing Zhang et al. [32] กล่าวว่าพื้นที่ภายในสามเหลี่ยมที่เกิดจากพิกัดจุดของ anchor node 3 อันนั้นจะเกิดรูปแบบของ

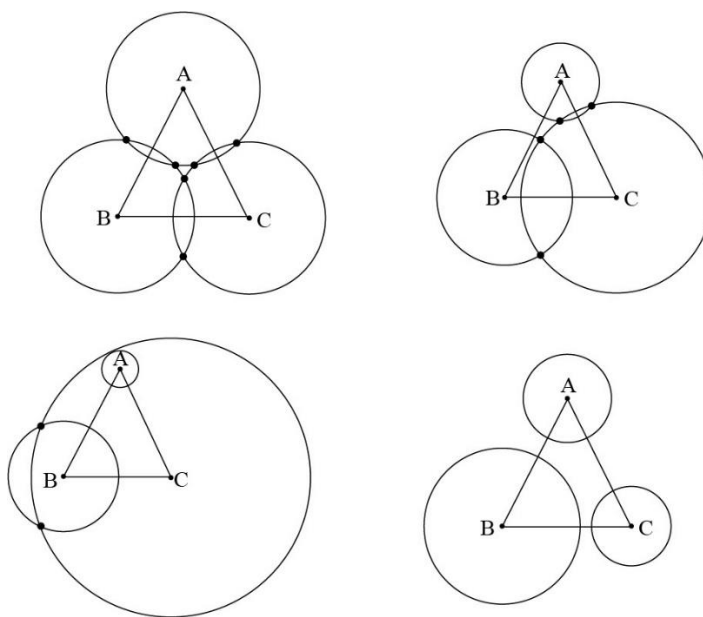
จุดตัดของเส้นรอบรูปวงกลมได้ทั้งหมด 3 รูปแบบ คือ 1) เกิดจุดตัดกันเพียงจุดเดียว 2) เกิดจุดตัด 3 จุด และ 3) ไม่มีจุดตัดเกิดขึ้น ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 รูปแบบการเกิดจุดตัดของวงกลม 3 วงภายในพื้นที่ 3 เหลี่ยม [32]

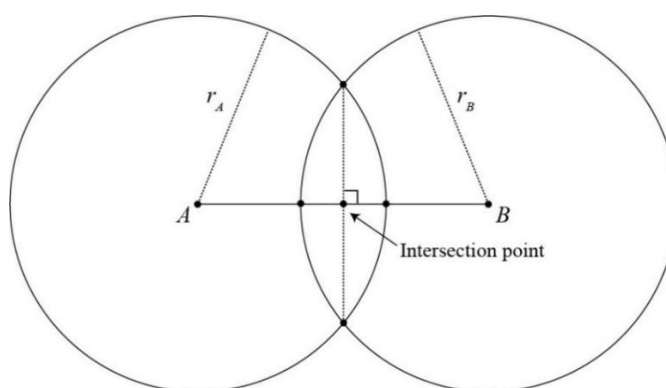
โดยรูปแบบที่ 1 นั้นสามารถใช้วิธี Trilateration ได้ทันทีเนื่องจากไม่มีค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นที่จุดตัดใด ๆ แต่ถ้าเป็นรูปแบบที่ 2 และ 3 นั้นจำเป็นจะต้องมีวิธีการหาตำแหน่งพิกัดและลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ด้วยเช่นกัน โดย Zaniani et al. [33] ได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการลดค่าความผิดพลาดจากการใช้วิธี Trilateration เนื่องจากระยะจาก Anchor ถึง Node มีความผิดพลาดทำให้ตำแหน่งของจุดตัดวงกลมมีความคลาดเคลื่อน โดยการใช้วิธีการปรับปรุงค่าความผิดพลาดแบบใหม่ (Error Correction Algorithm: ECA) ซึ่งมีการแบ่งรูปแบบของความคลาดเคลื่อนออกเป็น 4 รูปแบบ ดังรูปที่ 3.4 คือ 1) มีจุดตัด 3 จุดที่อยู่ใกล้กัน เทียบได้กับรูปแบบที่ 2 ของ Aiqing Zhang et al. หลักการคือการหาจุดศูนย์กลางของจุดตัดที่ใกล้ที่สุดของวงกลมที่มีการที่เหลื่อมกัน เพื่อใช้ในการประมาณพิกัดตำแหน่ง 2) มีวงกลมที่ไม่ซ้อนทับกัน 1 คู่ทำให้เกิดจุดตัดขึ้นแค่ 2 จุดภายในพื้นที่สามเหลี่ยม ให้ทำการขยายรัศมีของวงกลมที่ไม่ซ้อนทับกันนั้นขึ้นเพื่อทำให้เกิดจุดตัด 3 จุดแล้วทำการประมาณพิกัดตำแหน่งโดยใช้หลักการในประเภทที่ 1 ต่อไป 3) การที่มีเส้นรอบรูปของวงกลมเพียง 2 วงตัดกัน ส่วนอีก 1 วงไม่เกิดจุดตัดผ่านวงกลมอื่น สาเหตุเกิดจากวงกลมที่ไม่ตัดวงกลมใด ๆ นั้นมีขนาดเล็กหรือใหญ่ไปมาก ให้ทำการเพิ่มหรือลดขนาดของรัศมีวงกลมที่ไม่ได้ตัดกับวงกลมอื่น ๆ ตามความเหมาะสมของรัศมีวงกลมรูปอื่นเพื่อจะให้เกิดจุดตัด 3 จุดแล้วทำการประมาณพิกัดตำแหน่งโดยใช้หลักการในประเภทที่ 1 ต่อไป ประเภทที่ 4) เป็นประเภทสุดท้ายที่ไม่มีเส้นรอบรูปวงกลมวงไหนตัดกัน จะไปตรงกับรูปแบบที่ 3 ของ Aiqing Zhang et al. ให้ทำการเพิ่มรัศมีของวงกลมทั้ง 3 วงขึ้นจนเกิดจุดตัด 3 จุดแล้วทำการประมาณพิกัดตำแหน่งโดยใช้หลักการในประเภทที่ 1 ต่อไป





รูปที่ 3.4 รูปแบบการคลาดเคลื่อนของจุดตัดที่เกิดจากวงกลม 3 วง [33]

Junhua Yang et al. [34] ได้มีการกล่าวถึงการลดค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการหาตำแหน่งจากจุดตัดของวงกลม 3 วงเช่นกัน โดยการใช้วิธีการ Bilateral Greed Iteration (BGI) ในงานวิจัยนี้จะมีอยู่ 4 รูปแบบที่คล้ายกับวิธี ECA แต่จะแตกต่างกันที่งานวิจัยของ Junhua Yang et al. จะพิจารณาการประมาณตำแหน่งจากวงกลมทีละ 2 วงแล้วหลังจากนั้นจึงทำการประมาณค่ารวมในภายหลัง ซึ่งความน่าสนใจจะอยู่ในรูปแบบที่เส้นรอบรูปของวงกลม 2 วงมีการตัดกัน 2 จุด ดังรูปที่ 3.5 จะเริ่มจากการลากเส้นตรงผ่านจุดศูนย์กลางของวงกลม 2 วง และลากเส้นตรงอีกเส้นผ่านจุดตัดที่เกิดขึ้นจากวงกลม 2 วง ซึ่งเส้นตรง 2 เส้นนี้จะมีจุดตัดอยู่ด้วยกัน 1 จุดซึ่งตำแหน่งของจุดตัดจะเป็นตำแหน่งของวัตถุที่สนใจที่ได้จากการประมาณด้วยวิธีการนี้



รูปที่ 3.5 พิกัดตำแหน่งที่เกิดจากจุดตัดของเส้นตรง 2 เส้นภายในวงกลม 2 วง [34]

## บทที่ 4

### วิธีดำเนินการ

#### 4.1 ฮาร์ดแวร์

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบอุปกรณ์สำหรับการวัดระยะด้วยคลื่นความถี่แถบกว้าง เป็นอุปกรณ์ที่เอาไว้ใช้ได้ทั้ง Anchor node และ Tag node โดยจะเรียกตัวอุปกรณ์รับส่งสัญญาณนี้ว่า Beacon ตัวแผ่นวงจรของ Beacon ประกอบไปด้วยเซนเซอร์ UWB และส่วนที่เป็นหน่วยประมวลผลของอุปกรณ์ ดังรูปที่ 4.1 อุปกรณ์นี้สามารถสลับโหมดการใช้งานระหว่าง Anchor และ Tag ได้ด้วยการเปลี่ยนคำสั่งในโปรแกรมของหน่วยประมวลผล

