7-335-525

การพัฒนาระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารแบบประหยัดต้นทุนด้วยสัญญาณ Wi-Fi RSSI โดยใช้วิธี Trilateration และ Kalman Filtering

Development of a Cost-Effective Wi-Fi RSSI-Based Indoor Localization System Using Trilateration and Kalman Filtering

เกรียงไกร ลิ่มทอง* เสฏฐวุฒิ สิงห์ที เกียรติขจร จันทร์ตรี กมลชนก พุกอำรุง
ธนภัทร บุญพันธ์ และ อาธร ดำเนินอุดมการณ์
สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และหุ่นยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งแก้ไขปัญหาการระบุตำแหน่งภายในอาคารซึ่งระบบ GPS ไม่สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากสัญญาณถูกกั้นหรือสะท้อนในพื้นที่ปิด ส่งผลให้การนำทางและการติดตามตำแหน่งภายในอาคารขาดความแม่นยำและน่าเชื่อถือ ปัญหานี้สำคัญอย่างยิ่งในสถานที่ที่ต้องการการติดตามและนำทางที่แม่นยำ เช่น มหาวิทยาลัย ห้างสรรพสินค้า และคลังสินค้า เราจึงเสนอระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารโดยอาศัยสัญญาณ Wi-Fi RSSI พร้อมเทคนิค Trilateration และ Kalman filter เพื่อลดสัญญาณรบกวนและเพิ่มความถูกต้องของการวัดระยะทาง

ระบบประกอบด้วยฮาร์ดแวร์ที่ออกแบบมาอย่างประหยัดต้นทุน ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Wemos D1 Mini ร่วมกับเราเตอร์ Wi-Fi TP-LINK TL-WR840N และแบตเตอรี่ลิเธียมโพลิเมอร์ที่รองรับการใช้งานต่อเนื่องกว่า 3 ชั่วโมง ส่วนซอฟต์แวร์พัฒนาเป็นเว็บแอปพลิเคชันที่แสดงตำแหน่งผู้ใช้บนแผนผังหลายชั้น พร้อมระบบจัดการเราเตอร์และรองรับการติดตามหลายอุปกรณ์แบบเรียลไทม์ผ่าน Firebase

ผลการทดสอบภาคสนามพบว่าระบบสามารถระบุตำแหน่งได้แม่นยำเฉลี่ยเพียง 2.5 เมตร เมื่อใช้เราเตอร์สามเครื่องและ Kalman Filter สามารถลดความผันผวนสัญญาณ RSSI ลงได้อย่างมีนัยสำคัญถึง 30% เมื่อเทียบกับวิธีการเฉลี่ย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือที่เพิ่มขึ้นสำหรับการติดตามผู้ใช้ภายในอาคาร ระบบนี้มีความคุ้มค่า รวดเร็ว และง่ายต่อการเข้าถึง ในอนาคตจะมีการผสาน การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เพื่อเพิ่มความแม่นยำและประสิทธิผลยิ่งขึ้นอีกด้วย

คำสำคัญ: การระบุตำแหน่งภายในอาคาร, Wi-Fi RSSI, Trilateration, Kalman filter, การระบุตำแหน่งราคาประหยัด

Abstract

This research addresses the critical problem of indoor positioning where Global Positioning System (GPS) fails to operate effectively due to signal obstruction or reflection in enclosed environments, resulting in

*Corresponding author, E-mail: kriangkrai.l@bu.ac.th

inaccurate and unreliable navigation and location tracking within buildings. This issue is particularly significant in venues requiring precise tracking and navigation, such as universities, shopping centers, and warehouses. The study proposes an indoor positioning system based on Wi-Fi RSSI signals integrated with trilateration techniques and Kalman filtering to reduce signal noise and enhance distance measurement accuracy.

The system comprises cost-effective hardware components, utilizing a Wemos D1 Mini microcontroller in conjunction with a TP-LINK TL-WR840N Wi-Fi router and lithium polymer batteries supporting continuous operation for over three hours. The software component is developed as a web application that displays user positions on multi-floor building plans, featuring router management capabilities and real-time multi-device tracking through Firebase integration.

Field testing results show that the system achieves an average location accuracy of just 2.5 meters using three routers, and a Kalman filter can significantly reduce RSSI fluctuations by up to 30% compared to the average method, demonstrating increased efficiency and reliability for indoor user tracking. The system is cost-effective, fast, and easy to implement. In the future, machine learning will be integrated to further increase accuracy and effectiveness.

Keywords: indoor positioning system, Wi-Fi RSSI, trilateration, Kalman filter, economical positioning

1. ที่มาและความสำคัญ

ระบบระบุตำแหน่งมีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันและการพัฒนาระบบสารสนเทศเชิงพื้นที่ (Location-Based Services) โดยเฉพาะระบบ Global Positioning System (GPS) ที่ใช้งานอย่างแพร่หลายในการเดินทาง การขนส่งโลจิสติกส์ การติดตามยานพาหนะ และการสำรวจเชิงภูมิสารสนเทศ ด้วยความสามารถในการระบุตำแหน่งที่แม่นยำและครอบคลุมพื้นที่กว้างในระดับสากล ทำให้ GPS เป็นเทคโนโลยีมาตรฐานที่ได้รับการยอมรับในหลายภาคส่วน แต่ GPS มีข้อจำกัดสำคัญเมื่อใช้ภายในอาคาร (Indoor Positioning System) เนื่องจากสัญญาณดาวเทียมความถี่สูงถูกลดทอน (Signal Attenuation) เมื่อผ่านสิ่งกีดขวาง เช่น ผนัง หลังคา หรือวัสดุโครงสร้างที่หนาแน่น นอกจากนี้ยังเกิดปัญหาการสะท้อนและการเบี่ยงเบนของสัญญาณ (Non-Line-of-Sight) ส่งผลให้สัญญาณ GPS มีคุณภาพต่ำและผลลัพธ์การระบุตำแหน่งขาดความแม่นยำ

