

ระบบระบุตำแหน่งวัตถุไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้น
ที่ใช้เทคนิคฟังก์เจอร์พรีนที่ตึงซึ่งมีความคงทนและมีความซับซ้อนต่ำ



นายเกรียงไกร มณีรัตน์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2559

**ROBUST AND LOW COMPLEXITY WIRELESS
INDOOR POSITIONING SYSTEMS FOR MULTI-FLOOR
BUILDINGS USING FINGERPRINTING TECHNIQUES**



Kriangkrai Maneerat

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Telecommunication Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2016

ระบบระบุตำแหน่งวัตถุไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้น
ที่ใช้เทคนิคฟังก์เจอร์ปริ้นท์ตั้งซึ่งมีความคงทนและมีความซับซ้อนต่ำ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาคุณวุฒิปบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ชุตินา พรหมมาก)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์)

กรรมการ

(ผศ. ดร.ธนภัทร์ อนุศาสน์อมรกุล)

กรรมการ

(อ. ดร.กมล เขมระรังษี)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรม

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์



เกรียงไกร มณีรัตน์ : ระบบระบุตำแหน่งวัตถุไร้สายภายในอาคารแบบหลายชั้นที่ใช้เทคนิคฟingerprinting ที่ตั้งซึ่งมีความคงทนและมีความซับซ้อนต่ำ (ROBUST AND LOW COMPLEXITY WIRELESS INDOOR POSITIONING SYSTEMS FOR MULTI-FLOOR BUILDINGS USING FINGERPRINTING TECHNIQUES) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตินา พรหมมาก, 253 หน้า

ปัจจุบันการระบุตำแหน่งวัตถุที่อยู่ภายนอกอาคารซึ่งรู้จักกันดีคือ การประยุกต์ใช้ระบบดาวเทียมบอกพิกัด (Global Positioning System: GPS) และการประยุกต์ใช้เครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Cellular Networks) อย่างไรก็ตามสัญญาณจากระบบดาวเทียม GPS และเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับการค้นหาตำแหน่งวัตถุภายในอาคารเนื่องจากการบดบังของตัวอาคารและลักษณะของเส้นทางการรับส่งสัญญาณที่มีสิ่งกีดขวาง (Non-Line-of-Sight: NLOS) ส่งผลให้กำลังของสัญญาณจากระบบดาวเทียม GPS จะถูกลดทอนลงอย่างมาก ส่วนการใช้สัญญาณจากระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ก็ไม่เพียงพอที่จะระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารอย่างละเอียดได้

สำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น (Multi-floor Positioning System) ที่มีโครงสร้างกายภาพที่ซับซ้อนและมีจำนวนหลายชั้น การกำหนดตำแหน่งติดตั้งของโนดอ้างอิงที่ไม่เหมาะสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุจะส่งผลให้เกิดจุดอับสัญญาณ และได้รับจำนวนสัญญาณจากโนดอ้างอิงไม่เพียงพอสำหรับใช้วิเคราะห์และคำนวณหาตำแหน่งวัตถุ ยิ่งไปกว่านั้นถ้าระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นเกิดการล้มเหลว หรือตกอยู่ภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงบางโนดในระบบเสียหายหรือไม่ทำงาน สมรรถนะในการระบุตำแหน่งวัตถุของระบบระบุตำแหน่งจะลดลงอย่างมากและอาจเกินกว่าจะยอมรับได้

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้พัฒนาวิธีการออกแบบและวางแผนเครือข่ายสื่อสารไร้สายสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคฟingerprinting (Fingerprinting Techniques) เพื่อกำหนดโครงสร้างระบบที่เหมาะสมที่สามารถให้สมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่ยอมรับได้ ทั้งในสภาวะปกติและสภาวะที่มีโนดอ้างอิงบางโนดในระบบไม่ทำงาน นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคฟingerprinting ที่มีความซับซ้อนในการประมวลผลต่ำ (Low Complexity) และมีความสามารถในการรองรับการทำงานในสภาวะที่โนดอ้างอิงบางโนดไม่ทำงาน (Robustness) ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมาก

สำหรับการประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ทั้งทางด้านอุตสาหกรรม ทางการแพทย์ การผลิต และการให้บริการต่าง ๆ



สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
ปีการศึกษา 2559

ลายมือชื่อนักศึกษา _____
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

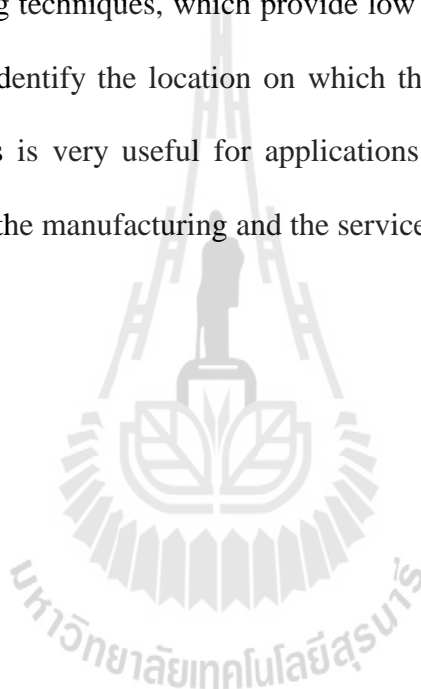
KRIANGKRAI MANEERAT : ROBUST AND LOW COMPLEXITY
WIRELESS INDOOR POSITIONING SYSTEMS FOR MULTI-FLOOR
BUILDINGS USING FINGERPRINTING TECHNIQUES. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. CHUTIMA PROMMAK, Ph.D., 253 PP.

INDOOR POSITIONING SYSTEM/ MULTI-FLOOR BUILDING/ ROBUST
SYSTEM DESIGN/ ROBUSTNESS/ LOW COMPUTATIONAL COMPLEXITY

Nowadays the outdoor positioning systems well-known are the Global Positioning System (GPS) and the implementation of the cellular networks. Unfortunately, the signals from GPS satellites and the transmission of cellular networks are unsuitable for deploying location determination inside the buildings. Because its weak GPS signal reception when there are Non-Line-of-Sight (NLOS), while implementing the signal from the cellular networks is not sufficient to effectively locate objects in indoor environments.

For wireless indoor positioning systems for multi-floor buildings, these systems have a more complex indoor environment with the multi-layered. If the placement of the reference nodes have insufficient coverage over the service area, the indoor positioning systems will have a low quality of radio signal propagation. This cause the problem of incomplete the received signal strength (RSS) vectors received from the reference nodes. This can greatly affect the operations of the positioning systems such as the computational procedures. Moreover, if the indoor positioning systems are under unexpected situations such as RN failures, these failures can lead to accuracy performance degradation and a lack of system reliability.

Therefore, this research proposes the development of the reference node placement techniques for wireless indoor positioning systems in multi-floor building using fingerprinting techniques, which can optimal placement of the reference nodes are installed inside the building and can work under either the fault-free scenario or the RN-failure scenarios. Furthermore, this research proposes the development of localization technique for wireless indoor positioning systems in multi-floor building based on fingerprinting techniques, which provide low computational complexity and can reliably/robustly identify the location on which the object is located under RN-failure scenarios. This is very useful for applications in various fields such as the medical, the industry, the manufacturing and the services.



School of Telecommunication Engineering

Academic Year 2016

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคลต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยอย่างดียิ่ง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุติมา พรหมมาก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่เมตตากรุณาให้โอกาสทางการศึกษา อบรม สั่งสอน ชี้แนะ ช่วยเหลือ สนับสนุนในการทำการศึกษางานวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการเขียน และตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ มีสวัสดิ์ อาจารย์ ดร.กมล เขมะรังสี และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนภัทร์ อนุศาสน์อมรกุล ที่เมตตากรุณาให้คำปรึกษา ชี้แนะ ช่วยเหลือ ชี้แนะทางการเขียน และให้คำแนะนำในการทำการศึกษางานวิจัย อีกทั้งยังช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรคร์ รองศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และให้กำลังใจมาโดยตลอด

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัย รวมถึงบุคลากรประจำศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติที่ให้ความช่วยเหลือในด้านสถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยนี้

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้การสนับสนุนทางการศึกษาและกำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดาและญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพรักทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบันจนสำเร็จการศึกษา

เกรียงไกร มณีรัตน์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ก
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฐ
สารบัญรูป.....	ฌ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	4
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	5
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น.....	5
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	6
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	6
1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน.....	6
1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย.....	7
1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย.....	7
1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	8
1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	8
1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	8
1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	8
1.8 นวัตกรรมของงานวิจัย.....	9
1.9 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	9

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2	ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	11
2.1	กล่าวนำ.....	11
2.1.1	แนวทางการพัฒนาระบบระบุตำแหน่ง.....	12
2.1.1.1	การพัฒนาทางโครงสร้างและการออกแบบระบบ.....	12
2.1.1.2	การพัฒนาวิธีการที่ใช้ในการระบุตำแหน่ง.....	13
2.1.1.3	การลดผลกระทบทางกายภาพที่เกิดจากสภาพแวดล้อม.....	13
2.2	การสำรวจระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร.....	14
2.2.1	โครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร.....	14
2.2.1.1	ช่วงการวัดค่า.....	15
2.2.1.2	ช่วงการอัปเดตตำแหน่ง.....	17
2.2.2	เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งาน.....	19
2.2.2.1	เครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (WPAN).....	19
2.2.2.2	เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN).....	20
2.2.2.3	เครือข่ายไร้สายระดับขอบเขตเมืองใหญ่ (WMAN).....	20
2.2.2.4	เครือข่ายไร้สายวงกว้าง (WWAN).....	21
2.2.3	ประเภทของเทคนิคระบบระบุตำแหน่ง.....	24
2.2.3.1	กลุ่มเทคนิค Triangulation.....	24
	a) เทคนิค Lateration.....	24
	b) เทคนิค Angulation.....	28
2.2.3.2	กลุ่มเทคนิค Scene Analysis.....	29
2.2.3.3	กลุ่มเทคนิค Proximity.....	31
2.2.4	ตัวชี้วัดประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่ง.....	35
2.2.4.1	สมรรถนะความถูกต้อง.....	35
2.2.4.2	สมรรถนะความแม่นยำ.....	35
2.2.4.3	ความซับซ้อนในแง่เวลาที่ใช้ในการประมวลผล.....	35
2.2.4.4	สมรรถนะความคงทน.....	36

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.2.4.5	สมรรถนะความยืดหยุ่น.....	36
2.2.4.6	ภาระของระบบระบุตำแหน่ง.....	37
2.2.5	การจำแนกประเภทของระบบ โดยพิจารณาจากพื้นที่ให้บริการ.....	41
2.2.5.1	ระบบระบุตำแหน่งภายในระนาบสองมิติ.....	41
2.2.5.2	ระบบระบุพิกัดภายในพื้นที่ 3 มิติ.....	41
2.2.5.3	ระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น.....	42
2.3	ความน่าเชื่อถือของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร.....	47
2.3.1	องค์ประกอบสำคัญที่เป็นต้นเหตุทำให้ระบบขาดความน่าเชื่อถือ.....	47
2.3.1.1	ประมาณข้อมูลระยะทางหรือมุม.....	47
2.3.1.2	การคำนวณหาตำแหน่ง.....	48
2.3.1.3	เทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุ.....	48
2.3.2	แนวทางการพัฒนาความคงทนของระบบระบุตำแหน่งวัตถุ.....	48
2.3.2.1	เพิ่มความน่าเชื่อถือด้วยการเข้ารหัสข้อมูล.....	49
2.3.2.2	การตรวจจับและป้องกันเหตุการณ์ที่ผิดปกติ.....	49
2.3.2.3	การพัฒนาระบบระบุตำแหน่งให้มีความคงทน.....	49
2.3.2.4	การตรวจสอบตำแหน่ง.....	50
2.3.2.5	การพัฒนาฮาร์ดแวร์ให้มีความคงทน.....	50
2.4	งานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบระบบ.....	51
2.4.1	การออกแบบการวางตำแหน่งของโนดอ้างอิงในระบบระบุตำแหน่ง.....	52
2.4.1.1	การออกแบบ ๑ สำหรับกลุ่มเทคนิค Scene Analysis.....	53
2.4.1.2	การออกแบบ ๑ สำหรับกลุ่มเทคนิค Triangulation.....	54
2.4.2	การออกแบบเครือข่ายที่มีความทนทานต่อการล้มเหลวหรือ การไม่ทำงานของบางอุปกรณ์ในระบบ.....	58
2.5	งานวิจัยที่เกี่ยวกับเทคนิคการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร.....	61
2.5.1	การตรวจจับและป้องกันเหตุการณ์ที่ผิดปกติของระบบ.....	61
2.5.1.1	การตรวจจับ ๑ ของกลุ่มเทคนิค Scene Analysis.....	62
2.5.1.2	การตรวจจับ ๑ ของกลุ่มเทคนิค Triangulation.....	63

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.2	การปรับปรุงกลไกการคำนวณของเทคนิคระบุตำแหน่ง.....	66
2.5.2.1	การปรับปรุง ๆ ของกลุ่มเทคนิค Scene Analysis.....	66
2.5.2.2	การปรับปรุง ๆ ของกลุ่มเทคนิค Triangulation.....	67
2.5.3	จำแนกข้อมูลพารามิเตอร์ของระบบที่มีความคลุมเครือ.....	70
2.5.3.1	จำแนกข้อมูล ๆ ของกลุ่มเทคนิค Scene Analysis.....	70
2.5.3.2	จำแนกข้อมูล ๆ ของกลุ่มเทคนิค Triangulation.....	71
2.5.3.3	จำแนกข้อมูล ๆ ของกลุ่มเทคนิค Proximity.....	72
2.6	กล่าวสรุป.....	74
3	การพัฒนาเทคนิคระบุหมายเลขชั้นที่สามารถรองรับการทำงาน	
	ภายใต้สภาวะผิดปกติ.....	77
3.1	กล่าวนำ.....	77
3.2	ภาพรวมและแนวความคิดการพัฒนาเทคนิคระบุหมายเลขชั้นที่สามารถรองรับ	
	การทำงานภายใต้สภาวะผิดปกติ.....	78
3.2.1	เทคนิคระบุหมายเลขชั้นที่มีอยู่ในปัจจุบัน.....	79
3.2.1.1	Nearest Floor Algorithm.....	80
3.2.1.2	Lui's Floor Algorithm.....	80
3.2.1.3	Group Variance Algorithm.....	81
3.3	การพัฒนาเทคนิคระบุหมายเลขชั้น RMoS Floor Algorithm.....	81
3.3.1	โครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งวัตถุ.....	81
3.3.2	กรอบการทำงานของเทคนิคระบุชั้น RMoS Floor Algorithm.....	83
3.4	ข้อกำหนดการทดลอง.....	87
3.4.1	สถานที่การทดลองและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	87
3.4.2	อุปกรณ์การทดลอง.....	90
3.5	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	92
3.5.1	การทดลองภายใต้สภาวะปกติ.....	92
3.5.1.1	การวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะผลรวมความแรงสัญญาณ.....	92

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5.1.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิคระบุชั้นภายใต้ สภาวะปกติ.....	97
3.5.2 การทดลองภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงบาง โหนดไม่ทำงาน.....	101
3.6 กล่าวสรุป.....	105
4 การพัฒนาเทคนิคการออกแบบโครงสร้างระบบระบุตำแหน่งวัตถุ ภายในอาคารหลายชั้นที่สามารถรองรับการทำงานภายใต้สภาวะผิดปกติ.....	106
4.1 กล่าวนำ.....	106
4.2 ภาพรวมและแนวคิดการพัฒนาเทคนิคการออกแบบโครงสร้าง ระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่สามารถรองรับ การทำงานภายใต้สภาวะผิดปกติ.....	107
4.2.1 การนิยามปัญหาของระบบระบุตำแหน่งวัตถุที่ตกอยู่ภายใต้ สภาวะที่มีโนดอ้างอิงบาง โหนดไม่ทำงาน.....	108
4.3 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบ โครงสร้าง ระบบระบุตำแหน่ง.....	109
4.3.1 สมการคณิตศาสตร์สำหรับการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ไบนารี.....	109
4.3.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	111
4.3.3 สมการเงื่อนไข.....	111
4.4 การค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิคฮิวริสติก.....	113
4.4.1 ข้อมูลเริ่มต้น.....	117
4.4.1.1 จำนวนและตำแหน่งจุดทดสอบสัญญาณ.....	117
4.4.1.2 จำนวนและตำแหน่งที่สามารถติดตั้ง โหนดอ้างอิงได้.....	117
4.4.1.3 ค่าความแรงสัญญาณที่ทุกจุดทดสอบรับได้.....	117
4.4.1.4 ดัชนีความถูกต้องและดัชนีความน่าเชื่อถือ.....	117
4.4.1.5 ขนาดของพื้นที่ให้บริการในแต่ละชั้น.....	118
4.4.1.6 ขนาดพื้นที่ครอบคลุมของ โหนดอ้างอิง.....	118
4.4.2 การประมาณจำนวน โหนดอ้างอิงเริ่มต้น.....	118
4.4.3 การกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงเริ่มต้น.....	119

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.4.4	การค้นหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยวิธีการอบอุ่นจำลอง.....	120
4.4.4.1	รูปแบบของคำตอบ.....	121
4.4.4.2	ฟังก์ชันการประเมินผล.....	121
4.4.4.3	การย้ายตำแหน่งใหม่.....	122
4.4.4.4	การตรวจสอบเงื่อนไข.....	123
4.4.4.5	การเปรียบเทียบฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....	123
4.4.4.6	ความน่าจะเป็นที่จะยอมรับคำตอบที่แย่กว่าเดิม.....	123
4.4.4.7	เกณฑ์การหยุด.....	124
4.5	ข้อกำหนดการทดลอง.....	126
4.5.1	สถานที่การทดลองและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	126
4.5.2	อุปกรณ์การทดลอง.....	129
4.6	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	129
4.6.1	ผลการค้นหาตำแหน่งติดตั้งของโนดอ้างอิง.....	129
4.6.2	ผลการระบุตำแหน่งวัตถุของแต่ละโครงสร้างการออกแบบ.....	134
4.6.2.1	แนวโน้มของความถูกต้องในการระบุตำแหน่ง เมื่อจำนวนโนดอ้างอิงเสียเพิ่มมากขึ้น.....	134
4.6.2.2	ผลความถูกต้องในการระบุหมายเลขชั้น.....	137
4.6.2.3	ผลความถูกต้องในการระบุตำแหน่ง.....	138
4.6.3	การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบระบุตำแหน่งภายใต้ รูปแบบการเสียของโนดอ้างอิงในลักษณะต่าง ๆ.....	149
4.7	กล่าวสรุป.....	160
5	การพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น ที่ใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ตั้งซึ่งมีความคงทนและมีความซับซ้อนต่ำ.....	161
5.1	กล่าวนำ.....	161
5.2	ภาพรวมและแนวคิดการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น ที่ใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ตั้งซึ่งมีความคงทนและมีความซับซ้อนต่ำ.....	162

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3	การพัฒนาเทคนิคระบุตำแหน่งที่มีความคงทนและมีความซับซ้อนต่ำ.....	163
5.3.1	กระบวนการแอคทีฟยูคลีเดียน.....	166
5.4	ข้อกำหนดการทดลอง.....	169
5.4.1	สถานที่การทดลองและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	170
5.4.2	อุปกรณ์การทดลอง.....	173
5.5	ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	173
5.5.1	ผลการเปรียบเทียบระบบระบุตำแหน่งที่ใช้และไม่ใช้ กระบวนการทำงานแอคทีฟ.....	173
5.5.2	สมรรถนะในการระบุตำแหน่งของเทคนิคระบุตำแหน่ง.....	176
5.5.2.1	ความถูกต้องในการระบุตำแหน่ง.....	176
5.5.2.2	ความซับซ้อนในการประมวลผล.....	179
5.6	กล่าวสรุป.....	182
6	สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	184
6.1	สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	184
6.2	ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	186
6.3	แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	187
รายการอ้างอิง.....		189
ภาคผนวก.....		202
ภาคผนวก ก. ข้อมูลของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย โปรแกรมที่ใช้งาน และผลการออกแบบโครงสร้างระบบ.....		203
ภาคผนวก ข. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....		223
ประวัติผู้เขียน.....		253

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างของระบบระบุตำแหน่งวัตถุที่จำแนกด้วยช่วงการอัปเดตตำแหน่ง.....	18
2.2 ตัวอย่างของเทคโนโลยีที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบระบุตำแหน่งวัตถุ ภายในอาคาร.....	22
2.3 ข้อดีและข้อจำกัดของกลุ่มเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคาร.....	34
2.4 ตัวอย่างของสมรรถนะในการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารของงานวิจัยในปัจจุบัน.....	39
2.5 ตัวอย่างของพื้นที่ที่ใช้ในการระบุตำแหน่งวัตถุของงานวิจัยในปัจจุบัน.....	44
2.6 ตัวอย่างงานวิจัยที่พิจารณาการวางโน้ดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุ ภายในอาคาร.....	56
2.7 ตัวอย่างงานวิจัยที่พิจารณาการออกแบบเครือข่ายที่มีความทนทานต่อการล้มเหลว.....	60
2.8 ตัวอย่างระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่พิจารณาการตรวจจับ และป้องกันเหตุการณ์ที่ผิดปกติ.....	65
2.9 ตัวอย่างระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่พิจารณาการปรับปรุงกลไก การคำนวณของเทคนิคระบุตำแหน่ง.....	69
2.10 ตัวอย่างระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่พิจารณาการจำแนก ข้อมูลพารามิเตอร์ด้วยพีชคณิตเชิงเส้น.....	73
3.1 ตัวแปรที่ใช้ในเทคนิคระบุหมายเลขชั้น RMoS floor algorithm.....	85
3.2 ขั้นตอนการทำงานของเทคนิคระบุชั้น RMoS floor algorithm.....	86
3.3 ข้อกำหนดของการทดลอง.....	89
3.4 รายละเอียดของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณที่ใช้ในการทดลอง.....	91

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.1	ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น..... 110
4.2	Pseudo code ของเทคนิคการออกแบบ R-MSMR..... 115
4.3	ข้อกำหนดของเทคนิคการออกแบบและการระบุตำแหน่ง..... 128
4.4	ตัวอย่างของผลลัพธ์ในการค้นหาคำตอบของ R-MSMR, R=1 กรณีพื้นที่แบบ 1 ชั้น..... 130
4.5	จำนวนโนคอ้างอิงที่ได้จากการค้นหาคำตอบของแต่ละเทคนิค..... 131
4.6	ผลความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งของแต่ละโครงสร้างการออกแบบ..... 136
4.7	ผลการระบุตำแหน่งวัตถุของพื้นที่ให้บริการแบบ 1 ชั้น..... 146
4.8	ผลการระบุตำแหน่งวัตถุของพื้นที่ให้บริการแบบ 2 ชั้น..... 147
4.9	ผลการระบุตำแหน่งวัตถุของพื้นที่ให้บริการแบบ 3 ชั้น..... 148
5.1	ข้อกำหนดของการทดลอง..... 170



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ขั้นตอนการทำงานของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร..... 3
2.1	องค์ประกอบของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายของระบบระบุตำแหน่งวัตถุ..... 15
2.2	พารามิเตอร์ของระบบที่ถูกใช้งานในระบบระบุตำแหน่ง..... 16
2.3	แผนผังเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย..... 19
2.4	ประเภทของเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุ..... 24
2.5	เทคนิคระบุตำแหน่ง Time of Arrival / Roundtrip Time of Flight..... 25
2.6	เทคนิคระบุตำแหน่ง Time Difference of Arrival..... 26
2.7	การพิจารณาค่า Path loss ของเทคนิค RSS-Based..... 26
2.8	เทคนิคระบุตำแหน่ง Visible Light Communication..... 27
2.9	เทคนิคระบุตำแหน่ง Angle of Arrival..... 28
2.10	เทคนิคระบุตำแหน่ง K-Nearest Neighbor..... 29
2.11	เทคนิคระบุตำแหน่ง Probabilistic..... 30
2.12	เทคนิคระบุตำแหน่ง Neural Networks..... 31
2.13	กลุ่มเทคนิคระบุตำแหน่ง Proximity..... 32
2.14	ประเภทของพื้นที่ระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร..... 41
2.15	ระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในระนาบสองมิติ..... 41
2.16	ระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในพื้นที่ 3 มิติ..... 42
2.17	ระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น..... 42
2.18	แนวทางการพัฒนาของระบบระบุตำแหน่งที่พิจารณาสมรรถนะความคงทน..... 49
2.19	ปรัทัศน์วรรณกรรมเกี่ยวกับการออกแบบระบบ..... 51
2.20	ปรัทัศน์วรรณกรรมเกี่ยวกับการพัฒนากระบวนการคำนวณหาตำแหน่ง ที่พิจารณาสมรรถนะความคงทน..... 61
2.21	ภาพรวมการพัฒนาสมรรถนะความคงทนของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร..... 76

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 แผนภาพขององค์ประกอบหลักที่ใช้ในระบบระบุตำแหน่งวัตถุ.....	82
3.2 สภาวะล้มเหลวที่เกิดจากการเสียบของโนคอ้างอิง.....	82
3.3 พื้นที่การทดลองของ Building A.....	88
3.4 พื้นที่การทดลองของ Building B.....	89
3.5 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่ใช้ในการทดลอง.....	91
3.6 ฮิสโตแกรมผลรวมของความแรงสัญญาณภายใต้สภาวะการทำงานปกติ.....	94
3.7 ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% ของค่าเฉลี่ยของผลรวมความแรงสัญญาณที่รับได้ ภายใต้สภาวะการทำงานปกติ.....	96
3.8 เปอร์เซ็นต์ของความถูกต้องในการระบุชั้นภายใต้สภาวะการทำงานปกติ.....	99
3.9 เปอร์เซ็นต์ของความถูกต้องในการระบุชั้นภายใต้สภาวะการทำงานปกติ และสถานะที่มีโนคอ้างอิงเสียบ 2 โนคและ 8 โนค.....	102
4.1 แผนภาพการทำงานของเทคนิคการออกแบบ R-MSMR.....	114
4.2 การประมาณจำนวน โนคอ้างอิงเริ่มต้นด้วยขนาดพื้นที่ครอบคลุมของ โนคอ้างอิง.....	119
4.3 ตัวอย่างการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โนคอ้างอิงเริ่มต้นด้วยการวางแบบสมมาตร.....	119
4.4 ตัวอย่างของตำแหน่งติดตั้ง โนคอ้างอิงที่เหมาะสมที่ได้จากวิธีการอบอุ่นจำลอง.....	121
4.5 วิธีการย้ายตำแหน่ง โนคอ้างอิงใหม่ด้วยโครงสร้างแบบ 3 มิติ.....	122
4.6 พื้นที่การทดลองอาคารวิชาการ 3 ชั้น.....	127
4.7 ตำแหน่งติดตั้ง โนคอ้างอิงของพื้นที่ให้บริการแบบ 1 ชั้น.....	132
4.8 ตำแหน่งติดตั้ง โนคอ้างอิงของพื้นที่ให้บริการแบบ 2 ชั้น.....	132
4.9 ตำแหน่งติดตั้ง โนคอ้างอิงของพื้นที่ให้บริการแบบ 3 ชั้น.....	133
4.10 แนวโน้มของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละ โครงสร้างการออกแบบ ภายในพื้นที่ให้บริการแบบ 3 ชั้น.....	135
4.11 เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องของการระบุหมายเลขชั้นเมื่อระบบระบุตำแหน่ง มีโนคอ้างอิงไม่ทำงานชั้นละ 3 โนค.....	138
4.12 ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งวัตถุของพื้นที่แบบ 1 ชั้น.....	139

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งวัตถุของพื้นที่แบบ 2 ชั้น.....	140
4.14 ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งวัตถุของพื้นที่แบบ 3 ชั้น.....	140
4.15 CDF ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งวัตถุ ภายในพื้นที่ 2 ชั้น.....	141
4.16 เปรอ์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยระหว่างสภาวะปรกติ และสภาวะที่มีโนดอ้างอิงเสียชั้นละ 3 โหนด.....	143
4.17 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งวัตถุ ภายในอาคาร 2 ชั้นภายใต้การเสียของโนดอ้างอิงชั้นละ 3 โหนด.....	145
4.18 รูปแบบการเสียของโนดอ้างอิงในลักษณะต่าง ๆ.....	150
4.19 ตัวอย่างระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างแบบ R-MSMR, $R=1$ ซึ่งตกอยู่ภายใต้ สภาวะที่โนดอ้างอิงจำนวนชั้นละ 3 โหนดเสียแบบทำนองเดียวกันกรณีที่ 1.....	151
4.20 ผลความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งของเทคนิคระบุชั้น RMoS ร่วมกับ เทคนิคระยะห่างยูคลีเดียนแบบปรกติ.....	153
4.21 ผลความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งของเทคนิคระบุชั้น RMoS ร่วมกับ เทคนิคระยะห่างยูคลีเดียนแบบแอกทิฟ.....	153
4.22 ผลการระบุตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งใช้โครงสร้างแบบ Uniform ซึ่งตกอยู่ ภายใต้การเสียแบบทำนองเดียวกันกรณีที่ 1 ซึ่งมีโนดอ้างอิงเสียจำนวน 2 โหนด.....	155
4.23 ผลการระบุตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งใช้โครงสร้างแบบ R-MSMR, $R=2$ ซึ่ง ตกอยู่ภายใต้การเสียแบบทำนองเดียวกันกรณีที่ 1 ซึ่งมีโนดอ้างอิงเสียจำนวน 2 โหนด.....	156
4.24 ผลการระบุตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งใช้โครงสร้างแบบ Uniform ซึ่งตกอยู่ ภายใต้การเสียแบบตรงข้ามกันกรณีที่ 1 ซึ่งมีโนดอ้างอิงเสียจำนวน 2 โหนด.....	158
4.25 ผลการระบุตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งใช้โครงสร้างแบบ R-MSMR, $R=2$ ซึ่ง ตกอยู่ภายใต้การเสียแบบทำนองเดียวกันกรณีที่ 1 ซึ่งมีโนดอ้างอิงเสียจำนวน 2 โหนด.....	159

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 ภาพรวมของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น.....	163
5.2 ตัวอย่างการจำแนกฐานข้อมูลฟังก์เจอร์ปริ้นท์ด้วยระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม.....	164
5.3 ตัวอย่างกระบวนการกรองระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม.....	165
5.4 ตัวอย่างกระบวนการแอกทิฟยูคลิเดียน.....	166
5.5 ตัวอย่างระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารภายในชั้น 3 ซึ่งตั้งอยู่ภายใต้ การเสียบของโน้ตบุ๊กจำนวน 2 โน้ต.....	167
5.6 พื้นที่การทดลอง C-building (อาคาร 3 ชั้น) กรณีโครงสร้าง การออกแบบ R-MSMR, R=2.....	171
5.7 พื้นที่การทดลอง NECTEC building (อาคาร 6 ชั้น) กรณีโครงสร้าง การออกแบบ R-MSMR, R=2.....	172
5.8 แนวโน้มสมรรถนะในการระบุตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งวัตถุ ที่ใช้โครงสร้างแบบ R-MSMR, R=2 ภายใน C-building.....	175
5.9 ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของระบบระบุตำแหน่งวัตถุ ที่ใช้โครงสร้างแบบ R-MSMR, R=2 ภายใน C-building.....	178
5.10 ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของระบบระบุตำแหน่งวัตถุ ที่ใช้โครงสร้างแบบ R-MSMR, R=2 ภายใน NECTEC building.....	178
5.11 ฮิสโตแกรมของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการค้นหาตำแหน่งวัตถุ สำหรับพื้นที่การทดลอง C-building.....	181
5.12 ฮิสโตแกรมของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการค้นหาตำแหน่งวัตถุ สำหรับพื้นที่การทดลอง NECTEC building.....	181
ก.1 ชุดพัฒนา 1322x ZigBee Evaluation Kit.....	203
ก.2 ย่านความถี่ของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 และตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4.....	204
ก.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	205
ก.4 PCB inverted-F-antenna.....	205
ก.5 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย MC13224 Sensor Node.....	206

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ก.6 Sub Miniature version “A” connector.....	207
ก.7 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย MC13224 Network Node.....	208
ก.8 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย MC13224 Low Power Node.....	209
ก.9 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย MC13224 USB Dongle.....	210
ก.10 โปรแกรม Freescale BeeKit.....	211
ก.11 โปรแกรม IAR Embedded Workbench.....	212
ก.12 สาย J-Link V8.....	212
ก.13 โปรแกรม Docklight.....	213
ก.14 โปรแกรม MATLAB.....	214
ก.15 โปรแกรม Sweet Home 3D.....	214
ก.16 ตัวอย่างตำแหน่งติดตั้งโน้ตอ้างอิงเริ่มต้นสำหรับอาคารวิชาการ (กรณี 1 ชั้น).....	215
ก.17 ตัวอย่างตำแหน่งติดตั้งโน้ตอ้างอิงเริ่มต้นสำหรับอาคารวิชาการ (กรณี 2 ชั้น).....	216
ก.18 ตัวอย่างตำแหน่งติดตั้งโน้ตอ้างอิงเริ่มต้นสำหรับอาคารวิชาการ (กรณี 3 ชั้น).....	219

บทที่ 1

บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นกรกล่าวถึงความเป็นมาและเหตุจูงใจในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งประกอบด้วยหัวข้อดังนี้ หัวข้อ 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา หัวข้อ 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย หัวข้อ 1.3 สมมติฐานของการวิจัย หัวข้อ 1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น หัวข้อ 1.5 ขอบเขตของการวิจัย หัวข้อ 1.6 วิธีดำเนินการวิจัย หัวข้อ 1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ หัวข้อ 1.8 นวัตกรรมของงานวิจัยนี้ และหัวข้อ 1.9 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ที่ผ่านมาระบบตำแหน่งวัตถุที่ประยุกต์ใช้ระบบดาวเทียมบอกพิกัด (Global Positioning System: GPS) (Djuknic and Richton, 2001) เป็นที่รู้จักกันดีในการหาดำแหน่งวัตถุภายนอกอาคาร รวมถึงการใช้สัญญาณจากเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ (cellular networks) ในการบอกตำแหน่งโดยประมาณจากรัศมีครอบคลุมของสถานีฐานที่ส่งสัญญาณมายังเครื่องโทรศัพท์ที่ใช้งาน (Pahlavan and Krishnamurthy, 2013) อย่างไรก็ตามสัญญาณจากระบบดาวเทียม GPS และเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ ไม่เหมาะในการประยุกต์ใช้กับการค้นหาตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร เนื่องจากโครงสร้างทางกายภาพและสิ่งแวดล้อมภายในอาคารนั้นมีลักษณะที่ซับซ้อน ส่งผลให้กำลังของสัญญาณจากระบบดาวเทียม GPS จะถูกลดทอนลงอย่างมาก ส่วนการใช้สัญญาณจากระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ก็ไม่เพียงพอที่จะระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารอย่างละเอียดได้ (Pahlavan and Krishnamurthy, 2013) ดังนั้นในการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร (Indoor Positioning System: IPS) จึงต้องอาศัยเครือข่ายสื่อสารไร้สายระยะใกล้ โดยสามารถประยุกต์ใช้กับเครือข่ายสื่อสารไร้สายมาตรฐานต่าง ๆ เช่น มาตรฐาน IEEE 802.11 (Wireless Local Area Network: WLAN) มาตรฐาน IEEE 802.15.3a (Ultra-wideband: UWB) และมาตรฐาน IEEE 802.15.4 (ZigBee) เป็นต้น

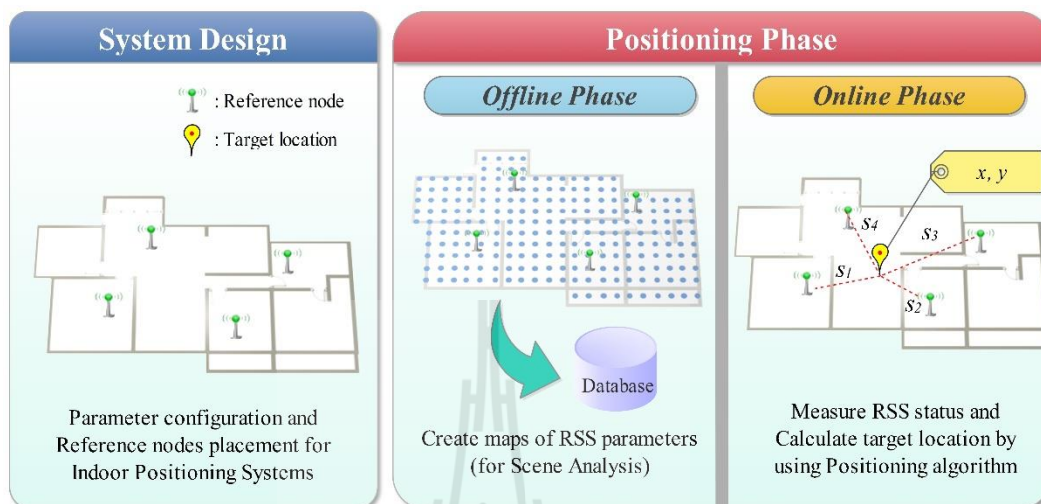
วิทยานิพนธ์นี้มุ่งพัฒนาเทคนิคการออกแบบเครือข่ายสื่อสารไร้สายที่มีประสิทธิภาพสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น (multi-floor positioning system) ซึ่งพิจารณาพื้นที่ให้บริการภายในอาคารที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อน มีจำนวนหลายชั้น และมีสิ่งกีดขวางการเดินทางของสัญญาณ (Non-Line-of-Sight: NLOS) วิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาเทคนิคการออกแบบโครงสร้าง

ระบบระบุตำแหน่งวัตถุในอาคารหลายชั้น โดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของโครงสร้างเครือข่ายสื่อสารไร้สาย อาทิเช่น จำนวนและตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิง (reference nodes: RN) ซึ่งเป็นอุปกรณ์สื่อสารไร้สายที่ทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณสำหรับใช้ในการวิเคราะห์และคำนวณหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุ โดยเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์และคำนวณหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุจะใช้ข้อมูลสัมพัทธ์ (relative information) ระหว่างโนดอ้างอิงกับวัตถุที่ต้องการหาตำแหน่ง ตัวอย่างข้อมูลดังกล่าวได้แก่ ระยะห่างระหว่างวัตถุกับโนดอ้างอิง (Wang, 2012) (Xu et al., 2008) มุมระหว่างวัตถุกับโนดอ้างอิง (Peng and Sichertiu, 2006) (Brida, et al., 2010) หรือความแรงสัญญาณที่วัตถุรับได้จากโนดอ้างอิง (Received Signal Strength: RSS) (Cheng and Lin, 2009) (Li, 2007) เป็นต้น ซึ่งคุณลักษณะของข้อมูลสัมพัทธ์เหล่านี้จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการคำนวณหาพิกัดของตำแหน่งวัตถุ

สมรรถนะความคงทนของระบบ (robustness) หรือตัวบ่งชี้ถึงความน่าเชื่อถือ (reliability) และความเชื่อมั่นของระบบ (confidentiality) หรือความสมบูรณ์ (integrity) ของการทำงานภายใต้สถานการณ์ที่ไม่เป็นมิตรของสิ่งแวดล้อม (hostile environments) (Boukerche et al., 2008) เช่น การล่อมของโนดภายในระบบและส่งผลให้ระบบดังกล่าวเกิดความล้มเหลว เป็นต้น โดยความแตกต่างของการล่อมระหว่างเครือข่ายทั่วไปกับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารคือ การล่อมเหลวของเครือข่ายแบบทั่วไปจะส่งผลให้รูปแบบการรับส่งข้อมูลไม่สามารถทำงานได้ เนื่องจากเส้นทางการสื่อสารที่ผ่านโนดดังกล่าวไม่สามารถใช้งานได้ ตรงกันข้ามกับกรณีของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร ถึงแม้จะมีโนดอ้างอิงเสียหรือไม่ทำงานตามปกติ แต่ระบบระบุตำแหน่งอาจจะยังสามารถบอกตำแหน่งของวัตถุได้ แต่อย่างไรก็ตามความต้องการของตำแหน่งที่หาได้จะลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานในสถานการณ์ปกติ ซึ่งอาจมีค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งวัตถุมากกว่าที่จะยอมรับได้

สำหรับขั้นตอนการทำงานของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนได้แก่ ขั้นตอนการออกแบบระบบ (system design) และขั้นตอนการระบุตำแหน่ง (positioning phase) แสดงได้ดังรูปที่ 1.1 ในขั้นตอนแรกจะเป็นช่วงการวางแผนและออกแบบระบบ ซึ่งมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้กับระบบระบุตำแหน่ง เช่น จำนวนและตำแหน่งติดตั้งของโนดอ้างอิง เป็นต้น ในขั้นตอนที่สองแบ่งเป็น 2 การทำงานคือออฟไลน์เฟส (offline phase) และออนไลน์เฟส (online phase) ในช่วงการทำงานแรกหรือออฟไลน์เฟสจะดำเนินการเฉพาะเทคนิคในกลุ่ม Scene Analysis ที่มีการเก็บรวบรวมความแรงสัญญาณที่วัตถุรับได้จากโนดอ้างอิงภายในพื้นที่ให้บริการเพื่อสร้างเป็นฐานข้อมูลที่เรียกว่า ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรี้นท์ (fingerprint database) ขณะที่การทำงานในช่วงออนไลน์เฟส หรือช่วงการค้นหาตำแหน่งวัตถุ ระบบระบุตำแหน่งวัตถุ

(ทุกกลุ่มเทคนิค) จะคำนวณหาตำแหน่งวัตถุด้วยเทคนิคระบุตำแหน่งที่ใช้ข้อมูลสัมพัทธ์ระหว่าง โหนดอ้างอิงกับ โหนดวัตถุ และบอกตำแหน่งวัตถุในระบบพิกัด x, y (และ z ในบางกรณี)



รูปที่ 1.1 ขั้นตอนการทำงานของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร

พิจารณาที่ขั้นตอนการออกแบบระบบ การกำหนดตำแหน่งติดตั้งของโหนดอ้างอิงที่ไม่เหมาะสมสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุที่อยู่ในอาคารแบบหลายชั้นอาจส่งผลกระทบต่อระดับความถูกต้อง (accuracy) และความแม่นยำ (precision) ในการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุ เนื่องจากพื้นที่ภายในอาคารหลายชั้นมีลักษณะทางกายภาพที่ซับซ้อน และมีสิ่งกีดขวางทางเดินสัญญาณมาก ซึ่งอาจทำให้การแพร่กระจายของสัญญาณจากโหนดอ้างอิงไปยังบริเวณต่าง ๆ ภายในอาคารไม่ทั่วถึง หรือไม่มีประสิทธิภาพ ส่งผลให้เกิดจุดอับสัญญาณ หรือจำนวนสัญญาณจากโหนดอ้างอิงที่รับได้ไม่เพียงพอสำหรับใช้วิเคราะห์และคำนวณหาตำแหน่งวัตถุ ยิ่งไปกว่านั้น สถานการณ์การล้มเหลวที่ระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารอาจต้องเผชิญคือ สถานการณ์ผิดปกติที่มีโหนดอ้างอิงบางโหนดในระบบเสียหรือไม่ทำงาน ดังนั้นการกำหนดโครงสร้างระบบเครือข่ายไร้สายที่เหมาะสมที่สามารถให้สมรรถนะในการระบุตำแหน่งวัตถุที่ยอมรับได้ ทั้งในสภาวะปกติและสภาวะที่ผิดปกติ จึงเป็นประเด็นการพัฒนาที่สำคัญที่จะช่วยให้ระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

พิจารณาขั้นตอนการระบุตำแหน่ง เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารชนิดต่าง ๆ พบว่า การระบุตำแหน่งโดยใช้เทคนิคในกลุ่ม Scene Analysis จะสามารถให้ประสิทธิภาพในการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุที่อยู่ในเกณฑ์ที่ดี และระบบประเภทนี้มี

ความยืดหยุ่นสูง (scalability) อีกทั้งยังสามารถใช้อุปกรณ์สื่อสารไร้สายที่มีความซับซ้อนต่ำ (hardware complexity) (Liu et al., 2007) อย่างไรก็ตามถ้าหากเทคนิคกลุ่มนี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่มีหลายชั้น ค่าความซับซ้อนในการประมวลผลของระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้น (run-time complexity) เนื่องจากขนาดและจำนวนชั้นอาคารที่มากขึ้นจะส่งผลให้ฐานข้อมูลที่เกิดขึ้นที่รวบรวมไว้มีจำนวนมาก และทำให้การคำนวณหาตำแหน่งวัตถุใช้เวลานาน ยิ่งไปกว่านั้น การคำนวณหาตำแหน่งวัตถุด้วยเทคนิคกลุ่ม Scene Analysis อาจจะต้องเผชิญกับสถานการณ์ผิดปกติของระบบ เช่น การเสียของโนดอ้างอิงบางโนดในระบบ ส่งผลให้ไม่มีข้อมูลความแรงสัญญาณจากโนดอ้างอิงที่เสียดังกล่าว และทำให้เทคนิคระบุตำแหน่งมีประสิทธิภาพที่ลดลง และอาจมีสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งที่ไม่สามารถยอมรับได้ ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาวิธีการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุสำหรับเทคนิคกลุ่ม Scene Analysis ที่สามารถคำนวณหาตำแหน่งวัตถุได้อย่างรวดเร็ว และมีความซับซ้อนในการประมวลผลต่ำ อีกทั้งยังสามารถรองรับการทำงานในลักษณะต่าง ๆ ได้

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงได้พัฒนาวิธีการออกแบบและวางแผนเครือข่ายสื่อสารไร้สายสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคกลุ่ม Scene Analysis เพื่อกำหนดโครงสร้างระบบที่เหมาะสมที่สามารถให้สมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่ยอมรับได้ ทั้งในสภาวะปกติและสภาวะที่มีโนดอ้างอิงบางโนดในระบบไม่ทำงาน นอกจากนี้ วิทยานิพนธ์นี้ได้พัฒนาวิธีการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุสำหรับเทคนิคในกลุ่ม Scene Analysis ที่มีความซับซ้อนในการประมวลผลต่ำ (low complexity) และมีความสามารถในการรองรับการทำงานภายใต้สภาวะที่โนดอ้างอิงบางโนดในระบบไม่ทำงาน ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ ทั้งด้านอุตสาหกรรม ด้านการแพทย์ ด้านการผลิต และด้านบริการ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อสมรรถนะในการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น ซึ่งประกอบไปด้วย ความถูกต้อง ความแม่นยำและความซับซ้อนในการประมวลผล เป็นต้น
- 1.2.2 พัฒนาวิธีการออกแบบและวางแผนเครือข่ายสื่อสารไร้สายสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคกลุ่ม Scene Analysis เพื่อกำหนดโครงสร้างระบบที่เหมาะสมที่สามารถให้สมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่ยอมรับได้ ทั้งในสภาวะปกติและสภาวะที่มีโนดอ้างอิงบางโนดในระบบไม่ทำงาน

- 1.2.3 พัฒนารูปแบบการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุสำหรับเทคนิคในกลุ่ม Scene Analysis ที่มีความซับซ้อนในการประมวลผลต่ำ และมีความสามารถในการรองรับการทำงานภายใต้สภาวะที่โนดอ้างอิงบางโนดไม่ทำงาน
- 1.2.4 เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบสมรรถนะภายใต้สภาวะการทำงานลักษณะต่าง ๆ ของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้นที่ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิคการออกแบบที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิคอื่น ๆ เช่น การวางโนดอ้างอิงกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ (Uniform placement) เป็นต้น
- 1.2.5 เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบสมรรถนะในการระบุตำแหน่งภายใต้สภาวะการทำงานลักษณะต่าง ๆ ของวิธีการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิคการระบุตำแหน่งอื่น ๆ เช่น เทคนิค Euclidean distance เป็นต้น

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

- 1.3.1 โครงสร้างการออกแบบที่พัฒนาขึ้นสามารถให้สมรรถนะในการระบุตำแหน่งทั้งภายใต้สภาวะการทำงานปกติและสภาวะที่โนดอ้างอิงไม่ทำงานได้ดีกว่าเทคนิคอื่น ๆ หรือมีสมรรถนะความคงทนดีกว่าเทคนิคอื่น ๆ
- 1.3.2 เทคนิคระบุตำแหน่งที่พัฒนาขึ้นสามารถบรรเทาผลกระทบที่เกิดจากการเสี่ยของโนดอ้างอิงได้ดีกว่าเทคนิคอื่น ๆ และสามารถคำนวณหาตำแหน่งวัตถุได้อย่างรวดเร็ว
- 1.3.3 เมื่อรวมโครงสร้างการออกแบบ และเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุที่พัฒนาขึ้นเข้าด้วยกัน จะได้ระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่มีความคงทนและมีความซับซ้อนต่ำ ซึ่งสามารถรองรับการทำงานทั้งภายใต้สภาวะปกติและสภาวะที่โนดอ้างอิงไม่ทำงาน

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.4.1 เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่งานวิจัยนี้เลือกใช้คือ อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.15.4
- 1.4.2 ช่องสัญญาณของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.15.4 จะต้องไม่ทำงานอยู่ในย่านความถี่เดียวกันกับเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย IEEE 802.11
- 1.4.3 กำหนดให้กำลังส่ง (power transmission) ของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.15.4 แต่ละโนดมีค่าเท่ากัน
- 1.4.4 กำหนดให้ตำแหน่งของวัตถุที่ต้องการทราบพิกัดเป็น โนดวัตถุที่ไม่เคลื่อนที่ (stationary node)

- 1.4.5 พัฒนาวิธีการออกแบบและวางแผนเครือข่ายสื่อสารไร้สายสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้นที่ใช้เทคนิคกลุ่ม Scene Analysis
- 1.4.6 ตำแหน่งที่สามารถติดตั้ง โหนดอ้างอิง (candidate locations) จะถูกกำหนดไว้ล่วงหน้า และเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete)
- 1.4.7 สถานที่ทำการทดลองจะเป็นอาคารอย่างน้อย 2 ชั้น
- 1.4.8 สภาวะการทำงานปกติของระบบคือ สภาวะที่โหนดอ้างอิงทุกโหนดในระบบสามารถทำงานได้ตามปกติ ขณะที่สภาวะที่ผิดปกติของระบบคือ สภาวะที่มีโหนดอ้างอิงบางโหนดในระบบเสียหรือไม่ทำงาน

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.5.1 ศึกษาโครงสร้าง และหลักการทำงานของเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น
- 1.5.2 พัฒนาวิธีการออกแบบและวางแผนเครือข่ายสื่อสารไร้สายสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคกลุ่ม Scene Analysis เพื่อกำหนดโครงสร้างระบบที่เหมาะสมที่สามารถให้สมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่ยอมรับได้ ทั้งในสภาวะปกติและสภาวะที่มีโหนดอ้างอิงบางโหนดในระบบไม่ทำงาน
- 1.5.3 พัฒนาวิธีการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุสำหรับเทคนิคในกลุ่ม Scene Analysis ที่มีความซับซ้อนในการประมวลผลต่ำ และมีความสามารถในการรองรับสภาวะการทำงานลักษณะต่าง ๆ ได้ เช่น สภาวะที่มีโหนดอ้างอิงในระบบไม่ทำงาน เป็นต้น
- 1.5.4 วิเคราะห์และเปรียบเทียบสมรรถนะภายใต้สภาวะการทำงานลักษณะต่าง ๆ ของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารแบบหลายชั้นที่ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิคการออกแบบที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิคอื่น ๆ เช่น วางโหนดอ้างอิงกระจายตัวแบบสม่ำเสมอ เป็นต้น
- 1.5.5 วิเคราะห์และเปรียบเทียบสมรรถนะในการระบุตำแหน่งภายใต้สภาวะการทำงานลักษณะต่าง ๆ ของวิธีการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิคอื่น ๆ เช่น เทคนิค Euclidean distance เป็นต้น

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน
 - 1) สำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

- 2) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร
- 3) ศึกษาค่าพารามิเตอร์ของระบบ เช่น ค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ เพื่อนำมาใช้สำหรับพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้น
- 4) พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการออกแบบระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้น ซึ่งเป็นสมการสำหรับการหาค่าเหมาะสมที่สุด
- 5) พัฒนาวิธีการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุสำหรับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้กลุ่มเทคนิค Scene Analysis
- 6) วิเคราะห์และเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ได้จากการเทคนิคการออกแบบที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิคอื่น ๆ
- 7) วิเคราะห์และเปรียบเทียบสมรรถนะในการระบุตำแหน่งของวิธีการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิคอื่น ๆ

1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย

เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

- 1) การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล โดยการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) ศึกษาเทคนิควิธีการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารชนิดต่าง ๆ
- 3) พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับออกแบบระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคกลุ่ม Scene Analysis เพื่อกำหนดโครงสร้างระบบที่เหมาะสมที่สามารถให้สมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่ยอมรับได้ ทั้งในสภาวะปรกติและสภาวะที่มีโนดอ้างอิงบางโนดในระบบไม่ทำงาน
- 4) พัฒนาวิธีการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุสำหรับเทคนิคในกลุ่ม Scene Analysis ที่มีความซับซ้อนในการประมวลผลต่ำ และมีความสามารถในการรองรับการทำงานในสภาวะที่โนดอ้างอิงบางโนดไม่ทำงาน
- 5) ทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ได้จากเทคนิคการออกแบบที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิคอื่น ๆ
- 6) ทดลองเปรียบเทียบสมรรถนะในการระบุตำแหน่งของวิธีการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิคอื่น ๆ

1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย อาคารเครื่องมือ 4 อาคารบรรณสาร และอาคารวิชาการ 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา

30000 และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) 112 ถ.พหลโยธิน ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (personal computer)
- 2) อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 (Freescale MC13224 รุ่นที่ 3 ซึ่งมี ARM7TDM เป็นตัวประมวลผล)
- 3) โปรแกรมควบคุมอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย Freescale BeeKit
- 4) โปรแกรม IAR Embedded Workbench
- 5) โปรแกรม MATLAB
- 6) โปรแกรม ILOG CPLEX

1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล โดยการสำรวจบริษัทนวัตกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) เก็บรวบรวมค่าพารามิเตอร์ของระบบ เช่น ค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และใช้สร้างเป็นฐานข้อมูล
- 3) เก็บรวบรวมผลการทดลองเพื่อประเมินสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้น

1.6.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองของเทคนิคออกแบบที่พัฒนาขึ้นกับรูปแบบการวางโนดอ้างอิงวิธีการอื่น ๆ และวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองของสมรรถนะในการระบุตำแหน่งของวิธีการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิคอื่น ๆ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและขยายขีดความสามารถของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่สามารถรองรับการทำงานในสถานะที่โนดอ้างอิงบางโนดไม่ทำงาน

1.7 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.7.1 ได้วิธีการออกแบบและวางแผนเครือข่ายสื่อสารไร้สายสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคกลุ่ม Scene Analysis ซึ่งมีโครงสร้างระบบที่เหมาะสมที่สามารถให้สมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่ยอมรับได้ ทั้งในสถานะปกติและสถานะที่มีโนดอ้างอิงบางโนดในระบบไม่ทำงาน

- 1.7.2 ได้เทคนิควิธีการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุสำหรับเทคนิคในกลุ่ม Scene Analysis ที่มีความซับซ้อนในการประมวลผลต่ำ และมีความสามารถในการรองรับการทำงานในสถานะที่โนคอ้างอิงบางโนคไม่ทำงาน

1.8 นวัตกรรมของงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น โดยเล็งเห็นถึงข้อดีของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ที่นอกจากจะมีน้ำหนักเบา ใช้พลังงานต่ำ และสามารถสร้างการเชื่อมต่อเป็นเครือข่ายได้แล้ว อุปกรณ์ดังกล่าวยังมีความสามารถในการวัดค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้ และมีคุณสมบัติการตรวจวัดข้อมูลทางกายภาพของสิ่งแวดล้อม เช่น ค่าอุณหภูมิ และค่าความชื้นสัมพัทธ์ เป็นต้น โดยได้นำเสนอระบบระบุตำแหน่งวัตถุไร้สายภายในอาคารหลายชั้นที่มีโครงสร้างการออกแบบที่มีความคงทน สามารถรองรับการทำงานทั้งภายใต้สภาวะปกติและภายใต้สภาวะที่มีโนคอ้างอิงบางโนคไม่ทำงาน อีกทั้งระบบระบุตำแหน่งนี้ยังสามารถระบุหมายเลขชั้นได้อย่างถูกต้อง ภายใต้สภาวะการทำงานที่ผิดปกติ และสามารถบรรเทาผลกระทบที่เกิดจากการเสีหรือไม่ทำงานของโนคอ้างอิงได้ ยิ่งไปกว่านั้น ระบบระบุตำแหน่งที่ได้นี้ยังสามารถคำนวณหาตำแหน่งวัตถุได้อย่างรวดเร็ว และมีความซับซ้อนในการประมวลผลต่ำด้วยการใช้ข้อมูลทางกายภาพของสิ่งแวดล้อมที่ประกอบด้วย ค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ หรือกล่าวได้ว่า ระบบระบุตำแหน่งที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ทำงานอยู่บนพื้นฐานการใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรี้นท์ซึ่งมีความคงทนที่ดี และมีความซับซ้อนในการประมวลผลที่ต่ำ

1.9 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 6 บท

บทที่ 1 เป็นบทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของงานวิจัย สมมติฐานของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย ประโยชน์ที่ได้รับ และนวัตกรรมของงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงการสำรวจระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร ความน่าเชื่อถือของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร งานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบระบบ และงานวิจัยที่เกี่ยวกับเทคนิคการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร

บทที่ 3 กล่าวถึงภาพรวมและแนวคิดการพัฒนาเทคนิคระบุหมายเลขชั้นที่สามารถรองรับการทำงานภายใต้สภาวะผิดปกติ และการพัฒนาเทคนิคระบุหมายเลขชั้น และการวิเคราะห์สมรรถนะของเทคนิคระบุหมายเลขชั้น

บทที่ 4 กล่าวถึงการพัฒนาเทคนิคการออกแบบโครงสร้างระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่สามารถรองรับการทำงานภายใต้สภาวะผิดปกติ การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงสร้างระบบระบุตำแหน่ง และการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีฮิวริสติก และการวิเคราะห์สมรรถนะของเทคนิคการออกแบบโครงสร้าง

บทที่ 5 กล่าวถึงการพัฒนาาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้นที่มีการใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปรีนที่ดิ่งซึ่งมีความคงทนและมีความซับซ้อนต่ำ และการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบระบุตำแหน่ง

บทที่ 6 กล่าวถึงการสรุปผลของการวิจัย ปัญหาและข้อเสนอแนะ และแนวทางการพัฒนาในอนาคต



บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ระบบระบุตำแหน่งวัตถุ (positioning system หรือ localization) คือรูปแบบการทำงานที่อาศัยความสามารถในการประมวลผลของคอมพิวเตอร์เพื่อค้นหาพิกัดทางกายภาพของสิ่งที่สนใจไม่ว่าจะเป็นสิ่งที่มีชีวิตหรือไม่มีชีวิต สามารถเคลื่อนที่ได้หรือไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ โดยจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลทางกายภาพที่วัดได้จากตำแหน่งที่สนใจ และใช้ความสัมพันธ์ของข้อมูลดังกล่าว คาดเดาตำแหน่งที่สนใจด้วยกลยุทธ์ หรือเทคนิคระบุตำแหน่ง ดังนั้นความท้าทายของการระบุตำแหน่งวัตถุจึงไม่ได้มีเพียงแต่ให้ความถูกต้องในการค้นหาพิกัดทางกายภาพของสิ่งที่พิจารณาแล้ว แต่ระบบยังต้องเผชิญกับปัญหาการรบกวนจากสภาพแวดล้อม (เช่น สัญญาณรบกวน) ข้อจำกัดทางความสามารถของตัวประมวลผล (เช่น เทคโนโลยีของฮาร์ดแวร์) และรูปแบบการให้บริการในพื้นที่ลักษณะต่าง ๆ (เช่น ภายในอาคาร หรือภายนอกอาคาร) เป็นต้น

พิจารณาที่ความหลากหลายของรูปแบบการประยุกต์ใช้งานของระบบระบุตำแหน่งในปัจจุบัน ซึ่งไม่เพียงแต่แสดงให้เห็นถึงบทบาทที่ได้เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวันของมนุษย์ แต่ยังแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของระบบดังกล่าวที่สังเกตได้จากจำนวนของงานวิจัยที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว หรืออีกความหมายคือ กลุ่มนักวิจัยและกลุ่มนักพัฒนาได้เล็งเห็นถึงความสำคัญขององค์ความรู้ในด้านการระบุตำแหน่งวัตถุที่มีต่อการดำเนินชีวิตในปัจจุบัน ส่งผลให้การศึกษาค้นคว้า และการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งเกิดขึ้นอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างของรูปแบบที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานมีดังนี้

- **ระบบการจัดส่งสินค้า:** การติดตามสินค้าหรือตู้คอนเทนเนอร์ การติดตามสายการผลิต และเส้นทางการเดินรถ (Esposito et al., 2009) (How et al., 2002) (Ussmueller et al., 2012)
- **ด้านการรักษาความปลอดภัย:** การระบุตำแหน่งเจ้าหน้าที่ภายในพื้นที่รักษาความปลอดภัยสูง เช่น ในเหมืองแร่ หรือในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น (Gansemer et al., 2009) (Xu et al., 2008)
- **บริการทางการแพทย์:** การเฝ้าติดตามผู้ป่วย และภายในโรงพยาบาลที่ใช้ระบบขนส่งอัจฉริยะด้วยหุ่นยนต์ (Murai et al., 2012) (Sghaier et al., 2011)

- **การค้นหาและการกู้ภัย:** การติดตามตำแหน่งของนักดับเพลิง ผู้ประสบภัยในหิมะถล่มหรือแผ่นดินไหว (Rüppel et al., 2010) (Sathyan and Hedley 2013) (Yuan et al., 2011)
- **บ้านอัจฉริยะ:ระบบเฝ้าดูแลเด็กทารก โปรแกรมควบคุมระยะไกล การติดตามทรัพย์สิน และการตรวจจับผู้บุกรุก** (Wang et al., 2010)
- **ทางการทหาร:** การทำงานแบบร่วมกันของหุ่นยนต์อัจฉริยะภายในสนามรบ และระบบวางแผนเส้นทางสำหรับหุ่นยนต์บนพื้นดินและอากาศ (Jacoby and Chang, 2008) (Sharma, 2011)
- **การเกษตร:** ตรวจจับพฤติกรรมของสัตว์ในฟาร์ม เช่น การเดินของม้า (Millner et al., 2009)
- **นิเวศวิทยาเชิงพฤติกรรม:** พฤติกรรมทางสังคมของสัตว์ การย้ายถิ่นฐานของสัตว์ป่า เช่น เต่าขนาดเล็ก และม้า เป็นต้น (Joshi et al., 2008) (Tsai et al., 2011)

2.1.1 แนวทางการพัฒนาระบบระบุตำแหน่ง

ในปัจจุบันมีกลุ่มนักวิจัยมากมายได้ทำการคิดค้นและพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุโดยการพิจารณาองค์ประกอบต่าง ๆ ที่เป็นส่วนสำคัญของระบบ ถึงแม้งานวิจัยเหล่านี้อาจมีวัตถุประสงค์ในการดำเนินงานที่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตาม ทุกงานวิจัยล้วนต้องการเพิ่มขีดความสามารถให้กับระบบระบุตำแหน่งวัตถุ ซึ่งสามารถจำแนกลักษณะของการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุที่มีในปัจจุบันได้อาทิเช่น

2.1.1.1 การพัฒนาทางโครงสร้างและการออกแบบระบบ

สำหรับผลกระทบที่เกิดจากสภาพแวดล้อมของการระบุตำแหน่งวัตถุภายนอกอาคาร จะมีผลกระทบน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการค้นหาตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร เนื่องจากสิ่งที่ผู้ออกแบบระบบต้องเผชิญ ไม่ได้มีเพียงแค่รูปแบบของสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา และยากที่จะคาดเดาแล้ว ผู้ออกแบบยังต้องคำนึงถึงรูปแบบทางโครงสร้างที่ซับซ้อนของตัวอาคาร (เช่น สิ่งกีดขวางภายในอาคาร) ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างระบบระบุตำแหน่งให้มีประสิทธิภาพและมีผลกระทบจากตัวอาคารน้อยที่สุด จึงเป็นสิ่งที่หลายงานวิจัยให้ความสำคัญและพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ข้อจำกัดของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานก็เป็นอีกหนึ่งความท้าทายของการพัฒนาระบบเช่นกัน ตัวอย่างเช่น การพิจารณาจำนวนและตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิง (Reference Nodes: RNs) ที่เหมาะสมสำหรับอาคารในแต่ละลักษณะ (Baala et al., 2009) และการพัฒนาขีดจำกัดของเทคโนโลยีด้วยการรวมคุณสมบัติการทำงานของหลายเทคโนโลยีเข้าด้วยกัน (Yong and Kavehrad, 2012) เป็นต้น

2.1.1.2 การพัฒนาวิธีการที่ใช้ในการระบุตำแหน่ง

หนึ่งในสิ่งสำคัญที่ทุกระบบระบุตำแหน่งจะต้องพิจารณาคือ เทคนิคหรือวิธีการที่ใช้ในการค้นหาตำแหน่ง การได้มาซึ่งตำแหน่งที่ถูกต้องนั้นระบบจะต้องมีรูปแบบการวิเคราะห์ข้อมูลและรูปแบบการคำนวณหาตำแหน่งที่มีประสิทธิภาพ ดังนั้นถ้าผู้ออกแบบเลือกใช้เทคนิคระบุตำแหน่งที่ไม่เหมาะสม และไม่เพียงพอสำหรับความต้องการในการใช้งาน ระบบดังกล่าวจะมีความสามารถในการระบุตำแหน่งที่แม่นยำและขาดความน่าเชื่อถือ ซึ่งการค้นคว้าและพัฒนาวิธีการระบุตำแหน่งแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบคือ การคิดค้นเทคนิคระบุตำแหน่งใหม่ และการปรับปรุงพัฒนาเทคนิคที่มีอยู่ในมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ตัวอย่างการปรับปรุงเทคนิค เช่น การรวมเทคนิคระบุตำแหน่งเข้าด้วยกัน (เช่น เทคนิคแบบผสม) (Huang and Wan, 2007) (Kodippili and Dias, 2010) หรือการแก้ไขจุดอ่อนของเทคนิคที่มีอยู่ (Chia et al., 2013) (Fang et al., 2012) (Long et al., 2013) เป็นต้น

2.1.1.3 การลดผลกระทบทางกายภาพที่เกิดจากสภาพแวดล้อม

เนื่องจากการวิจัยส่วนใหญ่ของระบบระบุตำแหน่งวัตถุได้มีการประยุกต์ใช้งานอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย (e.g. WLAN, WSNs) ที่อาศัยประโยชน์จากค่าพารามิเตอร์ของสิ่งแวดล้อม ซึ่งค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวคือค่าทางกายภาพที่โน้ดวัตถุ สามารถวัดได้หรือสามารถรับได้จากสิ่งแวดล้อมที่ความแปรปรวนและเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา อาทิเช่น ค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับ (Received Signal Strength: RSS) (Cheng and Lin, 2009) (Kaemarungsi, 2005)¹ (Li, 2007) หรือค่าเวลาที่ใช้ในการเดินทางของสัญญาณ (Time of Arrival: TOA) (Wang, 2012) (Wang et al., 2013) เป็นต้น (ซึ่งพารามิเตอร์ของระบบจะกล่าวอย่างละเอียดในหัวข้อ 2.2.4) ด้วยเหตุนี้ ความน่าเชื่อถือและความเที่ยงตรงของค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ จึงมีความสำคัญต่อสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งวัตถุ เช่น ระบบที่เลือกใช้เวลาในการเดินทางของสัญญาณเป็นค่าพารามิเตอร์ ไม่เพียงแต่ระบบดังกล่าวจะต้องมีการประสาน (synchronized) ระหว่างตัวอุปกรณ์ที่แม่นยำแล้ว แต่ระบบดังกล่าวยังต้องเผชิญกับปัญหาการแพร่กระจายสัญญาณแบบหลายทิศทาง (multipath propagation) ที่เกิดจากสิ่งกีดขวางที่อยู่ระหว่างภาคส่งและภาครับ ด้วยเหตุนี้ ความผิดพลาดในการตรวจจับสัญญาณแรกที่เดินทางมายังอุปกรณ์ภาครับจึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ จากปัญหาดังต้นจึงเป็นเหตุให้หลายงานวิจัยในปัจจุบันนำเสนอแนวทางการลดผลกระทบและแก้ไขปัญหาดังกล่าว (Lee and Scholtz, 2002) นอกจากนี้ยังมีหลายงานวิจัยที่ศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของสัญญาณ เพื่อเพิ่มความเข้าใจและใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบ (Kaemarungsi, 2005)¹

ในบทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ภาพรวมของระบบระบุตำแหน่งวัตถุ ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้มาจากศึกษาและรวบรวมจากปริทัศน์วรรณกรรมที่มีอยู่ในปัจจุบัน เพื่อใช้เป็นพื้นฐานองค์ความรู้สำหรับผู้สนใจ โดยวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาการระบุตำแหน่งวัตถุที่อยู่ในอาคารเป็นหลัก เนื้อหาในบทที่ 2 แบ่งออกเป็นหัวข้อดังนี้ หัวข้อ 2.2 การสำรวจระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร หัวข้อ 2.3 ความน่าเชื่อถือของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร หัวข้อ 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบระบบ หัวข้อ 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวกับเทคนิคการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร และหัวข้อ 2.6 กล่าวสรุป

2.2 การสำรวจระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร

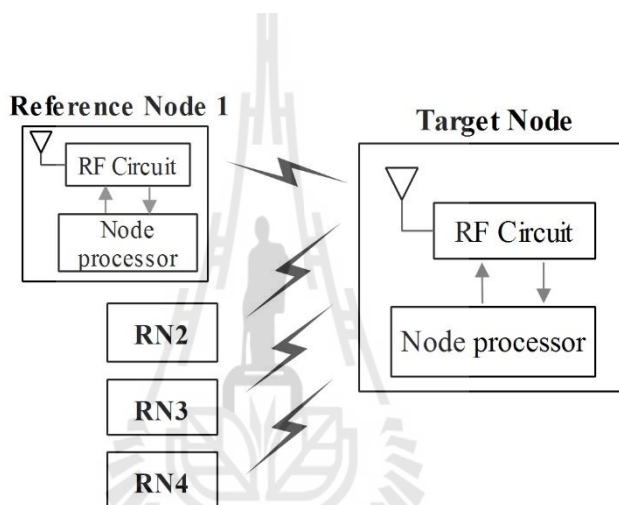
สำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุในปัจจุบันที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางคือ ระบบดาวเทียมบอกพิกัด (Global Positioning System: GPS) เป็นระบบระบุตำแหน่งที่สามารถค้นหาพิกัดของผู้ใช้งาน (หรือภาครับ GPS) บนพื้นผิวโลกโดยใช้ประโยชน์จากสัญญาณที่รับได้จากดาวเทียมที่โคจรรอบโลก (Djukanic and Richton, 2001) (Pahlavan and Krishnamurthy, 2013) (แต่อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการระบุตำแหน่งของระบบ GPS จะถูกจำกัด เมื่อตำแหน่งของภาครับ GPS อยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ไม่เป็นมิตร อาทิเช่น ภายในตัวอาคาร ในถ้ำ หรือแม้กระทั่งในเขตตัวเมือง (Gustafsson and Gunnarsson, 2005) (Pahlavan and Krishnamurthy, 2013) สาเหตุเนื่องมาจากสัญญาณที่ถูกส่งมาจากดาวเทียมจะถูกลดทอนและถูกบดบังจากสภาพแวดล้อมเหล่านี้ ด้วยเหตุนี้ เทคโนโลยี GPS จึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้สำหรับการระบุตำแหน่งวัตถุที่อยู่ในอาคาร

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้จำแนกและแบ่งการพิจารณาระบบระบุตำแหน่งออกเป็นหลายลักษณะ ซึ่งช่วยทำให้เข้าใจรูปแบบและหลักการทำงานของระบบระบุตำแหน่งแต่ละระบบ ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยแบ่งออกเป็น 5 หัว ข้อ ได้แก่ หัวข้อ 2.2.1 โครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร หัวข้อ 2.2.2 เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งาน หัวข้อ 2.2.3 ประเภทของเทคนิคระบบระบุตำแหน่ง หัวข้อ 2.2.4 ตัวชี้วัดประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่ง และสุดท้าย หัวข้อ 2.2.5 การจำแนกประเภทของระบบโดยพิจารณาจากพื้นที่ให้บริการ

2.2.1 โครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร

สำหรับโครงสร้างพื้นฐานของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารจะมีอุปกรณ์พื้นฐาน 2 ชนิดคือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นตำแหน่งอ้างอิงหรือที่เรียกว่า โหนดอ้างอิง จะถูกติดตั้งให้อยู่ในส่วนต่าง ๆ ของอาคาร ซึ่งรู้ตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ (x, y) ที่แน่นอน และถูกกำหนดชื่อเฉพาะให้กับ

แต่ละอุปกรณ์ เช่น ระบบที่ประยุกต์ใช้ WLAN จะมีการกำหนดชื่อหรือที่เรียกว่า Medium Access Control address (MAC address) ของตำแหน่งอ้างอิงที่แตกต่างกัน เป็นต้น อุปกรณ์พื้นฐานชนิดที่สองคือ อุปกรณ์ทำหน้าที่เป็นตำแหน่งวัตถุหรือตำแหน่งที่ต้องการค้นหา ซึ่งอุปกรณ์ประเภทนี้สามารถเคลื่อนที่ได้ และมีคุณสมบัติในการวัดค่าพารามิเตอร์ของระบบ เช่น ค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับได้ เพื่อนำข้อมูลที่วัดได้ไปคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุด้วยเทคนิคการระบุตำแหน่งวิธีต่าง ๆ โดยภายในอุปกรณ์ทั้งสองชนิดประกอบด้วย หน่วยประมวลผล (node processor) และวงจรรวมวิทยุ (RF circuit) ซึ่งทำหน้าที่ประมวลผล และติดต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ข้างเคียงด้วยสัญญาณวิทยุ รูปที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบของอุปกรณ์พื้นฐานทั้งสองชนิด



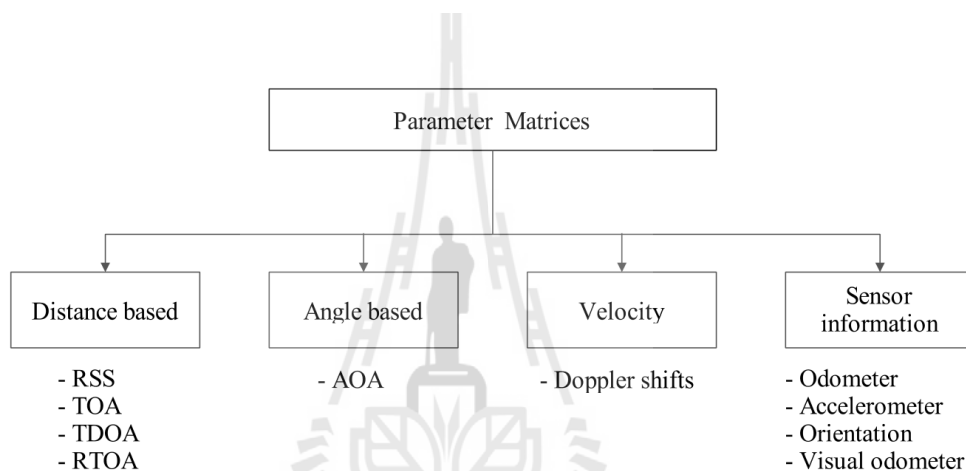
รูปที่ 2.1 องค์ประกอบของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายของระบบระบุตำแหน่งวัตถุ

สำหรับในขั้นตอนการค้นหาตำแหน่งวัตถุ หรือในช่วงออนไลน์เฟส (online phase) สามารถแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนคือ ช่วงการวัดค่า และช่วงการอัปเดตตำแหน่ง โดยทั้งสองช่วงการทำงานนี้จะใช้ระยะเวลาในการดำเนินงานเพียงไม่กี่วินาที และเป็นขั้นตอนที่ระบบระบุตำแหน่งใช้ข้อมูลพารามิเตอร์ที่วัดได้ในปัจจุบันคำนวณหาตำแหน่งวัตถุ

2.2.1.1 ช่วงการวัดค่า

ขั้นตอนแรก อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายจะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลกันภายในเครือข่าย โดยอุปกรณ์ภาคส่งจะทำการส่งสัญญาณข้อมูลในรูปแบบของแพ็คเกจ (packets) ไปยังอุปกรณ์ภาครับ ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้วิธีการแพร่กระจายสัญญาณแบบบรอดแคสต์ (broadcast) ให้ภาครับทุกตัว หรือแบบยูนิแคสต์ (unicast) เพื่อเจาะจงภาครับ จากนั้นที่ภาครับจะทำการดึง

ข้อมูลที่อยู่ภายในแพ็คเกจมาพิจารณา โดยข้อมูลดังกล่าวถูกเรียกว่า ตัวชี้วัดสัญญาณ (signal metrics) ซึ่งเป็นค่าคุณสมบัติของสัญญาณที่ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างภาคส่งและภาครับ (เช่น ค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ และค่ามุมของสัญญาณที่เดินทางมาถึง (Angle of Arrival: AOA) (Wymeersch, 2009) โดยพารามิเตอร์ของระบบดังกล่าวจะถูกนำไปใช้เป็นอินพุตให้กับเทคนิคระบุตำแหน่งในขั้นตอนถัดไป ซึ่งการเลือกใช้ตัวชี้วัดแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับเทคนิคที่ใช้ในการระบุตำแหน่งเป็นหลัก รูปที่ 2.2 แสดงพารามิเตอร์ของระบบที่ถูกใช้งานในระบบระบุตำแหน่ง ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภทได้แก่ ระยะทาง (distance based), มุม (angle based), ความเร็ว (velocity) และข้อมูลที่ได้จากตัวตรวจวัด (sensor information) (Wymeersch, 2009)



รูปที่ 2.2 พารามิเตอร์ของระบบที่ถูกใช้งานในระบบระบุตำแหน่ง

❖ ระยะทาง: คือระบบที่พิจารณาค่าระยะห่างทางกายภาพระหว่างโนดภาคส่งและภาครับ ซึ่งระยะทางเสมือนนี้สามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางกับค่าความแรงของสัญญาณที่รับได้โดยใช้โมเดลการการลดทอนของสัญญาณ (path loss model) (Cheng and Lin, 2009) (Leung, 2012) (Li, 2007) หรือการใช้คุณสมบัติของเวลาที่ใช้ในการแพร่กระจายของสัญญาณไร้สาย เช่น Time of Arrival (TOA) (Wang, 2012) (Wang et al., 2013), Time Difference of Arrival (TDOA) (He et al., 2013) (Xu et al., 2008) (Xu et al., 2011) และ Roundtrip Time of Flight (RTOF) (Ussmueller et al., 2012) เป็นต้น (ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อ 2.2.3)

❖ มุม: อาศัยการพิจารณาความสัมพันธ์ของทิศทาง (orientations) ซึ่งสามารถประมาณได้จากการใช้ค่ามุมของสัญญาณที่เดินทางมาถึง ระบบที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ประเภทนี้ ที่อุปกรณ์รับส่งสัญญาณจะต้องมีการติดตั้งสายอากาศแบบกำหนดทิศทาง (directional antenna) หรือสายอากาศแบบหลายทิศทาง (multiple antenna) (Brida, et al., 2010) (Kaplan, 2006) (Peng and Sichertiu, 2006)

❖ ความเร็ว: เป็นการอาศัยความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์ดอปเพลอร์ (doppler effect) (How et al., 2002) ซึ่งระบบระบุตำแหน่งเหล่านี้จะต้องใช้การทำงานของ GSP เป็นหลัก โดยระบบจะค้นหาตำแหน่งด้วยการพิจารณาค่าอัตราเร็วเฉลี่ยของการเปลี่ยนแปลงค่าเฟสที่เดินทางมายังภาครับ (carrier phase)

❖ ข้อมูลที่ได้จากตัวตรวจวัด: เป็นวิธีการที่ใช้ข้อมูลทางกายภาพโดยตรงของวัตถุ ซึ่งแตกต่างจากค่าพารามิเตอร์สามชนิดแรก โดยตัวชี้วัดประเภทนี้จะอาศัยการวัดข้อมูลภายใน (Measured internally) (Li et al., 2004) (Olson et al., 2000) เช่น การวัดระยะทางที่เดินทางมาโดยใช้ odometer หรือ pedometer ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดที่สามารถบอกระยะทางที่ยานพาหนะเดินทางมา การวัดค่าความเร่งด้วยเครื่องวัดความเร่ง (accelerometer) เป็นต้น

2.2.1.2 ช่วงการอัปเดตตำแหน่ง

ในขั้นตอนที่สอง เป็นขั้นตอนที่รวบรวมข้อมูลที่วัดได้ และใช้ข้อมูลดังกล่าวป้อนเป็นอินพุตให้กับเทคนิคระบุตำแหน่ง โดยที่ลักษณะการทำงานของขั้นตอนนี้สามารถจำแนกตามรูปแบบการทำงานได้ 3 ประเภทดังนี้

❖ แบบศูนย์กลางและแบบกระจาย: สำหรับระบบระบุตำแหน่งที่มีรูปแบบการทำงานแบบศูนย์กลาง (centralized) เมื่อตำแหน่งวัตถุทำการวัดข้อมูลพารามิเตอร์เรียบร้อยแล้ว จากนั้นจะส่งข้อมูลที่วัดได้ผ่านเครือข่ายของระบบ ไปยังหน่วยประมวลผลกลาง ซึ่งทำหน้าที่ประมวลผลตำแหน่งของวัตถุ บางงานวิจัยเรียกลักษณะการทำงานแบบนี้ว่า การระบุตำแหน่งจากระยะไกล (remote localization) ซึ่งการทำงานในลักษณะนี้มีความยืดหยุ่นต่ำและไม่เหมาะกับการนำไปใช้กับเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ (Kaemarungsi, 2005)¹ ในขณะที่ระบบระบุตำแหน่งที่ทำงานแบบกระจายตัว (distributed) ที่ตำแหน่งวัตถุจะทำการวัดข้อมูลพารามิเตอร์และดำเนินการหาตำแหน่งด้วยตัวเอง (self-localization) ส่งผลให้ระบบแบบนี้มีความยืดหยุ่นสูงและเหมาะสมกับเครือข่ายที่มีขนาดใหญ่ (Conti et al., 2012) (Wymeersch et al., 2009) (Yuan et al., 2011)

❖ แบบสัมบูรณ์และแบบสัมพัทธ์: ระบบระบุตำแหน่งแบบสัมบูรณ์ (absolute) หมายถึงการระบุตำแหน่งโดยอาศัยระบบพิกัดที่ได้กำหนดไว้ก่อนล่วงหน้า เช่น การทำงานของระบบ GPS ซึ่งรู้พิกัดของดาวเทียมที่แน่นอน (How et al., 2002) (Joshi et al., 2008) (Millner et al., 2009) ขณะที่ระบบระบุตำแหน่งแบบสัมพัทธ์ (relative) จะเป็นการระบุตำแหน่งโดยใช้ข้อมูลของโนดข้างเคียง หรือใช้ข้อมูลของสิ่งแวดลอม (Fang et al., 2007)

❖ แบบเอกเทศและแบบร่วมมือกัน: ระบบระบุตำแหน่งแบบเอกเทศ (non-cooperative) คือระบบระบุตำแหน่งที่ไม่มีการติดต่อสื่อสารกันระหว่างตำแหน่งวัตถุด้วยกัน ซึ่ง

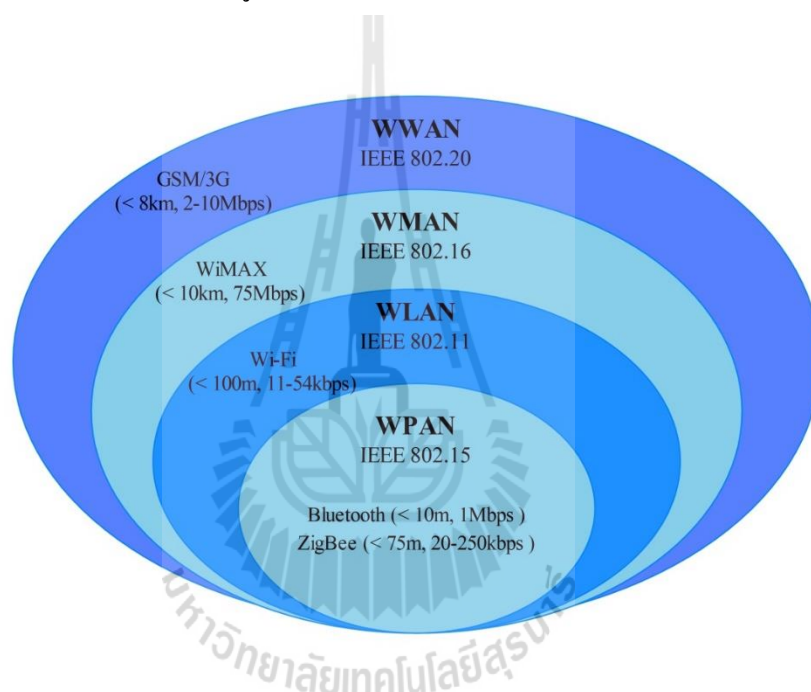
โนดวัตถุทุกโนดจะสามารถติดต่อสื่อสารได้เพียงแค่นอคอ้างอิงของระบบเท่านั้น (Fang et al., 2010) (Fluerasu et al., 2010) (Kaemarungsi et al., 2013) (Kodippili and Dias, 2010) (Rüppel et al., 2010) ดังนั้นระบบระบุตำแหน่งประเภทนี้จึงต้องการความครอบคลุมสัญญาณของโนคอ้างอิง หรืออีกความหมายคือ ระยะการรับส่งสัญญาณของโนคอ้างอิงภายในอาคารจะต้องมากพอสำหรับพื้นที่ให้บริการ ขณะที่ระบบระบุตำแหน่งแบบร่วมมือกัน (cooperative) คือระบบที่โนดวัตถุสามารถติดต่อสื่อสารและแลกเปลี่ยนข้อมูลซึ่งกันและกันได้ ดังนั้นความต้องการในการครอบคลุมสัญญาณของโนคอ้างอิงจึงไม่จำเป็น เนื่องจากข้อมูลพารามิเตอร์ที่ตำแหน่งวัตถุต้องใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งสามารถมาได้มาจากโนดวัตถุข้างเคียง และโนคอ้างอิงที่อยู่ภายในระยะทำการ ดังนั้นระบบระบุตำแหน่งแบบร่วมมือกัน จึงสามารถให้ทั้งความถูกต้องในการระบุตำแหน่งที่ดี และมีประสิทธิภาพในแง่ความครอบคลุมที่ดีอีกด้วย (Conti et al., 2012) (Sathyan and Hedley, 2013) (Win et al., 2011) (Wymeersch et al., 2009) ตัวอย่างการจำแนกรูปแบบการทำงานของระบบระบุตำแหน่งโดยการพิจารณาขั้นตอนในช่วงการอัปเดตตำแหน่งแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างของระบบระบุตำแหน่งวัตถุที่จำแนกด้วยช่วงการอัปเดตตำแหน่ง

Localization	Centralized or Distributed	Absolute or Relative	Non-cooperative or Cooperative	Area
GPS (Millner et al., 2009) (Djuknic and Richton, 2001)	Distributed	Absolute	Non-cooperative	Outdoor
GNSS (Fluerasu et al., 2010)	Distributed	Absolute	Non-cooperative	Indoor
LORAN-C (Yinbing et al., 2011)	Centralized	Absolute	Non-cooperative	Outdoor
Cell phone (Pahlavan and Krishnamurthy, 2013)	Centralized	Absolute	Non-cooperative	Outdoor
RFID (Rüppel et al., 2010) (Luca et al., 2006)	Centralized	Absolute /relative	Non-cooperative	Indoor
SPAWN (Conti et al., 2012) (Wymeersch et al., 2009)	Distributed	Absolute /relative	Cooperative	Indoor
FACT (Sathyan and Hedley, 2013)	Distributed	Absolute /relative	Cooperative	Outdoor/ indoor
COLOR (Papapostolou et al., 2012)	Distributed	Absolute /relative	Cooperative	Indoor

2.2.2 เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งาน

เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับระบบระบุตำแหน่งวัตถุในปัจจุบัน สามารถจำแนกโดยพิจารณาตามขนาดของพื้นที่ให้บริการซึ่งแบ่งได้ 4 กลุ่มโดยเรียงตามลำดับจากขนาดพื้นที่ครอบคลุมน้อยไปหามาก คือ 1) เครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (Wireless Personal Area Network: WPAN) 2) เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network: WLAN) 3) เครือข่ายไร้สายระดับขอบเขตเมืองใหญ่ (Wireless Metropolitan Area Network: WMAN) และ 4) เครือข่ายไร้สายวงกว้าง (Wireless Wide Area Network: WWAN) ซึ่งแผนผังของเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนผังเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สาย

2.2.2.1 เครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (WPAN)

คือระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สายที่ถูกกำหนดให้อยู่ในมาตรฐาน IEEE 802.15.4 มีพื้นที่ครอบคลุมประมาณไม่เกิน 75 เมตร และมีมาตรฐานย่อยที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน เช่น

- ❖ IEEE 802.15.1 (Bluetooth) มีพื้นที่การทำงานครอบคลุมประมาณไม่เกิน 10 เมตร เป็นมาตรฐานการสื่อสารแบบวงแคบ (narrow band communication) ใช้คลื่นความถี่วิทยุ 2.4 GHz และมีอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลประมาณ 1 Mbps (version 1.2) (Pahlavan and Krishnamurthy, 2013)

❖ IEEE 802.15.4 (ZigBee) คือเทคโนโลยีการสื่อสารที่มีอัตราการรับส่งข้อมูลต่ำ มีพื้นที่การทำงานครอบคลุมประมาณไม่เกิน 75 เมตร ใช้ในช่วงความถี่ ISM bands (the industrial, scientific and medical bands) ได้แก่ ช่วงความถี่ 868 MHz สำหรับยุโรป ช่วงความถี่ 915 MHz สำหรับสหรัฐอเมริกาและออสเตรเลีย และช่วงความถี่ 2.4 GHz สำหรับทั่วโลก โดยมีอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลเท่ากับ 20 Kbps, 40 kbps และ 250 Kbps ตามลำดับ (Pahlavan and Krishnamurthy, 2013)

2.2.2.2 เครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN)

คือระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สายที่ทำงานอยู่บนมาตรฐาน IEEE 802.11 โดยมีชื่อเรียกอีกอย่างว่า Wi-Fi (Wireless Fidelity) มีพื้นที่การทำงานครอบคลุมระดับองค์กรหรือหน่วยงาน ซึ่งมีพื้นที่ประมาณไม่เกิน 100 เมตร โดยมาตรฐาน IEEE 802.11 มีมาตรฐานย่อยซึ่งมีการใช้วิธีการเข้ารหัสสัญญาณที่แตกต่างกัน (Pahlavan and Krishnamurthy, 2013) อาทิเช่น

- ❖ IEEE 802.11a ใช้งานในช่วงความถี่ 5 GHz มีอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงสุด 54 Mbps
- ❖ IEEE 802.11b ใช้งานในช่วงความถี่ 2.4 GHz มีอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงสุด 11 Mbps
- ❖ IEEE 802.11g ใช้งานในช่วงความถี่ 2.4 GHz มีอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงสุด 54 Mbps
- ❖ IEEE 802.11n ใช้งานในช่วงความถี่ 2.4 และ 5 GHz มีอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลสูงสุด 300 Mbps

2.2.2.3 เครือข่ายไร้สายระดับขอบเขตเมืองใหญ่ (WMAN)

คือระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สายที่มีขนาดพื้นที่ครอบคลุมระดับขอบเขตเมืองใหญ่ เทคโนโลยีสื่อสารไร้สายที่ทำงานอยู่บนมาตรฐาน IEEE 802.16 (WiMAX) (Pahlavan and Krishnamurthy, 2013) เช่น

- ❖ IEEE 802.16d ทำงานในช่วงความถี่ไม่เกิน 11 GHz มีอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูล 75 Mbps และมีพื้นที่ครอบคลุมประมาณ 6.4 ถึง 10 กิโลเมตร
- ❖ IEEE 802.16e ทำงานในช่วงความถี่ 2 ถึง 6 GHz มีอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูล 30 Mbps และมีพื้นที่ครอบคลุมประมาณ 1.6 ถึง 5 กิโลเมตร

2.2.2.4 เครือข่ายไร้สายวงกว้าง (WWAN)

คือระบบเครือข่ายสื่อสารไร้สายบริเวณกว้าง สามารถครอบคลุมพื้นที่ทั่วประเทศหรือภูมิภาค ซึ่งเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายประเภทนี้ทำงานอยู่บนมาตรฐาน IEEE 802.20 (Mobile Broadband Wireless Access: MBWA) และ WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้เป็นมาตรฐานในโทรศัพท์ยุค 3G (Pahlavan and Krishnamurthy, 2013)

จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมพบว่า เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่จัดอยู่ในระบบเครือข่ายแบบ WPAN และ WLAN เป็นกลุ่มเทคโนโลยีที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารมากที่สุด อาทิเช่น มาตรฐาน IEEE 802.15.4 หรือมาตรฐาน IEEE 802.11 (Wi-Fi) เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม นอกเหนือจากสองระบบเครือข่ายข้างต้นแล้ว ได้มีหลายงานวิจัยในปัจจุบันนำเสนอระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารที่อาศัยความสามารถของเทคโนโลยีชนิดอื่น ๆ เช่น การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ (Visible Light Communication: VLC) หรือมาตรฐาน IEEE 802.15.4a (Ultra-wideband: UWB) เป็นต้น ดังนั้นจะเห็นได้ว่าระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารมีรูปแบบและแนวทางการพัฒนาที่หลากหลาย ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีมาตรฐานต่าง ๆ ที่มีอยู่แล้วในอาคาร (เช่น VLC) หรือนำไปใช้กับรูปแบบการทำงานที่มีอยู่แล้ว เช่น การนำไปใช้กับเครือข่าย ZigBee ที่อยู่ภายในอาคาร ซึ่งเดิมทีระบบนี้อาจถูกออกแบบมาเพื่อตรวจวัดข้อมูลทางกายภาพของสิ่งแวดล้อม (เช่น ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์) และส่งข้อมูลที่วัดได้มายังส่วนควบคุมกลาง ถ้าหากผู้ออกแบบเพิ่มการทำงานของระบบระบุตำแหน่งวัตถุเข้าไปในเครือข่ายนี้ จะทำให้ระบบระบุตำแหน่งวัตถุนี้มีทางเลือกของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการระบุตำแหน่งมากขึ้น ซึ่งระบบระบุตำแหน่งไม่เพียงจะใช้ประโยชน์จากค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ แต่ยังสามารถใช้ค่าทางกายภาพของสิ่งแวดล้อมซึ่งคือ ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ร่วมกับการระบุตำแหน่งได้อีกด้วย อีกทั้งยังช่วยให้ระบบระบุตำแหน่งมีสมรรถนะในการระบุตำแหน่งดีขึ้นอีกด้วย (Maneerat, 2012) ซึ่งตัวอย่างของเทคโนโลยีที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบระบุตำแหน่งวัตถุแสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของเทคโนโลยีที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบระบุตำแหน่งวัตถุ

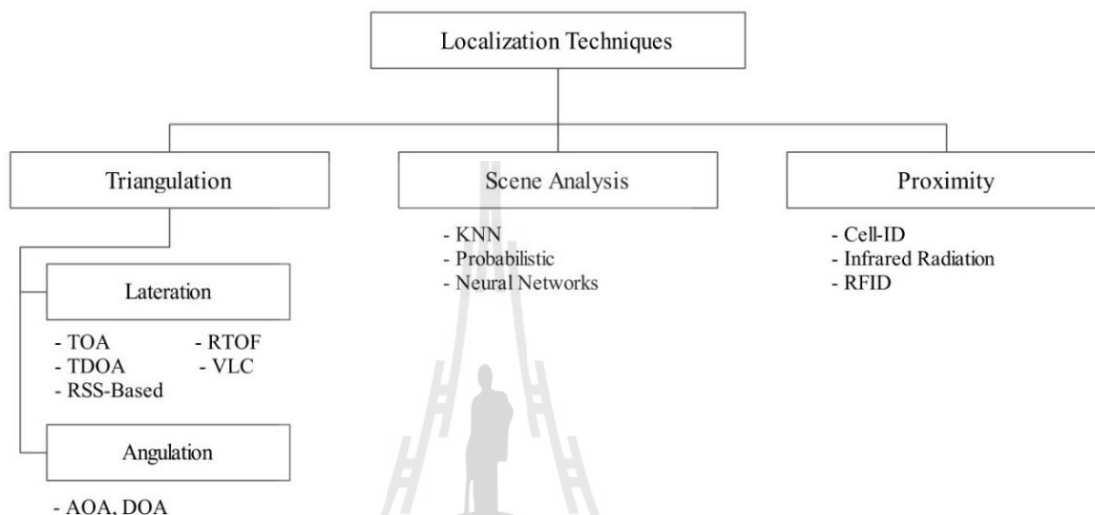
Technologies	Frequency	Brand/ Processing	Parameter metrics	Papers
IEEE 802.15.4 (ZigBee)	ISM 2.4 GHz	XBeePro Modules by MaxStream	Distance based (RSS)	Joshi et al. (2008)
		Crossbow's MICAz, Imote2, Cricket motes	Distance based (TDOA)	Sghaier et al. (2011)
		Texas Instruments CC2431	Ensemble approach	Fang et al. (2012)
		IP-Link 2220 Helicomm Inc.	Distance based (RSS)	Cheng and Lin (2009)
		Freescale's MC13224V SoC platform	Single Nearest Neighbour	Kaemarungsi et al. (2013)
		TI/Chipcon's ZigBee modules	Neural Network	Hung et al. (2010)
		TelosB wireless platform	Nearest Neighbour	Bal et al. (2010)
IEEE 802.11a/b/g/n (WLAN)	ISM 5.8 GHz (BW 125 MHz)	WX-1590 SparkLAN	KWNN	Li et al. (2005)
		PDA (HP iPAQ 114) with Windows Mobile / AP-WLAN	Single Nearest Neighbour	Gansemer et al. (2010)
		Mobile phones (Nokia 5800 XpressMusic and HTC WildFire)	K-Nearest Neighbour	Alsehly et al. (2011)
		Apple MacBook (Windows XP SP3) / D-Link DWL-2000AP	Probabilistic	Al-Ahmadi et al. (2011)
		HTC Desire smartphone (Android 2.2) / ASUS WL-330gE 802.11g AP / D-Link DIR-300 Wireless AP	Distance based (TOA) / RF fingerprint	Liu and Yang (2011)
	Maxim MAX2829 RF IC	Distance based (TOA)	Sathyan and Hedley (2013)	

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างของเทคโนโลยีที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกับระบบระบุตำแหน่งวัตถุ (ต่อ)

Technologies	Frequency	Brand/ Processing	Parameter metrics	Papers
IEEE 802.15.4a (UWB)	3.2-7.4 GHz	-	Distance based (TOA)	Conti et al. (2012)
	2-8 GHz (BW 0.5-6 GHz)	Network analyzer agilent PNA E8803A	Distance based (RSS)	Gentile and Kik (2007)
IEEE 802.15.4a (UWB) VLC	3-10 GHz (BW 1 GHz)	Virtex4 Xilinx FPGA	Distance based (TOA / TDOA)	Segura et al. (2012)
	-	Mobile robot HOSPI	LED light	Murai et al. (2012)
	-	Vector Signal Analyzer (VSA), RF spectrum analyzer (RFSA)	Distance based (VLC)	Kim et al. (2013)
RFID	868 MHz, 2.45 GHz	Modern standard CMOS	Distance based (RTOF)	Ussmueller et al. (2012)
RFID, WLAN, IEEE 802.15.3a (UWB)	886 MHz, ISM 2.4 GHz, NaN	IntelliFind RTLS, NaN, NaN	AP-coverage	Rüppel et al. (2010)
VLC, IEEE 802.15.4 (ZigBee)	NaN, ISM 2.4 GHz	Evaluation board with the embedded ZigBee modem	Proximity	Yong et al. (2012)
Laser light flashes	-	Geared electro motor FTB	Distance based (TOA)	Romer (2003)

2.2.3 ประเภทของเทคนิคระบบระบุตำแหน่ง

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมสามารถแบ่งเทคนิคที่ใช้ในการระบุตำแหน่งวัตถุได้ 3 ประเภทคือ กลุ่มเทคนิค Triangulation กลุ่มเทคนิค Scene Analysis และกลุ่มเทคนิค Proximity (Liu et al., 2007) แสดงได้ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ประเภทของเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุ

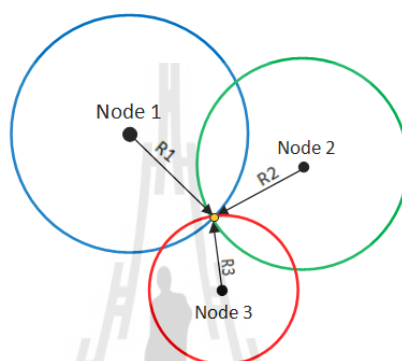
2.2.3.1 กลุ่มเทคนิค Triangulation

กลุ่มเทคนิค Triangulation เป็นกลุ่มเทคนิคระบุตำแหน่งที่ใช้คุณสมบัติทางเรขาคณิตของตรีโกณมิติเพื่อระบุตำแหน่งของเป้าหมาย ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ เทคนิค Lateration และเทคนิค Angulation

2.2.3.1.a เทคนิค Lateration

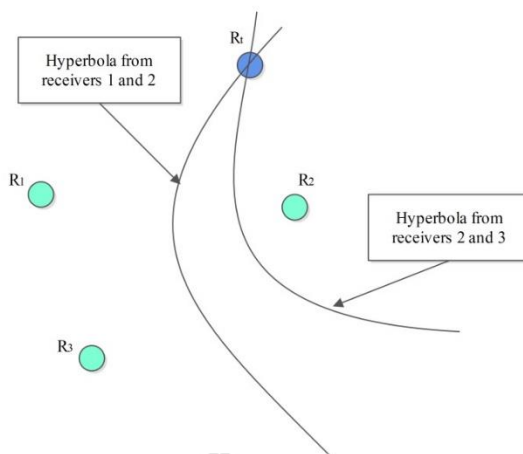
คือกลุ่มเทคนิคระบุตำแหน่งที่ใช้คุณสมบัติการวัดระยะห่างระหว่างโนควัตถุกับ โนควัตถุอื่นที่อยู่ภายในอาคารหรือเรียกอีกอย่างว่า เทคนิคการวัดระยะ (range measurement technique) ซึ่งเป็นเทคนิคที่วัดระยะทางเสมือนระหว่างโนควัตถุและโนควัตถุด้วยการอาศัยการลดทอนของสัญญาณ หรืออาศัยเวลาที่ใช้ในการเดินทางของสัญญาณ สำหรับเทคนิคระบุตำแหน่งที่จัดอยู่ในเทคนิคประเภทนี้ได้แก่

❖ *Time of Arrival (TOA)*: เป็นเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุที่พิจารณาค่าเวลาที่ใช้ในการแพร่กระจายของสัญญาณแบบทางเดียว (one-way propagation time) แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 โดยแต่ละคู่โหนด (โหนดวัตถุและโหนดอ้างอิง) จะมีการวัดความแตกต่างของเวลาระหว่างเวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณของโหนดอ้างอิง และเวลาที่รับสัญญาณได้ของโหนดวัตถุ ซึ่งข้อจำกัดของเทคนิคนี้คือ โหนดวัตถุจะต้องได้รับสัญญาณจากโหนดอ้างอิงอย่างน้อย 3 โหนด อีกทั้งในแต่ละคู่โหนดจะต้องมีการประสานกันอย่างแม่นยำ (Lee and Scholtz, 2002) (Wang, 2012) (Wang et al., 2013)



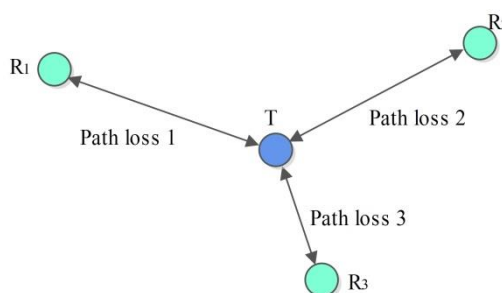
รูปที่ 2.5 เทคนิคระบุตำแหน่ง Time of Arrival / Roundtrip Time of Flight

❖ *Time Difference of Arrival (TDOA)*: เป็นเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุที่อาศัยการพิจารณาความแตกต่างของเวลาที่ใช้ในการแพร่กระจายของสัญญาณซึ่งมีความแน่นอนมากกว่าเทคนิค TOA โดยเทคนิคนี้จะพิจารณาความแตกต่างของเวลาที่เดินทางมาถึงอย่างน้อยจากโหนดอ้างอิง 2 โหนด และใช้สมการไฮเพอร์โบลิก (hyperboloid) คำนวณหาจุดตัดของเส้นหรือตำแหน่งวัตถุ แสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งข้อจำกัดของเทคนิคระบุตำแหน่งนี้คือ ภาควงหรือโหนดอ้างอิงแต่ละโหนดจะต้องมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลสัญญาณอ้างอิงและเวลาอ้างอิงอย่างแม่นยำ (He et al., 2013) (Xu et al., 2008) (Xu et al., 2011)



รูปที่ 2.6 เทคนิคระบุตำแหน่ง Time Difference of Arrival

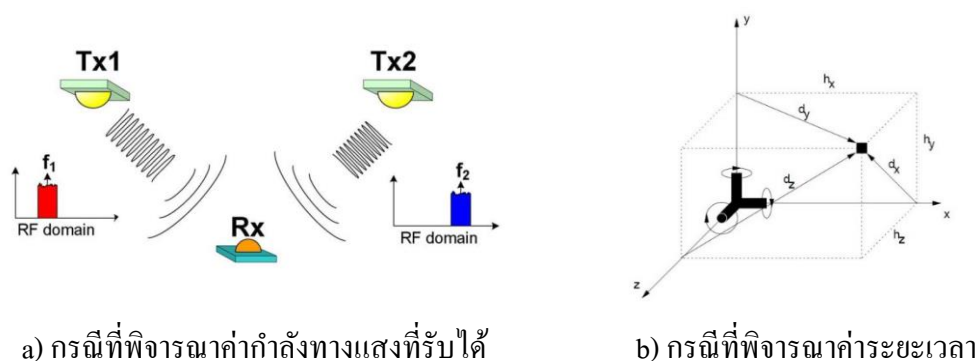
❖ *Received Signal Strength-Based (RSS-Based)*: จากข้อเสียของสองเทคนิคข้างต้น ถ้าหากเส้นทางการรับส่งข้อมูลเป็นเส้นทางที่มีสิ่งกีดขวาง (Non Line of Sight: NLOS) สมรรถนะในการระบุตำแหน่งวัตถุของทั้งสองเทคนิคจะลดลง ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงข้อจำกัดดังกล่าว เทคนิค RSS-Based จึงใช้คุณสมบัติการแพร่กระจายของสัญญาณวิทยุที่อยู่ภายในอาคาร โดยใช้พื้นฐานการลดทอนของสัญญาณที่คำนวณได้จากค่าการสูญเสียเนื่องจากการแพร่กระจายของสัญญาณ ซึ่งสามารถใช้หลักการคำนวณจากแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในเชิงทฤษฎี (theoretical propagation model) หรือจากแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นในเชิงประสบการณ์ (empirical propagation model) โดยเทคนิคระบุตำแหน่งนี้ ที่ภาครับจะวัดค่าความเข้มของสัญญาณจากภาคส่ง และแปลงค่าความแรงของสัญญาณที่ได้รับได้ให้เป็นระยะทางเสมือน ก่อนจะใช้คุณสมบัติทางเรขาคณิตของตรีโกณมิติคำนวณหาตำแหน่งวัตถุ (Cheng and Lin, 2009) (Li, 2007) แสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การพิจารณาค่า Path loss ของเทคนิค RSS-Based

❖ *Roundtrip Time of Flight (RTOF)*: เป็นเทคนิคระบุตำแหน่งที่อาศัยเวลาที่สัญญาณเดินทางไปกลับจากภาคส่งไปยังภาครับแล้วย้อนกลับมา โดยจะใช้ความสัมพันธ์ของการซิงโครไนซ์ของสัญญาณนาฬิกา (clock synchronization) แทนที่การซิงโครไนซ์ในแบบ TOA ซึ่งนิยมนำไปประยุกต์ใช้กับระบบเรดาร์ (radar) อย่างไรก็ตาม การวัดค่าความล่าช้า หรือเวลาที่ใช้ในการประมวลผล (delay/ processing time) ของเทคนิคระบุตำแหน่งประเภทนี้ยังคงเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก เนื่องจากอุปกรณ์ภาครับหรือ โหนดวัดจำเป็นต้องตอบสนองต่อการแพร่กระจายของสัญญาณอย่างสมบูรณ์ที่สุด (Ussmueller et al., 2012)

❖ *Visible Light Communication (VLC)*: เป็นเทคนิคระบุตำแหน่งที่ใช้การสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้จากหลอดไฟ LED โดยเทคนิคระบุตำแหน่งประเภทนี้จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์สองชนิดคือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นภาคส่ง (transmitter: Tx) และอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นภาครับ (receiver: Rx) โดยที่ภาคส่ง (หรือหลอดไฟ LED) จะถูกมอดูเลตสัญญาณแสงด้วยความถี่คลื่นพาห์ที่แตกต่างกัน ซึ่งใช้แทนชื่อของ โหนดอ้างอิง และ โหนดวัดจะคำนวณหาระยะห่างระหว่าง โหนดอ้างอิงและตำแหน่งตัวเองจากค่ากำลังทางแสง (optical power) ที่รับได้ (Kim et al., 2013) หรือจากช่วงระยะเวลา (time duration) (Romer, 2003) และใช้คุณสมบัติทางเรขาคณิตคำนวณหาตำแหน่งวัตถุ แสดงได้ดังรูปที่ 2.8(a) และรูปที่ 2.8(b) ตามลำดับ ซึ่งข้อจำกัดของเทคนิคระบุตำแหน่งประเภทนี้คือ เส้นทางการรับส่งข้อมูลระหว่างภาคส่งและภาครับจะต้องเป็นแบบไม่มีสิ่งกีดขวาง (LOS) อีกทั้งเทคโนโลยี VLC จะไม่สามารถเชื่อมต่อกันแบบเครือข่ายได้ ซึ่งต้องอาศัยความสามารถของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายประเภทอื่นแทน เช่น เครือข่าย ZigBee เพื่อส่งข้อมูลที่วัดได้ไปประมวลผลหรือแสดงตำแหน่งของวัตถุที่ส่วนควบคุมกลาง

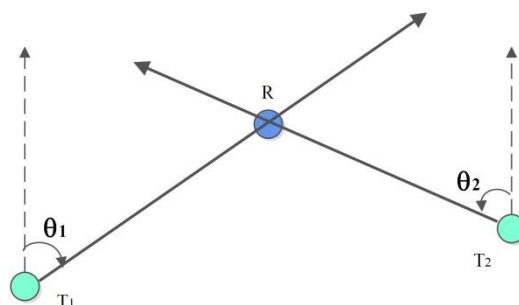


รูปที่ 2.8 เทคนิคระบุตำแหน่ง Visible Light Communication

2.2.3.1.b เทคนิค Angulation

กลุ่มเทคนิคระบุตำแหน่งที่พิจารณาคณสมบัติการวัดค่ามุมหรือทิศทางของสัญญาณระหว่างโนดวัตถุกับโนดอ้างอิงที่อยู่ภายในอาคาร บางงานวิจัยเรียกเทคนิคประเภทนี้ว่า direction-based (Win et al., 2011) เทคนิคระบุตำแหน่งที่จัดอยู่ในเทคนิคประเภทนี้ได้แก่

❖ *Angle of Arrival (AOA)*: หรือ Direction of Arrival (DOA) เป็นเทคนิคระบุตำแหน่งที่อาศัยการวัดค่ามุมของสัญญาณที่เดินทางมาถึง หรือการวัดทิศทางของสัญญาณที่เดินทางมาถึง โดยที่อุปกรณ์ภาครับสามารถเลือกพิจารณาค่าแอมพลิจูด (amplitude) หรือค่าเฟส (phase) ของสัญญาณที่เดินทางมาถึงเป็นพารามิเตอร์ของระบบ (Mao et al., 2007) และระบุตำแหน่งของวัตถุโดยใช้การตัดกัน (intersection) ของทิศทางของสัญญาณ ซึ่งจะมีการกำหนดทิศทางของสัญญาณระหว่างคู่ของโนดอ้างอิงให้เป็นเส้นตรง (lines) และคำนวณหาค่ารัศมีระหว่างโนดอ้างอิงถึงโนดวัตถุ โดยเทคนิคระบุตำแหน่งประเภทนี้จะต้องรู้ค่ามุมของโนดอ้างอิงอย่างน้อย 2 โนด แสดงได้ดังรูปที่ 2.9 ข้อดีของเทคนิคระบุตำแหน่งประเภทนี้คือ สามารถระบุตำแหน่งของวัตถุภายในบริเวณระนาบสองมิติ (x, y) หรือในแบบพิกัดสามมิติได้ (x, y, z) โดยที่ไม่จำเป็นต้องมีการประสานกันระหว่างอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ แต่ข้อเสียของเทคนิคระบุตำแหน่งนี้คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นภาครับต้องสามารถวัดค่ามุมได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ เช่น ถ้าเลือกพิจารณาค่าเฟสของสัญญาณที่เดินทางมาถึง ภาครับจะต้องใช้สายอากาศแถวลำดับ (antenna array) (Mao et al., 2007) ส่งผลให้อุปกรณ์ภาครับมีขนาดใหญ่และมีความซับซ้อนสูง อีกทั้งยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการบดบัง (shadowing) และผลกระทบของคลื่นหลายวิถี ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ทิศทางของสัญญาณผิดเพี้ยน และทำให้ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งลดน้อยลง (Brida et al., 2010) (Cheng and Lin, 2009) (Peng and Sichitiu, 2006)

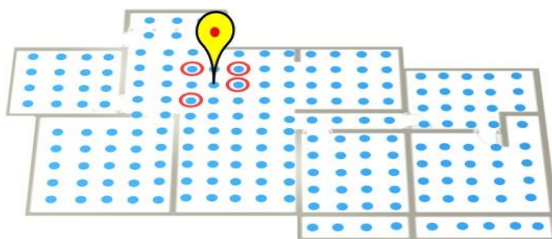


รูปที่ 2.9 เทคนิคระบุตำแหน่ง Angle of Arrival

2.2.3.2 กลุ่มเทคนิค Scene Analysis

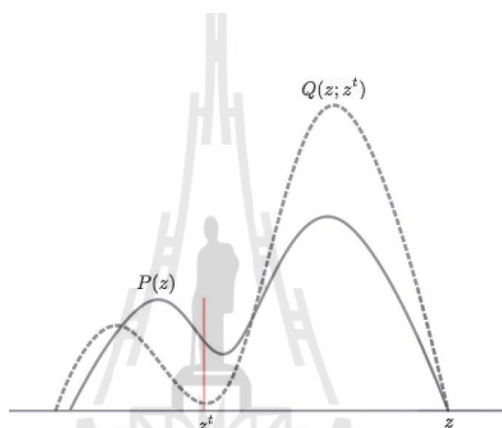
กลุ่มเทคนิค Scene Analysis เป็นกลุ่มเทคนิคระบุตำแหน่งที่ใช้คุณสมบัติการวิเคราะห์เหตุการณ์ซึ่งจะมีการเก็บรวบรวมคุณสมบัติของเหตุการณ์ภายในพื้นที่ให้บริการหรือที่เรียกว่า ตำแหน่งฟิงเกอร์ปรี้นท์ (location fingerprint) โดยกลุ่มเทคนิคระบุตำแหน่งกลุ่มนี้จะมีการเก็บรวบรวมฐานข้อมูลของเหตุการณ์ในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งเป็นการบันทึกค่าพารามิเตอร์ของระบบที่อยู่ภายในอาคาร เรียกขั้นตอนการทำงานดังกล่าวว่า การสร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรี้นท์ จากนั้นระบบระบุตำแหน่งจะทำการจับคู่ (matching) ข้อมูลระหว่างฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรี้นท์และตำแหน่งปัจจุบันของวัตถุ เพื่อเลือกตำแหน่งฟิงเกอร์ปรี้นท์ที่มีความใกล้เคียงกับตำแหน่งวัตถุมากที่สุด โดยเทคนิคกลุ่มนี้สามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ ออฟไลน์เฟส (offline phase) และออนไลน์เฟส (Esposito et al., 2009) สำหรับในขั้นตอนออฟไลน์เฟสจะเป็นขั้นตอนการสร้างฐานข้อมูล ซึ่งจะมีการกำหนดตำแหน่งฟิงเกอร์ปรี้นท์ที่ใช้สำหรับวัดค่าพารามิเตอร์ของระบบ เช่น ค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ เพื่อสร้างเป็นฐานข้อมูล ถัดมาในขั้นตอนออนไลน์เฟสหรือขั้นตอนการระบุตำแหน่ง ที่ตำแหน่งวัตถุจะทำการวัดค่าพารามิเตอร์ของระบบ และคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุด้วยเทคนิคระบุตำแหน่งชนิดต่าง ๆ (Esposito et al., 2009) (Kaemarungsi, 2005)¹ (Kodippili and Dias, 2010) (Liu et al., 2007) (Marques et al., 2012) ตัวอย่างเทคนิคระบุตำแหน่งที่อยู่ในกลุ่มเทคนิค Scene Analysis นี้มีดังนี้

❖ *K-Nearest Neighbor (KNN)*: วิธีการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด K จำนวน เป็นเทคนิคระบุตำแหน่งที่พิจารณาความใกล้เคียงของเวกเตอร์ความแรงสัญญาณที่รับได้ระหว่างตำแหน่งวัตถุ และฐานข้อมูล ซึ่งจะคำนวณหาความแตกต่างดังกล่าวด้วยสมการคำนวณความแตกต่าง อาทิเช่น สมการระยะห่างยูคลีเดียน (Euclidean distance) สมการระยะห่างแมนฮัตตัน (Manhattan distance) และสมการระยะห่างทานิมโตะ (Tanimoto distance) (Marques et al., 2012) เป็นต้น ถัดมาจะทำการคัดเลือกตำแหน่งฟิงเกอร์ปรี้นท์ที่มีความใกล้เคียงกับตำแหน่งวัตถุมากที่สุดจำนวน K ตำแหน่งไปคำนวณหาพิกัดวัตถุด้วยวิธีการหาค่าเฉลี่ยของพิกัด x, y หรือวิธีการถ่วงน้ำหนัก (weighted) (Liu et al., 2007) แสดงดังรูปที่ 2.10



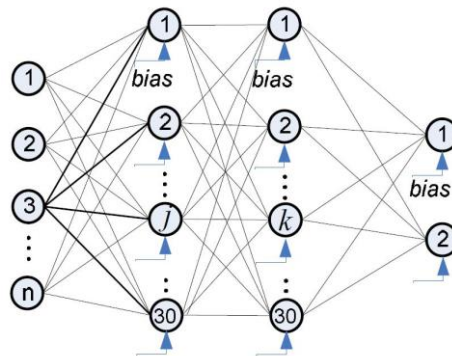
รูปที่ 2.10 เทคนิคระบุตำแหน่ง K-Nearest Neighbor

❖ *Probabilistic Methods*: วิธีการระบุตำแหน่งที่อาศัยคุณสมบัติพื้นฐานความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ จะพิจารณาการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไข (conditional probability distribution) ของเวกเตอร์ความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่งวัตถุและฐานข้อมูล ซึ่งเรียกอีกอย่างว่า ฟังก์ชันความน่าจะเป็น (likelihood function) โดยที่ฟังก์ชันดังกล่าวจะให้ความน่าจะเป็น (probability) หรือความหนาแน่นความน่าจะเป็น (probability density) ของเหตุการณ์ที่เวกเตอร์ความแรงสัญญาณในฐานข้อมูลจะเป็นตำแหน่งของวัตถุ โดยใช้กฎของเบย์ (Bayes' rule) เพื่อคำนวณหาฟังก์ชันความน่าจะเป็นด้วยวิธีฮิสโตแกรม (Histogram approach) หรือวิธีเคอร์เนล (Kernel approach) (Fang et al., 2012) แสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 เทคนิคระบุตำแหน่ง Probabilistic

❖ *Neural Networks*: วิธีการโครงข่ายประสาทเทียม เป็นเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคารที่มีความซับซ้อนสูงซึ่งอาศัยการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์และใช้ฟังก์ชันการจำแนกกลุ่มแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linear discriminant function) โดยจำแนกกลุ่มที่เหมาะสมด้วยการใช้โครงสร้างเซลล์ประสาท (neuron) ที่ประกอบไปด้วย เซตของเส้นเชื่อมอินพุต (set of input links) ที่มีค่าถ่วงน้ำหนักของจุดประสาท (synaptic weights) ซึ่งหาได้จากผลรวมของค่าถ่วงน้ำหนักอินพุตทั้งหมด และมีฟังก์ชันกระตุ้น (activation function) ที่ทำหน้าที่จำกัดขอบเขตค่าแอมพลิจูดของเอาต์พุต โดยรูปแบบทั่วไปของฟังก์ชันกระตุ้นจะมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่บอกความเหมาะสมของปัญหาว่า อยู่หรือไม่อยู่ในกลุ่มเดียวกัน (yes/no) (Hung et al., 2010) แสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 เทคนิคระบุตำแหน่ง Neural Networks

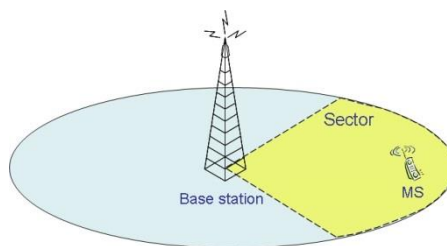
2.2.3.3 กลุ่มเทคนิค Proximity

กลุ่มเทคนิค Proximity เป็นกลุ่มเทคนิคระบุตำแหน่งที่อาศัยคุณสมบัติของสัญลักษณ์ (symbolic) ที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลตำแหน่ง ซึ่งความถูกต้องของตำแหน่งจะขึ้นอยู่กับความสามารถของสายอากาศว่ามีพื้นที่การทำงานครอบคลุมมากน้อยเพียงใด แนวคิดการทำงานของเทคนิคกลุ่มนี้คือ เมื่อโน้ดวัตถุเคลื่อนที่เข้าใกล้โน้ดอ้างอิง ที่โน้ดวัตถุจะสามารถตรวจจับสัญญาณที่ถูกส่งออกมาจากโน้ดอ้างอิงได้ หรืออีกความหมายคือ โน้ดวัตถุเคลื่อนที่เข้าไปอยู่ภายในพื้นที่การทำงานของโน้ดอ้างอิง จากนั้นระบบทำการพิจารณาพิสัยของโน้ดอ้างอิงดังกล่าวเป็นพิสัยของวัตถุ สำหรับกรณีที่โน้ดวัตถุสามารถรับค่าสัญญาณจากโน้ดอ้างอิงได้มากกว่าสองโน้ด จะใช้วิธีการพิจารณาค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโน้ดอ้างอิงที่มากที่สุดเป็นพิสัยของวัตถุ (Zhang and Ye, 2011) โดยเทคโนโลยีการสื่อสารที่ถูกนำมาใช้กับเทคนิคกลุ่มนี้เช่น Infrared Radiation (IR), Radio Frequency Identification (RFID) และ Cell Identification (Cell-ID) ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Pahlavan and Krishnamurthy, 2013) หรือแม้กระทั่งการใช้เทคโนโลยี VLC แสดงได้ดังรูปที่ 2.13

ซึ่งข้อดีของกลุ่มเทคนิคประเภทนี้คือง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง ไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่มีความซับซ้อน อีกทั้งยังไม่มีส่วนการสร้างฐานข้อมูลอีกด้วย อย่างไรก็ตาม สมรรถนะในการระบุตำแหน่งของกลุ่มเทคนิคประเภทนี้จะมีน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มเทคนิค Triangulation และกลุ่มเทคนิค Scene Analysis



a) Visible Light Communication



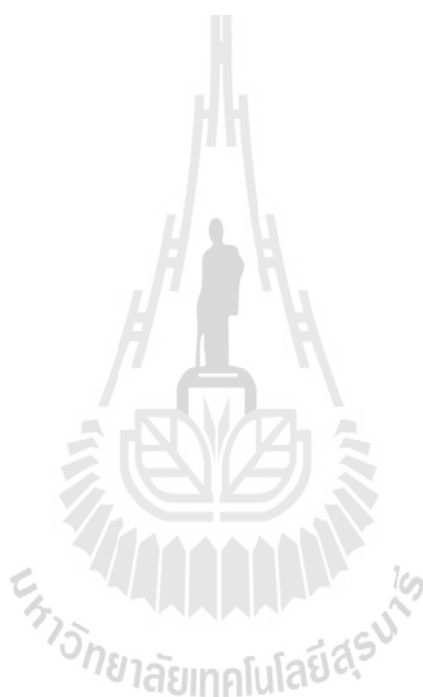
b) Cell Identification (Cell-ID)

รูปที่ 2.13 กลุ่มเทคนิคระบุตำแหน่ง Proximity

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคาร สามารถสรุปข้อดีและข้อจำกัดของกลุ่มเทคนิคระบุตำแหน่งได้ดังตารางที่ 2.3 สำหรับในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจะพิจารณาการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่อยู่ในกลุ่มเทคนิค Scene Analysis ซึ่งถึงแม้ว่ากลุ่มเทคนิคดังกล่าวจะต้องใช้ระยะเวลาในการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อสร้างเป็นฐานข้อมูล แต่อย่างไรก็ตาม ผลกระทบที่เกิดกับกลุ่มเทคนิค Scene Analysis ซึ่งเกิดจากโครงสร้างของระบบ หรือสภาพแวดล้อมภายในตัวอาคาร (เช่น ตำแหน่งของโนคอ้างอิง หรือคุณลักษณะการแพร่กระจายสัญญาณ) จะมีน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มเทคนิคอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น ถ้าหากผู้ออกแบบเลือกใช้กลุ่มเทคนิค Triangulation สำหรับการระบุตำแหน่งวัตถุ นอกจากระบบจะต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนแล้ว กระบวนการทำงานของกลุ่มนี้ยังต้องมีการสร้างแบบจำลองการลดทอนของสัญญาณ เช่น แบบจำลองการถดถอย (regression model) หรือแบบจำลองที่ใช้สำหรับคำนวณหาระยะทางเสมือนระหว่างวัตถุกับโนคอ้างอิง เช่น แบบจำลองการลดทอน (path loss model) ซึ่งการทำงานดังกล่าวไม่เพียงจะต้องมีการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อใช้สร้างแบบจำลองแล้ว แต่ผู้ออกแบบยังต้องวิเคราะห์ถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับแบบจำลองภายใต้การรับส่งข้อมูลเป็นเส้นทางที่มีสิ่งกีดขวางและไม่มีสิ่งกีดขวาง อีกทั้งยังต้องมีการทดสอบการทำงานของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเพื่อให้แบบจำลองสามารถคำนวณหาระยะทางเสมือนได้อย่างถูกต้อง

หรือกระแม้กระทั่งการเลือกใช้กลุ่มเทคนิค Proximity ระบุตำแหน่งของวัตถุ แม้ว่ากลุ่มเทคนิคดังกล่าวจะมีความง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง แต่สมรรถนะในการระบุตำแหน่งของระบบจะมีค่าน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคกลุ่มอื่น ๆ ซึ่งสามารถบอกได้เพียงตำแหน่งคร่าว ๆ ที่วัตถุตั้งอยู่ โดยค่าความคลาดเคลื่อนของเทคนิคกลุ่มนี้อาจมากถึงรัศมีการครอบคลุมการทำงานของโนคอ้างอิง เช่นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ซึ่งมีรัศมีการทำงานประมาณ 30 เมตรภายในอาคาร (Maneerat, 2012) ดังนั้น ค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่ง

ของกลุ่มเทคนิค Proximity อาจมากถึง 30 เมตร จากความได้เปรียบของกลุ่มเทคนิค Scene Analysis ที่สามารถใช้อุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนต่ำ และมีสมรรถนะในการระบุตำแหน่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดี อีกทั้งมีผลกระทบทางโครงสร้างของระบบน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มเทคนิคอื่น ๆ ด้วยเหตุนี้ วิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้เทคนิคระบุตำแหน่งที่อยู่ในกลุ่มเทคนิค Scene Analysis สำหรับการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้น



ตารางที่ 2.3 ข้อดีและข้อจำกัดของกลุ่มเทคนิคระบุตำแหน่งภายในอาคาร

กลุ่มเทคนิคระบุตำแหน่ง	เทคนิคระบุตำแหน่ง	ข้อดีของเทคนิคระบุตำแหน่ง	ข้อจำกัดของเทคนิคระบุตำแหน่ง
Triangulation (L)	TOA, TDOA, RSS	<ul style="list-style-type: none"> - มีสมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่ดี - โครงสร้างของระบบมีความยืดหยุ่นมากกว่ากลุ่มเทคนิคอื่น ๆ - เวลาในการดำเนินงานรวดเร็วกว่าเทคนิคกลุ่มอื่น ๆ 	<ul style="list-style-type: none"> - สมรรถนะของระบบจะขึ้นอยู่กับความแม่นยำในการ synchronized ระหว่างภาคส่งและภาครับ การกำหนด topology ของเครือข่าย และคุณภาพของพารามิเตอร์ของระบบ
Triangulation (A)	AOA	<ul style="list-style-type: none"> - มีสมรรถนะในการระบุที่ดีและมีความน่าเชื่อถือมากกว่ากลุ่มเทคนิคอื่น ๆ - เหมาะสำหรับการระบุตำแหน่งวัตถุภายในพื้นที่สามมิติ 	<ul style="list-style-type: none"> - อุปกรณ์ภาคส่งและภาครับมีความซับซ้อนสูงเนื่องจากต้องมีการติดตั้งสายอากาศเฉพาะ - การบดบัง และผลกระทบของคลื่นหลายวิถี มีผลต่อสมรรถนะ
Scene Analysis	KNN, Probabilistic, Neural Networks	<ul style="list-style-type: none"> - อุปกรณ์ของระบบมีความซับซ้อนต่ำ - มีผลกระทบจากการวางตำแหน่ง โหนดอ้างอิงในระบบน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มเทคนิคอื่น ๆ 	<ul style="list-style-type: none"> - ใช้ระยะเวลาในการเตรียมการมาก และถ้าหากโครงสร้างของอาคารหรือของระบบเปลี่ยน จะต้องดำเนินการเก็บข้อมูลใหม่ - คุณภาพของข้อมูลที่เก็บรวบรวมได้ มีผลต่อสมรรถนะของระบบ
Proximity	Cell-ID, VLC	<ul style="list-style-type: none"> - ง่ายและสะดวกต่อการนำไปใช้งานจริง - อุปกรณ์ของระบบมีความซับซ้อนต่ำ 	<ul style="list-style-type: none"> - สมรรถนะของระบบจะขึ้นอยู่กับความสามารถของสายอากาศ - มีสมรรถนะความถูกต้องต่ำกว่าเทคนิคกลุ่มอื่น ๆ
Hybrid / Combination	TOA & AOA, Proximity & KNN	<ul style="list-style-type: none"> - ให้สมรรถนะที่ดีกว่าการใช้เทคนิคใดเพียงเทคนิคเดียว - เนื่องจากปัจจัยที่มีผลกระทบต่อเทคนิค A มักจะไม่มีผลต่อเทคนิค B 	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นการเพิ่มเงื่อนงำของปัจจัย และความซับซ้อนให้กับระบบ - บางระบบจำเป็นต้องเพิ่มการติดตั้งฮาร์ดแวร์ (cost เพิ่มขึ้น)

2.2.4 ตัวชี้วัดประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่ง

สมรรถนะ (performance) ของระบบระบุตำแหน่งวัตถุ หรือตัวบ่งชี้ที่แสดงถึงคุณภาพ และประสิทธิภาพของระบบระบุตำแหน่งวัตถุว่าระบบดังกล่าวมีคุณภาพหรือความสามารถในการ ค้นหาตำแหน่งวัตถุมากน้อยเพียงใด โดยค่าสมรรถนะของการระบุตำแหน่งที่พบในปริทัศน์ วรรณกรรมมีดังนี้

2.2.4.1 สมรรถนะความถูกต้อง

สมรรถนะความถูกต้อง (accuracy) คือการบอกระยะความคลาดเคลื่อนระหว่าง ตำแหน่งวัตถุจริงและตำแหน่งวัตถุที่หาได้ ซึ่งมีหน่วยเป็นเมตรหรือฟุต ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่มุ่งเน้น ไปที่การพัฒนาสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งเป็นหลัก เพื่อให้ระบบมีค่าความ คลาดเคลื่อนน้อยที่สุดหรือมีค่าความผิดพลาดที่สามารถยอมรับได้ อย่างไรก็ตามระบบระบุ ตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่มีสมรรถนะความถูกต้องในระบุตำแหน่งที่ดีมาก ๆ มักจะมีข้อ แลกเปลี่ยน (tradeoff) ระหว่างสมรรถนะความถูกต้องกับสมรรถนะชนิดอื่น ๆ ตัวอย่างเช่น ค่าที่ เหมาะสมหรือยอมรับได้ระหว่างสมรรถนะความถูกต้องกับสมรรถนะความซับซ้อนในแง่ของเวลา ที่ใช้ในการประมวลผล เป็นต้น

2.2.4.2 สมรรถนะความแม่นยำ

สมรรถนะความแม่นยำ (precision) หรือความเที่ยงตรง เป็นค่าที่รายงานถึงช่วง ความเชื่อมั่น (confidence interval) หรือเปอร์เซ็นต์ของการระบุตำแหน่งที่จะประสบผลสำเร็จ ส่วนมากนิยมใช้สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างระบบระบุตำแหน่งสองระบบ โดยจะพิจารณาจาก ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะที่คลาดเคลื่อน (Cumulative Distribution Function: CDF) ตัวอย่างเช่น การเปรียบเทียบความแม่นยำของระบบระบุตำแหน่งชนิด ก. ที่มีความแม่นยำของ ตำแหน่ง 80 % ภายใน 3.5 เมตร กับระบบระบุตำแหน่งชนิด ข. ที่มีความแม่นยำของตำแหน่ง 80% ภายใน 5 เมตร ระบบระบุตำแหน่งที่ให้ความแม่นยำที่ดีกว่าคือ ระบบระบุตำแหน่งชนิด ก. (การ ระบุตำแหน่ง 80 ครั้งจาก 100 ครั้งของระบบระบุตำแหน่ง ก. จะมีค่าความผิดพลาดในการระบุ ตำแหน่งไม่เกิน 3.5 เมตร) เป็นต้น

2.2.4.3 ความซับซ้อนในแง่เวลาที่ใช้ในการประมวลผล

ความซับซ้อนในแง่เวลาที่ใช้ในการประมวลผล (run-time complexity) จะบอก เป็นระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลลัพธ์ภายในช่วงการระบุตำแหน่งวัตถุ ถ้าหากระบบระบุ ตำแหน่งวัตถุมีสมรรถนะความซับซ้อนที่ต่ำ ระบบนั้นจะสามารถค้นหาตำแหน่งวัตถุได้รวดเร็วกว่า ระบบระบุตำแหน่งที่มีความซับซ้อนสูง อีกทั้งการพิจารณาสมรรถนะความซับซ้อนในแง่ของเวลา ที่ใช้ในการประมวลผลยังพิจารณาถึงฟังก์ชันการเติบโตทางเวลา (growth in run-time) ซึ่งเป็นค่า

ฟังก์ชันที่ใช้อธิบายแนวโน้มพฤติกรรมการเติบโตทางเวลาของเทคนิคระบุตำแหน่ง ซึ่งใช้สำหรับประเมินสมรรถนะความซับซ้อนของระบบถ้าหากขนาดของพื้นที่ หรือจำนวนของพารามิเตอร์ที่ใช้ในระบบมีมากขึ้น

2.2.4.4 สมรรถนะความคงทน

สมรรถนะความคงทน (robustness) คือความทนทานของระบบระบุตำแหน่งที่ยังคงสามารถทำงานได้อย่างมีสมรรถนะความถูกต้องและความแม่นยำที่ยอมรับได้ภายใต้สภาวะที่ย่ำแย่หรือสภาพแวดล้อมที่มีความแปรปรวน ซึ่งจะพิจารณาจากฟังก์ชันปกติ (function normally) หรือการทำงานปกติกับสภาวะการทำงานที่ผิดปกติของระบบ ตัวอย่างเช่น ระบบระบุตำแหน่ง ค. คิดตั้งโนดอ้างอิงจำนวน 10 โหนดไว้ในส่วนต่าง ๆ ของอาคาร และที่ตำแหน่ง a. ในช่วงเวลาเช้าสามารถวัดค่าความเข้มสัญญาณจากโนดอ้างอิงทั้ง 10 โหนดได้ (สภาวะปกติ) ถัดมาในช่วงเวลาบ่ายทำการวัดค่าความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่งเดียวกันพบว่า ไม่สามารถรับค่าความเข้มสัญญาณจากโนดอ้างอิงตัวครบทั้ง 10 ตัว (สภาวะที่ผิดปกติ) สาเหตุอาจเกิดจากโนดอ้างอิงเสียหรือไม่ทำงาน ดังนั้นการพิจารณาสมรรถนะความคงทนของระบบสามารถทำได้โดย การเปรียบเทียบสมรรถนะความถูกต้องและความแม่นยำในการระบุตำแหน่งของทั้งสองสถานการณ์ว่า สภาวะการทำงานที่ผิดปกติสามารถให้ผลสมรรถนะในการระบุตำแหน่งใกล้เคียงกับสภาวะการทำงานปกติมากน้อยเพียงใด ซึ่งระบบระบุตำแหน่งวัดค่าที่มีสมรรถนะความคงทนที่ดีจะสามารถทำงานได้อย่างมีสมรรถนะภายใต้ทุกสภาวะการทำงานของระบบ

2.2.4.5 สมรรถนะความยืดหยุ่น

สมรรถนะความยืดหยุ่น (scalability) หรือความสามารถในการปรับตัว (adaptability) เป็นค่าที่ใช้บอกความสามารถของระบบระบุตำแหน่งวัดค่าที่มีพื้นที่การทดลองขนาดใหญ่ โดยปกติแล้วเมื่อระยะห่างระหว่างโนดอ้างอิงและโนดวัดค่ามากขึ้น ค่าความเข้มสัญญาณที่โนดวัดค่ารับได้จากโนดอ้างอิงจะมีค่าน้อยลง ดังนั้นถ้าผู้ออกแบบระบบเลือกจำนวนของโนดอ้างอิงไม่เพียงพอหรือไม่ครอบคลุมทั่วทั้งพื้นที่ให้บริการ อาจส่งผลให้พื้นที่ภายในอาคารบางส่วนไม่สามารถรับค่าความเข้มสัญญาณจากโนดอ้างอิงได้ และเป็นสาเหตุทำให้สมรรถนะในการระบุตำแหน่งลดน้อยลง เช่น ในระบบระบุตำแหน่งที่ใช้เทคนิค RSS-Based จะต้องสามารถวัดค่าความเข้มสัญญาณจากโนดอ้างอิงได้อย่างน้อย 3 โหนด เป็นต้น หนึ่งในแนวทางการแก้ปัญหาคือ การกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุด เช่น การพิจารณาการวางโนดอ้างอิงด้วยวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (Binary Integer Linear Programming: BILP) (Aomumpai et al., 2013) เป็นต้น นอกจากนี้ ผู้ออกแบบระบบยังต้องคำนึงถึงส่วนประกอบต่าง ๆ ของระบบ อาทิ

เช่น กำลังส่ง (Transmit power) ชนิดของสายอากาศ และ โครงสร้างภายในอาคาร (LOS, NLOS) เพื่อเพิ่มสมรรถนะสมรรถนะความยืดหยุ่นให้กับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร

2.2.4.6 ภาวะของระบบระบุตำแหน่ง

ภาวะของระบบระบุตำแหน่งหรือเรียกว่า cost ของระบบ เกิดมาจากค่า cost ทางโครงสร้างของระบบ ค่า cost ที่เกิดจากการเพิ่มแบนด์วิดท์ (bandwidth) หรือค่า cost ที่เกิดจากการติดตั้งอุปกรณ์ และเวลาที่ใช้ในการสำรวจพื้นที่ ตลอดจนค่า cost ของเวลาที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ถ้าผู้ออกแบบสามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีรับส่งสัญญาณไร้สายที่ถูกติดตั้งอยู่แล้วภายในอาคารกับระบบระบุตำแหน่ง ระบบนั้นจะสามารถประหยัดค่า cost ที่มาจากโครงสร้างของระบบ และค่า cost ที่มาจากการเพิ่มแบนด์วิดท์ได้ ตัวอย่างเช่น การใช้เทคโนโลยี IEEE 802.11 ที่ถูกติดตั้งอยู่แล้วภายในอาคาร ซึ่งนอกจากจะสามารถใช้ในการรับส่งสัญญาณข้อมูลผ่านการสื่อสารไร้สายได้แล้ว เทคโนโลยีดังกล่าวยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบระบุตำแหน่งวัตถุได้อีกด้วย หรือบางงานวิจัยได้นำเสนอวิธีการลดระยะเวลาในการเก็บข้อมูลค่าความเข้มสัญญาณเพื่อใช้สร้างฐานข้อมูลในช่วงออฟไลน์เฟส ซึ่งเป็นการช่วยลดค่า cost ของเวลาที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาค่า cost ในแง่ของราคาอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่ใช้ต่อหน่วย และพิจารณาค่า cost ของการบริโภคพลังงาน (power consumption) ต่อวัน เพื่อคำนวณค่าไฟฟ้าที่ต้องจ่าย

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่มีในปัจจุบันพบว่า สมรรถนะที่ระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่งานวิจัยส่วนใหญ่พิจารณาคือ สมรรถนะความถูกต้อง และสมรรถนะความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง อย่างไรก็ตาม ความสำคัญของสมรรถนะในการระบุตำแหน่งชนิดอื่น ๆ ยังเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้ระบบระบุตำแหน่งมีประสิทธิภาพและตอบรับกับความต้องการของผู้ใช้งานหรือการทำงานนั้น ๆ ได้ ตัวอย่างเช่น ถ้าระบบระบุตำแหน่งพิจารณาเพียงสมรรถนะความถูกต้องและความแม่นยำโดยไม่พิจารณาสมรรถนะความซับซ้อนในการประมวลผล ระบบดังกล่าวอาจใช้ระยะเวลาในการค้นหาตำแหน่งที่นานเกินไป หรือใช้ความสามารถของหน่วยประมวลผล และหน่วยความจำมากที่เกินความจำเป็น ส่งผลให้ค่า cost ในแง่ของพลังงาน และราคาของอุปกรณ์มีมากขึ้น หรือแม้กระทั่งระบบระบุตำแหน่งที่มีสมรรถนะทั้งความถูกต้องและสมรรถนะความซับซ้อนที่ดี แต่เมื่อเกิดเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิด เช่น อคคีภัย ซึ่งส่งผลให้อุปกรณ์ในระบบบางโนดเสียหายและไม่สามารถใช้งานได้ ถ้าระบบนี้ไม่มีสมรรถนะความคงทนที่ดีหรือยอมรับได้ ระบบดังกล่าวจะไม่สามารถรองรับกับสภาวะการทำงานที่ผิดปกตินี้ได้ และไม่สามารถรักษาสมรรถนะความถูกต้องของระบบให้อยู่ในระดับเดิมได้ เป็นต้น สมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งเหล่านี้จึงเป็น

ตัวชี้วัดสำคัญที่ผู้ออกแบบควรคำนึงถึงว่า ระบบระบุตำแหน่งที่พัฒนาขึ้นจะต้องเผชิญกับปัญหาในรูปแบบใดบ้างหรือมีข้อจำกัดในส่วนใดบ้าง เพื่อให้ระบบระบุตำแหน่งมีประสิทธิภาพตามที่ผู้ออกแบบคาดหวัง ตัวอย่างของสมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่งานวิจัยในปัจจุบันพิจารณา แสดงดังตารางที่ 2.4



ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างของสมรรถนะในการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารของงานวิจัยในปัจจุบัน

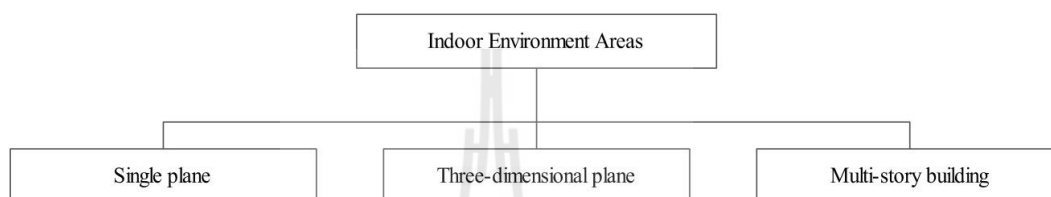
Papers	Accuracy (Ave. error)	Precision	Complexity	Robustness	Scalability	Cost
Conti et al. (2012)	20.2 cm. (Coo.) 22.0 cm. (Non.)	36.4 cm. in 90% (Coo.) 37.4 cm. in 90% (Non.)	Depend on number of nodes in network.	High (in cooperative, UWB)	High (large area for coo.)	Reduce power per node (Coverage) Increase cost of nodes (Price)
Sathyan and Hedley (2013)	1.06 m. (coo.)	1.37 m. in 90% (Coo.)	4.4 ms. per node per time step	High (50% links removed is 1.78 m. in 90%)	High connectivity (Ave. conn. in coo. = 17.35)	Lower computational cost and communication overhead
Segura et al. (2012)	± 1 cm.	≈ 18 cm. in 90%	Extra from local oscillator (LO)	High (by using UWB)	High flexibility by LO	Extra power consumption by LO
Murai et al. (2012)	1.4 m. per VLC	-	-	High by using Laser Range Finder and can operate during a power failure	-	Extra from mobile robot
Kodippili and Dias (2010)	2.55 m. (grid $4m^2$) 1.09 m. (grid $2m^2$)	3 m. in 90%	-	High robust tech. suitable for commercial app.	Large-scale deployment well	Using existing infrastructure (reduce cost)
Fang et al. (2012)	< 1.25 m. (noise- free condition)	1.1 m. in 90%	Higher than base positioning algorithms	High (gives the larger weights in dynamic envir.)	-	-
Kaemarungsi et al. (2013)	0.77 m.	2.8 m. in 92%	Depend on number of grids and RNs (Euclidean dis.)	High (ZigBee signal is less fluctuate than Wi-Fi) (LOS)	Low ($35m^2/4$ RNs)	Time cost from collected during offline phase
Fang et al. (2007)	8 m.	Depend on TX range and boundary nodes	Most expensive (0.68ms per node)	High (tolerate for few neighbors fail)	-	Storage size in kbytes

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างของสมรรถนะในการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารของงานวิจัยในปัจจุบัน (ต่อ)

Papers	Accuracy (Ave. error)	Precision	Complexity	Robustness	Scalability	Cost
Luca et al. (2006)	1.15 m. (for 1 RFID no power)	-	Low complexity from RFID	High for without power data	Sufficiently large (2.78 devices/m ²) Low sensitivity (-24 dBm)	No energy (without power data) 222.3 μ J. Energy consumption (with used)
Kim et al. (2013)	Within a few cm.	-	Extra complexity from VLC system	Estimated dis. effects of radiation directivity and the incidence angle	Low (80cm ²) Limit by NLOS	Low cost receiver Extra cost transmitters system
Li et al. (2005)	2.69 m. for 5WNN (used 16 RNs.)	3.3 m. in 95% for kriging group (used 20 RNs.)	Low workload	Accuracy granularity is around 2–3m., vary propagation envir.	Low (400 m ² / >16 RNs)	Save on training time
Marques et al. (2012)	3.35 m. for Manhattan	-	Low (5.1 ms. per sample for Manhattan)	Affected by the number of filtered samples	High (can used multi-floor envir.)	Low memory requirements
Hung et al. (2010)	< 5 m.	8.5 m. in 90% for BPNN with SIP	-	-	Low (500 m ² / 30 RNs)	Time cost from collected during offline phase
Gansemer et al. (2010)	2.12 - 2.69 m.	4.5 m. in 90% for moving median approach	Trade off between calibration time and location accuracy	High (used moving median filter reduces median location estimation error)	High (can used multi-floor envir.)	Time cost spent for calibration
Al-Ahmadi et al. (2011)	2.27 m.	3 m. in 90%	Depend on number of RSS fingerprints	High (if used large number of fingerprints)	High (can used multi-floor envir.)	Low computational cost by grouping the locations in radio map

2.2.5 การจำแนกประเภทของระบบโดยพิจารณาจากพื้นที่ให้บริการ

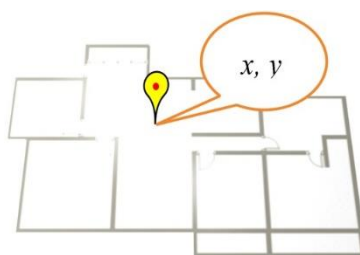
จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมพบว่าระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารสามารถแบ่งประเภทของพื้นที่ระบุตำแหน่งได้เป็น 3 ประเภทคือ หัวข้อ 2.2.5.1 ระบบระบุตำแหน่งภายในระนาบสองมิติ (two-dimensional plane) หัวข้อ 2.2.5.2 ระบบระบุพิกัดภายในพื้นที่ 3 มิติ (three-dimensional plane) และหัวข้อ 2.2.5.3 ระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น (multi-story building) แสดงได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ประเภทของพื้นที่ระบบระบุตำแหน่งภายในอาคาร

2.2.5.1 ระบบระบุตำแหน่งภายในระนาบสองมิติ

สำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุประเภทนี้เป็นกลุ่มงานวิจัยที่ได้รับความนิยมและถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยการระบุตำแหน่งประเภทนี้จะพิจารณาพิกัดทางภาพแบบ x, y โดยตำแหน่งของวัตถุที่หาได้จะถือว่าตั้งอยู่บนพื้นระนาบ x, y แสดงดังรูปที่ 2.15 ระบบระบุตำแหน่งประเภทนี้สามารถทำการทดลองได้จริงและง่ายต่อการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ

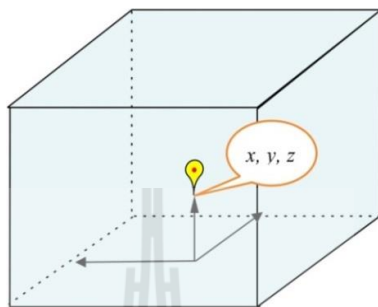


รูปที่ 2.15 ระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในระนาบสองมิติ

2.2.5.2 ระบบระบุพิกัดภายในพื้นที่ 3 มิติ

ประเภทของพื้นที่ระบบระบุตำแหน่งประเภทที่สองคือ ระบบระบุพิกัดภายในพื้นที่ 3 มิติ โดยตำแหน่งที่ได้ของระบบระบุตำแหน่งประเภทนี้คือ พิกัด x, y, z โดยที่พิกัด x, y จะมี

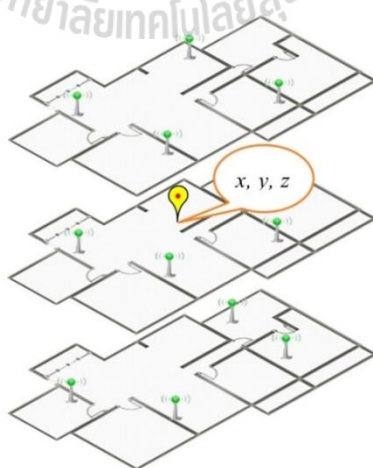
ลักษณะเหมือนกับระบบระบุตำแหน่งภายในบริเวณระนาบเดียว ส่วนพิกัด z จะหมายถึงความสูงที่วัดจากพื้น เช่น การระบุพิกัด x, y, z ภายในห้อง เป็นต้น แสดงดังรูปที่ 2.16 โดยส่วนมากระบบประเภทนี้ยากที่จะทำการทดลองในพื้นที่จริง ดังนั้นพื้นที่ทดสอบของระบบจึงถูกจำลองขึ้นด้วยโปรแกรมจำลอง



รูปที่ 2.16 ระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในพื้นที่ 3 มิติ

2.2.5.3 ระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น

พื้นที่ของระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารประเภทที่สามคือ ระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น ซึ่งเป็นระบบระบุตำแหน่งที่ค้นหาพิกัด $x, y, floor$ โดยที่พิกัด x, y จะมีลักษณะเหมือนกับระบบระบุตำแหน่งภายในบริเวณระนาบเดียว ส่วน $floor$ คือหมายเลขชั้นที่ตำแหน่งวัตถุตั้งอยู่แสดงได้ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น

จากการปฏิสัมพันธ์ที่พบระหว่างระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในระนาบเดียวเป็นระบบระบุตำแหน่งที่ถูกพัฒนามากที่สุด เนื่องจากระบบดังกล่าวเป็นรูปแบบพื้นฐานของการระบุตำแหน่งภายในอาคารแบบทั่วไป ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับรูปแบบการทำงานในด้านต่าง ๆ โดยระบบดังกล่าวมีทั้งการทดลองในสถานที่จริงและการจำลองระบบขึ้นเพื่อทดสอบสมรรถนะของระบบตำแหน่ง อย่างไรก็ตาม จะสังเกตได้ว่าแนวโน้มของระบบระบุตำแหน่งในปัจจุบันได้มุ่งเน้นไปที่การระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น ซึ่งเป็นความท้าทายใหม่ของระบบระบุตำแหน่งวัตถุ เนื่องจากไม่เพียงแต่ระบบจะต้องเผชิญปัญหากับสิ่งกีดขวางที่เป็นผนังหรือประตูภายในชั้นเดียวกัน และปัญหาการลดทอนสัญญาณจากพื้นอาคารระหว่างชั้นแล้ว แต่ระบบยังต้องเผชิญปัญหาความแตกต่างทางโครงสร้างของอาคารในแต่ละชั้น เช่น อาคารที่มีชั้นล่างเป็นลานจอดรถซึ่งเป็นพื้นที่โล่ง และมีชั้นถัดขึ้นไปเป็นสำนักงานซึ่งมีสภาพแวดล้อมที่แออัด ส่งผลให้ลักษณะเฉพาะของสัญญาณในแต่ละชั้นมีความแตกต่างกัน เป็นต้น

นอกจากนี้ความท้าทายของระบบระบุตำแหน่งแบบหลายชั้นยังมีความน่าสนใจมากกว่าระบบระบุตำแหน่งภายในบริเวณระนาบเดียว ซึ่งความผิดพลาดของหมายเลขชั้นอาจนำมาซึ่งตำแหน่งวัตถุที่คลาดเคลื่อนเกินกว่าจะยอมรับได้ เช่น ความผิดพลาดของตำแหน่งวัตถุในระบบระนาบเดียวอาจเกิดขึ้นเพียงไม่กี่เมตร (x, y) ซึ่งอาจคลาดเคลื่อนเพียงแค่ห้องที่วัตถุอยู่ ขณะที่ความผิดพลาดของหมายเลขชั้นอาคารดูเหมือนจะมีความร้ายแรงมากกว่า เนื่องจากถ้าหากระบบระบุตำแหน่งนี้ถูกนำไปใช้กับการช่วยเหลือผู้ประสบภัยในเหตุการณ์ฉุกเฉินต่าง ๆ ที่เวลาและความถูกต้องของตำแหน่งวัตถุเป็นหัวใจสำคัญของการทำงาน ระบบที่ไม่สามารถระบุชั้นได้อย่างถูกต้องอาจนำมาซึ่งความสูญเสียของชีวิตผู้ประสบภัยและของหน่วยกู้ภัยได้ เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างของงานวิจัยในปัจจุบันซึ่งจำแนกตามพื้นที่ให้บริการแสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างของพื้นที่ที่ใช้ในการระบุตำแหน่งวัตถุของงานวิจัยในปัจจุบัน

System types	Techniques Group	Localization algorithm	Applications	Number of node (T/RN)	Space dimension	Experimental	Papers
Single plane	Trilateration (L)	-	Network navigation	5T / 25RN	12 x 12 m ²	Real environment	Conti et al. (2012)
		FACT	Tracking fire fighters	28(T+RN) / 5GSP	80 x 80 m ²	Real environment & Simulation	Sathyan and Hedley (2013)
		RSS-Based	General building	5TX / 31RX	40 x 40 m ²	Real environment	Gentile and Kik (2007)
			Animal Tracking System	1T / 4RN	60 x 60 m ²	Real environment	Joshi et al. (2008)
		TOA/TDOA	Robot navigation	1T / 3RN	60 m ²	Real environment	Segura et al. (2012)
		TDOA	Emergency services	1T / 4RN	50 x 50 m ²	Real environment/ Simulation	Xu et al. (2008)
			Indoor positioning services	1T / 3RN	16 x 16 m ²	Real environment	Xu et al. (2011)
			Specific medical application	16motes / 1BS	40 x 40 m ²	Real environment	Sghaier et al. (2011)
		MMSE approach	Patient monitors	1T / 16RN	300 m ²	Real environment	Cheng and Lin (2009)
		MDS / MLE / MDS-MLE	Emergency event	1T / 4RN	80 x 80 m ²	Simulation	Li (2007)

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างของพื้นที่ที่ใช้ในการระบุตำแหน่งวัตถุของงานวิจัยในปัจจุบัน (ต่อ)

System types	Techniques Group	Localization algorithm	Applications	Number of node (T/RN)	Space dimension	Experimental	Papers	
Single plane	Trilateration (L)	TOA	sensor positioning applications	1T / 4RN	2 x 2 m ²	Simulation	Wang (2012)	
		GNSS-based approach	Indoor positioning services	1RX / 4TX	34 x 60 m ²	Real environment/ Simulation	Wang et al. (2013)	
		RTOF	Logistics, Automotive applications	1TX / 1RX	2 x 2 m ²	Real environment	Ussmueller et al. (2012)	
		VLC based on IM/DD	Indoor positioning services	1T / 3RN	80 x 80 cm ²	Real environment	Kim et al. (2013)	
	Trilateration (A)	CAOA	Indoor positioning services	1T / 10RN	100 x 100 m ²	Simulation	Brida et al. (2010)	
	Scene Analysis	Euclidean distance	Indoor positioning services	1T / 4(RN+Gate)	5 x 7 m ²	Real environment	Kaemarungsi et al. (2013)	
		Ensemble approach/ Gradient/ MSD	Indoor positioning services	1T / 8RN	14 x 14 m ²	Real environment	Fang et al. (2012)	
	Scene Analysis & Trilateration (L)	3NN & RSS-Based	General commercial applications	1T / 8RN	500m ²	Real environment	Kodippili and Dias (2010)	
	Proximity	VLC coverage	HOSPI		-	In hospital	Real environment	Murai et al. (2012)
			Extension of position service area		1T / 4Relay /1RN	77 x 20 m ²	Real environment	Yong and Kavehrad (2012)

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างของพื้นที่ที่ใช้ในการระบุตำแหน่งวัตถุของงานวิจัยในปัจจุบัน (ต่อ)

System types	Techniques Group	Localization algorithm	Applications	Number of node (T/ RN)	Space dimension	Experimental	Papers
Single plane/ 3Dimension	Scene Analysis	Isolines / Euclidean	Digital museum guides	1T / 15AP	2000 m ² (two floors)	Real environment	Gansemer et al. (2009)
3Dimension	Trilateration (L)	TOA-VLC	Indoor positioning services	1T / 1LED	height 2.5 m.	Simulation	Wang et al. (2013)
	Scene Analysis	4NN	Monitoring and Control applications	1T / 8RN	15 x 13 x 10 m ³	Real environment	Bal et al. (2010)
Multi-Floor	Scene Analysis	Fingerprint techniques	General commercial applications	1T / 7RN	270 m ² per floors (2 floors)	Real environment/ Simulation	Esposito et al. (2009)
		NN	Object tracking and Security control	1T / -	60 x 40 m ² per floors (2 floors)	Real environment	Wang et al. (2010)
		Euclidean with MLEE	Indoor applications	1T / 24BS	324 m ² per floors (3 floors)	Real environment	Gansemer et al. (2010)
		KNN / Group variance	Location-aware applications	1T / 50AP	3 floors	Real environment	Aleshly et al. (2011)
		Prob. (Bayesian graphical models)	Context-aware services	1T / -	36 x 30 m ² per floors (2 floors)	Real environment	Al-Ahmadi et al. (2011)
	Trilateration (L) & Scene Analysis	Virtual Aps & Weighted Screening	Indoor positioning services	1T / 51AP	60 x 25 m ² per floors (8floors)	Real environment	Liu and Yang (2011)
	Proximity	AP coverage	Emergency services	-	In building	Real environment	Rüppel et al. (2010)

2.3 ความน่าเชื่อถือของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร

ความน่าเชื่อถือของระบบ (system reliability) สามารถนิยามในความหมายเดียวกันกับคงทนของระบบ (system robustness) ซึ่งบ่งชี้ถึงความน่าเชื่อถือ (reliability) ความเชื่อมั่นของระบบ (confidentiality) ความสมบูรณ์ (integrity) หรือความสามารถของระบบที่เติมเต็มรูปแบบการทำงานภายใต้สถานการณ์ที่ไม่เป็นมิตรของสิ่งแวดล้อม (hostile environments) หรือภายใต้การถูกคุกคามหรือถูกโจมตี (attacked) จากโหนดที่ไม่หวังดี (malicious node) (Boukerche et al., 2008) หรือแม้กระทั่งภายใต้การล้มเหลวของโหนด (node failures) หรืออุบัติเหตุที่ไม่คาดคิด (accidents) (Wang, 2009) เช่น การล้มของโหนดภายในระบบซึ่งอาจเกิดจากความบกพร่องของฮาร์ดแวร์ (hardware failures) ความผิดพลาดของซอฟต์แวร์ (software errors) การเชื่อมต่อที่ล้มเหลว (loss of wireless/wired links) หรือภัยพิบัติทางธรรมชาติ (Dharmaraja et al., 2008) เป็นต้น ตัวอย่างของระบบระบุตำแหน่งที่ตกอยู่ในแวดล้อมที่ไม่เป็นมิตร เช่น สถานการณ์ที่โหนดอ้างอิงบางโหนดในระบบไม่สามารถทำงานได้อย่างปรกติ เกิดจากอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์เกิดการขัดข้อง ส่งผลให้โหนดอ้างอิงดังกล่าวไม่สามารถใช้งานได้ และทำให้โหนดอ้างอิงขาดความน่าเชื่อถือและกลายเป็นโหนดที่ไม่หวังดี ด้วยเหตุนี้ ระบบระบุตำแหน่งที่มีสมรรถนะความคงทนที่ดีจะเป็นระบบที่ให้ความน่าเชื่อถือ และสามารถรับประกันการทำงานทั้งภายใต้สถานการณ์ปรกติและผิดปกติได้

สำหรับในบทนี้ผู้วิจัยจะให้ภาพรวมของความน่าเชื่อถือสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร ซึ่งประกอบด้วย หัวข้อ 2.3.1 องค์ประกอบสำคัญที่เป็นต้นเหตุทำให้ระบบระบุตำแหน่งขาดความน่าเชื่อถือ และหัวข้อ 2.3.2 แนวทางการพัฒนาสมรรถนะความคงทนของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร

2.3.1 องค์ประกอบสำคัญที่เป็นต้นเหตุทำให้ระบบขาดความน่าเชื่อถือ

องค์ประกอบสำคัญของระบบระบุตำแหน่งวัตถุที่สามารถเป็นต้นเหตุให้ระบบระบุตำแหน่งตกอยู่ภายใต้สถานะที่ไม่เป็นมิตรของสิ่งแวดล้อม หรือสถานะที่ถูกคุกคามหรือถูกโจมตีจากโหนดที่ไม่หวังดี แบ่งออกเป็น 3 องค์ประกอบคือ ประมาณข้อมูลระยะทางหรือมุม (distance/Angle estimation) การคำนวณหาตำแหน่ง (position computation) และเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุ (localization algorithm) อธิบายได้ดังนี้ (Boukerche et al., 2008)

2.3.1.1 ประมาณข้อมูลระยะทางหรือมุม

คือองค์ประกอบที่เกี่ยวกับการประมาณข้อมูลระยะทางระหว่างโหนด อาทิเช่น ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้ ค่าเวลาที่ใช้ในการเดินทางของสัญญาณ ค่าความแตกต่างของเวลาใช้ในการเดินทางของสัญญาณ และค่ามุมของสัญญาณที่เดินทางมาถึง เป็นต้น ซึ่งความผิดพลาดของ

ข้อมูลดังกล่าวอาจมีผลกระทบมาจากการเพิ่มหรือลดกำลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูล ความล่าช้าของสัญญาณ และสภาพแวดล้อมที่ถูกบดบังจากสิ่งกีดขวางภายในอาคาร หรือการเปลี่ยนแปลงของสื่อทางกายภาพ (physical medium) เช่น สัญญาณรบกวน สิ่งกีดขวาง หรือคลื่นไฟ เป็นต้น

2.3.1.2 การคำนวณหาตำแหน่ง

คือองค์ประกอบของการคำนวณหาตำแหน่งซึ่งอยู่บนพื้นฐานของการใช้ข้อมูลที่ได้จากองค์ประกอบแรก เช่น การใช้งานกลุ่มเทคนิค Triangulation ที่มีการทำงานแบบร่วมกัน (cooperative) เป็นต้น ดังนั้นความผิดพลาดของโนดหนึ่งจะถูกส่งต่อไปยังอีกโนด ถ้าหากโนดต้นทางหรือ โนดแรกไม่สามารถคำนวณหาตำแหน่งได้อย่างถูกต้อง

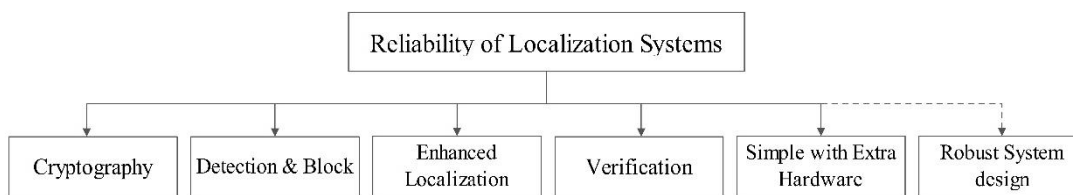
2.3.1.3 เทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุ

คือองค์ประกอบหลักของระบบระบุตำแหน่งซึ่งจะทำหน้าที่จัดการข้อมูลที่รวบรวมได้จากโนดทั้งหมดในระบบเพื่อประมาณตำแหน่งของ โนดวัตถุ ในองค์ประกอบนี้การคำนวณที่มีช่องโหว่จะส่งผลกระทบไปยังส่วนต่าง ๆ ของระบบ และเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้โนดเกิดความคลุมเครือ (Boukerche et al., 2008)

ดังนั้นจะสังเกตได้ว่าระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารสามารถถูกโจมตีจากความคลุมเครือด้วยหลายปัจจัย ซึ่งพฤติกรรมความผิดปกติที่เล็กน้อยอาจนำไปสู่ผลกระทบต่อระบบระบุตำแหน่งที่ให้ค่าความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งที่แย่ เช่น การเกิดความคลุมเครือของระยะทางเสมือนระหว่าง โนดวัตถุและ โนดอ้างอิง ส่งผลให้ตำแหน่งที่คำนวณได้จากเทคนิคระบุตำแหน่งมีความคลาดเคลื่อน และตำแหน่งที่มีความผิดพลาดดังกล่าวอาจถูกส่งต่อไปยังส่วนอื่น ๆ ในระบบ เช่น ส่วนควบคุมกลาง หรือ โนดวัตถุข้างเคียงที่ทำงานแบบร่วมกัน ซึ่งผลลัพธ์นี้จะส่งผลให้ระบบระบุตำแหน่งวัตถุมีสมรรถนะในการทำงานที่ลดลงและขาดความน่าเชื่อถือ

2.3.2 แนวทางการพัฒนาความคงทนของระบบระบุตำแหน่งวัตถุ

จากปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับความน่าเชื่อถือของระบบระบุตำแหน่งพบว่าแนวทางในการพัฒนาสมรรถนะความคงทนของระบบระบุตำแหน่งให้สามารถต่อกรหรือรองรับการทำงานภายใต้สถานการณ์ที่ไม่เป็นมิตรหรือสถานการณ์ที่ไม่ปกติ แบ่งออกเป็น 5 แนวทาง (Boukerche et al., 2008) แสดงได้ดังรูปที่ 2.18 ซึ่งแต่ละแนวทางอธิบายได้ดังนี้



รูปที่ 2.18 แนวทางการพัฒนาของระบบระบุตำแหน่งที่พิจารณาสมรรถนะความคงทน

2.3.2.1 เพิ่มความน่าเชื่อถือด้วยการเข้ารหัสข้อมูล

การเพิ่มความน่าเชื่อถือด้วยการเข้ารหัสข้อมูล (reliable through cryptography) เป็นวิธีการเข้ารหัสข้อมูลที่ใช้เพื่อเพิ่มความถูกต้องให้กับการรับส่งข้อมูล โดยมีการยืนยันตัวตนของโหนดที่เข้าร่วม ซึ่งช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือของโหนดและยังป้องกันความคลุมเครือของโหนดที่เกิดความสับสนที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลในเครือข่าย (Boukerche et al., 2008)

2.3.2.2 การตรวจจับและป้องกันเหตุการณ์ที่ผิดปกติ

การตรวจจับและป้องกันเหตุการณ์ที่ผิดปกติ (misbehavior detection and block) เป็นแนวทางการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งที่ได้รับความนิยมอย่างมาก แนวคิดของการพัฒนาคือออกแบบกลไกการทำงานของเทคนิคให้สามารถตรวจจับความผิดปกติของโหนดอ้างอิงที่คลุมเครือ และไม่นำโหนดดังกล่าวมาร่วมพิจารณาในการระบุตำแหน่ง เช่น งานวิจัย Laoudias et al. (2011) ได้นำเสนอวิธีการตรวจจับและกำจัดค่าผิดปกติ (outlier detection and elimination) ของค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโหนดอ้างอิงที่มีความคลุมเครือ หรือจำแนกโหนดอ้างอิงที่มีความคลุมเครือในระบบระบุตำแหน่งด้วยค่าเริ่มต้น (threshold) (Meng et al., 2011) (Zhang, 2011)

2.3.2.3 การพัฒนาระบบระบุตำแหน่งให้มีความคงทน

การพัฒนาระบบระบุตำแหน่งให้มีความคงทน (robust position computation) เป็นการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งโดยจะสมมติฐานว่ามีการ โจมตีจากโหนดอ้างอิงที่คลุมเครือตลอดเวลา หรืออีกความหมายคือระบบจะอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ไม่เป็นมิตรตลอดเวลา ซึ่งจะไม่มีการควบคุมการตรวจจับหรือป้องกันเหมือนแนวทางก่อนหน้า ด้วยเหตุนี้เทคนิคระบุตำแหน่งจะต้องสามารถทำงานภายใต้การโจมตีของโหนดที่คลุมเครือได้ การพัฒนาระบบลักษณะนี้เรียกอีกอย่างว่า Enhanced localization algorithm (Conti et al., 2012) (Chia et al., 2013) (Long et al., 2013) (Sathyan and Hedley, 2013)

2.3.2.4 การตรวจสอบตำแหน่ง

หลายงานวิจัยพิจารณาความน่าเชื่อถือของตำแหน่งวัตถุที่คำนวณได้ ซึ่งเป็นการพิจารณาเพียงแค่ผลลัพธ์สุดท้ายของตำแหน่งที่คำนวณได้ โดยไม่มีการตรวจจับหรือหลีกเลี่ยงการพิจารณาโนดอ้างอิงที่คลุมเครือ แนวทางนี้ใช้วิธีการตรวจสอบว่าตำแหน่งสุดท้ายที่ประมาณได้ยังคงอยู่ภายในพื้นที่ที่ครอบอยู่ (claimed region) หรือมีความสอดคล้องกับข้อมูลตำแหน่งที่รวบรวมได้หรือไม่ ซึ่งเรียกแนวทางการพัฒนานี้ว่า การตรวจสอบตำแหน่ง (location verification) เช่น ในงานวิจัย Boukerche et al. (2008) ได้ใช้วิธีการ LAD (Localization Anomaly Detect) เพื่อตรวจสอบว่าตำแหน่งที่คำนวณได้มีความคงเส้นคงวา (consistent) หรือไม่ โดยอาศัยข้อมูลเบื้องต้นของแบบจำลองและค่าที่สังเกตได้ เป็นต้น

2.3.2.5 การพัฒนาฮาร์ดแวร์ให้มีความคงทน

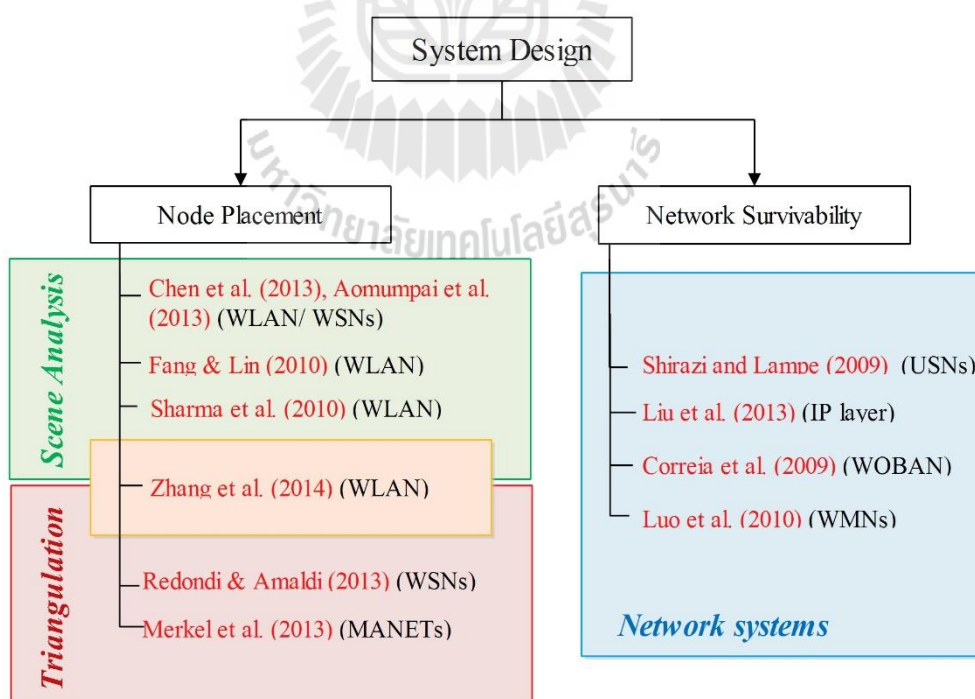
การพัฒนาฮาร์ดแวร์ให้มีความคงทน (simple and extra hardware) เป็นแนวทางที่อาศัยการทำงานของเทคนิคที่มีความง่ายและไม่ซับซ้อน เช่น การระบุตำแหน่งของกลุ่มเทคนิค Proximity ที่มีจะทำให้สมรรถนะความถูกต้องต่ำกว่าเทคนิคระบุตำแหน่งในกลุ่มอื่น ๆ ด้วยเหตุนี้สมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่ต่ำของเทคนิคจะถูกชดเชยด้วยอุปกรณ์ที่มีความแม่นยำในการประมาณระยะทาง เช่น การใช้สายอากาศที่มีประสิทธิภาพการทำงานสูงซึ่งสามารถส่งข้อมูลแบบ asymmetric transmission ซึ่งสามารถบอกภาค (sector) ของสายอากาศที่ส่งแพ็คเก็ตนั้นมาได้ อย่างแม่นยำ โดยการใช้อุปกรณ์ดังกล่าวจะช่วยป้องกันการความผิดพลาดในการประมาณระยะทางได้ (Boukerche et al., 2008) แต่อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าระบบจะสามารถให้สมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งที่ดี แต่อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ใช้จะมีความซับซ้อนสูง ส่งผลให้อุปกรณ์มีขนาดใหญ่ และมีราคาแพง

จากการปฏิสัมพันธ์ของงานที่เกี่ยวกับความน่าเชื่อถือหรือความคงทนของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารจะสังเกตได้ว่า ทั้ง 5 แนวทางการพัฒนาข้างต้นเป็นแนวทางการพัฒนาความน่าเชื่อถือที่ถูกดำเนินการในช่วงการระบุตำแหน่ง ซึ่งจากการสำรวจปฏิสัมพันธ์ของงานยังไม่พบงานวิจัยใดในปัจจุบันที่พิจารณาการพัฒนาความน่าเชื่อถือในขั้นตอนการออกแบบระบบให้สามารถรองรับการทำงานที่ผิดปกติ เช่น การเสียบของโนดอ้างอิง ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงได้เล็งเห็นความสำคัญของการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุในขั้นตอนการออกแบบ อย่างไรก็ตามความสำคัญของการพัฒนาและปรับปรุงขั้นตอนการทำงานทั้งสอง ควรถูกพิจารณาและดำเนินการไปพร้อม ๆ กัน

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบระบบ

แนวทางการพัฒนาสมรรถนะระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารสามารถแบ่งได้ 2 แนวทางคือ 1) การพัฒนาการออกแบบระบบ (system design) และ 2) การพัฒนากระบวนการค้นหาตำแหน่งของระบบ (positioning phase) จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมพบว่า ยังไม่มีงานวิจัยใดในปัจจุบันที่พิจารณาการพัฒนาการออกแบบระบบเพื่อทำให้ระบบระบุตำแหน่งมีสมรรถนะความคงทนที่ดี ด้วยเหตุนี้ เพื่อให้เข้าใจถึงวิธีการออกแบบระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร และเข้าใจถึงวิธีการออกแบบเครือข่ายที่สามารถรองรับการล่มของโหนดในระบบ ในบทนี้ผู้วิจัยจึงได้ทำการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมเกี่ยวกับการออกแบบระบบในลักษณะต่าง ๆ ซึ่งแบ่งได้ 2 กลุ่มคือ หัวข้อ 2.4.1 การออกแบบการวางตำแหน่งของโหนดอ้างอิงในระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร และหัวข้อ 2.4.2 การออกแบบเครือข่ายที่มีความทนทานต่อการล้มเหลวหรือการไม่ทำงานของบางอุปกรณ์ในระบบ แผนภาพการจำแนกปริทัศน์วรรณกรรมเกี่ยวกับการพัฒนาการออกแบบระบบแสดงได้ดังรูปที่ 2.19

หมายเหตุ การสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาในส่วนขั้นตอนที่สอง หรือการพัฒนากระบวนการค้นหาตำแหน่งจะอธิบายในหัวข้อ 2.5



รูปที่ 2.19 ปริทัศน์วรรณกรรมเกี่ยวกับการออกแบบระบบ

2.4.1 การออกแบบการวางตำแหน่งของโนดอ้างอิงในระบบระบุตำแหน่ง

โครงสร้างพื้นฐานของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารประกอบไปด้วยอุปกรณ์พื้นฐาน 2 ชนิดคือ โนดอ้างอิง และ โนดวัตถุ (target node) โนดอ้างอิงหรืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นตำแหน่งอ้างอิงจะถูกติดตั้งอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของอาคาร ทำหน้าที่ให้ค่าความเข้มสัญญาณกับโนดวัตถุ ขณะที่โนดวัตถุหรืออุปกรณ์ทำหน้าที่เป็นตำแหน่งวัตถุ คือตำแหน่งที่ต้องการทราบพิกัดซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ เมื่อใดก็ตามที่โนดวัตถุต้องการทราบพิกัด โนดวัตถุจะทำการเก็บรวบรวมค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงภายในพื้นที่ให้บริการ และนำข้อมูลที่ได้ไปประมวลผลหาตำแหน่งด้วยเทคนิคระบุตำแหน่งชนิดต่าง ๆ อาทิเช่น KNN หรือ TOA เป็นต้น ดังนั้นจะสังเกตได้ว่า ไม่ว่าจะระบบจะเลือกใช้การระบุตำแหน่งด้วยกลุ่มเทคนิคใด (กลุ่มเทคนิค Scene Analysis หรือกลุ่มเทคนิค Triangulation) ค่าความเข้มสัญญาณที่โนดวัตถุรับได้จากโนดอ้างอิงจะเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลกระทบต่อตำแหน่งที่คำนวณได้ และส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่ง ด้วยเหตุนี้ การพัฒนาวิธีการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงเพื่อให้ระบบระบุตำแหน่งมีสมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่ดี จึงเป็นประเด็นสำคัญที่ผู้ออกแบบระบบไม่ควรมองข้าม

เช่น งานวิจัยที่ Khauphung et al. (2008) ได้ศึกษาและวิเคราะห์ถึงผลกระทบของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่ใช้เทคนิคกลุ่ม Scene Analysis ที่ตกอยู่ภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงในระบบไม่ทำงาน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า การเสียของโนดอ้างอิง 50% ในระบบ (เสีย 9 โนดจาก 17 โนด) ค่าความแม่นยำที่ 90% จะแย่กว่าสภาวะปรกติมากถึง 4.6 เท่า (ความแม่นยำที่ 90% ภายใน 23 เมตรจากสภาวะปรกติ 5 เมตร) หรือในงานวิจัย Baala et al. (2009) ได้ศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดจากการวางตำแหน่งของโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร และทำการวิเคราะห์ผลสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งที่เกิดขึ้นเมื่อรูปแบบการวางตำแหน่งของโนดอ้างอิงมีลักษณะการวางแบบสมมาตรและแบบอสมมาตร จากผลการทดลองช่วยยืนยันให้เห็นถึงความสำคัญของการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร ถ้าหากผู้ออกแบบไม่คำนึงถึงการวางตำแหน่งของโนดอ้างอิงที่เหมาะสมสมรรถนะในการระบุตำแหน่งของระบบอาจแยกลงหลายเท่า (งานวิจัยดังกล่าวมีค่าความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งเพิ่มขึ้นถึง 2 เท่าในกรณีที่วางแบบอสมมาตร)

จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพิจารณาการกำหนดตำแหน่งของโนดอ้างอิง สามารถแบ่งกลุ่มงานวิจัยได้ 2 กลุ่ม ตามประเภทของเทคนิคระบุตำแหน่งที่ใช้ งาน คือ 2.4.1.1) กลุ่มเทคนิค Scene Analysis และ 2.4.1.2) กลุ่มเทคนิค Triangulation

2.4.1.1 การออกแบบการวางโน้ดอ้างอิงสำหรับกลุ่มเทคนิค Scene Analysis

งานวิจัยที่พิจารณาเกี่ยวกับการวางตำแหน่ง โน้ดอ้างอิงสำหรับการระบุตำแหน่ง ด้วยกลุ่มเทคนิค Scene Analysis มีวัตถุประสงค์ของการเลือกติดตั้ง โน้ดอ้างอิงที่แตกต่างกัน อาทิ เช่น การกำหนดตำแหน่ง โน้ดอ้างอิงโดยพิจารณาค่าความเข้มสัญญาณที่สามารถครอบคลุมได้ทั่วพื้นที่บริการ (Aomumpai et al., 2013) (Chen et al., 2013) การกำหนดตำแหน่ง โน้ดอ้างอิงโดยพิจารณาการรับประกับคุณภาพของสัญญาณที่ดีที่สุด (Fang and Lin, 2010) การกำหนดตำแหน่ง โน้ดอ้างอิงโดยพิจารณาการลดจำนวนความซ้ำซ้อนของฐานข้อมูลให้น้อยที่สุด (Sharma et al., 2010) หรือการกำหนดตำแหน่ง โน้ดอ้างอิงโดยพิจารณาค่าความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งที่น้อยที่สุด (Zhang et al., 2014) เป็นต้น

งานวิจัย Chen et al. (2013) และ Aomumpai et al. (2013) มีวัตถุประสงค์ในการเลือกติดตั้ง โน้ดอ้างอิง 2 วัตถุประสงค์ โดยทั้งสองงานวิจัยมีวัตถุประสงค์แรกเหมือนกันคือ ต้องการจำนวน โน้ดอ้างอิงน้อยที่สุดซึ่งเพียงพอต่อระบบและมีสัญญาณครอบคลุมทั่วพื้นที่บริการ ขณะที่วัตถุประสงค์ที่สองของทั้งสองงานวิจัยมีความแตกต่างกัน โดยงานวิจัย Chen et al. (2013) ต้องการได้ค่าฟังก์ชัน fingerprint difference ที่มากที่สุด ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่บ่งชี้ถึงความแตกต่างของค่าความเข้มสัญญาณระหว่างตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์ ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกัน เนื่องจากความคล้ายคลึงกันของค่าความเข้มสัญญาณระหว่างสองฟิงค์จะนำไปสู่ความผิดพลาดในการจำแนกความแตกต่างของกระบวนการจับคู่ของเทคนิคระบุตำแหน่ง ในขณะที่วัตถุประสงค์ที่สองของงานวิจัย Aomumpai et al. (2013) คือ ต้องการได้ค่าที่มากที่สุดของผลรวมค่าความเข้มสัญญาณสูงสุดที่ตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์ที่ได้รับจากโน้ดอ้างอิง ซึ่งเป็นการกำหนดตำแหน่งของโน้ดอ้างอิงที่สามารถทำให้ทุกตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์ได้รับผลรวมของค่าความเข้มสัญญาณสูงสุดหรือดีที่สุด เนื่องจากความแปรปรวนของค่าความเข้มสัญญาณมีผลโดยตรงต่อสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่ง ดังนั้นการได้มาของผลรวมค่าความเข้มสัญญาณสูงสุดจะช่วยลดผลกระทบดังกล่าวได้ (Baala et al., 2009) โดยวิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดที่ทั้งสองงานวิจัยเลือกใช้คือ การจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing: SA) ซึ่งเป็นวิธีการค้นหาผลลัพธ์แบบเฉพาะที่ (local search) โดยจะทำงานแบบวนซ้ำและค้นหาผลเฉลยไปเรื่อย ๆ จนกว่าจะได้ผลลัพธ์ที่พอใจ ซึ่งใช้แนวคิดของการลดอุณหภูมิระหว่างการหลอมโลหะเพื่อให้ได้โลหะที่อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมที่สุดหรือมีความเหนียวและไม่เปราะ

งานวิจัย Fang and Lin (2010) Sharma et al. (2010) และ Zhang et al. (2014) จะไม่มีวัตถุประสงค์การค้นหาจำนวนของโน้ดอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุดภายในพื้นที่บริการเหมือนกับสองงานวิจัยข้างต้น แต่แทนที่ด้วยการกำหนดเงื่อนไขจำนวนของโน้ดอ้างอิงที่ต้องการติดตั้งไว้

ก่อนล่วงหน้า โดยวัตถุประสงค์ในการเลือกตำแหน่งโนดอ้างอิงของงานวิจัย Fang and Lin (2010) คือ ต้องการได้ค่าฟังก์ชันผลรวมของจำนวนความคล้ายคลึงของฟิงเกอร์ปรี้นท์ (fingerprint similar) ที่น้อยที่สุด ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่บ่งชี้ถึงจำนวนความซ้ำซ้อนของค่าความเข้มสัญญาณระหว่างตำแหน่ง ฟิงเกอร์ปรี้นท์ที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกัน หรืออีกความหมายคือ เป็นค่าฟังก์ชันที่บอกถึงจำนวน ความซ้ำซ้อนฐานข้อมูล ด้วยเหตุนี้การพิจารณาค่าฟังก์ชันดังกล่าวจึงเป็นการช่วยลดความ ผิดพลาดในการทำงานของกระบวนการจับคู่ของเทคนิคระบุตำแหน่ง โดยงานวิจัยดังกล่าวเลือกใช้ วิธีการ SA สำหรับการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด งานวิจัยที่ Sharma et al. (2010) มี วัตถุประสงค์ในการกำหนดตำแหน่งโนดอ้างอิงสองวัตถุประสงค์คือ 1) ต้องการได้ค่าสัญญาณ เฉลี่ยที่มากที่สุด และ 2) ต้องการได้สัญญาณรบกวนที่น้อยที่สุด หรืออีกความหมายคือ งานวิจัย Sharma et al. (2010) มีวัตถุประสงค์การกำหนดตำแหน่งโนดอ้างอิงที่ต้องการได้ค่าที่มากที่สุดของ ค่าอัตราส่วนของสัญญาณระหว่างสัญญาณที่ต้องการต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio: SNR) เพื่อรับประกันคุณภาพของค่าความเข้มสัญญาณภายในพื้นที่บริการ งานวิจัยที่ Zhang et al. (2014) มีวัตถุประสงค์ในการกำหนดตำแหน่งโนดอ้างอิงสองวัตถุประสงค์คือ 1) ต้องการได้ค่าที่ น้อยที่สุดของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการระบุตำแหน่ง และ 2) ต้องการได้ค่าที่มากที่สุดของ ค่าสัญญาณเฉลี่ยที่สามารถครอบคลุมทั่วพื้นที่บริการ โดยมีเงื่อนไขการรับประกันคุณภาพของการ ในบริการคือ ค่าความเข้มสัญญาณที่มากที่สุดสามอันดับแรกที่ทุกตำแหน่งฟิงเกอร์ปรี้นท์ที่ได้รับ จะต้องมากกว่าค่าเริ่มต้นที่กำหนดไว้ และวิธีการเลือกวางตำแหน่งโนดอ้างอิงของงานวิจัยนี้ สามารถรองรับการทำงานได้ทั้งสองกลุ่มเทคนิค (กลุ่มเทคนิค Scene Analysis และกลุ่มเทคนิค Triangulation) สำหรับการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของงานดังกล่าว เลือกใช้ขั้นตอนวิธีเชิง พันธุกรรม (Genetic Algorithms: GA) ที่อาศัยหลักการจากทฤษฎีวิวัฒนาการทางชีววิทยา และ รูปแบบการคัดเลือกตามธรรมชาติของสิ่งมีชีวิต โดยสิ่งมีชีวิตที่แข็งแกร่งที่สุด (หรือผลลัพธ์ที่ เหมาะสมที่สุด) จะสามารถดำรงอยู่รอดได้ในธรรมชาติ

2.4.1.2 การออกแบบการวางโนดอ้างอิงสำหรับกลุ่มเทคนิค Triangulation

งานวิจัยที่พิจารณาเกี่ยวกับการวางแผนการเลือกตำแหน่งโนดอ้างอิงสำหรับการ ระบุตำแหน่งด้วยกลุ่มเทคนิค Triangulation มีวัตถุประสงค์ของการเลือกติดตั้งโนดอ้างอิงใน แนวทางเดียวกันคือ การกำหนดตำแหน่งโนดอ้างอิงโดยพิจารณาการลดค่าความผิดพลาดในการ ระบุตำแหน่งที่น้อยที่สุด (Redondi and Amaldi, 2013) (Merkel et al., 2013)

งานวิจัย Redondi and Amaldi (2013) และ Merkel et al. (2013) มีวัตถุประสงค์ ในการเลือกติดตั้งโนดอ้างอิงเหมือนกันคือ ต้องการได้ค่าที่น้อยที่สุดของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย

ของการระบุตำแหน่ง และงานวิจัยทั้งสองจะไม่มีวัตถุประสงค์การค้นหาจำนวนของโนดอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุดภายในพื้นที่ให้บริการ ซึ่งจำนวนโนดอ้างอิงจะถูกกำหนดไว้ก่อนหน้า โดยเป็นเงื่อนไขของต้นทุนที่จำกัด นั่นคือมีจำนวนของโนดอ้างอิงที่สามารถติดตั้งได้จำกัด นอกจากนั้นในงานวิจัย Redondi and Amaldi (2013) มีเงื่อนไขกำหนดว่าตำแหน่งที่สามารถติดตั้งโนดอ้างอิงจะต้องติดตั้งอยู่บนกำแพงของอาคารเท่านั้น ซึ่งการติดตั้งดังกล่าวแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ การติดตั้งบนกำแพงแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete) หรือติดตั้งบนจุดที่กำหนดไว้ และการติดตั้งบนกำแพงแบบต่อเนื่อง (continuous) โดยงานวิจัยดังกล่าวเลือกใช้วิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการค้นหาแบบทาบู (Tabu search) ซึ่งเป็นการค้นหาผลลัพธ์แบบวิธีโคจรตามเส้นทาง ผลลัพธ์ที่ถูกยอมรับแล้วในรอบทำงานปัจจุบันจะถูกบันทึกไว้ในรายการต้องห้าม (tabu list) เพื่อหลีกเลี่ยงการพิจารณาปัญหาซ้ำในรอบการค้นหาถัดไป งานวิจัยที่ Merkel et al. (2013) กำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่รองรับการระบุตำแหน่งวัตถุที่ไม่อยู่นิ่ง หรือรูปแบบการติดตามวัตถุ (tracking) โดยเลือกใช้วิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธี GA โดยทำการเปรียบเทียบการใช้ค่าฟังก์ชันการประเมิน (fitness function) ของ 4 ฟังก์ชัน ได้แก่ Perimeter coverage, Hop count, Geometric, และ Correct room เพื่อวิเคราะห์ถึงการทำงานของฟังก์ชันการประเมินที่ให้ผลลัพธ์ของการเลือกตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการระบุตำแหน่งน้อยที่สุด

ตัวอย่างงานวิจัยที่พิจารณาการวางโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุ ภายในอาคารแสดงได้ดังตารางที่ 2.6 ซึ่งจากการปริทัศน์วรรณกรรมพบว่าการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่พบในปัจจุบัน จะพิจารณาเพียงแค่ระบบที่อยู่ภายใต้สถานการณ์การทำงานที่ปรกติ ซึ่งยังไม่พบงานวิจัยใดที่พิจารณาการกำหนดตำแหน่งโนดอ้างอิงที่สามารถรองรับการทำงานในสถานการณ์ที่มีโนดอ้างอิงบางโนดในระบบไม่ทำงานตามปรกติ ซึ่งเป็นสถานการณ์ที่อาจเกิดขึ้นได้กับทุกระบบระบุตำแหน่ง เช่น การเกิดอัคคีภัย ส่งผลให้โนดอ้างอิงบางโนดเกิดความเสียหายและไม่สามารถใช้งานได้ การเกิดสถานการณ์ดังกล่าวขึ้นกับระบบระบุตำแหน่งจะส่งผลให้สมรรถนะในการระบุตำแหน่งของระบบลดลงอย่างมาก ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจะทำการพัฒนาการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่สามารถรองรับการทำงานทั้งภายใต้สถานการณ์ปรกติและสถานการณ์ที่มีการล่มของโนดอ้างอิงบางโนดในระบบ

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างงานวิจัยที่พิจารณาการวางโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร

กลุ่มเทคนิค	งานวิจัย	วัตถุประสงค์ของการติดตั้งโนดอ้างอิง	เงื่อนไขของการติดตั้งโนดอ้างอิง	เทคนิค	ขนาดพื้นที่การทดลอง
Scene Analysis	Aomumpai et al. (2013)	1) Minimize number of RNs ที่สามารถครอบคลุมทั่วพื้นที่	1.1) จำนวน RN ที่ติดตั้งต้องมีอย่างน้อย N_R โหนด 1.2) ทุก grids จะต้องได้รับ RSS มากกว่าค่า threshold 1.3) ทุก grids จะต้องได้รับ RSS จาก RN ที่ติดตั้ง 1.4) ทุก grids จะต้องได้รับ RSS อย่างน้อย N_R ค่า	SA	63m. x 10m. and 23m. x 37m.
		2) Maximize summation of maximum RSS ของแต่ละ grid	2.1) จำนวน RN ที่ติดตั้งต้องมีเท่ากับ N_R โหนด 1.2) ถึง 1.4)		
	Chen et al. (2013)	1) Minimize number of RNs ที่มี coverage ที่เพียงพอตามที่ต้องการ	1.1) ค่า RSS อันดับ 1 st ที่ grid รัับได้จะต้องไม่ต่ำกว่าค่า threshold (R_{cov}) 1.2) ค่า RSS ที่สามารถรับได้ n จำนวนจาก N RNs จะต้องสามารถใช้ได้อย่างน้อย R_{loc} จำนวน	SA	17m. x 35m.
		2) Maximize fingerprint difference	2.1) neighbor ของ grid จะต้องอยู่ภายในรัศมีที่กำหนด (D_{th}) 2.2) การมีอยู่ของค่าผลต่าง RSS ระหว่าง grid และ neighbor จะต้องมีค่าอย่างน้อย R_d		
	Sharma et al. (2010)	1) Minimize total number of similar fingerprints (SFs)	1.1) ถ้าผลต่างของค่า RSS ระหว่าง grid และ neighbor มีค่าน้อยกว่า T_{th} จะถือว่าทั้งสองตำแหน่งเป็น SFs ($S_{ij}=1$) 1.2) จำนวนโนดอ้างอิงต้องมีเท่ากับ N โหนด	SA	14m. x 14m.

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่างงานวิจัยที่พิจารณาการวางโนดอ้างอิงสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร (ต่อ)

กลุ่มเทคนิค	งานวิจัย	วัตถุประสงค์ของการติดตั้งโนดอ้างอิง	เงื่อนไขของการติดตั้งโนดอ้างอิง	เทคนิค	ขนาดพื้นที่การทดลอง
Scene Analysis	Fang and Lin (2010)	1) Maximize signal RSS (average)	1.1) จำนวน RN ที่ติดตั้งต้องมีเท่ากับ d โหนด	-	52m. x 18m.
		2) Minimize Noise (RSS value vs average RSS at same RN)			
Scene Analysis & Triangulation	Zhang et al. (2014)	1) Minimize average location error (E)	1.1) จำนวน RN ที่ติดตั้งต้องมีเท่ากับ n โหนด	GA	10m. x 10m.
		2) Maximize signal coverage ของพื้นที่ระบุตำแหน่ง (C)	2.1) ค่าระยะ D ที่น้อยสุด 3 อันดับแรก (ใน vector D) จะต้องมากกว่า D_R (หรือค่า RSS value ที่แรงสุด 3 อันดับแรกจะต้องมากกว่าค่า Threshold)		
Triangulation	Redondi and Amaldi (2013)	1) Minimize localization error (ใช้ Cramer-Rao Lower Bound. และใช้ Difference of Sum of Distances หาร error)	1.1) จำนวน RN ที่ติดตั้งต้องมีเท่ากับ b โหนด 1.2) ตำแหน่งที่สามารถติดตั้ง RN จะต้องอยู่บนกำแพงเท่านั้น	Tabu search	20m. x 20m.
	Merkel et al. (2013)	1) Minimize localization error (กรณี tracking)	1.1) กำหนดให้ fitness function มี 4 แบบ ได้แก่ Perimeter coverage, Hop count, Geometric, และ Correct room 1.2) จำนวน RN ที่ติดตั้งต้องมีเท่ากับ N โหนด	GA	25m. x 20m.

