

ระบบตรวจจับคนเดินเท้าด้วยเลเซอร์ย่านอินฟราเรดผ่าน  
โปรแกรม ARDUINO

INFRARED LASER-BASED PEDESTRIAN TRACKING  
SYSTEM WITH ARDUINO PROGRAM



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงปีการศึกษา 2560

# INFRARED LASER-BASED PEDESTRIAN TRACKING SYSTEM WITH ARDUINO PROGRAM



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)  
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2017

หัวข้อโครงการพิเศษ ระบบตรวจจับคนเดินเท้าด้วยเลเซอร์ย่านอินฟราเรดผ่านโปรแกรม Arduino  
Infrared Laser-based Pedestrian Tracking System with Arduino Program

ชื่อนักศึกษา นายณฤกษ์ พิทักษ์รักษากุล รหัสนักศึกษา 57050958  
นางสาวพัชราภรณ์ จรเสมอ รหัสนักศึกษา 57051004

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชา ฟิสิกส์  
ปีการศึกษา 2560  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.กฤษกร โฉ่เจริญรัตน์

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2560

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.สาทราย เล็กชะอุ่ม ประธานกรรมการ	
ดร.วรการ นียากร กรรมการ	
ผศ.ธนภรณ์ ลีลาวัฒนานนท์ กรรมการ	
ผศ.ดร.กฤษกร โฉ่เจริญรัตน์ กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	ระบบตรวจจับคนเดินเท้าด้วยเลเซอร์ย่านอินฟราเรดผ่านโปรแกรม Arduino Infrared Laser-based Pedestrian Tracking System with Arduino Program	
ชื่อนักศึกษา	นายณฤกรณ์ พิทักษ์รักษากุล	รหัสนักศึกษา 57050958
	นางสาวพัชราภรณ์ จรเสมอ	รหัสนักศึกษา 57051004
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)	
ภาควิชา	ฟิสิกส์	
ปีการศึกษา	2560	
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.กฤษกร โส้เจริญรัตน์	

### บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ออกแบบและสร้างระบบตรวจจับคนเดินเท้าที่ควบคุมด้วยโปรแกรม Arduino โดยที่นำไปติดตั้งบนไม้เท้าขาวซึ่งมีขนาดกะทัดรัดและน้ำหนักเบา ระบบตรวจจับคนเดินเท้าด้วยเลเซอร์ย่านอินฟราเรดนี้เหมาะสำหรับผู้พิการทางสายตาซึ่งสามารถตรวจจับวัตถุได้ 3 ระดับ ซึ่งสามารถบอกได้ว่าเป็นวัตถุอะไร (พื้น, วัตถุ หรือเพดาน) และสามารถตรวจจับวัตถุได้ไกลห่างจากผู้พิการทางสายตาตั้งแต่ 0 - 3000 เซนติเมตร ระบบตรวจจับคนเดินเท้าด้วยเลเซอร์ย่านอินฟราเรดมีความแม่นยำในการตรวจจับวัตถุในอาคารที่หลากหลายอย่างเช่น มนุษย์ ไม้ และซีเมนต์ สามารถส่งข้อมูลระยะทางของวัตถุกลับมายังผู้ใช้ได้อย่างรวดเร็ว

คำสำคัญ: ระบบตรวจจับคนเดินเท้า, เลเซอร์ย่านอินฟราเรด, การตรวจจับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Title</b>	Infrared Laser-based Pedestrian Tracking System with Arduino Program	
<b>Students</b>	Mr. Narikorn Phitagragsakul	Student ID 57050958
	Miss Patcharaporn Jornsamer	Student ID 57051004
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Applied Physics)	
<b>Department</b>	Physics	
<b>Faculty</b>	Science	
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
<b>Academic Year</b>	2560	
<b>Advisor</b>	Asst. Prof. Dr.Kitsakorn Locharoenrat	

### Abstract

This special project was to design and construct Infrared laser-based pedestrian tracking system controlled by Arduino program mounted onto a top of the white cane. So this device is compact and lightweight. The system suitable for blind people, as it can detect obstacles at 3 levels (floor, obstacles or ceiling) and can detect obstacle 0 - 3,000 cm away from the blind people. The tracking system was distance detection accuracy under indoor environment and sent data back so fast when it was performed for the different obstacles such as human, wood and cement.

**Keyword:** White cane, Infrared sensor, Tracking

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือและคำแนะนำจาก ผศ.ดร.กฤษกร โล้เจริญรัตน์ ซึ่งเป็นผู้ให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการที่ติดต่อมา และยังเป็นผู้เสนอแนะข้อสงสัยรวมถึงตรวจและแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆ ตลอดระยะเวลาที่จัดทำโครงการพิเศษ จึงทำให้คณะผู้จัดทำมีความรู้ ความเข้าใจ และแนวทางที่จะนำไปประยุกต์ในโครงการพิเศษนี้

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์สาหร่าย เล็กข่อม์ ที่ให้คำปรึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการทดลองต่างๆ และสนับสนุนคณะผู้จัดทำอย่างเต็มที่

ขอขอบคุณ Mr. Chi Fung Wong ที่ช่วยเหลือเกี่ยวกับโปรแกรมของระบบตรวจจับคนเดินเท้าด้วยเลเซอร์ย่านอินฟราเรด

ขอขอบคุณนางสาวฐิตาภรณ์ เดชโหมด ที่ช่วยเหลือเกี่ยวกับโปรแกรมที่ใช้ในการทำโครงการพิเศษนี้ และให้ความรู้เกี่ยวกับการเลือกใช้อุปกรณ์ต่างๆ

ขอขอบคุณคณิงชาติ แสนยศ ที่ช่วยออกแบบการทดลองทดสอบความแม่นยำของเลเซอร์และเสนอแนะเพิ่มเติมเกี่ยวกับการทดลอง

ขอขอบคุณเพื่อนคณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกคนที่ช่วยให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจให้คณะผู้จัดทำในการทำโครงการพิเศษ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบคุณอาจารย์สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและให้ความรู้ตลอดมา ทำให้คณะผู้จัดทำสามารถนำความรู้ที่ได้รับมาประยุกต์ใช้กับโครงการพิเศษจนสำเร็จลุล่วงและขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่คอยให้คำแนะนำและเป็นแรงผลักดันที่สำคัญทำให้ผู้จัดทำมีกำลังใจในการทำงานจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ณฤกรณ์ พิทักษ์รักษากุล  
พัชรภรณ์ จรเสมอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูปภาพ	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 Laser	4
2.2 Lidar (Light-Detection and Range)	10
2.3 รูปแบบการส่งข้อมูล	12
2.4 ไม้เท้าขาว (White cane)	14
2.5 โปรแกรมภาษา C++	15
2.6 Arduino	22
2.7 Buletooth	23
2.8 Servo Motor	23
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>27</b>
3.1 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ตรวจจับวัตถุ	27
3.2 การทดสอบการตรวจจับวัตถุ	35
3.3 การเขียนโปรแกรมตรวจจับวัตถุเพื่อที่จะส่งไปยังส่วนแสดงผล	40
3.4 ทดลองการตรวจจับวัตถุของอุปกรณ์	43
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล</b>	<b>44</b>
4.1 การทดสอบประสิทธิภาพและการทำงานของ LIDAR	44
4.2 การทดสอบและการทำงานของระบบตรวจจับคนเดินเท้าด้วยเลเซอร์ย่านอินฟรา- เรดผ่านโปรแกรม ARDUINO	49
4.3 ผลการทดลองการตรวจจับวัตถุของระบบตรวจจับคนเดินเท้าย่านอินฟราเรด	51
4.4 อภิปรายผล	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	61
5.1 สรุปผลการวิจัย	61
5.2 ข้อเสนอแนะ	61
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก ก	
ภาคผนวก ข	



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย	2
2.1 การแบ่งชนิดของเลเซอร์	10
2.2 แสดงประสิทธิภาพของ Lidar lite v3	11
2.3 แสดงคุณสมบัติของเลเซอร์	11
3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย	28
4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดระยะทางของมนุษย์	45
4.2 ผลทดสอบประสิทธิภาพการวัดระยะทางของไม้	46
4.3 ผลทดสอบประสิทธิภาพการวัดระยะทางของซีเมนต์	48
4.4 ผลการทดลองการตรวจจับวัตถุที่เป็นมนุษย์ (Human) มีค่าดัชนีหักเห (Refractive Index: n) เท่ากับ 1.36 ที่ระยะทางที่วัดได้ของ $\theta_1$ โดยวัตถุสูงน้อยกว่า 80 cm เปรียบเทียบกับค่าระยะทางจริง	52
4.5 ผลการทดลองการตรวจจับวัตถุที่เป็นมนุษย์ (Human) มีค่าดัชนีหักเห (Refractive Index: n) เท่ากับ 1.36 ที่ระยะทางที่วัดได้ของ $\theta_2$ โดยวัตถุสูง 80 cm เปรียบเทียบกับค่าระยะทางที่จริง	52
4.6 ผลการทดลองการตรวจจับวัตถุที่เป็นมนุษย์ (Human) มีค่าดัชนีหักเห (Refractive Index: n) เท่ากับ 1.36 ที่ระยะทางที่วัดได้ ของ $\theta_3$ โดยวัตถุสูง 81- 180 cm เปรียบเทียบกับค่าระยะทางจริง	53
4.7 ผลการทดลองการตรวจจับวัตถุที่เป็นไม้ (Wood) มีค่าดัชนีหักเห (Refractive index: n) เท่ากับ 1.60 ที่ระยะทางที่วัดได้ ของ $\theta_1$ โดยวัตถุสูง ต่ำกว่า 80 cm เปรียบเทียบกับค่าระยะทางที่จริง	54
4.8 ผลการทดลองการตรวจจับวัตถุที่เป็นไม้ (Wood) มีค่าดัชนีหักเห (Refractive index:n) เท่ากับ 1.60 ที่ระยะทางที่วัดได้ ของ $\theta_2$ โดยวัตถุสูง 80 cm เปรียบเทียบกับค่าระยะทางจริง	54
4.9 ผลการทดลองการตรวจจับวัตถุที่เป็นไม้ (Wood) มีค่าดัชนีหักเห (Refractive index:n) เท่ากับ 1.60 ที่ระยะทางที่วัดได้ ของ $\theta_3$ โดยวัตถุสูงกว่า 80 cm เปรียบเทียบกับค่าระยะทาง	56
4.10 ผลการทดลองการตรวจจับวัตถุที่เป็นซีเมนต์ (Cement) มีค่าดัชนีหักเห (Refractive Index: n) เท่ากับ 1.55 ที่ระยะทางที่วัดได้ ของ $\theta_1$ โดยวัตถุสูง ต่ำกว่า 80 cm เปรียบเทียบกับค่าระยะทางจริง	57
4.11 ผลการทดลองการตรวจจับวัตถุที่เป็นซีเมนต์ (Cement) มีค่าดัชนีหักเห (Refractive Index: n) เท่ากับ 1.55 ที่ระยะทางที่วัดได้ ของ $\theta_2$ โดยวัตถุสูง 80 cm เปรียบเทียบกับค่าระยะทางจริง	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.12 ผลการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นซีเมนต์ (Cement) มีค่าดัชนีหักเห (Refractive Index: $n$ ) เท่ากับ 1.55 ที่ระยะทางที่วัดได้ ของ $\theta_3$ โดยวัตถุสูง 81 – 180 cm เปรียบเทียบกับค่าระยะทางจริง	58
4.13 ผลการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างระยะทางที่วัดได้ของ วัตถุที่เป็นมนุษย์ (Human), ไม้ (Wood) และ ซีเมนต์ (Cement) ของ $\theta_2$	59
4.14 ผลการเปรียบเทียบระหว่างดัชนีหักเหของมนุษย์ (Human), ซีเมนต์ (Cement) และไม้ (wood) กับค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างระยะทางที่วัดได้ของวัตถุที่เป็น มนุษย์ (Human), ซีเมนต์ (Cement) และไม้ (Wood) ของ $\theta_2$	60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 Electromagnetic Spectrum	5
2.2 Energy level	6
2.3 Radiative processes with Einstein's constants	7
2.4 แสงผ่านปริซึมและรูปร่างของเส้นลำแสงเลเซอร์	8
2.5 แสดงถึงการปล่อยลำแสงของไฟฉายกับเลเซอร์	9
2.6 แนวคิดการขยายลำแสงเลเซอร์	10
2.7 Lidar lite v3	11
2.8 กำหนดจุดเริ่มต้นกับจุดสิ้นสุด	13
2.9 Acknowledge	13
2.10 แสดง Pulse Width Modulation	14
2.11 ไม้เท้าขาว	15
2.12 Arduino nano	24
2.13 Servo Motor	25
3.1 Lidar-Lite V3	28
3.2 Arduino Nano	29
3.3 HC-05 Bluetooth Module	29
3.4 Tower Pro MG995 DIGI Hi-Speed Servo	30
3.5 ไม้เท้าขาว	30
3.6 หลักการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับวัตถุ	31
3.7 การเชื่อมต่อของอุปกรณ์	32
3.8 วงจรที่ใช้ในการทำ PCB	32
3.9 ชัดแผ่น PCB	33
3.10 รีดวงจรให้ติดกับแผ่น PCB	33
3.11 นำแผ่น PCB ไปกัดกับน้ำกรดกัดทองแดงเพื่อที่จะลอกทองแดงออก	34
3.12 แผ่น PCB ที่กัดทองแดงเสร็จเรียบร้อยแล้ว	34
3.13 บัดกรีเพื่อเชื่อมกับอุปกรณ์	35
3.14 อุปกรณ์ที่ติดกับไม้เท้าขาว	35
3.15 โปรแกรม Arduino	36
3.16 เลือกบอร์ด Arduino Nano	37
3.17 เลือก Processor เป็น ATmega328	37
3.18 เลือก Port COM3	38
3.19 โปรแกรมวัดระยะทางโดยแบบ PWM	39
3.20 ต่อสายจาก Oscilloscope กับ Lidar และ บอร์ด Arduino Nano	40
3.21 การทดลองวัดการตรวจจับของ Lidar	40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนไว้สำหรับใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.22 สัญญาณ Pulse width ที่จับโดย Oscilloscope	41
3.23 โปรแกรมการคำนวณระยะทางเชื่อมต่อกับบลูทูธ (1)	41
3.24 โปรแกรมการคำนวณระยะทางเชื่อมต่อกับบลูทูธ (2)	42
3.25 โปรแกรมการคำนวณระยะทางเชื่อมต่อกับบลูทูธ (3)	42
3.26 โปรแกรมการคำนวณระยะทางเชื่อมต่อกับบลูทูธ (4)	43
3.27 โปรแกรมการคำนวณระยะทางเชื่อมต่อกับบลูทูธ (5)	43
4.1 การจัดอุปกรณ์ในการทดสอบประสิทธิภาพของ LIDAR	44
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่กำหนด (cm) กับระยะทางที่วัดได้ (cm) ของมนุษย์	46
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริง (cm) กับระยะทางที่วัดได้ (cm) ของไม้	47
4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริง (cm) กับระยะทางที่วัดได้ (cm) ของซีเมนต์	49
4.5 ภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นมนุษย์ (Human)	49
4.6 ภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นซีเมนต์ (Cement)	50
4.7 ภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นไม้ (Wood)	51
4.8 ผลการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นมนุษย์ (Human) เปรียบเทียบกับค่าระยะทางจริง โดยวัดสูง 80 cm ( $\theta_2$ )	53
4.9 ผลการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นไม้ (Wood) เปรียบเทียบกับค่าระยะทาง โดยวัดสูง 80 cm ( $\theta_2$ )	55
4.10 ผลการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นซีเมนต์ (Cement) เปรียบเทียบกับค่าระยะทางจริง โดยวัดสูง 80 cm ( $\theta_2$ )	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในปัจจุบันนี้ประชากรในโลกยังคงมีผู้ที่มีปัญหาทางด้านสายตาได้แก่ คนตาบอด และ คนที่มีความสามารถทางการมองเห็นที่ต่ำ ทำให้ผู้คนเหล่านี้ประสบปัญหาและข้อจำกัดในการดำเนินชีวิตประจำวันโดยเฉพาะการเดินทางไปในที่ต่างๆ อาจเกิดอันตรายจากการที่เดินไปชนวัตถุที่กีดขวางอยู่ข้างหน้า

การนำทางคนตาบอดมีหลากหลายแบบ อย่างเช่น สุนัขนำทาง แต่ทว่ายังมีข้อจำกัดเพราะว่าสุนัขนำทางต้องผ่านการฝึกฝนเป็นระยะเวลาที่นาน เพราะฉะนั้นเครื่องมือจึงเป็นสิ่งที่ดีที่สุดสำหรับการนำทาง เครื่องมือที่สามารถช่วยนำทางให้แก่ผู้คนเหล่านี้ซึ่งเครื่องมือการนำทางมีทั้งในอาคารและนอกอาคารที่สามารถช่วยให้ชีวิตของผู้คนเหล่านี้ได้มีชีวิตที่ดีขึ้น การที่คนตาบอดจะสามารถหลีกเลี่ยงวัตถุสิ่งกีดขวางที่อยู่ตรงหน้าได้นั้นเป็นเรื่องที่ยากลำบากโดยเฉพาะในอาคารซึ่งมีวัตถุหลากหลายชนิดจึงอาจจะเป็นอันตรายได้ ในปัจจุบันนั้นได้มีการศึกษาและพัฒนาเครื่องมือที่ใช้นำทางในอาคารโดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เข้ามาช่วย อย่างเช่น ไม้เท้าสำหรับคนตาบอดอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะมีการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดระยะทางบนไม้เท้า อย่างเช่น Ultrasonic Sensor ที่สามารถวัดระยะระหว่างสิ่งกีดขวางกับผู้ใช้ ทำให้สามารถช่วยหลีกเลี่ยงการเดินของคนที่มีปัญหาทางด้านสายตา

ทางผู้จัดทำจึงได้ศึกษาและออกแบบอุปกรณ์ไม้เท้าที่ประกอบด้วยเซ็นเซอร์อินฟราเรดเลเซอร์โดยใช้การควบคุมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วยโปรแกรม Arduino เป็นตัวตรวจจับสิ่งกีดขวางที่อยู่ข้างหน้าของผู้ใช้ เพราะว่าเซ็นเซอร์อินฟราเรดเลเซอร์นั้นมีความแม่นยำที่สูงในการตรวจจับวัตถุที่อยู่ในระยะที่ไกล อีกทั้งสถานที่ภายในอาคารมีพื้นที่ค่อนข้างแคบซึ่งตัวอินฟราเรดเลเซอร์มีลำแสงที่เป็นแนวเส้นตรงที่บานออกน้อยจึงทำให้การใช้อินฟราเรดเลเซอร์นั้นมีความเหมาะสมที่จะใช้ตรวจจับวัตถุในอาคาร อย่างเช่น โรงพยาบาล สถานที่ส่วนตัวและสถานที่ราชการ ผู้จัดทำได้ติดตั้งอินฟราเรดเลเซอร์ด้านบนของไม้เท้านำทางคนตาบอด ซึ่งอินฟราเรดเลเซอร์นั้นผู้จัดทำได้ใช้ Lidar (Light Detection and Ranging) sensor ที่มีความสามารถในการส่งผ่านข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) เพื่อออกแบบระบบนำทางเพื่อผู้คนที่มีความบกพร่องทางด้านสายตาโดยใช้ Infrared Laser
- 2) เพื่อศึกษาการทำงานของ Infrared Laser
- 3) เพื่อศึกษาและออกแบบระบบไมโครคอนโทรลเลอร์โดยใช้ Arduino Board

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

การออกแบบและสร้างตัวอุปกรณ์ไม้เท้าประกอบด้วยเซ็นเซอร์อินฟราเรดเลเซอร์เป็นตัวตรวจจับระยะไกล บอร์ด Arduino เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นอุปกรณ์ขนาดกะทัดรัดและน้ำหนักเบา โดยการตรวจจับระยะทางได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ อุปกรณ์สามารถตรวจสอบอุปสรรคต่างๆ เอกสารเซ็นเซอร์ชนิดนี้ และโต๊ะไม้ที่นำมาใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

งานวิจัยมีระยะเวลาในการจัดทำรวมทั้งสิ้น 11 เดือน โดยเริ่มตั้งแต่เดือนพฤษภาคม 2559 ถึงเดือนมีนาคม 2560 ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงาน ดังนี้

ตารางที่ 1.1 แนวทางการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงาน	ระยะเวลา											
	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	
1. ค้นคว้าและศึกษางานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานที่ผู้จัดทำสนใจ	↔											
2. ศึกษาคุณสมบัติของระบบแจ้งเตือนที่สนใจในงานนี้คือ Lidar		↔										
3. ศึกษาและใช้งานโปรแกรม Arduino และตรวจสอบคุณสมบัติของ Lidar โดยใช้โปรแกรม Arduino			↔	↔								
4. ทำบอร์ดวงจรเพื่อลดขนาดของชิ้นงานให้เล็กลง					↔							
5. ประกอบชิ้นส่วนของอุปกรณ์ต่างๆ เกิดเป็นชิ้นงานที่สมบูรณ์							↔					
6. เก็บผลการทดลองและประมวลผลข้อมูล								↔				
7. สรุปรงานวิจัยพร้อมเขียนรายงาน											↔	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) สามารถสร้างอุปกรณ์ไม้เท้าที่ประกอบด้วยเซ็นเซอร์อินฟราเรดเลเซอร์เป็นตัวตรวจจับระยะไกล โดยอุปกรณ์สามารถตรวจจับอุปสรรคต่างๆ และแสดงค่าระยะทางอุปสรรคได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ

2) ไม้เท้าสำหรับผู้พิการทางสายตาสามารถนำไปใช้ตรวจจับสิ่งกีดขวางต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ระบบการตรวจจับวัตถุที่มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือได้มีความจำเป็นในปัจจุบันเป็นอย่างมาก เพราะว่าการตรวจจับสิ่งที่ผิดพลาดอาจจะเป็นอันตรายต่อผู้ใช้ได้ การใช้เซนเซอร์ที่มีความแม่นยำสูงและรวดเร็วจะทำให้ระบบสามารถตรวจจับได้อย่างมีประสิทธิภาพอย่างสูง ในปัจจุบันได้มีการทำวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาไม้นำทางคนตาบอดอย่างมาก การนำเอาเลเซอร์ตรวจจับมาติดกับไม้นำทางคนตาบอดก็เป็นการพัฒนาในรูปแบบหนึ่ง

### 2.1 Laser

เลเซอร์ (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) เป็นอุปกรณ์ ที่ให้กำเนิดแสง โดยพลังงานจากแสงเลเซอร์ มีคุณสมบัติที่หลากหลายขึ้นอยู่กับการออกแบบและการนำไปใช้งาน การค้นพบเลเซอร์เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1954 โดย ซี. เอช.ทาวน์ส (C.H. Townes) ได้เสนอเป็นหลักการหรือทฤษฎีเกี่ยวกับเลเซอร์เอาไว้ ซึ่งผลงานในครั้งนั้นทำให้เขาได้รับการประกาศเกียรติคุณให้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ในปี ค.ศ. 1964

หลักการของ ซี. เอช.ทาวน์ส (C.H. Townes) ก่อให้เกิดแรงผลักดันให้มีการศึกษาและสานต่อเรื่องเทคโนโลยีเลเซอร์จนมีวิวัฒนาการที่ก้าวหน้ามาเป็นลำดับโดยในเดือนพฤษภาคม ปีค.ศ. 1960 ที่ โอดอร์ ไมแมน (Theodore Maiman) ได้ทำการศึกษาค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับแสงเลเซอร์ขึ้นที่สถาบันวิจัย ฮิวจ์ (Hughes Research Laboratories)

ที่โอดอร์ ไมแมนนำหลักการของซี. เอช.ทาวน์สมาประดิษฐ์เลเซอร์เครื่องแรกของโลกขึ้นโดยเป็นเลเซอร์ที่ทำจากทับทิม (Ruby Laser) จัดว่าเป็นเลเซอร์ของแข็งและในปีเดียวกันนั้นเองจาแวน (Javan) ก็ได้ประดิษฐ์ เลเซอร์ที่ทำจากก๊าซฮีเลียม-นีออนได้เป็นผลสำเร็จซึ่งถือว่าเป็นเลเซอร์แบบก๊าซ จากนั้นพัฒนาการเกี่ยวกับเทคโนโลยีเลเซอร์ก็พัฒนาต่อไปอย่างต่อเนื่อง มีการผลิตเลเซอร์ชนิดต่างๆ ออกมามากมาย ซึ่งมีทั้งที่ทำจาก ของแข็ง ของเหลว ก๊าซ และจากสารกึ่งตัวนำจำพวกไดโอด

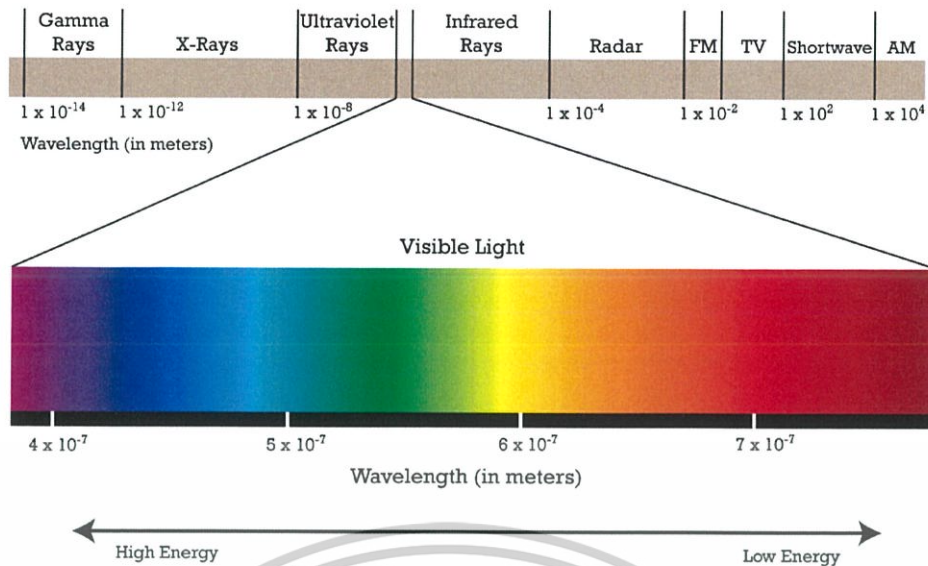
#### 2.1.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic disturbance) โดยการทำให้สนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก หรือถ้าสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวาง ประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่มีการสั่นในแนวตั้งฉากกัน และอยู่บนระนาบตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นที่เคลื่อนที่โดยไม่อาศัยตัวกลาง จึงสามารถเคลื่อนที่ในสุญญากาศได้

##### 1) สเปกตรัม (Spectrum)

สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะประกอบด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่และความยาวคลื่นแตกต่างกัน ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่ คลื่นแสงที่ตามองเห็น อัลตราไวโอเล็ต อินฟราเรด คลื่นวิทยุ โทรทัศน์ ไมโครเวฟ ริงส์เอกซ์ ริงส์แกมมา เป็นต้น ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

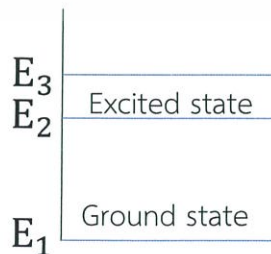


รูปที่ 2.1 Electromagnetic Spectrum

### 2.1.2 Energy level

อิเล็กตรอนยึดติดกับนิวเคลียสด้วยแรงทางไฟฟ้า แรงทางไฟฟ้านี้สามารถพิจารณาได้ในแง่ของพลังงานยึดเหนี่ยวระหว่างนิวเคลียสกับอิเล็กตรอน เนื่องจากวงโคจรของอิเล็กตรอนแต่ละวงอยู่ห่างจากโปรตอน (หรือนิวเคลียส) ไม่เท่ากัน แรงที่โปรตอนดึงดูดอิเล็กตรอนก็จะไม่เท่ากันไปด้วย เมื่อแรงไม่เท่ากันทำให้ความเร็วที่อิเล็กตรอนสั่นรอบโปรตอนไม่เท่ากัน ดังนั้นพลังงานของอิเล็กตรอนในแต่ละวงโคจรจึงไม่เท่ากัน

อิเล็กตรอนสามารถเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานได้โดยเปลี่ยนจาก Ground state ไปยัง Excited state โดย Energy level แสดงดังรูปที่ 2.2 พลังงานที่เป็นค่าลบหมายความว่าอิเล็กตรอนยึดเกาะอยู่กับอะตอม พลังงานที่มีค่าลบมากที่สุดคือวงโคจรที่อยู่ใกล้นิวเคลียสมากที่สุด ซึ่งจะหมายถึงพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนมากที่สุด ยิ่งอิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ พลังงานยึดเหนี่ยวจะลดลงเรื่อยๆ พลังงานเท่ากับศูนย์หมายความว่าอิเล็กตรอนเป็นอิสระจากอะตอม พลังงานที่เป็นค่าบวกหมายความว่าอิเล็กตรอนเป็นอิสระจากอะตอมรวมทั้งมีความเร็วด้วย ดังนั้นอิเล็กตรอนอิสระจึงมีพลังงานเป็นศูนย์หรือมีค่าที่เป็นค่าบวก ในกรณีของอะตอมพลังงานของอิเล็กตรอนไม่ได้เป็นเส้นกราฟที่ต่อเนื่อง พลังงานของอิเล็กตรอนจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงซึ่งจะเป็นแบบขั้นบันได นั่นคือค่าของพลังงานของอิเล็กตรอนจะมีได้เป็นบางค่า หรือค่าพลังงานจะไม่ต่อเนื่องนั่นเอง



รูปที่ 2.2 Energy level

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกอย่างหนึ่งคือ พลังงานของโฟตอน สามารถหาได้จากสมการที่ (2.1) และ (2.2)

$$E = h(\nu) = h\left(\frac{c}{\lambda}\right) \quad (2.1)$$

$$E = E_1 - E_2 \quad (2.2)$$

### 2.1.3 หลักการของเลเซอร์

การขยายแสงคือการเพิ่มจำนวนโฟตอนหรือเพิ่มความเข้มแสงให้มีมากขึ้นกว่าเดิม โดยปรกติอะตอมหรือโมเลกุลจะอยู่ในชั้นพลังงานต่ำเสมอ ( $E_1$ ) เพราะเป็นสภาวะที่มีความเสถียรภาพมากกว่า แต่เมื่ออะตอมหรือโมเลกุลถูกกระตุ้นก็จะเกิดการดูดกลืนแสงหรือพลังงานที่มากกระตุ้นทำให้อะตอมหรือโมเลกุลขึ้นไปอยู่ในชั้นพลังงานที่สูงกว่า ( $E_2$ ) แต่สถานะพลังงานในชั้นพลังงาน  $E_2$  นี้มีความไม่เสถียรจึงสามารถคงตัวได้เพียงชั่วระยะเวลาหนึ่งจึงคายพลังงานออกมาเพื่อทำให้ตัวเองอยู่ในสภาวะเสถียรอีกครั้งในชั้นระดับพลังงาน  $E_1$

ดังนั้นพลังงานที่อะตอมหรือโมเลกุลปล่อยออกมาจึงมีค่าเท่ากับผลต่างของพลังงานระหว่าง  $E_2 - E_1$  การคายพลังงานออกมาหรือการเปล่งแสงในลักษณะนี้ เป็นไปตามธรรมชาติเราเรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า เปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเอง (Spontaneous Emission)

แต่สำหรับการเปล่งแสงแบบถูกเร้า (Stimulated Emission) อันเป็นหลักการสำคัญของเลเซอร์นั้น จะแตกต่างกับการเปล่งแสงแบบเกิดขึ้นเองข้างต้น คือเมื่อ อะตอมหรือโมเลกุลขึ้นไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่าใน  $E_2$  และมีการฉายแสงเข้าไปโดยแสงที่ฉายเข้าไปนั้นจะต้องมีค่าพลังเท่ากับผลต่างของชั้นพลังงาน  $E_2 - E_1$  ที่อะตอมหรือโมเลกุลได้ดูดกลืนเอาไว้ และแสงที่เข้าไปนี้เองที่จะทำให้อะตอมหรือโมเลกุลคายพลังงานที่ดูดกลืนเอาไว้ก่อนเวลา ทำให้เกิดแสงที่มีขนาดเท่าๆกันทั้งแสงที่ถูกปล่อยออกมาและแสงที่ถูกฉายเข้าไปเพื่อเร้า มีทั้งพลังงานที่เท่ากัน มีทิศทางเคลื่อนที่เดียวกัน และเฟสของคลื่นที่เหมือนกันซึ่งหลักการอันนี้เองที่นำมาใช้กับเทคโนโลยีเลเซอร์

เมื่ออะตอมหรือโมเลกุลของเนื้อวัสดุที่นำมาใช้ทำเลเซอร์อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นดังกล่าว แสงเคลื่อนที่ผ่านเนื้อวัสดุของเลเซอร์ที่ถูกกระตุ้นก็ยิ่งทำให้เกิดการคายแสงมากขึ้นทำให้ความเข้มแสงเพิ่มขึ้นนั่นเอง หรือการได้ว่าจำนวนโฟตอนเพิ่มมากขึ้นนั่นเองหลักการนี้คือการขยายแสงเพื่อให้โฟตอนมีจำนวนมากพอ ซึ่งกระทำโดยการใส่กระจก 2 ชั้นวางขนานกันที่ปลายทั้งสองของเนื้อวัสดุ กระจกทั้งสองนี้เรียกว่า Optical Cavity ที่จะทำหน้าที่สะท้อนส่องให้โฟตอนวิ่งไปวิ่งมาในเนื้อวัสดุอันเป็นตัวกลางเลเซอร์จนได้ปริมาณมากพอและเมื่อมีความเข้มสูงจนเกิด Gain ที่มีค่ามากกว่าพลังงานของระบบลำแสงของเลเซอร์จึงพุ่งออกมา

จากที่กล่าวมาข้างต้นกระบวนการปลดปล่อยแสงจะเกี่ยวข้องกับ Einstein's coefficients ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งการดูดกลืน การปล่อยแสงแบบธรรมชาติ และการปล่อยแสงแบบกระตุ้นซ้ำสามารถหาได้โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดกลืน (Absorption) แสดงในสมการที่ (2.3)

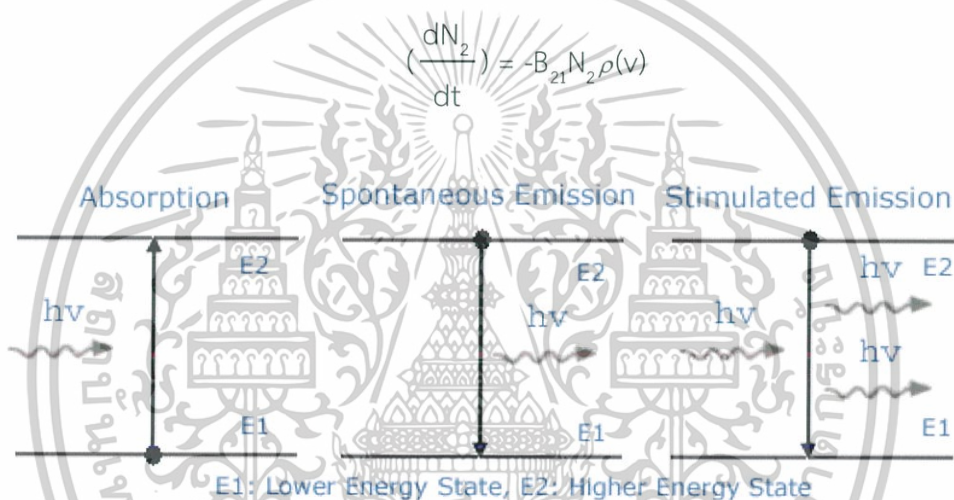
$$\left(\frac{dN_1}{dt}\right) = -B_{12}N_1\rho(\nu) \quad (2.3)$$

การปล่อยแสงแบบธรรมชาติ (Spontaneous emission) แสดงในสมการที่ (2.4)

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right) = -A_{21}N_2 \quad (2.4)$$

การปล่อยแสงแบบกระตุ้น (Stimulated emission) แสดงในสมการที่ (2.5)

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right) = -B_{21}N_2\rho(\nu) \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.3 Radiative processes with Einstein's constants.

#### 2.1.4 องค์ประกอบเลเซอร์ [1]

##### 1) Pump

Pump คือแหล่งพลังงานของพลังงานที่ถูกกระตุ้นของอะตอมในตัวกลางไปสู่ระดับชั้นที่ถูกกระตุ้นเพื่อสร้างประชากรผกผัน

##### 2) Laser medium

เป็นสารหรือวัสดุที่ทำให้เกิดแสงเลเซอร์ ที่มีโครงสร้างอะตอมหรือโมเลกุลเหมาะสมกับการเกิดเลเซอร์ ตัวอย่างเช่น ผลึกทับทิม (Ruby Crystal) แก๊สผสมระหว่างแก๊สฮีเลียมกับนีออน (He-Ne Gas) สารละลายสีย้อมผ้า (Dye Solution) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ฯลฯ

##### 3) Optical cavity

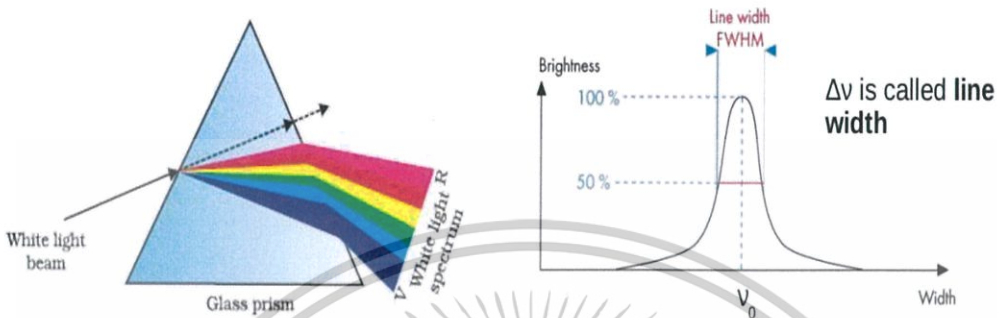
Optical cavity คือ ช่องว่างระหว่างกระจกเลเซอร์ ซึ่งกระจกที่ 1 จะสะท้อนแสง 100% และกระจกที่ 2 จะจัดเรียงแสงเข้าด้วยกันครั้งแล้วครั้งเล่า โดยที่แต่ละครั้งจะผ่านสื่อนำแสง โดอนหนึ่งในกระจกนั้น (Output coupler) จะส่งลำแสงออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.5 คุณสมบัติของเลเซอร์

#### 1) Monochromaticity

เลเซอร์แผ่รังสีที่มีความยาวคลื่นเดียว (สีเดียว) สามารถดูได้จากการที่มีความกว้างของเส้นที่แคบมากๆ



รูปที่ 2.4 แสงผ่านปริซึม (ซ้าย). รูปร่างของเส้นลำแสงเลเซอร์ (ขวา)

$$E_2 - E_1 = h\nu$$

$$\lambda_0 = c/\nu$$

(2.6)

$\lambda_0$  คือ จุดตรงกลางของความยาวคลื่น

$\Delta\lambda$  คือ FWHM (wavelength) linewidth

$\Delta\nu$  คือ ความถี่ของเส้น

#### 2) Coherence

หลอดไฟฟ้าที่เปล่งแสงประกอบด้วยอะตอมที่เล็กจำนวนมาก โดยแต่ละอะตอมจะทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดแสง ดังนั้นแต่ละอะตอมก็เปล่งแสงออกมาอย่างอิสระซึ่งกันและกัน แสงที่ถูกปล่อยออกมาจากหลอดไฟจึงมีเฟส และความยาวคลื่นต่างกันไป ยิ่งกว่านั้นแต่ละคลื่นที่ถูกปล่อยออกมามีทิศทางไม่แน่นอน หรือเป็น random แสงจากแหล่งต้นกำเนิดแสงธรรมดาโดยทั่วไปจะเรียกว่า แสงอินโคฮีเรนต์ (Incoherence light) ต้นกำเนิดของแสงเลเซอร์นอกจากจะให้แสงสีเดียวทุกๆ คลื่นของแสงเลเซอร์จะมีเฟสเดียวกันหมด ดังนั้นแสงเลเซอร์จึงเรียกว่า แสงโคฮีเรนต์ (Coherence light) ระยะความเป็นอาพันธ์ เวลาความเป็นอาพันธ์ และความถี่ของเส้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.7) สมการที่ (2.8) และ สมการที่ (2.9) ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระยะความเป็นอาพันธ์ (Coherence length)

$$L_c = ct_c \quad (2.7)$$

เวลาความเป็นอาพันธ์ (Coherence time)

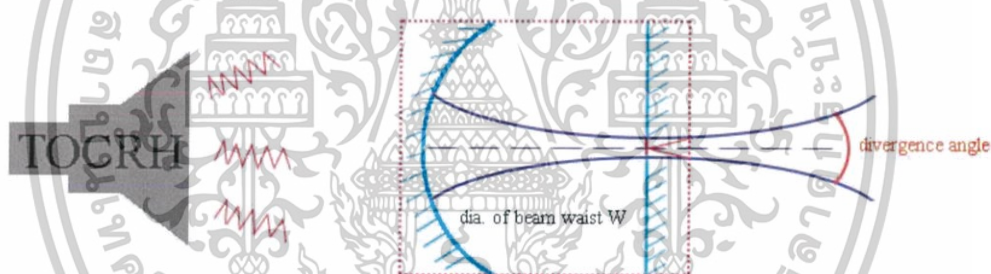
$$t_c \approx 1/\Delta\nu \quad (2.8)$$

ซึ่ง  $\Delta\nu$  หาได้จาก

$$\Delta\nu = c\Delta\lambda / \lambda_0^2 \quad (2.9)$$

### 3) Directionality

ลำแสงเลเซอร์จะขนานกันไปตลอดระยะทางไกลๆ ไม่มีการบานปลายออก ดังนั้นความเข้มของแสงเลเซอร์จะลดลงน้อยมากในระยะทางไกลๆ ซึ่งในรูปที่ 2.5 แสดงถึงการปล่อยลำแสงไฟฉายกับเลเซอร์



รูปที่ 2.5 แสดงถึงการปล่อยลำแสงของไฟฉายกับเลเซอร์

### 4) Intensity

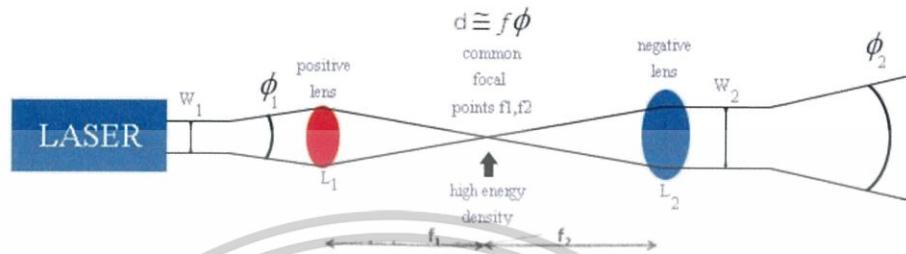
แสงเลเซอร์จะมีความเข้มแสงค่อนข้างสูง ความเข้มแสงจะลดลงน้อยมากในระยะทางไกลๆ สามารถหาค่าความเข้มแสงได้ในเทอมของอัตราการส่งออกและรังสี แสดงในสมการที่ (2.10)

$$\text{Photon output rate} = \frac{1}{\lambda^2} \frac{1}{e^{h\nu / kT} - 1} \Delta A \Delta\nu \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5) Focusability

แสงเลเซอร์สามารถโฟกัสเป็นจุดเล็กๆได้โดยผ่านเลนส์นูน จะแสดงแนวคิดการขยายลำแสงเลเซอร์ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แนวคิดการขยายลำแสงเลเซอร์

ขนาดของจุดลำแสงโฟกัสหาได้จาก

$$d \cong f\phi$$

(2.11)

2.1.6 ประเภทของเลเซอร์

เลเซอร์สามารถแบ่งได้หลากหลายแบบดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแบ่งชนิดของเลเซอร์

Classification	Examples
Active medium	Gas, Solid, Liquid lasers
Emission wavelength	IR, Vis, UV
Output power	0.1 mW – 600 W
Beam spot	0.4 mm – 4 cm
Beam divergence	0.2 -18 mrad

2.2 Lidar (Light Detection and Range)

เป็นระบบค้นหาวัตถุเหมือนกับระบบเรดาร์ แต่ใช้แสงเลเซอร์แทนการใช้คลื่นสัญญาณวิทยุในเรดาร์ซึ่งทำให้มีความแม่นยำมากกว่า ในปัจจุบัน Lidar ใช้เป็นเซนเซอร์สำหรับรถขับเคลื่อนอัตโนมัติ โดยที่เซนเซอร์ Lidar ใช้ค้นหาวัตถุรอบรถ อีกทั้งนั้นยังใช้ในการสำรวจทางโบราณคดีโดยใช้ดาวเทียมที่มีระบบ Lidar

2.2.1 Lidar lite v3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่เผยแพร่โดยสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) ซึ่งสามารถใช้ในการค้าขายและเผยแพร่ได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย แต่ขอสงวนสิทธิ์ในกรณีที่มีการนำข้อมูลไปใช้ในการค้าขายหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน) ขอสงวนสิทธิ์ในกรณีที่มีการนำข้อมูลไปใช้ในการค้าขายหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากสถาบันวิจัยและพัฒนาพื้นที่สูง (องค์การมหาชน)

ได้มาตรฐาน ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.7 โดยประสิทธิภาพของ Lidar lite v3 แสดงในตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของเลเซอร์แสดง [2] ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 แสดงประสิทธิภาพของ Lidar lite v3

Specification	Measurement
Range (70%) reflective target	40 m (131 ft.)
Resolution	+/- 1 cm (0.4 in.)
Accuracy < 5 cm	±2.5 cm (1 in.) typical*
Accuracy ≥ 5 cm	±10 cm (3.9 in.) typical Mean ±1% of distance maximum Ripple ±1% of distance maximum
Update rate (70% Reflective Target)	270 Hz typical 650 Hz fast mode** >1000 Hz short range only
Repetition rate	~50 Hz default 500 Hz max

ตารางที่ 2.3 แสดงคุณสมบัติของเลเซอร์

Specification	Measurement
Wavelength	905 nm (nominal)
Total laser power (peak)	1.3 W
Mode of operation	Pulsed (256 pulse max. pulse train)
Pulse width	0.5 μs (50% duty Cycle)
Pulse train repetition frequency	10-20 KHz nominal
Energy per pulse	<280 nJ
Beam diameter at laser aperture	12 x 2 mm (0.47 x 0.08 in.)
Divergence	8 mRadian



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1.1 ทฤษฎีการดำเนินงาน

ในการวัดค่าอุปกรณ์นี้จะทำการปรับค่าความสอดคล้องของตัวรับสัญญาณก่อนเป็นประจำเพื่อแก้ไขระดับแสงโดยรอบและให้ความไวสูงสุด จากนั้นอุปกรณ์จะส่งสัญญาณอ้างอิงจากเครื่องส่งสัญญาณไปที่ผู้รับและจัดเก็บ signature หลังจากนั้นอุปกรณ์จะกำหนดเวลาล่าช้าสำหรับระยะทางที่ "ศูนย์" คำนวณความล่าช้านี้เป็นระยะ ๆ หลังจากการวัดหลายครั้งถัดไปอุปกรณ์จะเริ่มการวัดด้วยการทำชุดของสิ่งที่ได้มา การได้รับข้อมูลแต่ละครั้งคือการส่งสัญญาณเลเซอร์หลักในขณะที่การบันทึกสัญญาณย้อนกลับที่เครื่องรับ ถ้ามีการจับคู่สัญญาณผลลัพธ์จะถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำเป็นบันทึกความสัมพันธ์ การรวบรวมครั้งต่อไปจะสรุปกับผลก่อนหน้านี้ เมื่อวัตถุในระยะทางหนึ่งสะท้อนให้เห็นถึงสัญญาณเลเซอร์กลับไปยังอุปกรณ์ที่ได้มาช้าๆ เหล่านี้ทำให้เกิดยอดเกิดขึ้นจากเสียงรบกวนที่ตำแหน่งระยะทางที่สอดคล้องกันในความสัมพันธ์ที่บันทึกไว้

อุปกรณ์ดังกล่าวรวมสิ่งที่ได้มาไว้จนกว่าสัญญาณจะมีค่าสูงสุดในความสัมพันธ์ระยะเปลี่ยนถึงค่าสูงสุด ถ้าสัญญาณกลับไม่แข็งแรงพอสำหรับอุปกรณ์นี้จะเกิดขึ้นอุปกรณ์จะหยุดที่การได้รับสูงสุดที่กำหนดไว้ล่วงหน้า

ความแรงของสัญญาณคำนวณจากขนาดของจุดสูงสุดของการบันทึกสัญญาณและเกณฑ์สัญญาณที่ถูกต้องถูกคำนวณจากพื้นเสียงรบกวน ถ้าจุดสูงสุดคือเหนือเกณฑ์นี้การวัดถือว่าถูกต้องและอุปกรณ์จะคำนวณระยะทางมีฉะนั้นจะรายงาน 1 ซม. เมื่อเริ่มต้นต่อไปการวัดอุปกรณ์จะล้างการบันทึกสัญญาณและเริ่มการทำงานของซีควเอนซ์อีกครั้ง

การหาระยะทางที่เลเซอร์ตรวจจับได้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.12)

$$D = \frac{\text{Pulse width}}{10 \mu\text{s/cm}} \quad (2.12)$$

## 2.3 รูปแบบการส่งข้อมูล

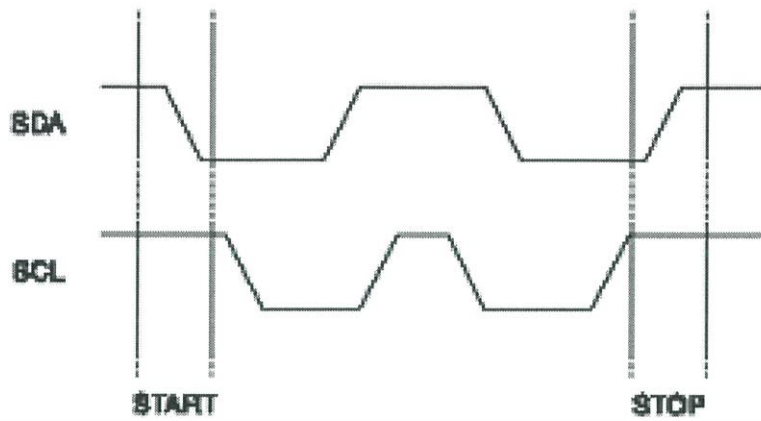
### 2.3.1 I2C (Inter-IC Communication)

เป็นระบบสื่อสารข้อมูลที่ใช้สาย 2 สายในการส่งข้อมูลคือสาย SDA (Serial Data Line) และสาย SCL (Serial Clock Line) สาย SDA คือสายที่ใช้ในการส่งข้อมูล และสาย SCL เป็นสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในการกำหนดจังหวะการทำงาน ระบบ I2C Bus นี้ได้รับการพัฒนาจากบริษัทฟิลิป ในปัจจุบันมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หลายตัวที่ใช้ระบบนี้ในการสื่อสาร ด้วยเหตุผลที่ว่าใช้สายสัญญาณน้อย รับส่งด้วยความเร็วสูง และสามารถต่อพ่วงอุปกรณ์ได้หลายตัว ทำได้โดยการกำหนด Address ของแต่ละตัวไม่ให้เหมือนกัน คือ

- Master คืออุปกรณ์ที่ทำการส่งข้อมูล
- Slave คืออุปกรณ์ที่รับข้อมูล

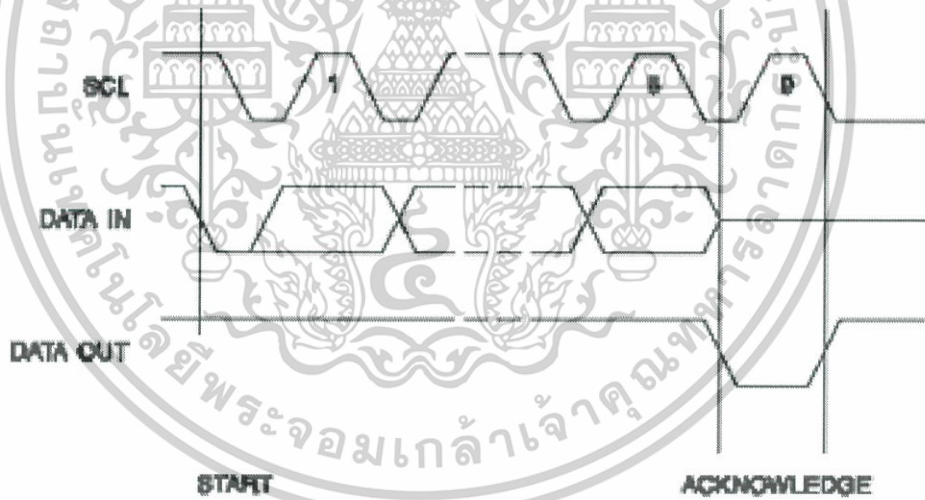
ในการที่จะเริ่มติดต่อกับระบบ I2C Bus จำเป็นต้องมีการสร้างเงื่อนไขของสายสัญญาณเพื่อให้อุปกรณ์ Slave เตรียมตัวรับข้อมูล เงื่อนไขคือให้ SCL = 1 และให้ SDA เปลี่ยนจาก 1 เป็น 0 ดังรูปภาพ ส่วนการหยุดการสื่อสารทำได้โดย ให้ SCL = 1 และให้ SDA เปลี่ยนจาก 1 เป็น 0 ดังรูปที่ 2.8 [3]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 กำหนดจุดเริ่มต้นกับจุดสิ้นสุด

เมื่ออุปกรณ์มาสเตอร์ทำการส่งข้อมูลให้อุปกรณ์ Slave ครบ 8 บิตแล้ว อุปกรณ์ Slave ต้องทำการบอกว่าได้รับข้อมูลครบแล้ว โดยการส่งบิต acknowledge ออกไปที่สาย SDA ให้อุปกรณ์มาสเตอร์รู้เพื่อที่จะได้ส่งข้อมูลถัดไปให้อุปกรณ์ Slave จากรูปบิต acknowledge จะส่งออกไปจากอุปกรณ์ Slave ในสัญญาณนาฬิกาลูกที่ 9 การส่งบิต acknowledge ออกไปทำให้สถานะที่สาย SDA มีค่าลอจิก 0 ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.9

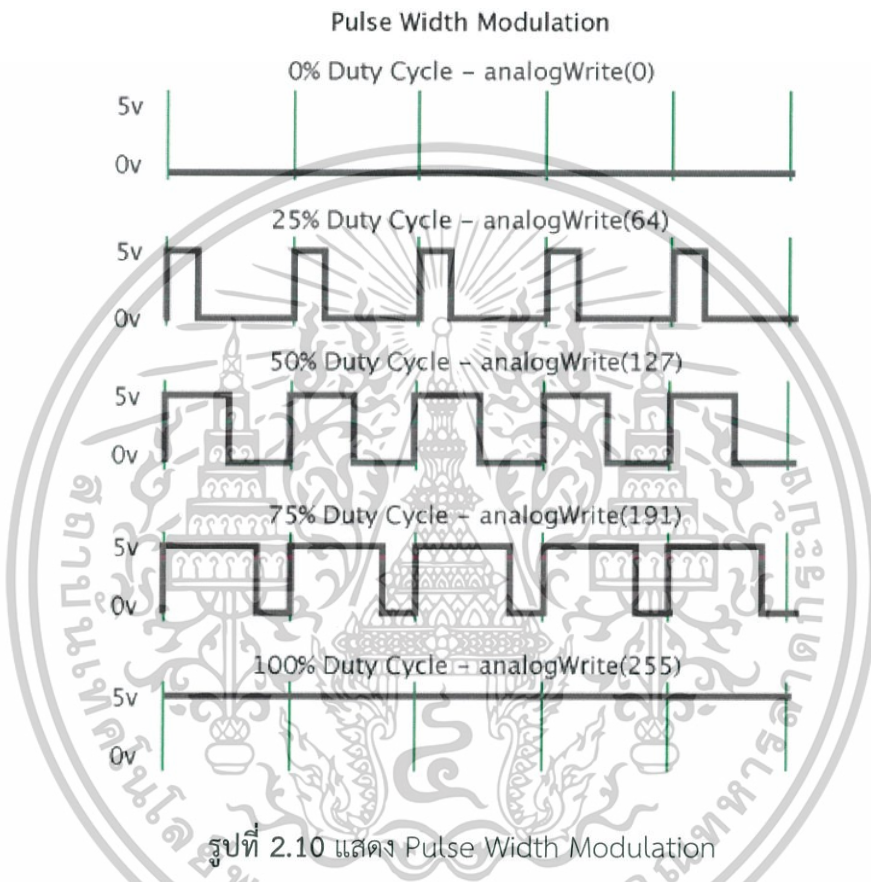


รูปที่ 2.9 Acknowledge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 PWM (Pulse width modulate)

PWM คือเทคนิคการส่งสัญญาณแบบสวิตช์ หรือ ส่งค่าดิจิทัล 0-1 โดยให้สัญญาณความถี่คงที่ การควบคุมระยะเวลาสัญญาณสูงและสัญญาณต่ำ ที่ต่างกัน ก็จะทำให้ค่าแรงดันเฉลี่ยของสัญญาณสวิตช์ ต่างกันด้วย สำหรับโมดูล PWM ของ Arduino มีความละเอียด 8 bit หรือ ปรับได้ 255 ระดับ ดังนั้นค่าสัญญาณ 0 โวลต์ถึง 5 โวลต์ จะถูกแสดงเป็นสัญญาณแบบดิจิทัล จะได้ 0 ถึง 255 ซึ่งเราสามารถเทียบสัดส่วนคำนวณจากเลขจริง เป็น เลขทางดิจิทัลได้ [4] ซึ่งแสดงในภาพที่ 2.10



## 2.4 ไม้เท้าขาว (White cane)

### 2.4.1 ประวัติไม้เท้าขาว

คนตาบอดได้ใช้ไม้เท้าเพื่อการเดินทางอย่างอิสระเป็นเวลาหลายพันปี ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาคนตาบอดมีเหตุผลที่แตกต่างกันในการใช้ไม้เท้า บางคนใช้เพื่อป้องกันสุนัขขณะที่คนอื่น ๆ ใช้ไม้เท้าเพื่อเตือนคนว่าพวกเขากำลังลงมาที่ถนน ไม้เท้าขาวที่ทันสมัยตามที่เรารู้จักจนกระทั่งถึงสมัยสงครามโลกครั้งที่ 1 มีการถกเถียงกันมากกว่าประเทศใดพัฒนาไม้เท้าขาวเป็นอันดับแรก อย่างไรก็ตามการใช้แท่งสีขาวกลายเป็นเรื่องปกติธรรมดาในยุโรปแล้วย้ายไปอเมริกาเหนือจนกระทั่งถึงช่วงสงครามโลกครั้งที่สองมีการสร้างไม้เท้าที่เพียงพอและการพัฒนาระบบการฝึกอบรมทหารผ่านศึกที่ตาบอดไปใช้ พร้อมกับการพัฒนาของไม้เท้าที่มีประโยชน์และเทคนิคที่เหมาะสมตามกฎหมายเพื่อให้คนตาบอดสามารถเข้าถึงพื้นที่สาธารณะและอาคารได้อย่างเท่าเทียมกัน [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.2 ความยาวของไม้เท้าขาว

ไม้เท้าขาวควรมีความยาว 42 นิ้ว ไปจนถึง 60 นิ้ว โดยไม้เท้าขาวแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ไม้เท้าขาว

### 2.4.3 วัสดุของไม้เท้าขาว

1) Aluminum tube อลูมิเนียมค่อนข้างหนักและแข็งแรง พวกเขาไม่ได้ทำละลาย ถ้าอ่อนน้อยพวกเขาก็จะยืดตัวออก ด้วยแรงกดดันเพียงเล็กน้อยพวกเขาจะงอ คนจำนวนน้อยมากมีความสามารถในการประสานไม้เท้าให้เข้ากับสภาพเดิม ไม้เท้าอเล็กซ์น้อยอาจดูไม่สวยเท่าเนื้อตรง แต่สามารถเชื่อมั่นได้เป็นเวลานาน

2) Solid fiber glass มีทั้งแข็งแรงและยืดหยุ่นและผสมผสานของคุณภาพ มีน้ำหนักน้อยกว่าไม้เท้า ไฟเบอร์กลาสที่เป็นของแข็งจะโค้งงอและยืดตัว หากผู้ใช้โค้งงอผ่านจุดหนึ่ง พวกเขาจะใช้จะแบ่งเป็นเศษยาวซึ่งเป็นอันตรายต่อการสัมผัส

3) Fiber glass ไฟเบอร์กลาสมีน้ำหนักเบาและใช้งานง่ายมาก มันมีการตีกลับที่ดีไป แต่จะใช้เวลาโค้งปานกลางโดยไม่ทำลาย นั่นคือไม่อาจทนต่อการสะดุดใครได้ เมื่อมันแตกหักกลวงไฟเบอร์กลาสมีแนวโน้มที่จะบดขยี้และแตกสลายเร็ว ๆ นี้

4) Carbon fiber เส้นใยคาร์บอนไฟเบอร์ค่อนข้างแข็งแรงและมีการตีกลับเล็กน้อยเท่านั้น น้ำหนักเบาและใช้งานง่าย เมื่อเทียบกับใยแก้วลวงคาร์บอนไฟเบอร์มีความแข็งแรงและใช้เวลานานกว่าเล็กน้อยหลังจากหยุดพัก

## 2.5 โปรแกรม C++

ภาษาของการเขียนโปรแกรมใช้งาน Arduino Board ใช้ภาษา C/C++ โดยประกอบด้วย Structure, values (variables and constants) และ Functions [6]

### 2.5.1 ฟังก์ชันหลัก(Structure)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เป็นฟังก์ชันหลักในการเขียนโปรแกรม จำเป็นต้องมีในทุกโปรแกรม ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1) **Setup()** คือ ฟังก์ชันใช้ในการประกาศค่าเริ่มต้น ตำแหน่งพอร์ตที่ใช้งาน รวมถึง ฟังก์ชันที่อยู่โลบาร์ที่ใช้งาน เป็นฟังก์ชันที่ทำงานเพียงครั้งเดียว จะทำงานทุกครั้ง ที่มีการรีเซต หรือ รีบูตเครื่องใหม่ เท่านั้น

2) **loop ()** คือ ฟังก์ชันใช้ในการเขียนโค้ดโปรแกรมการทำงานของ Arduino เป็นฟังก์ชัน การวนลูปไป

### 2.5.2 ชุดคำสั่งในการควบคุม (Control Structures)

เป็นชุดคำสั่งในการใช้ในการตัดสินใจหาทางออก เพื่อใช้ในการทำงาน

1) **If** คือ คำสั่งในการตัดสินใจ แบบตัวเลือกเดียว โดยใช้งานร่วมกับ And, Or Not, ==, !=, <, > เพื่อใช้ในการตัดสินใจในการหาคำตอบ

2) **If...Else** คือ คำสั่งในการตัดสินใจ แบบหลายตัวเลือก โดยใช้งานร่วมกับ And, Or Not, ==, !=, <, > เพื่อใช้ในการตัดสินใจในการหาคำตอบ

3) **For** คำสั่ง FOR เป็นคำสั่งกำหนดเงื่อนไขเป็นจำนวนครั้งที่จะทำตามชุดคำสั่งต่าง ๆ ภายใน loop เหมาะที่จะใช้กับงานประเภทที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง

4) **Switch case** คำสั่ง switch case ใช้ในการจัดการเงื่อนไขหลายเงื่อนไขโดยเฉพาะ การใช้งานโครงสร้าง การจำแนกเงื่อนไขไม่จำเป็นต้องอาศัยเฉพาะตัวแปรที่เก็บค่าจำนวนเต็มเท่านั้น ข้อมูลแบบอื่นก็ใช้ได้

5) **Do... while** คำสั่ง do while เป็นคำสั่งที่กำหนดให้มีการทำงานวนรอบ คล้าย ๆ คำสั่ง while แต่แตกต่างกันที่คำสั่ง do while จะให้ทำคำสั่งใน loop do ก่อน แล้วค่อยพิจารณาเงื่อนไขใน while ถ้าค่าเงื่อนไขใน while เป็นจริง จึงจะวนรอบทำคำสั่งในลูป do ต่อไป

6) **Break** คำสั่ง break เป็นคำสั่งที่ให้โปรแกรมออกจาก loop ทันที โดยไม่ทำคำสั่งที่เหลือต่อ ส่วนมาก ก่อนจะใช้คำสั่งนี้ ก็จะมีการตรวจสอบอะไรซักอย่างเสียก่อน ซึ่งคำสั่ง break นี้ สามารถใช้ได้กับ loop หลาย ๆ loop ไม่ว่าจะเป็น while, do while, for, switch และอื่น ๆ

7) **Continue** คำสั่ง continue ใช้สำหรับสั่งให้กลับไปเริ่มต้นที่จุดเริ่มต้นใหม่ ใช้ร่วมกับ คำสั่งการวนลูปต่างๆจะต่างกับคำสั่งเพราะว่า คำสั่ง break นั้นจะเป็นคำสั่งเพื่อออกจาก loop ส่วน คำสั่ง continue นั้นจะเป็นคำสั่งเพื่อกระโดดไปยังต้น

8) **Return** คำสั่ง return คือคำสั่งที่ส่งค่าอะไรก็ได้กลับออกไปจากฟังก์ชัน

9) **goto** คำสั่ง goto เป็นคำสั่งที่ทำให้ กระโดดไปทำบรรทัดนั้น

10) **{}** (curly braces) วงเล็บปีกกาหรือ {} เป็นส่วนที่สำคัญของการเขียนโปรแกรม ภาษา C มีการใช้ในโครงสร้างที่แตกต่างกันหลายประการที่ระบุ และบางครั้งอาจจะทำให้เกิดความ สับสน

11) **// (single line comment)** คำสั่งสำหรับอธิบายหรือ comment ในภาษาซี คือ ส่วนที่หมายถึงเหตุของโปรแกรมมีไว้เพื่อให้ผู้เขียนโปรแกรมอธิบายกำกับลงไป ใน source code ซึ่ง คอมไพเลอร์จะข้ามการแปลผลในส่วนที่เป็นคอมเม้น ส่วนของ // (single line comment) จะเป็นการคอมเม้นบรรทัดเดียว

12) **/\* \*/ (multi-line comment)** คำสั่งสำหรับอธิบายหรือ comment ในภาษาซี คือ ส่วนที่หมายถึงเหตุของโปรแกรมมีไว้เพื่อให้ผู้เขียนโปรแกรมอธิบายกำกับลงไป ใน source code ซึ่ง

คอมไพเลอร์จะข้ามการแปลผลในส่วนที่เป็นคอมเม้น ส่วนของ /\* \*/ (multi-line comment) จะเป็นการคอมเม้นหลายบรรทัด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ฟังก์ชัน ยักทิ้งให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13) #define Define เป็นการกำหนดค่านิพจน์ต่างๆ ให้กับชื่อของตัวคงที่

14) #include การกำหนดชื่อไฟล์ตามหลัง Include จะใช้เครื่องหมาย <>ซึ่งจะเป็นการอ่านไฟล์จากไดเรกทอรี หรือโพลเดอร์ที่กำหนดไว้ก่อนแล้ว โดยปกติจะเป็นโพลเดอร์ include แต่ถ้าใช้เครื่องหมาย “ ” เป็นการอ่านไฟล์จาก โพลเดอร์ หรือ ไดเรกทอรี ที่กำลังติดต่อยู่และไฟล์ที่จะ include เข้ามานี้จะต้องไม่มีฟังก์ชัน main() โดยมากจะประกอบไปด้วยโปรแกรมย่อย ค่าคงที่ หรือ ข้อความต่างๆ

### 2.5.3 Arithmetic Operators

1) = (Assignment Operator) เครื่องหมาย = หมายถึง นำค่าจาก operand ฝั่งขวา ไปใส่ใน operand ฝั่งซ้าย

