

ระบบระบุตัวตนโดยใช้สัญญาณกล้ามเนื้อเนื่อรอบดวงตา

HUMAN IDENTIFICATION SYSTEM USING EXTRAOCULAR
MUSCLES SIGNAL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-010-179

ระบบระบุตัวตนโดยใช้สัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา

HUMAN IDENTIFICATION SYSTEM USING EXTRAOCULAR
MUSCLES SIGNAL



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-EN-M-010-179

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HUMAN IDENTIFICATION SYSTEM USING EXTRAOCULAR
MUSCLES SIGNAL



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017

KMITL-2017-EN-M-010-179

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

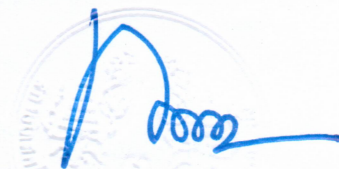
หัวข้อวิทยานิพนธ์ ระบบระบุตัวตนโดยใช้สัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา
Thesis Title Human Identification System using Extraocular Muscles Signal
นักศึกษา นางสาวอิสราภรณ์ โกคินโชติอนันต์
รหัสประจำตัว 57601139
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-010-179

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สุรพันธ์	ยิ้มมัน	
ผศ.ดร.ตุลยา	ลิมปิติ	
ผศ.ดร.ศรวฒน์	ชีวปรีชา	
รศ.ดร.ยุทธพงษ์	รังสรรค์เสรี	
รศ.ดร.ปราโมทย์	วาดเขียน	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ระบบระบุตัวตนโดยใช้สัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตา
นักศึกษา	นางสาวอิสราภรณ์ โภคินโชติอนันต์
รหัสประจำตัว	57601139
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอระบบจำแนกบุคคลด้วยสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตา โดยใช้เพียงโซ่อิเล็กทรอนิกส์ตัวเซอริในการตรวจจับการเคลื่อนไหวของกล้ำมเนื้อบริเวณรอบดวงตาในขณะที่ทำการกระพริบตา ซึ่งรูปแบบของสัญญาณที่ได้พบว่ามีลักษณะที่คล้ายคลึงกับสัญญาณไฟฟ้าในดวงตา โดยวิธีการวัดข้อมูลที่น่าสนใจมีความเรียบง่ายกว่างานวิจัยอื่นๆ สัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตาที่ได้จากการบันทึกจะถูกนำมาหาคุณลักษณะเด่นด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์ที่ไม่ต่อเนื่อง เพื่อลดจำนวนมิติของข้อมูลให้เหลือเพียงส่วนที่มีนัยยะสำคัญเท่านั้น จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้ป้อนเข้าสู่กระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งนำไปสู่ขั้นตอนการตัดสินใจต่อไป โดยในการทดลองได้นำระบบข้างต้นมาใช้จำแนกบุคคลโดยใช้สัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตา ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าระบบสามารถจำแนกบุคคลได้ จำนวน 2-9 บุคคล ซึ่งระบบมีค่าความถูกต้องเฉลี่ยอยู่ที่ 92.89-58.47 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

Thesis	Human Identification System Using Extraocular Muscles Signal
Student	Miss. Isaraporn Pokinchotanun
Student ID.	57601139
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Paramote Wardkein

ABSTRACT

This thesis presents a novel method for identifying individuals from their extraocular muscle signals. Using a piezo electric transducer, we record the muscle movements during blinking. The characteristics of the acquired signal is almost identical to that of an electrooculogram (EOG). Notably, our data acquisition stage is less complex compared to other existing methods. By exploiting discrete Fourier transform, we can extract the essential features from the signal. We then train an artificial neural network to recognize the pattern of eye-muscle features from each individual for personal identification. The experimental results show that the proposed system is able to distinguish (2-9) with accuracies between 92.89%- 58.47%, respectively.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ปราโมทย์ วาดเขียน และ รศ.ดร. จีรสุดา โกษียาภรณ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า และขอขอบคุณพี่และน้องๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคน

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา และคุณตาคุณยาย ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

อิสราภรณ์ โภคินโชติอนันต์



III
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	1
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.5 โครงประกอบของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กล่าวนำ.....	4
2.2 สัญญาณชีวไฟฟ้า.....	4
2.3 สัญญาณไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดมาจากดวงตา.....	5
2.3.1 องค์ประกอบหลักของดวงตา.....	5
2.3.2 สัญญาณไฟฟ้าในดวงตา.....	7
2.3.3 สัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา.....	10
2.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์.....	11
2.4.1 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน.....	12
2.5 วงจรขยายสัญญาณ.....	13
2.5.1 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส.....	13
2.5.2 วงจรส่งผ่านแรงดัน.....	14
2.5.3 วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ.....	15
2.6 การมอดูเลตและการดีมอดูเลตขนาด.....	15
2.6.1 การมอดูเลตขนาด.....	15
2.6.2 การดีมอดูเลตขนาด.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 วงจรกรองสัญญาณเชิงเลข.....	18
2.7.1 การออกแบบวงจรกรองผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด แบบเฟสเชิงเส้น.....	19
2.8 กระบวนการดึงลักษณะเด่น.....	22
2.8.1 การแปลงฟูเรียร์ที่ไม่ต่อเนื่อง.....	22
2.9 ระบบโครงข่ายประสาทเทียม.....	23
2.9.1 ฟังก์ชันกระตุ้น.....	23
2.9.2 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม.....	26
2.9.3 กระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม.....	27
2.10 การประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคลด้วยสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบ...	32
ดวงตา	
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	34
2.11.1 งานวิจัยที่นำเสนอวิธีการวัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตา.....	34
2.11.2 งานวิจัยที่นำสัญญาณไฟฟ้าในดวงตามายืนยันบุคคล.....	37
บทที่ 3 ระบบจำแนกบุคคลด้วยสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตา.....	39
3.1 กล่าวนำ.....	39
3.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณไฟฟ้าในดวงตากับสัญญาณ...	39
กล้ำมเนื้อรอบดวงตา	
3.3 กระบวนการเก็บสัญญาณ.....	40
3.3.1 ทรานซิวเซอร์ที่ใช้การวัดสัญญาณ.....	41
3.3.2 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส.....	42
3.3.3 วงจรมอดูเลตสัญญาณ.....	42
3.4 กระบวนการประมวลผลสัญญาณเบื้องต้น.....	44
3.4.1 การกรองสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตาที่ผ่านการมอดูเลตขนาด ชนิดคลื่นพาห้...	45
ขนาดใหญ่ ด้วยตัวกรองความถี่แถบผ่าน	
3.4.2 การดีมอดูเลตสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตาที่ผ่านการมอดูเลตชนิดคลื่นพาห้...	49
ขนาดใหญ่	
3.4.3 การกรองสัญญาณไฟตรงออกจากสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตา.....	52
3.4.4 การเลือกสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ.....	52
3.5 ระบบจำแนกบุคคลด้วยสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตา.....	53

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.1 การแปลงฟูเรียร์ที่ไม่ต่อเนื่อง.....	53
3.5.2 โครงข่ายประสาทเทียม.....	54
3.5.3 การทดสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม.....	56
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	58
4.1 กล่าวนำ.....	58
4.2 ผลการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณไฟฟ้าในดวงตากับ.....	58
สัญญาณกล้ามเนื้อเนื้องอกดวงตา	
4.3 ผลของวงจรที่ใช้ในการออกแบบสร้างเครื่องมือวัดสัญญาณกล้ามเนื้อเนื้องอกดวงตา.....	62
4.3.1 ผลการทดลองของวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส.....	62
4.3.2 ผลการทดลองของวงจรการมอดูเลตแอมพลิฟิเคชันชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่.....	64
4.4 ผลการทดลองการประมวลผลเบื้องต้น.....	65
4.4.1 การกรองสัญญาณกล้ามเนื้อเนื้องอกดวงตา.....	65
ที่ผ่านการมอดูเลตขนาด ชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่ ด้วยตัวกรองความถี่แถบผ่าน	
4.4.2 การตีมอดูเลตสัญญาณกล้ามเนื้อเนื้องอกดวงตา.....	66
ที่ผ่านการมอดูเลตชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่	
4.4.3 ผลการทดลองจากการเลือกสัญญาณกล้ามเนื้อเนื้องอกดวงตา 1 คาบสัญญาณ.....	67
4.5 ผลการทดลองของโครงข่ายประสาทเทียม.....	73
4.5.1 ผลการทดลองในส่วนของการแปลงฟูเรียร์ที่ไม่ต่อเนื่อง.....	73
4.5.2 ผลการทดลองในส่วนของโครงข่ายประสาทเทียม.....	79
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	91
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	91
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	91
เอกสารอ้างอิง.....	92
ภาคผนวก.....	95
ภาคผนวก ก.....	96
ภาคผนวก ข.....	121
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	152
ประวัติผู้เขียน.....	157

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	เกณฑ์ในการบอกระดับหรือขนาดของความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ [28]	12
2.2	Receiver-Operating-Characteristic	33
2.3	ลักษณะเด่นของสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาที่ถูกแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม [7].....	38
3.1	จำนวนสัญญาณที่ใช้ในการทดลองของแต่ละบุคคล.....	54
4.1	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณไฟฟ้าในดวงตากับสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา จากอาสาสมัคร 15 คน	61
4.2	ตัวอย่างผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 6.	79
4.3	ตัวอย่างผลของประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล.....ของการสุ่มครั้งที่ 6	80
4.4	ตัวอย่างผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1	80
4.5	ตัวอย่างผลของประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล.....ของการสุ่มครั้งที่ 1	80
4.6	ตัวอย่างผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5.	80
4.7	ตัวอย่างผลของประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 5 บุคคล.....ของการสุ่มครั้งที่ 5	81
4.8	ตัวอย่างผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4.	81
4.9	ตัวอย่างผลของประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 7 บุคคล.....ของการสุ่มครั้งที่ 4	82
4.10	ตัวอย่างผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1.	82
4.11	ตัวอย่างผลของประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 9 บุคคล.....ของการสุ่มครั้งที่ 1	83
4.12	ตัวอย่างผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 11 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5	83
4.13	ตัวอย่างผลของประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 11 บุคคล.....ของการสุ่มครั้งที่ 5	84
4.14	ตัวอย่างผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1...	85
4.15	ตัวอย่างผลของประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล.....ของการสุ่มครั้งที่ 1	85

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.16	ตัวอย่างผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5.	85
4.17	ตัวอย่างผลของประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล..... ของการสุ่มครั้งที่ 5	85
4.18	ตัวอย่างผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3.	86
4.19	ตัวอย่างผลของประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 5 บุคคล..... ของการสุ่มครั้งที่ 3	86
4.20	ตัวอย่างผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3.	86
4.21	ตัวอย่างผลของประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 7 บุคคล..... ของการสุ่มครั้งที่ 3	87
4.22	ตัวอย่างผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3.	87
4.23	ตัวอย่างผลของประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 9 บุคคล..... ของการสุ่มครั้งที่ 3	88
4.24	ตัวอย่างผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 11 บุคคลของการสุ่มครั้งที่ 2	88
4.25	ตัวอย่างผลของประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 11 บุคคล..... ของการสุ่มครั้งที่ 2	89
4.26	สรุปผลของประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล ที่ผ่านการทดสอบ ทั้ง 2 วิธี	90

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ภาพตัดขวางของดวงตาด้านซ้าย [11].....	5
2.2	องค์ประกอบของกล้ามเนื้อภายในเบ้าตา [16].....	6
2.3	กล้ามเนื้อยกหนังตา [16].....	7
2.4	กล้ามเนื้อหลับตา [29].....	7
2.5	การบันทึกสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาด้วยการติดอิเล็กโทรดที่ตำแหน่งต่างๆ.....	8
2.6	สัญญาณไฟฟ้าในดวงตาแนวแกนนอน.....	8
2.7	สัญญาณไฟฟ้าในดวงตาแนวแกนตั้ง.....	9
2.8	สัญญาณไฟฟ้าในดวงตาแบบกระพริบตา.....	10
2.9	กล้ามเนื้อที่มีลักษณะที่นูนขึ้น ขณะทำการกระพริบตา.....	10
2.10	องค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา.....	11
2.11	วงจรรขยายแบบไม่กลับเฟส.....	13
2.12	วงจรส่งผ่านแรงดัน.....	14
2.13	วงจรรขยายแบบรวมสัญญาณ.....	15
2.14	การมอดูเลตขนาด ชนิดคลื่นพาร์ซขนาดใหญ่.....	16
2.15	บล็อกไดอะแกรมการมอดูเลตขนาด.....	17
2.16	ผลตอบสนองทางขนาดของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน.....	20
2.17	ผลตอบสนองความถี่ในหน่วยเดซิเบลของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	21
2.18	ผลตอบสนองความถี่ในหน่วยเดซิเบลของตัวกรองความถี่แถบผ่าน.....	21
2.19	ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดเชิงเส้น.....	24
2.20	ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดขั้นบันได.....	24
2.21	ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดทางลาด.....	25
2.22	ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดซิกมอย.....	25
2.23	โครงข่ายเซลล์ประสาทเทียมแบบชั้นเดียว.....	26
2.24	โครงข่ายเซลล์ประสาทเทียมแบบหลายชั้น.....	28
2.25	การวัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาด้วยการติดอิเล็กโทรด [25].....	35
2.26	สัญญาณไฟฟ้าในดวงตาที่วัดได้จากการติดอิเล็กโทรด [25].....	35
2.27	JINS MEME Glasses [26].....	35
2.28	สัญญาณไฟฟ้าในดวงตาที่วัดได้จาก JINS MEME Glasses [26].....	36
2.29	สัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมองที่มีสัญญาณไฟฟ้าในดวงตารวมมาด้วย [7].....	36

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.30	สัญญาณไฟฟ้าในดวงตาที่ผ่านการกรองด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน [7].....	36
2.31	สัญญาณไฟฟ้าคลื่นสมองที่มีสัญญาณไฟฟ้าในดวงตารวมมาอยู่ด้วย..... โดยใช้ Neurosky Mindwave headset ในการวัดสัญญาณ [7]	37
3.1	บล็อกไดอะแกรมของหลักการที่นำเสนอ.....	39
3.2	สัญญาณไฟฟ้าในดวงตา.....	40
3.3	สัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา.....	40
3.4	องค์ประกอบในการวัดสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา.....	40
3.5	เพียโซอิเล็กทริกไดอะแฟรม.....	41
3.6	รายละเอียดของเพียโซอิเล็กทริกไดอะแฟรม.....	41
3.7	วงจรรขยายแบบไม่กลับเฟส.....	42
3.8	วงจรมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่.....	44
3.9	กระบวนการประมวลผลสัญญาณเบื้องต้น.....	45
3.10	ขั้นตอนการเก็บสัญญาณ $S_{AM}(n)$	45
3.11	ผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรองความถี่แถบผ่าน.....	47
3.12	ผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่แถบผ่านในหน่วยเดซิเบล.....	47
3.13	ผลตอบสนองทางเฟสของตัวกรองความถี่แถบผ่าน.....	48
3.14	โค้ดที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองความถี่แถบผ่าน.....	48
3.15	ขั้นตอนการกรองสัญญาณ $S_{AM}(n)$	48
3.16	ผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	50
3.17	ผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านในหน่วยเดซิเบล.....	50
3.18	ผลตอบสนองทางเฟสของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	51
3.19	โค้ดที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน.....	51
3.20	ขั้นตอนการดีมอดูเลตสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาที่ผ่านการมอดูเลตขนาด..... ชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่	52
3.21	ขั้นตอนการกรองสัญญาณไฟตรงออกจากสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา.....	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.22	การกำหนดค่าที่ใช้ในการเลือกสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ.....	53
3.23	ขั้นตอนการหาลักษณะเด่นของสัญญาณ.....	53
3.24	โครงสร้างของระบบโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทดลอง.....	55
3.25	ตัวอย่างหน้าต่างโปรแกรมของ Tool box ที่ใช้ใน MATLAB.....	56
3.26	การทดสอบประสิทธิภาพแบบ leave one out.....	57
3.27	การทดสอบประสิทธิภาพแบบ 2-fold.....	57
4.1	บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของระบบการจำแนกบุคคลด้วยสัญญาณ..... กล้ำมเนื้อรอบดวงตา	58
4.2	แสดงการติดตั้งอุปกรณ์วัดสัญญาณ ขณะวัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาและ..... สัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตาพร้อมกัน	59
4.3	ตัวอย่างสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตา จากการเก็บสัญญาณของบุคคลที่ 1 ครั้ง.. ที่ 1	59
4.4	ตัวอย่างสัญญาณไฟฟ้าในดวงตา จากการเก็บสัญญาณของบุคคลที่ 1 ครั้งที่ 1.....	60
4.5	กราฟแสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณไฟฟ้าในดวงตากับ..... สัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตา จากอาสาสมัคร 15 คน	61
4.6	ตำแหน่งการบ่อนสัญญาณ V_i และ วัดสัญญาณ V_o ในวงจรขยายแบบไม่กลับ..... เฟส	62
4.7	ผลของวงจขยายแบบไม่กลับเฟส ของสัญญาณคลื่นรูปไซน์.....	63
4.8	ผลของวงจขยายแบบไม่กลับเฟส ของสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตา.....	63
4.9	รูปสัญญาณมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่ ด้วยสัญญาณคลื่นรูปไซน์.....	64
4.10	ผลการทดสอบวงจรมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่ ด้วยสัญญาณคลื่น.... รูปไซน์ (ที่การปรับ Time/Div = 25 ms)	64
4.11	ผลการทดสอบวงจรมอดูเลตขนาด ชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่..... ด้วยสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตา	65
4.12	องค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณการมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่ ของสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตา	65
4.13	องค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณการมอดูเลตเชิงขนาดชนิดคลื่นพาห้..... ขนาดใหญ่ของสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตาที่ผ่านการกรองด้วยตัวกรองความถี่ แถบผ่าน	66

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
4.14 องค์ประกอบทางความถี่ของตัวอย่างสัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตา..... จากการเก็บสัญญาณของบุคคลที่ 1 ครั้งที่ 1	67
4.15 ตัวอย่างสัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ ในโดเมนเวลา..... จากการเก็บสัญญาณของบุคคลที่ 1 ครั้งที่ 1 (การกระพริบตาครั้งที่ 1-6)	67
4.16 ตัวอย่างสัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ ในโดเมนเวลา..... จากการเก็บสัญญาณของบุคคลที่ 1 ครั้งที่ 1 (การกระพริบตาครั้งที่ 7-17)	68
4.17 สัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ และค่าเฉลี่ย ในโดเมนเวลา..... ของบุคคลที่ 1-6	69
4.18 สัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ และค่าเฉลี่ย ในโดเมนเวลา..... ของบุคคลที่ 7-12	70
4.19 สัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ และค่าเฉลี่ย ในโดเมนเวลา..... ของบุคคลที่ 13-18	71
4.20 สัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ และค่าเฉลี่ย ในโดเมนเวลา..... ของบุคคลที่ 19-20	72
4.21 ค่าเฉลี่ยของสัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตา ในโดเมนเวลาของบุคคล 20 คน.....	72
4.22 ตัวอย่างสัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ ในโดเมนความถี่..... จากการเก็บสัญญาณของบุคคลที่ 1 ครั้งที่ 1 (การกระพริบตาครั้งที่ 1-9)	73
4.23 ตัวอย่างสัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ ในโดเมนความถี่..... จากการเก็บสัญญาณของบุคคลที่ 1 ครั้งที่ 1 (การกระพริบตาครั้งที่ 10-17)	74
4.24 สัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ และค่าเฉลี่ย ในโดเมนความถี่..... ของบุคคลที่ 1-6	75
4.25 สัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ และค่าเฉลี่ย ในโดเมนความถี่..... ของบุคคลที่ 7-12	76
4.26 สัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ และค่าเฉลี่ย ในโดเมนความถี่..... ของบุคคลที่ 13-18	77
4.27 สัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ และค่าเฉลี่ย ในโดเมนความถี่..... ของบุคคลที่ 19-20	78
4.28 ค่าเฉลี่ยของสัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตา ในโดเมนความถี่ของบุคคล 20 คน.....	78

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการจำแนกบุคคลเป็นสิ่งที่มีความสำคัญ และจำเป็นในงานหลายๆ ด้าน ที่ต้องการการรักษาความปลอดภัยสูง ส่งผลให้มีการนำระบบไบโอเมตริกหรือการใช้คุณลักษณะเฉพาะของบุคคล ใช้ในการยืนยันตัวตนบุคคล ยกตัวอย่างเช่น การใช้ลายนิ้วมือ [1], เสียงพูด [2] และรูปหน้าของแต่ละบุคคล [3] มาใช้ในการยืนยันตัวตนบุคคล แต่ในงานจริงนั้นพบว่า ลายนิ้วมือ, เสียงพูดและรูปหน้าของแต่ละบุคคลนั้น ไม่สามารถใช้กับระบบที่มีความต้องการใช้การรักษาความปลอดภัยขั้นสูงได้ เนื่องจากลักษณะเหล่านี้สามารถถูกปลอมแปลงได้ง่าย ดังนั้นจึงได้มีการใช้สัญญาณไฟฟ้าที่มาจากร่างกายมาใช้ในการยืนยันบุคคล ตัวอย่าง เช่น สัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมอง (Electroencephalogram : EEG) [4], สัญญาณเสียงเต้นหัวใจ (Phonocardiogram : PCG) [5], สัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ (Electrocardiogram : ECG) [6] และ สัญญาณไฟฟ้าในดวงตา (Electrooculogram : EOG) [7] ซึ่งสามารถใช้งานกับระบบที่มีความต้องการความปลอดภัยสูงได้ เนื่องจากปลอมแปลงได้ยาก

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เนื่องจากวิธีการจำแนกบุคคลด้วยสัญญาณไฟฟ้าในดวงตานั้น ยังไม่เป็นที่แพร่หลายเท่ากับวิธีการอื่นๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยความเป็นจริงแล้วสัญญาณไฟฟ้าในดวงตานั้นมีความน่าสนใจที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในงานอื่นๆ เช่น ทางการแพทย์ ใช้ในการวินิจฉัยโรค โดยได้มีการนำสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาไปทำการวิเคราะห์ถึงความเป็นไปได้ที่จะเกิดโรคกล้ามเนื้อตาบิดเกร็ง (Eye dystonia) [8] โดยใช้สัมประสิทธิ์จากแบบจำลองอัตถถดถอย (Autoregressive model : AR model) เป็นลักษณะเด่น แล้วนำไปหาสเปกตรัมความหนาแน่นกำลัง (Power spectrum density) เพื่อนำไปใช้เป็นตัวแทนของสัญญาณข้อมูล ในการระบุความเป็นไปได้ของโรคด้วยเทคนิคซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support vector machine : SVM) โดยวิธีการนี้จะให้ผลที่แม่นยำถึง 93.40 เปอร์เซ็นต์ และยังสามารถนำไปใช้ในระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ (Human computer interface : HCI) โดย [9] ได้ทำการนำสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาไปใช้แทนเมาส์ในการควบคุมการทำงานของคอมพิวเตอร์ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผู้พิการ โดยจะใช้หลักการดึงลักษณะเด่นของสัญญาณจากการพิจารณาขนาดของสัญญาณ, ค่าสูงสุดของสัญญาณและลักษณะของสัญญาณ เพื่อนำไปใช้ในการแยกแยะว่ากำลังทำกิจกรรมใด เช่น ถ้ากระพริบตาติดต่อกันสองครั้งจะแทนการดับเบิ้ลคลิกเมาส์ เป็นต้น ซึ่งระบบนี้จะมีผลที่แม่นยำถึง 84.42 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยานิพนธ์นี้ต้องการพัฒนาวิธีการทดแทนการวัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาโดยใช้สัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาจากการวัดด้วยเพียโซอิเล็กทริกทรานซิวเซอร์เทียบเคียงแทน และสามารถที่จะนำสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตานี้ไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอื่นต่อไป

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

จากบทความของ M. Abo-Zahhad และคณะ [7] ได้นำเสนอวิธีการยืนยันตัวตนบุคคลโดยการนำสัญญาณที่วัดได้จาก Neurosky Mindwave Headset ซึ่งเป็นสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมองที่มีสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาแฝงอยู่ จึงได้ทำการแยกสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาออก เพื่อนำมาใช้ในการยืนยันตัวตนบุคคล โดยได้ทำการนำเสนอวิธีการยืนยันตัวตนบุคคลไว้ จากนั้นทำการแบ่งกลุ่มลักษณะของสัญญาณโดยอิงจากรูปสัญญาณในโดเมนของเวลา และนำผลลัพธ์ทั้งหมดที่ได้ไปจำแนกด้วยหลักการวิเคราะห์ดิสคริมิแนนท์เชิงเส้น (Linear discriminant analysis) ซึ่งสัญญาณที่ได้จะถูกนำไปประมวลเพื่อยืนยันตัวตนบุคคล ผลที่ได้พบว่าสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาสามารถนำมาใช้ในการยืนยันตัวตนบุคคลได้จริง แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอขึ้นมีความซับซ้อน อีกทั้งเซนเซอร์ที่ใช้วัดสัญญาณมีราคาที่สูง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอการวัดสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา เพื่อนำไปใช้ในการยืนยันตัวตนบุคคล โดยสมมุติฐานของงานวิจัยคือรูปร่างของสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาที่วัดได้ด้วยเพียโซอิเล็กทริกทรานซิวเซอร์นั้นมีลักษณะที่คล้ายคลึงกับสัญญาณไฟฟ้าในดวงตา และสามารถที่จะนำมาใช้เทียบเคียงได้ อีกทั้งช่วยลดขั้นตอนในการแยกสัญญาณในกรณีทีวัดสัญญาณเป็นสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมอง และมีราคาที่ถูกอีกด้วย โดยหลักการเกิดสัญญาณจากเพียโซอิเล็กทริกทรานซิวเซอร์นั้นจะใช้แรงกดที่เกิดจากการยึดหดตัวของกล้ามเนื้อบริเวณรอบดวงตามากระทำกับเพียโซอิเล็กทริกทรานซิวเซอร์เกิดเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยภายในงานวิจัยนี้ได้นำสัญญาณดังกล่าวมาแปลงให้อยู่ในโดเมนความถี่ และใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการยืนยันตัวตนบุคคล โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สัญญาณการกระพริบตาที่ได้จากเพียโซอิเล็กทริกทรานซิวเซอร์นั้น สามารถที่จะใช้เป็นทางเลือกหนึ่งในการยืนยันตัวตนบุคคลได้

1.4 ขอบเขตการวิจัย

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอวิธีการจำแนกบุคคลด้วยสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา โดยใช้เพียโซอิเล็กทริกทรานซิวเซอร์เป็นตัววัดสัญญาณ แทนการใช้สัญญาณไฟฟ้าในดวงตา โดยใช้หลักการแปลงฟูเรียร์เป็นเครื่องมือในการดึงลักษณะเด่นของสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา เพื่อใช้เป็นตัวแทนของสัญญาณข้อมูล และทำการจำแนกบุคคลโดยจำลองการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม

ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น ด้วยวิธีการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับคืนสภาพได้ (Resilient backpropagation)

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาความเป็นมาของงานวิจัย และทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในงานวิจัย
2. ทำการศึกษาสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาที่มีแหล่งกำเนิดจากกล้ามเนื้อบริเวณรอบดวงตา พร้อมกับคิดค้นวิธีการที่สามารถเทียบเคียงกับวิธีการที่มีอยู่เดิม และสามารถใช้งานได้จริง
3. ทำการเก็บข้อมูลสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาเพื่อสร้างฐานข้อมูลที่ใช้ในงานวิจัย
4. ทำการวิเคราะห์หาค่าสเปกตรัมโดยใช้วิธีการแปลงฟูเรียร์ที่ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier transform) เพื่อนำมาใช้เป็นลักษณะเด่นในกระบวนการตัดสินใจ
5. นำข้อมูลลักษณะเด่นที่ได้มาเข้าสู่ระบบ จากนั้นทำการเรียนรู้และทดสอบ
6. เก็บผลการทดลอง เพื่อคำนวณค่าประสิทธิภาพของระบบ

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กล่าวนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการ และทฤษฎี รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ซึ่งประกอบไปด้วยลักษณะพื้นฐาน และแนวทางการวิเคราะห์ของสัญญาณไฟฟ้าในดวงตา และสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา วงจรขยายสัญญาณ การมอดูเลตสัญญาณ หลักการที่ใช้ในการดึงลักษณะเด่นของสัญญาณ การสร้างโครงข่ายประสาทเทียมแบบเพอร์เซ็ปตรอนหลายชั้น ตลอดจนการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคลด้วยสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา

2.2 สัญญาณชีวไฟฟ้า (Bioelectric signals)

สัญญาณชีวไฟฟ้า [11] หรือ สัญญาณทางชีวภาพ (Bio signals) เป็นสัญญาณที่มีแหล่งกำเนิดมาจากเนื้อเยื่อภายในร่างกายของสิ่งมีชีวิตที่ยังมีชีวิตอยู่ ซึ่งสัญญาณที่ได้สามารถวัดได้จากการนำทรานซิวเตอร์ที่มีคุณสมบัติเฉพาะในการวัดการเปลี่ยนแปลงทางชีวไฟฟ้าของเซลล์หรืออวัยวะภายในร่างกาย โดยทั่วไปจะใช้อิเล็กโทรดในการวัด ซึ่งสัญญาณที่ได้จะมีแอมพลิจูดและความถี่ที่ต่างกัน ตัวอย่างเช่น สัญญาณคลื่นไฟฟ้าหัวใจ (Electrocardiogram : ECG) ที่วัดจากการทำงานของกล้ามเนื้อหัวใจ โดยวัดสัญญาณจากการติดทรานซิวเตอร์ที่หน้าอก ซึ่งช่วงความถี่ของสัญญาณที่วัดได้นั้นจะเท่ากับ 0.15- 150 เฮิร์ตซ์ [12] และสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมอง (Electroencephalogram : EEG) ที่วัดจากการทำงานของสัญญาณไฟฟ้าในสมอง โดยวัดสัญญาณจากการติดทรานซิวเตอร์ที่หนังศีรษะ ซึ่งช่วงความถี่ของสัญญาณที่วัดได้นั้นเท่ากับ 0.2-50 เฮิร์ตซ์ [12] เป็นต้น

โดยทั่วไปจะนำสัญญาณชีวไฟฟ้าไปใช้ประโยชน์ในแง่ของการแพทย์ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการศึกษาถึงการนำสัญญาณชีวไฟฟ้าไปใช้ในการพัฒนาระบบรักษาความปลอดภัย แทนการรักษาความปลอดภัยแบบเดิม ซึ่งใช้ลักษณะทางกายวิภาค เช่น ใบหน้า ลายนิ้วมือ เสียง และ ลักษณะทางพฤติกรรม เช่น ลายเซ็น การเดิน โดยลักษณะทางกายวิภาคและลักษณะทางพฤติกรรมนั้นมีความซ้ำซ้อนกันคือสามารถปลอมแปลงได้ง่ายจึงทำให้มีความไม่น่าเชื่อถือ ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาระบบรักษาความปลอดภัยด้วยการนำสัญญาณชีวไฟฟ้าไปใช้ในการยืนยันตัวตนบุคคล ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการนำสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาใช้ในการยืนยันตัวตนบุคคลเป็นหลัก

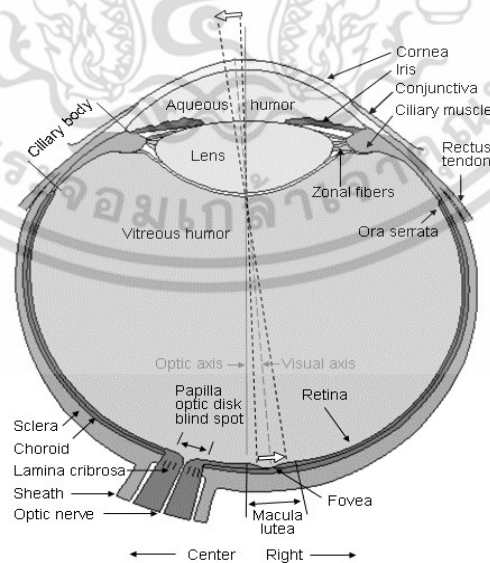
2.3 สัญญาณไฟฟ้าที่มีแหล่งกำเนิดมาจากดวงตา

2.3.1 องค์ประกอบหลักของดวงตา

ในหัวข้อนี้จะอธิบายลักษณะทางกายภาพของลูกตา กล้ามเนื้อภายในเข้าตาและหนังตา

2.3.1.1 ลักษณะทางกายภาพของดวงตา

จะทำการอธิบายองค์ประกอบหลักของดวงตา [11, 13] ผ่านการเดินทางของแสง เมื่อแสงเดินทางเข้าสู่ด้านหน้าของดวงตา แสงจะผ่านส่วนแรกของดวงตาคือกระจกตา (Cornea) ซึ่งทำหน้าที่ในการกระจายแสง ถัดจากกระจกตาแสงจะผ่านของเหลวใสที่เรียกว่า สารน้ำในลูกตา (Aqueous humor) โดยสารน้ำในลูกตาจะมีสารอาหารและออกซิเจนที่ใช้ในการหล่อเลี้ยงดวงตา จากนั้นแสงจะเดินทางผ่านเลนส์ (Lens) โดยมีกล้ามเนื้อยึดเลนส์ (Ciliary muscles) ทำหน้าที่ควบคุมรูปร่างของเลนส์รวมถึงดัชนีการหักเหของแสง ซึ่งเลนส์จะทำหน้าที่รวมแสง โดยที่ตำแหน่งของเลนส์นั้นจะมีผลต่อเส้นทางการเดินทางของแสง และความคมชัดของภาพที่ดวงตาได้รับ แสงที่ผ่านเลนส์จะถูกส่งไปยังจอตา (Retina) ซึ่งระหว่างเลนส์และจอตาจะมีสารโปรตีนใส (Vitreous humor) หรือที่เรียกว่า วัุ้นในลูกตา (Vitreous chamber) ที่มีหน้าที่ในการช่วยลูกตา ให้มีรูปร่างคงที่ รวมถึงเป็นแหล่งอาหารหล่อเลี้ยงแก้วตา, เนื้อเยื่อยึดเลนส์ โดยจอตาจะประกอบไปด้วยเซลล์ที่ไวต่อแสง (Photosensitive cells) และเส้นประสาทจำนวนมาก ซึ่งจะทำการสร้างภาพด้วยการเปลี่ยนแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าส่งไปยังสมองผ่านทางเส้นประสาทตาหรือเส้นประสาททมองคู่ที่ 2 (Optic nerve) โดยจะแสดงองค์ประกอบของดวงตาดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวางของดวงตาด้านซ้าย [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.2 ลักษณะทางกายภาพของกล้ามเนื้อภายในเบ้าตา

การหดตัวและคลายตัวของกล้ามเนื้อภายในเบ้าตา [15, 16] ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนไหวของลูกตา โดยกล้ามเนื้อภายในเบ้าตานี้ประกอบไปด้วยกล้ามเนื้อ 6 มัด ได้แก่ กล้ามเนื้อเมดไดออลเร็คทัส (Medial rectus), กล้ามเนื้อแลททีรอลเร็คทัส (Lateral rectus), กล้ามเนื้อซูพีเรียเร็คทัส (Superior rectus), กล้ามเนื้ออินฟีเรียเร็คทัส (Inferior rectus), กล้ามเนื้อซูพีเรียออบลิค (Superior oblique) และ กล้ามเนื้ออินฟีเรียออบลิค (Inferior oblique) โดยจะแสดงกล้ามเนื้อภายในเบ้าตาได้ดังรูปที่ 2.2

โดยที่กล้ามเนื้อเมดไดออลเร็คทัสและแลททีรอลเร็คทัส นั้นช่วยให้ลูกตาเคลื่อนไหวได้ในแนวแกนนอน ส่วนกล้ามเนื้อซูพีเรียเร็คทัสและกล้ามเนื้ออินฟีเรียเร็คทัส นั้นช่วยให้ลูกตาเคลื่อนไหวได้ในแนวแกนตั้งและสุดท้ายกล้ามเนื้อซูพีเรียออบลิคและกล้ามเนื้ออินฟีเรียออบลิค นั้นช่วยให้ลูกตาเคลื่อนไหวได้ในแนวแกนบิดกล่าวคือกล้ามเนื้อคู่นี้จะช่วยให้เราสามารถกรอกตาไปมาได้

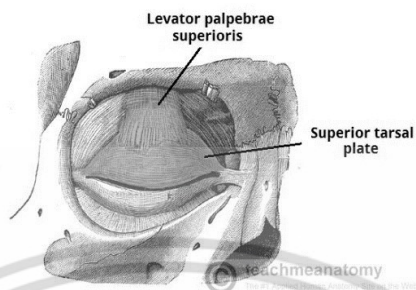


รูปที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบของกล้ามเนื้อภายในเบ้าตา [16]

2.3.1.3 ลักษณะทางกายภาพของหนังตา

หนังตา (Eye lid) มีหน้าที่ในการป้องกันแสง และฝุ่นละอองให้กับลูกตา โครงสร้างของหนังตาประกอบไปด้วยหลายชั้น โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะให้ความสนใจเกี่ยวกับชั้นกล้ามเนื้อของหนังตาเป็นหลัก ซึ่งชั้นกล้ามเนื้อของหนังตานี้เป็นองค์ประกอบที่ใช้ในการกระพริบตา ประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือ

1) กล้ามเนื้อยกหนังตาหรือกล้ามเนื้อลืมตา (Levator palpebrae superioris) เป็นกล้ามเนื้อมัดเดียวที่ทำหน้าที่ในการยกหนังตาด้านบนขึ้น โดยตำแหน่งของกล้ามเนื้อยกหนังตาจะอยู่ติดกับแผ่นหนังตาบน (Superior tarsal plate) ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 กล้ามเนื้อยกหนังตา [16]

2) กล้ามเนื้อหลับตา (Orbicularis oculi) เป็นกล้ามเนื้อมัดเดียวที่ทำหน้าที่หดตัวซึ่งจะทำให้เกิดการหลับตาหรือการที่หนังตาดับลงมา โดยลักษณะของกล้ามเนื้อหลับตานี้จะเป็นเส้นใยวงกลมล้อมรอบดวงตา ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กล้ามเนื้อหลับตา [29]

2.3.2 สัญญาณไฟฟ้าในดวงตา (Electrooculogram)

สัญญาณไฟฟ้าในดวงตา [11] นั้นเป็นสัญญาณที่เกิดขึ้นจากความต่างศักย์ของขั้วไฟฟ้าระหว่างหน้า (กระจกตา) และหลัง (จอตา) ของลูกตา ซึ่งให้ศักย์ไฟฟ้าที่เป็นบวกและลบตามลำดับ โดยการเคลื่อนไหวของลูกตานั้นจะส่งผลให้ขั้วไฟฟ้าเคลื่อนที่หรือเกิดการหมุนขึ้นและก่อให้เกิดการเปลี่ยนของขั้วไฟฟ้าสลับไปมาตามรอบการเคลื่อนไหวของลูกตา ซึ่งขนาดของสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาที่วัดได้นั้นอยู่ในช่วง 0.4-1.0 mV โดยทั่วไปจะนำสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาไปใช้ในงานที่ต้องการวัดการ

เคลื่อนที่ของดวงตา เช่น ในการวินิจฉัยความผิดปกติของระบบการมองเห็นและการใช้ในการตรวจจับ การเคลื่อนไหวของดวงตา อีกทั้งยังนำไปใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์ที่รองรับการใช้งานในผู้พิการอีกด้วย

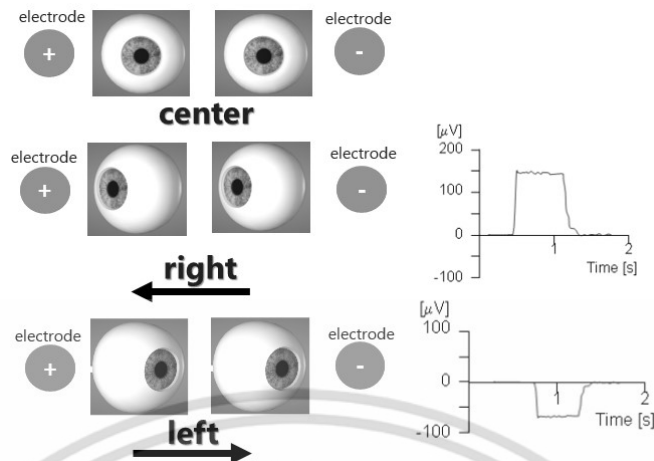
การวัดค่าสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาสามารถทำได้ 2 วิธี วิธีแรก คือการนำสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมอง มาทำการแยกสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาออก [17] ซึ่งวิธีการนี้将有ความซับซ้อนจากการแยกสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาออกจากสัญญาณไฟฟ้าคลื่นสมอง และสัญญาณที่ได้อาจมีความผิดพลาดจากการแยกสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาออกจากสัญญาณไฟฟ้าคลื่นสมอง วิธีที่สองคือการนำแผ่นอิเล็กโทรดติดข้างดวงตา [18] ซึ่งวิธีการนี้สามารถบันทึกสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาได้โดยตรง โดยสามารถแสดงการติดอิเล็กโทรดที่ตำแหน่งต่างๆ ได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การบันทึกสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาด้วยการติดอิเล็กโทรดที่ตำแหน่งต่างๆ

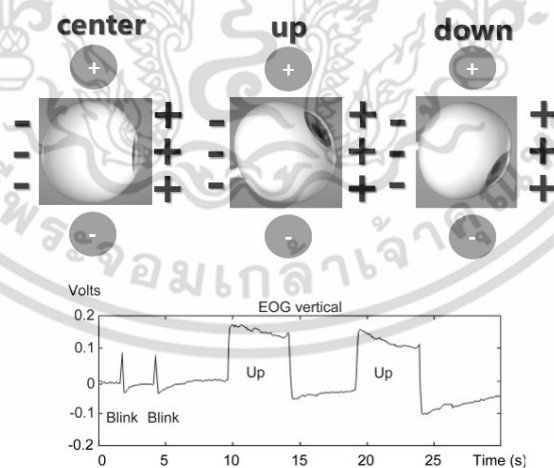
โดยสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาสามารถแบ่งได้ 3 แบบ ดังนี้

1). สัญญาณไฟฟ้าในดวงตาแนวแกนนอน (EOG Horizontal) เกิดจากการกรอกลูกตาในแนวแกนนอน ด้วยการกรอกลูกตาจากตำแหน่งมองตรง (center) ไปด้านซ้าย หรือจากตำแหน่งมองตรงไปด้านขวา ซึ่งจะให้สัญญาณที่มีแอมพลิจูดเป็นลบ และบวก ตามลำดับ โดยจะแสดงสัญญาณและตำแหน่งของเซนเซอร์ที่วัดได้ดังรูปที่ 2.6 จากรูปจะเห็นว่าขั้วศักย์ไฟฟ้าบวกจะอยู่ทางด้านหน้าของลูกตาหรือกระจกตา และขั้วศักย์ไฟฟ้าลบจะอยู่ทางด้านหลังของลูกตาหรือจอภาพ ส่งผลให้ขณะที่ทำการกรอกลูกตาไปด้านขวา สัญญาณไฟฟ้าที่ได้จะมีแอมพลิจูดเป็นบวกและ ขณะที่ทำการกรอกลูกตาไปด้านซ้ายจะมีค่าแอมพลิจูดเป็นลบ



รูปที่ 2.6 สัญญาณไฟฟ้าในดวงตาแนวแกนนอน

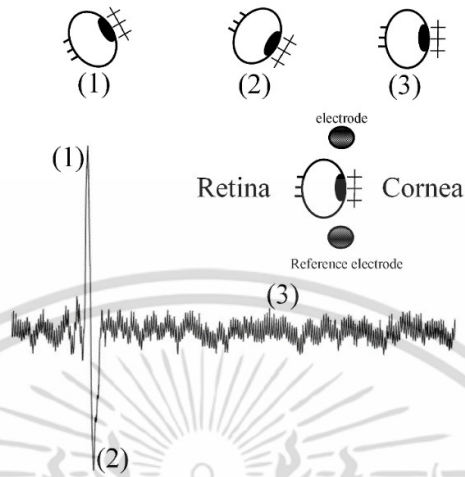
2). สัญญาณไฟฟ้าในดวงตาแนวแกนตั้ง (EOG Vertical) เกิดจากการรอกลูกตาในแนวแกนตั้ง ด้วยการรอกลูกตาจากตำแหน่งมองตรงไปด้านบน หรือจากตำแหน่งมองตรงไปด้านล่าง ซึ่งจะให้สัญญาณที่มีแอมพลิจูดเป็นบวก และลบ ตามลำดับ โดยจะแสดงสัญญาณ และตำแหน่งของเซนเซอร์ที่วัดดังรูปที่ 2.7 จากรูปจะเห็นได้ว่าขั้วศักย์ไฟฟ้าบวกจะอยู่ทางด้านหน้าของลูกตาหรือกระจกตา และขั้วศักย์ไฟฟ้าลบจะอยู่ทางด้านหลังของลูกตาหรือจอภาพ ส่งผลให้ขณะที่ทำการรอกลูกตาไปด้านบนสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จะมีแอมพลิจูดเป็นบวกและขณะที่ทำการรอกลูกตาลงด้านล่างจะมีค่าแอมพลิจูดเป็นลบ