2.4.2 การออกแบบเครือข่ายที่มีความทนทานต่อการล้มเหลวหรือการไม่ทำงานของบางอุปกรณ์ในระบบ

ความสามารถในการอยู่รอดของเครือข่าย (network survivability) คือ ความสามารถของเครือข่ายในการรองรับการทำงานภายใต้สถานการณ์ที่ถูกโจมตี (attacks) หรือภายใต้การล้มเหลวของโหนด หรือแม้กระทั่งอุบัติเหตุที่ไม่คาดคิด (Wang, 2009). เนื่องจากพื้นที่การทำงานของระบบเครือข่ายประเภทต่าง ๆ อาจตั้งอยู่ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น ภัยพิบัติ (disaster) พื้นที่ที่ไม่เป็นมิตร (hostile areas) หรือในสนามรบ (battle field) เป็นต้น ดังนั้น คำนิยามของความสามารถในการอยู่รอดของระบบเครือข่ายจึงสามารถนิยามในความหมายเดียวกันกับสมรรถนะความคงทนของระบบที่เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสมบูรณ์ของการทำงานภายใต้สภาพแวดล้อมที่ไม่เป็นมิตร (Qian et al., 2007) เพื่อรับประกันว่าเครือข่ายจะยังคงสามารถทำงานได้ตามที่ผู้ออกแบบคาดหวังไว้ จากปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเครือข่ายให้สามารถทนทานต่อการล้ม แสดงตัวอย่างได้ดังนี้

งานวิจัย Shirazi and Lampe (2009) ทำการศึกษาและพัฒนาปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการวางตำแหน่งของโหนดในเครือข่าย UWB Wireless Sensor Networks (USNs) โดยในงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นไปที่การลดระดับการแทรกสอดในช่วงเวลาของการรับส่งสัญญาณ เนื่องจากการส่งข้อมูลในช่วงเวลาเดียวกันของโหนดที่อยู่ติดกัน อาจแทรกสอดระหว่างซึ่งกันและกันได้ และเป็นสาเหตุที่ทำให้การเชื่อมต่อเกิดความผิดพลาด (link error) ตัวอย่างเช่น ถ้าผู้ออกแบบกำหนดให้โหนดมีการวางตำแหน่งอย่างหนาแน่นอาจส่งผลทำให้เกิดระดับของการแทรกสอดที่มากขึ้น ในขณะที่การกำหนดให้โหนดมีการวางตำแหน่งอย่างเบาบางอาจนำไปสู่ความไม่ครอบคลุมของพื้นที่การทำงาน ดังนั้นงานวิจัยดังกล่าวจึงนำเสนอการกำหนดตำแหน่งของโหนดในเครือข่าย USNs ที่มีวัตถุประสงค์คือ ต้องการได้ค่าความหนาแน่นของโหนดภายในเครือข่ายที่ดีที่สุด โดยพิจารณาจากค่า outage probability ที่น้อยที่สุด

ในงานวิจัย Liu et al. (2013) นำเสนอการออกแบบระบบเครือข่ายที่สามารถรองรับการติดต่อสื่อสารภายใต้สถานการณ์การล่มของโหนดในเครือข่าย โดยพิจารณาโหนดที่ทำงานอยู่บนเครือข่ายระดับ IP (IP layer network) ซึ่งสาเหตุที่ทำให้โหนดในเครือข่าย IP ล้มเหลวอาจเกิดจากความบกพร่องของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ หรือเกิดจากโหนดดังกล่าวไม่สามารถรับมือกับปริมาณทราฟฟิคที่มากเกินไปจนความสามารถได้ (overloaded network) ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยดังกล่าวจึงให้แนวทางการออกแบบระบบเครือข่าย IP ที่อยู่ภายใต้สภาวะการล่มของโหนด เพื่อให้เครือข่ายยังคงสามารถทำงานได้อย่างปกติหลังจากเกิดเหตุการณ์การล้มเหลวดังกล่าว

งานวิจัย Correia et al. (2009) นำเสนอวิธีการวางแผนเครือข่ายให้มีความทนทานต่อการล้มเหลวของระบบ (fault-tolerance) สำหรับเครือข่ายแบบผสม Wireless-Optic Broadband-Access Network (WOBAN) การล้มของระบบ WOBAN แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ในส่วนหน้า (front end) หรือพื้นที่การทำงานของเครือข่ายการเข้าถึงไร้สาย (wireless access network) ปัญหาการเชื่อมต่อที่ล้มเหลวและปัญหาการแทรกสอดที่เกิดจากความเสียหายของอุปกรณ์เชื่อมต่อ ในขณะที่การล้มของส่วนปลายด้านหลัง (back end) หรือพื้นที่การทำงานของเครือข่ายทางแสง (optical network) การล้มเหลวของระบบเกิดจากความเสียหายของสายเชื่อมต่อ เช่น splitter's fiber branches เป็นต้น ซึ่งวิธีการแก้ปัญหาที่งานวิจัยนี้เสนอคือ กลไกการเลือกเส้นทางหลัก (primary route) และเส้นทางสำรอง (backup route) สำหรับหลีกเลี่ยงเส้นทางที่เสียหาย และไม่สามารถใช้งานได้

งานวิจัย Luo et al. (2010) นำเสนอวิธีการออกแบบการเลือกจำนวน และการเลือกตำแหน่งติดตั้งของ โหนดเกตเวย์ (gateway) สำหรับเครือข่าย Wireless Mesh Networks (WMNs) โดยสาเหตุการล้มของระบบเกิดจากการแทรกสอดระหว่าง โหนดเกตเวย์ด้วยกัน ถ้าหากตำแหน่งของแต่ละโหนดมีการวางที่หนาแน่นเกินไปอาจนำไปสู่ค่าวิสัยสามารถ (throughput) ที่ลดลง โดยในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการทางฮิวริสติก (heuristic algorithm) ซึ่งถูกแปลงมาจาก โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบหลายวัตถุประสงค์ (multi-objective integer linear program) ซึ่งผลลัพธ์ของจำนวนและตำแหน่ง โหนดเกตเวย์ที่ได้จากกระบวนการ สามารถลดการแทรกสอดระหว่าง โหนดเกตเวย์ และทำให้เครือข่ายสามารถทนทานต่อการล้มของโหนดได้อีกด้วย

ตัวอย่างงานวิจัยที่พิจารณาการออกแบบเครือข่ายที่มีความทนทานต่อการล้มเหลวแสดงได้ดังตารางที่ 2.7

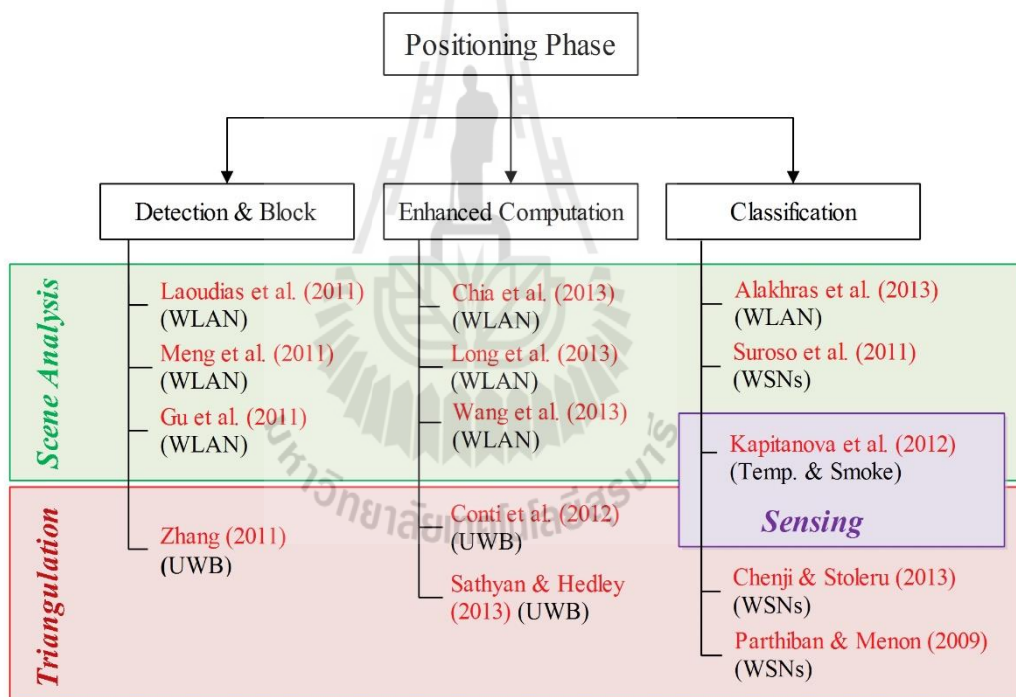
ความแตกต่างของการล้มเหลวระหว่างเครือข่ายทั่วไปและระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารคือ การล้มเหลวของเครือข่ายแบบทั่วไปจะส่งผลให้ไม่สามารถทำงานในรูปแบบการรับและส่งข้อมูลได้ เนื่องจากเส้นทางที่ผ่าน โหนดดังกล่าวไม่สามารถใช้งานได้ ทำให้การบริการดังกล่าวอาจร้ายแรงถึงขั้นไม่สามารถใช้งานได้ ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดเหตุการณ์ดังกล่าวผู้ออกแบบส่วนใหญ่ มักมีการสำรองเส้นทางส่งข้อมูล หรือมีการเพิ่มแบนด์วิดท์เพื่อรองรับปริมาณข้อมูล ตรงกันข้ามกับกรณีของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร ถึงแม้จะมีโหนดอ้างอิงไม่ทำงานตามปรกติ แต่ระบบระบุตำแหน่งอาจจะยังสามารถบอกตำแหน่งของวัตถุได้ แต่ผลกระทบที่เกิดขึ้นคือ ความถูกต้องของตำแหน่งที่หาได้อาจลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับการทำงานในสถานการณ์ปรกติ ด้วยเหตุนี้ แนวทางการสำรองเส้นทางรับส่งข้อมูลหรือการเพิ่มแบนด์วิดท์ จึงไม่ใช่ทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการแก้ไขปัญหาการล้มของโหนดอ้างอิงในระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร

ตารางที่ 2.7 ตัวอย่างงานวิจัยที่พิจารณาการออกแบบเครือข่ายที่มีความทนทานต่อการล้มเหลว

Network types	Objective	Failure scenario	Approach	Papers
Ultra-Wideband Sensor Networks (USNs)	To finding the best node density for minimum outage probability of USN.	Interference lead to the probability of link error	The best node density for minimum outage probability	Shirazi and Lampe (2009)
IP layer network	To minimum-cost survivable IP network under any node failure scenario.	Failure of any potential relay node that links incapable of transmitting the information flow.	Mixed-integer programming (MIP) model	Liu et al. (2013)
Wireless Mesh Networks (WMNs)	To address the gateway placement problem with interference reduction and fault tolerance assurance considered.	Link interference and gateway failure	An interference-aware and K-coverage gateway placement algorithm (IKGPA)	Luo et al. (2010)
Wireless–Optical Broadband-Access Network (WOBAN)	To address integrated routing and channel assignment in multi-radio WOBANs aimed at obtaining a fault-tolerant network.	Optical network fault and wireless access fault.	Resource-efficient approach (Primary route, Backup route).	Correia et al. (2009)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวกับเทคนิคการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร

หลายงานวิจัยในปัจจุบันได้ให้ความสำคัญกับการพัฒนากระบวนการคำนวณหาตำแหน่ง (Positioning phase) หรือการทำงานในช่วงออนไลน์เฟสของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร โดยสมรรถนะที่งานวิจัยเหล่านี้พิจารณาคือ สมรรถนะความคงทนของระบบ หรือความสามารถในรองรับการทำงานทั้งภายใต้สภาวะปรกติและสภาวะที่ผิดปกติ ซึ่งผู้วิจัยจำแนกงานวิจัยเหล่านี้ ออกเป็น 3 กลุ่มคือ 2.5.1) การตรวจจับและป้องกันเหตุการณ์ที่ผิดปกติของระบบ 2.5.2) การปรับปรุงกลไกการคำนวณของเทคนิคระบุตำแหน่ง และ 2.5.3) การจำแนกข้อมูลพารามิเตอร์ของระบบที่มีความคลุมเครือ แผนภาพการจำแนกปฏิสัมพันธ์ที่เกี่ยวกับพัฒนากระบวนการคำนวณหาตำแหน่งที่พิจารณาสมรรถนะความคงทนแสดงได้ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ปฏิสัมพันธ์ที่เกี่ยวกับพัฒนากระบวนการคำนวณหาตำแหน่งที่พิจารณาสมรรถนะความคงทน

2.5.1 การตรวจจับและป้องกันเหตุการณ์ที่ผิดปกติของระบบ

การตรวจจับและป้องกันเหตุการณ์ที่ผิดปกติ เป็นแนวทางการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่มีแนวคิดคือ เพื่อพัฒนาการกลไกการทำงานของเทคนิคระบุตำแหน่งให้สามารถตรวจจับความผิดปกติของโนดอ้างอิงที่มีความคลุมเครือ และไม่นำโนดดังกล่าวมารวม

พิจารณากับกระบวนการระบุตำแหน่ง จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวกับการตรวจจับ และป้องกันเหตุการณ์ที่ผิดปกติสามารถแบ่งกลุ่มงานวิจัยได้ 2 กลุ่ม ตามประเภทของเทคนิคระบุตำแหน่งที่ใช้ งาน คือ 2.5.1.1) กลุ่มเทคนิค Scene Analysis และ 2.5.1.2) กลุ่มเทคนิค Triangulation

2.5.1.1 การตรวจจับและป้องกันเหตุการณ์ที่ผิดปกติของกลุ่มเทคนิค Scene Analysis

งานวิจัย Laoudias et al. (2011) นำเสนอการพัฒนาวิธีการตรวจสอบเหตุการณ์ที่จุดเข้าถึง (access points: APs) หรือ โหนดอ้างอิงที่ไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ ซึ่งเกิดจากไฟฟ้าดับ (power outage) และส่งผลให้โหนดอ้างอิงไม่สามารถใช้งานได้ชั่วคราว ดังนั้นการระบุตำแหน่งวัตถุในช่วงเวลาดังกล่าวจะมีความผิดพลาดเกิดขึ้นอย่างมาก โดยวิธีการตรวจสอบเหตุการณ์ที่งานวิจัยนี้ใช้คือ การตรวจจับการลดทอนของสัญญาณ (signal attenuation) ด้วยการพิจารณาค่าระยะห่างยูคลิเดียน (Euclidean distance) ของตำแหน่งข้างเคียงของเทคนิคระบุตำแหน่ง KNN โดยในขั้นตอนการตรวจจับจะพิจารณาว่า ค่าผลรวมของระยะห่างยูคลิเดียนที่ได้จากตำแหน่งข้างเคียงจำนวน K ตำแหน่ง มีค่าต่ำกว่าค่าเริ่มต้นที่กำหนดไว้หรือไม่ เพื่อรับประกันว่าเวกเตอร์ความเข้มสัญญาณที่ได้รับซึ่งมีความผิดพลาด (corrupt) จะถูกตรวจจับได้ที่ระดับความน่าจะเป็นที่สูง (high probability) จากผลการทดลอง การเปรียบเทียบสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งภายใต้สถานะที่มีโหนดอ้างอิงในระบบไม่ทำงาน ระหว่างเทคนิคที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิค KNN แบบดั้งเดิม พบว่า การไม่ทำงานของโหนดอ้างอิง 0% 40% และ 80% (จากจำนวน โหนดอ้างอิง 9 โหนด) กรณีที่ระบุตำแหน่งด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้นมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 2 เมตร 3.5 เมตร และ 5.5 เมตร ตามลำดับ ขณะที่เทคนิค KNN แบบดั้งเดิมมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 2 เมตร 9.2 เมตร และ 11.5 เมตร ดังนั้น การใช้เทคนิคที่งานวิจัยดังกล่าวพัฒนาขึ้น ในกรณีที่โหนดไม่ทำงาน 40% และ 80% จะสามารถให้สมรรถนะในการระบุตำแหน่งดีกว่าเทคนิคที่แบบดั้งเดิม 2.6 เท่า และ 2.1 เท่า ตามลำดับ

งานวิจัย Meng et al. (2011) ทำการพัฒนาเทคนิคระบุตำแหน่งที่อยู่ในกลุ่ม Scene Analysis ซึ่งเลือกใช้เทคนิคความน่าจะเป็น (probabilistic technique) ที่มีการสร้างฐานข้อมูลแบบฮิสโตแกรมความน่าจะเป็น (probabilistic histogram) โดยนำเสนอวิธีการตรวจจับและจำกัดค่าผิดปกติของค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับจากโหนดอ้างอิง หรือจุดเข้าถึงที่เป็นภัย (APs attack) โดยใช้กระบวนการที่มีชื่อว่า RANdom SAmple Consensus (RANSAC) ซึ่งเป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันในกลุ่มงานวิจัยการประมวลผลภาพ (image processing area) ในกระบวนการดังกล่าว ค่าความเข้มสัญญาณที่ผิดปกติ (outliers) จะถูกตัดและไม่ถูกนำมาพิจารณา ขณะที่ค่าความเข้มสัญญาณที่ปกติ (inliers) จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุด้วยเทคนิคความน่าจะเป็น จากผลการ

ทดลอง การเปรียบเทียบสมรรถนะความแม่นยำในการระบุตำแหน่งภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิง เป็นภัยหรือทำงานผิดปกติ ระหว่างในกรณีที่มีการกำจัดและไม่มีกำจัดค่าผิดปกติพบว่า ภายใต้การทำงานที่ผิดปกติของโนดอ้างอิง 2 โนดจากทั้งหมด 6 โนด กรณีที่ใช้วิธีกำจัดค่าผิดปกติมีความแม่นยำของตำแหน่งที่ 80% ภายใน 2 เมตร ขณะที่กรณีที่ไม่มีการใช้วิธีกำจัดค่าผิดปกติมีความแม่นยำของตำแหน่งที่ 80% ภายใน 3.6 เมตร ซึ่งการใช้เทคนิคที่พัฒนาขึ้นจะมีสมรรถนะในการระบุตำแหน่งดีกว่าการใช้ 1.8 เท่า

งานวิจัย Gu et al. (2011) นำเสนอวิธีการปรับปรุงการทำงานของเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่ใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปริ้นท์ โดยระบบระบุตำแหน่งนี้จะเผชิญกับปัญหาความสมมาตรของความเข้มสัญญาณที่รับได้ (symmetrical RSS problem) ซึ่งมีสาเหตุมาจากค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับจากโนดอ้างอิงมีแปรปรวนและมีความผิดพลาด ส่งผลให้กระบวนการจับคู่ของสมการระยะห่างแมนฮัตตัน (Manhattan distance) เกิดความผิดพลาด ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอกลไกการตรวจสอบค่าผลรวมของระยะห่างแมนฮัตตันที่ได้จากตำแหน่งข้างเคียงจำนวน K ตำแหน่ง โดยพิจารณาค่าเริ่มต้นของความแปรปรวน ซึ่งจากผลการทดลอง การเปรียบเทียบสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงถูกแทรกสอด (interfered) หรือถูกรบกวนโดยโนดวัตถุ ระหว่างเทคนิคที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิค KNN แบบดั้งเดิมพบว่า เทคนิคที่พัฒนาขึ้นมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 2.5 เมตร และ 1.7 เมตร ในกรณีที่พิจารณาดำแหน่งข้างเคียง K เท่ากับ 3 และ 4 ตำแหน่ง ตามลำดับ ขณะที่เทคนิค KNN แบบดั้งเดิมค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 3.5 เมตร และ 2.3 เมตร ดังนั้นการใช้เทคนิคที่พัฒนาขึ้นจะมีสมรรถนะในการระบุตำแหน่งดีกว่าเทคนิคดั้งเดิม 1.4 เท่า และ 1.35 เท่า ตามลำดับ

2.5.1.2 การตรวจจับและป้องกันเหตุการณ์ที่ผิดปกติของกลุ่มเทคนิค Triangulation

งานวิจัย Zhang (2011) พิจารณาการทำงานของระบบระบุตำแหน่งแบบร่วมมือกัน (cooperative localization) ซึ่งเป็นระบบระบุตำแหน่งที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาตำแหน่งวัตถุ และเพื่อแก้ไขจุดอ่อนของระบบระบุตำแหน่งที่อยู่ในกลุ่มเทคนิค Triangulation อาทิเช่น ข้อจำกัดของความครอบคลุมพื้นที่การทำงานของโนดที่มีระยะการรับส่งข้อมูลที่จำกัด โดยความสามารถในการทำงานของกลุ่มโนดวัตถุ (หรือ agents) ที่เพิ่มขึ้นจากระบบระบุตำแหน่งแบบเดิมคือ ความสามารถในการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างตัวเองและ โนดวัตถุข้างเคียง โดยข้อมูลที่แต่ละ โนดทำการแลกเปลี่ยน เช่น ตำแหน่งปัจจุบัน ความเร็ว และทิศทางของ โนดข้างเคียง เป็นต้น (Wymeersch et al., 2009) โดยงานวิจัย Zhang (2011) ได้นำเสนอการพัฒนาการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบร่วมมือกันซึ่งแบ่งการทำงานออกเป็นสองช่วงคือ

ช่วงการวัดระยะห่าง และช่วงการอัปเดตตำแหน่ง ในช่วงการทำงานแรก แต่ละโหนดวัตถุจะทำการระบุตำแหน่งของตัวเองโดยใช้คุณสมบัติการวัดระยะทางเสมือนของเทคนิค TOA ซึ่งได้มาจากค่าความเร็วในการแพร่กระจายของแสง (light propagation speed) และในช่วงถัดมาจะใช้เทคนิคที่พัฒนาขึ้น ซึ่งมีชื่อว่า ℓ_1 -regularized Least Squares (LS) approach ซึ่งใช้สำหรับจำแนกโหนดอ้างอิงในระบบระบุตำแหน่งว่า เป็นโหนดอ้างอิงที่ไม่หวังดี หรือเป็นโหนดอ้างอิงที่มีความน่าเชื่อถือ (honest anchors) และระบุตำแหน่งของวัตถุโดยใช้ข้อมูลพารามิเตอร์ที่รับได้จากโหนดอ้างอิงที่มีความน่าเชื่อถือ จากนั้นกระบวนการทำงานแบบร่วมมือกันของโหนดวัตถุ (target cooperation) จะถูกดำเนินการ โดยที่แต่ละโหนดวัตถุจะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลตำแหน่งปัจจุบัน และข้อมูลระยะห่างระหว่างตัวเองกับโหนดอื่น ๆ เพื่อใช้ในการอัปเดตหรือปรับปรุงตำแหน่งของตัวเอง

ซึ่งจากผลการทดลอง สมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งภายใต้สภาวะที่มีโหนดอ้างอิงที่มีความน่าสงสัยจำนวน 2 โหนดจาก 8 โหนด (หรือ 37.5% ของโหนดอ้างอิงในระบบ) ของเทคนิคระบุตำแหน่งแบบร่วมมือกันและแบบไม่ร่วมมือกัน ซึ่งทั้งสองกรณีใช้วิธีการจำแนกโหนดอ้างอิงที่พัฒนาขึ้น พบว่าเทคนิคระบุตำแหน่งแบบร่วมมือกันและแบบไม่ร่วมมือกัน มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 0.229 เมตร และ 0.237 เมตร ที่ความน่าจะเป็นในการตรวจจับโหนดอ้างอิงที่ไม่หวังดี 99.7% และ 99.2% ตามลำดับ

ตัวอย่างระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่พิจารณาการตรวจจับและป้องกัน เหตุการณ์ที่ผิดปกติแสดงได้ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่พิจารณาการตรวจจับและป้องกัน เหตุการณ์ที่ผิดปกติ

กลุ่มเทคนิค	ลักษณะความผิดปกติของระบบ	เทคนิคการตรวจจับ	วิธีการตรวจจับ	สมรรถนะของระบบ	ขนาดพื้นที่การทดลอง	เทคโนโลยีรับส่งสัญญาณ	งานวิจัย
Scene Analysis	โนดอ้างอิงในระบบบางโนดไม่สามารถทำงานได้เนื่องจากไฟฟ้าดับ	Hybrid positioning algorithm	ตรวจจับด้วยระดับความน่าจะเป็น	Error distance [m.] 0%, 40%, 80% fail จาก 9 RNs - เทคนิคที่พัฒนา = 2m., 3.5m., 5.5m. - เทคนิค KNN = 2m., 9.2m., 11.5m.	20m.x25m.	WLAN	Laoudias et al. (2011)
	ความผิดปกติของค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิง	RANSAC	ตรวจจับและจำกัดค่าผิดปกติด้วยค่าเริ่มต้น	CDF [%] 2 RNs attacked จาก 6 RNs - ใช้ outlier APs detection = 80% in 2m. - ไม่ใช้ outlier APs detection = 80% in 3.6m.	30m.x20m.	WLAN	Meng et al. (2011)
	ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงมีความแปรปรวน	WKNN based on Manhattan	ตรวจจับและจำแนกโนดอ้างอิงที่มีความแปรปรวน	Error distance [m.] 1 RN attacked จาก 4 RNs - เทคนิคที่พัฒนา (K=3, 4) = 2.5m., 1.7m. - เทคนิค KNN (K=3, 4) = 3.5m., 2.3m.	15m.x15m.	WLAN	Gu et al. (2011)
Triangulation	มีโนดอ้างอิงที่มีความน่าสงสัย	ℓ_1 -regularized Least Squares approach	ตรวจจับและจำแนกโนดอ้างอิงที่มีความน่าสงสัย	Error distance [m.] 3 RNs attacked จาก 9 RNs - Cooperative = 0.229 with prob. 99.7% - Noncooperative = 0.237 with prob. 99.2%	10m.x10m.	UWB	Zhang (2011)

2.5.2 การปรับปรุงกลไกการคำนวณของเทคนิคระบุตำแหน่ง

การพัฒนาาระบบระบุตำแหน่งในลักษณะนี้จะสมมติฐานว่ามีการโจมตีจากโนดอ้างอิงที่คลุมเครือตลอดเวลา ซึ่งจะไม่มีการบวกรวดการตรวจจับหรือป้องกันเหมือนแนวทางก่อนหน้า ดังนั้นเทคนิคระบุตำแหน่งจะต้องสามารถทำงานภายใต้สภาวะการทำงานผิดปกติของระบบได้ จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงกลไกการคำนวณของเทคนิคระบุตำแหน่งสามารถแบ่งกลุ่มงานวิจัยได้ 2 กลุ่ม ตามประเภทของเทคนิคระบุตำแหน่งที่ใช้งาน คือ 2.5.2.1) กลุ่มเทคนิค Scene Analysis และ 2.5.2.2) กลุ่มเทคนิค Triangulation

2.5.2.1 การปรับปรุงการคำนวณของกลุ่มเทคนิค Scene Analysis

งานวิจัย Chia et al. (2013) ได้ให้ภาพรวมของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่ใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปรีนท์ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ signal-based และ model-based โดยในกลุ่มแรกประกอบไปด้วยเทคนิค median-based method, sensor selection, และ RSM (Ration-based Signal strength Metric) ในกลุ่มที่สองประกอบด้วยเทคนิค cluster-based method, RWGH (Residual Weighting) และ IDM (Inclusive Disjunction Model) โดยงานวิจัยนี้ได้พิจารณาสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารเมื่อเกิดการความผิดปกติที่เรียกว่า the possible signal strength attacks (หรือความแปรปรวนของค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับ) จากผลการทดลอง การเปรียบเทียบสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีความแปรปรวนของสัญญาณ ระหว่างกรณีที่ใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปรีนท์ในกลุ่ม signal-based และ model-based พบว่า การ Attacked APs (changing RSS ด้วยค่าการลดทอน) จำนวน 4 โหนดจาก 9 โหนด เทคนิคกลุ่ม signal-based จะมีค่า Error reduction rate เท่ากับ 40% 5% และ 25% (median-based, sensor selection, และ RSM ตามลำดับ) ขณะที่กรณีของกลุ่ม model-based จะมี Error reduction rate เท่ากับ 15% 60% 40% (cluster-based, RWGH และ IDM ตามลำดับ) จากผลการทดลอง ถ้าหากมีการโจมตีจากโนดอ้างอิง 4 โหนดจาก 9 โหนด กลุ่ม model-based จะสามารถให้ผลสมรรถนะโดยรวมที่ดีกว่า signal-based อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของกลุ่ม model-based คือ สมรรถนะความซับซ้อนในการทำงานจะมีมากกว่ากลุ่ม signal-based

งานวิจัย Long et al. (2013) นำเสนอการพัฒนาาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่ใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปรีนท์ ซึ่งการทำงานในขั้นตอนออฟไลน์เฟสหรือขั้นตอนการสร้างฐานข้อมูลของงานวิจัยนี้จะไม่มีการวัดและเก็บรวบรวมข้อมูลพารามิเตอร์ในพื้นที่อาคาร แทนที่ด้วยการพิจารณาระยะห่างระหว่างตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์กับโนดอ้างอิงที่ตั้งตั้งภายในอาคาร และใช้เงื่อนไขตรวจสอบความสัมพันธ์ของระยะห่างดังกล่าวด้วย binary number (0, 1) แทนการบันทึก

ค่าความเข้มสัญญาณที่ได้รับได้ ซึ่งงานวิจัยนี้เรียกตำแหน่งฟิงเกอร์ปรี้นท์ในลักษณะนี้ว่า การวิเคราะห์ฟิงเกอร์ปรี้นท์ (analytical fingerprint) สำหรับในขั้นตอนการระบุตำแหน่งหรือออนไลน์เฟสจะใช้เทคนิค KNN และใช้วิธีการจับคู่ด้วยเทคนิค Hamming distance โดยสภาวะที่ผิดปกติที่งานวิจัยนี้พิจารณาคือ ความไม่คงที่ของค่าความเข้มสัญญาณซึ่งมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างภายในอาคาร และการแทรกสอดช่องสัญญาณระหว่าง APs ในระบบ จากผลการทดลองการเปรียบเทียบสมรรถนะความแม่นยำในการระบุตำแหน่งภายใต้สภาพแวดล้อมที่ผิดปกติระหว่างกรณีที่ใช้เทคนิคที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิค ML multilateration พบว่าเทคนิคที่พัฒนามีค่าความแม่นยำของตำแหน่งที่ 80% ภายใน 1.7 เมตร ขณะที่เทคนิค ML multilateration มีค่าความแม่นยำของตำแหน่งที่ 80% ภายใน 2.8 เมตร จากผลการทดลองเทคนิคที่งานวิจัยนี้นำเสนอสามารถให้สมรรถนะในการระบุตำแหน่งได้ดีกว่าเทคนิคกลุ่ม Triangulation

งานวิจัย Wang et al. (2013) นำเสนอการพัฒนากระบวนการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่อยู่บนพื้นฐานกลุ่มเทคนิค Scene Analysis ซึ่งใช้ฐานข้อมูลแบบการแจกแจงความน่าจะเป็น (probabilistic distribution) โดยพิจารณาการทำงานร่วมกันของอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นตำแหน่งวัตถุต่างชนิด ได้แก่ laptops และ smart phone โดยนำเสนอเทคนิค Spatial Mean Normalization (SMN) ซึ่งจะทำการหน้าที่ชดเชยค่า shift effect จากอุปกรณ์แต่ละชนิด สำหรับเทคนิคระบุตำแหน่งที่งานวิจัยนี้เลือกใช้คือวิธีการความน่าจะเป็น (likelihood approach) ซึ่งจะเลือกตำแหน่งของวัตถุจากความน่าจะเป็นที่มากที่สุด (largest likelihood value) จากผลการทดลอง การเปรียบเทียบสมรรถนะความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง ระหว่างกรณีที่ใช้เทคนิคที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิค Original RSS พบว่าเทคนิคที่พัฒนามีค่าความแม่นยำของตำแหน่งที่ 80% ภายใน 3.2 เมตร ขณะที่เทคนิค ML multilateration มีค่าความแม่นยำของตำแหน่งที่ 80% ภายใน 4.4 เมตร ซึ่งจากการทดลอง การใช้เทคนิค SMN จะช่วยให้สมรรถนะความแม่นยำในการระบุตำแหน่งที่ 80% ดีกว่ากรณีที่ไม่ใช้การชดเชยค่า shift effect ระหว่างอุปกรณ์ 1.37 เท่า

2.5.2.2 การปรับปรุงการคำนวณของกลุ่มเทคนิค Triangulation

ในงานวิจัยที่ Conti et al. (2012) ได้พัฒนาเทคนิคระบุตำแหน่งแบบร่วมมือกันที่ประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการสื่อสารมาตรฐาน IEEE 802.15.4a (Ultra-wideband) โดยมุ่งเน้นไปที่การบรรเทาความผิดพลาดของการแปลงระยะทางซึ่งเป็นจุดอ่อนของเทคนิคที่พิจารณาค่าเวลาที่ใช้ในการเดินทางของสัญญาณ (Time of Arrival) ด้วยเทคนิค range error mitigation ซึ่งจะมีการจำแนกคุณลักษณะของสัญญาณแบบ LOS และแบบ NLOS ก่อนที่จะนำมาใช้งาน จากนั้นระบุตำแหน่งด้วยเทคนิค SPAWN (Sum-product algorithm over a Wireless Network) (Wymeersch et

al., 2009) ที่มีกระบวนการแลกเปลี่ยนข้อมูลระหว่างโหนดวัตถุ จากผลการทดลอง การเปรียบเทียบสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีความแปรปรวนของสัญญาณระหว่างกรณีที่ใช้เทคนิคบรรเทาความผิดพลาดของระยะและกรณีที่ไม่ใช้พบว่า การใช้เทคนิคที่พัฒนาขึ้นจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 21.6 cm และ 23.0 cm (กรณีที่เป็น Cooperative และ Noncooperative ตามลำดับ) ขณะที่กรณีที่ไม่ใช้เทคนิคบรรเทาความผิดพลาดของระยะ มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 43.0 cm และ 49.3 ดังนั้นการใช้เทคนิคที่พัฒนาขึ้นจะมีสมรรถนะในการระบุตำแหน่งดีกว่าการไม่ใช้ 1.99 เท่า และ 2.14 เท่า ตามลำดับ

งานวิจัย Sathyan and Hedley (2013) นำเสนอเทคนิคระบุตำแหน่งแบบร่วมมือกันที่ใช้ Bayesian framework สำหรับการติดตามตำแหน่งของโหนดวัตถุ ซึ่งมีชื่อว่า Fast and Accurate Cooperative Tracking (FACT) โดยในการระบุตำแหน่งเริ่มต้น (โหนดที่ไม่เคลื่อนที่) จะใช้การทำงานของ DV-distance algorithm เพื่อคำนวณหาระยะห่างระหว่างโหนดและระบุตำแหน่งด้วยเทคนิค Triangulation ขณะที่การระบุตำแหน่งแบบต่อเนื่อง (โหนดที่เคลื่อนที่) จะใช้การคำนวณหาระยะห่างด้วยการพิจารณาค่า round trip delay ก่อนที่จะใช้เทคนิค iterative least squares (ILS) (Sathyan and Hedley, 2012) ระบุตำแหน่งวัตถุ ซึ่งในขั้นตอนการระบุตำแหน่งนี้ทุก agents จะทำการ broadcast ข้อมูลตำแหน่งของตัวเองให้กับ agents ข้างเคียง และใช้ข้อมูลดังกล่าวปรับปรุงตำแหน่งของตัวเอง โดยกระบวนการดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ไขความคลุมเครือของตำแหน่งวัตถุที่ได้รับความเข้มสัญญาณไม่พอต่อความต้องการของเทคนิคระบุตำแหน่ง (ได้รับสัญญาณน้อยกว่า 3 สัญญาณ) จากผลการจำลองระบบ การเปรียบเทียบสมรรถนะแม่นยำในการระบุตำแหน่งภายใต้ความคลุมเครือของตำแหน่งวัตถุและภายใต้สถานะที่การเชื่อมต่อของระบบลดลง 50% (reduced connectivity by links removed) ระหว่างกรณีที่ใช้เทคนิค FACT และกรณีที่ใช้เพียงแค่วิธีพื้นฐาน DV-distance algorithm พบว่า การใช้เทคนิคที่พัฒนาขึ้นมีค่าความแม่นยำของตำแหน่งที่ 90% ภายใน 1.78 เมตร ขณะที่กรณีที่ใช้ DV-distance algorithm ค่าความแม่นยำของตำแหน่งที่ 90% ภายใน 5.91 เมตร ซึ่งกรณีที่ไม่ใช้เทคนิคที่พัฒนาขึ้นมีสมรรถนะในการระบุตำแหน่งแยกว่า 3.32 เท่า

ตัวอย่างระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่พิจารณาการปรับปรุงกลไก การคำนวณของเทคนิคระบุตำแหน่งแสดงได้ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ตัวอย่างระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่พิจารณาการปรับปรุงกลไกการคำนวณของเทคนิคระบุตำแหน่ง

กลุ่มเทคนิค	ลักษณะความผิดปกติของระบบ	เทคนิคการ	สมรรถนะของระบบ	ขนาดพื้นที่การทดลอง	เทคโนโลยีรับส่งสัญญาณ	งานวิจัย
Scene Analysis	Security threats; the possible signal strength attacks, changing the RSS values	Signal-based /Model-based	Error reduction rate (%) [m.] 4 RN attacked จาก 9 RNs Signal-based = 5% - 39% Model-based = 15% - 60%	50x50m ² .	WLAN	Chia et al. (2013)
	Signal fluctuation due to the changes of infrastructures	KNN based on Hamming + Fuzzy	CDF [%] [m.] 5 APs (normally) เทคนิคที่พัฒนา (K=1) = 80% in 1.7m. ML multilateration = 80% in 2.8m.	40x20m ²	WLAN	Long et al. (2013)
	Problem of cross-device positioning	SMN approach	CDF [%] [m.] 4 APs (normally) SMN approach = 80% in 3.2m. Original RSS = 80% in 4.4m.	8.6x5.2m ² .	WLAN	Wang et al. (2013)
Triangulation	Uncertainty due to range error	SPAWN	Error distance [cm.] - range error mitigation (coo., non.) = 21.6cm., 23.0cm. - without range error mitigation (coo., non.) = 43.0cm., 49.0m.	12m.x12m.	UWB	Conti et al. (2012)
	Ambiguously determine target location (RN<3) and links removed	FACT	CDF [%] [m.] - เทคนิคที่พัฒนา = 90% in 1.78m. - เทคนิค DV-distance = 90% in 5.91m.	100m.x100m.	UWB	Sathyan and Hedley (2013)

2.5.3 การจำแนกข้อมูลพารามิเตอร์ของระบบที่มีความคลุมเครือ

เทคนิคการจำแนกประเภทข้อมูล (classification algorithm) คือ การคัดเลือกสมมติฐานจากเซตของทางเลือกที่มีค่าที่เหมาะสมที่สุดจากเซตข้อสังเกต เพื่อแสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างกลุ่มของข้อมูล และทำนายว่าข้อมูลนี้ควรจัดอยู่ในกลุ่มใด ซึ่งหนึ่งในวิธีการจำแนกประเภทข้อมูลที่ได้รับความนิยมคือ ฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic) ซึ่งเป็นกระบวนการตัดสินใจของคอมพิวเตอร์ที่มีความใกล้เคียงกับการตัดสินใจที่ชาญฉลาดของมนุษย์ โดยอาศัยข้อมูลในระบบที่มีความแน่นอนหรือมีความชัดเจนทางตรรกศาสตร์ เพื่อใช้ในการอธิบายความคลุมเครือ (uncertain) หรือความไม่แน่นอน (inexact) ของข้อมูล โดยใช้ทฤษฎีของเซตเพื่อแทนระดับความคลุมเครือนั้น ๆ (Srikan, 2009) (Kapitanova et al., 2012) ตัวอย่างการนำฟัซซีลอจิกไปประยุกต์ใช้งาน เช่น การตรวจจับข้อมูลทางกายภาพของสิ่งแวดล้อมเพื่อเตือนภัยเหตุการณ์ต่าง ๆ เช่นงานวิจัย Kapitanova et al. (2012) ทำการวัดค่าอุณหภูมิและปริมาณควันในอากาศที่อยู่ภายในตัวอาคาร จากนั้นใช้ฟัซซีลอจิกในการประเมินเหตุการณ์ว่าควรเปิดสัญญาณแจ้งเตือนเพลิงไหม้หรือไม่ เป็นต้น

ซึ่งหลายงานวิจัยในปัจจุบันได้นำวิธีการฟัซซีลอจิกมาใช้กับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารเพื่อเพิ่มสมรรถนะของระบบให้ดียิ่งขึ้น โดยใช้ฟัซซีลอจิกเพื่อวิเคราะห์และประเมินในการค่าพารามิเตอร์ของระบบที่มีความคลุมเครือ (input) และเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวให้อยู่ในรูปแบบค่าพารามิเตอร์ชนิดอื่นที่มีความสัมพันธ์กัน (output) เช่น ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้กับระยะทาง เป็นต้น จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำฟัซซีลอจิกมาใช้กับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร แบ่งกลุ่มงานวิจัยได้ 3 กลุ่ม ตามประเภทของเทคนิคระบุตำแหน่งที่ใช้งาน คือ 2.5.3.1) กลุ่มเทคนิค Scene Analysis 2.5.3.2) กลุ่มเทคนิค Triangulation และ 2.5.3.3) กลุ่มเทคนิค Proximity

2.5.3.1 การจำแนกข้อมูลที่มีความคลุมเครือของกลุ่มเทคนิค Scene Analysis

งานวิจัย Alakhras et al. (2013) ทำการพัฒนาาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่ใช้เทคนิค WKNN โดยนำเสนอวิธีการคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักของตำแหน่งข้างเคียง (Edge Weight) ที่ใช้วิธีการประเมินความคลุมเครือด้วยฟัซซีลอจิก โดยระบบดังกล่าวจะพิจารณาค่า input สองค่าคือ EucDis (Euclidean distance) และ APD (ระยะห่างระหว่างตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์และจุดเข้าถึง) ดังนั้นการประเมิน (หรือการแปลง) ค่าพารามิเตอร์ของงานวิจัยนี้จัดอยู่ในรูปแบบ Two Input Single Output (TISO) สำหรับกระบวนการทำงานของฟัซซีลอจิกที่งานวิจัยนี้พิจารณา คือ วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่า input ทั้งสอง (EucDis และ APD) และเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบของค่า

Edge Weight ของตำแหน่งข้างเคียง (หรือค่า output) ก่อนที่จะนำค่าถ่วงน้ำหนักของตำแหน่งข้างเคียง ไปคำนวณหาตำแหน่งวัตถุตามกระบวนการทำงานของเทคนิค WKNN

งานวิจัย Suroso et al. (2011) และ Jieun and Woo (2012) พัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่ใช้เทคนิค KNN โดยมีการที่มีการจำแนกกลุ่มของข้อมูลที่มีความคลุมเครือด้วยการใช้ Fuzzy C-Mean clustering (FCM) algorithm ซึ่งเป็นกระบวนการทำงานของพีชชีลอจิกในอีกลักษณะ โดยแนวคิดการทำงานของระบบระบุตำแหน่งวัตถุที่งานวิจัย Suroso et al. (2011) นำเสนอคือ การพิจารณาดำแหน่งฟังก์ชันปริ้นท์ในรูปแบบของ cluster และใช้กระบวนการทำงานของ FCM ในการประเมินและจำแนกกลุ่มของตำแหน่งฟังก์ชันปริ้นท์ที่น่าจะเป็นตำแหน่งของวัตถุจำนวน K ตำแหน่งฟังก์ชันปริ้นท์ (หรือ K cluster) แทนการใช้วิธีการจับคู่ในลักษณะทั่วไป (เช่น Euclidean distance) ขณะที่งานวิจัย Jieun and Woo (2012) จะพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของระบบแตกต่างกับงานวิจัย Suroso et al. (2011) คือ การใช้ Red LEDs ที่ถูกติดตั้งอยู่ภายในอาคาร แทนการใช้ค่าความเข้มสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิง

2.5.3.2 การจำแนกข้อมูลที่มีความคลุมเครือของกลุ่มเทคนิค Triangulation

ในงานวิจัย Chenji and Stoleru (2013) ทำการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่พิจารณาระยะทางเสมือนระหว่างโนด โดยนำเสนอวิธีการคำนวณหาตำแหน่งเสมือนที่มีความน่าเชื่อถือด้วยการใช้พีชชีลอจิกซึ่งมีแนวคิดการทำงานคือ ค่าความเข้มสัญญาณที่ตำแหน่งวัตถุรับได้จากโนดอ้างอิงจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปแบบของระยะทางด้วยกระบวนการประเมินของพีชชีลอจิกที่จัดอยู่ในรูปแบบ Single Input Single Output (SISO) จากนั้นคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุด้วยการใช้เทคนิค Lateration นอกจากนี้งานวิจัยดังกล่าวยังได้นำเสนอวิธีแก้ปัญหาความคลุมเครือในกรณีที่โนดวัตถุได้รับสัญญาณจากโนดอ้างอิงได้ไม่เพียงพอต่อความต้องการของระบบ (รับสัญญาณได้น้อยกว่า 3 โหนด) ด้วยการ ใช้ Fuzzy grid prediction ซึ่งมีการกำหนด grid cell ภายในพื้นที่ให้บริการ และพิจารณา grid ดังกล่าวเป็น virtual anchor (หรือ โหนดอ้างอิงเสมือน) จากนั้นคำนวณหาระยะห่างระหว่างตำแหน่งวัตถุและ virtual anchor จากเส้นรอบวง และมุมที่ได้จากทั้งสองตำแหน่ง

ในงานวิจัย Parthiban and Menon (2009) การพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่ใช้เทคนิค Lateration ที่พิจารณาการตัดกันของสามวงกลม โดยในงานวิจัยนี้จะสมมติให้โนดในระบบกระจายตัวอยู่ใกล้กัน ดังนั้นระบบจะมีจำนวนของ trilateration coordinates (การตัดกันของสามวงกลม) ที่มากกว่าหนึ่งพิกัด (ต้องการ trilateration coordinates อย่างน้อย 6

พิกัด) ถัดมาใช้กระบวนการฟัซซี่ลอจิกในการแปลงค่า distance different ให้เป็น distance adjustment และใช้การวิธีการประเมิน defuzzification แบบ centroid เพื่อคำนวณหาพิกัด x และ y

2.5.3.3 การจำแนกข้อมูลที่มีความคลุมเครือของกลุ่มเทคนิค Proximity

ในงานวิจัย Abdelhadi and Anan (2012) Kumar and Kumar (2013) Nanda et al. (2012) และ Parwekar and Reddy (2013) พัฒนาระบบระบุตำแหน่งของวัตถุภายในอาคารโดยใช้เทคนิค range free ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มเทคนิค Proximity โดยในกระบวนการทำงานของเทคนิคนี้จะมีการพิจารณาค่า Edge Weight ของตำแหน่งข้างเคียง ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้เลือกใช้ฟัซซี่ลอจิกสำหรับการประเมินและแปลงค่าพารามิเตอร์ของระบบ (input) ให้อยู่ในรูปของค่า Edge Weight (output) ซึ่งแต่ input ที่ในงานวิจัยพิจารณามีความแตกต่างกัน เช่น งานวิจัย Parwekar and Reddy (2013) และ Kumar and Kumar (2013) เลือกใช้ input เหมือนกันสองค่าคือ RSS และ LQI (Link Quality Indicator) ขณะที่งานวิจัย Abdelhadi and Anan (2012) Alonso et al. (2009) Garcia-Valverde et al. (2013) และ Nanda et al. (2012) เลือกใช้เพียงค่า RSS เป็น input ของระบบ นอกจากนี้งานวิจัย Abdelhadi and Anan (2012) ยังนำเสนอวิธีการ collaborative ระหว่าง โหนดที่รู้ตำแหน่งแน่นอนและ โหนดที่ไม่รู้ตำแหน่ง ซึ่งโหนดที่รู้ตำแหน่งจะทำหน้าที่เหมือน โหนดอ้างอิงที่เคลื่อนที่ได้ ในงานวิจัย Nanda et al. (2012) ทำการจำลองพื้นที่ระบุตำแหน่งแบบสามมิติและเปรียบเทียบผลการระบุตำแหน่งวัตถุระหว่างการใ้ Fuzzy Inference (การอนุมานตัวแปร) แบบ Mamdani และ Sugana งานวิจัย Alonso et al. (2009) และ Garcia-Valverde et al. (2013) นำเสนอเทคนิคระบุตำแหน่งที่พิจารณาค่าตำแหน่งของ AP ที่อยู่ใกล้ตำแหน่งวัตถุมากที่สุด โดย input ของระบบระบุตำแหน่งนี้คือ RSS ขณะที่ output ที่ได้คือ ตำแหน่งของ AP ซึ่งในงานวิจัยดังกล่าวได้ใช้กระบวนการทำงาน automatic learning สำหรับการ updated Fuzzy rule ด้วยเหตุนี้ การระบุตำแหน่งวัตถุในแต่ละครั้ง ค่า Fuzzy rule ดังกล่าวจะถูกปรับปรุงให้มีความถูกต้องยิ่งขึ้น ตัวอย่างระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่พิจารณาการจำแนกข้อมูลพารามิเตอร์ ด้วยฟัซซี่ลอจิกแสดงได้ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ตัวอย่างระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่พิจารณาการจำแนกข้อมูลพารามิเตอร์ด้วยพีซีลอจิก

System types	Techniques	Model	Input	Output	Approach	Papers
Single plane	Trilateration (L)	SISO	RSS	Distance	Lateration	Chenji and Stoleru (2013)
			Distance Dif.	Distance Adj.		Parthiban and Menon (2009)
	Scene Analysis	TISO	EucDis + APD	Edge Weight	WKNN	Alakhras et al. (2013)
		SISO	RSS	Optimum	FCM	Suroso et al. (2011)
	LED		Jieun and Woo (2012)			
	Proximity	TISO	RSS + LQI	Edge Weight	Range free	Parwekar and Reddy (2013)
						Kumar and Kumar (2013)
		SISO	RSS	Edge Weight	Range free	Abdelhadi and Anan (2012)
				Distance	AP coverage	Alonso et al. (2009)
	Garcia-Valverde et al. (2013)					
3D	Proximity	SISO	RSS	Edge Weight	Range free	Nanda et al. (2012)

2.6 กล่าวสรุป

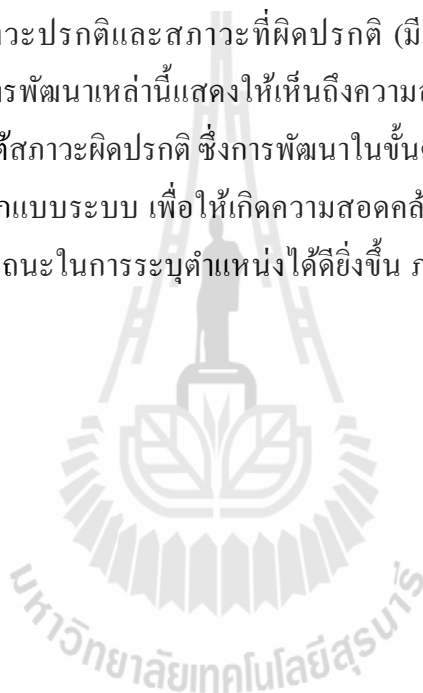
จากการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวกับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารช่วยแสดงให้เห็นถึงบทบาทและความสำคัญของระบบระบุตำแหน่งในปัจจุบัน ที่ได้เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ไม่ว่าจะเป็นด้านการขนส่ง ทางการแพทย์ ทางการทหาร ด้านเกษตรกรรม หรือแม้กระทั่งด้านความปลอดภัยของทรัพย์สินหรือผู้ใช้งาน ซึ่งจากความต้องการและการเพิ่มขึ้นของรูปแบบการนำไปประยุกต์ใช้งานเหล่านี้ ได้กลายมาเป็นแรงผลักดันให้กลุ่มนักวิจัยและกลุ่มนักพัฒนาในปัจจุบันทำการคิดค้นและพัฒนาเทคโนโลยีการทำงานของระบบระบุตำแหน่งให้มีประสิทธิภาพการทำงานที่ดียิ่งขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น การวิวัฒนาการของเทคโนโลยีสื่อสารในปัจจุบัน (เช่น ขนาดที่เล็กลง การประมวลผลที่แม่นยำมากขึ้น หรือความสามารถในการตรวจวัดข้อมูลทางกายภาพต่าง ๆ) และการพัฒนาเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุให้มีประสิทธิภาพ (เช่น การรวมข้อดีของกลุ่มเทคนิคเข้าด้วยกัน) ยังช่วยขยายขีดความสามารถของระบบระบุตำแหน่งวัตถุให้สามารถรองรับความต้องการของการให้บริการในลักษณะต่าง ๆ

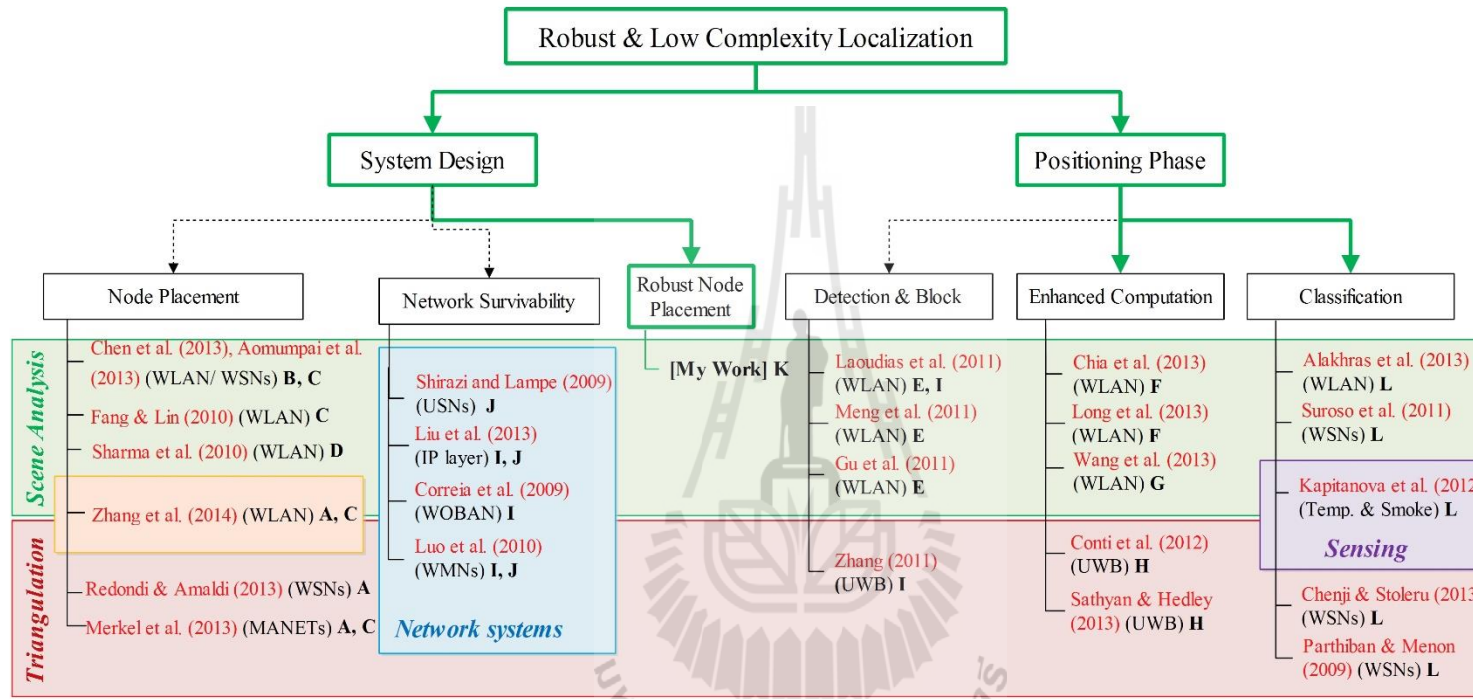
โดยกลุ่มงานวิจัยที่ศึกษาและพัฒนาาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารได้ให้ความสำคัญกับสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งวัตถุหลายชนิด ไม่ว่าจะเป็น ความถูกต้อง ความแม่นยำ ความซับซ้อนในการประมวลผล ความยืดหยุ่นของระบบ หรือแม้กระทั่งค่า cost ที่ถูกพิจารณาในแง่ต่างๆ อย่างไรก็ตาม สำหรับการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร ค่าสมรรถนะเหล่านี้ข้างต้นจะไม่มีประโยชน์และขาดความน่าเชื่อถือ ถ้าหากระบบไม่สามารถรับประกันการทำงานภายใต้สภาวะที่ต่างออกไปได้ เช่น สภาวะที่ผิดปกติของระบบซึ่งเกิดจากโนดบางโนดเสียหรือไม่ทำงาน เป็นต้น ดังนั้นการพิจารณาความสามารถในการทำงานเมื่อระบบระบุตำแหน่งตกอยู่ภายใต้สภาวะการทำงานที่ผิดปกติ หรือการพิจารณาสมรรถนะความคงทนของระบบ จะช่วยรับประกันความสามารถของสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งวัตถุได้

จากการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวกับการพัฒนาสมรรถนะระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารสามารถแบ่งออกเป็นสองกลุ่มตามขั้นตอนการทำงานคือ 1) การพัฒนาการออกแบบระบบ และ 2) การพัฒนากระบวนการค้นหาตำแหน่งของระบบ (การระบุตำแหน่งในขั้นตอนออฟไลน์เฟสและออนไลน์เฟส) สำหรับการพัฒนาในขั้นตอนแรก งานวิจัยในปัจจุบันได้มุ่งเน้นไปที่การพิจารณาการออกแบบและวางแผนตำแหน่งติดตั้งของโนดอ้างอิง โดยมีวัตถุประสงค์ของการติดตั้งที่แตกต่างกัน ซึ่งการพัฒนาในส่วนนี้ ยังไม่พบงานวิจัยใดในปัจจุบันที่พิจารณาการออกแบบและวางแผนตำแหน่งติดตั้งของโนดที่สามารถให้สมรรถนะคงทน หรือความน่าเชื่อถือภายใต้สภาวะการทำงานที่ผิดปกติ และถึงแม้จะมีกลุ่มงานวิจัยที่พิจารณาการออกแบบและวางแผนระบบให้มีความน่าเชื่อถือและมีความทนทานต่อการล้มเหลว หรือการไม่ทำงานของอุปกรณ์ในระบบ

อย่างไรก็ตาม วัตถุประสงค์การทำงานของเครือข่าย (networks) รวมถึงแนวทางการแก้ไข (เช่น การสำรองเส้นทางการรับส่งข้อมูลหรือการเพิ่มแบนด์วิดท์) ที่งานวิจัยกลุ่มดังกล่าวพิจารณาจะแตกต่างจากวัตถุประสงค์การทำงานของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร ซึ่งถ้าหากระบบระบุตำแหน่งวัตถุตกอยู่ภายใต้สถานะที่มีโหนดอ้างอิงบางโหนดในระบบเสียหรือไม่ทำงานตามปกติ กระบวนการระบุตำแหน่งวัตถุอาจยังคงสามารถทำงานได้ แต่ผลกระทบที่ตามมาคือ ความถูกต้องของตำแหน่งที่คำนวณได้จะลดลงอย่างมาก

สำหรับการพัฒนาในขั้นตอนการทำงานที่สอง จากการสำรวจงานวิจัยที่ในกลุ่มนี้พบว่า มีหลายงานวิจัยในปัจจุบันได้พัฒนากระบวนการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุให้สามารถรองรับการทำงานได้ทั้งภายใต้สถานะปกติและสถานะที่ผิดปกติ (มีสมรรถนะความคงทนและความน่าเชื่อถือ) ซึ่งแนวทางการพัฒนาเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการปรับปรุงกลไกการคำนวณหาตำแหน่งภายใต้สถานะผิดปกติ ซึ่งการพัฒนาในขั้นตอนการทำงานนี้ควรถูกดำเนินการควบคู่กับขั้นตอนการออกแบบระบบ เพื่อให้เกิดความสอดคล้องและช่วยให้ระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารมีสมรรถนะในการระบุตำแหน่งได้ดียิ่งขึ้น ภาพรวมของการพัฒนาระบบแสดงดังรูปที่ 2.21





A	Minimize location error	G	Problem of cross-device / Heterogeneous devices
B	Minimize number of RNs	H	Presence of malicious anchors / Location uncertainty
C	Maximize coverage of RNs / Maximize SNR	I	APs fail accidentally or maliciously / gateway failure /
D	Minimize similar fingerprint	J	Link interference / Overloaded network / Hardware failure
E	Detect and eliminate APs	K	Node placement for RNs-failure scenario
F	Signal strength fluctuation due to changes of infrastructures	L	Fuzzy classification

รูปที่ 2.21 ภาพรวมการพัฒนาสมรรถนะความคงทนของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร

บทที่ 3

การพัฒนาเทคนิคระบุหมายเลขชั้นที่สามารถรองรับการทำงาน ภายใต้สภาวะผิดปกติ

3.1 กล่าวนำ

หนึ่งในความท้าทายของระบบระบุตำแหน่งวัตถุไร้สายภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคระบุตำแหน่งฟิงเกอร์ปรี้นท์ติ้ง (fingerprinting technique) คือการล้มของโนดอ้างอิง (reference node failures) หรือสภาวะที่โนดอ้างอิงบางโนดไม่สามารถทำงานได้อย่างปกติ ซึ่งอาจเกิดจากความบกพร่องของฮาร์ดแวร์ (hardware failures) หรือความผิดพลาดของซอฟต์แวร์ (software errors) เป็นต้น เหล่านี้เป็นต้นเหตุที่ทำให้รูปแบบของความแรงสัญญาณที่รับได้ (Received Signal Strength: RSS) ภายในพื้นที่ให้บริการในช่วงออนไลน์เฟส (online phase) มีความผิดเพี้ยน ยิ่งไปกว่านั้นการล้มหรือการไม่ทำงานของโนดอ้างอิงในระบบไม่เพียงจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพความถูกต้องในการระบุหมายเลขชั้นลดลงแล้ว แต่ยังส่งผลกระทบต่อส่วนอื่น ๆ ของระบบระบุตำแหน่งวัตถุ และทำให้สมรรถนะโดยรวมของระบบลดลง ด้วยเหตุนี้ในบทนี้ผู้วิจัยจึงได้มุ่งพัฒนาเทคนิคระบุหมายเลขชั้นที่สามารถรองรับการทำงานทั้งภายใต้สภาวะปกติ (fault-free scenario) และภายใต้สภาวะผิดปกติซึ่งมีโนดอ้างอิงบางโนดในระบบไม่ทำงาน (reference node-failure scenarios)

เนื้อหาในบทที่ 3 แบ่งออกเป็นหัวข้อดังนี้ หัวข้อ 3.2 ภาพรวมและแนวคิดการพัฒนาเทคนิคระบุหมายเลขชั้นที่สามารถรองรับการทำงานภายใต้สภาวะผิดปกติ หัวข้อ 3.3 การพัฒนาเทคนิคระบุหมายเลขชั้น RMoS Floor Algorithm หัวข้อ 3.4 ข้อกำหนดการทดลอง หัวข้อ 3.5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง และหัวข้อ 3.6 กล่าวสรุป

3.2 ภาพรวมและแนวคิดการพัฒนาเทคนิคระบุหมายเลขชั้นที่สามารถรองรับการทำงานภายใต้สภาวะผิดพลาด

สำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุไร้สายภายในอาคารหลายชั้นนั้น ความผิดพลาดในการระบุตำแหน่ง (positioning error) จะอยู่ภายในระนาบสองมิติ (x, y) ซึ่งอาจเป็นการระบุห้องที่ผิดพลาดหรืออาจเป็นระยะที่คลาดเคลื่อนไปจากตำแหน่งจริงเพียงไม่กี่เมตร แตกต่างจากความผิดพลาดในการระบุหมายเลขชั้น (false floor determination) ที่อาจหมายถึงความผิดพลาดของตำแหน่งที่อยู่ในชั้นลานจอดรถแทนที่จะเป็นชั้นสำนักงาน ซึ่งดูเหมือนจะก่อให้เกิดผลกระทบร้ายแรงมากกว่าความผิดพลาดในระนาบสองมิติ และเป็นปัญหาสำคัญนอกเหนือจากการค้นหาตำแหน่งของวัตถุภายในระนาบสองมิติ ยิ่งไปกว่านั้นการล่มของโนดอ้างอิงในช่วงออนไลน์เฟสซึ่งเป็นต้นเหตุทำให้ความแรงสัญญาณที่รับได้จากอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายมีความผิดเพี้ยน และส่งผลกระทบต่อกระบวนการทำงานของระบบระบุตำแหน่งวัตถุ เช่น ขั้นตอนการประมวลผล หรือขั้นตอนการแลกเปลี่ยนข้อมูลในระบบระบุตำแหน่งแบบทำงานร่วมกัน (cooperative localization) เป็นต้น ด้วยเหตุนี้การล่มของโนดอ้างอิงนอกจากจะทำให้สมรรถนะความถูกต้องโดยรวมของระบบลดลงแล้วยังทำให้ความน่าเชื่อถือ (reliability) ของระบบระบุตำแหน่งลดลงอีกด้วย

หลายงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาเทคนิคระบุตำแหน่งเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบ และมุ่งเน้นไปที่การอธิบายลักษณะเฉพาะของค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ อาทิเช่น ค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ (Dardari et al., 2015) (He and Gary, 2016) เป็นต้น มีเพียงไม่กี่งานวิจัยที่พิจารณาระบบระบุตำแหน่งวัตถุที่ตกอยู่ภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงาน เช่น ในงานวิจัย Khauphung et al. (2008) ได้ทำการศึกษาสมรรถนะความคงทน (robustness) ของระบบระบุตำแหน่งวัตถุที่ตกอยู่ภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงาน โดยจากผลการทดลอง เมื่อระบบระบุตำแหน่งตกอยู่ภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงานจำนวน 50% ของโนดอ้างอิงทั้งหมด สมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งของระบบจะลดลงมากถึง 10% - 50% นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่พิจารณาสมรรถนะความคงทนของระบบระบุตำแหน่งในแง่ของความแปรปรวนของค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ (He and Gary, 2016) หรือการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมภายในพื้นที่ให้บริการ เช่น การเคลื่อนย้ายเฟอร์นิเจอร์ (Mager et al., 2015) เป็นต้น

นอกจากนี้ ยังมีงานวิจัยที่มุ่งเน้นพัฒนาเทคนิคระบุหมายเลขชั้นและพิจารณาความคงทนของระบบระบุตำแหน่ง อาทิเช่น งานวิจัยของ Gupta et al. (2014) และงานวิจัยของ Lee and Seunghwan (2014) ทั้งสองงานวิจัยนี้ได้นำเสนอเทคนิคระบุหมายเลขชั้นที่ค้นหาตำแหน่งของวัตถุที่เคลื่อนที่ไป

มาระหว่างชั้นอาคาร โดยงานวิจัย Gupta et al. (2014) นำเสนอเทคนิคระบุหมายเลขชั้นสำหรับหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ไปมาระหว่างชั้นด้วยการใช้ข้อมูลร่วม (incorporative information) ที่ได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดแรงดัน (pressure sensor) และจุดเข้าถึง (access points: APs). โดยเทคนิคระบุชั้นของงานวิจัยดังกล่าวทำงานอยู่บนพื้นฐานการใช้ค่าความแรงสัญญาณที่รับได้จากจุดเข้าถึง และใช้วิธีการความน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood: ML) ระบุหมายเลขชั้นของหุ่นยนต์ ส่วนงานวิจัย Lee and Seunghwan (2014) ได้นำเสนอเทคนิคระบุตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่ใช้งานไจโรสโคป (gyroscopes) หรืออุปกรณ์ตรวจวัดลักษณะการหมุนเพื่อแสดงสถานะของหุ่นยนต์ที่กำลังเคลื่อนที่อยู่ระหว่างชั้นบันได อย่างไรก็ตามทั้งสองงานวิจัยพิจารณาเฉพาะการติดตามความเปลี่ยนแปลงของหมายเลขชั้นเมื่อตำแหน่งของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปมาระหว่างชั้น (ระหว่างชั้นบันได) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง งานวิจัยเหล่านี้ยังไม่ได้พิจารณาสมรรถนะความคงทนของระบบในแง่ของการทำงานที่ล้มเหลวของโนดอ้างอิงในช่วงออนไลน์เฟส ด้วยเหตุนี้จากการปริทัศน์วรรณกรรมข้างต้นจึงเป็นแรงจูงใจให้ผู้วิจัยมุ่งพัฒนาเทคนิคระบุหมายเลขชั้นอาคารเพื่อขยายขีดความสามารถของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารให้สามารถรองรับกับสถานการณ์ที่มีโนดอ้างอิงบางโนดในระบบไม่ทำงาน

3.2.1 เทคนิคระบุหมายเลขชั้นที่มีอยู่ในปัจจุบัน

สำหรับเทคนิคระบุหมายเลขชั้นที่มีอยู่ในปัจจุบันสามารถแบ่งออกเป็นสองประเภทตามพื้นฐานการใช้ฐานข้อมูลตำแหน่งฟิงเกอร์ปรี้นท์ (location fingerprint database) ได้แก่ เทคนิคระบุชั้นที่ใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรี้นท์ และเทคนิคระบุชั้นที่ไม่ใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรี้นท์ สำหรับเทคนิคประเภทแรก เทคนิคระบุหมายเลขชั้นที่ใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรี้นท์ สมรรถนะของระบบจะขึ้นอยู่กับจำนวนของตำแหน่งฟิงเกอร์ปรี้นท์ (fingerprint locations) ที่ถูกบันทึกภายในพื้นที่ให้บริการ ซึ่งจำเป็นต้องมีขั้นตอนการทำงานและใช้ระยะเวลาที่มากขึ้นสำหรับการเก็บรวบรวมข้อมูลความแรงสัญญาณที่รับได้ ณ ตำแหน่งฟิงเกอร์ปรี้นท์ในช่วงออฟไลน์เฟส (offline phase) (He and Gary, 2016) ตรงกันข้ามกับเทคนิคระบุหมายเลขชั้นที่ไม่ใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรี้นท์ซึ่งมีข้อดีคือไม่มีกระบวนการเก็บรวบรวมข้อมูลความแรงสัญญาณที่รับได้ในช่วงออฟไลน์เฟส อย่างไรก็ตามสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพและกลไกการคำนวณของเทคนิคระบุหมายเลขชั้นในช่วงออนไลน์เฟสเป็นหลัก

เพื่อที่จะประเมินสมรรถนะของเทคนิคระบุหมายเลขชั้นที่นำเสนอ ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบเทคนิคระบุหมายเลขชั้นที่นำเสนอกับเทคนิคอื่น ๆ ที่มีอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งมีทั้งเทคนิคที่ใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนธ์และเทคนิคที่ไม่ใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนธ์ เทคนิคที่ใช้ฐานข้อมูลตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนธ์ที่ประกอบไปด้วย the nearest floor algorithm (Alsehly et al.,2011) (ใช้ชื่อย่อว่า เทคนิค nearest) และ Lui's floor algorithm (Liu and Yang 2011) (ใช้ชื่อย่อว่า เทคนิค Lui's) สำหรับเทคนิคที่ไม่ใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนธ์ได้แก่ the group variance algorithm (Alsehly et al.,2011) (ใช้ชื่อย่อว่า เทคนิค group variance) โดยคำอธิบายการทำงานของทั้งสามเทคนิคระบุชั้นแสดงดังนี้

3.2.1.1 Nearest Floor Algorithm (Alsehly et al.,2011)

เทคนิคระบุชั้นนี้ทำงานอยู่บนพื้นฐานของเทคนิคการหาดำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด K จำนวน (K-Nearest Neighbor: KNN) เป็นเทคนิคที่มีการเก็บรวบรวมความแรงสัญญาณในช่วงออฟไลน์เฟสเพื่อใช้สร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนธ์ โดยข้อมูลที่ถูกบันทึกลงในฐานข้อมูลประกอบด้วย ชื่อของโนดอ้างอิง หมายเลขของอุปกรณ์เข้าถึง (MAC address) หมายเลขชั้น และค่าความแรงสัญญาณสูงสุดที่รับได้ ในการระบุหมายเลขชั้นของเทคนิคนี้ ค่าความแรงสัญญาณที่ตำแหน่งวัดได้รับได้ในช่วงออนไลน์เฟสจะถูกเปรียบเทียบกับค่าความแรงสัญญาณในฐานข้อมูลตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนธ์ จากนั้นระบบจะทำการเลือกตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนธ์ที่มีค่าความแรงสัญญาณใกล้เคียงกับตำแหน่งวัดจำนวน K ตำแหน่ง (เลือกใช้ $K = 3$) และใช้กลไกการคำนวณของเทคนิคการหาดำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุด K จำนวน สุดท้ายจะได้หมายเลขชั้นที่วัดตั้งอยู่

3.2.1.2 Lui's Floor Algorithm (Liu and Yang 2011)

เทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่มีการใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนธ์ร่วมกับการระบุหมายเลขชั้น โดยระบบจะมีการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของความแตกต่างของสัญญาณระหว่างความแรงสัญญาณที่ถูกเก็บบันทึกไว้ในฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนธ์ และความแรงสัญญาณที่ตำแหน่งวัดได้รับได้ จากนั้นระบบจะเลือกหมายเลขชั้นที่วัดตั้งอยู่โดยพิจารณาจากค่าเฉลี่ยความแตกต่างของสัญญาณที่น้อยที่สุด

3.2.1.3 Group Variance Algorithm (Alsehly et al.,2011)

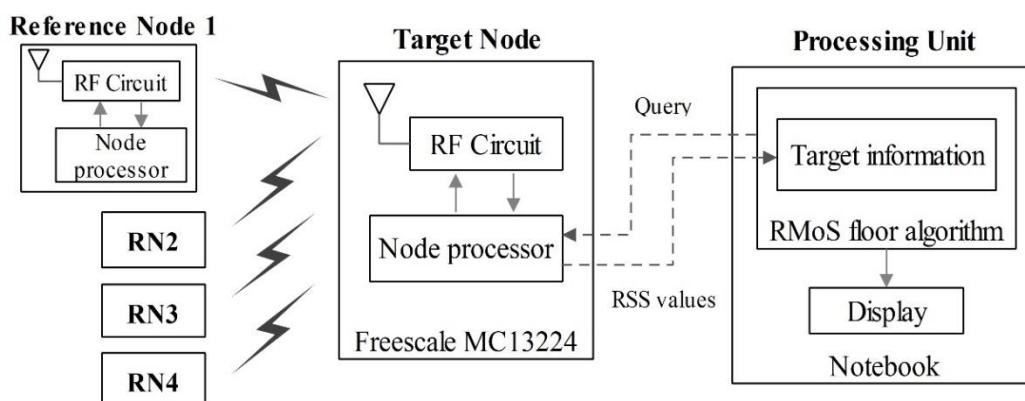
เทคนิคระบุชั้นนี้เป็นเทคนิคที่ไม่อาศัยฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรี้นท์ ซึ่งระบบจะพิจารณาการกระจายตัว (distribution) ของค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ในแต่ละชั้นในช่วงออนไลน์เฟส โดยพิจารณาค่าพารามิเตอร์ทางสถิติที่รับได้จากโนดอ้างอิงจำนวน 3 ชนิดประกอบไปด้วย ค่าพิสัย (range) ค่าความแปรปรวน (variance) และค่าการใช้ได้ (availability) โดยเทคนิคระบุชั้นจะมีการกำหนดค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อใช้เป็นคะแนนให้กับแต่ละชั้น หรือที่เรียกว่า floor points จากนั้นระบบจะเปรียบเทียบ floor points และเลือกหมายเลขชั้นที่ให้ค่า floor points สูงที่สุดเป็นชั้นที่วัตถุตั้งอยู่

3.3 การพัฒนาเทคนิคระบุหมายเลขชั้น RMoS Floor Algorithm

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้อธิบายการทำงานของเทคนิคระบุหมายเลขชั้นที่นำเสนอสำหรับระบบระบบตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยดังนี้ หัวข้อ 3.3.1 อธิบายโครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร หัวข้อ 3.3.2 อธิบายเทคนิคระบุชั้นที่มีความคงทนซึ่งให้ชื่อเรียกว่า Robust Mean of Sum-RSS (RMoS) floor algorithm และเป็นเทคนิคระบุชั้นที่ถูกพัฒนามาจากงานวิจัย (Maneerat and Prommak, 2014) โดยเทคนิค RMoS floor algorithm เป็นเทคนิคที่ไม่ใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรี้นท์ร่วมกับการระบุหมายเลขชั้น ซึ่งจะใช้เพียงแต่ค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ในช่วงออนไลน์เฟสระบุหมายเลขชั้นของวัตถุ (บทความนี้ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการนานาชาติ (Maneerat et al., 2016))

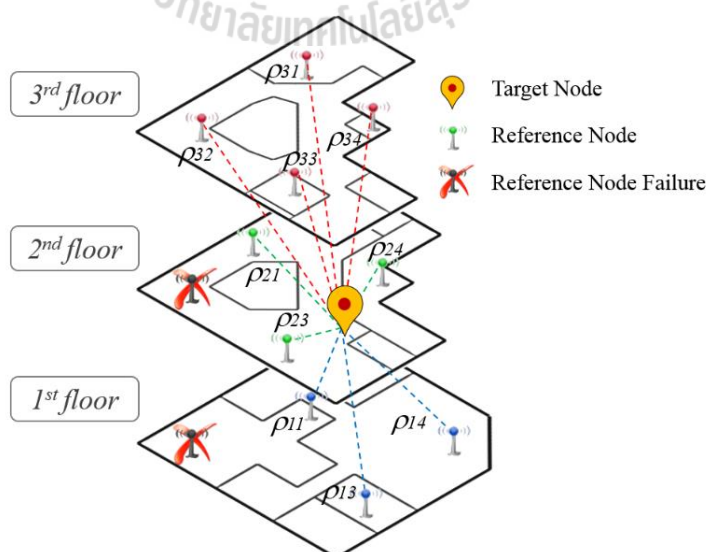
3.3.1 โครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งวัตถุ

องค์ประกอบหลักของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารของวิทยานิพนธ์นี้แสดงดังรูปที่ 3.1 ประกอบไปด้วยโนดอ้างอิง (reference nodes: RNs) โหนดวัตถุ (target node) และหน่วยประมวลผล (processing unit) โหนดอ้างอิงคืออุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่ถูกติดตั้งในส่วนต่าง ๆ ของอาคาร ทำหน้าที่จะส่งค่าความแรงสัญญาณให้กับโนดวัตถุเมื่อได้รับการร้องขอ ขณะที่โนดวัตถุคืออุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่สามารถเคลื่อนที่ได้ โดยโนดวัตถุจะร้องขอค่าความแรงสัญญาณจากโนดอ้างอิง จากนั้นจะส่งข้อมูลความแรงสัญญาณนี้ไปยังหน่วยประมวลผลเพื่อคำนวณหมายเลขชั้นด้วยเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุ



รูปที่ 3.1 แผนภาพขององค์ประกอบหลักที่ใช้ในระบบระบุตำแหน่งวัตถุ

รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ตกอยู่ภายใต้สถานะที่มีโนดอ้างอิงจำนวน 2 โหนดไม่ทำงาน จากรูป 3.2 แต่ละชั้นทำการติดตั้งโนดอ้างอิงจำนวน 4 โหนด เส้นประแทนค่าความแรงสัญญาณที่โนดวัตถุรับได้จากโนดอ้างอิงในระบบ โดยภายใต้สถานะผิดปกตินี้มีโนดอ้างอิงบนชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 จำนวนชั้นละ 1 โหนดไม่สามารถทำงานได้ สาเหตุอาจเกิดจากความบกพร่องของฮาร์ดแวร์ หรือความผิดพลาดของซอฟต์แวร์ ด้วยเหตุนี้โนดวัตถุจึงไม่สามารถรับค่าความแรงสัญญาณของโนดอ้างอิงดังกล่าวได้ และส่งผลให้การคำนวณหาหมายเลขชั้นของวัตถุมีความผิดพลาดเกิดขึ้น



รูปที่ 3.2 สถานะล้มเหลวที่เกิดจากการเสียของโนดอ้างอิง

3.3.2 กรอบการทำงานของเทคนิคระบุชั้น RMoS Floor Algorithm

เทคนิคระบุหมายเลขชั้นที่นำเสนอทำงานอยู่บนพื้นฐานของผลรวม (summations) ของความแรงสัญญาณที่โนดวัดได้รับได้จากโนดอ้างอิงที่ทำงานได้อย่างปกติในช่วงออนไลน์เฟส อีกทั้งเพื่อที่จะแก้ปัญหาความแปรปรวนของค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับภายในอาคาร ผู้วิจัยได้ใช้แนวคิดของการเปรียบเทียบช่วงความเชื่อมั่นของข้อมูล (confidence interval) ร่วมกับการระบุหมายเลขชั้นของเทคนิค RMoS โดยจะมีการเปรียบเทียบช่วงความเชื่อมั่นของค่าเฉลี่ยของผลรวมความแรงสัญญาณที่ได้รับได้ (mean of the RSS summations) เพื่อคำนวณหาหมายเลขชั้นของวัตถุ ซึ่งการทำงานของเทคนิคระบุชั้น RMoS ที่นำเสนออธิบายได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการทำงานของเทคนิคระบุชั้น RMoS และตารางที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการทำงาน (pseudo code) ของเทคนิคระบุชั้น RMoS โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้ เริ่มต้นจากโนดวัตถุทำการวัดหรือสแกน (scans) ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับจากโนดอ้างอิงที่ถูกติดตั้งภายในอาคารหลายชั้น จากนั้นจะได้เซตของค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับพร้อมกับชื่อเฉพาะของโนดอ้างอิง (reference node IDs) นั้น ๆ เพื่อใช้เป็นอินพุตให้กับเทคนิคระบุหมายเลขชั้น RMoS หมายเหตุวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้โนดวัตถุทำการวัดค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับจำนวน Γ ครั้ง ($\Gamma = 20$) ซึ่งจำนวนครั้งของการวัดค่าจะต้องไม่น้อยเกินไปจนไม่มีนัยสำคัญ และต้องไม่มากเกินไปจนส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการวัดค่ามีมากเกินไป อีกทั้งอัตราเร็วในการวัดข้อมูล (sampling rate) จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการร้องขอสัญญาณของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่เลือกใช้งาน ในกรณีนี้ผู้วิจัยได้กำหนดจำนวนครั้งของการวัดค่าความแรงสัญญาณซึ่งมีค่าไม่เกิน 30 ครั้ง ($\Gamma = 20$) ด้วยเหตุนี้ การคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่นของข้อมูลจึงใช้วิธีการแจกแจงแบบที (the t-distribution) (Jain, 1991) แต่ถ้าหากการวัดค่ามีมากกว่า 30 ครั้ง การคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่นของข้อมูลจะใช้วิธีการแจกแจงแบบปกติ (the normal distribution) (Jain, 1991)

เมื่อได้ค่าอินพุตที่ใช้อ้างอิงให้กับเทคนิคระบุชั้นแล้ว ระบบจะทำการคำนวณหาผลรวมของความแรงสัญญาณ (the RSS summation) \mathcal{Y}_f^T ด้วยสมการที่ 3.1 โดยในแต่ละครั้งของการวัดค่า \mathcal{Y}_f^T นั้น ตัวแปร \mathcal{Y}_f^T คือผลรวมของความแรงสัญญาณที่ได้รับจากโนดอ้างอิงจำนวน \mathcal{N}_f โหนด โดยที่ \mathcal{N}_f คือเซตของ $x\%$ ของโนดอ้างอิงที่ติดตั้งอยู่บนชั้น f^h ตัวแปร ρ_{fn}^T หมายถึงค่าความแรงสัญญาณที่วัดได้ในครั้งที่ \mathcal{Y}_f^T และรับได้จากโนดอ้างอิง n^h ที่ติดตั้งอยู่บนชั้น f^h หมายเหตุ $n=1, 2, \dots, \mathcal{N}_f$ เมื่อ \mathcal{N}_f คือจำนวนของโนดอ้างอิงทั้งหมดที่ถูกติดตั้งอยู่บนชั้น f^h และตัวแปร Ψ คือเซตของหมายเลขชั้นอาคารทั้งหมด

$$\gamma_f^\tau = \sum_{n \in \mathfrak{N}_f} \rho_{fn}^\tau \quad (3.1)$$

ถัดมาจะได้เซตของ $\Lambda_f = \{\gamma_p^\tau, \gamma_p^\tau, \dots, \gamma_p^\tau, \dots, \gamma_p^\tau\}$ โดยที่ Λ_f คือเซตของผลรวมค่าความแรงสัญญาณที่รับได้บนชั้น f^u ของการวัดทั้งหมด Γ ครั้ง จากนั้นใช้สมการที่ 3.2 คำนวณหาค่า $\Phi(\Lambda_f)$ หรือช่วงความเชื่อมั่น (L_f, U_f) ของค่าเฉลี่ยของผลรวมความแรงสัญญาณที่รับได้ของแต่ละชั้น

$$p(L_f \leq \mu \leq U_f) \approx 1 - \beta \quad (3.2)$$

เมื่อ L_f คือขอบเขตล่างของข้อมูล U_f คือขอบเขตบนของข้อมูล และ $1 - \beta$ คือ ความน่าจะเป็นที่กลุ่มประชากรเฉลี่ย (population mean) ของค่าความแรงสัญญาณ (μ) จะอยู่ระหว่าง L_f และ U_f ซึ่งค่า L_f, U_f และ β สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3 ถึง 3.5 ตามลำดับ

$$L_f = \eta(\Gamma) - t_{[1-(\beta/2); \Gamma-1]} \sqrt{\frac{\sigma^2(\Gamma)}{\Gamma}} \quad (3.3)$$

$$U_f = \eta(\Gamma) + t_{[1-(\beta/2); \Gamma-1]} \sqrt{\frac{\sigma^2(\Gamma)}{\Gamma}} \quad (3.4)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{c}{100} \right) \quad (3.5)$$

เมื่อสมการที่ 3.3 และสมการที่ 3.4 ถูกใช้เพื่อคำนวณหาขอบเขตล่าง L_f และขอบเขตบน U_f ของกลุ่มตัวอย่างค่าผลรวมความแรงสัญญาณที่รับได้ที่ความเชื่อมั่นของข้อมูล $c\%$ โดยที่ η คือค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างค่าผลรวมความแรงสัญญาณที่รับได้ ตัวแปร σ คือค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่าง และ $t_{[1-(\beta/2); \Gamma-1]}$ คือค่าควอนไทล์ (quantile) ของ $(1-(\beta/2))$ สำหรับการแจกแจงแบบทีที่มีจำนวน Γ ตัวอย่าง (Jain, 1991)

ขั้นตอนสุดท้ายของการระบุหมายเลขชั้น เทคนิคระบุหมายเลขชั้น RMoS จะทำการเปรียบเทียบช่วงความเชื่อมั่นของข้อมูล $\Phi(\Lambda_f)$ ที่ได้จากแต่ละชั้นจำนวน Ψ ชั้น จากนั้นเทคนิค RMoS จะเลือกหมายเลขชั้นที่มีค่า $\Phi(\Lambda_f)$ สูงที่สุดเป็นชั้นที่วัตถุประสงค์อยู่ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 3.6

$$floor = \arg \max_f (\Phi(\Lambda_f)) \quad (3.6)$$

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ใช้ในเทคนิคระบุหมายเลขชั้น RMoS floor algorithm

Variable	Definition
Λ_f	A set of the summation of the strongest RSS on the f^{th} floor $\{\gamma_f^1, \gamma_f^2, \dots, \gamma_f^{\Gamma}\}$
Ψ	A set of floors in the service areas $\{1, 2, \dots, F\}$
\mathcal{R}_f	A set of $x\%$ of RNs on the f^{th} floor that gives the strongest RSS values
$x\%$	The percentage of RNs that would be considered on each floor in the floor determination step
$\Phi(\cdot)$	The confidence interval for the mean of the RSS summations
γ_f^{τ}	The summation of the RSS that the target node receives from \mathcal{R}_f
ρ_{fn}^{τ}	The RSS value which is τ^{th} measurement from RN n^{th} on the f^{th} floor
N_f	Maximum number of RNs on the f^{th} floor
Γ	The number of RSS samples
F	The total number of floors in the multi-story buildings
L_f	the lower limit of the confidence of the population mean on the f^{th} floor
U_f	the upper limit of the confidence of the population mean on the f^{th} floor
μ	The population mean
σ	The sample standard deviation
η	The sample mean
c	The confidence level (i.e. 95% or 90%)
β	A significance level (i.e. 0.05 or 0.1)
$1-\beta$	The confidence coefficient
$t_{[1-(\beta/2); \Gamma-1]}$	The $(1-(\beta/2))$ -quantile of t -distribution and Γ samples

ตารางที่ 3.2 ขั้นตอนการทำงานของเทคนิคระบุชั้น RMoS floor algorithm

Input :		Specify Γ , F , N_p , $x\%$, the initial value of c
Output :		Floor number on which the target node is situated at the confidence level c
1:	The target node scans for RSS sent from the reference nodes.	
<i>(Begin the floor determination step)</i>		
2:	Repeat	
3:	Repeat	
4:	Compute the RSS summation $\gamma_f^\tau = \sum_{n \in \mathcal{R}_f} \rho_{fn}^\tau$	
5:	Until $\tau = \Gamma$	
6:	Set $\Lambda_f = \{\gamma_f^1, \gamma_f^2, \dots, \gamma_f^\tau, \dots, \gamma_f^\Gamma\}$	
7:	Until $f = F$	
8:	Set the confidence level $c =$ the specified initial value	
9:	Calculate $\Phi(\Lambda_f)$ with %CI = c for all $f \in \Psi$	
10:	If $\Phi(\Lambda_f)$ of any floor is overlapped	
11:	Repeat	
12:	Reduce the confidence level c	
13:	Calculate $\Phi(\Lambda_f)$ with %CI = c for all $f \in \Psi$	
14:	Until no overlap of $\Phi(\Lambda_f)$	
15:	c is the %CI of sum of the strongest RSS from \mathcal{R}_f for all $f \in \Psi$	
16:	The floor where the target node is located is associated with the floor that has the highest $\Phi(\Lambda_f)$ at the confidence level c . $floor = \arg \max_f (\Phi(\Lambda_f))$ at the confidence level c	

3.4 ข้อกำหนดการทดลอง

เพื่อที่จะวิเคราะห์สมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่ง RMoS ที่นำเสนอ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเปรียบเทียบผลสมรรถนะในการระบุชั้นของเทคนิคที่นำเสนอกับเทคนิคระบุชั้นที่มีอยู่ในปัจจุบัน โดยทำการเปรียบเทียบกับเทคนิคระบุหมายเลขชั้นสองประเภทซึ่งประกอบด้วย เทคนิคที่ใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรี้นท์ร่วมกับการระบุหมายเลขชั้น ได้แก่ เทคนิค Nearest (Alsehly et al.,2011) และเทคนิค Lui's (Liu and Yang 2011) และเทคนิคที่ไม่ใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรี้นท์ร่วมกับการระบุหมายเลขชั้นคือ เทคนิค Group variance (Alsehly et al.,2011) โดยสาเหตุที่ผู้วิจัยเลือกพิจารณาเปรียบเทียบสมรรถนะความถูกต้องในการระบุหมายเลขชั้นกับเทคนิคระบุชั้นทั้งสองประเภทคือ เพื่อประเมินและวิเคราะห์การทำงานของเทคนิคแต่ละประเภทเมื่อตกอยู่ภายใต้สถานการณ์ที่แตกต่างกัน

ในการวิเคราะห์สมรรถนะของเทคนิคระบุหมายเลขชั้น ผู้วิจัยได้แบ่งประเด็นการพิจารณาออกเป็น 2 หัวข้อดังนี้

- 1) เพื่อเปรียบเทียบผลสมรรถนะของเทคนิคระบุหมายเลขชั้นที่ตกอยู่ภายใต้สภาวะการทำงานปรกติและภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงบางโนดในระบบไม่ทำงาน
- 2) เพื่อเปรียบเทียบผลสมรรถนะของเทคนิคระบุหมายเลขชั้นภายในพื้นที่ให้บริการที่มีขนาดแตกต่างกัน

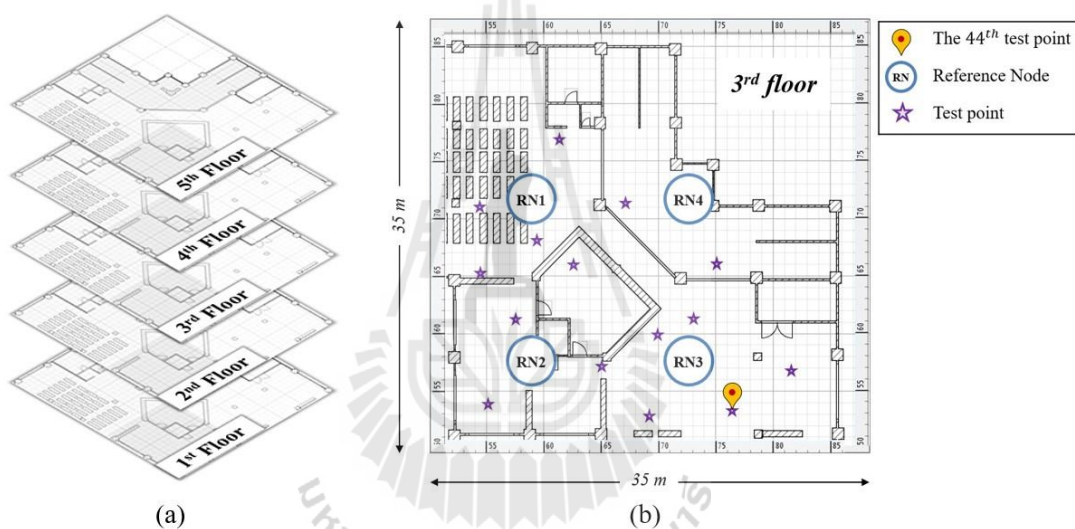
สำหรับข้อกำหนดการทดลองแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยดังนี้ หัวข้อ 3.4.1 สถานที่การทดลอง และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง และหัวข้อ 3.4.2 อุปกรณ์การทดลอง

3.4.1 สถานที่การทดลองและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

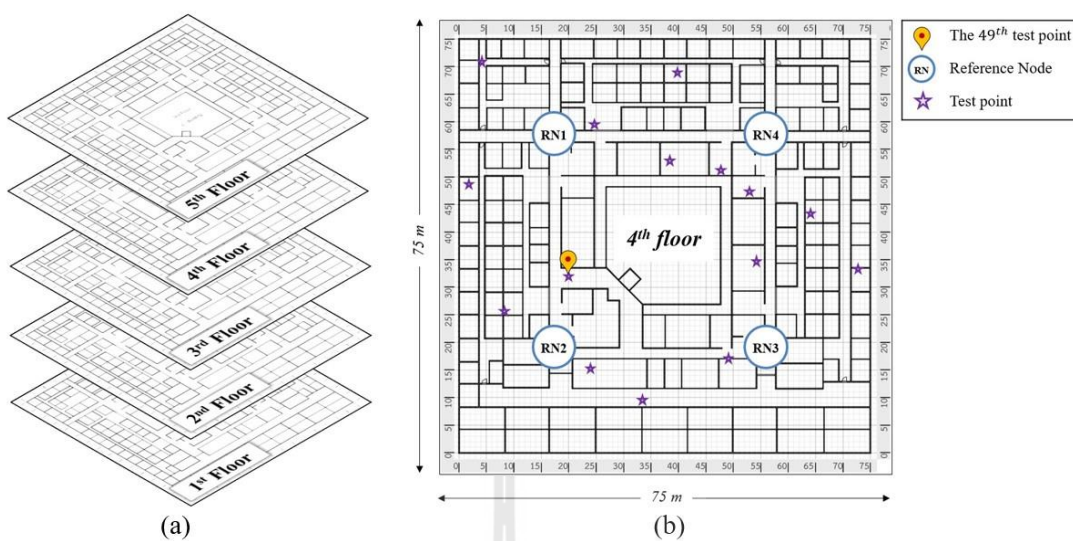
ทำการทดลองกับพื้นที่ให้บริการ 2 สถานที่ ซึ่งทั้งสองสถานที่เป็นอาคารขนาด 5 ชั้น โดยแต่ละอาคารมีขนาดและโครงสร้างที่แตกต่างกัน ได้แก่ พื้นที่การทดลองแรกให้ชื่อเรียกว่า Building A เป็นอาคารบรรณสารที่มีขนาดพื้นที่แต่ละชั้นประมาณ 35x35 ตารางเมตร และพื้นที่การทดลองที่สองให้ชื่อเรียกว่า Building B เป็นอาคารสำนักงานที่มีขนาดพื้นที่แต่ละชั้นประมาณ 75x75 ตารางเมตร แผนผังของอาคารทั้งสองแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 ตามลำดับ ทำการติดตั้งโนดอ้างอิงจำนวน 20 โหนดกับทั้งสองอาคาร โดยติดตั้งโนดอ้างอิงจำนวน 4 โหนดในแต่ละชั้นซึ่งมีรูปแบบการวางแบบสม่ำเสมอ (uniform placement) แสดงดังรูปที่ 3.3(b) และรูปที่ 3.4(b) และทำการสุ่มตำแหน่งของจุดทดสอบด้วยการสุ่มแบบสม่ำเสมอ (uniform random) จำนวนชั้นละ 15 จุด

ทดสอบ (รวมจุดทดสอบทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 75 จุดทดสอบ) เพื่อใช้สำหรับวิเคราะห์สมรรถนะของเทคนิคระบุหมายเลขชั้น โดยข้อกำหนดของการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 3.3

เพื่อที่จะแก้ปัญหาสภาวะการทำงานที่ล้มเหลวที่มีสาเหตุมาจากการล่มของ โหนดอ้างอิง ในการคำนวณหาค่าผลรวมของความแรงสัญญาณที่รับได้ ผู้วิจัยจะไม่ใช้ค่าความแรงสัญญาณที่รับได้จากโหนดอ้างอิงทุกโหนดภายในระบบ แต่จะพิจารณาเพียงแค่ว่าค่าความแรงสัญญาณที่แรงที่สุดที่รับได้จากโหนดอ้างอิงจำนวน $x\%$ ในแต่ละชั้น โดยจากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าการพิจารณาโหนดอ้างอิงที่ให้ค่าความแรงสัญญาณแรงที่สุดจำนวน 50% ($x=50\%$) เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณหาค่าผลรวมความแรงสัญญาณที่รับได้ภายใต้สภาวะที่มีโหนดอ้างอิงบางโหนดไม่ทำงาน



รูปที่ 3.3 พื้นที่การทดลองของ Building A (a) โครงสร้างของอาคาร 5 ชั้น (b) แผนผังของอาคาร และตัวอย่างของตำแหน่งจุดทดสอบจำนวน 15 จุดทดสอบที่อยู่บนชั้นที่ 3



รูปที่ 3.4 พื้นที่การทดลองของ Building B (a) โครงสร้างของอาคาร 5 ชั้น (b) แผนผังของอาคาร และตัวอย่างของตำแหน่งจุดทดสอบจำนวน 15 จุดทดสอบที่อยู่บนชั้นที่ 4

ตารางที่ 3.3 ข้อกำหนดของการทดลอง

Parameter	Detail
Floor dimensions	35m. × 35m. (Building A), 75m. × 75m. (Building B)
RN placement	Uniform placement
Test points	Total of 75 test points (15 test points/floor)
Number of RNs	Total of 20 Nodes (4 nodes/floor)
Test scenario	Fault-Free and RN-Failures
RN Failures pattern	20 failure patterns are random for each RN-failure scenario

3.4.2 อุปกรณ์การทดลอง

วิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ของ Freescale MC13224 รุ่นที่ 3 เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บวัดค่าความแรงสัญญาณที่รับได้เพื่อใช้สำหรับสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างความแรงสัญญาณกับระยะทาง ซึ่งจำแนกอุปกรณ์ออกเป็นสองชนิดคือ โหนดวัดและโหนดอ้างอิง โดยโหนดอ้างอิงจะมีสายอากาศชนิด Inverted F-antenna และ SMA-antenna (Sub Miniature version “A” connector antenna) ขณะที่โหนดวัดมีสายอากาศชนิด Inverted F-antenna กำหนดให้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายทุกโหนดทำงานในย่านความถี่ 2.480 GHz (Channel 26) (IEEE Std., 2011) และกำหนดให้ความสูงของโหนดอ้างอิงและโหนดวัดมีค่าเท่ากับ 2 เมตรและ 0.8 เมตร ตามลำดับ ในการได้มาซึ่งค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ โหนดวัดจะทำการรวบรวมค่าความแรงสัญญาณที่ถูกส่งมาจากโหนดอ้างอิงซึ่งถูกติดตั้งอยู่ในอาคาร โดยค่าความแรงสัญญาณเหล่านี้จะถูกใช้เพื่อคำนวณหาตำแหน่งของโหนดวัดภายในอาคารหลายชั้น และอัตราเร็วในการวัดข้อมูล (sampling rate) หรือจำนวนความถี่ในการเก็บวัดค่าความแรงสัญญาณต่อหนึ่งวินาทีของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายคือ 1 ครั้งภายใน 3 วินาที โดยวิทยานิพนธ์นี้พิจารณาดำเนินงานของโหนดวัดที่ไม่เคลื่อนที่ (stationary node) สำหรับการทดสอบสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่ง ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายสามารถศึกษาได้จากภาคผนวก ก.1 รูปที่ 3.5 แสดงอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่ใช้ในการทดลอง และตารางที่ 3.4 แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณที่ใช้ในการทดลอง



a) โนคอ้างอิง



b) โนควัตถุ



c) ชุดอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย.

