การวิเคราะห์ความแม่นยำของการหาตำแหน่งภายในอาคาร
โดยใช้เทคนิคการพิมพ์ลายนิ้วมือ

ACCURACY ANALYSIS OF INDOOR POSITIONING
USING FINGERPRINTING TECHNIQUE

กัญญาณี พุทธ์เจริญ
KANYANEE PHUTCHAROEN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2565

KMITL-2022-EN-M-029-094

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ACCURACY ANALYSIS OF INDOOR POSITIONING USING FINGERPRINTING TECHNIQUE WITH ANGLE DIVERSITY

KANYANEE PHUTCHAROEN

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2022
KMITL-2022-EN-M-029-094

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2022

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ความแม่นยำของการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคนิคการพิมพ์ลายนิ้วมือ
นักศึกษา	นางสาวกัญญาณี พุทธ์เจริญ
รหัสประจำตัว	60601208
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2565
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.พิชญ สุพรรณกูล

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันได้เริ่มมีการนำบีคอนที่ใช้บลูทูธพลังงานต่ำ (Bluetooth Low Energy: BLE) มาใช้อย่างกว้างขวางสำหรับการหาตำแหน่งโดยเฉพาะสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร แต่อย่างไรก็ตามยังเกิดค่าผิดพลาดสูงอยู่เนื่องจากการจางหายหลายวิถีหนาแน่นที่มักเกิดขึ้นในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร วิทยานิพนธ์นี้จึงได้วิเคราะห์ความแม่นยำของการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคนิคการพิมพ์ลายนิ้วมือร่วมกับบีคอน BLE สภาวะแวดล้อมภายในอาคารเป็นห้องขนาด 91.8 ตารางเมตร ที่มีบีคอน BLE 3 ตัว และอุปกรณ์ของผู้ใช้ (User Equipment: UE) เป็น iPhone รุ่น XS Max ที่มีโปรแกรม Beacon Analyzer ใช้วัดความเข้มสัญญาณภาครับ (Received Signal Strength: RSS) ของบีคอน BLE แต่ละตัว โดยใช้เทคนิคการพิมพ์ลายนิ้วมือกับการจับคู่ค่าผิดพลาดรากที่สองเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square: RMS) น้อยสุดเพื่อประมาณหาตำแหน่งของ UE วิเคราะห์ความแม่นยำจากการวัดครั้งเดียวและค่าเฉลี่ยการวัดห้าครั้ง แสดงลายนิ้วมือ RSS ของบีคอน BLE แต่ละตัว หาค่าและแสดงฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF) และฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function: CDF) ของค่าผิดพลาดระยะทาง จากผลที่ได้กรณีค่าเฉลี่ยการวัดห้าครั้งสามารถลดค่าความผิดพลาดระยะทางได้ประมาณ 0.90 เมตร เมื่อเทียบการรวัดครั้งเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Accuracy Analysis of Indoor Positioning Using Fingerprinting Technique
Student	Miss.Kanyanee Phutcharoen
Student ID	60601208
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2022
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr.Pichaya Supanakoon

ABSTRACT

Currently, Bluetooth low energy (BLE) beacons are widely used for positioning, especially an indoor environment. However, there is still high error due to dense multipath fading that often occurs in the indoor environment. This thesis analysis the accuracy of indoor positioning using fingerprinting technique with BLE beacons. The indoor environment is the room of 91.8 square meter with 3 BLE beacons. The user equipment (UE), iPhone XS Max, with Beacon Analyzer application is used to measure the received signal strength (RSS) of each BLE beacon. Fingerprinting technique with least root mean square (RMS) error matching is used to estimate the position of UE. The accuracy that obtained from single measurement and average five measurements are studied. The RSS fingerprint of each BLE beacon is shown. The probability density function (PDF) and cumulative distribution function (CDF) of distance error are evaluated and illustrated. From the results, the average five measurements can reduce the average distance error about 0.9 meter compared to from single measurement.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดีด้วยคำแนะนำ ชี้แนะแนวทางการแก้ปัญหาและคอยดูแลตลอดระยะเวลาที่ทำวิทยานิพนธ์นี้จาก ผศ.ดร.พิชญ สุพรรณกูล ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ และ ผศ.ดร.สถาพร พรหมวงศ์ ที่ให้คำแนะนำ และคอยชี้แนะแนวทางเกี่ยวกับโครงงานวิจัยอย่างดีมาโดยตลอด ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำและคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ในห้องวิจัย UWBRS ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจให้มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ที่คอยเป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกด้านมาโดยตลอด ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

กัญญาณี พุทธ์เจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II
กิตติกรรมประกาศ III
สารบัญ IV
สารบัญตาราง VI
สารบัญรูป VII
รายการคำย่อและสัญลักษณ์ VIII
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา 1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา 2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย 2
1.5 ขอบเขตการวิจัย 2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา 2

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ 4
2.1 บทนำ 4
2.2 เทคนิคการพิมพ์ลายนิ้วมือ 4
2.3 เทคโนโลยี BLE 6
2.4 บทสรุป 7

บทที่ 3 การวิเคราะห์ความแม่นยำ 8
3.1 บทนำ 8
3.2 แบบจำลองการวัด 9
3.3 ลายนิ้วมือ 9
3.4 ค่าผิดพลาดระยะทาง 9
3.5 บทสรุป 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแม่นยำ 11
4.1 บทนำ 11
4.2 ลายนิ้วมือ 11
4.3 ค่าผิดพลาดระยะทางที่แต่ละตำแหน่ง 15
4.4 ค่าผิดพลาดระยะทางเชิงสถิติ 17
4.5 บทสรุป 21

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 22
5.1 สรุปผลการวิจัย 22
5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางการพัฒนางานวิจัย 23

เอกสารอ้างอิง 24
ประวัติผู้เขียน 26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 พารามิเตอร์ของ BLE เทียบกับบลูทูธแบบดั้งเดิม 6

5.1 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของลายนิ้วมือ 22

5.2 ค่าเฉลี่ยและค่ามัธยฐานของค่าผิดพลาดระยะทาง 23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

3.1 แผนผังของห้องที่ใช้สำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร 8
4.1 ลายนิ้วมือของบีคอน BLE ตัวที่ 1 ในกรณีวัดครั้งเดียว 11
4.2 ลายนิ้วมือของบีคอน BLE ตัวที่ 2 ในกรณีวัดครั้งเดียว 12
4.3 ลายนิ้วมือของบีคอน BLE ตัวที่ 3 ในกรณีวัดครั้งเดียว 12
4.4 ลายนิ้วมือของบีคอน BLE ตัวที่ 1 ในกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกัน 13
4.5 ลายนิ้วมือของบีคอน BLE ตัวที่ 1 ในกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกัน 13
4.6 ลายนิ้วมือของบีคอน BLE ตัวที่ 1 ในกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกัน 14
4.7 ค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวกว้างที่แต่ละตำแหน่งกรณีวัดครั้งเดียว 14
4.8 ค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวยาวที่แต่ละตำแหน่งกรณีวัดครั้งเดียว 15
4.9 ค่าผิดพลาดระยะทางที่แต่ละตำแหน่งกรณีวัดครั้งเดียว 15
4.10 ค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวกว้างที่แต่ละตำแหน่งกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกัน 16
4.11 ค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวยาวที่แต่ละตำแหน่งกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกัน 16
4.12 ค่าผิดพลาดระยะทางที่แต่ละตำแหน่งกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกัน 17
4.13 PDF ของค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวกว้าง 18
4.14 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวกว้าง 18
4.15 PDF ของค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวยาว 19
4.16 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวยาว 19
4.17 PDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง 20
4.18 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์

บลูทูธพลังงานต่ำ (Bluetooth Low Energy)	BLE
ฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function)	CDF
การแผ่สเปกตรัมแบบลำดับตรง (Direct Sequence Spread Spectrum)	DSSS
การแผ่สเปกตรัมแบบการกระโดดความถี่ (Frequency Hopping Spread Spectrum)	FHSS
ระบบการหาตำแหน่งโลก (Global Positioning System)	GPS
อุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ (Industrial Sciences Medicine)	ISM
เส้นทางการมองเห็น (Line of Sight)	LOS
ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function)	PDF
รากที่สองเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square)	RMS
ความเข้มสัญญาณภาครับ (Received Signal Strength)	RSS
อุปกรณ์ของผู้ใช้ (User Equipment)	UE
โครงข่ายพื้นที่ส่วนบุคคลไร้สาย (Wireless Personal Area Network)	WPAN
บิตต่อวินาที (bits per second)	bps
กิโลบิตต่อวินาที (kilobit per second)	kbps
เมกะบิตต่อวินาที (megabit per second)	Mbps
เดซิเบล (decibel)	dB
เดซิเบลมิลลิวัตต์ (decibel milliwatt)	dBm
เมตร (meter)	m
ตารางเมตร (square meter)	m^2
แอมแปร์ (ampere)	A
มิลลิแอมแปร์ (milliampere)	mA
เฮิร์ทซ์ (hertz)	Hz
จิกะเฮิร์ทซ์ (gigahertz)	GHz
เมกะเฮิร์ทซ์ (megahertz)	MHz
วัตต์ (watt)	W
มิลลิวัตต์ (milliwatt)	mW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

