

การระบุตำแหน่งของผู้ขอความช่วยเหลือโดยใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบเฉพาะกิจ

Indoor localization of a wireless ad hoc sensor networks.

อรจิรา เกษโกวิท (Onchira Katekowitz)¹ และนพพร วิสิฐพงศ์พันธ์ (Nawaporn Wisitpongphan)²

ภาควิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

¹katekowitz@hotmail.com, ²nawapornn@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาและทดสอบการหาขีดความสามารถการระบุตำแหน่งของระบบขอความช่วยเหลือภายในอาคาร โดยใช้เทคนิคลายนิ้วมือ (Fingerprint) ซึ่งผู้วิจัยได้พัฒนาระบบ-เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบเฉพาะกิจที่ครอบคลุมภายในอาคาร 2 ชั้น โดยใช้อุปกรณ์ Zigbee Pro Series 2 จากผลการทดลองทางผู้วิจัยพบว่า หากใช้อุปกรณ์ Zigbee Router จำนวน 6 ตัว ในการสร้างระบบเครือข่ายแล้ว แม้ว่าสัญญาณจะครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด แต่ประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งจะอยู่ที่ประมาณ 73% เท่านั้น เนื่องมาจากอุปกรณ์ขอความช่วยเหลือจะสามารถเชื่อมต่อกับ router ได้เพียง 3-4 ตัวเท่านั้นในบางพื้นที่ ดังนั้นหากสามารถเพิ่มจำนวน router ในงานวิจัยนี้ให้มีมากขึ้นได้ ประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งก็จะดีขึ้น

คำสำคัญ: เครือข่ายไร้สายแบบเฉพาะกิจ การระบุตำแหน่ง เทคนิคลายนิ้วมือ ชิกบี

Abstract

This article presents a feasibility study of the fingerprint location algorithm in an in-door wireless sensor networks using Zigbee Pro Series 2. The target location spans two-storey of the building. According to the results obtained from the developed hardware/software testbed, we found that using 6 routers to relay the message provides only 73% accuracy in identifying the room at which the users or end-devices transmit a distress signals. The uncertainty in the obtained results is due to the fact that end-device can only communicate to 3-4 routers in some areas. Hence,

we expect that had we have used more routers in the system, the performance in terms of accuracy would be better.

Keyword: ad-hoc networks, localization, fingerprint, Zigbee

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยให้เกิดความสะดวกสบายในการดำเนินกิจกรรมต่าง ๆ อาทิเช่น โรงงานอุตสาหกรรม มีการนำเทคโนโลยี Zigbee เข้ามาช่วยในการส่งสัญญาณเพื่อระบุตำแหน่งสินค้าที่อยู่ภายในห้าง [1] ด้านเกษตรกรรมก็นำ Zigbee มาช่วยในการส่งข้อมูลตรวจจับความชื้น [2] และเมื่อปลายปี พ.ศ. 2554 หลังจากเกิดเหตุการณ์น้ำท่วมในกรุงเทพมหานครได้มีผู้นำ Zigbee มาประยุกต์ใช้งานเพื่อช่วยวัดระดับน้ำและประเมินเหตุการณ์ของระดับน้ำที่อาจเพิ่มมากขึ้นจนอาจก่อให้เกิดความเสียหายได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าวิวัฒนาการของเทคโนโลยีสามารถเพิ่มความสะดวกสบายในการทำงานด้านต่าง ๆ ได้มากมาย