รูปที่ 3.5 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.4 รายละเอียดของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณที่ใช้ในการทดลอง

Specification	Detail
Manufacturer	Freescale
Chipset	MC13224V
Frequency range	2.405 GHz – 2.480 GHz
Operating channel	CH 26 (2.480 GHz)
Rx sensitivity	-95 dBm
Transmit power	+3 dBm
Antenna	Inverted F-antenna and SMA-antenna

3.5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

เพื่อที่จะวิเคราะห์สมรรถนะของเทคนิคระบุชั้นที่ตกอยู่ภายใต้สภาวะการทำงานแบบต่าง ๆ ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้แบ่งการวิเคราะห์ผลการทดลองออกเป็น 2 หัวข้อได้แก่ หัวข้อ 3.5.1 ผลการทดลองภายใต้สภาวะปกติ และหัวข้อ 3.5.2 ผลการทดลองภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงบางโนดในระบบเสียหรือไม่ทำงาน

3.5.1 การทดลองภายใต้สภาวะปกติ

สำหรับการทดลองภายใต้สภาวะปกตินี้ โหนดอ้างอิงทุกโนดที่ถูกติดตั้งอยู่ภายในพื้นที่ให้บริการจะสามารถทำงานได้อย่างปกติ โดยแบ่งเป็นหัวข้อการศึกษาสองหัวข้อย่อยคือ หัวข้อ 3.5.1.1 มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของผลรวมของความแรงสัญญาณที่โนดวัดถูกรับได้จากโนดอ้างอิงที่ถูกติดตั้งในแต่ละชั้น และหัวข้อ 3.5.1.2 มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิคระบุชั้นที่นำเสนอกับเทคนิคระบุชั้นที่มีอยู่ในปัจจุบันภายใต้สภาวะการทำงานปกติ

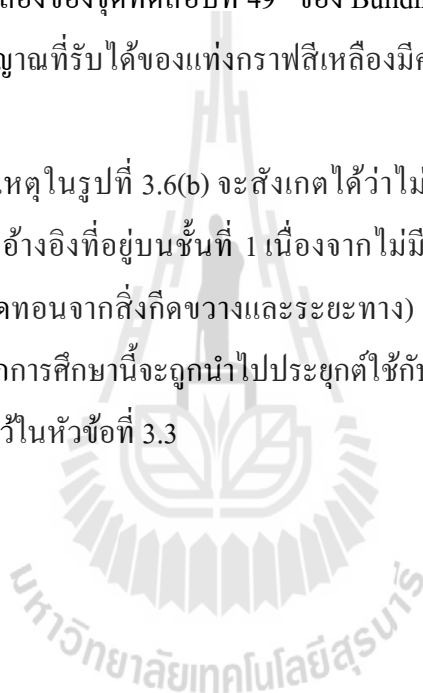
3.5.1.1 การวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะผลรวมความแรงสัญญาณ

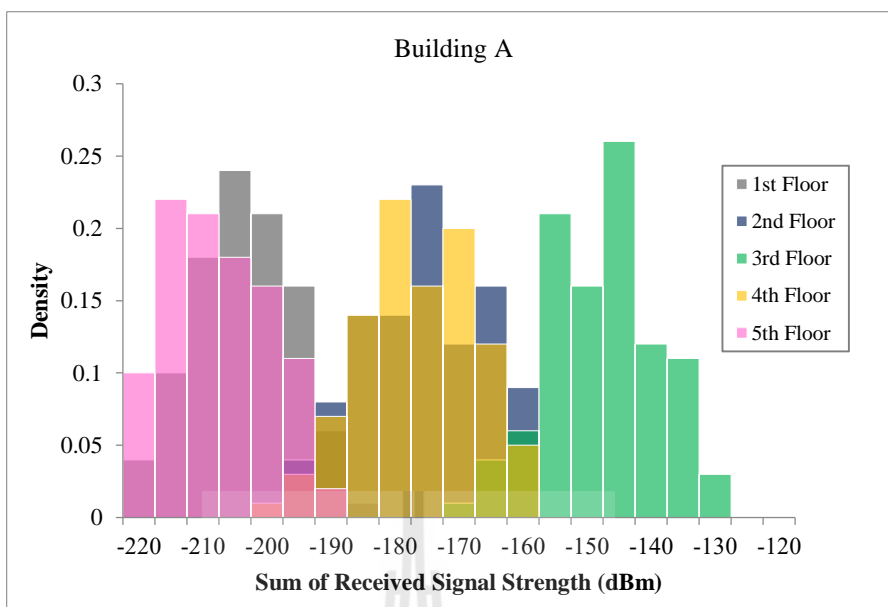
อันดับแรกผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของผลรวมความแรงสัญญาณที่รับได้ที่ตำแหน่งใด ๆ โดยพิจารณาจุดทดสอบที่ 44th เป็นจุดทดสอบที่อยู่บนชั้นที่ 3 ของพื้นที่การทดลอง Building A และพิจารณาจุดทดสอบที่ 49th เป็นจุดทดสอบที่อยู่บนชั้นที่ 4 ของพื้นที่การทดลอง Building B แทนด้วยสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมในรูปที่ 3.3(b) และรูปที่ 3.4(b) ตามลำดับ โดยทั้งสองกรณีการศึกษามีค่าพารามิเตอร์ดังนี้ $F = 5$, $N_f = 4$, $x = 50\%$ และ $\Gamma = 20$

ที่ตำแหน่งจุดทดสอบที่ 44th (Building A) และจุดทดสอบที่ 49th (Building B) ทำการวัดค่าความแรงสัญญาณจากโนดอ้างอิงทุกโนดที่อยู่ภายในอาคารจำนวน 20 ครั้ง โดยแต่ละครั้งของการวัดค่า \mathcal{I}^h นั้น ค่าความแรงสัญญาณจำนวน 20 ค่าที่ได้รับจากโนดอ้างอิงที่ถูกติดตั้งในอาคาร (โนดอ้างอิงจำนวน 20 โหนด) แทนด้วย $\rho_{f_n}^T$ (โดยที่ f แทนหมายเลขชั้นของโนดอ้างอิง n^h ที่ส่งค่าความแรงสัญญาณมายังโนดวัด) จากนั้นค่า \mathcal{I}_f^T (ผลรวมความแรงสัญญาณที่แรงที่สุดของ 50% ของโนดอ้างอิงที่ถูกติดตั้งอยู่บนชั้น f^h ของการวัดครั้งที่ \mathcal{I}^h) จะถูกคำนวณด้วยสมการที่ 3.1 และสุดท้ายจะได้ค่าผลรวมของความแรงสัญญาณที่รับได้จำนวน 100 ค่าจากการวัดทั้งหมด 20 ครั้ง (แต่ละการวัด \mathcal{I}^h ค่า $\mathcal{I}_1^T, \mathcal{I}_2^T, \dots, \mathcal{I}_5^T$ จะถูกคำนวณ)

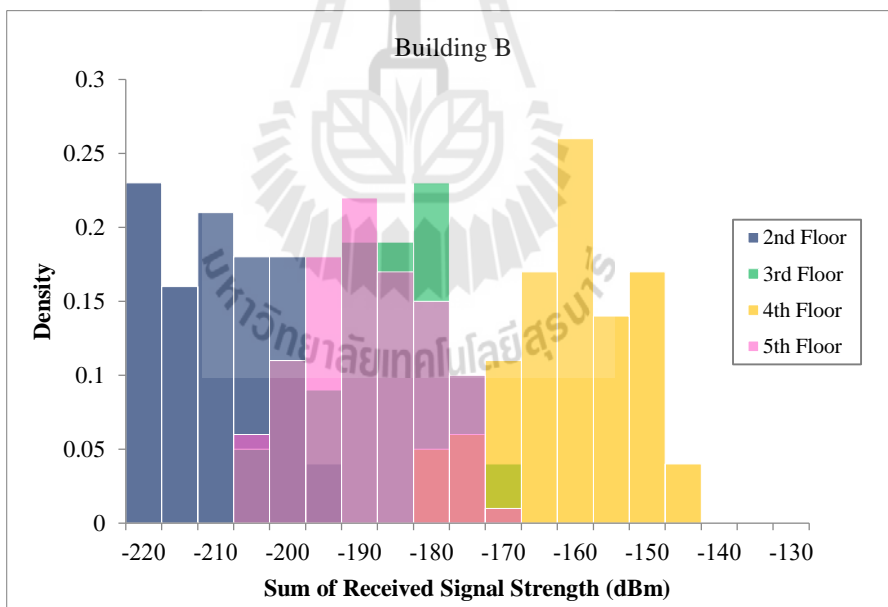
รูปที่ 3.6(a) และรูปที่ 3.6(b) แสดงฮิสโตแกรมผลรวมของความแรงสัญญาณที่จุดทดสอบที่ 44th ของ Building A และจุดทดสอบที่ 49th ของ Building B ตามลำดับ โดยกราฟแท่งแต่ละสีหมายถึงผลรวมของความแรงสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงในแต่ละชั้น จากผลการทดลองในรูปที่ 3.6(a) กรณีจุดทดสอบที่ 44th ของ Building A พบว่าผลรวมของความแรงสัญญาณที่รับได้ของกราฟแท่งสีเขียว (ผลรวมของความแรงสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงที่อยู่บนชั้นที่ 3) มีค่ามากกว่ากราฟแท่งสีอื่น ๆ ซึ่งอธิบายได้ว่าผลรวมของความแรงสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงบนชั้นที่ 3 (ซึ่งจุดทดสอบอยู่บนชั้นนี้) มีค่ามากกว่าผลรวมของความแรงสัญญาณที่ได้รับจากโนดอ้างอิงในชั้นอื่น ๆ เช่นเดียวกันกับผลการทดลองของจุดทดสอบที่ 49th ของ Building B ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.6(b) พบว่าผลรวมของความแรงสัญญาณที่รับได้ของแท่งกราฟสีเหลืองมีค่ามากที่สุด ซึ่งระบุว่าจุดทดสอบที่ 49th อยู่บนชั้นที่ 4

หมายเหตุในรูปที่ 3.6(b) จะสังเกตได้ว่าไม่มีกราฟแท่งผลรวมของความแรงสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงที่อยู่บนชั้นที่ 1 เนื่องจากไม่มีสัญญาณจากชั้นที่ 1 ที่ส่งมายังจุดทดสอบบนชั้นที่ 4 (ถูกลดทอนจากสิ่งกีดขวางและระยะทาง) โดยคุณลักษณะเฉพาะของผลรวมความแรงสัญญาณที่ได้จากการศึกษานี้จะถูกนำไปประยุกต์ใช้กับเทคนิคระบุหมายเลขชั้น RMoS ที่ได้นำเสนอ ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.3





a) จุดทดสอบที่ 44th บนชั้นที่ 3 ของพื้นที่บริการ Building A

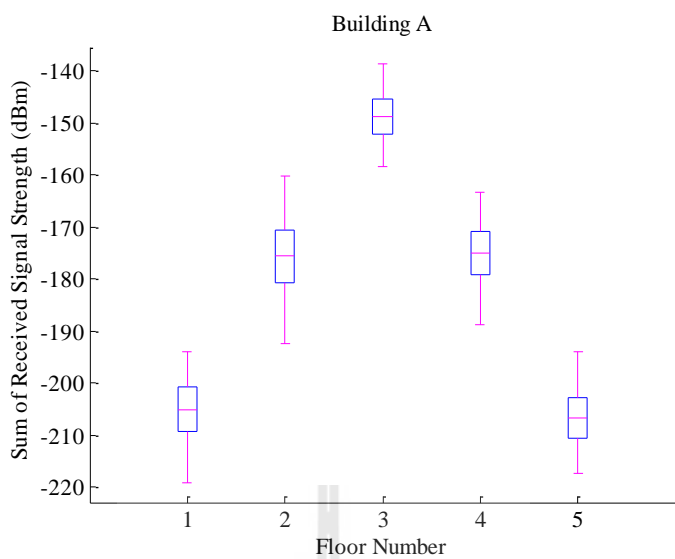


b) จุดทดสอบที่ 49th บนชั้นที่ 4 ของพื้นที่บริการ Building B

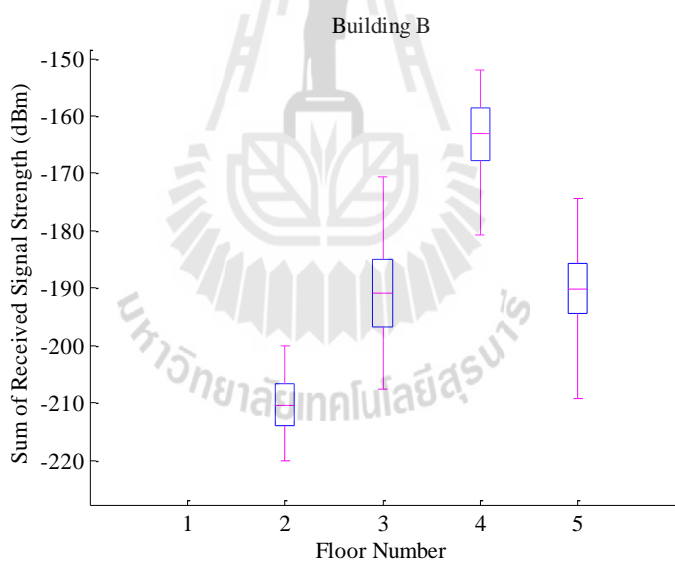
รูปที่ 3.6 ฮิสโตแกรมผลรวมของความแรงสัญญาณภายใต้สภาวะการทำงานปกติ

รูปที่ 3.7(a) และรูปที่ 3.7(b) แสดงผลช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% ของผลรวมความแรงสัญญาณที่รับได้ในแต่ละชั้นของพื้นที่การทดลอง Building A และ Building B ตามลำดับ โดยช่วงความเชื่อมั่นของข้อมูลแสดงโดยกล่อง (box) ที่อยู่ระหว่างขอบเขตบนและขอบเขตล่างของช่วงความเชื่อมั่น เส้นกราฟสีชมพูในกล่องหมายถึง ค่าเฉลี่ยของกลุ่มข้อมูล ผลการทดลองในรูปที่ 3.7(a) และรูปที่ 3.7(b) ช่วยแสดงให้เห็นว่าช่วงความเชื่อมั่นของผลรวมของความแรงสัญญาณที่รับได้บนชั้นจริงของโนด์วัตถุจะมีค่ามากกว่าชั้นอื่น ๆ ($\Phi(\Lambda_3)$ และ $\Phi(\Lambda_4)$ มีค่าสูงที่สุดสำหรับกรณีพื้นที่การทดลอง Building A และ Building B ตามลำดับ) โดยผลการทดลองของทั้งสองจุดทดสอบนี้ไม่เกิดการตัดกัน (no overlap) ระหว่างช่วงความเชื่อมั่นของกล่องสูงที่สุดและช่วงความเชื่อมั่นของกล่องอื่น ๆ ซึ่งผลการทดลองช่วยแสดงให้เห็นว่ากลุ่มข้อมูลของผลรวมความแรงสัญญาณที่รับได้จากชั้นที่จุดทดสอบทั้งสองอยู่มีค่าที่สูงกว่ากลุ่มข้อมูลของชั้นอื่น ๆ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นเทคนิคระบุชั้น RMoS ที่นำเสนอจึงสามารถระบุหมายเลขชั้นของตำแหน่งวัตถุได้อย่างถูกต้อง ซึ่งในการค้นหาครั้งนี้ ตำแหน่งของวัตถุอยู่บนชั้นที่ 3 ของ Building A และอยู่บนชั้นที่ 4 ของ Building B หมายเหตุในรูปที่ 3.7(b) จะไม่มีช่วงความเชื่อมั่นของผลรวมความแรงสัญญาณที่รับได้จากชั้นที่ 1 เนื่องจากโนด์วัตถุไม่สามารถรับค่าความแรงสัญญาณจากโนด์อ้างอิงที่อยู่บนชั้นที่ 1 ได้





a) จุดทดสอบที่ 44th บนชั้นที่ 3 ของพื้นที่บริการ Building A



b) จุดทดสอบที่ 49th บนชั้นที่ 4 ของพื้นที่บริการ Building B

รูปที่ 3.7 ช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% ของค่าเฉลี่ยของผลรวมความแรงสัญญาณที่ได้รับ
ภายใต้สภาวะการทำงานปกติ

3.5.1.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิคระบุชั้นภายใต้สภาวะปกติ

หัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิคระบุชั้นที่นำเสนอ กับเทคนิคระบุชั้นที่มีอยู่ในปัจจุบัน โดยพิจารณาสภาวะการทำงานปกติซึ่งโนคอ้างอิงทุกโนคในระบบสามารถทำงานได้อย่างปกติ โดยทำการเปรียบเทียบกับ 3 เทคนิคระบุชั้นที่ประกอบด้วยเทคนิค Nearest เทคนิค Lui's และเทคนิค Group variance โดยผู้วิจัยได้ใช้เปอร์เซ็นต์ของความถูกต้องในการระบุชั้น (the percentage of the correct floor determination) เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ประเมินสมรรถนะของเทคนิคระบุหมายเลขชั้น สำหรับข้อกำหนดของการทดลองอธิบายได้ดังหัวข้อที่ 3.4 นอกจากนี้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างเทคนิคระบุชั้น RMoS กับเทคนิคอื่น ๆ ที่ใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์ ผู้วิจัยได้พิจารณาผลกระทบของการใช้จำนวนตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์ที่แตกต่างกันได้แก่ 10, 30 และ 50 ตำแหน่ง (กำหนดให้ตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์มีลักษณะการกระจายแบบสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ให้บริการ)

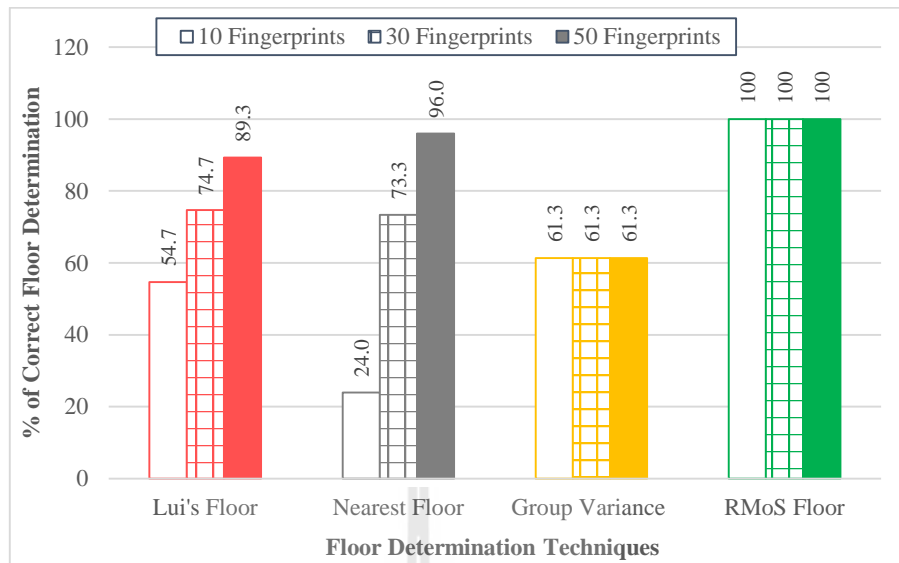
รูปที่ 3.8(a) และรูปที่ 3.8(b) เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ของความถูกต้องในการระบุชั้นของทั้ง 4 เทคนิคภายในพื้นที่การทดลอง Building A และ Building B ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่าเทคนิคระบุชั้น RMoS ที่นำเสนอมีสมรรถนะความถูกต้องดีกว่า 3 เทคนิคระบุตำแหน่ง อีกทั้งยังสามารถระบุหมายเลขชั้นได้อย่างถูกต้อง 100% ในทุกกรณีของจำนวนตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์สำหรับทั้งสองพื้นที่การทดลอง สาเหตุเนื่องมาจากเทคนิค RMoS จะไม่มีการใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์ในขั้นตอนการคำนวณ แต่จะใช้เพียงแต่ความแรงสัญญาณที่โนควัดได้รับได้จากโนคอ้างอิงในช่วงออนไลน์เฟสคำนวณหาหมายเลขชั้นของวัตถุ อีกทั้งยังทำงานอยู่บนพื้นฐานการพิจารณาช่วงความเชื่อมั่นของผลรวมความแรงสัญญาณที่รับได้จากโนคอ้างอิงดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.5.1.1

ในทางกลับกัน เทคนิค Nearest และเทคนิค Lui's ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์ร่วมกับการคำนวณหาหมายเลขชั้น จากผลการทดลองในรูปที่ 3.8 พบว่าสมรรถนะของเทคนิค Nearest และเทคนิค Lui's จะขึ้นอยู่กับจำนวนของฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์ ถ้าหากระบบมีจำนวนของตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์มาก เปอร์เซ็นต์ของความถูกต้องในการระบุหมายเลขชั้นจะมีมาก โดยเทคนิค Nearest มีสมรรถนะความถูกต้องในการระบุชั้นแย่ที่สุดซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ของความถูกต้องในการระบุชั้นเท่ากับ 24% และ 25.3% ในกรณีที่ใช้ฟิงเกอร์ปรีนท์ 10 ตำแหน่งภายในพื้นที่การทดลอง Building A และ Building B ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เทคนิค Nearest ในกรณีการ

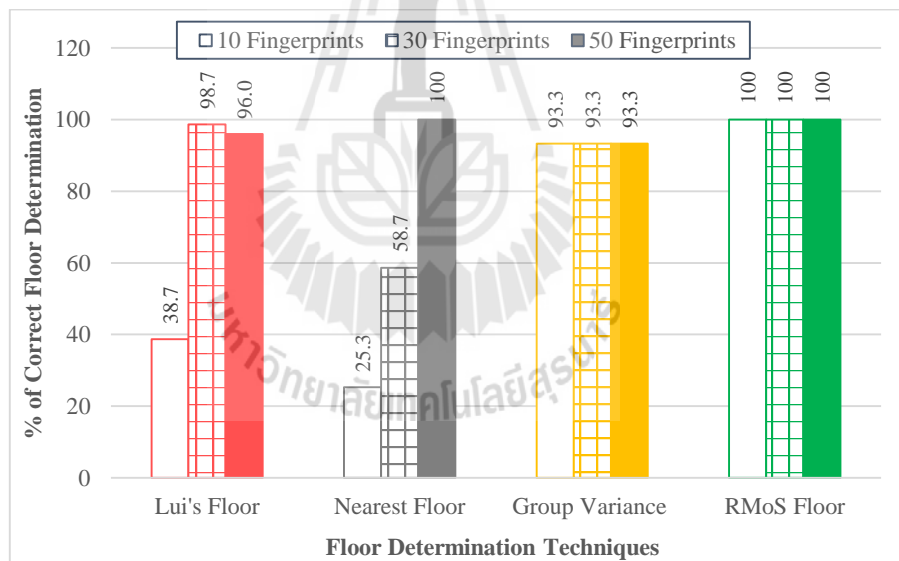
ทดลองที่ Building B สามารถระบุหมายเลขชั้นได้อย่างถูกต้อง 100% ซึ่งต้องใช้จำนวนของตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์เท่ากับ 50 ตำแหน่ง

สาเหตุที่เทคนิค Nearest และเทคนิค Lui's มีสมรรถนะในการระบุชั้นที่แม่นยำหากใช้จำนวนของตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์ที่ไม่ละเอียด (เช่น ตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์เท่ากับ 10 ตำแหน่ง) เนื่องจากข้อจำกัดของกระบวนการทำงานของกลุ่มเทคนิคที่ใช้ฐานข้อมูลฟังก์เจอร์ปริ้นท์ที่ต้องมีการสำรวจพื้นที่และรวบรวมลักษณะเฉพาะของความแรงสัญญาณที่ได้รับได้จากโหนดอ้างอิงที่ติดตั้งภายในพื้นที่ให้บริการในช่วงออฟไลน์เฟส ถ้าผู้ออกแบบเก็บบันทึกตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์น้อยเกินไป (ความละเอียดของฟังก์เจอร์ปริ้นท์ต่ำ) จะส่งผลให้ฐานข้อมูลฟังก์เจอร์ปริ้นท์นั้นไม่สามารถใช้เป็นตัวแทนของลักษณะเฉพาะของความแรงสัญญาณที่ได้รับสำหรับพื้นที่ให้บริการนั้น ดังนั้นสมรรถนะความถูกต้องของเทคนิคระบุตำแหน่งจะลดลงถ้าหากนำฐานข้อมูลที่ไม่ละเอียดนี้มาใช้ร่วมกับการระบุตำแหน่ง และเป็นสาเหตุให้เปอร์เซ็นต์ของความถูกต้องในการระบุหมายเลขชั้นมีค่าที่ต่ำ

ในทางกลับกัน ถึงแม้ว่าการเพิ่มจำนวนของตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์ที่บันทึกลงในฐานข้อมูลจะช่วยให้สมรรถนะของระบบดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจำนวนฐานข้อมูลฟังก์เจอร์ปริ้นท์ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าใช้จ่าย (cost) ในแง่ของเวลาที่ใช้ (time consumption) ในช่วงออฟไลน์เฟสเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจใช้ระยะเวลาในเก็บบันทึกข้อมูลนานเป็นอาทิตย์ถ้าหากพื้นที่การทดลองมีขนาดใหญ่ยิ่งไปกว่านั้น ถ้าหากมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในตัวอาคาร เช่น การเคลื่อนย้ายเฟอร์นิเจอร์หรือการเพิ่ม-ลด จำนวนของโหนดอ้างอิงในระบบ ฐานข้อมูลฟังก์เจอร์ปริ้นท์เหล่านี้จะต้องถูกเก็บบันทึกใหม่ทั้งหมด



a) Building A



b) Building B

รูปที่ 3.8 เปอร์เซนต์ของความถูกต้องในการระบุชั้นภายใต้สภาวะการทำงานปกติ

พิจารณาเทคนิค Group variance ซึ่งไม่มีการใช้ฐานข้อมูลฟังก์เจอร์ปรินท์ร่วมกับการระบุชั้น ผลสมรรถนะในการระบุชั้นจะมีค่าคงที่ในทุกกรณีของจำนวนตำแหน่งฟังก์เจอร์ปรินท์ ซึ่งผลการทดลองในรูปแบบที่ 3.8(a) และรูปที่ 3.8(b) พบว่าสมรรถนะของเทคนิค Group variance จะขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ให้บริการในแต่ละชั้น ถ้าหากพื้นที่ของอาคารมีขนาดใหญ่จะส่งผลทำให้สมรรถนะในการระบุหมายเลขชั้นดีขึ้น โดยเปอร์เซ็นต์ของความถูกต้องในการระบุหมายเลขชั้นของเทคนิค Group variance สำหรับพื้นที่การทดลอง Building B (ซึ่งมีขนาดพื้นที่แต่ละชั้นเท่ากับ 75x75 ตารางเมตร) มีค่ามากกว่าพื้นที่การทดลอง Building A (ซึ่งมีขนาดพื้นที่แต่ละชั้นเท่ากับ 35x35 ตารางเมตร) ซึ่งในกรณีนี้มีเปอร์เซ็นต์ของความถูกต้องในการระบุหมายเลขชั้นที่ Building B เท่ากับ 93.3% และที่ Building A เท่ากับ 61.3%

สาเหตุที่การผลทดลองของเทคนิค Group variance กรณีอาคารขนาดเล็กให้สมรรถนะความถูกต้องที่ต่ำกว่ากรณีอาคารขนาดใหญ่ซึ่งมีจำนวนของโนคอ้างอิงเท่ากัน เนื่องจากความผิดพลาดในการคำนวณค่า floor points ที่เป็นผลมาจากความคล้อยถึงกันของค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ภายในอาคาร ตัวอย่างเช่น เมื่อพิจารณาค่า floor points ที่ได้จากการคำนวณค่าความแปรปรวนของสัญญาณในกรณีอาคารขนาดเล็ก ค่าความแรงของสัญญาณที่ตำแหน่งวัดได้รับได้จากโนคอ้างอิงภายในชั้นจริงของวัตถุและชั้นข้างเคียงมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นค่าความแปรปรวนของชั้นข้างเคียงนี้อาจถูกเลือกให้เป็นค่าความแปรปรวนสูงสุดแทนที่จะเป็นค่าความแปรปรวนที่ได้จากชั้นจริงของวัตถุ ด้วยเหตุนี้ค่า floor points ที่ไม่ถูกต้องนี้ จึงทำให้เทคนิค Group variance ระบุหมายเลขชั้นผิด

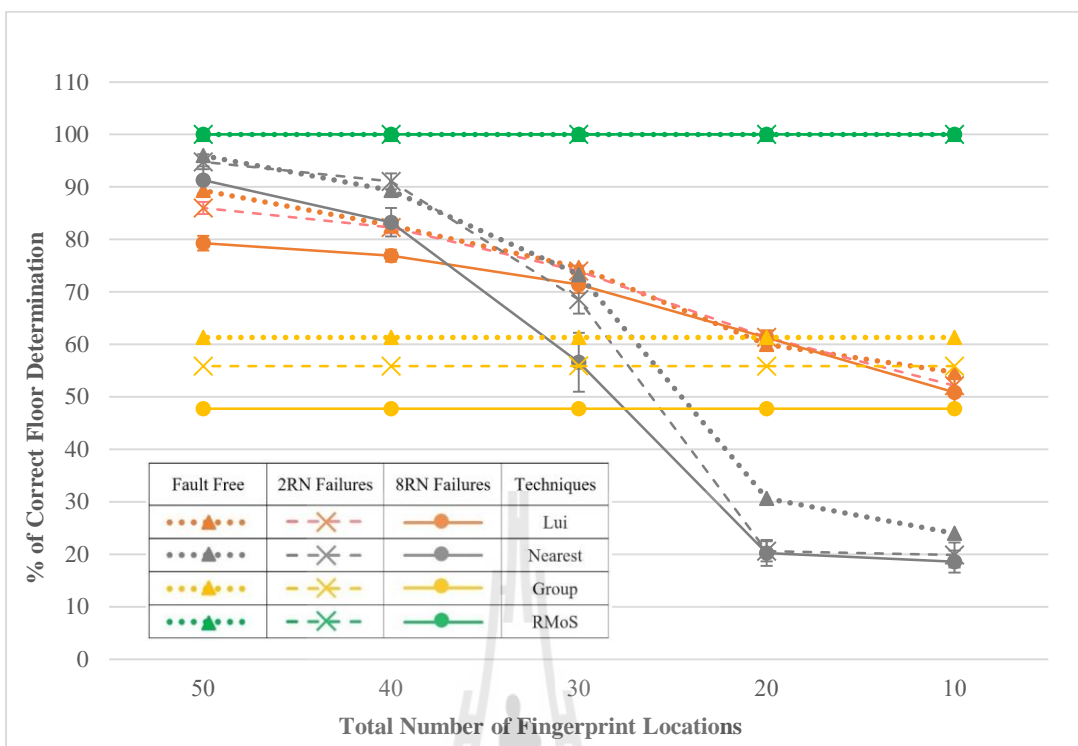
ตรงกันข้าม กรณีที่อาคารมีขนาดใหญ่ ค่าความแรงสัญญาณที่ตำแหน่งวัดได้รับได้จากโนคอ้างอิงในชั้นอื่น ๆ อาจมีค่าน้อยหรือไม่ปรากฏ เนื่องจากระยะห่างและการลดทอนของสัญญาณที่เกิดขึ้นภายในอาคาร ดังนั้นชั้นอาคารที่มีค่าความแปรปรวนสูงสุดจึงเป็นชั้นที่ได้รับสัญญาณจากโนคอ้างอิงมากที่สุด นั่นคือชั้นที่วัตถุตั้งอยู่ ซึ่งในกรณีนี้เทคนิค Group variance สามารถระบุชั้นได้อย่างถูกต้อง หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าความแรงสัญญาณที่อยู่ภายในอาคารที่มีขนาดใหญ่จะส่งผลดีต่อสมรรถนะการระบุตำแหน่งของเทคนิค Group variance

3.5.2 การทดลองภายใต้สถานะที่มีโนดอ้างอิงบางโนดไม่ทำงาน

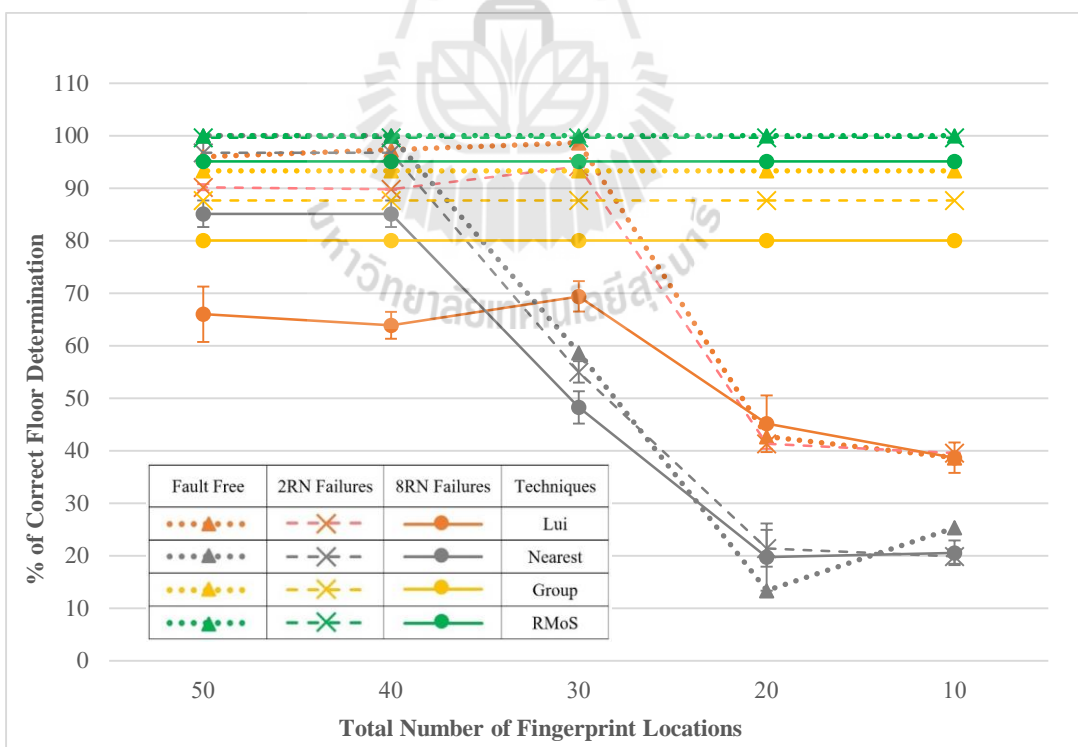
ทำการทดลองโดยใช้ข้อกำหนดตามหัวข้อที่ 3.4 โดยพิจารณาสถานะการทำงานที่มีโนดอ้างอิงบางโนดในระบบเสียหรือไม่ทำงาน ซึ่งพิจารณากรณีของการเสีย 2 กรณี ได้แก่ กรณีที่มีโนดอ้างอิงเสียจำนวน 2 โหนด และกรณีที่มีโนดอ้างอิงเสียจำนวน 8 โหนด โดยผลการทดลองของแต่ละกรณีได้มาจากค่าเฉลี่ยของผลการทดลองทั้ง 20 รูปแบบการเสีย (ทำการสุ่มรูปแบบการเสีย 20 รูปแบบ) ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า จะต้องมิมีโนดอ้างอิงที่ยังสามารถทำงานได้ปรกติคงเหลืออย่างน้อย 50% ของจำนวนโนดอ้างอิงทั้งหมดในแต่ละชั้น ตัวอย่างเช่น กรณีที่มีโนดอ้างอิงเสีย 8 โหนด ผู้วิจัยได้ทำการสุ่มและเลือกปิดการทำงาน โหนดอ้างอิงจำนวน 8 โหนดจากโนดทั้งหมด 20 โหนด (นับเป็น 1 รูปแบบการเสีย) โดยแต่ละชั้น สามารถมีจำนวนโนดอ้างอิงที่ไม่ทำงานสูงสุดได้ไม่เกิน 2 โหนด (ติดตั้งโนดอ้างอิงจำนวน 4 โหนดในแต่ละชั้น) และทำงานครบทั้งหมด 20 รูปแบบการเสีย โดยแต่ละรูปแบบการเสีย ทำการระบุหมายเลขชั้นของจุดทดสอบที่ถูกสุ่มทั้ง 75 จุดทดสอบเพื่อคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ของความถูกต้องในการระบุหมายเลขชั้น จากนั้นคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ของความถูกต้องในการระบุหมายเลขชั้นของทั้ง 20 รูปแบบการเสีย สุดท้ายจะได้ค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ของความถูกต้องในการระบุหมายเลขชั้นสำหรับกรณีที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงาน 8 โหนด

เพื่อที่จะประเมินสมรรถนะของเทคนิคระบุชั้นที่มีอยู่ในปัจจุบันที่ใช้และไม่ใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนซ์ภายใต้สถานะการล่มของโนดอ้างอิง และเพื่อที่จะสังเกตผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเพิ่มลดจำนวนตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนซ์ ผู้วิจัยได้กำหนดจำนวนของตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนซ์ทั้งหมด 5 จำนวน ได้แก่ 50, 40, 30, 20 และ 10 ตำแหน่ง โดยกำหนดให้ตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนซ์ที่มีการกระจายตัวแบบสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นที่ให้บริการ

รูปที่ 3.9(a) และรูปที่ 3.9(b) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์ของความถูกต้องในการระบุหมายเลขชั้นภายใต้สถานะการทำงาน 3 สถานะ ได้แก่ สถานะปรกติ (fault-free) สถานะที่มีโนดอ้างอิงเสีย 2 โหนด (2RN-failure) และสถานะที่มีโนดอ้างอิงเสีย 8 โหนด (8RN-failure) ซึ่งแทนด้วยเส้นจุดที่มีสัญลักษณ์สามเหลี่ยม เส้นประที่มีสัญลักษณ์กากบาท และเส้นทึบที่มีสัญลักษณ์วงกลมตามลำดับ



a) Building A



b) Building B

รูปที่ 3.9 เปอร์เซ็นต์ของความถูกต้องในการระบุชั้นภายใต้สภาวะการทำงานปกติและสภาวะที่มีโนดอ้างอิงเสีย 2 โหนดและ 8 โหนด

พิจารณาผลการทดลองของเทคนิค Nearest และเทคนิค Lui's ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีการใช้ฐานข้อมูลฟังก์เจอร์ปริ้นท์ร่วมกับการระบุหมายเลขชั้น จากผลการทดลองพบว่าการล่มของโนดอ้างอิงมีผลต่อสมรรถนะความถูกต้องในการระบุชั้นของทั้งสองเทคนิค เมื่อระบบตกอยู่ภายใต้สถานะที่มีโนดอ้างอิงเสีย 2 โนดและเสีย 8 โนด แนวโน้มของสมรรถนะในการระบุชั้นมีลักษณะเดียวกับผลการทดลองภายใต้สถานะการทำงานปกติดังการทดลองที่ 3.5.1.2 ซึ่งสมรรถนะของทั้งสองเทคนิคจะขึ้นอยู่กับจำนวนของตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์ ถ้าจำนวนของตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์มีมาก ผลสมรรถนะความถูกต้องในการระบุชั้นจะมีมาก ตัวอย่างเช่น พิจารณากรณีของพื้นที่การทดลอง Building A ภายใต้สถานะที่มีโนดอ้างอิงเสีย 2 โนดแสดงดังรูปที่ 3.9(a) เปอร์เซ็นต์ของความถูกต้องในการระบุหมายเลขชั้นของเทคนิค Nearest มีค่าลดลงจาก 94.8%, 91.1%, 68.5%, 20.6% ถึง 19.8% เมื่อใช้จำนวนของตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์เท่ากับ 50, 40, 30, 20 และ 10 ตำแหน่งตามลำดับ และเมื่อมีจำนวนของโนดอ้างอิงที่เสียเพิ่มขึ้นเป็น 8 โนด (8RN-failure scenario) จะยิ่งส่งผลให้สมรรถนะความถูกต้องของเทคนิค Nearest แย่กว่ากรณีที่มีโนดอ้างอิงเสีย 2 โนด สาเหตุเนื่องมาจากเทคนิค Nearest และเทคนิค Lui's เกิดข้อผิดพลาดในกระบวนการจับคู่ (matching) ค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ ซึ่งจำนวนของโนดอ้างอิงที่ค้นพบที่ตำแหน่งวัตถุในช่วงออนไลน์เฟสจะต้องมีค่าเท่ากับจำนวนของโนดอ้างอิงที่มีอยู่ในฐานข้อมูล ดังนั้นการหายไปของค่าความแรงสัญญาณที่รับได้เนื่องจากการเสียของโนดอ้างอิงในช่วงออนไลน์เฟสหรือช่วงระบุตำแหน่ง จึงส่งผลให้กระบวนการจับคู่เกิดความผิดพลาด และทำให้การเสียของโนดอ้างอิงจำนวนมาก เช่น การเสียของโนดอ้างอิง 8 โนด (จาก 20 โนดในระบบ) ส่งผลต่อสมรรถนะของระบบมากกว่าการเสีย 2 โนด (จาก 20 โนดในระบบ) เช่นเดียวกับผลการทดลองของพื้นที่ Building B ที่แสดงในรูปที่ 3.9(b)

พิจารณาเทคนิค Group variance ซึ่งเป็นเทคนิคที่ไม่ใช้ฐานข้อมูลฟังก์เจอร์ปริ้นท์ร่วมกับการระบุหมายเลขชั้น สมรรถนะความถูกต้องของระบบจะแย่ลงเมื่อเกิดการล่มของโนดอ้างอิง โดยในกรณีพื้นที่การทดลอง Building A ภายใต้การเสียของโนดอ้างอิง 2 โนดและ 8 โนด แทนด้วยเส้นกราฟสีเหลืองในรูปที่ 3.9(a) เปอร์เซ็นต์ของความถูกต้องในการระบุหมายเลขชั้นลดลงจาก 61.3% เป็น 55.8% และ 47.7% ตามลำดับ เช่นเดียวกับผลการทดลองที่เกิดขึ้นกับพื้นที่การทดลอง Building B แทนด้วยเส้นกราฟสีเหลืองในรูปที่ 3.9(b) สาเหตุที่การเพิ่มขึ้นของจำนวนโนดอ้างอิงที่เสียส่งผลให้สมรรถนะของเทคนิค Group variance ลดลงเนื่องจากความผิดเพี้ยนของค่าพารามิเตอร์ทางสถิติ 3 ชนิด ซึ่งการหายไปของค่าความแรงสัญญาณในบางชั้นจะส่งผลให้ค่า floor points ที่

คำนวณได้มีความผิดพลาด ตัวอย่างเช่น การคำนวณหาค่า floor points ที่ได้จากค่าพิสัยที่พิจารณา ค่าสูงสุดและต่ำสุดของค่าความแรงสัญญาณที่โนดวัตถุได้รับจากโนดอ้างอิงในแต่ละชั้น ถ้าหากความล้มเหลวเกิดขึ้นกับโนดอ้างอิงที่มีค่าความแรงสัญญาณมากที่สุดที่อยู่ในชั้นนั้น ค่าพิสัยของชั้นดังกล่าวที่คำนวณได้จะไม่ถูกต้อง ด้วยเหตุนี้ การเสียของโนดอ้างอิงที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้สมรรถนะของเทคนิค Group variance แย่ลง

พิจารณาเทคนิค RMoS ซึ่งเป็นเทคนิคที่ไม่ใช้ฐานข้อมูลฟังก์ชันปริ้นท์ร่วมกับการระบุหมายเลขชั้นพบว่า สมรรถนะความถูกต้องของเทคนิค RMoS มีค่าดีกว่าสมรรถนะของเทคนิคระบุชั้นอื่น ๆ ทุกภายใต้สภาวะการทำงานของทั้งสองพื้นที่การทดลอง โดยเทคนิค RMoS มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุหมายเลขชั้นมากถึง 100% สำหรับทั้ง 3 สภาวะการทำงานในกรณีพื้นที่การทดลอง Building A (เส้นกราฟสีเขียวในรูปที่ 3. 9(a)) ซึ่งถึงแม้ว่าภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงเสีย 8 โหนดของพื้นที่การทดลอง Building B ผลสมรรถนะความถูกต้องของเทคนิค RMoS จะมีค่าลดลง (เส้นทึบสีเขียวในรูปที่ 3. 9(b)) แต่อย่างไรก็ตาม เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุหมายเลขชั้นที่มีค่าเท่ากับ 95.1% ยังคงมากกว่าเทคนิคระบุชั้นอื่น ๆ สาเหตุที่เทคนิค RMoS มีความคงทนต่อสภาวะการล่มของโนดอ้างอิงเนื่องจากในกระบวนการค้นหาหมายเลขชั้นจะพิจารณาเพียงแค่ความแรงสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงที่ยังคงทำงานได้อย่างปรกติเท่านั้น ด้วยเหตุนี้การเสียของโนดอ้างอิงจึงส่งผลกระทบต่อขั้นตอนการคำนวณหาหมายเลขชั้นของเทคนิค RMoS น้อยมาก (จนถึงไม่ส่งผลกระทบ) อย่างไรก็ตาม สมรรถนะของเทคนิค RMoS จะมีค่าลดลงเมื่อตกอยู่ภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงเสีย 8 โหนดในกรณีพื้นที่การทดลองที่มีขนาดใหญ่ สาเหตุเนื่องมาจากความครอบคลุมของสัญญาณที่ไม่เพียงพอสำหรับอาคารที่มีขนาดใหญ่ (มีโนดอ้างอิงเพียง 4 โหนดต่อพื้นที่ 5,625 ตารางเมตร) ส่งผลให้ค่าความแรงสัญญาณที่ตำแหน่งต่าง ๆ รับได้จากโนดอ้างอิงมีค่าน้อยหรือไม่ปรากฏ ยิ่งไปกว่านั้น หากระบบระบุตำแหน่งตกอยู่ภายใต้สภาวะมีโนดอ้างอิงในระบบไม่ทำงาน (e.g. 8RN-failure) ค่าความแรงสัญญาณที่รับได้เหล่านี้จะทำให้การคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่นของผลรวมความแรงสัญญาณที่รับได้ของแต่ละชั้นเกิดความคลาดเคลื่อน และทำให้เทคนิค RMoS ระบุหมายเลขชั้นผิด หรืออาจกล่าวได้ว่า ภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงในระบบไม่ทำงาน คุณภาพและความครอบคลุมของความแรงสัญญาณที่รับได้มีผลต่อสมรรถนะของเทคนิค RMoS ซึ่งหนึ่งในแนวทางการแก้ปัญหาข้างต้นคือ การพิจารณาจำนวนและตำแหน่งของโนดอ้างอิงที่เหมาะสมที่สามารถรองรับการทำงานภายใต้สภาวะปรกติและสภาวะที่มีโนดอ้างอิงบางโนดไม่ทำงาน ซึ่งจะเป็นงานที่ผู้วิจัยได้พัฒนาในบทที่ 4

3.6 กล่าวสรุป

ในบทนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอการพัฒนาเทคนิคระบุหมายเลขชั้นสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่สามารถรองรับการทำงานทั้งภายใต้สภาวะปรกติและภายใต้สภาวะที่มีโนคอ้างอิงบางโนคในระบบไม่ทำงาน โดยเทคนิคระบุชั้นที่นำเสนอมีชื่อเรียกว่า RMoS floor algorithm ซึ่งเป็นเทคนิคที่ไม่มีการสร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์ในช่วงออฟไลน์เฟส ใช้เพียงค่าความแรงสัญญาณที่โนควัตถุรับได้ในช่วงออนไลน์เฟสระบุหมายเลขชั้นของวัตถุ โดยสมรรถนะของเทคนิคระบุชั้นที่นำเสนอจะถูกเปรียบเทียบกับเทคนิคระบุชั้นที่มีอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการทดสอบกับพื้นที่ให้บริการที่มีขนาดที่แตกต่างกันสองขนาด โดยจากผลการทดลองสามารถสรุปข้อสังเกตได้ดังนี้

- 1) เทคนิคระบุชั้น RMoS ที่นำเสนอมีสมรรถนะความถูกต้องในการระบุชั้นดีกว่าเทคนิคระบุอื่น ๆ ที่ใช้และไม่ใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์ในทุกกรณีการทดสอบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคนิค RMoS มีเปอร์เซ็นต์ของความถูกต้องในการระบุชั้นมากถึง 100 % ในสภาวะการทำงานปรกติ และมากกว่า 95% ในสภาวะที่มีโนคอ้างอิงในระบบไม่ทำงานจำนวน 40% หรือสามารถกล่าวได้ว่าเทคนิค RMoS เป็นเทคนิคระบุชั้นที่มีความทนทานและมีความคงทนต่อสภาวะการเสี่ยของโนคอ้างอิง
- 2) เมื่อจำนวนของโนคอ้างอิงที่เสี่ยมีเพิ่มมากขึ้น ผลสมรรถนะความถูกต้องในการระบุชั้นของทุกเทคนิคจะมีค่าลดลง แต่อย่างไรก็ตาม เทคนิคระบุชั้น RMoS จะสามารถบรรเทาผลกระทบที่เกิดจากการเสี่ยของโนคอ้างอิงได้ดีกว่าเทคนิคอื่น ๆ
- 3) ขนาดของพื้นที่การทดลองที่มากขึ้น (และมีความแรงสัญญาณที่ไม่ความครอบคลุม) จะส่งผลให้สมรรถนะความถูกต้องของเทคนิคระบุชั้น RMoS มีค่าลดลง
- 4) จำนวนของตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์ที่มีผลต่อสมรรถนะความถูกต้องในการระบุชั้นของเทคนิคระบุชั้นที่ใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์ร่วมกับการระบุหมายเลขชั้น

บทที่ 4

การพัฒนาเทคนิคการออกแบบโครงสร้างระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่สามารถรองรับการทำงานภายใต้สภาวะผิดปกติ

4.1 กล่าวนำ

การวางแผนและการออกแบบระบบคือขั้นตอนการทำงานแรกของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญที่ผู้ออกแบบจะทำการวางแผนและกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เป็นส่วนประกอบของระบบระบุตำแหน่ง อาทิเช่น เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายที่เลือกใช้ กำลังส่งของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย ช่องสัญญาณ จำนวนและตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงภายในพื้นที่บริการ เป็นต้น นอกจากนี้ผู้ออกแบบยังต้องคำนึงถึงสถานการณ์ต่าง ๆ ที่ระบบอาจจะต้องเผชิญ ตัวอย่างเช่น สถานการณ์ผิดปกติซึ่งมีโนดอ้างอิงบางโนดในระบบเสียหรือไม่ทำงาน และเป็นสาเหตุให้สมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งลดลง เป็นต้น ดังนั้นการกำหนดโครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งวัตถุให้เหมาะสมจึงมีความสำคัญต่อการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุให้มีประสิทธิภาพ

เนื้อหาในบทที่ 4 แบ่งออกเป็นหัวข้อดังนี้ หัวข้อ 4.2 ภาพรวมและแนวคิดการพัฒนาเทคนิคการออกแบบโครงสร้างระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่สามารถรองรับการทำงานภายใต้สภาวะผิดปกติ หัวข้อ 4.3 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงสร้างระบบระบุตำแหน่ง หัวข้อ 4.4 การค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีวิวิธิติก หัวข้อ 4.5 ข้อกำหนดการทดลอง หัวข้อ 4.6 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง และหัวข้อ 4.7 กล่าวสรุป

4.2 ภาพรวมและแนวคิดการพัฒนาเทคนิคการออกแบบโครงสร้างระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่สามารถรองรับการทำงานภายใต้สภาวะผิดปกติ

วิทยานิพนธ์นี้พิจารณาาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ทำงานอยู่บนพื้นฐานของเทคนิคฟิงเกอร์ปรีนท์ ซึ่งเป็นเทคนิคระบุตำแหน่งที่มีการประมวลผลง่ายและรวดเร็ว ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มเทคนิค Scene Analysis ที่จะมีการเก็บรวบรวมคุณสมบัติของเหตุการณ์ในช่วงออฟไลน์เฟสเพื่อสร้างฐานข้อมูลที่เรียกว่า ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์ โดยผู้ออกแบบระบบจะทำการกำหนดตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์ สำหรับการเก็บบันทึกค่าความแรงสัญญาณที่อยู่ภายในพื้นที่ให้บริการ จากนั้นในช่วงออนไลน์เฟส ระบบระบุตำแหน่งจะทำการจับคู่ค่าความแรงสัญญาณระหว่างฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์กับตำแหน่งที่ต้องการทราบพิกัด และเลือกตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์ที่มีความใกล้เคียงมากที่สุดเป็นตำแหน่งของวัตถุ

สำหรับโครงสร้างพื้นฐานของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารที่ทำงานอยู่บนพื้นฐานเทคนิคฟิงเกอร์ปรีนท์ ประกอบไปด้วยอุปกรณ์พื้นฐาน 2 ชนิดคือ โนคอ้างอิง และ โนควัตถุ โนคอ้างอิงคืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นตำแหน่งอ้างอิงจะถูกติดตั้งอยู่ในส่วนต่าง ๆ ของอาคาร ทำหน้าที่ส่งค่าความแรงสัญญาณให้กับ โนควัตถุ ขณะที่ โนควัตถุคืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นตำแหน่งวัตถุหรือตำแหน่งที่ต้องการทราบพิกัดซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ เมื่อใดก็ตามที่ โนควัตถุต้องการทราบพิกัด โนควัตถุจะทำการเก็บรวบรวมค่าความแรงสัญญาณที่รับได้จาก โนคอ้างอิงภายในพื้นที่ให้บริการ และนำข้อมูลที่ได้ไปประมวลผลหาตำแหน่งด้วยเทคนิคระบุตำแหน่งวิธีต่าง ๆ อาทิเช่น เทคนิคระยะห่างยูคลีเดียน (Euclidean distance technique)

ตำแหน่งติดตั้ง โนคอ้างอิงที่ไม่เหมาะสมจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะความถูกต้อง และความแม่นยำ ในการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปรีนท์ (Aomumpai, 2012) เนื่องจากพื้นที่ภายในอาคารหลายชั้นมีลักษณะทางกายภาพที่ซับซ้อน และมีสิ่งกีดขวางทางเดินของสัญญาณมาก ส่งผลให้การแพร่กระจายสัญญาณจาก โนคอ้างอิงไปยังพื้นที่ต่าง ๆ ภายในอาคารไม่ทั่วถึง หรือไม่มีประสิทธิภาพ ทำให้บางพื้นที่เกิดจุดอับสัญญาณ หรือได้รับจำนวนความแรงสัญญาณจาก โนคอ้างอิงไม่เพียงพอสำหรับใช้วิเคราะห์และคำนวณหาตำแหน่งวัตถุ ยิ่งไปกว่านั้นถ้าหากระบบระบุตำแหน่งต้องตกอยู่ภายใต้สถานการณ์ล้มเหลวที่มี โนคอ้างอิงบางโนคในระบบไม่ทำงาน ซึ่งอาจเกิดจากอุบัติเหตุที่ไม่คาดคิด เช่น อัคคีภัย เป็นต้น จะส่งผลให้ระบบระบุตำแหน่งมีสมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่ลดลงจากเดิมอย่างมาก (Khauphung et al., 2008) ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอเทคนิคการออกแบบโครงสร้างระบบระบุตำแหน่งวัตถุ

ภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปรีนท์ ที่พิจารณาการกำหนดจำนวนและตำแหน่งติดตั้ง โนคอ้างอิงที่เหมาะสม เพื่อให้โครงสร้างของระบบสามารถรองรับการทำงานทั้งภายใต้สภาวะปกติ และภายใต้สภาวะที่มีโนคอ้างอิงบางโนคไม่ทำงาน

4.2.1 การนิยามปัญหาของระบบระบุตำแหน่งวัตถุที่ตกอยู่ภายใต้สภาวะที่มีโนคอ้างอิงบางโนคไม่ทำงาน

ระบบระบุตำแหน่งที่มีสมรรถนะความถูกต้องและแม่นยำภายใต้สภาวะปกติที่ดีเยี่ยม อาจมีสมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่ลดลงเกินกว่าครึ่ง เมื่อระบบตกอยู่ภายใต้สภาวะที่มีโนคอ้างอิงบางโนคเสียหรือไม่ทำงาน ซึ่งสมรรถนะที่เป็นตัวชี้วัดความสามารถในการทำงานภายใต้สภาวะดังกล่าวคือ สมรรถนะความคงทน หรือความสามารถในการทนทานต่อเหตุการณ์ผิดปกติที่เกิดขึ้นกับระบบ (fault-tolerance) เป็นสมรรถนะที่ใช้อธิบายความสามารถของระบบระบุตำแหน่งเมื่อระบบต้องตกอยู่ภายใต้สถานการณ์ที่ไม่เป็นมิตรของสิ่งแวดล้อม (hostile environments) หรือสถานการณ์ที่ผิดปกติ ซึ่งสาเหตุเหล่านี้อาจเกิดจากความบกพร่องของฮาร์ดแวร์ ความผิดพลาดของซอฟต์แวร์ การเชื่อมต่อที่ล้มเหลว (loss of wireless/wired links) หรือเกิดจากภัยพิบัติทางธรรมชาติ (Wang, 2009) (Dharmaraja et al., 2008) เป็นต้น ดังนั้นระบบระบุตำแหน่งที่มีสมรรถนะความคงทนที่ดีจึงเป็นระบบระบุตำแหน่งที่สามารถให้สมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่ยอมรับได้ ทั้งในสภาวะปกติและสภาวะที่มีโนคอ้างอิงบางโนคในระบบไม่ทำงาน

โดยตัวอย่างของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ตกอยู่ภายใต้สภาวะที่มีโนคอ้างอิงไม่ทำงานได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งเป็นสภาวะการทำงานผิดปกติ และเป็นต้นเหตุทำให้โนควัตถุไม่สามารถรับค่าความแรงสัญญาณของโนคอ้างอิงบางโนคภายในพื้นที่ให้บริการได้ อีกทั้งยังส่งผลให้การคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุสำหรับระบบระบุตำแหน่งที่ใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปรีนท์มีความผิดพลาดเกิดขึ้น

4.3 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงสร้างระบบระบุตำแหน่ง

หัวข้อนี้นำเสนอการพัฒนาเทคนิคการออกแบบโครงสร้างระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคฟังก์ชันปริ้นท์ ซึ่งมุ่งเน้นการวางแผนเครือข่ายในส่วนของโครงสร้างเครือข่ายสื่อสารไร้สาย โดยเป็นการกำหนดจำนวนและตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงที่เหมาะสมกับลักษณะของพื้นที่ให้บริการ ยิ่งไปกว่านั้น โครงสร้างของระบบที่ได้ยังสามารถรองรับการทำงานทั้งภายใต้สภาวะปกติ และภายใต้สภาวะที่มีโหนดอ้างอิงบางโหนดไม่ทำงานได้ โดยเทคนิคการออกแบบที่พัฒนาขึ้นมีชื่อเรียกว่า Robust-Maximum Summation of Max RSSI (R-MSMR) ซึ่งเป็นเทคนิคการออกแบบที่พัฒนามาจากงานวิจัยของ Kondee et al. (2015) โดยเทคนิคการออกแบบดังกล่าวใช้แนวทางการกำหนดปัญหาของสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (Binary Integer Linear Programming: BILP) เพื่อกำหนดจำนวนและตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ และใช้วิธีการค้นหาคำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด (near optimal) ด้วยวิธีการอบอุ่นจำลอง (Simulated Annealing: SA) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการค้นหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพของเทคนิคฮิวริสติก (heuristic technique) (ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อ 4.4 ถัดไป)

สำหรับหัวข้อการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบโครงสร้างระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคฟังก์ชันปริ้นท์ ซึ่งสามารถรองรับการทำงานทั้งภายใต้สภาวะปกติและสภาวะที่มีโหนดอ้างอิงบางโหนดไม่ทำงาน แบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยดังนี้ หัวข้อ 4.3.1 สมการคณิตศาสตร์สำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี หัวข้อ 4.3.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และหัวข้อ 4.3.3 สมการเงื่อนไข

4.3.1 สมการคณิตศาสตร์สำหรับการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี

วิทยานิพนธ์นี้ได้นิยามปัญหาการออกแบบโครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคฟังก์ชันปริ้นท์ ซึ่งสามารถรองรับการทำงานทั้งในสภาวะปกติและสภาวะที่มีโหนดอ้างอิงบางโหนดไม่ทำงาน โดยผู้วิจัยได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ในรูปแบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี ซึ่งประกอบไปด้วยสองส่วนสำคัญคือ สมการวัตถุประสงค์และสมการเงื่อนไข โดยสมการวัตถุประสงค์คือ สมการที่อยู่ในรูปของค่าต่ำสุด (minimization) หรือค่าสูงสุด (maximization) ขณะที่สมการเงื่อนไขคือ สมการที่แสดงข้อจำกัดของปัจจัยต่าง ๆ โดยตัวแปรที่ใช้ในสมการคณิตศาสตร์สำหรับโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีที่นำเสนอใน

วิทยานิพนธ์นี้ ประกอบด้วย ตัวแปรเซต (set) ตัวแปรตัดสินใจ (decision variable) ที่มีค่าเป็น 0 หรือ 1 และตัวแปรคงที่ (constant parameter) ดังแสดงได้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น

ตัวแปร	คำนิยาม
เซตของตัวแปร :	
B	เซตของตำแหน่งโนคอ้างอิงที่สามารถติดตั้งในเครือข่ายได้
T	เซตของตำแหน่งที่เป็นจุดทดสอบสัญญาณ
ตัวแปรตัดสินใจ :	
c_j	ตัวแปรตัดสินใจที่จะเลือกติดตั้ง โนคอ้างอิง มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเลือกติดตั้ง โนคอ้างอิงที่ตำแหน่ง j หรือมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการเลือกติดตั้ง โนคอ้างอิงที่ตำแหน่ง j โดยที่ $j \in B$
S_{ij}	ตัวแปรตัดสินใจที่อธิบายการได้รับสัญญาณที่จุดทดสอบ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อจุดทดสอบสัญญาณที่ตำแหน่ง i ได้รับสัญญาณจากโนคอ้างอิงที่ตำแหน่ง j หรือมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อจุดทดสอบสัญญาณที่ตำแหน่ง i ไม่ได้รับสัญญาณจากโนคอ้างอิงที่ตำแหน่ง j โดยที่ $i \in T, j \in B$
ตัวแปรค่าคงที่ :	
P_{ij}	ค่าความเข้มสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณที่ตำแหน่ง i รับได้จากโนคอ้างอิงที่ตำแหน่ง j โดยที่ $i \in T, j \in B$ (Watt)
P_T	ค่าความแรงของสัญญาณที่น้อยที่สุดที่ทำให้สามารถได้รับสัญญาณจากโนคอ้างอิงได้ (Watt) กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.1 pW (-100 dBm)
N_s	จำนวนโนคอ้างอิงที่เพียงพอสำหรับติดตั้งในระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในพื้นที่ให้บริการ
α	ดัชนีความถูกต้อง (accuracy index) หรือจำนวนโนคอ้างอิงที่สามารถรับประกันว่าระบบจะมีสมรรถนะความถูกต้องและความแม่นยำที่ดี (กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 4 (Kaemarungsi, 2005) ²)
R	ดัชนีความน่าเชื่อถือ (reliability index) หรือจำนวนโนคอ้างอิงชดเชยซึ่งสามารถรับประกันว่าระบบจะมีสมรรถนะความถูกต้องและความแม่นยำที่ยอมรับได้ถ้าหากระบบตกอยู่ภายใต้สถานการณ์ล้มเหลว (กำหนดให้มีค่ามากกว่า 0)

4.3.2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ในการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงที่เหมาะสมสำหรับระบบระบบ ตำแหน่งวิทยุภายในอาคารหลายชั้น ซึ่งรองรับการทำงานทั้งภายใต้สภาวะปกติและสภาวะที่มี โหนดอ้างอิงบางโหนดไม่ทำงานคือ เพื่อเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ค่าที่มากที่สุดของผลรวม ความแรงสัญญาณสูงสุดที่จุดทดสอบสัญญาณรับได้จากโหนดอ้างอิงในระบบ (Maximize-Sum of Maximum RSS : MSMR) โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์นี้จะสามารถเพิ่มคุณภาพของค่าความแรง สัญญาณที่ได้รับจากโหนดอ้างอิงภายในพื้นที่ให้บริการ และทำให้ทุกจุดทดสอบได้จำนวนสัญญาณที่ รับได้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ โดยสามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$\text{Maximize } \sum_{\forall i \in T} \max_{\forall j \in B} (S_{ij} P_{ij}) \quad (4.1)$$

4.3.3 สมการเงื่อนไข

เงื่อนไขสำหรับการกำหนดจำนวนและตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมสำหรับระบบระบบ ตำแหน่งวิทยุภายในอาคารแบบหลายชั้นซึ่งรองรับการทำงานทั้งภายใต้สภาวะปกติและสภาวะที่มี โหนดอ้างอิงบางโหนดไม่ทำงานประกอบด้วย 4 เงื่อนไข ดังนี้

1) เงื่อนไขการรับประกันคุณภาพของสัญญาณที่ครอบคลุมทั่วทั้งบริเวณของพื้นที่ ให้บริการ โดยกำหนดว่าสัญญาณที่จุดทดสอบสัญญาณ i รับได้จากโหนดอ้างอิง j จะต้องมีค่าความแรงสัญญาณที่รับได้สูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

$$S_{ij} (P_{ij} - P_T) \geq 0 \quad \forall i \in T, \forall j \in B \quad (4.2)$$

2) เงื่อนไขการกำหนดจำนวนของสัญญาณที่รับได้ที่จุดทดสอบ i ที่อยู่ทั่วบริเวณของ อาคารจะต้องได้รับสัญญาณจากโหนดอ้างอิงอย่างน้อยจำนวน $\alpha + R$ สัญญาณ

$$\sum_{\forall j \in B} S_{ij} \geq \alpha + R \quad \forall i \in T \quad (4.3)$$

3) เงื่อนไขการกำหนดจำนวนโนดอ้างอิงที่ใช้ในการติดตั้งภายในพื้นที่ให้บริการของระบบระบุตำแหน่งจะต้องมีจำนวนเท่ากับจำนวนโนดอ้างอิงที่เพียงพอ

$$\sum_{\forall j \in B} c_j = N_s \quad (4.4)$$

4) เงื่อนไขการได้รับสัญญาณจากโนดอ้างอิง โดยจุดทดสอบสัญญาณ i จะต้องได้รับสัญญาณจากโนดอ้างอิง j ที่ได้ถูกติดตั้งไว้ในระบบ

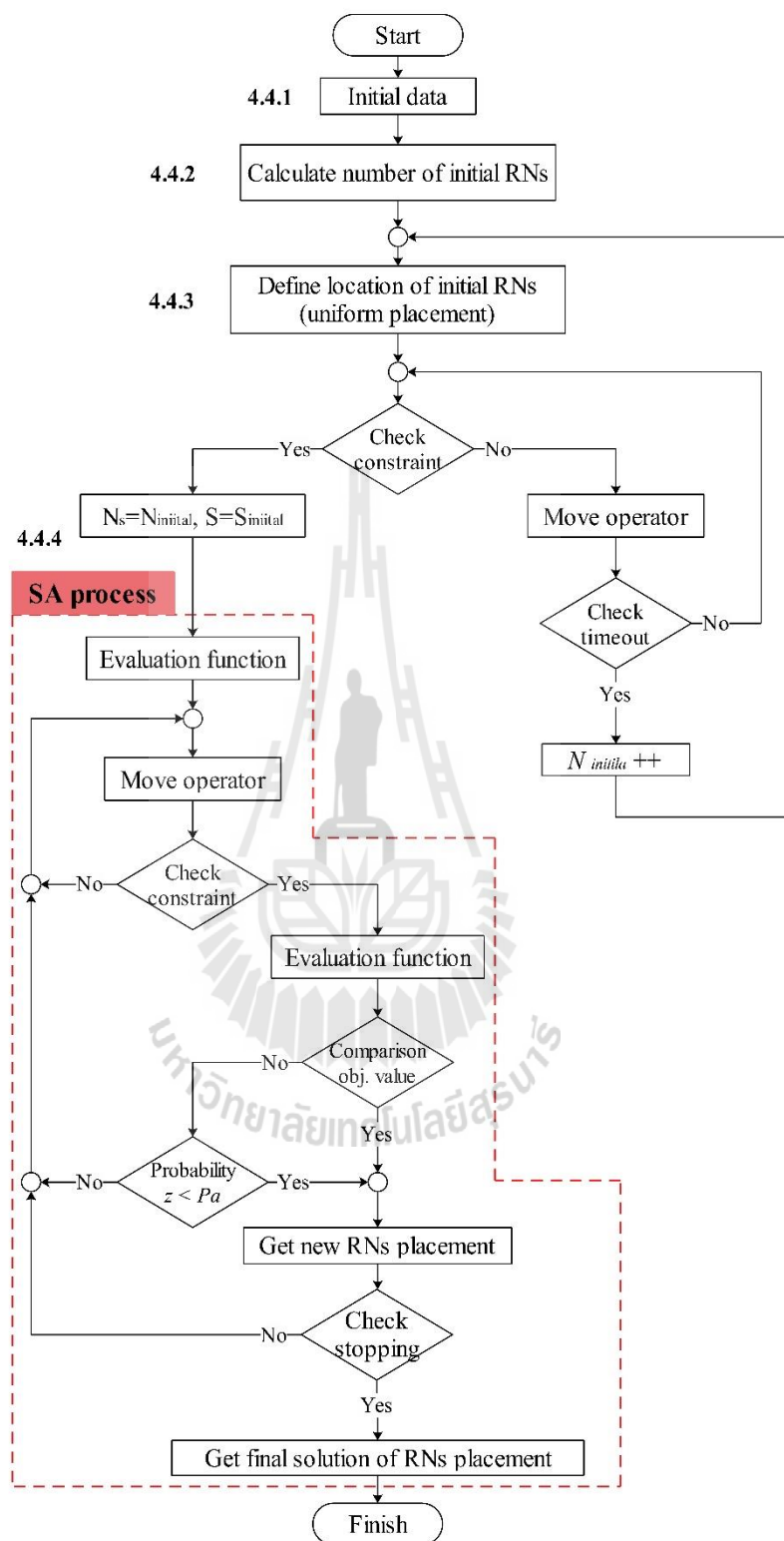
$$S_{ij} \leq c_j \quad \forall i \in T, \forall j \in B \quad (4.5)$$



4.4 การค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยเทคนิคฮิวริสติก

วิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้วิธีการอบอุ่นจำลองเป็นกลไกการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของสมการคณิตศาสตร์ในหัวข้อก่อนหน้า ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการค้นหาคำตอบของเทคนิคฮิวริสติกที่ได้รับความนิยมและมีประสิทธิภาพ โดยวิธีการอบอุ่นจำลองเป็นเทคนิคการค้นหาคำตอบแบบสุ่มที่ใช้งานง่าย เลียนแบบกรรมวิธีการควบคุมอุณหภูมิของการอบโลหะให้ร้อนแล้วปล่อยให้เย็นลงช้า ๆ เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างผลึกที่มีพลังงานภายในน้อยที่สุด และช่วยให้โลหะมีคุณสมบัติทางกายภาพที่แข็งแกร่งและทนทาน (Srikae, 2009) โดยโลหะในสถานะของเหลวซึ่งมีอุณหภูมิสูงจะมีโครงสร้างระดับโมเลกุลที่มีพลังงานสูง และมีปริมาณการเคลื่อนที่สูง เปรียบได้กับการค้นหาคำตอบที่มีพลังงานมากพอที่จะหลุดพ้นจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบ (local optimum) และเมื่อทำการลดอุณหภูมิลงอย่างช้า ๆ โมเลกุลโครงสร้างของโลหะจะมีการจัดตัวเป็นผลึก เสมือนการค้นหาคำตอบถูกจำกัดให้อยู่ในช่วงคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำกลไกการค้นหาคำตอบของวิธีการอบอุ่นจำลองนี้มาประยุกต์ใช้ร่วมกับสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีผ่านการทำงานของโปรแกรม MATLAB เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาการออกแบบโครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปรีนท์ ซึ่งสามารถรองรับการทำงานทั้งในสถานะปกติและสถานะที่มีโนดอ้างอิงบางโนดไม่ทำงาน รูปที่ 4.1 แสดงแผนภาพการทำงานของเทคนิคการออกแบบ R-MSMR และตารางที่ 4.2 แสดงขั้นตอนการทำงานของเทคนิคการออกแบบ R-MSMR ซึ่งสามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็น 4 ขั้นตอนตามหัวข้อย่อ ดังนี้ หัวข้อ 4.4.1 ข้อมูลเริ่มต้น หัวข้อ 4.4.2 การประมาณจำนวน โหนดอ้างอิงเริ่มต้น หัวข้อ 4.4.3 การกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงเริ่มต้น และหัวข้อ 4.4.4 การค้นหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยวิธีการอบอุ่นจำลอง



รูปที่ 4.1 แผนภาพการทำงานของเทคนิคการออกแบบ R-MSMR

ตารางที่ 4.2 Pseudo code ของเทคนิคการออกแบบ R-MSMR

Input :	Specify $P_{a_initial}$, φ , τ_{stop} , n_{worse_max} , ΔE , STP , $Candi$, RSS_data , A_f , D_{cover}		
Output :	Solution of RNs placement for multi-floor building using fingerprint technique (S_{final})		
1:	Initialize $Iter = 0$, $n_{worse} = 0$, $\tau = \tau_{initial}$, $N_{initial}$		
2:	Calculate number of initial RNs ($N_{initial}$)		4.4.2
3:	Repeat		
4:	Define location of initial RNs ($S_{initial}$) by $N_{initial}$		4.4.3
5:	Check constraints Eq. (4.2) – Eq. (4.5)		
6:	Repeat		
7:	Generate new assignment S_{new} from S (move operator)		
8:	Check constraints Eq. (4.2) – Eq. (4.5)		
9:	Until timeout > 300 sec		
10:	Set $N_{initial} ++$		
11:	Until all of constraints pass		
12:	$N_s = N_{initial}$, $S = S_{initial}$		
----- SA process -----			



ตารางที่ 4.2 Pseudo code ของเทคนิคการออกแบบ R-MSMR (ต่อ)

----- SA process -----			
13:		Set $Iter_{max} = N_s$	4.4.4
14:		Calculate $\tau_{initial}$	
15:		Calculate evaluation function $E(S)$	4.4.4.2
16:		Repeat	
17:		Repeat	
18:		Repeat	
19:		Generate new assignment S_{new} from S (move operator)	4.4.4.3
20:		Check constraints Eq. (4.2) – Eq. (4.5)	
21:		Until all of constraints pass	
22:		Calculate evaluation function $E(S_{new})$	
23:		Calculate $\Delta E = E(S) - E(S_{new})$	4.4.4.5
24:		Set $Iter ++$	
25:		If $\Delta E < 0$	
26:		$n_{worse} = 0$	
27:		$S = S_{new}$	
28:		$E(S) = E(S_{new})$	
29:		Else $\Delta E \geq 0$	
30:		Set $n_{worse} ++$	
31:		Repeat	
32:		If $random[0,1] < e^{-[\Delta E/\tau]}$	4.4.4.6
33:		$S = S_{new}$	
34:		$E(S) = E(S_{new})$	
35:		Until $n_{worse} = n_{worse_max}$	
36:		End SA process!!!	
37:		Until $Iter = Iter_{max}$	
38:		Reset $Iter = 0$	
39:		Calculate $\tau = \varphi\tau$	
40:		Calculate $Iter_{max} = \frac{Iter_{max}}{\varphi}$	
41:		Until $\tau = \tau_{stop}$	
42:		End SA process!!!	4.4.4.7
43:		$S_{final} = S$	

4.4.1 ข้อมูลเริ่มต้น

ขั้นตอนการทำงานแรกของเทคนิคการออกแบบ R-MSMR เริ่มจากการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบระบุตำแหน่งวัตถุ เพื่อใช้เป็นข้อกำหนดและข้อจำกัดของการค้นหาคำตอบ ซึ่งข้อมูลเริ่มต้น (initial data) เหล่านี้จะถูกใช้ร่วมกับการค้นหาจำนวนและตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ โดยข้อมูลเริ่มต้นของเทคนิคการออกแบบ R-MSMR ประกอบไปด้วย

4.4.1.1 จำนวนและตำแหน่งจุดทดสอบสัญญาณ

จำนวนและตำแหน่งจุดทดสอบสัญญาณ (STP) คือตำแหน่งที่ใช้วัดค่าความแรงสัญญาณที่รับได้จากโนดอ้างอิงซึ่งกระจายอยู่ทั่วพื้นที่ให้บริการ โดยผู้ออกแบบจะมีการกำหนดจำนวน ตำแหน่ง และระยะห่างระหว่างตำแหน่งของจุดทดสอบให้ครอบคลุมทั่วพื้นที่ให้บริการ

4.4.1.2 จำนวนและตำแหน่งที่สามารถติดตั้งโนดอ้างอิงได้

จำนวนและตำแหน่งที่สามารถติดตั้งโนดอ้างอิงได้ (Candi) คือตำแหน่งที่เป็นไปได้ที่สามารถติดตั้งโนดอ้างอิงภายในพื้นที่ให้บริการ โดยวิทยานิพนธ์นี้กำหนดให้ตำแหน่งที่สามารถติดตั้งโนดอ้างอิงได้เป็นแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete) เพื่อลดระยะเวลาในการค้นหาของสมการคณิตศาสตร์

4.4.1.3 ค่าความแรงสัญญาณที่ทุกจุดทดสอบรับได้

ค่าความแรงสัญญาณที่ทุกจุดทดสอบรับได้ (RSS_data) คือค่าความแรงสัญญาณของทุกจุดทดสอบสัญญาณในพื้นที่ให้บริการซึ่งได้รับจากโนดอ้างอิงทุกตำแหน่งที่สามารถติดตั้งได้ มีหน่วยเป็นวัตต์ (Watt)

4.4.1.4 ดัชนีความถูกต้องและดัชนีความน่าเชื่อถือ

ดัชนีความถูกต้อง (α) คือจำนวนโนดอ้างอิงที่ช่วยให้ระบบระบุตำแหน่งวัตถุจะมีสมรรถนะความถูกต้องและความแม่นยำที่ดีภายใต้สภาวะปรกติ จากคำแนะนำของงานวิจัย Kaemarungsi (2005)² จำนวนโนดอ้างอิงดังกล่าวควรมีค่าน้อยกว่าจำนวน 4 โนด ขณะที่ดัชนีความน่าเชื่อถือ (R) คือจำนวนโนดอ้างอิงชดเชยที่ช่วยให้ระบบระบุตำแหน่งวัตถุมีสมรรถนะความ

ถูกต้องและความแม่นยำที่ติงภายใต้สภาวะที่มีโหนดอ้างอิงบางโหนดในระบบไม่ทำงาน ซึ่งถูกกำหนดให้มีค่ามากกว่า 0

4.4.1.5 ขนาดของพื้นที่ให้บริการในแต่ละชั้น

ขนาดของพื้นที่ให้บริการในแต่ละชั้น (A_f) คือขนาดของพื้นที่อาคารในแต่ละชั้น คำนวณได้จากพื้นที่โดยประมาณของแต่ละชั้นในแบบระนาบเดียว (กว้าง x ยาว)

4.4.1.6 ขนาดพื้นที่ครอบคลุมของโหนดอ้างอิง

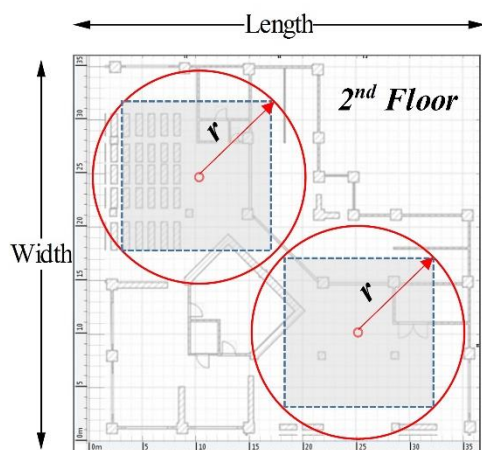
ขนาดพื้นที่ครอบคลุมของโหนดอ้างอิง (D_{cover}) คือขนาดของระยะความครอบคลุมการทำงานของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่ทำหน้าที่เป็นโหนดอ้างอิงโดยประมาณ โดยคำนวณได้จาก $D_{cover} = 2r^2$ เมื่อ r คือระยะสูงสุดที่จุดทดสอบจะสามารถรับความแรงสัญญาณจากโหนดอ้างอิง (Kondee, 2014). โดยวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ของ Freescale MC13224 รุ่นที่ 3 ซึ่งมีกำลังส่งเท่ากับ +3 dBm และมีรัศมีครอบคลุมภายในพื้นที่อาคารประมาณ 30 เมตร ($r = 30$)

4.4.2 การประมาณจำนวนโหนดอ้างอิงเริ่มต้น

ในขั้นตอนถัดมาเทคนิคการออกแบบ R-MSMR จะทำการคำนวณหาจำนวนของโหนดอ้างอิงเริ่มต้น ซึ่งเป็นจำนวนขั้นต่ำที่จะสามารถให้ความครอบคลุมของสัญญาณได้ทั่วทั้งพื้นที่ให้บริการ แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 โดยจำนวนโหนดอ้างอิงเริ่มต้น ($N_{initial}$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.6

$$N_{initial} = \sum_{f=1}^F \left[\frac{A_f}{D_{cover}} + R \right] \quad (4.6)$$

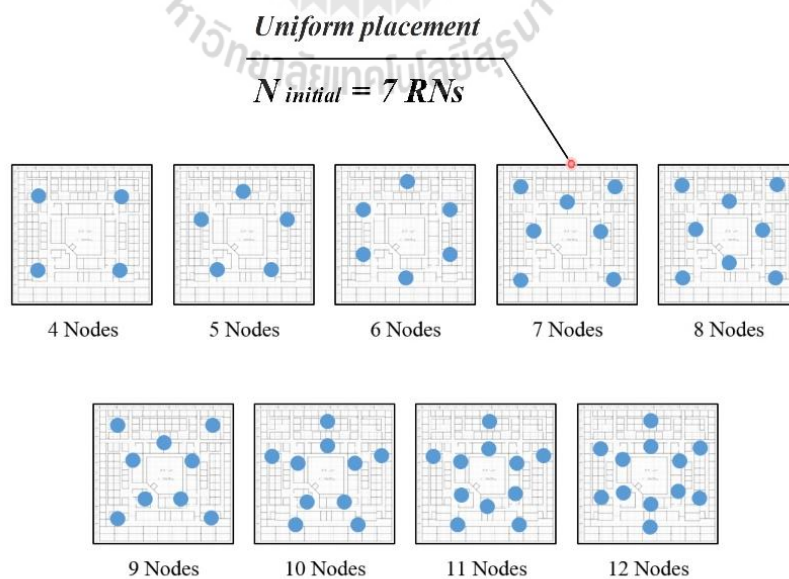
เมื่อ A_f แทนขนาดของพื้นที่ให้บริการในชั้น f พารามิเตอร์ D_{cover} คือขนาดพื้นที่ครอบคลุมของโหนดอ้างอิงโดยประมาณซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายที่เลือกใช้งาน R คือดัชนีความน่าเชื่อถือ และ F คือจำนวนชั้นอาคารทั้งหมดของพื้นที่ให้บริการ



รูปที่ 4.2 การประมาณจำนวน โหนดอ้างอิงเริ่มต้นด้วยขนาดพื้นที่ครอบคลุมของ โหนดอ้างอิง

4.4.3 การกำหนดตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงเริ่มต้น

เมื่อได้จำนวนโหนดอ้างอิงเริ่มต้น ($N_{initial}$) จากการคำนวณของสมการที่ 4.6 แล้ว ขั้นตอนถัดมาเทคนิคการออกแบบ R-MSMR จะทำการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงเริ่มต้น โดยจำนวนโหนดอ้างอิงเริ่มต้นจากขั้นตอนก่อนหน้าจะถูกใช้เพื่อเลือกตำแหน่งของโหนดอ้างอิงเริ่มต้นที่มีการวางแบบสม่ำเสมอ (uniform placement) ซึ่งถูกกำหนดไว้ก่อนหน้าโดยผู้ออกแบบระบบ แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 (สำหรับตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงเริ่มต้นสามารถดูเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ก.2)



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงเริ่มต้นด้วยการวางแบบสม่ำเสมอ

ถัดมาเมื่อได้จำนวนและตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงเริ่มต้นแล้ว ค่าเริ่มต้นนี้จะถูกนำไปตรวจสอบด้วยสมการเงื่อนไขที่ 4.2 ถึงสมการเงื่อนไขที่ 4.5 (อธิบายในหัวข้อ 4.4.4.4) เพื่อตรวจสอบว่าจำนวนโนคอ้างอิงเริ่มต้นดังกล่าวสามารถใช้เป็นจำนวนโนคอ้างอิงขั้นต่ำที่ระบบจะสามารถใช้เพื่อค้นหาตำแหน่งของโนคอ้างอิงที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการได้หรือไม่ โดยในแต่ละรอบการทำงานของกระบวนการนี้ ระบบจะทำการปรับเปลี่ยนตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงปัจจุบันด้วยวิธีการย้ายตำแหน่งใหม่ (ซึ่งวิธีการย้ายตำแหน่งใหม่จะอธิบายอย่างละเอียดในหัวข้อ 4.4.4.3) เพื่อตรวจสอบถึงตำแหน่งที่อาจเป็นไปได้ภายใต้จำนวนโนคอ้างอิงเริ่มต้นนั้น ๆ ถ้าหากการทำงานในกระบวนการนี้ไม่ผ่านสมการเงื่อนไขภายในระยะเวลาที่กำหนด นั่นหมายถึงจำนวนโนคอ้างอิงเริ่มต้นดังกล่าวไม่เพียงพอที่จะทำให้โครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งมีสมรรถนะตามเงื่อนไขการออกแบบตามที่ต้องการ ระบบจะทำการเพิ่มจำนวนของโนคอ้างอิงเริ่มต้นจำนวน 1 โนค พร้อมกับกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงเริ่มต้นใหม่ด้วยการวางแบบสุ่ม และทำการตรวจสอบเงื่อนไขซ้ำ เมื่อใดก็ตามที่ผ่านสมการเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อ จำนวนโนคอ้างอิงที่เพียงพอ (N_s) และตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงเริ่มต้นดังกล่าว ($S_{initial}$) จะถูกใช้เป็นตัวเริ่มต้นของกระบวนการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยวิธีการอบอุ่นจำลองซึ่งอธิบายได้ดังรูปที่ 4.1

หมายเหตุ เมื่อสิ้นสุดกระบวนการนี้ จำนวนโนคอ้างอิงที่เพียงพอ (N_s) นี้จะเป็นจำนวนโนคอ้างอิงที่จะถูกติดตั้งภายในพื้นที่ให้บริการ และจะไม่มี的增加จำนวนโนคอ้างอิงอีก ด้วยเหตุนี้ในขั้นตอนถัดไป การค้นหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยวิธีการอบอุ่นจำลองจะดำเนินการค้นหาคำตำแหน่งติดตั้งที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

4.4.4 การค้นหาคำตอบที่เหมาะสมด้วยวิธีการอบอุ่นจำลอง

เมื่อได้จำนวนโนคอ้างอิงที่เพียงพอสำหรับติดตั้งในระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในพื้นที่ให้บริการ (N_s) และตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงเริ่มต้น ($S_{initial}$) จากขั้นตอนก่อนหน้าแล้ว ในขั้นตอนถัดมา ระบบจะทำการค้นหาคำตำแหน่งของโนคอ้างอิงที่เหมาะสมจากจำนวนโนคอ้างอิงที่เพียงพอด้วยวิธีการอบอุ่นจำลอง โดยจะมีการประเมินค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามสมการที่ 4.1 และมีการตรวจสอบสมการเงื่อนไข 4.2 ถึงสมการเงื่อนไขที่ 4.5 ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 โดยรายละเอียดขั้นตอนการทำงานของวิธีการอบอุ่นจำลองมีดังนี้



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างของตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสมที่ได้จากวิธีการบ่อนจำลอง

4.4.4.1 รูปแบบของคำตอบ

วิทยานิพนธ์นี้ใช้เมตริกซ์แถว (row matrix) C ที่มีขนาดมิติ $1 \times J$ สำหรับเก็บค่าผลลัพธ์ของตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่ได้จากเทคนิคการออกแบบ R-MSMR โดยที่ $C = [c_1 \ c_2 \ c_3 \ \dots \ c_j \ \dots \ c_J]$ เมื่อ c_j คือตัวแปรตัดสินใจที่จะเลือกติดตั้งโนดอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเลือกติดตั้งโนดอ้างอิงที่ตำแหน่ง j หรือมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการเลือกติดตั้งโนดอ้างอิงที่ตำแหน่ง j ตัวอย่างเช่น $C = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]$ หมายถึงเมตริกซ์แถว C ที่มีขนาดมิติ 1×8 ซึ่งแสดงผลลัพธ์ตำแหน่งติดตั้งที่โนดอ้างอิง 3 ตำแหน่งคือ ติดตั้งโนดอ้างอิง c_1 c_2 และ c_7 เป็นต้น

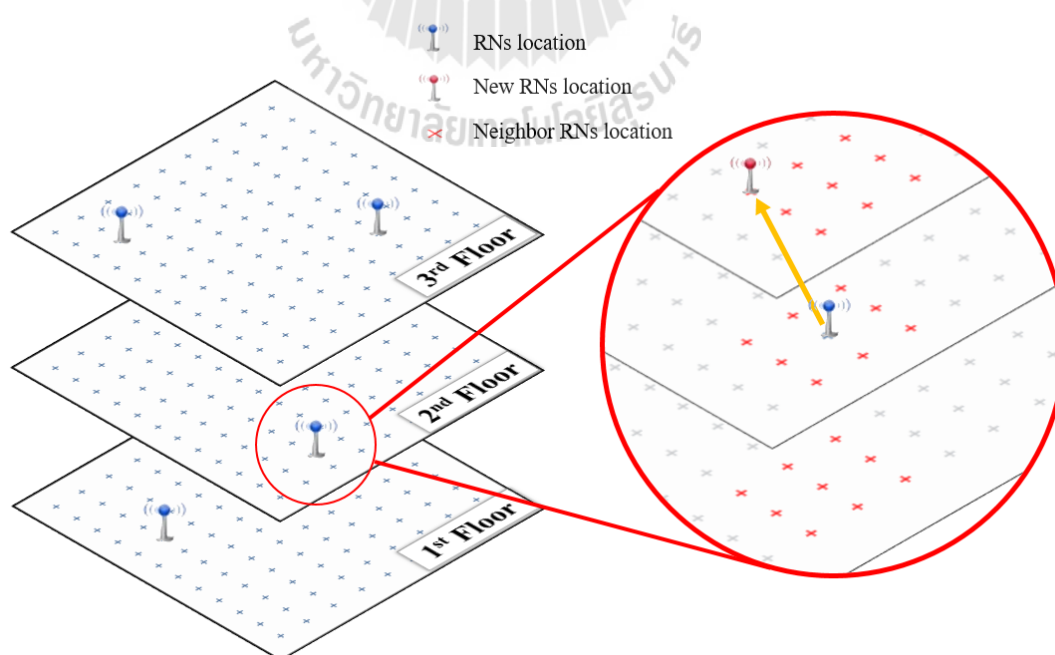
4.4.4.2 ฟังก์ชันการประเมินผล

ฟังก์ชันการประเมินผล (evaluation function) คือสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับประเมินค่าคำตอบของปัญหา เป็นสมการคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปของค่าต่ำสุดหรือค่าสูงสุด โดยค่าที่ได้จากการคำนวณฟังก์ชันการประเมินผลเรียกว่า ค่าวัตถุประสงค์ (objective value: E) ซึ่งจะถูกใช้เป็นตัวชี้วัดคุณภาพของคำตอบ โดยวิทยานิพนธ์นี้ใช้สมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันการประเมินผล ซึ่งมีวัตถุประสงค์คือ เพื่อเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดที่ให้ได้ค่าที่มากที่สุดของผลรวมความแรงสัญญาณสูงสุดที่จุดทดสอบสัญญาณรับได้จากโนดอ้างอิงในระบบ แสดงดังสมการที่ 4.7

$$E(S) = \sum_{\forall i \in T} \max_{\forall j \in B} (S_{ij} P_{ij}) \quad (4.7)$$

4.4.4.3 การย้ายตำแหน่งใหม่

การย้ายตำแหน่งใหม่หรือศัพท์เทคนิคเรียกว่า move operator เป็นวิธีการคำนวณหาคำตอบใหม่จากจุดของคำตอบปัจจุบันใด ๆ ซึ่งจะทำให้คำตอบหรือสภาวะปัจจุบันของคำตอบเปลี่ยนแปลงไปตามการย้าย (move) โดยกระบวนการดังกล่าวถูกนำมาใช้เพื่อค้นหาตำแหน่งใหม่สำหรับติดตั้งโนดอ้างอิง ซึ่งเป็นการปรับเปลี่ยนผลลัพธ์ของตำแหน่งเดิมจากคำตอบที่มีอยู่รอบ ๆ หรือจากตำแหน่งข้างเคียง (neighborhood) เพื่อช่วยให้กระบวนการค้นหาคำตอบได้ผลคำตอบที่ดีกว่าคำตอบปัจจุบัน วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอวิธีการย้ายตำแหน่งใหม่ด้วยโครงสร้างแบบ 3 มิติ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.5 โดยขั้นตอนการทำงานของกรย้ายตำแหน่งใหม่สำหรับติดตั้งโนดอ้างอิงเริ่มจาก ทำการสุ่มเลือกตำแหน่งโนดอ้างอิงที่ถูกติดตั้งอยู่แล้ว (ชุดของคำตอบเริ่มต้น) จำนวน 1 ตำแหน่ง (ตำแหน่งของโนดอ้างอิงสีน้ำเงินในรูปวงกลม) ซึ่งตำแหน่งที่สุ่มได้คือตำแหน่งปัจจุบันที่จะถูกปรับเปลี่ยนให้เป็นตำแหน่งใหม่จากตำแหน่งข้างเคียงแบบ 3 มิติ (เครื่องหมายกากบาทสีแดง) จากนั้นตำแหน่งที่สามารถติดตั้งได้ของตำแหน่งข้างเคียงแบบ 3 มิติจะถูกสุ่มเพื่อใช้เป็นตำแหน่งใหม่ โดยมีเงื่อนไขคือตำแหน่งใหม่ที่สุ่มได้จะต้องไม่อยู่ในชุดคำตอบเริ่มต้น ซึ่งในกรณีนี้ ตำแหน่งที่สามารถติดตั้งได้มีจำนวน 26 ตำแหน่ง สุดท้ายย้ายตำแหน่งใหม่ที่ได้นี้จะเป็ตำแหน่งของโนดอ้างอิงที่ถูกติดตั้งแทนที่ตำแหน่งปัจจุบัน (ตำแหน่งของโนดอ้างอิงสีแดง)



รูปที่ 4.5 วิธีการย้ายตำแหน่งโนดอ้างอิงใหม่ด้วยโครงสร้างแบบ 3 มิติ

4.4.4.4 การตรวจสอบเงื่อนไข

การตรวจสอบเงื่อนไข เป็นการตรวจสอบข้อกำหนดหรือข้อจำกัดของปัญหา ซึ่งเป็นกลไกการควบคุมและตัดสินใจของวิธีการค้นหาคำตอบที่จะเลือกหรือไม่เลือกดำเนินการ โดยวิทยานิพนธ์นี้ใช้สมการเงื่อนไขที่แสดงข้อจำกัดของการออกแบบภายใต้ปัจจัยต่าง ๆ จำนวน 4 สมการเงื่อนไข ได้แก่ สมการที่ 4.2 ถึงสมการที่ 4.5 เพื่อตรวจสอบว่าโครงสร้างของตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงนั้น ๆ อยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ทุกข้อหรือไม่ หากไม่เป็นไปตามเงื่อนไข ระบบจะทำการซ้ำในขั้นตอนการค้นหาตำแหน่งใหม่ ตรงกันข้าม ถ้าหากเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดทุกข้อ นั้นหมายถึงจำนวนและตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงดังกล่าวสามารถใช้เป็นโครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งที่มีวัตถุประสงค์ตามที่ต้องการได้

4.4.4.5 การเปรียบเทียบฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ในขั้นตอนการทำงานนี้ ค่าวัตถุประสงค์ของโครงสร้างการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงปัจจุบัน (E) และตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงใหม่ (E_{new}) จะถูกเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบว่าโครงสร้างใหม่มีค่าวัตถุประสงค์ดีกว่าโครงสร้างปัจจุบันหรือไม่ โดยวิทยานิพนธ์นี้มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือเพื่อต้องการหาค่าที่มากที่สุด (maximize) ดังนั้นถ้าหากโครงสร้างใหม่มีค่าวัตถุประสงค์มากกว่าโครงสร้างปัจจุบัน (มีค่าวัตถุประสงค์ดีกว่าเดิม) ระบบจะทำการแทนที่โครงสร้างปัจจุบันด้วยโครงสร้างใหม่ และใช้โครงสร้างตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงใหม่นี้เป็นผลลัพธ์ของคำตอบ แต่ถ้าหากโครงสร้างใหม่มีค่าวัตถุประสงค์น้อยกว่าโครงสร้างปัจจุบัน (มีค่าวัตถุประสงค์แย่กว่าเดิม) ระบบจะเข้าสู่กระบวนการตัดสินใจว่าจะยอมรับโครงสร้างที่มีค่าวัตถุประสงค์ที่แย่กว่านี้หรือไม่ด้วยวิธีการความน่าจะเป็นที่จะยอมรับคำตอบที่แย่กว่าเดิม

4.4.4.6 ความน่าจะเป็นที่จะยอมรับคำตอบที่แย่กว่าเดิม

ในกรณีที่ค่าวัตถุประสงค์ของโครงสร้างการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงใหม่แย่กว่าค่าวัตถุประสงค์ของโครงสร้างปัจจุบัน วิธีการบออ่อนจำลองจะใช้วิธีการความน่าจะเป็นที่จะยอมรับคำตอบที่แย่กว่าเดิมเพื่อตัดสินใจว่าจะยอมรับคำตอบดังกล่าวหรือไม่ ซึ่งสมการที่ใช้ในการตัดสินใจที่จะยอมรับคำตอบที่แย่กว่าแสดงได้ดังสมการที่ 4.8 และสมการที่ใช้คำนวณค่าความน่าจะเป็นของการยอมรับคำตอบที่แย่กว่าเดิม (P_d) แสดงได้ดังสมการที่ 4.9

$$z < P_a \quad (4.8)$$

$$P_a = e^{-\left[\frac{\Delta E}{\tau}\right]} \quad (4.9)$$

เมื่อ z คือค่าตัวเลขสุ่มที่มีการกระจายแบบสม่ำเสมอ (uniform distribution) ซึ่งจะถูกเลือกในช่วง $[0, 1]$ ค่า $\Delta E = E - E_{new}$ หรือค่าผลต่างของฟังก์ชันการประเมินผลระหว่างคำตอบปัจจุบัน (E) กับคำตอบใหม่ (E_{new}) และ τ คือค่าอุณหภูมิปัจจุบันของการอบอุ่น

เมื่อใดก็ตามที่ค่าวัตถุประสงค์ของโครงสร้างใหม่แยกว่าโครงสร้างปัจจุบัน จำนวนครั้งของการไม่มีปรับปรุงค่าคำตอบที่ดีขึ้น (n_{worse}) จะถูกนับ และถ้าหากสมการที่ 4.8 เป็นจริง ($z < P_a$) หมายถึงระบบจะยอมรับโครงสร้างใหม่ที่แยกว่าเดิมนี้ ตรงกันข้าม ถ้าหากสมการที่ 4.8 เป็นเท็จ ($z \geq P_a$) หมายถึงระบบจะไม่ยอมรับโครงสร้างใหม่ที่แยกว่าเดิมนี้ และระบบจะดำเนินการซ้ำในขั้นตอนการค้นหาตำแหน่งใหม่

พิจารณาสมการที่ 4.9 จะสังเกตได้ว่าที่รอบการทำงานที่มีอุณหภูมิของการอบอุ่นสูง ๆ ระบบจะมีความน่าจะเป็นที่จะยอมรับคำตอบที่แยกว่าเดิมนี้นั้นมากกว่ารอบการทำงานที่มีค่าอุณหภูมিরอบอ่อนต่ำ ๆ ซึ่งลักษณะการทำงานดังกล่าวของวิธีการอบอุ่นจำลองเปรียบได้กับการหลุดพ้นจากคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบในช่วงเริ่มต้น (การค้นหาคำตอบแบบหยาบ) โดยผลลัพธ์นี้อาจนำไปสู่การลู่เข้าหากลุ่มคำตอบที่ดีขึ้นกว่าเดิม ในทางตรงกันข้าม ที่รอบการทำงานที่มีค่าอุณหภูมিরอบอ่อนต่ำ ๆ ระบบจะไม่ยอมรับคำตอบที่แยกว่าเดิมนี้ และยอมรับคำตอบใหม่ที่ดีกว่าคำตอบปัจจุบันเท่านั้น เพื่อที่ระบบจะสามารถค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบได้อย่างละเอียด

4.4.4.7 เกณฑ์การหยุด

เกณฑ์การหยุด คือกลไกที่ทำหน้าที่เป็นส่วนควบคุมที่ทำให้ระบบการออกแบบหยุดการค้นหาคำตอบ จะถูกดำเนินการในช่วงที่กระบวนการค้นหาคำตอบลู่เข้าใกล้จุดสมดุล ซึ่งสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของสถานะคำตอบที่ไม่มีนัยสำคัญเพียงพอ โดยสถานะนี้จะเกิดขึ้นเมื่อระบบมีคำตอบที่เข้าใกล้ค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวงแคบ ซึ่งวิทยานิพนธ์นี้เลือกใช้เกณฑ์การหยุดที่พิจารณาจากค่าพารามิเตอร์ 2 ค่าคือ เมื่อค่าอุณหภูมิปัจจุบันของการอบอุ่น (τ) ลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ (หรือมีค่าเท่ากับ τ_{stop}) หรือเมื่อไม่มีการปรับปรุงค่าคำตอบที่ดีขึ้นจำนวน n_{worse_max} ครั้ง

ติดต่อกัน ดังนั้นการทำงานของเทคนิคการออกแบบจะถูกหยุดการค้นหาคำตอบเมื่อระบบมีค่าพารามิเตอร์ตรงกับเกณฑ์การหยุดที่กำหนดไว้ได้อย่างใดอย่างหนึ่ง

สมการที่ 4.10 คือสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าอุณหภูมิการอบอุ่นเริ่มต้น ($\tau_{initial}$) ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปค่าอุณหภูมิการอบอุ่นจะมีค่าลดลง ค่า $\bar{\Delta E}$ คือค่าเฉลี่ยของผลต่างฟังก์ชันการประเมินใน 20 รอบการทำงานของทดสอบเบื้องต้น (preliminary test) โดยสมการที่ 4.11 คือสมการที่ใช้สำหรับปรับลดอุณหภูมิการอบอุ่นในแต่ละรอบการค้นหา ซึ่ง τ ค่าอุณหภูมิการอบอุ่นใด ๆ ระบบจะพิจารณาจำนวนครั้งของการค้นหาคำตอบ ($Iter$) ซึ่งถูกกำหนดด้วยจำนวนครั้งสูงสุดของการค้นหาคำตอบ ($Iter_{max}$) ที่คำนวณได้จากสมการที่ 4.12 ซึ่งค่าดังกล่าวจะมีค่าเพิ่มขึ้นในทุก ๆ รอบของการปรับค่าอุณหภูมิการอบอุ่น วิทยานิพนธ์นี้กำหนดค่าเริ่มต้นของจำนวนครั้งสูงสุดของการค้นหาคำตอบ ($Iter_{max}$) ให้มีค่าเท่ากับจำนวนโนดอ้างอิงที่เพียงพอ (N_s)

$$\tau_{initial} = -\frac{\bar{\Delta E}}{\ln(P_{a_initial})} \quad (4.10)$$

$$\tau = \varphi\tau \quad (4.11)$$

$$Iter_{max} = \frac{Iter_{max}}{\varphi} \quad (4.12)$$

โดยวิทยานิพนธ์นี้กำหนดค่าพารามิเตอร์ $P_{a_initial} = 0.8$, $\varphi = 0.9$, $\tau_{stop} = 0.01$ และ $n_{worse_max} = 2000$ ตามคำแนะนำการทำงานของวิธีการอบอุ่นจำลองที่มีประสิทธิภาพ (Kondee, 2014) (Kirkpatrick, 1984) ซึ่งจะช่วยให้ระบบมีเสถียรภาพ และเพิ่มโอกาสที่การค้นหาคำตอบจะเข้าสู่หาคำตอบที่ดีที่สุด

สุดท้ายเมื่อกระบวนการทำงาน SA สิ้นสุดลง ระบบจะได้ตำแหน่งติดตั้งของโนดอ้างอิงที่เหมาะสม (S_{final}) สำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่สามารถรองรับการทำงานทั้งภายใต้สภาวะปกติและสภาวะที่มีโนดอ้างอิงบางโนดไม่ทำงาน