ระยะห่างของแต่ละตำแหน่งตามแนวกว้าง (Space Distance of Each Position Point along Width), m	Δx
ระยะห่างของแต่ละตำแหน่งตามแนวยาว (Space Distance of Each Position Point along Length), m	Δy
พิกัดตำแหน่ง (i,j) (Position Coordinates (i,j))	(i,j)
พิกัดตำแหน่งของ UE ที่ประมาณได้ (Estimated Position Coordinates of UE)	(i_e,j_e)
พิกัดตำแหน่งของ UE ที่ถูกต้อง (Correct Position Coordinates of UE)	(i_c,j_c)
ตำแหน่งที่ i ตามแนวกว้าง (i^{th} Wide Position)	i
ตำแหน่งที่ถูกต้องที่ i_c ตามแนวกว้าง (${i_c}^{th}$ Correct Wide Position)	i_c
ตำแหน่งที่ประมาณได้ที่ i_e ตามแนวกว้าง (${i_e}^{th}$ Estimated Correct Wide Position)	i_e
จำนวนตำแหน่งทั้งหมดตามแนวกว้าง (Total Number of Wide Position)	i_{max}
ตำแหน่งที่ j ตามแนวยาว (j^{th} Long Position)	j
ตำแหน่งที่ถูกต้องที่ j_c ตามแนวยาว (${j_c}^{th}$ Correct Long Position)	j_c
ตำแหน่งที่ประมาณได้ที่ j_e ตามแนวยาว (${i_e}^{th}$ Estimated Correct Long Position)	j_e
จำนวนตำแหน่งทั้งหมดตามแนวยาว (Total Number of Long Position)	j_{max}
บีคอน BLE ตัวที่ k (k^{th} BLE Beacon)	k
จำนวนบีคอน BLE ทั้งหมด (Total Number of BLE Beacon)	k_{max}
ค่าผิดพลาดรระยะทาง (Distance Error), m	E_d
ค่าผิดพลาด RMS ที่พิกัดตำแหน่ง (i,j) (RMS Error at Position Coordinates (i,j)), dB	$E_{i,j}$
ค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวกว้าง (Wide Distance Error), m	E_x
ค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวยาว (Long Distance Error), m	E_y
RSS ของบีคอน BLE ตัวที่ k (RSS of k^{th} BLE Beacon), dBm	$P_{i,j}$
RSS ของบีคอน BLE ตัวที่ k ที่ตำแหน่งพิกัด (i,j) (RSS of k^{th} BLE Beacon at Position Coordinates (i,j)), dBm	$P_{i,j}^k$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การหาตำแหน่งภายในอาคารได้กลายมาเป็นหัวข้อที่สำคัญในปัจจุบัน โดยจะเห็นได้ว่ามีงานวิจัยเกี่ยวกับการหาตำแหน่งภายในอาคารจำนวนมาก รวมทั้งการให้บริการรูปแบบใหม่ที่ได้ประยุกต์ใช้การหาตำแหน่งเกิดขึ้นมา [1]-[5] ระบบการหาตำแหน่งโลก (Global Positioning System: GPS) ได้นำมาใช้หาตำแหน่งภายนอกอาคารอย่างแพร่หลาย แต่การหาตำแหน่งภายในอาคารไม่สามารถใช้ GPS ได้ เนื่องจากรับสัญญาณดาวเทียมได้ระดับน้อยมาก และไม่ได้เป็นสภาวะแวดล้อมเส้นทางการมองเห็น (Line of Sight: LOS) จึงทำให้เกิดค่าผิดพลาดมาก เทคโนโลยีบีคอนที่ใช้บลูทูธพลังงานต่ำ (Bluetooth Low Energy: BLE) ได้เข้ามามีบทบาทในด้านการหาตำแหน่งภายในอาคาร เนื่องจากมีราคาถูก ติดตั้งได้ง่าย และพัฒนาได้ง่ายผ่านทางโปรแกรมในโทรศัพท์มือถือหรืออุปกรณ์ของผู้ใช้ (User Equipment: UE) [6] ได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่ได้นำบีคอน BLE มาใช้หาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคนิคการหาตำแหน่งแบบต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น การหาตำแหน่งที่ใช้แบบจำลองการสูญเสียเชิงวิถี [7] การหาตำแหน่งที่ใช้จุดศูนย์ถ่วงน้ำหนัก [8] และการหาตำแหน่งที่ใช้เทคนิคการพิมพ์ลายนิ้วมือ [9]-[10] แต่อย่างไรก็ตาม การหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้บีคอน BLE ยังเกิดค่าผิดพลาดสูงอยู่เนื่องจากการจางหายหลายวิถีหนาแน่นที่มักเกิดขึ้นในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร ดังนั้น การวิเคราะห์ความแม่นยำจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อพัฒนาเทคนิคสำหรับลดค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้นนี้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้คือการวิเคราะห์ความแม่นยำของการหาตำแหน่งภายในอาคาร โดยได้เลือกใช้เทคนิคการพิมพ์ลายนิ้วมือสำหรับใช้หาตำแหน่งภายในอาคารเนื่องจากเป็นเทคนิคที่ใช้ได้กับทั้งสภาวะแวดล้อม LOS และไม่ได้เป็นสภาวะแวดล้อม LOS ซึ่งมีโอกาสเกิดขึ้นภายในอาคาร ทำการวิเคราะห์ความแม่นยำในเทอมของค่าผิดพลาดระยะทางโดยแสดงให้เห็นค่าผิดพลาดที่แต่ละตำแหน่ง และวิเคราะห์เชิงสถิติในเทอมของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF) และฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function: CDF)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เนื่องจากในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาความแม่นยำของการหาตำแหน่งภายในอาคาร ซึ่งเป็นสภาวะแวดล้อมที่มีการจางหายหลายวิถีมาก เป็นผลทำให้เกิดค่าผิดพลาดระยะทางมาก ดังนั้นเพื่อจะลดผลกระทบของการจางหายหลายวิถี จึงได้ทำการวัดที่แต่ละตำแหน่งหลายครั้งแล้วนำมาเฉลี่ยกัน โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้วิเคราะห์ความแม่นยำที่ได้จากการวัดครั้งเดียวและค่าเฉลี่ยการวัดห้าครั้ง

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้เทคนิคการพิมพ์ลายนิ้วมือสำหรับหาตำแหน่งภายในอาคาร ใช้วิธีจับคู่ค่าผิดพลาดรากที่สองเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square: RMS) น้อยสุดเพื่อประมาณหาตำแหน่งของอุปกรณ์ของผู้ใช้ (User Equipment: UE) ในการวิเคราะห์ความแม่นยำของการหาตำแหน่งภายในอาคารจะพิจารณาในเทอมของค่าผิดพลาดระยะทาง ค่าผิดพลาดระยะทางนี้จะถูกวิเคราะห์ที่แต่ละตำแหน่ง และวิเคราะห์เชิงสถิติในเทอมของ PDF และ CDF ของการวัดครั้งเดียวเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยการวัดห้าครั้ง

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้วิเคราะห์ความแม่นยำของการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคนิคการพิมพ์ลายนิ้วมือ สภาวะแวดล้อมภายในอาคารเป็นห้องขนาดกว้าง 9.0 m ยาว 10.2 m มีพื้นที่ 91.8 m^2 ทำการวัดทั้งหมด 168 ตำแหน่ง ใช้บีคอน BLE ทั้งหมด 3 ตัว ติดอยู่ที่ผนังด้านซ้าย ด้านขวา และด้านหลังของห้อง UE เป็น iPhone รุ่น XS Max ที่มีโปรแกรม Beacon Analyzer ถูกนำมาใช้วัดความเข้มสัญญาณภาครับ (Received Signal Strength: RSS) ของบีคอน BLE แต่ละตัว ได้ใช้เทคนิคการพิมพ์ลายนิ้วมือกับการจับคู่ค่าผิดพลาด RMS น้อยสุด เพื่อประมาณหาตำแหน่งของ UE ได้แสดงลายนิ้วมือ RSS ของบีคอน BLE แต่ละตัว ทำการวิเคราะห์ค่าผิดพลาดระยะทางที่แต่ละตำแหน่ง PDF และ CDF ของค่าผิดพลาดระยะทางที่ได้จากการวัดครั้งเดียวและจากค่าเฉลี่ยการวัดห้าครั้งแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 กล่าวถึง บทนำ ซึ่งประกอบไปด้วยความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

เอกสารนี้ได้รับอนุญาตให้ใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 กล่าวถึง ทฤษฎีและหลักการ ซึ่งประกอบไปด้วย บทนำ เทคนิคการพิมพ์ลายนิ้วมือ เทคโนโลยี BLE และบทสรุป

บทที่ 3 การวิเคราะห์ความแม่นยำ ซึ่งประกอบไปด้วย บทนำ แบบจำลองการวัด ลายนิ้วมือ ค่าผิดพลาดระยะทาง และบทสรุป

บทที่ 4 กล่าวถึง ผลการวิเคราะห์ความแม่นยำ ซึ่งประกอบไปด้วย บทนำ ลายนิ้วมือ ค่าผิดพลาดระยะทางที่แต่ละตำแหน่ง ค่าผิดพลาดระยะทางเชิงสถิติ และบทสรุป

บทที่ 5 กล่าวถึง สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ซึ่งประกอบไปด้วยสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะแนวทางการพัฒนางานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 บทนำ

เทคนิคการพิมพ์ลายนิ้วมือซึ่งเป็นเทคนิคที่นำมาใช้หาตำแหน่งภายในอาคารอย่างแพร่หลาย มีวิธีใช้ประมาณหาตำแหล่งหลายวิธี เช่น บนพื้นฐานบนเพื่อนบ้านใกล้สุด (Nearest Neighbor) [11]-[12] วิธีการจำคู่ค่าผิดพลาดรากที่สองเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square: RMS) น้อยสุด [13] และวิธีการเรียนรู้เชิงลึก [14] นอกจากนั้นยังนำไปประยุกต์ใช้กับระบบวายฟาย (WiFi) [15] ซิกบี (ZigBee) [16] โครงข่ายเซลลูลาร์ (Cellular Network) [17] และบลูทูธพลังงานต่ำ (Bluetooth Low Energy: BLE) [18] ในบทนี้ ได้กล่าวถึงเทคนิคการพิมพ์ลายนิ้วมือที่ใช้วิธีการจำคู่ค่าผิดพลาดรากที่สองเฉลี่ยกำลังสอง หลังจากนั้นกล่าวถึงเทคโนโลยีบลูทูธพลังงานต่ำ (Bluetooth Low Energy: BLE) [19] ซึ่งเป็นส่วนของบีคอนที่นำมาใช้ส่งสัญญาณ

2.2 เทคนิคการพิมพ์ลายนิ้วมือ

เทคนิคการพิมพ์ลายนิ้วมือเป็นเทคนิคหนึ่งที่นิยมนำมาใช้หาตำแหน่งภายในอาคาร เทคนิคนี้ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนที่ใช้อุปกรณ์ของผู้ใช้ (User Equipment: UE) วัดรวบรวมลายนิ้วมือของแต่ละตำแหน่งครอบคลุมพื้นที่การใช้งานทั้งหมด และสร้างเป็นฐานข้อมูล ขั้นตอนที่สองเป็นขั้นตอนที่ต้องการประมาณหาตำแหน่งของ UE โดย UE วัดลายนิ้วมือที่ตำแหน่งของ UE แล้วนำลายนิ้วมือที่วัดได้นี้ไปจับคู่เปรียบเทียบกับลายนิ้วมือที่อยู่ในฐานข้อมูล และตัดสินใจว่าลายนิ้วมือที่วัดได้นี้ใกล้เคียงกับลายนิ้วมือในฐานข้อมูลที่ตำแหน่งใดมากที่สุด ตำแหน่งที่ได้นี้ถูกกำหนดให้เป็นตำแหน่งของ UE

