

การประยุกต์ใช้คุณลักษณะของใบหน้าแบบไฮบริดสำหรับการระบุตัวบุคคล

HYBRID FACIAL FEATURES WITH APPLICATION IN PERSONAL IDENTIFICATION



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2564

KMITL-2021-EN-D-018-032

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HYBRID FACIAL FEATURES WITH APPLICATION IN PERSONAL IDENTIFICATION



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTIRCAL ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2021
KMITL-2021-EN-D-018-032

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2021

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประยุกต์ใช้คุณลักษณะของใบหน้าแบบไฮบริด
นักศึกษา	สำหรับการระบุตัวบุคคล
รหัสประจำตัว	นาย บุญยชนะ ภูระหงษ์
ปริญญา	57601028
สาขาวิชา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
พ.ศ.	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	2564
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ (ร่วม)	ผศ.ดร. วันวิสา ชัชวงษ์
	รศ.ดร. ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้เสนอการระบุตัวบุคคลและการตรวจสอบตัวบุคคล โดยใช้พื้นฐานของโครงสร้างใบหน้าแบบสองมิติและแบบสามมิติจากรูปใบหน้า การเลือกรูปภาพใบหน้าจะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขความแตกต่างของแต่ละบุคคลในฐานข้อมูลรูปภาพ จุดสำคัญของใบหน้าแบบสองมิติใช้งานโดยไลบรารี 2D Dlib เป็นการนำจุดสำคัญของใบหน้าที่ได้มาสร้างโครงหน้าแบบสามมิติด้วยเทคนิคการแปลงเชิงเส้น ข้อดีของการระบุตัวตนด้วยใบหน้าแบบไฮบริดนี้คือคุณสมบัติไม่แปรเปลี่ยนต่อการแปลงอย่างสมบูรณ์ในระนาบสามมิติ โดยมีความคงทนต่อการแปลงเรขาคณิตแบบสัมพรรคและคงความเป็นเอกลักษณ์ คุณลักษณะของใบหน้าในสามมิตินี้ขึ้นอยู่กับโครงสร้างใบหน้าของแต่ละบุคคล การระบุตัวบุคคลจากโครงสร้างใบหน้าแบบไฮบริดสามารถหาได้จากคล้ายคลึงกันของคุณสมบัติใบหน้าแบบสองมิติและแบบสามมิติรวมกัน โดยการหาความแตกต่างกันของคุณสมบัติใบหน้าแบบสองมิติ คือ การหาระยะห่างระหว่างจุดสำคัญของภาพใบหน้าอ้างอิงและภาพใบหน้าการสอบทดสอบ ซึ่งถูกจัดแนวขอบภาพด้วยเมทริกซ์การแปลงรูปทางเรขาคณิต ส่วนการหาความแตกต่างกันของคุณสมบัติใบหน้าแบบสามมิติ คือ การคำนวณความแตกต่างของปริมาตรทรงพีระมิด ที่ถูกสร้างขึ้นจากจุดสำคัญของใบหน้าในการระบุหรือยืนยันตัวตน ผลลัพธ์ที่ได้จากการร่วมกันของคุณลักษณะของใบหน้าแบบสองมิติและโครงหน้าแบบสามมิติมีประสิทธิภาพอัลกอริทึมด้วยความแม่นยำ 99.98 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	Hybrid Facial Features with Application in Personal Identification
Student	Mr. Boonchana Purahong
Student ID.	57601028
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2021
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Vanvisa Chutchavong
Thesis Co-Advisor	Assoc. Prof. Dr. Chuchart Pintavirooj

ABSTRACT

This thesis presents the hybrid facial feature with identification and verification based on 2D and 3D facial images. A query facial image had taken under conditions different the facial image of the same person (as the query). The query facial image database was constructed. The technique of 2D Dlib facial landmarks using a direct linear transform technique. A set of absolute affine invariance had constructed from a series of 3D landmark quadruplets, which make the facial identification robust to affine geometric transformation. These 3D facial features serve as a coarse feature depend on each individual facial structure. The construct of 2D detail features are the edge facial image confined between 2D Dlib landmarks. The similarity of 2D feature is achieve by aligning the 2D query edge image against that of the reference edge image. The geometric transformation matrix is estimate from the 2D Dlib landmarks, where correspondence is well established. An identification/verification cost function using a combination of local 2D facial features and global 3D facial features is utilized to verify and identify a query facial image against a candidate facial image(s). The performance of the algorithm yields an area of 99.98%.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาและความเอื้อเฟื้อจากอาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.วันวิสา ชัชวงษ์ และ รศ. ดร. ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ คำแนะนำ ต่าง ๆ ตลอดจนให้ความรู้แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ ผศ. ดร. เตือนใจ อาชีวะพนิช และครอบครัวที่รักยิ่งของข้าพเจ้าที่คอย ช่วยเหลือ ในด้านต่าง ๆ รวมถึงคอยให้กำลังใจที่ให้เสมอมา

I really appreciate Prof. Dr. Hisayuki AOYAMA for the continuous support of my oversea study and related research, for his patient, motivation, and immense knowledge.

ขอขอบคุณ นายอนิวัฒน์ จูห้อง และนายไอศูรย์ กาญจนสุรัตน์ ที่คอยช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และเติมเต็มวิทยานิพนธ์นี้จนสมบูรณ์

สำหรับคุณค่าความดีอันใดและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแต่ ผู้มีพระคุณทุกท่าน

บุญยชนะ ภูระหงษ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ใบหน้า.....	4
2.2 ภาพดิจิทัล.....	5
2.3 การประมวลผลภาพ.....	8
2.4 การแปลงเรขาคณิตของภาพ.....	15
2.5 คุณสมบัติที่ไม่แปรเปลี่ยนทางเรขาคณิต.....	26
2.6 การวัดและประเมินผลทางภาพ.....	30
2.7 DIRECT LINEAR TRANSFORMATION.....	31
2.8 ทบทวนวรรณกรรม.....	33
บทที่ 3 การออกแบบการทดลอง.....	35
3.1 บทนำ.....	35
3.2 การออกแบบกล้องถ่ายภาพใบหน้าแบบสามมิติ.....	36
3.3 การออกแบบวิธีการระบุตัวบุคคลด้วยใบหน้าแบบสองมิติ.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การออกแบบวิธีการสร้างตัวแปรการแปลงแบบสามมิติ	38
3.5 การออกแบบวิธีการระบุตัวบุคคลด้วยใบหน้าแบบสามมิติ	38
3.6 การออกแบบขั้นตอนการหาค่าความผิดพลาดแบบไฮบริด	39
บทที่ 4 ผลการทดลอง	41
4.1 ผลลัพธ์การสร้างกล้องถ่ายแบบสามมิติ	41
4.2 ผลลัพธ์การระบุตัวบุคคลด้วยใบหน้าแบบสองมิติ	42
4.3 ผลการสร้างตัวแปรการแปลงแบบสามมิติ	45
4.4 ผลลัพธ์การระบุตัวบุคคลด้วยใบหน้าแบบสามมิติ	46
4.5 การหาค่าความผิดพลาดแบบไฮบริด	49
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	50
5.1 สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง	50
5.2 ข้อเสนอแนะ	50
บรรณานุกรม	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สรุปลักษณะของการแปลงเรขาคณิตแบบเชิงเส้น	25
4.1 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของระยะทาง	44
4.2 ผลลัพธ์ของกระบวนการระบุตัวบุคคลด้วยใบหน้าแบบสองมิติ	45
4.3 ผลลัพธ์การเปรียบเทียบความเหมือนกันของโครงหน้าแบบสามมิติ	48
4.4 ผลลัพธ์ของกระบวนการระบุตัวบุคคลด้วยใบหน้าแบบสามมิติ	49
4.5 ค่า α และประสิทธิภาพของการระบุตัวบุคคล	49



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การกำหนดจุด 68 จุดบนใบหน้าและโครงหน้าของมนุษย์	4
2.2 จำลองซ้อนภาพ	5
2.3 ภาพขาวดำ	6
2.4 ภาพระดับเทา	7
2.5 ภาพสี	8
2.6 ฮิสโตแกรม	10
2.7 ภาพคอนทราสต์	11
2.8 ตัวอย่างการปรับคอนทราสต์แบบ Linear contrast stretch	12
2.9 ตัวอย่างฮิสโตแกรมก่อนและหลังของวิธี Histogram Equalization	13
2.10 ภาพก่อนและหลังการทำ Adaptive histogram equalization	13
2.11 ภาพก่อนและหลังการทำ Contrast Limited adaptive histogram equalization	14
2.12 พิกัดจุดสังเกตบนใบหน้า 68 จุด	15
2.13 พิกัดจุดสังเกตบนใบหน้า 68 จุด	18
2.14 การสเกลภาพ	20
2.15 การหมุนภาพ	21
2.16 การบิดภาพ	22
2.17 การแปลงเรขาคณิตแบบไม่เป็นเชิงเส้น	26
2.18 การแปลงแบบคงรูป	28
2.19 การแปลงแบบเหมือน	29
2.20 การแปลงแบบสัมพันธ์	30
2.21 กรอบอ้างอิงพื้นที่วัตถุและระนาบภาพและระบบพิกัดที่เกี่ยวข้อง	32
2.22 การถ่ายภาพจุดที่ไม่รู้จัก	32
3.1 ระบบการระบุตัวบุคคล	35
3.2 การออกแบบกล้องถ่ายภาพ	36
3.3 ขั้นตอนการระบุตัวบุคคลด้วยใบหน้าแบบสองมิติ	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และแจ้งอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 การกำหนดจุด 68 จุดบนใบหน้าและโครงหน้าของมนุษย์	38
3.5 ขั้นตอนการระบุตัวบุคคลด้วยภาพใบหน้าแบบสามมิติ	39
3.6 ขั้นตอนการหาค่าความผิดพลาดแบบไฮบริด	40
4.1 กล้องเว็บแคมสำหรับใช้ในขั้นตอนการเก็บข้อมูลภาพถ่ายใบหน้า	41
4.2 สภาพแวดล้อมการเก็บข้อมูลภาพ	42
4.3 ผลลัพธ์การสกัดคุณลักษณะของภาพใบหน้าแบบสองมิติด้วยไลบรารี 2D Dlib	43
4.4 ภาพใบหน้าที่ผ่านกระบวนการลบพื้นหลัง	44
4.5 ภาพใบหน้าที่ผ่านกระบวนการหาขอบภาพ	45
4.6 การกำหนดมุมกล้องไปรงแสงรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส	45
4.7 ผลลัพธ์การจำลองกล้องไปรงแสงรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส	46
4.8 ผลลัพธ์การใช้ไลบรารี 2D Dlib ทั้งสองใบหน้า	46
4.9 ผลลัพธ์การสร้างภาพแบบสามมิติจากจุดสำคัญบนใบหน้า	47
4.10 ผลลัพธ์ของการสร้างโครงหน้าแบบสามมิติ	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

บทที่ 1 เป็นการกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษารวมถึงทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย รวมถึงขั้นตอนการศึกษาของงานวิจัย

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเข้าถึงงานหรือทรัพยากรบางประเภทจำเป็นต้องมีระดับการเข้าถึงข้อมูล รวมถึงการระบุตัวบุคคล แต่ปัญหาการเข้าถึงข้อมูลอาจเกิดจากหลายกรณี เช่น การลี้ภัยหรือการซ่อนตัว หรือรหัสผ่าน รวมถึงการทำอุปกรรมในการยืนยันตัวบุคคลหาย หรือการปลอมแปลงอุปกรรมนั้น ๆ

คุณลักษณะทางชีวภาพ หรือ ไบโอมेटริกซ์ (Biometric) คือ การวัดและการวิเคราะห์ข้อมูลทางกายภาพของเอกลักษณ์และคุณลักษณะของพฤติกรรมแต่ละบุคคล เทคโนโลยีส่วนใหญ่ใช้สำหรับการระบุตัวบุคคลและการเข้าถึงบางอย่างในระบบควบคุม ไบโอมेटริกซ์มีสองประเภท ได้แก่ ลักษณะพฤติกรรม เช่น รูปแบบการเดิน และลักษณะทางสรีรวิทยา เช่น ลายนิ้วมือ ม่านตา รูปร่างของมือ รหัสพันธุกรรม (Deoxyribonucleic acid, DNA) หรืออัตราส่วนของใบหน้า เป็นต้น คุณลักษณะที่สำคัญของคุณลักษณะทางชีวภาพสำหรับการใช้ในการยืนยันตัวบุคคลที่กล่าวมานั้นมีความหลากหลายและแตกต่างกันไปในแต่ละตัวบุคคล

หนึ่งในความท้าทายของปัญหาของการมองเห็นทางคอมพิวเตอร์ คือ การจดจำใบหน้าของมนุษย์แบบอัตโนมัติ ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากในการทดลองจริง นอกจากนี้ยังมีหลายงานวิจัยที่นำการจดจำใบหน้าของมนุษย์ไปใช้ในงานต่าง ๆ เช่น ระบบกล้องวงจรปิด การวิเคราะห์ข้อมูลทางนิติวิทยาศาสตร์ การดึงข้อมูลจากฐานข้อมูลในแผนกตำรวจ การบังคับใช้กฎหมาย การปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับคอมพิวเตอร์ และการรักษาความปลอดภัยหรือการควบคุมการเข้าออกสถานที่

ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น จึงเป็นแนวทางให้ผู้วิจัยศึกษาวิเคราะห์และออกแบบแนวทางแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ด้วยการนำเสนอการระบุตัวบุคคลโดยการใช้รูปการผสมผสานกันระหว่างใบหน้าแบบสามมิติและใบหน้าแบบสองมิติร่วมกับคุณลักษณะทางเรขาคณิต ซึ่งเป็นการนำเอาข้อดีของคุณลักษณะทางชีวภาพที่มีความเป็นเอกลักษณ์ในแต่ละคน และความต้านทานต่อการเสีรूपของคุณลักษณะทางเรขาคณิตมาใช้ร่วมกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีความมุ่งหมายเพื่อออกแบบการระบุตัวบุคคลโดยใช้คุณสมบัติทางเรขาคณิตของใบหน้าแบบสองมิติและสามมิติโดยมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

1. เพื่อออกแบบอุปกรณ์สำหรับการบันทึกภาพใบหน้าแบบสามมิติ
2. เพื่อออกแบบการสกัดคุณลักษณะทางเรขาคณิตของใบหน้าแบบสองมิติ
3. เพื่อออกแบบการสกัดคุณลักษณะทางเรขาคณิตของใบหน้าแบบสามมิติ
4. เพื่อระบุตัวบุคคลโดยการใช้ลักษณะใบหน้าแบบสองมิติ
5. เพื่อระบุตัวบุคคลโดยการใช้ลักษณะใบหน้าแบบสามมิติ
6. เพื่อระบุตัวบุคคลโดยการใช้ลักษณะใบหน้าแบบสองมิติและสามมิติร่วมกัน
7. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการระบุตัวบุคคลโดยการใช้ลักษณะใบหน้าแบบสองมิติ การระบุตัวบุคคลโดยการใช้ลักษณะใบหน้าแบบสามมิติและระบุตัวบุคคลโดยการใช้ลักษณะใบหน้าแบบสองมิติและสามมิติร่วมกัน

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

1. การออกแบบรูปแบบการเก็บภาพถ่ายใบหน้า ซึ่งใช้ในงานวิจัยสามารถนำมาใช้ในการเก็บรูปทั้งแบบสองมิติและแบบสามมิติ รวมถึงสามารถนำไปใช้ในการสกัดคุณลักษณะทางเรขาคณิตของใบหน้าแบบสองมิติและแบบสามมิติได้
2. การสกัดคุณลักษณะทางเรขาคณิตของใบหน้าแบบสองมิติสามารถนำมาใช้ในการระบุตัวบุคคลโดยการใช้ลักษณะใบหน้าแบบสองมิติได้และมีค่าความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้
3. การสกัดคุณลักษณะทางเรขาคณิตของใบหน้าแบบสามมิติสามารถนำมาใช้ในการระบุตัวบุคคลโดยการใช้ลักษณะใบหน้าแบบสามมิติได้และมีค่าความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้
4. การสกัดคุณลักษณะทางเรขาคณิตของใบหน้าแบบสองมิติและแบบสามมิติสามารถนำมาใช้ในการระบุตัวบุคคลโดยการใช้ลักษณะใบหน้าแบบสองมิติและแบบสามมิติร่วมกันได้และมีค่าความแม่นยำอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

แนวคิดที่ใช้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ นำเอาหลักการของค่าความแตกต่างของระยะทางระหว่างจุดสำคัญบนใบหน้าแบบสองมิติและค่าความแตกต่างของปริมาตรที่เกิดจากจุดสำคัญบนใบหน้าแบบสามมิติระหว่างภาพต้นแบบและภาพที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบ โดยเริ่มจากการถ่ายภาพด้วยกล้องสองตัว แล้วนำภาพแต่ละภาพผ่านกระบวนการสกัดคุณลักษณะใบหน้าแบบสองมิติด้วย 2D Dlib จากนั้นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำจุดสำคัญของทั้งสองภาพมาคำนวณหาเมทริกซ์การแปลงเรขาคณิต เพื่อสร้างใบหน้าเป็นภาพสามมิติ จากนั้นนำค่าความต่างของระยะทางระหว่างจุดสำคัญบนใบหน้าแบบสองมิติ และค่าความแตกต่างของปริมาตรที่เกิดจากจุดสำคัญบนใบหน้าแบบสามมิติระหว่างภาพต้นแบบและภาพที่ต้องการนำมาเปรียบเทียบ

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. ออกแบบวิธีการสร้างระยะทางระหว่างจุดสำคัญบนใบหน้าแบบสองมิติ
2. ออกแบบวิธีการคำนวณระยะทางระหว่างจุดสำคัญบนใบหน้าแบบสองมิติ
3. ออกแบบวิธีการสร้างปริมาตรระหว่างจุดสำคัญบนใบหน้าแบบสามมิติ
4. ออกแบบวิธีการคำนวณปริมาตรระหว่างจุดสำคัญบนใบหน้าแบบสามมิติ
5. ออกแบบวิธีการเปรียบเทียบระยะทางระหว่างจุดสำคัญบนใบหน้าแบบสองมิติของใบหน้าสองใบหน้าที่
6. ออกแบบวิธีการเปรียบเทียบปริมาตรระหว่างจุดสำคัญบนใบหน้าแบบสามมิติของใบหน้าสองใบหน้าที่
3. ออกแบบวิธีการระบุตัวบุคคลโดยการผสมกันของใบหน้าแบบสองมิติและสามมิติ

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ขั้นตอนของการศึกษาการระบุตัวบุคคลโดยใช้คุณสมบัติทางเรขาคณิตของใบหน้าแบบไฮบริด มี 7 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบุตัวบุคคลโดยใช้ใบหน้าแบบสองมิติ
2. ค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบุตัวบุคคลโดยใช้ใบหน้าแบบสามมิติ
3. ค้นคว้าและศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการระบุตัวบุคคลโดยใช้ใบหน้าแบบไฮบริด
4. ออกแบบวิธีการระบุตัวบุคคลโดยใช้ใบหน้าแบบสองมิติและสามมิติ
5. ทดลองวิธีการระบุตัวบุคคลโดยใช้ใบหน้าแบบสองมิติและสามมิติ
6. ประเมินผลการทดลองวิธีการระบุตัวบุคคลโดยใช้ใบหน้าแบบสองมิติและสามมิติ
7. สรุปผลการทดลองวิธีการระบุตัวบุคคลโดยใช้ใบหน้าแบบสองมิติและสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

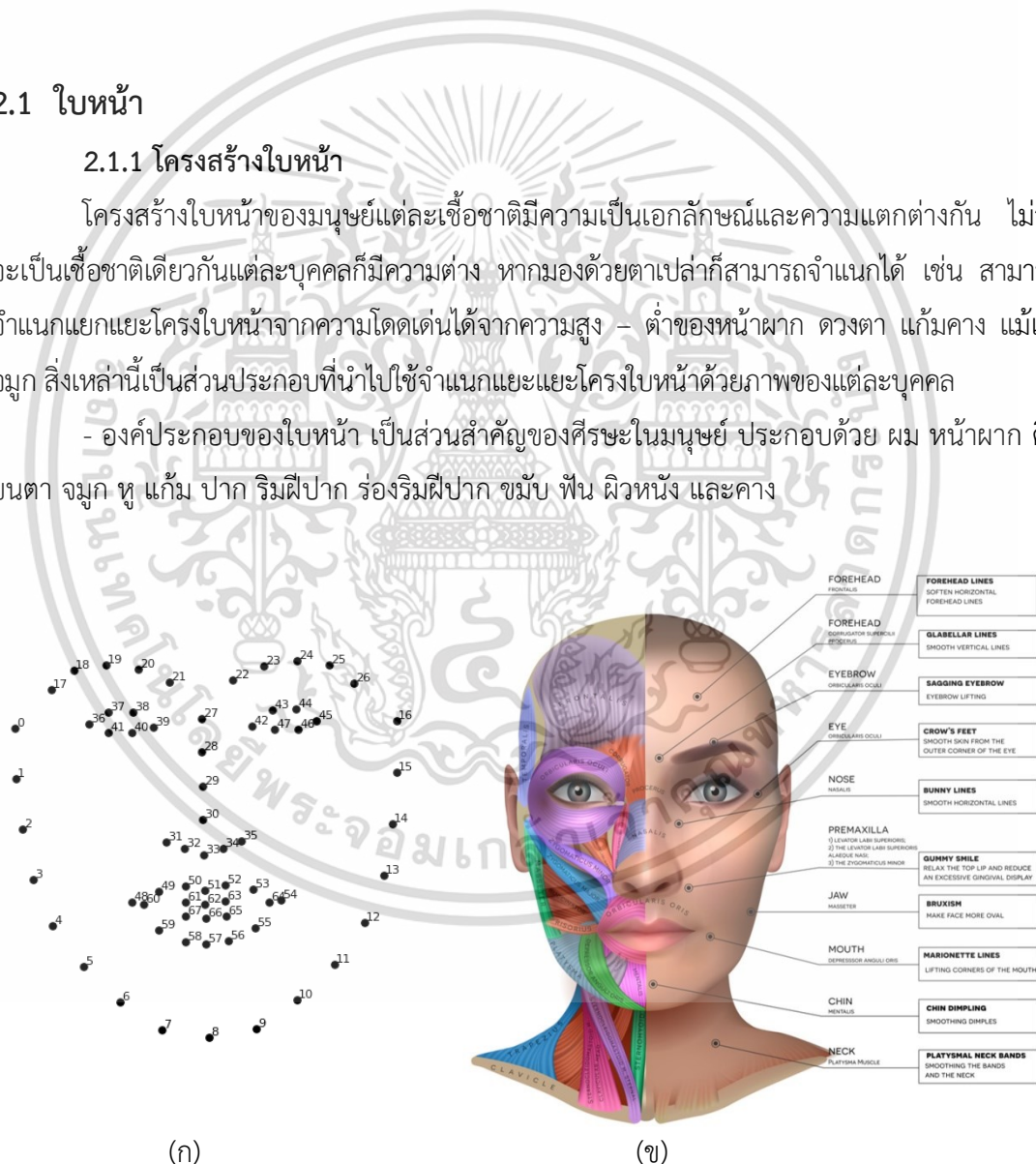
บทที่ 2 เป็นการกล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรม งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่นำมาใช้ใน งานวิจัย ประกอบด้วย ทฤษฎีเกี่ยวกับใบหน้า โครงสร้างใบหน้า ภาพดิจิทัล การประมวลผลภาพ การประมวลผลภาพ คุณสมบัติที่ไม่แปรเปลี่ยนทางเรขาคณิต การวัดและประเมินผลทางภาพ และ ท้ายเป็นการทบทวนวรรณกรรม