2) + (Addition) เครื่องหมาย + หมายถึง การบวก

3) - (Subtraction) เครื่องหมาย - หมายถึง การลบ

4) \* (Multiplication) เครื่องหมาย \* หมายถึง การคูณ

5) / (Division) เครื่องหมาย / หมายถึง การคูณ

6) % (Modulo) เครื่องหมาย % หมายถึงหาเศษจากการหาร

### 2.5.4 Comparison Operators

1) == (equal to) เครื่องหมาย == หมายถึงเท่ากับ

2) != (not equal to) เครื่องหมาย != หมายถึงไม่เท่ากับ

3) < (less than) เครื่องหมาย < หมายถึงน้อยกว่า

4) > (greater than) เครื่องหมาย > หมายถึงมากกว่า

5) <= (less than or equal to) เครื่องหมาย <= หมายถึงมากกว่าหรือเท่ากับ

6) >= (greater than or equal to) เครื่องหมาย >= หมายถึงน้อยกว่าหรือเท่ากับ

### 2.5.5 Boolean Operators

1) && (and) เครื่องหมาย&& (and) หมายถึง และ (and)

2) || (or) เครื่องหมาย|| (or) หมายถึง หรือ (or)

3) ! (not) เครื่องหมาย! (not) หมายถึง ไม่ (not)

### 2.5.6 Pointer Access Operators

1) \* dereference operator \* dereference operator หมายถึงตัวดำเนินการ คูณ

2) & reference operator & dereference operator หมายถึงตัวดำเนินการและ

### 2.5.7 Bitwise Operators

1) & (bitwise and) เครื่องหมาย& (bitwise and) หมายถึง การ and บิตต่อบิต

2) | (bitwise or) เครื่องหมาย| (bitwise or) หมายถึง การ or บิตต่อบิต

3) ^ (bitwise xor) เครื่องหมาย^ (bitwise xor) หมายถึง การ xorบิตต่อบิต

4) ~ (bitwise not) เครื่องหมาย~ (bitwise not) หมายถึง การกลับบิตทั้งหมดเป็นค่า

ตรงกันข้าม

5) << (bitshift left) เครื่องหมาย<< (bitshift left) หมายถึง การเลื่อนบิตมาทางซ้าย

6) >> (bitshift right) เครื่องหมาย>> (bitshift left) หมายถึง การเลื่อนบิตมาทางขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.8 Compound Operators

- 1) ++ (increment) เครื่องหมาย++ (increment) หมายถึง การเพิ่มค่าหนึ่งค่าให้กับตัวแปร
- 2) -- (decrement) เครื่องหมาย-- (decrement) หมายถึง การลดค่าหนึ่งค่าให้กับตัวแปร
- 3) += (compound addition) เครื่องหมาย+= (compound addition) หมายถึง การบวกค่าให้กับตัวแปร
- 4) -= (compound subtraction) เครื่องหมาย-= (compound subtraction) หมายถึง การลบค่าให้กับตัวแปร
- 5) \*= (compound multiplication) เครื่องหมาย\*= (compound multiplication) หมายถึง การคูณค่าให้กับตัวแปร
- 6) /= (compound division) เครื่องหมาย/= (compound division) หมายถึง การหารค่าให้กับตัวแปร
- 7) &= (compound bitwise and) เครื่องหมาย&= (compound bitwise and) หมายถึง การ and ค่าให้กับตัวแปร

## 2.5.9 Variables

- 1) Constants เป็นค่าคงที่ตัวแปรที่กำหนดไว้ล่วงหน้าคือตัวอักขระที่นำมาประกอบกัน ตั้งแต่ 1 ตัวอักขระขึ้นไป เพื่อบอกลักษณะอย่างใดอย่างหนึ่งของข้อมูล INPUT | OUTPUT| INPUT\_PULLUP ค่าคงที่เหล่านี้แสดงถึงระดับลอจิกที่ขาไอซีว่าเป็น HIGH หรือ LOW และใช้เมื่อมีการอ่านหรือเขียนไปที่ขาไอซี HIGH จะแทนระดับลอจิก 1, ON, หรือ 5 volts ในขณะที่ LOW คือระดับลอจิก 0, OFF, หรือ 0 volts
- 2) True | False ค่าเหล่านี้เป็นค่าคงที่ Boolean ซึ่งบอกสถานะระดับลอจิก FALSE หมายถึง 0(ศูนย์) ในขณะที่ TRUE จะหมายถึง 1, หรืออะไรก็ได้ที่ไม่ใช่ ศูนย์ ดังนั้นในทางลอจิกแล้ว -1, 2, -200 จะหมายถึง TRUE
- 3) Integer constants เป็นตัวแปรพื้นฐานที่เก็บตัวเลขโดยไม่มีจุดทศนิยม และเก็บค่า 16 bit มีค่าระหว่าง 32,767 ถึง -32,768
- 4) Floating point constants เป็นตัวแปรพื้นฐานที่เก็บตัวเลขโดยไม่มีจุดทศนิยม และเก็บค่า 16 bit มีค่าระหว่าง 32,767 ถึง -32,768
- 5) Boolean เป็นค่าคงที่ มีสองค่า คือ true และ false
- 6) Char ข้อมูลชนิดอักขระ ใช้เนื้อที่ 1 byte
- 7) Unsigned char ข้อมูลชนิดอักขระ ไม่คิดเครื่องหมาย
- 8) Byte ตัวแปร byte เก็บตัวเลข 8 bit ไม่มีทศนิยม มีค่า 0 - 255
- 9) Int เป็นตัวแปรพื้นฐานที่เก็บตัวเลขโดยไม่มีจุดทศนิยม และเก็บค่า 16 bit มีค่าระหว่าง 32,767 ถึง -32,768
- 10) UnsignedInt ข้อมูลชนิดจำนวนเต็ม ไม่คิดเครื่องหมาย
- 11) Word ค่าเก็บ 16 บิต เก็บค่าตั้งแต่ 0-65535 เช่นเดียวกับ int
- 12) Long เป็นตัวแปรจำนวนเต็มแบบขยายโดยไม่มีจุดทศนิยม เก็บค่าแบบ 32 bit มีค่าระหว่าง 2,147,483,647 ถึง -2,147,483,648

เอกสารนี้เป็นเอกสารหนึ่งของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางสถาบันฯ ถือว่าผิดกฎหมายและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 13) Unsigned long ข้อมูลชนิดจำนวนเต็มแบบยาว ไม่คิดเครื่องหมาย
- 14) Short ข้อมูลชนิดจำนวนเต็มแบบสั้น ใช้เนื้อที่ 1 byte
- 15) Float ตัวแปรชนิด floating-point หรือตัวแปรที่มีจุดทศนิยม ตัวแปรนี้มีค่ามากกว่าค่าของตัวแปรจำนวนเต็ม โดยใช้เนื้อที่เก็บ 32 bit
- 16) Double ข้อมูลชนิดเลขทศนิยม ใช้เนื้อที่ 8 byte
- 17) String - char array จะมีการเก็บข้อมูลอยู่ 2 ส่วน ส่วนแรกจะเป็นข้อมูลตัวอักษร โดยเก็บเรียงกันไป แะส่วนที่ 2 จะเก็บจุดสิ้นสุดของสตริง
- 18) String - object การเก็บข้อมูลของสตริงบนหน่วยความจำ
- 19) Array ตัวแปร arrays หรือตัวแปรหลายมิติเป็นตัวแปรที่สามารถเข้าถึงได้ด้วยค่าตัวชี้หรือ index ค่าตัวแปรใน array อาจเรียกใช้โดยระบุชื่อ array และระบุตัวชี้ index number ตัวแปร array จะมี index เริ่มต้นจาก 0 ตัวแปร array จะต้องตั้งค่า ก่อนจะนำไปใช้งาน และอาจกำหนดค่าเริ่มต้นหรือไม่ก็ได้

#### 2.5.10 Conversion การแปลงค่า

- 1) Char () แปลงค่าข้อมูลให้เป็น char
- 2) Byte () แปลงค่าข้อมูลให้เป็น byte
- 3) Int () แปลงค่าข้อมูลให้เป็น int
- 4) Word () แปลงค่าข้อมูลให้เป็น word
- 5) Long () แปลงค่าข้อมูลให้เป็น long
- 6) Float () แปลงค่าข้อมูลให้เป็น float

#### 2.5.11 Variable Scope & Qualifiers

1) Variable scope ตัวแปรสามารถตั้งค่าตอนเริ่มต้นโปรแกรมก่อน void setup (), หรือตั้งค่าตัวแปรภายในฟังก์ชัน, และบางครั้งก็ตั้งค่าตัวแปรภายในกลุ่มคำสั่ง for loop ซึ่งการตั้งค่าตัวแปรในแบบต่างๆ มีผลถึงขอบเขตการใช้ตัวแปร, หรืออีกนัยหนึ่งการที่โปรแกรมจะสามารถใช้ตัวแปรนั้น ตัวแปรแบบ global เป็นตัวแปรที่โปรแกรมมองเห็นและใช้งานได้จากทุกฟังก์ชันและทุกกลุ่มคำสั่งในโปรแกรม ตัวแปรนี้จะตั้งค่าที่ตอนเริ่มต้นโปรแกรม, ก่อน setup () function ตัวแปรแบบ local เป็นตัวแปรที่ตั้งค่าภายในฟังก์ชันหรือภายในกลุ่มคำสั่ง for loop ตัวแปรนี้จะมองเห็นและใช้งานได้เฉพาะภายในฟังก์ชันที่มันตั้งค่า ชื่อตัวแปรแบบนี้อาจมีชื่อซ้ำกันในแต่ละฟังก์ชัน แต่ในการทำงานฟังก์ชันแต่ละตัวจะใช้ตัวแปรตัวนั้นเฉพาะที่ตั้งค่าภายในตัวมันเท่านั้น

2) Static คำหลักแบบคงที่ใช้ในการสร้างตัวแปร ได้เพียงหนึ่งฟังก์ชัน

3) Volatile Volatile เอาไว้บอกคอมไพเลอร์ว่าตัวแปรที่ถูกประกาศมีโอกาสที่จะถูกเปลี่ยนค่าได้

4) Const คำหลัก const ย่อมาจากค่าคงที่ มันเป็นตัวแปรที่ปรับเปลี่ยนพฤติกรรมของตัวแปรที่ทำให้ตัวแปร "อ่านอย่างเดียว"

5) Utilities sizeof () นับจำนวน element ใน array

#### 2.5.12 Functions

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Pin Mode () Pin Mode ใช้ในกลุ่ม void setup () เพื่อกำหนดหน้าที่ขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ให้เป็น ขารับสัญญาณ INPUT หรือขาส่งสัญญาณ OUTPUT

- Digital Write () Digital Write คือส่งค่าลอจิก HIGH หรือ LOW (เปิด หรือ ปิด) ไปยังขา digital ที่กำหนดหมายเลขขาไอซีอาจกำหนดเป็นตัวแปรหรือค่าคงที่ (0-13)

- Digital Read () Digital Read คำสั่งนี้อ่านค่าจาก ขาไอซีที่ถูกกำหนดให้เป็น digital pin ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็น HIGH หรือ LOW หมายเลขขาไอซีอาจกำหนดเป็นตัวแปรหรือค่าคงที่ (0-13)

## 2) Analog I/O

- Analog Reference () คำสั่งนี้ควรจะใช้ในการตั้งแรงดันอ้างอิงซึ่งเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับอนาล็อก ตัวเลือกที่เป็นไปได้หลังจากที่แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงอนาล็อกที่มีการเปลี่ยนแปลงก็อาจจะได้ผลแรกจากอนาล็อกอ่าน () จะไม่ถูกต้อง

- Analog Read () คำสั่งนี้อ่านค่าจากขา Analog จะได้ค่า 10 bit คำสั่งนี้จะทำงานกับขา analog input (0-5) เท่านั้น และได้ผลลัพธ์เป็นเลขจำนวนเต็มค่า 0 – 1023

- AnalogWrite () - PWM เป็นคำสั่งเขียนค่า analog เทียมโดยใช้ hardware enabled pulse width modulation (PWM) ไปยังขา output ที่สามารถทำ PWM ได้ ใน Arduino รุ่นใหม่ที่ใช้ชิพ Atmega168 คำสั่งนี้จะทำงานกับขา 3, 5, 6, 9, 10, และ 11 ส่วน Arduino รุ่นเก่าที่ใช้ Atmega8 จะรองรับเพียงขา 9, 10 และ 11 ค่าที่เขียนสามารถใช้เป็นตัวแปรหรือค่าคงที่จาก 0 – 255

- AnalogReadResolution () Analog Read Resolution () เป็นส่วนขยายของ API อนาล็อกสำหรับ Arduino เนื่องจาก ชุดขนาด (ในบิต) ของค่าที่ส่งกลับโดย Analog Read Resolution () มันเริ่มต้นเป็น 10 บิต (คำตอบแทนระหว่าง 0-1023) สำหรับความเข้ากันได้ย้อนหลังกับตามแผง AVR

- AnalogWriteResolution () Analog Write Resolution () เป็นส่วนขยายของ API อนาล็อกสำหรับ Arduino เนื่องจาก Analog Write Resolution () กำหนดความละเอียดของการ Analog Write Resolution () ฟังก์ชัน มันเริ่มต้นเป็น 8 บิต (ค่าระหว่าง 0-255) สำหรับความเข้ากันได้ย้อนหลังกับตามแผง AVR

## 3) Advanced I/O

- Tone () Tone คือการ สร้างคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่ที่ระบุ (50% และเอฟเอ็ม) ในระยะเวลาที่สามารถระบุมีฉะนั้นคลื่นจะไม่หยุดจนกว่าจะได้รับการเรียกร้องให้ NOTONE () ฟินสามารถเชื่อมต่อกับออก Piezo หรือสถานที่ตั้งลำโพงมันสามารถเสมอถูกสร้างขึ้นพร้อมกันหนึ่งเสียง ถ้าเสียงที่มีอยู่แล้วเล่นบนขาที่แตกต่างกันเสียงโทร () ไม่มีผล ถ้าเสียงที่เล่นบนขาเดียวกันจะมีการกำหนดความถี่ของการโทร

- NoTone () No Tone คือ หยุดการสร้างคลื่นสี่เหลี่ยมที่เกิดจาก Tone () มีผลถ้าไม่มีเสียงจะถูกสร้างขึ้นไม่มี

- ShiftOut () Shift Out ของข้อมูลหนึ่งบิต เริ่มต้นจากสิ่งที่สำคัญที่สุด (เช่นซ้ายสุด) ที่สำคัญน้อยที่สุด (ขวาสุด IE) บิต บิตในการเปิดแต่ละครั้งจะถูกเขียนด้วยขาข้อมูลหลังจากที่เขียน นำพิกษาขจร (สูงต่ำแล้ว) คือการแสดงให้เห็นว่าขาสามารถใช้ได้ มอนูญาติให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ารณใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- `ShiftIn ()` `Shift In ()` ของข้อมูลหนึ่งบิต เริ่มต้นจากสิ่งที่สำคัญที่สุด (เช่นซ้ายสุด) ที่สำคัญน้อยที่สุด (ขวาสุด IE) บิต สำหรับบิตของขานาฬิกาแต่ละคนจะตั้งค่าให้สูงอ่านบิตต่อไปจากสายข้อมูลและเซ็นนาฬิกาให้ต่ำลงอีกครั้ง

- `PulseIn ()` `Pulse In` (สูงหรือต่ำ) เมื่อขาออก ตัวอย่างเช่นถ้าค่าสูงรอ `Pulse In` จนกระทั่งขาไป HIGH, เวลาเริ่มต้นแล้วรอจนขาอยู่ในระดับต่ำและเวลาที่หยุด ถูกส่งกลับไปตามความยาวของ `Pulse In` ใน microseconds หลังจากเวลาที่แน่นอน, 0 ถูกส่งกลับถ้าไม่มี `Pulse In` มา นับเวลาฟังก์ชันนี้ได้รับการพิจารณาตามประสบการณ์และจะแสดงข้อผิดพลาดในอีกพอร์ตอื่นต่อไป ทำงานร่วมกับพอร์ตไมโครระหว่าง 10 วินาทีและ 3 นาที

#### 4) Time

- `Millis ()` คำสั่งนี้จะแสดงผลค่าเวลาเป็นมิลลิวินาทีแสดงค่าที่ Arduino board1 เริ่มต้นทำโปรแกรมปัจจุบัน ค่าที่ได้เป็นค่า unsigned long ขนาด 32 bit

- `Micros ()` ส่งกลับจำนวนของ microseconds ที่ได้ผ่านไปยังตั้งแต่บอร์ด Arduino ทำงานปัจจุบันโปรแกรม จำนวน microseconds ตั้งแต่โปรแกรมเริ่มต้น

5) `Delay ()` หยุดการทำงานโปรแกรมสำหรับจำนวนของเวลา (ใน milliseconds) ระบุเป็นพารามิเตอร์ (มี 1,000 มิลลิวินาทีในที่สองเป็น.) `Milliseconds =` จำนวนมิลลิวินาทีในการหยุดการทำงานชั่วคราว

- `Delay Microseconds ()` จำนวน microseconds เพื่อหยุดโปรแกรมจำนวนของเวลา (ใน microseconds) ระบุเป็นพารามิเตอร์ มีพื่น microseconds ในมิลลิวินาที

#### 6) Math

- `Min ()` คำสั่งนี้คำนวณค่าที่น้อยกว่าของค่าที่ให้มาในวงเล็บและคืนค่าที่น้อยกว่า

- `Max ()` คำสั่งนี้คำนวณค่าที่มากกว่าของค่าที่ให้มาในวงเล็บและคืนค่าที่มากกว่า

- `Abs ()` คำนวณค่าสัมบูรณ์ของจำนวนเนื่องจากวิธีการ `abs ()` ฟังก์ชันจะดำเนินการหลีกเลี่ยงการใช้ฟังก์ชันอื่น ๆ ภายในวงเล็บอาจนำไปสู่ผลลัพธ์ที่ไม่ถูกต้อง

- `Constrain ()` `Constrain` คือการจำกัดจำนวน `Constrain` จะจำกัดประเภทข้อมูลทั้งหมดทั้ง ปลายบนและปลายล่างของช่วงประเภทข้อมูล

- `Map ()` แผนที่จำนวนจากช่วงหนึ่งไปยังอีก นั่นคือค่าของ `from Low` จะได้รับการ `map` ไป `to Low` ค่าของจากสูงไป `to High` ค่าในระหว่างกับค่าในระหว่าง ฯลฯ

- `Pow ()` คำนวณค่าของจำนวนที่ยกกำลัง `Pow ()` สามารถใช้เพื่อเพิ่มจำนวนการใช้พลังงานที่เป็นเศษส่วน นี่จะเป็นประโยชน์สำหรับการสร้างแผนที่การชี้แจงของค่าหรือเส้นโค้ง

- `Sort ()` คำนวณค่ารากที่สองของจำนวน

#### 7) Trigonometry

- `Sin ()` คำนวณค่า `sin` ของมุม (เรเดียน) ผลที่ได้จะอยู่ระหว่าง -1 และ 1

- `Cos ()` คำนวณค่า `cos` ของมุม (เรเดียน) ผลที่ได้จะอยู่ระหว่าง -1 และ 1

- `Tan ()` คำนวณแทนเจนต์ของมุม (เรเดียน) ผลที่ได้จะอยู่ระหว่างอินฟินิตี้ลบและ

อินฟินิตี้

#### 8) Random Number

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Random Seed () เป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับ function random. Random () ที่จะใช้ในครั้งต่อไป โดยค่าที่ออกมาจะเป็นค่าเดิมเสมอ ซึ่ง function นี้ไม่มีการ return ค่าออกมา

- Random () ฟังก์ชันสุ่มตัวเลข

### 9) Bits and Bytes

- Low Byte () แยกตัวแปรที่เป็น byte ที่ต่ำสุดออก

- High Byte () แยกตัวแปรที่เป็น byte ที่สูงสุดหรือมีขนาดใหญ่ออก

- Bit Read () อ่านบิตของจำนวน

- Bit Write () เขียนบิตของตัวแปรที่เป็น "0", "1"

- Bit Set () เซตค่าบิตของตัวแปรที่เป็น "1"

- Bit Clear () Clear บิตของตัวแปรที่เป็น "0"

- Bit () คำนวณค่าของบิตที่ระบุ

### 10) External Interrupts การขัดจังหวะจากภายนอก

- Attach Interrupt () การกำหนดฟังก์ชันให้เกิดการขัดจังหวะที่ภายนอก

- Detach Interrupt () ปิดการกำหนดการขัดจังหวะ

### 2.5.13 Interrupts การขัดจังหวะจากภายใน

- Interrupts () การขัดจังหวะ

- No Interrupts () ปิดการใช้งานการขัดจังหวะ

### 2.5.14 Communication การสื่อสารข้อมูล

- Serial ใช้สำหรับการสื่อสารระหว่างบอร์ด Arduino และคอมพิวเตอร์หรืออุปกรณ์อื่น ๆ ทั้งหมด

- Stream เป็นพื้นฐานสำหรับลักษณะตามไบนารี

## 2.6 Arduino

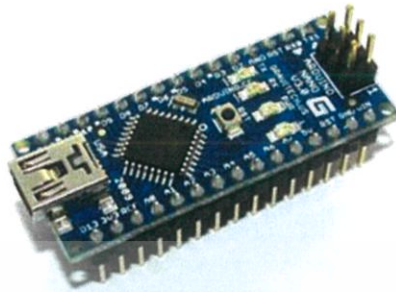
Arduino เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่มีการพัฒนาแบบ Open Source คือมีการเปิดเผยข้อมูลทั้งด้าน Hardware และ Software ตัว บอร์ด Arduino ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับผู้เริ่มต้นศึกษา ทั้งนี้ผู้ใช้งานยังสามารถดัดแปลง เพิ่มเติม พัฒนาต่อยอดทั้งตัวบอร์ด หรือโปรแกรมต่อได้อีกด้วย

ความง่ายของบอร์ด Arduino ในการต่ออุปกรณ์เสริมต่างๆ คือผู้ใช้งานสามารถต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์จากภายนอกแล้วเชื่อมต่อเข้ามาที่ขา I/O ของบอร์ด หรือเพื่อความสะดวกสามารถเลือกต่อกับบอร์ดเสริม (Arduino Shield) ประเภทต่างๆ เช่น Arduino XBee Shield, Arduino Music Shield, Arduino Relay Shield, Arduino Wireless Shield, Arduino GPRS Shield เป็นต้น มาเปรียบกับบอร์ดบนบอร์ด Arduino แล้วเขียนโปรแกรมพัฒนาต่อได้เลย

### 2.6.1 Arduino Nano

Arduino Nano มีขนาดเพียง 1.8 x 4.8 เซนติเมตร หรือมีขนาดประมาณนิ้วหัวแม่มือของเรา ซึ่งถือว่ามีขนาดเล็กมาก เมื่อเทียบกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์อื่น บนบอร์ด Arduino ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Nano นั้นมีวงจรสำหรับปรับแรงดันไฟฟ้าให้เหมาะสมกับตัวมันเองอยู่แล้ว เพียงแค่เราเสียบสาย USB เข้ากับ Arduino Nano และต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ บอร์ดก็พร้อมใช้งานได้ทันที เมื่อเสียบสาย USB บอร์ดของเรา ก็พร้อมสำหรับการเขียนโปรแกรม โดยอาศัยไฟเลี้ยงที่มาจากสาย USB [7]



รูปที่ 2.12 Arduino Nano

## 2.7 Bluetooth

Bluetooth เป็นเทคโนโลยีความถี่วิทยุคลื่นสั้นที่คาดว่าจะเข้ามาแทนที่การใช้สายเคเบิล และอินฟราเรดในในอุปกรณ์ต่างๆที่ต้องต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ทำให้ลดข้อยุ่งยากจากการใช้สายเคเบิลซึ่งไม่สะดวกซึ่งหากอุปกรณ์อยู่ในรัศมีของคลื่นก็ สามารถเชื่อมการติดต่อได้ทันที ในอนาคตเทคโนโลยี Bluetooth จะถูกพัฒนาให้เป็นมาตรฐานการเชื่อมต่อเครือข่ายภายในกลุ่มย่อย อาทิ ภายในรถยนต์หรืออุปกรณ์ไฟฟ้าภายในบ้านต่อเชื่อมเข้ากับเครือข่ายภายในหรือ แม้กระทั่งเครือข่ายอินเทอร์เน็ตทำให้ผู้ใช้สามารถควบคุมอุปกรณ์ในบ้าน จากระยะไกลได้

Bluetooth เป็นการส่งข้อมูลแบบ 2 ทางระหว่างอุปกรณ์ กับอุปกรณ์ที่มีเทคโนโลยี Bluetooth เหมือนกันสื่อสารด้วยเทคโนโลยีความถี่วิทยุคลื่นสั้นช่วงความถี่ 2.400 และ 2.4835 GHz. และเพื่อป้องกันการชนกันของสัญญาณ (มีช่วงความถี่ใกล้เคียงกับสัญญาณ Microwave) วิธีการส่งจะอาศัยเทคโนโลยีที่ชื่อว่า frequency hopping ซึ่งมีหลักการทำงานคือ จะแบ่งช่องสัญญาณออกเป็น 79 ช่องความถี่ (ช่องละ 1 MHz) และจะทำการเปลี่ยนแปลงระดับของความถี่ในกำลังส่งสัญญาณ 1,600 ครั้งต่อ 1 วินาที

Bluetooth เชื่อมต่อในรูปแบบ oriented service ซึ่งจะมี 2 ช่องการสื่อสารในตัวเองที่เรียกว่า master และ Slave โดยอุปกรณ์ที่มีสถานะเป็น Master จะเป็นตัวส่งการเชื่อมต่อการสื่อสารส่วนตัว ลูกข่ายหรือ Slave จะเป็นตัวที่ถูกค้นหาเข้ามาเชื่อมต่อโดยในหนึ่งอุปกรณ์ Bluetooth สามารถสลับสถานะ ทำหน้าที่สลับกันได้ (เป็นได้ทั้ง master และ slave ในเวลาเดียวกัน เรียกว่า Scatter net สังเกตได้จากภาพด้านบน notebook จะเป็น slave ของ เครื่อง PC แต่ในเวลาเดียวกัน ตัว notebook จะเป็น Master เชื่อมต่ออีก 2 อุปกรณ์(ในวงรอบสีแดง) โดยปกติแล้ว Bluetooth นี้ สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ได้ 8 ตัว (1 Master + 7 Slave) [8]

## 2.8 เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor)

เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) เป็นมอเตอร์ที่มีการควบคุมการเคลื่อนที่ของมัน (State) ไม่ว่าจะ เป็นระยะหรือความเร็ว มุมการหมุน โดยมีการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control) เป็นไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีโหมดปรับแรงบิดและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

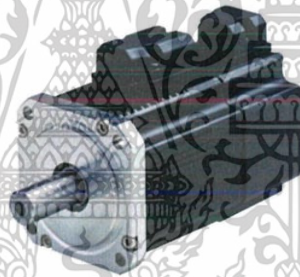
อุปกรณ์ที่สามารถควบคุมเครื่องจักรกลหรือระบบการทำงานนั้นๆให้เป็นไปตามความต้องการ เช่น ควบคุมความเร็ว (Speed), ควบคุมแรงบิด (Torque), ควบคุมแรงตำแหน่ง (Position), ระยะทางในการเคลื่อนที่(หมุน) (Position Control) ของตัวมอเตอร์ได้ ซึ่งมอเตอร์ทั่วไปไม่สามารถควบคุมในลักษณะงานเบื้องต้นได้ โดยให้ผลลัพธ์ตามความต้องการที่มีความแม่นยำสูง

ขนาดของ Servo Motor จะมีหน่วยในการบอกขนาดเป็นวัตต์ (Watt) Servo Motor ของ Panasonic จะมีขนาดตั้งแต่ 50W-15kW ทำให้ผู้ใช้งานมีความหลากหลายในการใช้งาน

### 2.8.1 หลักการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์

การทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ชนิดนี้จะคล้ายกับการทำงานของซิงโครนัสมอเตอร์ 3 เฟส กล่าวคือเมื่อมีการควบคุมให้คอนโทรลเลอร์จ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังขดลวดที่สเตเตอร์ แกนเหล็กของสเตเตอร์จะกลายเป็นแม่เหล็กไฟฟ้า และหมุนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่แปรผันตามความถี่ ซึ่งเรียกว่า ความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed) หรือความเร็วสนามแม่เหล็กหมุน และจะดูให้โรเตอร์ซึ่งเป็นแม่เหล็กถาวรหมุนเคลื่อนที่ตาม

จากลักษณะโครงสร้างของโรเตอร์และหลักการทำงานที่เหมือนกับซิงโครนัสมอเตอร์ซึ่งเป็นมอเตอร์แบบเอซี แต่ไม่มีแปรงถ่าน (Brushless) ไม่มีซีคอมมิวเตเตอร์ จึงทำให้มอเตอร์ชนิดนี้มีชื่อเรียกขานแตกต่างกันออกไป [9]



รูปที่ 2.13 Servo Motor

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.9.1 งานวิจัยภายในประเทศ

ในปี ค.ศ. 2017 กาญจนา จันทร์ประเสริฐ ได้วิจัยเพื่อพัฒนาเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาที่ช่วยให้ผู้พิการทาง [10] สายตาที่มีความปลอดภัยในการใช้ชีวิตประจำวันตามปกติ ผลการพัฒนาได้เครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทาง สายตาที่ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนศีรษะ ส่วนลำตัว และส่วนขา อาศัยหลักการทำงานของการทำงานของคลื่น โดยประยุกต์ใช้เซนเซอร์แบบอัลตราโซนิก SRF05 และ HC-SR04 เซนเซอร์ PIR เป็นตัวตรวจจับสิ่งกีดขวางและควบคุมการทำงานโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARDUINO#ATMEGA 2560 ทำหน้าที่ประมวลผลกลาง โดยการทำงานของเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาที่พัฒนานี้เป็นการทำงานแบบไร้สายเพื่อสะดวกต่อการ ใช้งาน การแสดงสัญญาณเตือนผู้พิการทางสายตาให้รับรู้ว่ามีสิ่งกีดขวางมี 2 ลักษณะ คือ การสั่นของมอเตอร์และ เสียง 3 แบบ คือ “โพรตระวังศีรษะคะ” “โพรตระวังผู้คนพลุกพล่านคะ” และ “โพรตระวังขาคะ” กำหนด โปรแกรมควบคุมเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาจะเริ่มเตือนเมื่อสิ่งกีดขวางอยู่ห่างจากผู้พิการทาง สายตา 40-60 เซนติเมตร

### 2.9.2 งานวิจัยต่างประเทศ

ในปี ค.ศ.2012 Y.S.H. Khraisat ทำการออกแบบระบบเรดาร์อินฟราเรด [11] ซึ่งใน บทความนี้ได้ทำการออกแบบระบบเรดาร์อินฟราเรดเพื่อใช้ในการตรวจจับวัตถุ โดยการสแกนด้วยมุม 180° และระยะห่างระหว่างเรดาร์กับวัตถุอยู่ที่ 10 ซม. ถึง 80 ซม. ระบบนี้มีการใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการออกแบบ ซึ่งผู้ใช้จะได้ยินเสียงแจ้งเตือนและระยะห่างของวัตถุจะสามารถ อ่านได้บนหน้าจอ LCD ขนาดเล็ก ในการดำเนินงานและการออกแบบถ้าทำการเปิดสวิทช์มอเตอร์จะ เริ่มหมุนเป็นมุม 180° โดยมอเตอร์ Stepper จะขับเซ็นเซอร์ IR (ซึ่งประกอบด้วยemitter และ เครื่องตรวจจับ emitter) จะส่งสัญญาณอินฟราเรดเพื่อตรวจจับวัตถุเมื่อสัญญาณนี้กระทบวัตถุ สัญญาณจะสะท้อนกลับไปยังเครื่องตรวจจับจากนั้นเครื่องตรวจจับจะส่งสัญญาณอนาล็อกที่มี แรงดันไฟฟ้าและมุมที่เหมาะสม แรงดันไฟฟ้าของสัญญาณนี้จะขึ้นกับระยะทาง 16F877Aจะ ดำเนินการทางซอฟต์แวร์และแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัลโดยใช้ A / D และให้คำสั่งไปที่แอลอีดี ซึ่งจะบอกถึงทิศทางของวัตถุและแสดงระยะทางบนหน้าจอ LCD และจะส่งสัญญาณเตือนไปที่ลำโพง

ในปี ค.ศ. 2014 นักวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีอินเดีย ในกรุงนิวเดลี สร้างไม้เท้าอัจฉริยะ "สมาร์ทเคน" [12] ที่สามารถสั่นเพื่อเตือนผู้บกพร่องทางการมองเห็นที่ใช้งานไม้เท้านี้ หากมีสิ่งกีดขวางที่อยู่ด้านหน้า ด้วยระยะทางถึง 3 เมตร ทั้งยังตรวจจับวัตถุที่อยู่เหนือระดับเข้าขึ้นไป อย่างเช่น แผลงกันหรือป้ายที่ยื่นออกมา ซึ่งเป็นปัญหาที่ผู้พิการกลุ่มนี้มักพบเมื่อใช้ไม้เท้านำทางแบบธรรมดาสมาร์ทเคนตรวจจับสิ่งกีดขวางจากการใช้คลื่นเสียงอัลตราซาวด์ ส่งไปยังวัตถุรอบตัวผู้ใช้ และเมื่อมีคลื่นเสียงสะท้อนกลับมา ไม้เท้าอัจฉริยะนี้จะสั่นเตือนเพื่อให้ผู้ใช้เปลี่ยนทิศทางเดิน รวหล คัมภีร์ ผู้พิการอาสาสมัครทดลองใช้สมาร์ทเคน บอกว่า สิ่งประดิษฐ์นี้ช่วยให้อุ่นใจและเพิ่มความมั่นใจเมื่อเดินไปบนท้องถนน ไม่ว่าจะไปทำงาน กลับบ้าน หรือเดินในห้างสรรพสินค้า ซึ่งช่วยลดเวลาเดินทางลงถึง 25% จากเดิมที่เคยเดินทาง 10 นาที ตอนนี้อยู่เวลาเพียง 7 นาทีครึ่งเท่านั้น ศาสตราจารย์ มินคซึ พลกฤษณ์ หนึ่งในทีมสร้างไม้เท้าอัจฉริยะ ยกตัวอย่างความสำเร็จของไม้เท้านี้กับเด็กหญิงคนหนึ่งที่ยกพร่องด้านการมองเห็น ในนครมุมไบ ว่า แต่ก่อนพ่อแม่ของเธอจะต้องเดินทางไปทุกที่ที่เธออยากไป แต่ตอนนี้เธอสามารถไปไหนมาไหนเองได้แล้ว ทีมวิจัยยังหวังว่า สมาร์ทเคน เพิ่มความปลอดภัยให้คนตาบอด 39 ล้านคนทั่วโลก ในราคาที่สัมผัสได้ ซึ่งตั้งไว้ที่ 3,000 รูปี หรือราว 1,600 บาท

ในปี ค.ศ. 2014 I.Y.Chung, S. Kim และ K.H. Rhee ได้พัฒนาระบบแอปพลิเคชันอัจฉริยะ Android สำหรับไม้เท้าขาวซึ่งจะช่วยให้บุคคลที่มีความบกพร่องทางสายตาสามารถตรวจจับอุปสรรคในสภาพแวดล้อมของตนและนำทางพวกเขาไปยังจุดหมายปลายทางได้ [13] นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความสะดวกในการใช้งานเครือข่ายด้วยโทรศัพท์สมาร์ต ไม้เท้าขาวที่ออกแบบมารองรับแอปพลิเคชันเพื่อจับคู่กับสมาร์ตโฟน ใช้เซ็นเซอร์อัลตราโซนิกเพื่อตรวจจับสิ่งกีดขวางในขณะที่เดิน และใช้ gyro sensor เพื่อป้องกันการตก บอร์ดทดลองที่สร้างขึ้นจะจับคู่กับ App โทรศัพท์อัจฉริยะ ใช้โปรโตคอลแบบบลูทูธ V2.0

ในปี ค.ศ. 2016 M.F. Saaid, A. M. Mohammad และ M. S. A. Megat Alic ได้สร้าง ไม้เท้าขาวที่มีช่วงการแจ้งเตือนสำหรับคนตาบอด [14] โครงการนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อปฏิบัติแนวคิดโดย คำ ไม้เท้าอัจฉริยะที่ใช้ NI my RIO-1900 สามารถปรับเปลี่ยนเซ็นเซอร์ความถี่เสียงสำหรับการตรวจจับสิ่งกีดขวาง

เพื่อให้เหมาะกับข้อกำหนดของผู้ใช้ ในขณะที่เอาท์พุทผลิตเป็นสัญญาณหูฟังผ่านหูฟัง โครงการนี้คาดว่าจะช่วยให้คนเดินเท้าบกพร่องได้อย่างอิสระโดยไม่จำเป็นต้องกวาดหรือเคาะไม้เท้าเนื่องจากข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระยะทางที่เกิดอุปสรรคและสถานะที่ไม่เรียบ

ในปี ค.ศ. 2016 E.A. Williams , S.M. Cobbina และ S.K. Okrah ได้มีการออกแบบและการใช้วงจรรับสัญญาณอินฟราเรดแบบคู่สำหรับ ตรวจสอบผู้บงกกรูมีการออกแบบและดำเนินการให้ระบบมีการตรวจสอบผู้บงกกรูโดยใช้วงจรรับสัญญาณ อินฟราเรดแบบคู่ [15] ซึ่งวงจรรับสัญญาณอินฟราเรดแบบคู่เป็นวงจรมีการตรวจสอบการกระจายแสงเป็น พื้นที่กว้าง ถูกกำหนดให้เป็นเขตป้องกันผู้บงกกรู ซึ่งวงจรรับอินฟราเรดแบบคู่เหมาะในการป้องกัน ความปลอดภัยที่แม่นยำที่จะถูกมนุษย์บงกกรูอย่างเช่น ในธนาคาร ในทรัพย์สิน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ ออกแบบระบบการตรวจสอบผู้บงกกรูแบบไร้สายที่มีประสิทธิภาพและเชื่อถือได้ซึ่งเหมาะสำหรับการ ป้องกันทรัพย์สินของมีค่าของมนุษย์ให้ปลอดภัยจากผู้บงกกรูซึ่งมีความผิดพลาดในการตรวจจับน้อย และมีการแจ้งเตือนแบบเสียง เสียงที่ได้จากระบบตรวจสอบผู้บงกกรูในงานวิจัยนี้จะช่วยให้เจ้าของ ทรัพย์สินสามารถเตรียมตัวป้องกันผู้บงกกรูและสามารถติดต่อเจ้าหน้าที่เพื่อขอความช่วยเหลือได้

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องส่วนใหญ่นั้นได้ใช้อัลตราโซนิกเซนเซอร์ในการทดสอบสิ่งกีดขวางและวัดระยะทาง แต่ อัลตราโซนิกเซนเซอร์มีข้อเสียคือความเรียบของผิวชิ้นงาน และรูปร่างที่ซับซ้อนของชิ้นงานมีผลต่อการทดสอบมาก ทำให้ความแม่นยำลดลง ถ้านำไปใช้กับคนตาบอดอาจเป็นผลเสียเป็นอย่างมากเพราะความแม่นยำน้อยอาจทำให้มีอุบัติเหตุได้สูง ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำส่วนนี้ไปพัฒนาเพื่อลดข้อเสียโดยเปลี่ยนตัวเซนเซอร์ให้เหมาะสมคือใช้เซนเซอร์ตรวจจับย่านอินฟราเรดในการตรวจวัดแทนเนื่องจากมีความแม่นยำสูงในระบบตรวจจับในระยะทางไกล นอกจากนี้ยังมีการจัดการในสภาพแวดล้อมที่แคบภายใต้ลำแสงคู่ขนานและแคบ นอกจากนี้เรายังเน้นการนำทางภายในอาคารเนื่องจากผู้ใช้ส่วนใหญ่มักพบขณะเดินอยู่ในโรงพยาบาลสถานที่สาธารณะและสถานที่ของรัฐบาล เราได้ออกแบบและประดิษฐ์เซ็นเซอร์อินฟราเรดติดตั้งไว้บนด้านบนของไม้เท้าคนตาบอดด้วยประโยชน์จากลำแสงเลเซอร์แบบคู่ขนานและแคบแสงที่สะท้อนจากเป้าหมายไปยังเซ็นเซอร์ Lidar (Light Detection and Raging) ทำให้เรามีอัตราการรับส่งข้อมูลสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ตรวจจับวัตถุ

##### 3.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบระบบตรวจจับวัตถุโดยใช้ Lidar-lite V3 ซึ่งเป็น Laser sensor ในการตรวจจับวัตถุ Arduino Nano ได้ถูกนำมาใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อที่จะควบคุมการทำงานของเลเซอร์เพื่อที่จะได้ค่าระยะทางออกมา โดยจะมี Bluetooth เป็นตัวส่งข้อมูลไปยังหน้าจอแสดงผล อุปกรณ์ในงานวิจัยนี้ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

รายการอุปกรณ์	จำนวน (ตัว)
Lidar-Lite v3	1
Arduino Nano	1
HC-05 Bluetooth Module	1
Tower Pro MG995 DIGI High-Speed	1
Battery 9V	1
White cane	1
Resistor 1K	1
LM7805	1
Capacitor 1 $\mu$ F	2

##### 1) Lidar-Lite V3

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เลเซอร์เซนเซอร์เป็นอุปกรณ์ในการตรวจจับวัตถุที่เป็นสิ่งกีดขวางกับผู้ใช้งาน โดยที่ผู้วิจัยเลือก Lidar (Laser detection and ranging) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เพราะว่ามีอุปกรณ์นี้มีความเร็วในการตรวจจับค่อนข้างสูงมากเมื่อเทียบกับเซนเซอร์ชนิดอื่นเช่น Ultrasonic เป็นต้น อีกทั้งอุปกรณ์นี้ยังมีความแม่นยำค่อนข้างสูง เพราะว่าการบานออกของลำแสงนั้นค่อนข้างที่จะน้อยมากเมื่อตรวจจับในระยะที่ไกล ทำให้อุปกรณ์นี้มีความเหมาะสมในการตรวจจับวัตถุที่อยู่ในอาคารได้

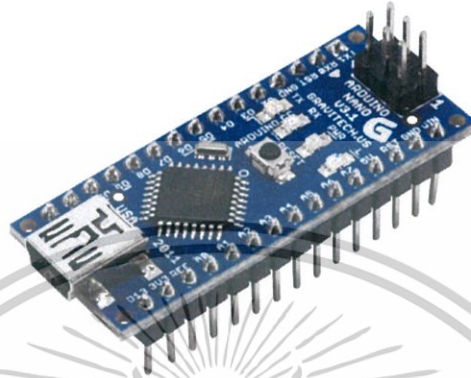


รูปที่ 3.1 Lidar-Lite V3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนบุคคลเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) Arduino Nano

ในงานวิจัยนี้จำเป็นที่จะต้องใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีขนาดเล็กเพื่อที่จะได้ติดตั้งไปยังไม่เท่า ซึ่ง Arduino Nano ดังแสดงในรูปที่ 3.2 สามารถตอบโจทย์ในตรงนี้ได้เพราะขนาดที่ค่อนข้างที่จะเล็กกว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิดอื่นๆ ไมโครคอนโทรลเลอร์นี้สามารถควบคุมการทำงานของ Lidar และ Bluetooth ได้

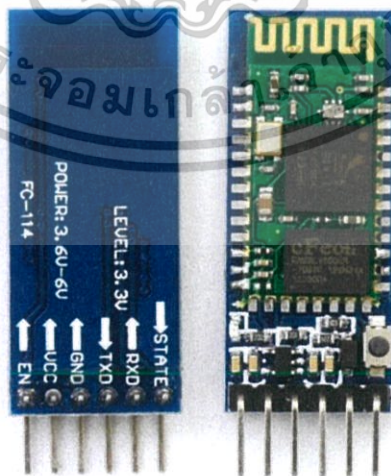


รูปที่ 3.2 Arduino Nano

## 3) HC-05 Bluetooth Module

HC-05 แสดงในรูปที่ 3.3 เป็นโมดูล Bluetooth ที่ใช้งานในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่างๆสามารถสื่อสารกับไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ผ่าน Serial port โมดูลรุ่น HC05 สามารถตั้งให้ใช้งานเป็นได้ทั้งโหมด Master (ให้อุปกรณ์อื่นมาเชื่อมต่อ) และโหมด Slave (เชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่น) การตั้งค่าต่างๆ เช่น ชื่ออุปกรณ์ รหัสผ่าน ทำได้ผ่าน AT Command ซึ่งจะต้องมีการต่อขาพิเศษเพื่อให้โมดูลเข้าโหมดการตั้งค่า หรือกดปุ่มบนโมดูลค้างไว้

ในงานวิจัยนี้ HC-05 จะทำการตั้งโหมดให้เป็น Master เพื่อที่จะส่งข้อมูลระยะทางไปยังจอแสดงผล



รูปที่ 3.3 HC-05 Bluetooth Module

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4) Tower Pro MG995 DIGI Hi-Speed Servo

เซอร์โวดังที่แสดงในรูปที่ 3.4 เป็นเซอร์โวนขนาดเล็กที่ใช้กระแสไฟฟ้ากระแสตรง ให้ทอร์กที่สูง สามารถเคลื่อนที่ได้ความเร็วสูง ใช้งานกับการควบคุมความเร็วได้ดี เงียบ และภายในทำจากเฟืองโลหะ เมื่อจ่ายไฟเลี้ยง 6 VDC ให้ Stall Torque 15 kg/cm (Stall torque คือทอร์กสูงสุดขณะยังไม่เคลื่อนที่)



รูปที่ 3.4 Tower Pro MG995 DIGI Hi-Speed Servo

#### 5) ไม้เท้าขาว (2.12 cm $\phi$ x 122.30 cm length)

ไม้เท้าขาว แสดงในรูปที่ 3.5 เป็นอุปกรณ์นำทางที่เป็นที่นิยมใช้กันในสากลเพราะว่าการที่ไม้เท้าทำมาจากวัสดุอลูมิเนียมทำให้ไม้เท้ามีน้ำหนักเบาและแข็งแรง อีกทั้งการใช้ไม้เท้าขาวเป็นสิ่งสำคัญมาก เพราะถ้าหากไม่มีความชำนาญในการใช้ก็อาจจะเป็นอันตรายได้



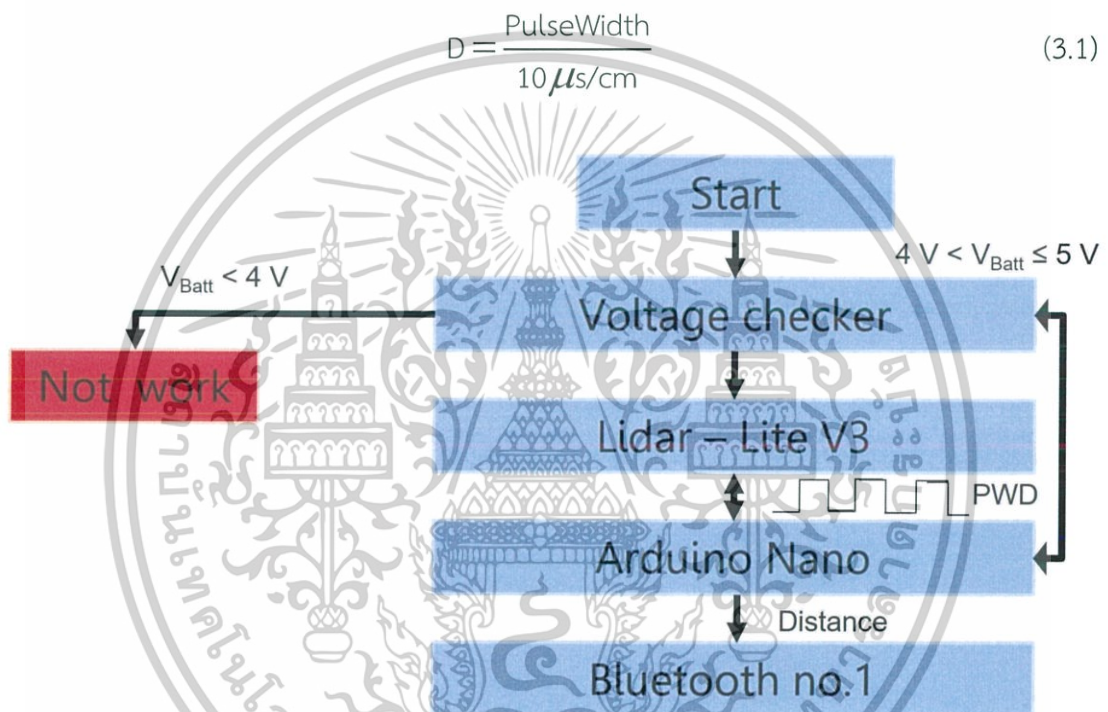
รูปที่ 3.5 ไม้เท้าขาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.2 หลักการทำงานและการเชื่อมต่ออุปกรณ์

การทำงานของอุปกรณ์นี้เริ่มจากอุปกรณ์เซ็นเซอร์แสงจากแบตเตอรี่ หากว่ากระแสไฟน้อยกว่า 4V อุปกรณ์ชนิดนี้จะไม่ทำงาน แต่หากว่ากระแสไฟอยู่ในช่วง 4-5V อุปกรณ์ชนิดนี้จะทำงาน เมื่ออุปกรณ์ทำงานแล้ว Lidar (Light detection and ranging) จะปล่อยแสงไปตกกระทบกับวัตถุและสะท้อนกลับมายังที่เซ็นเซอร์รับแสง สามารถวัดข้อมูลออกมาได้เป็นแบบ Pulse Width หลังจากนั้นจะส่งข้อมูลไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งก็คือ Arduino Nano

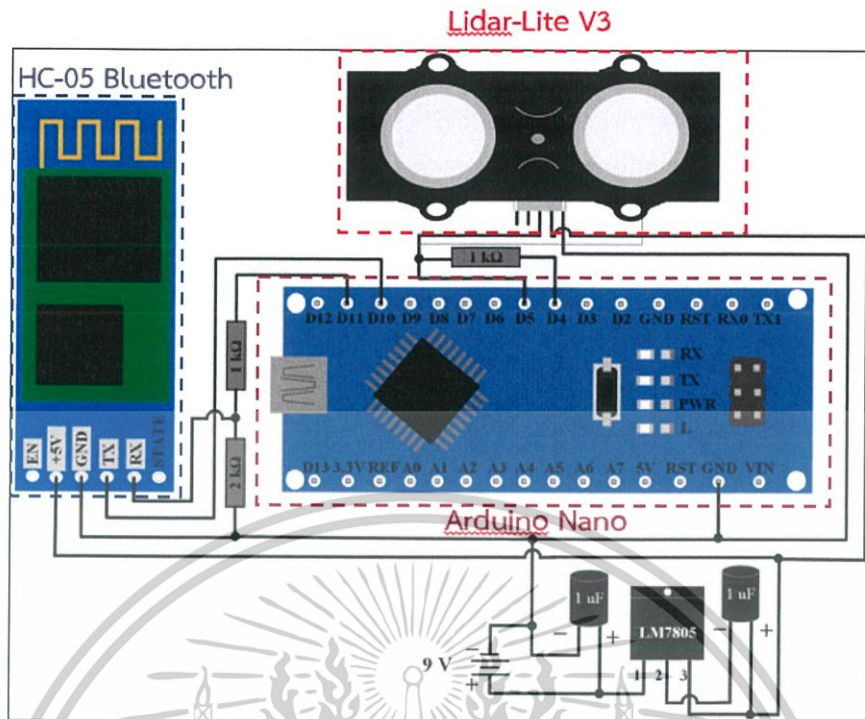
ไมโครคอนโทรลเลอร์จะคำนวณระยะทาง (D) ออกมาโดยใช้สมการที่ (3.1) เมื่อได้ระยะทางแล้วไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งข้อมูลไปยัง Bluetooth เพื่อที่จะให้ลูทูนี่ส่งข้อมูลไปยังจอแสดงผลสามารถดูหลักการการทำงานได้ตามรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 หลักการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับวัตถุ

อุปกรณ์ชนิดนี้สามารถนำมาเชื่อมต่อกันตามรูปที่ 3.7 โดยที่ผู้วิจัยนำเอาอุปกรณ์มาต่อเพิ่มเติมซึ่งก็คือ LM7805 และ ตัวเก็บประจุ  $1 \mu\text{F}$  เพื่อที่จะระบายความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



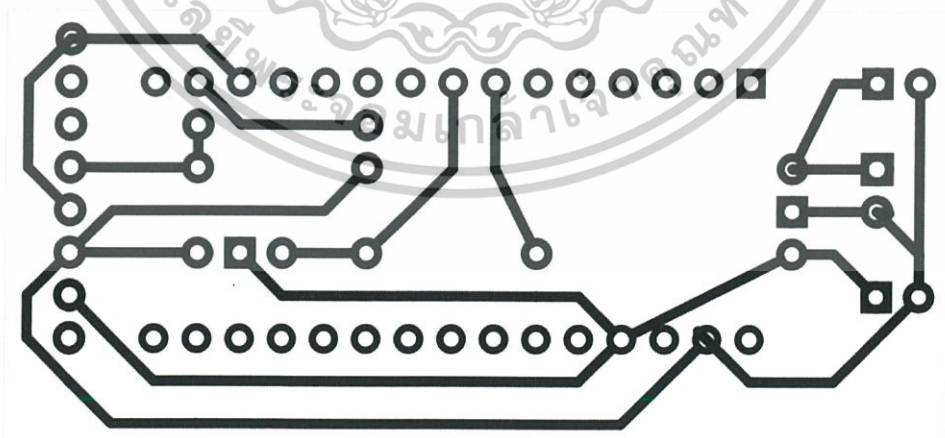
รูปที่ 3.7 การเชื่อมต่อของอุปกรณ์

### 3.1.3 การสร้างอุปกรณ์

หลังจากที่ทำการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการสร้างบอร์ด PCB เพื่อที่จะลดการใช้สายไฟในวงจรและง่ายต่อการดูแลรักษา โดยขั้นตอนการทำ PCB มีดังนี้

#### 1) ออกแบบวงจรที่ใช้ใน PCB

วงจร PCB มีการออกแบบดังรูปที่ 3.8

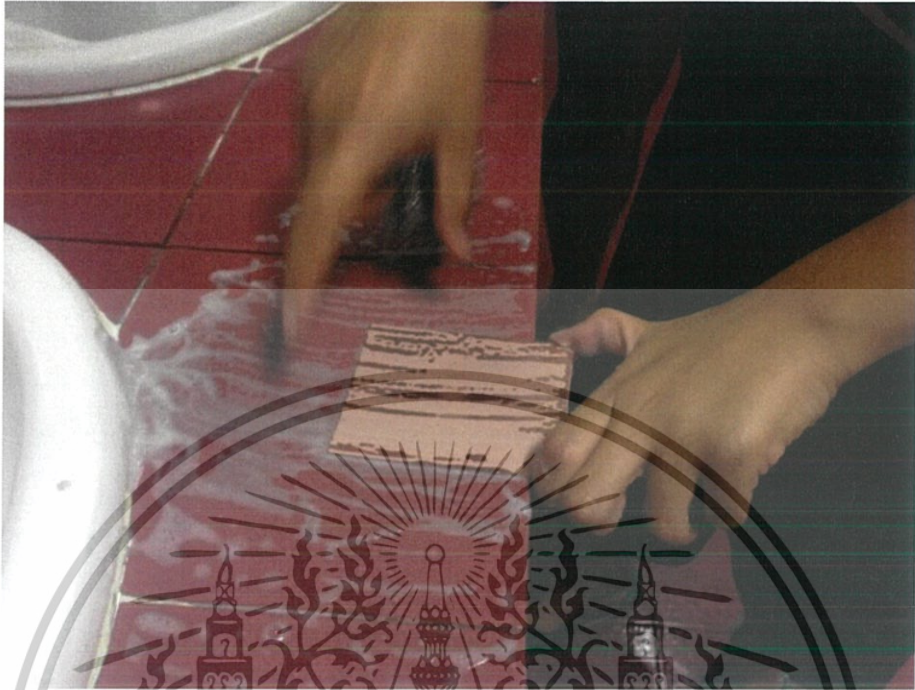


รูปที่ 3.8 วงจรที่ใช้ในการทำ PCB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) นำเอาแผ่น PCB ไปขัด

การขัดแผ่น PCB เป็นขั้นตอนเพื่อลอกที่เคลือบออกจากแผ่นออก ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ขัดแผ่น PCB

## 3) ปั่นสายวงจรมาติดลงบนแผ่น PCB ที่เตรียมไว้

นำลายปรี้นมาติดลงบนแผ่น PCB เพื่อต้องการให้ลายที่ต้องการติดลงบนแผ่น PCB

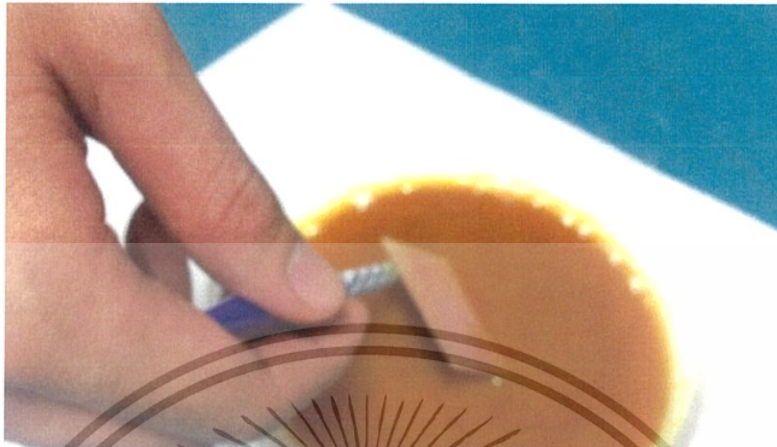
ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 รีดวงจรให้ติดกับแผ่น PCB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4) นำแผ่น PCB ไปกัดกับน้ำกรดที่ใช้กัดทองแดง  
นำแผ่น PCB ที่รีดเสร็จแล้วนำไปกัดกับน้ำกรดที่ใช้กัดทองแดงนำแผ่น PCB ไปกัดกับ  
น้ำกรดกัดทองแดงเพื่อที่จะลอกทองแดงออก ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 นำแผ่น PCB ไปกัดกับน้ำกรดที่ใช้กัดทองแดง

- 5) ล้างด้วยน้ำเปล่าจะได้วงจรบนบอร์ด PCB  
เมื่อนำแผ่น PCB ไปกัดกับกรดทองแดงเรียบร้อยแล้ว นำไปล้างด้วยน้ำเปล่าจะได้วงจร  
บนบอร์ด PCB ดังรูปที่ 3.12

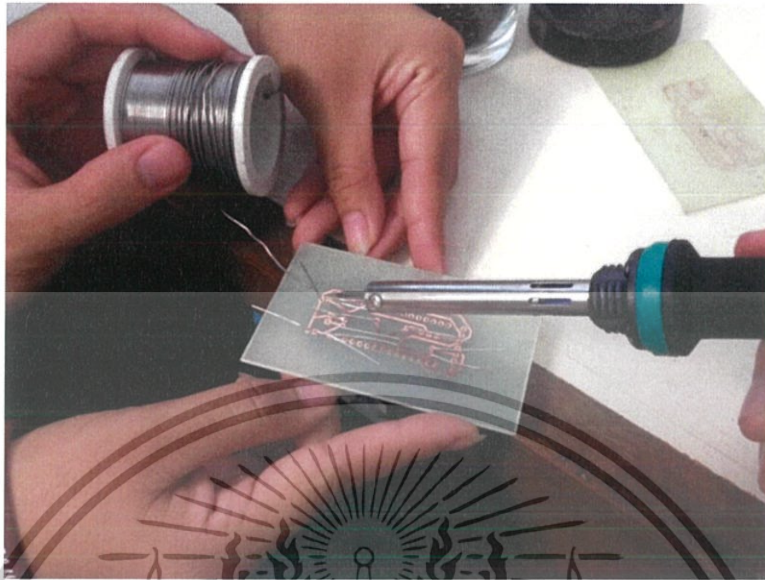


รูปที่ 3.12 แผ่น PCB ที่กัดทองแดงเสร็จเรียบร้อยแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) นำเอาบอร์ด PCB ไปเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ทั้งหมด

หลังจากที่กัดเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำบอร์ด PCB ไปเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ทั้งหมด ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 บัดกรีเพื่อเชื่อมกับอุปกรณ์

หลังจากที่ทำบอร์ด PCB เสร็จเรียบร้อยแล้วและนำเอาอุปกรณ์มาเชื่อมต่อกันเรียบร้อยแล้ว นำเอาอุปกรณ์มาเชื่อมต่อกับไม้เท้า ดังรูปที่ 3.14 โดยที่ระนาบของเลเซอร์จะทำมุม 45 องศา กับแนวระนาบ



รูปที่ 3.14 อุปกรณ์ที่ติดกับไม้เท้าขาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

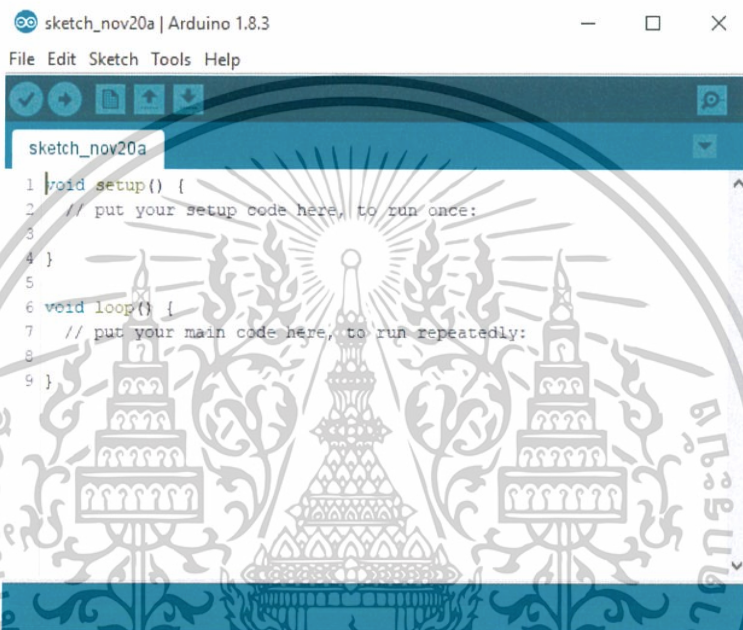
### 3.2 การทดสอบการตรวจจับวัตถุ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองกับวัตถุที่แตกต่างออกไป โดยเลือกจากคุณสมบัติการสะท้อนแสงของวัสดุและวัตถุที่พบเจอได้ในอาคารได้แก่ ไม้ มนุษย์ และกำแพงซีเมนต์

การทดสอบการตรวจจับวัตถุสามารถทำได้โดยการใช้ Lidar เชื่อมต่อกับ Oscilloscope เพื่อที่จะจับ PWM ออกมาและคำนวณระยะทางได้ วิธีการเป็นดังต่อไปนี้

#### 1) เปิดโปรแกรม Arduino ขึ้นมา

เริ่มทำการเปิดโปรแกรม Arduino ขึ้นมาโดยรูปแบบจะได้ตามรูปที่ 3.15



```

sketch_nov20a
1 void setup() {
2   // put your setup code here, to run once:
3
4 }
5
6 void loop() {
7   // put your main code here, to run repeatedly:
8
9 }

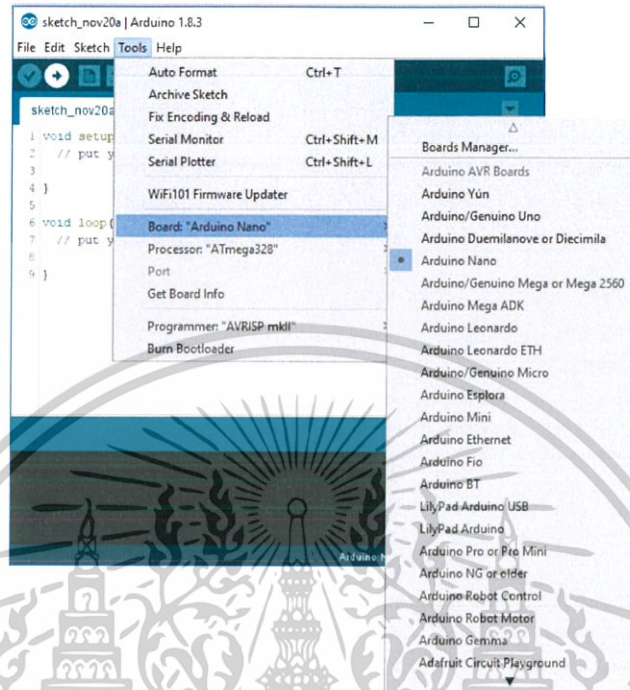
```

รูปที่ 3.15 โปรแกรม Arduino

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2) เลือกบอร์ดให้ตรงกับที่ใช้

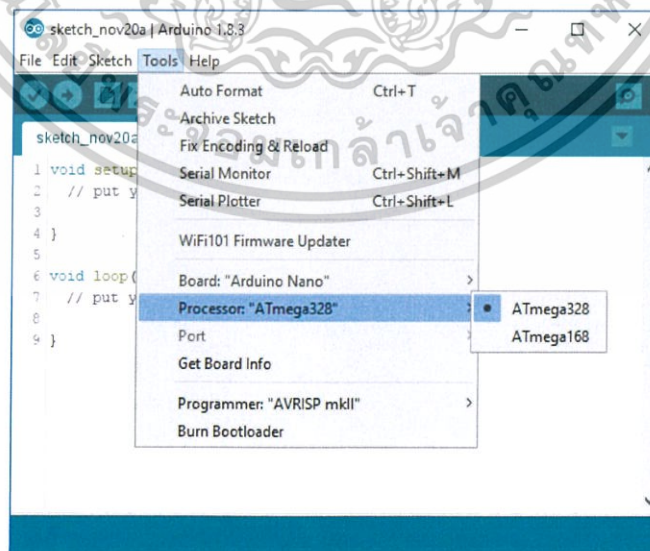
เมื่อเปิดโปรแกรมแล้วให้เราทำการเลือกบอร์ดให้ตรงกับรุ่นที่ใช้ ในที่นี้คือบอร์ด Arduino Nano ซึ่งวิธีเลือกบอร์ดจะแสดงดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 เลือกบอร์ด Arduino Nano

## 3) หลังจากนั้นให้เลือก Processor

เมื่อเลือกบอร์ดเป็น Arduino Nano จากนั้นทำการเลือก Processor เป็น ATmega328 แสดงดังรูปที่ 3.17

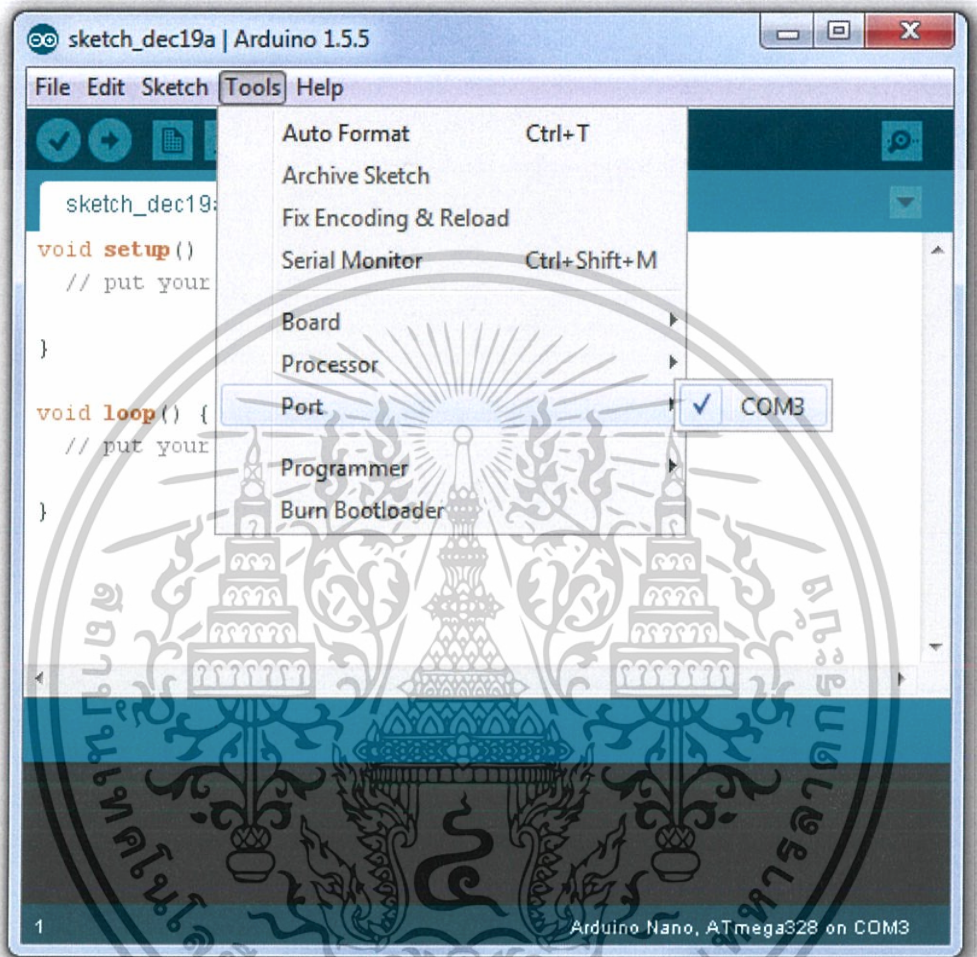


รูปที่ 3.17 เลือก Processor เป็น ATmega328

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4) เลือก Com Port ให้ตรงกับ Arduino Nano ที่เชื่อมต่ออยู่