รูปที่ 2.7 สัญญาณไฟฟ้าในดวงตาแนวแกนตั้ง

3). สัญญาณไฟฟ้าในดวงตาแบบกระพริบตา (EOG Eye blinking) โดยลักษณะการเกิดของสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาแบบกระพริบตาจะคล้ายกับสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาแนวแกนตั้ง แต่ต่างตรงที่

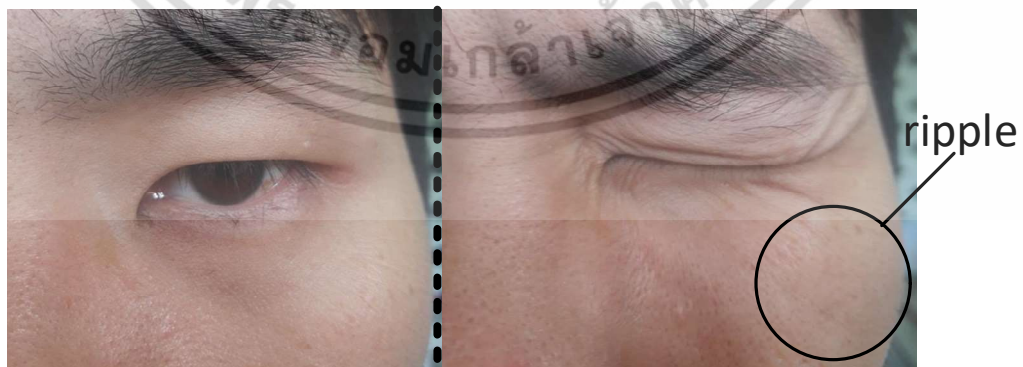
สัญญาณที่ได้จะเกิดจากการกรอกลูกตาไปทางด้านบน และลงด้านล่างอย่างรวดเร็วซึ่งเทียบเท่ากับการกระพริบตา โดยจะแสดงสัญญาณและตำแหน่งของเซ็นเซอร์ที่วัดดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 สัญญาณไฟฟ้าในดวงตาแบบกระพริบตา

2.3.3 สัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา (Eye muscle signal)

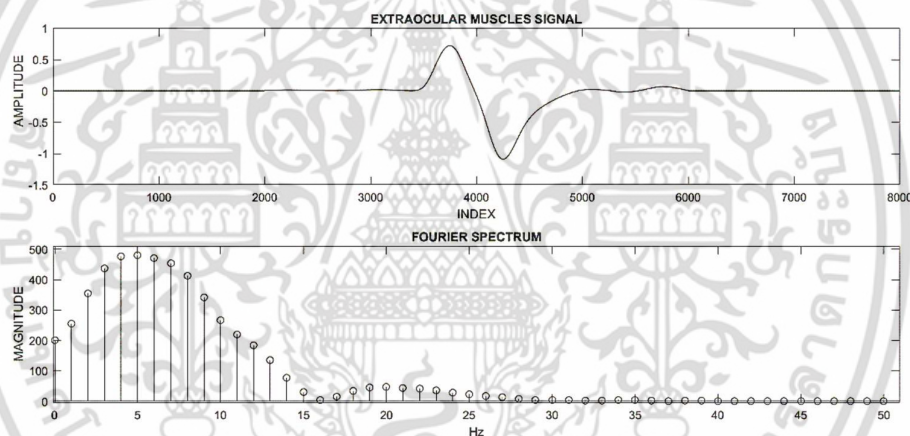
ในความเป็นจริงนั้นมนุษย์จะใช้กล้ามเนื้อที่เรียกว่า กล้ามเนื้อภายในเบ้าตา (หัวข้อที่ 2.3.1) ในการกรอกตาไปมา ซึ่งกล้ามเนื้อเหล่านี้จะทำการควบคุมการกรอกตาทุกทิศทาง ตั้งแต่การกรอกตาขึ้น/ลง ซ้าย/ขวา รวมถึงการเปิดปิดของเปลือกตา โดยการเปิดหรือปิดของเปลือกตา ถ้าทำการเปิดปิดโดยเร็วนั้น เราจะเรียกว่าการกระพริบตา ซึ่งในการกระพริบตาแต่ละครั้งนั้นจะใช้กล้ามเนื้อ 2 ชนิด คือกล้ามเนื้อยกหนังตาหรือกล้ามเนื้อลิ้มตา และ กล้ามเนื้อหลับตา ซึ่งในการกระพริบตาแต่ละครั้งนั้นจะก่อให้เกิดกล้ามเนื้อขึ้นในลักษณะนูนขึ้น (Ripple) ที่หางตาและบริเวณด้านล่างของดวงตา ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กล้ามเนื้อที่มีลักษณะที่นูนขึ้น ขณะทำการกระพริบตา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากกลไกการเกิดของสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตานั้นเป็นแบบเชิงกล (Mechanical) ซึ่งจะต่างกับสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาซึ่งมีกลไกการเกิดแบบเชิงไฟฟ้า ดังนั้นในการที่ทำการวัดสัญญาณที่มีการเกิดลักษณะเชิงกลนี้จะต้องใช้ทรานสดิวเซอร์ชนิดที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานเชิงกลให้เป็นพลังงานเชิงไฟฟ้า โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ในการแปลงพลังงานเชิงกลให้เป็นพลังงานเชิงไฟฟ้า โดยการนำเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ติดบริเวณด้านล่างของดวงตา เมื่อทำการกระพริบตาจะส่งผลให้เกิดกล้ามเนื้อขึ้น ซึ่งกล้ามเนื้อที่ขยับขึ้นนี้จะก่อให้เกิดแรงเชิงกลกระทำกับเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ และเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์จะเปลี่ยนพลังงานเชิงกลให้เป็นพลังงานเชิงไฟฟ้า โดยการกระพริบตา 1 ครั้ง จะเกิดสัญญาณที่เป็นแอมพลิจูดบวกและลบ ซึ่งมีรูปร่างของสัญญาณคล้ายกับสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาแบบกระพริบตา และสามารถแสดงองค์ประกอบของความถี่ของสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาได้ดังรูปที่ 2.10 จากรูปจะเห็นว่าสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาจะมีความถี่อยู่ในช่วง 0-30 เฮิร์ตซ์



รูปที่ 2.10 องค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา

2.4 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient)

การหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ [19] คือ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลตั้งแต่ 2 ชุดขึ้นไป เช่น การหาความสัมพันธ์ระหว่างส่วนสูงกับน้ำหนัก เป็นต้น ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาและสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาเพื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างทั้ง 2 สัญญาณว่ามีความสัมพันธ์มากหรือน้อยเพียงใด โดยจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ในการบ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณ ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ออกมาในรูปแบบของตัวเลข

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์นั้นจะใช้สัญลักษณ์ ρ แทนค่าสัมประสิทธิ์ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะมีค่าอยู่ในช่วง $[-1,1]$ ถ้าหากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ได้นั้นมีค่าเป็นบวก จะบ่งบอก

ถึงการมีความสัมพันธ์กันไปในทิศทางเดียวกัน หรือถ้าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้นั้นมีค่าเป็นลบ จะบ่งบอกถึงการมีความสัมพันธ์กันไปในทิศทางตรงกันข้าม โดยค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้นั้นสามารถใช้เกณฑ์ดังตารางที่ 2.1 ในการพิจารณาขนาดของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพื่อใช้ในการบอกระดับหรือขนาดของความสัมพันธ์

ตารางที่ 2.1 เกณฑ์ในการบอกระดับหรือขนาดของความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ [28]

ค่า ρ ระดับของความสัมพันธ์	ความหมาย
0.90-1.00	มีความสัมพันธ์กันสูงมาก
0.70-0.90	มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง
0.50-0.70	มีความสัมพันธ์กันในระดับปานกลาง
0.30-0.50	มีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำ
0.00-0.30	มีความสัมพันธ์กันในระดับต่ำมาก
0	ไม่มีความสัมพันธ์ใดๆ

โดยทั่วไปนั้นสามารถทำการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ได้หลากหลายแบบวิธี แต่ภายในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะขอกล่าวถึงการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน

2.4.1 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation coefficient)

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สันนั้นใช้หาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างข้อมูล 2 ชุด A,B โดยสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ได้ดังสมการที่ 2.1

$$\rho(A,B) = \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M \left(\frac{A_m - \mu_A}{\sigma_A} \right) \left(\frac{B_m - \mu_B}{\sigma_B} \right) \quad (2.1)$$

เมื่อ A_m คือ สมาชิกในชุดข้อมูลสัญญาณ A ที่มีความยาวเท่ากับ M ,

$$A = \{A_1, A_2, \dots, A_M\}$$

B_m คือ สมาชิกในชุดข้อมูลสัญญาณ B ที่มีความยาวเท่ากับ M ,

$$B = \{B_1, B_2, \dots, B_M\}$$

μ_A คือ ค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลสัญญาณ A มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M A_m$

μ_B คือ ค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลสัญญาณ B มีค่าเท่ากับ $\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M B_m$

σ_A คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดข้อมูลสัญญาณ A มีค่าเท่ากับ $\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (A_m - \mu_A)^2}$

σ_B คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดข้อมูลสัญญาณ B มีค่าเท่ากับ $\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (B_m - \mu_B)^2}$

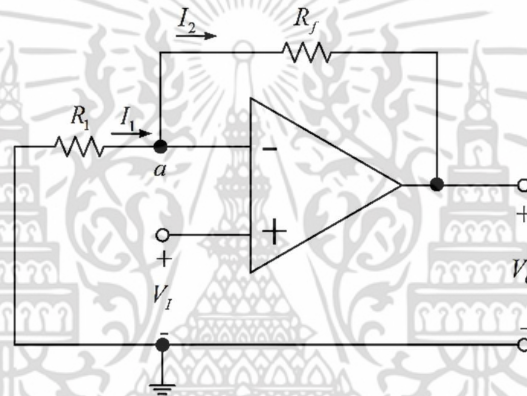
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 วงจรขยายสัญญาณ

ในหัวข้อนี้จะทำการอธิบายวงจรขยายสัญญาณ [20] พื้นฐานแบบต่าง ๆ ที่ใช้ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์หลัก ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะอธิบายเฉพาะวงจรที่ได้นำไปประยุกต์ใช้เท่านั้น

2.5.1 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting amplifier circuit)

วงจรขยายแบบไม่กลับเฟสเป็นวงจรขยายที่มีการป้อนสัญญาณอินพุต V_i เข้าที่ขาไม่กลับขั้วของออปแอมป์และความต้านทาน R_f จะต่อเข้ากับขากลับขั้วเทียบกับกราวด์ โดยจะทำการต่อความต้านทานป้อนกลับ R_f ระหว่างขาเอาท์พุทและขากลับขั้ว ดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

จากรูป กำหนดให้ V_a คือ แรงดันที่ขากลับขั้ว, V_i คือ แรงดันที่ขาไม่กลับขั้ว และ V_o คือ แรงดันที่ขาเอาท์พุท เมื่อพิจารณาที่โหนด a ที่กำหนดดังรูปที่ 2.10 โดยใช้กฎของ Kirchoff current law (KCL) และกฎของโอห์ม

จาก KCL

$$\sum I = 0 \quad (2.2)$$

จะได้

$$I_1 = I_2$$

$$\frac{0 - V_a}{R_1} = \frac{V_a - V_o}{R_f} \quad (2.3)$$

เมื่อ $V_a = V_i$ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

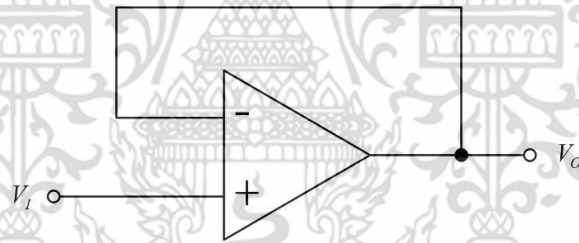
$$\frac{-V_I}{R_1} = \frac{V_I - V_O}{R_f} \quad (2.4)$$

เมื่อทำการจัดรูปให้อยู่ในรูปอัตราขยาย A_v จะได้

$$A_v = \frac{V_O}{V_I} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (2.5)$$

2.5.2 วงจรส่งผ่านแรงดัน (Voltage follower)

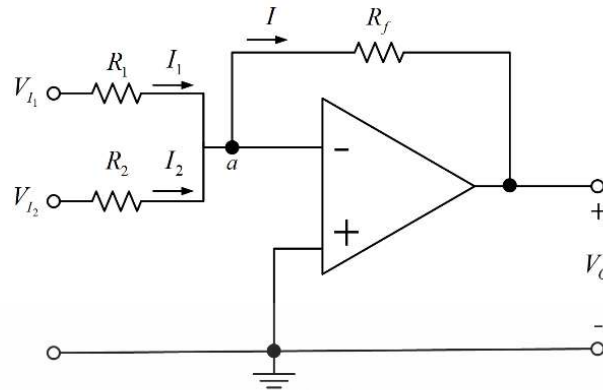
วงจรส่งผ่านแรงดันหรือวงจรบัฟเฟอร์ (Buffer) ดังแสดงในรูปที่ 2.12 เป็นวงจรที่มีอิมพีแดนซ์ขาเข้าของวงจรค่อนข้างสูง ในขณะที่อิมพีแดนซ์ขาออกของวงจรค่อนข้างต่ำ ซึ่งเป็นวงจรที่ทำหน้าที่ในการป้องกันไม่ไห้กระแสที่ไหลเข้าไปในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีความละเอียดอ่อนค่อนข้างสูง โดยจะจ่ายกระแสหรือแรงดัน เพื่อให้อุปกรณ์ที่มีความสามารถในการจ่ายกระแสได้น้อยหรือมีความบอบบาง สามารถที่จะควบคุมอุปกรณ์ที่ใช้กระแสสูงๆ ได้ เมื่อเชื่อมต่อกับวงจรอื่นแล้วจะไม่ทำให้วงจรอื่นมีผลที่แตกต่างไปจากเดิม โดยวงจรบัฟเฟอร์นั้นจะมีอัตราขยายเท่ากับ 1 หรือ แรงดันที่ขาไม่กลับขั้ว (V_I) มีค่าเท่ากับแรงดันที่ขาเอาต์พุต (V_O)



รูปที่ 2.12 วงจรส่งผ่านแรงดัน

2.5.3 วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ (Summing amplifier)

นอกจากใช้ออปแอมป์ในการขยายสัญญาณแล้วยังสามารถรวม (บวกหรือลบ) ได้อีกด้วย โดยลักษณะของวงจรขยายแบบรวมสัญญาณคือ การต่อวงจรออปแอมป์เพื่อให้อรับอินพุตหลายๆ สัญญาณรวมกัน ซึ่งค่าเอาต์พุตที่ได้จะเป็นผลรวมของค่าแรงดันของค่าอินพุตที่ป้อนเข้าไป โดยมีลักษณะการต่อวงจรแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วงจรขยายแบบรวมสัญญาณ

จากรูป กำหนดให้ V_1, V_2 คือ แรงดันอินพุต, V_a คือ แรงดันที่ขากลับขั้ว และ V_o คือ แรงดันที่ขาเอาต์พุต เมื่อพิจารณาที่โหนด a ที่กำหนดดังรูปที่ 2.13 โดยใช้กฎของ Kirchoff current law และกฎของโอห์ม

จาก KCL ในสมการที่ 2.2 จะได้

$$I = I_1 + I_2 \quad (2.6)$$

เนื่องจาก

$$I = \frac{V_a - V_o}{R_f}, I_1 = \frac{V_1 - V_a}{R_1}, I_2 = \frac{V_2 - V_a}{R_2} \text{ และ } V_a = 0 \quad (2.7)$$

เมื่อนำค่าในสมการ (2.7) แทนในสมการ (2.6) จะได้สมการแรงดันเอาต์พุตดังนี้

$$V_o = -\left(\frac{R_f}{R_1} V_1 + \frac{R_f}{R_2} V_2\right) \quad (2.8)$$

2.6 การมอดูเลตและการดีมอดูเลตขนาด (Amplitude modulation and demodulation)

2.6.1 การมอดูเลตขนาด

การมอดูเลตขนาด [21] เป็นการฝากสัญญาณในแบนด์มูลฐานหรือสัญญาณข่าวสารไปกับคลื่นพาห์ โดยการเคลื่อนย้ายย่านความถี่ของสัญญาณในแบนด์มูลฐานไปอยู่ในช่วงความถี่ของช่องการสื่อสารเพื่อที่จะได้สามารถส่งสัญญาณข่าวสารผ่านช่องการสื่อสารไปได้ ซึ่งการมอดูเลตขนาดจะใช้ระดับขนาดของสัญญาณข่าวสารไปควบคุมให้ขนาดของคลื่นพาห์ให้เปลี่ยนค่าตามขนาดของสัญญาณข่าวสาร

โดยภายในวิทยานิพนธ์นี้จะอธิบายถึงการมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่ ซึ่งวิธีการนี้ทำได้โดยใช้คลื่นพาห้ $A_c \cos(\omega_c t)$ ที่มีขนาดที่เหมาะสมกับเครื่องรับสัญญาณ ส่งรวมกับสัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตขนาดชนิดแถบข้างคู่ขจัดคลื่นพาห้ ดังแสดงในสมการที่ 2.9 โดยกำหนดให้ $m(t)$ เป็นสัญญาณข่าวสารหรือสัญญาณมูลฐานที่ต้องการนำไปมอดูเลตกับสัญญาณคลื่นพาห้

$$f(t) = m(t)\cos(\omega_c t) \quad (2.9)$$

นำ $f(t)$ มารวมกับสัญญาณคลื่นพาห้ $A_c \cos(\omega_c t)$ จะได้

$$S_{AM}(t) = A_c \cos(\omega_c t) + f(t) \quad (2.10)$$

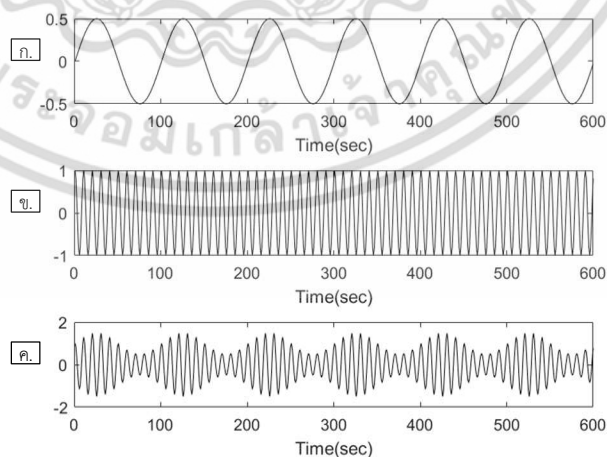
เมื่อแทนค่า $f(t)$ ลงใน สมการที่ 2.10 จะได้

$$S_{AM}(t) = A_c \cos(\omega_c t) + m(t)\cos(\omega_c t) \quad (2.11)$$

โดยที่ A_c คือ ค่าแอมพลิจูดของคลื่นพาห้ และเมื่อทำการจัดรูปแบบใหม่จะได้

$$S_{AM}(t) = A_c \left(1 + \frac{m(t)}{A_c}\right) \cos(\omega_c t) \quad (2.12)$$

จากสมการที่ 2.12 จะเห็นได้ว่าการมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่ นั้น สามารถสร้างได้โดยการเพิ่มระดับไฟกระแสดตรง (DC level) เข้าไปที่สัญญาณข่าวสาร $m(t)$ ก่อนที่จะทำการมอดูเลต จากสมการดังกล่าว นั้นสัญญาณคลื่นพาห้จะมีขนาดที่มีค่าเท่ากับ $A_c \left(1 + \frac{m(t)}{A_c}\right)$ โดยจะเรียกขนาดนี้ว่า กรอบของสัญญาณคลื่นพาห้ (Carrier envelope) และสามารถแสดงสัญญาณการมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่ได้ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 การมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่

ก). สัญญาณข่าวสาร ข). สัญญาณคลื่นพาห้ ค). สัญญาณมอดูเลตขนาด ชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะสามารถหาค่าดัชนีของการมอดูเลตขนาด (Amplitude modulation index : μ) ได้ดังนี้ เมื่อสมมุติให้สัญญาณข่าวสารมีค่าดังสมการที่ 2.13

$$m(t) = A_m \cos(\omega_m t) \quad (2.13)$$

เมื่อนำ $m(t)$ ไปแทนค่าในสมการที่ 2.12 จะได้

$$S_{AM}(t) = A_c \left(1 + \frac{A_m}{A_c} \cos(\omega_m t)\right) \cos(\omega_c t) \quad (2.14)$$

จากสมการที่ 2.14 สามารถหาค่าดัชนีของการมอดูเลตขนาด (μ) ได้ดังสมการที่ 2.15

$$\mu = \frac{A_m}{A_c} \quad (2.15)$$

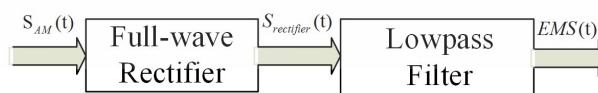
เพื่อที่จะให้ขั้นตอนในส่วนของการตีมอดูเลตสัญญาณแบบตรวจจับกรอบสัญญาณนั้นสามารถตีมอดูเลตสัญญาณข่าวสารออกมาไม่ผิดเพี้ยน โดยมีเงื่อนไขคือ ค่า $A_c \geq A_m$ หรือ $\mu \leq 1$ ต้องเป็นจริง

2.6.2 การตีมอดูเลตขนาด

การตีมอดูเลตสัญญาณมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่นั้นสามารถทำได้หลายวิธี โดยภายในวิทยานิพนธ์นี้จะขอกล่าวถึงวิธีการตีมอดูเลตขนาดโดยใช้วงจรตรวจจับกรอบสัญญาณ (Envelope detector) [22]

2.6.2.1 การตีมอดูเลตขนาดด้วยวงจรตรวจจับกรอบสัญญาณ

วิธีการนี้จะนำสัญญาณ $S_{AM}(t)$ ที่มีความถี่ของข่าวสารน้อยกว่าความถี่ของคลื่นพาห้ ($\omega_m < \omega_c$) มาทำการตรวจจับกรอบสัญญาณโดยการป้อนสัญญาณไปยังวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Full-wave rectifier) จากนั้นนำสัญญาณที่ผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น มาทำการกรองด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังแสดงบล็อกไดอะแกรมการตีมอดูเลตขนาดได้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 บล็อกไดอะแกรมการตีมอดูเลตขนาด

จากสัญญาณ $S_{AM}(t)$ ในสมการที่ 2.12 เมื่อทำการนำสัญญาณ $S_{AM}(t)$ มาผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น ซึ่งคุณสมบัติของวงจรเรียงกระแสแบบนี้ จะให้ผลเหมือนการนำสัญญาณมาหาค่าสัมบูรณ์ทางคณิตศาสตร์ จะได้ดังสมการที่ 2.16

$$\begin{aligned} S_{rectifier}(t) &= |S_{AM}(t)| = \left| A_c \left(1 + \frac{m(t)}{A_c} \right) \cos(\omega_c t) \right| \\ &= A_c \left(1 + \frac{m(t)}{A_c} \right) |\cos(\omega_c t)| \end{aligned} \quad (2.16)$$

จะได้

$$S_{rectifier}(t) = A_c \left(1 + \frac{m(t)}{A_c} \right) \left[\frac{2}{\pi} + \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\pi)}{1-4n^2} \cos(2n\omega_c t) \right] \quad (2.17)$$

เมื่อทำการกระจายพจน์ $A_c \left(1 + \frac{m(t)}{A_c} \right)$ เข้าไป จะได้สมการที่ 2.18

$$S_{rectifier}(t) = \frac{2A_c \left(1 + \frac{m(t)}{A_c} \right)}{\pi} + \frac{4A_c \left(1 + \frac{m(t)}{A_c} \right)}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(n\pi)}{1-4n^2} \cos(2n\omega_c t) \quad (2.18)$$

จากสมการที่ 2.18 จะเห็นได้ว่าพจน์แรกทางด้านขวามือของสมการนั้นไม่มีสัญญาณคลื่นพาห้ ซึ่งสัญญาณข่าวสารนั้นจะอยู่ในช่วงความถี่ต่ำ แต่ในขณะที่พจน์ที่ 2 และ 3 ทางด้านขวามือของสมการนั้นมีสัญญาณคลื่นพาห้จึงอยู่ในช่วงความถี่ที่สูงกว่า ดังนั้นจึงนำสมการที่ 2.18 มาผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งจะได้ผลดังสมการที่ 2.19

$$s(t) = \frac{2A_c \left(1 + \frac{m(t)}{A_c} \right)}{\pi} \quad (2.19)$$

2.7 ตัวกรองสัญญาณเชิงเลข (Digital filter)

ตัวกรองสัญญาณเชิงเลข [23] นั้นมีบทบาทอย่างมากต่อการประยุกต์ใช้ในงานด้านการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ไม่ว่าจะเป็นงานด้านการประมวลผลสัญญาณชีวการแพทย์ การประมวลผลภาพ (Image processing) เป็นต้น ล้วนแต่มีการใช้ตัวกรองสัญญาณเชิงเลขด้วยกันทั้งสิ้น โดยทั่วไปตัวกรองสัญญาณเชิงเลขสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด (Finite impulse response : FIR filters) และตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด (Infinite impulse response : IIR filters) ภายในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัดมาใช้ในขั้นตอนเตรียมสัญญาณ ซึ่งมีหลักการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.1 การออกแบบตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัดแบบเฟสเชิงเส้น (Design of linear-phase FIR filters)

ตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัดแบบเฟสเชิงเส้นนั้น เป็นตัวกรองพื้นฐานและสามารถออกแบบได้ง่าย อีกทั้งยังมีผลตอบสนองเฟสแบบเชิงเส้น กล่าวคือสัญญาณเอาต์พุตจะไม่มี ความผิดเพี้ยนเกิดขึ้น โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตได้ดังสมการที่ 2.20

$$y(n) = \sum_{m=0}^{M-1} h(m)x(n-m) \quad (2.20)$$

$$= h(0)x(n) + h(1)x(n-1) + h(2)x(n-2) + \dots + h(M-1)x(n-(M-1))$$

โดยที่ $x(n)$ คือ อินพุตที่ป้อน

$y(n)$ คือ เอาต์พุตที่ได้

$h(m)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองความถี่

M คือ อันดับของตัวกรอง

โดยสัญญาณเอาต์พุต $y(n)$ ที่ได้จะเกิดจากผลรวมจากการคูณกันของสัญญาณอินพุตที่เข้ามา ในสถานะก่อนหน้า กับค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองความถี่ $h(m)$ โดยที่ $m = 0, 1, \dots, M-1$ ซึ่งวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์ $h(m)$ ของตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์นั้นสามารถหาได้หลายวิธี แต่ภายในวิทยานิพนธ์นี้จะขออธิบายวิธีหน้าต่าง (Window method) แบบฟังก์ชันฮัมมิงเพียงอย่างเดียว

2.7.1.1 การออกแบบตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัดเฟสเชิงเส้นด้วยหน้าต่างแบบฟังก์ชันฮัมมิง

วิธีการนี้จะสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์ $h(m)$ ของตัวกรองความถี่ได้ โดยเริ่มจากคุณลักษณะของผลตอบสนองความถี่ที่ต้องการ $H_d(\omega)$ และผลตอบสนองอิมพัลส์ในอุดมคติ $h_d(m)$ ดังสมการที่ 2.21 และ 2.22

$$H_d(\omega) = \sum_{m=0}^{\infty} h_d(m)e^{-jom} \quad (2.21)$$

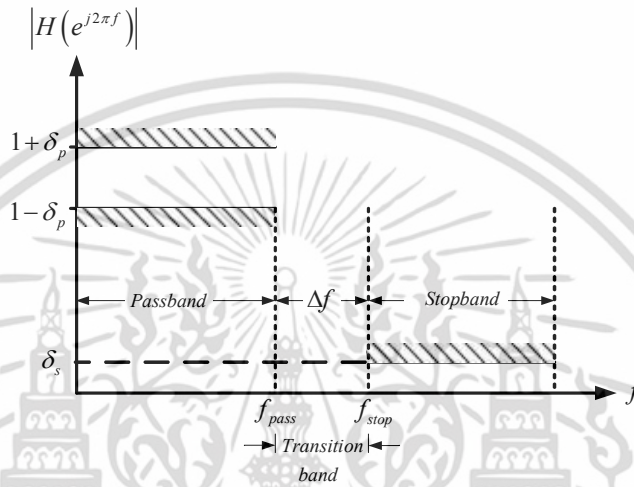
โดยที่

$$h_d(m) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H_d(\omega)e^{jom} d\omega \quad (2.22)$$

เนื่องจากวิธีการนี้ใช้ความยาวสัมประสิทธิ์ตัวกรอง $h(m)$ ที่จำกัด ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องตัด $h_d(m)$ ที่มีความยาว $m = M-1$ ซึ่งการตัดความยาวของ $h_d(m)$ นั้นจะสามารถเทียบเท่ากับการคูณ $h_d(m)$ ในสมการที่ 2.23 ด้วยฟังก์ชันหน้าต่าง $w(m)$ ที่ถูกกำหนดโดย

$$w(m) = \begin{cases} 1, & m = 0, 1, \dots, M-1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.23)$$

ในการออกแบบตัวกรองความถี่นั้น จำเป็นต้องทำการกำหนดรายละเอียด ตั้งแต่ชนิดของตัวกรองที่ต้องการ ค่าความถี่ตัด และรายละเอียดอื่นๆ เช่น ค่าความถี่ที่ขอบแถบผ่าน (f_{pass}), ค่าความถี่ที่ขอบแถบหยุด (f_{stop}), ค่าการกระเพื่อมในแถบผ่าน (δ_p) และ ค่าการลดทอนในแถบหยุด (δ_s) โดยจะทำการแสดงรายละเอียดของผลตอบสนองทางขนาด ซึ่งในที่นี้จะยกตัวอย่างรายละเอียดผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

จากรูปที่ 2.16 นั้นสามารถหาค่า Passband ripple และ ค่า Stopband attenuation ได้ดังสมการที่ 2.24 และ 2.25 ตามลำดับ เนื่องจากภายในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ฟังก์ชันหน้าต่างฮัมมิง ซึ่งได้ระบุค่า Passband ripple และ Stopband attenuation มีค่าประมาณ 0.0194 และ 53 เดซิเบล ตามลำดับ และสามารถหาค่าย่านแถบเปลี่ยนผ่านที่ผ่านการนอมอลไลซ์ (Transition band : Δf) ได้โดยการนำค่าความถี่ที่ขอบแถบหยุดมาลบกับค่าความถี่ที่ขอบแถบผ่าน และนอมอลไลซ์ด้วยค่าความถี่ของการสุ่ม (Normalized frequency : f_s) ดังสมการที่ 2.26

$$\text{Passband ripple} = 20 \log(\delta_p) \text{ dB} \quad (2.24)$$

$$\text{Stopband attenuation} = -20 \log(\delta_s) \text{ dB} \quad (2.25)$$

$$\Delta f = \frac{|f_{stop} - f_{pass}|}{f_s} \quad (2.26)$$

โดยที่ f_{pass} = ค่าความถี่ตัด f_c

โดยฟังก์ชันหน้าต่างแบบฟังก์ชันฮัมมิงนั้น สามารถหาค่าอันดับของตัวกรองได้ดังสมการที่ 2.27 และ สามารถหาค่าฟังก์ชันหน้าต่าง $w(m)$ ได้ดังสมการที่ 2.28

$$M = \frac{3.3}{\Delta f} \quad (2.27)$$

$$w(m) = 0.5 + 0.5 \cos\left(\frac{2\pi m}{M}\right); \quad |m| \leq \frac{(M-1)}{2} \quad (2.28)$$

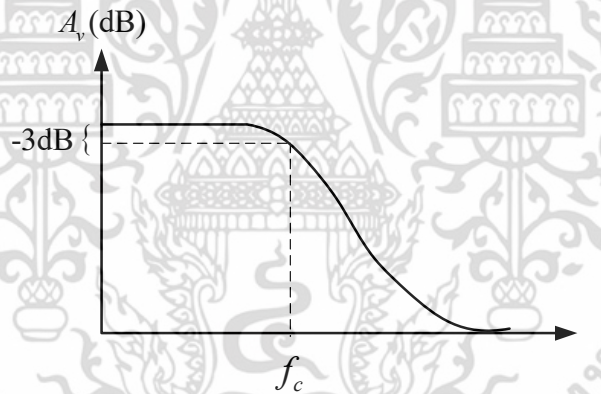
ดังนั้นผลตอบสนองอิมพัลส์ $h(m)$ ของตัวกรองจะสามารถหาค่าได้ ดังสมการที่ 2.29

$$h(m) = h_d(m) \times w(m) \quad (2.29)$$

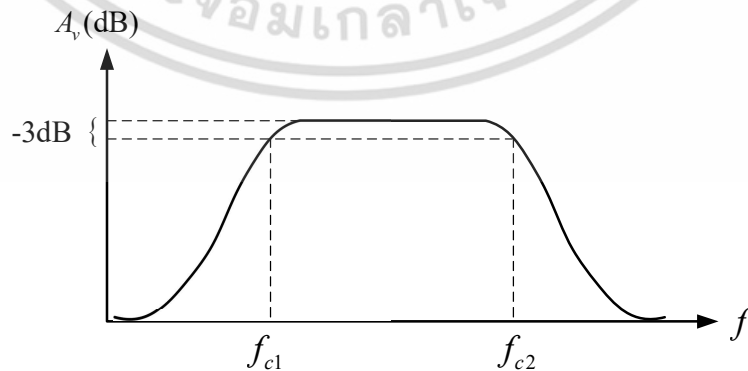
โดยที่

$$h(m) = \begin{cases} h_d(m), & m = 0, 1, \dots, M-1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

ในวิชยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านและแถบผ่าน โดยจะแสดงผลตอบสนองความถี่ในหน่วยเดซิเบลของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านและแถบผ่าน ดังรูปที่ 2.17 และ 2.18 ตามลำดับ และสามารถหาค่าผลตอบสนองอิมพัลส์ในอุดมคติของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านและแถบผ่านได้ดังสมการที่ 2.30 และ 2.31 ตามลำดับ



รูปที่ 2.17 ผลตอบสนองความถี่ในหน่วยเดซิเบลของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 2.18 ผลตอบสนองความถี่ในหน่วยเดซิเบลของตัวกรองความถี่แถบผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h_d(m) = \begin{cases} 2f_c & ; m = 0 \\ 2f_c \frac{\sin(m\omega)}{m\omega} & ; m \neq 0 \end{cases} \quad (2.30)$$

$$h_d(m) = \begin{cases} 2(f_{c2} - f_{c1}) & ; m = 0 \\ 2f_{c2} \frac{\sin(m\omega_2)}{m\omega_2} - 2f_{c1} \frac{\sin(m\omega_1)}{m\omega_1} & ; m \neq 0 \end{cases} \quad (2.31)$$

2.8 กระบวนการดึงลักษณะเด่น (Feature extraction)

ในการนำสัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตามาวิเคราะห์ จำเป็นที่จะต้องทำการดึงลักษณะเด่นของสัญญาณข้อมูลออกมาก่อน เพื่อที่จะใช้เป็นตัวแทนของสัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตา โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอกระบวนการดึงลักษณะเด่นของสัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตาด้วยการวิธีแปลงฟูเรียร์ไม่ต่อเนื่อง

2.8.1 การแปลงฟูเรียร์ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier transform)

วิทยานิพนธ์นี้ได้ประมวลผลสัญญาณในโดเมนของเวลาให้อยู่ในโดเมนของความถี่ ซึ่งจะทำให้สามารถเห็นถึงองค์ประกอบย่อยของสัญญาณที่เป็นส่วนสำคัญ โดยได้ทำการเลือกใช้วิธีการแปลงฟูเรียร์ไม่ต่อเนื่อง มาใช้ในการดึงลักษณะเด่นที่สำคัญของสัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตาออกมา เพื่อที่จะนำองค์ประกอบที่มีความสำคัญมาใช้ในการประมวลผล โดยที่การแปลงฟูเรียร์ที่ไม่ต่อเนื่องจะทำการแปลงสัญญาณที่มีความยาวจำกัด ในโดเมนของเวลาให้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของฟูเรียร์ในโดเมนของความถี่ โดยสามารถหาสัมประสิทธิ์ของฟูเรียร์ ได้จากสมการที่ 2.32

$$X(k) = \sum_{n=0}^{M-1} x(n) e^{-j2\pi kn/M} \quad (2.32)$$

เมื่อ $x(n)$ คือ สัญญาณอินพุตในโดเมนเวลาที่มีความยาว M และ $X(k)$ คือค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ในโดเมนของความถี่ โดยที่ n, k คือ ตัวชี้ลำดับของสัญญาณในโดเมนเวลาและโดเมนของความถี่ตามลำดับ ซึ่ง $n, k = 0, 1, 2, \dots, M-1$ และเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ $X(k)$ มีค่าเป็นจำนวนเชิงซ้อน จึงสามารถเขียนให้อยู่ในรูปพิกัดเชิงขั้ว ได้ดังสมการที่ 2.33

$$X(k) = |X(k)| e^{-j\theta(k)} = \text{Re}(k) + j \text{Im}(k) \quad (2.33)$$

โดย $\text{Re}(k)$ และ $\text{Im}(k)$ คือค่าของส่วนจริงและค่าของส่วนจินตภาพของ $X(k)$ ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่าขนาดของสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ได้ตามสมการที่ 2.34 และค่า θ ซึ่งเป็นค่าเฟสของค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ได้ดังสมการที่ 2.35

$$|X(k)| = \sqrt{\text{Re}^2(k) + \text{Im}^2(k)} \quad (2.34)$$

$$\theta(k) = \arctan(\text{Im}(k)/\text{Re}(k)) \quad (2.35)$$

2.9 ระบบโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network system)

โครงข่ายประสาทเทียม [24] คือโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่จำลองการทำงานของเครือข่ายเส้นประสาทในสมองมนุษย์ เพื่อใช้ในการเรียนรู้จัดจำรูปแบบ เช่นเดียวกับความสามารถที่มีในสมองมนุษย์ ซึ่งภายในสมองของมนุษย์นั้นประกอบไปด้วยหน่วยประมวลผลผลเรียกว่า เซลล์ประสาท (Neuron) มีจำนวนอยู่ประมาณล้านล้านเซลล์ และมีการเชื่อมต่อไปยังเซลล์ประสาทอื่นๆ อีกมากมาย โดยจะทำงานคล้ายกับคอมพิวเตอร์ที่มีการปรับตัวเองแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) และทำงานแบบขนาน ในการดูแลจัดการการทำงานร่วมกันของเซลล์ประสาทในสมอง ส่งผลให้มนุษย์สามารถที่จะเรียนรู้จัดจำสิ่งต่างๆ ได้เร็ว

ดังนั้นจึงได้มีการจำลองการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม โดยให้เซลล์ประสาทเทียมเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการหาเอาท์พุท $y_k(p)$ ซึ่งสามารถหาได้จาก ผลคูณระหว่างอินพุท $x(p)$ กับเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก (Weight, $W(p)$) โดยที่ค่า $y_k(p)$ ที่ได้นั้นจะมีค่าตามฟังก์ชันกระตุ้น $f(\bullet)$ ที่ใช้ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$y_k(p) = f(W(p) \cdot x(p)) \quad (2.36)$$

เมื่อ
$$W(p) = [W_{j0}, W_{j1}, \dots, W_{ji}, \dots, W_{jn}]$$

$$x(p) = [x_0, x_1, \dots, x_i, \dots, x_n]^T$$

และ p คือจำนวนรอบของการเรียนรู้

โดยในหัวข้อนี้จะทำการอธิบายถึง ชนิดของฟังก์ชันกระตุ้นต่างๆ สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม และกระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม ดังนี้

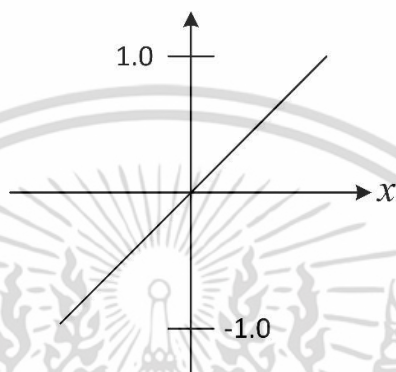
2.9.1 ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function)

ฟังก์ชันกระตุ้น $f(\bullet)$ มีอยู่หลากหลายชนิด โดยทั่วไปสามารถพบฟังก์ชันกระตุ้นที่พบเจอในโครงข่ายประสาทเทียมมากที่สุดอยู่ 4 ชนิด ดังนี้

2.9.1.1 ฟังก์ชันกระตุนเชิงเส้น (Linear function)

เอาต์พุตของฟังก์ชันเชิงเส้นนั้น จะมีค่าอยู่ในช่วง $-\infty$ ถึง ∞ โดยแสดงสมการของฟังก์ชันได้ดังสมการที่ 2.37 สามารถแสดงรูปฟังก์ชันได้ดังรูปที่ 2.19

$$f(x) = x \quad (2.37)$$

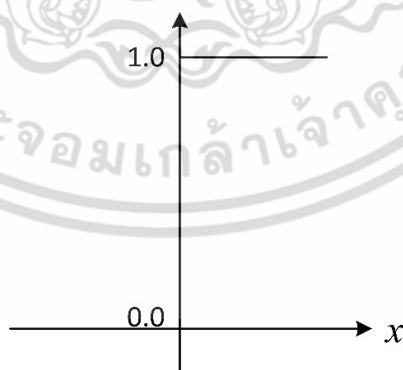


รูปที่ 2.19 ฟังก์ชันกระตุนเชิงเส้น

2.9.1.2 ฟังก์ชันกระตุนชนิดขั้นบันได (Step function)

เอาต์พุตของฟังก์ชันขั้นบันได จะมีค่าเท่ากับ 0 เมื่อ $x < 0$ และมีค่าเป็น 1 เมื่อ $x \geq 0$ ตามสมการที่ 2.38 สามารถแสดงรูปฟังก์ชันได้ดังรูปที่ 2.20

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (2.38)$$

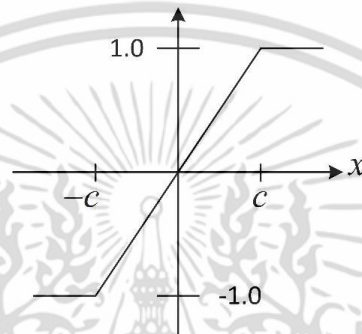


รูปที่ 2.20 ฟังก์ชันกระตุนชนิดขั้นบันได

2.9.1.3 ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดทางลาด (Ramp function)

เอาต์พุตของฟังก์ชันทางลาดมีค่าอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 โดยที่ c คือค่าคงที่ ตามสมการที่ 2.39 สามารถแสดงรูปฟังก์ชันได้ดังรูปที่ 2.21

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \geq c \\ mx + b, & |x| < c \\ -1, & |x| < -c \end{cases} \quad (2.39)$$

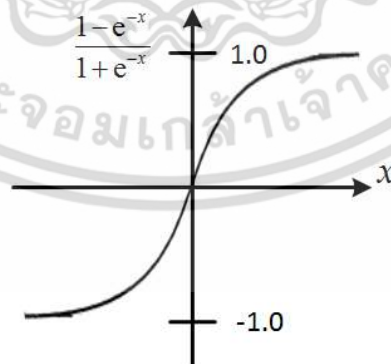


รูปที่ 2.21 ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดทางลาด

2.9.1.4 ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดซิกมอย (Sigmoid function)