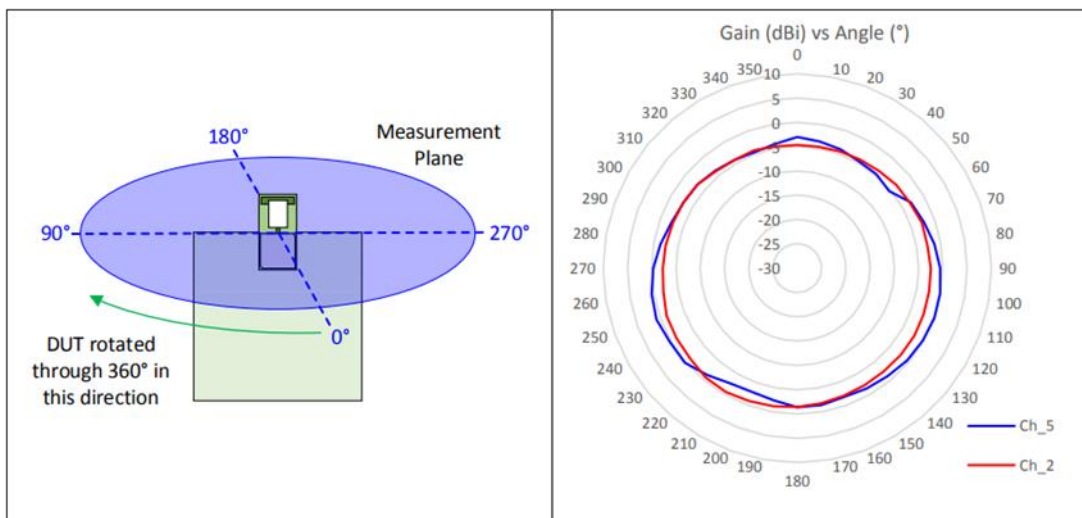


รูปที่ 4.1 อุปกรณ์สำหรับการวัดระยะด้วยคลื่นความถี่แถบกว้าง

ส่วนสำคัญในงานวิจัยนี้ที่ใช้สำหรับระบุตำแหน่งของวัตถุด้วยคลื่นความถี่แถบกว้างนั้นก็คือเซนเซอร์คลื่นความถี่แถบกว้าง DWM1000 จากบริษัท Decawave [29] ดังรูปที่ 4.2 เซนเซอร์ DWM1000 มีขนาด 23 mm x 13 mm มีการใช้พลังงานภายในเซนเซอร์ที่ต่ำ ซึ่งตัวเซนเซอร์นั้นจะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวส่งและตัวรับสัญญาณข้อมูลจาก Beacon หนึ่งไปยังอีก Beacon หนึ่ง โดยมีเสาส่งสัญญาณที่ติดตั้งมาพร้อมกับเซนเซอร์เพื่อกระจายคลื่นความถี่อยู่แล้ว รวมถึงได้มีการทดสอบความเสถียรของเสาส่งสัญญาณเมื่อกำหนดให้เซนเซอร์อยู่ในแนวตั้งดังรูปที่ 4.3



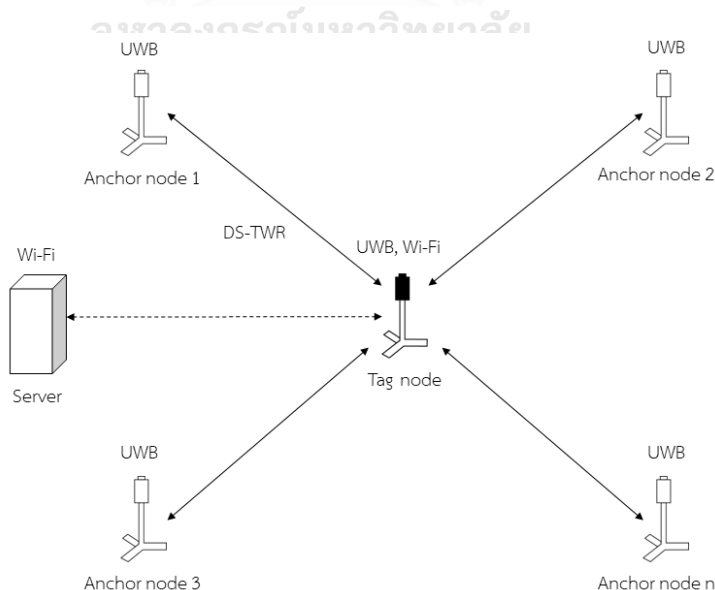
รูปที่ 4.2 เซนเซอร์คลื่นความถี่แถบกว้าง DWM1000



รูปที่ 4.3 การทดสอบความเสถียรของเสาส่งสัญญาณ

#### 4.2 ระบบการทำงานของ การรับข้อมูลในเครือข่ายของคลื่นความถี่แถบกว้าง

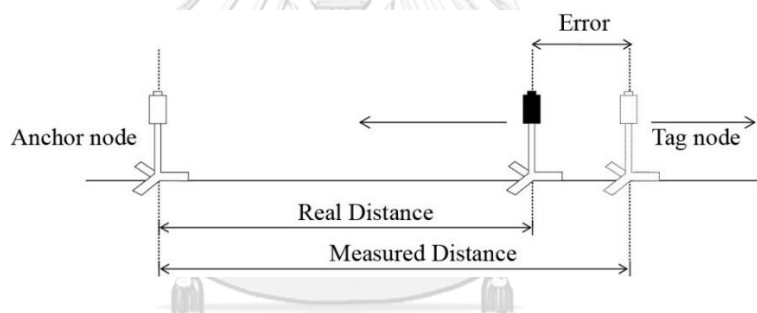
การทำงานของระบบในเครือข่ายนั้นจะประกอบไปด้วย Anchor node, Tag node และ Server ระยะจาก Anchor node แต่ละตัวจะถูกส่งมาให้กับ Tag node ที่เป็นตัวประมวลผล ซึ่งข้อมูลที่เป็นระยะทางจะถูกคำนวณให้กลายเป็นตำแหน่ง รวมถึงการปรับปรุงค่าความผิดพลาดก็จะถูกคำนวณที่ Tag node เช่นเดียวกัน ข้อมูลที่ได้จาก Tag node และจะถูกส่งผ่านสัญญาณ Wi-Fi ภายในบริเวณไปยัง Server เพื่อที่จะเก็บข้อมูลต่อไป



รูปที่ 4.4 แผนผังการทำงานของ การรับ - ส่งข้อมูลของเซนเซอร์คลื่นความถี่แถบกว้าง

### 4.3 การวิเคราะห์ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากเซนเซอร์

การหาระยะทางระหว่างเซนเซอร์ 1 คู่เทียบกับระยะทางจริงจะเป็นสิ่งที่ถูกนำมาทดสอบเป็นอันดับแรกเพื่อที่จะหาความผิดพลาดที่เกิดขึ้น เนื่องจากในสภาวะแวดล้อมจริงอาจจะมีสิ่งรบกวนมาทำให้เซนเซอร์เกิดความผิดพลาดได้ โดยให้ Beacon ตัวแรกเป็น Anchor node กำหนดตำแหน่งพิกัดเป็นจุดเริ่มต้นและอีกตัวเป็น Tag node ที่มีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงไปในระยะทางต่าง ๆ บนความสูงเท่ากันจากพื้น 1 m ดังรูปที่ 4.5 โดยเก็บข้อมูลระยะทางที่อ่านค่าได้จาก Tag node นำมาลบกับระยะทางจริงเพื่อที่จะได้ค่าความผิดพลาดของเซนเซอร์ในแต่ละระยะทาง เนื่องจากค่าความผิดพลาดมีส่วนสำคัญในการที่จะบอกได้ว่าระยะทางจริงระหว่างเซนเซอร์เป็นเท่าไร ค่าความผิดพลาดของระยะทางระหว่างเซนเซอร์นั้นจึงเป็นสิ่งที่ต้องหา เพื่อจะนำระยะที่ได้ไปหาตำแหน่งของวัตถุต่อไป โดยเริ่มจากการลดค่าความผิดพลาดของเซนเซอร์ในประมุข 1 มิติ ซึ่งก็คือการลดค่าความผิดพลาดของระยะทางระหว่างเซนเซอร์นั่นเอง



รูปที่ 4.5 การทดสอบระยะทางระหว่างเซนเซอร์

$$\bar{d}_{AT} = d_{AT} - e_{AT} \quad (4.1)$$

จากสมการหาระยะของวัตถุทางข้างต้น  $\bar{d}_{AT}$  คือระยะทางที่แท้จริงระหว่าง Anchor กับ Tag  $d_{AT}$  คือระยะทางที่ได้จากการอ่านค่าของตัวเซนเซอร์และ  $e_{AT}$  คือค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นระหว่างผลต่างของระยะทางจริงระหว่างเซนเซอร์และค่าที่ได้จากการอ่านค่าตัวเซนเซอร์ ซึ่งเราจะมาพิจารณาค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากเซนเซอร์ต่อว่า ค่าความผิดพลาดที่ได้นั้นประกอบไปด้วยค่าความผิดพลาดของเซนเซอร์ 2 ตัวคือ Anchor และ Tag ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจึงสามารถเขียนเป็นอีกสมการได้ดังต่อไปนี้

$$e_{AT} = e_A + e_T \quad (4.2)$$

โดย  $e_A$  คือค่าความผิดพลาดจากเซนเซอร์ของ Anchor และ  $e_T$  คือค่าความผิดพลาดจากเซนเซอร์ของ Tag ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการหาระยะของวัตถุใหม่ได้ดังนี้

$$\bar{d}_{AT} = d_{AT} - (e_A + e_T) \quad (4.3)$$

#### 4.4 การหาค่าความผิดพลาดจากเซนเซอร์คลื่นความถี่แถบกว้างด้วยการวิเคราะห์การถดถอย

การวัดค่าระยะทางจากตัวเซนเซอร์นั้นไม่สามารถรู้ค่าความผิดพลาดที่แน่นอนได้ เนื่องจากความผิดพลาดในแต่ละระยะอาจจะมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงต้องใช้การวิเคราะห์การถดถอยมาช่วยในการหาค่าความผิดพลาดที่แท้จริงที่เกิดขึ้น แบ่งออกได้เป็น 3 สมการย่อยดังต่อไปนี้

