

ระบบระบุตำแหน่งแบบเวลาจริงภายในอาคารด้วยเทคโนโลยี บลูทูธพลังงานต่ำ

ปิยะพงษ์ แดงขำ

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศและการสื่อสาร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการระบุตำแหน่งแบบเวลาจริงภายในอาคารด้วยเทคโนโลยีบลูทูธพลังงานต่ำ อุปกรณ์ที่ใช้แบ่งออกเป็นภาคส่งสัญญาณทำหน้าที่ปล่อยสัญญาณบลูทูธ และอุปกรณ์ภาครับสัญญาณทำหน้าที่เป็นเป้าหมายที่ต้องการระบุตำแหน่ง ขั้นตอนประกอบไปด้วยการคำนวณระยะทาง และการคำนวณพิกัด ในขั้นตอนการคำนวณพิกัดได้นำเสนอการเปรียบเทียบด้วยวิธีสามเหลี่ยมระยะและวิธี gradient descent ผลปรากฏว่าการคำนวณพิกัดด้วยวิธี gradient descent สามารถประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับพิกัดจริงมากกว่า นอกจากนี้ยังได้นำเสนอการเลือกพิกัดเริ่มต้นจากการคำนวณโดยใช้วิธีสามเหลี่ยมระยะมารวมกับวิธี gradient descent ผลปรากฏว่าจำนวนรอบการวนซ้ำมีค่าน้อยกว่าการเลือกพิกัดเริ่มต้นด้วยจุดกึ่งกลางพิกัดของอุปกรณ์ส่งสัญญาณ ซึ่งจะส่งผลให้เวลาการประมวลผลน้อยลงไปด้วย

คำสำคัญ: ระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร, บลูทูธพลังงานต่ำ, gradient descent

Indoor Real Time Localization System with Bluetooth Low Power

Piyapong Dangkham

Information and Communication Engineering, Faculty of Industrial Technology, Thepsatri Rajabhat University

Abstract

This paper presents the indoor real time localization system (indoor RTLS) with the bluetooth low power (BLE). There are 2 parts: transmitter and receiver beacon. The BLE receiver is the target to localize. The process is comprised of 2 steps, range estimation and coordinate computation. In the coordinate computation, the comparison between the trilateration and the gradient descent is presented. The result shows that the gradient descent is better than the trilateration. For the initial coordinate in the gradient descent, this paper uses the coordinate from the trilateration. This technique can decrease the iterations. It saves the processing time and it can be used in the real time system.

Keywords: Indoor RTLS, BLE, gradient descent

1. บทนำ

ระบบระบุตำแหน่งแบบเวลาจริง (Real Time Localization System: RTLS) เป็นระบบที่ใช้ในการชี้เฉพาะและการติดตามสิ่งของโดยจะต้องแสดงผลรูปแบบทันทีทันใด ซึ่งปัจจุบันเทคโนโลยีดาวเทียมสามารถตอบสนองความต้องการนี้ได้เป็นอย่างดี แต่ในที่นี้จะมุ่งเน้นระบบระบุตำแหน่งแบบเวลาจริงภายในอาคาร (Indoor Real Time Localization System: Indoor RTLS) ซึ่งมีแนวโน้มการใช้งานในเชิงพาณิชย์สูงขึ้นเรื่อยๆ [1] เนื่องจากภายในอาคารไม่สามารถใช้งานจากเทคโนโลยีดาวเทียมได้ ระบบระบุตำแหน่งแบบเวลาจริงภายในอาคารมีจุดประสงค์ในการใช้งานที่แตกต่างกันออกไป จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีที่มีอยู่มาประยุกต์ให้เข้ากับความต้องการพื้นฐานของงานด้านนั้นๆ โดยปัจจุบันระบบระบุตำแหน่งแบบเวลาจริงภายในอาคารมีการนำเทคโนโลยีต่างๆ มาใช้งานเทคโนโลยีที่นำมาใช้งานในระบบระบุตำแหน่งแบบเวลาจริงภายในอาคารแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท [1] คือ 1) เทคโนโลยีระบบเครือข่ายไร้สาย (Wireless LAN: WLAN, Wireless Sensor Network: WSN) 2) เทคโนโลยีระบบ RFID 3) เทคโนโลยีระบบ UWB และ 4) เทคโนโลยีอื่นๆ เช่น อินฟราเรด ซึ่งถ้าพิจารณาการนำมาใช้งานภายในอาคารแล้ว ระบบประเภทเทคโนโลยีระบบเครือข่ายไร้สายจะมีข้อจำกัดที่น้อยกว่าประเภทอื่นๆ

เทคโนโลยีระบบเครือข่ายไร้สายที่ถูกนำมาใช้ในระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารที่น่าสนใจคือ บลูทูธพลังงานต่ำ (Bluetooth Low Energy: BLE) ซึ่งเป็นการพัฒนาให้อุปกรณ์เชื่อมต่อกันผ่านเครือข่ายบลูทูธโดยใช้พลังงานที่ต่ำเพื่อให้ใช้งานอุปกรณ์ได้นานขึ้น ซึ่งใน [2] ได้นำเสนอการระบุตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้ทั้งเทคโนโลยี WI-FI และบลูทูธพลังงานต่ำร่วมกัน ในขณะที่ [3-5] นำเสนอการใช้งานบลูทูธพลังงานต่ำเพียงเทคโนโลยีเดียว โดยใน [5] ได้นำเสนอการระบุตำแหน่งทั้งกรณีที่เป็นเป้าหมายหยุดนิ่ง และเป้าหมายมีการเคลื่อนที่ การหาพิกัดของเป้าหมายใน [3-5] จะใช้วิธีสามเหลี่ยมระยะ (trilateration) แต่พบว่ายังมีความผิดพลาดจากพิกัดจริงอยู่ เพื่อให้การระบุตำแหน่งมีความแม่นยำเพิ่มมากขึ้น ใน [6] ได้นำเสนอวิธีการประมาณระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ บลูทูธพลังงานต่ำด้วย