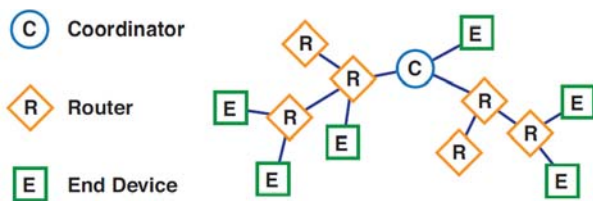
ด้วยหลักการประยุกต์ใช้งานข้างต้น คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดจะนำ Zigbee มาพัฒนารูปแบบการขอความช่วยเหลือของผู้ป่วยในโรงพยาบาล ซึ่งในปัจจุบันนี้จะใช้อุปกรณ์ขอความช่วยเหลือที่ส่วนใหญ่จะติดตั้งอยู่บริเวณหัวเตียงของผู้ป่วยและตามจุดต่าง ๆ เช่น ห้องน้ำ เป็นต้น ในกรณีที่ผู้ป่วยไม่ได้อยู่ใกล้บริเวณที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ขอความช่วยเหลือ ผู้ป่วยอาจได้รับการช่วยเหลือล่าช้า เนื่องจากเหตุผลดังกล่าวหากมีอุปกรณ์ที่สามารถติดตัวผู้ป่วยไปได้ทุกที่ สามารถกดปุ่มขอความช่วยเหลือได้ตลอดเวลาที่ต้องการ จะช่วยทำให้การดูแลผู้ป่วยเป็นไปได้อย่างทั่วถึงและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีสื่อสารแบบไร้สาย

Zigbee เป็นมาตรฐานสากล ที่ถูกกำหนดโดย Zigbee Alliance เป็นการสื่อสารแบบไร้สาย ที่มีอัตราการรับส่งข้อมูลต่ำ ใช้พลังงานต่ำ และราคาถูก โดยจุดประสงค์เพื่อให้สามารถสร้างระบบที่เรียกว่าเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network) ซึ่งระบบนี้จะสามารถทำงานภายในอาคารและภายนอกอาคารได้ด้วยแบตเตอรี่ 3.3 VDC

Zigbee มีลักษณะการทำงาน 3 รูปแบบ คือ Coordinator, Router และ End Device ดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่ง Coordinator มีหน้าที่เลือกช่องความถี่ที่จะใช้ในการสื่อสาร ขณะที่ Router จะมีหน้าที่ส่งต่อข้อความจากโหนดหนึ่งไปยังอีกโหนดหนึ่ง และอนุญาตให้โหนดลูกหรือ End Device เข้ามาเชื่อมต่อได้ ส่วน End Device มีหน้าที่ในการรับ-ส่งข้อมูลแต่หากไม่มีข้อมูลต้องส่งจะอยู่ในโหมดประหยัดพลังงาน (Sleep Mode) [3-4]



ภาพที่ 1: ลักษณะการทำงานของ Zigbee [4]

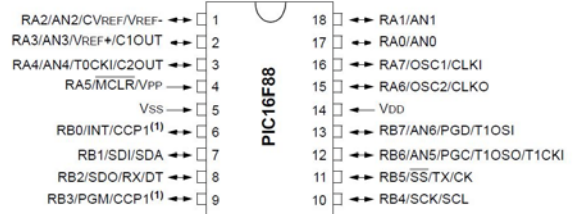
2.2 โมดูล PIC16F88

PIC เป็นชื่อเรียกของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะนำมาใช้ควบคุมการทำงานของ Zigbee Pro Series 2 เพื่อให้สามารถทำงานตามคำสั่งที่ระบุเอาไว้ อาทิเช่น การร้องขอค่า RSSI จากตัวอุปกรณ์ End Device การตรวจเช็คพลังงานคงเหลือ และปัจจัยหลักคือ การระบุตำแหน่งเมื่อมีการกดปุ่มร้องขอความช่วยเหลือ

