

ระบบติดตาม และระบุตำแหน่งของวัตถุในพื้นที่โล่ง โดยใช้เครือข่ายตรวจสอบไร้สาย (Zigbee)

Object Tracking System using Wireless Sensor Network in Open Area (Zigbee)

กัณวัฒน์ ไชยรัศมี (Kannawat Chaiyaratsamee)* ดร. ชัชชัย คุณบัว (Chatchai Khunboa)**

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบ และการทดสอบระบบติดตาม และระบุตำแหน่งของวัตถุในพื้นที่โล่ง โดยใช้เซ็นเซอร์ไร้สาย (Zigbee, มาตรฐาน IEEE 802.15.4) ในงานวิจัยนี้ได้นำ GPS มาช่วยในการระบุตำแหน่งของตัวอ้างอิง เพื่อให้สะดวกต่อการเคลื่อนย้าย เมื่อต้องการนำระบบไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุในสถานที่อื่น ในการทดสอบเบื้องต้นนี้ ได้ใช้วิธีการสามเหลี่ยมระยะ (Trilateration) ในการคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุพบว่า ในพื้นที่ที่มีความยาว 24.5 เมตร กว้าง 13.5 เมตร การคำนวณตำแหน่งของวัตถุมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 2.515 เมตร เมื่อเคลื่อนย้ายไปติดตั้งในพื้นที่ที่มีความยาว 94 เมตร กว้าง 91 เมตร การคำนวณตำแหน่งของวัตถุมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 4.55 เมตร

ABSTRACT

This research presents a design and an experiment of Object Tracking System using Wireless Sensor Network (Zigbee, IEEE 802.15.4) in an open area. The GPS is used as reference nodes. Thus, this methodology provides the simplicity of installation and movement. We use the Trilateration method to compute an object node. Results show that in an area of 24.5x13.5 m², this method has an error of 2.515 and in an area of 94x91 m², the error is approximately 4.55 meter.

คำสำคัญ : เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย ระบบระบุตำแหน่งวัตถุ ค่าความเข้มของสัญญาณ

Key Words : Wireless Sensor Network Object Tracking System RSS

*นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

***อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

บทนำ

ในปัจจุบันอุปกรณ์สื่อสารไร้สายได้มีการพัฒนาอุปกรณ์ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ทั้งในด้านการติดต่อสื่อสาร ให้สามารถติดต่อสื่อสารได้ไกล รวดเร็วขึ้น และในด้านพลังงาน มีการใช้พลังงานในปริมาณที่น้อยลง อีกทั้งอุปกรณ์เหล่านั้นยังได้มีการลดขนาดให้สามารถติดตั้งง่าย และมีราคาถูกเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งาน จึงมีการนำเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารแบบไร้สายมาใช้งานกันอย่างมากมายในวงกว้าง ทั้งใน โรงงานอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัย บริษัท ต่างๆ เป็นต้น

การนำอุปกรณ์สื่อสารไร้สายมาสร้างเป็นเครือข่ายเฝ้าสังเกตสถานที่ที่อันตราย และไม่สามารถเข้าถึงได้ เครือข่ายตรวจจับผู้บุกรุก อุปกรณ์สื่อสารไร้สายจะต้องเพิ่มความสามารถในการวัดค่าต่างๆ เข้าไปในการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย ให้รู้ถึงตำแหน่งที่แน่นอนของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายที่อยู่ในเครือข่าย Wireless Sensor Network ที่เราสร้างขึ้น เพื่อนำไปพัฒนาคุณภาพของการรับส่งข้อมูลในเครือข่าย ข้อมูลตำแหน่งของอุปกรณ์ไร้สายในเครือข่ายมีความสำคัญอยู่ 2 ประการคือ