(1) สมการถดถอยแบบเส้นตรง ในกรณีที่ค่าความผิดพลาดนั้นมีรูปแบบที่ไม่ซับซ้อนเราจะใช้การวิเคราะห์การถดถอยที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรเป็นเชิงเส้นตรง จากสมการที่ 4.2 สามารถเขียนเป็นสมการถดถอยแบบเส้นตรงได้ดังต่อไปนี้

$$e_A = k1_A d_{AT} + k2_A \quad (4.4)$$

$$e_T = k1_T d_{AT} + k2_T \quad (4.5)$$

และ

$$e_{AT} = k1_A d_{AT} + k2_A + k1_T d_{AT} + k2_T \quad (4.6)$$

โดยที่  $k1_A, k2_A, k1_T, k2_T$  คือตัวแปรภายในของสมการถดถอยแบบเส้นตรงที่ได้จากการใช้การวิเคราะห์การถดถอยที่เราจะต้องหาต่อไป ในกรณีที่มี Anchor มากกว่า 1 ตัว เราจะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเมทริกซ์ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} e_{A1T} \\ e_{A2T} \\ e_{A3T} \\ \vdots \\ e_{AnT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{A1T} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & d_{A1T} & 1 \\ 0 & 0 & d_{A2T} & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & d_{A2T} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{A3T} & 1 & \cdots & 0 & 0 & d_{A3T} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & d_{AnT} & 1 & d_{AnT} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k1_{A1} \\ k2_{A1} \\ k1_{A2} \\ k2_{A2} \\ k1_{A3} \\ k2_{A3} \\ \vdots \\ k1_{An} \\ k2_{An} \\ k1_T \\ k2_T \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

(2) สมการถดถอยแบบกำลังสอง ในกรณีที่ค่าความผิดพลาดนั้นมีรูปแบบความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นโค้ง ซึ่งเราจะใช้การวิเคราะห์การถดถอยพหุนามที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรเป็นแบบกำลังสอง จากสมการที่ 4.2 สามารถเขียนเป็นสมการถดถอยแบบกำลังสองได้ดังต่อไปนี้

$$e_A = k1_A d_{AT}^2 + k2_A d_{AT} + k3_A \quad (4.8)$$

$$e_T = k1_T d_{AT}^2 + k2_T d_{AT} + k3_T \quad (4.9)$$

และ

$$e_{AT} = k1_A d_{AT}^2 + k2_A d_{AT} + k3_A + k1_T d_{AT}^2 + k2_T d_{AT} + k3_T \quad (4.10)$$

โดยที่  $k1_A, k2_A, k3_A, k1_T, k2_T, k3_T$  คือตัวแปรภายในของสมการถดถอยแบบกำลังสองที่ได้จากการใช้การวิเคราะห์การถดถอยที่เราจะต้องหาต่อไป ในกรณีที่มี Anchor มากกว่า 1 ตัว เราจะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเมตริกซ์ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} e_{A1T} \\ e_{A2T} \\ \vdots \\ e_{AnT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{A1T}^2 & d_{A1T}^1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & d_{A1T}^2 & d_{A1T}^1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & d_{A2T}^2 & d_{A2T}^1 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 & d_{A2T}^2 & d_{A2T}^1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & d_{AnT}^2 & d_{AnT}^1 & 1 & d_{AnT}^2 & d_{AnT}^1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k1_{A1} \\ k2_{A1} \\ k3_{A1} \\ k1_{A2} \\ k2_{A2} \\ k3_{A2} \\ \vdots \\ k1_{An} \\ k2_{An} \\ k3_{An} \\ k1_T \\ k2_T \\ k3_T \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

(3) สมการถดถอยแบบลอการิทึม จากสมการที่ 4.2 สามารถเขียนเป็นสมการถดถอยแบบลอการิทึมได้ดังต่อไปนี้

$$e_A = k1_A \ln(d_{AT}) + k2_A \quad (4.12)$$

$$e_T = k1_T \ln(d_{AT}) + k2_T \quad (4.13)$$

และ

$$e_{AT} = k1_A \ln(d_{AT}) + k2_A + k1_T \ln(d_{AT}) + k2_T \quad (4.14)$$

โดยที่  $k1_A, k2_A, k1_T, k2_T$  คือตัวแปรภายในของสมการถดถอยแบบลอการิทึมที่ได้จากการใช้การวิเคราะห์การถดถอยที่เราจะต้องหาต่อไป ในกรณีที่มี Anchor มากกว่า 1 ตัว เราจะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเมตริกซ์ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} e_{A1T} \\ e_{A2T} \\ e_{A3T} \\ \vdots \\ e_{AnT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln(d_{A1T}) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \ln(d_{A1T}) & 1 \\ 0 & 0 & \ln(d_{A2T}) & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \ln(d_{A2T}) & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ln(d_{A3T}) & 1 & \cdots & 0 & 0 & \ln(d_{A3T}) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \ln(d_{AnT}) & 1 & \ln(d_{AnT}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k1_{A1} \\ k2_{A1} \\ k1_{A2} \\ k2_{A2} \\ k1_{A3} \\ k2_{A3} \\ \vdots \\ k1_{An} \\ k2_{An} \\ k1_T \\ k2_T \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

สมการเมตริกซ์ 3 รูปแบบของการวิเคราะห์การถดถอยจะทำให้เราหาค่าตัวแปรภายในของแต่ละสมการออกมาได้ และนำไปใช้เป็นการอ้างอิงถึงค่าความผิดพลาดของเซนเซอร์ในระยะอื่น ๆ ต่อไป

#### 4.5 การปรับปรุงค่าความผิดพลาดด้วยตัวกรองคาลมาน

ค่าที่วัดได้จากเซนเซอร์ในระยะที่เราสนใจเพียงระยะเดียวนั้นอาจมีความคลาดเคลื่อนของค่าความผิดพลาดอยู่ด้วย เนื่องจากปัจจัยความไม่แน่นอนของเซนเซอร์จึงนำเอาตัวกรองคาลมานมาเพื่อประมาณค่าความผิดพลาดให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น จากตารางที่ 3.1 สมการตัวกรองคาลมานสำหรับหลายข้อมูลใน 1 ระบบ จะนำสมการมาแยกออกเป็นดังต่อไปนี้

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_k \quad (4.16)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (4.17)$$

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \quad (4.18)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H\hat{x}_k^-) \quad (4.19)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_k^- \quad (4.20)$$

เมื่อ

$$\hat{x}_0 = [k1_{A1} \quad k2_{A1} \quad k1_{A2} \quad k2_{A2} \quad k1_{A3} \quad k2_{A3} \quad \cdots \quad k1_{An} \quad k2_{An} \quad k1_T \quad k2_T]^T \quad (4.21)$$



$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

$$P_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$R = \begin{bmatrix} 100 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 100 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 100 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

ค่า  $H$  จะเขียนให้อยู่ในรูปของสมการวิเคราะห์การถดถอยในรูปแบบต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

(1) สมการถดถอยแบบเส้นตรง

$$H = \begin{bmatrix} d_{A1T} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & d_{A1T} & 1 \\ 0 & 0 & d_{A2T} & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & d_{A2T} & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{A3T} & 1 & \cdots & 0 & 0 & d_{A3T} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & d_{AnT} & 1 & d_{AnT} & 1 \end{bmatrix} \quad (4.65)$$

(2) สมการถดถอยแบบกำลังสอง

$$H = \begin{bmatrix} d_{A1T}^2 & d_{A1T}^1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & d_{A1T}^2 & d_{A1T}^1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & d_{A2T}^2 & d_{A2T}^1 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 & d_{A2T}^2 & d_{A2T}^1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & d_{AnT}^2 & d_{AnT}^1 & 1 & d_{AnT}^2 & d_{AnT}^1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

(3) สมการถดถอยแบบลอการิทึม

$$H = \begin{bmatrix} \ln(d_{A1T}) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \ln(d_{A1T}) & 1 \\ 0 & 0 & \ln(d_{A2T}) & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \ln(d_{A2T}) & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ln(d_{A3T}) & 1 & \cdots & 0 & 0 & \ln(d_{A3T}) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & \ln(d_{AnT}) & 1 & \ln(d_{AnT}) & 1 \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

และ

$$Q = (\hat{x}_0)^2 \quad (4.29)$$

ตัวแปรในสมการตัวกรองคาลมานยังขาดไปอีกหนึ่งค่า นั่นก็คือ  $z_k$  ซึ่งค่านี้คือค่าความผิดพลาดจากเซนเซอร์อีกค่าหนึ่งที่ใช้วิธีการหาได้มาจากการนำระยะที่ถูกทำการลดค่าความผิดพลาดลงมาแล้วจากการใช้การวิเคราะห์การถดถอย มาหาตำแหน่งและนำตำแหน่งที่ได้ย้อนกลับไปหาระยะใหม่อีกครั้ง และนำไปลบกับค่าระยะก่อนหน้านี้ จะได้เป็นค่าความผิดพลาดอีกค่า โดยการหาตำแหน่งนั้นจะใช้วิธีการที่เรียกว่า Trilateration แบบเมตริกซ์หรือการหาจุดที่อยู่ตรงกลางระหว่างวงกลม 3 วงที่ได้กล่าวไปในบทที่ 3 แต่ในบทนี้จะนำเสนอวิธีการที่สามารถหาจุดที่อยู่ตรงกลางระหว่างวงกลมที่มีหลายวงได้ด้วย รวมถึงถ้าหากเกิดกรณีที่วงกลมไม่ได้มีจุดตัดร่วมกันก็ยังสามารถหาจุดกึ่งกลางได้อยู่ ในบทที่ 3.3 จากสมการหารัศมีวงกลมสมการที่ 3.7 และ 3.8 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการเมตริกซ์ได้ดังต่อไปนี้

$$2 \begin{bmatrix} x_3 + x_1 & y_3 - y_1 \\ x_3 + x_2 & y_3 - y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r_1^2 - r_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \\ (r_2^2 - r_3^2) - (x_2^2 - x_3^2) - (y_2^2 - y_3^2) \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

กำหนดให้

$$A = 2 \begin{bmatrix} x_3 + x_1 & y_3 - y_1 \\ x_3 + x_2 & y_3 - y_2 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