ข้อจำกัดดังกล่าวส่งผลกระทบต่อการประยุกต์ใช้ในสถานการณ์จริง เช่น การติดตามบุคลากรในโรงพยาบาล การจัดการสินค้าคงคลังในคลังเก็บสินค้า การนำทางในห้างสรรพสินค้า หรือการค้นหาตำแหน่งในสำนักงานที่มีพื้นที่ซับซ้อน ความต้องการระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารที่มีความแม่นยำและเชื่อถือได้จึงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในสังคมดิจิทัล

เพื่อแก้ไขปัญหาของ GPS ในอาคาร การใช้สัญญาณ Wi-Fi เป็นทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากโครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายไร้สายนี้มีการติดตั้งอย่างแพร่หลายในอาคารต่างๆ ทำให้สามารถใช้ประโยชน์จากโครงสร้างพื้นฐานเดิมได้โดยไม่ต้องลงทุนด้านฮาร์ดแวร์เพิ่มเติม หลักการระบุตำแหน่งด้วย Wi-Fi อาศัยการวัดค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ

(Received Signal Strength Indicator: RSSI) จากอุปกรณ์กระจายสัญญาณไร้สาย (Access Point) ข้อมูล RSSI จากหลายแหล่งสามารถนำมาประเมินระยะทางและใช้เทคนิค Trilateration ในการคำนวณหาตำแหน่งของอุปกรณ์ได้

แม้ Wi-Fi จะช่วยลดต้นทุนและเพิ่มโอกาสในการใช้งาน แต่ก็มีข้อจำกัดจากความผันผวนของค่า RSSI ที่อาจเปลี่ยนแปลงได้จากปัจจัยต่างๆ เช่น การเคลื่อนไหวของผู้ใช้งาน การเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม สิ่งกีดขวาง และการแทรกสอดของสัญญาณ เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว การนำเทคนิคการกรองสัญญาณขั้นสูงอย่าง Kalman Filtering ซึ่งเป็นอัลกอริทึมเชิงสถิติที่สามารถประเมินค่าตัวแปรที่แท้จริงจากข้อมูลที่มีความไม่แน่นอนและสัญญาณรบกวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ จะช่วยปรับปรุงความเสถียรและเพิ่มความแม่นยำให้กับผลลัพธ์การระบุตำแหน่งได้ดียิ่งขึ้น

งานวิจัยนี้จึงศึกษาและพัฒนาระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารที่อาศัยสัญญาณ Wi-Fi RSSI ร่วมกับเทคนิค Trilateration และ Kalman Filtering เพื่อเข้ามาแก้ปัญหาข้อจำกัดของ GPS ที่ผู้ใช้งานต้องการระบบติดตามตำแหน่งที่ถูกต้องเชื่อถือได้ และต้นทุนไม่สูง

2. วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารที่มีความแม่นยำ เสถียรภาพสูง และสามารถดำเนินการได้ในต้นทุนที่ต่ำ โดยใช้สัญญาณ Wi-Fi RSSI ร่วมกับเทคนิค Trilateration และการประมวลผลด้วย Kalman Filtering เพื่อลดสัญญาณรบกวนและเพิ่มความถูกต้องของการคำนวณตำแหน่ง วัตถุประสงค์เชิงเทคนิคประกอบด้วย การพัฒนาอัลกอริทึมสำหรับการรับและแปลงค่าความแรงของสัญญาณให้เป็นระยะทาง การคำนวณพิกัดเชิงพื้นที่ผ่านกระบวนการ Trilateration และการปรับปรุงความเสถียรของผลลัพธ์ด้วย Kalman Filtering โดยอัลกอริทึมทั้งหมดถูกประยุกต์ใช้งานบนแพลตฟอร์ม Embedded System ที่มีทรัพยากรจำกัด เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในสภาพแวดล้อมจริง

นอกจากนี้ วัตถุประสงค์เชิงเศรษฐกิจและสังคมยังมุ่งเน้นไปที่การใช้โครงสร้างพื้นฐาน Wi-Fi ที่มีอยู่แล้วร่วมกับอุปกรณ์ราคาประหยัดอย่าง Wemos D1 Mini เพื่อช่วยลดต้นทุนการติดตั้งและบำรุงรักษา อีกทั้งยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในสถานที่ที่หลากหลาย เช่น โรงพยาบาล ห้างสรรพสินค้า หรือสำนักงาน ทั้งนี้ การวิจัยได้กำหนดขอบเขตการทดลองภายในตึกเรียนจริงเพื่อทดสอบประสิทธิภาพและความถูกต้องของระบบ ผลลัพธ์ที่คาดว่าจะได้รับคือการสร้างต้นแบบระบบ Indoor Positioning ที่มีต้นทุนต่ำ เหมาะสมต่อการใช้งานจริง และสามารถต่อยอดไปสู่การพัฒนาระบบที่ซับซ้อนมากขึ้นในอนาคต

3. ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หัวข้อนี้นำเสนอทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยแบ่งส่วนประกอบออกเป็นสองส่วนหลัก ได้แก่ (1) การเลือกไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับระบบ IoT ที่สนับสนุนการเก็บและประมวลผลข้อมูลสัญญาณ และ (2) เทคนิคการประมวลผลสัญญาณที่ใช้ในการประมาณตำแหน่ง โดยเฉพาะการใช้ Kalman Filtering และวิธีการ Trilateration รวมถึงการพัฒนาแนวทางขั้นสูง เช่น การใช้ CSI, Deep Learning และ Kalman Filter แบบปรับปรุง ทั้งนี้เพื่อตอบโจทย์การสร้างระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารที่มีความแม่นยำและประหยัดต้นทุน

3.1 หลักการเลือกไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับระบบ IoT

การเลือกไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับระบบ IoT เป็นการตัดสินใจเชิงวิศวกรรมที่ต้องพิจารณาปัจจัยสำคัญสามประการตามแนวทางของ James et al. (2022) ได้แก่ สมรรถนะการประมวลผล ข้อจำกัดด้านพลังงาน และความสามารถในการเชื่อมต่อ

หลักการ "Right-sizing" มีบทบาทสำคัญในการเลือกทรัพยากรฮาร์ดแวร์ที่เหมาะสมกับภาระงานจริง เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ทรัพยากรเกินความจำเป็น Simion et al. (2023) แสดงให้เห็นถึง trade-off ระหว่างต้นทุน พลังงาน และสมรรถนะการคำนวณของไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละประเภท

ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ESP ของ Espressif ได้รับความนิยมสูงในระบบ IoT เนื่องจากมีโมดูลสื่อสารไร้สายภายในตัวและชุมชนนักพัฒนาขนาดใหญ่ การเปรียบเทียบไมโครคอนโทรลเลอร์หลักสามรุ่น พบว่า:

- **ESP8266 v2**: CPU 80 MHz, GPIO 16 ขา, Wi-Fi 2.4 GHz แต่มีขนาดบอร์ดใหญ่
- **ESP32 DEVKIT**: CPU dual-core 240 MHz, รองรับ Wi-Fi และ BLE แต่มีต้นทุนสูง
- **Wemos D1 Mini**: พัฒนาจาก ESP8266 ขนาดกะทัดรัด (34.2×25.6 มม.) น้ำหนักเบา ราคาประมาณ 110 บาท

เราจึงเลือก Wemos D1 Mini ที่สอดคล้องกับหลักการ Right-sizing และ Value Engineering ที่เน้นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อเทียบกับต้นทุน ในขณะที่ ESP32 เหมาะสำหรับงานที่ต้องการประสิทธิภาพสูง เช่น ระบบ IoT แบบกระจายตามการศึกษาของ Romero & Elustondo (2022)

3.2 ทฤษฎีการประมวลผลสัญญาณและการระบุตำแหน่ง

ในการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร การเข้าใจทฤษฎีการประมวลผลสัญญาณและเทคนิคการระบุตำแหน่งต่างๆ เป็นรากฐานสำคัญที่จะนำไปสู่การออกแบบระบบที่มีประสิทธิภาพ เทคนิคหลักที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในงานวิจัยด้านนี้คือ Kalman Filter ซึ่งเป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ประมาณสถานะของระบบที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยสามารถพิจารณาทั้งข้อผิดพลาดจากแบบจำลองและสัญญาณรบกวนจากการวัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กระบวนการทำงานของ Kalman Filter ประกอบด้วยสองขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการทำนาย (Prediction Step) และขั้นตอนการปรับปรุง (Update Step) โดยใช้ Kalman Gain ในการปรับสมดุลระหว่างผลการทำนายกับค่าที่วัดได้จริง ความสำคัญของเทคนิคนี้ได้รับการยืนยันจากงานวิจัยของ Wibisono & Wicaksono (2022) และ Luo et al. (2022) ที่แสดงให้เห็นว่าการกรอง RSSI ด้วย Kalman Filter ก่อนการคำนวณ Trilateration สามารถช่วยลดความคลาดเคลื่อนและเพิ่มเสถียรภาพของผลลัพธ์ได้อย่างมีนัยสำคัญ

นอกเหนือจาก RSSI แล้ว Channel State Information (CSI) ก็เป็นอีกหนึ่งแหล่งข้อมูลที่มีคุณค่าสำหรับการระบุตำแหน่ง CSI เป็นข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับการตอบสนองของช่องสัญญาณไร้สายที่สามารถบันทึกทั้งแอมพลิจูดและเฟส มีความละเอียดสูงกว่า RSSI อย่างเห็นได้ชัด การศึกษาของ Sun et al. (2021) ได้นำเสนอวิธี CLRS (CSI-Based Indoor Localization by Region Sectioning) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า CSI สามารถลดผลกระทบจาก multipath และเพิ่มความแม่นยำของการระบุตำแหน่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อีกเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจคือ Phase of Arrival (PoA) ซึ่งใช้การเปลี่ยนแปลงของเฟสสัญญาณที่เดินทางถึงผู้รับในการประมาณระยะทางหรือทิศทาง เทคนิคนี้สอดคล้องกับคุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เฟสจะเปลี่ยนแปลงตามระยะทางการเดินทางของสัญญาณ และสามารถใช้ร่วมกับเสาอากาศหลายตัวเพื่อหาทิศทางของแหล่งสัญญาณได้อย่างแม่นยำ