1. ด้านการกำหนดเส้นทางการรับส่งข้อมูล เนื่องจากกระยะการส่งสัญญาณของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายมีจำกัด เมื่อต้องการส่งข้อมูลต่างๆ ไปในเครือข่าย จะมีการเลือกเส้นทางที่ดี และมีประสิทธิภาพที่สุดเพื่อส่งข้อมูล ดังนั้นการประมาณตำแหน่งของอุปกรณ์ไร้สายจึงมีความสำคัญมากในการใช้เลือกเส้นทางการส่งข้อมูลที่ต้องการ และมีประสิทธิภาพที่สุด

2. ด้านการประยุกต์ใช้ เราสามารถนำเครือข่าย Wireless Sensor Network มาประยุกต์ใช้ในด้าน การตรวจจับตำแหน่งของคนไข้ในโรงพยาบาล หาดูจุดตรวจจับความผิดปกติในพื้นที่ต่างๆ เป็นต้น ปัญหาหลักในระบบการทำงานคือ การประมาณตำแหน่งของอุปกรณ์ไร้สายในเครือข่าย

อุปกรณ์สื่อสารไร้สาย Zigbee [9] ซึ่งมีมาตรฐาน IEEE 802.15.4 มีความถี่ 2.4 GHz ความเร็วในการรับส่งข้อมูล 20 Kbps ถึง 250 Kbps ส่งได้ระยะทางไกลถึง 100 เมตรในอาคาร และ 1500 เมตรในที่โล่ง Zigbee สามารถสร้างเครือข่ายได้ถึง 65,536 ตัว และยังโดดเด่นในเรื่องการประหยัดพลังงาน โดยถ่าน 1 ก้อนสามารถใช้ได้นานถึง 2 ปี เนื่องจาก Zigbee จะมีการปิด (Sleep mode) เมื่อไม่มีการเรียกใช้ แต่เมื่อมีการเรียกใช้จะใช้เวลาเพียง 15 ms ในการเปิดการทำงาน (Active mode) และใช้เวลา 15 ms ในการติดต่อกับเครือข่าย

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้นำ Zigbee มาสร้างเป็นเครือข่าย Wireless Sensor Network ให้เป็นเครือข่ายที่มีประสิทธิภาพในการตรวจจับ รับส่งข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว มีความแม่นยำสูง ประหยัดพลังงาน สามารถสร้างเครือข่ายได้ด้วยตัวเอง มีราคาถูก และสามารถปรับเปลี่ยนอุปกรณ์ในระบบได้ง่าย โดยหากเปรียบเทียบกับระบบติดตามแบบ GPS นั้น Zigbee สามารถใช้งานในพื้นที่ที่มีขนาดเล็กได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงกว่า และสามารถรับส่งข้อมูลได้ทันทีโดยไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนของการส่งข้อมูลไปยังศูนย์เหมือนระบบ GPS ในการตรวจจับรถ จึงทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายในการส่งข้อมูล

จากเหตุผลที่กล่าวข้างต้นนั้น Zigbee สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการจัดการระบบตรวจจับ ช่วยอำนวยความสะดวกในการติดต่อประสานงาน ซึ่งช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย

งานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

Received-signal-strength (RSS) [10]

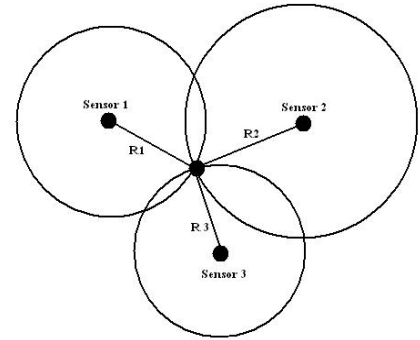
RSS เป็นวิธีการวัดความแรงของสัญญาณอาศัยหลักการลดทอนของสัญญาณ (Signal attenuation) ต่อระยะทางเพื่อใช้ในการคำนวณหาระยะห่างของวัตถุ โดยการวัดความแรงของ สัญญาณจะใช้วงจรที่แปลง