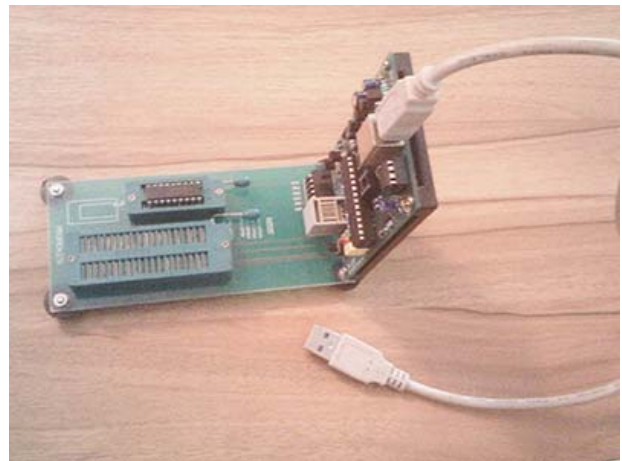
ในการโปรแกรมคำสั่งต่าง ๆ เพื่อบันทึกลงไปใน PIC16F88 นั้น จะต้องมีอุปกรณ์ในการเชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ดังแสดงในภาพที่ 2 และต้องมี Hex File Format (*.hex) ซึ่งเป็นไฟล์รหัส ASCII ที่ใช้สื่อสารระหว่างอุปกรณ์กับเครื่อง

คอมพิวเตอร์และเป็นแอดaptor ไฟล์ของโปรแกรม Compiler (ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม PIC C Compiler ในการ Compiler)

18-Pin PDIP, SOIC



ภาพที่ 2: โมดูล PIC16F88 [5]



ภาพที่ 3: อุปกรณ์ในการเขียนคำสั่งลงใน PIC16F88

2.3 Receive Signal Strength Indicator (RSSI)

Receive Signal Strength Indicator (RSSI) เป็นค่าความแรงของสัญญาณวิทยุ ตามหลักการแล้ว เมื่อระยะทางไกลออกไป สัญญาณก็จะอ่อนลง ดังนั้น ค่า RSSI จึงสามารถนำมาใช้ในการประมาณระยะทางระหว่างตัวรับ-ส่ง สัญญาณได้ โดยค่า RSSI มีหน่วยเป็น เดซิเบลมิลลิวัตต์ (dBm) อย่างไรก็ตาม ค่านี้มักไม่นิยมใช้ในงานที่ต้องการความแม่นยำสูง เนื่องจากมีความแปรปรวนและลดทอนของสัญญาณตามสภาพแวดล้อมซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น โครงสร้างอาคารซึ่งใช้วัสดุแตกต่างกัน ปริมาณผู้คนภายในอาคาร และสิ่งกีดขวางอื่น ๆ เป็นต้น ดังนั้น ในการนำค่า RSSI มาใช้เพื่อการคำนวณหาระยะทางนั้น จึงจำเป็นต้องเก็บข้อมูลไว้หลาย ๆ ครั้ง เพื่อนำมาวิเคราะห์ภายหลัง ซึ่งจะทำให้เกิดความผิดพลาดน้อยลง [4]

2.4 การคำนวณหาตำแหน่งโดยใช้เทคนิคลายนิ้วมือ

เทคนิคลายนิ้วมือ หรือ fingerprint นั้น เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการระบุตำแหน่ง ซึ่งมีลักษณะการทำงานแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ระยะออฟไลน์ (Offline Phase) และระยะออนไลน์ (Online Phase) [6]

ในระยะออฟไลน์ (Offline phase) ผู้วิจัยต้องทำการเก็บรวบรวมค่า RSSI ที่สามารถวัดได้จากตัวอุปกรณ์ Zigbee แต่ละตัวในตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งค่า RSSI ที่เก็บได้นั้นจะเป็นข้อมูลที่ใช้อ้างอิงเพื่อระบุตำแหน่งของผู้ใช้ ในการเก็บข้อมูลในแต่ละตำแหน่งจะต้องทำการวัดหลายครั้ง เพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่น่าเชื่อถือและมีความเสถียร

