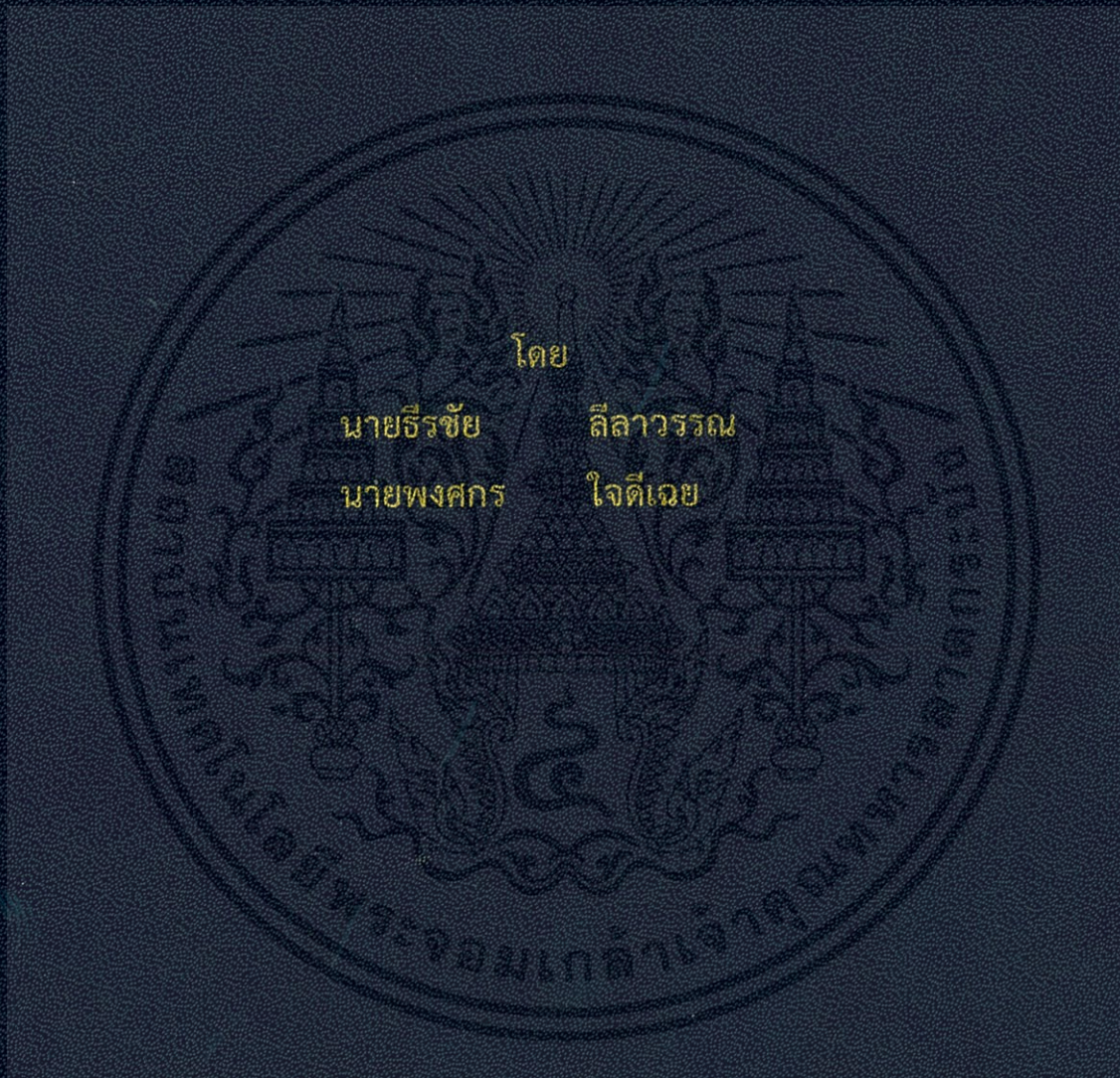


การระบุตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีซิกบี
INDOOR ENVIRONMENT LOCALIZATION BY USING ZIGBEE TECHNOLOGY



โดย

นายธีรชัย สีสาวรรณ

นายพงศกร ใจดีเฉย

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

การระบุตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีซิกบี
INDOOR ENVIRONMENT LOCALIZATION BY USING ZIGBEE TECHNOLOGY



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2555

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2555

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การระบุตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีซิกบี

INDOOR ENVIRONMENT LOCALIZATION BY USING ZIGBEE TECHNOLOGY

ผู้จัดทำ

1. นายธีรชัย สิลาวรรณ 52010513
2. นายพงศกร ใจดีเฉย 52010744



.....
(ผศ.ดร.พิชญ์ สุพรรณกุล)

อาจารย์ที่ปรึกษา



.....
(ดร.สถาพร พรหมวงศ์)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเป็นผลจากการทดลองศึกษา โดยได้รับความกรุณาช่วยเหลือแนะนำของเพื่อน รุ่นพี่ ตลอดช่วงระยะเวลาการทำปริญญาโทได้รับการสนับสนุนและให้คำปรึกษาจาก อาจารย์สถาพร พรหมวงศ์และอาจารย์พิชญ์ สุพรรณกุล ที่ได้ชี้แนะให้ผ่านพ้นปัญหาและอุปสรรคต่างๆ รวมไปถึงอาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้และให้คำปรึกษาแนะนำเกี่ยวกับปัญหาการจัดการทำปริญญาโทนี้ จึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณทุกสิ่งทุกอย่างที่ผ่านเข้ามาตลอดการจัดการทำปริญญาโทเล่มนี้ ทั้งอุปสรรคปัญหาที่ทำให้กลุ่มของข้าพเจ้าได้พัฒนาความรู้และทักษะในด้านต่าง ๆ เพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

ปริญญาโทเล่มนี้จะสำเร็จลุล่วงมิได้หากมิได้รับการสนับสนุนจากทุกท่านที่กล่าวมาข้างต้น สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้ให้การสนับสนุนทางการศึกษาทางด้านทุนทรัพย์และกำลังใจ อีกทั้งสิ่งต่างๆ มาโดยตลอด รวมทั้งญาติพี่น้องทุกท่านด้วย

นายธีรชัย สีสาวรรณ
นายพงศกร ใจดีเฉย
ผู้จัดทำ

การระบุตำแหน่งภายในอาคารโดยใช้เทคโนโลยีซิกบี
INDOOR ENVIRONMENT LOCALIZATION BY USING
ZIGBEE TECHNOLOGY

โดย นายธีรชัย สีสาวรรณ 52010513
นายพงศกร ใจดีเฉย 52010744

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.พิชญ์ สุพรรณกุล
ดร.สถาพร พรหมวงศ์

บทคัดย่อ

ปัจจุบันอุปกรณ์หลาย ๆ ชนิดต่างที่จะปรับเปลี่ยนไปสู่การใช้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายซึ่งเป็นเครื่องมือในการติดต่อสื่อสาร เพื่อให้การดำเนินชีวิตของมนุษย์ง่ายและสะดวกขึ้น การระบุตำแหน่งเป็นเทคนิคหนึ่งที่สามารถประยุกต์ได้โดยใช้เทคโนโลยีไร้สาย เพื่อประโยชน์ในการแสดงผลข้อมูลตามเวลาจริง ซิกบีเป็นอุปกรณ์สื่อสารแบบไร้สายชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์สำหรับแบบจำลองการหาตำแหน่งในสถานะแวดล้อมภายในอาคาร ดังนั้นโครงการนี้ได้ศึกษาและออกแบบการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีซิกบีสำหรับการหาตำแหน่งภายในอาคาร เพื่อศึกษาความแม่นยำและประโยชน์ในการนำอุปกรณ์ซิกบีมาใช้งาน

ABSTRACT

In present, there are many equipments leading to wireless technologies. A wireless communication is a tool of communicate human life to easy and more convenient. The localization is a technique that can be applied to use wireless for real-time responding. Hence zigbee is a wireless communication that can be applied for localization technique. Therefore, this project a present the indoor environment localization by using zigbee technology is studied and designed.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	I
บทคัดย่อ	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	XI
บทที่ 1	
บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
บทที่ 2	
ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 เทคโนโลยีสื่อสารระยะใกล้	3
2.2 มาตรฐาน IEEE 802.15.4 กับ ชิกบี	3
2.3 เทคโนโลยีชิกบี	4
2.4 อุปกรณ์ XBEE	10
2.5 ARDUINO	15
2.6 การส่งข้อมูลในรูปแบบของ API	16
2.7 การวัดค่าความเข้มของสัญญาณ	23
2.8 ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง	23
2.9 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากสมการยูคลิเดียน	24
2.10 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสม (CUMULATIVE PROBABILITY DISTRIBUTION FUNCTION : CDF)	24
2.11 การระบุตำแหน่งโดยใช้วิธี WEIGTHED CENTROID LOCALIZATION	25
2.12 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการหาตำแหน่งแบบ RSSI กับ WCL	27

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3	
การออกแบบและการจัดทำปฏิญานินพนธ์	28
3.1 การออกแบบ	28
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	29
3.3 การทดลองและการจัดเก็บผลการทดลอง	29
บทที่ 4	
ผลการทดลอง	40
4.1 ผลการวัดค่าความแรงของสัญญาณที่ระยะอ้างอิง	40
4.2 การทดลองเก็บค่าความแรงสัญญาณในแต่ละพิกัด ตามโมเดลในการทดลอง	40
4.3 การทดลองหาค่าคงที่การกระจายสัญญาณของสถานที่ต่าง ๆ	45
4.4 สรุปผลของการวิเคราะห์ค่าคงที่การแพร่กระจายสัญญาณในสภาวะแวดล้อมต่างๆ	47
4.5 ผลการทดลองเมื่อใช้การควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์	48
4.6 ผลการทดลองการปรับเปลี่ยนค่าตัวถ่วงน้ำหนัก	54
4.7 ผลการทดลองการปรับเปลี่ยนค่าตัวถ่วงน้ำหนัก	72
4.8 สรุปผลค่าระยะทางผิดพลาดโดยอ่านค่าจากกราฟของความน่าจะเป็นแจกสะสม	89
4.9 สรุปผลจากตารางและกราฟ	91
4.10 การปรับระยะห่างของแต่ละพิกัด	91
บทที่ 5	
สรุปผลและข้อเสนอแนะ	97
5.1 สรุปผล	97
5.2 ข้อเสนอแนะ	98
บรรณานุกรม	99
ภาคผนวก ก	
โปรแกรมควบคุมการทำงานในส่วนของมอนิเตอร์โหนด	100
ภาคผนวก ข	
โปรแกรมควบคุมการทำงานในส่วนของโหนดเป้าหมาย	106
ภาคผนวก ค	
โปรแกรมแสดงผลโดยใช้ MATLAB	122

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 จำนวนช่องสัญญาณของซิกบีที่ย่านความถี่ต่างๆ	5
2.2 รูปแบบของ ZIGBEE STACK	5
2.3 เครือข่ายแบบดาว	9
2.4 เครือข่ายแบบเพียร์ทูเพียร์	9
2.5 แสดงลักษณะทางกายภาพของ XBEE และ XBEE-PRO [1]	12
2.6 รูปแสดงฮาร์ดแวร์อาเดียน รุ่น UNO [2]	15
2.7 รูปแสดงหน้าต่างโปรแกรมสำหรับเขียนอาเดียน [3]	16
2.8 รูปแบบของ API PACKET FRAME MODE 1	17
2.9 รูปแบบของ API PACKET FRAME	17
2.10 รูปแบบของ API PACKET FRAME ประเภท AT COMMAND	18
2.11 รูปแบบของ API PACKET FRAME ประเภท AT COMMAND QUEUE PARAMETER VALUE	19
2.12 รูปแบบของ API PACKET FRAME ประเภท AT COMMAND RESPONSE	19
2.13 รูปแบบของ API PACKET FRAME ประเภท TX (TRANSMIT) REQUEST : 64 BIT ADDRESS	20
2.14 รูปแบบของ API PACKET FRAME ประเภท TX (TRANSMIT) REQUEST : 16-BIT ADDRESS	21
2.15 รูปแบบของ API PACKET FRAME ประเภท TX (TRANSMIT)	21
2.16 รูปแบบของ API PACKET FRAME ประเภท RX (RECEIVE) PACKET 64- BIT ADDRESS	22
2.17 รูปแบบของ API PACKET FRAME ประเภท RX (RECEIVE) PACKET 16- BIT ADDRESS	22
2.18 การหาตำแหน่งโดยใช้ WCL	26
3.1 การออกแบบระบบระบุตำแหน่งของปริณูนิพนธ์	28
3.2 โมเดลการทดลองหาค่าความแรงสัญญาณที่ระยะอ้างอิง	30
3.3 การทดลองจริงเพื่อหาค่าความแรงสัญญาณที่ระยะอ้างอิง	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 โมเดลการทดลองในการหาค่าดัชนีการแพร่กระจายสัญญาณในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ หรือค่า N	31
3.5 รูปการทดลองจริงในการหาค่าดัชนีการแพร่กระจายสัญญาณในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ หรือค่า N	31
3.6 ขั้นตอนแสดงวิธีการหาค่าดัชนีการแพร่กระจายสัญญาณในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ หรือค่า N	32
3.7 โมเดลการทดลองการเก็บผลการทดลองค่าความแรงสัญญาณในแต่ละพิกัดตำแหน่ง	33
3.8 การทดลองเก็บค่าความแรงสัญญาณตามจุดพิกัดที่กำหนด 36 จุด	33
3.9 ขั้นตอนการทำงานของกรวัดค่าความแรงสัญญาณทั้ง 36 จุดแบบใช้สาย RS232	34
3.10 การทดลองระบุตำแหน่งแบบไร้สาย	35
3.11 ขั้นตอนการทำงานของโหมดเป้าหมาย	36
3.12 ขั้นตอนการทำงานของมอเตอร์โหมด	37
3.13 ค่าพิกัดตำแหน่งที่ได้จากการรันโปรแกรม	38
3.14 หน้าต่างโปรแกรม MATLAB ที่ใช้แสดงกราฟ CDF	39
4.1 กราฟแสดงผลค่า RMSE กับค่า N	48
4.2 กราฟความผิดพลาดของระยะทาง โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม	56
4.3 กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว	56
4.4 กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม	57
4.5 กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว	57
4.6 กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม	58
4.7 กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาดในรูปแบบของกราฟพื้นผิว	60

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.8 กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจง สะสม	60
4.9 กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว	61
4.10 กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจง สะสม	63
4.11 กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว	63
4.12 กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจง สะสม	64
4.13 กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว	64
4.14 กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจง สะสม	66
4.15 กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว	67
4.16 กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาดโดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจง สะสม	67
4.17 กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว	68
4.18 กราฟแสดงค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจง สะสม	70
4.19 กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว	70
4.20 กราฟแสดงค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจง สะสม	71
4.21 กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว	71
4.22 กราฟแสดงค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจง สะสม	73
4.23 กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว	74
4.24 กราฟแสดงค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจง สะสม	74
4.25 กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว	75

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.26	กราฟแสดงค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจง สะสม	76
4.27	กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว	77
4.28	กราฟแสดงค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจง สะสม	78
4.29	กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว	78
4.30	กราฟแสดงค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจง สะสม	80
4.31	กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว	81
4.32	กราฟแสดงค่าระยะทางผิดพลาดโดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจง สะสม	81
4.33	กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว	82
4.34	กราฟแสดงค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจง สะสม	84
4.35	กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว	84
4.36	กราฟแสดงค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจง สะสม	85
4.37	กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว	85
4.38	กราฟแสดงค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจง สะสม	87
4.39	กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว	88
4.40	กราฟแสดงค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจง สะสม	88
4.41	กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว	89
4.42	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า มัธยฐานระยะทางผิดพลาดกับ ค่าตัวถ่วง น้ำหนัก(G) ของดัชนีการแพร่กระจายสัญญาณในสภาวะแวดล้อมต่างๆ หรือ ค่า N ที่ได้จากการทดลอง และค่าทางทฤษฎี	90

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.43	กราฟแสดงค่าระยะทางผิดพลาดโดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจง สะสม	92
4.44	กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว	93
4.45	กราฟแสดงค่าระยะทางผิดพลาดโดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจง สะสม	95
4.46	กราฟแสดงผลค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว	95



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า	
2.1	เปรียบเทียบคุณสมบัติ XBEE และ XBEE PRO	11
2.2	แสดงรายละเอียดต่างๆของ XBEE	13
4.1	แสดงการหาค่าเฉลี่ยความแรงของสัญญาณที่ระยะอ้างอิง (ในที่นี้กำหนดเป็น 1 เมตร)	40
4.2	ผลการทดลองเก็บค่าความแรงสัญญาณในแต่ละพิกัดของโหนดอ้างอิงที่ 1	40
4.3	ผลการทดลองเก็บค่าความแรงสัญญาณในแต่ละพิกัดของโหนดอ้างอิงที่ 2	41
4.4	ผลการทดลองเก็บค่าความแรงสัญญาณในแต่ละพิกัดของโหนดอ้างอิงที่ 3	43
4.5	ผลการทดลองเก็บค่าความแรงสัญญาณในแต่ละพิกัดของโหนดอ้างอิงที่ 4	44
4.6	ผลการทดลองการเก็บค่าความแรงไว้คำนวณเพื่อหาค่า n สำหรับโหนดอ้างอิงที่ 1	45
4.7	ผลการทดลองการเก็บค่าความแรงไว้คำนวณเพื่อหาค่า n สำหรับโหนดอ้างอิงที่ 2	46
4.8	ผลการทดลองการเก็บค่าความแรงไว้คำนวณเพื่อหาค่า n สำหรับโหนดอ้างอิงที่ 3	46
4.9	ผลการทดลองการเก็บค่าความแรงไว้คำนวณเพื่อหาค่า n สำหรับโหนดอ้างอิงที่ 4	47
4.10	ผลการทดลองการทดลองเก็บค่าความแรงสัญญาณในแต่ละพิกัด โดยการควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่โหนดอ้างอิงที่ 1	48
4.11	ผลการทดลองการทดลองเก็บค่าความแรงสัญญาณในแต่ละพิกัด โดยการควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่โหนดอ้างอิงที่ 2	50
4.12	ผลการทดลองการทดลองเก็บค่าความแรงสัญญาณในแต่ละพิกัด โดยการควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่โหนดอ้างอิงที่ 3	51
4.13	ผลการทดลองการทดลองเก็บค่าความแรงสัญญาณในแต่ละพิกัด โดยการควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่โหนดอ้างอิงที่ 4	52
4.14	พิกัดของการระบุตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักหรือค่า g นั้นมีค่า 1 และ 2 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $n = 1.6$	54

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.15	58
พิภัดของการระบุตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักหรือค่า g นั้นมีค่า 3 และ 4 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $n = 1.6$	
4.16	61
พิภัดของการระบุตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักหรือค่า g นั้นมีค่า 5 และ 6 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $n = 1.6$	
4.17	65
พิภัดของการระบุตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักหรือค่า g นั้นมีค่า 7 และ 8 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $n = 1.6$	
4.18	68
พิภัดของการระบุตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักหรือค่า g นั้นมีค่า 9 และ 10 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $n = 1.6$	
4.19	72
พิภัดของการระบุตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักหรือค่า g นั้นมีค่า 1 และ 2 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $n = 2$	
4.20	75
พิภัดของการระบุตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักหรือค่า g นั้นมีค่า 3 และ 4 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $n = 2$	
4.21	79
พิภัดของการระบุตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักหรือค่า g นั้นมีค่า 5 และ 6 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $n = 2$	
4.22	82
พิภัดของการระบุตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักหรือค่า g นั้นมีค่า 7 และ 8 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $n = 2$	
4.23	86
พิภัดของการระบุตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักหรือค่า g นั้นมีค่า 9 และ 10 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $n = 2$	
4.24	90
ค่ามัธยฐานความผิดพลาดของระยะทางของค่าตัวถ่วงน้ำหนักในกรณี ค่าดัชนีการแพร่กระจายสัญญาณในสภาวะแวดล้อมต่างๆ หรือ ค่า n ที่ได้จากการทดลอง และค่าทางทฤษฎี	
4.25	91
พิภัดของการระบุตำแหน่งตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักหรือค่า G นั้นมีค่า 1 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $N = 1.6$ และระยะระหว่างพิภัดเป็น 1.2 เมตร	
4.26	93
ตารางที่ 4.26 พิภัดของการระบุตำแหน่งตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักหรือค่า G นั้นมีค่า 1 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $N = 1.6$ และระยะระหว่างพิภัดเป็น 0.8 เมตร	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายเข้ามามีบทบาทมากขึ้นในชีวิตประจำวันของคนเรามากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นระบบเครือข่ายไร้สาย (Wireless Local Area Network : WLAN) การสื่อสารผ่านดาวเทียม เครือข่ายเซลลูลาร์ รวมไปถึงเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย (Wireless Sensor Network : WSN) ประโยชน์ของการสื่อสารไร้สายคือ ทำให้มนุษย์เราสามารถติดต่อสื่อสารถึงกันได้ทุกที่ ทุกเวลา และอุปกรณ์ต่าง ๆ สามารถเชื่อมต่อกันได้หลากหลาย โดยเทคโนโลยีไร้สายได้มีการถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่ดีมากขึ้น และมีราคาถูกลง เพื่อให้ผู้ใช้โดยทั่วไปสามารถเข้าถึงเทคโนโลยีนี้ได้อย่างทั่วถึง และสามารถตอบสนองต่อความต้องการในการใช้งานแต่ละด้านได้อย่างแพร่หลาย การระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารนั้นสามารถนำเทคโนโลยีเครือข่ายไร้สายมาประยุกต์ใช้งานได้ เนื่องจากอุปกรณ์มีขนาดเล็ก พกพาได้สะดวก สะดวกในการติดตั้ง ใช้พลังงานน้อย และสามารถสร้างเครือข่ายได้ ซึ่งการนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น การระบุตำแหน่งผู้ป่วยที่จำเป็นต้องดูแลพิเศษในโรงพยาบาล การระบุตำแหน่งของเด็กหลงในห้างสรรพสินค้า เป็นต้น

ปริญญาานิพนธ์นี้จึงได้นำเทคโนโลยีซิกบีที่เป็นอุปกรณ์ไร้สายระยะใกล้ โดยใช้เทคโนโลยีมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ซึ่งแม้จะมีอัตราการรับส่งข้อมูลต่ำกว่าหรือเท่ากับ 250 กิโลบิตต่อวินาที แต่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานในชีวิตประจำวันได้มากกว่าอุปกรณ์ไร้สายความเร็วสูง เนื่องจากมีขนาดเล็ก กินไฟน้อย และมีราคาไม่แพง ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร

ดังนั้นผู้จัดทำจึงได้มีการพัฒนาระบบระบุตำแหน่งวัตถุขึ้นมาจากเทคโนโลยีของซิกบี โดยมีการนำไมโครคอนโทรลเลอร์มาใช้ในการควบคุมการรับส่งค่าความแรงของสัญญาณ เพื่อให้วัตถุที่เป็นเป้าหมายมีการรับส่งแบบไร้สาย และทำการส่งต่อมายังที่มอดิเตอร์โหนดที่ต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงตำแหน่งของวัตถุผ่านทางหน้าจอ รวมทั้งศึกษาถึงโมดูลที่ใช้และเทคนิควิธีการคำนวณต่าง ๆ มาพิจารณาเพื่อใช้ในการระบุตำแหน่งวัตถุที่อยู่ภายในอาคาร

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) ศึกษาเกี่ยวกับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายและเทคโนโลยีของซิกบี
- 2) ศึกษาเกี่ยวกับหลักการประยุกต์เทคโนโลยีซิกบี สำหรับการให้หาตำแหน่งภายในอาคาร
- 3) สามารถออกแบบอุปกรณ์รับส่งสัญญาณด้วยเทคโนโลยีซิกบี และประมวลผลผ่านโปรแกรมจริง
- 4) นำไปประยุกต์การใช้งาน และแสดงผลการหาตำแหน่งตามเวลาจริง
- 5) แสดงผลการวัดและวิเคราะห์หาตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร

1.3 ขอบเขตปริญญานิพนธ์

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ศึกษาเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย โดยอาศัยเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายของซิกบี บนมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ประกอบการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาควบคุมในการรับส่งข้อมูลของซิกบี และได้ศึกษาทฤษฎีและหลักการวิเคราะห์การส่งผ่านของเทคโนโลยีซิกบี ในสภาวะแวดล้อมภายในอาคาร จากนั้นได้ทำการศึกษาทฤษฎีการระบุตำแหน่งของวัตถุภายในอาคาร โดยได้นำเทคนิคการระบุตำแหน่งโดยการถ่วงน้ำหนักมาประกอบกับการวัดความแรงของสัญญาณที่รับได้ เพื่อมาใช้ในการระบุตำแหน่ง จากนั้นออกแบบจำลองในการวัด ทำการวัดและทดลอง ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ อาคาร E12 ชั้นที่ 6 ลานหน้าลิฟต์ แล้วประเมินผลความแม่นยำของการหาตำแหน่ง และแสดงตำแหน่งของวัตถุที่อยู่ในพิกัดต่าง ๆ ตามเวลาจริงผ่านทางหน้าจอคอมพิวเตอร์

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีสื่อสารไร้สายระยะไกล

ในปัจจุบันนี้การสื่อสารไร้สายมีหลากหลายรูปแบบ สาเหตุเนื่องมาจากความเจริญก้าวหน้าทางเทคโนโลยีการสื่อสาร และวิวัฒนาการของสารกึ่งตัวนำและไมโครชิป ทำให้การประมวลสัญญาณดิจิทัลที่เป็นส่วนสำคัญสำหรับการสื่อสารแบบไร้สาย ทำได้รวดเร็วและอุปกรณ์ไมโครชิปมีราคาย่อมเยาลง ระบบการสื่อสารไร้สายแบ่งตามรัศมีการครอบคลุมของสัญญาณ เช่น การสื่อสารดาวเทียม (Satellite Communications) เป็นการสื่อสารไร้สายระยะไกล ที่รัศมีการสื่อสารสามารถครอบคลุมได้หลายร้อยกิโลเมตรหรือการสื่อสารแบบรังผึ้ง (Cellular Communications) ที่ใช้สำหรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่มีรัศมีการครอบคลุมสัญญาณระดับกลางประมาณหลายกิโลเมตร

การสื่อสารระยะไกลสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์สื่อสารได้หลายรูปแบบ โดยเฉพาะการเน้นกลุ่มเป้าหมายการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้การสื่อสารดังกล่าวเป็นมาตรฐาน จึงได้มีการกำหนดมาตรฐานสากล สำหรับการสื่อสารระยะไกล หรือการสื่อสารสำหรับ เครือข่ายพื้นที่ส่วนตัว (Personal Area Network) คือ มาตรฐาน IEEE 802.15 ซึ่งในมาตรฐานนี้ได้แบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย 4 กลุ่มสำหรับการสื่อสารระยะไกลแบบต่างๆ คือ กลุ่มที่ 1 (Task Group 1) เป็นการสื่อสารสำหรับบุคคลระยะไกล ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของมาตรฐานสำหรับการสื่อสารแบบบลูทูธ กลุ่มที่ 2 (Task Group 2) เป็นการสื่อสารที่เน้นการสื่อสารร่วมกับมาตรฐาน IEEE 802.11 กลุ่มที่ 3 (Task Group 3) เป็นการสื่อสารแบบระยะไกลแบบความเร็วสูง (≈ 20 เมกะบิตต่อวินาที) และกลุ่มที่ 4 (Task Group 4) เป็นการสื่อสารระยะไกลที่เน้นการสื่อสารแบบใช้พลังงานต่ำ รับส่งข้อมูลได้ต่ำ และมีความซับซ้อนน้อยเพื่อให้อุปกรณ์มีราคาถูก ซึ่งมาตรฐานนี้ได้นำมาใช้สำหรับการสื่อสารสำหรับเครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย

2.2 มาตรฐาน IEEE 802.15.4 กับ ชิปปี้

IEEE 802.15.4 เป็นมาตรฐานที่กำหนดใช้ในชั้นการสื่อสารที่ 2 ในแบบจำลอง OSI จุดประสงค์เพื่อการสื่อสารกันระหว่างสองอุปกรณ์ ถูกสร้างขึ้นโดยสถาบันวิศวกรไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (IEEE) ซึ่งงานหลักคือ การกำหนดมาตรฐานเพื่อให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีเป็นไปทิศทางเดียวกันใน Wasmote ใช้ XBee 802.15.4 OEM RF Modules

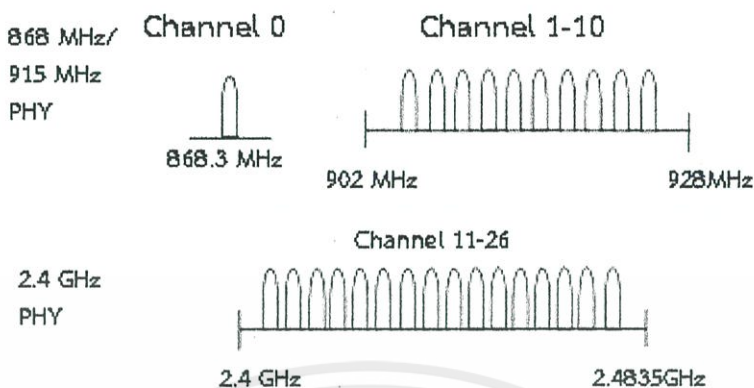
ซิกบีเป็นมาตรฐานที่กำหนดใช้ในการสื่อสารที่ 3 ในแบบจำลอง OSI จุดประสงค์หลักคือ การสร้างลำดับชั้น เครือข่าย (Hierarchy) เพื่อกำหนดจำนวนของอุปกรณ์สื่อสารให้เป็นกลุ่มของการสื่อสาร เพื่อกำหนดคุณลักษณะพิเศษเช่น การเข้ารหัสลับ , การยืนยันตัวตน และในการให้บริการโปรแกรมประยุกต์ชั้นบน ซึ่งสร้างขึ้นโดย Zigbee Alliance ในอุปกรณ์ Wasmote โพรโตคอลนี้ถูกกำหนดไว้โดยใช้โมดูล XBee XB Digi

2.3 เทคโนโลยีซิกบี

ซิกบีเป็นมาตรฐานของการสื่อสารข้อมูลแบบไร้สายสากล กำหนดโดย Zigbee Alliance เป็นกลุ่มองค์กรที่ไม่แสวงผลกำไรซึ่งมีบริษัทต่าง ๆ เข้าร่วมเป็นสมาชิกกว่า 300 ราย ซิกบีเป็นการสื่อสารแบบไร้สายที่มีอัตราในการรับส่งข้อมูลต่ำ ใช้พลังงานน้อย ราคาถูก จุดประสงค์เพื่อให้สามารถสร้างระบบที่เรียกว่า “เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สาย” ได้ ซึ่งระบบนี้จะสามารถทำงานได้ทั้ง ในร่ม กลางแจ้ง หนาแน่น หนาฝน และอยู่ได้ด้วยแบตเตอรี่ก้อนเล็กนานเป็นเดือนเป็นปี เหมาะสมกับการใช้งานกับระบบตรวจสอบสภาพแวดล้อมต่าง ๆ (Monitoring System)

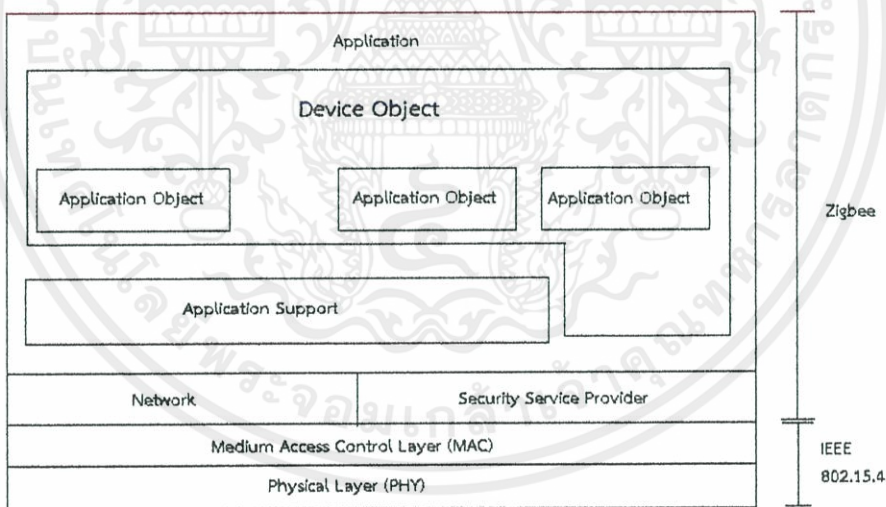
ซิกบีถูกสร้างขึ้นในการทำระบบเครือข่ายไร้สายส่วนบุคคล (WPAN) อยู่ภายใต้มาตรฐาน IEEE 802.15.4 โดยมาตรฐานนี้ใช้งานสำหรับการสื่อสารความเร็วต่ำ ใช้กำลังไฟฟ้าน้อย อุปกรณ์มีราคาถูก และมีคุณสมบัติในการจัดการตัวเองได้ เป็นเทคโนโลยีไร้สายที่ร่วมกันสื่อสารข้อมูลผ่านเซ็นเซอร์ขนาดเล็ก จำนวนเป็นพัน ๆ หมื่น ๆ ชิ้นฝังอยู่ตามส่วนต่าง ๆ ในอาคาร สำนักงาน หรือภายในบ้าน

ซิกบีได้กำหนดย่านความถี่ในการใช้งานตามมาตรฐานไว้ 3 ย่านความถี่คือ ย่าน 2.4 กิกะเฮิรตซ์ , 915 เมกะเฮิรตซ์ และ 868 เมกะเฮิรตซ์ โดยแต่ละย่านจะมีจำนวนช่องสัญญาณ 16 ช่อง , 10 ช่อง และ 1 ช่อง ตามลำดับ อัตราเร็วการรับส่งข้อมูลจะอยู่ที่ 250 กิโลบิตต่อวินาที , 40 กิโลบิตต่อวินาที และ 20 กิโลบิตต่อวินาที ตามลำดับเช่นกัน



รูปที่ 2.1 จำนวนช่องสัญญาณของซิกบีที่ย่านความถี่ต่างๆ

ซิกบีสามารถสร้างเป็นเครือข่ายได้ ทั้งนี้ซิกบี ได้อ้างอิงมาตรฐาน IEEE 802.15.4 โดยนำใน ส่วนของ Physical Layer และ MAC Layer มาทำงานตรงส่วน 2 เลเยอร์ล่างสุด เช่น เรื่องของระดับ กำลังสัญญาณ , Link Quality , Access Control , Security ฯลฯ แต่ในเลเยอร์ถัดไปจะเป็นส่วน ของซิกบี แสดงได้ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 รูปแบบของ Zigbee Stack

2.3.1 โพรโตคอลของซิกบี (Zigbee Protocol)

มาตรฐาน 802.15.4 มีจุดมุ่งหมายเบื้องต้นเพื่อตรวจจับและควบคุมแอปพลิเคชัน ความสามารถในการจัดการประหยัดพลังงานถือเป็นคุณสมบัติที่สำคัญในการที่จะทำให้อุปกรณ์ที่ใช้งาน แบตเตอรี่สามารถใช้งานได้ยาวนานขึ้น จำนวนปริมาณข้อมูลเอาต์พุต (แบนด์วิดท์) ที่ได้ค่อนข้างต่ำ

เมื่อเทียบกับไวร์เลสแลน ซึ่งต้องใช้ถึง 250 กิโลบิตต่อวินาที กับแอปพลิเคชันหลายตัวจึงจะมากเพียงพอ ระยะห่างระหว่างโหนด 2 โหนด อยู่ที่ 50 เมตรขึ้นไป และแต่ละโหนดที่แลกเปลี่ยนข้อมูลกันจะทำการสร้างเครือข่ายขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ เพื่อให้ครอบคลุมเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด

2.3.2 Hardware (Physical and MAC layers)

โดยส่วนใหญ่แล้วทุกโซลูชันจะทำงานที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ แต่เฉพาะที่อเมริกาเหนือทำงานที่ย่านความถี่ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ และที่ยุโรปทำงานที่ย่านความถี่ 868 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ เป็นย่านความถี่ที่อนุญาตให้ใช้ได้ฟรี ดังนั้นผลิตภัณฑ์จากซิกบีจึงอาจจะสามารถใช้ได้ทั่วโลก ผลิตภัณฑ์ในปัจจุบันทั้งหมดจะใช้ได้ที่ย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์

ในทุกย่านความถี่ใช้ DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) ที่ย่านความถี่ 868 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 915 เมกะเฮิร์ตซ์ ใช้วิธี BPSK (Binary Phase Shift Keying) และที่ย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ ใช้วิธี O-QPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying)

ที่ย่านความถี่ที่อนุญาตให้ใช้ได้ฟรีเริ่มมีการใช้กันมากและมีสัญญาณรบกวนมากขึ้นมาตรฐาน 802.15.4 มีคุณสมบัติมากมายที่จะทำให้แน่ใจว่ามีขั้นตอนการทำงานที่เชื่อถือได้ภายใต้สภาพแวดล้อมที่เลวร้ายที่สุด โดยมีคีย์เวิร์ด 3 ตัว คือ ทำให้ช่องสัญญาณว่าง (Clear Channel Assessment) ประเมินคุณภาพ (Quality Assessment) และการตรวจจับตัวรับพลังงาน (Receiver Energy Detection) เพื่อป้องกันปัญหาที่จะเกิดขึ้นจากตัวมันเอง เทคนิคที่เรียกว่า Carrier Sense Multiple Access (CSMA) เพื่อใช้ในการส่งข้อมูลซึ่งแน่ใจว่าไม่ก่อให้เกิดปัญหาการชนกันข้อมูลที่ถูส่งอยู่ในรูปกลุ่มข้อมูล ซึ่งกลุ่มข้อมูลของซิกบีมีขนาดสูงสุด 128 ไบต์ ซึ่งรวมโอเวอร์เฮดของโพรโทคอลด้วย มีที่ว่างได้สูงสุด 104 ไบต์ เมื่อเปรียบเทียบกับอีเทอร์เน็ตแล้วค่อนข้างเล็กกว่าแต่แอปพลิเคชันมาก ซึ่งเนื้อที่เท่านี้เพียงพอต่อการใช้งานของซิกบี

คุณสมบัติที่เป็นลักษณะเรียลไทม์ ซิกบีสามารถกำหนดให้ข้อความมีลำดับความสำคัญสูงสุดได้ โดยใช้กลไกการแบ่งช่วงเวลา ดังนั้น ข้อความที่มีลำดับความสำคัญสูงจะสามารถถูกส่งไปได้เร็วที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

ซิกบีใช้แอดเดรส 2 ประเภท มี IEEE address ขนาด 64 บิต ซึ่งเปรียบเทียบกับไอพีแอดเดรสบนอินเทอร์เน็ต และมีอีก 16 บิตเป็น short address ซึ่งใช้เน็ตเวิร์คละครั้ง ดังนั้นจะสามารถสร้างโหนดได้ทั้งหมด $2^{16} = 64000$ โหนด ซึ่งเพียงพอต่อการใช้งาน แต่ถ้าต้องการใช้จำนวนโหนดมากกว่านี้ต้องออกแบบเพื่อสร้างโหนดเกตเวย์

2.3.3 The Zigbee upper layers

เป็นเลเยอร์ที่อยู่ถัดขึ้นไปจากชั้น 802.15.4 ซึ่งเรียกว่ามาตรฐานซิกบี ซึ่งเลเยอร์นี้ประกอบไปด้วย แอปพลิเคชันโพรไฟล์ (Application Profile) ซีเคียวริตี้ เซตติง (Security Setting) และ เมสเสจจิง (messaging) ถึงแม้ว่าซิกบีมีสถาปัตยกรรมเป็นแบบตาข่าย (mesh) แต่ก็ไม่นับสนับสนุนการทำงานกับ สถาปัตยกรรมที่เป็นทอพอโลยีแบบสตาร์ ทรี หรือ ไฮบริดจ์เลย ขึ้นอยู่กับว่าแอปพลิเคชันในแต่ละโหนดจะมีข้อดีหรือข้อเสียอย่างไร ทอพอโลยีแบบสตาร์เป็นทอพอโลยีที่ง่ายที่สุด ทุกๆ โหนดจะเชื่อมต่อสื่อสารกับโหนดที่อยู่ตรงกลาง คล้ายดาว ทอพอโลยีแบบตาข่ายมีความซับซ้อนมาก แต่โหนดอาจมีการเชื่อมต่อกับโหนดอื่นๆ ที่อยู่ภายในช่วงได้ แต่เป็นการง่ายที่จะทราบว่ารูปร่างแบบนี้ทำให้เกิดเส้นทางระหว่างเน็ตเวิร์คที่เป็นไปได้มากมาย ทำให้ทอพอโลยีมีความแข็งแกร่งทนทาน เนื่องจากเส้นทางที่ใช้งานไม่ได้จะถูกละเว้นไปทอพอโลยีแบบคลัสเตอร์ทรี เป็นทอพอโลยีแบบง่ายที่สุด ที่เกิดจากการนำทอพอโลยีแบบสตาร์และตาข่ายมารวมกัน