และ

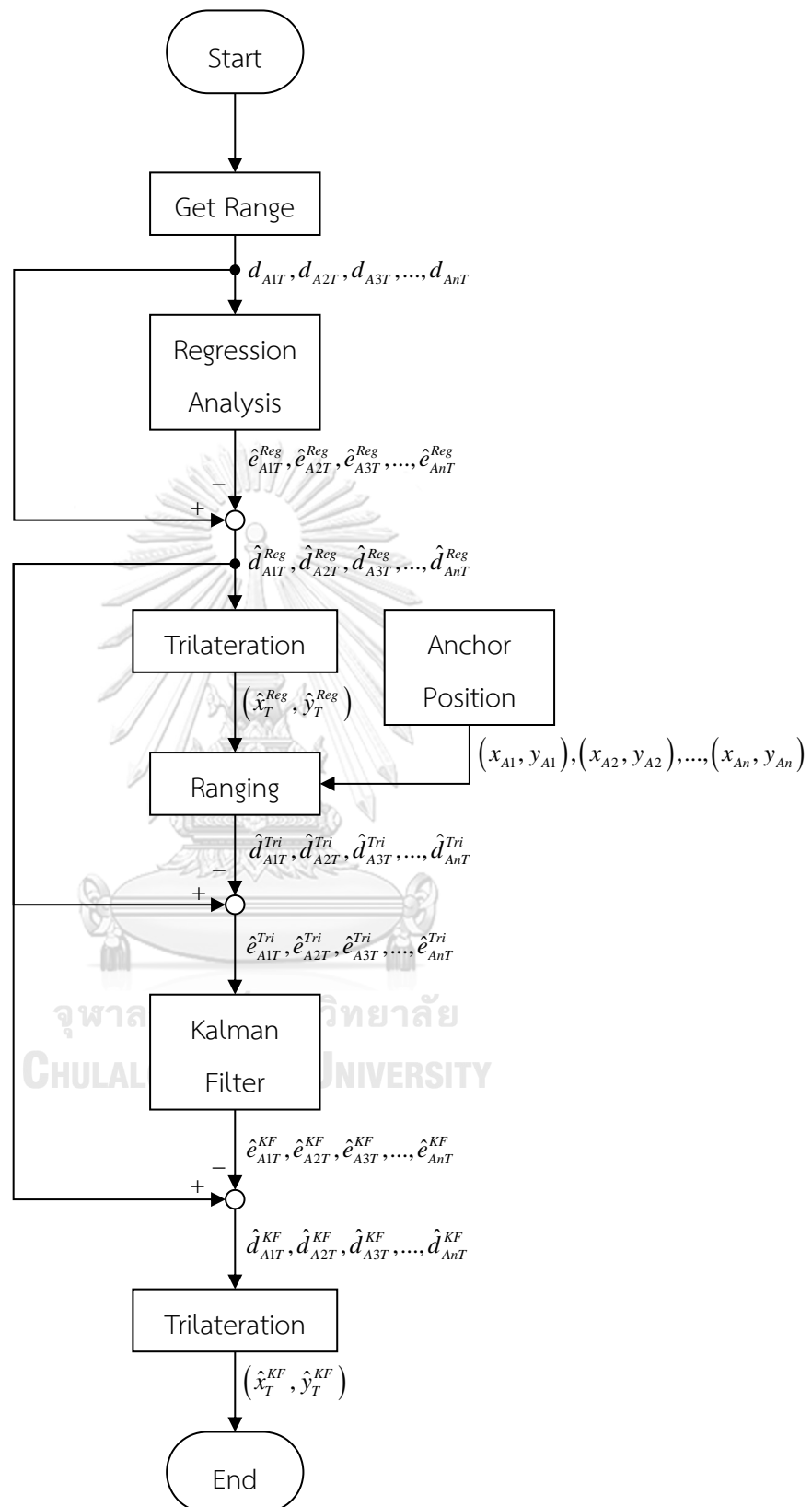
$$b = \begin{bmatrix} (r_1^2 - r_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \\ (r_2^2 - r_3^2) - (x_2^2 - x_3^2) - (y_2^2 - y_3^2) \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

จะสามารถหาตำแหน่งของจุดกึ่งกลางวงกลมได้โดยใช้สมการดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (4.33)$$

เมื่อหาตำแหน่งได้แล้ว ก็จะสามารถนำไปหาค่า  $z_k$  ต่อไปได้ ซึ่งจะทำให้สมการในระบบตัวกรองคาลมานทั้งหมดสมบูรณ์และสามารถประมาณหาค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นต่อไปได้ โดยการทำงานทั้งหมดของการลดค่าความผิดพลาดจะถูกแสดงในรูปที่ 4.6





รูปที่ 4.6 แผนภาพการทำงานของการทำงานของการปรับปรุงค่าความผิดพลาดจากการระบุตำแหน่งของวัตถุ

## บทที่ 5

### การทดลองและผลการทดลอง

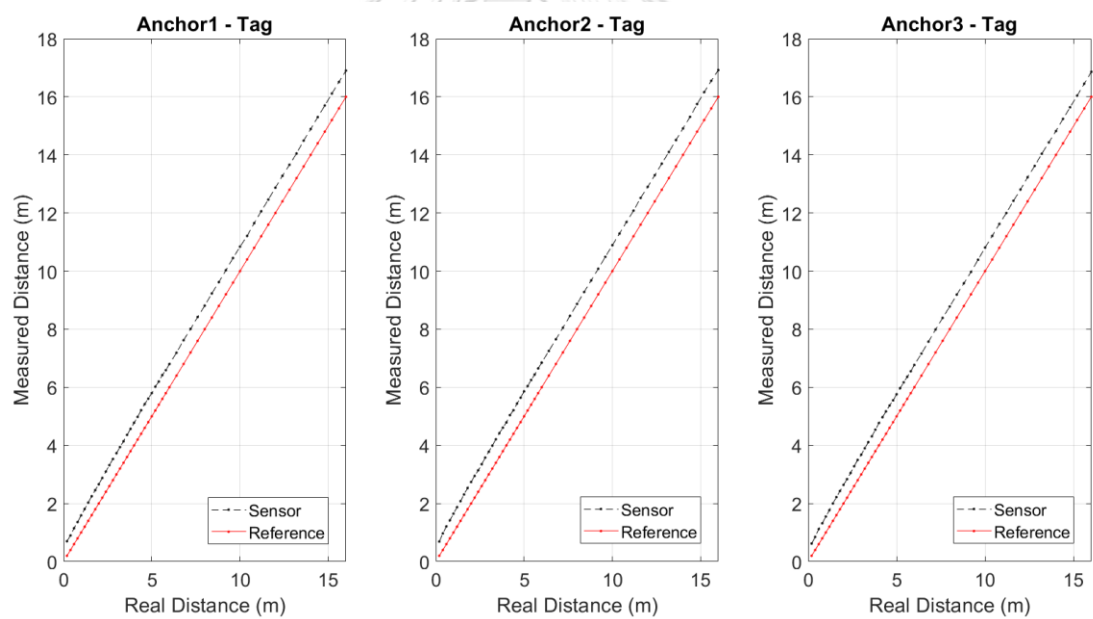
ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองปรับปรุงค่าความผิดพลาดจากการระบุตำแหน่งลงด้วยวิธีการแบบ offline และ online โดยในส่วนของ offline เราจะเริ่มจากการเก็บระยะเซนเซอร์เทียบกับจุดอ้างอิง และนำค่าที่ได้มาวิเคราะห์หาตัวแปรภายในโดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยเพื่อปรับปรุงค่าความผิดพลาดในแต่ละเซนเซอร์ แล้วจึงทดลองในส่วนของการปรับปรุงค่าความผิดพลาดแบบ online ต่อโดยใช้ตัวกรองคาลมาน ซึ่งจะทำให้ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยลงและทำให้ตำแหน่งของวัตถุที่วัดได้มีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้น

#### 5.1 การปรับปรุงค่าความผิดพลาดของระยะห่างระหว่างเซนเซอร์แบบ Offline

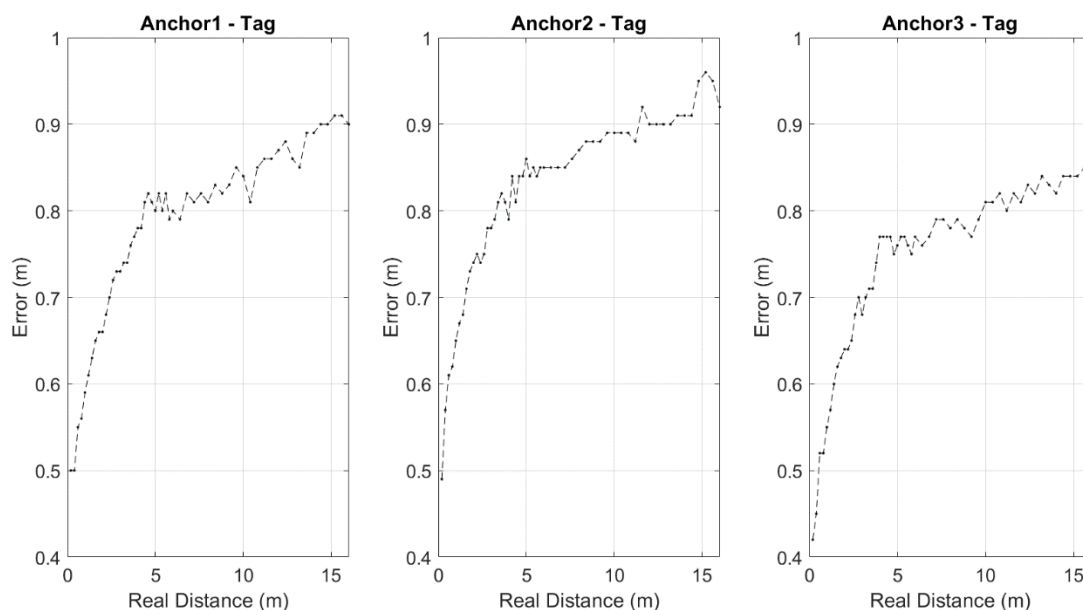
เราทำการทดลองวัดระยะห่างของเซนเซอร์แต่ละคู่ในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างเซนเซอร์และเซนเซอร์อยู่ในระนาบเดียวกัน ดังรูปที่ 5.1 เราจับคู่เซนเซอร์ระหว่าง Anchor node 3 ตัว กับ Tag 1 ตัว โดยในแต่ละครั้งเราจะให้เซนเซอร์ที่เป็น Anchor node ที่อยู่หนึ่งกับที่ ส่วน Tag node จะเป็นเซนเซอร์ตัวที่เคลื่อนที่ไปตามระยะต่าง ๆ ที่ได้กำหนดเอาไว้ จาก 0.2 เมตร ถึง 16 เมตร ซึ่งจุดที่เราทำการใช้เป็นจุดอ้างอิงจะมีระยะห่างทุก ๆ 0.2 เมตร ใน 6 เมตรแรก และ 0.4 เมตรใน 10 เมตรหลัง รวมทั้งหมด 55 จุดอ้างอิง จากรูปที่ 5.2 แสดงถึงระยะที่วัดได้จากเซนเซอร์เทียบกับระยะทางจริง จากรูปจะเห็นว่าเส้นสีดำที่มีรอยประที่เป็นระยะทางที่วัดได้นั้นมีความผิดพลาดอยู่เมื่อเทียบกับระยะทางจริงจากจุดอ้างอิงที่เป็นสีแดง นำระยะทางทั้งสองมาลบออกจากกัน จะได้เป็นค่าความผิดพลาดของระยะที่เกิดขึ้นในแต่ละคู่ของเซนเซอร์ที่วัดได้ ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.1 การทดสอบระยะทางระหว่างเซนเซอร์