2.1 ใบหน้า

2.1.1 โครงสร้างใบหน้า

โครงสร้างใบหน้าของมนุษย์แต่ละเชื้อชาติมีความเป็นเอกลักษณ์และความแตกต่างกัน ไม่ว่าจะ เป็นเชื้อชาติเดียวกันแต่ละบุคคลก็มีความต่าง หากมองด้วยตาเปล่าก็สามารถจำแนกได้ เช่น สามารถ จำแนกแยกแยะโครงใบหน้าที่โดดเด่นได้จากความสูง – ต่ำของหน้าผาก ดวงตา แก้มคาง แม้แต่ จมูก สิ่งเหล่านี้เป็นส่วนประกอบที่นำไปใช้จำแนกแยะแยะโครงใบหน้าที่ด้วยภาพของแต่ละบุคคล

- องค์ประกอบของใบหน้า เป็นส่วนสำคัญของศีรษะในมนุษย์ ประกอบด้วย ผม หน้าผาก คิ้ว ขนตา จมูก หู แก้ม ปาก ริมฝีปาก ร่องริมฝีปาก ขมับ ฟัน ผิวหนัง และคาง

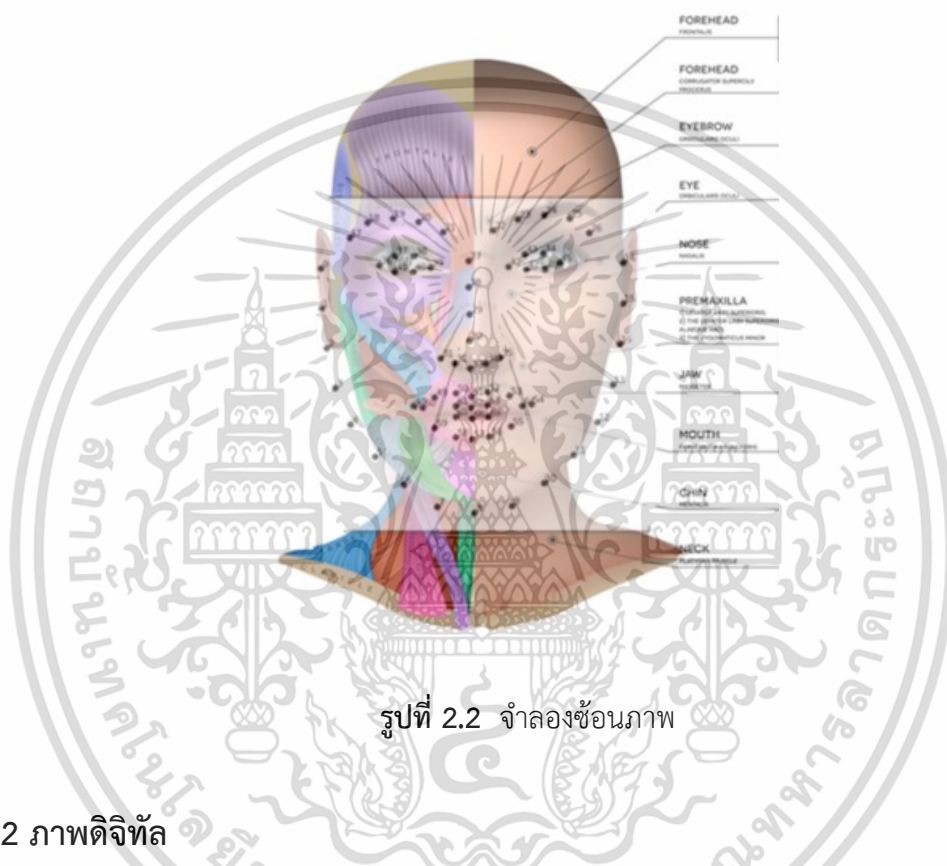


รูปที่ 2.1 การกำหนดจุด 68 จุดบนใบหน้าและโครงหน้าของมนุษย์ [http://dlib.net/ และ

info@doctorhopeplasticsurgery.com]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีการกำหนดคุณลักษณะสำคัญบนใบหน้า ซึ่งใบหน้าของคนแต่ละคน มีจุดที่สามารถกำหนด 68 จุดบนใบหน้า ซอฟต์แวร์จะทำหน้าที่ในการประมวลผลภาพใบหน้าโดยตรวจสอบจุดสำคัญจากโครงร่างของใบหน้า ระยะห่างระหว่างตา ความกว้างของจมูก สันจมูก ความลึกของเบ้าตา ความกว้างของโหนกคิ้ว รูปร่างของโหนกแก้ม มุมปาก หรือแม้กระทั่งความยาวของแนวกราม จุดที่สำคัญเหล่านี้ วัดโดยการสร้างรหัสการคำนวณที่เรียกว่า Faceprint



รูปที่ 2.2 จำลองซ้อนภาพ

2.2 ภาพดิจิทัล

ภาพดิจิทัลสามารถนิยามเป็นฟังก์ชันสองมิติ $f(x,y)$ เป็นการแทนข้อมูลภาพในระนาบสองมิติ ซึ่งมีหน่วยที่เล็กที่สุดเรียกว่า จุดภาพหรือพิกเซล (Pixel) โดยที่ x และ y เป็นพิกัดของภาพ และแอมพลิจูดของ f ที่พิกัด x, y ใดๆ ภายในภาพคือค่าความเข้มแสงของภาพ (Intensity) ที่ตำแหน่งนั้นๆ และเมื่อ x,y และแอมพลิจูดของ f เป็นค่าจำกัด (Finite value) จึงเรียกรูปภาพนี้ว่าเป็นภาพดิจิทัล (Digital Image) ค่าของ $f(x,y)$ แทนระดับความสว่างที่ตำแหน่ง (x,y) ซึ่งภาพนี้มีขนาด $m \times n$ ถ้ากำหนดให้ภาพ $f(x,y)$ มีขนาด M แถวและ N คอลัมน์ พิกัดของจุดกำเนิด (Origin) ของภาพคือที่ตำแหน่ง $(x,y) = (0,0)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1. ภาพขาวดำ (Binary image)

ภาพถ่ายขาวดำ หรือภาพไบนารีแสดงข้อมูลของภาพเพียงสองสีด้วยกันคือสีขาวและสีดำ ที่เรียกกันว่าภาพถ่ายโทนสีเดียว เป็นภาพที่มีสองเฉดสีเท่านั้น การถ่ายภาพชนิดนี้ผลักดันให้ช่างภาพคิดมากกว่าเพียงเรื่องสี และทำการสำรวจรูปร่าง พื้นผิว และโทนของสภาพแวดล้อม กล่าวคือในแต่ละพิกเซลของภาพถูกแทนค่าด้วยเลขฐาน 2 คือ 0 และ 1 จำนวน 1 บิต โดยที่ 0 หมายถึงสีดำ และ 1 หมายถึงสีขาว ภาพขาวดำมีตัวอย่างดังแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ภาพขาวดำ [<https://www.hisour.com/binary-image-27221/>]

2.2.2. ภาพระดับความเข้มเทา (Gray scale image)

ภาพเกรย์สเกลหรือภาพระดับสีเทา คือภาพ ขาว-ดำ-เทา โดยจะมีระดับความเข้มแสงในแต่ละระดับที่แตกต่างกันออกไปตั้งแต่ระดับขาว เทาและดำ โดยทั่วไปภาพระดับความเข้มเทาถูกแบ่งออกเป็น 8 บิต หรือกล่าวคือถูกแบ่งระดับความเข้มเทาออกเป็น 256 ระดับ หากพิกเซลนั้นค่าความเข้มเทาเท่ากับ 0 พิกเซลดังกล่าวมีสีเป็นสีดำ ในทางกลับกัน หากพิกเซลนั้นค่าความเข้มเทาเท่ากับ 255 ภาพที่แต่ละพิกเซลมีค่าความเข้มเทา พิกเซลดังกล่าวมีสีเป็นสีขาว จากการแปลงสีเทา คือ 0 ถึง 255 (8-bit) ภาพเกรย์สเกลเกิดจากการแปลงภาพสี RGB มาเป็น Grayscale โดยใช้สูตรทางคณิตศาสตร์ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Gray} = 0.299 \times R + 0.587 \times G + 0.114 \times B$$

เมื่อ Gray : ค่าความเข้มของสีเทา มีค่า 0 -255

ตัวอย่างของรูปภาพระดับความเข้มเทาแสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ภาพระดับเทา

2.2.3. ภาพสี

สี (COLOR) หมายถึง ลักษณะกระทบต่อสายตาให้เห็นเป็นสี การที่ได้เห็นสีจากสายตา สายตาจะส่งความรู้สึกไปยังสมองทำให้เกิดความรู้สึก จาก ภาพสี คือภาพที่ประกอบด้วยภาพระดับเทาประกอบด้วยแม่สีของแสง (RGB) เกิดจากการหักเหของแสงผ่านแท่งแก้วปริซึม มี 3 สี คือ สีแดง สีเหลือง และสีน้ำเงิน อยู่ในรูปของแสงรังสี ซึ่งเป็นพลังงานชนิดเดียวที่มีสี คุณสมบัติของแสงสามารถนำมาใช้ ในการถ่ายภาพ ภาพโทรทัศน์ การจัดแสงสีในการแสดงต่าง ๆ แม่สีแสงหลัก 3 สี ซ้อนกันที่ประกอบด้วย สีแดง (Red) สีน้ำเงิน (Blue) และสีเขียว (Green) ซึ่งเมื่อผสมกันจะทำให้เกิดสีจำนวนมากและเมื่อนำมารวมกันที่ความเข้มสูงสุดจะได้สีขาว ผลของภาพสีที่ผู้เห็นจะประกอบจากพิเซล ซึ่งแต่ละพิเซลแสดงผลของค่าความเข้มสีในแต่ละแถบสีนั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งแสดงค่าพิเซลในภาพสี



รูปที่ 2.5 ภาพสี [5]

2.3 การประมวลผลภาพ

2.3.1 จุดสนใจของภาพ (Region of Interest)

ปัจจุบันกล้องดิจิทัลมีอัตราการใช้งานเพิ่มมากขึ้นด้วยเป็นกล้องที่มีฟังก์ชันการใช้งานง่าย มีจำหน่ายในท้องตลาดเพิ่มขึ้นและมีการพัฒนาเทคโนโลยีเซ็นเซอร์จึงทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ มากมายรวมถึงจอร์ับภาพพิกเซลที่ใหญ่และจำนวนพิกเซลมากขึ้นภายในเซ็นเซอร์เดียว โดยปกติกำหนดเป็นขนาดของภาพที่เซ็นเซอร์สามารถจับได้นั้นคือจำนวนพิกเซลในแนวตั้งคูณด้วยจำนวนพิกเซลในแนวนอน การมีพิกเซลที่มีจำนวนมากอาจส่งผลให้ได้ภาพที่มีคุณภาพสูงและทำให้การซูมดิจิทัลเป็นจริงได้

การประมวลผลภาพที่ขนาดภาพใหญ่ขึ้นไม่ได้เป็นประโยชน์ทุกกรณี ถ้าไม่สนใจในรายละเอียดเล็ก ๆ หรือต้องการการวัดที่แม่นยำในภาพควรใช้รูปภาพที่มีขนาดเล็ก เหตุผล คือเมื่อเริ่มประมวลผลภาพต้องประมวลผลแต่ละพิกเซล โดยทำการคำนวณในแต่ละพิกเซล เนื่องจากพิกเซลจำนวนมากจึงเพิ่มการดำเนินการกระทำทางคณิตศาสตร์มากตามซึ่งจะแปรผกผันตรง หากต้องการได้ผลประมวลผลอย่างรวดเร็วซึ่งจะเป็นการระกการคำนวณการกระทำทางคณิตศาสตร์ที่สูงในคอมพิวเตอร์ที่ทำการประมวลผลนั้น ตัวอย่างเช่น

เมื่อได้ภาพที่มีขนาด 500×500 พิกเซล หมายความว่า

$$500 \times 500 = 250,000 \text{ พิกเซล}$$

ขณะนี้กำลังประมวลผลวิดีโอที่มี 50 ภาพต่อวินาที นั้นหมายความว่าต้องประมวลผล

$$50 \times 250,000 = 12,500,000 \text{ พิกเซลต่อวินาที}$$

ดังนั้นอัลกอริทึมที่ใช้ต้องมีการกระทำดำเนินการทางคณิตศาสตร์ 10 ครั้งต่อพิกเซล

โดยรวมแล้วคอมพิวเตอร์ต้องดำเนินการกระทำ

$$10 \times 12,500,000 = 125,000,000$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดำเนินการต่อวินาที นั้นเป็นผลภาระที่เครื่องคอมพิวเตอร์จะดำเนินการทำงานที่สำคัญสำหรับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพในการประมวลผล ดังนั้นเมื่อเลือกกล้องที่จะใช้ ควรเลือกให้มีความเหมาะสมกับการกระทำเพื่อการประมวลผล [7]

นอกเหนือจากการเลือกกล้องที่มีขนาดของตัวรับภาพต่อขนาดที่เหมาะสมแล้ว ควรพิจารณาแนะนำขอบเขตของความสนใจ (ROI) พื้นที่ที่น่าสนใจคือตัวอย่างภายในชุดข้อมูลที่ระบุเพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะ ด้วย ROI เป็นเพียงพื้นที่ (ปกติคือสี่เหลี่ยมผืนผ้า) ภายในภาพซึ่งกำหนดพิกเซลที่สนใจ แนวคิดของ ROI มักถูกนำไปใช้ในหลาย ด้านของแอปพลิเคชัน ตัวอย่างเช่นในการถ่ายภาพทางการแพทย์ขอบเขตของเนื้องอกอาจถูกกำหนดไว้บนรูปภาพหรือในปริมาตรเพื่อจุดประสงค์ในการวัดขนาด อาจมีการกำหนดเส้นขอบของเยื่อหุ้มหัวใจในภาพบางที่อาจอยู่ในช่วงระยะต่างๆ ของวงจรการเต้นของหัวใจตัวอย่างเช่น end-systole และ end-diastole เพื่อวัตถุประสงค์ในการประเมินการทำงานของหัวใจ ในระบบข้อมูลทางภูมิศาสตร์ (GIS) ROI สามารถนำมาใช้เป็นการเลือกรูปหลายเหลี่ยมจากแผนที่ 2 มิติได้อย่างแท้จริง ในการมองเห็นด้วยคอมพิวเตอร์และการรู้จำอักขระด้วยแสง ROI มีการกำหนดขอบเขตของวัตถุภายใต้การพิจารณา ในหลายแอปพลิเคชัน บ้ายสัญลักษณ์ (ข้อความ) จะถูกเพิ่มลงใน ROI เพื่ออธิบายเนื้อหาในลักษณะที่กะทัดรัด ภายใน ROI อาจเป็นจุดสนใจ (POI) ของแต่ละบุคคล พิกเซลเหล่านั้นที่ไม่รวมอยู่ในพื้นที่จะถูกละเว้นทั้งหมด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการประมวลผลน้อยลง

2.3.2 ฮิสโตแกรมของภาพ (Histogram)

สำหรับฮิสโตแกรมที่ใช้ในการประมวลผลภาพดิจิทัลโปรดดูฮิสโตแกรมของภาพและฮิสโตแกรมสี ฮิสโตแกรมฮิสโตแกรม นิยมใช้ในการนำเสนอข้อมูลในลักษณะกราฟแท่งซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล โดยคำว่าข้อมูลหมายถึงจำนวนพิกเซล ในแต่ละความสว่างต่าง ๆ หรือข้อมูลค่าสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน ของการมาถึงต่อนาที่ svg หนึ่งในเจ็ดเครื่องมือพื้นฐานที่มีคุณภาพ อธิบายครั้งแรกโดย Karl Pearson จุดประสงค์เพื่อประเมินการแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวแปรที่กำหนดโดยการแสดงความถี่ของการสังเกตที่เกิดขึ้นในช่วงค่าบางช่วง

ฮิสโตแกรมเป็นการแสดงการกระจายของข้อมูลตัวเลขโดยประมาณ ได้รับการแนะนำครั้งแรกโดย Karl Pearson [1] ในการสร้างฮิสโตแกรมขั้นตอนแรกคือการ "ที่เก็บข้อมูล" (หรือ "bin") ช่วงของค่านั้นคือแบ่งช่วงของค่าทั้งหมดออกเป็นชุดของช่วงเวลาจากนั้นนับจำนวนค่าที่อยู่ในแต่ละช่วงเวลา โดยปกติที่เก็บข้อมูลจะถูกระบุเป็นช่วงเวลาที่ไม่ทับซ้อนกันและไม่ทับซ้อนกันของตัวแปร ที่เก็บข้อมูล(ช่วงเวลา) ต้องอยู่ติดกันและมักจะมีขนาดเท่ากัน (แต่ไม่จำเป็นต้องมี) [2]

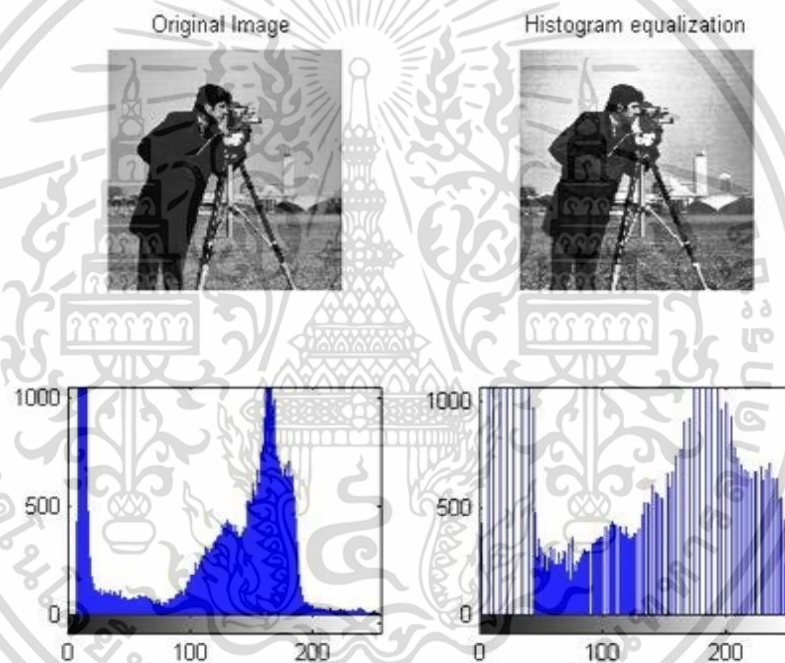
หากที่เก็บข้อมูลมีขนาดเท่ากันกราฟของข้อมูลเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าจะถูกสร้างขึ้นบนที่เก็บข้อมูลโดยมีความสูงเป็นสัดส่วนกับความถี่ - จำนวนกราฟของข้อมูลในแต่ละที่เก็บข้อมูล นอกจากนี้ฮิสโตแกรมอาจถูกทำให้เป็นมาตรฐานเพื่อแสดงความถี่ "สัมพัทธ์" จากนั้นจะแสดงสัดส่วนของกรณีที่อยู่ในแต่ละประเภทโดยผลรวมของความสูงเท่ากับ 1 ฮิสโตแกรมให้ความรู้สึกคร่าวๆเกี่ยวกับความ

หนาแน่นของการกระจายพื้นฐานของข้อมูลและบ่อยครั้งสำหรับการประมาณความหนาแน่น: การเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของตัวแปรที่อยู่เบื้องหลัง พื้นที่ทั้งหมดของฮิสโตแกรมที่ใช้สำหรับความหนาแน่นของความน่าจะเป็นจะถูกทำให้เป็นมาตรฐานเสมอเป็น 1 หากความยาวของช่วงเวลาบนแกน x เป็น 1 ทั้งหมดฮิสโตแกรมจะเหมือนกับพล็อตความถี่สัมพัทธ์

ซึ่งในส่วนการแสดงผลของรูปภาพดิจิทัลในภาพระดับเทาซึ่งในแกนนอนของฮิสโตแกรมแสดง ความสว่างที่มีความสว่างตั้งแต่ 0 - 255 กล่าวคือ ค่าทางด้านซ้ายของกราฟมีผลทำให้ภาพมีสีเข้มเข้าใกล้สีดำ ส่วนค่าทางด้านขวาของกราฟมีผลทำให้ภาพสว่างเข้าใกล้สีขาว ส่วนบริเวณตรงกลางกราฟแสดงส่วนน้ำหนักรายกลาง และแนวแกนตั้งแสดงจำนวนพิกเซลในแต่ละความสว่าง ถ้าหากภาพมีความมืดมาก กราฟที่ได้จะมีข้อมูลไปกองรวมกันทางด้านซ้าย หรืออาจกล่าวได้ว่า ฮิสโตแกรมนี้แสดงให้เห็นถึงความเบี่ยงเบนของข้อมูลว่ามีลักษณะการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบประจักษ์หรือไม่



รูปที่ 2.6 ฮิสโตแกรม [8]

2.3.3 คอนทราสต์ของภาพ (Contrast)

คอนทราสต์ของภาพ คือ ความแตกต่างของความส่องสว่างของแสงหรือสีที่ทำให้วัตถุโดดเด่น และสังเกตเห็นอย่างชัดเจน (หรือการนำเสนอในภาพหรือจอแสดงผล) แยกแยะได้ ในการรับรู้ภาพของโลกแห่งความเป็นจริงคอนทราสต์จะพิจารณาจากความแตกต่างของสีและความสว่างของวัตถุและวัตถุอื่น ๆ ที่อยู่ใกล้กัน ระบบการมองเห็นของมนุษย์มีความไวต่อความเปรียบต่างมากกว่า ความสว่างสัมบูรณ์ หรืออาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า คอนทราสต์ของภาพ คือค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของความแตกต่างระหว่างค่าระดับความเข้มเทาในแต่ละพิกเซลในภาพขนาด $m \times n$ และค่าความสว่าง
 ดังแสดงในสมการที่ 2.1 ความคมชัดสูงสุดของภาพคืออัตราส่วนคอนทราสต์หรือไดนามิกเรนจ์

$$C = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{n-1} (f(x,y) - B)^2} \quad (2.1)$$