แนวโน้มการพัฒนาในปัจจุบันมุ่งเน้นไปที่การบูรณาการเทคนิคหลายรูปแบบเข้าด้วยกัน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความทนทานของระบบ Wang และ Park (2020) ได้นำเสนอการใช้ Weight Grey Prediction Model ร่วมกับ RSSI และ CSI แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้ข้อมูลหลายมิติในการปรับปรุงความแม่นยำ ในขณะเดียวกัน Reyes et al. (2023) ได้ประยุกต์ใช้ Deep Neural Networks ร่วมกับ vector embedding ในการทำ fingerprinting ซึ่งไม่เพียงแต่ลดภาระการดูแลฐานข้อมูลเท่านั้น แต่ยังช่วยปรับปรุงความถูกต้องในระยะยาวอีกด้วย

การพัฒนาเทคนิคกรองขั้นสูงก็เป็นอีกหนึ่งทิศทางที่สำคัญ Pham et al. (2022) ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ Unscented Kalman Filter ร่วมกับเทคโนโลยี UWB สามารถปรับปรุงความเสถียรของการคาดคะเนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ Yimwadsana และ Serey (2020) ได้ผสาน AoA-based Wi-Fi localization กับ Kalman Filter ที่ปรับปรุงแล้วเพื่อเพิ่มความแม่นยำในสภาพแวดล้อมจริง

อย่างไรก็ตาม ระบบระบุตำแหน่งยังคงต้องเผชิญกับข้อจำกัดและความท้าทายที่สำคัญ ทั้งในด้านฮาร์ดแวร์และสภาพแวดล้อม ข้อจำกัดด้านฮาร์ดแวร์ พบว่า ESP8266 (เช่น Wemos D1 Mini) ไม่สามารถรองรับการใช้งาน Channel State Information (CSI) ได้เนื่องจากข้อจำกัดด้าน RAM, CPU และ SDK API ในขณะที่เทคโนโลยีที่มีความแม่นยำสูงอย่าง Ultra-Wideband (UWB) และ Bluetooth Low Energy (BLE) ยังคงมีต้นทุนสูงและต้องลงทุนในโครงสร้างพื้นฐานใหม่สำหรับสภาพแวดล้อม ระบบต้องเผชิญกับปัญหา multipath effect และการรบกวนจากอุปกรณ์อื่น ด้วยเหตุนี้ ความใหม่ (Novelty) ของงานวิจัยนี้จึงอยู่ที่การสร้างสมดุลระหว่างความแม่นยำและความทนทาน โดยการผสานเทคนิค Kalman Filtering เข้ากับระบบ Wi-Fi RSSI ที่ใช้ฮาร์ดแวร์ Wemos D1 Mini ที่มีทรัพยากรจำกัดแต่มีต้นทุนต่ำที่สุด เพื่อพิสูจน์ความเป็นไปได้ในการใช้งานจริงในสภาวะแวดล้อมที่ซับซ้อน

3.3 การวิเคราะห์เปรียบเทียบเทคนิคการระบุตำแหน่งที่เกี่ยวข้อง

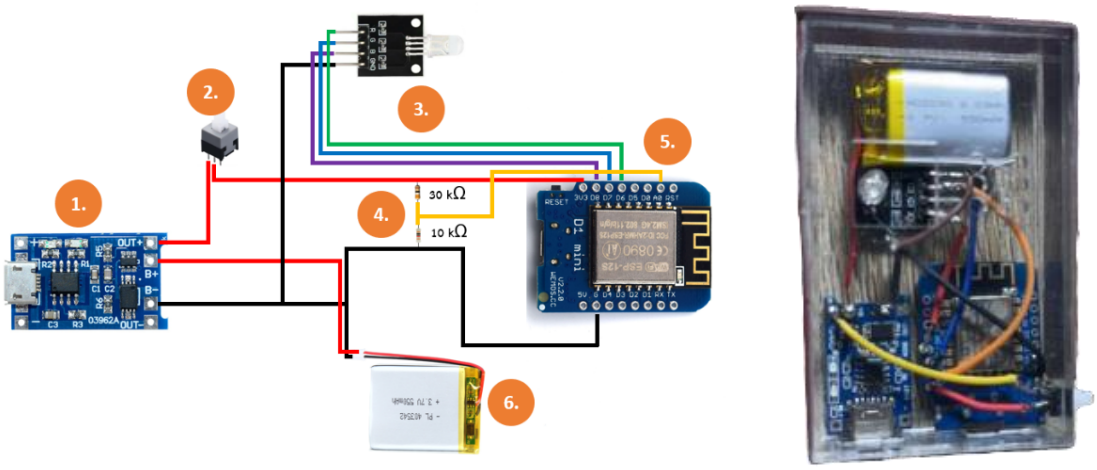
เพื่อยืนยันความเหมาะสมในการเลือกใช้ Wi-Fi RSSI และ Kalman Filter สำหรับระบบราคาประหยัด หัวข้อนี้จึงนำเสนอการเปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของเทคนิคการระบุตำแหน่งภายในอาคารที่ได้รับความนิยม โดยเปรียบเทียบในมิติของความแม่นยำ ต้นทุนโครงสร้างพื้นฐาน และความซับซ้อนทางเทคนิค ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปเปรียบเทียบเทคนิคการระบุตำแหน่งภายในอาคารที่เกี่ยวข้อง