ระยะออนไลน์ (Online phase) เป็นระยะการใช้งาน กล่าวคือ เมื่อต้องการทราบตำแหน่งของอุปกรณ์ Zigbee ที่เคลื่อนที่ จะต้องทำการวัดค่า RSSI จากตัวอุปกรณ์มาเปรียบเทียบกับค่า RSSI Fingerprint ที่วัดได้ในระยะออฟไลน์ โดยค่า RSSI fingerprint ตำแหน่งใดมีความใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้มากที่สุดก็จะประมาณตำแหน่งนั้นให้เป็นตำแหน่งปัจจุบัน [7-8]

ในการคำนวณหา Fingerprint ที่ใกล้เคียงนั้น จะหาจาก Euclidean Distance ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{n=1}^N (RSSI_i^{(n)} - RSSI_j^{(n)})^2} \quad (1)$$

โดยที่

d_{ij} คือ ค่าความต่างของสัญญาณ 2 จุด i และ j ในที่นี้เป็นความต่างของค่าความแรงสัญญาณระหว่างค่าในฐานข้อมูลและค่าที่รับมาจากการกดปุ่มร้องขอความช่วยเหลือ ณ เวลานั้น

$RSSI_i^{(n)}$ คือ ค่าความแรงสัญญาณที่วัดได้จาก Router ตัวที่ n ณ ตำแหน่ง i

$RSSI_j^{(n)}$ คือ ค่าความแรงสัญญาณที่วัดได้จาก Router ตัวที่ n ณ ตำแหน่ง j

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เครือข่ายไร้สายแบบเฉพาะกิจ เป็นเครือข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงของโครงข่ายตลอดเวลา โดยไม่มีการควบคุมจาก

ส่วนกลาง ซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถกำหนดโครงสร้างของเครือข่ายไว้ล่วงหน้าได้ และในการมุ่งเน้นของงานวิจัยนี้ต้องการจะนำเสนอการใช้งานเครือข่ายไร้สายแบบเฉพาะกิจเพื่อระบุตำแหน่งพื้นที่ของอุปกรณ์ภายในอาคาร จากการศึกษาพบว่า เทคนิคการระบุตำแหน่งมีหลายรูปแบบ ได้แก่ fingerprint, tracking ฯลฯ โดยสามารถสรุปประเด็นที่เกี่ยวข้องหลักๆ ได้ดังต่อไปนี้

การวัดความแรงของสัญญาณเพื่อให้สามารถระบุตำแหน่งของอุปกรณ์ ได้อย่างแม่นยำนั้น มีวิธีการเทียบตำแหน่งจากการวัดความแรงของสัญญาณของอุปกรณ์ไร้สายที่มีอยู่ในระบบซึ่งเรียกว่าเทคนิค fingerprint โดยหลักการการทำงานของ fingerprint จะเป็นการนำค่าความแรงสัญญาณที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลที่มีการวัดค่าไว้แล้วเพื่อระบุตำแหน่งให้กับโหนดเป้าหมายได้อย่างถูกต้องและคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด [8]

เทคนิคการระบุตำแหน่งของเครือข่ายไร้สายแบบเฉพาะกิจ มีการนำเวลาที่โหนดเข้ามาในเน็ตเวิร์ก (time-of-arrival (TOA)) และทิศทางที่โหนดเข้ามาในเน็ตเวิร์ก (direction-of-arrival (DOA)) เข้ามาช่วยในการคำนวณเพื่อปรับปรุงความแม่นยำของการระบุตำแหน่ง [9,10] และในกรณีที่โหนดมีการเคลื่อนที่ การติดตามการเคลื่อนที่ของโหนดเป็นสิ่งสำคัญในการระบุตำแหน่งที่แน่นอนด้วยเช่นกัน จึงมีการศึกษาเกี่ยวกับอัลกอริทึมของการจัดการวางโหนดแบบคงที่เพื่อใช้เป็นแกนหลักในการวัดความแรงของสัญญาณ ที่สามารถระบุระยะทางจากสถานีฐานไปยังตำแหน่งที่โหนดเป้าหมายตั้งอยู่ [11,12] นอกจากนี้เทคนิคที่กล่าวมาข้างต้นแล้วยังมีเทคนิคของการเลือกใช้พลังงานที่เหมาะสมเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านความถูกต้องในการระบุตำแหน่งของโหนดเป้าหมาย โดยสามารถเลือกปรับใช้พลังงานที่เหมาะสมในการติดตามระบุตำแหน่งสำหรับโหนดที่มีการเคลื่อนที่ในระบบ [13,14]