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงตำแหน่งของระยะทางที่วัดได้เทียบกับระยะทางจริง



รูปที่ 5.3 ค่าความผิดพลาดของระยะทางที่ได้จากเซนเซอร์เทียบกับระยะทางจริง

เมื่อเรารู้ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นแล้ว ก็จะทำให้การแทนค่าลงไปในการถดถอย โดยจะลองแทนค่าลงไปในการทั้ง 3 แบบคือ สมการเส้นตรง สมการกำลังสอง และสมการลอการิทึม โดยจากสมการที่ 4.7, 4.11, 4.15 ในบทที่ 4 สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการถดถอยได้ดังนี้

$$Y = X \cdot B \quad (5.1)$$

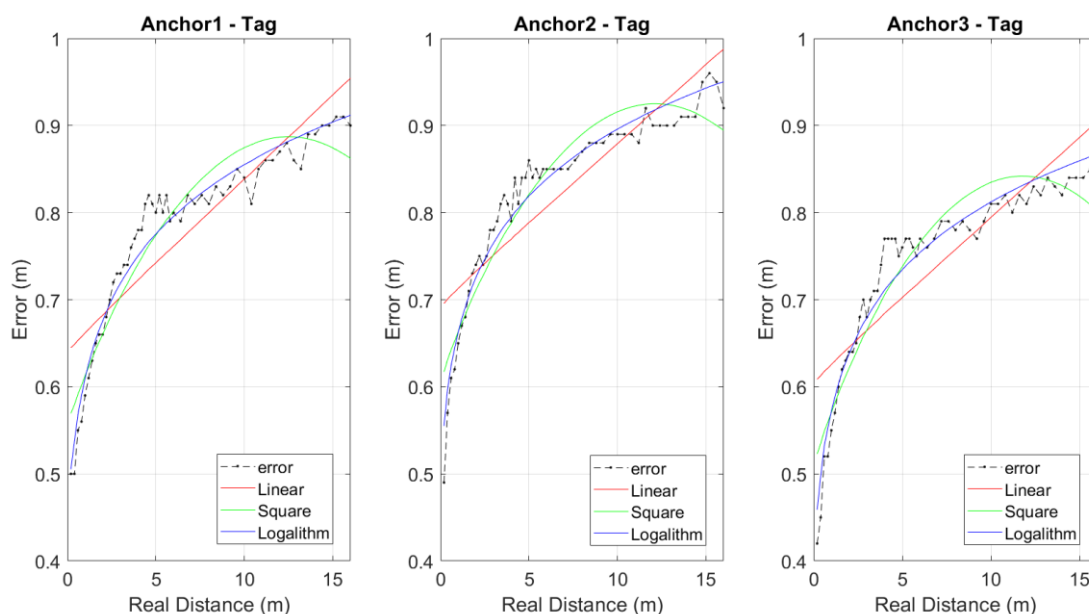
โดย  $Y$  คือค่าความผิดพลาดในแต่ละจุดอ้างอิง  $X$  คือสมการเมตริกซ์ของสมการถดถอยในรูปแบบต่าง ๆ ส่วน  $B$  คือค่าตัวแปรภายในที่เราต้องการจะหาโดยใช้การคำนวณจากโปรแกรม Matlab ด้วยฟังก์ชันของการหาตัวแปรภายในของสมการถดถอย  $B = \text{regress}(X, Y)$  และได้ค่าตัวแปรภายในออกมาในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าคงที่ของตัวแปรภายในที่ได้จากการหาด้วยการวิเคราะห์การถดถอยในรูปแบบสมการต่าง ๆ

สมการเส้นตรง		สมการกำลังสอง		สมการลอการิทึม	
$k1_{A1}$	0	$k1_{A1}$	0	$k1_{A1}$	0.004
$k2_{A1}$	-0.052	$k2_{A1}$	0	$k2_{A1}$	-0.05
$k1_{A2}$	-0.001	$k3_{A1}$	-0.048	$k1_{A2}$	0
$k2_{A2}$	0	$k1_{A2}$	0	$k2_{A2}$	0
$k1_{A3}$	-0.001	$k2_{A2}$	0	$k1_{A3}$	0
$k2_{A3}$	-0.086	$k3_{A2}$	0	$k2_{A3}$	-0.083
$k1_T$	0.019	$k1_{A3}$	0	$k1_T$	0.124
$k2_T$	0.683	$k2_{A3}$	0.003	$k2_T$	0.601
		$k3_{A3}$	-0.093		
		$k1_T$	-0.002		
		$k2_T$	0.053		
		$k3_T$	0.582		

หลังจากที่ได้ตัวแปรภายในของแต่ละสมการมาแล้ว จะทำการแทนค่ากลับเข้าไปในสมการที่ 5.1 อีกครั้งเพื่อหาค่า  $Y$  ใหม่ ซึ่งเมื่อนำไปสร้างกราฟจะเป็นกราฟของการวิเคราะห์การถดถอยซึ่งจะมีสมการเส้นตรง สมการกำลังสอง และสมการลอการิทึม ที่เทียบกับค่าความผิดพลาดของระยะที่วัดได้เทียบกับระยะจริง ดังรูปที่ 5.4 เมื่อเทียบกันดูแล้วจะพบว่า สมการลอการิทึมนั้นมีความคล้ายกับค่าความผิดพลาดมากที่สุด จึงจะนำรูปแบบสมการและตัวแปรภายในที่ได้ไปใช้ในส่วนต่อไป





รูปที่ 5.4 กราฟแสดงการใช้สมการถดถอยแบบเส้นตรง แบบกำลังสอง และแบบลอการิทึม ในการลดค่าความผิดพลาดของระยะที่เกิดขึ้นจากแต่ละเซนเซอร์

จากรูปที่ 5.4 ถ้าหากดูจากรูปกราฟแล้ว สมการเส้นตรงจะมีการเข้ากันของกราฟที่ใช้ได้น้อยที่สุด สมการกำลังสองและสมการลอการิทึมนั้นรูปแบบของกราฟสามารถเข้ากับกราฟค่าความผิดพลาดได้เป็นอย่างดี แต่ถ้ามาดูที่รูปแบบสมการกำลังสองจะพบว่า หากมีระยะผ่านไปมากขึ้นกราฟจะมีการดิ่งลง ซึ่งขัดกับกราฟค่าความผิดพลาด รูปแบบสมการลอการิทึมจึงเป็นรูปแบบสมการที่เหมาะสมที่จะทำไปใช้ปรับปรุงค่าความผิดพลาดในส่วนต่อ ๆ ไป

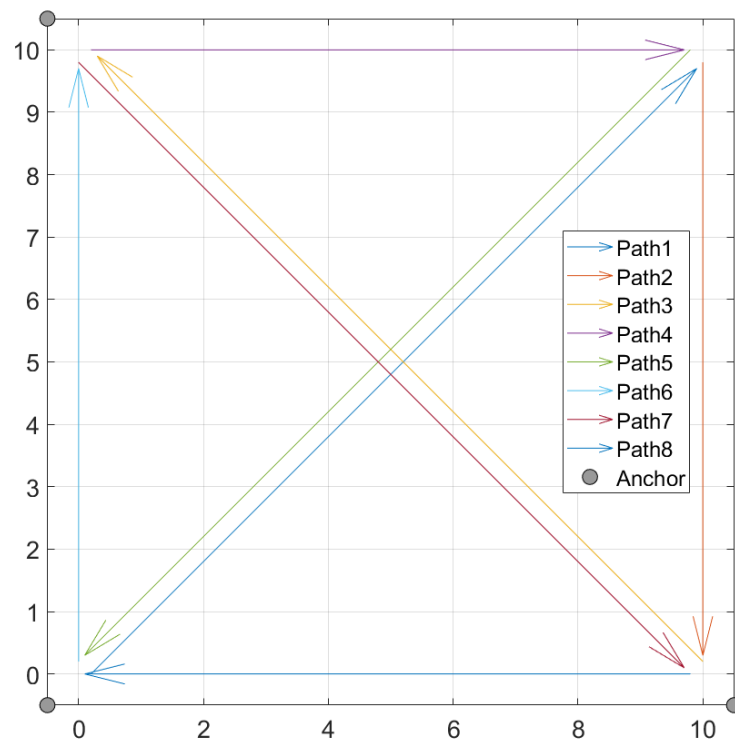
## 5.2 การปรับปรุงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งวัตถุแบบ Online