4.5 ข้อกำหนดการทดลอง

เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของโครงสร้างที่ได้จากเทคนิคการออกแบบ R-MSMR ที่พัฒนาขึ้น ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะในการระบุตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปรีนท์ซึ่งมีโครงสร้างการออกแบบที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้างที่ถูกนำมาเปรียบเทียบกับเทคนิคที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย โครงสร้างการวางแบบครอบคลุมและสม่ำเสมอ (coverage and uniform placement: Uniform) และโครงสร้างที่ได้จากเทคนิคการออกแบบ MSMR (Kondee, 2014) ในการทดสอบสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งวัตถุ ผู้วิจัยได้ทำการสุ่มเลือกตำแหน่งของจุดทดสอบด้วยวิธีการสุ่มแบบสม่ำเสมอ และใช้จุดทดสอบชุดนี้ประเมินสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งทั้งสามเทคนิคการออกแบบ โดยใช้เทคนิคระบุชั้น RMoS (การพัฒนาในบทที่ 3) ร่วมกับเทคนิคระยะห่างยูคลิเดียนแบบแอคทีฟ (Active Euclidean distance) กำหนดตำแหน่งของโนดวัตถุ (ซึ่งเทคนิคระยะห่างยูคลิเดียนแบบแอคทีฟจะอธิบายอย่างละเอียดในบทที่ 5)

ในการวิเคราะห์สมรรถนะของแต่ละโครงสร้างการออกแบบ ผู้วิจัยได้แบ่งวัตถุประสงค์การวิจัยออกเป็น 2 หัวข้อดังนี้

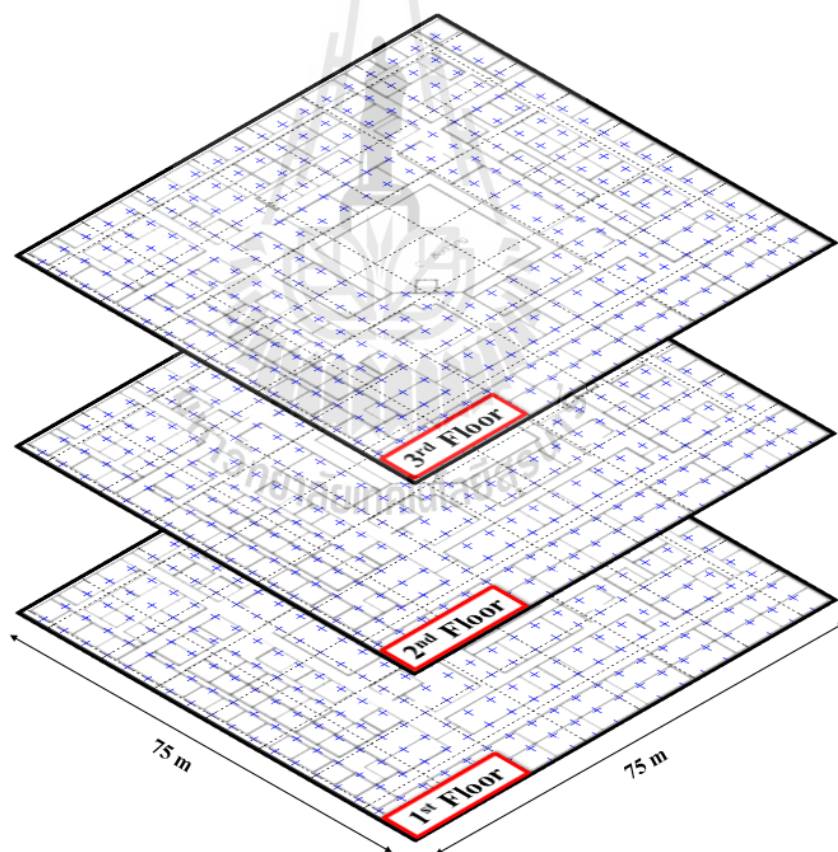
- 1) เพื่อเปรียบเทียบผลสมรรถนะในการระบุตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปรีนท์ซึ่งมีโครงสร้างการออกแบบที่แตกต่างกัน (หัวข้อ 4.6.2)
- 2) เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบระบุตำแหน่งภายใต้รูปแบบการเสียบของโนดอ้างอิงในลักษณะต่าง ๆ (หัวข้อ 4.6.3)

สำหรับข้อกำหนดการทดลองแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยดังนี้ หัวข้อ 4.5.1 สถานที่การทดลอง และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง และหัวข้อ 4.5.2 อุปกรณ์การทดลอง

4.5.1 สถานที่การทดลองและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ทำการทดลองภายในอาคารวิชาการ 3 ชั้น โดยละชั้นมีขนาดประมาณ 75x75 ตารางเมตร ซึ่งผู้วิจัยได้แบ่งพื้นที่การทดลองออกเป็น 3 กรณีคือ การทดลองภายในพื้นที่ 1 ชั้น (1st floor) การทดลองภายในพื้นที่ 2 ชั้น (1st floor และ 2nd floor) และการทดลองภายในพื้นที่ 3 ชั้น (1st floor, 2nd floor และ 3rd floor) รูปที่ 4.6 แสดงพื้นที่การทดลองอาคารวิชาการ 3 ชั้น โดยแต่ละพื้นที่การทดลอง

ผู้วิจัยได้กำหนดให้จุดทดสอบสัญญาณ (STP) และตำแหน่งที่สามารถติดตั้งโนดอ้างอิงได้ (Candi) มีข้อกำหนดเหมือนกันคือ มีจำนวนเท่ากันและอยู่บนตำแหน่งเดียวกันแทนด้วยเครื่องหมายบวกสีฟ้าในรูปที่ 4.6 ซึ่งแต่ละตำแหน่งมีระยะห่างระหว่างตำแหน่งเท่ากับ 4 เมตร (grid spacing เท่ากับ 4x4 ตารางเมตร) วิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีการจำลองค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ (RSS_data) จากสมการการถดถอย (regression model) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการจำลองค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ โดยใช้คุณสมบัติของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสัญญาณที่รับได้กับระยะทางที่ได้จากการวัดในพื้นที่การทดลองจริง ซึ่งข้อมูลความสัมพันธ์ที่ได้นี้จะถูกใช้เป็นตัวแทนของลักษณะการแพร่กระจายสัญญาณสำหรับพื้นที่ให้บริการนั้น ๆ (Kondee, 2014) (สามารถศึกษาวิธีการจำลองความแรงสัญญาณที่รับได้จากงานวิจัย Maneerat (2012))



รูปที่ 4.6 พื้นที่การทดลองอาคารวิชาการ 3 ชั้น

ในการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งที่มีโครงสร้างการติดตั้งโนดอ้างอิงที่แตกต่างกัน ผู้วิจัยได้กำหนดจำนวนและตำแหน่งของฟิงเกอร์ปรีนท์เหมือนกับตำแหน่งของจุดทดสอบสัญญาณและตำแหน่งที่สามารถติดตั้งโนดอ้างอิงได้ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.6 และทำการสุ่มจุดทดสอบ (test points) ที่จะถูกใช้เป็นตำแหน่งวัตถุด้วยการสุ่มแบบสม่ำเสมอ จำนวน 158, 316 และ 474 จุดทดสอบสำหรับการทดลองภายในพื้นที่ 1 ชั้น 2 ชั้น และ 3 ชั้น ตามลำดับ ซึ่งจำนวนจุดทดสอบดังกล่าวได้มาจากการกำหนดขนาดตัวอย่างจากเปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่น (วิทยานิพนธ์นี้ใช้ 95% ความเชื่อมั่น) เพื่อคำนวณหาจำนวนจุดทดสอบที่เพียงพอที่จะทำให้ผลการทดลองมีความน่าเชื่อถือ (คณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555) ตารางที่ 4.3 แสดงข้อกำหนดของการทดลองที่ใช้ในการออกแบบ โครงสร้าง และการระบุตำแหน่ง

หมายเหตุ ค่าพารามิเตอร์ที่จะถูกป้อนให้กับเทคนิคการออกแบบ MSMR และ R-MSMR ประกอบด้วย $P_{a_initial} = 0.8$, $\varphi = 0.9$, $\tau_{stop} = 0.01$ และ $n_{worse_max} = 2000$

ตารางที่ 4.3 ข้อกำหนดของเทคนิคการออกแบบและการระบุตำแหน่ง

Parameter	Detail
Floor dimensions	75m. × 75m. (for 1 st , 2 nd and 3 rd floor)
RNs placement	Uniform placement, MSMR and R-MSMR
Number of fingerprint locations	328 locations for one-story service area 656 locations for two-story service area 984 locations for three-story service area
Test points (i.e. target locations)	158 locations for one-story service area 316 locations for two-story service area 474 locations for three-story service area
RSS threshold (P_T)	0.1 pW (i.e. -100 dBm)
Accuracy index (α)	4 (Kaemarungsi, 2005) ²
Reliability index (R)	1, 2, 3 and 4
Positioning technique	Active Euclidean distance
Floor determination technique	RMoS floor algorithm

หมายเหตุ ตำแหน่งฟังก์ชันรีพรีนธ์ จุดทดสอบสัญญาณ (STP) และจุดที่สามารถติดตั้ง โนคอ้างอิงได้ (Candi) เป็นตำแหน่งเดียวกัน

4.5.2 อุปกรณ์การทดลอง

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ใช้ข้อกำหนดของอุปกรณ์การทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในบทที่ 3 (หัวข้อ 3.4.2) นอกจากนี้ สำหรับการทดสอบสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งภายใต้การ ล้มเหลวของโนคอ้างอิง ผู้วิจัยได้แบ่งสภาวะการทำงานของระบบออกเป็น 2 สภาวะได้แก่ สภาวะ ปรกติ (fault-free scenario) และสภาวะผิดปกติซึ่งเกิดจาก โนคอ้างอิงที่ติดตั้งอยู่ภายในพื้นที่ ให้บริการไม่สามารถทำงานได้อย่างปรกติ (RN-failure scenario)

4.6 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้แสดงผลลัพธ์ของการค้นหาคำตอบการออกแบบ โครงสร้าง และการ วิเคราะห์สมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งที่มีโครงสร้างการออกแบบที่แตกต่างกัน โดยโครงสร้าง ที่ถูกนำมาวิเคราะห์และเปรียบเทียบประกอบไปด้วย โครงสร้างแบบ Uniform โครงสร้างที่ได้จาก เทคนิคการออกแบบ MSMR และโครงสร้างที่ได้จากเทคนิคที่พัฒนาขึ้น R-MSMR ซึ่งพิจารณาการ ใช้ค่า $R=1, 2, 3$ และ 4 โดยหัวข้อการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองแบ่งออกเป็นหัวข้อ ย่อยดังนี้ หัวข้อ 4.6.1 ผลการค้นหาตำแหน่งติดตั้งของ โนคอ้างอิง หัวข้อ 4.6.2 ผลการระบุตำแหน่ง วัตถุของแต่ละ โครงสร้างการออกแบบ และหัวข้อ 4.6.3 การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบ ระบุตำแหน่งภายใต้รูปแบบการเสียบของโนคอ้างอิงในลักษณะต่าง ๆ

4.6.1 ผลการค้นหาตำแหน่งติดตั้งของโนคอ้างอิง

ในหัวข้อนี้จะทำการแสดงผลลัพธ์ของการค้นหาตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงที่ได้จาก โครงสร้างการออกแบบของแต่ละเทคนิค ตารางที่ 4.4 แสดงตัวอย่างการค้นหาคำตอบทั้ง 20 ครั้ง ของเทคนิคการออกแบบ R-MSMR, $R=1$ สำหรับกรณีพื้นที่ 1 ชั้น ซึ่งผลลัพธ์ในตารางประกอบไปด้วย ลำดับการค้นหาคำตอบ ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละการค้นหา จำนวน โนคอ้างอิงเริ่มต้น จำนวน โนคอ้างอิงที่จะถูกติดตั้งซึ่งเป็นผลลัพธ์ของคำตอบ เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ และ ตำแหน่งของโนคอ้างอิงที่จะถูกติดตั้ง ในการเลือกคำตอบที่ใช้เป็นตัวแทนของการค้นหาทั้ง 20 ครั้ง ทำให้ได้โดยการหาค่าเฉลี่ยของจำนวน โนคอ้างอิงที่จะถูกติดตั้ง (ปัดทศนิยมให้เป็นเลขจำนวนเต็ม) ซึ่ง

จากตัวอย่างสามารถคำนวณจำนวน โหนดอ้างอิงเฉลี่ยได้เท่ากับ 8 โหนด จากนั้นพิจารณาการค้นหาคำตอบที่มีจำนวนผลลัพธ์เท่ากับ 8 โหนด และมีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่มากที่สุด (ต้องการค่าที่มากที่สุด) สุดท้ายจำนวนและตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงของการค้นหาคำตอบนี้จะถูกใช้เป็น โครงสร้างการออกแบบระบบระบุตำแหน่งวัตถุ (การค้นหาคำตอบครั้งที่ 6)

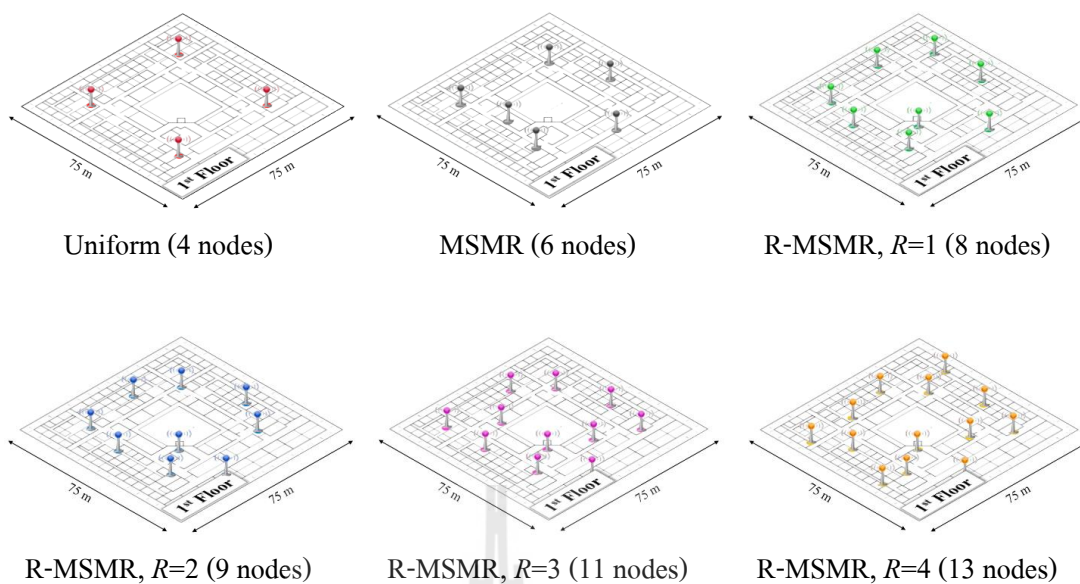
ตารางที่ 4.4 ตัวอย่างของผลลัพธ์ในการค้นหาคำตอบของ R-MSMR, $R=1$ กรณีพื้นที่แบบ 1 ชั้น

Run	Objective fn. (pWatt)	Initial node	Node installed	Run-Time (min)	Index of RNs installed							
					RN1	RN2	RN3	RN4	RN5	RN6	RN7	RN8
1	34456.14	4	8	20.46	44	92	135	141	205	247	251	280
2	30198.19	4	7	14.56	69	82	130	141	181	248	256	-
3	34882.36	4	8	15.4	35	44	130	135	141	238	248	280
4	34431.25	4	8	15.82	47	81	130	141	194	230	256	262
5	29831.82	4	7	14.42	82	90	113	135	141	238	248	-
6	35473.88	4	8	15.68	69	82	92	141	191	199	280	286
7	30505.59	4	7	11.95	82	92	106	154	238	248	280	-
8	29597.82	4	7	11.41	82	92	141	154	199	238	262	-
9	34675.45	4	8	15.26	47	82	92	135	186	238	244	268
10	30430.74	4	7	10.42	82	91	141	191	199	240	247	-
11	35410.68	4	8	15.54	69	82	92	159	180	248	256	280
12	34149.93	4	8	15.94	44	71	135	141	199	238	247	305
13	34885.88	4	8	16.70	69	79	92	141	186	205	248	280
14	29505.43	4	7	13.15	82	92	104	169	199	238	262	-
15	29897.47	4	7	16.96	44	92	100	141	219	248	280	-
16	29469.28	4	7	15.54	82	92	106	135	183	238	248	-
17	35192.46	4	8	20.52	69	82	130	135	141	230	256	262
18	34092.89	4	8	20.37	61	92	103	169	186	191	268	280
19	34273.30	4	8	20.36	51	82	92	106	191	248	275	280
20	33898.82	4	8	20.26	44	92	120	169	191	199	277	286
Average			7.6									

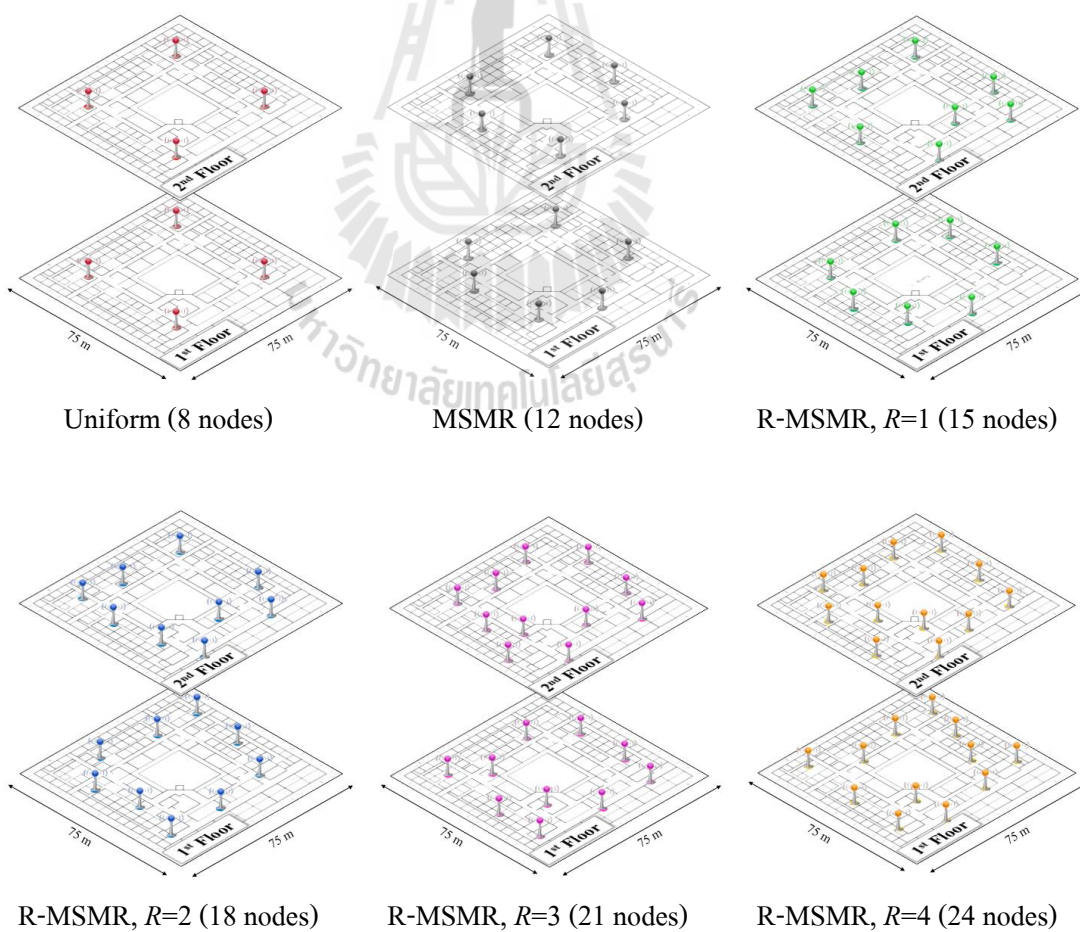
จำนวนและตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงที่ได้จากการค้นหาคำตอบของแต่ละเทคนิคแสดงดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.9 สำหรับพื้นที่ให้บริการแบบ 1 ชั้น 2 ชั้นและ 3 ชั้น ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเปรียบเทียบแต่ละโครงสร้างการออกแบบ โครงสร้างแบบ Uniform ใช้จำนวนโหนดอ้างอิงน้อยที่สุดสำหรับทั้งสามพื้นที่การทดลอง ขณะที่โครงสร้างแบบ R-MSMR ใช้จำนวนโหนดอ้างอิงมากที่สุด และจำนวนโหนดอ้างอิงที่ติดตั้งจะเพิ่มขึ้นถ้าหากค่าดัชนีความน่าเชื่อถือ (R) เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าโครงสร้างการออกแบบ R-MSMR ทั้ง 4 โครงสร้าง ($R=1, 2, 3$ และ 4) มีการกระจายตัวของจำนวนและตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงที่ครอบคลุมทั่วทั้งพื้นที่ให้บริการ ซึ่งสังเกตได้จากจำนวน โหนดอ้างอิงที่ถูกแบ่งติดตั้งในแต่ละชั้นแสดงดังตารางที่ 4.5 และตำแหน่งของโหนดอ้างอิงที่กระจายทั่วในพื้นที่ของอาคารแสดงดังรูปที่ 4.7 ถึงรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.5 จำนวน โหนดอ้างอิงที่ได้จากการค้นหาคำตอบของแต่ละเทคนิค

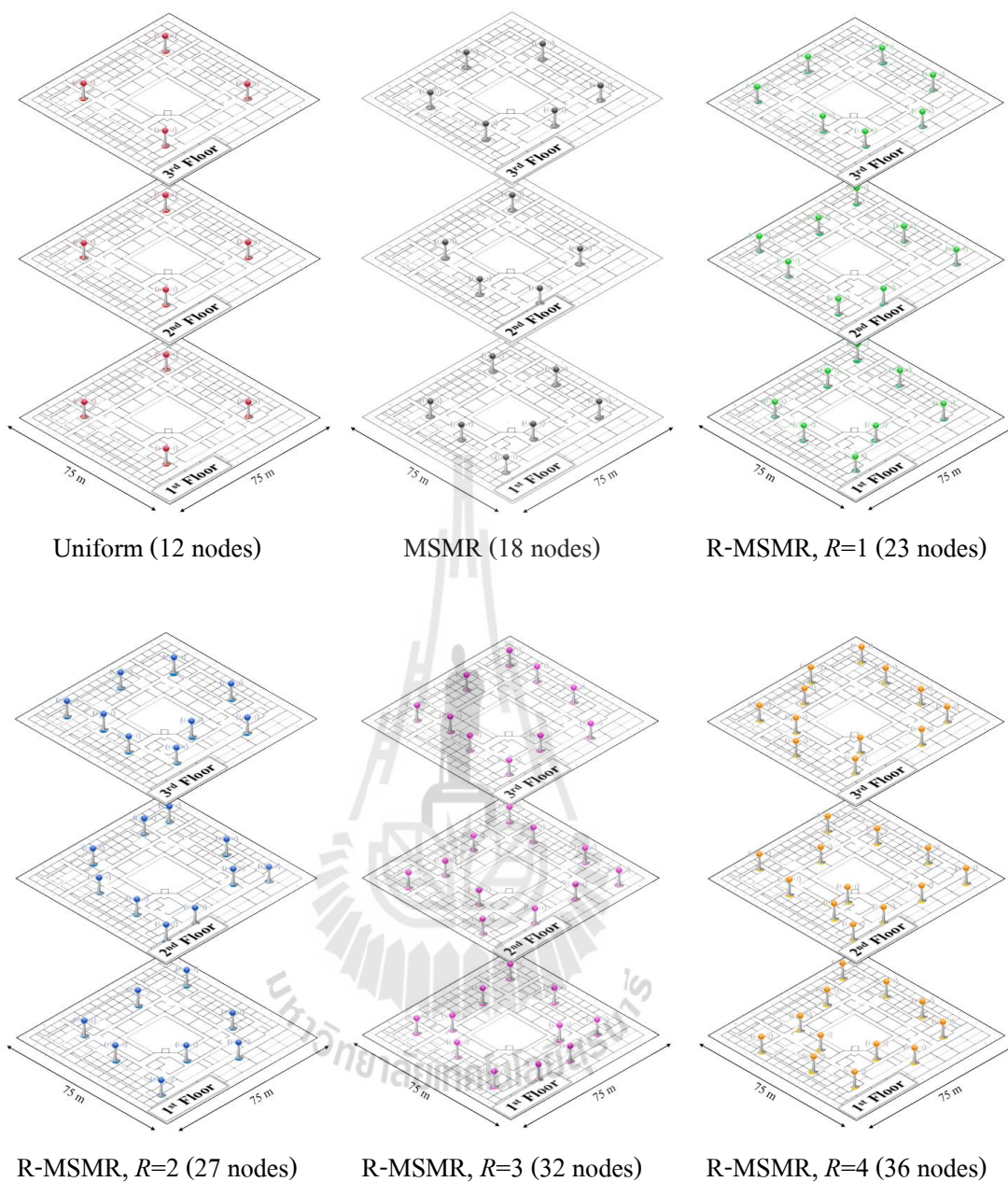
Scenario	Number of RNs installed					
	Uniform	MSMR	R-MSMR, $R=1$	R-MSMR, $R=2$	R-MSMR, $R=3$	R-MSMR, $R=4$
One-story service area	4	6	8	9	11	13
Two-story service area	8 [4+4]	12 [6+6]	15 [7+8]	18 [9+9]	21 [10+11]	24 [12+12]
Three-story service area	12 [4+4+4]	18 [7+5+6]	23 [8+8+7]	27 [8+10+9]	32 [11+11+10]	36 [12+12+12]



รูปที่ 4.7 ตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงของพื้นที่ให้บริการแบบ 1 ชั้น



รูปที่ 4.8 ตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงของพื้นที่ให้บริการแบบ 2 ชั้น



รูปที่ 4.9 ตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงของพื้นที่ให้บริการแบบ 3 ชั้น

4.6.2 ผลการระบุตำแหน่งวัตถุของแต่ละโครงสร้างการออกแบบ

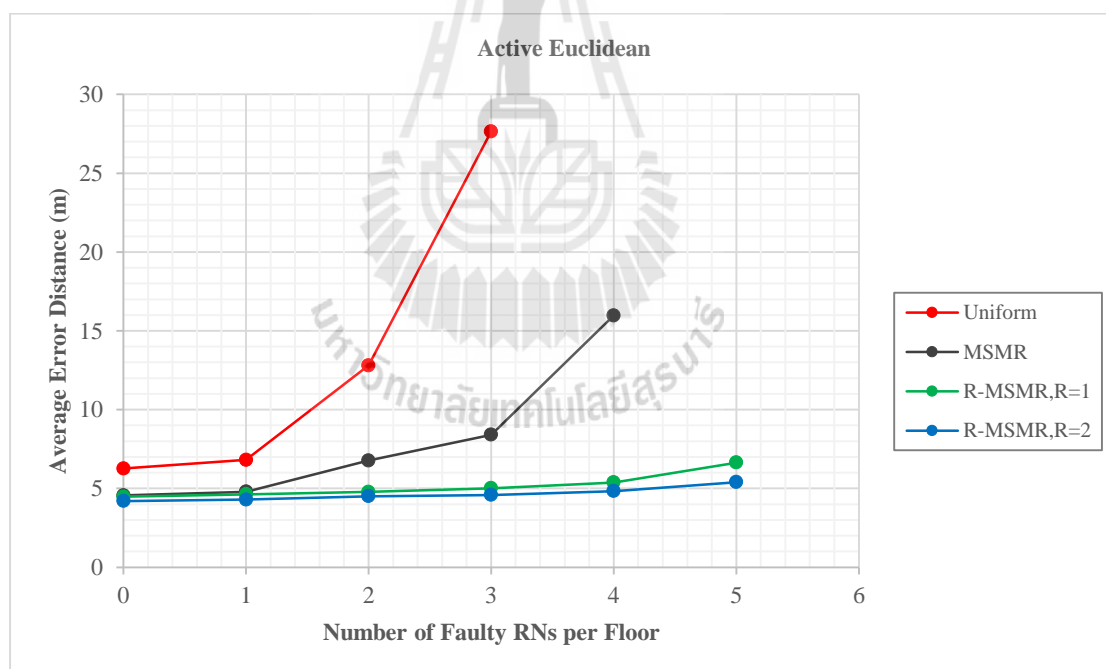
เพื่อที่จะประเมินสมรรถนะของ โครงสร้างระบบระบุตำแหน่งวัตถุที่ได้จากเทคนิคการออกแบบแต่ละชนิด ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการระบุตำแหน่งวัตถุโดยใช้โครงสร้างการออกแบบที่ได้ ซึ่งแต่ละโครงสร้างจะใช้ข้อกำหนดของการทดลองตามตารางที่ 4.3 โดยในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้พิจารณาสถานะการทำงานของระบบ 2 สถานะคือ สถานะปรกติ และสถานะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงาน โดยสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างการออกแบบด้วยวิธีต่าง ๆ จะถูกประเมินด้วยเทคนิคระบุชั้น RMoS ร่วมกับเทคนิคระยะห่างยูคลีเดียนแบบแอกทิฟ ซึ่งผลการทดลองสามารถแบ่งได้ 3 หัวข้อย่อยคือ หัวข้อ 4.6.2.1 แนวโน้มของความถูกต้องในการระบุตำแหน่งเมื่อมีจำนวน โหนดอ้างอิงที่เสียเพิ่มขึ้น หัวข้อ 4.6.2.2 ผลความถูกต้องในการระบุหมายเลขชั้น และหัวข้อ 4.6.2.3 ผลความถูกต้องในการระบุตำแหน่ง

4.6.2.1 แนวโน้มของความถูกต้องในการระบุตำแหน่งเมื่อจำนวนโนดอ้างอิงเสียเพิ่มมากขึ้น

เพื่อที่จะวิเคราะห์ถึงแนวโน้มของผลกระทบที่เกิดจากการเสียของโนดอ้างอิงในระบบ ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ทำการแบ่งกรณีการเสียของโนดอ้างอิงออกเป็น 6 กรณีได้แก่ 0 โหนด (สถานะปรกติ), กรณีที่มีโนดอ้างอิงเสียชั้นละ 1 โหนด, ชั้นละ 2 โหนด, ชั้นละ 3 โหนด, ชั้นละ 4 โหนด และชั้นละ 5 โหนด โดยแต่ละกรณีผู้วิจัยได้ทำการสุ่มตำแหน่ง โหนดอ้างอิงที่ไม่ทำงานด้วยการสุ่มแบบสม่ำเสมอจำนวน 4 รูปแบบ ดังนั้นผลการระบุตำแหน่งวัตถุภายใต้สถานะผิดปกติจะได้อาจมาจากการหาค่าเฉลี่ยของทั้ง 4 รูปแบบ รูปที่ 4.10 และตารางที่ 4.6 แสดงผลความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งภายในพื้นที่ให้บริการแบบ 3 ชั้นของ 4 โครงสร้างการออกแบบซึ่งประกอบไปด้วยโครงสร้างแบบ Uniform, MSMR, R-MSMR, $R=1$ และ R-MSMR, $R=2$ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อจำนวนของโนดอ้างอิงที่ไม่ทำงานมีเพิ่มมากขึ้น ระบบระบุตำแหน่งทุกโครงสร้างจะมีแนวโน้มของสมรรถนะที่ลดลง โดยที่สถานะปรกติ (ไม่มีโนดเสีย) ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งของแต่ละเทคนิคมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งโครงสร้างการออกแบบ Uniform มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยแย่ที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.26 เมตร แต่เมื่อมีจำนวน โหนดอ้างอิงที่เสียเพิ่มขึ้น เช่น กรณีที่มีโนดอ้างอิงเสียชั้นละ 3 โหนด โครงสร้างแบบ Uniform มีสมรรถนะความถูกต้องที่ลดลงอย่างมาก ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมากกว่าโครงสร้างอื่น ๆ โดยมีค่ามากถึง 27.64 เมตร ส่วนโครงสร้างแบบ MSMR มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 8.41 เมตร ขณะที่โครงสร้างการ

ออกแบบ R-MSMR, $R=1$ และ $R=2$ มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเพียง 5.01 เมตรและ 4.59 เมตรตามลำดับ เป็นต้น จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงข้อดีของโครงสร้างการออกแบบที่นำเสนอ R-MSMR ที่สามารถให้สมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งที่ดี และถึงแม้จะมีจำนวนของโหนดอ้างอิงไม่ทำงานมากถึง 15 โหนด (พื้นที่บริการแบบ 3 ชั้นซึ่งมีโหนดอ้างอิงเสียชั้นละ 5 โหนด) แต่ระบบระบุตำแหน่งยังคงมีสมรรถนะความถูกต้องใกล้เคียงกับสถานะที่โหนดอ้างอิงทำงานได้อย่างปกติ (กรณีเสีย 0 โหนด)

หมายเหตุ ผู้วิจัยได้กำหนดให้โหนดอ้างอิงคงเหลือที่สามารถทำงานได้อย่างปกติมีจำนวนอย่างน้อย 1 โหนดในแต่ละชั้น นั่นคือโครงสร้างแบบ Uniform และแบบ MSMR สามารถมีจำนวนโหนดอ้างอิงไม่ทำงานสูงสุดได้เพียงชั้นละ 3 โหนด และ 4 โหนด ตามลำดับ เนื่องจากจำนวนโหนดอ้างอิงน้อยที่สุดที่ถูกติดตั้งในแต่ละชั้นของโครงสร้างแบบ Uniform และแบบ MSMR มีจำนวน 4 โหนดและ 5 โหนด ตามลำดับ (พื้นที่การทดลองแบบ 3 ชั้น)



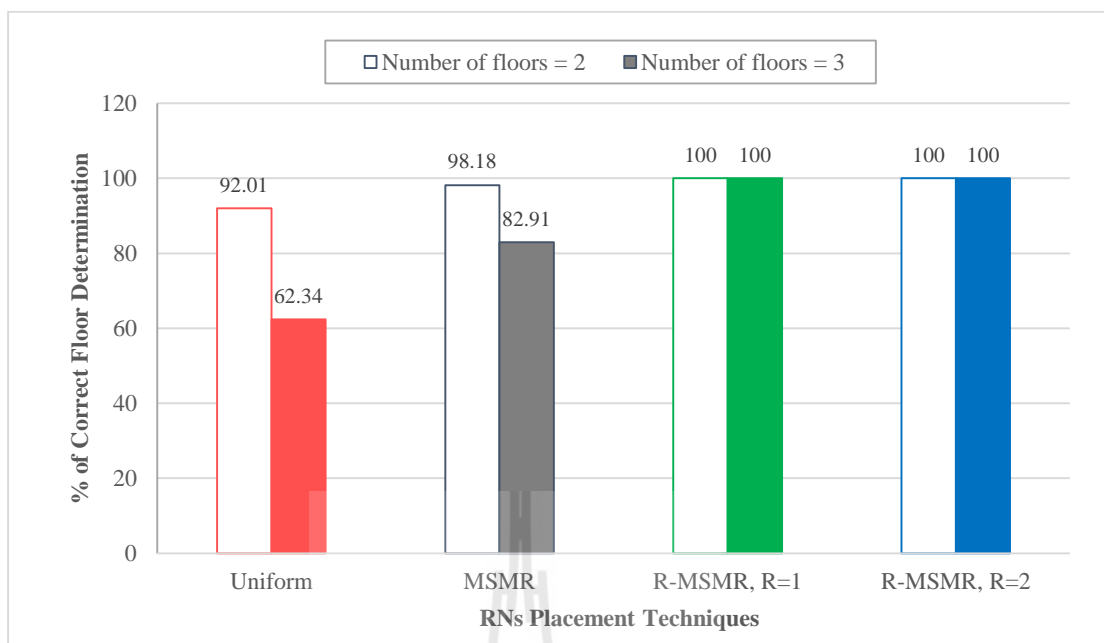
รูปที่ 4.10 แนวโน้มของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละโครงสร้างการออกแบบภายในพื้นที่ให้บริการแบบ 3 ชั้น

ตารางที่ 4.6 ผลความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งของแต่ละโครงสร้างการออกแบบ

Scenario	Techniques	Average error distance (m)	Standard deviation (m)
Fault-Free	Uniform	6.26	3.94
	MSMR	4.96	2.65
	R-MSMR, $R=1$	4.48	2.74
	R-MSMR, $R=2$	4.21	2.47
1RN Failure	Uniform	6.82	4.73
	MSMR	4.79	2.66
	R-MSMR, $R=1$	4.63	2.79
	R-MSMR, $R=2$	4.30	2.58
2RNs Failure	Uniform	12.80	13.32
	MSMR	6.77	6.73
	R-MSMR, $R=1$	4.78	2.96
	R-MSMR, $R=2$	4.50	2.65
3RNs Failure	Uniform	27.64	20.84
	MSMR	8.41	10.68
	R-MSMR, $R=1$	5.01	3.68
	R-MSMR, $R=2$	4.59	2.70
4RNs Failure	Uniform	-	-
	MSMR	15.97	18.64
	R-MSMR, $R=1$	5.38	3.40
	R-MSMR, $R=2$	4.83	2.69
5RNs Failure	Uniform	-	-
	MSMR	-	-
	R-MSMR, $R=1$	6.64	6.12
	R-MSMR, $R=2$	5.40	4.02

4.6.2.2 ผลความถูกต้องในการระบุหมายเลขชั้น

หัวข้อนี้ผู้วิจัยพิจารณาสถานะการทำงานของระบบ 2 สถานะคือ สถานะปกติ และสถานะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงานจำนวนชั้นละ 3 โหนด (3RNs failure) โดยในสถานะผิดปกติ ผู้วิจัยได้ทำการสุ่มตำแหน่งโนดอ้างอิงที่ไม่ทำงานด้วยการสุ่มแบบสม่ำเสมอจำนวน 4 รูปแบบ ตารางที่ 4.8 และตารางที่ 4.9 แสดงผลการระบุหมายเลขชั้นของแต่ละเทคนิค จากผลการทดลองพบว่าทุกโครงสร้างการออกแบบสามารถระบุหมายเลขชั้นได้อย่างถูกต้อง 100% (false floor determination = 0%) ทั้งภายในพื้นที่แบบ 2 ชั้นและ 3 ชั้น แต่เมื่อระบบระบุตำแหน่งวัตถุตกอยู่ภายใต้การล้มเหลวของโนดอ้างอิง ซึ่งมีโนดอ้างอิงเสียจำนวนชั้นละ 3 โหนด รูปที่ 4.11 แสดงผลการระบุหมายเลขชั้นภายใต้สถานะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงานจำนวนชั้นละ 3 โหนดของ 4 โครงสร้างการออกแบบซึ่งประกอบไปด้วย โครงสร้างแบบ Uniform, MSMR, R-MSMR, $R=1$ และ R-MSMR, $R=2$ จากผลการทดลองพบว่าโครงสร้างแบบ Uniform และแบบ MSMR เกิดความผิดพลาดในการระบุหมายเลขชั้นขึ้น โดยโครงสร้างแบบ Uniform มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชั้นเท่ากับ 92.01% และ 62.34% สำหรับพื้นที่แบบ 2 ชั้นและ 3 ชั้น ตามลำดับ ส่วนการใช้โครงสร้างแบบ MSMR มีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุชั้นเท่ากับ 98.18% และ 82.91% สำหรับพื้นที่แบบ 2 ชั้นและ 3 ชั้น ตามลำดับ แต่เมื่อใช้โครงสร้างระบบที่ได้จากการออกแบบด้วยเทคนิค R-MSMR ทั้ง 4 โครงสร้าง ($R=1, 2, 3$ และ 4) สามารถระบุหมายเลขชั้นได้อย่างถูกต้อง 100% ทั้งพื้นที่ให้บริการแบบ 2 ชั้นและ 3 ชั้น นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อขนาดของพื้นที่ให้บริการมีขนาดใหญ่ขึ้น (มีจำนวนชั้นเพิ่มขึ้น) ผลการระบุหมายเลขชั้นของระบบระบุตำแหน่งที่มีโครงสร้างการออกแบบ Uniform และ MSMR จะมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุหมายเลขชั้นที่ลดน้อยลง หรืออีกความหมายคือ เมื่อระบบระบุตำแหน่งตกอยู่ภายใต้สถานะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงาน ขนาดของพื้นที่การให้บริการจะมีผลกระทบต่อความถูกต้องในการระบุหมายเลขชั้นของระบบระบุตำแหน่งวัตถุที่ใช้โครงสร้างแบบ Uniform และแบบ MSMR ในขณะที่ระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างของเทคนิค R-MSMR จะสามารถทนทานต่อสถานะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงานได้ และสมรรถนะในการระบุชั้นจะไม่ขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่การทดลอง



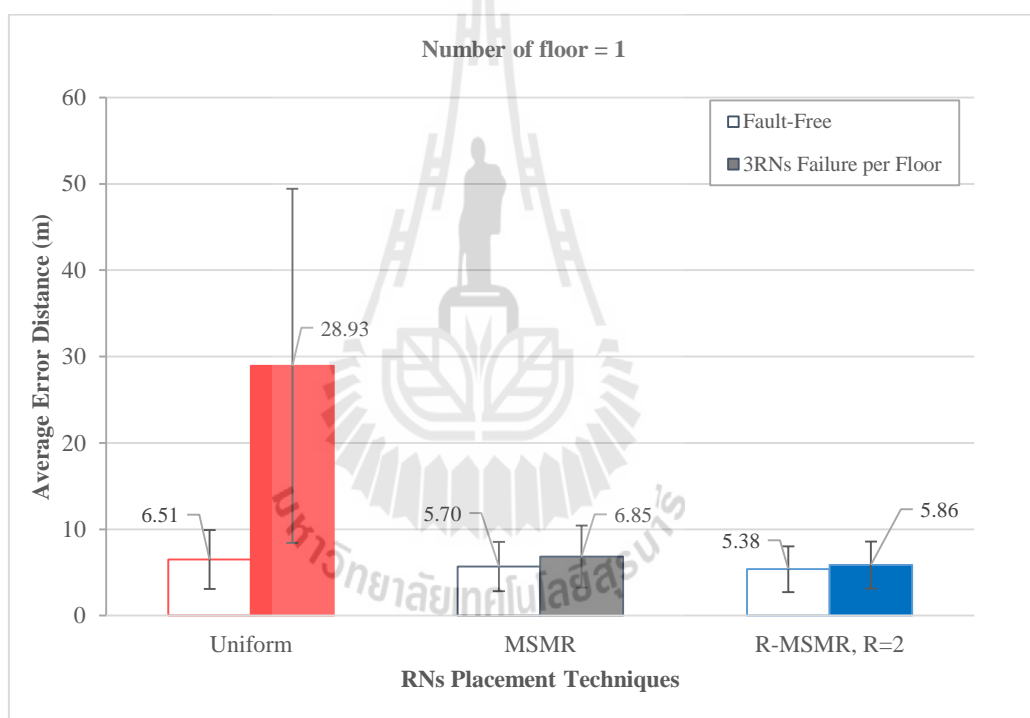
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบความถูกต้องของการระบุหมายเลขชั้นเมื่อระบบระบุตำแหน่งมีโนดอ้างอิงไม่ทำงานชั้นละ 3 โหนด

4.6.2.3 ผลความถูกต้องในการระบุตำแหน่ง

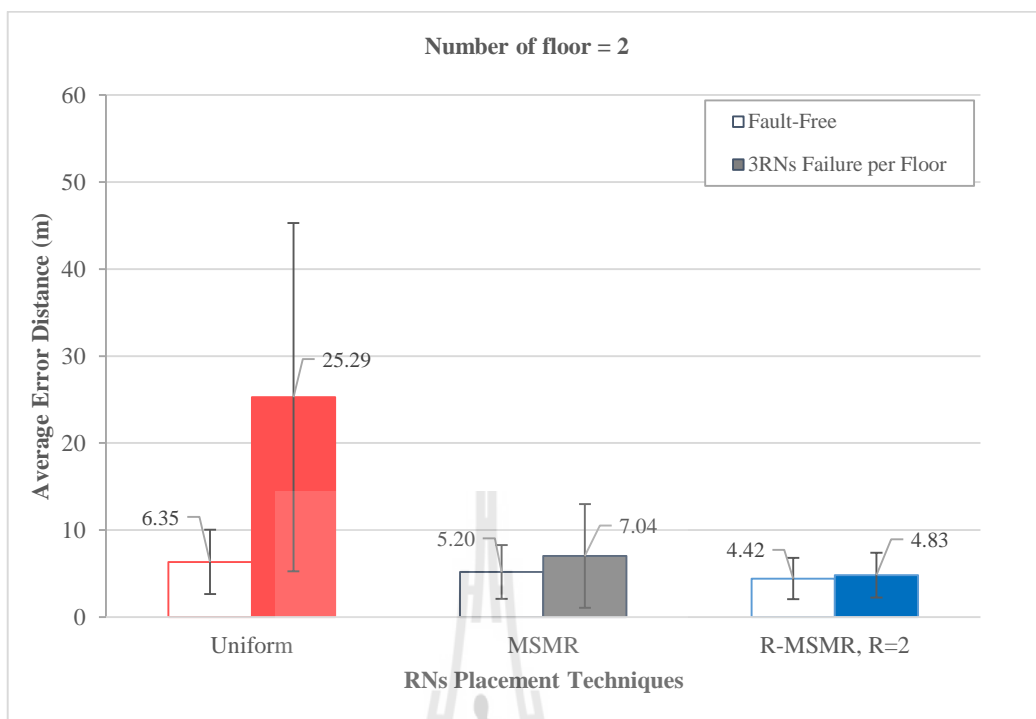
พิจารณาผลความถูกต้องในการระบุตำแหน่ง (x, y) ภายใต้สภาวะการทำงานปกติ รูปที่ 4.12 ถึงรูปที่ 4.14 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการระบุตำแหน่งภายในพื้นที่ 1 ชั้นถึง 3 ชั้นของ 3 โครงสร้างการออกแบบที่ประกอบด้วย โครงสร้างแบบ Uniform, MSMR และ R-MSMR, $R=2$ จากผลการทดลองพบว่าโครงสร้างการออกแบบ R-MSMR, $R=2$ สามารถให้ผลการระบุตำแหน่งดีที่สุดในทั้ง 3 พื้นที่การทดลอง ตัวอย่างเช่น รูปที่ 4.13 การทดลองภายในสภาวะปกติของพื้นที่แบบ 2 ชั้น ระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างการออกแบบ R-MSMR, $R=2$ มีค่าคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 4.42 เมตร ขณะที่ระบบที่ใช้โครงสร้างแบบ Uniform และ MSMR มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 6.35 เมตรและ 5.20 เมตร ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาที่เปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้าง R-MSMR, $R=2$ (%Decreasing of the average error distance compare with R-MSMR, $R=2$ หรือ %DE with R-MSMR, $R=2$) ภายใต้สภาวะปกติของทั้ง 3 พื้นที่การทดลองดังตารางที่ 4.7 ถึงตารางที่ 4.9 พบว่าโครงสร้างการออกแบบ R-MSMR, $R=2$ สามารถให้ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งดีกว่าโครงสร้างแบบ Uniform ประมาณ 17.33% ถึง 32.85% และดีกว่าโครงสร้าง MSMR ประมาณ 5.35% ถึง 14.93% ยิ่งไปกว่า

นั้น ระบบระบุตำแหน่งภายใต้สภาวะปกติที่ใช้โครงสร้างการออกแบบ R-MSMR จะมีแนวโน้มของสมรรถนะความถูกต้องดีขึ้นถ้าหากค่าดัชนีความน่าเชื่อถือ (R) มีค่ามากขึ้น

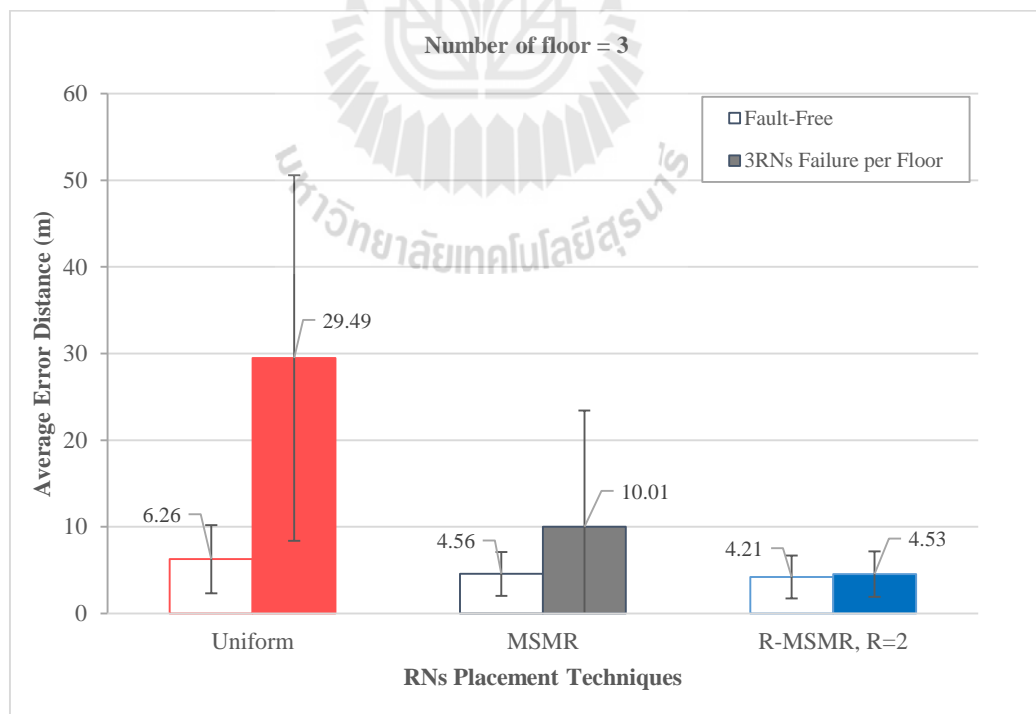
เมื่อพิจารณาที่ผลกระทบที่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของขนาดพื้นที่ให้บริการภายใต้สภาวะปกติ โครงสร้างการออกแบบทั้ง 3 โครงสร้างมีสมรรถนะในการระบุตำแหน่งดีขึ้นตามจำนวนชั้นอาคารที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสาเหตุเนื่องมาจากจำนวนชั้นที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้มีจำนวนโหนดอ้างอิงที่ถูกติดตั้งในระบบเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นค่าความแรงของสัญญาณที่จุดต่าง ๆ รับได้จากโหนดอ้างอิงภายในอาคารจะมีความครอบคลุมมากขึ้น และช่วยทำให้ระบบระบุตำแหน่งวัตถุที่ใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Kaemarungsi, 2005)¹



รูปที่ 4.12 ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งวัตถุของพื้นที่แบบ 1 ชั้น

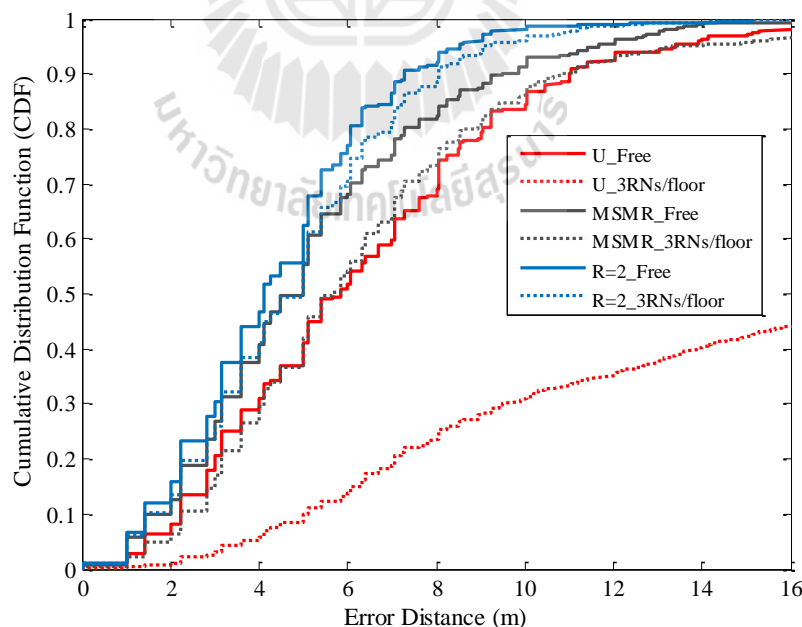


รูปที่ 4.13 ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งวัตถุของพื้นที่แบบ 2 ชั้น



รูปที่ 4.14 ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งวัตถุของพื้นที่แบบ 3 ชั้น

พิจารณาภาวะการทำงานที่ผิดปกติซึ่งมีโนคอ้างอิงเสียงจำนวนชั้นละ 3 โนค รูปที่ 4.15 แสดงความแม่นยำของการระบุตำแหน่งจากฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะความคลาดเคลื่อน (Cumulative Distribution Function : CDF) ของการระบุตำแหน่งวัตถุภายในพื้นที่แบบ 2 ชั้น ซึ่งโครงสร้างการออกแบบ 3 โครงสร้างที่ประกอบด้วย Uniform, MSMR และ R-MSMR, $R=2$ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อเกิดการเสียของโนคอ้างอิงจำนวน 3 โนคในแต่ละชั้น โครงสร้างการออกแบบทั้ง 3 โครงสร้างจะมีสมรรถนะในการระบุตำแหน่งลดลง ซึ่งโครงสร้างการออกแบบที่มีสมรรถนะในการระบุตำแหน่งดีที่สุดยังคงเป็นโครงสร้างของเทคนิคที่นำเสนอ R-MSMR, $R=2$ โดยโครงสร้างแบบ R-MSMR, $R=2$ มีความแม่นยำของตำแหน่งที่ 90% ภายในระยะ 8.06 เมตร (เส้นประสีน้ำเงิน) ขณะที่โครงสร้าง Uniform และ MSMR มีความแม่นยำของตำแหน่งที่ 90% ภายในระยะ 57.66 เมตร (เส้นประสีแดง) และ 10.82 เมตร (เส้นประสีดำ) ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองนี้พบว่า ระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างแบบ Uniform จะได้รับผลกระทบจากการเสียของโนคอ้างอิงมากที่สุด ซึ่งคิดเป็นค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นจากสภาวะปกติมากถึง 18.94 เมตร ขณะที่ระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างการออกแบบด้วยวิธี R-MSMR, $R=2$ มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นจากสภาวะปกติเพียง 0.41 เมตร

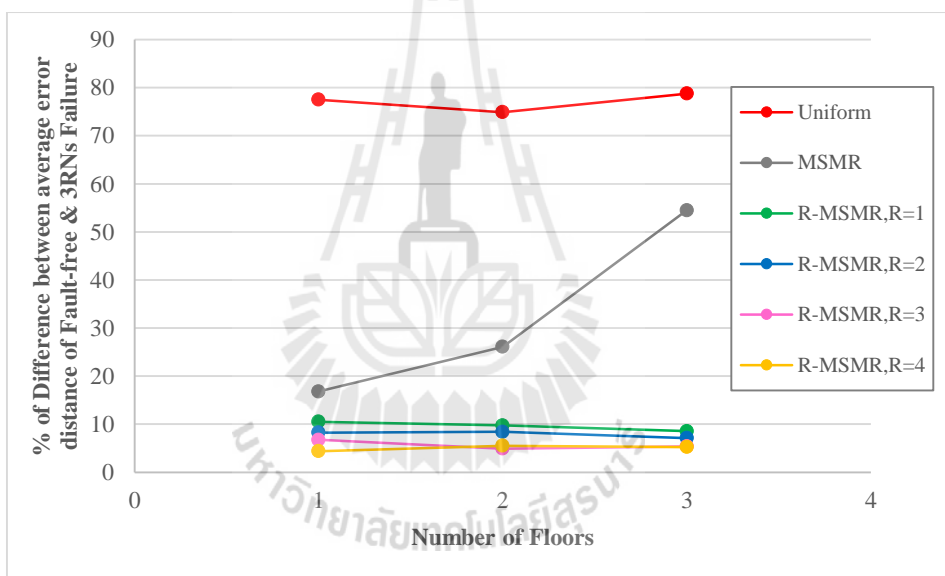


รูปที่ 4.15 CDF ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งวัตถุภายในพื้นที่ 2 ชั้น

พิจารณาที่ %DE with R-MSMR, $R=2$ ภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงานชั้นละ 3 โหนดของทั้ง 3 พื้นที่การทดลองดังตารางที่ 4.7 ถึงตารางที่ 4.9 ระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างการออกแบบด้วยวิธี R-MSMR, $R=2$ สามารถให้ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งดีกว่าโครงสร้างแบบ Uniform ประมาณ 79.73% ถึง 84.64% และดีกว่าโครงสร้างแบบ MSMR ประมาณ 14.33% ถึง 54.78% ตัวอย่างเช่น รูปที่ 4.14 การทดลองภายในสภาวะปรกติของพื้นที่แบบ 3 ชั้น ภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงานชั้นละ 3 โหนด ระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างแบบ Uniform และแบบ MSMR มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 29.49 เมตรและ 10.01 เมตร ตามลำดับ ขณะที่โครงสร้างแบบ R-MSMR, $R=2$ มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเพียง 4.53 เมตร ซึ่งโครงสร้างการออกแบบ R-MSMR, $R=2$ สามารถให้ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งดีกว่าโครงสร้างแบบ Uniform และ MSMR ซึ่งคิดเป็น %DE with R-MSMR, $R=2$ เท่ากับ 84.64% และ 54.78% ตามลำดับ ยิ่งไปกว่านั้นเมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation : SD) หรือค่าที่ใช้อธิบายการกระจายตัวของค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งในแต่ละครั้งว่าห่างจากค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมากน้อยเพียงใด จากผลการทดลองพบว่าโครงสร้างแบบ Uniform และแบบ MSMR ที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากถึง 21.10 เมตรและ 13.42 เมตร ตามลำดับ ขณะที่ R-MSMR, $R=2$ มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเพียง 2.63 เมตร ซึ่งจากผลการทดลองนี้ช่วยแสดงให้เห็นถึงข้อจำกัดของทั้งโครงสร้างแบบ Uniform และแบบ MSMR เมื่อต้องตกอยู่ภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงาน (ชั้นละ 3 โหนด) โดยโครงสร้างการออกแบบทั้งสองจะไม่สามารถบรรเทาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเสียบของโนดอ้างอิงได้ แตกต่างจากระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างการออกแบบด้วยวิธี R-MSMR ที่มีสมรรถนะความถูกต้องดีกว่าทั้งในสภาวะปรกติและสภาวะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงาน หรืออีกความหมายคือ มีสมรรถนะความคงทนดีกว่าโครงสร้างแบบอื่น ๆ

นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อขนาดของพื้นที่ให้บริการมีขนาดใหญ่ขึ้น ผลการทดลองจะช่วยให้เห็นถึงข้อจำกัดของระบบระบุตำแหน่งที่มีโครงสร้างแบบ MSMR ที่ถึงแม้โครงสร้างแบบ MSMR จะถูกพัฒนาขึ้นเพื่อกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงสำหรับอาคารแบบหลายชั้น แต่เมื่อระบบระบุตำแหน่งตกอยู่ภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงาน ระบบดังกล่าวไม่เพียงจะมีสมรรถนะความถูกต้องลดลงจากเดิมหลายเท่าแล้ว แนวโน้มการปรับปรุงของสมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่ควรเพิ่มขึ้นตามจำนวนของโนดอ้างอิงที่เพิ่มขึ้นกลับให้ผลตรงกันข้าม ซึ่งมีแนวโน้มของสมรรถนะความคงทนที่ลดลง สังเกตได้จากเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยระหว่างสภาวะปรกติและสภาวะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงานชั้นละ 3 โหนด (%)

Difference between average error distance of Fault-free and 3RN's Failure หรือ %DIF) แสดงดังรูปที่ 4.16 เมื่อพื้นที่ให้บริการมีขนาดเพิ่มขึ้นจากพื้นที่แบบ 1 ชั้นเป็น 3 ชั้น โครงสร้างแบบ MSMR (เส้นกราฟสีดำ) จะมีสมรรถนะความคงทนที่ลดลง ซึ่งมี %DIF หรือค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นจากสถานะปกติเท่ากับ 16.80%, 26.11% และ 54.50% ตามลำดับ ในขณะที่โครงสร้างการออกแบบ R-MSMR ทั้ง 4 โครงสร้างจะมีแนวโน้มของสมรรถนะความคงทนคงที่ (โครงสร้าง R-MSMR, $R=2$ มี %DIF เท่ากับ 8.26%, 8.41% และ 7.13%) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระบบระบุตำแหน่งมีโนดอ้างอิงเสียมากถึง 9 โนดภายในพื้นที่แบบ 3 ชั้น โครงสร้าง R-MSMR, $R=2$ ยังสามารถให้สมรรถนะความคงทนที่ดีเยี่ยม โดยมี %DIF เท่ากับ 7.13% หรือมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นจากสถานะปกติเพียง 0.32 เมตร



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยระหว่างสถานะปกติและสถานะที่มีโนดอ้างอิงเสียชั้นละ 3 โนด

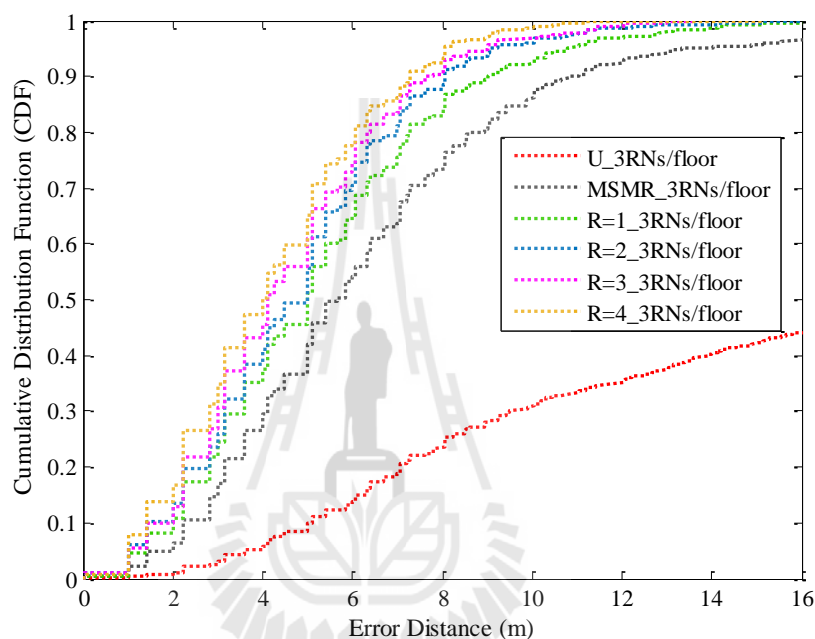
จากข้อสังเกตข้างต้นแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้โครงสร้างการออกแบบ MSMR จะสามารถให้ความถูกต้องในการระบุตำแหน่งภายใต้สถานะปกติได้ใกล้เคียงกับโครงสร้างการออกแบบที่นำเสนอ R-MSMR ทั้ง 3 พื้นที่ให้บริการ แต่เมื่อเกิดการเสียของโนดอ้างอิงจำนวนชั้นละ 3 โนด โครงสร้างของ MSMR จะมีสมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่แยกลงตามจำนวนชั้นอาคารที่เพิ่มขึ้น อีกความหมายคือ สมรรถนะความคงทนของโครงสร้างการออกแบบ MSMR จะแปรผกผัน

ตรงกับขนาดของพื้นที่ให้บริการ ถ้าระบบระบุตำแหน่งมีขนาดของพื้นที่การทดลองเพิ่มขึ้น สมรรถนะในการระบุตำแหน่งของโครงสร้าง MSMR จะลดลง แตกต่างจากโครงสร้างที่นำเสนอ R-MSMR ที่สามารถให้สมรรถนะความคงทนที่ดีและคงที่ ถึงแม้ขนาดของพื้นที่ให้บริการจะมีขนาดใหญ่ขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นภายใต้สภาวะการเสียดของโนดอ้างอิง แนวโน้มสมรรถนะความคงทนของระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างการออกแบบ R-MSMR จะมีค่าดีขึ้นถ้าหากค่าดัชนีความน่าเชื่อถือ (R) มีค่ามากขึ้น

พิจารณาที่ผลการทดลองในรูปที่ 4.15 เปรียบเทียบความแม่นยำในการระบุตำแหน่งระหว่างระบบระบุตำแหน่งภายในพื้นที่แบบ 2 ชั้นที่ใช้โครงสร้างการออกแบบ MSMR ภายใต้สภาวะการทำงานปกติ (12 โหนด) แทนด้วยเส้นทึบสีดำ และโครงสร้างการออกแบบ R-MSMR, $R=2$ ภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงานชั้นละ 3 โหนด (คงเหลือ 12 โหนด) แทนด้วยเส้นประสีน้ำเงิน พบว่าระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างการออกแบบ MSMR มีค่าความแม่นยำของตำแหน่งที่ 90% ภายในระยะ 9.60 เมตร ซึ่งต่ำกว่าโครงสร้างแบบ R-MSMR, $R=2$ ที่มีค่าความแม่นยำของตำแหน่งที่ 90% ภายในระยะ 8.06 เมตร ซึ่งจากผลการทดลองนี้ช่วยแสดงให้เห็นถึงข้อดีของโครงสร้างแบบ R-MSMR ที่ถึงแม้ว่าจำนวนคงเหลือของโนดอ้างอิงที่ยังสามารถทำงานได้อย่างปกติจะมีค่าเท่ากับจำนวนโนดอ้างอิงในสภาวะปกติของโครงสร้าง MSMR แต่โครงสร้างแบบ R-MSMR ยังสามารถให้สมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งที่ดีกว่า สาเหตุเนื่องมาจากโครงสร้างการออกแบบ R-MSMR มีวัตถุประสงค์ในการออกแบบตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่สามารถชดเชยค่าความแรงสัญญาณที่อาจสูญหายไปเนื่องจากมีโนดอ้างอิงบางโนดในระบบไม่ทำงานด้วยค่าดัชนีความน่าเชื่อถือ (R) ด้วยเหตุนี้กระบวนการทำงานดังกล่าวจึงช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากการเสียดของโนดอ้างอิงในระบบได้

พิจารณาระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างการออกแบบ R-MSMR ซึ่งมีการกำหนดค่า R ที่แตกต่างกัน รูปที่ 4.17 แสดงฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะความคลาดเคลื่อนของการระบุตำแหน่งวัตถุภายในพื้นที่แบบ 2 ชั้นที่ตกอยู่ภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงานชั้นละ 3 โหนด โดยพิจารณาโครงสร้างการออกแบบ 6 โครงสร้างที่ประกอบด้วย Uniform, MSMR และ R-MSMR ที่ใช้ค่า R เท่ากับ 1 ถึง 4 จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มจำนวน R ที่มากขึ้นจาก 1 ถึง 4 จะช่วยให้สมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งดีขึ้น ตัวอย่างเช่น ภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงานชั้นละ 3 โหนด ระบบระบุตำแหน่งภายในพื้นที่แบบ 2 ชั้นที่ใช้โครงสร้างการออกแบบ R-MSMR, $R=1$ ถึง 4 มีค่าความแม่นยำในการระบุตำแหน่งภายใน 5 เมตรเท่ากับ 51.11%, 55.62%,

61.08% และ 65.27% ตามลำดับ ซึ่งสมรรถนะในการระบุตำแหน่งจะดีขึ้นตามจำนวนค่า R ที่เพิ่มมากขึ้น และนอกจากนี้ยังพบข้อสังเกตของการใช้ $R=4$ ที่ระบบระบุตำแหน่งอาจเข้าใกล้ถึงจุดอิมตัวหรือจุดที่ระบบไม่สามารถให้สมรรถนะในการระบุตำแหน่งได้ดีกว่านี้ โดยมีสาเหตุมาจากองค์ประกอบต่าง ๆ ของระบบระบุตำแหน่ง อาทิเช่น ระยะห่างระหว่างตำแหน่งฟิงเกอร์ปริ้นท์ หรือเทคนิคการระบุตำแหน่งที่เลือกใช้ เป็นต้น



รูปที่ 4.17 ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของระยะคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 2 ชั้นภายใต้การเสียดของโนดอ้างอิงชั้นละ 3 โหนด

ถึงแม้ว่าการเพิ่มค่า R ของโครงสร้างการออกแบบ R-MSMR จะช่วยให้ระบบระบุตำแหน่งมีสมรรถนะถูกต้องที่ดีทั้งภายใต้สภาวะปกติและภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงาน แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มขึ้นของค่า R ยังเป็นการเพิ่มจำนวนของโนดอ้างอิงที่ถูกติดตั้งในระบบ ที่นำมาซึ่งค่าใช้จ่ายที่เพิ่มมากขึ้น เวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบของเทคนิค R-MSMR ที่มากขึ้น รวมทั้งพื้นที่ของหน่วยความจำที่ต้องใช้ในการเก็บข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้น ปัจจัยและข้อจำกัดเหล่านี้จะขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ออกแบบระบบว่าต้องการให้ระบบระบุตำแหน่งวัตถุมีสมรรถนะในการระบุตำแหน่งมากน้อยเพียงใด และขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่แตกต่างกัน รวมทั้งขึ้นอยู่กับงบประมาณในการติดตั้งโนดอ้างอิงที่จำกัด

ตารางที่ 4.7 ผลการระบุตำแหน่งวัตถุของพื้นที่ให้บริการแบบ 1 ชั้น (328 fingerprint locations, 158 target locations)

	Uniform		MSMR		R-MSMR, R=1		R-MSMR, R=2		R-MSMR, R=3		R-MSMR, R=4	
	Fault-free	3RN Failure /floor	Fault-free	3RN Failure /floor	Fault-free	3RN Failure /floor	Fault-free	3RN Failure /floor	Fault-free	3RN Failure /floor	Fault-free	3RN Failure /floor
Average error distance (m)	6.51 (a)	28.93 (b)	5.70 (a)	6.85 (b)	5.50 (a)	6.14 (b)	5.38 (a)	5.86 (b)	5.16 (a)	5.53 (b)	4.87 (a)	5.09 (b)
Maximum error distance (m)	17.03	85.68	15.30	24.96	15.30	15.99	13.42	14.58	15.30	16.53	15.30	13.55
Minimum error distance (m)	0.00	1.25	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.25	0.00	0.00
Standard deviation (m)	3.43	20.51	2.84	3.60	2.68	2.93	2.65	2.73	2.43	2.66	2.34	2.46
False floor determination (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
% DE with R-MSMR, R=1	15.55 %	78.77 %	3.51 %	10.28 %	-	-	-	-	-	-	-	-
% DE with R-MSMR, R=2	17.33 %	79.73 %	5.53 %	14.33 %	-	-	-	-	-	-	-	-
% DE with R-MSMR, R=3	20.75 %	80.88 %	9.45 %	19.20 %	-	-	-	-	-	-	-	-
% DE with R-MSMR, R=4	25.24 %	82.41 %	14.58 %	25.65 %	-	-	-	-	-	-	-	-
DIF (b-a)	22.42		1.15		0.65		0.48		0.37		0.22	
% DIF [(b-a)/b]*100	77.50 %		16.80 %		10.52 %		8.26 %		6.76 %		4.40 %	

หมายเหตุ % DE with R-MSMR, R=1 หมายถึง % Decreasing of the average error distance compare with R-MSMR, R=1

% DIF หมายถึง % Difference between average error distance of Fault-free and 3RN Failure

ตารางที่ 4.8 ผลการระบุตำแหน่งวัตถุของพื้นที่ให้บริการแบบ 2 ชั้น (656 fingerprint locations, 316 target locations)

	Uniform		MSMR		R-MSMR, R=1		R-MSMR, R=2		R-MSMR, R=3		R-MSMR, R=4	
	Fault-free	3RNs Failure /floor	Fault-free	3RNs Failure /floor	Fault-free	3RNs Failure /floor	Fault-free	3RNs Failure /floor	Fault-free	3RNs Failure /floor	Fault-free	3RNs Failure /floor
Average error distance (m)	6.35 (a)	25.29 (b)	5.20 (a)	7.04 (b)	4.76 (a)	5.28 (b)	4.42 (a)	4.83 (b)	4.33 (a)	4.55 (b)	3.99 (a)	4.23 (b)
Maximum error distance (m)	21.02	87.71	16.28	37.42	15.13	18.59	15.13	15.58	12.04	13.06	11.18	12.61
Minimum error distance (m)	0.00	0.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Standard deviation (m)	3.68	20.02	3.09	5.96	2.75	2.95	2.37	2.58	2.25	2.41	2.14	2.26
False floor determination (%)	0	7.99 %	0	1.82 %	0	0	0	0	0	0	0	0
% DE with R-MSMR, R=1	24.94 %	79.13 %	8.42 %	25.03 %	-	-	-	-	-	-	-	-
% DE with R-MSMR, R=2	30.28 %	80.90 %	14.93 %	31.37 %	-	-	-	-	-	-	-	-
% DE with R-MSMR, R=3	31.78 %	82.00 %	16.76 %	35.31 %	-	-	-	-	-	-	-	-
% DE with R-MSMR, R=4	37.05 %	83.28 %	23.19 %	39.92 %	-	-	-	-	-	-	-	-
DIF (b-a)	18.94		1.84		0.51		0.41		0.22		0.23	
% DIF [(b-a)/b]*100	74.91 %		26.11 %		9.74 %		8.41 %		4.91 %		5.53 %	

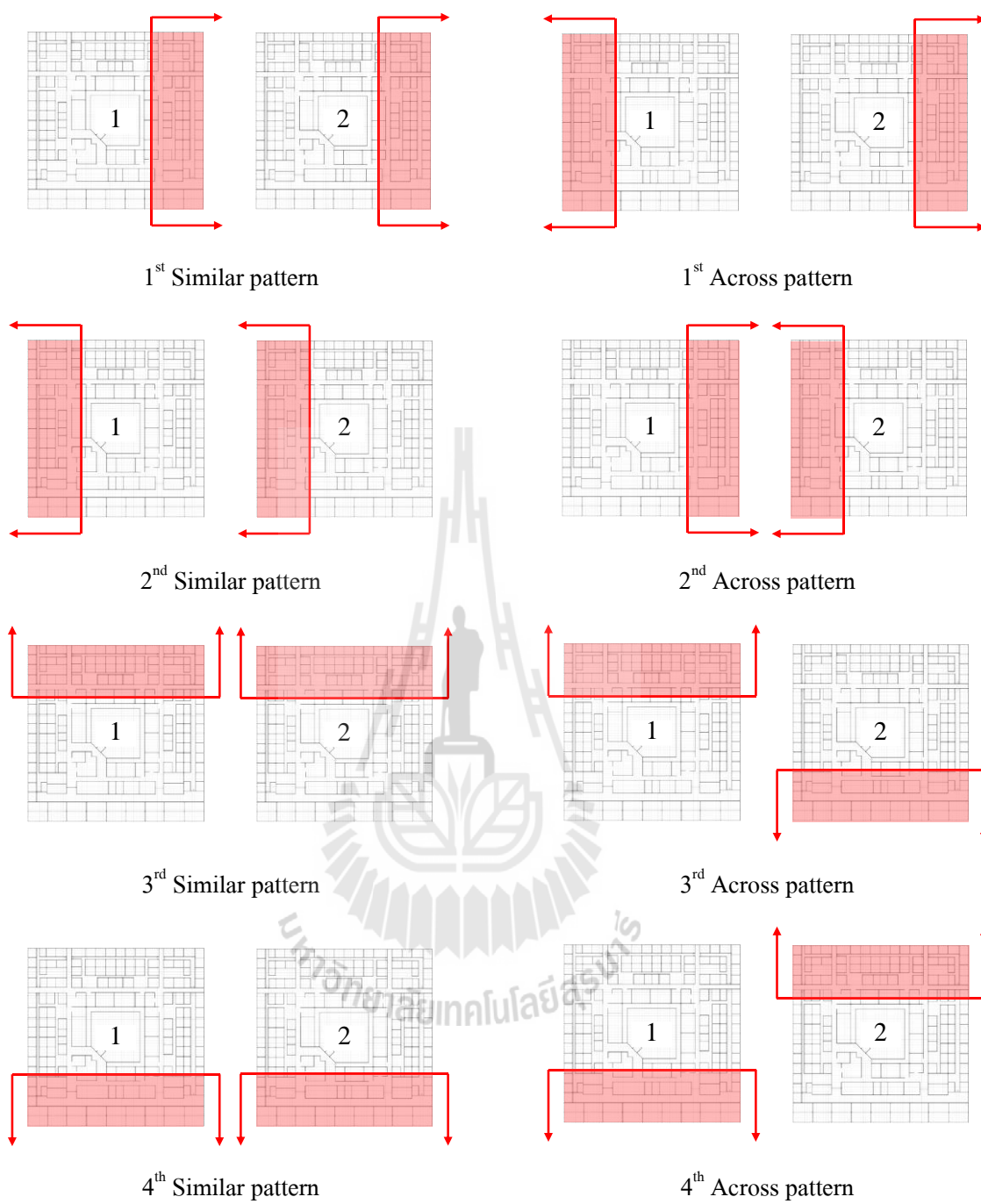
ตารางที่ 4.9 ผลการระบุตำแหน่งวัตถุของพื้นที่ให้บริการแบบ 3 ชั้น (984 fingerprint locations, 474 target locations)

	Uniform		MSMR		R-MSMR, R=1		R-MSMR, R=2		R-MSMR, R=3		R-MSMR, R=4	
	Fault-free	3RN's Failure /floor	Fault-free	3RN's Failure /floor	Fault-free	3RN's Failure /floor	Fault-free	3RN's Failure /floor	Fault-free	3RN's Failure /floor	Fault-free	3RN's Failure /floor
Average error distance (m)	6.26 (a)	29.49 (a)	4.56 (a)	10.01 (b)	4.48 (a)	4.89 (b)	4.21 (a)	4.53 (b)	4.11 (a)	4.34 (b)	3.95 (a)	4.16 (b)
Maximum error distance (m)	22.09	88.65	16.28	74.40	15.13	19.59	14.87	17.84	15.13	17.10	14.14	14.24
Minimum error distance (m)	0.00	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Standard deviation (m)	3.94	21.10	2.52	13.42	2.74	2.81	2.47	2.63	2.57	2.59	2.28	2.42
False floor determination (%)	0	37.66 %	0	17.09 %	0	0	0	0	0	0	0	0
% DE with R-MSMR, R=1	28.54 %	83.41 %	1.77 %	51.13 %	-	-	-	-	-	-	-	-
% DE with R-MSMR, R=2	32.85 %	84.64 %	7.70 %	54.78 %	-	-	-	-	-	-	-	-
% DE with R-MSMR, R=3	34.44 %	85.29 %	9.89 %	56.66 %	-	-	-	-	-	-	-	-
% DE with R-MSMR, R=4	37.00 %	85.88 %	13.40 %	58.41 %	-	-	-	-	-	-	-	-
DIF (b-a)	23.23		5.46		0.42		0.32		0.23		0.22	
% DIF [(b-a)/b]*100	78.76 %		54.50 %		8.54 %		7.13 %		5.38 %		5.25 %	

4.6.3 การวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบระบุตำแหน่งภายใต้รูปแบบการเสียบของโนคอ้างอิงในลักษณะต่าง ๆ

เพื่อที่จะวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายใต้รูปแบบการเสียบของโนคอ้างอิงในลักษณะต่าง ๆ ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการระบุตำแหน่งวัตถุภายในพื้นที่แบบ 2 ชั้น (1st floor และ 2nd floor) ซึ่งมีโครงสร้างตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงตามโครงสร้างที่ได้จากการค้นหาคำตอบในหัวข้อที่ 4.6.1 โดยพิจารณาโครงสร้างการออกแบบ 4 โครงสร้างที่ประกอบไปด้วยโครงสร้างแบบ Uniform, MSMR, R-MSMR, $R=1$ และ $R=2$ อีกทั้งผู้วิจัยได้กำหนดจำนวนและตำแหน่งของฟิงเกอร์ปรีนท์และสุ่มจุดทดสอบเหมือนกับหัวข้อการทดลองที่ 4.6 โดยใช้เทคนิคระบุชั้น RMoS สำหรับการระบุหมายเลขชั้นของวัตถุ และเปรียบเทียบการใช้เทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุ 2 เทคนิคคือ เทคนิคระยะห่างยูคลิเดียน (แบบปรกติ) และเทคนิคระยะห่างยูคลิเดียนแบบแอกทิฟ

ในการกำหนดตำแหน่งโนคอ้างอิงที่เสียบในหัวข้อนี้จะแตกต่างจากหัวข้อก่อนหน้า แทนที่ตำแหน่งการเสียบของโนคอ้างอิงแบบสุ่มด้วยการกำหนดรูปแบบการเสียบของโนคอ้างอิงใน 2 ลักษณะคือ การเสียบแบบทำนองเดียวกัน (Similar RN-Failures case) และการเสียบแบบตรงข้ามกัน (Across RN-Failures case) โดยแต่ละลักษณะแบ่งออกเป็น 4 กรณีตามทิศทางของอาคารแสดงได้ดังรูปที่ 4.18 สำหรับการเสียบแบบทำนองเดียวกัน โนคอ้างอิงบนชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 จะเสียบอยู่ในฝั่งเดียวกันของอาคาร ขณะที่การเสียบแบบตรงข้ามกัน โนคอ้างอิงบนชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 จะเสียบอยู่ในฝั่งตรงข้ามกันของอาคาร ดังนั้นผลความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งของการเสียบแต่ละแบบจะได้มาจากการหาค่าเฉลี่ยของทั้ง 4 ลักษณะการเสียบ ตัวอย่างเช่น โครงสร้างแบบ R-MSMR, $R=1$ ที่เกิดการเสียบของโนคอ้างอิงแบบทำนองเดียวกันมีการเสียบ 4 กรณี (1st - 4th similar pattern) ระบบจะทำการระบุตำแหน่งวัตถุภายใต้การเสียบทั้ง 4 กรณีและคำนวณหาค่าเฉลี่ยทั้ง 4 กรณี ซึ่งเป็นค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการเสียบแบบทำนองเดียวกันของระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างแบบ R-MSMR, $R=1$ (ค่าเฉลี่ยของ 316 จุดทดสอบ x 4 กรณีการเสียบ) เป็นต้น



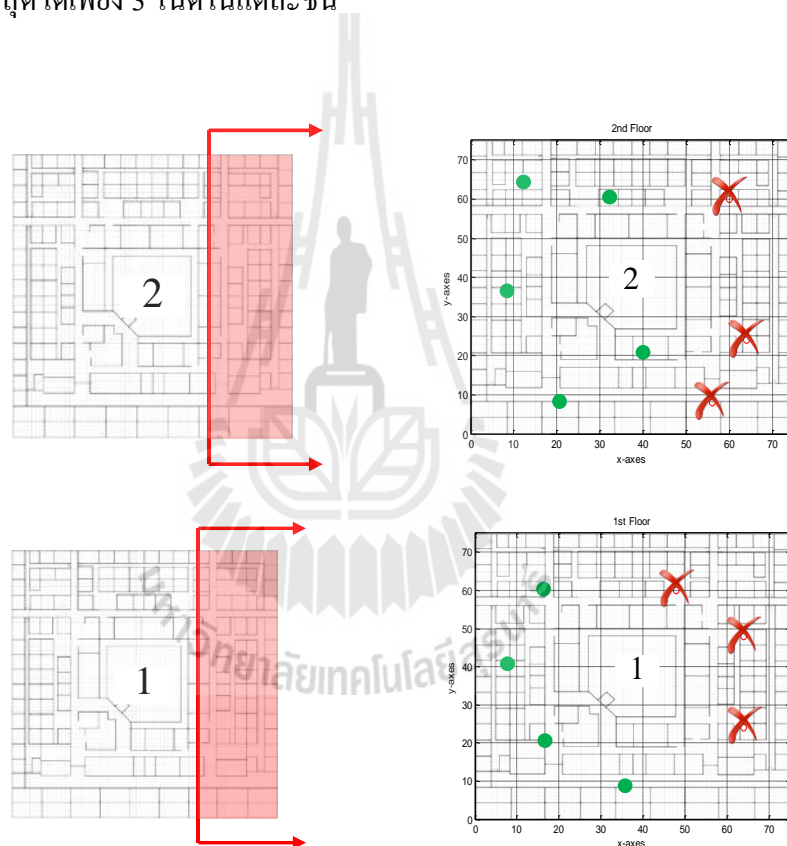
a) Similar RN-Failures case

b) Across RN-Failures case

รูปที่ 4.18 รูปแบบการเสียหายของโนดอ้างอิงในลักษณะต่าง ๆ

สำหรับการทดลองนี้ผู้วิจัยได้แบ่งจำนวนการเสียของโนคอ้างอิงออกเป็น 6 กรณีได้แก่ 0 โนค (สภาวะปรกติ), กรณีที่มีโนคอ้างอิงเสียชั้นละ 1 โนค, ชั้นละ 2 โนค, ชั้นละ 3 โนค, ชั้นละ 4 โนค และชั้นละ 5 โนค รูปที่ 4.19 แสดงตัวอย่างของระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างแบบ R-MSMR, $R=1$ ซึ่งตกอยู่ภายใต้สภาวะที่โนคอ้างอิงจำนวนชั้นละ 3 โนคเสียแบบทำนองเดียวกันกรณี ที่ 1 (1st Similar pattern) เครื่องหมายวงกลมสีเขียวแทนตำแหน่งของโนคอ้างอิงที่ถูกติดตั้ง และ เครื่องหมายกากบาทสีแดงแทนตำแหน่งของโนคอ้างอิงที่เสีย

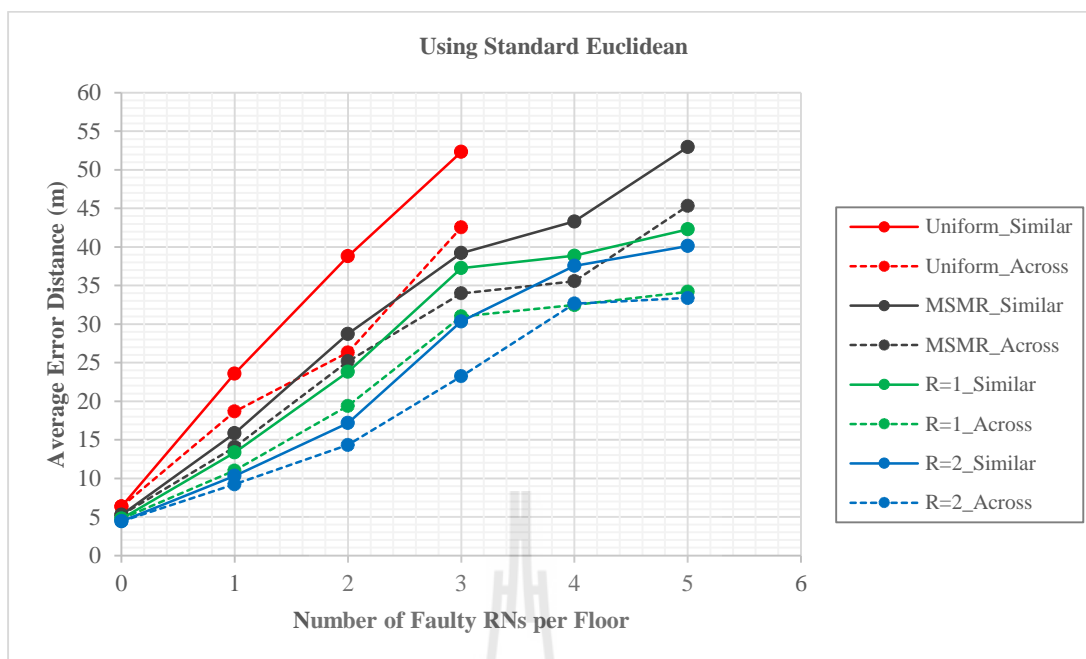
หมายเหตุ ยกเว้นระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างแบบ Uniform จะมีจำนวน โนค อ้างอิงที่เสียสูงสุดได้เพียง 3 โนคในแต่ละชั้น



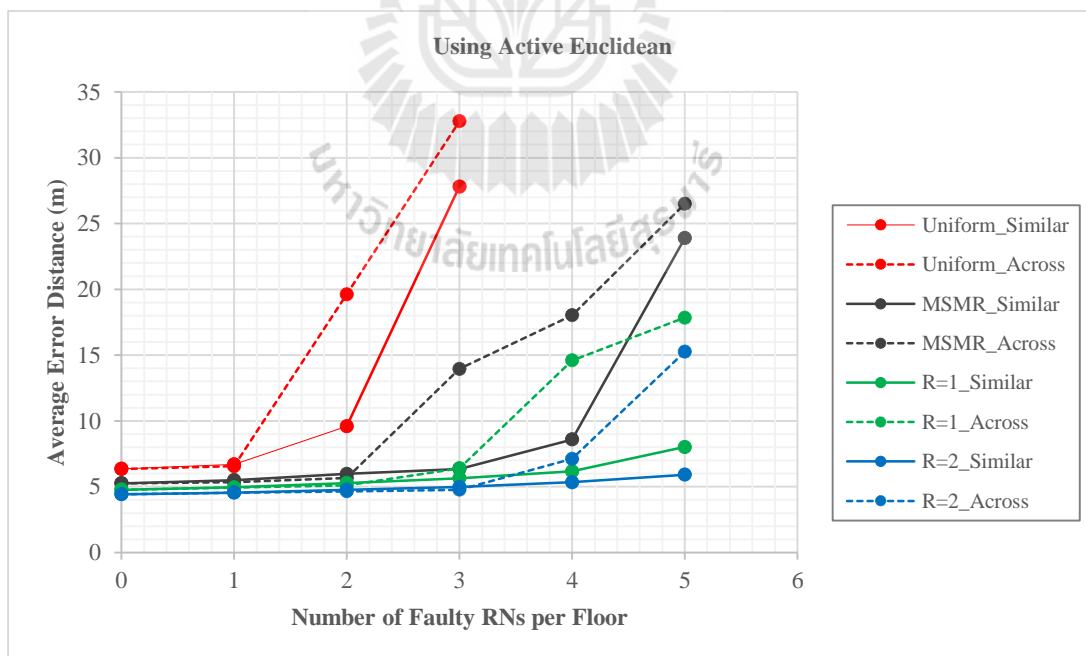
รูปที่ 4.19 ตัวอย่างระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างแบบ R-MSMR, $R=1$ ซึ่งตกอยู่ภายใต้ สภาวะที่โนคอ้างอิงจำนวนชั้นละ 3 โนคเสียแบบทำนองเดียวกันกรณีที่ 1

รูปที่ 4.20 และรูปที่ 4.21 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างการออกแบบชนิดต่าง ๆ ที่ตกอยู่ภายใต้การเสียดของโนดอ้างอิงทั้ง 2 ลักษณะสำหรับกรณีที่ใช้เทคนิคระยะห่างยูคลิดเบียนแบบปรกติ (แสดงในรูปที่ 4.20) และกรณีที่ใช้เทคนิคระยะห่างยูคลิดเบียนแบบแอกทีฟ (แสดงในรูปที่ 4.21) จากผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการระบุตำแหน่งของเทคนิคระยะห่างยูคลิดเบียนแบบปรกติ และแบบแอกทีฟพบว่า ที่สภาวะปรกติ (ไม่มีโนดอ้างอิงเสียด) การใช้เทคนิคระยะห่างยูคลิดเบียนแบบปรกติและแบบแอกทีฟจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากันในแต่ละโครงสร้างการออกแบบ ซึ่งโครงสร้างการออกแบบที่มีผลสมรรถนะในการระบุตำแหน่งดีที่สุดยังคงเป็นโครงสร้างที่ได้จากเทคนิคที่นำเสนอ R-MSMR, $R=2$ ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 4.42 เมตร แต่เมื่อเกิดการเสียดของโนดอ้างอิงตั้งแต่เสียด 1 โนดถึงเสียด 5 โนดในแต่ละชั้นพบว่า เทคนิคระยะห่างยูคลิดเบียนแบบแอกทีฟสามารถลดผลกระทบที่ขึ้นเกิดจากการเสียดของโนดอ้างอิงภายในอาคารได้ดีกว่า ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งน้อยกว่าเทคนิคยูคลิดเบียนแบบปรกติประมาณ 25% ถึง 85% ในแต่ละโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น พิจารณาโครงสร้างแบบ R-MSMR, $R=2$ ที่สภาวะการเสียดของโนดอ้างอิงจำนวนชั้นละ 3 โนดซึ่งเสียดแบบทำนองเดียวกัน (กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน) ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของระบบระบุตำแหน่งวัตถุที่ใช้เทคนิคระยะห่างยูคลิดเบียนแบบปรกติมีค่าเท่ากับ 30.34 เมตร (รูปที่ 4.20) ขณะที่เทคนิคระยะห่างยูคลิดเบียนแบบแอกทีฟมีค่าเท่ากับ 4.97 เมตร (รูปที่ 4.21) ซึ่งคิดเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยที่น้อยกว่าถึง 83.61% เป็นต้น ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อตกอยู่ภายใต้การเสียดของโนดอ้างอิง ระบบระบุตำแหน่งแต่ละโครงสร้างที่ใช้เทคนิคระยะห่างยูคลิดเบียนแบบปรกติจะมีสมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่แย่ ไม่ว่าลักษณะการเสียดของโนดอ้างอิงจะเป็นแบบทำนองเดียวกันหรือแบบตรงข้ามกันแสดงได้ดังรูปที่ 4.20

สาเหตุที่เทคนิคระยะห่างยูคลิดเบียนแบบแอกทีฟสามารถบรรเทาผลกระทบที่เกิดจากการเสียดของโนดอ้างอิงได้ดีกว่า เนื่องจากกลไกการทำงานของการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุในขั้นตอนการจับคู่ข้อมูลระหว่างตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์กับตำแหน่งวัตถุในช่วงออนไลน์เฟส ที่ระบบจะพิจารณาเฉพาะคู่ผลต่างค่าเฉลี่ยของความแรงสัญญาณที่โนดวัตถุสามารถรับสัญญาณจากโนดอ้างอิงได้เท่านั้น โดยจะไม่พิจารณาค่าความแรงสัญญาณที่ไม่ปรากฏที่อาจมีต้นเหตุมาจากการเสียดของโนดอ้างอิง หรืออาจเกิดจากการลดทอนของสัญญาณภายในอาคาร ด้วยเหตุนี้ขั้นตอนการคำนวณหาผลต่างของสมการยูคลิดเบียนจึงได้รับผลกระทบจากการเสียดของโนดอ้างอิงน้อยลง (เทคนิคระยะห่างยูคลิดเบียนแบบแอกทีฟจะอธิบายอย่างละเอียดในบทที่ 5)



รูปที่ 4.20 ผลความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งของเทคนิคระบุชั้น RMoS ร่วมกับเทคนิคระยะห่างยูคลีเดียนแบบปรกติ



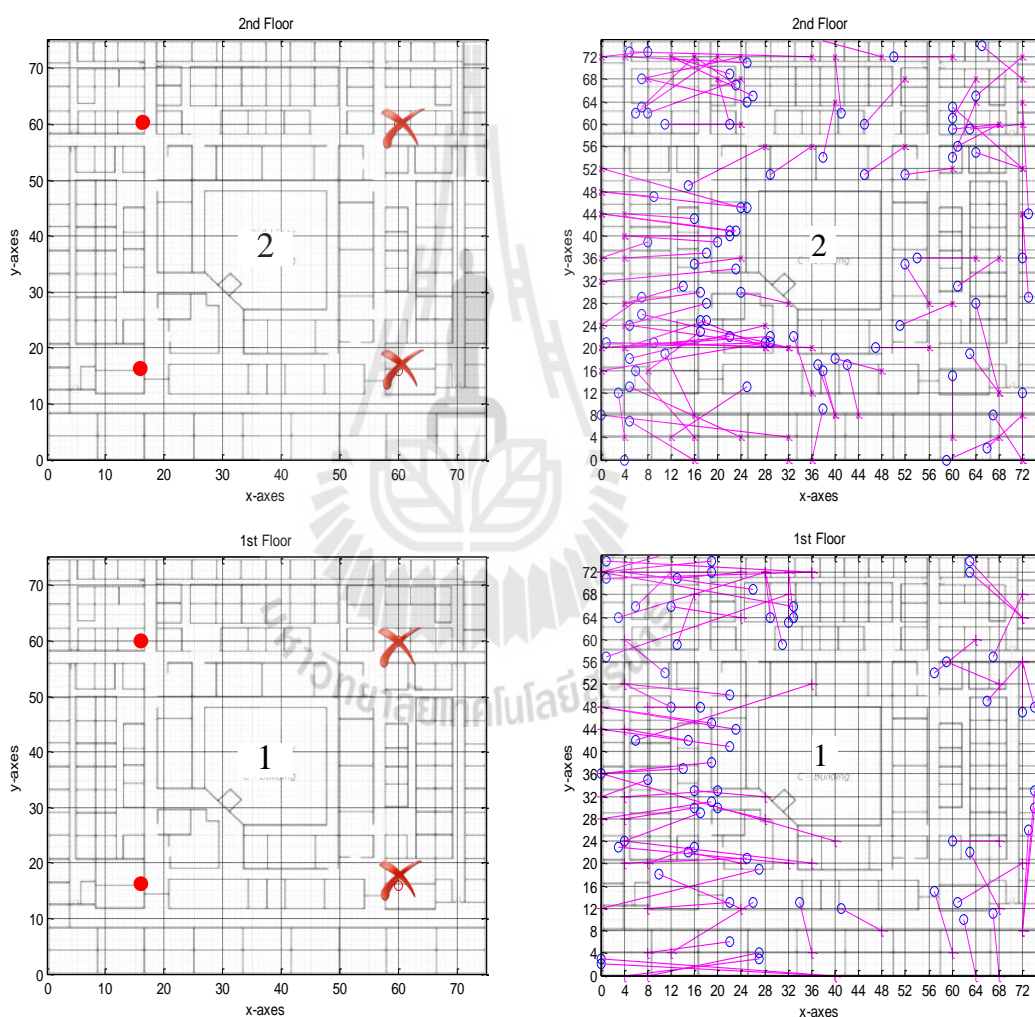
รูปที่ 4.21 ผลความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งของเทคนิคระบุชั้น RMoS ร่วมกับเทคนิคระยะห่างยูคลีเดียนแบบแอคทีฟ

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการเสียของโนดอ้างอิงในลักษณะทำนองเดียวกันและการเสียในลักษณะตรงข้ามกันพบว่า การเสียแบบตรงข้ามกันจะส่งผลให้ระบบระบุตำแหน่งมีประสิทธิภาพในการระบุตำแหน่งที่ต่ำกว่าการเสียแบบทำนองเดียวกัน พิจารณาระบบที่ใช้เทคนิคยูคลิดีเนียนแบบแอกทีฟแสดงในรูปที่ 4.21 การเสียแบบตรงข้ามกัน (เส้นประ) จะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะในการระบุตำแหน่งของทั้ง 4 โครงสร้างมากกว่าการเสียแบบทำนองเดียวกัน (เส้นทึบ) ตัวอย่างเช่น ระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างแบบ MSMR ในกรณีที่มีโนดอ้างอิงจำนวนชั้นละ 4 โหนดไม่ทำงาน การเสียแบบตรงข้ามกันมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 18.02 เมตร (เส้นประสีดำ) ขณะที่การเสียแบบทำนองเดียวกันมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยกว่าซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.58 เมตร คิดเป็นร้อยละความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่า 52.38%

เพื่อที่จะวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากรูปแบบการเสียของโนดอ้างอิงให้มากขึ้น ผู้วิจัยได้ทำการแสดงผลการค้นหาตำแหน่งของวัตถุภายในพื้นที่แบบ 2 ชั้นที่มีค่าความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งมากกว่า 8 เมตร โดยรูปที่ 4.22 ถึงรูปที่ 4.25 แสดงตัวอย่างการระบุตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งที่ใช้เทคนิคระยะห่างยูคลิดีเนียนแบบแอกทีฟ โดยพิจารณาโครงสร้างแบบ Uniform และ R-MSMR, $R=2$ ที่ตั้งอยู่ภายใต้การเสียของโนดอ้างอิงจำนวนชั้นละ 2 โหนดในสองลักษณะได้แก่ การเสียแบบทำนองเดียวกันกรณีที่ 1 (1st Similar pattern) แสดงในรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 และการเสียแบบตรงข้ามกันกรณีที่ 1 (1st Across pattern) แสดงในรูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25 โดยผลการทดลองนี้ระยะความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งที่มากกว่า 8 เมตรของตำแหน่งจริงและตำแหน่งที่คำนวณได้แทนด้วยเส้นทึบสีชมพู วงกลมสีชมพูแทนตำแหน่งจริง และเครื่องหมายบวกสีชมพูแทนตำแหน่งที่คำนวณได้ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า เมื่อพิจารณาว่าการเสียแบบทำนองเดียวกันของระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างแบบ Uniform ในรูปที่ 4.22 ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่า 8 เมตรส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณตรงข้ามกับโนดอ้างอิงที่เสีย (บริเวณทางด้านซ้ายของอาคาร) ซึ่งในการระบุตำแหน่ง 316 จุดทดสอบมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการเสียแบบทำนองเดียวกันกรณีที่ 1 เท่ากับ 10.33 เมตร

แตกต่างจากผลการทดลองในรูปที่ 4.23 ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่าการเสียแบบทำนองเดียวกันของระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างแบบ R-MSMR, $R=2$ จะมีสมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่ดีกว่า และมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยกว่า โดยในการระบุตำแหน่ง 316 จุดทดสอบมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของการเสียแบบทำนองเดียวกันกรณีที่ 1 เพียง 4.71 เมตร หรืออีกความหมายคือโครงสร้างการออกแบบที่นำเสนอ R-MSMR, $R=2$ สามารถบรรเทาผลกระทบจาก