เทคนิค	ข้อมูลที่ใช้	ข้อดี (Advantages)	ข้อจำกัด (Limitations)	ความแม่นยำโดยทั่วไป
Wi-Fi RSSI	Received Signal Strength Indicator	ใช้โครงสร้างพื้นฐาน Wi-Fi เดิม, ต้นทุนต่ำ	ผันผวนง่าย, ไวต่อสิ่งกีดขวาง (Multipath)	2 - 5 เมตร
Wi-Fi CSI	Channel State Information	ทนทานต่อ Multipath สูง, มีรายละเอียดข้อมูลสูง	ต้องใช้ฮาร์ดแวร์ที่รองรับ (เช่น ESP32), มีข้อจำกัดด้าน API/SDK	0.5 - 2 เมตร

เทคนิค	ข้อมูลที่ใช้	ข้อดี (Advantages)	ข้อจำกัด (Limitations)	ความแม่นยำโดยทั่วไป
UWB	Time of Flight/Difference	แม่นยำสูง, ทนทานต่อสิ่งกีดขวาง	ต้นทุนฮาร์ดแวร์สูง, ต้องติดตั้งโครงสร้างพื้นฐานใหม่	< 0.5 เมตร
Bluetooth/BLE	RSSI	ประหยัดพลังงาน, เหมาะสำหรับการติดตามระยะสั้น	ระยะทางจำกัด, สัญญาณผันผวน	1 - 3 เมตร

การเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่า แม้เทคนิคอื่น เช่น UWB หรือ CSI จะให้ความแม่นยำที่สูงกว่า แต่ Wi-Fi RSSI ยังคงเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดในการสร้างระบบที่ ประหยัดต้นทุน และสามารถนำไปใช้งานได้ทันทีโดยใช้โครงสร้างพื้นฐานที่มีอยู่แล้ว การประยุกต์ใช้ Kalman Filter ในงานวิจัยนี้จึงเป็นการปรับปรุงจุดอ่อนของ RSSI ในด้านความผันผวนของสัญญาณให้มีความเสถียรและแม่นยำยิ่งขึ้น ดังที่ยืนยันโดยงานวิจัยของ Wibisono & Wicaksono (2022)



รูปที่ 1 แผนผังฮาร์ดแวร์ที่ออกแบบ (ซ้าย) และต้นแบบอุปกรณ์จริง (ขวา)

4. วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารแบบประหยัดต้นทุน โดยใช้สัญญาณ Wi-Fi RSSI ร่วมกับเทคนิคการคำนวณ Trilateration และ Kalman Filtering กระบวนการดำเนินงานถูกออกแบบอย่างเป็นระบบ เพื่อสร้างต้นแบบที่มีประสิทธิภาพทั้งด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ รวมถึงการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงเพื่อประเมินความแม่นยำและเสถียรภาพของระบบ

อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ได้รับการออกแบบให้มีลักษณะกะทัดรัดคล้ายพวงกุญแจเพื่อความสะดวกในการพกพา ส่วนประกอบหลักประกอบด้วย โมดูล USB-C Charger, สวิตช์ล็อก, แบตเตอรี่ลิเทียมพอลิเมอร์ 550 mAh, โมดูล LED RGB KY-016 สำหรับแสดงสถานะแบตเตอรี่, ไมโครคอนโทรลเลอร์ Wemos D1 Mini, และตัวต้านทาน 10 kΩ และ 30 kΩ สำหรับวงจร

แบ่งแรงดัน ระบบทำงานโดยส่งแรงดันควบคุมไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อตรวจสอบระดับพลังงานและควบคุม LED แสดงสถานะ ผู้ใช้สามารถรับทราบระดับพลังงานคงเหลือได้อย่างชัดเจน แบตเตอรี่ 550 mAh ใช้กระแส 150 mA สามารถทำงานได้ 3.66 ชั่วโมง และชาร์จด้วยกระแส 1000 mA ใช้เวลา 33 นาที การออกแบบกล่องบรรจุใช้โปรแกรม FreeCAD เพื่อการจัดเรียงชิ้นส่วนที่เหมาะสมและประหยัดพื้นที่ ดังแสดงในรูปที่ 1

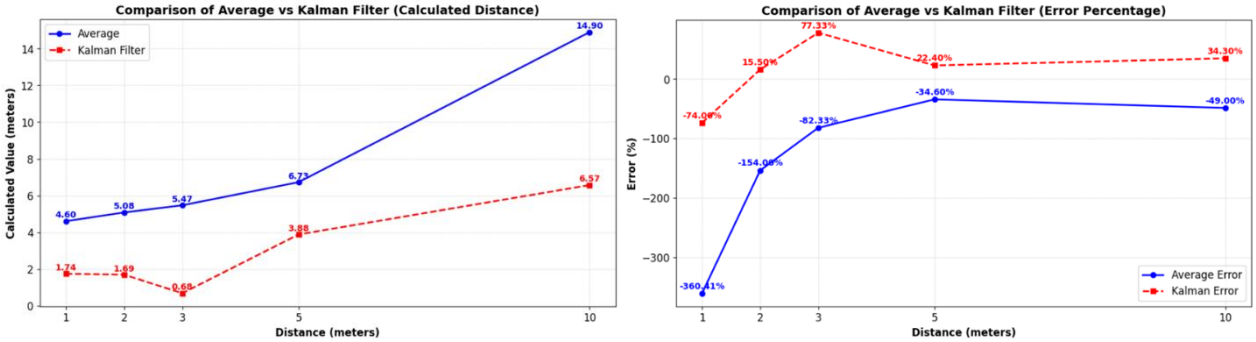
สำหรับการพัฒนาอัลกอริทึมการระบุตำแหน่ง ระบบถูกออกแบบให้สามารถรวบรวมค่าความแรงของสัญญาณ (RSSI) จากเราเตอร์จำนวน 3 จุดที่วางไว้ล่วงหน้า ข้อมูลที่ได้รับจะผ่านการกรองด้วย Kalman Filter ซึ่งช่วยลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนและทำให้ค่าที่ได้มีความเสถียรมากขึ้น Kalman Filter ถูกกำหนดค่าเริ่มต้นด้วยพารามิเตอร์พื้นฐาน เช่น ค่าประมาณเริ่มต้น ความแปรปรวนของข้อผิดพลาด สัญญาณรบกวนกระบวนการ และสัญญาณรบกวนจากการวัด เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือ

หลังจากนั้น ค่าของ RSSI จะถูกแปลงเป็นระยะทางโดยใช้แบบจำลองการสูญเสียสัญญาณตามระยะทาง (Log-Distance Path Loss Model) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากการจัดเรียงสมการให้อยู่ในรูปของระยะทางที่สัมพันธ์กับ RSSI อ้างอิงและค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียสัญญาณ ขั้นตอนต่อมาคือการนำค่าระยะทางจากเราเตอร์ทั้งสามจุดไปเข้าสมการทางเรขาคณิตแบบ Trilateration เพื่อระบุตำแหน่งพิกัดของอุปกรณ์ในเชิงสองมิติ กระบวนการนี้ช่วยให้สามารถประมาณตำแหน่งของอุปกรณ์ได้อย่างแม่นยำมากขึ้นเมื่อเทียบกับการใช้ค่า RSSI เพียงอย่างเดียว

การดำเนินการทดลองถูกออกแบบเพื่อทดสอบความแม่นยำและความเสถียรของระบบในสภาพแวดล้อมจริง การทดลองจัดขึ้นที่ตึก B4 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ โดยเลือกพื้นที่ในชั้น 1 และชั้น 3 เป็นสถานที่เก็บข้อมูล เราเตอร์จำนวน 3 ตัวถูกติดตั้งในตำแหน่งที่ผ่านการคำนวณเพื่อให้ได้ความครอบคลุมพื้นที่สูงสุด และเพิ่มความแม่นยำของการคำนวณตำแหน่ง

การทดลองชุดแรกเน้นเปรียบเทียบวิธีการกรองสัญญาณ โดยเปรียบเทียบระหว่างวิธีการเฉลี่ยค่า (Average) และ Kalman Filter ในการกรองค่า RSSI เพื่อแปลงเป็นระยะทางผ่านสมการ Log-Distance Path Loss Model การทดลองนี้ช่วยประเมินประสิทธิภาพของเทคนิคการกรองที่แตกต่างกันและสะท้อนประสิทธิภาพที่แตกต่างกันของวิธีการทั้งสอง

นอกจากการทดสอบวิธีการกรองสัญญาณแล้ว ยังได้มีการทดลองเก็บข้อมูล RSSI จากอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับโทรศัพท์มือถือในระยะทางที่แตกต่างกัน เพื่อวิเคราะห์ความสอดคล้องและความแตกต่างของอุปกรณ์ การติดตั้งเราเตอร์ในตำแหน่งต่างระดับ ได้แก่ บนพื้นและบนเพดาน ก็เป็นอีกปัจจัยที่ถูกทดสอบเพื่อประเมินผลกระทบต่อความแม่นยำของการเก็บข้อมูล



รูปที่ 2 เปรียบเทียบวิธี Kalman Filter กับวิธี Average Method ด้วยระยะทาง (ซ้าย) และเปอร์เซ็นความผิดพลาด (ขวา)

การทดลองระบุตำแหน่งจริงถูกออกแบบให้ทดสอบทั้งในกรณีที่ใช้เราเตอร์ 2 จุดและ 3 จุด สำหรับกรณีที่ใช้เราเตอร์ 2 จุด ยังคงมีข้อจำกัดในด้านความแม่นยำ เมื่อเพิ่มจำนวนเราเตอร์เป็น 3 จุดและประยุกต์ใช้เทคนิค Trilateration ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความแม่นยำในการระบุตำแหน่งเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

เพื่อประเมินความถูกต้องเชิงปริมาณ การทดลองสุดท้ายได้ดำเนินการวัดค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างตำแหน่งจริงกับตำแหน่งที่ระบบระบุ โดยเลือกจุดทดสอบ 15 ตำแหน่งในแต่ละชั้นของอาคาร ในชั้นที่ 1 ได้เลือกจุดทดสอบทั้งในทางเดินตรงกลางและห้อง Workshop ขณะที่ในชั้นที่ 3 เลือกจุดทดสอบทั้งในทางเดินและภายในห้องเรียน ความแตกต่างระหว่างตำแหน่งจริงและตำแหน่งที่ระบบระบุถูกนำมาใช้เป็นดัชนีบ่งชี้ความแม่นยำของระบบ

ขั้นตอนสุดท้ายของการวิจัยคือการวิเคราะห์ข้อมูล โดยมีการนำผลการทดลองทั้งหมดมาประเมินประสิทธิภาพของระบบในหลายมิติ ทั้งด้านความแม่นยำ เสถียรภาพ และความเหมาะสมของการติดตั้งอุปกรณ์ การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของวิธีการกรองสัญญาณที่แตกต่างกันให้ข้อสรุปเชิงประจักษ์ว่า Kalman Filter สามารถเพิ่มความเสถียร และลดความคลาดเคลื่อนของการคำนวณตำแหน่งได้มากกว่าวิธีการเฉลี่ยทั่วไป นอกจากนี้ ยังมีการวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยแวดล้อม เช่น การสะท้อนสัญญาณและสิ่งกีดขวาง ซึ่งมีผลโดยตรงต่อคุณภาพของสัญญาณและความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง ข้อมูลเชิงลึกเหล่านี้ช่วยยืนยันถึงประสิทธิภาพของต้นแบบระบบที่พัฒนาขึ้น และสะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพในการนำไปปรับใช้กับสภาพแวดล้อมจริงที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น