2.3.4 กลไกการรักษาความปลอดภัยของซิกบี

ซิกบีควบคุมความปลอดภัยในการส่งข้อมูลผ่านฮอป (hop) โดยใช้ความปลอดภัยของ MAC data frame แต่ถ้าเป็นการส่งแบบมัลติฮอป (multi-hop) ซิกบีจะใช้ความปลอดภัยจากเลเยอร์ชั้นบนๆ (เช่น ชั้น NWK) ชั้น MAC ใช้มาตรฐานการเข้ารหัสชั้นสูง (AES) โดยใช้อัลกอริทึม Cryptographic และ จัดทำเป็น security suite โดยใช้อัลกอริทึม AES ใน suite นี้จะป้องกันความลับ มีความถูกต้องและตรวจสอบความเป็นเจ้าของไว้กับ MAC frame ชั้น MAC ไม่มีกระบวนการทำ Security โพรโตคอลชั้นบนจะมีหน้าที่ตั้งคีย์ และกำหนดระดับความปลอดภัยที่จะใช้เพื่อควบคุม

2.3.5 ชนิดอุปกรณ์ของซิกบี

การแบ่งชนิดอุปกรณ์ของซิกบีแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ แบบ Physical Device และแบบ Logical Device

อุปกรณ์ซิกบี แบบ Physical Device แบ่งได้อีก 2 ประเภทคือ

1. Full Function Device (FFD) เป็นเราท์เตอร์ที่เป็นสื่อกลางในการส่งข้อมูลจากอุปกรณ์อื่นๆ ใช้พลังงานจากพาวเวอร์ไลน์ ทำงานได้ในทุกทอพอโลยี(Topology)และสามารถทำเป็นจุดเชื่อมต่อกันได้
2. Reduce Function Device (RFD) เหมาะแก่การเชื่อมต่อภายในเครือข่าย ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ ไม่สามารถถ่ายทอดข้อมูลจากอุปกรณ์อื่นๆได้ ทำได้ง่ายในเครือข่ายที่เป็นแบบ star

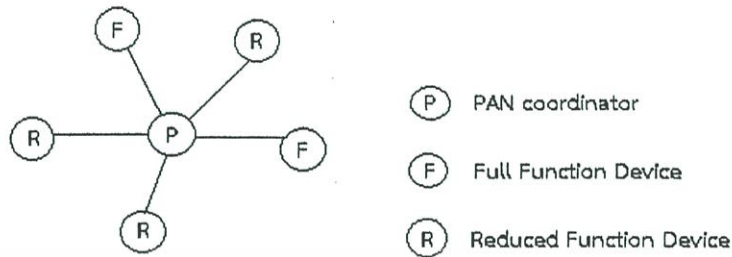
อุปกรณ์ซิกบีแบบ Logical Device มี 3 ประเภท คือ

1. โคออดิเนเตอร์ (Coordinator) มีหน้าที่สร้างการสื่อสารเชื่อมโยงเครือข่ายระหว่างอุปกรณ์ปลายทาง กับเราท์เตอร์ หรือ ระหว่างโคออดิเนเตอร์ด้วยกันเอง หรือ โคออดิเนเตอร์ กับ เราท์เตอร์ ทำการกำหนดแอดเดรสให้กับอุปกรณ์ที่อยู่ในวงเครือข่าย ไม่ให้ซ้ำกัน ดูแลจัดการเรื่องการหาเส้นทาง เปรียบได้กับอุปกรณ์แบบ FFD
2. อุปกรณ์ปลายทาง (End Device) เป็นอุปกรณ์ปลายทางสุด ซึ่งจะใช้รับสัญญาณจากเซ็นเซอร์ที่ปลายทาง โดยที่ใช้พลังงานในการทำงานต่ำอาจจะเป็นแบบ RFD หรือ FFD ก็ได้
3. เราท์เตอร์ (Router) มีหน้าที่รับส่งข้อมูลในเส้นทางต่าง ๆ ของเครือข่ายซึ่งเปรียบได้กับ FFD

จาก IEEE 802.15.4 เครือข่ายของซิกบีจำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่เป็น FFD อย่างน้อย 1 ตัวเพื่อการใช้งานร่วมกับเครือข่ายอื่นๆ ได้ แต่อุปกรณ์ปลายทางที่ใช้งานอาจจะเป็น RFD ก็ได้เพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่าย

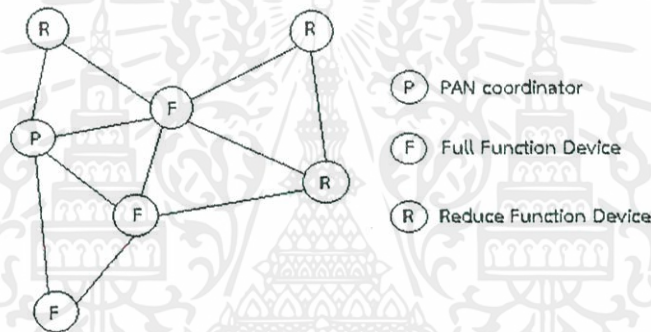
2.3.6 รูปแบบเครือข่ายซิกบี (Zigbee Networking Topology)

ในส่วนของรูปแบบเครือข่ายซิกบีนี้ จะถูกกำหนดเป็น 2 รูปแบบเครือข่าย ซึ่งจะถูกจัดการโดย Zigbee Networking Layer โดยจะต้องเป็น 1 ใน 2 รูปแบบที่ถูกกำหนดใน IEEE 802.15.4 คือ เครือข่ายรูปแบบดาว (Star Topology) และเครือข่ายแบบ Peer to Peer



รูปที่ 2.3 เครือข่ายแบบดาว

จากรูปที่ 2.3 แสดงเครือข่ายแบบดาว โดยมีลักษณะที่สำคัญคือ อุปกรณ์ปลายทางต่าง ๆ ในเครือข่ายซิกบี จะสามารถสื่อสารข้อมูลได้เฉพาะกับ PAN Coordinator เท่านั้น



รูปที่ 2.4 เครือข่ายแบบเพียร์ทูเพียร์

จากรูปที่ 2.4 แสดงถึงเครือข่ายแบบเพียร์ทูเพียร์ โดยมีลักษณะที่สำคัญ คือ ทุกๆอุปกรณ์ต่างๆในเครือข่ายซิกบี จะทำการสื่อสารข้อมูลกันได้โดยตรง โดยไม่จำเป็นต้องสื่อสารข้อมูลกับแพนโคออดิเนเตอร์เพียงอย่างเดียว

โดยรูปแบบของเครือข่ายที่มีลักษณะการสื่อสารข้อมูลแบบเพียร์ทูเพียร์ มีหลายรูปแบบ เช่น เครือข่ายแบบ Mesh (Mesh Topology) และเครือข่ายแบบทรี (Tree Topology) โดยมีลักษณะที่สำคัญ คือจะมีการสื่อสารข้อมูลเป็นลำดับชั้นลงไปเรื่อย โดยแพนโคออดิเนเตอร์จะเป็นจุดเริ่มต้นของเครือข่าย อีกทั้งยังสนับสนุนเครือข่ายแบบวงแหวน (Ring Topology) เช่นเดียวกัน

2.3.7 ขั้นตอนการทำงานของโพรโทคอลซิกบี

ขั้นตอนการทำงานตรงส่วนของโคออดิเนเตอร์จะเริ่มต้นเครือข่าย โดยการตรวจสอบการใช้ช่องสัญญาณวิทยุภายในบริเวณรอบ ๆ ถ้ามีช่องสัญญาณที่ไม่ถูกใช้โดยโคออดิเนเตอร์ตัวอื่น ก็สามารถ

เริ่มต้นเครือข่ายได้ หลังจากนั้น โคออดิเนเตอร์จะทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางของเครือข่ายเพื่อรองรับการเข้าร่วมเครือข่ายของอุปกรณ์ตัวอื่น ๆ

ในส่วนของอุปกรณ์ปลายทาง จะเริ่มต้นการทำงานโดยการร้องขอการเข้าร่วมเครือข่ายไปยัง โคออดิเนเตอร์ประจำเครือข่ายนั้น ๆ โดยการตรวจสอบผ่านช่องสัญญาณต่างๆ โคออดิเนเตอร์ใช้ช่องสัญญาณได้อยู่เมื่อเข้าร่วมเครือข่ายแล้ว อุปกรณ์ปลายทางจึงสามารถทำการร้องขอคำสั่งอื่น ๆ ผ่านทางโคออดิเนเตอร์ได้ เช่น การส่งข้อความทั่วไป (Message) , การร้องขอจำเป็น (Binding Request) , การขอยกออกจากเครือข่าย

2.3.8 การประยุกต์ใช้งานชิกปี

สามารถแบ่งได้ตามประเภทของข้อมูลข่าวสารที่มีอยู่ 3 แบบคือ

1. ข้อมูลแบบ Periodic ข้อมูลเป็นช่วงเวลา โปรแกรมสามารถควบคุมอัตราการส่งและตัวตรวจจับสัญญาณกระตุ้น เซ็คข้อมูลและทำให้ข้อมูลไม่เคลื่อนไหว ใช้สำหรับเซ็นเซอร์ และมิเตอร์
2. ข้อมูลแบบ Intermittent เป็นลักษณะที่มีการส่งผ่านข้อมูลเมื่อมีการใช้งาน เช่น สวิตซ์ไฟ
3. ข้อมูลแบบ Repetitive low latency ใช้ในงานที่ต้องการ Latency น้อย ๆ โดยการสื่อสารข้อมูลจะใช้วิธีจัดสรรช่วงเวลา และสามารถใช้กลไกแบบ GTS เพื่อรับประกันคุณภาพของการบริการ นำไปใช้งาน เช่น เมาส์ไร้สาย

2.4 อุปกรณ์ XBee

XBee เป็นอุปกรณ์ที่สามารถประยุกต์ใช้กับการควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ และ RF IC อยู่ในใน ทำหน้าที่เป็น อุปกรณ์ Transceiver (อุปกรณ์รับ-ส่งสัญญาณ) แบบ Half Duplex ที่ใช้ย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ มีการจัดการโดยใช้พลังงานต่ำ มีอินเตอร์เฟสที่ใช้รับและส่งข้อมูลกับ XBee เป็น UART (TTL) ซึ่งสำหรับทางด้านไมโครคอนโทรลเลอร์ เรานำขาที่ใช้ติดต่อสื่อสาร UART ของ XBee ต่อเข้ากับ UART ของ ไมโครคอนโทรลเลอร์

XBee สามารถใช้งานตามมาตรฐานชิกปีได้ โดยที่ไม่ต้องเขียนโปรแกรมสร้าง เครือข่ายชิกปีเลย เพราะว่าทางผู้ผลิตได้จัดทำเฟิร์มแวร์ที่จะโหลดเข้าไปในตัว XBee ให้เราสามารถ set parameter ผ่าน software interface (X-CTU หรือโปรแกรมที่เขียนขึ้นเอง), ผ่านทาง At

command (เหมือนกับการควบคุม GSM Module) โดยใช้ Hyper terminal ต่าง ๆ ในการรับส่งข้อมูลระหว่างซีเรียลพอร์ต หรือผ่านทาง การรับส่งข้อมูลด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ เมื่อตั้งค่า XBee ให้ทำงานเป็นอุปกรณ์ในเครือข่ายซิกบี แล้ว เราจะเรียก XBee แต่ละตัวเป็นโหนด

2.4.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของ XBee

1. Operating Frequency ISM Band 2.4 กิกะเฮิรตซ์ (ISM Band หมายถึง ย่านความถี่ใช้งานเพื่อการวิจัย ซึ่งจะอนุญาตให้ใช้กับ อุตสาหกรรม (Industrial) วิทยาศาสตร์ (Scientific) และ ทางการแพทย์ (Medical) รวมเป็น ISM)
2. มีสายอากาศให้เลือกใช้หลายแบบ คือ แบบ Chip Ant , Whip Ant , UFL con , RPSMA con โดย 2 แบบหลัง ต้องไปหาเสายอากาศย่าน 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ที่เป็น connector แบบ UFL หรือ SMA ในการต่อใช้งาน
3. Supply Voltage อยู่ที่ 2.8-3.4 โวลต์
4. Power Down Current < 10 ไมโครแอมป์
5. มี RF data rate อยู่ที่ 250 กิโลบิตต่อวินาที (เป็นส่วนของสัญญาณที่ส่งผ่านอากาศ)
6. มี Serial interface data rate อยู่ระหว่าง 1200 – 115200 บิตต่อวินาที (เป็นส่วนที่ติดต่อสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์)
7. เป็น Spread Spectrum ชนิด DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)
8. การกำหนด addressing มีลำดับลักษณะคือ กำหนด PAN ID สำหรับเครือข่ายหนึ่ง ๆ , กำหนด Channel และ กำหนด address ของแต่ละตัว

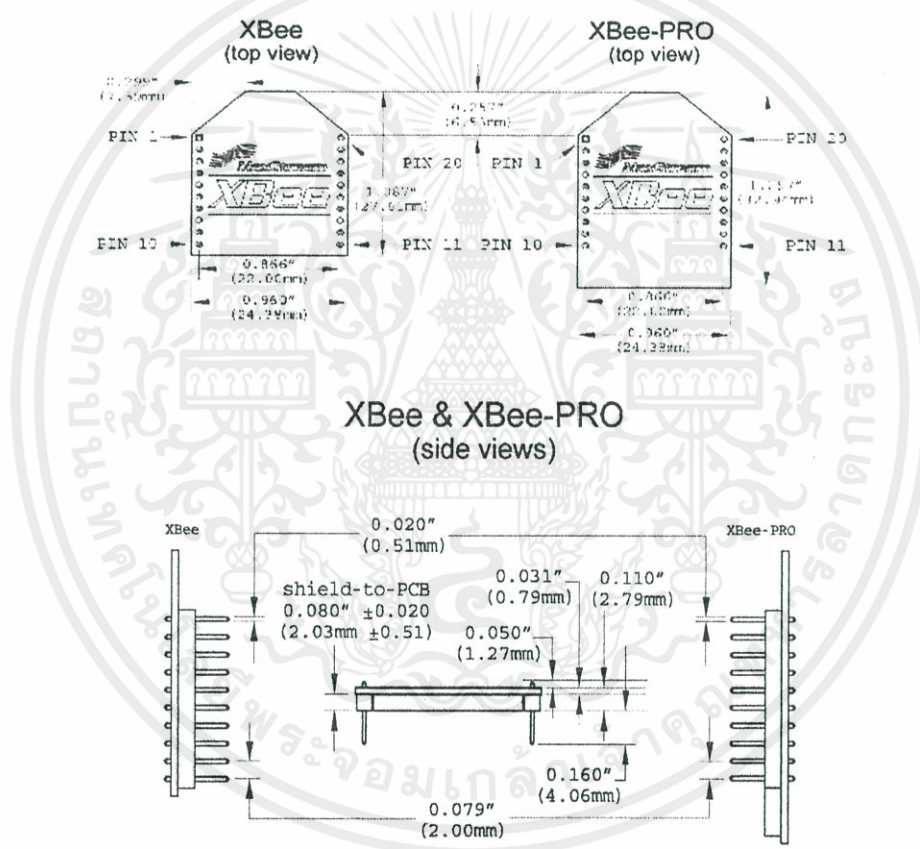
XBee แบ่งออกเป็น 2 รุ่น คือ รุ่น series 1 และรุ่น series 2 (ZB) และยังมีขนาดกำลังในการส่งให้เลือกอีก 2 แบบ คือ แบบธรรมดา (2 มิลลิวัตต์) กับ แบบPRO (50 – 60 มิลลิวัตต์) ซึ่งจะมีผลต่อในเรื่องระยะทางการรับส่งข้อมูล โดยแต่ละรุ่นนั้นสามารถสร้างเครือข่ายได้หลายแบบ แต่จะมีเพียงรุ่น series2 เท่านั้นที่สามารถทำเครือข่ายแบบ Mesh ได้

ตารางที่ 2.1 เปรียบเทียบคุณสมบัติ XBee และ XBee PRO

Feature	XBee Series 2	XBee Series 2 PRO
Power Input	2.8-3.3V @ 40mA	2.8-3.3V @ 295mA
Max data rate (Air)	250 Kbps	250 Kbps
Power Output	2mW output (+3dBm)	50mW output (+17dBm)
Distance	400ft (120m) range	1 mile (1600m) range
Antenna	Wire, Chip, UFL, SMA	Wire, Chip, UFL, SMA

Peripheral	6 10-bit ADC input pins 8 digital I/O pins	6 10-bit ADC input pins 8 digital I/O pins
Upgrade Firmware	Local (ZNET2.5) or over-air configuration (ZB)	Local (ZNET2.5) or over-air configuration (ZB)
Network	Point to Point / multi-point / Mesh network	Point to Point / multi-point / Mesh network

2.4.2 ลักษณะทางกายภาพ XBee และ XBee PRO



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะทางกายภาพของ XBee และ XBee-PRO [1]

2.4.3 การกำหนด PIN ของโมดูล XBee

ตารางที่ 2.2 แสดงรายละเอียดขาต่างๆของ XBee

ขาที่	ชื่อขา	ทิศทาง	การทำงาน
1	VCC	-	ขาดไฟเลี้ยง 2.8-3.3V
2	DOUT	Output	ส่งข้อมูลอนุกรม (UART Data Out)
3	DIN/CONFIG	Input	รับข้อมูลอนุกรม (UART Data In)
4	DO8	Output	Digital Output 8
5	RESET	Input	ขารีเซ็ตหลักของโมดูล
6	PWM0/RSSI	Output	PWM เอาท์พุท 0 / ความแรงสัญญาณภาครับ
7	PWM1	Output	PWM เอาท์พุท 1
8	Reserved	-	
9	DTR/SLEEP_RQ/DI8	Input	ควบคุมโหมด SLEEP / Digital Output 8
10	GND	-	กราวด์
11	AD4/DIO4	Either	อนาล็อกอินพุท 4 / ดิจิตอล I/O 4
12	CTS/DIO7	Either	Clear-to-send / ดิจิตอล I/O 7
13	ON/SLEEP	Output	ตรวจสอบสถานะโมดูล
14	VREF	Input	ความต่างศักย์อ้างอิงสำหรับ A/D อินพุท
15	Associated/AD5/DIO5	Either	อนาล็อกอินพุท 5 / ดิจิตอล I/O 5
16	RTS/AD6/DIO6	Either	Request-to-send / อนาล็อกอินพุท 6 / ดิจิตอล I/O 6
17	AD3/DIO3	Either	อนาล็อกอินพุท 3 / ดิจิตอล I/O 3
18	AD2/DIO2	Either	อนาล็อกอินพุท 2 / ดิจิตอล I/O 2
19	AD1/DIO1	Either	อนาล็อกอินพุท 1 / ดิจิตอล I/O 1
20	AD0/DIO0	Either	อนาล็อกอินพุท 0 / ดิจิตอล I/O 0

2.4.4 XBee Association

ในเครือข่ายซิกบีต้องมีการทำงานในโหมดประหยัดพลังงาน ในช่วงเวลาที่ไม่มีการทำงานรับส่งข้อมูล ดังนั้นตัว XBee จึงมีพารามิเตอร์ที่จะกำหนดการทำงานสำหรับ Sleep mode

2.4.5 XBee Addressing

ตัว XBee จะสามารถกำหนดค่าประจำตัวอ้างอิงของมัน (Address) 2 แบบ คือ แบบ 16 bit address และ 64 bit address ปกติแล้ว XBee ทุกตัวจะถูกกำหนดค่ามาจากโรงงานเป็น Address 64 bit อยู่แล้ว ซึ่งจะสามารถอ่านค่าได้จาก parameter SH+SL การใช้งาน Address 64 bit สามารถทำได้โดยกำหนด parameter MY ให้มีค่า 0xFFFF หรือ 0xFFFE ส่วน การกำหนด 16 bit address นั้นทำได้โดยกำหนด parameter MY ให้มีค่าน้อยกว่า 0xFFFE โดยจะเรียกเป็น mode การทำงาน 2 ประเภทคือ

1. Unicast Mode คือ การรับส่งข้อมูล โดยอาศัยหลักการ Acknowledgement คือหากทางด้านส่งนั้น ส่งข้อมูลไป แต่ไม่ได้รับ ACK ตอบกลับจากตัวรับ จะทำการส่งข้อมูลใหม่
2. Broadcast Mode คือ การส่งข้อมูลไปยังปลายทางให้ได้รับข้อมูลทุกตัว

2.4.6 XBee Operation Mode

XBee จะสามารถแบ่งช่วงการทำงานได้เป็น 5 แบบ คือ

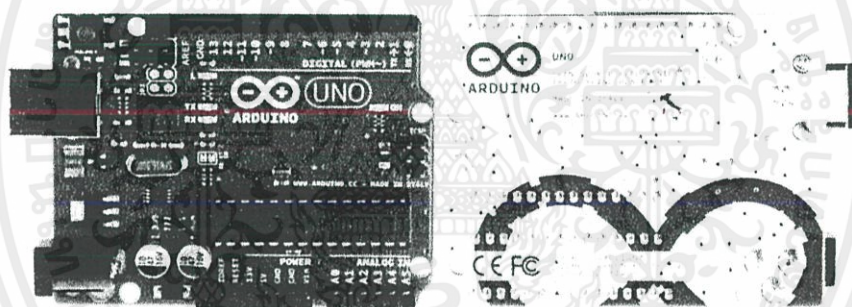
1. Idle Mode โหมดนี้ จะเป็นโหมดที่ไม่ได้รับส่งข้อมูล ตัว XBee เตรียมที่จะทำงานในโหมดอื่น ๆ ต่อไปทันที หากมีเงื่อนไขบางอย่าง
- 2.-3. Transmit / Receive Mode คือ ช่วงที่ XBee มีการรับ หรือ ส่งข้อมูล โดยจะแบ่งลักษณะการทำงานย่อยออกเป็น Direct กับแบบ Indirect, การกำหนด Address ต้นทางและปลายทาง , Clear Channel Assessment และ การตอบรับ Acknowledgement
4. Sleep Mode คือ ช่วงที่ XBee อยู่ในสถานะทำงานพลังงานต่ำที่สุด เมื่อไม่มีการใช้งาน
5. Command Mode คือ เป็นส่วนการปรับ parameter ของ XBee ซึ่งจะมีการกำหนด 2 แบบคือ แบบ AT command กับแบบ API Command

2.5 Arduino

อาเตียโน (Arduino) เป็นแผงวงจรไมโครคอมพิวเตอร์แบบเดี่ยวสร้างขึ้นเพื่อรับสัญญาณจากภายนอก และส่งสัญญาณไปควบคุมอุปกรณ์ภายนอกได้หลากหลาย โดยสามารถเขียนโปรแกรมเพิ่มเติมได้ในแผงวงจร อาเตียโนได้พัฒนาการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล AVR ที่กำลังได้รับความนิยมอย่างสูงทั่วโลก เพราะว่าเป็นระบบเปิด (open source) ซึ่งสามารถดัดแปลงไปใช้งานได้ทั้งฮาร์ดแวร์ และซอฟต์แวร์ ได้ทันที จะเป็นลักษณะภาษา C และ C++ โดยจัดให้มีฟังก์ชันต่าง ๆ ให้พร้อมกับการเรียกใช้งานได้หลากหลาย ครอบคลุมการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกต่าง ๆ ได้อย่างกว้างขวาง

2.5.1 ฮาร์ดแวร์ของอาเตียโน

ฮาร์ดแวร์ของแผงวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ที่ใช้การรับส่งสัญญาณแบบแอนะล็อกและดิจิทัลได้ และเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ได้ด้วยพอร์ต USB



รูปที่ 2.6 รูปแสดงฮาร์ดแวร์อาเตียโน รุ่น UNO [2]

2.5.2 ซอฟต์แวร์ของอาเตียโน

ซอฟต์แวร์อาเตียโนสามารถเขียนโปรแกรมได้หลายภาษา เช่น Java, C, C++ โดยสามารถเพิ่มเติมโปรแกรมได้เอง ซึ่งจะมีฟังก์ชันต่าง ๆ ให้ใช้งานอย่างหลากหลายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน โดยเราจะทำการสร้างฟังก์ชันหลักที่ต้องมีในทุก ๆ โปรแกรมก็คือ

ฟังก์ชัน set up จะถูกเรียกใช้งานเป็นอันดับแรกและถูกเรียกใช้เพียงครั้งเดียว เมื่อโปรแกรมเริ่มการทำงาน คล้ายกับฟังก์ชัน main ในภาษาซีแบบมาตรฐานที่ทำงานบนเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งฟังก์ชันนี้จะเอาไว้เขียนคำสั่งเพื่อทำการกำหนดค่าเริ่มต้นต่าง ๆ เช่น การกำหนด pin ว่าเป็นอินพุต หรือ เอาต์พุต เป็นต้น

ฟังก์ชัน loop เป็นฟังก์ชันที่ถูกเรียกใช้งานซ้ำโดยอัตโนมัติแบบไม่รู้จบ ถูกเรียกใช้หลังจากโปรแกรมทำงานในฟังก์ชัน set up เรียบร้อยแล้ว ฟังก์ชัน loop จะเอาไว้เขียนส่วนของการทำงานจริง ๆ ของโปรแกรม จากรูปที่ 2.7 เป็นตัวอย่างของการเขียนโปรแกรมไฟกระพริบ

ดังนั้นลำดับในการทำงานของโปรแกรมจึงเป็นดังนี้ เริ่มต้นที่ฟังก์ชัน set up แล้วไปทำงานต่อที่ฟังก์ชัน loop เมื่อทำงานเสร็จแล้ว ก็วนกลับมาทำงานที่ฟังก์ชัน loop ต่อไปแบบไม่รู้จบ ส่วนการประกาศตัวแปรเพื่อเก็บค่าระบุตำแหน่งของ pin ไว้บนสุด ก่อนฟังก์ชัน set up

```

Arduino - 0011 Alpha
File Edit Sketch Tools Help
Open
Blink
* or a built-in resistor so that you need only an LED.
*
* http://www.arduino.cc/en/Tutorial/Blink
*/

int ledPin = 13; // LED connected to digital pin 13

void setup() // run once, when the sketch starts
{
  pinMode(ledPin, OUTPUT); // sets the digital pin as output
}

void loop() // run over and over again
{
  digitalWrite(ledPin, HIGH); // sets the LED on
  delay(1000); // waits for a second
  digitalWrite(ledPin, LOW); // sets the LED off
  delay(1000); // waits for a second
}

```

รูปที่ 2.7 รูปแสดงหน้าต่างโปรแกรมสำหรับเขียนอาคูอินโน [3]

2.5.3 ข้อดีของอาเตียนโน

- ราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับแผงไมโครคอนโทรลเลอร์แบบอื่นที่มีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน
- ทำงานบนระบบปฏิบัติการได้มากมาย เช่น Windows, Macintosh OSX, Linux ขณะที่การทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์อื่นทำไม่ได้
- ใช้งานได้ง่าย มีโปรแกรมพัฒนาไม่ซับซ้อน
- สามารถใช้โปรแกรมที่มีอยู่มาประยุกต์ หรือต่อยอดการทำงานได้ (open source)
- สามารถนำไปขยายฮาร์ดแวร์ได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงาน

2.6 การส่งข้อมูลในรูปแบบของ API

การส่งข้อมูลในรูปแบบ API (Application Programming Interface) คือ การจัดเก็บข้อมูลที่ต้องการจะติดต่อสื่อสารกับโมดูลอื่นๆ ในรูปแบบโครงสร้างที่แน่นอน โดยจัดเก็บเป็น Frame

Packet ซึ่งสามารถบอกได้ว่าแพ็คเกจที่ส่งไปนั้นมีคำสั่งอะไร การส่งข้อมูลถูกต้องหรือไม่ และมีสถานะของการส่งและการรับของแพ็คเกจนั้น ๆ โดยข้อมูลที่ถูส่งไปจะอยู่ในรูปของเลขฐานสิบหก

2.6.1 รูปแบบของ API Frame

เราสามารถส่งข้อมูลในรูปแบบของ API Mode ได้โดยการตั้งค่าพารามิเตอร์ของคำสั่ง AP (API Enable) ดังนี้

AP = 0 เป็นการตั้งค่าการส่งข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบของ UART แบบปกติ API Mode จะถูกยกเลิก

AP = 1 เป็นการตั้งค่าการส่งข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบของ API Mode

AP = 2 เป็นการตั้งค่าการส่งข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบของ API Mode (Escaped Character)

ในโครงการนี้ใช้การส่งข้อมูลในรูปแบบของ API Mode (AP = 1)

API Mode (API = 1) เมื่อพารามิเตอร์ AP ถูกตั้งค่าเป็น 1 โครงสร้างของข้อมูลที่ส่งจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.8



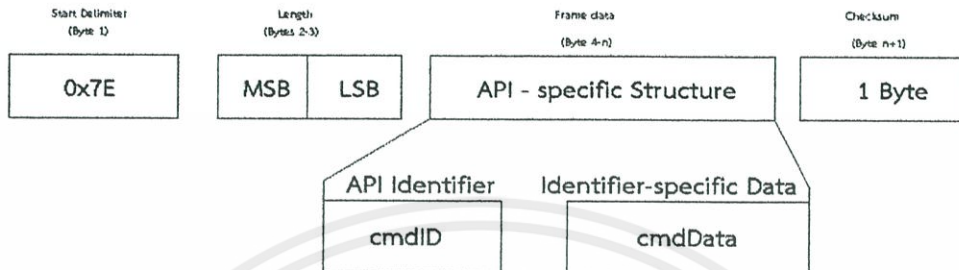
MSB – Most significant Byte LSB – Last Significant Byte

รูปที่ 2.8 รูปแบบของ API Packet frame Mode 1

Checksum คือ ไบต์ที่ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลที่ได้รับหรือส่งสามารถคำนวณหาค่า Checksum ได้โดยบวกเฟรมข้อมูลทุกไบต์ ในลักษณะของเลขฐานสิบหก หลังจากนั้นนำไบต์สุดท้ายไปลบออกจาก 0xFF จะได้ค่า Checksum ที่ถูกต้อง

2.6.2 ประเภทของ API (API Type)

รูปแบบของการส่งข้อมูลมีโครงสร้างแพ็คเกจดังรูปที่ 2.9



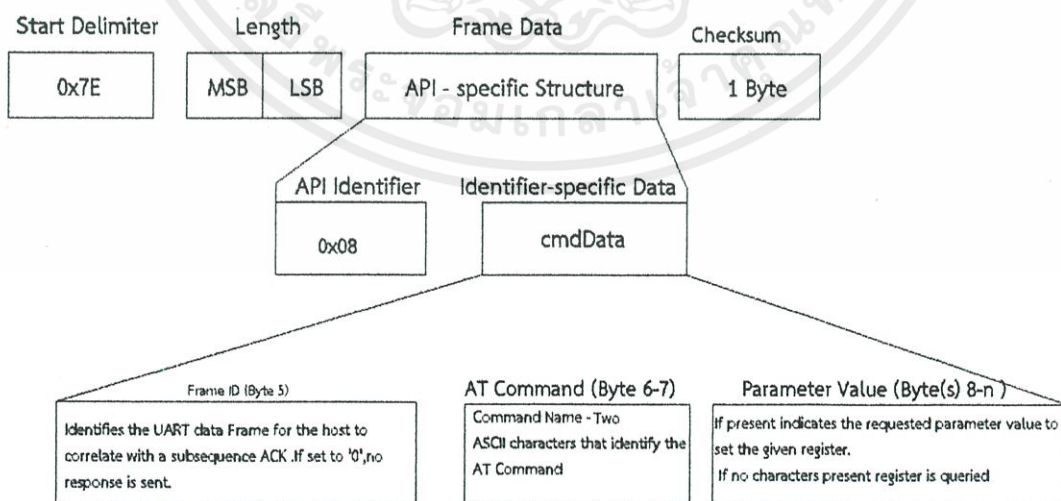
รูปที่ 2.9 รูปแบบของ API Packet Frame

cmdID (API Identifier) คือ ไบต์ที่เป็นตัวกำหนดรูปแบบของ API ว่าอยู่ในประเภทใด เช่น อยู่ในรูปแบบของ AT Command การรับข้อมูล หรือการส่งข้อมูล เป็นต้น

cmdData (Identifier-specific Data) คือ รูปแบบของข้อมูลที่ต่างๆ ถูกกำหนดโดย cmdID

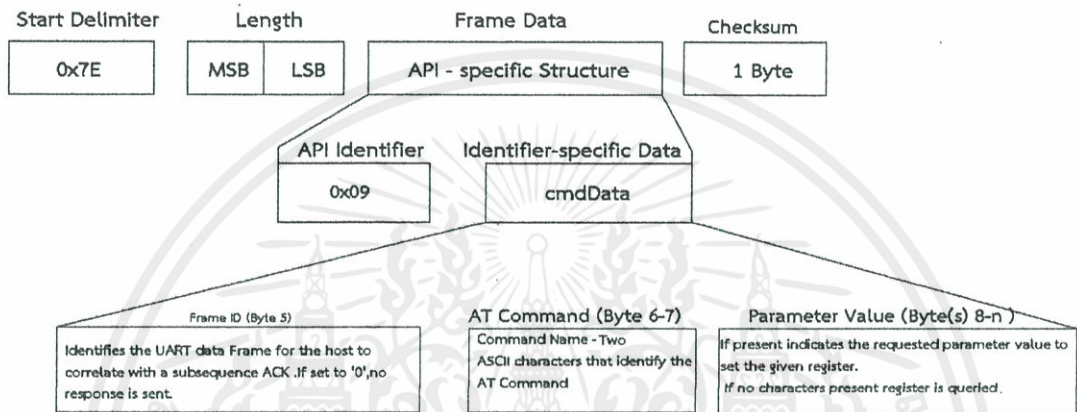
2.6.3 AT Command

API Frame ประเภท AT Command เป็นแพ็คเกจที่สามารถใช้เขียนหรืออ่านค่าพารามิเตอร์ของโมดูลชิปได้ซึ่งใช้คำสั่ง AT Command ในรูปแบบนี้ไม่จำเป็นต้องอยู่ในโหมด AT Command ค่าต่างๆสามารถแก้ไขหรืออ่านได้ทันที โดยจะมีค่า API Identifier เป็น 0x08 โครงสร้างของ AT Command frame ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 รูปแบบของ API Packet Frame ประเภท AT Command

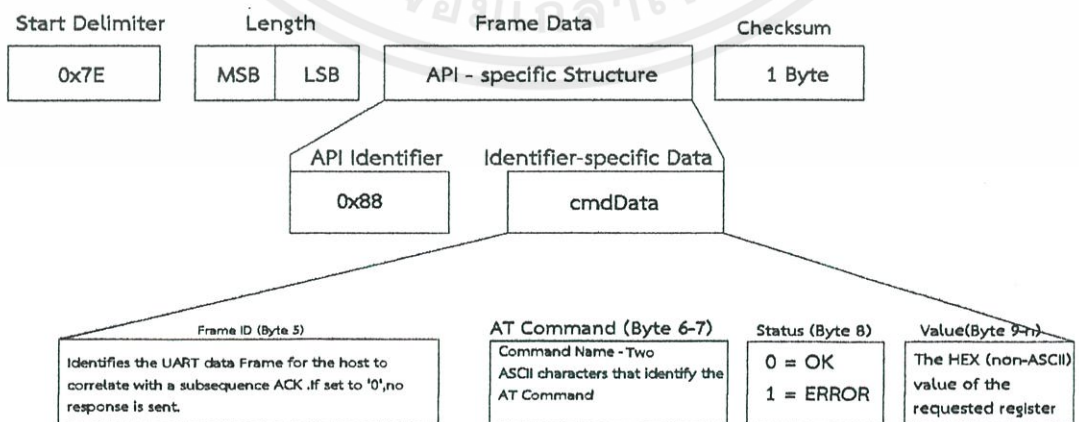
API Frame ประเภทนี้จะเหมือนกับ API Frame AT Command ซึ่งสามารถใช้เขียนหรืออ่านค่าพารามิเตอร์ของโมดูลชิปได้ โดยใช้ AT Command แต่ API Frame ประเภทนี้จะทำงานก็ต่อเมื่อ AT Command (API Identifier = 0x08) ทำงานเสร็จ ซึ่ง AT Command Queue Parameter Value มีค่า API Identifier เป็น 0x09 โครงสร้างของ API Frame ประเภทนี้เป็นได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 รูปแบบของ API Packet Frame ประเภท AT Command Queue Parameter Value

2.6.4 AT Command Response

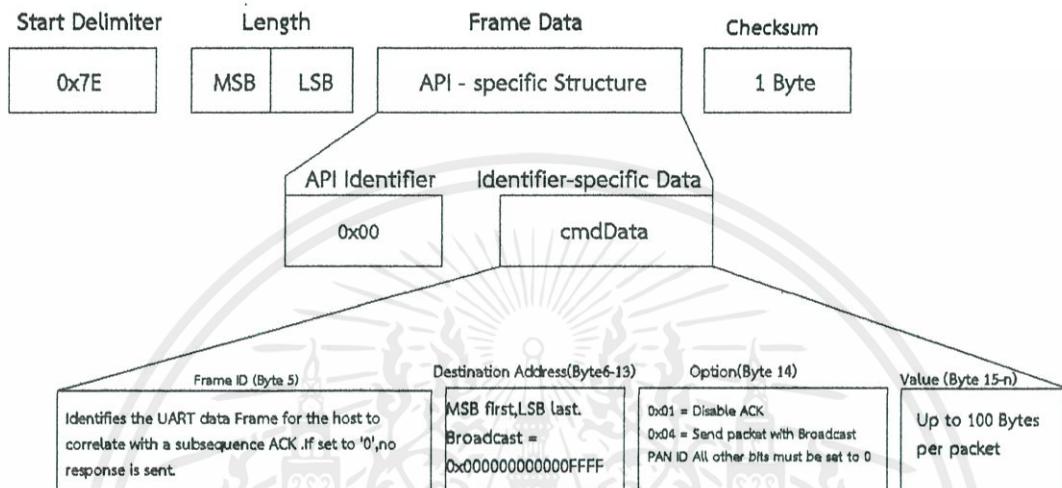
API Frame ประเภทนี้เป็นผลจากการใช้ API Frame AT Command ซึ่งจะแสดงผลลัพธ์ของข้อความ AT Command ที่ส่งไป บางคำสั่ง เช่น ND (Node Discovery) จะส่งผลลัพธ์ กลับมาหลายๆเฟรม ซึ่งเฟรมสุดท้ายจะบอกสถานะของการส่ง API Frame AT Command Response มีค่า API Identifier เป็น 0x88 โครงสร้าง API Frame ประเภทนี้ซึ่งรูปแบบการทำงานของ API Packet Frame แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 รูปแบบของ API Packet Frame ประเภท AT Command Response

2.6.4.1 Tx (Transmit) Request : 64 bit address

API Frame ประเภทนี้จะส่งข้อมูลในรูปแบบของแพ็กเก็ต ไปยังโมดูลปลายทาง โดยใช้ที่อยู่แบบ 64 บิต และมี API Identifier เป็น 0x00 โครงสร้างของ API frame ประเภทนี้แสดงได้ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 รูปแบบของ API Packet Frame ประเภท Tx (Transmit) Request : 64 bit address

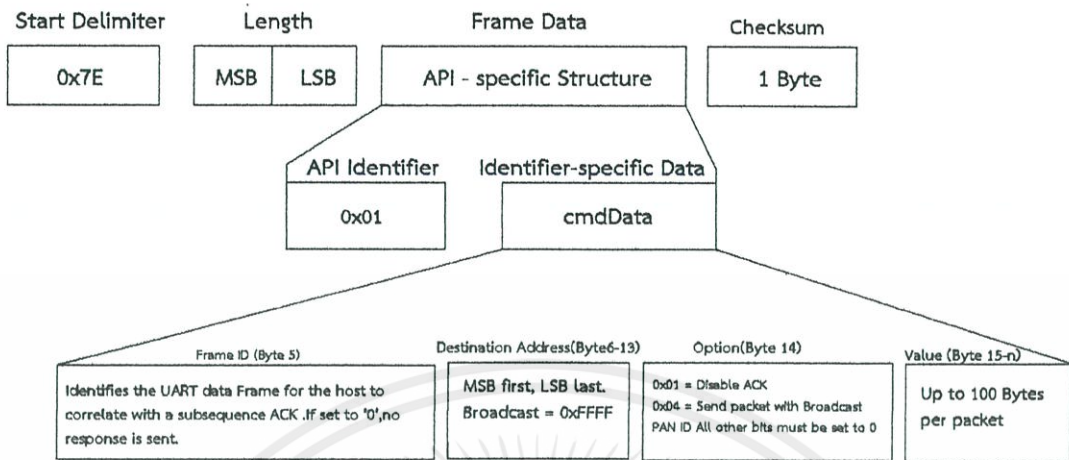
โดยที่ Destination Address คือ ที่อยู่ของโมดูลปลายทาง เมื่อถูกตั้งค่าเป็น 0x000000000000FFFF ข้อมูลจะถูกส่งแบบ Broadcast