โดยค่า C คือค่าคอนทราสต์ และ B คือค่าความสว่างของภาพ



รูปที่ 2.7 ภาพคอนทราสต์ (ก) คอนทราสต์ต่ำ (ข) คอนทราสต์สูง [9]

[https://th.wikipedia.org/wiki/%E0%B9%84%E0%B8%9F%E0%B8%A5%E0%B9%8C:Contrast_change_photoshop.jpg]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.4 การปรับค่าความสว่างของภาพ (Contrast enhancement)

การปรับค่าความสว่างของภาพ เป็นการปรับค่าความสว่างโดยยืดช่วงค่าความสว่างให้เต็มพิสัย (Range) ของข้อมูลภาพ เพื่อให้ภาพที่ได้มีคอนทราสต์ที่ดีและสามารถแสดงรายละเอียดต่าง ๆ ของภาพได้อย่างชัดเจน โดยกระบวนการปรับค่าความสว่างของภาพสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธีดังนี้

1. Linear contrast stretch คือการขยายพิสัยของค่าความเข้มข้อมูลเดิม ให้มีค่ามากยิ่งขึ้นจนเต็มช่วง 0-255 โดยใช้กราฟเปรียบเทียบที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง การปรับคอนทราสต์แบบเชิงเส้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.2

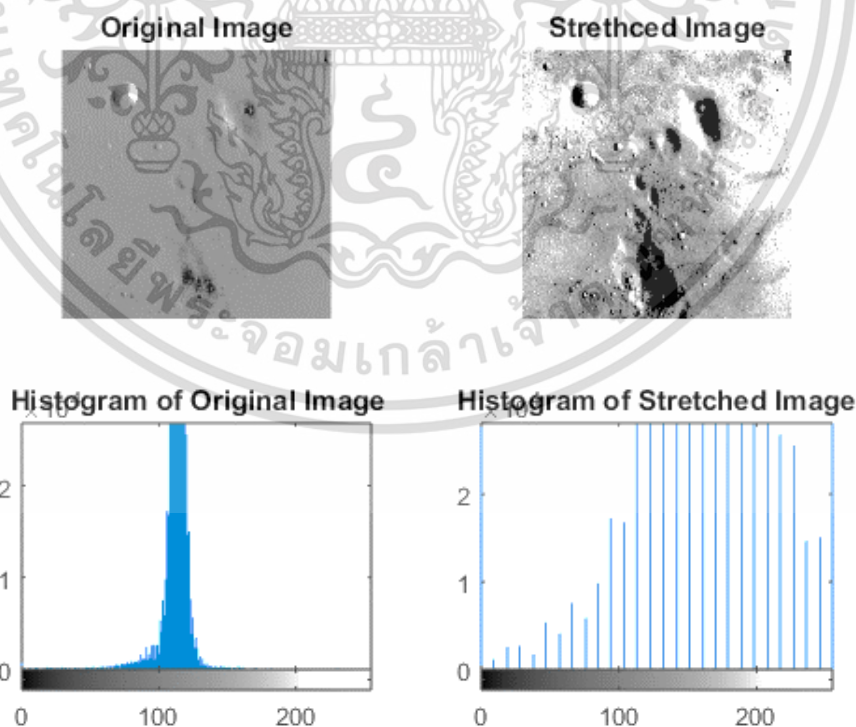
$$g(x, y) = \left(\frac{255}{DN_{\max} - DN_{\min}} \right) (f(x, y) - DN_{\min}) \quad (2.2)$$

โดย $g(x, y)$ คือ ค่าความสว่างใหม่ของภาพที่จุด (x, y)

$f(x, y)$ คือ ค่าความสว่างเดิมของภาพที่จุด (x, y)

DN_{\max} คือ ค่าความสว่างสูงสุด

DN_{\min} คือ ค่าความสว่างต่ำสุด

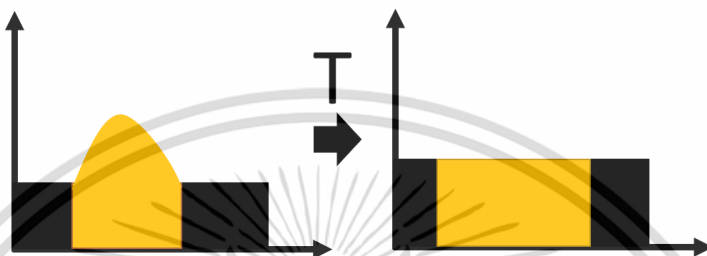


รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการปรับคอนทราสต์แบบ Linear contrast stretch

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

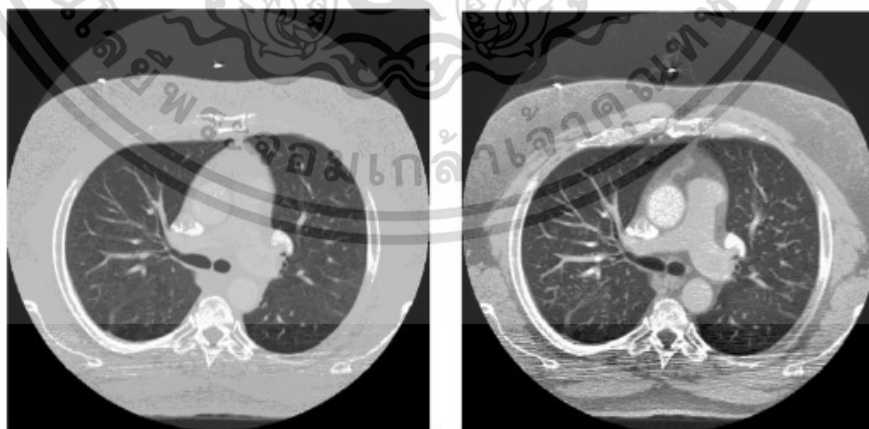
2. Non-Linear Contrast stretch เป็นการปรับระดับค่าความสว่างของข้อมูลภาพ โดยใช้ความสัมพันธ์ที่ไม่ใช่ลักษณะเชิงเส้นตรง เพื่อเปลี่ยนการกระจายข้อมูลที่ไม่ปกติให้เป็นแบบปกติและปรับจำนวนจุดภาพในแต่ละค่าความเข้มให้มีจำนวนใกล้เคียงกันซึ่งเทคนิคแบบนี้เรียกว่า Histogram equalization Stretch

- Histogram Equalization (HE) คือหนึ่งในวิธีที่นำเอาค่าฮิสโตแกรมของภาพมาประมวลผลเพื่อชดเชยความสว่างและกระจายความสว่างให้มีความสม่ำเสมอทั้งรูปภาพ



รูปที่ 2.9 ตัวอย่างฮิสโตแกรมก่อนและหลังของวิธี Histogram Equalization

- Adaptive histogram equalization (AHE) คือการพัฒนาต่อยอดของ Histogram Equalization เนื่องจากข้อเสียคือการขยายสัญญาณรบกวนในข้อมูลพื้นหลัง โดยการปรับปรุงวิธีการนี้เป็นการเพิ่มความคมชัดให้กับภาพซึ่งเป็นการปรับปรุงในระดับพื้นที่ (Local enhancement) แบบพื้นที่ภาพเป็นส่วน ๆ ตัวอย่างของภาพก่อนและหลังการทำ Adaptive histogram equalization ดังแสดงในรูปที่ 2.10

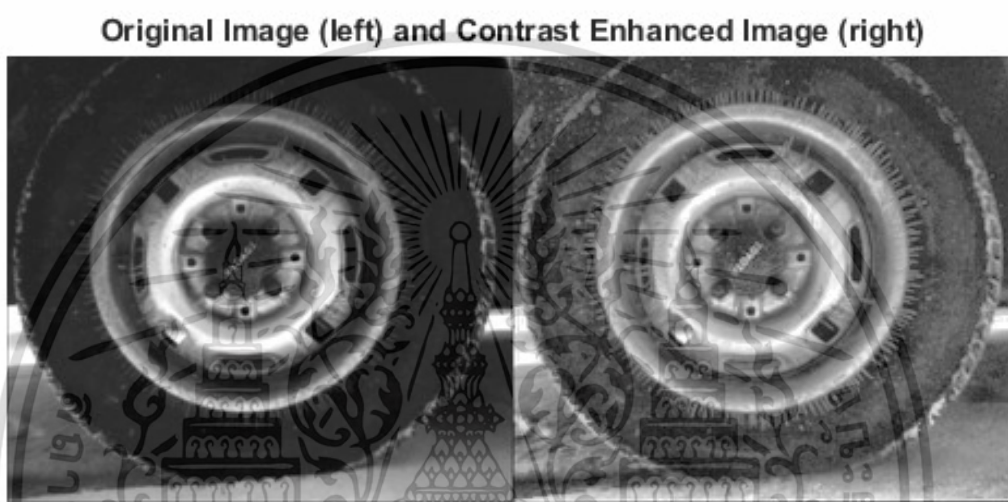


รูปที่ 2.10 ภาพก่อนและหลังการทำ Adaptive histogram equalization [10]

[https://www.researchgate.net/publication/285582177_Automatic_3D_pulmonary_nodule_detection_in_CT_images_A_survey/figures?lo=1&utm_source=google&utm_medium=organic]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Contrast Limited adaptive histogram equalization (CLAHE) คือการปรับปรุงความชัดของภาพโดยพัฒนามาจาก AHE ซึ่งมีปัญหาเดียวกันกับ HE ในเรื่องของเกิดการเกิด Over-enhancement โดยกระบวนการนี้เป็นการลดการกระจายของสัญญาณรบกวนโดยการตัดฮิสโตแกรม (Clip Histogram) แล้วจึงนำไปกระจายให้กับค่าความสว่างที่มีความถี่สะสมไม่เกินค่าลิมิตที่เป็นเกณฑ์ในการตัดฮิสโตแกรม ตัวอย่างของภาพก่อนและหลังการทำ Contrast Limited adaptive histogram equalization ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ภาพก่อนและหลังการทำ Contrast Limited adaptive histogram equalization [11]

3. Piecewise stretch เป็นการเลือกยืดข้อมูลภาพเป็นบางส่วน หรือเป็นช่วง ๆ โดยแต่ละช่วงอาจจะกำหนดพิสัย ของการยืดแตกต่างกันไป หลักการคือพิสัยของค่าความเข้มข้อมูลเดิมที่ต้องการขยายนั้น จะถูกแบ่งออกเป็นหลาย ๆ ช่วงและในแต่ละช่วงจะขยายให้เป็นค่าใด ๆ ก็ได้ตามต้องการแต่ต้องต่อเนื่องกันไปจนตลอดช่วง 0-255 เช่น แบ่งการขยายค่าความเข้มเดิมจาก 10-120 ให้เป็น 0-255

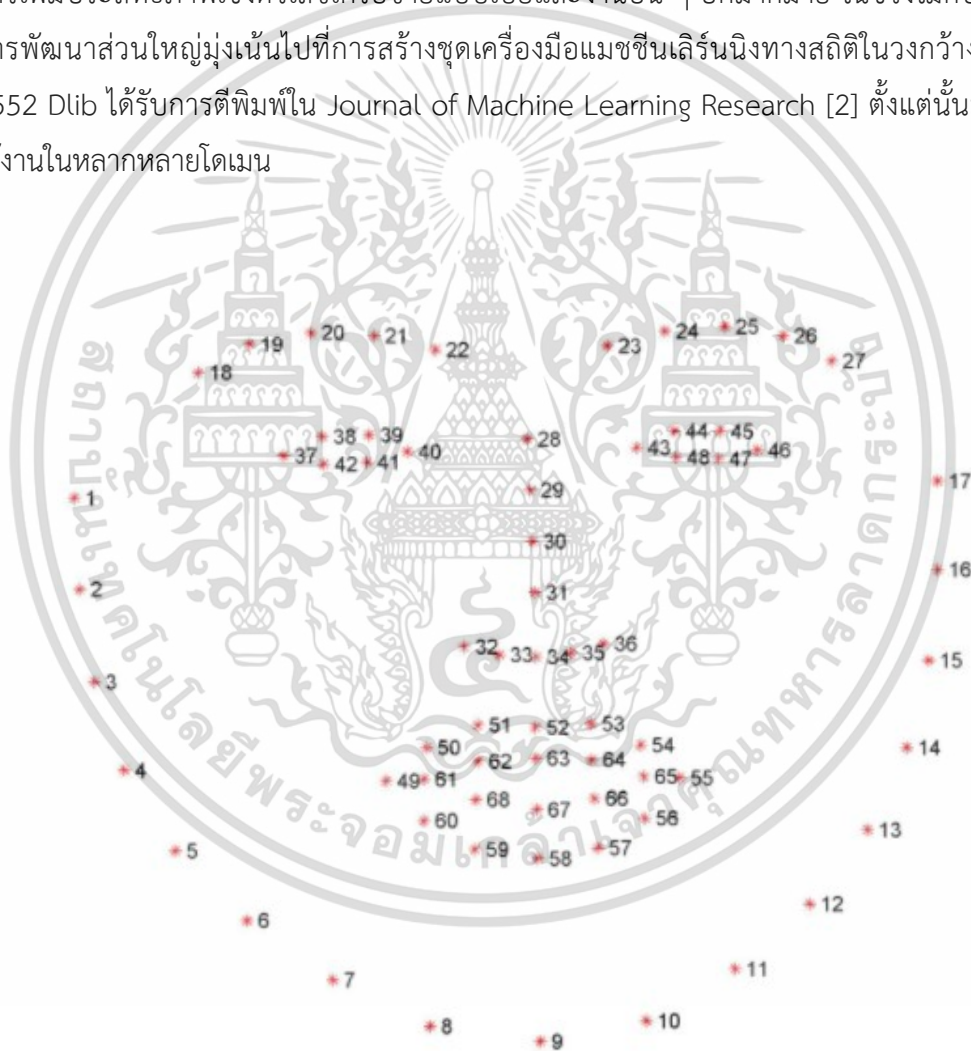
2.3.5 ค่าขีดระดับของภาพ (Image Thresholding)

Thresholding ประกอบด้วยการแบ่งส่วนภาพออกเป็นสองส่วน ส่วนหลักและพื้นที่พื้นหลัง ในรูปแบบที่เรียบง่ายที่สุดกระบวนการนี้ทำงานโดยการตั้งค่าให้พิกเซลทั้งหมดเป็นสีขาวที่อยู่ในช่วงระดับสีเทาเรียกว่าช่วงระดับที่กำหนดจำกัด และตั้งค่าพิกเซลอื่น ๆ ทั้งหมดในภาพให้เป็นสีดำ ภาพที่ได้จะเรียกว่าภาพไบนารี สำหรับภาพสีต้องระบุสามเกณฑ์สำหรับแต่ละองค์ประกอบสี เกณฑ์นี้สามารถเลือกได้ด้วยตนเองหรือโดยใช้เทคนิคอัตโนมัติ โดยปกติการเลือกเกณฑ์ด้วยตนเองจะกระทำโดยการลองผิดลองถูกโดยใช้ฮิสโตแกรมเป็นแนวทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.6 2D Dlib library

Dlib เป็นไลบรารีซอฟต์แวร์ข้ามแพลตฟอร์มที่เขียนด้วยภาษาโปรแกรม C++ การออกแบบได้รับอิทธิพลอย่างมากจากแนวคิดการออกแบบตามข้อกำหนดสัญญาและวิศวกรรมซอฟต์แวร์ตามส่วนประกอบ ดังนั้นสิ่งแรกและสำคัญที่สุดคือชุดของส่วนประกอบซอฟต์แวร์อิสระ เป็นซอฟต์แวร์โอเพนซอร์สที่เผยแพร่ภายใต้ใบอนุญาตซอฟต์แวร์ Boost นับตั้งแต่การพัฒนาเริ่มขึ้นในปี 2545 Dlib ได้เติบโตขึ้นโดยมีเครื่องมือหลากหลายประเภท ในปี 2559 ประกอบด้วยส่วนประกอบซอฟต์แวร์สำหรับจัดการกับระบบเครือข่ายเรดอินเทอร์เฟซผู้ใช้แบบกราฟิกโครงสร้างข้อมูลพีชคณิตเชิงเส้นการเรียนรู้ของเครื่องการประมวลผลภาพการซูดข้อมูล XML และการแยกวิเคราะห์ข้อความ การเพิ่มประสิทธิภาพเชิงตัวเลขเครือข่ายแบบเบย์และงานอื่น ๆ อีกมากมาย ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา การพัฒนาส่วนใหญ่มุ่งเน้นไปที่การสร้างชุดเครื่องมือแมชชีนเลิร์นนิงทางสถิติในวงกว้างและในปี 2552 Dlib ได้รับการตีพิมพ์ใน Journal of Machine Learning Research [2] ตั้งแต่นั้นมาก็มีการใช้งานในหลากหลายโดเมน



รูปที่ 2.12 พิกัดจุดสังเกตบนใบหน้า 68 จุด

2.4 การแปลงเรขาคณิตของภาพ (Geometric transformation of image)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการแปลงทางเรขาคณิตของภาพ เป็นการจับคู่ของภาพบนระนาบ ซึ่งการจับคู่ระหว่างจุดบนภาพต้นแบบกับจุดบนภาพที่เกิดจากการแปลงแบบจุดต่อจุด ขั้นตอนพื้นฐานในกระบวนการซ้อนทับภาพ จำเป็นต้องมีการแปลงทางเรขาคณิต เพื่อแปลงภาพที่ต้องการนำไปซ้อนทับบนภาพต้นฉบับหรือภาพที่ใช้อ้างอิงให้ได้ใกล้เคียงมากที่สุด การแปลงเรขาคณิตของภาพสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

1. การแปลงแบบเรขาคณิตเชิงเส้น
2. การแปลงแบบเรขาคณิตแบบไม่เป็นเชิงเส้น

2.4.1 การแปลงเรขาคณิตแบบเชิงเส้น (Geometric linear transformation)

การแปลงเรขาคณิตแบบเป็นเชิงเส้น (Geometrical Linear Transformation) การแปลงเรขาคณิตแบบเป็นเชิงเส้นหมายถึงการแปลงที่รวมถึงการสเกลหรือการขยายการเลื่อนภาพการหมุนภาพและการบิดภาพให้ $g(u, v)$ สำหรับ $1 \leq u \leq P$ และ $1 \leq v \leq Q$ แทนภาพเอาต์พุต (output) ที่ได้จากการแปลงเรขาคณิตของภาพอินพุต (input) $f(x, y)$ สำหรับ $1 \leq x \leq M$ และ $1 \leq y \leq N$ ภาพอินพุตและภาพเอาต์พุตอาจมีขนาดที่ไม่เท่ากันก็ได้ การแปลงเรขาคณิตมักทำในระบบพิกัดแบบคาร์ทีเซียน (Cartesian) ซึ่งมีจุดกำเนิด (0,0) อยู่ที่มุมล่างซ้ายของภาพ แต่สำหรับภาพดิจิทัล จุดกำเนิด (1,1) อยู่ที่มุมขวาบนของภาพ ความสัมพันธ์ของพิกัดคาร์ทีเซียนและแถวลำดับ (Array) ของภาพดิจิทัลแสดงในรูปที่ 2.1 และแถวลำดับของภาพดิจิทัลอินพุต (x, y) มีความสัมพันธ์กับพิกัดคาร์ทีเซียน (x, y) ดังนี้

$$x_c = x \quad (2.3ก)$$

$$y_c = M - y \quad (2.3ข)$$

เช่นเดียวกันสัมพันธ์ระหว่างแถวลำดับของภาพดิจิทัลเอาต์พุต (u, v) กับพิกัดคาร์ทีเซียน (u_c, v_c) มีดังนี้

$$u_c = v \quad (2.4ก)$$

$$v_c = P - u \quad (2.4ข)$$

ขบวนการแปลงเรขาคณิตของภาพที่กล่าวถึง ถ้าไม่ได้ระบุ จะถือว่าจุดกำเนิดของระบบพิกัดของภาพอยู่ที่ตำแหน่งมุมซ้ายบน

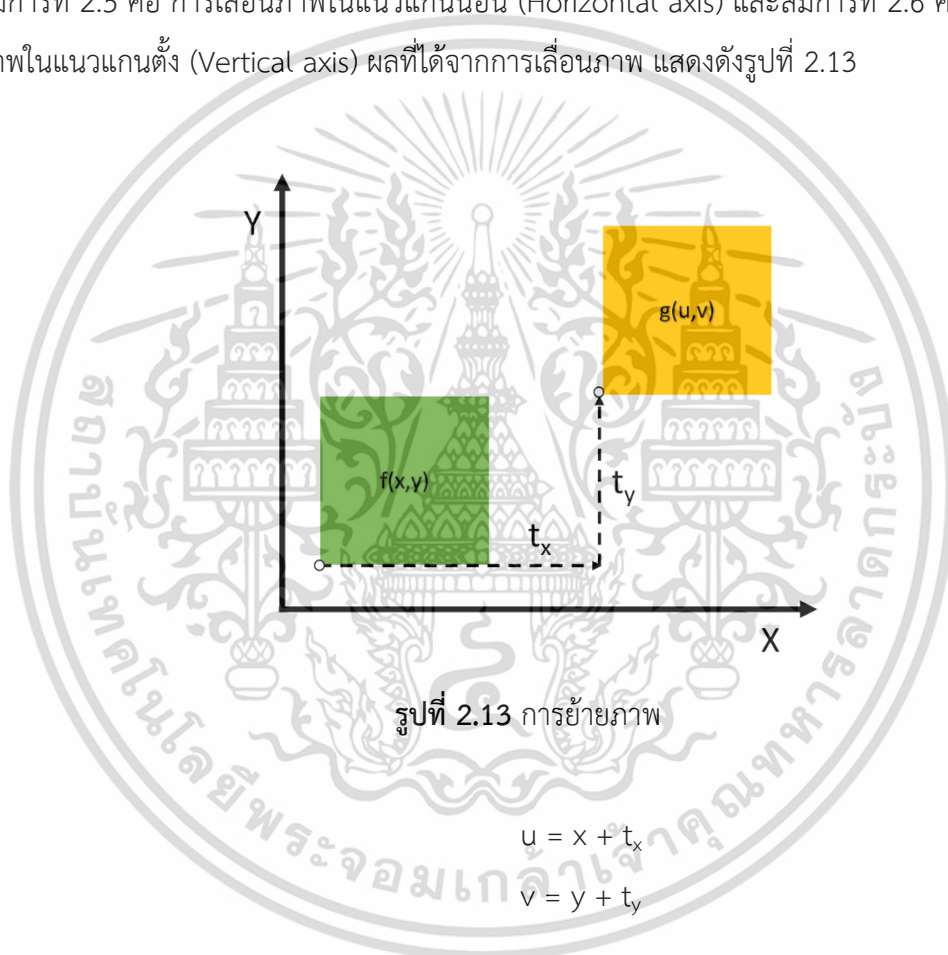
การแปลงเรขาคณิตแบบเชิงเส้น คือ การเปลี่ยนแปลงของภาพแบ่งเป็น 4 แบบ ดังนี้ การเลื่อนภาพ การสเกลภาพ (Scale) การหมุนภาพและการบิดภาพ ปกติการแปลงเรขาคณิตถูกใช้ในระบบคาร์ทีเซียน (Cartesian) กำหนดให้จุดกำเนิดพิกัดอยู่ที่ (0,0) หรือมุมล่างซ้ายของภาพ แต่ในระบบภาพดิจิทัลกำหนดให้จุดกำเนิดของภาพอยู่มุมบนซ้าย ขบวนการแปลงเรขาคณิตของภาพ หากไม่ได้ระบุ