เมื่อเลือกทั้งสองอย่างแล้ว ให้สังเกตที่มุมขวาล่างของหน้าต่างโปรแกรม จะปรากฏชื่อของบอร์ดที่เราได้ทำการเลือกไว้ ในขั้นตอนนี้ให้ตรวจสอบให้ถูกต้อง ในที่นี้ให้เลือก Com Port ให้ตรงกับ Arduino Nano ที่เชื่อมต่ออยู่ ตามรูปที่ 3.18

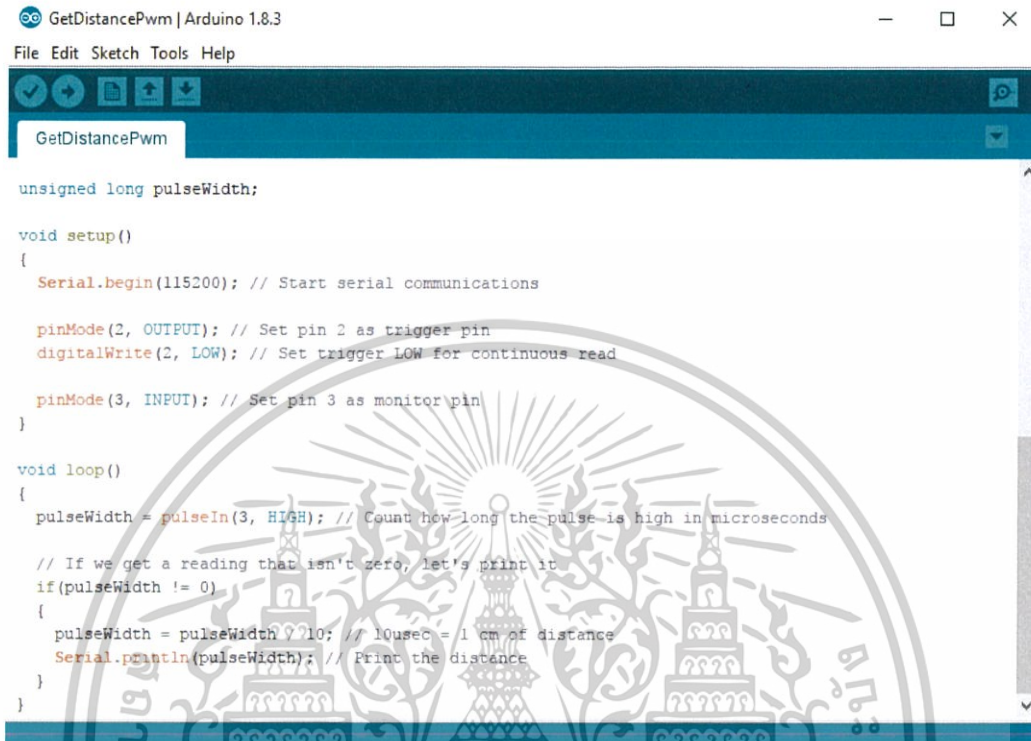


รูปที่ 3.18 เลือก Port COM3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5) เขียนโปรแกรมที่ไว้ใช้ควบคุม Lidar เพื่อที่จะวัดระยะทาง

เมื่อเลือก Com Port เรียบร้อย ทำการเขียนโปรแกรมแบบ PWM ที่ไว้ใช้ควบคุม Lidar เพื่อที่จะวัดระยะทางโดยโปรแกรมตามรูปที่ 3.19



```

GetDistancePwm | Arduino 1.8.3
File Edit Sketch Tools Help
GetDistancePwm
unsigned long pulseWidth;

void setup()
{
  Serial.begin(115200); // Start serial communications

  pinMode(2, OUTPUT); // Set pin 2 as trigger pin
  digitalWrite(2, LOW); // Set trigger LOW for continuous read

  pinMode(3, INPUT); // Set pin 3 as monitor pin
}

void loop()
{
  pulseWidth = pulseIn(3, HIGH); // Count how long the pulse is high in microseconds

  // If we get a reading that isn't zero, let's print it
  if(pulseWidth != 0)
  {
    pulseWidth = pulseWidth / 10; // 10usec = 1 cm of distance
    Serial.println(pulseWidth); // Print the distance
  }
}

```

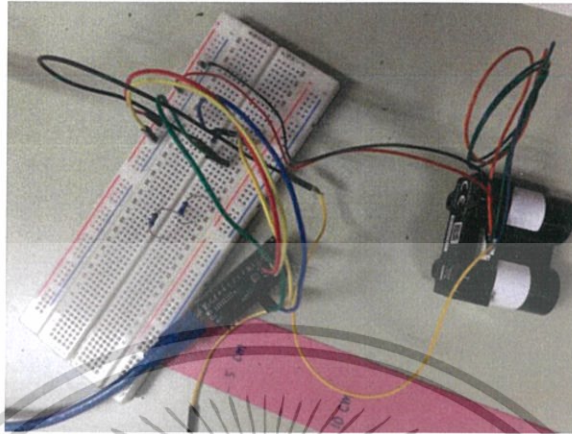
รูปที่ 3.19 โปรแกรมวัดระยะทางโดยแบบ PWM

กำหนดที่เก็บค่า pulsewidth แบบจำนวนเต็มขึ้นมา ในส่วนของการตั้งค่า : เริ่มต้นส่งข้อมูลแบบอนุกรม และตั้งค่า trigger pin2 เป็น digital output ตั้งค่า trigger เป็น low สำหรับอ่านข้อมูล จากนั้น ตั้งค่า monitor pin3 เป็น input

ส่วนของการวนรอบ : ระยะเวลาที่ pulse มีค่า high ในหน่วยมิลลิวินาที คือขนาดของ pulse ที่มาจาก pin3 ต่อไปตรวจสอบค่า pulsewidth ถ้าไม่เท่ากับ 0 ให้ นำค่า pulse ไปคำนวณโดยการหาร 10 และแสดงเป็นระยะทางออกมา

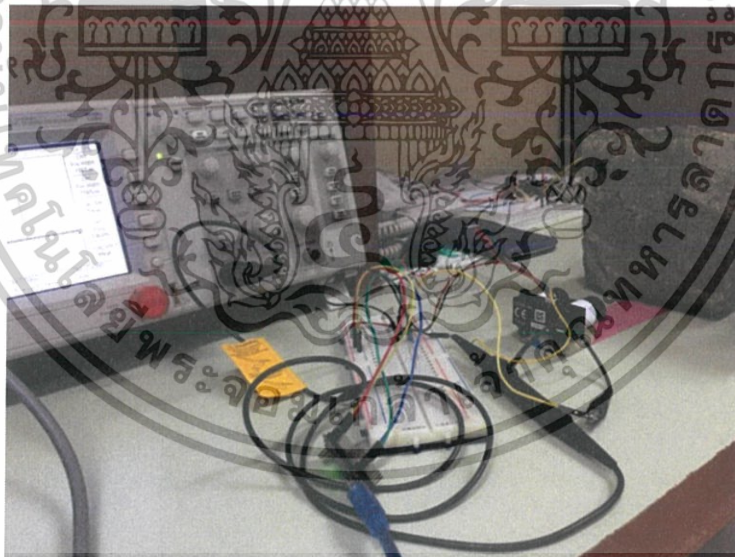
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 6) Lidar มาเชื่อมต่อกับ Oscilloscope ที่ Port output เทียบกับ Ground  
 นำ Lidar มาเชื่อมต่อกับ Oscilloscope ที่ Port output เทียบกับ Ground ต่อสายจาก Oscilloscope กับ Lidar และ บอร์ด Arduino Nano ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ต่อสายจาก Oscilloscope กับ Lidar และ บอร์ด Arduino Nano

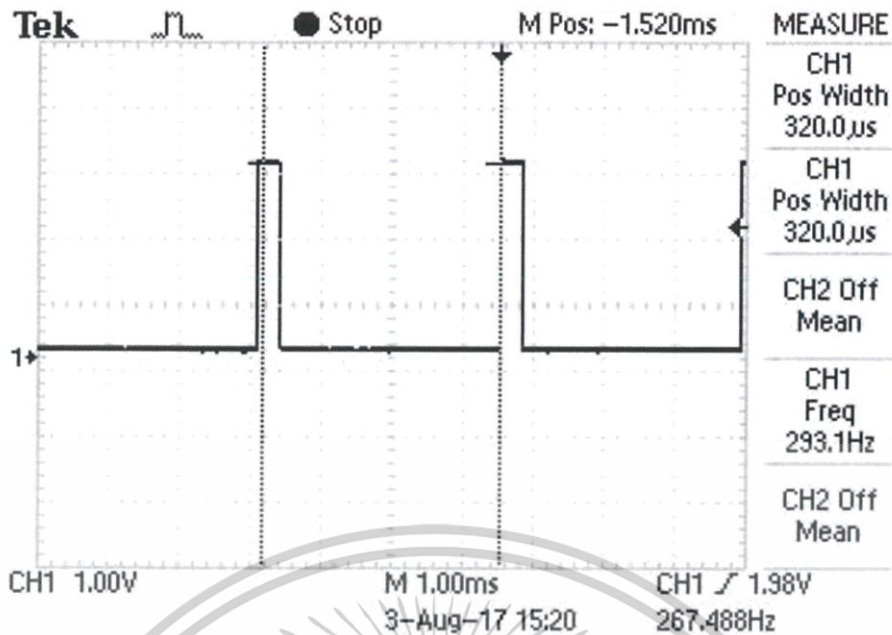
- 7) นำตัวอย่าง 3 ตัวอย่างมาทดสอบ ซึ่งได้แก่ ไม้, มนุษย์ และกำแพงซีเมนต์  
 เมื่อทำการเชื่อมต่อเรียบร้อยแล้ว นำตัวอย่าง 3 ตัวอย่างมาทดสอบ ซึ่งได้แก่ ไม้, มนุษย์ และ กำแพงซีเมนต์ แสดงการทดลองวัดการตรวจจับ ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 การทดลองวัดการตรวจจับของ Lidar

เมื่อ Lidar ตรวจจับระยะทางจากวัสดุได้แล้ว จะได้ผลลัพธ์เป็น Pulse width ออกมา ดังรูปที่ 3.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.22 สัญญาณ Pulse width ที่จับโดย Oscilloscope

หลังจากที่วัดสัญญาณ Pulse width มาได้แล้ว สามารถนำค่าสัญญาณมาคำนวณหา ระยะทางจากสมการที่ 1 เนื่องจากลำแสงที่ส่งผ่านของ Lidar นั้นจะส่งผ่าน 10 ไมโครวินาทีต่อ 1 เซนติเมตร จึงนำค่านี้ไปคำนวณออกมาเป็นระยะทางในหน่วยเซนติเมตรได้ บันทึกผลการทดลอง

### 3.3 การเขียนโปรแกรมตรวจจับวัตถุเพื่อที่จะส่งไปยังส่วนแสดงผล

หลังจากที่ทำการทดสอบการตรวจจับของ Lidar ในส่วนนี้จะเขียนโปรแกรมที่เซนเซอร์เชื่อมต่อกับบลูทูธ เพื่อที่จะส่งข้อมูลไปยังส่วนแสดงผล ซึ่งสามารถเขียนโปรแกรมได้ดังรูป 3.23 และ 3.24

```

1 #include <SoftwareSerial.h>
2 #include <Servo.h>
3 SoftwareSerial BTserial(11, 10); // RX | TX
4 // Connect the HC-05 TX to Arduino pin 11 RX.
5 // Connect the HC-05 RX to Arduino pin 10 TX through a voltage divider.
6
7 int _monitor=5, trigger=4;
8 int pulseWidth1,pulseWidth2,pulseWidth3;
9 String stringOne1,stringOne2,stringOne3;
10
11 Servo myservo;
12
13 void setup()
14 {
15     // start th serial communication with the host computer
16     Serial.begin(38400);
17
18     // start communication with the HC-05 using 38400
19     BTserial.begin(38400);
20
21
22     myservo.attach(9); // start servo
23
24     pinMode(trigger, OUTPUT); // Set trigger pin
25     digitalWrite(trigger, LOW); // Set trigger LOW for continuous read
26
27     pinMode(_monitor, INPUT); // Set monitor pin

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบให้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ผู้ใช้และผู้เผยแพร่ข้อมูลนี้ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

26
27 pinMode(_monitor, INPUT); // Set monitor pin
28 }
29
30 void loop()
31 {
32   myservo.write(54);
33   delay(300);
34   {
35     pulseWidth1 = pulseIn(_monitor, HIGH); // Count how long the pulse is high in microseconds
36     if(pulseWidth1 < 1200){
37       pulseWidth1 = pulseWidth1 / 10; // 10usec = 1 cm of distance
38       if ((pulseWidth1>49) && (pulseWidth1<=69)){
39         Serial.println(pulseWidth1);
40         BTserial.println("A");
41       } else if ((pulseWidth1>79) && (pulseWidth1<=89)){
42         Serial.println(pulseWidth1);
43         BTserial.println("B");
44       } else if ((pulseWidth1>99) && (pulseWidth1<=109)){
45         Serial.println(pulseWidth1);
46         BTserial.println("C");
47       } else if ((pulseWidth1>129) && (pulseWidth1<=149)){
48         Serial.println(pulseWidth1);
49         BTserial.println("D");
50       } else
51       {
52         Serial.println(pulseWidth1);
53       }
54     }
55   }
56 }
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81

```

รูปที่ 3.24 โปรแกรมการคำนวณระยะทางเชื่อมต่อกับบลูทูธ (2)

```

55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81

```

รูปที่ 3.25 โปรแกรมการคำนวณระยะทางเชื่อมต่อกับบลูทูธ (3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

26
27 pinMode(_monitor, INPUT); // Set monitor pin
28 }
29
30 void loop()
31 {
32   myservo.write(54);
33   delay(300);
34   {
35     pulseWidth1 = pulseIn(_monitor, HIGH); // Count how long the pulse is high in microseconds
36     if(pulseWidth1 < 1200){
37       pulseWidth1 = pulseWidth1 / 10; // 10usec = 1 cm of distance
38       if ((pulseWidth1>49)&&(pulseWidth1<=69)){
39         Serial.println(pulseWidth1);
40         BTserial.println("A");
41       } else if ((pulseWidth1>79)&&(pulseWidth1<=89)){
42         Serial.println(pulseWidth1);
43         BTserial.println("B");
44       } else if ((pulseWidth1>99)&&(pulseWidth1<=109)){
45         Serial.println(pulseWidth1);
46         BTserial.println("C");
47       } else if ((pulseWidth1>129)&&(pulseWidth1<=149)){
48         Serial.println(pulseWidth1);
49         BTserial.println("D");
50       } else
51       {
52         Serial.println(pulseWidth1);
53       }
54     }
55   }

```

รูปที่ 3.26 โปรแกรมการคำนวณระยะทางเชื่อมต่อกับบลูทูธ (4)