เอาต์พุตของฟังก์ชันกระตุ้นชนิดซิกมอย มีค่าอยู่ในช่วง -1 ถึง 1 โดยแสดงสมการของฟังก์ชันได้ดังสมการที่ 2.40 และสามารถแสดงรูปฟังก์ชันได้ดังรูปที่ 2.22

$$f(x) = (1 - e^{-x}) / (1 + e^{-x}) = \tanh(x) \quad (2.40)$$



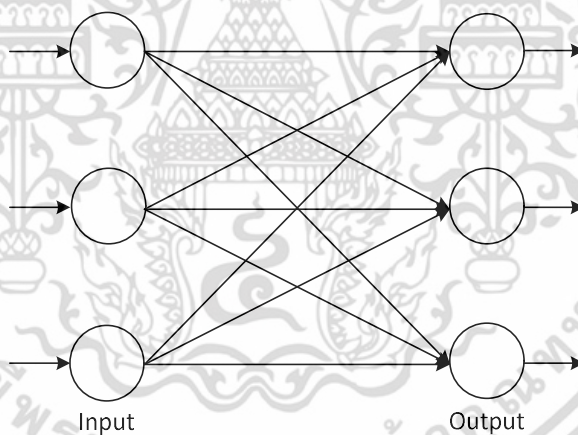
รูปที่ 2.22 ฟังก์ชันกระตุ้นชนิดซิกมอย

2.9.2 สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network topologies)

สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ โครงข่ายเซลล์ประสาทเทียมแบบชั้นเดียว (Single-layer neural network) และ โครงข่ายเซลล์ประสาทเทียมแบบหลายชั้น (Multi-layer neural network)

2.9.2.1 โครงข่ายเซลล์ประสาทเทียมแบบชั้นเดียว

โดยทั่วไปโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว เซลล์ประสาทเทียมถูกรวมกลุ่มกันเป็นชั้น (Layer) โดยที่แต่ละชั้นก็จะมี การเชื่อมต่อกันแล้วรวมกันเป็นโครงข่ายจะประกอบไปด้วยชั้นอินพุท (Input layer) และชั้นเอาต์พุท (Output layer) ซึ่งการนับจำนวนชั้นนั้นจะไม่นับส่วนที่เป็นอินพุท ซึ่งโครงสร้างแบบชั้นเดี่ยวนี เป็นโครงสร้างพื้นฐานที่ง่ายสำหรับการป้อนอินพุทและเหมาะสำหรับการประมวลผลกับข้อมูลที่ไม่มีความซับซ้อน สามารถแสดงโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบชั้นเดียว ได้ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 โครงข่ายเซลล์ประสาทเทียมแบบชั้นเดียว

2.9.2.2 โครงข่ายเซลล์ประสาทเทียมแบบหลายชั้น

โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นนั้นจะต่างกับแบบชั้นเดียวตรงที่จะมีชั้นซ่อน (Hidden layer) ขึ้นมา โครงสร้างที่ซับซ้อนขึ้นนี้จะส่งผลให้ระบบสามารถที่จะประมวลผลข้อมูลที่มีความซับซ้อนและมีขนาดที่ใหญ่ได้ โดยแสดงโครงสร้างได้ดังรูปที่ 2.24

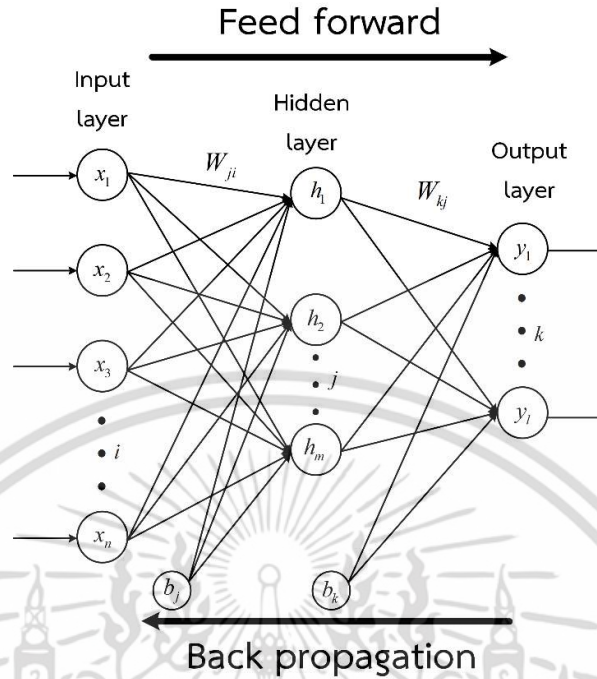
2.9.3 กระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม (Learning process of neural network)

กระบวนการเรียนรู้เป็นกระบวนการที่ต้องการปรับปรุงค่าเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก กับค่าไบอัส เพื่อให้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมสามารถที่จะตัดสินใจได้ โดยจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ แบบมีผู้ฝึกสอน (Supervised learning algorithm) และแบบไม่มีผู้ฝึกสอน (Unsupervised learning algorithm) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.9.3.1 การเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน (Supervised Learning Algorithm)

การเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนนั้น จะทำการป้อนกลุ่มของเป้าหมาย (Target) เพื่อที่ทำการชี้แนะโครงข่ายว่าคำตอบที่ได้ควรจะเป็นอย่างไร เมื่อทำการป้อนสัญญาณอินพุตเข้าให้กับโครงข่ายแล้ว สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะถูกเปรียบเทียบกับกลุ่มของเป้าหมาย จากนั้นก็จะทำการปรับปรุงค่าเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก เพื่อให้สัญญาณเอาต์พุต มีค่าเข้าใกล้กับกลุ่มของเป้าหมายมากที่สุด โดยจะทำการอธิบายกระบวนการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ กระบวนการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับคืนสภาพได้ (Resilient backpropagation) โดยโครงสร้างที่ใช้จะเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น จะประกอบไปด้วย ชั้นอินพุต ชั้นซ่อน (hidden layer) และชั้นเอาต์พุต ดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.24

กระบวนการเรียนรู้แบบการแพร่ย้อนกลับคืนสภาพได้นั้นจะประกอบไปด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือส่วนการเรียนรู้ไปข้างหน้า (Feed forward) และส่วนที่สองคือ ส่วนการเรียนรู้ย้อนกลับ (Back propagation) โดยจะทำการอธิบายเริ่มจากการเรียนรู้แบบไปข้างหน้า โดยจะมีการเชื่อมต่อระหว่างชั้นต่างๆ โดยเริ่มจากโหนดในชั้นอินพุตจะส่งข้อมูลไปยังทุกๆ โหนดในชั้นซ่อนชั้นแรก และทุกโหนดในชั้นซ่อนชั้นแรกจะส่งข้อมูลไปยังทุกๆ โหนดในชั้นถัดไป จนกระทั่งถึงชั้นซ่อนชั้นสุดท้ายซึ่งจะส่งข้อมูลไปยังทุกๆ โหนดในชั้นเอาต์พุต โดยสมการของแต่ละโหนดสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.24 โครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น

$$net_j = \sum_{i=1}^n x_i W_{ji} + b_j \quad (2.41)$$

$$net_k = \sum_{j=1}^m h_j W_{kj} + b_k \quad (2.42)$$

$$y_k = f \left(\sum_{j=1}^m W_{kj} f \left(\sum_{i=1}^n h_i W_{ji} + b_j \right) + b_k \right) \quad (2.43)$$

ในส่วนของการเรียนรู้ย้อนกลับในวิทยานิพนธ์นี้จะขอยกตัวอย่างอัลกอริทึมการแพร่ย้อนกลับคืนสภาพได้ (Resilient backpropagation) เพื่อใช้ในการปรับค่าน้ำหนัก และไบแอสในเส้นเชื่อมต่อระหว่างโหนดให้เหมาะสม โดยการปรับค่านี้อาจจะขึ้นกับความแตกต่างของค่าเอาต์พุตที่คำนวณได้กับค่าเอาต์พุตที่ต้องการ โดยอาศัยสมการค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Mean Square Error (MSE)) ดังแสดงได้ในสมการที่ 2.44

$$E(x) = \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l (t_k - y_k)^2 \quad (2.44)$$

โดยที่ t_k คือ ค่าเอาต์พุตที่ต้องการ

y_k คือ ค่าเอาต์พุตที่คำนวณได้

l คือ จำนวนของโหนดเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการปรับค่าน้ำหนักและไบแอสของระบบโครงข่ายประสาทเทียม อาศัยกฎการเรียนรู้ที่เรียกว่า การแพร่ย้อนกลับคืนสภาพได้ ซึ่งมีสมการเพื่อใช้คำนวณค่าน้ำหนักและไบแอสดังสมการที่ 2.44 และ 2.45 ตามลำดับ

$$W(m+1) = W(m) + \Delta W(m) \quad (2.45)$$

$$b(m+1) = b(m) + \Delta b(m) \quad (2.46)$$

โดยที่ $\Delta W(m)$ และ $\Delta b(m)$ คือ ค่า weight-step (2.47)

พิจารณาชั้นเอาต์พุตจะสามารถคำนวณหาค่า weight-step ของน้ำหนัก และไบแอสได้ดังสมการที่ 2.48 และ 2.49 ตามลำดับ

$$\Delta W_{kj}(m) = \begin{cases} -\Delta_{kj}(m) & , \text{if } \frac{\partial E}{\partial W_{kj}} > 0 \\ +\Delta_{kj}(m) & , \text{if } \frac{\partial E}{\partial W_{kj}} < 0 \\ 0 & , \text{else} \end{cases} \quad (2.48)$$

$$\Delta b_{kj}(m) = \begin{cases} -\Delta_{kj}(m) & , \text{if } \frac{\partial E}{\partial b_{kj}} > 0 \\ +\Delta_{kj}(m) & , \text{if } \frac{\partial E}{\partial b_{kj}} < 0 \\ 0 & , \text{else} \end{cases} \quad (2.49)$$

โดยที่ Δ_{kj} คือ ค่า update-value ของ ΔW_{kj} และ Δb_{kj} สามารถหาค่าได้ดังสมการที่ 2.50 และ 2.51 ตามลำดับ

$$\Delta_{kj}(m) = \begin{cases} \eta^+ \cdot -\Delta_{kj}(m-1) & , \text{if } \frac{\partial E}{\partial W_{kj}}(m-1) \cdot \frac{\partial E}{\partial W_{kj}}(m) > 0 \\ \eta^- \cdot +\Delta_{kj}(m-1) & , \text{if } \frac{\partial E}{\partial W_{kj}}(m-1) \cdot \frac{\partial E}{\partial W_{kj}}(m) < 0 \\ \Delta_{kj}(m-1) & , \text{else} \end{cases} \quad (2.50)$$

$$\Delta_{kj}(m) = \begin{cases} \eta^+ \cdot -\Delta_{kj}(m-1) & , \text{if } \frac{\partial E}{\partial b_{kj}}(m-1) \cdot \frac{\partial E}{\partial b_{kj}}(m) > 0 \\ \eta^- \cdot +\Delta_{kj}(m-1) & , \text{if } \frac{\partial E}{\partial b_{kj}}(m-1) \cdot \frac{\partial E}{\partial b_{kj}}(m) < 0 \\ \Delta_{kj}(m-1) & , \quad \text{else} \end{cases} \quad (2.51)$$

เมื่อ η^- คือ ค่า decrease parameter และ η^+ คือ ค่า increase parameter มีค่าอยู่ในช่วง $0 < \eta^- < 1 < \eta^+$

เนื่องจากโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้น ไม่สามารถคำนวณค่าผิดพลาดได้จากค่าน้ำหนักในชั้นซ่อน ดังนั้นการหาค่าอนุพันธ์จะไม่สามารถคำนวณได้โดยตรงแต่ต้องอาศัยกฎลูกโซ่ (Chain rule) สามารถคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial E}{\partial W_{kj}} = \frac{\partial E}{\partial net_k} \frac{\partial net_k}{\partial W_{kj}} \quad (2.52)$$

พิจารณา $\frac{\partial net_k}{\partial W_{kj}}$ จะได้

$$\frac{\partial net_k}{\partial W_{kj}} = \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^m h_j W_{kj} + b_k \right)}{\partial W_{kj}} = h_j \quad (2.53)$$

พิจารณา $\frac{\partial E}{\partial net_k}$ จะได้

$$\frac{\partial E}{\partial net_k} = \frac{\partial E}{\partial y_k} \frac{\partial y_k}{\partial net_k} = -(t_k - y_k) f'(net_{h_k}) \quad (2.54)$$

พิจารณาชั้นซ่อนจะสามารถ คำนวณหาค่า weight-step ของน้ำหนัก และไบแอสได้ดังสมการที่ 2.55 และ 2.56 ตามลำดับ

$$\Delta W_{ji}(m) = \begin{cases} -\Delta_{ji}(m) & , \text{if } \frac{\partial E}{\partial W_{ji}} > 0 \\ +\Delta_{ji}(m) & , \text{if } \frac{\partial E}{\partial W_{ji}} < 0 \\ 0 & , \quad \text{else} \end{cases} \quad (2.55)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta b_{ji}(m) = \begin{cases} -\Delta_{ji}(m) & , \text{if } \frac{\partial E}{\partial b_{ji}} > 0 \\ +\Delta_{ji}(m) & , \text{if } \frac{\partial E}{\partial b_{ji}} < 0 \\ 0 & , \text{else} \end{cases} \quad (2.56)$$

โดยที่ Δ_{ji} คือ ค่า update-value ของ ΔW_{ji} และ Δb_{ji} สามารถหาค่าได้ดังสมการที่ 2.56 และ 2.57 ตามลำดับ

$$\Delta_{ji}(m) = \begin{cases} \eta^+ (-\Delta_{ji}(m-1)) & , \text{if } \frac{\partial E}{\partial W_{ji}}(m-1) \cdot \frac{\partial E}{\partial W_{ji}}(m) > 0 \\ \eta^- (+\Delta_{ji}(m-1)) & , \text{if } \frac{\partial E}{\partial W_{ji}}(m-1) \cdot \frac{\partial E}{\partial W_{ji}}(m) < 0 \\ \Delta_{ji}(m-1) & , \text{else} \end{cases} \quad (2.57)$$

$$\Delta_{ji}(m) = \begin{cases} \eta^+ (-\Delta_{ji}(m-1)) & , \text{if } \frac{\partial E}{\partial b_{ji}}(m-1) \cdot \frac{\partial E}{\partial b_{ji}}(m) > 0 \\ \eta^- (+\Delta_{ji}(m-1)) & , \text{if } \frac{\partial E}{\partial b_{ji}}(m-1) \cdot \frac{\partial E}{\partial b_{ji}}(m) < 0 \\ \Delta_{ji}(m-1) & , \text{else} \end{cases} \quad (2.58)$$

เมื่อ η^- คือ ค่า decrease parameter และ η^+ คือ ค่า increase parameter มีค่าอยู่ในช่วง $0 < \eta^- < 1 < \eta^+$

ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าอนุพันธ์ $\frac{\partial E}{\partial W_{ji}}$ ได้ดังนี้

$$\frac{\partial E}{\partial W_{ji}} = \frac{\partial E}{\partial h_j} \frac{\partial h_j}{\partial net_j} \frac{\partial net_j}{\partial W_{ji}} \quad (2.59)$$

พิจารณา $\frac{\partial net_j}{\partial W_{ji}}$ จะได้

$$\frac{\partial net_j}{\partial W_{ji}} = \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^m x_i W_{ji} + b_j \right)}{\partial W_{ji}} = x_i \quad (2.60)$$

พิจารณา $\frac{\partial E}{\partial h_j}$ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
\frac{\partial E}{\partial h_j} &= \frac{\partial \left(\frac{1}{l} \sum_{k=1}^l (t_k - y_k)^2 \right)}{\partial h_j} \\
&= -\frac{2}{l} \sum_{k=1}^l (t_k - y_k) \frac{\partial y_k}{\partial h_j} \\
&= -\frac{2}{l} \sum_{k=1}^l (t_k - y_k) \frac{\partial y_k}{\partial net_k} \frac{\partial net_k}{\partial h_j} \\
&= -\frac{2}{l} \sum_{k=1}^l (t_k - y_k) f'(net_k) W_{kj}
\end{aligned} \tag{2.61}$$

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นคือ การแสดงสมการสำหรับใช้ในการปรับค่าน้ำหนักและไบแอสของชั้นซ่อน และชั้นเอาต์พุทของระบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบหลายชั้นแบบการแพร่ย้อนกลับคืนสภาพได้ ซึ่งระบบจะทำการปรับค่าน้ำหนักและไบแอสไปเรื่อยๆและจะหยุดก็ต่อเมื่อค่าความผิดพลาดทั้งหมดลดลงไปต่ำกว่าค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้

2.9.3.2 การเรียนรู้แบบไม่มีผู้ฝึกสอน (Unsupervised learning algorithm)

โครงข่ายจะสามารถเรียนรู้ได้ด้วยตัวเอง เป็นการเรียนรู้แบบไม่มีผู้แนะนำหรือไม่มีกลุ่มของเป้าหมาย (Target) ในการชี้แนะโครงข่ายว่าคำตอบที่ได้ควรจะเป็นอย่างไร โดยจะปรับปรุงค่าถ่วงน้ำหนัก โดยใช้ผลของสัญญาณอินพุทที่ป้อนให้กับโครงข่ายเท่านั้น ซึ่งจะใช้ค่าเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักเริ่มต้นเหมือนกับวิธีการเรียนรู้แบบมีผู้ฝึกสอน และใช้สมการที่ 2.62 ในการปรับปรุงค่าเวกเตอร์ถ่วงน้ำหนักที่ $k = 1, 2, \dots$ จนกระทั่งสัญญาณเอาต์พุท $h_j(p)$ หรือ ค่าเวกเตอร์น้ำหนัก $w_{ji}(p)$ ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งวิธีการเรียนรู้ชนิดนี้จะต้องมีจำนวนอินพุทที่มากเพียงพอ ระบบจึงจะสามารถตัดสินใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ

$$\begin{aligned}
W_{ji}(p+1) &= W_{ji}(p) + \Delta W_{ji}(p) \\
&= W_{ji}(p) + \mu h_j(p)x(p)
\end{aligned} \tag{2.62}$$

โดยที่ μ คือค่าอัตราการเรียนรู้ (Learning rate)

2.10 การประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล

ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล จะอยู่ในรูปแบบของการคำนวณค่าออกมาเป็นค่าความไว (Sensitivity) ค่าความจำเพาะ (Specificity) และ ค่าความถูกต้อง (Accuracy) ซึ่งในงานวิจัยนี้นำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของการตัดสินใจของระบบการจำแนกบุคคลด้วย

สัญญาณกล้ำมเนื่อรอบดวงตาว่ามีความแม่นยำเท่าใด โดยจะแสดงค่าที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 Receiver-Operating-Characteristic

		True Decision	
		Positive	Negative
System	Positive	True positive (TP)	False positive (FP)
	Negative	False negative (FN)	True negative (TN)

โดยสามารถอธิบายค่าต่างๆ ในตาราง ที่ 2.2 ได้ดังนี้

Positive หมายถึง กลุ่มของสัญญาณของบุคคลที่ต้องการ

Negative หมายถึง กลุ่มของสัญญาณของบุคคลที่ไม่ต้องการ

True Positive (TP) หมายถึง จำนวนของสัญญาณของบุคคลที่ต้องการที่ระบบตรวจสอบมาว่าเป็นบุคคลที่ต้องการ

False Positive (FP) หมายถึง จำนวนของสัญญาณของบุคคลที่ไม่ต้องการที่ระบบตรวจสอบมาว่าเป็นบุคคลที่ต้องการ

True Negative (TN) หมายถึง จำนวนของสัญญาณของบุคคลที่ไม่ต้องการที่ระบบตรวจสอบมาว่าเป็นบุคคลที่ไม่ต้องการ

False Negative (FN) หมายถึง จำนวนของสัญญาณของบุคคลที่ต้องการที่ระบบตรวจสอบมาว่าเป็นบุคคลที่ไม่ต้องการ

ซึ่งค่าจากตารางที่ 2.2 สามารถนำมาคำนวณหาค่าที่สามารถประเมินถึงประสิทธิภาพของระบบที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้ดังนี้

- ค่าความแม่นยำ (Precision) คือ ค่าอัตราส่วนระหว่างจำนวนของสัญญาณของบุคคลที่ไม่ต้องการที่ระบบตรวจสอบมาว่าเป็นบุคคลที่ต้องการกับสัญญาณทั้งหมดที่ระบบตรวจสอบมาว่าเป็นบุคคลที่ต้องการ

$$Precision (\%) = \left(\frac{TP}{FP + TP} \right) \times 100\% \quad (2.63)$$

- ค่าความไว (Sensitivity) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงโอกาสที่ระบบตัดสินใจเป็นบุคคลที่ต้องการได้อย่างถูกต้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Sensitivity (\%)} = \left(\frac{TP}{TP + FN} \right) \times 100\% \quad (2.64)$$

- ค่าความจำเพาะ (Specificity) คือ ค่าที่บ่งบอกถึงโอกาสที่ระบบตัดสินใจเป็นบุคคลที่ไม่ต้องการได้อย่างถูกต้อง

$$\text{Specificity (\%)} = \left(\frac{TN}{TN + FP} \right) \times 100\% \quad (2.65)$$

- ค่าความถูกต้อง (Accuracy) คือค่าเฉลี่ยที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพรวมในการตัดสินใจของทั้งระบบว่าสามารถตัดสินใจออกมาได้อย่างถูกต้องกี่เปอร์เซ็นต์

$$\text{Accuracy (\%)} = \left(\frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \right) \times 100\% \quad (2.66)$$

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำหลักการที่ได้กล่าวมาทั้งหมดไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและสร้างระบบจำแนกบุคคลด้วยสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา ดังจะกล่าวถึงในบทต่อไป

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Related work)

ในหัวข้อนี้จะทำการกล่าวถึงงานวิจัยที่นำเสนอวิธีการวัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตา และงานวิจัยที่นำสัญญาณไฟฟ้าในดวงตามายืนยันตัวบุคคล ในที่นี้จะยกตัวอย่างงานวิจัยที่มีความน่าสนใจมาสรุปโดยสังเขป

2.11.1 งานวิจัยที่นำเสนอวิธีการวัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตา

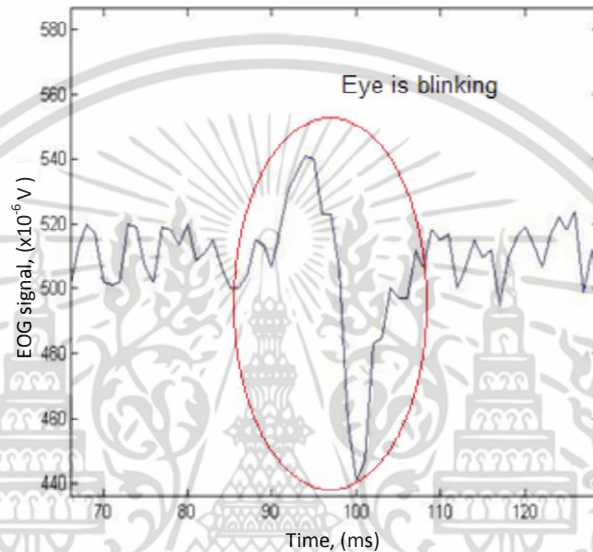
ในการวัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตา โดยทั่วไปจะแบ่งเป็น 2 แบบ แบบแรกคือการวัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาทางตรง และแบบที่สองคือการวัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาทางอ้อม

- วิธีวัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาทางตรง

วิธีการวัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาทางตรงนั้นสามารถทำได้หลายวิธี โดยในที่นี้จะขอกกล่าวถึง 2 วิธีการ ซึ่งวิธีการแรกเป็นวิธีการที่ใช้กันโดยทั่วไป จาก [25] จะใช้อิเล็กโทรดติดที่บริเวณใบหน้าดังแสดงในรูปที่ 2.25 และจะแสดงรูปร่างของสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาที่วัดได้ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.25 แสดงการวัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาด้วยการติดอิเล็กโทรด [25]



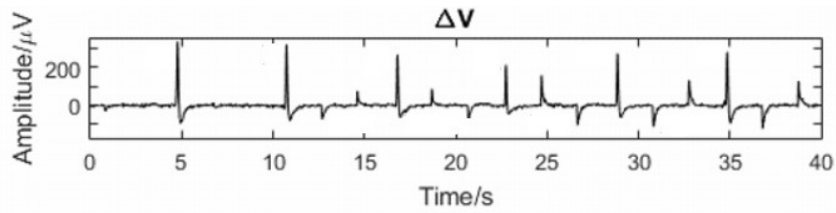
รูปที่ 2.26 สัญญาณไฟฟ้าในดวงตาที่วัดได้จากการติดอิเล็กโทรด [25]

และอีกวิธีการหนึ่งจะใช้อุปกรณ์ที่มีขายทั่วไป โดยในที่นี้จะยกตัวอย่างงานวิจัยของ N. Barbara [26] ที่ได้ใช้อุปกรณ์ที่มีชื่อว่า JINS MEME ในการวัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตา ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.27 โดยอุปกรณ์ตัวนี้ได้นำอิเล็กโทรดชนิดแห้งติดที่ตัวแว่นตา และจะส่งข้อมูลของสัญญาณเข้าสู่คอมพิวเตอร์หรือ สมาร์ทโฟน ผ่านทางบลูทูธ โดยจะแสดงสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาที่วัดได้ดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.27 JINS MEME Glasses [26]

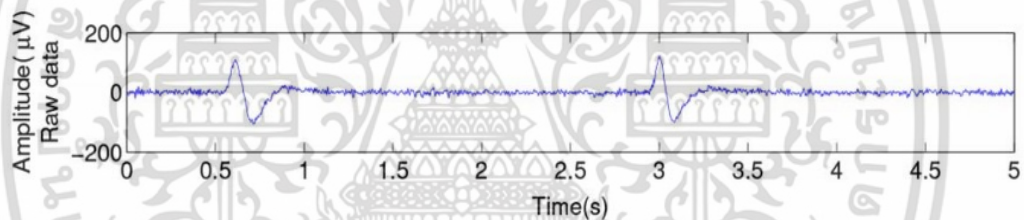
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



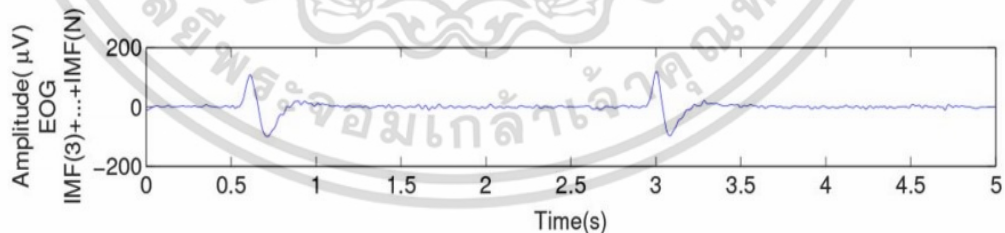
รูปที่ 2.28 สัญญาณไฟฟ้าในดวงตาที่วัดได้จาก JINS MEME Glasses [26]

-วิธีวัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาทางอ้อม

วิธีการวัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาทางอ้อมนั้นสามารถทำได้โดยการวัดสัญญาณไฟฟ้าคลื่นสมอง มาทำการแยกสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาออก โดยจะยกตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้วิธีการนี้มา 1 งานวิจัย คือ งานวิจัยของ M. Abo-Zahhad [7] ซึ่งเขาได้ใช้ Neurosky Mindwave headset มาใช้ในการวัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตา โดยที่สัญญาณที่ได้นั้นจะมีสัญญาณไฟฟ้าคลื่นสมองรวมมาอยู่ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.29 ดังนั้นเขาจึงต้องทำการแยกสัญญาณไฟฟ้าคลื่นสมองออกด้วยวิธีการ Empirical mode decomposition โดยจะแสดงสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาที่ได้ ดังรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.29 สัญญาณไฟฟ้าคลื่นสมองที่มีสัญญาณไฟฟ้าในดวงตารวมอยู่ด้วย โดยใช้ Neurosky Mindwave headset ในการวัดสัญญาณ [7]



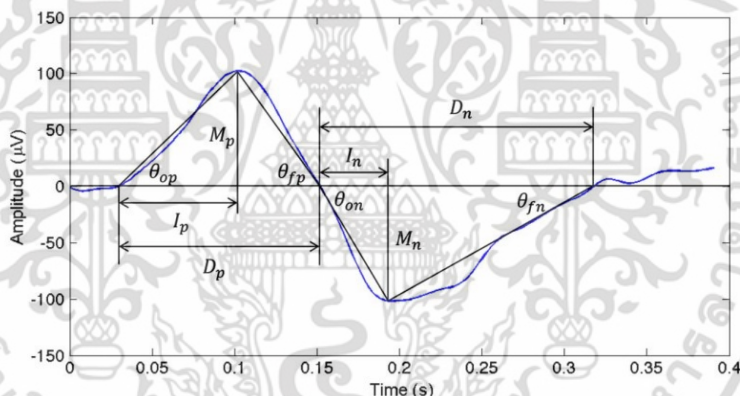
รูปที่ 2.30 สัญญาณไฟฟ้าในดวงตาที่แยกได้ด้วยวิธีการ Empirical mode decomposition [7]

จากวิธีการวัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตา ที่ได้กล่าวไปข้างต้น ทั้งวิธีวัดทางตรงและทางอ้อมนั้น มีข้อด้อยดังนี้ โดยวิธีการวัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาของงานวิจัยของ [25] และ [27] ซึ่งถ้านำมาใช้งานจริงต้องใช้เวลาในการติดอุปกรณ์ที่นานเนื่องจากต้องใช้เซนเซอร์ในการวัดสัญญาณหลายจุด อาจส่งผลให้ตำแหน่งที่ติดเซนเซอร์มีความคลาดเคลื่อนและสัญญาณที่ได้ อาจมีความผิดพลาดได้ และใน

ส่วนของงานวิจัย [7] เป็นการนำอุปกรณ์สำเร็จรูปที่สามารถวัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาได้อย่างสะดวก แต่มีราคาค่อนข้างสูงจึงทำให้เข้าถึงการใช้งานได้ยาก

2.11.2 งานวิจัยที่นำสัญญาณไฟฟ้าในดวงตามายืนยันบุคคล

งานวิจัยของ M. Abo-Zahhad [7] ได้ทำการเสนอการนำสัญญาณไฟฟ้าในดวงตา (EOG) มาใช้ในการยืนยันตัวตนบุคคล โดยใช้ Neurosky Mindwave headset ในการเก็บผลการทดลองจากอาสาสมัครทั้ง 25 คน เนื่องจากอุปกรณ์ที่เขาใช้ในการเก็บสัญญาณนั้นจะเก็บสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมอง (EEG) รวมมาด้วย ซึ่งเขาได้ใช้วิธีการ Empirical mode decomposition ในการแยกสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาออกมา จากนั้นทำการปรับขนาดของสัญญาณให้ทุกสัญญาณมีแอมพลิจูดสูงสุดมีค่าเป็น 1 จากนั้นทำการเลือกสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาออกมา 1 คาบสัญญาณของแต่ละบุคคล มาทำการดึงลักษณะเด่นโดยการนำสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาในโดเมนของเวลา มาทำการวิเคราะห์จากลักษณะรูปร่างของสัญญาณดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.31 และทำการแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มดังตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.31 การกำหนดตัวแปรที่ใช้ในการหาลักษณะเด่นของสัญญาณไฟฟ้าในดวงตา [7]

ตารางที่ 2.3 ลักษณะเด่นของสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาที่ถูกแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Group	Symbol	Description	
G1	M_p	Amplitude of positive peak of the eye blink	
	M_n	Amplitude of negative peak of the eye blink	
	I_p	Position of positive peak from the onset of positive pulse	
	I_n	Position of negative peak from the onset of negative pulse	
G2	A_p	Area under positive pulse of the eye blink	
	A_n	Area under negative pulse of the eye blink	
	E_p	Energy of the positive pulse of the eye blink	
	E_n	Energy of negative pulse of the eye blink	
	Av_p	Average value of the positive pulse of the eye blink	
	Av_n	Average value of negative pulse of the eye blink	
G3	S_{op}	Slope at the onset of the positive pulse ($\tan(\theta_{op})$)	
	S_{on}	Slope at the onset of the negative pulse ($\tan(\theta_{on})$)	
	S_{fp}	Slope at the offset of the positive pulse ($\tan(\theta_{fp})$)	
	S_{fn}	Slope at the offset of the negative pulse ($\tan(\theta_{fn})$)	
	D_p	Duration of positive pulse of the eye blink	
	D_n	Duration of negative pulse of the eye blink	
	G4	M_{p1}	Amplitude of positive peak of first derivative of the eye blink signal
		M_{n1}	Amplitude of negative peak of first derivative of the eye blink signal
		I_{p1}	Position of the positive peak of first derivative of the eye blink signal
		I_{n1}	Position of the negative peak of first derivative of the eye blink signal
N_{z1}		Number of zero crossings of the first derivative of the eye blink signal	
N_{z2}		Number of zero crossings of the second derivative of the eye blink signal	

จากนั้นเขาได้ใช้วิธีการจำแนกตัวสัญญาณของแต่ละบุคคลด้วยวิธีการวิเคราะห์การจำแนกประเภทเชิงเส้น (Linear discriminant analysis : LDA) ซึ่งให้เปอร์เซ็นต์ความแม่นยำของทั้งระบบอยู่ที่ 97.3 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าวิธีการที่นำเสนอมีความซับซ้อนอีกทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตานั้นมีราคาที่สูงอีกด้วย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอระบบการจำแนกบุคคลด้วยสัญญาณการยัดหดของกล้ามเนื้อรอบดวงตา โดยใช้วิธีการวัดสัญญาณด้วยเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ ซึ่งให้รูปสัญญาณที่มีความคล้ายคลึงจนสามารถนำมาใช้เทียบเคียงแทนสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาได้

บทที่ 3

ระบบจำแนกบุคคลด้วยสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา

3.1 กล่าวนำ

ในบทที่ 3 นี้ได้นำเสนอความสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณไฟฟ้าในดวงตากับสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา และระบบการจำแนกบุคคลด้วยสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาโดยประยุกต์ใช้วิธีการเก็บวัดค่าสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา ร่วมกับเทคนิคการดึงลักษณะเด่นของสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง เพื่อนำคุณลักษณะเด่นทางความถี่มาใช้ในการเรียนรู้จำของโครงข่ายประสาทเทียมชนิด การเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับคืนสภาพได้ (Resilient backpropagation) โดยสามารถจำแนกบุคคลเพื่อใช้ในการยืนยันตัวบุคคล โดยระบบที่นำเสนอประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ กระบวนการเก็บสัญญาณ, กระบวนการประมวลผลสัญญาณเบื้องต้นและระบบจำแนกบุคคลด้วยสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา ดังแสดงได้ด้วยบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.1



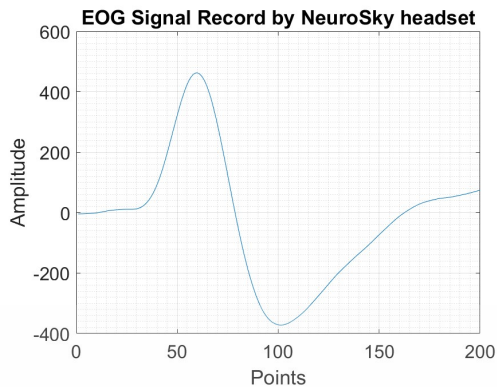
รูปที่ 3.1 บล็อกไดอะแกรมของหลักการที่นำเสนอ

3.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณไฟฟ้าในดวงตากับสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ใช้สัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตามาใช้ในการยืนยันตัวบุคคลแทนสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาที่มีการใช้ในการยืนยันตัวบุคคลโดยทั่วไป โดยสัญญาณไฟฟ้าในดวงตานั้นเกิดจากข้อไฟฟ้าในลูกตา ซึ่งสามารถวัดสัญญาณได้โดยการนำอิเล็กโทรดไปติดบริเวณรอบดวงตาในลักษณะดังรูปที่ 3.2ก) จะเห็นสัญญาณมีลักษณะดังรูป 3.2ข) และสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตานั้นเกิดจากการเคลื่อนไหวของกล้ามเนื้อขณะที่ทำการกระพริบตาที่กระทำต่อเซนเซอร์ ซึ่งสามารถวัดได้โดยนำเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์เช่นเซนเซอร์ติดบริเวณดวงตาดังรูปที่ 3.3ก) และมีรูปสัญญาณดังรูป 3.3ข) เมื่อพิจารณาถึงรูปร่างของสัญญาณทั้งสองในโดเมนเวลา พบว่ามีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน จึงนำสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาที่วัดได้มาจาก NeuroSky Mind wave กับสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาที่วัดได้มาทำการหาความสัมพันธ์ต่อกัน ด้วยวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบความเหมือนของสัญญาณทั้งสองสัญญาณ



(ก)



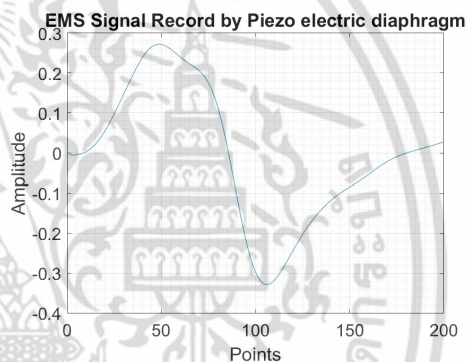
(ข)

รูปที่ 3.2 สัญญาณไฟฟ้าในดวงตา

(ก) วิธีการวัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาโดยทั่วไป (ข) สัญญาณไฟฟ้าในดวงตา 1 คาบสัญญาณ



(ก)



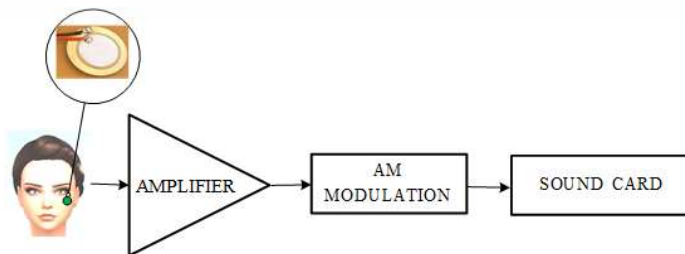
(ข)

รูปที่ 3.3 สัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา

(ก) วิธีการวัดสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา (ข) สัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา 1 สัญญาณ

3.3 กระบวนการเก็บสัญญาณ (Data acquisition stage)

ในส่วนของการวัดสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ทรานซิวเซอร์, วงจรขยายสัญญาณ และ วงจรมอดูเลตสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 องค์ประกอบของอุปกรณ์ในการวัดสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา

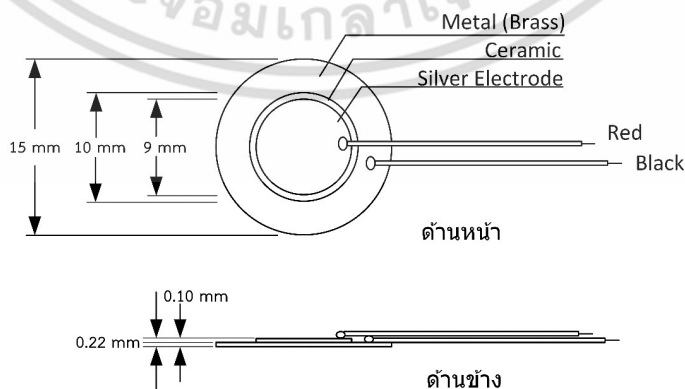
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 ทรานซิวเซอร์ที่ใช้ในการวัดสัญญาณ

สัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาทั้งหมดที่นำมาใช้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะใช้เพียโซอิเล็กทริกทรานซิวเซอร์ในการเก็บสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา โดยเพียโซอิเล็กทริกทรานซิวเซอร์จะทำการเปลี่ยนพลังงานกลจากการที่ผิวหนังกดที่ตัวเพียโซอิเล็กทริกทรานซิวเซอร์ขณะที่ทำการกระพริบตาในแต่ละครั้งให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้เพียโซอิเล็กทริกทรานซิวเซอร์ชนิดเพียโซอิเล็กทริกไดอะแฟรม (Piezo electric diaphragm) แบบกระตุ้นโดยภายนอก (External type) ในการทำการเก็บสัญญาณ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดโดยรวมเท่ากับ 15 มิลลิเมตร ประกอบด้วย แผ่นโลหะชนิดทองเหลือง (Plate metal (brass)) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร, เซรามิก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และ อิเล็กโทรดชนิดทองคำจากเงิน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 9 มิลลิเมตร ดังแสดงรายละเอียดของขนาดส่วนต่างๆ ของเพียโซอิเล็กทริกไดอะแฟรมไว้ในรูปที่ 3.6

ในการทดลองจะเก็บผลการทดลองจากอาสาสมัครทั้งหมด 20 คน โดยอาสาสมัครทั้งหมดมีการพักผ่อนที่เพียงพอ ซึ่งจะเก็บผลการทดลองทั้งหมด 10 ครั้งต่อคน เก็บครั้งละ 10 วินาที ในขณะที่ทำการเก็บผลการทดลองจะมีการเปิดสื่อบันทึกให้อาสาสมัครดูและจะไม่มีการเคลื่อนไหวลูกตานอกจากการกระพริบตา เพื่อให้ได้สัญญาณการกระพริบตาที่มีความเป็นธรรมชาติที่สุด โดยจะทำการติดเพียโซอิเล็กทริกไดอะแฟรมที่ใต้ดวงตาขณะทำการเก็บผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.3ก)

รูปที่ 3.5 เพียโซอิเล็กทริกไดอะแฟรม

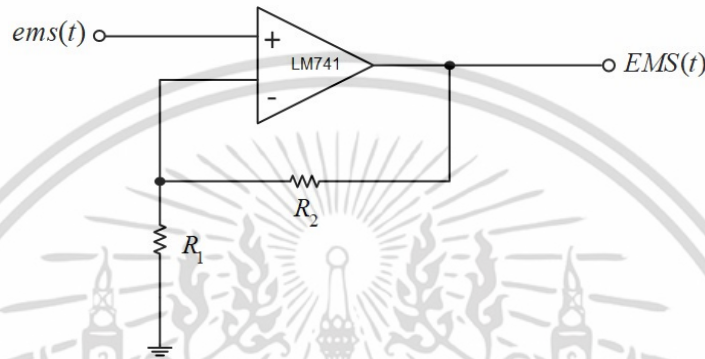


รูปที่ 3.6 รายละเอียดของเพียโซอิเล็กทริกไดอะแฟรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส (Non-inverting amplifier circuit)

เนื่องจากขนาดของสัญญาณกล้ำมเนื่อรอบดวงตา มีขนาดของสัญญาณที่ต่ำประมาณ 100-200 mV ซึ่งยากต่อการประมวลผล ทางวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกใช้วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส สามารถแสดงรูปวงจรถัดรูปที่ 3.7 เพื่อนำมาขยายสัญญาณกล้ำมเนื่อรอบดวงตาก่อนที่จะนำไปประมวลผลต่อไป



รูปที่ 3.7 วงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

จากรูปที่ 3.7 กำหนดให้ $ems(t)$ คือสัญญาณกล้ำมเนื่อรอบดวงตาก่อนขยายสัญญาณ และ $EMS(t)$ คือสัญญาณกล้ำมเนื่อรอบดวงตาหลังขยายสัญญาณ ดังนั้นสามารถคำนวณอัตราขยายได้จากสมการที่ 2.5 และแทนค่า ด้วย $R_1 = 10$ กิโลโอห์ม และ $R_2 = 100$ กิโลโอห์ม จะได้ค่าอัตราขยายมีค่าเท่ากับ 11 ดังแสดงดังสมการที่ 3.1

$$A_v = 1 + \frac{100k}{10k} = 11 \quad (3.1)$$

3.3.3 วงจรมอดูเลตสัญญาณ (AM Modulation)

ในการนำสัญญาณเข้าสู่คอมพิวเตอร์เพื่อทำการประมวลผลจำเป็นที่จะต้องทำการย้ายความถี่ของสัญญาณกล้ำมเนื่อรอบดวงตา ด้วยวงจรมอดูเลตขนาด ชนิดคลื่นพาร์ขนาดใหญ่ เนื่องจากสัญญาณกล้ำมเนื่อรอบดวงตานั้นมีความถี่ที่ต่ำอยู่ในช่วง 0-30 เฮิร์ตซ์ แต่ความถี่ที่ซาวด์การ์ดของคอมพิวเตอร์รับได้นั้นจะต้องอยู่ในช่วง 20-20000 เฮิร์ตซ์ ดังนั้นจึงต้องทำการย้ายสัญญาณกล้ำมเนื่อรอบดวงตาให้อยู่ในช่วงความถี่ของซาวด์การ์ดเพื่อที่จะสามารถส่งสัญญาณผ่านเข้าสู่คอมพิวเตอร์ได้

โดยใช้หลักการของมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาร์ขนาดใหญ่ ดังสมการที่ 2.12 ในการสร้างสัญญาณมอดูเลตขนาด โดยนำสัญญาณกล้ำมเนื่อรอบดวงตา V_{EMS} ที่ถูกขยายสัญญาณแล้ว มาบวกกับสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง V_{DC} ด้วยวงจขยายสัญญาณผลรวม (Summing Amplifier)