5. ผลและวิจารณ์

5.1 ความแม่นยำของ Kalman Filter เทียบกับ Average Method

จากผลการเปรียบเทียบระหว่าง Kalman Filter กับ Average Method ดังแสดงในรูปที่ 2 สามารถสรุปได้ว่าการนำวิธีการกรองสัญญาณแบบ Kalman Filter มาใช้มีความสามารถในการลดความผันผวนของค่าระดับสัญญาณ Received Signal Strength Indicator (RSSI) ได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเทียบกับวิธีการเฉลี่ยค่าทั่วไป (Average Method) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทดสอบที่ระยะจริง 1 เมตร พบว่า Kalman Filter ให้ค่าระยะทางเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากกว่า กล่าวคือ ผลลัพธ์จาก Kalman Filter อยู่ที่ประมาณ 1.74 เมตร ซึ่งคิดเป็นความคลาดเคลื่อนร้อยละ 74 ในขณะที่ Average Method ให้ค่าระยะทางเฉลี่ยสูงถึง 4.6 เมตร คิดเป็นความคลาดเคลื่อนมากกว่าร้อยละ 360 ผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็น

ถึงประสิทธิภาพของ Kalman Filter ในการลดความผิดพลาดของการประเมินระยะทาง และยืนยันว่าการใช้วิธีการกรองสัญญาณที่เหมาะสมสามารถยกระดับความแม่นยำของระบบระบุตำแหน่งได้อย่างมีนัยสำคัญ

5.2 ประสิทธิภาพของระบบ 2 Router เทียบกับ 3 Router

ผลการทดสอบระบบระบุตำแหน่งโดยใช้จำนวน Router ที่แตกต่างกันสะท้อนถึงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนจุดอ้างอิงและความแม่นยำที่ได้รับ โดยกรณีที่ใช้ Router เพียง 2 ตัว ระบบสามารถระบุตำแหน่งได้ในระดับที่เพียงพอต่อการใช้งานทั่วไป โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยประมาณ 2–4 เมตร ลักษณะการติดตั้งนี้มีข้อได้เปรียบในด้านความง่ายต่อการติดตั้งและการประหยัดต้นทุน เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ที่ไม่ต้องการความละเอียดสูง เช่น การติดตามการเคลื่อนที่โดยรวมของผู้ใช้งาน รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างผลลัพธ์ที่ได้และตำแหน่งจริงเพื่อนำมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นความผิดพลาด

ในขณะที่ระบบที่ใช้ Router จำนวน 3 ตัวให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำกว่ามาก โดยมีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 1–2.5 เมตร ความแม่นยำที่สูงขึ้นนี้เกิดจากการที่ระบบสามารถประยุกต์ใช้เทคนิค Trilateration ได้อย่างเต็มรูปแบบ จึงทำให้การประมาณตำแหน่งมีความน่าเชื่อถือสูงกว่า การกำหนดตำแหน่งด้วย Router สามตัวจึงเหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการความละเอียดสูง เช่น การติดตามตำแหน่งบุคคลในพื้นที่ขนาดใหญ่หรือการใช้งานในงานด้านความปลอดภัย

5.3 ประสิทธิภาพของระบบ 2 Router เทียบกับ 3 Router

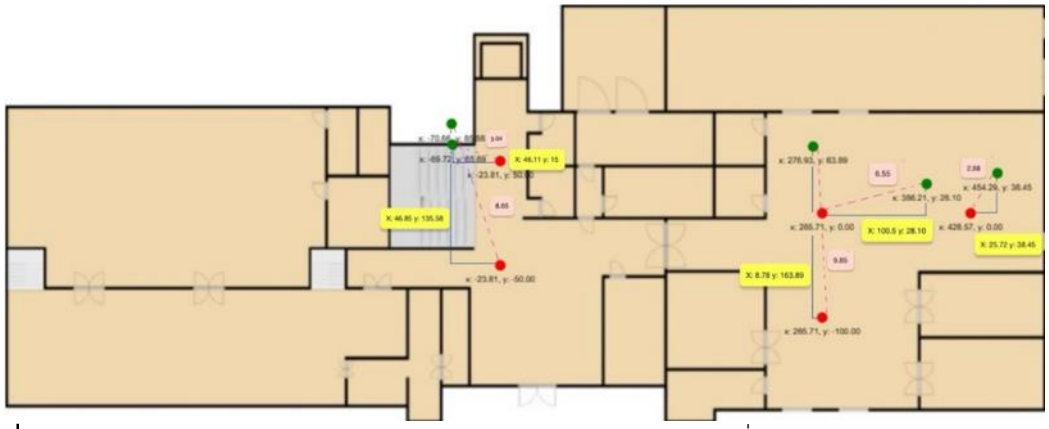
เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองโดยพิจารณาลักษณะของพื้นที่ พบว่าพื้นที่ทางเดินให้ผลการระบุตำแหน่งที่มีความแม่นยำมากกว่าพื้นที่ภายในห้อง โดยพื้นที่ทางเดินซึ่งมีสิ่งกีดขวางน้อยส่งผลให้การแพร่กระจายของสัญญาณเป็นไปอย่างราบรื่น ทำให้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.5–2.5 เมตร และการแสดงผลตำแหน่งมีความเสถียร

พื้นที่ภายในห้องซึ่งมีผนังและเฟอร์นิเจอร์เป็นสิ่งกีดขวาง พบว่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2–4 เมตร และมีความผันผวนสูงกว่า กรณีนี้สะท้อนให้เห็นถึงความท้าทายของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีระบุตำแหน่งภายในอาคารในสภาพแวดล้อมจริง ซึ่งอาจจำเป็นต้องมีการปรับแต่งพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมหรือเพิ่มจุดอ้างอิงเพื่อยกระดับความแม่นยำ

6. สรุปผล

งานวิจัยนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารต้นทุนต่ำโดยใช้สัญญาณ Wi-Fi RSSI ร่วมกับ Trilateration และ Kalman Filter ผลการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงแสดงความแม่นยำเฉลี่ย 2.5 เมตรเมื่อใช้เราเตอร์สามจุด โดย Kalman Filter สามารถลดความผันผวนของสัญญาณได้ 30% เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกรองสัญญาณ พบว่า Kalman Filter มีประสิทธิภาพเหนือกว่าวิธีการเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ โดยให้ค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่ระยะ 1 เมตรเพียง 1.74 เมตร (74% ความผิดพลาด) เมื่อเทียบกับวิธีการเฉลี่ยที่มีค่าคลาดเคลื่อน 4.6 เมตร (360% ความผิดพลาด)

ระบบต้นแบบที่พัฒนาด้วย Wemos D1 Mini ทำงานได้เสถียร โดยค่าความต่าง RSSI เมื่อเทียบกับสมาร์ทโฟนอยู่เพียง ±3 dBm การติดตั้งเราเตอร์บนเพดานให้ผลการรับสัญญาณที่ดีกว่าการวางบนพื้น แสดงความสำคัญของการออกแบบเชิงกายภาพ ข้อได้เปรียบสำคัญคือความคุ้มค่าและการเข้าถึงง่ายผ่าน Web Application โดยใช้โครงสร้างพื้นฐาน Wi-Fi ที่มีอยู่แล้ว ทำให้เหมาะสมกับการใช้งานจริงเมื่อเทียบกับเทคโนโลยี UWB หรือ LIDAR



รูปที่ 3 ตัวอย่างการวัดค่า error จากตำแหน่งจริง (จุดสีแดง) และตำแหน่งที่โปรแกรมคำนวณได้ (จุดสีเขียว)

อย่างไรก็ตาม ระบบยังเผชิญความท้าทายจากการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมและสัญญาณรบกวน ความแม่นยำขึ้นอยู่กับสภาพพื้นที่ งานในอนาคตควรขยายการทำงานไปยังย่าน 5 GHz และพิจารณาการผสาน Machine Learning หรือ Fingerprinting โดยสรุป งานวิจัยนี้สร้างระบบที่สมดุลระหว่างความแม่นยำ ต้นทุน และความสะดวกใช้งาน เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในโรงพยาบาล คลังสินค้า และห้างสรรพสินค้า วางรากฐานสำคัญสำหรับระบบ Smart Building และ Internet of Things

บรรณานุกรม

James, A., Seth, A., & Mukhopadhyay, S. C. (2022). Design considerations for IoT node. In Smart Sensors, Measurement and Instrumentation (pp. 47-73). Springer.

Luo, H., Xue, B., & Zhang, J. (2022). Design and implementation of an RSSI localization algorithm based on Kalman filter. Proceedings of SPIE, 12506, 125060G.

Pham, N. H. H., Nguyen, M., & Sun, C.-C. (2022). Indoor positioning system using UWB and Kalman filter to increase the accuracy of the localization system. In 2022 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (pp. 297-298). IEEE.

Reyes, J., Ho, I. W.-H., & Mak, M.-W. (2023). Wi-Fi CSI fingerprinting-based indoor positioning using deep learning and vector embedding. SSRN Electronic Journal.

Romero, C., & Elustondo, A. (2022). Análisis de la capacidad de la placa ESP32 para integrar sistemas IoT descentralizados. Revista elektrón, 6(1), 90-95.

Simion, A., Bira, C., & Voiculescu, V.-G. (2023). Embedded platform characterization for interface throughput and computing power in common 8/16/32-bit platforms. Proceedings of SPIE, 12487, 124870K.

Sun, H., Zhang, X., Meng, W., Liu, R., Li, K., & Peng, T. (2021). CLRS: A novel CSI-based indoor localization approach by region sectioning. In 2021 International Wireless Communications and Mobile Computing (pp. 1444-1449). IEEE.

Wang, J., & Park, J. G. (2020). IEEE 802.11 WLAN based indoor positioning algorithm using weight grey prediction model. In 2020 IEEE 22nd International Conference on High Performance Computing and Communications (pp. 1186-1193). IEEE.

Wibisono, W., & Wicaksono, A. (2022). An improved accuracy of indoor positioning system based on trilateration using Kalman filter. In 2022 International Conference on Information and Communication Technology (pp. 315-320). IEEE.

Yimwadsana, B., & Serey, V. (2020). Improving accuracy of an AoA-based Wi-Fi indoor localization using Kalman filter. In 2020 17th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (pp. 143-148). IEEE.