แบบจำลองการวิเคราะห์การถดถอยรูปแบบที่ต่างกัน ใน [7] เสนอการนำตำแหน่งที่ได้จากวิธีสามเหลี่ยมระยะมาวนซ้ำหาจุดกึ่งกลางเพื่อเป็นการระบุตำแหน่งให้แม่นยำขึ้น ใน [8] ได้ใช้การวนซ้ำร่วมกับการค้นหาแบบ cuckoo (cuckoo search) ขณะที่งานวิจัยใน [2] และ [9] นำเสนอการวนซ้ำเช่นเดียวกัน แต่ใช้วิธี gradient descent เพื่อหาค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุด โดยจำนวนรอบของการวนซ้ำขึ้นอยู่กับค่าเริ่มต้นที่ใช้ เมื่อนำมาใช้ในการระบุตำแหน่งจะใช้ค่าเริ่มต้นด้วยจุดกึ่งกลางพิกัดของจุดส่งสัญญาณ ซึ่งงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นยังพบปัญหาเรื่องการวนซ้ำที่จะต้องทำการคำนวณหลายรอบ

บทความนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบการระบุตำแหน่งด้วยวิธีสามเหลี่ยมระยะและวิธี gradient descent ซึ่งจะพบว่าวิธี gradient descent จะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่า แต่จะพบปัญหาในการคำนวณที่จะต้องทำการวนซ้ำเพื่อหาผลลัพธ์ บทความนี้จะได้นำเสนอการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยการนำวิธีสามเหลี่ยมระยะมารวมใช้เป็นค่าเริ่มต้นของการวนซ้ำ เนื่องจากพิกัดที่ได้จากวิธีสามเหลี่ยมระยะมีความใกล้เคียงกับพิกัดเป้าหมาย เมื่อนำมาใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการวนซ้ำจะทำให้ลดจำนวนรอบของการวนซ้ำได้เมื่อเทียบกับการใช้ค่าเริ่มต้นด้วยจุดกึ่งกลางพิกัดของจุดส่งสัญญาณ

2. ทฤษฎีและหลักการ

2.1 การคำนวณระยะทางจากความเข้มสัญญาณ

ในการนำระบบระบุตำแหน่งแบบเวลาจริงไปใช้งานจะพบว่าสภาพแวดล้อมมีผลต่อสัญญาณที่ส่งออกมาจากอุปกรณ์บลูทูธพลังงานต่ำ ทำให้มีการพัฒนาแบบจำลองเพื่อนำไปใช้ในการระบุตำแหน่งซึ่งแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม [1] คือ แบบวัดระยะทาง (range-base) และแบบไม่วัดระยะทาง (range-free) โดยงานวิจัยที่จะนำเสนอจะใช้แบบวัดระยะทาง เนื่องจากการใช้งานรูปแบบนี้จะใช้จำนวนอุปกรณ์บลูทูธพลังงานต่ำน้อยกว่า โดยขั้นตอนการระบุตำแหน่งจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลัก คือ ขั้นตอนการคำนวณระยะทาง และขั้นตอนการคำนวณพิกัด ซึ่งในขั้นตอนการคำนวณระยะทางจะใช้วิธีวัดสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์บลูทูธพลังงานต่ำ เช่น การวัดค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับ (Received Signal Strength Indication: RSSI) หรือการ

วัดค่าเวลาที่สัญญาณมาถึง (Time of Arrival: TOA) เมื่อได้ระยะทางจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณแล้ว จะนำระยะทางนั้นมาหาพิกัดของเป้าหมาย ซึ่งขั้นตอนการคำนวณพิกัดส่วนมากจะใช้วิธีสามเหลี่ยมระยะในการระบุตำแหน่ง

การใช้งานอุปกรณ์บลูทูธพลังงานต่ำจะสามารถวัดค่าความเข้มสัญญาณได้ในหน่วย dBm และใช้สมการที่ (1) ในการคำนวณระยะทางระหว่างอุปกรณ์รับและส่งสัญญาณ [6] ซึ่งเป็นการคำนวณด้วยการนำการสูญเสียเชิงวิถี (path loss) มาใช้

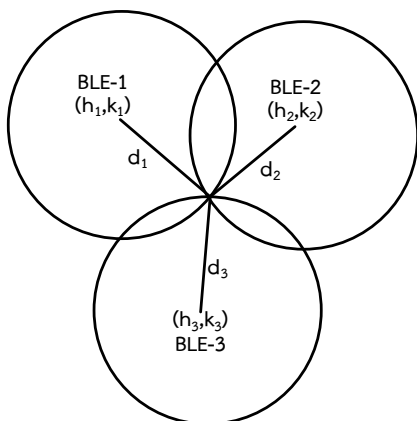
$$d(t) = 10^{(RSSI_{ref} - RSSI(t))/10n} \quad (1)$$

เมื่อ $d(t)$ คือ ระยะห่างจากอุปกรณ์ t เมตร
 $RSSI_{ref}$ คือ ค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับ 1 เมตร
 $RSSI(t)$ คือ ค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับ t เมตร
 และ n คือ ค่าตัวแปรในการส่งสัญญาณ

จากสมการที่ (1) จะพบว่ามีค่าคงที่ 2 ค่า คือ ค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับซึ่งใช้อ้างอิงในระยะ 1 เมตร และค่าตัวแปรในการส่งสัญญาณ ดังนั้นจึงต้องทำการหาค่าคงที่ทั้งสองก่อนนำไปคำนวณระยะทาง

2.2 การคำนวณพิกัดด้วยวิธีสามเหลี่ยมระยะ

สามเหลี่ยมระยะเป็นการคำนวณพิกัดโดยอาศัยการวัดระยะห่างจากอุปกรณ์บลูทูธพลังงานต่ำอย่างน้อยสามจุด ซึ่งจะได้จุดตัดกันของวงกลมทั้งสามดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การหาพิกัดเป้าหมายด้วยจุดตัดของวงกลม

จากรูปที่ 1 จุดตัดจะเป็นพิกัดของเป้าหมายในการระบุตำแหน่ง การคำนวณจะใช้สมการวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่ (h, k) และมีรัศมี d ซึ่งได้มาจากการคำนวณระยะทางจาก

ค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับ สมการของวงกลมทั้งสามแสดงได้ดังสมการที่ 2

$$\begin{aligned} (x - h_1)^2 + (y - k_1)^2 &= d_1^2 \\ (x - h_2)^2 + (y - k_2)^2 &= d_2^2 \\ (x - h_3)^2 + (y - k_3)^2 &= d_3^2 \end{aligned} \quad (2)$$

โดยที่ (x, y) คือ พิกัดของเป้าหมาย ซึ่งเป็นจุดตัดของวงกลมทั้งสาม เมื่อทำการกระจายสมการที่อยู่ในรูปกำลังสอง สมบูรณ์ และจัดรูปแบบใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการเมตริกซ์จะได้

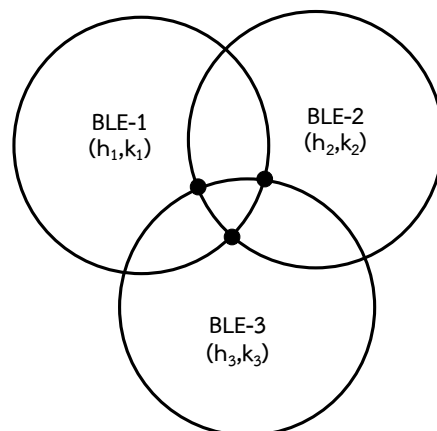
$$\begin{bmatrix} 1 & -2h_1 & -2k_1 \\ 1 & -2h_2 & -2k_2 \\ 1 & -2h_3 & -2k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^2 + y^2 \\ x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1^2 - h_1^2 - k_1^2 \\ d_2^2 - h_2^2 - k_2^2 \\ d_3^2 - h_3^2 - k_3^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

โดยที่พิกัดเป้าหมาย (x, y) สามารถคำนวณได้ด้วยการใช้กฎของคราเมอร์ (Cramer's Rule) ตามสมการที่ (4) และ (5)

$$x = \frac{\begin{vmatrix} 1 & d_1^2 - h_1^2 - k_1^2 & -2k_1 \\ 1 & d_2^2 - h_2^2 - k_2^2 & -2k_2 \\ 1 & d_3^2 - h_3^2 - k_3^2 & -2k_3 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & -2h_1 & -2k_1 \\ 1 & -2h_2 & -2k_2 \\ 1 & -2h_3 & -2k_3 \end{vmatrix}} \quad (4)$$

$$y = \frac{\begin{vmatrix} 1 & -2h_1 & d_1^2 - h_1^2 - k_1^2 \\ 1 & -2h_2 & d_2^2 - h_2^2 - k_2^2 \\ 1 & -2h_3 & d_3^2 - h_3^2 - k_3^2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & -2h_1 & -2k_1 \\ 1 & -2h_2 & -2k_2 \\ 1 & -2h_3 & -2k_3 \end{vmatrix}} \quad (5)$$

ในการนำไปใช้งานจริง ขั้นตอนการคำนวณระยะทางจากค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับอาจมีความคลาดเคลื่อน ทำให้จุดตัดของวงกลมทั้งสามมีมากกว่าหนึ่งจุด ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 จุดตัดของวงกลมที่มีมากกว่า 1 จุด

จากรูปที่ 2 จะพบว่ามีส่วนซ้อนทับกันของวงกลมทั้งสาม โดยพิกัดที่ถูกต้องของเป้าหมายจะอยู่ในส่วนซ้อนทับกัน ทำให้ค่าพิกัดที่เป็นไปได้มีเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้การระบุพิกัดของเป้าหมายมีความคลาดเคลื่อนไปด้วย

2.3 การคำนวณพิกัดด้วยวิธี Gradient Descent

ในกรณีที่การคำนวณระยะทางจากค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับมีความคลาดเคลื่อนจะทำให้การระบุพิกัดด้วยวิธีสามเหลี่ยมระยะมีพิกัดที่คลาดเคลื่อนไปด้วย หากพิจารณาจากสมการที่ (2) ค่าความผิดพลาดระหว่างค่าด้านซ้ายและด้านขวาของสมการควรมีค่าน้อยที่สุด ซึ่งกำหนดได้ดังสมการที่ (6)

$$err_{sqr} = \sum_{i=1}^3 ((x - h_i)^2 + (y - k_i)^2 - d_i^2)^2 \quad (6)$$

สมการที่ (6) ใช้ค่ากำลังสองเนื่องจากต้องการให้ค่าความผิดพลาดที่ได้เป็นค่าบวก เพื่อรวมค่าความผิดพลาดของวงกลมทั้งสามในการระบุพิกัดด้วยวิธีสามเหลี่ยมระยะ ซึ่งการเลือกพิกัดจะต้องทำให้ค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด การหาพิกัดที่เหมาะสมจึงต้องทำการวนซ้ำไปเรื่อยๆ จนถึงค่าความผิดพลาดที่ต้องการ วิธีในการหาค่าที่เหมาะสมวิธีหนึ่งคือ gradient descent [2],[7] ซึ่งจะหาค่าฟังก์ชันที่น้อยที่สุดเรียกว่า cost function โดยในที่นี้คือค่าความผิดพลาดที่คำนวณตามสมการที่ (6) ดังนั้น cost function ของกระบวนการ gradient descent จะเป็นไปตามสมการที่ (7)

$$J(x, y) = \sum_{i=1}^3 ((x - h_i)^2 + (y - k_i)^2 - d_i^2)^2 \quad (7)$$

เมื่อ $J(x, y)$ คือ cost function ของพิกัด (x, y) ที่ต้องการทำให้ได้ค่าที่น้อยที่สุด และค่าที่ทำการปรับพิกัดในแต่ละรอบการวนซ้ำ คือ

$$\theta_{j+1} = \theta_j - \alpha \nabla J(\theta) \quad (8)$$

เมื่อ θ_j คือเมตริกซ์ของพิกัด (x, y) ในขณะที่ α คืออัตราการเรียนรู้ (learning rate) มีผลต่อการปรับค่าในแต่ละรอบการวนซ้ำ หากมีค่ามากเกินไปอาจจะทำให้ค่าที่ปรับเกินค่าที่ต้องการ แต่ถ้ามีค่าน้อยเกินไปจะทำให้จำนวนรอบการวนซ้ำ

มีมากขึ้น และ $\nabla J(\theta)$ คือเมตริกซ์ค่าเกรเดียนท์ (gradient) ของ cost function กำหนดได้ดังสมการที่ (9)

$$\nabla J(\theta) = \nabla J(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{\partial J(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial J(x, y)}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (9)$$

และค่าเกรเดียนท์ที่ได้จาก $J(x, y)$ ในสมการที่ (7) หาได้จากสมการที่ (10) และ (11) ดังนี้

$$\frac{\partial J(x, y)}{\partial x} = 4 \sum_{i=1}^3 (x - h_i)((x - h_i)^2 + (y - k_i)^2 - d_i^2) \quad (10)$$

$$\frac{\partial J(x, y)}{\partial y} = 4 \sum_{i=1}^3 (y - k_i)((x - h_i)^2 + (y - k_i)^2 - d_i^2) \quad (11)$$

ดังนั้น การวนซ้ำแต่ละรอบจะทำให้ได้ค่าพิกัดใหม่ จนกว่าจะทำให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด ค่า θ_j ที่ทำการปรับค่าในแต่ละการวนซ้ำแสดงได้ในสมการที่ (12), (13)

$$x_{j+1} = x_j - \alpha \frac{\partial J(x, y)}{\partial x} \quad (12)$$

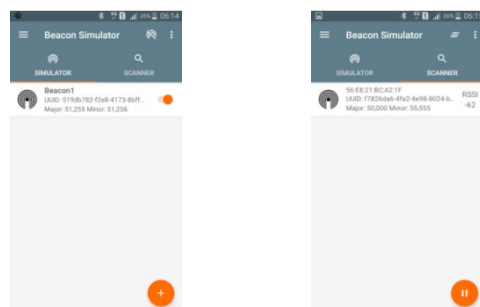
$$y_{j+1} = y_j - \alpha \frac{\partial J(x, y)}{\partial y} \quad (13)$$

โดยค่าเริ่มต้นของการวนซ้ำจะใช้จุดกึ่งกลางของพิกัดอุปกรณ์บลูทูธพลังงานต่ำที่ทำการปล่อยสัญญาณออกมา [2], [9] ค่าพิกัดเริ่มต้นคำนวณได้จากสมการที่ (14)

$$x_0 = \frac{h_1 + h_2 + h_3}{3}, y_0 = \frac{k_1 + k_2 + k_3}{3} \quad (14)$$

3. การทดสอบการระบุตำแหน่ง

บทความนี้เลือกใช้การรับส่งสัญญาณบลูทูธด้วยโปรแกรมจำลอง Beacon Simulator ด้วยโทรศัพท์มือถือที่ใช้ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ เนื่องจากต้องการควบคุมความเสถียรของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ โปรแกรมจำลอง Beacon Simulator จะใช้อุปกรณ์บลูทูธในโทรศัพท์มือถือ โดยแบ่งออกเป็นภาคส่ง และภาครับ ดังแสดงในรูปที่ 3

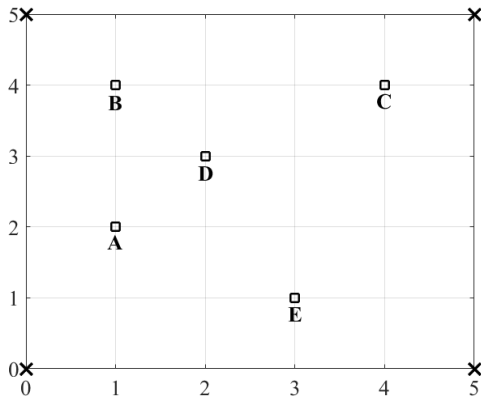


ก) ภาคส่ง

ข) ภาครับ

รูปที่ 3 โปรแกรมจำลอง Beacon Simulator

ในการทดสอบจะใช้โทรศัพท์มือถือจำลองการส่งสัญญาณบลูทูธทั้งหมด 4 จุด โดยวางห่างกัน 5 เมตร ในระนาบเดียวกัน ซึ่งจะเป็นพิกัดของอุปกรณ์บลูทูธพลังงานต่ำแผนผังตำแหน่งแสดงได้ดังรูปที่ 4 ในขณะที่จะทำการวัดสัญญาณเพื่อนำมาทดสอบการระบุตำแหน่งของเป้าหมายทั้งหมด 5 ตำแหน่ง (A, B, C, D และ E) ซึ่งตำแหน่งของพิกัดต่างๆ แสดงไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 4 แผนผังตำแหน่งของอุปกรณ์และจุดวัดสัญญาณ

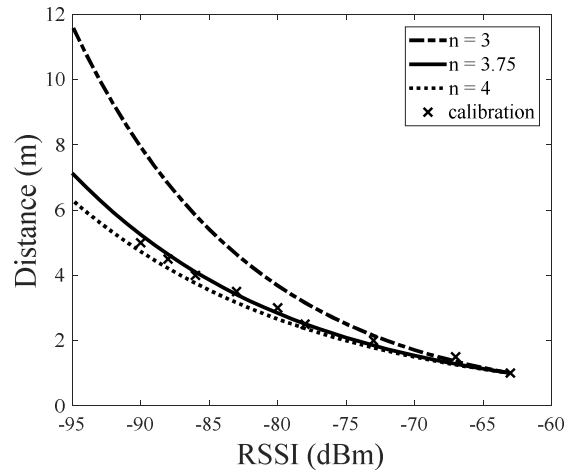
ตารางที่ 1 ตำแหน่งพิกัดของอุปกรณ์และจุดวัดสัญญาณ

ชื่อพิกัด	ตำแหน่งพิกัด	การใช้งาน
BLE1	0,0	จุดส่งสัญญาณ
BLE2	0,5	จุดส่งสัญญาณ
BLE3	5,5	จุดส่งสัญญาณ
BLE4	5,0	จุดส่งสัญญาณ
A	1,2	เป้าหมาย
B	1,4	เป้าหมาย
C	4,4	เป้าหมาย
D	2,3	เป้าหมาย
E	3,1	เป้าหมาย

4. ผลการระบุตำแหน่ง

การระบุตำแหน่งแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ คำนวณระยะทาง และคำนวณพิกัด ซึ่งในขั้นตอนการคำนวณระยะทางจะใช้วิธีการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับ และจากสมการที่ (1) จะต้องทำการวัดค่าที่ระยะอ้างอิง 1 เมตร ซึ่งทำการวัดค่าได้เป็น -63 dBm จากนั้นต้องทำการหาค่าตัวแปรในการส่งสัญญาณ โดยจะต้องนำไปเปรียบเทียบ

กับการคำนวณตามสมการที่ (1) ซึ่งในการทดสอบครั้งนี้ได้ทำการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับในระยะ 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5 และ 5 เมตร ผลการเปรียบเทียบค่าที่วัดจริงกับค่าที่คำนวณค่าตัวแปรในการส่งสัญญาณที่ต่างกันแสดงได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับ

จากรูปที่ 5 แสดงค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับเทียบกับระยะห่างของอุปกรณ์ ซึ่งจากสมการที่ (1) เมื่อแทนค่า n เป็น 3, 3.75 และ 4 แล้ว จะพบว่าที่ค่า n มีค่าเป็น 3.75 จะให้ค่าใกล้เคียงกับค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับเมื่อทำการวัดค่าจากอุปกรณ์จริง ดังนั้นการหาค่าระยะทางระหว่างอุปกรณ์รับส่งจึงเป็นไปตามสมการที่ (15)

$$d(t) = 10^{(RSSI_{ref} - RSSI(t))/37.5} \quad (15)$$

ในขั้นตอนการคำนวณพิกัดจะใช้ระยะทางระหว่างอุปกรณ์ ($d(t)$) ที่คำนวณจากสมการที่ 15 เมื่อทำการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับจากจุดส่งสัญญาณทั้ง 4 จุด ในตำแหน่งที่ต้องการทดสอบทั้ง 5 จุด โดยมีผลการวัดค่าแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการวัดความเข้มสัญญาณ (หน่วย : dBm)

พิกัด	BLE1	BLE2	BLE3	BLE4
A	-76	-81	-91	-88
B	-87	-65	-86	-92
C	-92	-86	-66	-87
D	-85	-80	-85	-86
E	-81	-91	-88	-75

วิธีการที่ใช้ในการคำนวณพิกัดจะเลือกค่าวัดความเข้มสัญญาณที่ได้รับสูงสุด 3 อันดับมาใช้ เช่น ที่จุดทดสอบ A จะเลือกใช้ค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับจากจุด BLE1, BLE2 และ BLE4 และในการประมาณพิกัดด้วยวิธี gradient descent จะใช้อัตราการเรียนรู้ที่มีค่าเป็น 0.0001 และพิกัดเริ่มต้นจะใช้จุดกึ่งกลางจากพิกัดอุปกรณ์ส่งสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำ ผลการประมาณพิกัดด้วยวิธีทั้งสองแสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบผลการประมาณพิกัด

พิกัด	ผลการประมาณพิกัด	
	สามเหลี่ยมระยะ	Gradient Descent
A	(0.84,2.08)	(0.85,2.08)
B	(0.94,4.28)	(0.96,4.26)
C	(4.04,4.26)	(4.04,4.26)
D	(1.82,3.18)	(1.87,3.13)
E	(2.98,0.78)	(2.97,0.81)

จากตารางที่ 3 จะพบว่าผลการประมาณพิกัดของเป้าหมายด้วยวิธีสามเหลี่ยมระยะและวิธี gradient descent ให้ค่าพิกัดที่ใกล้เคียงกัน ในการประมาณพิกัดของเป้าหมายที่ A(1,2) ค่าพิกัด y ที่ได้จากวิธีทั้งสองจะเท่ากันคือ 2.08 แต่วิธี gradient descent จะคำนวณค่าพิกัด x เป็น 0.85 ซึ่งจะใกล้เคียงกับพิกัด A(1,2) มากกว่าวิธีสามเหลี่ยมระยะที่ได้ค่าพิกัด x เป็น 0.84 ในขณะที่การประมาณพิกัด C(4,4) ทั้งสองวิธีให้ค่าพิกัดที่เท่ากันคือ (4.04,4.26) เพื่อหาประสิทธิภาพของทั้งสองวิธีบทความนี้จึงใช้ระยะทางยูคลิเดียน (Euclidean distance) มาคำนวณระยะทางระหว่างพิกัดจริงของเป้าหมายกับพิกัดที่ได้จากการคำนวณ โดยที่ถ้าระยะทางยูคลิเดียนระหว่างพิกัดมีค่าน้อย แสดงว่าพิกัดที่คำนวณมีความใกล้เคียงกับพิกัดจริงของเป้าหมาย ระยะทางยูคลิเดียนเป็นไปตามสมการที่ (16)

$$d_{euclidean} = \sqrt{(x_{tar} - x_{est})^2 + (y_{tar} - y_{est})^2} \quad (16)$$

เมื่อ x_{tar} คือ พิกัด x จริงของเป้าหมาย
 x_{est} คือ พิกัด x จากการคำนวณของเป้าหมาย
 y_{tar} คือ พิกัด y จริงของเป้าหมาย
 y_{est} คือ พิกัด y จากการคำนวณของเป้าหมาย

ผลการเปรียบเทียบระยะทางยูคลิเดียนระหว่างวิธีทั้งสองแสดงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบระยะทางยูคลิเดียน

พิกัด	ระยะทางยูคลิเดียน	
	สามเหลี่ยมระยะ	Gradient Descent
A	0.18	0.17
B	0.29	0.26
C	0.26	0.26
D	0.25	0.18
E	0.22	0.19
ค่าเฉลี่ย	0.24	0.21

จากตารางที่ 4 แสดงให้เห็นว่าการคำนวณพิกัดของเป้าหมายด้วยวิธี gradient descent ได้ค่าระยะทางยูคลิเดียนที่น้อยกว่าวิธีสามเหลี่ยมระยะ ซึ่งหมายความว่าพิกัดที่คำนวณได้จากวิธี gradient descent มีความใกล้เคียงกับพิกัดจริงมากกว่าวิธีสามเหลี่ยมระยะ โดยในพิกัด C(4,4) ค่าระยะทางยูคลิเดียนจากทั้งสองวิธีมีค่าที่เท่ากัน เนื่องจากผลจากการคำนวณพิกัดได้เท่ากันตามที่แสดงในตารางที่ 3

การคำนวณด้วยวิธี gradient descent มีความถูกต้องมากกว่าเนื่องจากการวนซ้ำจนกว่าจะได้ค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุด แต่จะทำให้การคำนวณใช้เวลามากขึ้นไปด้วยบทความนี้จึงเสนอการใช้ค่าเริ่มต้นจากค่าที่คำนวณได้จากวิธีสามเหลี่ยมระยะแทนที่จะใช้ค่าจุดกึ่งกลางจากพิกัดอุปกรณ์ส่งสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำตามสมการที่ (14) โดยค่าเริ่มต้นที่ใช้ในการคำนวณทั้งสองรูปแบบแสดงได้ดังตารางที่ 5 และผลการเปรียบเทียบผลการประมาณพิกัดแสดงได้ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบค่าเริ่มต้นของการวนซ้ำ

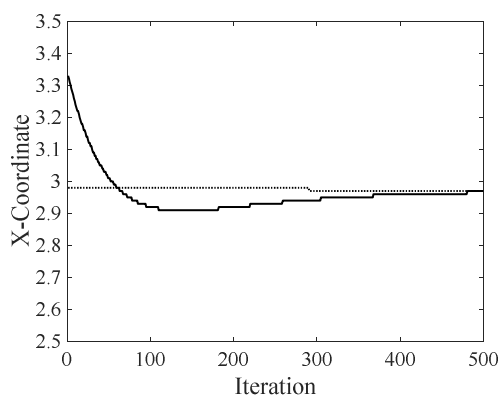
พิกัด	ค่าเริ่มต้น	
	จุดกึ่งกลางพิกัด	พิกัดจากสามเหลี่ยมระยะ
A	(1.67,1.67)	(0.84,2.08)
B	(1.67,3.33)	(0.94,4.28)
C	(3.33,3.33)	(4.04,4.26)
D	(1.67,3.33)	(1.82,3.18)
E	(3.33,1.67)	(2.98,0.78)

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบผลการประมาณพิกัด

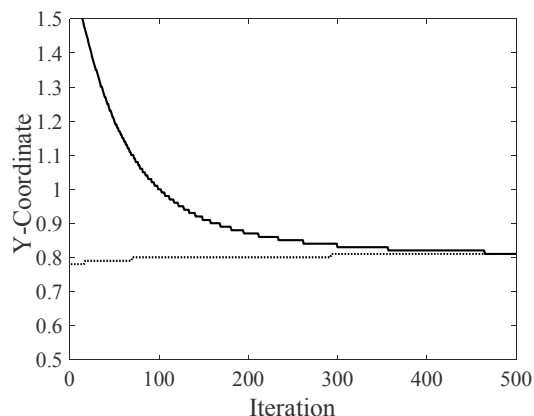
พิกัด	ผลการประมาณพิกัด	
	จุดกึ่งกลางพิกัด	พิกัดจากสามเหลี่ยมระยะ
A	(0.85,2.08)	(0.85,2.08)
B	(0.96,4.26)	(0.96,4.26)
C	(4.04,4.26)	(4.04,4.26)
D	(1.87,3.13)	(1.87,3.13)
E	(2.97,0.81)	(2.97,0.81)

ตารางที่ 6 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ค่าเริ่มต้นด้วยค่ากึ่งกลางจากพิกัดอุปกรณ์ส่งสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำ และการใช้ค่าเริ่มต้นด้วยค่าที่คำนวณได้จากวิธีสามเหลี่ยมระยะ ปรากฏว่าผลการประมาณพิกัดได้ค่าที่เท่ากัน ซึ่งแสดงว่าการเปลี่ยนค่าเริ่มต้นไม่ส่งผลต่อพิกัดเป้าหมายที่คำนวณได้

ในการทดสอบที่เป้าหมายจุด E การคำนวณหาพิกัด x ด้วยการกำหนดค่าเริ่มต้นด้วยจุดกึ่งกลางพิกัดอุปกรณ์ส่งสัญญาณจะเริ่มต้นที่ 3.33 และวนซ้ำจนได้ค่าคงที่ที่ 2.97 ซึ่งจะใช้จำนวนรอบทั้งสิ้น 486 รอบ ในขณะที่ถ้าใช้ค่าเริ่มต้นด้วยพิกัดที่คำนวณจากสามเหลี่ยมระยะจะเริ่มต้นพิกัด x ที่ 2.98 และวนซ้ำจนได้ค่าคงที่ที่ 2.97 ซึ่งจะใช้จำนวนรอบทั้งสิ้น 291 รอบ ซึ่งจะน้อยกว่าการใช้จุดกึ่งกลางพิกัด ในขณะที่การวนซ้ำหาพิกัด y จำนวนรอบการวนซ้ำของการใช้จุดกึ่งกลางพิกัดและการใช้พิกัดจากสามเหลี่ยมระยะจะเป็น 465 และ 293 รอบตามลำดับ รูปที่ 6 และรูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนรอบของการใช้ค่าเริ่มต้นด้วยการใช้จุดกึ่งกลาง (เส้นทึบ) และการใช้พิกัดจากสามเหลี่ยมระยะ (เส้นประ) ของพิกัด x และ y ตามลำดับ



รูปที่ 6 การวนซ้ำหาพิกัด x ที่เป้าหมายจุด E



รูปที่ 7 การวนซ้ำหาพิกัด y ที่เป้าหมายจุด E

ในตารางที่ 7 จะเป็นการเปรียบเทียบจำนวนรอบการวนซ้ำของการใช้ค่าเริ่มต้นทั้งสองแบบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ค่าเริ่มต้นของพิกัดด้วยจุดกึ่งกลางพิกัดอุปกรณ์ส่งสัญญาณบลูทูธพลังงานต่ำมีจำนวนการวนรอบมากกว่าการนำค่าเริ่มต้นที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีสามเหลี่ยมระยะ เนื่องจากการค่าพิกัดที่ได้จากวิธีสามเหลี่ยมระยะมีความใกล้เคียงกับค่าพิกัดจริงอยู่แล้ว จากนั้นนำมาวนซ้ำต่อในวิธี gradient descent จึงทำให้จำนวนรอบการวนซ้ำที่น้อยลง โดยในกรณีพิกัด C จะพบว่ามีการวนซ้ำเพียงแค่รอบเดียว เนื่องจากพิกัดที่ได้จากวิธีสามเหลี่ยมระยะเป็นพิกัดเดียวกับวิธี gradient descent

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบจำนวนการวนซ้ำ เมื่อ $\alpha = 0.0001$

พิกัด	จำนวนการวนซ้ำ		ร้อยละการวนซ้ำที่ลดลง
	จุดกึ่งกลางพิกัด	พิกัดจากสามเหลี่ยมระยะ	
A	441	217	50.79
B	552	497	9.96
C	600	1	99.83
D	819	538	34.31
E	486	293	39.71
ค่าเฉลี่ย			46.92

กรณีที่ค่าอัตราการเรียนรู้ (α) ลดลง จะส่งผลให้รอบการวนซ้ำมีค่าที่น้อยลงไปด้วย ในตารางที่ 8 เป็นการเปรียบเทียบจำนวนรอบการวนซ้ำของการใช้ค่าเริ่มต้นทั้งสองแบบโดยลดค่าอัตราการเรียนรู้เป็น 0.001 ซึ่งจะพบว่า

จำนวนรอบการวนซ้ำน้อยลงกว่าในตารางที่ 7 แต่ก็ยังพบว่าการใช้ค่าเริ่มต้นที่ได้จากการคำนวณพิกัดด้วยวิธีสามเหลี่ยมระยะจะทำให้รอบการวนซ้ำลดลงเช่นเดียวกัน

ตารางที่ 8 เปรียบเทียบจำนวนการวนซ้ำ เมื่อ $\alpha = 0.001$

พิกัด	จำนวนการวนซ้ำ		ร้อยละการวนซ้ำที่ลดลง
	จุดกึ่งกลางพิกัด	พิกัดจากสามเหลี่ยมระยะ	
A	59	22	62.71
B	49	27	44.90
C	59	1	98.31
D	81	54	33.33
E	48	30	37.50
ค่าเฉลี่ย			55.35

5. สรุปผล

การระบุตำแหน่งภายในอาคารด้วยเทคโนโลยีบลูทูธพลังงานต่ำโดยใช้วิธี gradient descent จะทำให้สามารถคำนวณพิกัดเป้าหมายได้ใกล้เคียงกว่าการใช้วิธีสามเหลี่ยมระยะ เนื่องจากวิธี gradient descent จะวนซ้ำหาพิกัดของเป้าหมายที่ทำให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด แต่จะต้องวนซ้ำซึ่งจะทำให้ใช้เวลาคำนวณมากกว่าวิธีสามเหลี่ยมระยะที่ใช้การคำนวณเพียงครั้งเดียว บทความนี้ได้นำเสนอการลดจำนวนรอบของการวนซ้ำด้วยการเลือกค่าเริ่มต้นที่เหมาะสมจากวิธีสามเหลี่ยมระยะ ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับการใช้จุดกึ่งกลางพิกัดของจุดส่งสัญญาณแล้วพบว่า การใช้ค่าเริ่มต้นด้วยพิกัดที่ได้จากวิธีสามเหลี่ยมระยะจะทำให้จำนวนรอบการวนซ้ำลดลง ถึงแม้ว่าจะเพิ่มการคำนวณพิกัดด้วยวิธีสามเหลี่ยมระยะมาเป็นค่าเริ่มต้น แต่เป็นการคำนวณเพียงแค่ครั้งเดียว เมื่อนำมาเทียบกับจำนวนรอบที่ลดลงแล้ว วิธีที่นำเสนอจะช่วยลดจำนวนรอบการวนซ้ำได้

6. เอกสารอ้างอิง

[1] J. Wu, "Three-Dimensional Indoor RFID Localization System," Ph.D. Dissertation, University of Nebraska - Lincoln, 2012.

[2] V. Varshney, R. K. Goel and M. A. Qadeer, "Indoor positioning system using Wi-Fi & Bluetooth Low Energy technology," 13th International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), Hyderabad, 2016, pp. 1-6.

[3] S. Chai, R. An and Z. Du, "An Indoor Positioning Algorithm Using Bluetooth Low Energy RSSI," International Conference on Advanced Material Science and Environmental Engineering (AMSEE 2016).

[4] N. Kuxdorf-Alkirata and D. Brückmann, "Reliable and low-cost indoor localization based on bluetooth low energy," 3rd International Symposium on Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS), Offenburg, 2016, pp. 92-96.

[5] I. Gorovyi, A. Roenko, A. Pitertsev, I. Chervonyak and V. Vovk, "Real-time system for indoor user localization and navigation using bluetooth beacons," 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kiev, 2017, pp. 1025-1030.

[6] S. Bertuletti, A. Cereatti, U. Della, M. Caldara and M. Galizzi, "Indoor distance estimated from Bluetooth Low Energy signal strength: Comparison of regression models," IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), Catania, 2016, pp. 1-5.

[7] A. De Blas and D. López-de-Ipiña, "Improving trilateration for indoors localization using BLE beacons," 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech), Split, 2017, pp. 1-6.

- [8] D. Mankotia, S. Agrawal and S. Singh, “Error minimization in Bluetooth based indoor localization of a mobile robot using Cuckoo Search algorithm,” International Conference on Medical Imaging, m-Health and Emerging Communication Systems (MedCom), Greater Noida, 2014, pp. 283-288.
- [9] R. Putta, M. Misra and D. Kapoor, “Smartphone based indoor tracking using magnetic and indoor maps,” 10th International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), Singapore, 2015, pp. 1-6.