จุดกำเนิดของภาพ ให้ถือว่ากำหนดจุดกำเนิดของภาพอยู่มุมบนซ้าย การแปลงเรขาคณิตของภาพ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใด ๆ ในระบบคาร์ทีเซียน ภาพต้นฉบับในระบบจะถูกแทนด้วยฟังก์ชัน $f(x,y)$ โดยกำหนดให้ตัวแปร x และ y แทนตำแหน่งใด ๆ ของภาพต้นฉบับและเมื่อมีการแปลงเรขาคณิต ภาพที่ถูกแปลงด้วยการแปลงเรขาคณิตสามารถแทนด้วยฟังก์ชัน $g(u,v)$ ซึ่งตัวแปร u และ v แทนตำแหน่งใด ๆ ของภาพที่ถูกแปลง

1. การเลื่อนภาพ (Translation)

การเลื่อนภาพ คือ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งออฟเซตสัมพัทธ์ (Relative offset address) ของภาพ โดยความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งการเคลื่อนย้าย แสดงได้ดังสมการที่ 2.5 และ 2.6 โดยที่สมการที่ 2.5 คือ การเลื่อนภาพในแนวแกนนอน (Horizontal axis) และสมการที่ 2.6 คือ การเลื่อนภาพในแนวแกนตั้ง (Vertical axis) ผลที่ได้จากการเลื่อนภาพ แสดงดังรูปที่ 2.13



$$u = x + t_x \quad (2.5)$$

$$v = y + t_y \quad (2.6)$$

โดย t_x และ t_y คือ ระยะการย้ายตำแหน่งเป็นระยะหนึ่ง ๆ ตามแนวแกนนอน และแกนตั้งตามลำดับ

สมการที่ 2.5 และ 2.6 สามารถเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ ได้ดังสมการที่ 2.7 หรือสมการที่ 2.8

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} x'_0 & x'_1 & x'_2 & \cdots & x'_n \\ y'_0 & y'_1 & y'_2 & \cdots & y'_n \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ y_0 & y_1 & y_2 & \cdots & y_n \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

โดย x และ y คือ พิกัดของจุดใด ๆ ของรูปก่อนการแปลงเรขาคณิต

x' และ y' คือ พิกัดของจุดใด ๆ ของรูปหลังการแปลงเรขาคณิต

2. การสเกลภาพ (Scaling)

การสเกลภาพ คือ การเปลี่ยนแปลงขนาดของภาพ ให้มีขนาดเพิ่มขึ้นหรือลดลงในด้านหนึ่ง ๆ การสเกลภาพสามารถกระทำได้ด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งพิกัดคาร์ทีเซียนของภาพที่นำเข้า ดังสมการที่ 2.9 และ 2.10 หรือเขียนในรูปแบบของเวกเตอร์ ได้ดังสมการที่ 2.11 หรือสมการที่ 2.12

$$u = s_x x \quad (2.9)$$

$$v = s_y y \quad (2.10)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 \\ 0 & s_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} x'_0 & x'_1 & x'_2 & \cdots & x'_n \\ y'_0 & y'_1 & y'_2 & \cdots & y'_n \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ y_0 & y_1 & y_2 & \cdots & y_n \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

โดย

x และ y คือ พิกัดของจุดใด ๆ ของรูปก่อนการแปลงเรขาคณิต

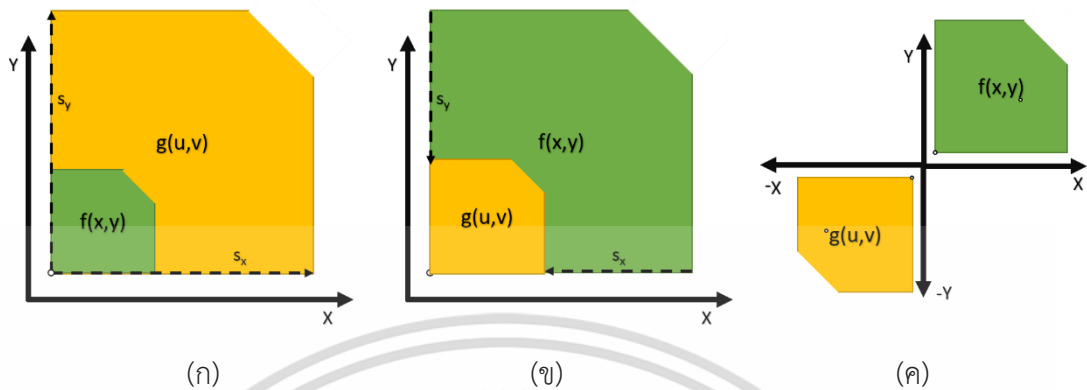
x' และ y' คือ พิกัดของจุดใด ๆ ของรูปหลังการแปลงเรขาคณิต

s_x และ s_y คือ ตัวแปรของสเกล (Scaling parameter) ตามแนวแกนนอน และแกนตั้งตามลำดับ

ผลของภาพหากค่าของ s_x และ s_y มีค่ามากกว่า 1 แสดงว่าภาพที่ได้มีการขยายในทิศทางที่สอดคล้องกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ก) และถ้าค่าของ s_x และ s_y อยู่ในช่วงระหว่าง 0 และ 1 ผลของภาพที่ได้มีการย่อในทิศทางที่สอดคล้องกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ข) ในทางกลับกัน ถ้าค่าของ s_x และ s_y มีค่าน้อยกว่า 1 จะได้ภาพที่มีลักษณะการสะท้อน (Reflection) หรือลักษณะของภาพที่กลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Mirror) จากด้านขวาเป็นด้านซ้าย ด้านซ้ายเป็นด้านขวา ด้านบนเป็นด้านล่าง ด้านล่างเป็นด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 2.14 (ค)



รูปที่ 2.14 การสเกลภาพ (ก) ค่าของ s_x และ s_y มีค่ามากกว่า 1 (ข) ค่าของ s_x และ s_y อยู่ในช่วงระหว่าง 0 และ 1 (ค) ค่าของ s_x และ s_y มีค่าน้อยกว่า 0

3. การหมุนภาพ (Rotation)

การหมุนภาพ คือ การเปลี่ยนตำแหน่งของภาพรอบจุดกำเนิด โดยการหมุนภาพเริ่มจากการกำหนดจุดใด ๆ ของฟังก์ชัน $f(x,y)$ ไปเป็นจุดใด ๆ ของฟังก์ชัน $g(u,v)$ ด้วยมุม θ ดังรูปที่ 2.16 สามารถเขียนเป็นสมการของการหมุนในพิกัดคาร์ทีเซียน ได้ดังสมการที่ 2.13 และ 2.14 หรือเขียนในรูปแบบของเวกเตอร์ ได้ดังสมการที่ 2.15 หรือ สมการที่ 2.16

$$u = x \cos \theta - y \sin \theta \tag{2.13}$$

$$v = x \sin \theta + y \cos \theta \tag{2.14}$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \tag{2.15}$$

$$\begin{bmatrix} x'_0 & x'_1 & x'_2 & \cdots & x'_n \\ y'_0 & y'_1 & y'_2 & \cdots & y'_n \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ y_0 & y_1 & y_2 & \cdots & y_n \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

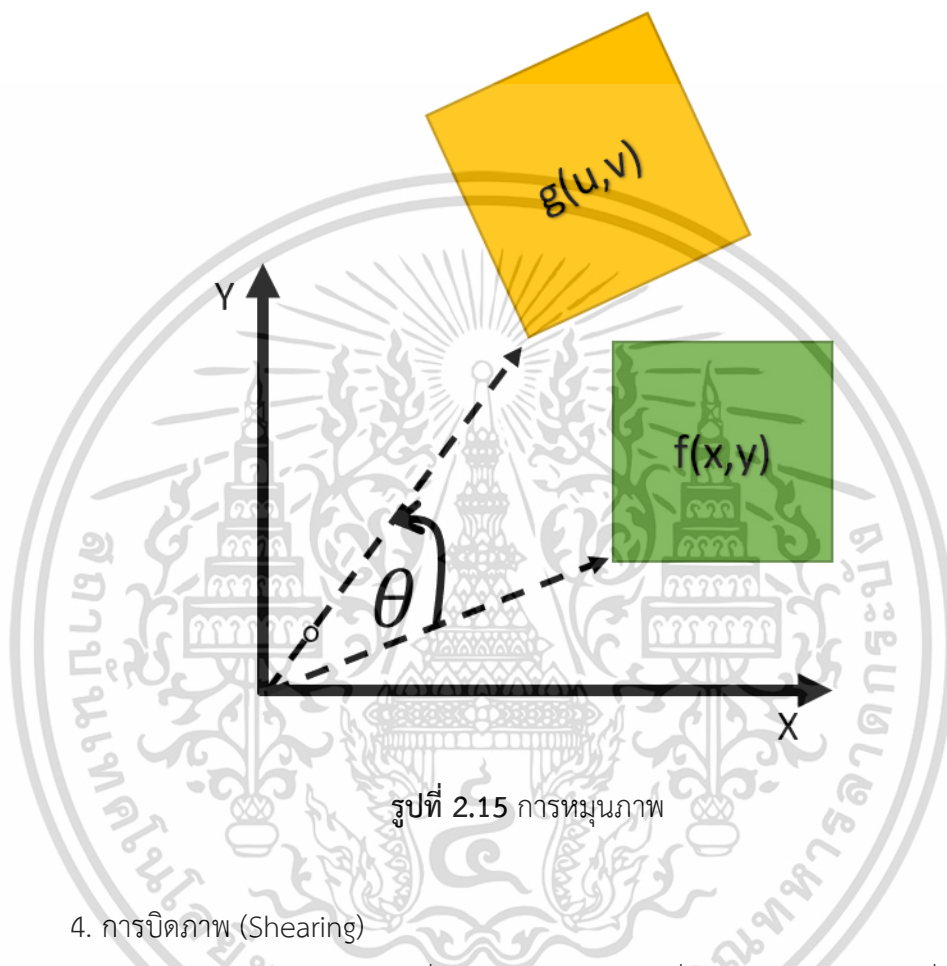
โดย x และ y คือ พิกัดของจุดใด ๆ ของรูปก่อนการแปลงเรขาคณิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

x' และ y' คือ พิกัดของจุดใด ๆ ของรูปหลังการแปลงเรขาคณิต

θ หมายถึง มุมของการหมุนในทิศทวนเข็มนาฬิกาเมื่อเทียบกับแนวแกนนอน

ขั้นตอนการหมุนภาพ สามารถทำได้โดยเลื่อนจุดที่ต้องการให้เป็นจุดหมุนมาไว้ที่จุดกำเนิด จากนั้นทำการหมุนภาพและย้ายภาพกลับไปตำแหน่งเดิม แสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การหมุนภาพ

4. การบิดภาพ (Shearing)

การบิดภาพ คือ การแปลงภาพที่ทำให้ลักษณะภาพเปลี่ยนแปลงไป จากภาพสี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือภาพสี่เหลี่ยมจัตุรัสเปลี่ยนไปเป็นภาพสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน โดยการบิดภาพ ซึ่งสามารถแบ่งการบิดภาพได้ 3 ประเภท คือ

1. การบิดภาพในไปในทิศทางแกนนอน
2. การบิดภาพไปในทิศทางแกนตั้ง
3. การบิดภาพไปทั้งในแกนนอนและแกนตั้ง

สมการของการบิดภาพทั้งในแกนนอนและแกนตั้งในรูปของคาร์ทีเซียน สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.17 และ 2.18 ตามลำดับ รูปแบบของเวกเตอร์ดังแสดงในสมการที่ 2.19 หรือ สมการที่ 2.20 ผลของการบิดภาพทั้งสามรูปแบบ แสดงได้ดังรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$u = x + sh_x y \quad (2.17)$$

$$v = y + sh_y x \quad (2.18)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & sh_x \\ sh_y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

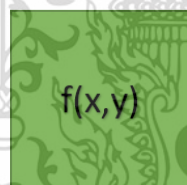
$$\begin{bmatrix} x'_0 & x'_1 & x'_2 & \cdots & x'_n \\ y'_0 & y'_1 & y'_2 & \cdots & y'_n \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & sh_x & 0 \\ sh_y & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ y_0 & y_1 & y_2 & \cdots & y_n \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

โดย x และ y คือ พิกัดของจุดใด ๆ ของรูปก่อนการแปลงเรขาคณิต

x' และ y' คือ พิกัดของจุดใด ๆ ของรูปหลังการแปลงเรขาคณิต

sh_x และ sh_y คือ ตัวแปรของการบิด (Shearing parameter) ตามแนวแกน x และแกน y ตามลำดับ

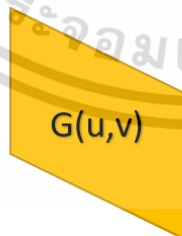
หากต้องการให้การบิดภาพไปในทิศทางแกนนอน ให้กำหนดค่าของ sh_y เป็น 0 และหากต้องการให้การบิดภาพไปในทิศทางแกนตั้ง ให้กำหนดค่าของ sh_x เป็น 0



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 2.16 การบิดภาพ (ก) ภาพต้นฉบับ (ข) การบิดภาพไปในทิศทางแกนนอน (ค) การบิดภาพไปในทิศทางแกนตั้ง (ง) การบิดภาพไปในสองแนวแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแปลงเรขาคณิตดังที่กล่าวมาแล้วนั้น หากวัตถุหนึ่งมีการเลื่อนภาพ การสเกล การหมุน ภาพรอบจุดกำเนิด และการบิดภาพ การแปลงเรขาคณิตย่อยเหล่านี้ สามารถรวมกันเป็นการแปลงเรขาคณิตรวมในรูปแบบเวกเตอร์ได้ดังสมการที่ 2.21 หรือสมการที่ 2.22

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & sh_x \\ sh_y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_x & 0 \\ 0 & s_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

$$\begin{bmatrix} x'_0 & \cdots & x'_n \\ y'_0 & \cdots & y'_n \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & sh_x & 0 \\ sh_y & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 & \cdots & x_n \\ y_0 & \cdots & y_n \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

จากสมการที่ 2.22 สามารถเขียนใหม่ให้ได้ดังสมการที่ 2.23

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 \\ d_1 & d_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_0 \\ d_0 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

การสเกล การหมุน และการบิดภาพ สามารถจัดรูปให้อยู่รวมกันในรูปแบบของเมทริกซ์ขนาด 2 แถว 2 หลัก (2x2) ในส่วนของการเลื่อนภาพอยู่ในเมทริกซ์ขนาด 2 แถว 1 หลัก (2x1) นอกจากนั้นแล้วการรวมกันผลการแปลงเรขาคณิตไม่มีคุณสมบัติการถ่ายทอด (Communicative) กล่าวคือ ภาพของการย้ายภาพแล้วหมุน ผลลัพธ์ที่ได้ ไม่เหมือนกับภาพของการหมุนแล้วย้ายภาพ

จากสมการที่ 2.22 สามารถจัดรูปสมการใหม่ได้ดังสมการที่ 2.24 ซึ่งเป็นการจัดรูปสมการการเลื่อนภาพการสเกล การหมุน และการบิดภาพ ให้อยู่รวมกันในรูปแบบของเมทริกซ์ขนาด 3 แถว 3 (3 x 3) หรือสามารถจัดรูปสมการได้ในอีกรูปแบบหนึ่งดังสมการที่ 2.25

$$\begin{bmatrix} x'_0 & \cdots & x'_n \\ y'_0 & \cdots & y'_n \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 & a_1 & a_2 \\ b_0 & b_1 & b_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 & \cdots & x_n \\ y_0 & \cdots & y_n \\ 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$Y=T*X \quad (2.25)$$

โดย X คือ กลุ่มของพิกัดของจุดใด ๆ ของรูปก่อนการแปลงเรขาคณิต

Y คือ กลุ่มของพิกัดของจุดใด ๆ ของรูปหลังการแปลงเรขาคณิต

T คือ เมทริกซ์การแปลงเรขาคณิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการใช้งานจำเป็นต้องหาค่าเมทริกซ์ T ก่อนกระทำการแปลงเรขาคณิตและต้องทราบค่าของคู่อันดับที่เหมือนกันหรือค่าของคู่อันดับที่ต้องการนำมาใช้ การหาค่าเมทริกซ์ T มีพื้นฐานจากการหาค่าความผิดพลาดกำลังสอง ดังแสดงในสมการที่ 2.26

$$\varepsilon^2 = (Y - TX)^T (Y - TX) \quad (2.26)$$

จากสมการที่ 2.26 สามารถทำอนุพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.27

$$\frac{d\varepsilon^2}{dT} = -2X^T (Y - TX) = 0 \quad (2.27)$$

และเมื่อทำการจัดรูปสมการใหม่ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.28

$$\begin{aligned} X^T Y &= X^T T X \\ Y^T X &= T^T X^T X \\ T^T &= (Y^T X) (X^T X)^{-1} \\ T &= (X^T X)^{-1} (X^T Y) \end{aligned} \quad (2.28)$$

2.4.2 กลุ่มของการแปลงเรขาคณิตเชิงเส้น (Class of Linear Geometric Transformation)

การแปลงเรขาคณิตเชิงเส้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่

1. การแปลงเรขาคณิตเชิงเส้นแบบ Orthogonal ได้แก่ การแปลงเรขาคณิตในลักษณะที่วัตถุจะคงรูปร่างและขนาดประกอบด้วยการแปลงแบบการเลื่อนและการหมุนเป็นการแปลงเรขาคณิตที่มี 3 พารามิเตอร์ ได้แก่ พารามิเตอร์การเคลื่อนย้ายในแนวแกน x (t_x) และแกน y (t_y) และพารามิเตอร์สำหรับการหมุน (θ) อาจเรียกการแปลงแบบนี้ว่าการแปลงแบบคงรูป (Rigid transform)

2. การแปลงเรขาคณิตเชิงเส้นแบบ Euclidean ได้แก่ การแปลงเรขาคณิตที่วัตถุคงรูปร่าง แต่ขนาดอาจเปลี่ยนแปลงได้ประกอบด้วยการแปลงแบบการเลื่อนการสเกลและการหมุนเป็นการแปลงเรขาคณิตที่มี 5 พารามิเตอร์ ได้แก่ พารามิเตอร์การเลื่อนในแนวแกน x (t_x) และแกน y (t_y) พารามิเตอร์การสเกลในแนวแกน x (s_x) และแกน y (s_y) และพารามิเตอร์สำหรับการหมุน (θ) การแปลงแบบ Euclidean บางครั้งถูกเรียกว่าการแปลงแบบเหมือน (Similarity Transform)

3. การแปลงเรขาคณิตเชิงเส้นแบบสัมพรรค (Affine Transform) ได้แก่ การแปลงเรขาคณิตที่ประกอบด้วยการเคลื่อนย้ายการสเกลการบิดและการหมุนเป็นการแปลงเรขาคณิตที่มี 6 พารามิเตอร์ ได้แก่ พารามิเตอร์การเคลื่อนย้ายในแนวแกน x (t_x) และแกน y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(t_y) การสเกลในแนวแกน x (s_x) และแกน y (s_y) การบิดในแนวแกน x (sh_x) และแกน y (sh_y) และพารามิเตอร์สำหรับการหมุน (θ)

การแปลงเรขาคณิตเชิงเส้นสามารถแบ่งได้ 3 กลุ่ม ประกอบด้วย

1. การแปลงเรขาคณิตเชิงเส้นแบบคงรูป
2. การแปลงเรขาคณิตเชิงเส้นแบบเหมือน
3. การแปลงเรขาคณิตเชิงเส้นแบบสัมพันธ์

กลุ่มของการแปลงเรขาคณิตแบบเชิงเส้น สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2.1

1. การแปลงเรขาคณิตเชิงเส้นแบบคงรูป (Rigid transform) คือ การแปลงเรขาคณิตที่ประกอบไปด้วยการเลื่อนและการหมุน โดยวัตถุจะคงรูปร่างและขนาดไว้เท่าเดิม การแปลงลักษณะแบบนี้มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องด้วยกัน 3 ตัวแปร ประกอบด้วย ตัวแปรการเลื่อนในแนวแกนนอน ตัวแปรการเลื่อนในแนวแกนตั้ง และตัวแปรสำหรับการหมุน ในการเปลี่ยนเรขาคณิตแบบคงรูปสามารถเรียกอีกอย่างว่า การแปลงเรขาคณิตเชิงเส้นแบบ Orthogonal

2. การแปลงเรขาคณิตเชิงเส้นแบบเหมือน (Similarity transform) คือ การแปลงเรขาคณิตที่ประกอบไปด้วยการเลื่อน การหมุน และการสเกล โดยวัตถุจะคงรูปร่างแต่ขนาดของวัตถุอาจเปลี่ยนแปลง ซึ่งในการแปลงแบบนี้มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องด้วยกัน 5 ตัวแปร ประกอบด้วย ตัวแปรการเลื่อนในแนวแกนนอน ตัวแปรการเลื่อนในแนวแกนตั้ง ตัวแปรการสเกลในแนวแกนนอน ตัวแปรการสเกลในแนวแกนตั้ง และตัวแปรสำหรับการหมุน ในการเปลี่ยนเรขาคณิตแบบคงรูปสามารถเรียกอีกอย่างว่า การแปลงเรขาคณิตเชิงเส้นแบบ Euclidean