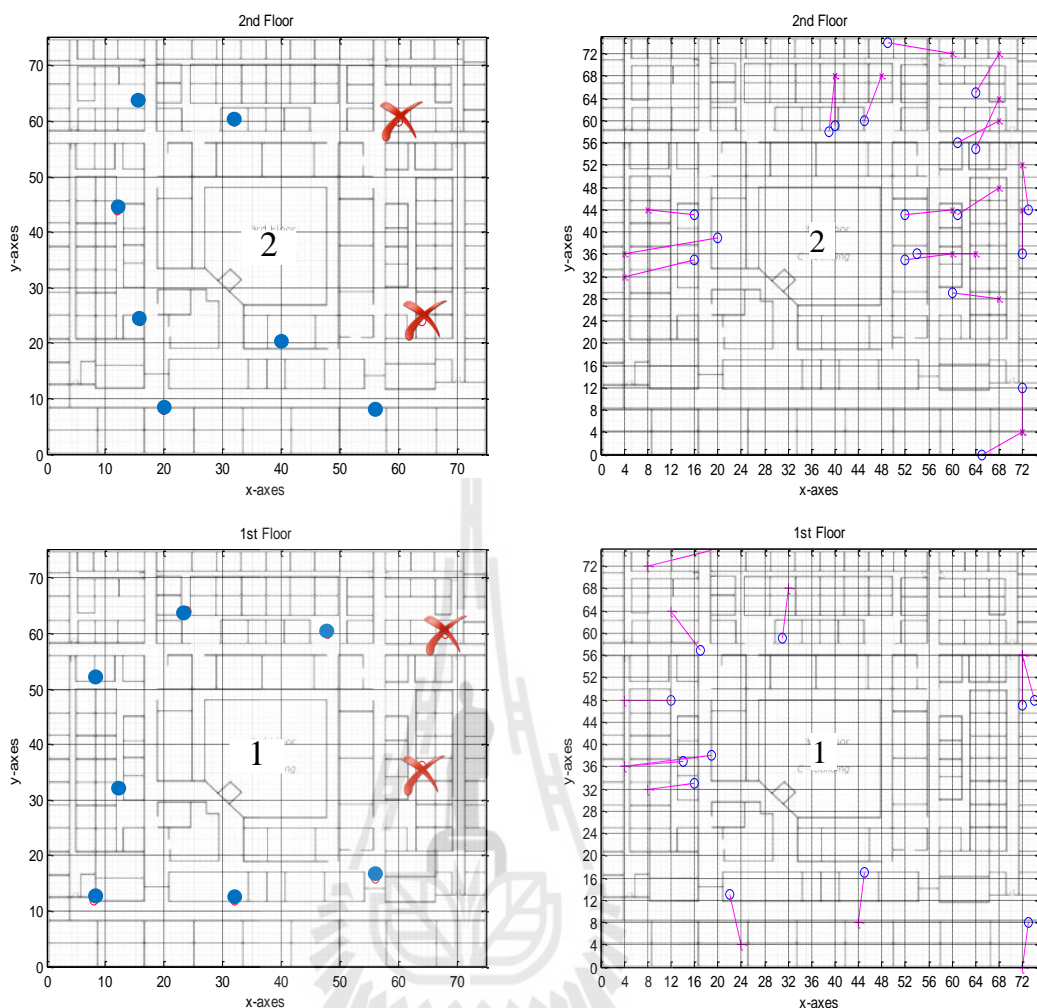
การเสียดังกล่าวในลักษณะทำนองเดียวกันได้ถึง 54.40% (เปรียบเทียบกับ โครงสร้างแบบ Uniform) นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อ โครงสร้างแบบ Uniform และ R-MSMR, $R=2$ ตกอยู่ภายใต้การเสียดังกล่าวจำนวน 2 โหนดในลักษณะทำนองเดียวกันกรณีที่ 1 ผลเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุหมายเลขชั้นของทั้งสองโครงสร้างจะมีค่าเท่ากับ 100% หรือสามารถระบุหมายเลขชั้นได้อย่างถูกต้อง 100% หรืออีกความหมายคือ การเสียดังกล่าวจะไม่ส่งผลกระทบต่อการระบุหมายเลขชั้นของระบบระบุตำแหน่งวัตถุ



a) Uniform placement

b) ความคลาดเคลื่อนที่มากกว่า 8 เมตร

รูปที่ 4.22 ผลการระบุตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งใช้โครงสร้างแบบ Uniform ซึ่งตกอยู่ภายใต้การเสียดังกล่าวจำนวน 2 โหนดในลักษณะทำนองเดียวกันกรณีที่ 1 ซึ่งมีโนดอ้างอิงเสียดังกล่าวจำนวน 2 โหนด



a) R-MSMR, $R=2$ placement

b) ความคลาดเคลื่อนที่มากกว่า 8 เมตร

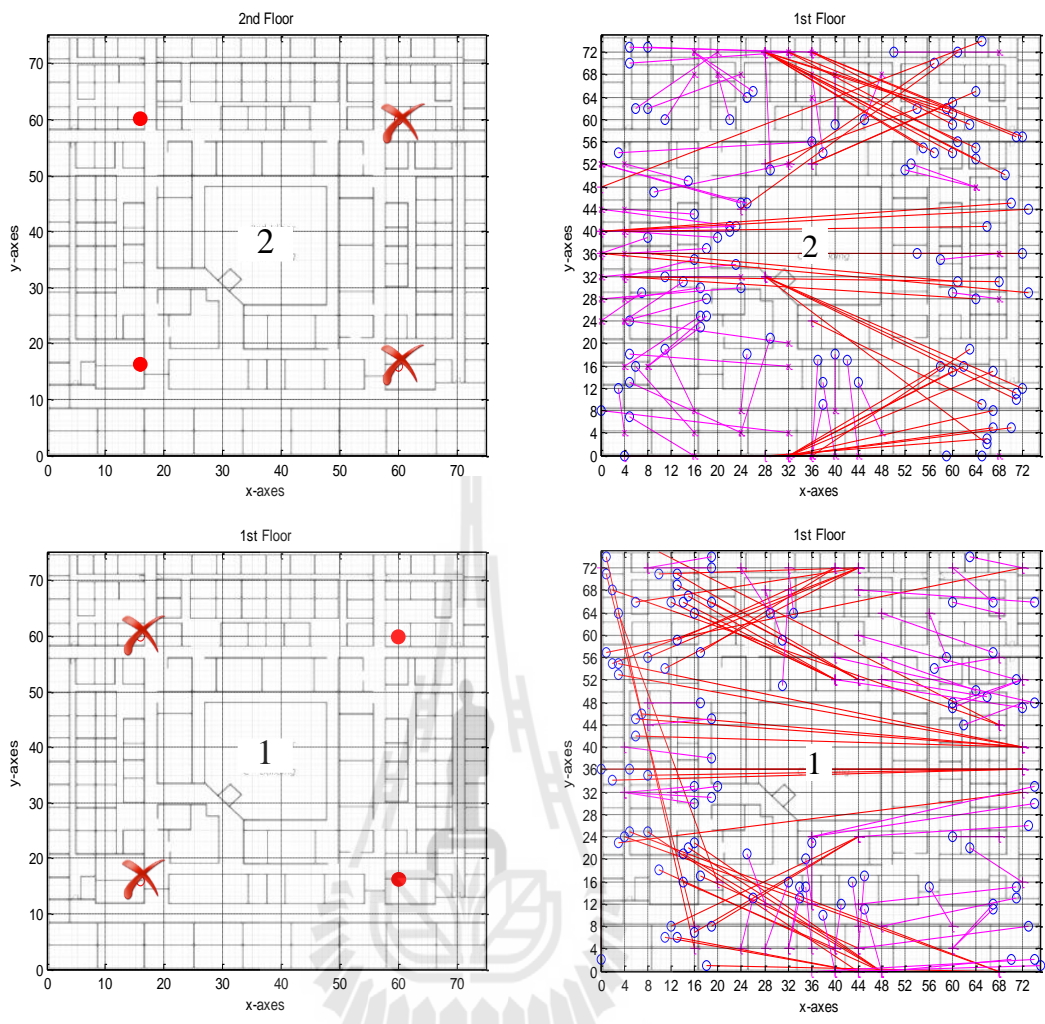
รูปที่ 4.23 ผลการระบุตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งใช้โครงสร้างแบบ R-MSMR, $R=2$ ซึ่งตกอยู่ภายใต้การเสียบแบบทำนองเดียวกันกรณีที่ 1 ซึ่งมีโนดอ้างอิงเสียบจำนวน 2 โนด

ถัดมาพิจารณาที่การเสียบในลักษณะตรงข้ามกันของระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างแบบ Uniform แสดงในรูปที่ 4.24 โดยตำแหน่งที่คำนวณได้ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนมากกว่า 8 เมตรส่วนใหญ่ยังคงเหมือนกับลักษณะการเสียบแบบทำนองเดียวกันก่อนหน้านี้ ซึ่งจะอยู่บริเวณตรงข้ามกับโนดอ้างอิงที่เสียบ นั่นคือบริเวณทางด้านขวาของอาคารชั้นที่ 1 และบริเวณทางด้านซ้ายของอาคารชั้นที่ 2 นอกจากนี้ผลความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งของ 316 จุดทดสอบในกรณีการเสียบแบบตรงข้ามกันมีค่าต่ำกว่ากรณีการเสียบแบบทำนองเดียวกันถึง 49.11% (กรณีการเสียบแบบตรงข้ามกันของโครงสร้างแบบ Uniform มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 20.3 เมตร) ยิ่งไปกว่า

นั้น ลักษณะ โนคอ้างอิงที่เสียบแบบตรงข้ามกันของระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างแบบ Uniform จะมีเปอร์เซ็นต์ความถูกต้องในการระบุหมายเลขชั้นมีค่าแยกว่าการเสียบแบบทำนองเดียวกัน ซึ่งการเสียบลักษณะนี้มีค่าเท่ากับ 74.0% จากผลการทดลองนี้จะสังเกตได้ว่า ตำแหน่งที่ระบุชั้นผิดพลาดส่วนใหญ่ จะอยู่บริเวณตำแหน่งของโนคอ้างอิงที่เสียบภายในชั้นนั้น (ระยะความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งที่มากกว่า 8 เมตรและระบุชั้นผิดของตำแหน่งจริงและตำแหน่งที่คำนวณได้แทนด้วยเส้นทึบสีแดง) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 4.25 การเสียบแบบตรงข้ามกันของระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างแบบ R-MSMR, $R=2$ ระบบระบุตำแหน่งยังคงมีสมรรถนะที่ดีกว่าโครงสร้างแบบ Uniform โดยโครงสร้างแบบ R-MSMR, $R=2$ มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกรณีการเสียบแบบตรงข้ามกันใกล้เคียงกับกรณีการเสียบแบบทำนองเดียวกันซึ่งมีค่าเท่ากับ 4.72 เมตร อีกทั้งยังสามารถระบุหมายเลขชั้นได้อย่างถูกต้อง 100% เช่นเดียวกับการเสียบแบบทำนองเดียวกัน

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงข้อดีของโครงสร้างการออกแบบ R-MSMR ที่นำเสนอ ซึ่งไม่เพียงจะสามารถให้สมรรถนะในการระบุตำแหน่งภายใต้สภาวะปรกติได้ดีกว่าโครงสร้างแบบอื่น ๆ แล้ว แต่เมื่อระบบต้องตกอยู่ภายใต้การเสียบของโนคอ้างอิงในลักษณะต่าง ๆ ระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างแบบ R-MSMR ยังคงสามารถรักษาสมรรถนะในการระบุตำแหน่งไว้ได้ ซึ่งมีสมรรถนะความคงทนดีกว่าโครงสร้างแบบอื่น ๆ

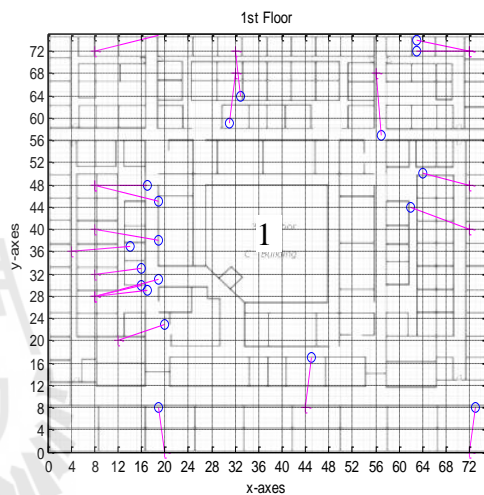
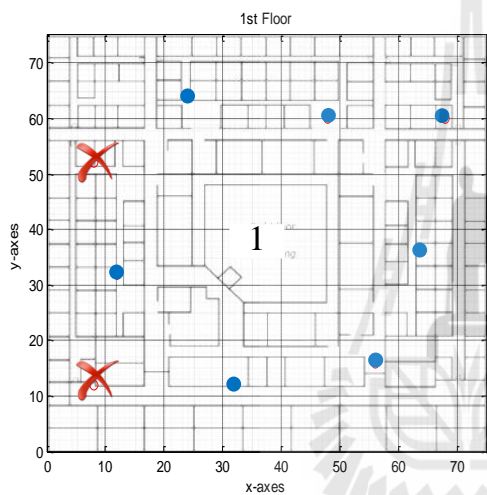
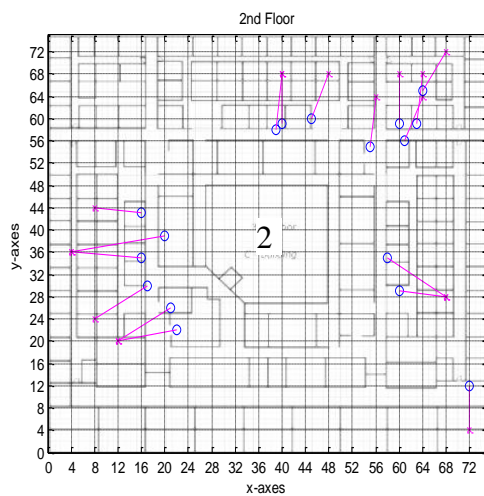
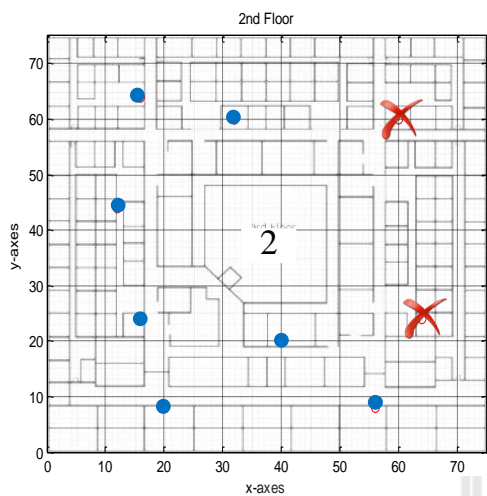
จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.6.2 และ 4.6.3 จะเห็นได้ว่าโครงสร้างการออกแบบที่นำเสนอ R-MSMR สามารถให้สมรรถนะในการระบุตำแหน่งดีกว่าโครงสร้างแบบอื่น ๆ ทั้งภายใต้สภาวะปรกติและภายใต้สภาวะที่มีโนคอ้างอิงไม่ทำงาน อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าโครงสร้างการออกแบบ R-MSMR จะมีสมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่ยอดเยี่ยม แต่ภาระของข้อแลกเปลี่ยน (trade-off) ที่ต้องแลกมาของโครงสร้างที่นำเสนอคือ จำนวน โนคอ้างอิงที่เพิ่มมากขึ้นสำหรับติดตั้งในระบบระบุตำแหน่ง ซึ่งอาจมีค่ามากกว่าสองเท่าของจำนวน โนคอ้างอิงที่ถูกติดตั้งภายในโครงสร้างแบบ Uniform ที่มีวัตถุประสงค์การกำหนดตำแหน่ง โนคอ้างอิงภายใต้เงื่อนไขการได้รับสัญญาณครอบคลุมทั่วทั้งอาคาร แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคการออกแบบที่นำเสนอ R-MSMR มีวัตถุประสงค์การออกแบบที่แตกต่างจากโครงสร้างแบบอื่น ๆ โดยเทคนิคการออกแบบ R-MSMR มีวัตถุประสงค์ในการกำหนดตำแหน่งติดตั้ง โนคอ้างอิงเพื่อให้สามารถรองรับการทำงานภายใต้สภาวะที่มีโนคอ้างอิงบางโนคในระบบเสียบ ด้วยเหตุนี้จำนวน โนคอ้างอิงที่เพิ่มขึ้นจึงเป็นข้อแลกเปลี่ยนของสมรรถนะความคงทนของเทคนิคโครงสร้างการออกแบบ R-MSMR



a) Uniform placement

b) ความคลาดเคลื่อนที่มากกว่า 8 เมตร

รูปที่ 4.24 ผลการระบุตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งใช้โครงสร้างแบบ Uniform ซึ่งตกอยู่ภายใต้การเสียบแบบตรงข้ามกันกรณีที่ 1 ซึ่งมีโนดอ้างอิงเสียบจำนวน 2 โนด



a) R-MSMR, $R=2$ placement

b) ความคลาดเคลื่อนที่มากกว่า 8 เมตร

รูปที่ 4.25 ผลการระบุตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งใช้โครงสร้างแบบ R-MSMR, $R=2$ ซึ่งตั้งอยู่ภายใต้การเสียบแบบทำนองเดียวกันกรณีที่ 1 ซึ่งมีโนดอ้างอิงเสียบจำนวน 2 โหนด

4.7 กล่าวสรุป

ในบทนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอการพัฒนาเทคนิคการออกแบบโครงสร้างระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ ซึ่งมุ่งเน้นการวางแผนเครือข่ายในส่วนของโครงสร้างเครือข่ายสื่อสารไร้สาย โดยเป็นการกำหนดจำนวนและตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงที่เหมาะสมกับลักษณะของพื้นที่ให้บริการ โดยใช้แนวทางการกำหนดปัญหาของสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี และใช้วิธีการค้นหาคำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีการบออ่อนจำลอง ยิ่งไปกว่านั้น โครงสร้างของระบบที่ได้จากการค้นหาคำตอบจะสามารถรองรับการทำงานทั้งภายใต้สภาวะปรกติ และภายใต้สภาวะที่มีโหนดอ้างอิงบางโหนดไม่ทำงานได้ อีกทั้งผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบสมรรถนะในการระบุตำแหน่งวัตถุของโครงสร้างการออกแบบที่นำเสนอกับโครงสร้างการออกแบบที่มีอยู่ อาทิเช่น โครงสร้างการวางแบบครอบคลุมและสม่ำเสมอ Uniform และ โครงสร้างที่ได้จากเทคนิคการออกแบบ MSMR (Kondee et al., 2015) เป็นต้น และทำการทดสอบกับพื้นที่ให้บริการที่แตกต่างกัน ได้แก่ พื้นที่แบบ 1 ชั้น แบบ 2 ชั้น และแบบ 3 ชั้น รวมทั้งพิจารณาสมรรถนะในการระบุตำแหน่งทั้งภายใต้สภาวะปรกติและภายใต้สภาวะที่มีโหนดอ้างอิงไม่ทำงาน โดยจากผลการทดลองสามารถสรุปข้อสังเกตได้ดังนี้

- 1) ระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างการออกแบบ R-MSMR สามารถให้สมรรถนะในการระบุตำแหน่งทั้งภายใต้สภาวะปรกติและสภาวะที่มีโหนดอ้างอิงไม่ทำงานได้ดีกว่าเทคนิคอื่น ๆ หรือมีสมรรถนะความคงทนดีกว่าเทคนิคอื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โครงสร้างแบบ R-MSMR มีสมรรถนะความคงทนดีกว่าโครงสร้างแบบ MSMR ประมาณ 14.33% ถึง 54.78% ภายใต้การเสี่ยของโหนดอ้างอิงจำนวนชั้นละ 3 โหนด
- 2) เมื่อขนาดของพื้นที่การทดลองมากขึ้น โครงสร้างการออกแบบ R-MSMR มีแนวโน้มของสมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่ดีขึ้น แตกต่างจากโครงสร้างการออกแบบอื่น ๆ เช่น โครงสร้างการออกแบบของเทคนิค MSMR เป็นต้น
- 3) สำหรับโครงสร้างการออกแบบ R-MSMR การใช้ค่าดัชนีความน่าเชื่อถือ (R) ที่มากขึ้นจะช่วยเพิ่มสมรรถนะในการระบุตำแหน่งของระบบให้ดีขึ้น
- 4) การเสี่ยของโหนดอ้างอิงในลักษณะตรงข้ามกันจะส่งผลกระทบต่อสมรรถนะในการระบุตำแหน่งทั้งการระบุหมายเลขชั้นและการระบุตำแหน่งในระนาบสองมิติ (x, y) มากกว่าการเสี่ยของโหนดอ้างอิงในลักษณะทำนองเดียวกัน

บทที่ 5

การพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น ที่ใช้เทคนิคฟังก์ชันปริ้นต์ดิงซึ่งมีความคงทนและมีความซับซ้อนต่ำ

5.1 กล่าวนำ

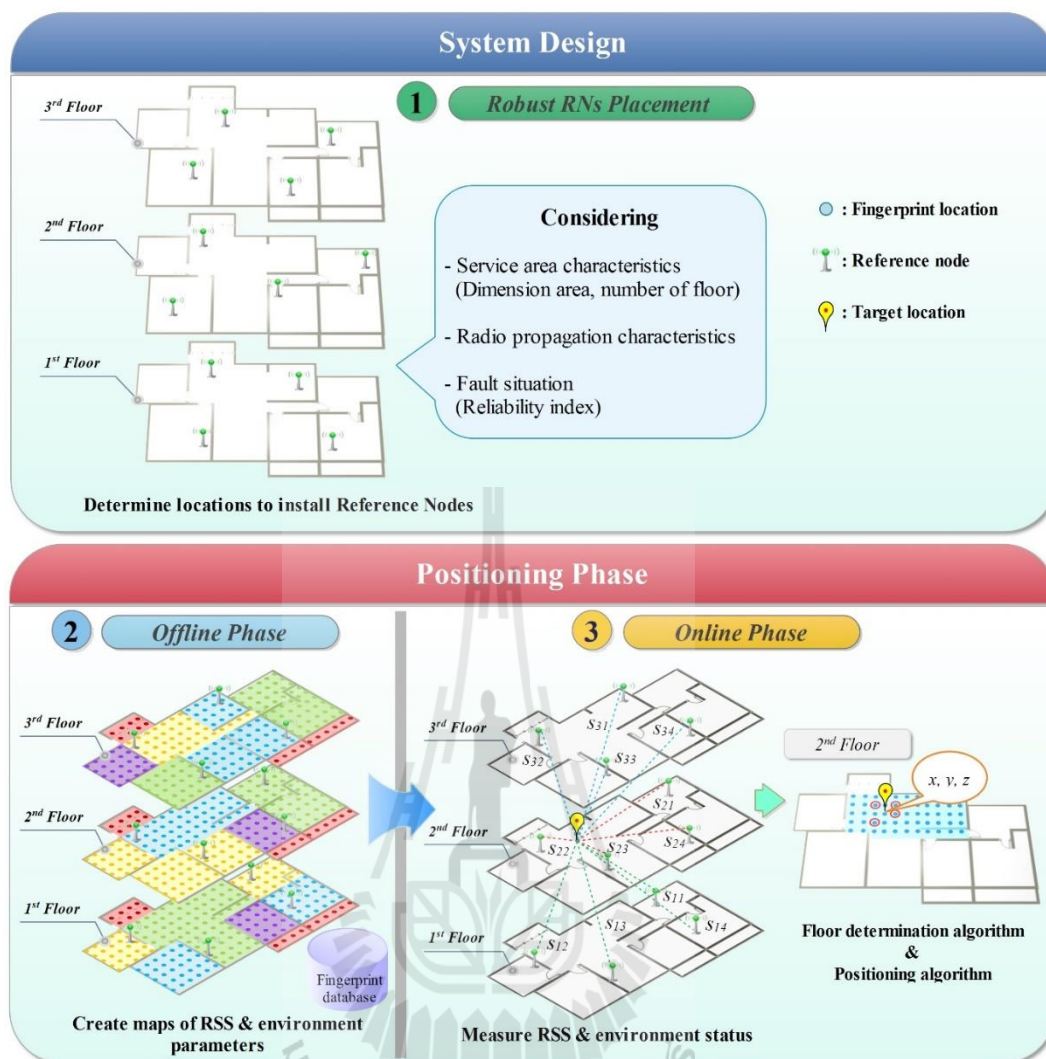
เพื่อพัฒนาและขยายขีดความสามารถของระบบระบุตำแหน่งวัตถุไร้สายภายในอาคารหลายชั้น ในบทนี้ผู้วิจัยได้บูรณาการองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ได้จากบทที่ 3 และบทที่ 4 รวมกับการพัฒนาที่ได้นำเสนอในบทที่ 5 นี้ โดยวิทยานิพนธ์นี้มุ่งพัฒนาระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคฟังก์ชันปริ้นต์ดิงซึ่งสามารถให้สมรรถนะความคงทนที่ดี สามารถรองรับการทำงานทั้งภายใต้สภาวะปกติและภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงบางโนดไม่ทำงานได้อีกทั้งยังมีความซับซ้อนในแง่ของเวลาที่ใช้ในการประมวลผลในช่วงการระบุตำแหน่งที่ต่ำ

เนื้อหาในบทที่ 5 แบ่งออกเป็นหัวข้อดังนี้ หัวข้อ 5.2 ภาพรวมและแนวคิดการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคฟังก์ชันปริ้นต์ดิงซึ่งมีความคงทนและมีความซับซ้อนต่ำ หัวข้อ 5.3 การพัฒนาเทคนิคระบุตำแหน่งที่มีความคงทนและมีความซับซ้อนต่ำ หัวข้อ 5.4 ข้อกำหนดการทดลอง หัวข้อ 5.5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง และหัวข้อ 5.6 กล่าวสรุป

5.2 ภาพรวมและแนวคิดการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ตั้งซึ่งมีความคงทนและมีความซับซ้อนต่ำ

รูปที่ 5.1 แสดงภาพรวมของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารแบบหลายชั้นที่ใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนการทำงาน ประกอบไปด้วย ขั้นตอนการออกแบบระบบ (หัวข้อการพัฒนาในบทที่ 4) และขั้นตอนการระบุตำแหน่ง (หัวข้อการพัฒนาในบทที่ 3 และบทที่ 5) โดยในบทนี้ ผู้วิจัยได้บูรณาการองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ได้พัฒนาในบทที่ 3 การพัฒนาเทคนิคระบุชั้นที่สามารถรองรับการทำงานภายใต้สภาวะผิดปกติ และบทที่ 4 การพัฒนาโครงสร้างการออกแบบที่สามารถรองรับการทำงานภายใต้สภาวะผิดปกติ และประยุกต์ใช้งานเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุภายในระนาบสองมิติ (x, y) ที่มีการใช้ค่าพารามิเตอร์ของสิ่งแวดล้อม (ค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์) ร่วมกับการระบุตำแหน่งวัตถุ อีกทั้งในบทนี้ผู้วิจัยยังได้นำเสนอกระบวนการแอคทีฟยูคลีเดียน (Active Euclidean process) สำหรับเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุภายในระนาบสองมิติ ที่ช่วยขยายขีดความสามารถของเทคนิคพื้นฐานและช่วยลดผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบเมื่อมีโนดอ้างอิงบางโนดในระบบไม่ทำงาน

ดังนั้นเมื่อรวมองค์ประกอบต่าง ๆ ที่พัฒนาขึ้นจะได้ระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่มีโครงสร้างการกำหนดตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงแบบ R-MSMR ซึ่งมีสมรรถนะความคงทนที่ดีและสามารถรองรับการทำงานทั้งภายใต้สภาวะปกติและภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงบางโนดไม่ทำงาน อีกทั้งระบบระบุตำแหน่งนี้ยังใช้เทคนิคระบุชั้น RMoS ที่มีความคงทนภายใต้สภาวะผิดปกติ ร่วมกับเทคนิคระบุตำแหน่งแบบแอคทีฟที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ของสิ่งแวดล้อมซึ่งสามารถคำนวณหาตำแหน่งวัตถุได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งมีความซับซ้อนในการประมวลผลในช่วงการระบุตำแหน่งต่ำ



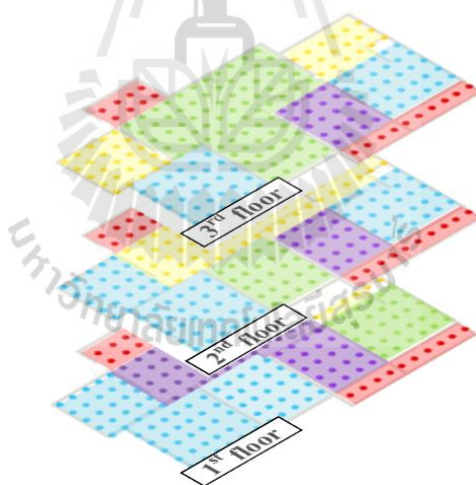
รูปที่ 5.1 ภาพรวมของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น

5.3 การพัฒนาเทคนิคระบุตำแหน่งที่มีความคงทนและมีความซับซ้อนต่ำ

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้อธิบายขั้นตอนการระบุตำแหน่งวัตถุภายในระนาบสองมิติ (x, y) ที่มีสมรรถนะความคงทนที่ดีและมีความซับซ้อนในแง่ของเวลาที่ใช้ในการประมวลผลที่ต่ำ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่จะถูกดำเนินการหลังจากที่ได้หมายเลขชั้นของวัตถุ โดยแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนการทำงานคือ

- 1) กระบวนการกรองระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (Temperature level filter) หรือเทคนิค Fusion parameter
- 2) กระบวนการแอกทีฟยูคลิดีเนียน (Active Euclidean process) และ
- 3) กระบวนการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก K จำนวน หรือเรียกว่า กระบวนการ WKNN

สำหรับกระบวนการแรก กระบวนการกรองระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมเป็นการทำงานที่ ถูกนำเสนอโดยงานวิจัย Maneerat and Prommak (2015) ทำหน้าที่จำแนกตำแหน่งฟังก์เจอร์ปรีนท์ใน ฐานข้อมูลที่มีระดับอุณหภูมิเดียวกันกับระดับอุณหภูมิของวัตถุ ทำให้ระบบไม่ต้องพิจารณา ตำแหน่งฟังก์เจอร์ปรีนท์ทั้งหมดที่มีอยู่ในฐานข้อมูล การทำงานในขั้นตอนนี้จะมีการเก็บรวบรวม ค่าพารามิเตอร์ของสิ่งแวดล้อมร่วมกับค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับได้จากโนคอ้างอิงภายในอาคาร ซึ่ง จะถูกดำเนินการในช่วงออฟไลน์เฟสแสดงได้ดังรูปที่ 5.2 โดยผู้ออกแบบจะทำการเก็บวัดค่าความ แรงสัญญาณที่ได้รับได้จากโนคอ้างอิงภายในอาคาร และทำการวัดค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ ที่ตำแหน่งฟังก์เจอร์ปรีนท์ จากนั้นนำค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้ไปคำนวณหาระดับ ของอุณหภูมิด้วยวิธีการกำหนดช่วงระดับอุณหภูมิของงานวิจัย Maneerat and Prommak (2015) ซึ่ง มีหน้าที่จำแนกว่าตำแหน่งฟังก์เจอร์ปรีนท์ดังกล่าวอยู่ในระดับอุณหภูมิใด (แทนระดับอุณหภูมิด้วยสี ต่าง ๆ) เช่น ตำแหน่งฟังก์เจอร์ปรีนท์ที่อยู่บริเวณทางเดินซึ่งมีอุณหภูมิสูงแทนด้วยจุดสีแดง เป็นต้น สุดท้ายจะได้ตำแหน่งฟังก์เจอร์ปรีนท์ที่ถูกจำแนกด้วยสีของระดับอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ตัวอย่างการจำแนกฐานข้อมูลฟังก์เจอร์ปรีนท์ด้วยระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

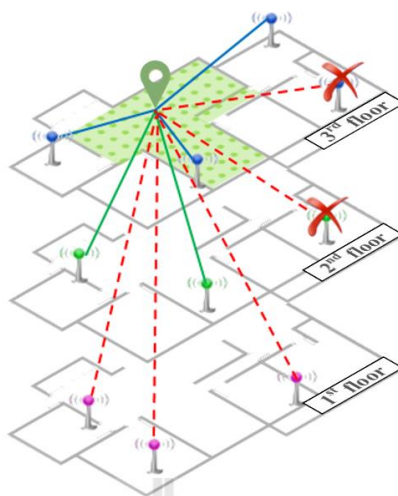
จากนั้นในขั้นตอนการระบุตำแหน่ง ที่โนควัตถุจะทำการวัดค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับได้จาก โนคอ้างอิงในช่วงออนไลน์เฟส และวัดค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์เพื่อที่จะนำไปจำแนก ด้วยวิธีการกำหนดช่วงระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม และใช้ข้อมูลดังกล่าวกรองพื้นที่ของตำแหน่ง ฟังก์เจอร์ปรีนท์ที่ไม่เกี่ยวข้องออกจากการคำนวณ ซึ่งตัวอย่างของการทำงานแสดงได้ดังรูปที่ 5.3

ตัวอย่างเช่น หลังจากที่ทราบหมายเลขชั้นของวัตถุจากขั้นตอนการคำนวณชั้นแล้ว (ชั้นที่ 3) ในขั้นตอนถัดมา ระบบจะเลือกตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์ที่มีระดับอุณหภูมิเดียวกับวัตถุมาพิจารณา (ระดับอุณหภูมิสีเขียว) ดังนั้นตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์ภายในพื้นที่สีเขียวบนชั้นที่ 3 เท่านั้นที่จะถูกนำไปคำนวณหาตำแหน่งวัตถุในขั้นตอนถัดไป ซึ่งการทำงานในขั้นตอนนี้ไม่เพียงจะช่วยลดระยะเวลาในการค้นหาวัตถุแล้ว (ไม่ต้องพิจารณาค่าตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์ทั้งหมด) แต่ระบบยังสามารถจำกัดขอบเขตพื้นที่การค้นหาตำแหน่งวัตถุให้เล็กลงได้อีกด้วย ซึ่งสามารถช่วยลดความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งได้



รูปที่ 5.3 ตัวอย่างกระบวนการกรองระดับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม

ถัดมาในกระบวนการที่สอง เป็นกระบวนการที่ผู้วิจัยได้ทำการปรับปรุงวิธีการคำนวณหา ระยะห่างยูคลิเดียนแบบปรกติ เพื่อลดผลกระทบที่เกิดขึ้นกับระบบระบุตำแหน่งเมื่อตกอยู่ภายใต้ สถานะการเสียบของโนคอ้างอิง ซึ่งเรียกว่า กระบวนการแยกที่พยูคลิเดียน (ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อ 5.3.1 ในกระบวนการนี้ ตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์ที่ได้จากกระบวนการกรองระดับอุณหภูมิของ สิ่งแวดล้อมจะถูกพิจารณา ซึ่งกระบวนการนี้จะมีการคำนวณหาผลต่างของความแรงสัญญาณ ระหว่างตำแหน่งวัตถุและตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์ โดยพิจารณาเฉพาะคู่ผลต่างของค่าเฉลี่ยความแรง สัญญาณที่โนควัตถุสามารถรับสัญญาณจากโนคอ้างอิงได้เท่านั้น หรือพิจารณาเฉพาะความแรง สัญญาณที่ถูกพบในช่วงออนไลน์เฟสเท่านั้น แสดงได้ดังรูปที่ 5.4 โดยจากรูปจะสังเกตได้ว่า ระบบ จะไม่พิจารณาการคำนวณคู่ผลต่างของโนคอ้างอิงที่เสียบ และโนคอ้างอิงที่อยู่ไกลออกไปซึ่งไม่ สามารถรับสัญญาณได้ โดยจะพิจารณาเฉพาะโนคอ้างอิงที่มีการตอบสนองต่อการร้องขอสัญญาณ เท่านั้น



รูปที่ 5.4 ตัวอย่างกระบวนการแอคทีฟยูคลีเดียน

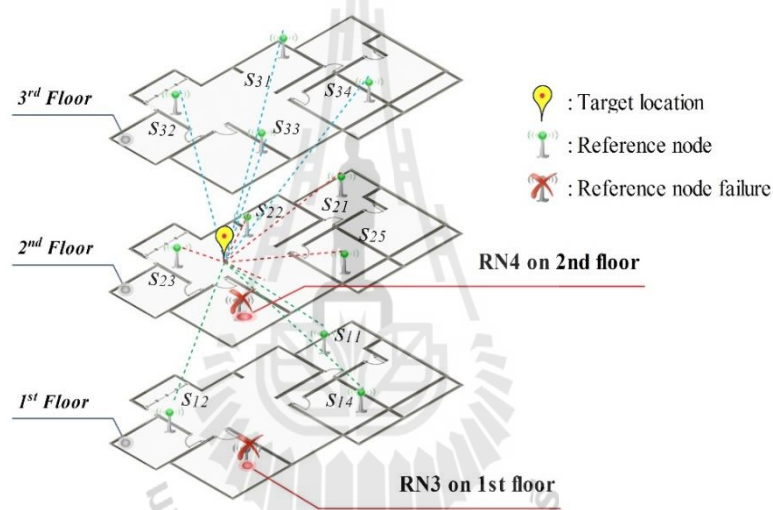
สุดท้ายกระบวนการพื้นฐาน WKNN (กำหนดให้ $K=4$) เป็นวิธีการค้นหาตำแหน่งวัตถุที่ใช้ฐานข้อมูลฟังก์เจอร์ปริ้นท์ที่ได้จากกระบวนการกรองระดับอนุภูมิ โดยมีการพิจารณาค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์เพื่อคำนวณหาพิกัด x, y ของวัตถุ ซึ่งตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์ที่มีความคล้ายคลึงกับตำแหน่งของวัตถุ (ในแง่ของความเร็วของสัญญาณที่ได้รับ) จะเป็นตำแหน่งที่มีค่าถ่วงน้ำหนักมาก (Maneerat, 2012) สุดท้ายเมื่อสิ้นสุดกระบวนการคำนวณของ WKNN ระบบจะได้พิกัดตำแหน่งของวัตถุที่อยู่ภายในอาคารหลายชั้นซึ่งมีผลลัพธ์เป็น x, y และหมายเลขชั้นของวัตถุ (*floor*)

5.3.1 กระบวนการแอคทีฟยูคลีเดียน

หัวข้อนี้ ผู้วิจัยได้นำเสนอกระบวนการแอคทีฟยูคลีเดียน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำหน้าที่คำนวณหาผลต่างของค่าเฉลี่ยของความแรงสัญญาณที่ได้รับระหว่างความแรงสัญญาณที่ตำแหน่งโนดวัตถุกับความแรงสัญญาณในฐานข้อมูลฟังก์เจอร์ปริ้นท์จำนวน M^h ตำแหน่ง (เป็นตำแหน่งของฟังก์เจอร์ปริ้นท์ที่ถูกจำแนกด้วยกระบวนการกรองระดับอนุภูมิของสิ่งแวดล้อม) โดยพิจารณาเฉพาะกลุ่มผลต่างของค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่โนดวัตถุสามารถรับสัญญาณจากโนดอ้างอิงได้เท่านั้น (แตกต่างจากการคำนวณพื้นฐานที่จะคำนวณทุกกลุ่มผลต่าง) และไม่สนใจว่าในการวัดครั้งดังกล่าว ค่าความแรงสัญญาณที่หายไปจะเกิดจากการเสี้ยวของโนดอ้างอิง หรือเกิดจากลดทอนของ

สัญญาณภายในอาคาร หรืออีกความหมายคือ ระบบจะพิจารณาเฉพาะค่าความแรงสัญญาณที่ถูกรับในช่วงออนไลน์เฟสเท่านั้น

รูปที่ 5.5 แสดงตัวอย่างของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร 3 ชั้น โดยแต่ละชั้นมีจำนวนโหนดอ้างอิงที่ถูกติดตั้งเท่ากับ 4 โหนด 5 โหนด และ 4 โหนด สำหรับชั้นที่ 1 ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 ตามลำดับ เมื่อระบบระบุตำแหน่งนี้ตกอยู่ภายใต้สถานะที่มีโหนดอ้างอิงจำนวน 2 โหนดในระบบไม่ทำงานได้แก่ โหนดอ้างอิง RN3 บนชั้นที่ 1 และโหนดอ้างอิง RN4 บนชั้นที่ 2 ดังนั้นในสถานการณ์นี้กระบวนการแอกทีฟยูทิลิตี้ที่นำเสนอจะไม่พิจารณาคู่ผลต่างของค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณของโหนดอ้างอิง RN3 บนชั้นที่ 1 และโหนดอ้างอิง RN4 บนชั้นที่ 2



รูปที่ 5.5 ตัวอย่างระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารภายใน 3 ชั้น ซึ่งตกอยู่ภายใต้การเสียของโหนดอ้างอิงจำนวน 2 โหนด

สมการที่ 5.1 เป็นสมการที่ใช้คำนวณหาระยะห่างยูทิลิตี้แบบแอกทีฟ เมื่อ d_i หมายถึงค่าระยะห่างยูทิลิตี้ของตำแหน่งฟังก์ชันปริ้นท์ i^{th} ตัวแปร F หมายถึงจำนวนชั้นอาคารทั้งหมด ตัวแปร N_f หมายถึงจำนวนของโหนดอ้างอิงบนชั้น f^{th} ที่โหนดวัตถุสามารถรับสัญญาณได้ซึ่งเป็นโหนดอ้างอิงที่มีการตอบสนอง หรือแอกทีฟ (active) ตัวแปร r_{fn}^i หมายถึงค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่ตำแหน่งฟังก์ชันปริ้นท์ i^{th} รับผิดชอบจากโหนดอ้างอิง n^{th} ที่ถูกติดตั้งอยู่บนชั้น f^{th} และตัวแปร \bar{r}_{fn} หมายถึงค่าเฉลี่ยความแรงสัญญาณที่โหนดวัตถุสามารถรับได้จากโหนดอ้างอิง n^{th} ที่มีการตอบสนองซึ่งถูกติดตั้งอยู่บนชั้น f^{th}

$$d_i = \sqrt{\sum_{f=1}^F \left\{ \sum_{n=1}^{N_f} (r_{fn}^i - \ddot{s}_{fn}^i)^2 \right\}} \quad (5.1)$$

จากสถานการณ์ในรูปที่ 5.5 กระบวนการแอกทีฟยูคลีเดียนสามารถคำนวณได้ดังนี้
พิจารณาการคำนวณค่าระยะห่างยูคลีเดียนของตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์ใด ๆ เช่น ฟังก์เจอร์ปริ้นท์
ตำแหน่งที่ 9th เมื่อ $F=3, N_1=3, N_2=4, N_3=4$ ค่าผลต่างความแรงสัญญาณในแต่ละชั้น f^{th} ของตำแหน่ง
ฟังก์เจอร์ปริ้นท์ที่ 9th สามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} f=1, N_1=3; & \quad (r_{11}^9 - \ddot{s}_{11}^9)^2 + (r_{12}^9 - \ddot{s}_{12}^9)^2 + (r_{14}^9 - \ddot{s}_{14}^9)^2 \\ f=2, N_2=4; & \quad (r_{21}^9 - \ddot{s}_{21}^9)^2 + (r_{22}^9 - \ddot{s}_{22}^9)^2 + (r_{23}^9 - \ddot{s}_{23}^9)^2 + (r_{25}^9 - \ddot{s}_{25}^9)^2 \\ f=3, N_3=4; & \quad (r_{31}^9 - \ddot{s}_{31}^9)^2 + (r_{32}^9 - \ddot{s}_{32}^9)^2 + (r_{33}^9 - \ddot{s}_{33}^9)^2 + (r_{34}^9 - \ddot{s}_{34}^9)^2 \end{aligned}$$

จะสังเกตได้ว่าการคำนวณค่าผลต่างความแรงสัญญาณในชั้น ที่ 1 และชั้นที่ 2 จะไม่มี
คู่ผลต่างของความแรงสัญญาณจากโหนดอ้างอิง RN3 บนชั้นที่ 1 (\ddot{s}_{13}) และจากโหนดอ้างอิง RN4 บน
ชั้นที่ 2 (\ddot{s}_{24}) เนื่องจากโหนดอ้างอิงดังกล่าวเป็นโหนดอ้างอิงที่ไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ (ซึ่ง
กระบวนการแอกทีฟยูคลีเดียนจะพิจารณาเฉพาะ โหนดอ้างอิงที่มีตอบสนองเท่านั้น) จากนั้น
กระบวนการแอกทีฟยูคลีเดียนจะคำนวณหาผลรวมของค่าผลต่างความแรงสัญญาณของทั้ง 3 ชั้น
และจะได้ค่าระยะห่างยูคลีเดียนของตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์ตำแหน่งที่ 9th (d_9)

เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนการทำงานของกระบวนการแอกทีฟยูคลีเดียนแล้ว (คำนวณค่า
ระยะห่างยูคลีเดียนของตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์ครบทั้ง M^{th} ตำแหน่ง) ระบบจะทำการเลือกตำแหน่ง
ฟังก์เจอร์ปริ้นท์ i^{th} ที่มีค่าระยะห่างยูคลีเดียน d_i ที่น้อยที่สุด K ลำดับแรกไปคำนวณหาพิกัด x, y ของ
วัตถุด้วยกระบวนการ WKNN สุดท้ายระบบระบุตำแหน่งจะสามารถบอกตำแหน่งของวัตถุที่อยู่
ภายในอาคารหลายชั้นได้ ซึ่งมีรูปแบบของตำแหน่งเป็น x, y, floor

หมายเหตุ ในแต่ละครั้งของการวัดค่าหรือสแกนค่าความแรงของสัญญาณ ในกรณีที่มีโหนด
วัตถุไม่ได้รับค่าความแรงสัญญาณจากโหนดอ้างอิงโหนดใด ๆ ระบบจะกำหนดให้ค่าความแรงของ
สัญญาณในการวัดครั้งนั้นมีค่าเท่ากับ -110 dBm ซึ่งกระบวนการทำงานนี้เดิมที่จะถูกดำเนินการทั้ง
ในช่วงออฟไลน์เฟสและออนไลน์เฟส แต่ในวิทยานิพนธ์นี้กระบวนการดังกล่าวจะดำเนินการ

เฉพาะขั้นตอนการสร้างฐานข้อมูลในช่วงออฟไลน์เฟสเท่านั้น (ผู้ออกแบบระบบสามารถตรวจสอบได้ว่ามีโนดอ้างอิงใดเสียหรือไม่ทำงาน)

5.4 ข้อกำหนดการทดลอง

เพื่อวิเคราะห์สมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้น ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบสมรรถนะในการระบุตำแหน่งของเทคนิคที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิคระบุตำแหน่งพื้นฐานที่ใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ โดยพิจารณาสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่ง 3 สมรรถนะที่ได้แก่ สมรรถนะความถูกต้อง (accuracy) และสมรรถนะความคงทน (robustness) และสมรรถนะความซับซ้อนในแง่ของเวลาที่ใช้ในการประมวลผล (computational complexity) และทำการเปรียบเทียบผลสมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่ง 5 เทคนิคประกอบด้วย

- 1) เทคนิคระยะห่างยูคลีเดียนแบบเสริม (Enhanced Euclidean distance: E-Euclidean)
- 2) เทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก K จำนวนแบบเสริม (Enhanced WKNN: E-WKNN)
- 3) เทคนิคระยะห่างยูคลีเดียนแบบแอคทีฟ (Active Euclidean distance: Active Euclidean)
- 4) เทคนิคการหาตำแหน่งข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดแบบถ่วงน้ำหนัก K จำนวนแบบแอคทีฟ (Active WKNN)
- 5) เทคนิคฟิวชันแบบแอคทีฟ (Active Fusion)

หมายเหตุ สำหรับเทคนิคระบุตำแหน่ง Active Fusion จะมีการใช้เทคนิคระบุหมายเลขชั้น RMoS ที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 ค้นหาหมายเลขชั้น ก่อนที่จะคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุในระนาบสองมิติ (x, y) ซึ่งผู้วิจัยได้แบ่งวัตถุประสงค์การวิจัยออกเป็น 2 หัวข้อดังนี้

- 1) เพื่อเปรียบเทียบผลสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งวัตถุระหว่างระบบที่ใช้และไม่ใช้กระบวนการทำงานแอคทีฟ (หัวข้อ 5.5.1)
- 2) เพื่อวิเคราะห์ผลสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น (หัวข้อ 5.5.2)

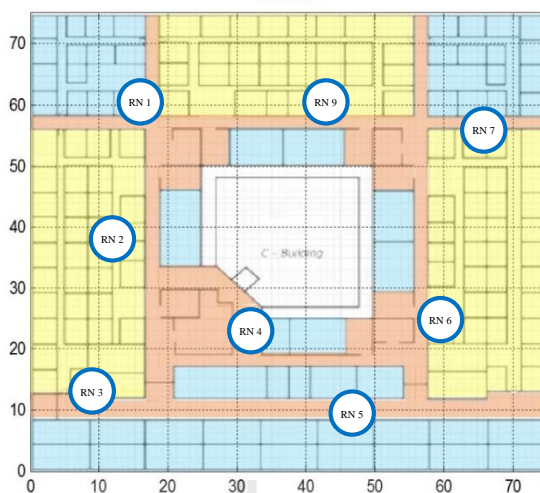
สำหรับข้อกำหนดการทดลองแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยดังนี้ หัวข้อ 5.4.1 สถานที่ทดลอง และพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง และหัวข้อ 5.4.2 อุปกรณ์การทดลอง

5.4.1 สถานที่การทดลองและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

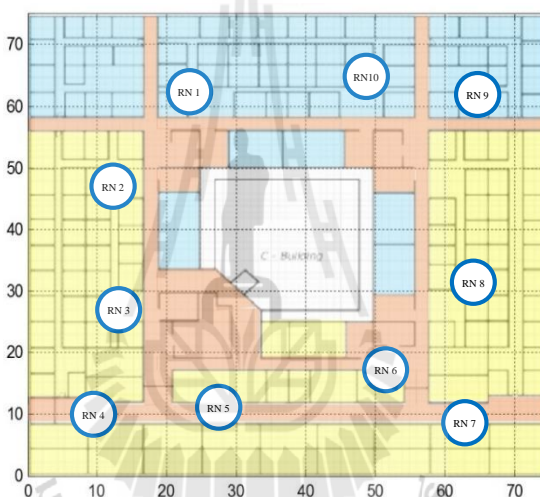
ในบทนี้ทำการทดลองกับพื้นที่ให้บริการ 2 สถานที่ โดยแต่ละอาคารมีโครงสร้างและมีขนาดที่แตกต่างกันได้แก่ พื้นที่การทดลองแรกเป็นอาคารวิชาการ 3 ชั้น (1st floor ถึง 3rd floor) แต่ละชั้นมีขนาดพื้นที่ประมาณ 75x75 ตารางเมตร ให้ชื่อเรียกว่า C-building และกำหนดให้มีระยะห่างระหว่างตำแหน่งฟิงเกอร์ปρί้นท์หรือที่เรียกว่า grid spacing เท่ากับ 4x4 ตารางเมตร ขณะที่พื้นที่การทดลองที่สองเป็นอาคารสำนักงาน 6 ชั้น (1st floor ถึง 6th floor) แต่ละชั้นมีขนาดพื้นที่ประมาณ 44x30 ตารางเมตร ให้ชื่อเรียกว่า NECTEC building กำหนดให้มีขนาด grid spacing เท่ากับ 2x2 ตารางเมตร ตารางที่ 5.1 แสดงข้อกำหนดของการทดลอง และรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.7 แสดงแผนผังของอาคาร C-building และ NECTEC building ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 ข้อกำหนดของการทดลอง

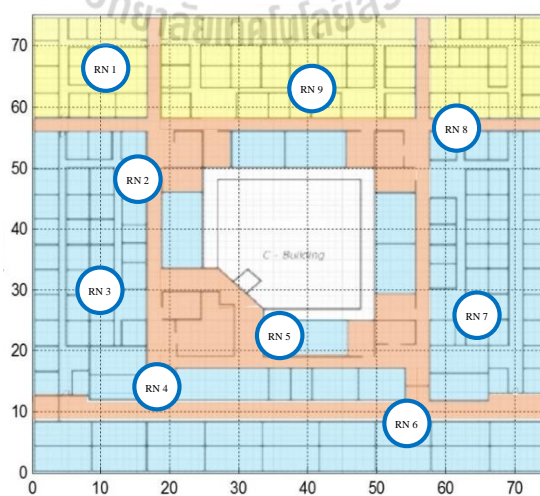
Parameter	Detail
Floor dimensions	75m. × 75m. (for 1 st to 3 rd floor) for C-building 44m. × 30m. (for 1 st to 6 th floor) for NECTEC building
RNs placement	R-MSMR, $R=2$
Number of fingerprint locations	984 locations for C-building (grid spacing 4x4 m ²) 1755 locations for NECTEC building (grid spacing 2x2 m ²)
Test points (i.e. target locations)	474 locations for C-building 384 locations for NECTEC building
Positioning technique	Enhanced Euclidean distance (E-Euclidean) Enhanced WKNN (E-WKNN) Active Euclidean distance (Active Euclidean) Active WKNN (Active WKNN) Active Fusion



a) First floor

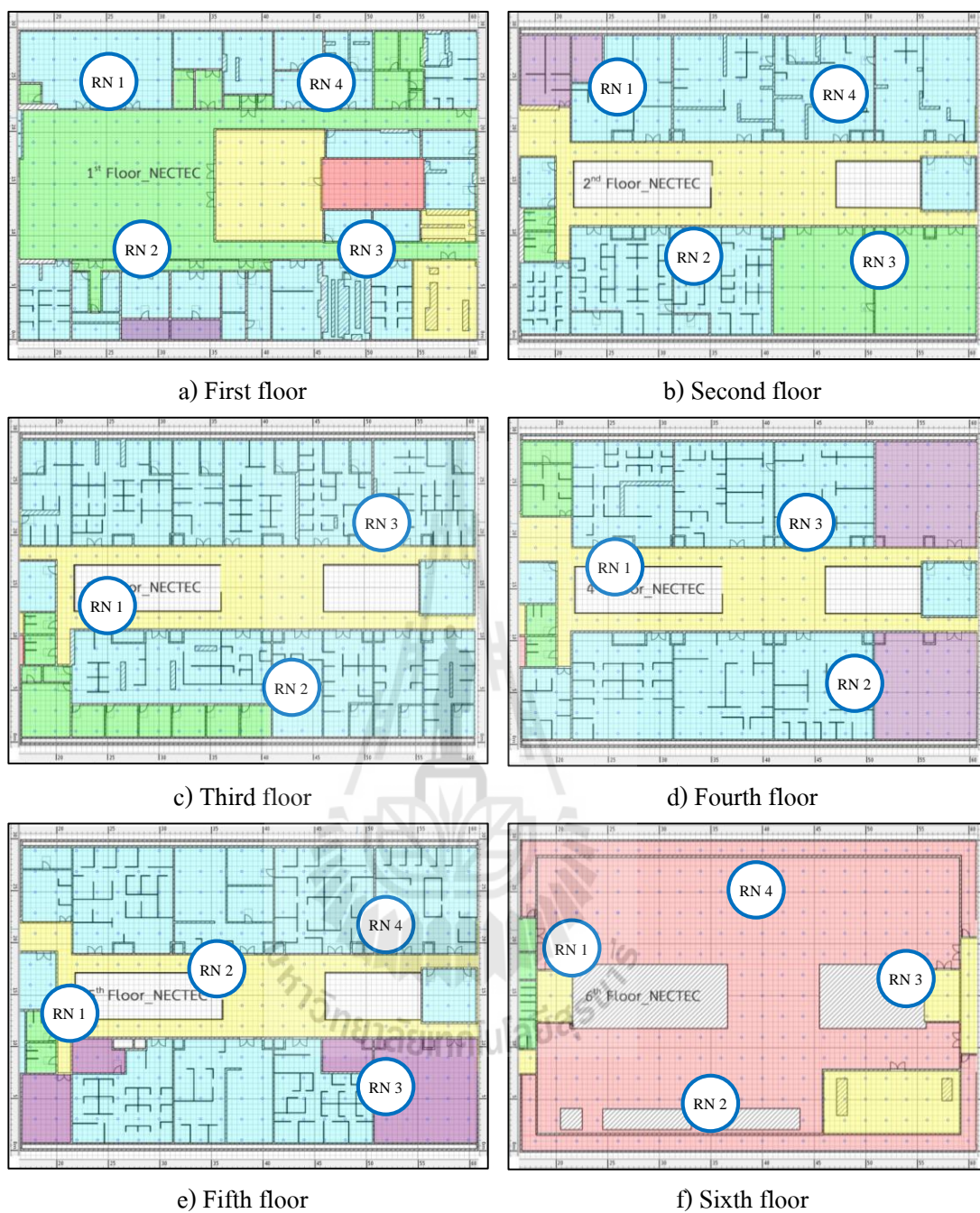


b) Second floor



c) Third floor

รูปที่ 5.6 พื้นที่การทดลอง C-building (อาคาร 3 ชั้น) กรณี โครงสร้างการออกแบบ R-MSMR, $R=2$



รูปที่ 5.7 พื้นที่การทดลอง NECTEC building (อาคาร 6 ชั้น) กรณีโครงสร้างการออกแบบ

R-MSMR, $R=2$

5.4.2 อุปกรณ์การทดลอง

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ใช้ข้อกำหนดของอุปกรณ์การทดลองเช่นเดียวกับข้อกำหนดในบทที่ 3 (หัวข้อ 3.4.2) และมีการใช้งานฟังก์ชันตัวตรวจวัดค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นฟังก์ชันการทำงานของ Freescale MC13224 โดยพารามิเตอร์ของสิ่งแวดล้อมนี้ จะถูกใช้ร่วมกับการค้นหาตำแหน่งของเทคนิคระบุตำแหน่ง Active Fusion ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายสามารถศึกษาได้จากภาคผนวก ก.1

5.5 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้แสดงผลสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น โดยแบ่งเป็นหัวข้อย่อยดังนี้ หัวข้อ 5.5.1 ผลการเปรียบเทียบระหว่างการใช้และไม่ใช้กระบวนการทำงานแอกทีฟ และหัวข้อ 5.5.2 สมรรถนะในการระบุตำแหน่งของเทคนิคระบุตำแหน่ง

5.5.1 ผลการเปรียบเทียบระบบระบุตำแหน่งที่ใช้และไม่ใช้กระบวนการทำงานแอกทีฟ

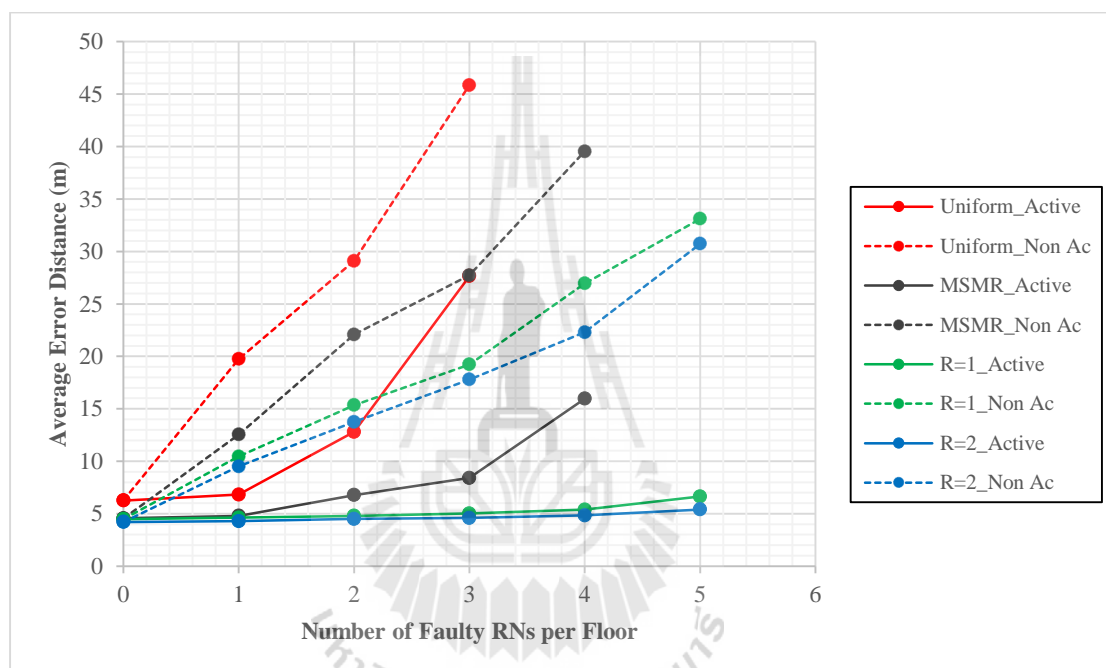
เพื่อที่จะประเมินสมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งที่ใช้และไม่ใช้กระบวนการแอกทีฟ ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ทำการทดลองภายในพื้นที่ให้บริการ C-building ที่เป็นอาคาร 3 ชั้น โดยใช้โครงสร้างของตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิง 4 โครงสร้างประกอบด้วย โครงสร้างแบบ Uniform, MSMR, R-MSMR, $R=1$ และ R-MSMR, $R=2$ และเปรียบเทียบการทำงานของเทคนิคระบุตำแหน่ง 2 เทคนิคคือ เทคนิคระยะห่างยูคลิเดียนที่ใช้กระบวนการแอกทีฟ (Active Euclidean distance) และ เทคนิคระยะห่างยูคลิเดียนที่ไม่ใช้กระบวนการแอกทีฟ (Non Active Euclidean distance หรือ Enhanced Euclidean distance) โดยในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยได้พิจารณาสถานะการเสี่ยของโนดอ้างอิง 6 สถานะ ได้แก่ 0 โนด (สถานะปกติ), สถานะที่มีโนดอ้างอิงเสี่ยชั้นละ 1 โนด, ชั้นละ 2 โนด, ชั้นละ 3 โนด, ชั้นละ 4 โนด และชั้นละ 5 โนด และทำการสุ่มตำแหน่งจุดทดสอบเพื่อใช้เป็นตำแหน่งวัตถุ จำนวน 474 ตำแหน่ง (158 จุดทดสอบในแต่ละชั้น) ซึ่งเป็นจำนวนจุดทดสอบที่ได้มาจากการคำนวณหาจุดทดสอบที่เพียงพอ (คณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2555) โดยในแต่ละกรณีการทดสอบ ผู้วิจัยได้ทำการสุ่มตำแหน่งโนดอ้างอิงที่ไม่ทำงานด้วยการสุ่มแบบสม่ำเสมอจำนวน 4 รูปแบบ จากนั้นคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งของทั้ง 4 รูปแบบการเสี่ย ซึ่งผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.8

หมายเหตุ ผลการทดลองในรูปที่ 5.8 เป็นผลการทดลองที่ถูกทำเพิ่มมาจากผลการทดลองในรูปที่ 4.10 (การศึกษาแนวโน้มสมรรถนะในการระบุตำแหน่งของเทคนิคระยะห่างยูคลิเดียนแบบแอกทีฟในหัวข้อ 4.6.1.1) อีกทั้งผู้วิจัยยังกำหนดให้โนดอ้างอิงคงเหลือที่สามารถทำงานได้อย่างปกติของโครงสร้างแบบ Uniform และแบบ MSMR สามารถมีจำนวนโนดอ้างอิงไม่ทำงานสูงสุดได้เพียงชั้นละ 3 โหนด และ 4 โหนด ตามลำดับ

รูปที่ 5.8 แสดงผลความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งภายในพื้นที่ทดลอง C-building ของทั้ง 4 โครงสร้างการออกแบบ โดยเส้นทึบแสดงกรณีที่ใช้กระบวนการแอกทีฟ ขณะที่เส้นประแสดงกรณีที่ไม่ใช้กระบวนการแอกทีฟ จากผลการทดลองพบว่า จำนวนการเสียของโนดอ้างอิงที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สมรรถนะในการระบุตำแหน่งลดลงเช่นเดียวกันกับการทดลองในบทที่ 3 และบทที่ 4 โดยในการเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างการใช้และไม่ใช้กระบวนการแอกทีฟ พบว่า ภายใต้สภาวะปกติ (เสีย 0 โหนด) ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งของการใช้และไม่ใช้กระบวนการแอกทีฟมีค่าเท่ากัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.27 เมตร, 4.55 เมตร, 4.47 เมตร และ 4.42 เมตร สำหรับกรณีที่ใช้โครงสร้างแบบ Uniform, MSMR, R-MSMR, $R=1$ และ R-MSMR, $R=2$ ตามลำดับ แต่เมื่อระบบระบุตำแหน่งตกอยู่ภายใต้สภาวะการเสียของโนดอ้างอิง เทคนิคระบุตำแหน่งที่ไม่ใช้กระบวนการแอกทีฟจะมีผลสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งลดลงอย่างมาก (ในทุกกรณีโครงสร้างการออกแบบ) ตัวอย่างเช่น รูปที่ 5.8 พิจารณาโครงสร้างการออกแบบ MSMR กรณีที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงานจำนวนชั้นละ 4 โหนด (เส้นกราฟสีดำ) ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งของเทคนิคระยะห่างยูคลิเดียนที่ไม่ใช้กระบวนการแอกทีฟมีมากถึง 39.53 เมตร ซึ่งมากกว่ากรณีที่ใช้กระบวนการแอกทีฟถึง 59.6% (กรณีที่ใช้กระบวนการแอกทีฟมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 15.97 เมตร) หรือแม้แต่ระบบระบุตำแหน่งที่ใช้โครงสร้างการออกแบบที่นำเสนอ R-MSMR, $R=2$ ในกรณีที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงานจำนวนชั้นละ 5 โหนด (เส้นกราฟสีน้ำเงิน) ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในการระบุตำแหน่งกรณีที่ไม่ใช้กระบวนการแอกทีฟมีมากถึง 30.73 เมตร ซึ่งมากกว่ากรณีที่ใช้ 82.42% (กรณีที่ใช้กระบวนการแอกทีฟมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเท่ากับ 5.4 เมตร) เป็นต้น

สาเหตุที่เทคนิคระยะห่างยูคลิเดียนแบบแอกทีฟสามารถลดผลกระทบการเสียของโนดอ้างอิงได้เนื่องจาก การปรับปรุงกลไกการทำงานของขั้นตอนการจับคู่ข้อมูลความแรงสัญญาณระหว่างความแรงสัญญาณตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์ กับความแรงสัญญาณตำแหน่งวัตถุรับได้ในช่วงออนไลน์เพลส โดยกระบวนการทำงานแบบแอกทีฟจะพิจารณาเฉพาะคู่ผลต่างค่าเฉลี่ยของความแรง

สัญญาณที่โน้ตวัตถุได้รับสัญญาณจากโน้ตอ้างอิงได้เท่านั้น (พิจารณาค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับ ที่มีค่ามากกว่า -110 dBm) โดยไม่สนใจว่าในการวัดครั้งนั้นค่าความแรงสัญญาณที่ไม่ปรากฏ (ค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับที่มีค่าต่ำกว่าหรือเท่ากับ -110 dBm) จะมีต้นเหตุมาจากการเสี่ยของโน้ตอ้างอิง หรือเกิดจากการลดทอนของสัญญาณภายในอาคาร ด้วยเหตุนี้ขั้นตอนการคำนวณหาผลต่างของสมการยูคลีเดียนแบบแอกทีฟจึงได้รับผลกระทบจากการเสี่ยของโน้ตอ้างอิงน้อยกว่าการใช้วิธีคำนวณของระยะห่างยูคลีเดียนแบบปรกติ



รูปที่ 5.8 แนวโน้มสมรรถนะในการระบุตำแหน่งของระบบระบุตำแหน่งวัตถุที่ใช้
โครงสร้างแบบ R-MSMR, $R=2$ ภายใน C-building

5.5.2 สมรรถนะในการระบุตำแหน่งของเทคนิคระบุตำแหน่ง

เพื่อที่จะประเมินสมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งที่นำเสนอ ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ใช้พื้นที่การทดลอง 2 อาคาร ได้แก่ C-building และ NECTEC building โดยทั้งสองพื้นที่การทดลองจะใช้โครงสร้างตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่ได้จากเทคนิคการออกแบบ R-MSMR, $R=2$ ซึ่งตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงของพื้นที่การทดลอง C-building และ NECTEC building แสดงได้ดังรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.7 ตามลำดับ โดยผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบผลสมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่ง 5 เทคนิคดังที่กล่าวไว้ข้างต้น หมายเหตุสำหรับเทคนิคระบุตำแหน่ง Active Fusion ที่นำเสนอจะมีการใช้ค่าพารามิเตอร์ของสิ่งแวดล้อมร่วมกับการระบุตำแหน่งวัตถุ ซึ่งผู้วิจัยได้กำหนดการแบ่งระดับอุณหภูมิของพื้นที่การทดลอง C-building และ NECTEC building เท่ากับ 3 ระดับอุณหภูมิและ 5 ระดับอุณหภูมิ แทนด้วยพื้นที่สีต่าง ๆ ในรูปที่ 5.6 และรูปที่ 5.7 ตามลำดับ และสำหรับวิธีการแบ่งระดับอุณหภูมิสามารถศึกษาได้จากงานวิจัย Maneerat (2012)

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้พิจารณาสถานะการเสียของโนดอ้างอิง 2 สถานะ ได้แก่ สถานะปกติ และสถานะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงานจำนวน 30% ของโนดอ้างอิงทั้งหมดในระบบ นั่นคือ พื้นที่การทดลอง C-building จะมีโนดอ้างอิงไม่ทำงานจำนวน 9 โหนด (จากโนดอ้างอิงทั้งหมด 27 โหนด) และพื้นที่การทดลอง NECTEC building จะมีโนดอ้างอิงไม่ทำงานจำนวน 7 โหนด (จากโนดอ้างอิงทั้งหมด 22 โหนด) อีกทั้งผู้วิจัยได้สุ่มเลือกจุดทดสอบด้วยวิธีการคำนวณจำนวนจุดทดสอบที่เพียงพอจำนวน 474 จุดทดสอบและ 384 จุดทดสอบสำหรับพื้นที่การทดลอง C-building และ NECTEC building ตามลำดับ ซึ่งข้อกำหนดของการทดลองแสดงดังตารางที่ 5.1

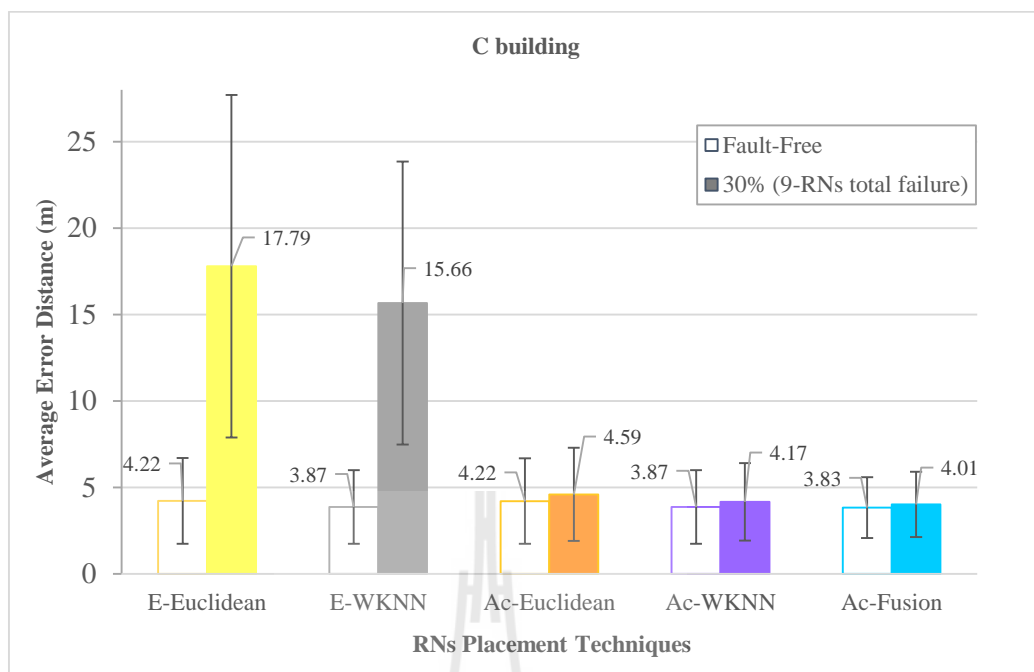
โดยในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้แบ่งการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งออกเป็น 2 หัวข้อคือ หัวข้อ 5.5.2.1 ความถูกต้องในการระบุตำแหน่ง และหัวข้อ 5.5.2. ความซับซ้อนในการประมวลผล

5.5.2.1 ความถูกต้องในการระบุตำแหน่ง

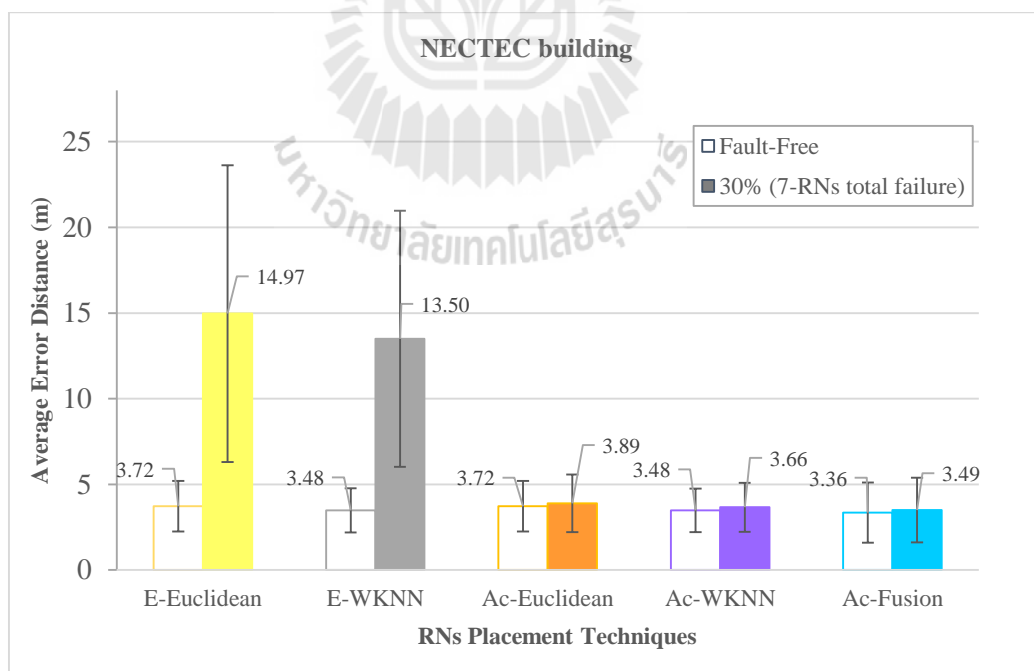
รูปที่ 5.9 และรูปที่ 5.10 แสดงผลค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของระบบระบุตำแหน่งวัตถุที่ใช้โครงสร้างแบบ R-MSMR, $R=2$ กรณีพื้นที่การทดลอง C-building และ NECTEC building ตามลำดับ ในแต่ละกรณีการทดสอบ ผู้วิจัยได้ทำการสุ่มตำแหน่งโนดอ้างอิงที่ไม่ทำงานจำนวน 30% ด้วยการสุ่มแบบสมมาตรจำนวน 4 รูปแบบ ภายใต้เงื่อนไขที่ว่า ในแต่ละชั้นจะต้องมีโนดอ้างอิงที่ยังสามารถทำงานได้ปรกติคงเหลืออย่างน้อย 1 โหนด และทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของ

ความคลาดเคลื่อนในการระบุตำแหน่งของแต่ละกรณี พิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 5.9 กรณีพื้นที่การทดลองขนาดใหญ่ C-building (75x75 ตารางเมตร) พบว่าภายใต้สภาวะการทำงานปกติ เทคนิคระบุตำแหน่งทั้ง 5 เทคนิคมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ซึ่งอยู่ในช่วงระหว่าง 3.83 เมตร ถึง 4.22 เมตร (เทคนิค Active Fusion ที่นำเสนอมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยน้อยที่สุดซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.83 เมตร) แต่เมื่อระบบระบุตำแหน่งตกอยู่ภายใต้สภาวะการทำงานผิดปกติซึ่งมีโนดอ้างอิงในระบบเสียไป 30% ของโนดอ้างอิงทั้งหมด ระบบระบุตำแหน่งที่ไม่ใช้กระบวนการแอกทีฟจะมีสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งลดลงอย่างมาก ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำกว่าสภาวะปรกติมากกว่า 75% (76.27% สำหรับเทคนิค E-Euclidean และ 75.28% สำหรับเทคนิค E-WKNN ตามลำดับ) แตกต่างกับระบบระบุตำแหน่งที่ใช้กระบวนการแอกทีฟทั้ง 3 เทคนิค เมื่อระบบตกอยู่ภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงาน 30% ระบบระบุตำแหน่งที่ใช้กระบวนการแอกทีฟจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยต่ำกว่าสภาวะปรกติไม่เกิน 8% (8.06%, 7.19% และ 4.48% สำหรับเทคนิค Active Euclidean เทคนิค Active WKNN และเทคนิค Active Fusion ตามลำดับ) โดยที่เทคนิค Active Fusion ที่นำเสนอสามารถให้สมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งดีที่สุดทั้งภายใต้สภาวะการทำงานปกติและภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงในระบบไม่ทำงาน 30 %

เช่นเดียวกันกับผลการทดลองภายในพื้นที่ให้บริการขนาดเล็ก NECTEC building (44x30 ตารางเมตร) แสดงดังรูปที่ 5.10 ผลสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งของทั้ง 5 เทคนิคจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับการทดลองของอาคาร C-building อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบผลสมรรถนะความถูกต้องระหว่างทั้งสองพื้นที่ให้บริการพบว่า พื้นที่การทดลอง NECTEC building จะมีสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งดีกว่าพื้นที่การทดลอง C-building สาเหตุเนื่องมาจาก พื้นที่การทดลอง NECTEC building มีการกำหนดระยะห่างระหว่างตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์หรือ grid spacing ที่ละเอียดกว่าพื้นที่การทดลอง C-building ที่มีขนาดของ grid spacing เท่ากับ 4x4 ตารางเมตร (grid spacing ของ NECTEC building มีค่าเท่ากับ 2x2 ตารางเมตร) ซึ่งการกำหนดค่า grid spacing ที่มีความละเอียดมากจะช่วยให้ระบบระบุตำแหน่งมีความถูกต้องและมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น (Kaemarungsi, 2005)¹ อย่างไรก็ตามการกำหนดค่า grid spacing ที่มีความละเอียดมากจะส่งผลทำให้ผู้ออกแบบต้องใช้ระยะเวลาในเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อสร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นข้อแลกเปลี่ยนของเวลาที่ใช้ในการดำเนินงาน กับสมรรถนะความถูกต้องของระบบระบุตำแหน่ง



รูปที่ 5.9 ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของระบบระบุตำแหน่งวัตถุที่ใช้
โครงสร้างแบบ R-MSMR, $R=2$ ภายใน C-building



รูปที่ 5.10 ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของระบบระบุตำแหน่งวัตถุที่ใช้
โครงสร้างแบบ R-MSMR, $R=2$ ภายใน NECTEC building

5.5.2.2 ความซับซ้อนในการประมวลผล

นิยามหรือคำจำกัดความของความซับซ้อนในแง่เวลาที่ใช้ในการประมวลผลจะบอกเป็นระยะเวลาที่ใช้ในการคำนวณหาผลลัพธ์ หรือระยะเวลาที่ใช้ในการค้นหาตำแหน่งวัตถุต่อหนึ่งตำแหน่ง ถ้าระบบระบุตำแหน่งวัตถุมีความซับซ้อนที่น้อย ระบบนั้นจะสามารถค้นหาตำแหน่งวัตถุได้รวดเร็วกว่าระบบระบุตำแหน่งที่มีความซับซ้อนมาก อีกทั้งการพิจารณาสมรรถนะความซับซ้อนในแง่เวลาที่ใช้ในการประมวลผลยังพิจารณาถึงฟังก์ชันการเติบโตทางเวลา (growth in runtime) ซึ่งเป็นค่าฟังก์ชันที่ใช้อธิบายพฤติกรรมแนวโน้มการเติบโตทางเวลาของอัลกอริทึม ที่ช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถประเมินสมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งถ้าหากขนาด หรือจำนวนพารามิเตอร์ที่ใช้ในระบบมีมากขึ้น

ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้ในหัวข้อ 5.5.2.1 อาจยังไม่สามารถแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของกลุ่มเทคนิคระบุตำแหน่ง 3 เทคนิคที่ใช้กระบวนการแอกทีฟ ซึ่งในหัวข้อนี้ ผู้วิจัยจะแสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบของเทคนิค Active Fusion ที่นำเสนอด้วยการเปรียบเทียบผลความซับซ้อนในแง่ของระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผลในช่วงออนไลน์เฟส โดยผู้วิจัยได้ทำการบันทึกเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการประมวลผลระบุตำแหน่งทั้ง 474 จุดทดสอบสำหรับพื้นที่การทดลอง C-building และ 384 จุดทดสอบสำหรับพื้นที่การทดลอง NECTEC building โดยแต่ละจุดทดสอบทำการระบุตำแหน่งซ้ำจำนวน 20 ครั้ง และทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของแต่ละเทคนิคระบุตำแหน่ง โดยในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของเทคนิคระบุตำแหน่งที่ใช้กระบวนการแอกทีฟ 3 เทคนิค ประกอบไปด้วย เทคนิค Active Euclidean เทคนิค Active WKNN และเทคนิค Active Fusion

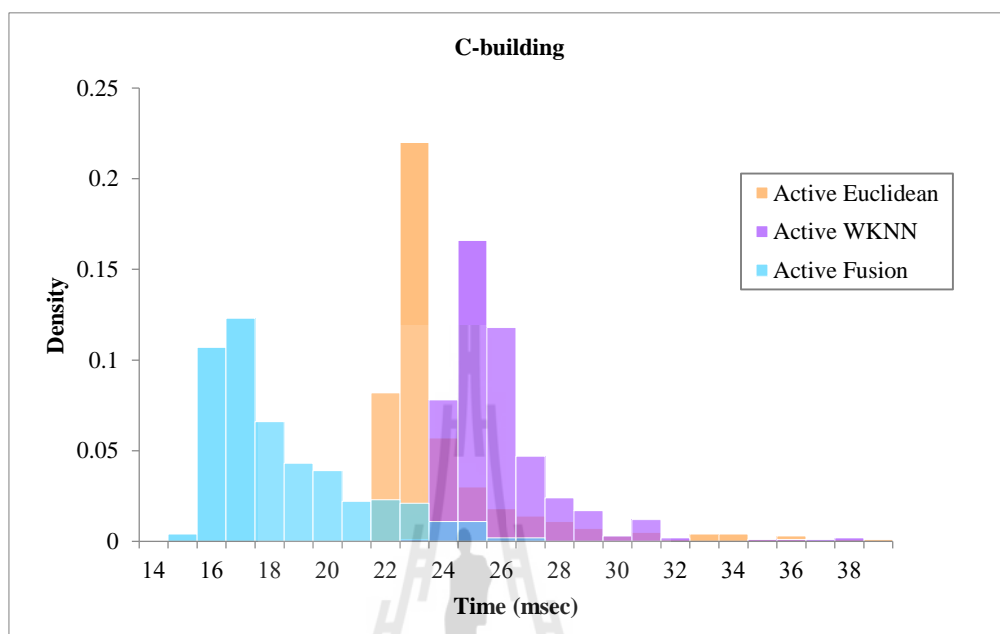
รูปที่ 5.11 และ 5.12 แสดงฮิสโตแกรมของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการค้นหาตำแหน่งวัตถุสำหรับพื้นที่การทดลอง C-building และ NECTEC building ตามลำดับ พิจารณาผลการทดลองในรูปที่ 5.11 กรณีพื้นที่ให้บริการ C-building ซึ่งมีจำนวนตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์เท่ากับ 984 ตำแหน่งพบว่า เทคนิค Active Fusion ที่นำเสนอมีสมรรถนะทางด้านเวลาที่เร็วที่สุด ซึ่งใช้เวลาในการค้นหาตำแหน่งวัตถุประมาณ 16-24 มิลลิวินาที (msec) ในขณะที่เทคนิค Active Euclidean และเทคนิค Active WKNN ใช้เวลาในการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุมากกว่าเทคนิคที่นำเสนอ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 22-23 มิลลิวินาที และ 24-28 มิลลิวินาที ตามลำดับ ยิ่งไปกว่านั้น เมื่อพิจารณาผลการทดลองภายในพื้นที่ให้บริการ NECTEC building ซึ่งมีจำนวนตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์เท่ากับ 1755 ตำแหน่ง จะช่วยแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของสมรรถนะทางด้านเวลาของเทคนิค Active Fusion ที่

นำเสนอซึ่งจะใช้เวลาในการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุน้อยกว่าเทคนิค Active Euclidean และเทคนิค Active WKNN ประมาณ 2.29 เท่า และ 2.47 เท่า ตามลำดับ

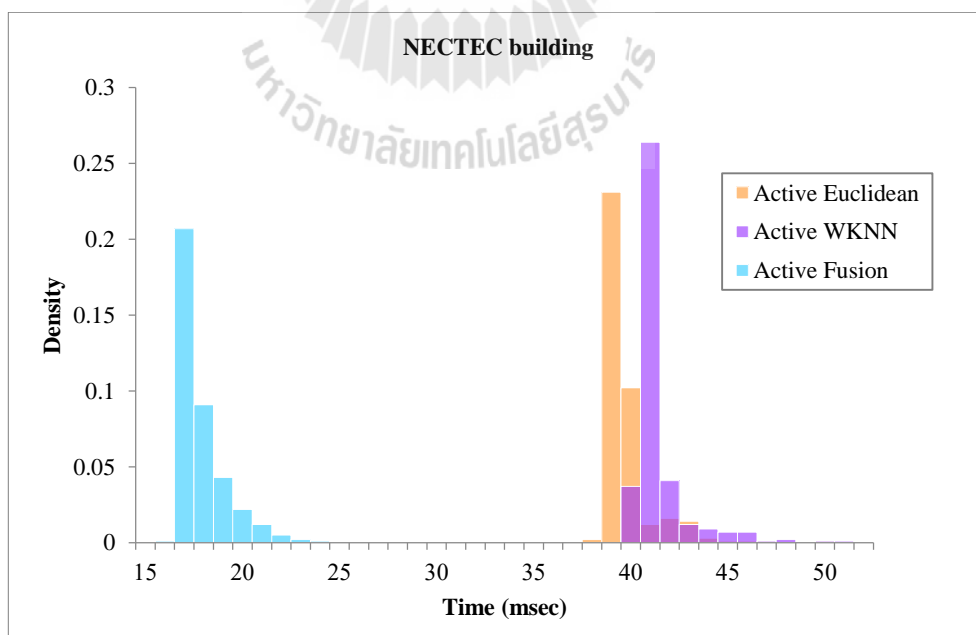
ดังนั้นถึงแม้ว่าทั้ง 3 เทคนิคระบุตำแหน่งที่ใช้กระบวนการแยกที่ฟจะมีสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งทั้งภายใต้สภาวะปรกติและภายใต้สภาวะที่มีโนคอ้างอิงไม่ทำงานใกล้เคียงกัน แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบสมรรถนะทางด้านเวลาหรือความซับซ้อนในแง่ของเวลาที่ใช้ในการประมวลผล เทคนิค Active Fusion ที่นำเสนอสามารถคำนวณหาตำแหน่งวัตถุได้รวดเร็วกว่าเทคนิคอื่น ๆ ยิ่งไปกว่านั้นถ้าหากจำนวนของตำแหน่งฟิงเกอร์ปรี้นท์ที่มีเพิ่มมากขึ้น เทคนิค Active Fusion ที่นำเสนอจะมีแนวโน้มของสมรรถนะความซับซ้อนในแง่เวลาที่ใช้ในการประมวลผลต่ำกว่าเทคนิคอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด สาเหตุที่เทคนิค Active Fusion มีสมรรถนะทางด้านเวลาดีกว่าเทคนิคอื่น ๆ เนื่องจาก เทคนิค Active Fusion มีการใช้ค่าพารามิเตอร์ของสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่โนควัตถุสามารถตรวจวัดได้ โดยค่าพารามิเตอร์ของสิ่งแวดล้อมนี้จะถูกใช้เพื่อจำแนกพื้นที่ของตำแหน่งฟิงเกอร์ปรี้นท์ที่เป็นไปได้ที่อาจเป็นตำแหน่งของวัตถุ ดังนั้นแทนที่การเปรียบเทียบตำแหน่งฟิงเกอร์ปรี้นท์ทั้งหมดที่มีอยู่ในฐานข้อมูล เทคนิค Active Fusion จะดำเนินการเปรียบเทียบตำแหน่งฟิงเกอร์ปรี้นท์ที่อยู่บนชั้นอาคารที่ได้จากเทคนิคระบุชั้น RMoS และมีระดับอุณหภูมิตรงกับระดับอุณหภูมิของตำแหน่งวัตถุมาพิจารณาเท่านั้น (กระบวนการ Floor filter และ Temperature level filter ของงานวิจัย Maneerat (2012)) ซึ่งกระบวนการทำงานดังกล่าวไม่เพียงจะช่วยทำให้ระบบระบุตำแหน่งมีสมรรถนะความถูกต้องที่ดียิ่งขึ้นแล้ว แต่ยังส่งผลให้ระบบระบุตำแหน่งใช้ระยะเวลาในการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุ น้อยลงอีกด้วย

จากผลการทดลองในหัวข้อที่ 5.5.1 และ 5.5.2 จะเห็นได้ว่าเทคนิคระบุตำแหน่งที่นำเสนอ Active Fusion สามารถให้สมรรถนะความคงทนที่ดีภายใต้สภาวะที่มีโนคอ้างอิงไม่ทำงาน อีกทั้งยังมีความซับซ้อนในการประมวลผลต่ำกว่าเทคนิคระบุตำแหน่งแบบพื้นฐาน แต่อย่างไรก็ตาม ภาระที่ต้องดำเนินการเพิ่มขึ้นของเทคนิค Active Fusion ที่นำเสนอคือ การเก็บรวบรวมข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของตำแหน่งฟิงเกอร์ปรี้นท์ในช่วงออฟไลน์เฟส ซึ่งในขั้นตอนี้จะมีขั้นตอนการจำแนกระดับอุณหภูมิซึ่งทำหน้าที่จัดกลุ่มตำแหน่งฟิงเกอร์ปรี้นท์ด้วยค่าอุณหภูมิและค่าความชื้น ด้วยเหตุนี้ความคงทนภายใต้สภาวะที่มีโนคอ้างอิงเสถียรและความซับซ้อนในการประมวลผลที่ต่ำจะถูกแลกเปลี่ยนมาด้วยขั้นตอนการทำงานในออฟไลน์เฟสที่เพิ่มมากขึ้น อีก

ทั้งอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายยังต้องสามารถเก็บวัดค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์ได้อีกด้วย



รูปที่ 5.11 ฮิสโตแกรมของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการค้นหาตำแหน่งวัตถุสำหรับพื้นที่การทดลอง C-building (grid spacing $4 \times 4 \text{ m}^2$)



รูปที่ 5.12 ฮิสโตแกรมของเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการค้นหาตำแหน่งวัตถุสำหรับพื้นที่การทดลอง NECTEC building (grid spacing $2 \times 2 \text{ m}^2$)

5.6 กล่าวสรุป

ในบทนี้ผู้วิจัยได้บูรณาการองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ได้ถูกพัฒนาในบทที่ 3 และบทที่ 4 อีกทั้งยังได้รวมเทคนิคระบุตำแหน่งที่ใช้ค่าพารามิเตอร์ของสิ่งแวดล้อมร่วมกับกระบวนการแอกทีฟยูคลิดเลียนเพื่อระบุตำแหน่งของวัตถุที่อยู่ในอาคารหลายชั้น โดยระบบที่ถูกบูรณาการขึ้นนี้เป็นระบบระบุตำแหน่งวัตถุไร้สายภายในอาคารหลายชั้นที่มีโครงสร้างการออกแบบที่มีความคงทน (ความสามารถของ R-MSMR) สามารถรองรับการทำงานทั้งภายใต้สภาวะปกติและภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงบางโนดไม่ทำงาน อีกทั้งระบบระบุตำแหน่งนี้ยังสามารถระบุหมายเลขชั้นได้อย่างถูกต้อง (จุดแข็งของ RMoS floor algorithm) ภายใต้สภาวะการทำงานที่ผิดปกติ และสามารถบรรเทาผลกระทบที่เกิดจากการเสียหรือไม่ทำงานของโนดอ้างอิงได้ (ความสามารถของ Active Euclidean) ยิ่งไปกว่านั้น ระบบระบุตำแหน่งที่ได้นี้ยังมีความซับซ้อนที่ต่ำ ซึ่งใช้ระยะเวลาในการค้นหาตำแหน่งของวัตถุน้อยกว่าเทคนิคระบุตำแหน่งพื้นฐาน (ความได้เปรียบของ Fusion parameter) หรือกล่าวได้ว่า ระบบระบุตำแหน่งที่บูรณาการขึ้นนี้เป็นระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ทำงานอยู่บนพื้นฐานการใช้ฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนซ์ที่มีความคงทนที่ดีและมีความซับซ้อนในการประมวลผลที่ต่ำ โดยในหัวข้อนี้ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ผลสมรรถนะของเทคนิคระบุตำแหน่งที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิคระบุตำแหน่งพื้นฐาน โดยพิจารณาสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่ง และสมรรถนะความซับซ้อนในแง่ของเวลาที่ใช้ในการประมวลผล ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปข้อสังเกตได้ดังนี้

- 1) เมื่อระบบระบุตำแหน่งวัตถุตกอยู่ภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงาน ระบบระบุตำแหน่งที่ใช้กระบวนการแอกทีฟที่มีสมรรถนะความถูกต้องดีกว่าระบบระบุตำแหน่งที่ไม่ใช้กระบวนการแอกทีฟมากกว่า 50% สำหรับทุกโครงสร้างการออกแบบ
- 2) ระบบระบุตำแหน่งที่นำเสนอสามารถให้สมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งทั้งภายใต้สภาวะการทำงานปกติและสภาวะที่มีโนดอ้างอิงบางโนดไม่ทำงานดีกว่าระบบระบุตำแหน่งพื้นฐาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระบบตกอยู่ภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงาน 30% ระบบระบุตำแหน่งที่นำเสนอมีสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งดีกว่าระบบระบุตำแหน่งพื้นฐานมากกว่า 74%
- 3) เมื่อมีโนดอ้างอิงไม่ทำงานจำนวน 30% เทคนิคระบุตำแหน่งที่ใช้กระบวนการแอกทีฟมีสมรรถนะความถูกต้องในการระบุตำแหน่งลดลงจากสภาวะปกติไม่เกิน 8% โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เทคนิคที่นำเสนอ Active Fusion มีสมรรถนะความถูกต้องที่ลดลงจากสภาวะ

ปรกติเพียง 4.48% และ 3.72% สำหรับพื้นที่บริการแบบ 3 ชั้น และพื้นที่บริการแบบ 6 ชั้น ตามลำดับ

- 4) เมื่อจำนวนของตำแหน่งฟังก์เจอร์ปริ้นท์ภายในพื้นที่ให้บริการมีเพิ่มมากขึ้น ระบบระบุตำแหน่งที่นำเสนอมีจะสมรรถนะทางด้านเวลาที่ดี ซึ่งสามารถคำนวณหาตำแหน่งวัตถุได้รวดเร็วระบบระบุตำแหน่งพื้นฐาน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ระบบระบุตำแหน่งที่นำเสนอใช้เวลาในการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุน้อยกว่าเทคนิค Active Euclidean และเทคนิค Active WKNN ประมาณ 2.29 เท่า และ 2.47 เท่าภายในพื้นที่ให้บริการที่มีขนาด 6 ชั้น



บทที่ 6

สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

สำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร (Indoor Positioning System: IPS) ที่มีลักษณะโครงสร้างทางกายภาพที่ซับซ้อนมากกว่าภายนอกอาคารที่เป็นพื้นที่โล่งนั้น การล้มหรือการเสียบของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณ ไร้สายที่ทำหน้าที่เป็น โหนดอ้างอิง (reference node failures) ไม่เพียงแต่จะทำให้ประสิทธิภาพในการค้นหาตำแหน่งของวัตถุลดลงแล้ว แต่ยังทำให้ตำแหน่งของวัตถุที่คำนวณได้ขาดความน่าเชื่อถือ (reliability) ซึ่งสถานการณ์ความล้มเหลวดังกล่าวอาจเกิดขึ้นได้กับทุกระบบระบุตำแหน่ง อาทิเช่น การเกิดอคติภัยที่ส่งผลให้โหนดอ้างอิงบางโหนดที่ถูกติดตั้งอยู่ภายในอาคารเสียหายหรือไม่สามารถทำงานได้ ภายใต้สถานการณ์ฉุกเฉินที่เร่งรีบนี้ ความรวดเร็วและความน่าเชื่อถือของตำแหน่งวัตถุที่คำนวณได้จะมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับการค้นหาและช่วยเหลือผู้ประสบภัยที่อยู่ในอาคารได้อย่างทันทั่วทั้ง โดยเฉพะอย่างยิ่งจะมีผลต่อความปลอดภัยในชีวิตของผู้ประสบภัยและพนักงานดับเพลิง ซึ่งสมรรถนะของระบบระบุตำแหน่งที่เป็นตัวชี้วัดความสามารถในการทำงานภายใต้สภาวะดังกล่าวคือ สมรรถนะความคงทน (robustness) และสมรรถนะความซับซ้อนในแง่ของเวลาที่ใช้ในการประมวลผล (computational complexity)

ด้วยเหตุนี้ วิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุไร้สายภายในอาคารหลายชั้นที่สามารถให้สมรรถนะในการระบุตำแหน่งที่ยอมรับได้ ทั้งในสภาวะปรกติและสภาวะที่มีโหนดอ้างอิงบางโหนดในระบบไม่ทำงาน อีกทั้งยังสามารถคำนวณหาตำแหน่งวัตถุได้อย่างรวดเร็ว และมีความซับซ้อนในการประมวลผลต่ำ โดยผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้อุปกรณ์รับส่งสัญญาณ ไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 (ZigBee) ของ Freescale MC13224 รุ่นที่ 3 ที่มีน้ำหนักเบา ใช้พลังงานต่ำ มีความสามารถในการวัดค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ (Received Signal Strength: RSS) และมีความสามารถในการวัดข้อมูลทางกายภาพของสิ่งแวดล้อม เช่น ค่าอุณหภูมิ (temperature) และค่าความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) เป็นต้น โดยผู้วิจัยได้บูรณาการองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ได้ถูกพัฒนาในบทที่ 3 บทที่ 4 และบทที่ 5 เข้าด้วยกัน โดยระบบที่ถูกบูรณาการขึ้นนี้เป็นระบบระบุตำแหน่งวัตถุไร้สายภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ติ้งซึ่งมีโครงสร้างการออกแบบที่มีความคงทนสามารถรองรับการทำงานทั้งภายใต้สภาวะปรกติและภายใต้สภาวะที่มี

โนคอ้างอิงบางโนคไม่ทำงาน อีกทั้งระบบระบุตำแหน่งนี้ยังสามารถระบุหมายเลขชั้นได้อย่างถูกต้องภายใต้สภาวะการทำงานที่ผิดปกติ และสามารถบรรเทาผลกระทบที่เกิดจากการเสี่ยของโนคอ้างอิงได้ ยิ่งไปกว่านั้นระบบระบุตำแหน่งนี้ยังมีความซับซ้อนในการประมวลผลที่ต่ำ ซึ่งสามารถค้นหาตำแหน่งของวัตถุได้อย่างรวดเร็ว หรือกล่าวได้ว่า ระบบระบุตำแหน่งที่บูรณาการขึ้นเป็นระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปรีนท์ติ้งซึ่งมีความคงทนและมีความซับซ้อนต่ำ โดยนวัตกรรมของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสรุปได้ดังนี้:

- ❖ **พัฒนาเทคนิคการออกแบบโครงสร้าง:** นำเสนอเทคนิคการออกแบบโครงสร้างระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปรีนท์ติ้งซึ่งสามารถรองรับการทำงานทั้งภายใต้สภาวะปกติ และภายใต้สภาวะที่มีโนคอ้างอิงบางโนคไม่ทำงาน มีชื่อเรียกว่า Robust-Maximum Summation of Max RSSI (R-MSMR) โดยมุ่งเน้นการวางแผนเครือข่ายในส่วนของโครงสร้างเครือข่ายสื่อสารไร้สาย โดยทำการกำหนดจำนวนและตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงที่เหมาะสมกับลักษณะของพื้นที่ให้บริการ ใช้แนวทางการกำหนดปัญหาของสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (Binary Integer Linear Programming: BILP) และใช้วิธีการค้นหาคำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีการอบอุ่นจำลอง (Simulated Annealing: SA)
- ❖ **พัฒนาเทคนิคระบุหมายเลขชั้น:** นำเสนอเทคนิคระบุหมายเลขชั้นสำหรับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่สามารถรองรับการทำงานทั้งภายใต้สภาวะปกติและภายใต้สภาวะที่มีโนคอ้างอิงบางโนคไม่ทำงาน มีชื่อเรียกว่า Robust Mean of Sum-RSS (RMoS) floor algorithm ซึ่งใช้แนวคิดของการพิจารณาช่วงความเชื่อมั่น (confidence interval) ของค่าเฉลี่ยผลรวมความแรงสัญญาณ (mean of RSS summations) ที่ตำแหน่งวัตถุรับได้จากโนคอ้างอิงภายในช่วงออนไลน์เฟสคำนวณหาหมายเลขชั้น อีกทั้งยังไม่จำเป็นต้องมีการสร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์ปรีนท์ใน ช่วงออฟไลน์เฟส
- ❖ **พัฒนากระบวนการจับคู่ (Matching):** นำเสนอการปรับปรุงกลไกการคำนวณของสมการระยะห่างยูคลีเดียน (Euclidean distance) ซึ่งให้ชื่อเรียกว่า Active Euclidean process เป็นกระบวนการที่ทำหน้าที่การจับคู่ข้อมูลความแรงสัญญาณระหว่างตำแหน่งฟิงเกอร์ปรีนท์กับตำแหน่งวัตถุ โดยกระบวนการที่นำเสนอจะพิจารณาเฉพาะโนคอ้างอิงที่มีการ

ตอบสนองหรือแอคทีฟเท่านั้น ซึ่งสามารถบรรเทาผลกระทบที่เกิดจากการเสียบหรือไม่ทำงานของโนคอ้างอิงได้

- ❖ **พัฒนาเทคนิคระบุตำแหน่งที่มีความซับซ้อนต่ำ:** นำเสนอเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุที่มีการใช้ค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ร่วมกับค่าพารามิเตอร์ของสิ่งแวดล้อม (ค่าอุณหภูมิและค่าความชื้นสัมพัทธ์) ซึ่งให้ชื่อเรียกว่า Fusion Parameter technique โดยเทคนิคที่นำเสนอจะช่วยจำแนกตำแหน่งฟังก์เจอร์ปรีนัทที่เป็นไปได้ ที่อาจเป็นตำแหน่งของวัตถุ แทนการพิจารณาฐานข้อมูลตำแหน่งฟังก์เจอร์ปรีนัททั้งหมด ซึ่งช่วยทำให้ระบบสามารถค้นหาตำแหน่งวัตถุได้อย่างรวดเร็ว มีความซับซ้อนในการประมวลผลต่ำ และมีแนวโน้มการเติบโตทางเวลาดำเนินการต่ำกว่าเทคนิคระบุตำแหน่งพื้นฐาน

6.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

จากการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นข้างต้น จะสังเกตเห็นว่าแต่ละองค์ประกอบการพัฒนาจะมีความยืดหยุ่นและเป็นอิสระจากกัน ซึ่งผู้ออกแบบระบบสามารถนำองค์ประกอบต่าง ๆ เหล่านี้ไปประยุกต์ใช้งานกับการทำงานที่หลากหลายตามความต้องการได้ ตัวอย่างเช่น การนำเทคนิคระบุหมายเลขชั้น RMoS ที่นำเสนอไปประยุกต์ใช้กับระบบระบุตำแหน่งภายในระนาบสองมิติ (x, y) ที่ไม่มีขั้นตอนการสร้างฐานข้อมูลในช่วงออฟไลน์เฟส เช่น เทคนิคกลุ่ม Triangulation ดังนั้นจะเห็นได้ว่าผู้ออกแบบไม่จำเป็นต้องเพิ่มขึ้นขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อใช้สร้างฐานข้อมูล (เป็นเทคนิคระบุชั้นที่ไม่ใช้ฐานข้อมูลฟังก์เจอร์ปรีนัท) ยิ่งไปกว่านั้นระบบระบุตำแหน่งนี้ยังได้ผลประโยชน์จากเทคนิคระบุหมายเลขชั้น RMoS ที่สามารถรองรับการทำงานภายใต้สภาวะที่มีโนคอ้างอิงไม่ทำงาน หรือมีสมรรถนะความคงทนอีกด้วย เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การนำองค์ประกอบพัฒนาต่าง ๆ เหล่านี้ไปประยุกต์ใช้งานอาจมีข้อจำกัดหรือข้อกำหนดที่ต้องพิจารณาเพิ่มเติม ตัวอย่างเช่น การนำโครงสร้างการออกแบบที่ได้จากเทคนิคการออกแบบ R-MSMR ไปประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากวัตถุประสงค์และเงื่อนไขการกำหนดจำนวนและตำแหน่งติดตั้งโนคอ้างอิงของเทคนิคการออกแบบนี้สามารถใช้ได้ดีกับเทคนิคระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคฟังก์เจอร์ปรีนัทตั้ง ซึ่งการนำโครงสร้างที่ได้จากการออกแบบไปใช้กับระบบระบุตำแหน่งประเภทอื่น ๆ เช่น กลุ่มเทคนิค Triangulation อาจไม่สามารถรับประกันสมรรถนะในการระบุตำแหน่งวัตถุภายใต้สภาวะที่มีโนคอ้างอิงไม่ทำงานได้ เนื่องจากความแตกต่างของกลไกการคำนวณหาตำแหน่งวัตถุ รวมทั้งความแตกต่างของข้อมูลพารามิเตอร์ของระบบ (เช่น RSS, TOA หรือ AOA) ด้วยเหตุนี้ในการนำองค์ประกอบบางส่วนไปประยุกต์ใช้งาน

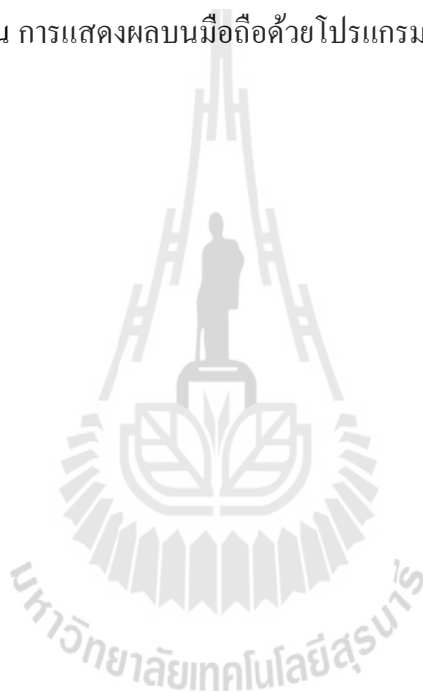
กับระบบระบุตำแหน่ง ผู้ออกแบบระบบจะต้องคำนึงถึงข้อจำกัดและกรอบการทำงานของแต่ละระบบ เพื่อทำให้องค์ประกอบการพัฒนาที่นำเสนอเกิดผลประโยชน์สูงสุดกับระบบระบุตำแหน่ง

นอกจากนี้ถึงแม้ว่าเทคนิคการออกแบบ R-MSMR ที่นำเสนอจะสามารถให้สมรรถนะในการระบุตำแหน่งดีกว่าโครงสร้างแบบอื่น ๆ ทั้งภายใต้สภาวะปรกติและภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงาน แต่อย่างไรก็ตาม ข้อแลกเปลี่ยนที่ต้องแลกมาถ้าหากใช้โครงสร้างการออกแบบที่นำเสนอคือจำนวนโนดอ้างอิงที่เพิ่มมากขึ้นสำหรับติดตั้งในระบบระบุตำแหน่ง ซึ่งอาจมีจำนวนมากกว่าสองเท่าของจำนวนโนดอ้างอิงของโครงสร้างแบบ Uniform ด้วยเหตุนี้ ผู้ออกแบบควรพิจารณาถึงข้อจำกัดของงบประมาณที่สามารถใช้จ่ายสำหรับดำเนินการกับระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร อีกทั้งถึงแม้ว่าเทคนิคระบุตำแหน่ง Active Fusion จะสามารถให้สมรรถนะความคงทนที่ดีภายใต้สภาวะที่มีโนดอ้างอิงไม่ทำงาน และมีความซับซ้อนในการประมวลผลต่ำกว่าเทคนิคระบุตำแหน่งแบบพื้นฐาน แต่อย่างไรก็ตาม ผู้ออกแบบจำเป็นต้องมีขั้นตอนการดำเนินงานที่มากขึ้นในช่วงออฟไลน์เฟส ซึ่งต้องมีการเก็บรวบรวมค่าอนุกรมและค่าความชันสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อม ด้วยเหตุนี้ ข้อแลกเปลี่ยนในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการเตรียมระบบ หรือเวลาดำเนินการในขั้นตอนออฟไลน์เฟสจะเป็นสิ่งที่ต้องถูกดำเนินการเพิ่ม

6.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการพัฒนาาระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นที่ใช้เทคนิคฟิงเกอร์ปริ้นท์ตั้งซึ่งมีความคงทนและมีความซับซ้อนต่ำ ซึ่งเนื่องจากการพัฒนาและขยายขีดความสามารถของระบบระบุตำแหน่งวัตถุที่แยกตามองค์ประกอบ ดังนั้นผู้ออกแบบสามารถเลือกทำการพัฒนาองค์ประกอบของส่วนใดส่วนหนึ่งได้ เช่น การพัฒนาเทคนิคการออกแบบโครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้น การกำหนดจำนวนและตำแหน่งติดตั้งโนดอ้างอิงที่เหมาะสม ได้ใช้วิธีการค้นหาคำตอบที่ใกล้เคียงคำตอบที่ดีที่สุด (near optimal) ด้วยเหตุนี้ประสิทธิภาพของคำตอบจะขึ้นอยู่กับความสามารถของวิธีการค้นหาคำตอบ (วิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีการค้นหาคำตอบของ SA) ซึ่งผู้ออกแบบสามารถเลือกใช้วิธีการค้นหาคำตอบชนิดอื่นที่มีประสิทธิภาพมากกว่า อาทิเช่น การค้นหาคำตอบด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) การค้นหาคำตอบด้วยโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) หรือการค้นหาคำตอบด้วยอาณานิคมของมด (Ant Colony Optimization: ACO) เป็นต้น หรือการพัฒนาในช่วงการค้นหาค่าตำแหน่งวัตถุ เช่น การพัฒนากระบวนการระบุตำแหน่งวัตถุ ในการวิเคราะห์และคำนวณหาค่าตำแหน่งของวัตถุ ผู้วิจัยได้ใช้ค่าพารามิเตอร์ของระบบที่ประกอบไปด้วย ค่าความแรงสัญญาณที่โนดวัตถุได้รับ ค่าอนุกรมและค่าความชันของสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะสังเกตได้ว่าเป็นข้อมูลที่ได้จาก

ตำแหน่งของ โหนดวัตถุ โหนดเดียวเท่านั้น โดยการพัฒนาในส่วนนี้ ผู้ออกแบบจะสามารถนำกระบวนการทำงานแบบร่วมกัน (cooperative localization) ที่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลตำแหน่งของวัตถุที่อยู่ข้างเคียง (มีทางเลือกของข้อมูลเพิ่มมากขึ้น) และอัปเดตตำแหน่งของตัวเองในแบบ real time ดังนั้นการรวมการทำงานนี้เข้ากับระบบที่นำเสนอจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารหลายชั้นได้ อีกทั้งเนื่องจากการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งของวิทยานิพนธ์นี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาอัลกอริทึมของการออกแบบโครงสร้างและอัลกอริทึมของการระบุตำแหน่ง ดังนั้นในส่วนของ การแสดงผล หรือการนำไปใช้งานจริงจะไม่ถูกพิจารณา ด้วยเหตุนี้ ผู้ออกแบบสามารถเลือกพัฒนาในส่วนของการแสดงผลหลังจากที่ได้พิกัดตำแหน่งของวัตถุด้วยรูปแบบการใช้งานจริง เช่น การแสดงผลบนมือถือด้วยโปรแกรม Android เป็นต้น



รายการอ้างอิง

- คณาจารย์ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (2555). **ความน่าจะเป็นและสถิติ**, โรงพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัดพิทักษ์การพิมพ์, กรุงเทพฯ.
- Abdelhadi, M. and Anan, M. (2012). **A Fuzzy-based Collaborative Localization Algorithm for Wireless Sensor Networks**, International Conference on Collaboration Technologies and Systems, pp. 152–156.
- Alakhras, M., Hussein, M., and Oussalah, M. (2013). **Multivariable Fuzzy Inference with Multi Nearest Neighbour for Indoor WLAN Localization Based on RSS Fingerprint**, 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation, pp. 656–662.
- Alonso, J.M., Ocaña, M., Sotelo, M.A., Bergasa, L.M., and Magdalena, L. (2009). **WiFi Localization System using Fuzzy Rule-based Classification**, Lecture Notes in Computer Science, vol. 5717, pp. 383–390.
- Alsehly, F., Arslan, T., and Sevak, Z. (2011). **Indoor Positioning with Floor Determination in Multi Story Buildings**, International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), pp. 1–7.
- Al-Ahmadi, A.S., Rahman, T.A., Kamarudin, M.R., Jamaluddin, M.H., and Omer, A.I. (2011). **Single-Phase Wireless LAN Based Multi-floor Indoor Location Determination System**, IEEE 17th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS), pp. 1057–1062.
- Aomumpai, S., (2012). **Optimal Reference Node Placement for Wireless Indoor Positioning Systems**, Master of Engineering in Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, NakhonRatchasima, Thailand.