ค่าความแรงของสัญญาณมาเป็นความแรงของแรงดันไฟฟ้า (RSSI)

ข้อดีอย่างหนึ่งของการใช้การวัดแบบนี้คือ ไม่ต้องการฮาร์ดแวร์ที่มีราคาสูงและง่ายต่อการติดตั้งเหมาะสำหรับการวัดในเมืองหรือที่ร่ม ใน Cellular และ WLAN network มีอุปกรณ์สำหรับวัดค่า RSS อยู่แล้วโดยไม่ต้องเพิ่มอุปกรณ์ใดๆ

สำหรับการวัดแบบ Direct measurement ไม่มีความน่าเชื่อถือเพราะว่ามี Standard deviation ของ Error มากซึ่งได้รับผลกระทบจาก Shadow fading ค่อนข้างมาก การทำให้ RSS น่าเชื่อถือมากขึ้นจะต้องสร้างระบบในการจดจำพื้นที่นั้นๆ โดยการวัดค่าและเก็บข้อมูลไว้หลายๆ ครั้ง เมื่อนำมาวิเคราะห์ภายหลังก็จะมีผลผิดพลาดน้อยลง นอกจากนี้วิธีนี้มักไม่ใช้ในงานที่ต้องการความแม่นยำสูงเนื่องจากมีค่าความแปรปรวนของสัญญาณสูงตามสภาพแวดล้อมต่างๆ กัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อสัญญาณมาจากหลายทิศทาง (Multipath) และเกิดเงาสะท้อนของ สัญญาณ (Shadowing effect) อย่างไรก็ตามวิธีการวัดความแรงของสัญญาณ (Signal-strength-based) มักนำไปใช้ในการประมาณค่าตำแหน่งวัตถุหรือนำไปใช้ร่วมกับวิธีอื่นในการพิจารณา

โดยปกติ Power ของสัญญาณจะมีการลดลงเป็นในอัตราส่วน d^{-2} โดยที่ d เป็นระยะห่าง ระหว่างตัวรับและตัวส่ง Multipath signal และ Shadowing เป็นสองสาเหตุหลักของ Environment error ในการวัดแบบ RSS Multiple signal ที่มีแอมพลิจูดและเฟสต่างกันเมื่อมาถึงตัวรับสัญญาณเหล่านี้จะเกิดการเสริมและลดความถี่เป็นฟังก์ชัน ทำให้ Frequency-selective อ่อนลงผลกระทบดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยใช้วิธี Spread spectrum (โดยการเฉลี่ยค่า Power ของตัวรับ over a wide range of frequency) นอกจากนี้ยังลดสัญญาณแทรกสอดใน Unlicensed band



ภาพที่ 1 แสดงการรับส่งสัญญาณเพื่อวัดความเข้มของสัญญาณ

Trilateration [13]

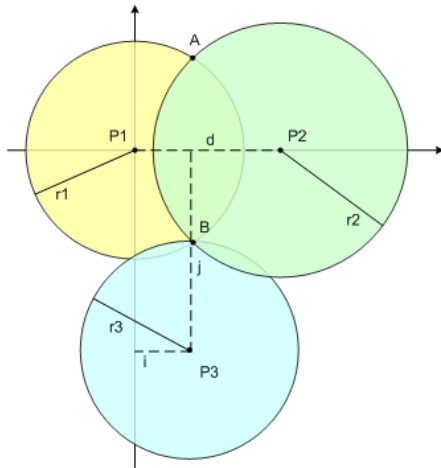
เป็นวิธีการหาค่าตำแหน่งของวัตถุโดยใช้รูปทรงสามเหลี่ยม วิธีการนี้จะใช้จุดอ้างอิงตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปในการหาค่าตำแหน่งของวัตถุ ซึ่งจะวัดระยะทางจากวัตถุไปยังจุดอ้างอิงแต่ละตัว ถ้าต้องการให้มีความแม่นยำในระนาบ 2 มิติมากขึ้น เราจะใช้จุดอ้างอิง 3 จุดในการคำนวณหาตำแหน่ง

การคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุโดยใช้จุดอ้างอิง 3 จุด ดังรูปที่ 5.5.1 เราจะใช้สูตรในการคำนวณ ดังนี้

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2d}$$

$$y = \frac{r_1^2 - r_3^2 + i^2 + j^2}{2j} - \frac{i}{j}x$$

โดยที่ x คือ จุดศูนย์กลางตำแหน่งแกน x
 y คือ จุดศูนย์กลางตำแหน่งแกน y
 r_1 คือ รัศมีของจุดอ้างอิงที่ 1
 r_2 คือ รัศมีของจุดอ้างอิงที่ 2
 r_3 คือ รัศมีของจุดอ้างอิงที่ 3
 I คือ ระยะห่างแนวแกน x ระหว่างจุดอ้างอิงที่ 1 กับ 3
 J คือ ระยะห่างแนวแกน y ระหว่างจุดอ้างอิงที่ 1 กับ 3



ภาพที่ 2 แสดงการคำนวณด้วยวิธี Trilateration

Haversine formula [12]

Haversine formula เป็นสมการในการหา ระยะห่างระหว่าง GPS สองตัว โดยใช้ละติจูด และลองจิจูดมาคำนวณหาระยะห่าง จากสูตร

$$\Delta \text{lat} = \text{lat}_2 - \text{lat}_1$$

$$\Delta \text{long} = \text{long}_2 - \text{long}_1$$

$$a = \sin^2(\Delta \text{lat}/2) + \cos(\text{lat}_1) \cdot \cos(\text{lat}_2) \cdot \sin^2(\Delta \text{long}/2)$$

$$c = 2 \cdot \text{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a})$$

$$d = R \cdot c$$

โดยที่ R = รัศมีโลก (รัศมีโลกเฉลี่ย = 6,371 กิโลเมตร)

d = ระยะห่างระหว่าง GPS สองตัว

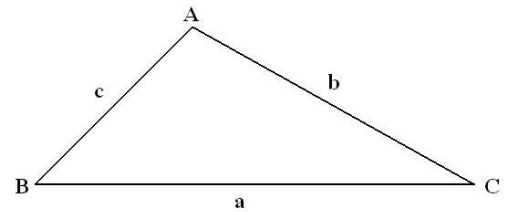
lat_1 = ละติจูดที่ได้จาก GPS ตัวที่ 1

lat_2 = ละติจูดที่ได้จาก GPS ตัวที่ 2

long_1 = ลองจิจูดที่ได้จาก GPS ตัวที่ 1

long_2 = ลองจิจูดที่ได้จาก GPS ตัวที่ 2

กฎของโคไซน์ (Cosine Law) [14]



ภาพที่ 3 แสดงมุม และด้านทั้งสามที่ใช้ในการคำนวณ ด้วยกฎของโคไซน์

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos(A)$$

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac \cos(B)$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos(C)$$

โดยที่ A = ขนาดของมุม A

B = ขนาดของมุม B

C = ขนาดของมุม C

a = ความยาวของ a

b = ความยาวของ b

c = ความยาวของ c

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

อุปกรณ์ในการวิจัย

ระบบติดตาม และระบุตำแหน่งในพื้นที่โล่ง จะแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ชุดอุปกรณ์เซ็นเซอร์ไร้สาย และส่วนของโปรแกรมประยุกต์ที่ใช้แสดงผล