3. การแปลงเรขาคณิตเชิงเส้นแบบสัมพันธ์ (Affine transform) คือ การแปลงเรขาคณิตที่ประกอบไปด้วยการเลื่อน การหมุน การสเกลและการบิด ซึ่งการแปลงแบบนี้มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องด้วยกัน 7 ตัวแปร ประกอบด้วย ตัวแปรการเลื่อนในแนวแกนนอน ตัวแปรการเลื่อนในแนวแกนตั้ง ตัวแปรการสเกลในแนวแกนนอน ตัวแปรการสเกลในแนวแกนตั้ง ตัวแปรการบิดในแนวแกนนอน ตัวแปรการบิดในแนวแกนตั้ง และตัวแปรสำหรับการหมุน

ตารางที่ 2.1 สรุปกลุ่มของการแปลงเรขาคณิตแบบเชิงเส้น

ชนิด	การแปลง	จำนวนตัวแปร
การแปลงแบบคงรูป	การเลื่อน การหมุน	3
การแปลงแบบเหมือน	การเลื่อน การหมุน การสเกล	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแปลงแบบสัมพรรค	การเลื่อน	7
	การหมุน	
	การสเกล	
	การบิด	

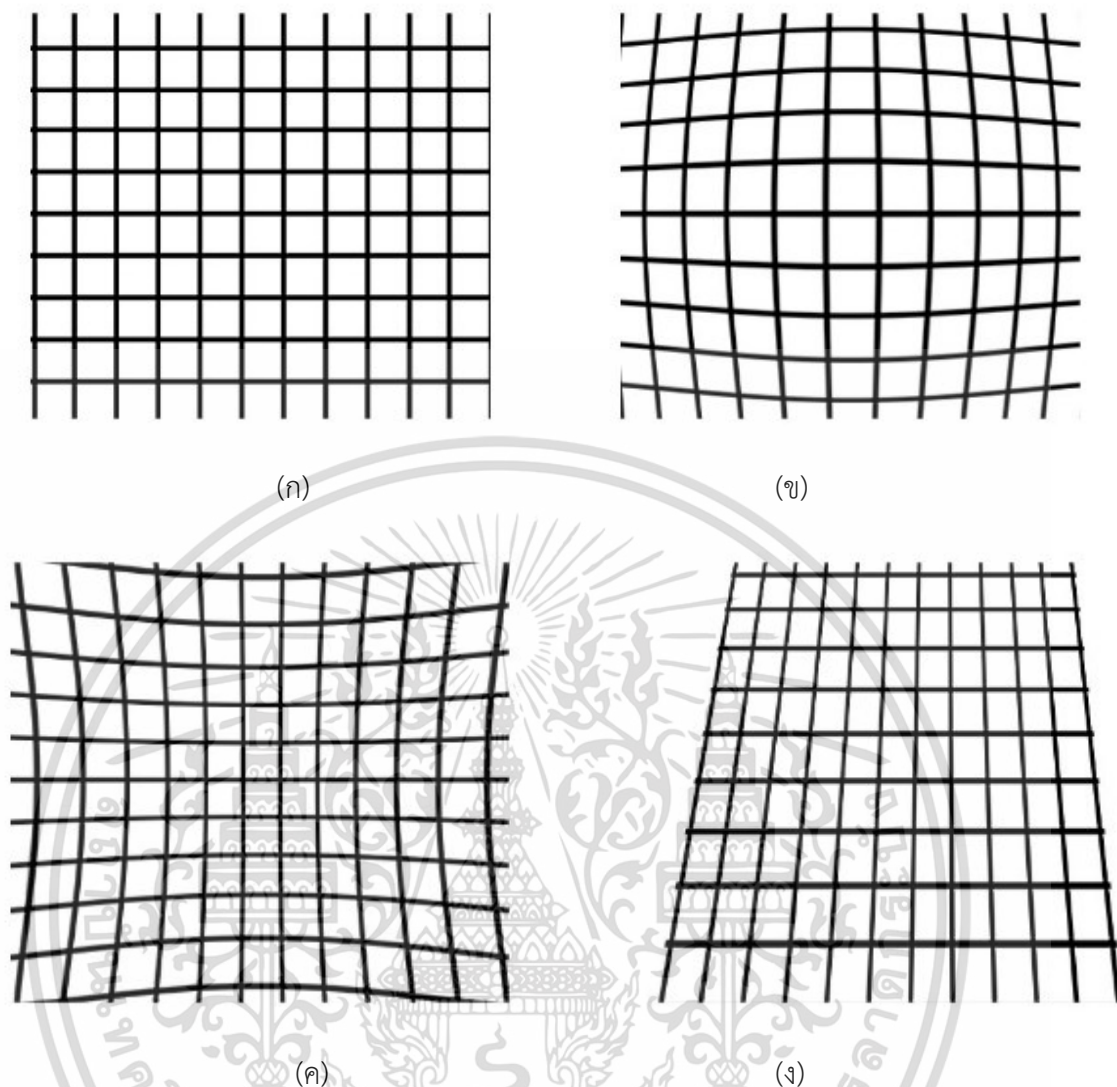
2.4.3 การแปลงเรขาคณิตแบบไม่เป็นเชิงเส้น

การแปลงเรขาคณิต 2 มิติแบบไม่เป็นเชิงเส้นการแปลงเรขาคณิต 2 มิติแบบไม่เป็นเชิงเส้นเป็นการแปลงที่นอกเหนือไปจากการสเกลการเลื่อนภาพการหมุนภาพและการบิดภาพเป็นการแปลงเรขาคณิตที่เหนือกว่าการแปลงสัมพรรคการแปลงเรขาคณิต 2 มิติแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะรวมถึงการแปลงแบบดัดโค้ง (Bending) การทำให้เรียว (Tapering) การแปลงแบบให้ป่อง (Barrel) การแปลงแบบให้ป่อง (Cushion) การแปลงแบบลู่เข้าสู่จุดรวมแสง (Perspective)

การแปลงเรขาคณิตแบบไม่เป็นเชิงเส้น คือ การแปลงที่เหนือกว่าการแปลงสัมพรรค เนื่องจากการรวมการแปลงแบบดัดโค้ง (Bending) การทำให้เรียว (Tapering) การแปลงให้ป่อง (Barrel) การแปลงให้ป่อง (Cushion) และการแปลงแบบลู่เข้าสู่จุดรวมแสง (Perspective) สมการการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้นเป็นสมการพหุนามอันดับสอง (Quadratic polynomial) ซึ่งมีตัวแปรทั้งหมด 12 ตัว โดยสมการการแปลงแบบไม่เป็นเชิงเส้นสามารถเขียนได้ ดังสมการที่ 2.29 และตัวอย่างของการแปลงเรขาคณิตแบบไม่เป็นเชิงเส้น แสดงได้ดังรูปที่ 2.17

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_5 & a_4 & a_3 & a_2 & a_1 & a_0 \\ b_5 & b_4 & b_3 & b_2 & b_1 & b_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^2 \\ y^2 \\ xy \\ x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

โดย a และ b คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแปลงเรขาคณิต



รูปที่ 2.17 การแปลงเรขาคณิตแบบไม่เป็นเชิงเส้น (ก) ภาพต้นฉบับ (ข) การแปลงแบบรูปลังเปี้ยว (ค) การแปลงให้เป็นรูปหมอนอิง (ง) การแปลงแบบลู่อู่เข้าสู่จุดรวมแสง

2.5 คุณสมบัติที่ไม่แปรเปลี่ยนทางเรขาคณิต (Geometric invariance) [13]

คุณสมบัติที่ไม่แปรเปลี่ยนต่อการแปลงทางเรขาคณิต คือ คุณสมบัติของวัตถุในภาพที่แม้ว่าวัตถุนั้นถูกแปลงเรขาคณิต แต่คุณลักษณะดังกล่าวไม่มีการเปลี่ยนแปลงไป เช่น คุณสมบัติของเส้นโค้งหรือพื้นผิวบนภาพ คุณสมบัติที่ไม่แปรเปลี่ยนต่อการแปลงทางเรขาคณิตเหล่านี้ ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการซ้อนทับภาพ ซึ่งจุดสำคัญ (Feature point) จะถูกนำมาใช้เป็นจุดอ้างอิงในการทับซ้อนภาพ

2.5.1 คุณสมบัติที่ไม่แปรเปลี่ยนต่อการแปลงทางเรขาคณิตเชิงเส้น (Linear invariance)

คุณสมบัติที่ไม่แปรเปลี่ยนต่อการแปลงทางเรขาคณิตเชิงเส้น มีอยู่ 2 ประเภท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. คุณสมบัติไม่แปรเปลี่ยนต่อการแปลงทางเรขาคณิตสัมพัทธ์ (Relative invariance) คือ คุณสมบัติที่ไม่แปรเปลี่ยนไปทั้งก่อนและหลังที่มีการเปลี่ยนแปลง โดยความสัมพันธ์ของคุณสมบัติดังกล่าวสามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.30

$$g(u,v) = T \bullet f(x,y) \quad (2.30)$$

โดย $g(u,v)$ คือ ภาพเอาต์พุต

$f(x,y)$ คือ ภาพอินพุต

T คือ เมทริกซ์ (Matrix) ของการแปลงเรขาคณิต

สามารถเขียนความสัมพันธ์นี้ให้ง่ายต่อความเข้าใจ จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.31

$$A_a = |T| \bullet A \quad (2.31)$$

โดย A และ A_a คือ คุณสมบัติที่ไม่แปรเปลี่ยนทางเรขาคณิตก่อนและหลังการแปลงเรขาคณิต

$|T|$ คือ ดีเทอร์มิแนนต์ของเมทริกซ์ T

2. คุณสมบัติไม่แปรเปลี่ยนต่อการแปลงทางเรขาคณิตสัมบูรณ์ (Absolute invariance) คือ คุณสมบัติที่เท่ากันทั้งก่อนและหลังที่มีการแปลงทางเรขาคณิต โดยคุณสมบัตินี้ สามารถสร้างได้จากอัตราส่วนของคุณสมบัติไม่แปรเปลี่ยนต่อการแปลงทางเรขาคณิตสัมพัทธ์สองคุณสมบัติ หรือกล่าวได้ว่า คุณสมบัติที่ไม่แปรเปลี่ยนต่อการแปลงทางเรขาคณิตสัมพัทธ์ของตัวแปร A และ B จากสมการที่ 2.31 หาอัตราส่วนได้ดังสมการที่ (2.32) ผลที่ได้ คือ คุณสมบัติไม่แปรเปลี่ยนต่อการแปลงทางเรขาคณิตสัมบูรณ์ ดังสมการที่ 2.33

$$\frac{A_a}{B_a} = \frac{|T| \bullet A}{|T| \bullet B} \quad (2.32)$$

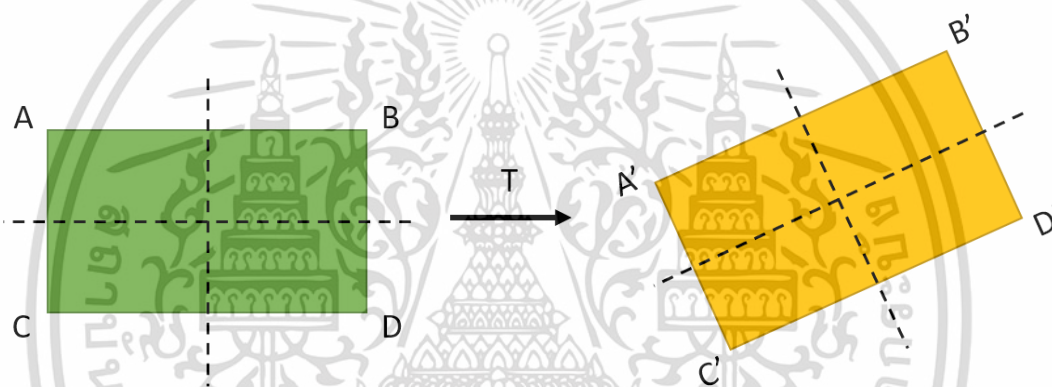
$$\frac{A_a}{B_a} = \frac{A}{B} \quad (2.33)$$

ตัวอย่างของคุณสมบัติไม่แปรเปลี่ยนต่อการแปลงทางเรขาคณิตสัมบูรณ์ เช่น พื้นที่ หรืออัตราส่วนของพื้นที่ที่สอดคล้องกัน

2.5.2 คุณสมบัติไม่แปรเปลี่ยนต่อการแปลงแบบคงรูป (Rigid invariance)

คุณสมบัติไม่แปรเปลี่ยนต่อการแปลงทางเรขาคณิตสัมบูรณ์ภายใต้การแปลงแบบคงรูป ได้แก่ ด้านหรือความยาวของวัตถุ ขนาดของมุมของวัตถุ พื้นที่ของวัตถุ และแกนหลังของวัตถุ กล่าวคือ ก่อนและหลังการแปลงเรขาคณิตด้าน หรือค่าความยาวของวัตถุ ขนาดของมุมของวัตถุ ขนาดพื้นที่ของวัตถุ และแกนหลังของวัตถุ ไม่แปรเปลี่ยน

กำหนดให้สี่เหลี่ยม $A'B'C'D'$ เกิดจากการแปลงรูปแบบคงรูปของรูปสี่เหลี่ยม $ABCD$ โดย T คือ เมทริกซ์การแปลงแบบคงรูป ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การแปลงแบบคงรูป

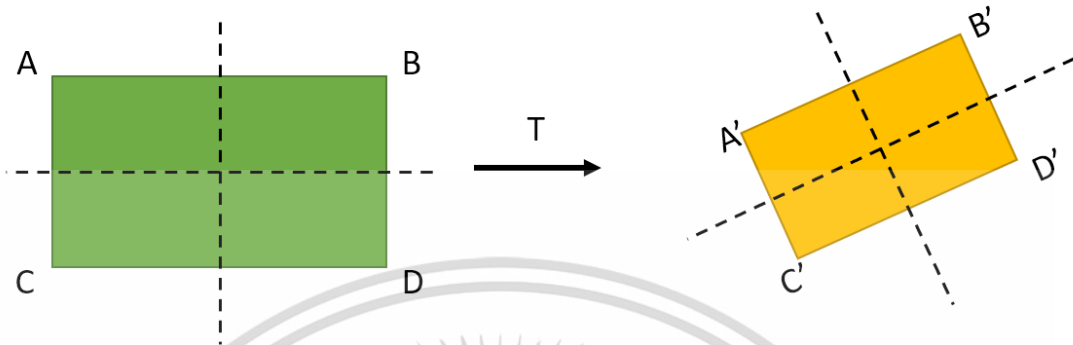
ผลของการแปลงแบบคงรูปของสี่เหลี่ยม $ABCD$ และสี่เหลี่ยม $A'B'C'D'$ จะได้ว่า $\angle A'B'D' = \angle ABD$, $\angle B'D'C' = \angle BDC$, $\angle D'C'A' = \angle DCA$, $\angle C'A'B' = \angle CAB$ หรืออาจกล่าวได้ว่ามุมทุกมุมของสี่เหลี่ยม $ABCD$ และสี่เหลี่ยม $A'B'C'D'$ มีค่าเท่ากัน

2.5.3 คุณสมบัติไม่แปรเปลี่ยนต่อการแปลงแบบเหมือน (Similarity invariance)

คุณสมบัติไม่แปรเปลี่ยนต่อการแปลงทางเรขาคณิตสัมบูรณ์ภายใต้การแปลงแบบเหมือน ได้แก่ อัตราส่วนของความยาวด้านของวัตถุ ขนาดของมุมของวัตถุ อัตราส่วนพื้นที่ของวัตถุ โดยกำหนดให้สี่เหลี่ยม $A'B'C'D'$ เกิดขึ้นจากการแปลงรูปแบบเหมือนของรูปสี่เหลี่ยม $ABCD$ โดย T คือ เมทริกซ์การแปลงแบบคงรูป ดังแสดงในรูปที่ 2.19

ผลของการแปลงแบบเหมือนรูปของสี่เหลี่ยม $ABCD$ และสี่เหลี่ยม $A'B'C'D'$ จะได้ว่าอัตราส่วนระหว่างมุม $A'B'D'$ และ $B'D'C'$ มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างมุม ABD และ BDC เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังแสดงในสมการที่ 2.34 หรืออาจกล่าวได้ว่าทุกอัตราส่วนระหว่างมุมทุกมุมของสี่เหลี่ยม ABCD และสี่เหลี่ยม A'B'C'D' มีค่าเท่ากัน

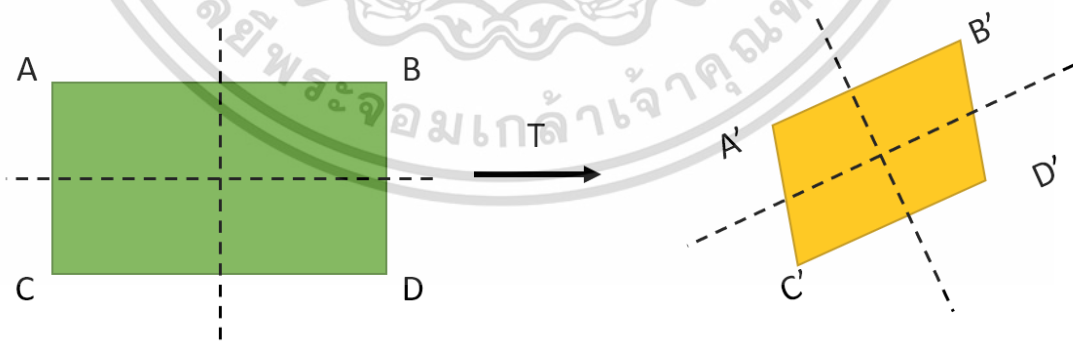


รูปที่ 2.19 การแปลงแบบเหมือน

$$\frac{\angle A'B'D'}{\angle B'D'C'} = \frac{\angle ABD}{\angle BDC} \quad (2.34)$$

2.5.4 คุณสมบัติไม่แปรเปลี่ยนต่อการแปลงแบบสัมพรรค (Affine invariance)

คุณสมบัติไม่แปรเปลี่ยนต่อการแปลงทางเรขาคณิตสัมบูรณ์ภายใต้การแปลงแบบสัมพรรค ได้แก่ อัตราส่วนของความยาวด้านที่ขนานกันของวัตถุ อัตราส่วนพื้นที่ของวัตถุ โดยกำหนดให้สี่เหลี่ยม A'B'C'D' เกิดขึ้นจากการแปลงรูปแบบเหมือนของรูปสี่เหลี่ยม ABCD โดย T คือ เมทริกซ์การแปลงแบบคงรูปดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การแปลงแบบสัมพรรค

ผลของการแปลงแบบสัมพรรครูปของสี่เหลี่ยม ABCD และสี่เหลี่ยม A'B'C'D' จะได้ว่าอัตราส่วนระหว่างเส้นตรง A'B' และ D'C' มีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างเส้นตรง AB และ DC เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ดูแลเนื้อหาเบเซประโยชน์ดำเนินการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังแสดงในสมการที่ 2.35 หรืออาจจะกล่าวได้ว่าทุกอัตราส่วนระหว่างเส้นตรงที่ขนานกันของสี่เหลี่ยม ABCD และสี่เหลี่ยม A'B'C'D' มีค่าเท่ากัน

$$\frac{\overline{A'B'}}{\overline{D'C'}} = \frac{\overline{AB}}{\overline{DC}} \quad (2.35)$$

2.6 การวัดและประเมินผลทางภาพ

การวัดประสิทธิภาพทั้งการระบุตัวตนใช้ตัวแปรสามตัวในการบ่งบอกประสิทธิภาพอันได้แก่ ความแม่นยำ (Accuracy, ACC) ความไว (Sensitivity, SE) และความจำเพาะ (Specification, SP) ตัวแปรเหล่านี้เกิดจากตัวแปรทั้งหมดสี่ตัวด้วยกัน คือ ผลบวกจริง (True Positive, TP) ผลบวกปลอม (False Positive, FP) ผลลบจริง (True Negative, TN) ผลลบปลอม (False Negative, FN) ในส่วนของประสิทธิภาพการระบุตัวบุคคลตัวแปรสี่ตัวที่ใช้มีความหมายดังนี้

ในส่วนของประสิทธิภาพการระบุตัวตนตัวแปรสี่ตัวที่ใช้มีความหมายดังนี้

1. ผลบวกจริง คือจำนวนภาพที่สามารถระบุตัวบุคคลได้ถูกต้อง
2. ผลบวกปลอม คือจำนวนภาพของคนอื่นที่ระบุว่าเป็นบุคคลเดียวกัน
3. ผลลบจริง คือจำนวนภาพคนอื่นที่ระบุว่าเป็นบุคคลอื่นได้ถูกต้อง
4. ผลลบปลอม คือจำนวนภาพคนเดียวกันที่ถูกระบุว่าเป็นบุคคลอื่น

ความแม่นยำ คือ ความสามารถในการระบุตัวบุคคลจากบุคคลอื่นได้อย่างถูกต้อง โดยสมการในการหาค่าความแม่นยำสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.36

$$ACC = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (2.36)$$

ความไว คือ ความสามารถในการระบุบุคคลนั้น ๆ ได้ถูกต้อง โดยสมการในการหาค่าความไวสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.37

$$SE = \frac{TP}{TP + FN} \quad (2.37)$$

ความจำเพาะ คือ ความสามารถในการแยกบุคคลนั้น ออกจากบุคคลอื่นได้ถูกต้อง โดยสมการในการหาค่าความจำเพาะสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.38

$$SP = \frac{TN}{TN + FP} \quad (2.38)$$

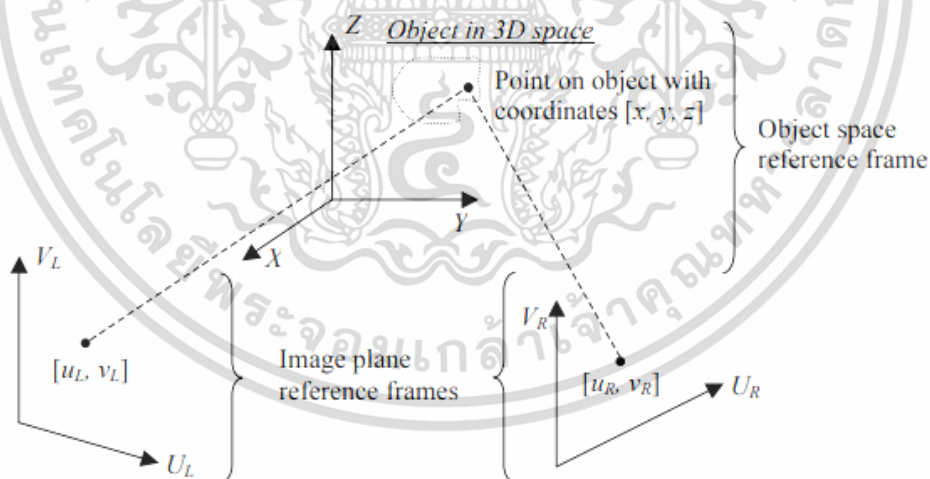
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 DIRECT LINEAR TRANSFORMATION (DLT)