- Aomumpai, S., Kondee, K., Prommak, C., and Kaemarungsi, K. (2013). **Optimal Reference Node Placement for Wireless Indoor Positioning Systems**, International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), pp. 1-6.
- Correia, N., Coimbra, J., Schutz, G. (2009). **Fault-Tolerance Planning in Multiradio Hybrid Wireless-Optical Broadband Access Networks**, IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, vol. 1, no. 7, pp. 645–654.
- Baala, O., Zheng, Y., and Caminada, A. (2009). **The Impact of AP Placement in WLAN-based Indoor Positioning System**, Eighth International Conference on Networks, pp. 12–17.
- Bal, M., Xue, H., Shen, W., and Ghenniwa, H. (2010). **A 3-D Indoor Location Tracking and Visualization System Based on Wireless Sensor Networks**, IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics (SMC), pp. 1584–1590.
- Boukerche, A., Oliveira, H.A.B., Nakamura, E.F.; and Loureiro, A.A.F. (2008). **Secure Localization Algorithms for Wireless Sensor Networks**, IEEE Communications Magazine, vol. 46, no. 4, pp. 96–101.
- Brida, P., Machaj, J., Benikovsky, J., and Duha, J. (2010). **A New Complex Angle of Arrival location Method for Ad Hoc Networks**, 7th Workshop on Positioning Navigation and Communication (WPNC), pp. 284–290.
- Chen, Q., Wang, B., Deng, X., Mo, Y., and Yang, L.T. (2013). **Placement of Access Points for Indoor Wireless Coverage and Fingerprint-based Localization**, International Conference on High Performance Computing and Communications & 2013 IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (HPCC_EUC), pp. 2253–2257.
- Cheng, Y. and Lin, Y. (2009). **A New Received Signal Strength Based Location Estimation Scheme for Wireless Sensor Network**, IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 55, no. 3, pp. 1295–1299.

- Chenji, H. and Stoleru, R. (2013). **Toward Accurate Mobile Sensor Network Localization in Noisy Environments**, IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 12, no. 6, pp. 1094–1106.
- Chia, W., Su, L.Y., Lee, C.M., Fang, S.H., Lin, W.J., He, X.P., and Feng, K.C. (2013). **A Survey of Secure Fingerprinting Localization in Wireless Local Area Networks**, International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC), pp. 1413–1417.
- Conti, A., Guerra, M., Dardari, D., Decarli, N., and Win, M.Z. (2012). **Network Experimentation for Cooperative Localization**, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 30, no. 2, pp. 467–475.
- Dardari, D., Closas, P., Djuric, P.M., (2015). **Indoor Tracking: Theory, Methods, and Technologies**, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 64, no. 4, pp. 1263–1278.
- Dharmaraja, S., Jindal, V., and Varshney, U. (2008). **Reliability and Survivability Analysis for UMTS Networks: An Analytical Approach**, IEEE Transactions on Network and Service Management, vol. 5, no. 3, pp. 132–142.
- Djuknic, G.M. and Richton, R.E. (2001). **Geolocation and Assisted GPS**, Computer, vol. 34, no. 2, pp. 123–125.
- Esposito, C., Cotroneo, D., and Ficco, M. (2009). **Calibrating RSS-based Indoor Positioning Systems**, IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, pp. 1–6.
- Fang, L., Du, W., and Ning, P. (2007). **A Beacon-Less Location Discovery Scheme for Wireless Sensor Networks**, Advances in Information Security, vol. 30, pp. 33-55.
- Fang, S., Wang, C., Huang, T., Yang, C., and Chen, Y. (2012). **An Enhanced ZigBee Indoor Positioning System with an Ensemble Approach**, IEEE Communications Letters, vol. 16, no. 4, pp. 564–567.
- Fang, S.H. and Lin, T.N. (2010). **A Novel Access Point Placement Approach for WLAN-based Location Systems**, IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp. 1–4.

- Fluerasu, A., Vervisch-Picois, A., Boiero, G., Ghinamo, G., Lovisolo, P., and Samama, N. (2010). **Indoor Positioning using GPS Transmitters: Experimental Results**, International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), pp. 1–9.
- Gansemer, S., Grossmann, U., and Hakobyan, S. (2010). **RSSI-based Euclidean Distance Algorithm for Indoor Positioning Adapted for the Use in Dynamically Changing WLAN Environments and Multi-level Buildings**, International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), pp. 1–6.
- Gansemer, S., Hakobyan, S., Puschel, S., and Grosmann, U. (2009). **3D WLAN Indoor Positioning in Multi-storey Buildings**, IEEE International Workshop on IDAACS, pp. 669–672.
- Garcia-Valverde, T., Garcia-Sola, A., Hagra, H., Dooley, J.A., Callaghan, V., and Botia, J.A. (2013). **A Fuzzy Logic-based System for Indoor Localization using WiFi in Ambient Intelligent Environments**, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 21, no. 4, pp. 702–718.
- Gentile, C. and Kik, A. (2007). **A Comprehensive Evaluation of Indoor Ranging using Ultra-wideband Technology**, Journal on Wireless Communications and Networking (EURASIP), pp. 1–10.
- Gu, F., Shang, J., Zheng, G., and Zhu, L. (2011). **An Improved Fingerprinting Method for Localization WLAN-based**, International Conference on Computer Science and Service System (CSSS), pp. 2051–2054.
- Gupta, P., Bharadwaj, S., Ramakrishnan, S., and Balakrishnan, J. (2014). **Robust Floor Determination for Indoor Positioning**, International Conference on Twentieth National Communications, pp. 1–6.
- Gustafsson, F. and Gunnarsson, F. (2005). **Mobile Positioning using Wireless Networks: Possibilities and Fundamental Limitations Based on Available Wireless Network Measurements**, IEEE Signal Processing Magazine, vol. 22, no. 4, pp. 41–53.

- He, H., Wu, L., Lu, J., Qiu, X., and Chen, J. (2013). **Time Difference of Arrival Estimation Exploiting Multichannel Spatio-Temporal Prediction**, IEEE Transactions on and Language Processing, vol. 21, no. 3, pp. 463–475.
- He, S. and Gary Chan, S.H., (2016). **Wi-Fi Fingerprint-based Indoor Positioning: Recent Advances and Comparisons**, IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 1, pp. 466–490.
- How, J., Pohlman, N., and Park, C. (2002). **GPS Estimation Algorithms for Precise Velocity, Slip and Race-track Position Measurements**, SAE Motorsports Engineering Conference & Exhibition.
- Huang, J. and Wan, Q. (2007). **The Cramer-Rao Bounds of Hybrid TOA/RSS and TDOA/RSS Location Estimation Schemes**, IEEE Communications Letters, vol. 11, no. 11, pp. 848–849.
- Hung, M.H., Lin, S.S., Cheng, J.Y., and Chien, W.L. (2010). **A ZigBee Indoor Positioning Scheme using Signal-Index-Pair Data Preprocess Method to Enhance Precision**, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 548–553.
- IEEE Std. (2011). **IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Network Part 15.4 Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)**, IEEE Standard 802.15.4-2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006), pp. 1–134.
- Jacoby, G.A. and Chang, D.J. (2008). **Towards Command and Control Networking of Cooperative Autonomous Robotics for Military Applications (CARMA)**, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 815–820.
- Jain, R. (1991). **Art of Computer Systems Performance Analysis Techniques for Experimental Measurements Simulation and Modeling**, Wiley Computer Publishing, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Jieun, K. and Woo, Y.J. (2012). **Cluster Analysis using Improved Fuzzy c-Means Clustering for Object Localization: Vision Based Ill Cattle Localization System**, 11th International Conference on Machine Learning and Applications, pp. 271–274.

- Joshi, A., VishnuKanth, I.N., Samdaria, N., Bagla, S., and Ranjan, P. (2008). **GPS-less Animal Tracking System**, Fourth International Conference on Wireless Communication and Sensor Networks, 2008 (WCSN 2008), pp. 120–125.
- Kaemarungsi, K. (2005)¹. **Design of Indoor Positioning Systems Based on Location Fingerprinting Technique**, Thesis of Doctor of Philosophy Degree, University of Pittsburgh, U.S.A.
- Kaemarungsi, K. (2005)². **Efficient Design of Indoor Positioning Systems Based on Location Fingerprinting**, International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing, Vol. 1, pp. 181–186.
- Kaemarungsi, K., Ranron, R., and Pongsoon, P. (2013). **Study of Received Signal Strength Indication in ZigBee Location Cluster for Indoor Localization**, International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), pp. 1–5.
- Kapitanova, K., Son, S.H., and Kang K.D. (2012). **Using Fuzzy Logic for Robust Event Detection in Wireless Sensor Networks**, Ad Hoc Networks, vol. 10, no. 4, pp. 709–722.
- Kaplan, L.M. (2006). **Global Node Selection for Localization in a Distributed Sensor Network**, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 42, no. 1, pp. 113–135.
- Khauphung, C., Keeratiwintakorn, P., and Kaemarungsi, K. (2008) **On Robustness of Centralized-based Location Determination using WSN**, 14th Asia-Pacific Conference on Communications, pp. 1–5.
- Kim, H.S., Kim, D.R., Yang, S.H., Son, Y.H., and Han, S.K. (2013). **An Indoor Visible Light Communication Positioning System using a RF Carrier Allocation Technique**, Journal of Lightwave Technology, vol. 31, no. 1, pp. 134–144.
- Kirkpatrick S. (1984). **Optimization by Simulated Annealing: Quantitative Studies**, Journal of Sataistical Physics, vol. 34, pp. 975–986.

- Kodippili, N.S. and Dias, D. (2010). **Integration of Fingerprinting and Trilateration Techniques for Improved Indoor Localization**, Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), pp. 1–6.
- Kondee, K. (2014). **Development of Reference Node Placement Techniques for Wireless Indoor Positioning Systems in Multi-Floor Building**, Thesis of Master Degree, Suranaree University of Technology, Thailand.
- Kondee, K., Aomumpai, S., and Prommak, C. (2015). **A Novel technique for Reference Node Placement in Wireless Indoor Positioning Systems Based on Fingerprint Technique**, 2016 ECTI Transactions on Computer and Information Technology (ECTI-CIT), pp. 131–141.
- Kumar, A. and Kumar, V. (2013). **Fuzzy Logic Based Improved Range Free Localization for Wireless Sensor Networks**, World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 7, pp. 455–463.
- Laoudias, C., Michaelides, M.P., and Panayiotou, C.G. (2011). **Fault Detection and Mitigation in WLAN RSS Fingerprint-based Positioning**, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 58, no. 4, pp. 1307–1315.
- Lee, J. and Scholtz, R.A. (2002). **Ranging in a Dense Multipath Environment using an UWB Radio Link**, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 31, no. 20, pp. 1677–1683.
- Lee, Y.C. and Seunghwan, P. (2014). **Localization Method for Mobile Robots Moving on Stairs in Multi-floor Environments**, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp. 4014–4020.
- Leung, Y.K. (2012). **Cooperative Localization and Mapping in Sparsely-Communicating Robot Networks**, Thesis of Doctor of Philosophy Degree, University of Toronto, Canada.
- Li, B., Wang, Y., Lee, H.K., Dempster, A., and Rizos, C. (2005). **Method for Yielding a Database of Location Fingerprints in WLAN**, IEEE Proceedings Communications, vol. 152, no. 5, pp. 580–586.

- Li, R., Di, K., Matthies, L.H., Arvidson, R.E., Folkner, W.M., and Archinal, B.A. (2004). **Rover Localization and Landing-site Mapping Technology for the 2003 Mars Exploration Rover Mission**, Photogrammetric engineering and remote sensing, vol. 70, no. 1, pp. 77–90.
- Li, X. (2007). **Collaborative Localization with Received-Signal Strength in Wireless Sensor Networks**, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 56, no. 6, pp. 3807–3817.
- Long, J., Yi, L., Wan, Y.H., Xu, B.G., Tang, S.L., Ding, X.K., and Wan, Q. (2013). **A Novel Indoor Positioning Method Based on Location Fingerprinting**, International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS), pp. 239–242.
- Liu, H., Darabi, H., Banerjee, and P., Liu, J. (2007). **Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems**, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, vol. 37, no. 6, pp. 1067–1080.
- Liu, H.H. and Yang, Y.N. (2011). **WiFi-based Indoor Positioning for Multi-floor Environment**, IEEE Region 10 Conference TENCN 2011, pp. 597–601.
- Liu, T., Yang, W., Bu, R., and Huang, J. (2013). **Reliable Telecommunication Network Design Problem under Node Failure**, International Symposium on Operations Research and its Applications in Engineering, Technology and Management 2013 (ISORA 2013), pp. 1–8.
- Luca, D.D., Mazzenga, F., Monti, C., and Vari, M. (2006). **Performance Evaluation of Indoor Localization Techniques Based on RF Power Measurements from Active or Passive Devices**, Journal on Applied Signal Processing, pp. 1–11.
- Luo, J., Wu, W., and Yang, M. (2010). **Interference-aware Gateway Placement for Wireless Mesh Networks with Fault Tolerance Assurance**, IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics (SMC), pp. 2373–2380.
- Mager, B., Lundrigan, P., and Patwari, N. (2015). **Fingerprint-based Device-free Localization Performance in Changing Environments**, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 33, no. 11, pp. 2429–2438.

- Maneerat, K. (2012). **Development of Wireless Indoor Positioning Systems for Multi-Floor Building using Hybrid Techniques**, Thesis of Master Degree, Suranaree University of Technology, Thailand.
- Maneerat, K. and Prommak, C. (2014). **An Enhanced Floor Estimation Algorithm for Indoor Wireless Localization Systems using Confidence Interval Approach**, International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering, vol. 8, no. 7, pp. 1182–1186.
- Maneerat, K. and Prommak, C. (2015). **Low complexity Wireless Indoor Positioning approaches Based on fingerprinting techniques**, International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC), pp. 244–249.
- Maneerat, K., Kaemarungsi, K., and Prommak, C. (2016). **Robust Floor Determination Algorithm for Indoor Wireless Localization Systems under Reference Node Failure**, Mobile Information Systems.
- Mao, G., Fidan, B., and Anderson, D.O.B. (2007). **Wireless Sensor Network Localization Techniques**, Computer Networks, vol. 51, no. 10, pp. 2529–2553.
- Marques, N., Meneses, F., and Moreira, A. (2012). **Combining Similarity Functions and Majority Rules for Multi-building, Multi-floor, WiFi Positioning**, International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), pp. 1–9.
- Meng, W., Xiao, W.; Ni, W., and Xie, L. (2011). **Secure and Robust Wi-Fi Fingerprinting Indoor Localization**, International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), pp. 1–7.
- Merkel, S., Unger, P., and Schmeck, H. (2013). **Evolutionary Algorithm for Optimal Anchor Node Placement to Localize Devices in a Mobile Ad Hoc Network During Building Evacuation**, Annual Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation, pp. 1407–1414.
- Millner, H., Ebel, R., Hoffmann, G., and Vossiek, M. (2009). **Wireless 3D Localization of Animals for Trait and Behavior Analysis in Indoor and Outdoor Areas**, IEEE MTT-S International Microwave Workshop on Wireless Sensing, Local Positioning, and RFID, 2009 (IMWS 2009), pp. 1–4.

- Murai, R., Sakai, T., Kawano, H., Matsukawa, Y., Kitano, Y., Honda, Y., and Campbell, K.C. (2012). **A Novel Visible Light Communication System for Enhanced Control of Autonomous Delivery Robots in a Hospital**, IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), pp. 510–516.
- Nanda, M., Kumar, A., and Kumar, S. (2012). **Localization of 3D WSN using Mamdani Sugano Fuzzy Weighted Centriod Approaches**, IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science, pp. 1–5.
- Olson, C.F., Matthies, L.H., Schoppers, M., and Maimone, M.W. (2000). **Robust Stereo Egomotion for Long Distance Navigation**, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, vol. 2, pp. 453–458.
- Pahlavan, K. and Krishnamurthy, P. (2013). **Principles of Wireless Access and Localization**, Wiley.
- Papapostolou, A., Xiao, W., and Chaouchi, H. (2011). **Cooperative Fingerprint-based Indoor Localization using Self-organizing Maps**, Conference on 7th International Wireless Communications and Mobile Computing, pp. 1814–1819.
- Parthiban, R. and Menon, A. (2009). **A Fuzzy Logic Algorithm for Minimizing Error (FLAME) in Wireless Sensor Networks**, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 1435–1440.
- Parwekar, P. and Reddy, R. (2013). **An Efficient Fuzzy Localization Approach in Wireless Sensor Networks**, IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp. 1–6.
- Peng, R. and Sichitiu, M.L. (2006). **Angle of Arrival Localization for Wireless Sensor Networks**, 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2006, vol. 1, pp. 374–382.
- Qian, Y., Lu, K., and Tipper, D.A. (2007). **A Design for Secure and Survivable Wireless Sensor Networks**, IEEE Wireless Communications, vol. 14, no. 5, pp. 30–37.
- Redondi, A.E.C. and Amaldi, E. (2013). **Optimizing the Placement of Anchor Nodes in RSS-based Indoor Localization Systems**, Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (MED-HOC-NET), pp. 8–13.

- Romer, K. (2003). **The Lighthouse Location System for Smart Dust**, Proceedings of the 1st international conference on Mobile systems, applications and services, pp. 15–30.
- Rüppel, U., Stübbe, K.M., and Zwinger, U. (2010). **Indoor Navigation Integration Platform for Firefighting Purposes**, International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), pp. 1–6.
- Sathyan, T. and Hedley, M. (2012). **Joint Location and Parameter Tracking of Mobile Nodes in Wireless Networks**, IEEE/ION Position Location and Navigation Symposium (PLANS), pp. 1195–1203.
- Sathyan, T. and Hedley, M. (2013). **Fast and Accurate Cooperative Tracking in Wireless Networks**, IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 12, no. 9, pp. 1801–1813.
- Segura, M., Mut, V., and Sisterna, C. (2012). **Ultra Wideband Indoor Navigation System**, IET Radar, Sonar & Navigation, vol. 6, no. 5, pp. 402–411.
- Sghaier, N., Melloukmetrics, A., Augustin, B., Amirat, Y., Marty, J., Khoussa, M.E.A., Abid, A., and Zitouni, R. (2011). **Wireless Sensor Networks for Medical Care Services**, 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), pp. 571–576.
- Sharma, C., Wong, Y.F., Soh, W.S., and Wong, W.C. (2010). **Access Point Placement for Fingerprint-based Localization**, IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS), pp. 238–243.
- Sharma, R. (2011). **Bearing-only Cooperative-Localization and Path-Planning of Ground and Aerial Robots**, Thesis of Doctor of Philosophy Degree, Brigham Young University, U.S.A.
- Shirazi, G.N. and Lampe, L. (2009). **Outage Optimal Node Placement in Ultra-wideband Sensor Networks**, IEEE International Conference on Ultra-Wideband, pp. 343–347.
- Srikae, A. (2009). **ปัญญาประดิษฐ์ (Computational Intelligence)**, Electrical Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand.
- Suroso, D.J., Cherntanomwong, P., Sooraksa, P., and Takada, J. (2011). **Location Fingerprint Technique using Fuzzy C-Means Clustering Algorithm for Indoor Localization**, IEEE Region 10 Conference on TENCON, pp. 88–92.

- Tsai, P., Yang, D., and Chen, M. (2011). **Mining Group Movement Patterns for Tracking Moving Objects Efficiently**, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 23, no. 2, pp. 266–281.
- Ussmueller, T., Brenk, D., Essel, J., Heidrich, J., Fischer, G., and Weigel, R. (2012). **Roundtrip-Time-of-Flight Based Localization of Passive Multi-standard RFID-tags**, IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems (ICWITS), pp. 1–4.
- Wang, C.H., Kao, T.W., Fang, S.H., Tsao, Y., Kuo, L.C., Kao S.W., and Lin, N.C. (2013). **Robust Wi-Fi Location Fingerprinting Against Device Diversity based on Spatial Mean Normalization**, Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA), pp. 1–4.
- Wang, H.Y., Zheng, V.W., Zhao, J., and Yang, Q. (2010). **Indoor Localization in Multi-Floor Environments with Reduced Effort**, IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom), pp. 244–252.
- Wang, T. (2012). **Novel Sensor Location Scheme using Time-of-Arrival Estimates**, IET Signal Processing, vol. 6, no. 1, pp. 8–13.
- Wang, T.Q., Sekercioglu, Y.A., Neild, A., and Armstrong, J. (2013). **Position Accuracy of Time-of-Arrival Based Ranging using Visible Light with Application in Indoor Localization Systems**, Journal of Lightwave Technology, vol. 31, no. 20, pp. 3302–3308.
- Wang, X.G. (2009). **Network System Survivability: A Survey**, International Conference on Industrial and Information Systems (IIS 2009), pp. 232–235.
- Win, M.Z., Conti, A., Mazuelas, S., Yuan Shen, Gifford, W.M., Dardari, D., and Chiani, M. (2011). **Network Localization and Navigation Via Cooperation**, IEEE Communications Magazine, vol. 49, no. 5, pp. 56–62.
- Wymeersch, H., Lien, J., and Win, M.Z. (2009). **Cooperative Localization in Wireless Networks**, IEEE Proceedings, vol. 97, no. 2, pp. 427–450.

- Xu, J., Ma, M., and Law, C.L. (2008). **Position Estimation using Ultra-wideband Time Difference of Arrival Measurements**, IET Science, Measurement & Technology, vol. 2, no. 1, pp. 53–58.
- Xu, J., Ma, M., and Law, C.L. (2011). **Performance of Time-Difference-of-Arrival Ultra Wideband Indoor Localisation**, IET Science, Measurement & Technology, vol. 5, no. 2, pp. 46–53.
- Yinbing, Z., Kejing, C., and Jun, Z. (2011). **Study on Non-time Base Conglobated Position Method for Loran-C**, Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (CSQRWC), pp. 198–201.
- Yong, U. and Kavehrad, M. (2012). **Two Hybrid Positioning System Design Techniques with Lighting LEDs and Ad-hoc Wireless Network**, IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 58, no. 4, pp. 1176–1184.
- Yuan Shen, Mazuelas, S., and Win, M.Z. (2011). **A Theoretical Foundation of Network Navigation**, IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2011), pp. 1–6.
- Zhang, R., Xia, W., Jia, Z., Shen, L., and Guo, J. (2014). **The Optimal Placement Method of Anchor Nodes Toward RSS-based Localization Systems**, International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), pp. 1–6.
- Zhang, W. (2011). **Cooperative Sensing for Target Estimation and Target Localization**, Thesis of Doctor of Philosophy Degree, Colorado State University, U.S.A.
- Zhang, Y. and Ye, W. (2011). **Design and Placement of Light Monitoring System in Museums Based on Wireless Sensor Networks**, International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes (ADCONIP), pp. 512–517.



The logo of Sakon Nakhon Rajabhat University is a large, faint watermark in the center of the page. It features a central figure of a person standing on a pedestal, surrounded by a circular emblem with a lotus flower and other symbols. The text 'มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี' is written in a circular path around the bottom of the emblem.

ภาคผนวก ก

ข้อมูลของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย โปรแกรมที่ใช้งาน
และผลการออกแบบโครงสร้างระบบ

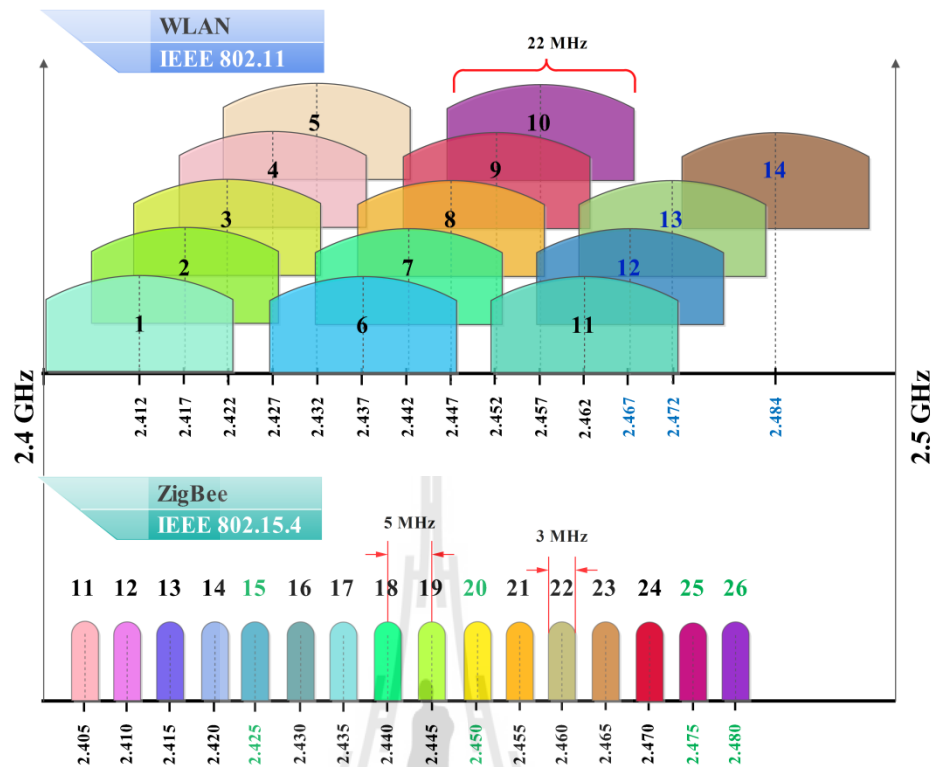
ก.1 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคโนโลยีรับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 (ZigBee) ซึ่งผลิตจากบริษัท Freescale (<http://www.freescale.com/>) โดยได้เลือกใช้ชุดพัฒนา 1322x ZigBee Evaluation Kit ที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ทั้งหมด 4 ชนิด ได้แก่ MC13224 Sensor Node, MC13224 Network Node, MC13224-LPN, และ MC13224 USB Dongle (ซึ่ง 1 ชุดประกอบไปด้วย 4S + 3N + 2L + U มีราคาต่อชุด \$2000) แสดงดังรูปที่ ก.1 โดยอุปกรณ์แต่ละชนิดจะทำงานในย่านความถี่ 2.4 GHz (มีค่าความถี่กลางตั้งแต่ 2.405 GHz ถึง 2.480 GHz) มีช่องสัญญาณทั้งหมด 16 ช่องสัญญาณ (ช่องสัญญาณที่ 11 ถึง ช่องสัญญาณที่ 26) โดยแต่ละช่องสัญญาณจะมีขนาดแบนด์วิดท์ (bandwidth) เท่ากับ 3 MHz สำหรับในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ช่องสัญญาณที่ 26 มีค่าความถี่กลางเท่ากับ 2.480 GHz ซึ่งเป็นช่องสัญญาณที่ไม่มีการรบกวนทับกับย่านความถี่ของมาตรฐาน IEEE 802.11 (Wireless Local Area Network : WLAN) รูปที่ ก.2 แสดงย่านความถี่ของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 และตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4

หมายเหตุ ช่องสัญญาณของ ZigBee ที่ไม่มีการรบกวนทับกับช่องสัญญาณของ WLAN มีทั้งหมด 4 ช่องสัญญาณ ได้แก่ ช่องสัญญาณที่ 15, 20, 25 และ 26 แสดงด้วยตัวอักษรสีเขียวในรูปที่ ก.2



รูปที่ ก.1 ชุดพัฒนา 1322x ZigBee Evaluation Kit



รูปที่ ก.2 ย่านความถี่ของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายตามมาตรฐาน IEEE 802.11 และตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4

โครงสร้างของระบบระบุตำแหน่งที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นประกอบไปด้วยอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย 2 ชนิดคือ โหนดอ้างอิง (reference node : RN) และ โหนดวัตถุ (target node) แสดงได้ดังรูปที่ ก.3 ซึ่งที่โหนดวัตถุจะเลือกใช้อุปกรณ์ MC13224 Sensor Node และ โหนดอ้างอิงจะใช้อุปกรณ์ MC13224 Sensor Node, MC13224 Network Node และ MC13224-LPN (รวมทั้งสิ้น 8 โหนด) ขณะที่ MC13224 USB Dongle จะใช้สำหรับการดักจับ packet ของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายเพื่อส่งต่อการสังเกตการณ์ ซึ่งสามารถเลือกช่องสัญญาณที่ต้องการตรวจจับ และสามารถแสดงข้อมูลที่ตรวจจับได้ เช่น ค่า address ต้นทาง ค่า address ปลายทาง และข้อมูลที่ส่ง เป็นต้น โดยรายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละชนิดมีดังนี้



a. โนคอ้างอิง

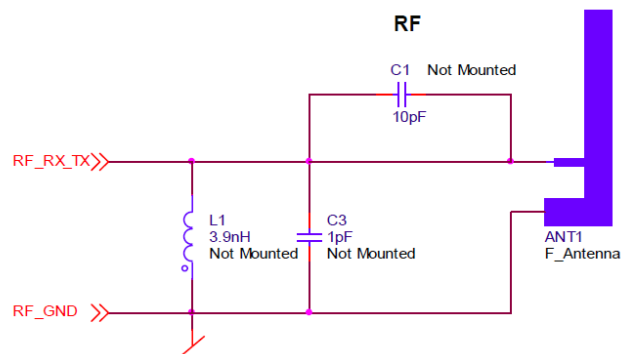


b. โนควัดฤ

รูปที่ ก.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ก.1.1 MC13224 Sensor Node (MC13224-SN)

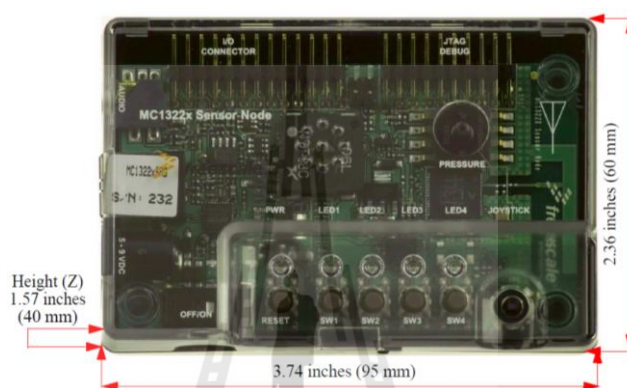
อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย MC13224 Sensor Node รุ่นที่ 3 ซึ่งมี ARM7TDM เป็นตัวประมวลผล และมีสายอากาศภายในตัว ซึ่งมีชื่อว่า PCB inverted-F-antenna (F-antenna) แสดงได้ดังรูปที่ ก.4 และรายละเอียดของสายอากาศ F-antenna แสดงดังตารางที่ ก.1 สำหรับ MC13224 Sensor Node มีคุณสมบัติเด่นคือ มีตัวตรวจจับความดัน (Pressure sensor) ตัวตรวจจับอุณหภูมิ (Temperature sensor) มาตรการความเร่งแบบ 3 แกน (3 axis accelerometer) และ Joystick ซึ่งสามารถปรับกำลังส่ง (transmit power) ตั้งแต่ +3 dBm ถึง -30 dBm มีค่าความไว (sensitivity) เท่ากับ -95 dBm (<1% PER for 20-byte packets) ราคาต่อหน่วยประมาณ \$220 (6,427 บาท) รูปที่ ก.5 แสดงอุปกรณ์ MC13224 Sensor Node และตารางที่ ก.2 แสดงรายละเอียดของ MC13224 Sensor Node



รูปที่ ก.4 PCB inverted-F-antenna

ตารางที่ ก.1 รายละเอียดของ PCB inverted-F-antenna

คุณสมบัติ	รายละเอียด
Typical nominal output power	0 dBm, with +4 dBm max
Typical sensitivity	-95 dBm.
Frequency range	2.405 GHz - 2.480 GHz
Typical range (outdoors, line of sight)	300 meters



รูปที่ ก.5 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย MC13224 Sensor Node

ตารางที่ ก.2 รายละเอียดของ MC13224 Sensor Node

คุณสมบัติ	รายละเอียด
Manufacturer	Freescale
Chipset	MC13224V
Frequency range	2.405 GHz - 2.480 GHz
Transmit power	+3 dBm to -30 dBm
Sensitivity	-95 dBm
Antenna	PCB inverted-F
Power	USB or DC Jack (12V Max) or 2x AA batteries
Connection	UART1: USB Interface FT232R
Size (x, y, z)	95 x 60 x 40 mm
Sensor features	Pressure, Temperature, 3 axis accelerometer
Other features	Joystick, 4 Push buttons, 4 GPIO LEDs
Price per unit	\$220 (6,427 Baht)

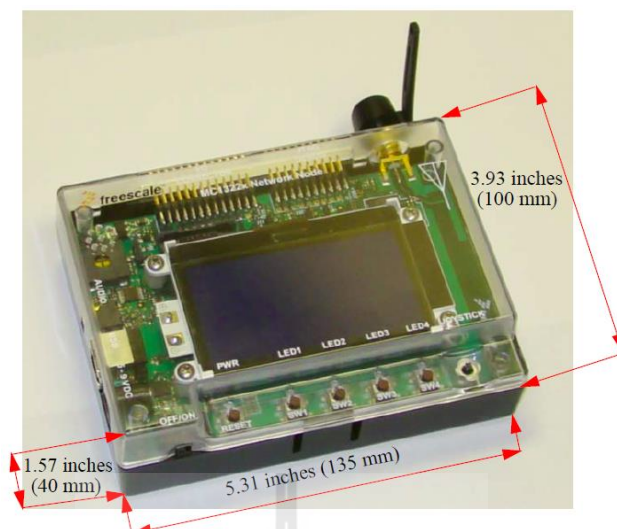
ก.1.2 MC13224 Network Node (MC13224-NN)

อุปกรณ์รับส่งสัญญาณ ไร้สาย MC13224 Network Node รุ่นที่ 3 ซึ่งมี ARM7TDM เป็นตัวประมวลผล และมีสายอากาศสองชนิดคือ Sub Miniature version “A” connector (SMA-antenna) และ F-antenna สำหรับสายอากาศ SMA-antenna แสดงได้ดังรูปที่ ก.6 และรายละเอียดของสายอากาศ F-antenna แสดงดังตารางที่ ก.3 สำหรับ MC13224 Network Node มีคุณสมบัติเด่นคือ จอแสดงผลขนาด 128x64 LCD with LED backlight มีตัวตรวจจับความดัน ตัวตรวจจับอุณหภูมิ มาตรการความเร่งแบบ 3 แกน และ Joystick ซึ่งสามารถปรับกำลังตั้งแต่ +2 dBm ถึง -30 dBm มีความไวเท่ากับ -95 dBm (<1% PER for 20-byte packets) ราคาต่อหน่วยประมาณ \$160 (4,674 บาท) รูปที่ ก.7 แสดงอุปกรณ์ MC13224 Network Node และตารางที่ ก.4 แสดงรายละเอียดของ MC13224 Network Node

รูปที่ ก.6 Sub Miniature version “A” connector

ตารางที่ ก.3 รายละเอียดของ Sub Miniature version “A” connector-antenna

คุณสมบัติ	รายละเอียด
Typical nominal output power	0 dBm, with +2 dBm max
Typical sensitivity	-95 dBm.
Frequency range	2.405 GHz - 2.480 GHz
Typical range (outdoors, line of sight)	300 meters



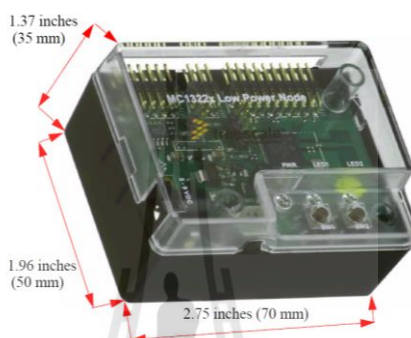
รูปที่ ก.7 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย MC13224 Network Node

ตารางที่ ก.4 รายละเอียดของ MC13224 Network Node

คุณสมบัติ	รายละเอียด
Manufacturer	Freescalo
Chipset	MC13224V
Frequency range	2.405 GHz - 2.480 GHz
Transmit power	+2 dBm to -30 dBm
Sensitivity	-95 dBm
Antenna	External SMA antenna or PCB inverted-F
Power	USB or DC Jack (12V Max) or 2x AA batteries
Connection	UART1: USB Interface FT232R
Size (x, y, z)	135 x 100 x 40 mm
Sensor features	Pressure, Temperature, 3 axis accelerometer
Other features	Joystick, 4 Push buttons, 4 GPIO LEDs
Price per unit	\$160 (4,674 Baht)

ก.1.3 MC13224 Low Power Node (MC13224-LPN)

อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย MC13224 Low Power Node รุ่นที่ 3 ซึ่งมี ARM7TDM เป็นตัวประมวลผล และมีเสาอากาศภายในตัว ซึ่งมีชื่อว่า F-antenna สามารถปรับกำลังส่งตั้งแต่ +4 dBm ถึง -30 dBm มีค่าความไวเท่ากับ -95 dBm (<1% PER for 20-byte packets) ราคาต่อหน่วย ประมาณ \$120 (3,506 บาท) รูปที่ ก.8 แสดงอุปกรณ์ MC13224 Low Power Node และตารางที่ ก.5 แสดงรายละเอียดของ MC13224 Low Power Node



รูปที่ ก.8 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย MC13224 Low Power Node

ตารางที่ ก.5 รายละเอียดของ MC13224 Low Power Node

คุณสมบัติ	รายละเอียด
Manufacturer	Freescale
Chipset	MC13224V
Frequency range	2.405 GHz - 2.480 GHz
Transmit power	+4 dBm to -30 dBm
Sensitivity	-95 dBm
Antenna	PCB inverted-F
Power	DC Jack (12V Max), or 2x AAA batteries
Connection	On pin header
Size (x, y, z)	70 x 50 x 30 mm
Sensor features	No
Other features	2 Push buttons, 2 GPIO LEDs
Price per unit	\$120 (3,506 Baht)

ก.1.4 MC13224 USB Dongle

อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย MC13224 USB Dongle มีสายอากาศภายในตัว ซึ่งมีชื่อว่า SMD ceramic สามารถปรับกำลังส่งตั้งแต่ +4 dBm ถึง -30 dBm มีค่าความไวเท่ากับ -95 dBm (<1% PER for 20-byte packets) ราคาต่อหน่วยประมาณ \$80 (2,337 บาท) รูปที่ ก.9 แสดงอุปกรณ์ MC13224 USB Dongle และตารางที่ ก.6 แสดงรายละเอียดของ MC13224 USB Dongle



รูปที่ ก.9 อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย MC13224 USB Dongle

ตารางที่ ก.6 รายละเอียดของ MC13224 USB Dongle

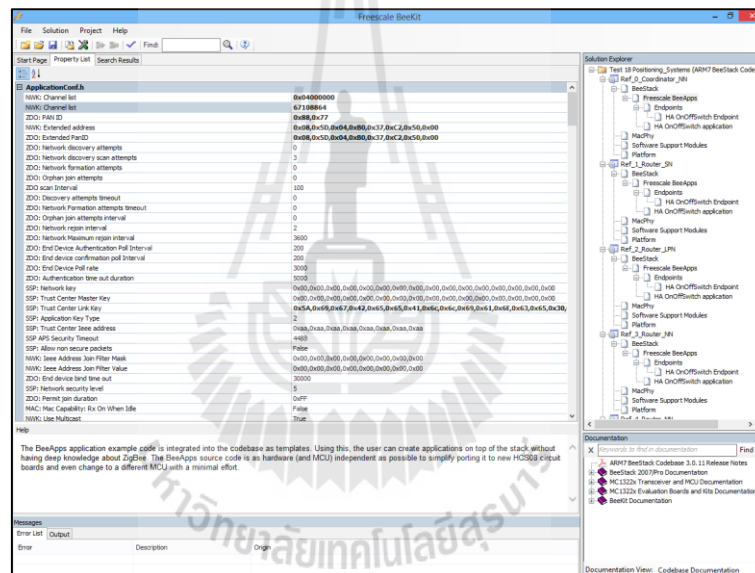
คุณสมบัติ	รายละเอียด
Manufacturer	Freescale
Chipset	MC13224V
Frequency range	2.405 GHz - 2.480 GHz
Transmit power	+4 dBm to -30 dBm
Sensitivity	-95 dBm
Antenna	SMD ceramic
Power	USB
Connection	UART1: USB Interface FT232R
Size (x, y, z)	60 x 24 x 12 mm
Sensor features	No
Other features	2 Push buttons, 1 GPIO LEDs
Price per unit	\$80 (2,337 Baht)

ก.2 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

สำหรับโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ โปรแกรมที่ใช้กำหนดค่าและควบคุมอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย และ โปรแกรมที่ใช้ประมวลผล รวมทั้งใช้คำนวณหาตำแหน่งวัตถุ

ก.2.1 โปรแกรมที่ใช้ควบคุมอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย

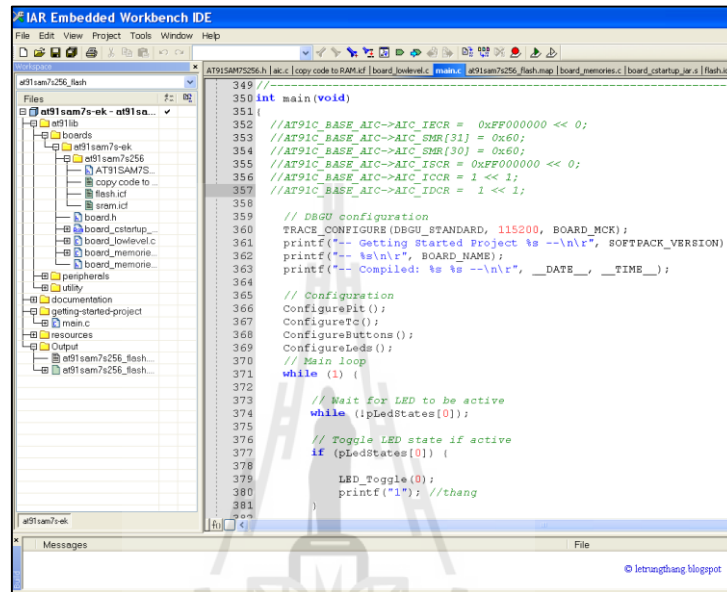
โปรแกรม Freescale BeeKit จะใช้สำหรับสร้างรูปแบบการเชื่อมต่อของอุปกรณ์แต่ละชนิด และกำหนดค่าต่าง ๆ ให้กับอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย อาทิเช่น ช่องสัญญาณ ค่า address ค่า PANID กำลังส่ง และค่าเวลาที่ใช้ในการอัปเดตเส้นทาง เป็นต้น รูปที่ ก.10 แสดงตัวอย่างหน้าต่างของโปรแกรม Freescale BeeKit



รูปที่ ก.10 โปรแกรม Freescale BeeKit

โปรแกรม IAR Embedded Workbench จะใช้สำหรับกำหนด code คำสั่ง หรือแก้ไข code คำสั่งที่ได้จากโปรแกรม Freescale BeeKit เพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สาย และควบคุมกลไกการทำงานของการทำงานของการรับส่งข้อมูล โดยจะอาศัยความรู้พื้นฐานของภาษา C ในการกำหนดกลไก สำหรับการโหลดคำสั่งลงที่บอร์ดหรือตัวอุปกรณ์จะใช้สาย J-Link V8 JLink Segger ARM Emulator Debugger เพื่อโหลด code คำสั่งลงอุปกรณ์รับส่งสัญญาณไร้สายผ่านขา JTAG Connector ของตัวอุปกรณ์ รูปที่ ก.11 แสดงตัวอย่างหน้าต่างของโปรแกรม IAR Embedded Workbench และรูปที่ ก.12 แสดง สาย J-Link V8

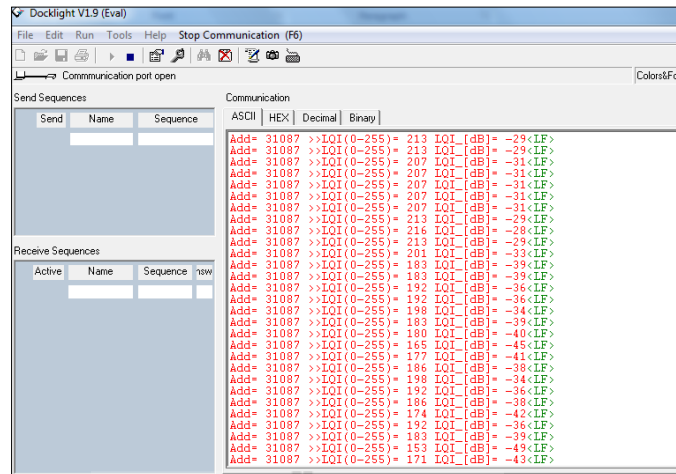
โปรแกรม Docklight จะใช้สำหรับแสดงค่าต่าง ๆ ที่อุปกรณ์รับส่งสัญญาณไริสายรับได้ เช่น ค่า LQI และ ค่า address ต้นทาง เป็นต้น ซึ่งจะแสดงผลในรูปแบบ text และเก็บบันทึกค่าเหล่านี้ลงใน text file (.txt) โดยมีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกับโปรแกรม HyperTerminal รูปที่ ก.13 แสดงตัวอย่างหน้าต่างของโปรแกรม Docklight



รูปที่ ก.11 โปรแกรม IAR Embedded Workbench



รูปที่ ก.12 สาย J-Link V8



รูปที่ ก.13 โปรแกรม Docklight

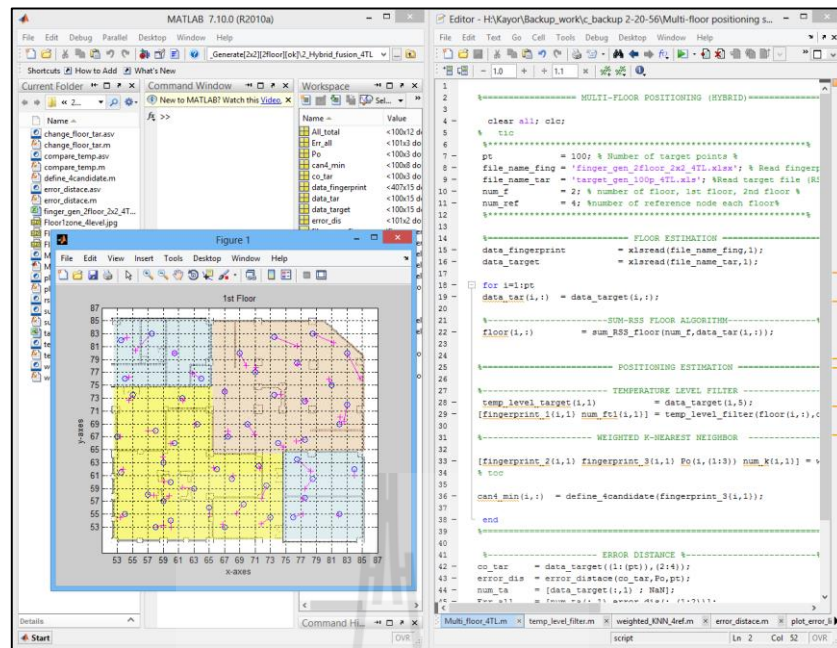
ก.2.2 โปรแกรมที่ใช้คำนวณหาตำแหน่งวัตถุ

โปรแกรม MATLAB จะใช้สำหรับการอ่านข้อมูลที่เก็บบันทึกได้จาก text file เพื่อนำไปจัดเก็บลงในไฟล์ Excel (ทำให้ text อยู่ในรูปของ matrix) เพื่อง่ายต่อการนำมาใช้งาน เมื่อต้องการระบุตำแหน่ง โปรแกรมจะมีหน้าที่อ่านค่าจากไฟล์ Excel (ฐานข้อมูลฟังก์เจอร์ปริ้นท์ และข้อมูลที่วัตถุวัดได้) และนำค่าที่อ่านได้ไปประมวลผลเพื่อระบุตำแหน่งของวัตถุตามกระบวนการทำงานของเทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้น รูปที่ ก.14 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม MATLAB ของงานวิจัยนี้

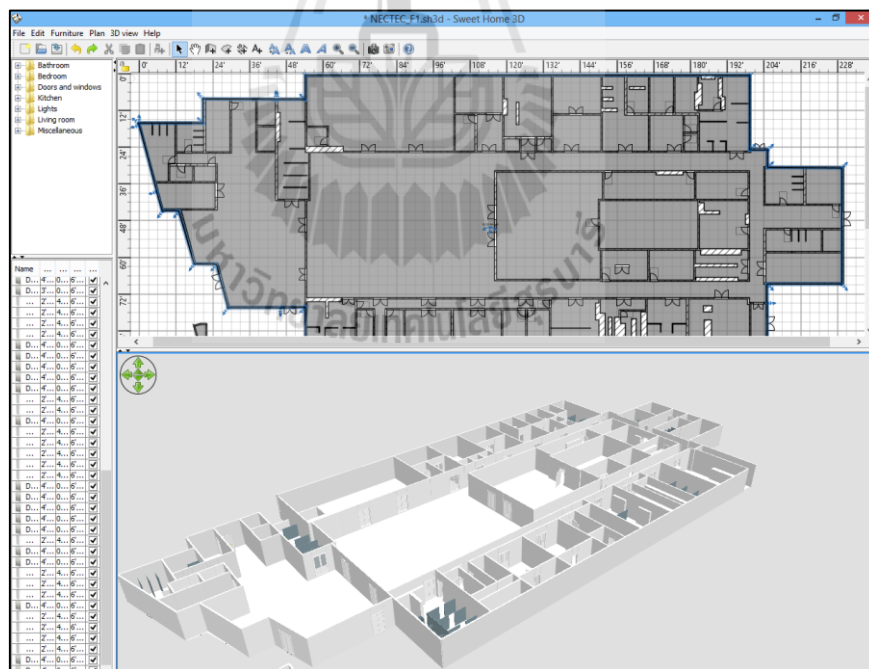
หมายเหตุ เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การพัฒนาเทคนิคที่ใช้ในการระบุตำแหน่งวัตถุ ดังนั้นกลไกการทำงานของขั้นตอนการระบุตำแหน่งของงานวิจัยนี้จึงยังไม่ถูกพิจารณา ด้วยเหตุนี้กระบวนการทำงานของระบบระบุตำแหน่งจึงยังไม่สามารถทำได้อย่างต่อเนื่อง (เช่น โนดวัตถุวัดค่าพารามิเตอร์และส่งต่อไปยังโปรแกรมประมวลผลแบบอัตโนมัติ)

โปรแกรมจำลองแผนที่ของอาคาร Sweet Home 3D ใช้สำหรับสร้างแผนที่ กำหนดโครงสร้างภายในของอาคาร เพื่อนำไปใช้ในการแสดงผลระบุตำแหน่งของวัตถุ ตัวอย่างหน้าต่างของโปรแกรมแสดงได้ดังรูปที่ ก.15

หมายเหตุ เนื่องจากพื้นที่ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจำนวนจำกัด ดังนั้นข้อมูล code คำสั่งของโปรแกรมควบคุม และ code กระบวนการทำงานของโปรแกรมประมวลผล เช่น code การทำงานของเทคนิคการระบุตำแหน่ง เป็นต้น รวมทั้งแผนที่ของอาคารที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะถูกเก็บไว้ใน CD ท้ายเล่มของวิทยานิพนธ์ (รายละเอียดของ CD สามารถดูได้จาก Readme.docx)



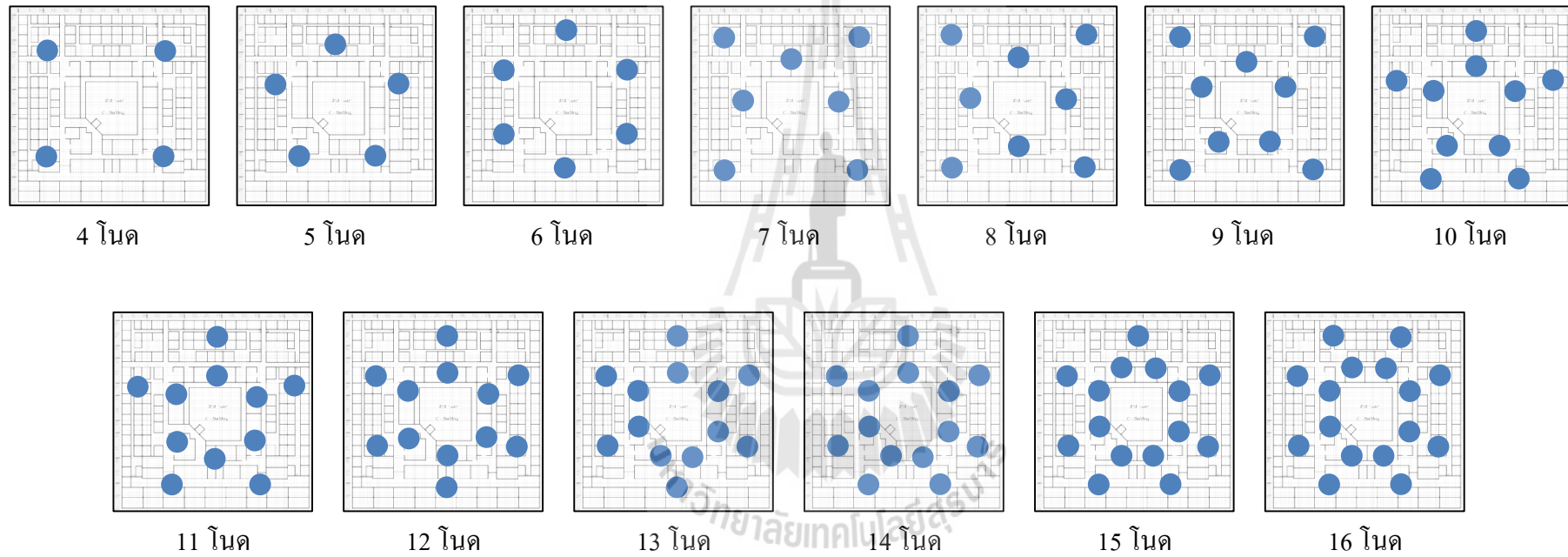
รูปที่ ก.14 โปรแกรม MATLAB



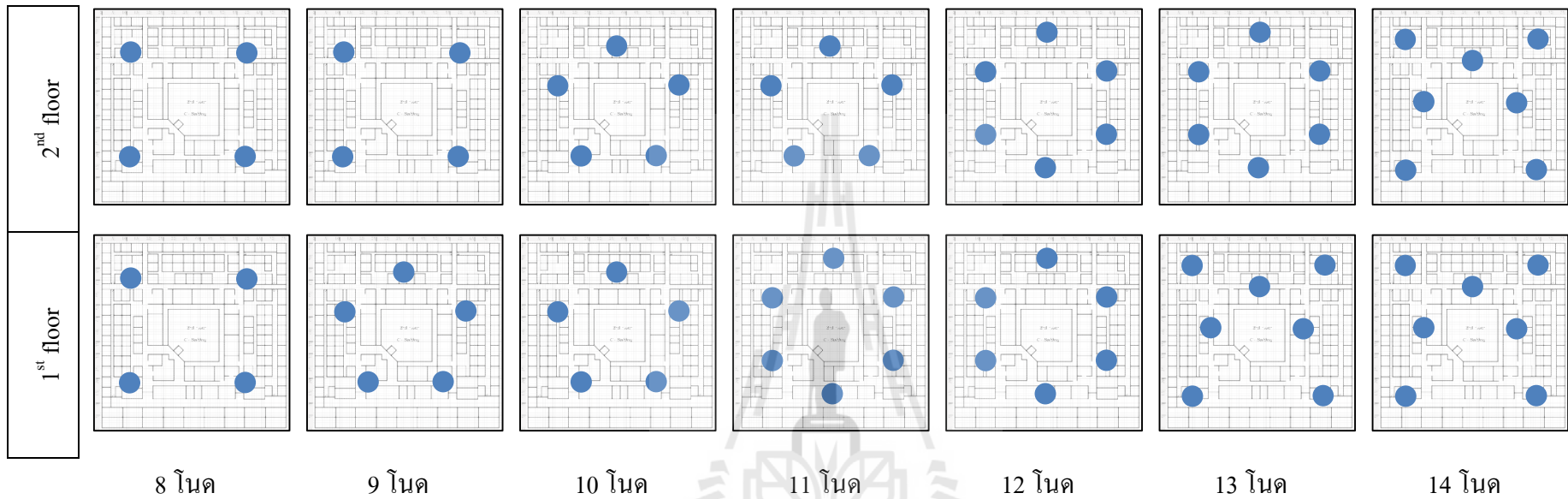
รูปที่ ก.15 โปรแกรม Sweet Home 3D

ก.3 ผลการออกแบบโครงสร้างระบบ

ก.3.1 การกำหนดตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงเริ่มต้น และค้นหาจำนวนโหนดอ้างอิงที่เพียงพอ

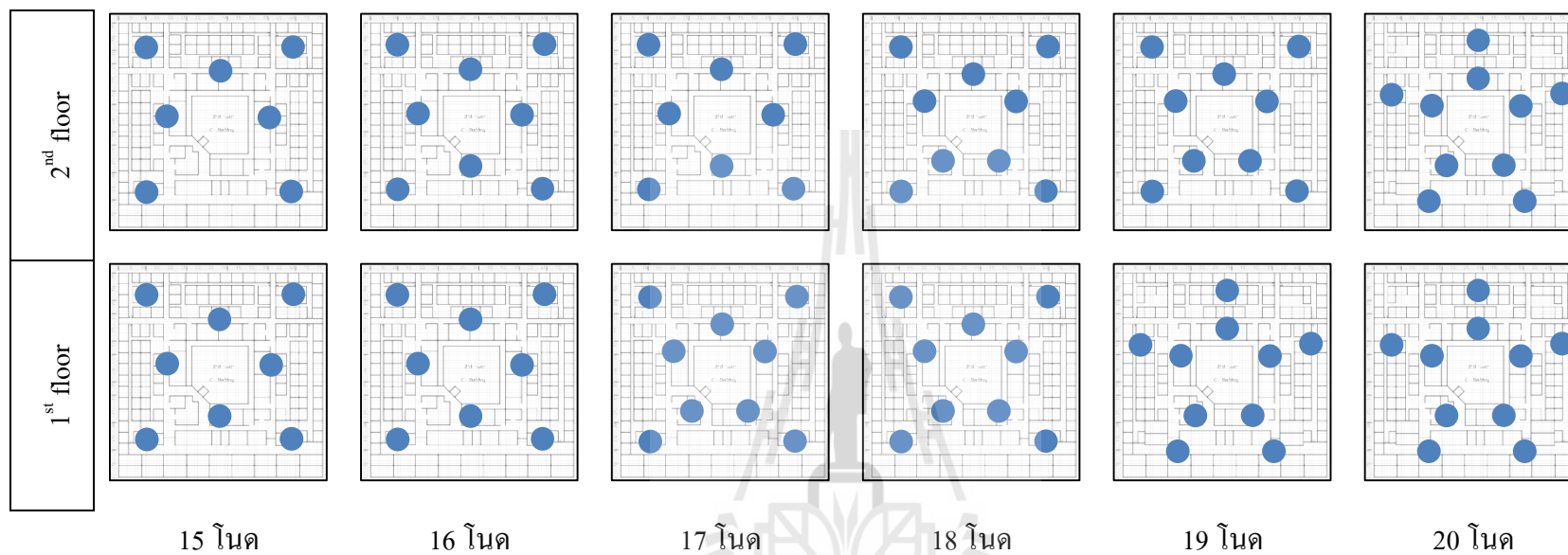


รูปที่ ก.16 ตัวอย่างตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงเริ่มต้นสำหรับอาคารวิชาการ (กรณี 1 ชั้น)



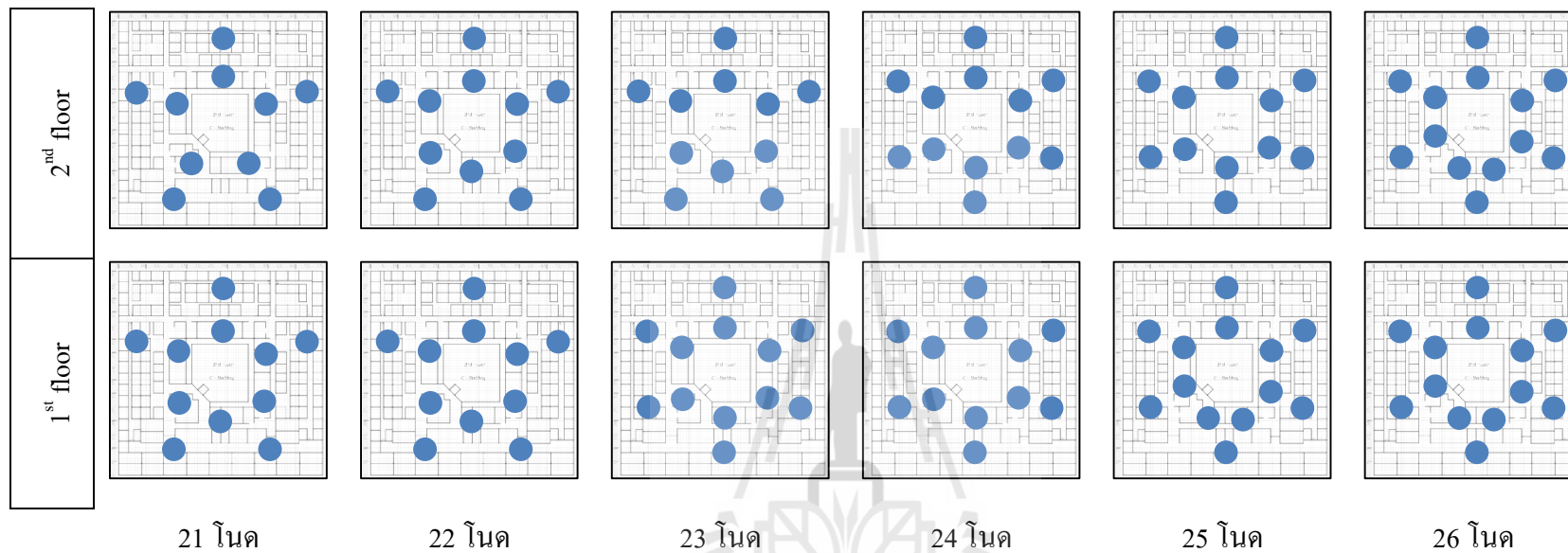
รูปที่ ก.17 ตัวอย่างตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงเริ่มต้นสำหรับอาคารวิชาการ (กรณี 2 ชั้น)



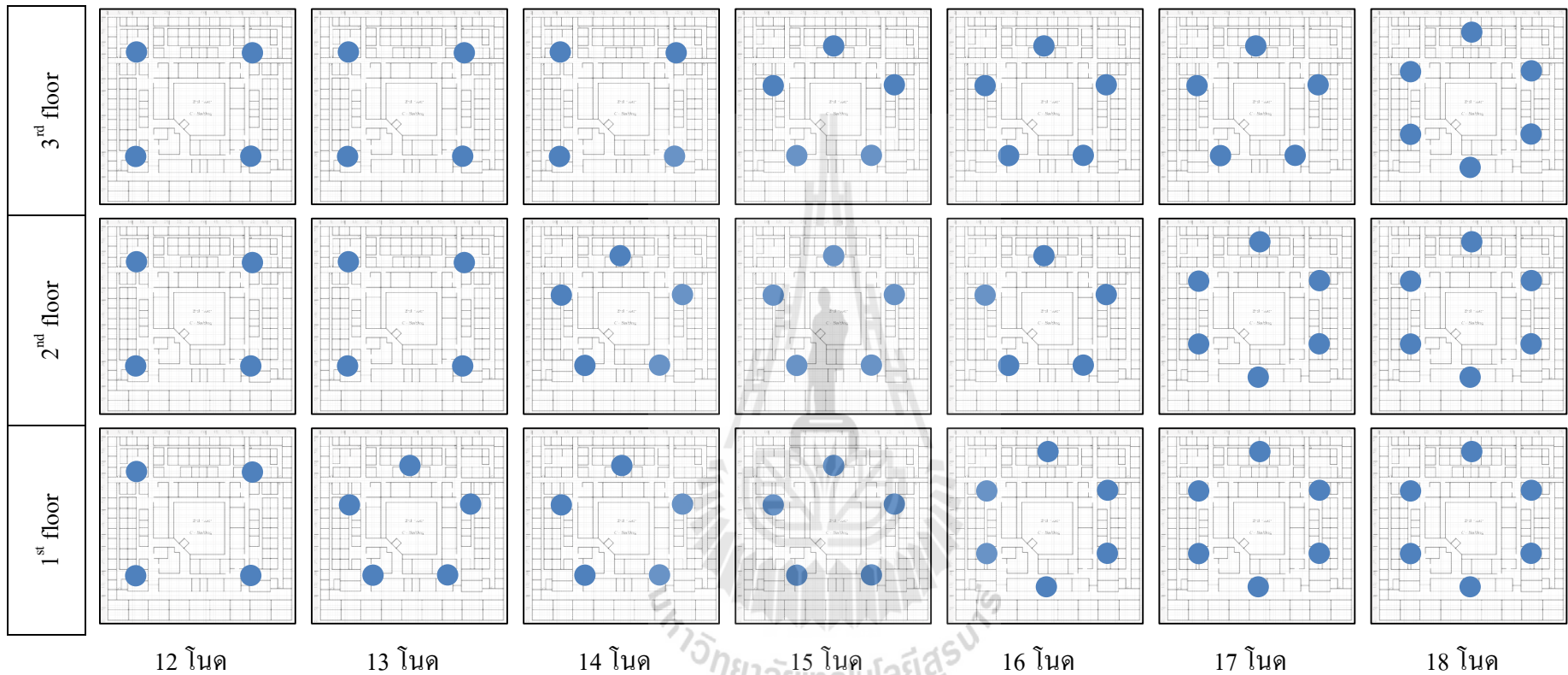


รูปที่ ก.17 ตัวอย่างตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงเริ่มต้นสำหรับอาคารวิชาการ (กรณี 2 ชั้น) (ต่อ)

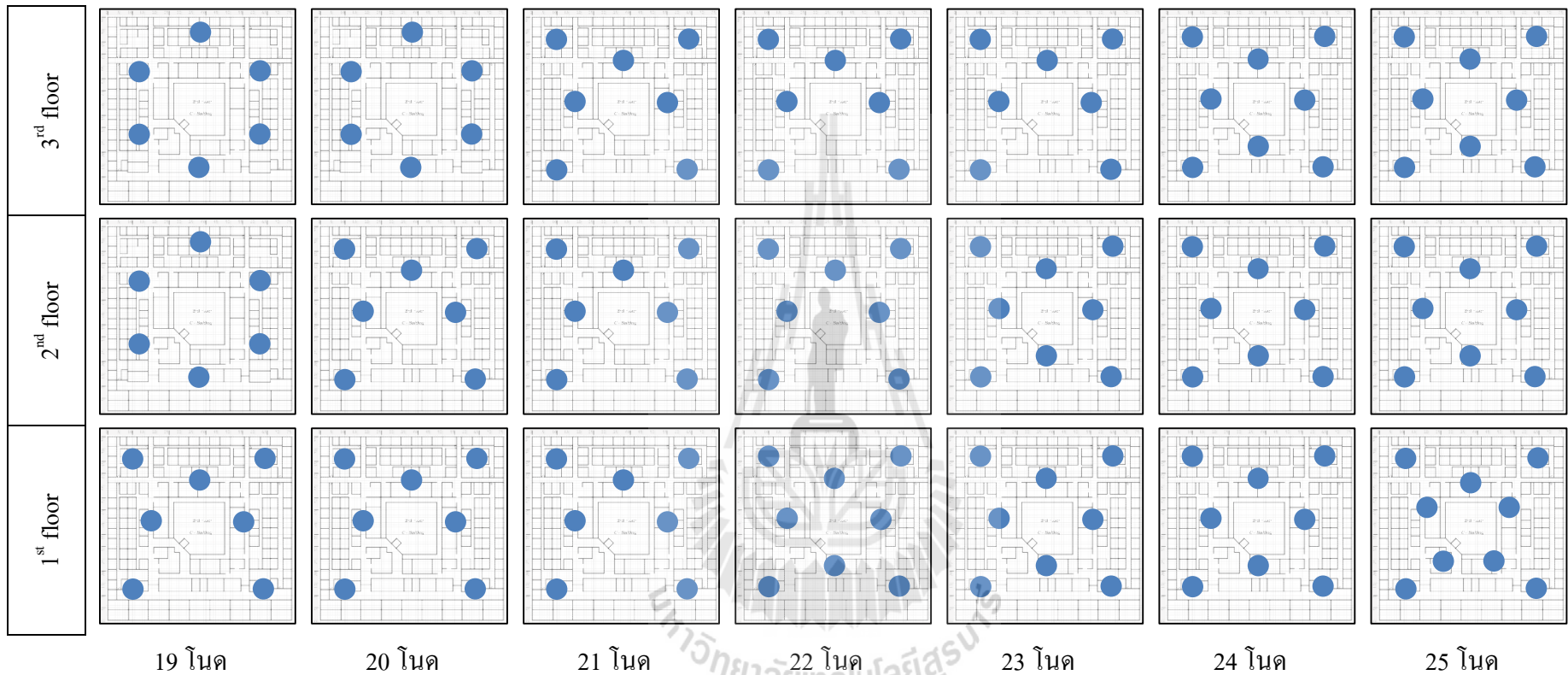




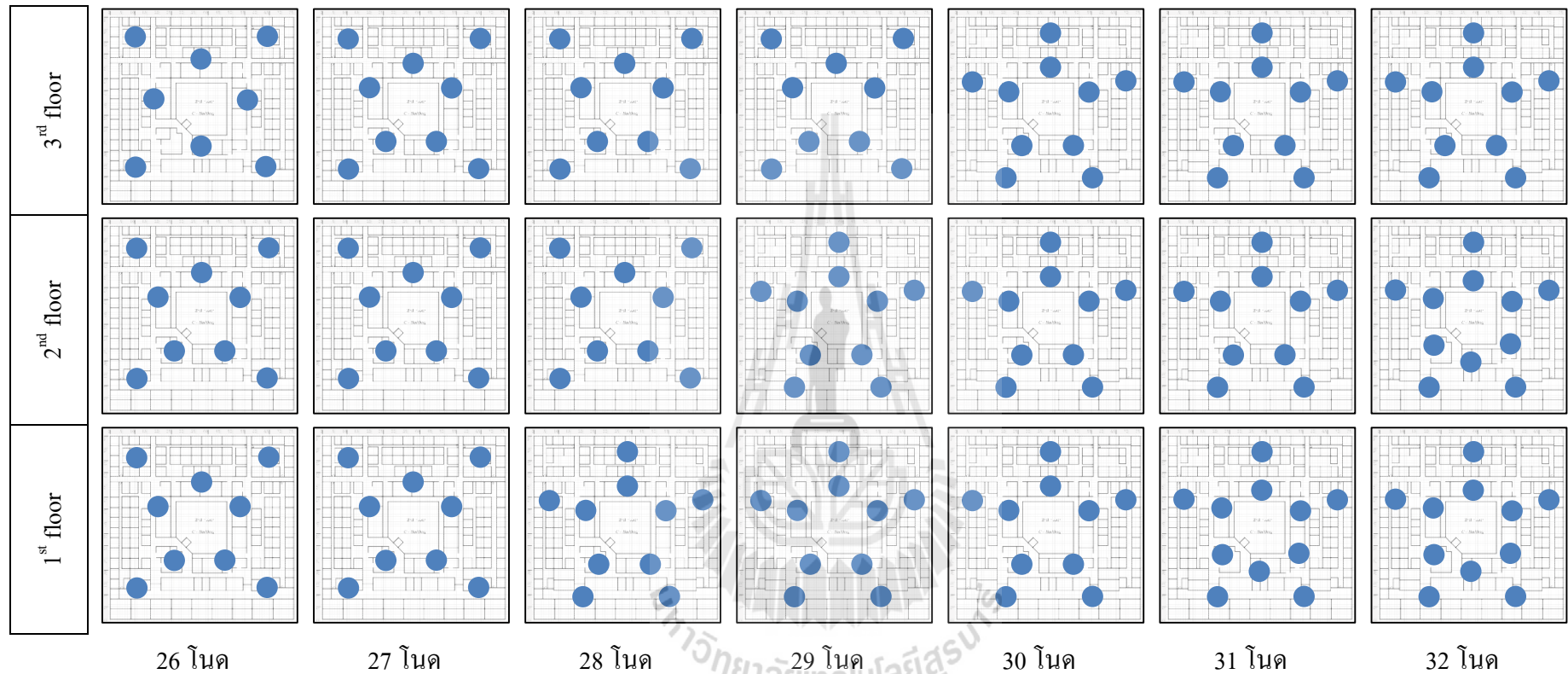
รูปที่ ก.17 ตัวอย่างตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงเริ่มต้นสำหรับอาคารวิชาการ (กรณี 2 ชั้น) (ต่อ)



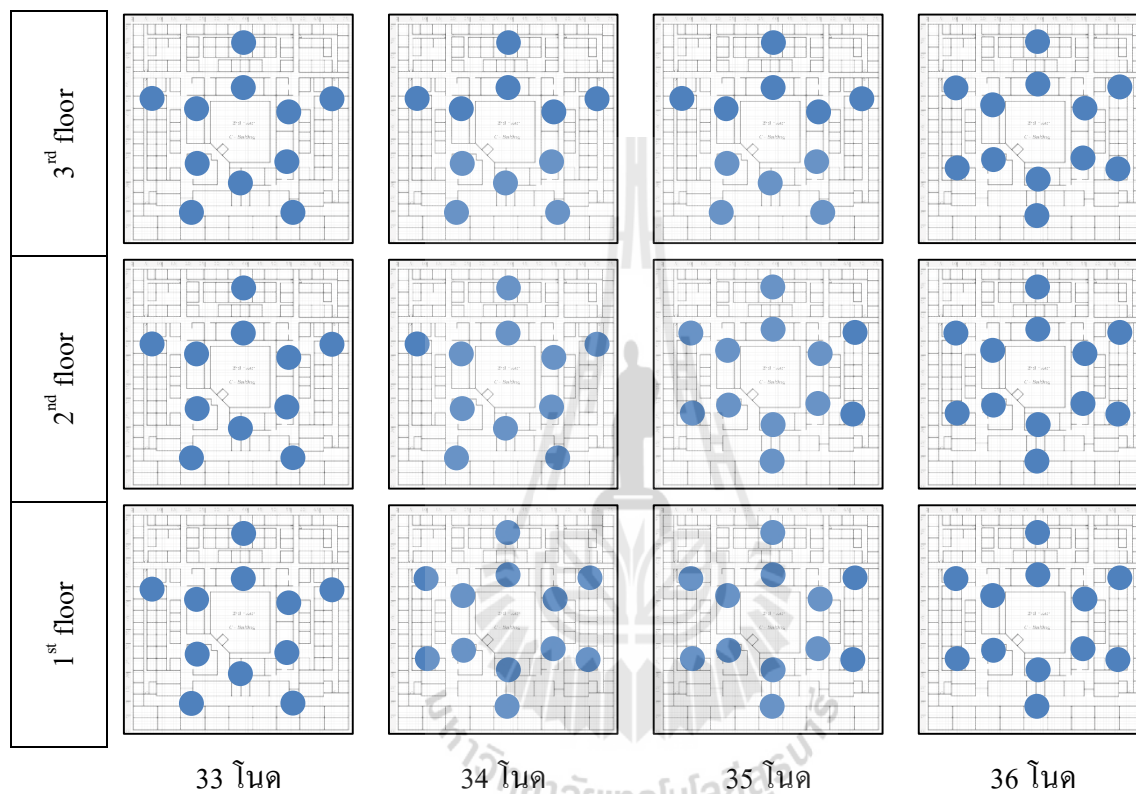
รูปที่ ก.18 ตัวอย่างตำแหน่งติดตั้ง โหนดอ้างอิงเริ่มต้นสำหรับอาคารวิชาการ (กรณี 3 ชั้น)



รูปที่ ก.18 ตัวอย่างตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงเริ่มต้นสำหรับอาคารวิชาการ (กรณี 3 ชั้น) (ต่อ)



รูปที่ ก.18 ตัวอย่างตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงเริ่มต้นสำหรับอาคารวิชาการ (กรณี 3 ชั้น) (ต่อ)



รูปที่ ก.18 ตัวอย่างตำแหน่งติดตั้งโหนดอ้างอิงเริ่มต้นสำหรับอาคารวิชาการ (กรณี 3 ชั้น) (ต่อ)



รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

- Maneerat, K., Kaemarungsi, K., and Prommak, C. (2016). **Robust Floor Determination Algorithm for Indoor Wireless Localization Systems under Reference Node Failure**, Mobile Information Systems.
- Maneerat, K. and Prommak, C., (2015). **Low complexity Wireless Indoor Positioning approaches based on fingerprinting techniques**, International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC).
- Maneerat, K. and Prommak, C., (2014). **An enhanced floor estimation algorithm for indoor wireless localization systems using confidence interval approach**, International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering, vol. 8, no. 7, pp. 1182-1186.
- Maneerat, K., Prommak, C and Kaemarungsi, K., (2014) **Floor Estimation Algorithm for Indoor Multi-story Positioning System using IEEE 802.15.4 Network**, Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON).

Research Article

Robust Floor Determination Algorithm for Indoor Wireless Localization Systems under Reference Node Failure

Kriangkrai Maneerat,¹ Kamol Kaemarungsi,² and Chutima Prommak¹

¹School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

²National Electronics and Computer Technology Center, NSTDA, Pathumthani, Thailand

Correspondence should be addressed to Chutima Prommak; cprommak@sut.ac.th

Received 15 July 2016; Accepted 15 September 2016

Academic Editor: Luis J. G. Villalba

Copyright © 2016 Kriangkrai Maneerat et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

One of the challenging problems for indoor wireless multifloor positioning systems is the presence of reference node (RN) failures, which cause the values of received signal strength (RSS) to be missed during the online positioning phase of the location fingerprinting technique. This leads to performance degradation in terms of floor accuracy, which in turn affects other localization procedures. This paper presents a robust floor determination algorithm called Robust Mean of Sum-RSS (RMoS), which can accurately determine the floor on which mobile objects are located and can work under either the fault-free scenario or the RN-failure scenarios. The proposed fault tolerance floor algorithm is based on the mean of the summation of the strongest RSSs obtained from the IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks (WSNs) during the online phase. The performance of the proposed algorithm is compared with those of different floor determination algorithms in literature. The experimental results show that the proposed robust floor determination algorithm outperformed the other floor algorithms and can achieve the highest percentage of floor determination accuracy in all scenarios tested. Specifically, the proposed algorithm can achieve greater than 95% correct floor determination under the scenario in which 40% of RNs failed.

1. Introduction

Nowadays, there are several indoor location services available for a wide range of applications such as those in commercial, agriculture, medical, and military uses [1–3]. Wireless communications are the major driving force of the development of such indoor location services. Various wireless technologies can be employed for indoor positioning systems. Some systems make use of an existing wireless network infrastructure such as Wi-Fi [4–6], Bluetooth [7], and the visible light communication (VLC) [8]. More flexible and efficient systems employ IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks (WSNs), providing advantages in terms of low power consumption, light weight, and low cost [9].

Existing indoor localization systems can be classified into three types based on the structure of the service areas. These include the indoor localization systems for two-dimensional service areas, three-dimensional service areas, and multistory

buildings [10]. Most of the existing systems are designed for usage in two-dimensional areas where the position of a target object is specified by coordinates (x, y) [10–12]. The second type of indoor positioning system considers a three-dimensional space wherein the location of each target is derived from multiple coordinates $(x, y, \text{ and } z)$. The systems in the second type are usually applied in particular fields such as those in the industrial applications [13]. Recently, the indoor positioning systems for multistory buildings have gained more attention. Such systems need to specify not only coordinates (x, y) but also the floor on which the object is located [14–18].

Most researches related to indoor positioning systems focus on either the development of the positioning techniques for improving the performance or the study and characterization of the unique properties of parameters such as the received signal strength (RSS) [10, 19]. There are only a few works considering failure scenarios of RNs, which are

the main equipment of the systems. In [20], the authors studied the robustness of the location determination when the system encountered a random failure of RNs. Under the RN-failure scenarios, their experiment results showed that the positioning accuracy could drop from 10% to 50% when approximately 50% of RNs failed in the system. Other related works consider the robustness of the positioning systems against variation of RSSs [21] and changes to the service environments such as furniture [22] and service times [23].

Although some existing works have studied the degradation of the positioning performances due to RN failure and have considered the robustness of the systems against the changes of some parameters, the literature still lacks a floor determination algorithm that is robust in a situation when some RNs in the system fail. Such an algorithm is an important part of the localization technique for the complex indoor environment of the multistory building. Therefore, this paper aims to present a floor determination algorithm that can reliably identify the floor on which the object is located under various RN-failure scenarios. Our contributions are summarized as follows:

- (i) We propose a floor determination algorithm which will serve as an important function of the indoor localization techniques for multistory buildings. The proposed algorithm is called the Robust Mean of Sum-RSS (RMoS) floor algorithm. It does not require the fingerprint database and can achieve the highest percentage of correct floor determination when compared to other existing techniques.
- (ii) The proposed RMoS floor algorithm is robust against all of our tested *RN-failure scenarios*. It can work under either the *fault-free scenario* or the partial *RN-failure scenarios*. It can achieve greater than 95% correct floor determination under the scenario in which 40% of RNs failed.

The remainder of this paper is organized into six sections as follows. In Section 2, we briefly summarize existing works on floor determination techniques. Section 3 provides an introduction to the RN-failure scenario and explains our proposed robust floor determination algorithm. Section 4 describes the experimental environment, the wireless transceivers, and the setup parameters in this work. Section 5 presents the experimental results and discussion. Finally, Section 6 concludes the paper.

2. Existing Floor Determination Techniques

In wireless indoor positioning systems for multifloor buildings, the positioning error of a target within the two-dimensional plane might mean a false room or error distance of a few meters. On the other hand, the false floor determination could mean the incorrect detection of the target on a car parking floor instead of an office floor. Therefore, the problem of floor determination is another important issue for the positioning applications besides the target's coordinates.

RN failures during the online positioning phase cause RSS values to be missed. This can greatly affect the operations

of the positioning systems such as the computational procedures and the signal sharing process in cooperative localization [24]. These failures can lead to accuracy performance degradation and a lack of system reliability [25]. Thus, a robust floor determination technique is required in order to achieve reliable indoor multifloor positioning systems that can provide high positioning accuracy under unexpected situations such as RN failures. In current literature, there are only a few papers considering the robustness of multifloor positioning systems, while the fault tolerance for the floor determination technique in terms of the presence of node failures has not been studied.

In [16, 17], the authors proposed floor determination algorithms that considered the movement of objects across the floors. In [16], the authors studied robots moving between floors by using incorporative information from the pressure sensor and the Wi-Fi access points (APs). Their floor determination algorithm is based on the RSS received from the APs that utilize a Maximum Likelihood (ML) to estimate the floor location of the robots. The authors in [17] presented the technique to estimate the robot position in each floor by using gyroscopes for recognizing the robot motion status on the stairs. However, these works only focused on the tracking of the floor changing when the robots moved in the staircase. Particularly, they did not consider the robustness in terms of faulty RNs during the online positioning phase. This reason has motivated our work to develop a floor determination algorithm to extend the capability of the indoor positioning systems to be able to handle situations where some RNs fail.

Existing floor determination approaches can be classified into two major types based on the use of the location fingerprint database: floor determination using the location fingerprint database and floor determination without the use of the location fingerprint database. For the approach that uses the fingerprint database, the system performance will depend on the number of the fingerprint locations which will require more steps and time for collecting the RSS data at the fingerprint locations in the offline phase [19]. In contrast, the approach that does not require the fingerprint locations has the advantage that it does not require the collection of the RSS data to create a database of floors in the offline phase. The system performance of the latter approach will depend on the calculation mechanism of the floor determination technique in the online phase only.

To evaluate the performance of the proposed floor determination algorithm, we compare our proposed algorithm with the other techniques in the literature, both those that use and those that do not use the location fingerprint database. The algorithms that use the fingerprint database in the floor determination process include the nearest floor algorithm [14] and Lui's floor algorithm [15]. Another algorithm that does not use the fingerprint database in the floor determination process is the group variance algorithm [14]. Brief descriptions of these three floor determination algorithms are presented as follows.

2.1. Nearest Floor Algorithm [14]. This algorithm is based on the *K*-Nearest Neighbor (KNN) algorithm. It requires

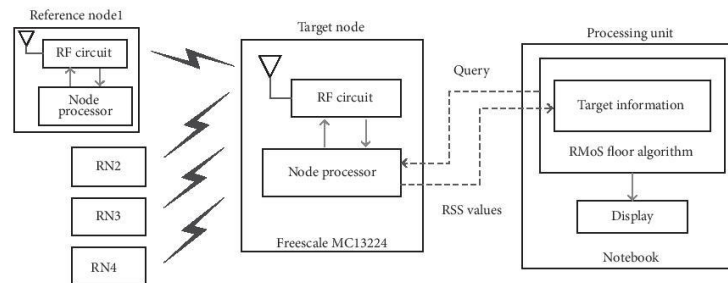


FIGURE 1: Block diagram of the main components in the indoor positioning systems.

collection of the RSSs in an offline phase in order to create the fingerprint database. This database records the information including the reference identification, the MAC address of the APs, the floor number, and the maximum RSS. To determine the floor number, the algorithm will compare the strongest online scanned RSS with the value in the fingerprint database. Then, the algorithm selects k APs ($k = 3$) with the closest RSS values and applies the KNN algorithm to select the best matched floor number from the fingerprint database.

2.2. Lui's Floor Algorithm [15]. Lui's floor algorithm also requires the fingerprint database. This algorithm computes an average signal distance between the RSS value recorded in the fingerprint database and the online scanned RSSs. Then, the algorithm selects the floor on which the object is located from the minimum average signal distance.

2.3. Group Variance Algorithm [14]. This algorithm does not use the fingerprint database. It considers the distribution of the RSS values in each floor. It takes into account three online statistical parameters obtained from each AP, which consist of the range, the variance, and the availability. The algorithm adds weighted values based on the specified criteria to determine the floor scores, called floor points. After comparing the floor points, the algorithm selects the estimated floor number with the highest floor points.

3. The RMoS Floor Algorithm

This section describes our proposed floor determination algorithm for multistory buildings. First, in Section 3.1, the structure of the main components in the indoor positioning systems is described. Then, in Section 3.2, we describe our fault tolerance floor determination algorithm, which is called the Robust Mean of Sum-RSS (RMoS) floor algorithm and is enhanced from our previous floor determination technique presented in [18]. The RMoS floor algorithm does not require the fingerprint database, which consumes a lot of time for RSS data collection. Our proposed algorithm utilizes only the

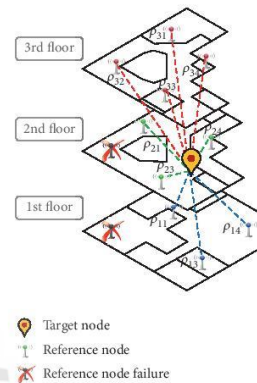


FIGURE 2: Floor determination schematic diagram.

online scanned RSS values received from the RNs in order to determine the floor location of the target node.

3.1. Structure of Indoor Positioning Systems. The main components of the indoor positioning systems used in this work are shown in Figure 1. They include the reference nodes (RNs), the target node, and the processing unit. The reference nodes are wireless transceivers that will send out signals upon request from the target node. The position of each reference node is known to the processing unit. The target node has a mobile wireless transceiver that helps determine on which floor number the target node is situated. The target node will query signals from the reference nodes. Then, it passes the signal information to the processing unit where the floor determination algorithm is executed.

Figure 2 illustrates an example of the structure of the indoor positioning system in a three-story building under the

Input: Specify $\Gamma, F, N_f, x\%$, the initial value of c
Output: Floor number on which the target node is situated at the confidence level c

- (1) The target node scans for RSS sent from the reference nodes.
(Begin the floor determination step)
- (2) Repeat
- (3) Repeat
- (4) Compute the RSS summation $\gamma_f^r = \sum_{n \in \mathfrak{R}_f} \rho_{fn}^r$
- (5) Until $\tau = \Gamma$
- (6) Set $\Lambda_f = \{\gamma_f^1, \gamma_f^2, \dots, \gamma_f^r, \dots, \gamma_f^F\}$
- (7) Until $f = F$
- (8) Set the confidence level $c =$ the specified initial value
- (9) Calculate $\Phi(\Lambda_f)$ with $\%CI = c$ for all $f \in \Psi$
- (10) If $\Phi(\Lambda_f)$ of any floor is overlapped
- (11) Repeat
- (12) Reduce the confidence level c
- (13) Calculate $\Phi(\Lambda_f)$ with $\%CI = c$ for all $f \in \Psi$
- (14) Until no overlap of $\Phi(\Lambda_f)$
- (15) c is the $\%CI$ of sum of the strongest RSS from \mathfrak{R}_f for all $f \in \Psi$
- (16) The floor where the target node is located is associated with the floor that has the highest $\Phi(\Lambda_f)$ at the confidence level c .
floor = $\arg \max_f (\Phi(\Lambda_f))$ at the confidence level c

ALGORITHM 1: Pseudo code for RMoS floor algorithm.

RN-failure scenario in which two RNs fail. In this diagram, four RNs are installed on each floor. Dashed lines represent RSSs that the target node receives from all RNs.

In Figure 2, one RN on the 1st floor and another RN on the 2nd floor become unavailable. This may be caused by hardware failures, software errors, or other faults. Hence, the online scanned RSSs of the target node would not have signals from these RNs.

3.2. Framework of RMoS Floor Algorithm. Our proposed algorithm determines the floor number of the target node based on the summations of the online scanned RSSs that the target node received from the working RNs in the building. In order to handle the fluctuation nature of the indoor wireless signal, the concept of the confidence interval comparison [26] is adopted in the RMoS floor algorithm. Specifically, RMoS compares the confidence intervals for the mean of the RSS summations. The following describes how the RMoS floor algorithm works.