ในส่วนนี้จะทำการลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในรูปแบบออนไลน์ หรือก็คือการที่จะทำให้ค่าความผิดพลาดนั้นมีค่าน้อยลงหากมีระยะเวลาที่ผ่านไปเรื่อย ๆ ซึ่งจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกคือใช้การ Simulation เพื่อที่จะดูว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นมีการปรับปรุงอยู่หรือไม่ และในส่วนหลังคือการนำวิธีการที่ใช้ใน Simulation ไปใช้ในการทดลองกับสถานที่จริง

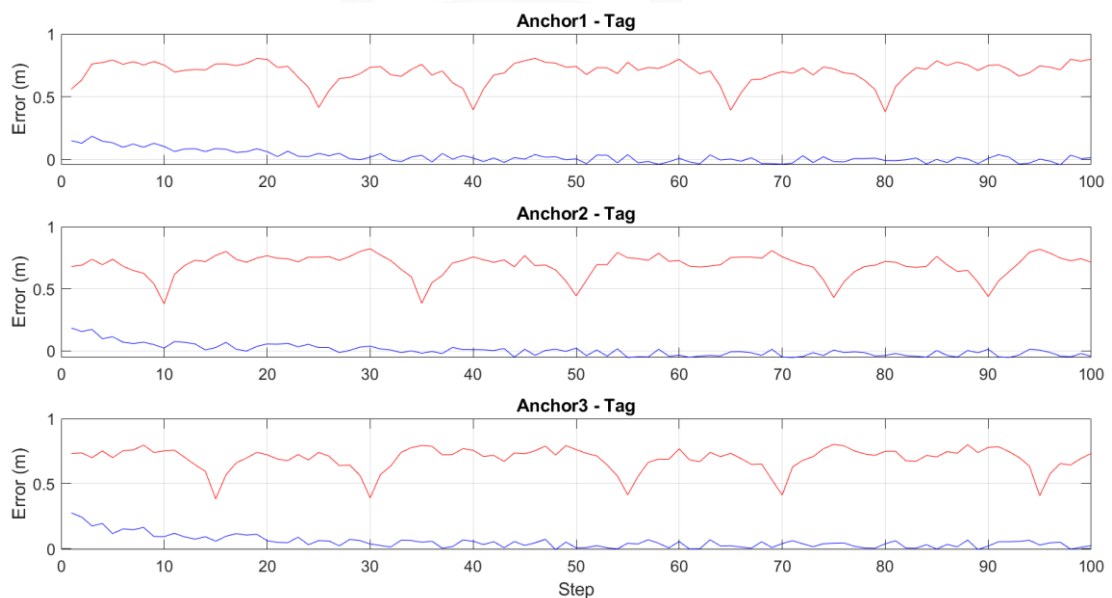
### 5.2.1 การทดลองที่ 1: Simulation

เราได้ทำการ Simulation โดยใช้โปรแกรม Matlab โดยตั้ง Anchor node ไว้ 3 จุด และให้ Tag node มีการเคลื่อนที่ไปรอบ ๆ ดังรูปที่ 5.5 ซึ่งเราได้จำลองค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นโดยอ้างอิงจากค่าที่บันทึกได้ในการทดลองจากส่วนก่อนหน้า โดยใช้ตัวกรองคาลมานเข้าไปเพื่อให้ตัวแปรภายใน

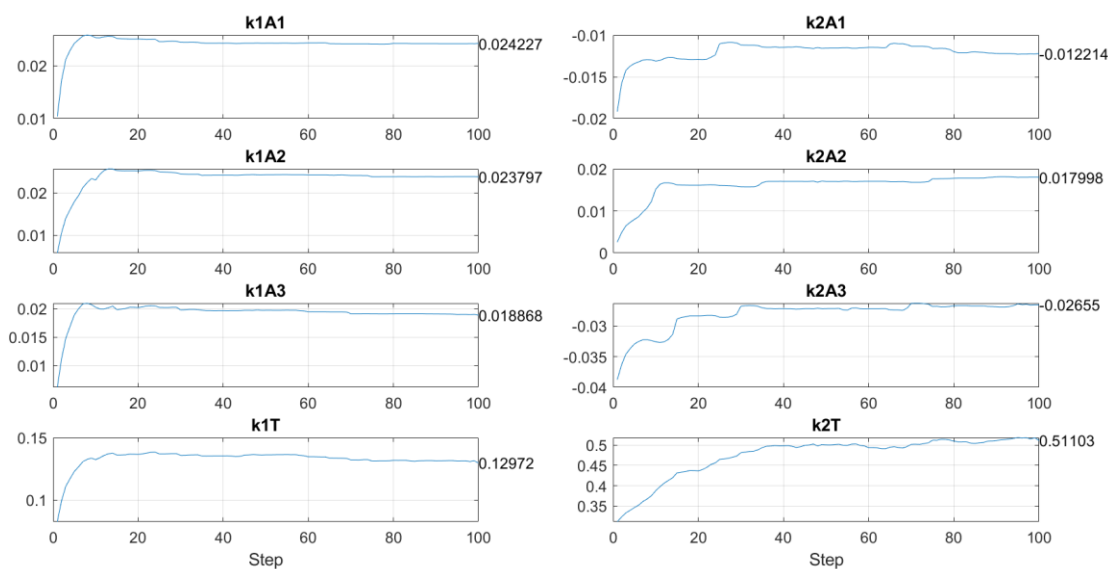
มีการปรับปรุงอยู่ตลอดเวลา รูปที่ 5.6 แสดงถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการ Simulation โดยผ่านไป 100 รอบการทำงาน จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าที่ลดลงเรื่อย ๆ ตามรอบที่เปลี่ยนไป



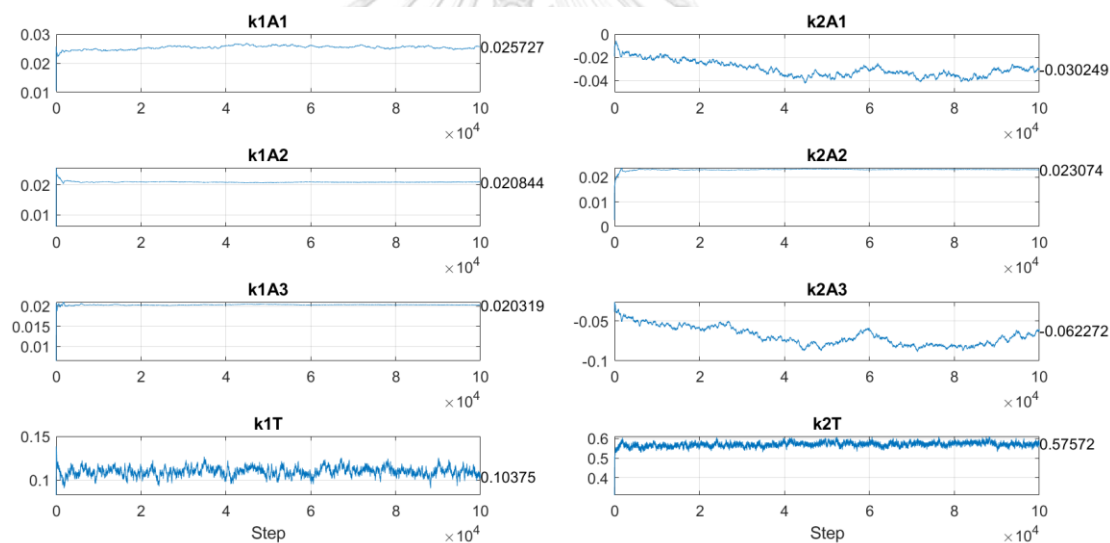
รูปที่ 5.5 เส้นทางการเคลื่อนที่ของ Tag node ใน Simulation



รูปที่ 5.6 ค่าความผิดพลาดที่เปลี่ยนไปเมื่อเทียบกับ Step การทำงานในโปรแกรมคำนวณ



รูปที่ 5.7 ค่าตัวแปรภายในของการทำงานภายใน 100 รอบ



รูปที่ 5.8 ค่าตัวแปรภายในของการทำงานภายใน 100,000 รอบ

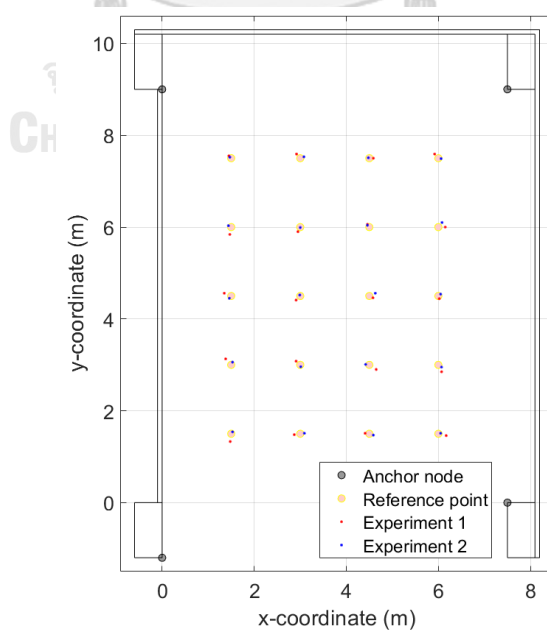
ในการทดลองนี้ได้ทำการบันทึกค่าตัวแปรภายในที่มีการเปลี่ยนไปในแต่ละรอบการคำนวณเอาไว้ ดังรูปที่ 5.7 และ 5.8 ซึ่งในรูปที่ 5.7 นั้นจะแสดงค่าตัวแปรภายในของการทำงานภายใน 100 รอบ และรูปที่ 5.8 จะเป็นการทำงาน 100,000 รอบ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้นั้นพบว่าเมื่อรอบการทำงานผ่านไป จะทำให้ค่าคงที่ภายในนั้นลู่เข้าสู่ค่า ๆ หนึ่ง ซึ่งจะมีผลต่อการปรับปรุงค่าความผิดพลาดของระยะที่ได้จากเซนเซอร์ ทำให้ระยะที่ได้นั้นมีความแม่นยำมากขึ้น