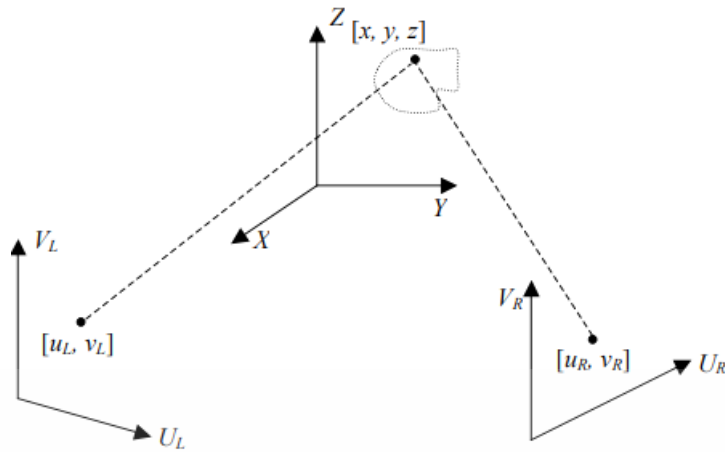
สำหรับการมีกล้องสองตัวเพื่อให้ได้ภาพสองภาพ ก่อนอื่นต้องกำหนดระบบพิกัดสองระบบ และกรอบอ้างอิง แสดงดังในรูปที่ 2.21 วัตถุที่อยู่ในพื้นที่เรียกว่า "กรอบอ้างอิงพื้นที่วัตถุ" และอ้างอิง เป็นระบบพิกัดคาร์ทีเซียน XYZ คำนวณวัตถุในพื้นที่สามมิติจริง ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน XYZ มีต้นกำเนิดได้ทุกที่เลือก ทางเลือกหนึ่งที่สะดวกคือการเลือกจุด

กรอบอ้างอิงสองมิติที่เกี่ยวข้องกับภาพจากกล้องแต่ละตัว เรียกว่า "กรอบอ้างอิงระนาบภาพ" และแสดงโดยใช้ U และ R ใน DLT มีสองมุมมองเสมอซึ่งเรียกว่ามุมมอง "ซ้าย" และ "ขวา" ดังนั้น กรอบอ้างอิงระนาบภาพซ้ายและขวาที่อ้างอิงกับ $U_L V_L$ และ $U_R V_R$ ระบบพิกัดตามลำดับ ในรูปที่ 2.21 มีกรอบอ้างอิงระนาบภาพหนึ่งสำหรับกล้องด้านซ้ายและอีกตัวสำหรับกล้องด้านขวา

ลองพิจารณาจุด $[x, y, z]$ ที่อยู่บนวัตถุดังแสดงในรูปที่ 2.21 จุดนี้ปรากฏในภาพซ้ายและขวา โดยตั้งอยู่ตามพิกัดภาพ $[u_L, v_L]$ และ $[u_R, v_R]$ ตามลำดับ จุด $[x, y, z]$ จะมีหน่วยความยาว (เช่นเมตร เป็นหน่วย SI) และ $[u_L, v_L]$ และ $[u_R, v_R]$ จะมีหน่วยของพิกเซล เป้าหมายของ DLT คือการกำหนด ตำแหน่งจริงของจุด $[x, y, z]$ ตาม u_L, v_L, u_R และ v_R ก่อนนี้สามารถทำได้โดยใช้วัตถุระบบจะต้อง ได้รับการปรับเทียบโดยใช้จุดของตำแหน่งที่รู้จัก



รูปที่ 2.21 กรอบอ้างอิงพื้นที่วัตถุและระนาบภาพและระบบพิกัดที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 2.22 การถ่ายภาพจุดที่ไม่รู้จัก

ใน สมการ (1a-1d) หลังจากการสอบเทียบ $L_1 \dots L_{11}$, $R_1 \dots R_{11}$ เป็นที่รู้จักและ u_L, v_L, u_R และ v_R เป็นที่รู้จักโดยการตรวจสอบภาพ ดังนั้นจึงมีสิ่งที่ไม่รู้จักสามตัว (x, y , และ z) และสี่สมการ จัดเรียงสมการใหม่และรวมเป็นระบบเมทริกซ์ให้ผล

$$\begin{bmatrix} L_1 - L_9 u_L & L_2 - L_{10} u_L & L_3 - L_{11} u_L \\ L_5 - L_9 v_L & L_6 - L_{10} v_L & L_7 - L_{11} v_L \\ R_1 - R_9 u_R & R_2 - R_{10} u_R & R_3 - R_{11} u_R \\ R_5 - R_9 v_R & R_6 - R_{10} v_R & R_7 - R_{11} v_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_L - L_4 \\ v_L - L_8 \\ u_R - R_4 \\ v_R - R_8 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

ถ้าแสดงเมทริกซ์แรกทางด้านซ้ายมือเป็น Q และเมทริกซ์ด้านขวาเป็น q , Eq. (14) สามารถเขียนเป็น:

$$Q \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = q, \quad (2.40)$$

ซึ่งสามารถหา $[x, y, z]$ ได้โดยใช้วิธีหลอกแบบผกผันของ Moore-Penrose:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = (Q^T Q)^{-1} Q^T q. \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 ทบทวนวรรณกรรม

ความสำคัญของปัญหาการประมวลผลของภาพด้วยคอมพิวเตอร์คือการจดจำใบหน้าของมนุษย์โดยอัตโนมัติ ความสำคัญในทางปฏิบัติที่ไม่สำคัญมากนัก มีแอปพลิเคชันจดจำใบหน้ามากมาย รวมถึงการควบคุมการเข้าถึงระบบเฟิร์มแวร์อัตโนมัติการวิเคราะห์ทางนิติวิทยาศาสตร์การเรียกข้อมูลอย่างรวดเร็วจากฐานข้อมูลในหน่วยงานตำรวจการบังคับใช้กฎหมายและการโต้ตอบกับคอมพิวเตอร์ของมนุษย์ การจดจำใบหน้าถูกกำหนดให้เป็นกระบวนการในการระบุการเปรียบเทียบรูปภาพใบหน้าของการประมวลผลของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ รูปภาพทั้งหมดในฐานข้อมูลใบหน้าหรือยืนยันตัวตนของบุคคล ลักษณะใบหน้าที่จะถูกเปรียบเทียบกับภาพต้นแบบของภาพใบหน้าจากฐานข้อมูล [3] ระบบจดจำใบหน้ามีสองประเภท ได้แก่ 2D และ 3D มีงานวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับการจดจำใบหน้าการฟื้นฟู 3 มิติเสมือนจริงและการตรวจจับอัตโนมัติใน [4-6] การจดจำใบหน้าแบบ 2 มิติ ได้เสนอตัวบอกการไล่ระดับสีแบบหลายทิศทางสำหรับการจดจำใบหน้าในภาพ 2 มิติ มีความแม่นยำสูงซึ่งมากกว่า 95% และสามารถระบุบุคคลที่มีแว่นตากันแดดหรือการแสดงออกได้ อย่างไรก็ตามอัลกอริทึมที่ซับซ้อนทำให้ใช้เวลานาน นำเสนอการจดจำใบหน้าโดยใช้การแยกคุณลักษณะตามการแปลงเวฟเล็ตแบบไม่ต่อเนื่องโดยใช้การทำให้เป็นมาตรฐานตามมาตราส่วนที่ติดตามขอบ อัตราส่วนพื้นที่และมุมของสามเหลี่ยมถูกนำมาใช้เพื่อการจดจำใบหน้าโดยอาศัยการตรวจจับจุดสังเกตบนใบหน้า [9] การศึกษาระยะทางและความลาดชันในการจดจำภาพ 2 มิติถูกนำเสนอใน [10]

การจดจำใบหน้าแบบ 3 มิติใช้การเข้ารหัสเวกเตอร์ของพีชคณิตของคุณลักษณะที่ไม่แปรผันตามมาตราส่วนเฉพาะที่แปลงและเข้ารหัสคุณลักษณะไบนารีสำหรับการจดจำใบหน้าของวิดีโอ [11] งานวิจัยนี้ให้ประสิทธิภาพการจดจำใบหน้าของวิดีโอที่ดีพอ ๆ กับการใช้คุณสมบัติ SIFT อย่างไรก็ตามมันเป็นอัลกอริทึมที่ซับซ้อน [12] ใช้การวิเคราะห์หลากหลายในการแยกแยะเพื่อการจดจำใบหน้าเป็นเครื่องวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับข้อมูลมิติสูง ผลลัพธ์บนฐานข้อมูลใบหน้าสามแบบแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่เสนอ อย่างไรก็ตามอัลกอริทึมถูกใช้ในข้อมูลมิติสูงซึ่งส่งผลต่อการใช้เวลานาน [13-15]

แนวคิดของบทความนี้แนะนำการระบุบุคคลตามลำดับชั้นโดยใช้ภาพใบหน้า ลักษณะใบหน้าทั่วโลกที่ข้อมูลหลากหลายจะรวมเข้ากับใบหน้าที่โดดเด่นในท้องถิ่น คุณลักษณะ 3 มิติที่นำเสนอไม่สามารถต้านทานการแปลงทางเรขาคณิตเชิงเส้นต่างๆ คุณสมบัติใบหน้าที่ยอดเยี่ยมในท้องถิ่นยังใช้ประโยชน์จาก Dlib ภูมิภาคที่น่าสนใจ (ROI) ถูกกำหนดให้เป็นพื้นที่ที่ จำกัด อยู่ในตัวเก็บข้อมูลจุดสังเกตของ 2D Dlib การตรวจจับขอบถูกนำไปใช้กับภาพความเข้มภายใน ROI ภาพขอบใบหน้าคล้ายกับภาพร่างโครงหน้าในภาพบุคคลและมีความทนทานต่อสภาพแสง ในการกำหนดฟังก์ชันที่ใช้เพื่อการระบุตัวตนด้วยตนเอง การจัดตำแหน่งใบหน้า 3 มิติและภาพใบหน้า 2 มิติจะได้รับการลงทะเบียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การระบุใบหน้าที่น่าเสนอตามจุดสังเกตบนใบหน้าแบบ 3 มิติมีดังต่อไปนี้ ประการแรกวิธีการที่เสนอนั้นรวดเร็วในแง่ของเวลาในการประมวลผลเนื่องจากไม่ได้ใช้เป็นเครื่องสแกนใบหน้า 3 มิติ ประการที่สองรูปแบบการระบุใบหน้าที่น่าเสนอเป็นรูปแบบไฮบริด ซึ่งรวมเอาคุณสมบัติที่ยอดเยี่ยมของใบหน้า 2 มิติเข้ากับคุณสมบัติใบหน้าแบบ 3 มิติ สิ่งนี้ทำให้เทคนิคที่ตั้งใจไว้มีความแม่นยำสูงในการระบุตัวบุคคล ประการที่สามคุณลักษณะใบหน้า 3 มิติที่น่าเสนอนั้นมีความเกือบสมบูรณ์แบบสำหรับการเปลี่ยนแปลงเชิงเรขาคณิตเชิงเรขาคณิตเนื่องจากขึ้นอยู่กับความไม่แน่นอนของความสัมพันธ์แบบสมบูรณ์ ประการสุดท้ายคุณสมบัติใบหน้า 2 มิติของเราไม่สามารถต้านทานต่อสภาวะการส่องสว่างได้เนื่องจากใช้ประโยชน์จากความสมบูรณ์ของภาพ



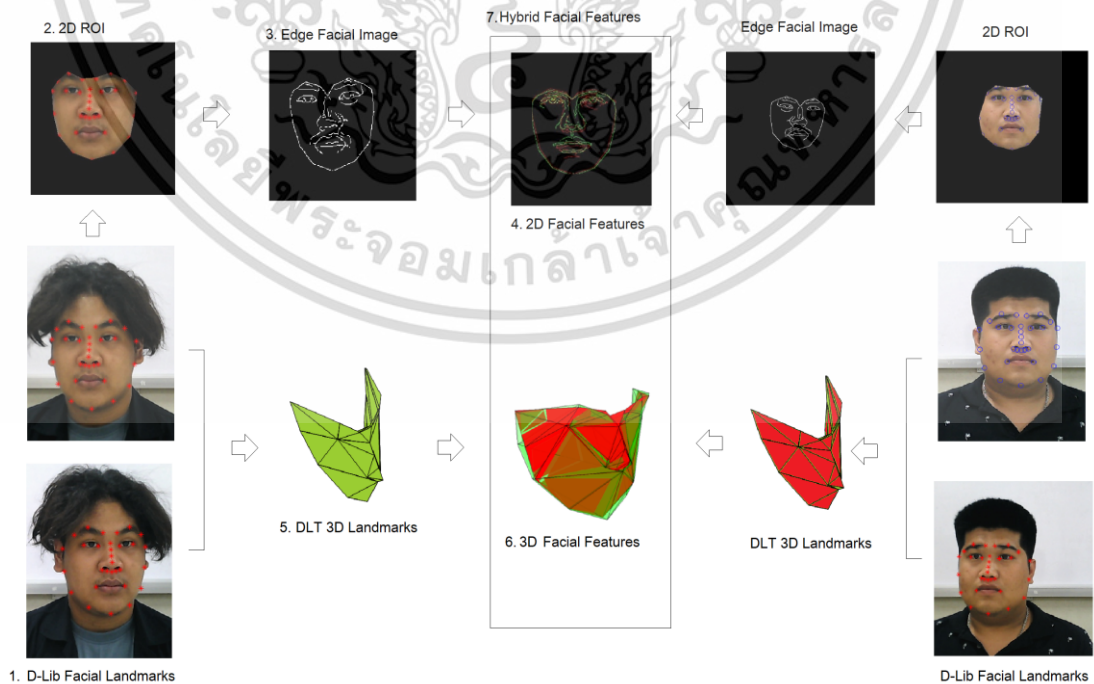
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบการทดลอง

3.1 บทนำ

กระบวนการทดลองและลำดับขั้นตอนการทำงานของงานวิจัยในเล่มนี้ ประกอบด้วยขั้นตอนการทำงานทั้งหมด ประกอบด้วยส่วนหลัก 6 ขั้นตอน เริ่มจากการถ่ายภาพใบหน้าของกลุ่มตัวอย่าง การหาจุดสำคัญของภาพใบหน้าสองมิติ การสกัดคุณลักษณะของภาพใบหน้า การสร้างโครงสร้างใบหน้าแบบสองมิติ การเปรียบเทียบโครงสร้างใบหน้าแบบสองมิติ และการเปรียบเทียบโครงสร้างใบหน้าแบบสามมิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานเริ่มจากการถ่ายภาพใบหน้าจำนวนสองภาพต่อการถ่ายภาพ 1 ครั้ง ลำดับถัดมา คือ การหาจุดสำคัญ (Landmark points) ของภาพใบหน้าสองมิติ แล้วนำภาพใบหน้าทั้งสองมาสกัดหาคุณลักษณะของใบหน้า (Edge facial image) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบคุณลักษณะภาพแบบสองมิติ จากนั้นเป็นการนำจุดสำคัญของภาพใบหน้าสองมิติมาสร้างเป็นโครงหน้าแบบสามมิติ และคำนวณหาปริมาตรทรงพีระมิดของทั้งใบหน้า ที่เกิดจากการใช้จุดสำคัญของภาพใบหน้าจำนวน 4 จุดมาสร้างภาพสามมิติเสมือน และขั้นตอนสุดท้ายคือการคำนวณหาความแตกต่างกันของปริมาตรทรงพีระมิดทั้งหมดของโครงหน้าแบบสามมิติระหว่างใบหน้าที่ต้องการตรวจสอบ และใบหน้าที่ในฐานะข้อมูล

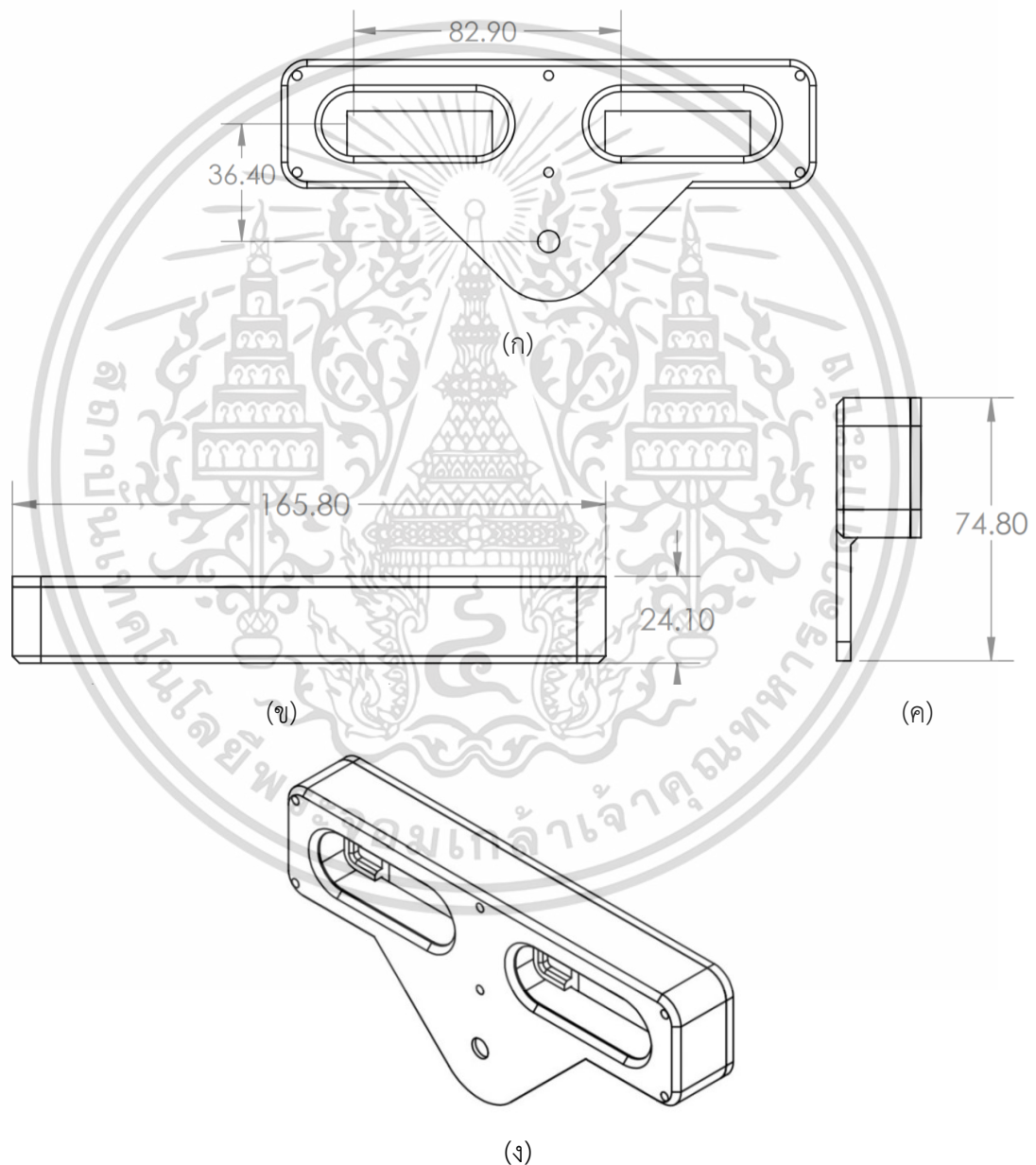


รูปที่ 3.1 ระบบการระบุตัวบุคคล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การออกแบบกล้องถ่ายภาพใบหน้าแบบสามมิติ

ขั้นตอนการเก็บข้อมูลภาพใบหน้าแบบสามมิติ จำเป็นต้องใช้กล้องถ่ายภาพจำนวนสองตัว โดยโครงสร้างของกล้องถ่ายภาพดังแสดงในรูปที่ 3.2 ประกอบไปด้วยกล้องเว็บแคม (Webcam) รุ่น Logitech C270 HD จำนวนสองตัว โดยกล้องถ่ายภาพวางอยู่ในระนาบเดียวกันถูกออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของกล้องถ่ายภาพเท่ากับ 82.9 มิลลิเมตร กรอบใส่กล้องถ่ายภาพ มีความสูง เท่ากับ 74.8 มิลลิเมตร ความยาวเท่ากับ 165.8 มิลลิเมตร และมีความหนา เท่ากับ 24.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.2 การออกแบบกล้องถ่ายภาพ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านบน (ค) ด้านข้าง

(ง) มุม Perspective

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การออกแบบวิธีการระบุตัวบุคคลด้วยใบหน้าแบบสองมิติ

กระบวนการระบุตัวบุคคลด้วยใบหน้าแบบสองมิติ ดังแสดงในรูปที่ 3.3 มีขั้นตอน เริ่มจากการบันทึกภาพใบหน้าของบุคคลที่ต้องการระบุตัวบุคคล จากนั้นนำภาพถ่ายที่ได้มาทำการสกัดคุณลักษณะของใบหน้าแบบสองมิติด้วยไลบรารี 2D Dlib ซึ่งเป็นการสกัดเอาจุดสำคัญบนใบหน้า เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณเมทริกซ์การแปลงเรขาคณิตแบบสัมพรรค (Affine transformation matrix) เมื่อได้เมทริกซ์การแปลงเรขาคณิตแบบสัมพรรคแล้ว ในลำดับถัดมา เป็นการนำภาพขอบของใบหน้า (Edge facial image) ที่ต้องการตรวจสอบมาเข้ากระบวนการผ่านเมทริกซ์การแปลงเรขาคณิตแบบสัมพรรค เพื่อให้ภาพขอบใบหน้าทั้งภาพต้นแบบและภาพที่ต้องการตรวจสอบซ้อนทับกัน ในขั้นตอนสุดท้าย คือ การหาค่าความผิดพลาดของระยะทาง (Distance Map Error) ซึ่งเป็นการหาค่าความต่างระหว่างจุดของภาพขอบของใบหน้า หากค่าความแตกต่างระหว่างภาพขอบของใบหน้าที่มีค่าน้อย ถือได้ว่าใบหน้าที่ต้นแบบมีโอกาสเป็นใบหน้าที่เดียวกัน ในทางกลับกัน หากค่าความแตกต่างระหว่างภาพขอบของใบหน้าที่มีค่ามาก ประเมินได้ว่าเป็นภาพใบหน้าของต่างบุคคล