ขั้นตอนแรก ลายนิ้วมือกำหนดให้เป็นความเข้มสัญญาณภาครับ (Received Signal Strength: RSS) ของบีคอน BLE แต่ละตัวและแต่ละตำแหน่ง ลายนิ้วมือซึ่งเป็น RSS ที่ตำแหน่งพิกัดตำแหน่ง (i,j) หรือตำแหน่งตามแนวกว้างที่ i ตามแนวยาวที่ j และของบีคอน BLE ตัวที่ k แทนด้วย $P_{i,j}^{k}$ เมื่อ $i = 1, 2, \dots, i_{max}$, $j = 1, 2, \dots, j_{max}$ และ $k = 1, 2, \dots, k_{max}$ โดยที่ i_{max} เป็นจำนวนตำแหน่งตามแนวกว้างทั้งหมด j_{max} เป็นจำนวนตำแหน่งตามแนวยาวทั้งหมด และ k_{max} เป็นจำนวนบีคอน BLE ที่ใช้ทั้งหมด ซึ่งทำให้ฐานข้อมูลมีจำนวนข้อมูลทั้งหมด $i_{max} \times j_{max} \times k_{max}$ ข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่สอง เป็นการประมาณหาตำแหน่งของ UE โดยใช้ UE วัดลายนิ้วมือซึ่งเป็น RSS ของบีคอน BLE แต่ละตัว กำหนดให้ลายนิ้วมือซึ่งเป็น RSS ของบีคอน BLE ตัวที่ k แทนด้วย P^k ซึ่งจำนวนลายนิ้วมือที่วัดได้ในขั้นตอนนี้มีทั้งหมด k_{max} ข้อมูล ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ประมาณหาตำแหน่งโดยใช้วิธีการจับคู่ค่าผิดพลาด RMS น้อยสุด ค่าผิดพลาด RMS ระหว่างลายนิ้วมือที่ UE วัดได้กับลายนิ้วมือในฐานข้อมูลที่ตำแหน่งพิกัดตำแหน่ง (i, j) หาได้จาก

$$E_{i,j} = \sqrt{\frac{1}{k_{max}} \sum_{k=1}^{k_{max}} \left(P^k - P_{i,j}^k\right)^2} \tag{2.1}$$

พิกัดตำแหน่งของ UE (i_e, j_e) ประมาณเป็นพิกัดที่มีค่าผิดพลาด RMS น้อยสุด ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$(i_e, j_e) = \arg\min_{(i,j)} E_{i,j} \tag{2.2}$$

ในการวิเคราะห์หาความแม่นยำของการหาตำแหน่งภายในอาคารจะพิจารณาในเทอมของค่าผิดพลาดระยะทาง ซึ่งหาได้จากผลต่างระหว่างพิกัดตำแหน่งของ UE ที่ได้จากการประมาณ (i_e, j_e) กับพิกัดตำแหน่งที่ถูกต้องของ UE (i_c, j_c) กำหนดให้ระยะห่างของแต่ละตำแหน่งตามแนวกว้างเป็น Δx ตามแนวยาวเป็น Δy จะได้ค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวกว้าง E_x และค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวยาว E_y เป็น

$$E_x = |i_e - i_c|\Delta x \tag{2.3}$$

$$E_y = |j_e - j_c|\Delta y \tag{2.4}$$

ค่าผิดพลาดระยะทาง E_d นิยามเป็นผลรวมเชิงเวกเตอร์ของค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวกว้างกับค่าผิดพลาดตามแนวยาว ซึ่งสามารถเขียนได้เป็น

$$E_d = \sqrt{{E_x}^2 + {E_y}^2} \tag{2.5}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าผิดพลาดระยะทางนี้นำมาวิเคราะห์ความแม่นยำที่แต่ละตำแหน่ง และวิเคราะห์เชิงทฤษฎีในเทอมของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF) และฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function: CDF) ของการวัดครั้งเดียวเปรียบเทียบกับค่าเฉลี่ยการวัดห้าครั้งซึ่งจะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

2.3 เทคโนโลยี BLE

เทคโนโลยี BLE เป็นเทคโนโลยีโครงข่ายพื้นที่ส่วนบุคคลไร้สาย (Wireless Personal Area Network: WPAN) ที่ออกแบบโดยกลุ่มที่สนใจเทคโนโลยีบลูทูธซึ่งประกอบไปด้วย 150 บริษัท เมื่อเปรียบเทียบกับบลูทูธแบบดั้งเดิม BLE ลดการใช้พลังงานและค่าใช้จ่ายลงอย่างมาก ในขณะที่ยังคงรักษาช่วงระยะทางการสื่อสารให้เท่ากันโดยประมาณ

เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง BLE กับบลูทูธแบบดั้งเดิม BLE ใช้แบบแผนเทคนิคการมอดูเลตดิจิทัลแบบการแผ่สเปกตรัมแบบลำดับตรง (Direct Sequence Spread Spectrum: DSSS) ในขณะที่บลูทูธแบบดั้งเดิมในแบบแผนการแผ่สเปกตรัมแบบการกระโดดความถี่ (Frequency Hopping Spread Spectrum: FHSS) BLE กับบลูทูธแบบดั้งเดิมใช้แถบความถี่เดียวกันคือ 2.4000-2.4835 GHz ซึ่งเป็นแถบความถี่สำหรับอุตสาหกรรม วิทยาศาสตร์ และการแพทย์ (Industrial Sciences Medicine: ISM) ทำให้อุปกรณ์ที่ใช้ทั้งสองแบบสามารถใช้สายอากาศร่วมกันได้ แต่อย่างไรก็ตาม BLE จะมีทั้งหมด 40 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณมีแบนด์วิดท์ 2 MHz ส่วนบลูทูธแบบดั้งเดิมมีทั้งหมด 79 ช่องสัญญาณ แต่ละช่องสัญญาณมีแบนด์วิดท์ 1 MHz BLE พารามิเตอร์อื่น ๆ ของ BLE เทียบกับบลูทูธแบบดั้งเดิมได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของ BLE เทียบกับบลูทูธแบบดั้งเดิม

พารามิเตอร์	**BLE**	**บลูทูธแบบดั้งเดิม**
อัตราข้อมูล	125 kbps, 1 Mbps, 2 Mbps	1-3 Mbps
ส่งสัญญาณเสียง	ไม่ได้	ได้
กำลังงานที่ใช้	0.01-0.50 W	1 W
กระแสที่ใช้	<15 mA	< 30 mA
จำนวนเครื่องลูกข่าย	ไม่ระบุ (ขึ้นอยู่กับการใช้งาน)	8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้บีคอน BLE จำนวน 3 ตัว เป็นตัวส่งสัญญาณที่รู้พิกัดตำแหน่ง โดยติดตั้งที่ผนังห้องภายในอาคาร และนำ RSS ที่รับได้จากบีคอน BLE มาประมาณหาพิกัดตำแหน่งของ UE โดยใช้เทคนิคการพิมพ์ลายนิ้วมือ

2.4 บทสรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงเทคนิคการพิมพ์ลายนิ้วมือซึ่งใช้วิธีการจำคู่ค่าผิดพลาด RMS น้อยสุดสำหรับประมาณหาตำแหน่งของ UE และกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของเทคโนโลยี BLE ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้บีคอน BLE เป็นตัวส่งสัญญาณ ซึ่งในบทต่อไปจะใช้ทฤษฎีและหลักการที่กล่าวถึงในบทนี้ทำการวิเคราะห์ความแม่นยำของการหาตำแหน่งภายในอาคาร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

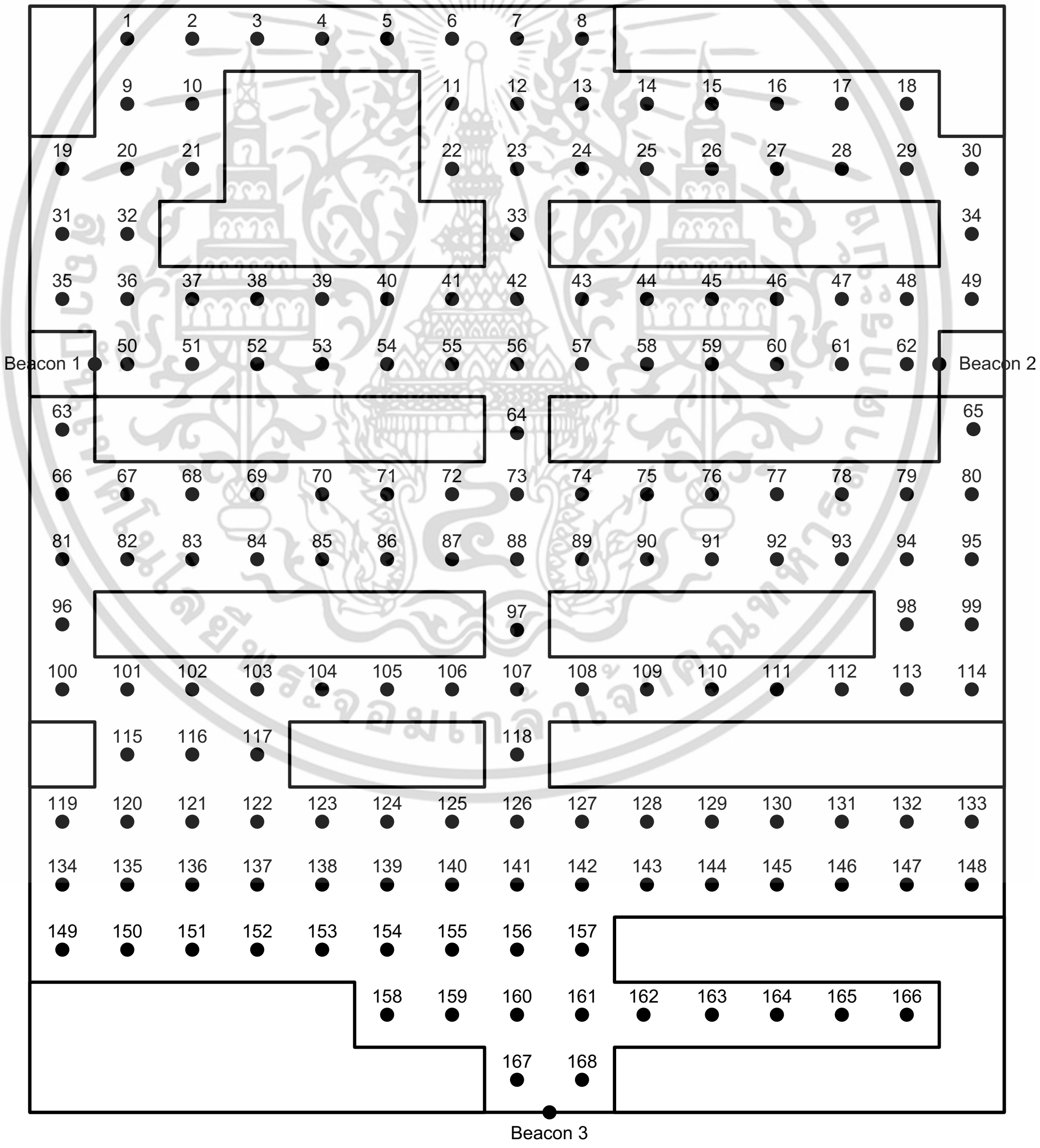
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การวิเคราะห์ความแม่นยำ

3.1 บทนำ

ในบทนี้ได้นำเทคนิคการพิมพ์ลายนิ้วมือร่วมกับการใช้บีคอนบลูทูธพลังงานต่ำ (Bluetooth Low Energy: BLE) ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 มาประยุกต์ใช้หาตำแหน่งภายในอาคาร และวิเคราะห์ความแม่นยำ โดยทดสอบจริงในห้องภายในอาคาร แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณี คือการวัดที่แต่ละตำแหน่งครั้งเดียว และการวัดที่แต่ละตำแหน่งจำนวนห้าครั้งแล้วนำมาเฉลี่ยกัน



