

การศึกษาระบบการหาตำแหน่งภายในอาคาร
ด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้

STUDY ON INDOOR LOCALIZATION SYSTEM
USING VISIBLE LIGHT COMMUNICATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2558

KMITL-2015-EN-M-230-176

การศึกษาระบบการหาตำแหน่งภายในอาคาร
ด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้

STUDY ON INDOOR LOCALIZATION SYSTEM
USING VISIBLE LIGHT COMMUNICATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2558

KMITL-2015-EN-M-230-176

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON INDOOR LOCALIZATION SYSTEM
USING VISIBLE LIGHT COMMUNICATION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INFORMATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2015

KMITL-2015-EN-M-230-176

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

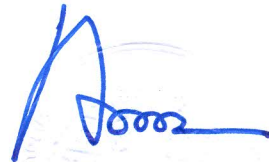
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้
Thesis Title Study on Indoor Localization System Using Visible Light Communication
นักศึกษา นายวิศรุต จันทรเสนา
รหัสประจำตัว 55613805
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมสารสนเทศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.พนารัตน์ เชิญถนอมวงศ์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-230-176

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อรรถสิทธิ์	เหล่าสกุล	
ผศ.ดร.สุธีรา	พันธุธีรานุรักษ์	
ดร.ขจิตพรรณ	กฤตพลวิมาน	
รศ.อรลาภ	แสงอรุณ	
ผศ.ดร.พนารัตน์	เชิญถนอมวงศ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2558 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคารเฉลิมพระเกียรติใหม่ ห้อง HM-403

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 14 กรกฎาคม พ.ศ. 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังสื่อโซเชียลมีเดีย
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้
นักศึกษา	นายวิศรุต จันทรเสนา
รหัสประจำตัว	55613805
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ
พ.ศ.	2558
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.พนารัตน์ เชิญถนอมวงศ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ เนื่องจากการประยุกต์ใช้งานการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็นได้ ได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นจากประโยชน์ของเทคโนโลยีนี้ ซึ่งไม่เพียงสามารถให้ความสว่างแก่การใช้งานได้เพียงอย่างเดียว แต่ยังให้การสื่อสารข้อมูลได้อีกด้วย ในวิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งการระบุตำแหน่งของวัตถุภายในอาคารออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงที่ 1 เป็นการใช้เทคนิคพรีอิกซิมิตี ร่วมกับเทคนิคฟิงเกอร์พริ้นต์ โดยการรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตนเชิงแสงในขอบเขตการส่องสว่างของหลอดสปอตไลท์แอลอีดีจากไดโอดพลังแสง สำหรับการระบุตำแหน่งด้วยเทคนิค พรีอิกซิมิตี และการรับความเข้มของแสงจากเครื่องวัดแสงสว่าง เพื่อใช้เป็นค่าพารามิเตอร์สำหรับการเปรียบเทียบรูปแบบด้วยการหาพิกัดตำแหน่งด้วยเทคนิคฟิงเกอร์พริ้นต์ ซึ่งในงานวิจัยช่วงที่ 1 นี้ ผลการทดลองวิจัยยังมีความคลาดเคลื่อนสูง อีกทั้งไม่สามารถระบุตำแหน่งของเป้าหมายเมื่ออยู่ในบริเวณที่แสงสว่างซ้อนทับกัน ดังนั้นจึงได้ทำการพัฒนาวิจัยมาสู่ช่วงที่ 2 โดยพัฒนาอุปกรณ์ให้สามารถอ่านข้อมูลในพื้นที่ที่แสงสว่างซ้อนทับกันได้ โดยใช้การสื่อสารแบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลาร่วมด้วย ซึ่งผลการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 การสื่อสารแบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลาสามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจากงานวิจัยในช่วงที่ 1 ได้ เนื่องจากอุปกรณ์ภาครับสามารถรับสัญญาณจากอุปกรณ์ภาคส่งได้ครบทุกตัวแม้ในบริเวณที่แสงสว่างซ้อนทับกัน และยังสามารถแบ่งขอบเขตพื้นที่ในการหาตำแหน่งจากบริเวณพื้นที่ที่แสงซ้อนทับกันได้ดีขึ้นอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Study on Indoor Localization System Using Visible Light Communication
Student	Mr.Wisarut Chantharasena
Student ID.	55613805
Degree	Master of Engineering
Program	Information Engineering
Year	2015
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Panarat Cherntanomwong

ABSTRACT

Indoor localization system using visible light communication (VLC) is studied in this thesis. The applications using VLC have recently become popular due to its benefits. VLC technology can provide not only illumination, but also the data communication via light. This thesis is divided into two phases. Firstly, the combination of proximity and fingerprint techniques is used to estimate the target location. The target receives the optical identification number from the photodiode on the extent of the illumination spotlight LED for positioning the target by the proximity technique. Moreover, at the same position, the LUX meter is used to measure the illuminance as a parameter for comparing the data pattern by the fingerprint localization technique. According to the first phase, the results give high distance errors because the optical identification number and the illuminance at the light overlapping area cannot be received correctly. For the second phase, the problem from the first phase has been solved. The device has been developed to receive the optical signal in the light overlapping area by using the technique of time division multiplexing (TDM). According to the results, TDM can deal with the first phase problem because the receiver can receive the optical signal in the light overlapping area from every transmitter, resulting in improving the localization accuracy using VLC.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พนารัตน์ เชิญถนอมวงศ์ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความช่วยเหลือ ให้ความรู้ และแนวทางการแก้ปัญหาสำหรับงานวิจัย ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา และให้คำแนะนำในสิ่งต่างๆ ซึ่งล้วนแต่มีประโยชน์กับการศึกษา และการใช้ชีวิต

ขอขอบคุณพี่ณพงษ์ ชื่นอรุระจิตร พี่สีสงคาม พิมมะเสน Mr.Dwi Joko Suroso พี่กฤษณ์ ศรีวิลาศ พี่ณัฐพล นาคราช น้องภูมินันท์ พรหมมาก น้องอลิสสา เลิศดิษยวรรณ น้องพัชร ลิ้มปิสุข น้องพรชนก นามอ่อนตา และน้องอภิชัย โอฬารรัตน์พันธ์ ที่ให้การช่วยเหลือในการทดลองวิจัย และมิตรภาพที่ดีเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ของข้าพเจ้า ที่คอยให้กำลังใจ ช่วยเหลือ ให้คำแนะนำในการเรียน การใช้ชีวิต และอยู่เคียงข้างข้าพเจ้าเสมอมา จนทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดาอันเป็นที่เคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้ด้วย

วิศรุต จันทรเสนา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 หลักการใหม่ที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้.....	2
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับงานวิจัย.....	3
2.1 กล่าวนำ.....	3
2.2 เทคนิคการระบุตำแหน่งวัตถุเป้าหมายภายในอาคาร.....	3
2.2.1 เทคนิคการระบุตำแหน่งวัตถุโดยใช้พื้นฐานทางเรขาคณิตของรูปสามเหลี่ยม.....	3
2.2.2 เทคนิคการระบุตำแหน่งวัตถุโดยอิงอ้างอิงตำแหน่งใกล้เคียง หรือเทคนิคพริ็อกซิมีตี้.....	4
2.2.3 เทคนิคการระบุตำแหน่งแบบฟิงเกอร์พรินต์ หรือเรียกโดยย่อว่าเทคนิคฟิงเกอร์พรินต์.....	4
2.3 พื้นฐานของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ (Visible Light Communication).....	5
2.3.1 การวัดค่าความสว่างของแสง (Illuminance: LUX).....	5
2.4 แสงสี.....	7
2.4.1 แสงที่มองเห็นได้ (Visible light).....	7
2.4.2 หน่วยวัดแสง.....	8
2.5 การผสมสัญญาณเชิงแสง.....	8
2.5.1 การผสมสัญญาณเชิงแสงโดยใช้การตรวจจับแบบโดยตรง (Direct Detection).....	8
2.5.2 สัญญาณแอนะล็อก และสัญญาณดิจิทัล.....	9
2.5.3 การมอดูเลต.....	10
2.6 การมัลติเพล็กซ์ (Multiplexing).....	10
2.6.1 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่.....	11
2.6.2 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา.....	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.7 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)	11
2.7.1 ET-BASE AVR ATmega64/128 r3.....	11
2.7.2 Arduino Uno Revision 3.....	18
2.7.3 Arduino Mega 2560 R3	19
2.8 อุปกรณ์ภาคส่ง	21
2.8.1 แอลอีดี (Light Emitting Diode: LED)	21
2.8.2 วงจรภาคส่ง	23
2.9 อุปกรณ์ภาครับ.....	27
2.9.1 โฟโตไดโอด (Photodiode)	27
2.9.2 วงจรภาครับ.....	27
บทที่ 3 ขั้นตอนการทดลองวิจัย.....	30
3.1 กล่าวนำ.....	30
3.2 การทดลองวิจัย	30
3.2.1 สภาพแวดล้อมในการทดลองวิจัย.....	30
3.2.2 ขอบเขตพื้นที่ทดลองวิจัย	31
3.2.3 ตำแหน่งฟิงเกอร์พริ้นต์.....	32
3.2.4 ค่าความเข้มของแสง และหมายเลขระบุตัวตน	32
3.2.5 ตำแหน่งสุ่มทดสอบ.....	34
3.2.6 การระบุตำแหน่งของวัตถุ.....	35
3.3 การทดลองวิจัยช่วงที่ 1	36
3.3.1 ระเบียบการทดลองวิจัยช่วงที่ 1	36
3.3.2 การรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตนในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1	36
3.4 การทดลองวิจัยช่วงที่ 2	36
3.4.1 ระเบียบการทดลองวิจัยช่วงที่ 2.....	37
3.4.2 การรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตนในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2	37
3.4.3 การระบุตำแหน่งเป้าหมายแบบพรีอิกซิมิตีในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2.....	37
บทที่ 4 ผลการทดลองวิจัย	39
4.1 กล่าวนำ	39
4.2 ผลการทดลองวิจัยช่วงที่ 1.....	39
4.2.1 การสร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1.....	39
4.2.2 ผลของการรับหมายเลขระบุตัวตนของฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์	52
4.2.3 ตำแหน่งสุ่มทดสอบการทดลองวิจัยช่วงที่ 1	54
4.2.4 ผลการรับข้อมูลของตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1.....	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2.5 ผลการระบุพิกัดตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1.....	61
4.3 ผลการทดลองวิจัยช่วงที่ 2.....	64
4.3.1 การสร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2.....	64
4.3.2 ผลของการรับหมายเลขระบุตัวตนของฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์	77
4.3.3 ตำแหน่งสุ่มทดสอบการทดลองวิจัยช่วงที่ 2	79
4.3.4 ผลการรับข้อมูลของตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2	80
4.3.5 ผลการระบุพิกัดตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2.....	86
4.4 สรุปผลการทดลองวิจัย.....	91
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	93
5.1 กล่าวนำ	93
5.2 สรุปผลการวิจัย	93
5.3 ข้อเสนอแนะ	94
เอกสารอ้างอิง.....	95
ภาคผนวก.....	97
ภาคผนวก ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	98
ประวัติผู้เขียน.....	104

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความยาวคลื่น และความถี่คลื่นของแสงสีที่แตกต่างกัน.....	7
2.2 ระบบหน่วยระหว่างประเทศ (SI) ของแสง.....	8
2.3 คุณสมบัติไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno Revision 3	19
2.4 คุณสมบัติไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 R3	20
3.1 รายละเอียดการจัดเก็บฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์	33
3.2 แสดงรายละเอียดต่างๆ ของการทดลองวิจัยช่วงที่ 1	36
3.3 แสดงรายละเอียดต่างๆ ของการทดลองวิจัยช่วงที่ 2	37
4.1 ฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 5 ซม.	40
4.2 ฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 70 ซม.	43
4.3 ฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 120 ซม.	46
4.4 ฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 150 ซม.	49
4.5 ตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 5 ซม.	55
4.6 ตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 70 ซม.	56
4.7 ตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 120 ซม.	57
4.8 ตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 150 ซม.	58
4.9 ผลการระบุพิกัดตำแหน่งสุ่มทดสอบที่ความสูง 5 ซม. และระยะความผิดพลาด ที่เกิดขึ้น ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1	61
4.10 ผลการระบุพิกัดตำแหน่งสุ่มทดสอบที่ความสูง 70 ซม. และระยะความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1	61
4.11 ผลการระบุพิกัดตำแหน่งสุ่มทดสอบที่ความสูง 120 ซม. และระยะความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1	61
4.12 ผลการระบุพิกัดตำแหน่งสุ่มทดสอบที่ความสูง 150 ซม. และระยะความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1	62
4.13 ฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ที่ระดับความสูง 5 ซม.	64
4.14 ฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ที่ระดับความสูง 70 ซม.	67
4.15 ฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ที่ระดับความสูง 120 ซม.	70
4.16 ฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ที่ระดับความสูง 150 ซม.	73
4.17 ตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ที่ระดับความสูง 5 ซม.	80
4.18 ตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ที่ระดับความสูง 70 ซม.	81
4.19 ตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ที่ระดับความสูง 120 ซม.	82
4.20 ตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ที่ระดับความสูง 120 ซม.	83
4.21 ผลการระบุพิกัดตำแหน่งสุ่มทดสอบที่ความสูง 5 ซม. และระยะความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.22 ผลการระบุพิกัดตำแหน่งสุ่มทดสอบที่ความสูง 70 ซม. และระยะความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2	87
4.23 ผลการระบุพิกัดตำแหน่งสุ่มทดสอบที่ความสูง 120 ซม. และระยะความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2	88
4.24 ผลการระบุพิกัดตำแหน่งสุ่มทดสอบที่ความสูง 120 ซม. และระยะความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2	89
4.25 สรุปผลการทดลองวิจัยการระบุตำแหน่งเป้าหมายภายในอาคารด้วยวีแอลซี.....	91



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 เทคนิคของการระบุตำแหน่งวัตถุเป้าหมายภายในอาคาร	3
2.2 ขอบเขตพื้นที่การระบุตำแหน่งด้วยเทคนิคพรีอิกซิมิตี้จากแต่ละสปอตไลท์แอลอีดี	4
2.3 เทคนิคการหาตำแหน่งด้วยฟิงเกอร์พริ้นต์	5
2.4 การประยุกต์ใช้งานการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้	6
2.5 สเปกตรัมของแสงเมื่อแสงขาวเดินทางผ่านปริซึม	7
2.6 รูปแบบการผสมสัญญาณ	9
2.7 สัญญาณแอนะล็อก และสัญญาณดิจิทัล	10
2.8 โครงสร้างของบอร์ด ET-BASE AVR ATmega64/128 r3	13
2.9 พอร์ต PA มีขนาด 8 บิต	14
2.10 พอร์ต PB มีขนาด 8 บิต	14
2.11 พอร์ต PC มีขนาด 8 บิต	15
2.12 พอร์ต PD มีขนาด 8 บิต	15
2.13 พอร์ต PE มีขนาด 8 บิต	15
2.14 พอร์ต PF มีขนาด 8 บิต	15
2.15 พอร์ต AVR ISP และวงจรส่วนที่เชื่อมต่อ	16
2.16 พอร์ต ET-CLCD	16
2.17 การจัดเรียงขาสัญญาณของ Character LCD มาตรฐาน	17
2.18 วงจรส่วนที่เชื่อมต่อกับ RS232	17
2.19 บอร์ด Arduino Uno Revision 3	18
2.20 บอร์ด Arduino Mega 2560 R3	20
2.21 สถาปัตยกรรมของการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้	21
2.22 หลอดซูปเปอร์ไบรท์แอลอีดี	22
2.23 หลอดสปอตไลท์แอลอีดี	23
2.24 หลอดอัลตราไบรท์แอลอีดี	23
2.25 วงจรภาคส่งในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1	24
2.26 แผงวงจรภาคส่งในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1	24
2.27 อุปกรณ์ภาคส่ง	25
2.28 วงจรภาคส่งในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2	25
2.29 แผงวงจรภาคส่งในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2	26
2.30 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภาคส่งในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2	26
2.31 ไฟโต้ไดโอดในรูปแบบต่างๆ	27
2.32 วงจรภาครับ	28
2.33 แผงวงจรภาครับ	28
2.34 การเชื่อมต่อวงจรภาครับกับบอร์ด ET-BASE AVR ATmega64/128 r3	29
2.35 การเชื่อมต่อวงจรภาครับกับบอร์ด Arduino Mega 2560 R3	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นว่าเป็นประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลองระบุตำแหน่งวัตถุเป้าหมายภายในอาคารด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ในห้องทึบแสง	30
3.2 ขอบเขตพื้นที่การทดลองวิจัย	31
3.3 ระดับความสูงของชุดอุปกรณ์ภาครับ	31
3.4 ตำแหน่งฟังก์ชันพรีนตีในการทดลองวิจัย	32
3.5 การรับหมายเลขระบุตัวตน และการวัดความสว่างของแสง	33
3.6 ตำแหน่งสุ่มทดสอบ	34
3.7 ขั้นตอนการระบุตำแหน่งเป้าหมาย	35
3.8 การแบ่งผลการทดลองวิจัยทั้ง 14 รูปแบบ	38
4.1 ตำแหน่งฟังก์ชันพรีนตีทั้ง 100 ตำแหน่ง	39
4.2 ผลการรับ ID ของฐานข้อมูลฟังก์ชันพรีนตีในการทดลองช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 5 ซม.	52
4.3 ผลการรับ ID ของฐานข้อมูลฟังก์ชันพรีนตีในการทดลองช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 70 ซม.	52
4.4 ผลการรับ ID ของฐานข้อมูลฟังก์ชันพรีนตีในการทดลองช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 120 ซม.	53
4.5 ผลการรับ ID ของฐานข้อมูลฟังก์ชันพรีนตีในการทดลองช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 150 ซม.	53
4.6 ตำแหน่งสุ่มทดสอบทั้ง 30 ตำแหน่ง	54
4.7 ตำแหน่งสุ่มทดสอบที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้ ที่ความสูง 5 ซม.	59
4.8 ตำแหน่งสุ่มทดสอบที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้ ที่ความสูง 70 ซม.	59
4.9 ตำแหน่งสุ่มทดสอบที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้ ที่ความสูง 120 ซม.	60
4.10 ตำแหน่งสุ่มทดสอบที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้ ที่ความสูง 150 ซม.	60
4.11 ระยะทางความผิดพลาดของการทดลองที่ 1 ที่ระดับความสูง 5 ซม.	63
4.12 ระยะทางความผิดพลาดของการทดลองที่ 1 ที่ระดับความสูง 70 ซม.	63
4.13 ระยะทางความผิดพลาดของการทดลองที่ 1 ที่ระดับความสูง 120 ซม.	63
4.14 ระยะทางความผิดพลาดของการทดลองที่ 1 ที่ระดับความสูง 150 ซม.	63
4.15 ผลการรับ ID ของฐานข้อมูลฟังก์ชันพรีนตีในการทดลองช่วงที่ 2 ที่ระดับความสูง 5 ซม.	77
4.16 ผลการรับ ID ของฐานข้อมูลฟังก์ชันพรีนตีในการทดลองช่วงที่ 2 ที่ระดับความสูง 70 ซม.	77
4.17 ผลการรับ ID ของฐานข้อมูลฟังก์ชันพรีนตีในการทดลองช่วงที่ 2 ระดับความสูง 120 ซม.	78
4.18 ผลการรับ ID ของฐานข้อมูลฟังก์ชันพรีนตีในการทดลองช่วงที่ 2 ระดับความสูง 150 ซม.	78
4.19 ตำแหน่งสุ่มทดสอบที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้ ที่ความสูง 5 ซม.	84
4.20 ตำแหน่งสุ่มทดสอบที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้ ที่ความสูง 70 ซม.	84
4.21 ตำแหน่งสุ่มทดสอบที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้ ที่ความสูง 120 ซม.	85
4.22 ตำแหน่งสุ่มทดสอบที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้ ที่ความสูง 150 ซม.	85
4.23 ระยะทางความผิดพลาดของการทดลองที่ 2 ที่ระดับความสูง 5 ซม.	90
4.24 ระยะทางความผิดพลาดของการทดลองที่ 2 ที่ระดับความสูง 70 ซม.	90
4.25 ระยะทางความผิดพลาดของการทดลองที่ 2 ที่ระดับความสูง 120 ซม.	90
4.26 ระยะทางความผิดพลาดของการทดลองที่ 2 ที่ระดับความสูง 150 ซม.	90

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ในที่สาธารณะขึ้นด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

การหาตำแหน่งของวัตถุภายในอาคาร (Indoor Localization) เป็นการตรวจจับตำแหน่งของเป้าหมายที่อยู่ในอาคาร ซึ่งสามารถช่วยในหลายต่อการค้นหาผู้ป่วยในโรงพยาบาล สินค้าในห้างสรรพสินค้า บุคคลในบ้าน หรือแม้แต่การหาตำแหน่งในเมืองแระ โดยในแต่ละการใช้งาน จะมีเทคนิควิธีการที่เหมาะสมที่แตกต่างกัน ซึ่งหลักๆแล้วจะมีเทคนิคหลักๆอยู่ 3 เทคนิค คือ 1. เทคนิคการระบุตำแหน่งวัตถุโดยใช้พื้นฐานทางเรขาคณิตของรูปสามเหลี่ยม (Triangulation) 2. เทคนิคการระบุตำแหน่งวัตถุโดยอิงอ้างอิงจากตำแหน่งใกล้เคียง (Proximity-based) หรือเรียกว่าเทคนิคพริ็อกซิมีตี้ 3. เทคนิคการระบุตำแหน่งวัตถุแบบฟิงเกอร์พริ้นท์ (Fingerprint-based) [1] ซึ่งเทคนิคเหล่านี้ส่วนใหญ่แล้วใช้เทคโนโลยีที่ใช้คลื่นวิทยุจากอุปกรณ์สื่อสารไร้สาย เช่น RFID, Wireless Sensor Network หรือ Bluetooth ซึ่งเทคโนโลยีเหล่านี้มีปัญหาในเรื่องของช่องของสัญญาณที่มีอยู่อย่างจำกัด และการรบกวนของสัญญาณที่ควบคุมได้ยาก แต่เมื่อเร็วๆนี้ได้มีเทคโนโลยีใหม่ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมา ชื่อว่า การสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ (Visible Light Communication: VLC)

การสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ เป็นการสื่อสารไร้สายรูปแบบใหม่ที่อาศัยแสงที่มองเห็นได้เป็นตัวกลางในการนำสัญญาณแสง โดยมีหลอดไฟที่มีอยู่แล้วภายในอาคารเป็นตัวส่งสัญญาณ และมีอุปกรณ์รับแสงเป็นตัวรับสัญญาณ การประยุกต์วีแอลซีมาใช้ใน การหาตำแหน่งของวัตถุภายในอาคาร ได้เริ่มมีการพัฒนาขึ้นมาบ้างแล้ว แต่ยังมีปัญหาเกี่ยวกับการนำไปใช้งานได้จริง งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคนิคพริ็อกซิมีตี้ ร่วมกับเทคนิคฟิงเกอร์พริ้นท์ ในการระบุพิกัดตำแหน่งภายในอาคารด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ โดยการใช้อัลซีในการส่งสัญญาณหมายเลขระบุตัวตน (Identifier: ID) เพื่อระบุตำแหน่งด้วยเทคนิคพริ็อกซิมีตี้ และใช้ค่าความสว่างของแสง (Illuminance) หน่วยลักซ์ (LUX) มาเป็นค่าพารามิเตอร์สำหรับการเปรียบเทียบรูปแบบข้อมูลสำหรับการระบุพิกัดตำแหน่ง (x, y) ที่แน่นอนด้วยเทคนิคฟิงเกอร์พริ้นท์ โดยในการทดลองวิจัยนี้ได้แบ่งการวิจัยออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 เป็นการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้แบบพื้นฐาน คืออุปกรณ์ภาคส่งแต่ละตัวมีวงจรควบคุมการส่งสัญญาณเป็นของตัวเอง และไม่มีการควบคุมจังหวะการส่งสัญญาณ และช่วงที่ 2 เป็นการแก้ปัญหาจากการทดลองวิจัยในช่วงแรกด้วยการสื่อสารแบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา (Time Division Multiplexing :TDM)

1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์ของการศึกษาดังนี้

1.2.1 เพื่อพิจารณาเทคนิคการระบุตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายภายในอาคารด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ที่มีความเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานประเภทต่าง ๆ. ๓. ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2.2 เพื่อสามารถระบุตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายในสภาพแวดล้อมภายในอาคารได้อย่างถูกต้อง โดยการระบุตำแหน่งของวัตถุด้วยเทคนิคพรีอักษมิติ ร่วมกับเทคนิคฟังก์เจอร์พรินท์

1.2.3 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเทคนิคการระบุตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายภายในอาคาร ด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ด้วยเทคนิคฟังก์เจอร์พรินท์โดยการวัดค่าความผิดพลาดระหว่างตำแหน่งจริงกับตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณ

1.2.4 เพื่อออกแบบระบบการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.2.5 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบการระบุตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายภายในอาคาร ด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้โดยการใช้เทคนิคการสื่อสารแบบการมัลติเพล็กซ์แบบการแบ่งเวลาร่วมด้วย

1.3 หลักการใหม่ที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

หลักการใหม่ที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.3.1 ผู้วิจัยได้นำเสนอวิธีการระบุตำแหน่งของเป้าหมายภายในอาคารด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ ด้วยเทคนิคพรีอักษมิติ ร่วมกับเทคนิคฟังก์เจอร์พรินท์

1.3.2 ผู้วิจัยได้นำเสนอการแก้ปัญหาการรับสัญญาณแสงในบริเวณที่แสงจากเครื่องส่งคนละตัวซ้อนทับกันซึ่งนำไปสู่การระบุตำแหน่งของเป้าหมายภายในอาคารได้ถูกต้องแม่นยำขึ้น

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีขั้นตอนของการศึกษาดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย หลักการที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการระบุตำแหน่งของเป้าหมาย และทฤษฎีการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้

บทที่ 3 บทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงขั้นตอนการทดลองวิจัยการดำเนินการระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้

บทที่ 4 บทนี้กล่าวถึงผลการทดลองวิจัย และผลการวิเคราะห์ในการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้

บทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

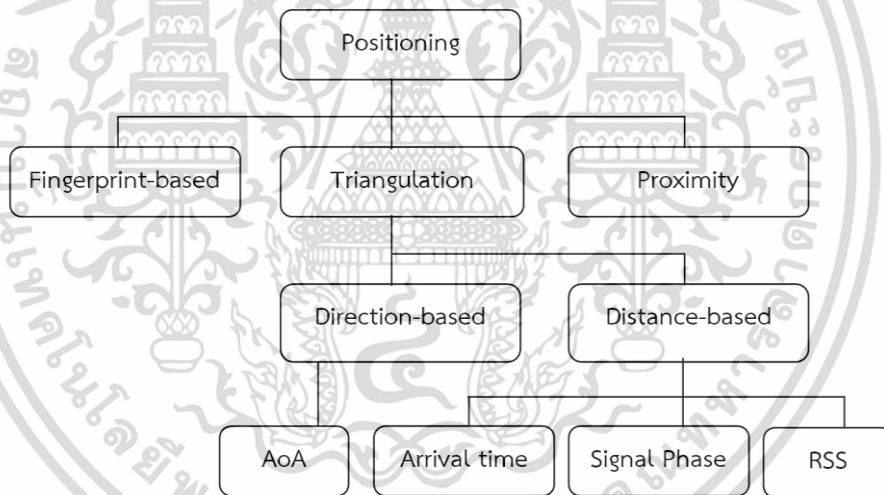
ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับงานวิจัย

2.1 กล่าวนำ

บทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยการดำเนินการออกแบบระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ ซึ่งประกอบด้วย เทคนิคการระบุตำแหน่งเป้าหมายภายในอาคาร พื้นฐานของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ แสงสี การผสมสัญญาณเชิงแสง ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) อุปกรณ์ภาคส่ง อุปกรณ์ภาครับ

2.2 เทคนิคการระบุตำแหน่งวัตถุเป้าหมายภายในอาคาร

เทคนิคการระบุตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายสามารถแบ่งออกเป็น 3 เทคนิค คือ 1. เทคนิคการระบุตำแหน่งวัตถุโดยใช้พื้นฐานทางเรขาคณิตของรูปสามเหลี่ยม 2. เทคนิคพริ็อกซิมีตี และ 3. เทคนิคฟิงเกอร์พรินต์ รูปที่ 2.1 แสดงเทคนิคการระบุตำแหน่ง รวมถึงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการระบุตำแหน่ง



รูปที่ 2.1 เทคนิคของการระบุตำแหน่งวัตถุเป้าหมายภายในอาคาร [2]

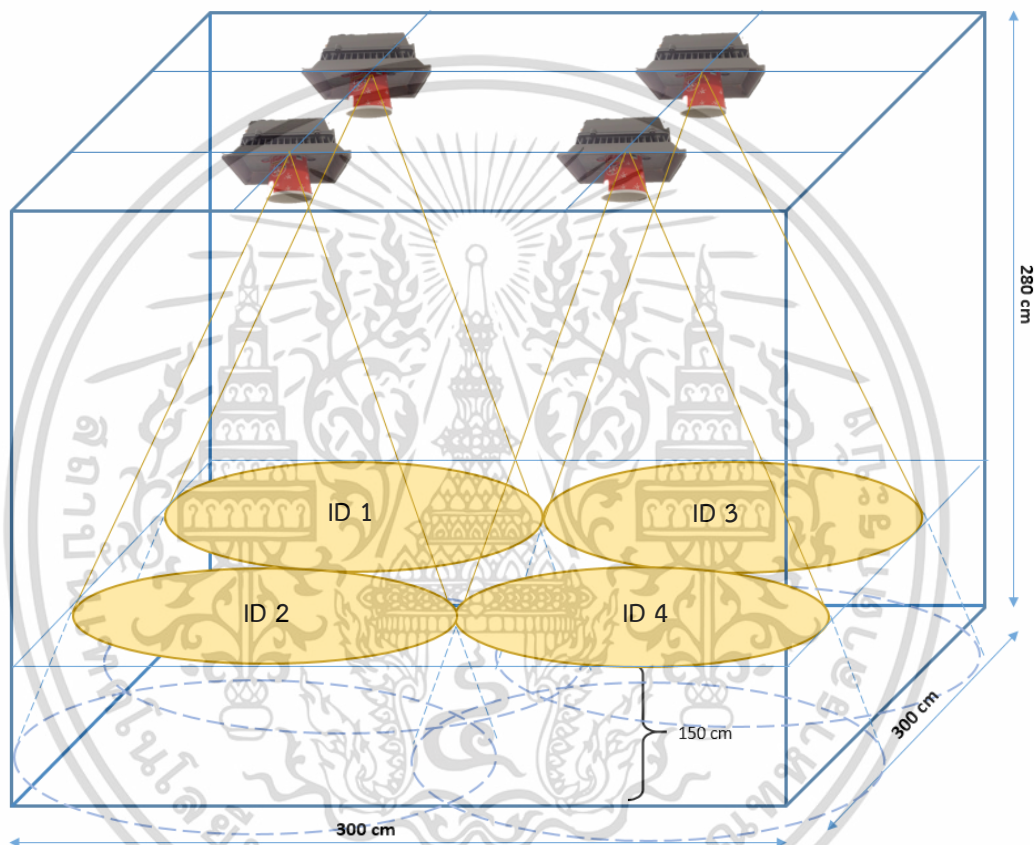
2.2.1 เทคนิคการระบุตำแหน่งวัตถุโดยใช้พื้นฐานทางเรขาคณิตของรูปสามเหลี่ยม

เทคนิคการระบุตำแหน่งวัตถุโดยใช้พื้นฐานทางเรขาคณิตของรูปสามเหลี่ยมเป็นการใช้คุณสมบัติทางเรขาคณิตของรูปสามเหลี่ยมเพื่อคำนวณพิกัดตำแหน่งวัตถุเป้าหมาย ซึ่งสามารถแบ่งย่อยออกได้เป็นการใช้ระยะทางเพื่อระบุพิกัดตำแหน่งวัตถุ (Distance-based) และการคำนวณเชิงมุมเพื่อระบุพิกัดตำแหน่งวัตถุ (Direction-based) สำหรับการระบุระยะทางในการระบุพิกัดตำแหน่ง โดยการคำนวณระยะทางระหว่างโนดอ้างอิงกับโนดเป้าหมาย ซึ่งระยะทางสามารถคำนวณ

ได้จากการวัดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น ค่าระดับความเข้มของสัญญาณ, เวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณ (ToA, และ TDoA)

2.2.2 เทคนิคการระบุตำแหน่งวัตถุโดยอิงตำแหน่งใกล้เคียง หรือเทคนิคพริอ็อกซิมิตี้

เทคนิคพริอ็อกซิมิตี้ เป็นการระบุตำแหน่งวัตถุเป้าหมายโดยการอ้างอิงตำแหน่งโหนดอ้างอิงที่ใกล้เคียงที่สุด เมื่อตัวรับรับข้อมูลจากตัวส่งได้แล้ว ก็จะสามารถบอกได้ว่าวัตถุนั้นอยู่ในบริเวณที่ใกล้เคียงกับตัวส่งนั้นๆ ในการทดลองวิจัยนี้ใช้หมายเลขระบุตัวตน (ID) เป็นค่าพารามิเตอร์ในการกำหนดขอบเขตของวัตถุ โดยที่ ID นั้นสามารถรับได้เมื่ออยู่ในขอบเขตของแสง ตามรูปที่ 2.2