Option Byte คือ ตัวเลือกของการส่ง เมื่อถูกตั้งค่าเป็น 0x01 จะยกเลิกการส่ง ACK เมื่อตั้งค่าเป็น 0x04 จะส่งแพ็กเก็ตไปยังโมดูลที่อยู่ PAN ID เดียวกัน

RF Data คือ ข้อมูลที่ต้องการส่ง

2.6.4.2 Tx (Transmit) Request : 16-bit address

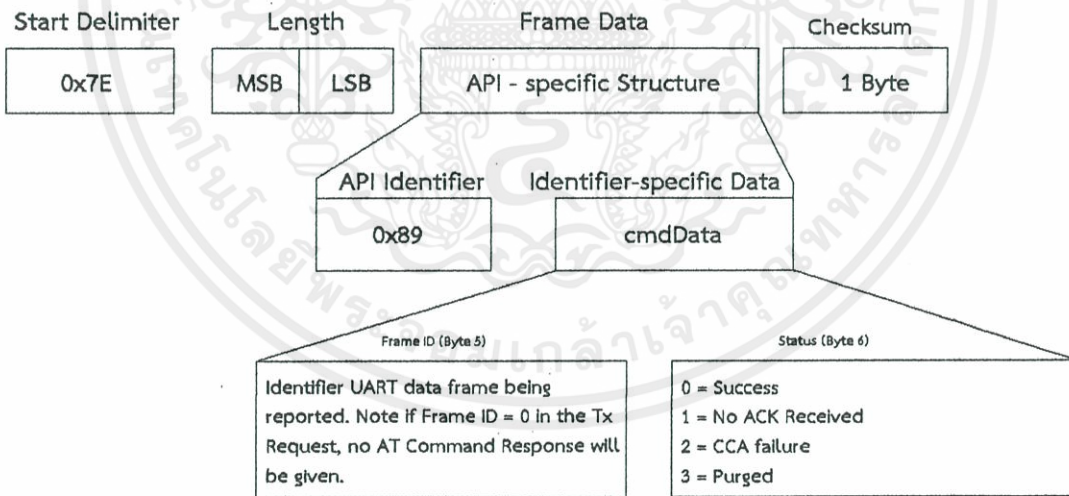
API Frame ประเภทนี้จะส่งข้อมูลในรูปแบบของแพ็กเก็ตไปยังโมดูลปลายทาง โดยใช้ที่อยู่แบบ 16 บิต และมี API Identifier เป็น 0x01 โครงสร้างของ API frame ประเภทนี้มีรูปแบบของแพ็กเก็ตดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 รูปแบบของ API Packet Frame ประเภท Tx (Transmit) Request : 16-bit address

2.6.4.3 Tx (Transmit) Status

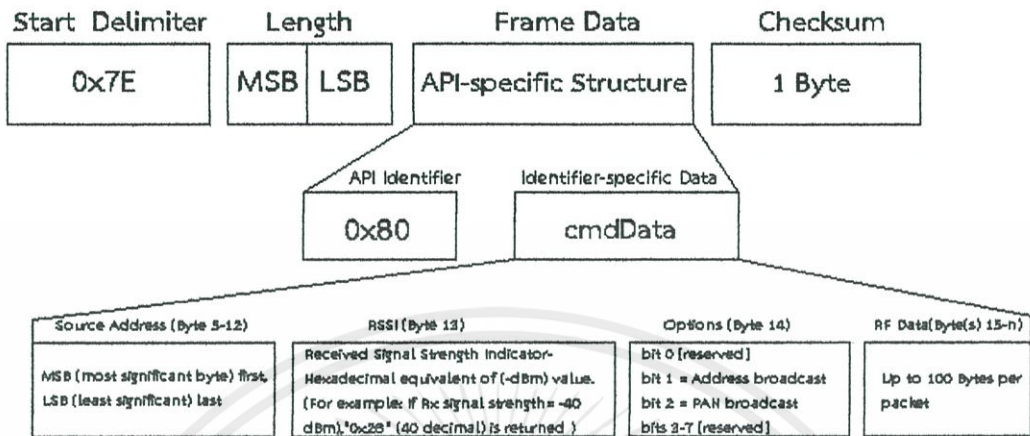
เมื่อมีทำการส่งข้อมูลเสร็จแล้ว โมดูลที่ได้รับข้อมูลจะส่งสถานะของการส่งกลับมายังโมดูลที่ส่งข้อมูล API Frame ประเภทนี้เพื่อบอกถึงสถานะของการส่งข้อมูลว่าสำเร็จหรือไม่ มี API Identifier เป็น 0x89 โครงสร้างของ API Frame แสดงได้ดังรูป 2.15



รูปที่ 2.15 รูปแบบของ API Packet Frame ประเภท Tx (Transmit)

2.6.4.4 Rx (Receive) Packet 64-bit address

API Frame ประเภทนี้มี API Identifier เป็น 0x80 เมื่อโมดูลได้รับข้อมูลจากการส่งแบบที่อยู่ 64 บิตแล้ว Frame packet ที่ได้รับจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 รูปแบบของ API Packet Frame ประเภท Rx (Receive) Packet 64-bit address

Source Address คือ ที่อยู่ของโมดูลที่ส่งข้อมูลมายังตัวรับ

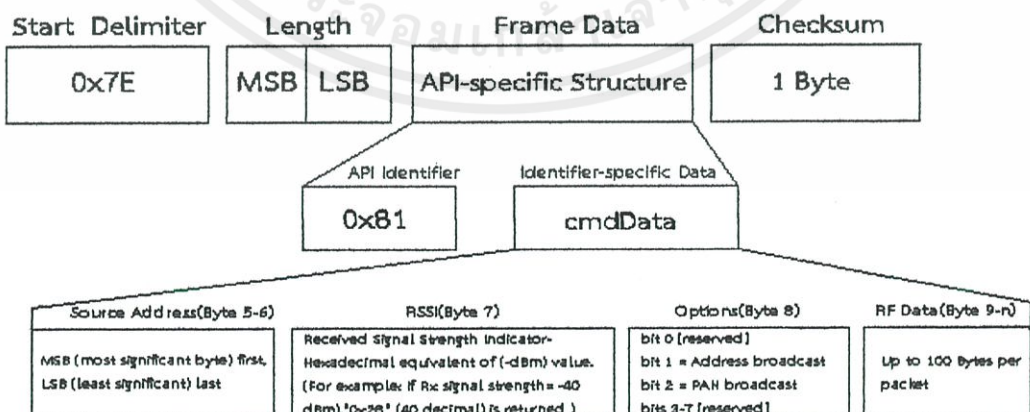
RSSI คือ ความแรงของสัญญาณ

Option Byte คือ รูปแบบการส่ง ถ้าเป็น 0x01 จะเป็นการส่งแบบหนึ่งต่อหนึ่ง ถ้าเป็น 0x02 จะเป็นการส่งแบบ PAN broadcast

RF Data คือ ข้อมูลที่ได้รับ

2.6.4.5 Rx (Receive) Packet 16-bit address

API Frame ประเภทนี้ API Identifier เป็น 0x81 เมื่อโมดูลได้รับข้อมูลจากการส่งแบบที่อยู่ 16 bit แล้ว Frame Packet ที่ได้รับจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 รูปแบบของ API Packet Frame ประเภท Rx (Receive) Packet 16-bit address

2.7 การวัดค่าความเข้มของสัญญาณ

ความเข้มของสัญญาณเป็นวิธีการวัดรูปแบบการลดทอนของสัญญาณวิทยุ (Signal Attenuation) ภายในสภาวะแวดล้อมภายในอาคารจากเซ็นเซอร์ไร้สายตัวหนึ่งไปยังเซ็นเซอร์ไร้สายอีกตัวหนึ่ง ซึ่งเรียกค่าดังกล่าวว่า ค่าความเข้มของสัญญาณ โดยค่าความเข้มของสัญญาณมีความสัมพันธ์ตามสมการดังนี้

$$PL(d) = P(d_0) - 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \text{ (dBm)} \quad (2.1)$$

กำหนดให้

$PL(d)$ คือ การสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss) ในหน่วยเดซิเบล (dBm) ที่ระยะทาง d

$P(d_0)$ คือ การสูญเสียตามระยะทาง (Path Loss) ในหน่วยเดซิเบล (dBm) ที่ระยะทางอ้างอิง

d คือ ระยะทางจากจุดกำเนิดความแรงสัญญาณถึงจุดใดๆ

d_0 คือ ระยะทางอ้างอิง

n คือ เลขชี้กำลัง (Exponent) หรือค่าดัชนีการแพร่กระจายของสัญญาณในสภาวะแวดล้อมต่างๆ

โดยตัวแปร n จะเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงได้ง่ายในสภาพแวดล้อมการกระจายสัญญาณภายในอาคาร โดยจะเปลี่ยนไปตามวัตถุ และรูปแบบของสิ่งก่อสร้างภายในอาคาร

2.8 ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง

ในการวิเคราะห์ผลของค่าข้อมูลทางสถิติเพื่อทำการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาด เช่น การเปรียบเทียบค่าที่ทำการทดลอง กับค่าที่ได้ทางทฤษฎี ซึ่งค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสองจะมีค่าขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ทำการเปรียบเทียบด้วยดังสมการที่ 2.2

$$RMSE = \sqrt{\frac{(RSSI(m) - RSSI(c))^2}{n}} \quad (2.2)$$

เมื่อ $RMSE$ คือ ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง

$RSSI(m)$ คือ ความแรงสัญญาณที่ได้จากการวัด

$RSSI(c)$ คือ ความแรงสัญญาณที่ได้จากการคำนวณตามสมการของ Path Loss model

n คือ จำนวนที่ใช้ในการเปรียบเทียบ

2.9 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดจากสมการยุกติเตียน

ในโครงการนี้ใช้เป็นการเปรียบเทียบค่าพิกัดจริง กับ ค่าพิกัดที่ได้จากการถ่วงน้ำหนัก

$$f_i(x, y) = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2} \quad (2.3)$$

เมื่อ $f_i(x, y)$ คือ ค่าความผิดพลาดของแต่ละพิกัดตำแหน่ง

x' คือ ค่าพิกัด x ที่ได้จากการระบุตำแหน่งโดยใช้วิธีการถ่วงน้ำหนัก

y' คือ ค่าพิกัด y ที่ได้จากการระบุตำแหน่งโดยใช้วิธีถ่วงน้ำหนัก

x คือ ค่าพิกัด x จริง

y คือ ค่าพิกัด y จริง

2.10 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบสะสม (Cumulative Probability Distribution Function : CDF)

ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมของตัวแปรสุ่ม X คือ ฟังก์ชันที่แสดงถึงความน่าจะเป็นสะสมเมื่อ X มีค่าน้อยกว่าค่าใดค่าหนึ่ง

C.D.F ของ X คือ $F(x) = P(X \leq x)$

กรณีที่ X เป็นตัวแปรสุ่มวิฤต $X = x_1, x_2, x_3, \dots, x_j, \dots, x_n$

ความน่าจะเป็นสะสมของ $X = x_1, x_2, x_3, \dots, x_j$ คือ $F(x) = \sum_{i=1}^j P(X = x_i)$

กรณีที่ X เป็นตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่อง ความน่าจะเป็นสะสมของ X คือ $F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt$

สมบัติของฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม

- 1) $0 \leq F(x) \leq 1$
- 2) $F(-\infty) = 0, F(\infty) = 1$

3) $F(x)$ เป็นฟังก์ชันที่ค่าไม่ลดลง ถ้า a และ b เป็นค่าคงที่ โดยที่ $a \leq b$ จะได้ว่า $F(a) \leq F(b)$

4) การหาความน่าจะเป็นจากความน่าจะเป็นสะสม

4.1) ถ้า X เป็นตัวแปรสุ่มวิฤต จะได้ว่า

$$P(X = a) = F(a) - F(a^-) \text{ เช่น } P(X = 1) = P(X \leq 1) - P(X < 1)$$

$$P(a \leq X \leq b) = F(b) - F(a^-) + P(X = a)$$

$$P(a < X \leq b) = F(b) - F(a)$$

$$P(a \leq X < b) = F(b^-) - F(a^-) + P(X = a) - P(X = b)$$

$$P(a < X < b) = F(b^-) - F(a^-) - P(X = b)$$

4.2) ถ้า X เป็นตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่อง จะได้ว่า

$$P(X = a) = P(X = b) = 0$$

$$P(a \leq X \leq b) = P(a < X \leq b) = P(a \leq X < b) = P(a < X < b) = F(b) - F(a)$$

5) ความสัมพันธ์ระหว่าง $f(x)$ และ $F(x)$ เมื่อ X เป็นตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่องเป็นดังนี้

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt \text{ และ } f(x) = \frac{d}{dx} F(x)$$

จากสมบัติข้อ 5 ถ้ามี $f(x)$ เมื่อ X เป็นตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่อง โดยที่ $a < X < b$ แล้วสรุปค่า $F(x)$ ได้ดังนี้

$$F(X) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \int_a^x f(t) dt, & a \leq x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases} \quad (2.4)$$

2.11 การระบุตำแหน่งโดยใช้วิธี Weighted Centroid Localization

การระบุตำแหน่งมีวิธีการที่หลากหลายวิธี สำหรับโครงงานนี้ได้เลือกใช้วิธีการระบุตำแหน่งแบบ การถ่วงน้ำหนักหรือ weighted centroid โดยมีพื้นฐานแนวคิดจากวิธีการหาจุดเซนทรอยด์ของวัตถุ ซึ่งแสดงสมการของค่าพิกัด (x, y) ของวัตถุ ดังสมการที่ (2.5)

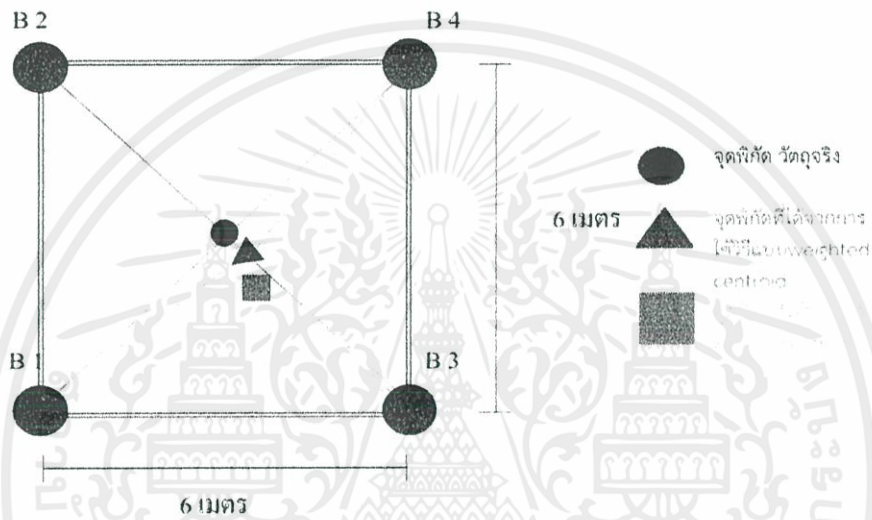
$$p'_i(x, y) = \frac{\sum_{j=1}^n (a_j(x_i, y_j))}{n} \quad (2.5)$$

กำหนดให้

$p'_i(x, y)$ คือ พิกัดที่ได้จากวิธีแบบเซนทรอยด์

$(a_i(x_i, y_j))$ คือ ตำแหน่งของพิกัดจริง

n คือ จำนวนจุดที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 2.18 การหาค่าตำแหน่งโดยใช้ WCL

สูตรการหาค่าตำแหน่งโดยใช้วิธี weighted centroid เป็นวิธีการระบุตำแหน่ง โดยเพิ่มค่าตัวถ่วงน้ำหนัก เข้าไปในการวิเคราะห์ ซึ่งแสดงดังสมการ

$$w_{ij} = \frac{1}{(d_{ij})^g} \tag{2.6}$$

$$p''_i(x, y) = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} (a_i(x_i, y_j))}{\sum_{j=1}^n w_{ij}} \tag{2.7}$$

กำหนดให้

$p''_i(x, y)$ คือ พิกัดการประมาณค่าที่ได้จากการใช้วิธีระบุตำแหน่งแบบ weighted centroid

d_{ij} คือ ระยะทางที่ได้จากการคำนวณจาก path loss model จากโหนดอ้างอิง

- w_j คือ ค่าตัวถ่วงน้ำหนักของระยะทาง
- g คือ ระดับของตัวถ่วงน้ำหนัก

2.12 การเปรียบเทียบระหว่างวิธีการหาตำแหน่งแบบ RSSI กับ WCL

เนื่องจากในวัดค่าความเข้มของสัญญาณมีความแปรปรวนของสัญญาณตามแต่ลักษณะของสภาพแวดล้อม ถึงแม้ว่าจะมีการวัดค่าหลายๆครั้งแล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยนั้นยังคงมีความผิดพลาดในการระบุตำแหน่งที่มากอยู่ จึงต้องมีการใช้ร่วมกับวิธีการระบุตำแหน่งแบบถ่วงน้ำหนัก โดยการถ่วงน้ำหนักจะต้องมีการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ซึ่งก็คือ ค่าระดับของตัวถ่วงน้ำหนัก (g) ที่ทำให้ค่าของระยะทางที่ผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด จะเห็นได้ว่าหลังจากใช้วิธีการระบุตำแหน่งแบบถ่วงน้ำหนักแล้ว การระบุตำแหน่งมีความแม่นยำมากกว่าที่ใช้การวัดค่าความเข้มของสัญญาณเพียงอย่างเดียว



บทที่ 3

การออกแบบและการจัดทำปฏิญญานิพนธ์

3.1 การออกแบบ

3.1.1 โครงสร้างของระบบ

ในการออกแบบระบบระบุตำแหน่งภายในอาคารนี้ ประกอบไปด้วย โหนดเป้าหมาย โหนดอ้างอิง มอนิเตอร์โหนด โปรแกรมแสดงผล และส่วนที่แสดงผล โดยผู้จัดทำได้ทำการออกแบบระบบระบุตำแหน่งนี้จะใช้ชิปทั้งหมด 6 ตัว ซึ่งมีจำนวน 4 ตัวที่ทำหน้าที่เป็นโหนดอ้างอิงวางไว้ในพิกัดที่ถูกระบุไว้แน่นอนแล้ว ส่วนโหนดเป้าหมายจะทำการติดตั้งไว้กับบอร์ดอาเดียโนรุ่น UNO จะทำหน้าที่ในการรวบรวมค่าความแรงที่วัดได้จากโหนดอ้างอิงแต่ละโหนด และทำการส่งข้อมูลแพ็คเกจเหล่านั้นให้กับตัวมอนิเตอร์โหนดที่ได้ทำการต่อเข้ากับบอร์ดอาเดียโนรุ่น Leonardo ซึ่งจะรับข้อมูล เมื่อมีการกดปุ่มสวิตซ์ที่บอร์ดของ Leonardo เพื่อนำไปแสดงผลออกมาเป็นตำแหน่งของวัตถุที่หน้าจอกอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 3.1

รูปที่ 3.1 การออกแบบระบบระบุตำแหน่งของปฏิญญานิพนธ์

3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ฮาร์ดแวร์

- อุปกรณ์ XBee Series 2 จำนวน 6 ตัว
- สาย USB เชื่อมต่อ
- คอมพิวเตอร์พกพา
- กล่องสำหรับวาง XBee จำนวน 5 กล่อง
- ตลับเมตร
- ถ่านไฟฉายขนาด AA
- บอร์ดแปลงไฟสำหรับใช้กับโหนดอ้างอิง
- บอร์ดอาเดียน รุ่น UNO
- บอร์ดอาเดียน รุ่น Leonardo

ซอฟต์แวร์

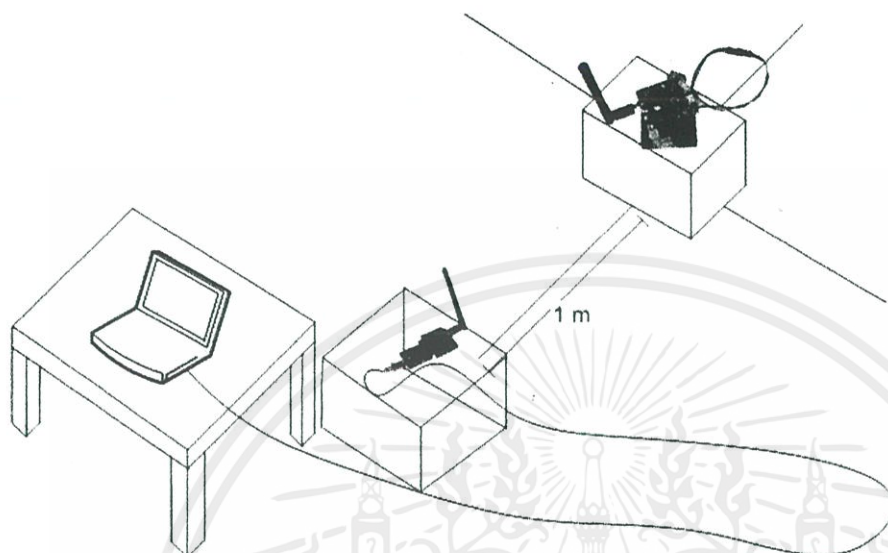
- โปรแกรม MATLAB
- โปรแกรม X-CTU
- โปรแกรม Arduino
- โปรแกรม RCOM-Meshbee

3.3 การทดลองและการจัดเก็บผลการทดลอง

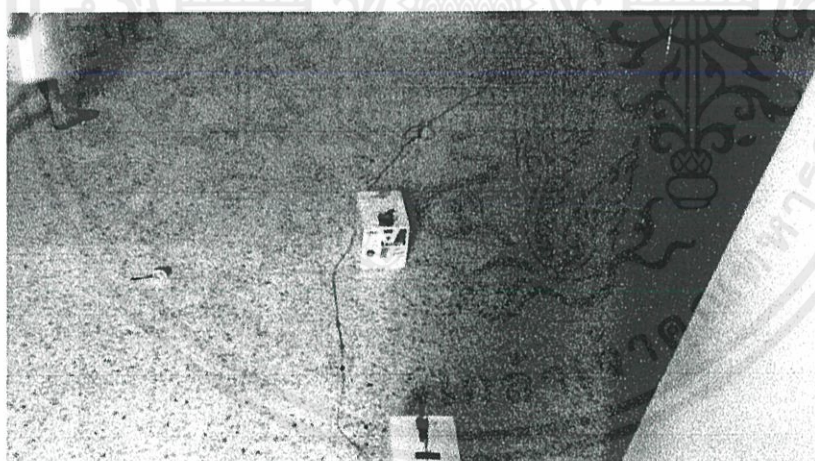
3.3.1 การทดลองเพื่อหาค่าความแรงสัญญาณที่ระยะอ้างอิง

การทดลองในส่วนนี้ได้ทำการทดลองหาค่าความแรงสัญญาณที่ระยะอ้างอิง โดยมีการจัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 3.2 โดยใช้โหนดอ้างอิงแต่ละตัวทำการหมุนที่ละ 90 องศา โดยให้โหนดเป้าหมายอยู่กับที่เพื่อทำการรับ

ค่า ส่วนโหนดอ้างอิงแต่ละตัว วางระยะห่างระหว่างอุปกรณ์สองตัวคือ 1 เมตร แล้วทำการอ่านค่าความแรงจากโปรแกรมของอุปกรณ์ที่ได้รับมาจากโหนดเคลื่อนที่



รูปที่ 3.2 โมเดลการทดลองหาค่าความแรงสัญญาณที่ระยะอ้างอิง



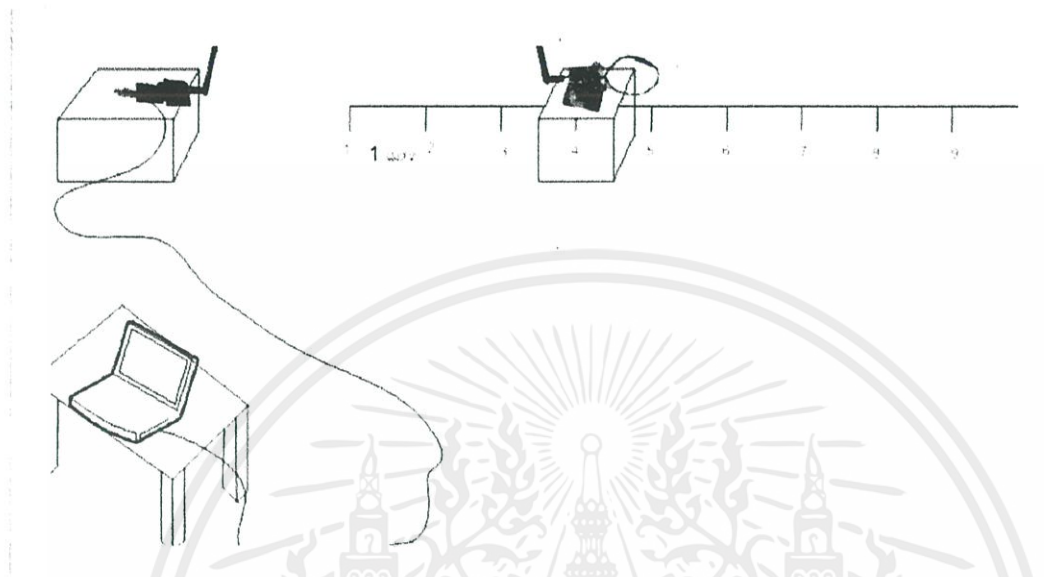
รูปที่ 3.3 การทดลองจริงเพื่อหาค่าความแรงสัญญาณที่ระยะอ้างอิง

3.3.2 การทดลองเพื่อหาค่าดัชนีการแพร่กระจายสัญญาณในสภาวะแวดล้อมต่างๆ หรือค่า n

ในการทดลองนี้ผู้ทำการทดลองได้ทำการจัดวางอุปกรณ์ดังรูป 3.4 โดยการทดลองนี้ได้กำหนดให้โหนดเคลื่อนที่อยู่กับที่ แล้วทำการเลื่อนโหนดอ้างอิงครั้งละ 10 เมตร โดยทำการเปลี่ยนโหนดอ้างอิงไปจนครบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้ง 4 ตัวและบันทึกผลค่าความแรงเพื่อคำนวณหา ค่าดัชนีการแพร่กระจายสัญญาณในสภาวะแวดล้อมต่างๆ หรือค่า n ต่อไป

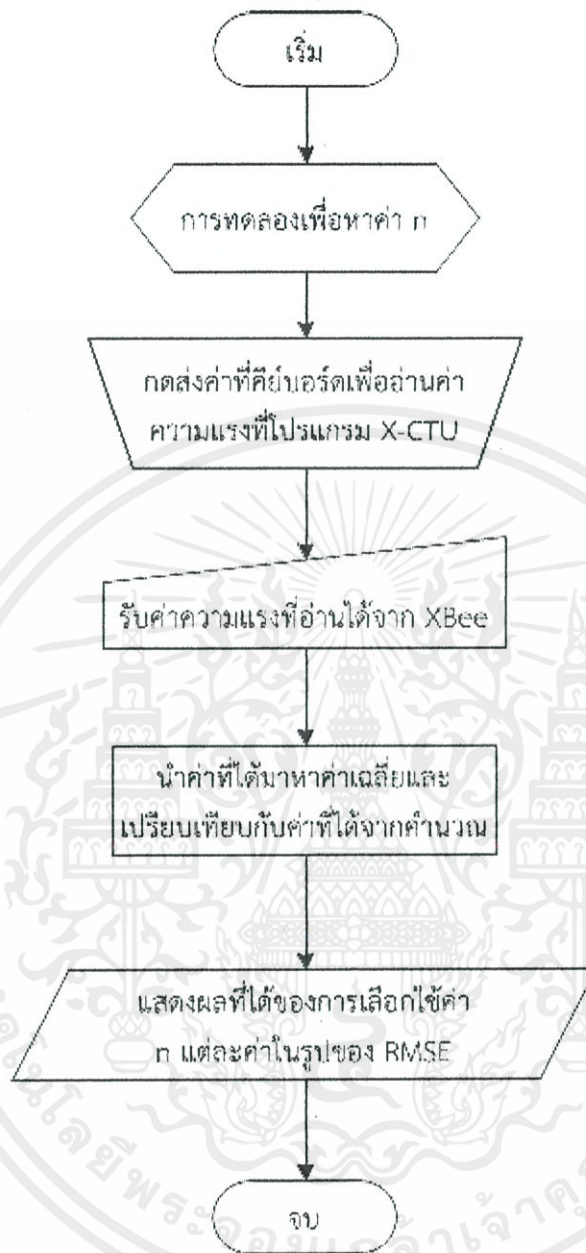


รูปที่ 3.4 โมเดลการทดลองในการหาค่าดัชนีการแพร่กระจายสัญญาณ ในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ หรือค่า n



รูปที่ 3.5 รูปการทดลองจริงในการหาค่าดัชนีการแพร่กระจายสัญญาณในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ หรือค่า n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนแสดงวิธีการหาค่าดัชนีการแพร่กระจายสัญญาณในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ หรือค่า n

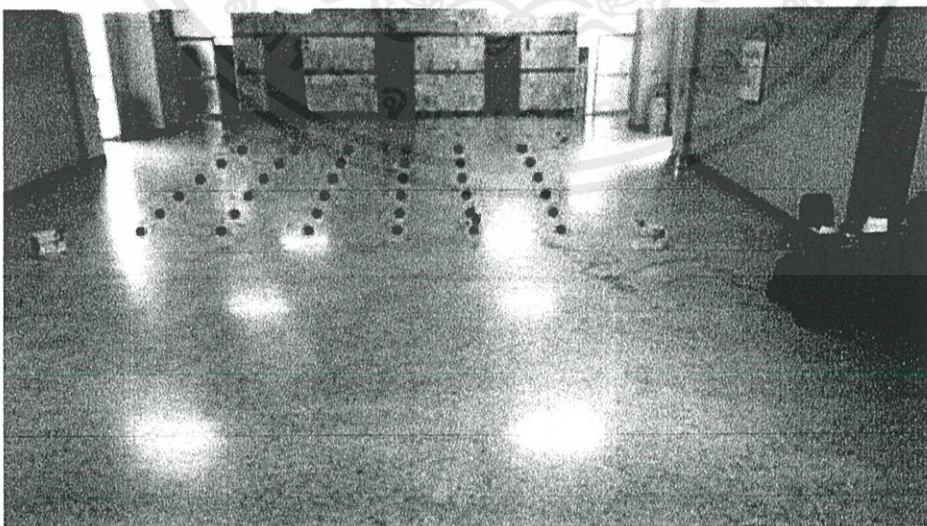
ในการทดลองเพื่อหาค่าความแรงของสัญญาณที่ตำแหน่งต่าง ๆ ทั้ง 36 จุดนี้ทางผู้จัดทำได้ทำการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าระยะทางที่ผิดพลาด ระหว่างการใช้สาย RS232 กับ การนำไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อลดระยะการใช้สายว่าเป็นอย่างไร

3.3.3 การทดลองเพื่อหาค่าความแรงของสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ 36 จุด โดยใช้สาย RS232

ทำการทดลองเก็บค่าความแรงสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ซึ่งผู้ทำการทดลองได้กำหนดพิกัดทดลองไว้ 36 จุด และกำหนด 4 จุด สำหรับโหนดอ้างอิง จากนั้นทำการทดลองเพื่อเก็บค่าความแรงตามจุดพิกัด 36 จุด เพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าความผิดพลาดของความแรงที่ได้จากการใช้อุปกรณ์ XBee โดยอ่านค่าผ่านโปรแกรม RCOM-Meshbee



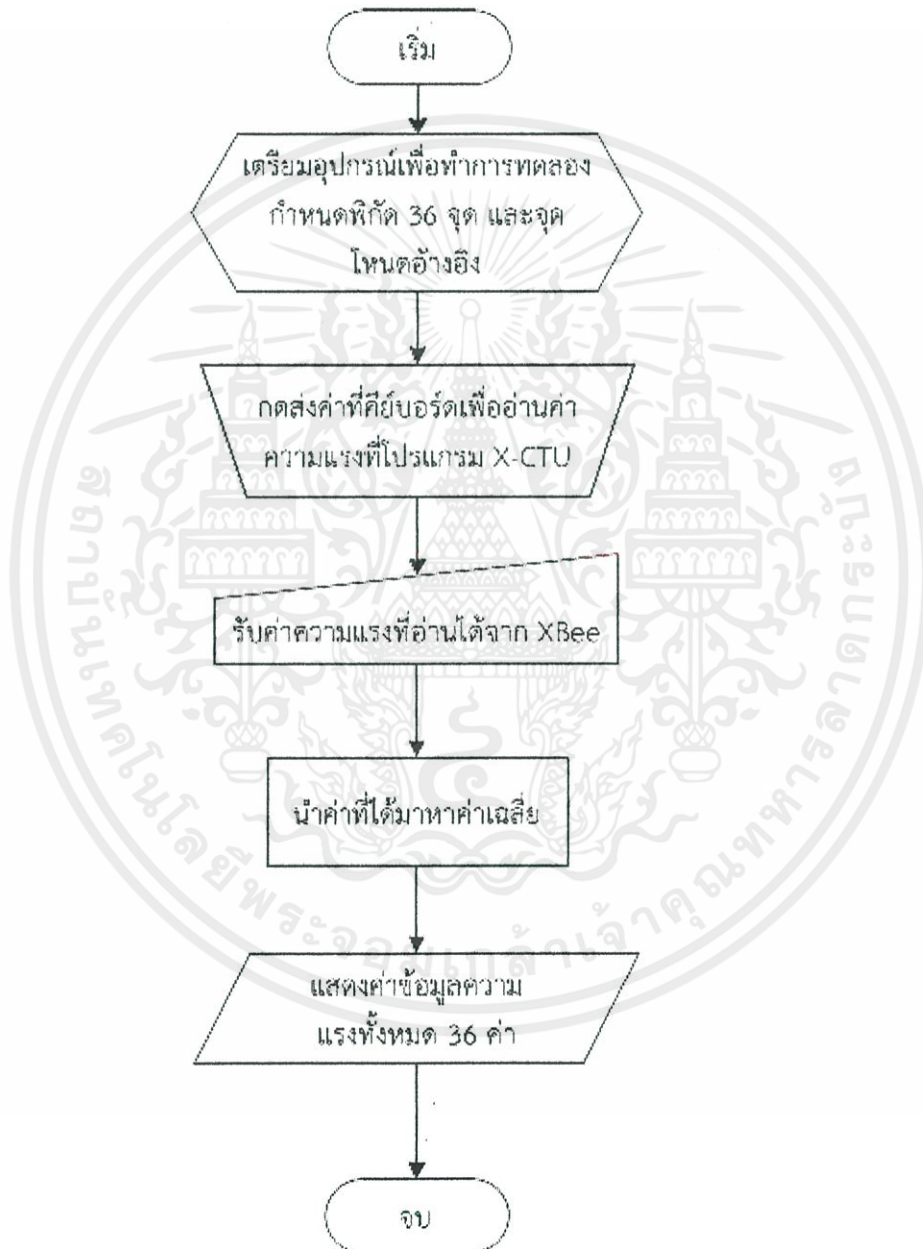
รูปที่ 3.7 โมเดลการทดลองการเก็บผลการทดลองค่าความแรงสัญญาณ ในแต่ละพิกัดตำแหน่ง



รูปที่ 3.8 การทดลองเก็บค่าความแรงสัญญาณตามจุดพิกัดที่กำหนด 36 จุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

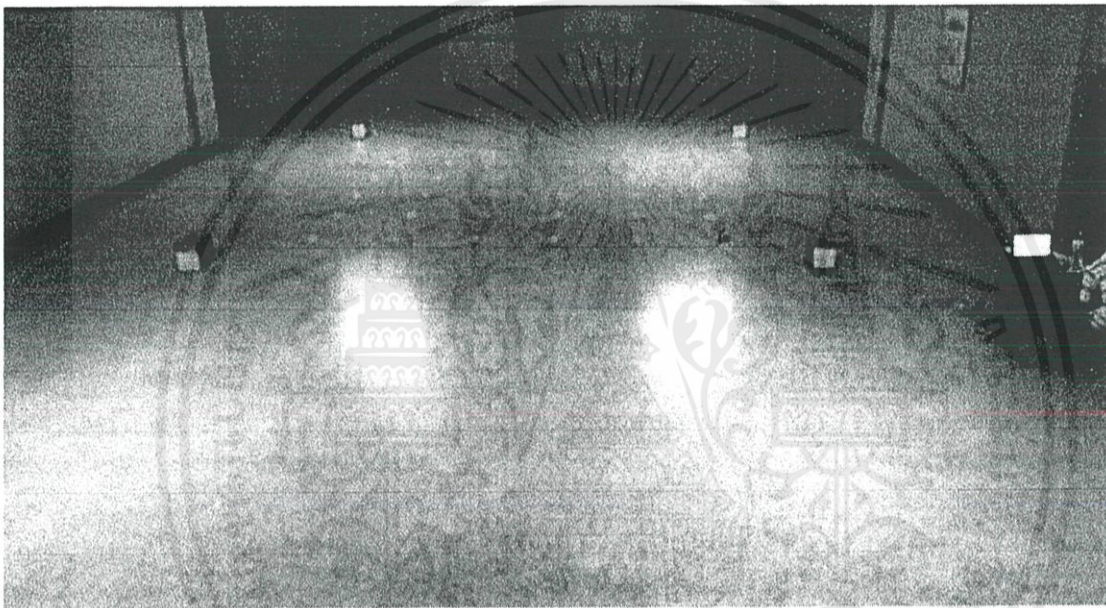
จากรูปที่ 3.8 การทดลองทำการจัดวางอุปกรณ์ตามรูปโมเดล โดยทำการควบคุม XBee ผ่านโปรแกรม RCOM-Meshbee โดย XBee ที่เป็นโหนดเคลื่อนที่จะทำการ ส่งคำสั่งเรียกห้อง เพื่อรอการตอบกลับค่าความแรงจากโหนดอ้างอิงแต่ละตัว หลังจากได้รับค่าความแรงแล้ว ค่าความแรงของตำแหน่งที่โหนดเคลื่อนย้ายอยู่จะตอบกลับมาในรูปแบบของแพ็กเก็ตของข้อมูล โดยจะปรากฏในโปรแกรม X-CTU ทำการทดลองแต่ละจุดจำนวน 10 ครั้งหาค่าเฉลี่ย และบันทึกผล



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการทำงานของการทำงานวัดค่าความแรงสัญญาณทั้ง 36 จุดแบบใช้สาย RS232

3.3.4 การทดลองเพื่อระบุตำแหน่งของโหนดเป้าหมาย โดยการควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์

ทำการวัดค่าความแรงสัญญาณ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ เช่นเดียวกันกับแบบใช้สาย RS232 แต่ต่างกันตรงที่เปลี่ยนมาใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมที่ตัวโหนดเป้าหมาย และ มอนิเตอร์โหนด ซึ่งเมื่อทำการกดปุ่มสวิตช์ที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ของมอนิเตอร์โหนด ค่าความแรงจากโหนดอ้างอิงแต่ละอัน จะถูกส่งมายังโหนดเป้าหมายจนครบทุกโหนด จึงส่งต่อไปยังที่มอนิเตอร์โหนดเพื่อป้อนข้อมูลเข้าโปรแกรม MATLAB และแสดงผลออกมาเป็นตำแหน่ง ซึ่งจะทำการวัดแต่ละตำแหน่งเป็นจำนวน 10 ครั้ง