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 อุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้มีการใช้ Zigbee Pro Series 2 ทั้งหมด 9 ตัว โดยแต่ละตัวจะถูกตั้งค่าการทำงานที่แตกต่างกันดังนี้

Coordinator ดังแสดงในภาพที่ 4 (ก) จำนวน 1 ตัว ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับเครื่องแม่ข่ายเพื่อส่งงานจากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

และรับค่าที่ส่งต่อมาจากอุปกรณ์ตัวอื่น ๆ จะถูกติดตั้งไว้บริเวณ ส่วนด้านหน้าของชั้น 4 ดังแสดงในภาพที่ 5 (ก)

Router ดังแสดงในภาพที่ 4 (ข) จำนวน 6 ตัว จะวางตามจุดต่าง ๆ ภายในอาคารครอบคลุมพื้นที่ 2 ชั้น (ชั้น 4 และ ชั้น 5) เพื่อให้ End Device สามารถติดต่อสื่อสารกับ Coordinator ได้ แสดงดังภาพที่ 5

End Device ดังแสดงในภาพที่ 4 (ค) จำนวน 2 ตัว ใช้ในการทดสอบกดปุ่มร้องขอความช่วยเหลือจากจุดต่าง ๆ ภายในอาคาร 2 ชั้น



(ก)

(ข)

(ค)

ภาพที่ 4: อุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย

3.2 ตำแหน่งการวางอุปกรณ์เพื่อทำการวัดค่าสัญญาณ

การดำเนินการวิจัยจะต้องทำการวัดค่าความแรงสัญญาณแต่ละจุด จุดละ 20 ครั้ง ดังภาพที่ 5 แล้วนำมาคำนวณค่าเฉลี่ย พร้อมระบุตำแหน่งของห้องเพื่อเก็บลงในฐานข้อมูล

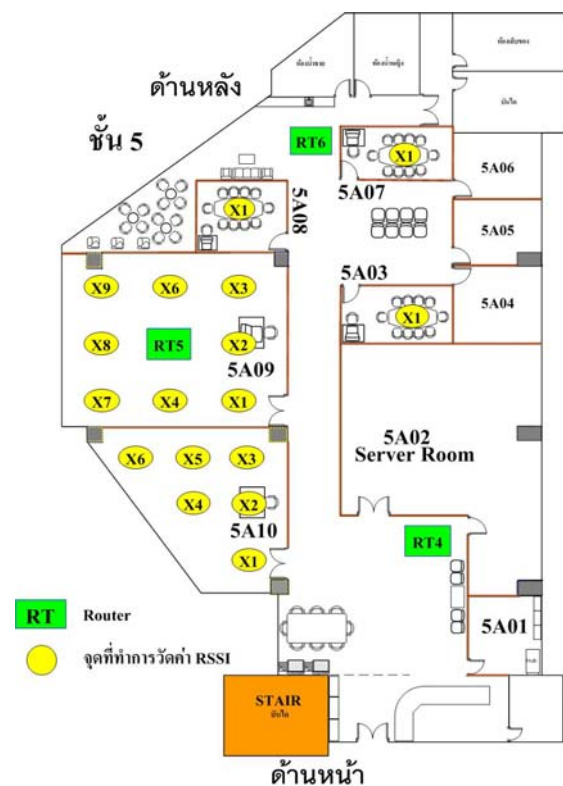
3.3 โปรแกรม Zigbee Network Detection

โปรแกรม Zigbee Network Detection ที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ จะสามารถเพิ่มข้อมูลของอุปกรณ์ที่มีอยู่ในระบบ แสดงสถานะการเชื่อมต่อพอร์ตคอม วันที มีปุ่มสอบถามตำแหน่งของ End Device และสามารถแสดงค่าความแรงของสัญญาณที่ Router แต่ละตัวได้รับจาก End Device ดังแสดงในภาพที่ 6