ชุดอุปกรณ์เซ็นเซอร์ไร้สายที่ใช้ในการทำวิจัย ประกอบด้วย ตัวส่งสัญญาณ Xbee Pro ของบริษัท Maxstream ตัวรับสัญญาณ GPS ไมโครคอนโทรลเลอร์ ATmega 168 และแบตเตอรี่ โดยแบ่งเป็นตัวอ้างอิง (Reference Node) ตัววัตถุที่ต้องการหาตำแหน่ง (Object Node) และตัวรับค่าเพื่อนำไปแสดงผลที่โปรแกรมประยุกต์



ภาพที่ 4 ชุดอุปกรณ์เซ็นเซอร์ไร้สาย

โปรแกรมประยุกต์พัฒนาโดยใช้ภาษา C# .Net เพื่อทำการรับค่าพิกัดจาก GPS และรับค่าความเข้มของสัญญาณเพื่อนำมาหาตำแหน่งของวัตถุ

การออกแบบระบบ

ระบบติดตาม และระบุตำแหน่งของวัตถุในพื้นที่โล่งนี้ ได้ออกแบบมาให้เริ่มต้นโดยที่โปรแกรมประยุกต์จะร้องขอพิกัด ละติจูด และลองจิจูด ของตัวอ้างอิง เพื่อนำมาคำนวณตำแหน่งของตัวอ้างอิง โดยใช้ Haversine formula ในการหาระยะห่างของตัวอ้างอิงแต่ละตัว และใช้ กฎของโคไซน์ ในการระบุตำแหน่งของตัวอ้างอิง

ในส่วนของการติดตาม และระบุตำแหน่งของวัตถุ จะทำโดยการให้ตัววัตถุส่งข้อความร้องขอไปยังตัวอ้างอิง เพื่อนำไปหาความเข้มของสัญญาณที่ได้รับ และรวบรวมความเข้มของสัญญาณที่ได้รับจากตัวอ้างอิงทั้งหมดที่ได้รับ ส่งไปยังตัวรับค่าเพื่อนำไปคำนวณด้วยโปรแกรมประยุกต์ที่พัฒนาขึ้นมา โดยใช้วิธี Trilateration ในการระบุตำแหน่งของตัววัตถุ

การทดลอง

พื้นที่ทดลองขนาดเล็ก

ขั้นที่ 1

ทำการเก็บค่าความเข้มของสัญญาณในระยะต่างๆ เพื่อนำมาใช้เป็นความเข้มสัญญาณ เทียบกับระยะอ้างอิงเฉลี่ย เพื่อในไปใช้คำนวณหาตำแหน่งของวัตถุ

ขั้นที่ 2

โปรแกรมประยุกต์ส่งข้อความร้องขอพิกัดของตัวอ้างอิง และตัววัตถุส่งข้อความร้องขอความเข้มของสัญญาณ เพื่อส่งไปคำนวณตำแหน่งของวัตถุ

สถานที่ทำการทดลอง คือ คาบฟ้าภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์คอมพิวเตอร์ มีความยาวประมาณ 24.5 เมตร กว้างประมาณ 13.5 เมตร ใช้ตัวอ้างอิง 3 ตัว เพื่อหาตำแหน่งของตัววัตถุ 1 ตัว โดยการทดสอบการทำงาน ตัววัตถุจะส่งค่าความเข้มของสัญญาณที่ได้จากตัวอ้างอิง 3 ตัว ไปยังตัวรับค่าเพื่อนำไปคำนวณตำแหน่งของวัตถุทุกๆ 3 วินาที

พื้นที่ทดลองขนาดใหญ่

ขั้นที่ 1

ทำการเก็บค่าความเข้มของสัญญาณในระยะต่างๆ เพื่อนำมาใช้เป็นความเข้มสัญญาณ เทียบกับระยะอ้างอิงเฉลี่ย เพื่อในไปใช้คำนวณหาตำแหน่งของวัตถุ