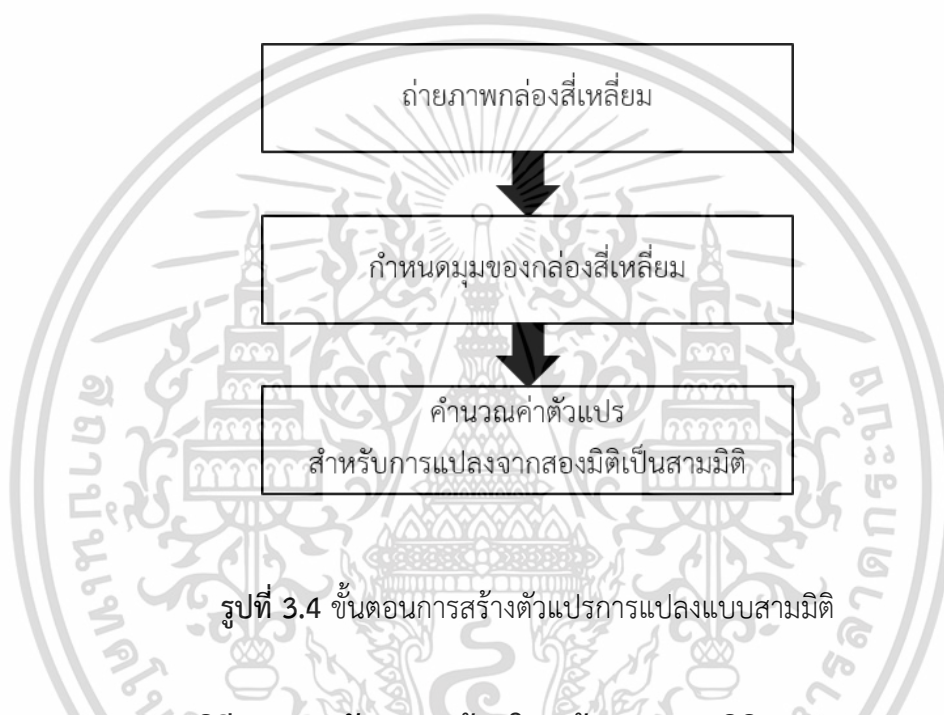


รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการระบุตัวบุคคลด้วยใบหน้าแบบสองมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การออกแบบวิธีการสร้างตัวแปรการแปลงแบบสามมิติ

การสร้างภาพแบบสามมิติจากภาพถ่ายแบบสองมิติมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งจำเป็นต้องมีตัวแปรในการคำนวณ เพื่อใช้ในการแปลงภาพถ่ายสองมิติเป็นภาพสามมิติ โดยในงานวิจัยนี้มีการคำนวณหาค่าตัวแปรการแปลงแบบสามมิติวิธีการเริ่มจากการนำกล้องโปร่งแสงรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีความยาวที่ทราบค่ามาถ่ายภาพด้วยอุปกรณ์บันทึกภาพที่สร้างขึ้น จากนั้นนำภาพกล้องโปร่งแสงรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสเข้าโปรแกรม และกำหนดมุมแต่ละมุมของกล้องสี่เหลี่ยมจัตุรัส เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าตัวแปร



รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการสร้างตัวแปรการแปลงแบบสามมิติ

3.5 การออกแบบวิธีการระบุตัวบุคคลด้วยใบหน้าแบบสามมิติ

กระบวนการระบุตัวบุคคลด้วยใบหน้าแบบสามมิติมีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.5 เริ่มจากการนำจุดสำคัญของใบหน้าที่ได้จากการสกัดคุณลักษณะของใบหน้าแบบสองมิติด้วยไลบรารี 2D Dlib จากขั้นตอนกระบวนการระบุตัวบุคคลด้วยใบหน้าแบบสองมิติ มาคำนวณด้วยสมการการแปลงภาพด้วยตัวแปรจากขั้นตอนการสร้างภาพแบบสามมิติจากภาพถ่ายแบบสองมิติ เมื่อได้โครงหน้าแบบสามมิติแล้ว ขั้นตอนถัดมาเป็นการหาปริมาตรของทรงพีระมิดในโครงหน้าแบบสามมิติ เพื่อนำมาใช้ในการเปรียบเทียบหาความแตกต่างของปริมาตรในแต่ละทรงพีระมิด ในการเปรียบเทียบความเหมือนกันของโครงหน้าแบบสามมิติ หากมีค่าความแตกต่างระหว่างปริมาตรของทรงพีระมิดน้อย ถือได้ว่าภาพใบหน้าที่มีโอกาสเป็นภาพใบหน้าของบุคคลเดียวกัน ในทางกลับกัน หากค่าความแตกต่างระหว่างปริมาตรของทรงพีระมิดมาก ประเมินได้ว่าเป็นภาพใบหน้าต่างบุคคลกัน



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการระบุตัวบุคคลด้วยภาพใบหน้าแบบสามมิติ

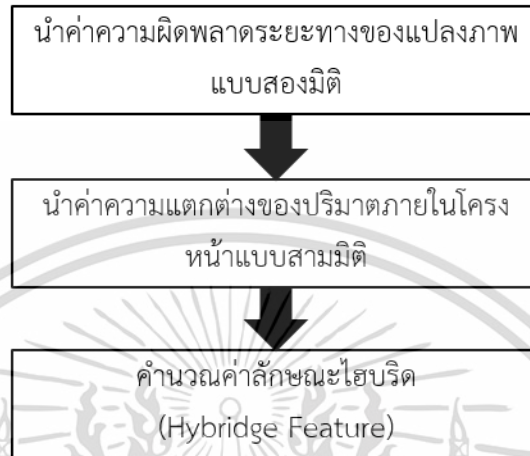
3.6 การออกแบบขั้นตอนการหาค่าความผิดพลาดแบบไฮบริด

ในส่วนสุดท้ายของกระบวนการในการระบุตัวบุคคล คือ กระบวนการตรวจสอบโดยใช้การคำนวณค่าความผิดพลาดแบบไฮบริด ซึ่งเป็นการรวมกันระหว่างค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากกระบวนการระบุตัวบุคคลด้วยภาพใบหน้าแบบสองมิติ และจากกระบวนการระบุตัวบุคคลด้วยภาพใบหน้าแบบสามมิติดังแสดงในรูปที่ 3.6 ซึ่งมีขั้นตอนในการคำนวณดังต่อไปนี้ เริ่มจากการนำค่าความผิดพลาดระหว่างจุดของหน้าแบบสองมิติ และค่าความต่างกันของปริมาตรระหว่างโครงสร้างใบหน้าแบบสามมิติมาใช้ในสมการดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{Hybrid feature} = (\alpha) \text{ 3D Feature} + (1 - \alpha) \text{ 2D Feature} \quad (3.1)$$

โดยการปรับค่า α ให้มีค่าความถูกต้อง (Accuracy) สูงที่สุด



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการหาค่าความผิดพลาดแบบไฮบริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลลัพธ์การสร้างกล้องถ่ายแบบสามมิติ

โครงสร้างของกล้องสำหรับใช้ในขั้นตอนการเก็บข้อมูลภาพถ่ายใบหน้าแสดงดังรูปที่ 4.1 ประกอบไปด้วยกล้องเว็บแคม จำนวนสองตัว ซึ่งเป็นกล้องเว็บแคมรุ่น Logitech C270 HD โดยกล้องวางอยู่ในระนาบเดียวกันและออกแบบให้ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของกล้องเว็บแคมห่างกันเท่ากับ 82.9 มิลลิเมตร กรอบใส่กล้องเว็บแคมมีความสูงเท่ากับ 74.8 มิลลิเมตร ความยาวเท่ากับ 165.8 มิลลิเมตร และมีความหนาเท่ากับ 24.1 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.1 กล้องเว็บแคมสำหรับใช้ในขั้นตอนการเก็บข้อมูลภาพถ่ายใบหน้า

สภาพแวดล้อมสำหรับการถ่ายภาพใบหน้าประกอบด้วยพื้นหลังสีขาวและกล้องเว็บแคมติดตั้งอยู่บริเวณด้านหน้าของบุคคลที่ถูกถ่ายภาพ ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 สภาพแวดล้อมการเก็บข้อมูลภาพ

4.2 ผลลัพธ์การระบุตัวบุคคลด้วยใบหน้าแบบสองมิติ

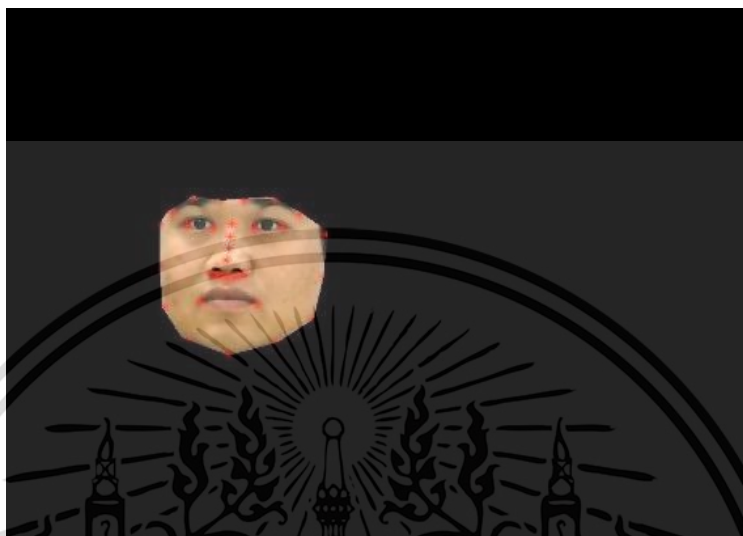
ผลลัพธ์จากกระบวนการระบุตัวบุคคลด้วยภาพใบหน้าแบบสองมิติได้มาจากการบันทึกภาพใบหน้าของบุคคลที่ต้องการระบุตัวบุคคลและผ่านการสกัดคุณลักษณะของภาพใบหน้าแบบสองมิติด้วยไลบรารี 2D Dlib ซึ่งเป็นการสกัดเอาจุดสำคัญของบนภาพใบหน้า ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ผลลัพธ์การสกัดคุณลักษณะของภาพใบหน้าแบบสองมิติด้วยไลบรารี 2D Dlib

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนต่อมาดำเนินการตัดส่วนเฉพาะภาพใบหน้า ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นการลบส่วนพื้นหลังออกให้เหลือเพียงภาพใบหน้าและนำภาพดังกล่าวมาผ่านขั้นตอนการหาขอบภาพ โดยผลลัพธ์การหาภาพขอบของใบหน้า แสดงได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 ภาพใบหน้าที่ผ่านกระบวนการลบพื้นหลัง




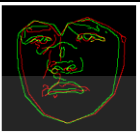

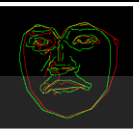
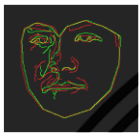




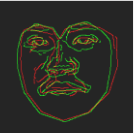




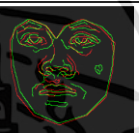
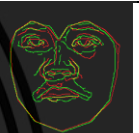

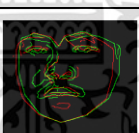

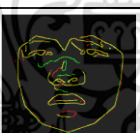



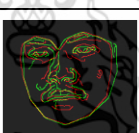


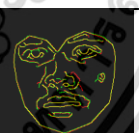
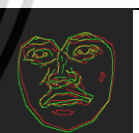
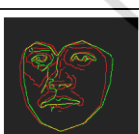

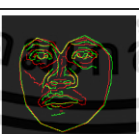

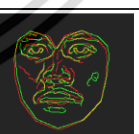
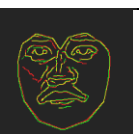


รูปที่ 4.5 ภาพใบหน้าที่ผ่านกระบวนการหาขอบภาพ

ขั้นตอนสุดท้าย คือ การหาค่าความผิดพลาดของระยะทาง (Distance Map Error) ซึ่งเป็นการหาค่าความต่างระหว่างจุดของภาพขอบของใบหน้า หากค่าความแตกต่างระหว่างภาพขอบของใบหน้ามีค่าน้อย ประมวลผลได้ว่าภาพใบหน้าที่ทำเนิการอยู่นี้มีโอกาสเป็นภาพใบหน้าบุคคลเดียวกันในทางกลับกัน หากค่าความความแตกต่างระหว่างภาพขอบของใบหน้ามีค่าความแตกต่างมาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณได้ว่าเป็นภาพใบหน้าบุคคลต่างคนกัน โดยผลลัพธ์ของการหาความแตกต่างแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตัวอย่างการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของระยะทาง

	S 1'	S 2'	S 3'	S 4'	S 5'	S 6'
S 1	 1.0568	 3.3520	 2.8116	 2.0895	 3.7043	 2.4481
S 2	 1.9362	 0.9520	 2.0518	 2.0780	 2.9925	 2.3956
S 3	 3.1114	 4.1287	 0.5315	 2.4280	 4.0700	 3.4374
S 4	 2.3125	 2.8140	 1.8868	 0.8994	 3.0093	 2.2505
S 5	 2.3915	 2.6906	 2.4080	 1.8694	 0.6398	 1.8031
S 6	 2.4779	 3.1865	 2.6593	 1.8022	 2.8164	 0.9697

เมื่อ S แทน ข้อมูลภาพของแต่ละบุคคล

S' แทน ข้อมูลภาพของบุคคลที่นำข้อมูลภาพมาเปรียบเทียบ

n แทน ตัวบุคคล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

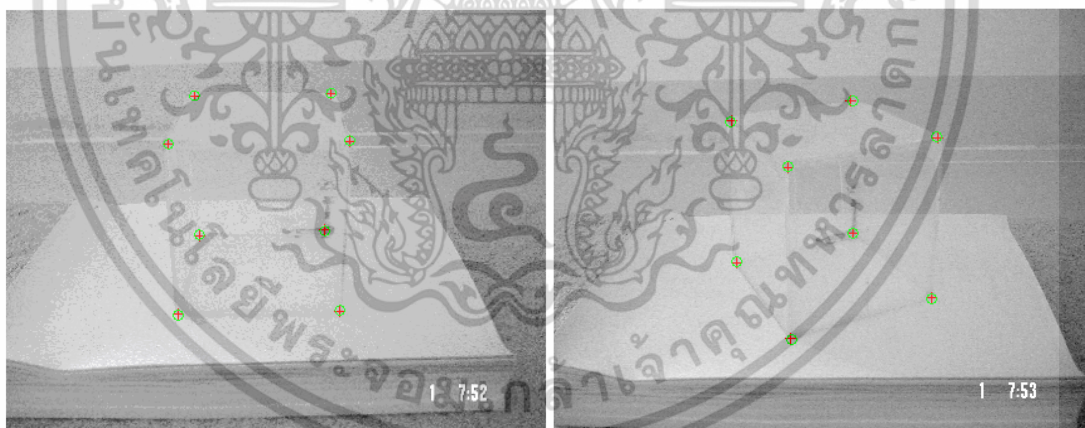
จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของระยะทาง พบว่าข้อมูลภาพของแต่ละบุคคลที่เป็นบุคคลเดียวกับบุคคลที่นำข้อมูลภาพมาเปรียบเทียบ ผลลัพธ์การเปรียบเทียบจะได้ค่าต่ำสุด ในแต่ละครั้งของการประมวลผล

ตารางที่ 4.2 ผลลัพธ์ของกระบวนการระบุตัวบุคคลด้วยใบหน้าแบบสองมิติ

ตัวแปร	ผลลัพธ์
ค่าความถูกต้อง	95.99%
ค่าความไว	95.88%
ค่าความจำเพาะ	95.99%

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลลัพธ์ของกระบวนการระบุตัวบุคคลด้วยใบหน้าแบบสองมิติ พบว่ามีค่าความค่าความถูกต้องเท่ากับ 95.99 เปอร์เซ็นต์ ค่าความไวและค่าความจำเพาะมีค่าเท่ากับ 95.88 เปอร์เซ็นต์ และ 95.99 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

4.3 ผลการสร้างตัวแปรการแปลงแบบสามมิติ

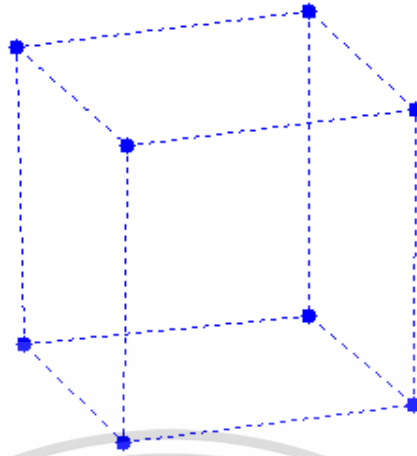


รูปที่ 4.6 การกำหนดมุมกล้องโปร่งแสงรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ผลการสร้างภาพแบบสามมิติจากภาพถ่ายแบบสองมิติมีภาพจากการนำกล้องโปร่งแสงรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีการกำหนดความยาวมาทำการถ่ายภาพด้วยอุปกรณ์บันทึกภาพที่สร้างขึ้น จากนั้นนำภาพที่บันทึกมาเข้าโปรแกรม และกำหนดมุมแต่ละมุมของกล้องโปร่งแสงรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส ดังแสดงในรูปที่ 4.6 เมื่อได้ค่าตัวแปรในการคำนวณสำหรับสร้างภาพสามมิติ ภาพจำลองของ

กล้องโปร่งแสงรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส แสดงได้ดังรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ผลลัพธ์การจำลองกล่องโปร่งแสงรูปทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัส

4.4 ผลลัพธ์การระบุตัวบุคคลด้วยใบหน้าแบบสามมิติ

ในกระบวนการระบุตัวบุคคลด้วยใบหน้าแบบสามมิติของการนำจุดสำคัญของภาพใบหน้า ที่ได้จากการสกัดคุณลักษณะของภาพใบหน้าแบบสองมิติด้วยไลบรารี 2D Dlib แสดงได้ดังรูปที่ 4.8 จากขั้นตอนกระบวนการระบุตัวบุคคลด้วยภาพใบหน้าแบบสองมิติ มาคำนวณด้วยสมการการแปลงภาพด้วยตัวแปรจากขั้นตอนการสร้างภาพแบบสามมิติจากภาพถ่ายแบบสองมิติดังแสดงในรูปที่ 4.9 เมื่อได้โครงหน้าแบบสามมิติแล้ว ขั้นตอนถัดมา คือ การหาปริมาตรของทรงพีระมิดในโครงหน้าแบบสามมิติดังแสดงในรูปที่ 4.10 เพื่อนำมาใช้ในการเปรียบเทียบหาความแตกต่างของปริมาตรในแต่ละทรงพีระมิด



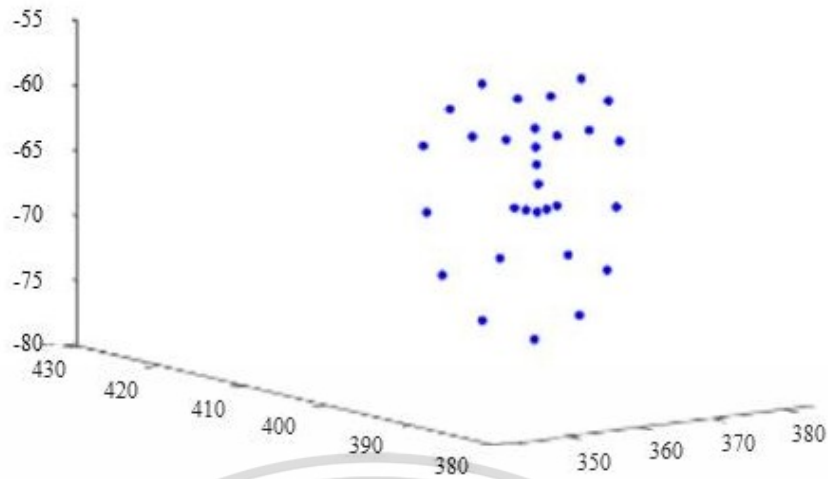
(ก)



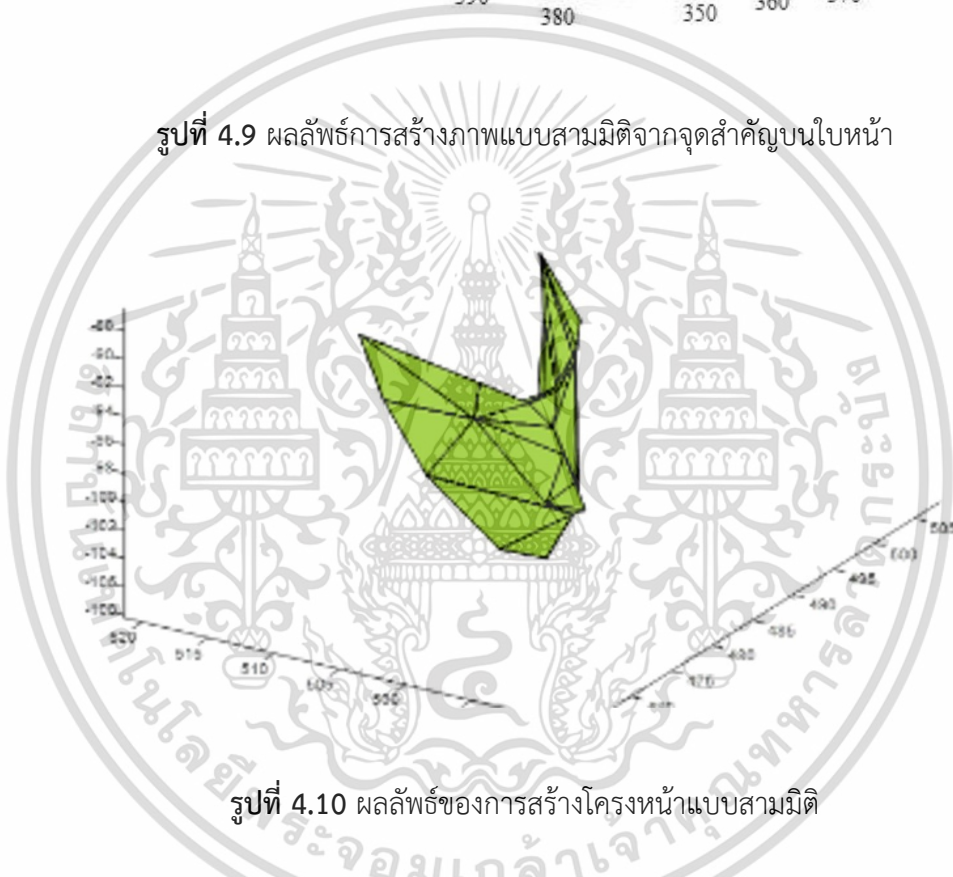
(ข)