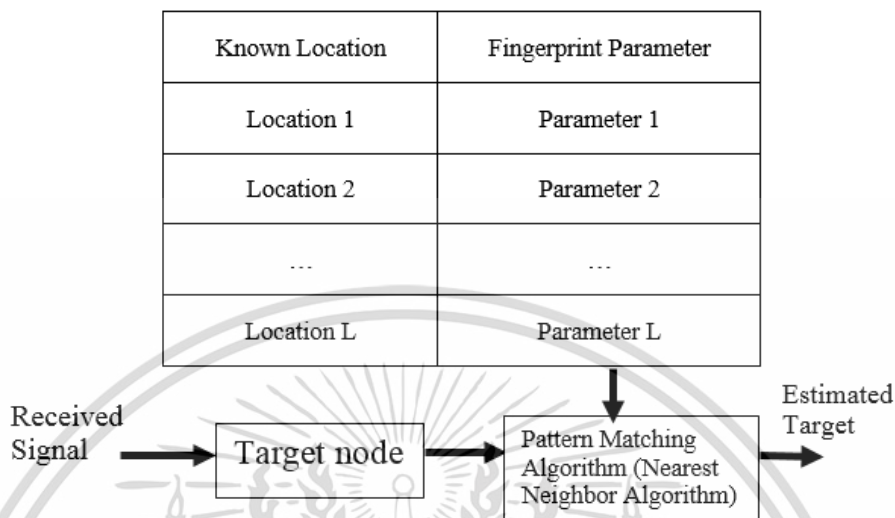
รูปที่ 2.2 ขอบเขตพื้นที่การระบุตำแหน่งด้วยเทคนิคพริอ็อกซิมิตี้จากแต่ละสปอตไลท์แอลอีดี

2.2.3 เทคนิคการระบุตำแหน่งแบบฟิงเกอร์พรินต์ หรือเรียกโดยย่อว่าเทคนิค ฟิงเกอร์พรินต์

เทคนิคการระบุตำแหน่งแบบฟิงเกอร์พรินต์ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Scene Analysis เป็นวิธีการที่อาศัยการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้รับจากอุปกรณ์เป้าหมายกับฐานข้อมูลที่มีพิกัดที่แน่นอนเพื่อใช้ฐานข้อมูลนั้นเป็นตัวอ้างอิงพิกัดของวัตถุเป้าหมาย การทำงานของเทคนิคฟิงเกอร์พรินต์ ได้แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการจัดเก็บข้อมูลค่าพารามิเตอร์ จากพิกัดตำแหน่งต่างๆที่ทราบอยู่แล้วลงในฐานข้อมูล เรียกขั้นตอนนี้ว่า เฟสออฟไลน์ (offline phase) ขั้นตอนที่ 2 เรียกว่า เฟสออนไลน์ (online phase) เป็นการเก็บค่าพารามิเตอร์จากเป้าหมายที่ต้องการหาตำแหน่ง แล้วนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี เมื่อผู้ใดเห็นใบนี้หรือใช้ข้อมูลใดๆจากเอกสารนี้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถือว่าผิดกฎหมาย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าพารามิเตอร์นั้นไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ในฐานข้อมูลที่มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด สำหรับใช้ในการอ้างอิงตำแหน่งของวัตถุ [3] ตามแผนภาพแสดงขั้นตอนการระบุตำแหน่งเป้าหมายด้วยเทคนิคฟingerprint ในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 เทคนิคการทำตำแหน่งด้วยเทคนิคฟingerprint

2.3 พื้นฐานของระบบการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ (Visible Light Communication)

การสื่อสารผ่านแสงที่มองเห็นได้ คือการสื่อสารข้อมูลโดยใช้ แสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้ โดยมีความยาวคลื่นระหว่าง 375 nm. – 780 nm. ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่เป็นอันตรายต่อสายตา แสงมีคุณสมบัติเป็นทวิภาวะ คือเป็นทั้งคลื่น และอนุภาค (โฟตอน) ซึ่งการเป็นอนุภาคนี้ทำให้ตามนุษย์มองเห็นได้นั่นเอง

2.3.1 การวัดค่าความสว่างของแสง (Illuminance: LUX)

ความสว่างของแสงของพื้นผิวใดๆ หมายถึง ค่าความสว่างที่ตกบนพื้นที่ผิวต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ถ้าพิจารณาพื้นผิวที่อยู่ห่างจากหลอดไฟที่มีกำลังส่องสว่าง 1 แคนเดลา (candela) เป็นระยะทาง 1 เมตร ความเข้มของการส่องสว่างจะมีค่า 1 ลักซ์ (LUX) โดยความเข้มของการส่องสว่างจะแปรผกผันกับระยะทางยกกำลังสอง ดังสมการ

$$E = \frac{I}{R^2} \tag{2.1}$$

- เมื่อ E คือความสว่างของแสง (LUX)
- I คือกำลังส่องสว่าง (candela: cd)
- R คือระยะทางจากหลอดไฟถึงพื้นผิวที่พิจารณา (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยกำลังส่องสว่างของหลอดไฟ (I) สามารถหาได้จาก

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (2.2)$$

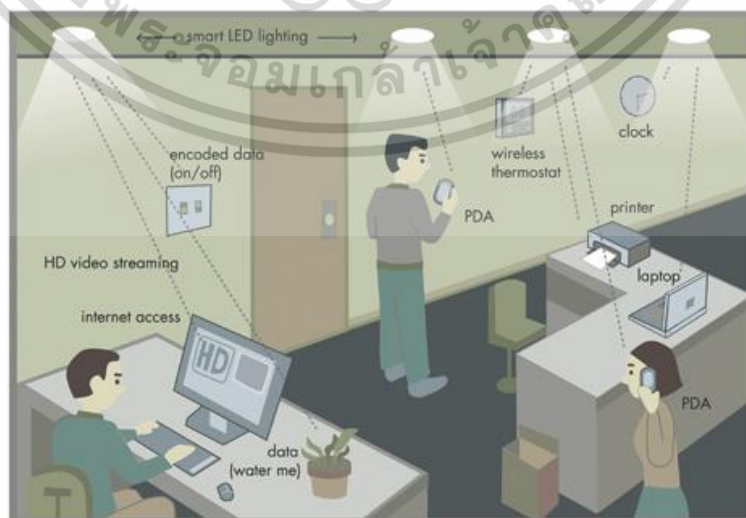
เมื่อ P คือกำลังของหลอดไฟ (Watt)
 r คือรัศมีของพื้นที่ผิวที่แสงตกกระทบ (m)

หรือ หากกำลังส่องสว่างจากกฎของ Lambert-Beers [4]

$$I = I_0 e^{-\alpha R} \quad (2.3)$$

เมื่อ I_0 คือกำลังส่องสว่างของแหล่งกำเนิด (candela: cd)
 α คือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของตัวกลาง

การสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ หรือ วิแอลซี (VLC) เป็นหนึ่งในรูปแบบการสื่อสารไร้สาย (Wireless Communication) ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.7 ที่ได้รับการพัฒนาให้สามารถรับส่งข้อมูลดิจิทัลได้จริงในไม่กี่ปีที่ผ่านมา โดยจะใช้หลอดเรืองแสง (Fluorescent Lamp) หรือหลอดแอลอีดี (Light Emitting Diode: LED) เป็นอุปกรณ์ส่งสัญญาณ และใช้โฟโตไดโอด (Photodiode) หรือ ตัวตรวจจับ (image sensor) เป็นอุปกรณ์รับสัญญาณ แล้วนำสัญญาณนั้นมาแปลงกลับเป็นข้อมูลให้กับผู้ใช้ สำหรับการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้นั้นสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย ตัวอย่างดังรูปที่ 2.4 นอกจากจะให้แสงส่องสว่างแล้วยังสามารถส่งผ่านข้อมูลได้ แทนหลอดไฟรูปแบบเดิมที่ให้เพียงแสงสว่างเท่านั้น ดังนั้น ผู้เสนอโครงการวิจัยจึงสนใจที่จะสร้างระบบต้นแบบในการหาตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายภายในอาคาร โดยใช้การสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ เนื่องจากเห็นว่าการใช้วิแอลซีจะทำให้ระบบการหาตำแหน่งมีการลงทุนที่ต่ำลงได้ เพราะภายในอาคารมีการติดตั้งหลอดไฟเรืองแสง หรือหลอดแอลอีดีอยู่แล้วนั่นเอง



รูปที่ 2.4 การประยุกต์ใช้งานการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานภายในเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 แสงสี

แสง เป็นพลังงานรังสี (Radiation Energy) ที่ตารับรู้และมีปฏิกิริยาตอบสนองด้วยกระบวนการ วิเคราะห์แยกแยะของสมอง ตาสามารถวิเคราะห์พลังงานแสงโดยการรับรู้วัตถุ สัมพันธ์กับตำแหน่ง ทิศทาง ระยะทาง ความเข้มของแสง และความยาวคลื่นที่มองเห็นได้

2.4.1 แสงที่มองเห็นได้ (Visible light)

แสงขาวแท้จริงแล้วประกอบด้วยแสงสีที่รวมกันเรียกว่า “สเปกตรัม (Spectrum)” ประกอบด้วยเจ็ดสีได้แก่ ม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม แดง โดยสีม่วงจะมีพลังงานมากที่สุด (ความยาวคลื่นสั้นสุด) และพลังงานจะลดลงเรื่อยๆตามลำดับจนกระทั่งสีแดงที่มีพลังงานต่ำสุด (ความยาวคลื่นยาวสุด)

ปรากฏการณ์การเกิดสเปกตรัมของแสงขาวเช่น ถ้าเอาปริซึมไปวางให้แสงส่องผ่าน ดังรูปที่ 2.5 เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหแตกต่างกัน ความยาวคลื่นที่ต่างกันจะหักเหด้วยมุมที่ไม่เท่ากัน จึงมองเห็นสีแสงขาวแยกสเปกตรัมเป็นสีต่างๆ ได้เมื่อนำฉากไปรับ ปรากฏการณ์ธรรมชาติอีกอย่างหนึ่งได้แก่ การเกิดรุ้ง ซึ่งเกิดจากการที่แสงเดินทางผ่านหยดไอน้ำในอากาศทำให้เกิดการหักเหของแสง เกิดเป็นสเปกตรัมของแสงขาวขึ้นนั่นเอง ซึ่งแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.5 สเปกตรัมของแสงเมื่อแสงขาวเดินทางผ่านปริซึม [6]

ตารางที่ 2.1 ความยาวคลื่น และความถี่ของแสงสีที่แตกต่างกัน

แสงสี	ความยาวคลื่น (m)	ความถี่ (Hz)
ม่วง	$3.9 - 4.5 \times 10^{-7}$	$6.7 - 7.7 \times 10^{14}$
น้ำเงิน	$4.5 - 4.9 \times 10^{-7}$	$6.1 - 6.7 \times 10^{14}$
เขียว	$4.9 - 5.8 \times 10^{-7}$	$5.3 - 6.1 \times 10^{14}$
เหลือง	$5.8 - 6.0 \times 10^{-7}$	$5.1 - 5.3 \times 10^{14}$
ส้ม	$6.0 - 6.2 \times 10^{-7}$	$4.8 - 5.1 \times 10^{14}$
แดง	$6.2 - 7.7 \times 10^{-7}$	$3.9 - 4.8 \times 10^{14}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 หน่วยวัดแสง

หน่วยที่ใช้ในการวัดแสงแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ระบบหน่วยระหว่างประเทศ (SI) ของแสง

ปริมาณ	หน่วย SI	ตัวย่อ
พลังงานของการส่องสว่าง	จูล (joule)	J
ฟลักซ์ส่องสว่าง (Luminous flux)	ลูเมน (lumen) หรือ แคนเดลา · สเตอเรเดียน (candela · steradian) หรือ กำลังของความสว่าง (Luminous power)	lm
ความเข้มของการส่องสว่าง (Luminous intensity)	แคนเดลา (candela)	cd
ความเข้มของความสว่าง (Luminance)	แคนเดลา/ตารางเมตร (candela/square meter)	cd/m ²
ความสว่าง (Illuminance)	ลักซ์ (lux) หรือ ลูเมน/ตารางเมตร	lx
ประสิทธิภาพการส่องสว่าง (Luminous efficacy)	ลูเมน ต่อ วัตต์ (lumens per watt)	lm/W

2.5 การผสมสัญญาณเชิงแสง

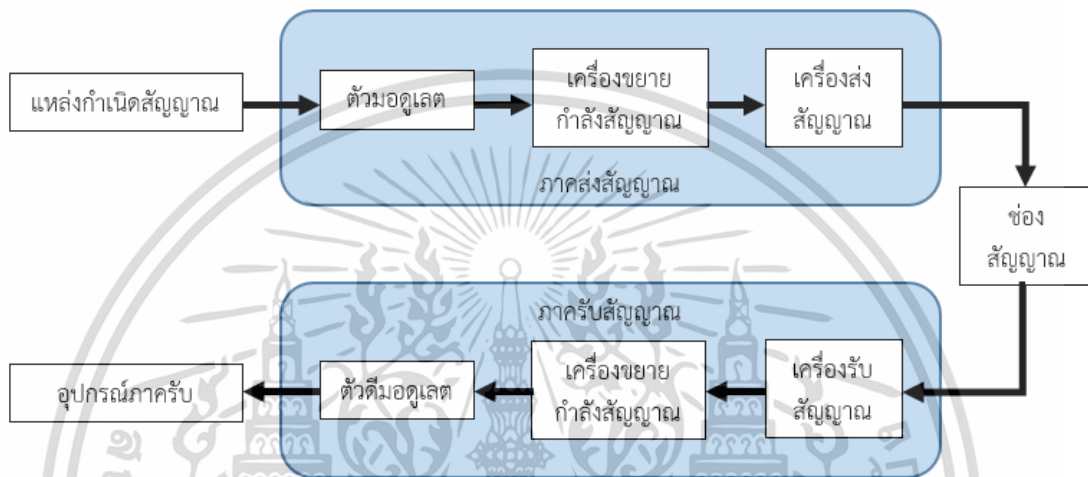
วิธีการผสมสัญญาณสำหรับการสื่อสารเชิงแสงแบ่งออกเป็นสองกลุ่มหลัก ได้แก่ เทคนิคการผสมสัญญาณแบบตรวจจับโดยตรง (Direct Detection) และเทคนิคการผสมสัญญาณแบบร่วมนัย (Coherent Detection) ซึ่งการตรวจจับโดยตรงเป็นการส่งสัญญาณแบบเบสแบนด์ (Baseband Transmissions) ที่มีสถานะเป็น “1” และ “0” สำหรับแหล่งกำเนิดแสง (Optical Source) เลเซอร์ จะทำการส่งในลักษณะของการกระพริบเลเซอร์ เปิด และ ปิด ตามลำดับ ส่วนเทคนิคการตรวจจับแบบร่วมนัยเป็นเทคนิคการผสมสัญญาณที่เหมือนกับการสื่อสารที่ใช้ความถี่คลื่นวิทยุ ซึ่งสัญญาณที่ตกกระทบที่ส่วนหน้า (Front End) เป็นการรวมกันของสัญญาณที่เข้ามากับสัญญาณที่กำเนิดจาก ตัวกำเนิดสัญญาณเฉพาะที่ (Local Oscillator) โดยการกระทำการตรวจจับแบบร่วมนัย จะได้ความไว (Sensitivity) ในการตรวจจับสัญญาณที่สูงกว่าแบบการตรวจจับโดยตรง

2.5.1 การผสมสัญญาณเชิงแสงโดยใช้การตรวจจับแบบโดยตรง (Direct Detection)

โมเดลของระบบการสื่อสารแบบการตรวจจับโดยตรงแสดงได้ดังรูปที่ 2.6 โดยข่าวสารที่จะทำการส่งจะถูกผสมกับคลื่นพาห้ทางแสงที่ส่วนของตัวผสมสัญญาณ และส่งไปยังภาครับ จากนั้นระบบของเลนส์และตัวตรวจจับสัญญาณแสงจะทำการตรวจจับกำลังงานชั่วขณะ (Instantaneous Power) ที่มาถึงภาครับโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การผสมสัญญาณแบบการตรวจจับโดยตรงสัญญาณไบนารีจะอยู่ในลักษณะ เปิด และปิด ของสัญญาณที่ภาคส่ง ซึ่งบอกถึงความแตกต่างของรูปแบบของคลื่นสัญญาณ โดยรูปแบบคลื่นทั่วไปของการตรวจจับโดยตรงจะเป็นการผสมสัญญาณแบบ Pulse Code Modulation (PCM) ที่เข้ารหัสแบบ NRZ (Non Return to Zero) หรือแบบ RZ (Return to Zero) สำหรับการสื่อสารเชิงแสงทั่วไปใช้แบบ Bi Phase (Manchester) ซึ่งคุณสมบัติของรูปคลื่นมีองค์ประกอบสัญญาณ DC ต่ำ มี Symbol/Bit Synchronization ในตัวเอง บางครั้งเรียกว่า Self-Clocking Code แต่จะมีข้อเสียคือมีการขยายของแบนด์วิดท์จึงไม่ได้รับความนิยมในการสื่อสารที่ต้องการความเร็วสูง



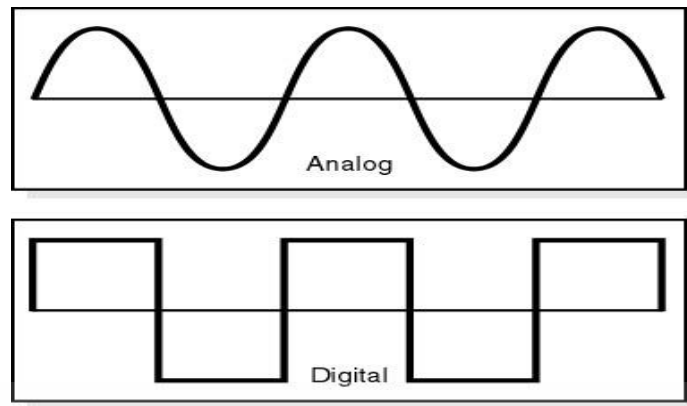
รูปที่ 2.6 รูปแบบการผสมสัญญาณ [7]

2.5.2 สัญญาณแอนะล็อก และสัญญาณดิจิทัล

สัญญาณแอนะล็อก (Analog Signal) เป็นสัญญาณแบบต่อเนื่อง มีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ (sine wave) โดยที่แต่ละคลื่นจะมีความถี่และความเข้มของสัญญาณที่ต่างกัน เมื่อนำสัญญาณข้อมูลเหล่านี้ผ่านอุปกรณ์รับสัญญาณและแปลงสัญญาณก็จะได้ข้อมูลที่ต้องการ ตัวอย่างของการส่งข้อมูลที่มีสัญญาณแบบแอนะล็อก คือ การส่งผ่านระบบโทรศัพท์

สัญญาณแอนะล็อก เป็นสัญญาณที่มักเกิดขึ้นในธรรมชาติเป็นสัญญาณที่มีความต่อเนื่อง ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว สัญญาณแบบนี้ เช่น เสียงพูด เสียงดนตรี เป็นต้น

สัญญาณดิจิทัล (Digital Signal) หมายถึง สัญญาณที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Data) ที่มีขนาดแน่นอนซึ่งขนาดดังกล่าวอาจกระโดดไปมาระหว่างค่าสองค่า คือ สัญญาณระดับสูงสุดและสัญญาณระดับต่ำสุด ซึ่งสัญญาณดิจิทัลนี้เป็นสัญญาณที่คอมพิวเตอร์ใช้ในการทำงานและติดต่อสื่อสารกัน โดยในรูปที่ 2.7 แสดงรูปแบบของสัญญาณแอนะล็อก และสัญญาณดิจิทัล



รูปที่ 2.7 สัญญาณแอนะล็อก และสัญญาณดิจิทัล [7]

2.5.3 การมอดูเลต

การมอดูเลตการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ เป็นการนำรหัสเลขฐาน 2 มามอดูเลตให้เป็นสัญญาณเชิงแสงด้วยวิธีการคีย์แบบออน-ออฟ (On-Off Keying: OOK) เพื่อควบคุมการเปิด-ปิดของแหล่งกำเนิดแสง

การคีย์แบบออน-ออฟ คือการใช้ช่วงเวลาการเปิดปิดการส่งสัญญาณที่แตกต่างกันในการแทนข้อมูล ใช้หลักการเดียวกับการส่งรหัสมอร์ส (Morse Code) กรณีที่พิจารณากระบวนการสื่อสารที่มีการส่งสัญญาณแบบการคีย์แบบออน-ออฟ ที่มีลักษณะในการส่งสัญญาณข้อมูล เพื่อแสดงถึงข้อมูลดิจิทัล “0” หรือ “1” ดังสมการที่ 2.4

$$r(t) = \begin{cases} 0 & ; \text{if "0" is transmitted} \\ s(t) & ; \text{if "1" is transmitted} \end{cases} \quad (2.4)$$

เมื่อ $s(t)$ เป็นรูปแบบของสัญญาณซึ่งถูกใช้เพื่อแสดงถึงข้อมูลดิจิทัล “1” ที่มีการส่ง ข้อมูลด้วยพลังงาน ดังนั้น จะพบว่าลักษณะของสัญญาณข้อมูลที่ถูกตรวจจับได้ที่ภาครับมีลักษณะดังสมการที่ 2.5

$$r(t) = \begin{cases} n(t) & ; \text{if "0" is transmitted} \\ s(t) + n(t) & ; \text{if "1" is transmitted} \end{cases} \quad (2.5)$$

โดย $n(t)$ แสดงถึงผลของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ

2.6 การมัลติเพล็กซ์ (Multiplexing)

การมัลติเพล็กซ์ คือกระบวนการที่ทำให้สัญญาณมากกว่า 1 สัญญาณ สามารถส่งไปยังตัวกลาง หรือช่องสัญญาณเดียวกันได้ โดยตัวมัลติเพล็กซ์ (Multiplexer: MUX) จะทำการรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณให้เป็นสัญญาณเพียงสัญญาณเดียว แล้วส่งผ่านไปยังตัวกลาง เมื่อถึงด้านรับ สัญญาณรวมจะถูกแยกเป็นสัญญาณแต่ละสัญญาณออกมาด้วยตัวดีมัลติเพล็กซ์ (Demultiplex: DEMUX)

การมัลติเพล็กซ์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทหลักคือ การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiplexing: FDM) และการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา (Time Division Multiplexing: TDM) [7]

2.6.1 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งความถี่ เป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์ที่เหมาะสมกับสัญญาณแอนะล็อก ในการใช้แบนด์วิดท์ร่วมกันในการส่งสัญญาณหลายๆ สัญญาณ หลักการคือ แต่ละสัญญาณข้อมูลจะถูกมอดูเลตกับคลื่นพาหะที่มีความถี่แตกต่างกัน จากนั้นสัญญาณมอดูเลตจะถูกส่งผ่านไปยังตัวกลางเดียวกัน แต่คนละความถี่นั่นเอง

2.6.2 การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา

การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา เป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับสัญญาณดิจิทัลในการใช้แบนด์วิดท์ร่วมกันในการส่งสัญญาณหลายๆ สัญญาณ โดยจะทำการแบ่งเวลาในการส่ง

2.7 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ คืออุปกรณ์ควบคุมขนาดเล็ก ภายในไมโครคอนโทรลเลอร์จะประกอบด้วยส่วนประกอบหลักสำคัญของระบบคอมพิวเตอร์เข้าไว้ด้วยกัน ได้แก่ ซีพียู หน่วยความจำ และพอร์ต ซึ่งทั้งหมดถูกบรรจุรวมเข้าไว้ภายใต้ตัวถังเดียวกัน

ซีพียูจะติดต่อกับหน่วยความจำโปรแกรมเพื่ออ่านคำสั่งที่ระบุไว้ โดยต้องทำการอ้าง ตำแหน่งของหน่วยความจำผ่านสายสัญญาณที่เรียกว่า บัสแอดเดรส (address bus) แล้วทำการ อ่านข้อมูลคำสั่งออกมาจากหน่วยความจำโปรแกรมภายนอกแอดเดรสนั้นๆ จากนั้นทำการ ประมวลผล โดยมีหน่วยความจำข้อมูลแรมเป็นที่พักของข้อมูลที่อยู่ในระหว่างการประมวลผล ข้อมูลในการประมวลผลจะส่งผ่านสายสัญญาณที่เรียกว่าบัสข้อมูล (data bus) แล้วส่งต่อไปยัง อุปกรณ์ภายนอกผ่านทางขาพอร์ตอินพุต และพอร์ตเอาต์พุต

ในการทดลองวิจัยนี้ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์จำนวน 2 ชุด สำหรับการทดลองวิจัยในแต่ละช่วงการทดลอง โดยในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 ได้เลือกใช้ ET-BASE AVR ATmega64/128 r3 และการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ผู้ทดลองวิจัยได้เลือกใช้บอร์ด Arduino ในการควบคุมการทำงานของระบบ

2.7.1 ET-BASE AVR ATmega64/128 r3

ET-BASE AVR ATmega64/128 r3 เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ในตระกูล AVR ของบริษัทAtmel ซึ่งบอร์ดนี้เลือกใช้ MCU เบอร์ ATmega64 และ เบอร์ ATmega128 ขนาด 64 Pin โดยในบอร์ด ET-BASE AVR ATmega64/128 r3 นี้จะเน้นจะเน้นการใช้งานทรัพยากรของตัว MCU เองเป็นหลักซึ่งจะมีการขอหาสัญญาณ I/O ออกมาจัดเรียงให้เป็นพอร์ต PA,PB,PC,PD,PE,PF และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอร์ตET-CLCD เพื่อสะดวกต่อการใช้งาน พร้อมทั้งพอร์ตสำหรับดาวโหลดโปรแกรม นอกจากนี้ยังได้เพิ่มวงจร Line Driver RS-232 เข้าไปด้วยเพื่อให้สามารถใช้งานทางด้านพอร์ทอนุกรม RS-232 ได้ง่ายและสะดวกยิ่งขึ้น [6]

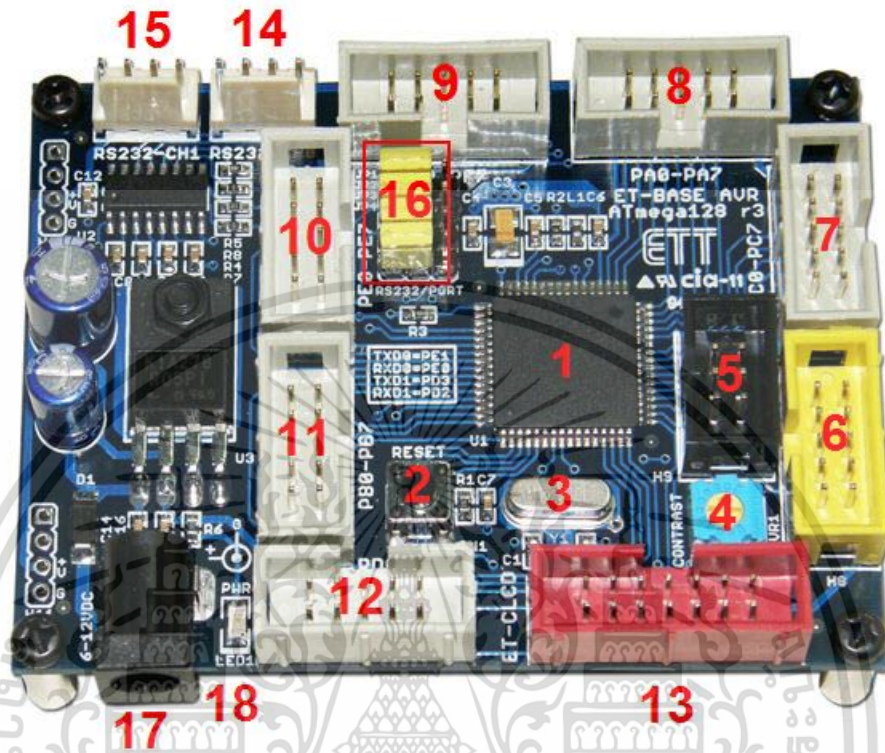
2.7.1.1 คุณสมบัติของบอร์ด ET-BASE AVR ATmega64/128 r3

- MCU ตระกูล AVR เบอร์ ATmega64 , ATmega128 ของ Atmel ซึ่งเป็น MCU ขนาด 8-Bit โดยเลือกใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณนาฬิกาแบบ XTAL คา 16 MHz ซึ่งคุณสมบัติเด่น ๆ ของ MCU ได้แก่
 - หน่วยความจำ Flash สำหรับเขียนโปรแกรม 64 KBytes สำหรับ ATmega64 และ 128K Bytes สำหรับ ATmega128 และมี RAM 4 KBytes
 - หน่วยความจำข้อมูลถาวรแบบ EEPROM ขนาด 2K Bytes สำหรับ ATmega64และ 4 K Byte สำหรับ ATmega128 ซึ่งสามารถลบและเขียนซ้ำได้กว่า 100,000 ครั้ง
 - จำนวน I/O สูงสุดถึง 53 I/O Pins
 - วงจรสื่อสาร SPI จำนวน 1 ช่อง , I2C จำนวน 1 ช่อง , Programmable Serial USARTs จำนวน 2 ช่อง
 - ADC ขนาด 10-Bit จำนวน 8 ช่อง
 - Timers/Counters 8-Bit จำนวน 2 ช่อง , Timers/Counters 16-Bit จำนวน 2 ช่อง , 8-Bit PWM 2 ช่อง , Watchdog Timer , Real Time Counter
- I/O PORT 10 PIN จำนวน 6 PORT ดังนี้ PA,PB,PC,PD,PE,PF
- พอร์ต ISP LOAD สำหรับโปรแกรม MCU (ต้องใช้ร่วมกับ ET-AVR ISP หรือเครื่องโปรแกรม ISP อื่นที่มีการจัดเรียงขาสัญญาณเหมือนกัน)
- วงจร Line Driver สำหรับพอร์ตสื่อสารอนุกรม RS232 จำนวน 2 ช่อง โดยเชื่อมต่อกับสัญญาณ PE0(RXD0) และ PE1(TXD0) จำนวน 1 ช่อง ส่วนที่เหลืออีก 1 ช่องจะต่อกับสัญญาณ PD2(RXD1) และ PD3(TXD1) เพื่อให้ผู้ใช้สามารถทดสอบการติดต่อสื่อสาร RS232
- วงจรเชื่อมต่อจอแสดงผล LCD แบบ Character (ET-CLCD) พร้อม VR ปรับความเข้มของ LCD ซึ่งใช้การเชื่อมต่องจรกับ LCD แบบ 4 Bit Interface
- วงจร Regulate ขนาด +5V / 2A สำหรับใช้งานเป็นแหล่งจ่ายไฟเลี้ยงวงจรให้กับจอแสดงผล LCD และอุปกรณ์ I/O ต่างๆ ที่ใช้กับแหล่งจ่ายขนาดขนาด +5V พร้อม LED แสดงสถานะสีแดง
- ขนาด PCB Size เล็กเพียง 8 X 6 cm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1.2 โครงสร้างของบอร์ด ET-BASE AVR ATmega64/128 r3

โครงสร้างของบอร์ด ET-BASE AVR ATmega64/128 r3 ประกอบด้วยพอร์ตเชื่อมต่อและอุปกรณ์ต่างๆ 18 ส่วน แสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของบอร์ด ET-BASE AVR ATmega64/128 r3 [8]

- หมายเลข 1 คือ MCU เบอร์ ATmega64 หรือ ATmega128 ซึ่งเป็น MCU ตระกูล AVR จาก ATMEL
- หมายเลข 2 คือ Switch RESET ใช้สำหรับ Reset การทำงานของ MCU
- หมายเลข 3 คือ Crystal ค่า 16 MHz
- หมายเลข 4 คือ ตัวต้านทานสำหรับปรับค่าความเข้มให้ LCD
- หมายเลข 5 พอร์ต AVR ISP (6 PIN) ใช้สำหรับดาวน์โหลด Hex File ให้กับ MCU
- หมายเลข 6 พอร์ต AVR ISP (10 PIN) ใช้สำหรับดาวน์โหลด Hex File ให้กับ MCU
- หมายเลข 7 คือ PORTC มีขนาด 8 Bit คือ PC0-PC7
- หมายเลข 8 คือ PORTA มีขนาด 8 Bit คือ PA0-PA7
- หมายเลข 9 คือ PORTF มีขนาด 8 Bit คือ PF0-PF7
- หมายเลข 10 คือ PORTE มีขนาด 8 Bit คือ PE0-PE7
- หมายเลข 11 คือ PORTB มีขนาด 8 Bit คือ PB0-PB7
- หมายเลข 12 คือ PORTD มีขนาด 8 Bit คือ PD0-PD7

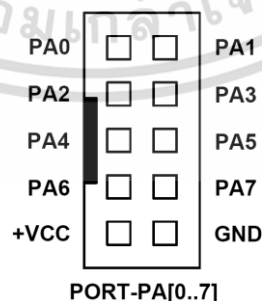
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หมายเลข 13 คือ พอร์ต ET-CLCD สำหรับเชื่อมต่อกับ LCD ชนิด Character Type ซึ่งใช้การเชื่อมต่อแบบ 4 Bit
- หมายเลข 14 และ 15 คือ ขั้วต่อ RS232 สำหรับใช้งานทั่วไป
- หมายเลข 16 คือ จัมเปอร์ สำหรับเลือกใช้งาน RS232 หรือ พอร์ต IO
- หมายเลข 17 คือ ขั้วต่อแหล่งจ่ายไฟสำหรับเลี้ยงวงจรของบอร์ด
- หมายเลข 18 คือ LED Power ใช้สำหรับแสดงสถานะของแหล่งจ่ายไฟ +5VDC

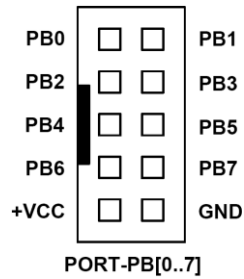
2.7.1.3 ขั้วต่อสัญญาณต่างๆ

สำหรับขั้วต่อสัญญาณของพอร์ต I/O จาก MCU นั้นจะถูกออกแบบและจัดเตรียมไว้ผ่านทางขั้วต่อแบบ IDC-Header ขนาด 10 Pin (2X5) จำนวน 6 ชุด คือ PA,PB,PC,PD,PE,PF ตามลำดับ โดยที่ขั้วต่อสัญญาณแต่ละชุด จะประกอบไปด้วยสัญญาณของ I/O ที่เชื่อมต่อมาจากขาสัญญาณของ MCU โดยตรงทั้งหมด โดยจุดเชื่อมต่อกับสัญญาณภายนอกบอร์ดมีดังนี้