ขั้นที่ 2

โปรแกรมประยุกต์ส่งข้อความร้องขอความเข้มของวัตถุ โดยที่ตัวอ้างอิงจะส่งสัญญาณออกไปยังวัตถุทุกๆ 0.5 วินาที เพื่อให้ทราบถึงความเข้มของสัญญาณ และเมื่อตัววัตถุได้รับความเข้มจากตัวอ้างอิงครบทั้ง 3 ตัว จะส่งค่าความเข้มของสัญญาณไปยังโปรแกรมประยุกต์ เพื่อทำการหาตำแหน่งของวัตถุ

สถานที่ทำการทดลอง คือ บริเวณที่จอดรถหลังหอประชุมกาญจนาภิเษก มหาวิทยาลัยขอนแก่น มีความยาวประมาณ 94 เมตร และกว้างประมาณ 91 เมตร ใช้ตัวอ้างอิง 3 ตัว เพื่อหาตำแหน่งของวัตถุ 1 ตัว โดยการทดสอบตัววัตถุจะรับความเข้มของสัญญาณจากตัวอ้างอิงทั้ง 3 ตัว ที่ส่งออกมาทุกๆ 0.5 วินาที และส่งไปยังตัวรับเพื่อทำการคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุ

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

การทดลองในพื้นที่ขนาดเล็ก

ผลการวิจัยที่ได้ในการหาตำแหน่งตัวอ้างอิง โดยใช้ค่าพิกัดจาก GPS มาหาความห่างระหว่างตัวอ้างอิง

แต่ละตัว โดยใช้ Haversine formula และกฎของโคไซน์ ได้ค่าความยาวประมาณ 23.7 เมตร และความกว้างประมาณ 13.2 เมตร ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 0.5 เมตร

ผลที่ได้จากการหาตำแหน่งของวัตถุ ตามตำแหน่งต่างๆ เป็นไปตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงตำแหน่งของวัตถุ เทียบกับตำแหน่งที่คำนวณได้ และค่าความคลาดเคลื่อน

ตำแหน่งของวัตถุ	ตำแหน่งที่คำนวณได้	ค่าความคลาดเคลื่อน (ม.)
5,5	4,3.58	1,1.42
5,10	5.8,8.35	0.8,1.65
10,10	13.8,14.2	3.8,4.2
10,15	14.37,13.5	4.37,1.5
15,15	17.83,18.58	2.83,3.58

จากตำแหน่งที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด คือ 0.8 เมตร และมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุด คือ 4.37 เมตร คิดเป็นค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน 2.515 เมตร

การทดลองในพื้นที่ขนาดใหญ่

ผลการวิจัยที่ได้ในการหาตำแหน่งตัวอ้างอิง โดยใช้ค่าพิกัดจาก GPS มาหาความห่างระหว่างตัวอ้างอิงแต่ละตัว โดยใช้ Haversine formula และกฎของโคไซน์ ได้ค่าความยาวประมาณ 93.65 เมตร และความกว้างประมาณ 87.04 เมตร ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 2.155 เมตร

ผลที่ได้จากการหาตำแหน่งของวัตถุ ตามตำแหน่งต่างๆ เป็นไปตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงตำแหน่งของวัตถุ เทียบกับตำแหน่งที่คำนวณได้ และค่าความคลาดเคลื่อน

ตำแหน่งของวัตถุ	ตำแหน่งที่คำนวณได้	ค่าความคลาดเคลื่อน (ม.)
30,50	34.7,48.2	4.7,1.8
30,70	33.2,72.6	3.2,2.6
30,90	33.4,93.84	3.4,3.84
50,10	47.65,13.4	2.35,3.4
50,20	52.6,18.7	2.6,1.3
50,30	54.36,36.4	4.36,6.4
50,50	47.3,48.35	2.7,1.65
60,20	63.4,16.7	3.4,3.3
60,40	67.8,45.5	7.8,5.5
60,60	65.62,64.38	5.62,4.38

จากตำแหน่งที่คำนวณได้ มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด คือ 1.3 เมตร และมีความคลาดเคลื่อนมากที่สุด คือ 7.8 เมตร คิดเป็นค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อน 4.55 เมตร