### 5.2.2 การทดลองที่ 2: Experiment

จากการทดลองในส่วนก่อนหน้าที่เป็นการ Simulation ได้ผลลัพธ์ในการปรับปรุงค่าความผิดพลาดที่ดีขึ้น จึงได้นำเอาวิธีการจากการทดลองก่อนหน้ามาทดลองในสถานการณ์จริง ดังรูปที่ 5.9 พื้นที่จริงมีขนาดประมาณ  $7.5 \times 9$  เมตร โดยทำการติดตั้ง Anchor node ไว้ที่เสาที่อยู่บริเวณแต่ละมุมของพื้นที่ทดลองโดยตำแหน่งของ Anchor node แต่ละตัวจะอยู่ในตารางที่ 5.1 และได้ทำการทดลองเคลื่อนที่ Tag node ที่ติดอยู่บนรถเข็น โดยเคลื่อนที่ไปยังจุดอ้างอิงที่กำหนดไว้ในตารางที่ 5.2 ซึ่งผลการทดลองที่ได้ทั้งนี้จะถูกแสดงไว้ในรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.9 สถานที่ทดสอบการปรับปรุงค่าความผิดพลาดจากการระบุตำแหน่งบนระนาบ 2 มิติ



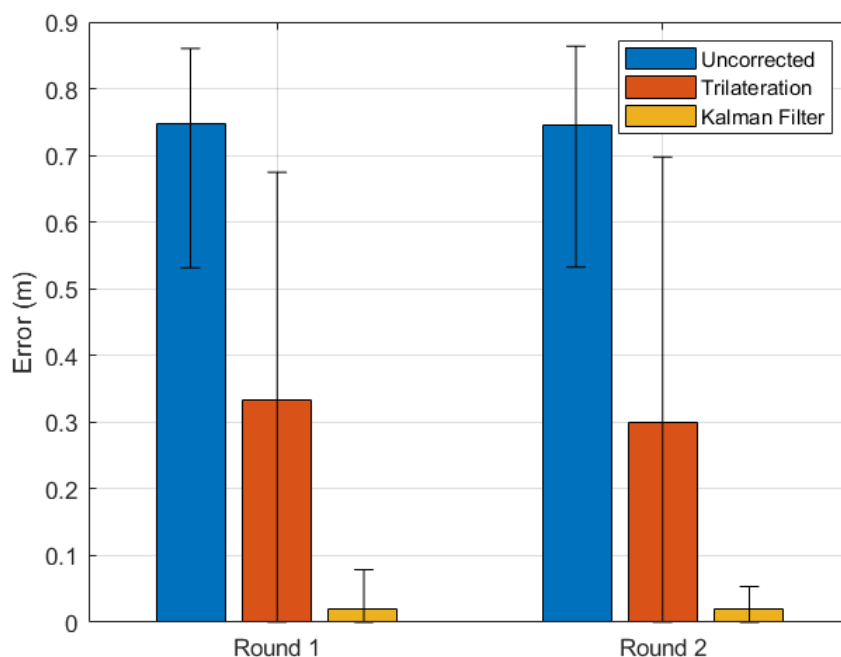
รูปที่ 5.10 ตำแหน่งที่ได้จากการปรับปรุงค่าความผิดพลาด

ตารางที่ 5.2 ตารางตำแหน่งของ Anchor Node ในการทดลองที่ 2.1

Anchor Nodes	ตำแหน่ง	
	x (m)	y (m)
1	0.00	0.00
2	0.00	9.00
3	7.50	0.00
4	7.50	9.00

ตารางที่ 5.3 ตารางตำแหน่งของจุดอ้างอิงและจุดที่ได้จากการทดสอบในการทดลองที่ 2.1

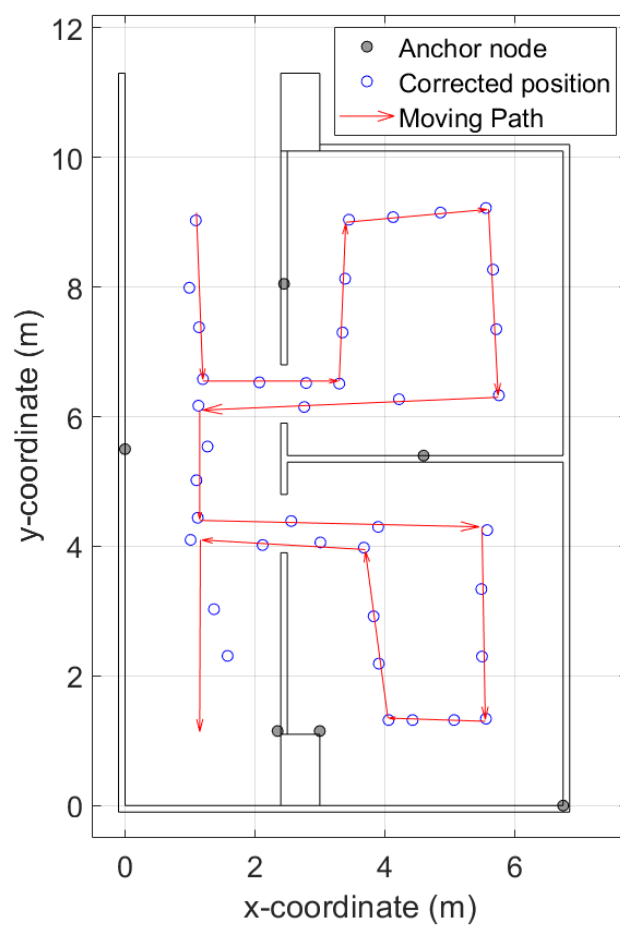
จุดอ้างอิง	ตำแหน่ง		การทดสอบ ครั้งที่ 1	ตำแหน่ง		การทดสอบ ครั้งที่ 2	ตำแหน่ง	
	x (m)	y (m)		x (m)	y (m)		x (m)	y (m)
#1	1.50	7.50	#1	1.45	7.55	#1	1.47	7.52
#2	1.50	6.00	#2	1.47	5.84	#2	1.44	6.03
#3	1.50	4.50	#3	1.35	4.56	#3	1.46	4.45
#4	1.50	3.00	#4	1.38	3.13	#4	1.53	3.06
#5	1.50	1.50	#5	1.48	1.33	#5	1.53	1.54
#6	3.00	7.50	#6	2.92	7.59	#6	3.08	7.53
#7	3.00	6.00	#7	2.95	5.90	#7	3.00	5.99
#8	3.00	4.50	#8	2.91	4.41	#8	2.99	4.52
#9	3.00	3.00	#9	2.91	3.08	#9	3.01	2.96
#10	3.00	1.50	#10	2.87	1.48	#10	3.09	1.51
#11	4.50	7.50	#11	4.59	7.50	#11	4.48	7.51
#12	4.50	6.00	#12	4.46	6.06	#12	4.46	6.04
#13	4.50	4.50	#13	4.58	4.46	#13	4.63	4.56
#14	4.50	3.00	#14	4.65	2.90	#14	4.42	3.01
#15	4.50	1.50	#15	4.41	1.51	#15	4.59	1.47
#16	6.00	7.50	#16	5.92	7.59	#16	6.06	7.49
#17	6.00	6.00	#17	6.15	6.00	#17	6.08	6.10
#18	6.00	4.50	#18	6.02	6.05	#18	4.44	4.54
#19	6.00	3.00	#19	6.07	6.07	#19	2.85	2.95
#20	6.00	1.50	#20	6.17	6.05	#20	1.46	1.51



รูปที่ 5.11 กราฟแสดงค่าความผิดพลาดของระยะระหว่างเซนเซอร์ทั้งก่อนและหลังการลดค่าความผิดพลาด

จากรูปที่ 5.11 แสดงให้เห็นว่าการระบุตำแหน่งที่มีการปรับปรุงค่าแล้วมีความแม่นยำในการระบุตำแหน่งมากกว่าการที่นำระยะที่วัดได้จากเซนเซอร์มาระบุตำแหน่งโดยตรง และการทดสอบครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีความแตกต่างกันที่ค่าความผิดพลาดที่เป็นค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด ซึ่งการทดลองแรกนั้นค่าตัวแปรภายในที่ใส่ลงไปยังไม่ได้ทำการคำนวณค่าใหม่ แต่เมื่อมีการขยับ Tag node ไปเรื่อยๆ ค่าตัวแปรภายในจะถูกทำให้ลู่เข้าสู่ค่าคงที่ และทำให้เกิดการปรับปรุงค่าความผิดพลาดที่เกิดจากการระบุตำแหน่ง

การทดลองในสถานการณ์จริงอีกส่วนที่เราได้ทดสอบไปนั้นคือการระบุตำแหน่งเมื่อมีการเคลื่อนที่ผ่านห้องต่าง ๆ โดยทำให้เหมือนสถานการณ์จริงมากที่สุด ดังรูปที่ 5.12 เราทำการติดตั้ง Anchor node ไว้ที่ผนังห้องโดยตำแหน่งจะแสดงในตารางที่ 5.3 และติด Tag node ไว้บนรถเข็น โดยทำการเคลื่อนที่ Tag node ผ่านผนังกันไปยังจุดอ้างอิงต่าง ๆ ที่อยู่ที่ปลายทั้ง 2 ฝั่งของลูกศรที่ได้กำหนดจุดอ้างอิงไว้ในตารางที่ 5.4 ซึ่งระหว่างจุดอ้างอิงเราได้ทำการเก็บผลการทดลองเอาไว้อีก 2 ตำแหน่ง ผลการทดลองที่เป็นค่าความผิดพลาดของตำแหน่งที่วัดและคำนวณได้เมื่อเทียบกับตำแหน่งของจุดอ้างอิงจะถูกแสดงในตารางที่ 5.5