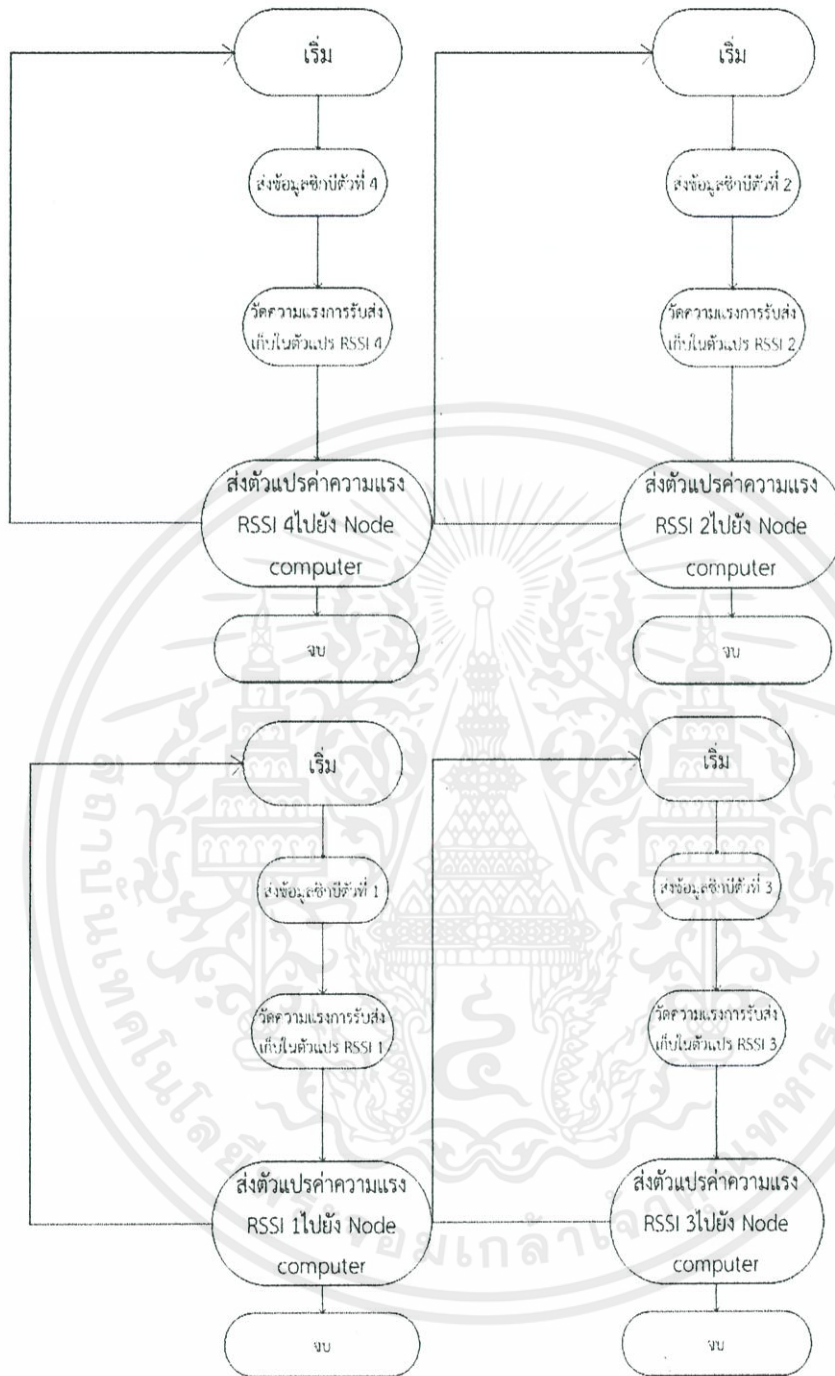


รูปที่ 3.10 การทดลองระบุตำแหน่งแบบไร้สาย

จากรูปที่ 3.10 เราสามารถพิจารณาในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ควบคุม XBee ที่ทำหน้าที่เป็นโหนดเป้าหมาย กับ ส่วนที่เป็นมอนิเตอร์โหนด ดังนี้

3.3.4.1 Arduino UNO

Arduino UNO ทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมโหนดเป้าหมาย โดยจะทำการส่งคำสั่งไปยังโหนดอ้างอิงที่ 1 ถึง 4 แล้วโหนดอ้างอิงแต่ละตัวจะส่งค่าความแรงกลับมาที่โหนดเป้าหมาย โดยทำการเก็บค่าความแรงไว้ในรูปตัวแปร RSSI1-4 ตามลำดับของโหนดอ้างอิง เมื่อได้รับข้อมูลจากโหนดอ้างอิงแต่ละตัวครบแล้ว จะทำการส่งข้อมูลให้ไปยังมอนิเตอร์โหนดที่เชื่อมต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์



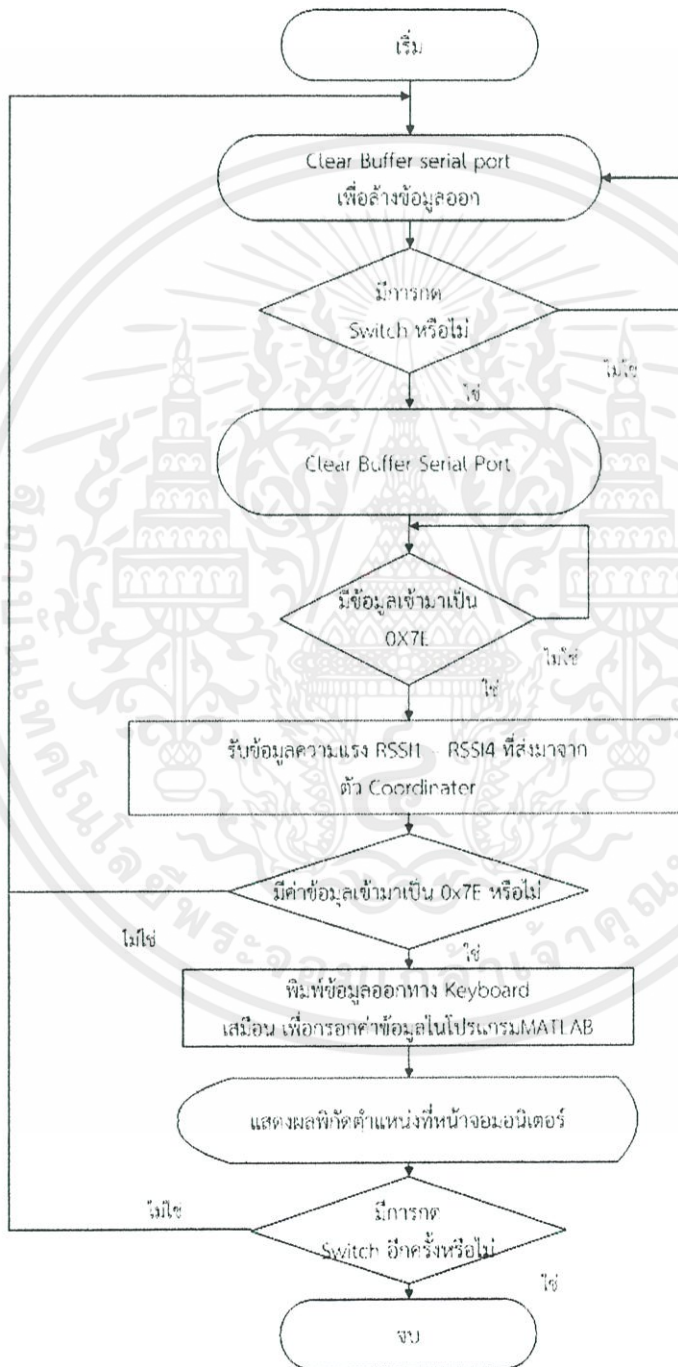
รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการทำงานของโหนดเป้าหมาย

3.3.4.2 Arduino Leonardo

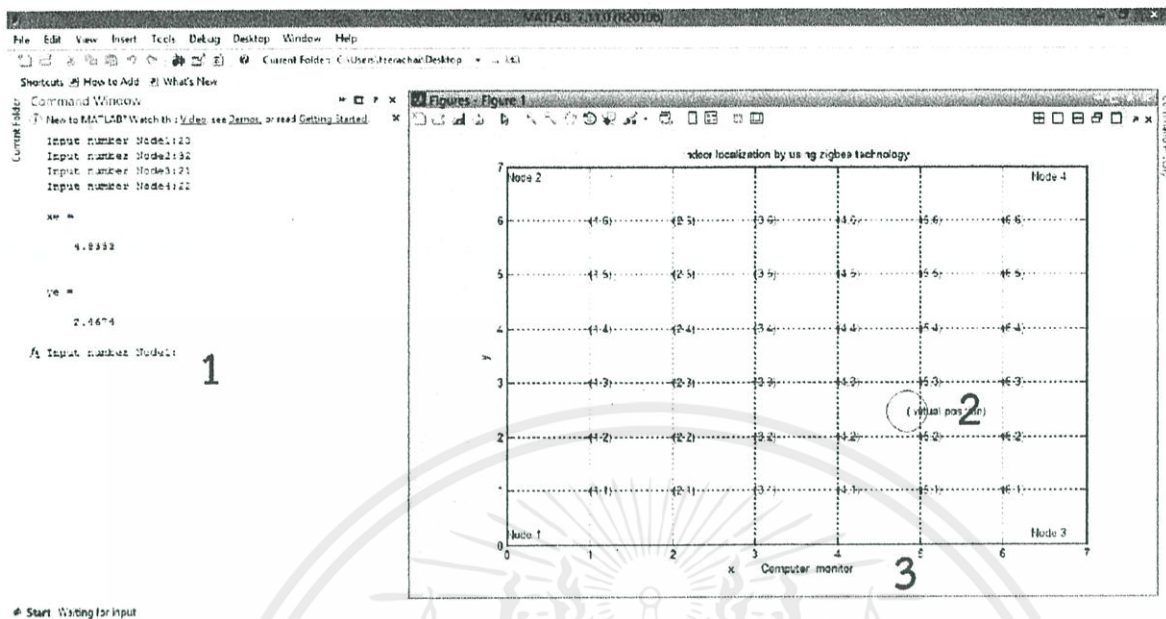
Arduino Leonardo มีคุณสมบัติในการจำลองเป็นการกดปุ่มคีย์บอร์ดเสมือน การทดลองได้ทำการรันโปรแกรม MATLAB เพื่อรอรับค่าไว้ หลังจากได้สั่งทำการรันโปรแกรมแล้ว เมื่อทำการกดสวิทซ์ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ตัวมอนิเตอร์โหนดแล้ว จะมีการทำงานเหมือนการกดปุ่มกรอกค่าความแรงที่โปรแกรม จากนั้นโปรแกรมจะทำการรันค่าตามค่าตัวถ่วงน้ำหนัก และ ค่าดัชนีการแพร่กระจายสัญญาณในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ที่ได้กรอกเป็นค่าคงที่ไว้ในโปรแกรม เพื่อแสดงค่าพิกัดตำแหน่งเสมือนออกมา



รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการทำงานของมอนิเตอร์โหนด



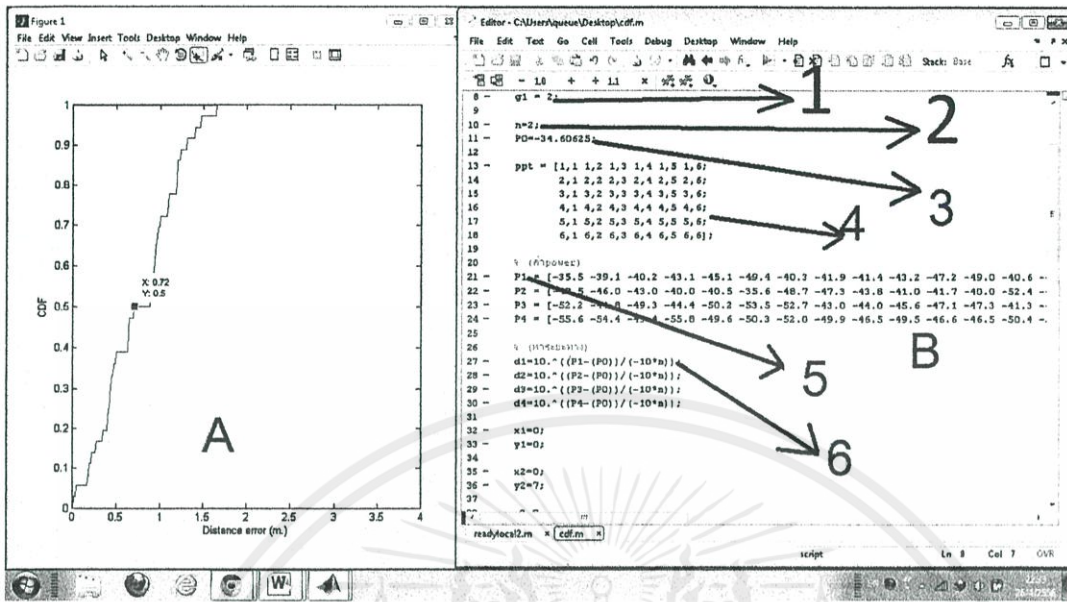
รูปที่ 3.13 ค่าพิกัดตำแหน่งที่ได้จากการรันโปรแกรม

จากรูปที่ 3.13 เป็นการแสดงผลของพิกัดเสมือนแสดงให้เห็นการระบุตำแหน่งแบบตามระยะเวลาจริง โดยได้เขียนโปรแกรม MATLAB ให้ทำการรันรับค่าแบบไม่รู้จบ ซึ่งส่วนการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำการพิมพ์ค่าความแรงสัญญาณมาอย่างไม่รู้จบเช่นเดียวกัน โดยเวลาการประมวลผลเพื่อพิมพ์ค่านั้นมีความเร็วกว่าการประมวลผลของ MATLAB ดังนั้นโปรแกรมจึงแสดงผลได้ตามระยะเวลาจริง โดยมีการพิมพ์ค่าความแรงกับการรับค่าความแรงที่สอดคล้องกัน

หมายเลขที่ 1 แสดงถึงส่วนของโปรแกรมทำการรันเพื่อรอรับค่าความแรงจากส่วนไมโครคอนโทรลเลอร์

หมายเลขที่ 2 ส่วนการแสดงจุดพิกัดเสมือนของตำแหน่งของโหนดเคลื่อนที่

หมายเลขที่ 3 ส่วนหน้าจอกการแสดงผล



รูปที่ 3.14 แสดงหน้าต่างโปรแกรม MATLAB ที่ใช้แสดงกราฟ CDF

หลังจากการบันทึกผลค่าความแรงที่ได้จากการประยุกต์ใช้แบบไร้สาย มาทำการบันทึกพิกัดตำแหน่งที่แสดงออกมา แล้วนำมาทดลองโดยใช้ค่าดัชนีการแพร่กระจายสัญญาณในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองปรับเปลี่ยนค่าตัวถ่วงน้ำหนักจากน้อยไปมากโดยเพิ่มขึ้นทีละ 1 ค่า

ส่วน A คือ การแสดงผลในส่วนของกราฟความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม

ส่วน B คือ การแสดงผลในส่วนของ editor โดยจากรูปที่ 3.14

หมายเลข 1 คือ ค่าตัวถ่วงน้ำหนักที่ใช้ในการคำนวณ

หมายเลข 2 คือ ค่าดัชนีการแพร่กระจายสัญญาณในสภาวะแวดล้อมต่างๆ

หมายเลข 3 คือ ค่าของความแรงสัญญาณอ้างอิงที่ทดลองได้

หมายเลข 4 คือ การกำหนดตำแหน่งพิกัดที่ใช้ในการทดลอง

หมายเลข 5 คือ ค่าความแรงสัญญาณที่ได้จากการทดลองแบบไร้สาย

หมายเลข 6 คือ สูตรการคำนวณการแปลงค่าความแรงสัญญาณเป็นความแรง หรือ Path loss model

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการวัดค่าความแรงของสัญญาณที่ระยะอ้างอิง

ตารางที่ 4.1 แสดงการหาค่าเฉลี่ยความแรงของสัญญาณที่ระยะอ้างอิง (ในที่นี้กำหนดเป็น 1 เมตร)

โหนดอ้างอิง	ค่าเฉลี่ยของค่าความแรงของสัญญาณที่ระยะอ้างอิง
1	-34.2000 dBm
2	-33.9250 dBm
3	-34.1000 dBm
4	-36.2000 dBm
เฉลี่ย	-34.4187 dBm

จากโหนดอ้างอิงที่ 1, 2, 3 และ 4 และค่าเฉลี่ยของทั้ง 4 โหนด จะได้ค่าความแรงของสัญญาณที่ระยะอ้างอิง สรุปผลได้ค่าเฉลี่ยที่ใช้คือ -34.41875 dBm

4.2 การทดลองเก็บค่าความแรงสัญญาณในแต่ละพิกัด ตามโมเดลในการทดลอง

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองเก็บค่าความแรงสัญญาณในแต่ละพิกัดของโหนดอ้างอิงที่ 1

พิกัด	ครั้งที่1 (dBm)	ครั้งที่2 (dBm)	ครั้งที่3 (dBm)	ครั้งที่4 (dBm)	ครั้งที่5 (dBm)	ครั้งที่6 (dBm)	ครั้งที่7 (dBm)	ครั้งที่8 (dBm)	ครั้งที่9 (dBm)	ครั้งที่10 (dBm)	เฉลี่ย (dBm)
(1,1)	-36	-36	-36	-36	-36	-35	-35	-35	-35	-35	-35.5
(1,2)	-38	-38	-38	-39	-38	-40	-40	-40	-40	-40	-39.1
(1,3)	-39	-46	-39	-39	-39	-40	-40	-40	-40	-40	-40.2
(1,4)	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-44	-43	-43	-43	-43.1
(1,5)	-44	-44	-44	-45	-45	-45	-46	-46	-46	-46	-45.1
(1,6)	-49	-49	-49	-49	-49	-50	-50	-50	-49	-50	-49.4
(2,1)	-40	-40	-40	-40	-40	-41	-41	-40	-41	-40	-40.3
(2,2)	-43	-43	-43	-43	-43	-41	-41	-41	-41	-40	-41.9
(2,3)	-42	-43	-42	-43	-43	-41	-40	-40	-40	-40	-41.4
(2,4)	-42	-43	-43	-43	-43	-43	-44	-44	-43	-44	-43.2
(2,5)	-47	-47	-48	-47	-47	-46	-47	-47	-48	-48	-47.2
(2,6)	-49	-50	-49	-49	-50	-51	-48	-48	-48	-48	-49
(3,1)	-40	-40	-40	-40	-40	-42	-41	-41	-41	-41	-40.6

(3,2)	-42	-42	-42	-42	-41	-40	-40	-40	-40	-40	-40.9
(3,3)	-46	-46	-46	-46	-46	-45	-46	-45	-46	-45	-45.7
(3,4)	-44	-44	-44	-45	-44	-44	-43	-43	-43	-43	-43.7
(3,5)	-48	-49	-49	-49	-49	-49	-48	-48	-48	-48	-48.5
(3,6)	-53	-53	-53	-52	-51	-50	-49	-49	-49	-49	-50.8
(4,1)	-43	-44	-44	-45	-44	-40	-40	-40	-40	-40	-42
(4,2)	-42	-42	-43	-42	-43	-40	-40	-40	-40	-40	-41.2
(4,3)	-43	-43	-42	-42	-42	-44	-44	-44	-44	-44	-43.2
(4,4)	-48	-49	-47	-50	-49	-48	-47	-47	-46	-46	-47.7
(4,5)	-47	-50	-47	-47	-48	-50	-48	-48	-48	-48	-48.1
(4,6)	-47	-48	-47	-47	-47	-49	-48	-48	-48	-48	-47.7
(5,1)	-44	-45	-44	-44	-45	-47	-47	-46	-46	-46	-45.4
(5,2)	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46
(5,3)	-48	-46	-47	-48	-46	-47	-47	-46	-46	-46	-46.7
(5,4)	-46	-46	-46	-48	-46	-52	-50	-51	-51	-51	-48.7
(5,5)	-50	-50	-51	-51	-51	-46	-48	-48	-48	-48	-49.1
(5,6)	-51	-51	-51	-51	-51	-52	-52	-52	-53	-52	-51.6
(6,1)	-49	-49	-49	-49	-49	-48	-48	-48	-48	-48	-48.5
(6,2)	-46	-47	-47	-46	-47	-46	-46	-46	-46	-46	-46.3
(6,3)	-46	-46	-45	-44	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-45.7
(6,4)	-49	-49	-49	-50	-50	-49	-48	-49	-49	-49	-49.1
(6,5)	-52	-50	-51	-52	-52	-54	-57	-54	-54	-55	-53.1
(6,6)	-49	-49	-49	-50	-50	-52	-54	-55	-55	-54	-51.7

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองเก็บค่าความแรงสัญญาณในแต่ละพิกัดของโหนดอ้างอิงที่ 2

พิกัด	ครั้งที่ 1 (dBm)	ครั้งที่2 (dBm)	ครั้งที่3 (dBm)	ครั้งที่4 (dBm)	ครั้งที่5 (dBm)	ครั้งที่6 (dBm)	ครั้งที่7 (dBm)	ครั้งที่8 (dBm)	ครั้งที่9 (dBm)	ครั้งที่10 (dBm)	เฉลี่ย (dBm)
(1,1)	-49	-50	-50	-50	-50	-48	-47	-47	-47	-47	-48.5
(1,2)	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46
(1,3)	-42	-42	-42	-42	-42	-44	-44	-44	-44	-44	-43
(1,4)	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40
(1,5)	-40	-40	-40	-40	-40	-41	-41	-41	-41	-41	-40.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1,6)	-36	-36	-36	-36	-36	-35	-35	-36	-35	-35	-35.6
(2,1)	-50	-49	-50	-49	-49	-48	-48	-48	-48	-48	-48.7
(2,2)	-48	-47	-48	-47	-47	-48	-47	-47	-47	-47	-47.3
(2,3)	-42	-43	-42	-43	-43	-45	-45	-45	-45	-45	-43.8
(2,4)	-40	-40	-40	-40	-40	-42	-42	-42	-42	-42	-41
(2,5)	-41	-41	-41	-41	-41	-42	-43	-43	-42	-42	-41.7
(2,6)	-41	-41	-41	-41	-41	-39	-39	-39	-39	-39	-40
(3,1)	-55	-58	-56	-57	-55	-49	-48	-49	-48	-49	-52.4
(3,2)	-45	-45	-44	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-45	-44.9
(3,3)	-46	-46	-46	-46	-46	-44	-44	-44	-44	-44	-45
(3,4)	-43	-43	-43	-43	-43	-44	-43	-43	-43	-43	-43.1
(3,5)	-42	-42	-42	-42	-42	-40	-40	-40	-40	-40	-41
(3,6)	-42	-41	-41	-41	-41	-39	-39	-39	-39	-39	-40.1
(4,1)	-51	-51	-51	-51	-50	-50	-50	-50	-49	-49	-50.2
(4,2)	-46	-46	-46	-46	-46	-48	-47	-47	-47	-47	-46.6
(4,3)	-44	-44	-44	-44	-45	-45	-45	-45	-45	-46	-44.7
(4,4)	-44	-44	-43	-43	-43	-44	-44	-43	-44	-44	-43.6
(4,5)	-43	-43	-43	-43	-43	-42	-42	-42	-42	-42	-42.5
(4,6)	-43	-43	-43	-43	-43	-41	-41	-41	-41	-41	-42
(5,1)	-57	-56	-56	-56	-57	-54	-54	-53	-53	-53	-54.9
(5,2)	-50	-49	-49	-49	-50	-51	-51	-50	-50	-50	-49.9
(5,3)	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-49	-49	-50	-49.8
(5,4)	-49	-48	-48	-49	-48	-45	-44	-45	-45	-45	-46.6
(5,5)	-47	-47	-47	-46	-47	-50	-50	-50	-50	-50	-48.4
(5,6)	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46	-46
(6,1)	-50	-51	-50	-50	-50	-50	-51	-51	-51	-51	-50.5
(6,2)	-50	-50	-50	-49	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-49.9
(6,3)	-50	-51	-50	-51	-50	-50	-49	-49	-49	-49	-49.8
(6,4)	-46	-46	-46	-46	-46	-50	-50	-50	-50	-50	-48
(6,5)	-49	-48	-49	-49	-49	-50	-51	-51	-51	-50	-49.7
(6,6)	-52	-52	-53	-53	-52	-51	-51	-51	-51	-51	-51.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองเก็บค่าความแรงสัญญาณในแต่ละพิกัดของโหนดอ้างอิงที่ 3

พิกัด	ครั้งที่ 1 (dBm)	ครั้งที่2 (dBm)	ครั้งที่3 (dBm)	ครั้งที่4 (dBm)	ครั้งที่5 (dBm)	ครั้งที่6 (dBm)	ครั้งที่7 (dBm)	ครั้งที่8 (dBm)	ครั้งที่9 (dBm)	ครั้งที่10 (dBm)	เฉลี่ย (dBm)
(1,1)	-51	-51	-52	-51	-52	-53	-53	-53	-53	-53	-52.2
(1,2)	-44	-45	-45	-45	-45	-44	-45	-45	-45	-45	-44.8
(1,3)	-48	-51	-49	-48	-49	-49	-50	-49	-50	-50	-49.3
(1,4)	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-45	-45	-45	-45	-44.4
(1,5)	-49	-50	-50	-50	-50	-50	-51	-51	-51	-50	-50.2
(1,6)	-55	-55	-55	-55	-55	-52	-52	-52	-52	-52	-53.5
(2,1)	-52	-53	-53	-52	-53	-54	-55	-51	-51	-53	-52.7
(2,2)	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43
(2,3)	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44
(2,4)	-46	-46	-46	-47	-46	-45	-45	-45	-45	-45	-45.6
(2,5)	-48	-48	-49	-48	-48	-46	-46	-46	-46	-46	-47.1
(2,6)	-48	-48	-48	-48	-48	-46	-46	-47	-47	-47	-47.3
(3,1)	-42	-42	-42	-42	-42	-41	-40	-41	-40	-41	-41.3
(3,2)	-43	-43	-43	-43	-42	-45	-45	-45	-45	-44	-43.8
(3,3)	-44	-45	-45	-45	-45	-44	-44	-45	-45	-44	-44.6
(3,4)	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43
(3,5)	-44	-44	-44	-44	-44	-46	-46	-46	-46	-46	-45
(3,6)	-49	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48	-48.1
(4,1)	-39	-39	-38	-38	-39	-38	-38	-38	-38	-38	-38.3
(4,2)	-41	-42	-41	-42	-42	-41	-41	-41	-41	-41	-41.3
(4,3)	-43	-43	-43	-43	-43	-40	-40	-40	-40	-40	-41.5
(4,4)	-45	-46	-44	-45	-45	-43	-43	-44	-43	-43	-44.1
(4,5)	-43	-44	-44	-43	-44	-47	-47	-47	-47	-47	-45.3
(4,6)	-45	-45	-44	-44	-45	-48	-48	-49	-48	-48	-46.4
(5,1)	-39	-40	-39	-39	-39	-40	-40	-40	-40	-40	-39.6
(5,2)	-41	-41	-41	-41	-41	-40	-40	-40	-40	-40	-40.5
(5,3)	-39	-39	-39	-40	-39	-38	-38	-39	-39	-38	-38.8
(5,4)	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40	-40
(5,5)	-46	-46	-46	-46	-46	-50	-50	-50	-49	-50	-47.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(5,6)	-47	-47	-47	-47	-47	-49	-48	-48	-48	-48	-47.6
(6,1)	-33	-33	-33	-33	-33	-34	-34	-34	-34	-34	-33.5
(6,2)	-38	-38	-38	-38	-38	-40	-40	-40	-40	-40	-39
(6,3)	-40	-40	-40	-41	-41	-42	-42	-42	-42	-42	-41.2
(6,4)	-41	-41	-41	-41	-41	-42	-43	-42	-43	-42	-41.7
(6,5)	-42	-42	-42	-41	-42	-42	-43	-43	-43	-43	-42.3
(6,6)	-44	-44	-44	-44	-44	-43	-43	-43	-43	-43	-43.5

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองการเก็บค่าความแรงสัญญาณในแต่ละพิกัดของโหนดอ้างอิงที่ 4

พิกัด	ครั้งที่ 1 (dBm)	ครั้งที่ 2 (dBm)	ครั้งที่ 3 (dBm)	ครั้งที่ 4 (dBm)	ครั้งที่ 5 (dBm)	ครั้งที่ 6 (dBm)	ครั้งที่ 7 (dBm)	ครั้งที่ 8 (dBm)	ครั้งที่ 9 (dBm)	ครั้งที่ 10 (dBm)	เฉลี่ย (dBm)
(1,1)	-53	-54	-54	-54	-55	-57	-57	-57	-57	-58	-55.6
(1,2)	-53	-54	-54	-55	-54	-54	-54	-56	-55	-55	-54.4
(1,3)	-50	-50	-50	-50	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49.4
(1,4)	-57	-56	-57	-56	-56	-57	-54	-55	-55	-55	-55.8
(1,5)	-50	-49	-49	-49	-49	-50	-50	-50	-50	-50	-49.6
(1,6)	-51	-51	-51	-52	-52	-49	-49	-49	-50	-49	-50.3
(2,1)	-55	-55	-55	-55	-55	-49	-49	-49	-49	-49	-52
(2,2)	-49	-48	-49	-49	-49	-51	-51	-51	-51	-51	-49.9
(2,3)	-46	-46	-46	-46	-46	-47	-47	-47	-47	-47	-46.5
(2,4)	-50	-49	-50	-49	-50	-49	-50	-50	-49	-49	-49.5
(2,5)	-47	-47	-47	-47	-48	-46	-46	-46	-46	-46	-46.6
(2,6)	-47	-47	-47	-47	-47	-46	-46	-46	-46	-46	-46.5
(3,1)	-51	-50	-51	-51	-50	-51	-50	-50	-50	-50	-50.4
(3,2)	-54	-54	-53	-53	-54	-61	-62	-62	-62	-61	-57.6
(3,3)	-48	-48	-48	-48	-48	-46	-46	-46	-46	-46	-47
(3,4)	-50	-50	-49	-49	-49	-49	-48	-48	-48	-48	-48.8
(3,5)	-46	-45	-46	-46	-46	-43	-43	-43	-43	-43	-44.4
(3,6)	-43	-43	-43	-43	-43	-42	-42	-42	-42	-42	-42.5
(4,1)	-48	-51	-51	-51	-52	-52	-52	-53	-53	-52	-51.5
(4,2)	-52	-52	-52	-52	-52	-52	-51	-51	-51	-52	-51.7
(4,3)	-46	-46	-46	-46	-46	-49	-49	-49	-49	-49	-47.5

(4,4)	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44
(4,5)	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-44	-43.1
(4,6)	-41	-41	-41	-41	-41	-42	-42	-42	-42	-42	-41.5
(5,1)	-51	-52	-51	-51	-52	-49	-49	-49	-49	-49	-50.2
(5,2)	-54	-55	-55	-55	-56	-52	-52	-52	-52	-53	-53.6
(5,3)	-44	-44	-44	-44	-44	-43	-43	-43	-43	-43	-43.5
(5,4)	-43	-43	-43	-43	-43	-46	-45	-45	-45	-45	-44.1
(5,5)	-43	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42.1
(5,6)	-42	-42	-42	-42	-42	-41	-41	-42	-42	-41	-41.7
(6,1)	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49
(6,2)	-48	-48	-48	-48	-49	-47	-47	-47	-47	-47	-47.6
(6,3)	-44	-45	-45	-45	-45	-44	-44	-44	-44	-44	-44.4
(6,4)	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43
(6,5)	-42	-42	-42	-42	-42	-43	-43	-43	-43	-43	-42.5
(6,6)	-36	-36	-36	-36	-36	-36	-37	-37	-37	-37	-36.4

4.3 การทดลองหาค่าคงที่การกระจายสัญญาณของสถานที่ต่างๆ

การทดลองนี้จะทำการทดลองหาค่า n โดยการปรับเลื่อนตำแหน่งของโหนดอ้างอิงกับโหนดเคลื่อนที่โดยเริ่มการทดลองที่ระยะ 1 เมตรโดย เลื่อนไปถึงระยะ 10 เมตร

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองการเก็บค่าความแรงไวค่านวมเพื่อหาค่า n สำหรับโหนดอ้างอิงที่ 1

ระยะ (m)	ครั้งที่ 1 (dBm)	ครั้งที่ 2 (dBm)	ครั้งที่ 3 (dBm)	ครั้งที่ 4 (dBm)	ครั้งที่ 5 (dBm)	ครั้งที่ 6 (dBm)	ครั้งที่ 7 (dBm)	ครั้งที่ 8 (dBm)	ครั้งที่ 9 (dBm)	ครั้งที่ 10 (dBm)	เฉลี่ย (dBm)
1	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31
2	-39	-38	-38	-38	-38	-38	-39	-39	-38	-39	-38.4
3	-40	-41	-42	-41	-42	-40	-41	-41	-41	-40	-40.9
4	-46	-45	-44	-44	-45	-44	-44	-44	-44	-44	-44.4
5	-45	-46	-46	-45	-46	-44	-45	-45	-45	-45	-45.2
6	-50	-50	-50	-50	-49	-52	-50	-50	-50	-50	-50.1
7	-46	-46	-46	-46	-46	-47	-49	-48	-49	-48	-47.1
8	-50	-50	-49	-49	-50	-50	-50	-50	-50	-50	-49.8

9	-50	-50	-50	-50	-50	-51	-51	-51	-51	-50	-50.4
10	-40	-50	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-49	-48.2

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองการเก็บค่าความแรงไว้คำนวณเพื่อหาค่า n สำหรับโหนดอ้างอิงที่ 2

ระยะ (m)	ครั้งที่ 1 (dBm)	ครั้งที่ 2 (dBm)	ครั้งที่ 3 (dBm)	ครั้งที่ 4 (dBm)	ครั้งที่ 5 (dBm)	ครั้งที่ 6 (dBm)	ครั้งที่ 7 (dBm)	ครั้งที่ 8 (dBm)	ครั้งที่ 9 (dBm)	ครั้งที่ 10 (dBm)	เฉลี่ย (dBm)
1	1	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31
2	2	-27	-37	-38	-38	-38	-36	-37	-37	-37	-37
3	3	-40	-39	-39	-39	-39	-41	-40	-40	-40	-40
4	4	-43	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-44
5	5	-45	-46	-45	-45	-45	-46	-46	-46	-46	-46
6	6	-47	-47	-45	-45	-47	-49	-49	-49	-50	-50
7	7	-49	-48	-50	-50	-48	-46	-46	-47	-46	-46
8	8	-47	-46	-47	-47	-46	-48	-48	-48	-49	-49
9	9	-55	-53	-52	-52	-54	-52	-53	-52	-52	-52
10	10	-49	-49	-49	-49	-49	-51	-49	-49	-50	-50

ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองการเก็บค่าความแรงไว้คำนวณเพื่อหาค่า n สำหรับโหนดอ้างอิงที่ 3

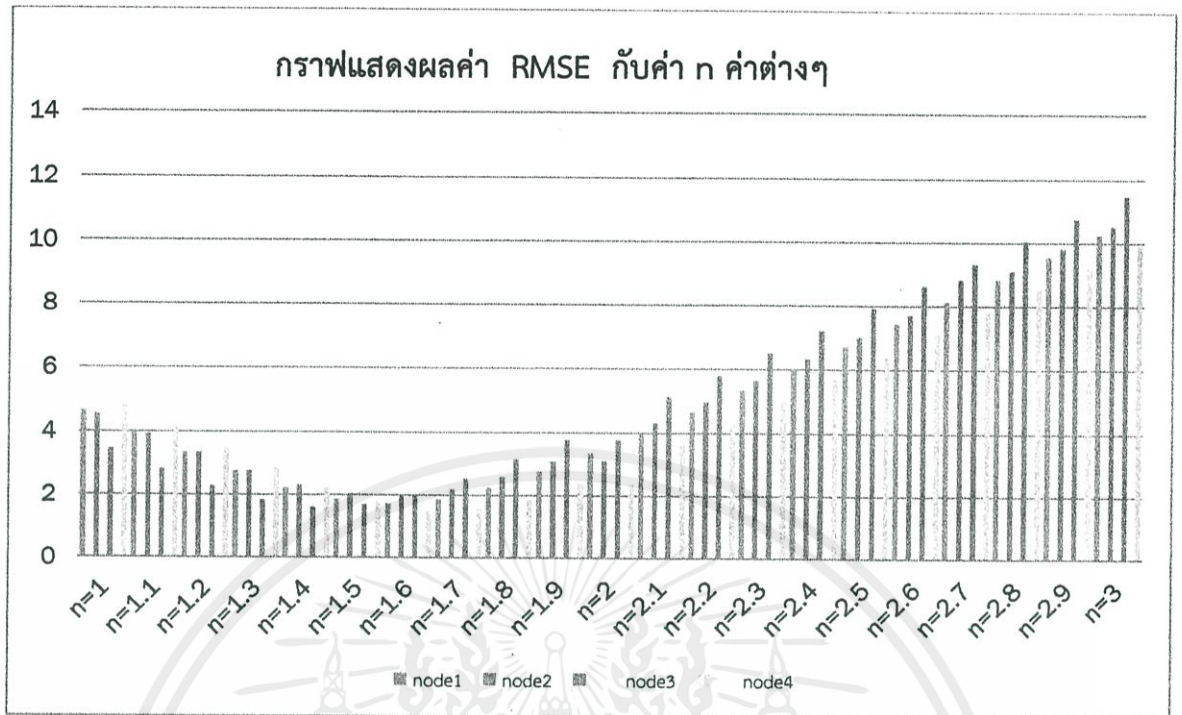
ระยะ (m)	ครั้งที่ 1 (dBm)	ครั้งที่ 2 (dBm)	ครั้งที่ 3 (dBm)	ครั้งที่ 4 (dBm)	ครั้งที่ 5 (dBm)	ครั้งที่ 6 (dBm)	ครั้งที่ 7 (dBm)	ครั้งที่ 8 (dBm)	ครั้งที่ 9 (dBm)	ครั้งที่ 10 (dBm)	เฉลี่ย (dBm)
1	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30	-30
2	-39	-38	-39	-39	-39	-37	-38	-37	-37	-38	-38.1
3	-41	-42	-42	-42	-41	-42	-42	-42	-43	-42	-41.9
4	-42	-43	-43	-43	-42	-42	-42	-42	-42	-42	-42.3
5	-43	-45	-45	-45	-43	-44	-44	-44	-44	-44	-44.1
6	-48	-47	-48	-46	-48	-46	-46	-46	-45	-46	-46.6
7	-46	-46	-46	-46	-46	-45	-45	-46	-47	-43	-45.6
8	-48	-48	-48	-49	-47	-48	-49	-48	-48	-48	-48.1
9	-48	-50	-50	-50	-50	-49	-49	-48	-48	-48	-49
10	-47	-47	-47	-47	-47	-48	-50	-50	-50	-49	-48.2

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองการเก็บค่าความแรงไว้คำนวณเพื่อหาค่า n สำหรับโหนดอ้างอิงที่ 4

ระยะ (m)	ครั้งที่ 1 (dBm)	ครั้งที่ 2 (dBm)	ครั้งที่ 3 (dBm)	ครั้งที่ 4 (dBm)	ครั้งที่ 5 (dBm)	ครั้งที่ 6 (dBm)	ครั้งที่ 7 (dBm)	ครั้งที่ 8 (dBm)	ครั้งที่ 9 (dBm)	ครั้งที่ 10 (dBm)	เฉลี่ย (dBm)
1	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32	-32
2	-46	-43	-45	-44	-44	-40	-40	-40	-40	-40	-42.2
3	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43	-43
4	-46	-46	-46	-46	-46	-43	-43	-43	-43	-43	-44.5
5	-46	-46	-47	-47	-47	-48	-48	-49	-49	-49	-47.6
6	-49	-49	-48	-49	-49	-46	-46	-46	-46	-46	-47.4
7	-50	-48	-48	-48	-48	-48	-49	-48	-48	-48	-48.3
8	-49	-49	-49	-49	-49	-48	-48	-48	-48	-48	-48.5
9	-52	-52	-52	-52	-52	-51	-51	-50	-50	-50	-51.2
10	-50	-51	-50	-51	-50	-51	-52	-52	-51	-51	-50.9

4.4 สรุปผลของการวิเคราะห์ค่าคงที่การแพร่กระจายสัญญาณในสภาวะแวดล้อมต่างๆ

จากการทดลองค่าความแรงสัญญาณของโหนดต่างๆ และที่ระยะ 1 เมตร ถึง 10 เมตรได้นำค่าดังกล่าวมาคำนวณในสูตร Path loss model โดยปรับเปลี่ยนค่า n ในช่วง $n = 1$ ถึง $n = 3$ โดยใช้ค่าความแรงสัญญาณอ้างอิงจากการทดลองและเปรียบเทียบกับทุกจุดค่าความแรงที่ทำการทดลองในตารางที่ 4.6 ถึงตารางที่ 4.9 ได้ผลการทดลองของค่ากำลังสองของความคลาดเคลื่อนของค่า n ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลการปรับเปลี่ยนค่า n กับค่า RMSE

จากรูปที่ 4.1 แสดงค่า RMSE เมื่อค่า $n = 1.6$ เป็นค่าที่ RMSE ที่น้อยที่สุด และ แตกต่างกั น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบแต่ละโหนดในค่า n ค่าเดียวกัน ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่าที่ $n = 1.6$ เพื่อแทนค่า ในการคำนวณ ในสมการของ Path loss model โดยได้ทำการเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีและ ปรับเปลี่ยนค่าตัวถ่วงน้ำหนัก จำนวน 10 ค่า

4.5 ผลการทดลองเมื่อใช้การควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อเป็นการประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมโดย ลักษณะการควบคุมแบบไร้สาย และทำการทดลองเก็บค่าความแรงทุกจุดพิกัด เช่นเดียวกับหัวข้อ 4.2