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบ และทดสอบระบบติดตาม และระบุตำแหน่งของวัตถุในพื้นที่โล่ง โดยใช้เครือข่ายตรวจจับไร้สาย Zigbee และได้นำ GPS มาช่วยในการคำนวณหาตำแหน่งของตัวอ้างอิง เพื่อให้สามารถเคลื่อนย้าย และติดตั้งได้ง่าย

ผลจากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงความคลาดเคลื่อนโดยรวมของการหาระยะ และตำแหน่งของตัวอ้างอิง ซึ่งมาจากทั้งจากอุณหภูมิ ความชื้น ของสถานที่ทำการทดลอง และจำนวนการเก็บข้อมูล และอัลกอริทึมที่เอามาใช้ในการทดสอบ

แนวทางการพัฒนาต่อ

จากผลการทดลองยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่สามารถทำให้แม่นยำขึ้นได้ด้วยการอัลกอริทึมในเรื่องตำแหน่ง เช่น ตัวกรองคาลแมน (Kalman filter) เพิ่มจำนวนตัวอ้างอิงขึ้น หรือทำการเก็บค่าความเข้มของสัญญาณที่ตำแหน่งต่างๆ มาทำ Fingerprint เพื่อให้มีความคลาดเคลื่อนลดลง

เอกสารอ้างอิง

1. Arunkumar Thangavelu., K. Bhuvaneswari., K. Kumar., K. Senthikumar., and S.N. Sivanandam. 2007. Location Identification and Vehicle Tracking using VANET (VETRAC). IEEE - ICSCN 2007: 112-116.
2. Erin-Ee-Lin Lau., and Wan-Young Chung. 2007. Enhanced RSSI-based Real-time User Location Tracking System for Indoor and Outdoor Environments. ICCIT 2007: 1213-1218.
3. Binghao Li., Jeffrey Kam., Jonathan Lui., Andrew G. Dempster., and Chris Rizos. 2007. Direction-based Wireless LAN positioning. 4th Int. Symp. on Location Based Services & TeleCartography. Hong Kong, 8-10 November: 306-316
4. Ruei-Hong Yan., Chin-Hao Yu., Ing-Jr Ding., and Dr. Kun Cheng Tsai. 2005. Wireless Sensor Network Based Smart Community Security Service.
5. Jan Blumenthal., Ralf Grossmann., Frank Golatowski., and Dirk Timmermann. 2007. Weighted Centroid Localization in Zigbee-based Sensor Network. IEEE - WISP'07: 1-6.
6. Reiner Jedermann., Christian Behrens., Detmar Westphal., and Walter Lang. 2006. Applying Autonomous Sensor System in Logistic Combining Sensor Networks, RFIDs and Software Agents. Sensors and Actuators A: Physical(132): 370-375.
7. Guoqiang Mao., Baris Fidan., and Brian D.O. Anderson. 2007. Wireless Sensor Network Localization Techniques. Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking(51): 2529-2553.
8. SH Gary Chan., and Victor Cheung. 2007. Location Estimation. Sensor Networks and Configuration (N. P. Mahalik, ed.): 317-332
9. Zigbee Alliance.2007. Zigbee Specification v2.5. Retrieved November 28, 2009, from <http://www.zigbee.org>
10. RSSI. Retrieved September 24, 2008, from <http://www.greatnote.com/blog/2007/12/29/rssi/>
11. Ing. Martin Orlich. 2006. Localization methods in mobile networks GSM. Retrieved September 24, 2008, from <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2006022801>
12. Haversine formula. Retrieved November 28, 2009, from <http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>
13. Trilateration. Retrieved September 24, 2008, from <http://en.wikipedia.org/wiki/Trilateration>
14. Cosine Law. Retrieved November 28, 2009, from http://en.wikipedia.org/wiki/Law_of_cosines