รูปที่ 4.8 ผลลัพธ์การใช้ไลบรารี 2D Dlib ทั้งสองใบหน้า (ก) กล่องเว็บแคมตัวที่ 1
(ข) กล่องเว็บแคมตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ผลลัพธ์การสร้างภาพแบบสามมิติจากจุดสำคัญบนใบหน้า



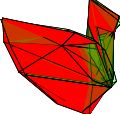
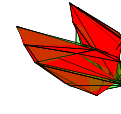

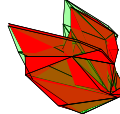
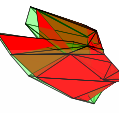

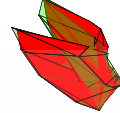
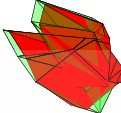

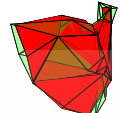
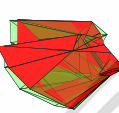
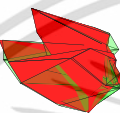

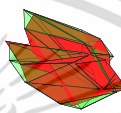

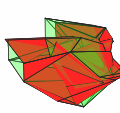
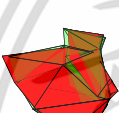

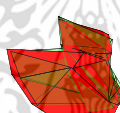
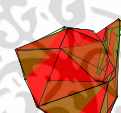
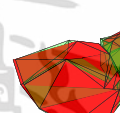
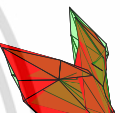


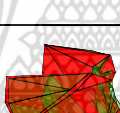



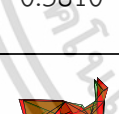


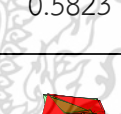
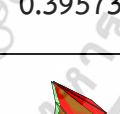



รูปที่ 4.10 ผลลัพธ์ของการสร้างโครงหน้าแบบสามมิติ

ผลลัพธ์การเปรียบเทียบความเหมือนกันของโครงหน้าแบบสามมิติดังแสดงได้ในตารางที่ 4.3 หากมีค่าความแตกต่างระหว่างปริมาตรของทรงพีระมิดน้อย ประมาณได้ว่าใบหน้าบุคคลนี้มีโอกาสเป็นภาพใบหน้าเดียวกัน ในทางกลับกัน หากค่าความแตกต่างระหว่างอัตราส่วนปริมาตรของทรงพีระมิดมาก ประมาณได้ว่าเป็นบุคคลใบหน้าต่างคนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 ผลลัพธ์การเปรียบเทียบความเหมือนกันของโครงหน้าแบบสามมิติ

	S 1'	S 2'	S 3'	S 4'	S 5'	S 6'
S 1	 0.5072	 2.0993	 1.58765	 2.32345	 2.69681	 1.9951
S 2	 2.1547	 0.101121	 1.8687	 2.424489	 2.19816	 1.9274
S 3	 1.28881	 1.71889	 0.5072	 2.0993	 1.50378	 2.32345
S 4	 0.95708	 1.38401	 1.02972	 0.10121	 1.86873	 2.19816
S 5	 0.5810	 1.20153	 1.28079	 0.5823	 0.39573	 0.99367
S 6	 1.18483	 0.79369	 0.58824	 1.58230	 1.328079	 0.2262

เมื่อ S แทน ข้อมูลภาพของแต่ละบุคคล

S' แทน ข้อมูลภาพของบุคคลที่นำข้อมูลภาพมาเปรียบเทียบ

n แทน ตัวบุคคล

จากตารางที่ 4.3 แสดงผลลัพธ์การเปรียบเทียบความเหมือนกันของโครงหน้าแบบสามมิติ พบว่า ข้อมูลภาพของแต่ละบุคคลที่เป็นบุคคลเดียวกับบุคคลที่นำข้อมูลภาพมาเปรียบเทียบ ผลลัพธ์การเปรียบเทียบจะได้ค่าต่ำสุด ในแต่ละครั้งของการประมวลผล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ผลลัพธ์ของกระบวนการระบุตัวบุคคลด้วยใบหน้าแบบสามมิติ

ตัวแปร	ผลลัพธ์
ค่าความถูกต้อง	80.55 %
ค่าความไว	65.98%
ค่าความจำเพาะ	80.70%

จากตารางที่ 4.4 แสดงผลลัพธ์ของกระบวนการระบุตัวบุคคลด้วยภาพใบหน้าแบบสามมิติ พบว่ามีค่าความค่าความถูกต้องเท่ากับ 80.55 เปอร์เซ็นต์ ค่าความไวและค่าความจำเพาะมีค่าเท่ากับ 65.98 เปอร์เซ็นต์ และ 80.70 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

4.5 การหาค่าความผิดพลาดแบบไฮบริด

ในส่วนสุดท้ายของกระบวนการในการระบุตัวบุคคล คือ กระบวนการตรวจสอบโดยใช้การคำนวณค่าความผิดพลาดแบบไฮบริด ซึ่งเป็นการรวมกันระหว่างค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากกระบวนการระบุตัวบุคคลด้วยใบหน้าแบบสองมิติ และจากกระบวนการระบุตัวบุคคลด้วยใบหน้าแบบสามมิติ ผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับค่าตัวแปร α ในสมการที่ 3.1 มีค่าความถูกต้อง (Accuracy) ค่าความไว (Sensitivity) และค่าความจำเพาะ (Specification) ดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยค่า α ที่ให้ค่าความถูกต้องสูงสุด คือ 0.3

ตารางที่ 4.5 ค่า α และประสิทธิภาพของการระบุตัวบุคคล

α	ค่าความถูกต้อง	ค่าความไว	ค่าความจำเพาะ
0.1	99.72%	73.20%	97.54%
0.2	99.77%	77.32%	98.41%
0.3	99.78%	80.41%	98.98%
0.4	99.76%	88.66%	99.87%
0.5	99.21%	88.66%	99.32%
0.6	96.64%	91.75%	96.69%
0.7	89.65%	94.85%	89.59%
0.8	75.25%	95.88%	75.03%
0.9	60.13%	59.73%	68.03%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การระบุตัวบุคคลและการตรวจสอบตัวบุคคล โดยใช้พื้นฐานของโครงสร้างใบหน้าแบบสองมิติและแบบสามมิติจากรูปใบหน้า มีกระบวนการดังต่อไปนี้ เริ่มจากการบันทึกภาพด้วยกล้องจำนวนสองตัวที่มีการวางตัวของกล้องในระนาบเดียวกัน จากนั้นนำภาพที่ได้ทั้งสองผ่านกระบวนการสกัดจุดสำคัญของใบหน้าแบบสองมิติด้วยไลบรารี 2D Dlib ซึ่งเป็นไลบรารีสำหรับกระบวนการสกัดจุดสำคัญของใบหน้า จากนั้นนำจุดสำคัญของใบหน้าที่ได้ มาสร้างโครงหน้าแบบสามมิติ การระบุตัวบุคคลจากโครงสร้างใบหน้าแบบไฮบริดสามารถหาได้จาก การหาความคล้ายคลึงกันของคุณสมบัติใบหน้าแบบสองมิติและแบบสามมิติรวมกัน ในการหาความคล้ายคลึงกันของใบหน้าแบบสองมิติคำนวณจาก ระยะห่างระหว่างจุดสำคัญของภาพใบหน้าอ้างอิง และภาพใบหน้าที่ทดสอบ ซึ่งถูกจัดแนวขอบภาพด้วยเมทริกซ์การแปลงรูปทางเรขาคณิต ส่วนการหาความแตกต่างกันของคุณสมบัติใบหน้าแบบสามมิติ คือ การคำนวณความแตกต่างของปริมาตรทรงพีระมิด ที่ถูกสร้างขึ้นจากจุดสำคัญของใบหน้า ผลลัพธ์ที่ได้จากการรวมกันของคุณลักษณะของใบหน้าแบบสองมิติและโครงหน้าแบบสามมิติมีค่าความแม่นยำ 99.97 เปอร์เซ็นต์

การสร้างภาพสามมิติของวิทยานิพนธ์นี้ ใช้พื้นฐานของ การแปลงเชิงเส้นตรง (Direct linear transform, DLT) เพราะฉะนั้นจึงต้องมีการสอบเทียบ (Calibrate) กล้อง หากมีการรบกวนใด ๆ กับตัวกล้องถ่ายภาพ จำเป็นต้องมีการสอบเทียบกล้องใหม่อีกครั้งหนึ่ง

ผลลัพธ์จากการทดลองการปรับตัวแปร α ในด้านของผลกระทบและประสิทธิภาพของระบบพบว่า ประสิทธิภาพของระบบมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อค่าของแสงเปลี่ยนไป ผลที่ตามมา คือ ต้องลดหรือเพิ่มค่าปรับตัวแปร α ของคุณสมบัติใบหน้าแบบสองมิติตามค่าของแสงที่เปลี่ยนไป นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงท่าทางหรือตำแหน่งของบุคคลส่งก็ยังคงส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพของระบบ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นการเลือกใช้ค่าตัวแปร α ขึ้นอยู่กับการใช้งาน

5.2 ข้อเสนอแนะ

ด้วยงานวิจัยนี้ มีข้อจำกัดในการดำเนินการสรุปได้ดังนี้

1. ด้านวิธีการเก็บข้อมูลเพราะเป็นข้อมูลส่วนบุคคล
2. รูปแบบการเก็บภาพข้อมูลของแต่ละบุคคล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ดังนั้นมีข้อเสนอแนะว่า จัดสถานที่เป็นห้องต้นแบบเพื่อจัดเก็บภาพข้อมูลของแต่ละบุคคล เพราะเนื่องจากแสงเป็นตัวแปรสำคัญในการเก็บข้อมูลรวมทั้งองศาของแสง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Joseph A. Mannino. **Human Biology**. St. Louis, Mo. : Mosby, 1994.
- [2] Elaine N. Marieb and Katja N. Hoehn. **Human Anatomy & Physiology**. Boston : Pearson, 2018
- [3] Robert M. Berne, Bruce M. Koeppen, and Bruce A. Stanton. **Berne & Levy Physiology**. Philadelphia : Mosby/Elsevier, 2008.
- [4] สมเกียรติ อุดมพระราชากุล. **การประมวลผลภาพดิจิทัลเบื้องต้น (DIGITAL IMAGE PROCESSING)**. กรุงเทพฯ : ท้อป. 2554.
- [5] Shahrokh Heidari, Mohammad Rasoul Pourarian, Reza Gheibi, Mosayeb Naseri, and Monireh Houshmand. 2017. “Quantum red–green–blue image steganography”. **International Journal of Quantum Information**.
- [6] ชูชาติ พิณทิวรุจน์. **การประมวลผลภาพดิจิทัลด้วย Matlab**. กรุงเทพฯ : มิน เซอร์วิส ซีพ พลายน. 2556
- [7] นิรนาม. **การกรองข้อมูลภาพ** [Online]. เข้าได้จาก :<https://www.mathworks.com/help/images/ref/imfilter.html>
- [8] Angelina **ฮิสโตแกรม** [Online]. เข้าได้จาก :<https://digitalimagingpic.blogspot.com/2018/05/histogram-equalization-in-digital-image.html>
- [9] นิรนาม **คอนทราสต์** [Online]. เข้าได้จาก :<https://petapixel.com/assets/uploads/2019/04/lowcontrastfeattt-800x420.jpg>
- [10] James Fishbaugh **Adaptive histogram equalization** [Online]. เข้าได้จาก :<http://www.cs.utah.edu/~jfishbau/improc/project2/>
- [11] นิรนาม **Contrast Limited adaptive histogram equalization** [Online]. เข้าได้จาก :<https://www.mathworks.com/help/images/ref/adapthisteq.html>
- [12] Leonardo Araujo dos Santos **การคอนโวลูชัน** [Online]. เข้าได้จาก :<https://leonardoaraujosantos.gitbooks.io/artificial-intelligence/content/convolution.html>

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [13] ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์ เทคนิคการซ้อนทับภาพ งานเทคโนโลยีการศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2560
- [14] J. Dou and J. Li. 2014. "Image matching based local Delaunay triangulation and affine invariant geometric constraint", **Optik**. 526-531.
- [15] P. Chuchart, S. C. Fernand and I. Woranut. 2010. "Fingerprint Alignment Based on Local Feature Combined with Affine Geometric Invariant". **International Conference in Central Europe on Computer Graphics**. 173-178.
- [16] G. Bebis, T. Deaconu and M. Georgiopoulos. 1999. "Fingerprint identification using Delaunay triangulation". **International Conference on Information Intelligence and System**. 452-459.
- [17] K. Javad and K. Ali Mohammad. 2017. "Fingerprint indexing based on expanded Delaunay triangulation". **Expert Systems with Applications**. 251-267.
- [18] L. Wang and X. He. 2015. "Affine image matching using Delaunay Triangles". **International Conference on Estimation Detection and Information Fusion**. 34-39.
- [19] M. M. Fraz. P. Remagnino. A. Hoppe. S. Velastin. B. Uyyanonvara and S. A. Barman. 2011. "A supervised method for retinal blood vessel segmentation using line strength multiscale Gabor and morphological features". **IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications**. 410-415.
- [20] W. A. B. Wan Mustafa. H. Yazid. S. B. Yaacob and S. N. Bin Basah. 2014. "Blood vessel extraction using morphological operation for diabetic retinopathy". **IEEE Region 10 Symposium**. 208-212.
- [21] A. Zahedi. H. Sadjedi and A. Behrad. 2010. "A new retinal image processing method for human identification using radon transform". **Iranian Conference on Machine Vision and Image Processing**. 1-4.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [22] T. Chihaoui. R. Kachouri. H. Jlassi. M. Akil and K. Hamrouni. 2015. “Human identification system based on the detection of optical Disc Ring in retinal images”. **International Conference on Image Processing Theory**. 263-267.
- [23] A. Dehghani. Z. Ghassabi. H. A. Moghddam. 2013. “Human recognition based on retinal images and using new similarity function”. **J Image Video Proc**. 58.
- [24] C. Köse and C. İkibaş. 2011. “A personal identification system using retinal vasculature in retinal fundus images”. **Expert Systems with Applications**. (38): 13670-13681.
- [25] S. M. Lajevardi. A. Arakala. S. A. Davis and K. J. Horadam. 2013. “Retina Verification System Based on Biometric Graph Matching”. **IEEE Transactions on Image Processing**. (22): 3625-3635.
- [26] M. Ortega. M. G. Penedo. J. Rouco. N. Barreira and M. J. Carreira. 2009. “Retinal Verification Using a Feature Points-Based Biometric Pattern”. **Journal on Advances in Signal Processing**. 1-13.
- [27] P. Nazari and H. Pourghassem. 2017. “A novel retina-based human identification algorithm based on geometrical shape features using a hierarchical matching structure”. **Computer Methods and Programs in Biomedicine**. (141): 43-58.
- [28] K. Deng. J. Tian. J. Zheng. X. Zhang. X. Dai. M. Xu. 2010. “Retinal fundus image registration via vascular structure graph matching”. **Int. J. Biomed. Imag**.
- [29] J. J. Staal. M. D. Abramoff. M. Niemeijer. M. A. Viergever. B. V. Ginneken. 2004. “Ridge based vessel segmentation in color images of the retina”. **IEEE Transactions on Medical Imaging**. 501-509.
- [30] M. Niemeijer. J. J. Staal. B. V. Ginneken. M. Loog. M. D. Abramoff. 2004. “Comparative study of retinal vessel segmentation methods on a new publicly available database”. **SPIE Medical Imagin**. 648-656.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [31] T. Kauppi. V. Kalesnykiene. J. Kamarainen. L. Sorri. H. Uusitalo. H. Kälviäinen. J. Pietilä. 2007. “DIARETDB0: Evaluation Database and Methodology for Diabetic Retinopathy Algorithms”.
- [32] T. Kauppi. V. Kalesnykiene. J. Kamarainen. L. Sorri. H. Uusitalo. H. Kälviäinen. J. Pietilä. 2007. “DIARETDB1 diabetic retinopathy database and evaluation protocol”. **the British Machine Vision Conference**.
- [33] E. Decencièrè. G. Cazuguel. X. Zhang. G. Thibault. J. C. Klein. F. Meyer. B. Marcotegui. G. Quellec. M. Lamard. R. Danno. D. Elie. P. Massin. Z. Viktor. A. Erginay. B. Lay. A. Chabouis. 2013. “TeleOphta: Machine learning and image processing methods for teleophthalmology”. **IRBM**. 196-203.
- [34] C. Hernandez-Matas. X. Zabulis. A. Triantafyllou. P. Anyfanti. S. Douma. A. A. Argyros. 2017. “FIRE: Fundus Image Registration Dataset”. **Journal for Modeling in Ophthalmology**. 16-28.
- [35] K. M. Adal. P. G. Etten. J. P. Martinez. L. J. Vliet. K. A. Vermeer. 2015. “Accuracy Assessment of Intra and Inter-Visit Fundus Image Registration for Diabetic Retinopathy Screening”. **Invest Ophthalmol Vis Sci**. 1805-1812.
- [36] P. Liskowski and K. Krawiec. 2016. “Segmenting retinal blood vessels with deep neural networks”. **IEEE Trans Med Imaging**. 2369-2380.
- [37] F. Farokhain. C. Yang. H. Demirel. S. Wu and I. Beheshti. 2017. “Automatic parameters selection of Gabor filters with the imperialism competitive algorithm with application to retinal vessel segmentation”. **Biocybern. Biomed**. 246-254.
- [38] A. E. Rad. M. S. M. Rahim. H. Kolivand and I. B. M. Amin. 2017. “Morphological region- based initial contour algorithm for level set methods in image segmentation”. **Multimed Tools Appl**. 2185-2201.
- [39] G. Yanhui. B. Ümit. J. Lucas. K. Khorasani and A. Şengür. 2018. “A retinal vessel detection approach using convolution neural network with reinforcement sample learning strategy”. **Measurement**. 586-591.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [40] A. T. U. Ahamed. A. Jothish. G. Johnson and S. B. V. Krishna. 2018. “Automated System for Retinal Vessel Segmentation”. **Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies**. 717-722.
- [41] Athasart Narkthewan and Noppadol Maneerat. 2019. “Retina Blood Vessel Detection for Diabetic Retinopathy Diagnosis”. **International Conference on Biomedical Engineering and Technology**. USA. 149–152.
- [42] Z. Fan. J. Lu. C. Wei. H. Huang. X. Cai. and X. Chen. 2019. “A hierarchical image matting model for blood vessel segmentation in fundus images”. **IEEE Trans. Image Process**. 2367-2377.
- [43] S. Dash and M. R. Senapati. 2020. “Enhancing detection of retinal blood vessels by combined approach of DWT, Tyler Coye and Gamma correction”. **Biomedical Signal Processing and Control**.
- [44] Ravi Kamble. Manesh Kokare. Girish Deshmukh. Fawnizu Azmadi Hussin and Fabrice Mériaudeau. 2017. “Localization of optic disc and fovea in retinal images using intensity based line scanning analysis”. **Computers in Biology and Medicine**. (87): 382-396
- [45] Sangita Bharkad. 2017. “Automatic segmentation of optic disc in retinal images”. **Biomedical Signal Processing and Control**. (31): 483-498.
- [46] R. Panda. N.B. Puhan. G. Panda. 2017 “Robust and accurate optic disk localization using vessel symmetry line measure in fundus images”. **Biocybern. Biomed**. (37): 466-476.
- [47] Bin Gui. Ren-Jun Shuai. Ping Chen. 2018. “Optic disc localization algorithm based on improved corner detection”. **Procedia Computer Science**. (131): 311-319.
- [48] S. P. Subramanya Jois. S. Harsha and J. R. Harish Kumar. 2018. “Automatic Optic Disc Localization Using Particle Swarm Optimization Technique”. **IEEE Region 10 Conference TENCON**. 1718-1722.

บรรณานุกรม (ต่อ)

- [49] Johannes Dietter. Wadood Haq. Iliya V. Ivanov. Lars A. Norrenberg. Michael Völker. Marek Dynowski. Daniel Röck. Focke Ziemssen. Martin A. Leitritz. Marius Ueffing. 2019. “Optic disc detection in the presence of strong technical artifacts”. **Biomedical Signal Processing and Control**. (53)
- [50] Ünver. H.M.; Kökver. Y.; Duman. E.; Erdem. O.A. 2019. “Statistical Edge Detection and Circular Hough Transform for Optic Disk Localization”. **Appl. Sci**.
- [51] D. Oza. A. Nair and J. R. H. Kumar. 2019. “A Novel Application of Multiscale Low-Rank Image Decomposition for Optic Disc Localization”. **IEEE Region 10 Conference (TENCON)**. 2690-2694.
- [52] Z. Waheed. M. Usman Akram. A. Waheed. M. A. Khan .A. Shaukat and M. Ishaq. 2016. “Person identification using vascular and non-vascular retinal features. **Computers & Electrical Engineering**. (53): 359-371.
- [53] A. Zahedi. H. Sadjedi and A. Behrad. 2010. “A new retinal image processing method for human identification using radon transform”. **Iranian Conference on Machine Vision and Image Processing**. 1-4.
- [54] S. M. Lajevardi. A. Arakala. S. A. Davis and K. J. Horadam. 2013. “Retina Verification System Based on Biometric Graph Matching”. **IEEE Transactions on Image Processing**. (22): 3625-3635.
- [55] S. Aleem. B. Sheng. P. Li. P. Yang and D. D. Feng. 2019. “Fast and Accurate Retinal Identification System: Using Retinal Blood Vasculature Landmarks.” **IEEE Transactions on Industrial Informatics**. (15): 7. 4099-4110.
- [56] Sadikoglu. Fahreddin & Üzelaltınbulat. Selin. 2016. “Biometric Retina Identification Based on Neural Network”. **Procedia Computer Science**. (102). 26-33.

บรรณานุกรม (ต่อ)

[57] Roy ND. and Biswas A. 2015. “Detection of bifurcation angles in a retinal fundus image”. Eighth international conference on advances in pattern recognition (ICAPR).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] **Purahong, B.**, Kanjanasurat, I., Sithiyopasakul, P., Chutchavong, V., Pintavirooj, C. "Approximation of the maximally flat filter by using Bézier curve with an exponential function", Journal of Physics: Conference Series, Vol. 1457, pp. 1-6, 2020.
- [2] **Purahong, Boonchana** & Chutchavong, Vanvisa & Aoyama, Hisayuki & Pintavirooj, Chuchart. (2020). Hybrid Facial Features with Application in Person Identification. Journal of Mobile Multimedia, Vol. 16, Issue 1-2, pp. 245-266, 2020 10.13052/jmm1550-4646.161212.
- [3] **B. Purahong** "Implementation of ECG Portable Device for Real-Time Signal Monitoring," 2017 the 3rd International Conference on Communication and Information Processing (ICCIP 2017).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้