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม Zigbee Network Detection ที่พัฒนาขึ้นมีดังนี้ ก่อนการเปิดโปรแกรมจะต้องเชื่อมต่อ Coordinator เข้ากับเครื่องแม่ข่ายให้เรียบร้อย เมื่อทำการเปิดโปรแกรมขึ้นมา โปรแกรมจะทำการเชื่อมต่อกับพอร์ตคอมอัตโนมัติ เมื่อต้องการตรวจเช็คอุปกรณ์ที่มีอยู่จะใช้หน้าต่าง Overview Network ซึ่งเป็นส่วนของการ Monitor ระบบทั้งหมด โดยสามารถกดถาม End Device ว่าอยู่ ณ ตำแหน่งห้องไหน และเมื่อมีการกดปุ่มร้องขอความช่วยเหลือ ระบบจะทำงานดังแสดงในภาพที่ 7

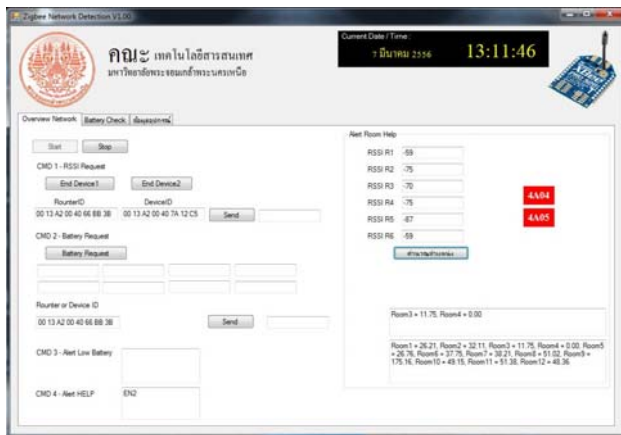


(ก) พื้นที่การทดลองบริเวณอาคารนวมินทรราชินีชั้น 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

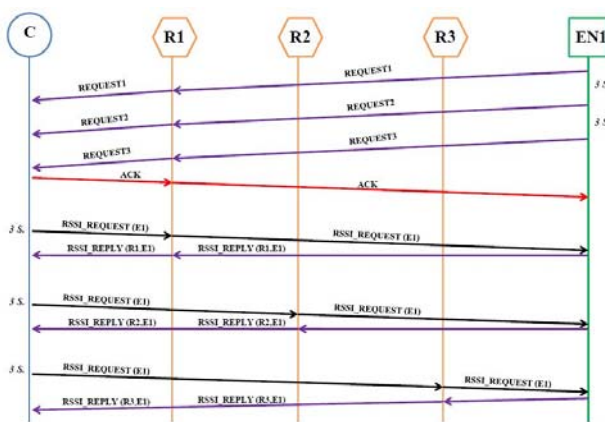


(ข) พื้นที่การทดลองบริเวณอาคารนวมินทรราชินีชั้น 5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ภาพที่ 5: ตำแหน่งการวางอุปกรณ์ภายในอาคาร 2 ชั้น