รูปที่ 3.1 แผนผังของห้องที่ใช้สำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 แบบจำลองการวัด

สภาวะแวดล้อมภายในอาคารที่ใช้สำหรับการหาตำแหน่งเป็นห้อง T-314 ชั้น 3 อาคารภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ห้องมีขนาดกว้าง 9.0 m ยาว 10.2 m มีพื้นที่ 91.8 ตารางเมตร ได้แบ่งตำแหน่งในการวัดตามแนวกว้างทั้งหมด 15 ตำแหน่ง ตามแนวยาวทั้งหมด 17 ตำแหน่ง โดยที่ระยะห่างของแต่ละตำแหน่งตามแนวกว้างและแนวยาวเป็น 0.6 m ตำแหน่งที่สามารถวัดได้มีทั้งหมด 168 ตำแหน่ง ได้ใช้บีคอน BLE ทั้งหมด 3 ตัว โดยที่ตัวที่ 1 ติดอยู่ที่ผนังเสาด้านซ้ายของห้อง ตัวที่ 2 ติดอยู่ที่ผนังเสาด้านขวาของห้อง และตัวที่ 3 ติดอยู่ที่ผนังด้านหลังของห้อง โดยทั้ง 3 ตัวติดตั้งอยู่ที่ความสูง 1.8 m จากพื้นห้อง อุปกรณ์ของผู้ใช้ (User Equipment: UE) เป็น iPhone รุ่น XS Max ใช้โปรแกรม Beacon Analyzer วัดความเข้มสัญญาณภาครับ (Received Signal Strength: RSS) ของบีคอน BLE แผนผังของห้องที่ใช้สำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคารได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1

3.3 ลายนิ้วมือ

ในที่นี้ลายนิ้วมือหมายถึง RSS ที่วัดได้ที่แต่ละตำแหน่ง ซึ่งก็คือ $P_{i,j}^k$ ที่ได้นิยามไว้ในบทที่ 2 ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้วัด 2 กรณี กรณีแรกวัด RSS ของแต่ละบีคอน BLE ที่แต่ละตำแหน่งครั้งเดียวแล้วทำเป็นลายนิ้วมือสำหรับเก็บในฐานข้อมูลและสำหรับทดสอบหาตำแหน่งของ UE กรณีที่สองวัด RSS ของแต่ละบีคอน BLE ที่แต่ละตำแหน่งจำนวน 5 ครั้ง นำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยก่อนแล้วจึงทำเป็นลายนิ้วมือสำหรับเก็บในฐานข้อมูลและสำหรับทดสอบหาตำแหน่งของ UE

3.4 ค่าผิดพลาดระยะทาง

การวิเคราะห์ความแม่นยำจะพิจารณาในเทอมของค่าผิดพลาดระยะทาง ซึ่งได้จากการจับคู่หาค่าผิดพลาด RMS ระหว่าง RSS ที่วัดได้ในขณะทำการประมาณหาตำแหน่ง P^k กับ RSS ที่ทำเป็นลายนิ้วมือเก็บไว้ในฐานข้อมูล $P_{i,j}^k$ ดังแสดงไว้ในสมการ (2.1) และประมาณหาพิกัดตำแหน่งของ UE (i_e, j_e) เป็นตำแหน่งที่มีค่าผิดพลาด RMS น้อยสุดดังแสดงในสมการ (2.2) หลังจากนั้นคำนวณหาค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวกว้าง E_x และค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวยาว E_y โดยใช้สมการ (2.3) และ (2.4) ตามลำดับ และขั้นตอนสุดท้าย ค่าผิดพลาดระยะทางหาได้โดยใช้สมการ (2.5)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 บทสรุป

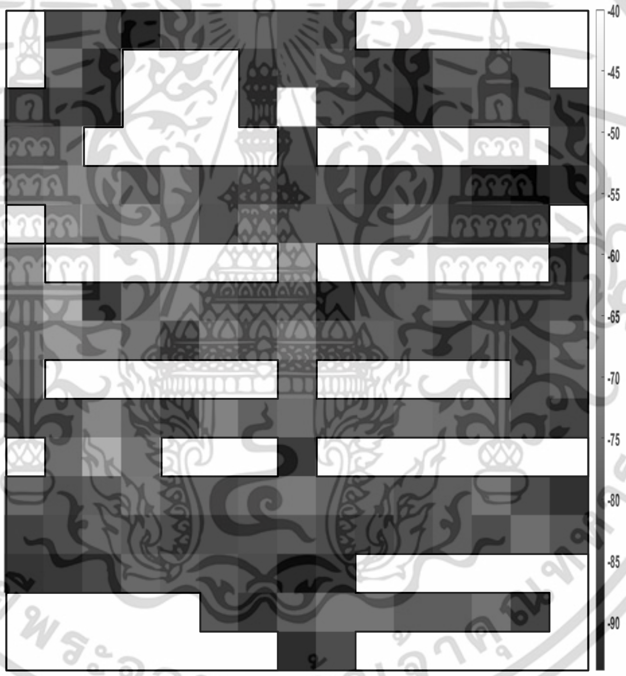
การวิเคราะห์ความแม่นยำของการหาตำแหน่งภายในอาคารได้แบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณี คือกรณีวัดที่แต่ละตำแหน่งครั้งเดียว และกรณีทำการวัดที่แต่ละตำแหน่งจำนวนห้าครั้งแล้วนำมาเฉลี่ยกัน ในแต่ละกรณีขั้นแรกจะเก็บฐานข้อมูลลายนิ้วมือที่แต่ละตำแหน่งของบีคอน BLE แต่ละตัว ต่อมาพิจารณาค่าผิดพลาดระยะทางแต่ละตำแหน่ง หลังจากนั้นหาฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF) และฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function: CDF) ของค่าผิดพลาดระยะทาง ซึ่งได้แสดงผลที่ได้ไว้ในบทถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิเคราะห์ความแม่นยำ

4.1 บทนำ

ในบทนี้ได้แสดงผลการวิเคราะห์ความแม่นยำ ซึ่งแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณี คือกรณีทำการวัดที่แต่ละตำแหน่งครั้งเดียว และกรณีทำการวัดที่แต่ละตำแหน่งจำนวนห้าครั้งแล้วนำมาเฉลี่ยกัน ในแต่ละกรณีได้แสดงผลลายนิ้วมือ ค่าผิดพลาดระยะทางที่แต่ละตำแหน่ง และค่าผิดพลาดระยะทางเชิงสถิติ ซึ่งพิจารณาในเทอมของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF) และฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function: CDF) ของค่าผิดพลาดระยะทาง



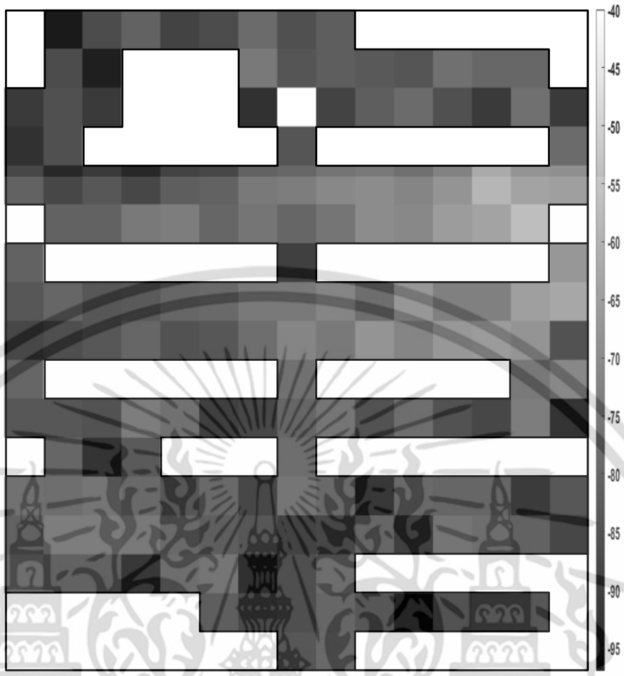
รูปที่ 4.1 ลายนิ้วมือของบีคอน BLE ตัวที่ 1 ในกรณีวัดครั้งเดียว

4.2 ลายนิ้วมือ

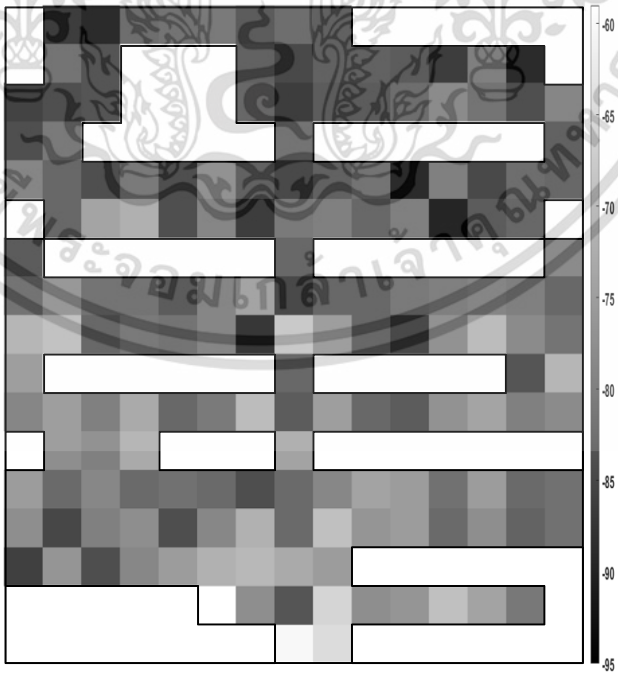
รูปที่ 4.1 ถึง 4.3 แสดงลายนิ้วมือซึ่งเป็นความเข้มสัญญาณภาครับ (Received Signal Strength: RSS) ของบีคอนบลูทูธพลังงานต่ำ (Bluetooth Low Energy: BLE) ตัวที่ 1, 2 และ 3 ในกรณีวัดครั้งเดียวตามลำดับ ส่วนลายนิ้วมือซึ่งเป็น RSS ของบีคอน BLE ตัวที่ 1, 2 และ 3 ในกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกันได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.4 ถึง 4.6 ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของลายนิ้วมือที่ได้จากกรณีวัดครั้งเดียวกับกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกันมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเป็น -79.44 dBm และ -79.51 dBm

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับ แต่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของลายนิ้วมือที่ได้จากกรณีวัดครั้งเดียวมีค่ามากกว่าที่ได้จากกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกัน 1.29 dB ซึ่งมีค่าเป็น 7.25 dB และ 5.96 dB ตามลำดับ