เมื่อทำการแทนค่า $V_1 = V_{EMS}$ และ $V_2 = V_{DC}$ ลงในสมการที่ 2.8 จะสามารถแสดงสมการของอัตราขยายสัญญาณได้ดังสมการที่ 3.2

$$V_{out} = -\left(\left(\frac{R_f}{R_1}\right)V_{EMS} + \left(\frac{R_f}{R_2}\right)V_{DC}\right) \quad (3.2)$$

กำหนดให้ $R_1 = R_2 = R_f = 120$ กิโลโอห์ม และ เพื่อความสมบูรณ์ของสัญญาณมอดูเลตขนาด ชนิดคลื่นพาร์ขนาดใหญ่ วิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้ไฟฟ้ากระแสตรง V_{DC} มีค่าเท่ากับ 9 โวลต์ และทำการแทนค่าดังสมการที่ 3.3

$$V_{out} = -\left(\left(\frac{120k}{120k}\right)V_{EMS} + 9v\left(\frac{120k}{120k}\right)\right) \quad (3.3)$$

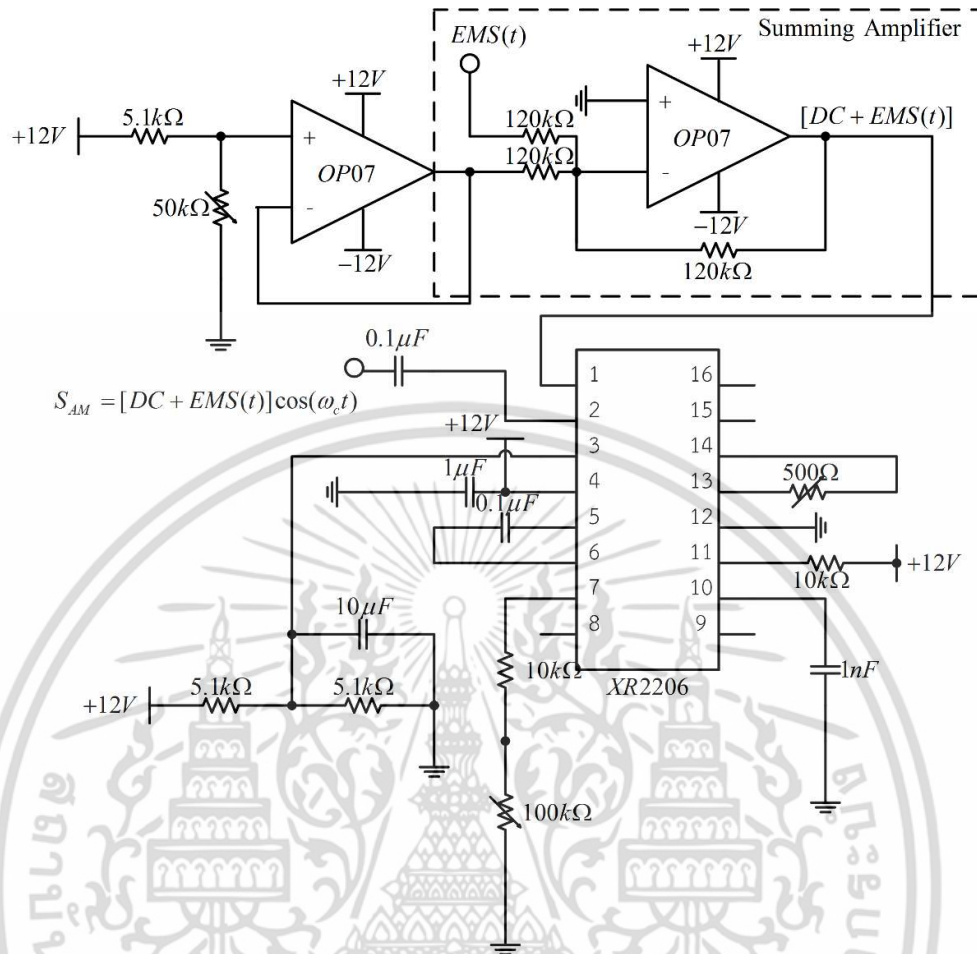
ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตที่ได้ของวงจรจะมีค่าเป็น

$$V_{out} = -(V_{EMS} + 9v) = -[9v + EMS(t)] \quad (3.4)$$

จากนั้นนำสัญญาณกล้ำมเนื่อรอบดวงตาที่ถูกรวมกับสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรง มาทำการคูณกับสัญญาณคลื่นพาร์ โดยที่สัญญาณคลื่นพาร์มีความถี่เท่ากับ 1.05 กิโลเฮิร์ตซ์ และตามสมการของการมอดูเลตขนาด ชนิดคลื่นพาร์ขนาดใหญ่ ดังสมการที่ 3.5

$$S_{AM} = -[9v + EMS(t)]\cos(\omega_c t) \quad (3.5)$$

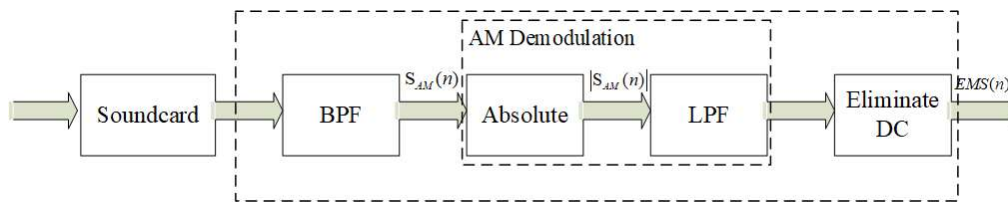
โดยที่ $EMS(t)$ คือ สัญญาณกล้ำมเนื่อรอบดวงตา, $\cos(\omega_c t)$ คือ สัญญาณคลื่นพาร์ โดยใช้ไอซีเบอร์ XR2206 ซึ่งมีคุณสมบัติในการให้กำเนิดสัญญาณ (Function generator) นำมาใช้ในการสร้างสัญญาณคลื่นพาร์และนำ $-[9v + EMS(t)]$ มาคูณกับสัญญาณคลื่นพาร์ ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็นสัญญาณมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาร์ขนาดใหญ่ สามารถแสดงรูปวงจรได้ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรการมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่

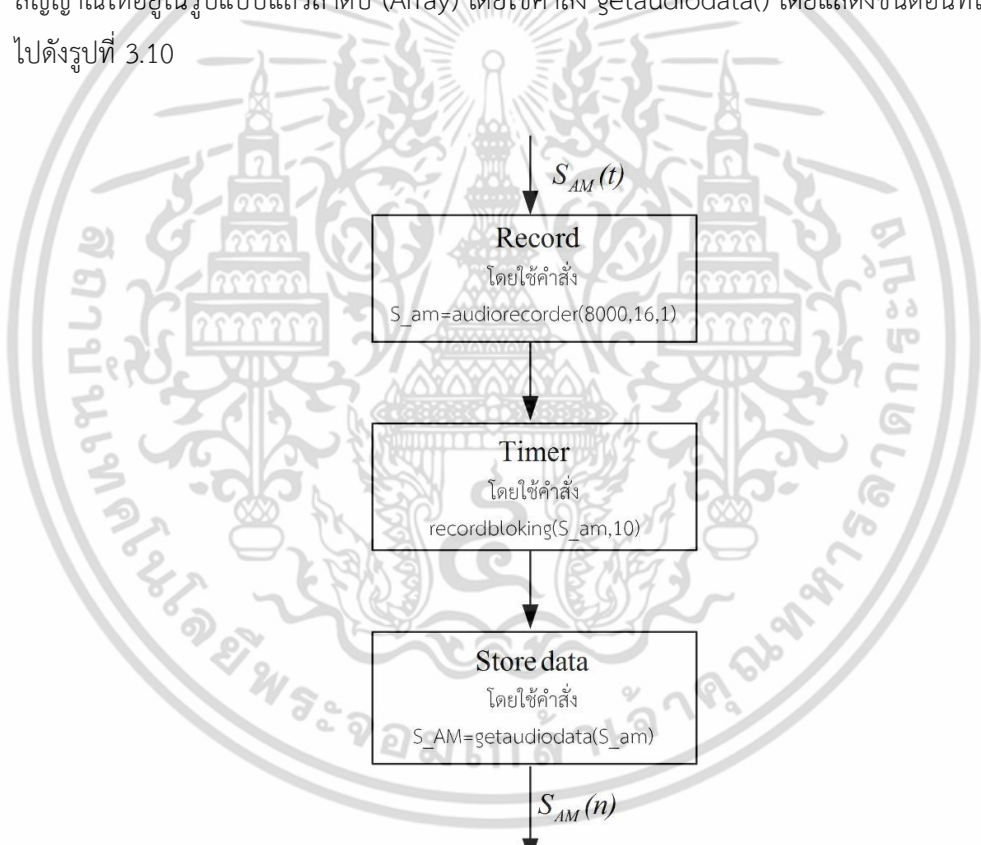
3.4 กระบวนการประมวลผลสัญญาณเบื้องต้น (Preprocessing stage)

เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากขั้นตอนการเก็บสัญญาณ เป็นสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตาที่ผ่านการมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่ $S_{AM}(t)$ ที่ใช้สัญญาณคลื่นพาห้ที่มีความถี่อยู่ที่ 1.05 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยจะทำการส่งสัญญาณเข้าสู่คอมพิวเตอร์ผ่านทาง USB ซาวด์การ์ดรุ่น CREATIVE SOUND BLASTER PLAY! 2 ด้วยค่าอัตราการซึกตัวอย่าง (Sampling rate : f_s) เท่ากับ 8000 เฮิร์ตซ์ จะได้เป็นสัญญาณ $S_{AM}(n)$ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความถี่อื่นนอกเหนือจากความถี่ของสัญญาณ $S_{AM}(n)$ ปนเข้ามา ก่อนทำการตีมอดูเลตจึงต้องทำการกรองสัญญาณด้วยตัวกรองความถี่แถบผ่าน จากนั้นทำการตีมอดูเลตสัญญาณ $S_{AM}(n)$ ด้วยการนำไปผ่านการหาค่าสัมบูรณ์ และผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน เพื่อแยกได้เป็นสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตา โดยหลักการที่ได้กล่าวมานี้สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 กระบวนการประมวลผลสัญญาณเบื้องต้น

ในการเก็บสัญญาณ $S_{AM}(n)$ จะใช้โปรแกรม MATLAB ในการเก็บสัญญาณ โดยคำสั่ง audiorecorder() กำหนดให้มีค่าอัตราการซีกตัวอย่าง f_s เท่ากับ 8000 เฮิรตซ์ ที่มี 16 บิตต่อ 1 จุดสัญญาณ และกำหนดช่องสัญญาณในการรับอินพุต 1 ช่องสัญญาณ จากนั้นทำการตั้งค่าเวลาที่ใช้ในการเก็บสัญญาณทั้งหมด 10 วินาที ต่อ 1 ครั้ง โดยใช้คำสั่ง recordblocking() และทำการเก็บสัญญาณให้อยู่ในรูปแบบแถวลำดับ (Array) โดยใช้คำสั่ง getaudiodata() โดยแสดงขั้นตอนที่ได้กล่าวไปดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการเก็บสัญญาณ $S_{AM}(n)$

3.4.1 การกรองสัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตาที่ผ่านการมอดูเลตขนาด ชนิดคลื่นพาร์ขนาดใหญ๋ ด้วยตัวกรองความถี่แถบผ่าน

โดยในขั้นตอนของการกรองสัญญาณนี้ จะใช้ตัวกรองความถี่แถบผ่านด้วยตัวกรองผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัดเฟสเชิงเส้น ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเลือกใช้วิธีการออกแบบโดยใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าตาแบบฟังก์ชันฮัมมิง เนื่องจากชนิดของตัวกรองที่ใช้เป็นแบบกรองความถี่แถบผ่าน ค่าผลตอบสนองอิมพัลส์ในอุดมคติ $h_d(m)$ จะสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 2.30

เนื่องจากสัญญาณ $S_{AM}(n)$ นั้นอยู่ที่ความถี่ 1.05 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังนั้นจึงทำการกำหนดค่าความถี่ตัดด้านต่ำ f_{c1} และความถี่ตัดด้านสูง f_{c2} ให้มีค่าเท่ากับ 0.9 และ 1.1 กิโลเฮิร์ตซ์ตามลำดับ จากนั้นทำการหาค่าความยาวของตัวกรอง โดยใช้ฟังก์ชันฮัมมิง ดังสมการที่ 2.25 ภายในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้ $|f_{stop} - f_{pass}| = 0.5$ กิโลเฮิร์ตซ์ ดังนั้นเมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 2.26 จะได้ $\Delta f = \frac{0.5k}{8k} = 0.0625$ และแทนค่าลงในสมการที่ 2.27 จะสามารถหาจำนวนลำดับของตัวกรองได้ดังสมการที่ 3.6

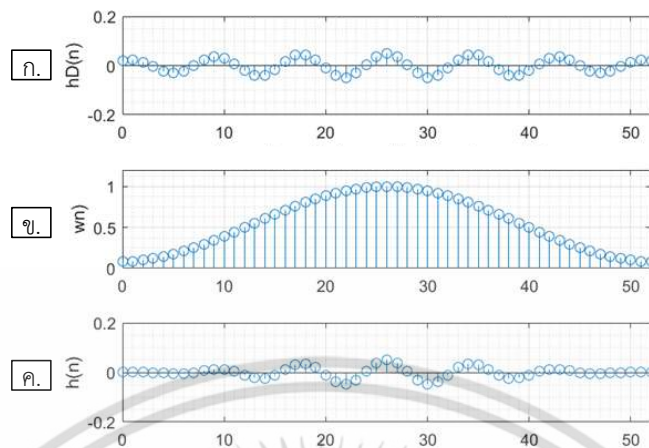
$$M = \frac{3.3}{0.0625} = 52.8 \approx 53 \quad (3.6)$$

โดยจะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง $h(m)$ ที่มีความยาว 53 จุด หรือมีความยาวอยู่ในช่วง $-26 \leq m \leq 26$ โดยจากผลตอบสนองอิมพัลส์ จากสมการที่ 2.29 เมื่อทำการกำหนดช่วงของความยาวของตัวกรอง จะได้ดังสมการที่ 3.7

$$h(m) = h_d(m) \times w(m) \quad ; -26 \leq m \leq 26 \quad (3.7)$$

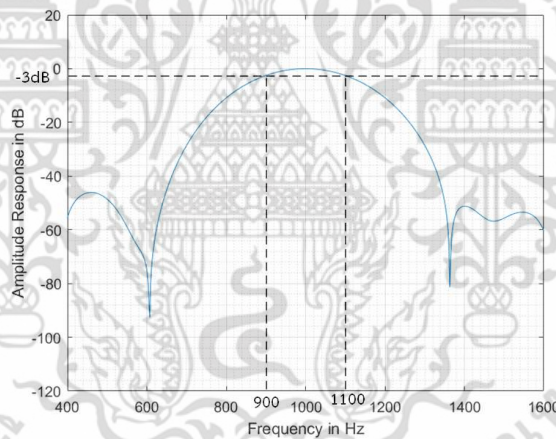
โดยสามารถหาค่า $w(m)$ ได้ดังสมการที่ 2.28 และ $h_d(m)$ คำนวณได้จากสมการที่ 2.31 โดยได้ทำการนำค่า f_{c1} และ f_{c2} ที่ได้กำหนดไว้ มาทำการนอโมลไลซ์ความถี่ จะได้ $f_{c1} = \frac{0.9k}{8k} = 0.1125$ และ $f_{c2} = \frac{1.1k}{8k} = 0.1375$

ซึ่งเมื่อทำการแทนค่า $h_d(m)$ และ $w(m)$ ลงในสมการที่ 3.7 พร้อมกับคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ $h(m)$ สามารถแสดงผลตอบสนองอิมพัลส์ของ $h_d(m)$ $w(m)$ และ $h(m)$ ได้ดังรูปที่ 3.11 และสามารถแสดงผลตอบสนองทางขนาดในหน่วยเดซิเบล และ ผลตอบสนองทางเฟสได้ดังรูปที่ 3.12 และ 3.13 ตามลำดับ จากรูปที่ 3.12 จะเห็นได้ว่าตัวกรองความถี่แถบผ่านที่ได้ทำการออกแบบนั้น ให้ผลตอบสนองตรงตามที่ได้กำหนดไว้ที่ความถี่ตัดด้านต่ำเท่ากับ 0.9 กิโลเฮิร์ตซ์ และความถี่ตัดด้านสูงเท่ากับ 1.1 กิโลเฮิร์ตซ์ พร้อมแสดงโค้ดที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองความถี่แถบผ่านได้ดังรูปที่ 3.14



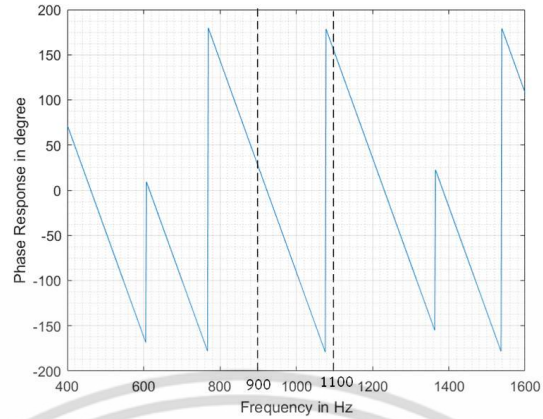
รูปที่ 3.11 ผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรองความถี่แถบผ่าน

ก). ผลตอบสนองอิมพัลส์ในอุดมคติ $h_d(m)$ ข). ฟังก์ชันหน้าต่าง $w(m)$ แบบฮัมมิง ค). ผลตอบสนองอิมพัลส์ $h(m)$



รูปที่ 3.12 ผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่แถบผ่านในหน่วยเดซิเบล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 ผลตอบสนองทางเฟสของตัวกรองความถี่แถบผ่าน

```
% Hamming filter band pass
N1 = 53;
Fs = 8000;
f1 = 900;
f2 = 1100;
fc1 = f1/Fs;
fc2 = f2/Fs;
omegac1 = 2*pi*fc1;
omegac2 = 2*pi*fc2;
%% คำนวณค่า  $h_1(m)$ 
m = 1;
for n = -(N1-1)/2:(N1-1)/2
    if n == 0
        hd1(m) = 2*(fc2-fc1);
    else
        hd1(m) = [2*fc2*sin(n.*omegac2)./(n.*omegac2)] - [2*fc1*sin(n.*omegac1)./(n.*omegac1)];
    end;
    m = m+1;
end
%% คำนวณค่า  $w(m)$ 
m = 1;
for n = -(N1-1)/2:(N1-1)/2
    w1(m) = 0.54+0.46*cos(2*pi*n/NN);
    m = m+1;
end
%% คำนวณค่า  $h(m)$ 
h1 = hd1.*w1;
```

รูปที่ 3.14 โค้ดที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองความถี่แถบผ่าน

โดยจะนำสัญญาณ $S_{AM}(n)$ มาทำการกรองสัญญาณเฉพาะในช่วงความถี่ 900-1100 เฮิรตซ์ ด้วยตัวกรองความถี่แถบผ่าน โดยใช้คำสั่ง filter() โดยจะแสดงขั้นตอนที่ได้กล่าวไปดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ขั้นตอนการกรองสัญญาณ $S_{AM}(n)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการทำงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.2 การตีความอูเลตสัญญาณกล้ำเนื่อรอบดวงตาที่ผ่านการมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาหุขนาดใหญ่

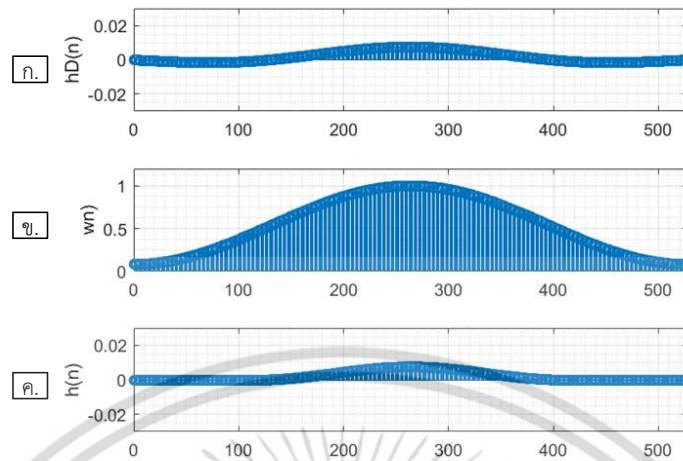
ในส่วนนี้เป็นกรนำสัญญาณที่ได้จากการกรองด้วยตัวกรองความถี่แถบผ่านมาทำการตีมอดูเลต โดยจะนำสัญญาณกล้ำเนื่อรอบดวงตาในคอมพิวเตอร์ ดั้งนั้นนำ $s_{AM}(n)$ มาทำการหาค่าสัมบูรณ์ ซึ่งการนำสัญญาณ $s_{AM}(n)$ มาหาค่าสัมบูรณ์นั้นจะให้ผลเช่นเดียวกับการนำสัญญาณผ่านวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น โดยใช้คำสั่ง `abs()` ในการหาค่าสัมบูรณ์ของสัญญาณ $s_{AM}(n)$ ซึ่งจะได้เป็นสัญญาณ $s_{AMD}(n)$ จากนั้นทำการกรองสัญญาณ $s_{AMD}(n)$ ด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยกำหนดค่าความถี่ตัด f_c ที่ 30 เฮิร์ตซ์ และกำหนดค่าความกว้างของแถบเปลี่ยน Δf เท่ากับ 50 เฮิร์ตซ์ เพื่อให้ตัวกรองมีผลตอบสนองทางขนาดที่ใกล้เคียงกับทางอุดมคติมากที่สุด ดังนั้นสัญญาณที่ได้จากการผ่านตัวกรองความถี่ต่ำผ่านนั้นจะมีการลดทอนทางขนาดที่ต่ำ โดยได้ทำการออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านด้วยวิธีการออกแบบโดยใช้ฟังก์ชันหน้าต่างชนิดฟังก์ชันฮัมมิง สามารถหาค่าผลตอบสนองอิมพัลส์ในอุดมคติ $h_d(m)$ ได้ดังสมการที่ 2.30 และทำการหาค่าความยาวของตัวกรอง โดยคำนวณจากสมการที่ 2.27 ซึ่งภายในวิทยานิพนธ์นี้ได้กำหนดให้ $|f_{stop} - f_{pass}| = 0.05$ กิโลเฮิร์ตซ์ ดังนั้นเมื่อแทนค่าลงสมการที่ 2.26 จะได้ $\Delta f = \frac{0.05k}{8k} = 0.00625$ ลงในสมการที่ 2.26 จะสามารถหาค่าได้ดังสมการที่ 3.8

$$M = \frac{3.3}{0.00625} = 528 \quad (3.8)$$

จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรอง $h(m)$ ที่มีความยาว 528 จุด หรือมีความยาวอยู่ในช่วง $-264 \leq m \leq 264$ โดยจากผลตอบสนองอิมพัลส์ จากสมการที่ 2.30 เมื่อทำการกำหนดช่วงของความยาวของตัวกรอง จะได้ดังสมการที่ 3.9 โดยที่ $w(m)$ สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.28 และ $h_d(m)$ คำนวณได้จากสมการที่ 2.30

$$h(m) = h_d(m) \times w(m) \quad ; -264 \leq m \leq 264 \quad (3.9)$$

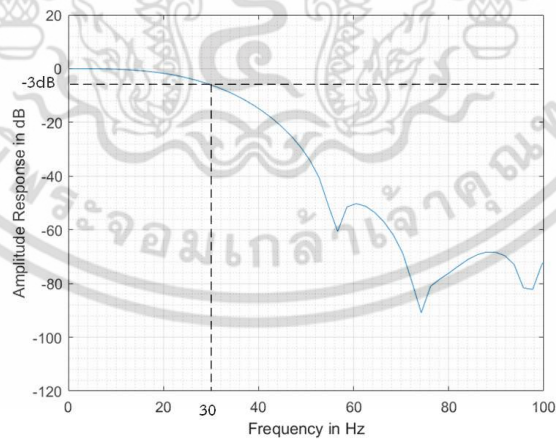
ซึ่งเมื่อทำการแทนค่า $h_d(m)$ และ $w(m)$ ลงในสมการที่ 3.9 พร้อมกับคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ $h(m)$ สามารถแสดงผลตอบสนองอิมพัลส์ของ $h_d(m)$ $w(m)$ และ $h(m)$ ได้ดังรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ผลตอบสนองอิมพัลส์ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

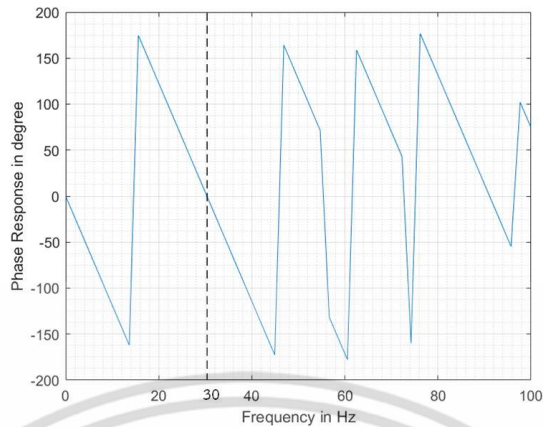
ก). ผลตอบสนองอิมพัลส์ในอุดมคติ $h_d(m)$ ข). ฟังก์ชันหน้าต่าง $w(m)$ แบบฮัมมิง ค). ผลตอบสนองอิมพัลส์ $h(m)$

และสามารถแสดงผลตอบสนองทางขนาดในหน่วยเดซิเบล และ ผลตอบสนองทางเฟสได้ดังรูปที่ 3.17 และ 3.18 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่ได้ทำการออกแบบนั้น ให้ผลตอบสนองตรงตามที่ได้กำหนดไว้ที่ความถี่ตัดเท่ากับ 30 เฮิร์ตซ์ พร้อมแสดงโค้ดที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านได้ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.17 ผลตอบสนองทางขนาดของตัวกรองความถี่ต่ำผ่านในหน่วยเดซิเบล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 ผลตอบสนองทางเฟสของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

```

% Hamming filter low pass
N2 = 528;
fc = 30;
fc = fc/Fs;
omegac = 2*pi*fc;

%% คำนวณค่า  $h_d(m)$ 
m = 1;
for n = -(N2-1)/2:(N2-1)/2
    if n == 0
        hd2(m) = 2*fc;
    else
        hd2(m) = 2*fc*sin(n.*omegac)./(n.*omegac);
    end;
    m = m+1;
end

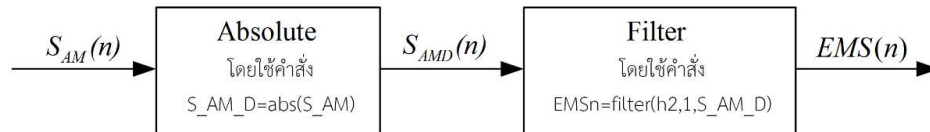
%% คำนวณค่า  $w(m)$ 
m = 1;
for n = -(N2-1)/2:(N2-1)/2
    w2(m) = 0.54+0.46*cos(2*pi*n/N2);
    m = m+1;
end

%% คำนวณค่า  $h(m)$ 
h2 = hd2.*w2;

```

รูปที่ 3.19 โค้ดที่ใช้ในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน

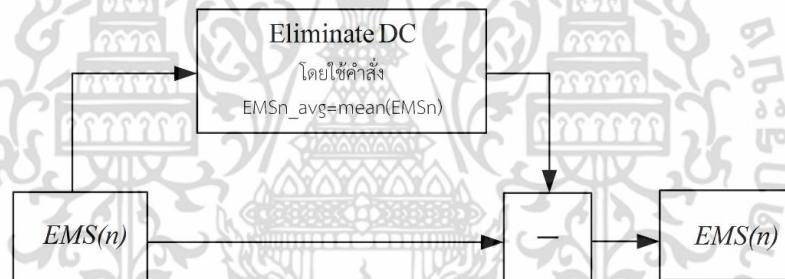
ในส่วนสุดท้ายของการติ่มอดูเลตจะทำการนำสัญญาณ $S_{AMD}(n)$ มาทำการกรองสัญญาณให้เหลือเฉพาะสัญญาณกล่อมเนื้อรอบดวงตา $EMS(n)$ ด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยใช้คำสั่ง filter() จากขั้นตอนที่กล่าวไปทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ขั้นตอนการหาค่าสัมบูรณ์และกรองสัญญาณรบกวนจากสัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่

3.4.3. การกรองสัญญาณไฟตรงออกจากสัญญาณรบกวน

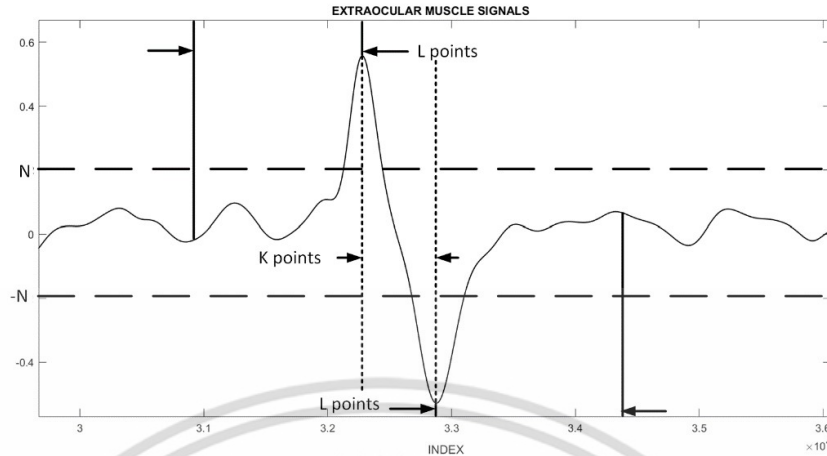
เนื่องจากอุปกรณ์ภายในของชาวต์คาร์ตมีการสร้างแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเกิดขึ้น จึงทำให้สัญญาณรบกวนที่วัดได้ถูกยกขึ้นตามแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ดังนั้นจึงต้องนำสัญญาณรบกวนที่วัดได้มาประมวลผลให้สัญญาณอยู่ในกรอบระดับเดียวกันก่อนที่จะทำการไปประมวลสัญญาณในขั้นตอนต่อไป โดยการนำสัญญาณรบกวนที่วัดได้มาประมวลผล ค่าเฉลี่ยของสัญญาณรบกวน โดยใช้คำสั่ง `mean()` ในการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณ $EMS(n)$ ได้โดยจะแสดงขั้นตอนที่ได้กล่าวไปดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ขั้นตอนการกรองสัญญาณไฟตรงออกจากสัญญาณรบกวน

3.4.4. การเลือกสัญญาณรบกวน 1 คาบสัญญาณ

นำสัญญาณที่ผ่านกระบวนการข้างต้น มาทำการเลือกสัญญาณรบกวนที่วัดได้มาประมวลผล 1 คาบสัญญาณ โดยทำการเลือกสัญญาณที่มีแอมพลิจูดฝั่งบวกที่มีค่ามากกว่า N และแอมพลิจูดฝั่งลบที่มีค่าน้อยกว่า $-N$ ที่มีค่าความกว้างระหว่างแอมพลิจูดฝั่งบวกกับแอมพลิจูดฝั่งลบไม่ต่ำกว่า K จุด โดยกำหนดตำแหน่งในการตัดสัญญาณจากแอมพลิจูดฝั่งบวกสูงสุดไปทางด้านซ้าย L จุด และจากแอมพลิจูดฝั่งลบต่ำสุดไปทางด้านขวา L จุด โดยกำหนดให้ L มีค่าเท่ากับ 1000 จุด ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากการทดลอง ดังแสดงการกำหนดค่าในการเลือกสัญญาณได้ดังรูปที่ 3.22 ซึ่งจะได้สัญญาณที่มีความยาว X จุด เนื่องจากในการเลือกสัญญาณแต่ละครั้งนั้นจะได้ความยาวของสัญญาณที่ไม่เท่ากัน จึงเพิ่มค่าศูนย์เพื่อให้สัญญาณมีความยาวทั้งหมด 3000 จุดเท่ากัน



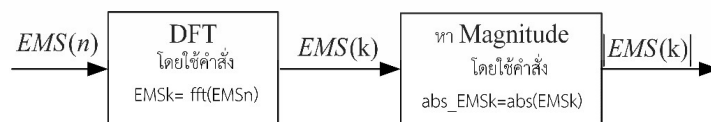
รูปที่ 3.22 การกำหนดค่าที่ใช้ในการเลือกสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ

3.5 ระบบจำแนกบุคคลด้วยสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา

ระบบจำแนกบุคคลด้วยสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะจำแนกบุคคลด้วยสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา โดยอาศัยการแปลงฟูเรียร์ที่ไม่ต่อเนื่อง และใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการตัดสินใจ

3.5.1 การแปลงฟูเรียร์ที่ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier transform (DFT))

การหาลักษณะเด่นของสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา 1 คาบเวลา ซึ่งสัญญาณที่ได้เป็นสัญญาณที่อยู่ในโดเมนเวลา $EMS(n)$ โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้วิธีการแปลงฟูเรียร์ที่ไม่ต่อเนื่อง โดยได้ใช้คำสั่ง `fft()` ใน MATLAB ในการหาสัมประสิทธิ์ของสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา $EMS(k)$ โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้เฉพาะขนาดของสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ของสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา $|EMS(k)|$ จำนวน 40 ค่า ตั้งแต่ความถี่ 0 ถึง 78 เฮิรตซ์ เป็นลักษณะเด่นของสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา $EMS(n)$ โดยจะใช้คำสั่ง `abs()` ในการหาขนาดของค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้โดยจะแสดงขั้นตอนที่ได้กล่าวไปดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ขั้นตอนการหาลักษณะเด่นของสัญญาณ

3.5.2 โครงข่ายประสาทเทียม (Neural network)

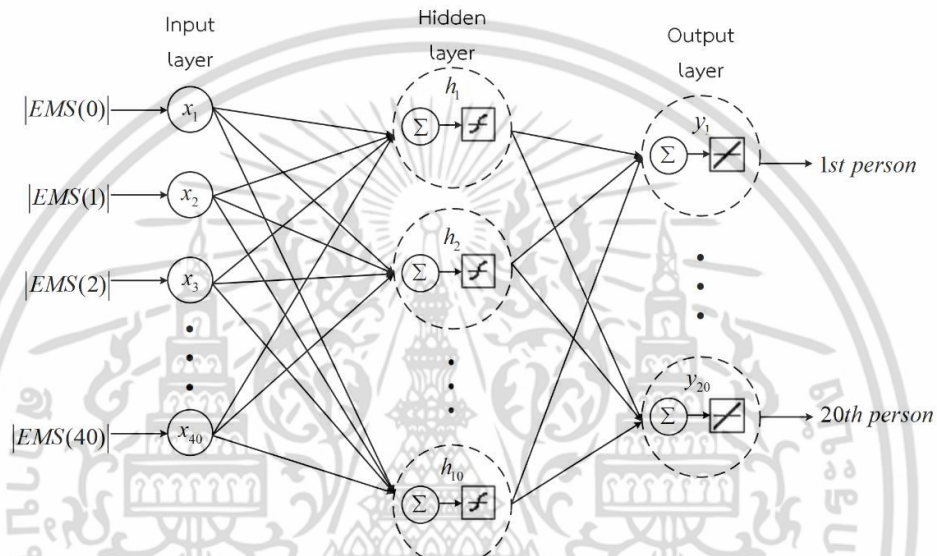
ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซพตรอนหลายชั้นแบบเรียนรู้การแพร่ย้อนกลับคืนสภาพได้ (Resilient backpropagation) เพื่อใช้ในการเรียนรู้ และตัดสินใจในการแยกแยะตัวบุคคล โดยมีอินพุตเป็นขนาดของค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ของสัญญาณกล่อมเนื้อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ ของแต่ละบุคคล ทั้งหมด 20 บุคคล โดยกำหนดเอาทพุตของโครงข่ายประสาทเทียมเป็น 1 เมื่อเป็นบุคคลที่ 1, และกำหนดให้เป็น 2 เมื่อเป็นบุคคลที่ 2 กำหนดในลักษณะนี้จนกระทั่งครบ K คน โดยทำการสร้างระบบโครงข่ายประสาทเทียมที่มี $K = 2$ ถึง $K = 11$ โดยแบ่งเป็นข้อมูลของบุคคลดังแสดงได้ในตารางที่ 3.1 โดยวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ Tool box ใน MATLAB ในการเขียนโปรแกรมส่วนของการเรียนรู้ระบบโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซพตรอนหลายชั้น แบบเรียนรู้การแพร่ย้อนกลับคืนสภาพได้

ตารางที่ 3.1 จำนวนสัญญาณที่ใช้ในการทดลองของแต่ละบุคคล

บุคคลที่	จำนวนข้อมูล
1	139
2	30
3	49
4	41
5	85
6	30
7	43
8	69
9	47
10	57
11	68
12	70
13	113
14	54
15	86
16	33
17	51
18	49
19	56
20	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบโครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซพตรอนหลายชั้น แบบเรียนรู้การแพร่ย้อนกลับคืนสภาพได้ จะประกอบไปด้วย 3 ชั้น คือ ชั้นอินพุต ประกอบด้วยจำนวนข้อมูลที่ป้อนให้กับโครงข่ายซึ่งในที่นี้คือจำนวนขนาดของสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ที่ได้จากการคำนวณในหัวข้อที่ 3.4.2 โดยในการทดลองทำการเลือกใช้ค่าขนาดของสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์เท่ากับ 40 ค่า, ชั้นที่ 2 คือ ชั้นซ่อน โดยในชั้นซ่อนนี้มีฟังก์ชันกระตุ้นแบบซิกมอยด์ และชั้นที่ 3 คือ ชั้นเอาต์พุต ประกอบไปด้วย 20 นิวรอน และมีฟังก์ชันกระตุ้นแบบเชิงเส้น ดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 โครงสร้างของระบบโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในการทดลอง

รูปตัวอย่างหน้าต่างโปรแกรมของ Neural network tool box ที่ใช้ใน MATLAB แสดงดังรูปที่ 3.25 จากรูปที่ 3.25 โดยจะทำการอธิบายรายละเอียดของหน้าต่างโปรแกรม Tool box แบ่งออกเป็น 4 ส่วน ดังนี้

หมายเลข 1 : ส่วนของ Neural Network

ในส่วนนี้จะแสดงรายละเอียดของโครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ จำนวนโหนดของชั้นอินพุต ชั้นซ่อน และชั้นเอาต์พุต ซึ่งในรูปที่ 3.25 ได้ใช้อินพุตทั้งหมด 40 โหนด ชั้นซ่อนทั้งหมด 10 โหนด และเอาต์พุต 5 โหนด

หมายเลข 2 : ส่วนของ Algorithms

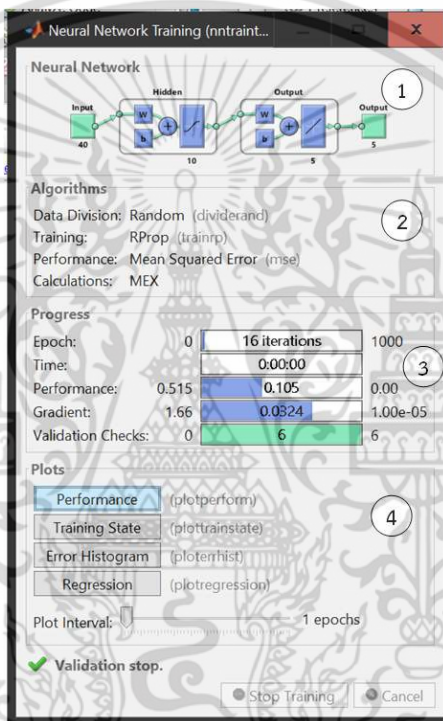
ในส่วนนี้จะแสดงรายละเอียดของขั้นตอนวิธี (Algorithms) ที่ใช้ในการปรับปรุงค่าน้ำหนัก โดยในที่นี้จะใช้กฎการเรียนรู้แบบ RProp (Resilient backpropagation) และมาหาค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น โดยใช้ Mean Squared error ซึ่งค่าทั้งหมดที่กล่าวมาจะถูกคำนวณหาค่าโดยโปรแกรม MATLAB

หมายเลข 3 : ส่วนของ Progress

ในส่วนนี้จะแสดงถึงความคืบหน้าของตัวโปรแกรมในขณะที่โครงข่ายเข้าสู่กระบวนการเรียนรู้ของการปรับค่าน้ำหนัก โดยจากรูปที่ 3.25 จะเห็นได้ว่าขั้นตอนการเรียนรู้ได้ใช้จำนวนรอบในการปรับค่าน้ำหนักทั้งหมด 16 รอบ ใช้เวลาทั้งหมด 0 วินาที และค่าความผิดพลาดเริ่มต้นที่ 1.66

หมายเลข 4 : ส่วนของ Plots

ในส่วนนี้จะเป็นส่วนที่แสดงประสิทธิภาพในขั้นตอนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม โดยจะแสดงอยู่ในรูปแบบของกราฟ



รูปที่ 3.25 ตัวอย่างหน้าต่างโปรแกรมของ Tool box ที่ใช้ใน MATLAB ของการจำแนกบุคคล 5 คน

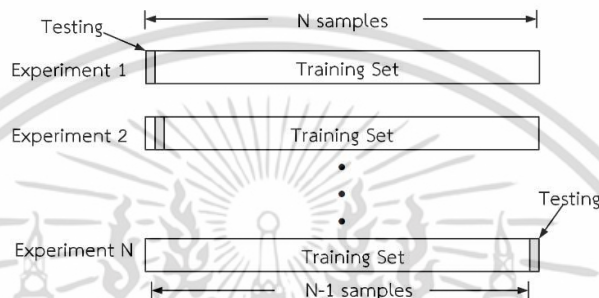
3.5.3 การทดสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม

การแบ่งข้อมูลของสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตาเพื่อทำการทดสอบ โดยใช้วิธี cross-validation ซึ่งเป็นวิธีที่ตัดส่วนของข้อมูลที่ใช้กระบวนการเรียนรู้มาทดสอบ แต่เนื่องจากจำนวนของสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตามีจำนวนน้อย วิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกใช้ วิธีทดสอบประสิทธิภาพแบบ leave one out และ 2-fold โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- วิธีการทดสอบประสิทธิภาพแบบ leave one out

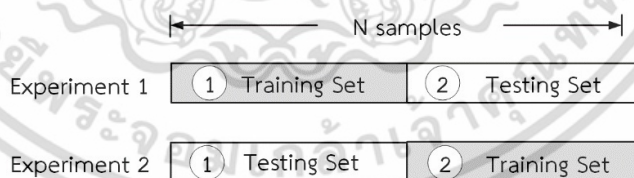
วิธีการทดสอบประสิทธิภาพแบบ leave one out จะทำการเลือกสุ่มข้อมูลของสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตามา 1 สัญญาณ จากทั้งหมด N สัญญาณ นำมาใช้สำหรับการทดสอบ และที่เหลือ $N-1$ สัญญาณจะนำมาใช้สำหรับการเรียนรู้ สลับสุ่มสัญญาณไปจนครบ N สัญญาณ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.26 วิธีการนี้หากทำครบ N รอบจะทำการดึงข้อมูลออกมาทั้งหมด N ตัว สำหรับการทดสอบ โดยที่ไม่ซ้ำกัน ซึ่งหมายความว่าข้อมูลแต่ละข้อมูลมีโอกาสที่จะถูกทดสอบ



รูปที่ 3.26 การทดสอบประสิทธิภาพแบบ leave one out

- วิธีการทดสอบประสิทธิภาพแบบ 2-fold

วิธีการทดสอบประสิทธิภาพแบบ 2-fold จะทำการแบ่งโดยเลือกสุ่มข้อมูลทั้งหมดแบ่งออกเป็น 2 ชุด เท่าๆกัน โดยจะนำข้อมูลชุดที่ 1 เป็นข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ และชุดที่ 2 เป็นข้อมูลสำหรับการทดสอบ ในการทดลองครั้งแรก ส่วนครั้งที่ 2 จะนำข้อมูลชุดที่ 2 เป็นชุดข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ และข้อมูลชุดที่ 1 เป็นชุดข้อมูลสำหรับการทดสอบ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 3.27



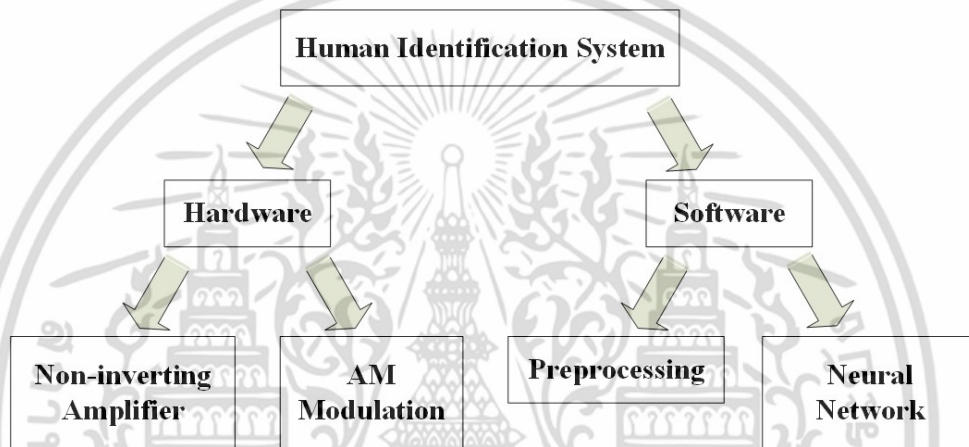
รูปที่ 3.27 การทดสอบประสิทธิภาพแบบ 2-fold

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์

4.1 กล่าวนำ

เพื่อเป็นการยืนยันหลักการในบทที่ 2 และการออกแบบในบทที่ 3 สามารถแสดงผลการทดลองที่ได้ในบทที่ 4 ซึ่งจะแบ่งผลการทดลองออกเป็น 2 ส่วนหลัก แสดงได้ดังรูปที่ 4.1



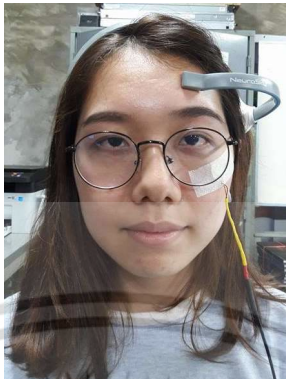
รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนประกอบของระบบการจำแนกบุคคลด้วยสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา

ส่วนแรกคือส่วนของฮาร์ดแวร์ จะประกอบไปด้วยผลของวงจรที่ใช้ในการออกแบบสร้างเครื่องมือที่สามารถวัดสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา และส่วนที่สองคือส่วนของซอฟต์แวร์ จะประกอบไปด้วยส่วนของการประมวลผลเบื้องต้นและส่วนของโครงข่ายประสาทเทียม

4.2 ผลการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณไฟฟ้าในดวงตากับสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา

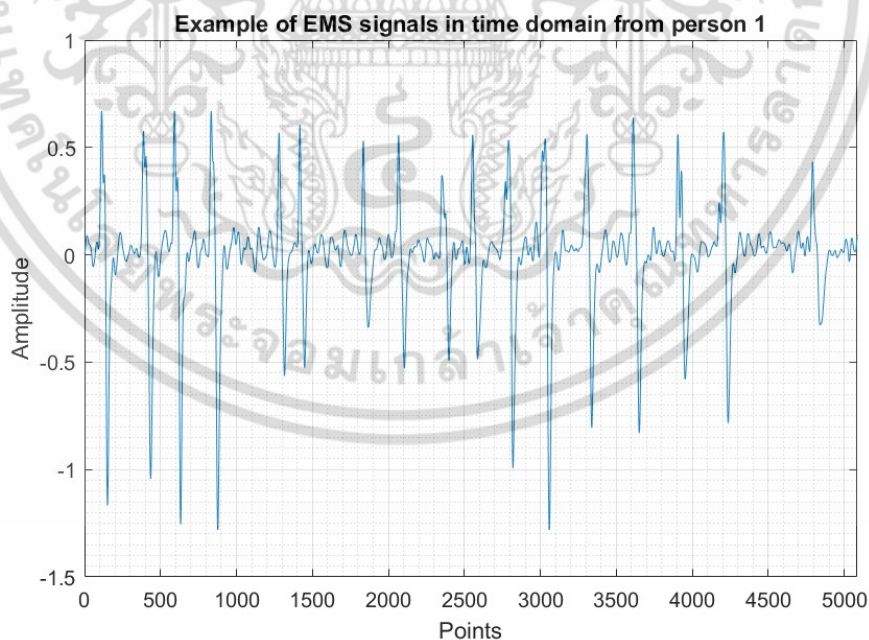
ในส่วนนี้เป็นการทดลองการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณไฟฟ้าในดวงตากับสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาว่ามีความสัมพันธ์กันหรือไม่ โดยนำสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาที่วัดด้วยอุปกรณ์ NeuroSky Mindwave และ สัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา ที่วัดด้วยเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์เซ็นเซอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ ซึ่งแสดงรูปแบบการเก็บผลตามรูปที่ 4.2 โดยมีการติดตั้งอุปกรณ์วัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาบริเวณศีรษะของผู้ทำการทดลอง และติดตั้ง

อุปกรณ์วัดสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาที่บริเวณด้านข้างตาซ้าย ซึ่งวิธีดังกล่าวจะสามารถเก็บผลการทดลองสัญญาณทั้งสองได้พร้อมกัน



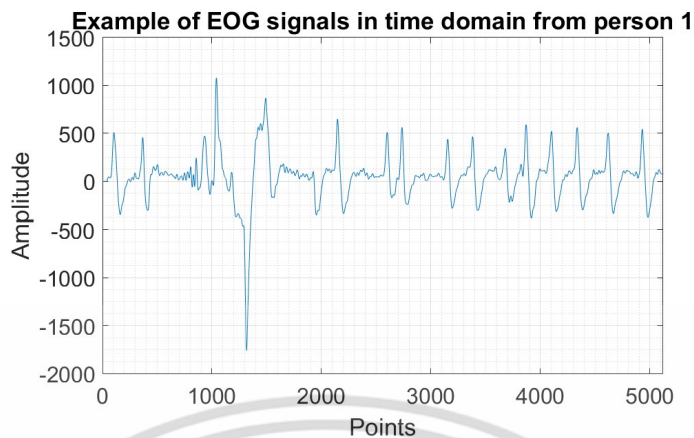
รูปที่ 4.2 การติดตั้งอุปกรณ์วัดสัญญาณ ขณะวัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาและสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาพร้อมกัน

จากการทดลองสามารถเก็บข้อมูลสัญญาณไฟฟ้าได้จาก 15 คน มาหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ตามรูปแบบของสมการที่ 2.1 โดยยกตัวอย่างวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณไฟฟ้าในดวงตากับสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา ของบุคคลที่ 1 จากการเก็บสัญญาณครั้งที่ 1 ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.3 ตัวอย่างสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา จากการเก็บสัญญาณของบุคคลที่ 1 ครั้งที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



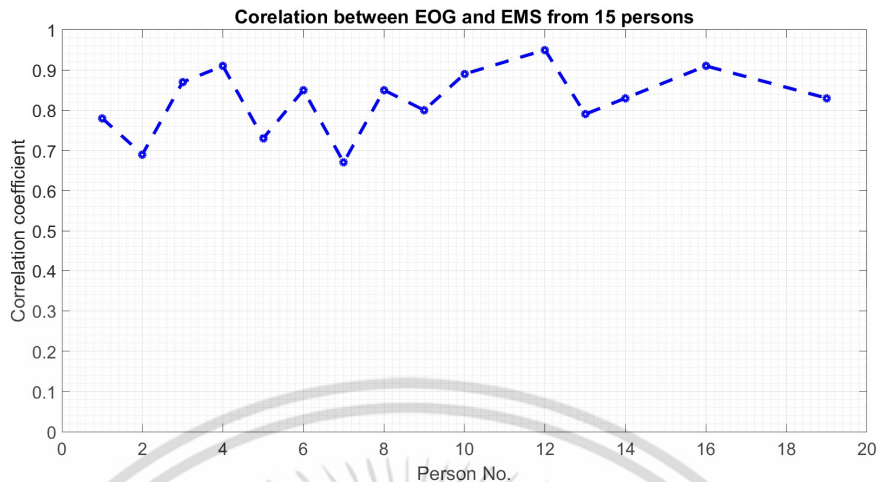
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างสัญญาณไฟฟ้าในดวงตา จากการเก็บสัญญาณของบุคคลที่ 1 ครั้งที่ 1

เนื่องจากสัญญาณที่บันทึกจากอุปกรณ์ทั้ง 2 ใช้ค่าอัตราซีกตัวอย่างที่ไม่เท่ากัน โดย NeuroSky Mindwave ใช้ค่าอัตราซีกตัวอย่างเท่ากับ 512 เฮิร์ตซ์ และ เพียโซอิเล็กทริกทรานซิวเซอร์ใช้ค่าอัตราซีกตัวอย่างเท่ากับ 8000 เฮิร์ตซ์ ดังนั้นจึงนำสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตาที่ได้จากการวัดสัญญาณจากเพียโซอิเล็กทริกเซ็นเซอร์มาสุ่มตัวอย่างซ้ำ (resampling) ให้มีค่าอัตราซีกตัวอย่างที่เท่ากับสัญญาณไฟฟ้าในดวงตา ที่วัดสัญญาณจาก NeuroSky Mindwave จากนั้นนำสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตาที่ผ่านการสุ่มตัวอย่างซ้ำ และสัญญาณไฟฟ้าในดวงตามาเลือกสัญญาณ 1 คาบสัญญาณ จะได้สัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตา 17 คาบสัญญาณและสัญญาณไฟฟ้าในดวงตา 14 คาบสัญญาณ ของการบันทึกผลครั้งที่ 1 โดยใช้โปรแกรม Matlab ในการคำนวณหาค่าสหสัมพันธ์สามารถแสดงขั้นตอนการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ได้ดังนี้

1) นำสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตา 17 คาบสัญญาณและสัญญาณไฟฟ้าในดวงตา 14 คาบสัญญาณ มาหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ โดยให้สัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตาที่การกระพริบตาครั้งที่ 1 มาจับคู่คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาทั้ง 14 คาบสัญญาณ ในขั้นตอนนี้จะได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตาที่การกระพริบตาครั้งที่ 1 กับสัญญาณไฟฟ้าในดวงตา 14 ค่า

2) ทำซ้ำ 1) โดยเปลี่ยนมาใช้สัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตาที่การกระพริบตาครั้งที่ 2 จับคู่คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์กับสัญญาณไฟฟ้าในดวงตาทั้ง 14 คาบสัญญาณ วนไปจนครบ 17 รอบ ซึ่งเท่ากับจำนวนสัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตา 17 คาบสัญญาณ

3) นำค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้ทั้งหมด 17×14 ค่า มาหาค่าเฉลี่ยได้เป็นค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการเก็บสัญญาณครั้งที่ 1 ของบุคคลที่ 1 จากนั้นทำซ้ำไปเรื่อยๆจนกว่าจะได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของการเก็บสัญญาณทั้งหมดของแต่ละบุคคล ซึ่งค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแต่ละบุคคลแสดงในตารางที่ 4.1 และสามารถพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณไฟฟ้าในดวงตากับสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา จากอาสาสมัคร 15 คน

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณไฟฟ้าในดวงตากับสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา จากอาสาสมัคร 15 คน

บุคคล (จำนวนข้อมูล(EMSxEOG))	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
1(139x125)	0.78
2(30x29)	0.69
3(49x49)	0.87
4(41x39)	0.91
5(85x82)	0.73
6(30x30)	0.85
7(43x43)	0.67
8(69x67)	0.85
9(47x45)	0.80
10(57x56)	0.89
12(70x65)	0.95
13(113x110)	0.79
14(54x52)	0.83
16(33x33)	0.91
19(56x55)	0.83
ค่าเฉลี่ย(916x880)	0.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

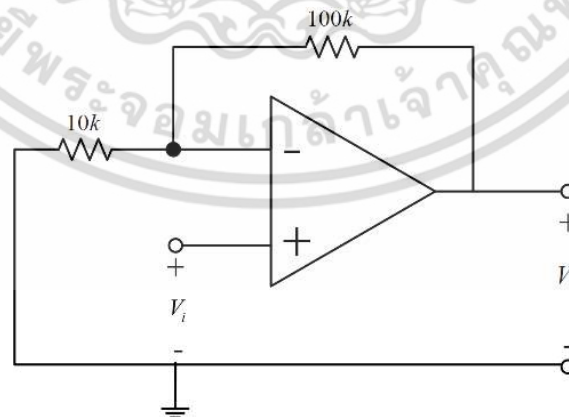
จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณไฟฟ้าในดวงตากับสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาทั้งหมดจากอาสาสมัคร 15 คน มีค่าอยู่ในช่วง 0.7 -1 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.82 จากผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่า สัญญาณไฟฟ้าในดวงตากับสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา มีความสัมพันธ์กันในระดับที่สูง สามารถใช้เทียบเคียงกันได้

4.3 ผลของวงจรที่ใช้ในการออกแบบสร้างเครื่องมือวัดสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา

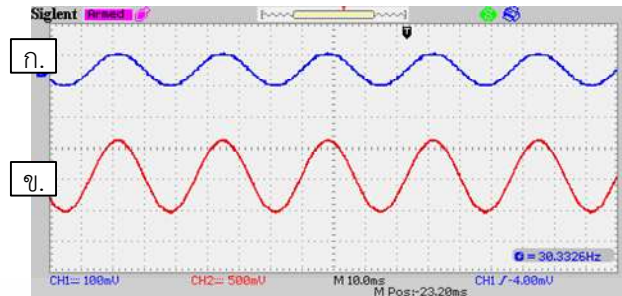
สัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาจะถูกวัดจากเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์ที่ติดอยู่บริเวณใต้ล่างของดวงตา ดังรูปที่ 3.3ก) และจะถูกทำการขยายขนาดของสัญญาณให้มีขนาดใหญ่ขึ้นด้วยวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสที่อัตราขยายเท่ากับ 11 เท่า หลังจากนั้นสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาที่มีความถี่ประมาณ 0.2 – 30 เฮิร์ตซ์ จะถูกทำการมอดูเลตขนาดซินคัสคลื่นพาห้ขนาดใหญ่ ด้วยความถี่คลื่นพาห้เท่ากับ 1.05 กิโลเฮิร์ตซ์ ผลการทดลองในส่วนนี้จะประกอบไปด้วยผลของวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส และ ผลของวงจรการมอดูเลตขนาดซินคัสคลื่นพาห้ขนาดใหญ่

4.3.1 ผลการทดลองของวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส

เพื่อความง่ายต่อการพิจารณา ในส่วนของผลของการทดลองวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสนี้จะสร้างสัญญาณคลื่นรูปไซน์ ขนาดเท่ากับ $100 mV_{pp}$ ที่ความถี่ 30 เฮิร์ตซ์ ซึ่งขนาดและความถี่ของสัญญาณคลื่นรูปไซน์จะมีค่าใกล้เคียงกับสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา และป้อนเข้าสู่ขาอินพุต V_i ของวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส และ วัดสัญญาณสัญญาณเอาต์พุต V_o ดังแสดงในรูปที่ 4.6 และสามารถแสดงรูปสัญญาณคลื่นรูปไซน์ ก่อนและหลังทำการขยายสัญญาณด้วยวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส ได้ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 ตำแหน่งการป้อนสัญญาณ V_i และ วัดสัญญาณ V_o ในวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส



รูปที่ 4.7 ผลของวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส ของสัญญาณคลื่นรูปไซน์

ก. สัญญาณคลื่นรูปไซน์ก่อนขยาย ข. สัญญาณคลื่นรูปไซน์หลังขยาย

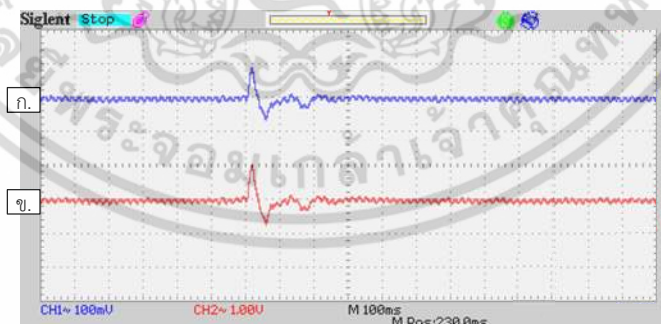
จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าที่ขนาดของสัญญาณเอาต์พุต V_o ที่วัดได้มีค่าเท่ากับ 1100 mV_{pp} และเมื่อนำมาคำนวณหาค่าอัตราขยาย A_v ดังสมการที่ 4.1

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \quad (4.1)$$

จะได้

$$A_v = \frac{1100 \text{ mV}}{100 \text{ mV}} = 11 \quad (4.2)$$

ค่าอัตราการขยายที่คำนวณได้นั้นมีค่าตรงตามที่ได้ออกแบบไว้ และได้แสดงตัวอย่างสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมก่อนและหลังทำการขยายสัญญาณด้วยวงจรขยายแบบไม่กลับเฟสได้ดังรูปที่ 4.8

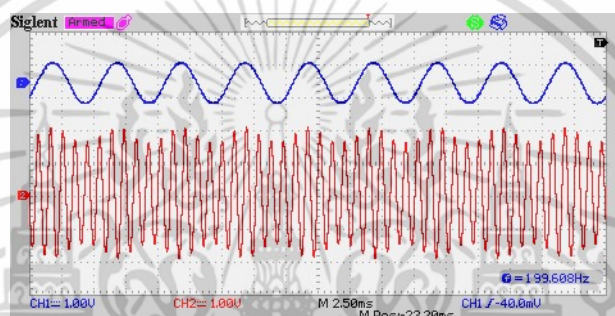


รูปที่ 4.8 ผลของวงจรขยายแบบไม่กลับเฟส ของสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยม

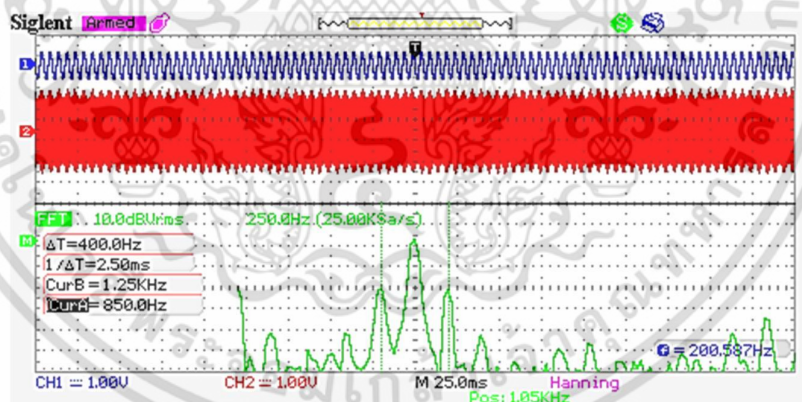
ก. สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมก่อนขยาย ข. สัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมหลังขยาย

4.3.2 ผลการทดลองของวงจรการมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่

วงจรการมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่นี้ ได้ทำการออกแบบโดยนำสัญญาณกล้ำมเนื่อรอบดวงตามาทำการมอดูเลตด้วยคลื่นพาห้ที่มีความถี่เท่ากับ 1.05 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งสัญญาณกล้ำมเนื่อรอบดวงตานั้นจะมีความถี่อยู่ในช่วง 0.2 – 30 เฮิร์ตซ์ ซึ่งมีค่าน้อยทำให้เมื่อนำมาแปลงให้อยู่ในโดเมนความถี่เห็นผลสเปกตรัมที่ไม่ชัดเจนดังนั้น จึงได้ทำการป้อนสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่มีความถี่ 200 เฮิร์ตซ์ แทนสัญญาณกล้ำมเนื่อรอบดวงตา $EMS(t)$ ซึ่งจะทำการป้อนสัญญาณ ดังรูปที่ 3.8 จากนั้นจะทำการบันทึกสัญญาณเอาท์พุทที่ได้ทั้งในโดเมนเวลา และความถี่ ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10 ตามลำดับ

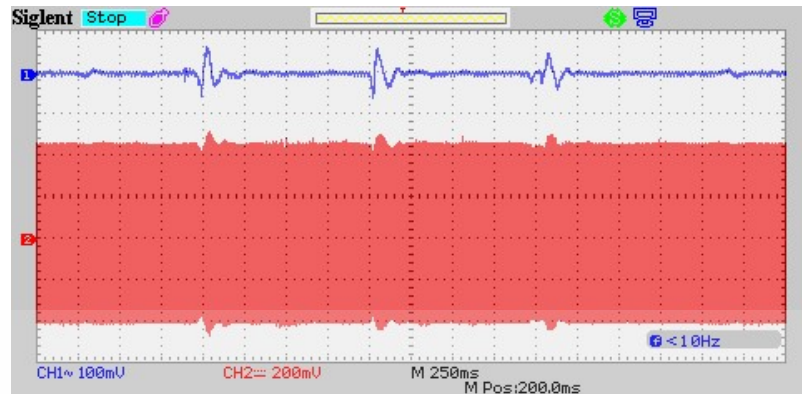


รูปที่ 4.9 รูปสัญญาณมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่ ด้วยสัญญาณคลื่นรูปไซน์



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบวงจรมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่ ด้วยสัญญาณคลื่นรูปไซน์ (ที่การปรับ Time/Div = 25 ms)

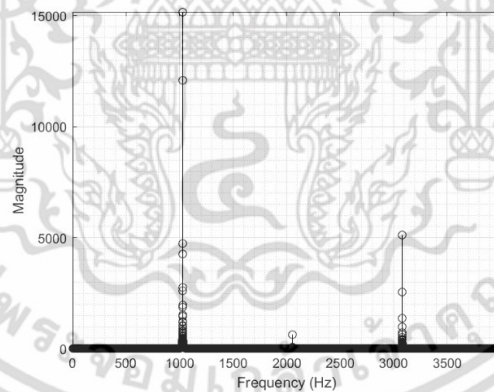
จากการทดลองในรูปที่ 4.9 และ 4.10 แสดงให้เห็นว่ากรอบของสัญญาณการมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่จะมีการเปลี่ยนแปลงตามรูปร่างของสัญญาณข่าวสาร และจะมีความถี่ของคลื่นพาห้ที่ความถี่ด้านต่ำเท่ากับ 850 เฮิร์ตซ์ และ ความถี่ด้านสูงเท่ากับ 1.25 กิโลเฮิร์ตซ์ จากนั้นทำการนำสัญญาณกล้ำมเนื่อรอบดวงตาที่ผ่านการขยายมาทำการป้อนเข้าสู่วงจรมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่ และทำการบันทึกสัญญาณเอาท์พุทที่ได้ดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบวงจรมอดูเลตขนาด ชนิดคลื่นพาร์ขนาดใหญ่ ด้วยสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา

4.4 ผลการทดลองการประมวลผลเบื้องต้น (Preprocessing)

การส่งข้อมูลของสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาที่ผ่านการมอดูเลต $S_{AM}(t)$ ผ่านทางตัวการ์ดของคอมพิวเตอร์ และใช้โปรแกรม Matlab ในการบันทึกสัญญาณ โดยจะแสดงองค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาร์ขนาดใหญ่ของสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาที่ได้ ดังรูปที่ 4.12

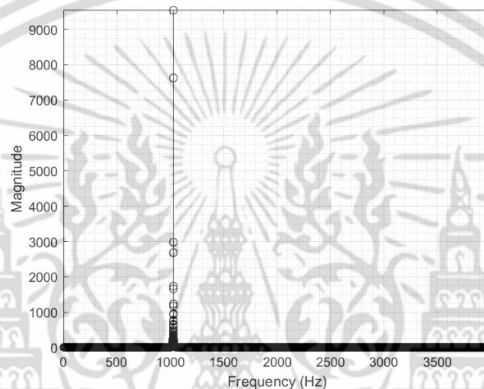


รูปที่ 4.12 องค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณการมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาร์ขนาดใหญ่ของสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา

4.4.1 การกรองสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาที่ผ่านการมอดูเลตขนาด ชนิดคลื่นพาร์ขนาดใหญ่ด้วยตัวกรองความถี่แถบผ่าน

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าเมื่อนำสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาที่ผ่านการมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาร์ขนาดใหญ่ มาหาองค์ประกอบทางความถี่พบว่ามีความถี่ที่ฮาร์โมนิกอื่นเกิดขึ้น นอกจาก

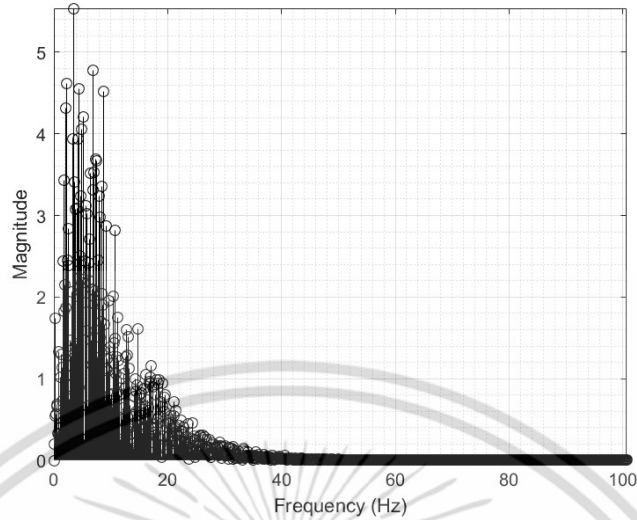
ความถี่ของคลื่นพาห้ที่ได้ทำการมอดูเลตที่ 1.05 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งในทางปฏิบัติไม่มีอุปกรณ์ชนิดใดที่สามารถสร้างสัญญาณรูปไซน์ที่แท้จริงได้ ทำให้เมื่อนำสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่ไม่ใช่สัญญาณไซน์ที่แท้จริงมามอดูเลตจะทำให้เกิดความถี่ที่ฮาร์โมนิกอื่นเสมอ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการกรองสัญญาณด้วยตัวกรองความถี่แถบผ่าน ซึ่งสามารถแสดงผลสัญญาณกล้ำเนื้อรอบดวงตาที่ผ่านการมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่ที่ผ่านการกรองความถี่ที่ฮาร์โมนิกอื่นออก ด้วยตัวกรองความถี่แถบผ่านดังรูปที่ 4.13 จากรูปจะพบว่าวงจรกรองที่ได้ทำการออกแบบสามารถกรองสัญญาณที่เหลือเฉพาะความถี่คลื่นพาห้เท่ากับ 1.05 กิโลเฮิร์ตซ์



รูปที่ 4.13 องค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณการมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่ของสัญญาณกล้ำเนื้อรอบดวงตาที่ผ่านการกรองด้วยตัวกรองความถี่แถบผ่าน

4.4.2 การตีมอดูเลตสัญญาณกล้ำเนื้อรอบดวงตาที่ผ่านการมอดูเลตขนาดชนิดคลื่นพาห้ขนาดใหญ่

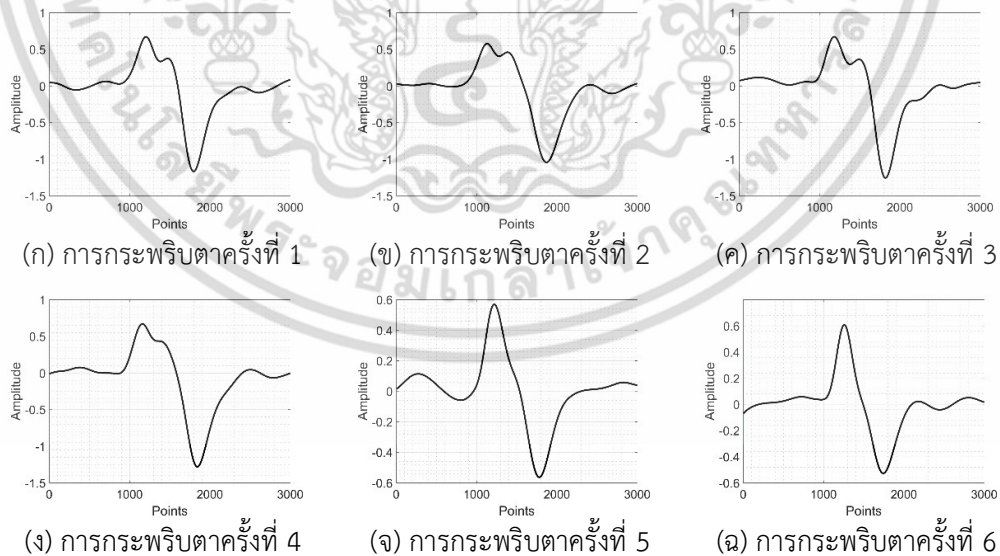
สัญญาณ $S_{AM}(n)$ ที่ผ่านการหาค่าสัมบูรณ์จะได้เป็นสัญญาณ $|S_{AM}(n)|$ ซึ่งได้อธิบายหลักการไปในหัวข้อที่ 2.6.2 เนื่องจากสัญญาณกล้ำเนื้อรอบดวงตา $EMS(n)$ นั้นอยู่ในช่วงความถี่ต่ำและมีนัยยะสำคัญอยู่ที่ 0-30 เฮิร์ตซ์ จึงได้ออกแบบตัวกรองความถี่ต่ำผ่านที่มีค่าความถี่ตัดอยู่ที่ 30 เฮิร์ตซ์สามารถแสดงรูปสัญญาณและองค์ประกอบความถี่ของสัญญาณ $EMS(n)$ ที่ผ่านการกรองด้วยความถี่ต่ำผ่านได้ดังรูปที่ 4.3 และ 4.14 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.3 เป็นตัวอย่างการบันทึกสัญญาณของบุคคลที่ 1 ครั้งที่ 1 จากการเก็บสัญญาณทั้งหมด 10 ครั้ง จะเห็นได้ว่าสัญญาณ $EMS(n)$ ที่ผ่านการกรองด้วยวงจรความถี่ต่ำผ่านนั้น มีสัญญาณ $EMS(n)$ ทั้งหมด 17 คาบสัญญาณ ซึ่งการกระพริบตา 1 ครั้งจะให้สัญญาณ $EMS(n)$ 1 คาบสัญญาณ



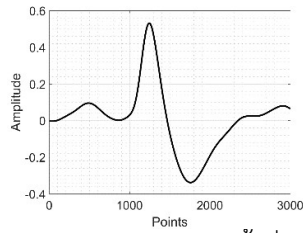
รูปที่ 4.14 องค์ประกอบทางความถี่ของตัวอย่างสัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตา จากการเก็บสัญญาณของบุคคลที่ 1 ครั้งที่ 1

4.4.3 ผลการทดลองจากการเลือกสัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ

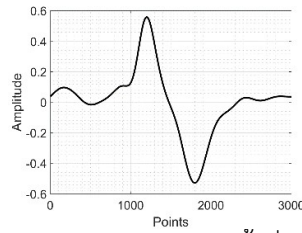
เมื่อทำการนำตัวอย่างสัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตา จากการเก็บสัญญาณของบุคคลที่ 1 ครั้งที่ 1 ที่ได้จากหัวข้อที่ 4.3.4 มาทำการเลือกสัญญาณตามหัวข้อที่ 4.3.4 ซึ่งได้สัญญาณที่ตรงตามคุณสมบัติที่กำหนดไว้ทั้งหมด 17 สัญญาณ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 และ 4.16



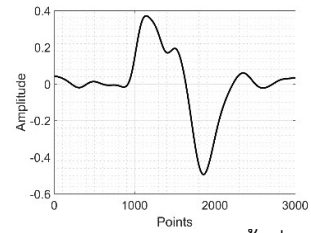
รูปที่ 4.15 ตัวอย่างสัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ ในโดเมนเวลา จากการเก็บสัญญาณของบุคคลที่ 1 ครั้งที่ 1 (การกระพริบตาครั้งที่ 1-6)



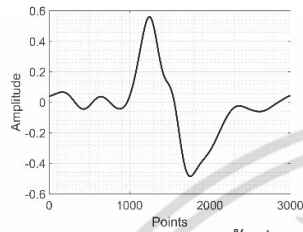
(ก) การกระพริบตาครั้งที่ 7



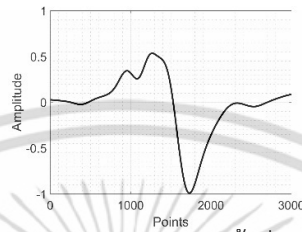
(ข) การกระพริบตาครั้งที่ 8



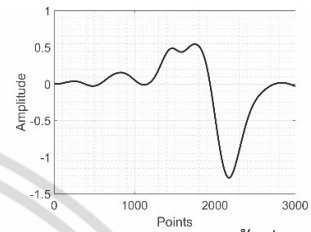
(ค) การกระพริบตาครั้งที่ 9



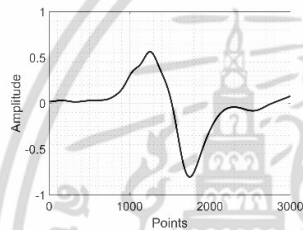
(ง) การกระพริบตาครั้งที่ 10



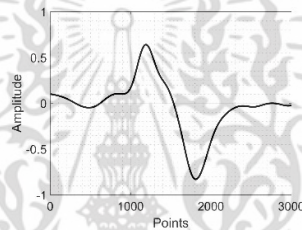
(จ) การกระพริบตาครั้งที่ 11



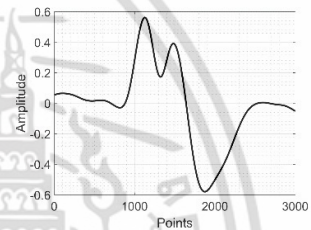
(ฉ) การกระพริบตาครั้งที่ 12



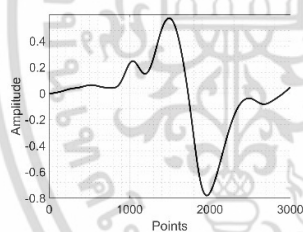
(ช) การกระพริบตาครั้งที่ 13



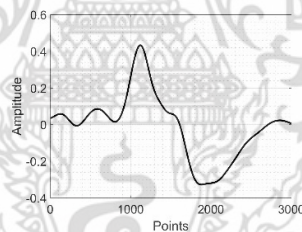
(ซ) การกระพริบตาครั้งที่ 14



(ฅ) การกระพริบตาครั้งที่ 15



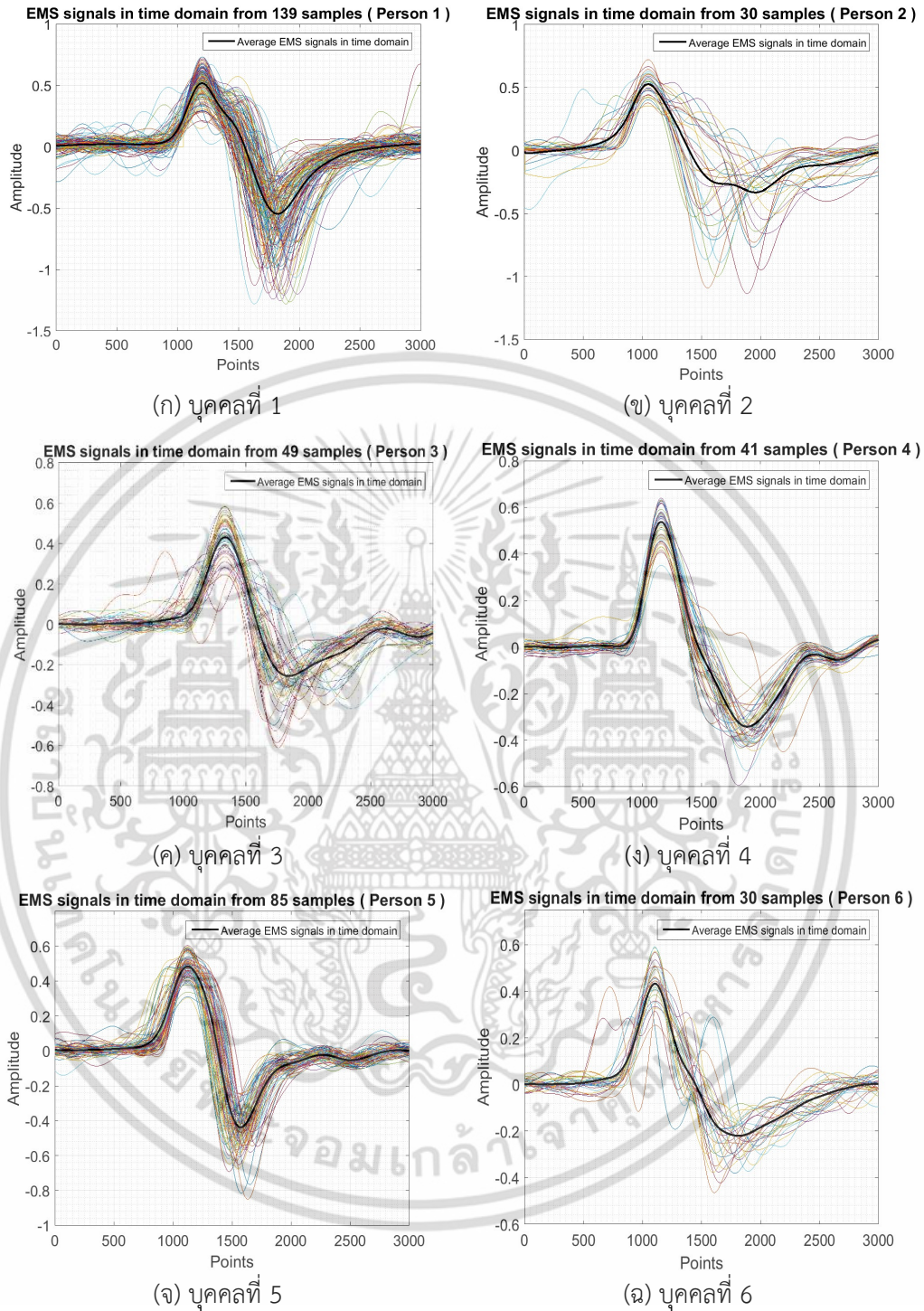
(ญ) การกระพริบตาครั้งที่ 16



(ฎ) การกระพริบตาครั้งที่ 17

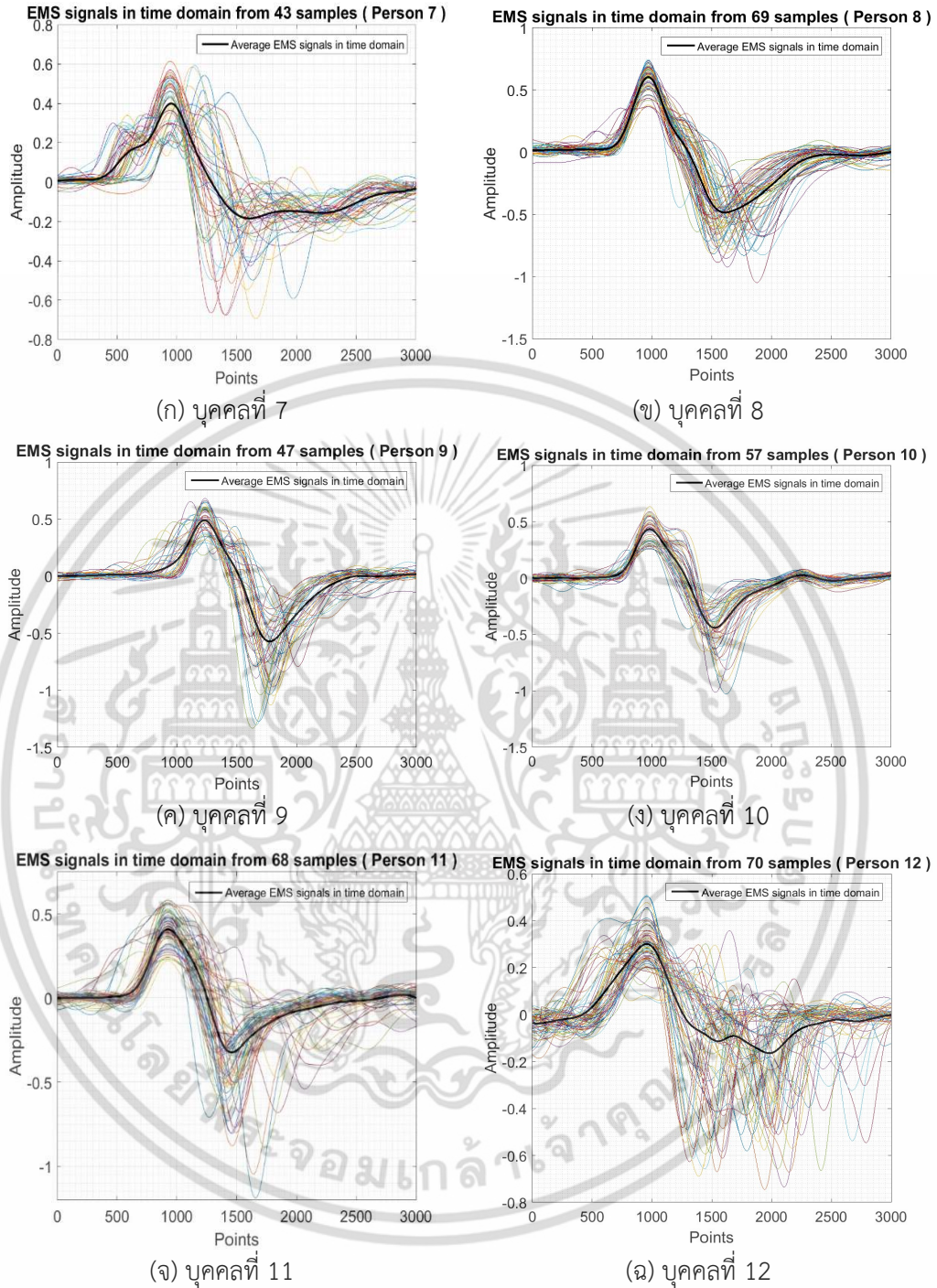
รูปที่ 4.16 ตัวอย่างสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ ในโดเมนเวลา จากการเก็บสัญญาณของบุคคลที่ 1 ครั้งที่ 1 (การกระพริบตาครั้งที่ 7-17)

สัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณของอาสาสมัครทั้ง 20 คน และจำนวนของคาบสัญญาณที่บันทึก และค่าเฉลี่ยของสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาที่ได้ในแต่ละบุคคลแสดงได้ดังรูปที่ 4.17-4.20



รูปที่ 4.17 สัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ และค่าเฉลี่ยในโดเมนเวลาของบุคคลที่ 1-6

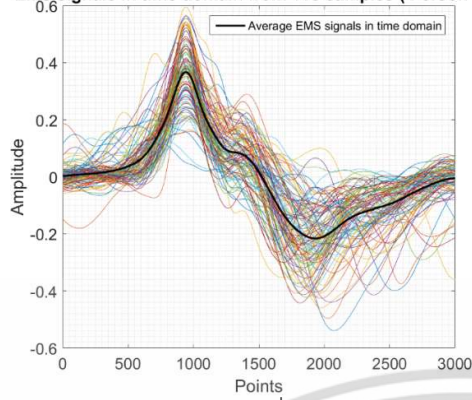
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 สัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ และค่าเฉลี่ยในโดเมนเวลาของบุคคลที่ 7-12

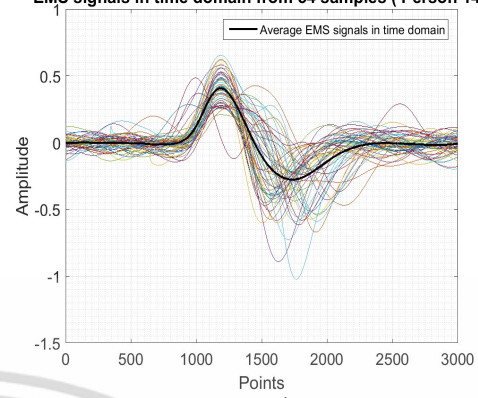
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EMS signals in time domain from 113 samples (Person 13)



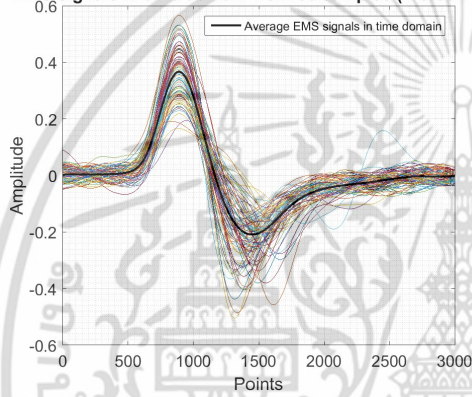
(ก) บุคคลที่ 13

EMS signals in time domain from 54 samples (Person 14)



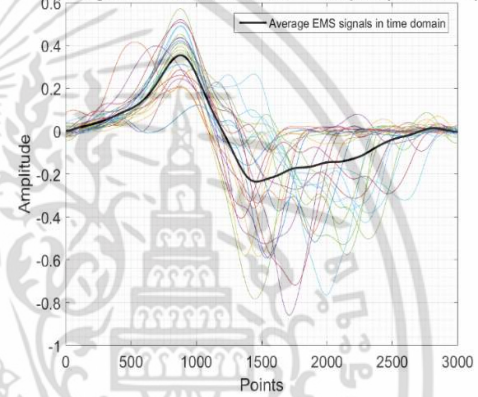
(ข) บุคคลที่ 14

EMS signals in time domain from 86 samples (Person 15)



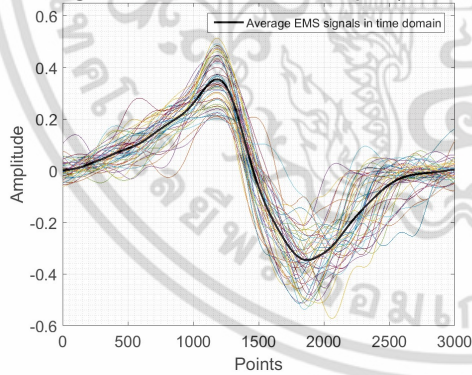
(ค) บุคคลที่ 15

EMS signals in time domain from 33 samples (Person 16)



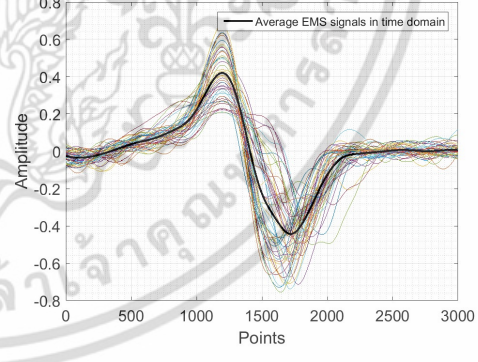
(ง) บุคคลที่ 16

EMS signals in time domain from 51 samples (Person 17)



(จ) บุคคลที่ 17

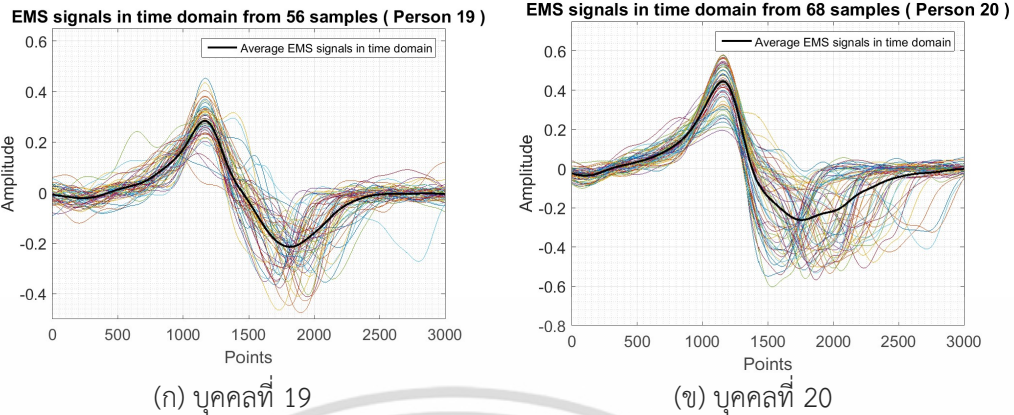
EMS signals in time domain from 49 samples (Person 18)



(ฉ) บุคคลที่ 18

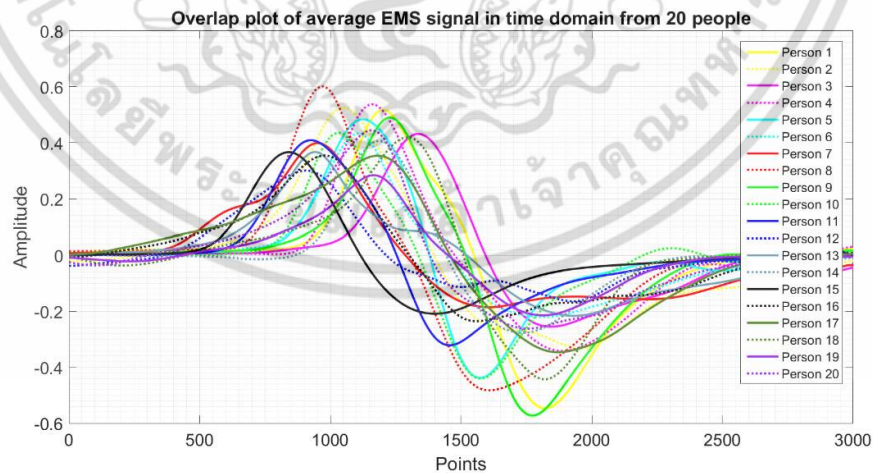
รูปที่ 4.19 สัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ และค่าเฉลี่ยในโดเมนเวลาของบุคคลที่ 13-18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 สัญญาณกล้ามเนื้อเนื้องอรวงตา 1 คาบสัญญาณ และค่าเฉลี่ยในโดเมนเวลาของบุคคลที่ 19-20

จากรูปที่ 4.17-4.20 จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการพลอตสัญญาณกล้ามเนื้อเนื้องอรวงตา 1 คาบสัญญาณ ในโดเมนเวลาของแต่ละบุคคลเทียบกับ พบว่าสัญญาณของบุคคลที่ 1, 4, 5, 15 และ 18 มีลักษณะสัญญาณในแต่ละครั้งคล้ายคลึงกัน และมีความแปรปรวนน้อยทำให้ค่าเฉลี่ยของสัญญาณสอดคล้องกับรูปสัญญาณกล้ามเนื้อเนื้องอรวงตาที่วัดได้ในแต่ละครั้ง โดยเมื่อนำค่าเฉลี่ยของสัญญาณกล้ามเนื้อเนื้องอรวงตา 1 คาบสัญญาณในโดเมนเวลาของแต่ละบุคคลเทียบกับทั้งหมด 20 คน แสดงได้ดังรูปที่ 4.21 จากรูปจะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของสัญญาณกล้ามเนื้อเนื้องอรวงตา 1 คาบสัญญาณ ในโดเมนเวลาของแต่ละบุคคลเมื่อนำมาเทียบกับทั้งหมด 20 คน พบว่ามีขนาดสูงสุดของแอมพลิจูด เฟส และรูปร่างความกว้างของแอมพลิจูดฝั่งบวกและลบของสัญญาณในแต่ละบุคคลมีความแตกต่างกัน

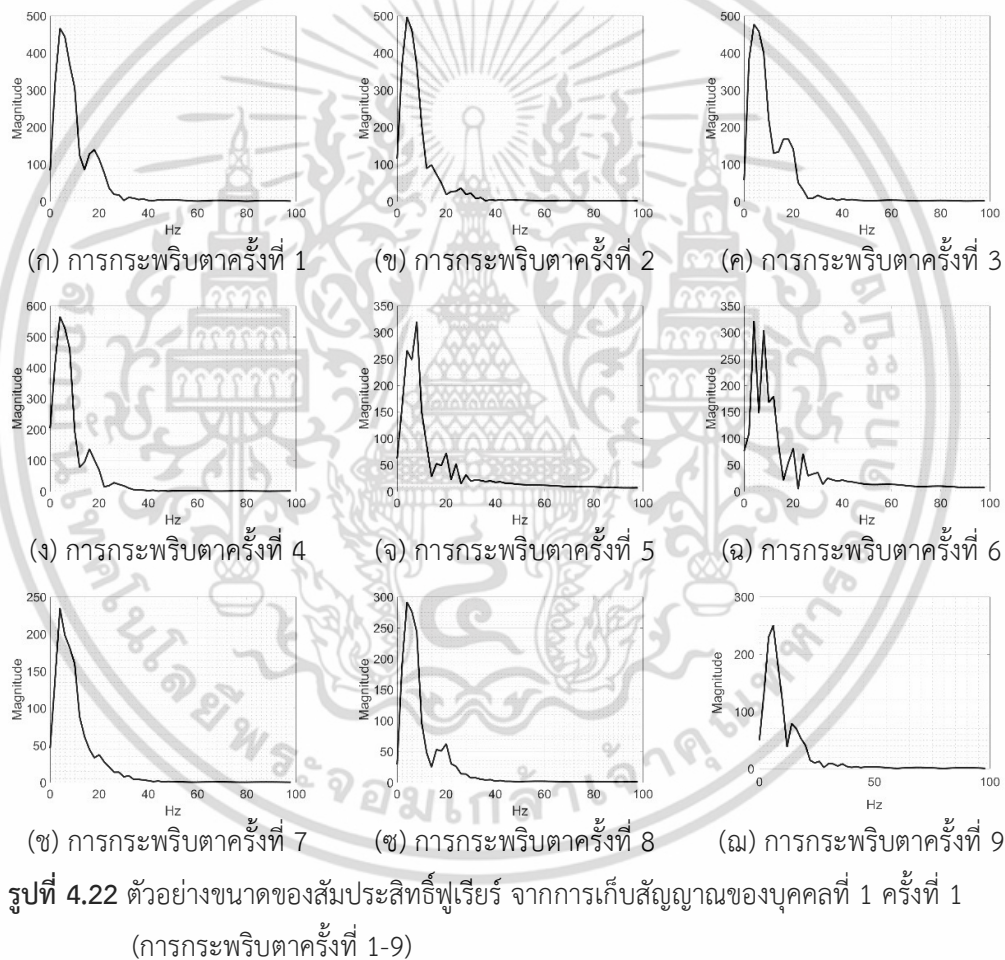


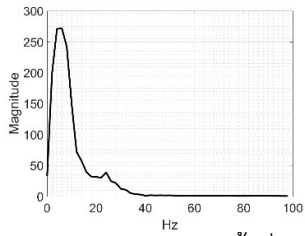
รูปที่ 4.21 ค่าเฉลี่ยของสัญญาณกล้ามเนื้อเนื้องอรวงตา ในโดเมนเวลาของบุคคล 20 คน

4.5 ผลการทดลองของโครงข่ายประสาทเทียม

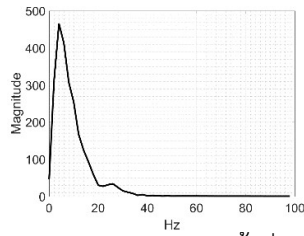
4.5.1 ผลการทดลองในส่วนของการแปลงฟูเรียร์ที่ไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier transform (DFT))

ในส่วนนี้จะเป็นการแสดงผลของการดึงคุณลักษณะเด่นของสัญญาณกล้ำมเนือรอบดวงตา ด้วยวิธีการแปลงฟูเรียร์ที่ไม่ต่อเนื่อง เพื่อที่จะใช้เป็นตัวแทนของสัญญาณก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการเรียนรู้ และตัดสินใจ โดยนำตัวอย่างสัญญาณกล้ำมเนือรอบดวงตา 1 คาบเวลา จากการเก็บสัญญาณของบุคคลที่ 1 ครั้งที่ 1 มาทำการหาขนาดสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ โดยจะแสดงผลที่ได้ดังรูปที่ 4.22-4.23

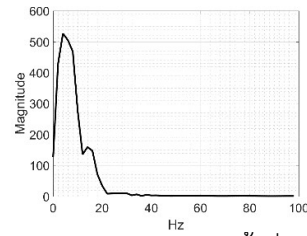




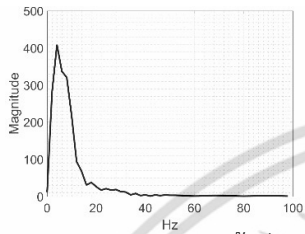
(ก) การกระพริบตาครั้งที่ 10



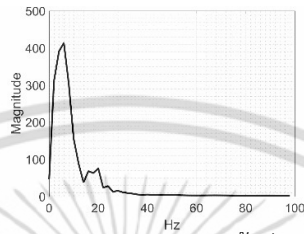
(ข) การกระพริบตาครั้งที่ 11



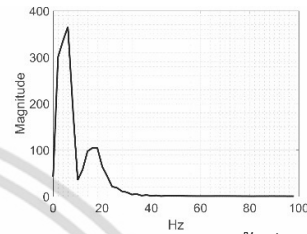
(ค) การกระพริบตาครั้งที่ 12



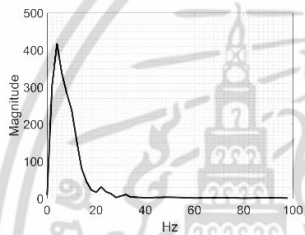
(ง) การกระพริบตาครั้งที่ 13



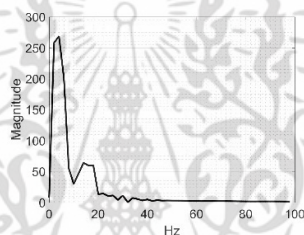
(จ) การกระพริบตาครั้งที่ 14



(ฉ) การกระพริบตาครั้งที่ 15



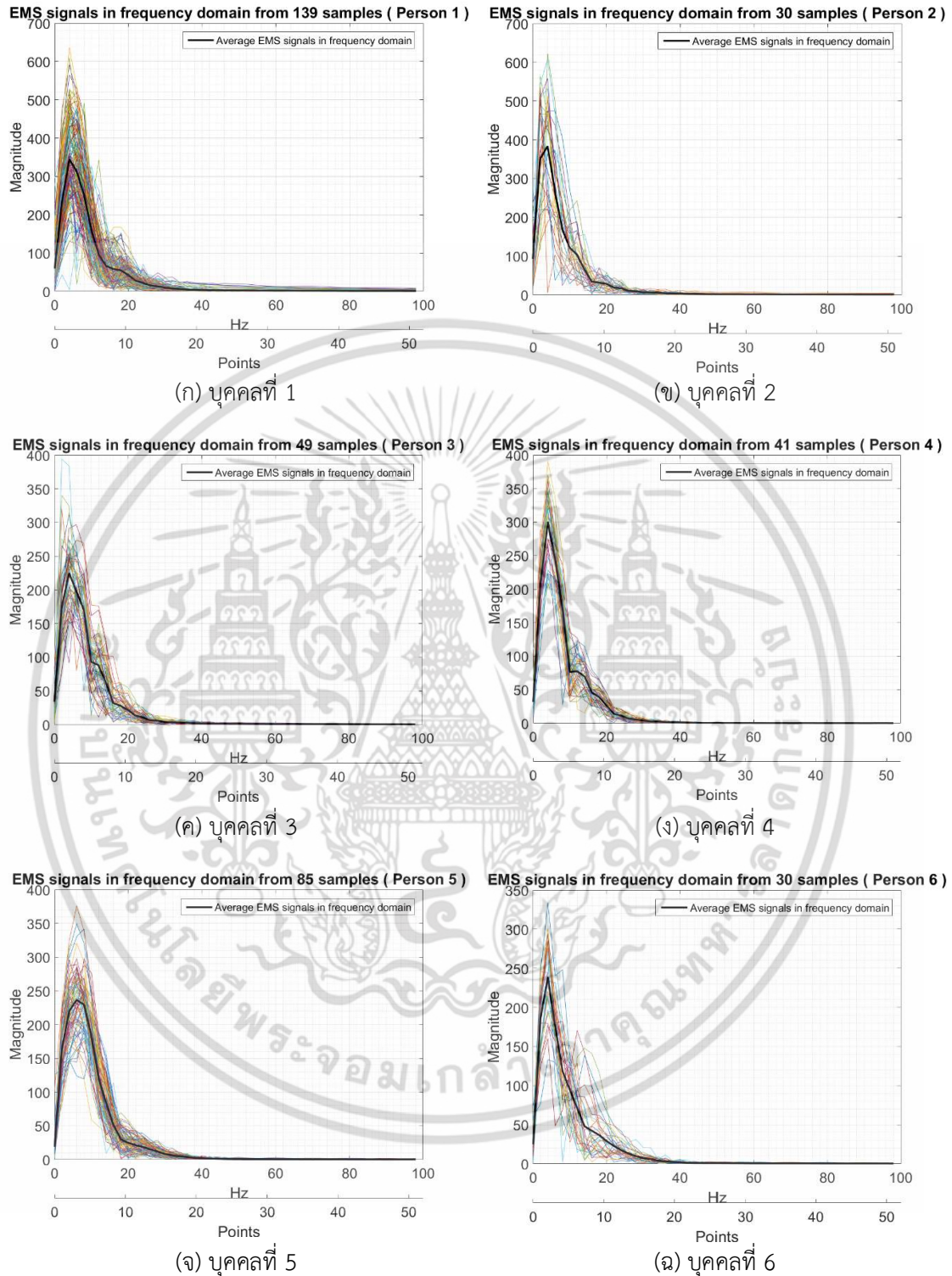
(ช) การกระพริบตาครั้งที่ 16



(ซ) การกระพริบตาครั้งที่ 17

รูปที่ 4.23 ตัวอย่างขนาดของสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ จากการเก็บสัญญาณของบุคคลที่ 1 ครั้งที่ 1 (การกระพริบตาครั้งที่ 10-17)

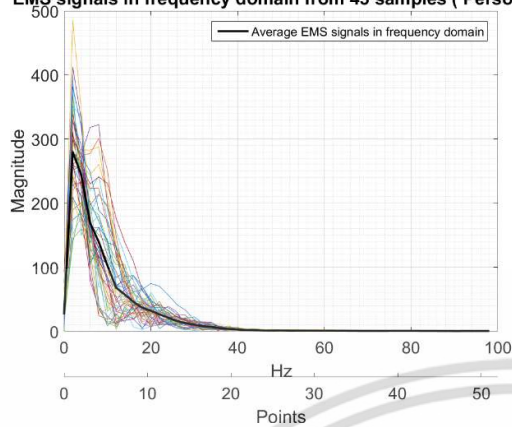
เมื่อนำสัญญาณกล่อมเนื้อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณของอาสาสมัครทั้ง 20 คน จากหัวข้อที่ 4.3.4 มาทำการหาขนาดสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ โดยแสดงจำนวนของสัญญาณที่บันทึก และค่าเฉลี่ยของขนาดของสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ของสัญญาณกล่อมเนื้อรอบดวงตาที่ได้ในแต่ละบุคคลได้ดังรูปที่ 4.24-4.27 และเมื่อนำค่าเฉลี่ยของสัญญาณกล่อมเนื้อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณในโดเมนความถี่ของแต่ละบุคคลเทียบกับทั้งหมด 20 คน แสดงได้ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.24 สัญญาณกล้ำมเนื้อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ และค่าเฉลี่ยในโดเมนความถี่ ของบุคคลที่ 1-6

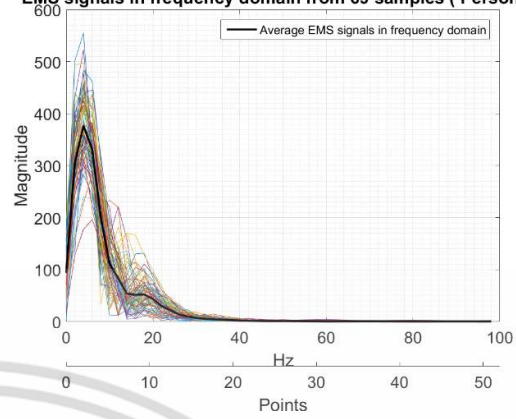
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EMS signals in frequency domain from 43 samples (Person 7)



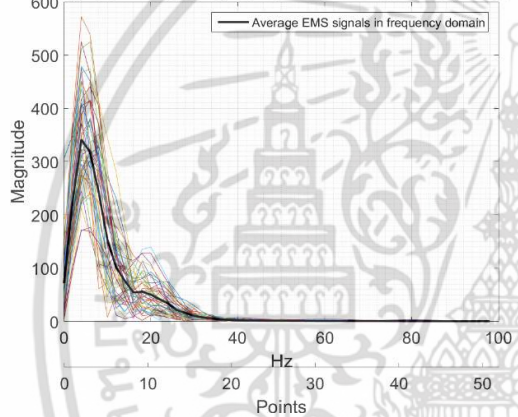
(ก) บุคคลที่ 7

EMS signals in frequency domain from 69 samples (Person 8)



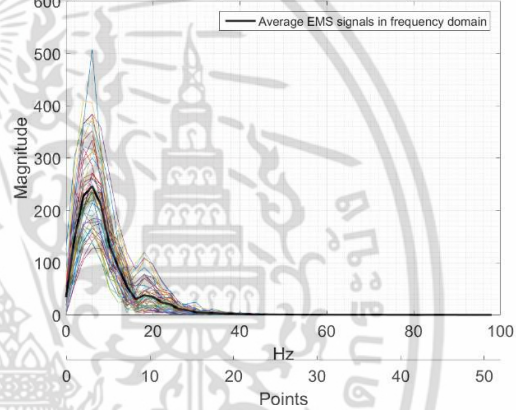
(ข) บุคคลที่ 8

EMS signals in frequency domain from 47 samples (Person 9)



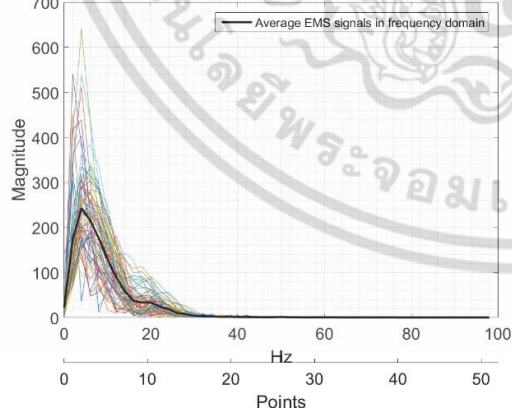
(ค) บุคคลที่ 9

EMS signals in frequency domain from 57 samples (Person 10)



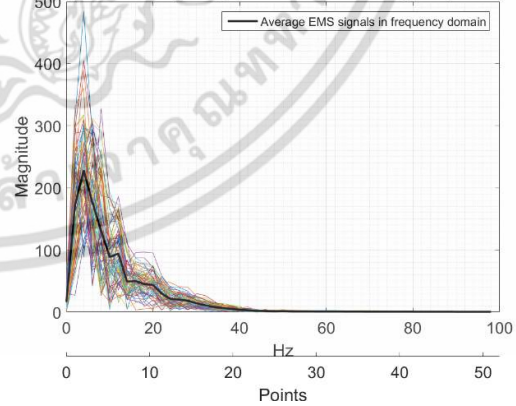
(ง) บุคคลที่ 10

EMS signals in frequency domain from 68 samples (Person 11)



(จ) บุคคลที่ 11

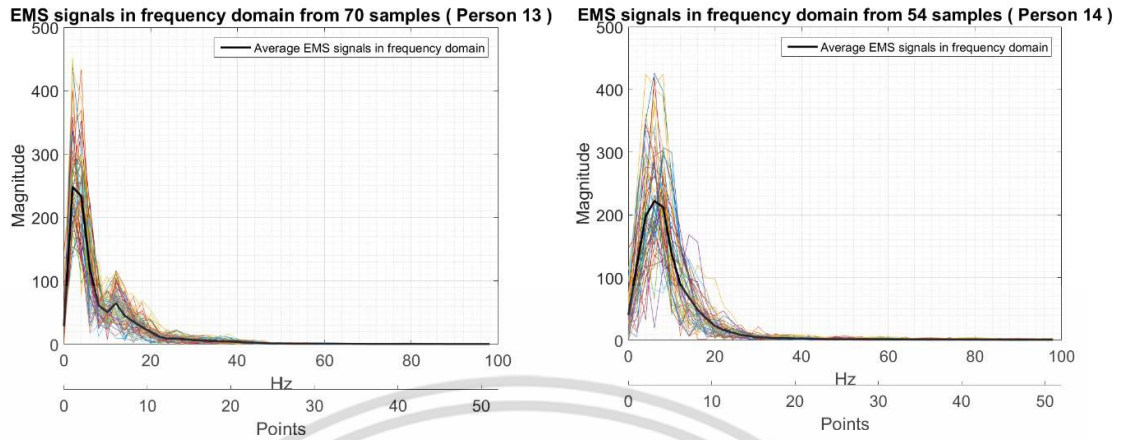
EMS signals in frequency domain from 70 samples (Person 12)



(ฉ) บุคคลที่ 12

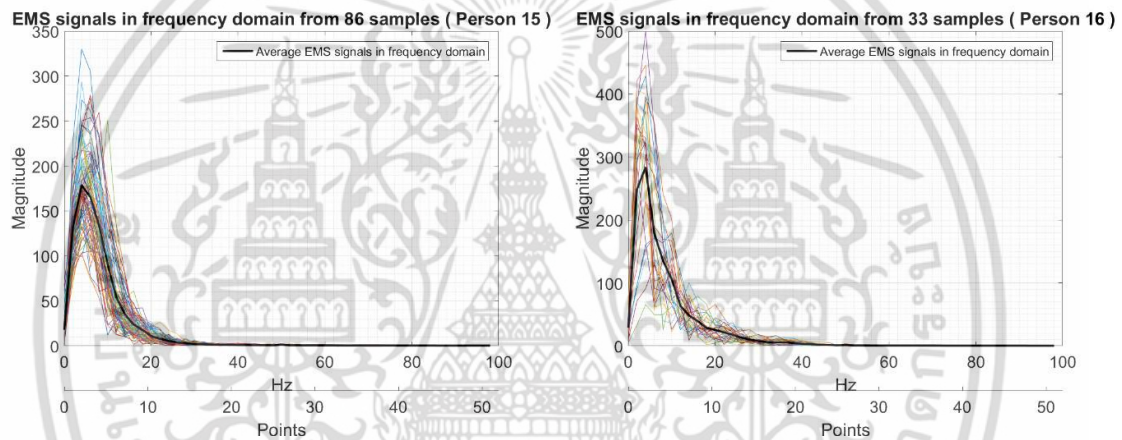
รูปที่ 4.25 สัญญาณกล่อมเนื้อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ และค่าเฉลี่ยในโดเมนความถี่ ของบุคคลที่ 7-12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



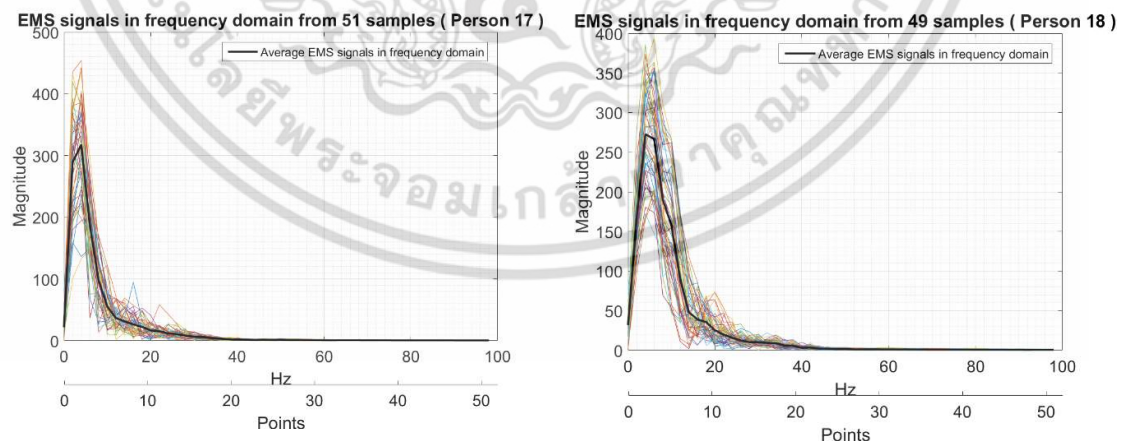
(ก) บุคคลที่ 13

(ข) บุคคลที่ 14



(ค) บุคคลที่ 15

(ง) บุคคลที่ 16

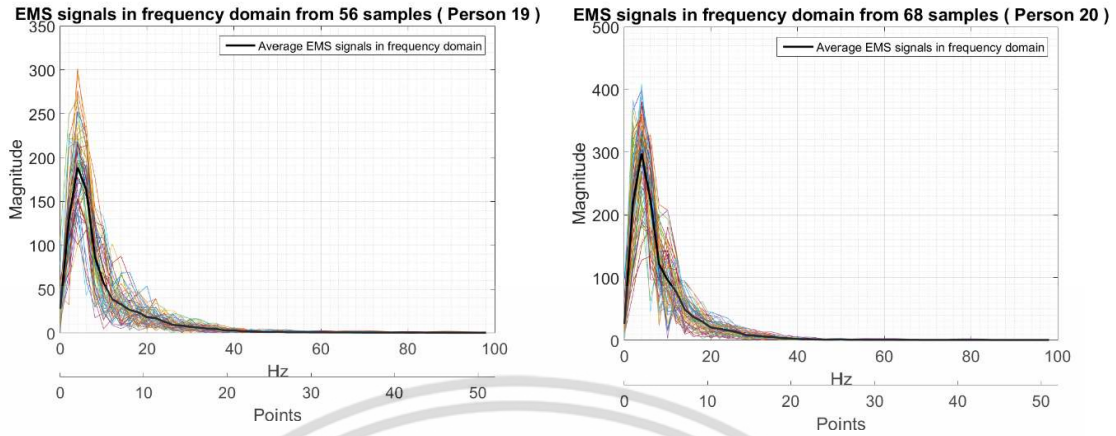


(จ) บุคคลที่ 17

(ฉ) บุคคลที่ 18

รูปที่ 4.26 สัญญาณกล้ำเนื้อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ และค่าเฉลี่ยในโดเมนความถี่ ของบุคคล
ที่ 13-18

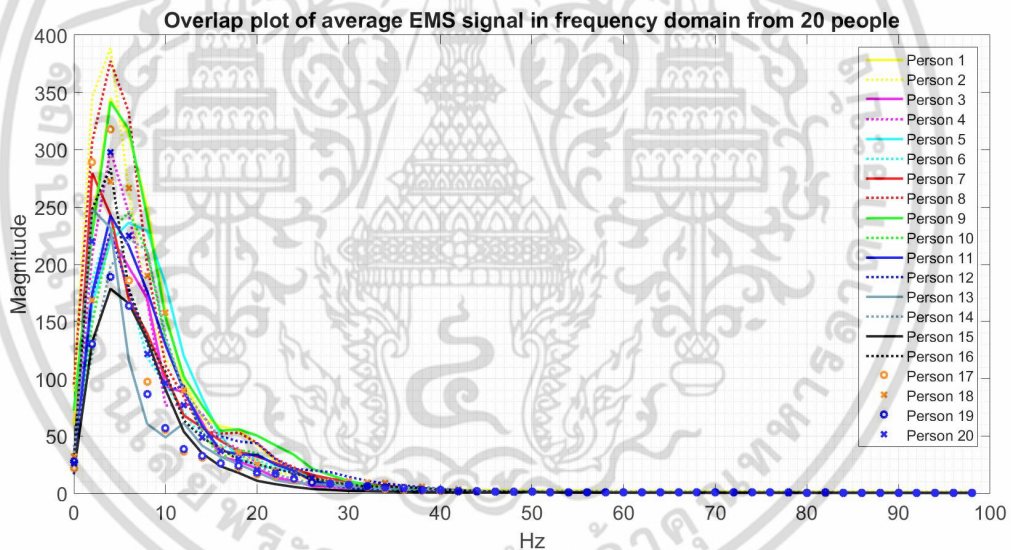
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) บุคคลที่ 19

(ข) บุคคลที่ 20

รูปที่ 4.27 สัญญาณกล่อมเนื้อรอบดวงตา 1 คาบสัญญาณ และค่าเฉลี่ยในโดเมนความถี่ ของบุคคลที่ 19-20



รูปที่ 4.28 ค่าเฉลี่ยของสัญญาณกล่อมเนื้อรอบดวงตา ในโดเมนความถี่ของบุคคล 20 คน

จากรูปที่ 4.24-4.28 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ทั้งหมด จะเห็นได้ว่าขนาดของสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ของสัญญาณกล่อมเนื้อรอบดวงตาใน 20 คน จะมีนัยยะสำคัญในโดเมนความถี่ที่ตำแหน่ง 0-40 ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกสัญญาณที่ตำแหน่ง 0-40 เป็นคุณลักษณะเด่นของสัญญาณกล่อมเนื้อรอบดวงตาในขั้นตอนต่อไป

4.5.2 ผลการทดลองในส่วนของโครงข่ายประสาทเทียม (Neural network)

ในส่วนนี้จะแบ่งผลการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของผลของการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม และส่วนของผลที่ได้จากการจำแนกบุคคล โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมที่ได้ทำการออกแบบ โดยในส่วนนี้จะแบ่งวิธีทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคลออกเป็น 2 วิธี โดยวิธีแรกคือแบบ leave-one out และแบบ 2-fold ดังนี้

4.5.2.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล ด้วยวิธี leave-one out

ในส่วนนี้จะใช้วิธีการทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคลแบบ leave one out โดยการนำสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาออก 1 คาบสัญญาณ เพื่อทำการทดสอบแล้วใช้สัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาที่เหลือในการฝึกสอน (training) และเปลี่ยนสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาที่ใช้ทดสอบจนครบทุกสัญญาณในชุดข้อมูลที่กำหนด จำนวนรอบที่ทดสอบคือจำนวนสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาในชุดข้อมูลที่กำหนด โดยจะทำการทดสอบประสิทธิภาพระบบจำแนกบุคคลขนาดต่างๆ ได้แก่ การจำแนกบุคคล 2 บุคคล ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง, การจำแนกบุคคล 3 บุคคล ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง, การจำแนกบุคคล 5 บุคคล ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง, การจำแนกบุคคล 7 บุคคล ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง, การจำแนกบุคคล 9 บุคคล ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง และ การจำแนกบุคคล 11 บุคคล ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง โดยสุ่มเลือกบุคคลที่ใช้ทดสอบแต่ละครั้งจากข้อมูลทั้ง 20 คน และยกตัวอย่างของผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการจำแนกบุคคลที่ขนาดต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.2, 4.4, 4.6, 4.8, 4.10 และ 4.12 ตามลำดับ สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของระบบได้คำนวณค่าความไว (Sensitivity), ค่าความจำเพาะ (Specificity), ค่าความแม่นยำ (Precision), ค่าความถูกต้อง (Accuracy) ตามสมการที่ 2.62, 2.63, 2.64, 2.65 ตามลำดับ และตัวอย่างของผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล, 3 บุคคล, 5 บุคคล, 7 บุคคล, 9 บุคคล และ 11 บุคคล ได้ดังตารางที่ 4.3, 4.5, 4.7, 4.9, 4.11 และ 4.13 ตามลำดับ โดยผลที่เหลือจะแสดงไว้ในภาคผนวก ก

ตารางที่ 4.2 ตัวอย่างผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 6

		Detected person	
		8	13
True person	8	67	2
	13	0	113
Accuracy (%)		98.90	

ตารางที่ 4.3 ตัวอย่างผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 6

Person No.	Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
8	100.00	98.26	97.10	97.10
13	98.26	100.00	100.00	100.00

ตารางที่ 4.4 ตัวอย่างผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

		Detected person		
		4	5	13
True person	4	38	1	2
	5	0	84	1
	13	0	0	113
Accuracy (%)		98.33		

ตารางที่ 4.5 ตัวอย่างผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

Person No.	Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
4	92.68	100.00	100.00	92.68
5	98.82	99.34	98.82	98.82
13	100.00	97.60	97.41	100.00

ตารางที่ 4.6 ตัวอย่างผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

		Detected person				
		4	8	9	12	19
True person	4	36	5	0	0	0
	8	6	56	4	2	1
	9	4	12	23	2	6
	12	1	2	5	54	8
	19	0	0	0	7	49
Accuracy (%)		77.03				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 ตัวอย่างผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 5 บุคคล
ของการสุ่มครั้งที่ 5

Person No.	Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
4	87.80	94.30	76.60	87.80
8	81.16	89.50	74.67	81.16
9	48.94	95.59	71.88	48.94
12	77.14	93.71	83.08	77.14
19	87.50	91.85	76.56	87.50

ตารางที่ 4.8 ตัวอย่างผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

		Detected person						
		1	6	7	8	13	15	18
True person	1	100	0	1	13	6	14	5
	6	4	1	2	1	8	12	2
	7	7	1	16	1	15	0	3
	8	17	0	1	44	2	3	2
	13	0	0	3	2	102	6	0
	15	5	0	0	0	1	80	0
	18	14	0	1	2	3	4	25
Accuracy (%)		69.57						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ตัวอย่างผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 7 บุคคล
ของการส้อมครั้งที่ 4

Person No.	Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
1	71.94	85.08	68.03	71.94
6	3.33	99.73	50.00	3.33
7	37.21	97.78	66.67	37.21
8	63.77	94.46	69.84	63.77
13	90.27	88.37	74.45	90.27
15	93.02	88.07	67.23	93.02
18	51.02	96.62	67.57	51.02

ตารางที่ 4.10 ตัวอย่างผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการส้อมครั้งที่ 1

	Detected person								
	4	5	13	1	15	8	12	11	9
4	6	0	5	4	14	11	1	0	0
5	0	72	1	7	4	0	0	1	0
13	0	1	105	0	3	0	7	0	2
1	0	11	3	94	12	9	7	2	1
15	0	8	4	1	73	0	0	0	0
8	0	2	2	25	5	31	3	0	1
12	0	5	11	1	0	0	51	0	2
11	0	11	7	10	26	2	3	5	4
9	0	0	20	4	4	3	0	0	16
Accuracy (%)	61.80								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 ตัวอย่างผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 9 บุคคล
ของการสุม ครั้งที่ 1

Person No.	Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
4	14.63	100.00	100.00	14.63
5	84.71	90.93	65.45	84.71
13	88.98	84.67	62.50	88.98
1	67.63	87.35	64.38	67.63
15	84.88	84.82	51.77	84.88
8	44.93	94.41	55.36	44.93
12	72.86	95.04	70.83	72.86
11	7.35	99.33	62.50	7.35
9	28.07	97.76	61.54	28.07

ตารางที่ 4.12 ตัวอย่างผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 11 บุคคล ของการสุมครั้งที่ 5

	Detected person										
	1	3	7	9	11	12	13	15	17	18	19
1	105	2	0	2	4	3	5	14	1	3	0
3	7	2	0	0	2	2	6	29	1	0	0
7	6	0	2	2	1	11	15	1	5	0	0
9	26	0	1	6	1	6	1	4	1	1	0
11	19	1	0	1	10	1	6	28	2	0	0
12	8	0	1	0	1	41	15	1	2	1	0
13	0	0	0	0	0	3	108	1	1	0	0
15	4	0	0	0	0	0	4	78	0	0	0
17	12	0	0	1	0	0	24	3	9	0	2
18	21	0	0	0	2	6	3	0	1	16	0
19	2	0	0	0	0	10	15	17	2	3	7
Accuracy (%)	49.80										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.13 ตัวอย่างผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 11 บุคคล
ของการสุ่มครั้งที่ 5

Person No.	Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
1	74.10	81.45	58.19	74.10
3	4.08	99.53	50.00	4.08
4	9.76	98.38	36.36	9.76
5	80.00	86.54	54.84	80.00
6	0.00	99.77	0.00	0.00
7	11.63	98.83	50.00	11.63
8	57.97	92.82	57.14	57.97
10	7.02	98.60	40.00	7.02
13	97.35	83.03	62.86	97.35
15	88.37	81.29	48.41	88.37
17	31.37	98.17	66.67	31.37

4.4.2.2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล ด้วยวิธี 2-fold

ในส่วนนี้จะใช้วิธีการทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล แบบ 2-fold โดยแบ่งข้อมูลสัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตาออกเป็น 2 ส่วน โดยที่แต่ละส่วนมีจำนวนสัญญาณกล้ำมเน็อรอบดวงตาที่เท่ากัน จากนั้นสัญญาณ 1 ส่วนจะถูกใช้เป็นสัญญาณทดสอบประสิทธิภาพของการจำแนกบุคคล ทำจนครบตามจำนวนที่แบ่งไว้คือ 2 ส่วน โดยจะทำการทดสอบประสิทธิภาพระบบจำแนกบุคคลขนาดต่างๆ ได้แก่ การจำแนกบุคคล 2 บุคคล ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง, การจำแนกบุคคล 3 บุคคล ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง, การจำแนกบุคคล 5 บุคคล ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง, การจำแนกบุคคล 7 บุคคล ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง, การจำแนกบุคคล 9 บุคคล ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง และ การจำแนกบุคคล 11 บุคคล ได้ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้งโดยสุ่มเลือกบุคคลที่ใช้ทดสอบแต่ละครั้งจากข้อมูลทั้ง 20 คน และยกตัวอย่างของผลการทดสอบประสิทธิภาพระบบการจำแนกบุคคลที่ขนาดต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.14, 4.16, 4.18, 4.20, 4.22 และ 4.24 ตามลำดับ สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของระบบได้คำนวณค่าความไว (Sensitivity), ค่าความจำเพาะ (Specificity), ค่าความแม่นยำ (Precision), ค่าความถูกต้อง (Accuracy) ตามสมการที่ 2.62, 2.63, 2.64, 2.65 ตามลำดับ และตัวอย่างของผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล, 3 บุคคล, 5 บุคคล, 7 บุคคล, 9 บุคคล และ 11 บุคคล ได้ดังตารางที่ 4.15, 4.17, 4.19, 4.21, 4.23 และ 4.25 ตามลำดับ โดยผลที่เหลืือจะแสดงไว้ในภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ตัวอย่างผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

		Detected person	
		1	13
True person	1	129	10
	13	2	111
Accuracy (%)		95.24	

ตารางที่ 4.15 ตัวอย่างผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

Person No.	Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/Person (%)
1	98.47	91.74	92.81	92.81
13	91.74	98.47	98.23	98.23

ตารางที่ 4.16 ตัวอย่างผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

		Detected person		
		4	5	15
True person	4	27	4	10
	5	0	83	2
	15	3	2	81
Accuracy (%)		90.09		

ตารางที่ 4.17 ตัวอย่างผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

Person No.	Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/Person (%)
4	65.85	98.20	90.00	65.85
5	97.65	94.74	93.26	97.65
15	94.19	90.16	87.10	94.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.18 ตัวอย่างผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

		Detected person				
		8	11	17	18	20
True person	8	74	0	7	2	2
	11	9	27	0	0	7
	17	10	1	43	1	2
	18	6	2	6	24	11
	20	0	0	2	6	48
Accuracy (%)		59.67				

ตารางที่ 4.19 ตัวอย่างผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

Person No.	Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
8	87.06	85.03	74.75	87.06
11	62.79	98.44	90.00	62.79
17	75.44	92.02	74.14	75.44
18	48.98	95.52	72.73	48.98
20	85.71	88.42	68.57	85.71

ตารางที่ 4.20 ตัวอย่างผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

		Detected person						
		4	6	7	12	16	17	20
True person	4	36	0	0	1	0	0	4
	6	7	2	4	4	1	2	10
	7	3	2	21	6	0	8	3
	12	0	0	5	53	2	3	7
	16	2	3	3	3	11	1	10
	17	0	1	2	4	0	28	16
	20	4	3	3	8	2	6	42
Accuracy (%)		57.44						

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.21 ตัวอย่างผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 7 บุคคล
ของการสุ่มครั้งที่ 3

Person No.	Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
4	87.80	90.75	69.23	87.80
6	6.67	95.50	18.18	6.67
7	48.84	91.01	55.26	48.84
12	75.71	84.34	67.09	75.71
16	33.33	97.33	68.75	33.33
17	54.90	89.19	58.33	54.90
20	61.76	75.12	45.65	61.76

ตารางที่ 4.22 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

	Detected person								
	1	2	3	5	6	15	17	19	20
1	94	1	3	17	0	15	2	2	5
2	10	2	2	3	0	2	7	0	4
3	2	0	4	6	0	30	0	2	5
5	9	0	0	67	0	8	0	0	1
6	4	0	0	3	0	8	3	4	8
15	3	0	0	7	0	74	0	2	0
17	9	0	0	0	0	3	24	9	6
19	3	0	0	1	0	8	6	34	4
20	10	0	2	7	0	12	12	3	22
Accuracy (%)	54.04								

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.23 ตัวอย่างผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 9 บุคคล
ของการสุ่มครั้งที่ 3

Person No.	Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
1	67.63	81.95	65.28	67.63
2	6.67	99.69	66.67	6.67
3	8.16	97.84	36.36	8.16
5	78.82	85.23	60.36	78.82
6	0.00	100.00	0	0.00
15	86.05	74.17	46.25	86.05
17	47.06	90.83	44.44	47.06
19	60.71	92.88	60.71	60.71
20	32.35	90.06	40.00	32.35

ตารางที่ 4.24 ตัวอย่างผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 11 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

	Detected person										
	3	4	5	8	10	12	14	16	17	18	20
3	2	4	14	2	6	3	6	0	3	1	8
4	3	10	5	1	1	0	1	0	2	0	18
5	0	0	73	0	2	3	6	0	0	0	1
8	0	3	2	43	1	2	6	0	3	2	7
10	1	2	12	10	16	3	7	0	3	3	0
12	0	0	1	0	0	58	2	0	3	2	4
14	0	0	10	3	6	4	27	0	1	2	1
16	0	0	7	4	5	5	0	1	4	2	5
17	0	1	0	1	0	5	5	0	21	1	17
18	0	0	7	4	0	9	3	1	0	19	6
20	2	0	4	1	2	3	4	1	7	12	32
Accuracy (%)	48.24										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.25 ตัวอย่างผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 11 บุคคล
ของการสุ่มครั้งที่ 2

Person No.	Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
3	4.08	98.04	25.00	4.08
4	24.39	96.69	50.00	24.39
5	85.88	78.69	54.07	85.88
8	62.32	90.88	62.32	62.32
10	28.07	92.56	41.03	28.07
12	82.86	86.83	61.05	82.86
14	50.00	87.30	40.30	50.00
16	3.03	99.34	33.33	3.03
17	41.18	91.53	44.68	41.18
18	38.78	91.88	43.18	38.78
20	47.06	81.84	32.32	47.06

จากผลของการทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคลทั้ง 2 วิธี สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.26 จากตารางที่ 4.26 จะเห็นได้ว่าวิธีการทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล ด้วยวิธี Leave-one out ให้ค่าสูงสุดที่การจำแนกบุคคล 2 บุคคล ซึ่งได้ค่าความไว (Sensitivity), ค่าความจำเพาะ (Specificity), ค่าความแม่นยำ (Precision) และค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของระบบโดยเฉลี่ยเท่ากับ 90.29, 90.29, 91.77 และ 92.29 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และให้ค่าต่ำสุดที่สามารถยอมรับได้ที่การจำแนกบุคคล 9 บุคคล ซึ่งได้ค่าความไว, ค่าความจำเพาะ, ค่าความแม่นยำ และค่าความถูกต้องของระบบโดยเฉลี่ยเท่ากับ 50.29, 91.63, 57.76 และ 58.47 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และวิธีการทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคลด้วยวิธี 2-fold ให้ค่าสูงสุดที่การจำแนกบุคคล 2 บุคคล ซึ่งได้ค่าความไว, ค่าความจำเพาะ, ค่าความแม่นยำ และค่าความถูกต้องของระบบโดยเฉลี่ยเท่ากับ 79.99, 79.99, 81.09 และ 83.12 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และให้ค่าต่ำสุดที่สามารถยอมรับได้ที่การจำแนกบุคคล 7 บุคคล ซึ่งได้ค่าความไว, ค่าความจำเพาะ, ค่าความแม่นยำ และค่าความถูกต้องของระบบโดยเฉลี่ยเท่ากับ 49.41, 88.26, 51.42 และ 56.16 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

ตารางที่ 4.26 สรุปผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล ที่ผ่านการทดสอบ ทั้ง 2 วิธี

Methods	Number of persons	Sensitivity	Specificity	Precision	Average Accuracy (%)
Leave-one out	2	90.29	90.29	91.77	92.29
	3	79.88	89.52	81.50	82.39
	5	68.53	91.01	70.65	72.80
	7	58.92	92.34	67.20	68.29
	9	50.29	91.63	57.76	58.47
	11	40.66	91.26	50.47	51.30
2-Fold	2	79.99	79.99	81.09	83.12
	3	77.19	88.54	80.01	81.15
	5	58.85	87.64	62.60	65.33
	7	49.41	88.26	51.42	56.16
	9	42.55	88.80	45.11	50.00
	11	38.37	89.78	39.90	47.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอระบบจำแนกบุคคลด้วยสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาโดยใช้เพียงโซ่อิเล็กทริกทรานซิวเซอร์ในการวัดสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา ซึ่งเพียงโซ่อิเล็กทริกทรานซิวเซอร์นี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนแรงที่กล้ามเนื้อรอบดวงตา (ในขณะที่ทำการกระพริบตา) มากกระทำกับเพียงโซ่อิเล็กทริกทรานซิวเซอร์ ให้เป็นสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตา โดยสัญญาณที่วัดได้นั้นมีความคล้ายคลึงกับสัญญาณไฟฟ้าในดวงตา อีกทั้งวิธีการวัดสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาก็มีความซับซ้อนน้อยกว่าการวัดสัญญาณไฟฟ้าในดวงตา และเมื่อนำสัญญาณทั้งสองสัญญาณของบุคคลจำนวน 15 คน มาหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่าค่าที่ได้มีค่าเฉลี่ยสูงถึง 0.82 ซึ่งหมายถึงทั้งสองสัญญาณมีความสัมพันธ์กันในระดับสูง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เลือกใช้สัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาแทนสัญญาณไฟฟ้าในดวงตา และเมื่อนำสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาในแต่ละบุคคล มาทำการจำแนกบุคคลด้วยโครงข่ายประสาทเทียมหลายชั้น ด้วยการเรียนรู้แบบการแพร่ย้อนกลับคืนสภาพได้ และเมื่อทำการทดสอบการจำแนกบุคคล ตั้งแต่ 2, 3, 5, 7, 9 และ 11 บุคคล พร้อมกับทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคลด้วยวิธี leave one out และ วิธี 2-fold พบว่า วิธีทดสอบแบบ leave-one out จะให้ค่าความไว (Sensitivity), ค่าความจำเพาะ (Specificity), ค่าความแม่นยำ (Precision) และค่าความถูกต้องของระบบโดยเฉลี่ย (Average Accuracy) ที่สูงกว่า วิธีทดสอบแบบ 2-fold นั้นหมายความว่าถ้าต้องการให้ระบบมีความแม่นยำที่สูงขึ้นจะต้องใช้สัญญาณในการฝึกสอนเป็นจำนวนมากระบบถึงจะสามารถจำแนกบุคคลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถจำแนกบุคคลได้อย่างแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้สูงสุด 9 คน ที่ค่าความถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 58.47 เปอร์เซ็นต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในการพัฒนาระบบจำแนกบุคคลด้วยสัญญาณกล้ามเนื้อรอบดวงตาที่นำมาต่อยอดจากวิธีที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์นี้ โดยอาจทำการปรับปรุงเพื่อเพิ่มรายละเอียดหรือเงื่อนไขให้ระบบสามารถทำการตรวจสอบจำแนกได้ดีและแม่นยำมากยิ่งขึ้น ดังนี้

1. เพิ่มจำนวนของสัญญาณที่ใช้ในกระบวนการเรียนรู้ให้เพิ่มมากขึ้น
2. นำวิธีการดึงลักษณะเด่นแบบอื่นมาใช้ร่วมกับวิธีการแปลงฟูเรียร์แบบไม่ต่อเนื่อง เช่น ใช้วิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบอิสระ (Independent component analysis) เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Conti, G. Vitello ,F. Sorbello and S. Vitabile “An Advanced Technique for User Identification using Partial Fingerprint”, **2013 Seventh International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems**, July 2013, pp.236-242.
- [2] A.L. Higgins, L.G. Bahler and J.E. Porter, “Voice identification using nearest-neighbor distance measure”, **1993 IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing**, Vol. 2, April 1993, pp.375-378.
- [3] C. C. Liu and S.Y. Chin, “A face identification algorithm using two dimensional binary principal component analysis”, **2010 International Symposium on Computer Communication Control and Automation**, May 2010, pp. 252-255.
- [4] Poulos, M. Rangoussi and N. Alexandris, “Neural network based person identification using EEG features”, **Acoustics, Speech, and Signal Processing**, Vol. 2, Mar 1999, pp.1117-1120.
- [5] S.B.B. Kumar and M. Jagannath, “Analysis of Phonocardiogram Signal for Biometric Identification System”, **2015 International Conference on Pervasive Computing (ICPC)**, Jan 2015, pp.1-4.
- [6] J.J. Wu and Y. ZHANG, “ECG IDENTIFICATION BASED ON NEURAL NETWORKS”, **2014 11th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing**, Dec 2014, pp.92-96.
- [7] M. Abo-Zahhad, S.M. Ahmed, and S.N. Abbas, “A Novel Biometric Approach for Human Identification and Verification Using Eye Blinking Signal”, **IEEE SIGNAL PROCESSING LETTERS**, Vol. 22, No. 7, JULY 2015, pp.876-880.
- [8] S. Datta, et al, “Blink Recognition to Detect the Possibility of Eye Dystonia based on Electrooculogram Analysis”, **2014 International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication(CIEC)**, pp.186-190.
- [9] A. M. S. Ang, Z. G. Zhang, Y. S. Hung and J. N. F. Mak, “A User-friendly Wearable Single-channel EOG-based Human-Computer Interface for Cursor Control”, **7th**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Annual International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering Montpellier, April 2015, pp.565-568.

- [10] AASM Manual for Scoring Sleep (2007). “**The AASM Manual for the Scoring of Sleep and Associated Events**” [online]. Available: www.aasmnet.org/scoringmanual
- [11] J. Malmivuo and R. Plonsey, **Bioelectromagnetism**. London: Oxford University Press. 1995.
- [12] JH.V. Bommel and M.A. Musen, **Handbook of medical informatics**, Springer. 1997
- [13] Y. N. Singh, S. K. Singh, and A. K. Ray, “Bioelectrical Signals as Emerging Biometrics : Issues and Challenges”, ISRN Signal Processing Volume 2012, [Online] Available: <http://dx.doi.org/10.5402/2012/712032>
- [14] B. Skarf, “**Normal and Abnormal Eyelid Function**”, Spencer S. Eccles Health Sciences Library. Utah: University of Utah. 2005. [Online] Available: <https://collections.lib.utah.edu/details?id=190107>
- [15] D. Kjellgren. **HUMAN EXTRAOCULAR MUSCLES**. Sweden: Umeå University. 2004
- [16] **The EXTRAOCULAR MUSCLES**. [Online] Available: <http://teachmeanatomy.info/head/organs/eye/extraocular-muscles/>
- [17] H. Y. Cai, J. X. Ma, L. C. and Shi Bao-Liang Lu, “A novel method for EOG features extraction from the forehead”, **2011 Annual International Conference of the IEEE on Engineering in Medicine And Biology Society (EMBC)**, Sept. 2011, pp. 3075-3078.
- [18] M. Sanjeeva Reddy, A.Sammaiah, B. Narsimha and K. Subba Rao, “Analysis of EOG Signals using Empirical Mode Decomposition for eye Blink Detection”, **2011 International Conference on Multimedia and Signal Processing**.
- [19] A.M. Yaglom. **Correlation Theory of Stationary and Related Random Function**. London: Springer-Verlag.
- [20] H.L. F. Canque. **Analog Electronics Applications**. New York: CRC Press Taylor & Francis Group.
- [21] วิวัฒน์ กิรานนท์. **วิศวกรรมการสื่อสาร**. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2540.
- [22] M.S. Roden. **Introduction to Communication Theory**. New York: Pergamon. 1972

- [23] ราชู พันธุ์ฉลาด. การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล. กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร. 2557.
- [24] A. Zaknich. **Neural Networks for Intelligent Signal Processing**. London: World Scientific. 2003
- [25] N.M. M. Noor and M.A.M. Mustafa, “Eye Movement Activity that Affected the Eye Signals using Electrooculography (EOG) Technique”, **6th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering**, November 2016, pp. 91-95.
- [26] N. Barbara and T. A. Camilleri, “Interfacing with a speller using EOG glasses”, **2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)**, October 2016, pp. 1069-1074.
- [27] Devore, Jay and Peck, Roxy. **Statistics : The Exploration and Analysis of Data**. California: Wadsworth, Inc.
- [28] BIODIGITAL. “BIODIGITAL.” [Online], Available: <https://human.biodigital.com/>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล
ด้วยวิธี leave-one out

ตารางที่ ก.1 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

		Detected person	
		4	5
True person	4(41)	40	1
	5(85)	2	83

ตารางที่ ก.2 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
4	40	1	83	2	95.24	98.81	97.56	97.56
5	83	2	40	1	98.81	95.24	97.65	97.65

ตารางที่ ก.3 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

		Detected person	
		4	7
True person	4(41)	41	0
	7(43)	2	41

ตารางที่ ก.4 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
4	41	0	41	2	95.35	100.00	100.00	100.00
7	41	2	41	0	100.00	95.35	95.35	95.35

ตารางที่ ก.5 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

		Detected person	
		2	17
True person	2(30)	17	13
	17(51)	3	48

ตารางที่ ก.6 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
2	17	13	48	3	85.00	78.69	56.67	56.67
17	48	3	17	13	78.69	85.00	94.12	94.12

ตารางที่ ก.7 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

		Detected person	
		13	14
True person	13(113)	112	1
	14(54)	5	49

ตารางที่ ก.8 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
13	112	1	49	5	95.73	98.00	99.12	99.12
14	49	5	112	1	98.00	95.73	90.74	90.74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.9 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

		Detected person	
		1	18
True person	1(139)	126	13
	18(49)	19	30

ตารางที่ ก.10 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
1	126	13	30	19	86.90	69.77	90.65	90.65
18	30	19	126	13	69.77	86.90	61.22	61.22

ตารางที่ ก.11 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 6

		Detected person	
		8	13
True person	8(69)	67	2
	13(113)	0	113

ตารางที่ ก.12 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 6

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
8	67	2	113	0	100.00	98.26	97.10	97.10
13	113	0	67	2	98.26	100.00	100.00	100.00

ตารางที่ ก.13 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 7

		Detected person	
		5	10
True person	5(85)	79	6
	10(57)	10	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.14 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 7

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
5	79	6	47	10	88.76	88.68	92.94	92.94
10	47	10	79	6	88.68	88.76	82.46	82.46

ตารางที่ ก.15 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 8

		Detected person	
		3	5
True person	3(49)	47	2
	5(85)	6	79

ตารางที่ ก.16 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 8

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
3	47	2	79	6	88.68	97.53	95.92	95.92
5	79	6	47	2	97.53	88.68	92.94	92.94

ตารางที่ ก.17 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 9

		Detected person	
		7	19
True person	7(43)	41	2
	19(56)	4	52

ตารางที่ ก.18 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 9

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
7	41	2	52	4	91.11	96.30	95.35	95.35
19	52	4	41	2	96.30	91.11	92.86	92.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.19 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 10

		Detected person	
		13	16
True person	13(113)	110	3
	16(33)	8	25

ตารางที่ ก.20 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 10

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
13	110	3	25	8	93.22	89.29	97.35	97.35
16	25	8	110	3	89.29	93.22	75.76	75.76

ตารางที่ ก.21 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

		Detected person		
		4	5	13
True person	4(41)	38	1	2
	5(85)	0	84	1
	13(113)	0	0	113

ตารางที่ ก.22 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
4	38	3	197	0	92.68	100.00	100.00	92.68
5	84	1	151	1	98.82	99.34	98.82	98.82
13	113	0	122	3	100.00	97.60	97.41	100.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.23 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

		Detected person		
		5	8	14
True person	5(85)	79	0	6
	8(69)	5	62	2
	14(54)	10	5	39

ตารางที่ ก.24 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
5	79	6	101	15	92.94	87.07	84.04	92.94
8	62	7	118	5	89.86	95.93	92.54	89.86
14	39	15	141	8	72.22	94.63	82.98	72.22

ตารางที่ ก.25 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

		Detected person		
		2	6	16
True person	2(30)	19	5	6
	6(30)	4	19	7
	16(33)	3	11	19

ตารางที่ ก.26 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
2	19	11	38	7	63.33	84.44	73.08	63.33
6	19	11	38	16	63.33	70.37	54.29	63.33
16	19	14	38	13	57.58	74.51	59.38	57.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.27 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

		Detected person		
		6	7	10
True person	6(30)	14	6	10
	7(43)	7	30	6
	10(57)	3	1	53

ตารางที่ ก.28 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
6	14	16	83	10	46.67	89.25	58.33	46.67
7	30	13	67	7	69.77	90.54	81.08	69.77
10	53	4	44	16	92.98	73.33	76.81	92.98

ตารางที่ ก.29 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

		Detected person		
		8	14	19
True person	8(69)	66	3	0
	14(54)	3	47	4
	19(56)	0	4	52

ตารางที่ ก.30 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
8	66	3	99	3	95.65	97.06	95.65	95.65
14	47	7	118	7	87.04	94.40	87.04	87.04
19	52	4	113	4	92.86	96.58	92.86	92.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.31 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 6

		Detected person		
		2	7	16
True person	2(30)	19	6	5
	7(43)	6	31	6
	16(33)	4	13	16

ตารางที่ ก.32 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 6

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
2	19	11	47	10	63.33	82.46	65.52	63.33
7	31	12	35	19	72.09	64.81	62.00	72.09
16	16	17	50	11	48.48	81.97	59.26	48.48

ตารางที่ ก.33 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 7

		Detected person		
		4	11	13
True person	4(41)	36	4	1
	11(68)	4	54	10
	13(113)	1	1	111

ตารางที่ ก.34 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 7

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
4	36	5	165	5	87.80	97.06	87.80	87.80
11	54	14	147	5	79.41	96.71	91.53	79.41
13	111	2	90	11	98.23	89.11	90.98	98.23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.35 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 8

		Detected person		
		10	13	20
True person	10(57)	55	0	2
	13(113)	1	106	6
	20(68)	9	9	50

ตารางที่ ก.36 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 8

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
10	55	2	156	10	96.49	93.98	84.62	96.49
13	106	7	105	9	93.81	92.11	92.17	93.81
20	50	18	161	8	73.53	95.27	86.21	73.53

ตารางที่ ก.37 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 9

		Detected person		
		2	8	15
True person	2(30)	13	8	9
	8(69)	4	61	4
	15(86)	0	1	85

ตารางที่ ก.38 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 9

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
2	13	17	146	4	43.33	97.33	76.47	43.33
8	61	8	98	9	88.41	91.59	87.14	88.41
15	85	1	74	13	98.84	85.06	86.73	98.84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.39 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 10

		Detected person		
		8	16	19
True person	8(69)	63	4	2
	16(33)	5	18	10
	19(56)	0	5	51

ตารางที่ ก.40 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 10

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
8	63	6	69	5	91.30	93.24	92.65	91.30
16	18	15	114	9	54.55	92.68	66.67	54.55
19	51	5	81	12	91.07	87.10	80.95	91.07

ตารางที่ ก.41 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

		Detected person				
		4	5	13	1	15
True person	4(41)	18	1	6	7	9
	5(85)	0	69	0	11	5
	13(118)	1	0	112	0	5
	1(139)	2	9	5	113	10
	15(86)	2	3	5	1	75

ตารางที่ ก.42 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
4	18	5	369	23	43.90	98.66	78.26	43.90
5	69	13	318	16	81.18	96.07	84.15	81.18
13	112	16	275	6	94.92	94.50	87.50	94.92
1	113	19	274	26	81.29	93.52	85.61	81.29
15	75	29	312	11	87.21	91.50	72.12	87.21

ตารางที่ ก.43 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

	Detected person				
	1	5	10	11	19
1(139)	102	13	4	9	11
5(85)	8	74	1	1	1
True person 10(57)	15	12	13	11	6
11(68)	14	12	8	24	10
19(56)	5	3	0	1	47

ตารางที่ ก.44 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
1	102	42	158	37	73.38	79.00	70.83	73.38
5	74	40	186	11	87.06	82.30	64.91	87.06
10	13	13	247	44	22.81	95.00	50.00	22.81
11	24	22	236	44	35.29	91.47	52.17	35.29
19	47	28	213	9	83.93	88.38	62.67	83.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.45 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

		Detected person				
		3	6	12	17	18
True person	3(49)	42	0	2	4	1
	6(30)	9	4	6	9	2
	12(70)	5	3	54	4	4
	17(51)	2	2	1	46	0
	18(49)	4	0	5	5	35

ตารางที่ ก.46 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
3	42	20	139	7	85.71	87.42	67.74	85.71
6	4	5	177	26	13.33	97.25	44.44	13.33
12	54	14	127	16	77.14	90.07	79.41	77.14
17	46	22	135	5	90.20	85.99	67.65	90.20
18	35	7	146	14	71.43	95.42	83.33	71.43

ตารางที่ ก.47 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

		Detected person				
		2	7	14	16	20
True person	2(30)	11	3	7	1	8
	7(43)	0	33	2	1	7
	14(54)	0	1	50	1	2
	16(33)	1	8	4	5	15
	20(68)	2	4	5	2	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.48 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
2	11	3	143	19	36.67	97.95	78.57	36.67
7	33	16	121	10	76.74	88.32	67.35	76.74
14	50	18	104	4	92.59	85.25	73.53	92.59
16	5	5	149	28	15.15	96.75	50.00	15.15
20	55	32	99	13	80.88	75.57	63.22	80.88

ตารางที่ ก.49 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

	True person	Detected person				
		4	8	9	12	19
4(41)		36	5	0	0	0
8(69)		6	56	4	2	1
9(47)		4	12	23	2	6
12(70)		1	2	5	54	8
19(56)		0	0	0	7	49

ตารางที่ ก.50 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
4	36	11	182	5	87.80	94.30	76.60	87.80
8	56	19	162	13	81.16	89.50	74.67	81.16
9	23	9	195	24	48.94	95.59	71.88	48.94
12	54	11	164	16	77.14	93.71	83.08	77.14
19	49	15	169	7	87.50	91.85	76.56	87.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.51 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

	Detected person						
	4	5	13	1	15	8	12
4(41)	13	3	5	3	12	5	0
5(85)	0	72	0	8	4	0	1
13(118)	0	0	112	0	4	0	2
True person 1(139)	0	10	2	101	12	10	4
15(86)	0	6	6	2	72	0	0
8(69)	0	1	1	21	2	41	3
12(70)	0	6	10	1	0	2	51

ตารางที่ ก.52 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
4	13	0	449	28	31.71	100.00	100.00	31.71
5	72	26	390	13	84.71	93.75	73.47	84.71
13	112	24	350	6	94.92	93.58	82.35	94.92
1	101	35	361	38	72.66	91.16	74.26	72.66
15	72	34	390	14	83.72	91.98	67.92	83.72
8	41	17	421	28	59.42	96.12	70.69	59.42
12	51	10	411	19	72.86	97.62	83.61	72.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.53 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

		Detected person						
		3	4	5	7	10	18	19
True person	3(49)	20	10	3	3	10	0	3
	4(41)	5	34	1	0	0	0	1
	5(85)	3	0	77	0	3	0	2
	7(43)	0	2	10	29	0	0	2
	10(57)	7	2	8	0	33	4	3
	18(49)	0	1	7	0	3	32	6
	19(56)	0	0	0	3	1	5	47

ตารางที่ ก.54 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/person
	TP	FN	TN	FP				
3	20	15	252	29	40.82	94.38	57.14	40.82
4	34	15	238	7	82.93	94.07	69.39	82.93
5	77	29	195	8	90.59	87.05	72.64	90.59
7	29	6	243	14	67.44	97.59	82.86	67.44
10	33	17	239	24	57.89	93.36	66.00	57.89
18	32	9	240	17	65.31	96.39	78.05	65.31
19	47	17	225	9	83.93	92.98	73.44	83.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.55 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

	Detected person						
	1	2	3	13	14	16	19
1(139)	120	1	1	3	6	0	8
2(30)	11	4	2	12	1	0	0
3(49)	10	0	13	10	13	0	3
True person 13(113)	0	0	0	108	0	2	3
14(54)	15	0	2	2	31	0	4
16(33)	10	1	0	13	4	1	4
19(56)	7	0	0	19	3	0	27

ตารางที่ ก.56 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
1	120	53	184	19	86.33	77.64	69.36	86.33
2	4	2	300	26	13.33	99.34	66.67	13.33
3	13	5	291	36	26.53	98.31	72.22	26.53
13	108	59	196	5	95.58	76.86	64.67	95.58
14	31	27	273	23	57.41	91.00	53.45	57.41
16	1	2	303	32	3.03	99.34	33.33	3.03
19	27	22	277	29	48.21	92.64	55.10	48.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.57 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

	Detected person						
	1	6	7	8	13	15	18
1(139)	100	0	1	13	6	14	5
6(30)	4	1	2	1	8	12	2
7(43)	7	1	16	1	15	0	3
True person 8(69)	17	0	1	44	2	3	2
13(113)	0	0	3	2	102	6	0
15(86)	5	0	0	0	1	80	0
18(49)	14	0	1	2	3	4	25

ตารางที่ ก.58 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
1	100	47	268	39	71.94	85.08	68.03	71.94
6	1	1	367	29	3.33	99.73	50.00	3.33
7	16	8	352	27	37.21	97.78	66.67	37.21
8	44	19	324	25	63.77	94.46	69.84	63.77
13	102	35	266	11	90.27	88.37	74.45	90.27
15	80	39	288	6	93.02	88.07	67.23	93.02
18	25	12	343	24	51.02	96.62	67.57	51.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.59 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

		Detected person						
		1	2	6	9	15	17	20
True person	1(139)	109	1	0	5	15	5	4
	2(30)	8	9	0	0	6	5	2
	6(30)	3	0	1	1	10	5	10
	9(47)	26	0	1	11	4	2	3
	15(86)	3	0	0	0	82	1	0
	17(51)	3	0	0	0	9	29	10
	20(68)	16	1	0	1	12	8	31

ตารางที่ ก.60 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
1	109	59	163	30	78.42	73.42	64.88	78.42
2	9	2	263	21	30.00	99.25	81.82	30.00
6	1	1	271	29	3.33	99.63	50.00	3.33
9	11	7	261	36	23.40	97.39	61.11	23.40
15	82	56	190	4	95.35	77.24	59.42	95.35
17	29	26	243	22	56.86	90.33	52.73	56.86
20	31	29	241	38	44.93	89.26	51.67	44.93

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.61 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

		Detected person								
		4	5	13	1	15	8	12	11	9
True person	4(41)	6	0	5	4	14	11	1	0	0
	5(85)	0	72	1	7	4	0	0	1	0
	13(118)	0	1	105	0	3	0	7	0	2
	1(139)	0	11	3	94	12	9	7	2	1
	15(86)	0	8	4	1	73	0	0	0	0
	8(69)	0	2	2	25	5	31	3	0	1
	12(70)	0	5	11	1	0	0	51	0	2
	11(68)	0	11	7	10	26	2	3	5	4
	9(47)	0	0	20	4	4	3	0	0	16

ตารางที่ ก.62 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
4	6	0	447	35	14.63	100.00	100.00	14.63
5	72	38	381	13	84.71	90.93	65.45	84.71
13	105	63	348	13	88.98	84.67	62.50	88.98
1	94	52	359	45	67.63	87.35	64.38	67.63
15	73	68	380	13	84.88	84.82	51.77	84.88
8	31	25	422	38	44.93	94.41	55.36	44.93
12	51	21	402	19	72.86	95.04	70.83	72.86
11	5	3	448	63	7.35	99.33	62.50	7.35
9	16	10	437	41	28.07	97.76	61.54	28.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.63 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

		Detected person								
		1	5	7	8	11	13	15	19	20
True person	1(139)	97	15	0	7	3	3	12	0	2
	5(85)	9	70	0	0	1	0	4	1	0
	7(43)	2	12	7	0	2	18	1	1	0
	8(69)	24	1	0	36	0	4	2	0	2
	11(68)	16	11	1	1	6	6	25	0	2
	13(113)	0	0	1	1	0	108	3	0	0
	15(86)	1	5	0	1	2	4	73	0	0
	19(56)	0	3	1	2	0	16	11	20	3
	20(68)	11	7	2	7	0	14	8	3	16

ตารางที่ ก.64 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
1	97	63	336	42	69.78	84.21	60.63	69.78
5	70	54	363	15	82.35	87.05	56.45	82.35
7	7	5	426	36	16.28	98.84	58.33	16.28
8	36	19	397	33	52.17	95.43	65.45	52.17
11	6	8	427	62	8.82	98.16	42.86	8.82
13	108	65	325	5	95.58	83.33	62.43	95.58
15	73	66	360	13	84.88	84.51	52.52	84.88
19	20	5	413	36	35.71	98.80	80.00	35.71
20	16	9	417	52	23.53	97.89	64.00	23.53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.65 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

		Detected person								
		1	4	8	10	11	12	14	16	19
True person	1(139)	106	0	9	5	6	5	3	0	5
	4(41)	4	15	13	2	4	0	1	0	2
	8(69)	14	1	48	1	1	4	0	0	0
	10(57)	16	0	0	5	16	4	9	0	7
	11(68)	17	1	5	9	17	0	8	2	9
	12(70)	6	1	0	0	0	56	2	1	4
	14(54)	17	0	3	1	8	0	19	0	6
	16(33)	8	1	1	1	4	11	2	2	3
	19(56)	3	0	0	0	2	13	3	0	35

ตารางที่ ก.66 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
1	106	85	197	33	76.26	69.86	55.50	76.26
4	15	4	288	26	36.59	98.63	78.95	36.59
8	48	31	255	21	69.57	89.16	60.76	69.57
10	5	19	298	52	8.77	94.01	20.83	8.77
11	17	41	286	51	25.00	87.46	29.31	25.00
12	56	37	247	14	80.00	86.97	60.22	80.00
14	19	28	284	35	35.19	91.03	40.43	35.19
16	2	3	301	31	6.06	99.01	40.00	6.06
19	35	36	268	21	62.50	88.16	49.30	62.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.67 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

		Detected person								
		6	7	8	9	11	12	13	17	18
True person	6(30)	0	2	0	1	15	5	3	4	0
	7(43)	0	6	1	2	6	10	11	5	2
	8(69)	0	0	58	0	4	2	2	2	1
	9(47)	0	0	15	17	6	3	2	1	3
	11(68)	0	1	2	1	50	2	9	3	0
	12(70)	0	3	1	0	1	45	15	2	3
	13(113)	0	2	0	0	0	4	103	4	0
	17(51)	0	3	2	0	5	0	19	22	0
	18(49)	0	1	5	2	7	7	4	1	22

ตารางที่ ก.68 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
6	0	0	323	30	0.00	100.00	0	0.00
7	6	12	317	37	13.95	96.35	33.33	13.95
8	58	26	265	11	84.06	91.07	69.05	84.06
9	17	6	306	30	36.17	98.08	73.91	36.17
11	50	44	273	18	73.53	86.12	53.19	73.53
12	45	33	278	25	64.29	89.39	57.69	64.29
13	103	65	220	10	91.15	77.19	61.31	91.15
17	22	22	301	29	43.14	93.19	50.00	43.14
18	22	9	301	27	44.90	97.10	70.97	44.90

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.69 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

		Detected person								
		2	3	5	6	7	9	15	17	19
True person	2(30)	9	0	4	0	3	5	2	6	1
	3(49)	0	7	5	0	4	0	30	0	3
	5(85)	0	0	78	1	0	0	5	0	1
	6(30)	1	0	5	1	0	0	11	6	6
	7(43)	0	1	13	0	14	1	1	9	4
	9(47)	2	2	9	0	1	23	3	3	4
	15(86)	0	0	6	0	0	0	80	0	0
	17(51)	0	0	1	0	1	1	7	35	6
	19(56)	0	0	3	0	2	1	9	4	37

ตารางที่ ก.70 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
2	9	3	275	21	30.00	98.92	75.00	30.00
3	7	3	277	42	14.29	98.93	70.00	14.29
5	78	46	206	7	91.76	81.75	62.90	91.76
6	1	1	283	29	3.33	99.65	50.00	3.33
7	14	11	270	29	32.56	96.09	56.00	32.56
9	23	8	261	24	48.94	97.03	74.19	48.94
15	80	68	204	6	93.02	75.00	54.05	93.02
17	35	28	249	16	68.63	89.89	55.56	68.63
19	37	25	247	19	66.07	90.81	59.68	66.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.71 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 11 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

		Detected person										
		4	5	13	1	15	8	12	15	17	18	19
True person	4(41)	4	2	6	2	15	12	0	0	0	0	0
	5(85)	0	67	2	10	4	0	1	1	0	0	0
	13(118)	0	1	106	0	4	1	4	0	1	1	0
	1(139)	0	12	3	97	12	9	3	2	0	0	1
	15(86)	0	7	4	3	72	0	0	0	0	0	0
	8(69)	0	1	2	30	2	30	2	0	0	1	1
	12(70)	0	4	9	3	0	1	52	0	0	1	0
	15(68)	0	10	7	20	23	0	3	3	2	0	0
	17(57)	0	0	35	5	4	7	0	0	6	0	0
	18(49)	0	10	2	13	0	1	9	0	1	9	4
	19(56)	0	3	15	1	12	0	8	1	3	3	10

ตารางที่ ก.72 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 11 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
4	4	0	452	37	9.76	100.00	100.00	9.76
5	67	50	389	18	78.82	88.61	57.26	78.82
13	106	85	350	12	89.83	80.46	55.50	89.83
1	97	87	359	42	69.78	80.49	52.72	69.78
15	72	76	384	14	83.72	83.48	48.65	83.72
8	30	31	426	39	43.48	93.22	49.18	43.48
12	52	30	404	18	74.29	93.09	63.41	74.29
15	3	4	453	65	4.41	99.12	42.86	4.41
17	6	7	450	51	10.53	98.47	46.15	10.53
18	9	6	447	40	18.37	98.68	60.00	18.37
19	10	6	456	46	17.86	98.70	62.50	17.86

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.73 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 11 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

		Detected person										
		4	5	7	9	10	11	12	13	14	17	20
True person	4(41)	15	5	0	2	1	8	0	1	3	3	3
	5(85)	0	73	0	2	2	0	0	2	5	0	1
	7(43)	0	14	3	0	0	0	9	14	0	3	0
	9(47)	0	6	0	15	2	4	7	3	3	2	5
	10(57)	2	14	0	4	9	16	3	0	5	0	4
	11(68)	3	15	0	4	6	18	1	5	6	5	5
	12(70)	0	2	1	1	0	1	49	11	1	0	4
	13(113)	0	0	0	0	0	0	3	108	0	1	1
	14(54)	2	12	0	1	4	4	2	2	26	0	1
	17(51)	2	0	1	1	1	2	0	16	3	20	5
	20(68)	2	12	2	3	0	6	2	21	1	3	16

ตารางที่ ก.74 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 11 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
4	15	11	337	26	36.59	96.84	57.69	36.59
5	73	80	279	12	85.88	77.72	47.71	85.88
7	3	4	349	40	6.98	98.87	42.86	6.98
9	15	18	337	32	31.91	94.93	45.45	31.91
10	9	16	343	48	15.79	95.54	36.00	15.79
11	18	41	334	50	26.47	89.07	30.51	26.47
12	49	27	303	21	70.00	91.82	64.47	70.00
13	108	75	244	5	95.58	76.49	59.02	95.58
14	26	27	326	28	48.15	92.35	49.06	48.15
17	20	17	332	31	39.22	95.13	54.05	39.22
20	16	29	352	52	23.53	92.39	35.56	23.53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.75 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 11 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

	Detected person										
	1	2	5	6	10	14	15	16	18	19	20
1(139)	98	0	14	0	3	1	13	1	4	3	2
2(30)	13	3	1	0	0	0	3	1	0	0	9
5(85)	7	0	64	0	2	3	6	0	2	1	0
6(30)	3	0	1	1	0	0	12	0	0	6	7
10(57)	20	0	12	0	2	2	21	0	0	0	0
True person 14(54)	15	1	10	0	1	9	17	0	0	1	0
15(86)	2	0	5	0	0	1	77	0	0	1	0
16(33)	6	3	4	0	0	0	5	4	2	3	6
18(49)	12	0	14	0	0	0	3	1	8	7	4
19(56)	0	1	1	0	1	2	21	0	2	20	8
20(68)	13	0	8	0	0	0	10	1	2	6	28

ตารางที่ ก.76 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 11 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
1	98	91	216	41	70.50	70.36	51.85	70.50
2	3	5	311	27	10.00	98.42	37.50	10.00
5	64	70	250	21	75.29	78.13	47.76	75.29
6	1	0	313	29	3.33	100.00	100.00	3.33
10	2	7	312	55	3.51	97.81	22.22	3.51
14	9	9	305	45	16.67	97.13	50.00	16.67
15	77	111	237	9	89.53	68.10	40.96	89.53
16	4	4	310	29	12.12	98.73	50.00	12.12
18	8	12	306	41	16.33	96.23	40.00	16.33
19	20	28	294	36	35.71	91.30	41.67	35.71
20	28	36	314	40	41.18	89.71	43.75	41.18

ตารางที่ ก.77 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 11 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

		Detected person										
		1	3	4	5	6	7	8	10	13	15	17
True person	1(139)	103	0	0	10	0	1	8	3	3	9	2
	3(49)	3	2	3	6	0	1	1	1	8	24	0
	4(41)	6	1	4	1	0	0	10	0	6	13	0
	5(85)	12	0	1	68	0	0	0	0	1	3	0
	6(30)	4	0	1	2	0	2	3	1	9	6	2
	7(43)	0	0	0	14	1	5	0	1	19	0	3
	8(69)	23	0	0	2	0	0	40	0	1	3	0
	10(57)	17	1	0	15	0	0	1	4	0	19	0
	13(113)	0	0	1	0	0	0	0	0	110	1	1
	15(86)	4	0	0	5	0	0	0	0	1	76	0
	17(51)	5	0	1	1	0	1	7	0	17	3	16

ตารางที่ ก.78 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 11 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
1	103	74	325	36	74.10	81.45	58.19	74.10
3	2	2	426	47	4.08	99.53	50.00	4.08
4	4	7	424	37	9.76	98.38	36.36	9.76
5	68	56	360	17	80.00	86.54	54.84	80.00
6	0	1	428	30	0.00	99.77	0.00	0.00
7	5	5	423	38	11.63	98.83	50.00	11.63
8	40	30	388	29	57.97	92.82	57.14	57.97
10	4	6	424	53	7.02	98.60	40.00	7.02
13	110	65	318	3	97.35	83.03	62.86	97.35
15	76	81	352	10	88.37	81.29	48.41	88.37
17	16	8	428	35	31.37	98.17	66.67	31.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.79 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 11 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

		Detected person										
		1	3	7	9	11	12	13	15	17	18	19
True person	1(139)	105	2	0	2	4	3	5	14	1	3	0
	3(49)	7	2	0	0	2	2	6	29	1	0	0
	7(43)	6	0	2	2	1	11	15	1	5	0	0
	9(47)	26	0	1	6	1	6	1	4	1	1	0
	11(68)	19	1	0	1	10	1	6	28	2	0	0
	12(70)	8	0	1	0	1	41	15	1	2	1	0
	13(113)	0	0	0	0	0	3	108	1	1	0	0
	15(86)	4	0	0	0	0	0	4	78	0	0	0
	17(51)	12	0	0	1	0	0	24	3	9	0	2
	18(49)	21	0	0	0	2	6	3	0	1	16	0
	19(56)	2	0	0	0	0	10	15	17	2	3	7

ตารางที่ ก.80 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 11 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
1	103	74	325	36	74.10	81.45	58.19	74.10
3	2	2	426	47	4.08	99.53	50.00	4.08
4	4	7	424	37	9.76	98.38	36.36	9.76
5	68	56	360	17	80.00	86.54	54.84	80.00
6	0	1	428	30	0.00	99.77	0.00	0.00
7	5	5	423	38	11.63	98.83	50.00	11.63
8	40	30	388	29	57.97	92.82	57.14	57.97
10	4	6	424	53	7.02	98.60	40.00	7.02
13	110	65	318	3	97.35	83.03	62.86	97.35
15	76	81	352	10	88.37	81.29	48.41	88.37
17	16	8	428	35	31.37	98.17	66.67	31.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล ด้วยวิธี 2-fold

ตารางที่ ข.1 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

		Detected person	
		1	13
True person	1(139)	129	10
	13(113)	2	111

ตารางที่ ข.2 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
1	129	10	111	2	98.47	91.74	92.81	92.81
13	111	2	129	10	91.74	98.47	98.23	98.23

ตารางที่ ข.3 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

		Detected person	
		2	11
True person	2(30)	14	16
	11(68)	8	60

ตารางที่ ข.4 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
2	14	16	60	8	63.64	78.95	46.67	46.67
11	60	8	14	16	78.95	63.64	88.24	88.24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

		Detected person	
		3	18
True person	3(49)	45	4
	18(49)	18	31

ตารางที่ ข.6 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
3	45	4	31	18	71.43	88.57	91.84	91.84
18	31	18	45	4	88.57	71.43	63.27	63.27

ตารางที่ ข.7 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

		Detected person	
		4	5
True person	4(41)	41	0
	5(85)	8	77

ตารางที่ ข.8 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
4	41	0	77	8	83.67	100.00	100.00	100.00
5	77	8	41	0	100.00	83.67	90.59	90.59

ตารางที่ ข.9 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

		Detected person	
		6	11
True person	6(30)	10	20
	11(68)	8	60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.10 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
6	10	20	60	8	55.56	75.00	33.33	33.33
11	60	8	10	20	75.00	55.56	88.24	88.24

ตารางที่ ข.11 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 6

		Detected person	
		7	19
True person	7(43)	31	12
	19(56)	3	53

ตารางที่ ข.12 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 6

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
7	31	12	53	3	91.18	81.54	72.09	72.09
19	53	3	31	12	81.54	91.18	94.64	94.64

ตารางที่ ข.13 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 7

		Detected person	
		8	15
True person	8(69)	56	13
	15(86)	4	82

ตารางที่ ข.14 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 7

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
8	56	13	82	4	93.33	86.32	81.16	81.16
15	82	4	56	13	86.32	93.33	95.35	95.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.15 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 8

		Detected person	
		10	20
True person	10(57)	52	5
	20(68)	7	61

ตารางที่ ข.16 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 8

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
10	52	5	61	7	88.14	92.42	91.23	91.23
20	61	7	52	5	92.42	88.14	89.71	89.71

ตารางที่ ข.17 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 9

		Detected person	
		12	16
True person	12(70)	59	11
	16(33)	28	5

ตารางที่ ข.18 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 9

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
12	59	11	5	28	67.82	31.25	84.29	84.29
16	5	28	59	11	31.25	67.82	15.15	15.15

ตารางที่ ข.19 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 10

		Detected person	
		14	17
True person	14(54)	49	5
	17(51)	4	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.20 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 2 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 10

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
14	49	5	47	4	92.45	90.38	90.74	90.74
17	47	4	49	5	90.38	92.45	92.16	92.16

ตารางที่ ข.21 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

		Detected person		
		1	2	15
True person	1(139)	106	10	23
	2(30)	11	13	6
	15(86)	5	0	81

ตารางที่ ข.22 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
1	106	33	94	16	76.26	85.45	86.89	76.26
2	13	17	187	10	43.33	94.92	56.52	43.33
15	81	5	119	29	94.19	80.41	73.64	94.19

ตารางที่ ข.23 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

		Detected person		
		2	5	6
True person	2(30)	9	8	13
	5(85)	0	81	4
	6(30)	1	4	25

ตารางที่ ข.24 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
2	9	21	106	1	30.00	99.07	90.00	30.00
5	81	4	34	12	95.29	73.91	87.10	95.29
6	25	5	90	17	83.33	84.11	59.52	83.33

ตารางที่ ข.25 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

		Detected person		
		2	13	18
True person	2(30)	8	15	7
	13(113)	3	107	3
	18(49)	3	5	41

ตารางที่ ข.26 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
2	8	22	148	6	26.67	96.10	57.14	26.67
13	107	6	49	20	94.69	71.01	84.25	94.69
18	41	8	115	10	83.67	92.00	80.39	83.67

ตารางที่ ข.27 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

		Detected person		
		3	12	13
True person	3(49)	38	5	6
	12(70)	5	50	15
	13(113)	3	3	107

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.28 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
3	38	11	157	8	77.55	95.15	82.61	77.55
12	50	20	145	8	71.43	94.77	86.21	71.43
13	107	6	88	21	94.69	80.73	83.59	94.69

ตารางที่ ข.29 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

		Detected person		
		4	5	15
	4(41)	27	4	10
True person	5(85)	0	83	2
	15(86)	3	2	81

ตารางที่ ข.30 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
4	27	14	164	3	65.85	98.20	90.00	65.85
5	83	2	108	6	97.65	94.74	93.26	97.65
15	81	5	110	12	94.19	90.16	87.10	94.19

ตารางที่ ข.31 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 6

		Detected person		
		4	14	19
	4(41)	35	4	2
True person	14(54)	6	46	2
	19(56)	2	2	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.32 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 6

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
4	35	6	98	8	85.37	92.45	81.40	85.37
14	46	8	87	6	85.19	93.55	88.46	85.19
19	52	4	81	4	92.86	95.29	92.86	92.86

ตารางที่ ข.33 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 7

		Detected person		
		5	12	15
True person	5(85)	77	3	5
	12(70)	9	54	7
	15(86)	6	0	80

ตารางที่ ข.34 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 7

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
5	77	8	134	15	90.59	89.93	83.70	90.59
12	54	16	157	3	77.14	98.13	94.74	77.14
15	80	6	131	12	93.02	91.61	86.96	93.02

ตารางที่ ข.35 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 8

		Detected person		
		7	8	17
True person	7(43)	37	1	5
	8(69)	7	60	2
	17(51)	10	11	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.36 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 8

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
7	37	6	90	17	86.05	84.11	68.52	86.05
8	60	9	67	12	86.96	84.81	83.33	86.96
17	30	21	97	7	58.82	93.27	81.08	58.82

ตารางที่ ข.37 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 9

		Detected person		
		9	16	18
True person	9(47)	27	9	11
	16(33)	3	23	7
	18(49)	7	6	36

ตารางที่ ข.38 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 9

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
9	27	20	59	10	57.45	85.51	72.97	57.45
16	23	10	63	15	69.70	80.77	60.53	69.70
18	36	13	50	18	73.47	73.53	66.67	73.47

ตารางที่ ข.39 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 10

		Detected person		
		12	15	20
True person	12(70)	45	7	18
	15(86)	0	82	4
	20(68)	2	18	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.40 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 3 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 10

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
12	45	25	130	2	64.29	98.48	95.74	64.29
15	82	4	93	25	95.35	78.81	76.64	95.35
20	48	20	127	22	70.59	85.23	68.57	70.59

ตารางที่ ข.41 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

		Detected person				
		3	8	12	14	20
True person	3(49)	14	4	1	23	7
	8(69)	0	50	1	4	14
	12(70)	2	0	59	2	7
	14(54)	3	5	3	34	9
	20(68)	11	3	6	3	45

ตารางที่ ข.42 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
3	14	16	188	35	28.57	92.16	46.67	28.57
8	50	12	152	19	72.46	92.68	80.65	72.46
12	59	11	143	11	84.29	92.86	84.29	84.29
14	34	32	168	20	62.96	84.00	51.52	62.96
20	45	37	157	23	66.18	80.93	54.88	66.18

ตารางที่ ข.43 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

		Detected person				
		2	4	5	13	15
True person	2(30)	4	5	5	11	2
	4(41)	1	12	5	11	12
	5(85)	0	3	71	5	6
	13(113)	0	1	2	107	3
	15(86)	0	0	4	6	76

ตารางที่ ข.44 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
2	4	1	266	23	14.81	99.63	80.00	14.81
4	12	9	258	29	29.27	96.63	57.14	29.27
5	71	16	199	14	83.53	92.56	81.61	83.53
13	107	33	163	6	94.69	83.16	76.43	94.69
15	76	23	194	10	88.37	89.40	76.77	88.37

ตารางที่ ข.45 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

		Detected person				
		8	11	17	18	20
True person	8(69)	74	0	7	2	2
	11(68)	9	27	0	0	7
	17(51)	10	1	43	1	2
	18(49)	6	2	6	24	11
	20(68)	0	0	2	6	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.46 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
8	74	25	142	11	87.06	85.03	74.75	87.06
11	27	3	189	16	62.79	98.44	90.00	62.79
17	43	15	173	14	75.44	92.02	74.14	75.44
18	24	9	192	25	48.98	95.52	72.73	48.98
20	48	22	168	8	85.71	88.42	68.57	85.71

ตารางที่ ข.47 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

		Detected person				
		1	6	9	11	16
1(139)	True person	93	0	12	33	1
6(30)		9	0	1	20	1
9(47)		26	1	9	10	1
11(68)		13	2	2	48	3
16(33)		10	0	1	11	11

ตารางที่ ข.48 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
1	93	58	68	46	66.91	53.97	61.59	66.91
6	0	3	161	31	0.00	98.17	0.00	0.00
9	9	16	152	38	19.15	90.48	36.00	19.15
11	48	74	113	20	70.59	60.43	39.34	70.59
16	11	6	150	22	33.33	96.15	64.71	33.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.49 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

		Detected person				
		1	2	3	4	5
True person	5(85)	70	1	9	3	2
	7(43)	5	33	2	0	3
	10(57)	8	0	44	4	1
	18(49)	8	2	4	25	10
	19(56)	0	6	3	10	37

ตารางที่ ข.50 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 5 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
5	2	16	23	83	2.35	58.97	11.11	2.35
7	3	17	32	40	6.98	65.31	15.00	6.98
10	1	19	22	56	1.75	53.66	5.00	1.75
18	10	17	17	39	20.41	50.00	37.04	20.41
19	37	16	172	19	66.07	91.49	69.81	66.07

ตารางที่ ข.51 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

		Detected person						
		5	6	7	9	12	13	15
True person	5(85)	57	0	2	11	2	3	15
	6(30)	1	0	2	4	5	3	15
	7(43)	7	0	7	3	3	21	2
	9(47)	10	0	1	23	2	5	6
	12(70)	2	0	2	6	25	34	1
	13(113)	0	0	0	1	1	102	9
	15(86)	10	0	1	0	0	0	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.52 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
5	57	30	232	33	63.33	88.55	65.52	63.33
6	0	0	289	30	0.00	100.00	#DIV/0!	0.00
7	7	8	282	36	16.28	97.24	46.67	16.28
9	23	25	266	24	48.94	91.41	47.92	48.94
12	25	13	264	45	35.71	95.31	65.79	35.71
13	102	66	187	11	90.27	73.91	60.71	90.27
15	75	48	214	11	87.21	81.68	60.98	87.21

ตารางที่ ข.53 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

		Detected person						
		3	5	9	10	11	13	14
True person	3(49)	10	5	0	6	8	8	12
	5(85)	1	66	4	7	2	1	4
	9(47)	0	7	24	5	4	5	2
	10(57)	9	6	11	12	8	4	7
	11(68)	5	9	1	5	30	12	6
	13(113)	0	0	0	1	1	110	1
	14(54)	2	15	2	5	4	2	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.54 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
3	10	17	266	39	20.41	93.99	37.04	20.41
5	66	42	210	19	77.65	83.33	61.11	77.65
9	24	18	252	23	51.06	93.33	57.14	51.06
10	12	29	264	45	21.05	90.10	29.27	21.05
11	30	27	246	38	44.12	90.11	52.63	44.12
13	110	32	166	3	97.35	83.84	77.46	97.35
14	24	32	252	30	44.44	88.73	42.86	44.44

ตารางที่ ข.55 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

		Detected person						
		4	6	7	12	16	17	20
True person	4(41)	36	0	0	1	0	0	4
	6(30)	7	2	4	4	1	2	10
	7(43)	3	2	21	6	0	8	3
	12(70)	0	0	5	53	2	3	7
	16(33)	2	3	3	3	11	1	10
	17(51)	0	1	2	4	0	28	16
	20(68)	4	3	3	8	2	6	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.56 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
4	36	16	157	5	87.80	90.75	69.23	87.80
6	2	9	191	28	6.67	95.50	18.18	6.67
7	21	17	172	22	48.84	91.01	55.26	48.84
12	53	26	140	17	75.71	84.34	67.09	75.71
16	11	5	182	22	33.33	97.33	68.75	33.33
17	28	20	165	23	54.90	89.19	58.33	54.90
20	42	50	151	26	61.76	75.12	45.65	61.76

ตารางที่ ข.57 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

	Detected person							
	1	2	3	8	15	18	19	
1(139)	98	1	2	20	15	3	0	
2(30)	15	1	3	8	3	0	0	
3(49)	9	1	6	2	30	0	1	
8(69)	16	1	0	42	9	1	0	
15(86)	6	0	3	0	77	0	0	
18(49)	20	0	1	2	5	17	4	
19(56)	12	0	1	0	12	7	24	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.58 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
1	98	78	167	41	70.50	68.16	55.68	70.50
2	1	3	264	29	3.33	98.88	25.00	3.33
3	6	10	259	43	12.24	96.28	37.50	12.24
8	42	32	223	27	60.87	87.45	56.76	60.87
15	77	74	188	9	89.53	71.76	50.99	89.53
18	17	11	248	32	34.69	95.75	60.71	34.69
19	24	5	241	32	42.86	97.97	82.76	42.86

ตารางที่ ข.59 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

	Detected person						
	1	4	5	8	10	11	17
1(139)	71	14	28	8	7	5	6
4(41)	2	33	2	0	1	1	2
5(85)	12	1	68	0	3	1	0
8(69)	26	7	3	21	0	3	9
10(57)	13	9	16	0	11	8	0
11(68)	14	8	22	2	5	10	7
17(51)	9	2	1	1	1	0	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.60 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 7 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
1	71	76	180	68	51.08	70.31	48.30	51.08
4	33	41	218	8	80.49	84.17	44.59	80.49
5	68	72	183	17	80.00	71.76	48.57	80.00
8	21	11	230	48	30.43	95.44	65.63	30.43
10	11	17	240	46	19.30	93.39	39.29	19.30
11	10	18	241	58	14.71	93.05	35.71	14.71
17	37	24	214	14	72.55	89.92	60.66	72.55

ตารางที่ ข.61 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

	True person	Detected person								
		2	4	9	10	12	13	14	16	19
2(30)		3	2	2	2	0	20	0	0	1
4(41)		0	18	0	4	0	19	0	0	0
9(47)		1	1	14	12	10	4	0	2	3
10(57)		0	3	4	27	5	9	5	1	3
12(70)		2	3	1	6	44	7	0	1	6
13(113)		0	0	1	2	7	99	0	0	4
14(54)		3	0	0	22	1	10	12	0	6
16(33)		0	0	4	2	8	18	0	1	0
19(56)		2	0	2	2	6	14	2	0	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.62 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
2	3	8	243	27	10.00	96.81	27.27	10.00
4	18	9	228	23	43.90	96.20	66.67	43.90
9	14	14	232	33	29.79	94.31	50.00	29.79
10	27	52	219	30	47.37	80.81	34.18	47.37
12	44	37	202	26	62.86	84.52	54.32	62.86
13	99	101	147	14	87.61	59.27	49.50	87.61
14	12	7	234	42	22.22	97.10	63.16	22.22
16	1	4	245	32	3.03	98.39	20.00	3.03
19	28	23	218	28	50.00	90.46	54.90	50.00

ตารางที่ ข.63 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

		Detected person								
		4	5	6	7	8	14	16	18	20
4(41)		8	10	0	0	9	4	1	0	9
5(85)		0	70	1	0	3	8	0	2	1
6(30)		3	5	1	2	1	3	2	1	12
7(43)		0	13	3	2	2	2	4	1	16
True person 8(69)		1	1	0	0	57	2	0	0	8
14(54)		1	15	0	0	2	28	0	6	2
16(33)		2	4	4	4	6	2	1	2	8
18(49)		0	13	2	2	2	6	0	13	11
20(68)		2	13	1	0	14	1	3	4	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.64 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
4	8	9	202	33	19.51	95.73	47.06	19.51
5	70	74	140	15	82.35	65.42	48.61	82.35
6	1	11	209	29	3.33	95.00	8.33	3.33
7	2	8	208	41	4.65	96.30	20.00	4.65
8	57	39	153	12	82.61	79.69	59.38	82.61
14	28	28	182	26	51.85	86.67	50.00	51.85
16	1	10	209	32	3.03	95.43	9.09	3.03
18	13	16	197	36	26.53	92.49	44.83	26.53
20	30	67	180	38	44.12	72.87	30.93	44.12

ตารางที่ ข.65 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

		Detected person								
		1	2	3	5	6	15	17	19	20
1(139)	True person	94	1	3	17	0	15	2	2	5
2(30)		10	2	2	3	0	2	7	0	4
3(49)		2	0	4	6	0	30	0	2	5
5(85)		9	0	0	67	0	8	0	0	1
6(30)		4	0	0	3	0	8	3	4	8
15(86)		3	0	0	7	0	74	0	2	0
17(51)		9	0	0	0	0	3	24	9	6
19(56)		3	0	0	1	0	8	6	34	4
20(68)		10	0	2	7	0	12	12	3	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.66 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
1	94	50	227	45	67.63	81.95	65.28	67.63
2	2	1	319	28	6.67	99.69	66.67	6.67
3	4	7	317	45	8.16	97.84	36.36	8.16
5	67	44	254	18	78.82	85.23	60.36	78.82
6	0	0	321	30	0.00	100.00	#DIV/0!	0.00
15	74	86	247	12	86.05	74.17	46.25	86.05
17	24	30	297	27	47.06	90.83	44.44	47.06
19	34	22	287	22	60.71	92.88	60.71	60.71
20	22	33	299	46	32.35	90.06	40.00	32.35

ตารางที่ ข.67 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

		Detected person								
		1	4	7	9	11	14	15	17	18
1(139)		76	6	3	13	8	1	14	2	16
4(41)		3	27	1	0	1	0	9	0	0
7(43)		5	0	28	1	1	0	0	7	1
9(47)		20	1	4	11	3	1	2	3	2
True person	11(68)	8	7	7	3	14	2	20	3	1
	14(54)	21	2	0	0	6	9	13	1	2
	15(86)	1	3	0	0	1	1	79	1	0
	17(51)	4	2	3	0	4	0	7	30	1
	18(49)	9	0	2	2	1	1	4	1	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.68 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
1	76	71	227	63	54.68	76.17	51.70	54.68
4	27	21	276	14	65.85	92.93	56.25	65.85
7	28	20	275	15	65.12	93.22	58.33	65.12
9	11	19	292	36	23.40	93.89	36.67	23.40
11	14	25	289	51	21.54	92.04	35.90	21.54
14	9	6	294	45	16.67	98.00	60.00	16.67
15	79	69	224	7	91.86	76.45	53.38	91.86
17	30	18	273	21	58.82	93.81	62.50	58.82
18	29	23	274	20	59.18	92.26	55.77	59.18

ตารางที่ ข.69 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

		Detected person								
		3	5	9	10	13	14	17	19	20
3(49)	3	17	1	4	5	10	4	2	3	
5(85)	0	68	5	1	1	6	0	3	1	
9(47)	2	6	25	2	1	2	2	4	3	
10(57)	1	16	15	11	3	8	0	2	1	
True person 13(113)	0	0	1	0	95	1	6	4	6	
14(54)	7	14	2	2	2	22	1	3	1	
17(51)	0	0	0	0	15	4	22	0	10	
19(56)	2	2	0	1	20	3	2	22	4	
20(68)	1	12	4	3	11	7	7	3	20	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.70 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 9 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
3	3	13	285	46	6.12	95.64	18.75	6.12
5	68	67	220	17	80.00	76.66	50.37	80.00
9	25	28	263	22	53.19	90.38	47.17	53.19
10	11	13	277	46	19.30	95.52	45.83	19.30
13	95	58	193	18	84.07	76.89	62.09	84.07
14	22	41	266	32	40.74	86.64	34.92	40.74
17	22	22	266	29	43.14	92.36	50.00	43.14
19	22	21	266	34	39.29	92.68	51.16	39.29
20	20	29	268	48	29.41	90.24	40.82	29.41

ตารางที่ ข.71 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 11 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

		Detected person										
		5	7	8	9	10	11	12	13	14	15	18
True person	5(85)	73	2	1	1	0	0	0	0	6	1	1
	7(43)	18	1	0	0	0	0	4	19	0	1	0
	8(69)	4	0	39	4	0	0	2	10	0	5	5
	9(47)	11	0	13	9	1	1	2	3	2	4	1
	10(57)	8	0	4	8	5	3	1	3	25	0	0
	11(68)	11	0	5	2	0	6	0	7	3	34	0
	12(70)	2	3	2	3	0	0	26	24	7	1	2
	13(113)	1	0	1	0	0	0	1	105	1	4	0
	14(54)	9	0	3	3	1	1	5	2	11	17	2
	15(86)	5	0	0	0	0	0	0	1	0	80	0
	18(49)	9	0	5	1	1	0	3	6	4	1	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.72 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 11 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 1

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
5	73	78	296	12	85.88	79.14	48.34	85.88
7	1	5	368	42	2.33	98.66	16.67	2.33
8	39	34	330	30	56.52	90.66	53.42	56.52
9	9	22	360	38	19.15	94.24	29.03	19.15
10	0	3	369	57	0.00	99.19	0.00	0.00
11	6	7	363	62	8.82	98.11	46.15	8.82
12	26	20	343	44	37.14	94.49	56.52	37.14
13	105	73	264	8	92.92	78.34	58.99	92.92
14	11	26	358	43	20.37	93.23	29.73	20.37
15	80	93	289	6	93.02	75.65	46.24	93.02
18	19	11	369	30	38.78	97.11	63.33	38.78

ตารางที่ ข.73 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 11 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 2

		Detected person										
		3	4	5	8	10	12	14	16	17	18	20
True person	3(49)	2	4	14	2	6	3	6	0	3	1	8
	4(41)	3	10	5	1	1	0	1	0	2	0	18
	5(85)	0	0	73	0	2	3	6	0	0	0	1
	8(69)	0	3	2	43	1	2	6	0	3	2	7
	10(57)	1	2	12	10	16	3	7	0	3	3	0
	12(70)	0	0	1	0	0	58	2	0	3	2	4
	14(54)	0	0	10	3	6	4	27	0	1	2	1
	16(33)	0	0	7	4	5	5	0	1	4	2	5
	17(51)	0	1	0	1	0	5	5	0	21	1	17
	18(49)	0	0	7	4	0	9	3	1	0	19	6
	20(68)	2	0	4	1	2	3	4	1	7	12	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.74 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 11 บุคคล ของการส้อมครั้งที่ 2

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/person
	TP	FN	TN	FP				
3	2	6	300	47	4.08	98.04	25.00	4.08
4	10	10	292	31	24.39	96.69	50.00	24.39
5	73	62	229	12	85.88	78.69	54.07	85.88
8	43	26	259	26	62.32	90.88	62.32	62.32
10	16	23	286	41	28.07	92.56	41.03	28.07
12	58	37	244	12	82.86	86.83	61.05	82.86
14	27	40	275	27	50.00	87.30	40.30	50.00
16	1	2	301	32	3.03	99.34	33.33	3.03
17	21	26	281	30	41.18	91.53	44.68	41.18
18	19	25	283	30	38.78	91.88	43.18	38.78
20	32	67	302	36	47.06	81.84	32.32	47.06

ตารางที่ ข.75 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 11 บุคคล ของการส้อมครั้งที่ 3

		Detected person										
		1	2	3	8	11	12	16	17	18	19	20
True person	1(139)	92	0	2	12	13	3	0	1	1	3	12
	2(30)	5	0	3	8	1	0	2	3	0	2	6
	3(49)	0	0	11	2	19	3	0	2	0	0	12
	8(69)	29	0	0	29	1	2	0	1	0	0	7
	11(68)	18	0	2	2	28	2	0	5	0	4	7
	12(70)	7	2	3	8	2	40	1	4	2	1	0
	16(33)	6	0	0	3	3	9	1	3	0	6	2
	17(51)	5	0	3	2	1	8	3	16	0	2	11
	18(49)	22	0	5	1	0	7	0	1	11	0	2
	19(56)	4	0	6	0	11	12	1	8	0	13	1
	20(68)	18	0	2	10	12	0	1	7	0	6	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.76 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 11 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 3

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ person
	TP	FN	TN	FP				
1	92	114	161	47	66.19	58.55	44.66	66.19
2	0	2	253	30	0.00	99.22	0.00	0.00
3	11	26	242	38	22.45	90.30	29.73	22.45
8	29	48	224	40	42.03	82.35	37.66	42.03
11	28	63	225	40	41.18	78.13	30.77	41.18
12	40	46	213	30	57.14	82.24	46.51	57.14
16	1	8	252	32	3.03	96.92	11.11	3.03
17	16	35	237	35	31.37	87.13	31.37	31.37
18	11	3	242	38	22.45	98.78	78.57	22.45
19	13	24	240	43	23.21	90.91	35.14	23.21
20	12	60	253	56	17.65	80.83	16.67	17.65

ตารางที่ ข.77 ผลทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกบุคคล 11 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

	True person	Detected person										
		4	5	6	7	9	10	11	13	14	15	19
4(41)		9	1	0	0	5	2	0	5	1	17	1
5(85)		0	71	0	0	1	0	4	2	4	3	0
6(30)		1	4	0	3	4	0	1	7	1	5	4
7(43)		1	14	0	4	4	0	1	18	0	0	1
9(47)		1	8	0	1	27	3	0	3	1	1	2
10(57)		0	13	1	0	8	10	8	0	3	11	3
11(68)		0	10	0	0	3	5	6	8	10	25	1
13(113)		0	1	0	1	0	0	0	107	0	0	4
14(54)		0	10	0	0	8	7	3	5	12	6	3
15(86)		1	14	0	1	0	1	0	4	0	65	0
19(56)		1	2	0	0	1	0	1	19	1	1	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.78 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 11 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 4

Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
4	9	5	332	32	21.95	98.52	64.29	21.95
5	71	77	270	14	83.53	77.81	47.97	83.53
6	0	1	341	30	0.00	99.71	0.00	0.00
7	4	6	337	39	9.30	98.25	40.00	9.30
9	27	34	314	20	57.45	90.23	44.26	57.45
10	10	18	331	47	17.54	94.84	35.71	17.54
11	6	18	335	62	8.82	94.90	25.00	8.82
13	107	71	234	6	94.69	76.72	60.11	94.69
14	12	21	329	42	22.22	94.00	36.36	22.22
15	65	69	276	21	75.58	80.00	48.51	75.58
19	30	19	341	26	53.57	94.72	61.22	53.57

ตารางที่ ข.78 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 11 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5

		Detected person										
		2	4	6	7	9	13	15	16	18	19	20
True person	2(30)	7	3	0	1	1	9	4	0	0	0	5
	4(41)	1	21	0	0	1	1	16	0	0	0	1
	6(30)	2	1	0	1	6	3	10	0	0	2	5
	7(43)	0	0	1	5	6	21	1	0	0	3	6
	9(47)	2	2	1	3	22	2	4	0	4	4	3
	13(113)	2	0	0	1	0	106	0	0	1	1	2
	15(86)	0	1	0	0	0	2	83	0	0	0	0
	16(33)	0	1	0	0	1	12	7	0	5	3	4
	18(49)	0	0	0	1	5	4	4	0	16	12	7
	19(56)	0	0	0	0	0	16	17	0	3	19	1
20(68)	0	3	0	1	1	24	9	1	3	8	18	

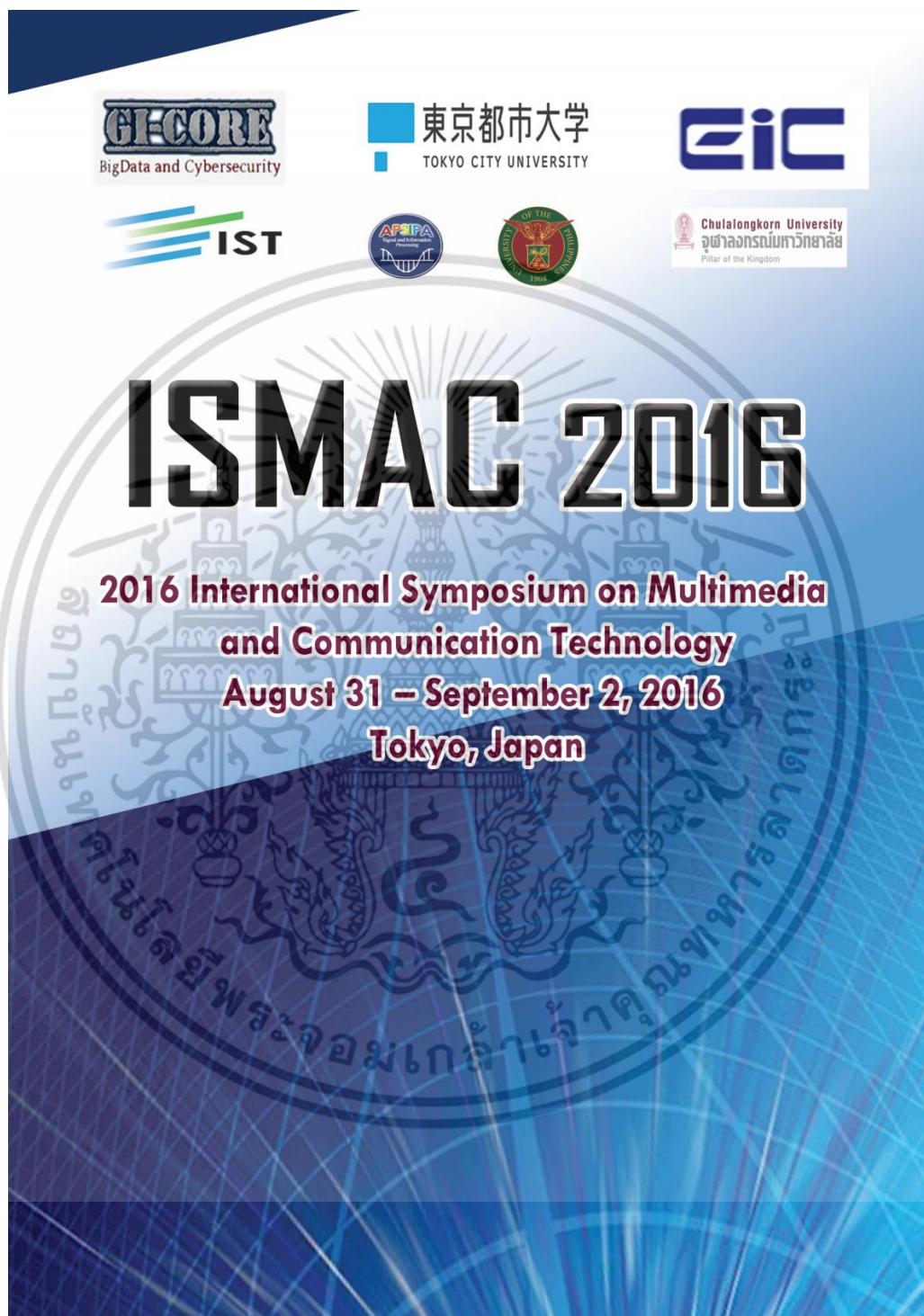
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




ตารางที่ ข.80 ผลของการประเมินประสิทธิภาพของระบบการจำแนกบุคคล 11 บุคคล ของการสุ่มครั้งที่ 5





Person No.	True person		Wrong person		Sensitivity (%)	Specificity (%)	Precision (%)	Accuracy/ Person (%)
	TP	FN	TN	FP				
2	7	7	290	23	23.33	97.64	50.00	23.33
4	21	11	276	20	51.22	96.17	65.63	51.22
6	0	2	297	30	0.00	99.33	0.00	0.00
7	5	8	292	38	11.63	97.33	38.46	11.63
9	22	21	275	25	46.81	92.91	51.16	46.81
13	106	94	191	7	93.81	67.02	53.00	93.81
15	83	72	214	3	96.51	74.83	53.55	96.51
16	0	1	297	33	0.00	99.66	0.00	0.00
18	16	16	281	33	32.65	94.61	50.00	32.65
19	19	33	278	37	33.93	89.39	36.54	33.93
20	18	34	297	50	26.47	89.73	34.62	26.47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่



ISMAC 2016

**2016 International Symposium on Multimedia
and Communication Technology**
August 31 – September 2, 2016
Tokyo, Japan

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

An Eye-Muscle Feature Extracting for Human Identification

Isaraporn Pokinchotanun*, Pakorn Sirichotedumrong*, Sukkharak Saechia† and Paramote Wardkein*

* Department of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand

† Department of Computer Education, Faculty of Education, Phranakhon Si Ayutthaya Rajabhat University, Thailand

Abstract— This paper presents a novel method to identify human from an eye-muscle signal. Due to the fact that humans blink their eyes through the related muscles, the rippling of skin occurs around the eye when eyelid is closed and opened. Using a piezo electric transducer, we can record the ripple as the eye-muscle wave. The appearance of the signal is almost identical to an electrooculogram (EOG). By exploiting discrete Fourier transform (DFT), we can extract the essential feature from the eye-muscle signal. We then supervise an artificial neural network (ANN) to recognize the pattern of eye-muscle feature from each person. In addition, the experimental results show that the proposed system is able to identify human at the accuracy of 85 percent. Notably, our data acquisition stage is less complex compared with other existing methods. The true positive and true negative rates are also presented. From our study, we can prove that the feature of eye-muscle signal is informative enough to distinguish a person from others.

Keywords— Artificial neural network, eye-muscle signal, electrooculogram, feature extraction, human identification, pattern recognition.

I. INTRODUCTION

Human identification system is imperative in many applications, especially for security system. Since each person has different characteristics, a person can be recognized by using biometrics. In security systems, finger print [1], voice [2], and face recognition [3] are usually applied. Furthermore, some electrical signals had been researched continually to obtain higher secured system, i.e. difficult to fake. For example, electroencephalogram (EEG) [4], Phonocardiogram (PCG) [5], Electrocardiogram (ECG) signals [6] and EOG signal [7].

EOG signal is generally extracted from EEG signal as in [8]. Numerous applications of EOG had been proposed [7], [9], [10]. By exploiting support vector machine (SVM) technique, the EOG signal can help diagnose eye dystonia disease based on the power spectrum density of the autoregressive model coefficients [9]. From [10], they also used SVM to help disabled people for controlling computer with EOG signal.

Later, M. Abo-Zahhad *et al.* [7] presented a technique to identify a human from EOG signal [8]. They used the Neurosky Mindwave headset in the data acquisition process. The output of this headset was an EEG signal. Therefore, they had to apply linear discriminant analysis in order to obtain

EOG signal. In addition, they reduced dimensions of signals by extracting the features: temporal lengths, amplitudes, and slopes. The features were classified into a few groups before analyzing. The results show that the features from the EOG signal of each person is individual. However, the complexity of this technique from data acquisition, feature extraction, and the cost of implementation are needed to be concerned.

In this paper, we present a human identification system based on an eye-muscle signal. The signal is acquired from a piezo electric transducer by converting mechanical energy to electrical energy. The signal recorded by our method is very similar to the EOG signal including while blinking. Thus, we can use the eye-muscle signal instead of the EOG signal. A DFT is then exploited to extract the feature of eye-muscle signal. In our system, an artificial neural network is applied to recognize the eye-muscle signal's feature from each person. According to the experimental results, the proposed system can distinguish a person from others by using the proposed system. The identification performance is of 85 percent. The outcomes of our work confirm that each person has their own particular eye-muscle movement, while the blinking occurs.

This article is organized as follows. We describe the entire proposed system in section II. This section consists of the data acquisition, the preprocessing, the feature extraction, and the pattern recognition stages. Section III presents the experiment including results and discussions. Finally, conclusion part is provided in section IV.

II. PROPOSED SYSTEM

In this section, we present our human identification system as illustrated in Fig. 1.

A. Eye-Muscle Signal Acquisition

A relationship between EOG signal and our eye-muscle signal is described in this part. An EOG signal is generated by eyeball or eyelid movement. It is generally recorded from electrodes attached around the eye. From [7], they use Neurosky Mindwave headset to acquire a signal. However, the headset is typically used to record an EEG signal. They hence need to extract EOG part by empirical mode decomposition (EMD) [8]. Considering at the EOG signal, when the eyeball rotates toward upper electrode, the positive pole of cornea moves closer to the electrode making the

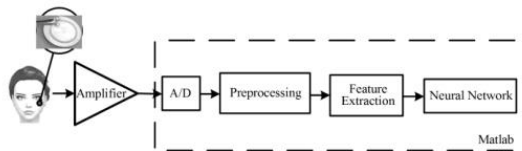


Fig. 1 Diagram of human identification system

magnitude of EOG signal increased. On the other hand, rotating the eye downward decreases the level of EOG signal. Fig. 2 illustrates the relationship between the eyeball movement and the amplitude of EOG signal. Another straightforward approach to obtain EOG signal is to place a number of electrodes around the eye as shown in Fig. 3(a) [11]. Although this method give EOG signal directly, it requires more sensors and also difficult to setup compared with earlier method.

In fact, an eye cannot rotate by itself. A human moves our eyes through the surrounded eye muscles, called extraocular muscles [12]. These muscles control every movement of the eyeball. Likewise, a human uses two muscles, which are the levator palpebrae superioris and the orbicularis oculi, to blink [13]. Consequently, muscles cause a ripple around the eye every time the blinking occurs. In this study, piezo electric transducer is used to measure this wave as an eye-muscle signal.

As suggested in [14], we directly place the piezo electric transducer next to an eye as shown in Fig. 3(b). A comparison between the eye-muscle signal and the EOG signal shown in Fig. 4 confirms that both signals are similar. In this fashion, our system can acquire the eye-muscle signal to substitute the use of EOG signal. The significant benefit of our approach is of using only one transducer for eye-muscle signal acquisition.

In this paper, we use piezo electric with the type of Piezoelectric diaphragm (size 18 mm.) in Fig.5(a) to convert mechanical energy to electrical energy. Due to a weak signal recorded from the piezo, the non-inverting amplifier strengthens its amplitude as illustrated in Fig.5(b). The gain of amplifier, A_v , can be computed as in (1).

$$A_v = 1 + R_2/R_1 \quad (1)$$

From (1), $R_1 = 10K \Omega$ and $R_2 = 100K \Omega$ are chosen to achieve the gain of 11.

Consequently, the eye-muscle signal obtained by the piezo is converted to the digital signal by using the data acquisition board (NATIONAL INSTRUMENT BNC-2110).

B. Preprocessing Stage

The first thing we have to do after receiving digital data is to remove unwanted parts, considered as noise. Due to a human blinks an eye at the limited frequency (a few Hertz), the data can be cleaned up by using low-pass filter. Fig. 6(a) and 6(b) illustrate the before and after preprocessing example

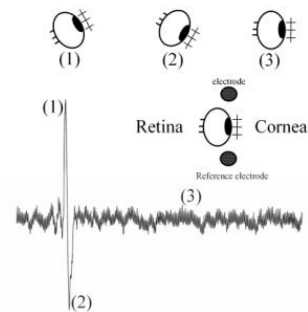


Fig. 2 Relationship between eyeball movement and EOG signal

of the eye-muscle signals, respectively. The signal is now ready for the following procedures.

C. Feature Extraction

A feature extraction stage is often exploited to reduce the dimensions of data making them more informative or computable. The perfect extraction method has to preserve the information needed while eliminating redundancies. The proposed system uses discrete Fourier transform (DFT) to find spectrum of data. The DFT transforms data from time to frequency domain. By using only a few low-frequency spectrums, the proposed system can recognize the pattern of an eye-muscle signal.

Let $x^i(n)$ represent an eye-muscle signal and $X^i(k)$ be their frequency domain counterpart of i th person where $n, k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ and $i = 1, 2, 3, \dots, L$. The DFT of the eye-muscle signal can be computed as

$$X^i(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x^i(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad (2)$$

From (2), the DFT provides a complex output, $X^i(k)$. The magnitude spectrums represented by $X_{mag}^i(k)$ can be calculated from (3). Given $\text{Re}[X^i(k)]$ and $\text{Im}[X^i(k)]$ denote real and imaginary parts of $X^i(k)$, respectively. Note that, $\text{sqr}(\cdot)$ stands for square root computation.

$$X_{mag}^i(k) = \left| X^i(k) \right| = \text{sqr} \left(\left\{ \text{Re}[X^i(k)] \right\}^2 + \left\{ \text{Im}[X^i(k)] \right\}^2 \right) \quad (3)$$

Since almost of the parts of magnitude spectrums are grouped at low frequencies, the higher frequencies can be neglected with insignificant consequences. Let $\hat{X}_{mag}^i(u)$ be the truncated magnitude spectrums where $u = 0, 1, 2, \dots, \tilde{N}$ and $\tilde{N} \ll N$. Equation (3) can be rewritten as shown in (4). We use the pattern of $\hat{X}_{mag}^i(u)$ to verify human in the next part.

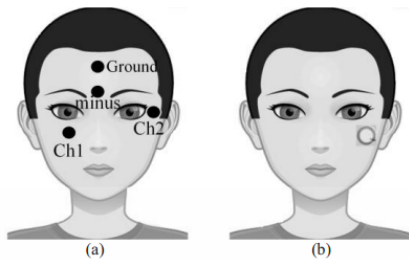


Fig. 3 Signal acquisitions (a) EOG using electrodes (b) Eye-muscle signal using piezo electric transducer

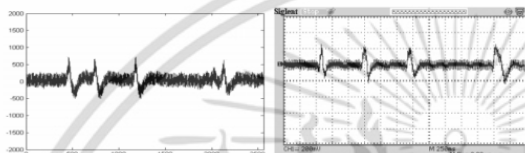


Fig. 4 Comparison between EOG signal (left) and eye-muscle signal (right)

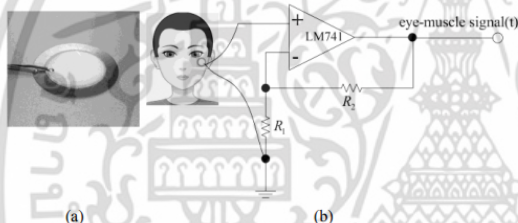


Fig. 5 (a) piezo electric transducer (b) Non Inverting Amplifier circuit

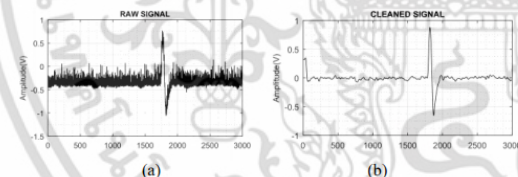


Fig. 6 (a) Raw eye-muscle signal (b) Eye-muscle signal after preprocessing

$$\hat{X}_{mag}^i(u) = [X_{mag}^i(0), X_{mag}^i(1), X_{mag}^i(2), \dots, X_{mag}^i(\tilde{N})]^T \quad (4)$$

D. Pattern Recognition

According to the extracted feature from previous subsection, an artificial neural network (ANN) with single-layer feed-forward architecture is employed as a decision-making process of system for its lowest complexity. We train the ANN to learn the different between each feature pattern of eye-muscle signal.

In supervising process, each node inside the ANN is fed by two categories of data, positive and negative data. The positive data is the right feature for current node. On the contrary, the negative data is the fault data to supervise ANN to deal with a problem when incoming data is incorrect.

Fig. 6(a) and 6b illustrate inside elements in each node for recognizing i th person and our ANN architecture for L people identification respectively. The number of people, L , indicates the number of nodes in the system. Each input is modified by weight function, denoted by $w^j(u)$, before passing through the node. Note that, the weight function is specific for each ANN node. We use the step function as the activating function for sharp and clear result. Lastly, each node calculates and makes a decision if it is a right person or not.

III. EXPERIMENTAL RESULTS

Previously, we propose the system which consists of data acquisition, feature extraction, and pattern recognition stages. In the system, ANN is supervised to recognize some known humans. The goal of the proposed system is to distinguish a person from others. Hence, we can see the performance by calculating the system accuracy.

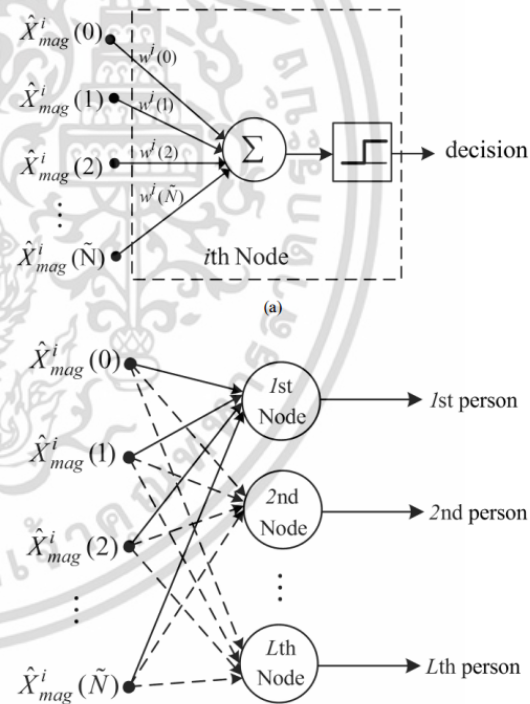


Fig. 6 (a) Diagram inside i th node of ANN (b) Architecture of ANN for recognizing L people

In the experiment, the proposed system is achieved in two cases, case I: using original dynamic range data, case II: using normalized dynamic range data. In both cases, An ANN is fed by 5 positive and 30 negative data for every person. Each eye-muscle signal is reduced its dimension from 1,000 to 40 points by feature extraction stage. We collected a lot of eye-muscle signals from many people. Table I shows the results of both cases.

From Table I, the true positive represents the situation that proposed system makes a right decision with the given person. The true negative is the opposite case that the system responses correctly when the input is the wrong person. As can be seen, the average accuracy of proposed system is about 85 percent. The normalization helps increasing true positive of the system as demonstrated in case II. However, case II shows that the normalized dynamic range data decrease the uniqueness of data from each person. The result of true negative value of case II is slightly less than the case I.

IV. CONCLUSIONS

This paper presents a human identification system from an eye-muscle signal. We use a piezo electric transducer to acquire the eye-muscle signal caused by rippling of muscle around the eye. This signal and EOG signal are mostly indistinguishable while blinking. In this manner, we can record the blinking pattern without difficulty compared with the existing approaches. Subsequently, the feature extraction stage reduces the dimension of data and makes it more informative. The discrete Fourier transform is exploited to obtain the spectrum of data and then keep only significant frequencies. Proposed system uses an artificial neural network to recognize the pattern of these features. According to experimental results, the system is able to identify a person with the accuracy around 85 percent.

TABLE I
TRUE POSITIVE, TRUE NEGATIVE, AND ACCURACY RATE OF PROPOSED SYSTEM TESTED WITH 10 PEOPLE FOR CASE I AND CASE II

Person No.	Case I			Case II		
	True Positive	True Negative	Acc. ¹ (%)	True Positive	True Negative	Acc. ¹ (%)
1	5/5	26/30	88.57	5/5	25/30	85.71
2	3/5	26/30	82.86	5/5	25/30	85.71
3	4/5	28/30	91.43	3/5	29/30	91.43
4	3/5	24/30	77.14	3/5	26/30	82.86
5	3/5	25/30	80.00	3/5	24/30	77.14
6	3/5	25/30	80.00	3/5	25/30	80
7	3/5	28/30	88.57	4/5	26/30	85.71
8	4/5	26/30	85.71	5/5	25/30	85.71
9	5/5	27/30	91.43	5/5	25/30	85.71
10	3/5	28/30	88.57	3/5	28/30	88.57
Avg.	72%	87.67%	85.43	78%	86%	84.86

¹Accuracy

We can conclude that the eye-muscle signal of human is unique enough for distinguishing between people. In addition, the discrete Fourier transform provides satisfied results in feature extraction stage. The experiment also show that normalizing data prior to pattern recognition stage improves a true positive chance. In contrast, normalization reduces a true negative rate marginally.

REFERENCES

- [1] V. Conti, G. Vitello, F. Sorbello, and S. Vitabile, "An advanced technique for user identification using partial fingerprint," *International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems*, pp.236-242, July 2013.
- [2] A. L. Higgins, L. G. Bahler, and J. E. Porter, "Voice identification using nearest-neighbor distance measure," *IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing*, Vol. 2, pp.375-378, April 1993.
- [3] C. Liu and S. Chin, "A face identification algorithm using two dimensional binary principal component analysis," *International Symposium on Computer Communication Control and Automation*, pp. 252-255, May 2010.
- [4] M. Poulos, M. Rangoussi, and N. Alexandris, "Neural network based person identification using EEG features," *Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. 2, pp.1117-1120, Mar 1999.
- [5] S. B. B. Kumar and M. Jagannath, "Analysis of phonocardiogram signal for biometric identification system," *International Conference on Pervasive Computing (ICPC)*, pp.1-4, Jan 2015.
- [6] J. Wu and Y. Zhang, "ECG identification based on neural networks", *International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing*, pp.92-96, Dec 2014.
- [7] M. Abo-Zahhad, S. M. Ahmed, and S. N. Abbas, "A novel biometric approach for human identification and verification using eye blinking signal," *IEEE signal processing letters*, Vol. 22, No. 7, pp.876-880, July 2015.
- [8] M. S. Reddy, A.Sammaiah, B. Narsimha, and K. S. Rao, "Analysis of EOG Signals using Empirical Mode Decomposition for eye Blink Detection," *International Conference on Multimedia and Signal Processing*, Vol. 2, pp.293-297, 2011.
- [9] S. Datta, A. Banerjee, M. Pal, A. Konar, D. D. Tibarewala, and R. Janarthanan, "Blink recognition to detect the possibility of eye dystonia based on electrooculogram analysis," *International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication (CIEC)*, pp.186-190, 2011.
- [10] A. M. S. Ang, Z. G. Zhang, Y. S. Hung, and J. N. F. Mak, "A user-friendly wearable single-channel EOG-based human-computer interface for cursor control," *International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering Montpellier*, pp.565-568, April 2015.
- [11] M. I. Rusydi, T. Okamoto, S. Ito, and M. Sasaki, "Rotation matrix to operate a robot manipulator for 2D analog tracking objects using electrooculography," *Robotic*, pp.289-309, 2014.
- [12] D. Kjellgren, *Human Extraocular Muscles*, Umeå University, 2004.
- [13] V. V. Nabokov, *The Eye: A Survey of Human Vision*, PediaPress, 2004.
- [14] C. Iber, S. Ancoli-Israel, A. L. Chesson, and S. F. Quan, *The AASM Manual for the Scoring of Sleep and Associated Events*, AASM manual for scoring sleep, 2007.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	อิสราภรณ์ โภคินโชติอนันต์
วัน เดือน ปีเกิด	28 พฤศจิกายน 2534
ประวัติการศึกษา	2556 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความสนใจเฉพาะด้าน	Signal Processing Artificial Neural Network Biomedical Engineering Data Analysis



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้