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองการทดลองเก็บค่าความแรงสัญญาณในแต่ละพิกัด โดยการควบคุมโดย ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่โหนดอ้างอิงที่1

พิกัด	ครั้งที่ 1 (dBm)	ครั้งที่ 2 (dBm)	ครั้งที่ 3 (dBm)	ครั้งที่ 4 (dBm)	ครั้งที่ 5 (dBm)	ครั้งที่ 6 (dBm)	ครั้งที่ 7 (dBm)	ครั้งที่ 8 (dBm)	ครั้งที่ 9 (dBm)	ครั้งที่ 10 (dBm)	เฉลี่ย (dBm)
(1,1)	-38	-38	-37	-35	-37	-37	-37	-37	-35	-36	-33
(1,2)	-45	-45	-49	-41	-43	-41	-41	-44	-42	-42	-43.3
(1,3)	-41	-40	-42	-40	-40	-39	-40	-40	-40	-40	-40.2

(1,4)	-46	-44	-44	-46	-43	-44	-44	-44	-44	-44	-44.2
(1,5)	-50	-50	-47	-49	-49	-47	-47	-47	-50	-49	-48.5
(1,6)	-48	-52	-53	-49	-47	-47	-47	-50	-51	-51	-49.5
(2,1)	-40	-40	-41	-42	-45	-40	-40	-40	-39	-40	-40.7
(2,2)	-44	-43	-44	-43	-43	-44	-44	-43	-43	-43	-43.4
(2,3)	-43	-43	-44	-40	-42	-41	-42	-42	-43	-42	-42.2
(2,4)	-44	-44	-46	-41	-44	-46	-42	-42	-43	-44	-43.1
(2,5)	-46	-46	-49	-48	-46	-49	-49	-49	-50	-49	-48.1
(2,6)	-50	-50	-48	-48	-48	-51	-50	-50	-46	-46	-48.7
(3,1)	-41	-40	-42	-38	-43	-45	-39	-40	-40	-41	-40.9
(3,2)	-43	-43	-41	-42	-40	-45	-44	-44	-43	-43	-42.8
(3,3)	-46	-46	-43	-44	-46	-43	-46	-46	-42	-42	-44.4
(3,4)	-43	-47	-44	-44	-43	-42	-44	-44	-42	-42	-43.5
(3,5)	-46	-43	-46	-45	-46	-43	-47	-44	-45	-45	-45
(3,6)	-51	-52	-60	-56	-52	-51	-53	-52	-52	-51	-53
(4,1)	-48	-47	-50	-46	-47	-46	-46	-46	-48	-48	-47.2
(4,2)	-45	-46	-46	-48	-45	-44	-44	-45	-46	-44	-45.3
(4,3)	-43	-43	-43	-47	-46	-43	-43	-43	-43	-42	-43.6
(4,4)	-46	-46	-46	-46	-44	-46	-42	-42	-43	-43	-44.4
(4,5)	-47	-47	-48	-52	-47	-47	-46	-44	-48	-46	-47.2
(4,6)	-52	-51	-50	-52	-52	-48	-49	-49	-48	-48	-49.9
(5,1)	-49	-46	-55	-46	-52	-49	-59	-57	-44	-44	-50.1
(5,2)	-49	-46	-52	-52	-48	-47	-52	-51	-51	-53	-50.1
(5,3)	-47	-51	-47	-53	-48	-46	-52	-50	-48	-49	-49.1
(5,4)	-59	-50	-61	-57	-49	-59	-50	-46	-47	-50	-52.8
(5,5)	-53	-54	-56	-52	-51	-46	-52	-52	-49	-49	-51.4
(5,6)	-61	-56	-52	-68	-68	-54	-55	-55	-60	-58	-58.4
(6,1)	-46	-50	-57	-53	-46	-48	-46	-45	-46	-47	-48.4
(6,2)	-49	-51	-51	-55	-52	-54	-49	-47	-50	-50	-50.8
(6,3)	-48	-46	-47	-50	-45	-47	-47	-47	-48	-47	-47.2
(6,4)	-52	-56	-48	-47	-50	-50	-50	-50	-49	-54	-50.6
(6,5)	-55	-59	-52	-57	-57	-52	-50	-50	-52	-51	-53.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(6,6)	-48	-54	-49	-61	-55	-49	-52	-51	-54	-54	-52.7
-------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-------

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองการทดลองเก็บค่าความแรงสัญญาณในแต่ละพิกัด โดยการควบคุมโดย
ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่โหนดอ้างอิงที่ 2

พิกัด	ครั้งที่ 1 (dBm)	ครั้งที่ 2 (dBm)	ครั้งที่ 3 (dBm)	ครั้งที่ 4 (dBm)	ครั้งที่ 5 (dBm)	ครั้งที่ 6 (dBm)	ครั้งที่ 7 (dBm)	ครั้งที่ 8 (dBm)	ครั้งที่ 9 (dBm)	ครั้งที่ 10 (dBm)	เฉลี่ย (dBm)
(1,1)	-50	-52	-45	-45	-52	-44	-53	-44	-46	-44	-47.5
(1,2)	-44	-45	-44	-44	-43	-43	-43	-43	-46	-46	-44.1
(1,3)	-41	-42	-41	-42	-54	-40	-40	-41	-42	-50	-43.3
(1,4)	-40	-39	-40	-39	-39	-54	-54	-54	-54	-42	-45.5
(1,5)	-38	-38	-65	-38	-36	-37	-37	-37	-37	-37	-39.9
(1,6)	-34	-35	-35	-38	-34	-34	-33	-32	-33	-33	-34.1
(2,1)	-51	-45	-45	-44	-44	-56	-45	-46	-46	-52	-47.4
(2,2)	-43	-44	-43	-42	-45	-43	-43	-43	-51	-45	-44.1
(2,3)	-40	-41	-41	-40	-42	-52	-41	-41	-41	-41	-42
(2,4)	-40	-40	-41	-39	-39	-39	-39	-53	-40	-40	-41
(2,5)	-40	-42	-41	-40	-40	-38	-38	-38	-37	-38	-39.2
(2,6)	-40	-67	-42	-39	-41	-40	-38	-38	-39	-39	-42.3
(3,1)	-46	-47	-45	-44	-47	-55	-45	-45	-56	-46	-47.6
(3,2)	-46	-46	-47	-46	-47	-45	-47	-46	-46	-45	-46.1
(3,3)	-46	-44	-46	-54	-44	-42	-43	-54	-42	-42	-45.7
(3,4)	-40	-46	-40	-42	-45	-41	-40	-40	-40	-40	-41.4
(3,5)	-40	-41	-39	-42	-53	-40	-41	-41	-40	-40	-41.7
(3,6)	-40	-43	-41	-52	-42	-43	-42	-42	-40	-43	-42.8
(4,1)	-47	-50	-46	-58	-52	-52	-55	-54	-48	-46	-50.8
(4,2)	-49	-46	-46	-50	-47	-46	-47	-47	-53	-64	-49.5
(4,3)	-44	-44	-44	-44	-44	-44	-53	-45	-45	-44	-45.1
(4,4)	-44	-44	-44	-43	-45	-44	-42	-42	-53	-42	-44.3
(4,5)	-46	-52	-41	-42	-42	-43	-42	-43	-42	-43	-43.6
(4,6)	-43	-42	-44	-56	-45	-45	-55	-43	-43	-43	-45.9

(5,1)	-46	-53	-47	-52	-49	-53	-53	-48	-54	-53	-50.8
(5,2)	-47	-49	-49	-46	-49	-47	-46	-46	-46	-47	-47.2
(5,3)	-46	-46	-47	-48	-48	-46	-47	-46	-48	-49	-46.9
(5,4)	-46	-46	-44	-47	-46	-44	-46	-46	-46	-46	-45.7
(5,5)	-46	-46	-47	-43	-43	-50	-48	-48	-49	-49	-46.9
(5,6)	-49	-42	-48	-44	-44	-47	-51	-51	-44	-44	-46.4
(6,1)	-49	-49	-49	-47	-57	-47	-53	-52	-55	-47	-50.5
(6,2)	-47	-47	-51	-53	-53	-54	-53	-53	-51	-51	-51.3
(6,3)	-52	-49	-56	-47	-47	-42	-48	-48	-48	-48	-48.5
(6,4)	-46	-46	-47	-52	-51	-44	-44	-46	-55	-44	-47.5
(6,5)	-46	-45	-45	-49	-47	-45	-73	-46	-46	-65	-50.7
(6,6)	-43	-45	-44	-46	-46	-52	-46	-46	-65	-47	-48

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองการทดลองเก็บค่าความแรงสัญญาณในแต่ละพิกัด โดยการควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่โหนดอ้างอิงที่ 3

พิกัด	ครั้งที่ 1 (dBm)	ครั้งที่ 2 (dBm)	ครั้งที่ 3 (dBm)	ครั้งที่ 4 (dBm)	ครั้งที่ 5 (dBm)	ครั้งที่ 6 (dBm)	ครั้งที่ 7 (dBm)	ครั้งที่ 8 (dBm)	ครั้งที่ 9 (dBm)	ครั้งที่ 10 (dBm)	เฉลี่ย (dBm)
(1,1)	-47	-50	-46	-52	-60	-56	-54	-55	-52	-52	-52.4
(1,2)	-46	-46	-46	-44	-43	-48	-49	-49	-57	-45	-47.3
(1,3)	-53	-44	-43	-49	-46	-43	-43	-56	-46	-44	-46.7
(1,4)	-51	-44	-43	-50	-46	-44	-45	-45	-53	-50	-47.1
(1,5)	-47	-50	-49	-49	-50	-53	-52	-53	-48	-48	-49.9
(1,6)	-52	-50	-51	-48	-52	-54	-52	-52	-50	-48	-49.9
(2,1)	-46	-54	-46	-44	-45	-48	-49	-47	-48	-48	-47.5
(2,2)	-44	-43	-53	-40	-42	-43	-51	-44	-44	-44	-44.8
(2,3)	-53	-51	-46	-53	-43	-43	-45	-47	-47	-47	-47.8
(2,4)	-67	-51	-51	-58	-44	-45	-52	-52	-48	-48	-51.6
(2,5)	-51	-59	-49	-47	-47	-48	-50	-49	-49	-48	-49.7
(2,6)	-53	-52	-52	-52	-53	-52	-52	-52	-50	-49	-51.7
(3,1)	-42	-41	-46	-52	-43	-42	-40	-40	-43	-43	-43.2

(3,2)	-43	-42	-43	-45	-44	-54	-41	-41	-41	-41	-43.5
(3,3)	-43	-44	-52	-44	-43	-44	-42	-43	-41	-41	-43.7
(3,4)	-45	-46	-43	-42	-50	-44	-46	-44	-51	-41	-45.2
(3,5)	-48	-72	-46	-47	-46	-46	-46	-46	-46	-47	-49
(3,6)	-47	-48	-45	-48	-50	-47	-48	-48	-45	-45	-47.1
(4,1)	-38	-53	-38	-41	-38	-37	-38	-54	-39	-39	-41.5
(4,2)	-40	-42	-42	-40	-41	-34	-38	-38	-39	-40	-41.2
(4,3)	-55	-41	-42	-41	-38	-53	-40	-58	-40	-40	-44.8
(4,4)	-47	-47	-47	-44	-47	-46	-42	-56	-42	-42	-46
(4,5)	-49	-49	-47	-46	-48	-45	-44	-43	-42	-42	-45.5
(4,6)	-56	-50	-54	-49	-48	-52	-55	-54	-56	-52	-52.6
(5,1)	-40	-36	-39	-39	-40	-38	-38	-38	-37	-36	-38.1
(5,2)	-39	-41	-39	-38	-39	-39	-39	-39	-40	-40	-39.3
(5,3)	-42	-43	-42	-42	-42	-43	-52	-40	-40	-40	-42.6
(5,4)	-44	-44	-47	-42	-42	-41	-40	-41	-41	-41	-41.7
(5,5)	-46	-46	-49	-46	-48	-49	-44	-57	-47	-47	-47.9
(5,6)	-50	-49	-46	-45	-58	-46	-60	-46	-46	-45	-49.1
(6,1)	-38	-37	-37	-58	-35	-35	-33	-52	-33	-32	-39
(6,2)	-42	-42	-40	-40	-39	-43	-36	-51	-35	-35	-40.3
(6,3)	-44	-64	-42	-40	-43	-42	-40	-40	-40	-40	-43.5
(6,4)	-52	-43	-42	-44	-43	-43	-43	-56	-43	-44	-45.3
(6,5)	-44	-43	-44	-43	-47	-42	-45	-77	-44	-44	-47.3
(6,6)	-46	-46	-47	-49	-47	-46	-45	-45	-44	-43	-45.8

ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองการทดลองเก็บค่าความแรงสัญญาณในแต่ละพิกัด โดยการควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่หนดอ้างอิงที่ 4

พิกัด	ครั้งที่ 1 (dBm)	ครั้งที่ 2 (dBm)	ครั้งที่ 3 (dBm)	ครั้งที่ 4 (dBm)	ครั้งที่ 5 (dBm)	ครั้งที่ 6 (dBm)	ครั้งที่ 7 (dBm)	ครั้งที่ 8 (dBm)	ครั้งที่ 9 (dBm)	ครั้งที่ 10 (dBm)	เฉลี่ย (dBm)
(1,1)	-53	-52	-49	-47	-54	-56	-53	-54	-56	-46	-52
(1,2)	-42	-55	-57	-46	-42	-45	-45	-45	-45	-47	-46.9

(1,3)	-48	-44	-45	-46	-47	-57	-47	-46	-50	-46	-47.6
(1,4)	-58	-46	-46	-48	-47	-45	-45	-45	-47	-49	-47.6
(1,5)	-42	-42	-42	-43	-52	-42	-42	-42	-43	-43	-43.3
(1,6)	-41	-41	-41	-43	-58	-44	-45	-47	-33	-50	-44.3
(2,1)	-43	-49	-46	-47	-47	-52	-52	-49	-49	-48	-48.2
(2,2)	-48	-43	-46	-46	-53	-47	-46	-46	-46	-46	-46.7
(2,3)	-46	-54	-57	-46	-52	-56	-58	-58	-51	-56	-53.4
(2,4)	-43	-45	-59	-55	-47	-50	-45	-45	-46	-46	-48.1
(2,5)	-43	-41	-42	-43	-44	-50	-44	-44	-44	-44	-43.9
(2,6)	-46	-47	-47	-43	-46	-56	-46	-58	-47	-47	-48.3
(3,1)	-48	-46	-45	-45	-46	-47	-58	-58	-44	-45	-48.2
(3,2)	-42	-41	-41	-41	-42	-42	-43	-43	-43	-52	-43
(3,3)	-45	-43	-42	-43	-44	-44	-43	-44	-44	-56	-44.7
(3,4)	-44	-42	-43	-42	-43	-44	-43	-43	-43	-43	-43
(3,5)	-38	-38	-39	-52	-40	-38	-40	-40	-40	-40	-40.5
(3,6)	-39	-40	-41	-40	-42	-40	-39	-39	-55	-40	-41.5
(4,1)	-46	-41	-66	-48	-59	-45	-46	-46	-46	-45	-48.8
(4,2)	-42	-44	-43	-45	-42	-56	-45	-45	-44	-43	-44.9
(4,3)	-40	-40	-40	-53	-41	-41	-41	-42	-58	-42	-43.8
(4,4)	-41	-64	-42	-41	-43	-43	-41	-41	-41	-41	-43.8
(4,5)	-39	-40	-37	-40	-52	-39	-52	-41	-38	-38	-41.6
(4,6)	-37	-37	-42	-39	-37	-42	-41	-42	-42	-44	-40.3
(5,1)	-55	-44	-44	-45	-43	-42	-45	-44	-46	-46	-45.4
(5,2)	-41	-42	-43	-40	-41	-44	-43	-43	-41	-41	-41.9
(5,3)	-40	-38	-53	-40	-40	-40	-43	-43	-56	-42	-43.5
(5,4)	-40	-37	-39	-38	-39	-39	-43	-42	-56	-55	-42.8
(5,5)	-38	-39	-37	-39	-40	-38	-54	-39	-39	-40	-40.3
(5,6)	-54	-40	-39	-40	-40	-41	-38	-38	-38	-39	-40.7
(6,1)	-44	-56	-43	-44	-45	-44	-57	-57	-56	-55	-50.1
(6,2)	-44	-44	-44	-44	-61	-44	-42	-42	-46	-46	-45.7
(6,3)	-40	-38	-40	-59	-41	-39	-53	-42	-42	-42	-43.6
(6,4)	-38	-38	-38	-37	-37	-38	-36	-38	-37	-37	-37.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(6,5)	-36	-36	-56	-37	-36	-37	-36	-36	-36	-36	-38.2
(6,6)	-35	-35	-35	-35	-34	-36	-35	-35	-35	-36	-35.1

4.6 ผลการทดลองการปรับเปลี่ยนค่าตัวถ่วงน้ำหนัก

ในตารางที่ 4.14 ถึงตารางที่ 4.18 ใช้ค่าคงที่การแพร่กระจาย ทำการทดลองโดยนำผลค่าความแรงที่ได้ในตารางที่ 4.10 ถึงตารางที่ 4.13 มาคำนวณหาค่าระยะทางผิดพลาดเมื่อเทียบกับพิกัดจริงโดยใช้ค่าคงที่การแพร่กระจายสัญญาณในสภาวะแวดล้อมต่างๆ หรือ ค่า n ที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 4.14 พิกัดของการระบุตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักหรือค่า g นั้นมีค่า 1 และ 2 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $n = 1.6$

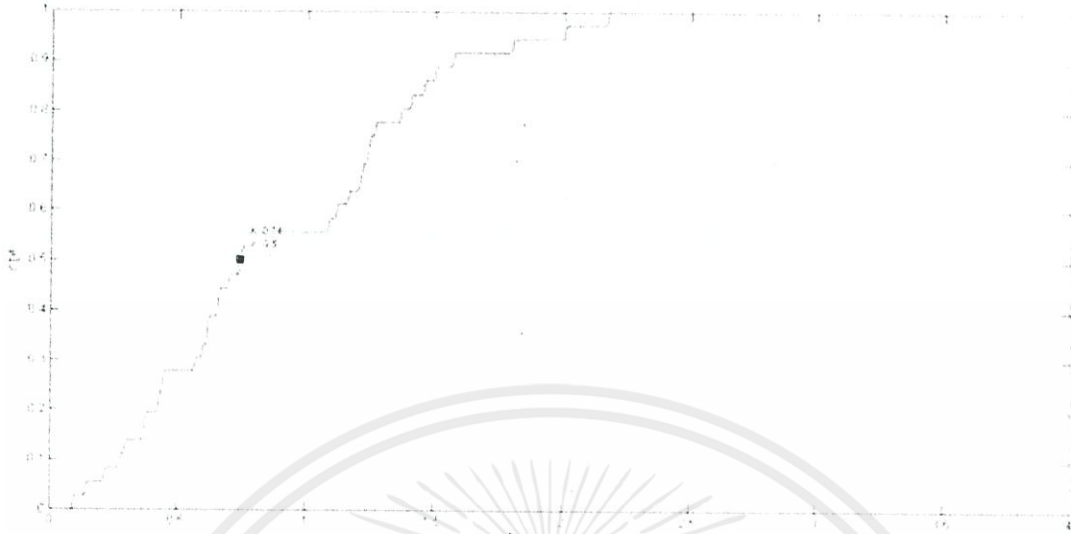
พิกัด	$g=1$	ค่าระยะทาง ผิดพลาด(m)	$g=2$	ค่าระยะทาง ผิดพลาด(m)
(1,1)	(0.7300,1.0141)	0.2704	(0.0578,0.1202)	1.2891
(1,2)	(3.0350,3.0350)	2.2831	(2.6501,2.6501)	1.7735
(1,3)	(2.0464,2.9000)	1.0512	(0.9870,2.2065)	0.7936
(1,4)	(2.8640,3.1016)	2.0692	(2.2456,2.6736)	1.8196
(1,5)	(2.8725,5.3443)	1.9039	(2.1543,6.4085)	1.8211
(1,6)	(1.5917,6.0826)	0.5974	(0.1415,6.8859)	1.2336
(2,1)	(2.3756,2.5595)	1.6041	(1.2924,1.5079)	0.871
(2,2)	(2.7904,3.0522)	1.316	(2.3398,2.8392)	0.9054
(2,3)	(1.6708,3.2118)	0.3914	(0.6937,3.2861)	1.3373
(2,4)	(1.7990,4.3048)	0.3651	(0.7692,4.9671)	1.5703
(2,5)	(0.0052,7.0000)	2.8248	(1.4437,6.3944)	1.5013
(2,6)	(3.1471,2.0613)	4.1023	(1.1982,6.0295)	0.8023
(3,1)	(3.1471,2.0013)	1.012	(2.6625,1.0207)	0.3381
(3,2)	(3.7156,3.2844)	1.4703	(3.8622,3.1378)	1.4276
(3,3)	(3.6124,3.1282)	0.6257	(3.6982,2.7732)	1.0418
(3,4)	(3.1016,4.1360)	0.1698	(2.6736,4.7544)	0.822
(3,5)	(3.3571,4.7592)	0.4307	(3.5547,5.6549)	0.8582
(3,6)	(4.0687,5.1057)	1.3935	(4.2677,6.0365)	1.2682
(4,1)	(4.4950,2.1040)	1.2099	(5.4885,1.0089)	1.4885

(4,2)	(4.7208,3.1068)	1.3208	(5.5518,3.0535)	1.8756
(4,3)	(3.5000,3.5000)	0.7071	(3.5000,3.5000)	0.7071
(4,4)	(3.2666,3.7334)	0.7804	(3.0700,3.9300)	0.9326
(4,5)	(3.9070,0.3760)	4.6249	(4.3544,5.1691)	0.3927
(4,6)	(4.4560,5.4897)	0.6844	(5.6974,6.5551)	1.7859
(5,1)	(5.3186,2.9907)	2.016	(6.3636,2.0124)	1.6983
(5,2)	(5.3182,3.1135)	1.1581	(6.1636,2.3352)	1.2109
(5,3)	(4.5831,3.5081)	0.6572	(5.4588,3.3258)	0.5627
(5,4)	(4.9404,3.7510)	0.256	(5.7715,3.5263)	0.9053
(5,5)	(3.5000,3.5000)	2.1213	(3.5000,3.5000)	2.1213
(5,6)	(3.1148,3.5189)	3.1161	(2.8832,3.2426)	3.4762
(6,1)	(5.2073,1.6554)	1.0286	(6.8709,0.0973)	1.2543
(6,2)	(4.8575,2.1425)	1.1514	(5.8983,1.1017)	0.904
(6,3)	(4.0149,2.9851)	1.9852	(4.3248,2.6752)	1.7064
(6,4)	(3.6539,3.3461)	2.4355	(3.5945,3.4055)	2.4779
(6,5)	(3.6728,3.3272)	2.866	(3.5855,3.4145)	2.8885
(6,6)	(3.5762,3.4238)	3.5372	(3.5313,3.4687)	3.5358



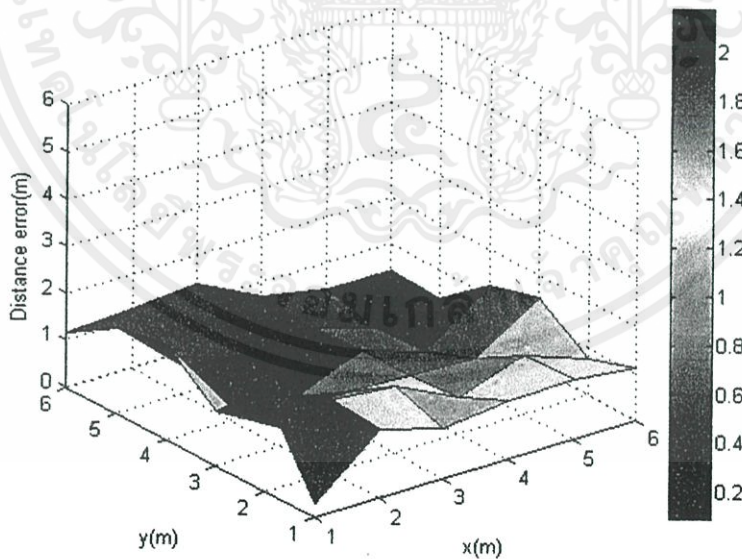
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม เมื่อค่า $n = 1.6$ และ ค่า $g = 1$



รูปที่ 4.2 ค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม

จากรูปที่ 4.2 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อใช้ค่า $n = 1.6$ และ $g = 1$ ซึ่งจากตำแหน่งกราฟที่ 0.5 ในแกน y หมายถึง ค่ามัธยฐานนั่นเอง โดยแกน x นั้นคือค่าระยะทางผิดพลาด จากกราฟสามารถแสดงได้ว่า ค่ามัธยฐานของระยะทางที่ผิดพลาดของกรณีดังกล่าวได้ค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 0.74 เมตร

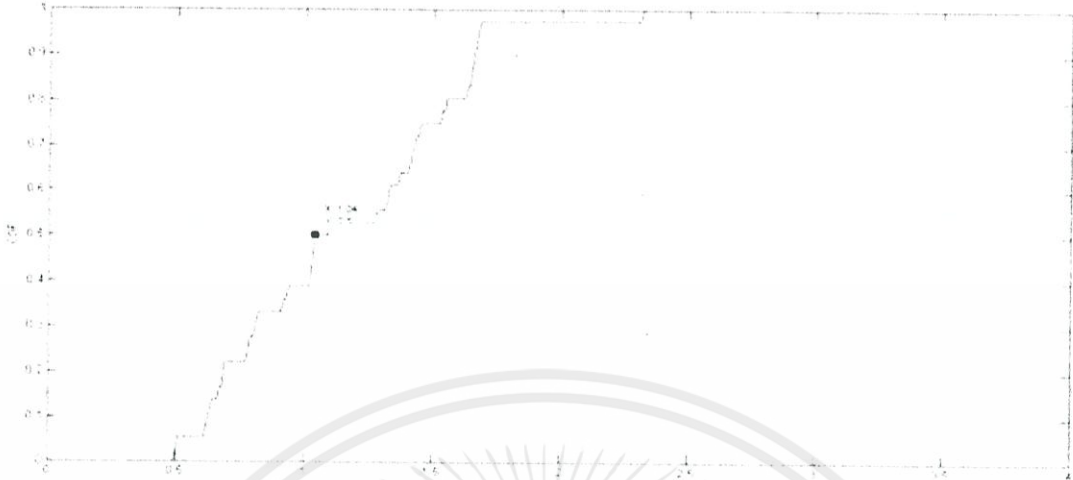


รูปที่ 4.3 ค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

จากรูปที่ 4.3 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดในแต่ละตำแหน่งในโมเดลว่า แต่ละตำแหน่งนั้นทำให้เกิดค่าระยะทางผิดพลาดเป็นเท่าใด โดยแสดงในรูปของกราฟพื้นผิว

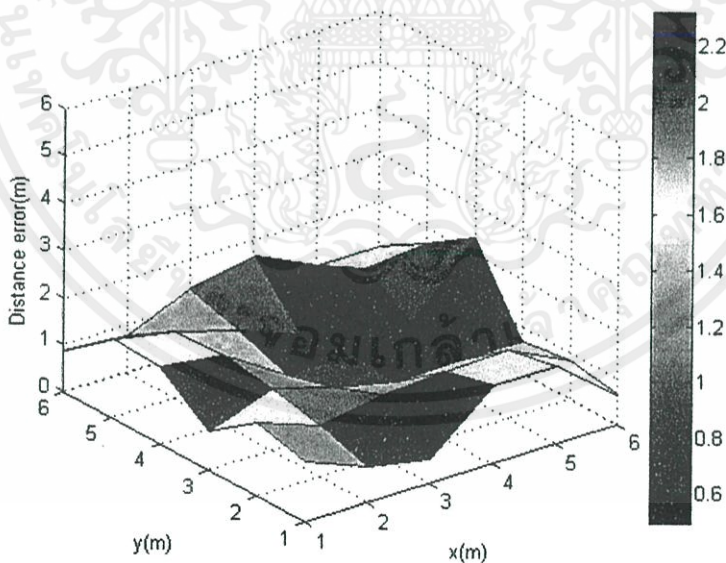
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม เมื่อค่า $n = 1.6$ และ ค่า $g = 2$



รูปที่ 4.4 ค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม

จากรูปที่ 4.4 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อใช้ค่า $n = 1.6$ และ $g = 2$ ซึ่งจากตำแหน่งกราฟที่ 0.5 ในแกน y หมายถึง ค่ามัธยฐานนั่นเอง โดยแกน x นั่นคือค่าระยะทางผิดพลาด จากกราฟสามารถแสดงได้ว่า ค่ามัธยฐานของระยะทางที่ผิดพลาดของกรณีดังกล่าวได้ค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 1.04 เมตร



รูปที่ 4.5 ค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

จากรูปที่ 4.5 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดในแต่ละตำแหน่งในโมเดลว่า แต่ละตำแหน่งนั้นทำให้เกิดค่าระยะทางผิดพลาดเป็นเท่าใด โดยแสดงในรูปของกราฟพื้นผิว

ตารางที่ 4.15 พิกัดของกระบอกตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักหรือค่า g นั้นมีค่า 3 และ 4 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $n = 1.6$

พิกัด	$g=3$	ค่าระยะทาง ผิดพลาด(m)	$g=4$	ค่าระยะทาง ผิดพลาด(m)
(1,1)	(0.0038,0.0127)	1.4026	(0.0002,0.0014)	1.4131
(1,2)	(2.3381,2.3381)	1.3802	(0.7944,2.6308)	0.6635
(1,3)	(0.4152,1.5790)	1.5366	(0.1613,1.0906)	2.0855
(1,4)	(1.6877,2.2402)	1.8894	(1.2200,1.8278)	2.1833
(1,5)	(1.5372,6.8187)	1.8964	(1.0677,6.9482)	1.9494
(1,6)	(0.0964,6.9886)	1.3393	(0.0225,6.9999)	1.3983
(2,1)	(0.5815,0.7385)	1.4424	(0.2338,0.3241)	1.8911
(2,2)	(1.8661,2.5748)	0.5902	(1.4726,2.3433)	0.6293
(2,3)	(0.2810,3.3886)	1.7624	(6.6115,3.4486)	4.6332
(2,4)	(0.3016,5.5145)	2.2756	(0.1144,5.9500)	2.7126
(2,5)	(0.7591,6.8215)	2.204	(6.3818,6.9513)	4.7966
(2,6)	(0.5438,6.6181)	1.582	(0.2313,6.8607)	1.967
(3,1)	(2.1676,0.4488)	0.9984	(1.7296,0.1842)	1.5098
(3,2)	(3.9496,3.0504)	1.416	(3.9911,3.0089)	1.4143
(3,3)	(3.7595,2.4413)	0.9429	(3.7992,2.1365)	1.1766
(3,4)	(2.2402,5.3123)	1.5164	(1.8278,5.7800)	2.1313
(3,5)	(3.8849,6.2112)	1.5	(4.2276,6.5396)	1.9691
(3,6)	(4.4027,6.5100)	1.4925	(4.5630,6.7494)	1.7334
(4,1)	(6.1963,0.4091)	2.2744	(6.5980,0.1518)	2.733
(4,2)	(6.0725,3.1323)	2.3616	(6.3990,3.2315)	2.6966
(4,3)	(3.5000,3.5000)	0.7071	(3.5000,3.5000)	0.7071
(4,4)	(3.9085,4.0915)	0.1294	(2.7783,4.2217)	1.2417
(4,5)	(4.8075,5.8028)	1.1386	(5.2293,6.2573)	1.7584
(4,6)	(6.4338,6.8911)	2.5918	(6.7648,6.9748)	2.9316
(5,1)	(6.7853,1.2066)	1.7972	(6.9307,0.6931)	1.9549
(5,2)	(6.7854,1.6271)	1.8239	(6.9307,1.1052)	2.128
(5,3)	(5.0406,6.4111)	3.4114	(6.4561,2.7376)	1.4796

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

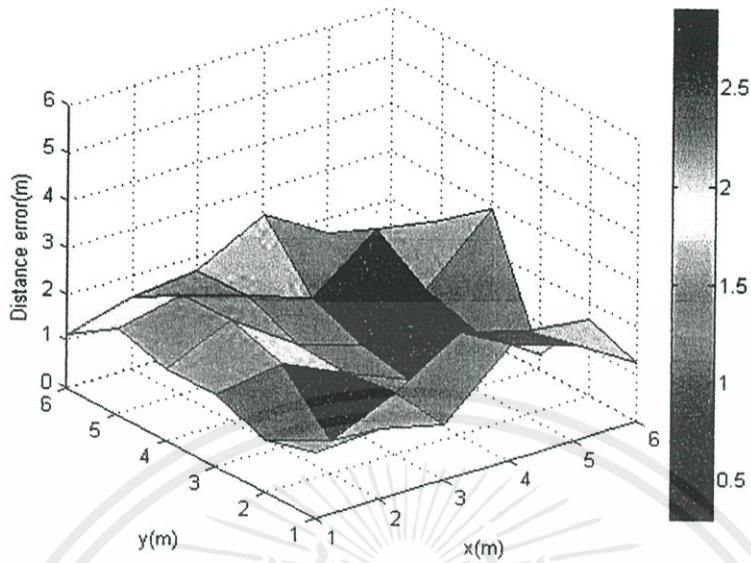
(5,4)	(6.2730,3.1461)	1.5329	(6.5664,2.7838)	1.9831
(5,5)	(3.5000,3.5000)	2.1213	(3.5000,3.5000)	2.1213
(5,6)	(2.6875,2.9039)	3.8644	(2.4855,2.5993)	4.2294
(6,1)	(6.8709,0.0973)	1.2543	(6.9710,0.0193)	1.3801
(6,2)	(6.4946,0.5054)	1.5743	(6.7805,0.2195)	1.9441
(6,3)	(4.4937,2.5063)	1.5851	(4.5808,2.4192)	1.5334
(6,4)	(3.5314,3.4606)	2.5268	(3.5143,3.4857)	2.5383
(6,5)	(3.5292,3.4708)	2.9057	(3.5088,3.4912)	2.9125
(6,6)	(3.5087,3.4913)	3.5356	(3.5021,3.4979)	3.5355

ผลการทดลองโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม เมื่อค่า $n = 1.6$ และ ค่า $g = 3$



รูปที่ 4.6 ค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม

จากรูปที่ 4.6 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อใช้ค่า $n = 1.6$ และ $g = 3$ ซึ่งจากตำแหน่งกราฟที่ 0.5 ในแกน y หมายถึง ค่ามัธยฐานนั่นเอง โดยแกน x นั้นคือค่าระยะทางผิดพลาด จากกราฟสามารถแสดงได้ว่า ค่ามัธยฐานของระยะทางที่ผิดพลาดของกรณีดังกล่าวได้ค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 1.52 เมตร



รูปที่ 4.7 ค่าระยะทางผิดพลาดในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

จากรูปที่ 4.7 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดในแต่ละตำแหน่งในโมเดลว่า แต่ละตำแหน่งนั้นทำให้เกิดค่าระยะทางผิดพลาดเป็นเท่าใด โดยแสดงในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

ผลการทดลองโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม เมื่อค่า $n = 1.6$ และ ค่า $g = 4$

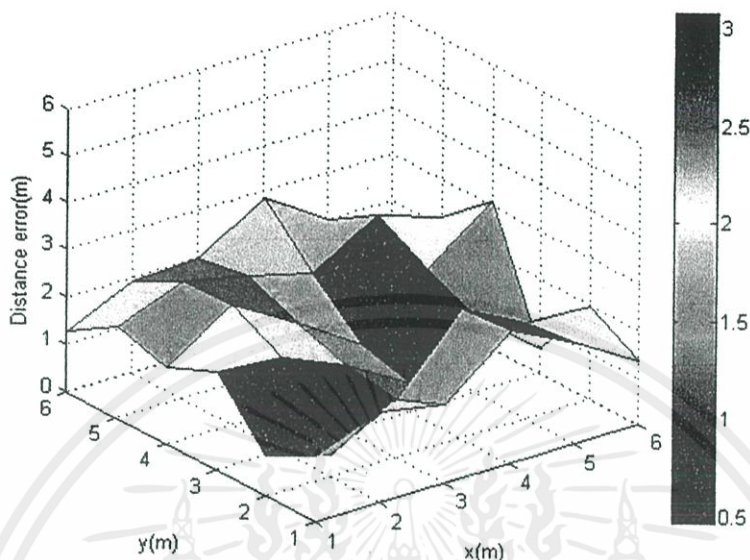


รูปที่ 4.8 ค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม

จากรูปที่ 4.8 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อใช้ค่า $n = 1.6$ และ $g = 4$ ซึ่งจากตำแหน่งกราฟที่ 0.5 ในแกน y หมายถึง ค่ามัธยฐานนั่นเอง โดยแกน x นั้นคือค่าระยะทางผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟสามารถแสดงได้ว่า ค่ามัธยฐานของระยะทางที่ผิดพลาดของกรณีดังกล่าวได้ค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 1.94 เมตร



รูปที่ 4.9 ค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

จากรูปที่ 4.9 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดในแต่ละตำแหน่งในโมเดลว่า แต่ละตำแหน่งนั้นทำให้เกิดค่าระยะทางผิดพลาดเป็นเท่าใด โดยแสดงในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

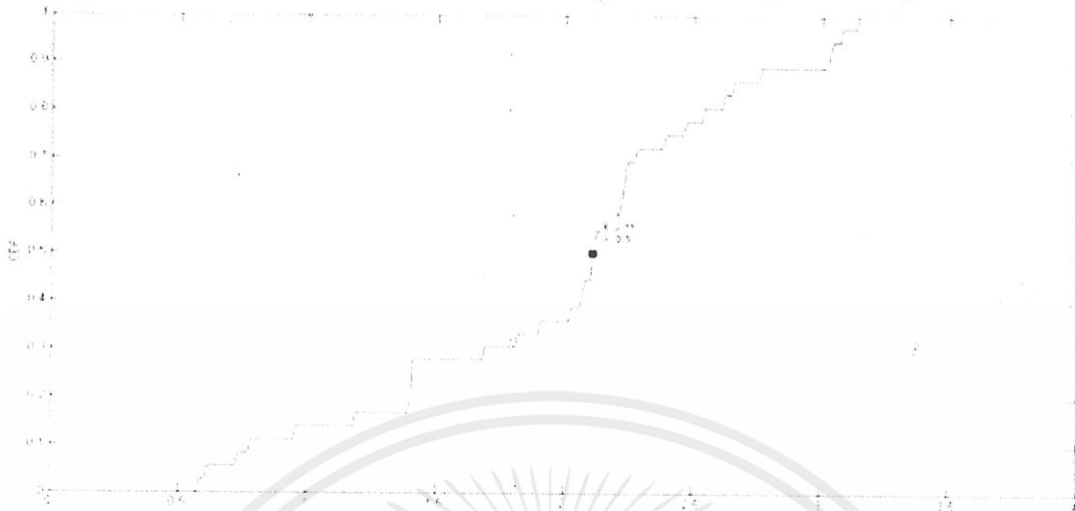
ตารางที่ 4.16 พิกัดของกระบอกตำแหน่งตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักหรือค่า g นั้นมีค่า 5 และ 6 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $n = 1.6$

พิกัด	$g=5$	ค่าระยะทางผิดพลาด(m)	$g=6$	ค่าระยะทางผิดพลาด(m)
(1,1)	(0,0.0002)	1.4141	(0,0)	1.4142
(1,2)	(1.8730,1.8730)	0.8822	(1.6924,1.6924)	0.7577
(1,3)	0.0601,0.7381)	2.4494	(0.0219,0.4933)	2.6908
(1,4)	(0.8532,1.4576)	2.5466	(0.8532,1.4576)	2.5466
(1,5)	(0.7279,6.9857)	2.0043	(0.4892,6.9961)	2.0604
(1,6)	(0.0053,6.9999)	1.4104	(0.0012,7.0000)	1.4134
(2,1)	(0.0886,0.1352)	2.0979	(0.0329,0.0554)	2.1821
(2,2)	(1.1535,2.1358)	0.8573	(0.8908,1.9454)	1.1105
(2,3)	(0.0476,3.4775)	2.001	(0.0199,3.4904)	2.0399

(2,4)	(0.0428,6.2775)	3.0029	(0.0159,6.5123)	3.2013
(2,5)	(0.1887,6.9870)	2.6887	(0.0926,6.9966)	2.7613
(2,6)	(0.0966,6.9503)	2.1274	(0.0403,6.9823)	2.1921
(3,1)	(1.3642,0.0727)	1.8804	(1.0667,0.0281)	2.1638
(3,2)	(3.9960,3.0004)	1.4117	(3.9860,3.0104)	1.4118
(3,3)	(3.8210,1.8607)	1.4043	(3.8283,1.6144)	1.6143
(3,4)	(1.4506,6.1468)	2.6475	(1.1415,6.4190)	3.0505
(3,5)	(4.5411,6.7391)	2.3237	(4.8181,6.8430)	2.5889
(3,6)	(4.7479,6.8718)	1.9533	(4.9427,6.9346)	2.1558
(4,1)	(6.8045,0.0543)	2.9597	(6.9052,0.0192)	3.0663
(4,2)	(6.6080,3.3145)	2.9205	(6.7438,3.3753)	3.0692
(4,3)	(3.5000,3.5000)	0.7071	(3.5000,3.5000)	0.7071
(4,4)	(2.6752,4.3248)	1.364	(2.5945,4.4055)	1.4628
(4,5)	(5.5980,6.5568)	2.5823	(5.9057,6.7426)	2.5823
(4,6)	(6.9028,6.9942)	3.0683	(6.9596,6.9987)	3.1236
(5,1)	(6.9779,0.3924)	2.0691	(6.9930,0.2211)	2.1398
(5,2)	(6.9779,0.7422)	2.344	(6.9930,0.4943)	2.4978
(5,3)	(6.6871,2.4429)	1.7767	(6.8213,2.1750)	1.9994
(5,4)	(6.7416,2.4628)	2.323	(6.8468,2.1832)	2.5906
(5,5)	(3.5000,3.5000)	2.1213	(3.5000,3.5000)	2.1213
(5,6)	(2.2763,2.3319)	4.5688	(2.0696,2.0951)	4.8822
(6,1)	(6.9935,0.0038)	1.4069	(6.9985,0.0007)	1.4127
(6,2)	(6.9066,0.0934)	2.1111	(6.9606,0.0394)	2.1833
(6,3)	(4.6245,2.3755)	1.5106	(4.6460,2.3540)	1.5002
(6,4)	(3.5049,3.4951)	2.5457	(3.5016,3.4984)	2.5483
(6,5)	(3.5025,3.4975)	2.9146	(3.5007,3.4453)	2.9434
(6,6)	(3.5005,3.4995)	3.5355	(3.5001,3.4999)	3.5355

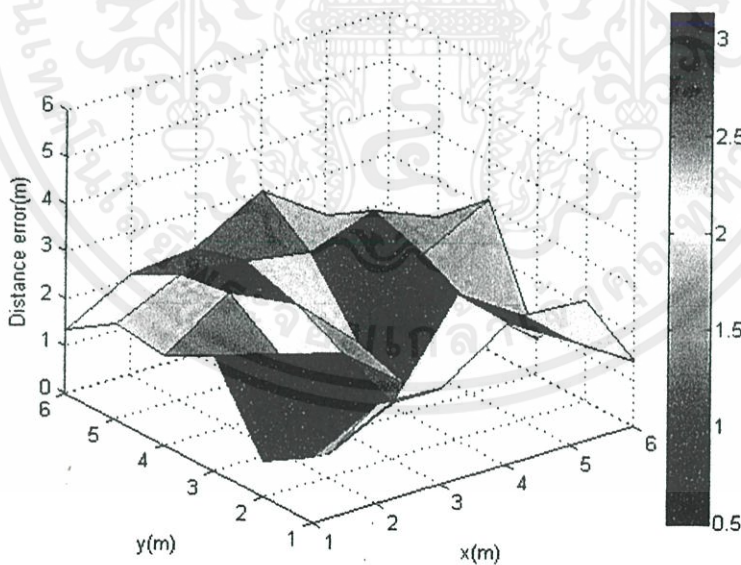
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม เมื่อค่า $n = 1.6$ และ ค่า $g = 5$



รูปที่ 4.10 ค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม

จากรูปที่ 4.10 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อใช้ค่า $n = 1.6$ และ $g = 5$ ซึ่งจากตำแหน่งกราฟที่ 0.5 ในแกน y หมายถึง ค่ามัธยฐานนั่นเอง โดยแกน x นั้นคือค่าระยะทางผิดพลาด จากกราฟสามารถแสดงได้ว่า ค่ามัธยฐานของระยะทางที่ผิดพลาดของกรณีดังกล่าวได้ค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 2.11 เมตร



รูปที่ 4.11 ค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

จากรูปที่ 4.11 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดในแต่ละตำแหน่งในโมเดลว่า แต่ละตำแหน่งนั้นทำให้เกิดค่าระยะทางผิดพลาดเป็นเท่าใด โดยแสดงในรูปของกราฟพื้นผิว

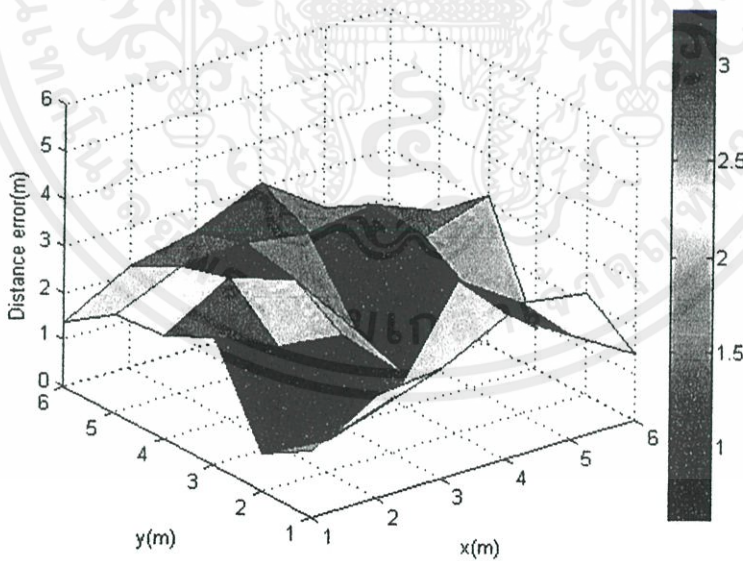
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม เมื่อค่า $n = 1.6$ และ ค่า $g = 6$



รูปที่ 4.12 ค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม

จากรูปที่ 4.12 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อใช้ค่า $n = 1.6$ และ $g = 6$ ซึ่งจากตำแหน่งกราฟที่ 0.5 ในแกน y หมายถึง ค่ามัธยฐานนั่นเอง โดยแกน x นั่นคือค่าระยะทางผิดพลาด จากกราฟสามารถแสดงได้ว่า ค่ามัธยฐานของระยะทางที่ผิดพลาดของกรณีดังกล่าวได้ค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 2.19 เมตร



รูปที่ 4.13 ค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

จากรูปที่ 4.13 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดในแต่ละตำแหน่งในโมเดลว่า แต่ละตำแหน่งนั้นทำให้เกิดค่าระยะทางผิดพลาดเป็นเท่าใด โดยแสดงในรูปของกราฟพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 พิกัดของการระบุตำแหน่งตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักหรือค่า g นั้นมีค่า 7 และ 8 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $n = 1.6$

พิกัด	$g=7$	ค่าระยะทาง ผิดพลาด(m)	$g=8$	ค่าระยะทาง ผิดพลาด(m)
(1,1)	(0,0)	1.4142	(0,0)	1.4142
(1,2)	(1.5335,1.5335)	0.7087	(1.3904,1.3904)	0.7239
(1,3)	(0.0079,0.3268)	2.8514	(0.0028,0.2152)	2.958
(1,4)	(0.3879,0.8817)	3.1778	(0.2552,0.6745)	3.4079
(1,5)	(0.3253,6.9989)	2.1097	(0.2146,6.9997)	2.1484
(1,6)	(0.0003,7.0000)	1.414	(0.0001,7.0000)	1.4141
(2,1)	(0.0121,0.0226)	2.2152	(0.0044,0.0092)	2.228
(2,2)	(0.6977,1.7679)	1.3228	(0.5399,1.6011)	1.5136
(2,3)	(0.0083,3.4959)	1.1088	(0.5399,1.6016)	2.0217
(2,4)	(0.0059,6.6751)	2.8538	(0.0022,6.7755)	3.4197
(2,5)	(0.6453,6.9991)	2.4149	(0.0221,6.9998)	2.8127
(2,6)	(0.0168,6.9937)	2.2182	(0.0071,6.9977)	2.2287
(3,1)	(0.8277,0.0167)	2.3845	(0.8227,0.0107)	2.3915
(3,2)	(3.9583,3.0411)	1.415	(3.9243,3.0757)	1.4183
(3,3)	(3.8247,1.3967)	1.803	(3.9243,1.0371)	2.1696
(3,4)	(0.8817,6.6121)	3.3631	(0.6745,6.7448)	3.5975
(3,5)	(5.0621,6.9084)	2.8096	(5.2783,6.9467)	2.9967
(3,6)	(5.1364,6.9668)	2.345	(5.3222,6.9832)	2.5218
(4,1)	(6.9541,0.0068)	3.1165	(6.9777,0.0024)	3.1404
(4,2)	(6.8326,3.4174)	3.1674	(6.8907,3.4457)	3.2321
(4,3)	(3.5000,3.5000)	0.7071	(3.5000,3.5000)	0.7071
(4,4)	(2.5319,4.4681)	1.5409	(2.4839,4.5161)	1.6015
(4,5)	(6.1544,6.8532)	2.8418	(6.3513,6.9272)	3.0402
(4,6)	(6.9831,6.9970)	3.1453	(6.9929,6.9999)	3.1555
(5,1)	(6.9978,0.1249)	2.1811	(6.9993,0.0700)	2.205
(5,2)	(6.9978,0.3271)	2.6057	(6.9993,0.2152)	2.6801
(5,3)	(6.8982,1.9351)	2.1765	(6.9420,1.7206)	2.3256

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

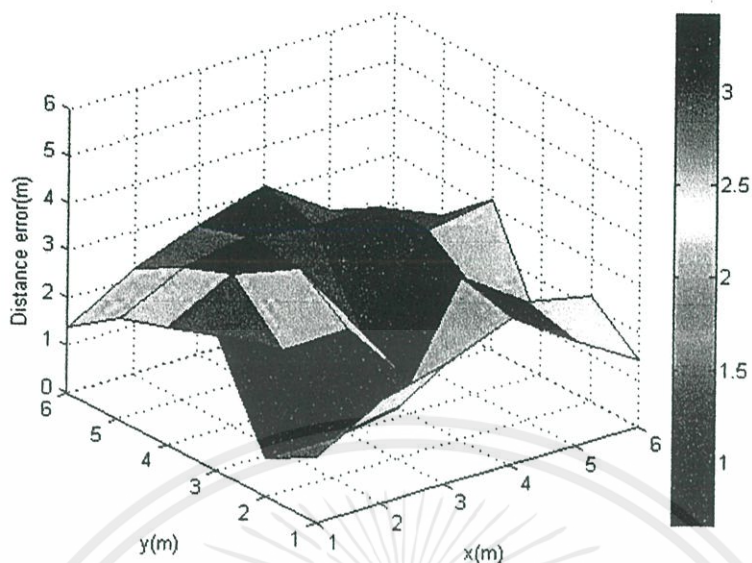
(5,4)	(6.9098,1.9383)	2.8103	(6.9472,1.7219)	2.9969
(5,5)	(3.5000,3.5000)	2.1213	(3.5000,3.5000)	2.1213
(5,6)	(1.8696,1.8812)	5.1733	(1.6806,1.6858)	5.4434
(6,1)	(6.9997,0.0001)	1.4139	(6.9999,0)	1.4141
(6,2)	(6.9834,0.0166)	2.2138	(6.9930,0.0070)	2.2267
(6,3)	(4.6566,2.3434)	1.4953	(4.6618,2.3382)	1.4929
(6,4)	(3.5005,3.4995)	2.5491	(3.5002,3.4998)	2.5494
(6,5)	(3.5002,3.4998)	2.9154	(3.5001,3.4999)	2.9154
(6,6)	(3.5000,3.5000)	3.5355	(3.5000,3.5000)	3.5355

ผลการทดลองโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม เมื่อค่า $n = 1.6$ และค่า $g = 7$



รูปที่ 4.14 ค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม

จากรูปที่ 4.14 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อใช้ค่า $n = 1.6$ และ $g = 7$ ซึ่งจากตำแหน่งกราฟที่ 0.5 ในแกน y หมายถึง ค่ามัธยฐานนั่นเอง โดยแกน x นั้นคือค่าระยะทางผิดพลาด จากกราฟสามารถแสดงได้ว่า ค่ามัธยฐานของระยะทางที่ผิดพลาดของกรณีดังกล่าวได้ค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 2.22 เมตร



รูปที่ 4.15 ค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

จากรูปที่ 4.15 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดในแต่ละตำแหน่งในโมเดลว่า แต่ละตำแหน่งนั้นทำให้เกิดค่าระยะทางผิดพลาดเป็นเท่าใด โดยแสดงในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

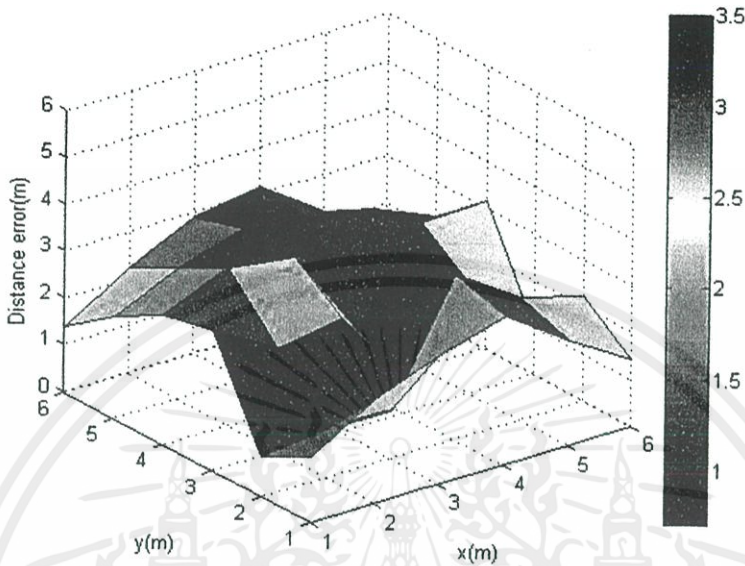
ผลการทดลองโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม เมื่อค่า $n = 1.6$ และ ค่า $g = 8$



รูปที่ 4.16 ค่าระยะทางผิดพลาดโดยแสดงในความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม

จากรูปที่ 4.16 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อใช้ค่า $n = 1.6$ และ $g = 8$ ซึ่งจากตำแหน่งกราฟที่ 0.5 ในแกน y หมายถึง ค่ามัธยฐานนั่นเอง โดยแกน x นั้นคือค่าระยะทาง

ผิดพลาด จากกราฟสามารถแสดงได้ว่า ค่ามัธยฐานของระยะทางที่ผิดพลาดของกรณีดังกล่าวได้ค่า ระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 2.24 เมตร



รูปที่ 4.17 ค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

จากรูปที่ 4.17 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดในแต่ละตำแหน่งในโมเดลว่า แต่ละตำแหน่งนั้น ทำให้เกิดค่าระยะทางผิดพลาดเป็นเท่าใด โดยแสดงในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

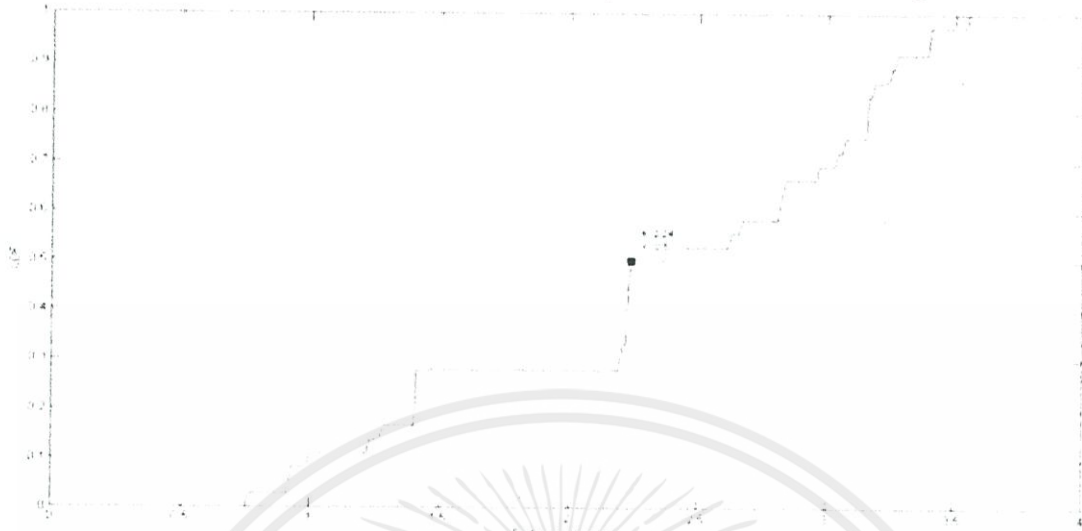
ตารางที่ 4.18 พิกัดของการระบุตำแหน่งตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนัก หรือ ค่า g นั้นมีค่า 9 และ 10 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $n = 1.6$

พิกัด	$g=9$	ค่าระยะทาง ผิดพลาด(m)	$g=10$	ค่าระยะทาง ผิดพลาด(m)
(1,1)	(0,0)	1.4142	(0,0)	1.4142
(1,2)	(1.2594,1.2594)	0.7847	(1.1385,1.1385)	0.8726
(1,3)	(0.0010,0.1411)	3.0284	(0.0004,0.0922)	3.0748
(1,4)	(0.1663,0.5125)	3.5858	(0.1007,0.3876)	3.7227
(1,5)	(0.1409,6.9993)	2.1761	(0.0921,7.0000)	2.1964
(1,6)	(0,7)	1.4142	(0,7)	1.4142
(2,1)	(0.0016,0.0038)	2.2329	(0.0006,0.0015)	2.2349
(2,2)	(0.4166,1.4443)	1.6781	(0.3207,0.2974)	2.3914

(2,3)	(0.0615,3.4993)	2.0018	(0.0015,3.4999)	2.0601
(2,4)	(0.0007,6.8592)	3.4889	(0.0003,6.9079)	3.5291
(2,5)	(0.0108,6.9994)	2.8204	(0.0052,7.0000)	2.8248
(2,6)	(0.0030,6.9992)	2.233	(0.0012,6.9997)	2.2349
(3,1)	(0.4890,0.0015)	2.7022	(0.3729,0.0006)	2.8108
(3,2)	(3.8864,3.1136)	1.4233	(3.8481,3.1519)	1.4304
(3,3)	(3.7963,1.0396)	2.116	(3.7761,0.8955)	2.243
(3,4)	(0.5125,6.8337)	3.771	(0.3876,6.8923)	3.8974
(3,5)	(5.4711,6.9691)	3.1597	(5.6438,6.9821)	3.3043
(3,6)	(5.3970,6.9915)	2.594	(5.6596,6.9958)	2.8399
(4,1)	(6.9892,0.0009)	3.1517	(6.9947,0.0003)	3.1572
(4,2)	(6.9287,3.4645)	3.2745	(6.9536,3.4768)	3.3022
(4,3)	(3.5000,3.5000)	-0.7071	(3.5000,3.5000)	0.7071
(4,4)	(2.4471,4.5529)	1.6484	(2.4192,4.5808)	1.6841
(4,5)	(6.5050,6.9537)	3.1768	(6.6237,6.9742)	3.2835
(4,6)	(6.9970,7.0000)	3.1594	(6.9758,7.0000)	3.1393
(5,1)	(6.9908,0.0394)	2.2104	(6.9999,0.0021)	2.235
(5,2)	(6.9998,0.1411)	2.7303	(6.9990,0.0922)	2.7633
(5,3)	(6.9609,1.5285)	2.4516	(6.9812,1.3560)	2.5745
(5,4)	(6.9692,1.5290)	3.1597	(6.9821,1.3562)	3.3043
(5,5)	(3.5000,3.5000)	2.1213	(3.5000,3.5000)	2.1213
(5,6)	(1.5044,1.5060)	5.6934	(1.3416,1.3426)	5.9224
(6,1)	(7,0)	1.4142	(7,0)	1.4142
(6,2)	(6.9970,0.0035)	2.2316	(6.9988,0.0012)	2.2345
(6,3)	(4.6643,2.3357)	1.4918	(4.6655,2.3345)	1.4912
(6,4)	(3.5001,3.4999)	2.5494	(3.5000,3.5000)	2.5495
(6,5)	(3.5000,3.5000)	2.9155	(3.5000,3.5000)	2.9155
(6,6)	(3.5000,3.5000)	3.5355	(3.5000,3.5000)	3.5355

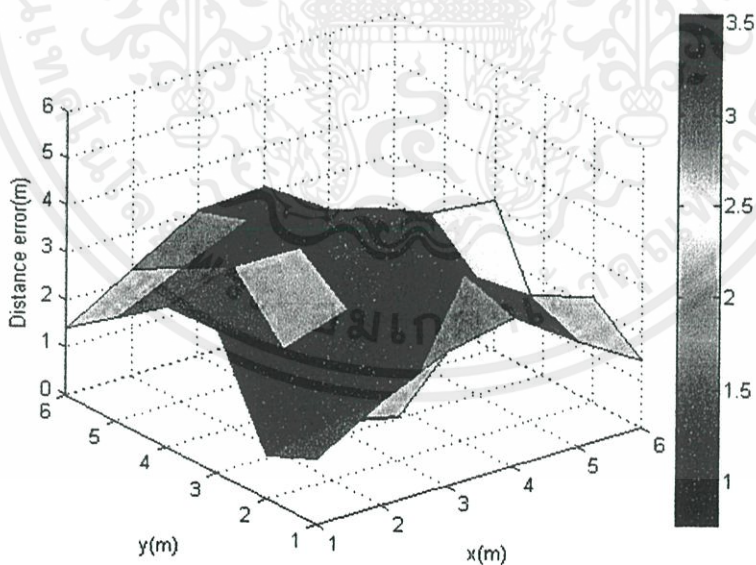
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม เมื่อค่า $n = 1.6$ และค่า $g = 9$



รูปที่ 4.18 ค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม

จากรูปที่ 4.18 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อใช้ค่า $n = 1.6$ และ $g = 9$ ซึ่งจากตำแหน่งกราฟที่ 0.5 ในแกน y หมายถึง ค่ามัธยฐานนั่นเอง โดยแกน x นั้นคือค่าระยะทางผิดพลาด จากกราฟสามารถแสดงได้ว่า ค่ามัธยฐานของระยะทางที่ผิดพลาดของกรณีดังกล่าวได้ค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 2.24 เมตร

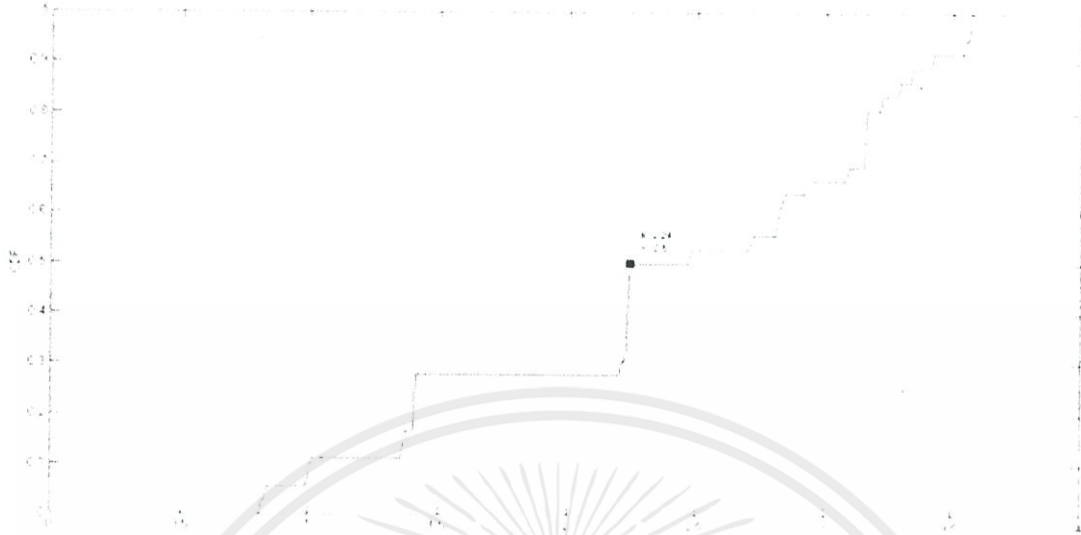


รูปที่ 4.19 ค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

จากรูปที่ 4.19 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดในแต่ละตำแหน่งในโมเดลว่า แต่ละตำแหน่งนั้นทำให้เกิดค่าระยะทางผิดพลาดเป็นเท่าใด โดยแสดงในรูปของกราฟพื้นผิว

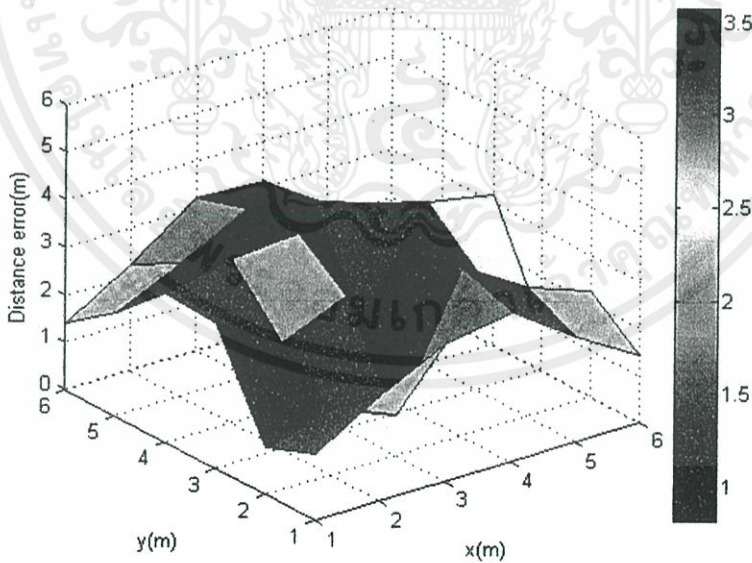
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม เมื่อค่า $n = 1.6$ และค่า $g = 10$



รูปที่ 4.20 ค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม

จากรูปที่ 4.20 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อใช้ค่า $n = 1.6$ และ $g = 10$ ซึ่งจากตำแหน่งกราฟที่ 0.5 ในแกน y หมายถึง ค่ามัธยฐานนั่นเอง โดยแกน x นั้นคือค่าระยะทางผิดพลาด จากกราฟสามารถแสดงได้ว่า ค่ามัธยฐานของระยะทางที่ผิดพลาดของกรณีดังกล่าวได้ค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 2.24 เมตร



รูปที่ 4.21 ค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

จากรูปที่ 4.21 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดในแต่ละตำแหน่งในโมเดลว่า แต่ละตำแหน่งนั้นทำให้เกิดค่าระยะทางผิดพลาดเป็นเท่าใด โดยแสดงในรูปของกราฟพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 ผลการทดลองการปรับเปลี่ยนค่าตัวถ่วงน้ำหนัก

ในตารางที่ 4.19 ถึง ตารางที่ 4.23 ใช้ค่าคงที่การแพร่กระจาย ทำการทดลองโดยนำผลค่าความแรงที่ได้ในตารางที่ 4.10 ถึงตารางที่ 4.13 มาคำนวณหาค่าระยะทางผิดพลาดเมื่อเทียบกับพิกัดจริงโดยใช้ค่าดัชนีการแพร่กระจายสัญญาณในสภาวะแวดล้อมต่างๆ หรือ ค่า n ทางทฤษฎี ซึ่งใช้ค่า $n = 2$

ตารางที่ 4.19 พิกัดของการระบุตำแหน่งตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักหรือค่า g นั้นมีค่า 1 และ 2 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $n = 2$

พิกัด	$g=1$	ค่าระยะทางผิดพลาด(m)	$g=2$	ค่าระยะทางผิดพลาด(m)
(1,1)	(1.1202,1.4478)	0.4637	(1,1202,1.4478)	0.4637
(1,2)	(2.8014,3.3793)	2.2688	(2.1515,3.2221)	1.6791
(1,3)	(2.3165,3.0330)	1.3169	(1.3479,2.4837)	0.6225
(1,4)	(2.9913,3.1843)	2.1519	(2.4879,2.8469)	1.8824
(1,5)	(4.6630,2.9462)	4.1995	(5.5947,1.8738)	5.5574
(1,6)	(1.9817,5.7016)	1.026	(0.7330,6.7245)	0.7721
(2,1)	(2.6116,2.7709)	1.8735	(1.6927,1.9118)	0.9622
(2,2)	(3.0083,3.2128)	1.5772	(2.5513,2.9564)	1.1039
(2,3)	(1.9695,3.2241)	0.2262	(0.9930,3.2421)	1.0357
(2,4)	(2.0931,4.1563)	0.1819	(1.0969,4.7169)	1.1531
(2,5)	(2.6873,4.9734)	0.6878	(1.8203,6.0554)	1.0706
(2,6)	(2.5272,4.6413)	1.4574	(1.5853,5.6479)	0.54401
(3,1)	(3.2322,2.3267)	1.3469	(2.8637,1.3760)	0.4
(3,2)	(3.6783,3.3217)	1.4856	(3.8113,3.1887)	1.4392
(3,3)	(3.5920,3.2014)	0.6253	(3.6669,2.9127)	0.6726
(3,4)	(3.1843,4.0087)	0.1845	(2.8469,4.5121)	0.5344
(3,5)	(3.3513,4.5333)	0.5841	(3.4495,5.3427)	0.5652
(3,6)	(3.9981,4.8397)	1.5305	(4.2071,5.7353)	1.2358
(4,1)	(4.2840,2.3735)	1.4026	(5.1148,1.3876)	1.1803
(4,2)	(4.5073,3.1509)	1.2577	(5.2638,3.0490)	1.6424
(4,3)	(3.5000,3.5000)	0.7071	(3.5000,3.5000)	0.7071

(4,4)	(3.3103,3.6897)	0.7562	(3.1443,3.8557)	0.8678
(4,5)	(3.8213,4.2041)	0.8157	(4.1729,4.8679)	0.2176
(4,6)	(4.3120,5.0971)	0.9553	(5.4465,6.2214)	1.4633
(5,1)	(5.0068,3.1591)	2.1591	(6.0424,2.4055)	1.7497
(5,2)	(5.0068,3.2423)	1.2423	(6.0424,2.6552)	1.2312
(5,3)	(4.3788,3.5243)	0.8129	(5.1400,3.4158)	0.4387
(5,4)	(4.6441,3.7540)	0.4163	(5.4790,3.6411)	0.5985
(5,5)	(3.5000,3.5000)	2.1213	(3.5000,3.5000)	2.1213
(5,6)	(3.1750,3.5479)	3.0567	(2.9665,3.3704)	3.3241
(6,1)	(4.8522,2.0177)	1.534	(6.0812,0.8030)	0.2131
(6,2)	(4.6004,2.3996)	1.4555	(5.5369,1.4631)	0.709
(6,3)	(3.9300,3.0700)	2.0712	(4.2217,2.7783)	1.7921
(6,4)	(3.6518,3.3482)	2.437	(3.6236,3.3764)	2.4569
(6,5)	(3.6777,3.3223)	2.8649	(3.6219,3.3781)	2.8785
(6,6)	(3.5810,3.4190)	3.537	(3.5482,3.4518)	3.5361

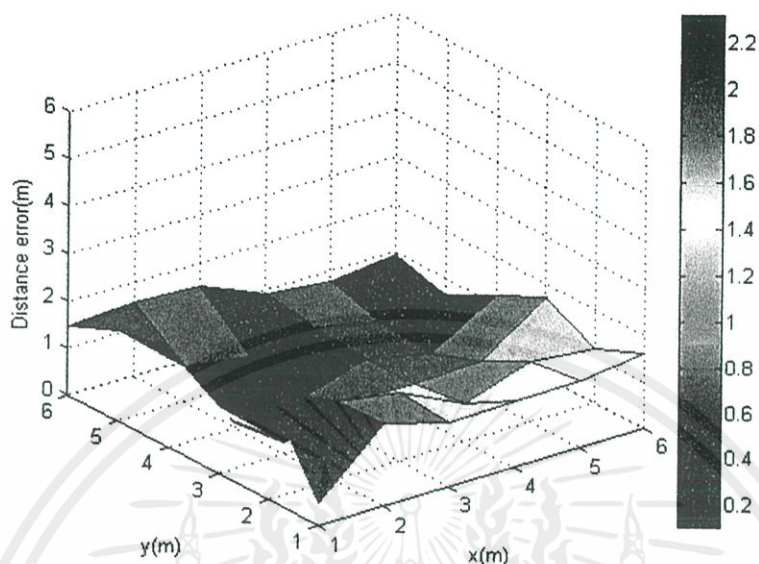
ผลการทดลองโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม เมื่อค่า $n = 2$ และ ค่า $g = 1$



รูปที่ 4.22 ค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม

จากรูปที่ 4.22 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อใช้ค่า $n = 2$ และ $g = 1$ ซึ่งจากตำแหน่งกราฟที่ 0.5 ในแกน y หมายถึง ค่ามัธยฐานนั่นเอง โดยแกน x นั้นคือค่าระยะทางผิดพลาด

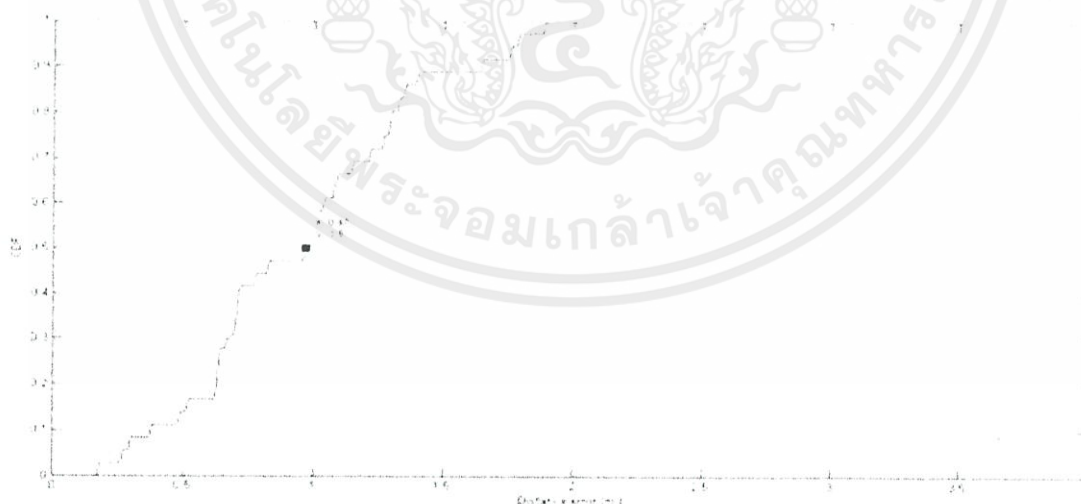
จากกราฟสามารถแสดงได้ว่า ค่ามัธยฐานของระยะทางที่ผิดพลาดของกรณีดังกล่าวได้ค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 0.95 เมตร



รูปที่ 4.23 ค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

จากรูปที่ 4.23 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดในแต่ละตำแหน่งในโมเดลว่า แต่ละตำแหน่งนั้นทำให้เกิดค่าระยะทางผิดพลาดเป็นเท่าใด โดยแสดงในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

ผลการทดลองโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม เมื่อค่า $n = 2$ และค่า $g = 2$

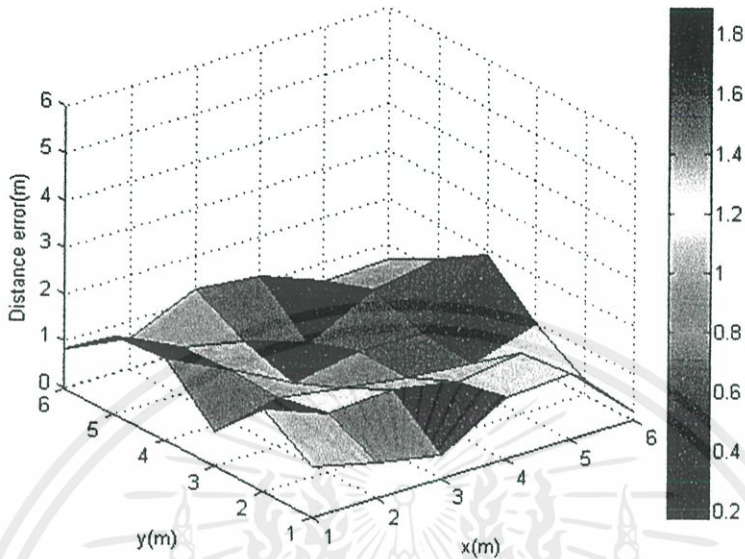


รูปที่ 4.24 ค่าระยะทางผิดพลาดโดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม

จากรูปที่ 4.24 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อใช้ค่า $n = 2$ และ $g = 2$ ซึ่งจากตำแหน่งกราฟที่ 0.5 ในแกน y หมายถึง ค่ามัธยฐานนั่นเอง โดยแกน x นั้นคือค่าระยะทางผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟสามารถแสดงได้ว่า ค่ามัธยฐานของระยะทางที่ผิดพลาดของกรณีดังกล่าวได้ค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 0.97 เมตร



รูปที่ 4.25 ค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

จากรูปที่ 4.25 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดในแต่ละตำแหน่งในโมเดลว่า แต่ละตำแหน่งนั้นทำให้เกิดค่าระยะทางผิดพลาดเป็นเท่าใด โดยแสดงในรูปของกราฟพื้นผิว

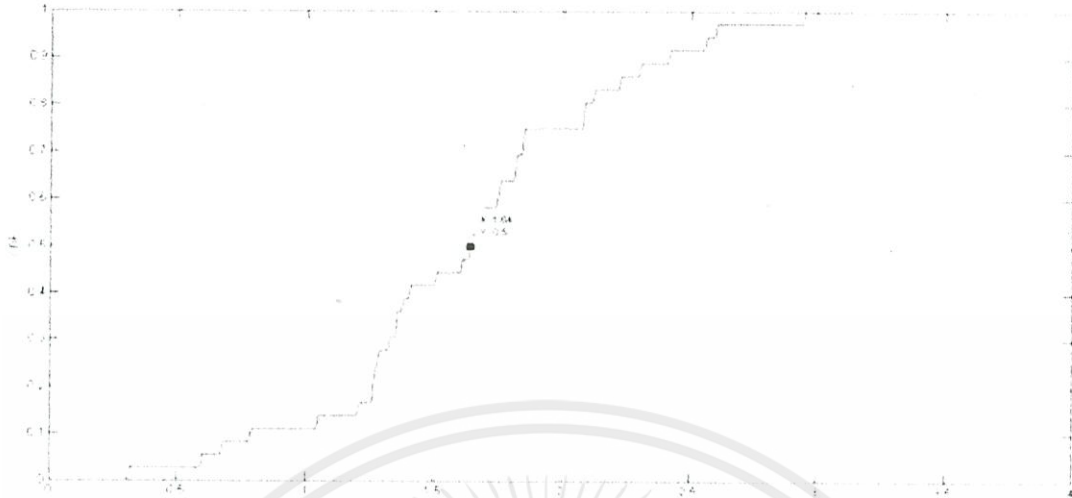
ตารางที่ 4.20 พิกัดของการระบุตำแหน่งตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักหรือค่า g นั้นมีค่า 3 และ 4 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $n = 2$

พิกัด	$g=3$	ค่าระยะทางผิดพลาด(m)	$g=4$	ค่าระยะทางผิดพลาด(m)
(1,1)	(0.0196,0.0488)	1.366	(0.0022,0.0081)	1.4069
(1,2)	(1.5910,3.0375)	1.194	(1.1391,2.8369)	0.8484
(1,3)	(0.7070,1.9411)	1.0987	(0.3453,1.4696)	1.6646
(1,4)	(2.0131,2.4994)	1.8106	(1.5863,2.1552)	1.9357
(1,5)	(6.2173,1.0151)	6.565	(6.5845,0.5117)	7.1646
(1,6)	(0.2322,6.9542)	1.2248	(0.0720,6.9929)	1.3591
(2,1)	(0.9568,1.1541)	1.0545	(0.4877,0.6304)	1.5568
(2,2)	(2.1406,2.7289)	0.7423	(1.7811,2.5262)	0.57
(2,3)	(0.4832,3.3314)	1.5526	(0.2348,3.4040)	1.8108

(2,4)	(0.5223,5.1993)	1.9031	(0.2489,5.6106)	2.3791
(2,5)	(1.1259,6.6229)	1.8433	(0.6632,6.8618)	2.292
(2,6)	(0.8845,6.3220)	1.161	(0.4598,6.6867)	1.6863
(3,1)	(2.4605,0.7430)	0.5976	(2.0744,0.3772)	1.1156
(3,2)	(3.9035,3.0965)	1.4208	(3.9612,3.0388)	1.4153
(3,3)	(3.7255,2.6375)	0.811	(3.7691,2.3781)	0.9891
(3,4)	(2.4994,4.9869)	1.1066	(2.1552,5.4137)	1.6469
(3,5)	(3.6799,5.9121)	1.1376	(3.9546,6.2917)	1.6062
(3,6)	(4.3208,6.2655)	1.3472	(4.4322,6.5716)	1.5421
(4,1)	(5.8126,0.7140)	1.835	(6.2983,0.3371)	2.392
(4,2)	(5.7901,3.0770)	2.0891	(6.1503,3.1524)	2.4396
(4,3)	(3.5000,3.5000)	0.7071	(3.5000,3.5000)	0.7071
(4,4)	(3.0014,3.9986)	0.9986	(2.8801,4.1199)	1.1263
(4,5)	(4.5375,5.4441)	0.6972	(4.8952,5.9077)	1.2749
(4,6)	(6.2533,6.7351)	2.3701	(6.6687,6.9168)	2.8218
(5,1)	(6.5845,1.6540)	1.7142	(6.8285,1.0822)	1.8303
(5,2)	(6.5845,2.0311)	1.5848	(6.8285,1.5080)	1.8935
(5,3)	(5.7340,3.2201)	0.7663	(6.1627,2.9830)	1.1628
(5,4)	(6.0056,3.3726)	1.185	(6.3446,3.0710)	1.6343
(5,5)	(3.5000,3.5000)	2.1213	(3.5000,3.5000)	2.1213
(5,6)	(2.8045,3.1072)	3.6316	(2.6479,2.8413)	3.9382
(6,1)	(6.6894,0.2502)	1.0186	(6.9041,0.0706)	1.2966
(6,2)	(6.1854,0.8146)	1.1998	(6.5710,0.4290)	1.6716
(6,3)	(4.4055,2.5945)	1.6453	(4.5161,2.4839)	1.5711
(6,4)	(3.5683,3.4317)	2.4972	(3.5324,3.4676)	2.5244
(6,5)	(3.5569,3.4431)	2.897	(3.5231,3.4769)	2.9077
(6,6)	(3.5192,3.4808)	3.5356	(3.5066,3.4934)	3.5355

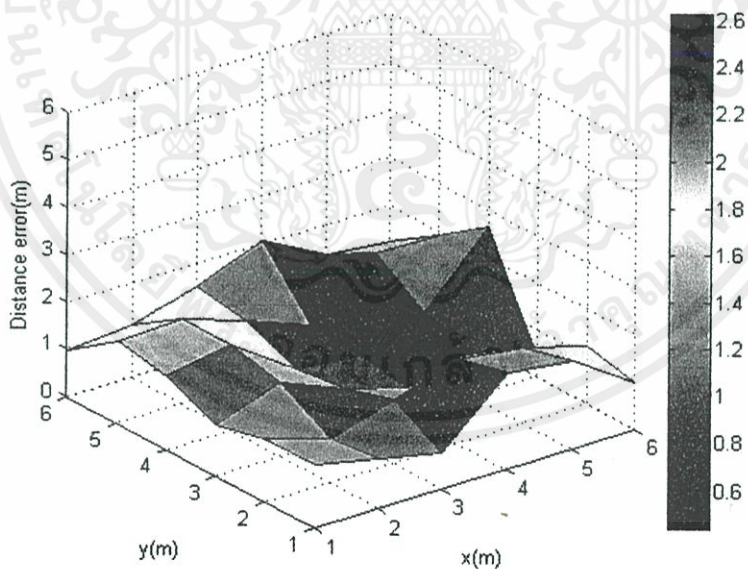
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม เมื่อค่า $n = 2$ และ ค่า $g = 3$



รูปที่ 4.26 ค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม

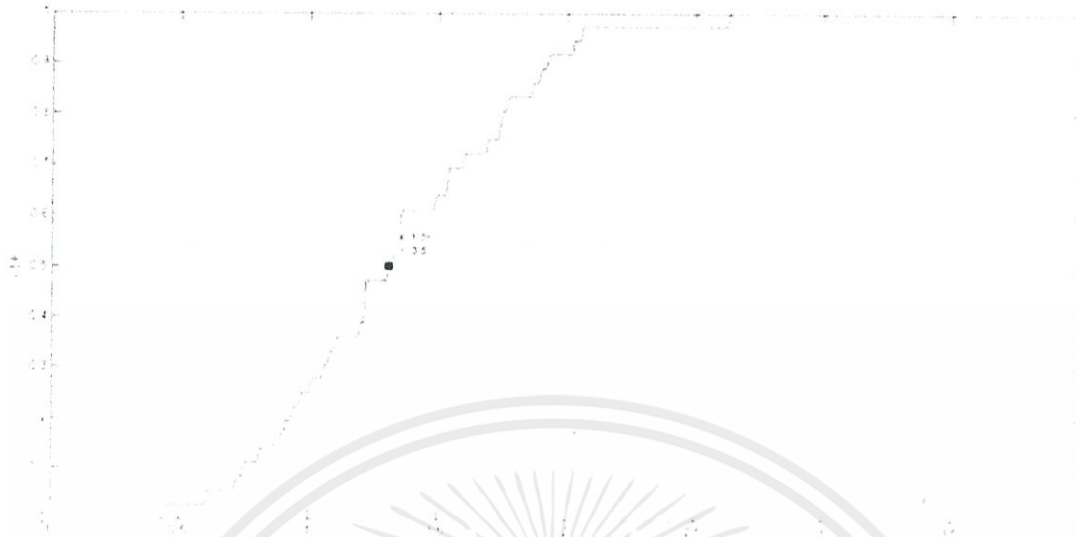
จากรูปที่ 4.26 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อใช้ค่า $n = 2$ และ $g = 3$ ซึ่งจากตำแหน่งกราฟที่ 0.5 ในแกน y หมายถึง ค่ามัธยฐานนั่นเอง โดยแกน x นั้นคือค่าระยะทางผิดพลาด จากกราฟสามารถแสดงได้ว่า ค่ามัธยฐานของระยะทางที่ผิดพลาดของกรณีดังกล่าวได้ค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 1.64 เมตร



รูปที่ 4.27 ค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

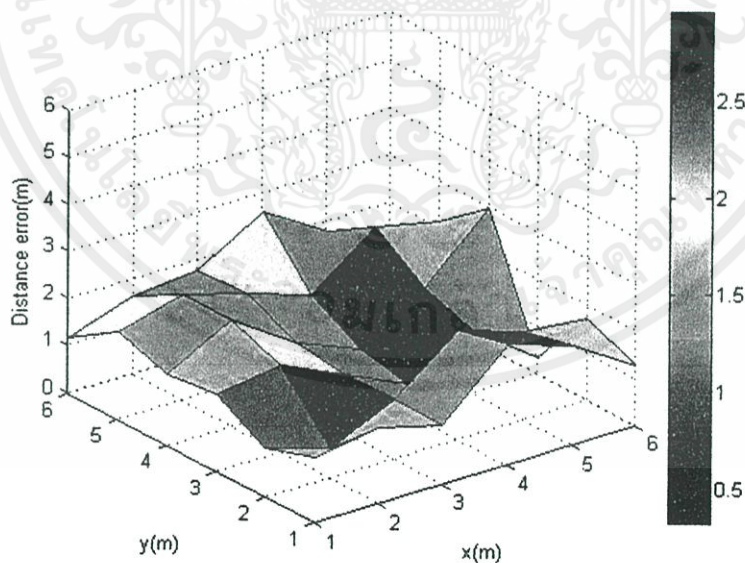
จากรูปที่ 4.27 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดในแต่ละตำแหน่งในโมเดลว่า แต่ละตำแหน่งนั้นทำให้เกิดค่าระยะทางผิดพลาดเป็นเท่าใด โดยแสดงในรูปของกราฟพื้นผิว

ผลการทดลองโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม เมื่อค่า $n = 2$ และ ค่า $g = 4$



รูปที่ 4.28 ค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม

จากรูปที่ 4.28 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อใช้ค่า $n = 2$ และ $g = 4$ ซึ่งจากตำแหน่งกราฟที่ 0.5 ในแกน y หมายถึง ค่ามัธยฐานนั่นเอง โดยแกน x นั่นคือค่าระยะทางผิดพลาด จากกราฟสามารถแสดงได้ว่า ค่ามัธยฐานของระยะทางที่ผิดพลาดของกรณีดังกล่าวได้ค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 1.31 เมตร



รูปที่ 4.29 ค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

จากรูปที่ 4.29 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดในแต่ละตำแหน่งในโมเดลว่า แต่ละตำแหน่งนั้นทำให้เกิดค่าระยะทางผิดพลาดเป็นเท่าใด โดยแสดงในรูปของกราฟพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.21 พิกัดของการระบุตำแหน่งตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนัก หรือค่า g นั้นมีค่า 5 และ 6 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $n = 2$

พิกัด	$g=5$	ค่าระยะทาง ผิดพลาด(m)	$g=6$	ค่าระยะทาง ผิดพลาด(m)
(1,1)	(0.00,0.0014)	1.4132	(0,0)	1.4142
(1,2)	(0.7944,2.6308)	0.6635	(0.4155,2.3370)	0.6747
(1,3)	(0.1613,1.0906)	2.0854	(0.0734,0.7990)	2.3881
(1,4)	(1.2200,1.8278)	2.1833	(0.9186,1.5276)	2.4737
(1,5)	(6.7854,0.2513)	7.4847	(6.8908,0.1227)	7.6478
(1,6)	(0.0225,6.9989)	1.3976	(0.0070,6.9998)	1.4091
(2,1)	(0.2333,0.3241)	1.8916	(0.1078,0.1614)	2.0697
(2,2)	(1.4726,2.3433)	0.6292	(1.2118,2.1757)	0.8075
(2,3)	(0.1150,3.4486)	1.9376	(0.0568,3.4734)	2
(2,4)	(0.1144,5.9500)	2.7126	(0.0521,6.2200)	2.9534
(2,5)	(0.3818,6.9513)	2.535	(0.2174,6.9831)	2.6665
(2,6)	(0.2313,6.8607)	1.967	(0.1151,6.9389)	2.1058
(3,1)	(1.7296,0.1842)	1.5098	(1.4316,0.0878)	1.8144
(3,2)	(3.9911,3.0089)	1.4143	(4.0000,3.0000)	1.4142
(3,3)	(3.7992,2.1365)	1.1765	(3.8179,1.9135)	1.3599
(3,4)	(1.8278,5.7800)	2.1313	(1.5276,6.0814)	2.5495
(3,5)	(4.2276,6.5376)	1.9675	(4.4813,6.7006)	2.2552
(3,6)	(4.5630,6.7494)	1.7334	(4.7097,6.8533)	1.9108
(4,1)	(6.5989,0.1518)	2.7338	(6.7741,0.0668)	2.9269
(4,2)	(6.3990,3.2315)	2.6966	(6.5732,3.2997)	2.8828
(4,3)	(3.5000,3.5000)	0.7071	(3.5000,3.5000)	0.7071
(4,4)	(2.7783,4.2217)	1.2926	(2.6939,4.3061)	1.3414
(4,5)	(5.2293,6.2573)	1.7584	(5.5291,6.5079)	2.1475
(4,6)	(6.8565,6.9745)	3.0182	(6.9380,6.9922)	3.101
(5,1)	(6.9307,0.6931)	1.9549	(6.9722,0.4399)	2.0502
(5,2)	(6.9307,1.1052)	2.128	(6.9722,0.8043)	2.3064
(5,3)	(6.4561,2.7370)	1.4797	(6.6503,2.4998)	1.7244

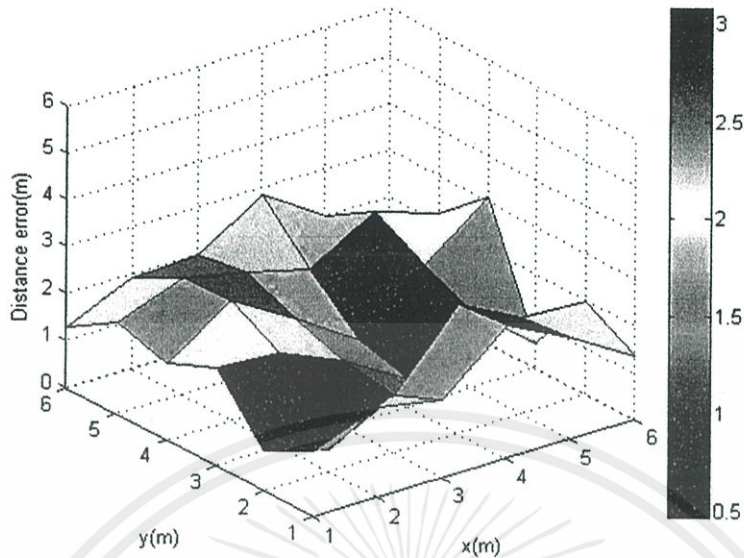
(5,4)	(6.5664,2.7838)	1.9831	(6.7134,2.5235)	2.2618
(5,5)	(3.5000,3.5000)	2.1213	(3.5000,3.5000)	2.1213
(5,6)	(2.4855,2.5993)	4.2294	(2.3188,2.3826)	4.5027
(6,1)	(6.9710,0.0193)	1.38	(6.9913,0.0053)	1.4043
(6,2)	(6.7805,0.2195)	1.9441	(6.8891,0.1109)	2.0879
(6,3)	(4.5808,2.4192)	1.5334	(4.6180,2.3820)	1.514
(6,4)	(3.5143,3.4857)	2.5383	(3.5061,3.4939)	2.5447
(6,5)	(3.5088,3.4912)	2.9125	(3.5033,3.4967)	2.9143
(6,6)	(3.5021,3.4979)	3.5355	(3.5007,3.4993)	3.5355

ผลการทดลองโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม เมื่อค่า $n = 2$ และค่า $g = 5$



รูปที่ 4.30 ค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม

จากรูปที่ 4.30 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อใช้ค่า $n = 2$ และ $g = 5$ ซึ่งจากตำแหน่งกราฟที่ 0.5 ในแกน y หมายถึง ค่ามัธยฐานนั่นเอง โดยแกน x นั้นคือค่าระยะทางผิดพลาด จากกราฟสามารถแสดงได้ว่า ค่ามัธยฐานของระยะทางที่ผิดพลาดของกรณีดังกล่าวได้ค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 2.09 เมตร



รูปที่ 4.31 ค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

จากรูปที่ 4.31 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดในแต่ละตำแหน่งในโมเดลว่า แต่ละตำแหน่งนั้นทำให้เกิดค่าระยะทางผิดพลาดเป็นเท่าใด โดยแสดงในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

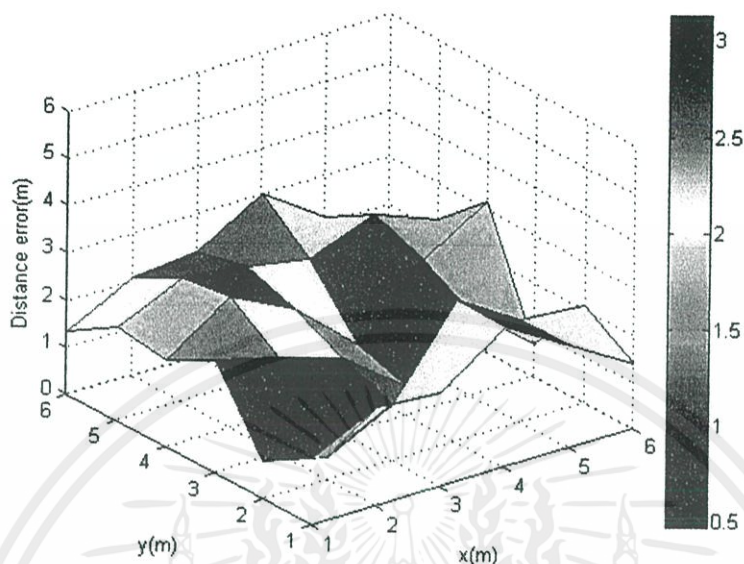
ผลการทดลองโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม เมื่อค่า $n = 2$ และ ค่า $g = 6$



รูปที่ 4.32 ค่าระยะทางผิดพลาดโดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม

จากรูปที่ 4.32 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อใช้ค่า $n = 2$ และ $g = 6$ ซึ่งจากตำแหน่งกราฟที่ 0.5 ในแกน y หมายถึง ค่ามัธยฐานนั่นเอง โดยแกน x นั้นคือค่าระยะทางผิดพลาด

จากกราฟสามารถแสดงได้ว่า ค่ามัธยฐานของระยะทางที่ผิดพลาดของกรณีดังกล่าวได้ค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 1.94 เมตร



รูปที่ 4.33 ค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

จากรูปที่ 4.33 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดในแต่ละตำแหน่งในโมเดลว่า แต่ละตำแหน่งนั้นทำให้เกิดค่าระยะทางผิดพลาดเป็นเท่าใด โดยแสดงในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

ตารางที่ 4.22 พิกัดของการระบุตำแหน่งตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักหรือค่า g นั้นมีค่า 7 และ 8 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $n = 2$

พิกัด	$g=7$	ค่าระยะทาง ผิดพลาด(m)	$g=8$	ค่าระยะทาง ผิดพลาด(m)
(1,1)	(0,0)	1.4142	(0,0)	1.4142
(1,2)	(0.3652,2.2312)	0.6756	(0.2428,2.0455)	0.7586
(1,3)	(0.0328,0.5803)	2.6058	(0.0146,0.4187)	2.763
(1,4)	(0.6794,1.2611)	2.7576	(0.4953,1.0309)	3.0117
(1,5)	(6.9448,0.0600)	7.7294	(6.9722,0.0295)	7.77
(1,6)	(0.0022,7.0000)	1.4127	(0,7.0000)	1.4142
(2,1)	(0.1078,0.1614)	2.1575	(0.0489,0.0792)	2.1992
(2,2)	(0.9937,2.0198)	1.0065	(0.8126,1.8730)	1.1941
(2,3)	(0.0282,3.4864)	2.0309	(0.0140,3.4931)	2.0463

(2,4)	(0.0236,6.4282)	3.1309	(0.0107,6.5849)	3.2618
(2,5)	(0.1232,6.9942)	2.7385	(0.0696,6.9980)	2.7782
(2,6)	(0.0571,6.9733)	2.1731	(0.0284,6.9883)	2.2054
(3,1)	(1.1781,0.0412)	2.0588	(0.9646,0.0191)	2.2594
(3,2)	(3.9953,3.0065)	1.4142	(3.9764,3.0236)	1.4146
(3,3)	(3.8269,1.7094)	1.5328	(3.8280,1.5240)	1.6924
(3,4)	(1.2611,6.3206)	2.8998	(1.0309,6.5047)	3.186
(3,5)	(4.7115,6.8053)	2.4876	(4.9193,6.8734)	2.682
(3,6)	(4.8644,6.9143)	2.0765	(5.0208,6.9501)	2.233
(4,1)	(6.8734,0.0292)	3.033	(6.9291,0.0127)	3.091
(4,2)	(6.6963,3.3535)	3.017	(6.7838,3.3941)	3.1133
(4,3)	(3.5000,3.5000)	0.7071	(3.5000,3.5000)	0.7071
(4,4)	(2.6244,4.3756)	1.426	(2.5675,4.4325)	1.4963
(4,5)	(5.7900,6.6793)	2.4544	(6.0119,6.7940)	2.6956
(4,6)	(6.97313,6.9976)	3.136	(6.9882,6.9993)	3.1509
(5,1)	(6.9889,0.2782)	2.1158	(6.9956,0.1757)	2.1591
(5,2)	(6.9889,0.5821)	2.4426	(6.9956,0.4193)	2.5458
(5,3)	(6.7763,2.2788)	1.9171	(6.8573,2.0758)	2.0745
(5,4)	(6.8111,2.2904)	2.4905	(6.8760,2.0815)	2.6833
(5,5)	(3.5000,3.5000)	2.1213	(3.5000,3.5000)	2.1213
(5,6)	(2.1519,2.1867)	4.7595	(1.9885,2.0071)	5.0012
(6,1)	(6.9973,0.0014)	1.4113	(6.9992,0)	1.4136
(6,2)	(6.9443,0.0557)	2.1615	(6.9721,0.0279)	2.1987
(6,3)	(4.6392,2.3608)	1.5034	(4.6512,2.3488)	1.4978
(6,4)	(3.5025,3.4975)	2.5476	(3.5010,3.4990)	2.5487
(6,5)	(3.5012,3.4988)	2.9151	(3.5004,3.4996)	2.9153
(6,6)	(3.5002,3.4998)	3.5355	(3.5001,3.4999)	3.5355

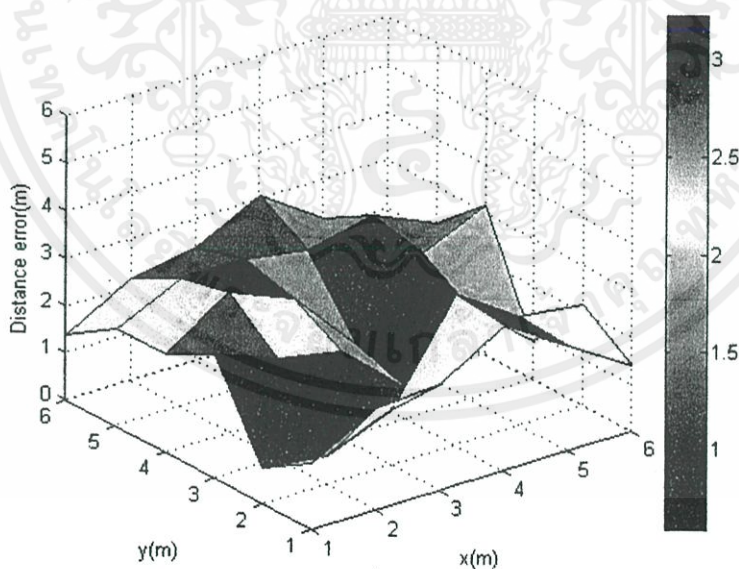
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม เมื่อค่า $n = 2$ และค่า $g = 7$



รูปที่ 4.34 ค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม

จากรูปที่ 4.34 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อใช้ค่า $n = 2$ และ $g = 7$ ซึ่งจากตำแหน่งกราฟที่ 0.5 ในแกน y หมายถึง ค่ามัธยฐานนั่นเอง โดยแกน x นั้นคือค่าระยะทางผิดพลาด จากกราฟสามารถแสดงได้ว่า ค่ามัธยฐานของระยะทางที่ผิดพลาดของกรณีดังกล่าวได้ค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 2.17 เมตร

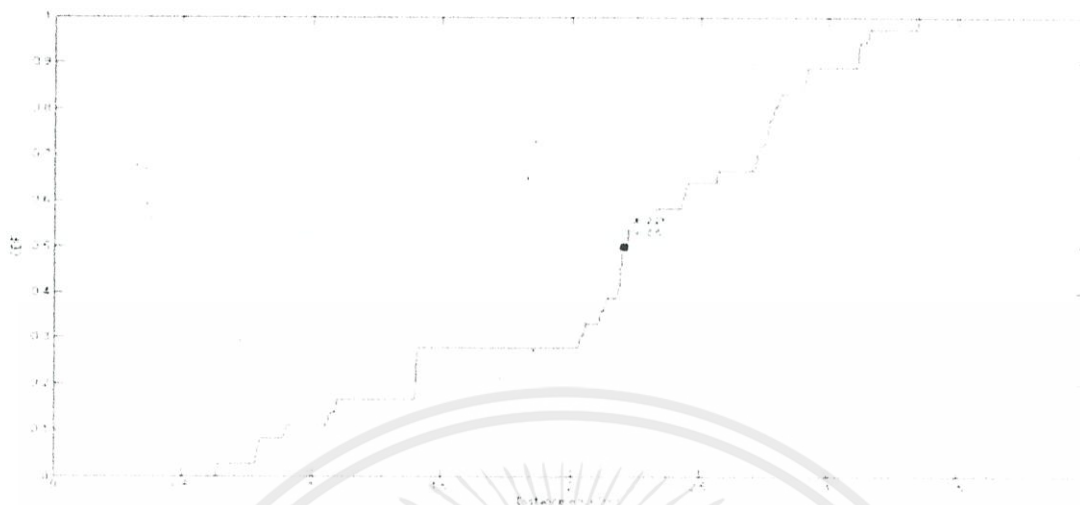


รูปที่ 4.35 ค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

จากรูปที่ 4.35 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดในแต่ละตำแหน่งในโมเดลว่า แต่ละตำแหน่งนั้นทำให้เกิดค่าระยะทางผิดพลาดเป็นเท่าใด โดยแสดงในรูปของกราฟพื้นผิว

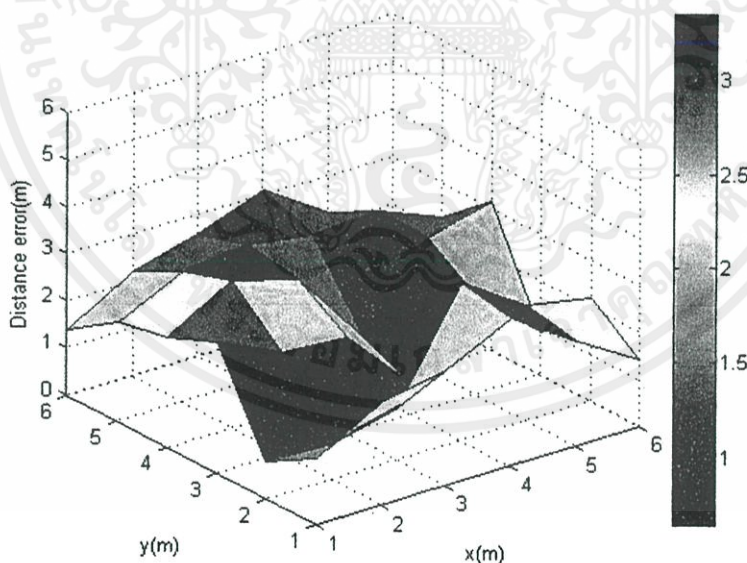
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม เมื่อค่า $n = 2$ และค่า $g = 8$



รูปที่ 4.36 ค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม

จากรูปที่ 4.36 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อใช้ค่า $n = 2$ และ $g = 8$ ซึ่งจากตำแหน่งกราฟที่ 0.5 ในแกน y หมายถึง ค่ามัธยฐานนั่นเอง โดยแกน x นั่นคือค่าระยะทางผิดพลาด จากกราฟสามารถแสดงได้ว่า ค่ามัธยฐานของระยะทางที่ผิดพลาดของกรณีดังกล่าวได้ค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 2.21 เมตร



รูปที่ 4.37 ค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

จากรูปที่ 4.37 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดในแต่ละตำแหน่งในโมเดลว่า แต่ละตำแหน่งนั้นทำให้เกิดค่าระยะทางผิดพลาดเป็นเท่าใด โดยแสดงในรูปของกราฟพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4..23 พิกัดของการระบุตำแหน่งตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักหรือค่า g นั้นมีค่า 9 และ 10 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $n = 2$

พิกัด	$g=9$	ค่าระยะทาง ผิดพลาด(m)	$g=10$	ค่าระยะทาง ผิดพลาด(m)
(1,1)	(0,0)	1.4142	(0,0)	1.4142
(1,2)	(0.1600,1.8713)	0.8498	(0.1048,1.7090)	0.9413
(1,3)	(0.0064,0.3007)	2.8763	(0.0028,0.2152)	2.958
(1,4)	(0.3571,0.8363)	3.2284	(0.2552,0.6745)	3.4079
(1,5)	(6.9861,0.0146)	7.7902	(6.9930,0.0072)	7.8003
(1,6)	(0,7.0000)	1.4142	(0,7.0000)	1.4142
(2,1)	(0.0220,0.0387)	2.2188	(0.0044,0.0092)	2.228
(2,2)	(0.6630,1.7337)	1.3633	(0.5399,1.6011)	1.5136
(2,3)	(0.0070,3.4965)	2.0539	(0.0035,3.4983)	2.0577
(2,4)	(0.0048,6.7008)	3.3578	(0.0022,6.7855)	3.4279
(2,5)	(0.0392,6.9993)	2.8003	(0.0221,6.9998)	2.8127
(2,6)	(0.0141,6.9948)	2.2211	(0.0071,6.9977)	2.2287
(3,1)	(0.7861,0.0088)	2.4257	(0.6380,0.0040)	2.5634
(3,2)	(3.9524,3.0476)	1.4158	(3.9243,3.0757)	1.4183
(3,3)	(3.8230,1.3564)	1.8381	(3.8132,1.2058)	1.9699
(3,4)	(0.8363,6.6429)	3.4156	(0.6745,6.7448)	3.5975
(3,5)	(5.1074,6.9178)	2.8494	(5.2783,6.9467)	2.9967
(3,6)	(5.1743,6.9710)	2.3813	(5.3222,6.9832)	2.5218
(4,1)	(6.9603,0.0055)	3.1229	(6.9777,0.0024)	3.1404
(4,2)	(6.8462,3.4240)	3.1826	(6.8907,3.4457)	3.2321
(4,3)	(3.5000,3.5000)	0.7071	(3.5000,3.5000)	0.7071
(4,4)	(2.5213,4.4787)	1.5543	(2.4839,4.5161)	1.6015
(4,5)	(6.1976,6.8690)	2.8848	(6.3513,6.9172)	2.6385
(4,6)	(6.9948,6.9998)	3.1573	(6.9977,6.9999)	3.1601
(5,1)	(6.9982,0.1109)	2.1871	(6.9993,0.0700)	2.205
(5,2)	(6.9982,0.3009)	2.6229	(6.9993,0.2152)	2.6801
(5,3)	(6.9090,1.8902)	2.2082	(6.9420,1.7206)	2.3256

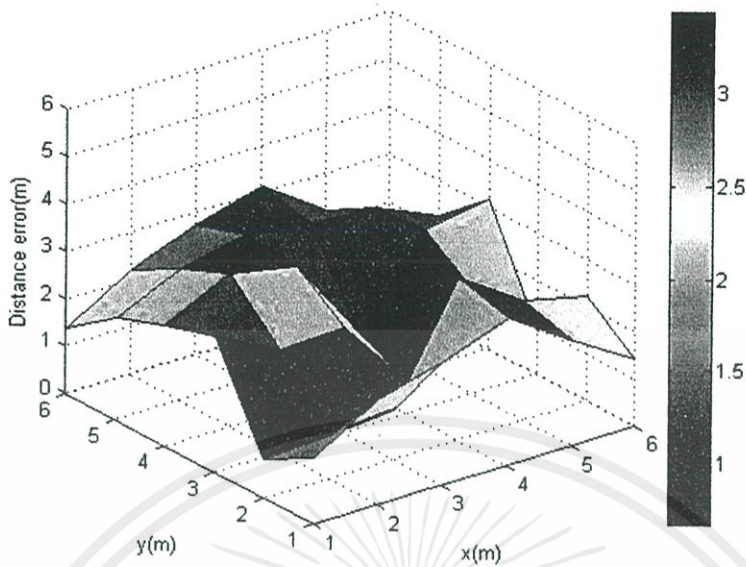
(5,4)	(6.9189,1.8929)	0.8705	(6.9472,1.7219)	2.9969
(5,5)	(3.5000,3.5000)	2.1213	(3.5000,3.5000)	2.1213
(5,6)	(1.8309,1.8407)	5.2291	(1.6806,1.6858)	5.4434
(6,1)	(6.9998,0)	1.4141	(6.9999,0)	1.4135
(6,2)	(6.9860,0.0140)	2.2173	(6.9930,0.0070)	2.2267
(6,3)	(4.6579,2.3421)	1.4947	(4.6618,2.3382)	1.4929
(6,4)	(3.5004,3.4996)	2.5492	(3.5002,3.4998)	2.5494
(6,5)	(3.5002,3.4998)	2.9154	(3.5001,3.4999)	1.4142
(6,6)	(3.5000,3.5000)	3.5355	(3.5000,3.5000)	0.9413

ผลการทดลองโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม เมื่อค่า $n=2$ และค่า $g=9$



รูปที่ 4.38 ค่าระยะทางผิดพลาด โดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม

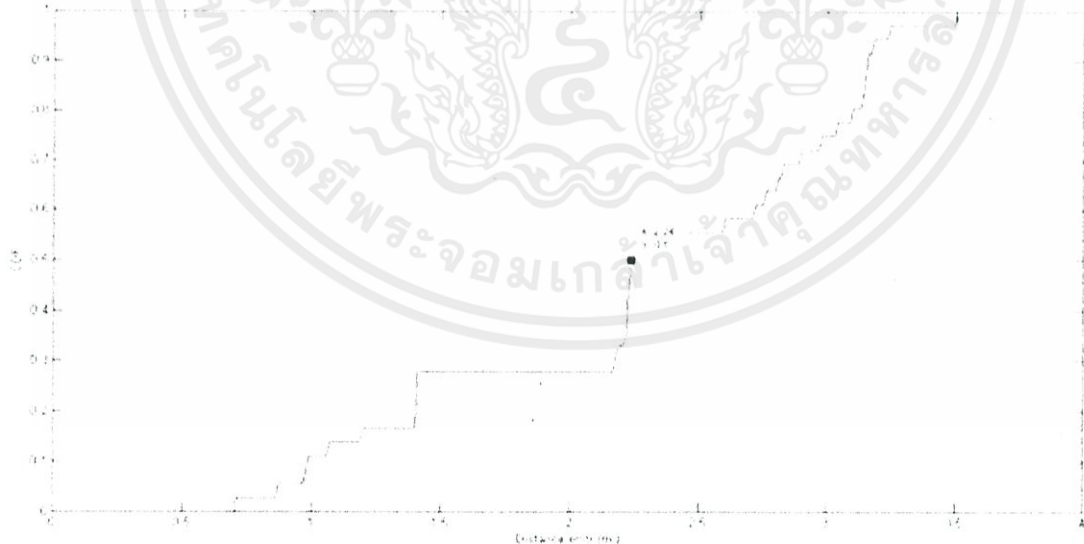
จากรูปที่ 4.38 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อใช้ค่า $n=2$ และ $g=9$ ซึ่งจากตำแหน่งกราฟที่ 0.5 ในแกน y หมายถึง ค่ามัธยฐานนั่นเอง โดยแกน x นั้นคือค่าระยะทางผิดพลาด จากกราฟสามารถแสดงได้ว่า ค่ามัธยฐานของระยะทางที่ผิดพลาดของกรณีดังกล่าวได้ค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 2.23 เมตร



รูปที่ 4.39 ค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

จากรูปที่ 4.39 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดในแต่ละตำแหน่งในโมเดลว่า แต่ละตำแหน่งนั้นทำให้เกิดค่าระยะทางผิดพลาดเป็นเท่าใด โดยแสดงในรูปของกราฟพื้นผิว

ผลการทดลองโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม เมื่อค่า $n=2$ และ ค่า $g=10$

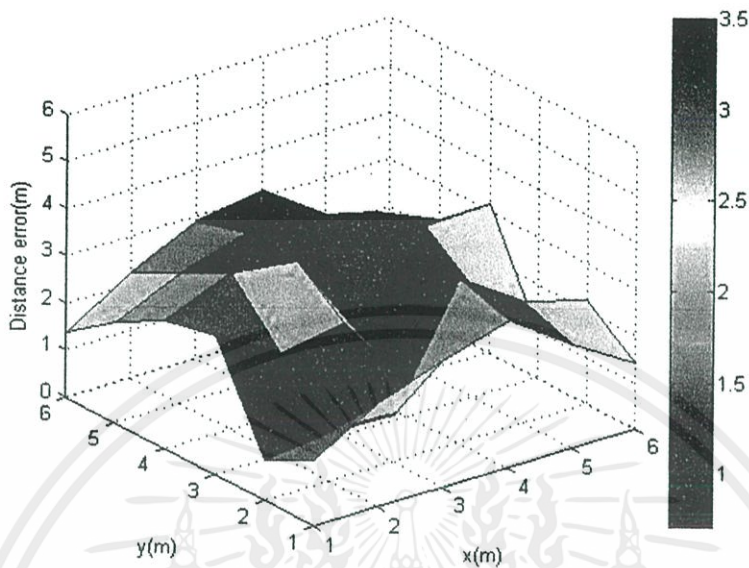


รูปที่ 4.40 ค่าระยะทางผิดพลาดโดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม

จากรูปที่ 4.40 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อใช้ค่า $n=2$ และ $g=10$ ซึ่งจากตำแหน่งกราฟที่ 0.5 ในแกน y หมายถึง ค่ามัธยฐานนั่นเอง โดยแกน x นั้นคือค่าระยะทางผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟสามารถแสดงได้ว่า ค่ามัธยฐานของระยะทางที่ผิดพลาดของกรณีดังกล่าวได้ค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 2.24 เมตร



รูปที่ 4.41 ค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

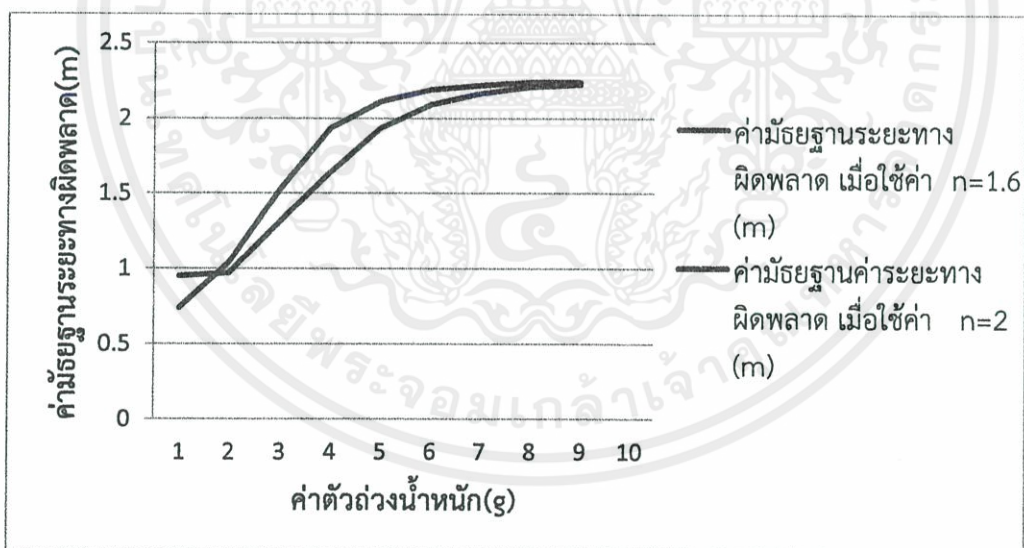
จากรูปที่ 4.41 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดในแต่ละตำแหน่งในโมเดลว่า แต่ละตำแหน่งนั้นทำให้เกิดค่าระยะทางผิดพลาดเป็นเท่าใด โดยแสดงในรูปของกราฟพื้นผิว

4.8 สรุปผลค่าระยะทางความผิดพลาดโดยอ่านค่าจากกราฟของความน่าจะเป็นแจกสะสม

ทำการสรุปค่าความผิดพลาดที่ได้ของค่าตัวถ่วงน้ำหนักแต่ละค่าโดยเลือกค่าที่เป็นมัธยฐานในค่าตำแหน่งที่ 0.5 ของกราฟของความน่าจะเป็นแจกแจงสะสมโดยสรุปได้ตามตารางที่ 4.24 เพื่อเลือกค่าที่เหมาะสม

ตารางที่ 4.24 ค่ามัธยฐานความผิดพลาดของระยะทางของค่าตัวถ่วงน้ำหนักในกรณีค่าดัชนีการแพร่กระจายสัญญาณในสภาวะแวดล้อมต่างๆ หรือ ค่า n ที่ได้จากการทดลอง และค่าทางทฤษฎี

ค่าตัวถ่วงน้ำหนัก(g)	ค่ามัธยฐานของระยะทางผิดพลาด เมื่อใช้ค่า $n=1.6$ (m)	ค่าตัวถ่วงน้ำหนัก(g)	ค่ามัธยฐานของระยะทางผิดพลาด เมื่อใช้ค่า $n=2$ (m)
1	0.74	1	0.95
2	1.04	2	0.97
3	1.52	3	1.31
4	1.937	4	1.64
5	2.11	5	1.937
6	2.19	6	2.09
7	2.22	7	2.165
8	2.24	8	2.21
9	2.24	9	2.225
10	2.24	10	2.24



รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ามัธยฐานระยะทางผิดพลาดกับค่าตัวถ่วงน้ำหนัก(g) ของดัชนีการแพร่กระจายสัญญาณในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ หรือ ค่า n ที่ได้จากการทดลอง และค่าทางทฤษฎี

4.9 สรุปผลจากตารางและกราฟ

จากรูปที่ 4.42 และตาราง 4.24 ได้แสดงค่ามัธยฐานความผิดพลาดของระยะทางผิดพลาดของค่าตัวถ่วงน้ำหนักค่าต่างๆ ในกรณีเมื่อเลือกใช้ค่าดัชนีการแพร่กระจายสัญญาณในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ หรือ ค่าที่ได้จากการทดลอง $n=1.6$ และ ค่าของค่าตัวถ่วงน้ำหนักเป็น 1 พบว่าให้ค่ามัธยฐานระยะทางผิดพลาดที่น้อยสุด และแนวโน้มค่าตัวถ่วงน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ค่ามัธยฐานระยะทางผิดพลาดมากขึ้นตาม