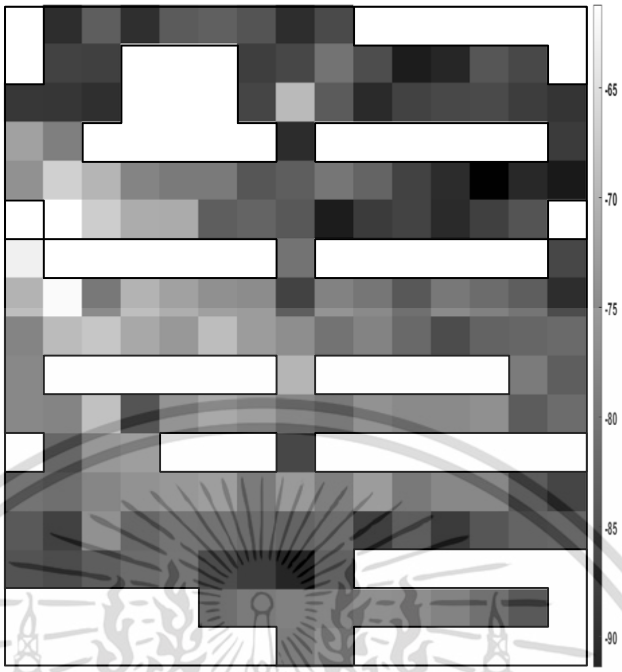


รูปที่ 4.2 ลายนิ้วมือของบีคอน BLE ตัวที่ 2 ในกรณีวัดครั้งเดียว

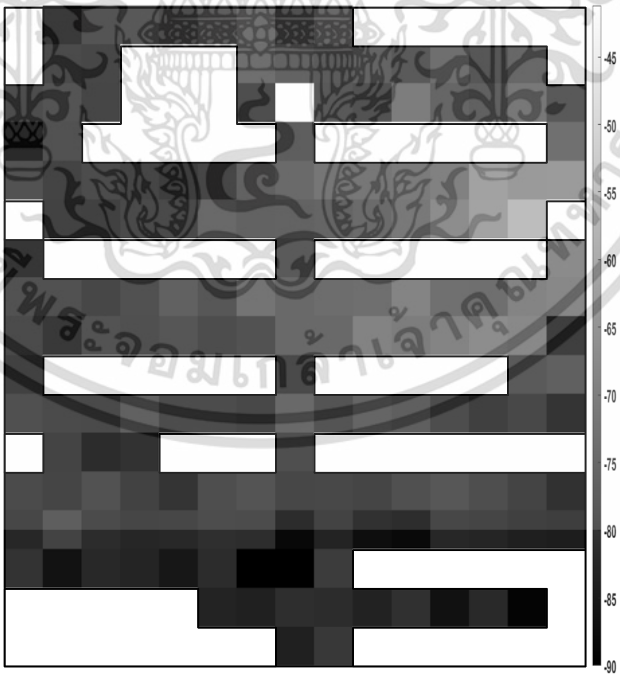


รูปที่ 4.3 ลายนิ้วมือของบีคอน BLE ตัวที่ 3 ในกรณีวัดครั้งเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



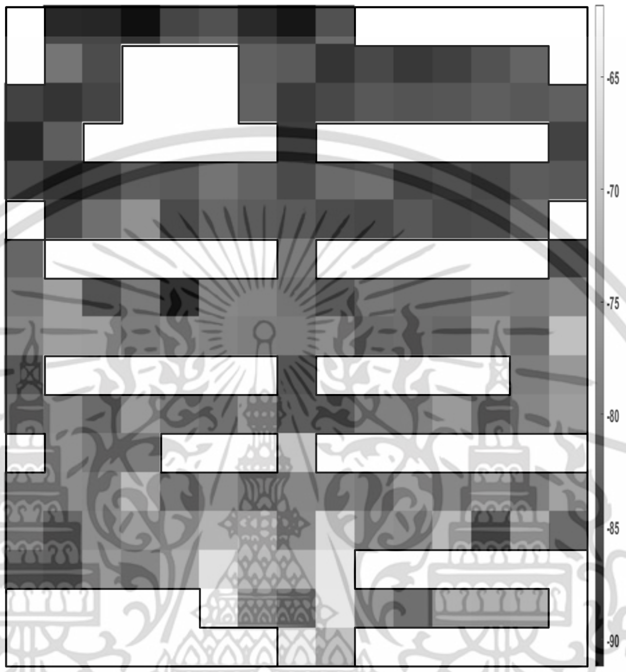
รูปที่ 4.4 ลายนิ้วมือของบีคอน BLE ตัวที่ 1 ในกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกัน



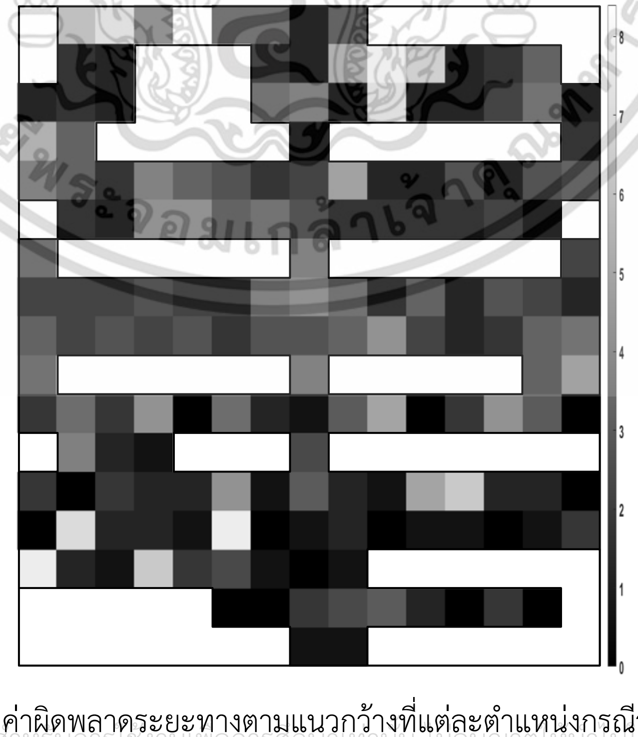
รูปที่ 4.5 ลายนิ้วมือของบีคอน BLE ตัวที่ 2 ในกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่าในกรณีที่วัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกันมีช่วงการเปลี่ยนแปลงของลายนิ้วมือที่น้อยกว่า นั่นคือสามารถลดผลกระทบของการจางหายหลายวิถีที่เกิดอย่างหนาแน่นภายในอาคารได้ ลายนิ้วมือทั้งหมดนี้จะถูกนำมาเก็บเป็นฐานข้อมูลเพื่อใช้สำหรับจับคู่เปรียบเทียบกับลายนิ้วมือที่วัดได้เพื่อประมาณหาตำแหน่งอุปกรณ์ของผู้ใช้ (User Equipment: UE) และหาค่าผิดพลาดระยะทางที่เกิดขึ้นจากการวัดทั้ง 2 กรณีมาเปรียบเทียบกัน



รูปที่ 4.6 ลายนิ้วมือของบีคอน BLE ตัวที่ 3 ในกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกัน

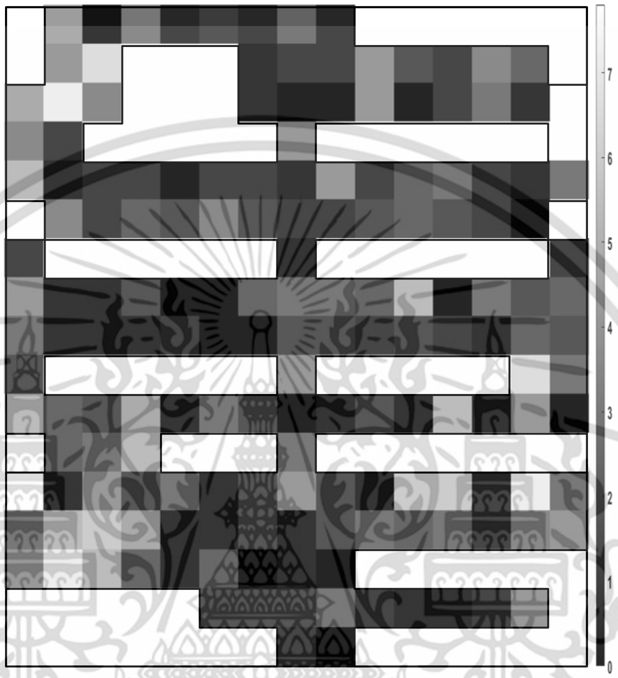


รูปที่ 4.7 ค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวกว้างที่แต่ละตำแหน่งกรณีวัดครั้งเดียว

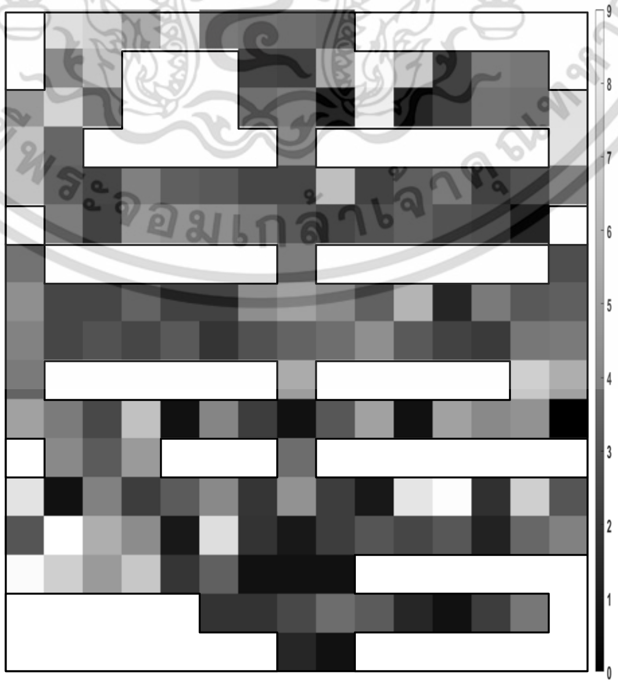
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ค่าผิดพลาดระยะทางที่แต่ละตำแหน่ง

หัวข้อนี้ได้วิเคราะห์ค่าผิดพลาดระยะทางที่แต่ละตำแหน่ง โดยหมายเลขของแต่ละตำแหน่งได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1 รูปที่ 4.7 แสดงค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวกว้างที่แต่ละตำแหน่งกรณีวัดครั้งเดียว ค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวกว้างมีค่ามากสุดเท่ากับ 8.4 m ที่ตำแหน่งที่ 4 (บริเวณด้านบนซ้ายของแผนผังห้อง)



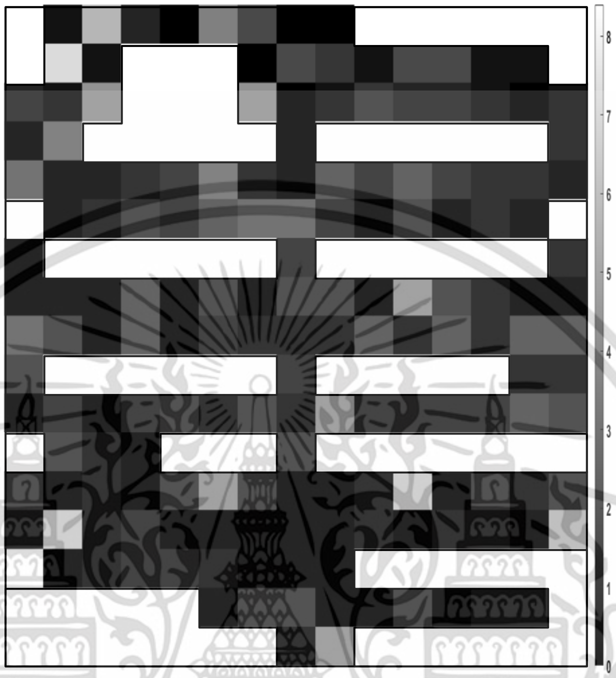
รูปที่ 4.8 ค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวยาวที่แต่ละตำแหน่งกรณีวัดครั้งเดียว