ภาพที่ 6: หน้าจอโปรแกรม Zigbee Network Detection



ภาพที่ 7: ขั้นตอนของระบบในการร้องขอความช่วยเหลือ

จากภาพที่ 7 เมื่อมีการกดปุ่มร้องขอความช่วยเหลือ อุปกรณ์ End Device จะส่ง Packet ทุก ๆ 3 วินาทีมายัง Coordinator และจะหยุดส่งเมื่อได้รับการตอบกลับจาก Coordinator ดังแสดงในเส้นลูกศรสีแดง จากนั้นระบบจะสั่งงานให้ Coordinator ส่ง Packet ไปสั่งให้ Router ทุก ๆ ตัว ร้องขอค่า RSSI จาก End Device ตัวที่กดปุ่มร้องขอความช่วยเหลือ ดังแสดงในเส้นลูกศรสีดำ เมื่อ End Device ได้รับ Packet ร้องขอค่า RSSI ก็จะตอบกลับไปที่ Router แต่ละตัวตามลำดับ ดังแสดงในเส้นลูกศรสีม่วง ซึ่งในการส่ง Packet เพื่อร้องขอหรือตอบกลับนั้นจะสามารถส่งโดยตรงไปยัง Coordinator หรือส่งแบบ multi-hop ผ่าน router เพียงตัวเดียวหรือหลายตัวก็ได้ เมื่อโปรแกรม Zigbee Network Detection ได้รับค่า RSSI มาจาก router ครบทุกตัวแล้ว จะทำการคำนวณค่า Euclidean Distance ไปยัง RSSI fingerprint แต่ละชุดที่อยู่ในฐานข้อมูล แล้วแสดงผลออกมาเป็นตำแหน่งห้องที่มี fingerprint ใกล้เคียงกับสัญญาณที่วัดได้

มากที่สุด ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในการระบุตำแหน่งนั้นจะไม่เกิน 30 วินาที

4. ผลของการวิจัย

การทดสอบในการหาขีดความสามารถในการระบุตำแหน่งของระบบขอความช่วยเหลือที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น จะต้องมีการทดสอบการวางเครือข่ายของอุปกรณ์ Router เพื่อให้สัญญาณครอบคลุมพื้นที่ภายในอาคาร 2 ชั้นและทดสอบความแม่นยำของการระบุตำแหน่ง โดยมีผลของการทดสอบดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1: ผลการสุ่มกดปุ่มร้องขอความช่วยเหลือ 10 ตำแหน่ง

จุดที่สุ่ม	แสดงผลตำแหน่งถูกต้องจาก 10 ครั้ง (ครั้ง)	คิดเป็นเปอร์เซ็นต์
4A02 (X1)	8	80
4A03 (X2)	7	70
4A04 (X5)	8	80
4A05 (X5)	8	80
4A07 (X8)	8	80
4A08 (X2)	7	70
5A03 (X1)	6	60
5A07 (X1)	8	80
5A08 (X2)	6	60
5A09 (X5)	7	70
ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์		73

จากตารางที่ 1 เป็นผลจากการสุ่มตำแหน่งกดปุ่มร้องขอความช่วยเหลือ 10 ตำแหน่ง ตำแหน่งละ 10 ครั้ง โดยในการวัดประสิทธิภาพนี้จะกำหนดให้การระบุตำแหน่งประสบความสำเร็จหากระบบสามารถแสดงตำแหน่งห้องได้ถูกต้องหรือคลาดเคลื่อนได้ไม่เกิน 3 ห้อง ยกตัวอย่างเช่น จากการทดลองกดปุ่มร้องขอความช่วยเหลือที่ห้อง 4A02 ตำแหน่ง X1 10 ครั้ง ระบบสามารถระบุตำแหน่งได้ถูกต้อง 8 ครั้ง

จากการทดลองระบุตำแหน่งด้วยเทคนิค Fingerprint พบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นมานี้ สามารถระบุตำแหน่งได้แม่นยำ 73% ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น 27% อาจมีปัจจัยมาจากปัญหา

การลดทอนของสัญญาณอันสืบเนื่องมาจากการจัดวางตำแหน่ง router ที่ไม่เหมาะสม จำนวน router ที่มีน้อยเกินไป และการเคลื่อนที่ของคนภายในคอกที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