4.10 การปรับระยะห่างของแต่ละพิกัด

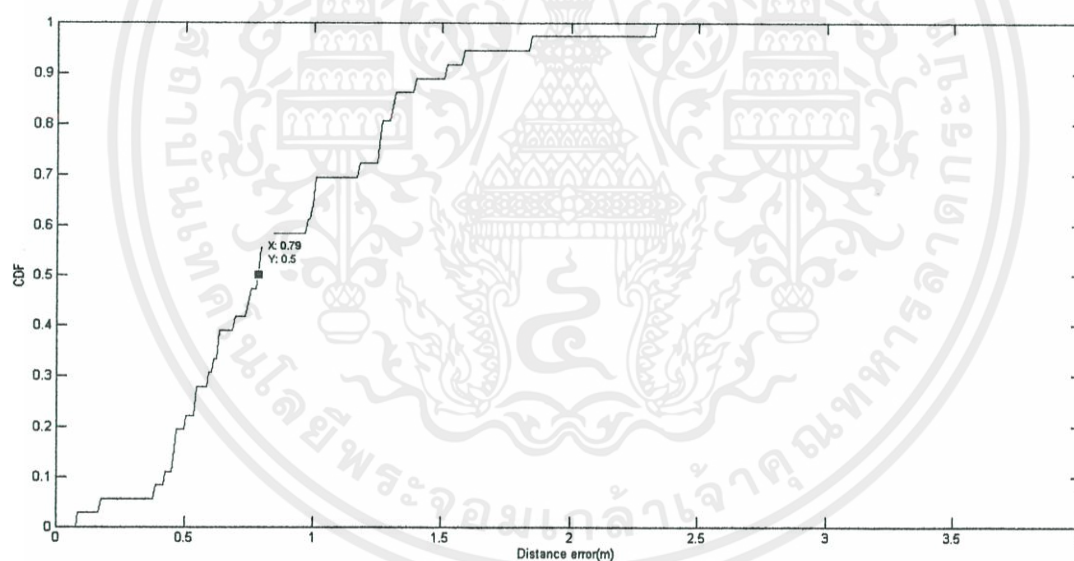
4.10.1 ทำการปรับระยะห่างของแต่ละพิกัดเป็น 1.2 เมตร

ตารางที่ 4.25 พิกัดของการระบุตำแหน่งตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักหรือค่า g นั้นมีค่า 1 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $n = 1.6$ และระยะระหว่างพิกัดเป็น 1.2 เมตร

พิกัด	พิกัดเฉลี่ยที่วัดได้ (m)	ค่าความผิดพลาดของระยะทาง (m)
(1,1)	(1.3274,1.3323)	0.4665
(1,2)	(1.4431,2.9023)	1.0052
(1,3)	(1.1138,3.1332)	0.1752
(1,4)	(1.3052,4.3530)	0.4667
(1,5)	(1.6934,4.7087)	0.7521
(1,6)	(1.0316,5.9115)	0.0940
(2,1)	(2.4395,2.3311)	1.4018
(2,2)	(1.6166,1.9411)	0.3879
(2,3)	(2.0291,3.6429)	0.6436
(2,4)	(1.5868,4.4828)	0.6355
(2,5)	(1.4553,5.0849)	0.5513
(2,6)	(1.7283,5.6635)	0.4325
(3,1)	(2.5392,2.1704)	1.2579
(3,2)	(1.9532,2.7000)	1.2591
(3,3)	(3.8801,3.4748)	1.0000
(3,4)	(2.2572,3.8525)	0.7573
(3,5)	(2.3098,5.4034)	0.7995
(3,6)	(2.0569,5.2832)	1.1845
(4,1)	(4.1507,3.3330)	2.3378
(4,2)	(3.0344,2.1859)	0.9833
(4,3)	(4.4600,2.7801)	0.5099
(4,4)	(4.4089,3.4303)	0.7008
(4,5)	(4.3846,4.6113)	0.5468

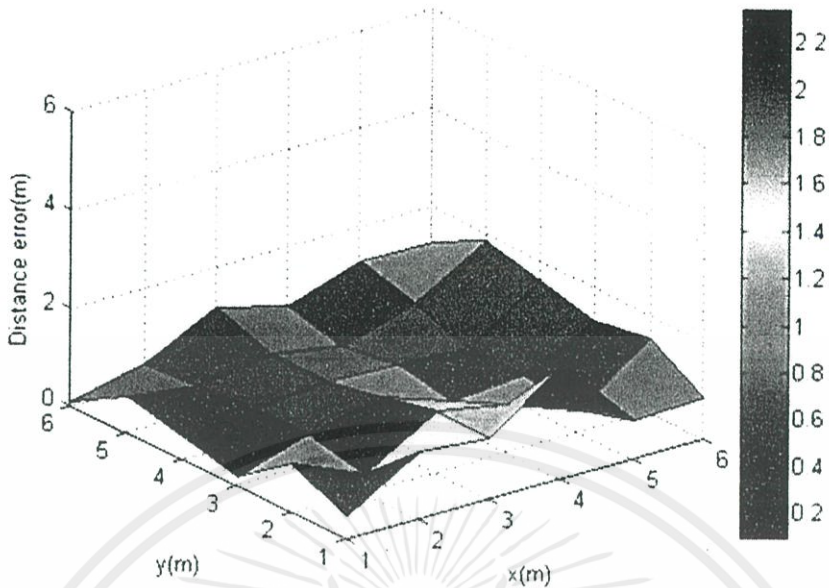
(4,6)	(4.2932,5.2619)	0.7943
(5,1)	(5.0884,1.7982)	0.8031
(5,2)	(4.6684,1.6788)	0.4616
(5,3)	(4.5565,2.5973)	0.5991
(5,4)	(4.9598,3.3804)	0.6209
(5,5)	(4.2394,4.3311)	1.0129
(5,6)	(4.6728,4.7325)	1.3091
(6,1)	(5.9539,1.8509)	0.8521
(6,2)	(4.5719,1.4772)	1.5208
(6,3)	(4.6899,2.8023)	1.3249
(6,4)	(4.6801,3.1176)	1.5877
(6,5)	(4.6724,3.7052)	1.8545
(6,6)	(5.1318,5.0767)	1.2647

ผลการทดลองโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม หลังจากทำปรับระยะเป็น 1.2 เมตร เมื่อค่า $n = 1.6$ และค่า $g = 1$



รูปที่ 4.43 ค่าระยะทางผิดพลาดโดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม

จากรูปที่ 4.43 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุด หลังจากปรับระยะห่างระหว่างพิกัดเป็น 1.2 เมตร และใช้ค่า $n = 1.6$ และ $g = 1$ ซึ่งจากตำแหน่งกราฟที่ 0.5 ในแกน y หมายถึงค่ามัธยฐานนั่นเอง โดยแกน x นั้นคือค่าระยะทางผิดพลาด จากกราฟสามารถแสดงได้ว่า ค่ามัธยฐานของระยะทางที่ผิดพลาดของกรณีดังกล่าวได้ค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 0.79 เมตร



รูปที่ 4.44 ค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

จากรูปที่ 4.44 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดในแต่ละตำแหน่งในโมเดลว่า แต่ละตำแหน่งนั้นทำให้เกิดค่าระยะทางผิดพลาดเป็นเท่าใด โดยแสดงในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

4.10.2 ทำการปรับระยะห่างของแต่ละพิกัดเป็น 0.8 เมตร

ตารางที่ 4.26 พิกัดของการระบุตำแหน่งตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนักโดยค่าตัวถ่วงน้ำหนักหรือค่า g นั้นมีค่า 1 และค่าความผิดพลาดระยะทาง เมื่อค่า $n = 1.6$ และระยะระหว่างพิกัดเป็น 0.8 เมตร

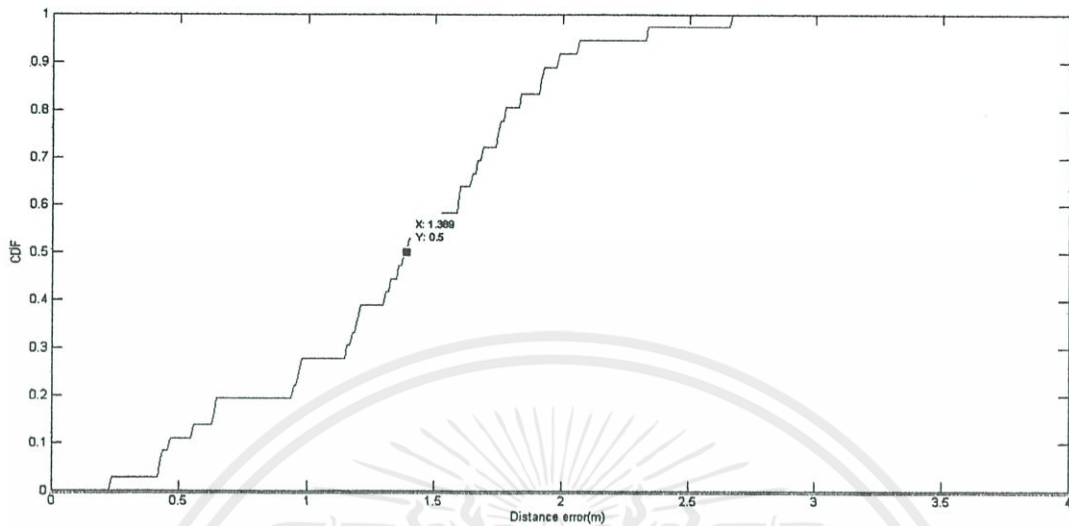
พิกัด	พิกัดเฉลี่ยที่วัดได้ (m)	ค่าความผิดพลาดของระยะทาง(m)
(1,1)	(1.3447,1.3152)	0.4665
(1,2)	(2.4775,2.6176)	1.0052
(1,3)	(2.6384,2.3468)	0.1752
(1,4)	(2.1829,3.4322)	0.4667
(1,5)	(2.2208,3.6295)	0.7521
(1,6)	(2.4960,4.2002)	0.0940
(2,1)	(2.5888,1.2801)	1.4018
(2,2)	(3.2948,2.4242)	0.3879
(2,3)	(3.5935,4.0959)	0.6436
(2,4)	(3.6052,3.2959)	0.6355
(2,5)	(3.4666,3.9955)	0.5513
(2,6)	(4.1898,4.4733)	0.4325
(3,1)	(3.9529,2.8431)	1.2579

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3,2)	(4.0555,3.2035)	1.2591
(3,3)	(4.2039,3.0278)	1.0000
(3,4)	(3.7156,4.6701)	0.7573
(3,5)	(3.8981,4.2358)	0.7995
(3,6)	(3.9749,4.2706)	1.1845
(4,1)	(4.7612,2.4881)	2.3378
(4,2)	(3.6911,2.5562)	0.9833
(4,3)	(4.5078,4.6073)	0.5099
(4,4)	(5.2399,3.4008)	0.7008
(4,5)	(4.8523,4.5394)	0.5468
(4,6)	(4.2591,4.8742)	0.7943
(5,1)	(5.0388,2.6494)	0.8031
(5,2)	(4.8702,3.2003)	0.4616
(5,3)	(5.1489,3.4064)	0.5991
(5,4)	(5.2599,3.6389)	0.6209
(5,5)	(5.1670,5.1672)	1.0129
(5,6)	(5.3578,4.7208)	1.3091
(6,1)	(5.5997,2.4787)	0.8521
(6,2)	(4.8457,3.5304)	1.5208
(6,3)	(4.9870,4.0444)	1.3249
(6,4)	(5.4553,4.7742)	1.5877
(6,5)	(4.6261,5.2913)	1.8545
(6,6)	(5.6456,6.4321)	1.2674

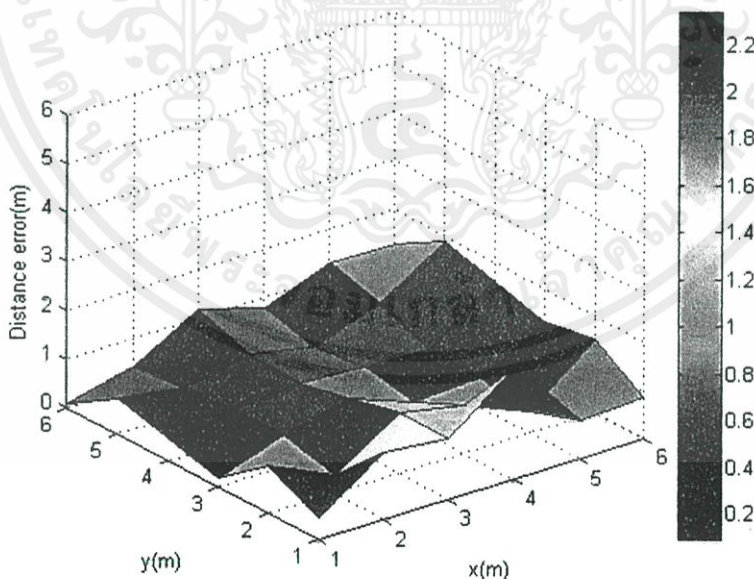
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุม หลังจากทำปรับระยะเป็น 0.8 เมตร เมื่อค่า $n = 1.6$ และค่า $g = 1$



รูปที่ 4.45 ค่าระยะทางผิดพลาดโดยแสดงในรูปความน่าจะเป็นแจกแจงสะสม

จากรูปที่ 4.45 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุด หลังจากปรับระยะห่างระหว่างพิกัดเป็น 0.8 เมตร และใช้ค่า $n = 1.6$ และ $g = 1$ ซึ่งจากตำแหน่งกราฟที่ 0.5 ในแกน y หมายถึงค่ามัธยฐานนั่นเอง โดยแกน x นั้นคือค่าระยะทางผิดพลาด จากกราฟสามารถแสดงได้ว่า ค่ามัธยฐานของระยะทางที่ผิดพลาดของกรณีดังกล่าวได้ค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุดคือ 1.39 เมตร



รูปที่ 4.46 ค่าระยะทางผิดพลาด ในรูปแบบของกราฟพื้นผิว

จากรูปที่ 4.46 แสดงถึงค่าระยะทางผิดพลาดในแต่ละตำแหน่งในโมเดลว่า แต่ละตำแหน่งนั้นทำให้เกิดค่าระยะทางผิดพลาดเป็นเท่าใด โดยแสดงในรูปของกราฟพื้นผิว

4.11สรุปผลจากการทดลองปรับระยะทางระหว่างจุดพิกัด

ในการทดลองปริณญาณิพนธ์นี้ผู้ทดลองได้ทำการปรับระยะทางระหว่างพิกัดโดยเพิ่มขึ้นและลดลง 0.2 เมตรโดยข้อจำกัดของพื้นที่ในการทดลองในกรณีปรับระยะทางระหว่างโหนดเป็น 1.2 เมตร เป็นกรณีของขอบเขตของโมเดลที่กว้างที่สุดที่เป็นไปได้ มีค่าระยะทางผิดพลาด เท่ากับ 0.79 เมตร ซึ่งใกล้เคียงกับโมเดลในปริณญาณิพนธ์ ซึ่งในกรณีที่ลดระยะทางระหว่างโหนดเป็น 0.8 เมตร มีค่ามัธยฐานผิดพลาดทางระยะทางเป็น 1.39 เมตร จากการทดลองเห็นค่าความผิดพลาดระยะทางผิดพลาดในกรณีที่ลดขนาดของโมเดลจะเพิ่มขึ้นมาก แต่ในกรณีที่ขอบเขตโมเดลที่เพิ่มขึ้น ค่าความผิดพลาดระยะทางนั้นไม่เพิ่มขึ้นมากนัก ส่วนในกรณีลดระยะห่างระหว่างพิกัดลงพบว่ามีค่าความผิดพลาดระยะทางมากขึ้นกว่าเดิมเกือบเท่าตัว



บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการออกแบบระบบระบุตำแหน่งของวัตถุภายในอาคารโดยมีการนำอุปกรณ์ชิคปีมาใช้ เนื่องจากชิคปีเป็นอุปกรณ์ที่สามารถนำไปใช้งานด้านเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สายได้ ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.4 ซึ่งได้ทำการศึกษาค้นคว้าถึงคุณสมบัติของชิคปีที่เลือกใช้ โดยใช้เทคนิคการระบุตำแหน่งแบบการถ่วงน้ำหนัก โดยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญสำหรับเทคนิคในการระบุตำแหน่งวิธีนี้คือ ค่าความแรงของสัญญาณแต่ละตำแหน่งที่สามารถนำไปคำนวณระยะทางระหว่างโหนดอ้างอิงได้ ค่าระดับตัวถ่วงน้ำหนักที่ต้องการทดลองเพื่อปรับค่าที่เหมาะสมกับการทดลองเพื่อให้มีค่าระยะทางผิดพลาดน้อยที่สุด ค่าดัชนีการแพร่กระจายสัญญาณในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ซึ่งในสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ซึ่งในแต่ละสภาวะแวดล้อมที่ต่างกันจะมีค่าพารามิเตอร์ต่างกัน จากนั้นนำค่าพิกัดที่ได้จากคำนวณมาเปรียบเทียบกับพิกัดจริงในโมเดลที่ได้ออกแบบไว้ เพื่อแสดงผลที่ได้ผ่านการประมวลผลทางโปรแกรม MATLAB และประเมินผลค่าระยะทางที่ผิดพลาดอยู่ในรูปแบบของกราฟฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม ซึ่งผลดังกล่าวได้จากการออกแบบจำลองการวัดและทดลองการวัด ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง คณะวิศวกรรมศาสตร์ อาคาร E12 ชั้นที่ 6 บริเวณลานหน้าลิฟต์ พิกัดที่ได้ทำการทดลองมีทั้งหมด 36 จุด โดยในแต่ละจุดมีระยะห่างในแนวแกน x และแกน y เป็นระยะทาง 1 เมตร

สำหรับการที่จะได้มาซึ่งค่าความแรงสัญญาณที่ได้จากโหนดอ้างอิง 4 ตัวนั้น และได้ทำการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุม โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ (บอร์ดอาเดียโน รุ่น UNO) เชื่อมต่ออยู่กับชิคปีที่ทำหน้าที่เป็นโคออดิเนเตอร์ (เปรียบเสมือนเป็นวัตถุเป้าหมาย) มีการรับส่งค่าความแรงของสัญญาณจากแต่ละโหนดมาอยู่ตลอดเวลา ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวนี้ทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมค่าความแรงจากโหนดอ้างอิงทั้ง 4 โหนด มาส่งต่อให้กับชิคปีตัวที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ และรับค่าความแรงและบันทึกผลความแรงอย่างต่อเนื่องเพื่อส่งต่อไปที่ส่วนโปรแกรมแสดงผล เพื่อแสดงเป็นพิกัดต่อไปในส่วนการทดลองปรับเลื่อนระยะห่างระหว่างจุดพิกัดอ้างอิงเพื่อศึกษาผลของค่าความคาดเคลื่อนเพิ่มเติม โดยจากการทดลองในกรณีค่าตัวถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 1 และค่าดัชนีการแพร่กระจายสัญญาณในสภาวะแวดล้อมจากการทดลอง พบว่าให้ค่าความผิดพลาดของระยะทางที่น้อยที่สุด มีค่าเท่ากับ 0.74 เมตร โดยในขั้นตอนของการปรับเลื่อนระยะพิกัดพบว่ากรณีของระยะห่างจุดพิกัดเป็น 0.8 เมตร ให้ค่าความผิดพลาดของระยะทางเท่ากับ 1.39 เมตร และกรณีระยะห่างจุดพิกัดเป็น 1.2 เมตร ให้ค่าความผิดพลาดของระยะทางเท่ากับ 0.79 เมตร ซึ่งค่าความผิดพลาดอาจเกิดมาจากปัญหาสัญญาณย่านความถี่ข้างเคียงที่ก่อให้เกิดการรบกวน ปัญหาการจางหายและการเปลี่ยนแปลงของสภาวะภายในอาคาร รวมทั้งการเกิดการรบกวนของสัญญาณจากระบบความถี่เดียวกัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการระบุตำแหน่งแบบอื่นเพิ่มเติม
2. ทำการศึกษาสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันเพิ่มเติม เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการระบุตำแหน่ง
3. มีการทดลองเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ชนิดอื่น ๆ เพื่อดูประสิทธิภาพและขีดจำกัดในการใช้งานเพิ่มเติม
4. มีการสร้างฐานข้อมูลของความแรงสัญญาณกับค่าความผิดพลาดระยะทาง เพื่อปรับปรุงตำแหน่งของพิกัดให้แม่นยำมากขึ้น



บรรณานุกรม

- [1]Digi.com.“RFmodulesutilizingtheZigBeePROFeatureSet.”<http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/zigbee-mesh-module/xbee-zb-module#docs>
- [2] arduino.cc . “Arduino uno.”<http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>
- [3] logicthai.net . “เริ่มต้นกับ arduino .” <http://www.logicthai.net/node/13>
- [4]ThaiEasyElec.com.“IntroductionZigbeeandXbeeBASIC.”<http://www.thaieasyelec.com/Review-Product-Article/zigbee-and-xbee-basic.html>
- [5]ThaiEasyElec.com. “Xbee คือ อะไร.” <http://www.thaieasyelec.com/Review-Product-Article/what-is-xbee.html>
- [6] Jutamas tongkam, “Evaluation of Wireless Sensor Network with Weighted Centroid localization Algorithm Based on Measurement data.” Accuracy of RSS-Based Centroid Localization Algorithms in an Indoor Environment ”, 2012.
- [7] ปริญญา สงวนสัตย์. คู่มือ MATLAB ฉบับสมบูรณ์.นทบุรี:ไอทีซี,2553
- [8] J. Chen, X.J. Wu¹, P.Z. Wen, F. Ye¹, J.W. Liu. “A New Distributed Localization Algorithm for ZigBee Wireless Networks.” Guilin University of Electronic Technology,2009.
- [9] Long ChengCheng-Dong Wu and Yun-Zhou Zhang. “ Indoor Robot Localization Based on Wireless Sensor Networks.”IEEE.2004.
- [10] Sukhyun Yun, Jaehun Lee, Wooyong Chung and Euntai Kim.“Centroid Localization Method in Wireless SensorNetworks using TSK Fuzzy.” odelingDepartment of Electrical and Electronic Engineering Yonsei University,2009.
- [11]Jan Blumenthal , Ralf Grossmann, Frank Golatowski, Dirk TimmermannCELISCA. “Weighted Centroid Localization in Zigbee-basedSensor Networks.” University of Rostock,2010.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
// Pin 13 has an LED connected on most Arduino boards.

// give it a name:

int LED_Green = 13; //GREEN LOW = LED ON, HIGH = LED OFF

int SW1 = A0;

//variable

byte inByte;

word i;

word Timeout;

byte outChar;

byte rssi,rssi1,rssi2,rssi3,rssi4;

// the setup routine runs once when you press reset:

void setup() {

  Serial1.begin(9600);

  Keyboard.begin();

  // initialize the digital pin as an output.

  pinMode(LED_Green, OUTPUT);

  pinMode(SW1, INPUT);

  digitalWrite(A0, HIGH);

  digitalWrite(LED_Green, HIGH);

  delay(500);

  digitalWrite(LED_Green, LOW);
```

```

delay(500);

digitalWrite(LED_Green, HIGH);

delay(500);

digitalWrite(LED_Green, LOW);

delay(500);

}

```

```
// the loop routine runs over and over again forever:
```

```

void loop()
{
while(digitalRead(SW1) == 1){
  delay(1);
  inByte = Serial1.read();
};
while(digitalRead(SW1) == 0) {
  delay(100);
};
while(digitalRead(SW1) == 1){
  Clear_RxBuff();
  API_Rx_Wait();          i
  Keyboard.println(rssi1,HEX);
  delay(100);
  Keyboard.println(rssi2,HEX);
}
}

```

```

    delay(100);

    Keyboard.println(rssi3,HEX);

    delay(100);

    Keyboard.println(rssi4,HEX);

    delay(1200);

}

while(digitalRead(SW1) == 0) {

    delay(100);

}

}

//=====
void API_Rx_Wait()
{
    //Timeout = 0;

    do{

        delay(1);

        //Timeout++;

        inByte = Serial1.read();

    }while(inByte != 0x7E);

    Timeout = 0;

    do{

        delay(1);

```

```

Timeout++;

}while((Serial1.available() < 21)&&(Timeout < 1000));

if(Timeout < 1000){

    inByte = Serial1.read();

    inByte = Serial1.read();

    inByte = Serial1.read();

    inByte = Serial1.read();

    inByte = Serial1.read();

    inByte = Serial1.read();

    inByte = Serial1.read();

    inByte = Serial1.read();

    inByte = Serial1.read();

    inByte = Serial1.read();

    inByte = Serial1.read();

    inByte = Serial1.read();

    inByte = Serial1.read();

    inByte = Serial1.read();

    inByte = Serial1.read();

    inByte = Serial1.read();

    inByte = Serial1.read();

    inByte = Serial1.read();

    rssi1 = Serial1.read();

    rssi2 = Serial1.read();

    rssi3 = Serial1.read();

    rssi4 = Serial1.read();

```

```
        inByte = Serial1.read();
    }
}

//=====

void Clear_RxBuff()
{
    delay(10);
    do{
        inByte = Serial1.read();
    }while(Serial1.available());
}
//=====
```





ภาคผนวก ข
โปรแกรมควบคุมการทำงานในส่วนของโหนดเป้าหมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

//#include <SoftwareSerial.h>

//SoftwareSerial Debugger(A5, A4); // RX, TX

// Pin 13 has an LED connected on most Arduino boards.

// give it a name:

int LED_Green = 9;

int LED_Red = 7;

//variable

byte inByte;

word len;

word i;

word Timeout;

byte outChar;

byte rssi,rssi1,rssi2,rssi3,rssi4;

byte CheckSumCal;

byte CheckSumRead;

byte ByteCount;

//byte Transmit_buff[25];

byte Recieve_buff[25];

byte Header_buff[5] = {0x7E,0x00,0x16,0x10,0x01};

boolean Quit,Package_Timeout;

boolean completed;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

// the setup routine runs once when you press reset:

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);

  // initialize the digital pin as an output.
  pinMode(LED_Green, OUTPUT);
  pinMode(LED_Red, OUTPUT);
  digitalWrite(LED_Red, LOW);
  digitalWrite(LED_Green, HIGH);
  delay(500);
  digitalWrite(LED_Green, LOW);
  delay(500);
  digitalWrite(LED_Green, HIGH);
  delay(500);
  digitalWrite(LED_Green, LOW);
  delay(500);
}
```

// the loop routine runs over and over again forever:

```
void loop()
{
  Clear_RxBuff();
  link1_ZB();
  delay(350);
}
```

```
API_Tx_return_wLED();  
  
Clear_RxBuff();  
  
testRF_AT_ZB();  
  
delay(150);  
  
API_Tx_return_RSSI_ZB();  
  
rssi1 = rssi;
```

```
Clear_RxBuff();  
  
link2_ZB();  
  
delay(350);  
  
API_Tx_return_wLED();  
  
Clear_RxBuff();  
  
testRF_AT_ZB();  
  
delay(150);  
  
API_Tx_return_RSSI_ZB();  
  
rssi2 = rssi;
```

```
Clear_RxBuff();  
  
link3_ZB();  
  
delay(350);  
  
API_Tx_return_wLED();  
  
Clear_RxBuff();  
  
testRF_AT_ZB();
```

```

delay(150);

API_Tx_return_RSSI_ZB();

rssi3 = rssi;

Clear_RxBuff();

link4_ZB();

delay(350);

API_Tx_return_wLED();

Clear_RxBuff();

testRF_AT_ZB();

delay(150);

API_Tx_return_RSSI_ZB();

rssi4 = rssi;

Clear_RxBuff();

link5_ZB();

delay(350);

API_Tx_return_wLED();

}

//=====

void link1_ZB()

{

    Serial.write(0x7E);

```

```

Serial.write(0x00);

Serial.write(0x12);

Serial.write(0x10);

Serial.write(0x01);

Serial.write(0x00);

Serial.write(0x13);

Serial.write(0xA2);

Serial.write(0x00);

Serial.write(0x40);

Serial.write(0x6F);

Serial.write(0xE1);

Serial.write(0x6E);

Serial.write(0xFF);

Serial.write(0xFE);

Serial.write(0x00);

Serial.write(0x00);

Serial.write(0x30);

Serial.write(0x31);

Serial.write(0x32);

Serial.write(0x33);

Serial.write(0x78);

}

//=====

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
void link2_ZB()
{
  Serial.write(0x7E);
  Serial.write(0x00);
  Serial.write(0x12);
  Serial.write(0x10);
  Serial.write(0x01);
  Serial.write(0x00);
  Serial.write(0x13);
  Serial.write(0xA2);
  Serial.write(0x00);
  Serial.write(0x40);
  Serial.write(0x6F);
  Serial.write(0xE2);
  Serial.write(0x3E);
  Serial.write(0xFF);
  Serial.write(0xFE);
  Serial.write(0x00);
  Serial.write(0x00);
  Serial.write(0x31);
  Serial.write(0x32);
  Serial.write(0x33);
  Serial.write(0x34);
}
```

```

Serial.write(0xA3);

}

//=====

void link3_ZB()
{
Serial.write(0x7E);

Serial.write(0x00);

Serial.write(0x12);

Serial.write(0x10);

Serial.write(0x01);

Serial.write(0x00);

Serial.write(0x13);

Serial.write(0xA2);

Serial.write(0x00);

Serial.write(0x40);

Serial.write(0x4A);

Serial.write(0x7F);

Serial.write(0x90);

Serial.write(0xFF);

Serial.write(0xFE);

Serial.write(0x00);

Serial.write(0x00);

Serial.write(0x32);

```

```

Serial.write(0x33);

Serial.write(0x34);

Serial.write(0x35);

Serial.write(0xD5);

}

//=====

void link4_ZB()
{
Serial.write(0x7E);
Serial.write(0x00);
Serial.write(0x12);
Serial.write(0x10);
Serial.write(0x01);
Serial.write(0x00);
Serial.write(0x13);
Serial.write(0xA2);
Serial.write(0x00);
Serial.write(0x40);
Serial.write(0x77);
Serial.write(0x0E);
Serial.write(0x90);
Serial.write(0xFF);
Serial.write(0xFE);

```

```

Serial.write(0x00);

Serial.write(0x00);

Serial.write(0x33);

Serial.write(0x34);

Serial.write(0x35);

Serial.write(0x36);

Serial.write(0x15);

}

//-----

void link5_ZB()
{
Serial.write(0x7E);
Serial.write(0x00);
Serial.write(0x14);
Serial.write(0x10);
Serial.write(0x01);
Serial.write(0x00);
Serial.write(0x13);
Serial.write(0xA2);
Serial.write(0x00);
Serial.write(0x40);
Serial.write(0x7A);
Serial.write(0x25);

```

```

Serial.write(0x05);

Serial.write(0xFF);

Serial.write(0xFE);

Serial.write(0x00);

Serial.write(0x00);

Serial.write(0x44);

Serial.write(0x42);

ChecksumCal = 0x2D;

Serial.write(rssi1);

ChecksumCal = CheckSumCal + rssi1;

Serial.write(rssi2);

ChecksumCal = CheckSumCal + rssi2;

Serial.write(rssi3);

ChecksumCal = CheckSumCal + rssi3;

Serial.write(rssi4);

ChecksumCal = CheckSumCal + rssi4;

ChecksumCal = 0xFF - CheckSumCal;

Serial.write(CheckSumCal);

}

//=====

void API_Tx_return_wLED()

{

```

```

Timeout = 0;

do{

    delay(1);

    Timeout++;

    inByte = Serial.read();

}while((inByte != 0x7E)&&(Timeout < 5000));

if(Timeout < 5000){

    Package_Timeout = 0;

    inByte = Serial.read();

    inByte = Serial.read();

    len = inByte + 1;

    Timeout = 0;

    do{

        delay(1);

        Timeout++;

    }while((Serial.available() < len)&&(Timeout < 1000));

    if(Timeout < 1000){

        for(i=0;i<=len;i++){

            inByte = Serial.read();

            if(i == 5){

                if(inByte == 0x00){

                    digitalWrite(LED_Green, HIGH);

                    delay(10);

```

```

        digitalWrite(LED_Green, LOW);
    }
    else{
        digitalWrite(LED_Red, HIGH);
        delay(10);
        digitalWrite(LED_Red, LOW);
    }
}
}
}
}
else
{
    Package_Timeout = 1;
}
}
//=====
void API_Tx_return_RSSI_ZB()
{
    Timeout = 0;
    completed = 0;
    do{
        delay(1);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Timeout++;

inByte = Serial.read();

}while((inByte != 0x7E)&&(Timeout < 5000));

if(Timeout < 5000){

Package_Timeout = 0;

inByte = Serial.read();

inByte = Serial.read();

len = inByte + 1;

Timeout = 0;

do{

delay(1);

Timeout++;

}while((Serial.available() < len)&&(Timeout < 1000));

if(Timeout < 1000){

for(i=0;i<=len;i++){

inByte = Serial.read();

delay(2);

if(i == 4){

if(inByte == 0x00){

digitalWrite(LED_Green, HIGH);

delay(10);

digitalWrite(LED_Green, LOW);

completed = 1;

```

```

}

else{

    digitalWrite(LED_Red, HIGH);

    delay(10);

    digitalWrite(LED_Red, LOW);

}

}

if(i==5){

    if(completed == 1){

        rssi = inByte;

    }

    else{

        rssi = 0;

    }

}

}

//For loop

}

}

else

{

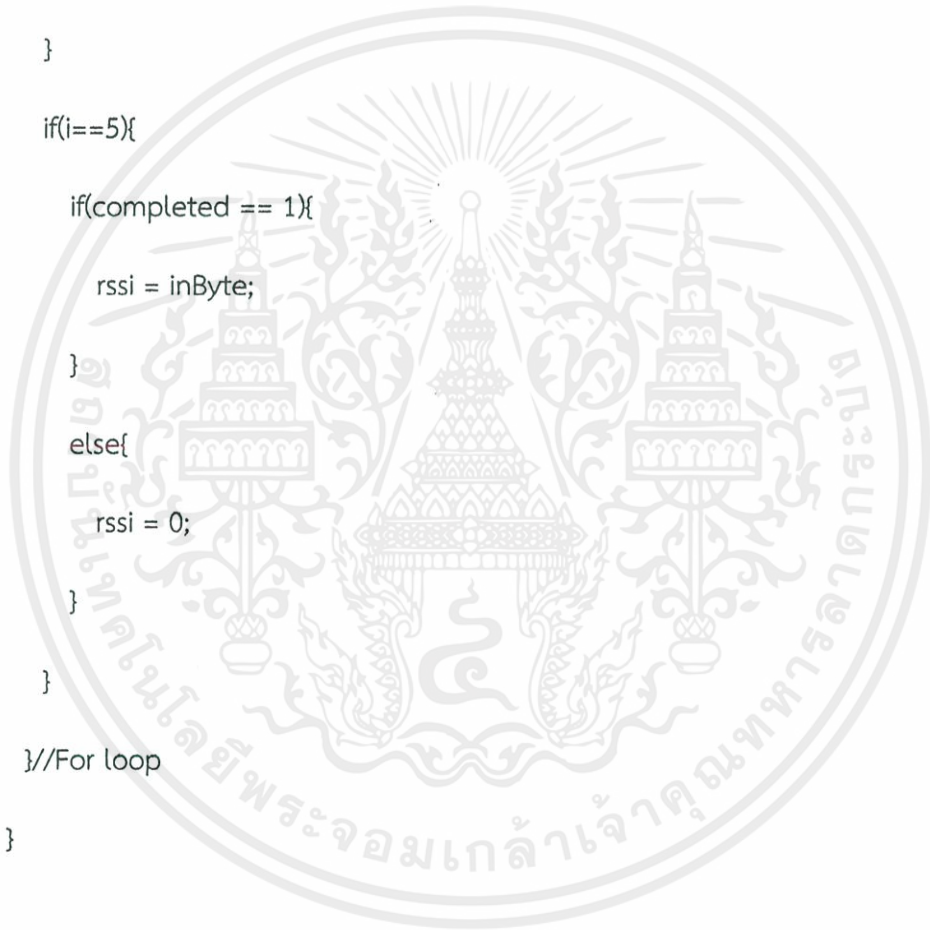
    Package_Timeout = 1;

}

}

}

```



```

//=====
void testRF_AT_ZB()
{
  Serial.write(0x7E);
  Serial.write(0x00);
  Serial.write(0x04);
  Serial.write(0x08);
  Serial.write(0x01);
  Serial.write(0x44);
  Serial.write(0x42);
  Serial.write(0x70);
}
//=====
void Clear_RxBuff()
{
  delay(10);
  do{
    inByte = Serial.read();
  }while(Serial.available());
}
//=====

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า, ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

close all;

clear all;

clc;

while 1

%%%%path loss exponent and power at reference%%%%

n=1.6;

P0=-34.60625;

g=1;

%%%% Received power from reference node%%%%%%

X1=input('Input number Node1:','s');
X2=input('Input number Node2:','s');
X3=input('Input number Node3:','s');
X4=input('Input number Node4:','s');

% fscanf(",text);

Y1 = hex2dec(X1);

Y2= hex2dec(X2);

Y3 = hex2dec(X3);

Y4 = hex2dec(X4);

%%%% Received power from reference node%%%%%%

P1 = -Y1;

P2 = -Y2;

```

P3 = -Y3;

P4 = -Y4;

%%%distance Tx to Rx%%%

d1=10.^((P1-(P0))/(-10*n));

d2=10.^((P2-(P0))/(-10*n));

d3=10.^((P3-(P0))/(-10*n));

d4=10.^((P4-(P0))/(-10*n));

%%%Coordinate of Reference Zigbee%%%

x1=0;

y1=0;

x2=0;

y2=7;

x3=7;

y3=0;

x4=7;

y4=7;

plot(1,1,'b*',1,2,'b*',1,3,'b*',1,4,'b*',1,5,'b*',1,6,'b*',2,1,'b*',2,2,'b*',2,3,'b*',2,4,'b*',2,5,'b*',2,6,'b*',3,1,'b*',3,2,'b*',3,3,'b*',3,4,'b*',3,5,'b*',3,6,'b*',4,1,'b*',4,2,'b*',4,3,'b*',4,4,'b*',4,5,'b*',4,6,'b*',5,1,'b*',5,2,'b*',5,3,'b*',5,4,'b*',5,5,'b*',5,6,'b*',6,1,'b*',6,2,'b*',6,3,'b*',6,4,'b*',6,5,'b*',6,6,'b*');

text(1,1,'(1,1)');

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

text(1,2,'(1,2)');
text(1,3,'(1,3)');
text(1,4,'(1,4)');
text(1,5,'(1,5)');
text(1,6,'(1,6)');
text(2,1,'(2,1)');
text(2,2,'(2,2)');
text(2,3,'(2,3)');
text(2,4,'(2,4)');
text(2,5,'(2,5)');
text(2,6,'(2,6)');
text(3,1,'(3,1)');
text(3,2,'(3,2)');
text(3,3,'(3,3)');
text(3,4,'(3,4)');
text(3,5,'(3,5)');
text(3,6,'(3,6)');
text(4,1,'(4,1)');
text(4,2,'(4,2)');
text(4,3,'(4,3)');
text(4,4,'(4,4)');
text(4,5,'(4,5)');
text(4,6,'(4,6)');

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

text(5,1,'(5,1)');
text(5,2,'(5,2)');
text(5,3,'(5,3)');
text(5,4,'(5,4)');
text(5,5,'(5,5)');
text(5,6,'(5,6)');

text(6,1,'(6,1)');
text(6,2,'(6,2)');
text(6,3,'(6,3)');
text(6,4,'(6,4)');
text(6,5,'(6,5)');
text(6,6,'(6,6)');

text(0,0.2,'Node 1');
text(0,6.8,'Node 2');
text(6.35,0.2,'Node 3');
text(6.35,6.8,'Node 4');

title('Indoor localization by using zigbee technology');

grid on;

hold on;

xe
=(1./(d1.^g)*x1+1./(d2.^g)*x2+1./(d3.^g)*x3+1./(d4.^g)*x4)/(1./(d1.^g)+1./(d2.^g)+1./(d3.^g)+1./(d4.^g))

```

```

ye
=(1./(d1.^g)*y1+1./(d2.^g)*y2+1./(d3.^g)*y3+1./(d4.^g)*y4)./(1./(d1.^g)+1./(d2.^g)+1./(d
3.^g)+1./(d4.^g))

axis ([0 7 0 7]);

xlabel('x    Computer monitor ');
ylabel('y');

plot(xe,ye,'ro','MarkerSize',37);

text(xe,ye,(' virtual position'));

hold off;

end

```