```

--
91 {
92   Serial.println(pulseWidth2);
93 }
94 }
95 }
96 myservo.write(122);
97 delay(300);
98
99 pulseWidth3 = pulseIn(_monitor, HIGH); // Count how long the pulse is high in microseconds
100 if(pulseWidth3 >= 0){
101   pulseWidth3 = pulseWidth3 / 10; // 10usec = 1 cm of distance
102   if ((pulseWidth3>80)&&(pulseWidth3<=100)){
103     Serial.println(pulseWidth3);
104     BTserial.println("M");
105   } else if ((pulseWidth3>100)&&(pulseWidth3<=250)){
106     Serial.println(pulseWidth3);
107     BTserial.println("N");
108   }
109   else
110   {
111     Serial.println(pulseWidth3);
112   }
113 }
114 }
115 myservo.write(54);
116 delay(175);
117 }

```

รูปที่ 3.27 โปรแกรมการคำนวณระยะทางเชื่อมต่อกับบลูทูธ (5)

ส่วนของการตั้งค่า : เชื่อมต่อ HC-05 ขาส่ง TX เข้ากับ Arduino pin 11 ขารับ RX และเชื่อมต่อ HC-05 ขารับ RX เข้ากับ Arduino pin 10 ขาส่ง TX ผ่านการแบ่งแรงดันไฟฟ้า กำหนดค่า monitor trigger และ pulsewidth กำหนดการเริ่มต้นส่งข้อมูลแบบอนุกรมกับคอมพิวเตอร์แม่ข่าย เริ่มการติดต่อกับ HC-05 โดยใช้ค่า 38400 จากนั้น ตั้งค่า trigger pin เป็น output ตั้งค่า trigger ค่าเป็น low เพื่ออ่านอย่างต่อเนื่อง จากนั้น ตั้งค่า monitor pin เป็น input

ส่วนของการวนรอบ: ระยะเวลาที่ pulse มีค่า high ในหน่วยมิลลิวินาทีจาก monitor จากนั้นตรวจสอบค่า pulsedwidth ถ้าไม่เท่ากับ 0 ให้ นำค่า pulse ไปคำนวณโดยการหาร 10 และ แสดงเป็นระยะทางออกมา

### 3.4 ทดลองการตรวจจับวัตถุของอุปกรณ์

หลังจากเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมการทำงานของ Lidar ที่เชื่อมต่อกับบลูทูธเสร็จเรียบร้อยแล้วทำการทดลองโดยใช้วัตถุที่แตกต่างกันออกไปได้แก่ ไม้ มนุษย์ และกำแพงซีเมนต์

- 1) ติดตั้งอุปกรณ์ให้มีตัวเซนเซอร์ขนานกับพื้น เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดในการวัด
- 2) เชื่อมต่ออุปกรณ์กับ Oscilloscope เพื่อดูสัญญาณ PWM
- 3) เปิดเครื่องให้ทำงานและเริ่มการวัดระยะทาง
- 4) นำไม้มาวางที่ระยะ 10 เซนติเมตร
- 5) วัดระยะทางที่วัดได้จากเลเซอร์ และบันทึกผล
- 6) เปลี่ยนระยะออกแบบของวัตถุไปที่ 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 200, 400, 600, 800, 1000, 2000 และ 3000 เซนติเมตร และบันทึกผลการทดลองระยะจริง
- 7) เปลี่ยนวัตถุเป็น มนุษย์ และทำการทดลองตั้งแต่ข้อที่ 3.4.3 ถึง 3.4.7
- 8) เปลี่ยนวัตถุเป็น กำแพงซีเมนต์ และทำการทดลองตั้งแต่ข้อที่ 3.4.3 ถึง 3.4.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

การทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองของระบบตรวจจับคนเดินเท้าด้วยเลเซอร์ย่านอินฟราเรดผ่านโปรแกรม ARDUINO โดยจะทำการตรวจจับระยะทางของวัตถุ 3 ชนิดด้วยกัน ได้แก่ มนุษย์ (Human), ไม้ (Wood) และซีเมนต์ (Cement) ซึ่งกำหนดความสูงที่ตรวจจับให้แสดงค่าออกมาเป็น 3 ระยะ คือ ความสูงที่น้อยกว่า 80 เซนติเมตร เป็น  $\theta_1$  ความสูงที่ 80 เซนติเมตร เป็น  $\theta_2$  และความสูงที่ 81-180 เซนติเมตร เป็น  $\theta_3$

#### 4.1 การทดสอบประสิทธิภาพและการทำงานของ LIDAR

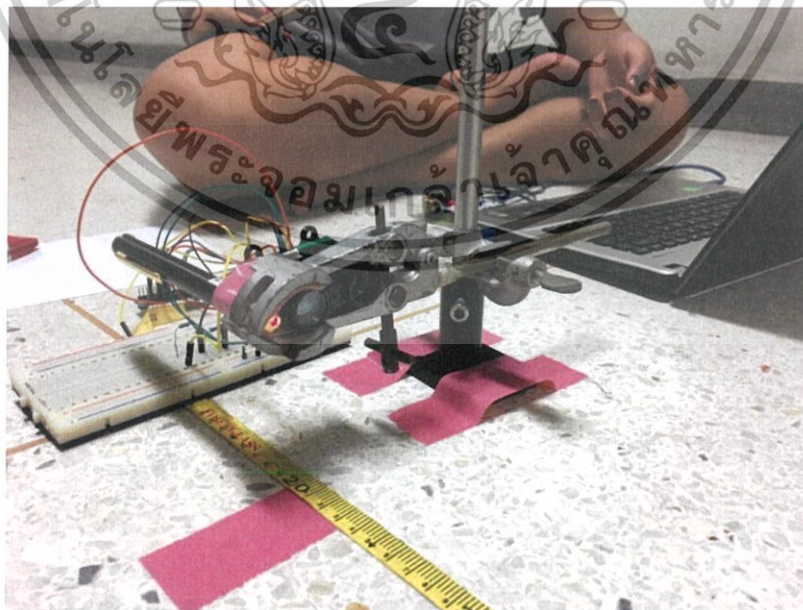
การทดสอบประสิทธิภาพและการทำงานของ LIDAR นี้ จะทำการทดสอบทั้งหมด 3 ตอน คือ วัตการตรวจจับมนุษย์ ไม้ และซีเมนต์

##### 4.1.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

- 1) LIDAR
- 2) มนุษย์
- 3) ไม้
- 4) มนุษย์

##### 4.1.2 การทดสอบและการวิเคราะห์เพื่อใช้ในการตรวจจับมนุษย์ ไม้ และซีเมนต์ ตอนที่ 1 ตรวจจับระยะทางของมนุษย์

- 1) จัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การจัดอุปกรณ์ในการทดสอบประสิทธิภาพของ LIDAR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) ให้มนุษย์ไปยืนที่ระยะ 10 เซนติเมตร
- 3) วัดระยะทางที่วัดได้จากเลเซอร์ และบันทึกผล
- 4) เปลี่ยนระยะออกแบบของวัตถุไปที่ 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 200, 400, 600, 800, 1000, 2000 และ 3000 เซนติเมตร และบันทึกผลการทดลองระยะจริง ดังตารางที่ 4.1

ตอนที่ 2 ตรวจสอบระยะทางของไม้

- 1) จัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.1
- 2) นำไม้ไปวางไว้ที่ระยะ 10 เซนติเมตร
- 3) วัดระยะทางที่วัดได้จากเลเซอร์ และบันทึกผล
- 4) เปลี่ยนระยะออกแบบของวัตถุไปที่ 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200, 500, 1000, 2000 และ 3000 เซนติเมตร และบันทึกผลการทดลองระยะจริง ดังตารางที่ 4.2

ตอนที่ 3 ตรวจสอบระยะทางของซีเมนต์

- 1) จัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 4.1
- 2) นำซีเมนต์ไปวางไว้ที่ระยะ 10 เซนติเมตร
- 3) วัดระยะทางที่วัดได้จากเลเซอร์ และบันทึกผล
- 4) เปลี่ยนระยะออกแบบของวัตถุไปที่ 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200, 500, 1000, 2000 และ 3000 เซนติเมตร และบันทึกผลการทดลองระยะจริง ดังตารางที่ 4.3

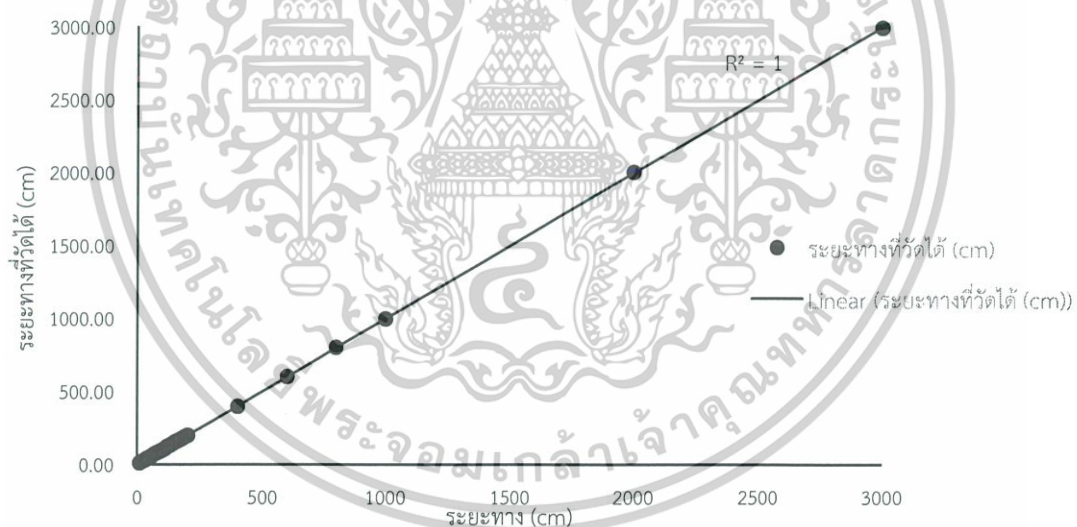
ตารางที่ 4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดระยะทางของมนุษย์

ระยะทาง (cm)	ระยะทางที่วัดได้ (cm)					เฉลี่ย (cm)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
10	10.00	10.00	10.20	10.41	10.01	10.12
20	20.03	19.62	20.44	22.39	20.00	20.50
30	30.00	30.01	30.40	32.66	30.01	30.62
40	40.01	40.01	40.03	44.40	40.84	41.06
50	50.01	50.01	50.40	50.00	50.79	50.24
60	60.01	63.60	62.41	61.60	60.40	61.60
70	70.89	72.00	72.40	73.60	70.00	71.78
80	80.01	80.01	80.00	84.40	80.40	80.96
90	89.61	89.20	90.00	90.00	90.00	89.76
100	100.80	98.40	98.41	97.20	100.00	98.96
110	109.30	106.00	107.20	107.60	110.00	108.02
120	120.40	123.20	122.80	123.60	120.80	122.16
130	130.40	132.00	130.80	131.20	129.60	130.80

เอกสารนี้เป็นเอกสารทูลสงวนลิขสิทธิ์ของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ไม่ควรคัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดระยะทางของมนุษย์

ระยะทาง (cm)	ระยะทางที่วัดได้ (cm)					เฉลี่ย (cm)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
140	140.40	143.20	143.60	144.00	139.20	142.08
150	150.80	152.80	153.60	153.60	150.40	152.24
160	160.00	161.20	161.20	162.40	160.40	161.04
170	170.40	170.00	171.20	170.40	169.90	170.38
180	180.80	180.00	180.80	180.40	180.00	180.40
190	190.80	192.00	191.20	191.20	189.00	190.84
200	200.00	199.20	200.40	201.60	200.00	200.24
400	388.00	397.00	402.00	399.00	404.20	398.04
600	604.00	605.00	601.00	603.20	600.00	602.64
800	802.00	797.00	805.00	805.00	800.00	801.80
1000	992.00	1005.00	992.00	1000.00	1003.00	998.40
2000	1990.00	1990.00	2010.00	2016.00	2012.00	2003.60
3000	3004.00	3012.00	3004.00	2988.00	2956.00	2992.80



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่กำหนด (cm) กับระยะทางที่วัดได้ (cm) ของมนุษย์

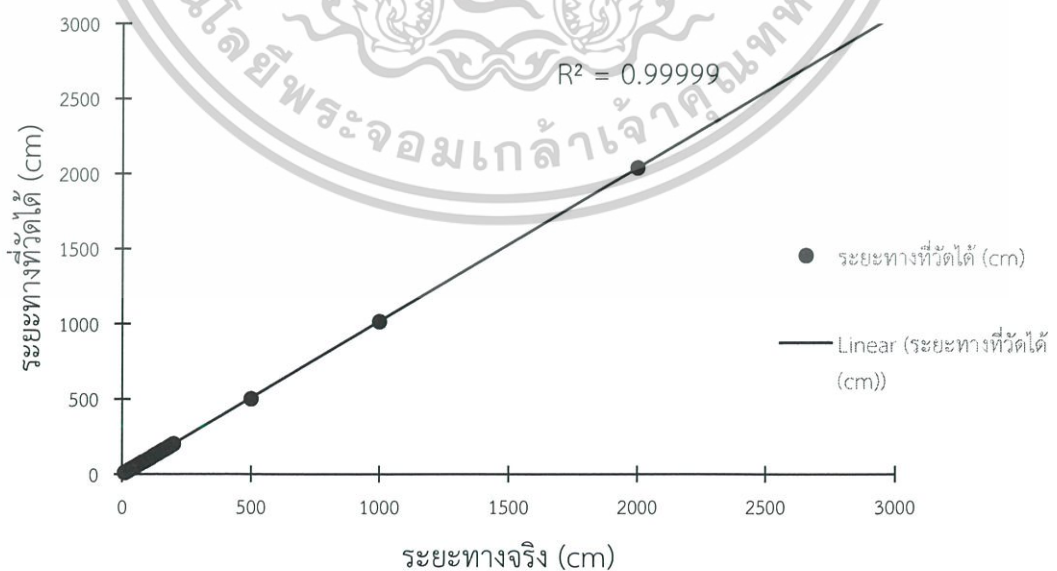
ตารางที่ 4.2 ผลทดสอบประสิทธิภาพการวัดระยะทางของไม้

ระยะทางจริง (cm)	ระยะทางที่วัดได้ (cm)					เฉลี่ย (cm)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
10	10.03	10.18	10.00	10.00	10.01	10.04
20	20.40	20.00	20.81	20.41	20.00	20.32
30	32.00	30.01	30.40	30.01	30.81	30.65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 (ต่อ) ผลทดสอบประสิทธิภาพการวัดระยะทางของไม้

ระยะทาง จริง (cm)	ระยะทางที่วัดได้ (cm)					เฉลี่ย (cm)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
40	40.41	40.81	40.41	40.01	40.41	40.41
50	49.64	50.80	50.00	50.40	50.81	50.33
70	71.60	70.81	72.40	71.21	70.70	71.34
80	83.60	80.81	80.01	80.01	80.88	81.06
110	104.40	110.40	107.20	108.00	108.40	107.68
120	120.40	120.80	120.40	121.00	120.00	120.52
130	129.20	130.00	130.40	131.00	129.20	129.96
140	141.20	139.60	140.00	140.00	140.80	140.32
150	150.00	151.20	149.20	150.00	150.40	150.16
160	160.00	160.40	160.40	160.00	162.50	160.66
170	171.20	169.20	170.80	170.00	169.60	170.16
180	179.60	181.60	180.40	181.00	180.80	180.68
190	190.40	191.70	190.50	191.00	190.40	190.80
200	201.00	202.00	202.00	201.00	203.60	201.92
500	503.50	503.50	504.00	500.00	500.00	502.20
1000	1018.00	1019.00	1019.00	1010.00	1013.00	1015.80
2000	2044.00	2043.50	2043.50	2025.00	2040.00	2039.20
3000	3066.00	3066.00	3066.00	3059.00	3063.00	3064.00

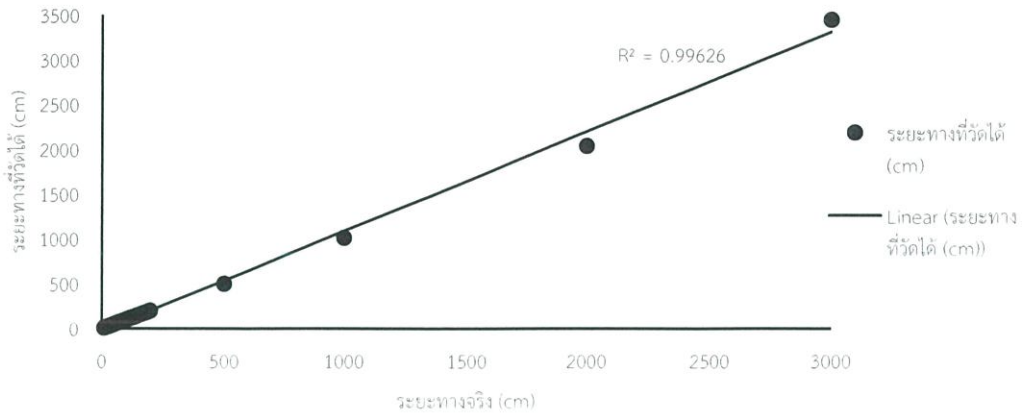


เอกสารนี้เป็นรูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริง (cm) กับระยะทางที่วัดได้ (cm) ของไม้ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลทดสอบประสิทธิภาพการวัดระยะทางของซีเมนต์

ระยะทางจริง (cm)	ระยะทางที่วัดได้ (cm)					เฉลี่ย (cm)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
10	10.02	10.11	10.01	10.01	10.01	10.03
20	20.05	20.01	20.01	20.02	20.01	20.02
30	30.01	30.02	30.01	30.02	30.01	30.01
40	40.01	40.01	40.04	40.01	40.03	40.02
50	50.02	50.01	50.06	50.01	50.01	50.02
60	60.02	60.01	60.01	60.01	60.01	60.01
70	70.00	70.01	70.01	70.01	70.04	70.01
80	79.99	80.01	80.05	80.01	80.02	80.02
90	90.02	90.01	90.00	90.01	90.01	90.01
100	101.00	100.00	100.00	100.00	101.00	100.40
110	110.00	110.00	110.00	110.00	110.00	110.00
120	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00
130	130.00	130.00	130.00	130.00	130.10	130.02
140	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00	140.00
150	150.10	150.00	150.00	150.00	150.00	150.02
160	161.00	160.00	160.00	160.00	160.00	160.20
170	170.00	171.00	170.00	171.00	171.10	170.62
180	181.00	181.00	180.00	180.00	180.00	180.40
190	190.00	190.00	190.00	190.00	190.00	190.00
200	201.00	202.00	200.00	200.00	204.00	201.40
500	503.50	504.00	504.00	500.00	501.00	502.50
1000	1019.50	1019.00	1019.00	1015.00	1013.00	1017.10
2000	2044.50	2046.00	2045.50	2041.00	2042.00	2043.80
3000	3058.50	3059.50	3059.00	3053.00	3033.00	3052.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริง (cm) กับระยะทางที่วัดได้ (cm) ของซีเมนต์

## 4.2 การทดสอบและการทำงานของระบบตรวจจับคนเดินเท้าด้วยเลเซอร์ย่านอินฟราเรดผ่านโปรแกรม ARDUINO

การทดสอบและการทำงานของระบบตรวจจับคนเดินเท้าด้วยเลเซอร์ย่านอินฟราเรดนั้นจะทำการทดลองทั้งหมด 3 ขั้นตอน คือ

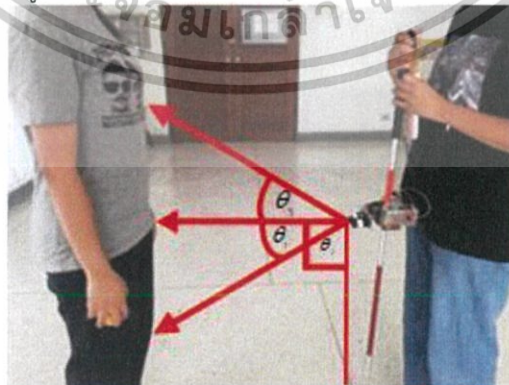
### 4.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- 1) ไม่ทำข่าว
- 2) ระบบตรวจจับคนเดินเท้าด้วยเลเซอร์ย่านอินฟราเรด
- 3) มนุษย์
- 4) ไม้
- 5) ซีเมนต์

### 4.2.2 การทดลองการตรวจจับวัตถุของระบบตรวจจับคนเดินเท้าย่านอินฟราเรด

ตอนที่ 1 ทดสอบการตรวจจับวัตถุของระบบตรวจจับคนเดินเท้าย่านอินฟราเรดที่ตรวจจับมนุษย์ (Human)

- 1) จัดอุปกรณ์ดังรูป 4.5



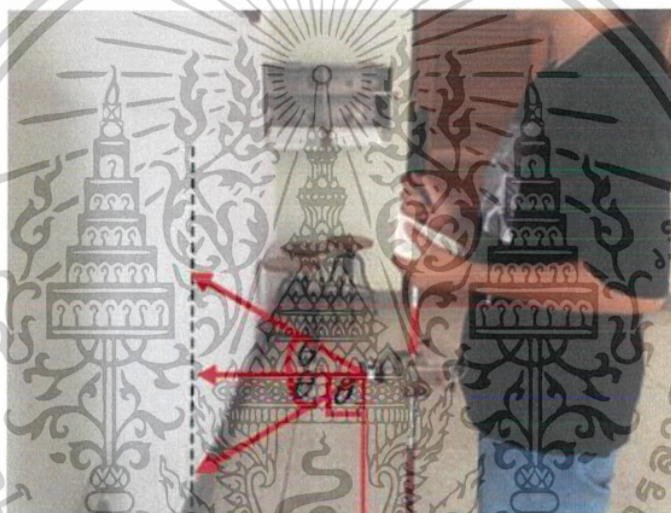
รูปที่ 4.5 ภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นมนุษย์ (Human)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) ให้มนุษย์ไปยืนที่ระยะ 30 เซนติเมตร
- 3) วัดระยะทางที่วัดได้จากเลเซอร์ และบันทึกผล
- 4) เปลี่ยนระยะออกแบบของวัตถุไปที่ 60, 90, 100, 250, 500, 1000, 2000 และ 3000 เซนติเมตร และบันทึกผลการทดลองระยะจริง ดังตารางที่ 4.4 - 4.7
- 5) กำหนดความสูงของวัตถุที่เป็นมนุษย์ (Human) โดย
  - 5.1 ความสูงที่ น้อยกว่า 80 เซนติเมตร เป็น  $\theta_1$
  - 5.2 ความสูงที่ 80 เซนติเมตร เป็น  $\theta_2$
  - 5.3 ความสูงที่ 81-180 เซนติเมตร เป็น  $\theta_3$

ตอนที่ 2 ทดสอบการตรวจจับวัตถุของระบบตรวจจับคนเดินเท้าย่านอินฟราเรดที่ตรวจจับซีเมนต์ (Cement)

- 1) จัดอุปกรณ์ดังรูป 4.6



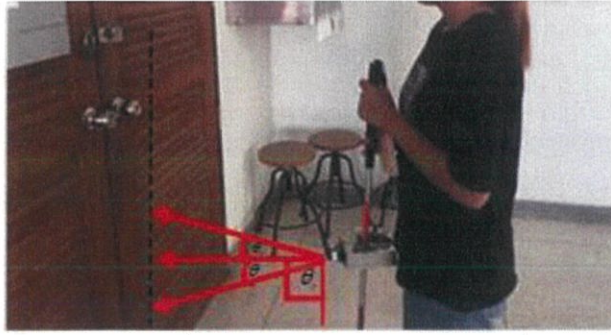
รูปที่ 4.6 ภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นซีเมนต์ (Cement)

- 2) นำไม้ไปวางไว้ที่ระยะ 30 เซนติเมตร
- 3) วัดระยะทางที่วัดได้จากเลเซอร์ และบันทึกผล
- 4) เปลี่ยนระยะออกแบบของวัตถุไปที่ 60, 90, 100, 250, 500, 1000, 2000 และ 3000 เซนติเมตร และบันทึกผลการทดลองระยะจริง ดังตารางที่ 4.8 - 4.11
- 5) กำหนดความสูงของวัตถุที่เป็นมนุษย์ (Human) โดย
  - 5.1 ความสูงที่น้อยกว่า 80 เซนติเมตรเป็น  $\theta_1$
  - 5.2 ความสูงที่ 80 เซนติเมตร เป็น  $\theta_2$
  - 5.3 ความสูงที่ 81-180 เซนติเมตร เป็น  $\theta_3$

ตอนที่ 3 ทดสอบการตรวจจับวัตถุของระบบตรวจจับคนเดินเท้าย่านอินฟราเรดที่ตรวจจับไม้ (Wood)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 1) จัดอุปกรณ์ดังรูป 4.7



รูปที่ 4.7 ภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นไม้ (Wood)

- 2) นำไม้ไปวางไว้ที่ระยะ 30 เซนติเมตร
- 3) วัดระยะทางที่วัดได้จากเลเซอร์ และบันทึกผล
- 4) เปลี่ยนระยะออกแบบของวัตถุไปที่ 60, 90, 100, 250, 500, 1000, 2000 และ 3000 เซนติเมตร และบันทึกผลการทดลองระยะจริง ดังตารางที่ 4.12 - 4.15
- 5) กำหนดความสูงของวัตถุที่เป็นมนุษย์ (Human) โดย
  - 5.1 ความสูงที่น้อยกว่า 80 เซนติเมตร เป็น  $\theta_1$
  - 5.2 ความสูงที่ 80 เซนติเมตร เป็น  $\theta_2$
  - 5.3 ความสูงที่ 81 - 180 เซนติเมตร เป็น  $\theta_3$

#### 4.3 ผลการทดลองการตรวจจับวัตถุของระบบตรวจจับคนเดินเท้าย่านอินพราเรด

##### 4.3.1 ผลการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นมนุษย์ (Human)

ผลการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นมนุษย์ (Human) มีค่าดัชนีหักเห (Refractive index :  $n$ ) เท่ากับ 1.36 เปรียบเทียบกับค่าระยะทางจริง โดย

กำหนดความสูงของวัตถุที่เป็นมนุษย์ (Human) คือ

- ความสูงที่น้อยกว่า 80 เซนติเมตร เป็น  $\theta_1$
- ความสูงที่ 80 เซนติเมตร เป็น  $\theta_2$
- ความสูงที่ 81 - 180 เซนติเมตร เป็น  $\theta_3$

ทำการทดลองจำนวน 5 ครั้ง และหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.4 - 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

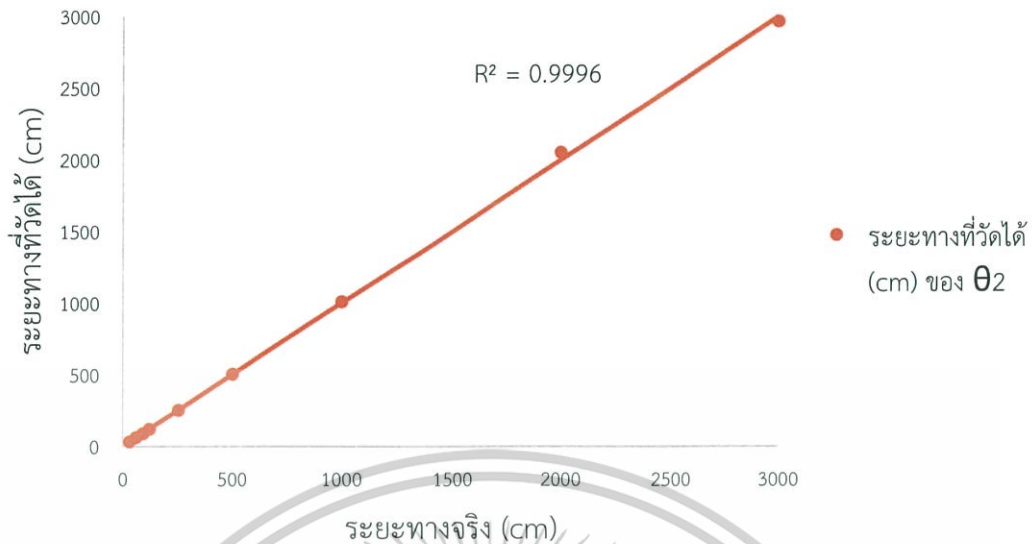
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการตรวจจับวัตถุที่เป็นมนุษย์ (Human) มีค่าดัชนีหักเห (Refractive Index:  $n$ ) เท่ากับ 1.36 ที่ระยะทางที่วัดได้ของ  $\theta_1$  โดยวัตถุสูงน้อยกว่า 80 cm เปรียบเทียบกับค่าระยะทางจริง

ระยะทางจริง (cm)	ระยะทางที่วัดได้ (cm) ของ $\theta_1$					ระยะ ทางที่วัดได้ เฉลี่ย (cm)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
30	77	76	70	76	62	72.2
60	119	124	155	129	143	134.0
90	139	132	127	126	132	131.2
120	144	148	143	147	141	144.6
250	A	A	A	A	A	A
500	A	A	A	A	A	A
1000	A	A	A	A	A	A
2000	A	A	A	A	A	A
3000	A	A	A	A	A	A

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นมนุษย์ (Human) มีค่าดัชนีหักเห (Refractive index :  $n$ ) เท่ากับ 1.36 ที่ระยะทางที่วัดได้ของ  $\theta_2$  โดยวัตถุสูง 80 cm เปรียบเทียบกับค่าระยะทางที่จริง

ระยะทาง จริง(cm)	ระยะทางที่วัดได้ (cm) ของ $\theta_2$					ระยะทาง ที่วัดได้ เฉลี่ย (cm)	เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อน (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
30	31.00	31.00	29.00	31.00	32.00	30.80	2.67
60	59.00	60.00	60.00	59.00	62.00	60.00	0.00
90	90.00	86.00	87.00	86.00	86.00	87.00	3.33
120	119.00	117.00	117.00	117.00	123.00	118.60	1.17
250	251.00	251.00	251.00	249.00	252.00	250.80	0.32
500	502.00	500.00	502.00	500.00	501.00	501.00	0.20
1000	1008.00	1002.00	1008.00	1014.00	1012.00	1008.80	0.88
2000	2052.00	2049.00	2045.00	2047.00	2057.00	2050.00	2.50
3000	2972.00	2956.00	-	-	-	2964.00	1.20

จากตารางที่ 4.5 นำข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่จริง (cm) กับระยะทางที่วัดได้ (cm) ที่เอกสารเป็นเอกสารผลงานวิจัยหรือการเขียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าต้นฉบับเอกสารวิชาการ  
 $\theta_2$  ของมนุษย์ (Human) แสดงดังรูปที่ 4.8  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ผลการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นมนุษย์ (Human) เปรียบเทียบกับค่าระยะทางจริง โดยวัตถุสูง 80 cm ( $\theta_2$ )

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นมนุษย์ (Human) มีค่าดัชนีหักเห (Refractive index :  $n$ ) เท่ากับ 1.36 ที่ระยะทางที่วัดได้ ของ  $\theta_3$  โดยวัตถุสูง 81-180 cm เปรียบเทียบกับค่าระยะทางจริง

ระยะทางจริง (cm)	ระยะทางที่วัดได้ (cm) ของ $\theta_3$					ระยะทางที่ วัดได้เฉลี่ย (cm)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
30	74.00	107.00	94.00	75.00	101.00	90.20
60	308.00	223.00	303.00	310.00	300.00	288.80
90	305.00	307.00	308.00	B	307.00	306.20
120	B	B	B	B	B	B
250	B	B	B	B	B	B
500	B	B	B	B	B	B
1000	B	B	B	B	B	B
2000	B	B	B	B	B	B
3000	B	B	B	B	B	B

\*\*\*หมายเหตุ A คือ จุดที่ไม่สามารถตรวจจับวัตถุได้ (พบพื้น), B คือ จุดที่ไม่สามารถตรวจจับวัตถุได้ (พบเพดาน)  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 ผลการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นไม้ (Wood)

ผลการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นไม้ (Wood) มีค่าดัชนีหักเห (Refractive index : n เท่ากับ 1.60 เปรียบเทียบกับค่าระยะทางจริง โดย

กำหนดความสูงของวัตถุที่เป็นไม้ (Wood) คือ

- ความสูงที่น้อยกว่า 80 เซนติเมตร เป็น  $\theta_1$
- ความสูงที่ 80 เซนติเมตร เป็น  $\theta_2$
- ความสูงที่ 81-180 เซนติเมตร เป็น  $\theta_3$

ทำการทดลองจำนวน 5 ครั้ง และหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.7 - 4.9

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นไม้ (Wood) มีค่าดัชนีหักเห (Refractive index : n) เท่ากับ 1.60 ที่ระยะทางที่วัดได้ ของ  $\theta_1$  โดยวัตถุสูง ต่ำกว่า 80 cm เปรียบเทียบกับค่าระยะทางที่จริง

ระยะทางจริง (cm)	ระยะทางที่วัดได้ (cm) ของ $\theta_1$					ระยะ ทางที่วัดได้ เฉลี่ย (cm)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
30	76.00	60.00	58.00	62.00	77.00	66.60
60	97.00	98.00	93.00	87.00	86.00	92.20
90	129.00	125.00	124.00	134.00	124.00	127.20
120	150.00	143.00	147.00	144.00	151.00	147.00
250	A	A	A	A	A	A
500	A	A	A	A	A	A
1000	A	A	A	A	A	A
2000	A	A	A	A	A	A
3000	A	A	A	A	A	A

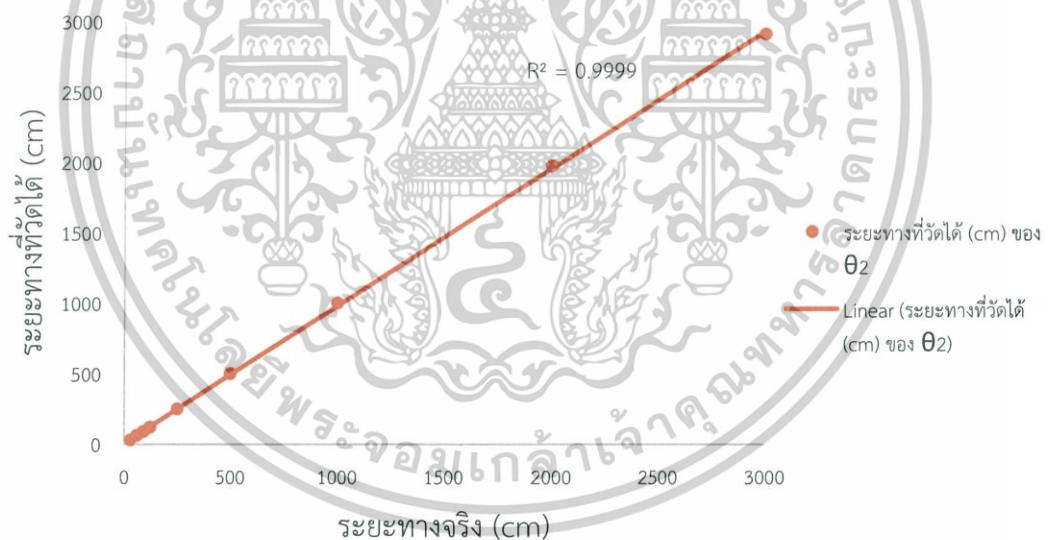
ตารางที่ 4.8 ผลการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นไม้ (Wood) มีค่าดัชนีหักเห (Refractive index : n) เท่ากับ 1.60 ที่ระยะทางที่วัดได้ ของ  $\theta_2$  โดยวัตถุสูง 80 cm เปรียบเทียบกับค่าระยะทางจริง

ระยะทางจริง (cm)	ระยะทางที่วัดได้ (cm) ของ $\theta_2$					ระยะทาง ที่วัดได้ เฉลี่ย (cm)	เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อน (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
30	30.00	30.00	29.00	29.00	29.00	29.40	2.00
60	59.00	59.00	61.00	60.00	62.00	60.20	0.33
90	92.00	89.00	89.00	90.00	88.00	89.60	0.44

ตารางที่ 4.8 (ต่อ) ผลการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นไม้ (Wood) มีค่าดัชนีหักเห (Refractive index :  $n$ ) เท่ากับ 1.60 ที่ระยะทางที่วัดได้ ของ  $\theta_2$  โดยวัตถุสูง 80 cm เปรียบเทียบกับค่าระยะทางจริง

ระยะทางจริง (cm)	ระยะทางที่วัดได้ (cm) ของ $\theta_2$					ระยะทางที่วัดได้เฉลี่ย (cm)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
120	119.00	120.00	119.00	119.00	121.00	119.60	0.33
250	249.00	249.00	250.00	251.00	252.00	250.20	0.08
500	501.00	502.00	501.00	500.00	500.00	500.80	0.16
1000	1002.00	1005.00	1001.00	1000.00	1001.00	1001.80	0.18
2000	1974.00	1978.00	-	-	-	1976.00	1.20
3000	2917.00	2912.00	-	-	-	2914.50	2.85

จากตารางที่ 4.8 นำข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจริง (cm) กับระยะทางที่วัดได้ (cm) ที่  $\theta_2$  ของไม้ (Wood) แสดงดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นไม้ (Wood) เปรียบเทียบกับค่าระยะทาง โดยวัตถุสูง 80 cm ( $\theta_2$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นไม้ (Wood) มีค่าดัชนีหักเห (Refractive index : n) เท่ากับ 1.60 ที่ระยะทางที่วัดได้ ของ  $\theta_3$  โดยวัตถุสูงกว่า 80 cm เปรียบเทียบกับค่าระยะทาง

ระยะทางจริง (cm)	ระยะทางที่วัดได้ (cm) ของ $\theta_3$					ระยะทางที่วัดได้เฉลี่ย (cm)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
30	88	109	96	95	92	96.0
60	301	297	305	306	304	302.6
90	304	301	309	312	B	306.5
120	B	B	B	B	B	B
250	B	B	B	B	B	B
500	B	B	B	B	B	B
1000	B	B	B	B	B	B
2000	B	B	B	B	B	B
3000	B	B	B	B	B	B

\*\*\*หมายเหตุ A คือ จุดที่ไม่สามารถตรวจจับวัตถุได้ (พบพื้น)  
B คือ จุดที่สามารถตรวจจับวัตถุได้ (พบเพดาน)

#### 4.3.3 ผลการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นซีเมนต์ (Cement)

ผลการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นซีเมนต์ (Cement) มีค่าดัชนีหักเห (Refractive index : n) เท่ากับ 1.55 เปรียบเทียบกับค่าระยะทาง โดยกำหนดความสูงของวัตถุที่เป็นซีเมนต์ (Cement) คือ

- ความสูงที่น้อยกว่า 80 cm เป็น  $\theta_1$
- ความสูงที่ 80 cm เป็น  $\theta_2$
- ความสูงที่ 81 - 180 cm เป็น  $\theta_3$

ทำการทดลองจำนวน 5 ครั้ง และหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.10 - 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นซีเมนต์ (Cement) มีค่าดัชนีหักเห (Refractive Index:  $n$ ) เท่ากับ 1.55 ที่ระยะทางที่วัดได้ ของ  $\theta_1$  โดยวัตถุสูง ต่ำกว่า 80 cm เปรียบเทียบกับค่าระยะทางจริง

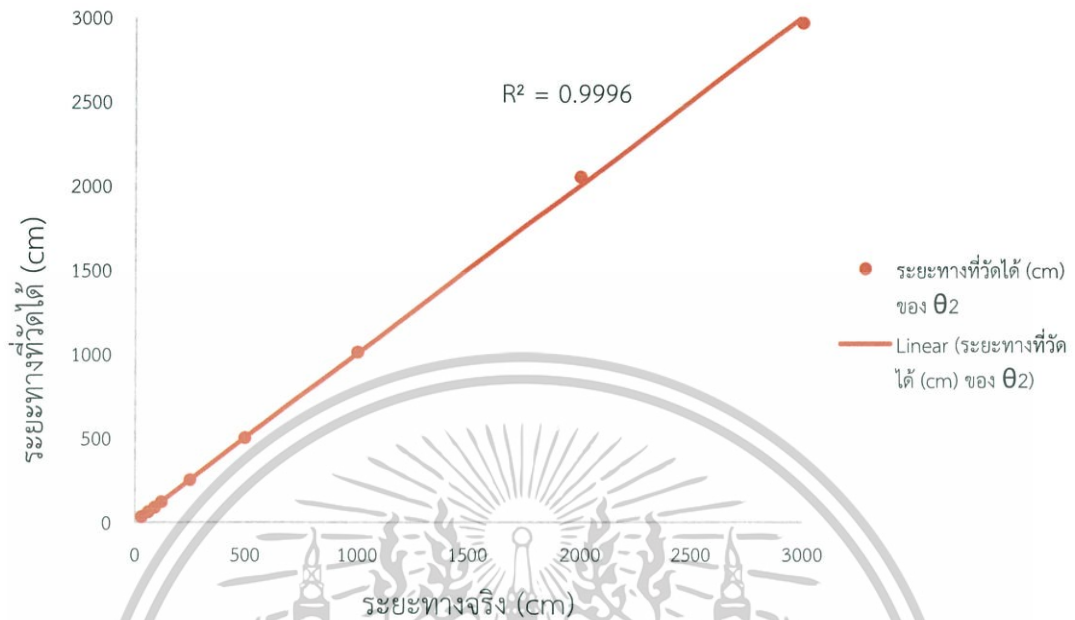
ระยะทางจริง (cm)	ระยะทางที่วัดได้ (cm) ของ $\theta_1$					ระยะทาง ที่วัดได้ เฉลี่ย (cm)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
30	53.00	52.00	58.00	52.00	58.00	54.60
60	88.00	85.00	90.00	86.00	91.00	88.00
90	127.00	119.00	138.00	119.00	130.00	126.60
120	145.00	140.00	153.00	151.00	162.00	150.20
250	A	A	A	A	A	A
500	A	A	A	A	A	A
1000	A	A	A	A	A	A
2000	A	A	A	A	A	A
3000	A	A	A	A	A	A

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นซีเมนต์ (Cement) มีค่าดัชนีหักเห (Refractive Index:  $n$ ) เท่ากับ 1.55 ที่ระยะทางที่วัดได้ ของ  $\theta_2$  โดยวัตถุสูง 80 cm เปรียบเทียบกับค่าระยะทางจริง

ระยะทาง (cm)	ระยะทางที่วัดได้ (cm) ของ $\theta_2$					ระยะทาง ที่วัดได้ เฉลี่ย (cm)	เปอร์เซ็นต์ ความคลาด เคลื่อน (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
30	30.00	29.00	31.00	30.00	31.00	30.20	0.67
60	59.00	60.00	59.00	59.00	60.00	59.40	1.00
90	90.00	90.00	90.00	91.00	89.00	90.00	0.00
120	121.00	120.00	120.00	119.00	119.00	119.80	0.17
250	249.00	250.00	248.00	247.00	247.00	248.20	1.20
500	500.00	500.00	500.00	500.00	501.00	500.20	0.04
1000	1001.00	1002.00	998.00	1001.00	1012.00	1002.80	0.28
2000	1978.00	1977.00	1986.00	1970.00	1970.00	1976.20	1.19
3000	2830.00	2839.00	2806.00	2814.00	-	2822.30	5.92

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.11 นำข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่จริง (cm) กับระยะทางที่วัดได้ (cm) ที่  $\theta_2$  ของซีเมนต์ (Cement) แสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ผลการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นซีเมนต์ (Cement) เปรียบเทียบกับค่าระยะทางจริง โดยวัตถุสูง 80 cm ( $\theta_2$ )

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองตรวจจับวัตถุที่เป็นซีเมนต์ (Cement) มีค่าดัชนีหักเห (Refractive Index:  $n$ ) เท่ากับ 1.55 ที่ระยะทางที่วัดได้ ของ  $\theta_3$  โดยวัตถุสูง 81 – 180 cm เปรียบเทียบกับค่าระยะทางจริง

ระยะทางจริง (cm)	ระยะทางที่วัดได้ (cm) ของ $\theta_3$					ระยะทางที่ วัดได้เฉลี่ย (cm)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	
30	88.00	81.00	84.00	84.00	81.00	83.60
60	111.00	111.00	113.00	112.00	115.00	112.40
90	167.00	167.00	201.00	206.00	191.00	186.40
120	251.00	232.00	263.00	257.00	267.00	254.00
250	278.00	282.00	286.00	282.00	28.60	282.80
500	B	B	B	B	B	B
1000	B	B	B	B	B	B
2000	B	B	B	B	B	B
3000	B	B	B	B	B	B

เอกสารนี้ เป็นเอกสารที่ A คือ จุดที่ไม่สามารถตรวจจับวัตถุได้ (พบพื้น) ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น B คือ จุดที่ไม่สามารถตรวจจับวัตถุได้ (พบเพดาน) เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 ผลการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างระยะทางที่วัดได้ของวัตถุที่เป็นมนุษย์ (Human), ไม้ (Wood) และ ซีเมนต์ (Cement) ของ  $\theta_2$

ระยะทางที่จริง (cm)	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)		
	มนุษย์ (Human) n=1.36	ซีเมนต์ (Cement) n=1.55	ไม้ (Wood) n=1.60
30	2.67	0.67	2.00
60	0.00	1.00	0.33
90	3.33	0.00	0.44
120	1.17	0.17	0.33
250	0.32	1.20	0.08
500	0.20	0.04	0.16
1000	0.88	0.28	0.18
2000	2.50	1.19	1.20
3000	1.20	5.92	2.85
เฉลี่ย	1.36	1.16	0.84

#### 4.4 อภิปรายผล

จากการทดสอบความแม่นยำของ LIDAR กับวัตถุแต่ละชนิดพบว่า กราฟระหว่างระยะทางจริงกับระยะทางที่วัดได้นั้นมีค่า R-Square ( $R^2$ ) ที่แตกต่างกัน ซึ่งค่า R-Squared ( $R^2$ ) สามารถบ่งบอกถึงความแม่นยำในการตรวจวัดวัตถุ ดังนั้นค่า R-Square ( $R^2$ ) ที่มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับ 1 จะสามารถบอกได้ว่ามีความแม่นยำที่สูง [16]

จากการทดสอบพบว่า มนุษย์ (Human) มีค่า R-Squared ( $R^2$ ) = 1 [17] ดังรูปที่ 4.2 ไม้ (Wood) มีค่า R-Squared ( $R^2$ ) = 0.9999 [18] ดังรูปที่ 4.3 และ ซีเมนต์ (Cement) มีค่า R-Squared ( $R^2$ ) = 0.9962 [19] ดังรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าค่า R-Squared ( $R^2$ ) ของแต่ละวัตถุนั้นมีค่าใกล้เคียง 1 จึงสามารถบอกได้ว่าอุปกรณ์ LIDAR นั้นมีความแม่นยำในการตรวจวัดวัตถุที่สูง

จากการทดลองระบบตรวจจับคนเดินเท้าย่านอินฟราเรดพบว่าค่า R-Squared ( $R^2$ ) ของมนุษย์ (Human) มีค่า 0.9996 ดังรูปที่ 4.8 ค่า R-Squared ( $R^2$ ) ของไม้ (wood) มีค่า 0.9999 ดังรูปที่ 4.9 และ ค่า R-Squared ( $R^2$ ) ของซีเมนต์ (Cement) มีค่า 0.9996 ดังรูปที่ 4.10 จะสังเกตได้ว่าค่า R-Squared ( $R^2$ ) ของแต่ละวัตถุนั้นมีค่าใกล้เคียง 1 จึงสามารถบอกได้ว่าระบบตรวจจับคนเดินเท้าย่านอินฟราเรดนั้นมีความแม่นยำในการตรวจวัดวัตถุที่สูง แต่ทว่ากรณีที่พิจารณาเฉพาะค่า R-Squared ( $R^2$ ) เพียงอย่างเดียวนั้นไม่เพียงพอที่จะสามารถบอกได้ว่าการตรวจวัดวัตถุแต่ละชนิดมีความแม่นยำมากเพียงใด จึงจำเป็นต้องพิจารณาค่าดัชนีหักเห (Refractive Index : n) ของวัตถุแต่ละชนิดและพิจารณาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการทดลอง

โดยค่าดัชนีหักเห (Refractive Index : n) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนความเร็วของแสงเมื่อผ่านตัวกลางต่างชนิดกัน ซึ่งถ้าหากค่าดัชนีหักเหมีค่ามากก็จะมีหักเหที่สูงในทำนองเดียวกันถ้าหากค่าดัชนีหักเหมีค่าน้อยก็จะมีหักเหที่ต่ำ จากค่าดัชนีหักเห (Refractive index : n) ของ

มนุษย์ (Human) มีค่า  $n=1.36$  ค่าดัชนีหักเห (Refractive index :  $n$ ), ของไม้ (wood) มีค่า  $n=1.60$  และค่าดัชนีหักเห (Refractive index :  $n$ ) ของซีเมนต์ (Cement) มีค่า  $n=1.55$  ซึ่งจะสังเกตได้ว่าค่าดัชนีเหของของไม้ (wood) และซีเมนต์ (Cement) มีค่าที่ใกล้เคียงกันเพราะว่ามีคุณสมบัติเป็น homogeneous ที่มีสารเนื้อเดียวกันตลอดทั้งแผ่น แต่ทว่าร่างกายมนุษย์มีคุณสมบัติเป็น inhomogeneous ซึ่งมีเนื้อเยื่อที่ไม่เหมือนกันตลอดทั้งร่างกายจึงทำให้ค่าดัชนีหักเห (Refractive index :  $n$ ) มีค่าน้อยกว่าไม้และซีเมนต์ ด้วยคุณสมบัติของวัสดุเหล่านี้จึงมีผลต่อการตรวจจบบั้วตูดของระบบตรวจจบบคนเดินเท้าย่านอินฟราเรด ซึ่งสามารถอภิปรายได้ตามตารางที่ 4.11 ข้างล่างนี้

**ตารางที่ 4.14** ผลการเปรียบเทียบระหว่างดัชนีหักเหของมนุษย์ (Human), ซีเมนต์ (Cement) และ ไม้ (wood) กับค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนระหว่างระยะทางที่วัดได้ของวัตถุที่เป็น มนุษย์ (Human), ซีเมนต์ (Cement) และไม้ (Wood) ของ  $\theta_2$

วัตถุที่ใช้ในการทดลอง	ดัชนีหักเห (Refractive index : $n$ )	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน (%)
มนุษย์ (Human)	1.36	1.36
ซีเมนต์ (Cement)	1.55	1.31
ไม้ (Wood)	1.60	0.84

จากการเปรียบเทียบระหว่างดัชนีหักเห (Refractive index :  $n$ ) และ เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนดังตารางที่ 4.11 พบว่า ดัชนีหักเห (Refractive index :  $n$ ) ของมนุษย์ (Human) มีค่าที่มาก จะทำให้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมีค่ามากตาม แต่ทว่า ซีเมนต์ (Cement) และ ไม้ (Wood) นั้น มีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่น้อยเพราะมีค่าดัชนีหักเห (Refractive index :  $n$ ) ที่มาก จึงเป็นข้อสรุปได้ว่าระบบตรวจจบบคนเดินเท้าย่านอินฟราเรดนั้นมีความแม่นยำในการตรวจจบบั้วตูดที่สูงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัย

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดสอบประสิทธิภาพของ LIDAR พบว่า อุปกรณ์ชิ้นนี้ซึ่งเป็นเลเซอร์ย่านอินฟราเรดมีความแม่นยำสูงมากในการตรวจจับวัตถุในระยะใกล้และไกลจึงทำให้เลเซอร์ชนิดนี้เหมาะสมกับการนำมาประยุกต์ใช้ในระบบตรวจจับคนเดินเท้าด้วยเลเซอร์ย่านอินฟราเรดผ่านโปรแกรม ARDUINO โดยที่ติดตั้งไว้ด้านบนของไม้เท้าขาว ซึ่งสามารถนำไปช่วยเหลือผู้พิการทางด้านสายตา

ซึ่งหลังจากนั้นผู้วิจัยได้นำระบบตรวจจับคนเดินเท้าไปติดตั้งกับไม้เท้าอัจฉริยะ เพื่อทำการทดลองโดยการใช้จริง ซึ่งผู้วิจัยได้ออกแบบมุมในการตรวจจับออกเป็น 3 ระยะ คือ ความสูงน้อยกว่า 80 cm ( $\theta_1$ ), ความสูง 80 cm ( $\theta_2$ ) และความสูง 81-180 cm ( $\theta_3$ ) โดยที่การตรวจจับระยะแรก ( $\theta_1$ ) สามารถตรวจจับที่มีวัตถุขนาดเล็กและสามารถระบุพื้นได้ การตรวจจับระยะที่สอง ( $\theta_2$ ) สามารถตรวจจับวัตถุที่มีระดับปกติได้ การตรวจจับระยะสุดท้าย ( $\theta_3$ ) สามารถตรวจจับวัตถุที่มีความสูงกว่าปกติและสามารถระบุเขตแดนได้ ระบบตรวจจับคนเดินเท้าด้วยเลเซอร์ย่านอินฟราเรดที่ติดตั้งกับไม้เท้าอัจฉริยะนั้นมีความแม่นยำในการตรวจจับวัตถุในบริเวณอาคารและสามารถส่งข้อมูลระยะทางของวัตถุกลับมาได้อย่างรวดเร็ว

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. จากการสร้างนำเอาระบบตรวจจับคนเดินเท้าด้วยเลเซอร์ย่านอินฟราเรดไปติดตั้งกับไม้เท้าขาวนั้นพบว่ายังมีการใช้สายไฟที่เกินความจำเป็นอยู่จึงต้องแก้ไขที่จุดนี้
2. ระบบตรวจจับคนเดินเท้าด้วยเลเซอร์ย่านอินฟราเรดนั้นพิจารณาการตรวจจับวัตถุที่อยู่ในอาคาร ซึ่งวัตถุในอาคารมีมากมายที่มากกว่า มนุษย์ ไม้ และซีเมนต์ ในภายภาคหน้างานวิจัยชิ้นนี้อาจจะตรวจจับวัตถุที่มากกว่านี้ได้
3. ระบบตรวจจับคนเดินเท้าด้วยเลเซอร์ย่านอินฟราเรดนั้นใช้แบตเตอรี่ที่มีขนาดใหญ่ ในภายภาคหน้าอาจจะเปลี่ยนมาใช้แบตเตอรี่ที่มีขนาดเล็กลงได้
4. หากพบพื้นที่ที่มีความต่างระดับหรือขรุขระควรจะมีการวางแนวไม้เท้าให้เอียงแทนการใช้ถือแบบตั้งฉากกับพื้นและเปลี่ยนการวัดของเลเซอร์ให้มีแค่ 2 ระดับ ( $\theta_2, \theta_3$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Locharoenrat, Optical Properties of Solids: An Introductory Textbook, Pan Stanford, Singapore, 2016.
- [2] Lidar-lite V3 Operation Manual and Technical Specifications [ออนไลน์] เข้าถึงจาก [http://static.garmin.com/pumac/LIDAR\\_Lite\\_v3\\_Operation\\_Manual\\_and\\_Technical\\_Specifications.pdf](http://static.garmin.com/pumac/LIDAR_Lite_v3_Operation_Manual_and_Technical_Specifications.pdf)
- [3] Aon Micro, 2003, เชื่อมต่อระบบ I2C Bus เขียน/อ่าน EEPROM 24CXX ได้ [ออนไลน์] เข้าถึงจาก [www.geocities.ws/aon\\_micro](http://www.geocities.ws/aon_micro)
- [4] เซเรฟ คนที่โลกไม่ต้องการ, 2016, [Arduino] PWM คืออะไร [ออนไลน์] เข้าถึงจาก [naringroup.blogspot.com](http://naringroup.blogspot.com)
- [5] Thomas Bickford, 1996, Care and Feeding of the Long White Cane: Instructions in Cane Travel for Blind People [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก [nfb.org](http://nfb.org)
- [6] Tarapong Sattagan, 2016, ภาษาของการเขียนโปรแกรม Arduino Board [ออนไลน์] เข้าถึงจาก <https://arduinothing.blogspot.com>
- [7] Arduino, 2013, Tutorial 02: Arduino Nano [ออนไลน์] เข้าถึงจาก : [www.gravitechthai.com](http://www.gravitechthai.com)
- [8] Mr. Computer, 2011, ความหมายและการทำงานของ Bluetooth [ออนไลน์] เข้าถึงจาก [com360.blogspot.com](http://com360.blogspot.com)
- [9] Allicano', 2016, เซอร์ไว้มอเตอร์ [ออนไลน์] เข้าถึงจาก : <http://chanaphinp.blogspot.com>
- [10] กาญจนา จันทร์ประเสริฐ, 2017, การพัฒนาเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตา, วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 25(1), 137-147.
- [11] Y.S.H. Khraisat, Design Infrared Radar System, Contemporary Engineering Sciences, Vol. 5, Issue 3, 2012, 111-117.
- [12] R.K. Megalingam, A. Nambissan, A. Thambi, A. Gopinath, M. Nandakumar, Sound and Touch Based Smart Cane: Better Walking Experience for Visually Challenged, Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS), IEEE International Conference on, October, 22, 2016 Selangor, Malaysia.
- [13] I.Y. Chung, S. Kim, K.H. Rhee, The Smart Cane Utilizing a Smart Phone for The Visually Impaired Person, Consumer Electronics (GCCE), 2014 IEEE 3rd Global Conference on, October, 7-10, 2014, Tokyo, Japan, 106-107.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [14] M.F. Saaid, A.M. Mohammad, M.S.A. Megat Ali, Smart Cane with Range Notification for Blind People, Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS), IEEE International Conference on, October, 22, 2016, Selangor, Malaysia, 225-229.
- [15] E.A. Williams, S.M. Cobbina, S.K. Okrah, Design and Implementation of a Dual Infra-Red Receiver Circuit for Intruder Detection, International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 6, Issue 5, 2016, 494-497.
- [16] F. E. Dowell, E. B. Maghirang, F. Xie, G. L. Lookhart, R. O. Pierce, B. W. Seabourn, S. R. Bean, J. D. Wilson, and O. K. Chung, Predicting Wheat Quality Characteristics and Functionality Using Near-Infrared Spectroscopy, Cereal Chem, Volume 85, Issue 5, 2006, 529-536.
- [17] K.I. Zaytsev, A.A. Gavdush, N.V. Chernomyrdin, S.O. Yurchenko, Highly Accurate in Vivo Terahertz Spectroscopy of Healthy Skin: Variation of Refractive Index and Absorption Coefficient Along the Human Body, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, Volume 5, Issue 5, 2015, 817-827.
- [18] A. Kienle, C. D'Andrea, F. Foschum, P. Taroni and A. Pifferi, Light Propagation in Dry and Wet Softwood, Opt. Exp, Volume 16, Issue 13, 2008, 9895.
- [19] M. P. Gorsky, P. P. Maksimyak and A. P. Maksimyak, Optical Sizing of Cement Particles, Optica Applicata, Volume 11, Issue 2, 2010, 459.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การพัฒนาเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตา

## Development of the Obstacle Warning Instruments

กาญจนา จันทร์ประเสริฐ\*

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต ตำบลหลักหก อำเภอเมือง จังหวัดปทุมธานี 12000

Kanchana Chanprasert\*

Department of Physics, Faculty of Science, Rangsit University, Lak Hok, Muang, Pathum Thani 12000

### บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาที่ช่วยให้ผู้พิการทางสายตามีความปลอดภัยในการใช้ชีวิตประจำวันตามปกติ ผลการพัฒนาได้เครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาที่ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนศีรษะ ส่วนลำตัว และส่วนขา อาศัยหลักการทำงานของสัทธอนของคลื่น โดยประยุกต์ใช้เซนเซอร์แบบอัลตราโซนิก SRF05 และ HC-SR04 เซนเซอร์ PIR เป็นตัวตรวจจับสิ่งกีดขวางและควบคุมการทำงานโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARDUINO#ATMEGA 2560 ทำหน้าที่ประมวลผลกลาง โดยการทำงานของเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาคือเป็นการทำงานแบบไร้สายเพื่อสะดวกต่อการใช้งาน การแสดงสัญญาณเตือนผู้พิการทางสายตาให้รับรู้ว่าสิ่งกีดขวางมี 2 ลักษณะ คือ การสั่นของมอเตอร์และเสียง 3 แบบ คือ “โปรดระวังศีรษะคะ” “โปรดระวังผู้คนพลุกพล่านคะ” และ “โปรดระวังขาคะ” กำหนดโปรแกรมควบคุมเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาจะเริ่มเตือนเมื่อสิ่งกีดขวางอยู่ห่างจากผู้พิการทางสายตา 40-60 เซนติเมตร

คำสำคัญ : ผู้พิการทางสายตา; เซนเซอร์แบบอัลตราโซนิก; ไมโครคอนโทรลเลอร์

### Abstract

The purpose of this research was to develop obstacle warning instruments for the blind so that they are safer in daily life. The development showed that the obstacle warning instruments for the blind were made in three parts; head, waist and leg. The principle of the instruments supported reflection of waves. The instruments composed of ultrasonic sensors; SRF05 and HC-SR04, PIR sensors and are controlled by microcontrollers; ARDUINO#ATMEGA 2560 which is wireless. The microcontroller would display warnings from motor oscillation with three warning sounds. “Mind your head,” “Beware of the people in front of you,” and “Mind your legs.” The instruments’ program default control settings begin to warn when detecting obstacles in the range of 40 to 60 cm.

\*ผู้รับผิดชอบบทความ : kanchanprasert@gmail.com

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Keywords: blind; ultrasonic sensor; microcontroller

## 1. บทนำ

มนุษย์จัดเป็นทรัพยากรที่สำคัญที่สุดที่จะเป็นปัจจัยหลักในการพัฒนาประเทศ เนื่องจากมนุษย์เป็นสิ่งที่สามารถก่อให้เกิดการพัฒนาภายในตนเองและเพิ่มคุณค่าได้ มนุษย์สามารถสะสมความรู้ ทักษะ และประสบการณ์ เพื่อนำไปใช้ในการปฏิบัติงานและพัฒนางานให้ดียิ่งขึ้น สามารถสร้างการเปลี่ยนแปลงให้กับองค์กร สังคมและประเทศชาติได้ ดังนั้นประเทศใดที่มีทรัพยากรมนุษย์ที่พร้อมไปด้วยศักยภาพทั้งทางด้านร่างกาย อารมณ์ จิตใจ และสติปัญญาถือได้ว่าเป็นประเทศที่มีศักยภาพในการพัฒนามากกว่าประเทศอื่น แต่ในความเป็นจริงแล้วในประเทศทุกแห่งบนโลกนี้ยังคงมีทรัพยากรมนุษย์ที่มีความบกพร่องทั้งทางด้านร่างกายและจิตใจที่เรียกกันว่าคนพิการซึ่งถ้าประเทศใดมีจำนวนกลุ่มคนผู้พิการมากอาจจะส่งผลกระทบต่อพัฒนาประเทศ ทำให้บางครั้งกลุ่มคนผู้พิการเหล่านี้ถูกละเลยจากสังคมจนกลายเป็นกลุ่มผู้ด้อยโอกาสในสังคม ซึ่งแท้จริงแล้วกลุ่มคนผู้พิการเหล่านี้เป็นกลุ่มบุคคลที่ได้รับผลกระทบจากสภาพแวดล้อมทางสังคมที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการดำรงชีพและการมีส่วนร่วมในกิจกรรมของสังคม เช่น การประกอบอาชีพ การศึกษา ดังนั้นจึงควรได้รับการช่วยเหลือสนับสนุนจากสังคมให้สามารถช่วยเหลือตนเองได้ในการดำเนินชีวิตให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพราะนอกจากจะเป็นการลดภาระค่าใช้จ่ายในการดูแลผู้พิการแล้ว ยังเป็นการส่งเสริมและสนับสนุนให้ผู้พิการมีความภาคภูมิใจในการใช้ชีวิตอย่างมีคุณค่า ไม่เป็นภาระของสังคม [1]

สำหรับในประเทศไทยได้มีประกาศกระทรวงการพัฒนาสังคมและความมั่นคงของมนุษย์เรื่องประเภทและหลักเกณฑ์ความพิการ (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2555 กำหนดประเภทความพิการ ไว้ 7 ประเภท ดังนี้

ความพิการทางการเห็น ความพิการทางการได้ยินหรือสื่อความหมาย ความพิการทางการเคลื่อนไหวหรือทางร่างกาย ความพิการทางจิตใจหรือพฤติกรรม ความพิการทางสติปัญญา ความพิการทางการเรียนรู้ และความพิการทางออทิสติก [2] โดยกำหนดคำนิยามของคนพิการทางการเห็นไว้ในประกาศกระทรวงการพัฒนาสังคมและความมั่นคงของมนุษย์ เรื่อง ประเภทและหลักเกณฑ์ความพิการประกาศ ณ วันที่ 30 เมษายน พ.ศ.2552 ข้อ 4 หลักเกณฑ์กำหนดความพิการทางการเห็น ได้แก่ (1) ตาบอด หมายถึง การที่บุคคลมีข้อจำกัดในการปฏิบัติกิจกรรมในชีวิตประจำวันหรือการเข้าไปมีส่วนร่วมในกิจกรรมทางสังคม ซึ่งเป็นผลมาจากกรณีที่มีความบกพร่องในการเห็น เมื่อตรวจวัดการเห็นของสายตาสายที่ตึกว่าเมื่อใช้แว่นสายตาธรรมดาแล้ว อยู่ในระดับต่ำกว่า 3 ส่วน 60 เมตร (3/60) หรือ 20 ส่วน 400 ฟุต (20/400) ลงมาจนกระทั่งมองไม่เห็นแม้แต่แสงสว่าง หรือมีลานสายตาแคบกว่า 10 องศา (2) ตาเห็นเลือนราง หมายถึง การที่บุคคลมีข้อจำกัดในการปฏิบัติกิจกรรมในชีวิตประจำวันหรือการเข้าไปมีส่วนร่วมในกิจกรรมทางสังคม ซึ่งเป็นผลมาจากกรณีที่มีความบกพร่องในการเห็นเมื่อตรวจวัดการเห็นของสายตาสายที่ตึกว่า เมื่อใช้แว่นสายตาธรรมดาแล้ว อยู่ในระดับตั้งแต่ 3 ส่วน 60 เมตร (3/60) หรือ 20 ส่วน 400 ฟุต (20/400) ไปจนถึงต่ำกว่า 6 ส่วน 18 เมตร (6/18) หรือ 20 ส่วน 70 ฟุต (20/70) หรือมีลานสายตาแคบกว่า 30 องศา และจากสถิติข้อมูลคนพิการที่มีบัตรประจำตัวคนพิการ จำแนกตามจังหวัด ประเภทความพิการ และเพศตั้งแต่วันที่ 1 เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2537 ถึงวันที่ 31 เดือนมกราคม พ.ศ. 2557 โดยข้อมูลประมวลผลจากฐานข้อมูลทะเบียนกลางคนพิการ สำนักงานส่งเสริมและพัฒนาคุณภาพชีวิตคน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิการแห่งชาติ มีจำนวนผู้พิการทางการเห็น ชาย 79,656 หญิง 85,426 รวม 165,082 คน ซึ่งเป็นจำนวนที่อยู่ในลำดับที่ 3 รองจากความพิการทางการเคลื่อนไหวหรือทางร่างกาย และความพิการทางการได้ยินหรือสื่อความหมาย (ข้อมูล ณ วันที่ 3 กุมภาพันธ์ 2557) [3] ซึ่งกลุ่มคนความพิการทางการเห็นนี้ถ้าขยายความนิยามกล่าวได้ว่า คือ คนปกติธรรมดาที่สายตามองไม่เห็นหรือมองเห็นได้จำกัด แต่ก็ไม่ได้แตกต่างจากบุคคลทั่วไป เนื่องจากเขาสามารถที่จะพัฒนาตนเองได้ เช่นเดียวกับคนปกติทั่วไป ผู้พิการทางสายตาสามารถเดินทางไปไหนมาไหนได้เอง แต่ก็ต้องขึ้นอยู่กับเหตุปัจจัยหลายประการ เช่น ทักษะในการทำความคุ้นเคยกับสภาพแวดล้อมและการเคลื่อนไหว เทคนิคการใช้ไม้เท้า หรืออุปกรณ์ช่วยในการเดินทางชนิดอื่น ๆ

นอกจากนี้ก็ยังขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมเจตคติของผู้คนรอบข้าง ความคาดหวังของผู้อื่น หรือตนเองที่มีต่อความสามารถของคนตาบอดแต่ละคน แต่ก็ยังมีปัญหาและอุปสรรคที่สำคัญของผู้พิการทางสายตานั้นก็คือความไม่รู้ไม่เข้าใจของคนทั่วไปซึ่งเป็นที่มาของความเชื่อพื้นฐานแบบเวทมนิยม ซึ่งเป็นประการสำคัญยิ่งที่เป็นตัวขัดขวางการพัฒนาคุณภาพชีวิตของผู้พิการทางสายตา ซึ่งผู้พิการทางสายตาหวังจะได้มีฐานะเป็นคนไทยอย่างสมบูรณ์ มีสิทธิหน้าที่และโอกาสเช่นเดียวกับบุคคลทั่วไปในสังคม มีส่วนร่วมคิดร่วมทำ และร่วมรับผิดชอบในกิจการทุกด้านที่เป็นสาธารณะ และมีผลกระทบโดยตรงต่อมนุษย์ทุกคน Dr. Kenneth Jernigan ปรมาศตบอดแห่งศตวรรษที่ 20 ได้กล่าวไว้ว่าปัญหาที่แท้จริงของผู้พิการทางสายตามีใช้การมองไม่เห็น ปัญหาที่แท้จริง คือ ความเข้าใจที่ผิดพลาดและการขาดข้อมูลที่ถูกต้อง หากผู้พิการทางสายตาได้รับการศึกษาฝึกอบรมอย่างถูกต้องและได้รับโอกาสที่เท่าเทียมกับบุคคลทั่วไปแล้ว การตาบอดก็เป็นแค่เพียงความไม่สะดวก หรือความน่ารำคาญทางกายภาพ

เท่านั้น [4]

จากสถานการณ์และเหตุผลที่กล่าวข้างต้นทำให้มีผู้สนใจพัฒนาเครื่องเตือนเพื่ออำนวยความสะดวกแก่ผู้พิการ เช่น วรากร และอานนท์ [5] ได้ประดิษฐ์เครื่องช่วยเหลือในการเดินทางสำหรับผู้พิการทางสายตา โดยมีวัตถุประสงค์เพื่ออำนวยความสะดวกแก่ผู้พิการทางสายตาโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F4585 และผลจากการทดสอบเครื่องช่วยเหลือในการเดินทางสำหรับผู้พิการทางสายตา สามารถทำตามขอบเขตที่กำหนด คือ สามารถบอก วัน เดือน ปี เวลา อุณหภูมิ ทิศ และระยะห่างระหว่างวัตถุเป็นเสียงพูดได้ถูกต้อง ผู้พิการสามารถทำการตั้ง วัน และเวลาเองได้ และชาร์จแบตเตอรี่ได้ ชุดฟังก์ชัน และอนุรักษ์ [6] ได้ศึกษา เรื่อง อุปกรณ์ช่วยในการเคลื่อนที่สำหรับผู้พิการทางสายตาโดย PSoc โดยติดตั้งอุปกรณ์ไปยังเครื่องใช้ต่าง ๆ ที่ผู้ใช้งานพกติดตัวแทนการใช้ไม้เท้าซึ่งอาจติดไว้ที่แขนตาควบคูกับหูฟัง ติดไว้ที่หมวก หรือเครื่องใช้ใด ๆ ก็ตาม ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้ไม่ต้องใช้มือในการถือ สُرพล [7] ได้พัฒนาเครื่องบอกเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตา เรียกว่า “ไอโซนาร์” ที่สามารถตรวจจับสิ่งกีดขวางในระดับศีรษะถึงระดับเอวของผู้ใช้งาน รัศมีการตรวจจับทางด้านหน้าอยู่ที่ 130 เซนติเมตร และด้านข้าง 80 เซนติเมตร แต่จากการศึกษางานวิจัยดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยพบว่ายังมีเครื่องแจ้งเตือนที่สามารถบอกการแจ้งเตือนตั้งแต่ศีรษะ ลำตัว และส่วนขาในอุปกรณ์เดียวกัน และไม่สามารถแยกแจ้งเตือนเป็นส่วน ๆ ได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะพัฒนาเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตา ที่มีตัวตรวจจับและจะส่งสัญญาณสั้นและเสียงให้แก่ผู้พิการ เพื่อป้องกันสิ่งกีดขวางที่อาจก่อให้เกิดอันตรายให้แก่ผู้พิการทางสายตาทั้งในส่วนศีรษะ ส่วนลำตัว และส่วนขา เพื่อให้ผู้พิการมีอิสระในการดำรงชีวิตและมีอิสระในการดำเนินชีวิตมากขึ้น และให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผู้พิการเหล่านี้มีความเชื่อมั่นและมั่นใจว่าตนเองก็สามารถทำหลาย ๆ สิ่ง ได้ไม่ได้น้อยไปกว่าคนปกติแต่อย่างใด

## 2. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาที่ช่วยให้ผู้พิการทางสายตามีความปลอดภัยในการใช้ชีวิตประจำวันตามปกติ โดยเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาที่พัฒนาขึ้นจะมีส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ ส่วนศีรษะ ส่วนลำตัว และส่วนขา เป็นอุปกรณ์ช่วยในการเตือนให้ผู้พิการทราบถึงการมีสิ่งกีดขวางที่อยู่ด้านหน้าโดยเริ่มเตือนเมื่อสิ่งกีดขวางอยู่ห่างจากผู้พิการทางสายตาเป็นระยะ 50 เซนติเมตร

## 3. นิยามศัพท์เฉพาะ

เครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นนี้อาศัยความรู้เกี่ยวกับ (1) สมบัติของรังสีอินฟราเรดและสมบัติของคลื่นอัลตราโซนิก (2) การสะท้อนของคลื่น (3) เซนเซอร์วัดระยะทางแบบอินฟราเรดและเซนเซอร์ตรวจจับและวัด

ระยะทางแบบอัลตราโซนิก (4) เซนเซอร์จับการเคลื่อนไหว PIR และ (5) ไมโครคอนโทรลเลอร์

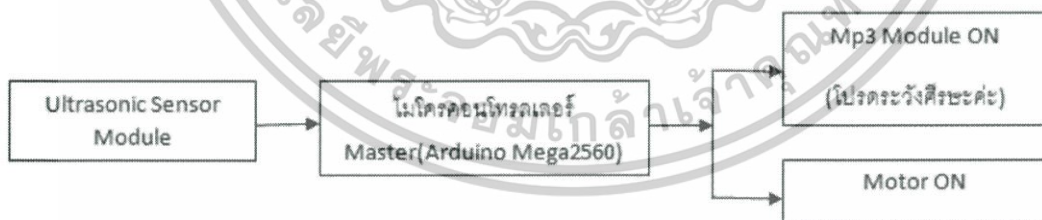
## 4. อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

4.1 ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับข้อมูลความพิการทางการเห็นและสถานการณ์ในปัจจุบันของประเทศไทย

4.2 ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับเซนเซอร์ (sensor) ชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller) การออกแบบวงจรบันทึกเสียง วงจรบอกทิศ (digital compass) และวงจรแสดงผล โดยในการออกแบบครั้งนี้ได้เลือกใช้เซนเซอร์แบบอัลตราโซนิก SRF05 และ HC-SR04 เซนเซอร์ PIR เป็นตัวตรวจจับสิ่งกีดขวางและควบคุมการทำงานโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ARDUINO#ATMEGA-2560 ทำหน้าที่ประมวลผลกลาง รวมถึงการใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Nano และ บูลทูธ HC-05

4.3 ออกแบบบล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาของส่วนศีรษะ ส่วนลำตัว และส่วนขา (รูปที่ 1-3)



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาส่วนศีรษะ

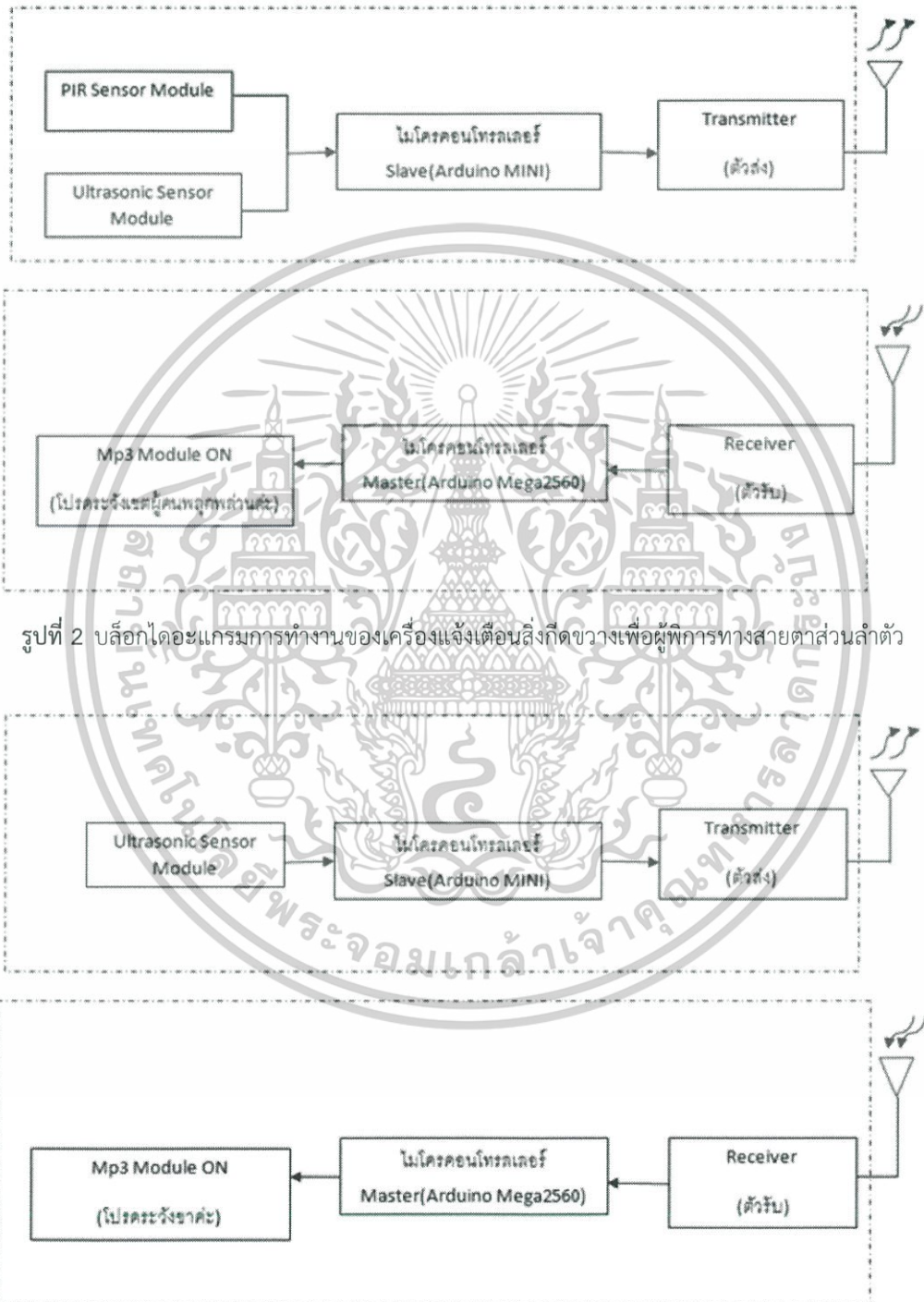
4.4 ออกแบบโครงสร้างเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาที่ประดิษฐ์ขึ้นประกอบด้วยส่วนศีรษะ ส่วนลำตัว และส่วนขา โดยจะติดตั้งเซนเซอร์จับการเคลื่อนไหว PIR เซนเซอร์วัดระยะทางแบบอินฟราเรดและเซนเซอร์ตรวจจับและวัดระยะทาง

แบบอัลตราโซนิก พร้อมทั้งไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็น 3 ชุด แล้วส่งสัญญาณไปยังกล่องควบคุมที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวที่ 4 ในกล่องที่เข้มขัดคาคอเว โดยเป็นการทำงานแบบไร้สาย แบบ xbee ใช้แบตเตอรี่ขนาดเล็กใน หมวกสำหรับสวมศีรษะ และเข้มขัดรัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าข้างทั้ง 2 ข้าง เป็นอุปกรณ์ช่วยในการเตือนให้ผู้  
พิการทราบถึงการมีสิ่งกีดขวางที่อยู่ด้านหน้าโดยเริ่ม

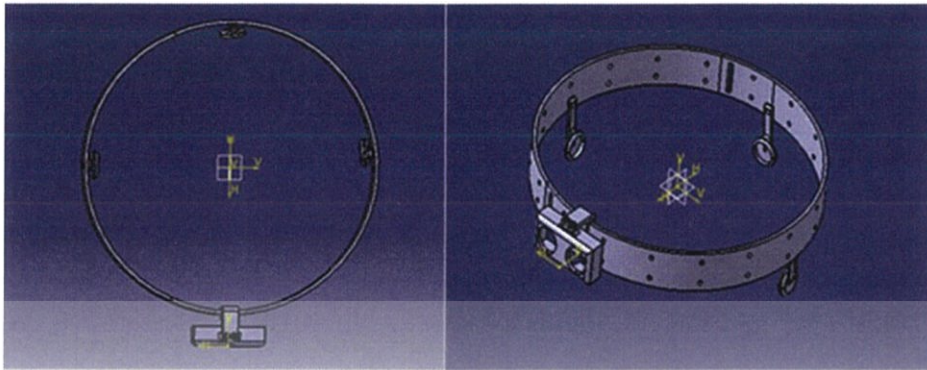
เตือนเมื่อสิ่งกีดขวางอยู่ห่างจากผู้พิการทางสายตา 50  
เซนติเมตร ทั้งด้านหน้า ด้านข้าง และด้านหลัง



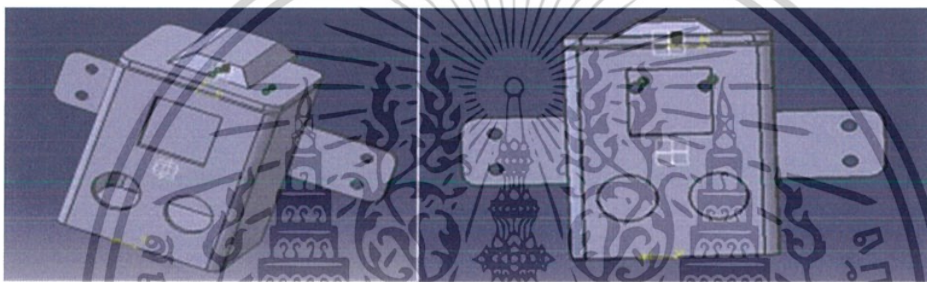
รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาส่วนลำตัว

รูปที่ 3 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาสวนขา

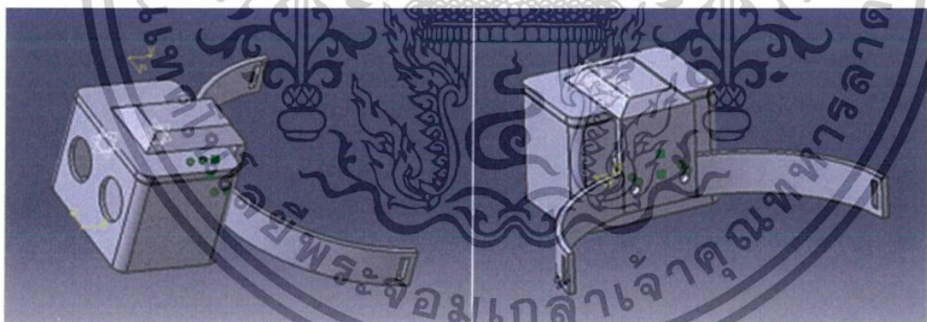
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 ภาพด้านบนของโครงสร้างส่วนสี่ระยะ



รูปที่ 5 ภาพด้านบน ด้านหลัง และด้านข้างของโครงสร้างส่วนลำตัว



รูปที่ 6 ภาพของโครงสร้างส่วนขา

4.4.1 ส่วนสี่ระยะจะประกอบด้วยเซนเซอร์แบบอัลตราโซนิก 4 ตัว ซึ่งทำหน้าที่ ตรวจจับวัตถุ 180 องศา หลังจากนั้นเซนเซอร์แบบอัลตราโซนิกจะส่งค่าไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อสั่งให้มอเตอร์ที่อยู่ในแต่ละตำแหน่งสั้น และความแรงของมอเตอร์จะขึ้นอยู่กับระยะทาง และไมโครคอนโทรลเลอร์ก็จะส่งข้อมูลไปสั่ง

โมดูล MP3 เพื่อเปิดเสียงที่เราได้บันทึกไว้ให้ตรงกับตำแหน่งที่เซนเซอร์แบบอัลตราโซนิกตรวจจับได้ (รูปที่ 4)

4.4.2 ส่วนลำตัวจะประกอบด้วยเซนเซอร์แบบอัลตราโซนิก 1 ตัว สำหรับตรวจจับระยะของวัตถุที่เข้ามาใกล้ และเซนเซอร์ PIR มีหน้าที่ ตรวจจับการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไหว ถ้ามีการเคลื่อนไหวในระยะที่เซนเซอร์แบบอัลตราโซนิกจับได้ ก็จะส่งสัญญาณไปหาไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อสั่งให้มอเตอร์สั่น (รูปที่ 5)

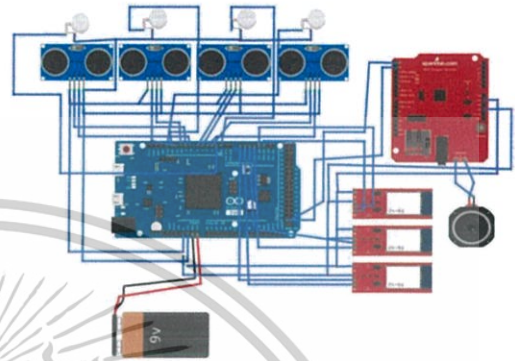
4.4.3 ส่วนขาทั้งสองข้างจะมีไมโครคอนโทรลเลอร์ข้างละ 1 ตัว แล้ว เซนเซอร์แบบอัลตราโซนิก 3 ตัวเอาไว้ตรวจสอบระยะทั้งสองข้าง (รูปที่ 6)

4.5 ออกแบบวงจรเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางเพื่อผู้พิการทางสายตา ดังนี้

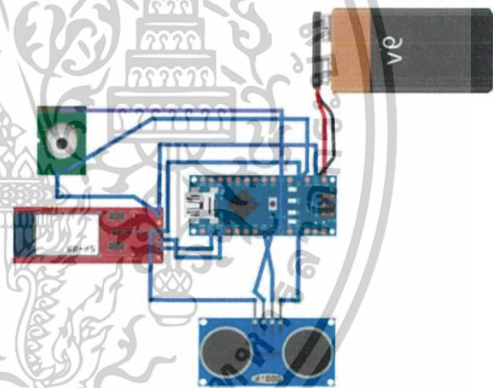
4.5.1 หลักการทำงานของวงจรส่วนศีรษะ (รูปที่ 7) ซึ่งติดตั้งเซนเซอร์แบบอัลตราโซนิกไว้ 4 ตัว หน้า-ซ้าย-หลัง-ขวา รอบชิ้นงาน เพื่อตรวจจับสิ่งกีดขวางโดยส่งสัญญาณไปที่ตัวประมวลผลกลาง คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยจะมีการรับสัญญาณแบบมีสาย เมื่อเซนเซอร์แบบอัลตราโซนิกตัวใดตัวหนึ่งตรวจจับสิ่งกีดขวางที่อยู่ในระยะที่เขียนโปรแกรมควบคุมไว้ จะส่งสัญญาณไปที่ตัวประมวลผลกลาง จะมีการทำงานของวงจร เช่น ตรวจจับวัตถุที่อยู่ด้านหน้า ตัวประมวลผลกลางจะสั่งให้มอเตอร์ที่อยู่ด้านหน้าสั่น พร้อมกับมีการแสดงผลของเสียงที่บันทึกว่า “โปรดระวังศีรษะค่ะ” ตรวจจับวัตถุที่อยู่ด้านซ้ายหรือขวา ตัวประมวลผลกลางจะสั่งให้มอเตอร์ที่อยู่ด้านซ้ายหรือด้านขวาสั่น พร้อมกับมีการแสดงผลของเสียงที่บันทึกว่า “โปรดระวังศีรษะค่ะ”

4.5.2 หลักการทำงานของวงจรส่วนลำตัว (รูปที่ 8) ซึ่งติดตั้งเซนเซอร์ 2 ชนิด คือ เซนเซอร์แบบอัลตราโซนิกที่ใช้ตรวจจับสิ่งกีดขวาง และเซนเซอร์ PIR ที่ใช้ตรวจจับความเคลื่อนไหวของสิ่งมีชีวิต เมื่อเซนเซอร์ชนิดใดชนิดหนึ่งหรือทั้ง 2 ชนิด ตรวจจับสิ่งกีดขวางหรือการเคลื่อนไหว จะส่งสัญญาณไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ แล้วส่งต่อบลูทูธ ที่ทำหน้าที่เป็นตัวส่ง ส่งไปยังบลูทูธของวงจรที่ศีรษะ ซึ่งทำหน้าที่ตัวรับ จะถอดรหัสแล้วส่งไปยังตัวประมวลผลกลาง ซึ่งตัวประมวลผลกลางจะวิเคราะห์ว่าเป็นเป็นข้อมูล

จากเซนเซอร์แบบอัลตราโซนิก หรือ เซนเซอร์ PIR ตรวจจับได้ ซึ่งตัวประมวลผลกลางจะสั่งให้แสดงผลของเสียงที่บันทึกว่า “โปรดระวังผู้คนพลุกพล่านค่ะ”

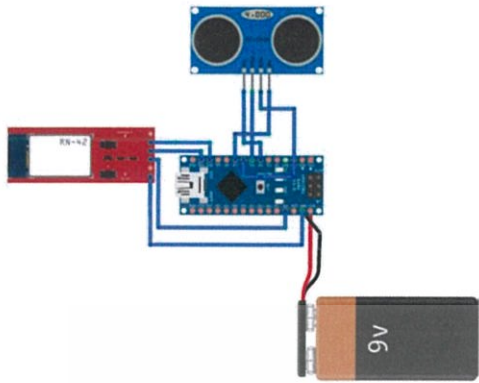


รูปที่ 7 วงจรส่วนศีรษะ



รูปที่ 8 วงจรส่วนลำตัว

4.5.3 หลักการทำงานของวงจรส่วนขา (รูปที่ 9) ซึ่งติดตั้งเซนเซอร์แบบอัลตราโซนิกไว้ข้างละ 1 ตัว เมื่อจับสิ่งกีดขวางได้ จะส่งสัญญาณไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ แล้วส่งต่อบลูทูธ (Bluetooth) ที่ทำหน้าที่เป็นตัวส่ง ส่งไปยังบลูทูธของวงจรที่ศีรษะ ซึ่งทำหน้าที่ตัวรับ จะถอดรหัสแล้วส่งไปยังตัวประมวลผลกลาง ซึ่งตัวประมวลผลกลางจะสั่งให้แสดงผลของเสียงที่บันทึกว่า “โปรดระวังขาค่ะ”



รูปที่ 9 วงจรส่วนขา

4.6 การทดสอบกับอาสาสมัครที่เป็นนักศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จำนวน 10 คน (รูปที่ 10) ดังนี้

4.6.1 การทดสอบการทำงานของเซนเซอร์แบบอัลตราโซนิก และ เซนเซอร์ PIR จะแยกเก็บข้อมูลแต่ละส่วน คือ ส่วนศีรษะ ส่วนลำตัว และส่วนขา

4.6.2 การทดสอบส่วนศีรษะจะนำสิ่งกีดขวางเคลื่อนที่เข้าหาอาสาสมัครทั้งด้านหน้า ด้านขวา ด้านหลังและด้านซ้ายเพื่อบันทึกระยะเวลาที่มอเตอร์เริ่มสั่นเตือนทุกตัว

4.6.3 การทดสอบส่วนลำตัวและส่วนขาจะให้อาสาสมัครเคลื่อนที่เข้าสิ่งกีดขวางที่เป็นวัตถุทั่วไป เช่น ผนังอาคารเรียน ฯลฯ ด้วยอัตราเร็ว 0.24 เมตรต่อวินาที

4.6.4 วัดระยะเวลาจากเซนเซอร์ถึงวัตถุกีดขวางเมื่อระบบบันทึกเสียงแสดงผลและมอเตอร์สั่นเตือน



รูปที่ 10 การทดสอบการทำงานของเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตา

### 5. ผลการวิจัย

5.1 เครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาที่ประดิษฐ์ขึ้นประกอบด้วยส่วนศีรษะมีมวล 130 กรัม ส่วนลำตัวมีมวล 210 กรัม ส่วนขามีมวล 220 กรัม โดยจะติดตั้งเซนเซอร์จับการเคลื่อนไหว PIR เซนเซอร์วัดระยะทางแบบอินฟราเรดและเซนเซอร์

ตรวจจับและวัดระยะทางแบบอัลตราโซนิก พร้อมทั้งไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็น 3 ชุด แล้วส่งสัญญาณไปยังกล่องควบคุมที่มีไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวที่ 4 ในกล่องที่เชื่อมต่อคอร์ดตามรูป กล่องควบคุมมีมวลรวม 370 กรัม เครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตา ทั้งชุดมีมวลรวม 930 กรัม การทำงานของกล่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมเป็นการทำงานแบบไร้สาย ใช้พลังงานจากแบตเตอรี่สำรองสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ขนาด 5,600 mA อัตราการใช้พลังงานจากตัวส่งสัญญาณ 560 mA ตัวรับ 300 mA ใช้ได้นาน 3 ชั่วโมง อุปกรณ์นี้ช่วยในการเตือนให้ผู้พิการทราบถึงการมีสิ่งกีดขวางที่อยู่ด้านหน้า ด้านข้าง และด้านหลังโดยกำหนดค่าจากการเขียนโปรแกรมให้เริ่มเตือนเมื่อสิ่งกีดขวางอยู่ห่างจากผู้พิการทางสายตา 50 เซนติเมตร ทั้งด้านหน้า ด้านข้าง และด้านหลัง (รูปที่ 11)



รูปที่ 11 เครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตา

5.2 ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาส่วนศีรษะ ที่เป็นการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์แบบอัลตราโซนิก 4 ตัว หน้า-ซ้าย-หลัง-ขวา รอบชิ้นงาน โดยแสดงผลเป็นการสั่งมอเตอร์ 4 ตัวที่ติดอยู่พบว่าทุกตัวสั้นพร้อมทั้งแสดงผลของเสียงที่บันทึกว่า “โปรดระวังศีรษะค่ะ” ด้วยทุกครั้ง มอเตอร์ด้านหน้าจะเริ่มเมื่อสิ่งกีดขวางอยู่ห่างจากผู้ทดสอบมีค่าระหว่าง 41.2-41.7 เซนติเมตร และมีค่าเฉลี่ย 41.4 เซนติเมตรมอเตอร์

ด้านซ้ายจะเริ่มเมื่อสิ่งกีดขวางอยู่ห่างจากผู้ทดสอบมีค่าระหว่าง 44.0-44.2 เซนติเมตร และมีค่าเฉลี่ย 44.2 เซนติเมตร มอเตอร์ด้านหลังจะเริ่มเมื่อสิ่งกีดขวางอยู่ห่างจากผู้ทดสอบมีค่าระหว่าง 43.0-44.4 เซนติเมตร และมีค่าเฉลี่ย 43.2 เซนติเมตร และมอเตอร์ด้านซ้ายจะเริ่มเมื่อสิ่งกีดขวางอยู่ห่างจากผู้ทดสอบมีค่าระหว่าง 45.0-45.2 เซนติเมตร และมีค่าเฉลี่ย 45.2 เซนติเมตร

5.3 ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาส่วนเอวที่เป็น การทดสอบเซนเซอร์ 2 ชนิด คือ เซนเซอร์แบบอัลตราโซนิก และเซนเซอร์ PIR พบว่าเริ่มแสดงผลของเสียงที่บันทึกว่า “โปรดระวังผู้คนพลุกพล่านค่ะ” เมื่อวัตถุอยู่ห่างจากผู้ทดสอบมีค่าระหว่าง 54.0-54.6 เซนติเมตร และค่าเฉลี่ยเท่ากับ 54.3 เซนติเมตร และเมื่อคนอยู่ห่างจากผู้ทดสอบมีค่าระหว่าง 42.3-42.7 เซนติเมตร และค่าเฉลี่ยเท่ากับ 42.5 เซนติเมตร ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตา ส่วนขาที่เป็นการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์แบบอัลตราโซนิกข้างละ 1 ตัว พบว่าทุกตัวแสดงผลเริ่มผลของเสียงที่บันทึกว่า “โปรดระวังขาค่ะ” เมื่อสิ่งกีดขวางอยู่ห่างจากขาขวาผู้ทดสอบระหว่าง 47.0-47.4 เซนติเมตร และมีค่าเฉลี่ย 47.2 เซนติเมตร และเมื่อสิ่งกีดขวางอยู่ห่างจากขาซ้ายผู้ทดสอบระหว่าง 47.1-47.4 เซนติเมตร และมีค่าเฉลี่ย 47.3 เซนติเมตร

5.4 ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาทั้ง 3 ส่วนพร้อมกันโดยเดินเข้าหาผนังกำแพงด้านหน้า เดินเข้าหาผนังกำแพงด้านขวา เดินถอยหลังเข้าหาผนังกำแพง และเดินเข้าหาผนังกำแพงด้านซ้าย พบว่ามอเตอร์เริ่มแสดงผลการสั่งและแสดงผลเสียงที่บันทึกว่า “โปรดระวังศีรษะค่ะ” “โปรดระวังผู้คนพลุกพล่านค่ะ” และ “โปรดระวังขาค่ะ” สลับกัน เมื่อสิ่งกีดขวางอยู่ห่างจากผู้ทดสอบมีค่าระหว่าง 41.2-44.5 เซนติเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 ความคิดเห็นของอาสาสมัครที่ทดสอบการทำงานของเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตา มีดังนี้ เครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางแสดงการสั้นและเสียงเตือนได้ชัดเจน น้ำหนักเบา สามารถใช้งานได้จริง มีการทำงานในส่วนลำตัวและขาแบบไร้สายทำให้ไม่รุงรัง และให้ความเห็นว่าควรออกแบบส่วนศีรษะให้เป็นหมวก เมื่อเวลาใช้งานจริงจะช่วยป้องกันแสงแดดและสวยงามด้วย

## 6. อภิปรายผลการวิจัย

การพัฒนาเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาค้างนี้ใช้ เซนเซอร์จับการเคลื่อนไหว PIR เซนเซอร์วัดระยะทางแบบอินฟราเรดและเซนเซอร์ตรวจจับและวัดระยะทางด้วยอัลตราโซนิก พร้อมทั้งไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถเตือนผู้ใช้งานได้เมื่อมีสิ่งกีดขวางอยู่ห่างจากในระยะที่กำหนดไว้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของวรากร และอานนท์ [5] ชุตินพงษ์ และอนุรักษ์ [6] สุรพล [7] กาญจนว และชวิน [8] ทิมวิจัย บัณฑิตวิทยาลัย สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยสยาม [9] อธิพล [10] และเสฐียรพงษ์ และคณะ [11] ซึ่งการศึกษาเพื่อพัฒนานวัตกรรมสำหรับผู้พิการทางสายตาทั้งหมด สามารถหลบหลีกสิ่งกีดขวางเป็นผลที่ทำให้ลดการเกิดอุบัติเหตุที่เกิดจากสิ่งกีดขวางที่จะก่อให้เกิดอันตรายให้แก่ผู้พิการทางสายตา ช่วยให้ผู้พิการมีอิสระในการดำรงชีวิตและมีอิสระในการดำเนินชีวิตมากขึ้น และเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาค้างนี้เริ่มเตือนเมื่อสิ่งกีดขวางอยู่ห่างจากผู้พิการทางสายตา 40-60 เซนติเมตร ซึ่งสอดคล้องกับบทความปริทรรศน์ของณัฐพร [12] ที่นำเสนอไม้เท้าสำหรับผู้พิการทางสายตาที่ประกอบด้วยระบบตรวจจับวัตถุกีดขวางโดยใช้ตัวตรวจจับ (sensor) พบว่าสามารถตรวจจับวัตถุได้หลายชนิดในช่วง 10-80 เซนติเมตร

## 7. สรุป

ผลการวิจัยพบว่าเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาที่พัฒนาขึ้นนี้ สามารถใช้งานได้จริงโดยเริ่มเตือนเมื่อสิ่งกีดขวางอยู่ห่างจากผู้พิการทางสายตา 40-60 เซนติเมตร การแสดงสัญญาณเตือนผู้พิการทางสายตาให้รับรู้ว่ามีสิ่งกีดขวางมี 2 ลักษณะ คือ การสั้นของมอเตอร์และเสียง แต่เนื่องจากวัตถุประสงค์เริ่มต้นของการแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาค้างนี้ต้องการให้อุปกรณ์ชุดนี้สามารถเตือนผู้พิการทางสายตาได้ตลอดความสูงของผู้ใช้งาน ดังนั้นจึงออกแบบมี 3 ส่วน แต่จากการทดสอบใช้งานจริงจะพบว่าอุปกรณ์แต่ละส่วนที่อยู่ในลักษณะชุดต้นแบบจึงขาดความสวยงาม และยังไม่สะดวกต่อการใช้งาน ดังนั้นถ้ามีการนำเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาค้างนี้ไปพัฒนาเพิ่มเติมด้านออกแบบบรรจุผลิตภัณฑ์ จะทำให้ได้อุปกรณ์ที่สามารถใช้งานได้จริงและมีความสวยงาม สะดวกต่อการใช้งานได้ต่อไป

## 8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักรวิจัย มหาวิทยาลัยรังสิต ที่สนับสนุนทุนวิจัยในการศึกษาค้างนี้ อาจารย์อวัช แก้วกัญท์ อาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมชีวการแพทย์ ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำ และกลุ่มอาสาสมัครที่ให้ความร่วมมือในการทดสอบเครื่องแจ้งเตือนสิ่งกีดขวางสำหรับผู้พิการทางสายตาที่พัฒนาขึ้น

## 9. รายการอ้างอิง

- [1] สำนักงานพัฒนานโยบายสุขภาพระหว่างประเทศ , 2556, รายงานฉบับสมบูรณ์สถานการณ์คนพิการในสังคมไทย : การวิเคราะห์ข้อมูลการสำรวจความพิการและคุณภาพของสำนักงานสถิติแห่งชาติ ปี พ.ศ. 2545 และ 2550, กระทรวง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สาธารณสุข, นนทบุรี, 138 น.
- [2] ประกาศกระทรวงการพัฒนาสังคมและความมั่นคงของมนุษย์ เรื่อง ประเภทและหลักเกณฑ์ความพิการ ฉบับที่ 2, 2555, ราชกิจจานุเบกษา, เล่ม 129 ตอนพิเศษ 119 ง: 22-23.
- [3] ความรู้เกี่ยวกับคนพิการ, 2554, แหล่งที่มา : <http://www.pwdsthai.com>, 7 มิถุนายน 2557.
- [4] คู่มืออาสาสมัคร ร่วมพัฒนาคุณภาพชีวิตคนตาบอด สมาคมคนตาบอดแห่งประเทศไทย, 2556, แหล่งที่มา : <http://www.thaihealth.or.th/node/35554>. 15 กรกฎาคม 2557.
- [5] วรากร ศรีสัมพันธ์ และอานนท์ กอกกระโทก, 2552, เครื่องช่วยเหลือในการเดินทางสำหรับผู้พิการทางสายตา, แหล่งที่มา : <http://www.te.kmutnb.ac.th/msn/blinds.pdf>, 13 กันยายน 2557.
- [6] ชุตติพงษ์ หมั่นสระเกษ และอนรรักษ์ ศรีประสิทธิ์, 2554, อุปกรณ์ช่วยในการเคลื่อนที่สำหรับผู้พิการทางสายตาโดย PSoC, แหล่งที่มา : [https://app.enit.kku.ac.th/mis/administrator/doc\\_upload/20120305112357.pdf](https://app.enit.kku.ac.th/mis/administrator/doc_upload/20120305112357.pdf).
- [7] สุรพล วรภัทราทรร, 2557, ไอโซนาร์, เอกสารประกอบการแสดงผลงานประดิษฐ์คิดค้นประจำปี 2555, สำนักงานคณะกรรมการสภาวิจัยแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.
- [8] กาญจนา จันทร์ประเสริฐ และชวิน สมอาทิตย์, 2554, แว่นตาอัจฉริยะสำหรับผู้พิการทางสายตา, เอกสารประกอบการแสดงผลงานประดิษฐ์คิดค้นประจำปี 2554, สำนักงานคณะกรรมการสภาวิจัยแห่งชาติ, กรุงเทพฯ, น. 20.
- [9] ทีมวิจัย บัณฑิตวิทยาลัย สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยสยาม, 2555, Safety glass, เอกสารประกอบการแสดงผลงานประดิษฐ์คิดค้นประจำปี 2555, สำนักงานคณะกรรมการสภาวิจัยแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.
- [10] ชีรพล จงพิพัฒน์ศิริ, 2556, การเพิ่มประสิทธิภาพของระบบสแตอโรโอวิชันโดยใช้อัลตราโซนิกเซนเซอร์และระบบเสียงสามมิติเพื่อช่วยในการเดินทางของผู้พิการทางสายตา, วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, สงขลา.
- [11] เสฐียรพงษ์ ชัยมณี, สุรรัตย์ ศิริกาญจนากุล และสุเพ็ญพร พันธุ์สุวรรณ, 2557, เครื่องบอกระยะทางอัจฉริยะสำหรับผู้พิการทางสายตา, แหล่งที่มา : <http://store.learnsquare.com/eserv/change:211/FullReport.pdf>, 13 กันยายน 2557.
- [12] ณิชพร ฤทธิ์นุ้ม, 2557, ไม้เท้าอิเล็กทรอนิกส์สำหรับผู้พิการทางสายตา, แหล่งที่มา : <http://www.ecti-thailand.org/emagazine/views/44>, 13 กันยายน 2557.

## Design Infrared Radar System

Yahya S. H. Khraisat

AL-Balqa' Applied University,  
Al-Huson University College,  
Electrical and Electronics Department,  
P.O. Box 50, Al-Huson 21510, Jordan  
yahya@huson.edu.jo

### Abstract

In this paper we designed a type of close proximity infrared radar system used to detect any object close to the device by making scanning with angle  $180^\circ$  and distance from 10cm to 80cm. The system is based on microcontroller design. The user will hear a voice just as alarm sound and the distance of the object will be readable on the screen of small LCD. The user also can see the light given by LED appear in the direction of the object.

**Keywords:** Infrared Radar, Sensor, Automotive Radar, Microcontroller and Targets Detection

### 1. Introduction

Radar can be briefly defined as method of using radio wave to determine the location of objects in space in relation to a known point.

More precise definition of radar is that it is an electromagnetic system for detection, location and sometimes for recognition of target objects, which operates by transmitting electromagnetic signals, receiving echoes from target objects within its volume of coverage, and extracting location and other information from the echo signals [1]. IR Radar is an application of automotive radar, where this type of pulse radar is operating by sending short pulse to make scanning. Actually with small range (don't offer more than 1.5 meter). The goal of this paper is to create a working IR Radar system to detect close proximity targets at an angle of 180 degrees, with range (10-80cm).

#### 1.1 Features of IR radar:

1. Increases the detection range from 80cm to 4m by using sonar range finder which uses time-of-flight to measure distance.

2. Increases the angular rotation of stepper motor to  $360^\circ$  (full rotation) by installing brush on the shunt of the stepper motor. Comparison between Ultrasonic and IR sensors.

#### Ultrasonic-sensor:

- Time of flight distance measurement.
- Longer range than IR.
- affected by wind.
- affected by hardness of object.

#### IR-sensor

- Angle (parallax) distance measurement.
- Shorter range than SONAR.
- affected by sunlight.
- affected by color of object.

#### 2. Method of Works:

The Sharp IR Range Finder works by the process of triangulation. A pulse of light (wavelength range of  $850\text{nm} \pm 70\text{nm}$ ) is emitted and then reflected back (or not reflected at all). When the light returns it comes back at an angle that is dependent on the distance of the reflecting object. Triangulation works by detecting this reflected beam angle, by knowing the angle, distance can then be determined [2].

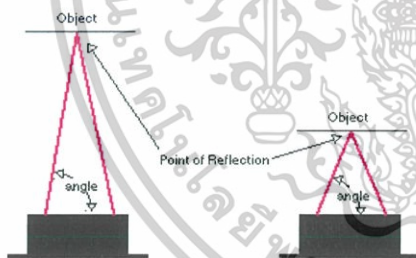


Figure1 Different Angles with Different Distances

The IR range finder receiver has a special precision lens that transmits the reflected light onto an enclosed linear CCD array based on the triangulation angle. The CCD array then determines the angle and causes the range finder to then give a corresponding analog value to be read by your microcontroller. Additional to this, the Sharp IR Range Finder circuitry applies a modulated frequency to the emitted IR beam.

#### Beam Width:

A major advantage we may have with the Sharp IR range sensor is beam width. Unlike sonar, it's fairly thin - meaning to detect an object your sensor must basically point directly at that object.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1 Principle of Operation (GP2D12 IR Sensor)

### GP2D12 IR Sensor Description

The GP2D12 provides a non-linear voltage output in relation to the distance of an object from the sensor and interfaces easily using any analog to digital converter. Figure 2 shows a Sharp GP2D12. The LED on the left is an emitter, while the bigger lens on the right is a detector.

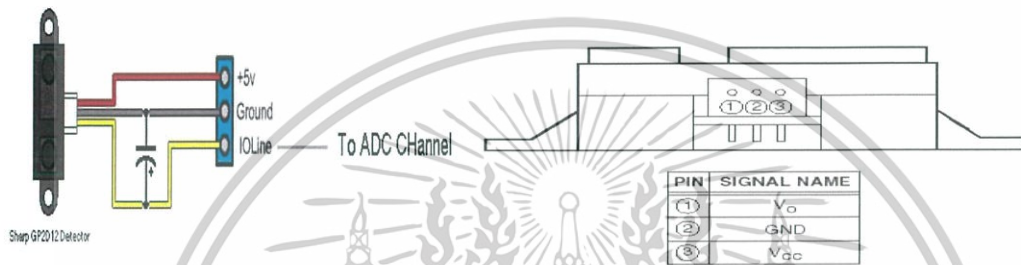


Figure 2 Pin Layouts for GP2D12 [15]

GP2D12 Infrared Ranger module has 3 terminals: Power input (Vcc), Ground (GND) and Voltage output (Vout). The output voltage depends on the following factors:

1. Distance to the nearest reflective object.
2. Object color.
3. Object surface.
4. Surrounding light.

Only the first factor is desired to affect the output voltage, it must be independent upon the other three factors, to achieve that, all sensors are positioned at carefully selected points in the vehicle to avoid direct exposure to surrounding lighting. We can make a walls covered with a plastic tape at the same height of the infrared sensors to make its color homogeneous at all points. Tape's color is selected to be light green to ensure the maximum amount of reflected ray. To read the voltage values from the GP2D12, you must wait till after the acknowledgement period which is around 32 to 52.9 ms.

## 2.2. Work instruction

When we used infrared light we should take care that the time it takes to hit an obstacle and reflect back can not be measured because infrared light travels fast. No measurement equipment is available yet. Therefore, the following theory must be used.

The infrared light is sent out from a transmitter to the object in front, by passing through a condense lens so that the light intensity is focused on a certain

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ถือเป็นการละเมิดลิขสิทธิ์และจะดำเนินการตามกฎหมายที่เกี่ยวข้อง

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

point. Reflection occurs once the light hits the surface of the object. Part of the reflected light will be sent back to the receiver end, in which another lens will combine these lights and determine the point of impact.

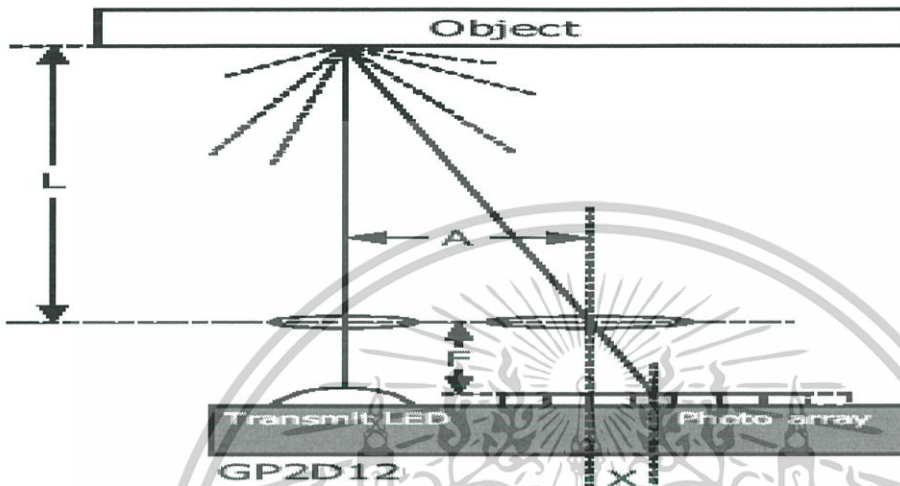


Figure3 Distance Measurement by GP2D12

The light will then be passed on to an array of photo-transistors [3]. The position in which the light falls can be used to calculate the distance (L) from the transmitter to the obstacle using the following formula:

$$L / A = F / X$$

Therefore,

$$L = (F \times A) / X$$

### 3. PROJECT DESIGN

#### 3.1. Processing Overview

We will discuss the operation and design of our block diagram figure 4.

**Firstly** switch is on, then we will get closed circuit. The stepper motor will be turned on with instruction to rotate 180 by pic (16f877A).

**Stepper motor** will drive the **IR SENSOR** [this sensor GP2D12 consist of emitter and detector. The emitter will send an infrared signal to detect an object. When this signal hits the object, the signal will be reflected back to the detector.

Then the detector will send analog signal with suitable voltage and angel. The voltage of this signal is suitable with the distance. **16F877A** will make its [software operation] and convert analog signal to digital by **A/D** and give a

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้ภายในห้องสมุดเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

command to the led which in the direction of the object and display the distance on the LCD then the speaker will give alarm.

**Special case:**

When we deal with moving object, the software will be changed consumed with the pic variation in angel and voltage. We showed a close design to the circuit drawn using proteus program as shown in figure 5.

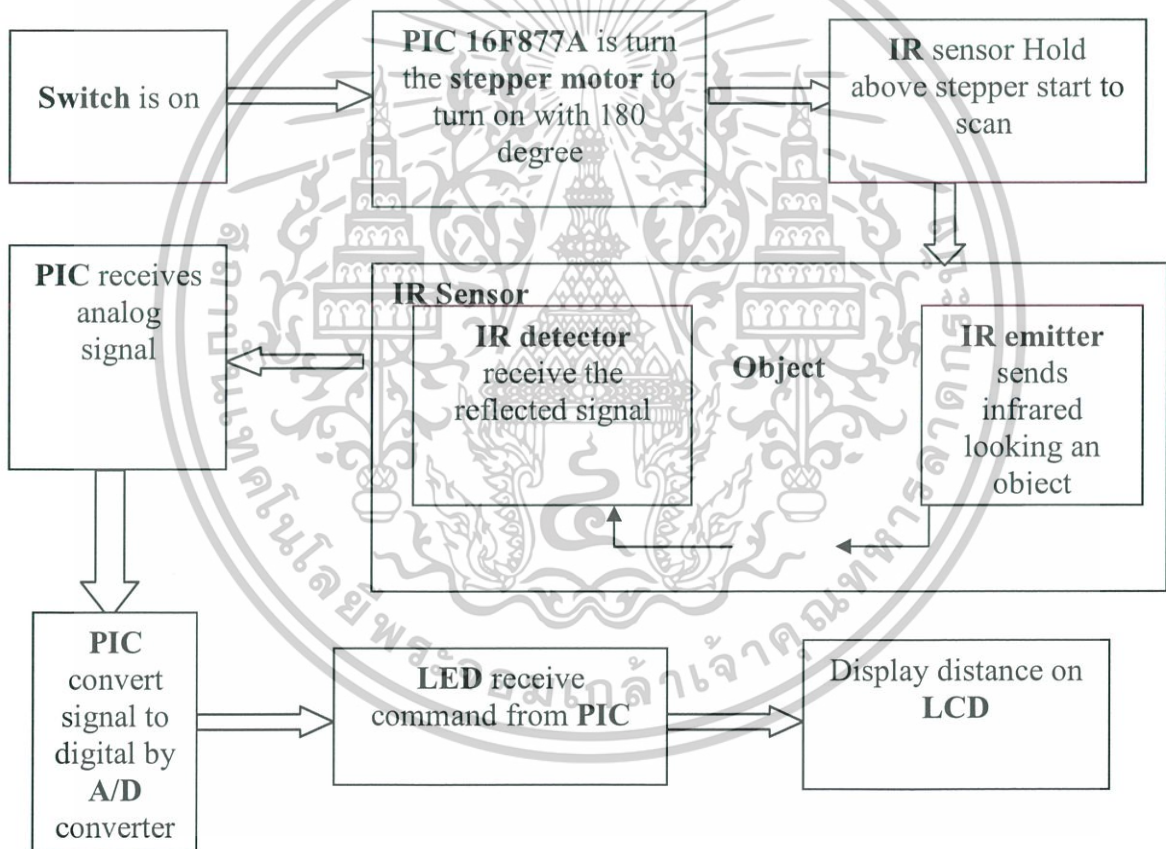


Figure 4 Block diagram of IR RADAR system.

**3.2 Hard Ware Connections:**

The following figure demonstrates the schematic design of our proposed system.  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

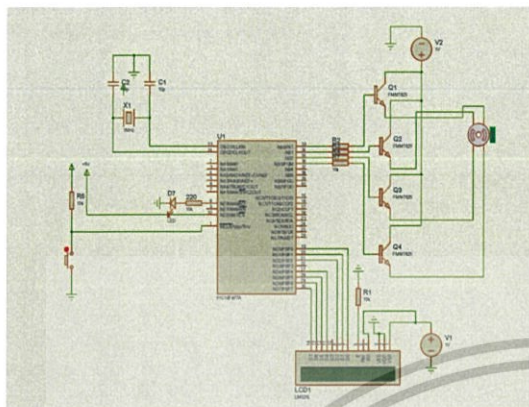


Figure 5 Circuit of the Schematics design

The following figure shows the hard ware of our designed system

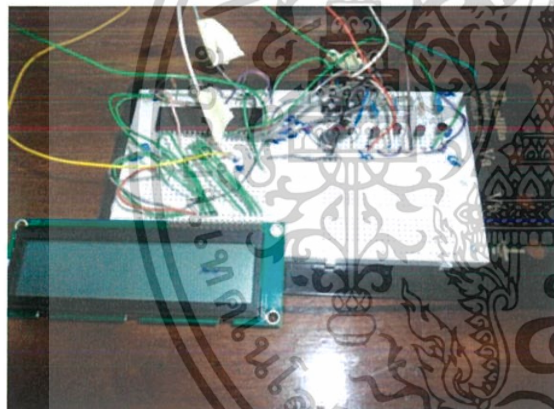


Figure 6 The hardware connection of our designed system

#### 4. Conclusion and Future Work

There are many improvements that we can make to our system in order to create better results. First of all, we need to increase the range of the detection, not to limit our input signals as much to get accurate results. We need to adjust with the sampling rate that we used in order to be able to detect smaller velocities as well as more accurate ranges.

We could optimize the algorithm for the peak locator in the velocity analysis to give more accurate results. IR can be cheaper and smaller than Ultrasonic although sensing with light is less efficient than sensing with sound. A major problem with the Sharp IR range finder is beam width, it's fairly thin.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## References

- [1] The IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms, IEEE std 100 – 1996.
- [2]<http://wearcam.org/seatsale/programs/www.beyondlogic.org/Serial/serial1.htm>.
- [3] [http://en.wikipedia.org/wiki/IR\\_sensor](http://en.wikipedia.org/wiki/IR_sensor).
- [4] Skolnik, M., Introduction to Radar System, third edition, New York: MC Graw-Hill, 2001.
- [5] David K. Barton, Radar System Analysis and Modeling, Artech House, Boston, London, 2005.
- [6] DEVINE PETER (2000), radar level measurement, VEGA Controls Ltd, Kendal House, Victoria Way, Burgess Hill, West Sussex, RH 15 9NF England.
- [7] IEEE Standard Radar Definitions, IEEE Standard 686-1 990, New York: The Institute of Electrical and Electronic Engineers, 1993.
- [8] Blake, L.V. "Prediction of Radar Range" In Radar Handbook, 2 nd ed.ed .by M.skolnik.New York: MC Graw –Hill, 1990, chap.2.
- [9] Dixon ,R.C.Radio Receiver Design .Sec .5.5 Newyork :Marcel Dekker 1998.
- [10] Siebert, W.M."Some Application of Detection Theory to Radar."IRE Nat Conv Recod 1987.
- [11] Skolnik,M."Improvements for Air Surveillance Radar, proc.1999 IEEE Radar Conference, Waltham.
- [12] [http://www.yourdictionary.com/images/computer/reflection principle](http://www.yourdictionary.com/images/computer/reflection%20principle).
- [13]<http://www.arabteam2000-forum.com/index.phpshowtopic>.
- [14]<http://translate.google.jo/translatear&langpair=en%7Car&u=http://www.steppermotors>.
- [15] Microchip –PIC 16F877A28/40 –pin 8Bit Microcontrollers data sheet.
- [16][http://translate.google.jo/translate&langpairhttp://ssecganesh.blogspot.com/2008/05/driving-stepper-motor-using-uln2003.html](http://translate.google.jo/translate&langpair=http://ssecganesh.blogspot.com/2008/05/driving-stepper-motor-using-uln2003.html)

**Received: November, 2011**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# The Smart Cane Utilizing a Smart Phone for the Visually Impaired Person

Il Yong CHUNG

Dept. of Computer Engineering, College of Electronics & Information Engineering, Chosun University  
Gwangju, Korea  
[iyc@chosun.ac.kr](mailto:iyc@chosun.ac.kr)

Sanghag Kim and Kang Hyeon RHEE

Dept. of Electronics Engineering, College of Electronics & Information Engineering, Chosun University  
Gwangju, Korea  
[or7seven@gmail.com](mailto:or7seven@gmail.com), [khrhee@chosun.ac.kr](mailto:khrhee@chosun.ac.kr)

**Abstract**—This paper deals with the intelligent Android application system for smart cane, which helps the visually impaired person to detect an obstacle in their environment and to guide them towards their destination. In addition, it can increase a convenience to the utilization that networks with smart phone.

The designed smart cane supports an application to pair it to smart phone. It uses an ultrasonic sensor to detect obstacles while walking, and a gyro sensor is used to prevent falls. The formed experimental board is paired to a smart phone App. using Bluetooth V2.0 serial protocol.

**Keywords**—smart cane; visually impaired person; Application; AVR.

## I. INTRODUCTION

A cane seems to be a hand and foot to a visually impaired person. Nowadays, canes almost like conforming existence and nonexistence of obstacles.

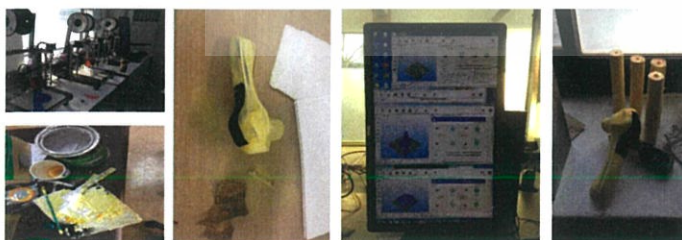
Many researchers have studied a variety of utilities for the visually impaired that already exist. Shane Mac Namara and Gerard Lacey proposed *Smart Walker* [1] for the first time. K.M. Hou, E. Pissaloux and H.L. Shi studied *Explorer Stick* [2] on smart environment. Recently, X. Qian and C. Ye proposed a *Plane Extraction* method [3] for the visually impaired.

In this paper, for the visually impaired person, our goal is to present an experimental motivational system for obstacle detection, decision indication, voice guidance, the prevention of falls, and night walking with the smart cane using a smart phone App.

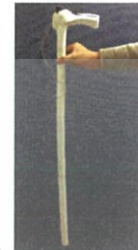
## II. MANUFACTURING

### A. Outward Form of Smart Cane

Our smart cane is manufactured according to the prototype below:



(a)



(b)

Fig 1. Making a prototype (a) and its outward form shape (b).

The designed smart cane consists of three main parts: 1) a hand grip (four kinds of functional devices built in), 2) a pole (battery pack) and 3) an ultrasound sensor (obstacle detection) as shown in Fig. 2.

- Vibrator (Warning obstacles)
- Cds
- Network (Using Bluetooth to smart phone)
- 3-axis Acceleration/Gyro Sensor
- Pole (Battery)
- Ultrasound sensor (Obstacle detection)

Fig. 2. The functions of the smart cane.

In Fig. 2 top part, AVR module, a vibrator and a speaker are built into the cane grip for pairing to a smart phone via Bluetooth. The middle part is the pole, in which a chargeable battery pack is inserted. An ultrasonic sensor is built in bottom part for obstacle detection. These functions are implemented on the AVR module which is built into the cane grip inside as shown in Fig. 3.

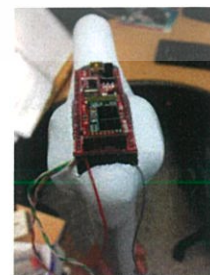


Fig. 3. AVR module built into cane grip.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## B. Devices Purpose

The purpose of the devices in the designed smart cane is described as follows:

- 1) Ultrasonic sensor: obstacle detection in the left/right/front of the visually impaired.
- 2) Cds: luminance around the visually impaired.
- 3) Microcontroller: controls the input and output data.
- 4) Vibrator: vibration for existence and nonexistence of obstacles.
- 5) Bluetooth module: pairing to smart phone (Android application)
- 6) Acceleration/gyro sensor (InvenSense MPU-6050 3-Axis): prevents falls and controls the error range of the ultrasonic sensor.
- 7) Power module

First, the sensor network consists of an acceleration gyro and an ultrasonic sensor, and the Bluetooth V2.0 module.

Second, the smart phone application program system can guide the user safely from the starting point to the destination. According to the instruction system, the visually impaired person is guided to the destination on real time i.e. 'go straight,' 'turn left,' 'turn right,' and 'stop' and the current situations are reported to him by voice. There are three vibrators on the left, light, and top sides of the cane grip, that generate a danger signal according to the direction of obstacles.

## C. Implementation

The proposed smart cane is developed using the applications below:

- 1) Atmel Studio 6.1
- 2) Rhino 3D 5.0
- 3) Java SE (JDK) 7u21, Android ADT v22.0.0
- 4) Android application tool

## III. EXPERIMENT

### A. Communication

For the experiment of the proposed smart cane, the items below are involved:

- 1) HC-SR04 operation (Ultrasonic sensor, Obstacle sensing)
- 2) Communication between AVR and Android (Bluetooth V2.0)
- 3) Pairing between AVR and smart phone (Bluetooth V2.0.)
- 4) Intercommunication between AVR modules each other (Bluetooth V2.0)

For communication between AVR and Android, the Bluetooth V2.0 serial protocol is used.

The formed experimental board pairs with the smart phone of the visually impaired person's conservator, transmitting his present situation to the conservator's smart phone through his mobile network as shown in Fig. 4.

### B. Formed Experimental Board

The devices in II-B involved on the experimental board: When the visually impaired person moves and taps with the cane on the street, it has the possibility of generating some noise. LPF (Low Pass Filter) is used to remove noises rapidly. Eq. (1) is shown a mathematical form of 1<sup>st</sup> LPF.

$$y_i = \alpha x_i + (1 - \alpha)y_{i-1}, \alpha \triangleq \frac{\Delta T}{RC + \Delta T}, \text{ where } 0 \leq \alpha \leq 1. \quad (1)$$

The designed LPF in this paper,  $\alpha$  is 0.9 to increase an effect of noise removal and reduce delays in time.

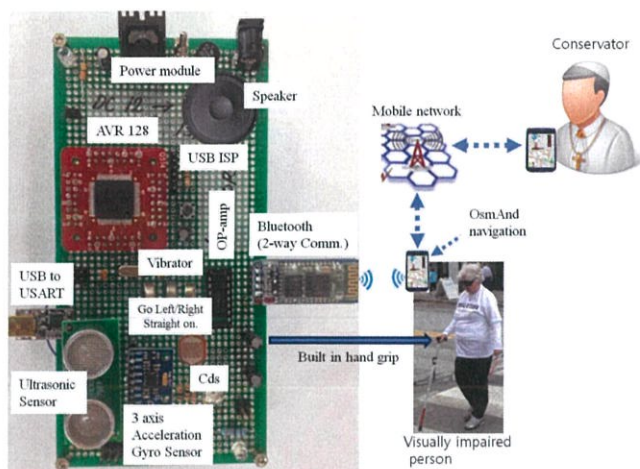


Fig. 4. The system configuration.

## C. Obstacle Detection

In Fig. 5, according to the beam pattern of the SRF04, a trigger signal is generated and an echo is detected by the obstacles. The reflected impulse (left/right/front direction) is measured, and three vibrators determine the direction of obstacles.

Search the (left/right/front) direction in obstacle's range

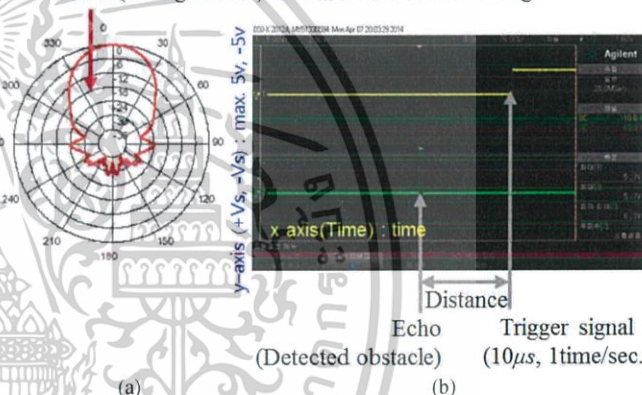


Fig. 5. The beam pattern of the SRF04 (a), measures the echo trigger signal and detect the reflective impulse of the obstacle (b).

## IV. CONCLUSIONS

Our smart cane is designed to allow the visually impaired to move freely by themselves. The conservator can monitor the environment of the visually impaired person through his smart phone on real time. Its technical performances will be evaluated to these existing systems on a variety of environmental obstacles.

## REFERENCES

- [1] Yusro M., Hou K.M., Pissaloux E., Shi H.L., Ramli K. and Sudiana D., "SEES: Concept and design of a smart environment explorer stick," *Human System Interaction (HSI), 2013 The 6th International Conference on*, pp. 70-77, 2013
- [2] MacNamara, S. and Lacey, G., "A smart walker for the frail visually impaired," *Robotics and Automation, 2000 Proceedings. ICRA IEEE International Conference on*, Vol.2, pp. 1354-1359, 2000
- [3] Niitsu, Y., Taniguchi, T. and Kawashima, K. "Detection and notification of dangerous obstacles and places for visually impaired persons using a smart cane," *Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU), 2014 Seventh International Conference on*, pp. 68-69, 2014.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Smart Cane with Range Notification for Blind People

\*M.F. Saaid, A. M. Mohammad, M. S. A. Megat Ali

Faculty of Electrical Engineering  
Universiti Teknologi MARA  
Shah Alam, Selangor

\*mfarids@salam.uitm.edu.my

**Abstract**—Blind people are prone to sweep or knock whatever obstacle which pass before them during walking, subjecting them to risk of injury caused from fall. The aim of this project is to develop a smart cane with distance measurement system. The system comprise of an ultrasonic sensor as input and earphone as the output. Ultrasonic sensor is used to measure distance from the obstacle. Data is then sent to National Instrument myRIO-1900 controller for processing which later produce beeping sound as the output. The process was graphically programmed using LabVIEW with FPGA as the intended target. Performance of the system has been ascertained through several verification tests. In general, the device will alert blind people of the obstacles through the audio output.

**Index Terms**—blind people; distance measurement; ultrasonic; NI myRIO-1900; audio output.

## I. INTRODUCTION

Blindness is defined as the state of being sightless in which both eyes suffer from complete loss of vision. The impairment is not fixable, even through the use of glasses, contact lenses or in extreme cases, surgical procedure. The disability is mostly caused by diabetes, macular degeneration, traumatic injuries, infection and glaucoma. Other causes include blocked blood vessels, complications of premature birth, complication of eye surgery, stroke and tumors [1, 2].

There are many early signs of blindness such a discomfort and weary eyes, foreign body sensation, and pain. Patients may experience discharge from the eyes [1]. World Health Organization has estimated that about 285 million people worldwide are visually impaired; in which 39 million are blind while another 246 million have a low vision [3]. The number of people suffering from loss of sight is increasing dramatically [3, 4]. The Royal National Institute of Blind People (RNIB) has predicted that by 2020, the number of visually impaired in UK will be over 2 million people [5].

Blind people experience difficulties when commuting to their intended destination [6, 7]. One of the greater obstacles is to detect foreign objects across their walking path. Based on [8], a safe distance between a blind person and an obstacle is in the range of 20 cm to 250 cm. With reference to Mau et al. [9], roughly 90% of the blind population is unable to travel alone. 3% of them are dependent on their pet while the remaining 7% uses the white cane. Even with the white cane, their mobility is still limited; both indoor and outdoor.

In the 21st century, the latest smart cane to hit the market was introduced by the Indian Technology Delhi's Assistive Technologies Group (Assistech). The device helps the visually impaired to navigate around an obstacle by measuring the distance through vibration detection and sonar technology [9]. Developers have put in effort to help the visually impaired feel safe, secure and comfortable whenever going out in public or at home. The cane is continuously refined to serve as their second eye, which ultimately allows them to walk independently.

Smart Cane; developed by Rutgers University and GSET implements ultrasonic sensors to detect obstacles and a vibrating motor to alert the user [11]. Its concept is similar to the one developed by Assistech, but with an additional feature which allows the sensor to be adjusted according to the height of the user [10]. Both devices however, focused on obstacles in front of the blind individuals. Meanwhile, the cane developed by Yoshihiro et al, also considers uneven floor conditions. Dangerous surfaces are detected via infrared sensor and the information is relayed to the user via headphone.

This project aims to further revolutionize the idea using NI myRIO-1900. The proximity sensor for obstacle detection can be adjusted to suit user specification. Meanwhile the output is produced as an auditory signal through earphone. The project is expected to enable the visually impaired walk independently without the need to sweep or knock the cane as information related to distance to the obstacle and uneven floor conditions have already been made available by the system.

## II. METHODOLOGY

This study is focused on aspects related to hardware design and algorithm implementation. All information associated with input specifications, processing device and output component were collected prior to prototype realization. Components identified include ultrasonic sensor as the input, NI myRIO-1900 as the processor and auditory signal as the output. Aspects of power supply have been researched to comply with portability requirements. Hence, rechargeable battery has been considered for this project. Performance of the proposed device focused on implementation of the sensor, as well as overall accuracy and efficiency.

Ultrasonic sensor measures the distance between obstacle and the device [12]. Time taken by the sound wave to travel from the sensor to the nearest object and reflected back to the sensor is defined as the Time of Flight (TOF).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Meanwhile, a sub-component of decision-making process used for selection of beeping pattern is outlined based on the detected obstacle range. Flowchart for the program is subsequently shown in Fig. 3.

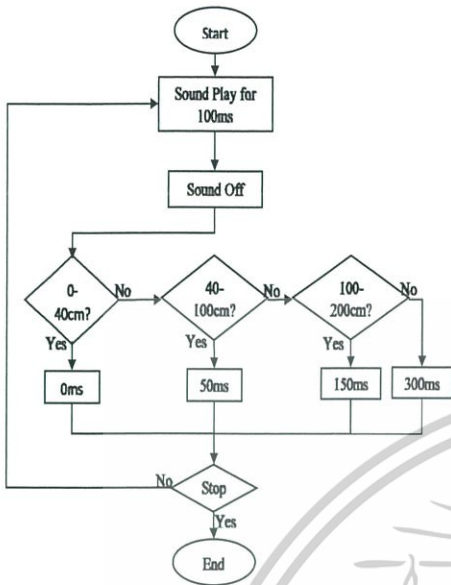


Fig. 3. Audio Signal Selection Flowchart

IV. EXPERIMENTAL TEST

Experiments were conducted to analyze the best position and angle of the sensor when combined with the cane. Two sensor positions were analyzed; upper and lower position of the cane.

A. Sensor at the Upper Position

Length of the cane was 120 cm. As shown in Figure 4, the average height taken between ground level and the top of the cane is 80 cm. The sensor was implemented for angles of 90° and 45°. The obstacles were 200 cm from the sensor. The top of obstacle were 80 cm from ground level. Meanwhile the bottom obstacle was placed on the floor. The middle obstacle is positioned midway between the top and bottom obstacles. Distance for each obstacle is averaged over three readings and the results are presented in Table II.

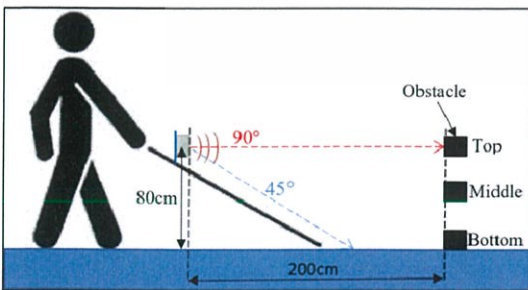


Fig. 4. Sensor at the Upper Position

B. Sensor at the Lower Position

The experiment was replicated with the sensor at a lower position. The setup is as illustrated in Figure 5. Average distance between the sensor and each obstacle is presented in Table III. As shown in Fig. 6, height of the obstacles was then plotted against the distance measured from different sensor positions and angles.

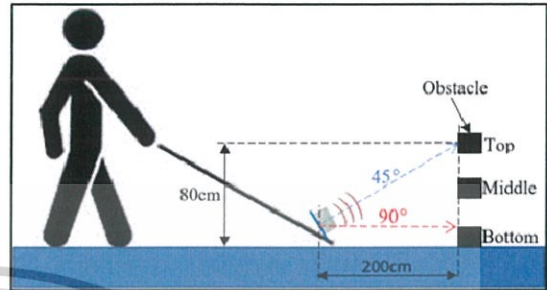


Fig. 5. Sensor at the Lower Position

TABLE II. DISTANCE RECORDED FOR SENSOR AT THE UPPER POSITION

Angle of Sensor	Obstacle's Position	Distance (cm)
90°	Top	197
		199
		200
	Middle	212
		216
		213
Bottom	225	
	222	
	223	
45°	Top	230
		222
		224
	Middle	221
		214
		221
Bottom	209	
	210	
		208

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE III. DISTANCE RECORDED FOR SENSOR AT THE LOWER POSITION

Angle of Sensor	Obstacle's Position	Distance (cm)
90°	Top	210
		212
		211
	Middle	203
		205
		204
Bottom	199	
	200	
	201	
45°	Top	204
		205
		202
	Middle	209
		210
		207
	Bottom	243
		255
		272

## V. CONCLUSION

The study has successfully developed a smart cane for alerting the blind user of the impending obstacles. These were realized through implementation of ultrasonic sensor which is capable of measuring distance to the object. The information is then fed to the NI myRIO-1900 which later translates into audio signal. The frequency of beeping increases as the user walks closer to the obstacle. The placement and orientation of the sensor on the cane was also successfully analyzed in terms of accuracy and angle. The upper positioned sensor with angle of 90° has been found to the most practical configuration. In general, a smart cane with range notification feature has successfully been developed and its specifications verified.

## ACKNOWLEDGMENT

Authors would like to express gratitude to the Faculty of Electrical Engineering, Universiti Teknologi MARA, Malaysia for funding this research project.

## REFERENCES

- [1] A. A. Dahl, "Blindness," 2/25, 2015. [Online]. Available: <http://www.medicinenet.com/blindness/article.htm>. [Accessed: 10-Dec-2015].
- [2] Linda J. Vorvick, "Blindness and Vision Loss," 9/3, 2012. [Online]. Available: <http://www.nytimes.com/health/guides/symptoms/blindness/overview.html#top>. [Accessed: 10-Dec-2015].
- [3] S. P. Mariotti, *Global Data on Visual Impairments 2010*, Geneva: World Health Organization, 2012.
- [4] K. Lim, "Vision 2020 and prevention of blindness: Is it relevant or achievable in the modern era?" *Ann. Acad. Med.*, vol. 35, no. 3, pp. 215–222, 2006.
- [5] J. Slade, *Eye Health Data Summary*, London: Royal National Institute of Blind People, 2014.
- [6] A. Noorithaya, M. K. Kumar, and A. Sreedevi, "Voice assisted navigation system for the blind," in *Proc. 2014 Int. Conf. Circuits, Commun. Control Comput.*, 2014, pp. 177–181.
- [7] M. F. Saaid, I. Ismail, and M. Z. H. Noor, "The studies of tags detection performances for different tags type in RFIWS system," in 2012 IEEE 8th International Colloquium on Signal Processing and its Applications (CSPA), pp. 310–315.
- [8] L. Nieto, C. Padilla, and M. Barrios, "Design and implementation of electronic aid to blind's cane," in *Proc. 2014 III Int. Congr. Eng. Mechatron. Autom.*, 2014, pp. 1–4.
- [9] E. Bal, "An RFID application for the disabled: Path Finder," in *Proc. 1st Annu. RFID Eurasia*, 2007, pp. 1–5.
- [10] J. O'CALLAGHAN, "The white stick gets a 21st century makeover: £30 smart cane uses SONAR and vibrations to help blind people 'see,'" 20 June, 2014. [Online]. Available: <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2663715/The-white-stick-gets-21st-century-makeover-30-smart-cane-uses-SONAR-vibrations-help-blind-people-see.html>.

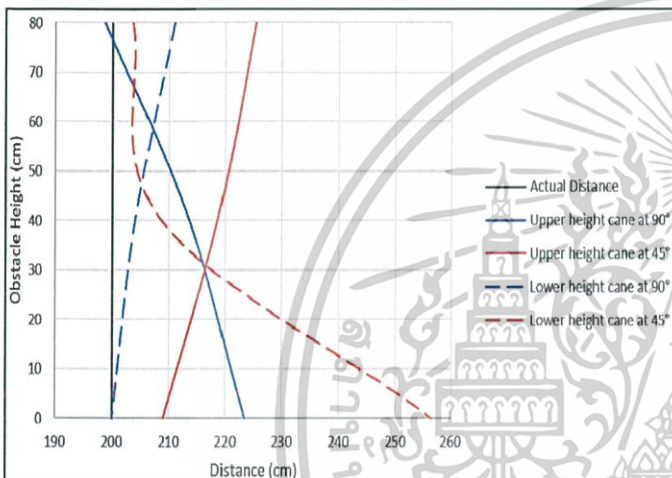


Fig. 6. Obstacle's height versus measured distance from different position and angle

Results show that sensors at upper and lower positions with angle of 45° are not suitable as the measurement deviated too far compared to other sensor settings. For top and middle obstacles, sensor at lower position with angle of 45° attained values close to the actual distance. However, its performance deteriorates for lower positioned obstacles. The sensor at lower position with angle of 90° achieved the most accurate reading, even for the top obstacle.

However, such position is prone to being damaged when the user swings the cane. In addition, impurities such as dust, sand and mud may get lodged on the sensor component when used outdoor. Consequently, this will adversely affect the overall performance and accuracy of the system for detecting obstacles. As an alternative, sensor at the upper position with angle of 90° can also efficiently measure obstacle distance.

For such setup, the measured distance increases with lower positioned obstacles. The bottom-most obstacle however, recorded deviation of not more than 12.5% from the actual distance. Furthermore during the experiment, the obtained measurements were almost constant and thus, are more reliable for practical implementation. Hence for this project, the most suitable sensor configuration will be at the upper position with angle of 90°.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [11] W. Huang, H. McNamara, D. Molodan, A. Pasarkar, and R. Rizzo, "Smart cane," unpublished.
- [12] T. Emaru, and T. Tsuchiya, "Research on estimating smoothed value and differential value by using sliding mode system," *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 19, no. 3, pp. 391–402, 2003.



# Design and Implementation of a Dual Infra-Red Receiver Circuit for Intruder Detection

Emmanuel Atta Williams\*, Stephen Marrion Cobbina\*\*, Stephen Kwaku Okrah\*\*\*

\* & \*\* Department of Electrical/Electronics Engineering, Takoradi Polytechnic, Ghana

\*\*\* Department of Engineering, Ghana Technology University College, Takoradi, Ghana

**Abstract-** Security Management and Safeguard of properties have become a necessity in any establishment and requires a measure to deny access to unauthorized personnel from accessing facility. Some of these measures come at a cost as security is inevitable. The objective of this project was to design and implement an affordable, effective and reliable wireless intruder detection system and to minimize false triggering and enhance detection using Dual Infrared Technology. The idea was to employ distance infrared proximity sensor (SHARP 0A41SK) which generated an interrupted signal when any obstacle is in front of IR sensor. The interrupted signal was fed to an IC (NE 555) timer arrangement to produce a flip-flop audible sound to alert people of intruder presence. The designed and constructed dual infrared intruder detection system subjected to testing produced an accurate security zone that spreads out uniformly to enhance protection for properties, homes and offices. The system could be adapted to monitor other alarm conditions such as fire, heat smoke, flood, etc. The design could be recommended for use of GSM applications as the alarm system that could be programmed to call Police distress line directly and relay a pre-programmed message with the address of the intrusion scene for better response rescue by the police.

**Index Terms-** Dual, Infra-red, Intruder Detection, Receiver, Security

## I. INTRODUCTION

Management of assets and safeguard of properties and human lives have become a fundamental requirement in any establishment such as institutions, hospitals, industries and homes as well. Security management is the identification of assets (including information assets), followed by the development, documentation, and implementation of policies and procedures for protecting these assets. There are two types of security management namely software security and physical security management. Software security is an idea implemented to protect software against malicious attack and other hackers so that the software continues to function correctly under such potential risks. Security is necessary to provide integrity, authentication and availability.

Physical Security describes security measures that are designed to deny access to unauthorized personnel (including hackers or even accidental intruders) from physically accessing building, facility, resource, or stored information; and guidance on how to design structures to resist potentially hostile acts. Physical security can be as simple as a locked door or as

elaborate as multiple layers of barriers, armed security guards and guardhouse placement. Physical security is primarily concerned with restricting physical access by unauthorized people (commonly interpreted as intruders) to controlled facilities, although there are other considerations and situations in which physical security measures are valuable (for example, limiting access within a facility and/or to specific assets, and environmental controls to reduce physical incidents such as fires and floods). Security inevitably incurs costs and, in reality, it can never be perfect or complete - in other words, security can reduce but cannot entirely eliminate risks. Physical access controls for protected facilities are generally intended to deter potential intruders (e.g. warning signs and perimeter markings); distinguish authorized from unauthorized people (e.g. using keycards/access badges); delay, frustrate and ideally prevent intrusion attempts (e.g. strong walls, door locks and safes); detect intrusions and monitor/record intruders (e.g. intruder alarms and CCTV systems); and trigger appropriate incident responses (e.g. by security guards and police). Burglar alarms have been around for thousands of years. The most basic alarm used by ancient humans was the dog. It would protect property and guard against people who were attempting to take valuables. Over time, humans used other tricks like chimes to warn them against burglars. The use of burglar bars on doors, burglary proof on windows and fencing of a house are now not a requisite to protect us from burglary. Modern burglar alarms, however, are far more elaborate and use advanced forms of technology [1].

Hardwired systems have circuitries that are interconnected via wires. For installation of these types of systems professional help is needed. They are considered to be the most reliable one, as each and every sensor is physically connected to the control unit. This will reduce the chances of errors in the working of the system.

During the 1980s, improvements to motion sensors merged with other technologies. Motion sensors began to use infrared technology to avoid false positives and also superior electrical components to establish full home protection systems. The Infrared Radiation represents a major field in the electromagnetic spectrum and is the energy in the region of the electromagnetic radiation spectrum at wavelengths longer than those of visible light, but shorter than those of radio waves. Electromagnetic radiation is energy that is propagated through free space or through a material medium in the form of electromagnetic waves, such as radio waves, visible light, and gamma rays [2]. The term also refers to the emission and transmission of such radiant energy. With increasing growth rate of population in the society, daily crime rate in the homes and offices have also increased

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

immensely. Home and office security in this modern technological world is an electronic detection device system. In today's modernized alarm systems, the detection system employs a single unit sensor or dual technology which comprises two types of sensing unit. These can stop the unlawful entry and intruder activity before it takes place, and gives an alert of an intruder attack [3]. Therefore, there is the need to design and implement an affordable and effective Infrared Receiver Circuit for intrusion using Dual Sensors.

## II. PROBLEM STATEMENTS

Rapid growth in the world population with in commensurate employment opportunities and pressures of a more complex

society, the incidences of human intrusion and burglaries and crime in private and public places are on the increase. Heightened security concerns at homes, banks, shopping malls, schools, offices, etc. have led to continued search for different and improved security gadgets which are expensive. These security gadgets have their sensors for intruder detection at separate locations which makes it expensive [4]. Also both sensors must detect an intruder before an alarm will trigger. This implies that when a sensor unit is faulty the system cannot detect any intrusion. There is there for the need to design and construct an affordable and effective Infrared Receiver Circuit for intrusion using Dual Sensors.

## III. METHODOLOGY

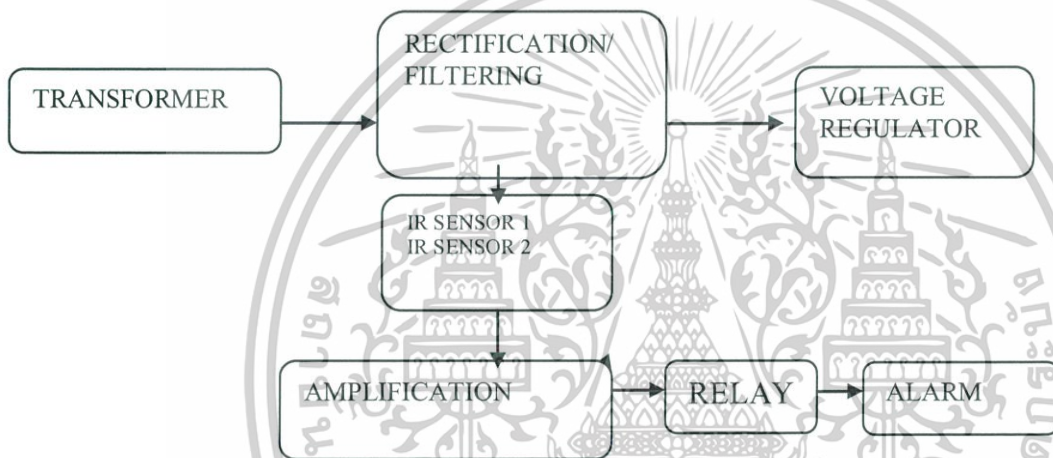


Figure 1. Block diagram of Dual Infrared Receiver Circuit

The block diagram above represented the major components used and the sequential flow of signal from detection of intruder to the sounding of an alarm. This system was designed to alert the user when an intruder entered the home or office. If there was any obstacle in front of IR sensor, it generated an interrupt signal. This interrupted signal was amplified to switch a relay for the buzzer to sound an alarm. IR transmitter emitted infrared radiation which have to be detected by IR receiver.<sup>[15]</sup> When an intruder or obstacle broke the line of sight, the transmitted IR rays were reflected back to the IR receiver. The breaking of the line of sight (interrupted signal) would trigger a loud audible sound to alert people of intruder presence [5].

The method used for the design and implementation of the dual infrared detection system was categorized under the following stages: Component Assembling, Soldering Station operation and Packaging.

## IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

During the design and implementation stages, tests were carried out and the following observations were made:

The full wave rectifier produced an output of 24Vdc which served the input of the 7812 voltage regulator which generated an

output of 12Vdc. The half wave rectification produced a 12Vdc output which was fed to a 7805 voltage regulator and produced an output of 5Vdc.

The Infrared Emitter produced radiated rays which upon intruder detection produced an output signal by Infrared Receiver. The output signal of the receiver was very weak to drive the buzzer and needed to be amplified. The signal was amplified by a transistor to operate the output device which is the buzzer.

The designed and implemented dual infrared receiver system worked by sending out a beam of light, of which when the beam of rays broken by human across the path of the infrared sensor activated the alarm and the buzzer was sounded. The system was tested at an entrance point of an area and an alarm was triggered when an intruder passes within its range of coverage to notify or alert the people within its inhabitant or security personnel. The alarm produced or generated by the output device (buzzer) was audibly enough to alert property owners of intruder presence for unauthorized or unlawful entry into premises (office or home). The designed and implemented Dual Infrared Intruder Detection system subjected to testing ensures an accurate security zone suitable for enhancing protection for properties, homes, offices and safeguarding

ไม่ว่ากรณีใดๆ หวังสัน อีกทงห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

humans and offers the advantage of low cost and low power consumption in its operation.

**Intensity of Radiation**

It was realized that the energy from the point source of radiation which is defined as coverage zone for protection can be calculated using the formula

$$E = \frac{AM}{4\pi R^2} \tag{1}$$

Where Incidence E is the flux per unit area at the detector, has units of W/m<sup>2</sup>

Emittance M is the flux per unit area of the source, has units of W/m<sup>2</sup>

Surface Area A is the area from the point source, has units of m<sup>2</sup>

Distance R is the distance between the target and Receiver, has units of m

From Stefan-Boltzmann law [6],  $M = \epsilon \sigma T^4$  \

where

$\epsilon$  is the Emissivity of surface

$\sigma$  is the Stefan-Boltzmann constant

T is the Temperature measured in Kelvin

From equations (1) and (2), the intensity of radiation was calculated using the following measured parameters:

Area (A) = 0.04m<sup>2</sup>

Emissivity of surface ( $\epsilon$ ) = 0.94

Temperature (T) = 309K

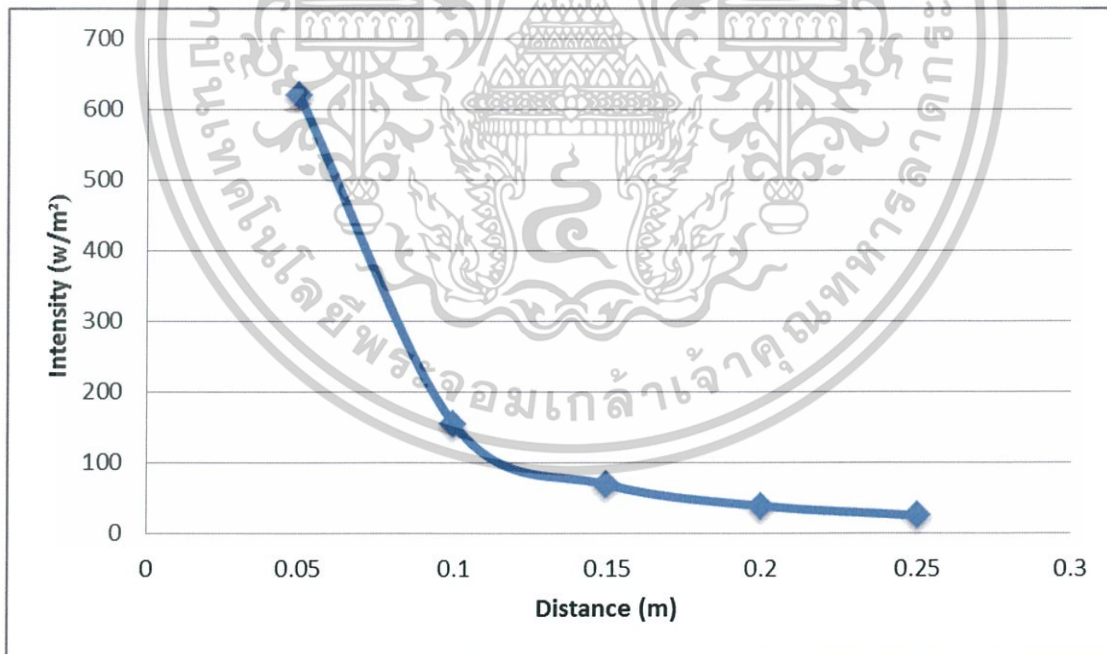
Stefan-Boltzmann constant ( $\sigma$ ) = 5.67\*10exp -8 w/m<sup>2</sup>K<sup>-4</sup>

Emittance, M =  $\epsilon \sigma T^4$   
 = 485.89 w/m<sup>2</sup>

From the formula  $E = \frac{AM}{4\pi R^2}$ , the values of intensity calculated against their respective distances were tabulated below [ 7]

**Table 1: The relationship of Intensity against Distance**

Parameter	Unit	1	2	3	4	5
Area (A)	m <sup>2</sup>	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Emittance (M)	w/m <sup>2</sup>	485.89	485.89	485.89	485.89	485.89
Distance(R)	m	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25
Intensity (E)	w/m <sup>2</sup>	618.65	154.66	68.74	38.66	24.75



**Figure 1: A graph of Intensity against Distance**

The analysis made on the design of Dual Infrared Intruder Detection System revealed that the strength of the output signal to trigger the alarming circuit depended on the measure of the distance of the intruder detected by the proximity sensors. If the object is close, the reflected rays will be stronger than if the object is further away. The value of intensity radiated depends on

the value of the distance measured between the target and the detector. Therefore, the closer the object the high the Intensity. This principle can be used for several automated systems such as robotics, industrial safety device to detect gas leakages, automated patient monitoring at hospitals, a measure of fail-safe functions for equipments in a factory and for traffic signaling.

## V. CONCLUSION

Conclusively, a dual infrared intruder detection system has been designed and implemented. The use of Dual Infrared as a nonstatic unit radiated beam of lights that spreads across a wider area defined as zone of protection. This phenomenon of dual infrared made it suitable for accurate security protection against human intrusion for homes, offices, banks and properties. The designed project was affordable, effective and reliable wireless intruder detection system. The system is a measure for life guarding valuable properties and humans against intruder attacks and minimizes false triggering or false detection. The audible sound generated by this research gives the alertness to owners or occupants of properties and neighbours around of intruder attack and can call police for assistance.

## ACKNOWLEDGEMENT

We do acknowledge Nana Yaw Yankson and Vincent Olympio, former students of Ghana Technology University, Takoradi, Ghana for their immense contributions toward this article.

## REFERENCES

- [1] Jason Chavis. (2015, May 08). What Is the History of the Burglar Alarm?[Online]. Available: [http://www.ehow.com/facts/5038281\\_history-burglar-alarm.html](http://www.ehow.com/facts/5038281_history-burglar-alarm.html)
- [2] Cool Cosmos (2013). what is infrared?[Online]. Available: [http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic\\_classroom/ir\\_tutorial/what\\_is\\_ir.html](http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_classroom/ir_tutorial/what_is_ir.html)

- [3] A wireless Home Security System, Honeywell Security & Data Collection Newhouse Industrial Estate, Lanarkshire ML1 5SB Scotland, 2009, pp 1-3.
- [4] Riccardo Focardi and Fabio Martinelli, "A Uniform Approach for the Definition of Security Properties," in Lecture Notes in Computer Science, Volume 1708, 1999, pp 794-813.
- [5] Kh. Asaduzzaman, M. Nazrul Islam, M. Shahjamal and MahbubulHoq, (2010). Infrared Security Alarming System.[Online]. Available: <http://medwelljournals.com/abstract/?doi=ajit.2010.243.247>
- [6] Characteristics and use of Infrared Detectors, Solid State Division Hamamatsu Photonics K K, Japan, Cat No KIRD9001E03,2004, pp 3.
- [7] Tuneable Rate and Low Jitter. (1998, January 20). Infrared Propagation and Detection[Online].
- [8] Available: [http://fas.org/man/dod-101/navy/docs/es310/IR\\_prop/IR\\_prop.htm](http://fas.org/man/dod-101/navy/docs/es310/IR_prop/IR_prop.htm)

## AUTHORS

**First Author-** Emmanuel Atta Williams, Department of Electrical/Electronics Engineering, Takoradi Polytechnic, Ghana. E-mail : [attawilliams@yahoo.com](mailto:attawilliams@yahoo.com)/[attawilliams@gmail.com](mailto:attawilliams@gmail.com)

**Second Author-** Stephen Marrion Cobbina, Department of Electrical/Electronics Engineering, Takoradi Polytechnic, Ghana. E-mail: [ekumtobia@yahoo.co.uk](mailto:ekumtobia@yahoo.co.uk)

**Third Author-** Stephen Kwaku Okrah, Department of Engineering, Ghana Technology University College, Takoradi, Ghana., E-mail : [okrah0612009@yahoo.com](mailto:okrah0612009@yahoo.com)

**E-mail Address of Corresponding Author:**  
[attawilliams@yahoo.com](mailto:attawilliams@yahoo.com)/[attawilliams@gmail.com](mailto:attawilliams@gmail.com)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Predicting Wheat Quality Characteristics and Functionality Using Near-Infrared Spectroscopy

F. E. Dowell<sup>1,2</sup> E. B. Maghirang,<sup>1</sup> F. Xie,<sup>3</sup> G. L. Lookhart,<sup>3</sup> R. O. Pierce,<sup>4</sup> B. W. Seabourn,<sup>5</sup>  
S. R. Bean,<sup>5</sup> J. D. Wilson,<sup>5</sup> and O. K. Chung<sup>5</sup>

## ABSTRACT

Cereal Chem. 83(5):529–536

The accuracy of using near-infrared spectroscopy (NIRS) for predicting 186 grain, milling, flour, dough, and breadmaking quality parameters of 100 hard red winter (HRW) and 98 hard red spring (HRS) wheat and flour samples was evaluated. NIRS shows the potential for predicting protein content, moisture content, and flour color  $b^*$  values with accuracies suitable for process control ( $R^2 > 0.97$ ). Many other parameters were predicted with accuracies suitable for rough screening including test weight, average single kernel diameter and moisture content, SDS sedimentation volume, color  $a^*$  values, total gluten content, mixograph, farinograph, and alveograph parameters, loaf volume, specific loaf volume, baking water absorption and mix time, gliadin and glutenin

content, flour particle size, and the percentage of dark hard and vitreous kernels. Similar results were seen when analyzing data from either HRW or HRS wheat, and when predicting quality using spectra from either grain or flour. However, many attributes were correlated to protein content and this relationship influenced classification accuracies. When the influence of protein content was removed from the analyses, the only factors that could be predicted by NIRS with  $R^2 > 0.70$  were moisture content, test weight, flour color, free lipids, flour particle size, and the percentage of dark hard and vitreous kernels. Thus, NIRS can be used to predict many grain quality and functionality traits, but mainly because of the high correlations of these traits to protein content.

Quality characteristics of wheat (*Triticum aestivum* L.) whole grain, flour, dough, and bread can be measured by various qualitative and quantitative tests. These measurements are typically used to determine value or used to predict functionality and end use quality. There are standard or recommended measurement methods for many of these quality parameters such as those found in the Approved Methods of AACC International (2000) and the United States Department of Agriculture (USDA) Grain Inspection Handbook (USDA 2004). These methods are generally difficult and time-consuming, and most cannot be used to rapidly measure quality characteristics and functionality.

Near-infrared spectroscopy (NIRS) has been used as a rapid, accurate, and nondestructive technique for measuring many wheat quality parameters. Williams et al (1988) used NIRS to predict wheat strength from hard red spring (HRS) flour spectra with good accuracies. Their samples were selected to represent a wide range in dough strength, sedimentation volume, and loaf volume. Rubenthaler and Pomeranz (1987) showed good correlations of water absorption, mix time, and loaf volume of hard red winter (HRW) wheat to flour NIR spectra. Delwiche et al (1998) applied NIRS models of flour from pure HRW cultivars to predict glutenin and gliadin content, SDS sedimentation volume, and mixograph peak resistance. When using commercial HRW and HRS flour, Delwiche and Weaver (1994) predicted absorption, mix time, bake score, loaf height, and mix tolerance from NIR spectra.

Pawlinsky and Williams (1998) further showed that, when scanning Canadian HRW and HRS wheat grain, they could predict functionality parameters for the identification of suitable material for advancement in breeding programs. Their tests were limited to predicting protein content, wet gluten content, Zeleny sedimentation volume, mixing time, and farinograph parameters. In a study using spectra from whole grain and flour, Millar (2003) developed NIRS calibrations from U.K. and French wheat and showed potential for predicting protein and moisture content, water absorption, and flour color using NIR spectra, but had poor results when attempting to predict loaf volume and crumb grain score. Sissons et al (2006) used NIR spectra from grain from durum (*Triticum turgidum* L.) breeding lines to predict kernel, flour, and dough characteristics for breeding programs. Their results showed potential for grouping samples into low, medium, and high categories for test weight, thousand kernel weight, semolina yield, semolina yellow color, semolina browning, grain hardness, and cooked pasta firmness.

Hruskova and Famera (2003) used flour NIR spectra for quantitative screening based on moisture and protein content, ash, and wet gluten content. However, related research showed that farinograph (Hruskova et al 2001) and alveograph (Hruskova and Smejda 2003) parameters were predicted poorly when using NIR spectra from flour. Devaux et al (1986) used NIRS models to assign French soft wheat samples into three breadbaking quality categories (good, unsuitable, and irregular), but actual quality measurements or predictions were not made.

Thus, although other researchers have examined the potential for NIRS to predict various quality parameters from flour and whole grain spectra, most were limited to small sample sets, pure cultivars, or predicting a few specific parameters. No previous research has attempted to predict multiple whole kernel, milling, flour, dough, and breadmaking quality from whole kernels and flour from samples representing those in commercial trade. Thus, the objective of this research was to evaluate the potential of NIRS to measure whole kernel, milling, flour, dough, and breadmaking quality characteristics from whole kernels and flour of HRW and HRS wheat samples selected to represent the quality range expected in U.S. commercial wheat. It is not the goal of this research to develop calibrations but to examine where NIRS may provide the grain industry with a potential rapid means to predict grain, flour, dough, and bread quality, and where to focus future calibration efforts.

<sup>1</sup> USDA ARS, Grain Marketing and Production Research Center, Engineering Research Unit, 1515 College Avenue, Manhattan, KS 66502. Names are necessary to report factually on available data; however, the USDA neither guarantees nor warrants the standard of the product, and the use of the name by the USDA implies no approval of the product to the exclusion of others that may also be suitable.

<sup>2</sup> Corresponding author. Phone: 785-776-2753. Fax: 785-537-5550. E-mail: floyd.dowell@gmprc.ksu.edu

<sup>3</sup> Kansas State University, Department of Grain Science and Industry, Manhattan, KS 66506.

<sup>4</sup> USDA, Grain Inspection, Packers, and Stockyards Administration, Federal Grain Inspection Service, Kansas City, MO 64163.

<sup>5</sup> USDA ARS, Grain Marketing and Production Research Center, Grain Quality and Structure Research Unit, 1515 College Avenue, Manhattan, KS 66502.

## MATERIALS AND METHODS

### Wheat Samples

One hundred HRW and 100 HRS wheat samples (1 kg each) from the 2002 and 2003 crop years were provided by the USDA Grain Inspection, Packers, and Stockyards Administration (GIPSA), Federal Grain Inspection Service (FGIS), Kansas City, MO. Samples were selected primarily based on their protein content and were expected to result in a wide range of bread quality.

Two HRS wheat samples were discarded from the sample set due to insect infestation. The HRW protein content range was 9.2–15.8% (average 12.6%), and the HRS protein content range was 11.4–19.3% (average 14.6%). Maghirang et al (2006) reported the details on all quality factors for these samples, including their source.

### NIR Instrumentation

Four NIR instruments were selected to determine whether different wavelength ranges or scanning technology would affect prediction accuracy. NIR instruments used to collect spectral data of whole grain and flour samples were the Cognis-QTA Bruker Optics FT-NIR (835–2,502 nm, Cognis, Cincinnati, OH), which measured NIR absorbance using an interferometer; the Foss Infratec 1241 (850–1,050 nm, Foss NIRSystems, Eden Prairie, MN), which has the narrowest wavelength range but is probably the most common NIR instrument used in the grain industry; the Foss NIRSystems 6500 (450–2,498 nm), which had the widest wavelength range and included the visible spectrum; and the Perten Diode Array (DA) 7200 (950–1,650 nm, Perten Instruments, Springfield, IL). For the Foss 6500, the full-rectangular scanning module was used for scanning grain, whereas the quarter-rectangular module was used for scanning flour. The Foss 1241 measured NIR absorbance using diffuse transmittance, whereas the other spectrometers used diffuse reflectance. All spectral data were collected at the USDA-ARS Grain Marketing and Production Research Center (GMPRC), Manhattan, KS, except for Foss Infratec 1241 whole grain spectra that were collected by GIPSA. Grain samples used for spectral data collection were passed through the Boerner sample divider (Seedburo Equipment Company, Chicago, IL), with the number of passes being dependent on the sample size requirement of the NIR instrument. This was done to ensure that representative subsamples from the original sample were being used.

For all spectrometers, data were collected according to the instrument manufacturers' recommendations. For the Cognis-QTA, 200 spectra were collected from a subsample with  $\approx 150$  g of grain or 80 g of flour and it was continuously stirred while the sample container rotated about a fixed paddle. The spectra were averaged into one spectrum. This was repeated for a second subsample and the spectra from the two subsamples were averaged. For the Foss 6500, 64 spectra were collected from a subsample with  $\approx 250$  g of grain or 60 g of flour as the sample cell moved past the detection optics, and the spectra were automatically averaged into one spectrum. This was repeated for a second subsample and the spectra from the two subsamples were averaged. For the Perten 7200, 100 spectra were collected as a sample with  $\approx 260$  g of grain or 160 g of flour rotating in the sample cup. The spectra were automatically averaged into one spectrum. This was repeated four times on the same subsample, and the four resulting spectra were averaged. For the Foss Infratec whole grain analysis, one spectrum was collected from each of 10 subsamples from 600 g of sample as the sample automatically fed through the spectrometer. The 10 spectra were then automatically averaged. For the flour samples analyzed on the Foss Infratec, a subsample of  $\approx 10$  g was placed in a sample cell and five spectra were collected and automatically averaged. This was repeated for a second flour subsample and the two spectra were averaged.

### Wheat Quality Analysis

Maghirang et al (2006) described the testing methods. Whole grain quality characteristics included test weight, protein content, moisture content, single kernel hardness, average single kernel moisture content, and mean kernel diameter. In addition, the percentage of dark hard and vitreous kernels were measured on the HRS wheat samples.

Flour was milled on a Brabender Quadrumat Sr. mill using the procedures described by Maghirang et al (2006). Milling and flour quality indicators measured include flour yield, wheat and flour ash contents, flour protein content, brightness ( $L^*$ ), amount of red and green color ( $a^*$ ), amount of yellow and blue color ( $b^*$ ), flour geometric mean diameter, starch geometric mean diameter, polyphenol oxidase content, falling number, SDS sedimentation volume, total gluten content, gluten index, insoluble and soluble glutenin protein contents, gliadin protein content, total glutenin protein content, free lipids, polar lipids, and nonpolar lipids.

Dough properties were evaluated using the mixograph, farinograph, and alveograph. Parameters measured by the mixograph were water absorption, mix time, and mixing tolerance. The parameters measured by the farinograph were water absorption, development time, stability, tolerance, and quality number. The parameters measured by the alveograph were peak height, length, swelling index, work, and configuration ratio. The breadmaking quality parameters measured for the pup loaf (100 g of flour) straight-dough procedures were baking water absorption, baking mix time, crumb grain score, loaf volume, specific loaf volume, and loaf volume potential.

All whole grain quality characteristics were analyzed by GIPSA. CII Laboratory Services, Kansas City, MO, conducted alveograph tests. The GMPRC conducted all other tests. Standard methods were used whenever an approved method was available and are described by Maghirang et al (2006).

### Data Analyses

Forty-six HRW and 47 HRS whole grain, milling, flour, dough, and breadmaking quality characteristics were analyzed from both whole grain and flour spectra, resulting in a total of 186 predictions. Spectral data were analyzed using GRAMS/AI software (v. 7, Thermo Galactic, Salem, NH). Models were developed for each quality parameter by partial least squares (PLS) regression. The number of factors when the  $F$ -ratio probability level was  $\approx 0.75$  was used for the calibration model. A one-sample-out cross-validation was used for the PLS analysis.

Since many measured parameters are correlated to protein content, the PLS regressions were performed with and without the influence of protein content. To remove the influence of protein content on the regressions, each selected attribute was regressed on protein content and the residuals calculated. These residuals were then used in the PLS regressions. This was done only for the Foss 6500 data.

Mean-centered absorbance ( $\log 1/R$ ) and the Savitzky-Golay first-derivative of the absorbance spectrum were analyzed. Other pretreatments were not tested. Small improvements in prediction accuracies can be achieved with some spectral pretreatments (Delwiche and Reeves 2004), but generally pretreatments will result in similar classification accuracies but with fewer factors. Statistics used to determine the ability of NIR to predict specific parameters were the coefficient of determination ( $R^2$ ) and standard error of cross validation (SECV). When reporting results, only parameters with  $R^2 > 0.70$  were considered important. This value was selected because the ratio of the standard deviation of the reference data to the SECV, which is similar to the  $RPD$  in Williams (2001), is  $\approx 2$  when  $R^2 = 0.70$ . A smaller  $R^2$  indicates predictions using PLS will not be much better than predictions using the mean value of the reference data alone. Similarly, higher  $R^2$  values indicate that NIR spectroscopy can predict quality parameters with more accuracy. Williams (2001) indicated that  $R^2 = 0.70$ – $0.90$  is

suitable for rough screening,  $R^2 = 0.90-0.97$  is suitable for screening or quality control,  $R^2 = 0.97-0.99$  is suitable for process control, and larger values are suitable for most applications.

## RESULTS

### Comparison of NIR Spectrometers

When comparing  $R^2$  and SECV values for the four spectrometers for each of the HRS and HRW grain and flour quality predictions, the Foss 6500 had the highest  $R^2$  for 68 of the quality predictions (Tables I-IV). The Foss 1241 had the highest  $R^2$  for 46 of the quality predictions, followed by the Perten 7200 for 22 of the quality predictions, and the Cognis QTA for 14 of the quality predictions. There were 36 quality factors predicted with the same accuracy by two or more spectrometers.

There were no whole grain, flour, dough, or baking characteristics that were consistently predicted more accurately by a specific spectrometer, with the exception of flour color. The Foss

6500 had  $R^2$  values for color  $a^*$  and  $b^*$  that were almost twice as high as the other spectrometers ( $\approx 0.96$  when predicting flour color from flour and  $\approx 0.70$  when predicting flour color from whole grain), which can be expected because it was the only spectrometer that had a visible wavelength sensor in addition to an NIR sensor. The Cognis FT-NIR with its interferometer and ability to measure absorbance over very narrow wavebands did not show any advantages in predicting quality factors when compared with the other instruments. This is probably because the quality factors absorb over broad regions in the NIR, therefore negating any benefit of using the interferometer. The Foss 1241 with the narrowest wavelength range had higher  $R^2$  values for more quality predictions when compared with the Cognis and Perten instruments. Because absorption overtones extend throughout the NIR region, perhaps the simplicity of this instrument offsets the noise introduced when using sensors that extend further into the NIR. A more complete comparison and description of these spectrometers and their advantages and limitations is reported by Armstrong et al (2006).

TABLE I  
Summary of Partial Least Squares Regression Statistics for Predicting Grain, Flour and Baking Quality Characteristics from Spectra from Four NIR Spectrometers (Hard Red Winter Wheat Whole Kernels)

Quality Parameter	Cognis FT-NIR		Foss 1241		Foss 6500			Perten 7200		
	$R^2$	SECV	$R^2$	SECV	$R^2$	SECV	$R^2^c$	SECV <sup>c</sup>	$R^2$	SECV
Test weight, lb/bu	0.69(7)	0.66	0.69(6)	0.66	<b>0.74(6)</b>	0.56	0.60(6)	0.60	<b>0.72(10)</b>	0.62
Grain protein content, 14% mb	<b>0.98(10)</b>	0.25	<b>0.99(9)</b>	0.18	<b>0.97(12)</b>	0.29	-	-	<b>0.98(9)</b>	0.25
Grain moisture content, %	<b>0.95(7)</b>	0.19	<b>0.96(8)</b>	0.19	<b>0.96(8)</b>	0.18	<b>0.95(8)</b>	0.20	<b>0.97(10)</b>	0.16
Single kernel hardness index	0.38(10)	3.86	0.47(10)	3.51	0.46(10)	3.54	0.38(10)	3.65	0.39(8)	3.79
Single kernel moisture, %	<b>0.93(7)</b>	0.26	<b>0.93(6)</b>	0.26	<b>0.92(10)</b>	0.26	<b>0.92(8)</b>	0.27	<b>0.94(5)</b>	0.22
Single kernel dia, avg mm	0.68(6)	0.07	0.55(11)	0.08	<b>0.71(8)</b>	0.07	0.45(11)	0.07	<b>0.71(6)</b>	0.06
Flour protein content, 14% mb	<b>0.92(9)</b>	0.45	<b>0.97(7)</b>	0.29	<b>0.97(12)</b>	0.30	-	-	<b>0.97(10)</b>	0.31
Falling number, sec	0.13(1)	105.5	0.21(9)	91.44	0.30(8)	86.16	0.22(9)	89.30	0.04(5)	100.9
Flour yield, extraction, %	0.37(6)	1.01	0.36(11)	1.00	0.34(6)	1.04	0.28(6)	1.03	0.39(5)	1.00
Wheat ash, 14% mb	0.43(8)	0.07	0.41(8)	0.07	0.43(8)	0.07	0.31(10)	0.07	0.33(5)	0.08
Flour ash, 14% mb	0.31(9)	0.03	0.27(8)	0.03	0.26(10)	0.03	0.24(10)	0.03	0.13(4)	0.03
Polyphenol oxi, au/min/mL	0.45(7)	0.06	0.41(7)	0.06	0.51(6)	0.06	0.50(8)	0.05	0.41(7)	0.06
SDS sedimentation vol, mL	<b>0.70(8)</b>	2.36	<b>0.70(11)</b>	2.36	<b>0.72(9)</b>	2.31	0.25(10)	2.20	0.68(7)	2.47
Brightness (color $L^*$ )	0.35(5)	0.39	0.42(9)	0.37	0.21(2)	0.43	0.28(10)	0.22	0.33(5)	0.40
Red/green (color $a^*$ )	0.50(8)	0.16	0.45(8)	0.17	0.69(9)	0.13	0.59(12)	0.12	0.56(10)	0.15
Yellow/blue (color $b^*$ )	0.30(8)	0.57	0.32(12)	0.57	0.66(13)	0.39	0.66(13)	0.39	0.36(10)	0.55
Gluten content, g/10 g of flour	<b>0.92(10)</b>	0.16	<b>0.93(9)</b>	0.14	<b>0.88(10)</b>	0.19	0.26(6)	0.14	<b>0.92(10)</b>	0.15
Average gluten index, %	0.27(4)	2.83	0.38(12)	2.65	0.51(12)	2.05	0.17(9)	2.62	0.40(9)	2.59
Flour size GMD, 50% vol, $\mu\text{m}$	0.11(4)	2.32	0.25(10)	2.17	0.31(10)	2.06	0.31(10)	2.06	0.13(4)	2.30
Starch size GMD, 50% vol, $\mu\text{m}$	0.14(5)	1.33	0.07(8)	1.63	0.16(3)	1.63	0.11(4)	1.57	0.09(5)	1.38
Soluble glutenins, mg	<b>0.75(9)</b>	0.42	<b>0.77(8)</b>	0.40	<b>0.75(10)</b>	0.42	0.19(7)	0.39	0.61(5)	0.51
Soluble gliadins, mg	<b>0.85(9)</b>	0.76	<b>0.89(8)</b>	0.64	<b>0.86(10)</b>	1.72	0.17(5)	0.65	<b>0.88(10)</b>	0.65
Insoluble glutenins, mg	<b>0.85(9)</b>	0.64	<b>0.85(7)</b>	0.65	<b>0.84(10)</b>	0.66	0.09(9)	0.62	<b>0.84(10)</b>	0.67
Total glutenins, mg	<b>0.89(8)</b>	0.76	<b>0.93(7)</b>	0.59	<b>0.92(9)</b>	0.64	0.12(6)	0.56	<b>0.81(6)</b>	1.02
Free lipids, %	0.08(2)	4.67	0.46(12)	3.61	0.08(2)	4.68	0.03(6)	4.70	0.001(1)	4.90
Polar lipids, %	0.14(5)	3.25	0.15(5)	3.16	0.18(4)	3.11	0.04(5)	3.02	0.07(4)	4.46
Nonpolar lipids, %	0.05(2)	4.46	0.21(11)	3.94	0.05(1)	4.51	0.05(1)	4.51	0.001(1)	5.54
Mixograph absorption, %	<b>0.92(7)</b>	0.67	<b>0.92(7)</b>	0.69	<b>0.90(9)</b>	0.75	0.15(4)	0.64	<b>0.91(7)</b>	0.74
Mixograph time, min	0.40(8)	0.53	0.44(9)	0.50	0.60(9)	0.43	0.42(10)	0.42	0.47(9)	0.49
Mixograph tolerance score (0-6)	0.30(8)	0.78	0.26(12)	0.80	0.41(9)	0.71	0.42(4)	0.70	0.25(6)	0.79
Farinograph absorption, %	0.65(9)	1.35	0.65(12)	1.35	<b>0.76(13)</b>	1.12	0.51(14)	1.10	0.66(10)	1.32
Farinograph development time, min	0.32(8)	3.79	0.33(9)	3.73	0.23(6)	4.01	0.04(3)	3.75	0.36(9)	3.64
Farinograph stability, min	0.16(5)	3.76	0.30(14)	3.50	0.06(7)	4.03	0.04(3)	4.05	0.15(10)	3.92
Farinograph mixing tolerance, min	0.21(5)	10.12	0.24(10)	10.04	0.14(7)	10.71	0.02(4)	10.62	0.19(9)	10.31
Farinograph quality number	0.36(8)	47.39	0.34(9)	47.56	0.27(7)	50.18	0.13(2)	47.50	0.27(7)	49.19
Alveograph peak (P), mm	0.05(7)	15.20	0.20(11)	13.81	0.26(10)	13.34	0.22(10)	13.17	0.23(10)	13.74
Alveograph length (L), mm	0.65(8)	18.47	0.69(7)	17.44	0.69(10)	17.45	0.10(10)	16.88	<b>0.70(9)</b>	17.33
Alveograph swelling index, mL	0.64(7)	2.12	0.69(7)	1.94	<b>0.72(10)</b>	1.88	0.08(8)	1.86	<b>0.73(10)</b>	1.83
Alveograph work, $10^{-4}$ J	0.66(7)	48.60	0.69(9)	43.63	<b>0.70(10)</b>	45.72	0.09(10)	44.28	0.69(8)	46.02
Alveograph configuration ratio (P/L)	0.48(8)	0.42	0.47(7)	0.41	0.52(10)	0.40	0.05(7)	0.40	0.69(10)	0.32
Baking water absorption, %	0.48(9)	1.31	0.48(7)	1.28	0.37(6)	1.42	0.05(11)	1.25	0.43(8)	1.35
Baking mix time, min	0.37(8)	0.68	0.35(13)	0.70	0.41(9)	0.66	0.34(12)	0.63	0.38(9)	0.68
Crumb grain score (0-6)	0.27(8)	0.58	0.14(6)	0.61	0.20(6)	0.59	0.08(16)	0.56	0.23(8)	0.58
Loaf volume, $\text{cm}^3$	<b>0.78(7)</b>	39.27	<b>0.81(7)</b>	36.36	<b>0.82(9)</b>	36.11	0.05(5)	32.83	<b>0.82(10)</b>	35.85
Loaf specific vol, $\text{cm}^3/\text{g}$	<b>0.80(9)</b>	0.25	<b>0.80(9)</b>	0.25	<b>0.85(11)</b>	0.22	0.05(9)	0.23	<b>0.80(10)</b>	0.24
Loaf vol potential, $\text{cm}^3/\%$ protein	0.35(8)	3.98	0.27(7)	4.20	0.22(3)	4.30	0.07(4)	4.08	0.25(5)	4.26

<sup>a</sup>  $R^2$  values  $\geq 0.70$  shown in bold font.

<sup>b</sup> Numbers in parentheses after the  $R^2$  values refer to the number of factors of the PLS model.

<sup>c</sup> After protein covariate removal.

When spectra were preprocessed using a Savitzky-Golay first-derivative, no advantage in  $R^2$  or SECV values over using the absorbance spectra was seen in the ability to predict any quality parameters (data not shown).

### Predictions Using HRW Whole Kernel and Flour Spectra

When analyzing spectra from whole kernels, one or more spectrometers predicted HRW grain protein content, flour protein content, and grain moisture content with  $R^2 \geq 0.97$  (Table I). Average single kernel moisture content, total gluten content, total glutenin content, and mixograph absorption were predicted with  $R^2 \geq 0.90$ . Test weight, average single kernel diameter, SDS sedimentation volume, soluble and insoluble glutenin content, soluble gliadin content, farinograph absorption, alveograph length, alveograph swelling index, alveograph work, loaf volume, and specific loaf volume were predicted with  $R^2$  values of  $\approx 0.70$ – $0.90$ .

When analyzing flour spectra, one or more spectrometers predicted HRW grain and flour protein content, and color  $b^*$  with

$R^2 \geq 0.97$  (Table II). Color  $a^*$ , total gluten content, total glutenin content, and mixograph absorption were predicted with  $R^2 \geq 0.90$ . The following attributes were predicted with  $R^2$  of 0.70–0.90: SDS sedimentation volume, soluble and insoluble glutenin content, soluble gliadin content, alveograph length, alveograph swelling index, alveograph work, loaf volume, and specific loaf volume.

### Predictions Using HRS Whole Kernel and Flour Spectra

Results similar to HRW wheat were seen when predicting quality traits of HRS wheat. When analyzing spectra from whole kernels, one or more spectrometers predicted grain and flour protein content, and grain moisture content with  $R^2 \geq 0.97$  (Table III). Total gluten content was predicted with  $R^2 \geq 0.90$ . The attributes predicted with  $R^2$  of  $\approx 0.70$ – $0.90$  were test weight, average single kernel moisture content, dark hard and vitreous kernels, average single kernel diameter, color  $a^*$  and  $b^*$ , insoluble and total glutenin content, mixograph absorption, farinograph quality number, baking water absorption, loaf volume, and specific loaf volume.

**TABLE II**  
Summary of Partial Least Squares Regression Statistics for Predicting Grain, Flour and Baking Quality Characteristics from Spectra from Four NIR Spectrometers (Hard Red Winter Wheat Flour)

Quality Parameter	Cognis FT-NIR		Foss 1241		Foss 6500			Perten 7200		
	$R^2$	SECV	$R^2$	SECV	$R^2$	SECV	$R^2$ <sup>c</sup>	SECV <sup>c</sup>	$R^2$	SECV
Test weight, lb/bu	0.38(8)	0.94	0.43(6)	0.88	0.55(6)	0.79	0.34(5)	0.77	0.47(6)	0.86
Grain protein content, 14% mb	<b>0.95(4)</b>	0.39	<b>0.98(5)</b>	0.25	<b>0.98(5)</b>	0.25	–	–	<b>0.98(6)</b>	0.30
Grain moisture content, %	0.38(8)	0.73	0.30(12)	0.78	0.47(9)	0.67	0.46(9)	0.67	0.29(11)	0.81
Single kernel hardness index	0.29(8)	4.15	0.14(5)	4.45	0.47(8)	3.49	0.39(8)	3.59	0.30(3)	4.00
Single kernel moisture, %	0.45(8)	0.70	0.38(12)	0.76	0.53(8)	0.65	0.52(8)	0.66	0.32(12)	0.82
Single kernel dia, avg mm	0.43(8)	0.09	0.37(6)	0.10	0.54(11)	0.08	0.27(11)	0.08	0.40(6)	0.09
Flour protein content, 14% mb	<b>0.96(7)</b>	0.35	<b>0.99(7)</b>	0.21	<b>0.98(6)</b>	0.22	–	–	<b>0.99(8)</b>	0.20
Falling number, sec	0.08(10)	105.7	0.08(8)	100.0	0.14(6)	95.83	0.10(6)	96.11	0.01(3)	111.7
Flour yield, extraction, %	<b>0.27(10)</b>	1.14	0.40(11)	1.00	0.36(6)	1.02	0.32(6)	1.01	0.24(10)	1.18
Wheat ash, 14% mb	0.36(9)	0.08	0.18(7)	0.09	0.24(7)	0.08	0.10(9)	0.09	0.31(8)	0.08
Flour ash, 14% mb	0.56(10)	0.02	0.14(12)	0.03	0.34(10)	0.03	0.29(10)	0.03	0.35(8)	0.02
Polyphenol oxi, au/min/mL	0.41(10)	0.06	0.24(10)	0.07	0.33(6)	0.07	0.21(3)	0.07	0.32(8)	0.07
SDS sedimentation vol, mL	0.67(4)	2.49	<b>0.70(7)</b>	2.39	0.69(3)	2.42	0.11(4)	2.37	<b>0.70(4)</b>	2.36
Brightness (color $L^*$ )	0.31(7)	0.41	0.40(6)	0.37	0.32(4)	0.40	0.27(10)	0.20	0.37(10)	0.40
Red/green (color $a^*$ )	0.41(9)	0.18	0.47(11)	0.17	<b>0.96(7)</b>	0.05	<b>0.94(10)</b>	0.05	0.53(12)	0.16
Yellow/blue (color $b^*$ )	0.31(9)	0.58	0.51(12)	0.48	<b>0.97(7)</b>	0.11	<b>0.97(7)</b>	0.11	0.48(12)	0.49
Gluten content, g/10 g of flour	<b>0.91(6)</b>	0.16	<b>0.95(10)</b>	0.12	<b>0.93(5)</b>	0.14	0.14(3)	0.15	<b>0.94(9)</b>	0.13
Average gluten index, %	0.33(3)	2.69	0.42(10)	2.53	0.50(3)	2.02	0.36(5)	2.22	0.40(7)	2.55
Flour size GMD, 50% vol, $\mu$ m	0.58(8)	1.59	0.40(7)	1.90	0.60(2)	1.55	0.58(2)	1.55	0.51(5)	1.71
Starch size GMD, 50% vol, $\mu$ m	0.11(2)	1.34	0.05(3)	1.39	0.09(1)	1.36	0.03(6)	1.68	0.11(1)	1.34
Soluble glutenins, mg	<b>0.75(4)</b>	0.41	<b>0.78(8)</b>	0.39	<b>0.78(8)</b>	0.39	0.17(9)	0.40	<b>0.79(3)</b>	0.38
Soluble gliadins, mg	<b>0.84(6)</b>	0.77	<b>0.89(7)</b>	0.64	<b>0.86(5)</b>	0.71	0.16(9)	0.67	<b>0.88(7)</b>	0.67
Insoluble glutenins, mg	<b>0.82(5)</b>	0.71	<b>0.83(7)</b>	0.68	<b>0.86(4)</b>	0.63	0.13(7)	0.60	<b>0.86(4)</b>	0.63
Total glutenins, mg	<b>0.91(4)</b>	0.68	<b>0.93(6)</b>	0.62	<b>0.96(5)</b>	0.48	0.15(8)	0.55	<b>0.95(5)</b>	0.53
Free lipids, %	0.21(9)	4.57	0.48(11)	3.57	0.61(13)	3.07	0.58(13)	3.04	0.28(8)	4.26
Polar lipids, %	0.14(4)	3.27	0.23(6)	3.00	0.16(4)	3.14	0.04(2)	3.20	0.14(3)	3.18
Nonpolar lipids, %	0.16(5)	4.97	0.22(11)	3.93	0.33(13)	3.72	0.33(13)	3.72	0.13(10)	4.36
Mixograph absorption, %	<b>0.92(3)</b>	0.68	<b>0.95(7)</b>	0.55	<b>0.93(5)</b>	0.63	0.03(3)	0.72	<b>0.92(4)</b>	0.67
Mixograph time, min	0.35(10)	0.56	0.36(10)	0.54	0.54(5)	0.45	0.43(6)	0.42	0.35(3)	0.54
Mixograph tolerance score (0–6)	0.26(9)	0.83	0.28(14)	0.80	0.45(5)	0.67	0.46(5)	0.67	0.22(3)	0.81
Farinograph absorption, %	0.63(11)	1.40	0.69(12)	1.26	0.63(6)	1.37	0.32(11)	1.31	0.67(12)	1.32
Farino development time, min	0.29(3)	3.81	0.38(5)	3.56	0.29(2)	3.81	0.14(2)	3.83	0.37(3)	3.60
Farino stability, min	0.13(9)	4.15	0.06(5)	3.99	0.06(2)	3.97	0.03(2)	3.97	0.15(8)	3.90
Farino mixing tolerance, min	0.11(9)	11.74	0.17(7)	10.39	0.06(2)	11.05	0.04(2)	10.98	0.13(8)	11.11
Farino quality number	0.35(5)	46.85	0.37(5)	46.02	0.31(2)	48.37	0.07(2)	48.37	0.39(9)	46.49
Alveograph peak ( $P$ ), mm	0.04(3)	15.06	0.11(8)	14.54	0.24(10)	13.72	0.06(2)	14.19	0.07(3)	14.66
Alveo length ( $L$ ), mm	<b>0.72(7)</b>	16.55	<b>0.71(7)</b>	16.83	<b>0.71(3)</b>	16.91	0.09(2)	16.39	<b>0.71(3)</b>	16.50
Alveo swelling index, mL	<b>0.71(6)</b>	1.88	<b>0.72(8)</b>	1.86	<b>0.73(4)</b>	1.84	0.08(2)	1.81	<b>0.73(3)</b>	1.82
Alveo work, $10^{-4}$ J	<b>0.70(5)</b>	45.69	<b>0.70(7)</b>	45.63	<b>0.75(3)</b>	41.68	0.05(4)	44.26	<b>0.70(4)</b>	45.54
Alveo config ratio ( $P/L$ )	0.56(9)	0.38	0.50(8)	0.40	0.58(7)	0.32	0.16(7)	0.37	0.50(5)	0.40
Baking water absorption, %	0.51(4)	1.24	0.52(5)	1.23	0.53(4)	1.22	0.01(2)	1.30	0.54(8)	1.21
Baking mix time, min	0.20(5)	0.77	0.38(10)	0.68	0.40(3)	0.66	0.23(3)	0.68	0.38(10)	0.69
Crumb grain score (0–6)	0.19(3)	0.59	0.32(10)	0.55	0.34(2)	0.54	0.12(3)	0.54	0.21(5)	0.59
Loaf volume, $\text{cm}^3$	<b>0.78(6)</b>	39.85	<b>0.87(6)</b>	30.25	<b>0.83(5)</b>	35.16	0.02(3)	35.91	<b>0.83(4)</b>	34.66
Loaf specific vol, $\text{cm}^3/\text{g}$	<b>0.77(7)</b>	0.27	<b>0.84(6)</b>	0.22	<b>0.80(5)</b>	0.25	0.01(3)	0.25	<b>0.80(4)</b>	0.25
Loaf vol potential, $\text{cm}^3/\%$ protein	0.40(9)	3.87	0.45(10)	3.64	0.33(7)	4.03	0.01(2)	4.22	0.41(8)	3.79

<sup>a</sup>  $R^2$  values  $\geq 0.70$  shown in bold font.

<sup>b</sup> Numbers in parentheses after the  $R^2$  values refer to the number of factors of the PLS model.

<sup>c</sup> After protein covariate removal.

When analyzing spectra from flour, one or more spectrometers predicted HRS grain and flour protein content, and color  $b^*$  with  $R^2 \geq 0.97$  (Table IV). Color  $a^*$  and total gluten content were predicted with  $R^2 \geq 0.90$ . The attributes predicted with  $R^2$  of  $\approx 0.70$ – $0.90$  were test weight, flour particle size, insoluble glutenin content, total glutenin content, free lipid content, mixograph and farinograph water absorption, baking water absorption, loaf volume, and specific loaf volume.

### Influence of Protein Content on Predictions

While NIR spectroscopy shows potential to predict various HRW and HRS quality attributes, many of these attributes are correlated to protein content. Of those parameters predicted with  $R^2 \geq 0.70$  for either HRW or HRS wheat, total gluten content, insoluble glutenin content (HRW), total glutenin content, soluble gliadin content (HRW), mixograph absorption, loaf volume, and specific loaf volume were correlated to protein content with  $r >$

0.90. SDS sedimentation volume, soluble glutenin content (HRW), insoluble glutenin content (HRS), alveograph length, alveograph swelling index, and alveograph work (HRW) were correlated to protein content with  $r > 0.80$ . Test weight, average single kernel diameter, baking water absorption, alveograph work (HRS), and farinograph absorption were correlated to protein content with  $r > 0.70$ . The remaining parameters of moisture content, color  $a^*$  and  $b^*$ , flour particle size, lipid content, and dark hard and vitreous kernels showed no significant correlation to protein content.

When the influence of protein content was removed from the HRW grain and flour analyses, the only constituents predicted with  $R^2 \geq 0.70$  were moisture content predicted from grain spectra, and color  $a^*$  and  $b^*$  values from flour (Tables I and II). Most constituents had  $R^2$  values reduced to  $< 0.20$  when the influence of protein content was removed.

When the influence of protein content was removed from the HRS grain and flour analyses, the only constituents predicted

**TABLE III**  
Summary of Partial Least Squares Regression Statistics for Predicting Grain, Flour and Baking Quality Characteristics from Spectra from Four NIR Spectrometers (Hard Red Spring Wheat Whole Kernels)

Quality Parameter	Cognis FT-NIR		Foss 1241		Foss 6500			Perten 7200		
	$R^2$	SECV	$R^2$	SECV	$R^2$	SECV	$R^2$ <sup>c</sup>	SECV <sup>c</sup>	$R^2$	SECV
Test weight, lb/bu	<b>0.85</b> (8)	0.65	0.62(9)	1.05	<b>0.89</b> (12)	0.56	<b>0.73</b> (12)	0.63	<b>0.84</b> (10)	0.68
Grain protein content, 14% mb	<b>0.98</b> (10)	0.22	<b>0.99</b> (9)	0.20	<b>0.97</b> (12)	0.29	–	–	<b>0.98</b> (10)	0.23
Grain moisture content, %	<b>0.89</b> (7)	0.36	<b>0.98</b> (7)	0.17	<b>0.93</b> (6)	0.28	<b>0.92</b> (6)	0.29	<b>0.94</b> (8)	0.25
Dark hard vitreous, %	<b>0.79</b> (8)	7.78	<b>0.77</b> (12)	8.18	<b>0.84</b> (8)	6.85	<b>0.79</b> (6)	7.48	<b>0.79</b> (7)	7.89
Single kernel hardness index	0.50(11)	3.42	0.41(12)	3.76	0.57(12)	3.18	0.52(12)	3.37	0.49(11)	3.50
Single kernel moisture, %	<b>0.81</b> (6)	0.45	<b>0.81</b> (10)	0.45	<b>0.84</b> (6)	0.41	<b>0.82</b> (6)	0.42	<b>0.84</b> (5)	0.41
Single kernel dia, avg mm	0.68(8)	0.08	0.68(11)	0.08	<b>0.70</b> (10)	0.08	0.45(10)	0.08	<b>0.70</b> (7)	0.08
Flour protein content, 14% mb	<b>0.97</b> (10)	0.26	<b>0.98</b> (8)	0.24	<b>0.97</b> (12)	0.26	–	–	<b>0.98</b> (9)	0.24
Falling number, sec	0.40(8)	63.65	0.43(7)	61.49	0.43(9)	61.72	0.39(7)	62.00	0.37(7)	64.76
Flour yield, extraction, %	0.42(10)	1.62	0.63(12)	1.25	0.54(12)	1.42	0.35(12)	1.42	0.53(10)	1.41
Wheat ash, 14% mb	0.47(9)	0.08	0.37(7)	0.09	0.47(7)	0.08	0.37(7)	0.08	0.45(9)	0.08
Flour ash, 14% mb	0.43(7)	0.03	0.34(13)	0.03	0.38(8)	0.03	0.29(7)	0.03	0.37(11)	0.03
Polyphenol oxi, au/min/mL	0.44(5)	0.06	0.51(13)	0.06	0.46(10)	0.07	0.32(5)	0.07	0.52(11)	0.06
SDS sedimentation vol, mL	0.02(6)	4.63	0.01(3)	4.67	0.05(6)	4.58	0.02(6)	4.56	0.01(3)	4.71
Brightness (color $L^*$ )	0.28(10)	0.37	0.11(6)	0.40	0.35(11)	0.35	0.31(8)	0.23	0.27(9)	0.37
Red/green (color $a^*$ )	0.63(8)	0.14	0.63(12)	0.14	<b>0.70</b> (11)	0.12	0.62(11)	0.11	0.60(9)	0.14
Yellow/blue (color $b^*$ )	0.58(6)	0.45	0.50(12)	0.42	<b>0.73</b> (12)	0.36	<b>0.72</b> (12)	0.36	0.67(11)	0.41
Gluten content, g/10 g of flour	<b>0.86</b> (8)	0.16	<b>0.90</b> (7)	0.14	<b>0.87</b> (10)	0.15	0.39(3)	0.13	<b>0.90</b> (8)	0.13
Average gluten index, %	0.15(2)	3.66	0.17(2)	3.61	0.13(3)	3.72	0.11(4)	3.66	0.17(4)	3.63
Flour size GMD, 50% vol, $\mu$ m	0.49(12)	1.78	0.45(10)	1.84	0.60(12)	1.57	0.43(9)	1.87	0.46(9)	1.82
Starch size GMD, 50% vol, $\mu$ m	0.31(5)	1.43	0.30(7)	1.44	0.35(11)	1.42	0.08(2)	1.38	0.44(11)	1.31
Soluble glutenins, mg	0.13(6)	0.70	0.13(6)	0.70	0.11(5)	0.70	0.08(2)	0.67	0.16(6)	0.68
Soluble gliadins, mg	0.33(8)	2.04	0.36(6)	1.97	0.20(6)	2.23	0.01(5)	2.01	0.21(5)	2.19
Insoluble glutenins, mg	<b>0.78</b> (8)	0.85	<b>0.76</b> (10)	0.89	<b>0.76</b> (10)	0.90	0.07(3)	0.77	0.38(7)	1.45
Total glutenins, mg	<b>0.81</b> (8)	0.88	<b>0.82</b> (7)	0.86	<b>0.76</b> (9)	1.00	0.01(7)	0.80	0.61(9)	1.29
Free lipids, %	0.40(4)	4.89	0.48(10)	4.53	0.50(9)	4.47	0.47(8)	4.39	0.66(10)	3.68
Polar lipids, %	0.27(8)	3.75	0.32(3)	3.55	0.30(5)	3.59	0.27(8)	3.55	0.45(11)	3.25
Nonpolar lipids, %	0.36(2)	3.94	0.36(7)	3.97	0.39(7)	3.88	0.37(7)	3.90	0.49(10)	3.56
Mixograph absorption, %	<b>0.86</b> (8)	0.79	<b>0.86</b> (7)	0.80	<b>0.85</b> (11)	0.83	0.06(5)	0.78	<b>0.89</b> (9)	0.69
Mix time, min	0.63(8)	0.59	0.62(12)	0.61	0.66(8)	0.52	0.43(4)	0.60	0.61(7)	0.61
Mix tolerance score (0–6)	0.51(8)	0.78	0.54(8)	0.77	0.58(6)	0.72	0.48(5)	0.72	0.52(8)	0.77
Farinograph absorption, %	0.66(11)	1.37	0.66(10)	1.35	0.66(10)	1.35	0.32(9)	1.39	0.69(10)	1.34
Farino development time, min	0.607(8)	3.98	0.60(12)	4.38	0.65(8)	4.07	0.35(7)	3.93	0.60(9)	4.39
Farino stability, min	0.35(8)	3.54	0.50(12)	3.10	0.48(8)	3.16	0.43(8)	3.01	0.46(4)	3.19
Farino mixing tolerance, min	0.21(9)	8.65	0.14(6)	8.87	0.29(8)	8.12	0.19(8)	8.04	0.27(10)	8.40
Farino quality number	0.66(8)	41.35	0.67(12)	41.61	<b>0.73</b> (10)	37.33	0.50(8)	35.7	0.68(9)	40.30
Alveograph peak ( $P$ ), mm	0.03(3)	17.22	0.17(11)	16.30	0.39(10)	13.84	0.25(8)	15.21	0.21(12)	16.25
Alveo length ( $L$ ), mm	0.42(10)	19.80	0.40(10)	19.13	0.51(10)	17.85	0.21(8)	18.25	0.43(10)	19.37
Alveo swelling index, mL	0.41(10)	2.00	0.41(10)	1.97	0.52(10)	1.79	0.21(8)	1.82	0.36(7)	2.04
Alveo work, $10^{-4}$ J	0.44(7)	79.64	0.44(6)	79.04	0.46(6)	77.37	0.05(2)	74.66	0.46(7)	77.21
Alveo config ratio ( $P/L$ )	0.27(10)	0.29	0.26(10)	0.29	0.48(10)	0.24	0.28(11)	0.26	0.34(11)	0.27
Baking water absorption, %	<b>0.70</b> (8)	0.95	0.67(9)	0.99	0.68(10)	0.97	0.32(2)	1.04	<b>0.70</b> (10)	0.96
Baking mix time, min	0.56(7)	0.87	0.50(12)	0.89	0.59(7)	0.78	0.44(7)	0.83	0.57(6)	0.86
Crumb grain score (0–6)	0.31(9)	0.55	0.21(3)	0.57	0.17(2)	0.59	0.15(2)	0.59	0.19(4)	0.58
Loaf volume, $\text{cm}^3$	<b>0.79</b> (8)	40.56	<b>0.79</b> (8)	40.58	<b>0.77</b> (9)	42.82	0.01(4)	37.68	<b>0.79</b> (7)	40.60
Loaf specific vol, $\text{cm}^3/\text{g}$	<b>0.76</b> (8)	0.28	<b>0.77</b> (11)	0.28	<b>0.73</b> (9)	0.30	0.01(4)	0.26	<b>0.78</b> (8)	0.27
Loaf vol potential, $\text{cm}^3/\%$ protein	0.11(4)	3.46	0.18(6)	3.32	0.06(6)	3.65	0.01(4)	3.41	0.14(5)	3.40

<sup>a</sup>  $R^2$  values  $\geq 0.70$  shown in bold font.

<sup>b</sup> Numbers in parentheses after the  $R^2$  values refer to the number of factors of the PLS model.

<sup>c</sup> After protein covariate removal.

with  $R^2 \geq 0.70$  were test weight, moisture content, dark hard and vitreous kernels, and color  $b^*$  predicted from grain spectra, and color  $L^*$ ,  $a^*$ , and  $b^*$  values, flour particle size, and free lipids predicted from flour spectra (Tables III and IV). As with HRW results, most constituents  $R^2$  values were reduced to  $<0.20$ , which shows the strong influence of protein content on the ability of NIRS to predict many quality parameters.

### Comparison of Predictions from Whole Kernels or Flour

Grain protein content was predicted from flour spectra with good accuracy ( $R^2 = 0.98$ ), but that is because grain and flour protein content are highly correlated ( $r = 0.99$ ). Except for HRS test weight, which could be predicted from flour spectra with  $R^2 = 0.74$ , no other grain characteristics could be predicted from flour spectra. There may be occasions when a miller or baker may wish to determine whole kernel characteristics from good or bad performing flour so similar grain lots can be obtained, or avoided.

However, these results show it is difficult to determine grain characteristics from flour. As expected, most flour, dough, and baking parameters were predicted more accurately, or with similar accuracy, when using the flour spectra than when using whole kernel spectra. Exceptions were that some farinograph and mixograph parameters had slightly greater  $R^2$  values when predicted from whole kernel spectra than from flour spectra.

### DISCUSSION

Measuring protein content in grain and flour has been a successful application of NIRS because it has very strong and broad absorption bands throughout the NIR region (Williams 2001) and is a major wheat component. This is not the case for many other biochemical components that affect other grain quality attributes because they may be present in very small quantities and additionally highly correlated to protein content, as shown in this

TABLE IV  
Summary of Partial Least Squares Regression Statistics for Predicting Grain, Flour and Baking Quality Characteristics from Spectra from Four NIR Spectrometers (Hard Red Spring Wheat Flour)

Quality Parameters	Cognis FT-NIR		Foss 1241		Foss 6500			Perten 7200		
	$R^2$	SECV	$R^2$	SECV	$R^2$	SECV	$R^2$ <sup>c</sup>	SECV <sup>c</sup>	$R^2$	SECV
Test weight, lb/bu	0.67(9)	0.97	0.66(11)	0.99	<b>0.74(8)</b>	0.86	0.40(8)	0.89	0.66(7)	0.99
Grain protein content, 14% mb	<b>0.98(7)</b>	0.24	<b>0.99(10)</b>	0.19	<b>0.98(7)</b>	0.23	—	—	<b>0.98(9)</b>	0.26
Grain moisture content, %	0.40(10)	0.85	0.43(12)	0.82	0.40(9)	0.83	0.39(8)	0.84	0.32(8)	0.90
Dark hard vitreous, %	0.34(8)	13.97	0.45(5)	12.67	0.45(5)	12.67	0.39(5)	12.70	0.37(6)	13.58
Single kernel hardness index	0.42(10)	3.68	0.31(12)	4.08	0.40(4)	3.69	0.39(4)	3.71	0.19(3)	4.29
Single kernel moisture, %	0.43(10)	0.80	0.35(11)	0.85	0.34(9)	0.85	0.29(10)	0.86	0.38(8)	0.83
Single kernel dia, avg mm	0.51(3)	0.10	0.58(12)	0.09	0.55(4)	0.09	0.23(3)	0.09	0.56(7)	0.09
Flour protein content, 14% mb	<b>0.99(3)</b>	0.15	<b>0.99(7)</b>	0.16	<b>0.99(4)</b>	0.16	—	—	<b>0.99(7)</b>	0.16
Falling number, sec	0.23(6)	71.64	0.37(4)	64.71	0.43(6)	61.39	0.39(6)	62.01	0.37(6)	64.94
Flour yield, extraction, %	0.53(7)	1.42	0.58(12)	1.34	0.63(9)	1.24	0.52(9)	1.22	0.56(8)	1.37
Wheat ash, 14% mb	0.32(10)	0.09	0.35(12)	0.09	0.32(12)	0.09	0.11(11)	0.10	0.20(8)	0.10
Flour ash, 14% mb	0.46(7)	0.03	0.47(10)	0.03	0.41(8)	0.03	0.38(8)	0.03	0.40(8)	0.03
Polyphenol oxi, au/min/mL	0.27(8)	0.08	0.31(10)	0.07	0.26(9)	0.08	0.15(9)	0.08	0.25(10)	0.08
SDS sedimentation vol, mL	0.30(6)	2.36	0.05(4)	4.54	0.04(3)	4.57	0.01(2)	4.51	0.06(4)	4.56
Brightness (color $L^*$ )	0.40(9)	0.32	0.40(11)	0.33	0.49(7)	0.30	<b>0.75(5)</b>	0.14	0.43(6)	0.32
Red/green (color $a^*$ )	0.61(8)	0.14	0.60(12)	0.14	<b>0.96(6)</b>	0.04	<b>0.90(6)</b>	0.06	0.57(8)	0.15
Yellow/blue (color $b^*$ )	0.49(10)	0.50	0.38(12)	0.56	<b>0.97(6)</b>	0.12	<b>0.97(6)</b>	0.13	0.35(8)	0.59
Gluten content, g/10 g of flour	<b>0.91(9)</b>	0.13	<b>0.91(8)</b>	0.13	<b>0.90(5)</b>	0.13	0.45(6)	0.13	0.91(7)	0.13
Average gluten index, %	0.15(8)	3.78	0.16(12)	3.83	0.17(2)	3.63	0.17(3)	3.59	0.16(5)	3.67
Flour size GMD, 50% vol, mm	<b>0.70(3)</b>	1.33	<b>0.72(8)</b>	1.31	<b>0.78(11)</b>	1.16	<b>0.77(11)</b>	1.17	0.72(6)	1.31
Starch size GMD, 50% vol, mm	0.38(7)	1.26	0.24(4)	1.49	0.36(6)	1.38	0.24(9)	1.29	0.26(4)	1.48
Soluble glutenins, mg	0.07(3)	0.73	0.04(4)	0.73	0.09(4)	0.71	0.09(7)	0.68	0.10(3)	0.70
Soluble gliadins, mg	0.34(5)	1.99	0.33(5)	2.01	0.30(3)	2.06	0.02(3)	2.08	0.29(3)	2.06
Insoluble glutenins, mg	<b>0.81(10)</b>	0.79	<b>0.78(6)</b>	0.81	<b>0.86(7)</b>	0.68	0.02(3)	0.81	<b>0.80(3)</b>	0.82
Total glutenins, mg	<b>0.82(7)</b>	0.85	<b>0.86(7)</b>	0.76	<b>0.88(7)</b>	0.71	0.05(3)	0.82	<b>0.86(5)</b>	0.75
Free lipids, %	0.52(10)	4.57	<b>0.74(12)</b>	3.24	<b>0.73(11)</b>	3.29	<b>0.71(11)</b>	3.27	0.60(9)	4.11
Polar lipids, %	0.35(7)	3.60	0.35(5)	3.51	0.35(6)	3.52	0.28(6)	3.47	0.52(8)	3.03
Nonpolar lipids, %	0.22(9)	5.24	0.44(11)	3.74	0.37(11)	4.04	0.37(11)	4.05	0.35(11)	4.16
Mixograph absorption, %	<b>0.88(3)</b>	0.74	<b>0.88(7)</b>	0.72	<b>0.88(4)</b>	0.73	0.01(2)	0.72	<b>0.87(5)</b>	0.78
Mixograph time, min	0.53(8)	0.69	0.66(12)	0.58	0.67(7)	0.57	0.47(8)	0.58	0.64(4)	0.59
Mixograph tolerance score (0–6)	0.65(10)	0.66	0.58(12)	0.72	0.55(7)	0.75	0.41(8)	0.76	0.58(5)	0.72
Farinograph absorption, %	0.64(7)	1.39	0.75(10)	1.15	0.58(7)	1.50	0.32(9)	1.39	0.62(6)	1.42
Farinograph development time, min	0.60(8)	4.36	0.59(12)	4.47	0.67(9)	3.95	0.28(7)	4.14	0.62(6)	4.23
Farinograph stability, min	0.44(9)	3.29	0.43(9)	3.26	0.38(6)	3.41	0.24(4)	3.45	0.43(5)	3.26
Farinograph mixing tolerance, min	0.22(5)	8.50	0.22(4)	8.38	0.14(3)	8.82	0.02(2)	8.72	0.19(7)	8.78
Farinograph quality number	0.66(9)	42.21	0.58(7)	45.97	0.65(8)	42.41	0.36(11)	41.17	0.68(6)	40.37
Alveograph peak (P), mm	0.31(8)	14.77	0.41(10)	13.39	0.21(9)	15.83	0.22(9)	15.73	0.30(10)	15.30
Alveograph length (L), mm	0.62(9)	15.66	0.66(11)	14.77	0.60(9)	16.02	0.37(9)	16.10	0.53(6)	17.27
Alveograph swelling index, mL	0.60(7)	1.62	0.65(10)	1.51	0.62(9)	1.58	0.37(9)	1.61	0.55(6)	1.71
Alveograph work, 10 <sup>-4</sup> J	0.49(2)	74.84	0.49(6)	75.02	0.52(3)	72.42	0.08(3)	72.50	0.50(8)	75.94
Alveograph config. ratio (P/L)	0.50(8)	0.23	0.54(10)	0.22	0.48(9)	0.24	0.32(9)	0.24	0.50(10)	0.23
Baking water absorption, %	0.63(3)	1.05	<b>0.74(9)</b>	0.87	0.65(5)	1.03	0.06(3)	1.11	0.64(6)	1.04
Baking mix time, min	0.42(5)	1.01	0.55(13)	0.89	0.61(7)	0.82	0.44(8)	0.83	0.56(5)	0.87
Crumb grain score (0–6)	0.19(5)	0.59	0.19(2)	0.58	0.14(8)	0.61	0.16(8)	0.61	0.19(9)	0.62
Loaf volume, cm <sup>3</sup>	<b>0.82(3)</b>	36.64	<b>0.83(7)</b>	36.59	<b>0.83(4)</b>	35.98	0.01(4)	37.47	<b>0.82(5)</b>	37.44
Loaf specific vol, cm <sup>3</sup> /g	<b>0.80(4)</b>	0.25	<b>0.80(7)</b>	0.26	<b>0.80(4)</b>	0.26	0.02(4)	0.26	0.78(5)	0.27
Loaf vol potential, cm <sup>3</sup> /g protein	0.16(3)	3.40	0.12(6)	3.44	0.17(4)	3.35	0.01(3)	3.27	0.14(7)	3.51

<sup>a</sup>  $R^2$  values  $\geq 0.70$  shown in bold font.

<sup>b</sup> Numbers in parentheses after the  $R^2$  values refer to the number of factors of the PLS model.

<sup>c</sup> After protein covariate removal.

study. Thus, it is difficult to measure these attributes using NIRS independent of their correlation to protein content. One exception is particle size analysis by NIRS because absorption increases with an increase in particle size (Approved Method 39-70A, near-infrared reflectance method for hardness determination in wheat) (AACC International 2000), and Tables I–IV show that particle size predictions are not influenced by the removal of protein content from prediction models.

Results obtained by Pawlinsky and Williams (1998) when scanning whole kernels to predict protein content, gluten content, and mixograph time were similar to those obtained in this study, but their  $R^2$  values for farinograph parameters were higher than obtained in this study. Their better results may be because their samples were from pure cultivars grown at one location. Millar (2003) reported an  $R^2$  value for protein content measured from whole grain that was similar to that reported here ( $R^2 = 0.99$  vs. 0.97), but their water absorption and loaf volume  $R^2$  values were much lower (0.68 vs. 0.90 for water absorption and 0.41 vs. 0.80 for loaf volume). When predicting these same parameters from flour, Millar (2003) reports protein content predictions that are similar to those achieved in this study ( $R^2 = 0.99$ ), but farinograph water absorption predictions were higher ( $R^2 = 0.93$  vs. 0.58–0.63), and loaf volume predictions were lower ( $R^2 = 0.62$  vs. 0.83) than values reported here. Their samples had a much narrower range in quality when compared with the range of those used in this study, with the protein content and loaf volume ranges being only about half the range of samples in the study reported here.

Delwiche et al (1998) reported HRW  $R^2$  values for predicting protein content that were similar to those reported here (0.99 vs. 0.97). The absolute amount of gliadins and glutenins is well correlated to protein content (Bean et al 1998; Delwiche et al 1998), and after the influence of protein content was removed from the predictions by Delwiche et al (1998),  $R^2$  values, although poor, were similar or higher than those reported here for HRW wheat (0.53 vs. 0.17 for gliadins, 0.41 vs. 0.09 for glutenin content, 0.54 vs. 0.46 for mix time, and 0.45 vs. 0.42 for mix tolerance). Thus it may be possible to predict the quantity of gliadins and glutenins using NIRS only because of the correlation to protein content. The Delwiche et al (1998) sample set had a wider range of protein content (6.8–20.1% vs. 9.2–15.8%) and mixograph time (1.6–7.5 min vs. 2.5–6.1 min) than in this study. These statistics reported by Delwiche et al (1998) may be better than some of those reported here because their sample set consisted of pure cultivars grown in one region, whereas the commercial samples and blends used in this study were obtained from throughout the United States. These commercial samples include environmental influences and blends that may mask differences in protein quality. Protein quality measurements (quantity of gliadins and glutenins) by NIRS may be applicable to breeding programs as stated by Delwiche et al (1998) but may not be attainable on commercial samples.

Sissons et al (2006) showed the correlation of protein content to durum quality measurements but removed the influence of protein content only from the predictions of test weight and pasta firmness. The  $R^2$  value for test weight of  $\approx 0.90$  was much higher than the best value of 0.73 obtained in our research. This may be because their samples consisted of pure breeding lines.

Delwiche and Weaver (1994) reported similar  $R^2$  ( $\approx 0.65$ ) for baking water absorption as achieved in our research but much lower values for mix time ( $R^2 = 0.25$  vs. 0.61). Williams et al (1988) reported baking absorption, farinograph absorption, protein content, loaf volume, and alveograph work  $R^2$  values similar to those obtained in this research. However, their farinograph stability  $R^2$  values were much higher than ours (0.73 vs. 0.38). This may be due to their samples containing a much wider range in strength values because they were selected specifically based on strength parameters and included hard and soft wheat. Rubenthaler

and Pomeranz (1987) predicted loaf volume of HRW wheat flours with similar accuracy as in this study, but their mix time and absorption  $R^2$  values were much higher (0.72 vs. 0.40 for mix time and 0.81 vs. 0.53 for absorption). This may be due to the small number of unique samples analyzed by Rubenthaler and Pomeranz (1987). They analyzed 173 subsamples but these were mostly replicates from only 19 original samples.

Hruskova et al (2001) reported that no farinograph characteristics were predicted from NIR spectra with  $R^2 < 0.40$ , which they achieved with water absorption. The farinograph water absorption was predicted in our research with an  $R^2$  of  $\approx 0.70$ . Hruskova and Smejda (2003) did not achieve  $R^2 \geq 0.25$  for any alveograph measurements, possibly due to their small sample sizes. In this study, we achieved HRW  $R^2$  values of  $\approx 0.70$  for alveograph length, swelling index, and work. Hruskova and Famera (2003) reported Zeleny sedimentation  $R^2$  of 0.11–0.50 when predicted from flour NIR spectra, whereas we achieved  $R^2$  values of  $\approx 0.20$ –0.70 in our studies.

This research did not attempt to predict starch damage using NIRS. However, Osborne et al (1982) used NIRS to predict starch damage as measured by the Farrand method with a SEP = 3.2. Morgan and Williams (1995) used NIRS to predict starch damage with SEP = 3 and  $R^2 = 0.92$ . However, Finney et al (1988) showed a high correlation ( $r = 0.89$ ) between hardness and damaged starch, and this relationship was further reviewed by Pomeranz (1988). Thus, since damaged starch is not chemically different from undamaged starch, NIRS likely predicts starch damage because of correlations of starch damage to factors that have absorption bands in the NIR region.

The precision of the reference methods affects the potential for using NIRS to predict flour and grain attributes. The reference method precision for those characteristics predicted with  $R^2 > 0.70$  are discussed below. Williams (1975) reported that the moisture content reference method (Approved Method 44-15A, moisture-air oven method) (AACC International 2000) standard error was 0.069%. The SECV results reported here were 0.20–0.29% for predicting grain moisture content and 0.27–0.42% for predicting single kernel moisture content. These samples had equilibrated to  $\approx 11\%$  moisture content, with a standard deviation between samples of  $\approx 1\%$ . Thus, while the SECV was several times higher than the reference error, a lower NIR error may be achieved with a wider range of moisture content. Williams (1975) reported that the protein content reference method (Approved Method 46-10, crude protein improved Kjeldahl method) standard error was 0.098%. The SECV results reported here were 0.16–0.30%. Thus, protein content was predicted with an error of 2–3 $\times$  that of the reference method. Oliver et al (1992) reported standard deviations for  $L^*$ ,  $a^*$ , and  $b^*$  of 0.48, 0.12, and 0.78, respectively, when measuring 33 white flours. The reproducibility should be less than these values. The flour SECV values of 0.14–0.20, 0.05–0.06, and 0.11–0.13 for  $L^*$ ,  $a^*$ , and  $b^*$ , respectively, indicate that the Foss 6500 is predicting color values with accuracies better than those reported previously.

This research showed that the free lipid reproducibility using two replicates per sample was  $\approx 1.70\%$  (data not shown), which agrees with repeatability reported by Hubbard et al (2004) of  $\approx 2\%$ . The NIR prediction SECV was 3.20% for HRS flour. Thus, the error for predicting free lipids using NIRS was about twice that of the reference method. All other lipid predictions were poor.

For flour particle size predictions, the reproducibility of our laser diffraction reference method was 0.336  $\mu\text{m}$  (average standard deviation of two replicates from 99 samples) and CV = 0.4%. Hareland (1994) reported that the sieving reference method had a standard deviation = 7.2  $\mu\text{m}$  and coefficient of variation (CV) of 8.9% for our approximate particle size range, and that the laser diffraction method had a standard deviation = 3.8  $\mu\text{m}$  and CV = 4.5%. They also used NIRS to predict flour particle size with a CV = 1.3% and SECV = 1.1  $\mu\text{m}$ . These results agree with our

HRW CV = 1.3% and SECV = 1.17  $\mu\text{m}$ . Thus, NIRS can be used to predict HRS flour particle size with accuracies similar to reference methods reported previously, but 3–4 $\times$  higher than the reproducibility of the reference method used in this research.

HRS dark hard and vitreous kernel predictions had a SECV = 7.48%, which is about twice the standard deviation of 3.5 reported by Xie et al (2004) for detecting vitreous kernels in durum wheat. HRS test weight SECV was 0.63 lb/bu and was less than the standard error of 1.20 lb/bu for replicates reported by Troccoli and di Fonzo (1999). This lower NIRS error was unexpected and shows that the error in predicting test weight using NIRS is less than the error in measuring test weight in replicated samples. The HRW test weight error was similar in magnitude to the HRS error, but the HRW  $R^2$  value was only 0.60.

While other researchers have reported the application of NIRS to predict various quality attributes, this is the first attempt to predict multiple whole grain, flour, dough, and bake quality attributes from whole grain, and then the same attributes from flour from the same samples. Most results agree with previous researchers. However, this is the first report of using NIRS to predict SDS sedimentation volume and alveograph parameters from whole grain.

NIRS shows the potential for using spectra from whole kernels for predicting protein content and bulk moisture content with accuracies suitable for process control ( $R^2 > 0.97$ ). Test weight, average single kernel diameter and moisture content, SDS sedimentation volume, color  $a^*$  and  $b^*$  values, total gluten content, soluble gliadin content, soluble and insoluble glutenin content, total glutenin content, mixograph water absorption, farinograph water absorption, farinograph quality number, alveograph length, alveograph swelling index, alveograph work, loaf volume, specific loaf volume, baking water absorption, and dark hard and vitreous kernels had accuracies suitable for rough screening ( $R^2 \geq 0.70$ ).

NIR spectra from flour can predict protein content and  $b^*$  value with accuracies suitable for process control. NIR spectra from flour can predict test weight, color  $a^*$ , total gluten content, soluble gliadin content, soluble and insoluble glutenin contents, total glutenin content, flour particle size, free lipid content, mixograph and farinograph water absorption, alveograph length, alveograph swelling index, alveograph work, baking water absorption, loaf volume, specific loaf volume, and SDS sedimentation volume with accuracies suitable for rough screening. However, when the influence of protein content on prediction models is removed, very few quality attributes could be predicted with accuracy, even for rough screening.

#### ACKNOWLEDGMENTS

We gratefully acknowledge the USDA, ARS, GMPRC Hard Winter Wheat Quality Laboratory for sample analysis and the USDA, GIPSA, FGIS Technical Center for sample analysis and partial funding for this research. We also thank Perten Instruments, Cognis, and Foss for loaning NIR instrumentation. We also thank Stephen Delwiche, agricultural engineer, USDA ARS Instrumentation and Sensing Laboratory, Beltsville, MD, and Mark West, area statistician, USDA ARS, Ft. Collins, Co., for comments on early versions of this manuscript.

#### LITERATURE CITED

AACC International. 2000. Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists, 10th Ed. Methods 39-70A, 44-15A, and 46-10. The Association: St. Paul, MN.

Armstrong, P. R., Maghirang, E. B., Xie, F., and Dowell, F. E. 2006. Comparison of dispersive and Fourier-transform NIR instruments for measuring grain and flour attributes. *Appl. Eng. Agric.* 22:453-457.

Bean, S. R., Lyne, R. K., Tilley, K. A., Chung, O. K., and Lookhart, G. L. 1998. A rapid method for quantitation of insoluble polymeric proteins in flour. *Cereal Chem.* 75:374-379.

Delwiche, S. R., and Reeves, J. B., III. 2004. The effect of spectral pre-treatments of the partial least squares modeling of agricultural products. *J. Near Infrared Spectrosc.* 12:177-182.

Delwiche, S. R., and Weaver, G. 1994. Bread quality of wheat flour by near-infrared spectrophotometry: Feasibility of modeling. *J. Food Sci.* 59:410-415.

Delwiche, S. R., Graybosch, R. A., and Peterson, C. J. 1998. Predicting protein composition, biochemical properties, and dough-handling properties of hard red winter wheat flour by near-infrared reflectance. *Cereal Chem.* 75:412-416.

Devaux, M. F., Bertrand, D., and Martin, G. 1986. Discrimination of bread-baking quality of wheats according to their variety by near-infrared reflectance spectroscopy. *Cereal Chem.* 63:151-154.

Finney, P. L., Kinney, J. E., and Donelson, J. R. 1988. Prediction of damaged starch in straight-grade flour by near-infrared reflectance analysis of whole ground wheat. *Cereal Chem.* 65:449-452.

Hareland, G. A. 1994. Evaluation of flour particle size distribution by laser diffraction, sieve analysis and near-infrared reflectance spectroscopy. *J. Cereal Sci.* 21:183-190.

Hruskova, M., and Famera, O. 2003. Prediction of wheat and flour Zeleny sedimentation value using NIR technique. *Czech J. Food Sci.* 21:91-96.

Hruskova, M., and Smejda, P. 2003. Wheat flour dough alveograph characteristics predicted by NIRSystems 6500. *Czech J. Food Sci.* 21:28-33.

Hruskova, M., Bednarova, M., and Novotny, F. 2001. Wheat flour dough rheological characteristics predicted by NIRSystems 6500. *Czech J. Food Sci.* 19:213-218.

Hubbard, J. D., Downing, J. M., Ram, M. S., and Chung, O. K. 2004. Lipid extraction from wheat flour using supercritical fluid extraction. *Cereal Chem.* 81:693-698.

Maghirang, E. B., Lookhart, G. L., Bean, S. R., Pierce, R. O., Xie, F., Caley, M. S., Wilson, J. D., Seabourn, B. W., Ram, M. S., Park, S. H., Chung, O. K., and Dowell, F. E. 2006. Comparison of quality characteristics and breadmaking functionality of hard red winter and hard red spring wheat. *Cereal Chem.* 83:520-528.

Millar, S. J. 2003. The development of near-infrared (NIR) spectroscopy calibrations for the prediction of wheat and flour quality. The Home-Grown Cereals Authority Project Report No. 310. HGCA: London.

Morgan, J. E., and Williams, P. C. 1995. Starch damage in wheat flours: A comparison of enzymatic, iodometric, and near-infrared reflectance techniques. *Cereal Chem.* 72:209-212.

Oliver, J. R., Blakeney, A. B., and Allen, H. M. 1992. Measurement of flour color in color space parameters. *Cereal Chem.* 69:546-551.

Osborne, B. G., Douglas, S., and Fearn, T. 1982. The application of near infrared reflectance analysis to rapid flour testing. *J. Food Technol.* 17:355-363.

Pawlinsky, T., and Williams, P. 1998. Prediction of wheat bread-baking functionality in whole kernels, using near infrared reflectance spectroscopy. *J. Near Infrared Spectrosc.* 6:121-127.

Pomeranz, Y. 1988. Composition and functionality of wheat flour components. Pages 219-370 in: *Wheat Chemistry and Technology*. Y. Pomeranz, ed. AACC International: St. Paul, MN.

Rubenthaler, G. L., and Pomeranz, Y. 1987. Near-infrared reflectance spectra of hard red winter wheats varying widely in protein content and breadmaking potential. *Cereal Chem.* 64:407-411.

Sissons, M., Osborne, B., and Sissons, S. 2006. Application of near infrared reflectance spectroscopy to a durum wheat breeding programme. *J. Near Infrared Spectrosc.* 14:17-25.

Troccoli, A., and di Fonzo, N. 1999. Relationship between kernel size features and test weight in *Triticum durum*. *Cereal Chem.* 76:45-49.

USDA. 2004. Grain Inspection Handbook, Book II. Washington, D.C.

Williams, P. C. 1975. Application of near infrared reflectance spectroscopy to analysis of cereal grains and oilseeds. *Cereal Chem.* 52:561-576.

Williams, P. C. 2001. Implementation of near-infrared reflectance technology. Pages 145-169 in: *Near-infrared Technology in the Agricultural and Food Industries*. P. Williams and K. Norris, eds. AACC International: St. Paul, MN.

Williams, P. C., El-Haramen, P. J., Ortis-Ferira, G., and Srivastava, J. P. 1988. Preliminary observations of the determination of wheat strength by near-infrared reflectance. *Cereal Chem.* 65:109-114.

Xie, F., Pearson, T., Dowell, F. E., and Zhang, N. 2004. Detecting vitreous wheat kernels using reflectance and transmittance image analysis. *Cereal Chem.* 81:594-597.

ไม่วารณใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
[Received January 25, 2006. Accepted June 26, 2006.]

# Highly Accurate *in Vivo* Terahertz Spectroscopy of Healthy Skin: Variation of Refractive Index and Absorption Coefficient Along the Human Body

Kirill I. Zaytsev, Arseniy A. Gavdush, Nikita V. Chernomyrdin, and Stanislav O. Yurchenko

**Abstract**—A method to reconstruct the terahertz (THz) refractive index and absorption coefficient of *in vivo* tissue using THz pulsed spectroscopy (TPS) has been proposed. The method utilizes a reference THz window to fix the sample of interest during the TPS reflection mode measurements. Satellite pulses caused by multiple THz-wave reflections in the reference window are taken into account to accurately solve the inverse problem. The stability of the proposed method in the presence of various factors, including digital noise in the TPS waveforms and fluctuations of the reference THz window position, has been accurately analyzed. The method has been implemented to study *in vivo* the THz refractive index and absorption coefficient of the human skin. The skin from three persons has been measured, and the results agree with the well-known data on healthy skin spectroscopy in general, except for several regions of the skin. Thus, for the elbow, the hand, the knee, and the heel the THz refractive index and absorption coefficient considerably differ from the average values. The observed results are of principle importance for further development of novel approaches to skin diagnosis based on THz technologies.

**Index Terms**—Absorption coefficient, inverse problem, material parameters, refractive index, spectroscopy of the skin, terahertz pulsed spectroscopy, THz technology.

## I. INTRODUCTION

TERAHERTZ (THz) pulsed spectroscopy (TPS) recently has attracted considerable interest as a prospective method of medical diagnosis [1]–[5].

TPS first appeared as a result of Auston's research on semiconductor photoconductivity [6], [7]. It was rapidly developed through novel techniques to generate and detect THz pulses [8]–[20]. Methods of characterizing the THz material parameters [21]–[31], as well as methods of THz time-of-flight tomography [32]–[35], have been proposed. Its applicability to non-

invasive medical diagnosis of oral, [36] skin, [37]–[40] colon [41], [42], and liver [43] cancers and to intraoperative diagnosis of breast cancer [44]–[47] has been considered. In [48], [49] it was shown, that the exposure of artificial human skin tissue to the intense picosecond THz pulses affects the expression levels of genes, associated with non-melanoma cancers and inflammatory diseases of the skin. The ability to cause favorable changes in the expression of genes indicates prospectives of therapeutic applications of THz radiation. The use of TPS for sensing in corneal tissue [50], dental tissue [51], [52], and blood [53]–[55], as well as for studying thermal and chemical tissue burns [56]–[59], has been studied. In [60] and [61], the ability to noninvasively diagnose dysplastic skin nevi has been demonstrated; this is of importance since the dysplasia of skin nevi is considered to be a melanoma precursor, which is reportedly the most dangerous skin cancer [62], [63]. Despite the wide variety of biomedical applications of TPS, the development of novel methods for TPS signal processing and the inverse problem solution is of great importance for further progress of TPS technology.

In this paper, we describe a method to reconstruct the THz refractive index and absorption coefficient of *in vivo* tissue based on TPS signal processing. The method implies reflection mode measurement of the sample, while it is placed behind a reference SiO<sub>2</sub>-window. We take into account satellite pulses, appearing as a result of the multiple THz-wave reflections in the reference window, thereby allowing us to significantly increase the accuracy of the inverse problem solution. The stability of the proposed method in the presence of various factors, including TPS waveform noise and fluctuations of the reference window position, is studied by means of numerical modeling. We implement the method to study *in vivo* the THz refractive index and absorption coefficient of the skin from three persons. Observed results agree with the well-known data in general. However, we demonstrate significant fluctuations of THz characteristics of the skin along the various skin regions, in particular, the hand, the knee, and the heel. These fluctuations should be taken into account for further development of novel methods of skin diagnosis using TPS.

This paper is organized as follows. In Section II, we briefly discuss the TPS setup utilized to study the skin. In Section III, we introduce the method to reconstruct the THz refractive index and absorption coefficient of tissue *in vivo*. Section III-A introduces an approach both for studying the stability of the inverse problem solution and for estimating the reconstruction error based on numerical simulations. In Section III-B and III-C,

Manuscript received March 28, 2015; revised May 16, 2015; accepted July 21, 2015. Date of publication nulldate; date of current version August 31, 2015. The work of A. A. Gavdush and N. V. Chernomyrdin was supported by the Russian Foundation for Basic Research under Projects 14-02-00781, 14-08-31124, 14-08-31102, and 15-32-20575. The work of K. I. Zaytsev and S. O. Yurchenko was supported by the Government of the Russian Federation under Grant 074-U01. (Corresponding authors: Kirill I. Zaytsev and Stanislav O. Yurchenko.)

K. I. Zaytsev and N. V. Chernomyrdin are with Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russia, with ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia, and also with I. M. Sechenov First Moscow State Medical University, 119048, Moscow, Russia (e-mail: kirzay@gmail.com).

A. A. Gavdush and S. O. Yurchenko are with the Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russia, and also with the ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia (e-mail: st.yurchenko@mail.ru).

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

Digital Object Identifier 10.1109/TTHZ.2015.2460677

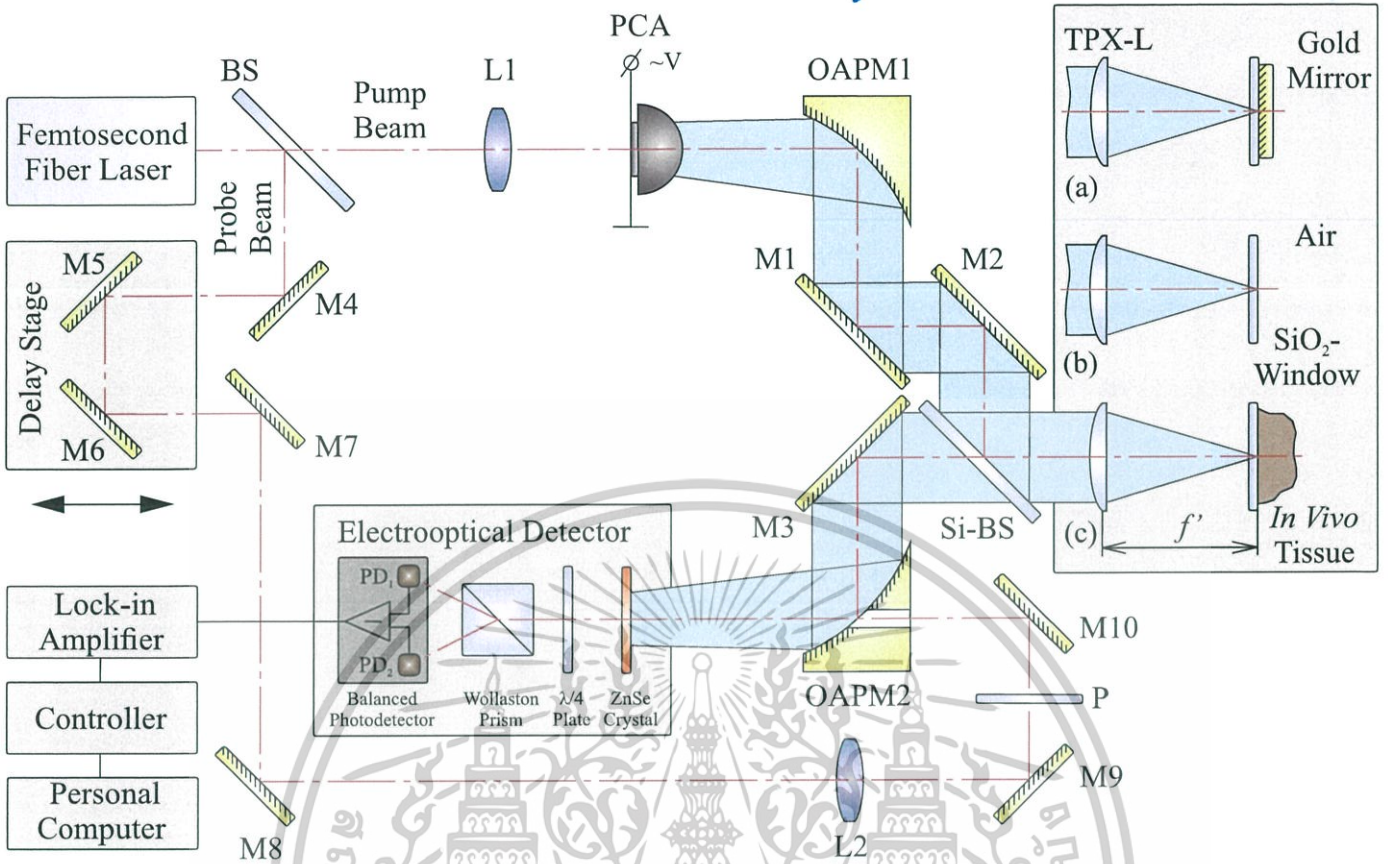


Fig. 1. Schematic representation of experimental setup; BS and Si-BS stand for beamsplitters operating in the optical and the THz ranges, respectively. PCA stands for the LT-GaAs-photoconductive antenna, L1 and L2 stand for optical lenses, TPX-L stands for the THz lens made of polymethylpentene, M1–M10 stand for plane gold-coated mirrors, OAPM1 and OAPM2 stand for off-axial gold-coated parabolic mirrors, and P stands for the optical polarizer. Panels (a), (b), and (c) illustrate the process of TPS waveform detection: (a) corresponds to the waveform  $E_m$  reflected from the window with the gold mirror behind; (b) corresponds to the waveform  $E_r$  reflected from the empty window; (c) corresponds to the sample waveform  $E_s$ .

we examine the instability of the inverse problem solution in the presence of digital noises in the TPS waveforms and fluctuations of the reference window position, respectively. In Section III-D we verify the proposed method by comparing our results on healthy skin characterization *in vivo* with the well-known data. Section IV presents the results of systematic *in vivo* THz spectroscopy of various skin regions. Section V summarizes the results of the paper.

## II. EXPERIMENTAL SETUP

In the present work we use a compact TPS setup, which is similar to the one described in [35]. The setup operates in reflection mode and allows us to measure the THz spectra between 0.1 and 2.5 THz.

Fig. 1 schematically represents the experimental setup and illustrates the process of TPS waveform detection. The TPS system utilizes the second-harmonic radiation of the Er-doped femtosecond fiber laser with an average power of 200 mW for both THz pulse generation and detection. The central wavelength is 780 nm, and the pulse duration and the pulsed repetition rate are 100 fs and 60 MHz, respectively. THz-wave generation is produced in a LT-GaAs-photoconductive antenna [10], and detection of THz pulses is conducted in a ZnTe-electro-optical detector [14].

We perform the reflection mode measurements with a beamsplitter and a normal angle of radiation incidence on the sample

surface. The sample waveform is obtained while sample is placed behind the reference 1-mm-thick window made of crystalline quartz. The window allows us to fix the sample toward the TPS setup. Thus, the interface between the SiO<sub>2</sub> and the sample is located at the TPX-lens focus [Fig. 1(c)].

## III. RECONSTRUCTION OF THz REFRACTIVE INDEX AND ABSORPTION COEFFICIENT

Three THz waveforms are detected to characterize a single sample: the waveform  $E_m = E_m(t)$  reflected from the reference window with a gold mirror placed behind [Fig. 1(a)], the waveform  $E_r = E_r(t)$  reflected from the empty reference window [Fig. 1(b)], and the waveform  $E_s = E_s(t)$  reflected from the reference window with the sample of interest placed behind [Fig. 1(c)]. Let us define the Fourier spectrums of  $E_m$ ,  $E_r$ , and  $E_s$  as  $\tilde{E}_m = \tilde{E}_m(\nu)$ ,  $\tilde{E}_r = \tilde{E}_r(\nu)$ , and  $\tilde{E}_s = \tilde{E}_s(\nu)$ , where  $\nu$  is an electromagnetic wave frequency.

Fig. 2 shows the typical waveforms observed during *in vivo* spectroscopy of the skin: (a), (b) and (c) correspond to  $E_m$ ,  $E_r$  and  $E_s$ . The waveforms contain the first pulse, reflected from the interface between air and the reference window (region (I) in Fig. 2), the second pulse, reflected from the interface between the reference window and the mirror, the reference window and the air, or the reference window and the sample (region (II)

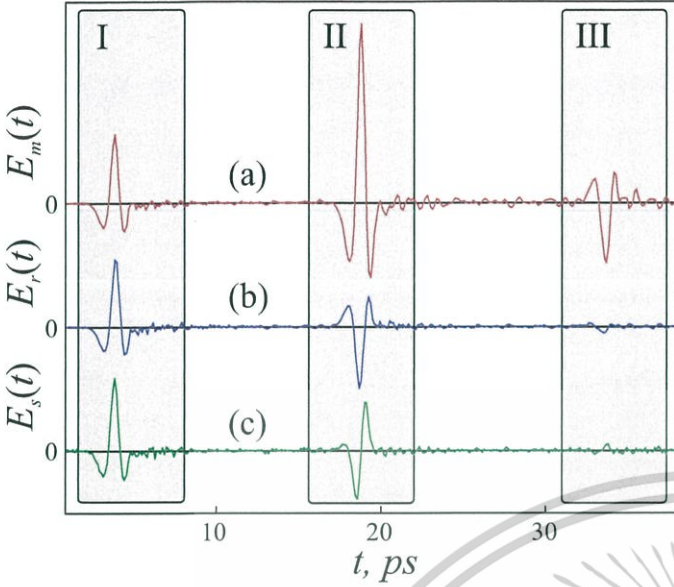


Fig. 2. TPS waveforms corresponding to the THz pulse reflection (a) from the reference window with the gold mirror placed behind  $E_m$ , (b) from the empty reference window  $E_r$ , and (c) from the reference window with the sample of interest placed behind  $E_s$ . Regions (I), (II), and (III) in all the waveforms indicate the reference, the sample, and the first satellite pulses, respectively.

in Fig. 2), and the third pulse (the first satellite pulse), originating owing to the multiple THz-wave reflections in the reference window (region (III) in Fig. 2). The first pulse remains the same for all the waveforms, since it reflects from the front surface of the reference window. Therefore, we use it to estimate the uniform zero point of the signals in the time-domain. The second pulse and the first satellite pulse are taken into account to reconstruct the THz refractive index and absorption coefficient of the sample. We will show below that consideration of the satellite pulses allows us to significantly raise the reconstruction accuracy.

Our method allows reconstruction of the THz refractive index  $n = n(\nu)$  and absorption coefficient  $\alpha = \alpha(\nu)$  of the sample, which are related to the complex sample refractive index  $\tilde{n} = \tilde{n}(\nu)$

$$\tilde{n} = n - i \frac{c}{2\pi\nu} \alpha \quad (1)$$

where  $c \simeq 3 \times 10^8$  m/s stands for the speed of light in vacuum. We reconstruct the complex refractive index of the sample, and the solution of this inverse problem should minimize an error functional

$$\tilde{n} = \arg \min_{\tilde{n}} [\Phi] \quad (2)$$

where

$$\Phi = \left| \tilde{H}_{exp} - \tilde{H}_{th} \right|^2 + \left| \phi[\tilde{H}_{exp}] - \phi[\tilde{H}_{th}] \right|^2 \quad (3)$$

where  $\tilde{H}_{exp} = \tilde{H}_{exp}(\nu)$  and  $\tilde{H}_{th} = \tilde{H}_{th}(\nu, \tilde{n})$  are experimental and theoretical transfer functions,  $|\dots|$  and  $\phi[\dots]$  are operators to extract the modulus and the phase.

We define the experimental transfer function as

$$\tilde{H}_{exp} = \frac{\tilde{E}_s - \tilde{E}_r}{\tilde{E}_m - \tilde{E}_r}. \quad (4)$$

For the theoretical transfer function we assume satellite pulses originating from the multiple THz-wave reflections in the reference window:

$$\tilde{H}_{th} = \frac{\tilde{R}_{12} - \tilde{R}_{10} + \sum_{j=1}^N (\tilde{R}_{12}^{j+1} - \tilde{R}_{10}^{j+1}) \tilde{R}_{10}^j \tilde{P}_1^{2j}}{\tilde{R}_{13} - \tilde{R}_{10} + \sum_{j=1}^N (\tilde{R}_{13}^{j+1} - \tilde{R}_{10}^{j+1}) \tilde{R}_{10}^j \tilde{P}_1^{2j}} \quad (5)$$

where  $\tilde{R}_{mk} = \tilde{R}_{mk}(\nu, \tilde{n}_m, \tilde{n}_k)$  describes the Fresnel reflection at the interface of  $m$ th and  $k$ th media:

$$\tilde{R}_{mk} = \frac{\tilde{n}_k - \tilde{n}_m}{\tilde{n}_m + \tilde{n}_k}. \quad (6)$$

The indices  $m, k = 0, 1, 2$ , and 3 correspond to the air, SiO<sub>2</sub>, tissue, and gold mirror media, respectively.  $\tilde{P}_1 = \tilde{P}_1(\nu, \tilde{n}_1, l)$  is based on the Bouguer–Lambert–Beer law describing the THz-wave propagation along a distance  $l$  in the reference SiO<sub>2</sub> window

$$\tilde{P}_1 = \exp\left(-i \frac{2\pi\nu}{c} \tilde{n}_1 l\right). \quad (7)$$

In (5)–(7), the complex refractive indices of air and SiO<sub>2</sub> ( $\tilde{n}_0$  and  $\tilde{n}_1$ ), the effective complex refractive index of the gold mirror ( $\tilde{n}_3$ ), the number of satellite pulses ( $N$ ), and the thickness of the reference window ( $l$ ) are known *a priori*, and the THz complex refractive index of the sample ( $\tilde{n} = \tilde{n}_2$ ) is estimated via (2).

In contrast to the well-known methods used to determine the THz material parameters via the reflection-mode measurements (for instance, see [24]), in the described approach we assume multiple THz-wave reflections in the reference window, thereby allowing us to significantly increase the reconstruction accuracy. To examine the impact of the sample transfer function determination error  $\Delta\tilde{H}_{th}$  on the reconstruction error  $\Delta\tilde{n}$  for various numbers of satellite pulses  $N$ , we implement the local linearization [28], [64] of the theoretical transfer function (5)

$$\Delta\tilde{n} = \tilde{K} \Delta\tilde{H}_{th} \quad (8)$$

where  $\tilde{K} = \tilde{K}(N, \nu, \tilde{n}_1, \tilde{n}, l)$  is a complex coefficient of the local linearization. By calculating  $\tilde{K}$  for typical experimental conditions (for simplicity, we assume, that  $n_1 = 2.14$  and  $\alpha_1 = 0$  are the THz refractive index and absorption coefficient of the reference window at  $\nu = 1.0$  THz,  $l = 1.0$  mm is the thickness of this window, and  $n = 1.57$  and  $\alpha = 13 \text{ mm}^{-1}$  are the typical values of THz refractive index and absorption coefficient of the skin tissue *in vivo* at  $\nu = 1.0$  THz), we determine the dependence  $\tilde{K}(N)$ , which is presented in Fig. 3 as the modulus  $|\tilde{K}|$  and the phase  $\phi[\tilde{K}]$ .

One can observe that  $|\tilde{K}|$  decreases with an increase of  $N$ . Thus, the more satellite pulses are considered, the higher the reconstruction accuracy is. Moreover,  $\phi(\tilde{K})$  significantly varies with  $N$ ; therefore, the impact of  $\Delta\tilde{H}_{th}$  on reconstruction of the real and imaginary parts of the complex refractive index and, as a consequence, on reconstruction of the THz refractive

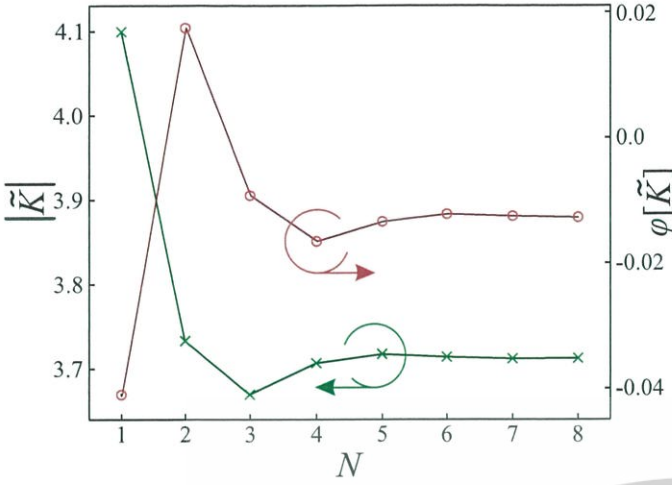


Fig. 3. The modulus  $|\tilde{K}|$  and the phase  $\phi[\tilde{K}]$  of the local linearization coefficients  $\tilde{K}(N)$  (8) calculated for the typical conditions of the experiment:  $n_1 = 2.14$  and  $\alpha_1 = 0$  are the THz refractive index and absorption coefficient of the reference window at  $\nu = 1.0$  THz,  $l = 1.0$  mm is the thickness of this reference window, and  $n = 1.57$  and  $\alpha = 13 \text{ mm}^{-1}$  are the typical THz refractive index and absorption coefficient of the skin tissue *in vivo* at  $\nu = 1.0$  THz.

index and absorption coefficient differs for various  $N$ . For specified local linearization conditions the accuracy of reconstruction could be 10% higher in case of even one satellite pulse is taken into account.

Many factors affect the process of THz refractive index and absorption coefficient reconstruction. The list of factors, which are inherent specifically to the proposed method, includes digital noise in the TPS waveforms, spectral inhomogeneity of the TPS sensitivity, and fluctuations of the reference window position, caused by movements of the sample *in vivo*. All these factors should be considered during solution of the inverse problem and estimation of the reconstruction error [28], [65].

#### A. Numerical Approach to Examine the Stability of the Inverse Problem Solution

We study the stability of the inverse problem solution by means of numerical simulations of the algorithm implementation in the presence of specified negative factors (see Fig. 4).

First, we define the model of THz material parameters of the sample. We use the well-known model of the THz material parameters of the skin  $\tilde{n} = \tilde{n}(\nu)$ , which are described with the double-Debye model [66]

$$\tilde{n} = \sqrt{\tilde{\varepsilon}}, \quad \tilde{\varepsilon} = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_2}{1 + i2\pi\nu\tau_1} + \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_\infty}{1 + i2\pi\nu\tau_2} \quad (9)$$

where  $\tilde{\varepsilon} = \tilde{\varepsilon}(\nu)$  is a complex dielectric permittivity,  $\varepsilon_s$ ,  $\varepsilon_2$ , and  $\varepsilon_\infty$  are dielectric parameters,  $\tau_1$  and  $\tau_2$  are relaxation times in the medium (Table I).

Second, we solve the direct problem. A Gaussian monopulse function  $E_0 = E_0(t)$  [35] is assumed to describe the THz-pulse radiating the sample

$$E_0 = -2e^{1/2}(\pi\nu_c t) \exp(-2(\pi\nu_c t)^2) \quad (10)$$

where  $\nu_c = 0.95$  THz stands for a central frequency of the Gaussian monopulse. The Fourier spectrums of the waveforms  $\tilde{E}_m$ ,  $\tilde{E}_r$  and  $\tilde{E}_s$ , which form the basis for the inverse problem

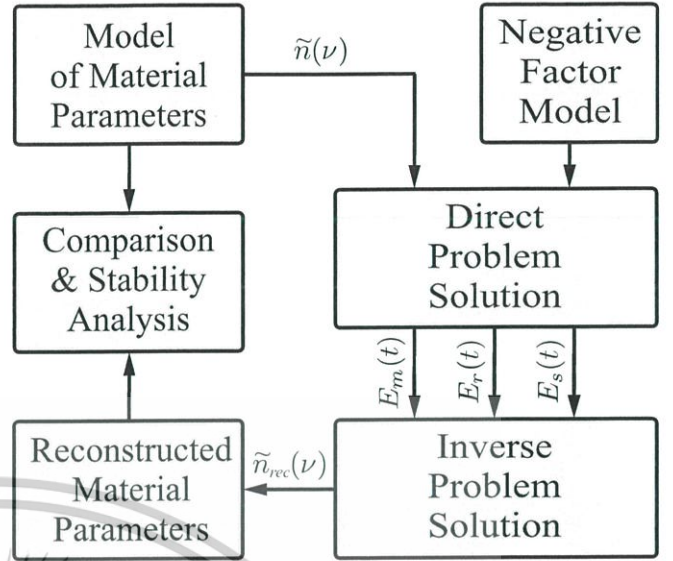


Fig. 4. Schematic representation of the method applied to examining the stability of THz refractive index and absorption coefficient reconstruction.

TABLE I  
DOUBLE-DEBYE MODEL PARAMETERS FOR THE THz COMPLEX DIELECTRIC PERMITTIVITY OF THE SKIN *IN VIVO* [66]

$\varepsilon_s$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_\infty$	$\tau_1$ (ps)	$\tau_2$ (ps)
60.0	3.6	3.0	10.0	0.2

solution, are modeled based on the Fresnel formulas (6) and the Beer–Lambert–Bouger law (7)

$$\begin{aligned} \tilde{E}_m &= \tilde{E}_0 \left( R_{01} + T_{01} T_{10} P_1^2 \left( R_{13} + \sum_{j=1}^N P_1^{2j} R_{13}^{j+1} R_{10}^j \right) \right) \\ \tilde{E}_r &= \tilde{E}_0 \left( R_{01} + T_{01} T_{10} P_1^2 \left( R_{10} + \sum_{j=1}^N P_1^{2j} R_{10}^{2j+1} \right) \right) \\ \tilde{E}_s &= \tilde{E}_0 \left( R_{01} + T_{01} T_{10} P_1^2 \left( R_{12} + \sum_{j=1}^N P_1^{2j} R_{12}^{j+1} R_{10}^j \right) \right) \end{aligned} \quad (11)$$

where  $\tilde{E}_0 = \tilde{E}_0(\nu)$  stands for the Fourier spectrum of the Gaussian monopulse (10) describing the spectral inhomogeneity of the TPS sensitivity; indices 0, 1, 2, and 3 correspond to the air, SiO<sub>2</sub>, tissue, and gold media, respectively. In (11) one satellite pulse is considered, i.e.,  $N = 1$ . The thickness of the reference window is  $l = 1$  mm, and the THz material parameters of the reference window represent the crystalline quartz [67]. A time-domain representation of the waveforms is obtained via the inverse Fourier transform

$$E_m = \mathcal{F}_\nu^{-1}[\tilde{E}_m], \quad E_r = \mathcal{F}_\nu^{-1}[\tilde{E}_r], \quad E_s = \mathcal{F}_\nu^{-1}[\tilde{E}_s] \quad (12)$$

where  $\mathcal{F}_\nu^{-1}$  stands for the inverse Fourier transform operator. Equations (10)–(12) allow us to solve the direct problem, namely, to simulate the backscattering of the THz pulse and to estimate the waveforms.

Finally, the inverse problem is solved via (2), which results in the reconstructed material parameters  $\tilde{n}_{\text{rec}} = \tilde{n}_{\text{rec}}(\nu)$ . To study the stability of the inverse problem solution, we introduce the negative factors of reconstruction (digital noise in the TPS waveforms and translational and angular fluctuations of the reference window position) at the stage of the direct problem solution [see (10)–(12)], and then obtain the distorted TPS waveforms and solve the inverse problem (2). The errors of the THz refractive index and absorption coefficient reconstruction are calculated via a comparison of the initial,  $\tilde{n}$ , and the reconstructed,  $\tilde{n}_{\text{rec}}$ , parameters.

Notice, the described approach (Fig. 4) also allows us to examine the experimental error of the THz material parameter reconstruction, namely, to calculate the error bars.

### B. Digital Noise in the TPS Waveforms

Let us consider the inverse problem instability caused by digital noise in the TPS waveforms. We assume white Gaussian noise distorting the waveforms in (12)

$$E'_m = E_m + \varsigma_m, \quad E'_r = E_r + \varsigma_r, \quad E'_s = E_s + \varsigma_s \quad (13)$$

where  $\varsigma_m = \varsigma_m(t, \sigma_N)$ ,  $\varsigma_r = \varsigma_r(t, \sigma_N)$  and  $\varsigma_s = \varsigma_s(t, \sigma_N)$  correspond to different realizations of Gaussian noise with uniform standard deviation  $\sigma_N$ . The noise is introduced in fractions of the maximal amplitude of the reference THz pulse (region (1) in the Fig. 2).

We perform a set of equal numerical experiments with different noise realizations,  $\varsigma_{m,p}$ ,  $\varsigma_{r,p}$  and  $\varsigma_{s,p}$ . This leads to the set of reconstruction results  $\tilde{n}_{\text{rec},p}$ , where  $p = 1, 2, \dots, M$  is the experiment number. By comparing  $\tilde{n} = n - i\alpha c / (2\pi\nu)$  and  $\tilde{n}_{\text{rec},p} = n_{\text{rec},p} - i\alpha_{\text{rec},p} c / (2\pi\nu)$ , we calculate the normalized spectral densities of the reconstruction errors

$$\begin{aligned} \frac{\Delta n}{n} &= \frac{1}{n} \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{p=1}^M |n_{\text{rec},p} - n|^2}, \\ \frac{\Delta \alpha}{\alpha} &= \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{p=1}^M |\alpha_{\text{rec},p} - \alpha|^2} \end{aligned} \quad (14)$$

where  $M \rightarrow +\infty$  is the number of numerical experiments. Fig. 5 shows the results of these calculations: (a) shows the initial model of the THz refractive index and absorption coefficient,  $n$  and  $\alpha$ , as well as the results of the inverse problem solution,  $n_{\text{rec},p}$  and  $\alpha_{\text{rec},p}$ , calculated for  $\sigma_N = 0.3\%$ ; (b) and (c) shows the normalized spectral densities of the errors of the refractive index and the absorption coefficient reconstruction,  $\Delta n/n$  and  $\Delta \alpha/\alpha$ .

The noise leads to significant distortions in the reconstruction results. The observed errors have stochastic character, and the error magnitude varies inhomogeneously with frequency [Fig. 5(a)]. The standard deviation  $\sigma_N \leq 0.2\%$  allows accurate reconstruction of the THz material parameters in a reliable frequency range of 0.2 to 1.4 THz [Fig. 5(b) and 5(c)]. This standard deviation can be easily achieved via the waveform averaging or by implementing the effective methods of TPS waveform denoising [69]–[71].

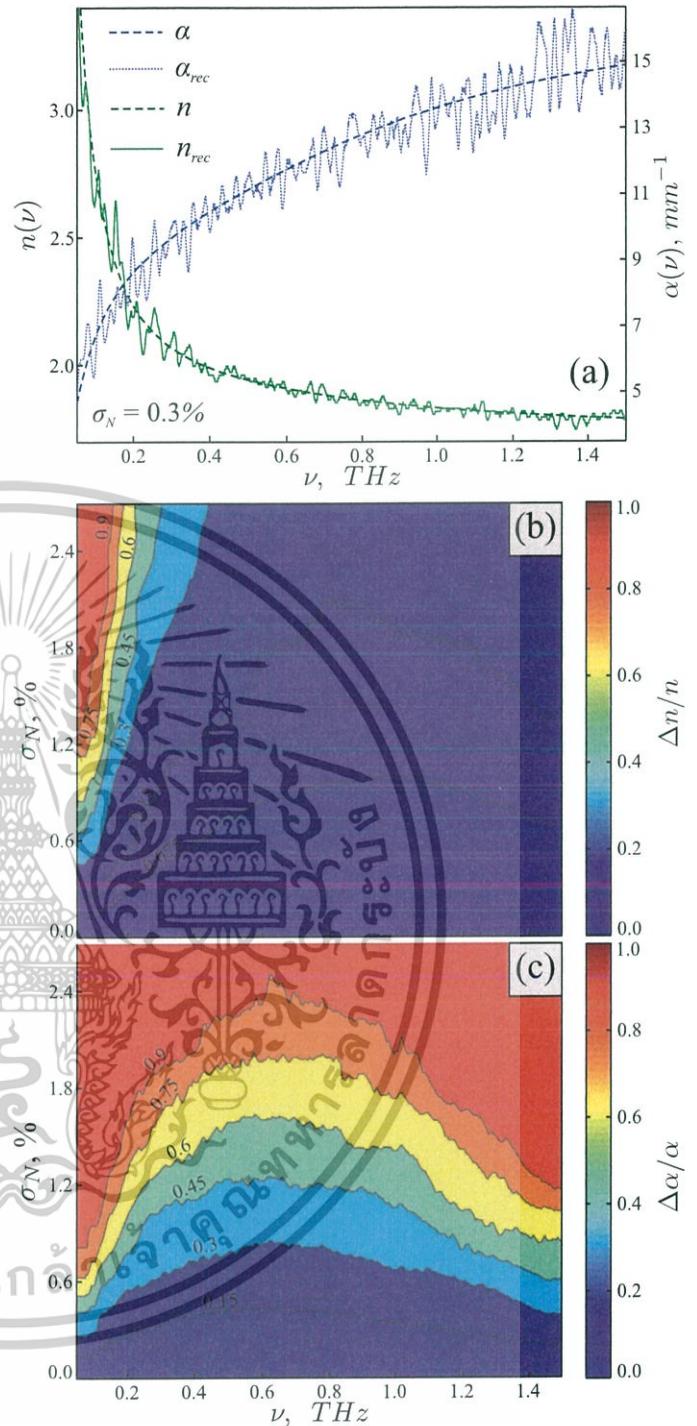


Fig. 5. Impact of white Gaussian noise in the TPS waveforms (13) on the reconstruction of the THz refractive index and absorption coefficient of the skin *in vivo*. (a) Initial model of THz refractive index and absorption coefficient,  $n$  and  $\alpha$ , and the reconstructed curves,  $n_{\text{rec},p}$  and  $\alpha_{\text{rec},p}$ , calculated for  $\sigma_N = 0.3\%$ . (b) Normalized spectral density of the refractive index reconstruction error  $\Delta n/n$  (14). (c) Normalized spectral density of the absorption coefficient reconstruction error  $\Delta \alpha/\alpha$  (14).

### C. Fluctuations of the Reference Window Position

The person (patient) can easily impact the reference window position by pressing it during the sample waveform detection. This may cause errors in the inverse problem solution. Reference window fluctuations can be divided into two types: 1) the

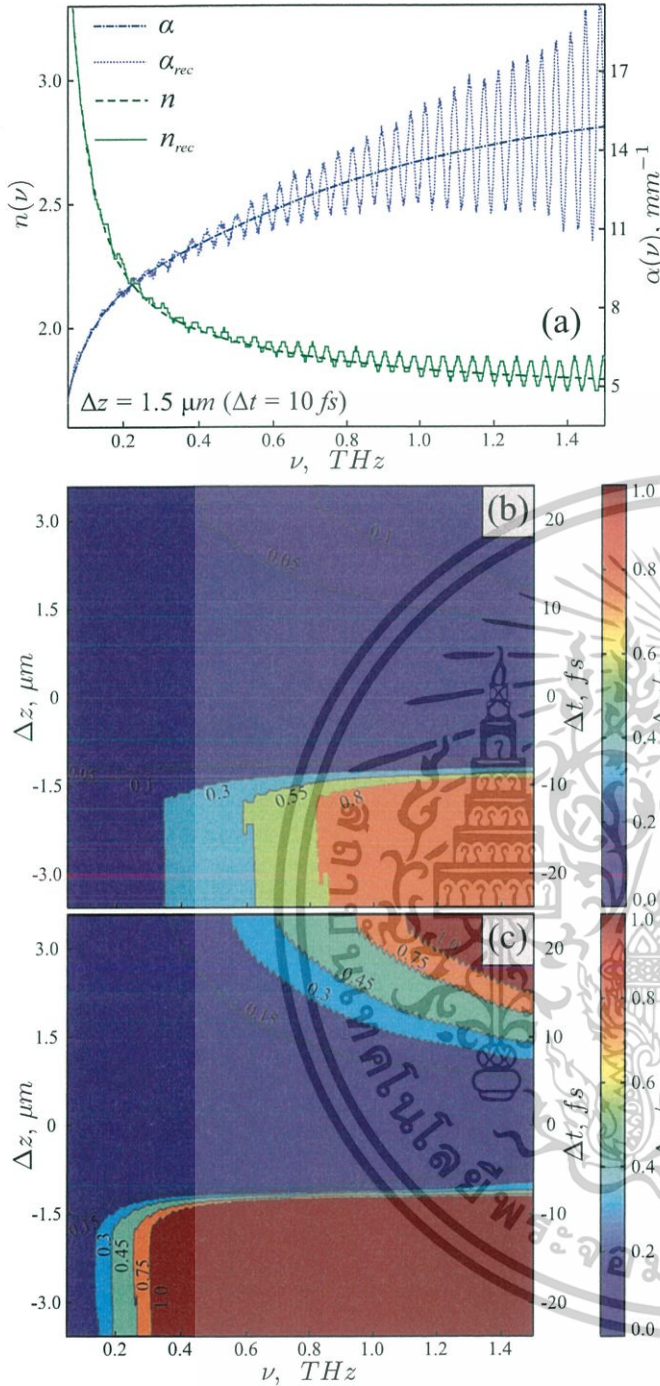


Fig. 6. Impact of the reference window translation (15) on reconstruction of the THz refractive index and absorption coefficient of the skin *in vivo*. (a) Initial model of the THz refractive index and absorption coefficient,  $n$  and  $\alpha$ , and the reconstructed curves,  $n_{rec}$  and  $\alpha_{rec}$ , calculated for  $\Delta z = +1.5 \mu\text{m}$  ( $\Delta t = +10 \text{ fs}$ ). (b) Normalized spectral density of the refractive index reconstruction error  $\Delta n/n$  (16). (c) Normalized spectral density of the absorption coefficient reconstruction error  $\Delta \alpha/\alpha$  (16).

linear translation along the THz beam axis and 2) the deviation of the angular orientation (Fig. 1).

For  $\Delta z$  linear translation of the reference window in the direction of the TPS lens (positive direction), we observe  $\Delta t$  translation of the sample waveform

$$E'_s = E_s(t + \Delta t), \quad \Delta t = 2 \frac{\Delta z}{c}. \quad (15)$$

This time-domain translation leads to the appearance of the reconstruction errors. We apply numerical simulations to solve the direct and the inverse problems in the presence of this factor for various  $\Delta t$ , and Fig. 6 shows the results.

Fig. 6(a) illustrates the typical character of the noise in reconstructed THz refractive index and absorption coefficient owing to  $\Delta z = +1.5 \mu\text{m}$  ( $\Delta t = +10 \text{ fs}$ ). The noise in  $n_{rec}$  and  $\alpha_{rec}$  exhibit an oscillating character, and its magnitude varies inhomogeneously with frequency. Fig. 6(b) and 6(c) shows the normalized spectral densities of the noise magnitude,  $\Delta n/n$  and  $\Delta \alpha/\alpha$ , caused by various  $\Delta t$ . Notice that  $\Delta n/n$  and  $\Delta \alpha/\alpha$  are estimated via the grayscale morphological closing [72]

$$\begin{aligned} \frac{\Delta n}{n} &= \frac{1}{n} \left( ((n_{rec,p} - n) \oplus a) \ominus a \right) \\ \frac{\Delta \alpha}{\alpha} &= \frac{1}{\alpha} \left( ((\alpha_{rec,p} - \alpha) \oplus a) \ominus a \right) \end{aligned} \quad (16)$$

where  $(f \oplus a)$  stands for the grayscale delatation of  $f$  by the primitive of  $a$  size,  $(f \ominus a)$  stands for the grayscale erosion of  $f$  by the primitive of  $a$  size, and  $a$  is chosen to be wider than the period of the error oscillations [Fig. 6(a)].

The functions  $\Delta n/n$  and  $\Delta \alpha/\alpha$  have asymmetric character with respect to the ideal position of the window  $\Delta t = 0$  ( $\Delta z = 0$ ). One can notice significant distortions caused by even small translations of the reference window,  $|\Delta z| > 1.2 \mu\text{m}$  ( $|\Delta t| > 8 \text{ fs}$ ). Therefore, for the correct solution of the inverse problem we should apply TPS waveforms preprocessing in order to estimate the uniform zero point of waveforms  $E_m$ ,  $E_r$ , and  $E_s$  in time-domain. In the present work we use the correlation procedure [72] to accurately solve this problem.

Another distortion of the reconstruction results is caused by the angular deviation of the reference window orientation,  $\theta$ . It breaks the condition of the normal THz-wave incidence on the interfaces between media (6). It also increases the optical path, traveled by the THz pulse in the reference window; thus, we observe an effective change of the reference window thickness in (7). For small angular deviations,  $\theta < 5^\circ$ , the reflectivity change is negligible, and it cannot significantly affect the inverse problem solution [23], [28], [31]. However, changes of the THz-wave optical path can impact the material parameter reconstruction.

We assume this factor by changing the reference window thickness in (11) and (7)

$$l' = l + \Delta l, \quad \Delta l = l \left( \frac{1}{\cos(\theta)} - 1 \right) \quad (17)$$

where  $\Delta l$  stands for the thickness increment. The inverse problem is solved based on the distorted waveforms, and we compare the reconstructed curves,  $n_{rec}$  and  $\alpha_{rec}$ , with the initial ones,  $n$  and  $\alpha$ . The results of calculations are presented in Fig. 7. Fig. 7(a) illustrates the typical noise originating from  $\theta = 4.4^\circ$  ( $\Delta l = 3 \mu\text{m}$ ). The noise in  $n_{rec}$  and  $\alpha_{rec}$  have an oscillating character, with the inhomogeneous magnitude. Fig. 7(b) and 7(c) shows the normalized spectral densities of the noise magnitudes,  $\Delta n/n$  and  $\Delta \alpha/\alpha$ , calculated for various  $\Delta l$  (16).

The  $\Delta n/n$  and  $\Delta \alpha/\alpha$  functions have a symmetric character with respect to the ideal angular orientation of the reference window,  $\Delta l = 0$  ( $\theta = 0$ ). The error increases significantly if

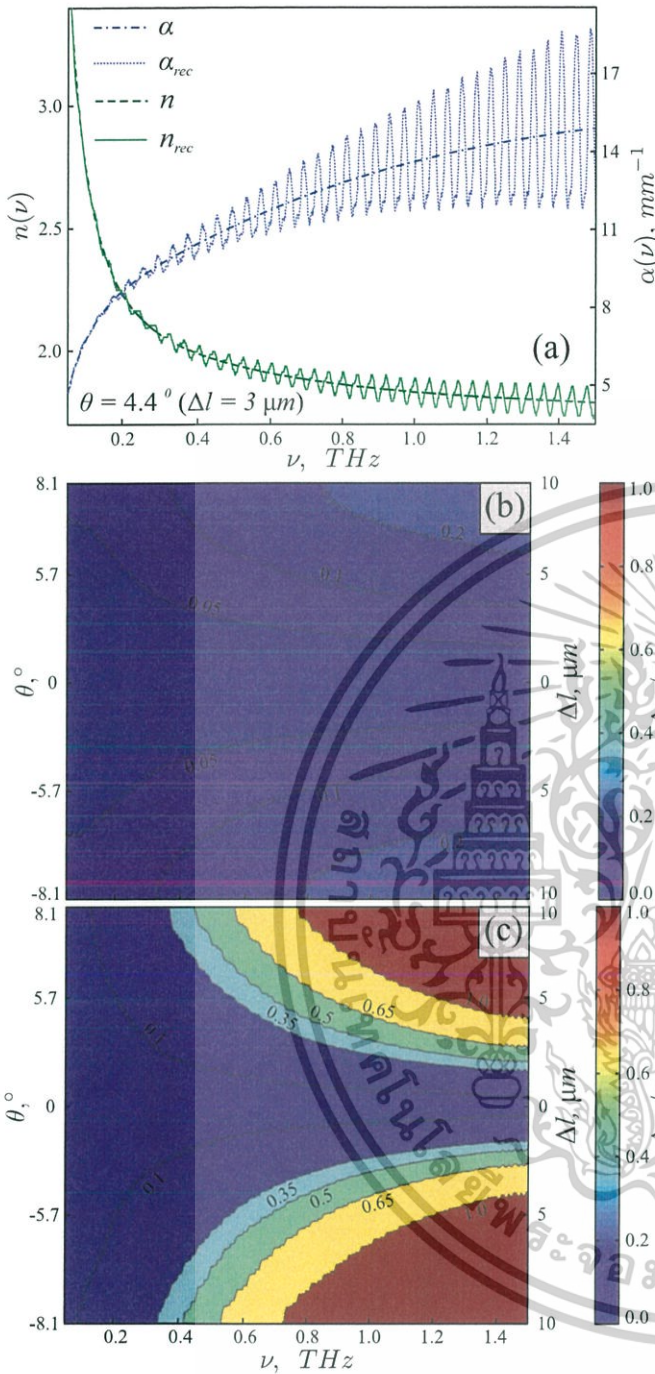


Fig. 7. Impact of the reference window angular deviations (17) on reconstruction of the THz refractive index and absorption coefficient of the skin *in vivo*. (a) Initial model of the THz refractive index and the absorption coefficient,  $n$  and  $\alpha$ , and the reconstructed curves,  $n_{rec}$  and  $\alpha_{rec}$ , calculated for  $\theta = 4.4^\circ$  ( $\Delta l = 3 \mu m$ ). (b) Normalized spectral density of the refractive index reconstruction error  $\Delta n/n$  (16). (c) Normalized spectral density of the absorption coefficient reconstruction error  $\Delta \alpha/\alpha$  (16).

$\theta > 2.5^\circ$  ( $\Delta l > 1 \mu m$ ). Thus, we should satisfy the condition  $\theta < 2.5^\circ$  during TPS waveform detection. The specified accuracy of the reference window orientation can be easily achieved by rigidly fixing the window, and so the latter factor does not impact the inverse problem solution.

Besides the considered sources of measurement errors, which are inherent specifically to the described reconstruction technique, there are many other ones exist, for instance, jitters in

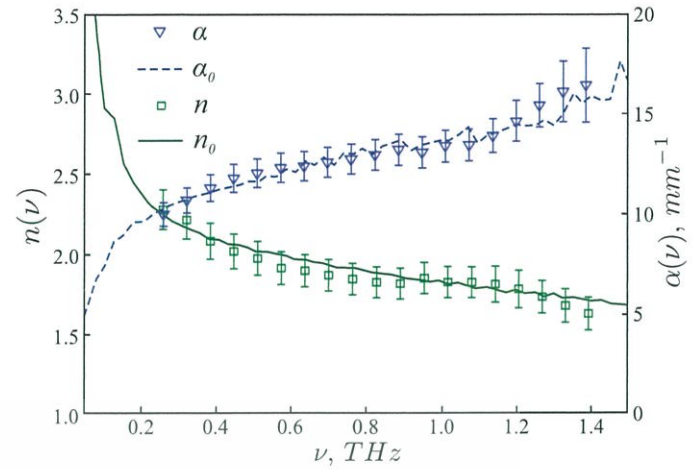


Fig. 8. Comparison of our results on *in vivo* THz spectroscopy of the skin from the arm,  $n$  and  $\alpha$ , with the well-known data,  $n_0$  and  $\alpha_0$ , from [74].

the TPS delay stage [73] and instabilities of the femtosecond laser [28]. Obviously, these errors are inherent to all the TPS techniques, and they can cause instabilities of the TPS inverse problem solutions. However, systematic studying of all the TPS instabilities is out of scope of the present paper.

#### D. Verification of the Method

Before experimental implementation of the proposed method, we have studied the THz materials parameters of the reference THz window (Fig. 1). We have characterized the  $SiO_2$ -window using the TPS transmission-mode measurements [28]. Observed THz material parameters agree with the well-known data from [67], and we use them to process the data of *in vivo* measurements of the skin.

To verify the described approach for reconstruction of the THz refractive index and absorption coefficient, we implement it to study *in vivo* the skin from the arm. Fig. 8 shows that the results of our measurements,  $n$  and  $\alpha$ , agree well with the data from [74],  $n_0$  and  $\alpha_0$ .

The error bars in Fig. 8 are calculated using the same approach, which was implemented for studying the stability of the inverse problem solution (Fig. 4). First, we ensured that during the experiment and TPS data processing we have satisfied all the demands associated with the reference window position (see Section III-C). Second, we considered the reconstructed material parameters as an initial condition to solve the direct problem [see (10)–(12)] and to obtain the waveform models. White Gaussian noise, which is inherent to the experimental waveforms, was added to the models of the TPS waveforms, the TPS inverse problem was solved (2), and the error bars were calculated via (14). The described approach to calculate the error bars provides a unique opportunity to estimate the errors of reconstruction considering all the aspects of the reflection mode measurement. Moreover, the described technique can be generalized to study the stability and to analyze the measurement errors for other types of TPS systems [8]–[20].

The reconstruction error varies inhomogeneously with frequency for both THz refractive index and absorption coefficient in the Fig. 8. This feature of the error bars originates both from the spectral inhomogeneities of TPS sensitivity and from the multiple THz-wave reflections in the reference THz window.

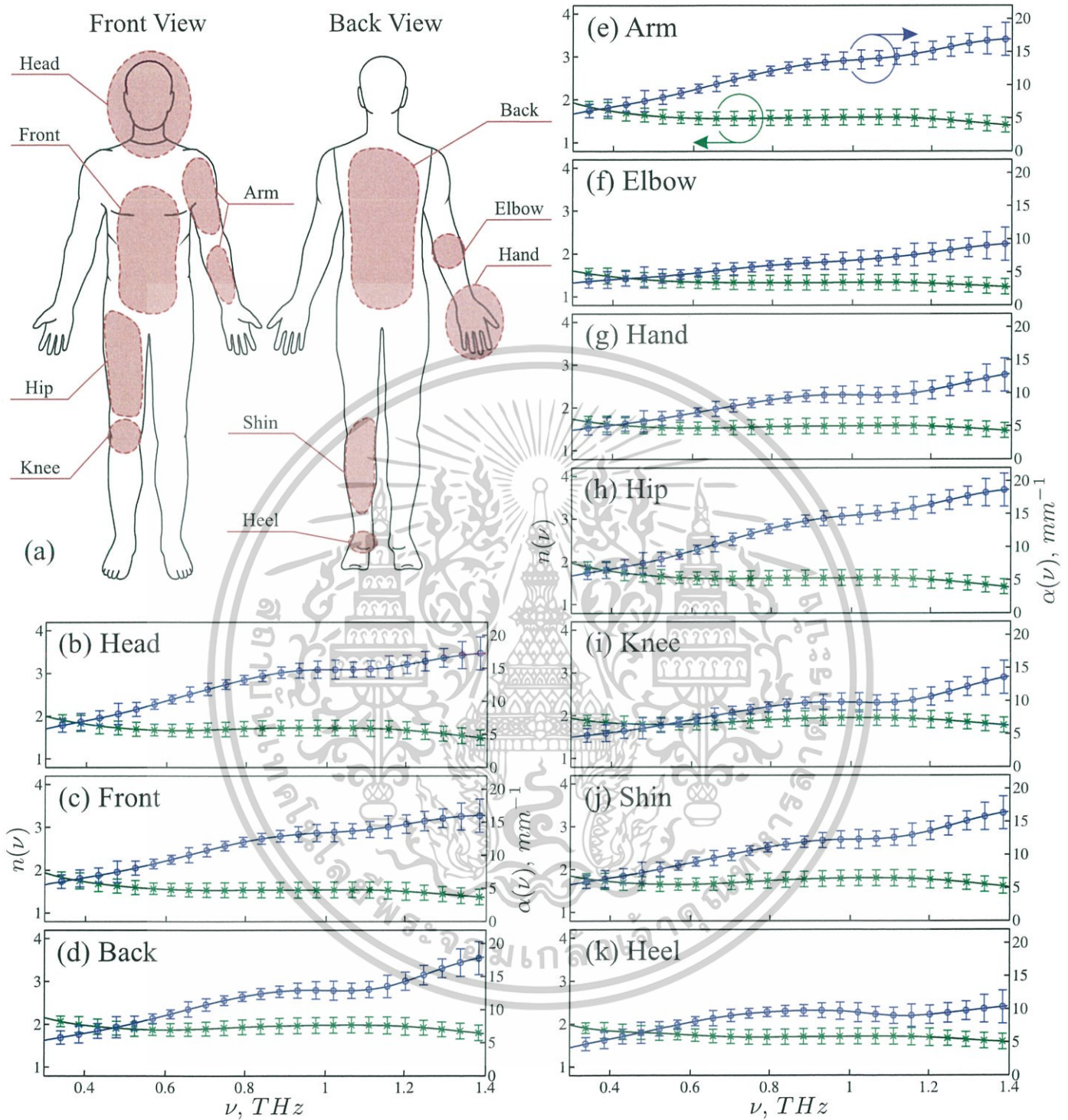


Fig. 9. Variation of the THz refractive index and absorption coefficient of the skin *in vivo* along the human body. Panel (a) schematically represents the human body and considered regions. The curves from (b) to (k) represent the THz characteristics of the skin from the head, the front side of the body, the back side of the body, the arm, the elbow, the hand, the hip, the knee, the shin, and the heel, respectively. The material parameters of the skin are collected from three persons. At least 5 spectral characteristics from each of the listed regions of the body from each of the persons (at least 15 spectral characteristics from each region of interest) were used to calculate the averaged curves  $n$  and  $\alpha$ .

The error rises dramatically at low ( $\nu < 0.2$  THz) and high ( $\nu > 1.4$  THz) frequencies due to the number of TPS instabilities [28], [73]. Moreover, THz-wave scattering on the surface and in the volume of the tissue sample prevents accurate reconstruction at higher frequencies [60]. Thereby, we do not show the reconstruction results in these frequency ranges.

#### IV. MEASURING THE VARIATION OF REFRACTIVE INDEX AND ABSORPTION COEFFICIENT OF THE SKIN ALONG THE HUMAN BODY

We used the proposed algorithm to study *in vivo* the THz refractive index and absorption coefficient of the skin from three

persons. We considered the variation of the THz characteristics of the skin along the body by measuring a number of points from each part of the body from each person, and we systematically analyzed the observed results.

Fig. 9 shows the results of skin spectroscopy. We have grouped the results according to the fluctuations of the THz characteristics along the body. Similar THz refractive index and absorption coefficient are inherent to certain regions of the body, which are marked in Fig. 9(a) with the dashed red lines. Each group represents the results of averaging of at least 5 measurements from each of the three persons (i.e., each group is formed on the basis of at least 15 spectral characteristics). The groups represent the THz refractive index and the absorption coefficient from the head, including the face, the chin, and the neck [Fig. 9(b)]; the front side of the body [Fig. 9(c)]; the back side of the body [Fig. 9(d)]; the arm [Fig. 9(e)]; the elbow [Fig. 9(f)]; the hand [Fig. 9(g)]; the hip [Fig. 9(h)]; the knee [Fig. 9(i)]; the shin [Fig. 9(j)]; and the heel [Fig. 9(k)].

Despite the fact that all the refractive index curves,  $n$ , decrease monotonically with frequency and, inversely, all the absorption coefficient curves,  $\alpha$ , increase monotonically (Fig. 9), the THz characteristics of the skin varies considerably along the body. The highest THz-wave absorption corresponds to the skin from the head and the hip, and the lowest one corresponds to the skin from the elbow, the knee, and the heel. Since the THz waves penetrate only the epidermis of the skin, the THz characteristics depends exactly on the physical and chemical properties of the epidermis tissue, i.e., on picosecond dynamics in media [29], [74], [75]. The water content in tissue significantly impacts its THz characteristics owing to the high polarity of the water molecule [76], [77]. Obviously, the structure of the epidermis, namely, the thickness of the stratum corneum [33] and the features of the THz-wave scattering on the surface and in the volume of the tissue, affects its characterization in the THz frequency range.

The results of the present paper are of principal importance for further development of novel methods of skin diagnosis and therapy based on THz technology and, in particular, on TPS. All the methods to noninvasively diagnose skin cancers [37]–[40], [60], [61] and burns [56]–[59] based on THz absorption spectroscopy, as well as all the approaches for principal component analysis [40], [60], should be adjusted to account for the variations of the THz refractive index and absorption coefficient along the human body.

## V. CONCLUSION

In conclusion, in this paper we have proposed a method for reconstruction of the THz refractive index and absorption coefficient of *in vivo* tissue using TPS. The method utilizes the reference SiO<sub>2</sub>-window to fix the sample during measurements. It accounts satellite THz pulses in TPS waveforms, originating from the multiple THz-wave reflections in the reference window, to accurately solve the inverse problem. We have studied the stability of the inverse problem solution in the presence of various negative factors, and we have verified the proposed method. We have implemented the method to characterize human skin *in vivo*. The observed results agree with the well-known data in general, except for several regions of the skin. Thus, for the elbow, the hand, the knee, and the heel

the THz refractive index and absorption coefficient differ from the average values. This result is of principle importance for further development of novel approaches to noninvasively diagnose cancers and burns of the skin using the THz absorption spectroscopy.

## REFERENCES

- [1] D. D. Arnone *et al.*, "Applications of terahertz (THz) technology to medical imaging," *Proc. SPIE*, vol. 3828, pp. 209–219, Sep. 1999.
- [2] E. Pickwell and V. P. Wallace, "Biomed. applications of terahertz technology," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 39, no. 17, pp. R301–R310, Sep. 2006.
- [3] K. Ajito and Y. Ueno, "THz chemical imaging for biological applications," *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 293–300, Sep. 2011.
- [4] E. MacPherson, G. P. Gallerano, G.-S. Park, H. Hintzsche, and G. J. Wilmink, "Guest editorial: Terahertz imaging and spectroscopy for biology and biomedicine," *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol. 3, no. 4, pp. 354–356, Jul. 2013.
- [5] S. Fan, Y. He, B. S. Ung, and E. Pickwell-MacPherson, "The growth of biomedical terahertz research," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 47, no. 37, Sep. 2014, Art. no. 374009.
- [6] D. H. Auston, "Picosecond optoelectronic switching and gating in silicon," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 26, no. 3, pp. 101–103, Feb. 1975.
- [7] D. H. Auston and P. R. Smith, "Generation and detection of millimeter waves by picosecond photoconductivity," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 43, no. 7, pp. 631–633, Oct. 1983.
- [8] D. H. Auston, K. P. Cheung, and P. R. Smith, "Picosecond photoconducting hertzian dipoles," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 45, no. 3, pp. 284–286, Aug. 1984.
- [9] F. E. Doany, D. Grischkowsky, and C.-C. Chi, "Carrier lifetime versus ion-implantation dose in silicon on sapphire," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 50, no. 8, pp. 460–462, Feb. 1987.
- [10] K. A. McIntosh, K. B. Nichols, S. Verghese, and E. R. Brown, "Investigation of ultrashort photocarrier relaxation times in low-temperature-grown GaAs," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 70, no. 3, pp. 354–356, Jan. 1997.
- [11] G. Klatt *et al.*, "Terahertz emission from lateral photo-dember currents," *Opt. Express*, vol. 18, no. 5, pp. 4939–4947, Mar. 2010.
- [12] J.-S. Hwang *et al.*, "The dependence of terahertz radiation on the built-in electric field in semiconductor microstructures," *Opt. Express*, vol. 15, no. 8, pp. 5120–5125, Apr. 2007.
- [13] L. Xu, X.-C. Zhang, and D. H. Auston, "Terahertz beam generation by femtosecond optical pulses in electro-optic materials," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 61, no. 15, pp. 1784–1786, Oct. 1992.
- [14] C. Winnewisser, P. U. Jepsen, M. Schall, V. Schyja, and H. Helm, "Electro-optic detection of THz radiation in litao3, limbo3 and ZnTe," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 70, no. 23, pp. 3069–3071, Jun. 1997.
- [15] G. Gallot and D. Grischkowsky, "Electro-optic detection of terahertz radiation," *J. Opt. Soc. Amer. B*, vol. 16, no. 8, pp. 1204–1212, Aug. 1999.
- [16] T. Yasui, S. Yokoyama, H. Inaba, K. Minoshima, T. Nagatsuma, and T. Araki, "Terahertz frequency metrology based on frequency comb," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 17, no. 1, pp. 191–201, Jan./Feb. 2011.
- [17] X. Lu and X.-C. Zhang, "Generation of elliptically polarized terahertz waves from laser-induced plasma with double helix electrodes," *Physical Rev. Lett.*, vol. 108, no. 12, Mar. 2012, Art no 123903.
- [18] A. V. Borodin *et al.*, "Transformation of terahertz spectra emitted from dual-frequency femtosecond pulse interaction in gases," *Opt. Lett.*, vol. 38, no. 11, pp. 1906–1908, Jun. 2013.
- [19] Y.-D. Hsieh *et al.*, "Terahertz comb spectroscopy traceable to microwave frequency standard," *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol. 3, no. 3, pp. 322–330, May 2013.
- [20] A. V. Borodin, M. N. Esaulkov, A. A. Frolov, A. P. Shkurinov, and V. Y. Panchenko, "Possibility of direct estimation of terahertz pulse electric field," *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 14, pp. 4092–4095, Jul. 2014.
- [21] L. Duvillaret, F. Garet, and J.-L. Coutaz, "Highly precise determination of optical constants and sample thickness in terahertz time-domain spectroscopy," *Appl. Opt.*, vol. 38, no. 2, pp. 409–415, Jan. 1999.
- [22] T. D. Dorney, R. G. Baraniuk, and D. M. Mittleman, "Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy," *J. Opt. Soc. Amer. A*, vol. 18, no. 7, pp. 1562–1571, Jul. 2001.
- [23] I. Pupez, R. Wilk, and M. Koch, "Highly accurate optical material parameter determination with THz time-domain spectroscopy," *Opt. Express*, vol. 15, no. 7, pp. 4335–4350, Apr. 2007.

- [24] S. Huang *et al.*, "Improved sample characterization in terahertz reflection imaging and spectroscopy," *Opt. Express*, vol. 17, no. 5, pp. 3848–3854, Mar. 2009.
- [25] M. Scheller, "Real-time terahertz material characterization by numerical three-dimensional optimization," *Opt. Express*, vol. 19, no. 11, pp. 10647–10655, May 2011.
- [26] G. P. Kniffin and L. M. Zurk, "Model-based material parameter estimation for terahertz reflection spectroscopy," *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 231–241, Mar. 2012.
- [27] J. A. Hejase, E. J. Rothwell, and P. Chahal, "A multiple angle method for THz time-domain material characterization," *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol. 3, no. 5, pp. 656–665, Sep. 2013.
- [28] K. I. Zaytsev *et al.*, "Accuracy of sample material parameters reconstruction using terahertz pulsed spectroscopy," *J. Appl. Phys.*, vol. 115, no. 19, p. 193105, May 2014.
- [29] S. O. Yurchenko and K. I. Zaytsev, "Spectroscopy of nafion in terahertz frequency range," *J. Appl. Phys.*, vol. 116, no. 11, p. 113508, Sep. 2014.
- [30] D. Stanze, B. Globisch, R. J. B. Dietz, H. Roehle, T. Gobel, and M. Schell, "Multilayer thickness determination using continuous wave THz spectroscopy," *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol. 4, no. 6, pp. 696–701, Nov. 2014.
- [31] K. I. Zaytsev, A. A. Gavdush, S. P. Lebedev, V. E. Karasik, and S. O. Yurchenko, "A method of studying spectral optical characteristics of a homogeneous medium by means of terahertz time-domain spectroscopy," *Opt. Spectrosc.*, vol. 118, no. 4, pp. 552–562, Mar. 2015.
- [32] D. M. Mittleman, S. Hunsche, L. Boivin, and M. C. Nuss, "T-ray tomography," *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 12, pp. 904–906, Jun. 1997.
- [33] Y. Chen, S. Huang, and E. Pickwell-MacPherson, "Frequency-wavelet domain deconvolution for terahertz reflection imaging and spectroscopy," *Opt. Express*, vol. 18, no. 2, pp. 1177–1190, Jan. 2010.
- [34] K. W. Kim, H. Kim, J. Park, J. K. Han, and J.-H. Son, "Terahertz tomographic imaging of transdermal drug delivery," *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 99–106, Jan. 2012.
- [35] K. I. Zaytsev, V. E. Karasik, I. N. Fokina, and V. I. Alekhovich, "Invariant embedding technique for medium permittivity profile reconstruction using terahertz time-domain spectroscopy," *Opt. Eng.*, vol. 52, no. 6, p. 068203, Jun. 2013.
- [36] Y. C. Sim, J. Y. Park, K.-M. Ahn, C. Park, and J.-H. Son, "Terahertz imaging of excised oral cancer at frozen temperature," *Biomed. Opt. Express*, vol. 4, no. 8, pp. 1413–1421, Aug. 2013.
- [37] R. M. Woodward, V. P. Wallace, D. D. Arnone, E. H. Linfield, and M. Pepper, "Terahertz pulsed imaging of skin cancer in the time and frequency domain," *J. Biol. Phys.*, vol. 29, no. 2–3, pp. 257–259, Jun. 2003.
- [38] R. M. Woodward *et al.*, "Terahertz pulse imaging of EX VIVO basal cell carcinoma," *J. Investigative Dermatol.*, vol. 120, no. 1, pp. 72–78, Aug. 2003.
- [39] V. P. Wallace *et al.*, "Terahertz pulsed imaging of basal cell carcinoma *ex vivo* and *in vivo*," *Brit. J. Dermatol.*, vol. 151, no. 2, pp. 424–432, Aug. 2004.
- [40] S. Nakajima, H. Hoshina, M. Yamashita, C. Otani, and N. Miyoshi, "Terahertz imaging diagnostics of cancer tissues with a chemometrics technique," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 4, p. 041102, Jan. 2007.
- [41] C. B. Reid *et al.*, "Terahertz pulsed imaging of freshly excised human colonic tissues," *Phys. in Medicine and Biology*, vol. 56, no. 14, pp. 4333–4353, Jul. 2011.
- [42] P. Doradla, K. Alavi, C. Joseph, and R. Giles, "Detection of colon cancer by continuous-wave terahertz polarization imaging technique," *J. Biomed. Opt.*, vol. 18, no. 9, Sep. 2013, Art no 090504.
- [43] L. Rong *et al.*, "Terahertz in-line digital holography of human hepatocellular carcinoma tissue," *Scientific Rep.*, vol. 5, p. 8445, Jan. 2015.
- [44] A. J. Fitzgerald *et al.*, "Terahertz pulsed imaging of human breast tumors," *Radiology*, vol. 239, no. 2, pp. 533–540, May 2006.
- [45] P. C. Ashworth *et al.*, "Terahertz pulsed spectroscopy of freshly excised human breast cancer," *Opt. Express*, vol. 17, no. 15, pp. 12444–12454, Jul. 2009.
- [46] A. J. Fitzgerald, S. Pinder, A. D. Purushotham, P. O'Kelly, P. C. Ashworth, and V. P. Wallace, "Classification of terahertz-pulsed imaging data from excised breast tissue," *J. Biomed. Opt.*, vol. 17, no. 1, p. 016005, Jan. 2012.
- [47] A. J. Fitzgerald, E. Pickwell-MacPherson, and V. P. Wallace, "Use of finite difference time domain simulations and Debye theory for modelling the terahertz reflection response of normal and tumour breast tissue," *PLoS ONE*, vol. 9, no. 7, Jul. 2014, Art no E99291.
- [48] L. V. Titova *et al.*, "Intense THz pulses cause H2AX phosphorylation and activate DNA damage response in human skin tissue," *Biomed. Opt. Express*, vol. 4, no. 4, pp. 559–568, Apr. 2013.
- [49] L. V. Titova *et al.*, "Intense THz pulses down-regulate genes associated with skin cancer and psoriasis: a new therapeutic avenue?," *Scientific Rep.*, vol. 3, p. 2363, Aug. 2013.
- [50] D. B. Bennett *et al.*, "Terahertz sensing in corneal tissues," *J. Biomed. Opt.*, vol. 16, no. 5, May 2011, Art no 057003.
- [51] D. Crawley, C. Longbottom, V. P. Wallace, B. Cole, D. Arnone, and M. Pepper, "Three-dimensional terahertz pulse imaging of dental tissue," *J. Biomed. Opt.*, vol. 8, no. 2, pp. 303–307, Apr. 2003.
- [52] E. Pickwell *et al.*, "A comparison of terahertz pulsed imaging with transmission microradiography for depth measurement of enamel demineralisation *in vitro*," *Caries Res.*, vol. 41, no. 1, pp. 49–55, Dec. 2007.
- [53] C. B. Reid, G. Reese, A. P. Gibson, and V. P. Wallace, "Terahertz time-domain spectroscopy of human blood," *IEEE J. Biomed. Health Informat.*, vol. 17, no. 4, pp. 774–778, Apr. 2013.
- [54] K. Jeong *et al.*, "Characterization of blood using terahertz waves," *J. Biomed. Opt.*, vol. 18, no. 10, Oct. 2013, Art no 107008.
- [55] C. B. Reid, G. Reese, A. P. Gibson, and V. P. Wallace, "Terahertz time-domain spectroscopy of human blood," *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol. 3, no. 4, pp. 363–367, Jul. 2013.
- [56] Z. D. Taylor *et al.*, "Reflective terahertz imaging of porcine skin burns," *Opt. Lett.*, vol. 33, no. 11, pp. 1258–1260, Jun. 2008.
- [57] M. H. Arbab, T. C. Dickey, D. P. Winebrenner, A. Chen, M. B. Klein, and P. D. Mourad, "Terahertz reflectometry of burn wounds in a rat model," *Biomed. Opt. Express*, vol. 2, no. 8, pp. 2339–2347, Aug. 2011.
- [58] P. Tewari *et al.*, "In vivo terahertz imaging of rat skin burns," *J. Biomed. Opt.*, vol. 17, no. 4, p. 040503, Apr. 2012.
- [59] W. E. Baughman, H. Yokus, S. Balci, D. S. Wilbert, P. Kung, and S. M. Kim, "Observation of hydrofluoric acid burns on osseous tissues by means of terahertz spectroscopic imaging," *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, vol. 3, no. 4, pp. 387–394, Jul. 2013.
- [60] K. I. Zaytsev, K. G. Kudrin, V. E. Karasik, I. V. Reshetov, and S. O. Yurchenko, "In vivo terahertz spectroscopy of pigmentary skin nevi: Pilot study of non-invasive early diagnosis of dysplasia," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 106, no. 5, Feb. 2015, Art no 053702.
- [61] K. I. Zaytsev *et al.*, "In vivo spectroscopy of healthy skin and pathology in terahertz frequency range," in *J. Phys.: Conf. Series*, Jan. 2015, vol. 584, no. 1, p. 012023.
- [62] R. L. Barnhill, J. A. Fine, G. C. Roush, and M. Berwick, "Predicting five-year outcome for patients with cutaneous melanoma in a population-based study," *Cancer*, vol. 78, no. 3, pp. 427–432, Jan. 1996.
- [63] M. Arumi-Uria, N. S. McNutt, and B. Finnerty, "Grading of atypia in nevi: Correlation with melanoma risk," *Modern Pathol.*, vol. 16, no. 8, pp. 764–771, Aug. 2003.
- [64] K. I. Zaytsev, K. P. Tsapenko, P. A. Nosov, and S. O. Yurchenko, "An impact of multiple wave reflections in a flat sample on material parameter reconstruction using THz pulsed spectroscopy," in *J. Phys.: Conf. Series*, Jan. 2005, vol. 584, no. 1, Art no 012005.
- [65] M. Kruger, S. Funkner, E. Bründermann, and M. Havenith, "Uncertainty and ambiguity in terahertz parameter extraction and data analysis," *J. Infrared, Millim., THz Waves*, vol. 32, no. 5, pp. 699–715, May 2011.
- [66] E. Pickwell, B. E. Cole, A. J. Fitzgerald, V. P. Wallace, and M. Pepper, "Simulation of terahertz pulse propagation in biological systems," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, no. 12, pp. 2190–2192, Mar. 2004.
- [67] D. Grischkowsky, S. Keiding, M. van Exter, and C. Fattinger, "Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors," *J. Opt. Soc. Amer. B*, vol. 7, no. 10, pp. 2006–2015, Oct. 1990.
- [68] M. Naftaly and R. Dudley, "Methodologies for determining the dynamic ranges and signal-to-noise ratios of terahertz time-domain spectrometers," *Opt. Lett.*, vol. 34, no. 8, pp. 1213–1215, Apr. 2009.
- [69] K. I. Zaytsev *et al.*, "An approach for automatic construction of the wavelet-domain de-noising procedure for THz pulsed spectroscopy signal processing," in *J. Phys.: Conf. Series*, Mar. 2014, vol. 486, no. 1, Art no 012034.
- [70] N. V. Chernomyrdin *et al.*, "Wavelet-domain de-noising technique for THz pulsed spectroscopy," *Proc. SPIE*, vol. 9216, Sep. 2014, Art no 921611.
- [71] K. I. Zaytsev *et al.*, "Wavelet-domain de-noising of optical coherent tomography data for biomedical applications," in *J. Phys.: Conf. Series*, Jan. 2015, vol. 584, no. 1, Art no. 012013.
- [72] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2007.
- [73] N. Vieweg *et al.*, "Terahertz-time domain spectrometer with 90 dB peak dynamic range," *J. Infrared, Millim., THz Waves*, vol. 35, no. 10, pp. 823–832, Oct. 2014.

- [74] E. Pickwell, B. E. Cole, A. J. Fitzgerald, M. Pepper, and V. P. Wallace, "In vivo study of human skin using pulsed terahertz radiation," *Phys. Medicine Biol.*, vol. 49, no. 9, p. 1595, May 2004.
- [75] J.-Y. Chen, J. R. Knab, S. Ye, Y. He, and A. G. Markelz, "Terahertz dielectric assay of solution phase protein binding," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no. 24, p. 243901, Jun. 2007.
- [76] L. Thrane, R. H. Jacobsen, P. Uhd Jepsen, and S. R. Kieding, "THz reflection spectroscopy of liquid water," *Chemical Phys. Lett.*, vol. 240, no. 4, pp. 330–333, Jun. 1995.
- [77] E. S. Zhukova *et al.*, "Vibrational states of a water molecule in a nanocavity of beryl crystal lattice," *J. Chemical Phys.*, vol. 140, no. 22, p. 224317, Jun. 2014.



**Nikita V. Chernomyrding** is currently working toward the master's degree from Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

He is also an engineer with Terahertz Technology Laboratory (URL: <http://teratech.ru/>) at the Research and Educational Center "Photonics and Infrared Technology" at BMSTU. His research interests include THz pulsed spectroscopy, biomedical applications of THz technology, and digital signal processing.



**Kirill I. Zaytsev** was born in 1989. He is currently working toward the Ph.D. degree from Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, Russia.

He is also an associate researcher of Terahertz Technology Laboratory (URL: <http://teratech.ru/>) at Research and Educational Center "Photonics and Infrared Technology" at BMSTU. His research interests include THz technology, THz pulsed spectroscopy, inverse ill-posed problems in optics, and photonic crystals.



**Stanislav O. Yurchenko** was born in 1985. He received the Ph.D. degree in physical and mathematical sciences from from the Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia, in 2009.

He is currently an associate Professor at Bauman Moscow State Technical University (BMSTU), Moscow, Russia, and a head of the Terahertz Technology Laboratory (URL: <http://teratech.ru/>) at Research and Educational Center "Photonics and Infrared Technology" at BMSTU. His research interests include condensed matter physics, physics

of phase transitions, photonics.



**Arseniy A. Gvdush** is currently working toward the master's degree from Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.

He is also an engineer with Terahertz Technology Laboratory (URL: <http://teratech.ru/>) at the Research and Educational Center "Photonics and Infrared Technology" at BMSTU. His research interests include THz pulsed spectroscopy, inverse problems in optics, and digital signal processing.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



# Lidar Lite v3 Operation Manual and Technical Specifications

## Table of Contents

### Laser Safety

#### ⚠ WARNING

This device requires no regular maintenance. In the event that the device becomes damaged or is inoperable, repair or service must be handled by authorized, factory-trained technicians only. Attempting to repair or service the unit on your own can result in direct exposure to laser radiation and the risk of permanent eye damage. For repair or service, contact your dealer or Garmin® for more information. This device should not be modified or operated without its housing or optics. Operating this device without a housing and optics, or operating this device with modified housing or optics that expose the laser source, may result in direct exposure to laser radiation and the risk of permanent eye damage. Removal or modification of the diffuser in front of the laser optic may result in the risk of permanent eye damage.

Use of controls or adjustments or performance of procedures other than those specified in this documentation may result in hazardous radiation exposure. Garmin is not responsible for injuries caused through the improper use or operation of this product.

#### ⚠ CAUTION

This device emits laser radiation. This Laser Product is designated Class 1 during all procedures of operation. This designation means that the laser is safe to look at with the unaided eye, however it is advisable to avoid looking into the beam when operating the device and to turn off the module when not in use.

### Documentation Revision Information

Rev	Date	Changes
0A	09/2016	Initial release

- Lidar Lite v3 Operation Manual and Technical Specifications ..... 1**
- Laser Safety ..... 1
- Documentation Revision Information.....1
- Specifications ..... 2**
- Physical ..... 2
- Electrical ..... 2
- Performance ..... 2
- Interface..... 2
- Laser..... 2
- Connections ..... 2**
- Wiring Harness ..... 2
- Connector ..... 2
  - Connector Port Identification ..... 2
- I2C Connection Diagrams ..... 3
  - Standard I2C Wiring ..... 3
  - Standard Arduino I2C Wiring ..... 3
  - PWM Wiring..... 3
  - PWM Arduino Wiring..... 3
- Operational Information ..... 4**
- Technology ..... 4
- Theory of Operation ..... 4
- Interface..... 4
  - Initialization ..... 4
  - Power Enable Pin ..... 4
  - I2C Interface ..... 4
  - Mode Control Pin ..... 4
  - Settings..... 4
- I2C Protocol Information ..... 6**
- I2C Protocol Operation ..... 7
- Register Definitions ..... 7
  - Control Register List ..... 7
  - Detailed Control Register Definitions..... 8
- Frequently Asked Questions ..... 12**
- Must the device run on 5 Vdc? Can it run on 3.3 Vdc instead?..... 12
- What is the spread of the laser beam? ..... 12
- How do distance, target size, aspect, and reflectivity effect returned signal strength?..... 12
- How does the device work with reflective surfaces? ..... 12
  - Diffuse Reflective Surfaces..... 12
  - Specular Surfaces ..... 12
- How does liquid affect the signal? ..... 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Specifications

## Connections

### Physical

Specification	Measurement
Size (LxWxH)	20 × 48 × 40 mm (0.8 × 1.9 × 1.6 in.)
Weight	22 g (0.78 oz.)
Operating temperature	-20 to 60°C (-4 to 140°F)

### Electrical

Specification	Measurement
Power	5 Vdc nominal 4.5 Vdc min., 5.5 Vdc max.
Current consumption	105 mA idle 135 mA continuous operation

### Performance

Specification	Measurement
Range (70% reflective target)	40 m (131 ft)
Resolution	+/- 1 cm (0.4 in.)
Accuracy < 5 m	±2.5 cm (1 in.) typical*
Accuracy ≥ 5 m	±10 cm (3.9 in.) typical Mean ±1% of distance maximum Ripple ±1% of distance maximum
Update rate (70% Reflective Target)	270 Hz typical 650 Hz fast mode** >1000 Hz short range only
Repetition rate	~50 Hz default 500 Hz max

\*Nonlinearity present below 1 m (39.4 in.)

\*\*Reduced sensitivity

### Interface

Specification	Measurement
User interface	I2C PWM External trigger
I2C interface	Fast-mode (400 kbit/s) Default 7-bit address 0x62 Internal register access & control
PWM interface	External trigger input PWM output proportional to distance at 10 µs/cm

### Laser

Specification	Measurement
Wavelength	905 nm (nominal)
Total laser power (peak)	1.3 W
Mode of operation	Pulsed (256 pulse max. pulse train)
Pulse width	0.5 µs (50% duty Cycle)
Pulse train repetition frequency	10-20 KHz nominal
Energy per pulse	<280 nJ
Beam diameter at laser aperture	12 × 2 mm (0.47 × 0.08 in.)
Divergence	8 mRadian

### Wiring Harness



Wire Color	Function
Red	5 Vdc (+)
Orange	Power enable (internal pull-up)
Yellow	Mode control
Green	I2C SCL
Blue	I2C SDA
Black	Ground (-)

There are two basic configurations for this device:

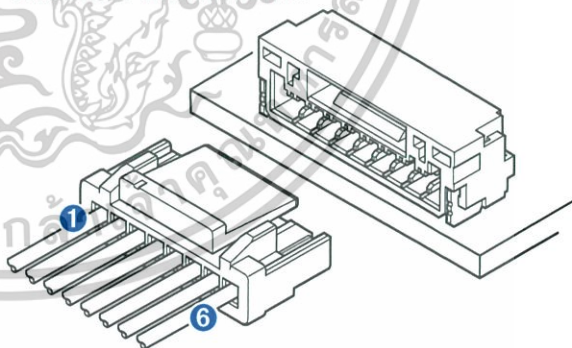
- **I2C (Inter-Integrated Circuit)**—a serial computer bus used to communicate between this device and a microcontroller, such as an Arduino board ("I2C Interface", page 4).
- **PWM (Pulse Width Modulation)**—a bi-directional signal transfer method that triggers acquisitions and returns distance measurements using the mode-control pin ("Mode Control Pin", page 4).

### Connector

You can create your own wiring harness if needed for your project or application. The needed components are readily available from many suppliers.

Part	Description	Manufacturer	Part Number
Connector housing	6-position, rectangular housing, latch-lock connector receptacle with a 1.25 mm (0.049 in.) pitch.	JST	GHR-06V-S
Connector terminal	26-30 AWG crimp socket connector terminal (up to 6)	JST	SSHL-002T-P0.2
Wire	UL 1061 26 AWG stranded copper	N/A	N/A

### Connector Port Identification

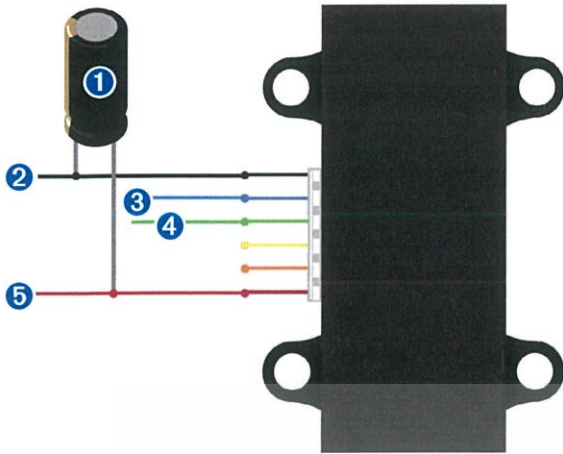


Item	Pin	Function
1	1	5 Vdc (+)
	2	Power enable (internal pull-up)
	3	Mode control
	4	I2C SCL
	5	I2C SDA
6	6	Ground (-)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

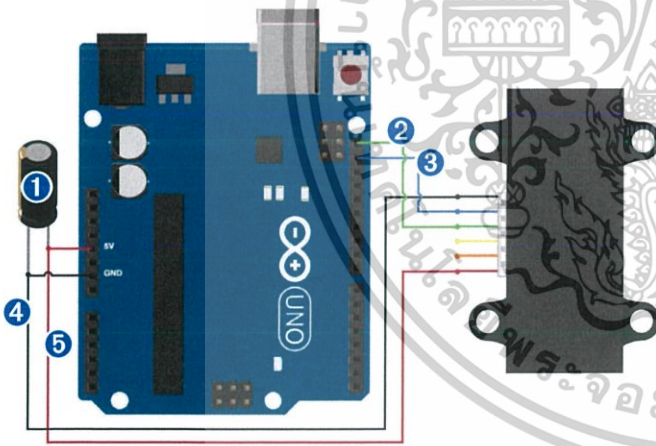
## I2C Connection Diagrams

### Standard I2C Wiring



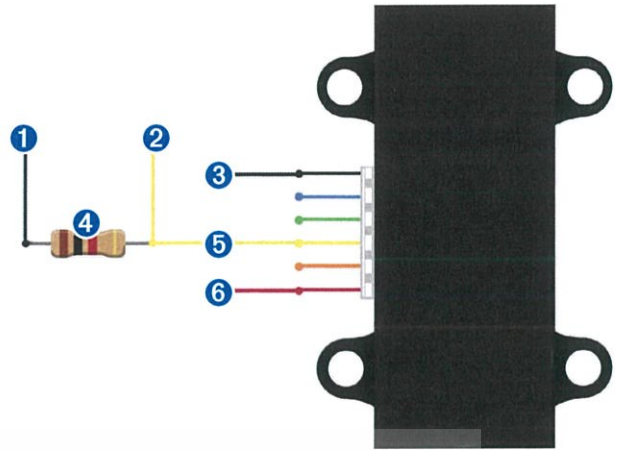
Item	Description	Notes
1	680µF electrolytic capacitor	You must observe the correct polarity when installing the capacitor.
2	Power ground (-) connection	Black wire
3	I2C SDA connection	Blue wire
4	I2C SCA connection	Green wire
5	5 Vdc power (+) connection	Red wire The sensor operates at 4.75 through 5.5 Vdc, with a max. of 6 Vdc.

### Standard Arduino I2C Wiring



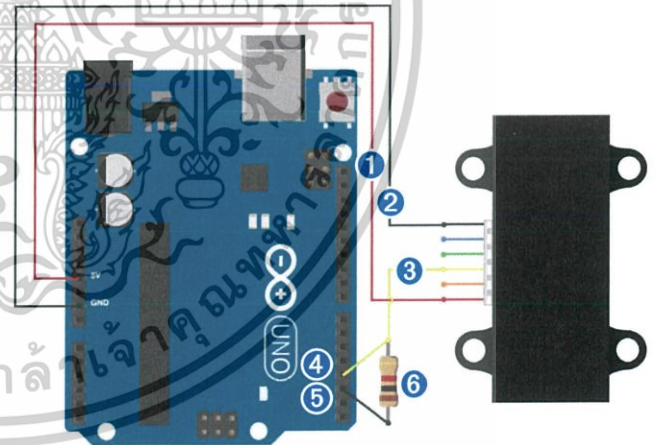
Item	Description	Notes
1	680µF electrolytic capacitor	You must observe the correct polarity when installing the capacitor.
2	I2C SCA connection	Green wire
3	I2C SDA connection	Blue wire
4	Power ground (-) connection	Black wire
5	5 Vdc power (+) connection	Red wire The sensor operates at 4.75 through 5.5 Vdc, with a max. of 6 Vdc.

## PWM Wiring



Item	Description	Notes
1	Trigger pin on microcontroller	Connect the other side of the resistor to the trigger pin on your microcontroller.
2	Monitor pin on microcontroller	Connect one side of the resistor to the mode-control connection on the device, and to a monitoring pin on your microcontroller.
3	Power ground (-) connection	Black Wire
4	1kΩ resistor	
5	Mode-control connection	Yellow wire
6	5 Vdc power (+) connection	Red wire The sensor operates at 4.75 through 5.5 Vdc, with a max. of 6 Vdc.

### PWM Arduino Wiring



Item	Description	Notes
1	5 Vdc power (+) connection	Red wire The sensor operates at 4.75 through 5.5 Vdc, with a max. of 6 Vdc.
2	Power ground (-) connection	Black Wire
3	Mode-control connection	Yellow wire
4	Monitor pin on microcontroller	Connect one side of the resistor to the mode-control connection on the device, and to a monitoring pin on your microcontroller.
5	Trigger pin on microcontroller	Connect the other side of the resistor to the trigger pin on your microcontroller.
6	1kΩ resistor	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Operational Information

## Technology

This device measures distance by calculating the time delay between the transmission of a Near-Infrared laser signal and its reception after reflecting off of a target. This translates into distance using the known speed of light. Our unique signal processing approach transmits a coded signature and looks for that signature in the return, which allows for highly effective detection with eye-safe laser power levels. Proprietary signal processing techniques are used to achieve high sensitivity, speed, and accuracy in a small, low-power, and low-cost system

## Theory of Operation

To take a measurement, this device first performs a receiver bias correction routine, correcting for changing ambient light levels and allowing maximum sensitivity.

Then the device sends a reference signal directly from the transmitter to the receiver. It stores the transmit signature, sets the time delay for "zero" distance, and recalculates this delay periodically after several measurements.

Next, the device initiates a measurement by performing a series of acquisitions. Each acquisition is a transmission of the main laser signal while recording the return signal at the receiver. If there is a signal match, the result is stored in memory as a correlation record. The next acquisition is summed with the previous result. When an object at a certain distance reflects the laser signal back to the device, these repeated acquisitions cause a peak to emerge, out of the noise, at the corresponding distance location in the correlation record.

The device integrates acquisitions until the signal peak in the correlation record reaches a maximum value. If the returned signal is not strong enough for this to occur, the device stops at a predetermined maximum acquisition count.

Signal strength is calculated from the magnitude of the signal record peak and a valid signal threshold is calculated from the noise floor. If the peak is above this threshold the measurement is considered valid and the device will calculate the distance, otherwise it will report 1 cm. When beginning the next measurement, the device clears the signal record and starts the sequence again.

## Interface

### Initialization

On power-up or reset, the device performs a self-test sequence and initializes all registers with default values. After roughly 22 ms distance measurements can be taken with the I2C interface or the Mode Control Pin.

### Power Enable Pin

The enable pin uses an internal pullup resistor, and can be driven low to shut off power to the device.

### I2C Interface

This device has a 2-wire, I2C-compatible serial interface (refer to I2C-Bus Specification, Version 2.1, January 2000, available from Philips Semiconductor). It can be connected to an I2C bus as a slave device, under the control of an I2C master device. It supports 400 kHz Fast Mode data transfer.

The I2C bus operates internally at 3.3 Vdc. An internal level shifter allows the bus to run at a maximum of 5 Vdc. Internal 3k ohm pullup resistors ensure this functionality and allow for a simple connection to the I2C host.

The device has a 7-bit slave address with a default value of 0x62. The effective 8-bit I2C address is 0xC4 write and 0xC5 read. The device will not respond to a general call. Support is not provided for 10-bit addressing.

Setting the most significant bit of the I2C address byte to one triggers automatic incrementing of the register address with successive reads or writes within an I2C block transfer. This is commonly used to read the two bytes of a 16-bit value within one transfer and is used in the following example.

The simplest method of obtaining measurement results from the I2C interface is as follows:

- 1 Write 0x04 to register 0x00.
- 2 Read register 0x01. Repeat until bit 0 (LSB) goes low.
- 3 Read two bytes from 0x8f (High byte 0x0f then low byte 0x10) to obtain the 16-bit measured distance in centimeters.

A list of all available control registers is available on [page 7](#).

For more information about the I2C protocol, see [I2C Protocol Operation \(page 7\)](#).

### Mode Control Pin

The mode control pin provides a means to trigger acquisitions and return the measured distance via Pulse Width Modulation (PWM) without having to use the I2C interface.

The idle state of the mode control pin is high impedance (High-Z). Pulling the mode control pin low will trigger a single measurement, and the device will respond by driving the line high with a pulse width proportional to the measured distance at 10  $\mu$ s/cm. A 1k ohm termination resistance is required to prevent bus contention.

The device drives the mode control pin high at 3.3 Vdc. Diode isolation allows the pin to tolerate a maximum of 5 Vdc.

As shown in the diagram [PWM Arduino Wiring \(page 3\)](#), a simple triggering method uses a 1k ohm resistor in series with a host output pin to pull the mode control pin low to initiate a measurement, and a host input pin connected directly to monitor the low-to-high output pulse width.

If the mode control pin is held low, the acquisition process will repeat indefinitely, producing a variable frequency output proportional to distance.

The mode control pin behavior can be modified with the ACQ\_CONFIG\_REG (0x04) I2C register as detailed in [0x04 \(page 8\)](#).

### Settings

The device can be configured with alternate parameters for the distance measurement algorithm. This can be used to customize performance by enabling configurations that allow choosing between speed, range and sensitivity. Other useful features are also detailed in this section. See the full register map ([Control Register List \(page 7\)](#)) for additional settings not mentioned here.

### Receiver Bias Correction

Address	Name	Description	Initial Value
0x00	ACQ_COMMAND	Device command	--

- Write 0x00: Reset device, all registers return to default values
- Write 0x03: Take distance measurement without receiver bias correction
- Write 0x04: Take distance measurement with receiver bias correction

Faster distance measurements can be performed by omitting the receiver bias correction routine. Measurement accuracy and sensitivity are adversely affected if conditions change (e.g. target distance, device temperature, and optical noise). To achieve good performance at high measurement rates receiver bias correction must be performed periodically. The recommended method is to do so at the beginning of every 100 sequential measurement commands.

### Maximum Acquisition Count

Address	Name	Description	Initial Value
0x02	SIG_COUNT_VAL	Maximum acquisition count	0x80

The maximum acquisition count limits the number of times the device will integrate acquisitions to find a correlation record peak (from a returned signal), which occurs at long range or with low target reflectivity. This controls the minimum measurement rate and maximum range. The unit-less relationship is roughly as follows:  $rate = 1/n$  and  $range = n^{1/4}$ , where  $n$  is the number of acquisitions. [เรื่องถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้](#)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่หรือใช้เพื่อการค้าโดยไม่ได้รับอนุญาต

### Measurement Quick Termination Detection

Address	Name	Description	Initial Value
0x04	ACQ_CONFIG_REG	Acquisition mode control	0x08

You can enable quick-termination detection by clearing bit 3 in this register. The device will terminate a distance measurement early if it anticipates that the signal peak in the correlation record will reach maximum value. This allows for faster and slightly less accurate operation at strong signal strengths without sacrificing long range performance.

### Detection Sensitivity

Address	Name	Description	Initial Value
0x1c	THRESHOLD_BYPASS	Peak detection threshold bypass	0x00

The default valid measurement detection algorithm is based on the peak value, signal strength, and noise in the correlation record. This can be overridden to become a simple threshold criterion by setting a non-zero value. Recommended non-default values are 0x20 for higher sensitivity with more frequent erroneous measurements, and 0x60 for reduced sensitivity and fewer erroneous measurements.

### Burst Measurements and Free Running Mode

Address	Name	Description	Initial Value
0x04	ACQ_CONFIG_REG	Acquisition mode control	0x08
0x11	OUTER_LOOP_COUNT	Burst measurement count control	0x00
0x45	MEASURE_DELAY	Delay between automatic measurements	0x14

The device can be configured to take multiple measurements for each measurement command or repeat indefinitely for free running mode.

OUTER\_LOOP\_COUNT (0x11) controls the number of times the device will retrigger itself. Values 0x00 or 0x01 result in the default one measurement per command. Values 0x02 to 0xfe directly set the repetition count. Value 0xff will enable free running mode after the host device sends an initial measurement command.

The default delay between automatic measurements corresponds to a 10 Hz repetition rate. Set bit 5 in ACQ\_CONFIG\_REG (0x04) to use the delay value in MEASURE\_DELAY (0x45) instead. A delay value of 0x14 roughly corresponds to 100Hz.

The delay is timed from the completion of each measurement. The means that measurement duration, which varies with returned signal strength, will affect the repetition rate. At low repetition rates (high delay) this effect is small, but for lower delay values it is recommended to limit the maximum acquisition count if consistent frequency is desired.

### Velocity

Address	Name	Description	Initial Value
0x09	VELOCITY	Velocity measurement output	--

The velocity measurement is the difference between the current measurement and the previous one, resulting in a signed (2's complement) 8-bit number in cm. Positive velocity is away from the device. This can be combined with free running mode for a constant measurement frequency. The default free running frequency of 10 Hz therefore results in a velocity measurement in .1 m/s.

### Configurable I2C Address

Address	Name	Description	Initial Value
0x16	UNIT_ID_HIGH	Serial number high byte	Unique
0x17	UNIT_ID_LOW	Serial number low byte	Unique
0x18	I2C_ID_HIGH	Write serial number high byte for I2C address unlock	--
0x19	I2C_ID_LOW	Write serial number low byte for I2C address unlock	--
0x1a	I2C_SEC_ADDR	Write new I2C address after unlock	--
0x1e	I2C_CONFIG	Default address response control	0x00

The I2C address can be changed from its default value. Available addresses are 7-bit values with a '0' in the least significant bit (even hexadecimal numbers).

To change the I2C address, the unique serial number of the unit must be read then written back to the device before setting the new address. The process is as follows:

- 1 Read the two byte serial number from 0x96 (High byte 0x16 and low byte 0x17).
- 2 Write the serial number high byte to 0x18.
- 3 Write the serial number low byte to 0x19.
- 4 Write the desired new I2C address to 0x1a.
- 5 Write 0x08 to 0x1e to disable the default address.

This can be used to run multiple devices on a single bus, by enabling one, changing its address, then enabling the next device and repeating the process.

The I2C address will be restored to default after a power cycle.

### Power Control

Address	Name	Description	Initial Value
0x65	POWER_CONTROL	Power state control	0x80

**NOTE:** The most effective way to control power usage is to utilize the enable pin to deactivate the device when not in use.

Another option is to set bit 0 in this register which disables the receiver circuit, saving roughly 40mA. After being re-enabled, the receiver circuit stabilizes by the time a measurement can be performed. Setting bit 2 puts the device in sleep mode until the next I2C transaction, saving 20mA. **Since the wake-up time is only around 2 m/s shorter than the full power-on time, and both will reset all registers, it is recommended to use the enable pin instead.**

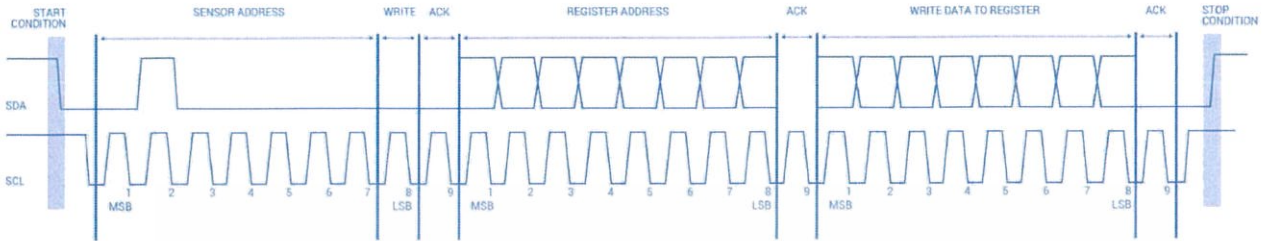
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## I2C Protocol Information

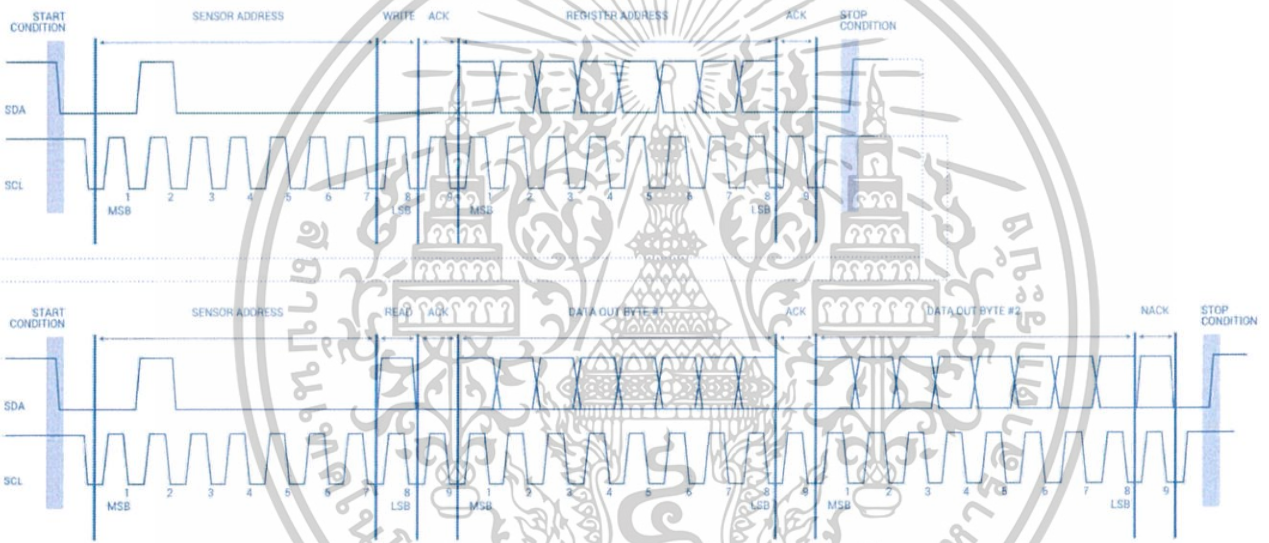
This device has a 2-wire, I2C-compatible serial interface (refer to I2C-Bus Specification, Version 2.1, January 2000, available from Philips Semiconductor). It can be connected to an I2C bus as a slave device, under the control of an I2C master device. It supports standard 400 kHz data transfer mode. Support is not provided for 10-bit addressing.

The Sensor module has a 7-bit slave address with a default value of 0x62 in hexadecimal notation. The effective 8 bit I2C address is: 0xC4 write, 0xC5 read. The device will not presently respond to a general call.

### Write



### Read



### Notes:

- This device does not work with repeated START conditions. It must first receive a STOP condition before a new START condition.
- The ACK and NACK items are responses from the master device to the slave device.
- The last NACK in the read is technically optional, but the formal I2C protocol states that the master shall not acknowledge the last byte.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## I2C Protocol Operation

The I2C serial bus protocol operates as follows:

- 1 The master initiates data transfer by establishing a start condition, which is when a high-to-low transition on the SDA line occurs while SCL is high. The following byte is the address byte, which consists of the 7-bit slave address followed by a read/write bit with a zero state indicating a write request. A write operation is used as the initial stage of both read and write transfers. If the slave address corresponds to the module's address the unit responds by pulling SDA low during the ninth clock pulse (this is termed the acknowledge bit). At this stage, all other devices on the bus remain idle while the selected device waits for data to be written to or read from its shift register.
- 2 Data is transmitted over the serial bus in sequences of nine clock pulses (eight data bits followed by an acknowledge bit). The transitions on the SDA line must occur during the low period of SCL and remain stable during the high period of SCL.
- 3 An 8 bit data byte following the address loads the I2C control register with the address of the first control register to be read along with flags indicating if auto increment of the addressed control register is desired with successive reads or writes; and if access to the internal micro or external correlation processor register space is requested. Bit locations 5:0 contain the control register address while bit 7 enables the automatic incrementing of control register with successive data blocks. Bit position 6 selects correlation memory external to the microcontroller if set. (Presently an advanced feature)
- 4 If a read operation is requested, a stop bit is issued by the master at the completion of the first data frame followed by the initiation of a new start condition, slave address with the read bit set (one state). The new address byte is followed by the reading of one or more data bytes succession. After the slave has acknowledged receipt of a valid address, data read operations proceed by the master releasing the I2C data line SDA with continuing clocking of SCL. At the completion of the receipt of a data byte, the master must strobe the acknowledge bit before continuing the read cycle.
- 5 For a write operation to proceed, Step 3 is followed by one or more 8 bit data blocks with acknowledges provided by the slave at the completion of each successful transfer. At the completion of the transfer cycle a stop condition is issued by the master terminating operation.

## Register Definitions

### Control Register List

Address	R/W	Name	Description	Initial Value	Details
0x00	W	ACQ_COMMAND	Device command	--	page 8
0x01	R	STATUS	System status	--	page 8
0x02	R/W	SIG_COUNT_VAL	Maximum acquisition count	0x80	page 8
0x04	R/W	ACQ_CONFIG_REG	Acquisition mode control	0x08	page 8
0x09	R	VELOCITY	Velocity measurement output	--	page 8
0x0c	R	PEAK_CORR	Peak value in correlation record	--	page 8
0x0d	R	NOISE_PEAK	Correlation record noise floor	--	page 8
0x0e	R	SIGNAL_STRENGTH	Received signal strength	--	page 9
0x0f	R	FULL_DELAY_HIGH	Distance measurement high byte	--	page 9
0x10	R	FULL_DELAY_LOW	Distance measurement low byte	--	page 9
0x11	R/W	OUTER_LOOP_COUNT	Burst measurement count control	0x01	page 9
0x12	R/W	REF_COUNT_VAL	Reference acquisition count	0x05	page 9
0x14	R	LAST_DELAY_HIGH	Previous distance measurement high byte	--	page 9
0x15	R	LAST_DELAY_LOW	Previous distance measurement low byte	--	page 9
0x16	R	UNIT_ID_HIGH	Serial number high byte	Unique	page 9
0x17	R	UNIT_ID_LOW	Serial number low byte	Unique	page 9
0x18	W	I2C_ID_HIGH	Write serial number high byte for I2C address unlock	--	page 9
0x19	W	I2C_ID_LOW	Write serial number low byte for I2C address unlock	--	page 9
0x1a	R/W	I2C_SEC_ADDR	Write new I2C address after unlock	--	page 9
0x1c	R/W	THRESHOLD_BYPASS	Peak detection threshold bypass	0x00	page 9
0x1e	R/W	I2C_CONFIG	Default address response control	0x00	page 9
0x40	R/W	COMMAND	State command	--	page 10
0x45	R/W	MEASURE_DELAY	Delay between automatic measurements	0x14	page 10
0x4c	R	PEAK_BCK	Second largest peak value in correlation record	--	page 10
0x52	R	CORR_DATA	Correlation record data low byte	--	page 10
0x53	R	CORR_DATA_SIGN	Correlation record data high byte	--	page 10
0x5d	R/W	ACQ_SETTINGS	Correlation record memory bank select	--	page 10
0x65	R/W	POWER_CONTROL	Power state control	0x80	page 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Detailed Control Register Definitions

NOTE: Unless otherwise noted, all registers contain one byte and are read and write.

### 0x00

R/W	Name	Description	Initial Value
W	ACQ_COMMAND	Device command	--

Bit	Function
7:0	Write 0x00: Reset FPGA, all registers return to default values Write 0x03: Take distance measurement without receiver bias correction Write 0x04: Take distance measurement with receiver bias correction

### 0x01

R/W	Name	Description	Initial Value
R	STATUS	System status	--

Bit	Function
6	Process Error Flag 0: No error detected 1: System error detected during measurement
5	Health Flag 0: Error detected 1: Reference and receiver bias are operational
4	Secondary Return Flag 0: No secondary return detected 1: Secondary return detected in correlation record
3	Invalid Signal Flag 0: Peak detected 1: Peak not detected in correlation record, measurement is invalid
2	Signal Overflow Flag 0: Signal data has not overflowed 1: Signal data in correlation record has reached the maximum value before overflow. This occurs with a strong received signal strength
1	Reference Overflow Flag 0: Reference data has not overflowed 1: Reference data in correlation record has reached the maximum value before overflow. This occurs periodically
0	Busy Flag 0: Device is ready for new command 1: Device is busy taking a measurement

### 0x02

R/W	Name	Description	Initial Value
R/W	SIG_COUNT_VAL	Maximum acquisition count	0x80

Bit	Function
7:0	Maximum number of acquisitions during measurement

### 0x04

R/W	Name	Description	Initial Value
R/W	ACQ_CONFIG_REG	Acquisition mode control	0x08

Bit	Function
6	0: Enable reference process during measurement 1: Disable reference process during measurement
5	0: Use default delay for burst and free running mode 1: Use delay from MEASURE_DELAY (0x45) for burst and free running mode
4	0: Enable reference filter, averages 8 reference measurements for increased consistency 1: Disable reference filter
3	0: Enable measurement quick termination. Device will terminate distance measurement early if it anticipates that the signal peak in the correlation record will reach maximum value. 1: Disable measurement quick termination.
2	0: Use default reference acquisition count of 5. 1: Use reference acquisition count from REF_COUNT_VAL (0x12).
1:0	Mode Select Pin Function Control 00: Default PWM mode. Pull pin low to trigger measurement, device will respond with an active high output with a duration of 10us/cm. 01: Status output mode. Device will drive pin active high while busy. Can be used to interrupt host device. 10: Fixed delay PWM mode. Pulling pin low will not trigger a measurement. 11: Oscillator output mode. Nominal 31.25 kHz output. The accuracy of the silicon oscillator in the device is generally within 1% of nominal. This affects distance measurements proportionally and can be measured to apply a compensation factor.

### 0x09

R/W	Name	Description	Initial Value
R	VELOCITY	Velocity measurement output	--

Bit	Function
7:0	Velocity measurement output. The difference between the current measurement and the previous one, signed (2's complement) value in centimeters.

### 0x0c

R/W	Name	Description	Initial Value
R	PEAK_CORR	Peak value in correlation record	--

Bit	Function
7:0	The value of the highest peak in the correlation record.

### 0x0d

R/W	Name	Description	Initial Value
R	NOISE_PEAK	Correlation record noise floor	--

Bit	Function
7:0	A measure of the noise in the correlation record. Will be slightly above the third highest peak.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**0x0e**

R/W	Name	Description	Initial Value
R	SIGNAL_STRENGTH	Received signal strength	--

Bit	Function
7:0	Received signal strength calculated from the value of the highest peak in the correlation record and how many acquisitions were performed.

**0x0f**

R/W	Name	Description	Initial Value
R	FULL_DELAY_HIGH	Distance measurement high byte	--

Bit	Function
7:0	Distance measurement result in centimeters, high byte.

**0x10**

R/W	Name	Description	Initial Value
R	FULL_DELAY_LOW	Distance measurement low byte	--

Bit	Function
7:0	Distance measurement result in centimeters, low byte.

**0x11**

R/W	Name	Description	Initial Value
R/W	OUTER_LOOP_COUNT	Burst measurement count control	0x01

Bit	Function
7:0	0x00-0x01: One measurement per distance measurement command. 0x02-0xfe: Repetition count per distance measurement command. 0xff: Indefinite repetitions after initial distance measurement command. See ACQ_CONFIG_REG (0x04) and MEASURE_DELAY (0x45) for non-default automatic repetition delays.

**0x12**

R/W	Name	Description	Initial Value
R/W	REF_COUNT_VAL	Reference acquisition count	0x05

Bit	Function
7:0	Non-default number of reference acquisitions during measurement. ACQ_CONFIG_REG (0x04) bit 2 must be set.

**0x14**

R/W	Name	Description	Initial Value
R	LAST_DELAY_HIGH	Previous distance measurement high byte	--

Bit	Function
7:0	Previous distance measurement result in centimeters, high byte.

**0x15**

R/W	Name	Description	Initial Value
R	LAST_DELAY_LOW	Previous distance measurement low byte	--

Bit	Function
7:0	Previous distance measurement result in centimeters, low byte.

**0x16**

R/W	Name	Description	Initial Value
R	UNIT_ID_HIGH	Serial number high byte	Unique

Bit	Function
7:0	Unique serial number of device, high byte.

**0x17**

R/W	Name	Description	Initial Value
R	UNIT_ID_LOW	Serial number low byte	Unique

Bit	Function
7:0	Unique serial number of device, high byte.

**0x18**

R/W	Name	Description	Initial Value
W	I2C_ID_HIGH	Write serial number high byte for I2C address unlock	--

Bit	Function
7:0	Write the value in UNIT_ID_HIGH (0x16) here as part of enabling a non-default I2C address. See I2C_ID_LOW (0x19) and I2C_SEC_ADDR (0x1a).

**0x19**

R/W	Name	Description	Initial Value
W	I2C_ID_LOW	Write serial number low byte for I2C address unlock	--

Bit	Function
7:0	Write the value in UNIT_ID_LOW (0x17) here as part of enabling a non-default I2C address. See I2C_ID_HIGH (0x18) and I2C_SEC_ADDR (0x1a).

**0x1a**

R/W	Name	Description	Initial Value
R/W	I2C_SEC_ADDR	Write new I2C address after unlock	--

Bit	Function
7:0	Non-default I2C address. Available addresses are 7-bit values with a '0' in the least significant bit (even hexadecimal numbers). I2C_ID_HIGH (0x18) and I2C_ID_LOW (0x19) must have the correct value for the device to respond to the non-default I2C address.

**0x1c**

R/W	Name	Description	Initial Value
R/W	THRESHOLD_BYPASS	Peak detection threshold bypass	0x00

Bit	Function
7:0	0x00: Use default valid measurement detection algorithm based on the peak value, signal strength, and noise in the correlation record. 0x01-0xff: Set simple threshold for valid measurement detection. Values 0x20-0x60 generally perform well.

**0x1e**

R/W	Name	Description	Initial Value
R/W	I2C_CONFIG	Default address response control	0x00

Bit	Function
-----	----------

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3 0: Device will respond to I2C address 0x62. Device will also respond to non-default address if configured successfully. See I2C\_ID\_HIGH (0x18), I2C\_ID\_LOW (0x19), and I2C\_SEC\_ADDR (0x1a).  
1: Device will only respond to non-default I2C address. It is recommended to configure the non-default address first, then use the non-default address to write to this register, ensuring success.

**0x40**

R/W	Name	Description	Initial Value
R/W	COMMAND	State command	--

Bit	Function
2:0	000: Test mode disable, resume normal operation 111: Test mode enable, allows download of correlation record Select correlation memory bank in ACQ_SETTINGS (0x5d) prior to enabling test mode. Once test mode is enabled, read CORR_DATA (0x52) and CORR_DATA_SIGN (0x53) in one transaction (read from 0xd2). The memory index is incremented automatically and successive reads produce sequential data.

**0x45**

R/W	Name	Description	Initial Value
R/W	MEASURE_DELAY	Delay between automatic measurements	0x14

Bit	Function
7:0	Non-default delay after completion of measurement before automatic retrigger, in burst and continuous modes. ACQ_CONFIG_REG (0x04) bit 5 must be set. Value 0xc8 corresponds to 10 Hz repetition rate and 0x14 to roughly 100 Hz.

**0x4c**

R/W	Name	Description	Initial Value
R	PEAK_BCK	Second largest peak value in correlation record	--

Bit	Function
7:0	The value of the second highest peak in the correlation record.

**0x52**

R/W	Name	Description	Initial Value
R	CORR_DATA	Correlation record data low byte	--

Bit	Function
7:0	Correlation record data low byte. See CORR_DATA_SIGN (0x53), ACQ_SETTINGS (0x5d), and COMMAND (0x40).

**0x53**

R/W	Name	Description	Initial Value
R	CORR_DATA_SIGN	Correlation record data high byte	--

Bit	Function
7:0	Correlation record data high byte. Correlation record data is a 2's complement 9-bit value, and must be sign extended to be formatted as a 16-bit 2's complement value. Thus when repacking the two bytes obtained for the I2C transaction, set the high byte to 0xff if the LSB of the high byte is one.

**0x5d**

R/W	Name	Description	Initial Value
R/W	ACQ_SETTINGS	Correlation record memory bank select	--

Bit	Function
7:6	11: Access correlation memory bank. Write prior to test mode enable, see COMMAND (0x40).

**0x65**

R/W	Name	Description	Initial Value
R/W	POWER_CONTROL	Power state control	0x80

Bit	Function
2	1: Device Sleep, wakes upon I2C transaction. Registers are reinitialized, wakeup time similar to full reset using enable pin. 0: Device awake
0	1: Disable receiver circuit 0: Enable receiver circuit. Receiver circuit stabilizes by the time a measurement can be performed.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Frequently Asked Questions

### Must the device run on 5 Vdc? Can it run on 3.3 Vdc instead?

The device requires 5 Vdc to run properly, so this specification is recommended and supported.

### What is the spread of the laser beam?

At very close distances (less than 1 m) the beam diameter is about the size of the aperture (lens). For distances greater than 1 m, you can estimate the beam diameter using this equation:

Distance/100 = beam diameter at that distance (in whatever units you measured the distance).

The actual spread is ~8 milli-radians or ~1/2 degree.

### How do distance, target size, aspect, and reflectivity effect returned signal strength?

The device transmits a focused infrared beam that reflects off of a target, and a portion of that reflected signal returns to the receiver. The distance is calculated by taking the difference between the moment of signal transmission to the moment of signal reception. Successfully receiving a reflected signal is heavily influenced by several factors. These factors include:

- Target Distance

The relationship of distance (D) to returned signal strength is an inverse square. So, with increase in distance, returned signal strength decreases by  $1/D^2$  or the square root of the distance.

- Target Size

The relationship of a target's Cross Section (C) to returned signal strength is an inverse power of four. The device transmits a focused near-infrared laser beam that spreads at a rate of approximately  $0.5^\circ$  as distance increases. Up to 1 m it is approximately the size of the lens. Beyond 1 m, the approximate beam spread in degrees can be estimated by dividing the distance by 100, or ~8 milliradians. When the beam overfills (is larger than) the target, the signal returned decreases by  $1/C^4$  or the fourth root of the target's cross section.

- Aspect

The aspect of the target, or its orientation to the sensor, affects the observable cross section and, therefore, the amount of returned signal decreases as the aspect of the target varies from the normal.

- Reflectivity

Reflectivity characteristics of the target's surface also affect the amount of returned signal. In this case, we concern ourselves with reflectivity of near infrared wavelengths ("How does the device work with reflective surfaces?", page 12).

In summary, a small target can be very difficult to detect if it is distant, poorly reflective, and its aspect is away from the normal. In such cases, the returned signal strength may be improved by attaching infrared reflectors to the target, increasing the size of the target, modifying its aspect, or reducing distance from the sensor.

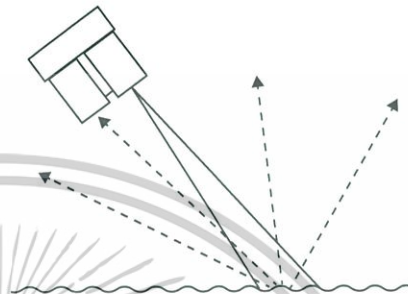
### How does the device work with reflective surfaces?

Reflective characteristics of an object's surface can be divided into three categories (in the real world, a combination of characteristics is typically present):

- Diffuse Reflective
- Specular
- Retro-reflective

#### Diffuse Reflective Surfaces

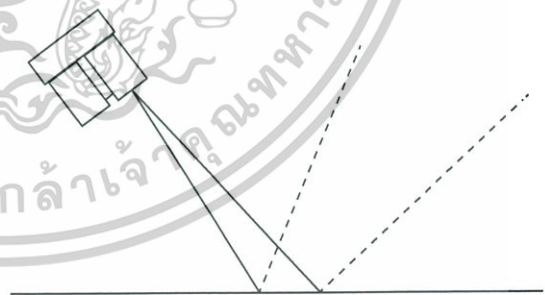
Purely diffuse surfaces are found on materials that have a textured quality that causes reflected energy to disperse uniformly. This tendency results in a relatively predictable percentage of the dispersed laser energy finding its way back to the device. As a result, these materials tend to read very well.



Materials that fall into this category are paper, matte walls, and granite. It is important to note that materials that fit into this category due to observed reflection at visible light wavelengths may exhibit unexpected results in other wavelengths. The near infrared range used by the device may detect them as nearly identical. For example, a black sheet of paper may reflect a nearly identical percentage of the infrared signal back to the receiver as a white sheet.

#### Specular Surfaces

Specular surfaces are found on materials that have a smooth quality that reflect energy instead of dispersing it. It is difficult or impossible for the device to recognize the distance of many specular surfaces. Reflections off of specular surfaces tend to reflect with little dispersion which causes the reflected beam to remain small and, if not reflected directly back to the receiver, to miss the receiver altogether. The device may fail to detect a specular object in front of it unless viewed from the normal.



Examples of specular surfaces are mirrors and glass viewed off-axis.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## How does liquid affect the signal?

There are a few considerations to take into account if your application requires measuring distances to, or within, liquid:

- Reflectivity and other characteristics of the liquid itself
- Reflectivity characteristics of particles suspended in the liquid
- Turbidity
- Refractive characteristics of the liquid

Reflectivity of the liquid is important when measuring distance to the surface of a liquid or if measuring through liquid to the bottom of a container ("How does the device work with reflective surfaces?", page 12).

It is important to note that measuring distance with the device depends on reflected energy from the transmitted signal being detected by the receiver in the sensor. For that reason, the surface condition of the liquid may play an important role in the overall reflectivity and detectability of the liquid. In the case of a flat, highly reflective liquid surface, the laser's reflected energy may not disperse adequately to allow detection unless viewed from the normal. By contrast, small surface ripples may create enough dispersion of the reflected energy to allow detection of the liquid without the need to position the sensor so that the transmitted beam strikes the liquid's surface from the normal.

Reflectivity of suspended particles is a characteristic that may help or hinder depending on the application.

Turbidity, or the clarity of a liquid created by the presence or absence of suspended particles, can similarly help or hinder measurement efforts. If the application requires detecting the surface of the liquid, then suspended particles may help by reflecting more of the transmitted beam back to the receiver, increasing detectability and permitting measurements to be taken.

It is important to note that, attempting to measure through suspended particles in a liquid will only be successful if the transmitted beam is allowed to reflect off of the desired target without first being absorbed or reflected by the suspended particles.

When the near infrared energy transmitted by the device transitions from the atmosphere to a liquid, the energy may be bent, or refracted, and absorbed in addition to being dispersed. The degree to which the transmitted beam is refracted and absorbed is defined by its refraction index. That being said, the most important criteria impacting successful measurement through a liquid is the amount of dispersion of the transmitted beam and whether any of the dispersed beam makes its way back to the receiver on the device.

Remember that electromagnetic energy travels slower through a liquid and may affect accuracy of the final measurement output.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



For the latest free software updates (excluding map data) throughout the life of your Garmin products, visit the Garmin Web site at [www.garmin.com](http://www.garmin.com).

**GARMIN®**

© 2016 Garmin Ltd. or its subsidiaries

Garmin International, Inc.  
1200 East 151<sup>st</sup> Street, Olathe, Kansas 66062, USA

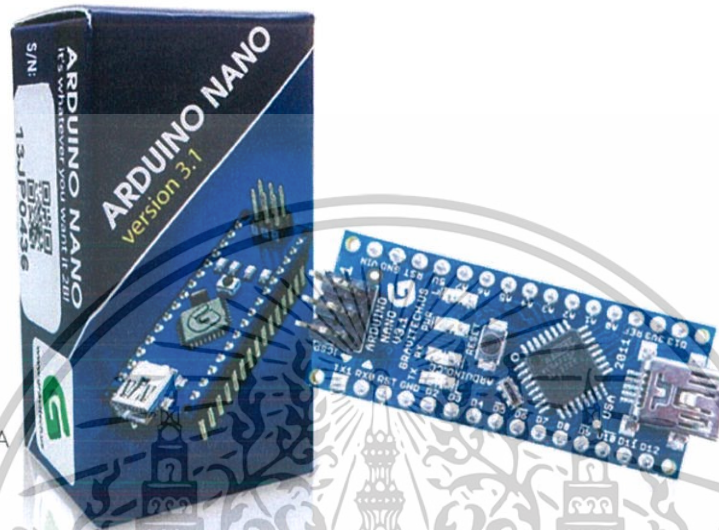
Garmin (Europe) Ltd.  
Liberty House, Hounsdown Business Park, Southampton, Hampshire, SO40 9LR UK

Garmin Corporation  
No. 68, Zhongshu 2<sup>nd</sup> Road, Xizhi Dist., New Taipei City, 221, Taiwan (R.O.C.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Arduino Nano 3.1

Item# ARMB-0022



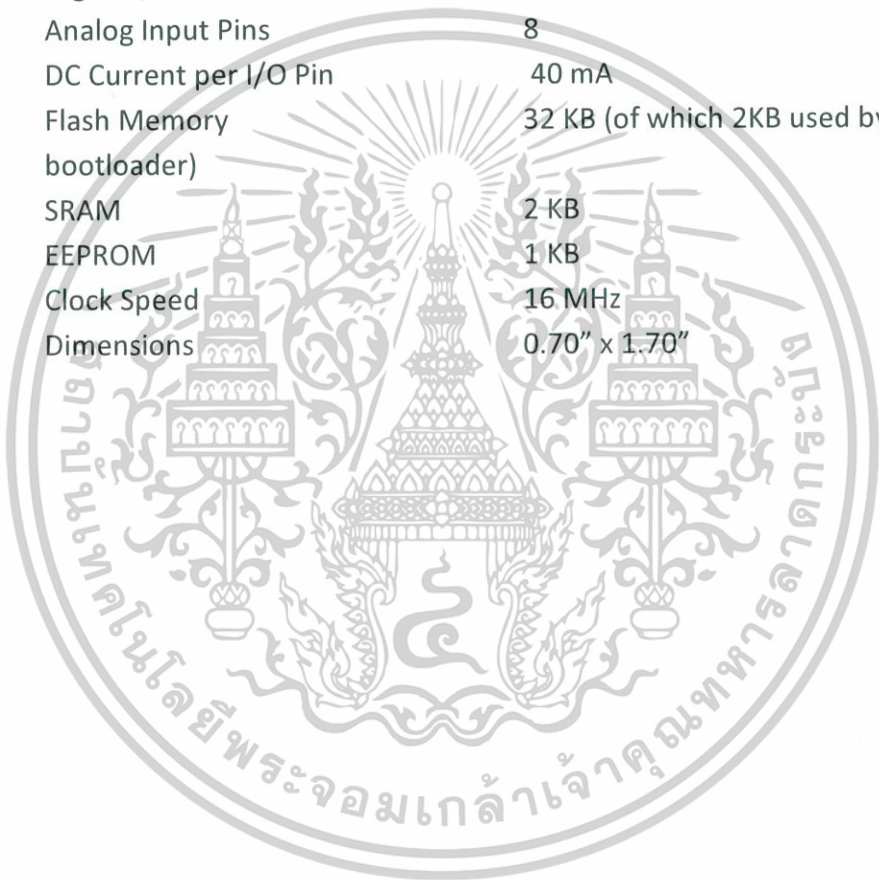
## Overview:

Arduino Nano is a surface mount breadboard embedded version with integrated USB. It is a smallest, complete, and breadboard friendly. It has everything that Diecimila/Duemilanove has (electrically) with more analog input pins and onboard +5V AREF jumper. Physically, it is missing power jack. The Nano is automatically sense and switch to the higher potential source of power, there is no need for the power select jumper.

Nano's got the breadboard-ability of the Boarduino and the Mini+USB with smaller footprint than either, so users have more breadboard space. It's got a pin layout that works well with the Mini or the Basic Stamp (TX, RX, ATN, GND on one top, power and ground on the other). This new version 3.0 comes with ATMEGA328 which offer more programming and data memory space. It is two layers. That make it easier to hack and more affordable.

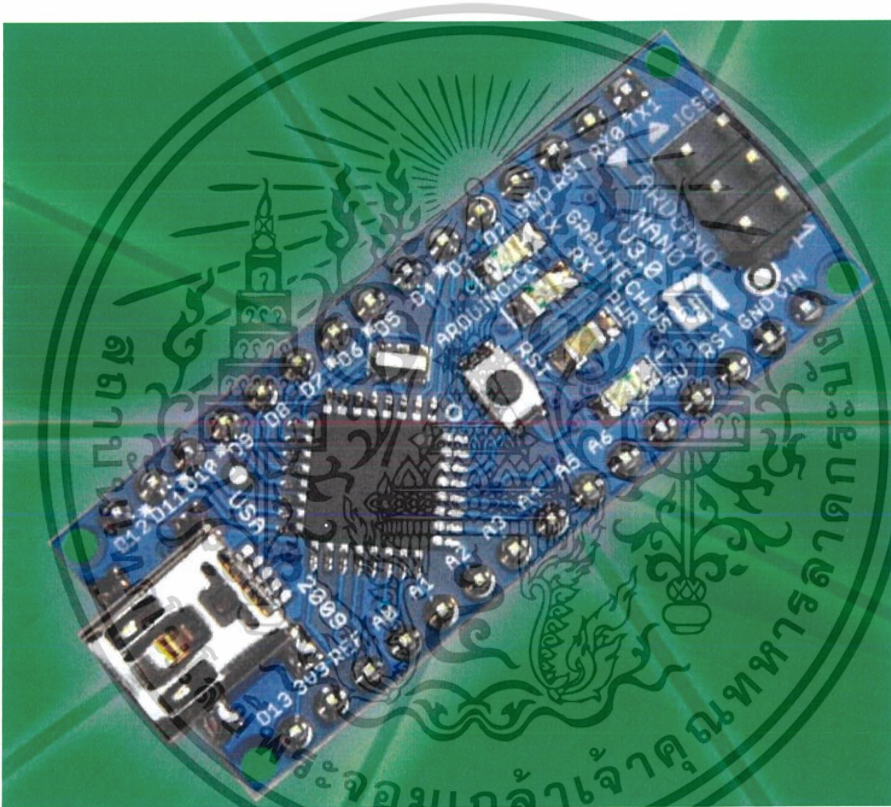
**Specifications:**

Microcontroller	Atmel ATmega328
Operating Voltage (logic level)	5 V
Input Voltage (recommended)	7-12 V
Input Voltage (limits)	6-20 V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	8
DC Current per I/O Pin	40 mA
Flash Memory bootloader)	32 KB (of which 2KB used by
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Clock Speed	16 MHz
Dimensions	0.70" x 1.70"



# *Arduino Nano (V3.0)*

## *User Manual*



Released under the Creative Commons Attribution Share-Alike 2.5 License

<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/>

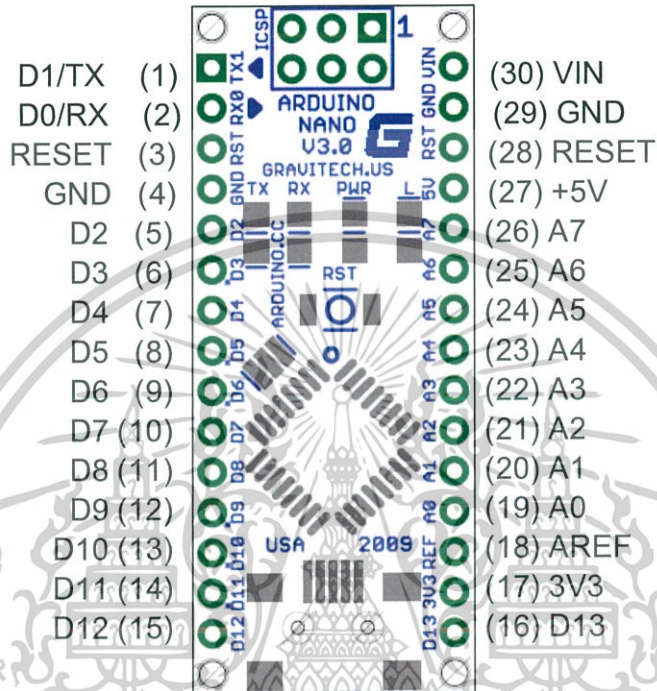
More information:

[www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)

Rev 3.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

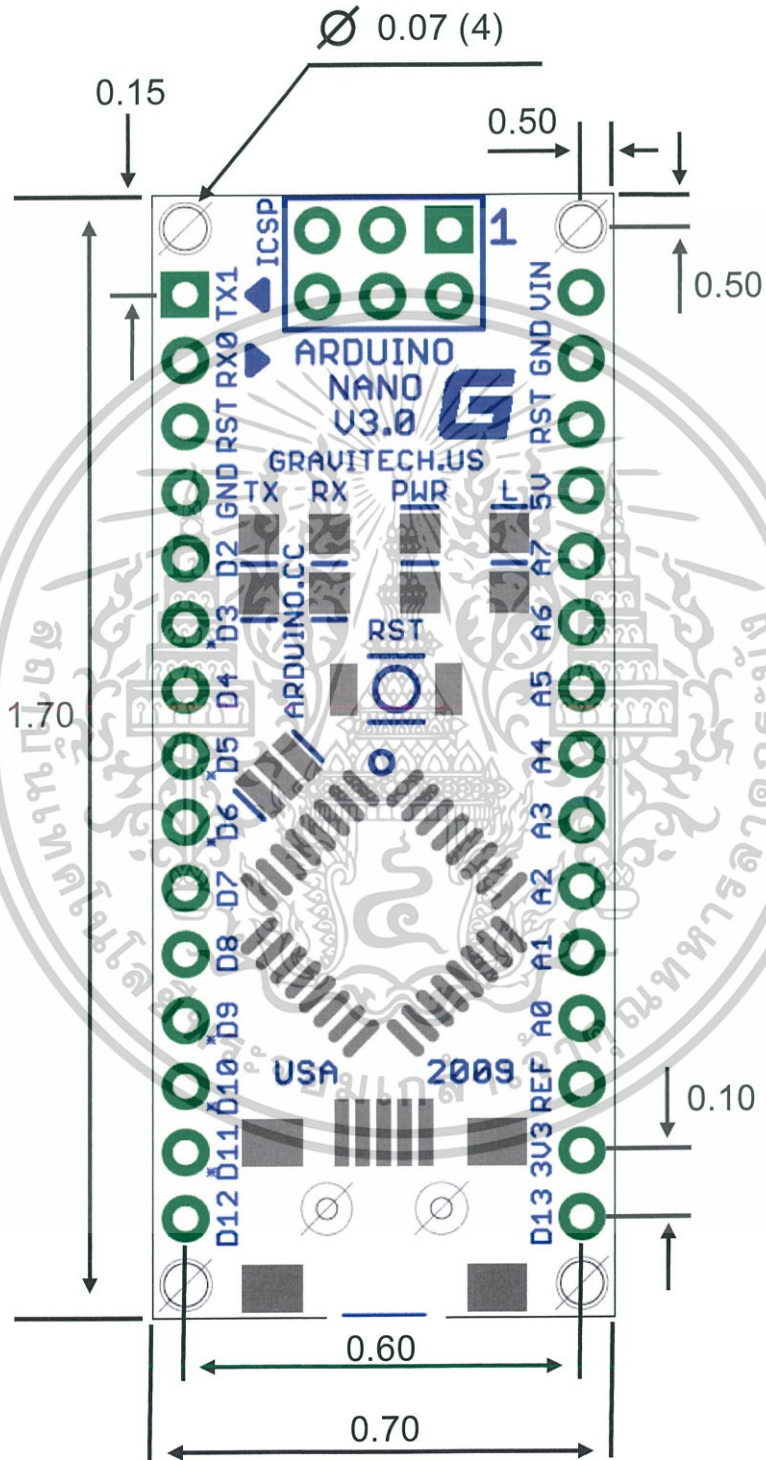
## Arduino Nano Pin Layout



Pin No.	Name	Type	Description
1-2, 5-16	D0-D13	I/O	Digital input/output port 0 to 13
3, 28	RESET	Input	Reset (active low)
4, 29	GND	PWR	Supply ground
17	3V3	Output	+3.3V output (from FTDI)
18	AREF	Input	ADC reference
19-26	A0-A7	Input	Analog input channel 0 to 7
27	+5V	Output or Input	+5V output (from on-board regulator) or +5V (input from external power supply)
30	VIN	PWR	Supply voltage

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

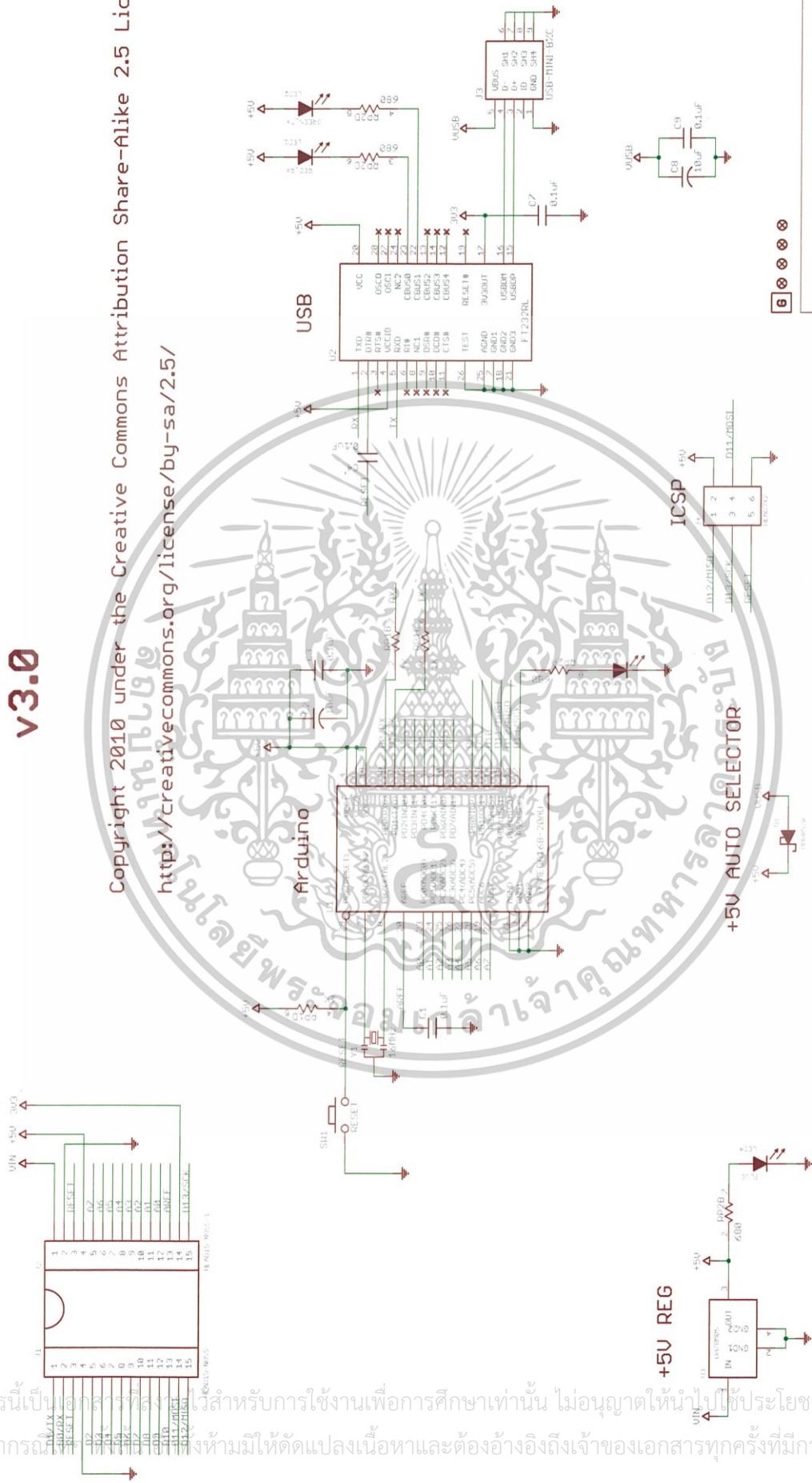
## Arduino Nano Mechanical Drawing



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้<sup>3</sup>

# Arduino Nano v3.0

Copyright 2010 under the Creative Commons Attribution Share-Alike 2.5 License  
<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/>

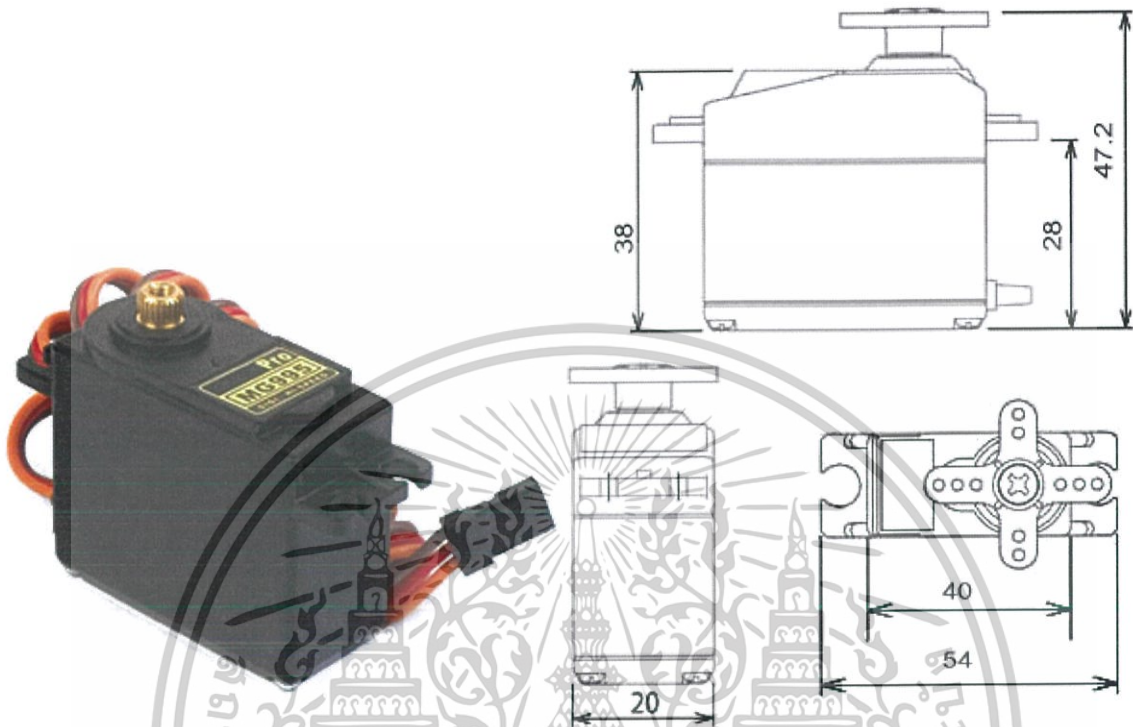


NOT USED  
 x 1 0010<sub>B</sub>  
 x 1K

TITLE: Arduino Nano30\_2010  
 Document Number:  
 Date: 3/4/2010 7:01:53 PM  
 Sheet: 1/1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# MG995 High Speed Metal Gear Dual Ball Bearing Servo



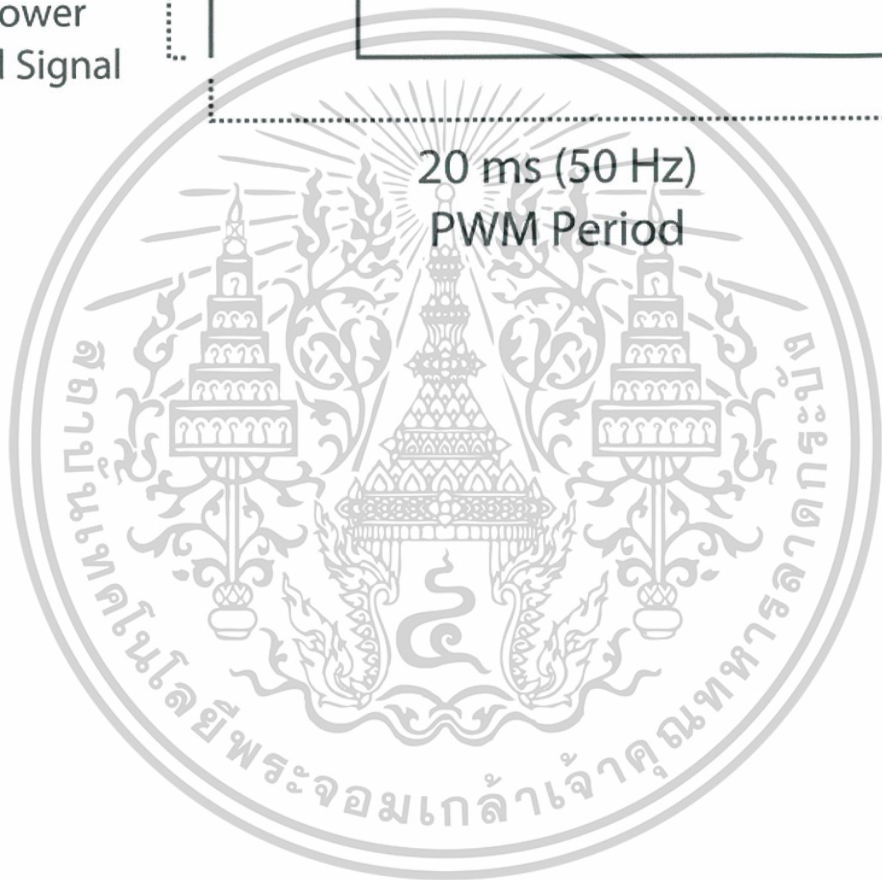
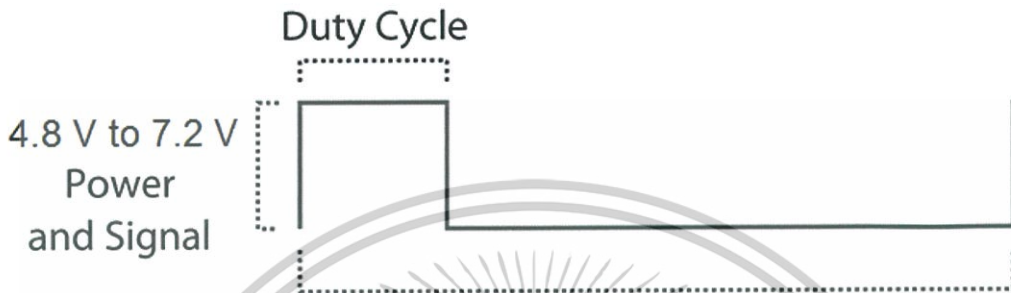
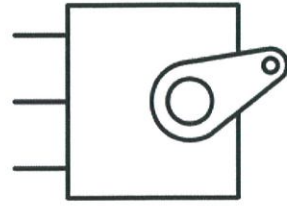
The unit comes complete with 30cm wire and 3 pin 'S' type female header connector that fits most receivers, including Futaba, JR, GWS, Cirrus, Blue Bird, Blue Arrow, Corona, Berg, Spektrum and Hitec.

This high-speed standard servo can rotate approximately 120 degrees (60 in each direction). You can use any servo code, hardware or library to control these servos, so it's great for beginners who want to make stuff move without building a motor controller with feedback & gear box, especially since it will fit in small places. The MG995 Metal Gear Servo also comes with a selection of arms and hardware to get you set up nice and fast!

## Specifications

- Weight: 55 g
- Dimension: 40.7 x 19.7 x 42.9 mm approx.
- Stall torque: 8.5 kgf·cm (4.8 V), 10 kgf·cm (6 V)
- Operating speed: 0.2 s/60° (4.8 V), 0.16 s/60° (6 V)
- Operating voltage: 4.8 V a 7.2 V
- Dead band width: 5  $\mu$ s
- Stable and shock proof double ball bearing design
- Temperature range: 0 °C – 55 °C

PWM=Orange (  $\square$  )  
Vcc = Red ( + )  
Ground=Brown ( - )

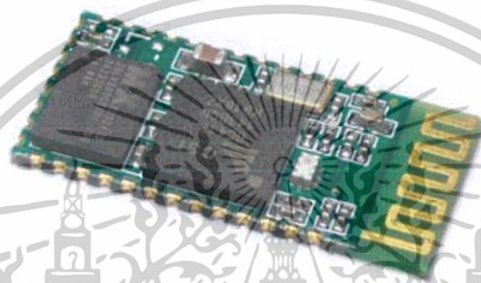


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# HC-05

## -Bluetooth to Serial Port Module

### Overview



HC-05 module is an easy to use Bluetooth SPP (Serial Port Protocol) module, designed for transparent wireless serial connection setup.

Serial port Bluetooth module is fully qualified Bluetooth V2.0+EDR (Enhanced Data Rate) 3Mbps Modulation with complete 2.4GHz radio transceiver and baseband. It uses CSR Bluecore 04-External single chip Bluetooth system with CMOS technology and with AFH(Adaptive Frequency Hopping Feature). It has the footprint as small as 12.7mmx27mm. Hope it will simplify your overall design/development cycle.

### Specifications

#### Hardware features

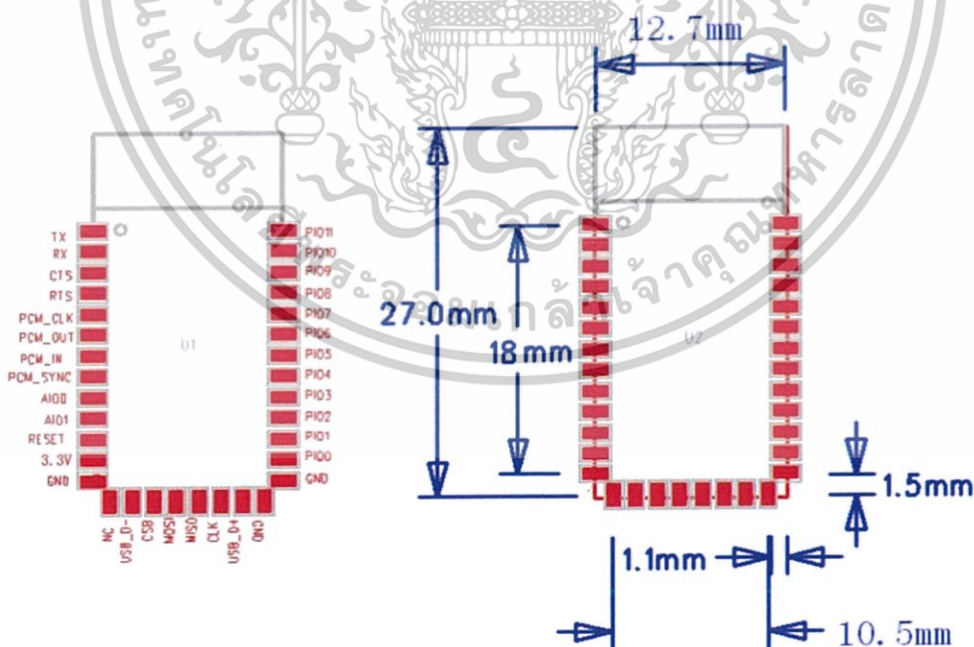
- Typical -80dBm sensitivity
- Up to +4dBm RF transmit power
- Low Power 1.8V Operation ,1.8 to 3.6V I/O
- PIO control
- UART interface with programmable baud rate

● **With integrated antenna** สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ● **With edge connector** ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Software features

- Default Baud rate: 38400, Data bits:8, Stop bit:1,Parity:No parity, Data control: has. Supported baud rate: 9600,19200,38400,57600,115200,230400,460800.
- Given a rising pulse in PIO0, device will be disconnected.
- Status instruction port PIO1: low-disconnected, high-connected;
- PIO10 and PIO11 can be connected to red and blue led separately. When master and slave are paired, red and blue led blinks 1time/2s in interval, while disconnected only blue led blinks 2times/s.
- Auto-connect to the last device on power as default.
- Permit pairing device to connect as default.
- Auto-pairing PINCODE: "0000" as default
- Auto-reconnect in 30 min when disconnected as a result of beyond the range of connection.

## Hardware



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PIN Name	PIN #	Pad type	Description	Note
GND	13	VSS	Ground pot	
	21			
	22			
3.3 VCC	12	3.3V	Integrated 3.3V (+) supply with On-chip linear regulator output within 3.15-3.3V	
AIO0	9	Bi-Directional	Programmable input/output line	
AIO1	10	Bi-Directional	Programmable input/output line	
PIO0	23	Bi-Directional RX EN	Programmable input/output line, control output for LNA(if fitted)	
PIO1	24	Bi-Directional TX EN	Programmable input/output line, control output for PA(if fitted)	

PIO2	25	Bi-Directional	Programmable input/output line	
PIO3	26	Bi-Directional	Programmable input/output line	
PIO4	27	Bi-Directional	Programmable input/output line	
PIO5	28	Bi-Directional	Programmable input/output line	
PIO6	29	Bi-Directional	Programmable input/output line	
PIO7	30	Bi-Directional	Programmable input/output line	
PIO8	31	Bi-Directional	Programmable input/output line	
PIO9	32	Bi-Directional	Programmable input/output line	
PIO10	33	Bi-Directional	Programmable input/output line	
PIO11	34	Bi-Directional	Programmable input/output line	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>RESETB</b>	11	CMOS input with weak internal pull-up	Reset if low.input debounced so must be low for >5MS to cause a reset	
<b>UART_RTS</b>	4	CMOS output, tri-stable with weak internal pull-up	UART request to send, active low	
<b>UART_CTS</b>	3	CMOS input with weak internal pull-down	UART clear to send, active low	
<b>UART_RX</b>	2	CMOS input with weak internal pull-down	UART Data input	
<b>UART_TX</b>	1	CMOS output, Tri-stable with weak internal pull-up	UART Data output	
<b>SPI_MOSI</b>	17	CMOS input with weak internal pull-down	Serial peripheral interface data input	
<b>SPI_CS<sub>B</sub></b>	16	CMOS input with weak internal pull-up	Chip select for serial peripheral interface, active low	
<b>SPI_CLK</b>	19	CMOS input with weak internal pull-down	Serial peripheral interface clock	
<b>SPI_MISO</b>	18	CMOS input with weak internal pull-down	Serial peripheral interface data Output	
<b>USB_</b>	15	Bi-Directional		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

USB_+	20	Bi-Directional	
NC	14		
PCM_CLK	5	Bi-Directional	Synchronous PCM data clock
PCM_OUT	6	CMOS output	Synchronous PCM data output
PCM_IN	7	CMOS Input	Synchronous PCM data input
PCM_SYNC	8	Bi-Directional	Synchronous PCM data strobe

## AT command Default:

How to set the mode to server (master):

1. Connect PIO11 to high level.
2. Power on, module into command state.
3. Using baud rate 38400, sent the "AT+ROLE=1\r\n" to module, with "OK\r\n" means setting successes.
4. Connect the PIO11 to low level, repower the module, the module work as server (master).

AT commands: (all end with \r\n)

1. Test command:

Command	Respond	Parameter
AT	OK	-

2. Reset

Command	Respond	Parameter
AT+RESET	OK	-

3. Get firmware version

Command	Respond	Parameter
AT+VERSION?	+VERSION:<Param> OK	Param : firmware version

Example:

```
AT+VERSION?\r\n
+VERSION:2.0-20100601
```

OK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4. Restore default

Command	Respond	Parameter
AT+ORGL	OK	-

Default state:

Slave mode, pin code :1234, device name: H-C-2010-06-01 ,Baud 38400bits/s.

## 5. Get module address

Command	Respond	Parameter
AT+ADDR?	+ADDR:<Param> OK	Param: address of Bluetooth module

Bluetooth address: NAP: UAP : LAP

Example:

```
AT+ADDR?\r\n
+ADDR:1234:56:abcdef
OK
```

## 6. Set/Check module name:

Command	Respond	Parameter
AT+NAME=<Param>	OK	Param: Bluetooth module name
AT+NAME?	+NAME:<Param> OK (/FAIL)	(Default :HC-05)

Example:

```
AT+NAME=HC-05\r\n set the module name to "HC-05"
OK
AT+NAME=ITeadStudio\r\n
OK
AT+NAME?\r\n
+NAME:ITeadStudio
OK
```

## 7. Get the Bluetooth device name:

Command	Respond	Parameter
AT+RNAME?<Param1>	1. +NAME:<Param2> OK 2. FAIL	Param1,Param 2 : the address of Bluetooth device

Example: (Device address 00:02:72:od:22:24, name: ITead)

```
AT+RNAME? 0002, 72, od2224\r\n
+RNAME:ITead
OK
```

## 8. Set/Check module mode:

Command	Respond	Parameter
AT+ROLE=<Param>	OK	Param:
AT+ROLE?	+ROLE:<Param>	0- Slave

	OK	1-Master 2-Slave-Loop
--	----	--------------------------

## 9. Set/Check device class

Command	Respond	Parameter
AT+CLASS=<Param>	OK	Param: Device Class
AT+ CLASS?	1. +CLASS:<Param> OK 2. FAIL	

## 10. Set/Check GIAC (General Inquire Access Code)

Command	Respond	Parameter
AT+IAC=<Param>	1.OK 2. FAIL	Param: GIAC (Default : 9e8b33)
AT+IAC	+IAC:<Param> OK	

Example:

```
AT+IAC=9e8b3f\r\n
OK
AT+IAC?\r\n
+IAC: 9e8b3f
OK
```

## 11. Set/Check -- Query access patterns

Command	Respond	Parameter
AT+INQM=<Param>,<Param2>,<Param3>	1.OK 2. FAIL	Param: 0---inquiry_mode_standard 1---inquiry_mode_rssi Param2: Maximum number of Bluetooth devices to respond to Param3: Timeout (1-48 : 1.28s to 61.44s)
AT+ INQM?	+INQM : <Param>,<Param2>,<Param3> OK	

Example:

```
AT+INQM=1,9,48\r\n
OK
AT+INQM\r\n
+INQM:1, 9, 48
OK
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 12. Set/Check PIN code:

Command	Respond	Parameter
AT+PSWD=<Param>	OK	Param: PIN code (Default 1234)
AT+ PSWD?	+ PSWD : <Param> OK	

## 13. Set/Check serial parameter:

Command	Respond	Parameter
AT+UART=<Param>,<Param2>,<Param3>	OK	Param1: Baud Param2: Stop bit Param3: Parity
AT+ UART?	+UART=<Param>,<Param2>,<Param3> OK	

## Example:

```
AT+UART=115200, 1,2,\r\n
OK
AT+UART?
+UART:115200,1,2
OK
```

## 14. Set/Check connect mode:

Command	Respond	Parameter
AT+CMODE=<Param>	OK	Param: 0 - connect fixed address 1 - connect any address 2 - slave-Loop
AT+ CMODE?	+ CMODE:<Param> OK	

## 15. Set/Check fixed address:

Command	Respond	Parameter
AT+BIND=<Param>	OK	Param: Fixed address (Default 00:00:00:00:00:00)
AT+ BIND?	+ BIND:<Param> OK	

## Example:

```
AT+BIND=1234, 56, abcdef\r\n
OK
AT+BIND?\r\n
+BIND:1234:56:abcdef
OK
```

## 16. Set/Check LED I/O

Command	Respond	Parameter
AT+POLAR=<Param1>,<Param2>	OK	Param1: 0- PIO8 low drive LED 1- PIO8 high drive LED
AT+ POLAR?	+ POLAR=<Param1>,<Param2> OK	

		Param2: 0- PIO9 low drive LED 1- PIO9 high drive LED
--	--	--

## 17. Set PIO output

Command	Respond	Parameter
AT+PIO=<Param1>,<Param2>	OK	Param1: PIO number Param2: PIO level 0- low 1- high

Example:

1. PIO10 output high level

AT+PIO=10, 1\r\n

OK

## 18. Set/Check – scan parameter

Command	Respond	Parameter
AT+IPSCAN=<Param1>,<Param2>,<Param3>,<Param4>	OK	Param1: Query time interval
AT+IPSCAN?	+IPSCAN:<Param1>,<Param2>,<Param3>,<Param4>	Param2: Query duration
	OK	Param3: Paging interval Param4: Call duration

Example:

AT+IPSCAN =1234,500,1200,250\r\n

OK

AT+IPSCAN?

+IPSCAN:1234,500,1200,250

## 19. Set/Check – SHIFF parameter

Command	Respond	Parameter
AT+SNIFF=<Param1>,<Param2>,<Param3>,<Param4>	OK	Param1: Max time
AT+ SNIFF?	+SNIFF:<Param1>,<Param2>,<Param3>,<Param4>	Param2: Min time
	OK	Param3: Retry time Param4: Time out

## 20. Set/Check security mode

Command	Respond	Parameter
AT+SENM=<Param1>,<Param2>	1. OK 2. FAIL	Param1: 0—sec_mode0+off
AT+ SENM?	+ SENM:<Param1>,<Param2>	1—sec_mode1+non_se

	OK	cure 2—sec_mode2_service 3—sec_mode3_link 4—sec_mode_unknow n Param2: 0—hci_enc_mode_off 1—hci_enc_mode_pt_t o_pt 2—hci_enc_mode_pt_t o_pt_and_bcast
--	----	--

## 21. Delete Authenticated Device

Command	Respond	Parameter
AT+PMSAD=<Param>	OK	Param: Authenticated Device Address

Example:

AT+PMSAD =1234,56,abcdef\r\n

OK

## 22. Delete All Authenticated Device

Command	Respond	Parameter
AT+ RMAAD	OK	

## 23. Search Authenticated Device

Command	Respond	Parameter
AT+FSAD=<Param>	1. OK 2. FAIL	Param: Device address

## 24. Get Authenticated Device Count

Command	Respond	Parameter
AT+ADCN?	+ADCN: <Param> OK	Param: Device Count

## 25. Most Recently Used Authenticated Device

Command	Respond	Parameter
AT+MRAD?	+ MRAD: <Param> OK	Param: Recently Authenticated Device Address

## 26. Get the module working state

Command	Respond	Parameter

AT+ STATE?	+ STATE: <Param> OK	Param: "INITIALIZED" "READY" "PAIRABLE" "PAIRED" "INQUIRING" "CONNECTING" "CONNECTED" "DISCONNECTED" "NUKNOV"
------------	------------------------	--

## 27. Initialize the SPP profile lib

Command	Respond	Parameter
AT+INIT	1. OK 2. FAIL	-

## 28. Inquiry Bluetooth Device

Command	Respond	Parameter
AT+INQ	+INQ: <Param1>, <Param2>, <Param3> .... OK	Param1: Address Param2: Device Class Param3 : RSSI Signal strength

Example:

```

AT+INIT\r\n
OK
AT+IAC=9e8b33\r\n
OK
AT+CLASS=0\r\n
AT+INQM=1,9,48\r\n
At+INQ\r\n
+INQ:2:72:D2224,3E0104,FFBC
+INQ:1234:56:0,1F1F,FFC1
+INQ:1234:56:0,1F1F,FFC0
+INQ:1234:56:0,1F1F,FFC1
+INQ:2:72:D2224,3F0104,FFAD
+INQ:1234:56:0,1F1F,FFBE
+INQ:1234:56:0,1F1F,FFC2
+INQ:1234:56:0,1F1F,FFBE
+INQ:2:72:D2224,3F0104,FFBC
OK
  
```

## 28. Cancel Inquiring Bluetooth Device

Command	Respond	Parameter
AT+ INQC	OK	-

## 29. Equipment Matching

Command	Respond	Parameter
AT+PAIR=<Param1>,<Param2>	1. OK 2. FAIL	Param1: Device Address Param2: Time out

## 30. Connect Device

Command	Respond	Parameter
AT+LINK=<Param>	1. OK 2. FAIL	Param: Device Address

Example:

AT+FSAD=1234,56,abcdef\r\n

OK

AT+LINK=1234,56,abcdef\r\n

OK

## 31. Disconnect

Command	Respond	Parameter
AT+DISC	1. +DISC:SUCCESS OK 2. +DISC:LINK_LOSS OK 3. +DISC:NO_SLC OK 4. +DISC:TIMEOUT OK 5. +DISC:ERROR OK	Param: Device Address

## 32. Energy-saving mode

Command	Respond	Parameter
AT+ENSNIFF=<Param>	OK	Param: Device Address

## 33. Exerts Energy-saving mode

Command	Respond	Parameter
AT+ EXSNIFF =<Param>	OK	Param: Device Address

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Revision History

Rev.	Description	Release date
v1.0	Initial version	7/18/2010



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้