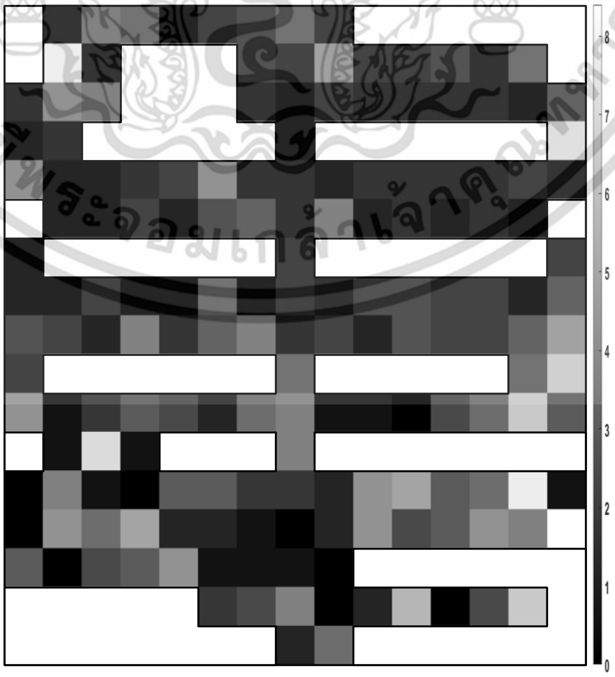
รูปที่ 4.9 ค่าผิดพลาดระยะทางที่แต่ละตำแหน่งกรณีวัดครั้งเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 แสดงค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวยาวที่แต่ละตำแหน่งกรณีวัดครั้งเดียว ค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวยาวมีค่ามากสุดเท่ากับ 7.8 m ที่ตำแหน่งที่ 119 (บริเวณด้านล่างซ้ายของแผนผังห้อง) และรูปที่ 4.9 แสดงค่าผิดพลาดระยะทางที่แต่ละตำแหน่งกรณีวัดครั้งเดียว ค่าผิดพลาดระยะทางมีค่ามากสุดเท่ากับ 9 m ที่ตำแหน่งที่ 135 (บริเวณด้านล่างซ้ายของแผนผังห้อง)



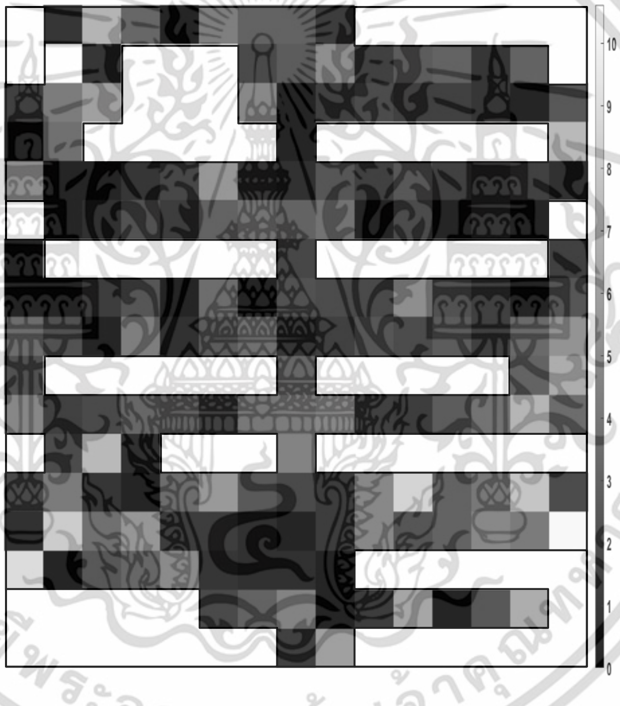
รูปที่ 4.10 ค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวกว้างที่แต่ละตำแหน่งกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกัน



รูปที่ 4.11 ค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวยาวที่แต่ละตำแหน่งกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.10 แสดงค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวกว้างที่แต่ละตำแหน่งกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกัน ค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวกว้างมีค่ามากสุดเท่ากับ 8.4 m ที่ตำแหน่งที่ 149 (บริเวณด้านล่างซ้ายของแผนผังห้อง) รูปที่ 4.11 แสดงค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวยาวที่แต่ละตำแหน่งกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกัน ค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวยาวมีค่ามากสุดเท่ากับ 8.4 m ที่ตำแหน่งที่ 148 (บริเวณด้านล่างขวาของแผนผังห้อง) และรูปที่ 4.12 แสดงค่าผิดพลาดระยะทางที่แต่ละตำแหน่งกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกัน ค่าผิดพลาดระยะทางมีค่ามากสุดเท่ากับ 10.62 m ที่ตำแหน่งที่ 9 (บริเวณด้านบนซ้ายของแผนผังห้อง) จากผลที่ได้ทั้งหมดนี้สามารถสรุปได้ว่าค่าผิดพลาดระยะทางมากสุดมีแนวโน้มที่อยู่ที่ตำแหน่งบริเวณมุมใดมุมหนึ่งของแผนผังห้อง เนื่องจากเป็นบริเวณที่อยู่ห่างจากบีคอน BLE ทั้ง 3 ตัว



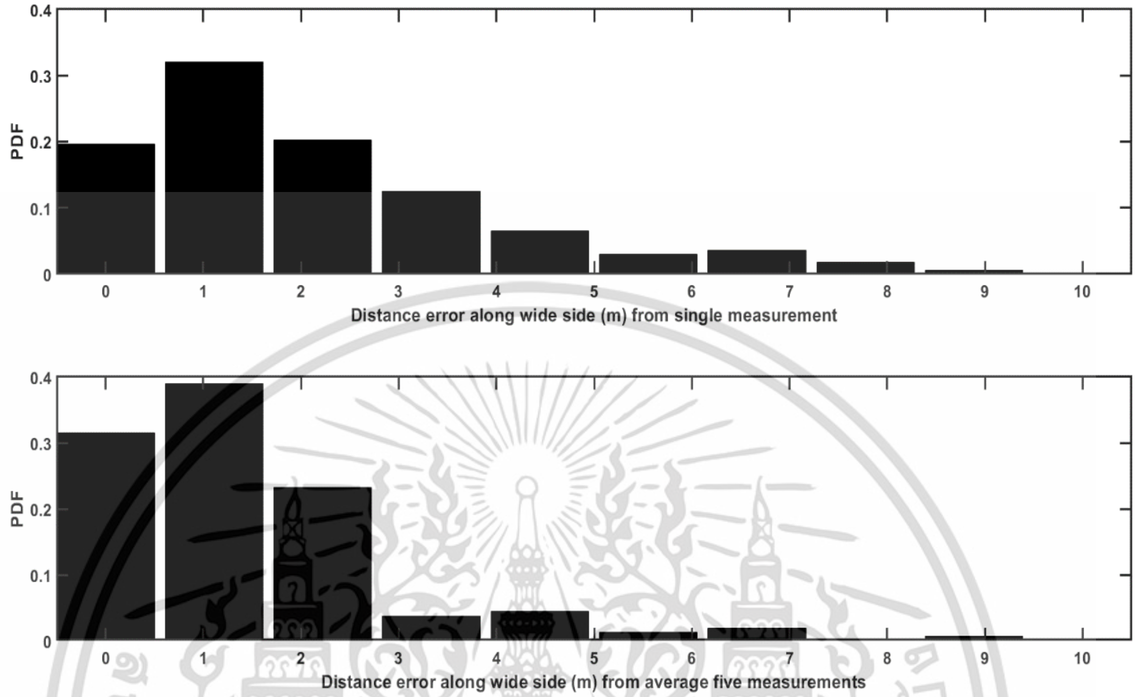
รูปที่ 4.12 ค่าผิดพลาดระยะทางที่แต่ละตำแหน่งกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกัน

4.4 ค่าผิดพลาดระยะทางเชิงสถิติ

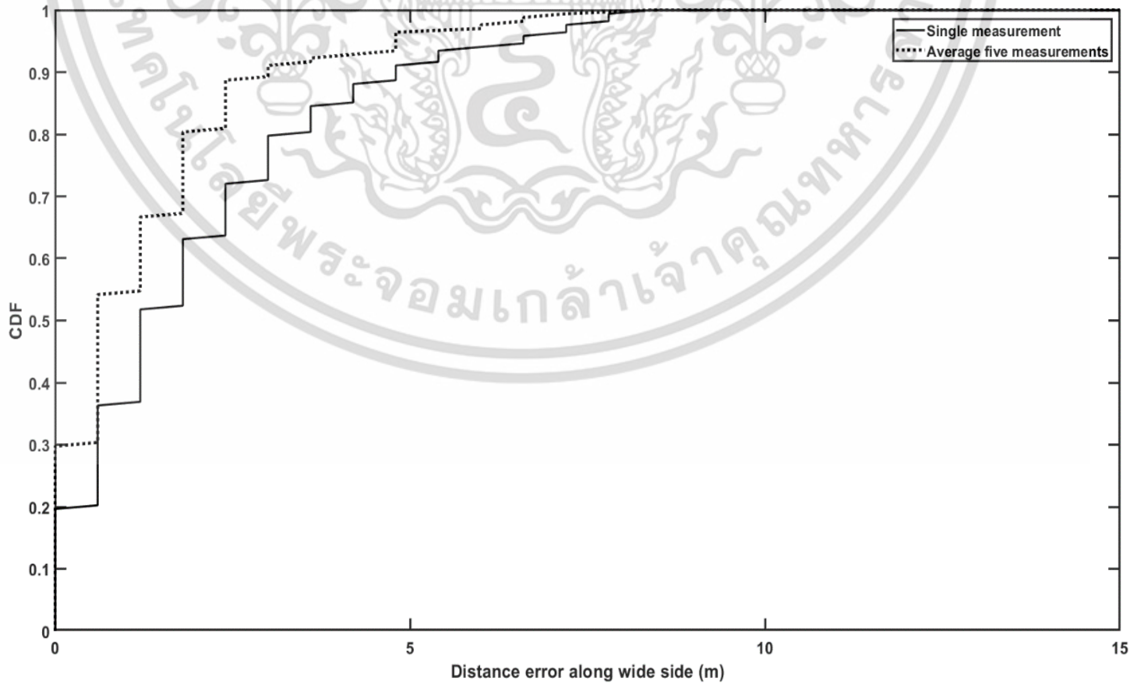
ค่าผิดพลาดระยะทางเชิงสถิติจะพิจารณาในเทอมของ PDF และ CDF รูปที่ 4.13 และ 4.14 แสดง PDF และ CDF ของค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวกว้างกรณีวัดครั้งเดียวเปรียบเทียบกับกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกันตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวกว้างกรณีวัดครั้งเดียวและกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกันมีค่าเป็น 2.00 m และ 1.30 m ตามลำดับ และที่ CDF เท่ากับ 0.5 ค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิดพลาดระยะทางตามแนวกว้างกรณีวัดครั้งเดียวและกรณีค่าเฉลี่ยการวัดห้าครั้งมีค่าเป็น 1.20 m และ 0.60 m ตามลำดับ