รูปที่ 5.12 เส้นทางและตำแหน่งของการเคลื่อนที่ของ Tag

ตารางที่ 5.4 ตารางตำแหน่งของ Anchor Node ในการทดลองที่ 2.2

Anchor Nodes	ตำแหน่ง	
	x (m)	y (m)
1	0.00	5.50
2	2.35	1.15
3	2.45	8.05
4	3.00	1.15
5	4.60	5.40
6	6.75	0.00

ตารางที่ 5.5 ตารางตำแหน่งของจุดอ้างอิงและจุดที่ได้จากการทดสอบในการทดลองที่ 2.2

จุดอ้างอิง	ค่าความผิดพลาด			จุดอ้างอิง	ค่าความผิดพลาด		
	x (m)	y (m)	ตำแหน่ง (m)		x (m)	y (m)	ตำแหน่ง (m)
#1	0.01	0.12	0.12	#8	0.03	0.04	0.05
#2	0	0.03	0.03	#9	0.01	0.01	0.01
#3	0	0.04	0.04	#10	0.01	0.04	0.04
#4	0.05	0.04	0.06	#11	0.01	0.03	0.03
#5	0.04	0.02	0.04	#12	0.02	0.03	0.03
#6	0.01	0.03	0.03	#13	0.15	0	0.15
#7	0.02	0.07	0.07	#14	-	-	-

จากการทดลองพบว่าการใช้วิธีลดค่าความผิดพลาดด้วยการใช้ตัวกรองคาลมานร่วมกับการวิเคราะห์การถดถอยนั้นสามารถที่จะนำมาใช้ระบุตำแหน่งในการจำลองการทดสอบใช้งานได้เป็นอย่างดี โดยที่ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยที่ได้นั้นมีค่าอยู่ที่ 5 เซนติเมตร



## บทที่ 6

### สรุปผล

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการปรับปรุงค่าความผิดพลาดจากการระบุตำแหน่งของวัตถุบนระนาบ 2 มิติ สำหรับระบบสัญญาณไร้สายที่ใช้เซนเซอร์เคลื่อนความถี่แถบกว้าง โดยนำเอาการลดค่าความผิดพลาดจากระยะระหว่างเซนเซอร์ที่ได้จากการทำการทดลองแบบ offline โดยเก็บชุดตัวอย่างของระยะระหว่างเซนเซอร์มาประมวลผลหารูปแบบของสมการของการวิเคราะห์การถดถอย ซึ่งได้ข้อสรุปว่าการใช้สมการลอการิทึมมาลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นมีประสิทธิภาพมากที่สุด และนำสมการลอการิทึมที่ได้มาลดค่าความผิดพลาดให้มากขึ้นโดยใช้ตัวกรองคาลมานมาปรับปรุงค่าตัวแปรภายในที่อยู่ในสมการลอการิทึม ซึ่งได้ทดสอบในรูปแบบการจำลองในโปรแกรมและทดสอบในพื้นที่ทดสอบจริง พบว่าค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นก่อนที่จะทำการปรับปรุงค่านั้นมีค่าประมาณ 75 เซนติเมตร และลดลงเหลือ 5 เซนติเมตรหลังจากทำการปรับปรุงค่าความผิดพลาด โดยงานวิจัยนี้ทำการระบุตำแหน่งของวัตถุบนระนาบ 2 มิติเท่านั้น ซึ่งวิธีการปรับปรุงค่าความผิดพลาดนั้นสามารถนำไปใช้ได้กับการระบุตำแหน่งในระบบ 3 มิติต่อไปได้ แต่ยังมีข้อแนะนำในส่วนที่เกิดความผิดพลาดมากเมื่อเซนเซอร์ตัวรับกับตัวส่งนั้นมีสิ่งกีดขวางที่มีความหนาแน่นมากซึ่งจะต้องทำการศึกษาต่อไปเพื่อให้การระบุตำแหน่งมีความแม่นยำมากขึ้นในทุกสถานการณ์



## บรรณานุกรม

1. Mautz, R., *Indoor positioning technologies*. 2012.
2. Klepeis, N.E., et al., *The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants*. Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology, 2001. **11**(3): p. 231-252.
3. Basiri, A., et al., *Indoor location based services challenges, requirements and usability of current solutions*. Computer Science Review, 2017. **24**: p. 1-12.
4. Davidovits, P., *Chapter 12 - Waves and Sound*, in *Physics in Biology and Medicine (Fifth Edition)*, P. Davidovits, Editor. 2019, Academic Press. p. 173-192.
5. Nakajima, K., C. Premachandra, and K. Kato, *3D environment mapping and self-position estimation by a small flying robot mounted with a movable ultrasonic range sensor*. Journal of Electrical Systems and Information Technology, 2017. **4**(2): p. 289-298.
6. Aitenbichler, E. and M. Muhlhauser. *An IR local positioning system for smart items and devices*. in *23rd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops, 2003. Proceedings*. 2003. IEEE.
7. Rieker, M., et al., *Automatically detecting pig position and posture by 2D camera imaging and deep learning*. Computers and Electronics in Agriculture, 2020. **174**: p. 105391.
8. Jekabsons, G., V. Kairish, and V. Zuravlyov, *An analysis of Wi-Fi based indoor positioning accuracy*. Applied Computer Systems, 2011. **44**(1): p. 131-137.
9. Cypriani, M., et al. *Open wireless positioning system: a Wi-Fi-based indoor positioning system*. in *2009 IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall*. 2009. IEEE.
10. Caceres, M., F. Sottile, and M.A. Spirito. *WLAN-based real time vehicle locating system*. in *VTC Spring 2009-IEEE 69th Vehicular Technology Conference*. 2009.

IEEE.

11. Xu, H. and L. Yang. *Ultra-wideband technology: Yesterday, today, and tomorrow*. in *2008 IEEE Radio and Wireless Symposium*. 2008. IEEE.
12. Win, M.Z., et al. *History and applications of UWB*. 2009. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
13. Allen, B., et al. *Ultra wideband: Applications, technology and future perspectives*. 2005. international workshop on convergent technologies (IWCT).
14. Kumar, V., S. Pandya, and R. Makavana, *ULTRA WIDE BAND (UWB) COMMUNICATION & ITS APPLICATIONS*. 2015.
15. Neiryneck, D., *An IEEE 802.15. 4A Ultra-Wideband Transceiver for Real Time Localisation and Wireless Sensor Networks*, in *Frequency References, Power Management for SoC, and Smart Wireless Interfaces*. 2014, Springer. p. 297-310.
16. Ubisense. Available from: <https://ubisense.com/>.
17. Gu, Y., A. Lo, and I. Niemegeers, *A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks*. IEEE Communications surveys & tutorials, 2009. **11**(1): p. 13-32.
18. Alereon. Available from: <http://www.alereon.com/>.
19. Decawave. Available from: <https://www.decawave.com/>.
20. BeSpoon. Available from: <https://bespoon.xyz/>.
21. Gezici, S., et al., *Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks*. IEEE signal processing magazine, 2005. **22**(4): p. 70-84.
22. Alarifi, A., et al., *Ultra wideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances*. Sensors, 2016. **16**(5): p. 707.
23. Mao, G., B. Fidan, and B.D. Anderson, *Wireless sensor network localization techniques*. Computer networks, 2007. **51**(10): p. 2529-2553.

24. Decawave. *The implementation of two-way ranging with the DW1000*. Available from: [https://www.decawave.com/wp-content/uploads/2018/10/APS013\\_The-Implementation-of-Two-Way-Ranging-with-the-DW1000\\_v2.3.pdf](https://www.decawave.com/wp-content/uploads/2018/10/APS013_The-Implementation-of-Two-Way-Ranging-with-the-DW1000_v2.3.pdf).
25. Neiryneck, D., E. Luk, and M. McLaughlin. *An alternative double-sided two-way ranging method*. in *2016 13th workshop on positioning, navigation and communications (WPNC)*. 2016. IEEE.
26. Huang, S., et al., *A real-time location system based on RFID and UWB for digital manufacturing workshop*. *Procedia Cirp*, 2017. **63**: p. 132-137.
27. Hindermann, P., et al., *High precision real-time location estimates in a real-life barn environment using a commercial ultra wideband chip*. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020. **170**: p. 105250.
28. Fresk, E., K. Ödmark, and G. Nikolakopoulos, *Ultra wideband enabled inertial odometry for generic localization*. *IFAC-PapersOnLine*, 2017. **50**(1): p. 11465-11472.
29. Bates, D.M. and D.G. Watts, *Nonlinear regression analysis and its applications*. Vol. 2. 1988: Wiley New York.
30. Welch, G. and G. Bishop, *An introduction to the Kalman filter*. 1995, Citeseer.
31. Thomas, F. and L. Ros, *Revisiting trilateration for robot localization*. *IEEE Transactions on robotics*, 2005. **21**(1): p. 93-101.
32. Zhang, A., X. Ye, and H. Hu, *Point In Triangle Testing Based Trilateration Localization Algorithm In Wireless Sensor Networks*. *TIIS*, 2012. **6**(10): p. 2567-2586.
33. Zaniani, M.M., A.M. Shahar, and I.A. Azid. *Trilateration target estimation improvement using new Error Correction Algorithm*. in *2010 18th Iranian Conference on Electrical Engineering*. 2010. IEEE.
34. Yang, J., Y. Li, and W. Cheng, *An improved geometric algorithm for indoor*

*localization*. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2018. **14**(3): p. 1550147718767376.





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**CHULALONGKORN UNIVERSITY**

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นาย พรพัฒน์ ชิวสุนทร
วัน เดือน ปี เกิด	25 กรกฎาคม 2539
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
วุฒิการศึกษา	ปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	กรุงเทพฯ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY