การประยุกต์วิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับระบบระบุตำแหน่งแบบเวลาจริงภายในอาคาร

Application of Genetic Algorithm for Indoor Real Time Localization System

วดีนาถ วรรณสวัสดิ์กุล* และ ปิยะพงษ์ แดงขำ

Wadeenat Wannasawaskul* and Piyapong Dangkham

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศและการสื่อสาร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

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

*Email: wadeenat.w@lawasri.tru.ac.th

Received: November 11, 2021; Revised: December 03, 2021; Accepted: December 07, 2021

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาด้วยวิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับระบบระบุตำแหน่งแบบเวลาจริงภายในอาคารด้วยการคำนวณสามเหลี่ยมระยะ ขั้นตอนการระบุตำแหน่งจะใช้ค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับมาคำนวณพิกัดจากสามจุดอ้างอิง โดยแก้สมการหาคำตอบที่สอดคล้องกับสมการวงกลมของจุดอ้างอิงทั้งสามจุดด้วยวิธีทางเมทริกซ์ แต่พบว่าในบางกรณีคำตอบที่ได้ไม่ใช่พิกัดที่ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุด บทความนี้จึงนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม วิธีการแก้ปัญหานี้จะใช้วิธีการวนซ้ำ และปรับปรุงคำตอบในแต่ละรอบให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ในการทดสอบการระบุตำแหน่ง จะใช้เทคโนโลยีบลูทูธพลังงานต่ำ ในห้องโถงโล่งไม่มีสิ่งกีดขวาง ผลการทดสอบพบว่าวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถเป็นตัวเลือกหนึ่งในการประยุกต์ใช้กับระบบระบุตำแหน่งแบบเวลาจริงภายในอาคาร

คำสำคัญ : วิธีเชิงพันธุกรรม, ระบบระบุตำแหน่ง, บลูทูธพลังงานต่ำ

Abstract

This paper presents the optimization problem for the indoor real time localization (indoor RTLS) with genetic algorithm. The indoor RTLS uses the trilateration technique to calculate the coordinate positions. The process estimates the range from 3 source references with the received signal strength indicator. The coordinate positions are computed by matrix technique for equation system. The solutions from matrix technique are not the minimum error in some case. The genetic algorithm is presented for the optimum search method. This algorithm iterates to compute in optimum coordinate positions and improve the appropriate position in each iteration. In testing process, the localization uses Bluetooth low energy technology in empty room. The results show that the genetic algorithm is a one choice for applying to the indoor RTLS.

Keywords : genetic algorithm, localization, Bluetooth low energy

1. บทนำ

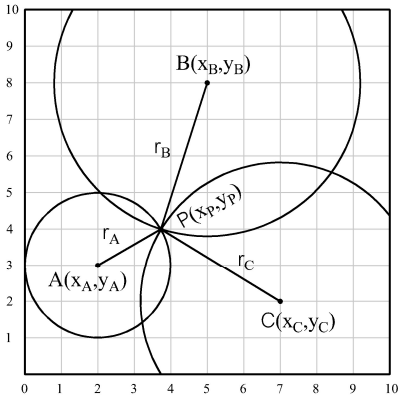
ค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับ (Received Signal Strength Indicator: RSSI) เป็นการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่ได้จากอุปกรณ์ส่งสัญญาณ โดยจะทำการวัดค่าในหน่วย dBm และนำมาคำนวณระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ด้วยวิธีการสูญเสียเชิงวิถี (Path Loss) [1] ค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับถูกนำมาใช้ในระบบระบุตำแหน่งแบบเวลาจริง (Real Time Localization System: RTLS) ซึ่งเป็นการหาตำแหน่งวัตถุที่ต้องการคล้ายกับระบบระบุตำแหน่งบนพื้นโลก (Global Positioning System: GPS) แต่เมื่อนำมาใช้ภายในอาคาร (Indoor RTLS) จะมีข้อจำกัด เนื่องจากไม่สามารถรับสัญญาณดาวเทียมภายในอาคารได้ จึงต้องเลือกใช้ค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับจากเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network) โดยมีหลากหลายเทคโนโลยี เช่น เทคโนโลยี Wi-Fi [2] เทคโนโลยีบลูทูธพลังงานต่ำ (Bluetooth Low Energy) [3] เทคโนโลยีเอกซ์บี (XBee) [4] หรือเทคโนโลยีอัลตร้าไวด์แบนด์ (Ultra-Wideband) [5] ซึ่งในแต่ละเทคโนโลยีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันทั้งด้านความละเอียดในการคำนวณระยะทางหรือต้นทุนของอุปกรณ์เครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย

ระบบระบุตำแหน่งแบบเวลาจริงใช้สามเหลี่ยมระยะ (Trilateration) ในการระบุพิกัดวัตถุ จะต้องใช้อุปกรณ์ส่งสัญญาณ 3 จุด แล้วใช้จุดตัดของวงกลมทั้งสามในการคำนวณพิกัดอ้างอิง แต่ในบางกรณีพบว่า จุดตัดของวงกลมทั้งสามมีการเหลื่อมซ้อน ทำให้ต้องพิจารณาจุดที่เหมาะสมในการใช้อ้างอิงพิกัดที่ถูกต้อง โดยอาศัยวิธีการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Problems) ซึ่งมีงานวิจัย [3] เสนอการใช้วิธีเกรเดียน เดสเซนท์ (Gradient Descent) ในการคำนวณหาค่าพิกัดของอุปกรณ์ บลูทูธพลังงานต่ำ วิธีการนี้จะใช้การวนซ้ำเพื่อหาค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุดหรือหาจุดต่ำสุดของความสัมพันธ์นั่นเอง ซึ่งต้องใช้การวนซ้ำรอบที่มากขึ้นตามความละเอียดที่ต้องการ งานวิจัย [6] ใช้วิธีค่าต่ำสุด-ค่าสูงสุด (Min-Max) ของค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับจากเครือข่ายไร้สาย โดยวิธีที่นำเสนอจะใช้ความสัมพันธ์ของค่าต่ำสุดและสูงสุดที่อ่านค่าจากค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับมากำหนดเป็นขอบเขต (Bounding-Box) แต่ยังพบปัญหาในการปรับสมดุลระหว่างการประมาณค่าความแม่นยำและการซับซ้อนในการคำนวณ ในขณะที่ [7] ใช้วิธีลดค่าความแปรปรวนของค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับ ก่อนที่จะนำมาคำนวณหาพิกัด ส่วนงานด้านระบบพิกัดในงานด้านหาความผิดพลาดทั้งหมดของเครื่องมือกลโรงงาน [8] นำเสนอการแก้ปัญหาด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) โดยนำไปแก้ปัญหาการติดตามด้วยเลเซอร์ ซึ่งพบว่าวิธีเชิงพันธุกรรมมีความเหมาะสมกับงานด้านหาค่าต่ำสุดหรือสูงสุดของความสัมพันธ์ที่ต้องใช้การแก้สมการหลายตัวแปร

บทความนี้จะทำการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบระบุตำแหน่งแบบเวลาจริง โดยนำวิธีเชิงพันธุกรรมมาประยุกต์ใช้ เนื่องจากข้อดีของวิธีนี้จะปรับคำตอบให้ใกล้เคียงกับค่าที่เหมาะสมในการวนซ้ำแต่ละรอบ และเลือกใช้เทคโนโลยีบลูทูธพลังงานต่ำเป็นเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย เนื่องจากสามารถใช้สมาร์ทโฟนเป็นอุปกรณ์รับส่งสัญญาณได้จึงสะดวกในการทดสอบ งานวิจัยนี้ใช้ภาษาไพธอน (Python) ในการคำนวณหาค่า ตำแหน่งจากค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับ ผลการเปรียบเทียบการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีเชิงพันธุกรรมแสดงไว้ในส่วนถัดไปของบทความนี้

2. หลักการสามเหลี่ยมระยะ

การคำนวณพิกัดด้วยวิธีสามเหลี่ยมระยะจะใช้หลักการของเรขาคณิตวิเคราะห์ โดยจะให้อุปกรณ์ส่งสัญญาณมีการแพร่สัญญาณในลักษณะของวงกลม และเมื่อคำนวณระยะทางจากค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับจะได้รัศมีของวงกลมในการแพร่สัญญาณ พิกัดของอุปกรณ์รับสัญญาณสามารถคำนวณได้จากจุดตัดทั้งสามของสมการวงกลม แสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การคำนวณพิกัดด้วยวิธีสามเหลี่ยมระยะ

จากรูปที่1 อุปกรณ์ส่งสัญญาณ 3 จุดคือ A, B และ C วางอยู่ที่พิกัด $(x_A, y_A), (x_B, y_B)$ และ (x_C, y_C) โดยแต่ละจุดกระจายสัญญาณเป็นรัศมีขนาด r_A, r_B และ r_C ตามลำดับ

พิกัดที่วงกลมทั้งสามตัดกันคำนวณได้จากจากสมการวงกลม ดังนี้ [9]

$$(x-x_A)^2+(y-y_A)^2=r_A^2 \quad (1)$$

$$(x-x_B)^2+(y-y_B)^2=r_B^2 \quad (2)$$

$$(x-x_C)^2+(y-y_C)^2=r_C^2 \quad (3)$$

จุดตัดของวงกลมทั้งสามจะเป็นจุดพิกัดของอุปกรณ์รับสัญญาณ $P(x_P,y_P)$ ซึ่งได้มาจากการหาค่า x และ y ที่สอดคล้องกับสมการ (1)-(3) โดยรัศมีของวงกลมแต่ละวงสามารถคำนวณได้จากสมการการสูญเสียเชิงวิถี [1] ดังสมการที่ (4)

$$r(d)=10^{(RSSI_{ref}-RSSI(d))/10n} \quad (4)$$

เมื่อ $r(d)$ คือ ระยะห่างจากอุปกรณ์ d เมตร

$RSSI_{ref}$ คือ ค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับที่จุดอ้างอิง 1 เมตร

$RSSI(d)$ คือ ค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับ d เมตร

และ n คือ ค่าตัวแปรในการส่งสัญญาณ

ในการหาพิกัด (x,y) ที่สอดคล้องกับทั้งสมการ (1)-(3) สามารถหาได้จากการกระจายพจน์กำลังสองแล้วจัดให้อยู่ในรูปแบบของเมทริกซ์ ซึ่งจากสมการที่ (1) สามาถเขียนได้ในรูปแบบกระจาย คือ

$$\left(x^2-2xx_A+x_A^2\right)+\left(y^2-2yy_A+y_A^2\right)=r_A^2 \quad (5)$$

จัดให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์จะได้ดังสมการที่ (6)

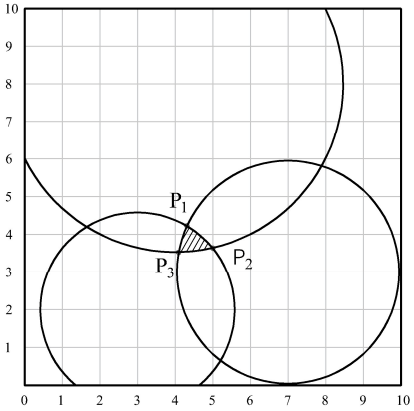
$$\begin{bmatrix}1 & -2x_A & -2y_A\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x^2+y^2\\ x\\ y\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}r_A^2-x_A^2-y_A^2\end{bmatrix} \quad (6)$$

เมื่อเขียนรวมทั้งสามสมการในรูปแบบเมทริกซ์จะได้ดังสมการที่ (7)

$$\begin{bmatrix}1 & -2x_A & -2y_A\\ 1 & -2x_B & -2y_B\\ 1 & -2x_C & -2y_C\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x^2+y^2\\ x\\ y\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}r_A^2-x_A^2-y_A^2\\ r_B^2-x_B^2-y_B^2\\ r_C^2-x_C^2-y_C^2\end{bmatrix} \quad (7)$$

ในการหาค่า x และ y สามารถนำอินเวอร์สเมทริกซ์ของเมทริกซ์ตัวแรกคูณทั้งสองข้างของสมการ ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีดั้งเดิมที่ใช้ในการหาพิกัด (x,y)

แต่ในบางกรณีไม่มีจุดตัดสอดคล้องกับสมการวงกลมทั้ง 3 สมการ แต่มีจุดตัดที่เกิดจากวงกลมเพียง 2 วง ทำให้ต้องทำการหาจุดที่ทำให้มีค่าความผิดพลาดที่สอดคล้องกับสมการที่ (1)-(3) น้อยที่สุด ซึ่งจะนำการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดมาประยุกต์ใช้ รูปที่ 2 แสดงกรณีไม่มีจุดตัดของวงกลม 3 วง จึงต้องทำการเลือกพิกัด (x,y) ในส่วนที่แรเงาด้วยการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 2 สามเหลี่ยมพิกัดที่มีไม่มีจุดตัดของวงกลม 3 วง

วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีเชิงพันธุกรรมมีลักษณะคล้ายหลักการวิวัฒนาการในเรื่องการคัดเลือกตามธรรมชาติ วิธีเชิงพันธุกรรมจะหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยใช้รูปแบบการถ่ายทอดพันธุกรรมที่ดีไปยังรุ่นต่อไป ขั้นตอนของวิธีเชิงพันธุกรรมจะสร้างเซตคำตอบในรูปแบบโครโมโซม (Chromosome) จากนั้นจะทำการคัดเลือกโครโมโซมที่ดีเพื่อส่งต่อไปยังรุ่นลูก ซึ่งจะมีการปรับปรุงพันธุกรรมหรือคำตอบที่ดีขึ้นโดยการสลับสายพันธุ์ (Crossover) และกลายพันธุ์ (Mutation) ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุ์กรรม เริ่มจากการกำหนดประชากร (Population) รุ่นแรกขึ้นมาก่อน โดยกำหนดในรูปแบบของเซต ดังนี้

$$\{[x_1,y_1],[x_2,y_2],[x_3,y_3],[x_4,y]\}$$

สมาชิกในเซตหรือประชากรเรียกว่าโครโมโซม และสมาชิกในโครโมโซมเรียกว่า ยีน (gene) เช่น โครโมโซม $[x_1,y_1]$ มียีน x_1,y_1 เป็นคำตอบของค่าที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งยีนแต่ละตัวจะใช้

วิธีการสุ่มเลือกจากขอบเขตของคำตอบ เมื่อต้องการปรับปรุงสายพันธุ์เพื่อส่งต่อไปยังรุ่นถัดไป จะพิจารณาจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) ซึ่งในการประยุกต์ใช้กับสามเหลี่ยมระยะคือ การหาพิกัด (x, y) ที่ทำให้ค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุด โดยนำสมการที่ (1)-(3) มาพิจารณา ซึ่งการคำนวณค่าความผิดพลาดจะใช้ผลรวมของทั้งสามสมการ ดังนั้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละชุดโครโมโซม n ที่มียีนเป็น x และ y แสดงได้ดังสมการที่ (8)

$$ObjectiveFn[n] = \sum_{i=1}^{3}\left((x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 - r_i^2\right)^2 \quad (8)$$

เมื่อ x_i และ y_i คือตำแหน่งพิกัดของอุปกรณ์ส่งสัญญาณ

หลังจากนั้น จะนำฟังก์ชันวัตถุประสงค์มาประเมินค่าความเหมาะสม (Fitness Evaluation) จากสมการที่ (9)

$$Fit[n] = \frac{1}{(1 + ObjectiveFn[n])} \quad (9)$$

จากสมการค่าความเหมาะสมแสดงให้เห็นว่า โครโมโซมที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์น้อยเข้าใกล้ 0 จะทำให้ได้ค่า $Fit[n]$ ที่เข้าใกล้ 1 แสดงให้เห็นว่าโครโมโซมชุดดังกล่าวมีความเหมาะสมเพื่อให้ได้ประชากรรุ่นใหม่ที่ดีขึ้นกว่ารุ่นก่อนหน้า จะต้องทำการสลับสายพันธุ์ซึ่งก็เป็นการผสมยีนของโครโมโซมแต่ละตัวนั่นเอง ในการกลายพันธุ์จะต้องกำหนดอัตราการสลับสายพันธุ์ (Crossover Rate) เพื่อใช้สุ่มแลกเปลี่ยนตำแหน่งยีนของแต่ละโครโมโซม และเพื่อไม่ให้เกิดการวนแลกเปลี่ยนยีนของโครโมโซมที่ซ้ำไปซ้ำมาจึงต้องสร้างการกลายพันธุ์ขึ้นโดยกำหนดอัตรากลายพันธุ์ (Mutation Rate) เพื่อสุ่มเลือกยีนที่จะใช้ในการกลายพันธุ์ จากนั้นจะได้ประชากรรุ่นถัดไปและวนกลับไปหาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ค่าความเหมาะสมสลับสายพันธุ์และกลายพันธุ์วนซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เข้าใกล้ศูนย์จึงจะหยุดการวนซ้ำ ยีนของโครโมโซมในเซตประชากรรุ่นสุดท้ายจะเป็นคำตอบของปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด

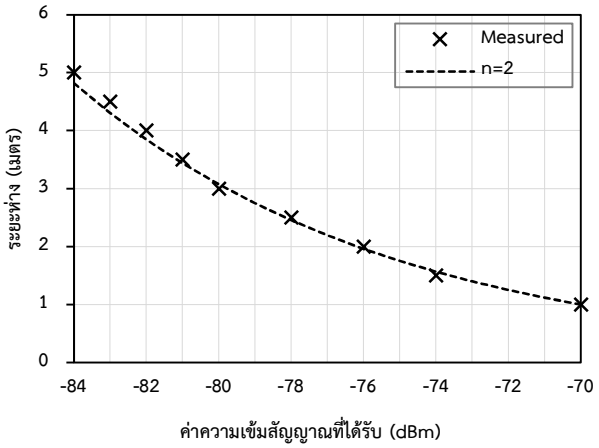
3. การทดสอบการคำนวณพิกัด

บทความนี้จะทำการศึกษาระบบระบุตำแหน่งแบบเวลาจริงด้วยเทคโนโลยีบลูทูธพลังต่ำ โดยอุปกรณ์รับส่งสัญญาณจะใช้สมาร์ทโฟนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์เวอร์ชั่น 11 ที่มีระบบเชื่อมต่อบลูทูธเวอร์ชั่น 5.0 และใช้แอพพลิเคชัน BLE Scanner เวอร์ชั่น 3.18 [10] ในการรับส่งสัญญาณบลูทูธ ซึ่งแอพพลิเคชันดังกล่าวมี 2 โหมดให้ใช้งานคือ 1) Advertiser สำหรับอุปกรณ์ส่งสัญญาณ และ 2) Scanner สำหรับอุปกรณ์รับสัญญาณ ซึ่งสามารถวัดค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับในหน่วย dBm และค่าการวัดแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับ

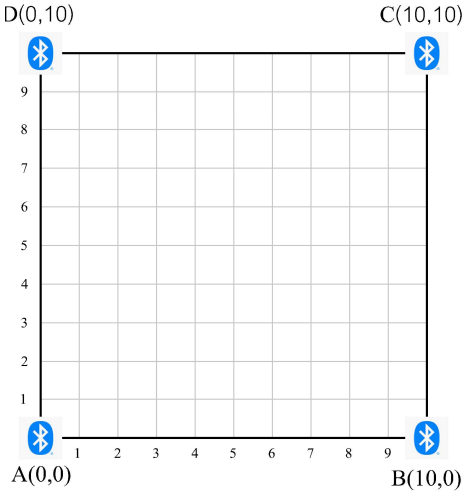
ระยะห่าง (เมตร)	ค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับ (dBm)
1.00	-70
1.50	-74
2.00	-76
2.50	-78
3.00	-80
3.50	-81
4.00	-82
4.50	-83
5.00	-84

เมื่อนำสมการที่ (4) มาคำนวณเพื่อหาค่า n หรือค่าตัวแปรในการส่งสัญญาณ จะทำให้ได้ค่า n=2 ซึ่งจะใช้ในการคำนวณระยะห่างระหว่างอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ ผลการเปรียบเทียบค่าการวัดความเข้มสัญญาณที่ได้รับการคำนวณการสูญเสียเชิงวิถีแสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ผลเปรียบเทียบการคำนวณค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับ

ก) ห้องประชุมที่ใช้ในการทดสอบ



ข) แผนผังการอ้างอิงจุด

รูปที่ 4 การจัดวางตำแหน่งอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ

การทดสอบการคำนวณพิกัดจะใช้ห้องประชุมที่โล่งไม่มีวัตถุกีดขวาง และกำหนดจุดพิกัดต่างๆ ในระนาบ 10x10 เมตร และวางสมาร์ทโฟนที่ใช้เป็นอุปกรณ์ส่งสัญญาณที่จุด A(0,0), B(10,0), C(10,10) และ D(0,10) ดังแสดงในรูปที่ 4 และกำหนดให้จุดพิกัดห่างกัน 1 เมตร เพื่อใช้ในการทดสอบวางอุปกรณ์รับสัญญาณและนำมาคำนวณหาพิกัดที่ถูกต้องที่สุด

4. ผลการทดสอบ

การทดสอบจะทำการวางสมาร์ทโฟนในพิกัดที่กำหนดไว้ในรูปที่ 4 โดยมีสมาร์ทโฟนอีก 4 เครื่องวางที่จุดมุมทั้ง 4 จุด ซึ่งจะใช้วิธีสามเหลี่ยมระยะแบบดั้งเดิมเปรียบเทียบกับวิธีเชิงพันธุกรรม เนื่องจากค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับสามารถคำนวณระยะห่างของอุปกรณ์ได้ด้วยสมการ (4) เมื่อค่า n=2 (จากรูปที่ 3) ทำให้ได้สมการที่สมบูรณ์ดังสมการที่ (10)

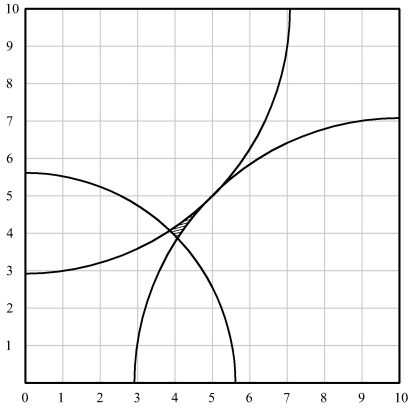
$$r(d) = 10^{(RSSI_{ref} - RSSI(d))/20} \qquad (10)$$

ผลการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณทั้ง 4 จุด เมื่ออุปกรณ์รับสัญญาณอยู่ที่จุด (4,4) แสดงได้ดังตารางที่ 2 และระยะห่างที่แสดงในตาราง คำนวณได้จากสมการที่ (10)

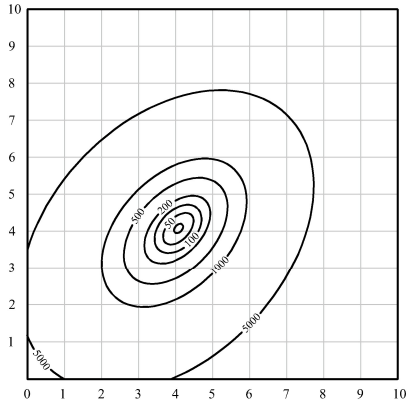
ตารางที่ 2 ค่าความเข้มสัญญาณ ณ ที่จุด (4,4)

จุดส่งสัญญาณ	ค่าความเข้มที่ได้รับ (dBm)	ระยะห่าง (เมตร)
A(0,0)	-85	5.62
B(10,0)	-87	7.08
C(10,10)	-89	8.91
D(0,10)	-87	7.08

เนื่องจากวิธีคำนวณพิกัดจะใช้สามจุดอ้างอิงจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณ จึงทำการเลือกค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับสูงสุด 3 ลำดับแรกมาใช้ เพราะเป็นจุดส่งสัญญาณที่อยู่ใกล้ตำแหน่งที่ทำการทดสอบ ดังนั้นจากตารางที่ 2 จึงทำให้ได้จุดส่งสัญญาณที่ใช้ 3 จุด คือ A(0,0), B(10,0) และ D(0,10) ดังรูปที่ 5 ซึ่งจะสังเกตว่าไม่มีจุดตัดกันของวงกลมทั้งสาม จึงทำให้ค่าที่คำนวณได้ด้วยวิธีดั้งเดิมอาจจะไม่ใช่ค่าที่ผิดพลาดน้อยที่สุด



รูปที่ 5 สามจุดอ้างอิงจากอุปกรณ์ส่งสัญญาณที่ใช้ทดสอบ



รูปที่ 6 ค่าความผิดพลาดที่พิกัดต่างๆ

ผลการเปรียบเทียบการคำนวณพิกัดด้วยวิธีสามเหลี่ยมระยะแบบดั้งเดิมและวิธีเชิงพันธุกรรม แสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบการคำนวณพิกัดด้วยวิธีสามเหลี่ยมระยะแบบดั้งเดิมและวิธีเชิงพันธุกรรม

วิธีคำนวณ	พิกัด	ระยะทางยูคลิเดียน
ดั้งเดิม	(4.07, 4.07)	0.10
เชิงพันธุกรรม	(4.03, 4.03)	0.04

จากตารางที่ 3 ระยะทางยูคลิเดียน [9] คือระยะห่างระหว่างพิกัด (x_1, y_1) กับ (x_2, y_2) คำนวณได้จากสมการที่ (11)

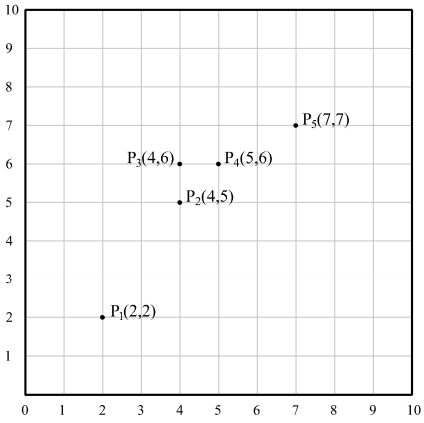
$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \qquad (11)$$

ผลการคำนวณจากตารางที่ 3 พบว่าพิกัดที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน คือ วิธีสามเหลี่ยมระยะแบบดั้งเดิมได้พิกัด (4.07,4.07) และวิธีเชิงพันธุกรรมได้พิกัด (4.03,4.03) ทั้งสองวิธีให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกันกับพิกัดที่ทำการทดสอบ คือ (4.00,4.00) แต่เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยระยะทางยูคลิเดียน พบว่าวิธีเชิงพันธุกรรมมีระยะทางที่ใกล้กว่า ซึ่งหมายความว่าพิกัดที่ใช้วิธีเชิงพันธุกรรมมีความใกล้เคียงกับพิกัดในการทดสอบมากกว่านั่นเอง

จะพบว่าวิธีสามเหลี่ยมระยะแบบดั้งเดิมไม่ได้ให้คำตอบที่สอดคล้องกับสมการวงกลมทั้งสามเสมอไป แต่ยังมีคำตอบอื่นที่ทำให้ได้พิกัดที่มีค่าความผิดพลาดน้อยกว่า โดยสามารถนำฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากสมการที่ (8) ซึ่งเป็นสมการวงกลมทั้งสามมาคำนวณทุกตำแหน่งได้ดังรูปที่ 6

จากรูปที่ 6 แสดงค่าความผิดพลาดเมื่อคำนวณตามสมการที่ (8) โดยใช้พิกัดทั้งหมดที่ใช้ทดสอบ (10x10 เมตร) จะพบว่าที่พิกัด (4,4) มีค่าความผิดพลาดลดลงเมื่อเทียบกับพิกัดที่ห่างออกไป แต่จะสังเกตได้ว่าพิกัด (4,4) ไม่ได้เป็นจุดศูนย์กลางของกราฟเส้นแสดงความผิดพลาด นั่นหมายความว่า พิกัด (4,4) ไม่สามารถคำนวณได้อย่างถูกต้องจากวิธีทั้งสอง แต่สามารถคำนวณพิกัดหรือคำตอบอื่นที่สอดคล้องกับสมการวงกลมทั้งสามให้ได้มากที่สุด

การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบการคำนวณพิกัดสามเหลี่ยมระยะด้วยวิธีแบบดั้งเดิมกับวิธีเชิงพันธุกรรม ในจุดทดสอบอีก 5 จุด แสดงได้ดังแผนผังในรูปที่ 7 โดยมีจุดทดสอบ คือ $P_1(2,2)$ $P_2(4,5)$ $P_3(4,6)$ $P_4(5,6)$ และ $P_5(7,7)$ ผลการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับ และการแปลงระยะห่างด้วยสมการที่ (10) แสดงได้ดังตารางที่ 4



รูปที่ 7 พิกัดทั้งหมดที่ใช้ทดสอบ

ตารางที่ 4 ค่าความเข้มสัญญาณของพิกัดที่ใช้ทดสอบ

พิกัด	A(0,0)		B(10,0)		C(10,10)		D(0,10)	
	dBm	m	dBm	m	dBm	m	dBm	m
P_1(2,2)	-78	2.51	-88	7.94	-91	11.22	-89	8.91
P_2(4,5)	-86	6.31	-88	7.94	-88	7.94	-87	7.08
P_3(4,6)	-87	7.08	-89	8.91	-87	7.08	-85	5.62
P_4(5,6)	-87	7.08	-88	7.94	-86	6.31	-86	6.31
P_5(7,7)	-90	10.00	-87	7.08	-83	4.47	-88	7.94

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบผลการคำนวณพิกัดที่ตำแหน่งทดสอบต่างๆ

พิกัด	วิธีการคำนวณ		ระยะทางยูคลิเดียน	
	ดั้งเดิม	เชิงพันธุกรรม	ดั้งเดิม	เชิงพันธุกรรม
P_1(2,2)	2.16, 2.16	2.17, 2.17	0.23	0.24
P_2(4,5)	3.84, 4.48	4.01, 4.70	0.54	0.30
P_3(4,6)	4.07, 5.93	4.03, 5.97	0.10	0.04
P_4(5,6)	5.00, 5.52	4.76, 5.72	0.48	0.38
P_5(7,7)	7.15, 6.51	7.15, 6.51	0.51	0.51

จากตารางที่ 5 ผลการคำนวณด้วยวิธีเชิงพันธุกรรมจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกับวิธีดั้งเดิม แต่เมื่อพิจารณาระยะทางยูคลิเดียนเทียบกับพิกัดที่ใช้ทดสอบจะพบว่า วิธีเชิงพันธุกรรมให้ค่าระยะยูคลิเดียนที่ต่ำกว่า เนื่องจากวิธีเชิงพันธุกรรมจะทำการวนซ้ำเพื่อหาค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุด โดยอาศัยฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นแนวทางในการปรับปรุงคำตอบที่หาได้ในแต่ละรอบการคำนวณ แต่ในบางกรณีก็จะพบว่าทั้งสองวิธีให้คำตอบที่เท่ากัน เช่น P_5(7,7) ได้พิกัดจากการคำนวณเป็น (7.15,6.51) ทั้ง 2 วิธี

เมื่อพิจารณาในแต่ละพิกัด จากตารางที่ 5 จะพบว่า พิกัด P_1(2,2) ทั้งสองวิธี ได้ค่าพิกัดที่คำนวณใกล้เคียงกัน สาเหตุเกิดจากจุดทดสอบอยู่ใกล้แหล่งส่งสัญญาณ A(0,0) ทำให้เมื่อคำนวณระยะห่างระหว่างอุปกรณ์รับและส่งสัญญาณ มีความผิดพลาดต่ำ จึงส่งผลต่อการคำนวณพิกัดด้วยสามเหลี่ยมระยะไปด้วย ซึ่งผลลัพธ์สอดคล้องกับ P_5(7,7) ที่อยู่ใกล้จุดส่งสัญญาณ C(10,10) ทำให้ข้อผิดพลาดที่เกิดจากการคำนวณระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ผิดพลาดต่ำไปด้วย การคำนวณพิกัดด้วยวิธีทั้งสองจึงให้ค่าที่เท่ากัน แต่ในขณะที่จุดทดสอบ P_2(4,5), P_3(4,6) และ P_4(5,6) เป็นพิกัดที่ไม่ได้ชิดขอบด้านใดด้านหนึ่ง ทำให้การคำนวณระยะห่างระหว่างอุปกรณ์รับส่งสัญญาณมีความคลาดเคลื่อน ไม่สามารถใช้วิธีสามเหลี่ยมระยะแบบดั้งเดิมหาพิกัดที่สอดคล้องกับสมการวงกลมทั้งสามได้ วิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้ในการวนซ้ำจึงทำให้ได้คำตอบที่สอดคล้องกับสมการวงกลมทั้งสามมากกว่า เพิ่งจะสังเกตุได้จาก ระยะทางยูคลิเดียนที่น้อยกว่าวิธีแบบดั้งเดิมอย่างเห็นได้ชัด

5. สรุปผล

การคำนวณพิกัดในระบบระบุตำแหน่งแบบเวลาจริงภายในอาคารด้วยเทคโนโลยีบลูทูธพลังงานต่ำ จะใช้หลักการสามเหลี่ยมระยะ โดยคำนวณรัศมีของวงกลมจากจุดส่งสัญญาณทั้ง 3 จุดอ้างอิง ด้วยค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับ และแก้ระบบสมการหาคำตอบด้วยวิธีทางเมทริกซ์ซึ่งเป็นวิธีดั้งเดิมที่มีใช้อยู่ แต่พบว่าการคำนวณด้วยวิธีดังกล่าวยังไม่ใช่ค่าที่เหมาะสมที่สุดที่สอดคล้องกับระบบสมการ วิธีการแก้ปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม จึงถูกนำเสนอเป็นอีกทางเลือก วิธีเชิงพันธุกรรมจะวนซ้ำและปรับปรุงคำตอบให้ได้ค่าที่เหมาะสม ผลการทดสอบพบว่า วิธีเชิงพันธุกรรมสามารถหา

ค่าที่เหมาะสมได้มากกว่าวิธีแบบดั้งเดิม โดยในตำแหน่งที่จุดรับสัญญาณใกล้เคียงกับจุดอ้างอิงพบว่าทั้งสองวิธีให้ค่าที่เหมาะสมได้ใกล้เคียงกัน เนื่องจากในขั้นตอนการคำนวณระยะทางด้วยสมการการสูญเสียเชิงวิถีมีความผิดพลาดต่ำ แต่ในขณะที่จุดรับสัญญาณที่ไกลจากจุดอ้างอิง วิธีเชิงพันธุกรรมให้คำตอบที่เหมาะสมมากกว่าวิธีแบบดั้งเดิมอย่างชัดเจน แสดงว่าวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถนำมาประยุกต์ใช้สำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารได้ อย่างไรก็ตามวิธีเชิงพันธุกรรมจะต้องวนซ้ำเพื่อหาคำตอบที่เหมาะสม ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบ ดังนั้นการนำไปประยุกต์ใช้งานจึงต้องคำนึงถึงจุดนี้ด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] 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 Sensor Applications Symposium (SAS),* Catania, 2016, pp.1-5.

[2] M M Maw, H M N M Tint and S. Duangsuwan, “Analysis of indoor Wi-Fi localization using gaussian process regression and K-nearest neighbor algorithms,” *UTK Research Journal,* vol. 14, no. 1, pp. 30-39. Jan.-Jul. 2020.

[3] P Dangkham, “Indoor Real Time Localization System with Bluetooth Low Power,” *Journal of Industrial Technology,* vol. 13, no. 1, pp. 71-80. Jan.-Jul. 2018 (in Thai).

[4] T. Phoka, K. Kumphet, and W. Massagram, “Localization of a Micro AUV with Dynamic Trilateration Using Low-power Packet Radio RSSI”, *ECTI-CIT*, vol. 15, no. 2, pp. 177 - 185, Apr. 2021.

[5] L. Génevé, O. Kermorgant and É. Laroche, "Limits of trilateration-based sensor placement algorithms," 2017 *IEEE Sensors Applications Symposium (SAS),* USA, 2017, pp. 1-6.

[6] A Booranawong, K Sengchuai, N Jindapetch and H Saito, “An investigation of min-max method problems for RSSI-based indoor localization: Theoretical and experimental studies,” *Engineering and Applied Science Research (EASR),* vol. 47, no. 3, pp. 313-325. Jul.-Sep. 2020.

[7] A Booranawong, J Sopajarn, T Sittiruk and N Jindapetch, “Reduction of RSSI variations for indoor position estimation in wireless sensor networks,” *Engineering and Applied Science Research (EASR),* vol. 45, no. 3, pp. 212-220. Jul.-Sep. 2018.

[8] H Wang, Y Cai, T Li, L Wang and F Li, “Application of genetic algorithm to multilateration measurement of the volumetric error in machine tools,” *Advances in Mechanical Engineering,* vol. 8, no. 9, pp. 1-10. Sep 2016.

[9] A. Baukerche, *Algorithms and Protocols for wireless sensor networks*, John Wiley and Sons, 2008.

[10] Bluepixel Technology, BLE Scanner. [Online]. Available: https://www.bluepixeltech.com