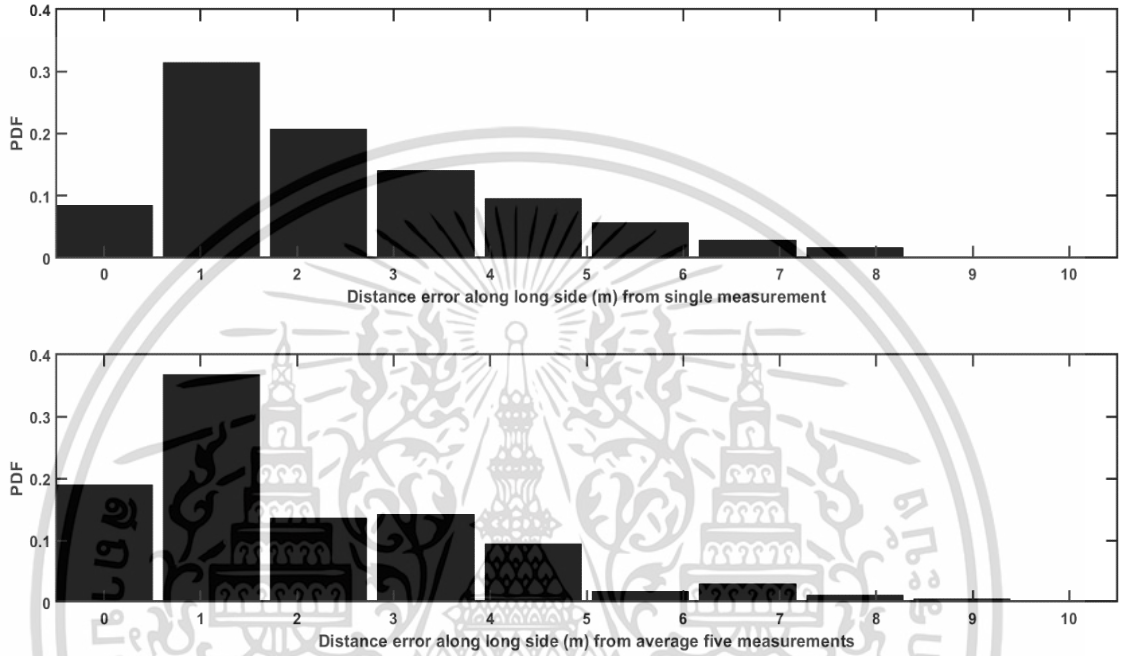
รูปที่ 4.13 PDF ของค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวกว้าง



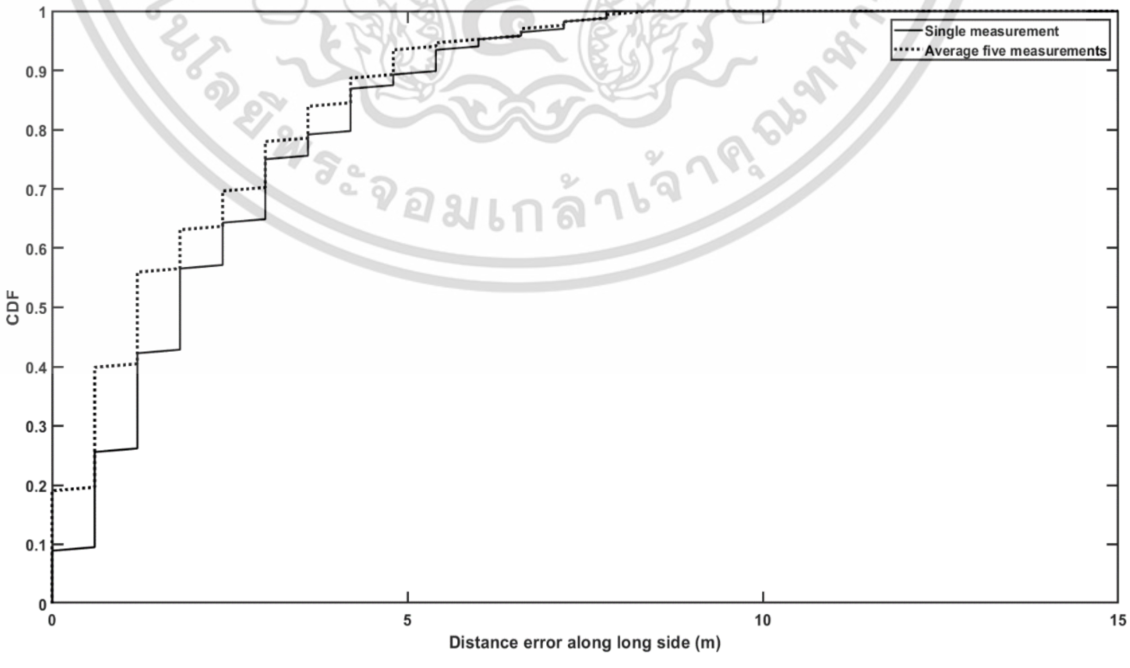
รูปที่ 4.14 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PDF และ CDF ของค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวยาวกรณีวัดครั้งเดียวเปรียบเทียบกับกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกันแสดงในรูปที่ 4.15 และ 4.16 ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวยาวกรณีวัดครั้งเดียวและกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกันมีค่าเป็น 2.33 m และ 1.94 m ตามลำดับ และที่ CDF เท่ากับ 0.5 ค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวยาวกรณีวัดครั้งเดียวและกรณีค่าเฉลี่ยการวัดห้าครั้งมีค่าเป็น 1.80 m และ 1.20 m ตามลำดับ



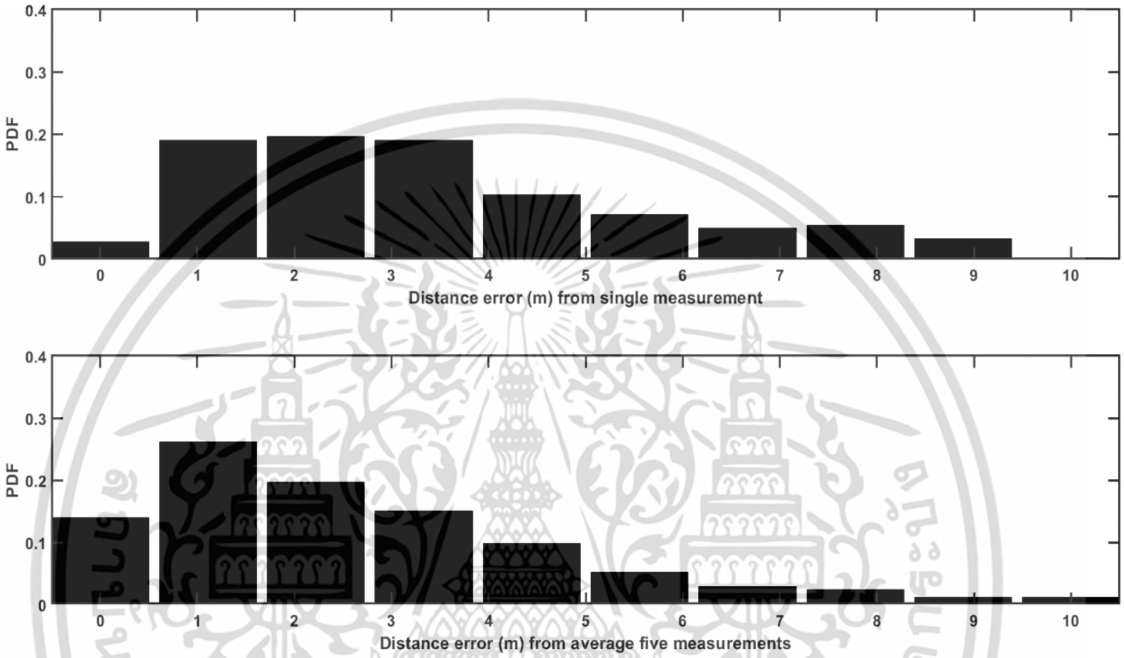
รูปที่ 4.15 PDF ของค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวยาว



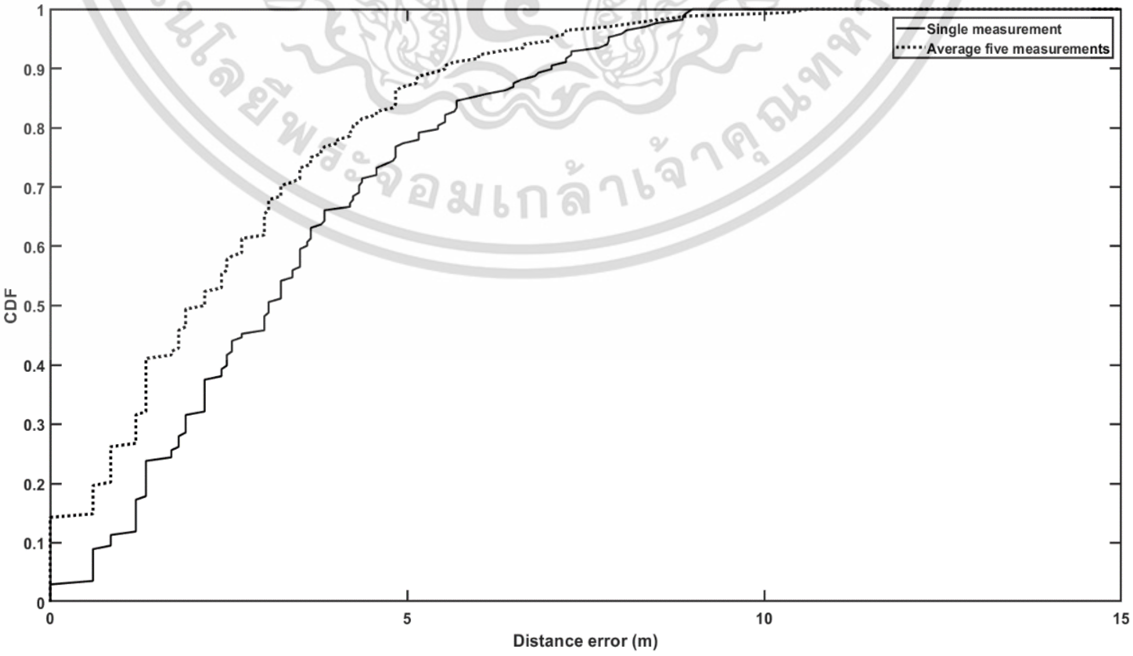
รูปที่ 4.16 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทางตามแนวยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ห้ามมิให้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดง PDF และ CDF ของค่าผิดพลาดระยะทางในกรณีวัดครั้งเดียวเปรียบเทียบกับกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกัน จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่ากรณีค่าเฉลี่ยการวัดห้าครั้งมีความแม่นยำมากกว่ากรณีวัดครั้งเดียว โดยที่ค่าเฉลี่ยของค่าผิดพลาดระยะทางในกรณีวัดครั้งเดียวและกรณีค่าเฉลี่ยการวัดห้าครั้งมีค่าเป็น 3.45 m และ 2.59 m ตามลำดับ และที่ CDF เท่ากับ 0.5 (ค่ามัธยฐาน) ค่าผิดพลาดระยะทางในกรณีวัดครั้งเดียวและกรณีค่าเฉลี่ยการวัดห้าครั้งมีค่าเป็น 3.06 m และ 2.16 m ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 PDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง



รูปที่ 4.18 CDF ของค่าผิดพลาดระยะทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ ... นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 บทสรุป

ในบทนี้ได้วิเคราะห์ความแม่นยำของการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยบีคอน BLE โดยได้วิเคราะห์ความแม่นยำที่ได้จากการวัดครั้งเดียวและค่าเฉลี่ยการวัดห้าครั้งแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่าในกรณีที่วัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกันมีช่วงการเปลี่ยนแปลงของลายนิ้วมือที่น้อยกว่า นั่นคือสามารถลดผลกระทบของการจางหายหลายวิถีที่เกิดอย่างหนาแน่นภายในอาคารได้ ค่าผิดพลาดระยะทางมากสุดมีแนวโน้มที่อยู่ที่ตำแหน่งบริเวณมุมใดมุมหนึ่งของแผนผังห้อง เนื่องจากเป็นบริเวณที่อยู่ห่างจากบีคอน BLE ทั้ง 3 ตัว ค่าเฉลี่ยการวัดห้าครั้งสามารถลดค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยได้ประมาณ 0.86 m ในขณะที่ค่ามัธยฐานของค่าผิดพลาดระยะทางลดลงประมาณ 0.90 m เมื่อเทียบกับการวัดครั้งเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้วิเคราะห์ความแม่นยำของการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคนิคการพิมพ์ลายนิ้วมือร่วมกับบีคอนบลูทูธพลังงานต่ำ (Bluetooth Low Energy: BLE) ซึ่งแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณี คือกรณีทำการวัดที่แต่ละตำแหน่งครั้งเดียว และกรณีทำการวัดที่แต่ละตำแหน่งจำนวนห้าครั้งแล้วนำมาเฉลี่ยกัน

จากการวิเคราะห์ลายนิ้วมือที่ได้จากบีคอน BLE ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของลายนิ้วมือที่ได้จากแต่ละกรณีได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของลายนิ้วมือที่ได้จากกรณีวัดครั้งเดียวกับกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกันมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของลายนิ้วมือที่ได้จากกรณีวัดครั้งเดียวมีค่ามากกว่าที่ได้จากกรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกันอย่างเห็นได้ชัดเจน กรณีที่วัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกันมีช่วงการเปลี่ยนแปลงของลายนิ้วมือที่น้อยกว่า นั่นคือสามารถลดผลกระทบของการจางหายหลายวิถีที่เกิดอย่างหนาแน่นภายในอาคารได้

ตารางที่ 5.1 ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของลายนิ้วมือ

	กรณีวัดครั้งเดียว	กรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกัน
ค่าเฉลี่ย	-79.44 dBm	-79.51 dBm
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	7.25 dB	5.96 dB

จากการวิเคราะห์ค่าผิดพลาดระยะทางที่แต่ละตำแหน่ง ทั้งสองกรณีจะมีแนวโน้มค่าผิดพลาดมากสุดอยู่ที่ตำแหน่งบริเวณมุมใดมุมหนึ่งของแผนผังห้อง เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่อยู่ไกลจากบีคอน BLE ทั้ง 3 ตัว จึงสามารถสรุปได้ว่า บริเวณที่อยู่ห่างจากบีคอนแต่ละตัวมากจะมีแนวโน้มทำให้เกิดความผิดพลาดได้สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ค่าผิดพลาดระยะทางเชิงสถิติ ซึ่งได้วิเคราะห์ในเทอมของฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF) และฟังก์ชันการแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function: CDF) ของค่าผิดพลาดระยะทาง ค่าเฉลี่ยและค่ามัธยฐานของค่าผิดพลาดระยะทางได้แสดงไว้ในตารางที่ 5.2 จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยการวัดห้าครั้งสามารถลดค่าความผิดพลาดระยะทางเฉลี่ยได้ประมาณ 0.86 m ในขณะที่ค่ามัธยฐานของค่าผิดพลาดระยะทางลดลงประมาณ 0.90 m เมื่อเทียบกับการวัดครั้งเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการวัดหลายครั้งและนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยกันสามารถเพิ่มความแม่นยำของการหาตำแหน่งภายในอาคารได้ เนื่องจากเป็นการลดผลกระทบของการจางหายหลายวิถีที่เกิดในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารลง

ตารางที่ 5.2 ค่าเฉลี่ยและค่ามัธยฐานของค่าผิดพลาดระยะทาง

	กรณีวัดครั้งเดียว	กรณีวัดห้าครั้งมาเฉลี่ยกัน
ค่าเฉลี่ย	3.45 m	2.59 m
ค่ามัธยฐาน	3.06 m	2.16 m

5.2 ข้อเสนอแนะแนวทางการพัฒนางานวิจัย

ความแม่นยำของการหาตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคนิคการพิมพ์ลายนิ้วมือที่ได้วิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พิจารณาเพียงกรณีทำการวัดที่แต่ละตำแหน่งครั้งเดียว และกรณีทำการวัดที่แต่ละตำแหน่งจำนวนห้าครั้งแล้วนำมาเฉลี่ยกัน ยังมีเงื่อนไขอื่นอีกที่มีผลกระทบต่อความแม่นยำของการหาตำแหน่งภายในอาคาร และจำเป็นที่ต้องวิเคราะห์ต่อไป เช่น จำนวนบีคอน BLE ที่ใช้ ระยะห่างของการติดตั้งบีคอน BLE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[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**, vol. 37, no. 6, pp. 1067-1080, 2007.

[2] P. Davidson and R. Piché, “A survey of selected indoor positioning methods for smartphones,” **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, vol. 19, no. 2, pp. 1-23, 2017.

[3] A. Hammed and H. A. Ahmed, “Survey on indoor positioning applications based on difference technologies,” **International Conference on Mathematics, Actuarial Science, Computer Science and Statistics (MACS)**, 2018.

[4] F. Zafari, A. Gkelias and K. K. Leung, “A survey of indoor localization systems and technologies,” **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, vol. 21, no. 3, pp. 1-32, 2019.

[5] P. S. Farahsari, A. Farahzadi, J. Rezazadeh and A. Bagheri, “A Survey on Indoor Positioning Systems for IoT-Based Applications,” **IEEE Internet of Things Journal**, vol. 9, no. 10, pp. 7680-7699, 2022.

[6] J. Vascak and I. Savko, “Radio beacons in indoor navigation,” **World Symposium on Digital Intelligence for Machines (DISA)**, pp. 283-287, 2018.

[7] M. Ji, J. Kim, J. Jeon and Y. Cho, “Analysis of positioning accuracy corresponding to the number of BLE beacons in indoor positioning system,” **International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)**, pp. 92-95, 2015.

[8] S. Subedi, G.-R. Kwon, S. Shin, S.-S. Hwang and J.-Y. Pyun, “Beacon based indoor positioning system using weighted centroid localization approach,” **International Conference Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)**, pp. 1016-1019, 2016.

[9] R. Faragher and R. Harle, “Location fingerprinting with Bluetooth low energy beacons,” **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, vol. 33, no. 11, pp. 2418-2428, Nov. 2015.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[10] S. G. Obreja, T. A.-Hassna, F. D. Mocanu and A. Vulpe, "Indoor localization using radio beacon technology," **International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)**, 2018.

[11] J. Kim, M. Ji, J. Jeon, S. Park and Y. Cho, "K-NN based positioning performance estimation for fingerprinting localization," **International Conference on Ubiquitous and Future Network (ICUFN)**, pp. 468-470, 2016.

[12] Z. Liu, X. Luo and T. He, "Indoor positioning system based on the improved W-KNN algorithm," **IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)**, pp. 1355-1359, 2017.

[13] K. Phutcharoen, M. Chamchoy and P. Supanakoon, "Accuracy study of indoor positioning with Bluetooth low energy beacons," **International Conference on Digital Arts, Media and Technology (DAMT) and ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunications Engineering (NCON)**, pp. 24-27, 2020.

[14] K. Y. Seok and J. H. Lee, "Deep learning based fingerprinting scheme for wireless positioning," **International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIC)**, pp. 312-314, 2020.

[15] R. Joseph and S. B. Sasi, "Indoor positioning using WiFi fingerprint," **International Conference on Circuits and Systems in Digital Enterprise Technology (ICCSDET)**, 2018.

[16] Y. Cui, S. Gao and Y. Zheng, "Application of ZigBee location fingerprint method in positioning of railway tunnel staff," **Chinese Automation Congress (CAC)**, pp. 3283-3287, 2018.

[17] X. Tian, X. Wu, H. Li and X. Wang, "RF fingerprints prediction for cellular network positioning: a subspace identification approach," **IEEE Transactions on Mobile Computing**, vol. 19, no. 2, pp. 450-465, 2020.

[15] J. Li, M. Nakano and N. Komuro, "Fingerprint-based BLE indoor location estimation using particle filters," **IEEE Global Conference on Life Sciences and Technologies (Life Tech)**, pp. 592-593, 2022.

[19] N. K. Gupta, **Inside Bluetooth Low Energy**, Artech, 2013.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวกัญญาณี พุทธ์เจริญ
วัน เดือน ปีเกิด	11 สิงหาคม 2534 ที่ชลบุรี
ที่อยู่	889/983 แอสปาย อโศกรัชดา ซอยสุทธิพร ถนนประชาสงเคราะห์ 2 แขวงดินแดง เขตดินแดง กรุงเทพมหานคร 10400
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2557 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์) มหาวิทยาเทคโนโลยีสุรนารี
ประสบการณ์ทำงาน	
พ.ศ.2557 - 2559	บริษัท เออร์เนท จำกัด
พ.ศ.2559 – 2562	บริษัท เอซี โปรเกรส เทคโนโลยี จำกัด
พ.ศ.2562 – ปัจจุบัน	บริษัท ทรู คอร์ปอเรชั่น จำกัด(มหาชน)

บทความที่ได้ตีพิมพ์

[1] **K. Phutcharoen**, M. Chamchoy and P. Supanakoon, “Accuracy study of indoor positioning with Bluetooth low energy beacons,” International Conference on Digital Arts, Media and Technology (DAMT) and ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunications Engineering (NCON), pp. 24-27 2020.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้