The following list defines the parameters used in our proposed algorithm. Algorithm 1 describes the pseudo code of the RMoS floor algorithm. The procedures are as follows. First, the target node scans for the RSSs sent from RNs installed in the multifloor building. A set of sampled RSS values and the reference node IDs of each RSS value are recorded as the input data vector for the floor determination step. During the RSS scanning procedure, the signal from each RN is scanned and recorded for Γ samples. The number of samples (Γ) is selected such that it is not too small that it becomes insignificant in the statistics and it is not too large that it would require too much time to collect the data. The sampling rate depends on the capability of the wireless transceiver to respond to the signal query. In the case that the

number of samples is less than 30, the t -distribution is applied in the confidence interval calculation [26]. Otherwise, the normal distribution should be utilized [26].

List of the Parameter Definitions

Λ_f : a set of the summations of the strongest RSSs on the f th floor $\{\gamma_f^1, \gamma_f^2, \dots, \gamma_f^r\}$

Ψ : a set of floors in the service areas $\{1, 2, \dots, F\}$

\mathfrak{R}_f : a set of $x\%$ of RNs on the f th floor that gives the strongest RSS values

$x\%$: the percentage of RNs that would be considered on each floor in the floor determination step

$\Phi(\cdot)$: the confidence interval for the mean of the RSS summations

γ_f^r : the summation of the RSSs that the target node receives from \mathfrak{R}_f

ρ_{fn}^r : the RSS value which is r th measurement from n th RN on the f th floor

N_f : maximum number of RNs on the f th floor

Γ : the number of RSS samples

F : the total number of floors in the multistory buildings

L_f : the lower limit of the confidence of the population mean on the f th floor

U_f : the upper limit of the confidence of the population mean on the f th floor

μ : the population mean

σ^2 : the sample standard deviation
 η : the sample mean
 c : the confidence level (i.e., 95% or 90%)
 β : a significance level (i.e., 0.05 or 0.1)
 $1 - \beta$: the confidence coefficient
 $t_{[1-(\beta/2), \Gamma-1]}$: the $(1 - (\beta/2))$ -quantile of t -distribution and Γ samples

In the floor determination step, first the RSS summation γ_f^r is computed by using (1). For the r th sampling, γ_f^r is the summation of RSSs received from RNs in \mathfrak{R}_f , where \mathfrak{R}_f is the set of $x\%$ of RNs on the f th floor that gives the strongest RSS values. The variable ρ_{fn}^r denotes the online scanned RSS which is scanned in the r th sampling and it is the signal received from n th RN which is on the f th floor. Note that $n = 1, 2, \dots, N_f$, where N_f is the maximum number of RNs on the f th floor. Ψ is the set of floors in the service areas.

$$\gamma_f^r = \sum_{n \in \mathfrak{R}_f} \rho_{fn}^r. \quad (1)$$

Next, a set $\Lambda_f = \{\gamma_f^1, \gamma_f^2, \dots, \gamma_f^c, \dots, \gamma_f^\Gamma\}$ is obtained. (Λ_f is a set of the RSS summations on f th floor for Γ number of RSS samples.) After that $\Phi(\Lambda_f)$, which is the confidence interval (L_f, U_f) for the mean of the RSS summations on each floor, is calculated by using

$$p(L_f \leq \mu \leq U_f) \approx 1 - \beta, \quad (2)$$

where L_f is the lower limit, U_f is the upper limit, and $1 - \beta$ is the probability that the population mean of RSSs (μ) will lie between L_f and U_f . They are calculated by using (3) to (5), respectively.

$$L_f = \eta(\Gamma) - t_{[1-(\beta/2), \Gamma-1]} \sqrt{\frac{\sigma^2(\Gamma)}{\Gamma}}, \quad (3)$$

$$U_f = \eta(\Gamma) + t_{[1-(\beta/2), \Gamma-1]} \sqrt{\frac{\sigma^2(\Gamma)}{\Gamma}}, \quad (4)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{c}{100} \right). \quad (5)$$

Note that (3) and (4) are used to determine the lower limit L_f and upper limit U_f of the sample values of the RSS summations at $c\%$ confidence level. η refers to the sample mean of RSS summations. σ^2 is the sample standard deviation and $t_{[1-(\beta/2), \Gamma-1]}$ is the $(1 - (\beta/2))$ -quantile of t -distribution and Γ samples [26].

Finally, to determine the floor number where the target node is situated, the proposed RMoS floor algorithm compares the confidence intervals $\Phi(\Lambda_f)$ over all floors in Ψ . Then, RMoS selects the floor number that has the highest value of $\Phi(\Lambda_f)$ as the floor where the target node is situated. This can be written in

$$\text{floor} = \arg \max_f (\Phi(\Lambda_f)). \quad (6)$$

TABLE I: Setup parameters.

Parameter	Detail
Floor dimensions	35 m. \times 35 m (Building A), 75 m \times 75 m (Building B)
RN placement	Uniform placement
Test points	Total of 75 test points (15 test points/floor)
Number of RNs	Total of 20 nodes (4 nodes/floor)
Test scenario	Fault-free and RN failures
RN failures pattern	20 failure patterns are random for each RN failure scenario

4. Experimental Setups

The performance of the proposed RMoS floor algorithm is evaluated through extensive experiments and the results are compared with other existing floor algorithms. In particular, the results are compared with two approaches of floor determination algorithms. The first approach uses the fingerprint database in the floor determination process. The existing floor determination algorithms in this approach that are compared with our proposed algorithm include the nearest floor algorithm [14] and Lui's floor algorithm [15]. The other approach compared here does not use the fingerprint database in the floor determination process. The existing algorithm in this approach that is compared with our proposed algorithm is the group variance algorithm [14]. The reason that we compare our proposed algorithm with the two approaches (with/without fingerprint database) is to evaluate and analyze how each approach performs in different network scenarios.

In our experimental study, two five-story buildings with different floor structures and with different dimension areas are tested. The first building, labelled Building A, is a library with dimensions of approximately 35 m (width) \times 35 m (length). The second building, labelled Building B, is an office building with dimensions of about 75 m (width) \times 75 m (length). The floor layouts of both buildings are illustrated in Figures 3 and 4, respectively. Twenty RNs were deployed in both service areas. Four RNs were installed uniformly on each floor as shown in Figures 3(b) and 4(b). Fifteen test points were randomly selected on each floor by using the uniform random function of MATLAB (i.e., a total of 75 test points) to analyze the performance of the floor determination algorithms. The setup parameters for the experiment are summarized in Table I.

In order to handle the situations of signal unavailability due to RN failure, we did not use RSS values received from all RNs in the system for the summation of RSSs, but instead only the strongest RSS values received from all RNs located on each floor are considered. From preliminary testing, we found that considering which 50% of RNs on each floor give the strongest RSS values (i.e., $x = 50\%$) is suitable for the RSS summations under RN failure.

Figure 5 illustrates the experimental equipment installed on each floor. This includes four RN nodes which are placed at a height of 2 m. The target node is connected to a computer

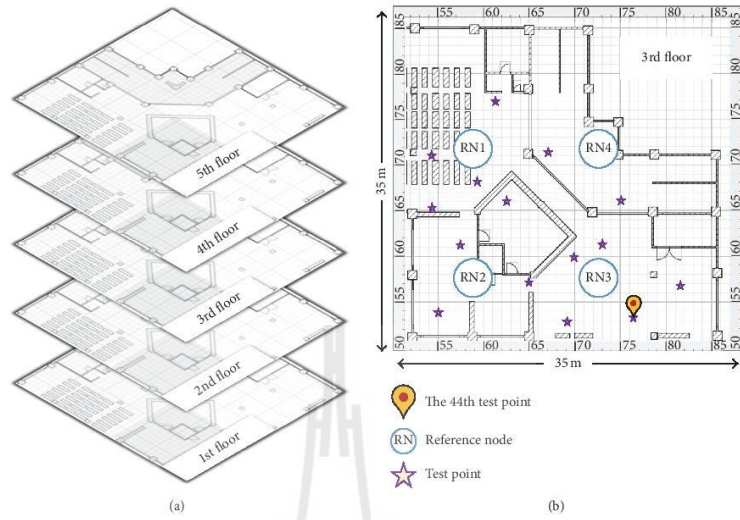


FIGURE 3: Building A. (a) The five-story structure. (b) Floor plan and example of 15 test points labelled with stars on the 3rd floor.

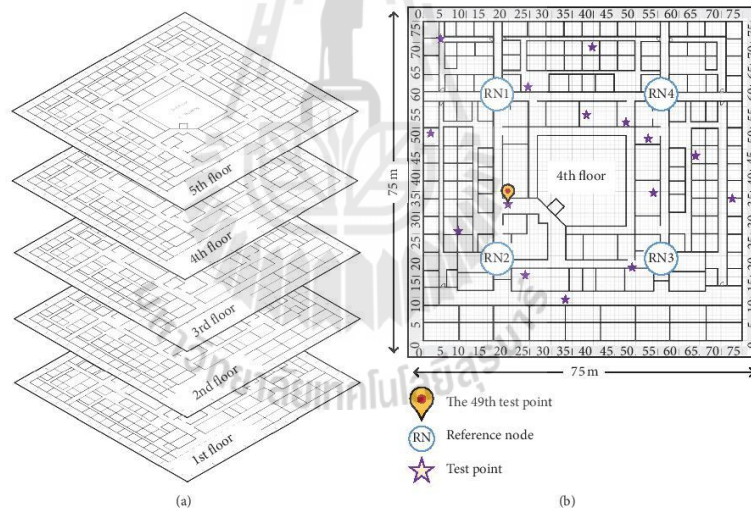


FIGURE 4: Building B. (a) The five-story structure. (b) Floor plan and example of 15 test points labelled with stars on the 4th floor.

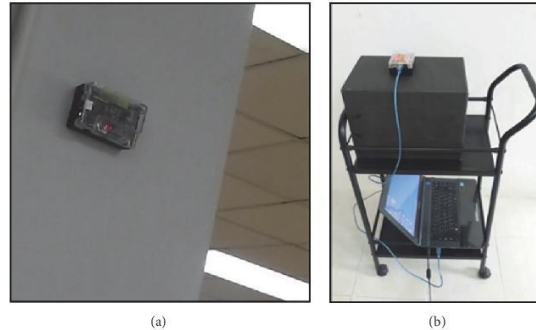


FIGURE 5: Experimental equipment in this work. (a) Reference node. (b) Target node.

TABLE 2: Specifications of the wireless transceivers.

Specification	Detail
Manufacturer	Freescall
Chipset	MC13224V
Frequency range	2.405 GHz–2.480 GHz
Operating channel	CH 26 (2.480 GHz)
Rx sensitivity	−95 dBm
Transmit power	+3 dBm
Antenna	Inverted F-antenna

notebook on which the floor determination algorithm is executed. The height of the target node is 0.8 m. IEEE 802.15.4 wireless transceivers were deployed in this work. They have Freescale MC13224V third-generation chipsets with built-in ARM7TDMI processors. The antennas of the wireless transceivers are the inverted F-shape antennas and different sets operate at 2.480 GHz (i.e., channel 26 of IEEE 802.15.4 standard). This is to avoid or minimize the interference from Wi-Fi networks in the areas. The target node will gather the RSS values that are transmitted from the RNs. Those measured RSS values are used to calculate the floor number of the target node. The sampling rate of wireless transceivers in this work is 1 sample in 3 seconds. Note that we consider the stationary node in our experimental study. Table 2 shows specifications of the wireless transceivers used in our experiments.

Two different scenarios were considered in our experiments. The first scenario is a *fault-free scenario* in which all RNs worked properly. The second scenario is *RN-failure scenario* in which some RNs in the system fail. In particular, we randomly turned off two and eight RNs in the system under the condition that the number of failed RNs on each floor did not exceed 50% of the total number of RNs on that floor (i.e., in this study, the maximum number of failed RNs on each floor is two nodes).

5. Results and Discussion

5.1. Fault-Free Scenario. The experiments in this scenario consider that all RNs in the service area work properly. The study is organized into two sets of experiments. First, Section 5.1.1 aims to analyze the characteristics of the summation of RSSs that the target node receives from RNs installed on each floor. Then, Section 5.1.2 aims to compare the performance of the proposed algorithm with that of other existing floor determination techniques in the case of no RN failure.

5.1.1. Analysis of RSS Summation Characteristics. First, we analyze the characteristics of the RSS summations at a particular point. Consider the 44th test point located on the third floor of Building A and consider the 49th test point located on the fourth floor of Building B as indicated by the yellow symbol in Figures 3(b) and 4(b), respectively. In both cases, $F = 5$, $N_f = 4$, $x = 50\%$, and $T = 20$. (Note that it would take approximately one minute to collect 20 samples.)

From all RNs in the online RSS system, we recorded 20 samplings that were received at the 44th and 49th test points. For each sampling r th, 20 RSS values received from all RNs in the system were recorded and denoted by $p_{f,n}^r$ (f represents the floor number of the n th RN that transmitted a particular RSS value.) Then, γ_f^r (the summation of the strongest RSSs received from 50% of RNs located on the f th floor for the r th sampling) was calculated by using (1). Finally, we obtained 100 values of the RSS summations for 20 signal samplings (i.e., for each r th sampling, $\gamma_1^r, \gamma_2^r, \dots, \gamma_5^r$ were computed).

Figures 6(a) and 6(b) are the histogram plots of the RSS summations at the 44th test point of Building A and the 49th test point of Building B, respectively. In the histogram, each color represents a summation of RSSs received from RNs located on each floor. In the case of the 44th test point of Building A, we can observe from Figure 6(a) that the RSS summations of the green bins (the summation of RSSs received from RNs on the third floor) are greater than those

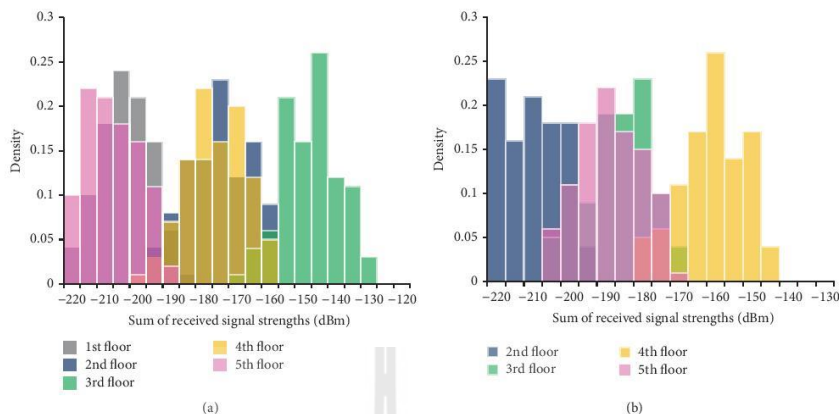


FIGURE 6: Histogram of the RSS summation in the fault-free scenario at (a) the 44th test point located on the third floor of Building A and (b) the 49th test point located on the fourth floor of Building B.

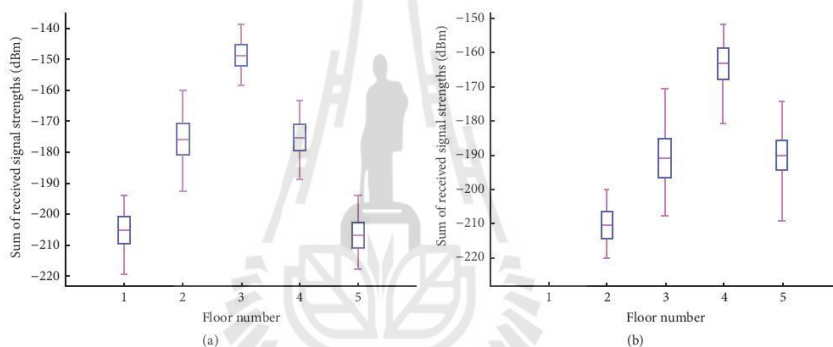


FIGURE 7: 95% confidence interval for the mean of the RSS summations in the fault-free scenario at (a) the 44th test point located on the third floor of Building A and (b) the 49th test point located on the fourth floor of Building B.

of the other bins. This indicates that the summations of RSSs received from RNs located on the third floor (which is the floor where the test point was located) are stronger than those received from RNs located on the other floors. The same results can be observed in the case of the 49th test point of Building B (Figure 6(b)) in which the RSS summations of the yellow bins are the strongest. This indicates that the 49th test point is located on the fourth floor. Note that in Figure 6(b) there is no bin of the summation of RSSs received from RNs on the first floor because signals from RNs on the first floor could not reach the 49th test point, which was located on the fourth floor. These characteristics of the RSS summations

observed from this study are applied in our proposed RMoS floor algorithm as described in Section 3.

Figures 7(a) and 7(b) illustrate a 95% confidence interval for the mean of the RSS summations on each floor for Building A and Building B, respectively. The confidence interval is shown by a box stretching between the lower and upper confidence limits. The pink line in the box indicates the sample mean. From Figures 7(a) and 7(b), it is clear that the confidence interval for the mean of the RSS summations on the actual floor where the target node was located is higher than that of the other floors (i.e., $\Phi(\Lambda_3)$ and $\Phi(\Lambda_4)$ are highest for the case of Building A and Building B, resp.). In

both cases, there is no overlap between the highest confidence intervals and the rest of the confidence intervals. This shows that the sample values of the RSS summations on both target floors are significantly higher than those of the other floors at a 95% confidence level. Therefore, the proposed RMoS floor algorithm correctly reports that the target node is on the third floor for Building A and the fourth floor for Building B. Note that in Figure 7(b) there is no confidence interval of the mean of the RSS summations on the first floor because the target node could not receive a signal from the RNs on the first floor.

5.1.2. Performance Comparisons under Fault-Free Scenario. This section aims to compare the proposed RMoS floor algorithm with other existing techniques under the normal operating scenario where all RNs work properly. In particular, the proposed algorithm was compared with the nearest floor algorithm [14], the group variance algorithm [14], and Lui's floor algorithm [15]. The performance of the floor determination algorithms was evaluated by the percentage of the correct floor determination. The experiments were set up as described in Section 4. Additionally, to compare the RMoS floor algorithm with the other algorithms that use the fingerprint database, we consider the effects of using different numbers of fingerprint locations. In particular, three different settings of fingerprint locations were considered: 10, 30, and 50 locations. They were selected uniformly across the service area.

Figures 8(a) and 8(b) compare the percentages of the correct floor determination among four floor determination algorithms for Building A and Building B, respectively. The results show that the proposed RMoS floor algorithm outperforms the other three algorithms and yields a 100% correct floor determination for all cases of the fingerprint setting in both buildings. The reason is that RMoS does not use the fingerprint database in the floor computing procedures but it utilizes only the online RSSs that the target node receives from RNs in the building. The RMoS floor algorithm determines the floor number based on the value of the confidence interval of the RSS summations as demonstrated in Section 5.1.1.

The nearest floor algorithm and Lui's floor algorithm, on the other hand, use the fingerprint database in the floor determination process. Consequently, from Figure 8, it can be observed that the performances of the nearest floor algorithm and Lui's floor algorithm are dependent on the number of fingerprint locations, whereby a higher number of fingerprint locations yield higher percentages of correct floor determination. The nearest floor algorithm yields the lowest percentage of correct floor determination at 24% and 25.3% for the case of 10 fingerprint locations for Building A and Building B, respectively. However, the nearest floor algorithm in the case of Building B was able to obtain a 100% correct floor determination performance at the price of using 50 fingerprint locations.

The reason that the nearest floor algorithm and Lui's floor algorithm perform worse when using lower numbers of fingerprint locations is that there is a limitation in these floor determination techniques that use the location fingerprinting database. That is, the location fingerprinting

approach requires a site survey and collection of RSS patterns from all RNs installed in the service area during the offline phase. If the system designer collected insufficient fingerprint locations (i.e., low fingerprinting granularity), this will result in a low resolution location fingerprint database that cannot represent the RSS characteristics of the service area. Therefore, the performance of the floor determination algorithms that use a poor resolution fingerprint database will be degraded during the online phase. This will result in lower accuracy in determining the correct floor.

On the other hand, even though these floor determination algorithms can increase the number of fingerprint locations in their database and thus can improve the floor determination accuracy, this will be achieved at the cost of longer fingerprint collection time during the offline phase. This can result in weeks spent on site survey and data collection for a large service area. Moreover, if there are any changes in the building structure or layout such as the relocation of furniture or an increase or decrease in the number of RNs in the system in the fingerprint database, the location fingerprint data will have to be collected again.

Considering the group variance algorithm which does not use the fingerprint locations, it has a constant percentage of correct floor determination in all cases of the fingerprint locations. From Figures 8(a) and 8(b), we can observe that the performance of the group variance algorithm depends on the floor size of the building; a bigger floor size yields a better performance. The percentage of correct floor determination of the group variance algorithm of Building B (with a floor size of 75 m \times 75 m) is higher than that of Building A (with a floor size of 35 m \times 35 m), that is, 93.3% for Building B and 61.3% for Building A.

The reason that the results of the group variance algorithm in a small building are worse than those in a large building which has the same number of RNs is the error in calculation of floor points. This is the result of the similarity of RSSs inside the building. For example, when considering the floor points which were calculated from the variance of signals in a small building, we can observe that the RSSs received from RNs at the object location at the actual target floor and the adjacent floor are very similar. Therefore, the variance of the adjacent floor may be selected as the highest variance instead of the variance of the actual target floor. This is the reason that the floor points are incorrect and cause the group variance algorithm to determine the wrong floor.

On the other hand, in the case of a large building, the RSS received from RNs on different floors at the target node location may be small or may not be present because of the large distance and higher attenuation of the signals. Therefore, the floor that has the highest variance will be the one that receives the most signals from the RNs and will be the floor on which the target node is located. The algorithm can determine the floor correctly. In other words, the RSSs within the large building can be distinguished easily and have a positive effect on the accuracy of the group variance algorithm.

5.2. RN-Failure Scenarios. In this section, the experimental setup is the same as that for those described in Section 4.

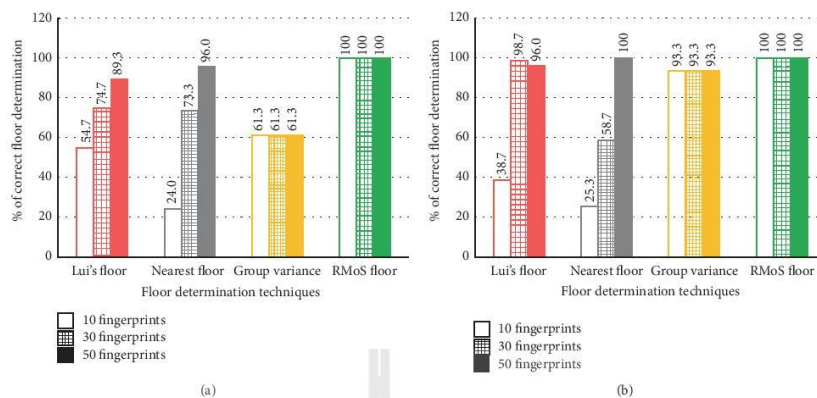


FIGURE 8: Percentage of correct floor determination of the fault-free scenario at (a) Building A and (b) Building B.

Additionally, however, this section considers that there are some faulty RNs in the system. In particular, two cases of RN failure were considered, including 2-RN failure and 8-RN failure. The experimental results of each case of RN failures were averaged from twenty faulty patterns. For example, in the case of 2-RN failure, we randomly selected and turned off two RNs from all RNs to create twenty patterns of two failed RNs. For each pattern, we obtained the percentage of correct floor determination from 75 test points selected uniformly throughout the whole building. Then, an average of the percentages of correct floor determination of those twenty patterns of 2-RN failure was computed. For the case of 8-RN failure, the same procedures were conducted.

To evaluate the performance of the existing floor determination algorithms that use and that do not use the fingerprint database under the RN-failure scenarios and to observe the effects of the fingerprint locations, five different settings of fingerprint locations were considered: 50, 40, 30, 20, and 10 locations. They were selected uniformly across the service area.

Figures 9(a) and 9(b) compare the average percentages of correct floor determination under three scenarios: fault-free, 2-RN-failure, and 8-RN-failure scenarios. The results are represented by a dotted line with triangle markers, a dashed line with cross markers, and a solid line with dot markers, respectively.

Considering the results of the nearest floor and Lui's floor algorithms which use the fingerprint database in the floor determination process, the performances of both algorithms are affected by the faulty RNs. For both the 2-RN-failure and 8-RN-failure scenarios, the trend of the performance is the same as that of the results in the case of the fault-free scenario presented in Section 5.1.2 in which the performances of both algorithms are dependent on the number of fingerprint

locations; using a larger number of fingerprint locations results in higher percentages of correct floor determination. For example, considering the case of Building A under the 2-RN-failure scenario (Figure 9(a)), the percentages of correct floor determination of the nearest floor algorithm decrease from 94.8% to 91.1% to 68.5% to 20.6% to 19.8% when using the number of 50, 40, 30, 20, and 10 fingerprint locations, respectively. As the number of failed RNs increases to eight (i.e., 8-RN-failure scenario), the performance of the nearest floor algorithm is worse than that in the 2-RN-failure scenarios. It can be observed that when using a large number of fingerprint locations, RN failure affects the performance of the nearest floor algorithm more than when using a small number of fingerprint locations. The reason for this is that the nearest floor algorithm and Lui's floor algorithm have an error in their RSS matching processes in which the number of discovered RNs at the target node location during the online phase must be equal to the number of RNs in the database (radio map). Therefore, the missing RSS component(s) due to RN failure during the online phase/location determination will cause errors in the matching processes. A larger number of RN failures, such as 8 nodes out of 20 nodes, will have a larger impact than when only 2 nodes out of 20 nodes have experienced a failure. Similar results were obtained for the case of Building B (Figure 9(b)).

Considering the group variance algorithm which does not use the fingerprint database, its performance is also affected by the RN failure. In the case of Building A under the 2-RN-failure and 8-RN-failure scenarios (the yellow lines in Figure 9(a)), the percentage of correct floor determination drops from 61.3% to 55.8% and 47.7%, respectively. Similar effects can be observed in the case of Building B (the yellow lines in Figure 9(b)). The reason that increasing the number of RN failures degrades the performance of the group variance

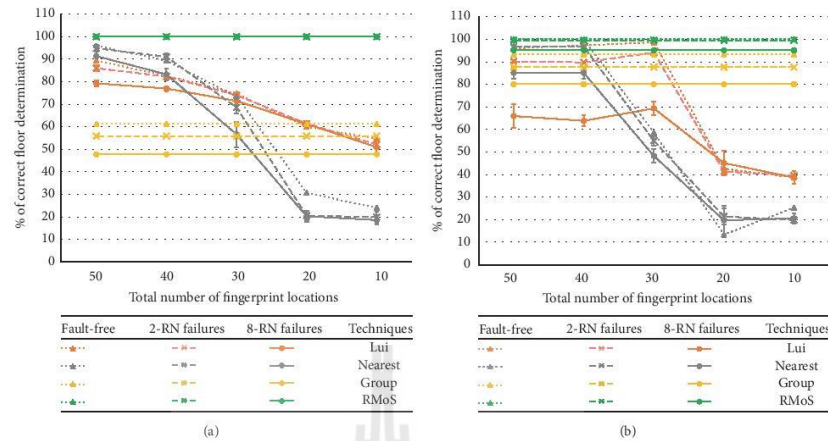


FIGURE 9: Percentage of correct floor determination in fault-free, 2-RN-failure and 8-RN-failure scenarios at (a) Building A and (b) Building B.

is the change in the calculation of three online statistical parameters obtained from each RN. The missing RSSs on some floors will affect the calculation of floor points and cause errors. For instance, the calculation of floor points is obtained from the ranges that consider the maximum and minimum value of RSSs at the target node from RNs on each floor. If the failure occurs to RN which had the largest RSSs on that floor, the range which was calculated on that floor will be incorrect. For this reason, the increasing number of failed RNs will result in the poorer performance of the group variance algorithm.

Considering the RMoS floor algorithm which does not use the fingerprint database, the performance of RMoS is superior to that of the other three floor algorithms under all tested scenarios in both buildings. The RMoS floor algorithm can achieve 100% correct floor determination for all three scenarios tested in Building A (the green lines in Figure 9(a)). However, for the 8-RN-failure scenario in Building B, the performance of the RMoS floor algorithm is slightly lower (the solid green line in Figure 9(b)), although its percentage of correct floor determination at 95.1% is still higher than that for those of the other floor algorithms. The reason that the RMoS floor algorithm is robust to the RN failure is that its floor determination process utilizes the online RSSs that the target node receives from the working RNs in the building. Consequently, the faulty RNs have very little to no effect on the RMoS floor computing procedures. However, the performance of the RMoS algorithm is slightly lower under the 8-RN-failure scenario in the bigger building. This is because the coverage of the wireless signal is not sufficient to cover a building which is large (i.e., only 4 RNs per 5,625 m²). This causes the RSSs at the target node from the RN to be very weak or to be unable to receive at all. Moreover,

if the localization system is under the failure state (e.g., 8-RN failure), these RSSs will cause a shift of the confidence interval for the RSS summations on each floor. This will cause the RMoS algorithm to identify the wrong floor. In other words, we can conclude that, under the state where there are nonoperating RNs, the quality and coverage of RSSs will have impacts on the performance of the RMoS technique. One of the solutions for avoiding this situation is to design a localization system such that the number and the location of the RNs should be optimized and provisioned to support the robust operation both during a normal situation and when there is a failure of some RNs. This is the next step in our future research work.

6. Conclusion

In this paper, we present the robust floor determination algorithm for the indoor multistory positioning systems. The proposed algorithm is called the RMoS floor algorithm. Extensive experiments were conducted to compare the proposed algorithm with the other floor algorithms previously presented in the literature. Experimental results showed that the RMoS floor algorithm outperformed the other algorithms and was able to achieve the highest percentage of correct floor determination at up to 100% in both *fault-free* and *RN-failure scenarios*. Specifically, the RMoS floor algorithm was able to achieve greater than 95% correct floor determination under the *RN-failure scenario* in which 40% of RNs in the building failed. Thus, we can say that our proposed RMoS floor algorithm is fault tolerant and robust to the *RN-failure scenarios* considered in our studies.

Our future research work will investigate how to optimize the indoor multifloor positioning system such that the floor

algorithm can provide robust operation, both during the normal situation and when there is a failure of some RNs in either small or big buildings.

Competing Interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this paper.

Acknowledgments

This work was supported in part by Suranaree University of Technology and the Office of the Higher Education Commission under the NRU project of Thailand and the National Research Council of Thailand (NRCT).

References

- [1] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, and J. Liu, "Survey of wireless indoor positioning techniques and systems," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews*, vol. 37, no. 6, pp. 1067–1080, 2007.
- [2] Y. Gu, A. Lo, and I. Niemegeers, "A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 13–32, 2009.
- [3] K. Pahlavan and P. Krishnamurthy, *Principles of Wireless Access and Localization*, John Wiley & Sons, New York, NY, USA, 2013.
- [4] S. Gansemmer, U. Großmann, and S. Hakobyan, "RSSI-based Euclidean distance algorithm for Indoor Positioning adapted for the use in dynamically changing WLAN environments and multi-level buildings," in *Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN '10)*, pp. 1–6, September 2010.
- [5] S. Al-Ahmadi, T. A. Rahman, M. R. Kamarudin, M. H. Jamaluddin, and A. I. Omer, "Single-phase wireless LAN based multi-floor indoor location determination system," in *Proceedings of the IEEE 17th International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS '11)*, pp. 1057–1062, IEEE, Tainan, Taiwan, December 2011.
- [6] N. Marques, F. Meneses, and A. Moreira, "Combining similarity functions and majority rules for multi-building, multi-floor, WiFi positioning," in *Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN '12)*, pp. 1–9, Sydney, Australia, November 2012.
- [7] P. Kriz, F. Maly, and T. Kozel, "Improving indoor localization using bluetooth low energy beacons," *Mobile Information Systems*, vol. 2016, Article ID 2083094, 11 pages, 2016.
- [8] Y. U. Lee and M. Kavehrad, "Two hybrid positioning system design techniques with lighting LEDs and ad-hoc wireless network," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1176–1184, 2012.
- [9] IEEE, "IEEE standard for local and metropolitan area networks—part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)," IEEE Standard 802.15.4e-2012, 2011.
- [10] D. Dardari, P. Ciosas, and P. M. Djurić, "Indoor tracking: theory, methods, and technologies," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 4, pp. 1263–1278, 2015.
- [11] Z. Farid, R. Nordin, M. Ismail, and N. F. Abdullah, "Hybrid indoor-based WLAN-WSN localization scheme for improving accuracy based on artificial neural network," *Mobile Information Systems*, vol. 2016, Article ID 6923931, 11 pages, 2016.
- [12] S. Lee, I. Lim, and J. Lee, "Method for improving indoor positioning accuracy using extended kalman filter," *Mobile Information Systems*, vol. 2016, Article ID 2369103, 15 pages, 2016.
- [13] M. Bal, H. Xuet, W. Shen, and H. Ghenniwa, "A 3-D indoor location tracking and visualization system based on wireless sensor networks," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics (SMC '10)*, pp. 1584–1590, IEEE, Istanbul, Turkey, October 2010.
- [14] F. Alsehly, T. Arslan, and Z. Sevak, "Indoor positioning with floor determination in multi story buildings," in *Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN '11)*, pp. 1–7, Guimarães, Portugal, September 2011.
- [15] H.-H. Liu and Y.-N. Yang, "WiFi-based indoor positioning for multi-floor environment," in *Proceedings of the IEEE Region 10 Conference: Trends and Development in Converging Technology Towards 2020 (TENCON '11)*, pp. 597–601, November 2011.
- [16] P. Gupta, S. Bharadwaj, S. Ramakrishnan, and J. Balakrishnan, "Robust floor determination for indoor positioning," in *Proceedings of the 20th National Conference on Communications (NCC '14)*, pp. 1–6, March 2014.
- [17] Y.-C. Lee and S. H. Park, "Localization method for mobile robots moving on stairs in multi-floor environments," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC '14)*, pp. 4014–4020, IEEE, San Diego, Calif, USA, October 2014.
- [18] K. Maneerat and C. Prommak, "An enhanced floor estimation algorithm for indoor wireless localization systems using confidence interval approach," *International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering*, vol. 8, no. 7, pp. 1182–1186, 2014.
- [19] S. He and S. G. Chan, "Wi-Fi fingerprint-based indoor positioning: recent advances and comparisons," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 1, pp. 466–490, 2016.
- [20] C. Khaiphung, P. Keeratwintakorn, and K. Kaemarungsi, "On robustness of centralized-based location determination using WSN," in *Proceedings of the 14th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC '08)*, pp. 1–5, October 2008.
- [21] W.-C. Lai, Y.-Y. Su, C.-M. Lee et al., "A survey of secure fingerprinting localization in wireless local area networks," in *Proceedings of the 12th International Conference on Machine Learning and Cybernetics (ICMLC '13)*, pp. 1413–1417, IEEE, Tianjin, China, July 2013.
- [22] B. Mager, P. Lundrigan, and N. Patwari, "Fingerprint-based device-free localization performance in changing environments," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 11, pp. 2429–2438, 2015.
- [23] Y. Tian, B. Denby, J. Ahriz, P. Roussel, and G. Dreyfus, "Robust indoor localization and tracking using GSM fingerprints," *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2015, no. 1, article 157, 2015.
- [24] T. Sathyan and M. Hedley, "Fast and accurate cooperative tracking in wireless networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 12, no. 9, pp. 1801–1813, 2013.
- [25] C. Laoudias, M. P. Michaelides, and C. G. Panayiotou, "Fault detection and mitigation in WLAN RSS fingerprint-based positioning," in *Proceedings of the International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN '11)*, pp. 1–7, Guimarães, Guimarães, September 2011.
- [26] R. K. Jain, *The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling*, Wiley- Interscience, New York, NY, USA, 1991.

Low Complexity Wireless Indoor Positioning Approaches based on Fingerprinting Techniques

Kriangkrai Maneerat and Chutima Prommak[†]
 School of Telecommunication Engineering
 Suranaree University of Technology
 Thailand

Abstract—Among different Wireless Indoor Positioning Systems (WIPS) that utilize radio frequency signal to estimation an object location, the system that uses Received Signal Strength (RSS) of the wireless transceiver, such as the fingerprinting approach, has gained lot of attention and been deployed widely. This paper presents a novel wireless indoor positioning approaches based on fingerprinting technique called Fusion parameter technique with temperature level (FUSTL). The proposed technique takes into account an environmental data in conjunction with RSS information in the fingerprinting database. The environmental data, such as room temperature and humidity, is used to classify different zones of the service areas. This information could help facilitate the RSS matching process of the fingerprinting technique. The performance of the proposed algorithm is compared with those of different indoor positioning techniques in literature. The experimental results shows that the proposed technique outperformed the other techniques and can provide the highest of accuracy and precision performance at the lowest computational complexity. Specifically, the positioning accuracy of our proposed technique is 15-27% higher than those of the other techniques whereas the computational complexity of our technique is 12-36% lower than those of the other techniques.

Keywords—wireless indoor positioning; fingerprinting; fusion parameter; low complexity

I. INTRODUCTION

Wireless Indoor Positioning Systems (WIPS) or wireless localization systems, are the wireless infrastructure system deployed to estimate the locations of mobile objects [1]. These systems are utilized in a wide range of applications such as those in commercial, logistics, agriculture, medical services, home applications, and military systems [1], [2]. Various wireless technologies can be employed for the wireless indoor localization applications. Some systems make use of an existing wireless network infrastructure such as the IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks (WLANs) [1]–[2]. More flexible and efficient systems employ the IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks (WSNs) due to the advantages in term of low power consumption, light weight and low cost [4]. Particularly, WSNs can not only measure the Received Signal Strength (RSS) from Reference nodes (RNs) but also detect several environmental parameters, such as temperature, relative humidity, light [3]–[6].

Some works in literature have considered the use of environmental information in the positioning process. In [8], the authors proposed the indoor positioning technique using

This work was supported in part by Suranaree University of Technology, the Office of the Higher Education Commission under NRU project of Thailand and the National Research Council of Thailand (NRCT).

[†] Corresponding author

Visible Light Communication (VLC) and an ad-hoc wireless network infrastructure. Their proposed algorithm is based on the proximity approach. It can only identify the room where the target node situated. In [9], the authors proposed the indoor positioning system that also utilized the VLC technology. Their positioning algorithm based on the trilateration method in which the distance between a transmitter and a receiver were estimated by measuring the received RF power in VLC. However, the service area size of this system is limited by the received RF power which can operate in few meters.

In [10], the navigation sensors of the robot and VLC technology were combined to improve the control system of the hospital transportation robots. However, VLC has rather limited range and is only suitable for systems with direct Line of Sight (LOS) between two transceivers.

Although, the use of light has been applied in the positioning system, the combination of environmental information and the RSS data of the wireless systems has not been considered. Therefore, this paper proposes wireless indoor positioning approaches based on the fingerprinting technique. The proposed technique takes into account an environmental data in conjunction with RSS information in the fingerprinting database to facilitate the RSS matching process of the fingerprinting technique.

The rest of the paper is organized into five sections as follows. Section II explains our proposed positioning technique and introduces the temperature level classification. Section III describes the experimental setup in this work. Section IV presents the experimental results and discussion. Finally, Section V concludes the paper.

II. THE FUSION PARAMETER TECHNIQUE

In this section, we describe new indoor positioning system that uses the combination of three environmental parameters which consist of RSS vectors, the temperature, and the relative humidity. The proposed indoor positioning approach is called the Fusion parameter technique with temperature level (FUSTL). Especially, our combined parameter technique not only provides the accuracy and the precision performance but also achieves low complexity in term of computational time for indoor positioning system that based on the fingerprinting technique.

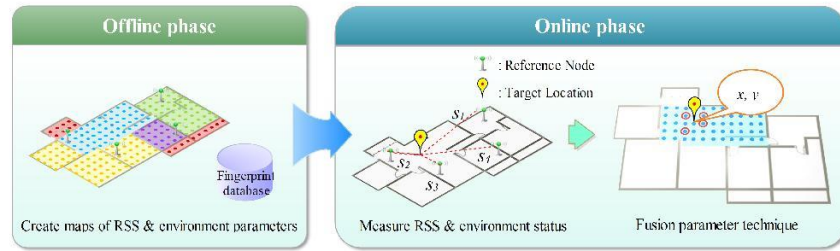


Fig. 1. Structure of indoor positioning system using Fusion parameter technique with temperature level.

A. Structure of Indoor Positioning System

Figure 1 illustrates an example of the structure of the proposed indoor positioning system that uses the combination of three environmental parameters which consist of RSS vectors, the temperature, and the relative humidity. The indoor positioning process is divided into two operational phase: an offline phase and an online phase. During offline phase, each location fingerprint (i.e. represented by the points on a map) record the physical environments of service area into the fingerprinting database. The environmental data consist of the RSS values received from each RN, the temperature values, and the relative humidity values. In this procedure, the temperature value and the relative humidity value are used to classify the similar physical environments of each sub-areas (i.e. a zone), which those called the temperature level (represented by the different color of the points on map). During online phase, whenever there is a request for the target position, the mobile target will measured the three environmental parameters and used this online information to estimate the target location by using the FUSTL. Detailed descriptions of our indoor positioning technique are as follows:

Offline phase: each location fingerprint, we recorded three environmental parameters simultaneously, which include the RSS vector, the temperature, and the relative humidity (i.e. we scanned about 100 sampling per location fingerprint). Note if RSS value from each RN cannot be received, we setup the -110 dBm to replace the missing RSS value. Next, the removing outliers (i.e. by the 10- and the 90-percentile) and an average of the three sampling data are calculated. The average value of temperature and the relative humidity are used to classify different zones of the service areas. Finally, the all data from above procedures are stored in the fingerprinting database.

The fingerprinting database is labeled consists of $\{F_1, F_2, \dots, F_i, \dots, F_M\}$. Where M denotes a total number of location fingerprints. Given that the location fingerprint F_i consists of $[x_i, y_i, T_i, H_i, L_i, R_i]$, where x_i and y_i refers to the coordinate x and y of location fingerprint i . The variable T_i and H_i represents the average value of the temperature and the relative humidity at location fingerprint i with $^{\circ}\text{C}$ and $\%$, respectively. L_i refers to the temperature level obtained from the classification process. The RSS vector received form RNs can be expressed as vector

$R_i = [r^1_i, r^2_i, \dots, r^N_i]$. Where r^N_i represents the average RSS received from RN n^{th} at the location fingerprint i and N refers to a total number of RNs deployed in the service area.

Online phase: in this operational phase, the indoor positioning technique is used to estimate the target location inside the service area. The online phase of the FUSTL can be divided into two processes, 1) the define parameter process and 2) the positioning process. First process, three environmental parameters at the target location are measured (i.e. we scanned about 20 sampling) and are used for both the removing outliers and an average calculation. Lastly, the average value of the temperature and the relative humidity are used to classify the temperature level.

The information of the target location is labeled consists of $[T_o, H_o, L_o, S_o]$. Where T_o and H_o represents the average value of temperature and the relative humidity. L_o refers to the temperature level of the target location. The RSS vector at the target location received form RNs is assumed as vector $S_o = [s_1, s_2, \dots, s_n, \dots, s_N]$. Where s_n represents the average RSS received from RN n^{th} .

Next, the second process is called the positioning process, which used to estimate the coordinate x and y of the target location. This process is divided into two procedures consist of the temperature level-filter and Weighted k -Nearest Neighbor (WKNN) calculation. The temperature level-filter is used to classify different zones of the service areas. This classification will compare the temperature level between the location fingerprint (L_i) and the target location (L_o). Then, all location fingerprints that same temperature are used for WKNN calculation.

Finally, the Weighted k -Nearest Neighbor approach is used to estimate the target location by using (1) to (4). Where d_j represents the Euclidean distance between the location fingerprint j and the target location, which is calculated by using (1). The variable δ_u is the smallest Euclidean distance u^{th} , for $u=1, 2, 3, \dots, k$ (i.e. we assign $k=4$). Where coordinate of target (x, y) estimated by using (2) and (3), while the weighted value of k nearest neighbor's coordinate (i.e. the location of the smallest Euclidean distance of first k order) are calculated by using (4). Where x_u and y_u denotes x - and y -coordinate of the location estimation, x_u and y_u refers to x - and y -coordinate of

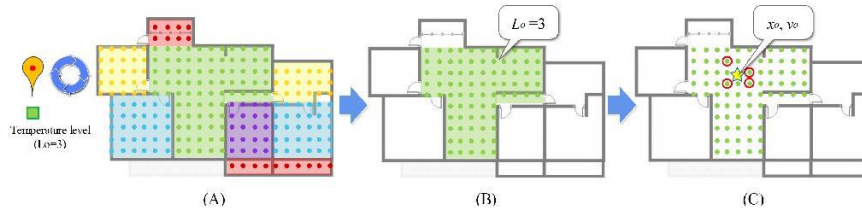


Fig. 2. Process of Fusion parameter technique. (A) The temperature level of classification (B) Considering location fingerprints with same temperature level of target. (C) Calculating Weighted K-Nearest Neighbor method in filter area.

the nearest neighbor u^{th} , and w_u refers to the weighted value of nearest neighbor u^{th} .

An example of the operation of The FUSTL illustrates in Figure 2. We assume that the system can classify the temperature level into 5 levels as show in Fig. 2(A). In the temperature level-filter procedure, the proposed technique will select the location fingerprints with same target's temperature level (i.e. $L_o = 3$) as show by green area in Fig. 2(B). Next, all of the location fingerprints within green zone are used to compute the target location. Finally, the target location (x_o, y_o) is estimated by using Weighted k -Nearest Neighbor approach as show in Fig. 2(C). The proposed technique does not need to conduct at all of the location fingerprints in the database. Instead, only the similar area or same zone are considered.

$$d_j = \sqrt{\sum_{n=1}^N (r_n^j - x_n)^2} \quad (1)$$

$$x_o = \sum_{v=1}^k x_v \cdot w_v \quad (2)$$

$$y_o = \sum_{v=1}^k y_v \cdot w_v \quad (3)$$

$$w_v = \frac{\left(\frac{1}{\delta_v'}\right)}{\sum_{v=1}^k \left(\frac{1}{\delta_v'}\right)} \quad (4)$$

B. Environmental Parameter Classification

To utilize the environmental parameters for indoor positioning system, the information of the temperature and the relative humidity is analyzed. The both information was recorded on the library building at Suranaree University of Technology. During the time between 8AM to 6PM, we recorded the environmental information at the ten different locations inside the building (i.e. one day for one location). The two different group areas are collected which consist of outside

(1st - 5th location) and inside (6th - 10th location) the air rooms. Figure 3 reports the temperature information that are collected by all ten locations. We observed that the temperature information can identify into two groups, which include outside and inside the air rooms. Except the 7th location (the red solid line), this location affected by a climate variability such as a heat wave. Thus, the temperature information of 7th location has more than other locations inside air room. This leads to false temperature level classification of the 2nd location and the 7th location (i.e. the overlapping of temperature in 26-28 °C).

Fortunately, this problem can solve by using the relative humidity information that has been affected less than the temperature information. In Figure 4 reports the relative humidity information that are collected by different ten locations. We observed that the relative humidity at the 2nd location and the 7th location can clearly separate. The 2nd location (the red dash line) has high the relative humidity value over 60%, while the 7th location with the climate variability (the red solid line) has less than 60%. Thus, using combination of both environmental parameters could be improved the accuracy of temperature level classification and also solve the problem of climate variability. Figure 5 describes the temperature level classification process of this work. Note that in this work, we provided an example of a classification guideline which only consider temperature level of classification with two temperature levels (i.e. hot and cool).

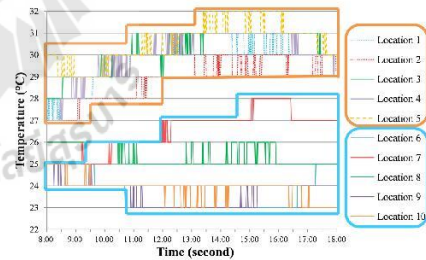


Fig. 3. The temperature information at the Library building during 8AM to 6PM.

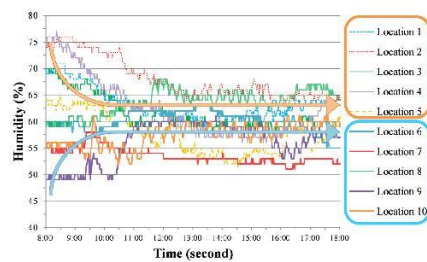


Fig. 4. The relative humidity information at the Library building during 8AM to 6PM.

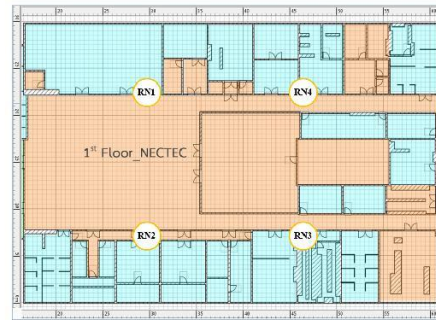


Fig. 6. Experimental area at NECTEC building.

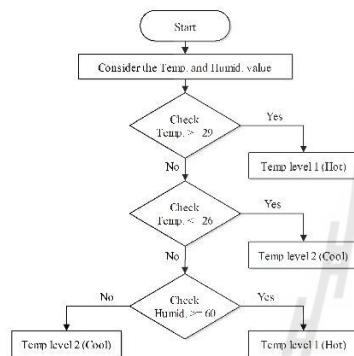


Fig. 5. Flowchart of temperature level classification.

III. EXPERIMENTAL SETUPS

To validate our proposed indoor positioning framework, we compare and analyze the proposed FUSTL with the existing basic techniques based on the fingerprinting approach, which consist of Euclidean distance and WKNN approach. The 1st floor of the NECTEC building was used to test the location determination performance of the three different techniques. The service dimensional area is approximately 30m × 60m and The four RNs that represented by orange circle which were installed around area as shows in Fig. 6. The 330 locations were used to collect the location fingerprints (i.e. the grid spacing is fixed at 2m). The 100 of test points were randomly selected to analyze the performance of three different positioning techniques.

Moreover, we deployed IEEE 802.15.4 wireless nodes which are based on Freescale MC13224V third generation chipset with built-in ARM7TDMI processor. Those sensors use channels in the same frequency that operate at 2.480 GHz (i.e. channel 26 of IEEE 802.15.4 standard [7]). The mobile node

(i.e. target node) is connected to a computer notebook on which the location determination algorithm is executed. For more details of the wireless transceiver were utilized in this work that described in [11].

IV. RESULTS AND DISCUSSION

To analyze and compare the results of different indoor positioning techniques, we consider three location determination performance which consist of an accuracy, the precision, and the computational complexity. Table I reports the performance of three different positioning techniques. We first consider the accuracy performance that explained by the average error distance. In this result, we found that the proposed FUSTL provides the accuracy performance result higher than other techniques. The FUSTL can achieves the average error distance about 1.59 meters, compare to 2.17 meters for the Euclidean distance and 1.89 meters for the WKNN algorithm. The results show that our proposed technique provides the accuracy performance better than Euclidean distance and original WKNN algorithm about 26.73% and 15.87%, respectively.

Next, Figure 7 illustrates the Cumulative Distribution Function (CDF) of error distance obtained by three different techniques. This result is used to explain the precision performance of the indoor positioning system. In this results in, we found that the FUSTL provides the highest precision performance, which can achieves approximately 90% precision at approximately 3 meters. This means that the 90 of 100 in estimating a location, an error distance of proposed technique is not greater than 3 meters, while the Euclidean distance and original WKNN algorithm have the lower precision performance about 66.6% and 79.1%, respectively. Moreover, when we consider the 80% of estimation error as shows in Table I. Our proposed technique does not error more than 2.52 meters, while Euclidean distance and original WKNN have an error distance up to 3.80 meters and 3.05 meters, respectively.

TABLE I. LOCALIZATION PERFORMANCE OF THREE DIFFERENT TECHNIQUES AT THE NECTEC BUILDING

Techniques	Accuracy (m.)	Precision in 3 m. (%)	Precision in 4 m. (%)	80% of estimation error (m)	90% of estimation error (m)
FUSTL	1.59	90.07	98.61	2.52	3.01
Euclidean	2.17	66.61	82.84	3.80	4.65
WKNN	1.89	79.07	93.83	3.05	3.65

Figure 8 plots the probability density function (PDF) of complexity in term of computation time during online positioning phase. The results show that our proposed technique provides the best complexity performance result, which has the greatest value of probability density of computation time between 14.3 msec. to 14.7 msec.. In other words, the probability that the running time computation during online positioning phase of the FUSTL is required about 14.3–14.7 msec. compare to 16.1–16.4 msec. for the Euclidean distance and 19.6–19.9 msec. for the WKNN algorithm. This performance is very importance for the indoor positioning system based on the fingerprinting database. Since, increasing of the service area such as a large building or the multi-floor building, this lead to more search space in the database and could become very high requirement for the computational time.

Moreover, Figure 9 reported an error distance between the actual target location and the estimated location of the eight test points on the 1st floor of NECTEC building. Where the pink circle represent the actual location of target, while different color points represent the estimated location obtained from three different techniques. In this result, we observed that the accuracy performance of the FUSTL (the blue star) provides smaller an error distance from the actual target location than other techniques. Particularly, it is clear that our proposed technique can determine the target location within the same zone or same temperature level of the actual target location. Thus, the FUSTL can estimate the target location which an error distance has not exceeded the room area.

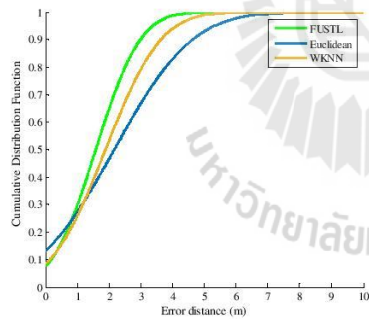


Fig. 7. CDF of error distance at the NECTEC building.

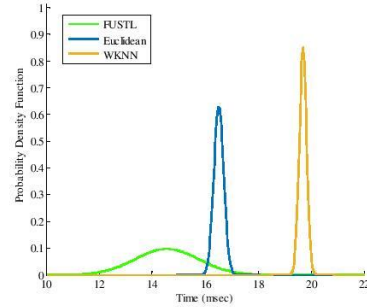


Fig. 8. PDF of computational complexity during online positioning phase.

The reason for the proposed FUSTL can outperforms other techniques such as the original WKNN algorithm, which are almost the same technique. Since the temperature level classification were used to classify the service area into the unique sub-areas. This procedure can filter the location fingerprints that seem irrelevant (i.e. mismatched temperature level) to out consideration. Hence, our proposed technique can reduce the error in term of a matching RSS pattern in the database. Specifically, the FUSTL not only provide the accuracy and precision performance better than the original techniques based on fingerprinting techniques, but also provide lower computational complexity than those techniques.

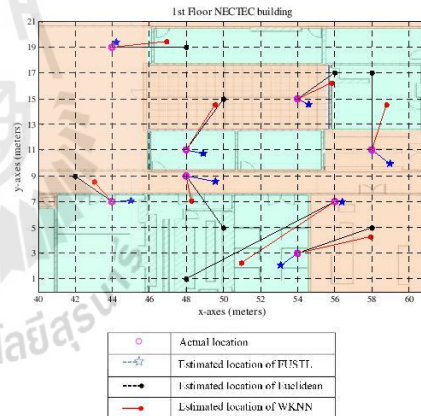


Fig. 9. An error distance between the actual location and the estimated location of eight test points at the NECTEC building.

V. CONCLUSION

In this paper, we present new combination positioning technique for the indoor positioning system. This technique based on the fingerprinting approach is called FUSTL technique. Our proposed technique takes into account an environmental data in conjunction with RSS information in the fingerprinting database. The environmental data, such as room temperature and humidity, is used to classify different zones of the service areas. The experiments were conducted to compare the proposed techniques with the other standard positioning techniques. Experimental results shown that the proposed combination technique is more the location estimation performance compared to the Euclidean distance and original WKNN. Our proposed technique not only provide the highest the accuracy and the precision performance, but also achieve the lowest complexity in term of computational time. Particularly, the positioning accuracy of our proposed technique is 15% to 27% higher than those of the other techniques whereas the computational complexity of our technique is 12% to 36% lower than those of the other techniques

Our future work, we will also integrate other procedure of indoor positioning systems to consider not only the target position in two-dimensional service areas but also the floor location of target in the indoor multi-story building.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported in part by Suranaree University of Technology, the Office of the Higher Education Commission under NRU project of Thailand and the National Research Council of Thailand (NRCT). The authors would like to thank Dr. Kamol Kaemarungsi for invaluable comments.

REFERENCES

- [1] L. Hui, H. Darabi, P. Banerjee, and L. Jing, "Survey of wireless indoor positioning techniques and systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, vol. 37, pp. 1067–1080, Nov. 2007.
- [2] G. Yanying, A. Lo, and I. Niemegeers, "A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, pp. 13–32, Mar. 2009.
- [3] M. Guoqiang, F. Bans, and A.D.O. Brian, "Wireless sensor network localization techniques," *Computer Networks*, vol. 51, pp. 2529–2553, Jul. 2007.
- [4] K. Pahlavan and P. Krishnamurthy, *Principles of Wireless Access and Localization* November, 1st ed, Wiley, 2013.
- [5] K. Kaemarungsi, R. Ranron, and P. Pongsoon, "Study of received signal strength indication in ZigBee location cluster for indoor localization," in *2013 Int. Conf. 10th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, pp. 1–6.
- [6] F. Shih-Hau, W. Chu-Hsuan, H. Ting-Yu, Y. Chin-Huang, and C. Yung-Sheng, "An enhanced ZigBee indoor positioning system with an ensemble approach," *IEEE Communications Letters*, vol. 16, pp. 564–567, Feb. 2012.
- [7] IEEE Std 802.15.4e-2012, "IEEE standard for local and metropolitan area networks-part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)," *IEEE Standards*, Sept. 2011, pp. 1–314.
- [8] L. Yong Up and M. Kavehrad, "Two hybrid positioning system design techniques with lighting LEDs and ad-hoc wireless network," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 58, pp. 1176–1184, Nov. 2012.
- [9] K. Hyun-Seung, K. Deok-Rae, Y. Se-Hoon, S. Yong-Hwan, and H. Sang-Kook, "An indoor visible light communication positioning system using a RF carrier allocation technique," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, pp. 134–144, Oct. 2012.
- [10] R. Murai, T. Sakai, H. Kawano, Y. Matsukawa, Y. Kitano, Y. Honda, and K.C. Campbell, "A novel visible light communication system for enhanced control of autonomous delivery robots in a hospital," in *2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, pp. 510–516.
- [11] K. Maneerat, C. Prommak, and K. Kaemarungsi, "Floor estimation algorithm for wireless indoor multi-story positioning systems," in *2014 Int. Conf. 11th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, pp. 1–5.

An Enhanced Floor Estimation Algorithm for Indoor Wireless Localization Systems Using Confidence Interval Approach

Kriangkrai Maneerat, Chutima Prommak

Abstract—Indoor wireless localization systems have played an important role to enhance context-aware services. Determining the position of mobile objects in complex indoor environments, such as those in multi-floor buildings, is very challenging problems. This paper presents an effective floor estimation algorithm, which can accurately determine the floor where mobile objects located. The proposed algorithm is based on the confidence interval of the summation of online Received Signal Strength (RSS) obtained from the IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks (WSN). We compare the performance of the proposed algorithm with those of other floor estimation algorithms in literature by conducting a real implementation of WSN in our facility. The experimental results and analysis showed that the proposed floor estimation algorithm outperformed the other algorithms and provided highest percentage of floor accuracy up to 100% with 95-percent confidence interval.

Keywords—Floor estimation algorithm, floor determination, multi-floor building, indoor wireless systems.

I. INTRODUCTION

THE rapid pace of technological advancement in wireless communications is currently the major driving force of the development of several indoor location services for wide range of applications such as those in commercial, agriculture, medical, and the military uses [1]. Various wireless technologies can be employed for indoor positioning applications. Some systems make use of an existing wireless network infrastructure such as Wi-Fi [2]–[6]. More flexible and efficient systems employ IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks (WSNs) due to the advantages in term of low power consumption, light weight and low cost [7].

Existing indoor localization systems can be classified into three types based on the structure of service areas. These include the indoor localization systems for two-dimensional service areas, three-dimensional service areas, and multi-story building [1], [8]. Most of existing systems are designed for usages in two-dimensional areas where the position of target object is specified by a coordinate (x, y) [8]. The second type of the indoor positioning system considers a three-dimensional space in a small service area, such as in a room. The state of the object location is derived in the form of coordinate (x, y, z) [9]. Lastly, the positioning systems designed for the indoor multi-story building need to specify not only coordinate (x, y)

in two-dimensional plane but also the floor where the object located [2]–[5].

An important performance of the positioning system for indoor multi-floor building is to accurately determine the floor number. False floor estimation could lead to serious injury or a death. For instance, in emergency situations such as fire, if the system incorrectly estimates the floor where the target located, the victims of fire or the firefighters may be in danger [6].

For this reason, we propose an effective floor estimation algorithm to determine the current target's floor in the environment of the multi-story building. In this work, we focus on floor determination only and use the online RSS collected via IEEE 802.15.4 network interface to estimate the floor number of target. In addition, the proposed floor estimation algorithm is compared with other techniques in literatures.

The remaining sections of this paper are organized into six sections as follows. In Section II, existing floor determination techniques are reviewed. Section III, we explain the proposed floor estimation algorithm. Section IV, the experimental setup of this work is described. Section V provides experimental results and analysis. Finally, Section VI concludes the paper.

II. EXISTING TECHNIQUE

In wireless indoor positioning systems for multi-floor buildings, an error location of a target within the two-dimensional plane might mean a false room or error distance in a few meters. On the other hand, the false floor estimation could mean a wrongly detection of the target on a car parking floor instead an office floor. Therefore, the problem of the floor determination is another important issue for positioning problem besides the target's coordinate. It should not be overlooked for the multi-floor positioning systems that require acceptable accuracy. This reason has motivated researchers to develop the floor estimation algorithm to extend the capability of indoor positioning system.

Based on our review, there are three different types of multi-floor positioning techniques. First type, the floor number is estimated in the first step and then the coordinates x and y (target location) is determined later. Second type, the location of target is estimated first and then the floor number is specified later. Third type, the target location and its floor number are defined simultaneously. The authors in [2] presented the positioning algorithm employing WLAN infrastructure. The technique in [2] is the first type of multi-

K. Maneerat and C. Prommak are with the School of Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand (e-mail: kkyor@hotmail.com, cprommak@sut.ac.th).

floor positioning techniques which based on fingerprint and Euclidean Distance. At the first stage, the determination of z-value (floor number) is estimated. While the second stage, the estimated x- and y-coordinates are calculated. Likewise the authors in [3] proposed Wi-Fi-based indoor positioning system that combined both characteristics of trilateration and scene analysis method. Their algorithm could estimate a target's floor by using signal strength of access points (APs) from different floors and then the location of the target is determined. The authors in [4] presented multi-floor positioning technique that did not require a time-consuming offline phase in order to build the radio map. In online phase, their positioning algorithm computes the user location and the floor number, respectively. The authors in [5] proposed the fingerprint method uses a previously stored map of the signal strength at several positions and determines the position using similarity functions and majority rules. Thus, their technique could calculate the location and the floor number of the target at the same time.

The authors in [10] proposed new Wi-Fi-based indoor positioning algorithms in order to determine the floor number of target. The two different approaches which used Wi-Fi signal to estimate the target's floor are designed as called the nearest floor algorithm and the group variance algorithm.

A. Nearest Floor Algorithm

This algorithm based on the K-Nearest Neighbor algorithm (KNN algorithm) is called nearest floor algorithm. This technique requires collecting the RSS during offline phase in order to build the database. It does not need to record the signals from all APs. Instead, only the best signal as maximum RSS value for each AP are recoded into the reference database. In the reference database, the information includes reference identification (reference ID), MAC address of APs, the floor number, and the maximum RSS, respectively. Whenever there is a request for a floor determination, the system will compare the strong Wi-Fi signal reading in the online phase with the reference database. Their system will select the closest k APs ($k=3$). Finally, the best matched floor number from the reference database is selected.

B. Group Variance Algorithm

This algorithm will consider the distribution of the RSS values in each floor. It takes into account three online statistical parameters obtained from each AP, which consists of the range, the variance, and the availability. The algorithm adds weighted values based on their proposed criteria to determine the best score called floor points that use for selecting the floor number. Whenever there is a request for target's floor, all above online statistical parameters were used to calculate the floor points. After comparing the floor points on each floor, the algorithm selects the estimate floor number with the maximum number of floor points.

III. THE CIS-RSS FLOOR ALGORITHM

In this section, we describe our floor estimation algorithm for the indoor multi-story positioning system. Our proposed

algorithm enhances the technique presented in [11]. The algorithm proposed in this paper utilizes the online RSS values received from the reference nodes (RNs) to determine the floor number where the target node is located. The RNs are IEEE 802.15.4 wireless transceivers that are installed on each floor and can respond to a signal inquiry from a target node of which we want to know the position.

Fig. 1 illustrates an example of the structure of the indoor positioning system in the three-story building. In this diagram, four RNs are installed on each floor. Dashed lines represent RSS that the target node receives from all RNs. Our approach does not require time consuming procedure during the offline phase to create the RSS database (i.e. Fingerprint). Instead, only uses the RSS values gathered in real time to perform the floor determination.

The proposed floor estimation algorithm is called the Confidence Interval Sum-RSS (CIS-RSS) floor algorithm. We use the statistical properties of data sets based on the confidence interval of RSS summation which aim to estimate the target's floor. Fig. 2 depicts the flow chart of the CIS-RSS floor algorithm. First, the target node scans RSS vector from RNs installed within the multi-floor building. The RSS vector consists of set of RSS values and the reference node IDs. During the signal inquiry process, the RSS vectors transmitted from each RN cannot be received, it is assumed that the RSS value is equal to -110 dBm.

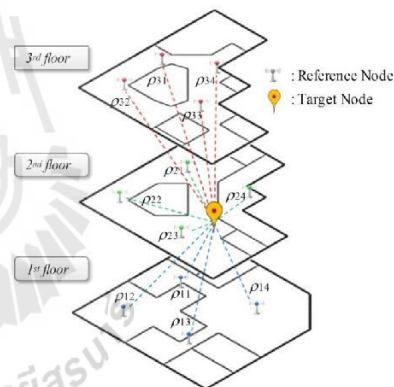


Fig. 1 Floor determination schematic diagram

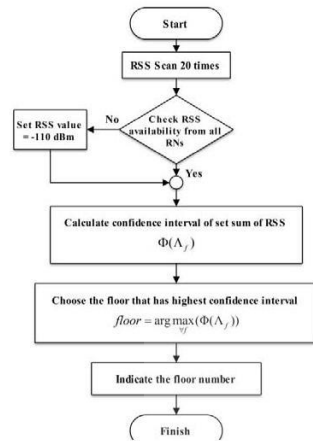


Fig. 2 Flow chart of the CIS-RSS floor algorithm

Next step, the confidence interval of set of RSS summation $\Phi(A_j)$ is calculated by using (1) where A_j is set of RSS summation on floor j^{th} which denote by $\{\gamma_j^1, \gamma_j^2, \dots, \gamma_j^N\}$. The summation of RSS γ_j^i is computed by using (2), where γ_j^i represents the sum of RSS value which is i^{th} measurement from all RN on floor j^{th} and ρ_{jn}^i refers to the RSS value which is i^{th} measurement from RN n^{th} on floor j^{th} . Using (3) to (5), we calculated the lower limit L_1 , the upper limit L_2 , and the probability $1-\beta$ that the mean of RSS (μ) will lie between L_1 and L_2 . Here, Γ is the number of sampled RSS, ϕ is the number of floors in the multi-story building, N is the number of RNs on each floor, σ^2 is the sample standard deviation and $t_{[1-(\beta/2); \Gamma-1]}$ is the $(1-(\beta/2))$ -quantile of t-distribution with Γ probability and Γ sample [12]. Note that equal number of the RNs is installed on each floor.

Finally, our floor estimation algorithm selects the floor number that results in the highest confidence interval of RSS summation and reports the floor number where the target node situated. The pseudo code of the CIS-RSS floor algorithm is shown in Table I.

$$P(L_1 \leq \mu \leq L_2) \approx 1 - \beta \tag{1}$$

$$\gamma_j^i = \sum_{n=1}^N \rho_{jn}^i \tag{2}$$

$$L_1 = \eta(\Gamma) - t_{[1-(\beta/2); \Gamma-1]} \sqrt{\frac{\sigma^2(\Gamma)}{\Gamma}} \tag{3}$$

$$L_2 = \eta(\Gamma) + t_{[1-(\beta/2); \Gamma-1]} \sqrt{\frac{\sigma^2(\Gamma)}{\Gamma}} \tag{4}$$

$$\beta = [(100 - \mathcal{C})/100]/2 \tag{5}$$

TABLE I
PSEUDO CODE FOR CIS-RSS FLOOR ALGORITHM

Input :	Online RSS vectors
Output :	Floor number
1:	Select a percent confidence interval \mathcal{C}
2:	Select a raw data of target on $f \in \phi$
3:	Repeat
4:	Repeat
5:	Repeat
6:	$\gamma_j^i = \sum(\rho_{jn}^i)$ for all $n = N$
7:	Until $\tau = \Gamma$
8:	Set $A_j = \{\gamma_j^1 \text{ to } \gamma_j^i\}$
9:	Until $f = \phi$
10:	Calculate $\Phi(A_j)$ with $\%CI = \mathcal{C}$ for all $f \in \phi$;
11:	If $\Phi(A_j)$ of 1^{st} and 2^{nd} is overlap
12:	then reduce \mathcal{C}
13:	Else \mathcal{C} is the $\%CI$ of sum of RSS
14:	Until stopping condition = true
15:	Select /highest $\Phi(A_j)$ is the floor of target with $\%CI = \mathcal{C}$

IV. EXPERIMENTAL SETUPS

We conducted real implementation and measurement to analyze the accuracy of the proposed floor estimation algorithm, compared with other algorithms in the literature. In particular, we compared our results with those of the nearest floor algorithm and the group variance algorithm [10]. The experiments were setup in the three-story Library building at Suranaree University of Technology. Figs. 3 (a) and (b) show the service environment and the floor's dimension (35m x 35m), respectively. Fifty test points on each floor (i.e. totally 150 test points) were randomly selected to analyze the floor estimation algorithm.

Two different implementations of RNs were considered in our experiments. The first scenario deploys two RNs on each floor whereas the second scenario deploys four RNs on each floor. Fig. 3 (b) shows the cases of using four RNs on each floor of the library buildings (RN1 to RN4). All of RNs are installed at the height of 2m while the mobile node (i.e. target node) is connected to a computer notebook on which the floor estimation algorithm is executed. The height of the wireless transceiver of the target node is 0.8 m. IEEE 802.15.4 wireless transceivers were deployed in this work. They have Free scale MC13224V third generation chipset with built-in ARM7TDMI processor. The antennas of wireless transceivers are the inverted F-shape antennas and operate at 2.480 GHz (i.e. channel 26 of IEEE 802.15.4 standard). Table II shows specifications of the wireless transceivers used in our implementation.

TABLE II
SPECIFICATION OF A WIRELESS TRANSCEIVER

Specification	Detail
Manufacturer	Free scale
Chipset	MC13224V
Frequency range	2.405 GHz – 2.480 GHz
Transmit power	+3 dBm
Sensitivity	-95 dBm
Operating channel	CH 26 (i.e. 2.480 GHz)
Antenna type	Inverted F-antenna

International Science Index, Electronics and Communication Engineering, Vol:8, No:7, 2014 waset.org/Publication/9998844

V. RESULTS AND ANALYSIS

First, we analyze characteristics of the RSS summation from all RNs installed on different floor. We consider the case that deploys four RNs on each floor. We recorded the RSS at the 77th test point on the second floor of the library building. Fig. 4 shows the Probability Density Function (PDF) of the set of summation of RSS that the test point obtained from all RNs on each floor. We can observe that the sum-RSS obtained from RNs on the second floor (i.e. blue line in Fig. 4) is higher than the sum-RSS obtained from RNs on the other floors. It means that the set of sum-RSS obtained from RNs on the floor where the target node located is stronger than those received from RNs located on the other floors. We use these observed results and characteristics to develop the floor estimation algorithm which can indicate the floor number of test point as described in detail in Section III.

Next, we demonstrate how well the proposed floor estimation algorithm works. We consider the case that deploys four RNs on each floor as shown in Fig. 3. Performance of the proposed algorithm was evaluated by measuring the confidence interval of sum-RSS of signal from different floors. For example, consider the box plot of sum-RSS at the 77th test point of the library building as shown in Fig. 5. The top line and the bottom line of the box represent the upper limit and lower limit of the confidence interval of sum-RSS. The pink line in the middle refers to the average of sum-RSS value. In Fig. 5, the highest box and the other boxes are clearly separated. It means that the floor number of the target node can be accurately determined by using the highest confidence interval of sum-RSS at 95% CI. In this case, the floor that the target node located is the second floor.

Moreover, the accuracy of the proposed floor estimation algorithm, CIS-RSS floor algorithm, was evaluated by comparing the percentage of the correct floor estimation with that of the other techniques in the literature. In particular, we compare with the nearest floor algorithm and the group variance algorithm [10]. We conducted two scenarios of RN deployments (i.e. installing two RNs and four RNs on each floor). For each scenario, we conducted 150 test points (50 test points on each floor).

Table III compares the percentage of the correct floor determination among three algorithms. The results show that the proposed CIS-RSS floor algorithm outperforms the other two algorithms in all scenarios. The CIS-RSS floor algorithm results in the highest percentage of correct floor determination up to 100% in all scenarios whereas the nearest floor and the group variance algorithm yield the correct floor estimation less than those of the CIS-RSS floor algorithm.

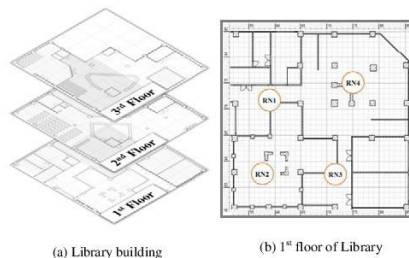


Fig. 3 Service environment and the floor layout

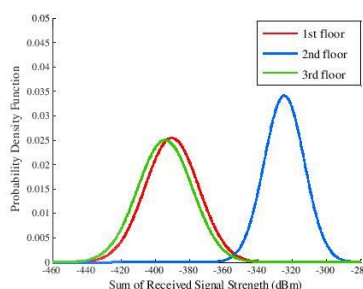


Fig. 4 PDF of sum-RSS value for 77th test point at Library building

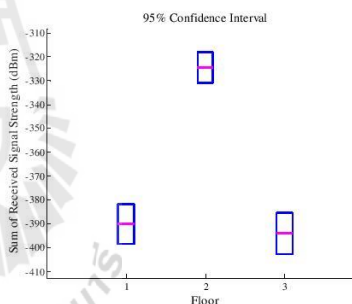


Fig. 5 Confidence interval of 77th test point at Library building

Floor estimation algorithm	Number of RNs deployed on each floor	
	2 RNs	4 RNs
CIS-RSS	100%	100%
Nearest Floor	99.3%	96.0%
Group Variance	85.3%	85.3%

VI. CONCLUSION

In this research, we presented the floor estimation algorithm

International Science Index, Electronics and Communication Engineering Vol:8, No:7, 2014 waset.org/Publication/9998844

for the indoor multi-story positioning systems. This algorithm is called CIS-RSS floor algorithm that use the statistical properties of RSS received in online phase to determine the floor number where the target node is located. The proposed algorithm does not require the offline phase to create maps of the radio signal strength. Extensive experiments were conducted to compare the proposed algorithm with the other floor estimation algorithms. The experimental results showed that the CIS-RSS floor algorithm outperformed the other algorithms and could achieve highest percentage of the correct floor estimation up to 100% with 95-percent confidence interval. Besides the accuracy performance of floor algorithm, our floor algorithm could provide the robustness of system: increasing the number RNs do not affect the performance of CIS-RSS floor algorithm.

Our future work will incorporate other parameters of the indoor environments to determine not only the floor number but also the target position in the indoor multi-story building.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported in part by Suranaree University of Technology, the Office of the Higher Education Commission under NRU project of Thailand and the National Research Council of Thailand (NRCT).

The authors would like to thank Dr. Kamol Kaemarungsi for invaluable comments and thank NECTEC, Thailand for providing Freescale wireless transceivers for our experiments.

REFERENCES

- [1] G. Yanying, A. Lo, and I. Niemegeers, "A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, pp. 13–32, Mar. 2009.
- [2] S. Gansmer, U. Grossmann, and S. Hakobyan, "RSSI-based euclidean distance algorithm for indoor positioning adapted for the use in dynamically changing WLAN environments and multi-level buildings," in *2010 Int. Conf. Indoor Positioning and Indoor Navigation*, pp. 1–6.
- [3] L. Hung-Huan and Y. Yu-Non, "WiFi-based indoor positioning for multi-floor Environment," in *2011 IEEE Region 10 Conf. TENCON*, pp. 597–601.
- [4] A. S. Al-Ahmadi, T. A. Rahman, M. R. Kamarudin, M. H. Jamaluddin, and A. I. Omer, "Single-phase wireless LAN based multi-floor indoor location determination system," in *2011 IEEE 17th Int. Conf. Parallel and Distributed Systems*, pp. 1057–1062.
- [5] N. Marques, F. Meneses, and A. Moreira, "Combining similarity functions and majority rules for multi-building, multi-floor, WiFi positioning," in *2012 Int. Conf. Indoor Positioning and Indoor Navigation*, pp. 1–9.
- [6] U. Ruppel, K. M. Stubbbe, and U. Zwingner, "Indoor navigation integration platform for firefighting purposes," in *2010 Int. Conf. Indoor Positioning and Indoor Navigation*, pp. 1–6.
- [7] IEEE Std 802.15.4e-2012, "IEEE standard for local and metropolitan area networks-part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)," *IEEE Standards*, Sept. 2011, pp. 1–314.
- [8] G. Mao, B. Fidan, and B.D.O. Anderson, "Wireless sensor network localization techniques," *Computer Networks*, vol. 51, pp. 2529–2553, July 2007.
- [9] M. Bal, H. Xue, W. Shen, and H. Ghenniwa, "A 3-D indoor location tracking and visualization system based on wireless sensor networks," in *2010 IEEE Int. Conf. Systems Man and Cybernetics*, pp. 1584–1590.
- [10] F. Alsehly, T. Arslan, and Z. Sevak, "Indoor positioning with floor determination in multi story buildings," in *2011 Int. Conf. Indoor Positioning and Indoor Navigation*, pp. 1–7.
- [11] K. Maneerat, C. Prommak, and K. Kaemarungsi, "Floor estimation algorithm for indoor multi-story positioning system using IEEE 802.15.4 network," in *2014 Int. Conf. Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, to be published.
- [12] R. K. Jain, *The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling*. Wiley-Interscience, New York, 1991, pp. 213–215.

Floor Estimation Algorithm for Wireless Indoor Multi-Story Positioning Systems

Kriangkrai Maneerat and Chutima Prommak[†]
School of Telecommunication Engineering
Suranaree University of Technology, Thailand

Kamol Kaemarungsi
National Electronics and Computer Technology Center,
NSTDA, Pathumthani, Thailand

Abstract—Wireless indoor positioning system has become one of important components in context-aware applications over the years. However, there are still some unsolved problems such as floor determination of mobile target in multi-story buildings. Therefore, this paper presents a simple floor estimation algorithm, which can accurately determine the mobile target's floor. The proposed algorithm is based on the use of *Received Signal Strength (RSS)* obtained from wireless interface of sensor node in IEEE 802.15.4 *Wireless Sensor Network (WSN)*. The performance of the proposed algorithm is compared with the nearest floor and the group variance algorithms found in the literature using a real implementation of IEEE 802.15.4 wireless sensor network in our facility. The experimental results showed that our proposed floor estimation algorithm provided the highest floor accuracy with the floor estimation precision of more than 90%.

Keywords— *Indoor Positioning System; Multi-floor Building; Floor Determination; Floor Estimation Algorithm.*

I. INTRODUCTION

During the last decade, the growth of wireless sensor network technologies have led to several new applications which allow embedded computer system to better serve its user according to user's context and location. One of the services of *Wireless Sensor Networks (WSNs)* is a location tracking of person or equipment which is equipped with wireless sensor node inside building. In this context, the wireless sensor network becomes an indoor positioning system, which can determine user's location and track user's position. Although, the well-known *Global Positioning System (GPS)* can effectively provide position for outdoor areas, it cannot be deployed in indoor environments because the satellite signal cannot penetrate into the building [1].

Among different approaches that utilize radio frequency signal to determine a location, the approach that uses *Received Signal Strength (RSS)* of wireless transceiver is the most promising solution. The main reasons are that it is simple to collect RSS on most hardware and it does not require any complex hardware and software to measure time or angle of the signal as in those time-of-arrival and angle-of-arrival approaches. A technique that simply uses pattern of RSS from a number of wireless signal sources to estimate a location is called location fingerprinting technique. This technique is usually deployed in two phases: the offline phase and the

online phase. The offline phase includes the collection of RSS patterns at various locations in order to build the location fingerprints stored in a database called radio map [2]. The online phase or positioning phase determines the location of target using various location determination techniques and algorithms.

Thus far, most indoor positioning systems in the literature are based on studies of two-dimensional space. For instance, the research works of [3], [4], and [5] are based on Wi-Fi network and for one-floor systems only. They focus on different aspects of the systems which are a combination of modeling, design, implementation, or comparison of positioning techniques such as triangulation [3], neural network [4], and particle filter [5]. However, indoor positioning applications are not limited to finding target's location within two-dimensional plane with the highest accuracy and precision. They also want to know which floor number the objects locate inside the building. Such location determination system is called multi-floor positioning system. Traditionally, the algorithm in the online phase of two-dimensional system will compute the target's location in x and y coordinates only. On the other hand, multi-floor positioning systems must be able to report the floor number of the target. Clearly, indoor positioning techniques for two dimensional systems are not sufficient to estimate the object's location within the multi-story buildings.

To solve the problem of multi-floor location determination, we propose a simple floor estimation algorithm to determine the current target's floor. In this work, we focus on floor determination only and use the RSS collected via IEEE 802.15.4 [6], [7] network interface to estimate the target's location. The use of wireless sensor network with limited computing power requires a low complexity algorithm that can provide accurate floor estimation. The proposed algorithm is compared with similar floor estimation algorithms in the literature.

The remaining sections of this paper are as follows. In Section II, existing floor determination techniques, which are the nearest floor algorithm and the group variance algorithm, are reviewed. Section III describes our proposed algorithm. Section IV and V discussed the experimental setups and results obtained from different algorithms, respectively. Finally, Section VI concludes this paper.

This work was supported in part by Suranaree University of Technology, the Office of the Higher Education Commission under NRU project of Thailand and the National Research Council of Thailand (NRCT).

[†]corresponding author

II. EXISTING TECHNIQUES

In wireless indoor positioning systems for multi-floor buildings, an error location of a target within the two-dimensional plane might mean a false room or error distance in a few meters. On the other hand, the false floor estimation could mean a wrongly detection of the target on a car parking floor or on an office floor. Therefore, the problem of the floor determination is another important issue for positioning problem besides the target's coordinate. It should not be overlooked for the multi-floor positioning systems that require acceptable accuracy. This reason has motivated researchers to develop the floor estimation algorithm to extend the capability of indoor positioning system.

Based on our review, there are three types of multi-floor positioning techniques. The first type estimates the floor first and then determines the target's location later. The second type estimates the target's location and then specifies floor number later. The third type defines the target's location and its floor number simultaneously. In [8], the authors proposed Wi-Fi-based indoor positioning system that combined both characteristic of trilateration and scene analysis methods. Their algorithm could estimate a target's floor by using signal strength of *access points (APs)* from different floors and therefore could determine the location of the target. In [9], the authors presented multi-floor positioning technique that did not require a time-consuming offline phase in order to build the radio map. The algorithm in the online phase computes the user's location first and then the floor number later. In [10], the authors studied how to reduce offline phase effort by collecting only labeled data on one floor (i.e. location fingerprints), while collecting unlabeled data on other floors. The location estimation process in the online phase is used to find the best match in database. Thus, their technique could compute the location and the floor number of the target at the same time.

In [11], the authors proposed new Wi-Fi-based indoor positioning algorithms in order to determine the target's floor. They designed two different approaches which used Wi-Fi signal to estimate the target's floor. Their approaches are called the nearest floor algorithm and the group variance algorithm.

A. Nearest Floor Algorithm

This algorithm based on the *K-Nearest Neighbor algorithm (KNN algorithm)* is called nearest floor algorithm. This technique requires collecting the RSS during offline calibration phase in order to build the database. They do not need to record the signals from all APs to build fingerprint database. Instead, the algorithm only records the best signal as maximum RSS value for each AP into its reference database. In each row of the reference database, the algorithm includes *reference identification (reference ID)*, MAC address of APs, the floor number, and the maximum RSS, respectively. Whenever there is a request for a floor determination, the system will compare the strong Wi-Fi signal reading in the online phase with the reference database. Their system will select the closest k APs ($k=3$). The final result of this algorithm is the selection of the best matched floor number from the reference database.

B. Group Variance Algorithm

The group variance algorithm considers the distribution of the RSS values in each floor. It takes into account three statistical parameters obtained from each AP, which consists of the range, the variance, and the availability. The algorithm adds weighted values based on their proposed criteria to determine the best score called floor points for selecting a floor number. It utilizes the RSS statistics during online phase only. Whenever there is a request for target's floor, all above statistical parameters were used to calculate the floor points. After comparing the floor points on each floor, the algorithm selects the estimate floor number with the maximum number of floor points.

III. SUM-RSS FLOOR ALGORITHM

In this section, we will describe our floor estimation algorithm for the indoor multi-story positioning systems. The proposed algorithm utilizes the online RSS values received from the *reference nodes (RNs)* to determine the floor number where the target node is located. RNs are wireless transceivers that are installed on each floor and can respond to a signal inquiry from a target node of which we want to know the position.

Fig. 1 illustrates an example of the structure of the indoor positioning system in the three-story building. In this system, four RNs are installed on each floor. Dashed lines represent RSS that the target node receives from all RNs. Our approach does not require time consuming procedure during the offline phase to create the database of the radio signal strength. Instead, the proposed algorithm utilizes the RSS values gathered in real time to perform floor determination.

The proposed algorithm will be called the *sum-RSS floor algorithm*. It simplifies the concept of signal summation and determines the target's floor by calculating summation of the average RSS values from all RNs of each floor as written in (1) where S_{fn} refers to average RSS value from RN n^{th} on floor f , N denotes the number of RNs on each floor. Note that the number of RNs on each floor is equal and the unit of S_{fn} and Sum_f are dBm.

$$Sum_f = \sum_{n=1}^N S_{fn} \quad (1)$$

Fig. 2 depicts the flow chart of the sum-RSS floor algorithm. First, the target node scans RSS vector from RNs inside the building. This results in a set of RSS values and reference IDs of RNs. During the signal inquiry process, we scan the RSS vector 100 times from each RN. Then, if the RSS value from any RN is not available, we will assume that the RSS value of such RN is -110 dBm. This means that the received signal at the target node from that RN is too weak. Then we use the 10- and 90- percentiles approach to remove RSS values which are outliers [12]. After that the average RSS value of each RN is calculated by using the remaining data points of RSS values. Then we calculate the summation of the average RSS value on each floor as written in (1). Finally, our floor estimation algorithm selects the floor number that has the

highest value of RSS summation and reports the floor where the target node situates.

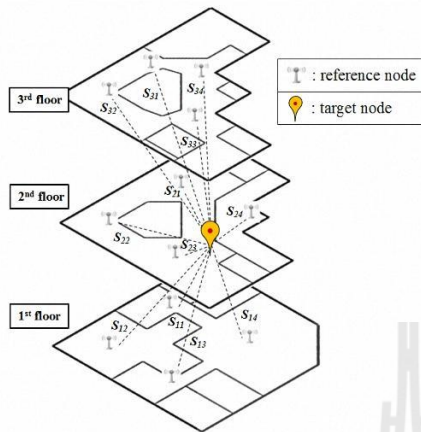


Figure 1. Floor determination schematic diagram, each line show the RSS from different RNs

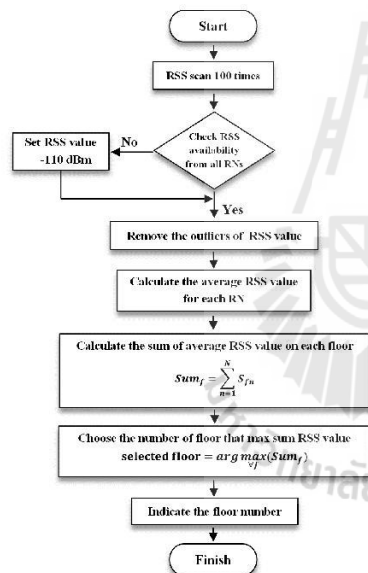


Figure 2. Flow chart of the sum-RSS floor algorithm

IV. EXPERIMENTAL SETUPS

Extensive experimental studies were conducted to analyze the accuracy of the proposed floor estimation algorithm, compared with other algorithms in the literature, including the nearest floor algorithm and the group variance algorithm [11]. The three-story library building at Suranaree University of Technology was used as a test bed. The area's dimension of each floor is approximately 35m × 35m with the floor plan as shown in Fig. 3. Fifty test points on each floor were randomly selected for the floor determination test (blue stars in Fig. 3a-c).

Two scenarios of the multi-story positioning system were used in the experiments. The first scenario deploys two RNs on each floor whereas the second scenario deploys four RNs on each floor. Fig. 3a to 3c show the cases of using four RNs on each floor. Fig. 4a depicts one of RNs which is installed at the height of 2m. Fig. 4b depicts the target node used for the floor determination test. It is a mobile node consisting of the wireless transceiver connected to a computer notebook where the floor estimation algorithms were run. The height of the wireless transceiver of the target node is 0.8m. The wireless transceivers

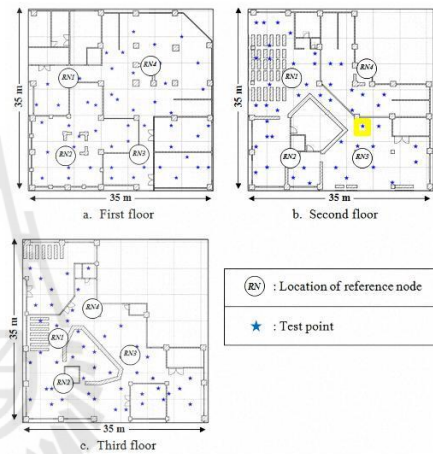


Figure 3. Experimental floor plan of multi-floor building

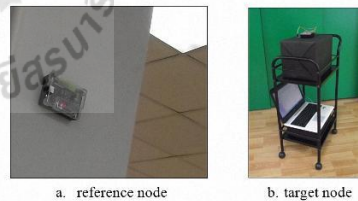


Figure 4. Experimental equipment in this work

of RNs and the target node were deployed using an IEEE 802.15.4 wireless nodes which are based on Freescale MC13224V third generation chipset with built-in ARM7TDMI processor. The antennas of RNs and target node are inverted F-shape antennas and all nodes operate at 2.480 GHz (or channel 26 of IEEE 802.15.4 standard). Table I shows parameters of the wireless transceivers used in our implementation.

V. RESULTS AND ANALYSIS

First we analyze characteristics of the received signal strength from all RNs installed in different floors. We consider the case that deploys two RNs on each floor. From Fig. 3, RN2 and RN4 of each floor are used. We recorded the received signal strength at 50 test points on the third floor (blue stars in Fig. 3c). Fig. 5 shows the average received signal strength from each RN at each test point on the third floor. Solid lines, dashed lines and dotted lines are the average received signal strength from RNs located on the first, second, and third floor, respectively. We can observe that the dotted line tends to be higher than the other lines. This means that for 50 test points on the third floor, the received signal strength from RNs located on the third floor is stronger than those received from RNs located on the first and the second floor. Using these observed results and characteristics, we developed the floor estimation algorithm which can indicate the floor number where the test point located as described in detail in Section III.

Next we demonstrate how the proposed floor estimation algorithm works. We consider the case that deploys four RNs on each floor as shown in Fig. 3. We want to determine the floor number of the test point highlighted in yellow in Fig. 3b. Table II reports the average received signal strength at the considered test point from RN1, RN2, RN3, and RN4 located on each floor. The last column on the right of Table II shows the summation of the received signal strength from RNs of each floor. We can see that the highest value is -318.9 dBm which is the summation of the received signal strength from RNs on the second floor. Thus, the proposed floor estimation algorithm indicates that the considered test point is located on the second floor which is correct.

Finally, the accuracy of the proposed floor estimation algorithm, sum-RSS floor algorithm, was evaluated by comparing the percentage of the correct floor estimation with that of the other techniques existed in the literature, including the nearest floor algorithm and the group variance algorithm [11]. We conducted experiments based on two scenarios of the multi-story positioning system. In the first scenario, two RNs are deployed on each floor of the three-story building whereas in the second scenario, four RNs are deployed on each floor (as shown in Fig. 3). For each scenario, we conducted 150 floor-determination tests on 50 test points of each floor (blue stars in Fig. 3a-c).

Fig. 6 reports the percentage of the correct floor estimation comparing three algorithms on those two scenarios. We can see that the proposed sum-RSS floor algorithm outperforms the other two algorithms in both scenarios. The sum-RSS floor algorithm results in the correct floor estimation higher than 90% in both scenarios whereas the nearest floor algorithm and the group variance algorithm yield the correct floor estimation

TABLE I. SPECIFICATION OF A WIRELESS TRANSCIVER

Hardware	Specification	
Sensor node	Manufacturer	Freescale
	Chipset	MC13224V
	Frequency range	2.405 GHz – 2.480 GHz
	Transmit power	4.5 dBm
	Operating channel	CH 26 (2.480 GHz)
Antenna	Inverted F-antenna	

TABLE II. RECEIVED SIGNAL STRENGTH STATISTICS FROM ALL RNs ON EACH FLOOR

Floor	Received Signal Strength (dBm)				Sum RSS from RNs on each floor
	RN1	RN2	RN3	RN4	
1 st	-111.54	-116.14	-94.76	-83.98	-406.42
2 nd	-88.37	-87.44	-77.93	-65.16	-318.90
3 rd	-99.26	-99.14	-93.89	-100.53	-392.82

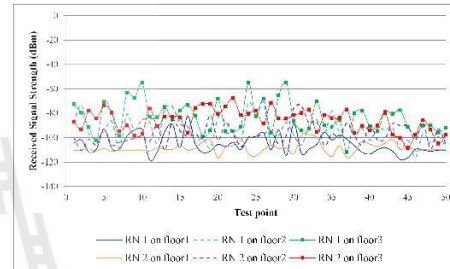


Figure 5. Average received signal strength from each RN at each test point on the third floor (Case1 - deploying two RNs per floor)

around 80% and 70%, respectively. Comparing two scenarios, we can observe the effects of the number of RNs deployed on each floor. In Fig. 6, we can see that all floor estimation algorithms studied here yield better results in the case that deployed four RNs on each floor. In particular, the sum-RSS floor algorithm can increase the percentage of the correct floor estimation up to 98.67%. Our future research will investigate on this factor in more detail.

In analyzing the false floor estimation, we found three types of errors. For the first error, the algorithm could not indicate the floor number because there are more than one answer. We denote this error as *can't predict*. The other two errors are *one-floor error* and *two-floor error*. In case of the one-floor error, the algorithm indicated one floor above or below the actual floor number that the test point located. In case of the two-floor error, the algorithm indicated two floors above or below the actual floor that the test point located. Fig. 7 and Fig. 8 report the percentage of the false floor estimation comparing three floor estimation algorithms on those three types of errors for the case that on each floor deploying two and four RNs, respectively.

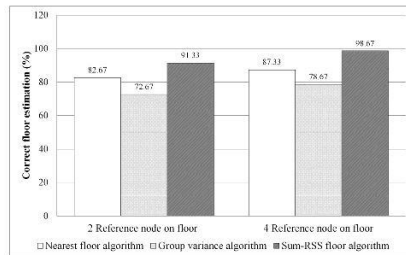


Figure 6. The correct floor estimation of each algorithm in two scenarios

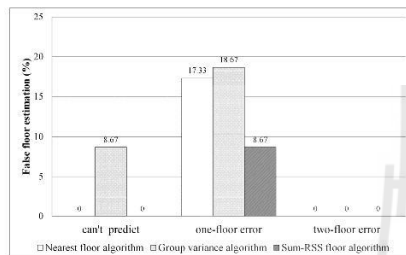


Figure 7. The false floor estimation of each algorithm for two RNs on floor

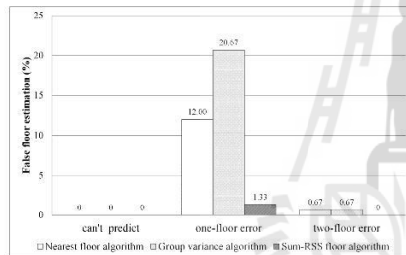


Figure 8. The false floor estimation of each algorithm for four RNs on floor

Fig. 7 shows that the group variance algorithm results in highest percentage of false floor estimation of the first and the second type of errors. It can be observed that the one-floor error occurs in all three algorithms. However, the sum-RSS floor algorithm yields the lowest percentage of the false floor estimation for the one-floor error. Note that the two-floor error does not occur in this scenario in which two RNs were deployed on each floor.

Fig. 8 shows superiority of the sum-RSS floor algorithm compared with the other two algorithms in the scenarios in which four RNs were deployed on each floor. We can see that although the one-floor error occurs in all three floor estimation algorithms, the sum-RSS floor algorithm results in the lowest

percentage of the false floor estimation, which is less than 1.5 %.

VI. CONCLUSION

In this research, we presented the floor estimation algorithm for the indoor multi-story positioning systems. We proposed a simple floor estimation algorithm named the sum-RSS floor algorithm. Our algorithm utilizes the online received signal strength from the reference nodes to determine the floor number where the target node is located. The proposed algorithm does not require the offline phase to create maps of the radio signal strength. Extensive experiments were conducted to compare the proposed algorithm with the other floor estimation algorithms. The experimental results showed that the sum-RSS floor algorithm outperformed the other algorithms and could provide high percentage of the correct floor estimation up to 98.67%. Our future work will incorporate other parameters of the indoor environments to determine not only the floor number but also the position of the target node in the indoor multi-story building.

REFERENCES

- [1] G. M. Djukic and R. E. Richton, "Geolocation and assisted GPS," in *IEEE Computer*, February 2001, pp. 123-125.
- [2] C. Esposito, D. Cotroneo, and M. Ficca, "Calibrating RSS-based indoor positioning systems," in *2009 IEEE Int. Conf. on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, October 2009, pp. 1-6.
- [3] Y. Chen and R. Luo, "Design and implementation of a WiFi-based local locating system," in *2007 IEEE Int. Conf. on Portable Information Devices*, May 2007, pp. 1-5.
- [4] M. Garcia, C. Martinez, J. Tomas, and J. Lloret, "Wireless sensors self-location in an indoor WLAN environment," in *2007 Int. Conf. on Sensor Technologies and Applications*, October 2007, pp. 146-151.
- [5] Widiyawan, M. Klepal, and D. Pesch, "Influence of predicted and measured fingerprint on the accuracy of RSSI-based indoor location systems," in *4th Workshop on Positioning, Navigation, and Communication*, March 2007, pp. 145-151.
- [6] IEEE standard for local and metropolitan area networks-part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), IEEE std. 802.15.4, September 2011, pp. 1-314.
- [7] N. Salman, I. Rasool, and A. H. Kemp, "Overview of the IEEE 802.15.4 standards family for Low Rate Wireless Personal Area Networks," September 2010, pp. 701-705.
- [8] H. H. Liu and Y. N. Yang, "WiFi-based indoor positioning for multi-floor Environment," in *The 2011 IEEE Region 10 Conference*, November 2011, pp. 597-601.
- [9] A. S. Al-Ahmadi, T. A. Rahman, M. R. Kamarudin, M. H. Jamaluddin, and A. I. Omer, "Single-phase wireless LAN based multi-floor indoor location determination system" in *2011 IEEE 17th Int. Conf. on Parallel and Distributed Systems*, December 2011, pp. 1057-1062.
- [10] H. Y. Wang, V. W. Zheng, Z. Junhui, and Y. Qiang, "Indoor localization in multi-floor environments with reduced effort," *2010 IEEE Int. Conf. on Pervasive Computing and Communications*, March-April 2010, pp. 244-252.
- [11] F. Alshely, T. Arslan, and Z. Sevak, "Indoor positioning with floor determination in multi story buildings," in *Int. Conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, September 2011, pp. 1-7.
- [12] R. Jain, *The art of computer systems performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling*, CA: Wiley, 1991.

ประวัติผู้เขียน

นายเกรียงไกร มณีรัตน์ เป็นบุตรของ พันตำรวจโท ถาวร มณีรัตน์ (เสียชีวิตในขณะปฏิบัติหน้าที่) และนางสมพิศ มณีรัตน์ เกิดเมื่อวันอาทิตย์ที่ 22 พฤศจิกายน พุทธศักราช 2530 ที่จังหวัด นครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต และระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี การศึกษา 2552 และ 2555 ตามลำดับ โดยมีอาจารย์ที่ปรึกษาคือ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชุตินา พรหมมาก และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมคือ อาจารย์ ดร.กมล เขมะรังษี ทั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจในด้านการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุไร้สายภายในอาคารที่ประยุกต์ใช้เครือข่ายสื่อสารไร้สาย IEEE 802.15.4 (ZigBee) จึงได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิตปีการศึกษา 2556 ในสาขาเดิม จากการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ และความเข้าใจทางด้านระบบระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารเป็นอย่างดี อีกทั้งยังมีบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่าง การศึกษาหลายบทความ