5. บทสรุป

เมื่อทำการวิเคราะห์ผลการวัดสัญญาณในการระบุตำแหน่ง สามารถสรุปได้ว่า การวางอุปกรณ์ Router เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ภายในอาคาร 2 ชั้น โดยมุ่งเน้นการระบุตำแหน่งนั้น ตำแหน่งในการจัดวาง router มีผลต่อความแม่นยำในการระบุตำแหน่งเป็นอย่างมาก ดังจะเห็นได้จากผลการทดลองในบทความนี้ ซึ่งใช้ router จำนวน 6 ตัวในระบบที่มีความถูกต้องเพียง 73% เท่านั้น ดังนั้นในอนาคต ผู้วิจัยจะทดสอบเพื่อหารูปแบบการจัดวางและจำนวน router ที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มความแม่นยำให้กับระบบต่อไป

6. ข้อเสนอแนะ

ในการเลือกใช้อุปกรณ์ Zigbee ควรเลือกใช้ให้เป็น Series เดียวกันและหากศึกษาเพิ่มเติมจากงานวิจัยนี้และสามารถจัดทำตัวอุปกรณ์ให้เล็กลงได้ จะช่วยเพิ่มความสะดวกในการพกพามากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Coxworth, B. LED lighting could guide shoppers to products in stores. [Online] 2012. Available from : <http://www.gizmag.com/led-rf-product-location-system/21247/> [2012, August 14].
- [2] เทพพิทักษ์ กำเพชร และวิริยะ กองรัตน์. "เครื่องวัดอุณหภูมิแบบไร้สาย." วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 21. (มกราคม-มิถุนายน 2555)
- [3] Wireless Mesh Networking. [Online] 2009. Available from : <http://www.digi.com/support/supporttype?type=documentation> [2012, September 14].
- [4] Product Manual : Xbee/Xbee PRO ZB RF Modules. [Online] 2012. Available from : <http://www.digi.com/support/productdetail?pid=4549&type=documentation> [2012, September 14].
- [5] Product Manual : PIC16F87/88. [Online] 2013. Available from : <http://www.microchip.com/wwwproduct>
- s/Devices.aspx?dDocName=en010243 [2012, September 14].
- [6] Awad, A. et al. "Adaptive Distance Estimation and Localization in WSN using RSSI Measures." *10th Euromicro Conference on Digital System Design Architectures, Methods and Tools*. (August 2007) : 471-478.
- [7] Kaemarungsi, K. and Krishnamurthy, P. "Properties of Indoor Received Signal Strength for WLAN Location Fingerprinting." *The First Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems : Networking and Services*. (August 2004) : 14-23.
- [8] Hossain, S. et al. "Accuracy Enhancement of Fingerprint Indoor Positioning System." *Third International Conference on Intelligent Systems, Modeling and Simulation*. (February 2012) : 600-605.
- [9] Wang, Z. and Zekavat, S. R. "A New TOA-DOA Node Localization for Mobile Ad-hoc Networks : Achieving High Performance and Low Complexity." *17th International Conference on Telecommunications*. (April 2010) : 836-842.
- [10] Koutsounikolas, D. et al. "CoCoA: Coordinated Cooperative Localization for Mobile Multi-Robot Ad Hoc Networks" *26th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*. (July 2006) : 9.
- [11] Kjargaard, M. B. "Indoor location fingerprinting with heterogeneous clients." *Pervasive and Mobile Computing, Volume 7*. (February 2011) : 31-43.
- [12] Dana, A. et al. "Localization in Ad-Hoc Networks" *IEEE International Conference on Telecommunications and Malaysia International*. (May 2007) : 313-317.
- [13] You, C. et al. "Sensor-Enhanced Mobility Prediction for Energy-Efficient Localization" *3rd Annual IEEE Communications Society, Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*. (September 2006) : 565-574.
- [14] Xiao, L. and Ouksel, A. M. "Scalable Self-Configuring Integration of Localization and Indexing in Wireless Ad-Hoc Sensor Networks" *7th International Mobile Data Management*. (May 2006) : 151.