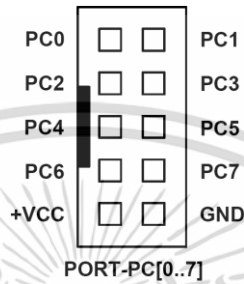
- ขั้วต่อแหล่งจ่ายไฟสำหรับเลี้ยงวงจรของบอร์ด
- ขั้วต่อ PORTA มีขนาด 8 Bit คือ PA0-PA7 ดังรูปที่ 2.9
- ขั้วต่อ PORTB มีขนาด 8 Bit คือ PB0-PB7 ดังรูปที่ 2.10
- ขั้วต่อ PORTC มีขนาด 8 Bit คือ PC0-PC7 ดังรูปที่ 2.11
- ขั้วต่อ PORTD มีขนาด 8 Bit คือ PD0-PD7 ดังรูปที่ 2.12
- ขั้วต่อ PORTE มีขนาด 8 Bit คือ PE0-PE7 ดังรูปที่ 2.13
- ขั้วต่อ PORTF มีขนาด 8 Bit คือ PF0-PF7 ดังรูปที่ 2.14
- ขั้วต่อ ET-CLCD สำหรับเชื่อมต่อกับ LCD ชนิด Character Type ดังรูปที่ 2.16
- ขั้วต่อ RS232 จำนวน 2 ช่อง โดยเชื่อมต่อกับสัญญาณ PE0(RXD0) และ PE1(TXD0) จำนวน 1 ช่อง ส่วนที่เหลืออีก 1 ช่อง จะต่อกับสัญญาณ PD2(RXD1) และ PD3(TXD1) เพื่อให้ผู้ใช้สามารถทดลองการติดต่อสื่อสาร RS232
- ขั้วต่อ AVR ISP ใช้สำหรับดาวน์โหลด Hex File ให้กับ MCU แสดงในรูปที่ 2.15



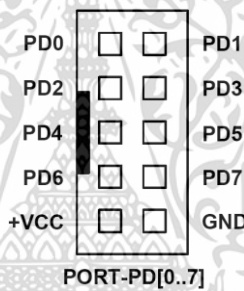
รูปที่ 2.9 พอร์ต PA มีขนาด 8 บิต [8]



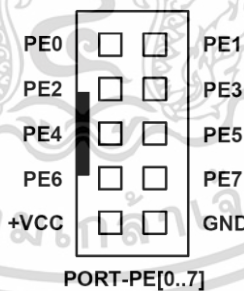
รูปที่ 2.10 พอร์ต PB มีขนาด 8 บิต [8]



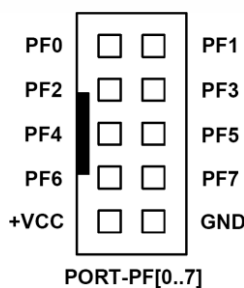
รูปที่ 2.11 พอร์ต PC มีขนาด 8 บิต [8]



รูปที่ 2.12 พอร์ต PD มีขนาด 8 บิต [8]

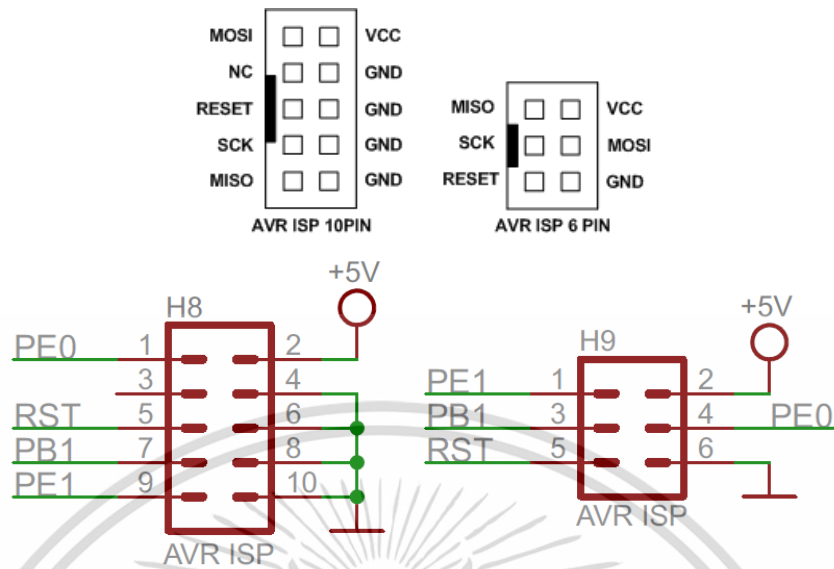


รูปที่ 2.13 พอร์ต PE มีขนาด 8 บิต [8]



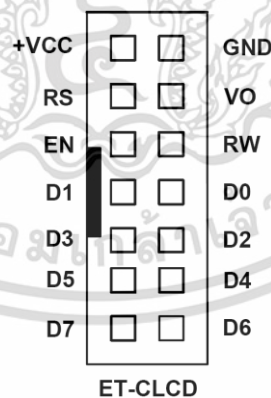
รูปที่ 2.14 พอร์ต PF มีขนาด 8 บิต [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

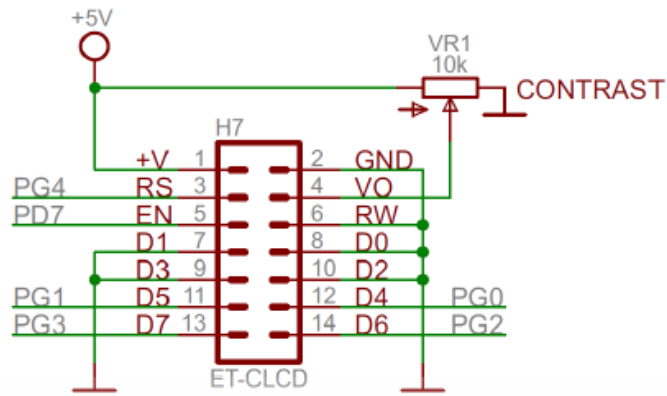


รูปที่ 2.15 พอร์ต AVR ISP และวงจรส่วนที่เชื่อมต่อ [8]

พอร์ต ET-CLCD ใช้กับ Character Type LCD โดยใช้ในการเชื่อมต่อแบบ 4 บิต โดยสัญญาณที่ใช้เชื่อมต่อกับ LCD จะเป็นสัญญาณจากพอร์ต PG และ PD (PD7) โดยในการเชื่อมต่อสายสัญญาณจากขั้วต่อของพอร์ต LCD ไปยังจอแสดงผล LCD นั้นให้ยึดชื่อขาสัญญาณเป็นจุดอ้างอิง โดยให้ต่อสัญญาณที่มีชื่อตรงกันเข้าด้วยกันให้ครบทั้ง 14 เส้น แสดงในรูปที่ 2.17



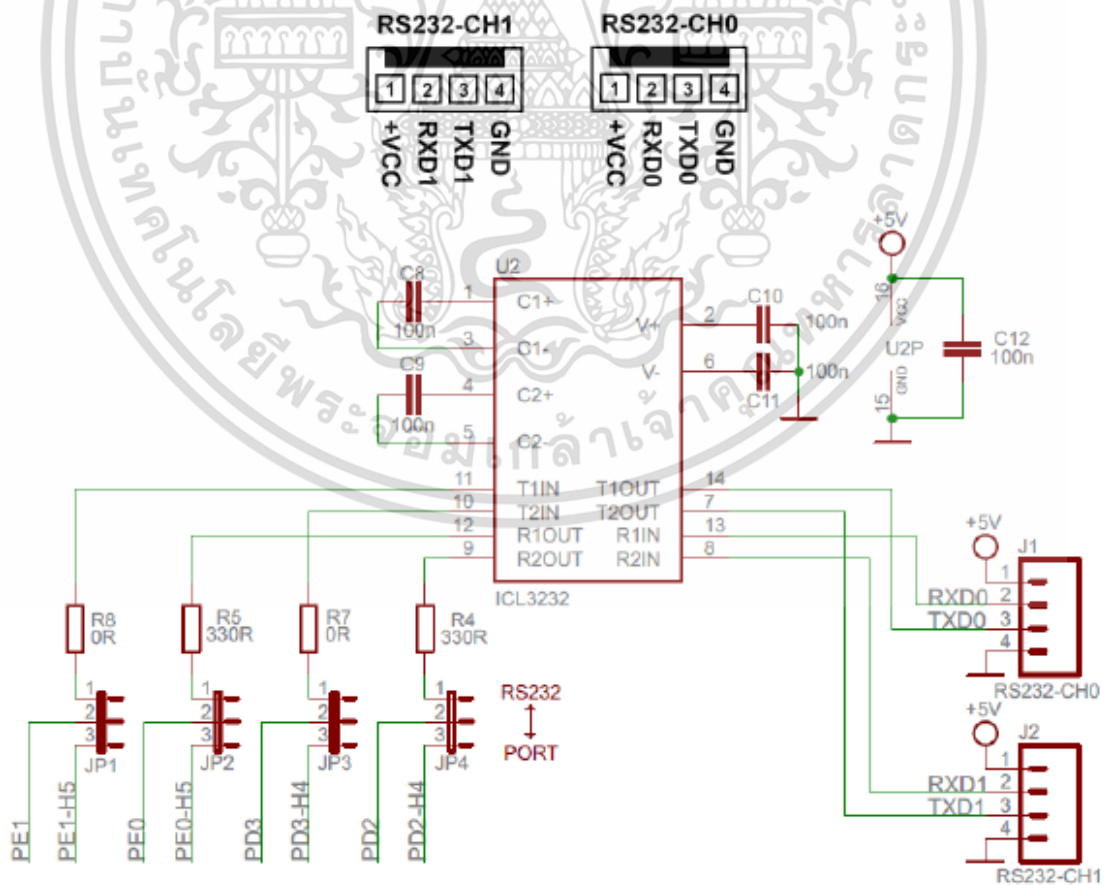
รูปที่ 2.16 พอร์ต ET-CLCD [8]



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
GND	+VCC	VO	RS	RW	EN	D0	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7

รูปที่ 2.17 การจัดเรียงขาสัญญาณของ Character LCD มาตรฐาน [8]

พอร์ต RS232 จำนวน 2 ช่อง โดยเชื่อมต่อกับสัญญาณ PE0(RXD0) และ PE1(TXD0) จำนวน 1 ช่อง ส่วนที่เหลืออีก 1 ช่อง จะต่อกับสัญญาณ PD2(RXD1) และ PD3(TXD1) แสดงในรูปที่ 2.18



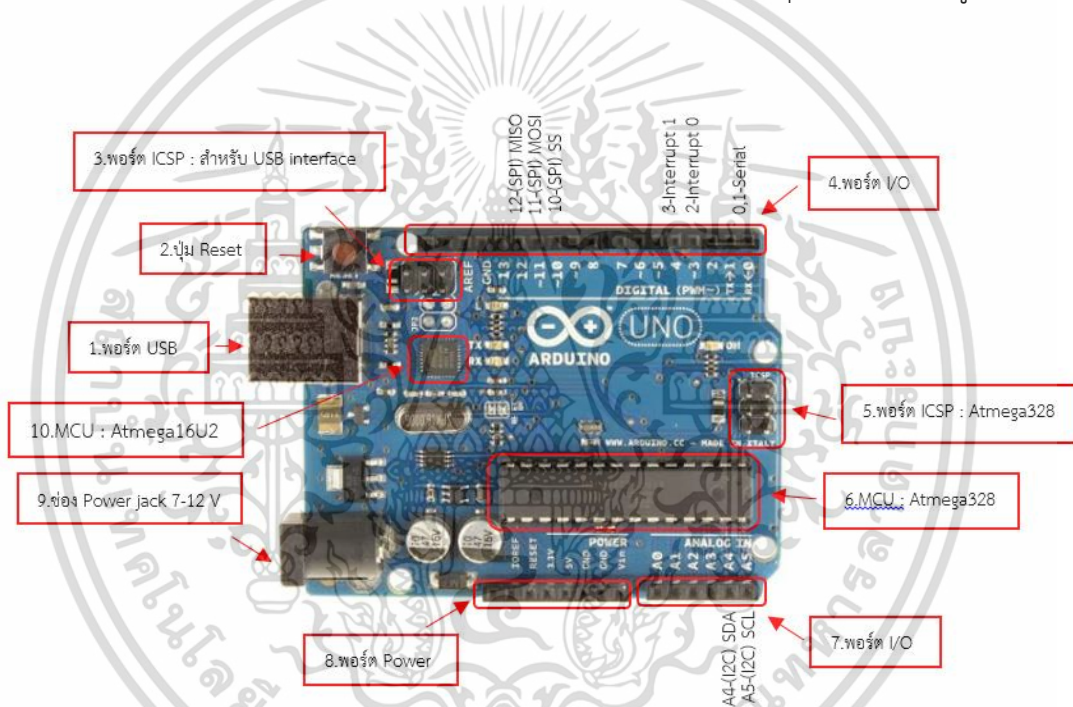
รูปที่ 2.18 วงจรส่วนที่เชื่อมต่อกับ RS232 [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 Arduino Uno Revision 3

บอร์ด Arduino เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source คือ มีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้านฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ โดยถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษา ทั้งนี้ผู้ใช้งานยังสามารถดัดแปลง เพิ่มเติม พัฒนาต่อยอดทั้งตัวบอร์ด หรือโปรแกรมต่อได้อีกด้วย [9] ตัวอย่างบอร์ด Arduino Uno Revision 3 แสดงในรูปที่ 2.19

เหตุผลที่เลือกใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิดนี้ เนื่องจากมีจำนวนขา Analog Input 6 ช่อง Digital Input 14 ช่อง จาก Digital Input สามารถใช้เป็นช่อง Interrupt ได้ 2 ช่อง Flash memory 32 kB สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB ได้โดยตรง Shield ส่วนใหญ่ ออกแบบมาเพื่อใช้กับบอร์ด Arduino Uno นี้ บอร์ดสามารถรองรับไฟฟ้าภายนอกได้ตั้งแต่ 6-20 โวลต์ แต่ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานคือ 7-12 โวลต์ ทำให้มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง



รูปที่ 2.19 บอร์ด Arduino Uno Revision 3 [10]

- หมายเลข 1 USB Port ใช้สำหรับเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ เพื่ออัปโหลดโปรแกรมเข้าไมโครคอนโทรลเลอร์ และจ่ายไฟให้กับบอร์ด
- หมายเลข 2 ใช้เมื่อต้องการให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เริ่มการทำงานใหม่
- หมายเลข 3 ICSP Port ของ Atmega16U2 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Visual Com port บน Atmega16U2
- หมายเลข 4 รับสัญญาณดิจิทัล ตั้งแต่ขา D0 ถึง D13 นอกจากนี้ บาง Pin จะทำหน้าที่อื่นๆ
- หมายเลข 5 Atmega328 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Boot loader

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้กับโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หมายเลข 6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Atmega328 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ใช้บนบอร์ด Arduino
- หมายเลข 7 รับสัญญาณแอนะล็อก ตั้งแต่ขา A0-A5
- หมายเลข 8 ไฟเลี้ยงของบอร์ดเมื่อต้องการจ่ายไฟให้กับวงจรภายนอก ประกอบด้วยขาไฟเลี้ยง +3.3 V, +5V, GND และ Vin
- หมายเลข 9 ช่องสำหรับรับไฟจากตัวแปรไฟ โดยที่แรงดันอยู่ระหว่าง 7-12 V
- หมายเลข 10 ไมโครคอนโทรลเลอร์ ของ Atmega16U2 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำหน้าที่ เป็น เชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ กับ Atmega16U2

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno Revision 3

คุณสมบัติ	Arduino Uno Revision 3
Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328) of which 0.5 KB used by boot loader
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz

2.7.3 Arduino Mega 2560 R3

Arduino Mega 2560 R3 เป็นบอร์ด Arduino ที่ออกแบบมาสำหรับงานที่ต้องใช้ I/O มากกว่า Arduino Uno R3 เช่น งานที่ต้องการรับสัญญาณจากเซนเซอร์ หรือควบคุมมอเตอร์ Servo หลายๆ ตัว ทำให้ Pin I/O ของบอร์ด Arduino Uno R3 ไม่สามารถรองรับได้ ทั้งนี้บอร์ด Mega 2560 R3 ยังมีความหน่วยความจำแบบ Flash มากกว่า Arduino Uno R3 ทำให้สามารถเขียนโค้ดโปรแกรมเข้าไปได้มากกว่า ในความเร็วของ MCU ที่เท่ากัน โดยคุณสมบัติของบอร์ด Arduino Mega 2560 R3 แสดงในตารางที่ 2.3 และตัวอย่างของบอร์ด Arduino Mega 2560 R3 แสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 บอร์ด Arduino Mega 2560 R3 [11]

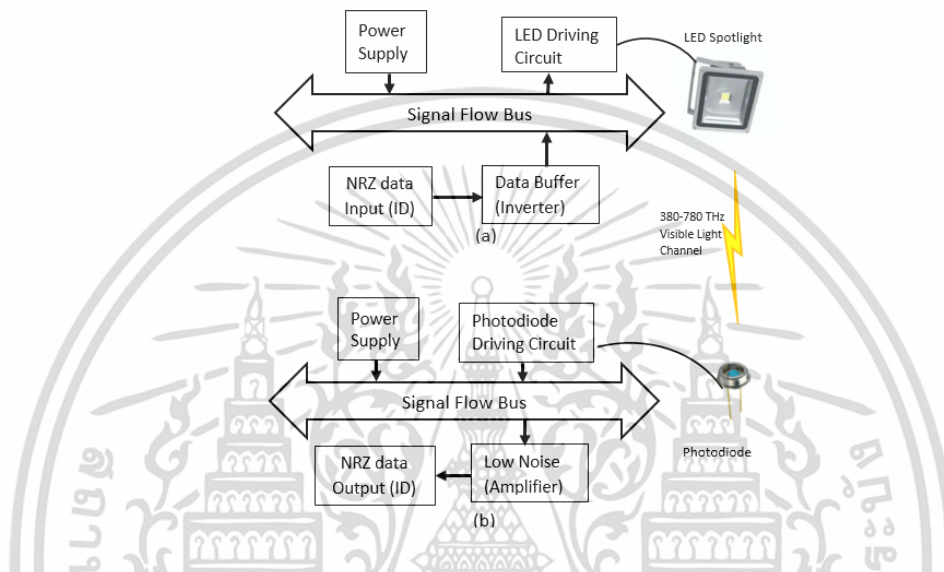
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega 2560 R3

คุณสมบัติ	Arduino ATmega2560
Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-18V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 14 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB
SRAM	8 KB (ATmega2560)
EEPROM	4 KB (ATmega2560)
Clock Speed	16 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 อุปกรณ์ภาคส่ง

การสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ เป็นหนึ่งในรูปแบบการสื่อสารไร้สาย ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.7 ที่ได้รับการพัฒนาให้สามารถรับ ส่งข้อมูลดิจิทัล โดยจะใช้หลอดเรืองแสง หรือหลอดแอลอีดี เป็นอุปกรณ์ส่งสัญญาณ สำหรับงานวิจัยนี้ได้นำหลอดสปอตไลท์แอลอีดี มาใช้ในการส่งข้อมูลเชิงแสง ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีกำลังส่งที่เหมาะสม ราคาไม่แพง ประยุกต์ใช้งานได้ง่าย ให้แสงสว่างทั่วถึง โดยสถาปัตยกรรมของการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ แสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 สถาปัตยกรรมของการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ (a) ฝั่งส่ง และ (b) ฝั่งรับ

2.8.1 แอลอีดี (Light Emitting Diode: LED)

ไดโอดเปล่งแสง หรือแอลอีดี คือไดโอดที่สามารถเปล่งแสงออกมาได้ แสงที่เปล่งออกมาประกอบด้วยคลื่นความถี่เดียวและเฟสต่อเนื่องกัน ซึ่งต่างกับแสงธรรมดาที่ตามองเห็น โดยหลอดแอลอีดีสามารถเปล่งแสงได้เมื่อจ่ายกระแสไฟเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และประสิทธิภาพในการให้แสงสว่างก็ยิ่งดีกว่าหลอดไฟขนาดเล็กทั่วไป แอลอีดีมีลักษณะเหมือนไดโอดทั่วไปที่ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด P และ N ประกอบกัน มีผิวข้างหนึ่งเรียบเป็นมันคล้ายกระจก เมื่อมีการให้ไบแอสตรงแก่ไดโอดจะทำให้เกิดทรอนที่สารกึ่งตัวนำชนิด N มีพลังงานสูงขึ้นไปจนสามารถวิ่งข้ามรอยต่อรวมกับโฮล (Hole) ใน P ก่อให้เกิดพลังงานในรูปของประจุโฟตอน ซึ่งจะแสดงแสงออกมา การนำแอลอีดีไปประยุกต์ใช้งานส่วนมากใช้ในภาคแสดงผล (LED Display) แอลอีดีโดยทั่วไปมีสองชนิดใหญ่ๆ คือ แอลอีดีชนิดที่ตามองเห็นได้ กับชนิดที่ตามองไม่เห็น ต้องใช้ทรานซิสเตอร์มาเป็นตัวรับแสงแทน

จากความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีเซมิคอนดักเตอร์ ทำให้เทคโนโลยีของแอลอีดีก้าวหน้าอย่างรวดเร็วตามไปด้วย ได้มีการนำแอลอีดีมาใช้ประโยชน์แพร่หลายมากขึ้น เช่น ในเครื่องคิดเลข สัญญาณจราจร ไฟท้ายรถยนต์ บ้ายสัญญาณต่างๆ ไฟฉาย ไฟให้สัญญาณของประกาศาร จอภาพยนตร์ขนาดใหญ่ ยิ่งไปกว่านั้น หน้าจอของโทรศัพท์มือถือ ก็เกือบทั้งหมดจะให้แสงสว่างด้วยหลอด

แอลอีดี
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แอลอีดีนับเป็นอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์แบบหนึ่งที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านและจะปล่อยแสงสว่างออกมา ความจริงแล้วแอลอีดีไม่ใช่เรื่องใหม่แต่อย่างใด โดยนักวิทยาศาสตร์ได้สังเกตมาตั้งแต่ปี 2450 ว่าเซมิคอนดักเตอร์จะเปล่งแสงออกมาเมื่อกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน อย่างไรก็ตามแสงที่เปล่งออกมามีปริมาณน้อยมาก จึงทำให้เทคโนโลยีนี้ไม่ได้รับความสนใจการนำเทคโนโลยีแอลอีดี มาใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์โดยเริ่มต้นขึ้นเมื่อนาย Nick Holonyak นักวิจัยแห่งบริษัท GE ประสบผลสำเร็จเมื่อปี 2505 ในการประดิษฐ์แอลอีดีที่สามารถเปล่งแสงสีแดงที่มีความสว่างออกมามากเพียงพอที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้ ทำให้ทั่วโลกเริ่มมีการตื่นตัววิจัยและพัฒนาในด้านนี้อย่างจริงจัง อย่างไรก็ตาม แอลอีดีที่ได้จากการวิจัยและพัฒนาในช่วงนั้นยังเปล่งแสงสว่างน้อยมาก จึงไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบให้แสงสว่างแต่อย่างใด ส่วนใหญ่นำไปใช้เป็นปุ่มสัญญาณแสงสีต่างๆในอุปกรณ์ไฟฟ้าเป็นต้นว่า หลอดแอลอีดีขนาดเล็กเท่าหัวเข็มหมุดได้ติดตั้งในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้สัญญาณว่าเครื่องกำลังเปิดหรือปิด เดิมแสงจากแอลอีดีจะเป็นสีต่างๆไม่ได้เป็นสีขาว จึงมีข้อจำกัดในการนำมาให้แสงสว่างแทนหลอดไฟ สำหรับบุคคลสำคัญที่สามารถแก้ไขปัญหานี้ คือ นาย Shuji Nakamura แห่งบริษัท Nichia Chemical ของญี่ปุ่น ได้ประสบผลสำเร็จในการประดิษฐ์ แอลอีดีสีน้ำเงินที่มีความสว่างจ้า จากนั้นได้นำแอลอีดีสีน้ำเงินไปเคลือบด้วยสารเคลือบเรืองแสงสีเหลือง จะทำให้แสงจากแอลอีดีที่ออกมกลายเปลี่ยนสีขาว สามารถนำไปใช้ในรูปให้แสงสว่าง โดยได้เริ่มวางตลาดแอลอีดีสีเขียวนับตั้งแต่ปี 2536 เป็นต้นมา ปัจจุบันจากความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีเซมิคอนดักเตอร์ทำให้เทคโนโลยีของแอลอีดีก้าวหน้าอย่างรวดเร็วตามไปด้วย ได้มีการนำแอลอีดีมาใช้ประโยชน์แพร่หลายมากขึ้นเรื่อยๆ เช่น ในเครื่องคิดเลข สัญญาณจราจร ไฟท้ายรถยนต์ ป้ายสัญญาณต่างๆ ไฟฉาย ไฟให้สัญญาณของประภาคาร จอภาพยนตร์ขนาดใหญ่ ยิ่งไปกว่านั้น หน้าจอของโทรศัพท์มือถือเกือบทั้งหมดจะให้แสงสว่างด้วยแอลอีดี ตัวอย่างของหลอดแอลอีดีได้แก่ หลอดซูเปอร์ไบรท์แอลอีดี (Super Bright LED) หลอดสปอตไลท์แอลอีดี (Spotlight LED) และหลอดอัลตราไบรท์แอลอีดี (Ultra Bright LED) ดังรูปที่ 2.22, 2.23 และ 2.24 ตามลำดับ



รูปที่ 2.22 หลอดซูเปอร์ไบรท์แอลอีดี [12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 หลอดสปอตไลท์แอลอีดี [13]



รูปที่ 2.24 หลอดอัลตราโปรท์แอลอีดี [14]

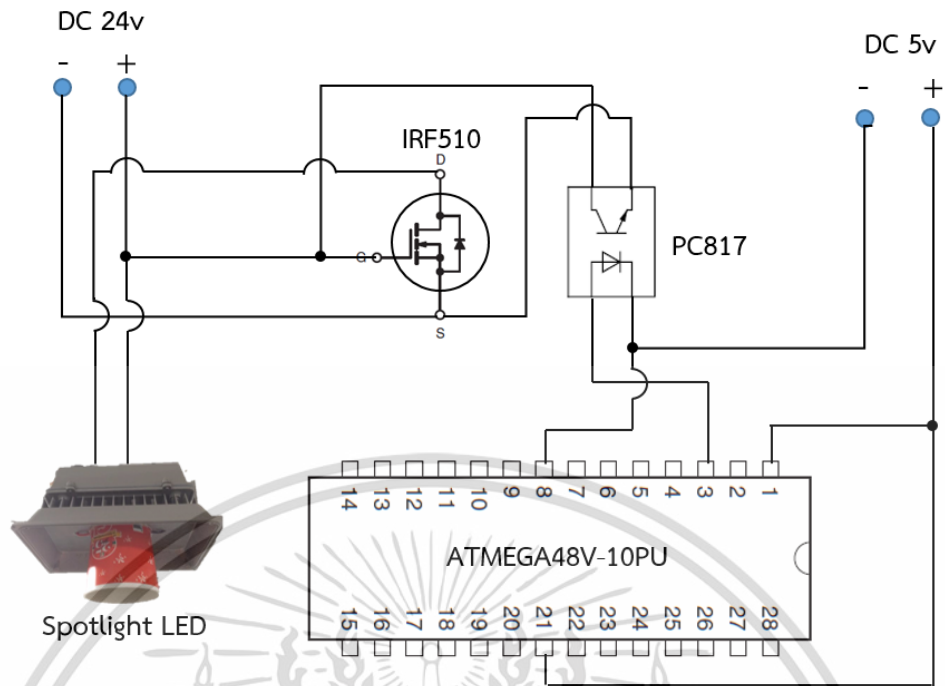
2.8.2 วงจรภาคส่ง

ผู้วิจัยได้ออกแบบวงจรภาคส่งสัญญาณ ด้วยการสั่งรหัสเลขฐาน 2 ไปทำการมอดูเลตแบบ OOK เพื่อควบคุมการเปิด-ปิดของ หลอดสปอตไลท์แอลอีดี โดยให้การรับส่งข้อมูลเป็นแบบ Non-return-to-zero (NRZ)

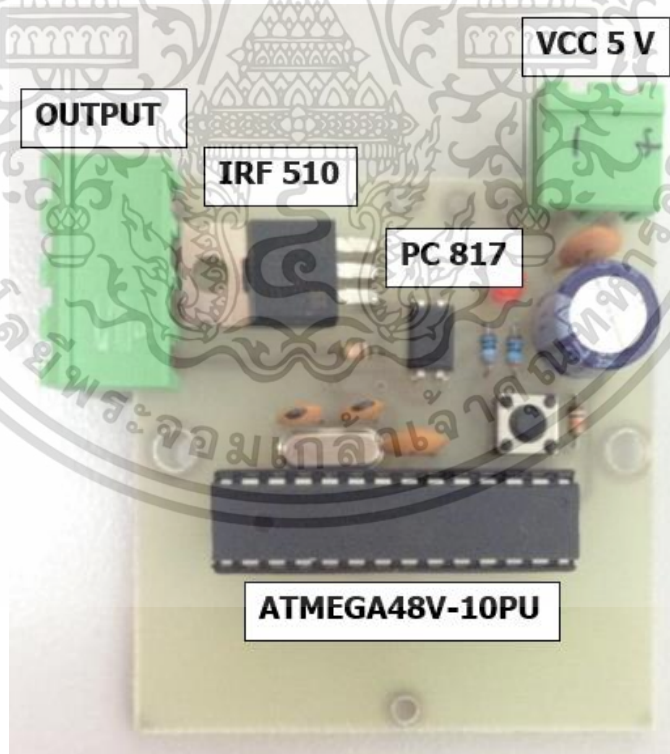
2.8.2.1 วงจรภาคส่งในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1

ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 ผู้วิจัยได้ออกแบบวงจรให้มีการเก็บข้อมูลหมายเลขระบุตัวตนลงในไมโครคอนโทรลเลอร์ ATMEGA48V-10PU เพื่อให้ส่งสัญญาณไปยังหลอดสปอตไลท์แอลอีดีตลอดเวลา โดยวงจรภาคส่งในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 แสดงดังรูปที่ 2.25 และรูปที่ 2.26 ซึ่งวงจรภาคส่ง 1 ตัว จะใช้ควบคุมหลอดสปอตไลท์แอลอีดี 1 หลอด แสดงดังรูปที่ 2.27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

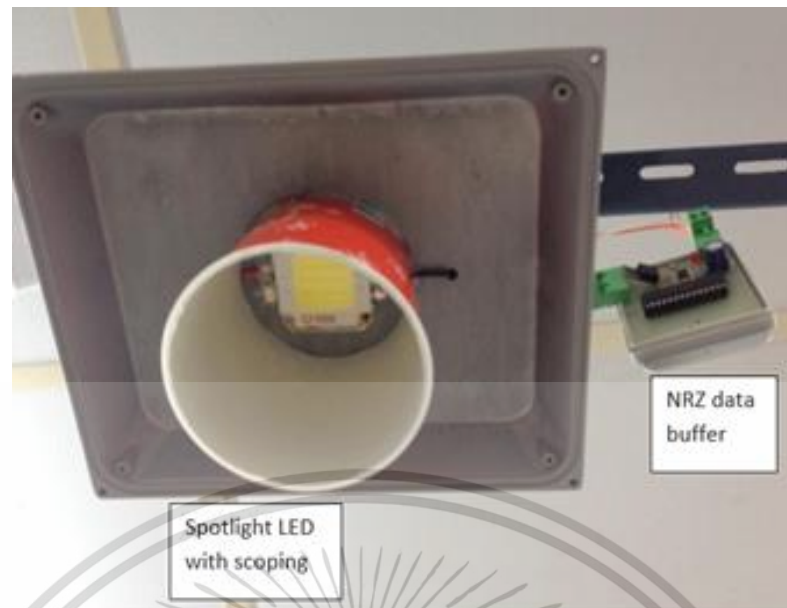


รูปที่ 2.25 วงจรภาคส่งในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1



รูปที่ 2.26 แผงวงจรภาคส่งในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1

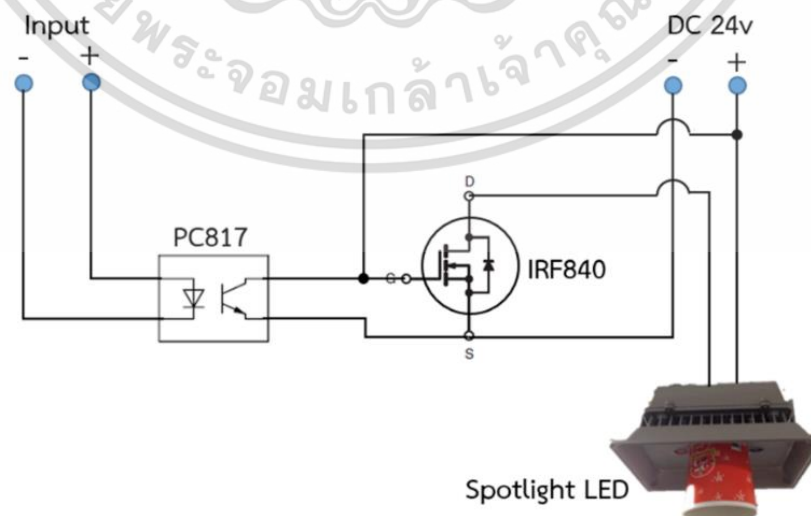
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 อุปกรณ์ภาคส่ง

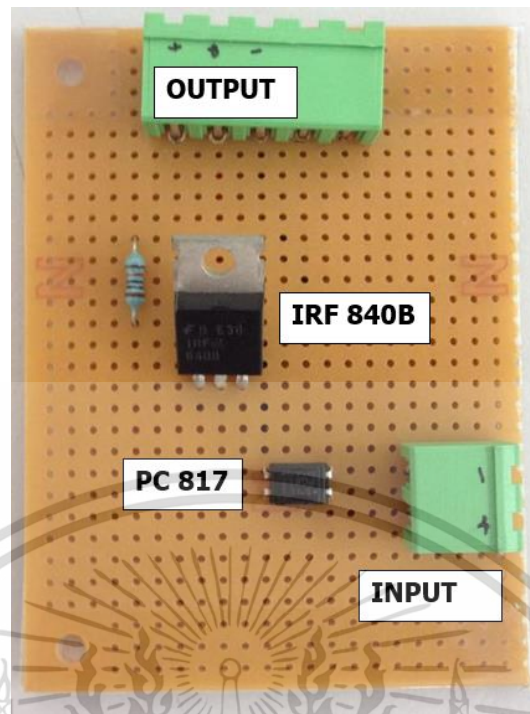
2.8.2.2 วงจรภาคส่งในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2

จากปัญหาของการทดลองที่จะกล่าวในบทถัดไป ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบวงจรภาคส่งใหม่ โดยเปลี่ยนรูปแบบการสื่อสารเป็นการสื่อสารแบบการเข้าถึงหลายช่องทางแบบการแบ่งเวลา อาศัยบอร์ด Arduino ในการควบคุมการทำงาน และส่งคำสั่งไปยังวงจรภาคส่งทั้ง 4 ตัว เพื่อให้ไปควบคุมการทำงานของหลอดสปอตไลท์แอลอีดีแต่ละหลอดในการส่งสัญญาณ โดยวงจรภาคส่งในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 แสดงดังรูปที่ 2.28 และรูปที่ 2.29 และการเชื่อมต่อบอร์ด Arduino วงจรภาคส่ง และหลอดสปอตไลท์แอลอีดี แสดงในรูปที่ 2.30

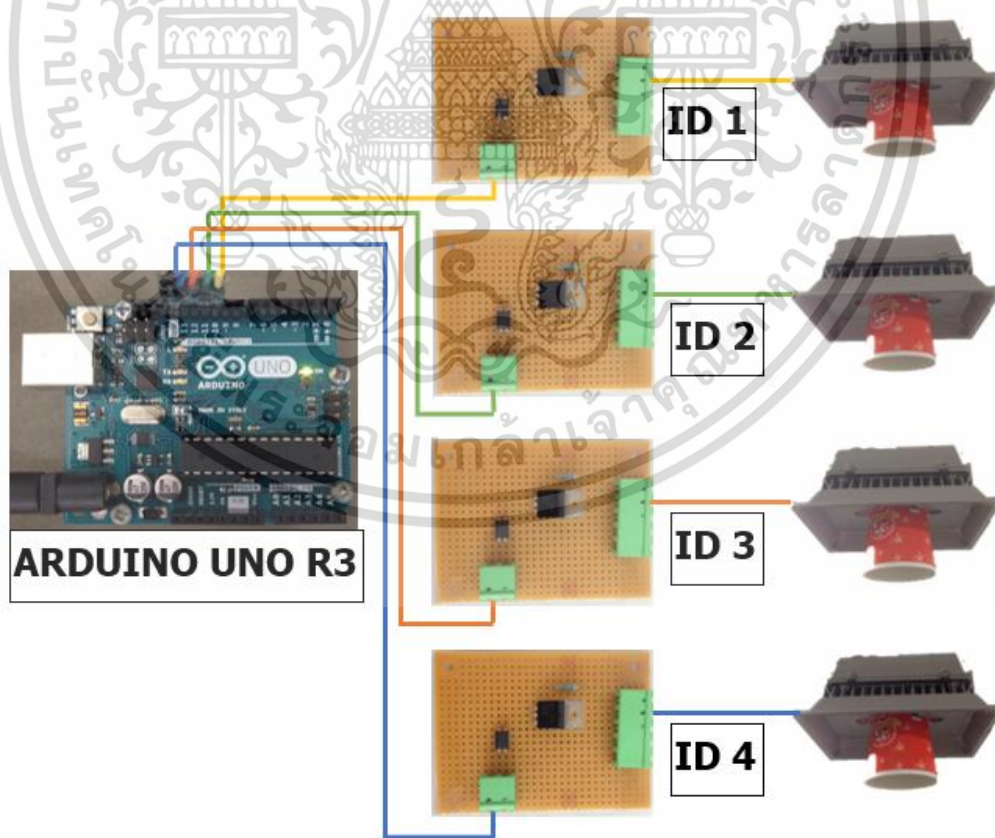


รูปที่ 2.28 วงจรภาคส่งในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 แผงวงจรภาคส่งในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2



รูปที่ 2.30 การเชื่อมต่ออุปกรณ์ภาคส่งในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2

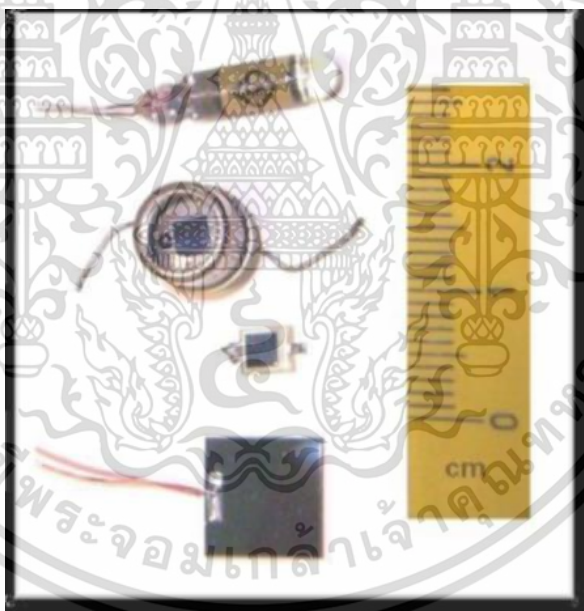
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 อุปกรณ์ภาครับ

ในการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ การรับสัญญาณเชิงแสงนั้นมีอุปกรณ์ที่นิยมใช้กันอยู่ 2 อย่าง คือตัวตรวจจับรูเงา (Image Sensor) และโฟโตไดโอด (Photodiode) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โฟโตไดโอดมาใช้ในการรับสัญญาณเชิงแสง เนื่องจากมีราคาถูก ใช้งานได้ง่าย มีประสิทธิภาพที่เหมาะสมกับการวิจัยนี้

2.9.1 โฟโตไดโอด (Photodiode)

โฟโตไดโอด เป็นอุปกรณ์เชิงแสงชนิดหนึ่งที่สามารถแปลงความถี่หรือความยาวคลื่นแสงเป็นกระแสไฟฟ้าหรือแรงดันไฟฟ้าได้ ขึ้นอยู่กับโหมดของการทำงานตัวอย่างเช่น เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) ถูกใช้ในการกำเนิดไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิด P และสารกึ่งตัวนำชนิด N รอยต่อจะถูกห่อหุ้มด้วยวัสดุที่แสงผ่านได้เช่น กระจกใส โฟโตไดโอด มีอยู่ 2 แบบคือ 1. แบบตอบสนองต่อแสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้ 2.แบบตอบสนองต่อแสงในย่าน อินฟราเรด (IR Photo Diode) ตัวอย่างของโฟโตไดโอดชนิดต่างๆแสดงดังรูปที่ 2.31

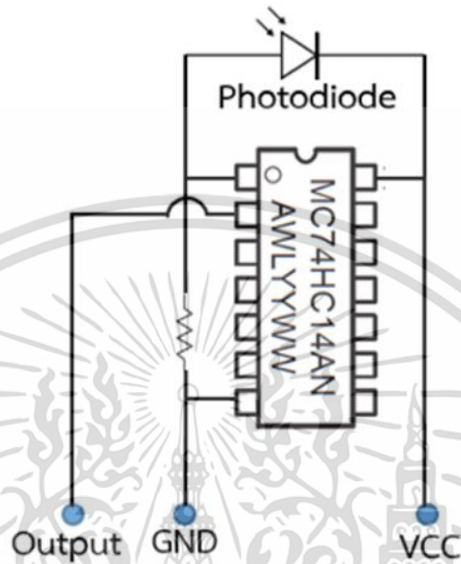


รูปที่ 2.31 โฟโตไดโอดในรูปแบบต่างๆ [15]

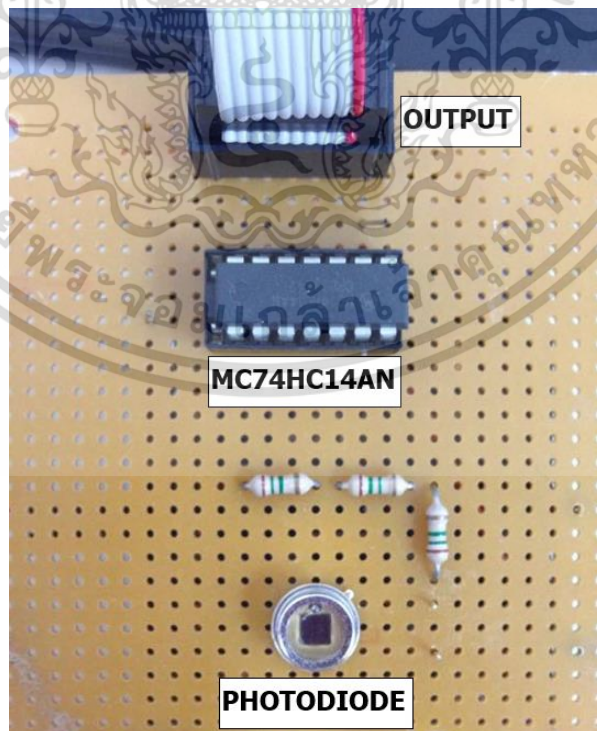
2.9.2 วงจรภาครับ

วงจรภาครับมีการออกแบบให้ใช้โฟโตไดโอดในการรับสัญญาณแสงเข้ามา และนอกจากนี้ยังมีการใช้ IC MC74HC14 มาใช้ในการรักษาระดับแรงดันระดับ TTL (แรงดันที่เข้ามาจะอยู่ในช่วง 0 ถึง 5V) ทำให้ง่ายต่อการวิเคราะห์สัญญาณข้อมูลที่รับได้ ซึ่งในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 ได้ใช้บอร์ด ET-BASE AVR ATmega64/128 r3 เป็นอุปกรณ์ส่งผ่านสัญญาณจากวงจรภาครับไปยังคอมพิวเตอร์ เพื่อแสดงผล และในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ผู้วิจัยได้เปลี่ยนมาใช้บอร์ด Arduino Mega 2560 R3 ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ในวงการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การส่งผ่านสัญญาณจากวงจรภาครับไปยังคอมพิวเตอร์ โดยในรูปแบบที่ 2.32, 2.33, 2.34 และ 2.35 แสดงวงจรภาครับ การเชื่อมต่อวงจรภาครับกับบอร์ด ET-BASE AVR ATmega64/128 r3 และการเชื่อมต่อวงจรภาครับกับบอร์ด Arduino Mega 2560 R3 ตามลำดับ

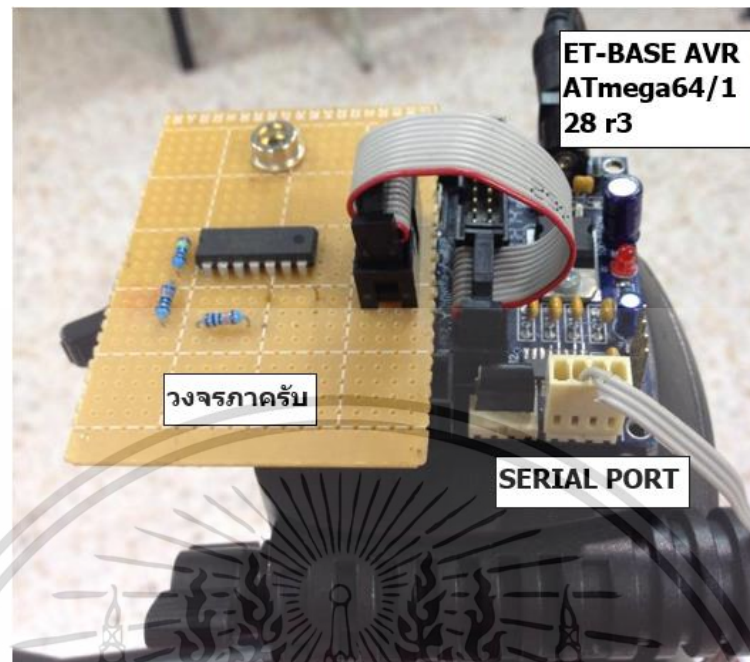


รูปที่ 2.32 วงจรภาครับ



รูปที่ 2.33 แผงวงจรภาครับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.34 การเชื่อมต่อวงจรถ่ายกับบอร์ด ET-BASE AVR ATmega64/128 r3



รูปที่ 2.35 การเชื่อมต่อวงจรถ่ายกับบอร์ด Arduino Mega 2560 R3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการทดลองวิจัย

3.1 กล่าวนำ

บทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงขั้นตอนการทดลองวิจัยการดำเนินการระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ โดยการใช้เทคนิคการหาตำแหน่งแบบพริ็อกซิมิตี้ร่วมกับเทคนิคการหาตำแหน่งแบบฟิงเกอร์พรินต์ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงการวิจัย คือช่วงที่ 1 เป็นการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้แบบพื้นฐาน คืออุปกรณ์ภาคส่งแต่ละตัวมีวงจรควบคุมการส่งสัญญาณเป็นของตัวเอง และไม่มีการควบคุมจังหวะการส่งสัญญาณ และช่วงที่ 2 เป็นการแก้ปัญหาจากการทดลองวิจัยในช่วงแรกโดยการสื่อสารแบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลาร่วมด้วย

3.2 การทดลองวิจัย

3.2.1 สภาพแวดล้อมในการทดลองวิจัย

สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลองระบุตำแหน่งวัตถุเป้าหมายภายในอาคารด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ คือภายในห้อง E12-911 ซึ่งเป็นห้องทึบแสงภายในอาคารเรียน 12 ชั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ดังรูปที่ 3.1

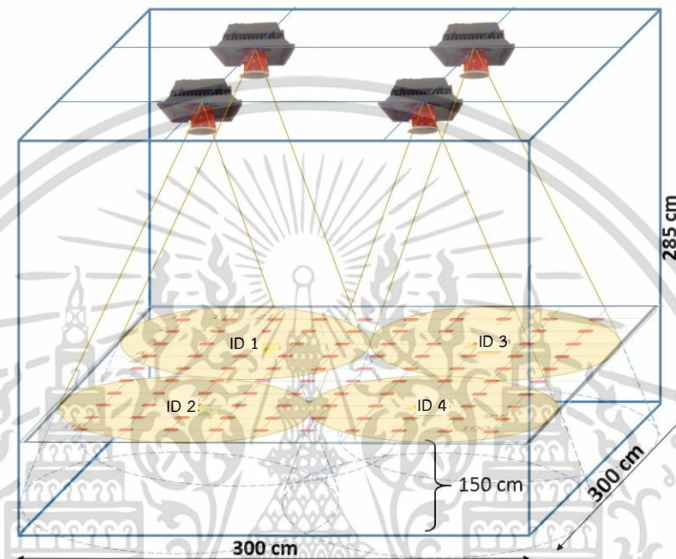


รูปที่ 3.1 สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการทดลองระบุตำแหน่งวัตถุเป้าหมายภายในอาคารด้วยการสื่อสาร

ด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ภายในห้องทึบแสง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

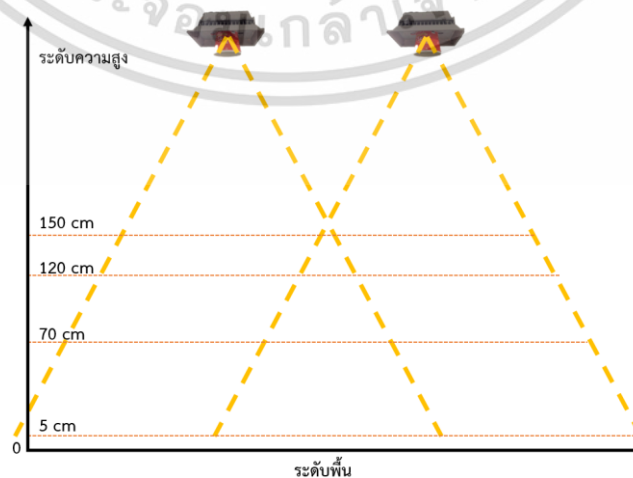
3.2.2 ขอบเขตพื้นที่ทดลองวิจัย

การทดลองวิจัยนี้ผู้ทดลองได้สร้างโครงเหล็กขึ้น เพื่อนำมาใช้เป็นขอบเขตของการทดลองวิจัย การระบุตำแหน่งวัตถุเป้าหมายภายในอาคารด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ สำหรับขอบเขตพื้นที่การทดลองวิจัยมีขนาดความกว้าง 300 เซนติเมตร ความยาว 300 เซนติเมตร ซึ่งหลอดสปอตไลท์แอลอีดีที่ใช้เป็นอุปกรณ์ภาคส่งจำนวน 4 หลอด จะถูกติดตั้งไว้ที่ความสูง 285 เซนติเมตรจากพื้น โดยมีระยะห่างกัน 150 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขอบเขตพื้นที่การทดลองวิจัย

และสำหรับชุดอุปกรณ์ภาครับ จะทำการรับข้อมูลที่ 4 ระดับความสูง คือที่ระยะความสูงจากพื้น 5, 70, 120 และ 150 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.3 เพื่อทดสอบการรับสัญญาณจากการซ้อนทับกันของแสงจากหลอดไฟคนละดวง

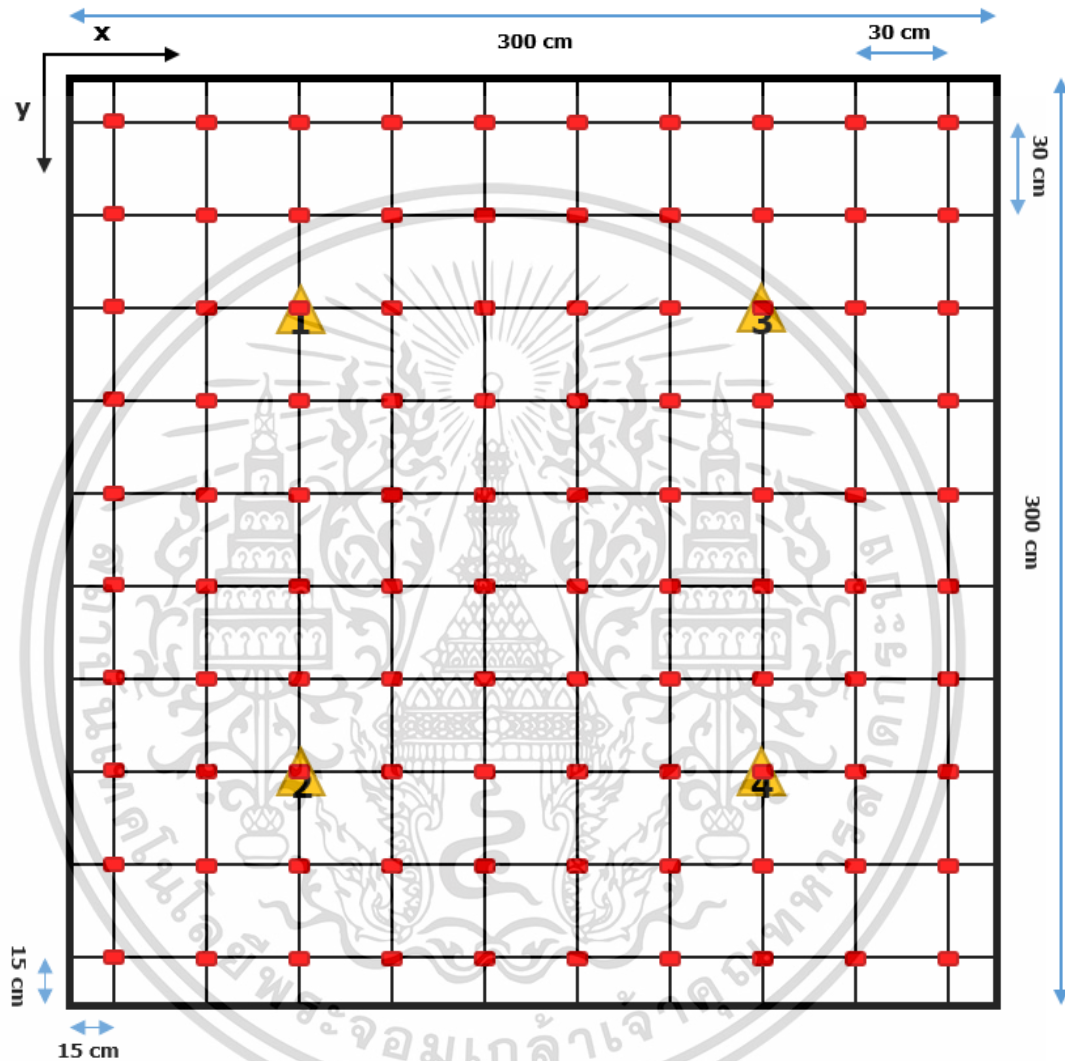


รูปที่ 3.3 ระดับความสูงของชุดอุปกรณ์ภาครับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประโยชน์เฉพาะในโครงการวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 ตำแหน่งฟังก์ชันปริ้นต์

ตำแหน่งฟังก์ชันปริ้นต์ คือตำแหน่งที่ถูกกำหนดพิกัด (x, y) เพื่อไว้ใช้พื้นฐานข้อมูลในการคำนวณพิกัดตำแหน่งของวัตถุเป้าหมาย โดยผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลของตำแหน่งฟังก์ชันปริ้นต์จำนวน 100 ตำแหน่ง แสดงดังรูปที่ 3.4



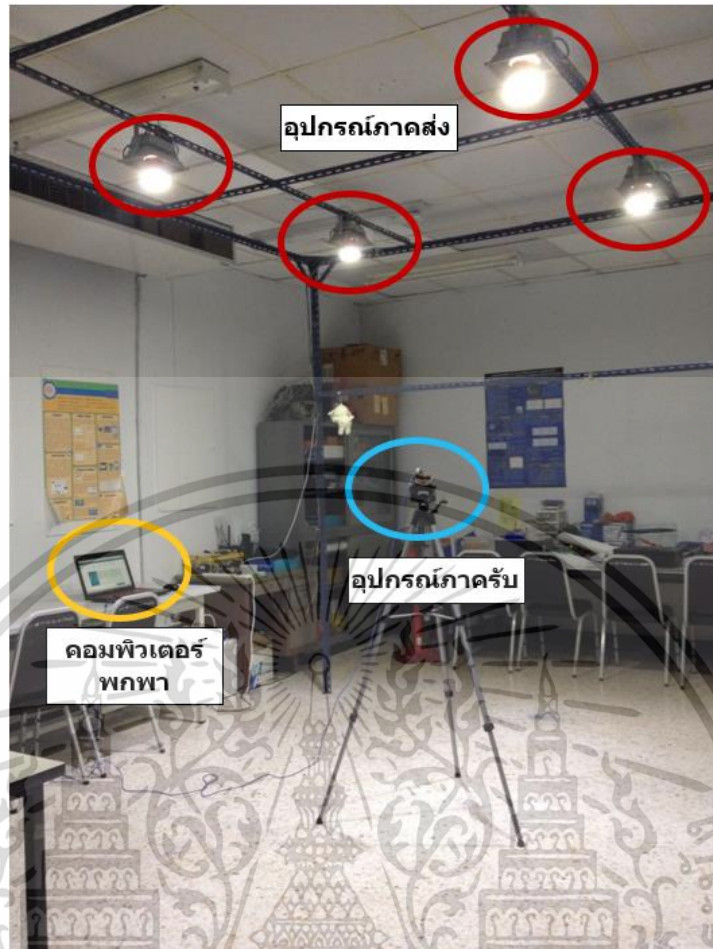
รูปที่ 3.4 ตำแหน่งฟังก์ชันปริ้นต์ในการทดลองวิจัย

3.2.4 ค่าความเข้มของแสง และหมายเลขระบุตัวตน

ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เปรียบเทียบรูปแบบมีอยู่ 2 พารามิเตอร์ คือค่าความสว่างของแสง (Illuminance) และหมายเลขระบุตัวตน (ID) จากแต่ละหลอดสปอตไลท์แอลอีดี โดยมีอุปกรณ์ภาครับ คือ ชุดอุปกรณ์รับสัญญาณแสง สำหรับรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตน และลักซ์มิเตอร์ (LUX Meter) สำหรับวัดค่าความสว่างของแสงในหน่วยลักซ์จากหลอดสปอตไลท์แอลอีดี ผ่านพอร์ตการสื่อสารแบบอนุกรม (Serial Port) ดังรูปที่ 3.5 โดยค่าพารามิเตอร์ที่อ่านได้จะถูกนำมาเก็บไว้ใน

ฐานข้อมูลในตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 การรับหมายเลขระบุตัวตน และการวัดความสว่างของแสง

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดการจัดเก็บฐานข้อมูลพิกัดพริ้นท์

ID	Position		Illuminance (LUX)
	x	y	
ID_t	x_1	y_1	l_1
	x_2	y_2	l_2
	x_3	y_3	l_3
	
	x_i	y_i	l_i

เมื่อ ID_t คือหมายเลขระบุตัวตนจากสเปคไลท์แอลอีดีจากหลอด t ; $t = 1, 2, 3, 4$

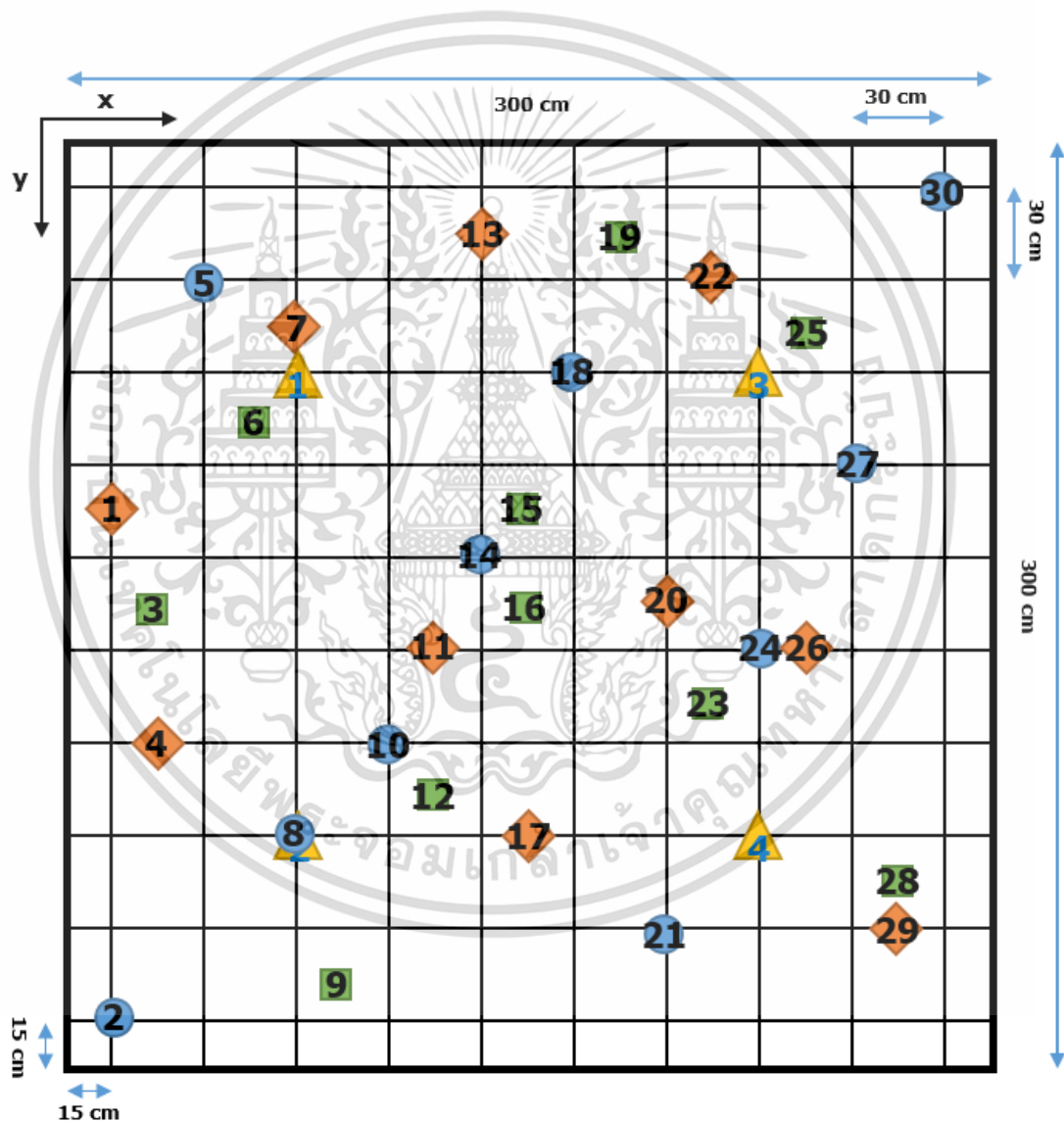
(x_i, y_i) คือพิกัดตำแหน่งในแนวแกน x และแกน y ณ ตำแหน่งพิกัดพริ้นท์ที่ i :
 $i = 1, 2, 3, \dots, 100$

l_i คือค่าความสว่างที่รับได้จากแต่ละพิกัดตำแหน่งที่ i ($i = 1, 2, 3, \dots, 100$) ในพื้นที่
 ครอบคลุมของ หลอด สเปคไลท์แอลอีดีที่ t ($t = 1, 2, 3, 4$) ซึ่งให้ ID_t

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 ตำแหน่งสุ่มทดสอบ

การทดสอบประสิทธิภาพการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้นั้น ได้สุ่มทดสอบตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายทั้งหมด 30 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 3.6 โดยแบ่งตำแหน่งทดสอบออกเป็น 3 กลุ่ม คือ 1. ตำแหน่งทดสอบที่อยู่บนตำแหน่งฟังก์เจอร์พรินต์ แทนด้วยรูปวงกลมสีน้ำเงิน 2. ตำแหน่งทดสอบที่อยู่ระหว่างตำแหน่งฟังก์เจอร์พรินต์ 2 ตำแหน่ง แทนด้วยรูปสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดสีส้ม และ 3. ตำแหน่งทดสอบที่อยู่ระหว่างตำแหน่งฟังก์เจอร์พรินต์ 4 ตำแหน่ง แทนด้วยรูปสี่เหลี่ยมสีเขียว และสามเหลี่ยมสีเหลือง คือตำแหน่งของหลอดสปอตไลท์แอลอีดี โดยที่จุดตัดของเส้นสีดำคือตำแหน่งของฟังก์เจอร์พรินต์



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งสุ่มทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 การระบุตำแหน่งของวัตถุ

การระบุตำแหน่งของวัตถุโดยการใช้เทคนิคพรีอิกซ์มิตี้ ร่วมกับเทคนิคฟิงเกอร์พริ้นต์ โดยพารามิเตอร์ที่ใช้คือ หมายเลขระบุตัวตนที่ได้รับได้ และค่าความสว่างของแสง ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองวิจัย 2 ขั้นตอนดังนี้

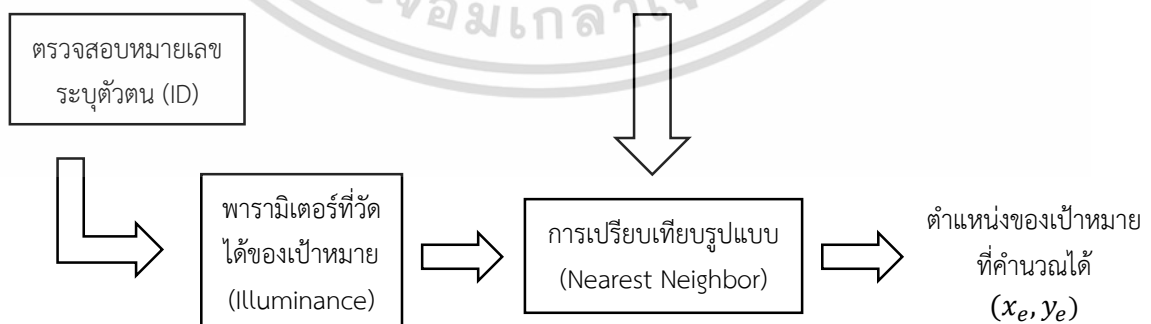
3.2.6.1 ขั้นตอนการเก็บฐานข้อมูล

ขั้นตอนนี้เป็นการรับค่าหมายเลขระบุตัวตนจากแต่ละหลอดสปอตไลท์แอลอีดีผ่านทางชุดอุปกรณ์รับสัญญาณแสง และรับค่าความสว่างของแสงผ่านลักซ์มิเตอร์ จากทั้ง 100 ตำแหน่ง ฟิงเกอร์พริ้นต์เก็บบันทึกไว้ในฐานข้อมูล ซึ่งแสดงรายละเอียดดังตารางที่ 3.1

3.2.6.2 ขั้นตอนการระบุพิกัดตำแหน่งของเป้าหมาย

ขั้นตอนนี้ วัตถุเป้าหมายจะถูกวางลงในตำแหน่งทดสอบ แล้วทำการรับหมายเลขระบุตัวตน และค่าความสว่างของแสง เพื่อตรวจสอบหมายเลขระบุตัวตนว่าอยู่ภายใต้ขอบเขตของหลอดสปอตไลท์แอลอีดีดวงใด และนำไปเปรียบเทียบรูปแบบกับฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์จากหมายเลขระบุตัวตนอื่นๆ ว่าค่าพารามิเตอร์ที่ได้รับได้นั้นมีความใกล้เคียงกับฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ใดมากที่สุด และนำไปประมวลผลเพื่อระบุพิกัดตำแหน่งของวัตถุเป้าหมายโดยการอ้างอิงตำแหน่งของฟิงเกอร์พริ้นต์นั้นๆ ซึ่งแสดงในรูปที่ 3.7

ID	Position (cm)		Illuminance (LUX)
	x	y	
ID_t	x_1	y_1	l_1
	x_2	y_2	l_2
	x_3	y_3	l_3
	
	x_i	y_i	l_i



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการระบุตำแหน่งเป้าหมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ความแม่นยำของการระบุตำแหน่งเป้าหมายสามารถพิจารณาได้จากระยะทางที่ผิดพลาดระหว่างตำแหน่งจริงกับตำแหน่งที่ได้จากการวิเคราะห์ และระยะทางที่ผิดพลาดสามารถคำนวณได้ด้วยใช้นอร์ม (Norm) [14] ดังสมการที่ 3.1

$$\text{error distance} = \sqrt{(x_a - x_e)^2 + (y_a - y_e)^2} \quad (3.1)$$

เมื่อ x_a และ y_a คือพิกัดตำแหน่งจริง

x_e และ y_e คือพิกัดตำแหน่งที่ได้จากการวิเคราะห์

3.3 การทดลองวิจัยช่วงที่ 1

3.3.1 ระเบียบการทดลองวิจัยช่วงที่ 1

รายละเอียดของการทดลองวิจัย สำหรับการดำเนินการระบบการหาตำแหน่งภายในอาคาร ด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ช่วงที่ 1 แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดต่างๆ ของการทดลองวิจัยช่วงที่ 1

รายการ	รายละเอียด
1. ตำแหน่งฟิงเกอร์พริ้นต์	100 ตำแหน่ง
2. ตำแหน่งส้อมทดสอบ	30 ตำแหน่ง
3. ขอบเขตพื้นที่การทดลอง	กว้าง 300 ซม. X ยาว 300 ซม. X สูง 285 ซม.
4. ระดับความสูงของอุปกรณ์ภาครับ	5 ซม., 70 ซม., 120 ซม. และ 150 ซม.
5. อุปกรณ์การทดลอง	หลอดสปอตไลท์แอลอีดี ขนาด 30 วัตต์ 4 หลอด กล่องควบคุมการส่งสัญญาณ 4 กล่อง ชุดรับสัญญาณ 1 ชุด ลักซ์มิเตอร์ 1 ตัว ขาตั้งกล่อง คอมพิวเตอร์พกพา 1 เครื่อง และโปรแกรมรับสัญญาณ

3.3.2 การรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตนในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1

การรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตนจากหลอดสปอตไลท์แอลอีดีที่ใช้ในการระบุตำแหน่งในการทดลองวิจัยด้วยชุดอุปกรณ์รับสัญญาณแสง โดยรับข้อมูล และส่งต่อไปยังพอร์ตการสื่อสารแบบอนุกรม (Serial Port) เพื่อแปลงสัญญาณที่ได้เป็นข้อมูลด้วยโปรแกรม Serial Monitor AVR

3.4 การทดลองวิจัยช่วงที่ 2

เนื่องจากปัญหาในการรับสัญญาณของหมายเลขระบุตัวตนในบริเวณที่แสงจากหลอดสปอตไลท์แอลอีดีมากกว่า 1 หลอดซ้อนทับกัน ทำให้ไม่สามารถอ่านข้อมูลหมายเลขระบุตัวตนจากบริเวณนั้นได้ ผู้ทดลองวิจัยจึงได้ทำการออกแบบอุปกรณ์ทั้งภาคส่ง และภาครับใหม่ โดยเปลี่ยนรูปแบบการ

เอกสารนี้ส่งสัญญาณเป็นการมัลติเพล็กซ์แบบการแบ่งเวลา (Time Division Multiplexing A: TDM) เพื่อให้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาครับสามารถรับสัญญาณจากในพื้นที่ที่มีการซ้อนทับกันของแสงจากแต่ละหลอด สปอตไลท์แอลอีดีได้

3.4.1 ระเบียบการทดลองวิจัยช่วงที่ 2

รายละเอียดของการทดลองวิจัย สำหรับการดำเนินการระบบการหาตำแหน่งภายในอาคาร ด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ช่วงที่ 2 แสดงดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียดต่างๆ ของการทดลองวิจัยช่วงที่ 2

รายการ	รายละเอียด
1. ตำแหน่งฟิงเกอร์พริ้นต์	100 ตำแหน่ง
2. ตำแหน่งปุ่มทดสอบ	30 ตำแหน่ง
3. ขอบเขตพื้นที่การทดลอง	กว้าง 300 ซม. X ยาว 300 ซม. X สูง 285 ซม.
4. ระดับความสูงของอุปกรณ์ ภาครับ	5 ซม., 70 ซม., 120 ซม. และ 150 ซม.
5. อุปกรณ์การทดลอง	หลอดสปอตไลท์แอลอีดี ขนาด 30 วัตต์ 4 หลอด วงจรส่งข้อมูล 4 ชุด กล่องควบคุมการส่งสัญญาณแบบ TDMA 1 กล่อง ชุดรับสัญญาณ 1 ชุด ถักซ์มิเตอร์ 1 ตัว ขาตั้งกล่อง คอมพิวเตอร์พกพา 1 เครื่อง และโปรแกรมรับสัญญาณ

3.4.2 การรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตนในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2

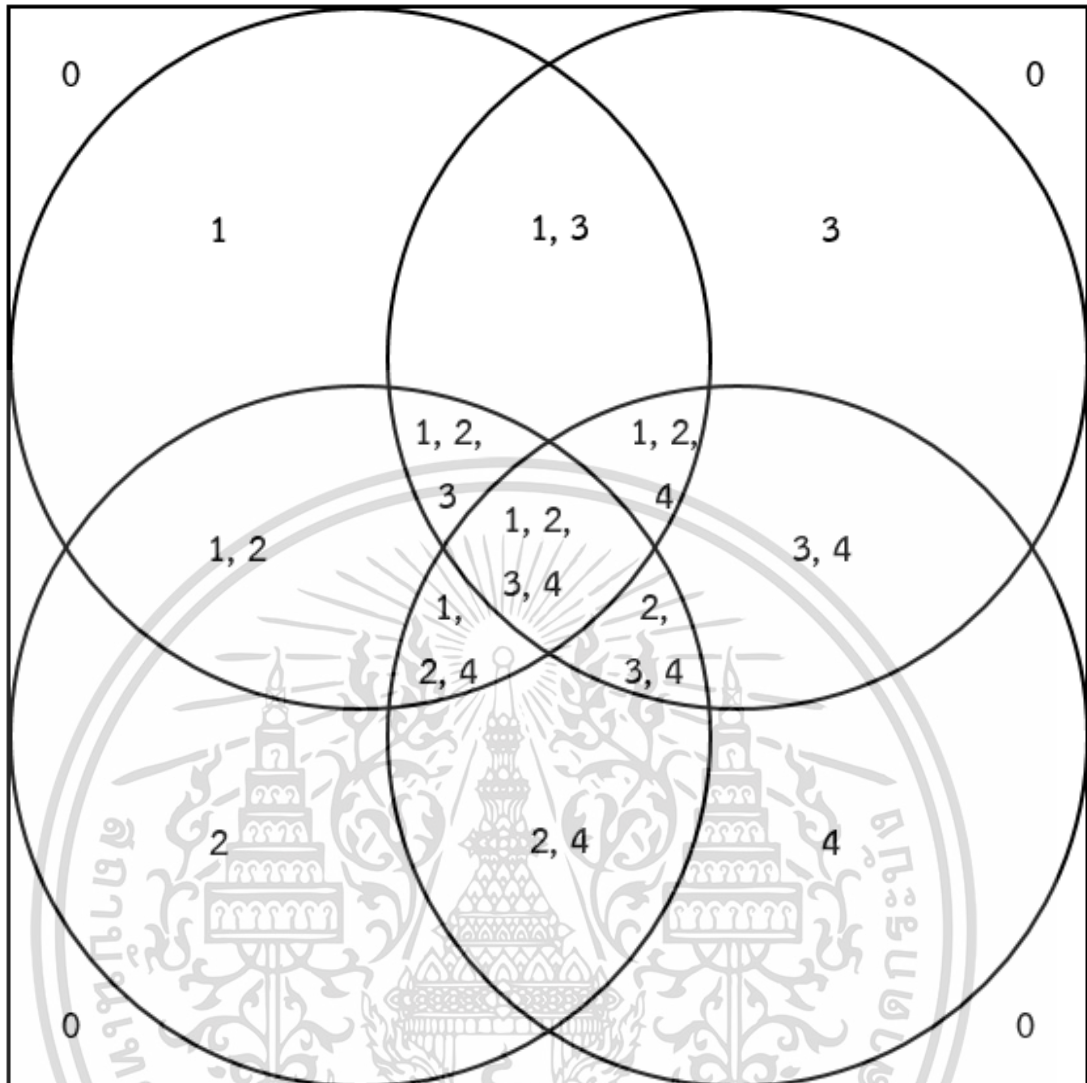
ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการระบุตำแหน่งในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 คือหมายเลขระบุตัวตนจากหลอดสปอตไลท์แอลอีดี โดยรับสัญญาณผ่านทางชุดอุปกรณ์รับสัญญาณแสง และอ่านข้อมูลผ่านพอร์ตการสื่อสารแบบอนุกรม (Serial Port) ด้วยโปรแกรม Serial Monitor ของ Arduino 1.6.5

3.4.3 การระบุตำแหน่งเป้าหมายแบบพรีอิกซิมิตีในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2

การระบุตำแหน่งของเป้าหมายแบบพรีอิกซิมิตี เป็นการระบุตำแหน่งเป้าหมายแบบหยาบๆ คือสามารถระบุตำแหน่งเป็นบริเวณพื้นที่ ไม่สามารถระบุตำแหน่งเป็นพิกัดที่แน่นอนได้ โดยอ้างอิงจากหมายเลขระบุตัวตนของหลอดแอลอีดีที่รับได้ โดยผู้ทดลองได้แบ่งผลของการทดลองวิจัยการระบุตำแหน่งเป้าหมายแบบพรีอิกซิมิตีไว้ 14 รูปแบบคือ บริเวณพื้นที่ที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้จากหลอดสปอตไลท์แอลอีดีเพียงหลอดเดียว 4 รูปแบบ บริเวณพื้นที่ที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้จากหลอดสปอตไลท์แอลอีดี 2 หลอด 4 รูปแบบ บริเวณพื้นที่ที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้จากหลอดสปอตไลท์แอลอีดี 3 หลอด 4 รูปแบบ บริเวณพื้นที่ที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้จากหลอดสปอตไลท์แอลอีดีทั้ง 4 หลอด 1 รูปแบบ และบริเวณพื้นที่ที่ไม่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้จากหลอดสปอตไลท์แอลอีดีได้เลย 1 รูปแบบ (ผู้ทดลองจะบันทึกค่าเป็น 0)

ดังรูปที่ 3.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 การแบ่งผลการทดลองวิจัยทั้ง 14 รูปแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองวิจัย

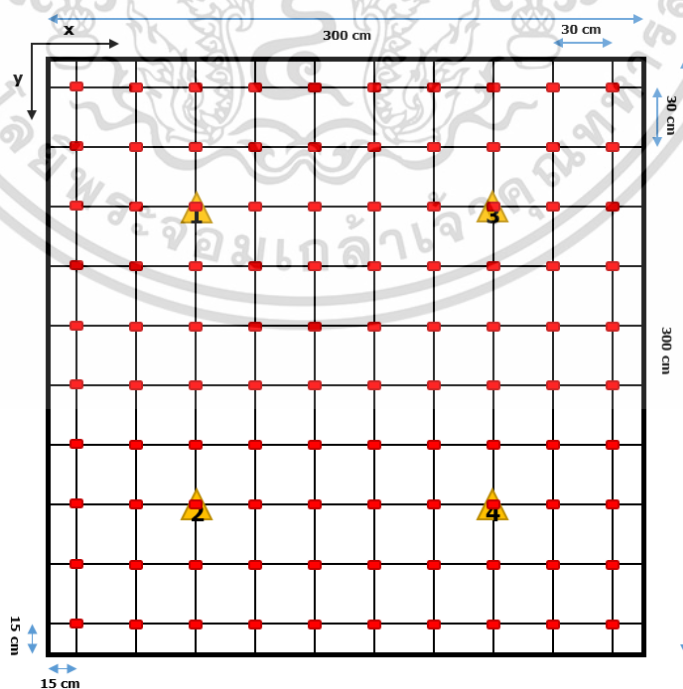
4.1 กล่าวนำ

บทนี้กล่าวถึงผลการทดลองวิจัย และผลการวิเคราะห์ในการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคาร ด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ โดยใช้เทคนิคการหาตำแหน่งแบบพริ็อกซิมิตี้ ร่วมกับการหาตำแหน่งแบบฟิงเกอร์พรินต์ ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วงการวิจัย คือ ช่วงที่ 1 เป็นการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้แบบพื้นฐาน คืออุปกรณ์ภาคส่งแต่ละตัวมีวงจรควบคุมการส่งสัญญาณเป็นของตัวเอง และไม่มีการควบคุมจังหวะการส่งสัญญาณ และช่วงที่ 2 เป็นการแก้ปัญหาจากการทดลองวิจัยในช่วงแรกด้วยการสื่อสารแบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา

4.2 ผลการทดลองวิจัยช่วงที่ 1

4.2.1 การสร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์พรินต์ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1

ฐานข้อมูลฟิงเกอร์พรินต์ในการทดลองการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ ได้ทำการเก็บหมายเลขระบุตัวตน และค่าความสว่างของแสงเป็นค่าพารามิเตอร์สำหรับทุกๆ ตำแหน่งของฟิงเกอร์พรินต์ ทั้ง 100 ตำแหน่ง แสดงในรูปที่ 4.1 โดยทำการเก็บข้อมูลจำนวน 5 รอบเพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าพารามิเตอร์สำหรับบันทึกลงในฐานข้อมูล โดยตำแหน่งที่รับหมายเลขระบุตัวตนได้ จะบันทึกเป็น 1, 2, 3 และ 4 ตามสัญญาณที่รับได้ แต่ในส่วนที่ไม่สามารถรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตนได้ จะบันทึกเป็น 0



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งฟิงเกอร์พรินต์ทั้ง 100 ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์จะแบ่งออกเป็น 4 ระดับ ตามความสูงของชุดอุปกรณ์ภาครับ ดังที่แสดงในตารางที่ 4.1 – 4.4

ตารางที่ 4.1 ฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 5 ซม.

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
1	0	15	15	160.2
2	1	15	45	175.2
3	1	15	75	196.2
4	0	15	105	228
5	0	15	135	255.4
6	0	15	165	257
7	0	15	195	235.8
8	2	15	225	199.8
9	0	15	255	177.8
10	0	15	285	164.6
11	0	45	15	170.6
12	1	45	45	226.4
13	0	45	75	216.4
14	0	45	105	252
15	0	45	135	275.8
16	0	45	165	277.2
17	0	45	195	264
18	0	45	225	225
19	2	45	255	192.4
20	0	45	285	176.2
21	1	75	15	186.4
22	1	75	45	213.6
23	0	75	75	248.8
24	0	75	105	285.6
25	0	75	135	304.4
26	0	75	165	306.6
27	0	75	195	296.4
28	0	75	225	259.4
29	0	75	255	220.6
30	0	75	285	200.4
31	0	105	15	217.6
32	0	105	45	251.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
33	0	105	75	286.4
34	0	105	105	329
35	0	105	135	359.2
36	0	105	165	364.6
37	0	105	195	347
38	0	105	225	302.4
39	0	105	255	266.4
40	0	105	285	237.8
41	0	135	15	257.8
42	0	135	45	270.4
43	0	135	75	295
44	0	135	105	348.2
45	0	135	135	401.6
46	0	135	165	415.4
47	0	135	195	367
48	0	135	225	311
49	0	135	255	279.4
50	0	135	285	261
51	0	165	15	242.2
52	0	165	45	268
53	0	165	75	292.2
54	0	165	105	342.8
55	0	165	135	402.6
56	0	165	165	411.4
57	0	165	195	370
58	0	165	225	316.6
59	0	165	255	283.2
60	0	165	285	259
61	0	195	15	209
62	0	195	45	238.6
63	0	195	75	266.6
64	0	195	105	308.8
65	0	195	135	350.4
66	0	195	165	354.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
67	0	195	195	342.4
68	0	195	225	305.2
69	0	195	255	265.6
70	0	195	285	231.4
71	3	225	15	182.8
72	0	225	45	205.4
73	0	225	75	234.4
74	0	225	105	271.6
75	0	225	135	301
76	0	225	165	307.2
77	0	225	195	302.6
78	0	225	225	266.8
79	0	225	255	220
80	0	225	285	199.2
81	3	255	15	176.2
82	3	255	45	189
83	0	255	75	206.6
84	0	255	105	244.6
85	0	255	135	278.2
86	0	255	165	282.4
87	0	255	195	269.2
88	0	255	225	230
89	0	255	255	237.8
90	0	255	285	182.2
91	0	285	15	164.6
92	3	285	45	179.2
93	3	285	75	190.6
94	0	285	105	219.6
95	0	285	135	255
96	0	285	165	267.2
97	0	285	195	247
98	0	285	225	213.8
99	0	285	255	184.2
100	0	285	285	172.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 70 ซม.

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
1	1	15	15	209
2	1	15	45	252.6
3	1	15	75	270
4	0	15	105	280.6
5	0	15	135	323.6
6	0	15	165	330.8
7	0	15	195	281.6
8	2	15	225	269.8
9	2	15	255	256
10	2	15	285	220
11	1	45	15	243.8
12	1	45	45	276.8
13	1	45	75	295.6
14	0	45	105	323.4
15	0	45	135	389.8
16	0	45	165	403
17	0	45	195	332.4
18	2	45	225	297
19	2	45	255	282.4
20	2	45	285	256.4
21	0	75	15	258
22	0	75	45	290
23	0	75	75	313.6
24	0	75	105	347.2
25	0	75	135	417.8
26	0	75	165	428.8
27	0	75	195	354.6
28	0	75	225	318
29	0	75	255	299.2
30	2	75	285	270.6
31	0	105	15	260.6
32	0	105	45	309.4
33	0	105	75	385.2
34	0	105	105	365.4
35	0	105	135	414.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
36	0	105	165	421.8
37	0	105	195	370.8
38	0	105	225	354.2
39	0	105	255	331
40	0	105	285	278.4
41	0	135	15	266.8
42	0	135	45	377.2
43	0	135	75	420.8
44	0	135	105	423.8
45	0	135	135	429.8
46	0	135	165	429.2
47	0	135	195	424.8
48	0	135	225	430.2
49	0	135	255	400.6
50	0	135	285	317
51	0	165	15	263.8
52	0	165	45	352.2
53	0	165	75	389.2
54	0	165	105	395
55	0	165	135	409.2
56	0	165	165	434.8
57	0	165	195	421.8
58	0	165	225	423.8
59	0	165	255	386.6
60	0	165	285	305.6
61	3	195	15	263.2
62	0	195	45	300.2
63	0	195	75	321.6
64	0	195	105	338.8
65	0	195	135	398.4
66	0	195	165	433.8
67	0	195	195	374.6
68	0	195	225	347.8
69	0	195	255	320
70	0	195	285	278.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
71	3	225	15	263.2
72	3	225	45	295.6
73	0	225	75	316.2
74	0	225	105	334.4
75	0	225	135	402
76	0	225	165	438.6
77	0	225	195	366.2
78	0	225	225	322.8
79	0	225	255	305.2
80	4	225	285	276.4
81	3	255	15	250.4
82	3	255	45	283.8
83	0	255	75	301.2
84	0	255	105	313
85	0	255	135	368.4
86	0	255	165	406
87	0	255	195	339.8
88	0	255	225	304.2
89	0	255	255	289.2
90	4	255	285	261
91	3	285	15	206
92	3	285	45	257.2
93	3	285	75	274.4
94	0	285	105	279
95	0	285	135	291.4
96	0	285	165	305.2
97	0	285	195	284
98	0	285	225	275.4
99	4	285	255	261
100	4	285	285	229

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 120 ซม.

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
1	0	15	15	139.6
2	1	15	45	313.6
3	1	15	75	380
4	1	15	105	379
5	0	15	135	296.8
6	0	15	165	262.6
7	2	15	195	365.4
8	2	15	225	382.4
9	2	15	255	343.6
10	0	15	285	187.8
11	1	45	15	250.8
12	1	45	45	400.8
13	1	45	75	446.6
14	0	45	105	458.4
15	0	45	135	438.4
16	0	45	165	436.2
17	0	45	195	447
18	2	45	225	455.6
19	2	45	255	425
20	2	45	285	340.8
21	1	75	15	305
22	1	75	45	430.8
23	1	75	75	482.2
24	0	75	105	492.8
25	0	75	135	492.2
26	0	75	165	510.6
27	0	75	195	489.4
28	2	75	225	496.4
29	2	75	255	459.2
30	2	75	285	385.8
31	1	105	15	258.4
32	0	105	45	421.2
33	0	105	75	471.2
34	0	105	105	484.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
35	0	105	135	455.6
36	0	105	165	438.8
37	0	105	195	484.2
38	0	105	225	490.8
39	0	105	255	458
40	2	105	285	349
41	0	135	15	161.8
42	0	135	45	316
43	0	135	75	465
44	0	135	105	452.2
45	0	135	135	305.8
46	0	135	165	284.6
47	0	135	195	436.4
48	0	135	225	501.4
49	0	135	255	427.4
50	2	135	285	225.4
51	3	165	15	175.6
52	0	165	45	354
53	0	165	75	442.4
54	0	165	105	448.2
55	0	165	135	357.8
56	0	165	165	287.8
57	0	165	195	427
58	0	165	225	488.4
59	0	165	255	426.8
60	0	165	285	271.6
61	3	195	15	270.4
62	3	195	45	428.8
63	0	195	75	475
64	0	195	105	486.2
65	0	195	135	460.6
66	0	195	165	446.2
67	0	195	195	484.4
68	0	195	225	491.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
69	0	195	255	464
70	4	195	285	385
71	3	225	15	310.8
72	3	225	45	439.6
73	0	225	75	489.2
74	0	225	105	495.4
75	0	225	135	471.4
76	0	225	165	491.2
77	0	225	195	490.2
78	0	225	225	504.4
79	4	225	255	474.6
80	4	225	285	405.4
81	3	255	15	248.6
82	3	255	45	412.8
83	3	255	75	458.6
84	0	255	105	465.4
85	0	255	135	424.8
86	0	255	165	378
87	0	255	195	455.6
88	4	255	225	466
89	4	255	255	441.8
90	4	255	285	361
91	0	285	15	129
92	3	285	45	290.2
93	3	285	75	383
94	3	285	105	380.6
95	0	285	135	260
96	0	285	165	186.8
97	0	285	195	317.8
98	4	285	225	383.8
99	4	285	255	356.8
100	0	285	285	203.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 150 ซม.

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
1	0	15	15	108.6
2	1	15	45	256.8
3	1	15	75	448.8
4	1	15	105	378.6
5	0	15	135	203.6
6	0	15	165	185.6
7	2	15	195	324.8
8	2	15	225	415.4
9	2	15	255	310
10	0	15	285	122.6
11	1	45	15	202.6
12	1	45	45	557.2
13	1	45	75	646.4
14	1	45	105	637.8
15	0	45	135	425.4
16	0	45	165	339.4
17	2	45	195	618.4
18	2	45	225	648.4
19	2	45	255	596.4
20	2	45	285	282.2
21	1	75	15	282.2
22	1	75	45	606.8
23	1	75	75	706.2
24	1	75	105	694
25	0	75	135	520.2
26	0	75	165	435.2
27	2	75	195	679.8
28	2	75	225	720.6
29	2	75	255	652.4
30	2	75	285	355.2
31	1	105	15	196.8
32	1	105	45	552.4
33	1	105	75	658.6
34	1	105	105	645.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
35	0	105	135	402.2
36	0	105	165	349.6
37	0	105	195	643.4
38	0	105	225	678.2
39	2	105	255	610
40	2	105	285	258.8
41	0	135	15	157.4
42	0	135	45	243
43	0	135	75	357
44	0	135	105	335.6
45	0	135	135	260.4
46	0	135	165	260
47	0	135	195	333
48	0	135	225	435.8
49	0	135	255	301.8
50	0	135	285	174.8
51	0	165	15	157.8
52	0	165	45	288.2
53	0	165	75	459.4
54	0	165	105	423.6
55	0	165	135	270
56	0	165	165	257
57	0	165	195	357.6
58	0	165	225	473.8
59	0	165	255	385.2
60	0	165	285	182.2
61	3	195	15	216.2
62	3	195	45	589.2
63	3	195	75	673
64	0	195	105	663.8
65	0	195	135	455
66	0	195	165	337.8
67	0	195	195	652
68	4	195	225	688.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

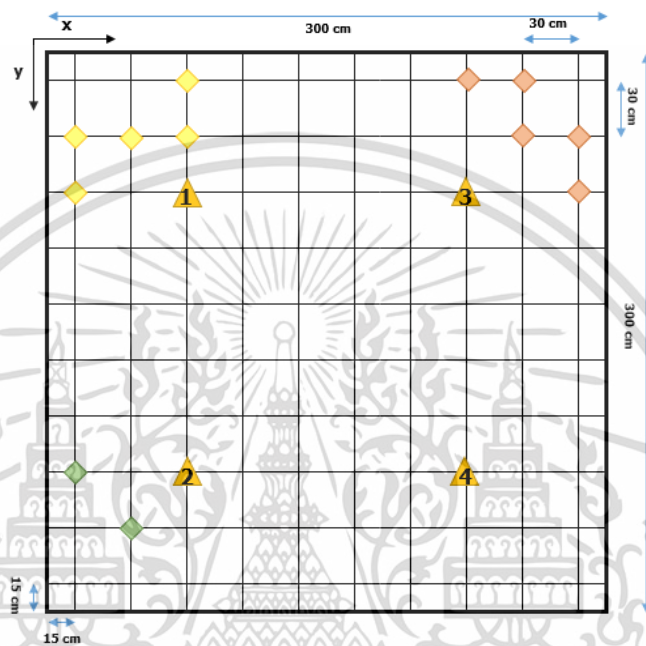
ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
69	4	195	255	635.6
70	4	195	285	346.4
71	3	225	15	277.2
72	3	225	45	622.8
73	3	225	75	721.4
74	0	225	105	700.2
75	0	225	135	541
76	0	225	165	380
77	0	225	195	685.4
78	4	225	225	742.4
79	4	225	255	675.6
80	4	225	285	412.4
81	3	255	15	189.4
82	3	255	45	570.4
83	3	255	75	657.2
84	0	255	105	637.6
85	0	255	135	390.8
86	0	255	165	252
87	4	255	195	606.2
88	4	255	225	664
89	4	255	255	612.6
90	4	255	285	307.2
91	0	285	15	115
92	3	285	45	203.2
93	3	285	75	369
94	3	285	105	306.4
95	0	285	135	180.2
96	0	285	165	174.6
97	4	285	195	217.2
98	4	285	225	346.2
99	4	285	255	261.6
100	0	285	285	130.8

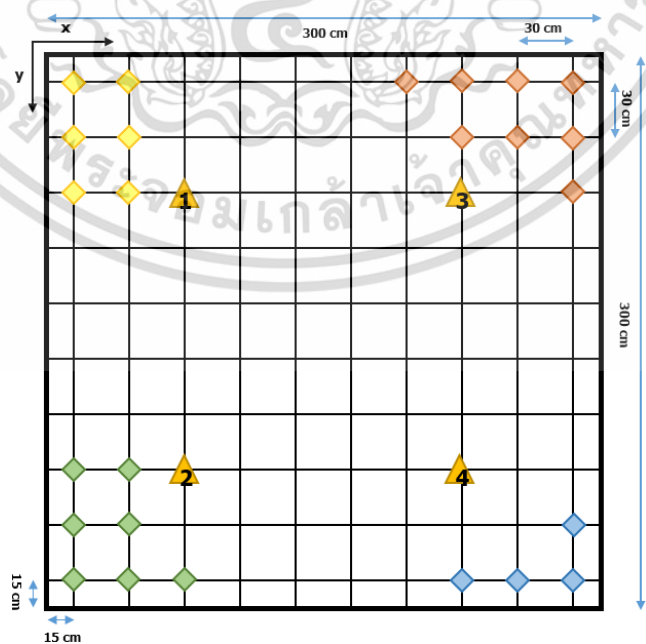
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลของการรับหมายเลขระบุตัวตนของฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์

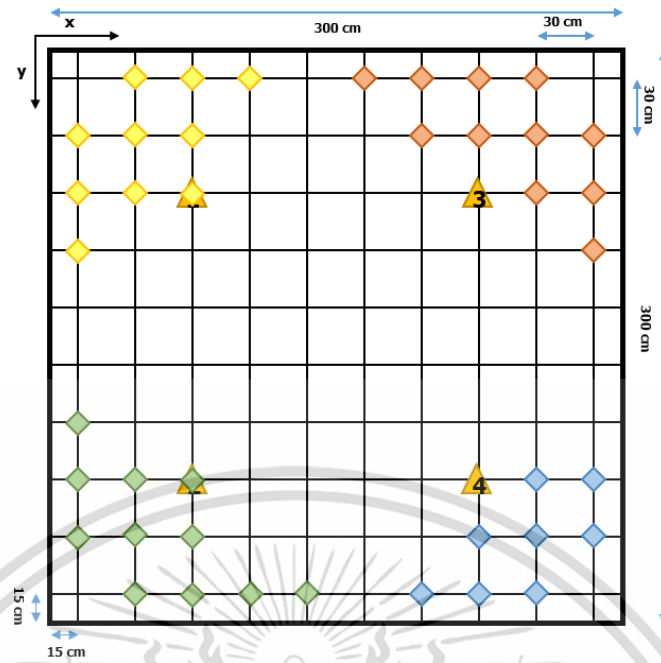
ผลของการรับค่าหมายเลขระบุตัวตนของฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์แสดงดังรูปที่ 4.2 -4.5 โดยรูปสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดสีเหลือง สีเหลี่ยมข้าวหลามตัดสีเขียว สีเหลี่ยมข้าวหลามตัดสีส้ม และ สีเหลี่ยมข้าวหลามตัดสีน้ำเงินคือตำแหน่งที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนหมายเลข 1, 2, 3 และ 4 ได้เพียงหมายเลขเดียว ตามลำดับ



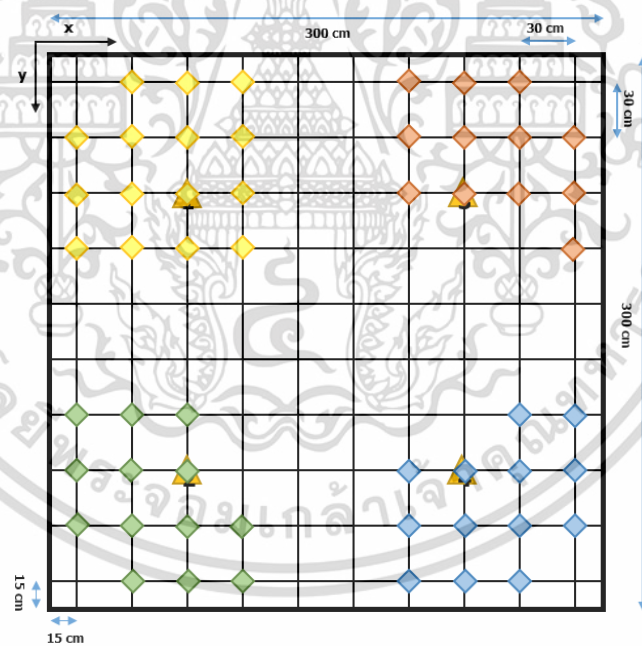
รูปที่ 4.2 ผลการรับ ID ของฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 5 ซม.



รูปที่ 4.3 ผลการรับ ID ของฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 70 ซม.
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 ผลการรับ ID ของฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 120 ซม.



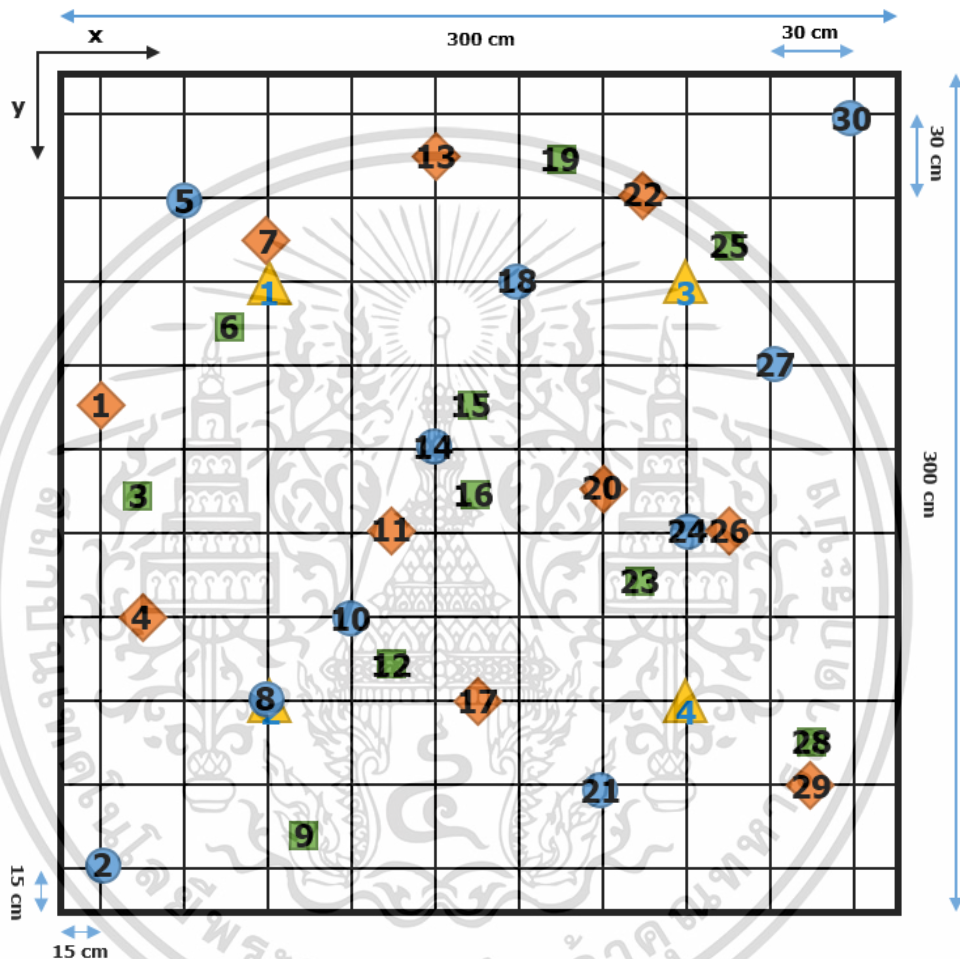
รูปที่ 4.5 ผลการรับ ID ของฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 150 ซม.

จากรูปที่ 4.2 – 4.5 จะเห็นว่าที่ระดับความสูง 150 ซม. จะรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตนได้มากที่สุด เนื่องจากเกิดการซ้อนทับกันของแสงน้อยที่สุด แต่ระดับความสูง 5 ซม. จะรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตนได้น้อยที่สุด เนื่องจากเกิดการซ้อนทับกันของแสงมาก ทำให้บริเวณนั้นไม่สามารถรับสัญญาณเชิงแสงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ตำแหน่งสุ่มทดสอบการทดลองวิจัยช่วงที่ 1

การระบุพิกัดตำแหน่งสุ่มทดสอบด้วยเทคนิคพริกซ์มีติ้ร่วมกับเทคนิคฟังก์ชันสุ่ม เริ่มจากการตรวจจับหมายเลขระบุตัวตน เพื่อใช้ในการอ้างอิงตำแหน่งที่เป็นไปได้ตามหมายเลขระบุตัวตนนั้น จากนั้นทำการวัดค่าความสว่างของแสงที่ตำแหน่งสุ่มทดสอบนั้น เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลสำหรับการระบุพิกัดตำแหน่งที่แน่นอน โดยจำนวนตำแหน่งสุ่มทดสอบ มีทั้งหมด 30 ตำแหน่งดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ตำแหน่งสุ่มทดสอบทั้ง 30 ตำแหน่ง

จากรูปที่ 4.6 รูปวงกลมสีน้ำเงิน คือตำแหน่งทดสอบที่อยู่บนจุดฟังก์ชันสุ่ม, รูปสี่เหลี่ยมข้าวหลามตัดสีส้ม คือตำแหน่งทดสอบที่อยู่ระหว่างฟังก์ชันสุ่ม 2 ตำแหน่ง, รูปสี่เหลี่ยมสีเขียว คือตำแหน่งทดสอบที่อยู่ระหว่างตำแหน่งของฟังก์ชันสุ่ม 4 ตำแหน่ง และสามเหลี่ยมสีเหลือง คือตำแหน่งที่อยู่ใต้หลอดสปอตไลท์แอลอีดี โดยตำแหน่งสุ่มทดสอบที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้แสดงในรูปที่ 4.7 – 4.10 ตามระดับความสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ผลการรับข้อมูลของตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1

ผลของการรับข้อมูลของตำแหน่งสุ่มทดสอบ แสดงได้ในตารางที่ 4.5 – 4.8

ตารางที่ 4.5 ตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 5 ซม.

Observer Location	ID	Illuminance (lux)
1	0	243
2	0	163.8
3	0	267.4
4	0	248.6
5	1	206.8
6	0	253
7	1	225.8
8	0	258.8
9	0	230
10	0	345.2
11	0	396.6
12	0	334.8
13	0	258.2
14	0	399.8
15	0	378.4
16	0	421
17	0	312.8
18	0	291.2
19	0	242.4
20	0	354.2
21	0	263.4
22	0	220.4
23	0	327.2
24	0	305.6
25	3	189.6
26	0	290.6
27	0	243.8
28	0	202.2
29	0	189.2
30	0	164.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 70 ซม.

Observer Location	ID	Illuminance (lux)
1	0	297.6
2	2	219.6
3	0	391.2
4	0	310.8
5	1	277.8
6	0	315.2
7	1	302.8
8	0	318.4
9	0	291
10	0	372.2
11	0	421
12	0	393.6
13	0	331.4
14	0	430.6
15	0	427
16	0	432
17	0	437.8
18	0	389
19	0	291.6
20	0	425.6
21	0	320.4
22	0	297.2
23	0	407.6
24	0	439.2
25	3	301.4
26	0	429.6
27	0	311.8
28	0	286.2
29	4	277.4
30	3	203

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 120 ซม.

Observer Location	ID	Illuminance (lux)
1	0	356.6
2	0	186.4
3	0	332.6
4	2	414.4
5	1	401
6	1	480.4
7	1	456
8	2	496.6
9	2	434
10	0	486
11	0	360.6
12	0	478.2
13	0	221.4
14	0	309
15	0	373.2
16	0	247.4
17	0	491.4
18	0	443
19	3	330.6
20	0	440.6
21	0	464
22	3	440.6
23	0	491.6
24	0	491.8
25	3	459.8
26	0	457.8
27	0	465.6
28	4	430.6
29	4	409.8
30	0	129

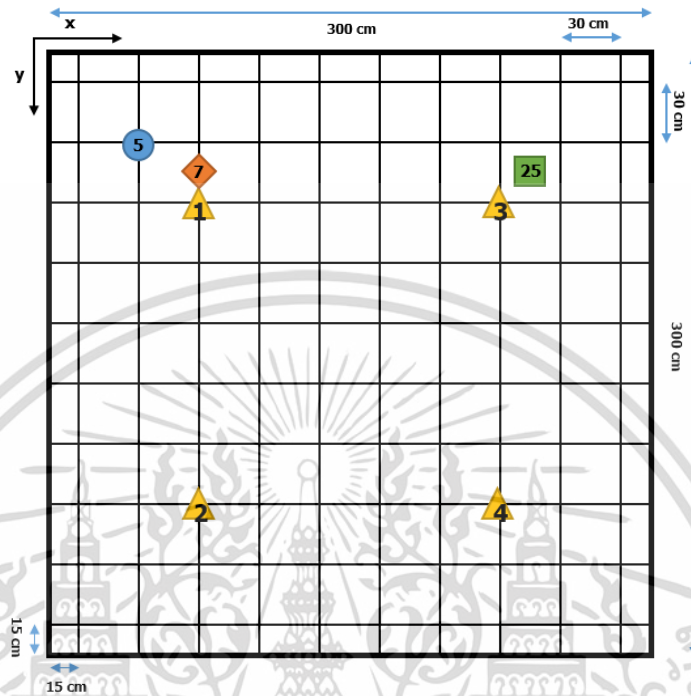
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 ตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 150 ซม.

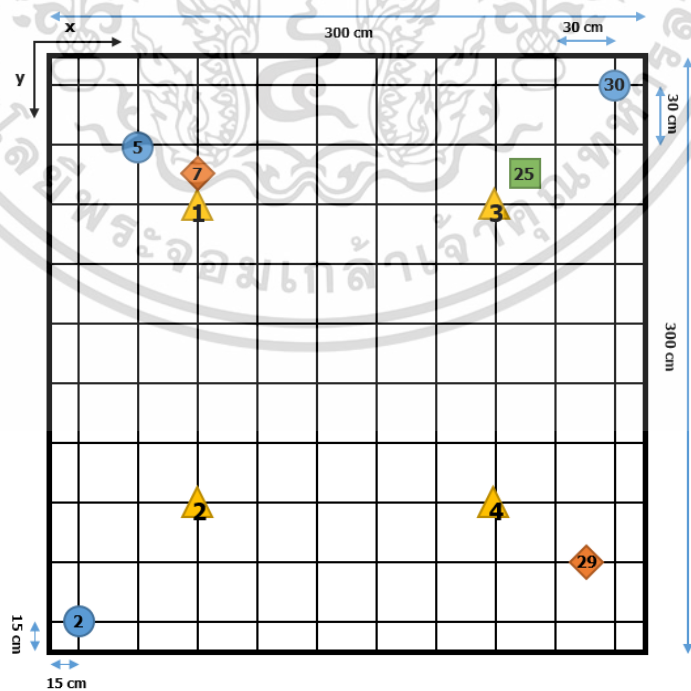
Observer Location	ID	Illuminance (lux)
1	1	390.4
2	0	129.2
3	0	222.8
4	2	526.2
5	1	553.6
6	1	701.2
7	1	662.8
8	2	726.4
9	2	592
10	0	637.4
11	0	271.6
12	0	600
13	0	178.4
14	0	260.4
15	0	259.8
16	0	258.2
17	0	318.6
18	0	473
19	3	257
20	0	320.8
21	4	649
22	3	614
23	0	527.6
24	0	351.8
25	3	665.8
26	0	318.6
27	3	647.4
28	4	586
29	4	518.6
30	0	112.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 – 4.8 ตำแหน่งสุ่มทดสอบที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้แสดงในรูปที่ 4.7 – 4.10

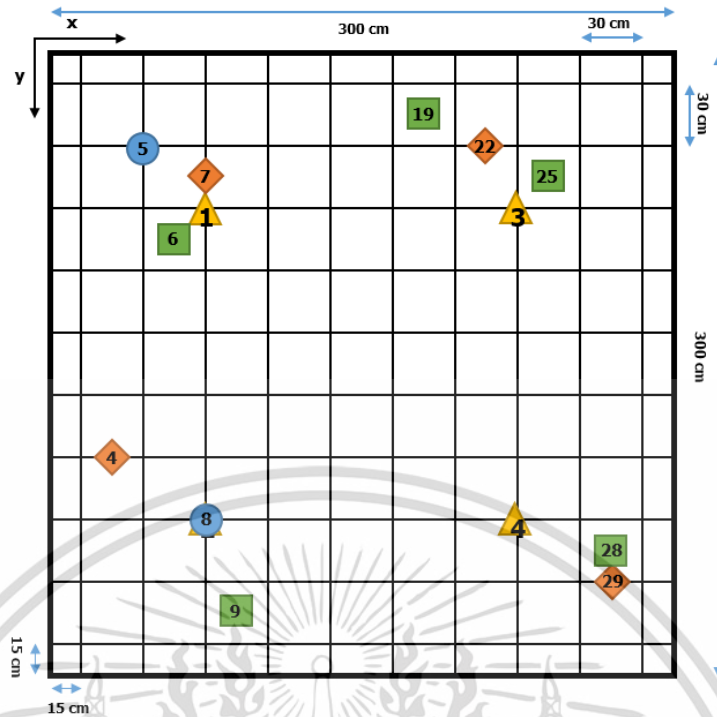


รูปที่ 4.7 ตำแหน่งสุ่มทดสอบที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้ ที่ความสูง 5 ซม.

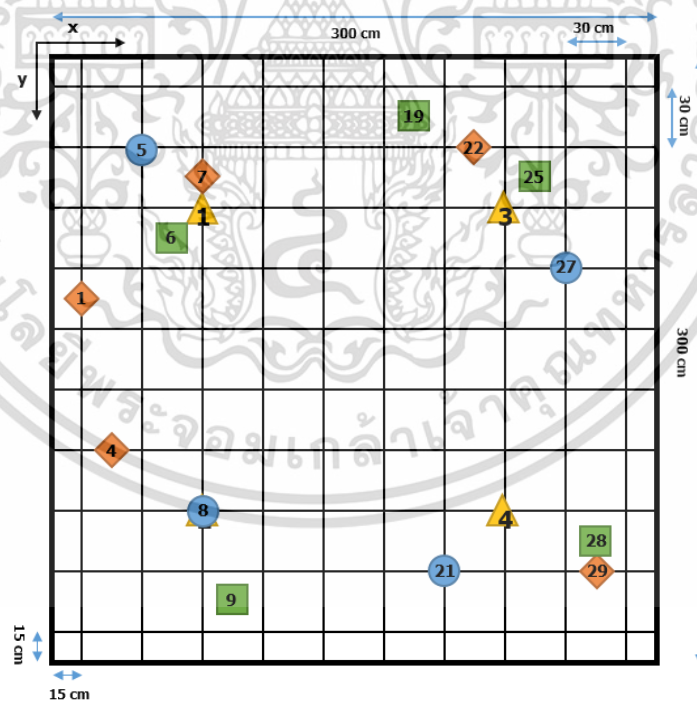


รูปที่ 4.8 ตำแหน่งสุ่มทดสอบที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้ ที่ความสูง 70 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ตำแหน่งสุ่มทดสอบที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้ ที่ความสูง 120 ซม.



รูปที่ 4.10 ตำแหน่งสุ่มทดสอบที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้ ที่ความสูง 150 ซม.

ที่ระดับความสูง 5, 70, 120 และ 150 ซม. จากตำแหน่งสุ่มทดสอบ 30 ตำแหน่ง มีตำแหน่งที่สามารถรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตนได้ 3, 6, 11 และ 14 ตำแหน่งตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่เพื่อประโยชน์เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิใช่ข้อมูลเชิงนโยบายด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 ผลการระบุพิกัดตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1

ตำแหน่งสุ่มทดสอบที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้ เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปแบบกับฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ และคำนวณหาระยะทางที่ผิดพลาด ตามสมการ 3.1 ให้ผลดังตารางที่ 4.9 – 4.12

ตารางที่ 4.9 ผลการระบุพิกัดตำแหน่งสุ่มทดสอบที่ความสูง 5 ซม. และระยะความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1

Observer location	ID	Actual position (cm)		Estimate Position (cm)		Error distance (cm)
		x_a	y_a	x_e	y_e	
5	1	45	45	75	45	30.00
7	1	75	60	45	45	33.54
25	3	240	60	255	45	21.21

ตารางที่ 4.10 ผลการระบุพิกัดตำแหน่งสุ่มทดสอบที่ความสูง 70 ซม. และระยะความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1

Observer location	ID	Actual position (cm)		Estimate Position (cm)		Error distance (cm)
		x_a	y_a	x_e	y_e	
2	2	15	285	15	285	0.00
5	1	45	45	45	45	0.00
7	1	75	60	45	75	33.54
25	3	240	60	255	45	21.21
29	4	270	255	285	255	15.00
30	3	285	15	285	15	0.00

ตารางที่ 4.11 ผลการระบุพิกัดตำแหน่งสุ่มทดสอบที่ความสูง 120 ซม. และระยะความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1

Observer location	ID	Actual position (cm)		Estimate Position (cm)		Error distance (cm)
		x_a	y_a	x_e	y_e	
4	2	30	195	45	255	61.85
5	1	45	45	45	45	0.00
6	1	60	90	75	75	21.21
7	1	75	60	45	75	33.54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 (ต่อ)

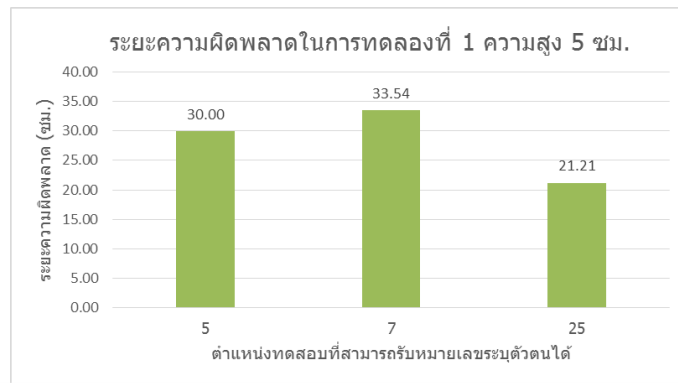
Observer location	ID	Actual position (cm)		Estimate Position (cm)		Error distance (cm)
		x_a	y_a	x_e	y_e	
8	2	75	225	75	225	0.00
9	2	90	270	45	255	47.43
19	3	180	30	225	15	47.43
22	3	210	45	225	45	15.00
25	3	240	60	255	75	21.21
28	4	270	240	255	255	21.21
29	4	270	255	225	285	54.08

ตารางที่ 4.12 ผลการระบุพิกัดตำแหน่งสุ่มทดสอบที่ความสูง 150 ซม. และระยะความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1

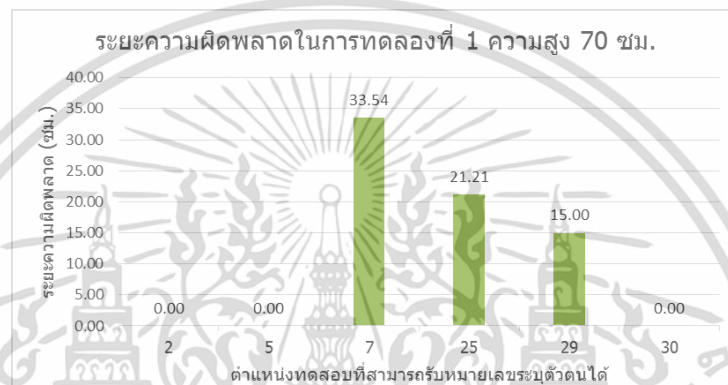
Observer location	ID	Actual position (cm)		Estimate Position (cm)		Error distance (cm)
		x_a	y_a	x_e	y_e	
1	1	15	120	15	105	15.00
4	2	30	195	45	255	61.85
5	1	45	45	105	45	60.00
6	1	60	90	75	75	21.21
7	1	75	60	105	75	33.54
8	2	75	225	75	225	0.00
9	2	90	270	45	255	47.43
19	3	180	30	225	15	47.43
21	4	195	255	195	255	0.00
22	3	210	45	225	45	15.00
25	3	240	60	195	75	47.43
27	3	255	105	255	75	30.00
28	4	270	240	255	195	47.43
29	4	270	255	255	195	61.85

จากตารางที่ 4.9 – 4.12 ตามระดับความสูง 5, 70, 120 และ 150 ซม. มีตำแหน่งที่สามารถรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตนได้ 3, 6, 11 และ 14 ตำแหน่ง และได้ให้ค่าเฉลี่ยระยะความผิดพลาดคือ 28.25, 11.63, 29.36 และ 34.87 ซม. ตามลำดับ โดยแสดงรายละเอียดของระยะความผิดพลาดดังรูปที่ 4.11 – 4.14

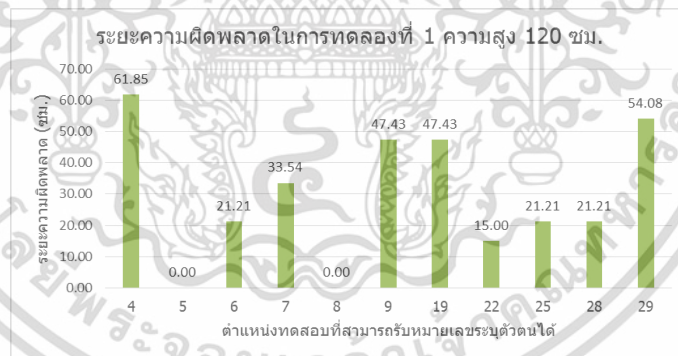
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



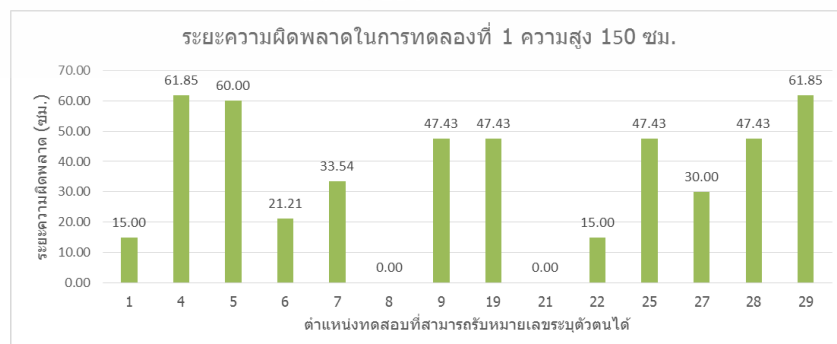
รูปที่ 4.11 ระยะทางความผิดพลาดของการทดลองที่ 1 ที่ระดับความสูง 5 ซม.



รูปที่ 4.12 ระยะทางความผิดพลาดของการทดลองที่ 1 ที่ระดับความสูง 70 ซม.



รูปที่ 4.13 ระยะทางความผิดพลาดของการทดลองที่ 1 ที่ระดับความสูง 120 ซม.



รูปที่ 4.14 ระยะทางความผิดพลาดของการทดลองที่ 1 ที่ระดับความสูง 150 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากปัญหาที่เกิดขึ้น ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ใหม่ โดยพัฒนาอุปกรณ์ให้สามารถอ่านข้อมูลในพื้นที่ที่แสงซ้อนทับกันได้ ด้วยการสื่อสารแบบการเข้าถึงหลายช่องทางแบบการแบ่งเวลา

4.3 ผลการทดลองวิจัยช่วงที่ 2

เนื่องจากปัญหาในการรับสัญญาณแสงในบริเวณที่แสงซ้อนทับกัน ผู้ทดลองวิจัยจึงได้ทำการออกแบบอุปกรณ์ทั้งภาคส่ง และภาครับใหม่ ด้วยการสื่อสารแบบ TDM

4.3.1 การสร้างฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2

ฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลอง ได้ทำการเก็บหมายเลขระบุตัวตน และค่าความสว่างของแสงเป็นค่าพารามิเตอร์สำหรับทุกๆ ตำแหน่งของฟิงเกอร์พริ้นต์ ทั้ง 100 ตำแหน่ง โดยทำการเก็บข้อมูลจำนวน 5 รอบเพื่อหาค่าเฉลี่ยของค่าพารามิเตอร์สำหรับบันทึกลงในฐานข้อมูล เช่นเดียวกับการทดลองวิจัยช่วงที่ 1

โดยฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์จะแบ่งออกเป็น 4 ระดับ ตามความสูงของชุดอุปกรณ์ภาครับ ดังที่แสดงในตารางที่ 4.13 – 4.16

ตารางที่ 4.13 ฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ที่ระดับความสูง 5 ซม.

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
1	1	15	15	36.8
2	1	15	45	40
3	1	15	75	44.4
4	1	15	105	51.8
5	1, 2	15	135	57
6	1, 2	15	165	58.4
7	2	15	195	53.2
8	2	15	225	45.4
9	2	15	255	39.6
10	2	15	285	36.2
11	1	45	15	39
12	1	45	45	42.2
13	1	45	75	49.4
14	1	45	105	57.6
15	1, 2	45	135	62
16	1, 2	45	165	62.4
17	2	45	195	59.8
18	2	45	225	50.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 (ต่อ)

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
19	2	45	255	42.8
20	2	45	285	39
21	1	75	15	42.4
22	1	75	45	48.2
23	1	75	75	56.2
24	1	75	105	64.4
25	1, 2	75	135	68.6
26	1, 2	75	165	69.2
27	1, 2	75	195	67
28	2	75	225	59.8
29	2	75	255	50.8
30	2	75	285	45
31	1	105	15	48.2
32	1, 3	105	45	55.4
33	1, 3	105	75	63.2
34	1, 3	105	105	73.2
35	1, 2	105	135	80
36	1, 2	105	165	81.4
37	2, 4	105	195	78
38	2, 4	105	225	68
39	2	105	255	60
40	2	105	285	54.2
41	1, 3	135	15	53.6
42	1, 3	135	45	58.8
43	1, 3	135	75	64.8
44	1, 3	135	105	76.2
45	1, 2, 3	135	135	89.2
46	1, 2, 3, 4	135	165	92.4
47	2, 4	135	195	78.2
48	2, 4	135	225	67.2
49	2, 4	135	255	61.4
50	2, 4	135	285	59
51	1, 3	165	15	51.8
52	1, 3	165	45	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 (ต่อ)

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
53	1, 3	165	75	63.4
54	1, 3	165	105	74.2
55	1, 3, 4	165	135	87.8
56	2, 3, 4	165	165	91
57	2, 3, 4	165	195	82
58	2, 4	165	225	70.6
59	2, 4	165	255	63.2
60	4	165	285	58.2
61	3	195	15	44.8
62	3	195	45	51.8
63	3	195	75	57.8
64	3	195	105	67.2
65	3, 4	195	135	76.8
66	3, 4	195	165	78.6
67	3, 4	195	195	75.6
68	4	195	225	69
69	4	195	255	60.2
70	4	195	285	52.8
71	3	225	15	39
72	3	225	45	43
73	3	225	75	50.4
74	3	225	105	58.8
75	3, 4	225	135	65.6
76	3, 4	225	165	67
77	3, 4	225	195	66.8
78	4	225	225	59.4
79	4	225	255	51.4
80	4	225	285	45
81	3	255	15	37
82	3	255	45	40
83	3	255	75	43.8
84	3	255	105	53
85	3, 4	255	135	61.4
86	3, 4	255	165	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 (ต่อ)

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
87	3, 4	255	195	60
88	4	255	225	52
89	4	255	255	45
90	4	255	285	41.6
91	3	285	15	34.6
92	3	285	45	37.2
93	3	285	75	40
94	3	285	105	47
95	3, 4	285	135	55
96	3, 4	285	165	58.2
97	4	285	195	54.4
98	4	285	225	46.4
99	4	285	255	41.6
100	4	285	285	38.8

ตารางที่ 4.14 ฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ที่ระดับความสูง 70 ซม.

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
1	1	15	15	46.6
2	1	15	45	56.8
3	1	15	75	60.6
4	1	15	105	63.6
5	1, 2	15	135	74.2
6	1, 2	15	165	76.2
7	2	15	195	64.8
8	2	15	225	61.4
9	2	15	255	58.4
10	2	15	285	51.4
11	1	45	15	54.6
12	1	45	45	62.6
13	1	45	75	66
14	1	45	105	73
15	1, 2	45	135	89.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 (ต่อ)

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
16	1, 2	45	165	91.6
17	2	45	195	75.6
18	2	45	225	67.6
19	2	45	255	63.4
20	2	45	285	58.4
21	1	75	15	57.6
22	1	75	45	64.6
23	1	75	75	69.2
24	1	75	105	78
25	1, 2	75	135	94
26	1, 2	75	165	96.8
27	2	75	195	80.8
28	2	75	225	71.6
29	2	75	255	67
30	2	75	285	61.4
31	1	105	15	57.2
32	1	105	45	69
33	1	105	75	76.6
34	1	105	105	81.6
35	1, 2	105	135	93.2
36	1, 2	105	165	95
37	2	105	195	84.4
38	2	105	225	80.6
39	2	105	255	76.6
40	2	105	285	64.8
41	1, 3	135	15	59.2
42	1, 3	135	45	82.4
43	1, 3	135	75	91.6
44	1, 3	135	105	93
45	1, 2, 3	135	135	95.2
46	2, 3, 4	135	165	97.6
47	2, 4	135	195	97
48	2, 4	135	225	98.6
49	2, 4	135	255	92.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 (ต่อ)

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
50	2, 4	135	285	73.4
51	3	165	15	57
52	1, 3	165	45	74.6
53	1, 3	165	75	82.6
54	1, 3	165	105	84.6
55	3, 4	165	135	89.4
56	2, 3, 4	165	165	98
57	2, 4	165	195	96
58	2, 4	165	225	96
59	2, 4	165	255	87.6
60	4	165	285	71.2
61	3	195	15	55
62	3	195	45	63
63	3	195	75	67.4
64	3	195	105	72
65	3, 4	195	135	88.6
66	3, 4	195	165	96.4
67	4	195	195	84.6
68	4	195	225	79.6
69	4	195	255	73.4
70	4	195	285	65
71	3	225	15	55.2
72	3	225	45	61.4
73	3	225	75	66
74	3	225	105	70.4
75	3, 4	225	135	86.8
76	3, 4	225	165	96.6
77	4	225	195	82.2
78	4	225	225	75
79	4	225	255	70.2
80	4	225	285	64.2
81	3	255	15	51.8
82	3	255	45	59.2
83	3	255	75	62.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 (ต่อ)

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
84	3	255	105	65.2
85	3, 4	255	135	79.4
86	3, 4	255	165	89.6
87	4	255	195	76.4
88	4	255	225	69.6
89	4	255	255	66.8
90	4	255	285	60
91	3	285	15	42.2
92	3	285	45	53
93	3	285	75	57
94	3	285	105	57.6
95	3	285	135	61.2
96	3, 4	285	165	67.4
97	4	285	195	63.8
98	4	285	225	62.6
99	4	285	255	59.8
100	4	285	285	52.4

ตารางที่ 4.15 ฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ที่ระดับความสูง 120 ซม.

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
1	1	15	15	36.4
2	1	15	45	76.4
3	1	15	75	87.4
4	1	15	105	87
5	1	15	135	63
6	2	15	165	58.6
7	2	15	195	85.4
8	2	15	225	88.4
9	2	15	255	78.2
10	2	15	285	39.4
11	1	45	15	64.8
12	1	45	45	93.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 (ต่อ)

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
13	1	45	75	103
14	1	45	105	103.6
15	1, 2	45	135	101.2
16	1, 2	45	165	99.6
17	2	45	195	103.2
18	2	45	225	102.2
19	2	45	255	94.8
20	2	45	285	72
21	1	75	15	77.8
22	1	75	45	100
23	1	75	75	110.8
24	1	75	105	111.6
25	1, 2	75	135	114
26	1, 2	75	165	113.4
27	2	75	195	111.8
28	2	75	225	111.4
29	2	75	255	102.8
30	2	75	285	81.4
31	1	105	15	66
32	1	105	45	98
33	1	105	75	107
34	1	105	105	109
35	1, 2	105	135	102.2
36	2	105	165	102.2
37	2	105	195	110.4
38	2	105	225	110
39	2	105	255	101.8
40	2	105	285	73
41	1	135	15	39.4
42	1, 3	135	45	76.8
43	1, 3	135	75	105.2
44	1, 3	135	105	97.6
45	1	135	135	65.6
46	2	135	165	67.8
47	2, 4	135	195	102.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 (ต่อ)

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
48	2, 4	135	225	113.4
49	2, 4	135	255	92.2
50	2	135	285	46.4
51	3	165	15	42
52	3	165	45	79.4
53	3	165	75	95
54	3	165	105	95.4
55	3	165	135	74
56	4	165	165	67.6
57	4	165	195	101.8
58	2, 4	165	225	112.8
59	4	165	255	95.8
60	4	165	285	59.4
61	3	195	15	64.8
62	3	195	45	92.2
63	3	195	75	101.4
64	3	195	105	102.6
65	3, 4	195	135	98.4
66	3, 4	195	165	103.8
67	4	195	195	113.4
68	4	195	225	114.4
69	4	195	255	106.2
70	4	195	285	81.6
71	3	225	15	70.4
72	3	225	45	94
73	3	225	75	103.2
74	3	225	105	103.6
75	3, 4	225	135	101.8
76	3, 4	225	165	113.4
77	4	225	195	114.6
78	4	225	225	116.8
79	4	225	255	109.6
80	4	225	285	90.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15 (ต่อ)

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
81	3	255	15	64.6
82	3	255	45	90
83	3	255	75	96.2
84	3	255	105	93.6
85	3, 4	255	135	87.2
86	3, 4	255	165	91.2
87	4	255	195	105.6
88	4	255	225	107.2
89	4	255	255	98
90	4	255	285	71.4
91	3	285	15	31
92	3	285	45	63.4
93	3	285	75	80
94	3	285	105	76.8
95	3	285	135	52.6
96	4	285	165	44.6
97	4	285	195	77.4
98	4	285	225	86.4
99	4	285	255	82.4
100	4	285	285	50

ตารางที่ 4.16 ฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ที่ระดับความสูง 150 ซม.

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
1	1	15	15	25.6
2	1	15	45	62.6
3	1	15	75	106.2
4	1	15	105	87.4
5	1	15	135	45.6
6	2	15	165	42.4
7	2	15	195	75.2
8	2	15	225	94
9	2	15	255	68.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 (ต่อ)

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
10	2	15	285	28.4
11	1	45	15	46.6
12	1	45	45	125.4
13	1	45	75	146.4
14	1	45	105	144.8
15	1	45	135	99.8
16	2	45	165	77.4
17	2	45	195	138.2
18	2	45	225	146
19	2	45	255	133.8
20	2	45	285	64.8
21	1	75	15	61.2
22	1	75	45	137
23	1	75	75	158
24	1	75	105	154.8
25	1	75	135	118
26	2	75	165	102.8
27	2	75	195	151.8
28	2	75	225	161.2
29	2	75	255	146
30	2	75	285	81.6
31	1	105	15	43.6
32	1	105	45	124
33	1	105	75	146.8
34	1	105	105	145
35	1	105	135	90.6
36	2	105	165	76.4
37	2	105	195	142.8
38	2	105	225	151
39	2	105	255	138
40	2	105	285	62.2
41	0	135	15	34
42	1	135	45	53.6
43	1	135	75	79.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.16 (ต่อ)

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
43	1	135	75	79.8
44	1	135	105	73.4
45	0	135	135	57.4
46	0	135	165	58.2
47	2	135	195	77.8
48	2	135	225	98
49	2	135	255	69.8
50	0	135	285	39.6
51	3	165	15	34.2
52	3	165	45	63.2
53	3	165	75	97.4
54	3	165	105	91.6
55	3	165	135	60.4
56	4	165	165	57.2
57	4	165	195	83.8
58	4	165	225	114.4
59	4	165	255	91.6
60	4	165	285	43.6
61	3	195	15	45.8
62	3	195	45	121.4
63	3	195	75	138.2
64	3	195	105	136.2
65	3	195	135	96.8
66	4	195	165	78
67	4	195	195	150
68	4	195	225	159.8
69	4	195	255	145.2
70	4	195	285	81.8
71	3	225	15	57
72	3	225	45	127
73	3	225	75	147.4
74	3	225	105	144.2
75	3	225	135	117.4
76	4	225	165	86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

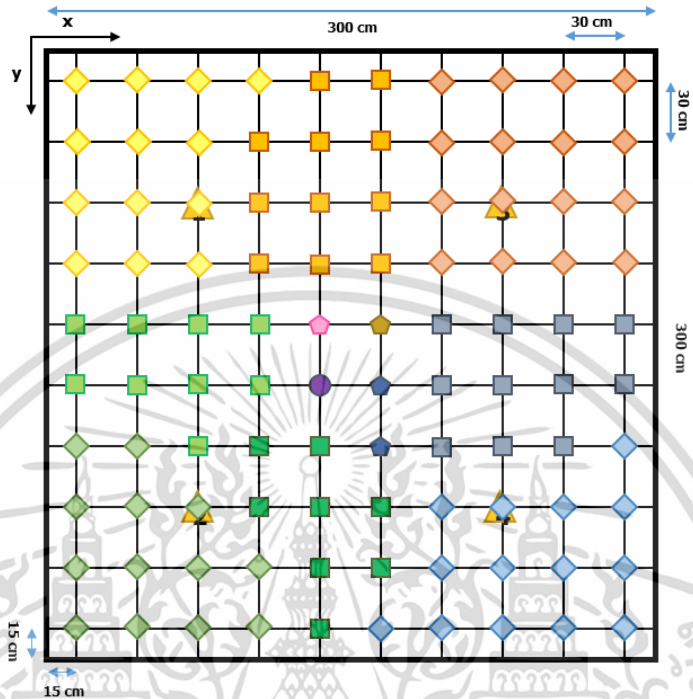
ตารางที่ 4.16 (ต่อ)

Fingerprint Location	ID	Position (cm)		Illuminance (lux)
		x	y	
77	4	225	195	157.8
78	4	225	225	169.8
79	4	225	255	156.8
80	4	225	285	100.6
81	3	255	15	49.6
82	3	255	45	115.8
83	3	255	75	133
84	3	255	105	130.2
85	3	255	135	83.2
86	4	255	165	59.8
87	4	255	195	139.8
88	4	255	225	152.2
89	4	255	255	138.8
90	4	255	285	71.8
91	3	285	15	24.2
92	3	285	45	42
93	3	285	75	75
94	3	285	105	65.8
95	0	285	135	39.4
96	4	285	165	38.2
97	4	285	195	51.8
98	4	285	225	86
99	4	285	255	67.6
100	0	285	285	30.6

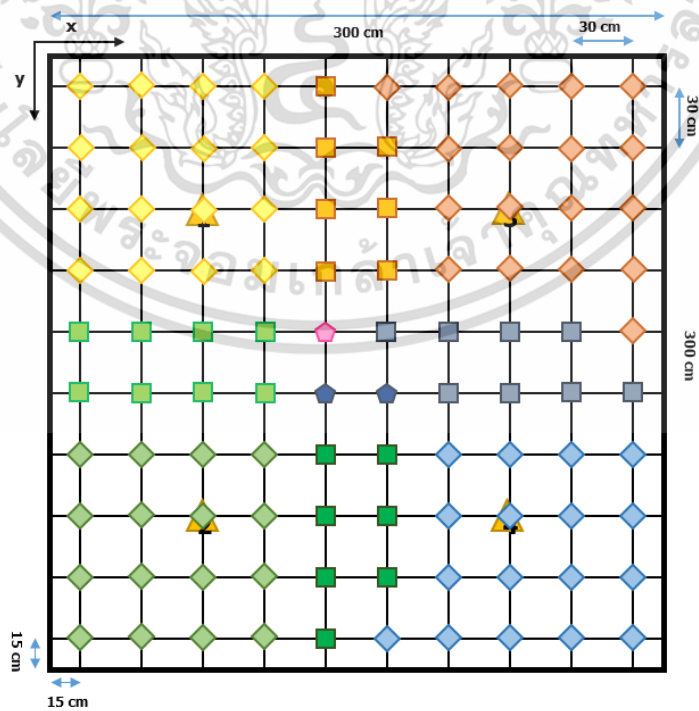
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลของการรับหมายเลขระบุตัวตนของฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์

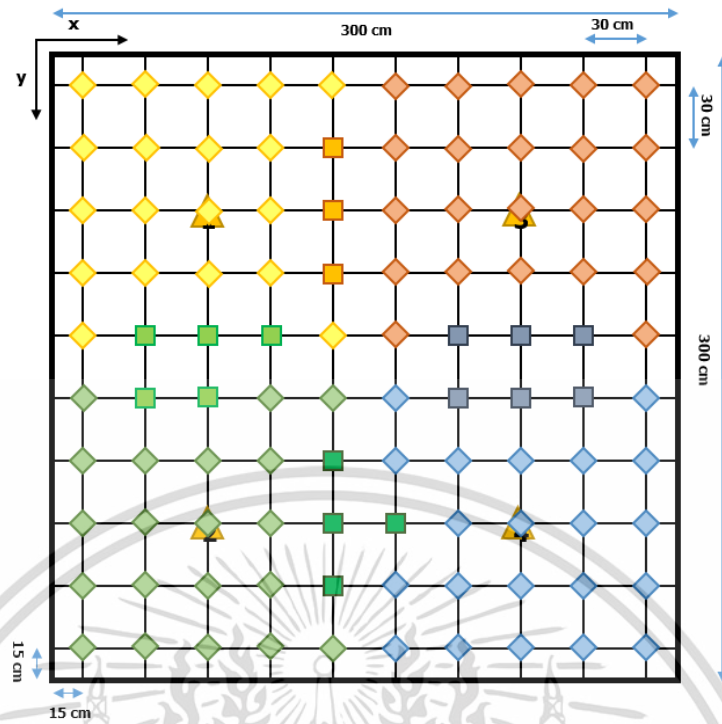
ผลของการรับค่าหมายเลขระบุตัวตนของฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์แสดงดังรูปที่ 4.15 -4.18



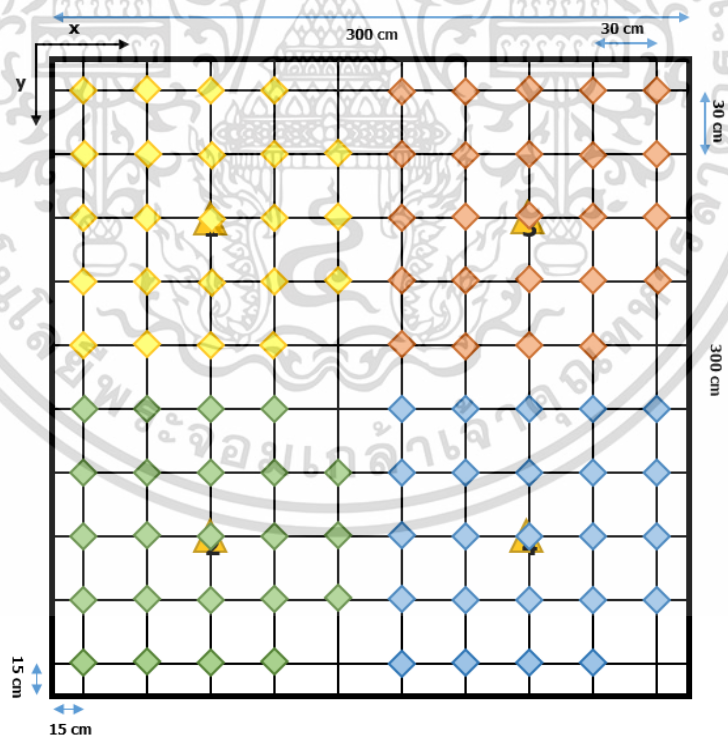
รูปที่ 4.15 ผลการรับ ID ของฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองช่วงที่ 2 ที่ระดับความสูง 5 ซม.



รูปที่ 4.16 ผลการรับ ID ของฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองช่วงที่ 2 ที่ระดับความสูง 70 ซม.
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ผลการรับ ID ของฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองช่วงที่ 2 ระดับความสูง 120 ซม.



รูปที่ 4.18 ผลการรับ ID ของฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ในการทดลองช่วงที่ 2 ระดับความสูง 150 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.15 – 4.18 แสดงผลการทดลองการระบุตำแหน่งด้วยหมายเลขระบุตัวตน ซึ่งได้ผลการทดลองวิจัย 13 รูปแบบ คือ

- 1) สีเหลี่ยมข้าวหลามตัดสีเหลือง คือตำแหน่งที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนหมายเลข 1 ได้เพียงหมายเลขเดียว
- 2) สีเหลี่ยมข้าวหลามตัดสีเขียว คือตำแหน่งที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนหมายเลข 2 ได้เพียงหมายเลขเดียว
- 3) สีเหลี่ยมข้าวหลามตัดสีแดง คือตำแหน่งที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนหมายเลข 3 ได้เพียงหมายเลขเดียว
- 4) สีเหลี่ยมข้าวหลามตัดสีน้ำเงิน คือตำแหน่งที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนหมายเลข 4 ได้เพียงหมายเลขเดียว
- 5) สีเหลี่ยมสีเขียวอ่อน คือตำแหน่งที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนหมายเลข 1 และ 2 ได้
- 6) สีเหลี่ยมสีส้ม คือตำแหน่งที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนหมายเลข 1 และ 3 ได้
- 7) สีเหลี่ยมสีเขียวเข้ม คือตำแหน่งที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนหมายเลข 2 และ 4 ได้
- 8) สีเหลี่ยมสีม่วง คือตำแหน่งที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนหมายเลข 3 และ 4 ได้
- 9) ห้าเหลี่ยมสีชมพู คือตำแหน่งที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนหมายเลข 1, 2 และ 3 ได้
- 10) ห้าเหลี่ยมสีเหลืองเข้ม คือตำแหน่งที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนหมายเลข 1, 3 และ 4 ได้
- 11) ห้าเหลี่ยมสีน้ำเงินเข้ม คือตำแหน่งที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนหมายเลข 2, 3 และ 4 ได้
- 12) วงกลมสีม่วง คือตำแหน่งที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนหมายเลข 1, 2, 3 และ 4 ได้
- 13) ตำแหน่งที่ไม่มีภาพสัญลักษณ์ คือตำแหน่งที่ไม่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนใดๆได้เลย

จากการทดลองพบว่าฐานข้อมูลที่ระดับความสูง 5 ซม. สามารถแบ่งกลุ่มของการรับหมายเลขระบุตัวตนจากการซ้อนทับกันของสัญญาณเชิงแสงได้มากที่สุด และลดหลั่นกันลงมาตามระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น จนถึงระดับความสูง 150 ซม. ที่ไม่มีการซ้อนทับกันของสัญญาณเชิงแสงเกิดขึ้น และด้วยการสื่อสารแบบมัลติเพล็กซ์แบบการแบ่งเวลา (TDM) ผลการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 พบว่าที่ระดับความสูง 5, 70, 120 และ 150 ซม. มีตำแหน่งฟิงเกอร์พริ้นต์ที่สามารถรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตนได้ 100, 100, 100 และ 94 ตำแหน่ง ซึ่งมากกว่าการทดลองวิจัยในช่วงที่ 1 โดยตำแหน่งฟิงเกอร์พริ้นต์ 6 ตำแหน่ง ที่ระดับความสูง 150 ซม. ที่ไม่สามารถรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตนได้ เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่สัญญาณเชิงแสงจากหลอดไฟไม่สามารถส่องสว่างไปถึงโดยตรงได้ หรือกล่าวได้ว่า อยู่นอกขอบเขตพื้นที่รับแสงนั่นเอง

4.3.3 ตำแหน่งสุ่มทดสอบการทดลองวิจัยช่วงที่ 2

ตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 นั้นมีทั้งหมด 30 ตำแหน่ง ดังรูปที่ 4.6 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการอนุมัติจากเจ้าของลิขสิทธิ์ หากต้องการนำเอกสารนี้ไปใช้ กรุณาติดต่อเจ้าของลิขสิทธิ์

4.3.4 ผลการรับข้อมูลของตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2
ผลของการรับข้อมูลของตำแหน่งสุ่มทดสอบ แสดงได้ในตารางที่ 4.17 – 4.20

ตารางที่ 4.17 ตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ที่ระดับความสูง 5 ซม.

Observer Location	ID	Illuminance (lux)
1	1, 2	55.6
2	2	37.6
3	1, 2	61.2
4	2	57.6
5	1	42
6	1	57.8
7	1	55.6
8	2	61
9	2	60
10	2, 4	79.2
11	1, 2, 4	89.8
12	2, 4	76.2
13	1, 3	57
14	1, 2, 3	90.2
15	1, 3	85
16	1, 2, 3, 4	95.2
17	2, 4	71.4
18	1, 3	64.6
19	3	51.8
20	3, 4	79.4
21	4	60.2
22	3	43.2
23	3, 4	72.6
24	3, 4	67.6
25	3	43.6
26	3, 4	65
27	3	53.2
28	4	46
29	4	44
30	3	34.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.18 ตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ที่ระดับความสูง 70 ซม.

Observer Location	ID	Illuminance (lux)
1	1	63.6
2	2	49.2
3	1, 2	86.2
4	2	68.2
5	1	61.4
6	1	70
7	1	66.6
8	2	70.4
9	2	65
10	2	83.6
11	1, 2	94.6
12	2, 4	88.6
13	1, 3	72.4
14	1, 2, 3	95.2
15	1, 3	93
16	1, 2, 3, 4	96
17	2, 4	99.6
18	1, 3	83.8
19	3	63
20	3, 4	94.4
21	4	73.2
22	3	63
23	3, 4	95.4
24	3, 4	96.2
25	3	62.6
26	3, 4	94.2
27	3	65.6
28	4	66.8
29	4	64
30	3	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 ตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ที่ระดับความสูง 120 ซม.

Observer Location	ID	Illuminance (lux)
1	1	63
2	2	36.2
3	1, 2	71.2
4	2	91.8
5	1	89.6
6	1	107.4
7	1	104
8	2	110
9	2	96.2
10	2	110.4
11	2	102.2
12	2	108.6
13	1	38.4
14	1	65.6
15	1, 3	97.8
16	0	54
17	2, 4	111.2
18	3	94.4
19	3	79.2
20	3, 4	95.6
21	4	114.2
22	3	92.6
23	4	110.4
24	3, 4	112.4
25	3	97
26	3, 4	106.8
27	3	98.8
28	4	107.6
29	4	95.6
30	3	30.6

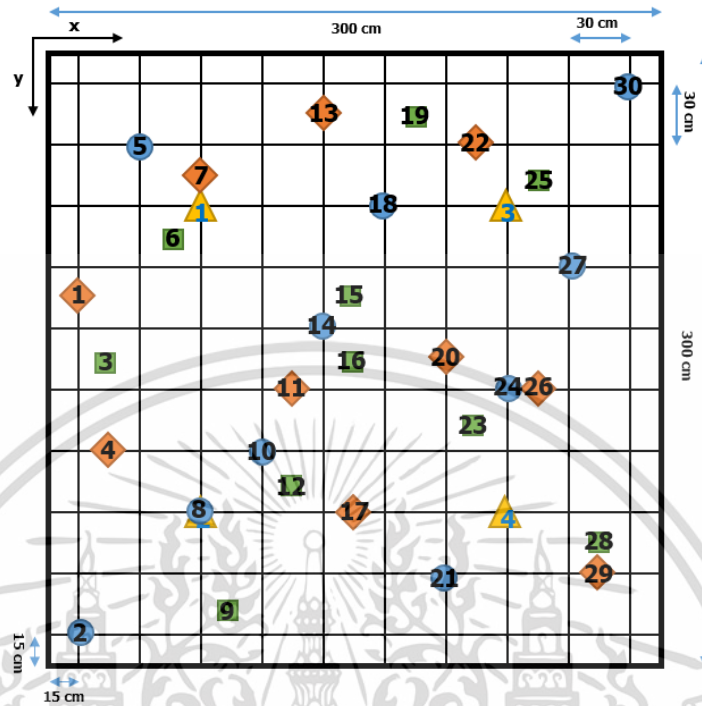
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.20 ตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ที่ระดับความสูง 150 ซม.

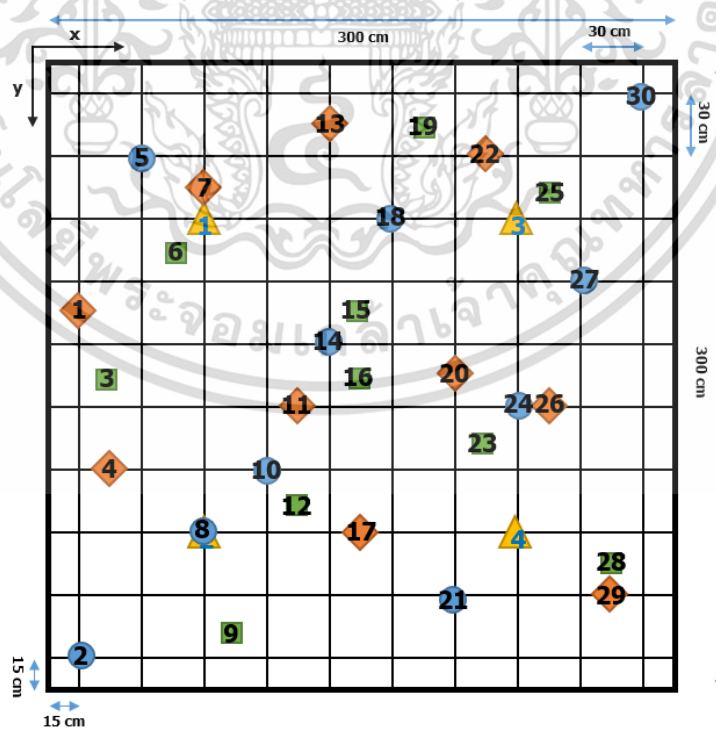
Observer Location	ID	Illuminance (lux)
1	1	45.2
2	0	28
3	0	47.4
4	2	139
5	1	125
6	1	156.4
7	1	150.8
8	2	123.6
9	2	129.4
10	2	143
11	2	76
12	2	150.4
13	1	40.4
14	0	58
15	0	57
16	0	57.4
17	2, 4	72
18	3	96
19	3	56.8
20	3, 4	65.4
21	4	149.6
22	3	127
23	4	126.4
24	4	88
25	3	138.6
26	4	86
27	3	134.8
28	4	138.2
29	4	138
30	3	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.17 – 4.20 ตำแหน่งสุ่มทดสอบที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้แสดงในรูปที่ 4.19 – 4.22

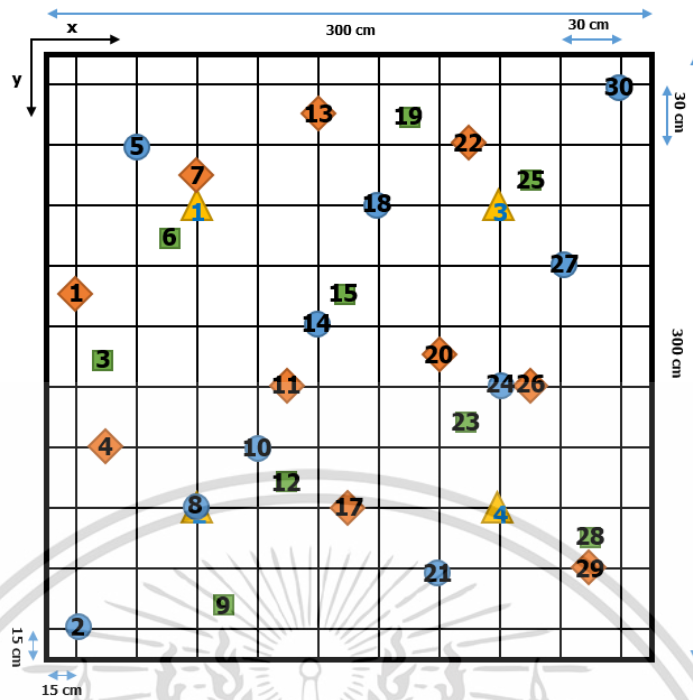


รูปที่ 4.19 ตำแหน่งสุ่มทดสอบที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้ ที่ความสูง 5 ซม.

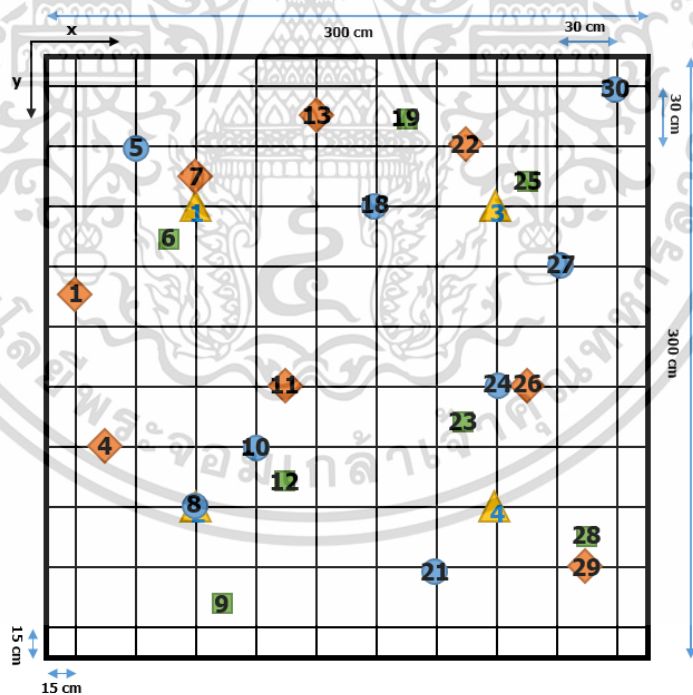


รูปที่ 4.20 ตำแหน่งสุ่มทดสอบที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้ ที่ความสูง 70 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ตำแหน่งสุ่มทดสอบที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้ ที่ความสูง 120 ซม.



รูปที่ 4.22 ตำแหน่งสุ่มทดสอบที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้ ที่ความสูง 150 ซม.

ผลการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 พบว่าที่ระดับความสูง 5, 70, 120 และ 150 ซม. มีตำแหน่งทดสอบที่สามารถรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตนได้ 30, 30, 29 และ 23 ตำแหน่ง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.5 ผลการระบุพิกัดตำแหน่งสุ่มทดสอบในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2

ตำแหน่งสุ่มทดสอบที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้ เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปแบบกับฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ และคำนวณหาระยะทางที่ผิดพลาด ตามสมการ 3.1 ให้ผลดังตารางที่ 4.21 – 4.24

ตารางที่ 4.21 ผลการระบุพิกัดตำแหน่งสุ่มทดสอบที่ความสูง 5 ซม. และระยะความผิดพลาด ที่เกิดขึ้น ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2

Observer location	ID	Actual position (cm)		Estimate Position (cm)		Error distance (cm)
		x_a	y_a	x_e	y_e	
1	12	15	120	15	135	15.00
2	2	15	285	15	285	0.00
3	12	30	150	45	135	21.21
4	2	30	195	45	195	15.00
5	1	45	45	45	45	0.00
6	1	60	90	45	105	21.21
7	1	75	60	75	75	15.00
8	2	75	225	105	255	42.43
9	2	90	270	105	255	21.21
10	24	105	195	135	195	30.00
11	124	120	165	*	*	*
12	24	120	210	105	195	21.21
13	13	135	30	165	45	33.54
14	123	135	135	135	135	0.00
15	13	150	120	165	105	21.21
16	1234	150	150	135	165	21.21
17	24	150	225	165	225	15.00
18	13	165	75	135	75	30.00
19	3	180	30	195	45	21.21
20	34	195	150	195	165	15.00
21	4	195	255	195	255	0.00
22	3	210	45	225	45	15.00
23	34	210	180	195	195	21.21
24	34	225	165	225	165	0.00
25	3	240	60	255	75	21.21
26	34	240	165	225	135	33.54
27	3	255	105	255	105	0.00
28	4	270	240	285	225	21.21
29	4	270	255	255	255	15.00
30	3	285	15	285	15	0.00

*ไม่สามารถเปรียบเทียบหมายเลขระบุตัวตนในฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.22 ผลการระบุพิกัดตำแหน่งสุ่มทดสอบที่ความสูง 70 ซม. และระยะความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2

Observer location	ID	Actual position (cm)		Estimate Position (cm)		Error distance (cm)
		x_a	y_a	x_e	y_e	
1	1	15	120	15	105	15.00
2	2	15	285	15	285	0.00
3	12	30	150	45	135	21.21
4	2	30	195	45	225	33.54
5	1	45	45	15	75	42.43
6	1	60	90	75	75	21.21
7	1	75	60	45	45	33.54
8	2	75	225	75	225	0.00
9	2	90	270	105	285	21.21
10	2	105	195	105	195	0.00
11	12	120	165	105	165	15.00
12	24	120	210	165	255	63.64
13	13	135	30	165	45	33.54
14	123	135	135	135	135	0.00
15	13	150	120	135	105	21.21
16	1234	150	150	*	*	*
17	24	150	225	135	225	15.00
18	13	165	75	165	105	30.00
19	3	180	30	195	45	21.21
20	34	195	150	195	165	15.00
21	4	195	255	195	255	0.00
22	3	210	45	195	45	15.00
23	34	210	180	195	165	21.21
24	34	225	165	195	165	30.00
25	3	240	60	255	75	21.21
26	34	240	165	195	165	45.00
27	3	255	105	255	105	0.00
28	4	270	240	255	255	21.21
29	4	270	255	285	195	61.85
30	3	285	15	285	15	0.00

*ไม่สามารถเปรียบเทียบหมายเลขระบุตัวตนในฐานะข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.23 ผลการระบุพิกัดตำแหน่งสุ่มทดสอบที่ความสูง 120 ซม. และระยะความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2

Observer location	ID	Actual position (cm)		Estimate Position (cm)		Error distance (cm)
		x_a	y_a	x_e	y_e	
1	1	15	120	15	135	15.00
2	2	15	285	15	285	0.00
3	12	30	150	45	165	21.21
4	2	30	195	45	255	61.85
5	1	45	45	15	75	42.43
6	1	60	90	105	75	47.43
7	1	75	60	45	105	54.08
8	2	75	225	105	225	30.00
9	2	90	270	45	255	47.43
10	2	105	195	105	195	0.00
11	2	120	165	105	165	15.00
12	2	120	210	105	225	21.21
13	1	135	30	135	15	15.00
14	1	135	135	135	135	0.00
15	13	150	120	135	105	21.21
17	24	150	225	165	225	15.00
18	3	165	75	225	45	67.08
19	3	180	30	165	45	21.21
20	34	195	150	195	135	15.00
21	4	195	255	195	225	30.00
22	3	210	45	195	45	15.00
23	4	210	180	225	255	76.49
24	34	225	165	225	165	0.00
25	3	240	60	255	75	21.21
26	34	240	165	195	165	45.00
27	3	255	105	255	75	30.00
28	4	270	240	255	225	21.21
29	4	270	255	165	255	105.00
30	3	285	15	285	15	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

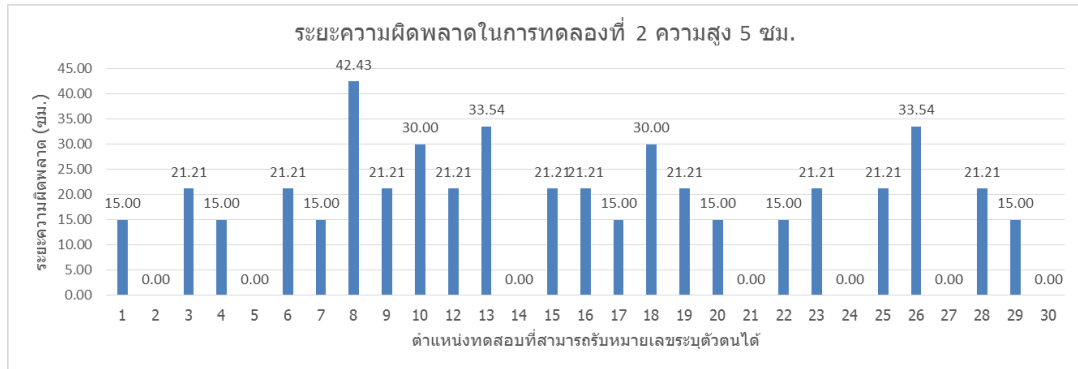
ตารางที่ 4.24 ผลการระบุพิกัดตำแหน่งสุ่มทดสอบที่ความสูง 120 ซม. และระยะความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2

Observer location	ID	Actual position (cm)		Estimate Position (cm)		Error distance (cm)
		x_a	y_a	x_e	y_e	
1	1	15	120	15	135	15.00
4	2	30	195	45	195	15.00
5	1	45	45	45	45	0.00
6	1	60	90	75	75	21.21
7	1	75	60	105	75	33.54
8	2	75	225	45	255	42.43
9	2	90	270	45	255	47.43
10	2	105	195	105	195	0.00
11	2	120	165	105	165	15.00
12	2	120	210	105	225	21.21
13	1	135	30	105	15	33.54
17	24	150	225	*	*	*
18	3	165	75	195	135	67.08
19	3	180	30	225	15	47.43
20	34	195	150	*	*	*
21	4	195	255	195	195	60.00
22	3	210	45	225	45	15.00
23	4	210	180	165	225	63.64
24	4	225	165	225	165	0.00
25	3	240	60	195	75	47.43
26	4	240	165	225	165	15.00
27	3	255	105	195	105	60.00
28	4	270	240	255	255	21.21
29	4	270	255	255	255	15.00
30	3	285	15	285	15	0.00
4	2	30	195	45	195	15.00

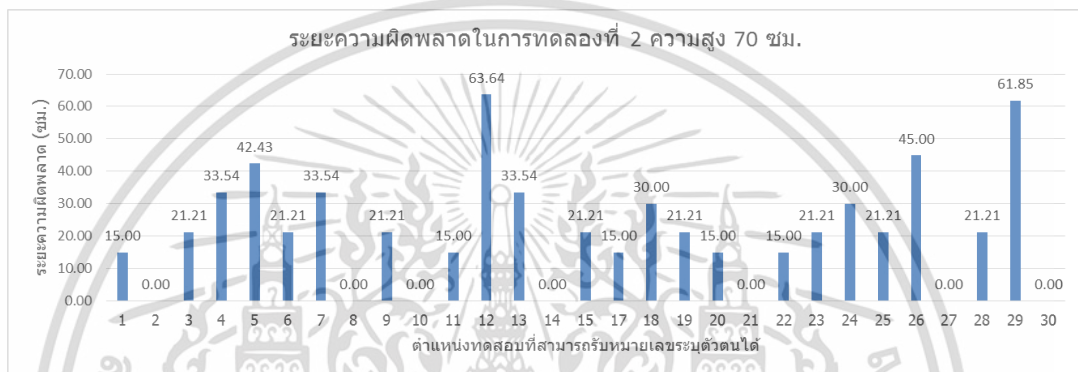
*ไม่สามารถเปรียบเทียบหมายเลขระบุตัวตนในฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ได้

จากตารางที่ 4.21 – 4.24 ตามระดับความสูง 5, 70, 120 และ 150 ซม. ให้ค่าเฉลี่ยระยะความผิดพลาดคือ 16.78, 21.32, 29.45 และ 28.53 ซม. ตามลำดับ แต่ในบางตำแหน่งที่รับหมายเลขระบุตัวตนได้ตรวจไม่พบหมายเลขระบุตัวตนในฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ ทำให้ไม่สามารถระบุตำแหน่งของตำแหน่งทดสอบได้ และรายละเอียดระยะทางความผิดพลาดแสดงดังรูปที่ 4.23 – 4.26

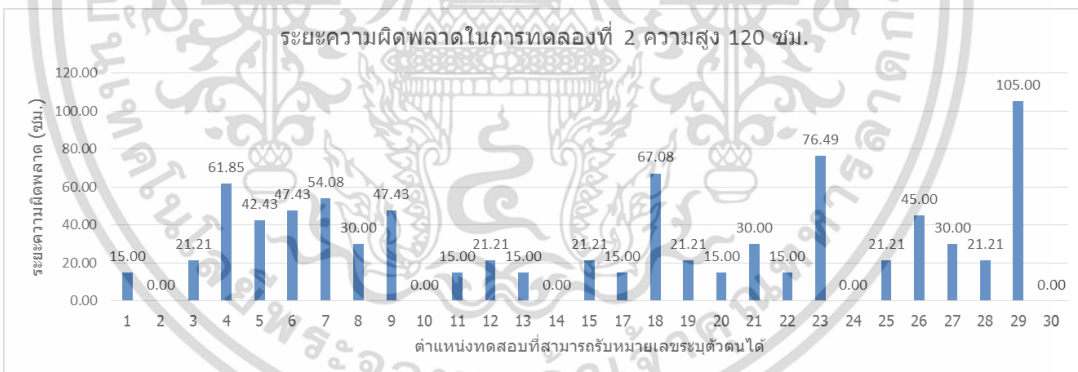
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



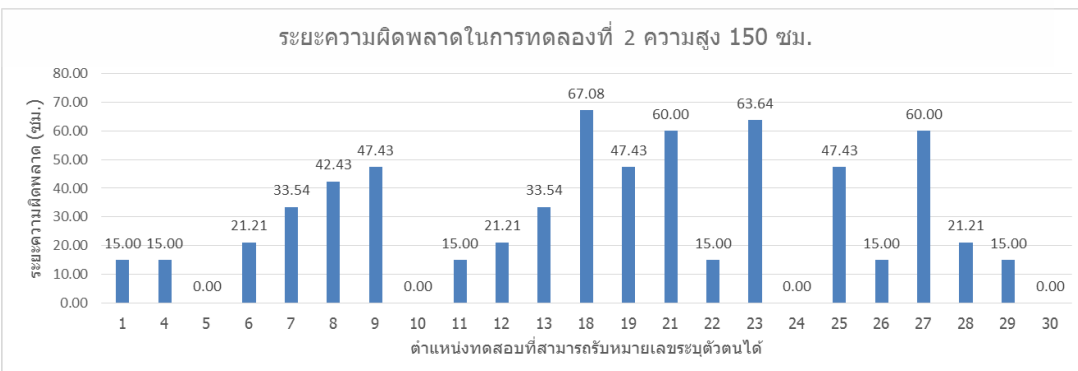
รูปที่ 4.23 ระยะทางความผิดพลาดของการทดลองที่ 2 ที่ระดับความสูง 5 ซม.



รูปที่ 4.24 ระยะทางความผิดพลาดของการทดลองที่ 2 ที่ระดับความสูง 70 ซม.



รูปที่ 4.25 ระยะทางความผิดพลาดของการทดลองที่ 2 ที่ระดับความสูง 120 ซม.



รูปที่ 4.26 ระยะทางความผิดพลาดของการทดลองที่ 2 ที่ระดับความสูง 150 ซม.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 สรุปผลการทดลองวิจัย

ผลของการทดลองวิจัยการระบุตำแหน่งเป้าหมายภายในอาคารด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้โดยใช้เทคนิคพรีอิกซิมิตี ร่วมกับเทคนิคฟิงเกอร์พริ้นต์ ทั้งการทดลองวิจัยที่ 1 และการทดลองวิจัยที่ 2 แสดงผลดังตารางที่ 4.25

ตารางที่ 4.25 สรุปผลการทดลองวิจัยการระบุตำแหน่งเป้าหมายภายในอาคารด้วยวีแอลซี

รายละเอียด	การทดลองวิจัยช่วงที่ 1				การทดลองวิจัยช่วงที่ 2			
	5	70	120	150	5	70	120	150
จำนวนตำแหน่งฟิงเกอร์พริ้นต์ที่รับหมายเลขระบุตัวตนได้	12 (12%)	25 (25%)	40 (40%)	53 (53%)	100 (100%)	100 (100%)	100 (100%)	94 (94%)
จำนวนตำแหน่งทดสอบที่รับหมายเลขระบุตัวตนได้	3 (10%)	6 (20%)	11 (37%)	14 (47%)	30 (100%)	30 (100%)	29 (97%)	23 (77%)
จำนวนตำแหน่งทดสอบที่รับหมายเลขระบุตัวตนได้ แต่ไม่สามารถระบุตำแหน่งได้	-	-	-	-	1 (3%)	1 (3%)	-	2 (9%)
ค่าเฉลี่ยระยะความผิดพลาด (ซม.)	28.25	11.63	29.36	34.87	16.78	21.32	29.45	28.53

จากตารางที่ 4.25 เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 พบว่าจำนวนของตำแหน่งของฟิงเกอร์พริ้นต์ของการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ให้ผลดีกว่าอย่างชัดเจน โดยในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 5, 70, 120 และ 150 ซม. สามารถรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตนได้ 12, 25, 40 และ 53 ตำแหน่ง ตามลำดับ แต่ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ที่ระดับความสูง 5, 70, 120 และ 150 ซม. สามารถรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตนได้ 100, 100, 100 และ 94 ตำแหน่ง ตามลำดับ และในส่วนของตำแหน่งสุ่มทดสอบก็เช่นกัน คือจำนวนตำแหน่งสุ่มทดสอบของการทดลองวิจัยที่ช่วง 2 ให้ผลดีกว่าการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 อย่างชัดเจน โดยในการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 ที่ระดับความสูง 5, 70, 120 และ 150 ซม. สามารถรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตนได้ 3, 6, 11 และ 14 ตำแหน่ง ตามลำดับ แต่ในการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ที่ระดับความสูง 5, 70, 120 และ 150 ซม. สามารถรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตนได้ 30, 30, 29 และ 23 ตำแหน่ง ตามลำดับ แต่ในบาง

ตำแหน่งสุ่มทดสอบของการทดลองวิจัยครั้งที่ 2 ไม่สามารถระบุพิกัดได้ เนื่องจากกลุ่มหมายเลขระบุตัวต้นที่รับได้ไม่มีอยู่ในฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ เช่นที่ระดับความสูง 5 ซม. ตำแหน่งทดสอบที่ 11 ซึ่งเป็นตำแหน่งทดสอบที่อยู่ระหว่างตำแหน่งของฟิงเกอร์พริ้นต์ 2 ตำแหน่ง ตรวจพบหมายเลขระบุตัวต้น 1, 2, 4 แต่ในฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ไม่มีตำแหน่งฟิงเกอร์พริ้นต์ใดที่บันทึกหมายเลขระบุตัวต้น 1, 2, 4 ไว้ ทำให้ตำแหน่งทดสอบที่ 11 ไม่สามารถระบุพิกัดตำแหน่งจากฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ได้ และสุดท้าย ระยะเวลาความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณพบว่า การทดลองที่ 1 ที่ระดับความสูง 70 ซม. ให้ระยะเวลาความผิดพลาดน้อยที่สุด เนื่องจากพื้นที่ที่รับสัญญาณหมายเลขระบุตัวต้นได้มีน้อย ทำให้ขอบเขตการระบุพิกัดตำแหน่งมีน้อยตามไปด้วย จึงทำให้มีระยะเวลาความผิดพลาดที่ต่ำที่สุด แต่ที่ระดับความสูง 150 ซม. ให้ค่าระยะเวลาความผิดพลาดเฉลี่ย 34.87 ซม. ซึ่งเป็นระยะเวลาความผิดพลาดที่ยอมรับไม่ได้ เนื่องจากมีขนาดเกินระยะห่างระหว่างตำแหน่งของฟิงเกอร์พริ้นต์ที่ 30 ซม. โดยสาเหตุที่ให้ความผิดพลาดที่สูง เนื่องจากรูปแบบการกระจายความสว่างของแสงเป็นแบบวงกลมรัศมีจากจุดศูนย์กลาง หรือตำแหน่งของหลอดไฟ ทำให้ค่าความสว่างของแสงที่อยู่ในวงกลมรัศมีเดียวกัน มีค่าความสว่างที่ใกล้เคียงกันมาก ทำให้การอ้างอิงพิกัดตำแหน่งของตำแหน่งสุ่มทดสอบตามค่าความสว่างของแสงมีโอกาสไปอ้างอิงพิกัดตำแหน่งฟิงเกอร์พริ้นต์ที่อยู่ด้านตรงข้ามตำแหน่งของหลอดไฟได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 กล่าวนำ

บทนี้กล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัยซึ่งผู้วิจัยได้นำเสนอกระบวนการการระบุตำแหน่งเป้าหมายภายในอาคารด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ โดยใช้เทคนิคพรีอักษิมีตีร่วมกับเทคนิคฟิงเกอร์พริ้นต์ ซึ่งงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้แบ่งการทดลองวิจัยออกเป็น 2 ช่วงคือ ช่วงที่ 1 เป็นการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้แบบพื้นฐาน คืออุปกรณ์ภาคส่งแต่ละตัวมีวงจรควบคุมการส่งสัญญาณเป็นของตัวเอง และไม่มีการควบคุมจังหวะการส่งสัญญาณ และช่วงที่ 2 เป็นการแก้ปัญหาการรับสัญญาณเชิงแสงในบริเวณที่แสงจากหลอดสปอตไลท์แอลอีดีมากกว่า 1 ดวง ซ้อนทับกันที่เกิดขึ้นในการทดลองวิจัยในช่วงแรก ด้วยการสื่อสารแบบการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลา โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งขั้นตอนการศึกษาออกเป็น 5 บท คือ บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย หลักการที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ส่วนบทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับการระบุตำแหน่งของเป้าหมาย และทฤษฎีการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ ในบทที่ 3 บทนี้ผู้วิจัยจะกล่าวถึงขั้นตอนการทดลองวิจัยการดำเนินการระบบการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ บทที่ 4 บทนี้กล่าวถึงผลการทดลองวิจัย และผลการวิเคราะห์ในการระบุตำแหน่งวัตถุภายในอาคารด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ และบทที่ 5 กล่าวถึงบทสรุปของงานวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.2 สรุปผลการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการทำวิทยานิพนธ์เพื่อนำเสนอวิธีการระบุตำแหน่งเป้าหมายภายในอาคารด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ เพื่อคำนวณพิกัดของเป้าหมายให้ได้ใกล้เคียงกับพิกัดตำแหน่งจริงมากที่สุด โดยการระบุตำแหน่งเป้าหมายภายในอาคารด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ ผู้วิจัยได้นำเสนอการใช้เทคนิคพรีอักษิมีตี ร่วมกับเทคนิคฟิงเกอร์พริ้นต์ โดยการรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตนเชิงแสงในขอบเขตการส่องสว่างของหลอด สปอตไลท์แอลอีดีสำหรับการระบุตำแหน่งแบบพรีอักษิมีตี และรับความสว่างของแสง (Illuminance) ในตำแหน่งเดียวกันเพื่อใช้เป็นค่าพารามิเตอร์สำหรับการเปรียบเทียบรูปแบบด้วยการหาพิกัดตำแหน่งด้วยเทคนิคฟิงเกอร์พริ้นต์ และได้ทดลองวิจัยที่ 4 ระดับความสูง คือ 5, 70, 120 และ 150 เซนติเมตร โดยในการทดลองวิจัยนี้ได้แบ่งการวิจัยออกเป็น 2 ช่วง คือช่วงที่ 1 เป็นการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้แบบพื้นฐาน โดยพบว่าระยะทางที่ผิดพลาดของการระบุตำแหน่งสุ่มทดสอบ 30 ตำแหน่งในแต่ละระดับความสูง ซึ่งมีตำแหน่งที่สามารถรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตนได้ 3, 6, 11 และ 14 ตำแหน่ง มีค่าเฉลี่ยของระยะทางที่ผิดพลาด คือ 28.25, 11.63, 29.36 และ 34.87 เซนติเมตร ตามลำดับ ซึ่งตำแหน่งสุ่มทดสอบที่ระดับ 5 และ 70 เซนติเมตร สามารถรับสัญญาณได้น้อย เนื่องจากจากการซ้อนทับกันของสัญญาณเชิงแสง ทำให้อุปกรณ์ภาครับไม่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตนในบริเวณที่แสงซ้อนทับกันได้ และที่ระดับความสูง 150 เซนติเมตร ให้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดที่สูง เนื่องจากใช้ค่าความสว่างของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นค่าพารามิเตอร์ในการเปรียบเทียบรูปแบบด้วยเทคนิคฟิงเกอร์พริ้นต์ โดยค่าความสว่างของแสงที่กระจายออกมาจากหลอดสโตนไลท์แอลอีดีนั้นเป็นลักษณะของวงกลมรัศมี ทำให้แต่ละตำแหน่งที่อยู่ในระยะวงกลมรัศมีเดียวกัน ให้ค่าความสว่างที่ใกล้เคียงกันมากจนไม่สามารถแยกได้ว่าตำแหน่งนั้นๆ อยู่ที่พิกัดใด ซึ่งจากผลการทดลอง ผู้วิจัยค้นพบปัญหาในการระบุพิกัดตำแหน่งด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้อยู่ 2 ปัญหาหลัก คือ 1. การรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตนของอุปกรณ์ต้นแบบอุปกรณ์ภาครัฐไม่สามารถรับสัญญาณในบริเวณพื้นที่ที่แสงจากหลอดสโตนไลท์แอลอีดีมากกว่า 1 หลอด ซ้อนทับกันได้ และ 2. การใช้ค่าความสว่างของแสงเป็นพารามิเตอร์ในการเปรียบเทียบรูปแบบ

จากปัญหาที่เกิดขึ้น ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบอุปกรณ์ต้นแบบการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ใหม่ โดยพัฒนาอุปกรณ์ให้สามารถอ่านข้อมูลในพื้นที่ที่แสงซ้อนทับกันได้ ด้วยการสื่อสารแบบมัลติเพล็กซ์แบบการแบ่งเวลา (TDM) ซึ่งผลการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 พบว่าที่ระดับความสูง 5, 70, 120 และ 150 เซนติเมตร มีตำแหน่งที่สามารถรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตนได้ 30, 30, 29 และ 23 ตำแหน่ง และได้ให้ค่าเฉลี่ยระยะความผิดพลาดคือ 16.78, 21.32, 29.45 และ 28.53 เซนติเมตรตามลำดับ ซึ่งเป็นระยะความผิดพลาดที่ยอมรับได้ เนื่องจากเป็นระยะความผิดพลาดที่ไม่สูงกว่าระยะห่างระหว่างตำแหน่งของฟิงเกอร์พริ้นต์ที่ 30 เซนติเมตร โดยที่ระดับความสูง 5 เซนติเมตรสามารถแบ่งกลุ่มของการรับหมายเลขระบุตัวตนได้ดีที่สุด ทำให้ได้ระยะความผิดพลาดที่น้อยที่สุดเนื่องจากการเปรียบเทียบรูปแบบค่าความสว่างของแสงนั้นจะอยู่ภายในขอบเขตของหมายเลขระบุตัวตนที่รับได้ แต่สำหรับตำแหน่งทดสอบที่ 11 ที่ไม่สามารถระบุพิกัดตำแหน่งได้ แม้จะสามารถรับหมายเลขระบุตัวตนได้ 3 หมายเลข คือ 1, 2 และ 4 เนื่องจากในฐานข้อมูลฟิงเกอร์พริ้นต์ไม่มีตำแหน่งใดที่สามารถรับหมายเลขระบุตัวตน 1, 2 และ 4 ได้ ทำให้ไม่สามารถเปรียบเทียบรูปแบบกับฐานข้อมูลได้ ด้วยเหตุผลเดียวกันนี้ ในตำแหน่งที่ 16 ของระดับความสูง 70 เซนติเมตร และตำแหน่งที่ 17 และ 20 ของระดับความสูง 150 เซนติเมตร ที่ไม่สามารถระบุพิกัดตำแหน่งได้

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองวิจัยช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 พบว่าจำนวนของตำแหน่งของฟิงเกอร์พริ้นต์ของการทดลองวิจัยช่วงที่ 2 ให้ผลดีกว่า เนื่องจากสามารถรับสัญญาณหมายเลขระบุตัวตนได้มากกว่าอย่างชัดเจน แสดงว่าวิธีการมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งเวลาสามารถแก้ไขปัญหาการซ้อนทับกันของสัญญาณเชิงแสงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.3 ข้อเสนอแนะ

กระบวนการการหาตำแหน่งภายในอาคารด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ตามที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการทดสอบการระบุตำแหน่งเบื้องต้นในพื้นที่ทดสอบขนาดกว้าง 300 เซนติเมตร ยาว 300 เซนติเมตร ซึ่งอาจลองนำไปใช้ทดสอบการระบุตำแหน่งด้วยการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ในพื้นที่จริง เช่น ห้างสรรพสินค้า, โรงพยาบาล, ที่ทำงาน, เหมืองแร่ หรือที่อยู่อาศัย เป็นต้น และเนื่องจากการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ยังเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่กำลังพัฒนาดังนั้น การพัฒนาอุปกรณ์ และระบบของการสื่อสารด้วยแสงที่ตามองเห็นได้ ก็เป็นอีกความท้าทายสำหรับนักพัฒนาเช่นกัน

เอกสารอ้างอิง

- [1] Chan E., Baciú G. **Introduction to Wireless Localization: With iPhone SDK Examples**. Singapore: Wiley-IEEE Press. 2012.
- [2] Figueiras J., Frattasi S. **Mobile Positioning and Tracking: From Conventional to Cooperative Techniques**. John Wiley and Sons. 2010.
- [3] ธนพงษ์ ชื่นอุระจิตร. “การหาตำแหน่งของวัตถุภายในอาคารแบบ 3 มิติ บนพื้นฐานเทคนิคการหาตำแหน่งแบบฟิงเกอร์ปริ้นท์บนเครือข่ายเซนเซอร์ไร้สาย.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.
- [4] Menzel R. **Photonics: Linear and Nonlinear Interactions of Laser Light and Matter**. New York: Springer. 2007.
- [5] Zolfagharifard E. “Light reading: visible light communications.” [Online]. Available: <http://www.theengineer.co.uk/1007419.article>. 2011.
- [6] จุฑามาศ วงษ์สวาท. “สเปกตรัม (Spectrum).” [Online]. Available: <http://www.promma.ac.th/main/chemistry/jutamas/lesson/spectrum2.htm>. 5550.
- [7] พนารัตน์ เขิญถนอมวงศ์. **การจัดการและการออกแบบระบบโทรคมนาคม**. นนทบุรี: สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช. 2556.
- [8] อีทีที. “คู่มือการใช้งาน ET-BASE AVR ATmega64/128 r3.” [Online]. Available: <http://www.es.co.th/Schematic/PDF/ET-BASEAVR-R3.PDF>. 2558.
- [9] เอกชัย มะการ. **เรียนรู้เข้าใจใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ด้วย Arduino**. กรุงเทพฯ: บริษัท อีทีที จำกัด, 2552.
- [10] Thaieasyelec. “บทความ Arduino คืออะไร? ตอนที่1 แนะนำเพื่อนใหม่ที่ชื่อ Arduino.” [Online]. Available: <http://www.thaieasyelec.com/article-wiki/basic-electronics/บทความ-arduinoคืออะไร-เริ่มต้นใช้งาน-arduino.html>. 2556.
- [11] Thaieasyelec. “Arduino Mega 2560.” [Online]. Available: <http://www.thaieasyelec.com/products/development-boards/arduino/official-boards-made-in-italy/arduino-mega-2560-detail.html>. 2556.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Mechashop. “3W White Led Hgh power Light 240-300LM LED Super Bright.” [Online]. Available: http://www.mechashop.com/store/product/view/3W_White_Led_Hgh_power_Light_240_300LM_LED_Super_Bright_EpiStar_Taiwan-17244406-th.html. 2007.
- [13] หจก.เฮงซาวด์ดอทคอม. “KS LIGHTING Spotlight led high power 30 W.” [Online]. Available: <http://www.hengsound.com/spotlight-led-high-power-30-w>. 2012.
- [14] Aksound. “หลอด led 8 mm อัลตราไบรท์ Ultra Bright.” [Online]. Available: http://shop.aksound.net/สินค้า-9หลอด_led_8_mm_อัลตราไบรท์_ultra_bright.html. 2014.
- [15] Wikipedia. “Photodiode.” [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Photodiode>. 2010.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

งานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

- [1] W. Chantharasena, K. Srivilas, and P. Cherntanomwong. "Implementation of Indoor Localization System by Combination of Proximity and Fingerprint Techniques using Visible Light Communication." International Technical Conference on Circuit/Systems Computers and Communications (ITC-CSCC), Phuket, Thailand, 2014.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Implementation of Indoor Localization System by Combination of Proximity and Fingerprint Techniques using Visible Light Communication

Wisarat Chantharasena
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
s5613805@kmitl.ac.th

Krit Srivilas
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
s6601108@kmitl.ac.th

Panarat Chermtanomwong
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang
Bangkok, Thailand
krpanara@kmitl.ac.th

Abstract—The applications using visible light communication (VLC) have recently become popular due to its benefit of VLC. VLC can provide not only the data communication via light, but also illumination. One of interest applications using VLC is the indoor localization because, in indoor environment, the light tubes are already installed. In this work, the indoor localization system is implemented. The combination of proximity and fingerprint techniques is used to estimate the target location. The LED spotlights at fixed locations are used as transmitters that transmit their unique IDs. By using the proximity technique, the rough location of the target is identified using the received ID. Then, the target location is estimated using fingerprint technique which illuminance it used as the fingerprint.

Keywords— visible light communication; spotlight LED; localization; proximity; fingerprint.

I. INTRODUCTION

Indoor Localization is the process to detect the position of the target inside the building. There are many applications for indoor localization. For example, it can easily help to monitor patients in the hospital, to find products in department stores, or to track elderly people in the house. Indoor localization can be generally categorized in to 3 types: i) Triangulation, ii) Scene analysis (localization fingerprinting) and iii) Proximity [1]. Moreover there are many technologies that support the implementation of indoor localization such as Radio frequency Identification (RFID), Bluetooth, Wireless sensor network (WSN) and Ultra Wideband (UWB). These technologies use radio waves to transmit signals. As known, in indoor environment, received radio signal is unreliable because of the signal fluctuation and multipath effect. Moreover, it is difficult to control the signal coverage and transmission security. The new technology was recently developed, which is called Visible Light Communication (VLC) can deal with this problems.

VLC is a new wireless communication using visible light as a carrier in the optical signal. The lamps in the building are used to transmit signals, while a light sensor acts as a receiver. The application of indoor localization using VLC has been developed recently [2] [3]. However there are still problems in

actual usage. In this paper, the indoor localization system using VLC is implemented by using combination of proximity and fingerprinting based techniques.

This paper consists of 5 sections. Introduction is given here in the first section. Section II describes the localization techniques. Section III explains experimental system and setup. Section IV explains the results and gives discussion. Finally, conclusion is given in section V.

II. LOCALIZATION TECHNIQUES

Indoor localization can be classified into 3 general techniques: i) Triangulation techniques; it uses the geometric properties of triangles to calculate the target location. ii) Proximity techniques; it can find the target location by detecting the signal packets from nearest antenna. iii) Scene analysis or localization fingerprinting technique. It previously collects the signal/data at known location in the database and then compares the parameter from target object with these database for estimating the target position [4]. This work uses combination of proximity technique to estimate the rough location of the target and fingerprint localization technique to estimate the fine location in x-y coordinate.

A. Proximity Technique

Proximity technique identifies the rough location with detect signal packets from antenna at known location. If the target can be detect packet from single antenna, it let us know that the target near that antenna. For proximity technique, the target receives the ID from the single spotlight LED to determine the rough location.

B. Fingerprint Location Technique

For fingerprint location technique, it compares target parameters with database parameters at known location. Fingerprint localization involves two-phase processes. For the first phase process, parameters from every known positions were recorded into database. We call this step the offline phase. Then, for the second step, it is called online phase, parameters of the target is compared with those in database by Nearest

Neighbor Algorithm. The location in the database providing the most similarity of these parameters will return as the location of the target. Fig. 1 demonstrates database and the process to find the location of the target using the fingerprint technique. The illuminance (LUX) is used as parameters recorded in the database so called fingerprint parameters

ID	Fingerprint Location (cm)		Fingerprint (Illuminance)
	x	y	
ID_t	x_1	y_1	l_1
	x_2	y_2	l_2

	x_k	y_k	l_k



Fig. 1 Database model and Fingerprint Technique [5]

By ID_t is the identification number received by photodiode from each spotlight LED when $t \in \{1, 2, 3, 4\}$. x_k is the coordinate in the horizontal axis. y_k is the coordinate in the vertical axis. l_k is the amount of illuminance received by the LUX meter within the area of ID_t .

Finally, after we estimated the position of the target, then we can calculate the distance error by norm equation

$$error\ distance = \sqrt{(x_a - x_e)^2 + (y_a - y_e)^2} \quad (1)$$

where x_a and y_a represent as the actual locations and x_e and y_e represent as the estimated locations.

III. EXPERIMENT SYSTEM AND SETUP

We design VLC devices by Non-Return-to-Zero (NRZ) [6]. Fig. 2 shows VLC-based transceiver architecture. For the transmitter, ID information is converted into binary NRZ input, which is used with On-Off Keying (OOK) modulation to control the switch of the spotlight LED. The transmitter is shown in Fig. 3. For the receiver, the photodiode receives signal, and the signal is demodulated by a non-coherent detection scheme into NRZ data, then converted into ID data. The receiver is shown in Fig. 4.

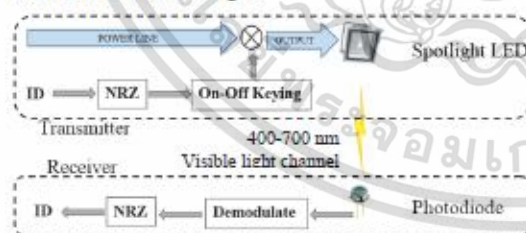


Fig. 2 VLC-based transceiver architecture



Fig. 3 VLC transmitter device

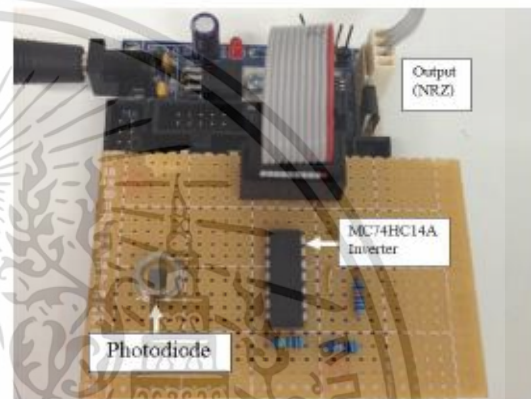


Fig. 4 VLC receiver device

The experimental area is 300 cm x 300 cm and four white spotlight LEDs of 30W were installed at a height of 280 cm. The receiver (Photodiode and LUX meter) height from floor is 150 cm as shown in Fig. 5.

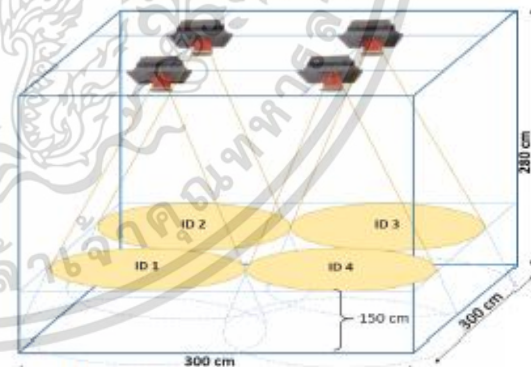


Fig. 5 Experimental area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The gap between all of 121 fingerprint points are 25 cm as show in Fig. 6, where the red spots represent fingerprint locations and 45 observe locations were randomly up in this area based on three characteristics. First, 15 blue circles represents the observed on locations in which are the fingerprint location. Second, 15 orange diamonds are the observed locations in between 2 fingerprint locations. And third, 15 green squares are the observed locations in between 4 fingerprints as shown in Fig. 7.

We divided the experiment into two phases. Firstly, we recorded the ID and illuminance from the red spots that every fingerprints to database as shown in Fig. 6. Every LED spotlight can be set to send its own unique ID, and winking quickly to send ID out via light. The experiment is divided into two stages. For the first stage, the illuminance and ID at each fingerprint location is recorded in the database. If some fingerprint cannot get ID, it was recorded 0. We use the Illuminance meter of YOKOGAWA brand 51002 series to collect illuminance.

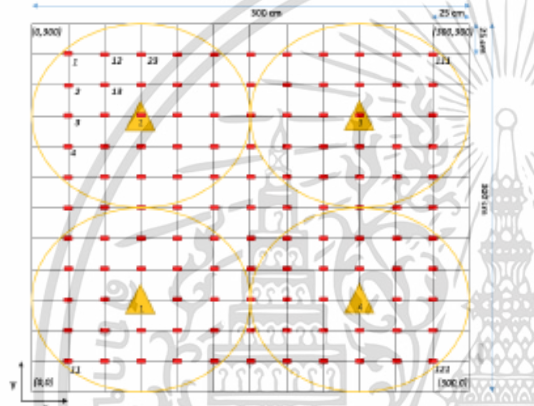


Fig. 6 All of Fingerprint Locations

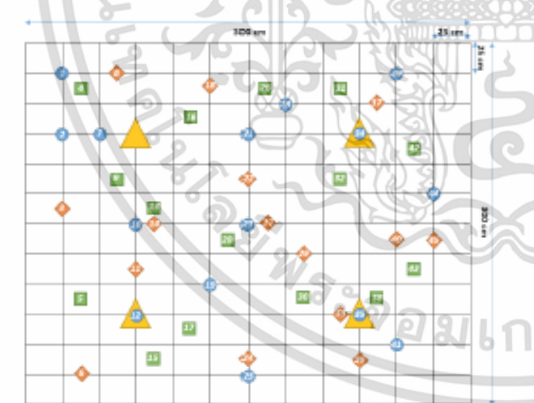


Fig. 7. All of Observe locations in the area of interest

Secondly, same parameters were detected from the target at every observed locations to compare with database to estimate the location of the target. In this work, the receiver at all observed location gets ID. Illuminance and compare these parameter to the database to estimate its own location.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

From all of 121 fingerprint locations, there are only 82 locations can get ID. By ID1, ID2, ID3 and ID4 give 20, 23, 21 and 18 positions in which respectively. In Fig. 8 the blue pentagons are fingerprint locations can get ID. From all of 45 observed positions, there are only 28 positions can receive IDs. Those positions are in area of beam from single LED spotlight as shown in Fig. 9. ID is an assistance to scope the location of the target. Illuminance in this scope area allows to specify the location of the target. The average of error distance is 34.05 cm.

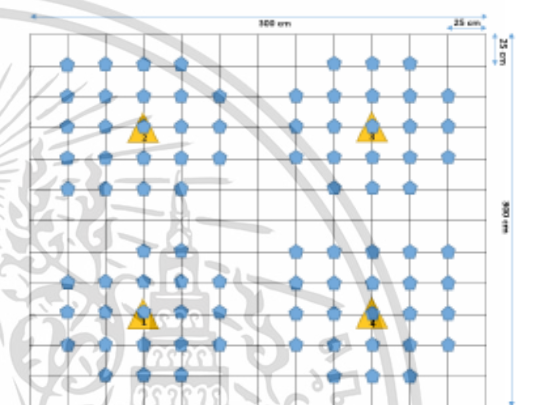


Fig. 8 Fingerprint locations in which can received ID

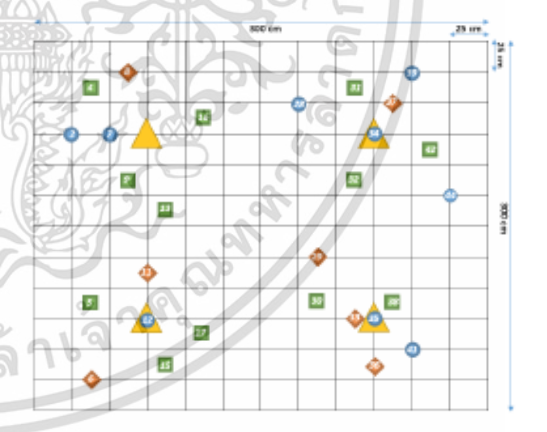


Fig. 9 Observed location in which can received ID

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

As mentioned, ID is an assistance to scope the location of the target. Illuminance in this scope allows to find the rough location. Then the fine location can be estimated using fingerprint technique. Fig. 10 show the error distance of all estimated target locations with can be received illuminance signal. The average of error distance is 34.05 cm.



Fig. 10 Error distance for each observed location

According to the result of the experiment, each observe location gives different error distance. For example, observe location numbers 28 and 41 give the accurate location as the observed on location are at the fingerprint location. The observed locations numbers 29 and 37 give 12.5 cm error distance when the observed locations are between 2 fingerprint locations. They can receive ID and constant illumination. Observe location numbers 4, 5, 9, 16, 17, 30, 31 and 38 give 17.7 cm error distance when the observed locations are in between 4 fingerprints. They can receive ID and constant illumination. Nevertheless other observed locations give the high error distance. For example observed location number 13 and 44 give error distance of 88 cm and 125 cm, respectively. Because a single spotlight LED giving illuminance depends on the radius of the spotlight LED. So illuminance parameter was a reference to another location with an equal radius as show in Fig. 11.



Fig. 11 Illuminance parameter was refer to another location

V. CONCLUSION

Indoor localization system using VLC is implemented. The combination of proximity and fingerprint techniques is used to estimate the target location. The result of the experiment gives the average of error distance of 34.05 cm. Illuminance parameter is difficult to identify the location within single spotlight LED. According to the experiment result, some observed locations cannot get ID. There are two reasons. The first reason is that those positions are outside the coverage of the light beam. And for the second reason, those positions are in the area of overlapping between multi-spotlight LED transmitters. Those things may make photodiode cannot receive the correct signal. In the future work, we will deal with the problem of overlapping of light from multi-spotlight LED transmitters to provide a better performance of localization using VLC.

REFERENCES

- [1] C.L. Chan Eddie, and B. George, "Introduction to wireless localization: with iPhone SDK Examples," This edition first published 2012 Copyright©2012 John WILEY & Sons Singapore Pte. Ltd.
- [2] X. Liu, H. Makino, and Y. Maeda, "Basic Study on Indoor Location Estimation using Visible Light Communication Platform," 30th Annual International IEEE EMBS Conference, August 20-24, 2008.
- [3] A. Maria Vegni and M. Biagi, "An Indoor Localization Algorithm in a Small-Cell LED-based Lighting System," 2012 International conference on indoor positioning and indoor navigation, November 13-15, 2012.
- [4] S. Phummasen, D. Joko Suroso, T. Chuenrajit, and P. Chertanontwong, "3D Fingerprint-based Indoor Localization Using RFID Passive Tag," ICEAST 2012, November 21-24, 2012.
- [5] P. chertanontwong, J. Takada, and H. Tsuji, "signal Subspace Interpolation from Discrete Measurement Samples in Constructing a Database for Location Fingerprint Technique," IEICE Transactions on Communications, Vol. E92-B, No. 9, pp.2922-2930, September 2009.
- [6] Y. Up Lee, and M. Kavehrad, "Two Hybrid Positioning System Design Techniques with Lighting LEDs and Ad-hoc Wireless Network," IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 58, No. 4, November 2012

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวิศรุต จันทรเสนา
วัน เดือน ปีเกิด	16 พฤศจิกายน 2532 จังหวัดอุดรธานี
ที่อยู่	72/3 หมู่ 1 ซอยศรีสวรรค์ ถนนทหาร ตำบลหมากแข้ง อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี 41000
อีเมล	tuiwissarut@gmail.com
ประวัติการศึกษา	2554 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้